主管单位：中华人民共和国工业和信息化部
主办单位：北京航空航天大学

ISSN 1001-5965
CN 11-2625/V

北京航空航天大學学报

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS



基于非线性因子恢复的位姿图优化算法

王　岩　　黄炳昊　　杨世春

7 | 2026
Vol.52

北 京 航 空 航 天 大 学 学 报

第 52 卷　第 7 期　（总第 401 期）　2026 年 7 月

目　　次

基于非线性因子恢复的位姿图优化算法 …… 王岩，黄炳昊，杨世春（2229）

非等间隔数据的电液伺服机构故障检测方法 …… 孔祥玉，王子文，周志杰，刘美枝，张晨（2239）

Wilson-ρ_∞方法及模拟系统的解析解 …… 邢誉峰，王雨竹，李玉婷，张慧敏（2251）

改进多层多级民机经济性修理级别分析模型 …… 王毅强，杨鑫（2260）

融合双重表情符号注意力机制的文本情感分类 …… 陈可嘉，夏瑞东，林鸿熙（2269）

跨层高效相位感知 Transformer 的结直肠息肉图像分割算法 ……
…… 梁礼明，李俞霖，刘阳倩，王涛，吴健（2281）

步进随机振动下电连接器微动磨损试验及性能退化模型 …… 骆燕燕，祁侨绅，王永鹏，武雄伟（2293）

基于 NB-XGB 融合的轻量化 CBTC 车载端入侵检测方法 …… 王国华，张蕾，张学军，逯闯（2303）

基于调制波移相的并联驱动系统传导干扰抑制方法 …… 张长勇，孙玉华，陈炟名，郭志浩（2316）

混合攻击下模糊马尔可夫跳变系统非脆弱异步控制 …… 祝超群，刘淑慧（2327）

暴雨灾害下机场基础设施网络韧性恢复策略 …… 黄信，杨立志，张永康，吴堃，齐麟，陈宇（2339）

大功率双储液器环路热管运行特性的实验研究 …… 秦海洋，付静伟，张如意，王荔，柏立战（2352）

基于 MPC 的液体火箭发动机电作动系统伺服控制策略 ……
…… 胡慧，谢芷羽，王海兴，王慧，马兵兵，田原（2359）

联合高效混合编码器和结构重参数化的 DINO 遥感目标检测算法 ……
…… 张文飞，张华卫，梅源，肖楠，朱秋东，廉敬（2371）

基于深度强化学习+模拟退火的地磁感知导航方法 …… 李红，徐晨燕，刘恒宇（2383）

胰岛素泵组典型故障机理建模与仿真分析 …… 王伟杰，郭丁珲，李翔宇，耿艺璇，权龙（2393）

多因素作用下机场滑行道桥健康承载力学性能分析 …… 张宇辉，廖蜀娇，赵媛媛（2403）

管制员个体工作负荷差异分析 …… 顾秋丽，王莉莉（2414）

基于深度神经网络和光度序列数据的卫星平台分类识别方法 …… 陈浩，刘通，张延鑫（2425）

地球静止轨道运行的 OSR 太阳吸收比变化分析 …… 文佳佳，谢荣建，钟思源，程锦铭，陈凡胜（2434）

卫星数字孪生模型多粒度协商修正方法 …… 伍学谦，董云峰，李智（2440）

飞行器结构分区差异化安全系数设计方法 …… 许宇声，张音旋，吴江鹏，陈亮，王磊，王晓军（2454）

球舱系统俯仰/横滚通道动力学建模及控制分析 …… 李一健，周江华，张晓军，赵春阳，徐国宁（2466）

刚弹耦合运载火箭自适应改进 PD 控制器 …… 江星宇，薛锋丰，蒋方华，师鹏，龚胜平（2477）

基于 Epsilon 约束列生成的机场停机位应急调整 …… 朱少川，郑磊，杜文博（2487）

重力辅助惯性导航可观测度分析 …… 万宏发，李姗姗，李新星，谭勖立，裴宪勇（2496）

平衡隐私与效用的联邦学习航班运行数据共享算法 …… 李鑫焱，陈信涛，赵慧敏，邓武（2509）
基于旅游领域的细粒度情感词典构建方法 …… 李琳，韩虎，范雅婷（2519）
基于机器学习的高压线数据库创建方法 …… 张衡，高艳辉，陆洋（2529）
基于流场均匀性的大型复合材料固化炉设计仿真 …… 王得权，赵宇轩，袁湘月，王青春，陈忠加（2540）
基于 SVM 与 K-means 的多层级雷达信号开集识别 ……
…… 翁雪慧，汪晓锋，应鹏，刘重安，周芳，全大英（2554）
基于改进线性注意力 Transformer 轻量化滚动轴承故障诊断 …… 张海燕，吴红兰，刘豪，孙有朝（2563）
基于改进 VAE-WGAN 的飞机不稳定进近检测 …… 丁聪，李啸宇，王文涛，张琦，张小贝（2580）
基于区域监测网的北斗 DCB 参数解算方法与影响因素分析 ……
…… 李文迪，曹月玲，孟轶男，戴吾蛟，潘林，周善石（2589）
一种基于任务流图结构重构的极化码 BP 译码算法 …… 曹皓，陈亦欧，张润泽（2601）
基于 FCM-ARIMAX 模型的氧气浓缩器性能退化建模 …… 张依，李娟，戴洪德，焦晓璇，屈慧妍（2610）
基于端到端深度学习网络的大容量图像隐写算法 …… 李凡，刘晨阳，孙智博，董振博，钱伟鹏（2621）
基于最大后验概率估计的多星座 ARAIM 故障排除方法 ……
…… 李亮，程力，李瑞杰，时秀芸，危亦林（2630）
不规则引力场下的航天器自适应预设性能姿轨跟踪控制 …… 李俊，朱宏玉（2639）
考虑带时间窗的多机型航班加油车三阶段调度优化 …… 邢志伟，周芳宇，孙恪，李雅婷（2651）
大跨度柔性支架光伏组件安装设备网络时延补偿策略 ……
…… 李金键，王海波，宋泓霖，杨青波，包茂成，钱华政，李博（2660）
基于 Mamba-CNN 的多尺度异常行为检测方法 …… 石洋宇，谢承杰，郑棣文，卢树华（2672）

期刊基本参数：CN 11-2625/V * 1956 * m * A4 * 452 * zh * P * ￥50.00 * 400 * 42 * 2026-07

（**编　辑**　张　嵘　孙　芳　万玉敏　卞欢欢　王　茜　李亚泰）

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

Vol. 52 No. 7 （Sum 401） July 2026

CONTENTS

Pose graph optimization algorithm based on nonlinear factor recovery
…… WANG Yan，HUANG Binghao，YANG Shichun （2229）
Fault detection method of electric-hydraulic servo actuator for non-equal interval data
…… KONG Xiangyu，WANG Ziwen，ZHOU Zhijie，LIU Meizhi，ZHANG Chen （2239）
Wilson-ρ_∞ method and analytical solution of analog system
…… XING Yufeng，WANG Yuzhu，LI Yuting，ZHANG Huimin （2251）
Improvement of economical level of repair analysis model with multi-indenture and multi-echelon for civil aircraft
…… WANG Yiqiang，YANG Xin （2260）
Textual sentiment classification incorporating dual emoji attention mechanisms
…… CHEN Kejia，XIA Ruidong，LIN Hongxi （2269）
Cross-layer high-efficiency phase-aware Transformer for colorectal polyp image segmentation algorithm
…… LIANG Liming，LI Yulin，LIU Yangqian，WANG Tao，WU Jian （2281）
Fretting wear test and performance degradation model of electrical connector under step random vibration
…… LUO Yanyan，QI Qiaoshen，WANG Yongpeng，WU Xiongwei （2293）
Lightweight NB-XGB fusion-based intrusion detection method for CBTC onboard systems
…… WANG Guohua，ZHANG Lei，ZHANG Xuejun，LU Chuang （2303）
A method for suppressing conducted interference in parallel drive systems based on modulated wave phase shift
…… ZHANG Changyong，SUN Yuhua，CHEN Daming，GUO Zhihao （2316）
Nonfragile asynchronous control of fuzzy Markov jump systems under hybrid cyber-attacks
…… ZHU Chaoqun，LIU Shuhui （2327）
Resilience recovery strategy of airport infrastructure network under rainstorm disasters
…… HUANG Xin，YANG Lizhi，ZHANG Yongkang，WU Kun，QI Lin，CHEN Yu （2339）
Experimental study on operating characteristics of a high capacity dual compensation chamber loop heat pipe
…… QIN Haiyang，FU Jingwei，ZHANG Ruyi，WANG Li，BAI Lizhan （2352）
MPC-based servo control strategy for liquid rocket engine electromechanical actuation system
…… HU Hui，XIE Zhiyu，WANG Haixing，WANG Hui，MA Bingbing，TIAN Yuan （2359）
A DINO remote sensing target detection algorithm combining efficient hybrid encoder and structural reparameterization
…… ZHANG Wenfei，ZHANG Huawei，MEI Yuan，XIAO Nan，ZHU Qiudong，LIAN Jing （2371）
Geomagnetic sensing navigation method based on deep reinforcement learning and simulated annealing
…… LI Hong，XU Chenyan，LIU Hengyu （2383）
Typical fault mechanism modeling and simulation analysis of insulin pump sets
…… WANG Weijie，GUO Dinghui，LI Xiangyu，GENG Yixuan，QUAN Long （2393）
Analysis of health-based load-bearing mechanical properties of airport taxiway bridges under multifactorial effects
…… ZHANG Yuhui，LIAO Shujiao，ZHAO Yuanyuan （2403）
Analysis of individual differences in controller workload
…… GU Qiuli，WANG Lili （2414）
Satellite platform classification method based on deep neural network using photometric data
…… CHEN Hao，LIU Tong，ZHANG Yanxin （2425）
Analysis of solar absorptance degradation of OSR in geostationary orbit
…… WEN Jiajia，XIE Rongjian，ZHONG Siyuan，CHENG Jinming，CHEN Fansheng （2434）
Multi-granularity and negotiation model updating method for satellite digital twin
…… WU Xueqian，DONG Yunfeng，LI Zhi （2440）
Sub-regional differentiated safety factors design method for aircraft structure
…… XU Yusheng，ZHANG Yinxuan，WU Jiangpeng，CHEN Liang，WANG Lei，WANG Xiaojun （2454）
Dynamic modeling and control analysis of pitch/roll channels for balloon-gondola system
…… LI Yijian，ZHOU Jianghua，ZHANG Xiaojun，ZHAO Chunyang，XU Guoning （2466）
An adaptive improved PD controller for rigid-elastic coupled launch vehicles
…… JIANG Xingyu，XUE Fengfeng，JIANG Fanghua，SHI Peng，GONG Shengping （2477）

An Epsilon constraint-based column generation for airport gate emergency reassignment
…… ZHU Shaochuan，ZHENG Lei，DU Wenbo （2487）
Analysis of observable degree of gravity aided inertial navigation
…… WAN Hongfa，LI Shanshan，LI Xinxing，TAN Xuli，PEI Xianyong （2496）
A federated learning flight operation data sharing algorithm for balancing privacy and utility
…… LI Xinyan，CHEN Xintao，ZHAO Huimin，DENG Wu （2509）
Construction method of fine-grained sentiment lexicon based on tourism field
…… LI Lin，HAN Hu，FAN Yating （2519）
Power line database creating method based on machine learning
…… ZHANG Heng，GAO Yanhui，LU Yang （2529）
Design and simulation of large composite material curing oven based on flow field uniformity
…… WANG Dequan，ZHAO Yuxuan，YUAN Xiangyue，WANG Qingchun，CHEN Zhongjia （2540）
Multi-level radar signal open-set recognition based on SVM and K-means
…… WENG Xuehui，WANG Xiaofeng，YING Peng，LIU Chongan，ZHOU Fang，QUAN Daying （2554）
Lightweight fault diagnosis of rolling bearings based on improved linear attention Transformer
…… ZHANG Haiyan，WU Honglan，LIU Hao，SUN Youchao （2563）
Unstable approach detection of aircraft based on modified VAE-WGAN
…… DING Cong，LI Xiaoyu，WANG Wentao，ZHANG Qi，ZHANG Xiaobei （2580）
Methods and influence factors analysis of BeiDou DCB parameter solving based on regional monitoring networks
…… LI Wendi，CAO Yueling，MENG Yinan，DAI Wujiao，PAN Lin，ZHOU Shanshi （2589）
A BP decoding algorithm for polar codes based on task graph reconstruction
…… CAO Hao，CHEN Yiou，ZHANG Runze （2601）
Performance degradation modeling of oxygen concentrators based on FCM-ARIMAX approach
…… ZHANG Yi，LI Juan，DAI Hongde，JIAO Xiaoxuan，QU Huiyan （2610）
A high-capacity image steganography algorithm based on end-to-end deep learning networks
…… LI Fan，LIU Chenyang，SUN Zhibo，DONG Zhenbo，QIAN Weipeng （2621）
Fault exclusion method based on maximum a posteriori probability estimation for multi-constellation ARAIM
…… LI Liang，CHENG Li，LI Ruijie，SHI Xiuyun，WEI Yilin （2630）
Adaptive prescribed performance attitude and orbit tracking control of spacecraft in irregular gravitational fields
…… LI Jun，ZHU Hongyu （2639）
Considering three-stage scheduling optimization of multi-type flight refueling vehicles with time windows
…… XING Zhiwei，ZHOU Fangyu，SUN Ke，LI Yating （2651）
Network delay compensation strategy for large-span flexible support photovoltaic module installation equipment
…… LI Jinjian，WANG Haibo，SONG Honglin，YANG Qingbo，BAO Maocheng，QIAN Huazheng，LI Bo （2660）
Multi-scale anomaly behavior detection method based on Mamba-CNN
…… SHI Yangyu，XIE Chengjie，ZHENG Diwen，LU Shuhua （2672）

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0363

基于非线性因子恢复的位姿图优化算法

王岩*，黄炳昊，杨世春
(北京航空航天大学 交通科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：为实现城市道路环境中车辆的高精度位姿估计，提出了一种基于非线性因子恢复的位姿图优化算法，在因子图框架下实现对全球导航卫星系统(GNSS)、视觉和惯性信息的有效融合。针对以往位姿图优化算法中各因子协方差估计不明的问题，采取非线性因子恢复算法从边缘化产生的稠密先验因子中提取所需信息，将先验因子替换成相对位姿因子，并对各因子的协方差矩阵做最优估计；设计一种利用视觉惯性里程计对GNSS信号异常情况做主动检测的方法，该方法能自适应地调整GNSS信号的协方差矩阵。上述机制保证了位姿图优化过程中各因子的信息一致性。在数据集和真实道路环境下开展相关测试，实验结果表明：所提方案有效提高了多源异步信号的融合效率，并能够提供稳健且全局一致的高精度位姿估计结果。

关 键 词：位姿图优化；视觉惯性里程计；协方差估计；位姿估计；多传感器融合
中图分类号：TP242.6
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2229-10

准确、实时的高精度定位技术是实现智能车辆全局决策规划的基础与前提，更广义的定位导航技术除了解决车辆的三维位置问题，还可以提供诸如速度、姿态等车辆的状态信息，这些信息会参与车辆运动控制周期中关键参数的计算和处理。单独使用一种信号源的位姿估计技术难以满足智能车辆在复杂城市环境下的位姿估计需求，如何有效融合多源异步传感器信息，以实现平滑且全局一致的位姿估计具有重要意义。

同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术通过载体搭载的视觉相机对周围环境进行探测，进而实现自身的运动状态估计及周围位置环境地图的构建。早期的SLAM技术[1-3]一般基于滤波方法，这类方法在场景较为简单的环境中有效率快的优点。然而，由于滤波方法在一定程度上假设了马尔可夫性，导致了不可避免的非线性误差。Klein等[4]首次将非线性优化方法应用于视觉SLAM邻域，并采用多线程的思想，在前端线程跟踪匹配视觉特征，在后端线程优化全局位姿并构建全局地图。Qin等[5]提出的VINS-Mono使用非线性优化的方法实现对视觉和惯性信息的紧耦合，通过构建的视觉惯性里程计(visual-inertial odometry, VIO)来对载体位姿进行高精度实时估计。

由于存在4个方向的不可观性，随着时间的推移，视觉惯性估计系统会产生不可避免的漂移和累计误差问题。Strasdat等[6]提出了通过闭环检测的方法在位姿图中构建相对位姿约束，以达到有效消除漂移的目的。近年来，许多视觉惯性位姿估计系统[5,7-8]也都采取了类似的方法，通过在外层构建额外的位姿图优化线程来获得全局一致的位姿估计效果。然而，与基于滤波的位姿估计方法不同，目前基于优化的位姿估计方法通常不会直接更新状态的协方差矩阵[9]，这使得在位姿图优化过程中，各约束的协方差矩阵往往被简单设置为单位矩阵，造成了信息的不一致性。Gong等[10]针对特征点在不同运动模式下深度估计不确定性的差异，提出了一

收稿日期：2024-05-29；录用日期：2024-07-05；网络出版时间：2024-08-16 08:36
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240814.1205.001
*通信作者. E-mail：wybuaa@buaa.edu.cn

引用格式：王岩，黄炳昊，杨世春. 基于非线性因子恢复的位姿图优化算法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2229-2238.
Wang Y，Huang B H，Yang S C. Pose graph optimization algorithm based on nonlinear factor recovery[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2229-2238 (in Chinese).

种基于惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 预积分的相对位姿不确定性估计方法。Mazuran 等[11]提出了一种非线性因子恢复的方法来估计一组非线性因子的协方差和非线性测量。Usenko 等[12]基于文献 [11] 的方法对视觉惯性里程计中的边缘化因子进行稀疏化，并将得到的非线性因子用于后端建图。上述研究主要集中在对特征点和载体姿态的不确定性估计上，或者利用非线性因子恢复来提取用于束调整法的关键信息，但这些方法并没有从本质上解决位姿图优化中各约束因子的协方差估计问题。

基于闭环约束构建的位姿图优化能够有效抑制闭环路径上的累计误差，但在城市道路场景下通常难以构建出有效的闭环约束。

基于构建闭环优化的位姿图优化能够有效消除闭环回路上的累计误差，但在城市道路环境中往往难以形成有效的闭环回路。近年来，许多学者提出利用全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 提供的全局位置信息来参与位姿图优化，以消除视觉惯性系统的累计误差问题。Qin 等[13]提出了一种通用的多传感器位姿估计系统，在概率图框架下融合局部传感器和全局传感器的信号源，实现局部精确和全局无偏的位姿估计。Han 等[14]提出了一种融合视觉、惯性和 GNSS 的多层位姿估计框架，在 GNSS 信号局部退化的情况下仍能保持高精度的车辆姿态估计。

本文提出了一种基于非线性因子恢复的位姿图优化算法。为有效融合多源传感器信息，实现局部光滑和全局无偏的位姿估计，构造了一个基于因子图模型的双层位姿估计结构，在内层通过对视觉和惯性信息的紧耦合实现高频、高精度的局部位姿估计。为校正视觉惯性里程计的累计偏差，并提供全局参考坐标系下的状态估计结果，在外层融合 GNSS 位置信息并构建大范围位姿图。利用非线性因子恢复算法对关键帧之间相对位姿因子的协方差矩阵进行最优估计，解决了位姿图优化过程中的信息不一致性问题。公开数据集和实车场景中的实验结果表明，在城市复杂环境中，相较于其他开源算法，本文提出的位姿图优化算法获得了更高的位姿估计精度。

1 基于因子图的视觉惯性里程计

1.1 因子图模型

对于求解大规模 SLAM 问题，常使用因子图模型进行建模。因子图属于概率图模型的一类分支，概率图模型还包括机器学习和状态估计邻域常见的贝叶斯网络和马尔可夫随机场[15]。对于一个一般的状态估计问题，希望在给定系统观测 $\boldsymbol{Z}=[\boldsymbol{z}_1,\boldsymbol{z}_2,\cdots,\boldsymbol{z}_m]^{\mathrm{T}}$ 的前提下，对系统未知状态变量 $\boldsymbol{\chi}=[\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n]^{\mathrm{T}}$ 进行最优估计。在因子图模型中，观测量不会被显式地表达出来，而是用不同的因子节点 $\boldsymbol{\phi}_i$ 进行替代，此时，最大似然估计问题可以公式化为

$$\boldsymbol{\chi}^*_{\mathrm{MLE}}=\arg\max_{\boldsymbol{\chi}}\prod_i\boldsymbol{\phi}_i \tag{1}$$

假设测量噪声服从高斯分布，将式 (1) 中第 i 个因子写为

$$\boldsymbol{\phi}_i\left(\boldsymbol{\chi}_i\right)=\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{h}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)-\boldsymbol{z}_i\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}\left(\boldsymbol{h}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)-\boldsymbol{z}_i\right)\right] \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{\chi}_i$ 为与第 i 个测量有关的所有状态变量；$\boldsymbol{h}_i(\cdot)$ 为对应的测量函数；$\boldsymbol{\Sigma}_i$ 为测量的协方差矩阵。

将式 (2) 中的二次型写成马氏范数的形式，并对式 (2) 取负对数，代入式 (1) 可得

$$\boldsymbol{\chi}^*_{\mathrm{MLE}}=\arg\min_{\boldsymbol{\chi}}\sum_i\left\|\boldsymbol{h}_i\left(\boldsymbol{\chi}_i\right)-\boldsymbol{z}_i\right\|^2_{\boldsymbol{\Sigma}_i}=\arg\min_{\boldsymbol{\chi}}\sum_i\left\|\boldsymbol{r}_i\left(\boldsymbol{\chi}_i\right)\right\|^2_{\boldsymbol{\Sigma}_i} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{r}_i(\cdot)$ 为残差函数。

此时，最大似然估计问题等价于最小化各残差函数的马氏范数之和，或者说转化为非线性最小二乘问题。

1.2 坐标系定义

多源融合位姿估计系统涉及多个空间坐标系，在此做统一定义和说明。假设各传感器都刚性连接在载体上，图 1 为各坐标系的相对关系示意图。涉及的传感器坐标系包括相机坐标系 $\{c\}$、IMU 坐

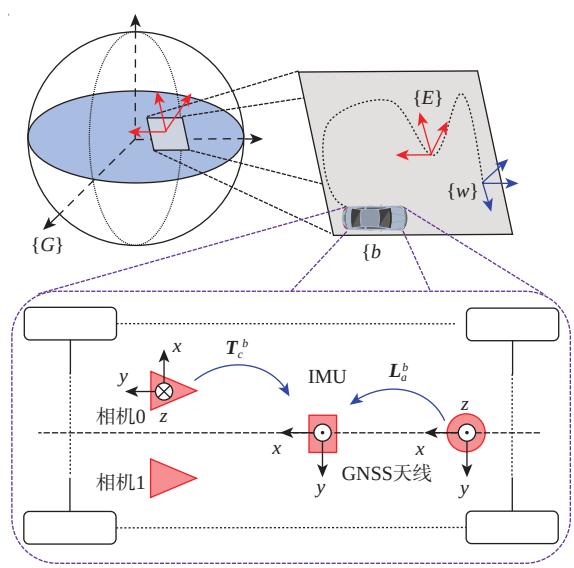


图 1 坐标系相对关系示意图

Fig. 1 Diagram of coordinate system relative relations

标$\{b\}$和 GNSS 天线坐标系$\{a\}$, 将 IMU 坐标系作为载体坐标系。相机和 IMU 之间的外参$\boldsymbol{T}_c^b$及 GNSS 天线与 IMU 之间的杆臂向量$\boldsymbol{L}_a^b$均可通过前期标定获得, 将其视为已知量。

视觉惯性里程计完成初始化[16]流程后, 可以确定局部世界坐标系$w(\cdot)$, 该局部世界坐标系的z轴与重力矢量方向对齐。第 1 次接收到 GNSS 信号后, 以该点为坐标原点建立东-北-天(ENU)切平面坐标系$\{E\}$, 其是一种相对于地球固定的右手直角坐标系, 将其作为整个位姿估计系统的全局参考坐标系, z轴也与重力矢量方向对齐。

1.3　视觉惯性里程计

为有效融合来自 IMU 的惯性信息和来自相机的视觉信息, 构建一个基于滑动窗口[17]的视觉惯性里程计。在一个完整窗口内, 待优化的状态变量可以写为

$$\begin{cases}\boldsymbol{\chi}=[\boldsymbol{x}_0,\boldsymbol{x}_1,\cdots,\boldsymbol{x}_k,\lambda_0,\lambda_1,\cdots,\lambda_m]\\ \boldsymbol{x}_k=\left[\boldsymbol{p}_{b_k}^w,\boldsymbol{v}_{b_k}^w,\boldsymbol{q}_{b_k}^w,\boldsymbol{b}_{\mathrm{a}},\boldsymbol{b}_{\mathrm{g}}\right]\\ k\in[0,n]\end{cases}\tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{x}_k$为第k帧图像所对应的载体状态量; 三维矢量$\boldsymbol{p}_{b_k}^w$和$\boldsymbol{v}_{b_k}^w$分别为k时刻载体在局部世界坐标系下的位置和速度; 四元数$\boldsymbol{q}_{b_k}^w$为载体坐标系b_k相对于局部世界坐标系$w(\cdot)$的旋转姿态; $\boldsymbol{b}_{\mathrm{a}}$和$\boldsymbol{b}_{\mathrm{g}}$分别为加速度计和陀螺仪的偏置; λ_m为特征点的逆深度。

为对滑动窗口内的状态变量进行优化估计, 按照文献 [5] 的方法将该问题建模成形如 1.1 节中的非线性最小二乘问题, 通过最小化先验及所有传感器测量残差的马氏范数之和来获得最优估计:

$$\min_{\boldsymbol{\chi}}\left\{\left\|\boldsymbol{r}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{\chi}\right\|^2+\sum_{k\in B}\left\|\boldsymbol{r}_B\left(\hat{\boldsymbol{z}}_{b_{k+1}}^{b_k},\boldsymbol{\chi}\right)\right\|_{\boldsymbol{\Sigma}_{b_{k+1}}^{b_k}}^2+\sum_{(l,j)\in C}\rho\left(\left\|\boldsymbol{r}_C\left(\hat{\boldsymbol{z}}_l^{c_j},\boldsymbol{\chi}\right)\right\|_{\boldsymbol{\Sigma}_l^{c_j}}^2\right)\right\}\tag{5}$$

式中: $\boldsymbol{r}_{\mathrm{p}}$和$\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}$为来自边缘化的先验信息; $\boldsymbol{r}_B\left(\hat{\boldsymbol{z}}_{b_{k+1}}^{b_k},\boldsymbol{\chi}\right)$和$\boldsymbol{r}_C\left(\hat{\boldsymbol{z}}_l^{c_j},\boldsymbol{\chi}\right)$分别为 IMU 的预积分残差和视觉相机的重投影残差, 集合B表示滑动窗口内所有相邻关键帧的 IMU 预积分约束索引, 集合C表示窗口内所有路标点与相机帧的观测对索引; $\hat{\boldsymbol{z}}$表示观测值; $\boldsymbol{\Sigma}_{b_{k+1}}^{b_k}$和$\boldsymbol{\Sigma}_l^{c_j}$为对应测量的协方差矩阵, c_j为第j帧图像采集时的相机坐标系; Huber 范数$\rho(\cdot)$用于抑制视觉观测的异常点, 以获得更稳健的状态估计结果, 可以写为

$$\rho(s)=\begin{cases}s & s\leqslant 1\\ 2\sqrt{s}-1 & s>1\end{cases}\tag{6}$$

为实现对状态量的实时在线估计, 采取滑动窗口的方法控制单次优化的计算规模, 图 2 为该方法的示意图。图中: $\boldsymbol{l}$为特征点, $\boldsymbol{T}$为位姿矩阵, $\boldsymbol{v}$为速度, $\boldsymbol{b}$为惯性测量单元的零偏向量。

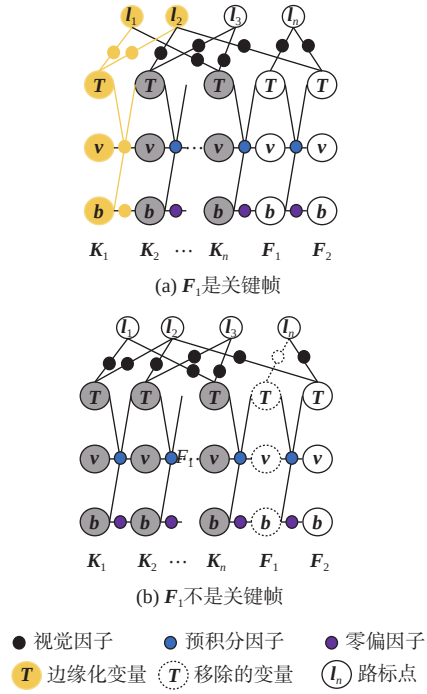


图 2　滑动窗口策略示意图

Fig. 2　Diagram of sliding window strategy

当视觉惯性里程计前端送入最新帧$\boldsymbol{F}_2$时, 先判断其前一帧$\boldsymbol{F}_1$是否为关键帧。若$\boldsymbol{F}_1$是关键帧(见图 2(a)), 则将窗口内最早的关键帧$\boldsymbol{K}_1$及其对应的视觉、惯性测量进行边缘化, 边缘化的状态会形成先验约束加入下次优化进程, 同时$\boldsymbol{F}_1$进入窗口, 替代原先关键帧$\boldsymbol{K}_n$的位置, 成为窗口内新的关键帧; 若$\boldsymbol{F}_1$不是关键帧(见图 2(b)), 由于非关键帧的视觉信息是冗余的, 将直接抛弃$\boldsymbol{F}_1$及其对应的视觉测量信息, IMU 预积分信息则会保留以保证惯性信息的连续性。

2　大范围全局位姿图优化

2.1　位姿图优化

视觉惯性里程计可以在短时间、小范围内提供高频且精确的位姿估计。然而在城市道路环境中, 光照大范围变化、环境纹理缺失等问题都会对其估计精度产生重大影响, 长时间运行所产生的累计误差问题也使其难以直接用于城市车辆的位姿估计任务。为在全局尺度上校正视觉惯性里程计的累计误差, 在视觉惯性系统的外层构建了一个如图 3 所示的大范围位姿图优化层。当内层视觉惯性里程计对关键帧进行边缘化后, 会保留该关键帧的位姿信息, 并将其加入到外层的位姿图中, 同时新加入的位姿状态量会和前若干帧位姿状态量形成相对位姿约束。在外层的位姿图中还包含来自 GNSS

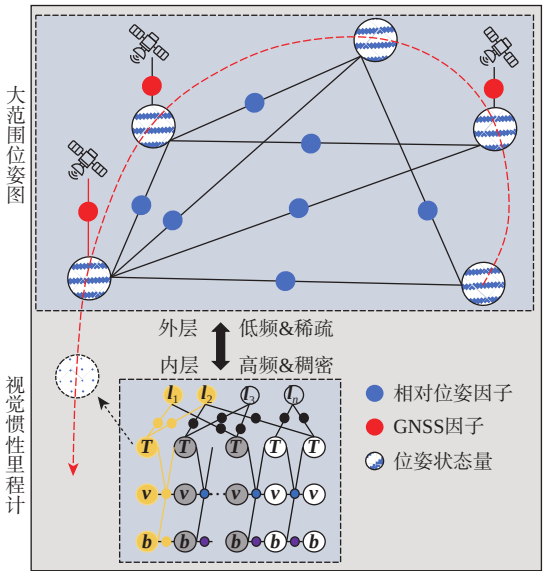


图3 双层位姿图优化示意图

Fig. 3 Diagram of dual-layer pose graph optimization

的全局约束因子，由于GNSS与视觉惯性系统的更新频率不同，图3中并不是每个位姿状态量都有相应的全局约束。位姿图和视觉惯性系统相同，也是一个状态估计器，不过其舍弃了对路标点等状态的估计，只优化不同时刻载体的位姿信息，因此，位姿图往往更稀疏。

定义位姿图中待优化的状态变量如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{PGO}}=[\boldsymbol{x}_0,\boldsymbol{x}_1,\cdots,\boldsymbol{x}_n]\\ \boldsymbol{x}_k=\left[\boldsymbol{p}_{b_k}^E,\boldsymbol{q}_{b_k}^E\right]\\ k\in[0,n]\end{cases}\tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{x}_k$为第k个关键帧时刻的载体状态量，包含载体在ENU坐标系下的位置$\boldsymbol{p}_{b_k}^E$和姿态$\boldsymbol{q}_{b_k}^E$。

与常见视觉惯性系统采用回环检测的闭环优化策略不同，考虑到城市道路场景难以形成有效的回环条件，选择在位姿图中加入来自GNSS的全局定位信息。GNSS信息的加入不仅抑制了漂移，还将局部位姿信息对齐到全局框架下。GNSS因子的残差函数定义为

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{G}}\left(\hat{\boldsymbol{z}}_k^{\mathrm{G}},\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{PSO}}\right)=\boldsymbol{p}_{b_k}^E+\boldsymbol{R}_{b_k}^E\boldsymbol{L}_a^b-\hat{\boldsymbol{p}}_{a_k}^E\tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{r}_{\mathrm{G}}$为三维空间中GNSS观测位置和模型预测位置之间的误差，把GNSS的绝对位置约束加入目标函数修正视觉惯性里程计的漂移；$\hat{\boldsymbol{p}}_{a_k}^E$为第$k$个关键帧时刻接收天线在ENU坐标系中的位置矢量，其是含噪声的测量值；$\boldsymbol{R}_{b_k}^E$为载体坐标系下的向量变换到全局ENU坐标系下的旋转矩阵，其是四元数$\boldsymbol{q}_{b_k}^w$对应的矩阵形式。

此外，视觉惯性里程计在短期内的位姿估计是精确的，考虑其相邻若干帧之间的相对位姿变化关系，导出其中的相对平移约束和相对旋转约束加入到外层的位姿图优化中。相对平移约束的残差函数定义为

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{S}}\left(\hat{\boldsymbol{z}}_{i,j}^{\mathrm{p}},\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{PSO}}\right)=\left(\boldsymbol{R}_{b_i}^E\right)^{-1}\left(\boldsymbol{p}_{b_j}^E-\boldsymbol{p}_{b_i}^E\right)-\left(\hat{\boldsymbol{R}}_{b_i}^w\right)^{-1}\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{b_j}^w-\hat{\boldsymbol{p}}_{b_i}^w\right)\tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{r}_{\mathrm{S}}$为相对位置残差，用来描述GNSS全局坐标系与视觉惯性里程计局部坐标系下载体相对位置的误差；$\hat{\boldsymbol{p}}_{b_i}^w$、$\hat{\boldsymbol{p}}_{b_j}^w$和$\hat{\boldsymbol{R}}_{b_i}^w$为对应时刻载体在局部世界坐标系下的状态量，上述量是直接从视觉惯性里程计中导出的，也将其视为带噪声的测量值。

同理，相对旋转约束的残差函数为

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{q}}\left(\hat{\boldsymbol{z}}_{i,j}^{\mathrm{q}},\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{PSO}}\right)=\left\{\left(\boldsymbol{q}_{b_i}^E\right)^{-1}\otimes\boldsymbol{q}_{b_j}^E\right\}^{-1}\otimes\left\{\left(\hat{\boldsymbol{q}}_{b_i}^w\right)^{-1}\otimes\hat{\boldsymbol{q}}_{b_j}^w\right\}\Big|_{xyz}\tag{10}$$

式中："$\otimes$"表示2个四元数之间的乘法运算；$\{\cdot\}|_{xyz}$表示只取出其中的虚数部分。

定义了各残差项后，就可以将上述状态估计问题转化成最小二乘问题：

$$\min_{\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{PGO}}}\left\{\sum_{(l,j)\in n}\left\|\boldsymbol{r}_{\mathrm{S}}\left(\hat{\boldsymbol{z}}_{i,j}^{\mathrm{p}},\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{PSO}}\right)\right\|_{\boldsymbol{\Sigma}_{ij}^{\mathrm{p}}}^2+\sum_{(l,j)\in n}\left\|\boldsymbol{r}_{\mathrm{q}}\left(\hat{\boldsymbol{z}}_{i,j}^{\mathrm{q}},\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{PSO}}\right)\right\|_{\boldsymbol{\Sigma}_{ij}^{\mathrm{q}}}^2+\sum_{k\in n}\left\|\boldsymbol{r}_{\mathrm{G}}\left(\hat{\boldsymbol{z}}_k^{\mathrm{G}},\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{PSO}}\right)\right\|_{\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{G}}}^2\right\}\tag{11}$$

与视觉惯性里程计的处理方法类似，采取数值优化的方法迭代求解该问题，以获得在全局参考坐标系下状态变量的最优估计。

2.2 视觉惯性因子的协方差估计

式(11)中，各马氏距离的协方差矩阵代表了对应因子在优化过程中所占的权重，在以往的众多位姿图优化算法中，这些协方差矩阵都被简单设置为单位矩阵，造成优化过程中各因子的信息不一致性，影响了位姿估计的精度和效果。本文采取非线性因子恢复算法对各因子的协方差进行恢复和最优估计。

2.2.1 非线性因子恢复算法

非线性因子恢复[11]最早被用于因子图的拓扑稀疏化，即使用稀疏的因子图拓扑结构近似代替原有的稠密分布，可以大大降低优化问题的规模，提高计算效率。受此启发，考虑使用非线性因子恢复算法，从视觉惯性里程计边缘化产生的稠密先验中提取非线性因子，并完成对关键帧之间相对位姿因子协方差矩阵的最优估计。

通过对式(5)中非线性最小二乘问题的残差函数进行线性化，可以获得多元高斯分布$p(\boldsymbol{\chi}_t)\sim N\left(\boldsymbol{\mu}_0,\boldsymbol{H}_0^{-1}\right)$。此时，构造另一个带有稀疏因子图拓扑结构的分布$p_{\mathrm{a}}(\boldsymbol{\chi}_t)\sim N\left(\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{a}},\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}^{-1}\right)$来近似原有的分布。2个分布之间的差异用KL散度进行衡量：

$$D_{\mathrm{KL}}\left(p(\boldsymbol{\chi})\|p_{\mathrm{a}}(\boldsymbol{\chi})\right)=\frac{1}{2}\left(\langle\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}},\boldsymbol{\Sigma}_0\rangle-\ln(\det(\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{\Sigma}_0))+\left\|\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}^{1/2}(\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{a}}-\boldsymbol{\mu}_0)\right\|^2-d\right)\tag{12}$$

式中: $\det(\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{\Sigma}_0)$为矩阵$\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{\Sigma}_0$的行列式, $\boldsymbol{\Sigma}_0=\boldsymbol{H}_0^{-1}$; d为常数; $\langle\boldsymbol{H}_a,\boldsymbol{\Sigma}_0\rangle$表示计算 2 个矩阵的内积。希望最小化 KL 散度, 以使 2 个分布在概率意义上尽可能接近。

对于第i个期望从视觉惯性里程计中恢复的非线性因子, 定义与之对应的残差函数:

$$\boldsymbol{e}_i\left(\boldsymbol{\chi},\boldsymbol{z}_i\right)=\boldsymbol{z}_i-\boldsymbol{h}_i\left(\boldsymbol{\chi}\right)\tag{13}$$

式中: $\boldsymbol{h}_i$为测量函数, 定义其测量协方差为$\boldsymbol{\Sigma}_i$; 测量值$\boldsymbol{z}_i$为伪测量, 并不来源于某个特定的传感器, 而是通过人为设定。

为使式 (12) 最小化, 直接取$\boldsymbol{z}_i$为当前线性化点处的期望测量值$\boldsymbol{z}_i=\boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{\mu}_0)$, 则$\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{a}}=\boldsymbol{\mu}_0$, 此时, 式 (12) 中的$\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}^{1/2}(\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{a}}-\boldsymbol{\mu}_0)$项可以消去。

为进一步估计每个因子的协方差矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_i$, 定义:

$$\begin{cases}\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_1\\ \vdots\\ \boldsymbol{J}_i\\ \vdots\\ \boldsymbol{J}_n\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{H}_{\mathrm{NFR}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \boldsymbol{H}_i & \\ & & & \ddots\\ & & & & \boldsymbol{H}_n\end{bmatrix}\end{cases}\tag{14}$$

式中: $\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}$中的元素$\boldsymbol{J}_i$为第$i$个非线性因子的残差函数关于状态变量的雅可比矩阵; $\boldsymbol{H}_{\mathrm{NFR}}$为块对角矩阵, 对角线上的元素$\boldsymbol{H}_i$为第$i$个非线性因子的信息矩阵$\left(\boldsymbol{H}_i=\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}\right)$。

此时, 稀疏分布$p_{\mathrm{a}}(\boldsymbol{\chi}_t)$的信息矩阵可以写为

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{NFR}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}\tag{15}$$

将式 (15) 代入式 (12) 中, 可得

$$\min_{\boldsymbol{H}_{\mathrm{NFR}}}D_{\mathrm{KL}}=\left\langle\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{NFR}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}},\boldsymbol{\Sigma}_0\right\rangle-\log\left(\det\left(\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{NFR}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}\right)\right)\tag{16}$$

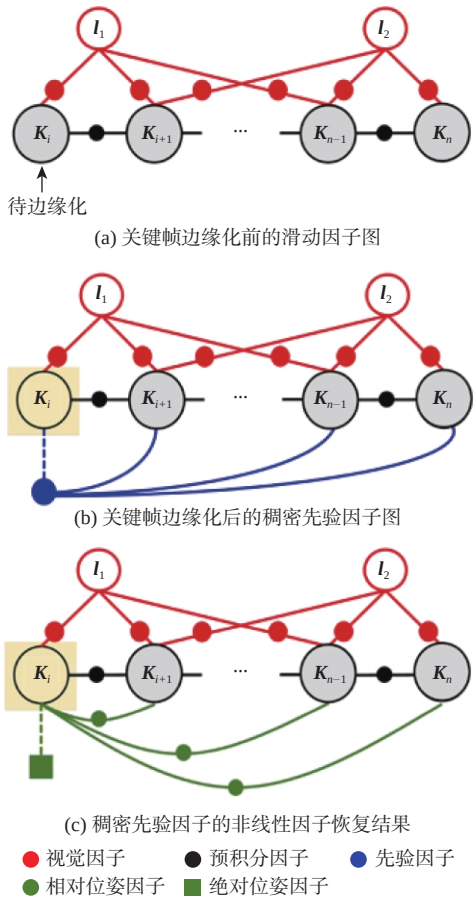
当$\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}$满秩且可逆时, 可以得到其闭式解:

$$\boldsymbol{H}_i=\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}=\left(\left\{\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}\boldsymbol{\Sigma}_0\boldsymbol{J}_{\mathrm{NFR}}^{\mathrm{T}}\right\}^{(i)}\right)^{-1}\tag{17}$$

式中: $\{\cdot\}^{(i)}$表示对角矩阵中的第i个矩阵块。

2.2.2　定义伪测量及恢复信息矩阵

按照 1.3 节的边缘化策略对关键帧进行边缘化时, 可以使用非线性因子恢复算法恢复出其和滑动窗口内其他关键帧之间相对位姿测量的信息矩阵。信息矩阵反映了因子的致信度和测量不确定性, 在后续优化过程中, 可以根据信息矩阵的大小动态调节不同因子的优化权重。整个流程如图 4 所示。



(a) 关键帧边缘化前的滑动因子图

(b) 关键帧边缘化后的稠密先验因子图

(c) 稠密先验因子的非线性因子恢复结果

图 4　非线性因子恢复示意图

Fig. 4　Diagram of nonlinear factor recovery

如图 4 (b) 所示, 采用 Schur 补[18]的方法对窗口内首个关键帧$\boldsymbol{K}_i$进行边缘化, 由于视觉和惯性约束的存在, 其会产生连接窗口内其他关键帧的稠密先验因子。借助非线性因子恢复算法, 可以将稠密先验因子近似恢复成图 4 (c) 中的相对位姿因子和绝对位姿因子, 为每个待恢复的非线性因子指定对应的残差函数。

1) 相对平移因子。对于关键帧$\boldsymbol{K}_i$及其之后的某个关键帧$\boldsymbol{K}_j, j\in[i+1,n]$, 通过定义伪测量$\boldsymbol{z}_{\mathrm{rel_p}}=\hat{\boldsymbol{p}}_{ij}^i\in\mathbf{R}^3$, 可以得到残差函数为

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel\_p}}=\left(\boldsymbol{R}_i^w\right)^{-1}\left(\boldsymbol{p}_i^w-\boldsymbol{p}_j^w\right)-\boldsymbol{z}_{\mathrm{rel\_p}}\tag{18}$$

2) 相对旋转因子。类似的, 定义相对旋转因子的伪测量$\boldsymbol{z}_{\mathrm{rel_q}}=\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}^i$, 其对应的残差函数为

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel\_q}}=\left(\boldsymbol{q}_i^w\right)^{-1}\otimes\boldsymbol{q}_j^w\otimes\left(\boldsymbol{z}_{\mathrm{rel\_q}}\right)^{-1}\Big|_{xyz}\tag{19}$$

3) 绝对位姿因子。绝对位姿因子只连接当前关键帧$\boldsymbol{K}_i$, 其伪测量定义为: $\boldsymbol{z}_{\mathrm{abs\_T}}=\hat{\boldsymbol{T}}_i\in\mathrm{SE}(3)$, 对应的残差函数为

$$\boldsymbol{r}_{\text{abs\_T}} = \text{Log}\left(\boldsymbol{T}_i^{-1}\boldsymbol{z}_{\text{abs\_T}}\right) \tag{20}$$

式中：Log 表示李群上的对数映射。

有了残差函数后，可以计算$\boldsymbol{J}_{\text{NFR}}$中的各雅可比矩阵，进而通过式 (17) 恢复出各因子的信息矩阵。用相对平移因子恢复出的协方差矩阵代替式 (11) 中的$\boldsymbol{\Sigma}_{ij}^{\text{p}}$，用相对旋转因子恢复出的协方差矩阵代替式 (11) 中的$\boldsymbol{\Sigma}_{ij}^{\text{q}}$。对于绝对位姿因子，并没有实际用到其恢复出的信息矩阵，本文仅为了保持矩阵$\boldsymbol{J}_{\text{NFR}}$的满秩特性。

2.3 异常 GNSS 因子主动检测

GNSS 因子作为全局约束被添加到大范围位姿图优化中，用于约束视觉惯性里程计的累计误差和漂移。GNSS 接收机能提供 GNSS 信号的测量协方差矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_{\text{Signal}}$，但该指标不能作为衡量 GNSS 信号好坏的唯一标准。考虑到视觉惯性里程计在短时间、小范围内的相对位姿估计精度非常高，可借助视觉惯性里程计的观测结果来对 GNSS 的异常数据进行主动检测，并实时调整测量协方差矩阵。在k时刻，假设 GNSS 对载体位置的观测结果为$\hat{\boldsymbol{p}}_{b_k}^{E}$，视觉惯性里程计对载体位置的估计结果为$\hat{\boldsymbol{p}}_{b_k}^{w}$，若以里程计的估计结果作为基准，则 GNSS 观测的位置误差为

$$\Delta\boldsymbol{p}_{b_k} = \left(\boldsymbol{R}_w^E\right)^{-1}\hat{\boldsymbol{p}}_{b_k}^{E} - \hat{\boldsymbol{p}}_{b_k}^{w} \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{R}_w^E$为由局部世界坐标系到全局参考坐标系的旋转矩阵；$\Delta\boldsymbol{p}_{b_k}$描述了 2 个系统对位置观测的偏差。

定义异常系数矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_\alpha$为

$$\boldsymbol{\Sigma}_\alpha = \begin{bmatrix} \alpha\left(\left[\Delta\boldsymbol{p}_{b_k}\right]_x\right) & 0 & 0 \\ 0 & \alpha\left(\left[\Delta\boldsymbol{p}_{b_k}\right]_y\right) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha\left(\left[\Delta\boldsymbol{p}_{b_k}\right]_z\right) \end{bmatrix} \tag{22}$$

式中：$[\cdot]_x$表示取出向量中的x方向分量，$[\cdot]_y$和$[\cdot]_z$同理；$\alpha(\cdot)$为映射函数，可以写为

$$\alpha(x) = 1 + t\exp\left(-\frac{m}{|x|}\right) \qquad x \neq 0 \tag{23}$$

其中：参数t为阈值，当x趋向于无穷大时，$\alpha(x)$会收敛到$t+1$，从而保证了不会出现非常大的异常系数；参数m控制了函数的增长速度。

将异常系数矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_\alpha$和测量协方差矩阵相乘，作为修正后的 GNSS 因子协方差矩阵：

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\text{G}} = \boldsymbol{\Sigma}_\alpha\boldsymbol{\Sigma}_{\text{Signal}} \tag{24}$$

当$\Delta\boldsymbol{p}_{b_k}$中各分量都很小时，异常系数矩阵的对角线元素趋向于 1，表示信任 GNSS 接收机提供的测量协方差矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_{\text{Signal}}$；当$\Delta\boldsymbol{p}_{b_k}$中各分量较大时，表示 GNSS 信号出现异常的概率也较大，通过异常系数矩阵放大了测量协方差矩阵，降低 GNSS 因子在图优化进程中所占的权重。上述机制实现了对 GNSS 因子测量协方差的动态调整，保证了优化过程中各因子的信息一致性。

3 实验验证

3.1 公开数据集实验

为验证本文算法的实际位姿估计效果，将其部署在公共数据集 UrbanLoco[19] 中进行测试实验。该数据集的数据是在真实的城市道路环境中采集的，包含隧道、桥梁、丘陵、运动的车辆和行人等各类复杂场景。采集数据的传感器固定在车顶，并在前期经过了统一的校准和标定。算法使用到的传感器包括：1 个视觉相机，分辨率为 2 048×1 536，帧率为 10 Hz；1 个 Xsens MTI 10 IMU，运行频率为 100 Hz；1 个低精度的 Ublox M8T GNSS 接收模块，用于提供原始 GNSS 定位数据；定位和定姿结果的真值由组合导航设备 Novatel SPAN-CPT 提供。该数据集的数据采集平台如图 5 所示。

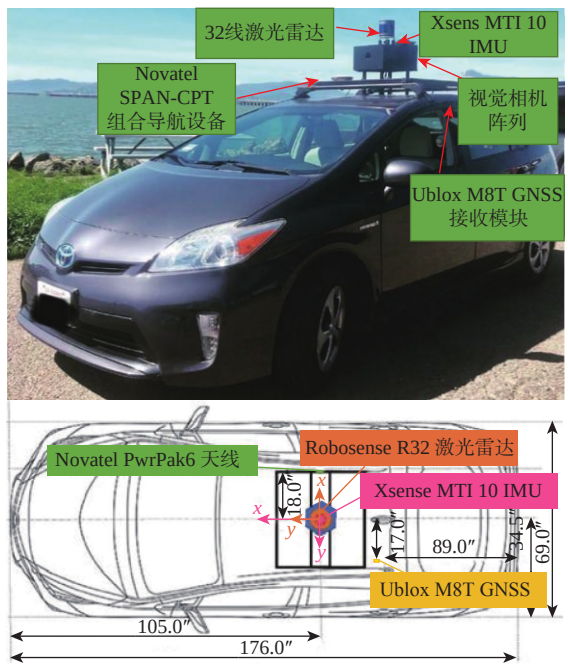


图 5 UrbanLoco 数据集采集平台

Fig. 5 UrbanLoco dataset collection platform

3.1.1 位姿估计效果验证

为全面验证本文算法的位姿估计效果，将其与其他开源的位姿估计算法进行比较验证。VINS-Mono 算法[5] 通过紧耦合视觉和惯性信息实现局部坐标系下的 6 自由度位姿估计，由于该算法缺乏对全局传感器的支持，不能输出在全局坐标系下的估计结果，在展示结果前会将其和真值轨迹对齐以达到与其他全局位姿估计算法类似的展示效果。VINS-Fusion 算法[13] 通过对视觉惯性里程计和全局传感器的松耦合，实现了局部精确和全局无漂移的位姿估计。上述算法所需的视觉和惯导信息由数据集中的相机和 IMU 提供，相机内参和各传感器

间的外参由数据集提供的标定文件确定, 各算法的视觉惯性里程计均不开启回环校正线程。VINS-Fusion 算法和本文算法所需的全局位置信息由低精度 GNSS 的单点定位解提供。

使用数据集中的序列 CA_20190828190411 进行对比测试, 该序列总长度约 1.2 km。当 GNSS 接收机第 1 次接收信号后, 会以该点为坐标原点建立 ENU 切平面坐标系, 该坐标系是整个位姿估计系统的全局参考坐标系。图 6 展示了 ENU 坐标系下通过各算法得到的轨迹对比情况。图中, 绿色散点是低精度的 GNSS 单点定位解, 该序列的 GNSS 信号质量较好, 没有出现过多的异常点。对比 3 种位姿估计算法, VINS-Mono 算法在轨迹首尾产生了较大的定位误差, VINS-Fusion 算法在 2 个弯道处位置估计效果不佳, 本文算法在全局尺度上整体定位效果较好。

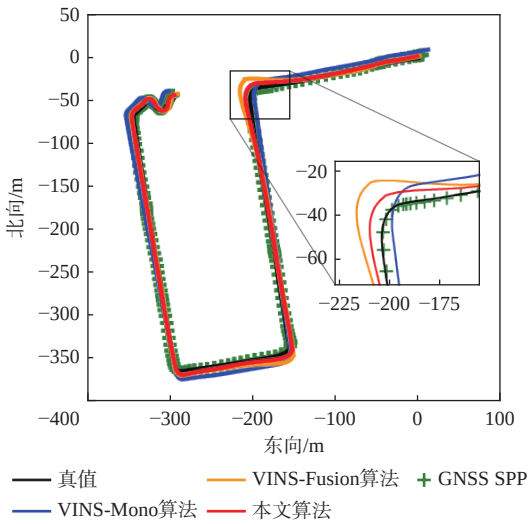


图 6　各算法轨迹对比

Fig. 6　Trajectory comparison of various algorithms

重点关注平面方向的位置误差及绕 z 轴方向的航向角误差, 上述误差随时间的变化如图 7 所示。结合图 7 分析, 本文算法的整体估计效果最佳; VINS-Mono 算法因为缺乏全局传感器, 在长距离的城市工况下, 误差难以得到有效抑制, 位置估计效果最差; 由于采用了单天线的 GNSS 方案, VINS-Fusion 算法和本文算法的航向角误差相较于 VINS-Mono 算法都有所增加, 主要是因为单天线的 GNSS 方案不能提供很好的航向角测量信息。值得注意的是, 本文算法和 VINS-Fusion 算法由于采用了类似的全局位姿优化框架, 在误差图中的误差变化趋势非常类似, 2 处误差峰值均对应了车辆的转弯时刻。然而, VINS-Fusion 算法在位姿图优化中将视觉惯性因子的协方差设置为单位矩阵, 造成各因子的信息不一致性。得益于非线性因子恢复算法对

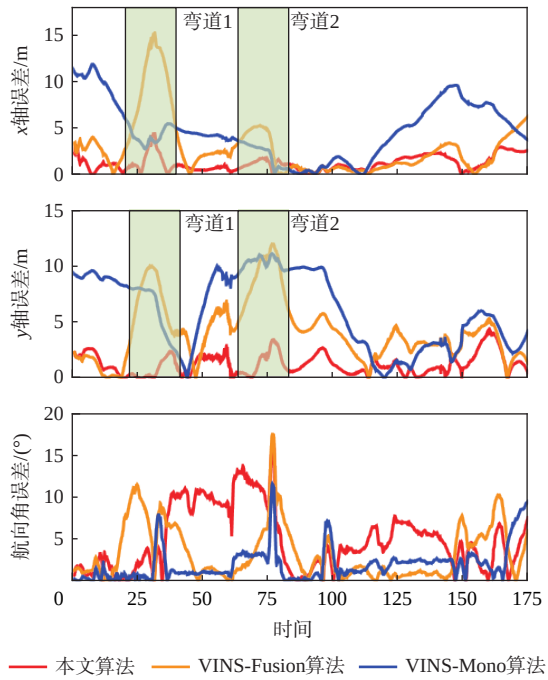


图 7　不同算法的关键状态量估计误差

Fig. 7　Estimation errors of key state quantities for different algorithms

各因子协方差的有效估计, 本文算法在各时刻的位姿估计效果均优于 VINS-Fusion 算法。

3.1.2　异常 GNSS 因子主动检测效果验证

为验证 2.3 节提出的异常 GNSS 因子主动检测方法的效果, 选择 UrbanLoco 数据集中的序列 CA_20190828173350 进行测试。该序列总长度约 3.4 km, 车辆在稠密的高层建筑间穿梭, GNSS 总体信号质量较差。当接收到 GNSS 数据后, 利用式 (22) 计算每条 GNSS 数据的异常系数矩阵, 取映射函数 $\alpha(\cdot)$ 中的参数 $t=9$, $m=30$。为验证该异常系数矩阵的有效性, 利用数据集中提供的位姿真值计算每条 GNSS 数据的实际位置误差。以异常系数矩阵中的系数 $\alpha([\Delta \boldsymbol{p}_{b_k}]_z)$ 和实际位置误差的 z 轴分量为例, 结果如图 8 所示。

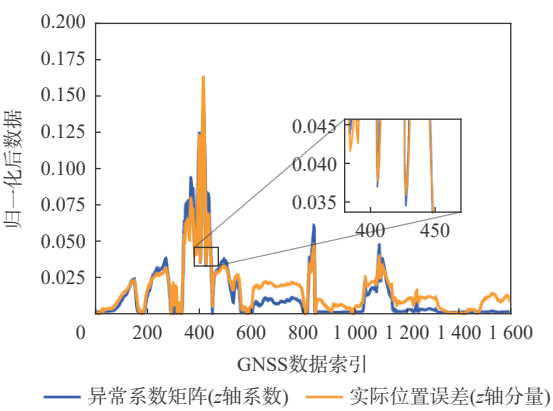


图 8　异常系数矩阵和实际位置误差关系

Fig. 8　Relationship of anomaly coefficient matrix and actual position error

为消除量纲的影响，图 8 中的 2 组数据均进行了归一化处理，可以观察到，系数$\alpha([\Delta \boldsymbol{p}_{b_k}]_z)$非常好地反映了 GNSS 数据$z$轴误差的变化趋势，两者具有较强的相关性。为更加直观地说明该方案对 GNSS 信号异常情况的识别效果，将异常系数矩阵中的对角线元素取均值：

$$\bar{\alpha}_k = \left[\alpha\left([\Delta \boldsymbol{p}_{b_k}]_x\right) + \alpha\left([\Delta \boldsymbol{p}_{b_k}]_y\right) + \alpha\left([\Delta \boldsymbol{p}_{b_k}]_z\right)\right]/3 \tag{25}$$

按照$\bar{\alpha}_k$的大小给 GNSS 数据点绘制不同的颜色。图 9 展示了该序列中 6 个不同位置的 GNSS 异常识别情况，其中，颜色越红，代表$\bar{\alpha}_k$越大，GNSS 信号异常概率越高。可以观察到，根据视觉惯性里程计短期精度高的特点，该方法可以有效识别 GNSS 的异常情况，一些明显偏离真实轨迹的观测值被正确地赋予了较大的异常系数。得益于该方法，在 GNSS 信号质量较差的位置，GNSS 因子的协方差矩阵会被重新调整，进而在参与全局位姿图优化时保持更好的信息一致性。

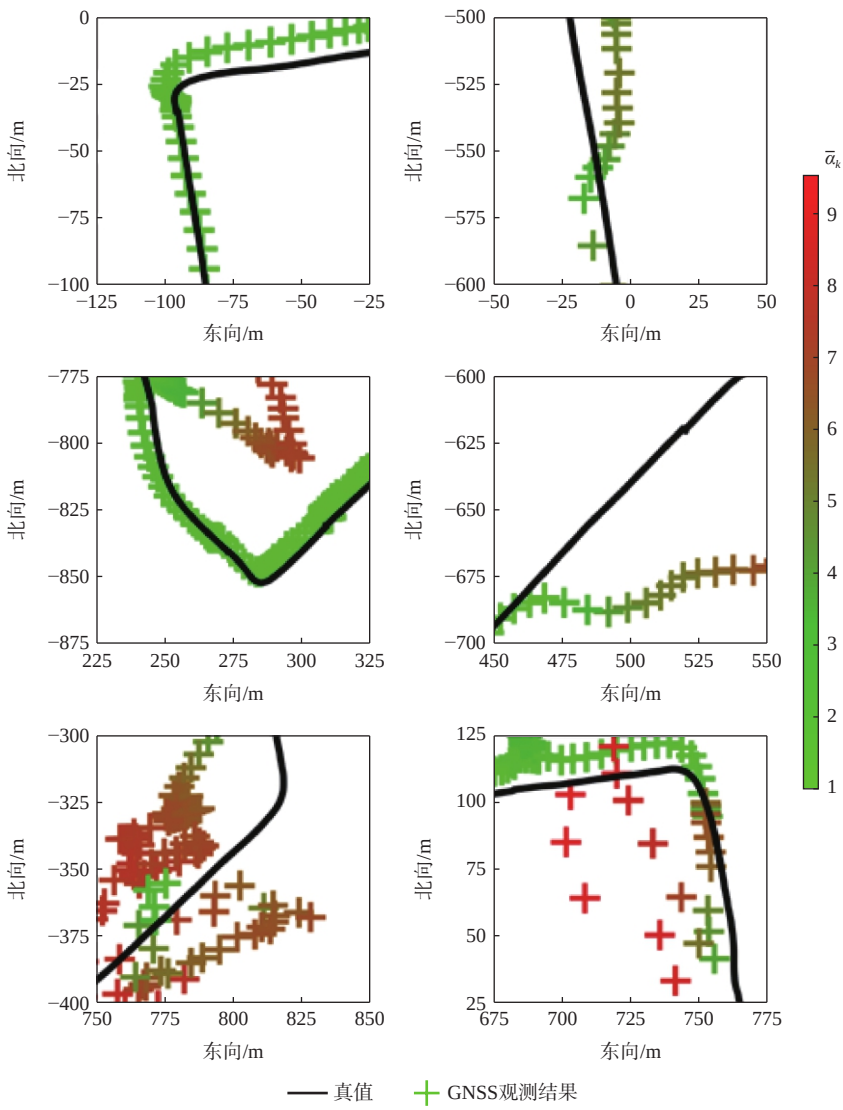


图 9 GNSS 因子异常识别效果

Fig. 9 Anomaly identification effect of GNSS factor

3.2 实车实验

为进一步验证本文算法在真实道路场景中的实际性能表现，在数据集实验的基础上进一步开展了实车测试实验。如图 10 所示，本文所用的多传感器数据采集平台基于北汽新能源 EU 车型搭建，各传感器固定在车顶。实验场地是北京航空航天大学沙河校区内的一段公共道路，实验车辆行驶的总路程约 1.4 km，路程中包括 2 个直角弯道和 3 段长直线，实验车辆平均车速约为 30 km/h。

MIIVII APEX AD10 工控机是所有数据采集和存储的中枢，其可以在满足抗振防水等工业级标准的同时提供高效的多传感器时钟同步功能。载体的位姿真值由北云 Bynav X1 高精度组合导航设备提供。组合导航设备中内置了高精度 GNSS 接收

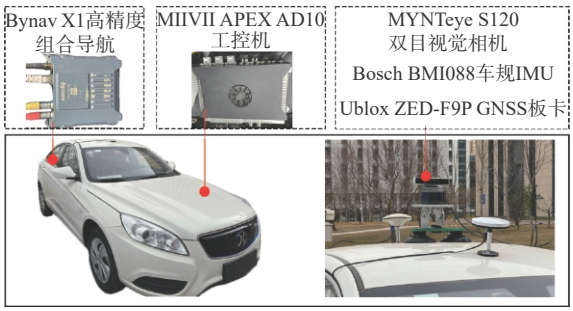


图 10　多传感器数据采集平台

Fig. 10　Multi-sensor data acquisition platform

板卡和战术级 IMU, 该组合导航设备在 RTK 辅助下可以提供 1 cm 和 10^{-6} cm 的长期定位精度, 以及 0.08°(基线长度 2 m) 的长期定向精度。MYNTeye S120 双目视觉相机(仅使用左目数据)固定在车顶, 其内置了一枚 Bosch BMI088 车规级 IMU, 相机和 IMU 之间具备硬件同步触发能力。低成本 GNSS 定位模块由 Ublox ZED-F9P GNSS 板卡和高增益三模天线组成。

经各算法得到的轨迹和高精度组合导航设备提供的真值轨迹对比如图 11 所示。可以观察到, VINS-Mono 算法由于不具备形成回环校正的条件, 同时缺乏有效的全局约束, 在较长距离的位姿估计过程中出现了较为明显的尺度漂移。与之相比, 本文算法凭借对全局信息的有效融合, 显著降低了全场景的定位误差。

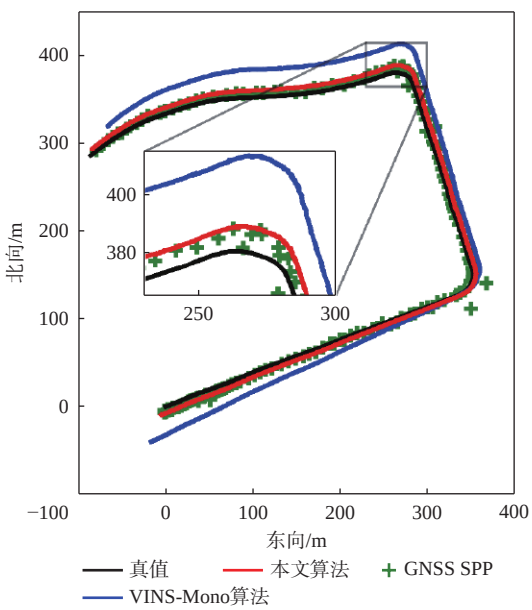


图 11　实车实验轨迹对比

Fig. 11　Trajectory comparison of vehicle experiment

进一步定量分析, 各算法的绝对轨迹误差(absolute trajectory error, ATE)如表 1 所示。与前文的数据集实验分析结果类似, 本文算法和 VINS-Mono 算法在方位角的估计效果上差距不大, 这主要是因为单天线的 GNSS 方案不能提供很好的方位角测量信息。在位置误差方面, 凭借对 GNSS 全局信息的有效融合, 本文算法的均方根误差(root mean squared error, RMSE)要显著低于 VINS-Mono 算法。此外, 针对低成本 GNSS 方案产生的少数异常解, 所提出的异常 GNSS 因子主动检测方案也能较为准确的识别, 并自适应地调整其协方差矩阵, 以降低对优化结果产生的影响。

表 1　绝对轨迹误差

Table 1　Absolute trajectory error

算法	位置ATE/m			方位角ATE/(°)		
	最大	最小	RMSE	最大	最小	RMSE
VINS-Mono	39.03	3.77	29.38	12.79	0.476	6.613
本文算法	10.94	2.06	7.287	16.36	1.188	6.842

4　结　论

1) 提出了一种基于非线性因子恢复的协方差估计方法, 实现了对位姿图中各因子协方差矩阵的最优估计。

2) 设计了一种异常 GNSS 因子主动检测方法, 该方法利用视觉惯性里程计对 GNSS 数据的异常情况进行识别, 并动态调整其协方差矩阵。

3) 在数据集和真实道路环境下开展了大量实验, 证明本文算法解决了以往位姿图优化算法中普遍存在的信息不一致问题, 在位姿估计精度上要显著优于 VINS-Mono 算法和 VINS-Fusion 算法。

参考文献（References）

[1] Davison A J, Reid I D, Molton N D, et al. MonoSLAM: real-time single camera SLAM[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(6): 1052-1067.

[2] Mourikis A I, Roumeliotis S I. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2007: 3565-3572.

[3] Huang G P, Mourikis A I, Roumeliotis S I. Observability-based rules for designing consistent EKF SLAM estimators[J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(5): 502-528.

[4] Klein G, Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces[C]//Proceedings of the 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Piscataway: IEEE Press, 2008: 225-234.

[5] Qin T, Li P L, Shen S J. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 1004-1020.

[6] Strasdat H, Montiel J M M, Davison A. Scale drift-aware large scale monocular SLAM[C]//Proceedings of the Robotics: Science and Systems Foundation. [S.l.:s.n.], 2010: 1-8.

[7] Mur-artal R, Tardós J D. Visual-inertial monocular SLAM with

map reuse[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(2): 796-803.

[8] Campos C, Elvira R, Rodríguez J J G, et al. ORB-SLAM3: an accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(6): 1874-1890.

[9] Shi P C, Zhu Z K, Sun S Y, et al. Covariance estimation for pose graph optimization in visual-inertial navigation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(6): 3657-3667.

[10] Gong Z, Liu P L, Wen F, et al. Graph-based adaptive fusion of GNSS and VIO under intermittent GNSS-degraded environment[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 8501116.

[11] Mazuran M, Burgard W, Tipaldi G D. Nonlinear factor recovery for long-term SLAM[J]. International Journal of Robotics Research, 2016, 35(1-3): 50-72.

[12] Usenko V, Demmel N, Schubert D, et al. Visual-inertial mapping with non-linear factor recovery[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 422-429.

[13] Qin T, Cao S, Pan J, et al. A general optimization-based framework for global pose estimation with multiple sensors[EB/OL]. (2019-01-11)[2024-05-01]. http://arxiv.org/abs/1901.03642.

[14] Han B, Xiao Z Y, Huang S, et al. Multi-layer VI-GNSS global positioning framework with numerical solution aided MAP initialization[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2021: 5448-5455.

[15] Dellaert F, Kaess M. 机器人感知: 因子图在 SLAM 中的应用[M]. 刘富强, 董靖, 译. 北京: 电子工业出版社, 2018: 4-5.
Dellaert F, Kaess M. Factor graphs for robot perception[M]. LIU F Q, DONG J, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 4-5(in Chinese).

[16] Qin T, Shen S J. Robust initialization of monocular visual-inertial estimation on aerial robots[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2017: 4225-4232.

[17] Indelman V, Williams S, Kaess M, et al. Factor graph based incremental smoothing in inertial navigation systems[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE Press, 2012: 2154-2161.

[18] Sibley G, Matthies L, Sukhatme G. Sliding window filter with application to planetary landing[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(5): 587-608.

[19] Wen W S, Zhou Y Y, Zhang G H, et al. UrbanLoco: a full sensor suite dataset for mapping and localization in urban scenes[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2020: 2310-2316.

Pose graph optimization algorithm based on nonlinear factor recovery

WANG Yan*, HUANG Binghao, YANG Shichun

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A pose graph optimization method employing nonlinear factor recovery was created in order to accomplish high-precision vehicle pose estimation in urban road situations. This method successfully incorporates vision, inertial information, and global navigation satellite system (GNSS) data inside the factor graph framework. To address the issue of unclear covariance estimation in previous pose graph optimization algorithms, the nonlinear factor recovery algorithm extracts the required information from the dense prior factors generated by marginalization, replacing the prior factors with relative pose factors and conducting optimal estimates for the covariance matrices of these factors. A procedure utilizing visual-inertial odometry for the active detection of GNSS signal anomalies has been designed, capable of adaptively adjusting the covariance matrix of GNSS signals. Throughout the pose graph optimization process, these strategies guaranteed consistency of factor information. Tests conducted on datasets and in real road environments indicate that this approach significantly improves the fusion efficiency of multisource asynchronous signals, providing robust and globally consistent high-precision pose estimation results.

Keywords: pose graph optimization; visual-inertial odometry; covariance estimation; pose estimation; multi-sensor fusion

Received: 2024-05-29; **Accepted**: 2024-07-05; **Published Online**: 2024-08-16 08:36

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240814.1205.001

* **Corresponding author**. E-mail: wybuaa@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0317

非等间隔数据的电液伺服机构故障检测方法

孔祥玉*，王子文，周志杰，刘美枝，张晨
(火箭军工程大学 导弹工程学院，西安 710025)

摘 要：故障检测技术是保障电液伺服机构 (EHSA) 安全稳定运行的重要技术。由于电液伺服机构存在检测次数有限、检测时间间隔不相等的问题，直接运用这类检测数据结合现有算法对其进行故障检测可能导致模型性能下降、检测准确率降低。为解决该问题，提出一种基于非等间隔数据的电液伺服机构故障检测方法。运用 M-H 算法结合同批次不同设备的电液伺服机构历史检测数据，将设备的历史检测数据等间隔化；运用核主成分分析 (KPCA) 方法分析主成分之间的差异，构建统计量，进行故障检测，利用贡献图法分析故障相关指标。所提方法在数据不等间隔且数量有限的情况下，具有较高的故障检测率。通过某型电液伺服机构的历史检测数据，验证了所提方法的有效性。

关 键 词：电液伺服机构；非等间隔数据；故障检测；核主成分分析；M-H 算法
中图分类号：V328.5
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2239-12

电液伺服机构 (electric-hydraulic servo actuator, EHSA) 具有动态响应速度快、负载能力强、体积小、刚度大、调速范围宽及不需要中间变速机构等特点[1-3]，是航天器控制系统中的重要设备之一[4]，其主要功能是在飞控计算机的控制作用下，将控制信号转换为航天器发动机喷管的偏转角度，以调整航天器的飞行姿态，飞行姿态直接影响到航天器的飞行稳定程度。然而，在运行过程中，航天器不可避免地受到各种干扰，如气流、风等气象变化的影响。随着航天任务的复杂程度和对航天器的可靠性要求日益提高，在运行过程中，电液伺服机构故障可能会导致飞行姿态系统故障[5]，一旦飞行姿态系统故障，可能直接导致航天器的飞行任务失败[6]。因此，对电液伺服机构进行故障检测十分重要[7]。

鉴于电液伺服机构具备复杂的动力学特性、恶劣的工作环境及严苛的控制精度要求，其在工作过程中可能会出现各种异常状况，这些异常状况包括但不限于动力装置故障、液压油源回路故障和伺服控制回路故障等。目前，关于电液伺服机构的故障检测方法已开展了很多研究[8]。在探讨电液伺服机构的故障诊断时，考虑到噪声工况下其非线性特性和故障特性的隐蔽性及电液伺服阀故障数据的稀缺性，Gao 等提出了一种基于消息传播机制的多源融合方法，用于电液伺服阀的故障状态诊断[9]。张磊等对电液伺服机构的结构和工作特性进行了分析，并在推理过程中运用了动态与静态数据的比较，构建了基于专家系统的故障诊断模型，实现了对电液伺服机构故障的有效识别[8]。陈雷针对某水下发声装置的电液伺服系统剖析了其工作原理，并基于该原理提出了一种针对电液伺服系统常见故障的故障诊断方法[10]。Shahkar 等针对系统中存在多种退化模式时的故障隔离问题，提出了一种求解复杂非线性多变量贝叶斯模型的方法，利用所有过去与现在的信息综合分析，对电液伺服阀进行故障隔离方法研究[11]。

由于电液伺服机构各部件之间关系复杂、设备

收稿日期：2024-05-15；**录用日期**：2024-07-26；**网络出版时间**：2024-08-27 16:03
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240827.1337.002
基金项目：国家自然科学基金 (62273354,62227814,61833016)
* **通信作者**. E-mail：xiangyukong@126.com

引用格式：孔祥玉，王子文，周志杰，等. 非等间隔数据的电液伺服机构故障检测方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2239-2250.
Kong X Y，Wang Z W，Zhou Z J，et al. Fault detection method of electric-hydraulic servo actuator for non-equal interval data [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2239-2250（in Chinese）.

运行环境恶劣等因素，在实际检测电液伺服机构故障时，很难对其建立准确的数学模型。受维护成本限制，电液伺服机构的检测次数有限，测试时间不完全等间隔，高价值检测样本和故障数据缺乏。然而，当前广泛应用的故障检测方法多数基于等间隔采样数据或忽略了实际采样间隔的差异性，这在一定程度上削弱了故障检测结果的准确性。同时，由于电液伺服机构高价值的各类故障样本稀缺、连续检测数据的不足，导致检测误差随时间累积，能够反映系统健康状态的特征被淹没；检测数据与故障的映射关系不明确，容易导致系统故障检测准确度下降或不足[12]。另外，数据的非等间隔情况可以等价于等间隔数据存在随机缺失的情况，数据缺失过多时，设备历史检测数据的概率分布与未缺失的历史检测数据概率分布存在较大差异。

针对上述问题，在考虑数据非等间隔的情况下，本文提出一种新的电液伺服机构故障检测方法。鉴于生产批次、工作环境、工作任务相似的其他设备中数据缺失率最小的设备历史检测数据概率分布与本文设备无缺失情况下的检测数据概率分布具有较高的相似性，若在将数据等间隔化的过程中学习低缺失率设备的概率分布可更加贴合设备的实际运行状况。本文借鉴元学习(meta-learning, ML)的思想[13]，在数据等间隔化的算法中学习缺失率最小设备的检测数据概率分布，并利用多个同批次设备的历史检测数据，从多个设备的历史检测数据中提取有用信息，进而能够更好地检测本文设备的实际运行状态，提高故障检测的准确性；首先，计算得到同型号、同批次、同工作环境中缺失数据较少设备历史检测数据的概率分布，作为数据等间隔化时的建议分布，以建议分布为依据使等间隔化后的数据更符合设备的实际运行状态；其次，在保留本文设备电液伺服机构原始检测数据的情况下，基于M-H算法[14-15]从同批次其他电液伺服机构历史检测数据中进行蒙特卡罗采样获得插补样本，以建议分布为基础设立接受该样本的判敛标准，将所采样本插补入本文设备的历史检测数据实现等间隔化；最后，利用核主成分分析(kernel principal components analysis, KPCA)方法[16-18]结合出厂前测试数据离线建立故障检测模型，并根据电液伺服机构基于实际检测的等间隔化检测数据更新模型，将模型检测出现故障的一组检测数据通过贡献图法定位可能导致故障的检测指标。

1 问题描述

作为精密的控制设备，电液伺服机构主要由3个关键部分组成[19]，分别为伺服控制回路、液压油源回路和动力装置。电液伺服机构回路构成如图1所示[1,20]。动力装置主要包括供电系统和电机，负责为油泵提供运转所需的能量。液压油源回路主要包括各类传感器、管路、油泵、单向阀、油滤、安全阀、充气阀、蓄能器、增压油箱及作动筒等[21]，通过协同工作实现液压油源的传送和控制。伺服控制回路主要包括负责精确控制液压油的流量和压力的反馈电位计、伺服放大器和双喷嘴二级力反馈电液伺服阀等元件[22]。

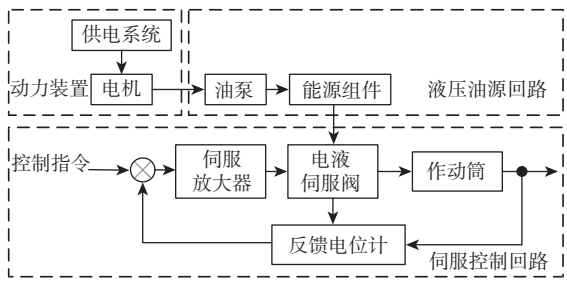


图1 电液伺服机构回路构成[1,20]

Fig. 1 Loop configuration of EHSA[1,20]

电液伺服机构主要部件及其层次化关系如图2所示。在电液伺服机构中，核心部件有伺服放大器、电液伺服阀和作动筒等。电液伺服机构的基本工作原理如下：伺服放大器会对输入的指令信号与系统反馈信号进行对比、放大和计算处理。基于该处理结果，伺服放大器会输出与控制偏差电压信号成比例的控制电流，控制电流作用于电液伺服阀的控制线圈；电液伺服阀将伺服放大器输出的很小的指令电流，变换和放大成一定功率的高压液体工质电流，输入作动筒；作动筒将电液伺服阀流量变换成具有一定速度的活塞杆的位移输出，用于控制发动机喷管的摆动，实现推力矢量控制[1]。

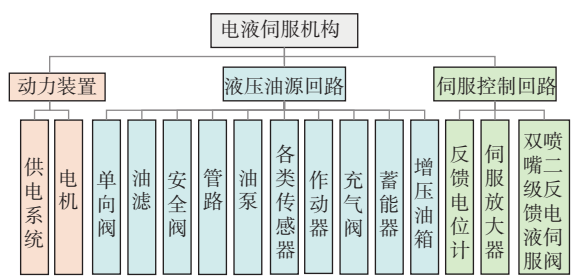


图2 电液伺服机构主要部件

Fig. 2 Main component of EHSA

结合现有研究对电液伺服机构故障机理进行分析可知，各部件的主要故障原因及其在检测指标上的体现如表1所示。由于电液伺服机构的故障类型多样，检测指标高维。鉴于作动筒和电液伺服阀中的反馈弹簧杆和滑阀等均为电液伺服机构中频繁运动的部件，因此，电液伺服阀中，科研人员关心的经常发生的故障有活塞故障、滑阀故障、喷嘴

表 1　常见故障及其检测指标的体现

Table 1　Embodiment of common faults and their detection indicators

部件	主要故障原因	主要指标体现
电机	受潮或多余物堆积等	绝缘检查不通过
	电枢润滑条件劣化	电机电流过大
油泵	泵入口压力低、油密封性差、泵流量不足等	建压时间过长
		频率特性相位滞后过大
		暂态特性时间过长
		油密封检查不通过
蓄能器	活塞密封圈故障	充气压力小于标准值
		非工作状态油面电压过高
		建压时间过长
	外密封性故障	油密封检查不通过
增压油箱	油箱密封性不佳导致泄漏	非工作状态油面电压过低
		非工作状态泵入口压力过小
	油箱加压弹簧或活塞故障	非工作状态泵入口压力过小
反馈电位计	电阻性能劣化	零位电压过大
		电位计分阻之差过大
电液伺服阀及作动筒	活塞故障、反馈电位计故障、作动筒故障、力矩马达故障、滑阀故障、喷嘴挡板阀故障	零位电压过大
		最大摆角过小
		位置特性相对误差过大
		暂态特性时间过长
		频率特性相位滞后过大
		回环宽度过大

挡板阀故障等。另外, 反馈电位计故障、力矩马达故障、泵入口压力低、蓄能器活塞密封性故障等也是相对容易发生的故障。结合表 1, 针对上述故障, 起关键作用的检测指标有零位电压、最大摆角、位置特性相对误差、暂态特性、频率特性和回环宽度等。

以作动筒与电液伺服阀的相关故障为例, 多类故障由多检测指标共同影响, 难以描述故障与指标的映射关系。考虑到实际中检测数据非等间隔、高价值故障样本少、不同类型故障数据不均衡的情况, 仅通过这些检测数据难以挖掘出电液伺服机构完备的故障模式、规律及潜在的故障, 对模型泛化能力产生不利影响。

2　本文方法

KPCA 方法能够提取数据的非线性和动态特征, 且适用于小样本数据[18], 是故障检测中的典型数据驱动方法之一, 这也意味着输入数据的质量对基于 KPCA 方法的故障检测模型的检测准确率至关重要。

2.1　基于 M-H 算法的非等间隔数据处理方法

原始 M-H 算法将数据等间隔化的过程中, 建议分布是检测数据所服从的概率分布, 这与本文设备无缺失情况下的检测数据概率分布差别较大。直接运用原始 M-H 算法可能使得等间隔化后数据与设备真实情况存在一定偏差。本节参考元学习的思想, 将缺失率最小的设备历史检测数据概率分布作为建议分布, 通过从剩余同批次设备历史检测数据组成的数据集中进行采样, 插补入本文设备的非等间隔历史检测数据, 从而使得插补后产生的等间隔化数据能适应于本文设备的实际运行状态趋势。

收集本文设备与同批次其他设备历史检测数据, 运用 M-H 算法获得将数据等间隔化的插补样本。在此基础上, 运用估算潜在规模缩减因子(estimated potential scale reduction, EPSR)算法, 根据建议分布设定算法的判敛标准, 分析插补样本收敛于本文设备历史检测数据的概率分布情况。

1) 运用 M-H 算法产生数据等间隔化样本。

① 将同批次其他设备历史检测数据作为采样数据集, 各检测指标的历史数据分别建立 Markov 链 $[x^{(0)},x^{(1)},x^{(2)},\cdots]$。随着时间 t 的变化, Markov 链服从平稳分布 $\pi(x)$。其中, x 为 Markov 链中随机采样得到的样本。

② 分别计算同批次各设备的历史检测数据缺失率, 将缺失率最低的设备检测数据的概率分布作为等间隔化算法中的建议分布 $g\left(x^{*},x^{(t)}\right)$, 即采样值从 $x^{(t)}$ 转移至 x^{*} 的概率分布。若本文设备为缺失率最低的设备, 则建议分布 $g\left(x^{*},x^{(t)}\right)$ 为本文设备的概率分布。

③ 根据平稳分布 $\pi(x)$, 接受概率 $h\left(x^{(t)},x^{*}\right)$ 的计算公式如下:

$$h\left(x^{(t)},x^{*}\right)=\min\left\{1,\frac{\pi(x^{*})g\left(x^{*},x^{(t)}\right)}{\pi(x^{(t)})g\left(x^{(t)},x^{*}\right)}\right\} \tag{1}$$

式中: $\pi(x^{*})$ 为采样值 x^{*} 服从的平稳分布; $\pi\left(x^{(t)}\right)$ 为采样值 $x^{(t)}$ 服从的平稳分布; $g\left(x^{(t)},x^{*}\right)$ 为采样值从 x^{*} 转移至 $x^{(t)}$ 的概率; $g\left(x^{*},x^{(t)}\right)$ 为采样值从 $x^{(t)}$ 转移至 x^{*} 的概率。

④ 产生服从平均分布的随机数 u', $u'\sim U(0,1)$, 令 $x^{(t+1)}$ 为

$$x^{(t+1)}=\begin{cases}x^{*} & u'\leqslant h\left(x^{(t)},x^{*}\right)\\ x^{(t)} & u'>h\left(x^{(t)},x^{*}\right)\end{cases} \tag{2}$$

⑤ 在电液伺服机构有 I 个检测指标的情况下, 设定通过循环步骤②～④ C 次, 得到 C 个随机样本, 将每个随机样本插入相应指标的初始 Markov 链, 产生 C 条 Markov 链。其中, y_{ic} 为第 i 个指标的原

始 Markov 链插入样本后生成的新链，新链y_{ic}中有S个样本$x_{ics}, i=1,\cdots,I; c=1,\cdots,C; s=1,\cdots,S$，$x_{ics}$表示第$i$个特征中第$c$条 Markov 链的第$s$个样本。运用 EPSR 算法，判断接纳样本$x_{ics}$后模型是否收敛于建议分布。

2）判断样本收敛性。

① 计算链内均值$\bar{y}_{ic}$与链间均值$\bar{y}_i$。

$$\bar{y}_{ic}=\frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S}y_{isc} \tag{3}$$

$$\bar{y}_i=\frac{1}{C}\sum_{c=1}^{C}\bar{y}_{ic} \tag{4}$$

② 计算各链间方差W与链内方差B。

$$W=\frac{1}{C}\sum_{c=1}^{C}\left[\frac{1}{S-1}\sum_{s=1}^{S}\left(y_{isc}-\bar{y}_{ic}\right)^2\right] \tag{5}$$

$$B=\frac{S}{C-1}\sum_{c=1}^{C}\left(\bar{y}_{ic}-\bar{y}_i\right)^2 \tag{6}$$

③ 对后验方差$\hat{V}$进行估计。

$$\hat{V}=\frac{S-1}{S}W+\frac{1}{S}B \tag{7}$$

④ 计算 EPSR 值$\sqrt{\hat{R}}$。

$$\sqrt{\hat{R}}=\sqrt{\hat{V}/W} \tag{8}$$

式中：$\sqrt{\hat{R}}\approx 1$时目标近似收敛。将S个样本x_{isc}取均值插补入本文设备的原始检测数据中。循环步骤 1) 和步骤 2)，直到原始检测数据等间隔化。

图 3 为非等间隔数据处理模型示意图。

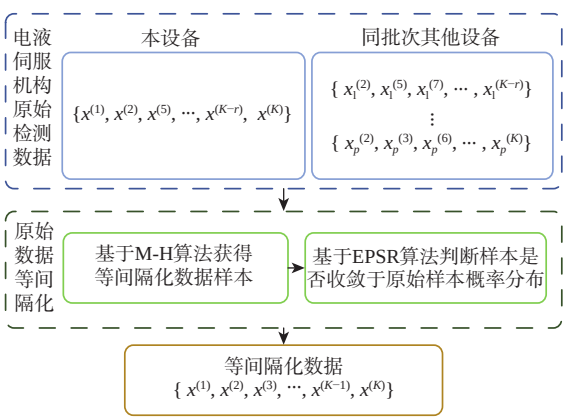


图 3 非等间隔数据处理模型

Fig. 3 Non-equal interval data processing model

2.2 基于核主成分分析方法的故障检测

在处理高维数据时，不同维度之间往往隐含着潜在的相关性，这导致指标间存在高度冗余性和强相关性。同时，高维数据中普遍存在的噪声问题不仅会降低数据分析的效率和性能，还会增加问题分析的复杂性。为解决该问题，一种有效的方法就是通过 KPCA 方法来处理数据。KPCA 方法能高效地识别数据的主要特征方向，去除信息含量低且携带噪声的维度，极大地提升模型的检测性能、数据分析的效率和结果的准确性。

但是，通过这种数据驱动方法，在建立故障检测模型时，需要样本数据能够明确反映电液伺服机构的故障类型和状态。因此，本文结合出厂前测试数据建立离线学习的故障检测模型，并根据等间隔化的实际检测数据更新模型，使得故障检测模型拥有更高的准确性。

1）KPCA 方法基本原理。设矩阵$\boldsymbol{X}$是由N个I维的等间隔化后的样本数据集构成，矩阵$\boldsymbol{X}$维度等于检测指标个数，每行代表一组有I个特征值的样本数据，即

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x_{11}&x_{12}&\cdots&x_{1I}\\x_{21}&x_{22}&\cdots&x_{2I}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\x_{N1}&x_{N2}&\cdots&x_{NI}\end{bmatrix}=[\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,\cdots,\boldsymbol{X}_I] \tag{9}$$

式中：

$$\boldsymbol{X}_i=\begin{bmatrix}x_{1i}\\x_{2i}\\\vdots\\x_{Ni}\end{bmatrix}\qquad i=1,2,\cdots,I \tag{10}$$

对矩阵$\boldsymbol{X}$标准化，得到$\boldsymbol{X}^*=\left[\boldsymbol{X}_1^*,\boldsymbol{X}_2^*,\cdots,\boldsymbol{X}_I^*\right]$。$\boldsymbol{X}^*$中的元素表示为

$$\boldsymbol{X}_i^*=\begin{bmatrix}x_{1i}^*\\x_{2i}^*\\\vdots\\x_{Ni}^*\end{bmatrix} \tag{11}$$

设定一个非线性映射$\boldsymbol{\varphi}$，对应的高维空间记为$\boldsymbol{\phi}$。将初始输入矩阵$\boldsymbol{X}$进行高维映射及中心化处理：

$$\boldsymbol{\phi}=[\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_1),\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_2),\cdots,\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_I)]^{\mathrm{T}}\in\mathbf{R}^{I\times f} \tag{12}$$

式中：f为高维空间维数；$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)$为高维空间$\boldsymbol{\phi}$中的样本，且满足$\sum_{i=1}^{I}\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)=\mathbf{0}$。

在高维空间$\boldsymbol{\phi}$中，样本的协方差矩阵$\boldsymbol{D}$为

$$\boldsymbol{D}=\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I}\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

设定$\boldsymbol{D}$的特征值为λ，特征向量为$\boldsymbol{V}$，有如下特征方程：

$$\lambda\boldsymbol{V}=\boldsymbol{D}\boldsymbol{V}=\left(\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I}\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)^{\mathrm{T}}\right)\boldsymbol{V}=\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I}\langle\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i),\boldsymbol{V}\rangle\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i) \tag{14}$$

式中: $\langle \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i), \boldsymbol{V} \rangle$为$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)$和$\boldsymbol{V}$的点积。

式(14)左右同乘$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_k)$可得

$$\lambda(\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_k), \boldsymbol{V}) = \langle \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i), \boldsymbol{DV} \rangle \qquad k = 1,2,\cdots,I \tag{15}$$

存在系数$a_i (i = 1,\cdots,I)$, 对于任意$\lambda \neq 0$的特征向量$\boldsymbol{V}$可以由特征空间样本$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)$映射为

$$\boldsymbol{V} = \sum_{i=1}^{I} a_i \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i) \tag{16}$$

结合式(15)和式(16)可得

$$\lambda \sum_{i=1}^{I} a_i \langle \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_k), \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i) \rangle = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^{I} a_i \left\langle \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_k), \sum_{J=1}^{I} \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_J) \right\rangle \langle \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_J), \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i) \rangle \tag{17}$$

根据 Mercer 定理, 式(17)中的点积运算通过引入核函数$K(x,y) = \langle \Psi(x), \Psi(y) \rangle$的方式来代替, 可以得到

$$\lambda \sum_{i=1}^{I} a_i K_{ki} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^{I} a_i K_{ki} K_{ji} \tag{18}$$

进一步简化可得

$$\begin{cases} I\lambda \boldsymbol{a} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{a} \\ \boldsymbol{a} = [a_1, a_2, \cdots, a_I]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{19}$$

式中: $\boldsymbol{a}$为特征向量。

由于上述过程是在$\sum_{i=1}^{I} \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i) = \boldsymbol{0}$的情况下进行推导的, 但在实际中, 样本数据不完全满足条件$\sum_{i=1}^{I} \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i) = \boldsymbol{0}$。鉴于此, 需要对特征空间$\boldsymbol{\phi}$做中心化处理, 中心化后的核函数定义为

$$\overline{\boldsymbol{K}} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{k}} - \boldsymbol{H}_I \boldsymbol{K}_{\mathrm{k}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{k}} \boldsymbol{H}_I + \boldsymbol{H}_I \boldsymbol{K}_{\mathrm{k}} \boldsymbol{H}_I \tag{20}$$

式中: $\boldsymbol{H}_I$为所有元素都为$1/I$的I维方阵; $\boldsymbol{K}_{\mathrm{k}}$为核矩阵。

因此, 式(19)可表示为

$$I\lambda \boldsymbol{a} = \overline{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{a} \tag{21}$$

式中: 向量$\|\boldsymbol{a}\|^2 = \lambda / I$。

基于上述推导, 可以通过特征空间样本$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i)$在特征向量$\boldsymbol{V}_k$上的投影来计算$\boldsymbol{X}$的主成分, 即

$$t_k(\boldsymbol{X}) = \langle \boldsymbol{V}_k, \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}_i) \rangle = \sum_{i=1}^{I} a_i^{(k)} K(\boldsymbol{X}_i, \boldsymbol{X}) \tag{22}$$

2) 基于统计量的故障检测。由上述步骤得到主成分, 通过式(23)计算 Hotelling's 统计量T^2为

$$T^2 = [\boldsymbol{t}_1, \cdots, \boldsymbol{t}_P] \boldsymbol{\Lambda}^{-1} [\boldsymbol{t}_1, \cdots, \boldsymbol{t}_P]^{\mathrm{T}} \tag{23}$$

式中: $\boldsymbol{\Lambda}$表示对角矩阵, 是 KPCA 方法中的标准记法。T^2表征数据在 KPCA 主成分空间中的变化情况, 其置信限可以根据分布F求得

$$T^2_{P,N,\alpha} \sim \frac{P(N^2-1)}{N-P} F_{P,N-P,\alpha} \tag{24}$$

式中: N为等间隔化后数据样本数量; P为保留的主成分个数; α为非故障数据的置信区间。

通过式(25)计算平方预测误差 (squared prediction error, SPE), 设Q为平方预测误差:

$$Q = \|\boldsymbol{\phi}(x) - \boldsymbol{\phi}_P(x)\|^2 = \sum_{j=1}^{N} \boldsymbol{t}_j^2 - \sum_{p=1}^{P} \boldsymbol{t}_p^2 \tag{25}$$

式中: Q表征数据在 KPCA 残差空间中的变化, 其置信限可以由式 (26) 求得

$$Q_\alpha \sim g\chi_h^2 \tag{26}$$

其中: g和h分别为Q_α的均值和方差的相关常数。

3) 基于贡献图的故障定位方法。通过 KPCA 方法检测到故障的同时, 需要分析故障产生的原因, 找出导致故障的检测指标。由 KPCA 方法可知, 原始检测指标中, 故障相关检测指标和主成分构成的统计量之间相关性较大, 而故障无关检测指标和主成分构成的统计量的相关性较小。检测指标与主成分之间的相关性可以通过计算故障情况下主成分中各检测指标贡献量的方式进行分析, 量化各检测指标对故障的贡献程度, 从而识别出导致故障的关键检测指标。据此, 贡献量计算方法如式(27)所示, 贡献量最大的检测指标就是可能引起故障的检测指标。

$$\begin{cases} A_j = \sum_{i=1}^{p} |\gamma_{i,j}| \\ \gamma_{i,j} = \boldsymbol{t}_i^{\mathrm{T}} x_j / \lambda_i \end{cases} \tag{27}$$

式中: A_j为第j个检测指标对统计量T^2的贡献量; p为保留下来最能表征故障主要信息的主成分个数; $\boldsymbol{t}_i$表示第i个主成分; x_j为第j个检测指标的检测数据。

图 4 为基于 KPCA 方法的故障检测模型示意图。

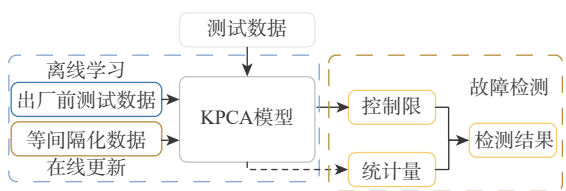


图 4　基于 KPCA 方法的故障检测模型

Fig. 4　Fault detection model based on KPCA method

2.3　故障检测方法实施步骤

本文所提故障检测方法主要包括以下 4 个步骤:

步骤 1　获取本文设备电液伺服机构的检测数据及同批次其他设备电液伺服机构的历史检测数据, 将这些数据进行预处理, 作为初始输入

数据。

步骤 2 收集同批次其他设备电液伺服机构的历史检测数据构成检测数据集，计算各设备的数据缺失率，选取数据缺失率最低的设备的检测数据概率分布作为建议分布。

步骤 3 通过 M-H 算法选取符合建议分布要求的样本插补入本文设备电液伺服机构历史检测数据中，从而实现本设备电液伺服机构历史检测数据的等间隔化。

步骤 4 结合设备的出厂前测试数据，建立基于 KPCA 方法的故障检测初始模型，并设定初始控制限，根据电液伺服机构等间隔化后的实际检测数据更新模型及控制限。

3 数据等间隔化仿真实验

本文采用基于高斯分布的仿真数据分析法分析数据等间隔化结果及对算法样本需求量的依赖程度。以服从高斯分布加随机噪声的 200 组仿真数据为例，通过随机删除 10%～50% 的数据模拟不同样本量情况下的不等间隔数据。以本文方法和常用于缺失数据插补的线性插补法将数据等间隔化，结果如图 5 和图 6 所示。

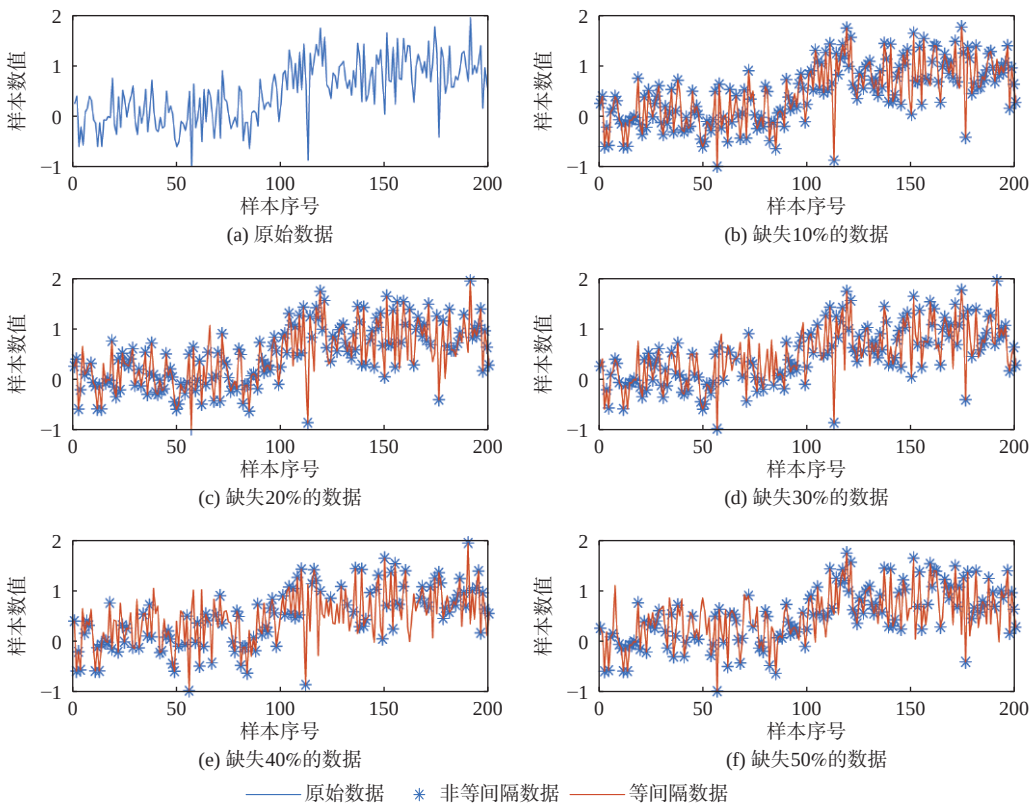


图 5 基于 M-H 算法的数据等间隔化结果

Fig. 5 Results of equal interval data based on M-H algorithm

另外，为分析数据处理效果，绘制原始等间隔数据、各缺失比例下非等间隔数据、本文方法及线性插补法处理后的等间隔数据的概率密度分布曲线，如图 7 所示。

由图 7 可知，本文方法与线性插补法的等间隔化数据均随着数据缺失比例的增加，而与原始数据的偏差随之增大。由图 5 和图 6 可知，等间隔化数据与原始数据的变化趋势相似，但在数据缺失率较高或存在连续性缺失的情况下，相比于线性插补法，基于 M-H 算法的等间隔化数据更贴合原始数据的变化趋势。

由图 7 可知，在缺失 10% 与 20% 数据的情况下，2 类方法处理后的等间隔数据与原始数据的概率密度曲线变化趋势相近，这表明等间隔化后的数据符合设备实际运行情况。但是，随着缺失率增加，基于线性插补法的等间隔数据与原始数据的概率密度分布在 30% 缺失率及以上的情况下差距较大；基于本文方法的等间隔数据与原始数据的概率密度分布在 40% 缺失率及以上的情况下差距较大，相较于线性插补法，本文方法在概率密度分布情况上具有较高的相似性。

为进一步分析等间隔化数据与原始数据的一致性，对等间隔化前后数据进行统计方法 t 检验，结果如表 2 所示。

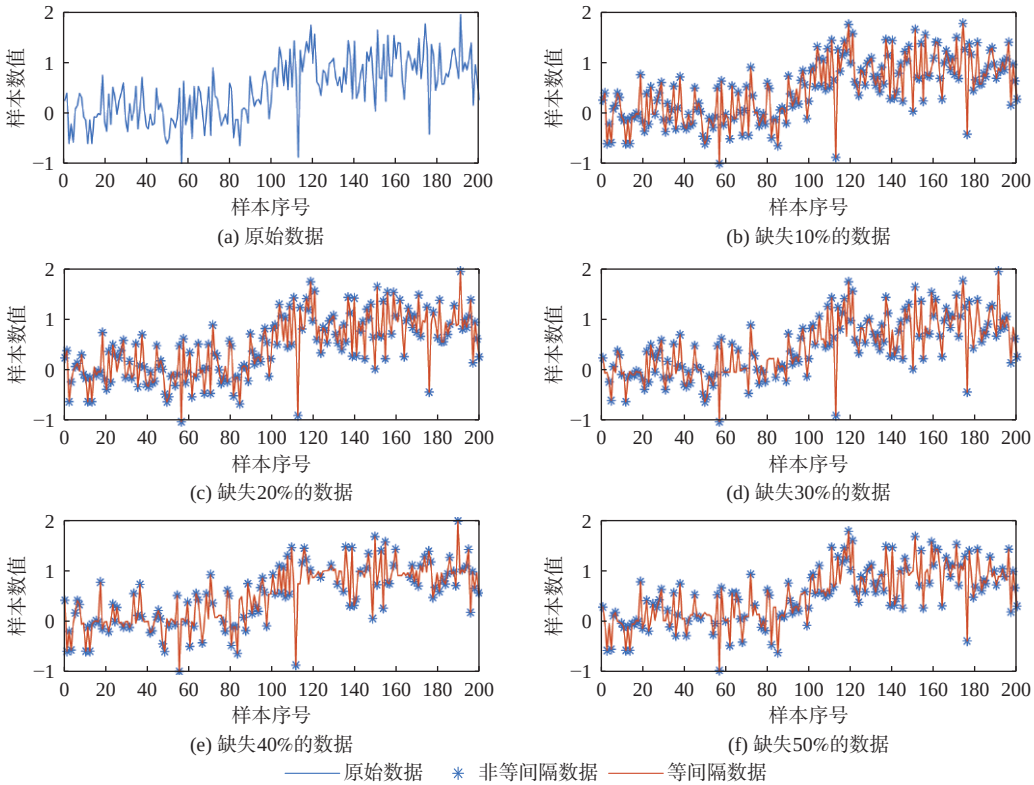


图 6　基于线性插补法的数据等间隔化结果

Fig. 6　Results of equal interval data based on linear interpolation method

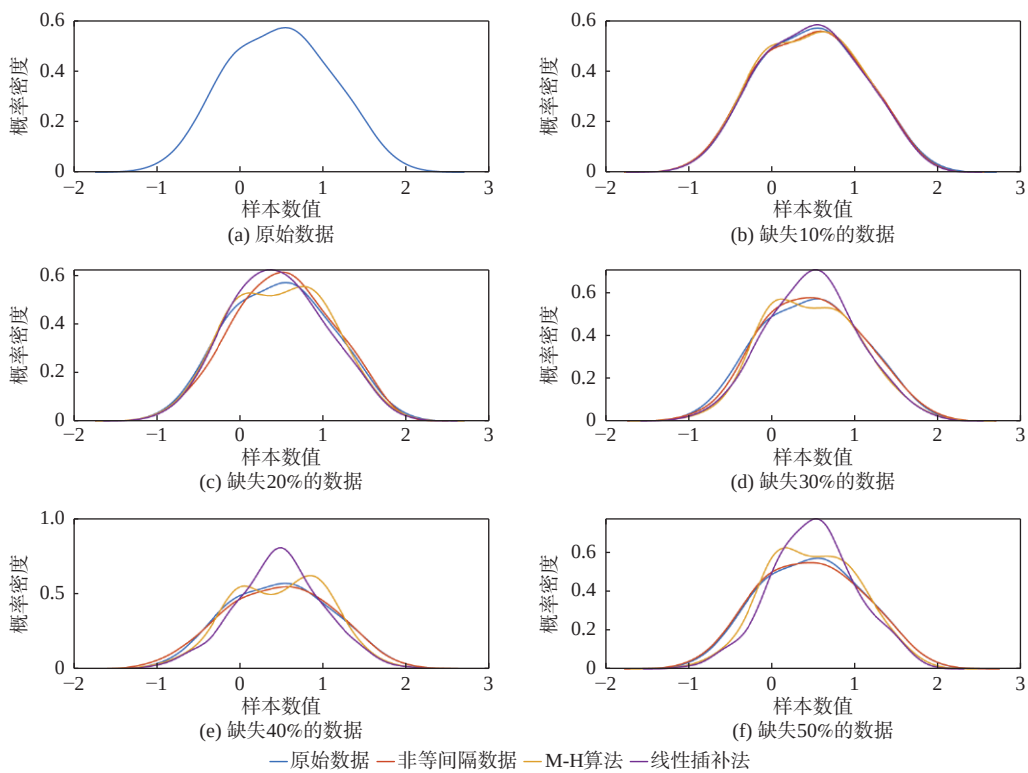


图 7　基于线性插补法的数据等间隔化结果概率密度分布

Fig. 7　Probability density distribution of data equidistantization results based on linear interpolation method

从表 2 中 t 检验的结果来看, z=0 说明线性插补法与 M-H 算法均不存在偏离原始数据概率分布的情况。但是, 与线性插补法相比, M-H 算法的 p 值相对较高, p 值越高, 说明样本的差异性越小, 在同等条件下, 本文方法可以得到与原始数据差异性更小的等间隔数据。

表 2 差异分析

Table 2 Variance analysis

缺失率/%	(z, p)	
	线性插补法	M-H算法
10	(0, 0.916 0)	(0, 0.984 4)
20	(0, 0.867 0)	(0, 0.949 9)
30	(0, 0.835 5)	(0, 0.890 8)
40	(0, 0.779 9)	(0, 0.822 5)
50	(0, 0.645 4)	(0, 0.776 5)

4 电液伺服机构故障检测实验验证

由表 1 可知，电液伺服机构组成部件众多，故障类别与检测指标类型多样。其中，如绝缘检查和密封检查可直接判读相应检测结果来分析相应部件是否故障，而其余检测指标与故障没有明确的映射关系，如作动筒故障，无法直接判定设备故障情况。通过本文方法对设备进行检测，相关检测指标包括：电机工作电流I_{m}、建压时间δ_{t}、蓄能器充气压力P_{a}、泵入口压力P_{o}、阀入口压力P_{v}、油面电压U_t、负载压差ΔP、零位电压$|\delta_{\mathrm{t0}}|$、回环宽度$\delta_{\mathrm{t}}^{\max(+)}$、零位偏差$\delta_{\mathrm{t0}}$、最大摆角$\theta$、相对误差$K_{\varepsilon\mathrm{t}}$、滞后相位$\phi_{\mathrm{o}}$、伺服阀线圈电阻$R_{\mathrm{s}}$、反馈电位计电阻$R_{\mathrm{f}}$、暂态时间$T_{\mathrm{temp}}$。

4.1 原始非等间隔数据等间隔化

选取同一段时段、同一批次的 5 套电液伺服机构历史检测数据。其中，设定电液伺服机构D_0为实验对象检测数据、$D_1 \sim D_4$为工作环境和任务类型均相同的电液伺服机构检测数据。鉴于非等间隔数据的概率分布与设备实际运行中的指标真实概率分布存在偏差，为准确反映设备的运行状态，以同批次、同工作环境的其他设备中缺失数据最少的设备概率密度分布为建议分布，通过借鉴相似设备的数据特征，来弥补单一设备数据缺失带来的不足。

实际情况下，原始数据中检测时间最小间隔为一个月。因此，将原始数据处理为间隔时长为一个月的等间隔数据。本节以某型电液伺服机构为例，对其相关检测指标，如回环宽度、零位偏差、最大摆角、相对误差、暂态时间、滞后相位的历史检测数据进行等间隔化处理，结果如图 8 所示。可知，插补后的数据基本符合原始数据的数值分布情况，能够反映原始数据的特征和趋势。然而，由于数据插补过程存在固有的随机性，等间隔数据与原始数据相比，存在一定的误差和不确定性。

为确保插补后数据的准确性和可靠性，需要对插补后的等间隔数据进行进一步的验证和比较，以

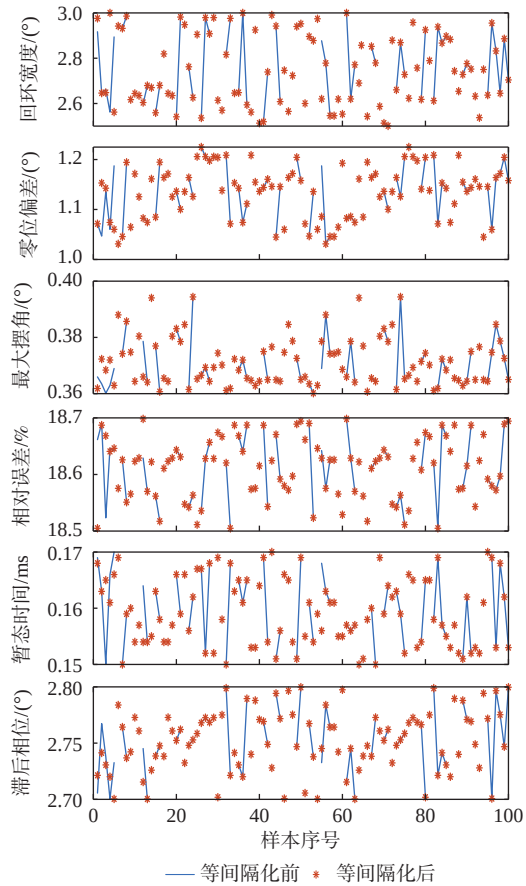


图 8 部分指标检测数据等间隔化结果

Fig. 8 Interinterval results of some index detection data

确保等间隔化数据不仅在数值上接近原始数据变化趋势，而且在统计特性上保持一致，满足分析需求。图 9 为部分指标检测数据等间隔处理前后的自相关系数。可知，在大部分情况下，等间隔数据的自相关系数小于非等间隔数据的自相关系数，说明插补后的等间隔数据信息量增加，作为故障诊断模型的输入，更有助于模型更加清晰地识别数据中的故障模式和变化趋势。另外，通过分析非等间隔数据处理前后概率密度分布曲线来分析等间隔化处理前后的数据统计特征变化。图 10 为部分指标检测数据概率分布曲线示意图。

如图 10 所示，经过等间隔化处理后的数据，其概率密度分布与原始数据的概率密度分布呈现出高度的相似性，并且显著趋向于设定的目标概率密度分布。结果表明，通过等间隔化处理，本文方法可以将非等间隔数据转换为更真实反映设备实际运行状况的等间隔数据集，提高了故障检测模型输入数据的准确性和可靠性。

4.2 故障检测及定位

将 4.1 节所述方法得到等间隔化的检测数据作为故障检测模型的输入数据集，在该数据集中随机选取 70%(即 70 组数据)的数据作为训练样本，用

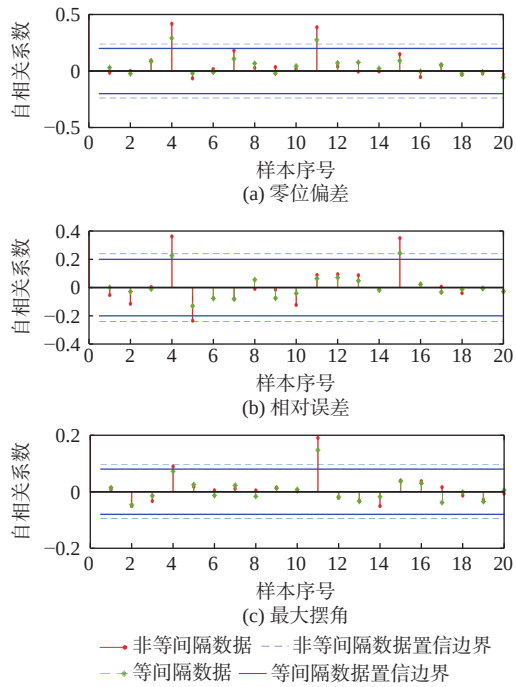


图 9　部分指标检测数据等间隔处理前后自相关系数

Fig. 9　Autocorrelation coefficient before and after interval processing of some index detection data

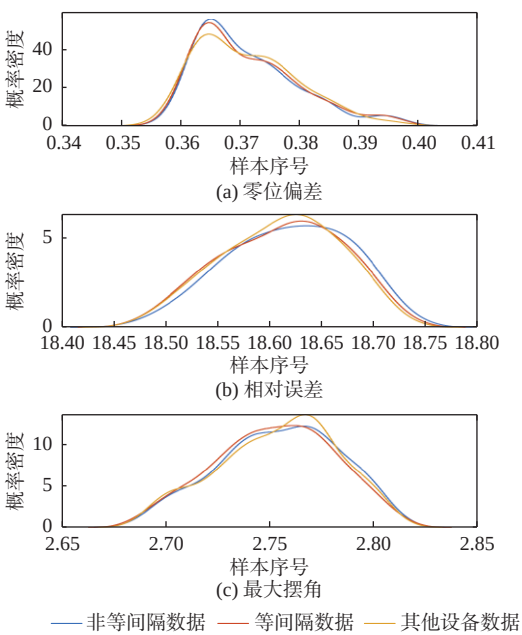


图 10　部分指标检测数据概率密度分布

Fig. 10　Probability distribution of partial index detection data

于训练基于 KPCA 方法的故障检测模型; 将剩余的 30%(即 30 组数据)的数据作为测试样本, 用于评价存在故障的情况下模型的检测效果。

样本集中, 49～54 和 82～87 采样数据点处电液伺服机构出现了作动筒故障。作动筒是电液伺服机构中磨损最突出、最核心的液压执行元件。作为系统的执行部分, 其执行结果是否准确决定了系统的整体性能。这 2 处故障是基于某型电液伺服机构历史检测数据, 能够代表这类电液伺服机构在真实工程环境下的设备运行情况。图 11 为本文方法故障检测结果示意图。可知, 通过本文方法对电液伺服机构的故障检测数据进行分析。计算得到统计量 T^2 和 SPE 作为控制限。另外, 计算检测数据的统计量并与控制限进行比较, 超出控制限的采样数据被认为是检测到电液伺服机构出现了故障。从图 11 可以看出, 有 2 组采样数据超出了控制限, 而在实际的检测中, 该电液伺服机构的确在这 2 处检测时间出现了作动筒相关的故障, 证实了本文方法的有效性和准确性。

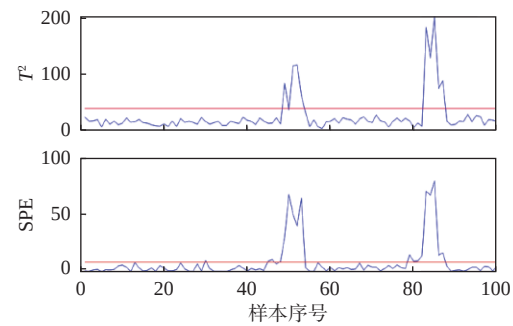


图 11　故障检测结果示意图

Fig. 11　Schematic diagram of fault detection results

为更加精确地评估本文方法的有效性, 本节进一步设计了对比实验。在相同条件下, 采用 BP 神经网络和支持向量机(support vector machine, SVM)作为对照, 与本文方法进行了基于电液伺服机构等间隔化数据的故障检测对比, 对比实验结果如图 12 所示。可知, 基于 SVM 的故障检测结果中检测到 7 次故障, 其中, 3 次诊断准确; 基于 BP 算法的故障检测结果中检测到 6 次故障, 其中, 4 次诊断正确。这是由于在训练集的 70 组数据中, 仅有 6 组标签为故障的数据(图 11 所示的第 49～54 组采样数据), 导致这 2 类方法故障检测准确度低的原因是训练集数据较少及数据多样性较差。

与此相比, 本文模型基于的 KPCA 方法是以通过计算统计量的方法确定故障检测所需的控制限。得到控制限后, 仅需计算需要进行故障检测的电液伺服机构检测数据的统计量; 通过比较控制限

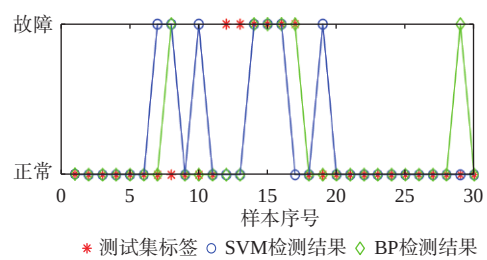


图 12　对比实验结果示意图

Fig. 12　Schematic of results of comparative experiment

与统计量，若统计量超出控制限则检测出电液伺服机构出现故障。因此，在本文模型训练时，需要至少能够具有统计学意义的规模相对较大的正常检测数据。得到能够区别电液伺服机构正常状态与故障状态的控制限后，对于故障数据样本的需求量依赖性较小。由于基于 KPCA 方法的故障诊断模型是通过分析检测数据对于各个主成分的贡献量来进行故障诊断，对不同类型样本数据依赖较小。

为进一步分析故障发生的根本原因，计算在出现故障时各检测指标对统计量 T^2 的贡献量，通过分析贡献量高的指标来找出可能引起故障的检测指标。结果如图 13 所示。可知，针对 2 组故障数据的检测均可发现，9～13 号变量和 16 号变量具有较高的贡献量。这些变量分别对应着回环宽度、零位偏差、最大摆角、相对误差、滞后相位和暂态时间等关键性能参数。结合表 1 中的数据，这些变量与作动筒部件的故障模式密切相关。

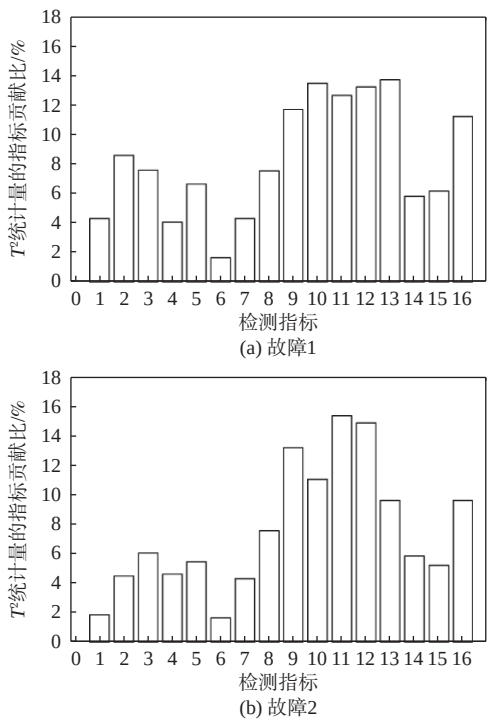


图 13 T^2 统计量的指标贡献图

Fig. 13 Index contributions of T^2 statistic

5 结 论

针对电液伺服机构实测数据存在非等间隔采样与高价值故障样本稀缺的双重挑战，本文提出一种融合马尔可夫链蒙特卡罗中的 M-H 算法与 KPCA 的故障检测方法。主要创新与结论如下：

1）引入 M-H 算法，利用同批次多台设备的历史检测数据对目标设备的非等间隔序列进行等间隔化处理，使重构数据更贴合设备实际退化轨迹，为高精度故障检测提供了可靠的数据基础。

2）基于出厂前测试数据离线建立 KPCA 基准模型，并引入历史检测数据实现在线更新，使模型能够自适应跟踪设备运行状态的变化，克服了小样本条件下模型泛化能力不足的问题。

3）采用贡献图法，有效分离并定位引发故障的关键检测指标，提升了检测结果的工程可解释性。

4）基于同批次多台电液伺服机构的实际检测数据与待测设备出厂前测试数据的验证结果表明，本文方法能够准确识别两次典型故障事件并精确定位相关指标，在非等间隔、小样本工程场景下展现出较高的检测准确性。

然而，本文中的检测指标是基于整个电液伺服机构进行检测，但故障分类是依据独立元器件故障，没有考虑对故障进行分层描述，拟作为下一步研究方向。仍需进一步探索该方法在不同设备类型、不同工作环境下的适用性，并优化算法以提高故障检测的精度和效率，为工业领域的故障检测提供更为先进和可靠的技术支持。

参考文献（References）

[1] 胡昌华, 马清亮, 郑建飞. 导弹测试与发射控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
Hu C H, Ma Q L, Zheng J F. Test and launch control technology for missile[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010(in Chinese).

[2] 潘昌忠, 何广, 李智靖, 等. 不确定电液伺服系统的时变输出约束自适应滤波控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(6): 1819-1828.
Pan C Z, He G, Li Z J, et al. Adaptive filtered control for uncertain electro-hydraulic servo systems with time-varying output constraints[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(6): 1819-1828(in Chinese).

[3] 郭新平, 汪成文, 刘华, 等. 基于扩张状态观测器的泵控电液伺服系统滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1159-1168.
Guo X P, Wang C W, Liu H, et al. Extended-state-observer based sliding mode control for pump-controlled electro-hydraulic servo system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1159-1168(in Chinese).

[4] Guo R, Sui J. Remaining useful life prognostics for the electro-hydraulic servo actuator using Hellinger distance-based particle filter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(4): 1148-1158.

[5] Phan V, Ahn K. Fault-tolerant control for an electro-hydraulic servo system with sensor fault compensation and disturbance rejection[J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111(11): 10131-10146.

[6] 黄旭星, 李爽, 杨彬, 等. 人工智能在航天器制导与控制中的应用综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 106-121.
Huang X X, Li S, Yang B, et al. Spacecraft guidance and control based on artificial intelligence: review[J]. Acta Aeronautica et As-

tronautica Sinica, 2021, 42(4): 106-121(in Chinese).

[7] 王学进, 董海迪, 王淅娜. 一种便携式导弹电液伺服机构动态测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 172-177.
Wang X J, Dong H D, Wang X N. Design of dynamic test system for portable missile electro-hydraulic servo mechanism[J]. Computer Measurement& Control, 2024, 32(5): 172-177 (in Chinese).

[8] 张磊, 卢文忠, 刘丙杰, 等. 导弹电液伺服机构故障诊断专家系统的设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(12): 3284-3286.
Zhang L, Lu W Z, Liu B J, et al. Application research of fault diagnostic expert system on missile electro-hydraulic servo mechanism[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(12): 3284-3286(in Chinese).

[9] Gao W, Sun P, Ai C, et al. Multisource electrohydraulic servo valve fault status diagnostic algorithm based on a message propagation mechanism[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(5): 055302.

[10] 陈雷. 某型电液伺服系统故障维修探析[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(7): 168-169.
Chen L. Analysis of fault maintenance of a certain electro-hydraulic servo system[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipmen, 2020, 56(7): 168-169(in Chinese).

[11] Shahkar S, Khorasani K. A multidimensional Bayesian methodology for diagnosis, prognosis, and health monitoring of electro-hydraulic servo valves[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 30(3): 931-943.

[12] 梁伟阁, 张钢, 王健, 等. 复杂机械设备健康状态预测方法研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 67-77.
Liang W G, Zhang G, Wang J, et al. A review on health state assessment and remaining useful life prediction of mechanical equipment under intelligent manufacturinglJ]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(7): 67-77(in Chinese).

[13] Vettoruzzo A, Bouguelia M R, Vanschoren J, et al. Advances and challenges in meta-learning: a technical review[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024, 46(7): 4763-4779.

[14] Altaleb A, Chauveau D. Bayesian analysis of the Logit model and comparison of two Metropolis-Hastings strategies[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2002, 39(1): 137-152.

[15] Roberts G, Rosenthal J. Optimal scaling for various Metropolis-Hastings algorithms[J]. Statistical Science, 2001, 6(4): 351-367.

[16] Schölkopf B, Smola A, Müller K. Kernel principal component analysis[C]//Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks. Berlin: Springer, 1997: 583-588.

[17] Liu L, Liu J, Wang H, et al. A multivariate monitoring method based on kernel principal component analysis and dual control chart[J]. Journal of Process Control, 2023, 127: 102994.

[18] 聂小辉, 金磊. 核主元分析在航天器飞轮自主故障诊断的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 2119-2128.
Nie X H, Jin L. Application of kernel principal component analysis in autonomous fault diagnosis for spacecraft flywheel[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 2119-2128(in Chinese).

[19] Goyal N. Structure specified optimal robust H_∞ loop shaping control of multivariable electro-hydraulic servo system using GA and PSO[J]. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2015, 4(6): 4991-4998.

[20] 卢红影, 李昌, 曲颖, 等. 电液伺服机构设计关键特性识别方法研究[J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2020, 34(4): 95-100.
Lu H Y, Li C, Qu Y, et al. Study on key design characteristics identification method of electro-hydraulic servo mechanism[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(4): 95-100(in Chinese).

[21] 陈兴根, 潘骏, 陈文华, 等. 电液伺服机构故障树分析[J]. 机电工程, 2009, 26(4): 25-27.
Chen X G, Pan J, Chen W H, et al. Fault tree analysis of electro-hydraulic servo mechanism[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2009, 26(4): 25-27(in Chinese).

[22] Li J, Kong L, Liang H, et al. Review of development and characteristics research on electro-hydraulic servo system[J]. Recent Patents on Engineering, 2024, 18(6): 140-154.

Fault detection method of electric-hydraulic servo actuator for non-equal interval data

KONG Xiangyu*, WANG Ziwen, ZHOU Zhijie, LIU Meizhi, ZHANG Chen

(Missile Engineering College, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Fault detection technology is an important technology to ensure the safe and stable operation of the electric-hydraulic servo actuator (EHSA). Owing to the electro-hydraulic servo mechanism's issues with unequal detection time intervals and limited detection times, utilizing such detection data directly in conjunction with the current algorithm to identify EHSA failure may result in decreased detection accuracy and model performance. In order to solve this kind of problem, a fault detection method of an electro-hydraulic servo mechanism based on non-equal interval data was proposed. First, the historical detection data of the equipment was isolated by combining the historical detection data of electro-hydraulic servo mechanisms of various devices in the same batch using the M-H algorithm. Second, the contribution graph approach was utilized to examine the fault-related indicators after statistics were constructed using the kernel principal components analysis (KPCA) method, which analyzed the discrepancies between principal components and served as the basis for fault identification. When the number is limited and the data are not evenly spaced, the suggested approach has a high defect identification rate. The effectiveness of the method is verified by the historical detection data of a certain type of electro-hydraulic servo system.

Keywords: electric-hydraulic servo actuator; non-equal interval data; fault detection; kernel principal components analysis; M-H algorithm

Received: 2024-05-15; **Accepted**: 2024-07-26; **Published Online**: 2024-08-27 16:03

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240827.1337.002

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62273354,62227814,61833016)

* **Corresponding author**. E-mail: xiangyukong@126.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0382

Wilson-ρ_∞方法及模拟系统的解析解

邢誉峰[1,*]，王雨竹[1]，李玉婷[1]，张慧敏[2]
(1. 北京航空航天大学 固体力学研究所，北京 100191；2. 北京宇航系统工程研究所，北京 100076)

摘 要：针对Wilson-θ方法高频耗散不能由频率无穷大时的谱半径ρ_∞精确控制问题，建立了ρ_∞和θ之间的关系，形成了Wilson-ρ_∞方法，并将其数值性能与广义-α方法进行比较。在Wilson-ρ_∞方法中，给定一个ρ_∞，存在2个θ。对应不同θ的Jacobi矩阵具有不同的本征根，Wilson-ρ_∞方法也因此具有不同的数值性能，根据谱半径特性给出推荐使用的θ。同时，基于Wilson-ρ_∞方法的阻尼比和频率，构造单自由度受迫振动系统的模拟系统，初始条件与作用在其上的外力和原系统相同。可以看出，Wilson-ρ_∞方法结果与模拟系统解析解吻合，且稳态响应不存在累计幅值误差和相位误差。数值比较结果验证了所得结论。

关 键 词：Wilson-θ方法；模拟系统；幅值衰减；周期延长；解析解
中图分类号：O302
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2251-09

时间积分方法(也经常称为算法)的基本思想是：将时间域离散成若干时间区间(也称为时间步)，并建立每个时间步内位移、速度和加速度随时间变化的规律，根据前一时刻已知的状态变量，利用平衡方程以递推方式计算当前时刻的状态变量[1]。经典时间积分方法有级数展开法[2]、Runge-Kutta法[3-4]和Newmark方法[5]等，其中，Newmark方法在工程中得到广泛应用，并且是现代时间积分方法的主要基础。

Newmark方法家族包含中心差分法(central difference method, CDM)、梯形法则(trapezoidal rule, TR)和Fox-Goodwin方法等著名二阶辛差分格式。但具有数值阻尼的格式仅具有一阶精度，且其高频数值阻尼难以精确控制，因此，人们逐渐发展出一些具有数值阻尼或可控数值阻尼的二阶方法，如Wilson-θ方法[6]、HHT-α方法[7]、WBZ-α方法[8]、HP-θ方法[9]、广义(generalized)-α方法[10-11]等。2024年，Newmark-ρ_∞方法[12]被提出，其具有无条件稳定性，且高频数值阻尼精确可控。

为综合提高方法性能，或为在求解某一问题时可以同时利用几个具有不同优点的方法，人们开始研究复合时间积分方法[13-17]。另外，数值实验表明，对线性系统无条件稳定的时间积分方法(如TR)，对简单的软弹簧问题[18]和刚性单摆问题[19]可能发散。因此，人们设计出了对某些类型非线性结构动力学系统无条件稳定的方法，如基于能量有界准则设计的方法[20-21]、以Houbolt方法[22]和Park方法[18]为代表的线性多步法、BN稳定型方法[23-24]等。针对线性动力学系统，一种联合方法[25]被提出，其联合使用模态叠加方法和时间积分方法来求解动态响应以提高计算精度。关于时间积分方法的研究进展及性能评价方法，还可以参考文献[26-29]。

时间积分方法的误差主要包括数值耗散和数值弥散，前者通常用幅值衰减率或数值阻尼比刻画，后者用周期延长率表征。数值阻尼(人工阻尼)的作用具有双重性，既可以滤去不需要或虚假高频响应成分，但也降低了低频响应精度。值得指出的是，在振动力学中，黏性阻尼力在一个周期内做功

收稿日期：2024-06-04；**录用日期**：2024-08-01；**网络出版时间**：2024-08-16 07:06
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240815.0943.002
基金项目：国家自然科学基金(12172023,12302044)
*通信作者. E-mail：xingyf@buaa.edu.cn

引用格式：邢誉峰，王雨竹，李玉婷，等. Wilson-ρ_∞方法及模拟系统的解析解[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2251-2259.
Xing Y F，Wang Y Z，Li Y T，et al. Wilson-ρ_∞ method and analytical solution of analog system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2251-2259 (in Chinese).

的大小随振动响应频率的增大而增大，即频率越高，黏性阻尼在一个周期内耗散的能量越多[30]。但在时间积分方法中，物理阻尼产生的高频耗散作用却可以忽略。因此，二阶阻尼型方法具有广泛的实用价值，如Wilson-θ方法就是早期发展的一种，但其经典格式中的数值阻尼不可控，对其数值性能的研究也不充分。

在此背景下，本文给出对应无穷大频率的谱半径ρ_∞与Wilson-θ方法的自由参数θ之间的关系，形成Wilson-ρ_∞方法；为更深入理解其数值性能，针对单自由度受迫振动系统，基于Wilson-ρ_∞方法的阻尼比和频率，构造了受迫振动系统的模拟系统，并给出其解析解；最终给出模拟系统的解析解和原系统吻合，且稳态响应不存在累计幅值误差和累计相位误差的结论。

1 Wilson-ρ_∞方法

考虑如下单自由度系统控制方程：

$$M\ddot{x}+C\dot{x}+Kx=R \tag{1}$$

式中：M、C、K和R分别为物理系统的质量、黏性阻尼系数、弹簧刚度和外部激励；x、$\dot{x}$和$\ddot{x}$分别为系统的位移、速度和加速度。

Wilson-θ方法是一种应用较为广泛的时间积分方法。在Wilson-θ方法中，加速度随着时间线性变化，即

$$\ddot{x}_{t_k+\eta}=\ddot{x}_{t_k}+\frac{\eta}{\theta h}\left(\ddot{x}_{t_k+\theta h}-\ddot{x}_{t_k}\right) \tag{2}$$

式中：h为时间步长；k为时间步数；$0\leqslant\eta\leqslant\theta h$；$t_k=t_0+kh$，令初始时刻$t_0$为零。

对式(2)进行2次积分，再将式(2)代入积分结果中可得

$$\begin{cases}x_{t_k+\eta}=x_{t_k}+\eta\dot{x}_{t_k}+\dfrac{\eta^2}{6}\left(\ddot{x}_{t_k+\eta}+2\ddot{x}_{t_k}\right)\\ \dot{x}_{t_k+\eta}=\dot{x}_{t_k}+\dfrac{\eta}{2}\left(\ddot{x}_{t_k+\eta}+\ddot{x}_{t_k}\right)\end{cases} \tag{3}$$

令式(3)中的$\eta=h$，可得Wilson-θ方法的差分格式为

$$\begin{cases}x_{t_k+h}=x_{t_k}+h\dot{x}_{t_k}+\dfrac{h^2}{6}\left(\ddot{x}_{t_k+h}+2\ddot{x}_{t_k}\right)\\ \dot{x}_{t_k+h}=\dot{x}_{t_k}+\dfrac{h}{2}\left(\ddot{x}_{t_k+h}+\ddot{x}_{t_k}\right)\end{cases} \tag{4}$$

式中：x_{t_k}、$\dot{x}_{t_k}$和$\ddot{x}_{t_k}$分别为t_k时刻的位移、速度和加速度的近似值。

令式(3)中的$\eta=\theta h$，可以给出用$x_{t_k+\theta h}$表达$\ddot{x}_{t_k+\theta h}$和$\dot{x}_{t_k+\theta h}$的公式，即

$$\ddot{x}_{t_k+\theta h}=\frac{6}{\theta^2h^2}\left(x_{t_k+\theta h}-x_{t_k}\right)-\frac{6}{\theta h}\dot{x}_{t_k}-2\ddot{x}_{t_k} \tag{5}$$

$$\dot{x}_{t_k+\theta h}=\frac{3}{\theta h}\left(x_{t_k+\theta h}-x_{t_k}\right)-2\dot{x}_{t_k}-\frac{\theta h}{2}\ddot{x}_{t_k} \tag{6}$$

令式(2)中$\eta=h$，再将式(5)中$\ddot{x}_{t_k+\theta h}$代入，可得差分格式(4)中的$\ddot{x}_{t_k+h}$，即

$$\ddot{x}_{t_k+h}=\frac{6}{\theta^3h^2}\left(x_{t_k+\theta h}-x_{t_k}\right)-\frac{6}{\theta^2h}\dot{x}_{t_k}+\left(1-\frac{3}{\theta}\right)\ddot{x}_{t_k} \tag{7}$$

为确定式(7)中的$x_{t_k+\theta h}$，Wilson-θ方法要求$x_{t_k+\theta h}$、$\ddot{x}_{t_k+\theta h}$和$\dot{x}_{t_k+\theta h}$满足如下平衡方程：

$$M\ddot{x}_{t_k+\theta h}+C\dot{x}_{t_k+\theta h}+Kx_{t_k+\theta h}=R_{t_k}+\theta\left(R_{t_k+h}-R_{t_k}\right) \tag{8}$$

因此，将式(5)和式(6)代入式(8)即可求得$x_{t_k+\theta h}$，进而根据式(7)和式(4)可以得到$\ddot{x}_{t_k+h}$、$\dot{x}_{t_k+h}$和x_{t_k+h}。

1.1 参数θ与ρ_∞关系

由于利用模态坐标可以对线性多自由度系统进行坐标解耦，即可以用主振动叠加方法求解线性多自由度系统的动力学响应，因此，可以借助单自由度系统来分析方法的数值性能。将方程(1)写成如下形式：

$$\ddot{x}+2\xi\omega\dot{x}+\omega^2x=r \tag{9}$$

式中：$\omega=\sqrt{K/M}$和$\xi=C/(2M\omega)$分别为物理系统固有频率和阻尼比；$r=\omega^2R/K$。

由位移、速度和加速度的差分关系式(4)和式(7)，可以得到Wilson-θ方法的递推计算格式为

$$\boldsymbol{X}_{t_k+h}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_{t_k}+\boldsymbol{L}r_{t_k+\theta h} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{t_k}^{\mathrm{T}}=\left[x_{t_k}\quad h\dot{x}_{t_k}\quad h^2\ddot{x}_{t_k}\right]$；$\boldsymbol{L}$为载荷作用向量；$r_{t_k+\theta h}=r_{t_k}+\theta\left(r_{t_k+h}-r_{t_k}\right)$；$\boldsymbol{A}$为决定算法数值性能的Jacobi矩阵。

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}\dfrac{\beta}{\tau^2}\\ \dfrac{\beta}{2\tau^2}\\ \dfrac{\beta}{6\tau^2}\end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1-\dfrac{\beta}{6} & 1-\dfrac{\beta\theta}{6}-\dfrac{\kappa}{3} & \dfrac{1}{2}-\dfrac{1}{6\theta}-\dfrac{\beta\theta^2}{18}-\dfrac{\kappa\theta}{6}\\ -\dfrac{\beta}{2} & 1-\dfrac{\beta\theta}{2}-\kappa & 1-\dfrac{1}{2\theta}-\dfrac{\beta\theta^2}{6}-\dfrac{\kappa\theta}{2}\\ -\beta & -\beta\theta-2\kappa & 1-\dfrac{\beta\theta^2}{3}-\dfrac{1}{\theta}-\kappa\theta\end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{cases}\beta=\left(\dfrac{\theta}{\tau^2}+\dfrac{\xi\theta^2}{\tau}+\dfrac{\theta^3}{6}\right)^{-1}\\ \kappa=\xi\beta/\tau\end{cases} \tag{13}$$

式中：$\tau=\omega h$。

根据式(13)可知，当$\tau\to\infty$时，黏性阻尼对谱特性和数值性能的影响可以忽略。

为设计Wilson-ρ_∞方法，需要将θ用ρ_∞表示，其中，ρ_∞为$\tau\to\infty$时的谱半径，其表征高频段的数值耗散程度。对于稳定方法有$0\leqslant\rho_\infty\leqslant1$。为找到$\theta$和

ρ_∞之间的关系, 下面分析 Wilson-θ 方法的谱特性。

对于稳定自由振动系统, 其能量不应随时间增加, 有正阻尼时还应逐渐减小, 因此, 稳定方法计算结果不应放大初始能量。经过若干步的递推计算, 若所得结果幅值比初始值大, 则方法不稳定。对于自由振动问题, r=0, 由式 (10) 得到

$$\boldsymbol{X}_{t_k}=\boldsymbol{A}^k\boldsymbol{X}_0 \tag{14}$$

当 $k\to\infty$时, $\boldsymbol{X}_{t_k}$是有界的, 当且仅当

$$\rho(\boldsymbol{A})=\max|\lambda_i|\leqslant 1 \qquad i=1,2,3 \tag{15}$$

式中: $\rho(\boldsymbol{A})$ 为谱半径; λ_i为 $\boldsymbol{A}$ 的本征根或方程(16)的根, 表示为

$$\det(\boldsymbol{A}-\lambda\boldsymbol{I})=0 \tag{16}$$

式 (15) 即为方法稳定的充要条件。令$\tau\to\infty$, 根据式 (16) 可以画出 ρ_∞和 θ 的关系曲线, 如图 1 所示。可以看出, 当 $\theta\geqslant$1.366 025≈1.37 时, Wilson-θ 具有无条件稳定性; 当 θ=1.420 815 时, ρ_∞具有最小值 0.520 967。

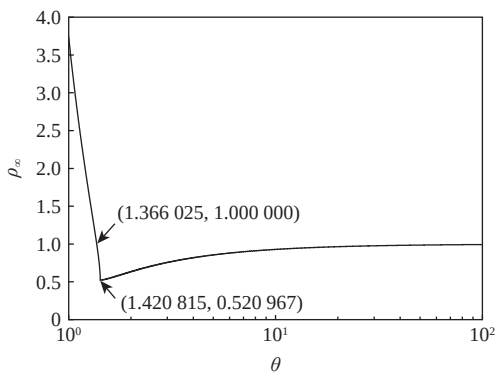


图 1　ρ_∞和 θ 关系曲线 ($\tau\to\infty$)

Fig. 1　Relationship curve of ρ_∞ and $\theta(\tau\to\infty)$

对于收敛方法, $\boldsymbol{A}$ 通常有一对共轭复根, 称为主根, 其余根称为寄生根。若状态变量满足离散时刻的平衡方程, 则寄生根为零, 如 Newmark 方法的 $\boldsymbol{A}$ 的寄生根为零。共轭复根的形式为

$$\lambda_{1,2}=a\pm \mathrm{i}b \tag{17}$$

根据谱半径的定义(式 (15)), 式 (17) 可以利用谱半径$\rho=\sqrt{a^2+b^2}$改写为

$$\lambda_{1,2}=\rho\mathrm{e}^{\pm \mathrm{i}\arctan(b/a)} \tag{18}$$

若τ为有限值, 在保证 $\rho_\infty\leqslant$1 的前提下, 为使 $\boldsymbol{A}$ 有共轭复根, τ存在分叉点, 记为τ_b, 如表 1 所示。

若$\tau\to\infty$, 为保证 $\boldsymbol{A}$ 具有一对共轭复根, 根据 Cardano 公式, $\boldsymbol{A}$ 的特征多项式的判别式Δ需要满足如下条件:

表 1　常用的ρ_∞值及其对应 θ

Table 1　Commonly used ρ_∞ and corresponding θ

ρ_∞	θ_1和分叉点τ_b	θ_2
0.6	θ_1=1.418 259, τ_b = 40.896 625	1.819 322
0.7	θ_1=1.409 577, τ_b = 19.537 309	2.441 147
0.8	θ_1=1.397 065, τ_b = 13.472 628	3.631 715
0.9	θ_1=1.382 232, τ_b = 10.601 429	7.156 400
1.0	θ_1=1.366 025, τ_b = 8.925 094	∞

$$\Delta=\theta^6-3\theta^5+2\theta^4+\theta^3-\frac{2}{3}\theta^2-\frac{1}{3}\theta-\frac{1}{18}>0 \tag{19}$$

即

$$\theta>1.420\ 815 \tag{20}$$

也就是说, 当$\theta>$1.420 815时, $\boldsymbol{A}$ 才有共轭复根。

根据式 (16) 可得式 (17) 中 a 和 b 表达式, 令其中的$\tau\to\infty$, 可得

$$\begin{cases} a=\dfrac{1}{6}\left[\left(\tilde{A}-\dfrac{3\sqrt{\tilde{B}}}{2}\right)^{1/3}+\left(\tilde{A}+\dfrac{3\sqrt{\tilde{B}}}{2}\right)^{1/3}\right]-6\tilde{C} \\ b=-\dfrac{\sqrt{3}}{6}\left[\left(\tilde{A}-\dfrac{3\sqrt{\tilde{B}}}{2}\right)^{1/3}-\left(\tilde{A}+\dfrac{3\sqrt{\tilde{B}}}{2}\right)^{1/3}\right] \end{cases} \tag{21}$$

式中:

$$\begin{cases} \tilde{A}=\left(\tilde{c}^2-\dfrac{9\tilde{b}}{2}\right)\tilde{c}-\dfrac{27\tilde{a}}{2} \\ \tilde{B}=\left(9\tilde{a}+\tilde{b}\tilde{c}\right)^2-4\left(\tilde{c}^2-3\tilde{b}\right)\left(\tilde{b}^2+3\tilde{a}\tilde{c}\right) \\ \tilde{C}=\tilde{c}/3 \end{cases} \tag{22}$$

$$\begin{cases} \tilde{a}=(\theta-1)^3/\theta^3 \\ \tilde{b}=\left(3\theta^3-6\theta^2+4\right)/\theta^3 \\ \tilde{c}=\left(-3\theta^3+3\theta^2+3\theta+1\right)/\theta^3 \end{cases} \tag{23}$$

将式 (21) 给出的 a、b 代入$\rho_\infty=\sqrt{a^2+b^2}$中, 可得 θ 与ρ_∞的关系式为

$$\rho_\infty=\frac{1}{6}\left\{3\left[\left(\tilde{A}-\frac{3\tilde{B}}{2}\right)^{1/3}-\left(\tilde{A}+\frac{3\tilde{B}}{2}\right)^{1/3}\right]^2+\left[\left(\tilde{A}-\frac{3\tilde{B}}{2}\right)^{1/3}+\left(\tilde{A}+\frac{3\tilde{B}}{2}\right)^{1/3}-6\tilde{C}\right]^2\right\}^{1/2} \tag{24}$$

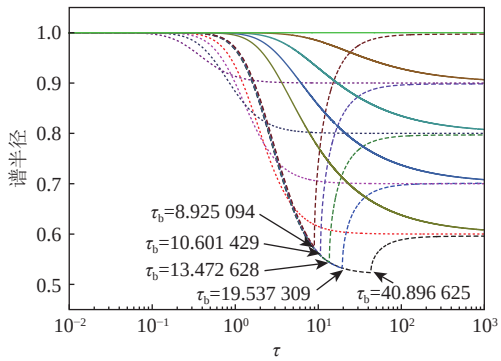
对式 (24) 进行分析可知, 当 θ =1.366 025 和 ∞时, ρ_∞=1, 参见图 1。给定ρ_∞, 根据式 (24) 可以求出 2 个 θ, 如表 1 所示。

根据式 (20) 和表 1 可知:

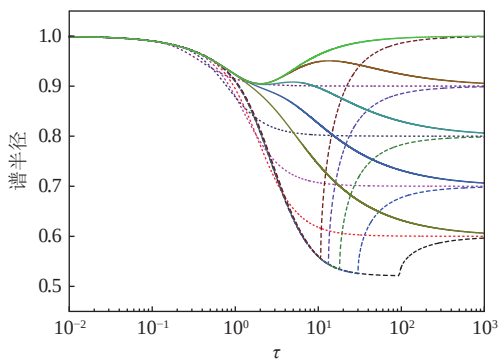
1) 当$\theta=\theta_2$时, 对任意的τ, $\boldsymbol{A}$ 都存在共轭复根。

2) 当$\theta=\theta_1$时, 若$\tau\leqslant\tau_\mathrm{b}$, $\boldsymbol{A}$ 有共轭复根, 图 2(a) 中标出了分叉点τ_b, 否则 $\boldsymbol{A}$ 仅有 3 个不等的实根。

比较图 2(a) 和图 2(b) 可以看出, 考虑黏性阻尼时, τ_b的值变大。



(a) ξ=0



(b) ξ=0.1

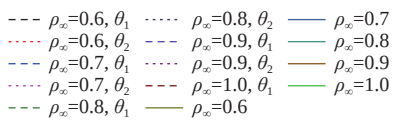


图 2 Wilson-ρ_∞方法与广义-α 方法的谱半径

Fig. 2 Spectral radii of Wilson-ρ_∞ method and Generalized-α method

1.2 谱 半 径

图 2 给出了具有不同 θ 的 Wilson-ρ_∞方法与广义-α 方法最优格式的谱半径。

广义-α 方法中，$0 \leqslant \rho_\infty \leqslant 1$，而 Wilson-$\rho_\infty$方法中，$0.520\,967 \leqslant \rho_\infty \leqslant 1$。为了比较 2 种方法的谱半径，图 2 中 ρ_∞的变化范围选为$0.6 \leqslant \rho_\infty \leqslant 1$。由图 2 可见：

1）Wilson-ρ_∞方法具有更大的高频耗散能力，广义-α 方法具有更高的低频精度。

2）若$\theta = \theta_2$，Wilson-ρ_∞方法的谱半径随着τ的增加逐渐降低，趋近于 ρ_∞，与广义-α 方法谱半径的变化趋势类似。

3）若$\theta = \theta_1$，Wilson-ρ_∞方法的谱半径随着τ的增加逐渐降低，但当$\tau \geqslant \tau_b$后，谱半径逐渐升高，趋近于 ρ_∞。并且在τ=τ_b之前，对应不同 ρ_∞的谱半径曲线基本重合。

4）若$\theta = \theta_1$，当$\tau > \tau_b$时，此时 Wilson-ρ_∞方法虽然收敛，但其计算结果不再有振荡性。

1.3 幅值衰减率和周期延长率

根据时间积分方法谱分析理论，$\lambda_{1,2}$可以表示为

$$\lambda_{1,2} = \mathrm{e}^{-\bar{\xi}\bar{\omega}h \pm \mathrm{i}\bar{\omega}_\mathrm{d}h} \tag{25}$$

式中：$\bar{\xi}$为算法阻尼比（数值阻尼比），常被用来表示幅值衰减率，实际上，$\bar{\xi}$仅是其较小时的幅值衰减率的因子，而幅值衰减率为$2\pi\bar{\xi}$[12]，不过，$\bar{\xi}$可以用于表征算法耗散性能；$\bar{\omega}$为算法频率，对应的自然频率$\bar{\omega}_\mathrm{d}$为

$$\bar{\omega}_\mathrm{d} = \bar{\omega}\sqrt{1-\bar{\xi}^2} \tag{26}$$

比较式 (18) 和式 (25) 可得

$$\rho = \mathrm{e}^{-\bar{\xi}\bar{\omega}h} \tag{27}$$

$$\bar{\omega}_\mathrm{d}h = \arctan(b/a) \tag{28}$$

由式 (27) 可知，$\bar{\xi} = -\ln\rho/(\bar{\omega}h)$，再根据式 (26) 和式 (28) 可得$\bar{\xi}$的表达式为

$$\bar{\xi} = -\frac{\ln\rho}{\sqrt{(\bar{\omega}_\mathrm{d}h)^2 + (\ln\rho)^2}} \tag{29}$$

从式 (29) 可以看出，若$\rho = 1$，则$\bar{\xi}$=0。$\bar{\xi}$能够直观地反映方法的耗散程度。考虑不同的ξ，图 3 和图 4 分别给出了 Wilson-ρ_∞方法和广义-α 方法的$\bar{\xi}$随 τ 的变化特性。可以看出：

1）当 τ 趋于 0 时，$\bar{\xi}$趋于ξ，若$\xi = 0$，则$\bar{\xi}$的初值为 0，即低频耗散由黏性阻尼决定。

2）在高频段，即使系统具有黏性阻尼，$\bar{\xi}$最终由数值阻尼决定（见式 (13)）。

3）若ρ_∞=1，则随着τ增大，$\bar{\xi}$趋于 0；不同于广义-α 方法，即使 ρ_∞=1 和ξ=0，Wilson-ρ_∞方法的$\bar{\xi}$通常不等于零，参见图 2 中的谱半径曲线。

4）由于$\bar{\xi}$在低频段取决于ξ，高频段由 ρ_∞决定，$\bar{\xi}$随着 τ 的变化特点是由ξ和 ρ_∞共同决定的。

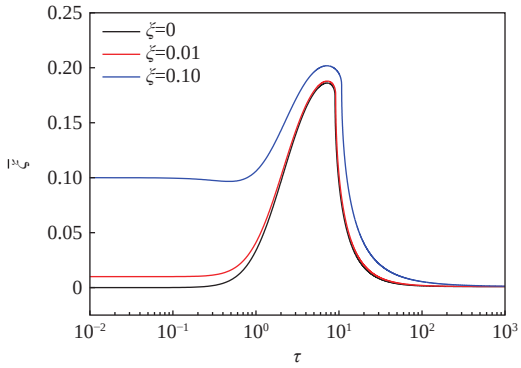
将与$\bar{\omega}$对应的周期$\bar{T} = 2\pi/\bar{\omega}_\mathrm{d}$称为方法周期，方法周期与物理系统周期$T = 2\pi/\omega_\mathrm{d}$不同，可以用周期延长率$\tilde{p} = \left(\bar{T} - T\right)/T$来表征二者之间的差别，$\tilde{p}$也被称为相位误差，其形式还可以写为[12]

$$\tilde{p} = \frac{\omega_\mathrm{d}}{\bar{\omega}_\mathrm{d}} - 1 = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\sqrt{1-\bar{\xi}^2}} \cdot \frac{\tau}{\sqrt{(\bar{\omega}_\mathrm{d}h)^2 + (\ln\rho)^2}} - 1 \tag{30}$$

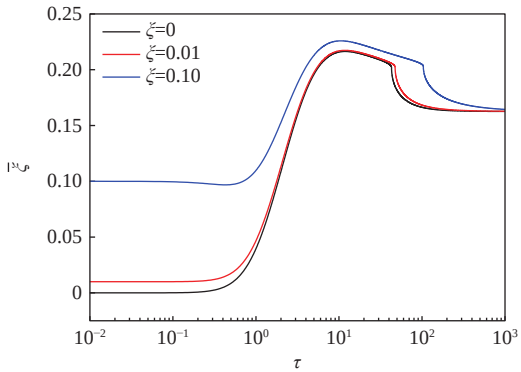
从式 (30) 可以看出，$\tilde{p}$通常随着τ的增大而增大，一般方法的$\tilde{p}$和τ曲线也不存在零点，本节略去$\tilde{p}$的数值结果。对于单自由度系统，若$\tilde{p}$和τ曲线具有零点，则可以利用$\tilde{p} = 0$来确定方法参数或时间步长，以实现相位误差为零的目的[31-32]。

1.4 计算精度

Wilson-ρ_∞方法为二阶方法。下面比较$\theta = \theta_1$和$\theta = \theta_2$时 Wilson-ρ_∞方法的计算精度。考虑如下单自由度系统：



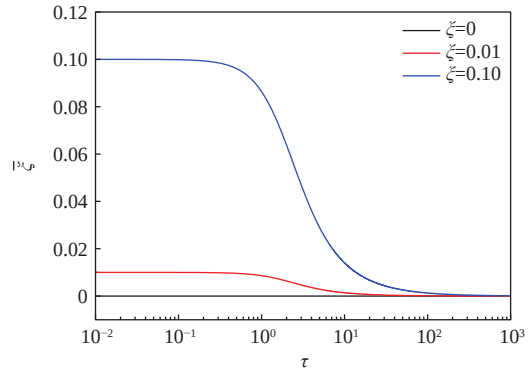
(a) ρ_∞=1.0 (θ=1.366 025)



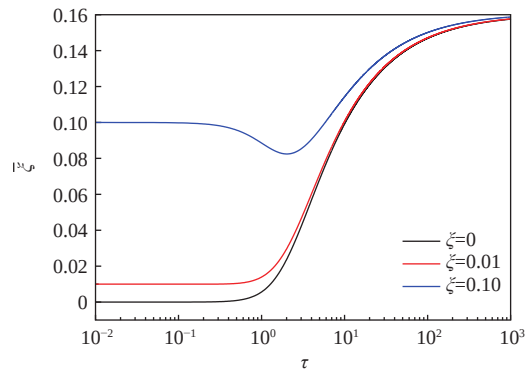
(b) ρ_∞=0.6 (θ=1.418 259)

图 3　不同 ξ 情况下的 Wilson-ρ_∞方法的数值阻尼比

Fig. 3　Numerical damping ratios of Wilson-ρ_∞ method for different ξ



(a) ρ_∞=1.0



(b) ρ_∞=0.6

图 4　不同 ξ 情况下的广义-α 方法的数值阻尼比

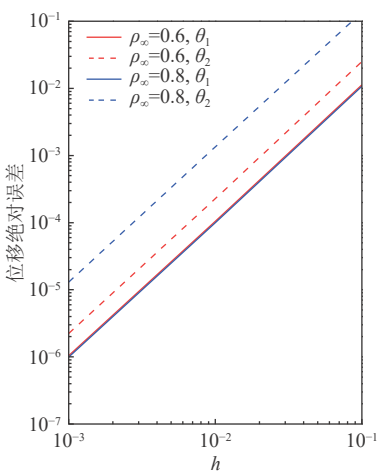
Fig. 4　Numerical damping ratios of Generalized-α method for different ξ

$$\begin{cases}\ddot{x}_t+4\dot{x}_t+5x_t=\sin(2t)\\ x(0)=57/65,\dot{x}(0)=2/65\end{cases}\tag{31}$$

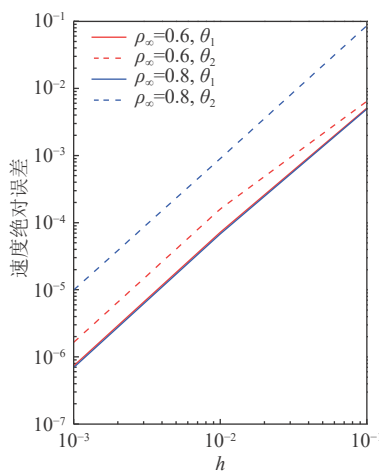
其解析解为

$$x(t)=\mathrm{e}^{-2t}(\cos t+2\sin t)-(8\cos 2t-\sin 2t)/65\tag{32}$$

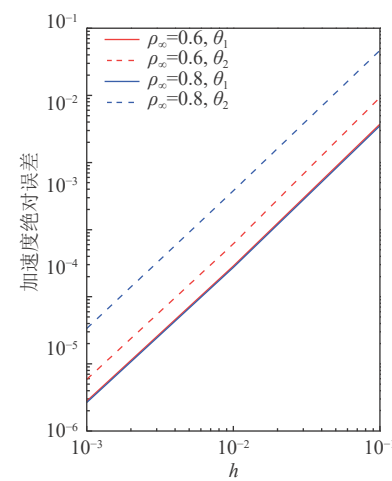
图 5 给出了 Wilson-ρ_∞方法在 t=1 时刻的位移、速度和加速度的绝对误差。可以看出，位移、速度和加速度都是二阶精确的；对于不同的ρ_∞，$\theta=\theta_1$时的计算精度比$\theta=\theta_2$时的高；θ等于不同θ_1时的计算精度基本相同，从图 2 也可以看出此结论。因此，在 Wilson-ρ_∞方法中，建议$\theta=\theta_1$。



(a) 位移绝对误差



(b) 速度绝对误差



(c) 加速度绝对误差

图 5　t=1 时刻的位移、速度和加速度的绝对误差

Fig. 5　Absolute errors of displacement, velocity, and acceleration at t=1

2　单自由度受迫振动系统的模拟系统

采用类似文献 [12] 的方法，基于 Wilson-ρ_∞方法的阻尼比和频率，构建单自由度简谐振动系统的模拟系统，并求出其解析解，将 Wilson-ρ_∞方法的结果与模拟系统解析解进行比较，以便理解二者数值性

能的一致性。

2.1 模拟系统及解析解

考虑简谐激励$R=F\sin(\Omega t)$作用，其中，F和Ω分别为激励幅值和频率。单自由度受迫振动系统方程(9)变为

$$\ddot{x}+2\xi\omega\dot{x}+\omega^2x=B\omega^2\sin(\Omega t) \tag{33}$$

式中：$B=F/K$。

方程(33)的解析解为

$$x(t)=\mathrm{e}^{-\xi\omega t}(c_1\cos(\omega_\mathrm{d}t)+c_2\sin(\omega_\mathrm{d}t))+B\beta\sin(\Omega t-\alpha) \tag{34}$$

式中：$\omega_\mathrm{d}=\omega\sqrt{1-\xi^2}$；$\alpha$为稳态响应和简谐激励之间的相位差；$c_1$和$c_2$为积分系数。

将式(34)代入初始条件$x(0)=x_0$和$\dot{x}(0)=\dot{x}_0$，可得

$$\begin{aligned}x(t)=&D\mathrm{e}^{-\xi\omega t}\sin(\omega_\mathrm{d}t+\vartheta)+\\&B\beta\mathrm{e}^{-\xi\omega t}\left(\sin\alpha\cos(\omega_\mathrm{d}t)+\frac{\xi\omega\sin\alpha-\Omega\cos\alpha}{\omega_\mathrm{d}}\sin(\omega_\mathrm{d}t)\right)+\\&B\beta\sin(\Omega t-\alpha)\end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{cases}D=\sqrt{x_0^2+\left(\dfrac{\dot{x}_0+\xi\omega x_0}{\omega_\mathrm{d}}\right)^2}\\ \vartheta=\arccos\left(\dfrac{\dot{x}_0+\xi\omega x_0}{D\omega_\mathrm{d}}\right)\\ \beta=\dfrac{1}{\sqrt{\left(1-\lambda^2\right)^2+(2\xi\lambda)^2}}\\ \alpha=\arccos\left(\dfrac{1-\lambda^2}{\sqrt{\left(1-\lambda^2\right)^2+(2\xi\lambda)^2}}\right)\end{cases} \tag{36}$$

式中：$\lambda=\Omega/\omega$。

从方程(33)可以看出，系统比例参数为ξ、ω，对于Wilson-ρ_∞方法，存在类似ξ、ω的$\bar{\xi}$和$\bar{\omega}$(参见1.3节)。因此，类比系统(33)，利用$\bar{\xi}$和$\bar{\omega}$构造如下模拟系统：

$$\ddot{x}+2\bar{\xi}\bar{\omega}\dot{x}+\bar{\omega}^2x=B\bar{\omega}^2\sin(\Omega t) \tag{37}$$

其承受的激励仍是简谐激励$R=F\sin(\Omega t)$，且要求系统(37)与系统(33)具有相同的初始条件。模拟系统(37)的解析解为

$$x(t_k)=\mathrm{e}^{-\bar{\xi}\bar{\omega}t_k}(\bar{c}_1\cos(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k)+\bar{c}_2\sin(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k))+B\bar{\beta}\sin(\Omega t_k-\bar{\alpha}) \tag{38}$$

式中：t_k相当于时间；$\bar{c}_1$和$\bar{c}_2$为积分常数；$\bar{\beta}$和$\bar{\alpha}$分别为位移动力放大因数和稳态响应与简谐激励之间的相位差；$\mathrm{e}^{-\bar{\xi}\bar{\omega}t_k}(\bar{c}_1\cos(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k)+\bar{c}_2\sin(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k))$为共轭主根的贡献；特解为$B\bar{\beta}\sin(\Omega t_k-\bar{\alpha})$。对于Wilson-$\rho_\infty$方法，由于状态变量不满足平衡方程，故$\boldsymbol{A}$有一个非零寄生根$\lambda_3$，考虑其贡献，式(38)可以写为

$$\begin{aligned}x(t_k)=&\mathrm{e}^{-\bar{\xi}\bar{\omega}t_k}(\bar{c}_1\cos(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k)+\bar{c}_2\sin(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k))+\bar{c}_3\lambda_3^k+\\&B\bar{\beta}\sin(\Omega t_k-\bar{\alpha})\end{aligned} \tag{39}$$

式中：$\bar{c}_3$为待定系数。

根据初始条件和模拟系统方程(37)可以确定式(39)中的待定系数，即

$$\begin{cases}\bar{c}_1=x_0+B\bar{\beta}\sin\bar{\alpha}-\bar{c}_3\\ \bar{c}_2=\dfrac{\dot{x}_0+\bar{\xi}\bar{\omega}x_0+B\bar{\beta}\left(\bar{\xi}\bar{\omega}\sin\bar{\alpha}-\Omega\cos\bar{\alpha}\right)-\bar{c}_3d}{\bar{\omega}_\mathrm{d}}\\ \bar{c}_3=B\bar{\beta}\dfrac{\left(\Omega^2-\bar{\omega}^2\right)\sin\bar{\alpha}+2\bar{\xi}\bar{\omega}\Omega\cos\bar{\alpha}}{d^2+2\bar{\xi}\bar{\omega}d+\bar{\omega}^2}\end{cases} \tag{40}$$

式中：$d=h^{-1}\ln|\lambda_3|$。

于是，式(39)变为

$$\begin{aligned}x(t_k)=&\bar{A}\rho^k\sin\left(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k+\bar{\vartheta}\right)+\\&B\bar{\beta}\frac{\left(\Omega^2-\bar{\omega}^2\right)\sin\bar{\alpha}+2\bar{\xi}\bar{\omega}\Omega\cos\bar{\alpha}}{d^2+2\bar{\xi}\bar{\omega}d+\bar{\omega}^2}\lambda_3^k+\\&B\bar{\beta}\rho^k\left(\sin\bar{\alpha}\cos(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k)+\frac{\bar{\xi}\bar{\omega}\sin\bar{\alpha}-\Omega\cos\bar{\alpha}}{\bar{\omega}_\mathrm{d}}\sin(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k)\right)+\\&B\bar{\beta}\sin(\Omega t_k-\bar{\alpha})\end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{cases}\bar{A}=\sqrt{x_0^2+\left(\dfrac{\dot{x}_0+\bar{\xi}\bar{\omega}x_0}{\bar{\omega}_\mathrm{d}}\right)^2}\\ \bar{\vartheta}=\arccos\left(\dfrac{\dot{x}_0+\bar{\xi}\bar{\omega}x_0}{\bar{A}\bar{\omega}_\mathrm{d}}\right)\\ \bar{\beta}=\dfrac{1}{\sqrt{\left(1-\bar{\lambda}^2\right)^2+\left(2\bar{\xi}\bar{\lambda}\right)^2}}\\ \bar{\alpha}=\arccos\left(\dfrac{1-\bar{\lambda}^2}{\sqrt{\left(1-\bar{\lambda}^2\right)^2+\left(2\bar{\xi}\bar{\lambda}_1\right)^2}}\right)\end{cases} \tag{42}$$

式中：$\rho^k=\mathrm{e}^{-\bar{\xi}\bar{\omega}t_k}$；$\bar{\lambda}=\Omega/\bar{\omega}$。

从式(40)可知，若仅考虑系统自由振动，则$\bar{c}_3=0$，即寄生根对自由振动没有贡献。由于$|\lambda_3|<1$，从式(41)可知，寄生根的贡献主要在响应的初始阶段。若B=0，则式(37)和式(41)退化到自由振动情况[12]，分别为

$$\ddot{x}+2\bar{\xi}\bar{\omega}\dot{x}+\bar{\omega}^2x=0 \tag{43}$$

$$x(t_k)=\bar{A}\rho^k\sin\left(\bar{\omega}_\mathrm{d}t_k+\bar{\vartheta}\right) \tag{44}$$

由于模拟系统(37)中的阻尼比和频率为方法的阻尼比和频率，模拟系统解析解(41)与用差分格式(4)得到的响应精度应相同，即差分解可以看成是模拟系统的解析解，或认为差分解具有解析性质。由此推测，模拟系统解析解的数值特性就是方法的数值性能。

从式(41)可以明确看出，若$\rho>1$，方法得到的瞬态响应发散；由于稳态响应幅值与ρ无关，因此不会发散，也没有累计的幅值误差；由于稳态响应频率是激励频率Ω，因此不存在累计相位差。文献[12]定义的幅值衰减率$2\pi\bar{\xi}$的含义为：一个周期

($2\pi/\bar{\omega}_d$)内自由振动模拟系统响应幅值衰减的相对大小, 为对数衰减率; 式 (30) 定义的周期延长率的含义为: 自由振动模拟系统响应周期$2\pi/\bar{\omega}_d$与原系统自由振动响应周期$2\pi/\omega_d$的相对大小。

2.2　算法结果与模拟系统解析解的比较

下面将模拟系统解析解与 Wilson-ρ_∞方法结果进行比较。令 K=25, M=1, $C=0.5$, 则$\omega=5$, $\xi=0.05$。简谐激励 $R=100\sin(10t)$, 初始位移 $x_0=1$, 速度 $\dot{x}_0=1$。考虑 2 种情况: ①情况 1: 自由振动, 步长 $h=\dfrac{2\pi}{5}/10$。②情况 2: 受迫振动, 步长 $h=\dfrac{2\pi}{10}/10$。

图 6 给出 2 种情况的位移响应。其中, Wilson-ρ_∞方法是利用$\rho_\infty=0.6(\theta=1.418\,259)$得到的, 而物理系统解析解和模拟系统解析解分别由式 (35) 和式 (41) 得到。

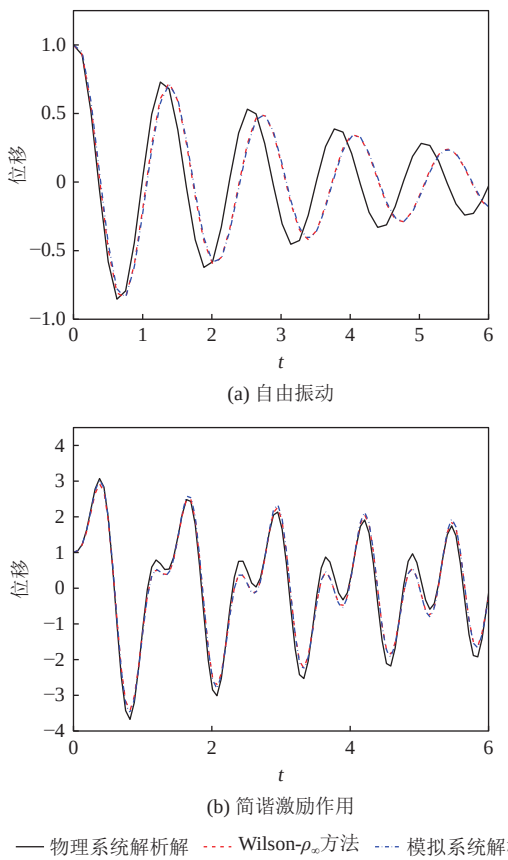


图 6　Wilson-ρ_∞方法位移和模拟系统位移解析解与物理系统位移解析解的比较

Fig. 6　Comparisons of Wilson-ρ_∞ algorithmic displacements and analytical displacements of analog system with physical system

经过计算可知, $\bar{c}_3=2.465\,5\times10^{-15}$, $\lambda_3=0.274\,6$。由图 6 可见, 方法结果和模拟系统解析解吻合, 但其与物理系统解析解之间存在明显的累计误差。

3　结　论

本文建立了 Wilson-ρ_∞方法和单自由度受迫振动系统的模拟系统。主要结论如下:

1) Wilson-ρ_∞方法的高频耗散程度可以由谱半径ρ_∞精确控制。

2) 由于时间积分方法的解可以看成是模拟系统的解析解, 因此可认为时间积分方法是一种解析方法。

3) 重新定义的幅值衰减率和周期延长率更加合理, 物理意义更加明确, 使累计幅值误差和累计相位误差的含义更加清楚。

4) 由于模拟系统稳态响应频率为激励频率且与谱半径无关, 稳态响应不存在累计幅值误差和累计相位误差。

对于其他时间积分方法, 只要已知其数值阻尼和频率, 同样可以构造模拟系统并求出解析解, 并且上述结论仍然成立。未来将进一步研究多自由度模拟系统的构造方法。

参考文献 (References)

[1] Bathe K J, Wilson E L. Numerical methods in finite element analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1976.

[2] 邢誉峰. 计算固体力学原理与方法[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019: 31-40.
Xing Y F. The principles and methods of computational solid mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2019: 31-40(in Chinese).

[3] Runge C. Ueber die numerische auflösung von differentialgleichungen[J]. Mathematische Annalen, 1895, 46(2): 167-178.

[4] Kutta W. Beitrag zur näherungsweisen Integration totaler differentialgleichungen[J]. Zeitschrift für Mathematik und Physik, 1901, 46(1): 435-453.

[5] Newmark N M. A method of computation for structural dynamics[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1959, 85(3): 67-94.

[6] Wilson E L, Farhoomand I, Bathe K J. Nonlinear dynamic analysis of complex structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1972, 1(3): 241-252.

[7] Hilber H M, Hughes T J R, Taylor R L. Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1977, 5(3): 283-292.

[8] Wood W L, Bossak M, Zienkiewicz O C. An alpha modification of Newmark's method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1980, 15(10): 1562-1566.

[9] Hoff C, Pahl P J. Development of an implicit method with numerical dissipation from a generalized single-step algorithm for structural dynamics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 67(3): 367-385.

[10] 邵慧萍, 蔡承文. 结构动力学方程数值积分的三参数算法[J]. 应用力学学报, 1988, 5(4): 76-81.
Shao H P, Cai C W. A three parameters algorithm for numerical integration of structural dynamic equations[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1988, 5(4): 76-81(in Chinese).

[11] Chung J, Hulbert G M. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalized-α

method[J]. Journal of Applied Mechanics, 1993, 60(2): 371-375.

[12] 邢誉峰, 李玉婷, 王雨竹. 具有可控数值阻尼的 Newmark-ρ_∞方法及模拟系统[J]. 力学与实践, 2025, 47(1): 195-200.
Xing Y F, Li Y T, Wang Y Z. Newmark-ρ_∞ method with controllable numerical damping and analog system[J]. Mechanics in Engineering, 2025, 47(1): 195-200(in Chinese).

[13] Bank R E, Coughran W M, Fichtner W, et al. Transient simulation of silicon devices and circuits[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 1985, 4(4): 436-451.

[14] Bathe K J, Baig M M I. On a composite implicit time integration procedure for nonlinear dynamics[J]. Computers & Structures, 2005, 83(31-32): 2513-2524.

[15] Chandra Y, Zhou Y, Stanciulescu I, et al. A robust composite time integration scheme for snap-through problems[J]. Computational Mechanics, 2015, 55(5): 1041-1056.

[16] Wen W B, Wei K, Lei H S, et al. A novel sub-step composite implicit time integration scheme for structural dynamics[J]. Computers & Structures, 2017, 182: 176-186.

[17] Xing Y F, Ji Y, Zhang H M. On the construction of a type of composite time integration methods[J]. Computers & Structures, 2019, 221: 157-178.

[18] Park K C. An improved stiffly stable method for direct integration of nonlinear structural dynamic equations[J]. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42(2): 464-470.

[19] Kuhl D, Crisfield M A. Energy-conserving and decaying algorithms in non-linear structural dynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5): 569-599.

[20] Belytschko T, Schoeberle D F. On the unconditional stability of an implicit algorithm for nonlinear structural dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42(4): 865-869.

[21] Zhang H M, Xing Y F, Ji Y. An energy-conserving and decaying time integration method for general nonlinear dynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2020, 121(5): 925-944.

[22] Houbolt J C. A recurrence matrix solution for the dynamic response of elastic aircraft[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1950, 17(9): 540-550.

[23] Ji Y, Xing Y F, Wiercigroch M. An unconditionally stable time integration method with controllable dissipation for second-order nonlinear dynamics[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 105(4): 3341-3358.

[24] Ji Y, Wu Y, Xing Y F. An accurate, controllably dissipative, unconditionally stable three-sub-step method for nonlinear dynamic analysis of structures[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, 23(12): 2350138.

[25] Xing Y F, Yao L, Ji Y. A solution strategy combining the mode superposition method and time integration methods for linear dynamic systems[J]. Acta Mechanica Sinica, 2022, 38(6): 521433.

[26] 邢誉峰, 张慧敏, 季奕. 动力学常微分方程的时间积分方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2022: 6-11.
Xing Y F, Zhang H M, Ji Y. Time integral methods for dynamic ordinary differential equations[M]. Beijing: Science Press, 2022: 6-11(in Chinese).

[27] Wang Y Z, Xue X D, Zhang T, et al. Overview and novel insights into implicit/explicit composite time integration type methods: fall under the RK: no ifs, ands, or buts[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30(6): 3891-3940.

[28] Zhang J. Optimal implicit single-step time integration methods with equivalence to the second-order-type linear multistep methods for structural dynamics: accuracy analysis based on an analytical framework[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024, 418: 116503.

[29] 邢誉峰, 季奕, 张慧敏. 时间积分方法的研究进展与挑战[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1692-1701.
Xing Y F, Ji Y, Zhang H M. Advances and challenges in time integration methods[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9): 1692-1701(in Chinese).

[30] 邢誉峰. 工程振动基础 [M]. 3 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2023: 18-24.
Xing Y F. The foundations of engineering vibrations[M]. 3rd ed. Beijing: Beihang University Press, 2023: 18-24(in Chinese).

[31] 邢誉峰, 郭静. 与结构动特性协同的自适应 Newmark 方法[J]. 力学学报, 2012, 44(5): 904-911.
Xing Y F, Guo J. A self-adaptive newmark method with parameters dependent upon structural dynamic characteristics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(5): 904-911(in Chinese).

[32] 邢誉峰, 杨蓉. 单步辛算法的相位误差分析及修正[J]. 力学学报, 2007, 39(5): 668-671.
Xing Y F, Yang R. Phase errors and their correction in symplectic implicit single-step algorithm[J]. Chinese Journal of Theoretical Applied Mechanics, 2007, 39(5): 668-671(in Chinese).

Wilson-ρ_∞ method and analytical solution of analog system

XING Yufeng[1,*], WANG Yuzhu[1], LI Yuting[1], ZHANG Huimin[2]

(1. Institute of Solid Mechanics, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The Wilson-ρ_∞ technique is formed by establishing a relationship between ρ_∞ and θ, as the high-frequency dissipation of the Wilson-θ method cannot be properly controlled by ρ_∞ (spectral radius at infinite frequency). The numerical performances of this approach are compared with those of the Generalized-α method. In the Wilson-ρ_∞ method, there are two different θ for a given ρ_∞. The characteristic roots of the Jacobi matrix corresponding to both θ are different, and the corresponding Wilson-ρ_∞ method has different numerical performances. A better θ is recommended according to the properties of the spectral radius. In addition, an analog system of a single degree-of-freedom forced vibration system is constructed with the dissipation and frequency of the Wilson-ρ_∞ method, and the initial conditions of which and the forces acting on the analog system are the same with those of the original system. It is evident that the steady state responses have no cumulative amplitude errors and phase errors, and the results of the Wilson-ρ_∞ method match the analytical solutions of the analog system.

Keywords: Wilson-θ method; analog system; amplitude decay; period elongation; analytical solution

Received: 2024-06-04; **Accepted**: 2024-08-01; **Published Online**: 2024-08-16 07:06

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240815.0943.002

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (12172023,12302044)

* **Corresponding author**. E-mail: xingyf@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0359

改进多层多级民机经济性修理级别分析模型

王毅强*，杨鑫
(中国民航大学 交通科学与工程学院，天津 300300)

摘 要：修理级别分析是民机运行支持分析中的一项重要内容，而民机部件的多层次性和实际维修场所的多个维修级别是民机维修保障分析的关键因素。现有的经济性修理级别分析模型在对分析项进行报废或转移决策时，存在上层父部件与其所属子部件成本重复累加的问题。基于此，通过研究父子部件之间的约束关系，引入总成本数据预处理矩阵，解决父子部件成本重复累加问题。在此基础上，对约束条件进行简化改进，并采用 LINGO18.0 软件的精确算法进行建模求解。结果表明：无论是两层两级模型还是三层三级模型，均能在较短时间内获得全局最优解，相对于启发式等近似算法，维修决策总成本可分别降低 37.9% 和 27.8%。所提模型及其求解算法可为民机维修设计及保障工作的开展提供决策支持。

关 键 词：修理级别分析；民机维修；经济性分析；维修成本；0-1 纯整数规划
中图分类号：V267
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2260-09

修理级别分析(level of repair analysis, LORA)主要用于分析产品维修决策的综合效益，是在与用户达成统一保障体系的基础上，帮助用户制定合理化维修解决方案的一种权衡分析技术[1]。LORA 主要解决 3 种问题：①哪些部件在故障时进行修理，哪些部件应丢弃报废；②上述故障件在维修网络的哪些位置进行修理和报废；③在上述位置部署哪些资源[2]，如需要维修、报废或转移部件所需的测试设备。

LORA 的概念首次出现在美国空军的 IRLA 分析技术中，通过逐个对分析项目的成本简单汇总对比，选出每个项目的最低成本维修方式，从而提高军用飞机的维修经济性和资源利用率[3]。美国国防部于 1993 年颁布了军用标准 MIT-STD-1390D，规定了 LORA 过程中的一般要求和工作描述[4]。2014 年，美军采用了国际自动机工程师学会发布的工业标准 AS1390[5]。国内在 1997 年也颁布了类似标准，即 GJB 2961—97，明确了 LORA 包括经济性和非经济性 2 类分析，对航空产品和其他军用产品提供了可参考的方法，确定了 LORA 基本原则[6]。

以上标准均未给出详细的经济性修理级别分析(economical level of repair analysis, ELORA)模型，针对 ELORA 模型，国外较有影响力的是 Barros、Saranga 和 Basten 分别提出的 3 种代表性模型。求解 ELORA 的第一代模型由 Barros 提出，该模型认为固定成本由处在同一个层次的所有部件共同承担，并假设丢弃和报废处理不会产生任何固定成本[7]。Saranga 和 Kumar 建立了一个与 Barros[7] 不同的整数规划模型，假设固定成本由每个部件独自承担，并采用遗传算法求解该模型[8]。Brick 等提出了一种更为具体的，即考虑固定设施选址问题的 LORA 混合整数规划模型[9]。随后，Basten 等通过使用分组部件共享固定成本的假设，解决了前两代 ELORA 模型固定成本处理无法统一兼容的问题[10]。显然，Basten 等[10] 的假设更符合现实情况，因为有

收稿日期：2024-05-29；录用日期：2024-06-21；网络出版时间：2024-07-05 18:07
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240705.1101.001
基金项目：国家自然科学基金 (U2033209)
*通信作者. E-mail：279351651@qq.com

引用格式：王毅强，杨鑫. 改进多层多级民机经济性修理级别分析模型 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2260-2268.
Wang Y Q，Yang X. Improvement of economical level of repair analysis model with multi-indenture and multi-echelon for civil aircraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2260-2268（in Chinese）.

些部件进行维修时所需的工具和支援设备是相同的, 完全可以认为这些部件分摊相同的固定成本。Basten 等用决策流的概念对模型进行了扩展, 从维修费用和维修效果等方面分别进行分析, 解决了决策结果图形化表示的问题[11-12]。之后, Basten 等将传统备件库存模型与 LORA 模型联合考虑进行优化决策, 进一步降低了维修成本[13]。Malyemez 等扩展了联合优化模型, 对最小成本和最大飞行时间进行分析, 并采用新型启发式算法求解[14]。Rawat 等将模块化概念与维修决策相结合进行分析, 并获得了最低全寿命周期成本[15]。国内, 薛陶等也提出了类似的决策流概念, 并在经济分析模型中考虑了飞机的原位维修特性[16]。贾宝惠等采用遗传禁忌搜索混合算法[17] 和二进制粒子群算法[18] 进行多层多级的 LORA 模型的维修成本优化。郭霖瀚[19] 和王瑞琦[20] 等将备件库存与 LORA 联合分析, 前者将维修时间引入传统的定量 LORA 中, 后者考虑多种故障模式, 都建立了多层多级联合优化模型。

虽然上述 ELORA 模型较好地处理了固定成本问题, 但在产品不同层次之间的部件与子部件可变成本与总成本处理方面建立的约束关系复杂, 特别是成本汇总计算时存在重复累加问题, 导致最终的决策结果不能完全达到最优成本效果。因此, 本文结合民机部件维修保障实际特点, 建立适用于多层多级的 ELORA 模型, 针对产品父子部件成本重复累加问题进行研究, 对两层两级模型的约束条件和成本数据进行改进以解决父子件成本重复问题, 并将改进的约束扩展到三层三级模型, 通过两层两级模型和三层三级模型的算例分析验证了模型的有效性与实用性。

1　民机维修策略

目前, 民机维修保障体系中部件结构层次、维修级别和维修方式灵活多变, 本节主要从 3 个层面介绍民机维修策略:

1) 根据部件产品结构层次, 可将民机产品分为外场可更换件(line replaceable unit, LRU)、车间可更换件(shop replaceable unit, SRU)、车间可更换子件(sub-shop replaceable unit, SSRU)等 3 个层次。

2) 维修场所的级别主要分为 3 级: 航线级、车间级、基地级。维修能力和维修任务复杂性随着航线级、车间级、基地级的顺序逐级提高。

部件同一项维修任务在不同维修级别执行的维修成本和维修效果也不同, 且部件的内部层次结构复杂, 存在父子件关系。因此, 根据不同的部件结构层次和维修级别进行 LORA 经济性分析是有必要的。

3) 目前的民用飞机维修活动中, 包括本位维修、移位维修、换件与不换件维修, 本文 ELORA 模型决策中主要有 3 种: 修理、报废和转移。

2　两层两级 ELORA 模型

2.1　基本假设

基于民机目前保障体系的特点, 基本假设如下:

1) LORA 分析项的结构分为 2 层时, 用 LRU、SRU 表示, 并通过有序数组 (i, j) 表示分析项层次结构间的从属关系; LORA 分析项的结构分为 3 层时, 用 LRU、SRU、SSRU 表示, 并通过有序数组 (i, j, k) 表示分析项层次结构间的从属关系。

2) 维修级别 e 分为 3 级: 航线级(e=1)、车间级(e=2)、基地级(e=3)。

3) 维修级别决策 c 包括 3 种选项: 修理(c=1)、报废(c=2)、转移(c=3)。

4) 分析项的分析过程从航线级、车间级、基地级的顺序逐级进行维修决策制定, 直至分析完成。

5) 分析项的维修仅能从维修能力较低的级别移向维修能力高的级别。

6) 分析项移动到维修能力较高的级别时, 要在较高维修级别选择一项维修决策。

2.2　维修成本类型

在民用飞机维修成本构成中, 主要包括可变成本与固定成本。与故障率和决策有关的费用为可变成本, 如图 1 所示。一次性投入为固定成本, 包括与决策相关的和与决策无关的, 如图 2 所示。

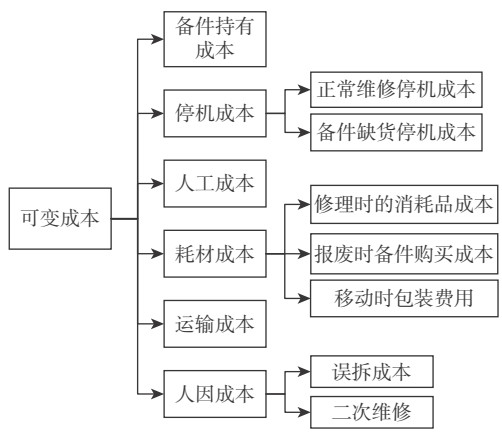


图 1　可变成本

Fig. 1　Variable cost

2.3　算例分析

2.3.1　维修成本预处理

ELORA 模型实际上是一个决策优化问题, 在现有的 ELORA 模型中, 当 LRU 采取报废或转移的维修决策时, 其中的子部件会被迫选择跟随父件

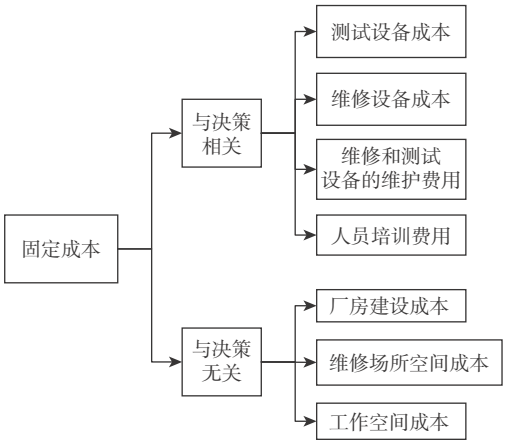


图2 固定成本

Fig. 2 Fixed cost

LRU的维修决策，通常会导致父子件成本重复累加的问题。本文通过引入决策变量和维修成本预处理矩阵解决父子件成本重复累加问题，实现维修成本总体最小化的决策效果，其中，决策变量$N_{e,c}(i,j)$为0-1变量，目标函数为求维修成本的最小值。

$$N_{e,c}(i,j)=\begin{cases}1 & \text{待分析项}(i,j)\text{在}e\text{级维修基地选择了决策}c\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

采用文献[8]的原始维修成本数据，利用式(2)将固定成本与可变成本结合形成总成本数据矩阵$\boldsymbol{M}_{e,c}$，其元素$M_{e,c}(i,j)$如表1所示。其中，$M_{e,c}(i,j)$为分析项(i,j)在e级选择决策c的总成本。

$$M_{e,c}(i,j)=C_{e,c}^{\mathrm{v}}(i,j)\lambda(i,j)+C_{e,c}^{\mathrm{f}}(i,j)\qquad\forall(i,j) \tag{2}$$

式中：$\lambda(i,j)$为分析项(i,j)每年的故障率；$C_{e,c}^{\mathrm{v}}(i,j)$为分析项$(i,j)$在$e$级选择决策$c$产生的可变成本；$C_{e,c}^{\mathrm{f}}(i,j)$为分析项$(i,j)$在$e$级选择决策$c$产生的固定成本。

对维修总成本数据$M_{e,c}(i,j)$进行预处理，令

$$W_{e,c}(i,0)=M_{e,c}(i,0)-\sum_{j=1}^{n}M_{e,c}(i,j)\qquad c\in\{2,3\} \tag{3}$$

$$W_{e,c}(i,j)=M_{e,c}(i,j) \tag{4}$$

式(3)采用父件成本减去下属所有子件成本，式(4)保证原子件成本不变，避免后期目标函数汇总累加时父子件的成本重复累加问题。得到维修成本预处理矩阵$\boldsymbol{W}_{e,c}$，其元素$W_{e,c}(i,j)$如表2所示。

经过上述预处理，目标函数简化为

$$\min\sum_{(i,j)}\sum_{e}\sum_{c}W_{e,c}(i,j)N_{e,c}(i,j)\qquad\forall(i,j) \tag{5}$$

2.3.2 约束条件

以往模型都是从分析项(i,j)基本单元出发建立约束，本节针对上述两层两级模型，在成本数据预处理的基础上重新建立约束条件，大幅减少了约束复杂性，同时避免成本重复累加问题。

表1 维修总成本数据

Table 1 Total maintenance cost data

(i,j)	$M_{1,1}$	$M_{1,2}$	$M_{1,3}$	$M_{2,1}$	$M_{2,2}$
(1,0)	194.00	245.00	354.40	777.20	195.50
(1,1)	726.80	80.30	350.67	740.10	85.43
(1,2)	717.20	45.80	350.43	734.62	50.84
(2,0)	1 164.00	495.00	207.38	1 322.20	124.20
(2,1)	1 020.40	153.00	51.36	1 167.00	68.07
(2,2)	1 014.50	126.40	51.16	1 161.60	45.66
(2,3)	1 005.70	106.60	50.76	1 153.80	41.64
(3,0)	191.00	213.00	902.46	1 295.10	122.82
(3,1)	103.20	36.00	900.12	1 252.00	46.01
(3,2)	131.10	48.50	900.37	1 261.10	58.54
(4,0)	379.10	263.00	1 003.98	2 089.05	248.95
(4,1)	208.10	96.40	1 001.62	1 906.08	72.81
(4,2)	204.95	53.80	1 000.66	1 903.96	59.93
(4,3)	213.00	49.60	1 000.52	1 910.40	55.65
(5,0)	243.40	282.40	606.51	901.90	299.25
(5,1)	254.50	131.00	602.18	793.60	71.71
(5,2)	160.80	43.60	601.08	758.10	44.20
(6,0)	2 789.50	387.40	209.65	2 990.27	146.50
(6,1)	2 533.00	119.20	52.64	2 729.70	65.84
(6,2)	2 550.80	116.20	53.81	2 738.10	56.51
(7,0)	2 152.80	628.00	617.64	2 367.50	631.47
(7,1)	1 825.20	77.80	603.15	2 018.90	80.05
(7,2)	1 807.40	54.80	601.48	2 007.03	56.99
(7,3)	1 811.10	52.95	601.11	2 011.10	54.99
(7,4)	1 813.75	53.75	601.10	2 011.00	55.75
(7,5)	1 804.00	48.00	600.40	2 004.00	50.08
(7,6)	1 804.65	52.40	600.62	2 003.10	54.46
(8,0)	2 037.50	175.00	52.25	2 137.88	95.00
(8,1)	2 037.50	121.00	42.25	2 137.88	67.50
(9,0)	1 218.00	102.00	201.80	1 271.60	104.80
(9,1)	1 218.00	102.00	401.80	1 271.60	104.80
(10,0)	1 526.40	86.00	352.64	1 629.70	88.00

1）约束1。维修能力的限制。

$$\sum_{c=1}^{3}N_{1,c}(i,j)=1\qquad\forall(i,j) \tag{6}$$

式(6)保证分析项必须在第一维修级别选择一项维修决策。

2）约束2。不同维修级别间决策约束。

$$N_{1,3}(i,j)=N_{2,1}(i,j)+N_{2,2}(i,j)\qquad\forall(i,j) \tag{7}$$

式(7)保证分析项如果在第一维修级别选择了转移决策，必须在第二维修级别选择一项维修决

表 2　维修成本预处理数据

Table 2　Maintenance cost preprocessing data

(i,j)	$W_{1,1}$	$W_{1,2}$	$W_{1,3}$	$W_{2,1}$	$W_{2,2}$
(1,0)	194.00	118.90	−346.70	777.20	59.22
(1,1)	726.80	80.30	350.67	740.10	85.43
(1,2)	717.20	45.80	350.43	734.62	50.84
(2,0)	1 164.00	109.00	54.10	1 322.20	−31.16
(2,1)	1 020.40	153.00	51.36	1 167.00	68.07
(2,2)	1 014.50	126.40	51.16	1 161.60	45.66
(2,3)	1 005.70	106.60	50.76	1 153.80	41.64
(3,0)	191.00	128.50	−898.03	1 295.10	18.28
(3,1)	103.20	36.00	900.12	1 252.00	46.01
(3,2)	131.10	48.50	900.37	1 261.10	58.54
(4,0)	379.10	63.20	−1 998.82	2 089.05	60.56
(4,1)	208.10	96.40	1 001.62	1 906.08	72.81
(4,2)	204.95	53.80	1 000.66	1 903.96	59.93
(4,3)	213.00	49.60	1 000.52	1 910.40	55.65
(5,0)	243.40	107.80	−596.75	901.90	183.34
(5,1)	254.50	131.00	602.18	793.60	71.71
(5,2)	160.80	43.60	601.08	758.10	44.20
(6,0)	2 789.50	152.00	103.20	2 990.27	24.15
(6,1)	2 533.00	119.20	52.64	2 729.70	65.84
(6,2)	2 550.80	116.20	53.81	2 738.10	56.51
(7,0)	2 152.80	288.30	−2 990.22	2 367.50	279.15
(7,1)	1 825.20	77.80	603.15	2 018.90	80.05
(7,2)	1 807.40	54.80	601.48	2 007.03	56.99
(7,3)	1 811.10	52.95	601.11	2 011.10	54.99
(7,4)	1 813.75	53.75	601.10	2 011.00	55.75
(7,5)	1 804.00	48.00	600.40	2 004.00	50.08
(7,6)	1 804.65	52.40	600.62	2 003.10	54.46
(8,0)	2 037.50	54.00	10.00	2 137.88	27.50
(8,1)	2 037.50	121.00	42.25	2 137.88	67.50
(9,0)	1 218.00	0.00	−200.00	1 271.60	0.00
(9,1)	1 218.00	102.00	401.80	1 271.60	104.80
(10,0)	1 526.40	86.00	352.64	1 629.70	88.00

策, 即在低维修层级选择转移到高维修层级维修, 必须选择一项维修决策, 这样更加符合现实情况。

3) 约束 3。父子件维修决策约束。

$$N_{e,c}(i,0) \leqslant N_{e,c}(i,j) \qquad c \in \{2,3\} \tag{8}$$

式(8)确保如果上层父件进行报废或转移的话, 其中的子件也需一起跟随父件报废或转移。

2.3.3　模型求解

本文使用 LINGO18.0 软件对模型进行建模求解。上述两层两级的 ELORA 模型求解结果如表 3 所示。

表 3 中, 分析项(1,1)的决策结果表示: (1,1)跟随父件(1,0)在第一维修级别选择了报废维修决策; (6,1)的维修决策结果表示: (6,1)跟随父件(6,0)在

表 3　维修决策结果

Table 3　Results of maintenance decisions

(i,j)	e=1			e=2	
	c=1	c=2	c=3	c=1	c=2
(1,0)	0	1	0	0	0
(1,1)	0	1	0	0	0
(1,2)	0	1	0	0	0
(2,0)	0	0	1	0	1
(2,1)	0	0	1	0	1
(2,2)	0	0	1	0	1
(2,3)	0	0	1	0	1
(3,0)	0	1	0	0	0
(3,1)	0	1	0	0	0
(3,2)	0	1	0	0	0
(4,0)	0	1	0	0	0
(4,1)	0	1	0	0	0
(4,2)	0	1	0	0	0
(4,3)	0	1	0	0	0
(5,0)	0	1	0	0	0
(5,1)	0	1	0	0	0
(5,2)	0	1	0	0	0
(6,0)	0	0	1	0	1
(6,1)	0	0	1	0	1
(6,2)	0	0	1	0	1
(7,0)	0	1	0	0	0
(7,1)	0	1	0	0	0
(7,2)	0	1	0	0	0
(7,3)	0	1	0	0	0
(7,4)	0	1	0	0	0
(7,5)	0	1	0	0	0
(7,6)	0	1	0	0	0
(8,0)	0	0	1	0	1
(8,1)	0	0	1	0	1
(9,0)	0	1	0	0	0
(9,1)	0	1	0	0	0
(10,0)	0	1	0	0	0

第一维修级别选择了转移维修决策, 并在第二维修级别选择了报废维修决策。

通过与文献 [8] 决策结果对比可知, (1,0)和(3,0)的决策结果与文献 [8] 不同, 文献 [8] 2 个分析项都是在第一维修级别选择了修理决策, 其中的子件选择报废决策, 导致维修成本的增加。本文决策结果(1,0)和(3,0)都是在第一维修级别选择报废决策, 因父子件之间的关系, 直接节省了子件的报废成本。

表 4 为不同算法的优化结果对比情况。可以看出, 本文算法速度更快、更有效且总成本更低, 降低幅度约 37.9%。由于该模型属于 0-1 纯整数规划模型, 相比于以往文献采用的遗传算法等启发式近

表4 不同算法结果

Table 4 Results of different algorithms

算法	计算结果/元	计算时间/s
PSO	4 277.27	30
IA-PSO	4 277.27	32
GATS	4 216.27	21
Branch and Bound(含重复成本)	4 216.27	0.05
Branch and Bound(扣除重复成本)	2 654.38	1.29

似算法，本文采用的是纯整数规划的分支定界精确算法，无论迭代次数还是计算时间都优于近似算法，并且能保证获得全局最优解。

3 三层三级 ELORA 模型

上述两层两级模型的约束条件和求解方法可进一步扩展到三层三级模型。

3.1 基本假设

三层三级模型通过引入决策变量$N_{e,c}(i,j,k)$和成本预处理矩阵$\boldsymbol{W}_{e,c}$，实现维修成本决策，其中，决策变量都为0-1变量，目标函数为求维修成本的最小值。因为多了一个产品结构层级，因此约束条件有所改变。

$$N_{e,c}(i,j,k)=\begin{cases}1 & \text{待分析项}(i,j,k)\text{在}e\text{级维修基地选择了决策}c\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{9}$$

目标函数为

$$\min\sum_{(i,j,k)}\sum_{e}\sum_{c}(C^{\mathrm{v}}_{e,c}(i,j,k)\lambda(i,j,k)+C^{\mathrm{f}}_{e,c}(i,j,k))N_{e,c}(i,j,k)\quad\forall(i,j,k) \tag{10}$$

式中：$\lambda(i,j,k)$为分析项(i,j,k)每年的故障率；$C^{\mathrm{v}}_{e,c}(i,j,k)$为分析项$(i,j,k)$在$e$级选择决策$c$产生的可变成本；$C^{\mathrm{f}}_{e,c}(i,j,k)$为分析项$(i,j,k)$在$e$级选择决策$c$产生的固定成本。

模型约束条件如下：

1）约束1。维修能力的限制。

$$\sum_{c=2}^{3}N_{1,c}(i,j,k)=1\quad\forall(i,j,k) \tag{11}$$

式(11)保证分析项必须在航线级选择一项维修决策。

2）约束2。不同维修级别间决策约束。

$$N_{1,3}(i,j,k)=N_{2,1}(i,j,k)+N_{2,2}(i,j,k)+N_{2,3}(i,j,k)\quad\forall(i,j,k) \tag{12}$$

$$N_{2,3}(i,j,k)=N_{3,1}(i,j,k)+N_{3,2}(i,j,k)\quad\forall(i,j,k) \tag{13}$$

式(12)、式(13)确保分析项如果在某一维修级别选择了转移决策，必须在其下一维修级别选择一项维修决策。

3）约束3。父子件维修决策约束。

$$N_{e,c}(i,0,0)\leqslant N_{e,c}(i,j,0)\quad c=\{2,3\} \tag{14}$$

$$N_{e,c}(i,j,0)\leqslant N_{e,c}(i,j,k)\quad c=\{2,3\} \tag{15}$$

式(14)、式(15)确保如果父件进行丢弃或者转移的话，其中的子件也需一起丢弃或者转移。

3.2 算例分析

3.2.1 初始决策结果

采用文献[21]的三层三级模型中分析项不同维修级别下的原始维修成本数据，由于文献[21]决策结果与文献本身所建立的约束条件不符合，对原文决策结果按照约束条件进行补全，将决策结果中部分为0的地方改为1，具体的补全结果如表5所示。

将补全后的决策结果代入目标函数中，得到的维修成本结果为5 209.85元，可以看出，按照文献[21]的约束条件和成本数据进行决策，得到的维修成本较高，说明该模型还有改进之处。

3.2.2 未考虑成本重复累加时的决策

根据本节建立的约束条件和目标函数，采用LINGO18.0分支定界精确算法，最终得到的决策结果如表6所示。

决策结果的维修成本为4 892.77元，发现表6与表5的决策结果相差较大，即采用精确算法求解后维修成本下降了6%，而且该模型尚未考虑父子件成本重复累加的问题，因此，将重复成本扣除后继续进行优化。

3.2.3 考虑成本重复累加时的决策

由于表6决策结果没有考虑父子件成本重复累加问题，可能导致决策结果成本数据偏高，与两层两级ELORA模型类似，进行成本数据预处理。

1）维修总成本数据采用式(16)：

$$M_{e,c}(i,j,k)=C^{\mathrm{v}}_{e,c}(i,j,k)\lambda(i,j,k)+C^{\mathrm{f}}_{e,c}(i,j,k)\quad\forall(i,j,k) \tag{16}$$

式中：$M_{e,c}(i,j,k)$为待分析项(i,j,k)在e级选择决策c的总成本。

2）父子件成本重复累加问题通过式(17)和式(18)解决。

$$W_{e,c}(i,0,0)=M_{e,c}(i,0,0)-\sum_{j=1}^{n}M_{e,c}(i,j,0)\quad c=\{2,3\} \tag{17}$$

$$W_{e,c}(i,j,0)=M_{e,c}(i,j,0)-\sum_{k=1}^{n}M_{e,c}(i,j,k)\quad c=\{2,3\} \tag{18}$$

$$W_{e,c}(i,j,k)=M_{e,c}(i,j,k) \tag{19}$$

表 5　初始决策结果

Table 5　Initial decision results

(i,j,k)	e=1		e=2			e=3	
	c=2	c=3	c=1	c=2	c=3	c=1	c=2
(1,0,0)	0	1	0	1	0	0	0
(1,1,0)	0	1	0	1	0	0	0
(1,1,1)	0	1	0	1	0	0	0
(1,1,2)	0	1	0	1	0	0	0
(1,2,0)	0	1	0	1	0	0	0
(1,2,1)	0	1	0	1	0	0	0
(2,0,0)	0	1	1	0	0	0	0
(2,1,0)	0	1	1	0	0	0	0
(2,1,1)	0	1	1	0	0	0	0
(2,1,2)	0	1	0	1	0	0	0
(2,1,3)	0	1	0	1	0	0	0
(2,2,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,0,0)	0	1	1	0	0	0	0
(3,1,0)	0	1	1	0	0	0	0
(3,1,1)	0	1	1	0	0	0	0
(3,1,2)	0	1	1	0	0	0	0
(3,2,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,2,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,3,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,3,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,4,0)	0	1	1	0	0	0	0
(3,4,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,4,2)	0	1	1	0	0	0	0
(3,4,3)	0	1	1	0	0	0	0
(3,5,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,5,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,5,2)	0	1	0	1	0	0	0
(3,6,0)	0	1	1	0	0	0	0
(3,7,0)	0	1	0	1	0	0	0
(4,0,0)	0	1	0	0	1	0	1
(4,1,0)	0	1	0	0	1	0	1
(5,0,0)	1	0	0	0	0	0	0

式中: $W_{e,c}(i,j,k)$为待分析项(i,j,k)在e级选择决策c的预处理成本。

三层三级模型的情况下, 在进行报废和转移维修决策时, 分析项 $(i,0,0)$ 即 LRU 不能直接减去其下所有子件、孙件(SRU、SSRU)的成本, 否则孙件 SSRU 的成本将多减一次。因此, 需要每个部件的成本减去自己的直属子件成本即可, 即 LRU 减去所属的 SRU 的成本, SRU 减去所属的 SSRU 的成本, 以保证 SSRU 的成本只减去 1 次。

如图 3 所示, LRU 包含 2 个子件即 SRU1 和 SRU2, 每个 SRU 包含 2 个子件即 SSRU1 和 SSRU2。

表 6　未考虑成本重复累加时的决策结果

Table 6　Decision results without considering repeated cost accumulation

(i,j,k)	e=1		e=2			e=3	
	c=2	c=3	c=1	c=2	c=3	c=1	c=2
(1,0,0)	1	0	0	0	0	0	0
(1,1,0)	1	0	0	0	0	0	0
(1,1,1)	1	0	0	0	0	0	0
(1,1,2)	1	0	0	0	0	0	0
(1,2,0)	1	0	0	0	0	0	0
(1,2,1)	1	0	0	0	0	0	0
(2,0,0)	1	0	0	0	0	0	0
(2,1,0)	1	0	0	0	0	0	0
(2,1,1)	1	0	0	0	0	0	0
(2,1,2)	1	0	0	0	0	0	0
(2,1,3)	1	0	0	0	0	0	0
(2,2,0)	1	0	0	0	0	0	0
(3,0,0)	0	1	1	0	0	0	0
(3,1,0)	0	1	1	0	0	0	0
(3,1,1)	0	1	1	0	0	0	0
(3,1,2)	0	1	1	0	0	0	0
(3,2,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,2,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,3,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,3,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,4,0)	0	1	1	0	0	0	0
(3,4,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,4,2)	0	1	1	0	0	0	0
(3,4,3)	0	1	1	0	0	0	0
(3,5,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,5,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,5,2)	0	1	0	1	0	0	0
(3,6,0)	0	1	1	0	0	0	0
(3,7,0)	0	1	0	1	0	0	0
(4,0,0)	1	0	0	0	0	0	0
(4,1,0)	1	0	0	0	0	0	0
(5,0,0)	1	0	0	0	0	0	0

分别用L、S、S_s代表报废或转移时的维修成本。

计算成本时, 针对转移和报废维修决策的目标函数为

$$L+S_1+S_2+S_{s11}+S_{s12}+S_{s21}+S_{s22} \tag{20}$$

此种情况下, 在转移和报废的决策时, 所有子件(SRU 和 SSRU)的成本属于重复成本, 如果直接汇总相加, 则会存在父子件成本重复问题。

对成本数据进行预处理, 即式(17)和式(18)后, 针对转移和报废决策的目标函数为

$$L-S_1-S_2+S_1-S_{s11}-S_{s12}+S_2-S_{s21}-S_{s22}+S_{s11}+S_{s12}+S_{s21}+S_{s22}=L \tag{21}$$

此种情况下, 在转移和报废的决策时, 子件或孙件的成本得以消除, 即不存在父子件成本重复累

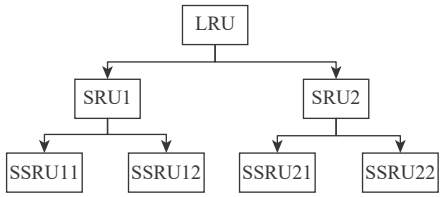


图3 LRU内部子件结构

Fig. 3 Internal subcomponent structure of LRU

加情况。

3）经过成本预处理后的总体目标函数为

$$\min \sum_{(i,j,k)} \sum_{e} \sum_{c} W_{e,c}(i,j,k) N_{e,c}(i,j,k) \quad \forall (i,j,k) \qquad (22)$$

决策结果如表7所示。最终决策结果表明成本优化为3 763.61元，相比于原始决策结果，成本值降低了约27.8%。

表7 考虑成本重复累加时的决策结果

Table 7 Results of maintenance decisions taking into account repeated accumulation of costs

(i,j,k)	e=1		e=2			e=3	
	c=2	c=3	c=1	c=2	c=3	c=1	c=2
(1,0,0)	0	1	0	1	0	0	0
(1,1,0)	0	1	0	1	0	0	0
(1,1,1)	0	1	0	1	0	0	0
(1,1,2)	0	1	0	1	0	0	0
(1,2,0)	0	1	0	1	0	0	0
(1,2,1)	0	1	0	1	0	0	0
(2,0,0)	0	1	0	1	0	0	0
(2,1,0)	0	1	0	1	0	0	0
(2,1,1)	0	1	0	1	0	0	0
(2,1,2)	0	1	0	1	0	0	0
(2,1,3)	0	1	0	1	0	0	0
(2,2,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,0,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,1,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,1,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,1,2)	0	1	0	1	0	0	0
(3,2,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,2,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,3,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,3,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,4,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,4,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,4,2)	0	1	0	1	0	0	0
(3,4,3)	0	1	0	1	0	0	0
(3,5,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,5,1)	0	1	0	1	0	0	0
(3,5,2)	0	1	0	1	0	0	0
(3,6,0)	0	1	0	1	0	0	0
(3,7,0)	0	1	0	1	0	0	0
(4,0,0)	0	1	0	0	1	0	1
(4,1,0)	0	1	0	0	1	0	1
(5,0,0)	1	0	0	0	0	0	0

通过表6和表7的对比发现，当父子件成本重复问题解决后，大多部件会在航线级选择转移决策，之后在车间级选择了报废决策。但也有例外，如(4,0,0)和(4,1,0)之前都是在航线级选择了报废决策，但当扣除重复成本后，(4,1,0)跟随(4,0,0)在航线级选择转移决策，在车间选择了继续转移，最终在基地级选择了报废决策。可以看出，在解决重复成本问题后，多数部件的决策结果会出现较大变动，从倾向于航线报废到倾向于在航线级选择转移决策，这更符合现实情况。

4 结 论

1）本文模型充分考虑了产品不同层次父子部件之间的隶属关系，通过对维修总成本数据的预处理，解决了多层多级民机维修体系中因层级关系复杂引起的父子件成本重复累加问题。

2）针对成本预处理后的数据矩阵，建立更为简单的约束条件，以表明不同维修级别与产品层次之间约束关系，通过纯整数规划的精确算法求解，最终在更短时间内达到全局最优解，对于本文所建立的二层二级模型和三层三级模型，总成本降低幅度分别可达37.9%和27.8%。

3）通过对三层三级模型扣除父子部件重复成本及对约束关系简化后，维修决策结果表明，多数部件的决策结果会出现较大变动，从倾向于航线报废到倾向于在航线级选择转移至下级，避免了维修资源的浪费，算例分析结果验证了模型及求解算法的高效性，具有一定的工程实际意义。

参考文献（References）

[1] Aerospace, Security and Defence Industries Association of Europe. International procedure specification for logistics support analysis (LSA): S3000L[S]. Brussels: Aerospace, Security and Defence Industries Association of Europe, 2010.

[2] Biçakci İ, Tansel Y, Karasakal E, et al. A new multi echelon repair network model with multiple upstream locations for level of repair analysis problem[J]. Defence Science Journal, 2021, 71(6): 762-771.

[3] Lucas C M. Level of repair analysis for the enhancement of maintenance resources in vessel life cycle sustainment[D]. Washington, D. C. : The George Washington University, 2018: 2038-2043.

[4] US Department of Defense. Level of repair analysis: MIL-STD-1390D[S]. Washington, D. C. : US Department of Defense, 1993.

[5] SAE. Level of repair analysis: AS1390[S]. Warrendale: SAE International, 2014.

[6] 国防科学技术工业委员会. 修理级别分析: GJB 2961—97[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1997.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Level of repair analysis: GJB 2961—97[S]. Beijing: Arma-

ment Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1997(in Chinese).

[7] Barros L L. The optimization of repair decision using life-cycle cost Parameters[J]. IMA Journal of Management Mathematics, 1998, 9(4): 403-413.

[8] Saranga H, Kumar U D. Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms: level of repair analysis[J]. Annals of Operations Research, 2006, 143(1): 91-106.

[9] Brick E S, Uchoa E. A facility location and installation of resources model for level of repair analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(2): 479-486.

[10] Basten R J I, Schutten J M J, Van Der Heijden M C. An efficient model formulation for level of repair analysis[J]. Annals of Operations Research, 2009, 172(1): 119-142.

[11] Basten R J I, Van Der Heijden M C, Schutten J M J. A minimum cost flow model for level of repair analysis[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 133(1): 233-242.

[12] Basten R J I, Van Der Heijden M C, Schutten J M J. Practical extensions to a minimum cost flow model for level of repair analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 211(2): 333-342.

[13] Basten R J I, Van Der Heijden M C, Schutten J M J. Joint optimization of level of repair analysis and spare parts stocks[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 222(3): 474-483.

[14] Malyemez C, Baykoç Ö F. Multi-objective optimisation of spare parts allocation and level of repair analysis in performance-based logistics[J]. The Aeronautical Journal, 2022, 126(1301): 1210-1221.

[15] Rawat M, Lad B K, Sharma A. Simulation-based joint optimization of fleet system modularity and level of repair decisions considering different failure rates of components[J]. Grey Systems: Theory and Application, 2020, 10(3): 377-390.

[16] 薛陶, 冯蕴雯, 薛小锋, 等. 一种飞机修理级别经济性分析模型[J]. 航空学报, 2013, 34(1): 97-103.
Xue T, Feng Y W, Xue X F, et al. An aircraft economic evaluation model for level of repair analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(1): 97-103(in Chinese).

[17] 贾宝惠, 周帆. 基于遗传禁忌搜索混合算法的修理级别问题研究[J]. 机械工程与自动化, 2015, 44(6): 11-13.
Jia B H, Zhou F. Study on level of repair analysis based on hybrid genetic-tabu search algorithm[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015, 44(6): 11-13(in Chinese).

[18] 贾宝惠, 邓婉怡, 王毅强. 三层三级民机修理级别经济性分析模型的改进[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 323468.
Jia B H, Deng W Y, Wang Y Q. Improvement of economical analysis model with three-indenture and threeechelon for civil aircraft repair level[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 323468(in Chinese).

[19] Guo L H, Fan J J, Wen M L, et al. Joint optimization of LORA and spares stocks considering corrective maintenance time[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(1): 85-95.

[20] Wang R Q, Chen G Y, Wu J, et al. Joint optimization method of spare parts stocks and level of repair analysis considering the multiple failure modes[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7254.

[21] 吴昊, 左洪福, 孙伟. 一种新的民用飞机修理级别优化模型[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 247-253.
Wu H, Zuo H F, Sun W. A new level of repair analysis optimization model for civil aircraft maintenance[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 247-253(in Chinese).

Improvement of economical level of repair analysis model with multi-indenture and multi-echelon for civil aircraft

WANG Yiqiang*, YANG Xin

(College of Transportation Science & Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The multi-indenture characteristics of civil aircraft components and the multi-echelon maintenance levels in the actual repair sites are the key factors in the analysis of civil aircraft maintenance support. Therefore, level of repair analysis is an important component in carrying out civil aircraft operation support activities. Existing economic models for level of repair analysis have the problem of repeated accumulation of costs between upper-level parent components and their subordinate child components when making decisions on discarded or moved items. In this paper, the constraint relationship between parent and child parts is studied, and the total cost data preprocessing, matrix is introduced to solve the problem of repeated accumulation of costs of parent and child parts. Based on the cost data preprocessing matrix the constraints are simplified and improved, and the exact algorithm of the LINGO18.0 software is used to model and solve the problem. The findings demonstrate that, in comparison to heuristics and other approximate algorithms, the model and its solution algorithms suggested in this paper can support decision-making for the development of the maintenance design and support of the civil aircraft. Whether it is a two-indenture and two-echelon model or a three-indenture and three-echelon model, the global optimal solution can be obtained in a shorter amount of time, and the maintenance decision-making cost can be reduced by 37.9% and 27.8% separately.

Keywords: level of repair analysis; civil aircraft maintenance; economical analysis; maintenance cost; 0-1 pure integer programming

Received: 2024-05-29; **Accepted**: 2024-06-21; **Published Online**: 2024-07-05 18:07

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240705.1101.001

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U2033209)

* **Corresponding author**. E-mail: 279351651@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0318

融合双重表情符号注意力机制的文本情感分类

陈可嘉[1]，夏瑞东[1]，林鸿熙[2,*]

(1. 福州大学 经济与管理学院，福州 350108；2. 莆田学院 商学院，莆田 351100)

摘 要：针对表情符号与文本数据结合时可能改变原语义，且其与文本数据相互作用机制尚未被充分探讨的问题，提出融合双重表情符号注意力机制的文本情感分类。使用BERT预训练模型获得文本的动态词向量表示；构建CNN-BiGRU双通道模型分别进行局部特征和全局特征提取；使用Emoji2vec模型获取表情符号向量表示，并构建双重表情符号注意力机制，分别从局部级和全局级表情符号注意力机制层面加强表情符号与文本数据结合后的关键信息；将输出的特征向量融合，进行情感分类。为验证所提模型的有效性，设置对比实验及消融实验，分别在Emoji-phone数据集和EmojifyData数据集上进行情感分类训练，结果表明：所提模型在准确率上相比于RoBERTa-3xBiGRU模型分别提升了0.017 6和0.016 6。

关 键 词：情感分类；表情符号；双通道模型；BERT；注意力机制
中图分类号：TP391
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2269-12

随着信息化的不断发展，各种平台上都会出现不同的文本数据。例如，在各种电商平台中，存在消费者对于不同产品使用后的体验评论；在社交平台中，存在不同用户对于各种事件的看法信息。情感分类是指将文本划分成积极、消极2种或多种类别，其是情感分析技术的核心，根据文本包含的情感信息及表达含义来判断文本的情感倾向。因此，对文本数据进行情感分类，于电商企业而言，可以了解消费者对于产品的满意度，于舆情监控方面，可以了解用户对于不同事件的真实看法。

目前，无论在电商平台还是社交平台中，用户可以输入文字，也可以将官方平台提供的表情符号插入文字中。表情符号是用户表达情感的一种方式，其对文本的情感表达会有重要的影响[1]。因此，在训练文本数据时，可以应用表情符号的相关重要信息。为研究表情符号结合文本数据后对于情感分类的影响，本文提出了一个考虑表情符号的情感分类模型，结合Emoji2vec模型获取表情符号的向量表示，运用双重表情符号注意力机制加强表情符号与文本数据的关键信息。

1 相关研究

深度学习及相关技术是目前针对情感分类任务的重要研究方法，其可以从大量的特征中训练出精确的模型，从而确定文本数据的分类结果[2]。常用的深度学习模型包括卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和递归神经网络(recursive neural network, RNN)。Liu[3]在进行文本情感分类时，通过带标签的训练集训练CNN模型，以此来捕捉文本的语义特征；RNN可以获取文本之间存在的长期依赖关系，但其在处理长序列数据时，可能会出现梯度爆炸和梯度消失现象。Xiao等[4]使用了RNN的变种，即双向长短期记忆(bidirectional long short-term memory, BiLSTM)网络，其特征提取

收稿日期：2024-05-14；**录用日期**：2024-07-05；**网络出版时间**：2024-08-28 12:52
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240827.1425.003
基金项目：国家自然科学基金(72374030)；福建省财政厅专项资金(0300-83022110)
*通信作者. E-mail：ptulhx@163.com

引用格式：陈可嘉，夏瑞东，林鸿熙. 融合双重表情符号注意力机制的文本情感分类[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2269-2280.
Chen K J，Xia R D，Lin H X. Textual sentiment classification incorporating dual emoji attention mechanisms[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2269-2280 (in Chinese).

采用LSTM神经网络结构，分别通过正序和逆序2种方式对输入序列进行处理，以此进行情感分析任务。在此基础上，作为BiLSTM的优化结构，双向门控循环单元[5] (bidirectional gating recurrent unit, BiGRU)在保持原有效果的同时，使结构更简单。同时，注意力机制在文本情感分类中得到了广泛关注[6]，其可以提高模型对重要语义信息的关注。孙红和陈强越[7]使用BERT训练词向量作为嵌入层，采用BiGRU模型提取上下文特征，并使用注意力机制将重要信息进行突出，从而完成情感分类；Zhang等[8]提出了一种融合句法、语义和知识的图注意力网络方面情感分类模型，考虑了重塑的句法依赖关系，使用多头自注意力机制捕获上下文的语义信息。

在此基础上，为更有效地提取文本数据中的全局和局部特征信息，有学者研究了双通道神经网络结合注意力机制在情感分类任务中的作用。Jia等[9]将BERT与多个特征提取深度学习模型（如TextCNN、BiLSTM和BiGRU）相结合，并使用注意力机制来增强情感信息；程艳等[10]结合CNN和BiGRU模型形成双通道对文本进行特征提取，再通过双重注意力机制将焦点集中在情感极性分类中的关键词汇上；Qiu等[11]结合CNN和BiGRU模型进行文本特征提取，再通过多头注意力机制突出重要情感内容以进行情感分类；Bao等[12]在BERT训练词向量的基础上结合CNN和BiGRU-Attention双通道进行情感分类；Yan等[13]提出一种注意力并行双通道深度学习混合模型，使用BERT提取语义特征和训练文本向量表示，在CNN和BiLSTM模型中分别引入注意力机制，形成双通道模型提取文本语义特征，从而丰富词义，提高分类水平。以上模型相比于单通道模型均取得了较好的实验结果，可以看出，结合注意力机制的双通道神经网络相比于单一通道模型可以更好地进行情感分类任务。

对于文本数据中的表情符号，不同学者将表情符号引入情感分类任务时采用不同的处理方式。陈黎等[14]提出考虑表情符号图像特征的研究方法，将表情符号的图像嵌入表达融入到文本特征中，利用多层感知机进行情感分类；Jiang等[15]提出了表情空间模型 (emoticon space model, ESM)，将文本中存在的表情符号及所有词映射到向量空间中，再使用支持向量机模型进行情感分类任务；赵晓芳和金志刚[16]利用ESM获取文本词向量及表情符号向量，输入基于注意力机制的CNN和RNN模型来获得语义特征，从而计算情感倾向；Su等[17]将文本中的单词及表情符号分别转换为分布式表示向量，再通过CNN获得最终的语义向量。为增强对情感语义的捕捉能力，张仰森等[18]构建出一个情感符号库，包括表情符号、情感词、程度副词、否定词等，利用BiLSTM模型、全连接网络及注意力机制分别对文本和情感符号库进行特征提取，得到相应语义表示，从而进行情感分类任务；何炎祥等[19]提出了情感语义的增强多通道卷积神经网络 (multi-channel convolution neural network, MCNN)，将表情符号空间矩阵与词向量相乘，将普通词向量映射至情感空间，再与MCNN结合以构建情感表示矩阵。

然而，目前考虑表情符号作用的情感分类模型中主要存在如下问题：①表情符号常见的处理方式是与文本一同输入至词嵌入层得到向量表示，较少考虑文本与表情符号都需要根据其不同特性来获取词向量表示，但向量表示的不同也会影响情感分类结果[20]。②表情符号在丰富文本信息和传达情感信息的同时，结合文本时也可能会改变原语义情况[21]，如“这手机真是好用极了😒”这条评论中的表情符号会对文本中词语的权重产生影响，从而影响情感倾向。但是，较少模型考虑到了表情符号结合文本后的相互作用机制。③在使用双通道神经网络分别提取到文本的局部及全局特征后，可以利用注意力机制加强关键语义特征信息，但较少研究考虑结合表情符号的注意力机制分别对于文本数据中局部特征信息和全局特征信息的关注情况，可能会对情感分类准确性造成影响。

针对以上问题，为更有效地进行情感分类任务，同时考虑到表情符号对于文本数据的影响及作用机制，本文提出融合双重表情符号注意力机制的文本情感分类模型BEvec-CBEmoAtt（即(BERT+Emoji2vec)-(CNN-EmojiAttention+BiGRU-EmojiAttention)的简称），理论贡献如下：①考虑到BERT预训练模型可以有效学习文本的动态词向量表示[22]，Emoji2vec模型专业针对表情符号向量的获取[23]，本文分别使用BERT和Emoji2vec来获得文本和表情符号的向量表示，以解决向量表示不同而影响情感分类的问题。②受陈亚茹和陈世平[21]提出的将深度学习与情感符号相结合的启发，本文提出了表情符号注意力机制，其在注意力机制的基础上计算包含表情符号的文本中每个词结合表情符号后的注意力权重，以此突出表情符号对于文本的作用机制。③为更好地捕捉注意力机制在融合表情符号后分别对于文本局部和全局特征信息的影响，引入双重表情符号注意力机制，其添加在特征获取层后以加强输出的关键信息，提高情感分类的准确性。

2　本文模型

本文提出的融合双重表情符号注意力机制的文本情感分类流程如图 1 所示。

1）数据集获取及预处理。收集实验所需文本数据集, 并进行相应预处理。

2）双通道语义特征获取层。首先, 使用 BERT 预训练模型来获得文本的动态词向量表示; 然后, 构建 CNN 局部特征提取与 BiGRU 全局特征提取的双通道模型。

3）双重表情符号注意力机制层。结合 Emoji-2vec 获得的表情符号向量, 在特征获取层后使用双重表情符号注意力机制分别对输出的特征矩阵进行权重分配, 考虑表情符号对于文本的作用机制, 以此衡量与表情符号结合后文本中词语的重要程度。

4）语义特征合成层。对注意力机制层输出的特征向量进行融合, 以此获得综合向量表示。

5）情感分类层。通过全连接神经网络计算后, 利用 Softmax 函数进行情感分类任务。

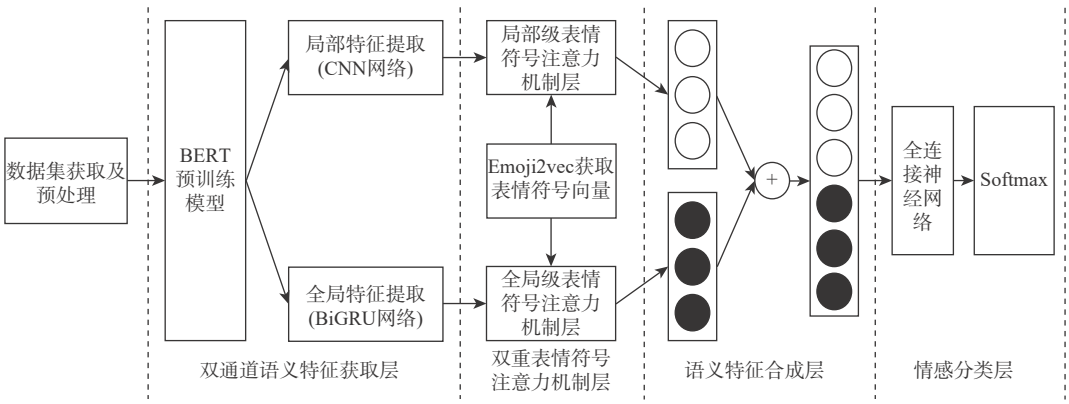


图 1　融合双重表情符号注意力机制的文本情感分类流程

Fig. 1　Flowchart of text sentiment classification incorporating dual emoji attention mechanisms

2.1　数据集获取及预处理

本文的中文数据集使用 python 从天猫商城 (www.tmall.com) 中进行评论数据集的爬取; 英文数据集使用 kaggle 网站 (www.kaggle.com) 上公开的 twitter 英文语料库。其中, 文本数据中均包含表情符号, 以此进行后续的情感分类任务。

获取的文本数据需要做预处理:

1）重复数据及过短数据剔除。将重复的无效数据及 5 个字或 5 个单词以下的数据进行剔除。

2）去停用词。停用词往往在文本中大量重复出现, 却没有实际含义, 如“嗯、了、即、oh、Uh、yes”等。将停用词进行剔除以获得更有效的文本数据。

2.2　双通道语义特征获取层

2.2.1　BERT 预训练模型

本文通过谷歌开源工具包 BERT 模型训练数据集上的文本向量表示。BERT 模型采用双向 Transformer 编码器进行上下文信息特征获取[24], 具有很强的文本特征表示能力, 其模型如图 2 所示。

在进行文本表示时, 利用 BERT 模型对输入长度为 n 的文本句子进行编码。由图 2 所示, 首先, 对文本进行词向量嵌入表示, 输入包括 3 部分, 分别为 Position Embedding、Segment Embedding 和

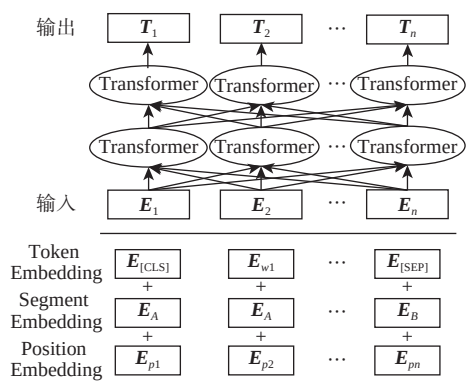


图 2　BERT 模型

Fig. 2　BERT model

Token Embedding, 其中, Token Embedding 将句子通过“[CLS]”和“[SEP]”进行标记。将 3 部分结合作为模型的输入, 表示为 $\boldsymbol{E}_1, \boldsymbol{E}_2, \cdots, \boldsymbol{E}_n$。然后, 通过 Transformer 的编码器结构, 将输入的每个词 $\boldsymbol{E}_n$ 转化为包含上下文信息和句法语义特征的 $\boldsymbol{T}_n$。$\boldsymbol{T}$=[$\boldsymbol{T}_1$, $\boldsymbol{T}_2$, ⋯, $\boldsymbol{T}_n$] 表示模型的输出向量, 也作为下游 CNN 模型和 BiGRU 模型的输入。

2.2.2　局部特征提取

在 BERT 模型的基础上, 结合 CNN 模型可以获取更多的局部特征信息。CNN 模型是一种能够

从文本中提取局部信息的方法，结构一般包括卷积层、池化层和全连接层。因此，将经过 BERT 模型训练得到的文本向量表示 $\boldsymbol{T}=[\boldsymbol{T}_1, \boldsymbol{T}_2, \cdots, \boldsymbol{T}_n]$ 作为 CNN 模型的输入，同时，本文使用 3 个不同大小的卷积核在文本向量矩阵中自上向下滑动来提取局部特征。

CNN 通常在卷积层提取特征后使用池化层进行特征压缩，但池化操作会破坏文本序列的时序性，同时存在特征信息丢失的问题[25]。为解决该问题，本文对卷积层得到的特征向量进行拼接，弃用池化层，融合表情符号注意力机制层，这种方法既增强了 CNN 提取文本局部特征后评论数据的关键信息，又降低了信息的损失。图 3 展示了使用 CNN 进行文本局部特征提取的模型结构。卷积核大小为 r，通道数为 c，文本长度为 n，卷积操作的时间复杂度为 $O(n\times r\times c)$。

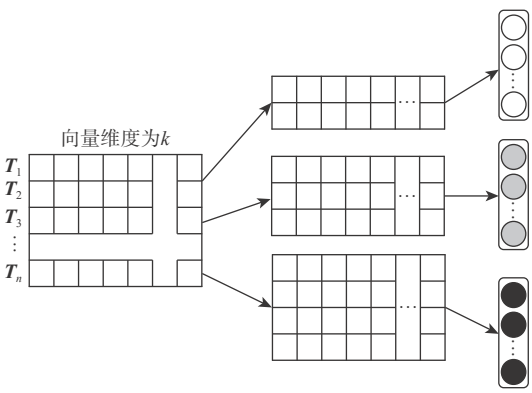


图 3 CNN 模型提取局部特征

Fig. 3 CNN model extracts local features

CNN 模型提取局部特征的具体过程如下：在图 3 中，$\boldsymbol{T}_1, \boldsymbol{T}_2, \cdots, \boldsymbol{T}_n$ 为 CNN 模型的输入向量，在卷积层中通过 3 个不同窗口大小(2,3,4)的卷积核，在向量矩阵中自上向下滑动进行特征提取。对于窗口大小为 r 的卷积核，通过第 i 次卷积操作提取到局部特征 $\boldsymbol{c}_i$，其计算公式为

$$\boldsymbol{c}_i = f(\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{T}_{(i,i+r-1)}+\boldsymbol{b}) \tag{1}$$

式中：f 表示非线性激活函数 ReLU；$\boldsymbol{T}_{(i,i+r-1)}$ 为文本向量矩阵中第 i 行到第 $i+r-1$ 行，卷积核 1 次读取的共 r 行的向量；$\boldsymbol{W}$ 为 CNN 卷积核中的参数；$\boldsymbol{b}$ 为偏置矩阵。

窗口大小为 r 的卷积核在文本向量矩阵中自上向下滑动，进行 $n-r+1$ 次卷积操作，得到的输出特征图序列 $\boldsymbol{C}_r$ 表示为

$$\boldsymbol{C}_r = [\boldsymbol{c}_1^r, \boldsymbol{c}_2^r, \cdots, \boldsymbol{c}_{n-r+1}^r] \tag{2}$$

将各卷积核卷积输出的 $\boldsymbol{C}_r$ 进行求和，得到综合局部特征矩阵 $\boldsymbol{L}$，其长度为 $\max(\boldsymbol{C}_2,\boldsymbol{C}_3,\boldsymbol{C}_4)=n-1$：

$$\boldsymbol{L} = [\boldsymbol{l}_1, \boldsymbol{l}_2, \cdots, \boldsymbol{l}_{n-1}] \tag{3}$$

2.2.3 全局特征提取

RNN 模型常用来提取文本全局特征，因为其可以捕获文本之间的长期依赖关系，但在处理长序列数据时，可能会出现梯度爆炸和梯度消失现象。长短期记忆网络 (long short-term memory, LSTM) 通过设置 RNN 模型的输入门、遗忘门和输出门 3 个门控单元，可以有效解决梯度消失问题。在此基础上，门控循环单元 (gated recurrent unit, GRU) 只设置了重置门和更新门，解决了 LSTM 模型中参数较多及训练时间较长的问题，保留 LSTM 优点的同时也提供了更快的训练速度。

由于单向 GRU 在各个时刻的隐含状态都是单向的，忽视了文本的全局语义信息，文本数据之后的内容对前文的影响也就无法推断。本文利用 BiGRU 模型来进行全局特征的提取，其在单向 GRU 的基础上可以提取前向和后向各时刻的隐藏状态。本文使用 BiGRU 提取文本信息全局特征的过程如图 4 所示。GRU 层的隐藏单元数量为 h，输入向量维度为 k，文本长度为 n，时间复杂度为 $O(n\times h\times k)$。

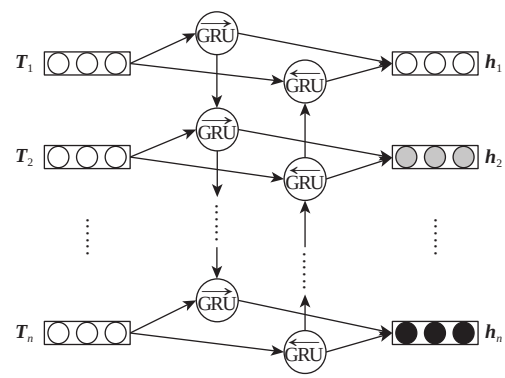


图 4 BiGRU 模型提取全局特征

Fig. 4 BiGRU model extracts global features

BiGRU 模型提取全局特征的具体过程如下：在图 4 中，$\boldsymbol{T}_1, \boldsymbol{T}_2, \cdots, \boldsymbol{T}_n$ 为 BiGRU 模型的输入向量，经过前向和后向 GRU 编码得到分别包括上文和下文信息的隐藏层，因此，BERT 模型输出的词向量 $\boldsymbol{T}_n$ 经过 BiGRU 提取到的包括上下文信息的全局特征为

$$\boldsymbol{h}_n = \left[\overrightarrow{\mathrm{GRU}}(\boldsymbol{T}_n), \overleftarrow{\mathrm{GRU}}(\boldsymbol{T}_n)\right] \tag{4}$$

则文本矩阵 $\boldsymbol{T}$ 经过 BiGRU 模型提取到的全局特征为

$$\boldsymbol{H} = [\boldsymbol{h}_1, \boldsymbol{h}_2, \cdots, \boldsymbol{h}_n] \tag{5}$$

2.3 双重表情符号注意力机制层

通过 CNN 及 BiGRU 网络可以得到充分考虑文

本局部特征的向量矩阵表示 $\boldsymbol{L}(\boldsymbol{L}=\boldsymbol{l}_1,\boldsymbol{l}_2,\cdots,\boldsymbol{l}_{n-1})$ 和文本上下文全局特征的向量矩阵表示 $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{H}=\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_n)$。为使模型更有效关注文本中的重要信息及更好地分析表情符号对文本情感分类的影响, 利用专门针对表情符号的 Emoji2vec 模型进行表情符号的向量化表示, 本文的表情符号使用 Eisner 等[23] 得出的 Emoji2vec 预训练结果 (https://github.com/uclnlp/emoji2vec)。同时, 提出表情符号注意力机制, 从局部级和全局级表情符号注意力机制来识别关键信息, 表情符号注意力机制简称为 EmoAtt。

注意力机制的核心是为不同的隐藏节点分配适当的注意力权重, 以感知重要的语义特征, 并进行重要度划分。权重的大小表示其对情感分类的影响程度。对于一条文本来说, 每个词语对于情感倾向的影响是不同的, 表情符号注意力机制则可以用来衡量文本与表情符号结合后词语的重要程度权重。双重表情符号注意力机制分别由局部级注意力机制层和全局级注意力机制层组成。在 2 个层面中, 均考虑表情符号对于文本的作用机制。

考虑表情符号在文本中的影响, $\boldsymbol{T}_n$ 表示文本中分词的词语转换为词向量的表示, $\boldsymbol{e}_k$ 表示文本中出现的表情符号使用开源 Emoji2vec 模型[23] 转换的向量表示, 因此, 将一条包含了表情符号的文本经过向量化后表示为 $\{\boldsymbol{T}_1,\boldsymbol{T}_2,\cdots,\boldsymbol{T}_n;\boldsymbol{e}_1,\boldsymbol{e}_2,\cdots,\boldsymbol{e}_k\}$。

由于在一条文本中可能会出现多个相同的表情符号, 为防止重复出现的单个表情符号被分配的权重过大而影响模型效果的情况, 本文对一条文本中的表情符号向量取平均值, 则平均后的表情符号向量 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}$ 表示为

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}=\frac{1}{k_n}\sum_{i=1}^{k_n}\boldsymbol{e}_i \tag{6}$$

1) 局部级表情符号注意力机制层中, $[\boldsymbol{l}_1,\boldsymbol{l}_2,\cdots,\boldsymbol{l}_{n-1}]$ 为文本中不包括表情符号的 $\{\boldsymbol{T}_1,\boldsymbol{T}_2,\cdots,\boldsymbol{T}_n\}$ 经过 CNN 后的向量表示, 则一条文本经过局部级注意力机制后的表示为

$$\boldsymbol{s}_{\mathrm{p}}=\sum_{t=1}^{n-1}\alpha_t^{\mathrm{p}}\boldsymbol{l}_t \tag{7}$$

式中: α_t^{p} 为文本中第 t 个特征序列向量结合表情符号后在句子中的注意力权重, 其计算公式为

$$\alpha_t^{\mathrm{p}}=\frac{\exp(\mathrm{score}(\boldsymbol{l}_t,\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}))}{\sum_{j=1}^{n-1}\exp(\mathrm{score}(\boldsymbol{l}_j,\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}))} \tag{8}$$

式中: socre( ) 表示衡量词结合表情符号后的重要程度的打分函数, 其计算公式为

$$\mathrm{score}(\boldsymbol{l}_t,\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}})=\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}^{\mathrm{T}}\tanh(\boldsymbol{W}_t^{\mathrm{l}}\boldsymbol{l}_t+\boldsymbol{W}_e^{\mathrm{l}}\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{b}_{\mathrm{l}}) \tag{9}$$

其中: $\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}^{\mathrm{T}}$ 为训练学习得到的权重向量的转置; $\boldsymbol{W}_t^{\mathrm{l}}$ 和 $\boldsymbol{W}_e^{\mathrm{l}}$ 为权重参数矩阵; $\boldsymbol{b}_{\mathrm{l}}$ 为偏置向量。

2) 全局级表情符号注意力机制层中, $[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_n]$ 为文本中不包括表情符号的 $\{\boldsymbol{T}_1,\boldsymbol{T}_2,\cdots,\boldsymbol{T}_n\}$ 经过 BiGRU 网络后的向量表示, 则一条文本经过全局级注意力机制后的表示为

$$\boldsymbol{s}_{\mathrm{o}}=\sum_{y=1}^{n}\alpha_y^{\mathrm{o}}\boldsymbol{h}_y \tag{10}$$

式中: α_y^{o} 为文本中第 y 个词结合表情符号后在句子中的注意力权重, 其计算公式为

$$\alpha_y^{\mathrm{o}}=\frac{\exp(\mathrm{score}(\boldsymbol{h}_y,\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}))}{\sum_{j=1}^{n}\exp(\mathrm{score}(\boldsymbol{h}_j,\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}))} \tag{11}$$

其中: score( ) 打分函数的计算公式为

$$\mathrm{score}(\boldsymbol{h}_y,\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}})=\boldsymbol{v}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}\tanh(\boldsymbol{W}_y^{\mathrm{h}}\boldsymbol{h}_y+\boldsymbol{W}_e^{\mathrm{h}}\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{b}_{\mathrm{h}}) \tag{12}$$

式中: $\boldsymbol{v}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}$ 为训练学习得到的权重向量的转置; $\boldsymbol{W}_y^{\mathrm{h}}$ 和 $\boldsymbol{W}_e^{\mathrm{h}}$ 为权重参数矩阵; $\boldsymbol{b}_{\mathrm{h}}$ 为偏置向量。

2.4　语义特征合成层

根据双通道语义特征获取层分别得到的文本局部特征和文本全局特征, 输入融合双重表情符号注意力机制层分别得到局部级特征向量表示 $\boldsymbol{s}_{\mathrm{p}}$ 和全局级特征向量表示 $\boldsymbol{s}_{\mathrm{o}}$。语义特征合成层的主要任务是将生成的局部级和全局级特征向量进行合并, 从而构建文本整体的情感特征向量。采取向量拼接融合的方式, 得到文本最终的特征向量表示 $\boldsymbol{X}$, 其既包含了文本局部特征和全局特征信息, 又包含了对分类结果影响大的表情符号特征信息。则文本最终的特征向量表示为

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{s}_{\mathrm{p}}\oplus\boldsymbol{s}_{\mathrm{o}} \tag{13}$$

式中: $\oplus$ 表示向量拼接。

2.5　情感分类层

情感分类层的构成为全连接神经网络和 Softmax 激活函数。将经过语义特征合成层得到的最终特征向量表示 $\boldsymbol{X}$ 输入到全连接神经网络中, 文本的情感概率 p 通过使用 Softmax 激活函数计算得到, 从而得到模型最终预测的情感分类结果。

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}=\tanh(\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}}) \tag{14}$$

$$p=\mathrm{Softmax}(\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}) \tag{15}$$

式中: $\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}$ 为全连接层的输出向量; $\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}$ 为权重矩阵; $\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}}$ 为偏置矩阵; p 为输出的情感预测概率。

为更好地训练模型, 本文采用交叉熵损失函数来衡量情感标签的真实概率分布 $P_{\mathrm{t}}(d)$ 与预测概率

分布 $P_p(d)$ 之间的距离。

$$L_s = -\sum_{d\in D}\sum_{i=1}^{c_c} P_t(d)\log_2 P_p(d) \tag{16}$$

式中：D 为数据集；d 为 D 中的一条文本；c_c 表示情感标签的数目，本文均为二分类任务，因此，c_c=2。

3 实验分析

3.1 实验数据集获取及预处理

考虑到表情符号对于情感分类模型的影响，本文使用的数据集为：①爬取天猫网站上的手机评论数据，进行重复数据剔除及去停用词等预处理操作，构建了一个基于表情符号的手机产品评论中文数据集 Emoji-phone，共有 20 260 条在线产品评论，其中未对文本进行情感标注；②公开的 twitter 英文语料库 EmojifyData，包含 1 800 万条带有表情符号的推文，本文在剔除 5 个单词以下的文本及去停用词操作后，随机选取该数据集中的 20 000 条文本作为该实验的数据集，其中未对文本进行情感标注。

由于 2 个数据集均未进行情感标注，需要进行人工情感标注。数据集示例如表 1 所示。将数据集公开于 GitHub 网站 (https://github.com/Emoji-NLP/Emoji-data)。Emoji-phone 数据集中，情感极性为正向的数据有 15 899 条，负向的数据有 4 361 条；EmojifyData 数据集中，情感极性为正向的数据有 13 319 条，负向的数据有 6 681 条。

表 1 数据集示例

Table 1 Example dataset

数据集	文本	情感标签
Emoji-phone	好喜欢这个手机，拍照超级好看 😊	1
	屏幕卡顿，系统卡 ☹，闪退游戏	0
EmojifyData	That's awesome! Plus you're a Meredith Angel!! 😇😊😊	1
	I feel the frustration aagh 😫	0

实验时，数据集按 8:1:1 分为训练集、验证集与测试集，则 Emoji-phone 数据集中训练集、验证集与测试集的数量分别为 16 208 条、2 026 条、2 026 条；EmojifyData 数据集中训练集、验证集与测试集的数量分别为 16 000 条、2 000 条、2 000 条。为了确保测试集中的正向和负向数据均衡，设置 Emoji-phone 数据集的测试集中情感极性正负数据各 1 013 条，EmojifyData 测试集的测试集中情感极性正负数据各 1 000 条。

3.2 实验设置

实验的运行环境为：基于 Windows10 操作系统，处理器为 i5-12500H，16 GB 内存，采用 RTX 3090 显卡进行模型的训练。算法使用 Python3.8 编程语言实现，编码工作通过 Pycharm 开发工具完成；使用的深度学习框架为 Tensorflow2.5.0、CUDA11.2。实验结果表明，训练时间方面，每个 epoch 的训练时间约为 62 min，总训练时间为 620 min。内存消耗方面，训练过程中内存使用量平均为 10 GB，峰值为 12 GB。GPU 利用率方面，训练过程中 GPU 利用率平均为 81%，峰值为 95%。

针对 BERT 预训练模型，对于中文和英文，本文使用谷歌发布的“BERT-Base Chinese”中文预训练模型和“BERT-Base Uncased”英文预训练模型，均采用 12 层 Transformer，每个 Transformer 共有 12 个注意力头，隐含层维度为 768。不同的参数设置也会影响本文模型的分类结果，但本文的主要研究内容并不是不同模型参数的实验对比，因此，通过参考相关资料[26]和验证测试，模型参数设置如表 2 所示。

表 2 模型参数设置

Table 2 Model parameters settings

参数	数值
Batch_size	64
epoch	10
词向量维度	768
学习率	10^{-5}
Dropout	0.3
优化器	Adam
卷积核尺寸	(2,3,4)
卷积核通道数	(128,128,128)
BiGRU层数	1
Hidden_size	256

3.3 评价指标

情感分类模型评估的常用指标为准确率 A、精确度 P、召回率 R、F_1 值。各评价指标的计算公式为

$$A = \frac{T_P + T_N}{T_P + T_N + F_P + F_N} \tag{17}$$

$$P = \frac{T_P}{T_P + F_P} \tag{18}$$

$$R = \frac{T_P}{T_P + F_N} \tag{19}$$

$$F_1 = 2\frac{PR}{P + R} \tag{20}$$

式中：T_P 表示样本正确分类为积极情感的数量；T_N 表示将样本正确分类为消极情感的数量；F_P 表示样本错误分类为积极情感的数量；F_N 表示将样本错误分类为消极情感的数量。

3.4　实验结果

本文模型分别在中英文数据集上进行训练, 使用 python 的第三方库 Seaborn 来可视化训练过程。模型训练集和验证集的准确率和损失函数值的变化如图 5 和图 6 所示。

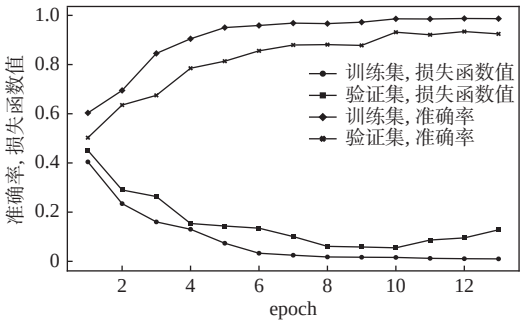


图 5　Emoji-phone 数据集上模型的准确率和损失函数值变化

Fig. 5　Variation of accuracy and loss values of model on Emoji-phone dataset

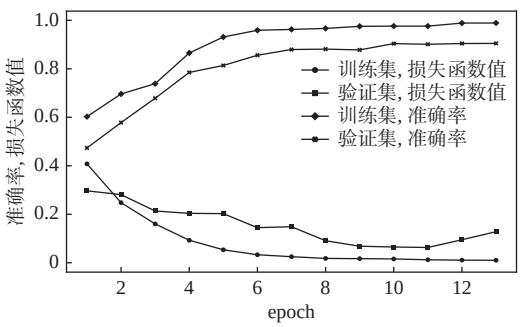


图 6　EmojifyData 数据集上模型的准确率和损失函数值变化

Fig. 6　Variation of accuracy and loss values of model on EmojifyData dataset

从图 5 和图 6 得出, 训练集和验证集的准确率随着 epoch 的变化逐渐提高, 当 epoch 为 10 时, Emoji-phone 数据集上验证集的准确率达到 0.939 9, EmojifyData 数据集上验证集的准确率达到 0.912 6, 并且开始趋向稳定。同时, 训练集的交叉损失函数值随着训练过程逐步减少达到较为稳定的情况。而在 Emoji-phone 数据集上, 验证集的损失函数值在 epoch 到达 10 后开始上升; 在 EmojifyData 数据集上, 验证集的损失函数值初期下降速度缓慢, 但整体训练情况稳步下降, 在 epoch 到达 11 后开始上升。这是一种过拟合现象, 模型在训练数据上的表现要优于在未见过的数据上的表现, 之后, 模型会过度优化和学习特定于训练数据的表示法, 而无法泛化到测试数据。因此, 采用早停策略, 当验证集损失开始上升时, 停止训练, 设置迭代参数 epoch=10, 防止出现过拟合。

为能更直观有效地展示模型效果, 使用 Seaborn 库和 matplotlib 库对模型中表情符号注意力机制的权重分配进行可视化展示, 选取一条英文文本“Today I was called a “wise kickass lady editor”. Well, made my day! 😍”进行可视化展示实验。

对于输入文本, 先使用 Jieba 分词工具对句子进行分词, 并去除标点符号和停用词, 得到“Today I was called a wise kickass lady editor Well made my day 😍”, 再将其输入本文模型中, 绘制出注意力权重热力图, 如图 7 所示。图中, 颜色深浅表示单词被分配的权重, 较深的颜色表示该单词对后续情感分类的重要性更高。可以看出, 模型在结合了表情符号注意力机制后, 对于“wise、kickass、Well”单词分配了较高的权重, 同时表情符号“😍”也被给予了较高的权重, 这些都是有关积极情感的词语。结果表明, 本文模型可以很好地找出在含有表情符号的文本中对情感分析结果影响较大的单词。

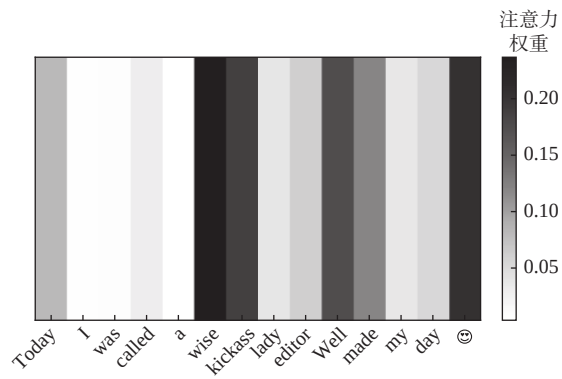


图 7　注意力权重热力图

Fig. 7　Attention weight heatmap

3.5　对比实验

为验证本文 BEvec-CBEmoAtt 模型的有效性, 进行对比实验对情感分类效果进行衡量。

将本文模型与以下 6 种常见的情感分类模型进行对比, 以验证模型在情感分类任务上的有效性和准确性, 其具体结果如表 3 所示。

1) 模型 1(W-CNN-BiGRU-Att)[11]。使用 Word2-vec 词向量嵌入, 依次通过 CNN 和 BiGRU 模型来获取特征信息, 最终引入注意力机制以进行情感分类。

2) 模型 2(W-AttCNN+AttBiGRU)[10]。使用 Word2vec 词向量嵌入, 采用注意力机制对模型嵌入层的输出进行特征加权, 分别使用多通道 CNN 和 BiGRU 对文本特征进行提取。

3) 模型 3(BERT-BiGRU)。在 BERT 模型的基础上, 增加 BiGRU 模型进一步获取全局特征信息以进行情感分类。

4) 模型 4(BERT-BiGRU-Att)[7]。在 BERT 模型的基础上, 引入 BiGRU-Attention 模型以获取全局

表3 对比实验在2个数据集上的测试结果

Table 3 Test results of comparison experiment on two datasets

模型	准确率		F_1值	
	Emoji-phone	EmojifyData	Emoji-phone	EmojifyData
模型1	0.867 5	0.840 8	0.870 1	0.839 8
模型2	0.882 7	0.843 8	0.882 8	0.842 2
模型3	0.903 5	0.858 8	0.903 8	0.859 5
模型4	0.913 7	0.880 5	0.913 4	0.879 7
模型5	0.919 5	0.887 0	0.919 6	0.885 8
模型6	0.913 9	0.887 2	0.912 9	0.884 8
本文模型	0.931 5	0.903 8	0.931 7	0.903 5

特征和情感分类关键特征信息。

5) 模型5(BERT-CNN+BiGRUAtt)[12]。在BERT模型的基础上,应用CNN提取局部特征,同时采用BiGRU-Attention来获取上下文特征,并突出关键词的权重。

6) 模型6(RoBERTa-3xBiGRU)[27]。RoBERTa是具有更多超参数选项的BERT,其将文本结合表情符号一起作为输入从而获得词向量表示,再使用3层BiGRU模型进行特征提取。

本文模型(BEvec-CBEmoAtt)中,BERT模型获得文本词向量表示,再通过CNN-BiGRU双通道模型提取局部和全局特征,结合Emoji2vec表情符号向量表示再引入双重表情符号注意力机制,来突出表情符号和关键词的权重。

对表3分析可得,模型1和模型2是基于Word2-vec来训练文本词向量,模型3~模型5及本文模型基于BERT来训练文本词向量,在整体结果方面,模型3~模型5及本文模型的准确率和F_1值均大于模型1和模型2,表明由BERT生成的词向量比Word2vec有更好的表征能力,有助于提高情感分类的表现。模型4相比于模型3的准确率在2个数据集上分别提高了0.010 2和0.021 7,说明注意力机制的引入突出了文本中的重要词汇,有助于提高情感分类的结果。模型5相对于模型4引入了CNN模型提取局部特征,其表现更好,说明双通道分别使用CNN和BiGRU模型可以发挥其各自的优势,可以更好地结合文本的局部和全局特征。模型6是将表情符号结合文本一同作为输入进行情感分类。本文模型是在双通道CNN和BiGRU模型基础上融合双重表情符号注意力机制,获得了最好的性能,准确率和F_1值在Emoji-phone数据集上分别达到了0.931 5和0.931 7,在EmojifyData数据集上分别达到了0.903 8和0.903 5,均优于其他模型。因此,说明了本文提出的融合双重表情符号注意力机制的情感分类模型的有效性。

3.6 消融实验

为评估BEvec-CBEmoAtt模型中每个模块对情感分析任务的影响,本文设置3个消融实验进行分析,包括:①不同向量表示的模型对比;②减少通道后的模型对比;③减少表情符号注意力机制后的模型对比。

1) 消融实验1。对于本文模型进行以下2种处理,以验证模型提出的文本和表情符号的向量化表示对于情感分类的影响。具体结果如表4所示。

表4 消融实验1在2个数据集上的测试结果

Table 4 Test results of ablation experiment 1 on two datasets

模型	准确率		F_1值	
	Emoji-phone	EmojifyData	Emoji-phone	EmojifyData
模型7	0.910 7	0.877 2	0.909 0	0.874 3
模型8	0.923 1	0.892 2	0.922 6	0.892 3
本文模型	0.931 5	0.903 8	0.931 7	0.903 5

① 模型7(Word2vec-CBEmoAtt)。使用Word2-vec获得文本词向量表示,通过CNN-BiGRU双通道模型提取局部和全局特征,结合Emoji2vec表情符号向量表示再引入双重表情符号注意力机制。

② 模型8(BERT-CBEmoAtt)。使用BERT获得文本词向量表示,通过CNN-BiGRU双通道模型提取局部和全局特征,结合随机初始化表情符号向量表示再引入双重表情符号注意力机制。

对表4分析可得,模型7是在本文模型的基础上,将BERT获取文本向量的方式替换成了Word2vec来获取文本向量,结果显示,在中英文数据集上,本文模型在F_1值比该模型分别高出0.022 7和0.029 2,说明BERT模型获取的词向量可以更好地进行后续情感分类任务;同时,模型7相比于对比实验中的模型2(W-AttCNN+AttBiGRU),考虑到表情符号注意力的作用,其在中英文数据集上F_1值比模型2分别高出0.026 2和0.032 1,这也显示出了表情符号注意力机制可以更好地进行情感分类任务。模型8是在本文模型的基础上,将Emoij2vec获取表情符号向量的方式替换为了随机初始化获取向量的方式,结果显示,在中英文数据集上,本文模型在F_1值上比模型8分别高出0.009 1和0.011 2。可以看出,对于数据中的文本及表情符号,获取向量的不同方式会对情感分类任务的准确性造成影响,说明了本文提出的使用BERT和Emoji2vec来分别获得文本和表情符号的向量表示的有效性。

2) 消融实验2。对于本文模型进行以下2种处理,以验证模型提出的双通道特征提取对于情感分类的影响。具体结果如表5所示。

表 5　消融实验 2 在 2 个数据集上的测试结果

Table 5　Test results of ablation experiment 2 on two datasets

模型	准确率		F_1值	
	Emoji-phone	EmojifyData	Emoji-phone	EmojifyData
模型9	0.920 3	0.885 5	0.9209	0.886 8
模型10	0.921 5	0.888 8	0.9217	0.887 1
本文模型	0.931 5	0.903 8	0.9317	0.903 5

① 模型 9(BEvec-CNN-EmoAtt)。使用 BERT-CNN 单通道获取文本特征表示, 再结合 Emoji2vec 获得的表情符号词向量同时输入到表情符号注意力机制以进行特征提取。

②模型 10(BEvec-BiGRU-EmoAtt)。使用BERT-BiGRU 单通道获取文本特征表示, 再结合 Emoji2-vec 获得的表情符号词向量同时输入到表情符号注意力机制以进行特征提取。

对表 5 分析可得, 模型 9 和模型 10 分别是在本文提出的模型基础上, 仅使用单通道 CNN-EmoAtt 或 BiGRU-EmoAtt 来进行特征提取。结果显示, 本文模型 BEvec-CBEmoAtt 相比于模型 9 和模型 10 在 Emoji-phone 数据集上, F_1 值分别高出 0.010 8 和 0.01; 在 EmojifyData 数据集上, F_1 值分别高出 0.016 7 和 0.016 4。说明双通道特征提取结合了双重表情符号注意力机制对于情感分类存在积极作用。而模型 10 中, 其精确度比本文模型高, 说明结合了表情符号注意力机制的单通道模型也可以较好地预测出积极情感。

同时, 模型 10 相比于对比实验中的模型 4 (BERT-BiGRU-Att), 其考虑到了表情符号的影响并使用了表情符号注意力机制, 结果显示, 在 Emoji-phone 数据集上, 准确率和 F_1 值高出 0.007 8 和 0.008 3; 在 EmojifyData 数据集上, 准确率和 F_1 值高出 0.008 3 和 0.007 4。因此, 有效说明了本文提出的表情符号注意力机制的有效性。

3) 消融实验 3。对于本文模型进行以下 3 种处理, 以验证模型提出的融合表情符号注意力机制对于情感分类的影响。具体结果如图 8 和图 9 所示。

① 模型 11(ESM)[19]。对文本词向量和表情符号词向量进行余弦距离计算, 从而得到单词到情感空间的映射关系, 使用支持向量机模型完成情感分类。

② 模型 12(BERT-CAtt+BAtt)。不考虑数据中的表情符号, 在 BERT 模型的基础上, 使用 CNN-Attention 和 BiGRU-Attention 组成的双通道模型针对纯文本输入进行情感分类。

③ 模型 13(BERT(Emo)-CAtt+BAtt)。保留数据中的表情符号, 利用 BERT 将得到的文本向量和随机初始化表情符号向量融合后, 输入 CNN-Attention 和 BiGRU-Attention 组成的双通道模型, 获取情感分类的特征信息。

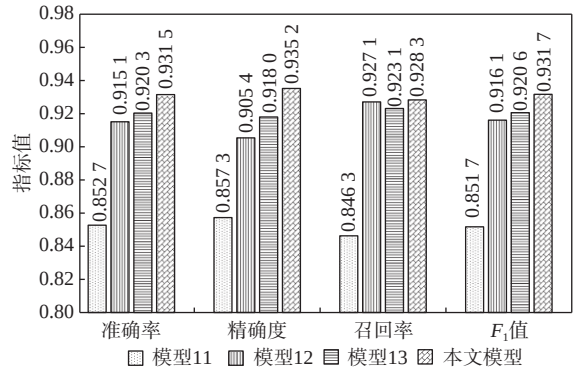


图 8　消融实验 3 在 Emoji-phone 数据集上的测试结果

Fig. 8　Results of ablation experiment 3 on Emoji-phone dataset

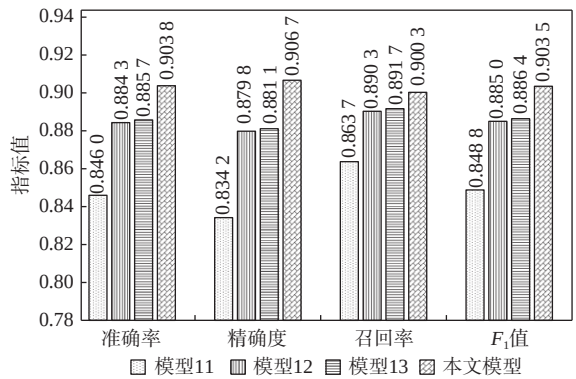


图 9　消融实验 3 在 EmojifyData 数据集上的测试结果

Fig. 9　Results of ablation experiment 3 on EmojifyData dataset

对图 8 和图 9 分析可得, 模型 11 中对于表情符号的处理是将其和文本词向量进行余弦距离运算, 其准确率和 F_1 值较低。模型 12 中, 针对本文提出的融合双重表情符号注意力机制的情感分类模型, 其在文本预处理时删除表情符号, 不考虑表情符号的作用, 结果显示, 本文模型在 Emoji-phone 数据集上准确率和 F_1 值上分别高出 0.016 4 和 0.015 6, 在 EmojifyData 数据集上准确率和 F_1 值上分别高出 0.019 5 和 0.018 5。模型 13 是在模型 12 的基础上, 保留数据中的表情符号获取其向量表示后再输入到后续模型中, 但不使用表情符号注意力机制, 在 2 个数据集中, 本文模型在准确率和 F_1 值上分别高出 0.011 2、0.011 1 和 0.018 1、0.017 1。可以看出, 考虑表情符号对于情感分类任务存在积极作用。同时, 本文提出的融合双重表情符号注意力机制的情感分类模型 (BEvec-CBEmoAtt) 在情感分类结果中均优于模型 11～模型 13, 说明提出的表情符号注意力机制可以有效考虑文本中表情符号的影响, 更好地捕捉文本特征信息。

根据 3 个消融实验可以看出, 在去除了不同模

块后，准确率和 F_1 值都有一定程度的下降，说明 BEvec-CBEmoAtt 模型中各个模型对于情感分析任务都有一定的贡献。对比 3 个消融实验中的模型 8（去除 Emoji2vec 模块）、模型 9（去除 BiGRU-EmoAtt 模块）、模型 10（去除 CNN-EmoAtt 模块）、模型 11（去除表情符号注意力机制模块）发现，在中英文数据集上，本文模型在 F_1 值上比模型 8 分别高出 0.009 1 和 0.011 2；在中英文数据集上，本文模型在 F_1 值上比模型 9 分别高出 0.010 8 和 0.016 7；在中英文数据集上，本文模型在 F_1 值上比模型 10 分别高出 0.01 和 0.016 4。在中英文数据集上，本文模型在 F_1 值上比模型 11 分别高出 0.08 和 0.054 7。由此可以看出，去除了表情符号注意力机制模块后，F_1 值的下降程度较大。因此，表情符号注意力机制可以更好地考虑表情符号在文本中的作用机制，更助于情感分析任务。

3.7 情感分类示例

将本文模型 (BEvec-CBEmoAtt) 与不考虑表情符号注意力机制的模型 12(BERT-CAtt+BAtt) 进行文本正负情感识别对比，列出 BERT-CAtt+BAtt 模型无法准确识别而本文模型可以正确识别的情感分类结果示例，如表 6 所示。

表 6 文本情感分类结果示例

Table 6 Example of text emotion classification results

文本	模型12	本文模型	True
① 这手机续航简直离谱！昨天早上充满电，到现在还有30%👍👍👍，害得我充电器都白带了！	负向	正向	正向
② 略重但质感无敌，游戏不适配，老公当备用机真香😍	负向	正向	正向
③ 手机用一天没问题，昨天899买的，今天799。呵呵，真牛😅	正向	负向	负向
④ 商品目前看来，没有什么大的损坏，但这包装，🙄呵呵的无话可说！	正向	负向	负向
⑤ Lord knows ion wanna get up 😩	正向	负向	负向
⑥ I wish I had someone to talk to about music man ☹️	正向	负向	负向
⑦ I suppose I'll be an adult and just dye my hair black or brown for this job 🙄	正向	负向	负向

对表 6 分析可得，文本①和文本②使用反向和隐晦的方式表达了情感，文本③～文本⑦可以看出用户是通过反讽的语言表达自己的情感，仅仅通过训练纯文本的形式进行情感分类，无法准确考虑到真实含义。而加入双重表情符号注意力机制，可以进一步加强或改变文本的重要语义信息，更有效地识别出句子的真实情感倾向。因此，说明了本文模型对于情感分类任务存在相应的实用价值。

4 结 论

1）本文提出了融合双重表情符号注意力机制的文本情感分类模型，通过 Emoji2vec 获取表情符号向量表示，提出表情符号注意力机制以考虑表情符号结合文本后的作用机制，同时，利用双重表情符号注意力机制分别加强文本局部和全局特征。

2）本文模型在中英文数据集上与常用的情感分类模型进行对比，准确率和 F_1 值在 Emojiphone 数据集上分别达到了 0.931 5 和 0.931 7，在 EmojifyData 数据集上分别达到了 0.903 8 和 0.903 5，均优于对比模型。

3）进行 3 个消融实验，即不同向量表示的模型对比、减少通道后的模型对比、减少表情符号注意力机制后的模型对比，结果显示，去除了表情符号注意力机制模块后，F_1 值的下降程度较大。因此，本文提出的融合双重表情符号注意力机制的情感分类模型可以很好地进行情感分类任务。

参考文献（References）

[1] Walther J B, D'addario K P. The impacts of emoticons on message interpretation in computer-mediated communication[J]. Social Science Computer Review, 2001, 19(3): 324-347.

[2] Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview[J]. Neural Networks, 2015, 61: 85-117.

[3] Liu B. Text sentiment analysis based on CBOW model and deep learning in big data environment[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11(2): 451-458.

[4] Xiao Z, Liang P J. Chinese sentiment analysis using bidirectional LSTM with word embedding[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Cloud Computing and Security. Berlin: Springer, 2016: 601-610.

[5] Zhang C Y, Wang D S, Wang L L, et al. Temporal data-driven failure prognostics using BiGRU for optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(8): 277-287.

[6] Zhang X S, Wu Z Q, Liu K, et al. Text sentiment classification based on BERT embedding and sliced multi-head self-attention Bi-GRU[J]. Sensors, 2023, 23(3): 1481.

[7] 孙红, 陈强越. 融合 BERT 词嵌入和注意力机制的中文文本分类

[J]. 小型微型计算机系统, 2022, 43(1): 22-26.
Sun H, Chen Q Y. Chinese text classification based on BERT and attention[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2022, 43(1): 22-26(in Chinese).

[8] Zhang S Y, Gong H F, She L N. An aspect sentiment classification model for graph attention networks incorporating syntactic, semantic, and knowledge[J]. Knowledge-Based Systems, 2023, 275: 110662.

[9] Jia K L, Meng F X, Liang J, et al. Text sentiment analysis based on BERT-CBLBGA[J]. Computers and Electrical Engineering, 2023, 112: 109019.

[10] 程艳, 尧磊波, 张光河, 等. 基于注意力机制的多通道 CNN 和 BiGRU 的文本情感倾向性分析[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(12): 2583-2595.
Cheng Y, Yao L B, Zhang G H, et al. Text sentiment orientation analysis of multi channels CNN and BiGRU based on attention mechanism[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(12): 2583-2595(in Chinese).

[11] Qiu H, Fan C D, Yao J, et al. Chinese microblog sentiment detection based on CNN-BiGRU and multihead attention mechanism[J]. Scientific Programming, 2020, 2020: 8865983.

[12] Bao T, Ren N, Luo R, et al. A BERT-based hybrid short text classification model incorporating CNN and attention-based BiGRU[J]. Journal of Organizational and End User Computing (JOEUC), 2021, 33(6): 1-21.

[13] Yan C, Liu J H, Liu W, et al. Research on public opinion sentiment classification based on attention parallel dual-channel deep learning hybrid model[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 116: 105448.

[14] 陈黎, 刘雨欣, 周耘立, 等. 融合表情符号图像特征学习的微博情感分类[J]. 四川大学学报 (自然科学版), 2021, 58(1): 74-80.
Chen L, Liu Y X, Zhou Y L, et al. Incorporating image features of emoticons into microblog sentiment classification[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2021, 58(1): 74-80(in Chinese).

[15] Jiang F, Liu Y Q, Luan H B, et al. Microblog sentiment analysis with emoticon space model[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2015, 30(5): 1120-1129.

[16] 赵晓芳, 金志刚. 融合表情符号与短文本的微博多维情感分类[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(5): 113-120.
Zhao X F, Jin Z G. Multi-dimensional sentiment classification of microblog based on emoticons and short texts[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(5): 113-120(in Chinese).

[17] Su Y J, Chen C H, Chen T Y, et al. Chinese microblog sentiment analysis by adding emoticons to attention-based CNN[J]. Journal of Internet Technology, 2020, 21(3): 821-829.

[18] 张仰森, 郑佳, 黄改娟, 等. 基于双重注意力模型的微博情感分析方法[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2018, 58(2): 122-130.
Zhang Y S, Zheng J, Huang G J, et al. Microblog sentiment analysis method based on a double attention model[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2018, 58(2): 122-130(in Chinese).

[19] 何炎祥, 孙松涛, 牛菲菲, 等. 用于微博情感分析的一种情感语义增强的深度学习模型[J]. 计算机学报, 2017, 40(4): 773-790.
He Y X, Sun S T, Niu F F, et al. A deep learning model enhanced with emotion semantics for microblog sentiment analysis[J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(4): 773-790(in Chinese).

[20] Prottasha N J, Sami A A, Kowsher M, et al. Transfer learning for sentiment analysis using BERT based supervised fine-tuning[J]. Sensors, 2022, 22(11): 4157.

[21] 陈亚茹, 陈世平. 融合自注意力机制和 BiGRU 网络的微博情感分析模型[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(8): 1590-1595.
Chen Y R, Chen S P. Microblog sentiment analysis model with the combination of self-attention and BiGRU[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(8): 1590-1595(in Chinese).

[22] Abdelgwad M M, Soliman T H A, Taloba A I. Arabic aspect sentiment polarity classification using BERT[J]. Journal of Big Data, 2022, 9(1): 1-15.

[23] Eisner B, Rocktäschel T, Augenstein I, et al. Emoji2vec: learning emoji representations from their description[C]//Proceedings of the 4th International Workshop on Natural Language Processing for Social Media. Austin: Association for Computational Linguistics, 2016: 48-54.

[24] Devlin J, Chang M W, Lee K, et al. BERT: bidirectional encoder representations from transformers for language understanding[J]. Computation and Language, 2018, 23(2): 3-19.

[25] 韩永鹏, 陈彩, 苏航, 等. 融合通道特征的混合神经网络文本分类模型[J]. 中文信息学报, 2021, 35(2): 78-88.
Han Y P, Chen C, Su H, et al. Hybrid neural network text classification model with channel features[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2021, 35(2): 78-88(in Chinese).

[26] 王根生, 黄学坚, 闵潞. 多元特征融合的 GRU 神经网络文本情感分类模型[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(10): 2130-2138.
Wang G S, Huang X J, Min L. GRU neural network text emotion classification model based on multi-feature fusion[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(10): 2130-2138(in Chinese).

[27] Talaat A S. Sentiment analysis classification system using hybrid BERT models[J]. Journal of Big Data, 2023, 10(1): 1-18.

Textual sentiment classification incorporating dual emoji attention mechanisms

CHEN Kejia[1], XIA Ruidong[1], LIN Hongxi[2,*]

(1. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. School of Business, Putian University, Putian 351100, China)

Abstract: Addressing the issue that the combination of emojis and text data may alter the original semantics, and the mechanism of their interaction with text data has not been fully explored. For this reason, textual sentiment classification incorporating dual emoji attention mechanisms is proposed in the paper. First, a BERT pre-training model is used to obtain the dynamic word vector representation of text; then a CNN-BiGRU dual-channel model is constructed to extract local and global features respectively; after that, the Emoji2vec model is used to obtain the emoji vector representation and construct a dual emoji attention mechanism, which strengthens the key information of the combination of emoji and text from the level of local and global emoji attention mechanisms respectively; then the output feature vectors are fused to classify emotions. In order to verify the effectiveness of the proposed model, contrast and ablation experiments were set up. The Emoji-phone and EmojifyData datasets were used for sentiment classification training, and the findings indicate that the model in this article outperforms the more recent RoBERTa-3xBiGRU model by 0.017 6 and 0.016 6, respectively.

Keywords: sentiment classification; emoji; dual-channel model; BERT; attention mechanism

Received: 2024-05-14; **Accepted**: 2024-07-05; **Published Online**: 2024-08-28 12:52

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240827.1425.003

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (72374030); Special Funds from Fujian Provincial Department of Finance (0300-83022110)

* **Corresponding author**. E-mail: ptulhx@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0331

跨层高效相位感知Transformer的结直肠息肉图像分割算法

梁礼明，李俞霖，刘阳倩，王涛，吴健*
(江西理工大学 电气工程与自动化学院，赣州 341000)

摘 要：针对结直肠息肉图像病变区域形状不规则、边缘轮廓模糊及与正常区域相似性高，导致细节信息丢失和病变区域误分割等问题，提出一种跨层高效相位感知Transformer的结直肠息肉图像分割算法。利用金字塔视觉Transformer分段编码器逐层提取输入特征图的全局语义信息和空间细节，多尺度解析结直肠息肉病变特征；通过极化自注意力模块对病变特征进行回归预测，加深特征语义信息关联性；设计高效相位感知模块，同时提取全局与局部信息，精准定位病变位置；采用跨层融合与传播模块，整合边缘细节，提升高级特征复用率。在CVC-ClinicDB、Kvasir-SEG、ETIS-LaribPolypDB、CVC-ConlonDB和CVC-T这5个数据集上进行实验，Dice指数分别为0.940、0.923、0.801、0.810和0.896，分割性能优于现有CaraNet、MSRAFormer等网络。结果表明，对于空间结构复杂、边缘模糊的结直肠息肉图像，所提算法均有较高的分割精度。

关 键 词：结直肠息肉；Transformer；极化自注意力模块；高效相位感知模块；跨层融合与传播模块

中图分类号：TP391.4

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2281-12

在恶性疾病中，结直肠癌是生活中最常见的癌症之一，其发病率和死亡率一直居高不下[1]，考虑到肠道细胞的过度增殖会引起结直肠发生病变，结直肠息肉就是最明显的特征。研究报告显示，结直肠息肉可以归类为增生性和腺性，增生性息肉为良性，而腺性息肉则有可能随着时间恶化[2]，早期尚可通过简单手术予以切除，生存率高达95%，但一旦进入晚期，比率将大幅度下降。也就是说，生活中定期去医院进行结直肠镜检查，早发现和精确的诊断结直肠腺性息肉是有效预防肠道发生病变的重要手段[3]。然而，结直肠息肉图像的病理特征表现出复杂的形态学结构，图像中的息肉存在大小不一、边缘模糊及正常区域与病变区域高相似性等特点，即便是有丰富临床经验的医生也会具有主观性判断，对同一幅分割结果做出不同解释，不同解释的差异可能导致结果出现漏检和误检等现象[4-5]。因此，临床上亟须开发一种自动识别和自动分割一体化的结直肠息肉图像分割算法，以协助医生提高诊断患者疾病的效率。

传统的结直肠息肉图像分割采取支持向量机(support vector machine, SVM)、息肉结构形状统计、阈值图像对比和人工选取病变特征等方法[6-9]，但传统方法对结直肠息肉图像分割仍具有挑战性。人工提取病变特征(如几何特征[10]、强度分布[11]

收稿日期：2024-05-17；录用日期：2024-08-01；网络出版时间：2024-08-30 10:15
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240829.1530.003
基金项目：国家自然科学基金(51365017,61463018)；江西省自然科学基金(20192BAB205084)；江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ170491,GJJ2200848)
*通信作者. E-mail：liyulin000821@163.com

引用格式：梁礼明，李俞霖，刘阳倩，等. 跨层高效相位感知Transformer的结直肠息肉图像分割算法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2281-2292. Liang L M，Li Y L，Liu Y Q，et al. Cross-layer high-efficiency phase-aware Transformer for colorectal polyp image segmentation algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2281-2292 (in Chinese).

和体积特征[12])和集成策略过于依赖实施者本身的经验;息肉结构形状设计与息肉图片样本数据息息相关,但临床上的病征具备随机性,数据库不能全部记录在案。

随着深度学习的深度普及和图像分析技术的高速发展,计算机算法辅助诊断已被广泛应用于临床上进行医学图像分割,帮助结直肠内科医生准确判断息肉生长位置[13]。众多学者将卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)用于医学图像分割领域,提出许多具有里程碑意义的分割网络,如全卷积网络(fully convolutional network, FCN)[14]和 Ronneberger 等[15]在 FCN 基础上提出的最经典的医学分割网络 U-Net,这些网络为之后的结直肠息肉图像分割研究奠定了良好的基础,呈现越来越多基于编码器-解码器框架的结直肠息肉图像分割网络。Ali 等[16]构建了以 ResNet 为编码器的深度可分离卷积网络,Khan 等[17]设计了反复卷积神经网络(reverse convolutional neural network, RCNN),这些网络在医学图像分割领域均取得了不错的表现,但受限于 CNN 框架结构单一,难以同步提取全局信息和局部信息,易导致错误分割。近年来,自然语言 Transformer[18]在医学图像分割领域的应用也备受关注,其通过建立全局上下文信息链捕获长距离依赖显性关系,增强了提取病变特征的能力。Peng 等[19]提出了一种 Transformer 的混合网络结构,Wang 等[20]构建了金字塔视觉 Transformer(pyramid vision Transformer, PVT),获得图像的语义信息。但这些方法在处理局部信息时易出现空间归纳偏差,导致边缘细节捕捉能力不足,使分割结果不完整和不连续等。

为应对上述问题,本文设计了跨层高效相位感知 Transformer 的结直肠息肉图像分割算法 PEC-Net。该网络由 4 个关键模块组成:结合 CNN 特征 PVT 分段编码器、极化自注意力(polarized self-attention, PSA)模块、高效相位感知模块 (efficient phase-aware module, EPAM) 和跨层融合与传播模块 (cross-layer fusion and propagation module, CFPM)。PVT 分段编码器利用更大的全局感受野提取输入图像中多尺度的远距离依赖特征,同时以平均池化替代卷积层减轻网络的计算复杂程度;PSA 模块旨在加深像素级语义特征之间的通道和空间拓扑关系,去除背景底噪,增强特征捕捉能力;EPAM 通过增大跨通道交互范围和波化特征图逐步聚集局部细节信息与全局上下文信息,帮助网络精准定位病变区域;CFPM 融合各阶段提供的高低级语义信息,有效地将像素级信息传递到整个网络。综上,编码器与解码器协同工作,使得网络能够深度学习结直肠息肉图像特征间的相关性,提高分割精度。

1 网络整体架构

1.1 总体结构

结直肠息肉图像分割时存在计算程度复杂、噪声敏感和特征信息不能有效传播等问题,致使图像分割时出现病变区域误分割和分割结果边缘模糊。为缓解上述问题,本文设计跨层高效相位感知 Transformer 网络 PEC-Net,用于结直肠息肉图像分割,其结构如图 1 所示。首先,利用 PVT 分段编码器生成不同阶段多尺度特征图,相比于 CNN,Transformer 结构能够更好地利用全局信息来处理特征之间的关系。然后,将多尺度特征图输送到 PSA 模

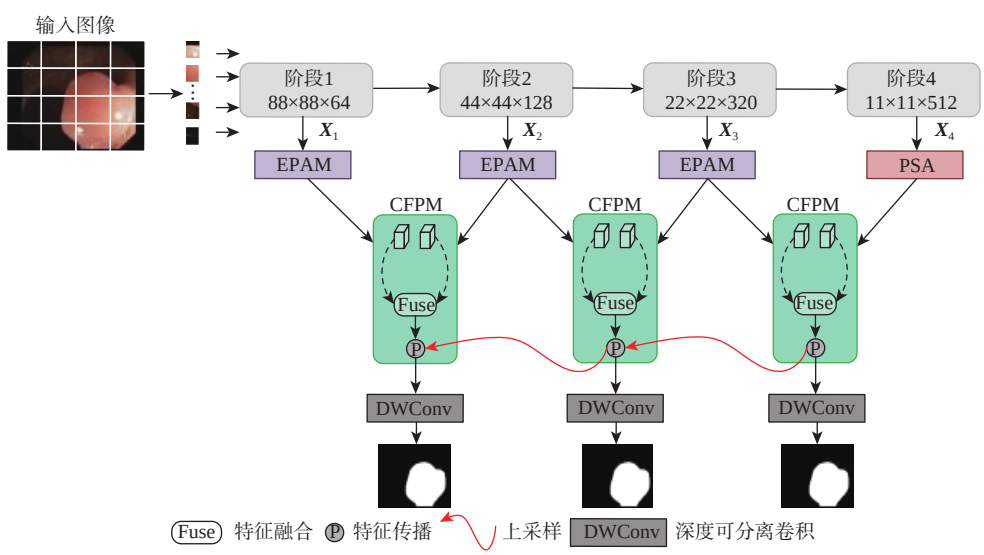


图 1 跨层高效相位感知 Transformer 网络框架

Fig. 1 Framework for cross-layer efficient phase-aware Transformer network

块和 EPAM 中, 前者通过回归预测深入学习特征图通道关联性与空间语义信息, 增强网络抗干扰能力, 后者采用高效和相位双分支, 同时捕获全局与局部信息, 使网络能提取信息更丰富的特征图, 保留更多关键内容。最后, 不同阶段的特征信息通过 CFPM 整合, 减少特征图重构时信息缺失, 输出更精确的掩码结果。

1.2　PVT 编码器

本文使用的分段编码器是在文献 [20] 的基础上改进的 PVTv2[21], 该编码器同样由 4 个完全相同的阶段组成, 每个阶段都包含重叠块压缩层、自注意力层和卷积前馈层, 其结构如图 2 所示。

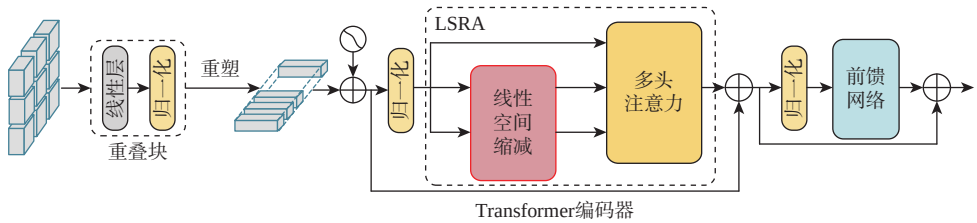


图 2　PVT 分段编码器结构

Fig. 2　Structure pyramid vision Transformer segment encoder

PVTv2 与文献 [20] 相比, 在 2 个方面进行了改进: ①将自注意力层中的空间减少注意层 (spatial reduction attention, SRA) 替换为线性空间减少注意层 (linear spatial reduction attention, LSRA)[21], 二者对比如图 3 所示。②取消自注意力层中的位置编码, 并在特征图外圈通过 Padding 操作扩充一圈 0, 同时在前馈层加入深度可分离卷积, 变成 PVTv2 的卷积前馈层, 其目的是: 卷积层可以通过特征图外圈的 0 学习到特征图的边缘轮廓信息, 而在卷积层内使用深度可分离卷积, 以进一步节省计算开销。LSRA 利用全局平均池化 (global average pooling, GAP) 操作替代 SRA 中的卷积层, 减轻网络的计算复杂程度, 具体过程可分别表示为

$$\Delta_{(\mathrm{SRA})}=\frac{2h^2w^2c}{R^2}+hwc^2R^2 \tag{1}$$

$$\Delta_{(\mathrm{LSRA})}=2hwP^2c \tag{2}$$

式中: Δ 为计算复杂度; R 为 SRA 的空间缩减率; P 为 LSRA 的池大小; h 为高; w 为宽; c 为通道数。

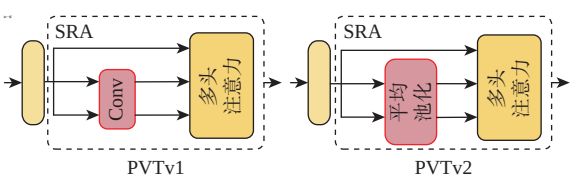


图 3　自注意力层结构对比

Fig. 3　Comparison of self-attention layer structure

1.3　极化自注意力模块

由于结直肠息肉图像复杂度高、像素级语义信息关联性强, 若只简单融合编码器输出特征图中表层细粒度信息与深层粗粒度信息, 无法充分获取病变区域的空间细节特征, 易引入背景底噪等干扰精度的无关信息。因此, 本文在 PEC-Net 编码器阶段 4 处引用 PSA 模块[22], 其结构如图 4 所示。图中: C 为特征图的通道数量, H 为特征图的高度, W 为特征图的宽度。PSA 模块通过像素级回归任务对输入图像的每个像素进行回归预测, 相比于经典注意力 CBAM[23], 其更加轻量化, 能在计算资源有限的同时保持良好的注意力增益。PSA 模块由空间自注意力 (spatial-only self-attention, SSA) 和通道自注意力 (channel only self-attention, CSA) 2 条分支并行布局组成, 其具体计算式为

$$\mathrm{PSA}(\boldsymbol{X})=S_{\mathrm{out}}+C_{\mathrm{out}} \tag{3}$$

式中: S_{out} 为空间自注意力分支处理后的输出; C_{out} 为通道自注意力分支与处理后的输出。

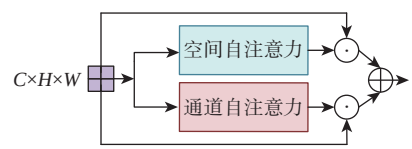


图 4　极化自注意力模块结构

Fig. 4　Structure of polarized self-attention module

1.3.1　空间自注意力

SSA 是指在自注意力的基础上, 增加处理空间信息的能力, 其能通过输入特征间的空间位置关系捕获局部细节信息, 提高网络表征水平, 结构如图 5 所示。首先, 通过 1×1 卷积将输入特征 $\boldsymbol{X}\in\mathbf{R}^{C\times H\times W}$ 降维形成子特征图 $\boldsymbol{W}_q\in\mathbf{R}^{C/2\times H\times W}$ 和 $\boldsymbol{W}_v\in\mathbf{R}^{C/2\times H\times W}$。其次, $\boldsymbol{W}_q$ 经过全局池化层缩小特征图尺寸为 $\boldsymbol{W}_q\in\mathbf{R}^{C/2\times 1\times 1}$, 目的是为在降低参数量的同时整合空间信息, 提高网络的鲁棒性。然后, 利用重塑操作调整 $\boldsymbol{W}_q$ 和 $\boldsymbol{W}_v$ 的空间维度, 以处理图像中不同区域的空间特征信息。由于 $\boldsymbol{W}_q$ 的空间尺寸被完全压缩, 使用 Softmax 函数对 $\boldsymbol{W}_q$ 进行增强, 且将 $\boldsymbol{W}_q$ 和 $\boldsymbol{W}_v$ 以矩阵乘法连接。最后, 为保留特征图本身的原始信息, 采用重塑操作和 Sigmoid 组成的映射层还原特征图的空间维度, 并与输入特征 $\boldsymbol{X}$ 相乘。具体过程

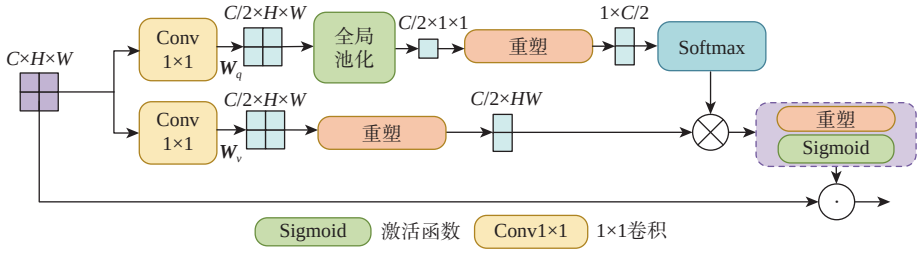


图 5 空间自注意力结构

Fig. 5 Structure of spatial-only self-attention

可表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{W}_q = \mathrm{Conv}_{1\times1}(\boldsymbol{X}) \\ \boldsymbol{W}_v = \mathrm{Conv}_{1\times1}(\boldsymbol{X}) \end{cases} \tag{4}$$

$$F_{\mathrm{GP}}(\boldsymbol{X}) = \frac{1}{H\times W}\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W} W_q(C,i,j) \tag{5}$$

$$A^{\mathrm{sp}}(\boldsymbol{X}) = F_{\mathrm{SG}}[\sigma_3(\mathrm{Softmax}(\sigma_1(F_{\mathrm{GP}}(\boldsymbol{W}_q)))\sigma_2(\boldsymbol{W}_v))] \tag{6}$$

$$S_{\mathrm{out}} = A^{\mathrm{sp}}(\boldsymbol{X})\odot^{\mathrm{sp}}\boldsymbol{X} \tag{7}$$

式中：C为通道数，H为高，W为宽；$\sigma_i(\cdot), i=1,2,3$表示重塑操作；$F_{\mathrm{GP}}(\cdot)$表示全局池化层；$F_{\mathrm{SG}}(\cdot)$表示 Sigmoid 激活函数；$\odot^{\mathrm{sp}}$表示空间乘法运算。

1.3.2 通道自注意力

与 SSA 不同的是，CSA 可帮助网络学习不同通道间的相关性和重要性，其能理解不同通道之间的语义关系，从而更好地捕获输入特征的深层语义信息，提升网络性能，结构如图 6 所示。首先，分别通过 2 个 1×1 卷积，将输入特征 $\boldsymbol{X}\in\mathbf{R}^{C\times H\times W}$转换成 $\boldsymbol{W}_{q'}\in\mathbf{R}^{1\times H\times W}$和$\boldsymbol{W}_{v'}\in\mathbf{R}^{C/2\times H\times W}$。然后，采用重塑操作调整$\boldsymbol{W}_{q'}$和$\boldsymbol{W}_{v'}$的通道数，在$\boldsymbol{W}_{q'}$经过 Softmax 函数后与$\boldsymbol{W}_{v'}$矩阵相乘。最后，将$\boldsymbol{W}_{q'}$和$\boldsymbol{W}_{v'}$输入由 1×1 卷积、特征维度标准化 (LN) 和 Sigmoid 激活函数组成的卷积映射层，将通道维度重新变为 C，且与初始输入特征$\boldsymbol{X}$相乘，保留更丰富的特征信息。其具体计算式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{W}_{q'} = \mathrm{Conv}_{1\times1}(\boldsymbol{X}) \\ \boldsymbol{W}_{v'} = \mathrm{Conv}_{1\times1}(\boldsymbol{X}) \end{cases} \tag{8}$$

$$A^{\mathrm{ch}}(\boldsymbol{X}) = F_{\mathrm{SG}}[\mathrm{Conv}_{1\times1}(\sigma_1(\boldsymbol{W}_{v'})\mathrm{Softmax}(\sigma_2(\boldsymbol{W}_{q'})))] \tag{9}$$

$$C_{\mathrm{out}} = A^{\mathrm{ch}}(\boldsymbol{X})\odot^{\mathrm{ch}}\boldsymbol{X} \tag{10}$$

式中：$\odot^{\mathrm{ch}}$表示通道乘法运算；A^{ch}为通过通道自注意力机制计算得到的注意力权重。

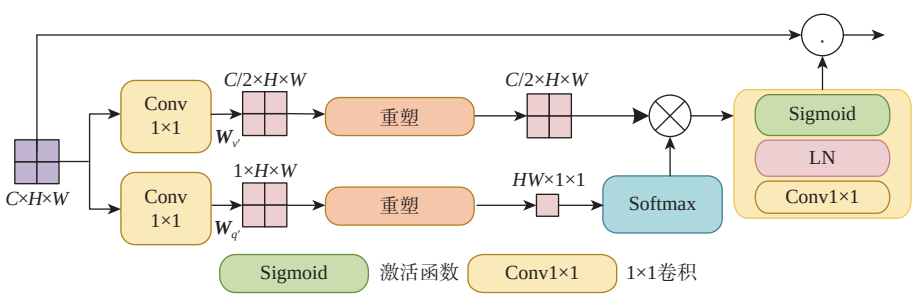


图 6 通道自注意力结构

Fig. 6 Structure of channel-only self-attention

1.4 高效相位感知模块

结直肠息肉图像通常包含十分丰富的特征信息，全局上下文信息涉及图像的整体结构与场景，通过图像的整体语义信息帮助网络精准定位息肉生长位置；而局部细节信息对于识别图像具体区域非常重要，网络需要利用其来准确分割图像中的区域细节。为更加精确地定位和输出预测图像，受文献 [24-25] 启发，设计 EPAM，其结构如图 7 所示。EPAM 由 2 条分支组成，高效通道分支对输入特征图实现跨通道交互，增大提取局部细节信息的覆盖范围；相位感知分支则以更恰当的方式整合特征图

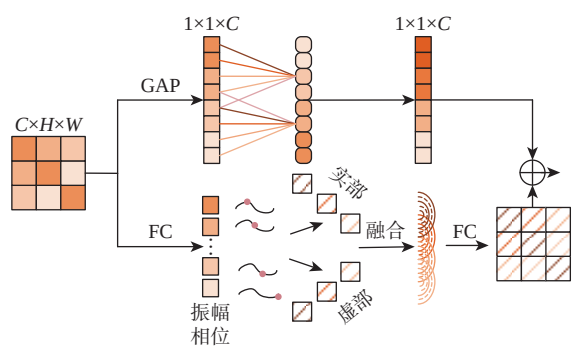


图 7 高效相位感知模块结构

Fig. 7 Structure of efficient phase-aware module

的全局上下文信息。

1.4.1　相位感知分支

为正确整合特征图全局上下文信息, 相位感知分支将每张特征图都赋予相应的振幅和相位信息, 使特征图以波的形式存在, 利用数学方法分析波的变换来获取更精确的上下文特征信息。给定输入特征图$\boldsymbol{x}_j$, 通过由多尺度感知器 (multilayer perceptron, MLP) 构成的全连接层 FC1。FC1 为每张特征图生成得到振幅z_j和相位θ_j, 其计算式为

$$z_j = \mathrm{FC1}(\boldsymbol{x}_j, W^c) \qquad j = 1,2,\cdots,n \tag{11}$$

$$\theta_j = \mathrm{FC1}(\boldsymbol{x}_j, W^\theta) \qquad j = 1,2,\cdots,n \tag{12}$$

式中: z_j为振幅, 即通过点卷积操作将特征图逐个进行图序列编码; θ_j为相位, 即特征图当前所在位置; W^c和W^θ为具有可学习参数的权重; n为特征的个数。

由式 (11)、式 (12) 及欧拉公式, 可得出波的表达式为

$$\tilde{Z}_j = |z_j| \odot \mathrm{e}^{\mathrm{i}\theta_j} = |z_j| \odot \cos\theta_j + \mathrm{i}|z_j| \odot \sin\theta_j \qquad j = 1,2,\cdots,n \tag{13}$$

式中: $\tilde{Z}_j$表示每个特征图振幅的实值; $|z_j|$表示每个特征图振幅的绝对值; $\odot$表示元素乘法。

特征图转化为多个特征波后, 使得网络可更容易地挖掘深度上下文语义信息, 通过 FC2 将全局特征波进行整合。此时, 面临不同阶段的特征时, 可利用波的特性, 根据相位差不同的权重进行自适应融合。FC2 的公式为

$$o_j = \mathrm{FC2}(\tilde{Z}_j, W^t) \qquad j = 1,2,\cdots,n \tag{14}$$

将式 (13) 代入式 (14) 中, 可得

$$O_j = \sum_k W^t_{jk} z_k \odot \cos\theta_k + W^i_{jk} z_k \odot \sin\theta_k \qquad j = 1,2,\cdots,n \tag{15}$$

式中: o_j为自适应融合的值; W^i和W^t为具有可学习参数的权重; O_j为自适应融合的最终值。

1.4.2　高效通道分支

高效通道分支主要通过对特征图的通道加权, 使网络能够更集中关注每个通道之间的关系, 提升网络对局部特征的感知能力, 在更少的计算参数的同时带来更明显的增益, 即“高效”。给定输入特征图$\boldsymbol{X} \in \mathbf{R}^{C\times H\times W}$, 首先, 将输入特征图通过全局平均池化, 目的是得到聚合特征$\boldsymbol{X}' \in \mathbf{R}^{C\times 1\times 1}$; 然后, 利用卷积核大小为$k$的 1×1 卷积生成聚合特征的通道权重, k由通道数自适应确定, k的大小代表局部跨通道交互的覆盖范围, 即每个通道有k个特征参与跨通道交互; 最后, 将归一化权重与相位感知分支的输出特征逐层相乘, 生成加权后的特征图$\boldsymbol{X}_{\mathrm{out}} \in \mathbf{R}^{C\times H\times W}$。其计算式为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{out}} = \mathrm{Conv}^k_{1\times 1}(F_{\mathrm{GAP}}(\boldsymbol{X})) \cdot O_j \tag{16}$$

$$k = \psi(C) = \left| \frac{\log_2 C}{\gamma} + \frac{b}{\gamma} \right|_{\mathrm{odd}} \tag{17}$$

式中: $F_{\mathrm{GAP}}(\cdot)$表示全局平均池化; $\psi(C)$表示k关于通道数的映射, 其结果是一个与之最接近的奇数; γ和b为线性系数, 本文实验中分别设置为 2 和 1; $|\,|_{\mathrm{odd}}$表示将结果调整为最接近的奇数。

1.5　跨层融合与传播模块

结直肠息肉图像分割在进行特征融合时常利用跨层次特征间的相关性来提升网络性能, 可现有办法往往将这些特征直接传递给解码器, 导致在特征融合时忽略了来自不同层次的特征贡献。这不仅不能将有价值的特征信息有效传播到解码器中, 还可能引入无效信息, 引起局部歧义, 进而影响分割结果。为此, 本文引入 CFPM[26], 通过相邻特征间的交叉相关性, 使跨层次特征可以有效的融合与传播。CFPM 由特征融合与特征传播 2 部分组成, 其结构如图 8 所示。

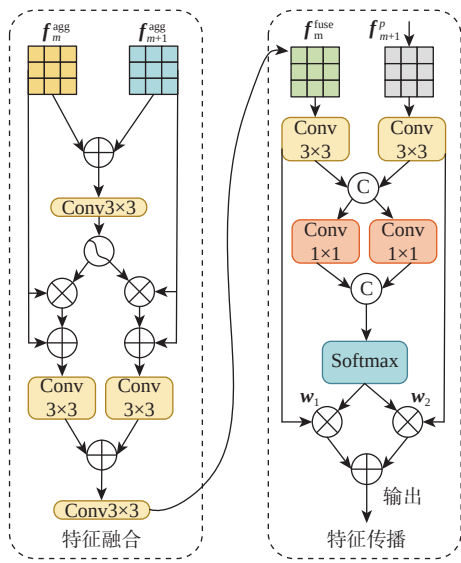


图 8　跨层融合与传播模块结构

Fig. 8　Structure of cross-layer fusion and propagation module

1.5.1　特征融合

给定 2 个跨级聚合特征$\boldsymbol{f}^{\mathrm{agg}}_{m+1} \in \mathbf{R}^{C\times H\times W}$和$\boldsymbol{f}^{\mathrm{agg}}_{m} \in \mathbf{R}^{C\times H\times W}$, 首先, 两者通过加法运算, 对特征内信息初步融合。然后, 将融合后的特征输入到 3×3 卷积层, 并通过 Sigmoid 映射得到 (0,1) 范围的特征图, 此时的特征图被归一化处理后用来增强跨层次特征, 捕获它们之间的相关性, 得到增强型特征图$\boldsymbol{f}^{\mathrm{en}}_{m+1}$和$\boldsymbol{f}^{\mathrm{en}}_{m}$。最后, 为保留初始的特征信息, 采用残差连接, 将增强的跨层次特征$\boldsymbol{f}^{\mathrm{en}}_{m+1}$和$\boldsymbol{f}^{\mathrm{en}}_{m}$与原始特征

信息相结合得到融合特征f_m^{fuse}，以提高特征信息的复用率。其具体计算式为

$$\begin{cases} f_{m+1}^{\text{en}} = f_{m+1}^{\text{agg}} + \sigma(\text{Conv}_{3\times3}(f_{m+1}^{\text{agg}})) \otimes f_{m+1}^{\text{agg}} \\ f_m^{\text{en}} = f_m^{\text{agg}} + \sigma(\text{Conv}_{3\times3}(f_{m+1}^{\text{agg}})) \otimes f_m^{\text{agg}} \\ f_m^{\text{fuse}} = \text{Conv}_{3\times3}(\text{Conv}_{3\times3}(f_{m+1}^{\text{en}}) + \text{Conv}_{3\times3}(f_m^{\text{en}})) \end{cases} \tag{18}$$

式中：$\sigma(\cdot)$表示 Sigmoid 激活函数。

1.5.2 特征传播

在经过特征融合后，还需将整合后的特征有效传播到整个网络。首先，将特征融合的输出特征f_m^{fuse}与 CFPM 的输出f_{m+1}^{p}(为区分起见，将 CFPM 的输出特征记作$f_{m+1}^{p} \in \mathbf{R}^{C\times H\times W}$)分别经过 3×3 卷积层处理，生成更加平滑的特征p_1和p_2。其次，通过 Concat 操作连接这 2 个特征，将它们组合在空间中特定的位置，得到空间特征$f_{\text{cat}} = [p_1, p_2] \in \mathbf{R}^{2\times W\times H}$。然后，对空间特征进行 1×1 卷积运算，将高维特征f_{cat}映射到 2 个不同的空间闸门，将 Softmax 函数应用到 2 个空间闸门，得到 2 个输出特征w_1、w_2。最后，将平滑特征p_1和p_2与输出特征w_1和w_2进行相乘和累加操作，得到最终传播特征$f_m^{p(i,j)}$。其具体计算式为

$$w_1^{(i,j)} = \frac{g_1^{(i,j)}}{g_1^{(i,j)} + g_2^{(i,j)}} \tag{19}$$

$$w_2^{(i,j)} = \frac{g_2^{(i,j)}}{g_1^{(i,j)} + g_2^{(i,j)}} \tag{20}$$

$$f_m^{p(i,j)} = w_1^{(i,j)} p_1^{(i,j)} + w_2^{(i,j)} p_2^{(i,j)} \tag{21}$$

式中：$g_1^{(i,j)}$和$g_2^{(i,j)}$分别为特征g_1和g_2中(i,j)个位置的权重；$w_1^{(i,j)} + w_2^{(i,j)} = 1$。

2 实验方法与设置

2.1 数据集

为评估网络对结直肠息肉图像分割的有效性、普适性和准确性，本文模型在 5 个公开数据集上进行了相关训练与测试。第 1 个数据集来自医学图像计算与计算机辅助发布的 CVC-ClinicDB[27]；第 2 个数据集是挪威奥斯陆大学医院的专家采集标注的 Kvasir-SEG[28]；第 3 个数据集生成于 MIC-CAI 息肉自动检测子挑战赛的 ETIS-LaribPolypDB[29]；第 4 个数据集是美国梅奥诊所发布的 CVC-ConlonDB[30]；第 5 个数据集 CVC-T 是一个更广泛的测试集，由患者结直肠息肉视频中得到的 60 张图像组成。本文随机选择 550 张 CVC-ClinicDB 数据集和 900 张 Kvasir-SEG 数据集中的结直肠息肉图像作为实验的训练集，剩余图像与 ETIS-LaribPolypDB、CVC-ConlonDB 和 CVC-T 组成实验测试集。为方便模型训练，将训练集图像分辨率统一设置为 352×352。数据集具体设置如表 1 所示。

表 1 数据集划分及尺寸

Table 1 Dataset partitioning and sizing

数据集	训练集	测试集	图片尺寸
CVC-ClinicDB	550	62	352×352
Kvasir-SEG	900	100	352×352
ETIS-LaribPolyDB	0	196	352×352
CVC-ConlonDB	0	380	352×352
CVC-T	0	60	352×352

2.2 实验环境与参数设置

实验网络中，采用由 IoU 损失函数与二进制交叉熵损失函数组合而成的损失函数，初始学习率设置为 10^{-5}，衰减周期和衰减率分别设置为 50 和 0.1。同时，采用自适应矩阵估计优化器，批次处理数据量设置为 8，训练总轮次设置为 100 轮，并使用{0.75,1,1.25}的多尺度训练策略。为提高对比网络的预测、学习和泛化能力的统一性，本文进行的所有训练与测试均使用相同数据集、学习率及优化策略。本文实验运行环境的硬件设备如表 2 所示。

表 2 实验环境

Table 2 Experimental environment

实验环境	设置
系统	Windows11
处理器	Inter Core i5-13600 CPU
显卡	NVIDIA GeForce RTX 4070Ti GPU
CUDA	CUDA 12.1
深度学习框架	Pytorch 3.9

2.3 损失函数

多数学者研究图像分割问题会采用加权二进制交叉熵损失函数来衡量预测结果和真实结果的差异，但结直肠息肉图像分割时的目标通常为较小的区域，这种情况会导致训练效果不佳，而加权 IoU 损失函数则利用预测边界框和真实边界框的交并集减轻了这种差异。因此，本文结合两者优点，使用加权二进制交叉熵函数和加权 IoU 损失函数组成新的损失函数来评测本文网络，该函数表达式为

$$L_{\text{BCE}} = -\frac{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}(1+\lambda\beta_{ij})\sum_{i=1}^{q}\varphi(g_{ij}=1)\lg P(p_{ij}=l|\alpha)}{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}\lambda\beta_{ij}} \tag{22}$$

$$L_{\text{IoU}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}(g_{ij}p_{ij})(1+\lambda\beta_{ij})}{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}(g_{ij}+p_{ij}-g_{ij}p_{ij})(1+\lambda\beta_{ij})} \tag{23}$$

$$L = L_{\mathrm{BCE}} + L_{\mathrm{IoU}} \tag{24}$$

式中: L_{BCE} 为二元交叉熵损失函数; L_{IoU} 为加权 IoU 损失函数值; $\varphi(\cdot)$ 表示标记像素类别的指数函数; λ 为超参数; $l \in (0,1)$ 用于区分病变区域和非病变区域; $P(p_{ij} = l|\alpha)$ 表示预测结果的概率值; β_{ij} 为权重值, 范围为 $(0,1)$, 该值越大, 说明像素与周围区域像素值差距越大; g_{ij} 为图像中位置 (i,j) 处的像素值。

2.4　评估指标

本文采用 6 个评估指标对结直肠息肉图像分割性能进行评估, 分别为骰子系数 (Dice)、平均交并比 (mean IoU, MIoU)、精确度 P_{C}、召回率 R、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和 F_2 得分, 其计算式分别为

$$D_{\mathrm{ice}} = \frac{2|x \cap Y|}{|x| + |Y|} \tag{25}$$

$$M_{\mathrm{IoU}} = \frac{|x \cap Y|}{|x| + |Y| - |x \cap Y|} \tag{26}$$

$$P_{\mathrm{C}} = \frac{T}{T + F_3} \tag{27}$$

$$R = \frac{T}{T + F_1} \tag{28}$$

$$F_2 = \frac{5RP_{\mathrm{C}}}{4P_{\mathrm{C}} + R} \tag{29}$$

$$M_{\mathrm{AE}} = \frac{1}{N}\sum |Y - x| \tag{30}$$

式中: x 为训练得到的分割结果中病变区域的像素集合; Y 为原结直肠息肉图像中金标签病变区域的像素集合; T 为分割结果正确分割的像素集合; F_1 为分割结果中被错误分类成前景像素的像素集合; F_3 为分割结果中被错误识别成背景像素的像素集合; N 为结直肠息肉图像中像素点总数。

3　实验结果

3.1　算法性能客观对比实验

本文对 PEC-Net 在结直肠息肉图像分割中的性能进行了验证, 并将其与多种结直肠息肉图像分割网络进行对比, 包括 U-Net[15]、PraNet、CaraNet[31]、PolypPVT[32]、SSFormer-s[33] 和 MSRAFormer[34]。U-Net 利用编码器和解码器之间的跳跃连接融合深层语义信息和浅层信息, 实现图像不同层次信息的简单融合; PraNet 基于并行反向注意力机制聚合深度语义信息, 建立病变位置边缘特征间的依赖关系; CaraNet 是专为小型医疗图像分割任务设计的新型神经网络, 通过特征金字塔来提取图像全局上下文信息; PolypPVT 采用视觉金字塔 Transformer, 通过伪装识别模块和相似聚合模块保留边缘细节, 有效抑制图像分割时出现的背景底噪; SSFormer-s 和 MSARFormer 分别专注于轻量化和高效率, 前者通过缩小模型参数和浮点计算, 在处理小型对象时表现出色, 后者则通过 Swin Transformer 与多尺度通道注意力机制相结合, 提升全局上下文信息的提取能力。为确保实验的一致性。以上算法在相同设备上复现了开源代码, 实验结果如表 3 和表 4 所示。

表 3　不同算法在 CVC-ClinicDB 和 Kvasir-SEG 数据集上的对比

Table 3　Comparison of different algorithms on CVC-ClinicDB and Kvasir-SEG datasets

数据集	算法	Dice	MIoU	R	P_{C}	F_2	MAE
CVC-ClinicDB	U-Net[15]	0.824	0.755	0.834	0.839	0.827	0.019
	PraNet	0.901	0.851	0.910	0.907	0.901	0.009
	CaraNet[31]	0.936	0.887	0.951	0.928	0.938	0.007
	SSFormer-s[33]	0.918	0.874	0.904	0.939	0.909	0.007
	MSRAFormer[34]	0.934	0.884	0.953	0.924	0.944	0.008
	PolypPVT[32]	0.934	0.879	0.937	0.936	0.927	0.012
	本文	0.940	0.894	0.968	0.948	0.951	0.005
Kvasir-SEG	U-Net[15]	0.820	0.746	0.856	0.857	0.827	0.054
	PraNet	0.900	0.842	0.911	0.915	0.901	0.029
	CaraNet[31]	0.918	0.867	0.912	0.938	0.914	0.023
	SSFormer-s[33]	0.926	0.873	0.917	0.941	0.920	0.017
	MSRAFormer[34]	0.919	0.870	0.921	0.938	0.918	0.020
	PolypPVT[32]	0.920	0.868	0.913	0.907	0.910	0.023
	本文	0.923	0.876	0.925	0.954	0.923	0.023

由表 3 可知, 本文网络分割性能较好, 在 CVC-ClinicDB 和 Kvasir-SEG 数据集上测试, Dice 系数达到 0.940 和 0.923, MIoU 达到 0.894 和 0.876, P_{C} 分别达到 0.948 和 0.954。U-Net、PraNet 和 CaraNet

表4 不同算法在ETIS-LaribPolypDB、CVC-ConlonDB和CVC-T数据集上的对比

Table 4 Comparison of different algorithms on ETIS-LaribPolypDB、CVC-ConlonDB and CVC-T datasets

数据集	算法	Dice	MIoU	R	P_C	F_2	MAE
ETIS-LaribPolypDB	U-Net[15]	0.511	0.437	0.523	0.620	0.510	0.058
	PraNet	0.716	0.642	0.739	0.755	0.717	0.043
	CaraNet[31]	0.747	0.672	0.811	0.731	0.777	0.017
	SSFormer-s[33]	0.769	0.694	0.856	0.743	0.800	0.016
	MSRAFormer[34]	0.747	0.673	0.823	0.786	0.781	0.012
	PolypPVT[32]	0.789	0.703	0.869	0.748	0.816	0.020
	本文	0.801	0.728	0.864	0.795	0.819	0.011
CVC-ColonDB	U-Net[15]	0.405	0.333	0.482	0.439	0.428	0.036
	PraNet	0.630	0.566	0.686	0.628	0.648	0.031
	CaraNet[31]	0.773	0.689	0.837	0.753	0.796	0.042
	SSFormer-s[33]	0.774	0.698	0.777	0.836	0.766	0.035
	MSRAFormer[34]	0.782	0.707	0.803	0.872	0.787	0.028
	PolypPVT[32]	0.804	0.725	0.835	0.822	0.812	0.031
	本文	0.810	0.730	0.844	0.834	0.815	0.026
CVC-T	U-Net[15]	0.716	0.627	0.754	0.766	0.735	0.022
	PraNet	0.872	0.797	0.841	0.940	0.904	0.009
	CaraNet[31]	0.886	0.823	0.851	0.944	0.922	0.011
	SSFormer-s[33]	0.889	0.823	0.862	0.946	0.915	0.009
	MSRAFormer[34]	0.894	0.828	0.863	0.954	0.927	0.006
	PolypPVT[32]	0.886	0.817	0.848	0.942	0.912	0.008
	本文	0.896	0.828	0.857	0.961	0.929	0.008

均是基于CNN框架构建而成，难以捕获全局语义信息间特征依赖关系，削弱语义信息在结直肠息肉图像分割时的指导作用。PolypPVT、SSFormer-s、MSRAFormer和本文网络PEC-Net利用Transformer重塑图像形状，缩短远近特征间距，捕获更多病变区域信息。PEC-Net的分割性能较传统医学分割网络U-Net显著提升，Dice系数分别提升0.116和0.103，MIoU分别提升0.139和0.13。相比基于CNN金字塔结构的CaraNet，PEC-Net的Dice系数分别提升0.004和0.005，MIoU分别提升0.007和0.009。同样采用Transformer的PolypPVT网络，Dice系数比PEC-Net低0.006和0.003，MIoU低0.015和0.008。Dice系数表示预测结果中病变区域像素数量与总数量的比值，高Dice系数说明PEC-Net分割结直肠息肉病变图像能力较优，而高MIoU则说明PEC-Net分割结果与金标签结果更加贴合。实验指标说明本文网络能学习图像中的判别性特征，准确区分出正常区域与病变区域，分割出准确的掩码结果。

表4展示了PEC-Net与其他6种网络在ETIS-LaribPolypDB、CVC-ConlonDB和CVC-T这3个数据集上的测试结果。Dice系数达到0.801、0.810和0.896，F_2得分达到0.819、0.815和0.929。PEC-Net与同样采用Transformer结构的SSFormer-s和MSRAFormer相比有较大提升，对比多尺度通道注意力网络MSRAFormer，Dice系数分别提升0.054%、0.028和0.002，F_2得分分别提升0.038、0.028和0.002。相较于反向注意力网络PraNet，Dice系数分别提升0.085、0.18和0.024，F_2得分别提升0.102、0.167和0.025。F_2得分是召回率和精确度的综合体现，高得分说明PEC-Net能更精确地将病变对象从背景区域中分割出来。

表5给出本文网络与其他6种网络的模型参数量、浮点运算速度和单轮训练时长，本文网络分别为30.88×10^6、8.87×10^9 s^{-1}和117 round/s，表明其能较快完成训练与测试。以Transformer为框架构建而

表5 不同算法的参数量、浮点运算速度和单轮训练时长

Table 5 Number of parameters, floating-point operations per second, and single-round training duration for different algorithms

算法	参数量	浮点运算速度/10^9 s^{-1}	单轮训练时长/s
U-Net[15]	34.52×10^6	65.52	309
PraNet	30.49×10^6	6.95	90
CaraNet[31]	44.53×10^6	11.47	256
PolypPVT[32]	25.10×10^6	5.29	233
SSFormer-s[33]	29.31×10^6	10.11	220
MASRFormer[34]	68.03×10^6	21.29	199
本文	30.88×10^6	8.87	117

成的 PolypPVT 和 SSFormer-s 网络在计算复杂度上明显高于 U-Net 和 CaraNet, 可轻量化网络 SSFormer-s 虽然降低了 Transfomer 的模型参数量, 但也降低了性能指标。本文网络的模型参数量和浮点运算速度分别为 30.88×10^6 和 8.87×10^9 s^{-1}, 均处于较优水平, 与最优网络 PolypPVT 相比, 在计算复杂度提升不大的情况下, 得到更优的分割性能。综合分析, 本文网络能在兼顾模型参数和计算复杂程度的情况下, 将 Transfomer 结构应用于结直肠息肉图像分割, 并提升分割精度。

为更清晰直观地呈现本文算法在训练过程中的 Dice 系数变化, 给出了 5 个数据集上 Dice 系数的变化曲线走势图, 如图 9 所示。可知, Dice 系数提升稳定且迅速, 不会出现过拟合现象, 在 epoch=90 左右达到峰值, 即最优 Dice 系数。

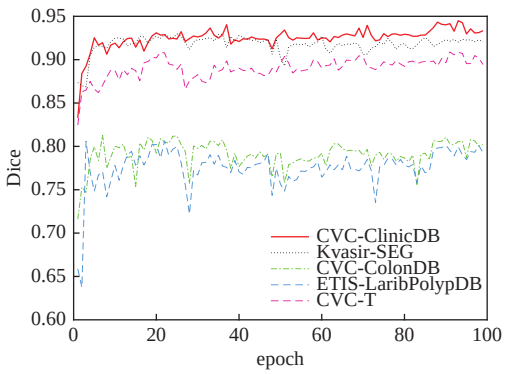


图 9　5 个数据集上 Dice 指数变化曲线

Fig. 9　Dice exponential change curves on five datasets

3.2　算法性能主观对比实验

图 10 和图 11 给出上述 7 种网络在 CVC-ClinicDB、Kvasir-SEG、ETIS-LaribPolypDB 和 CVC-ConlonDB 这 4 个数据集上的可视化分割结果, 用蓝色方框标出原图病变特征区域, 用红黄蓝 3 种颜色标注图像, 其中, 黄色表示真阳性, 红色表示假阳性, 蓝色表示假阴性, 清晰划分出前景对像和背景

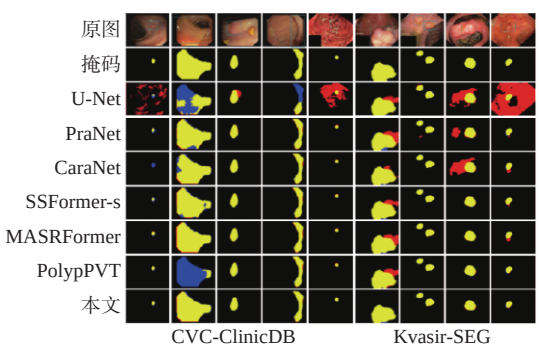


图 10　CVC-ClinicDB 和 Kvasir-SEG 数据集上不同网络分割结果

Fig. 10　Results of different network segmentation on CVC-ClinicDB and Kvasir-SEG datasets

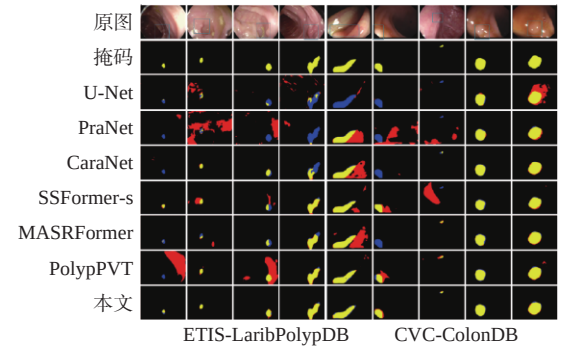


图 11　ETIS-LaribPolypDB 和 CVC-ColonDB 数据集上不同网络分割结果

Fig. 11　Results of different network segmentation on ETIS-LaribPolypDB and CVC-ColonDB datasets

对象。在图 10 的第 7 列和图 11 的第 8 列可视化结果图像中, 病变位置边界轮廓清晰, 与周围正常区域对比度明显, 7 种网络均能在分割时有良好的表现。从图 10 和图 11 的第 3 和 4 行可视化结果中可看出, U-Net 和 PraNet 出现大量错误分割, 说明只对不同层次特征做简单融合难以消除特征间产生的语义鸿沟, 影响分割准确性。图 10 的第 2 列与图 11 的第 7 列可视化结果中, 病变区域颜色从内至外逐层变浅, 浅色病变区域与正常区域颜色具有一致性, U-Net、CaraNet 和 PoylpPVT 只能判断出深色病变区域, 导致分割结果不连续, MASRFormer 和本文网络利用不同的通道注意力机制加深特征间的通道依赖关系, 是掩码结果与金标签高度贴合。图 11 中第 3 幅和第 6 幅结直肠息肉图像中存在反光现象, 导致部分病变区域和正常区域出现高光亮斑, 使得 U-Net、PraNet、SSFormer-s 和 MASRFormer 的分割结果中出现大量蓝色, 即丢失病变区域, 出现漏分割现象, 说明上述网络在分割时容易被无效信息干扰, 而本文网络 PEC-Net 则利用 PSA 模块剖析结直肠息肉图像中像素级语义信息间的关联性, 有效消除背景底噪等无效信息的干扰。由图 10 和图 11 第 1 行可以看出, SSFormer-s 和 CaraNet 虽然都是针对小对象, 但基于 Transformer 框架的 SSFormer-s 面对边缘细节和更小的局部病变区域有更加优秀的表现, 而 PEC-Net 利用 EPAM 增大特征信息的捕捉范围也能实现小对象的精准分割。与其他 6 种算法相比, PEC-Net 通过 PSA 模块增强语义信息关联性, EPAM 同时捕获全局语义信息与局部细节信息, CFPM 整合不同阶段特征信息, 并将其有效传递到整个网络。综上所述, 本文网络的分割精度效果更佳。

3.3　改进模块实验

为验证本文设计 EPAM 的合理性与有效性, 将文献 [24-25] 和 EPAM 在 CVC-ClinicDB 和 CVC-

ConlonDB 这 2 个数据集且同等实验环境下做对比实验，即编码器和解码器其他结构不调整的情况下，分别使用上述 3 个模块进行实验，实验结果如表 6 所示。

表 6 高效相位感知模块在 CVC-ClinicDB 和 CVC- ColonDB 数据集上的对比结果

Table 6 Comparison results of efficient phase-aware module on CVC-ClinicDB and CVC- ColonDB datasets

数据集	算法	Dice	MIoU	R	P_C	F_2	MAE
CVC-ClinicDB	文献[24]	0.934	0.886	0.940	0.940	0.934	0.008
	文献[25]	0.928	0.882	0.925	0.945	0.932	0.012
	本文	0.940	0.894	0.968	0.948	0.951	0.005
CVC-ColonDB	文献[24]	0.788	0.705	0.831	0.802	0.786	0.035
	文献[25]	0.786	0.705	0.799	0.849	0.801	0.042
	本文	0.810	0.730	0.844	0.834	0.815	0.026

表 6 给出 3 个模块的对比实验数据。本文设计模块除在 CVC-ConlonDB 数据集的 P_C 上取得次优结果，在其他数据上均取得最优，Dice 系数分别达到 0.940 和 0.810，与文献 [24] 对比分别提升了 0.006 和 0.022；与文献 [25] 对比，Dice 系数分别提升了 0.012 和 0.024。实验数据表明，本文设计的 EPAM 在吸取上述文献优点的同时，弥补了文献 [24] 对全局上下文提取能力不足，文献 [25] 对局部细节提取能力不足的缺点，该模块设计合理且有效。

3.4 消融实验

融合 Transformer 的编解码网络 PEC-Net 包括分段编码器与解码器，能够深度挖掘结直肠息肉图像的全局语义特征与局部细节特征，提取图中深层关键信息，得到高精度分割结果图像。为探究 PEC-Net 中各模块对网络分割性能的影响，本文在 CVC-ClinicDB 和 ETIS-LaribPolypDB 这 2 个数据集上分别进行消融实验。M1 以分段编码器为基础加入 EPAM 与 CFPM；M2 在编码器中只加入 PSA 模块和 CFPM；M3 不使用 CFPM 对各阶段信息进行融合，只有 PSA 模块和 EPAM 发挥作用；M4 在编码器中同时加入 PSA 模块、EPAM 和 CFPM，消融实验结果如表 7 和表 8 所示。PSA 模块加深特征通道之间依赖性和减少空间信息缺失，提高网络的精确度。EPAM 互补结直肠息肉图像中全局上下文信息与局部细节信息，提高网络平均交并比。

表 7 各模块在 CVC-ClinicDB 数据集上的消融结果

Table 7 Ablation results for each module on CVC-ClinicDB dataset

模块	解码器			Dice	MIoU	R	P_C	F_2
	极化	高效	混合					
M1		√	√	0.933	0.888	0.928	0.934	0.933
M2	√		√	0.923	0.874	0.922	0.946	0.920
M3	√	√		0.908	0.855	0.901	0.943	0.903
M4	√	√	√	0.940	0.894	0.938	0.948	0.951

表 8 各模块在 ETIS-LaribPolypDB 数据集上的消融结果

Table 8 Ablation results for each module on ETIS-LaribPolypDB dataset

模块	解码器			Dice	MIoU	R	P_C	F_2
	极化	高效	混合					
M1		√	√	0.786	0.712	0.830	0.830	0.804
M2	√		√	0.764	0.693	0.793	0.801	0.773
M3	√	√		0.703	0.619	0.668	0.731	0.748
M4	√	√	√	0.801	0.728	0.864	0.795	0.819

CFPM 对多尺度特征进行高效整合，保持对深层语义信息的复用率，提高 Dice 系数和 F_2 得分，消融实验阐述了本文网络各模块实际作用。

4 结 论

本文提出跨层高效相位感知 Transformer 网络 PEC-Net 应用于结直肠息肉图像分割，有效改善了结直肠息肉分割时细节信息丢失和病变区域误分割等问题。

1）PEC-Net 有效解决结直肠息肉图像分割细节丢失与误分割问题。跨层高效相位感知 Transformer 网络（PEC-Net）以 PVTv2 分段编码器提取多尺度特征，通过极化自注意力、高效相位感知、跨层融合与传播三大模块协同，实现全局语义与局部细节深度融合，显著提升分割完整性与边缘精度。

2）PEC-Net 在 5 个息肉数据集上均取得最优分割性能。在 CVC-ClinicDB、Kvasir-SEG、ETIS-LaribPolypDB、CVC-ConlonDB、CVC-T 这 5 个标准数据集上，PEC-Net 的 Dice 系数分别达到 0.940、0.923、0.801、0.810、0.896，MIoU 分别为 0.894、0.876、0.728、0.730、0.828，各项指标优于 U-Net、PraNet、CaraNet、PolypPVT、SSFormer-s、MSRAFormer 等主流算法，对复杂、模糊、小目标息肉均具备更强分割能力。

3）各核心模块协同显著提升网络精度与效率。消融实验与对比实验表明, 极化自注意力模块可抑制噪声、增强特征关联; 高效相位感知模块可同步捕获全局与局部信息; 跨层融合与传播模块可提升特征复用率。三者共同作用使模型在 30.88×10^6 参数量、8.87×10^9 s^{-1} 浮点运算速度的轻量化条件下, 实现高精度、稳定收敛的分割效果。

4）PEC-Net 具备临床辅助诊断应用价值。所提算法对边缘模糊、反光干扰、尺寸差异大的息肉图像均可实现精准分割, 结果与金标准高度一致, 能够为内镜下结直肠息肉自动识别与早期筛查提供可靠算法支撑, 具有较强实用价值。

未来可进一步研究轻量化与加速优化, 适配临床内镜实时分割部署; 引入多中心临床数据与小样本学习, 提升微小/罕见息肉图像分割鲁棒性; 探索多模态图像融合与端边云协同推理, 推动算法临床落地。

参考文献（References）

[1] Liang H, Cheng Z M, Zhong H Q, et al. A region-based convolutional network for nuclei detection and segmentation in microscopy images[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2022, 71: 103276.

[2] Banik D, Roy K, Bhattacharjee D, et al. Polyp-Net: a multimodel fusion network for polyp segmentation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 4000512.

[3] Jha D, Smedsrud P H, Johansen D, et al. A comprehensive study on colorectal polyp segmentation with ResUNet++, conditional random field and test-time augmentation[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2021, 25(6): 2029-2040.

[4] 关少亚, 张诚, 孟偲, 等. 基于相位对称性的血管超声图像分割算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(10): 2645-2650.
Guan S Y, Zhang C, Meng S, et al. Vascular ultrasound image segmentation algorithm based on phase symmetry[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(10): 2645-2650(in Chinese).

[5] Zhou L S, Liang L M, Sheng X Q. GA-Net: ghost convolution adaptive fusion skin lesion segmentation network[J]. Computers in Biology and Medicine, 2023, 164: 107273.

[6] Shao D G, Xu C R, Xiang Y, et al. Ultrasound image segmentation with multilevel threshold based on differential search algorithm[J]. IET Image Processing, 2019, 13(6): 998-1005.

[7] Eriyanti N A, Sigit R, Harsono T. Classification of colon polyp on endoscopic image using support vector machine[C]//Proceedings of the International Electronics Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2021: 244-250.

[8] Senthilkumaran N, Vaithegi S. Image segmentation by using thresholding techniques for medical images[J]. Computer Science & Engineering, 2016, 6(1): 1-13.

[9] Yue G H, Han W W, Jiang B, et al. Boundary constraint network with cross layer feature integration for polyp segmentation[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2022, 26(8): 4090-4099.

[10] Näppi J, Yoshida H. Automated detection of polyps with CT colonography evaluation of volumetric features for reduction of false-positive findings[J]. Academic Radiology, 2002, 9(4): 386-397.

[11] Jerebko A K, Franaszek M, Summers R M. Radon transform based polyp segmentation method for CT colonography computer aided diagnosis[C]//Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Conference on Medical Imaging: Physiology and Function-Methods, Systems, and Applications. Bellingham: SPIE, 2002, 225: 257-258.

[12] Yao J H, Miller M, Franaszek M, et al. Colonic polyp segmentation in CT colonography-based on fuzzy clustering and deformable models[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2004, 23(11): 1344-1352.

[13] Wu H S, Zhao Z B, Zhong J F, et al. PolypSeg: a lightweight context-aware network for real-time polyp segmentation[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(4): 2610-2621.

[14] Long J, Shelhamer E, Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2015: 3431-3440.

[15] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Berlin: Springer, 2015: 234-241.

[16] Ali S M F, Khan M T, Haider S U, et al. Depth-wise separable atrous convolution for polyps segmentation in gastro[C]//Proceedings of the MediaEval. [S.l.:s.n.]: 2020.

[17] Khan M A, Khan M A, Ahmed F, et al. Gastrointestinal diseases segmentation and classification based on duo-deep architectures[J]. Pattern Recognition Letters, 2020, 131: 193-204.

[18] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al. Attention is all you need[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2017: 6000-6010.

[19] Peng Z L, Huang W, Gu S Z, et al. Conformer: local features coupling global representations for visual recognition[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2022: 357-366.

[20] Wang J F, Huang Q M, Tang F L, et al. Stepwise feature fusion: local guides global[C]//Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Berlin: Springer, 2022: 110-120.

[21] Wang W H, Xie E Z, Li X, et al. PVTv2: improved baselines with pyramid vision Transformer[J]. Computational Visual Media, 2022, 8(3): 415-424.

[22] Liu H J, Liu F Q, FAN X Y, et al. Polarized self-attention: towards high-quality pixel-wise regression[EB/OL]. (2021-07-08)[2024-05-01]. https://arxiv.org/abs/2107.00782.

[23] Woo S, Park J, Lee J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 3-19.

[24] Wang Q L, Wu B G, Zhu P F, et al. ECA-Net: efficient channel attention for deep convolutional neural networks[C]//Proceedings of

the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 11531-11539.

[25] Tang Y H, Han K, Guo J Y, et al. An image patch is a wave: phase-aware vision MLP[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 10925-10934.

[26] Zhou T, Zhou Y, Gong C, et al. Feature aggregation and propagation network for camouflaged object detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2022, 31: 7036-7047.

[27] Bernal J, Sánchez F J, Fernández-esparrach G, et al. WM-DOVA maps for accurate polyp highlighting in colonoscopy: validation vs. saliency maps from physicians[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2015, 43: 99-111.

[28] Dutta A, Zisserman A. The VIA annotation software for images, audio and video[C]//Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM, 2019: 2276-2279.

[29] Tajbakhsh N, Gurudu S R, Liang J M. Automated polyp detection in colonoscopy videos using shape and context information[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2016, 35(2): 630-644.

[30] Silva J, Histace A, Romain O, et al. Toward embedded detection of polyps in WCE images for early diagnosis of colorectal cancer[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2014, 9(2): 283-293.

[31] Lou A G, Guan S Y, Ko H, et al. CaraNet: context axial reverse attention network for segmentation of small medical objects[C]// Proceedings of the Conference on Medical Imaging-Image Processing. Bellingham: SPIE, 2022, 12032: 81-92.

[32] Dong B, Wang W H, Fan D P, et al. Polyp-PVT: polyp segmentation with pyramid vision transformers[EB/OL]. (2024-02-19)[2024-05-01]. https://arxiv.org/abs/2108.06932.

[33] Shi W T, Xu J, Gao P. SSformer: a lightweight Transformer for semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE 24th International Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.

[34] Wu C, Long C, Li S J, et al. MSRAformer: multiscale spatial reverse attention network for polyp segmentation[J]. Computers in Biology and Medicine, 2022, 151: 106274.

Cross-layer high-efficiency phase-aware Transformer for colorectal polyp image segmentation algorithm

LIANG Liming，LI Yulin，LIU Yangqian，WANG Tao，WU Jian*

(School of Electrical Engineering and Automation，Jiangxi University of Science and Technology，Ganzhou 341000，China)

Abstract：This paper proposes a cross-layer efficient phase-aware Transformer segmentation algorithm for colorectal polyps in order to address the issues of irregular shape of the lesion region, fuzzy edge contour, and high similarity with normal region, which result in the loss of detail information and mis-segmentation of the lesion region. Firstly, the pyramid vision Transformer encoder is used to extract the global semantic information and spatial details of the input feature map layer by layer, and to analyze the colorectal polyp lesion features at multiple scales; secondly, the polarized self-attention module is used to regressively predict the lesion features, and to deepen the correlation of the semantic information of the features;thirdly, the high-efficiency phase-aware module is designed to extract the global and local information to precisely. The final one is the cross-layer fusion and propagation module, which enhances the rate of advanced feature reuse by integrating the edge details. Experiments were conducted on five datasets: CVC-ClinicDB, Kvasir-SEG, ETIS-LaribPolypDB, CVC-ConlonDB, and CVC-T, achieving Dice coefficients of 0.940, 0.923, 0.801, 0.810, and 0.896, respectively. This demonstrates superior segmentation performance over existing networks such as CaraNet and MSRAFormer. Both colorectal polyp images with fuzzy edges and complicated spatial organization exhibit great segmentation accuracy, according to the evaluation results.

Keywords：colorectal polyp；Transformer；polarized self-attention module；hight-efficiency phase-aware module；cross-layer fusion and propagation module

Received：2024-05-17；**Accepted**：2024-08-01；**Published Online**：2024-08-30 10：15

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240829.1530.003

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (51365017,61463018)； Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (20192BAB205084)； Jiangxi Provincial Department of Education Science and Technology Research Key Projects (GJJ170491, GJJ2200848)

* **Corresponding author**. E-mail：liyulin000821@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0350

步进随机振动下电连接器微动磨损试验及性能退化模型

骆燕燕[1,*]，祁侨绅[1,2]，王永鹏[3]，武雄伟[4]

(1. 河北工业大学 电工产品可靠性技术省部共建协同创新中心，天津 300401；2. 国家电网天津市电力公司城南供电分公司，天津 300201；3. 国家电网山东省电力公司邹平供电公司，邹平 256200；4. 国家电网河北省电力公司邯郸新区供电公司，邯郸 056000)

摘 要：针对电连接器工作时受步进随机振动作用，产生微动磨损而接触性能降低的问题，开展步进应力随机振动试验，采用电容层析成像(ECT)技术检测微动磨损过程中电连接器接触件间磨屑特征值，通过接触电阻与磨屑特征值研究步进应力随机振动条件下接触件的磨损程度及接触性能的退化规律。引入具有鲁棒性好、可以表征非线性关系的最大互信息系数(MIC)进行磨屑特征值与接触电阻的相关性分析，通过MIC筛选降维以提高模型预测精度。结果表明：步进应力随机振动下磨屑特征值、磨屑特征值总量和接触电阻均呈阶梯状变化趋势；通过MIC计算发现磨屑特征值总量与接触电阻强相关；能谱分析的结果与试验结果相吻合；采用MIC筛选优化的CHIO-Elman的性能退化模型的平均绝对误差百分比小于4%。

关 键 词：电连接器；电容层析成像；微动磨损；最大互信息系数；冠状病毒群体免疫优化算法

中图分类号：TM501

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2293-10

电连接器广泛应用于机械、电力、航空航天、交通运输等领域，是实现信号传输和电气连接的基础部件，其可靠性直接影响系统的安全运行[1-2]。在贮存和使用中，电连接器会受到各种环境因素的影响，使接触件发生相对位移和微动磨损，从而导致性能退化甚至失效[3]。迄今为止，学者对电连接器的微动磨损进行了大量研究，主要包括温度、湿度、振动、接触压力、镀层材料、载荷条件等因素对电连接器接触性能的影响[4-17]。研究发现，电连接器性能退化是一个漫长的过程，其主要原因是微动磨损过程中触点间产生导电性较差的磨屑。当磨屑层达到约25 μm时，将发生瞬断失效[18-19]。磨屑的产生和积累是一个复杂的过程，仅依靠接触电阻的变化曲线并不能灵敏地量化磨屑在微动磨损中的积累、分布和迁移特征。为解决该问题，本文利用电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)技术重建接触件间介电常数分布，并将接触区域内磨屑堆积和分布引起的介电系数变化转化为电容式传感器阵列中电极间电容值的变化。与超声波检测方法[20]和红外检测方法[21]等其他无损检测技术相比，ECT技术更易检测磨屑的堆积和分布。

目前，对振动应力下电连接器微动磨损的研究多为在恒定或冲击应力下的规律振动，对于步进应力随机振动的电连接器微动磨损研究极少。相比于其他振动试验，随机振动试验频率范围大，有助于更好地检测出产品中的各种缺陷，可提高检测效果，缩短试验时间，且学者对于随机振动的研究多

收稿日期：2024-05-23；录用日期：2024-06-14；网络出版时间：2024-06-25 11:25
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240624.1705.001
基金项目：河北省自然科学基金(E2018202156)
*通信作者. E-mail：luoyy@hebut.edu.cn

引用格式：骆燕燕，祁侨绅，王永鹏，等. 步进随机振动下电连接器微动磨损试验及性能退化模型[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2293-2302. Luo Y Y，Qi Q S，Wang Y P，et al. Fretting wear test and performance degradation model of electrical connector under step random vibration[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2293-2302 (in Chinese).

采用有限元仿真方法[22-26]。本文主要对电连接器在步进应力随机振动试验下的电连接器接触性能退化进行研究，采用 ECT 技术对随机振动接触件间磨屑的堆积与分布进行监测，探究步进应力随机振动下电连接器微动磨损过程中磨屑生成与演变、接触性能的退化规律，通过最大互信息系数（maximal information coefficient, MIC）计算磨屑特征值与接触电阻的相关性，筛选降维优化 CHIO-Elman 性能退化模型，并进行微动磨损过程中电接触性能退化预测。

1 试　验

1.1 试　品

受 ECT 技术对电连接器尺寸的限制，本文选择 2 芯 M 型电连接器的 10 mm 直径接触件作为试验对象，其长度为 65 mm，采用黄铜（HPb59-1 级：铜，60%；铅，1.9%；镍，1%；铁，0.5%；平衡锌）和镀金镍涂层。试品实物如图 1 所示，基本性能参数如表 1 所示。



图 1　电连接器接触件试品示意图

Fig. 1　Schematic diagram of electrical connector contacts specimen

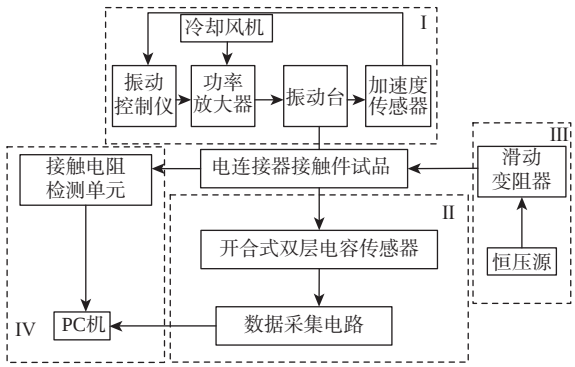
表 1　电连接器接触件试品部分基本性能参数

Table 1　Electrical connector contacts specimen part basic performance parameters

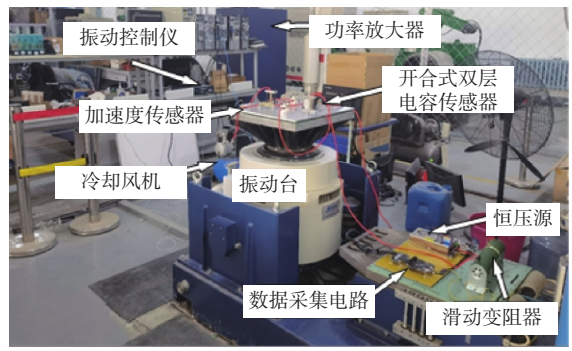
额定电压/V	额定电流/A	工作电压/V	耐电压/V	接触电阻/mΩ	绝缘阻抗/MΩ
500	80	600	3 000	0.2	2 000

1.2 试验设备

本文设计的电连接器微动磨损试验装置由随机振动驱动单元（Ⅰ）、磨屑特征值检测单元（Ⅱ）、负载电流施加单元（Ⅲ）和接触电阻测量单元（Ⅳ）组成，其原理与实物如图 2 所示。随机振动驱动单元为电连接器接触件试品施加振动激励；磨屑特征值检测单元将磨屑堆积与分布状态改变引起的介电常数变化转化为电极之间电容值的变化，并将其上传至计算机保存；接触电阻测量单元使用基于四线法原理的直流低电阻测试仪 VC6310 检测接触电阻，其开路电压为 4.2 V，测试电流为 1 A，精度可保证满量程时测量误差小于 0.1%。为确保测量精度，每次检测夹取电连接器接触件试品的同一部位进行接触电阻测试，同时将测量数据传送至计算机。



(a) 试验装置原理



(b) 试验装置实物图

图 2　电连接器微动磨损试验装置

Fig. 2　Fretting wear test device for electrical connector

1.3 试品的安装与检测

本文将电连接器接触件试品分为 x、y、z 这 3 个振动方向。x 向振动试品，其轴线与振动台台面保持平行，而劈槽则与台面保持垂直；y 向振动试品，其轴线和劈槽均垂直于振动台台面；z 向振动试品，其轴线与劈槽均与振动台台面保持平行。为确保同一组试品在振动试验中的振动激励条件一致，试品均通过夹具关于圆心对称等间隔安装。图 3 为电连接器接触件试品的安装示意图，图 4 为振动方向示意图。

磨屑是一种绝缘体，由磨损产生的镀层金属材

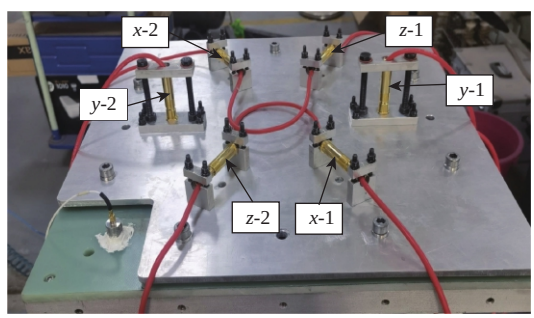


图 3　电连接器接触件试品安装示意图

Fig. 3　Installation diagram of electrical connector contacts specimen

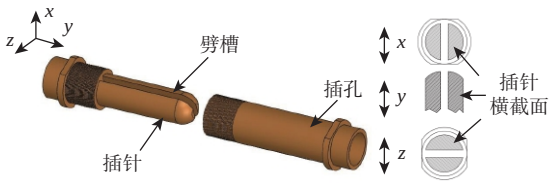


图 4　振动方向示意图

Fig. 4　Schematic diagram of vibration direction

料与氧气反应生成, 因此, 磨屑的产生会改变接触件间介电常数分布。在微动过程中, 磨屑在接触件间的接触面上不断积累和迁移, 其分布状态不断变化。在试验过程中, 存在重新被挤压填充到接触界面的可能, 但重新填充的磨屑与基体材料的介电常数明显不同。因此, 可以通过电容传感器感测接触区域间因磨屑而导致的介电常数变化, 并将其转换为电容值矩阵, 重建测量对象内部介质的材料分布, 以表征磨损程度[27-28]。综合考虑电连接器尺寸和检测精度, 将上下 2 层各 8 对电极沿圆周等间隔布置, 电极所围成的圆周半径为 18 mm, 电极宽度为 8 mm, 所有电极张角为 25.7°, 设置金属屏蔽罩保护电极不受外界电场影响, 选择带屏蔽层的导线减少线缆间的分布电容, 设计数据采集单元的线路时, 通过去除内层接地平面、精简线路数量、缩短线路、增加元器件或线路的距离、线路间添加接地铜带、减小过孔数量、减少线宽和优化布线避免线路平行等措施, 减少数据采集单元中的杂散电容。由于振动过程中插针与插孔不同步, 两者的接触表面会因磨损产生磨屑, 为了更好地分析磨屑的产生位置,将接触件插针与插孔的接触区域分为 2 个部分, 即接触区域 A 和 B, 如图 5 所示。

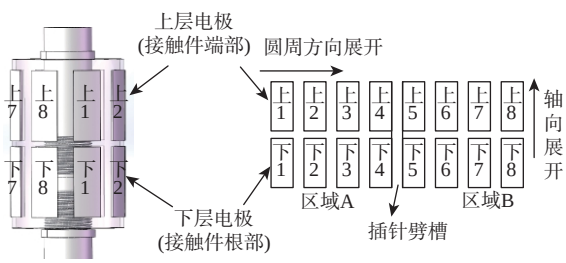


图 5　电连接器接触件试品接触区域划分

Fig. 5　Contact area division of electrical connector contacts specimen

选择上下区域中共 16 个电极对(1-2、2-3、3-4、4-5、5-6、6-7、7-8 等)检测到的测试前后电容值差(磨屑特征值ΔC)来表征试验过程中磨屑产生量。通过对 16 个电极的数据分析, 推导微动磨损过程中接触件各子区域之间的磨损状态, 并监测随机振动下连接器微动磨损的演变过程。

本文试验按照 GJB 1217A—2009[29] 中“2005 振动”项规定的环境条件进行。

表 2 为电连接器在步进应力随机振动下的微动磨损试验方案。根据表 2 制定的试验方案, 以及步进应力值的选择要求, 确定应力水平为 4 个, 依次设置为 0.04 g^2/Hz、0.06 g^2/Hz、0.08 g^2/Hz 和 0.10 g^2/Hz。每 20 min 手动测量电连接器接触件两端接触电阻及各子区域磨屑特征值, 200 min 为一个振动周期, 试验共计 800 min。试验结束后, 对典型电连接器接触件试品磨损后的插针进行能谱分析。图 6 为步进应力随机振动试验的应力水平。

表 2　试验方案

Table 2　Test plan

试验组别	应力水平/(g^2·Hz^{-1})	振动方向	试验时间/min	试品编号
1	0.04→0.06→0.08→0.10	x	800	x-1, x-2
2	0.04→0.06→0.08→0.10	y	800	y-1, y-2
3	0.04→0.06→0.08→0.10	z	800	z-1, z-2

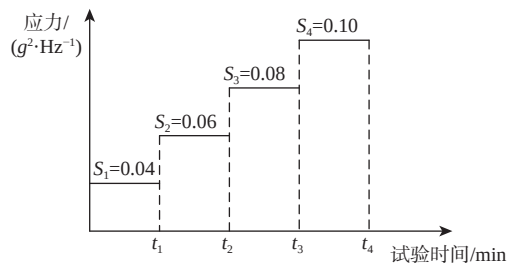


图 6　应力水平示意图

Fig. 6　Schematic diagram of stress level

2　微动磨损及性能退化规律分析

2.1　磨屑特征值变化规律分析

通过整理数据发现, 由电极对 2-3 和 6-7 检测到的磨屑特征值高于其他电极对检测数值。为了更好地分析步进应力随机振动下的磨屑演变规律, 重点研究电极对 2-3 和 6-7 在振动过程中的磨屑演变规律。步进应力下, 部分电连接器接触件试品重度磨损接触子区域中电极对 2-3 和 6-7 磨屑特征值变化如图 7 所示。

根据图 7 可知:

1) 随振动周期增加, 电连接器接触件试品接触表面各子区域的磨屑特征值整体呈上升趋势, 但几乎每个接触子区域的磨屑特征值均发生波动变化。在 0.04 g^2/Hz 的应力水平下, 磨屑特征值的波动幅度较小。当应力水平提升至 0.06 g^2/Hz 时, 磨屑特征值的增长速度有所减缓, 但波动幅度有所增加, 这可能是因为插针与插孔之间的相对位移增加, 导致磨屑迁移现象加剧。当应力水平进一步增至 0.08 g^2/Hz 时, 磨屑特征值显著上升, 意味着磨屑

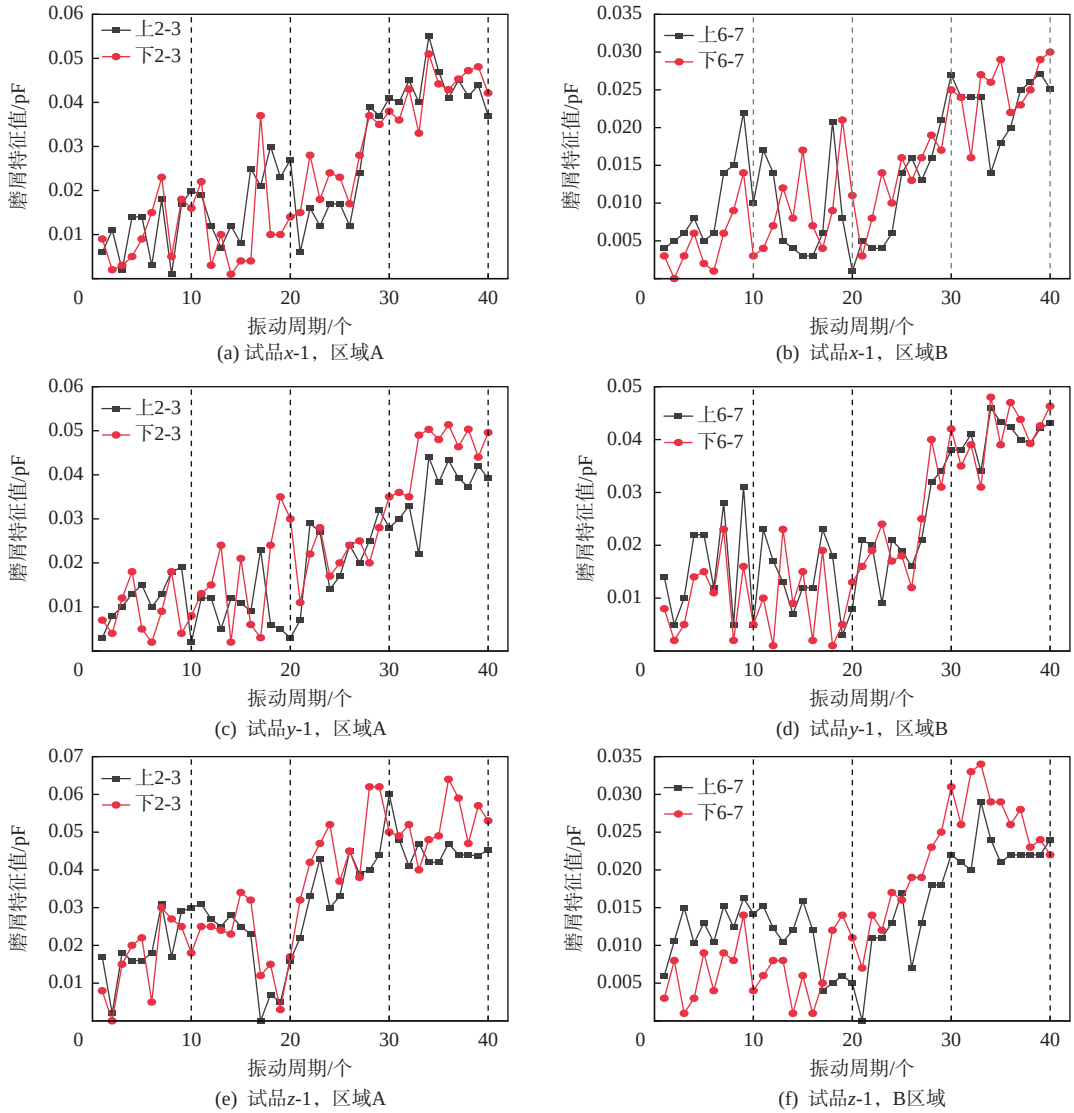


图 7 电连接器接触件试品重度磨损接触子区域中电极对 2-3 和 6-7 磨屑特征值变化

Fig. 7 Variation of wear debris characteristic values of electrode pairs 2-3 and 6-7 in heavily worn contact sub region of electrical connector contacts specimens

的生成或迁移现象更加显著。而在 0.10 g^2/Hz 的应力水平下，磨屑的生成和迁移达到了某种平衡状态，不再随着应力的增加而显著变化。

2）下层电极对 2-3 和 6-7 的磨屑特征值波动幅度高于上层电极对 2-3 和 6-7，这意味电连接器接触件试品下层磨损更为严重，即接触件的根部比端部遭受了更严重的损耗。

3）接触区域 A 的磨屑特征值普遍高于区域 B，特别是在 z 方向的振动下，区域 A 的磨屑特征值约为区域 B 的 2 倍。原因是：区域 A 位于劈槽下半周，由于重力的作用，导致更多的磨屑积聚于此。此外，磨屑会因为振动产生随机迁移现象，使磨屑分布不均匀，导致上下层磨屑特征值出现微小差异。

4）试品 y-1 的区域 B 磨屑特征值明显高于试品 x-1 和试品 z-1，即 y 方向振动的磨损程度高于 x 和 z 方向。

5）磨屑特征值在步进应力作用下呈现出一定的阶梯变化特征。

2.2 磨屑特征值总量变化规律分析

对 16 个子区域中磨屑特征值求和，记为磨屑特征值总量 $\sum\Delta C$，以表征接触件磨屑总量的多少。电连接器接触件试品磨屑特征值总量变化如图 8 所示。

根据图 8 可知：

1）电连接器接触件试品在 x、y、z 这 3 个方向的振动作用下，其磨屑特征值总量随着振动周期的增长而波动上升。在较低应力水平（如 0.04 g^2/Hz 和 0.06 g^2/Hz）时，磨屑特征值总量的增长趋势较为平缓；然而，当应力水平上升至 0.08 g^2/Hz 时，磨屑特征值总量的增长速度显著加快，呈现出近似线性的增长模式。最终，在应力水平达到 0.10 g^2/Hz 时，磨屑特征值总量进入了相对稳定的状态。磨屑特

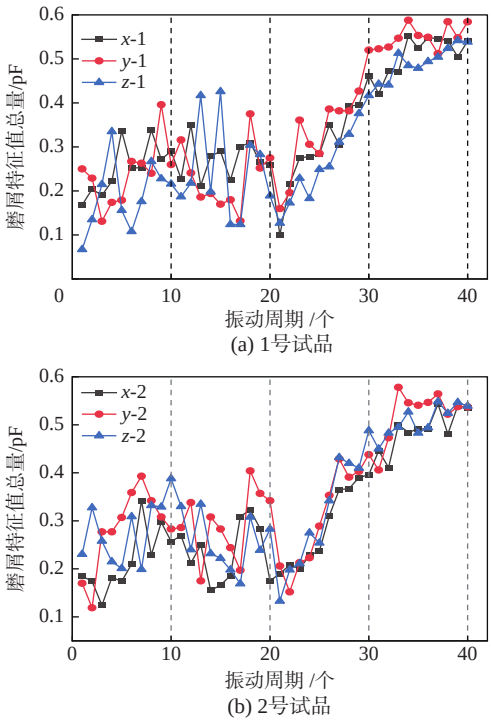


图 8　电连接器接触件试品磨屑特征值总量变化

Fig. 8　Changes in total characteristic values of wear debris in electrical connector contacts specimen

征值总量的波动是由于磨屑在微动过程中不断迁移, 部分磨屑在接触表面堆积, 而另一部分则可能散落在接触区域之外, 但整体趋势是增长的。振动应力会加剧磨损, 磨屑特征值总量的变化趋势呈现出阶梯状, 即在较低应力水平下, 接触件的磨损相对较轻, 而随着应力水平的提高, 磨损程度逐渐加剧。

2) 在相同的振动周期下, y 向试品的磨屑特征值总量及其波动幅度均超过了 x 向和 z 向试品, 而 x 向试品的磨屑特征值总量又高于 z 向。这表明, 在 y 向振动下, 电连接器的接触区域磨屑累积最为严重, 接触件的磨损也最为显著; 相比之下, z 向振动下的试品磨损程度较轻, 而 x 向振动下的试品磨损程度则介于 y 向和 z 向之间。

2.3　接触电阻变化规律分析

步进应力下电连接器接触件试品接触电阻变化如图 9 所示。

根据图 9 可知:

1) 在步进应力随机振动作用下, 试品在 x、y、z 这 3 个方向上的接触电阻值随着振动周期的增长而呈现出阶梯式的增长模式, 且波动幅度也随之增大。在较低的应力水平(0.04 g^2/Hz)时, 接触电阻的变动并不显著; 但当应力水平提升至 0.06 g^2/Hz 时, 接触电阻开始缓慢增加; 进一步增加至 0.08 g^2/Hz 时, 接触电阻的增长变得尤为明显; 而达到 0.10 g^2/Hz 时, 接触电阻进入到较为平稳的波动状态。

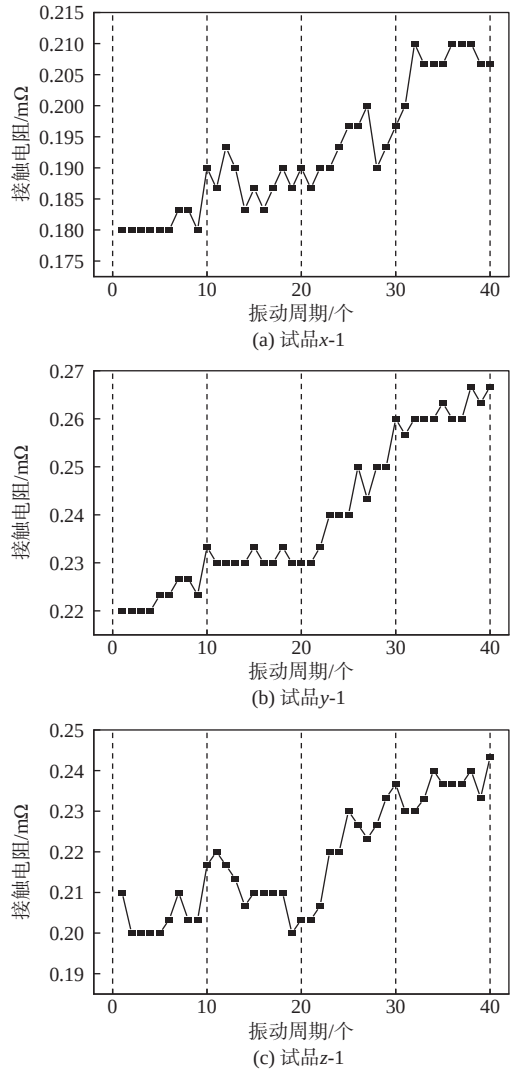


图 9　电连接器接触件试品接触电阻变化

Fig. 9　Contact resistance change of electrical connector contacts specimen

2) 在振动水平一致的情况下, y 方向的振动对试品的接触电阻影响更为显著, 其数值和波动幅度均超过 x 和 z 方向。具体地, y 方向试品的接触电阻最大值和波动幅度分别约为 x 方向试品的 1.27 倍和 1.37 倍, z 方向试品的 1.1 倍和 1.12 倍。

本文推测接触电阻的阶梯式变化趋势可能源于接触表面在不同振动强度下会发生明显变化。在振动初期, 插针与插孔的接触区域开始磨合, 伴随着磨屑的生成和积累, 接触表面的氧化膜或吸附的水膜遭到破坏, 使得接触电阻得以维持在较低且相对稳定的水平。随着振动的持续, 接触件间的材料磨损逐渐加剧, 磨屑的积累减少了接触点的数量, 降低了接触面积, 进而导致接触电阻增加。

2.4　基于最大互信息系数的关联性分析

MIC 是一种用于测量 2 个变量之间相关性的统计方法, 具有鲁棒性好、计算量小的特点。与 Pearson 相关系数相比, MIC 还可以表征变量之间

的非线性相关性。

给定 2 个变量 W 和 V，其 MIC 可以通过以下步骤计算：

1）分别离散 W 和 V。将变量 W 和 V 分别划分为多个离散区间或值，并将连续变量离散为离散观测值。

2）构建二维直方图。在离散变量的空间中构建二维直方图，计算 W 和 V 同时落在每个区间内的观测值或概率的数量。

3）计算 W 和 V 的互信息（mutual information, MI），以测量它们之间的相关性：

$$M_1(W,V)=\sum\sum P(W,V)\cdot\log_2(P(W,V)/(P(W),P(V))) \tag{1}$$

式中：$M_1(W,V)$为 W 和 V 的互信息；$P(W,V)$为变量 W 和 V 同时取 w 和 v 值的概率；$P(W)$和 $P(V)$分别为变量 W 和 V 取 w 和 v 值的边际概率；$\sum\sum$表示所有取值的求和运算。

4）MIC 被定义为互信息的最大值，并用于表征 W 和 V 之间的最大相关性。

$$M_2=\max(\mathrm{MI}(X,Y)) \tag{2}$$

式中：M_2为最大互信息系数。

MIC 的范围为 0～1。MIC>0.8，通常被认为是极强的相关性；MIC 介于 0.6～0.8 时，通常被认为是强相关性；MIC 介于 0.4～0.6 时，通常被认为是中等相关性；MIC 介于 0.2～0.4 时，通常被认为是弱相关性；MIC 介于 0～0.2 时，通常被认为是非常弱或无关。从磨屑特征值总量 $\sum\Delta C$和接触电阻 R 的变化规律分析可以看出，电连接器接触件试品在微动过程中，$\sum\Delta C$和 R 的变化具有相似的特性。本文采用 MIC 来分析两者之间的相关性，对每个试品的 2 组数据进行相关性分析。不同区域的 $\sum\Delta C$和 R 的 MIC 如表 3 所示。

表 3　各子区域的 MIC 计算结果

Table 3　Results of MIC calculations by sub region

试品编号	MIC(R, $\Sigma\Delta C$)				
	区域A	区域B	上层区域	下层区域	全部区域
x-1	0.51	0.62	0.45	0.68	0.88
x-2	0.53	0.51	0.39	0.65	0.66
y-1	0.47	0.50	0.45	0.52	0.85
y-2	0.39	0.40	0.36	0.44	0.44
z-1	0.59	0.51	0.52	0.58	0.71
z-2	0.53	0.63	0.56	0.60	0.78

从表 3 可以看出，$\sum\Delta C$和 R 显示出强相关性，特别是试品 x−1 的 MIC 达到了 0.88，表现出极强的相关性。另外，子区域的 MIC 大多呈现中等相关（0.4～0.6），不如全部区域的 MIC 高。试品在 y 方向上的 MIC 大多低于 x 和 z 方向；区域 A 和 B 的 MIC 相似；下层区域中的 MIC 高于上层区域。综上，可以通过磨屑特征值总量反映电连接器接触件的磨损程度。

2.5　插针实验前后的能谱分析

为验证电连接器接触件间磨屑检测的准确性，本节研究了振动前后插针表面各元素含量的变化。测试结束后，选择试品 y-1 对插针接触区域 A 根部的元素含量进行分析。能谱的位置选择区域如图 10 所示。每个位置对应的元素含量如表 4 所示。

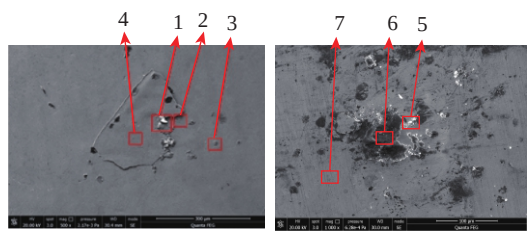


图 10　试品 y-1 插针根部能谱分析位置

Fig. 10　Location of spectroscopy analysis at root of specimen y-1 pin

表 4　试品 y-1 能谱分析各位置元素含量

Table 4　Analysis of element content at each position by specimen y-1 energy spectrum

编号位置	质量百分比/%					原子百分比/%				
	O	C	Ni	Cu	Au	O	C	Ni	Cu	Au
1	17.7		61.1	2.2	11.6	47.4		44.2	1.4	2.5
2	2		80.6	2.5	11.9	7.7		83.5	2.4	3.6
3	30.2		55.2	2.7	8.9	63.7		31.7	1.4	1.5
4	1.3		79.4	2.2	14.3	5.1		85.4	2.2	4.5
5	3.6		57.2	2.1	36.2	15.8		68.5	2.3	12.9
6	33	33	56	1.7	6.8	70.6	70.6	24.4	0.7	0.8
7	1.6		68.9	3	25.7	7		80.5	3.3	8.9

由图 10 和表 4 可知，4 号、7 号位置无明显的磨损痕迹，主要元素为镍、金等。6 号位置出现暗黑斑点，是轻微磨损区，铜元素较少，但碳元素含量急增，说明接触表面吸附了含碳有机物，与 7 号未

磨损区域相比, 镍和金元素大幅减少(质量百分比减幅分别为 18.72% 和 73.54%)。1 号和 5 号区域可归为严重磨损区, 与未磨损区域相比, 镍、金元素含量减少, 其中, 氧和铜等其他元素增多, 说明该区域镍金镀层脱落, 导致基体金属被氧化。综上, 能谱分析结果与磨屑特征值分析结果一致, 即电容层析装置可以较好地检测接触件间磨屑的产生与分布。

3　电连接器微动磨损性能退化模型

在微动磨损过程中, 磨屑特征值ΔC和接触电阻 R 具有相似的变化规律, 为进一步研究磨屑特征值与电接触性能退化之间的相关性, 以各接触区域的磨屑特征值为输入、接触电阻为输出, 构建性能退化模型。

3.1　模型建立

由第 2 节分析可知, 试验过程中, 磨屑特征值及接触电阻波动性较强, 而 Elman 神经网络对于高波动性数据集具有较高拟合度。与 BP 神经网络相比, Elman 神经网络在隐含层中增加了一个承接层, 具有记忆功能, 计算能力更强, 全局稳定性提升。

Elman 神经网络数学模型表达式为

$$\boldsymbol{y}(n)=g(\omega_3\boldsymbol{q}(n)) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{q}(n)=k(\omega_1\boldsymbol{x}_{\mathrm{c}}(n)+\omega_2(\boldsymbol{u}(n-1))) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{u}(n)=\boldsymbol{q}(n-1) \tag{5}$$

式中: $\boldsymbol{y}(n)$ 为输出层的输出向量, 即接触电阻; $\boldsymbol{q}(n)$ 为隐含层的节点向量; $\boldsymbol{u}(n)$ 为反馈状态向量; $\boldsymbol{x}_{\mathrm{c}}(n)$ 为输入向量, n 为输入层中的样本数量, 本文中 n=16; g 为输出层中神经元的传递函数; ω_1、ω_2、ω_3分别为隐含层、输出层、承接层和输入层间权重; k 为中间层神经元的传递函数, 通常为 Sigmoid 函数。

传统的 Elman 神经网络使用梯度下降法作为权重更新方法。当该方法的误差函数具有多个局部极小值时, 很难确保其找到最优解, 并且很容易陷入局部极小值, 导致收敛缓慢, 也影响了网络训练效果, 降低了结果的准确性[28]。为解决该问题, 使用具有全局搜索能力的冠状病毒群体免疫优化(coronavirus herd immunity optimization, CHIO)算法对 Elman 神经网络进行优化。CHIO 算法的灵感来自应对冠状病毒大流行的群体免疫概念。疾病传播率与感染者如何接触社会其他成员密切相关。为保护社区成员免受疾病的侵害, 卫生专家建议采取社交距离措施。群体免疫是指当大多数人群具有免疫力时, 即可防止疾病传播的状态。通过模拟群体免疫策略, 对 CHIO 算法进行优化。

具体步骤如下:

1) 初始化 CHIO, 构建优化问题目标函数:

$$\min f(a)\qquad a\in[l,u] \tag{6}$$

式中: l 和 u 分别为搜索的下限和上限。

2) 生成免疫群体 $\boldsymbol{H}$, 随机(或启发式)生成一组病例(个体)h。生成的病例存储为二维矩阵 $n\times h$:

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_1^1 & \boldsymbol{x}_2^1 & \cdots & \boldsymbol{x}_n^1\\ \boldsymbol{x}_1^2 & \boldsymbol{x}_2^2 & \cdots & \boldsymbol{x}_n^2\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{x}_1^h & \boldsymbol{x}_2^h & \cdots & \boldsymbol{x}_n^h\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中: $\boldsymbol{x}_i^j=\boldsymbol{l}_i+(\boldsymbol{u}_i-\boldsymbol{l}_i)r, i=1,2,\cdots,n, r\in(0,1)$; h为人口规模; n 为问题的维度。

3) 根据繁殖率 B 不同, 病例$\boldsymbol{x}_i^j$的基因$\boldsymbol{x}^j$会作出相应变化:

$$\boldsymbol{x}_i^j(t+1)=\begin{cases}\boldsymbol{x}_i^j(t) & r\geqslant B\\ \boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)\right) & r\leqslant B/3\\ \boldsymbol{N}\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)\right) & B/3<r\leqslant 2B/3\\ \boldsymbol{R}\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)\right) & r<B\end{cases} \tag{8}$$

式中: $\boldsymbol{x}_i^j(t+1)$为新的基因值; $\boldsymbol{x}_i^j(t)$为更新之前的基因值。

$$\boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)\right)=\boldsymbol{x}_j^i(t)+r\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)-\boldsymbol{x}_i^c(t)\right) \tag{9}$$

式中: $\boldsymbol{x}_i^c(t)$为从感染病例$i|s_i=1$中随机选择的状态向量。

$$\boldsymbol{N}\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)\right)=\boldsymbol{x}_j^i(t)+r\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)-\boldsymbol{x}_i^m(t)\right) \tag{10}$$

式中: $\boldsymbol{x}_i^m(t)$为从感染病例$i|s_i=0$中随机选择的状态向量。

$$\boldsymbol{R}\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)\right)=\boldsymbol{x}_j^i(t)+r\left(\boldsymbol{x}_i^j(t)-\boldsymbol{x}_i^v(t)\right) \tag{11}$$

式中: $\boldsymbol{x}_i^v(t)$为最佳免疫病例。

4) 用$\boldsymbol{x}^j(t+1)$生成的每个免疫接种率$O\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)\right)$更新人口免疫接种人群。如果$O\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)\right)<O\left(\boldsymbol{x}^j(t)\right)$, 则$\boldsymbol{x}^j(t)$被替换为$\boldsymbol{x}^j(t+1)$, 并且年龄$A_j$随着状态$S_j$增加。

$$S_j=\begin{cases}1 & O\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)<\dfrac{O\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)\right)}{\Delta O(\boldsymbol{x}^j)}\wedge S_j=0\wedge h\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)\right)\right)\\ 2 & O\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)<\dfrac{O\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)\right)}{\Delta O(\boldsymbol{x}^j)}\wedge S_j=1\right)\end{cases} \tag{12}$$

式中：$h\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)\right)$为新$\boldsymbol{x}^j(t+1)$继承任何感染病例值时的二进制值；$\Delta O\left(\boldsymbol{x}^j\right)$为人群免疫率的平均值。注意，如果新产生的个人免疫率高于人群的平均免疫率，则人群中的个人免疫速率将根据之前计算的社交距离而变化，这意味着人群免疫力开始增强。如果新产生的人群足够强壮，可以对流行病进行免疫，就达到了人群免疫阈值。

5）死亡病例。如果在当前$S_j=1$下达到最大迭代次数，免疫率$O\left(\boldsymbol{x}^j(t+1)\right)$未能提高，则病例死亡。之后，通过公式$\boldsymbol{x}_i^j=\boldsymbol{l}_i+(\boldsymbol{u}_i-\boldsymbol{l}_i)r$进行再生。进一步设置$S_j=A_j=0$有助于使当前种群多样化，从而避免局部最优性。

6）重复步骤3～步骤5，直到达到终止标准，这通常取决于是否达到了最大迭代次数。在这种情况下，易感病例和免疫病例的总数占主导地位，感染病例也消失了。

如果将所有区域磨屑特征值用作性能退化模型的输入进行预测，则所获结果的误差较大。为有效降低变量的维数，同时提高性能退化预测模型的效率，筛选出每个数据集中MIC值最大的8个子区域的数据，将这些区域用作预测模型的输入。

3.2 预测结果分析

本文选择平均绝对误差E_1、均方根误差E_2和平均绝对误差百分比E_3作为评估指标来验证模型的准确性。

$$E_1=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\hat{y}_i-y_i| \tag{13}$$

$$E_2=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-y_i)^2} \tag{14}$$

$$E_3=\frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\hat{y}_i-y_i}{y_i}\right| \tag{15}$$

式中：$\hat{y}_i$为接触电阻的预测值；y_i为接触电阻的测量值。

表5显示了Elman、CHIO-Elman和MIC筛选后的CHIO-Elman性能退化模型不同方向的性能评估指标。可以看出，与Elman模型相比，CHIO-Elman模型的E_3从4.62%降低到2.412 1%(x方向)、10.039%降低到5.054 7%(y方向)、5.12%降低到3.500 3%(z方向)，这表明用CHIO算法优化Elman模型有效。其中，x方向误差最小，预测精度最高。经MIC进一步筛选优化后，E_3从2.412 1%降低到1.714 1%(x方向)、5.054 7%降低到3.252 5%(y方向)、3.500 3%降低到2.052 8%(z方向)，这表明经MIC筛选优化后模型预测精度上有了更大的提高。综上可知，以接触电阻和磨屑特征值总量数据构建的MIC-CHIO-Elman模型可以较好地拟合步进应力随机振动下的电连接器性能退化。

表5 不同模型误差比较

Table 5 Comparison of errors between different models

模型	振动方向	E_1	E_2	E_3/%
Elman	x	0.011 1	0.014 3	4.62
	y	0.022 4	0.029 7	10.039
	z	0.013 1	0.014 8	5.12
CHIO-Elman	x	0.006 3	0.007 3	2.412 1
	y	0.012 9	0.014 6	5.054 7
	z	0.008 2	0.010 2	3.500 3
MIC-CHIO-Elman	x	0.003 5	0.016 8	1.714 1
	y	0.007 6	0.009 4	3.252 5
	z	0.004 4	0.004 9	2.052 8

4 结 论

1）各区域接触电阻、磨屑特征值和磨屑特征值总量呈现阶梯变化趋势。电连接器接触件在y方向振动下产生的磨屑最多，接触电阻值和波动量均较大，接触件磨损最严重。插针根部磨损较端部更严重。

2）能谱分析结果与接触电阻和磨屑特征值总量分析结果一致，电容层析装置可以较好地检测接触件间磨屑的产生与分布。

3）MIC的使用可以很好地表示变量之间的相关性，相对于传统的Pearson相关性，MIC更具鲁棒性，并且可以表示Pearson相关性无法表示的非线性映射关系。根据MIC计算的结果，在步进应力随机振动下，接触电阻和磨屑特征值总量之间显示出极强的相关性。

4）由磨屑特征值构建的MIC筛选优化的CHIO-Elman神经网络平均绝对误差百分比小于4%，预测结果的准确性得到了提高。

参考文献（References）

[1] Braunovic M. Fretting in electrical/electronic connections: a review[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2009, 92(8): 982-991.

[2] Ikeda H, Ito T, Sawada S, et al. Influence of fretting wear on life-time of tin plated connectors[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2009, 92(9): 1215-1222.

[3] Park Y W, Narayanan T S N S, Lee K Y. Fretting corrosion of tin-plated contacts[J]. Tribology International, 2008, 41(7): 616-628.

[4] 李玲, 李港华, 吕刚, 等. 双粗糙表面的微动磨损行为研究[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 193-201.
Li L, Li G H, Lv G, et al. Research on fretting wear behaviour of double rough surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 193-201 (in Chinese).

[5] 何莉萍, 彭金方, 蔡振兵, 等. 不同含氧量环境下紫铜/黄铜电接触微动磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(4): 680-689.
He L P, Peng J F, Cai Z B, et al. Electrical contact fretting wear behavior of copper/brass under different oxygen content[J]. Tribology, 2022, 42(4): 680-689(in Chinese).

[6] 刘少杰, 仇原鹰, 白金, 等. 三轴随机振动下电连接器的松动机理及应力-电阻映射关系研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(11): 190-195.
Liu S J, Qiu Y Y, Bai J, et al. Loosening mechanism and stress-resistance mapping relationship of electrical connector under triaxial random vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(11): 190-195(in Chinese).

[7] 刘琦, 郁大照, 许振晓, 等. 电连接器接触件微动磨损有限元仿真分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2021(2): 165-172.
Liu Q, Yu D Z, Xu Z X, et al. Finite element simulation analysis of fretting wear of aviation electrical connector contacts[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2021(2): 165-172(in Chinese).

[8] 郁大照, 张彤. 振动对航空电连接器的影响分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 87-93.
Yu D Z, Zhang T. Analysis of the influence of vibration on aviation electrical connectors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 87-93(in Chinese).

[9] Wen B H, Pan J, Qian P, et al. Research on the influence of the closing amount of electrical connector contacts on fretting wear under a vibration environment[J]. Electronics, 2023, 12(11): 2469.

[10] Feng C, Lin X X, Hu J X, et al. Study on the influence of fretting wear on electrical performance of SMA connector[J]. Microelectronics Reliability, 2021, 118: 114047.

[11] Pompanon F, Fouvry S, Alquier O. Influence of the relative humidity and H_2S-SO_2 polluted air on the fretting wear behavior of silver-plated electrical contacts[J]. Wear, 2022, 508: 204455.

[12] Liu X L, Li Z H, He J F, et al. Influence of humidity on endurance of electrical contact during fretting wear[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(2): 933-943.

[13] Siddaiah A, Kasar A K, Khosla V, et al. In-situ fretting wear analysis of electrical connectors for real system applications[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019, 3(2): 47.

[14] Liu X L, Li Z H, Xiao Q, et al. Fretting wear of co-Cr-Mo alloys at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(11): 7499-7510.

[15] Xu L, Ling S, Lin Y, et al. Fretting wear and reliability assessment of gold-plated electrical connectors[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 100: 113348.

[16] Liu X L, Cai Z B, Liu S B, et al. Influence of wear test parameters on the electrical contact performance of brass alloy/copper contactors under fretting wear[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2): 817-827.

[17] Wang J Y, Feng Y, Cai M, et al. Electrical contact resistance evolution and interface fretting wear characteristics of conductor-parallel groove clamp system response to breeze vibration environment[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(1): 43-51.

[18] Mcbride J W. Developments in fretting studies applied to electrical contacts[C]//Proceedings of the 52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Piscataway: IEEE Press, 2007: 170-180.

[19] Tamai T, Sawada S, Hattori Y. Contact mechanisms and contact resistance characteristics of solid tin and plated tin contacts used for connectors[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2010, 93(5): 670-677.

[20] Nishimoto M, Naka Y. Analysis of transient scattering by a metal cylinder covered with inhomogeneous lossy material for nondestructive testing[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2018, 101(1): 44-47.

[21] Radha P, Selvakumar N, Sekar J R, et al. A novel ultrasonic based NDT for smart analysis of material defects using IoT[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Inventive Computation Technologies. Piscataway: IEEE Press, 2021: 163-168.

[22] 张雯. 振动条件下电连接器接触件步进应力加速退化试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
Zhang W. Study on step-stress acceleration degradation test of electrical connector contacts under vibration[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020(in Chinese).

[23] 蒋杰, 肖曙红, 汤鹏. 圆形电源连接器随机振动分析与结构优化[J]. 机床与液压, 2017, 45(11): 111-116.
Jiang J, Xiao S H, Tang P. Random vibration analysis and structure optimization of circular power connector[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(11): 111-116(in Chinese).

[24] Flowers G T, Xie F, Bozack M J, et al. Modeling early stage fretting of electrical connectors subjected to random vibration[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(4): 721-727.

[25] Xu L, Ling S, Li D, et al. Vibration-induced dynamic characteristics modeling of electrical contact resistance for connectors[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113868.

[26] Krüger K, Yuan H M, Song J. The influence of the vibration test mode on the failure rate of electrical connectors[J]. Microelectronics Reliability, 2022, 135: 114567.

[27] 田海军, 周云龙. 电容层析成像技术研究进展[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(11): 1387-1392.
Tian H J, Zhou Y L. Progress in capacitance tomography technology research[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2012, 39(11): 1387-1392(in Chinese).

[28] Lei J, Liu Q B, Wang X Y. Physics-informed multi-fidelity learning-driven imaging method for electrical capacitance tomography[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 116: 105467.

[29] 中国人民解放军总装备部.电连接器试验方法: GJB 1217A—2009[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2009.
The General Armaments Department of the People's Liberation Army. Test methods for electrical connectors: GJB 1217A—2009[S]. Beijing: The General Armaments Department of the People's Liberation Army, 2009(in Chinese).

Fretting wear test and performance degradation model of electrical connector under step random vibration

LUO Yanyan[1, *], QI Qiaoshen[1, 2], WANG Yongpeng[3], WU Xiongwei[4]

(1. Provincial and Ministerial Co-construction Collaborative Innovation Center on Reliability Technology of Electrical Products, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. State Grid Tianjin Electric Power Company Chengnan Power Supply Branch, Tianjin 300201, China;
3. State Grid Shandong Electric Power Company Zouping Power Supply Company, Zouping 256200, China;
4. State Grid Hebei Electric Power Company Handan New Area Power Supply Company, Handan 056000, China)

Abstract: In view of the problem that the electrical connector is subjected to step stress random vibration during operation, which leads to fretting wear of the electrical connector and the reduction of contact performance, the step stress random vibration test is carried out. The electrical capacitance tomography (ECT) is used to detect the characteristic value of wear debris between the electrical connector contacts in the process of fretting wear. Contact resistivity and the characteristic value of wear debris are used to study the wear degree and degradation law of contact performance under step stress random vibration conditions. The maximal information coefficient (MIC), which has good robustness and can characterize the nonlinear relationship, is introduced to analyze the correlation between the characteristic value of wear debris and contact resistance, and the dimension is reduced through mic screening to improve the prediction accuracy of the model. The findings demonstrate that under the random vibration of step stress, there is a stepped change trend in the contact resistance, the total characteristic values of wear debris, and the characteristic values of wear debris. Through the calculation of the maximum information coefficient, it is found that the total amount of wear debris characteristics is strongly correlated with the contact resistance. The results of energy spectrum analysis are consistent with the test results. The average absolute error of CHIO-Elman neural network performance degradation model optimized by MIC screening is less than 4%.

Keywords: electrical connector; electrical capacitance tomography; fretting wear; maximal information coefficient; coronavirus herd immunity optimization algorithm

Received: 2024-05-23; **Accepted**: 2024-06-14; **Published Online**: 2024-06-25 11:25
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240624.1705.001
Foundation item: Natural Science Foundation of Hebei Province (E2018202156)
* **Corresponding author**. E-mail: luoyy@hebut.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0546

基于NB-XGB融合的轻量化CBTC车载端入侵检测方法

王国华*，张蕾，张学军，逯闯
(兰州交通大学 电子与信息工程学院，兰州 730070)

摘 要：为解决现有基于通信的列车控制(CBTC)系统入侵检测系统存在数据类别不平衡、检测准确率低和在线检测实时性不高的问题，提出一种基于朴素贝叶斯-极限梯度提升(NB-XGB)融合的轻量化CBTC车载端入侵检测方法，该方法分为离线检测阶段与在线检测阶段。离线检测阶段，对CICIDS2017数据集和CBTCset数据集进行预处理并利用基于相关性的特征选择方法进行特征提取，提取相关性最高且冗余度最低的最优特征子集；对最优特征子集进行基于编辑近邻欠采样(ENN)和合成少数类过采样(SMOTE)的混合采样数据平衡处理；通过静态加权融合的方法对朴素贝叶斯(NB)和极端梯度提升(XGBoost)模型进行集成，从而实现二分类；在线检测阶段，采用知识蒸馏技术将训练后的NB-XGB融合模型迁移至多层感知机(MLP)学生模型中实现轻量化实时样本检测。所提方法在CICIDS2017和CBTCset数据集上进行验证实验，与K近邻算法(KNN)、NB、孤立森林(IForest)等模型进行对比，NB-XGB融合模型的准确率分别为0.996 1和0.955 7，同时证明了所提方法的有效性；在轻量化实验中，推理时长降到了0.16 ms/样本，证明在线检测的实时性。

关 键 词：CBTC；入侵检测；机器学习；混合采样；知识蒸馏
中图分类号：TP393.08
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2303-13

城市轨道交通(urban rail transit, URT)系统是一种集传感器技术、控制技术、计算机技术和通信技术于一体的交通系统，具有高速、便捷、承载能力大等特点，日益成为现代公共交通的重要出行方式之一[1]。基于通信的列车控制(communication-based train control, CBTC)系统是URT中的核心控制系统之一，该系统通过无线通信实现列车之间、列车与轨旁设备之间的信息交互，融合了计算机、通信、控制等先进技术，具有高精度的列车定位、全自动控制等显著优势。CBTC系统的引入大幅度提升了城市轨道交通的自动化和信息化水平，推动了运营效率的提高。然而，随着CBTC系统对网络信息的高度依赖，也带来了许多安全威胁，严重威胁了城市轨道交通的运营效率和安全[2]。入侵检测系统(intrusion detection system, IDS)是一种有效的网络安全机制，用于监控网络或系统中的异常行为，检测可能的攻击或违规操作，并及时发出警报，帮助管理员采取应对措施[3-5]。IDS能够检测外部入侵和非法的内部操作，采用有效的入侵检测技术可以及时发现CBTC系统中的攻击行为并生成告警。这种主动防御手段能够有效预防针对列车运行控制、信号传输等关键设施设备的恶意破坏，避免因系统遭受攻击而导致的重大安全事故，确保城市轨道交通系统的安全稳定运行。

收稿日期：2025-08-05；**录用日期**：2025-12-08；**网络出版时间**：2026-01-04 18:58
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20260104.1526.003
基金项目：国家自然基金(61762058)；甘肃省重点研发计划(25YFFA089)；甘肃省自然科学基金(25JRRA190)
* **通信作者**. E-mail：wangguohua@mail.lzjtu.cn

引用格式：王国华，张蕾，张学军，等. 基于NB-XGB融合的轻量化CBTC车载端入侵检测方法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2303-2315. Wang G H，Zhang L，Zhang X J，et al. Lightweight NB-XGB fusion-based intrusion detection method for CBTC onboard systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2303-2315 (in Chinese).

陈雪倩等[2]提出一种基于网络流量和数据包的入侵检测系统，将基于自回归算法的流量检测模块与基于自组织映射神经网络的数据包检测模块相结合，能够有效检测 CBTC 系统的典型攻击行为（如拒绝服务（denial-of-service, DoS）攻击）。针对传统的 IDS 无法区分网络攻击和设备故障的问题，Song 等[6]提出一种使用网络和设备状态融合的新型入侵检测模型，来判断异常是由网络攻击还是系统故障所引起的，该方法实现了 97.64% 的真阳性率，能够显著提升 CBTC 系统的安全防护水平。同样，Gao 等[7]提出了一种基于机器学习和状态观测器的车地通信系统的入侵检测方法，将无线网络状态和设备状态相结合给出全面的入侵检测结果，验证了方法的有效性和实用性。针对中间人（man-in-the-middle, MITM）攻击，Li 等[8]提出一种基于边缘智能的 CBTC 系统的跨层防御方案，将机器学习的检测层与贝叶斯博弈的防御层相结合，推导出针对 MITM 的最优防御策略。针对目前机器学习在 CBTC 系统无线通信中无法检测零日攻击这一问题，Lu 等[9]提出一种基于迁移学习的 IDS，利用优化的一维卷积神经网络和长短期记忆从原始数据中自动提取时空特征，并通过知识传递方法实现零日攻击检测，该方法对零日攻击检测的平均 F_1 值达到了 93.21%。现有的研究虽然从多角度提出了 CBTC 系统的安全检测方法，但仍存在以下 2 个关键局限性：①数据类别不平衡问题：现有方法对少数类样本的检测能力不足，存在漏检风险；②检测实时性和有效性不高：现有的检测模型结构复杂、计算资源消耗大，更适用于离线检测场景，难以满足实时性要求高的在线检测需求。

数据类别不平衡问题是目前工业控制系统实现入侵检测的一个重大挑战，而 CBTC 系统作为典型的工业控制系统，该问题也会对其产生如下多方面的负面影响：①模型训练与推理过程中计算资源会向多数类样本倾斜，导致对攻击样本的检测精度不足，同时误报与漏报的权衡困境会加剧系统运维负担；②少数类样本的稀缺使模型难以学习攻击特征，导致对攻击的召回率显著下降（漏检率高）且误报率波动大，难以平衡精确率与召回率；③对于 CBTC 系统而言，漏检的攻击可能会引发列车超速等安全事故，造成安全风险的持续累积。此外，CBTC 系统对实时性的要求比较高。因此，如何在 CBTC 系统车载端实现高效率和高准确率的入侵检测尤为重要[1,10]。

为此，本文提出一种基于机器学习的轻量化 CBTC 车载端入侵检测方法。首先，针对数据类别不平衡问题，提出基于合成少数类过采样（synthetic minority over-sampling technique, SMOTE）[11]和编辑近邻欠采样（edited nearest neighbours under sampling, ENN）[12]的混合采样方法；其次，为提高检测准确率，提出基于朴素贝叶斯-极限梯度提升（naive Bayes-extreme gradient boosting, NB-XGB）融合的入侵检测方法；最后，为提高实时性，提出利用知识蒸馏技术实现模型轻量化部署，既保留了离线检测阶段复杂模型的优秀性能，同时也提高了 CBTC 车载端检测的效率。

本文的主要创新点为：①提出离线和在线两阶段检测方法；②利用知识蒸馏技术实现了 CBTC 车载端在线阶段检测模型的轻量化；③提出的 NB-XGB 融合方法，在 CICIDS2017 和 CBTCset 数据集上进行了全面的实验，结果证明，轻量化后的 NB-XGB 融合模型检测准确率有所提高，推理速度显著提升，检测实时性明显增强。

1 CBTC 系统及攻击类型

1.1 CBTC 系统

CBTC 系统结构如图 1 所示，主要由地面设备、车载设备及数据通信系统（data communication system, DCS）所构成。地面设备包含了列车自动监控（automatic train supervision, ATS）、区域控制器（zone controller, ZC）、计算机联锁（computer interlocking, CI）、无线接入点（access point, AP）及数据存储单元（database storage unit, DSU）。列车车载控制器（vehicle on-broad component, VOBC）和一些辅助设备构成了车载设备。DCS 由有线骨干网和车地无线网组成。

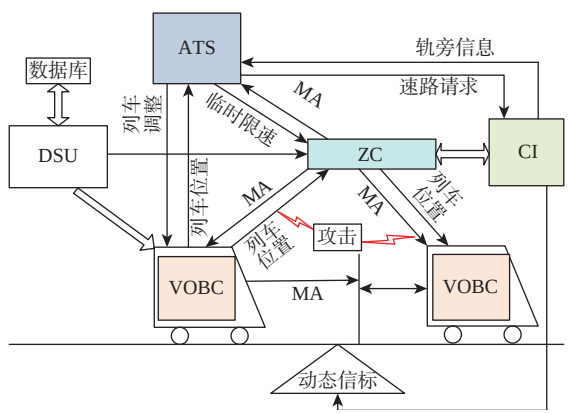


图 1 CBTC 系统结构

Fig. 1 Structure of CBTC system

CBTC 系统中，地面设备间的信息交互通过有线骨干网进行，地面设备与车载设备之间通过车地无线网进行信息交互。VOBC 通过车地无线网络周期性地向 ZC 发送列车位置、速度和方向等状态信息。ZC 综合 ATS 的调度指令、CI 提供的信号设备状态及线路数据，实时计算生成移动授权

(movement authority, MA)并下发给 VOBC。VOBC 基于接收到的 MA 信息, 结合列车当前运行状态, 动态计算防护曲线, 并按照曲线控制列车的运行, 从而确保行车安全并优化运行效率。

1.2　CBTC 系统攻击类型

CBTC 系统中的通信网络是基于互联网 IP 技术搭建的, 网络攻击威胁频发给 CBTC 系统的安全性带来了严重的挑战。DoS 攻击[13] 和数据篡改攻击[2] 是 CBTC 系统中常见的威胁。DoS 攻击可以阻断列车与地面控制中心之间的实时数据交互, 攻击者通过特殊的手段(如攻击数据包)来消耗 CBTC 系统服务器资源, 使被攻击的子系统丧失服务能力, 无法为其他子系统提供支持, 从而导致列车运行效率降低, 更可能危及列车运行安全。与 DoS 攻击不同, 数据篡改攻击不会直接阻断通信, 而是提供虚假消息(即通过非法手段篡改、伪造或删除 CBTC 系统中的关键参数)破坏系统的完整性和可用性, 导致系统做出错误的决策, 可能引发列车冲突、冒进信号或脱轨等严重事故。

2　本文方法

2.1　整体模型架构

本文提出的基于 NB-XGB 融合的轻量化 CBTC 入侵检测方法的整体框架如图 2 所示。

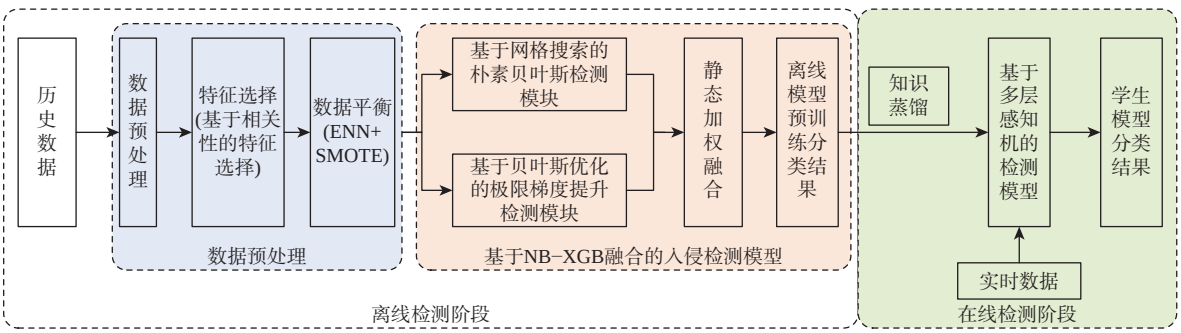


图 2　本文方法整体框架

Fig. 2　Overall framework of the proposed method

整个检测流程分为离线检测和在线检测 2 个阶段, 具体而言:

1) 离线检测阶段。首先, 对采集到的车载端历史数据进行数据预处理, 包含数据清洗、数据标准化、数据归一化等步骤; 其次, 通过基于相关性的特征选择(correlation-based feature selection, CFS)方法[14] 对预处理后的数据进行特征提取获取相关性最高冗余度最低的最优特征子集, 利用 ENN 和 SMOTE[15] 的混合采样方法[16] 对最优特征子集进行数据平衡处理; 最后, 将基于网格搜索(grid search, GS)[17] 的朴素贝叶斯(naive Bayes, NB)[18] 检测模块和基于贝叶斯优化(Bayesian optimization, BO)[19] 的极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)[20] 检测模块利用静态加权融合方法进行集成, 对平衡后的数据实现二分类, 通过对比测试离线模型预训练分类结果, 得到参数最优模型用于在线检测阶段的知识蒸馏。

2) 在线检测阶段。采用知识蒸馏技术[21-22] 实现模型轻量化部署, 将基于 NB-XGB 融合的复杂检测模型压缩为轻量级的多层感知机(multi-layer perceptron, MLP)[23] 学生模型中, 并利用实时数据进行模型测试。

2.2　数据处理方法

为提高数据质量并缓解类别不平衡问题, 在数据处理阶段依次进行特征选择和数据平衡 2 个部分, 具体方法如下:

1) 基于相关性的特征选择方法。CBTC 系统中多设备间的信息交互涉及大量数据传输, 其中, 可能包含冗余信息或环境噪声等干扰数据, 这些无效数据不仅会降低入侵检测的准确性, 还可能影响系统的实时性能。由于 CBTC 系统对实时性要求极高, 数据量的增加会导致传输延迟上升, 进而影响列车的安全控制和运行效率。因此, 在入侵检测过程中, 必须通过特征选择方法提取适用于 CBTC 系统的核心特征, 从而有效提升入侵检测的准确率并降低算法计算复杂度。

CFS 是一种过滤式特征选择方法, 本文利用贪心搜索策略, 通过逐步添加特征来构成特征子集, 计算子集的 Merit 分数, 选择出最大 Merit 值代表的子集作为最优子集。同时为了避免过度追求 Merit 分数最大化, 设置最大特征数与最小特征数来限制特征的数量。CFS 的评估函数具体表达式为

$$M_{\text{erit}S}=k\bar{r}_{\text{cf}}/\sqrt{k+k(k-1)\bar{r}_{\text{ff}}} \tag{1}$$

式中: S 为当前特征子集, 包含 k 个特征; $\bar{r}_{\text{cf}}$ 为衡量特征与目标变量的平均相关性; $\bar{r}_{\text{ff}}$ 表示特征之间的平均互相关性; k 为子集中特征的数量。

2) 基于混合采样的数据平衡方法。CBTC 系

统中数据样本通常包含正常数据及多种攻击类型，如DoS攻击、欺骗攻击和MITM攻击等。然而，由于系统在正常运行状态下占据主导地位，异常攻击样本相对稀缺，导致数据集存在明显的类别不平衡问题。这种数据分布的不平衡性可能使入侵检测模型过度偏向多数类样本，从而降低对少数类样本的识别性能，影响模型整体的检测效果。

ENN通过移除多数类的边界噪声样本或易被误分类样本实现欠采样，具体表达式为

$$d(x_i,x_j)=\sqrt{\sum_{l=1}^{d}(x_{i,l}-x_{j,l})^2} \tag{2}$$

式中：$d(x_i,x_j)$表示样本x_i和样本x_j之间的欧几里得距离；x_i和x_j为不同的样本；$x_{i,l}$和$x_{j,l}$为第l个特征；d为样本维度。

SMOTE是通过线性插值生成新的少数类样本的一种过采样技术，在少数类样本的特征空间中，找到相似样本并生成合成数据，具体表达式为

$$x_{\text{new}}=x_i+\lambda(x_{zi}-x_i) \tag{3}$$

式中：x_i表示少数类样本；x_{zi}表示从样本x_i中z个最近邻中随机选择的邻居样本；$\lambda\in[0,1]$为一个服从均匀分布的随机数。

本文将ENN与SMOTE相结合。首先，用SMOTE对少数类样本进行插值，生成合成样本；其次，用ENN对多数类样本进行选择性剔除，删除被误分类的边界样本；最后，将ENN筛选后的多数类样本、原始少数类样本和SMOTE生成样本进行合并构成新的数据集。

2.3 基于NB-XGB融合的离线入侵检测

现有CBTC系统中入侵检测方法面临检出率低和误报率高的双重挑战。过高的误报率可能导致系统产生虚警，进而引发不必要的列车紧急制动等误操作，严重影响列车运行效率。同时，传统单一检测模型往往难以有效识别各类攻击行为，尤其对少数类样本的检测准确率显著不足。针对上述问题，本文提出基于NB-XGB融合的离线入侵检测方法。首先，基于模型互补性原则，选择NB与XGBoost作为基分类器。该选择主要基于以下考量：①XGBoost作为强大的判别式模型，能够自动捕获复杂的特征交互与非线性的攻击模式，为集成模型提供高精度的判别基础；②NB作为一种生成式模型，具有坚实的概率理论基础，虽受限于条件独立性假设，但其计算效率高，概率估计稳定，在小样本场景下仍能保持较好的鲁棒性。二者在模型原理与性能上的异质性，为通过集成学习实现优势互补、提升整体泛化能力创造了条件。其次，利用GS和BO分别对2个模型的超参数进行优化，分别确定最优基模型；最后，通过对基模型输出的分类概率进行静态加权融合，生成最终的分类结果。

基于上述互补性选择，本节将依次介绍2个基分类器的构建优化过程及两者进行静态加权融合的实现方法。

1）基于GS优化的NB检测

高斯朴素贝叶斯是NB的一种变体，通过计算概率密度函数估计样本属于某一类的概率，具体表达式为

$$P(x_i'|y)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{y,i}^2}}\exp\left(-\frac{(x_i'-\mu_{y,i})^2}{2\sigma_{y,i}^2}\right) \tag{4}$$

式中：x_i'表示特征；y表示类别；$\mu_{y,i}$表示类别y下第i个特征的均值；$\sigma_{y,i}^2$表示类别y下第i个特征的方差。

GS被广泛用于模型超参数的优化问题。为提高NB模型的分类性能，利用GS对NB的超参数进行自动化寻优，其流程如图3所示。

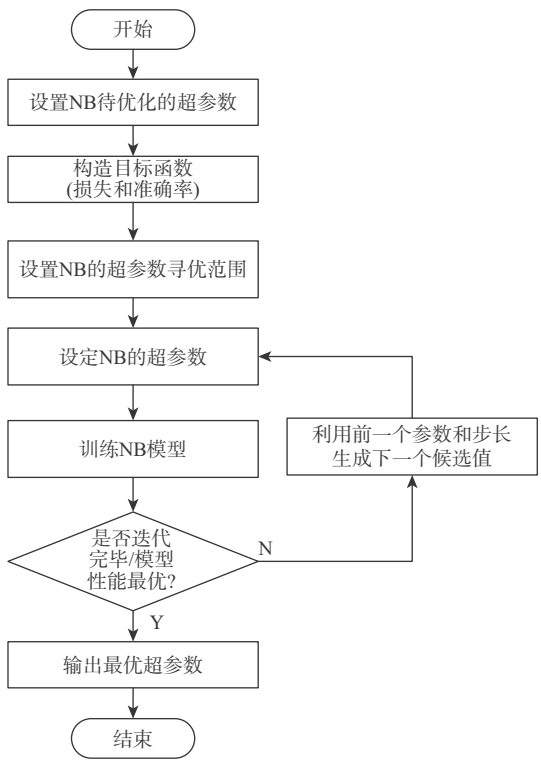


图3 基于GS的NB模型超参数优化流程

Fig. 3 Hyperparameter optimization flow of NB model based on GS

2）基于BO优化的XGBoost检测

XGBoost是对梯度提升决策树算法的一种改进和优化，由多个弱分类器集成所得，具体表达式为

$$\begin{cases}\hat{y}_i=\sum_{k=1}^{K}f_k(x_i)\\ f_k=F\end{cases} \tag{5}$$

式中：$\hat{y}_i$为样本x_i的预测值，表示分类概率的得分；

f_k为第k棵回归树; F为所有回归树的函数空间。

本文用目标函数$L(\Phi)$来衡量模型预测结果与真实标签之间的差距, 具体表达式为

$$L(\Phi)=\sum_i l(y_i,\hat{y}_i)+\sum_k \Omega(f_k) \tag{6}$$

等式右侧的第 1 项为损失函数, 第 2 项为正则项, 用来防止过拟合。本文使用对数损失函数, 具体表达式为

$$l(y_i,\hat{y}_i)=-[y_i\ln(p_i)+(1-p_i)\ln(1-p_i)] \tag{7}$$

式中: y_i表示真实值; $\hat{y}_i$表示模型的原始输出; p_i表示预测概率。

BO 算法是一种基于概率模型的序列优化方法, 用 BO 算法对 XGBoost 模型中的超参数进行优化, 对选择出的最优的超参数进行训练。基于 BO 优化的 XGBoost 超参数优化流程如图 4 所示。

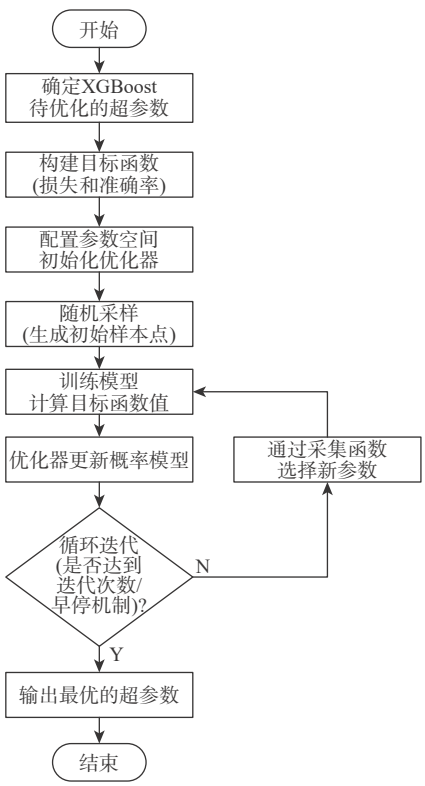


图 4　基于 BO 优化 XGBoost 模型超参数优化流程

Fig. 4　Hyperparameter optimization flow of XGBoost model based on BO optimization

3) 基于 XGBoost 和 NB 的静态加权融合

基于 NB-XGB 融合的离线入侵检测方法包含 XGBoost 和 NB 这 2 个基模型, 对 2 个检测模型的预测分类概率采用静态加权融合的方法进一步确定数据的分类。具体而言, 首先, 分别训练独立的 XGBoost 模型和 NB 模型, 二者均输出待检测数据属于各类别的概率; 其次, 对两模型的概率采用线性加权融合策略, 且两者权重满足之和为 1 的约束条件。具体表达式为

$$P(X)=\alpha P_{\mathrm{XGB}}(X)+(1-\alpha)P_{\mathrm{NB}}(X) \tag{8}$$

式中: α为 XGBoost 模型的权重值, $\alpha\in[0,1]$; $P_{\mathrm{XGB}}(X)$和$P_{\mathrm{NB}}(X)$分别表示 XGBoost 和 NB 模型输出的分类概率。

为确定最优权重分配, 本文采用了 GS 搜索方法, 在$\alpha\in[0,1]$的候选值范围内针对每个α值计算融合模型的性能指标(以 F_1 值为主要优化目标), 选取使性能最优的α值作为最优权重值。最后, 结合最优权重值和 2 个基模型的最优参数值, 重新训练静态加权融合模型并用于测试集评估。

2.4　基于知识蒸馏的轻量化在线检测模型

知识蒸馏是利用大模型训练出来的“知识”去指导小模型的学习, 使得小模型获得接近大模型的性能, 但计算的成本会更低, 模型也更为简单。本文知识蒸馏架构由可训练的学生模型(MLP 模型)、预训练的教师模型(NB-XGB 融合模型)和知识转移模块组成。知识来源包含概率输出的软标签和阈值化后 0/1 预测的硬标签。知识蒸馏结构如图 5 所示。

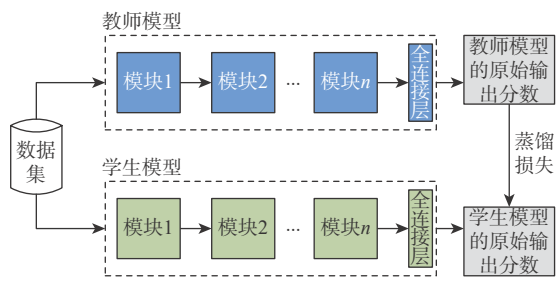


图 5　知识蒸馏结构

Fig. 5　Structure of knowledge distillation

为确保学生模型能够高效的从教师模型中学习知识, 用损失函数优化目标的设计, 蒸馏损失是学生模型和教师模型的软标签之间的 KL 损失, 具体表达式为

$$L_{\mathrm{KL}}(Q\,\|\,P)=\sum_{i=1}^{N}Q(y_i)\ln\left(\frac{Q(y_i)}{P(y_i)}\right) \tag{9}$$

式中: $Q(y_i)$和$P(y_i)$分别为教师模型和学生模型对类别y_i的预测概率; N为类别总数。

本文实现的目标为二分类, 则 KL 损失可以简化为

$$L_{\mathrm{KL}}=q\ln\left(\frac{q}{p}\right)+(1-q)\ln\left(\frac{1-q}{1-p}\right) \tag{10}$$

式中: p和q分别为模型预测概率分布正类的概率和真实概率分布中正类的概率。

MLP 是一种前馈神经网络, 由输入层、隐藏层和输出层构成, 信息通过各层之间的链接流动, 可

以学习到输入与输出之间的非线性关系。MLP的基本结构如图6所示。

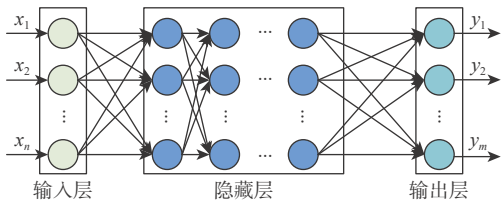


图6 MLP基本结构

Fig. 6 Basic structure of MLP

由于知识蒸馏中教师模型提供的“软标签”是连续值，因此，本文选用的学生模型为MLP的回归模型，优化器采用的是Adam优化器，用来反向传播和更新梯度；隐藏层中的激活函数为ReLU实现非线性变换；均方误差损失函数一般用于回归模型，将其作为蒸馏损失，计算学生模型的预测值与软标签之间的均方值。损失函数具体表达式为

$$L_{\mathrm{MSE}}=\sum_i\left(p_i^{\mathrm{teacher}}-p_i^{\mathrm{student}}\right)^2 \tag{11}$$

式中：p_i^{teacher}和p_i^{student}分别为教师模型和学生模型对训练样本的输出概率。

3 实验结果与分析

3.1 实验设置

实验环境使用系统为Ubuntun22.04，编程语言使用Python3.9，开发环境为vscode，深度学习框架为PyTorch1.12.1。硬件使用处理器为718532C、显卡为异构加速卡(32 GB)×2、内存为128 GB DDR4。相应的模型参数如表1和表2所示。

表1 基于BO优化的XGBoost模型参数设置

Table 1 Parameter settings of XGBoost model based on BO optimization

参数	数值
最大深度	(3, 10)
学习率	(0.01, 0.3)
基学习器数量	(50, 300)
子采样比例	(0.5, 1.0)
特征采样比例	(0.5, 1.0)
初始采样点数	5
迭代次数	100

3.2 实验数据

CICIDS2017数据集[24]是通过在实验室环境中模拟多种网络攻击和正常流量，收集了大量网络流量数据。该数据集由1 667 613条数据组成，包含了暴力破解、DoS攻击、DDoS攻击及Web攻击等13种攻击样本和78种数据特征。

表2 基于MLP学生模型参数设置

Table 2 Parameter settings based on MLP student model

参数	数值
隐藏层大小	(64, 32)
正则化系数	0.1
温度参数	3
最大迭代次数	300
随机种子	42

CBTCset数据集[25]是在2023年公开的检测CBTC网络中不当行为攻击的参考数据集，采用TrainSec开源仿真架构生成列车和WSU之间的数据，由TSMset和WOMset这2个数据子集构成。CBTCset数据集由2 315 223条数据组成，TSMset数据子集包含了3种攻击样本及12种特征，WOMset数据子集包含了2种攻击样本及13种特征，其中，2个数据子集中共有的特征有5个。

3.3 评价指标

采用准确率A_{cc}、召回率R、精确率P及F_1值等性能指标，对本文方法的分类效果进行系统性评估。各评价指标的定义如下：

$$A_{\mathrm{cc}}=\frac{T_{\mathrm{P}}+T_{\mathrm{N}}}{T_{\mathrm{P}}+T_{\mathrm{N}}+F_{\mathrm{P}}+F_{\mathrm{N}}} \tag{12}$$

$$P=\frac{T_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{P}}+F_{\mathrm{P}}} \tag{13}$$

$$R=\frac{T_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{P}}+F_{\mathrm{N}}} \tag{14}$$

$$F_1=\frac{2T_{\mathrm{P}}}{2T_{\mathrm{P}}+F_{\mathrm{P}}+F_{\mathrm{N}}} \tag{15}$$

式中：T_{P}表示正确检测出的攻击样本数；T_{N}表示正确检测出的正常样本数；F_{P}表示将正常样本误判为攻击样本数；F_{N}表示将攻击样本误判为正常样本数。

3.4 实验设计与验证

为验证本文方法的有效性，本节从以下6个方面展开实验设计与结果分析：数据预处理、特征选择、数据平衡、融合模型优化、对比实验及轻量化实验。具体如下：

1）数据预处理

为确保模型训练的有效性和泛化能力，本文对原始数据集进行了数据预处理，包含了多个数据集的整合、缺失值处理、标签标准化等步骤。

首先，对原始数据集的数据进行合并和清理。对数据集中存在多个数据文件时先对数据进行按行的合并，保留所有的特征；随后，对数据进行去重处理，并剔除存在严重缺失的样本。对于部分存在少量缺失值的字段，选择删除缺失行以避免引入偏

差; 其次, 对清洗后的数据集进行标签规范化处理。由于原始数据集中存在多个细粒度的标签, 为统一处理, 本文将其归为二分类任务, 将数据集中的良性样本(即 BEGIN)标记为正常(Label=0), 攻击样本全部归为异常(Label=1); 最后, 对数据集进行特征筛选与编码。剔除与模型学习无关的字段, 保留的所有数值型特征统一转换为浮点类型。此外, 对所有特征进行归一化处理, 使特征数值范围在 [0,1] 区间内。

2) 特征提取

对预处理完的数据集分别用 CFS 方法进行特征提取, 选择与标签相关性强但彼此冗余性低的 20 个特征构成特征子集, 通过本文所提出的入侵检测模型验证了 CFS 特征提取方法的有效性。基于 CFS、主成分分析法(principal component analysis, PCA)[15] 及 XGBoost 的特征提取方法的性能对比结果如表 3 所示。

表 3　不同特征提取方法的性能对比结果

Table 3　Performance comparison results of different feature extraction methods

方法	准确率	精确率	召回率	F_1值
CFS[14]	0.996 0	0.995 3	0.998 5	0.992 6
PCA[15]	0.995 7	0.992 5	0.993 7	0.993 1
XGBoost[20]	0.995 3	0.989 6	0.990 0	0.994 0

由表 3 可见, 相较于 PCA 和 XGBoost 特征提取方法, 基于 CFS 的方法在准确率、精确率及召回率指标上均表现更优, 表明 CFS 在正类样本识别中具有更强的捕获能力, 漏检率显著低于其他方法。

基于不同数据集的特征维度差异, 分别采用不同的特征处理策略。具体而言, 由于 CICIDS2017 数据集中具有 78 维特征, 特征维度相对较大, 因此需要通过特征提取方法进行降维以降低计算消耗, 而对于低维的 CBTCset 数据集(特征维度≤20), 则保留其原始特征空间以维持数据完整性。这种基于数据集特性的自适应处理方法, 既保障了模型的计算效率, 又避免了不必要的特征信息损失。

3) 数据平衡

本文将数据集以 6: 2: 2 划分为训练集、验证集和测试集, 针对训练集采用 ENN 和 SMOTE 混合采样的方法进行数据平衡处理, 以缓解数据类别不平衡对入侵检测性能的影响。同时, 引入 SMOTE 与 KMeans-SMOTE 作为对照方法, 通过本文模型系统验证 ENN 和 SMOTE 混合采样方法的有效性。本文基于 ENN-SMOTE 方法、SMOTE 及 KMeans-SMOTE 的数据平衡性能对比结果如表 4～表 6 所示。

表 4　CICIDS2017 数据集中数据平衡的性能对比结果

Table 4　CICIDS2017 performance comparison of data balance in dataset

方法	准确率	精确率	召回率	F_1值
ENN-SMOTE	0.995 2	0.990 3	0.994 4	0.992 3
SMOTE[11]	0.994 7	0.991 2	0.992 0	0.991 6
KMeans-SMOTE	0.994 7	0.987 5	0.995 6	0.991 5

表 5　TSMset 数据集中数据平衡的性能对比结果

Table 5　Performance comparison results of data balancing in TSMset dataset

方法	准确率	精确率	召回率	F_1值
ENN-SMOTE	0.986 0	0.952 1	0.926 7	0.939 4
SMOTE[11]	0.984 9	0.976 9	0.893 1	0.933 1
KMeans-SMOTE	0.985 6	0.995 9	0.881 2	0.935 1

表 6　WOMset 数据集中数据平衡的性能对比结果

Table 6　Performance comparison results of data balancing in WOMset dataset

方法	准确率	精确率	召回率	F_1值
ENN-SMOTE	0.946 4	0.765 8	0.812 0	0.790 1
SMOTE[11]	0.944 2	0.871 8	0.721 3	0.789 4
KMeans-SMOTE	0.945 9	0.905 6	0.700 1	0.789 7

由表 4 可知, 由于 ENN 删除了边界上被多数类包围的少数类样本, 减少“虚假”合成样本, 从而提升了分类器对正常样本的识别能力, 因此, 混合采样方法实现了 0.995 2 的准确率, 0.992 3 的 F_1 值及 0.990 3 的精确率, 但相较于 KMeans-SMOTE 数据平衡的方法, 其召回率略有降低, 这是由于欠采样丢失了原样本中的有用信息从而导致了召回率的小幅下降。

由表 5 可知, 相较于其他数据平衡方法, 本文方法实现了 0.986 0 的准确率、0.926 7 的召回率及 0.939 4 的 F_1 值, 这表明模型对正类样本的捕获能力较强。然而, 其精确率相对较低, 可能是由于混合采样过程中过度剔除了边界区域的关键多数类样本, 导致决策边界偏移造成的结果。

由表 6 可知, 相较于其他数据平衡方法, 本文方法在整体性能上呈现显著优势: 准确率达 0.946 4、召回率 0.812 0、F_1 值 0.790 1, 3 项核心指标均优于对比方法。这一结果印证了本文方法能够更有效地识别正类样本, 显著降低了漏检率。

综上, 本文方法在 3 个数据集中整体性能上优于其他 2 个方法, 检测准确率提升了 0.05%～0.22%, 是因为通过 ENN 将局部噪声进行处理再利用 SMOTE 进行插值, 避免了 SMOTE 在决策边界上生成危险样本及 KMeans-SMOTE 因聚类偏差导致的

过采样不均。

4）NB-XGB 融合模型优化实验

基于 NB-XGB 融合的入侵检测方法，是 XGBoost 与 NB 这 2 种方法的集成，并通过加权融合来确定样本具体的分类。首先，将平衡过后的数据送入 XGBoost 模型中，并结合 BO 提取最优的 XGBoost 参数；其次，将平衡后的数据送入到 NB 模型中，采用 GS 的方法提取最优的 NB 参数；最后，将得到最优的参数添加到 NB-XGB 融合模型中，分别对 2 个模型设置不同的权重值，进而得到最优的模型。本节实验共包含 3 个部分，即 XGBoost 和 NB 这 2 个基分类器的超参数优化及两者的加权系数实验，具体的分析和结果如下：

1）基于 BO 的 XGBoost 模型优化

为提升分类模型在数据集上的性能，采用 BO 方法对 XGBoost 模型的关键超参数（max_depth、learning_rate、n_estimators、subsample、colsample_bytree）进行调优。初始化阶段采用 5 个随机点进行模型训练与评估，随后执行 100 次贝叶斯迭代。同时本文引入早停机制，当连续 10 次迭代的优化结果未使损失函数值出现显著下降时，自动触发机制并终止训练过程。基于 BO 的 XGBoost 的优化过程中损失与准确率变化曲线如图 7～图 9 所示。

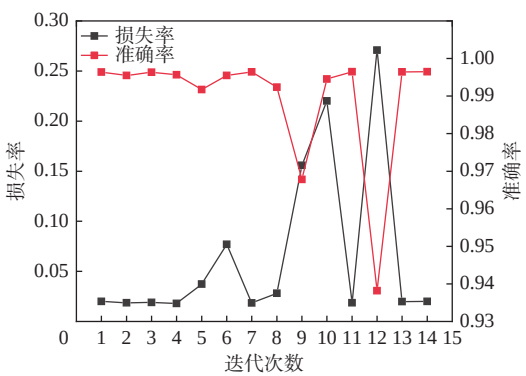


图 7 CICIDS2017 数据集下 XGBoost 优化过程中损失与准确率曲线

Fig. 7 Loss and accuracy curves of XGBoost in optimization process of CICIDS2017 dataset

由图 7 可知，几乎所有的点的准确率都超过了 0.97，说明该模型对多数样本的预测较为准确，整体的性能稳定。同时，大多数点的损失都小于 0.05，说明该模型的预测概率置信度较高，但是在第 12 次迭代过程中出现准确率小于 0.94，但损失却非常高的情况，因此，应将第 12 次迭代点做为异常点进行排除。

由图 8 可知，在迭代的过程中，模型的准确率始终保持在 0.970～0.982 之间，损失函数值始终保持在 0.095 之下，说明该数据集下优化的模型整体

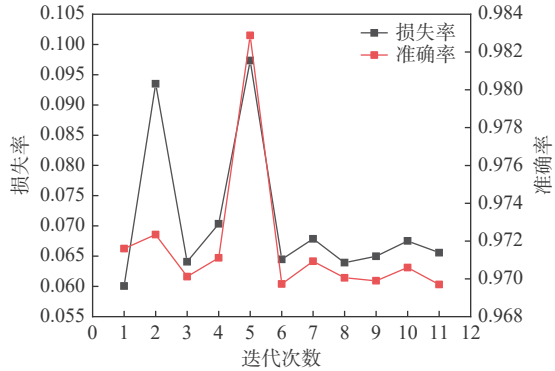


图 8 TSMset 数据集下 XGBoost 优化过程中的损失与准确率曲线

Fig. 8 Loss and accuracy curves of XGBoost in optimization process of TSMset dataset

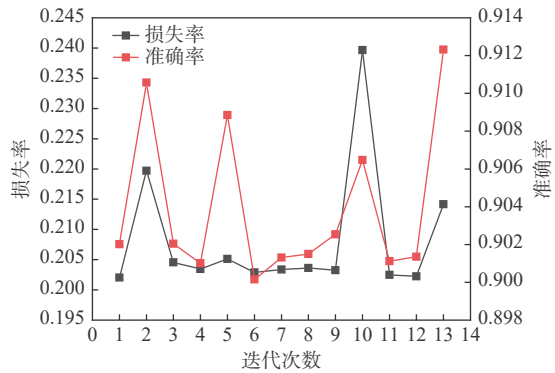


图 9 WOMset 数据集下 XGBoost 的优化过程中的损失与准确率曲线

Fig. 9 Loss and accuracy curves of XGBoost in optimization process of WOMset dataset

表现比较稳定。同时，从第 7 次迭代开始，2 个指标的波动浮动明显减小，表明 BO 优化已经收敛到了一个最优的参数空间。

由图 9 可知，多次迭代的损失值在 0.20～0.25 的范围内，说明模型整体的损失较低；模型的准确率整体表现比较稳定，在 0.89～0.91 之间波动。在第 10 次迭代过程中出现了异常值，模型的损失值激增到最高点，说明了该轮的超参数组合严重劣化了模型的性能，应该作为异常点删除掉。

2）基于 GS 的 NB 模型优化

为优化 NB 模型的性能，对其关键参数 var_smoothing 进行了网格搜索。本文在多个数量级上测试了该参数，选取准确率最高的参数值用于后续实验。实验结果表明，NB 模型在 var_smoothing 参数的不同数量级下性能表现稳健，仅当参数取值为 CICIDS2017 数据集为 1×10^{-5}、TSMset 与 WOMset 数据集为 1×10^{-9} 时，评估指标出现小数点后四位级别的细微波动，整体影响可忽略不计。综上可知，var_smoothing 作为 NB 模型的关键参数，其对模型整

体性能的影响程度有限。因此, 本文选取各数据集上表现最优的参数值开展性能评估。CICIDS2017 数据集和 CBTCset 数据集上 NB 模型的性能评估结果如表 7 所示。

表 7　不同数据集上 NB 模型的性能评估结果

Table 7　Performance evaluation results of NB models on different datasets

数据集	参数	准确率	精确率	召回率	F_1值
CICIDS2017[24]	1×10^{-5}	0.807 7	0.741 0	0.592 8	0.658 6
TSMset[25]	1×10^{-9}	0.985 7	1.000 0	0.879 0	0.935 6
WOMset[25]	1×10^{-9}	0.949 9	1.000 0	0.654 8	0.791 4

由表 7 可知, 在 CICIDS2017 数据集上, NB 模型对异常样本的识别能力较弱, 尤其在召回率方面受限, 说明模型受到数据复杂性的影响; 在 TSMset 数据集和 WOMset 数据集上, NB 模型的效果极佳, 在保持高精确率的同时保持较高召回率。此外, WOMset 数据集的 F_1 值低于 TSMset 数据集 F_1 值, 说明在 WOMset 数据集上模型存在漏报的风险。

3) NB-XGB 融合模型加权系数实验

为提升整体 NB-XGB 融合模型的性能, 分别从 2 个模型中选择最优的参数用于 NB-XGB 融合模型, 通过对 2 个模型设置不同的权重来判断模型整体的性能。对关键参数 W_{xgb}(XGBoost 模型权重), W_{nb}(NB 模型权重)进行网格搜索, NB-XGB 融合模型不同参数性能比较如表 8～表 10 所示。

表 8　CICIDS2017 数据集下 NB-XGB 融合模型不同参数性能比较

Table 8　Comparison of different parameters for NB-XGB fusion model on CICIDS2017 dataset

W_{xgb}	W_{nb}	准确率	精确率	召回率	F_1值
0	1.0	0.807 7	0.741 0	0.592 8	0.658 6
0.1	0.9	0.807 9	0.741 6	0.592 8	0.658 9
0.2	0.8	0.808 2	0.742 3	0.593 1	0.659 4
0.3	0.7	0.808 6	0.743 4	0.593 3	0.659 9
0.4	0.6	0.809 3	0.745 3	0.593 4	0.660 7
0.5	0.5	0.814 6	0.761 2	0.593 8	0.667 2
0.6	0.4	0.995 9	0.993 2	0.993 5	0.993 4
0.7	0.3	0.996 1	0.992 4	0.995 1	0.993 8
0.8	0.2	0.996 1	0.991 8	0.995 7	0.993 8
0.9	0.1	0.995 8	0.990 9	0.995 9	0.993 4
1.0	0	0.995 5	0.989 3	0.996 3	0.992 8

由表 8 可知, 当 W_{xgb}=0.8, W_{nb}=0.2 和 W_{xgb}=0.7, W_{nb}=0.3 时, 模型的指标表现达到最优, 准确率和 F_1 值分别达到了 0.996 1 和 0.993 8, 然而, 在二者综合性能相当的情况下, W_{nb} 为 0.2 时, 模型的召回率达到了 0.995 7 比 W_{nb}=0.3 提升了 0.06%。在 CBTC-IDS 中, 高召回率直接对应低漏报率, 鉴于其对行车安全的重大影响, 召回率相较于精确率具有更高的优先级, 因此, 本文选择 W_{xgb}=0.8, W_{nb}=0.2 参数作为模型的最优参数。同时, 利用 XGBoost 主导预测, NB 进行修正, 获得了 2 个模型的协同效果, 同时避免了 NB 主导时带来的性能下降问题。

表 9　TSMset 数据集下 NB-XGB 融合模型不同参数性能比较

Table 9　Comparison of different parameters for NB-XGB fusion model on TSMset dataset

W_{xgb}	W_{nb}	准确率	精确率	召回率	F_1值
0	1.0	0.985 7	0.992 2	0.878 8	0.935 5
0.1	0.9	0.985 7	0.992 2	0.878 9	0.935 5
0.2	0.8	0.985 7	0.992 2	0.878 9	0.935 5
0.3	0.7	0.985 7	0.992 2	0.878 9	0.935 5
0.4	0.6	0.985 7	0.992 2	0.878 9	0.935 5
0.5	0.5	0.985 7	0.992 2	0.878 9	0.935 5
0.6	0.4	0.980 7	0.913 4	0.923 7	0.918 5
0.7	0.3	0.977 1	0.869 2	0.948 0	0.906 9
0.8	0.2	0.974 9	0.847 6	0.959 7	0.900 2
0.9	0.1	0.973 4	0.833 7	0.967 4	0.895 6
1.0	0	0.972 6	0.825 5	0.972 9	0.893 2

表 10　WOMset 数据集下 NB-XGB 融合模型不同参数性能比较

Table 10　Comparison of different parameters for NB-XGB fusion model on WOMset dataset

W_{xgb}	W_{nb}	准确率	精确率	召回率	F_1值
0	1.0	0.949 9	0.992 8	0.654 6	0.791 3
0.1	0.9	0.949 9	0.992 8	0.654 6	0.791 3
0.2	0.8	0.949 9	0.992 8	0.654 6	0.791 3
0.3	0.7	0.949 9	0.992 8	0.654 6	0.791 3
0.4	0.6	0.949 9	0.992 8	0.654 6	0.791 3
0.5	0.5	0.949 9	0.992 8	0.654 7	0.791 3
0.6	0.4	0.930 7	0.727 3	0.835 5	0.777 6
0.7	0.3	0.917 2	0.655 1	0.906 6	0.760 6
0.8	0.2	0.909 1	0.624 1	0.939 7	0.750 1
0.9	0.1	0.905 3	0.610 7	0.957 6	0.745 8
1.0	0	0.902 1	0.600 9	0.967 5	0.741 4

由表 9 和表 10 可知, W_{xgb} 小于等于 0.5 时, 模型的各个评估指标基本一致, 并且精确率分别达到了 0.992 2 和 0.992 8, 表明模型在避免误判方面表现优异; 然而召回率相对较低, 反映出模型对正类样本的捕获能力不足, 存在一定漏检风险; W_{xgb} 大于等于 0.5 时, 模型的准确率、精确率、F_1 值有相应的降低, 但是召回率有了明显的提升。为在降低漏检率和保持零误报之间权衡, 本文选择了 W_{xgb}=0.6, W_{nb}=0.4 参数作为模型的最优参数。

5）模型对比实验

为验证本文方法的有效性，通过XGBoost、K近邻（K-nearest neighbors, KNN）算法、NB、孤立森林（isolation forest, IForest）、随机森林（random forest, RF）、MLP、CNN-LSTM[9]、DAO-BPNN[26]等模型作为对照，开展性能对比实验，不同模型的性能比较如表11～表13所示。

表11 CICIDS2017数据集不同模型的性能比较

Table 11 CICIDS2017 performance comparison of different models in dataset

模型	准确率	精确率	召回率	F_1值
XGBoost[20]	0.995 6	0.989 9	0.996 2	0.993 1
RF	0.994 5	0.991 7	0.990 8	0.991 3
MLP[23]	0.951 3	0.888 0	0.966 3	0.925 5
KNN	0.995 3	0.988 3	0.996 9	0.992 6
IForest	0.682 9	0.479 4	0.153 2	0.232 2
NB[18]	0.807 7	0.741 0	0.592 8	0.658 6
CNN-LSTM[9]	0.949 6	0.886 5	0.962 0	0.922 7
DAO-BPNN[26]	0.948 2	0.891 3	0.982 3	0.934 5
NB-XGB	0.996 1	0.991 8	0.995 7	0.993 8

表12 TSMset数据集不同模型的性能比较

Table 12 TSMset performance comparison of different models in dataset

模型	准确率	精确率	召回率	F_1值
XGBoost[20]	0.971 8	0.819 1	0.976 2	0.890 7
RF	0.985 7	0.999 8	0.879 1	0.935 5
MLP[23]	0.947 6	0.699 7	0.972 2	0.813 8
KNN	0.965 3	0.808 0	0.925 4	0.862 7
IForest	0.848 9	0.333 5	0.283 0	0.306 2
NB[18]	0.985 7	1.000 0	0.879 0	0.935 6
CNN-LSTM[9]	0.966 4	0.798 8	0.955 3	0.870 1
DAO-BPNN[26]	0.966 8	0.813 8	0.931 9	0.868 8
NB-XGB	0.980 7	0.913 4	0.923 7	0.918 5

从表11可知，与其他模型相比，本文方法在准确率、精确率和F_1值上均表现出显著优势，然而召回率略低于XGBoost、KNN模型，是由于加权融合后模型整体分类边界更加平衡，在降低误报的同时保持了对攻击的有效检测。

从表12可知，本文方法在准确率、F_1值相较于NB仅低0.5%、1.71%，相较于RF仅低0.5%、1.70%，但是相较于其他单一的模型表现出更好的指标均衡性。相较于RF的精确率高召回率低和XGBoost的召回率高精确率低，NB-XGB融合方法将精确率提高了11.4%，召回率提高了4.46%，同时相较于MLP的极端不平衡能够实现更稳定的预测可靠性。

由表13可知，本文方法在精确率、F_1值和准确率上都仅次于NB，但是NB存在高精确率低召回率的弊端，本文方法在精确率和召回率之间取得良好平衡，克服了NB的高精确低召回及XGBoost的高召回低精确的缺陷。在前期数据预处理中，3个数据集已进行降维处理，故数据集的特征维度对性能影响不大。

表13 WOMset数据集不同模型的性能比较

Table 13 WOMset performance comparison of different models in dataset

模型	准确率	精确率	召回率	F_1值
XGBoost[20]	0.901 4	0.598 9	0.969 8	0.740 5
RF	0.902 0	0.620 3	0.836 6	0.712 4
MLP[23]	0.909 5	0.635 2	0.884 5	0.739 4
KNN	0.905 0	0.618 3	0.901 8	0.733 6
IForest	0.821 2	0.331 5	0.228 2	0.270 6
NB[18]	0.949 9	1.000 0	0.654 8	0.791 4
CNN-LSTM[9]	0.883 1	0.560 1	0.906 0	0.692 2
DAO-BPNN[26]	0.899 5	0.609 4	0.855 3	0.711 7
NB-XGB	0.930 7	0.727 3	0.835 5	0.777 6

6）模型轻量化实验

为满足CBTC车载端实时性的需求，采用离线检测与知识蒸馏相结合的方式对模型进行轻量化处理。首先，在离线阶段对数据集进行处理和检测，训练出性能较优的混合模型；其次，通过知识蒸馏，将复杂模型的知识分别迁移到逻辑回归（logistic regression, LR）和MLP的轻量级学生模型中，从而在车载端实现高效的在线检测。CICIDS2017数据集和CBTCset数据集上模型轻量化后的性能评估如表14所示。

表14 不同数据集上模型轻量化后的性能比较

Table 14 Comparison of lightweight performance of models on different datasets

数据集	学生模型	准确率	精确率	召回率	F_1值
CICIIDS2017[24]	LR	0.860 7	0.741 1	0.852 7	0.793 0
	MLP[23]	0.955 9	0.901 9	0.964 0	0.931 9
TSMset[25]	LR	0.752 9	0.240 0	0.506 6	0.325 7
	MLP[23]	0.974 2	0.842 3	0.961 2	0.897 8
WOMset[25]	LR	0.782 3	0.330 8	0.489 5	0.394 8
	MLP[23]	0.925 6	0.703 8	0.840 8	0.766 2

从表14可知，MLP模型在3种数据集上的性能均显著高于LR模型，在CICIDS2017数据集上，MLP的准确率达到了0.955 9，F_1值达到了0.931 9，说明该复杂模型具有较好的分类能力；同时，在CBTCset数据集上，MLP模型的准确率和F_1值同样稳定，适合在车载端进行检测。

结合表15和图10可知，模型尺寸的压缩率达

到了 83% 以上, MLP 的推理时长降到 0.16 ms/样本。实验表明, NB-XGB 融合模型可以实现轻量化, 能够满足 CBTC 系统实时性要求。同时, 由表 14 可知, 知识蒸馏后学生模型对复杂教师模型进行了充分学习。通过知识蒸馏技术进行轻量化后的模型不仅提高了运行效率, 还继承了教师模型的优良性能。

表 15　不同数据集上模型大小和推理时长比较

Table 15　Comparison of model size and inference duration on different datasets

数据集	原模型大小/MB	MLP模型大小/MB	原模型推理时长/(ms·样本$^{-1}$)	MLP推理时长/(ms·样本$^{-1}$)
CICIDS2017[24]	0.50	0.08	7.20	0.16
TSMset[25]	1.12	0.07	7.69	0.16
WOMset[25]	1.30	0.08	7.24	0.16

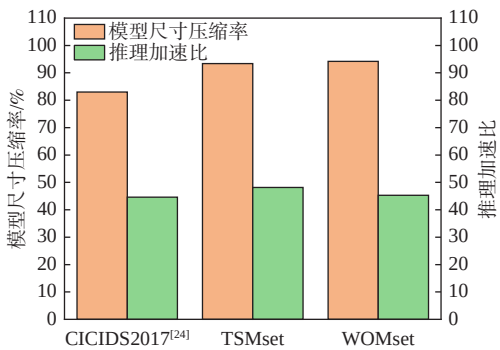


图 10　不同数据集下模型尺寸压缩率和推理加速比的比较

Fig. 10　Comparison of model size compression ratio and inference acceleration ratio under different datasets

4　结　论

1) 针对数据类别不平衡问题, 本文提出基于 ENN 和 SMOTE 的混合采样方法。实验证明, 混合采样方法在 3 个数据集中整体性能上优于 SMOTE 和 KMeans-SMOTE 方法, 检测准确率提升了 0.05%～0.22%。

2) 针对检测准确率低的问题, 本文提出基于 NB-XGB 融合的检测方法。通过 BO 和 GS 分别优化 XGBoost 和 NB 的模型参数, 经最优参数和加权融合确定最优的 NB-XGB 融合模型。实验证明, N_{xgb} 和 W_{nb} 权重系数达到动态平衡下, NB-XGB 融合模型的漏检率和误报率为最低, 且 NB-XGB 融合集成模型克服了单一模型“高精确低召回”或“高召回低精确”的缺陷。

3) 针对 CBTC 车载端检测实时性的需求, 本文提出通过知识蒸馏技术将 NB-XGB 融合模型的优势迁移至 MLP 模型, 实现模型轻量化。实验证明, 模型尺寸压缩率达到了 83% 以上, 模型推理时长降到了 0.16 ms/样本, 推理速度显著提升。

本文方法在实验室环境下验证有效, 但其性能仍依赖于训练数据的完备性, 对未知攻击类型的泛化能力及在真实硬件平台中的长期运行稳定性尚需进一步验证。此外, 现有实验未考虑车地通信越区切换过程中因时序滞后所引入的检测延迟问题。后续研究将在实际 CBTC 平台上进行系统部署与测试, 重点分析越区切换对入侵检测性能的影响, 并引入在线增量学习机制, 以持续增强对新型威胁的防御与适应能力。

参考文献（References）

[1] Zhu L, Chen C, Wang H W, et al. Machine learning in urban rail transit systems: a survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(3): 2182-2207.

[2] 陈雪倩, 步兵. 基于网络流量和数据包的 CBTC 入侵检测系统[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(S2): 154-160.
Chen X Q, Bu B. An intrusion detection system for CBTC based on network traffic and packets[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(S2): 154-160(in Chinese).

[3] 蹇诗婕, 卢志刚, 杜丹, 等. 网络入侵检测技术综述[J]. 信息安全学报, 2020, 5(4): 96-122.
Jian S J, Lu Z G, Du D, et al. Overview of network intrusion detection technology[J]. Journal of Cyber Security, 2020, 5(4): 96-122 (in Chinese).

[4] Abdulganiyu O H, Ait Tchakoucht T, Saheed Y K. A systematic literature review for network intrusion detection system (IDS)[J]. International Journal of Information Security, 2023, 22(5): 1125-1162.

[5] Ozkan-okay M, Samet R, Aslan Ö, et al. A comprehensive systematic literature review on intrusion detection systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 157727-157760.

[6] Song Y J, Bu B, Zhu L. A novel intrusion detection model using a fusion of network and device states for communication-based train control systems[J]. Electronics, 2020, 9(1): 181.

[7] Gao B, Bu B, Zhang W, et al. An intrusion detection method based on machine learning and state observer for train-ground communication systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 6608-6620.

[8] Li Y, Zhu L, Wang H W, et al. A cross-layer defense scheme for edge intelligence-enabled CBTC systems against MitM attacks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2286-2298.

[9] Lu H, Zhao Y N, Song Y J, et al. A transfer learning-based intrusion detection system for zero-day attack in communication-based train control system[J]. Cluster Computing, 2024, 27(6): 8477-8492.

[10] Gong T Y, Zhu L, Yu F R, et al. Edge intelligence in intelligent transportation systems: a survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(9): 8919-8944.

[11] Chawla N V, Bowyer K W, Hall L O, et al. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2002, 16(1): 321-357.

[12] Muntasir Nishat M, Faisal F, Jahan Ratul I, et al. A comprehensive investigation of the performances of different machine learning

classifiers with SMOTE-ENN oversampling technique and hyper-parameter optimization for imbalanced heart failure dataset[J]. Scientific Programming, 2022, 2022(1): 3649406.

[13] Li W, Yan Z W, He R W, et al. A novel machine learning based intrusion detection method for 5G empowered CBTC systems [C]//Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2022: 211-216.

[14] Sumaiya Thaseen I, Saira Banu J, Lavanya K, et al. An integrated intrusion detection system using correlation-based attribute selection and artificial neural network[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2021, 32(2): e4014.

[15] Han Y, Joe I. Enhancing machine learning models through PCA, SMOTE-ENN, and stochastic weighted averaging[J]. Applied Sciences, 2024, 14(21): 9772.

[16] Wang G H, Yan Q F. A method for improving the robustness of intrusion detection systems based on auxiliary adversarial training Wasserstein generative adversarial networks[J]. Electronics, 2025, 14(11): 2171.

[17] Yan T, Shen S L, Zhou A N, et al. Prediction of geological characteristics from shield operational parameters by integrating grid search and K-fold cross validation into stacking classification algorithm[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(4): 1292-1303.

[18] Ahakonye L A C, Nwakanma C I, Lee J M, et al. Efficient classification of enciphered SCADA network traffic in smart factory using decision tree algorithm[J]. IEEE Access, 2021, 9: 154892-154901.

[19] Yang K X, Liu L, Wen Y L. The impact of Bayesian optimization on feature selection[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 3948.

[20] Hooshmand M K, Huchaiah M D, Alzighaibi A R, et al. Robust network anomaly detection using ensemble learning approach and explainable artificial intelligence (XAI)[J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 94: 120-130.

[21] Chen G Z, Fan Z Y, Zhu Y X, et al. Multi-time knowledge distillation[J]. Neurocomputing, 2025, 623: 129377.

[22] Zhang W W, Guo Y F, Wang J H, et al. Collaborative knowledge distillation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2024, 34(8): 7601-7613.

[23] Jassam Mohammed A, Hameed Arif M, Adil Ali A. A multilayer perceptron artificial neural network approach for improving the accuracy of intrusion detection systems[J]. IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI), 2020, 9(4): 609.

[24] Panigrahi R, Borah S. A detailed analysis of CICIDS2017 dataset for designing intrusion detection systems[J]. International Journal of Engineering & Technology, 2018, 7(3.24): 479-482.

[25] Fakhereldine A, Zulkernine M, Murdock D. CBTCset: a reference dataset for detecting misbehavior attacks in CBTC networks[C]// Proceedings of the IEEE 34th International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2023: 57-62.

[26] Sun C Y, Zhang W J, Sun P, et al. A hybrid security framework for train-to-ground (T2G) communication using DOA-optimized BPNN detection, Bayesian risk scoring, and RL-based response[J]. Sensors, 2025, 25(10): 3208.

Lightweight NB-XGB fusion-based intrusion detection method for CBTC onboard systems

WANG Guohua*，ZHANG Lei，ZHANG Xuejun，LU Chuang

(School of Electronics and Information Engineering，Lanzhou Jiaotong University，Lanzhou 730070，China)

Abstract：Addressing the critical challenges of data class imbalance, low detection accuracy, and insufficient real-time performance in existing intrusion detection systems for communication-based train control (CBTC) systems, this study proposes a novel lightweight intrusion detection method for CBTC onboard equipment based on a fused Naive Bayes-extreme gradient boosting (NB-XGB) model. The proposed approach operates through two coordinated phases: an offline training phase and an online detection phase. In order to identify an ideal feature subset with greatest relevance and minimal redundancy, the CICIDS2017 and CBTCset datasets are preprocessed and then subjected to correlation-based feature selection during the offline phase. The extracted features are then balanced using a hybrid sampling approach that combines edited nearest neighbors (ENN) undersampling and synthetic minority over-sampling technique (SMOTE), after which the naive Bayes (NB) and XGBoost models are integrated through static weighted fusion to establish the classification foundation. To provide effective real-time detection for online deployment, knowledge distillation technology transfers the learned information from the trained NB-XGB fusion model to a lightweight multilayer perceptron (MLP) student model. The method's efficacy is demonstrated by experimental evaluation on the CICIDS2017 and CBTCset datasets, where the NB-XGB fusion model outperforms comparative models such as K-nearest neighbors (KNN), NB, and isolation forest (IForest) with notable accuracies of 0.996 1 and 0.955 7. It simultaneously demonstrates the effectiveness of the proposed method. Additional lightweight validation confirms the distilled model's inference speed of 0.16 ms per sample, sufficiently verifying the solution's real-time capabilities for practical CBTC intrusion detection scenarios.

Keywords：CBTC; intrusion detection; machine learning; hybrid sampling; knowledge distillation

Received：2025-08-05；**Accepted**：2025-12-08；**Published Online**：2026-01-04 18：58

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20260104.1526.003

Foundation items：National Natural Science Foundation of China(61762058); Key Research and Development Program of Gansu Province (25YFFA089); Natural Science Foundation of Gansu Province (25JRRA190)

* **Corresponding author**. E-mail：wangguohua@mail.lzjtu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0342

基于调制波移相的并联驱动系统传导干扰抑制方法

张长勇[1,*]，孙玉华[1]，陈炟名[1,2]，郭志浩[3]

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津 300300；2. 中汽研新能源汽车检验中心（天津）有限公司，天津 300300；
3. 中国航空工业集团天津航空机电有限公司，天津 300300)

摘 要：分布式电推进系统作为全电飞机、电动船舶等载运工具电气化发展的重要方向，通常采用多功率变换器并联的驱动架构。随着变换器数量的增加，电磁干扰也会加剧，从而直接威胁到系统的安全稳定运行。为抑制并联驱动系统产生的传导干扰，提出一种基于调制波移相的并联驱动系统传导干扰抑制方法。在深入分析系统电磁干扰噪声耦合机理的基础上，通过多端口网络模型级联建立并联驱动系统的传导干扰等效模型。通过引入实时位置电流补偿对各驱动器调制波进行移相控制，使各驱动器产生的共模噪声相互抵消。针对双电机并联驱动架构，在MATLAB/Simulink仿真环境和暗室实验环境下进行仿真与实验验证。结果表明：当驱动器同相调制波相位相差为360(°)/m(m为并联驱动器数量)时，噪声下降最为显著。所提方法适用于驱动模块参数一致的并联驱动系统，在不显著影响系统性能指标的前提下，显著降低了系统的传导干扰，对分布式电驱动系统设计具有一定参考价值。

关 键 词：电推进系统；戴维南等效；黑箱模型；共模噪声抑制；调制波移相；电流补偿
中图分类号：TM464; V242.4
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2316-11

相较于传统动力系统，分布式电推进系统凭借其可控性强、功率密度高和控制灵活等优点在电动飞机、电动船舶、电动垂直起降飞行器(electric vertical take-off and landing aircraft, eVTOL)等载运工具领域展现出巨大的应用潜力[1-3]。然而，分布式电推进系统由多个独立运行的驱动模块组成，模块产生的电磁干扰(electro magnetic interference, EMI)噪声具有多源耦合的特征，给分布式电推进驱动系统的传导EMI分析和抑制带来了极大挑战。即使系统中驱动模块均符合电磁兼容(electro magnetic compatibility, EMC)标准，系统仍可能受到耦合干扰的影响。随着级联驱动模块数量的增加，系统架构也愈加复杂，系统内部可能因阻抗匹配问题在某些频带产生严重的谐振，导致传导发射超标，进而影响敏感设备的稳定工作。因此，有效抑制系统中的传导干扰对分布式电推进技术的发展至关重要。

目前，针对传统电机驱动系统传导共模干扰抑制最常见的方法是在设备端口加装无源电磁干扰滤波器，利用设备噪声源阻抗与滤波器阻抗不匹配的原理阻断电压源逆变器(voltage source inverter, VSI)传导耦合路径[4]。然而，随着系统动态加载，设备整体端口源阻抗会显著变化，可能导致滤波器的实际抑制效果变差[5]。此外，还有一种噪声抑制方法是对主电路拓扑或结构进行优化，采用吸收或补偿高频噪声分量等手段，降低非理想电压和电流尖峰以抑制设备端口的噪声。然而，这种方法设计较为复杂，可能需要增加额外的辅助电路，对主电路

收稿日期：2024-05-22；录用日期：2024-06-28；网络出版时间：2024-07-10 14:53
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240708.1009.001
基金项目：民航首台(套)重点项目(3122023PY04)
*通信作者. E-mail：cyzhang@cauc.edu.cn

引用格式：张长勇，孙玉华，陈炟名，等. 基于调制波移相的并联驱动系统传导干扰抑制方法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2316-2326. Zhang C Y，Sun Y H，Chen D M，et al. A method for suppressing conducted interference in parallel drive systems based on modulated wave phase shift[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2316-2326 (in Chinese).

的稳定性会产生一定影响。相较于以上 2 种方法，在不增加系统体积、质量和损耗的情况下，通过改进脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 策略降低噪声水平更加符合电推进系统对高功率密度的需求。文献 [6] 提出一种利用固定载波信号对随机空间矢量脉宽调制(random space vector pulse width modulation, RSPWM)进行过调制的方法。文献 [7] 针对三相 VSI 提出了一种改进的零电压开关空间矢量脉宽调制(zero voltage switching space vector pulse width modulation, ZVS SVPWM)技术。尽管以上研究的实验结果成功降低了系统直流侧的共模干扰，但是由于未考虑开关频率变化对系统性能的影响，可能导致交流侧电流纹波增加和开关损耗加剧。

由于分布式电推进系统具有多源耦合、多径传输等特点，相关研究已经利用多噪声耦合机理对 PWM 策略进行了改进。在文献 [8] 中，通过使 2 个 VSI 载波相位交错来降低并联变换器的共模干扰。在文献 [9] 中，采用交错并联 VSI 的方法有效减小了共模滤波器的尺寸和质量。在文献 [10] 中，通过 3 个 VSI 配合交错角控制策略，成功减小了耦合电感的尺寸。这些研究通过噪声间的相互抵消来抑制传导干扰，但仅能处理可控和固定的系统噪声。在实际工业环境中，分布式电推进系统的各驱动模块具有独立运行、动态加载等特点，这使得耦合噪声呈现出随机变化的特征，大大增加了噪声分析和抑制的难度。

本文针对上述问题，通过对传统驱动系统的传导干扰机理及传输通道特性进行分析，提出一种适用于并联驱动系统的传导共模干扰抑制方法。首先，基于诺顿等效定理建立并联驱动系统 EMI 等效模型；在此基础上，阐明了不同采样方式下驱动器噪声的产生机理与耦合路径；随后，利用噪声对消特性设计了实时位置电流补偿模块；最后，通过仿真和双电机并联驱动系统试验平台验证了本文方法的有效性。

1　并联驱动系统传导干扰建模

1.1　单驱动模块等效模型

并联驱动系统内部的有源器件是主要的电磁干扰源，由于复杂的耦合路径及高频寄生参数的存在，直接建立 EMI 等效模型难度极大。因此，先针对单台驱动模块建立了“黑匣子”模型，再通过模型级联构建并联驱动系统的 EMI 等效模型。这一步骤旨在探究并联驱动系统噪声耦合的一般性规律，为后续研究提供基础。

设备级传导干扰抑制主要关注内部噪声的产生与传播机理，而系统级干扰抑制主要针对直流母线侧。为省去内部复杂结构与参数的提取，可将驱动模块视作一个“黑匣子”，如图 1 所示[11]。根据诺顿等效定理，建立驱动模块多端口网络模型，将驱动模块传导发射信号等效为共模噪声阻抗 Z_{cm} 与共模噪声源 I_{cm}；直流侧的外部阻抗 Z_{ext} 由线性阻抗稳定网络 Z_{LISN} 及插入阻抗($Z_{preset1}$ 和 $Z_{preset2}$)组成；I_{ext} 表示驱动器端口电流。为得到 2 组不同的外部阻抗(Z_{ext1} 和 Z_{ext2})，设置了 2 组预设阻抗($Z_{preset1}$ 和 $Z_{preset2}$)。通过改变外部阻抗的方式得到 2 组端口电流(I_{ext1} 和 I_{ext2})，如图 2 所示。根据基尔霍夫电流定律，由图 2 可得到表达式 (1)。对式 (1) 进行整理得到式 (2)。通过阻抗分析仪与电流检测探头测得 I_{ext1}、I_{ext2}、Z_{ext1} 和 Z_{ext2}[12]。因此，由式 (2) 可知，噪声源 I_{cm} 和内部参数阻抗 Z_{cm} 可以由 I_{ext1}、I_{ext2}、Z_{ext1} 和 Z_{ext2} 计算得出。

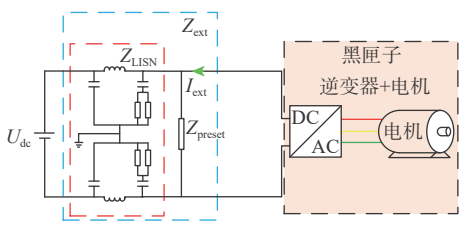
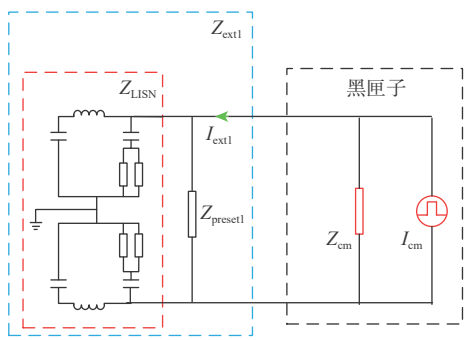
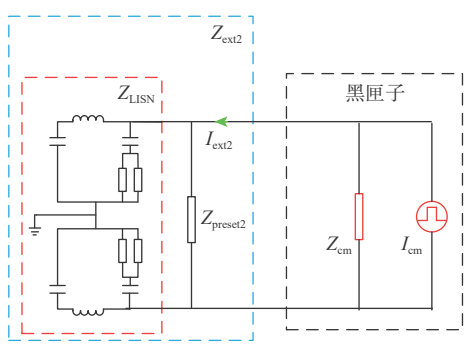


图 1　单驱动模块“黑匣子”模型[11]

Fig. 1　Single-driver “black box” model[11]



(a) 预设阻抗1



(b) 预设阻抗2

图 2　“黑匣子”模型的 2 组外部阻抗

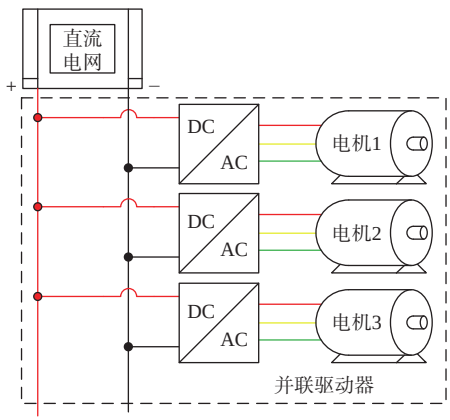
Fig. 2　Two sets of external impedances of "black box" model

$$\begin{cases} I_{\text{ext1}} = \dfrac{I_{\text{cm}}Z_{\text{cm}}}{Z_{\text{ext1}}+Z_{\text{cm}}} \\ I_{\text{ext2}} = \dfrac{I_{\text{cm}}Z_{\text{cm}}}{Z_{\text{ext2}}+Z_{\text{cm}}} \end{cases} \tag{1}$$

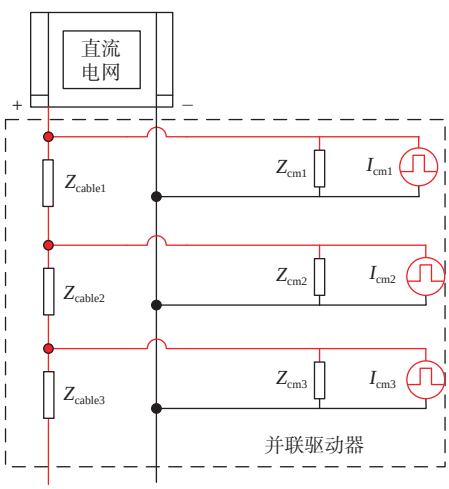
$$\begin{cases} I_{\text{cm}} = \dfrac{(Z_{\text{extt1}}-Z_{\text{ext2}})I_{\text{ext1}}I_{\text{ext2}}}{I_{\text{ext1}}Z_{\text{ext1}}-I_{\text{ext2}}Z_{\text{ext2}}} \\ Z_{\text{cm}} = \dfrac{I_{\text{ext1}}Z_{\text{ext1}}-I_{\text{ext2}}Z_{\text{ext2}}}{I_{\text{ext2}}-I_{\text{ext1}}} \end{cases} \tag{2}$$

1.2 并联驱动系统等效模型

基于1.1节等效替代的思想，通过单驱动模块多端口网络模型级联的方式建立并联驱动系统EMI等效模型，如图3所示。电机驱动模块的传导发射信号特性分别使用噪声阻抗Z_{cm}和噪声源I_{cm}表示。线缆连接系统各个模块，其寄生阻抗用Z_{cable}表示。线缆建模并不是本文的主要研究内容，因此，本文采用了一些现有的建模方法[13-14]。



(a) 并联驱动系统模型



(b) 传导干扰等效模型

图3 并联驱动系统模型及传导干扰等效模型

Fig. 3 Parallel drive system model and conducted interference equivalent model

为预测并联驱动系统共模噪声$I_{\text{cm·system}}$，需要获取各驱动模块产生的噪声$I_{\text{cm·source}n}$，$I_{\text{cm·source}n}$表示第n个驱动模块在直流母线侧产生的共模噪声。计算$I_{\text{cm·source}n}$还需要确定共模噪声源$I_{\text{cm}n}$及噪声源至直流母线侧传导路径的传递函数$W_{\text{path}n}$，如式(3)所示。由于并联驱动系统存在多源干扰、多径耦合的特性，直流母线侧的系统共模噪声$I_{\text{cm·system}}$受各驱动器噪声$I_{\text{cm·source1}}$，$I_{\text{cm·source2}}$，…，$I_{\text{cm·source}n}$的影响。因此，对于系统共模噪声的预测需要耦合多个驱动器的传导噪声，如式(4)所示。

$$I_{\text{cm·source}n} = I_{\text{cm}n}W_{\text{path}n} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{cm·system}} &= I_{\text{cm·source1}} + I_{\text{cm·source2}} + \cdots + I_{\text{cm·source}n} = \\ &\quad I_{\text{cm1}}W_{\text{path1}} + I_{\text{cm2}}W_{\text{path2}} + \cdots + I_{\text{cm}n}W_{\text{path}n} \end{aligned} \tag{4}$$

相较于传统通过提取关键器件寄生参数来建模的方法，“黑匣子”建模方法不仅可以预测母线侧系统噪声，还省去了内部复杂物理参数的提取过程。由于并联驱动系统中各驱动模块独立运行，驱动信号相位交错角及噪声相位差会随着启动间隔而变化，导致噪声耦合变得更加复杂。因此，需要对噪声耦合机理及驱动信号交错等问题进一步研究。

2 并联驱动系统多噪声耦合机理分析

本节首先介绍了并联驱动系统中的多噪声耦合问题。针对采用固定开关频率的规则采样PWM策略，分析了电机驱动器同相调制波相位交错对传导噪声的影响。在此基础上，提出了实时位置电流补偿模块，通过补偿电机转矩电流，解决了由驱动器启动间隔引起的噪声相位随机变化的问题。

2.1 并联电驱动模块噪声耦合问题

驱动器产生的传导噪声具有幅值和相位特性。本文以2台电机驱动器为例进行分析，简化式(4)得到式(5)。母线侧的系统噪声实质上是传导噪声的矢量合成，而式(5)并没有突出噪声的相位特性。为分析噪声相位对系统噪声的影响，用指数形式$I_{\text{cm·source}n}\text{e}^{\text{j}\psi_n}$替换$I_{\text{cm·source}n}$，得到式(6)。

$$I_{\text{cm·system}} = I_{\text{cm·source1}} + I_{\text{cm·source2}} \tag{5}$$

$$I_{\text{cm·system}} = I_{\text{cm·source1}}\text{e}^{\text{j}\psi_1} + I_{\text{cm·source2}}\text{e}^{\text{j}\psi_2} \tag{6}$$

式中：$I_{\text{cm·source1}}$、$I_{\text{cm·source2}}$为噪声幅值；ψ_1、ψ_2为噪声相位。

由式(6)得出，当$I_{\text{cm·source1}} \gg I_{\text{cm·source2}}$或$I_{\text{cm·source1}} \ll I_{\text{cm·source2}}$时，噪声幅值较大的驱动器决定了母线侧的系统噪声幅值。当$0.1 < I_{\text{cm·source1}}/I_{\text{cm·source2}} < 10$时，2种噪声幅值在同一数量级，2个驱动模块产生的共模噪声共同影响母线侧的系统噪声。

在分布式电推进系统中，多个相同模块化的驱动器通常采用并联的运行方式，以提升功率容量。

由于这些驱动器具有相同的开关频率和几乎相同的噪声幅值, 多噪声耦合引起的系统噪声幅值变化更为明显。因此, 本文主要研究噪声幅值在同一数量级的情况, 并假设各驱动模块噪声幅值近似相等($I_{\text{cm·source1}} \approx I_{\text{cm·source2}}$)。

系统中各驱动模块独立运行, 时域的时移会在频域上产生相移。驱动器间的启动间隔导致驱动信号交错角不固定, 进而影响驱动模块 EMI 噪声间的相位差。由式 (6) 化简得到式 (7), 随着噪声相位差$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$的变化, 系统噪声$I_{\text{cm·system}}$也会相应的改变。本文假设各驱动模块的噪声幅值近似相等。由式 (8) 中的系统噪声幅值$I_{\text{cm·system}}$计算可知, 噪声间相位差的改变会导致直流侧系统噪声幅值的变化。根据不等式关系, 由式 (8) 推得式 (9)。在极端情况下, 由 $I_{\text{cm·source1}} \approx I_{\text{cm·source2}}$可推出, 当噪声相位差$\Delta\psi = 0°$时, $I_{\text{cm·system}} \approx 2I_{\text{cm·source1}} \approx 2I_{\text{cm·source2}}$, 系统噪声进一步恶化, 当$\Delta\psi = 180°$时, $I_{\text{cm·system}}$大幅削弱, 如图 4 所示。因此, 可利用噪声同相恶化和反相消除的特性来抑制系统噪声。

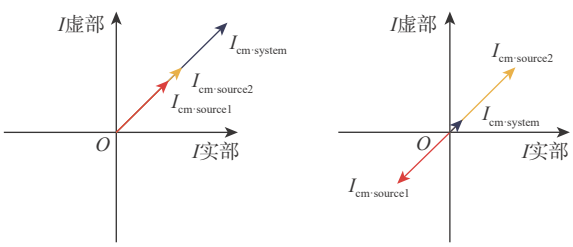


图 4　双并联驱动系统噪声矢量合成

Fig. 4　Dual parallel drive system noise vector synthesis

$$I_{\text{cm·system}} = I_{\text{cm·source1}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi_1} + I_{\text{cm·source2}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\psi_1+\Delta\psi)} = \left(I_{\text{cm·source1}} + I_{\text{cm·source2}}\cos\Delta\psi + \mathrm{j}I_{\text{cm·source2}}\sin\Delta\psi\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi_1} \tag{7}$$

$$I_{\text{cm·system}} = \sqrt{\left(I_{\text{cm·source1}} + I_{\text{cm·source2}}\cos\Delta\psi\right)^2 + \left(I_{\text{cm·source2}}\sin\Delta\psi\right)^2} \tag{8}$$

$$I_{\text{cm·system}} = \sqrt{\left(I_{\text{cm·source1}} + I_{\text{cm·source2}}\cos\Delta\psi\right)^2 + \left(I_{\text{cm·source2}}\sin\Delta\psi\right)^2} = \sqrt{I_{\text{cm·source1}}^2 + I_{\text{cm·source2}}^2 + 2I_{\text{cm·source1}}I_{\text{cm·source2}}\cos\Delta\psi} \geqslant \sqrt{2I_{\text{cm·source1}}I_{\text{cm·source2}} + 2I_{\text{cm·source1}}I_{\text{cm·source2}}\cos\Delta\psi} = \sqrt{2I_{\text{cm·source1}}I_{\text{cm·source2}}}\sqrt{\cos\Delta\psi + 1} \tag{9}$$

此外, 针对系统中多并联驱动模块的场景, 同样可以利用上述特性来减小系统噪声。当噪声相位差$\Delta\psi = 360°/m$(m 为驱动模块数量)时, 可以使噪声相互抵消, 从而有效地降低系统的传导干扰水平。以四并联驱动模块为例, 如图 5 所示, 当$\Delta\psi = 90°$时, 相较于$\Delta\psi = 0°$, 系统噪声幅值下降更为明显。

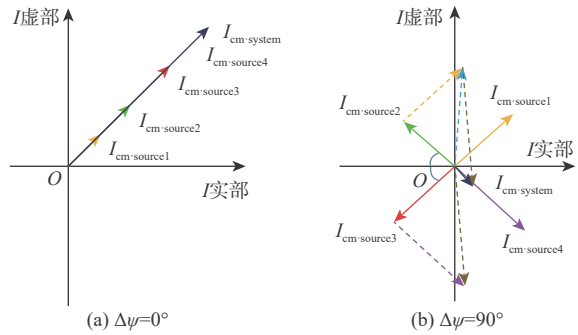


图 5　四并联驱动系统噪声矢量合成

Fig. 5　Four parallel drive system noise vector synthesis

2.2　基于规则采样 PWM 策略的共模噪声耦合分析

2 组电机驱动模块独立控制, 在不同启动时间间隔下, 驱动信号的时移会导致频域中噪声的相移。在噪声相位差$\Delta\psi = 180°$时, 实现了共模噪声的反相消除。然而, 若要保持这种特定相位偏移, 还需对干扰源进行特定分析。本文讨论的功率变换器为常规 VSI(两电平三相桥臂三相 VSI), VSI 上下桥臂中点是变换器噪声源[15-16]。目前, 大多数 VSI 采用规则采样 PWM 策略, 其中, 包括对称规则采样与不对称规则采样。以 VSI 的 A 相支路电压波形为例, 分析了 2 种 PWM 策略。由于 VSI 相电压具有 2 个与时间相关的函数, 可由式 (10) 表示, 因此, 可通过二重傅里叶分析电压的谐波组成[17]。

$$\begin{cases} x(t) = \omega_{\text{c}}t + \theta_{\text{c}} \\ y(t) = \omega_0 t + \theta_0 \end{cases} \tag{10}$$

式中: ω_{c}为载波角频率; ω_0为调制波角频率; θ_{c}为载波初始相位; θ_0为调制波初始相位。

2 种采样方式下 VSI 的 A 相相电压经二重傅里叶积分后得到的噪声源表达式分别为

$$U_{\text{cm·a}} = \frac{4U_{\text{dc}}}{\pi}\left\{\sum_{m_{\text{d}}=1}^{\infty}\sum_{n_{\text{d}}=-\infty}^{\infty}\frac{1}{q}\left[\sin\left((q+n_{\text{d}})\frac{\pi}{2}\right)J_{n_{\text{d}}}\cdot q\frac{\pi}{2}M\cos\left((m_{\text{d}}\omega_{\text{c}} + n_{\text{d}}\omega_0)t + m_{\text{d}}\theta_{\text{c}} + n_{\text{d}}\theta_0\right)\right]\right\} \tag{11}$$

$$U_{\text{cm·a}} = \frac{4U_{\text{dc}}}{\pi}\left\{\sum_{m_{\text{d}}=1}^{\infty}\sum_{n_{\text{d}}=-\infty}^{\infty}\frac{1}{q}\left[\sin\left((q+n_{\text{d}})\frac{\pi}{2}\right)J_{n_{\text{d}}}\cdot q\frac{\pi}{2}M\cos\left((m_{\text{d}}\omega_{\text{c}} + n_{\text{d}}\omega_0)t + m_{\text{d}}\theta_{\text{c}} + n_{\text{d}}\theta_0\right)\right]\right\} \tag{12}$$

式中: M 为调制深度; $q = m_{\text{d}} + n_{\text{d}}\omega_0/\omega_{\text{c}}$; m_{d}为载波索引量; n_{d}为基带索引量; $J_{n_{\text{d}}}(x)$为变量 x 的 n_{d}阶贝塞尔函数。

根据式(11)和式(12),可以得到噪声源相位$\theta_{\text{cm·system}}$为

$$\theta_{\text{cm·system}}=(m_{\text{d}}\omega_{\text{c}}+n_{\text{d}}\omega_0)t+m_{\text{d}}\theta_{\text{c}}+n_{\text{d}}\theta_0 \tag{13}$$

如式(14)所示,噪声源的初始相位仅与θ_{c}与θ_0有关,与时间无关,即系统初始调制参数固定时,噪声源的初始相位不会改变。2组噪声源的相位$\theta_{\text{cm·source1}}$和$\theta_{\text{cm·source2}}$,以及其相位差$\Delta\theta_{\text{cm·source}}$可用式(15)表示。对于并联驱动系统,通常采用相同开关频率即固定载波角频率,结合式(13)和式(15),可以得出,干扰噪声相位偏移受调制波角频率影响。由于在电机恒定负载时,同相调制波角频率是相同的,并且驱动信号的交错角是恒定的,因此,可以在电机达到稳定状态之前对同相调制波的相位进行补偿,以弥补启动间隔对噪声相位的偏移。

$$\theta_{\text{cm·initial}}=m_{\text{d}}\theta_{\text{c}}+n_{\text{d}}\theta_0 \tag{14}$$

$$\begin{cases}\theta_{\text{cm·source1}}=\theta_{\text{cm·source1}}(t)=\omega_1 t_1+\theta_{\text{cm·initial1}}\\ \theta_{\text{cm·source2}}=\theta_{\text{cm·source2}}(t)=\omega_2(t_1+\Delta t)+\theta_{\text{cm·initial2}}\\ \Delta\theta_{\text{cm·source}}=\theta_{\text{cm·source2}}-\theta_{\text{cm·source1}}=\\ \qquad\omega\Delta t+\theta_{\text{cm·initial2}}-\theta_{\text{cm·initial1}}\end{cases} \tag{15}$$

2.3 实时位置电流补偿模块设计

为补偿系统噪声源相位偏移,并实现传导信号的反相消除,本文提出了实时位置电流补偿模块(ripple current compensation module, RCCM)。该模块通过监测电机增量式编码器脉冲,获取调制波角频率与转子机械角度详细数据,并据此计算转矩电流补偿量。通过对转矩电流的补偿,实现对调制波的移相控制。

电流补偿模块控制框图如图6所示。首先,获取电机增量式编码器A、B、Z脉冲信号,计算出电机转子机械角度差,将观测值ψ_{cod}乘以比例系数K_{b}得到转速补偿$\hat{\omega}_{(k)}$;然后,根据转速与转矩电流的关系除以系数K_t得到电流补偿$\hat{i}_{(k)}$,将补偿电流与速度环给定电流$i_{\text{ref}(k)}$求和得到参考电流$i'_{(k)}$;最后,比较参考电流与电流采样$i_{(k-1)}$的差值Δi生成驱动信号PWM。其中,K_{b}由编码器种类及线数决定,本文采用2 500线增量式编码器K_{b}取0.002 5,$u_{(k)}$和$i_{(k)}$分别为电机在k时刻的电压值与电流值。$G_{\text{c}}(s)$为延迟电流采样环节。

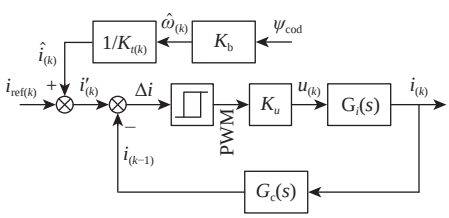


图6 含实时电流补偿的电流环控制框图

Fig. 6 Current loop control block diagram with real-time current compensation

3 仿真与实验验证

3.1 并联驱动系统仿真模型

本节旨在验证调制波移相策略在并联驱动系统中的有效性。图7为双并联驱动系统的仿真模型框图。其主要包括基于自适应PI的转速调节器和使用反馈交叉解耦法[18]的电流调节器。此外,在电流调节器前端引入实时位置电流补偿模块(position current compensation module, RCCM),用于设置驱动器调制波的相位。调制策略采用了SVPWM,控制对象为常规VSI与永磁同步电机。图7中,n_{ref}、i_q^*和$\hat{i}_{(k)}$分别表示给定转速、转速环给定电流和实时补偿电流;PWM为VSI驱动信号;Coder1、Coder2为电机增量式编码器;A、B、Z为电机增量式编码器脉冲信号;ω_{r1}、ω_{r2}为电机转子角速度;N_1、N_2为电机实际转速;i_{abc}、i'_{abc}为电流互感器采集的电机三相电流;U_{dc}为直流源。

3.2 干扰抑制仿真结果

基于如图7所示的双并联驱动系统仿真模型,在MATLAB/Simulink平台上对系统直流母线侧的传导发射电流进行了仿真预测。在仿真中,2组电机的负载保持恒定,转速为1 000 r/min,扭矩为10 N·m,均为4极对数。设置了2组驱动器的同相调制波相位交错角分别为0°、90°和180°。

并联VSI的A相电压相位差仿真结果如图8所示。系统直流母线侧传导发射电流的仿真预测如图9所示。

由图9可见,不同调制波相位偏移导致母线侧传导发射电流的变化。当调制波相位交错角为0°时,母线侧噪声幅值达到最大;当调制波相位交错角为90°时,噪声幅值次之;而当调制波相位交错角为180°时,噪声幅值显著减小。仿真结果验证了本文提出的调制波移相策略及电流补偿机制的有效性。除了1 MHz和6 MHz频带附近的共模干扰电流尖峰位置噪声幅值下降不明显,其余频段系统噪声幅值均下降了10～20 dBμA。在1 MHz频带附近的干扰尖峰主要是由于系统寄生参数在该频率处的共振引起;而在6 MHz频带附近的干扰尖峰主要是由于绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)梯形脉冲序列谐波引起的共振效应。

为进一步拓展到分布式电推进系统中多并联驱动模块的情况,以四并联驱动系统为例进行仿真

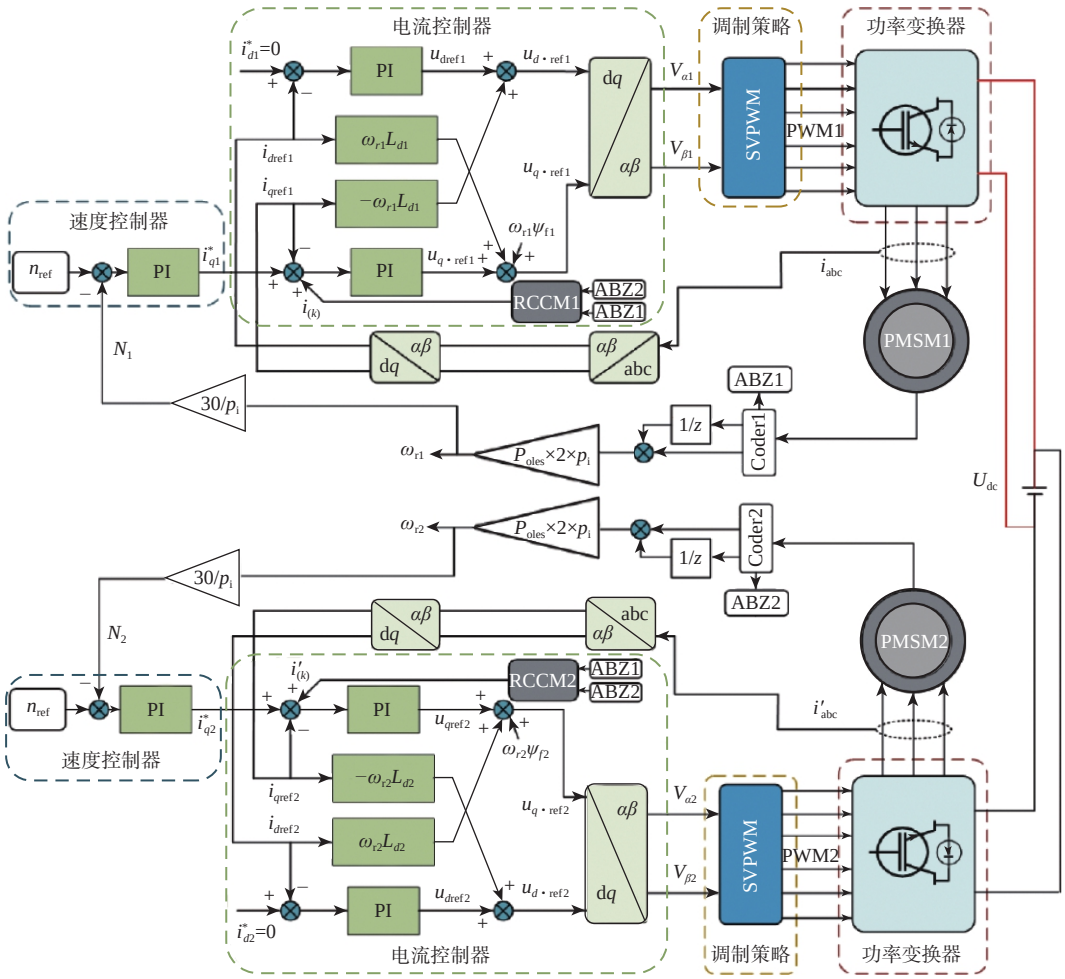


图 7　双并联驱动系统仿真模型框图

Fig. 7　Parallel drive system simulation model block diagram

预测。如图 10 所示, 同相调制波相位差相同时, 随着驱动模块数量的增加, 与双并联驱动系统相比, 四并联驱动系统直流母线侧共模噪声幅值也随之增加。由于系统阻抗的变化, 共振点处的电流尖峰也发生了偏移。

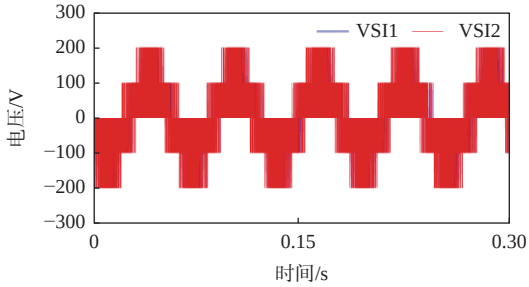
根据 $\Delta\psi = 360(°)/m$, 设置四并联 VSI 的同相调制波相位差为 90°, 并与 0°、45°相位差进行对比。四并联 VSI 的 A 相电压相位差仿真结果如图 11 所示。系统直流母线侧传导发射电流的仿真预测如图 12 所示。由图 12 可以看出, 除了共振频段的噪声下降不明显, 其余频段系统噪声下降约 10 dBμA。因此, 可以得出在多个相同驱动模块并联的系统中, 噪声同相恶化和反相消除的特性仍然适用。

3.3　干扰抑制实验结果

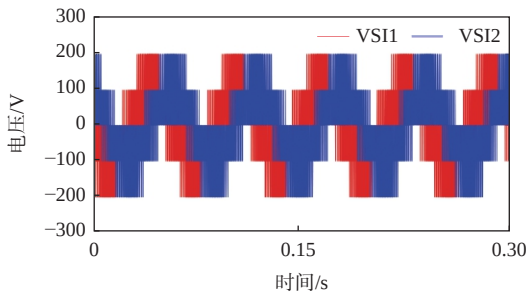
为进一步验证本文方法的可行性与有效性, 依据 RTCA DO-160G [19], 搭建了双电机驱动系统实验平台, 如图 13 所示。永磁同步电机及其驱动器参数如表 1 和表 2 所示, 实验平台设备参数如表 3 所示。电机驱动器通过隔离干扰噪声的高压直流线路阻抗稳定网络(line impedance stabilization networks, LISN)连接到直流电网中。在直流电力系统平台中, 各设备间采用非屏蔽线缆进行连接; IGBT 散热片固定在驱动器机壳上; LISN 与驱动器机壳放置在接地的导电铜板上; 2 台永磁同步电机处于恒定负载(磁粉制动器提供负载), 转速为 1 000 r/min、扭矩为 8 N·m。在系统运行过程中, 2 组驱动器的噪声通过设备端口传导至直流母线侧, 耦合形成系统噪声。因此, 双电机并联驱动系统实验平台可以验证多噪声耦合机理及传导干扰抑制方法的有效性。

首先, 将 2 组电机的同相调制波相位交错角分别设置为 0°、90°和 180°, 如图 14 所示, 相应的并联 VSI 的 A 相电流相位差如图 14(a)所示。

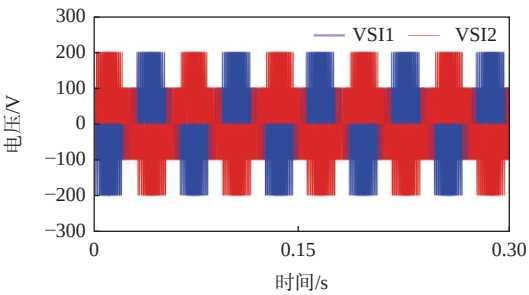
系统直流侧传导电流发射频谱如图 15 所示。仿真模型预测的直流母线侧传导发射电流与实测值的总体趋势保持一致。在 1 MHz 和 6 MHz 附近频段, 由于系统内部共振, 系统噪声幅值下降不明显。在 30～52 MHz 频段, 实测数据表明噪声幅值下降效果有限, 主要是由于系统低频谐波在高频寄生参数影响下的谐振效应。图 16 为 1.3 ～1.8 MHz



(a) 相位交错角为0°



(b) 相位交错角为90°



(c) 相位交错角为180°

图 8 双并联 VSI 的 A 相电压

Fig. 8 A-phase voltage of double parallel VSI

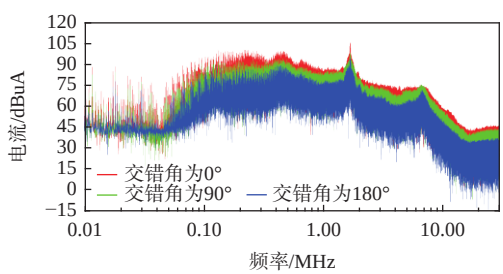


图 9 双并联驱动系统直流母线侧传导发射电流频谱预测

Fig. 9 Spectrum prediction of conduction emission current on DC bus side of double parallel drive system

频段的传导发射电流频谱，系统噪声幅值下降约11.4 dBμA。图 17 为 6.5～13 MHz 频段的传导发射电流频谱，系统噪声幅值约下降 8 dBμA。在 65～100 MHz 频段，传导发射电流频谱图，如图 18 所示，系统噪声幅值下降超过 10 dBμA。综合实验结果表明，通过引入转矩电流补偿，双电机并联驱动系统有效地抑制了系统直流母线侧传导干扰。

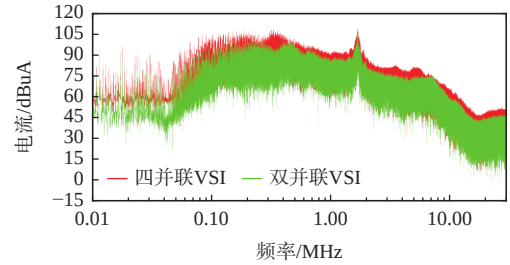
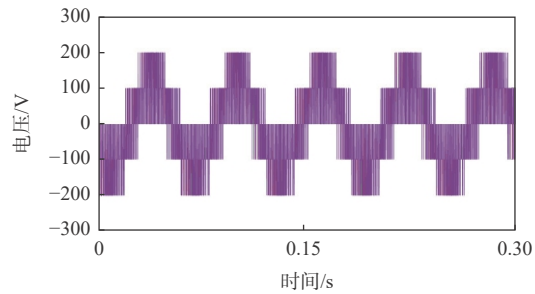
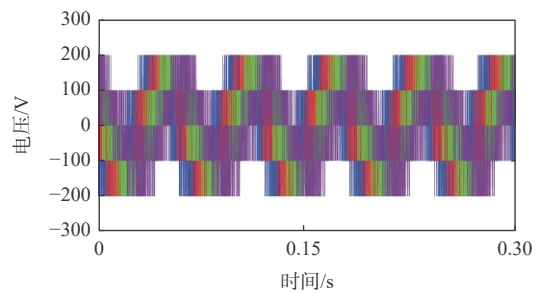


图 10 双、四并联驱动系统直流母线侧传导发射电流频谱预测对比

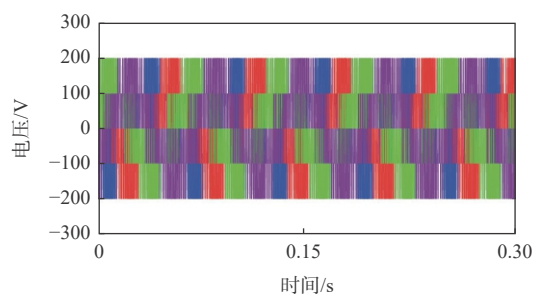
Fig. 10 Comparison of conduction emission current spectrum prediction on DC bus side of dual and quadruple parallel drive system



(a) 相位交错角为0°



(b) 相位交错角为45°



(c) 相位交错角为90°



图 11 四并联 VSI 的 A 相电压

Fig. 11 Four parallel VSI A-phase voltage

3.4 系统性能实验结果

为验证调制波移相策略对并联驱动系统性能的影响，在如图 13 所示的双电机并联驱动系统实验平台上进行了验证。本节实验中，2 台永磁同步电机处于恒定负载状态，转速为 1 000 r/min，扭矩为 4 N·m。

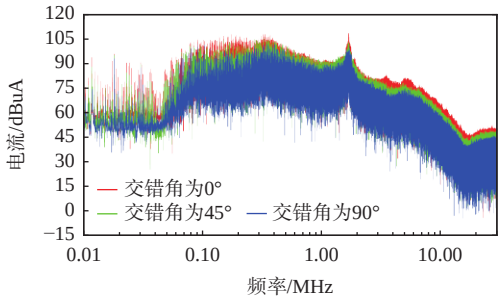


图 12　四并联驱动系统直流母线侧传导发射电流频谱预测

Fig. 12　Spectrum prediction of conduction emission current on DC bus side of four-parallel drive system

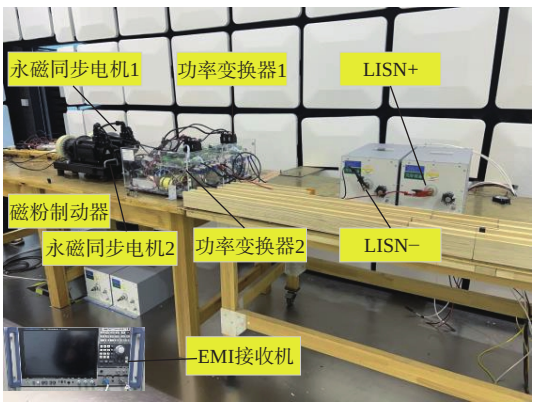


图 13　双电机并联驱动系统实验平台

Fig. 13　Double motor parallel drive system experiment platform

表 1　永磁同步电机参数

Table 1　Parameters of permanent magnet synchronous motor

额定电压/V	额定电流/A	额定功率/W	额定转速/(r·min^{-1})	额定转矩/(N·m)
220	10	1 500	1 500	10

表 2　永磁同步电机驱动器参数

Table 2　Permanent magnet synchronous motor driver parameters

直流电压/V	直流电流/A	交流电压/V	交流电流/A	开关频率/kHz	工作温度/℃	额定功率/kW
≤800	≤17	≤800	≤16	10	−5~45	10

表 3　实验平台设备参数

Table 3　Experimental platform equipment parameters

设备名称	型号	数量	设备参数
可编程直流电源	Preen ADG+	1	800 V(dc)
高压直流LISN	SOLAR	2	1 000 V(dc)
EMI 测试接收机	R&S®ESW	1	1 Hz~26 GHz
电机驱动器	M10015LB	2	10 kW
永磁同步电机	TP210-I	2	1.5 kW
射频电流探头	FCC F-52B	1	10~400 000 kHz

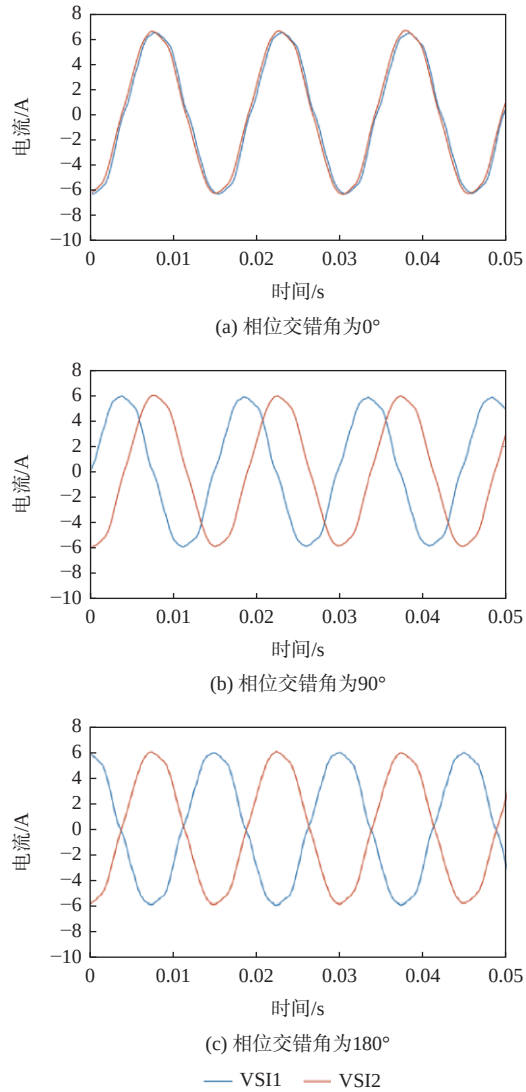


图 14　双并联 VSI 的 A 相电流

Fig. 14　A-phase current of double parallel VSI

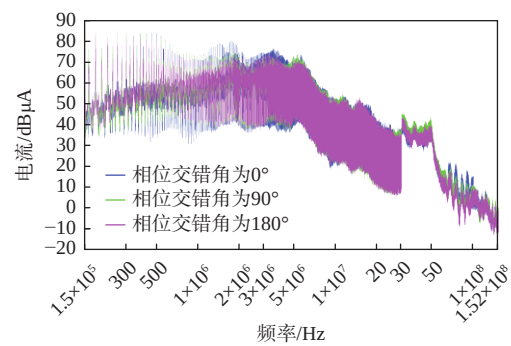


图 15　双电机并联驱动器系统直流侧传导发射电流频谱

Fig. 15　Spectrum of conduction emission current on DC side of dual motor parallel drive system

图 19 为采用调制波移相策略与传统调制策略下的电机转速波形对比分析。结果显示, 采用调制波移相策略时, 电机仍具有良好的速度响应能力, 并且在稳态时能够有效地将转速控制在目标值附近。

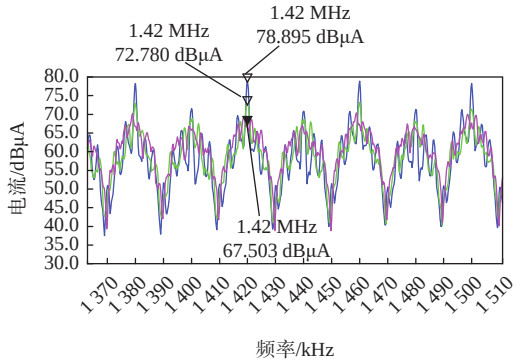


图 16 双电机并联驱动系统 1.3～1.8 MHz 频段传导发射电流频谱

Fig. 16 Conducted emission current spectrum of dual-motor parallel drive system in 1.3～1.8 MHz frequency band

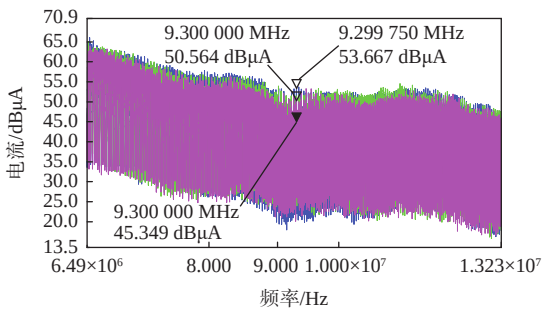


图 17 双电机并联驱动系统 6.5～13 MHz 频段传导发射电流频谱

Fig. 17 Conducted emission current spectrum of dual-motor parallel drive system in 6.5～13 MHz frequency band

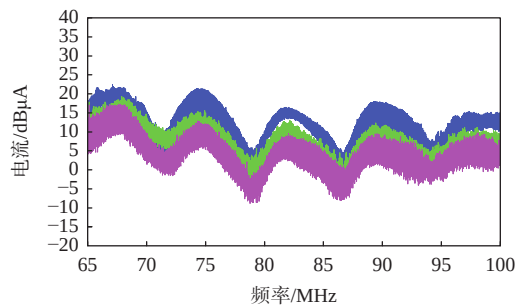


图 18 双电机并联驱动系统 65～100 MHz 频段传导发射电流频谱

Fig. 18 Conducted emission current spectrum of dual-motor parallel drive system in 60～100 MHz

图 20 展示了采用 2 种调制策略下的 q 轴电流波形对比分析。可以观察到，在电机启动阶段，由于系统对 q 轴电流进行了补偿，导致调制波移相策略相较于传统调制策略下的 q 轴电流呈现出一定程度的差异，在电机进入稳定运行阶段后，2 种调制策略下的 q 轴电流变化趋势几乎一致。这表明，在采用调制波移相策略时，电机仍能保持良好的动态性能。

综合实验结果表明，调制波移相策略在有效抑制了并联驱动系统共模干扰的同时，仍能维持良好的系统动态性能。

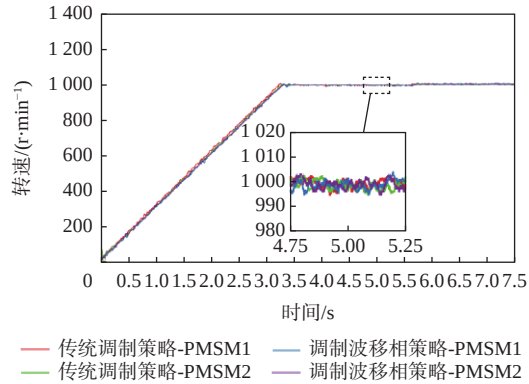


图 19 传统调制策略和调制波移相策略电机转速对比

Fig. 19 Comparison of motor speed between conventional modulation strategy and modulated wave phase-shift strategy

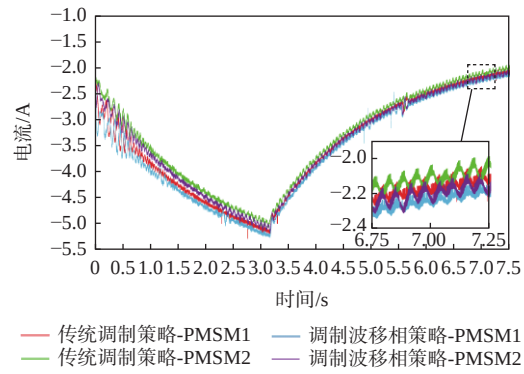


图 20 传统调制策略和调制波移相策略 q 轴电流对比

Fig. 20 Comparison of q-axis current between conventional modulation strategy and modulated wave phase-shift strategy

4 结 论

本文提出了一种基于调制波移相的并联驱动系统传导干扰抑制方法。该方法适用于驱动模块参数一致的并联驱动系统，在不显著影响系统性能指标的情况下，有效抑制了并联电驱动系统母线侧的传导干扰。

1）利用双电机并联驱动系统实验平台进行了实验验证，实验结果表明：在 1.3 ～1.8 MHz 区间，传导发射电流频谱干扰幅值下降约 11.4 dBμA，6.5～13 MHz 区间，干扰下降约 8 dBμA，60～100 MHz 区间，干扰幅值下降超过了 10 dBμA。

2）实验与仿真的传导发射电流结果总体趋势一致，验证了本文仿真模型的有效性。因此，可以通过多端口网络模型级联的方法建立并联驱动系统的高频电路模型，用于预测系统的传导发射电流。

3）本文方法不仅适用于双电机并联驱动架构，还可用于多旋翼无人机、电动船舰、电动飞机等采用分布式配电系统的运输载具，在抑制分布式电驱

动系统传导干扰方面，具有广泛的工程参考价值。

参考文献（References）

[1] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 47-69.
Deng J H. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 47-69(in Chinese).

[2] 孔祥浩, 张卓然, 陆嘉伟, 等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 021651.
Kong X H, Zhang Z R, Lu J W, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 021651(in Chinese).

[3] 宋清超, 陈家伟, 蔡坤城, 等. 多电飞机用燃料电池-蓄电池-超级电容混合供电系统的高可靠动态功率分配技术[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 445-458.
Song Q C, Chen J W, Cai K C, et al. A highly reliable power allocation technology for the fuel cell-battery-supercapacitor hybrid power supply system of a more electric aircraft[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 445-458(in Chinese).

[4] 蒋栋, 沈泽微, 刘自程, 等. 电力推进系统电力电子噪声的主动抑制技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5291-5302.
Jiang D, Shen Z W, Liu Z C, et al. Progress in active mitigation technologies of power electronics noise for electrical propulsion system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5291-5302(in Chinese).

[5] 张逸成, 叶尚斌, 张佳佳, 等. 电力电子设备传导噪声抑制措施研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 77-86.
Zhang Y C, Ye S B, Zhang J J, et al. Review of conducted noise suppression method for power electronic and electrical equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 77-86(in Chinese).

[6] Kashihara T, Araki Y, Yoshida H, et al. Overmodulation technique on common mode voltage reduction PWM inverter using saw-wave carrier signal[C]//Proceedings of the International Power Electronics Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 741-745.

[7] Das R M, Vinod Kumar S, Nandakumar S, et al. An improved random SVPWM for zero voltage switching three phase inverter[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 65: 285-292.

[8] Jiang D, Shen Z W, Wang F. Common-mode voltage reduction for paralleled inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3961-3974.

[9] Zhang D, Wang F, Burgos R, et al. Impact of interleaving on AC passive components of paralleled three-phase voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(3): 1042-1054.

[10] Ohn S, Jung H S, Boroyevich D, et al. A novel filter structure to suppress circulating currents based on the sequence of sideband harmonics for high-power interleaved motor-drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 853-866.

[11] 王浩宇, 孙红鹏, 张涛, 等. 独立供电系统传导干扰黑箱建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2347-2358.
Wang H Y, Sun H P, Zhang T, et al. Black-box modeling method for conducted interference in independent power supply systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2347-2358(in Chinese).

[12] Zhou P, Pei X J, Chen Q C, et al. EMI behavioral model based CM noise prediction method for DC power system considering multi-noise coupling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 4658-4667.

[13] Yang C Y, Yang P, Hua C C, et al. Analysis of the influence of various shield grounding modes on CM crosstalk between shielded cables[C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-3.

[14] Xue R Z, Pei X J, Yang C Y, et al. Modeling and experimental verification of common mode crosstalk with shielded cables in power converter system[C]//Proceedings of the IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia. Piscataway: IEEE Press, 2022: 449-453.

[15] Zhou W, Pei X J, Xiang Y X, et al. A new EMI modeling method for mixed-mode noise analysis in three-phase inverter system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 71535-71547.

[16] 何杰, 刘钰山, 毕大强, 等. 开关变换器传导干扰抑制策略综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1455-1472.
He J, Liu Y S, Bi D Q, et al. Review of conducted electromagnetic interference suppression strategies for switching converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1455-1472(in Chinese).

[17] 袁庆庆, 伍小杰, 吴强, 等. 低开关频率下的不对称空间矢量脉宽调制[J]. 电力电子技术, 2013, 47(5): 4-6.
Yuan Q Q, Wu X J, Wu Q, et al. Asymmetric SVPWM at low switching frequency[J]. Power Electronics, 2013, 47(5): 4-6(in Chinese).

[18] 魏学良, 戴珂, 方昕, 等. 三相并联型有源电力滤波器补偿电流性能分析与改进[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 113-119.
Wei X L, Dai K, Fang X, et al. Performance analysis and improvement of output for three phase shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 113-119(in Chinese).

[19] RTCA SC-135. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment: RTCA DO-160G[S]. Washington, D.C.: RTCA, 2010.

A method for suppressing conducted interference in parallel drive systems based on modulated wave phase shift

ZHANG Changyong[1, *], SUN Yuhua[1], CHEN Daming[1, 2], GUO Zhihao[3]

(1. School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. CATARC New Energy Vehicle Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China;
3. Tianjin Aviation Electrical Appliance Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: The drive architecture with many power converters in parallel is typically used in distributed electric propulsion systems, which are a key avenue in the development of electrification for all-electric aircraft, electric ships, and other transport vehicles. With the increase of the number of converters, electromagnetic interference will be intensified, which directly threatens the safe and stable operation of the system. In order to suppress the conducted interference generated by parallel drive systems, a modulated wave phase-shifting control strategy is proposed. Based on the in-depth analysis of the coupling mechanism of electromagnetic interference noise in the system, the conducted interference equivalent model of the parallel drive system is established through the cascade of a multi-port network model. By introducing real-time position current compensation, the modulation wave of each driver is controlled by phase-shifting, so that the common mode noise generated by each driver cancels out each other. The simulation and experimental verification are carried out in a MATLAB/Simulink simulation environment and a darkroom experiment environment for a dual-motor parallel drive architecture. The results show that when the phase difference of the driver modulation wave is 360°/m(m is the number of parallel drivers), the noise reduction is most significant. This technique greatly lowers the system's conducted interference without appreciably altering the system performance index, and it works well with parallel drive systems that have the same drive module specifications. It has a certain reference value for the design of a distributed electric drive system.

Keywords: electric propulsion system; Thevenin equivalent; black-box model; common mode noise suppression; modulated wave phase shift; current compensation

Received: 2024-05-22; **Accepted**: 2024-06-28; **Published Online**: 2024-07-10 14:53
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240708.1009.001
Foundation item: The first Civil Aviation Key Project (3122023PY04)
* **Corresponding author**. E-mail: cyzhang@cauc.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0349

混合攻击下模糊马尔可夫跳变系统非脆弱异步控制

祝超群[1, 2, 3, *]，刘淑慧[1]

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院，兰州 730050；2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室，兰州 730050；
3. 兰州理工大学 电气与控制工程国家级实验教学示范中心，兰州 730050)

摘 要：针对具有混合网络攻击和时变时延的 Takagi-Sugeno (T-S) 模糊马尔可夫跳变系统（MJSs），提出系统的非脆弱异步控制方法。利用 T-S 模糊方法基于模糊规则建立马尔可夫跳变系统模型，同时在通信网络中考虑由欺骗攻击和拒绝服务（DoS）攻击组成的混合网络攻击，并在测量信道中采用动态事件触发通信机制，从而降低不必要的数据传输；借助 Lyapunov-Krasovskii 方法和线性矩阵不等式技术推导出了闭环系统随机稳定性的充分条件，并利用线性不等式技术求解出非脆弱异步控制器增益矩阵。通过仿真算例验证了所提方法的正确性和有效性。

关 键 词：T-S 模糊马尔可夫跳变系统；拒绝服务攻击；欺骗攻击；动态事件触发；非脆弱异步控制

中图分类号：TP273

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2327-12

马尔可夫跳变系统 (Markov jump systems, MJSs) 能够有效描述实际工作环境中因外部扰动而导致参数或结构突变的动态系统。目前许多实际应用依赖于 MJSs 模型有效地解决了系统建模问题，主要包括电路系统、电力系统和网络化控制系统等[1-3]。到目前为止，MJSs 已经获得了众多研究者的关注，例如，文献 [4] 给出了 MJSs 均方稳定的充分条件；文献 [5] 通过给出转移概率矩阵和静态输出反馈控制策略讨论了 MJSs 的稳定控制问题；文献 [6] 提出一种模糊控制方法，实现了具有未知转移概率的 MJSs 镇定控制。

Takagi-Sugeno(T-S) 模糊马尔可夫跳变系统是一种将模糊逻辑与马尔可夫过程相结合的方法，用于描述复杂动态系统的行为，其优点在于系统能够适应系统动态的变化和外部扰动，即使在异步控制的情况下也能充分保证系统的控制性能。此外，T-S 模糊 MJSs 还可简化复杂系统的设计，通过模糊化和马尔可夫建模将复杂系统简化为一组规则，从而降低了系统设计和控制的复杂性[7-9]。文献 [7] 基于事件触发通信机制提出了 T-S 模糊 MJSs 的 H_∞异步控制方法，实现了闭环系统的全局镇定控制；文献 [8] 讨论了网络化 T-S 模糊 MJSs 的稳定控制问题，采用一种新型的非周期采样事件触发机制以减少数据传输，并设计了 H_∞鲁棒控制策略实现了系统的镇定控制；文献 [9] 针对具有多种网络攻击和时变时延的 T-S 模糊 MJSs，通过设计非脆弱保性能控制策略实现了系统的安全控制。

在网络化控制系统领域，由于通信网络的开放性及有限通信带宽，许多具有挑战性的问题随之出现，如网络攻击、数据丢包、网络时延及信道衰落等，这些问题的出现给系统控制带来了极大的挑战。目前，许多学者致力于解决网络化控制系统中恶意攻击引起的安全问题[10-18]。作为一种典型的网络攻击，拒绝服务 (denial of service, DoS) 攻击通常

收稿日期：2024-05-23；**录用日期**：2024-12-20；**网络出版时间**：2025-03-05 21:30
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250304.1056.001
基金项目：国家自然科学基金项目 (62363024, 62263019)
* **通信作者**. E-mail：chaoqunzhu@yeah.net

引用格式：*祝超群，刘淑慧. 混合攻击下模糊马尔可夫跳变系统非脆弱异步控制 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2327-2338.*
Zhu C Q，Liu S H. Nonfragile asynchronous control of fuzzy Markov jump systems under hybrid cyber-attacks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2327-2338（in Chinese）.

会阻塞网络信道的数据传输，而欺骗攻击主要是通过恶意注入虚假的数据信息，从而损害系统数据的真实性。文献[15]讨论了具有周期性DoS攻击和信号量化的不确定网络化控制系统的鲁棒镇定问题，给出基于事件触发状态反馈镇定的充分条件，确保了闭环系统的鲁棒稳定性；文献[16]针对具有随机非线性和欺骗攻击的时变网络化系统，研究了系统的鲁棒滤波算法和故障估计器的协同设计问题，采用服从伯努利分布的随机变量描述欺骗攻击的发生概率，并提出新颖的状态估计方案来补偿欺骗攻击对滤波性能的影响；文献[17]针对具有欺骗攻击和采用模糊模型的信息物理系统，提出一种新的事件触发机制来防御欺骗攻击，从而确保滤波误差系统的稳定性；文献[18]研究了具有混合网络攻击的T-S模糊系统的安全控制问题，通过构建DoS攻击与欺骗攻击的混合模型，基于李雅普诺夫稳定性理论和线性不等式技术推导出了系统指数均方稳定的充分条件。

由于模拟系统固有的不准确性，数字系统的有限字长、计算过程中的数值径流等原因，在运行中控制器或滤波器经常出现波动，导致了系统性能的下降甚至不稳定。通过设计非脆弱的滤波器或控制器，可以确保系统性能的稳定。文献[19]研究了T-S模糊模型描述的不确定非线性奇异状态延迟系统的非脆弱保性能控制问题，采用并行分布补偿方案设计了模糊状态反馈控制器，从而保证了闭环模糊奇异时滞系统的正则性、无脉冲性和渐近稳定性。文献[20]研究了具有输入量化和异步切换的离散时间脉冲T-S模糊系统的非脆弱保性能控制问题，但未考虑复杂系统的稳定控制问题，具有一定的保守性。然而，对于具有时变时延的非线性离散MJSs，进行模糊异步非脆弱控制问题的研究，还处于初始阶段。

当前，大多数研究针对MJSs的控制设计都基于一个基本的假设，即控制器模态切换与被控对象的模态切换同步，这需要及时获得被控对象的模态转换信息。然而，从网络化控制实践可知，由于传感器测量信息会受到时延和分组数据丢包的影响，直接获取系统模态转换信息具有一定的难度，从而导致控制器与被控对象模态不能保持同步状态，而采用异步控制方式就可以很好的克服上述困难。基于此，本文针对具有混合网络攻击和时变时延T-S模糊MJSs，通过动态事件触发通信机制以避免数据通信的拥堵，并采用非脆弱异步控制方法，借助Lyapunov-Krasovskii理论和线性矩阵不等式技术推导出闭环系统随机稳定的充分条件，实现了T-S模糊MJSs的安全控制。

1 问题描述

1.1 系统描述

考虑在给定概率空间上(U, F, P)的具有混合网络攻击[19]和时变时延的离散时间MJSs，该系统采用T-S模糊方法[21]进行描述，具有r条规则。

被控对象规则i。$z_1(k),z_2(k),\cdots,z_n(k)$为已知的前提变量，并且有$\boldsymbol{z}(k)\triangleq[z_1(k)z_2(k)\cdots z_n(k)]$；$\{\vartheta_{ij}, j\in\mathcal{N}\}$为模糊集；$\{v_k,k\geqslant 0\}\in\mathcal{M},\mathcal{M}=\{1,2,\cdots,g\}$表示离散时间MJSs的跳跃过程。如果$z_1(k)$为$\vartheta_{i1}$，$z_2(k)$为$\vartheta_{i2}$，$\cdots$，$z_n(k)$为$\vartheta_{in}$，那么

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_{iv_k}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_{iv_k}\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{A}_{div_k}\boldsymbol{x}(k-d(k))\\ \boldsymbol{x}(l)=\boldsymbol{\phi}(l)\qquad l=-d_2,-d_2+1,\cdots,0\end{cases}\tag{1}$$

式中：$i\in\mathcal{N},\mathcal{N}=\{1,2,\cdots,r\}$表示第$i$个模糊规则，$r$为规则总数；$\boldsymbol{x}(k)\in\mathbf{R}^n$、$\boldsymbol{u}(k)\in\mathbf{R}^m$和$\boldsymbol{\phi}(l)$分别为系统状态、控制输入和初始状态信息；$d(k)$为有界时变时延，满足$0<d_1\leqslant d(k)\leqslant d_2$；$\boldsymbol{A}_{iv_k}$、$\boldsymbol{B}_{iv_k}$和$\boldsymbol{A}_{div_k}$为具有适当维数的常数矩阵。

v_k表示马尔可夫系统的跳跃现象，满足$v_k\in\mathcal{M}$。则马尔可夫跳跃变量的转移概率为

$$P(v_{k+1}=f|v_k=t)=w_{tf}\qquad\forall t,f\in\mathcal{M}\tag{2}$$

式中：$w_{tf}\leqslant 1$，$\sum_{f=1}^{M}w_{tf}=1$，$\boldsymbol{w}=[w_{tf}]$

借助T-S模糊推理规则，可得被控对象的MJSs模型为

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\sum_{i=1}^{r}h_i(z(k))\left(\boldsymbol{A}_{iv_k}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_{iv_k}\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{A}_{div_k}\boldsymbol{x}(k-d(k))\right)\tag{3}$$

式中：i规则下的归一化模糊权重函数为$h_i(z(k))\triangleq\prod_{j=1}^{n}\vartheta_{ij}(z_j(k))\Big/\sum_{i=1}^{r}\prod_{j=1}^{n}\vartheta_{ij}(z_j(k))$，且满足$h_i(z(k))\geqslant 0$，$\sum_{i=1}^{r}h_i(z(k))=1$，$\vartheta_{ij}(z_j(k))$为$z_j(k)$在$\vartheta_{ij}$中的隶属度。定义$\Theta_i(z(k))=\sum_{i=1}^{r}h_i(z(k))=1$。

在现有的研究中，多数学者采用模糊思想为相应的线性化子系统设计局部控制器，这就是所谓的并行分布式补偿方法。基于此，本文设计了如下的模糊异步状态反馈控制律。

控制规则i。如果$z_1(k)$为ϑ_{i1}，$z_2(k)$为ϑ_{i2}，$\cdots$，$z_n(k)$为ϑ_{in}，那么

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}(k)=(\boldsymbol{K}_{i\delta_k}+\Delta\boldsymbol{K}_{i\delta_k})\boldsymbol{x}(k)\tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{K}_{i\delta_k}\in\mathbf{R}^{m\times n}$为待确定的第$i$个局部状态反馈控

制器参数; $\Delta\boldsymbol{K}_{i\delta_k}$ 为控制器的漂移, $\Delta\boldsymbol{K}_{i\delta_k}=\boldsymbol{E}_i\boldsymbol{F}_i(k)\boldsymbol{H}_i$, 而给出的矩阵 $\boldsymbol{E}_i$ 和 $\boldsymbol{H}_i$ 为具有适当维数的矩阵, $\boldsymbol{F}_i(k)$ 矩阵满足 $\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{F}_i(k)\leqslant\boldsymbol{I}$, 满足条件概率矩阵 $\boldsymbol{\Upsilon}=\left[\varphi_{sv}^{v(k+1)}\right]$, 且有

$$P_{\mathrm{r}}(\delta_{k+1}=v|\delta_k=s)=\varphi_{sv}^{v(k+1)}\qquad s,v\in\mathcal{M}\tag{5}$$

式中: $\sum_{v=1}^{N}\varphi_{sv}^{v(k+1)}=1$, $0\leqslant\varphi_{sv}^{v(k+1)}\leqslant1$, $\boldsymbol{\varphi}=\left[\varphi_{sv}^{v(k+1)}\right]$。需要注意的是 δ_k 为系统模式 v_k 的观测值, 其值取决于 δ_{k-1} 和 v_k。

在控制实践中, MJSs 的实际模态对控制器而言往往是未知的。因此, 本文采用式 (5) 的表示方法, 即控制器模态被看作是系统模态的观测值, 因而不需要与系统模态保持同步。

令 $\delta_k=s$, 则可得到如下的控制律:

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}(k)=\overline{\boldsymbol{K}}_{hs}\boldsymbol{x}(k)\tag{6}$$

式中: $\overline{\boldsymbol{K}}_{hs}=\sum_{i=1}^{r}h_i(z(k))\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}$, $\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}=\boldsymbol{K}_{is}+\Delta\boldsymbol{K}_{is}$。

1.2　动态事件触发机制

为减少不必要的数据传输, 本文在测量信道中采用了事件触发通信机制。传感器将采样到的信号发送到事件生成器, 用于判断测量输出是否需要通过网络信道发送给控制器, 相应的动态事件触发条件为

$$\boldsymbol{\xi}_k/\theta+\sigma\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(r_k)\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{e}(r_k)\leqslant0\tag{7}$$

式中: $\boldsymbol{e}(r_k)=\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}(r_k)$, $\boldsymbol{x}(r_k)$ 为事件发生器释放的信号; θ、σ 为正标量; $\boldsymbol{\Omega}$ 为一个正定加权矩阵; $\boldsymbol{\xi}_k$ 为内部动态变量, 满足条件:

$$\boldsymbol{\xi}_{k+1}=\lambda\boldsymbol{\xi}_k+\sigma\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(r_k)\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{e}(r_k)\tag{8}$$

其中: $\boldsymbol{\xi}_0=\boldsymbol{\xi}^0\geqslant\boldsymbol{0}$ 是初始条件, 常数 $\lambda\in(0,1)$, 且满足条件 $\lambda\theta\geqslant1$。

如果 t_k 为最近的触发时刻, 那么下一个触发时刻 t_{k+1} 被定义为

$$t_{k+1}=\min\left\{k>t_k|k\in\mathbf{N},\ \text{且满足式(7)}\right\}\tag{9}$$

1.3　混合网络攻击

如图 1 所示, 在信息物理系统中, 被控对象的控制信号和测量信号都必须通过网络进行传输。开放的网络环境意味着控制信道和测量信道都有可能受到网络攻击的威胁, 这些攻击将会对系统的控制性能产生负面影响。在量测信道中, 攻击者有可能发动欺骗攻击, 即发送虚假的数据信息 $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}(k))$ 来代替正常数据, 则受到欺骗攻击的量测输出 $\tilde{\boldsymbol{x}}(k)$ 可表示为

$$\tilde{\boldsymbol{x}}(k)=\eta(k)\boldsymbol{x}(k)+(1-\eta(k))\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}(k))\tag{10}$$

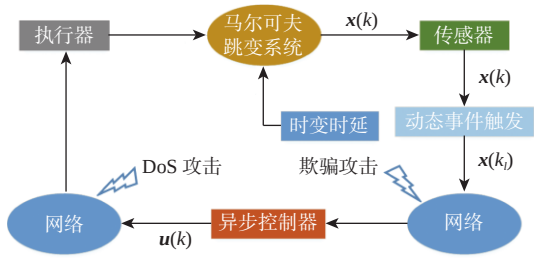


图 1　系统结构

Fig. 1　System structure

式中: 虚假数据信号 $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}(k))$ 满足条件 $\|\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}(k))\|_2\leqslant\|\boldsymbol{L}\boldsymbol{x}(k)\|_2$, $\boldsymbol{L}$ 为常数矩阵, $\eta(k)\in\{0,1\}$ 为服从伯努利分布的随机变量, 当 $\eta(k)=1$ 表示发生欺骗攻击; $\eta(k)=0$ 表示未发生欺骗攻击。欺骗攻击参数 $\eta(k)$ 的概率满足:

$$P_{\mathrm{r}}(\eta(k)=1)=E(\eta(k))=\overline{\eta}$$

$$P_{\mathrm{r}}(\eta(k)=0)=1-E(\eta(k))=1-\overline{\eta}$$

$$P_{\mathrm{r}}\left((\eta(k)-\overline{\eta})^2\right)=\overline{\eta}(1-\overline{\eta})$$

攻击者在控制信道中有可能会发起 DoS 攻击, 即攻击者通过发送无用或不相关信息来占用通信信道, 从而导致控制信息的丢失。这里引入了服从伯努利分布的随机变量 $\alpha(k)\in\{0,1\}$ 来表示 DoS 攻击是否发生, $\alpha(k)=1$ 表示 DoS 攻击处于休眠状态; $\alpha(k)=0$ 表示 DoS 攻击处于激活状态。DoS 攻击参数 $\alpha(k)$ 的概率满足:

$$P_{\mathrm{r}}(\alpha(k)=1)=E(\alpha(k))=\overline{\alpha}$$

$$P_{\mathrm{r}}(\alpha(k)=0)=1-E(\alpha(k))=1-\overline{\alpha}$$

$$P_{\mathrm{r}}\left((\alpha(k)-\overline{\alpha})^2\right)=\overline{\alpha}(1-\overline{\alpha})$$

假设 $\eta(k)$、$\alpha(k)$ 是相互独立的随机变量, 且满足条件 $0\leqslant\overline{\alpha}\leqslant1$, $0\leqslant\overline{\eta}\leqslant1$。因此, 执行器端接收到的控制信号可表示为

$$\boldsymbol{u}(k)=\alpha(k)\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}(k)=\alpha(k)\overline{\boldsymbol{K}}_{hs}[\eta(k)\boldsymbol{x}(k)+(1-\eta(k))\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}(k))]\tag{11}$$

在控制实践中, 本文考虑了网络信道可能面临的欺骗攻击和 DoS 攻击。首先, 欺骗攻击可能通过数据注入修改传感器量测数据, 使得控制器做出错误的决策, 从而导致系统控制性能下降。其次, 在控制信道中存在着可能发生的 DoS 攻击, DoS 攻击的主要目标是中断或延迟控制信息的传输, 将会对系统的正常运行产生严重影响。总而言之, 确保测量信道提供准确数据对于系统的稳定性是至关重要的, 与此同时还需要有效地应对潜在的 DoS 攻击, 从而维护控制系统的安全, 确保系统的控制性能。

综合考虑式 (3) 和执行器端的控制输入式 (11), 并令 $v_k = t$, $\tilde{\eta}(k) = \eta(k) - \overline{\eta}$, $\tilde{\alpha}(k) = \alpha(k) - \overline{\alpha}$, 可得闭环系统状态方程为

$$\boldsymbol{x}(k+1) = (\tilde{\alpha}(k)\boldsymbol{D}_1 + \tilde{\eta}(k)\boldsymbol{D}_2 + \tilde{\alpha}(k)\tilde{\eta}(k)\boldsymbol{D}_3 + \boldsymbol{D}_4)\boldsymbol{\zeta}(k) \tag{12}$$

其中:

$$\boldsymbol{D}_1 = \left[\overline{\eta}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad (1-\overline{\eta})\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{D}_2 = \left[\overline{\alpha}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad -\overline{\alpha}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{D}_3 = \left[\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad -\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{D}_4 = \left[\overline{\alpha}\,\overline{\eta}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) + \boldsymbol{A}_{ht} \quad \overline{\alpha}(1-\overline{\eta})\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad \boldsymbol{A}_{dht} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{\zeta}(k) = \left[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k) \quad \boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}(k)) \quad \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d(k)) \quad \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d_1) \quad \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d_2) \quad \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(r_k)\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{A}_{ht} = \sum_{i=1}^{r} h_i(z(k))\boldsymbol{A}_{it};\ \boldsymbol{B}_{ht} = \sum_{i=1}^{r} h_i(z(k))\boldsymbol{B}_{it}$$

$$\boldsymbol{A}_{dht} = \sum_{i=1}^{r} h_i(z(k))\boldsymbol{A}_{dit};\ \boldsymbol{K}_{hs} = \sum_{j=1}^{r} h_j(z(k))\boldsymbol{K}_{js}$$

为便于后续的证明, 先给出以下的定义与引理。

定义[22] 对于闭环系统式 (12), 若有以下不等式成立:

$$E\left(\sum_{k=0}^{\infty}\|\boldsymbol{x}(k)\|^2 | x_0, v_0, \delta_0\right) \leqslant \infty \tag{13}$$

则称闭环系统式 (12) 是随机稳定的。

引理[23] 对于矩阵 $\boldsymbol{U} = \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}$及适维矩阵 $\boldsymbol{U}_1$和 $\boldsymbol{U}_2$, 有

$$\boldsymbol{U} + \boldsymbol{U}_1\boldsymbol{F}(k)\boldsymbol{U}_2^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{U}_2\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{U}_1^{\mathrm{T}} < \boldsymbol{0} \tag{14}$$

式中: $\boldsymbol{F}(k)$满足 $\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{F}(k) \leqslant \boldsymbol{I}$。当且仅当标量 $\varepsilon > 0$, 使得以下不等式成立:

$$\boldsymbol{U} + \varepsilon\boldsymbol{U}_1\boldsymbol{U}_1^{\mathrm{T}} + \varepsilon^{-1}\boldsymbol{U}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}_2 < \boldsymbol{0} \tag{15}$$

本文的主要目标是针对具有混合网络攻击和时变时延的 T-S 模糊 MJSs 设计模糊非脆弱异步控制器式 (11), 从而确保闭环系统式 (12) 的随机稳定。

本文考虑了系统中时延 (即信号或数据传输的延迟) 随时间变化的现象。在很多实际系统中, 时延并不是固定不变的, 而是会随时间、负载、网络状况等条件的变化而波动。而时变时延的产生原因是不同的, 网络拥塞、负载变化及通信带宽变化等因素均会导致时变时延的发生。若时延越大, 系统的性能将会越差, 甚至有可能造成系统状态失稳。

2 主要结果

定理 1 对于闭环系统式 (12), 给定常数 $0 \leqslant \overline{\alpha} \leqslant 1$, $0 \leqslant \overline{\eta} \leqslant 1$, 若存在正定矩阵 $\boldsymbol{P}_{sti} > \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{P}_{fvi} > \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{R}_{iz} > \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{S}_{j1} > \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{S}_{j2} > \boldsymbol{0}$及 $\boldsymbol{S}_i > \boldsymbol{0}$, 任意整数 $i, j \in \mathcal{N}$, $t, f \in \mathcal{M}$ 和 $s, v \in \mathcal{M}$, $z \in \{1,2,3,4,5\}$, 使得以下不等式成立

$$\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{ii} < \boldsymbol{0} \tag{16}$$

$$\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{ij} + \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{ji} < \boldsymbol{0} \tag{17}$$

其中:

$$\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{ij} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}'_{11i} & \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{21ij} \\ \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{21ij} & \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{22i} \end{bmatrix},\ \boldsymbol{\Lambda}'_{11i} = \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{11i} + \boldsymbol{S}_{i1} + \boldsymbol{S}_{i2}$$

$$\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{11i} = \mathrm{diag}\{-\boldsymbol{P}_{sti} + \boldsymbol{R}_{i1} + (d_{12}+1)\boldsymbol{R}_{i3} - \sigma\left(1-\lambda+\frac{1}{\theta}\right)\boldsymbol{\Omega},$$
$$-\overline{\eta}\boldsymbol{I}_n, -\boldsymbol{R}_{v3}, -\boldsymbol{R}_{c1} + \boldsymbol{R}_{c2}, -\boldsymbol{R}_{b2}, -\left(1-\lambda+\frac{1}{\theta}\right)\boldsymbol{\Omega}\}$$

$$\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{21ij} = [\gamma_1\boldsymbol{D}_{1ij}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsvo} \quad \gamma_2\boldsymbol{D}_{2ij}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsvo} \quad \gamma_{12}\boldsymbol{D}_{3ij}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsvo} \quad \boldsymbol{D}_{4ij}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsvo} \quad \gamma_1\boldsymbol{D}_{1ij}^{\prime\mathrm{T}} \quad \gamma_2\boldsymbol{D}_{2ij}^{\prime\mathrm{T}} \quad \gamma_3\boldsymbol{D}_{3ij}^{\prime\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{D}_{4ij}^{\prime\prime\mathrm{T}} \quad \sqrt{\overline{\eta}}\mathcal{L}^{\mathrm{T}}]$$

$$\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{22i} = -\mathrm{diag}\{\boldsymbol{P}_{tfsvo}, \boldsymbol{P}_{tfsvo}, \boldsymbol{P}_{tfsvo}, \boldsymbol{P}_{tfsvo}, (d_1\boldsymbol{R}_{i4} + d_{12}\boldsymbol{R}_{i5})^{-1}, (d_1\boldsymbol{R}_{i4} + d_{12}\boldsymbol{R}_{i5})^{-1}, (d_1\boldsymbol{R}_{i4} + d_{12}\boldsymbol{R}_{i5})^{-1}, \boldsymbol{I}_n\}$$

$$\boldsymbol{D}'_{1ij} = \left[\overline{\eta}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad (1-\overline{\eta})\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{D}'_{2ij} = \left[\overline{\alpha}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad -\overline{\alpha}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{D}'_{3ij} = \left[\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad -\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{D}'_{4ij} = \left[\overline{\alpha}\,\overline{\eta}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) + \boldsymbol{A}_{ht} \quad \overline{\alpha}(1-\overline{\eta})\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs} + \Delta\boldsymbol{K}_{hs}) \quad \boldsymbol{A}_{dht} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{D}''_{4ij}=\boldsymbol{D}'_4-[\boldsymbol{I}_n\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}]=[\overline{\alpha}\,\overline{\eta}\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs}+\Delta\boldsymbol{K}_{hs})+\boldsymbol{A}_{ht}-\boldsymbol{I}_n\quad\overline{\alpha}(1-\overline{\eta})\boldsymbol{B}_{ht}(\boldsymbol{K}_{hs}+\Delta\boldsymbol{K}_{hs})\quad\boldsymbol{A}_{dht}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}]$$

$$\boldsymbol{S}_{i1}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{d_2}\overline{\boldsymbol{S}}_i & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{S}_{i2}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \dfrac{1}{d_2}\overline{\boldsymbol{S}}_i\end{bmatrix}$$

$$\overline{\boldsymbol{S}}_i=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{S}_i & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{S}_i\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{S}_i & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S}_i\end{bmatrix}$$

则称闭环系统式 (12) 是随机稳定的。

证明　首先, 定义如下:

$$\boldsymbol{R}_z(k)=\sum_{i=1}^{r}h_i(z(k))\boldsymbol{R}_{iz},\ \ \boldsymbol{S}(k)=\sum_{i=1}^{r}h_i(z(k))\boldsymbol{S}_i$$

$$\boldsymbol{S}_1(k)=\sum_{j=1}^{r}h_j(z(k))\boldsymbol{S}_{j1},\ \ \boldsymbol{S}_2(k)=\sum_{j=1}^{r}h_j(z(k))\boldsymbol{S}_{j2}$$

$$\boldsymbol{R}_1(k-d_1)=\sum_{c=1}^{r}h_c(z(k-d_1))\boldsymbol{R}_{c1}$$

$$\boldsymbol{R}_2(k-d_2)=\sum_{b=1}^{r}h_b(z(k-d_2))\boldsymbol{R}_{b2}$$

$$\boldsymbol{P}_{tfsvo}=\sum_{f=1}^{M}w_{tf}\sum_{v=1}^{N}\varphi_{sv}^{v(k+1)}\boldsymbol{P}_{fvo}$$

$$\boldsymbol{R}_3(k-d(k))=\sum_{v=1}^{r}h_v(z(k-d_1))\boldsymbol{R}_{v3}$$

$$\boldsymbol{P}_{st}(k)=\sum_{i=1}^{r}h_i(z(k))\boldsymbol{P}_{sti}$$

$$\boldsymbol{P}_{fv}(k+1)=\sum_{o=1}^{r}h_o(z(k+1))\boldsymbol{P}_{fvo}$$

$$\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)=\sum_{f=1}^{M}w_{tf}\sum_{v=1}^{N}\varphi_{sv}^{v(k+1)}\boldsymbol{P}_{fv}(k+1)=\sum_{f=1}^{M}w_{tf}\sum_{v=1}^{N}\varphi_{sv}^{v(k+1)}\sum_{o=1}^{r}h_o(z(k+1))\boldsymbol{P}_{fvo}=\sum_{o=1}^{r}h_o(z(k+1))\boldsymbol{P}_{tfsvo}$$

$$\boldsymbol{R}_4(k)-\boldsymbol{S}_1(k)=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i(z(k))h_j(z(k))(\boldsymbol{R}_{i4}-\boldsymbol{S}_{j1})$$

$$\boldsymbol{R}_5(k)-\boldsymbol{S}_2(k)=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_i(z(k))h_j(z(k))(\boldsymbol{R}_{i5}-\boldsymbol{S}_{j2})$$

$$\boldsymbol{S}_1(k)=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{d_2}\overline{\boldsymbol{S}}(k) & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{S}_2(k)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \dfrac{1}{d_2}\overline{\boldsymbol{S}}(k)\end{bmatrix}$$

$$\overline{\boldsymbol{S}}(k)=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{S}(k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{S}(k)\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{S}(k) & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S}(k)\end{bmatrix}$$

$d_{12}=d_2-d_1$,　$\gamma_{12}=\gamma_1-\gamma_2$,　$\gamma_1(k)=\sqrt{\overline{\alpha}(1-\overline{\alpha})}$

$\gamma_2(k)=\sqrt{\overline{\eta}(1-\overline{\eta})}$

其次, 定义李雅普诺夫函数为

$$V(k)=\sum_{i=1}^{4}V_i(k)$$

式中: $V_1(k)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{P}_{st}(k)\boldsymbol{x}(k)$

$$V_2(k)=\sum_{j=k-d_1}^{k-1}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(j)\boldsymbol{R}_1(j)\boldsymbol{x}(j)+\sum_{j=k-d_2}^{k-1-d_1}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(j)\boldsymbol{R}_2(j)\boldsymbol{x}(j)$$

$$V_3(k)=\sum_{\tau=-d_2+1}^{-d_1+1}\sum_{j=k+\tau}^{k-1}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(j)\boldsymbol{R}_3(j)\boldsymbol{x}(j)$$

$$V_4(k)=\sum_{\tau=-d_1}^{-1}\sum_{l=k+\tau}^{k-1}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(l)\boldsymbol{R}_4(l)\boldsymbol{\delta}(l)+\sum_{\tau=-d_2}^{-1-d_1}\sum_{l=k+\tau}^{k-1}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(l)\boldsymbol{R}_5(l)\boldsymbol{\delta}(l)$$

沿闭环系统式 (12) 的任意轨迹计算 $V(k)$ 的前向差分, 可得

$$\begin{aligned}E(\Delta V_1(k))&=E(V_1(k+1))-V_1(k)=\\&E\left(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{x}(k+1)\right)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{P}_{st}(k)\boldsymbol{x}(k)=\\&\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)(\gamma_1^2\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_1+\gamma_2^2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_2+\\&\gamma_{12}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_3+\boldsymbol{D}_4^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_4)\boldsymbol{\zeta}(k)-\\&\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{P}_{st}(k)\boldsymbol{x}(k)\end{aligned}\tag{18}$$

$$\begin{aligned}E(\Delta V_2(k))&=E(V_2(k+1))-V_2(k)=\\&\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_1(k)\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d_1)\boldsymbol{R}_1(k-d_1)\boldsymbol{x}(k-d_1)+\\&\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d_1)\boldsymbol{R}_2(k-d_1)\boldsymbol{x}(k-d_1)-\\&\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d_2)\boldsymbol{R}_2(k-d_2)\boldsymbol{x}(k-d_2)\end{aligned}\tag{19}$$

$$\begin{aligned}E(\Delta V_3(k))&=E(V_3(k+1))-V_3(k)=\\&(d_{12}+1)\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_3(k)\boldsymbol{x}(k)-\sum_{j=k-d_2}^{k-d_1}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(j)\boldsymbol{R}_3(j)\boldsymbol{x}(j)\leqslant\\&(d_{12}+1)\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_3(k)\boldsymbol{x}(k)-\\&\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d(k))\boldsymbol{R}_3(k-d(k))\boldsymbol{x}(k-d(k))\end{aligned}\tag{20}$$

$$\begin{aligned}E(\Delta V_4(k))=E\Bigg(&d_1\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_4(k)\boldsymbol{\delta}(k)+d_{12}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_5(k)\boldsymbol{\delta}(k)-\\&\sum_{l=k-d_2}^{k-1}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(l)\boldsymbol{R}_4(l)\boldsymbol{\delta}(l)-\sum_{l=k-d_2}^{k-d_1-1}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(l)\boldsymbol{R}_5(l)\boldsymbol{\delta}(l)\Bigg)\end{aligned}\tag{21}$$

$$\begin{aligned}E(\Delta V_4(k))&\leqslant d_1\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_4(k)\boldsymbol{\delta}(k)+d_{12}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_5(k)\boldsymbol{\delta}(k)-\\&\sum_{l=k-d_2}^{k-1}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}(l)\boldsymbol{S}(l)\boldsymbol{\delta}(l)\leqslant-\frac{1}{d_2}(\boldsymbol{x}(k-d(k))-\boldsymbol{x}(k-d_2))^{\mathrm{T}}\times\\&\boldsymbol{S}(k)(\boldsymbol{x}(k-d(k))-\boldsymbol{x}(k-d_2))-\frac{1}{d_2}(\boldsymbol{x}(k)-\\&\boldsymbol{x}(k-d(k)))^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}(k)(\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}(k-d(k)))\end{aligned}\tag{22}$$

已知欺骗攻击信号满足范数约束条件 $\|\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}(k))\|_2 \leqslant \|\boldsymbol{L}\boldsymbol{x}(k)\|_2$, 则有

$$\bar{\eta}\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}(k))\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}(k)) \leqslant \bar{\eta}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}\boldsymbol{x}(k) \tag{23}$$

综合考虑式 (18)～式 (23), 可得

$$\begin{aligned}E(\Delta V(k)) \leqslant\ & \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)[\gamma_1^2\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_1+\gamma_2^2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_2+\\ & \gamma_{12}\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_3+\boldsymbol{D}_4^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_4+\\ & \gamma_1^2\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))\boldsymbol{D}_1+\gamma_2^2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+\\ & d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))\boldsymbol{D}_2+\gamma_{12}\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))\boldsymbol{D}_3+\\ & \boldsymbol{D}_4'^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))\boldsymbol{D}_4'+\boldsymbol{S}_1(k)+\boldsymbol{S}_2(k)]\boldsymbol{\zeta}(k)-\\ & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{P}_{st}(k)\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_1(k)\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d_1)\times\\ & \boldsymbol{R}_1(k-d_1)\boldsymbol{x}(k-d_1)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d_1)\boldsymbol{R}_2(k-d_1)\boldsymbol{x}(k-d_1)-\\ & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d_2)\boldsymbol{R}_2(k-d_2)\boldsymbol{x}(k-d_2)+\\ & (d_{12}+1)\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}_3(k)\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k-d(k))\boldsymbol{R}_3(k-d(k))\times\\ & \boldsymbol{x}(k-d(k))+\bar{\eta}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}\boldsymbol{x}(k)-\\ & \bar{\eta}\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}(k))\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}(k))\end{aligned} \tag{24}$$

即

$$E(\Delta V(k)) \leqslant \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)\overline{\boldsymbol{\Lambda}}(k)\boldsymbol{\zeta}(k) \tag{25}$$

其中:

$$\begin{aligned}\overline{\boldsymbol{\Lambda}}(k) =\ & \gamma_1^2\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsv}(k+1)\boldsymbol{D}_1+\gamma_2^2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsv}(k+1)\boldsymbol{D}_2+\\ & \gamma_{12}\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsv}(k+1)\boldsymbol{D}_3+\boldsymbol{D}_4^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsv}(k+1)\boldsymbol{D}_4+\gamma_1^2\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+\\ & d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))\boldsymbol{D}_1+\gamma_2^2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))\boldsymbol{D}_2+\\ & \gamma_{12}\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))\boldsymbol{D}_3+\boldsymbol{D}_4'^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+\\ & d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))\boldsymbol{D}_4'+\boldsymbol{S}_1(k)+\boldsymbol{S}_2(k)+\boldsymbol{\Theta}_2(k)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Theta}_2(k) =\ & \mathrm{diag}\{\boldsymbol{R}_1(k)+(d_{12}+1)\boldsymbol{R}_3(k)-\boldsymbol{P}_{ts}(k)+\bar{\eta}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L},\\ & -\bar{\eta}\boldsymbol{I}_n,-\boldsymbol{R}_3(k-d(k)),-\boldsymbol{R}_1(k-d_1)+\\ & \boldsymbol{R}_2(k-d_1),-\boldsymbol{R}_2(k-d_2)\}\end{aligned}$$

综合考虑式 (16) 和式 (17), 并由式 (12) 可得:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Lambda}(k) =\ & \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{o=1}^{r}\sum_{c=1}^{r}\sum_{v=1}^{r}\sum_{b=1}^{r}h_i(z(k))h_j(z(k))h_o(z(k+1))\times\\ & h_c(z(k-d_1))h_v(z(k-d(k)))h_b(z(k-d_2))\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{ij}=\\ & \sum_{o=1}^{r}\sum_{c=1}^{r}\sum_{v=1}^{r}\sum_{b=1}^{r}h_o(z(k+1))h_c(z(k-d_1))h_v\times\\ & (z(k-d(k)))\times h_b(z(k-d_2))\left[\sum_{i=1}^{r}h_i^2(z(k))\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{ii}+\right.\\ & \left.\sum_{i=1}^{r-1}\sum_{j=i+1}^{r}h_i(z(k))h_j(z(k))(\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{ij}+\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_{ji})\right]<\boldsymbol{0}\end{aligned} \tag{26}$$

其中:

$$\boldsymbol{\Lambda}(k)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Lambda}_{11}(k) & \boldsymbol{\Lambda}_{21}(k)\\ * & \boldsymbol{\Lambda}_{22}(k)\end{bmatrix}<\boldsymbol{0} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{R}_4(k)-\boldsymbol{S}_1(k)>\boldsymbol{0},\quad \boldsymbol{R}_5(k)-\boldsymbol{S}_2(k)>\boldsymbol{0} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Lambda}_{11}(k) =\ & \mathrm{diag}\left\{-\boldsymbol{P}_{st}(k)+\boldsymbol{R}_1(k)+(d_{12}+1)\boldsymbol{R}_3(k)-\right.\\ & \sigma\left(1-\lambda+\frac{1}{\theta}\right)\boldsymbol{\Omega},-\bar{\eta}\boldsymbol{I}_n,-\boldsymbol{R}_3(k-d(k)),\\ & -\boldsymbol{R}_1(k-d_1)+\boldsymbol{R}_2(k-d_1),-\boldsymbol{R}_2(k-d_2),\\ & \left.-\left(1-\lambda+\frac{1}{\theta}\right)\boldsymbol{\Omega}\right\}+\boldsymbol{S}_1(k)+\boldsymbol{S}_2(k)\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_{21}(k)=\begin{bmatrix}\gamma_1\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1) & \gamma_2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1) & \gamma_{12}\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1) & \boldsymbol{D}_4^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1) & \gamma_1\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}} & \gamma_2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}} & \gamma_3\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{D}_4'^{\mathrm{T}} & \sqrt{\bar{\eta}}\mathcal{L}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Lambda}_{22}(k) =\ & -\mathrm{diag}\{\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1),\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1),\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1),\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1),\\ & (d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))^{-1},(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))^{-1},(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))^{-1},(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))^{-1},\boldsymbol{I}_n\}\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{D}_4'=\boldsymbol{D}_4-[\boldsymbol{I}_n\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}],\ \mathcal{L}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{L} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{\delta}(l)=\boldsymbol{x}(l+1)-\boldsymbol{x}$$

对式 (27) 应用舒尔补引理, 可得

$$\boldsymbol{\Lambda}_{11}(k)-\boldsymbol{\Lambda}_{21}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\Lambda}_{22}^{-1}(k)\boldsymbol{\Lambda}_{21}(k)<\boldsymbol{0} \tag{29}$$

则式 (29) 等价于

$$\begin{aligned}\overline{\boldsymbol{\Lambda}}(k) =\ & \gamma_1^2\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_1+\gamma_2^2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_2+\\ & \gamma_{12}^2\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_3+\boldsymbol{D}_4^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{P}}_{fv}(k+1)\boldsymbol{D}_4+\\ & \gamma_1^2\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))^{-1}\boldsymbol{D}_1+\gamma_2^2\boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+\\ & d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))^{-1}\boldsymbol{D}_2+\gamma_{12}^2\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+\\ & d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))^{-1}\boldsymbol{D}_3+\boldsymbol{D}_4'^{\mathrm{T}}(d_1\boldsymbol{R}_4(k)+d_{12}\boldsymbol{R}_5(k))^{-1}\boldsymbol{D}_4'+\\ & \bar{\eta}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}+\boldsymbol{\Lambda}_{11}(k)+\boldsymbol{S}_1(k)+\boldsymbol{S}_2(k)<\boldsymbol{0}\end{aligned}$$

由式 (12) 的数学关系可知, 当

$$E\left(\sum_{k=0}^{\infty}\|\boldsymbol{\zeta}(k)\|^2|x_0,v_0,\delta_0\right)\leqslant\infty$$

成立时, 则

$$E\left(\sum_{k=0}^{\infty}\|\boldsymbol{x}(k)\|^2|x_0,v_0,\delta_0\right)\leqslant\infty$$

也是成立的。

则由式 (25) 进一步可得:

$$\begin{aligned}E(\Delta V(k)) \leqslant\ & \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)\overline{\boldsymbol{\Lambda}}(k)\boldsymbol{\zeta}(k)\leqslant-\lambda_{\min}(-\overline{\boldsymbol{\Lambda}}(k))\times\\ & \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\zeta}(k)\leqslant-\beta\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\zeta}(k)\end{aligned} \tag{30}$$

其中, $\beta=\inf_{t\in\mathcal{M}}\{\lambda_{\min}(-\overline{\boldsymbol{\Lambda}}(k))\}$。并对式 (30) 的 k 从 $0\to\infty$ 求和, 可得

$$E(V(k+1)-V(0))\leqslant-\beta\sum_{k=0}^{\infty}E\left(\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\zeta}(k)\right) \tag{31}$$

对式 (31) 进行移项处理, 则有

$$\sum_{k=0}^{\infty}E\left(\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\zeta}(k)\right)\leqslant\frac{1}{\beta}(E(V(0))-E(V(k+1)))\leqslant\frac{1}{\beta}E(V(0))\tag{32}$$

由式 (32) 可得:

$$\sum_{k=0}^{+\infty}E\left(\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\zeta}(k)\right)\leqslant\frac{1}{\beta}E(V(0))<+\infty\tag{33}$$

显然, 根据定义 1 可知, 闭环系统 (12) 是随机稳定的。 **证毕**

定理 2　对于闭环系统 (12), 给定常数$0\leqslant\bar{\alpha}\leqslant1$, $0\leqslant\bar{\eta}\leqslant1$, 若存在对称矩阵$\tilde{\boldsymbol{P}}_{sti}>\boldsymbol{0}$, $\tilde{\boldsymbol{R}}_{iz}>\boldsymbol{0}$, $\tilde{\boldsymbol{S}}_i>\boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{X}$, 矩阵$\boldsymbol{Y}_j$和标量ρ_1, ρ_2, ρ_3, ω_1, ω_2, 及任意的$z=\{1,2,3,4,5\}$, i, j, o, c, v, $b\in\mathcal{N}$, t, $f\in\mathcal{M}$, 使得以下不等式成立:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Xi}_{ii}&\boldsymbol{\Theta}_{1ii}&\boldsymbol{\Theta}_{2i}\\\boldsymbol{\Theta}_{1ii}&-\rho_1^{-1}\boldsymbol{I}_n&\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{\Theta}_{2i}&\boldsymbol{0}&-\rho_1\boldsymbol{I}_n\end{bmatrix}<\boldsymbol{0}\tag{34}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Xi}_{ij}+\boldsymbol{\Xi}_{ji}&\boldsymbol{\Theta}_{1ij}&\boldsymbol{\Theta}_{2j}&\boldsymbol{\Theta}_{1ij}&\boldsymbol{\Theta}_{2i}\\\boldsymbol{\Theta}_{1ij}&-\rho_2^{-1}\boldsymbol{I}_n&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{\Theta}_{2j}&\boldsymbol{0}&-\rho_2\boldsymbol{I}_n&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{\Theta}_{1ij}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&-\rho_3^{-1}\boldsymbol{I}_n&\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{\Theta}_{2i}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&-\rho_3\boldsymbol{I}_n\end{bmatrix}<\boldsymbol{0}\tag{35}$$

$$\tilde{\boldsymbol{R}}_{4i}-\tilde{\boldsymbol{S}}_{j1}>\boldsymbol{0},\quad\tilde{\boldsymbol{R}}_{5i}-\tilde{\boldsymbol{S}}_{j2}>\boldsymbol{0}\tag{36}$$

其中:

$$\boldsymbol{\Xi}_{ij}=\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{\Xi}}_{ij}&\boldsymbol{\Xi}_{21ij}\\\boldsymbol{\Xi}_{21ij}&\boldsymbol{\Xi}_{22i}\end{bmatrix},\quad\tilde{\boldsymbol{\Xi}}_{ij}=\boldsymbol{\Xi}_{11i}+\tilde{\boldsymbol{S}}_{i1}+\tilde{\boldsymbol{S}}_{i2}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Xi}_{11i}=\mathrm{diag}\Big\{&-\omega_1\boldsymbol{X}-\omega_1\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}+\omega_1^2\boldsymbol{P}_{sti}^{-1}+\tilde{\boldsymbol{R}}_{i1}+\\&(d_{12}+1)\tilde{\boldsymbol{R}}_{i3}-\sigma\left(1-\lambda+\frac{1}{\theta}\right)\boldsymbol{I}_n,-2\bar{\eta}\boldsymbol{X}+\bar{\eta}\boldsymbol{I}_n,-\tilde{\boldsymbol{R}}_{v3},\\&-\tilde{\boldsymbol{R}}_{c1}+\tilde{\boldsymbol{R}}_{c2},-\tilde{\boldsymbol{R}}_{b2},-\boldsymbol{\Omega}\left(1-\lambda+\frac{1}{\theta}\right)\Big\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Xi}_{21ij}=[&\boldsymbol{T}_{11ij}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{T}_{12ij}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{T}_{13ij}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{T}_{14ij}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{T}_{11ij}^{\mathrm{T}}\\&\boldsymbol{T}_{12ij}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{T}_{13ij}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{T}_{21ij}^{\mathrm{T}}\quad\sqrt{\bar{\eta}}\boldsymbol{I}_n\quad\tilde{\boldsymbol{L}}^{\mathrm{T}}]\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{T}_{11ij}^{\mathrm{T}}=[\gamma_1\bar{\eta}\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad\gamma_1(1-\bar{\eta})\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}]$$

$$\boldsymbol{T}_{12ij}^{\mathrm{T}}=[\gamma_2\bar{\alpha}\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad-\gamma_2\bar{\alpha}\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}]$$

$$\boldsymbol{T}_{13ij}^{\mathrm{T}}=[\gamma_{12}\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad-\gamma_{12}\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}]$$

$$\boldsymbol{T}_{14ij}^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{A}_{it}\boldsymbol{X}+\bar{\alpha}\bar{\eta}\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad\bar{\alpha}(1-\bar{\eta})\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad\boldsymbol{A}_{dit}\boldsymbol{X}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}]$$

$$\boldsymbol{T}_{21ij}^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{A}_{it}\boldsymbol{X}+\bar{\alpha}\bar{\eta}\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j-\boldsymbol{X}\quad\bar{\alpha}(1-\bar{\eta})\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{Y}_j\quad\boldsymbol{A}_{dit}\boldsymbol{X}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}]$$

$$\boldsymbol{h}_{4ii}=\left[\bar{\alpha}\bar{\eta}\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}+\boldsymbol{A}_{ht}\quad\bar{\alpha}(1-\bar{\eta})\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}\quad\boldsymbol{A}_{dit}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\right]$$

$$\tilde{\boldsymbol{L}}=[\boldsymbol{L}\boldsymbol{X}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}]$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Xi}_{22i}=-\mathrm{diag}\{&\tilde{\boldsymbol{P}}_{tfsvo}-\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\tilde{\boldsymbol{P}}_{tfsvo}-\boldsymbol{X}-\\&\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\tilde{\boldsymbol{P}}_{tfsvo}-\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\ \tilde{\boldsymbol{P}}_{tfsvo}-\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},d_1^{-1}\boldsymbol{R}'_{i4}+\\&d_{12}^{-1}\boldsymbol{R}'_{i5},d_1^{-1}\boldsymbol{R}'_{i4}+d_{12}^{-1}\boldsymbol{R}'_{i5},d_1^{-1}\boldsymbol{R}'_{i4}+\\&d_{12}^{-1}\boldsymbol{R}'_{i5},d_1^{-1}\boldsymbol{R}'_{i4}+d_{12}^{-1}\boldsymbol{R}'_{i5},\boldsymbol{I}_n\}\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\Theta}_{1ij}=[\boldsymbol{\Theta}_{11ij}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{\Theta}_{12ij}^{\mathrm{T}}],\quad\boldsymbol{\Theta}_{2j}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{E}_j\boldsymbol{X}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}_{n\times13n}\\\boldsymbol{0}&\boldsymbol{E}_j\boldsymbol{X}&\boldsymbol{0}_{n\times13n}\end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Theta}_{11ij}=[&\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\gamma_1\overline{\eta}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\gamma_2\overline{\alpha}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\\&\gamma_{12}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\bar{\alpha}\overline{\eta}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\gamma_1\overline{\eta}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\\&\gamma_2\overline{\alpha}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\gamma_{12}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\bar{\alpha}\overline{\eta}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{0}]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Theta}_{12ij}=[&\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\gamma_1(1-\overline{\eta})(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad-\gamma_2\overline{\alpha}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\\&-\gamma_{12}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\bar{\alpha}(1-\overline{\eta})(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\gamma_1(1-\overline{\eta})(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\\&-\gamma_2\overline{\alpha}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad-\gamma_{12}(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\bar{\alpha}(1-\overline{\eta})(\boldsymbol{B}_{it}\boldsymbol{H}_j)^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{0}]\end{aligned}$$

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_{1i}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{d_2}\tilde{\tilde{\boldsymbol{S}}}_i&\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}\end{bmatrix},\quad\tilde{\boldsymbol{S}}_{2i}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{0}&\dfrac{1}{d_2}\tilde{\tilde{\boldsymbol{S}}}_i\end{bmatrix}$$

$$\tilde{\tilde{\boldsymbol{S}}}_i=\begin{bmatrix}-\tilde{\boldsymbol{S}}_i&\boldsymbol{0}&\tilde{\boldsymbol{S}}_i\\\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}\\\tilde{\boldsymbol{S}}_i&\boldsymbol{0}&-\tilde{\boldsymbol{S}}_i\end{bmatrix}$$

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_i=\boldsymbol{X}\boldsymbol{S}_i\boldsymbol{X}$$

则称闭环系统式 (12) 是随机稳定的, 且相应的控制增益矩阵为

$$\boldsymbol{K}_{hs}=\boldsymbol{Y}_j\boldsymbol{X}^{-1}$$

证明　对式 (34) 应用舒尔补引理, 可得

$$\boldsymbol{\Xi}_{ii}+\rho_1^{-1}\boldsymbol{\Theta}_{2i}\boldsymbol{\Theta}_{2i}^{\mathrm{T}}+\rho_1\boldsymbol{\Theta}_{1ii}\boldsymbol{\Theta}_{1ii}^{\mathrm{T}}<\boldsymbol{0}\tag{37}$$

对式 (37) 应用引理, 则有

$$\boldsymbol{\Xi}_{ii}+\boldsymbol{\Theta}_{1ii}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_i(k)\boldsymbol{\Theta}_{2i}+\boldsymbol{\Theta}_{2i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\Theta}_{1ii}<\boldsymbol{0}\tag{38}$$

式 (38) 不等式可以写为

$$\boldsymbol{\Xi}'_{ii}<\boldsymbol{0}\tag{39}$$

其中:

$$\boldsymbol{\Xi}'_{ii}=\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{\Xi}}_{ii}&\boldsymbol{\Xi}'_{21ii}\\*&\boldsymbol{\Xi}_{22i}\end{bmatrix},\quad\tilde{\boldsymbol{\Xi}}_{ii}=\boldsymbol{\Xi}_{11i}+\tilde{\boldsymbol{S}}_{i1}+\tilde{\boldsymbol{S}}_{i2}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Xi}'_{21ii}=[&\gamma_1\boldsymbol{h}_{1ii}^{\mathrm{T}}\quad\gamma_2\boldsymbol{h}_{2ii}^{\mathrm{T}}\quad\gamma_{12}\boldsymbol{h}_{3ii}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{h}_{4ii}^{\mathrm{T}}\quad\gamma_1\boldsymbol{h}_{1ii}^{\mathrm{T}}\\&\gamma_2\boldsymbol{h}_{2ii}^{\mathrm{T}}\quad\gamma_3\boldsymbol{h}_{3ii}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{h}'^{\mathrm{T}}_{4ii}\quad\sqrt{\bar{\eta}}\mathcal{L}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{h}_{1ii}=\left[\overline{\eta}\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}\quad(1-\overline{\eta})\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{h}_{2ii}=\left[\bar{\alpha}\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}\quad-\bar{\alpha}\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\right]$$

$$\boldsymbol{h}_{3ii}=\left[\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}\quad-\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\quad\boldsymbol{0}\right]$$

$\boldsymbol{h}'_{4ii}=\boldsymbol{h}_4-[\boldsymbol{I}_n\ \ \boldsymbol{0}\ \ \boldsymbol{0}\ \ \boldsymbol{0}\ \ \boldsymbol{0}\ \ \boldsymbol{0}]=\left[\bar{\alpha}\bar{\eta}\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}+\boldsymbol{A}_{ht}-\boldsymbol{I}_n\quad \bar{\alpha}(1-\bar{\eta})\boldsymbol{B}_{ht}\tilde{\boldsymbol{K}}_{hs}\quad \boldsymbol{A}_{dit}\quad \boldsymbol{0}\quad \boldsymbol{0}\quad \boldsymbol{0}\right]$，$\boldsymbol{Y}_i=\boldsymbol{K}_{hs}\boldsymbol{X}$

由于$\boldsymbol{P}_{tfsvo}=\sum_{f=1}^{M}w_{tf}\sum_{v=1}^{N}\varphi_{sv}^{v(k+1)}\boldsymbol{P}_{fvo}>\boldsymbol{0}$，则有

$$(\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1}-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{P}_{tfsvo}(\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1}-\boldsymbol{X})>\boldsymbol{0} \tag{40}$$

可以得到

$$-\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1}<\tilde{\boldsymbol{P}}_{tfsvo}-\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \tag{41}$$

其中：

$$\tilde{\boldsymbol{P}}_{tfsvo}=\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{tfsvo}\boldsymbol{X}=\sum_{f=1}^{M}w_{tf}\sum_{v=1}^{N}\varphi_{sv}^{v(k+1)}\tilde{\boldsymbol{P}}_{fvi}$$

$$\tilde{\boldsymbol{P}}_{fvi}=\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{fvi}\boldsymbol{X}$$

类似的，可以得到

$$\begin{cases}-\boldsymbol{P}_{sti}^{-1}<\tilde{\boldsymbol{P}}_{sti}-\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\\ -\boldsymbol{R}_{iz}^{-1}<\tilde{\boldsymbol{R}}_{iz}-\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{42}$$

其中：$\tilde{\boldsymbol{P}}_{sti}=\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{sti}\boldsymbol{X}$，$\tilde{\boldsymbol{R}}_{iz}=\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{iz}\boldsymbol{X}$。

由于$(\boldsymbol{P}_{sti}^{-1}-\omega_1{}^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{P}_{sti}(\boldsymbol{P}_{sti}^{-1}-\omega_1{}^{-1}\boldsymbol{X})\geqslant\boldsymbol{0}$，显然有

$$-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{sti}\boldsymbol{X}\leqslant-\omega_1\boldsymbol{X}-\omega_1\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}+\omega_1^2\boldsymbol{P}_{sti}^{-1} \tag{43}$$

综合考虑式(39)～式(43)，可得

$$\boldsymbol{\Xi}''_{ii}<\boldsymbol{0} \tag{44}$$

其中：

$$\boldsymbol{\Xi}'_{ii}=\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{\Xi}}_{ii} & \boldsymbol{\Xi}'_{21ii}\\ * & \boldsymbol{\Xi}'_{22i}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Xi}'_{22i}=-\mathrm{diag}\{\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},d_1^{-1}\boldsymbol{R}'_{i4}+d_{12}^{-1}\boldsymbol{R}'_{i5},d_1^{-1}\boldsymbol{R}'_{i4}+d_{12}^{-1}\boldsymbol{R}'_{i5},d_1^{-1}\boldsymbol{R}'_{i4}+d_{12}^{-1}\boldsymbol{R}'_{i5},d_1^{-1}\boldsymbol{R}'_{i4}+d_{12}^{-1}\boldsymbol{R}'_{i5},\boldsymbol{I}_n\}$$

对式(16)左乘$\mathrm{diag}\{\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{I}_n,\boldsymbol{I}_n,\boldsymbol{I}_n,\boldsymbol{I}_n,\boldsymbol{I}_n\}$和右乘$\mathrm{diag}\{\boldsymbol{X},\boldsymbol{X},\boldsymbol{X},\boldsymbol{X},\boldsymbol{X},\boldsymbol{X},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{P}_{tfsvo}^{-1},\boldsymbol{I}_n,\boldsymbol{I}_n,\boldsymbol{I}_n,\boldsymbol{I}_n,\boldsymbol{I}_n\}$，令$\boldsymbol{Y}_i=\boldsymbol{K}_{hs}\boldsymbol{X}$可得式(44)，则由式(16)和式(34)可得式(44)成立，综上可得$\boldsymbol{K}_{hs}=\boldsymbol{Y}_i\boldsymbol{X}^{-1}$。同时，综合式(17)和式(35)可得$\boldsymbol{K}_{hs}=\boldsymbol{Y}_j\boldsymbol{X}^{-1}$。当式(34)和式(35)可行时，得到非脆弱异步控制增益为$\boldsymbol{K}_{hs}=\boldsymbol{Y}_j\boldsymbol{X}^{-1}$。

证毕

众所周知，同步控制是指所有控制信号都按某个统一的时钟信号同步变化的，而异步控制是在各个操作模块间独立进行，不依赖统一的时钟信号。由于马尔可夫系统的随机跳变特性，很难直接获取系统的模态转换信息。此时，异步控制模式可以更好地反映工程控制实践过程。在实际应用中，由于异步控制过程中各系统模块独立的工作，能迅速响应外部事件需求，不需要持续的时钟信号驱动，可以有效的节省系统资源，还能更好的适应动态变化的环境。因此，异步控制方式常用于处理不确定性或事件驱动的系统，如嵌入式系统、实时系统及智能硬件系统等。

3 仿真验证

例1 考虑具有2个规则的T-S模糊MJSs模型，选择被控对象的系统参数为

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}0.76 & 0.3\\ 0.2 & 0.66\end{bmatrix},\ \boldsymbol{B}_1=\begin{bmatrix}-0.5\\ 0.301\,4\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{d1}=\begin{bmatrix}0 & 0.03\\ 0 & -0.06\end{bmatrix},\ \boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}0.7 & 0.004\\ 0.5 & 0.64\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_2=\begin{bmatrix}-0.000\,5\\ 0.301\,6\end{bmatrix},\ \boldsymbol{A}_{d2}=\begin{bmatrix}0 & 0.03\\ 0 & -0.06\end{bmatrix}$$

考虑控制器漂移$\Delta\boldsymbol{K}_{i\delta_k}=\boldsymbol{E}_i\boldsymbol{F}_i(k)\boldsymbol{H}_i$，$\boldsymbol{E}_1=[0.02\quad 0]$，$\boldsymbol{E}_2=[0\quad -0.01]$，$\boldsymbol{H}_1=0.02$，$\boldsymbol{H}_2=-0.02$，由于$\boldsymbol{F}_i(k)$矩阵满足$\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{F}_i(k)\leqslant\boldsymbol{I}$，故$|\boldsymbol{F}_1(k)|=0.5\sin(k)$，$|\boldsymbol{F}_2(k)|=-0.5\cos(k)$。

被控对象的隶属度函数分别为

$$\underline{h}_1(z_1)=1-1\Big/\left(1+\mathrm{e}^{\frac{-x_1-1.5}{2}}\right)$$

$$\overline{h}_1(z_1)=1-1\Big/\left(1+\mathrm{e}^{\frac{-x_1-1.5}{2}}\right)$$

$$\underline{h}_2(z_1)=1\Big/\left(1+\mathrm{e}^{\frac{-x_1+1.5}{2}}\right),\ \overline{h}_2(z_1)=1\Big/\left(1+\mathrm{e}^{\frac{-x_1-1.5}{2}}\right)$$

其中：$z_1(k)\in[-15,15]$为模糊作用区域，加权函数分别定义为$\overline{\varphi}_i(z(k))=1-\sin^2(z(k))$，$\underline{\varphi}_i(z(k))=\sin^2(z(k))$。

假设马尔可夫过程的状态转移概率矩阵为$\boldsymbol{w}=\begin{bmatrix}0.5 & 0.5\\ 0.6 & 0.4\end{bmatrix}$，异步控制状态转移概率矩阵为$\boldsymbol{\varphi}=\begin{bmatrix}0.9 & 0.1\\ 0.7 & 0.3\end{bmatrix}$；欺骗攻击与DoS攻击的发生概率分别为$\bar{\eta}=0.5$和$\bar{\alpha}=0.4$；时变时延参数分别为$d_1=3$，$d_2=5$；选取动态事件触发参数分别为$\lambda=0.8$，$\theta=10$和$\sigma=0.7$。利用MATLAB的LMI工具箱求解定理2，可得动态事件触发矩阵和异步控制器的增益矩阵分别为

$$\boldsymbol{\Omega}=\begin{bmatrix}1.350\,9 & -12.764\,9\\ -1.297\,2 & 13.790\,9\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{K}_1=[0.911\,9\quad 0.491\,7],\ \boldsymbol{K}_2=[-2.700\,6\quad -1.405\,6]$$

假设系统的初始状态为$\boldsymbol{x}(0)=\begin{bmatrix}4 & -4\end{bmatrix}$。图2为被控对象和控制器的上下隶属度函数。图3为系统和控制器模态图，从图3中可以看出，二者的工作模态是异步的；图4为欺骗攻击与DoS攻击的

发生时刻, 其中, “0” 表示有攻击信号, “1” 表示没有攻击信号; 图 5 为系统的时变时延轨迹; 图 6 为测量信道的动态事件触发通信时刻; 图 7 为闭环系统状态的轨迹。从图 7 中可以看出, 闭环系统的状态很快地收敛于平衡状态, 这说明本文提出的异步控制方法是有效的。针对 T-S 模糊马尔可夫系统的仿真结果如图 2～图 7 所示, 仿真结果表明, 本文给出的非脆弱异步控制方法是可行且有效的。

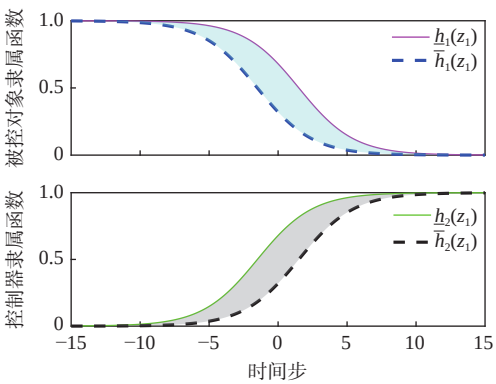


图 2　被控对象和控制器的 T-S 模糊隶属函数

Fig. 2　T-S fuzzy membership function of controlled objects and controllers

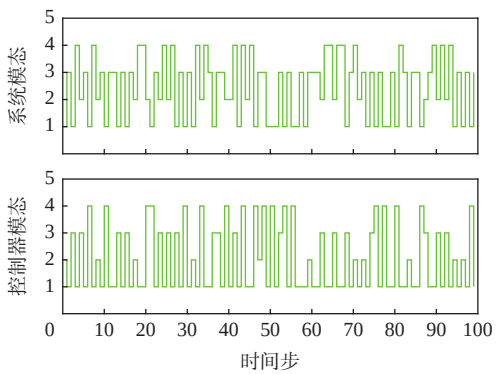


图 3　系统模态与控制器模态

Fig. 3　System mode and controller mode

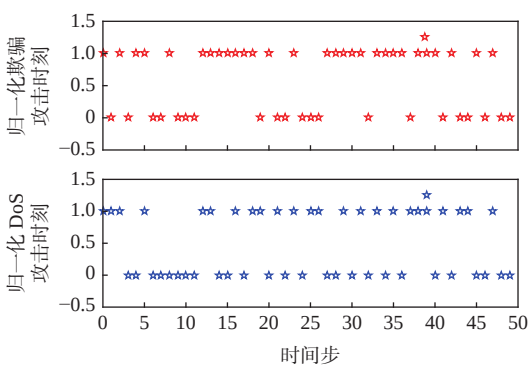


图 4　欺骗攻击与 DoS 攻击的发生时刻

Fig. 4　Spoofing attacks and DoS attacks occurred at the time

表 1 给出了时延最大值分别为 3、5 和 7 的状态项指标的值, 可以看到时延范围越大, 状态项指标值越来越大。从表中的数值对比可知, 时变时延

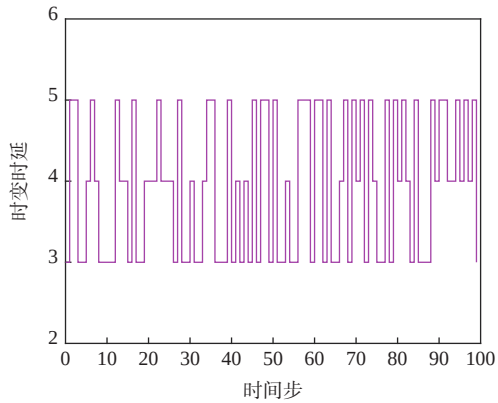


图 5　系统时变时延轨迹

Fig. 5　System time-varying delay trajectory

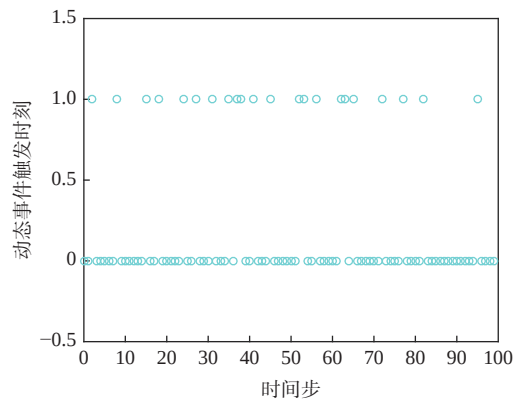


图 6　动态事件触发时刻

Fig. 6　Dynamic event triggering time

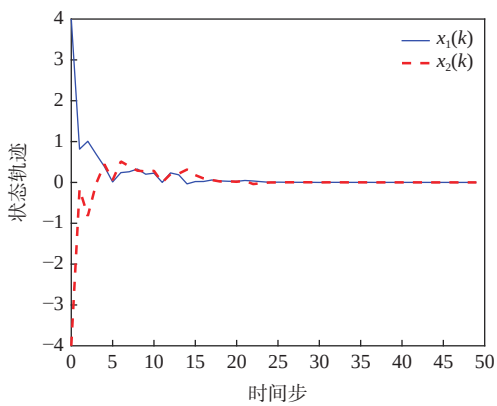


图 7　闭环系统状态轨迹

Fig. 7　Closed-loop system state trajectory

越大, 系统性能越差。

为进一步验证本文方法的有效性, 在相同初始条件下, 将本文方法与文献 [9] 提出的保性能非脆弱控制方法进行了比较。采用非脆弱控制方法获得的控制增益矩阵为 $\boldsymbol{K}_1 = [1.860\,6 \quad -1.914\,7]$, $\boldsymbol{K}_2 = [2.112\,8 \quad -1.777\,6]$, 对应的闭环系统状态轨迹如图 8 所示。通过对比图 7 与图 8 可知, 在具有相同的混合攻击和时变时延条件下, 采用本文方法可使闭环系统更快地返回

表1 不同时延最大值的状态项指标比较

Table 1 Comparison of state item indicators under different maximum delay values

归一化时延最大值	状态项指标	仿真步数
3	32.653 4	50
5	36.344 8	50
7	44.576 8	50

平衡状态，且具有良好的动态性能。

为了说明本文方法的优越性，在同样的条件下采用文献 [9] 的控制方案，相应的系统状态轨迹如图 9 所示。表 2 给出了 2 种控制方案下系统的性能指标对比。通过比较可以看出，本文方法不仅保证了系统的稳定，而且具有更加优越的控制性能。

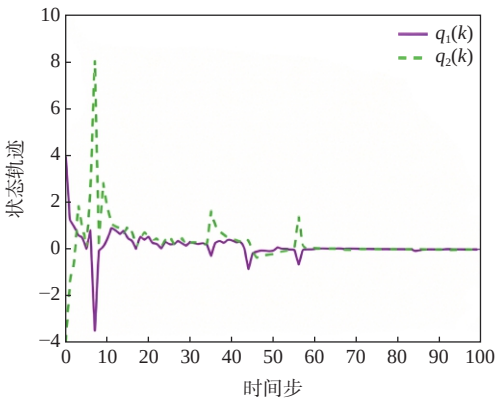


图 8 单连杆机械臂系统状态

Fig. 8 Single-link robotic arm system status

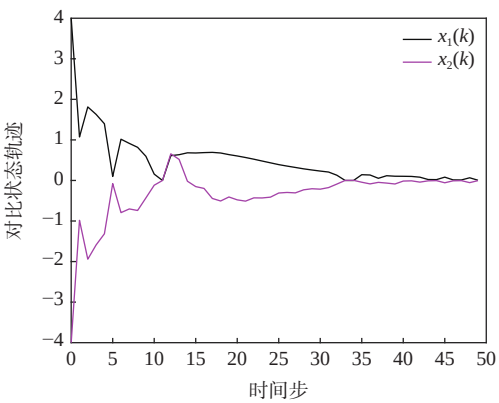


图 9 采用文献 [9] 控制方法的状态轨迹

Fig. 9 State trajectory of control method in reference [9] is adopted

例 2 为验证本文方法的有效性，下面给出一个单连杆机械臂系统[23]的应用实例，系统状态方程为

$$\begin{cases}\dot{q}_1(t)=fq_2(t)+(1-f)q_2(t-d(t))\\ \dot{q}_2(t)=-\dfrac{glM}{J}\sin(q_1(t))-\dfrac{fR}{J}q_2(t)-\\ \qquad\dfrac{(1-f)}{J}q_2(t-d(t))+\dfrac{1}{J}|\boldsymbol{u}(t)|\end{cases}$$

表2 不同控制方法的性能指标比较

Table 2 Comparison of performance indicators under different control methods

控制方法	仿真步数	稳定步数	状态项指标
本文方法	50	23	35.375 1
文献[9]	50	49	71.267 8

其中，$q_1(t)$和$q_2(t)$分别表示机器人手臂的角度和角速度。f、g、M、J和l分别为减速系数、重力加速度、载荷质量、惯性矩、机械臂长度和黏性摩擦系数。假设 $R=2(\mathrm{N\cdot m\cdot s})/\mathrm{rad}$，$l=0.5\ \mathrm{m}$，$g=9.81\ \mathrm{m/s^2}$，然而，随着时间的推移，$M$和$J$在$M_1=J_1=1$，$M_2=J_2=5$，$M_3=J_3=10$这 3 种模式之间变化，造成了所考虑系统出现跳跃。

通过对单连杆机械臂系统进行离散化，可得如下的模糊马尔可夫跳变系统：

被控对象规则 1：如果$q_1(k)$为0 rad，那么

$$\boldsymbol{q}(k+1)=\boldsymbol{A}_{\delta_k1}\boldsymbol{q}(k)+\boldsymbol{A}_{d\delta_k1}\boldsymbol{q}(k-d(k))+\boldsymbol{B}_{\delta_k1}\boldsymbol{u}(k)$$

被控对象规则 2：如果$q_1(k)$为π rad或$-\pi$ rad，那么

$$\boldsymbol{q}(k+1)=\boldsymbol{A}_{\delta_k2}\boldsymbol{q}(k)+\boldsymbol{A}_{d\delta_k2}\boldsymbol{q}(k-d(k))+\boldsymbol{B}_{\delta_k2}\boldsymbol{u}$$

其中：$\boldsymbol{A}_{\delta_k1}=\begin{bmatrix}1 & Tf\\ -TglM_{\delta_k}/J_{\delta_k} & 1-TfR/J_{\delta_k}\end{bmatrix}$

$$\boldsymbol{A}_{\delta_k2}=\begin{bmatrix}1 & Tf\\ -\beta TglM_{\delta_k}/J_{\delta_k} & 1-TfR/J_{\delta_k}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{d\delta_k1}=\boldsymbol{A}_{d\delta_k2}=\begin{bmatrix}0 & T(1-f)\\ 0 & -T(1-f)R/J_{\delta_k}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_{\delta_k1}=\boldsymbol{B}_{\delta_k2}=\begin{bmatrix}0\\ T/J_{\delta_k}\end{bmatrix}\qquad \delta_k=1,2,3$$

选择$q_1(k)\in(-\pi,\pi)$，$T=0.1$，$\beta=10^{-2}/\pi$。相应的归一化模糊加权函数定义为

$$h_1(q_1(k))=\begin{cases}\dfrac{\sin(q_1(k))-\beta q_1(k)}{(1-\beta)q_1(k)} & q_1(k)\neq 0\\ 1 & q_1(k)=0\end{cases}$$

$$h_2(q_1(k))=1-h_2(q_1(k))$$

利用 MATLAB 的 LMI 工具箱求解定理 2，可得

$$\boldsymbol{K}_1=[1.867\,6\quad -1.854\,7],\ \boldsymbol{K}_2=[1.912\,8\quad -1.800\,6]$$

在相同的攻击参数下，假设时变时延为$1\leqslant d(k)\leqslant 3$，系统初始状态为$\boldsymbol{q}(0)=\begin{bmatrix}4 & -4\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$。相应的单连杆机械臂系统状态如图 9 所示。从图 9 可以看出，当受到外部网络攻击时，实际系统依然可以在有限时间内保持稳定状态，这表明本文方法具有一定的有效性和实用性。

4 结 论

本文针对具有混合网络攻击和时变时延的 T-S 模糊 MJSs，研究了系统的非脆弱异步控制策略设

计问题。

1) 本文利用 T-S 模糊方法建立了包含混合网络攻击模式特征的 MJSs 模型, 并通过引入动态事件触发通信机制, 有效减轻了通信网络的带宽压力。

2) 本文基于 Lyapunov-Krasovskii 方法推导出系统随机稳定性的充分条件, 并借助线性矩阵不等式技术解出非脆弱异步控制器增益矩阵, 实现了 T-S 模糊 MJSs 的随机稳定控制。

3)本文方法在具有混合攻击与时变时延的复杂环境中, 能够确保 T-S 模糊 MJSs 的稳定性和安全性, 具有一定的可行性与应用价值。

参考文献（References）

[1] Xu N, Sun L K. Synchronization control of Markov jump neural networks with mixed time-varying delay and parameter uncertain based on sample point controller[J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 98(3): 1877-1890.

[2] Van Hien L, Trinh H. Observer-based control of 2-D Markov jump systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(11): 1322-1326.

[3] Xing M Q, Wang Y Q, Zhuang G M, et al. Dynamic event-based dissipative asynchronous control for T-S fuzzy singular Markov jump LPV systems against deception attacks[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 103(2): 1709-1731.

[4] El Ghaoui L, Rami M A. Robust state-feedback stabilization of jump linear systems via LMIs[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1996, 6(9-10): 1015-1022.

[5] Feng J E, Lam J, Shu Z. Stabilization of Markovian systems via probability rate synthesis and output feedback[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(3): 773-777.

[6] Shi L, Kao Y G. A fuzzy control approach to stabilization of Markovian jump systems with general unknown transition probabilities[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2016, 18(5): 1-11.

[7] Shen H, Li F, Yan H C, et al. Finite-time event-triggered H_∞ control for T-S fuzzy Markov jump systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(5): 3122-3135.

[8] Xie W Q, Nguang S K, Zhu H, et al. A novel event-triggered asynchronous H_∞ control for T-S fuzzy Markov jump systems under hidden Markov switching topologies[J]. 2022, 443(B): 258-282.

[9] Tan C, Gao C Z, Zhang Z Q, et al. Non-fragile guaranteed cost control for networked nonlinear Markov jump systems under multiple cyber-attacks[J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360(13): 9446-9467.

[10] Yan J J, Yang G H. Switching resilient control scheme for cyber-physical systems against DoS attacks[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(8): 4257-4276.

[11] Wu G P, Yang G H, Wang H M. ISS control synthesis of T-S fuzzy systems with multiple transmission channels under denial of service[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(6): 3010-3032.

[12] Zeng P Y, Deng F Q, Liu X H, et al. Event-triggered H_∞ control for network-based uncertain markov jump systems under DoS attacks [J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(6): 2895-2914.

[13] Su L, Ye D. Observer-based output feedback $H(\infty)$ control for cyber-physical systems under randomly occurring packet dropout and periodic DoS attacks[J]. ISA Transactions, 2019, 95: 58-67.

[14] Aslam M S, Tiwari P, Pandey H M, et al. Observer-based control for a new stochastic maximum power point tracking for photovoltaic systems with networked control system[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2023, 31(6): 1870-1884.

[15] Chen X L, Wang Y G, Hu S L. Event-based robust stabilization of uncertain networked control systems under quantization and denial-of-service attacks[J]. Information Sciences, 2018, 459: 369-386.

[16] Gu Z, Zhou X H, Zhang T, et al. Event-triggered filter design for nonlinear cyber-physical systems subject to deception attacks[J]. ISA Transactions, 2020, 104: 130-137.

[17] Liu J L, Yin T T, Cao J, et al. Security control for T-S fuzzy systems with adaptive event-triggered mechanism and multiple cyber-attacks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(10): 6544-6554.

[18] Han C S, Wu L G, Lam H K, et al. Nonfragile control with guaranteed cost of T-S fuzzy singular systems based on parallel distributed compensation[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(5): 1183-1196.

[19] Zheng Q X, Xu S Y, Du B Z. Asynchronous nonfragile guaranteed cost control for impulsive switched fuzzy systems with quantizations and its applications[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(10): 4471-4483.

[20] Aslam M S, Tiwari P, Pandey H M, et al. Robust stability analysis for class of Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy with stochastic process for sustainable hypersonic vehicles[J]. Information Sciences, 2023, 641: 119044.

[21] Lei Y W, Wang P Y, Ying Y M, et al. Stability and generalization for Markov chain stochastic gradient methods[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2022, 35: 37735-37748.

[22] Yin X X, Yue D, Hu S L, et al. Model-based event-triggered predictive control for networked systems with data dropout[J]. 2016, 54(2): 567-586.

[23] Wu Z G, Dong S L, Shi P, et al. Fuzzy-model-based nonfragile guaranteed cost control of nonlinear Markov jump systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(8): 2388-2397.

Nonfragile asynchronous control of fuzzy Markov jump systems under hybrid cyber-attacks

ZHU Chaoqun[1, 2, 3, *], LIU Shuhui[1]

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China;
3. National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The nonfragile asynchronous control method is proposed for Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy Markov jump systems (MJSs) with hybrid cyber-attacks and time-varying delays. Firstly, the Markov jump system model is established by utilizing the T-S fuzzy method under fuzzy rules. The hybrid cyber-attacks consisting of deception attacks and denial-of-service (DoS) attacks are considered in the communication network, and the dynamic event-triggered communication mechanism is adopted in the measurement channel to reduce unnecessary data transmission. Secondly, sufficient conditions for the stochastic stability of the closed-loop system are derived in terms of the Lyapunov-Krasovskii method and linear matrix inequality technique. The linear matrix inequality technique is used to solve the nonfragile asynchronous control gain matrices. Lastly, simulation examples verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

Keywords: T-S fuzzy Markov jump systems; denial-of-service attacks; deception attacks; dynamic event triggering; nonfragile asynchronous control

Received: 2024-05-23; **Accepted**: 2024-12-20; **Published Online**: 2025-03-05 21:30
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250304.1056.001
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62363024,62263019)
* **Corresponding author**. E-mail: chaoqunzhu@yeah.net

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0396

暴雨灾害下机场基础设施网络韧性恢复策略

黄信*，杨立志，张永康，吴箜，齐麟，陈宇
(中国民航大学 交通科学与工程学院，天津 300300)

摘 要：为提升暴雨灾害下机场基础设施网络抗灾韧性，考虑机场基础设施功能特征，建立机场基础设施网络拓扑模型，分析机场基础设施复杂网络特性；引入机场节点之间的航班数量和载客量及航线距离构建网络模型服务效率函数，通过节点失效前后网络模型服务效率变化定义机场节点的重要度指标，对网络中的关键节点进行识别；基于韧性三角形理论构建机场基础设施网络韧性恢复模型，研究暴雨灾害下关键机场节点、关键区域机场节点和多区域机场节点失效情景的机场节点恢复次序及最优策略。研究结果表明：所建模型整体结构呈现为小世界网络，表现为高集聚性；对整体网络服务效率影响较大的5个关键机场节点为广州白云机场、北京首都机场、深圳宝安机场、杭州萧山机场和上海虹桥机场；相对于基于重要度和基于节点度的恢复策略而言，基于网络韧性恢复策略的恢复效果最好，如关键节点失效场景下基于节点度和重要度恢复策略的网络韧性值分别为0.889和0.907，而基于网络韧性恢复策略的韧性值为0.915；相对于华北和西南区域机场节点而言，华东区域机场节点失效对机场基础设施网络运行效率的影响更大。

关 键 词：航空运输；机场基础设施网络；暴雨灾害；复杂网络理论；机场网络抗灾韧性；韧性恢复策略
中图分类号：U8; V351
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2339-13

机场基础设施是航空运输的主要设施载体，“十四五”民用航空发展规划指出要建设一流的基础设施体系[1]。中国暴雨等天气灾害频发，暴雨灾害会影响机场的正常运行[2]，导致机场网络效率降低甚至瘫痪。基于韧性理论研究暴雨灾害下机场基础设施网络抗灾韧性及其恢复策略，对提升中国机场网络抗灾安全具有重要意义。

目前针对交通系统网络韧性研究方面，国内外学者采用不同指标参数变化来衡量交通网络韧性[3-6]。Zhang等[4]采用网络拓扑效率指标评估了上海地铁网络韧性；Testa等[5]通过随机移除沿海交通网络节点，分析平均节点度、集聚系数和冗余性等指标的变化来评估交通网络韧性。为考虑交通系统网络的动态特性，应考虑交通系统流量等动态指标进行交通网络韧性研究，如D’Lima等[7]分析了地铁客流的时空特征，用地铁客流量恢复正常的速度作为评估地铁网络韧性的指标。Lu[8]基于网络拓扑结构和客流量指标参数量化了不同事件下轨道交通网络韧性的时变状况。John等[9]使用贝叶斯网络和模糊层次分析法构建了定量的风险评估模型量化海港系统韧性。韧性恢复优化分析是一个优化网络性能损失和恢复程度的问题[10-11]。一方面，网络在扰动后的恢复可通过优化网络结构实现恢复至原有系统性能水平或更高水平[12-13]，李林华[12]运用K-Means聚类算法对主动配电网划分恢复时段，通过添加虚拟支路，实现了主网重构与分布式电

收稿日期：2024-06-05；**录用日期**：2024-07-19；**网络出版时间**：2024-07-30 15:48
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240730.1142.001
基金项目：国家重点研发计划(2021YFB2600500)；中国民航大学科研启动基金(2020KYQD40)
* **通信作者**. E-mail：x_huang@cauc.edu.cn

引用格式：黄信，杨立志，张永康，等. 暴雨灾害下机场基础设施网络韧性恢复策略[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2339-2351. Huang X，Yang L Z，Zhang Y K，et al. Resilience recovery strategy of airport infrastructure network under rainstorm disasters[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2339-2351 (in Chinese).

源孤岛形成的全局优化。另一方面，网络的优化恢复受限于网络结构无法改变，只能通过优化恢复方案进而提高恢复效率[14-16]，黄莺等[15]采用网络平均效率为韧性指标，构建以网络韧性最大化为目标的地铁轨道交通网络恢复模型。可知，目前主要围绕地铁、电网等网络开展了韧性相关研究，而针对暴雨等灾害场景下机场基础设施网络韧性优化恢复方面尚未开展系统的研究，其抗灾韧性机理有待明确。由于机场基础设施网络节点为点对点网络运行方式，与地铁等网络存在显著差异，所以有必要研究暴雨灾害下机场基础设施网络的抗灾韧性及其恢复策略。

本文考虑机场基础设施的功能特征，建立机场基础设施网络拓扑模型，分析机场基础设施复杂网络特性，通过构建网络模型的服务效率函数和机场网络韧性恢复模型，考虑基于节点度、重要度和网络韧性 3 种恢复策略，研究暴雨灾害下关键机场节点、关键区域机场节点和多区域机场节点失效情景的机场节点恢复次序及最优策略，从而揭示暴雨灾害下机场基础设施网络的韧性恢复机理。

1 机场基础设施网络拓扑模型

为机场基础设施网络抗灾恢复研究提供网络分析模型，应建立机场基础设施网络拓扑模型，并分析其网络特征。基于中国航空交通体系规划和城市分类及城市机场间通航现状，选取了上海虹桥机场、上海浦东机场、北京首都机场、北京大兴机场、南京禄口机场、杭州萧山机场、青岛胶东机场、西安咸阳机场、郑州新郑机场、宁波栎社机场、天津滨海机场、长沙黄花机场、广州白云机场、深圳宝安机场、重庆江北机场、成都天府机场和成都双流机场作为机场基础设施网络的节点。

令 $G=(V,E)$ 表示机场基础设施网络，V 为机场节点集，$V=\{1,2,\cdots,N\}$，E 为边集，$E=\{e_{ij}/i\in V,j\in V,i\neq j\}$，$\boldsymbol{A}=[a_{ij}]_{N\times N}$ 表示邻接矩阵，机场节点 i 与机场节点 j 之间有相连的边即两机场互相通航，$a_{ij}=1$；否则 $a_{ij}=0$。基于机场基础设施网络模型节点信息和通航现状构建网络模型的邻接矩阵，将机场基础设施网络模型邻接矩阵表导入社会网络分析软件 UCINET，使用 NETDRAW 绘制出机场基础设施网络模型节点连通图，如图 1 所示，图中节点示意区域大小反映了节点度值的大小。

为揭示机场基础设施网络特征，并为机场基础设施网络关键节点识别提供分析数据，对机场基础设施网络拓扑模型进行分析，主要网络特性分析如下。

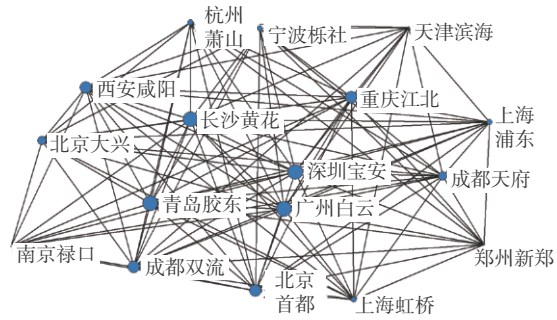


图 1 机场基础设施网络节点连通

Fig. 1 Airport infrastructure network node connectivity

1.1 度及度分布

网络中一个节点 i 所拥有的度 D_i 是该节点与其他节点相联系的边的数目[17]，如式 (1) 所示。度是描绘网络局部特征的基本参数，也是复杂网络中用于衡量节点重要性的最基础数据。根据式 (1) 计算得到机场基础设施网络模型的节点度值及中心性指标如表 1 所示。其中，相对中心度、绝对接近中心度和相对接近中心度分别为该机场节点度值与机场网络模型中能存在的最大机场节点度值的比值、该机场节点与机场网络模型中其他机场节点的航线距离之和、该机场节点的绝对接近中心度与机场网络模型中去除该机场节点后剩余机场节点数目的比值。

表 1 机场基础设施网络模型节点度值

Table 1 Degree of airport infrastructure network model nodes

名称	度值	相对中心度	绝对接近中心度	相对接近中心度
上海虹桥机场	12	0.750 0	14 850	873.529 4
上海浦东机场	12	0.750 0	15 180	892.941 1
北京首都机场	14	0.875 0	18 060	1 062.352 9
北京大兴机场	13	0.812 5	16 520	971.764 7
南京禄口机场	10	0.625 0	10 810	635.882 3
杭州萧山机场	12	0.750 0	14 540	855.294 1
青岛胶东机场	15	0.937 5	16 410	965.294 1
西安咸阳机场	14	0.875 0	15 570	915.882 3
郑州新郑机场	11	0.687 5	9 940	584.705 8
宁波栎社机场	12	0.750 0	13 360	785.882 3
天津滨海机场	11	0.687 5	13 800	811.764 7
长沙黄花机场	15	0.937 5	14 330	842.941 1
广州白云机场	15	0.937 5	21 120	1 242.352 9
深圳宝安机场	15	0.937 5	22 060	1 297.647 1
重庆江北机场	14	0.875 0	17 780	1 045.882 3
成都天府机场	13	0.812 5	19 740	1 161.176 4
成都双流机场	14	0.875 0	20 870	1 227.647 1

$$D_i = \sum a_{ij} \qquad j \in V, i \neq j \tag{1}$$

式中: i 和 j 分别为网络节点。

网络各节点的度采用可用度分布函数 $p(D)$ 描述, 此函数反映了网络系统的宏观统计特征, 整个网络的度分布情况为不同度节点的数量在网络中所占比重, 反映着节点之间联系程度。机场网络节点度值分布及度分布函数分别如图 2 和图 3 所示。

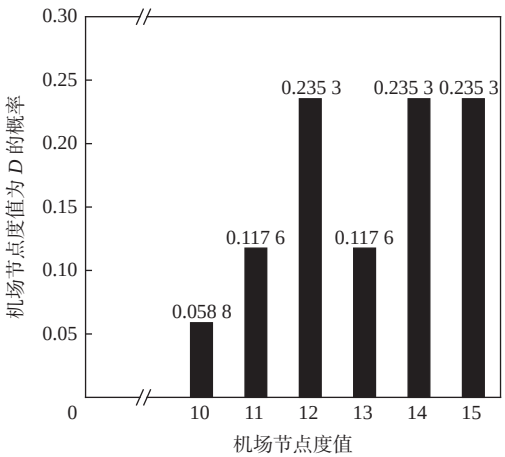


图 2　机场网络节点度值分布

Fig. 2　Distribution of airport network node degree

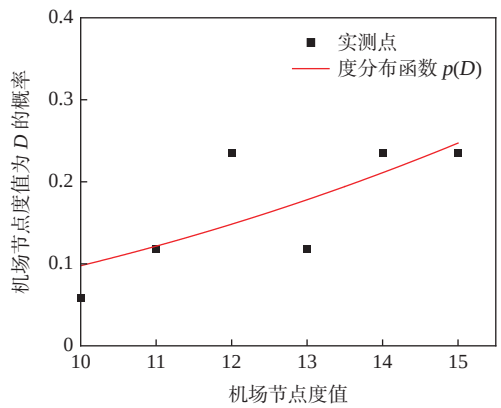


图 3　机场网络节点度分布函数

Fig. 3　Airport network nodes degree distribution function

由图 2 和图 3 可知, 机场基础设施网络模型中节点度值分布在 10～15 之间, 多为高可达性节点, 机场基础设施网络模型的节点度分布函数 $p(D) = 0.000\,5X^{2.289\,6}$, 相关系数 $R^2 = 0.558\,9$。

1.2　簇系数

簇系数是用来衡量网络节点聚类情况的参数[18]。对于某个节点 i 的簇系数可定义为与其所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例, 其簇系数 C_i 如式 (2) 所示, 机场基础设施网络模型各节点簇系数如表 2 所示。其中, 最大连边数目为机场网络模型中该机场节点与其他机场节点之间能存在的航线连边数目的最大值。

表 2　机场基础设施网络模型节点簇系数

Table 2　Cluster coefficient of airport infrastructure network model nodes

序号	名称	簇系数	最大连边数目
1	南京禄口机场	0.866 7	45
2	郑州新郑机场	0.818 2	55
3	西安咸阳机场	0.813 2	91
4	青岛胶东机场	0.809 5	105
5	长沙黄花机场	0.809 5	105
6	北京大兴机场	0.807 7	78
7	上海虹桥机场	0.803 0	66
8	上海浦东机场	0.803 0	66
9	杭州萧山机场	0.803 0	66
10	宁波栎社机场	0.803 0	66
11	北京首都机场	0.802 1	91
12	天津滨海机场	0.800 0	55
13	广州白云机场	0.771 4	105
14	深圳宝安机场	0.771 4	105
15	重庆江北机场	0.769 2	91
16	成都双流机场	0.769 2	91
17	成都天府机场	0.743 6	78

$$C_i = \frac{E_i}{k_i(k_i - 1)/2} \tag{2}$$

式中: k_i 为与节点 i 有边相连的节点数量; E_i 为节点 i 的 k_i 个邻节点集合中实际存在边的数量; C_i 值越大, 表示与该节点直接相连的其他节点之间相互联系越紧密。

网络的簇系数定义为网络中所有节点簇系数的平均值, 表达式为

$$C = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} C_i \tag{3}$$

式中: N 为网络模型中的节点数目。

由表 2 可知, 机场基础设施中机场节点的簇系数在 0.74～0.86 之间, 机场基础设施网络模型的簇系数为 0.80, 整体网络模型表现出高集聚性, 具有小世界网络特性。

1.3　连通指数

连通指数用网络中实际存在的连线数量 L_N 与网络中最多可能存在的连线总数之比[19]。本文构建的机场基础设施网络模型为有向网络, 其最多可能存在的连线数恰恰等于网络中的总对数, 故机场基础设施网络连通指数为

$$M=\frac{L_{\mathrm{N}}}{N(N-1)} \tag{4}$$

可知，本文构建的机场网络拓扑模型中实际存在的连线数量为222条，网络模型中最多可能存在的连线总数为289条，可以得到机场基础设施网络模型的连通指数为0.77。

2 机场基础设施网络韧性恢复模型

2.1 网络韧性概念

韧性表示系统经历冲击或扰动后能够恢复的能力[20-22]。韧性量化评估是针对扰动事件发生到系统性能恢复的整个过程中的系统韧性开展定量分析[23]。由于机场节点之间的通航流量和航线距离存在差异，在关键机场节点失效或关键区域机场节点失效情景下，如何确定失效机场节点的恢复时序，将对整个机场基础设施网络模型的服务效率恢复和机场基础设施网络模型的韧性评价至关重要。定义不同机场节点失效情景下机场基础设施网络服务效率变化如图4所示。

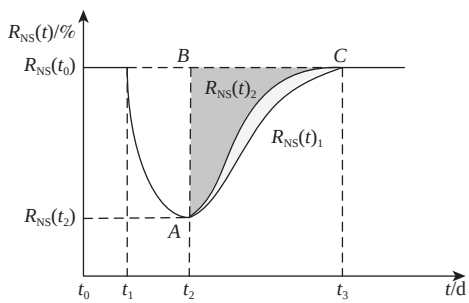


图4 机场基础设施网络服务效率恢复

Fig. 4 Recovery of airport infrastructure network service efficiency

由图4可知，t_0时刻机场网络服务效率为初始值$R_{\mathrm{NS}}(t_0)$，t_1时刻由于暴雨等天气灾害导致机场节点失效而致使机场网络服务效率下降，t_2时刻网络中多个机场节点失效致使机场网络服务效率下降到最低值$R_{\mathrm{NS}}(t_2)$，t_3时刻机场网络服务效率随着机场节点的修复恢复到初始值$R_{\mathrm{NS}}(t_0)$，$R_{\mathrm{NS}}(t)_1$、$R_{\mathrm{NS}}(t)_2$为不同恢复策略下的机场网络服务效率恢复曲线，定义点A、B、C与$R_{\mathrm{NS}}(t)_1$所围成浅色区域的面积为采用恢复策略1时整体机场网络损失性能，点A、B、C与$R_{\mathrm{NS}}(t)_2$所围成深色区域的面积为采用恢复策略2时整体机场网络损失性能。失效机场节点的恢复时间由机场等级确定，故失效机场节点间的恢复次序不影响整体机场网络的总恢复时间，但会影响机场基础设施网络服务效率恢复曲线的曲率，从而使得不同恢复策略下的机场网络性能损失不同，即得到不同的机场基础设施网络韧性值。

本文将机场基础设施网络韧性定义为失效节点恢复阶段机场基础设施网络服务效率与机场节点正常运行下机场基础设施网络服务效率的比值，即

$$\psi(f)=\int_{t_2}^{t_3}R_{\mathrm{NS}}(t|f)\mathrm{d}t/[(t_3-t_2)R_{\mathrm{NS}}(t_0)] \tag{5}$$

式中：$\psi(f)$为采用恢复策略f时机场基础设施网络韧性；$R_{\mathrm{NS}}(t|f)$为恢复策略f下t时刻归一化的机场基础设施网络服务效率；$R_{\mathrm{NS}}(t_0)$为机场基础设施网络服务效率初始值；t_2和t_3分别为恢复策略f开始时刻和完成时刻。

2.2 数学分析假设

为将机场基础设施网络恢复问题转化为数学分析模型，假设如下：

1）在机场基础设施网络中出现节点失效前机场基础设施网络服务效率维持在初始水平，干扰出现后迅速衰减至最低水平，在恢复阶段随着机场节点的恢复逐渐得到提高；

2）当机场节点失效时，机场节点的运输功能丧失，无法正常起降航班，OD（O为起点流量，D为终点流量）流量归0即与网络中其他机场节点断开连接；

3）在失效机场节点的恢复期间机场基础设施网络服务效率不发生变化，节点恢复完成机场基础设施网络服务效率提高；

4）机场节点的恢复工程为流水作业，为简化分析模型，假定待该机场节点恢复完成后，下一个机场节点开始进行恢复工程；

5）不同等级的机场节点所需要的恢复时间不同，根据枢纽机场和干线机场分别定义机场节点的恢复天数，假定枢纽机场节点功能恢复天数$t_{\mathrm{s}}=2$ d、干线机场节点功能恢复天数$t_{\mathrm{g}}=1$ d；

6）所有失效机场节点恢复完成后，机场基础设施网络服务效率能恢复到初始水平。

2.3 功能恢复约束条件

机场基础设施网络韧性恢复与机场节点受损情况、恢复持续时间及恢复资源等因素相关。为确定机场节点的合理恢复次序，提高机场网络抗灾能力，机场基础设施网络的功能恢复分析应考虑实际恢复资源的受限情况。根据失效机场节点信息及机场网络恢复过程中的实际问题，建立如下机场基础设施网络功能恢复的约束条件：

1）恢复任务执行时间约束。即恢复任务时间须在干扰发生后至网络完全恢复前执行，具体如下：

$$\text{s.t.}\quad t_2\leqslant t_i\leqslant t_3\qquad \forall i\in V \tag{6}$$

式中：t_i为开始恢复机场节点i的时刻。

2) 恢复策略 f 所用时间。其根据机场基础设施网络在不同失效情景下需要恢复的机场节点确定, 具体如下:

$$T(f)=(t_{\mathrm{s}}n_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{g}}n_{\mathrm{g}}) \tag{7}$$

式中: $T(f)$为恢复策略 f 所用总恢复时间; t_{s}和n_{s}分别为枢纽机场节点功能恢复天数和失效节点中枢纽机场节点个数; t_{g}和n_{g}分别为干线机场节点功能恢复天数和失效节点中干线机场节点个数。

3) 恢复过程中机场网络服务效率约束。受损机场节点 i 恢复完成前网络服务效率不变, 待该机场节点完全恢复之后网络性能才能得到提高, 具体如下:

$$R_{\mathrm{S}}(T_{i-1})=R_{\mathrm{S}}(t_i)<R_{\mathrm{S}}(T_i)\qquad \forall i\in V \tag{8}$$

式中: $R_{\mathrm{S}}(t_i)$为 t_i 时刻网络服务效率; T_i为机场节点 i 功能恢复持续时间。

网络服务效率能够从全局角度反映网络的连通性, 引入各机场节点间实际航线距离计算网络服务效率。随着机场节点恢复工程的进行, 机场网络中节点数量随恢复时间变化, 机场节点的 OD 流量恢复, 网络服务效率随之变化。机场网络韧性为失效节点恢复阶段机场网络服务效率与机场节点正常运行下机场网络服务效率的比值, 归一化的基础设施网络服务效率函数如式 (9) 所示, 根据不同恢复策略的网络服务效率恢复状况和对应损失的网络性能确定机场网络最优恢复策略, 定义机场基础设施网络韧性目标函数为

$$R_{\mathrm{NS}}(G)=R_{\mathrm{S}}(G)/\max_{i\neq j}R_{\mathrm{S},ij}=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}^{i,j\in V}\frac{\beta_{ij}f_{ij}}{d_{ij}}/\max_{i\neq j}R_{\mathrm{S},ij} \tag{9}$$

$$\max\psi(f)=\int_{t_2}^{t_x}R_{\mathrm{NS}}(t|f)\mathrm{d}t/(t_x-t_2)R_{\mathrm{NS}}(t_0) \tag{10}$$

式中: $R_{\mathrm{S}}(G)$为机场网络服务效率; $\max\limits_{i\neq j}R_{\mathrm{S},ij}$表示网络模型中节点对的服务效率最大值; $R_{\mathrm{NS}}(G)$为归一化的机场网络服务效率; d_{ij}为机场节点 i、j 之间的航线距离; β_{ij}和f_{ij}分别为机场节点 i、j 之间单位时间内的载客量和航班数量; t_2和t_3分别为恢复策略 f 开始和完成时刻; $\max\psi(f)$表示在恢复策略 f 下的机场网络最大韧性值。

3　节点服务效率重要度评估

为识别机场基础设施网络中的关键节点, 有必要建立机场网络节点服务效率函数, 并开展节点服务效率重要度评估。

网络拓扑效率表示为网络中所有节点对效率的平均值, 其中, 节点对效率反映从一个节点到达另一个节点的难易程度, 通常表示为节点间距离的倒数。通过航班数据平台梳理统计网络模型中各个机场节点之间多架次航班飞行距离, 取其均值作为两机场节点间的航线距离 d_{ij}。令 $R(G)$ 表示网络模型 G 的拓扑效率, 表示为

$$R(G)=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}\frac{1}{d_{ij}} \tag{11}$$

基于式 (11) 网络模型的拓扑效率函数, 引入机场节点 i、j 之间单位时间内的航班数量 f_{ij}和载客量β_{ij}, 定义节点 i、j 之间的服务效率函数, 表示为

$$R_{\mathrm{S},ij}=\omega_{ij}/d_{ij}=\beta_{ij}f_{ij}/d_{ij} \tag{12}$$

式中: ω_{ij}表示机场节点 i、j 之间单位时间内的流量数据。

将机场节点 i、j 之间的服务效率函数表示为网络模型中所有节点对服务效率的平均值, 则机场基础设施网络服务效率$R_{\mathrm{S}}(G)$表示为

$$R_{\mathrm{S}}(G)=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}\frac{\beta_{ij}f_{ij}}{d_{ij}}\qquad i,j\in V \tag{13}$$

式中: β_{ij}和f_{ij}分别为机场节点 i、j 之间单位时间内的载客量和航班数量。

为便于数据处理分析, 将机场基础设施网络服务效率$R_{\mathrm{S}}(G)$进行归一化处理, 得到归一化后的网络服务效率$R_{\mathrm{NS}}(G)$, 表示为

$$R_{\mathrm{NS}}(G)=R_{\mathrm{S}}(G)/\max_{i\neq j}R_{\mathrm{S},ij} \tag{14}$$

式中: $\max\limits_{i\neq j}R_{\mathrm{S},ij}$表示网络模型中节点对的服务效率最大值。

基于式 (14) 网络服务效率函数定义机场节点 i 的服务效率重要度指标K_i, 其反映了节点失效前后整体网络服务效率的相对变化, 表示为

$$K_i=(R_{\mathrm{NS}}(G)-R_{\mathrm{NS},i}(G))/R_{\mathrm{NS}}(G) \tag{15}$$

式中: $R_{\mathrm{NS},i}(G)$为机场节点 i 失效后网络的服务效率。

通过 OAG 平台梳理统计了 2023 年 7 月 24 日～2023 年 7 月 30 日一周的机场网络模型中机场节点间航班数据, 其中, 包括机场节点间的航班架次及载客量, 整理得到各机场节点的 OD 数据如表 3 所示, 表中 OD 数据为本文分析机场网络模型中 17 个机场节点之间的航班互通数据。

设定网络模型中的机场节点依次失效, 即该失效机场节点与网络模型中其他节点均断开, OD 数据归零处理, 计算网络模型中去除该失效机场节点后的节点对服务效率累加值和去除失效机场节点后的整体网络服务效率值, 得到每个机场节点失效前后整体网络服务效率的相对变化情况, 即机场节点服务效率重要度指标, 如表 4 所示。

表 3 机场网络节点 *OD* 数据

Table 3 Airport network nodes *OD* data

名称	代码	*O*点流量/人次	*D*点流量/人次	流量/人次
上海虹桥机场	SHA	91 812	91 596	183 408
上海浦东机场	PVG	42 226	39 481	81 707
北京首都机场	PEK	127 805	123 568	251 373
北京大兴机场	PKX	67 271	70 381	137 652
南京禄口机场	NKG	39 586	36 925	76 511
杭州萧山机场	HGH	81 077	74 682	155 759
青岛胶东机场	TAO	32 141	33 335	65 476
西安咸阳机场	XIY	52 614	52 288	104 902
郑州新郑机场	CGO	25 025	25 002	50 027
宁波栎社机场	NGB	25 268	23 178	48 446
天津滨海机场	TSN	34 663	34 155	68 818
长沙黄花机场	CSX	40 089	39 899	79 988
广州白云机场	CAN	131 702	135 657	267 359
深圳宝安机场	SZX	112 395	109 381	221 776
重庆江北机场	CKG	74 002	84 562	126 559
成都天府机场	TFU	52 557	52 226	104 783
成都双流机场	CTU	66 634	70 551	137 185

表 4 机场网络模型节点服务效率重要度

Table 4 Service efficiency importance index of airport network model nodes

失效机场	$R_{S,ij}$累加	$R_{S,i}(G)$	$R_{NS,i}(G)$	K_i
CAN	1 337 029.39	4 915.54	0.042 8	0.248 3
CGO	1 684 489.03	6 192.97	0.054 0	0.053 0
CKG	1 538 350.62	5 655.70	0.049 3	0.135 1
CSX	1 621 535.94	5 961.52	0.052 0	0.088 4
CTU	1 593 199.06	5 857.34	0.051 1	0.104 3
HGH	1 463 290.30	5 379.74	0.046 9	0.177 3
NGB	1 708 344.63	6 280.67	0.054 8	0.039 6
NKG	1 653 440.54	6 078.82	0.053 0	0.070 4
PEK	1 408 342.38	5 177.72	0.045 1	0.208 2
PKX	1 572 915.73	5 782.77	0.050 4	0.115 7
PVG	1 654 288.49	6 081.94	0.053 0	0.070 0
SHA	1 476 945.43	5 429.94	0.047 3	0.169 7
SZX	1 463 005.85	5 378.69	0.046 9	0.177 5
TAO	1 625 955.02	5 977.77	0.052 1	0.085 9
TFU	1 634 953.36	6 010.85	0.052 4	0.080 8
TSN	1 669 315.09	6 137.18	0.053 5	0.061 5
XIY	1 592 644.72	5 855.31	0.051 0	0.104 6

4 关键节点和关键区域识别

4.1 关键机场节点识别

节点服务效率重要度指标反映了单个节点失效场景下整体网络服务效率的相对变化情况，单个机场节点失效场景下的网络服务效率变化趋势如图 5 所示，机场节点的服务效率重要度指标分布状况如图 6 所示。

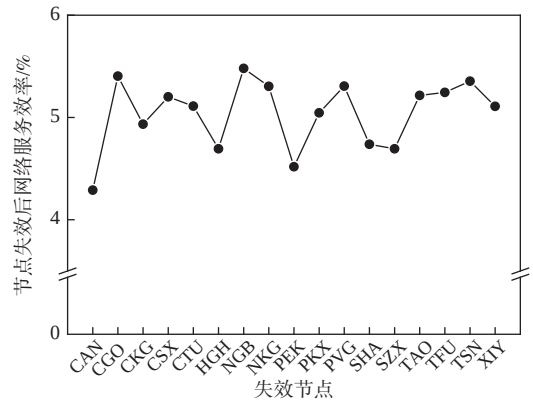


图 5 单个机场节点失效后网络服务效率变化

Fig. 5 Changes of network service efficiency after a single airport failure

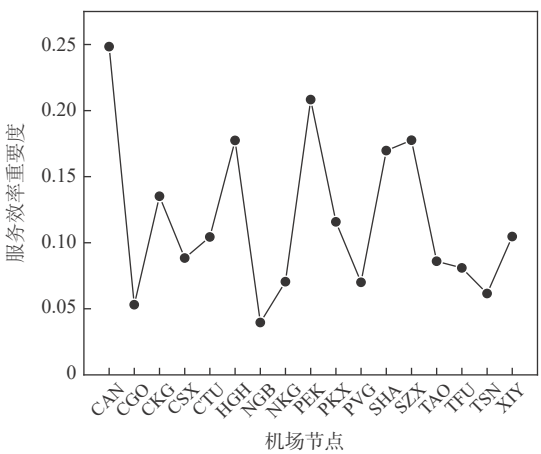


图 6 机场网络节点服务效率重要度指标

Fig. 6 Service efficiency importance index of airport network nodes

由图 5 和图 6 可知，网络模型中对整体网络服务效率影响较大的 5 个关键机场节点分别是广州白云机场(CAN)、北京首都机场(PEK)、深圳宝安机场(SZX)、杭州萧山机场(GH)和上海虹桥机场(SZX)。

基于网络模型复杂特征指标分及机场节点服务效率重要度指标，得到不同指标下的机场节点重要性排序，如表 5 所示。

由表 5 可知，点度中心性排序中，机场节点的度值越大，即机场节点与网络中的其他节点的连接边越多，排序越靠前；簇系数反映了该机场节点与邻近节点集合的集聚情况，越紧密排序越靠前；客流量排序中，机场节点的 *OD* 流量越大排序越靠前。由于各个指标的考量角度不同，得到的节点重要性排序也就有所差异，因此，在单一指标进行节点重要性排序时很可能无法得到最优值。

4.2 关键区域识别

为揭示网络中关于区域对机场韧性恢复的影响机理，有必要分析机场基础设施网络不同区域的

表 5　不同指标下的节点重要性排序表

Table 5　Airport nodes importance ranking under different indicators

排序	节点				
	点度中心性	接近中心性	簇系数	*OD*流量	服务效率重要度
1	TAO	SZX	NKG	CAN	CAN
2	CSX	CAN	CGO	PEK	PEK
3	CAN	CTU	XIY	SZX	SZX
4	SZX	TFU	TAO	SHA	HGH
5	PEK	PEK	CSX	HGH	SHA

降雨影响强度。降雨强度通常用来计量某一地区的降雨量大小, 其指单位时间内的平均雨水降落量, 降雨强度为降雨量除以降雨历时。中国采取的降雨强度判定标准如表 6 所示。

表 6　降雨强度判定标准

Table 6　Rainfall intensity determination standard

降雨等级	24 h内累计降雨量/mm
小雨	<10
中雨	10～24.9
大雨	25～49.9
暴雨	≥50
大暴雨	≥100

基于地理位置坐标对网络模型中各机场节点进行区域划分, 分为华东地区、华北地区、华中地区、华南地区、西南地区及西北地区六大区域, 整理得到各区域机场节点雨水数据如表 7 所示。

表 7　网络中各区域机场节点雨水数据

Table 7　Rainwater data of airport nodes in each region

区域划分	机场节点	节点代码	24 h最大降雨量/mm	一周降雨量/mm	区域节点总降雨量/mm
华东地区	上海虹桥机场	SHA	25.38	53.36	356.39
	上海浦东机场	PVG	26.77	66.23	
	南京禄口机场	NKG	16.24	54.35	
	杭州萧山机场	HGH	25.16	54.96	
	青岛胶东机场	TAO	17.48	37.54	
	宁波栎社机场	NGB	35.00	89.95	
华北地区	北京首都机场	PEK	78.16	125.31	372.00
	北京大兴机场	PKX	92.21	151.46	
	天津滨海机场	TSN	40.86	95.23	
华中地区	郑州新郑机场	CGO	24.15	41.27	63.35
	长沙黄花机场	CSX	11.30	22.08	
华南地区	广州白云机场	CAN	42.15	63.02	112.18
	深圳宝安机场	SZX	37.18	49.16	
西南地区	重庆江北机场	CKG	14.09	57.69	437.77
	成都天府机场	TFU	142.86	271.55	
	成都双流机场	CTU	53.63	108.53	
西北地区	西安咸阳机场	XIY	29.82	39.23	39.23

由表 7 可知, 西南地区的机场节点总降雨量在 6 个地区中排列第 1, 高达 437.77 mm。其次是华北地区和华东地区的机场节点总降雨量分别达到了 372.00 mm、356.39 mm, 可知网络模型中易受暴雨灾害袭扰的关键区域为西南地区、华北地区和华东地区。

5　机场网络韧性最优恢复策略分析

为揭示暴雨灾害下机场基础设施抗灾韧性及其恢复策略, 考虑基于节点度、重要度和网络韧性 3 种恢复策略, 分析关键节点、关键区域和多区域失效下机场基础设施的网络抗灾韧性及其恢复效果。

5.1　关键节点失效下最优恢复策略分析

由节点服务效率重要度分析得到网络模型中对整体网络服务效率影响较大的 5 个关键节点分别是广州白云机场、北京首都机场、深圳宝安机场、杭州萧山机场和上海虹桥机场。对网络中这 5 个关键节点同时作失效假设, 失效节点信息如表 8 所示。表中度值为该机场节点与其他机场节点相联系的边的数目, 流量为该机场节点的 *OD* 数据之和, 重要度指标为该机场节点服务效率重要度值。

表 8　失效关键节点信息表

Table 8　Information of failed key airport nodes

序号	机场节点	机场等级	度值	流量/人次	重要度
1	上海虹桥机场	枢纽机场	12	183 408	0.169 7
3	北京首都机场	枢纽机场	14	251 373	0.208 3
6	杭州萧山机场	干线机场	12	155 759	0.177 3
13	广州白云机场	干线机场	15	267 359	0.248 4
14	深圳宝安机场	枢纽机场	15	221 776	0.177 6

考虑上海虹桥机场等 5 个关键节点全部失效, 即机场功能损坏无法正常使用, 与其他机场节点断开联系, 基于遗传算法进行多个关键节点失效下的最优恢复策略求解, 基于网络韧性的优化求解过程如图 7 所示, 其中, 横坐标表示遗传算法的迭代次数, 纵坐标为遗传算法目标函数计算得到的整体网络韧性值。

由图 7 可知, 遗传算法在迭代 24 次后收敛至最优解, 迭代次数说明了该算法收敛较好, 适用于本文构建的机场网络拓扑模型, 机场网络最大韧性值为 0.915 3, 对应的机场节点最优恢复次序为北京首都机场、广州白云机场、深圳宝安机场、杭州萧山机场、上海虹桥机场。

考虑节点度、重要度和网络韧性 3 种恢复策略, 基于表 8 确定依据节点度、重要度优先恢复策略下的节点恢复次序, 采用遗传算法确定基于网络韧性优先恢复策略下的节点恢复次序及 3 种恢复策

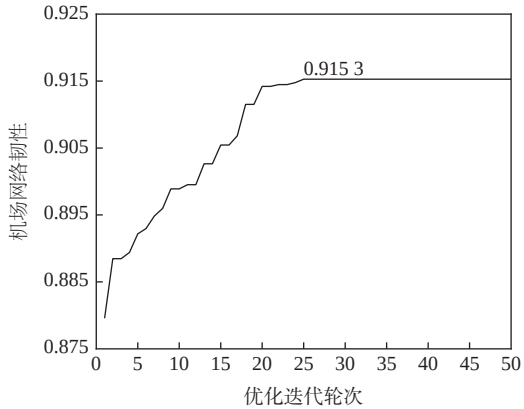


图7 关键节点失效下网络韧性最优恢复曲线

Fig. 7 Optimal recovery curve of network resilience after key airport nodes failure

略的韧性值，3种恢复策略下节点恢复次序及网络韧性值如表9所示。其中，扰动情景为关键节点蓄意失效，指对机场网络模型中的5个关键机场节点做失效假设。

表9 3种恢复策略下机场节点恢复次序表

Table 9 Airport nodes recovery sequence of three recovery strategies

恢复策略	机场节点恢复次序	韧性值
基于节点度的优先恢复	CAN→SZX→PEK→SHA→HGH	0.889
基于重要度的优先恢复	CAN→PEK→SZX→HGH→SHA	0.907
基于网络韧性的优先恢复	PEK→CAN→SZX→HGH→SHA	0.915

由表9可知，基于节点度、重要度和网络韧性恢复策略的机场节点恢复次序对应的网络韧性值分别为0.889、0.907、0.915，基于网络韧性的恢复策略下的网络韧性值相较于基于重要度的恢复策略提升了0.94%、较于基于节点度的恢复策略提升了2.91%。由此可知，基于单一指标的节点度和重要度恢复策略很可能得不到的最优机场节点恢复次序，也就无法在多个关键节点失效时做出最优恢复决策，即在多个机场节点遭到破坏时无法保证机场网络韧性最大，而基于网络韧性的恢复策略从整体网络角度出发，基于网络服务效率综合考虑机场节点的优先恢复性。

依据机场网络恢复模型假设中设定的机场等级与恢复时间关系，以及表9的机场节点恢复次序，计算得到了基于节点度、基于重要度和基于网络韧性3种恢复策略下的网络服务效率时变曲线如图8所示，不同机场节点恢复阶段的网络服务效率恢复百分比如图9所示，为更加直观表述不同恢复阶段的网络服务效率恢复百分比，采用了横轴时间是由大到小。

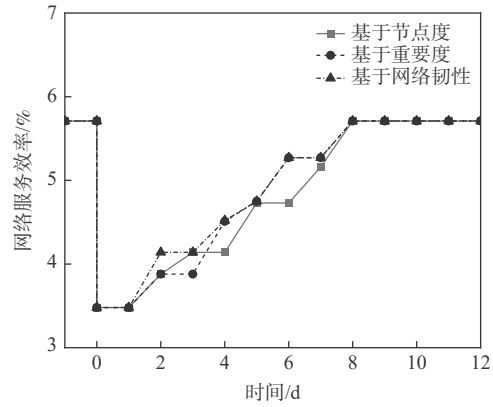


图8 关键节点失效下3种恢复策略的网络服务效率时变曲线

Fig. 8 Time-varying curves of network service efficiency of three recovery strategies after key node failure

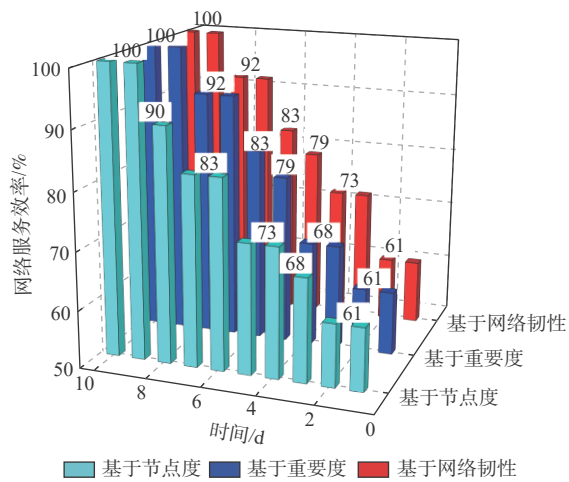


图9 关键节点失效下3种恢复策略的网络服务效率恢复百分比

Fig. 9 Recovery percentage of network service efficiency of three recovery strategies after key node failure

由图8和图9可知，当5个关键节点全部失效时，网络服务效率降为0.035，而5个关键节点均未失效时网络服务效率为0.057，说明关键节点失效后网络服务效率降低39.1%；基于节点度和基于重要度优先策略下在经历第1个恢复阶段的2天恢复时间后网络服务效率恢复至0.039，网络服务效率提升了7.0%，而基于网络韧性的恢复策略下第1个恢复阶段后网络服务效率恢复至0.042，网络服务效率提升了11.6%，相较其他2种恢复策略网络服务效率分别提升了4.6%，说明相对于基于单一指标的节点度和基于重要度的2种恢复策略而言，基于网络韧性恢复策略通过网络服务效率综合考虑机场网络整体性能，其恢复效果更好。

5.2 关键区域失效下最优恢复策略分析

为进一步分析暴雨灾害下机场基础设施网络的抗灾韧性和恢复策略，考虑机场基础设施网络中

关键区域机场节点失效场景, 对机场基础设施网络进行韧性恢复策略分析。由表 7 区域机场网络节点雨水数据表可以得知, 华东地区 6 个机场节点的 24 h 最大降雨量均在 15 mm 以上, 其中, 上海虹桥机场、上海浦东机场、杭州萧山机场及宁波栎社机场 4 个机场节点的 24 h 最大降雨量均达到 25 mm 以上, 达到大雨的降雨强度标准。在本文构建的机场基础设施网络模型中, 华东地区 6 个机场节点同时失效会对网络整体造成较大影响, 故选取华东地区作为关键区域, 进行关键区域内所有机场节点失效下的最优恢复策略求解, 失效机场节点信息如表 10 所示。

表 10　华东地区失效机场节点信息

Table 10　Information of failed airport nodes in East China

序号	机场节点	机场等级	度值	流量/人次	重要度
1	上海虹桥机场	枢纽机场	12	183 408	0.169 7
2	上海浦东机场	枢纽机场	12	81 707	0.070 0
5	南京禄口机场	干线机场	10	76 511	0.070 5
6	杭州萧山机场	干线机场	12	155 759	0.177 3
7	青岛胶东机场	干线机场	15	65 476	0.086 0
10	宁波栎社机场	干线机场	12	48 446	0.039 6

考虑华东地区 6 个机场节点全部失效, 即机场功能损坏飞机无法正常起降, 整个区域与其他区域的机场节点断开联系, 基于遗传算法进行关键区域机场节点失效下的最优恢复策略求解, 基于网络韧性优化求解过程如图 10 所示。

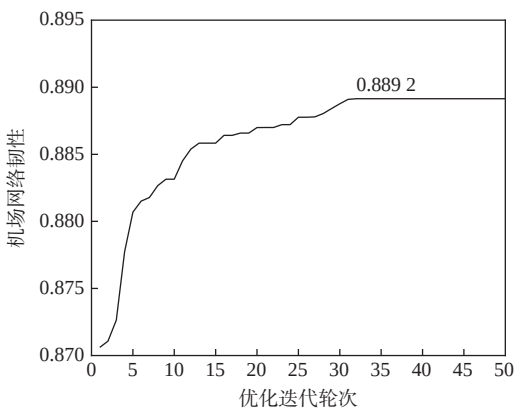


图 10　华东地区机场失效下网络韧性最优恢复曲线

Fig. 10　Optimal recovery curve of network resilience after East China airports failure

由图 10 可知, 算法在迭代 32 次后收敛至最优解, 机场网络最大韧性值为 0.889 2, 对应的机场节点最优恢复次序为上海浦东机场、杭州萧山机场、南京禄口机场、上海虹桥机场、宁波栎社机场、青岛胶东机场。

华东地区作为机场基础设施网络中的关键区域, 在暴雨灾害下进行机场基础设施网络最优恢复策略求解时, 基于表 10 确定节点度、重要度 2 种优先恢复策略下的节点恢复次序, 若基于节点度优先恢复策略中多个机场节点度值相同, 则依据 *OD* 流量大小排序; 采用遗传算法确定基于网络韧性优先恢复策略下的节点恢复次序及 3 种恢复策略的韧性值, 3 种恢复策略下节点恢复次序及网络韧性值如表 11 所示, 其中, 扰动情景为暴雨灾害下华东地区机场节点失效。

表 11　华东地区机场失效下 3 种恢复策略下机场节点恢复次序表

Table 11　Airport nodes recovery sequence of three recovery strategies after East China airports failure

恢复策略	机场节点恢复次序	韧性值
基于节点度的优先恢复	TAO→SHA→PVG→HGH→NGB→NKG	0.871
基于重要度的优先恢复	HGH→SHA→TAO→NKG→PVG→NGB	0.878
基于网络韧性的优先恢复	PVG→HGH→NKG→SHA→NGB→TAO	0.889

由表 11 可知, 暴雨灾害下华东地区机场节点失效的 3 种恢复策略, 基于节点度、重要度和网络韧性恢复策略的机场节点恢复次序对应的网络韧性值分别为 0.871、0.878、0.889, 基于网络韧性的恢复策略下的网络韧性值相较于基于重要度的恢复策略提升了 1.30%、较于基于节点度的恢复策略提升了 2.10%、较于随机的机场节点恢复次序提升了 2.13%。

依据机场网络恢复模型假设中设定的机场等级与恢复时间关系, 以及表 11 的华东区域失效机场节点恢复次序, 计算得到了基于节点度、基于重要度和基于网络韧性 3 种恢复策略下的网络服务效率时变曲线如图 11 所示, 不同恢复阶段网络服务效率恢复百分比如图 12 所示。

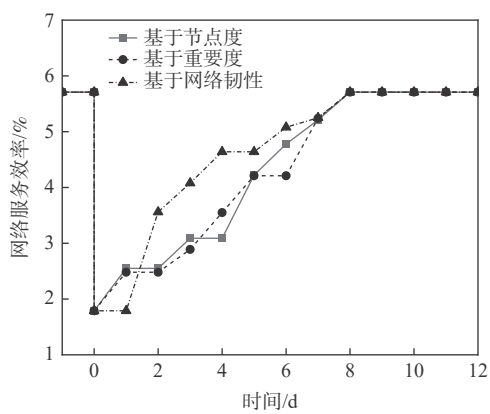


图 11　华东地区机场失效下恢复策略的效率时变曲线

Fig. 11　Time-varying curves of network service efficiency of recovery strategies after East China airports failure

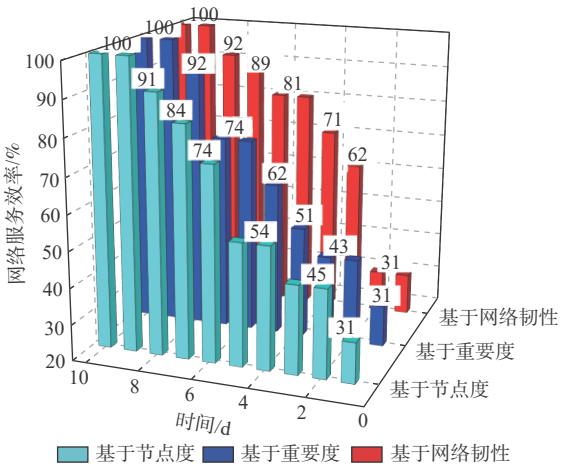


图 12 华东地区机场失效下 3 种恢复策略的网络服务效率

Fig. 12 Recovery percentage of network service efficiency in three recovery strategies after East China airports failure

由图 11 和图 12 可知，当华东地区 6 个机场节点全部失效时，网络服务效率降为 0.018，而华东地区 6 个机场节点均未失效时网络服务效率为 0.057，华东地区 6 个机场节点失效后网络服务效率降低 68.7%；基于节点度优先策略下在经历 2 个恢复阶段的 3 d 恢复时间后网络服务效率恢复至 0.031，网络服务效率提升了 22.8%，基于重要度指标优先策略下在经历 2 个恢复阶段后网络服务效率恢复至 0.029，网络服务效率提升了 19.3%，而基于网络韧性的恢复策略下在经历 2 个恢复阶段后网络服务效率恢复至 0.041，网络服务效率提升了 40.1%，较基于度优先策略网络服务效率提升 17.3%，较基于重要度指标优先策略网络服务效率提升 20.8%，上述数据说明，相对于基于节点度和基于重要度恢复策略，基于网络韧性的恢复策略的恢复效果更好。

相较于关键节点失效下的最优恢复策略分析而言，关键区域机场节点恢复得到的机场网络韧性提升效果不够显著，其原因是失效的机场节点均位于网络模型的同一区域内，恢复过程中该区域内的机场节点的恢复次序的变动对整体网络的服务效率影响有限。

5.3 多区域失效下最优恢复策略分析

为考虑机场基础设施网络中多区域机场功能失效对网络抗灾韧性的影响，进一步分析多区域失效下机场基础设施网络的韧性恢复策略。基于机场网络模型中易受暴雨灾害袭扰的关键区域识别，选取华北地区与西南地区的 6 个机场节点进行多区域失效下最优恢复策略分析。在本文构建的机场网络模型中，华北和西南地区包含 6 个机场节点，2 个地区达到暴雨的降雨强度的机场节点比例高达 66.7%，故选取华北和西南两地区进行多区域失效下的最优恢复策略求解，失效节点信息如表 12 所列。

考虑华北和西南 2 个地区的 6 个机场节点全部失效，即机场功能损坏飞机无法正常起降，2 个区域之间的机场节点互相断开联系及与其他区域的机场节点均断开联系，基于遗传算法进行多区域机场节点失效下的最优恢复策略求解，基于网络韧性优化过程如图 13 所示。

表 12 华北地区和西南地区失效节点信息

Table 12 Information of failed airport nodes in North China and Southwest China

序号	机场节点	机场等级	度值	流量/人次	重要度
3	北京首都机场	枢纽机场	14	251 373	0.208 3
4	北京大兴机场	枢纽机场	13	137 652	0.115 8
11	天津滨海机场	枢纽机场	11	68 818	0.061 6
15	重庆江北机场	枢纽机场	14	126 559	0.135 2
16	成都天府机场	枢纽机场	13	104 783	0.080 9
17	成都双流机场	枢纽机场	14	137 185	0.104 4

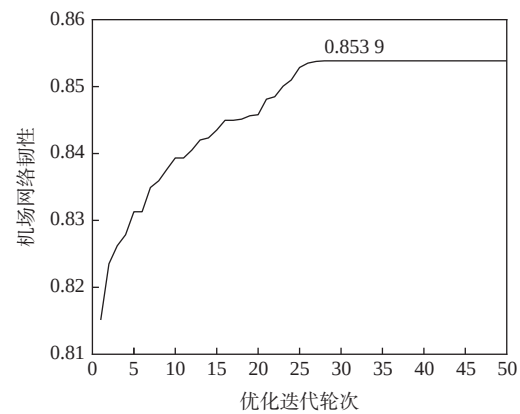


图 13 华北西南地区机场失效下网络韧性最优恢复曲线

Fig. 13 Optimal recovery curve of network resilience after North China and Southwest China airport failure

由图 13 可知，算法在运行 28 次后收敛至最优解，机场网络最大韧性值为 0.853 9，对应的机场节点最优恢复次序为北京首都机场、重庆江北机场、成都双流机场、成都天府机场、天津滨海机场、北京大兴机场。

华北和西南 2 个地区在暴雨灾害影响下进行多区域失效下最优恢复策略求解时，基于表 12 确定节点度、重要度优先恢复策略下的节点恢复次序，若基于节点度优先恢复策略中多个机场节点度值相同，则依据 *OD* 流量大小排序；采用遗传算法确定基于网络韧性优先恢复策略下的节点恢复次序及 3 种恢复策略的韧性值，3 种恢复策略下节点恢复次序及网络韧性值如表 13 所示，其中，扰动情景为暴雨灾害下华北地区和西南地区机场节点失效。

表 13　多区域机场失效下 3 种恢复策略下机场节点恢复次序表

Table 13　Airport nodes recovery sequence of three recovery strategies after multi-area airports failure

恢复策略	机场节点恢复次序	韧性值
基于节点度的优先恢复	PEK→CKG→CTU→PKX→TFU→TSN	0.838
基于重要度的优先恢复	PEK→CKG→PKX→CTU→TFU→TSN	0.831
基于网络韧性的优先恢复	PEK→CKG→CTU→TFU→TSN→PKX	0.854

由表 13 可知, 暴雨灾害下华北和西南地区两区域机场节点失效的 3 种恢复策略, 基于节点度、重要度和网络韧性恢复策略的机场节点恢复次序对应的网络韧性值分别为 0.838、0.831、0.854, 基于网络韧性的恢复策略下的网络韧性值相较于基于重要度的恢复策略提升了 2.71%、较于基于节点度的恢复策略提升了 1.92%、较于随机的机场节点恢复次序提升了 4.75%。

同时可知, 华北和西南 2 个地区在暴雨灾害影响下进行多区域失效下最优恢复策略求解相较于华东地区单个关键区域失效下的最优恢复策略求解, 失效机场节点数目相同但华北和西南 2 个区域失效下的最优恢复策略求解所得到的机场网络韧性提升效果较显著, 这是由于失效机场节点位于网络模型的多个区域内, 在恢复过程中 2 个区域内的机场节点的恢复的先后次序的变动会对整体网络的服务效率造成较大影响。

依据机场网络恢复模型假设中设定的机场等级与恢复时间关系, 以及如表 13 所示的华北和西南区域失效机场节点恢复次序, 计算得到基于节点度、基于重要度和基于网络韧性 3 种恢复策略下的网络服务效率时变曲线如图 14 所示, 不同恢复阶段网络服务效率恢复百分比如图 15 所示。

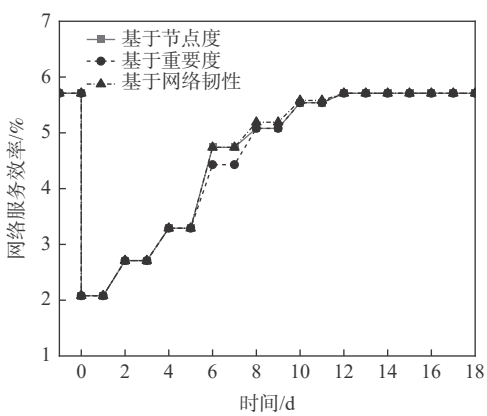


图 14　多区域机场失效下 3 种恢复策略的效率时变曲线

Fig. 14　Time-varying curves of network service efficiency of three recovery strategies after multi-area airport failure

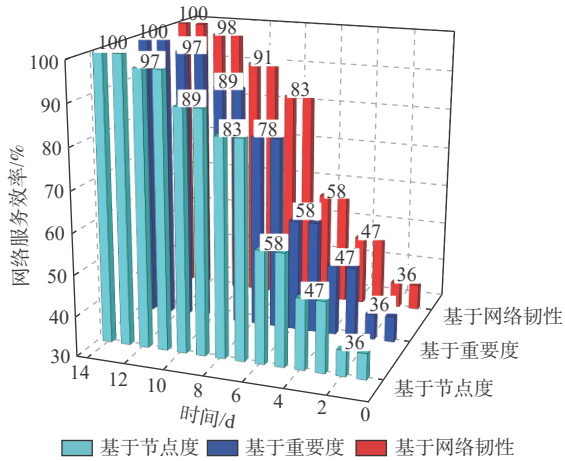


图 15　多区域机场失效下 3 种恢复策略的网络服务效率恢复百分比

Fig. 15　Recovery percentage of network service efficiency in three recovery strategies after multi-area airport failure

由图 14 和图 15 可知, 当华北和西南 2 个地区 6 个机场节点全部失效时, 网络服务效率降为 2.1%, 而华北和西南 2 个地区 6 个机场节点均未失效时网络服务效率为 5.7%, 说明华北和西南 2 个地区 6 个机场节点失效后网络服务效率降低 63.6%; 基于节点度、重要度优先策略在经历 4 个恢复阶段的 8 d 恢复时间后网络服务效率恢复至 5.1%, 网络服务效率提升了 52.5%, 而基于网络韧性的恢复策略下在经历 2 个恢复阶段后网络服务效率恢复至 5.2%, 网络服务效率提升了 54.5%, 较其他 2 种恢复策略网络服务效率提升 2.0%, 由此可见, 相对基于节点度和基于重要度恢复策略而言, 基于网络韧性的恢复策略的恢复效果更好。

同时可知, 相较于关键节点失效和关键区域机场节点失效下的最优恢复策略分析而言, 考虑多区域机场节点失效时 3 种恢复策略下的网络服务效率恢复速率相差不大, 基于节点度、重要度及网络韧性的恢复策略在经历 4 个恢复阶段后网络服务效率分别恢复至 5.1%、5.1% 和 5.2%, 基于网络韧性的恢复策略比基于节点度和基于重要度的恢复策略略高, 其原因是 3 种恢复策略的机场节点恢复次序前部分高度重合, 优先恢复的机场节点相同。

相较于华东区域的机场节点, 华北和西南区域的 6 个机场节点更易遭受暴雨灾害袭扰, 但由于华北和西南区域的机场节点集中于 4 个主要城市, 没有机场网络模型中的华东区域机场节点城市分布范围广, 因此, 华东区域机场节点相较于华北和西南区域机场节点对机场网络模型运行效率的影响更大。

6　结　论

本文考虑机场基础设施的功能特征, 建立了机

场网络拓扑模型并进行复杂网络特性分析，通过构建网络模型的服务效率函数和机场网络韧性恢复模型，研究关键节点、关键区域机场节点和多区域机场节点失效情景下的机场节点恢复次序及最优策略，得出主要结论如下：

1）机场基础设施网络系统的簇系数为0.80、连通指数为0.77，可知其整体结构呈现为小世界网络，表现为高集聚性。

2）机场基础设施网络模型中对整体网络服务效率影响较大的5个关键机场节点为广州白云机场、北京首都机场、深圳宝安机场、杭州萧山机场和上海虹桥机场。机场基础设施网络模型中易受暴雨灾害袭扰的关键区域为西南地区、华北地区及华东地区，其中，西南地区3个机场节点的周降雨量高达437.77 mm。

3）相对于基于重要度和基于节点度的恢复策略而言，基于网络韧性恢复策略的恢复效果最好，如关键节点失效场景下基于节点度和重要度恢复策略的网络韧性值为0.889和0.907，而基于网络韧性恢复策略的韧性值为0.915，其服务效率较基于节点度和重要度恢复策略而言提升4.6%，所以应根据网络韧性确定网络中机场节点的恢复次序。

4）相对于华北和西南区域机场节点而言，华东区域机场节点对机场网络模型运行效率的影响更大，在暴雨灾害下华东区域6个机场节点失效以及华北和西南两区域6个机场节点失效时，整体网络服务效率分别降低了68.7%和63.6%。

参考文献（References）

[1] 中国民用航空局. “十四五”民用航空发展规划[EB/OL]. (2022-01-07)[2023-03-24]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202201/t20220107_210798.html.
Civil Aviation Administration of China. The 14th Five Year Plan for the development of civil aviation[EB/OL]. (2022-01-07) [2023-03-24]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202201/t20220107_210798.html(in Chinese).

[2] 王兴隆, 赵俊妮, 王进. 恶劣天气下机场离场航班运行韧性评估及恢复[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 110-121.
Wang X L, Zhao J N, Wang J. Resilience assessment and recovery of airport departure flights under severe weather[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 110-121(in Chinese).

[3] Dunn S, Wilkinson S M. Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 90: 39-50.

[4] Zhang D M, Du F, Huang H W, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example[J]. Safety Science, 2018, 106: 230-243.

[5] Testa A C, Furtado M N, Alipour A. Resilience of coastal transportation networks faced with extreme climatic events[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2532(1): 29-36.

[6] 黄信, 谭成松, 吴堃, 等. 暴雪灾害下机场基础设施韧性研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 198-205.
Huang X, Tan C S, Wu K, et al. Study on resilience of airport infrastructure under blizzard weather[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 198-205(in Chinese).

[7] D’lima M, Medda F. A new measure of resilience: an application to the London Underground[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 81: 35-46.

[8] Lu Q C. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 117: 227-237.

[9] John A, Yang Z L, Riahi R, et al. A risk assessment approach to improve the resilience of a seaport system using Bayesian networks[J]. Ocean Engineering, 2016, 111: 136-147.

[10] Ayyub B M. Practical resilience metrics for planning, design, and decision making[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2015, 1(3): 04015008.

[11] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.

[12] 李林华. 计及负荷特性的主动配电网分时段故障恢复优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Li L H. Study on time division service restoration optimization of active distribution network considering load characteristics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019(in Chinese).

[13] 张冬梅, 孙士尉, 刘昕彤, 等. 遗传算法的舰船电力系统供电恢复研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(6): 73-75.
Zhang D M, Sun S W, Liu X T, et al. Research on power supply recovery of ship power system based on genetic algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(6): 73-75(in Chinese).

[14] 吕彪, 管心怡, 高自强. 地铁网络服务韧性评估与最优恢复策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 198-205.
Lyu B, Guan X Y, Gao Z Q. Evaluation and optimal recovery strategy of metro network service resilience[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 198-205(in Chinese).

[15] 黄莺, 刘梦茹, 魏晋果, 等. 基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 32-36.
Huang Y, Liu M R, Wei J G, et al. Research on urban metro network recovery strategy based on resilience curve[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 32-36(in Chinese).

[16] 张洁斐, 任刚, 马景峰, 等. 基于韧性评估的地铁网络修复时序决策方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(4): 14-20.
Zhang J F, Ren G, Ma J F, et al. Decision-making method of repair sequence for metro network based on resilience evaluation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(4): 14-20(in Chinese).

[17] Yang Z J, Chen X L. Evolution assessment of Shanghai urban rail transit network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applica-

tions, 2018, 503: 1263-1274.

[18] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.

[19] Cats O. Topological evolution of a metropolitan rail transport network: The case of Stockholm[J]. Journal of Transport Geography, 2017, 62(1): 172-183.

[20] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.

[21] Rose A. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions[J]. Environmental Hazards, 2007, 7(4): 383-398.

[22] Hosseini S, Barker K, Ramirez-marquez J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 145(3): 47-61.

[23] 毕玮. 城市地铁车站系统抗火韧性识别与度量研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
Bi W. Resilience identification and assessment of urban subway station system to fire disaster[D]. Nanjing: Southeast University, 2020 (in Chinese).

Resilience recovery strategy of airport infrastructure network under rainstorm disasters

HUANG Xin*, YANG Lizhi, ZHANG Yongkang, WU Kun, QI Lin, CHEN Yu

(School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To improve the resilience of the airport infrastructure network under rainstorm disaster, the airport infrastructure network topology model is established by considering the functional characteristics of airport infrastructure, and the complex network characteristics of airport infrastructure are analyzed. The service efficiency function of the airport network model is constructed by introducing the number of flights, passenger capacity and route distance between the airport nodes. The relevance index of the airport nodes is determined by comparing the network model service effectiveness before and after the airport node failure in order to identify the important airport nodes in the network. The resilience triangle theory serves as the foundation for the resilience recovery model of the airport infrastructure network, which is designed to investigate the best practices and recovery order for airport nodes in the event of failure for major airport nodes, major regional airport nodes, and multi-regional airport nodes during rainstorm disasters. The results show that the established model is presented as a small-world network, which is characterized by high agglomeration. The five key airport nodes that have a greater impact on the network service efficiency are Guangzhou Baiyun Airport, Beijing Capital Airport, Shenzhen Baoan Airport, Hangzhou Xiaoshan Airport and Shanghai Hongqiao Airport. Compared with the recovery strategy based on importance degree and node degree, the recovery strategy based on network resilience has the best recovery effect, such as the network resilience value based on node degree and importance degree under the key airport nodes failure is 0.889, 0.907, while the resilience value based on the network resilience recovery strategy is 0.915. Compared with the airport nodes in North China and Southwest China, the failure of the airport nodes in East China has a greater impact on the operation efficiency of airport infrastructure network.

Keywords: air transport; airport infrastructure networks; rainstorm disaster; complex network theory; airport network resilience to disasters; resilience recovery strategy

Received: 2024-06-05; **Accepted**: 2024-07-19; **Published Online**: 2024-07-30 15:48

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240730.1142.001

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2021YFB2600500); Research Initiation Fund of Civil Aviation University of China (2020KYQD40)

* **Corresponding author**. E-mail: x_huang@cauc.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0397

大功率双储液器环路热管运行特性的实验研究

秦海洋[1]，付静伟[2]，张如意[1]，王荔[1]，柏立战[3,*]

(1. 新乡航空工业（集团）有限公司，新乡 453003；2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所，成都 610036；
3. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：先进战斗机机载电子设备向着高功率、高集成度及微型化方向发展，发热量和热流密度持续增大，对机载高效热管理提出严峻挑战。基于此，设计开发一种大功率双储液器环路热管（LHP），以氨作为工质，传输距离为2.30 m，并对其开展全面系统的实验研究，重点考察其启动特性、传热能力及热阻变化。实验结果表明：该双储液器环路热管能够在蒸发器处于不同姿态（水平姿态、有利姿态和不利姿态）下成功启动并平稳运行，达到热载荷为900 W以上的传热能力。该双储液器环路热管系统热阻随蒸发器热载荷的增大先快速减小后逐渐增大，系统热阻最小值约为0.063 ℃/W。研究结果为未来机载高效热管理提供了一种新型技术手段和可行的解决方案。

关 键 词：环路热管；机载热管理；启动；传热能力；热阻
中图分类号：TB657.5; V228.3
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2352-07

先进战斗机机载电子设备向着高功率、高集成度及微型化和模块化方向发展，导致电子设备的发热量和热流密度持续增大，机载热管理问题日益凸显。同时，一些机载电子设备对控温精度和温度均匀性要求严格。而在空间布局上，随着监测、侦查、预警、信息传输及作战等任务种类的不断增多，各类大功率传感器和功率器件在机身呈现出分散分布的特点。以上新要求对机载高效热管理提出严峻挑战[1]。目前，飞机热管理普遍采用风冷及单相液冷技术，存在热流密度低、控温均匀性差、功耗需求高、运行维护要求高、体积/质量大等诸多缺点和不足，严重制约先进机载系统的发展，亟待开发新型高效的机载热管理技术，特别是应用相变传热技术的两相流体回路系统[2]。

环路热管（loop heat pipe, LHP）作为一种先进的两相传热器件，是目前航天器热控制领域最前沿的热控技术之一，被国际航天界确定为未来航天器热控系统的核心部件。LHP具有高传热性能、远距离热传输、抗重力/过载能力强、工作寿命长及良好的控温性能等突出优点[3-4]。其能够通过柔韧的管线将热源的热量快速传输至特定热沉中，实现对狭小空间内发热设备的有效热收集、高效热传输和快速热排散。LHP内部工质的循环依靠蒸发器毛细芯产生的毛细压力驱动，无需外加动力，因而能够有效避免机械运动部件引起的磨损及振动等固有问题。目前，LHP已成功应用于国内外多种航天器的热控系统，取得了良好的控温效果[5-7]。

随着LHP技术日益发展成熟，其应用领域逐渐向航空热管理拓展。为满足航空热管理对变姿态运行的要求，设计开发了双储液器环路热管（dual compensation chamber loop heat pipe，DCCLHP）。作为一种改进型LHP，DCCLHP在传统LHP只在蒸发器一端设置储液器的基础上，在另一端也增加了一个储液器，能够确保重力场中任意姿态储液器对

收稿日期：2024-06-05；**录用日期**：2024-09-27；**网络出版时间**：2024-10-08 15:10
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241008.1114.002
基金项目：国家自然科学基金 (51776012)
*通信作者. E-mail：bailizhan@buaa.edu.cn

引用格式：秦海洋，付静伟，张如意，等. 大功率双储液器环路热管运行特性的实验研究[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2352-2358.
Qin H Y，Fu J W，Zhang R Y，et al. Experimental study on operating characteristics of a high capacity dual compensation chamber loop heat pipe[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2352-2358 （in Chinese）.

蒸发器毛细芯的有效供液。这样能够保证 LHP 在任意姿态实现成功启动和高效运行, 有效解决了 LHP 在航空领域及地面环境的变姿态适用性问题。DCCLHP 运行时, 蒸发器吸收热量, 液体工质在其内部毛细芯外表面蒸气槽道内蒸发, 产生的蒸气沿着蒸气管线进入冷凝器冷凝为液体, 之后沿着液体管线流回蒸发器。整个过程的动力来源为毛细芯产生的毛细抽吸力。

目前, 国内外学者对 DCCLHP 的启动和运行特性开展了相关的实验研究。例如, 俄罗斯国家科学院热物理研究所(Institute of Thermal Physics, ITP)曾为美国空军实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)设计研制了一套 DCCLHP, 并针对 3 种典型姿态的运行特性进行实验研究, 发现了 DCCLHP 启动过程的温度波动及工质倒流等现象[8]。Lin 等[9]、Feng 等[10] 对 DCCLHP 的运行不稳定现象进行实验研究, 对其进行了特定姿态下的启动和稳态运行特性的测试, 观察到了 DCCLHP 运行过程中的温度迟滞现象。谢永奇等[11] 在重力场与加速度场交替变化下, 对 DCCLHP 进行稳态运行实验研究。柏立战等[12-15] 对 DCCLHP 开展实验研究, 考察了工质充装量不足条件下 DCCLHP 的启动特性及结构改进对 DCCLHP 运行性能的影响等。

以上研究验证了 DCCLHP 在重力场中运行对蒸发器处于不同姿态的适应性。然而, 目前研究的 DCCLHP 传热极限通常较小, 一般不超过 500 W; 而对于机载热管理系统, 发热量通常达千瓦级甚至数千瓦, 因而需要大幅提高 DCCLHP 的传热极限。针对上述要求, 本文设计研制了一套大功率 DCCLHP, 传输距离达 2.30 m, 并对其启动和运行特性开展全面系统的实验研究, 获得了一些重要结论。本文的实验结果能够为 DCCLHP 在机载热管理系统中的应用提供设计参考、技术储备与数据支撑。

1　实验系统

1.1　实验件

图 1 为本文设计研制的 DCCLHP 的结构示意图。该 DCCLHP 由蒸发器、2 个储液器、冷凝器、蒸汽管线和液体管线构成。毛细芯由镍粉烧结成型, 最大毛细力超过 80 kPa。其余部件材料均为 316L 不锈钢。DCCLHP 实物如图 2 所示。为加强液冷冷凝器内部的热交换, 对冷凝管线和冷水管线进行了优化设计, 冷凝器采用 6 条管路并联, 多次弯折的冷却水通道为冷凝管线提供充分冷却, 如图 3 所示。由于氨在常温范围内具有优异的综合热物理性能, 选用氨作为工质。表 1 为该 DCCLHP 的主要结构参数。

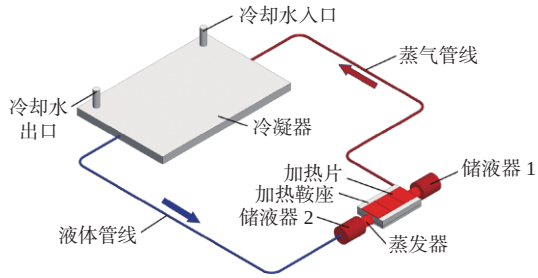


图 1　DCCLHP 结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of DCCLHP

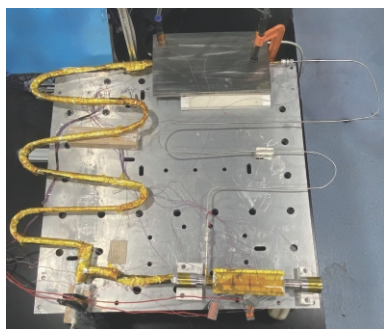
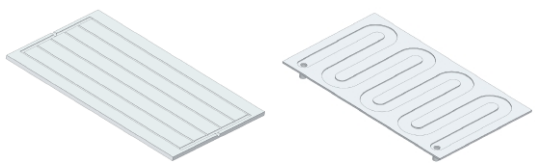


图 2　DCCLHP 实物

Fig. 2　Physical of DCCLHP



(a) 冷凝管线　　(b) 冷却水管线

图 3　液冷冷凝器示意图

Fig. 3　Schematic diagram of liquid cooled condenser

表 1　DCCLHP 的结构参数

Table 1　Structure parameters of DCCLHP

参数	数值
蒸发器外径, 内径, 长度/mm	25, 23, 190
储液器外径, 内径, 长度/mm	40, 38, 45
毛细芯常温毛细压力/kPa	>70
毛细芯外径, 内径, 长度/mm	23, 12, 170
毛细芯最大毛细半径/μm	0.55
毛细芯孔隙率/%	55
毛细芯渗透率/m^2	2×10^{-14}
蒸汽管线外径, 内径, 长度/mm	4, 3, 2 300
冷凝管线截面长度, 宽度, 流道长度/mm	3, 1, 300
液体管线外径, 内径, 长度/mm	3, 2, 2 400
工质充装量/g	75

1.2　实验装置

图 4 为本文采用的实验系统示意图。实验系统主要由 DCCLHP 实验件、热源系统、冷却水循环系统、温度测量与数据采集系统及方位调节机构等

组成。实验重点考察了该 DCCLHP 在如图 5 所示的 3 种蒸发器姿态下的启动和运行特性。图 5 中，θ 为蒸发器轴线与水平面之间的夹角，并约定液体引管穿过的储液器向上倾斜为正。如图 5 中①所示，无液体引管穿过的储液器位于蒸发器上方，不利于回流过冷液体对上方储液器的冷却，即蒸发器处于不利姿态。然而由于该姿态下冷凝器出口位于入口下方，冷凝后的液体工质更容易流出冷凝器，因此，对于冷凝器来说该姿态是有利姿态；相反，如图 5 中③所示，蒸发器则处于有利姿态，而此时冷凝器出口高于入口，液体工质流出冷凝器时需要克服重力的影响，因此，该姿态对于冷凝器来说是不利姿态。冷凝器的姿态倾斜还会影响其冷凝管线两相换热区的流型和液膜厚度，后续在分析姿态对实验结果的影响时，需要综合考虑姿态对蒸发器和冷凝器的不同影响。

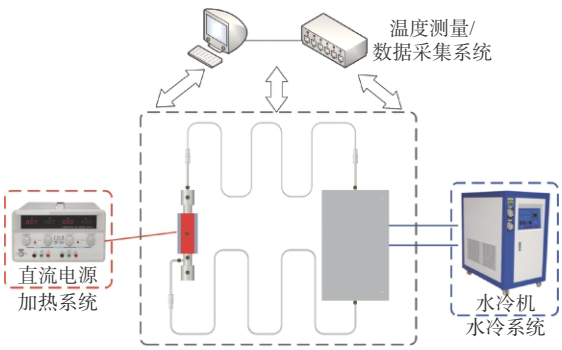


图 4 实验系统及测温点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system and temperature measurement points layout

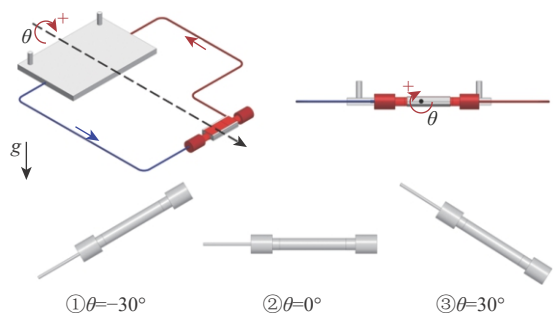


图 5 DCCLHP 蒸发器 3 种典型姿态

Fig. 5 Three typical orientations of DCCLHP evaporator

2 实验结果与分析

2.1 启动特性

启动性能是评价 DCCLHP 运行性能的一个重要指标，这是因为成功启动是 DCCLHP 实现工程应用的先决条件。本节介绍该 DCCLHP 在不同热载荷及蒸发器姿态下的启动过程。

2.1.1 热载荷为 10 W 和 20 W

蒸发器处于水平姿态，对蒸发器分别施加 10 W 和 20 W 热载荷情况下的启动过程如图 6 和图 7 所示。实验结果表明，本文设计的 DCCLHP 在 10 W 和 20 W 的较小热载荷下能够非常平稳地完成启动过程，表现出良好的小载荷启动特性。冷凝器入口温度均快速升高至接近蒸发器温度，表明蒸发器内产生的蒸汽进入了冷凝器，将热源热量高效传输至冷凝器并排散给热沉。特别是在热载荷为 20 W 的情况下，水冷机冷却水的温度设定为 20 ℃。对蒸发器持续加热 4 h，DCCLHP 能够保持稳定运行。

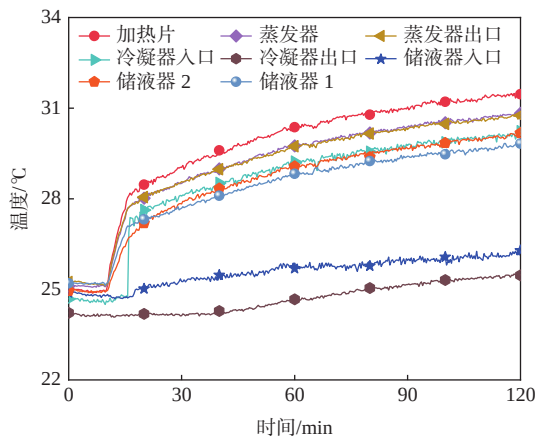


图 6 热载荷为 10 W 启动过程

Fig. 6 Startup process at heat load of 10 W

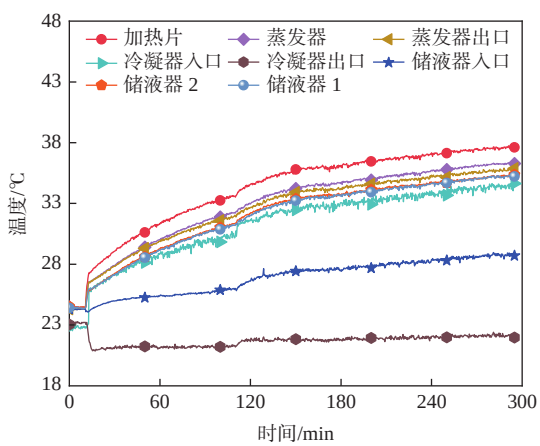


图 7 热载荷为 20 W 启动过程

Fig. 7 Startup process at heat load of 20 W

在这种小热载荷情况下，回流液体过冷量虽然很小，但足够冷却蒸发器向 2 个储液器的漏热，使得 DCCLHP 平衡在较低的运行温度。

2.1.2 热载荷为 150 W 和 200 W

蒸发器处于不利姿态 θ 为−30°，对蒸发器施加 150 W 热载荷情况下的启动过程如图 8 所示。相比低热载荷下的启动，此时 DCCLHP 系统各个部件的温度响应迅速，最终蒸发器的稳态运行温度为 51 ℃。

蒸发器处于有利姿态 θ 为 30°，对蒸发器施加 250 W 热载荷情况下的启动过程如图 9 所示。随着

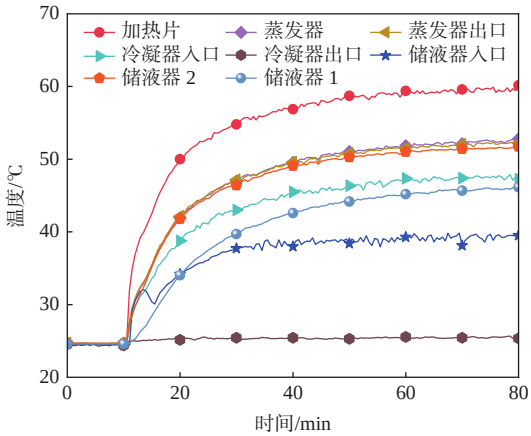


图 8　蒸发器不利姿态下, 热载荷为 150 W 启动过程

Fig. 8　Startup process at heat load of 150 W with evaporator at unfavorable attitude

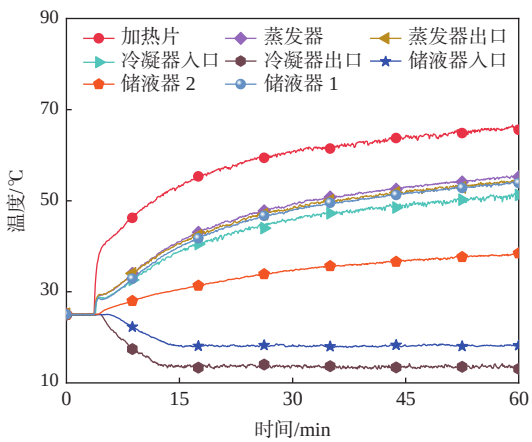


图 9　蒸发器有利姿态下, 热载荷为 250 W 启动过程

Fig. 9　Startup process at heat load of 250 W with evaporator at favorable attitude

启动热载荷的进一步提升, 蒸发器的稳态运行温度进一步升高, 约为 55 ℃。此时环路内部工质的流速和流量增大, 储液器入口温度明显下降。

2.2　传热性能

传热极限表征一定传输距离下 DCCLHP 蒸发器能够承受的最大热载荷。传热极限与多种因素有关, 比如蒸发器毛细芯的孔径大小、工质种类、毛细芯的厚度、工质充装量、热沉温度、安装位置及管线压降等。评价 DCCLHP 的传热性能, 传热极限是一个非常重要的指标。而在测试 DCCLHP 传热极限的过程中, 可以同时获得 DCCLHP 的稳态温度特性。在低功率启动条件下, 系统产生的蒸气量较少, 冷凝器内有效冷却面积相对较小, 蒸气冷凝在靠近冷凝器入口处即可完成, 此时冷凝器的利用率远未达到 100%。通常将该功率范围的 LHP 工作区称为“可变导热区”。LHP 的工作模式为可变热导模式, 这一区域 LHP 系统运行温度随着功率增加而变化不大甚至降低。随着功率的提升, 蒸发器中工质相变产生的蒸气量增多, 冷凝区域会占据整个冷凝管线, 环路热管会进入“固定导热区”, 此时环路热管的热阻趋于稳定, 系统的整体运行温度也会随着热载荷的增大而升高。

2.2.1　蒸发器水平姿态

为测试本文 DCCLHP 的传热极限, 对其进行功率递增测试。实验过程中, 对蒸发器按照 300 W-500 W-700 W-880 W-900 W 的规律依次施加热载荷, 如图 10 所示。实验中水冷机冷却水温度设置为 10 ℃。

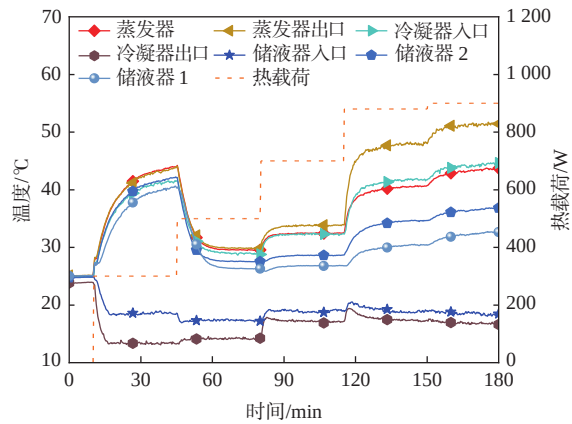


图 10　水平姿态功率递增实验

Fig. 10　Power increase experiment under horizontal attitude

在传热极限测试过程中, 当输入热载荷从 300 W 增加至 500 W 时, DCCLHP 蒸发器温度反而下降, 冷凝器出口温度略有上升, 这表明冷凝器利用率提高, 此时系统运行处于可变热导模式。当施加热载荷按照每次增加 200 W 的规律逐步增加到 900 W 时, DCCLHP 仍然能够平稳运行, 表现出良好的温度稳定性。此时蒸发器壁面的温度为 48 ℃ 左右。

2.2.2　蒸发器不利姿态

图 11 为蒸发器不利姿态 θ 为−30°下的功率递增实验结果。从图 11 可以得出, 在整个运行过程中储液器 1 的温度始终明显高于储液器 2 的温度, 这主要是由于当蒸发器处于不利姿态, 储液器 1 高于储液器 2, 蒸发器向储液器的漏热量主要以气泡的形式向上运动进入储液器 1。在不利姿态 θ 为−30°情况下, DCCLHP 系统在热载荷由 700 W 增加至 900 W 的过程中, 冷凝器出口的温度没有下降, 并且最终稳定运行时蒸发器的温度低于水平姿态之值。

2.2.3　蒸发器有利姿态

图 12 为蒸发器有利姿态 θ 为 30°下的功率递增实验结果。由于冷凝器处于出口高于入口的不利姿态, DCCLHP 温度变化特点与前 2 种姿态明显不同。在施加 500W 的热载荷后, 蒸发器温度没有下

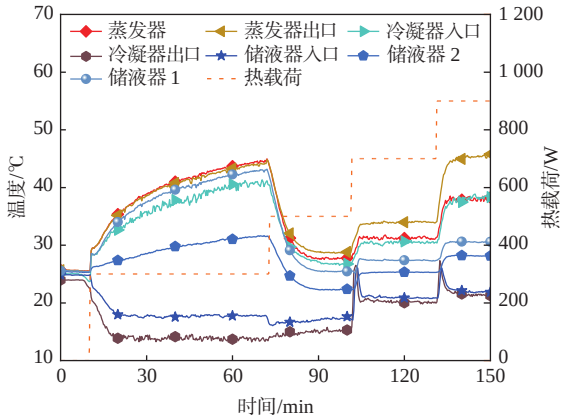


图 11 蒸发器不利姿态 θ 为−30°下功率递增实验

Fig. 11 Power increase experiment under unfavorable evaporator attitude at θ of −30°

降而是有所升高。当热载荷为 627 W, DCCLHP 能够保持稳定运行。当热载荷增加至 650 W, 蒸发器温度迅速升高, 超过 60 ℃。初步分析认为, 由于冷凝器处于不利姿态, 其冷凝能力严重受限。热量无法通过冷凝器有效传输至热沉, 导致热量积聚在蒸发器, 蒸发器温度迅速上升。出于安全原因, 实验中立即停止对蒸发器的加热。与上述 2 种姿态相比, 在许可温度范围内, 该姿态下 DCCLHP 的传热能力下降了 30% 以上。对于 DCCLHP, 当冷凝器的倾斜导致重力分量与冷凝器中的液体流动方向相反时, 重力将对液体的正向流动产生不利影响。冷凝的液体有可能积聚在两相热交换区, 导致液膜厚度显著增加, 这将大大降低冷凝器的冷凝能力, 并显著增加冷凝器内的流动阻力。

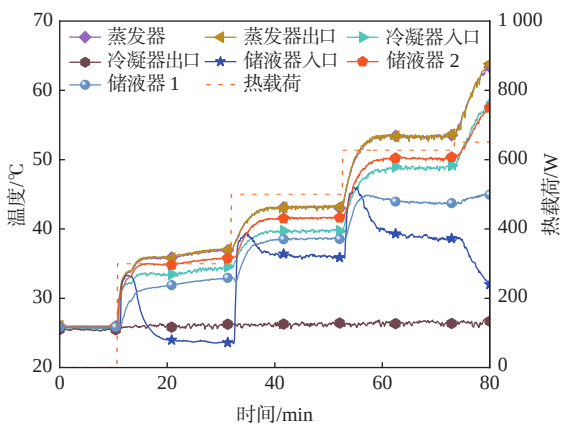


图 12 蒸发器有利姿态 θ 为 30°下功率递增实验

Fig. 12 Power increase experiment under favorable evaporator attitude at θ of 30°

表 2 为近些年关于 DCCLHP 的实验研究中所达到的最大传热能力, 这里用传热距离和传热能力的乘积来衡量有效传热能力的大小。

需要说明, 当环路热管应用于航空机载电子设备冷却时, 需要充分考虑过载作用对其运行性能的影响。在前期的实验研究中[4], 对结构相似的一套液冷型环路热管开展的过载实验研究表明, 对于传热能力接近千瓦的环路热管而言, 不同方向、不同量级及阶梯递增/递减的过载会影响回流液体工质的流动和冷凝器内冷凝液的受力情况, 从而对环路热管传热性能产生有利或不利的影响。其中, 最极端的不利影响(过载达 8g)表现为 DCCLHP 的最大传热能力下降约 20%。对于无外部动力源的冷却装置来说, 该抗过载表现能够满足战斗机绝大多数的飞行工况。

表 2 不同 DCCLHP 传热能力比较

Table 2 Comparison of heat transfer capacity of different DCCLHP

DCCLHP	蒸气管线外径, 内径, 长度/mm	传热能力/W	外径, 内径, 长度/mm	传热距离×传热能力/(W·m)
文献[4]	6, 4, 450	1 119	18, 16, 200	504
文献[16]	3, 2, 2 000	450	18, 16, 110	900
文献[11]	3, 2.6, 225	300	20, 18, 209	67.5
文献[17]	3, 2, 2 500	400	18, 16, 190	1 000
本文	4, 3, 2 300	900	25, 23, 190	2 070

2.3 系统热阻

系统热阻是评价 DCCLHP 系统传热性能的关键参数。系统热阻定义如下:

$$R = (T_{\mathrm{sad}} - T_{\mathrm{sink}})/Q \tag{1}$$

式中: T_{sad} 和 T_{sink} 分别为蒸发器鞍座温度和冷却水温度; Q 为施加于蒸发器的热载荷。

图 13 为功率递增实验中 DCCLHP 的系统热阻变化情况。当蒸发器处于水平姿态, 随着热载荷的增加, 系统热阻从热载荷为 300 W 时的 0.133 ℃/W 快速下降, 在热载荷为 500 W 时下降到 0.063 ℃/W, 在此期间系统处于可变热导模式。随着热载荷的进一步增加, 系统热阻逐渐增大。当蒸发器处于不利姿态 θ 为−30°时, DCCLHP 的系统热阻变化趋势

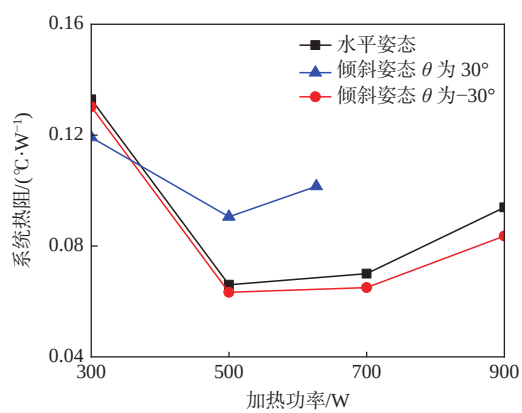


图 13 功率递增过程 DCCLHP 的系统热阻

Fig. 13 System thermal resistance of DCCLHP in power increasing process

与水平姿态接近, 并且略低于水平姿态, 表明在姿态对蒸发器不利影响和冷凝器有利影响的共同作用下, DCCLHP 系统的传热性能有略微提升。当蒸发器处于有利姿态 θ 为 30°时, 小热载荷下, 姿态对蒸发器的有利影响占据主导地位, 因此, 系统热阻有所下降。随着热载荷不断升高, 冷凝器的冷凝能力明显下降, 使得系统热阻增加超过 37%。由于冷凝器的冷凝能力下降, DCCLHP 已经无法在许可温度范围内传递 700 W 和 900 W 的热量, 因此, 没有给出 700 W 和 900 W 的系统热阻。在未来液冷冷凝器的设计中, 应该充分考虑姿态对冷凝换热区的影响。

本文研究中的温度测量不确定度约为±0.5 ℃, 直流电源输出热负荷的相对不确定度为 1.41%。系统热阻不确定度由方程(2)确定。所有测量的推导量的不确定度如表 3 所示。

$$\frac{\Delta R}{R}=\sqrt{\frac{2\Delta^2(T)}{(T_{\mathrm{sad}}-T_{\mathrm{sink}})^2}+\frac{\Delta^2(Q)}{Q^2}} \tag{2}$$

表 3　实验测量的不确定度

Table 3　Uncertainties of measured and derived quantities

参数	相对不确定度/%
输出电压	1.00
输出电流	1.00
输出功率	1.41
系统热阻	13.92 (水平姿态10 W) 0.91 (水平姿态900 W)

3　结　论

本文针对机载电子设备面临的大功率散热难题, 设计开发了一套大功率 DCCLHP, 以氨作为工质, 并对其运行特性开展全面系统的实验研究。根据实验结果, 得出以下结论:

1) 本文 DCCLHP 具有优良的启动性能。在不同的蒸发器姿态及宽广的热载荷范围内, 该 DCCLHP 均能成功启动, 并达到平稳运行。

2) 本文 DCCLHP 具有很高的传热能力。在 2.30 m 的传输距离下, 本文 DCCLHP 具有热载荷为 900 W 以上的传热能力, 能够满足大功率器件的散热需求。

3) 在蒸发器有利姿态下, 此时冷凝器处于出口高于入口的不利姿态, 重力的不利影响导致 DCCLHP 的最大传热能力下降超过 30%, 对未来液冷冷凝器的改型设计提出要求。

4) 本文 DCCLHP 系统热阻随着热载荷的增大先是快速减小, 然后逐渐增大。在蒸发器不利姿态热载荷为 500 W 运行时, 最小系统热阻仅约为 0.063 ℃/W, 表现出优异的传热性能与运行稳定性。

参考文献（References）

[1] 苗力. 某大功耗机载电子设备强迫风冷方案设计[J]. 机械工程师, 2016(2): 27-28.
Miao L. Scheme design of the forced air cooling for high power consumption airborne electronic equipment[J]. Mechanical Engineer, 2016(2): 27-28(in Chinese).

[2] 苏向辉. 航空电子设备冷却用环路热管冷凝器热沉分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 1942-1947.
Su X H. Analysis of heat sink for rejected condenser heat of loop heat pipes for cooling avionics[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 1942-1947(in Chinese).

[3] 张红星. 环路热管两相传热技术的理论和实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006: 3-5.
Zhang H X. Theoretical and experimental investigation of loop heat pipes[D]. Beijing: Beihang University, 2006: 3-5(in Chinese).

[4] 王焕发. 面向机载环境的环路热管技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2022: 4-5.
Wang H F. Research on loop heat pipe technology for airborne environment[D]. Beijing: Beihang University, 2022: 4-5(in Chinese).

[5] Maydanik Y F. Loop heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5-6): 635-657.

[6] Lu X Y, Hua T C, Liu M J, et al. Thermal analysis of loop heat pipe used for high-power LED[J]. Thermochimica Acta, 2009, 493(1-2): 25-29.

[7] Vasiliev L, Lossouarn D, Romestant C, et al. Loop heat pipe for cooling of high-power electronic components[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(1-2): 301-308.

[8] Gluck D, Gerhart C, Stanley S. Characterization of a high capacity, dual compensation chamber loop heat pipe[C]//Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum. Albuquerque: AIP, 1999, 458(1): 943-948.

[9] Lin G P, Zhang H X, Shao X G, et al. Development and test results of a dual compensation chamber loop heat pipe[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(4): 825-834.

[10] Feng J T, Lin G P, Bai L Z. Experimental investigation on operating instability of a dual compensation chamber loop heat pipe[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(8): 2316-2322.

[11] Xie Y Q, Zhang J, Xie L Y, et al. Experimental investigation on the operating characteristics of a dual compensation chamber loop heat pipe subjected to acceleration field[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 81: 297-312.

[12] Fu J W, Bai L Z, Zhang Y F, et al. Experimental study on the thermal performance of a dual compensation chamber loop heat pipe with dual vapor and condenser lines[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 43: 101994.

[13] Bai L Z, Fu J W, Pang L P, et al. Experimental study on a dual compensation chamber loop heat pipe with dual bayonet tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115821.

[14] Bai L Z, Tao Y B, Guo Y D, et al. Startup characteristics of a dual compensation chamber loop heat pipe with an extended bayonet

tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119066.

[15] Bai L Z, Lin G P, Zhang H X, et al. Effect of evaporator tilt on the operating temperature of a loop heat pipe without a secondary wick[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 600-603.

[16] Yang P H, Yang T, Gao T, et al. Experimental study on a dual compensation chamber loop heat pipe with a ceramic wick[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120750.

[17] Lin G P, Li N, Bai L Z, et al. Experimental investigation of a dual compensation chamber loop heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(15-16): 3231-3240.

Experimental study on operating characteristics of a high capacity dual compensation chamber loop heat pipe

QIN Haiyang[1], FU Jingwei[2], ZHANG Ruyi[1], WANG Li[1], BAI Lizhan[3, *]

(1. Xinxiang Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Xinxiang 453003, China;
2. The 29th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China;
3. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The advanced fighter aircraft's onboard electronic equipment is developing towards high power, high integration, and miniaturization, which results in a continuous increase in heat generation and heat flux and poses a serious challenge to airborne thermal management. With a transport distance of 2.30 meters and ammonia as the working fluid, a high-power dual compensation chamber loop heat pipe(LHP) was created in response to the aforementioned specifications. A comprehensive and systematic experimental study on the dual compensation chamber loop heat pipe was conducted, mainly focusing on its startup characteristics, heat transfer capacity, and thermal resistance change. With a heat transfer capacity of over 900 W, the testing findings demonstrate that the dual compensation chamber loop heat pipe can successfully accomplish startup and run smoothly under a variety of evaporator attitudes, including horizontal, favorable, and unfavorable attitudes. The system thermal resistance of the dual compensation chamber loop heat pipe first rapidly decreases and then gradually increases with the increase of the heat load, and the minimum value is about 0.063 ℃/W. This work provides a new technological means and a feasible solution for efficient thermal management of future airborne systems.

Keywords: loop heat pipe; airborne thermal management; startup; heat transfer capacity; thermal resistance

Received: 2024-06-05; **Accepted**: 2024-09-27; **Published Online**: 2024-10-08 15:10

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241008.1114.002

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51776012)

* **Corresponding author**. E-mail: bailizhan@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0443

基于MPC的液体火箭发动机电作动系统伺服控制策略

胡慧[1,2,*]，谢芷羽[3]，王海兴[2]，王慧[1]，马兵兵[1]，田原[1]

(1. 北京航天动力研究所，北京 100076；2. 北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191；
3. 北京航空航天大学 中法工程师学院，北京 100191)

摘　　要：液体火箭发动机作为航天器重要推进装置，其电作动系统（EMAS）对推力调节控制至关重要。永磁同步电机（PMSM）在EMAS中应用广泛，然而，传统PI电流控制在面对电机参数变化时存在局限。为此，开展了PMSM模型预测控制（MPC）研究。建立不同坐标系下PMSM数学模型，基于MPC基本原理设计预测速度和电流控制策略，包括相应预测模型和代价函数。利用MATLAB/Simulink搭建仿真模型，对比MPC和矢量控制（FOC）。仿真结果表明：相较FOC，MPC在位置阶跃响应中稳态误差降低约99%，超调量消除，响应时间缩短约80%；在扫频输入下，具有更优的动态跟踪能力；在负载变化下，转速波动幅度减少约80%。通过电机对拖平台实验验证，MPC在输入信号变化时响应更平滑、振荡小，其对更大负载扰动具有更强的适应能力。MPC在液体火箭发动机EMAS中，对PMSM的控制性能更优，能提升系统控制效果，为相关应用提供更好选择。

关 键 词：液体火箭发动机电作动系统；永磁同步电机；模型预测控制；矢量控制；控制性能
中图分类号：V221+.3; TB553
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2026)07-2359-12

液体火箭发动机是航天器最主要的推进装置之一，广泛应用于运载火箭和深空探测任务中。与固体火箭相比，液体火箭具有比冲高、推力可调、启动和关机可控等优点，尤其适用于需要高精度轨道控制的任务。液体火箭发动机一般由燃烧室、喷管、推进剂输送系统、控制系统和作动机构等组成。随着火箭控制系统向高精度、智能化发展，伺服作动机构也逐步从传统电液系统向响应更快、结构更紧凑的电作动系统（electromechanical actuation system, EMAS）演进。

液体火箭发动机的电作动系统是实现推力调节控制的关键部件，其性能直接影响火箭的姿态控制精度和飞行稳定性。国内外主要的运载火箭多使用以伺服阀为核心的电液伺服机构[1-2]。然而，电液伺服系统存在结构复杂、维护周期长、环境适应性差等问题，逐渐限制了其在现代航天器中的应用。相比之下，电作动系统因其结构紧凑、构成简单、制作周期短等优势，逐步成为替代传统伺服系统的技术趋势，特别适用于小型运载火箭、快速发射平台和重复使用航天器[3-4]。

电作动系统通常由电动机、机械传动装置、控制器及传感器构成，其中，电动机作为能量转换的核心，其性能直接影响系统的动态响应和控制精度。目前常用于电作动系统的电机类型主要包括有刷直流电机、无刷直流电机及永磁同步电机（permanent magnet synchronous motor, PMSM）。有

收稿日期：2025-07-04；录用日期：2025-11-21；网络出版时间：2026-01-15 09:14
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20260114.1437.001
*通信作者. E-mail：hh13141291049@163.com

引用格式：胡慧，谢芷羽，王海兴，等. 基于MPC的液体火箭发动机电作动系统伺服控制策略[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2359-2370. Hu H，Xie Z Y，Wang H X，et al. MPC-based servo control strategy for liquid rocket engine electromechanical actuation system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2359-2370 (in Chinese).

刷直流电机具有结构简单、控制便捷的特点，但由于其机械换向器和电刷存在火花干扰和寿命限制等问题，有刷直流电机效率低、可靠性低，并且需要更高的维护和维修成本[5]；无刷直流电机通过电子换向实现高效、低维护运行，适合中低功率控制应用；而永磁同步电机因其具有高功率密度、高效率、较低的转矩脉动及良好的热特性[6]，成为当前电作动系统中应用最为广泛的电机形式。

在液体火箭发动机电作动系统中，传统控制结构多采用PID控制器。PID控制器因参数少、算法简单易实现，在电机驱动控制领域应用广泛。文献[7]介绍了最佳整定法设计调节器PID参数。文献[8]采用调节器典型整定方法设计转速和电流调节器。然而，在变推力液体火箭发动机电驱系统的应用场景中，传统基于PID的三环控制方法存在明显缺陷。PID控制鲁棒性欠佳，易出现饱和现象，且简单的加权求和策略致使控制效率低下；难以兼顾动静态特性，参数整定过程复杂，高度依赖系统参数和实践经验。并且在引入位置伺服后，控制对象呈现复杂的时变非线性特征，负载受外界因素干扰，展现出复杂非线性特性，模型参数的不确定性为控制参数调试增添难度。为解决这一系列问题，考虑采用模型预测控制（model predictive control, MPC）等动态性能更优的方法。

模型预测控制诞生于20世纪70年代工业过程控制领域[9-10]。当时，工业生产对多变量、多约束复杂过程的优化控制需求迫切，但控制系统面临缺乏精准数学模型、受不确定性因素影响大、需与计算机紧密结合且兼顾实时性和经济性等难题。得益于芯片制造业和材料学的快速发展，微处理器处理速度和计算性能得到了快速提升，预测控制这一新兴计算机控制算法应运而生[11-12]。

模型预测控制最初并不依赖精确的参数化模型，而是基于系统的输入和输出特性构建预测机制，通过阶跃或脉冲响应对未来行为进行估计，并在有限预测时域内滚动优化控制量，同时结合反馈校正以修正预测误差。这种方法在计算复杂度和工程可实现性之间取得了较好平衡，因而在工业控制中得到较早应用。随着控制对象不确定性问题的凸显，引入模型辨识的预测控制方法逐步发展，通过在线更新模型参数提升系统性能与鲁棒性。此后，研究重点进一步转向稳定性和鲁棒性等理论问题，使预测控制能够适用于更一般的系统条件，并逐渐形成较为成熟的控制框架。其基本思想可概括为基于系统模型预测未来动态，在约束条件下优化控制输入，并通过滚动时域策略实现实时修正。其主要由预测模型、滚动优化和反馈校正3部分构成。

在液体火箭发动机电驱系统的应用场景中，PID控制器虽应用成熟，但面对电机复杂非线性特性和参数实时变化，难以保持系统控制性能最优。而模型预测控制因其强大的动态预测能力和显式约束处理能力，在液体火箭发动机推力矢量控制（field-oriented control, FOC）中展现出优越的跟踪性能与稳定性控制效果。文献[13-14]用MPC器取代传统电流环的PI控制器，实验结果表明模型预测控制算法比传统PI控制算法的响应更快，控制性能更加优异。

为提升PMSM的驱动系统控制性能，本文针对速度和电流分别设计了预测模型和代价函数，先通过在MATLAB/Simulink环境中搭建永磁同步电机预测电流控制模型和矢量控制仿真模型，采用J60TY440和J60TY1100这2种型号的电机，在位置输入信号变化和负载变化等不同工况下进行对比仿真。结果显示，模型预测控制在位置跟踪和负载变化响应方面表现优异，具有响应速度快、稳态误差小、无超调等优势。在真实对拖电机平台进行实验，验证了在变推力液体火箭发动机电驱系统的应用场景中，MPC性能的有效性和优越性。

1 永磁同步电机数学模型

在进行永磁同步电机数学模型推导时，因为本文设计选择的电机研究对象为表贴式永磁同步电机，而该电机的数学模型很复杂，具有强耦合、非线性的特点[15]。为便于建立数学模型并降低分析复杂度，本文将研究对象等效为理想电机，并作如下合理假设：

1）永磁体材料的磁导率视为恒定，从而忽略磁滞、磁饱和等非线性磁特性，同时不考虑涡流损耗及集肤效应对电磁过程的影响；

2）定子三相绕组在空间上呈对称分布，其轴线间相隔120°电角度，且三相绕组在结构参数上完全一致，在气隙中产生幅值相同、空间分布为正弦形式的磁动势；

3）忽略定子与转子槽结构及通风沟槽等对电感特性的影响，认为定子和转子等效为光滑表面，从而简化电磁参数的建模过程；

4）为分析计算，还需要设定绕组电流、磁链正方向；

5）转子上没有阻尼绕组。

简化操作完成后可以得到电机的电压方程为

$$\begin{cases} u_a = R_a i_a + \dfrac{\mathrm{d}\psi_a}{\mathrm{d}t} \\ u_b = R_b i_b + \dfrac{\mathrm{d}\psi_b}{\mathrm{d}t} \\ u_c = R_c i_c + \dfrac{\mathrm{d}\psi_c}{\mathrm{d}t} \\ u_{\mathrm{F}} = R_{\mathrm{F}} i_{\mathrm{F}} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{\mathrm{F}}}{\mathrm{d}t} \\ U_d = R_d I_d + \dfrac{\mathrm{d}\psi_d}{\mathrm{d}t} \\ U_q = R_q I_q + \dfrac{\mathrm{d}\psi_q}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{1}$$

式中: R_a、R_b、R_c为三相绕组的电阻; u_a、u_b、u_c及i_a、i_b、i_c分别为三相绕组的相电压和定子电流; ψ_a、ψ_b、ψ_c为三相绕组的磁链; u_{F}为励磁绕组端电压; i_{F}励磁绕组电流; ψ_{F}励磁绕组磁链; R_{F}励磁绕组电阻; U_d、U_q为 *d*-*q* 轴阻尼绕组等效电压; I_d、I_q为 *d*-*q* 轴阻尼绕组等效电流; ψ_d、ψ_q为 *d*-*q* 轴阻尼绕组磁链; R_d、R_q为 *d*-*q* 轴阻尼绕组电阻。

为简化电机模型并实现电磁量解耦, 本文采用两步坐标变换: 首先, 通过 Clarke 变换将三相静止坐标系映射至两相静止坐标系; 其次, 利用 Park 变换将变量转换至同步旋转坐标系。

坐标变换后得到电机的电压方程:

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_d \dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} - \omega L_q i_q \\ u_q = R i_q + L_q \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} + \omega L_d i_d + \omega \psi_{\mathrm{f}} \end{cases} \tag{2}$$

式中: R为定子绕组电阻; u_d、u_q为 *d*-*q* 轴电压; i_d、i_q和L_d、L_q分别为 *d*-*q* 轴电流和电感。ω为电机的电角速度; ψ_{f}为永磁体产生的磁链。

电机的磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_{\mathrm{f}} \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \tag{3}$$

电机转矩方程为

$$T_{\mathrm{e}} = \frac{3}{2} P_{\mathrm{n}} \psi_{\mathrm{f}} i_q \tag{4}$$

式中: T_{e}为电机电磁转矩; P_{n}为电机的极对数。

电机运动方程为

$$T_{\mathrm{e}} - T_{\mathrm{L}} = J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中: T_{L}为电机负载转矩; J为电机转子的转动惯量。

2　永磁同步电机模型预测控制

2.1　模型预测控制基本原理

模型预测控制通过系统模型对未来动态进行预测并优化控制输入, 其核心在于模型的预测功能而非具体结构形式。相较于线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)与滑模控制(sliding mode control, SMC), MPC 在同一优化框架内可显式处理执行器与状态约束, 并通过滚动时域优化协同应对多变量耦合与工况变化; 其权重与预测域参数提供了可解释的性能权衡机制。LQR 基于固定二次型指标与线性化工作点, 难以在不引入附加机制的情况下直接处理约束, 且对模型与工作点变化较为敏感[16]。SMC 具有较强鲁棒性, 但实际应用需通过边界层或低通滤波来抑制切换引起的抖振, 从而不可避免地引入相位滞后与稳态偏差, 在抖振抑制与动态/稳态性能之间形成固有权衡[17]。

综上, 在液体火箭电作动器这类强耦合、非线性且受严格约束的对象上, MPC 更能在满足约束与提升综合性能之间实现体系化、可调的最优设计。

如图 1 所示, MPC 由预测模型、误差校正机制及滚动优化过程构成。

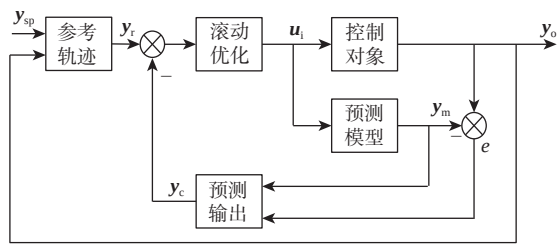


图 1　模型预测控制算法结构

Fig. 1　Structural of model predictive control algorithm

图 1 中, $\boldsymbol{y}_{\mathrm{sp}}$为系统的设定输出, $\boldsymbol{y}_{\mathrm{r}}$为参考轨迹, $\boldsymbol{u}_{\mathrm{i}}$为输入, $\boldsymbol{y}_{\mathrm{o}}$为实际输出值, $\boldsymbol{y}_{\mathrm{m}}$为模型输出, $\boldsymbol{y}_{\mathrm{c}}$为预测输出, e 为偏差。

本文基于状态空间描述构建 MPC 的预测模型, 并通过对连续模型进行离散化处理以适配滚动优化过程, 其系统状态空间表达式为

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(k) + \boldsymbol{D} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k) \tag{7}$$

式中: $\boldsymbol{x}$为状态变量; $\boldsymbol{y}$为输出变量; $\boldsymbol{u}$为输入变量; $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{D}$为方程系数矩阵。

经过计算得到经历了预测时域N_p的预测模型:

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{m}} = \boldsymbol{X}_{\mathrm{o}} + \boldsymbol{X}_{\mathrm{b}} \Delta \boldsymbol{u}(k) \tag{8}$$

其中: $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{m}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{y}(k+1) \\ \boldsymbol{y}(k+2) \\ \vdots \\ \boldsymbol{y}(k+N_p) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{X}_{\mathrm{b}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{CB} \\ \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})\boldsymbol{B} \\ \vdots \\ \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})^{N_{p-1}}\boldsymbol{B} \end{bmatrix}$,

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{o}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})\boldsymbol{x}(k) \\ \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A}^2+\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})\boldsymbol{x}(k) \\ \vdots \\ \boldsymbol{C}\sum_{i=0}^{N_p} \boldsymbol{A}^i \boldsymbol{x}(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k-1) \\ \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A}^2+\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}(k-1) \\ \vdots \\ \boldsymbol{C}\sum_{j=1}^{N_p} \boldsymbol{A}^j \boldsymbol{x}(k-1) \end{bmatrix}。$$

2.2 系统整体控制原理

本文搭建了永磁同步电机预测速度及电流控制模型，系统的整体控制原理如图2所示。

图2中，Θ^*为系统给定的位置指令，Θ为编码器测得的电机实际转子位置；$\omega_e(k)$为转子电角速度；$i_d^*(k)$、$i_q^*(k)$为预测速度控制器输出的d-q轴电流指令，$i_d(k)$、$i_q(k)$为实际d-q轴反馈电流；$i_d^p(k)$、$i_q^p(k)$为优化后的电流控制量；S_a、S_b、S_c为生成的三相开关信号；$1/p$为积分算子。

该系统采用位置环、预测速度环、预测电流环三级闭环控制架构。位置偏差经位置控制器调节后输出速度指令，再由预测速度环与预测电流环生成优化控制信号，经调制驱动永磁同步电机运行，实现闭环控制和高精度位置控制。

2.3 预测速度控制

2.3.1 预测速度模型建立

在PMSM控制结构中，速度外环直接决定系统的动态调节过程及其对外部扰动的响应特性。由于速度调节过程中易出现超调与响应受限等现象，本文从控制方法层面对速度环进行设计，引入模型预测控制框架，并以PMSM速度环为对象构建相应的预测模型，在此基础上完成速度外环MPC器的设计与分析。

基于PMSM的状态空间描述，可以构建用于速度预测的离散时间模型：

$$\omega_{rm}(k+1)=(1-b_0)\omega_m(k)+b_0\omega_m(k-1)+a_0\Delta i_q^*(k) \tag{9}$$

式中：$\omega_{rm}(k+1)$为$(k+1)T_s$时刻系统的预测输出；$b_0=-e^{-T_sB/J}$；$a_0=\frac{3}{2}P_n\psi_f(1-e^{-T_sB/J})$，$T_s$为速度环的采样周期，$B$为黏滞摩擦系数；$\Delta i_q^*(k)$为$kT_s$时刻的$q$轴电流控制增量；$\omega_m(k)$为$kT_s$时刻电机的实测转速。

为降低模型不确定性及外部扰动对预测精度的影响，在预测过程中引入基于当前时刻测量误差的补偿机制，从而修正下一步的预测结果，$(k+1)T_s$时刻的闭环预测输出可表示为

$$\omega_m(k+1)=\omega_{rm}(k+1)+e(k) \tag{10}$$

式中：预测误差$e(k)=\omega_m(k)-\omega_{rm}(k)$。

在速度指令生成过程中，为兼顾系统响应平滑性与稳定性，采用指数形式构造参考轨迹，使预测输出逐步逼近设定速度值，其表达式为

$$y_r(k+1)=\alpha\omega_m(k)+(1-\alpha)\omega_s(k) \tag{11}$$

式中：α为柔化指数，$0<\alpha<1$且$\omega_s(k)$为系统的设定值，本实验选取α=0.85。

2.3.2 速度代价函数设计

在速度控制优化过程中，控制目标是在保证预测转速$\omega_{rm}(k+1)$尽可能贴合参考轨迹$y_r(k+1)$的同时，抑制控制量$\Delta i_q^*(k)$的剧烈变化。基于上述考虑，构造如下二次型性能指标函数：

$$J_p=\lambda[\omega_{rm}(k+1)-y_r(k+1)]^2+\beta(\Delta i_q^*(k))^2 \tag{12}$$

式中：λ为跟踪误差变化的加权系数；β为控制量变化的加权系数。

通过求解式(13)：

$$\partial J_p/\partial\Delta i_q^*(k)=0 \tag{13}$$

并且通过对性能指标关于控制增量求极值，可获得对应的最优控制律，其解析形式如下：

$$\Delta i_q^*(k)=-\frac{\lambda a_0}{\lambda a_0^2+\beta}[(1-b_0)\omega_m(k)+b_0\omega_m(k-1)+e(k)-y_r(k-1)] \tag{14}$$

则kT_s时刻q轴电流给定值为

$$i_q(k)=i_q(k-1)+\Delta i_q^*(k) \tag{15}$$

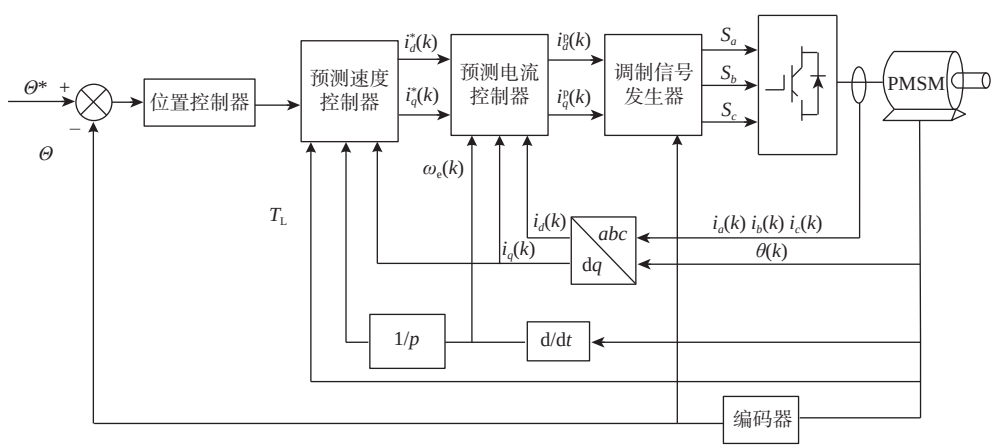


图2 系统整体控制原理

Fig. 2 Overall control principle of system

2.3.3　稳定性证明

令

$$v_k=(1-b_0)\omega_{\mathrm{m}}(k)+b_0\omega_{\mathrm{m}}(k-1)+e(k)-y_{\mathrm{r}}(k-1) \tag{16}$$

将式 (9) 和式 (10) 代入式 (12) 得到:

$$J_{\mathrm{p}}(k)=\lambda(v_k+a_0\Delta i_q^*(k))^2+\beta(\Delta i_q^*(k))^2 \tag{17}$$

由此得到最优一步代价:

$$J_{\mathrm{p}}^*(k)=\frac{\lambda\beta}{\lambda a_0{}^2+\beta}v_k{}^2 \tag{18}$$

$$V(k)=\frac{1}{\lambda}J_{\mathrm{p}}^*(k)=\frac{\beta}{\lambda a_0{}^2+\beta}v_k{}^2 \tag{19}$$

在常值设定$\omega_{\mathrm{s}}(k)\equiv\omega_{\mathrm{c}}$的一段时间内, 且误差补偿缓变, 即$e(k+1)\approx e(k)$, 由式 (9)、式 (14) 可得:

$$\begin{aligned}v_{k+1}=&(1-b_0)(\omega_{\mathrm{m}}(k+1)-\omega_{\mathrm{c}})+\\&b_0(\omega_{\mathrm{m}}(k)-\omega_{\mathrm{c}})+e(k+1)-y_{\mathrm{r}}(k)+\omega_{\mathrm{c}}=\\&\gamma(1-b_0)v_k+\gamma b_0v_{k-1}\end{aligned} \tag{20}$$

其中: $\gamma=\dfrac{\beta}{\lambda a_0{}^2+\beta}\in(0,1)$

式 (20) 给出关于v_k的二阶线性闭环:

$$\begin{bmatrix}v_{k+1}\\v_k\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\gamma(1-b_0)&\gamma b_0\\1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_k\\v_{k-1}\end{bmatrix} \tag{21}$$

使用 Jury 判据来判定稳定性: 对特征多项式$z^2-\gamma(1-b_0)z-\gamma b_0$, 因为 0<$b_0$<1, $\gamma\in(0,1)$, 有

$$\begin{cases}|-\gamma b_0|<1\\1-\gamma(1-b_0)-\gamma b_0=1-\gamma>0\\1+\gamma(1-b_0)-\gamma b_0>0\end{cases} \tag{22}$$

式(22)中 3 条均满足, 闭环极点落在单位圆内, 系统渐近稳定。

由式 (19) 和式 (20) 得到:

$$V(k+1)=\gamma v_{k+1}{}^2\leqslant\gamma(\gamma(1-b_0)|v_k|+\gamma b_0|v_{k-1}|)^2\leqslant\rho V(k) \tag{23}$$

式中: ρ 为闭环系统的收敛因子, ρ<1。由此得到, $V(k)$单调下降并收敛于 0。

综上, 在λ>0, β>0, 0<b_0<1 的情况下, MPC 速度环闭环系统渐进稳定。

本实验选取λ=1, β=0.001。

2.4　预测电流控制

2.4.1　预测电流模型建立

基于式(2)坐标变换关系, 可在同步旋转参考系下描述定子侧电压与电流之间的动态关系, 其数学表达式为

$$\begin{cases}u_d=Ri_d+L_d\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}-\omega L_qi_q\\u_q=Ri_q+L_q\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}+\omega(L_di_d+\psi_{\mathrm{f}})\end{cases} \tag{24}$$

考虑到研究对象为隐极型永磁同步电机, 其 d 轴与 q 轴电感参数相同, 可将式(24)电压方程进一步化简为

$$\begin{cases}u_d=Ri_d+L_{\mathrm{s}}\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}-\omega L_{\mathrm{s}}i_q\\u_q=Ri_q+L_{\mathrm{s}}\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}+\omega(L_{\mathrm{s}}i_d+\psi_{\mathrm{f}})\end{cases} \tag{25}$$

然后将其变形即可得到电机电流的状态方程:

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{R}{L_{\mathrm{s}}}i_d+\dfrac{1}{L_{\mathrm{s}}}u_d+\omega i_q\\\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{R}{L_{\mathrm{s}}}i_q+\dfrac{1}{L_{\mathrm{s}}}u_q-\omega i_d-\dfrac{\psi_{\mathrm{f}}}{L_{\mathrm{s}}}\omega\end{cases} \tag{26}$$

在数字控制实现条件下, 电流环采样周期远小于系统电磁时间常数, 因此, 可采用一阶近似方式对连续时间电流模型进行离散化处理, 其离散表达式为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}=\dfrac{i_d(k+1)-i_d(k)}{T_{\mathrm{s}}}\\\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}=\dfrac{i_q(k+1)-i_q(k)}{T_{\mathrm{s}}}\end{cases} \tag{27}$$

由此可得电机的预测电流控制模型:

$$\begin{cases}i_d(k+1)=i_d(k)+\\\qquad\dfrac{T_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{s}}}(u_d(k)-Ri_d(k)+\omega(k)L_{\mathrm{s}}i_q(k))\\i_q(k+1)=i_q(k)+\\\qquad\dfrac{T_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{s}}}(u_q(k)-Ri_q(k)-\omega(k)L_{\mathrm{s}}i_d(k)-\omega(k)\psi_{\mathrm{f}})\end{cases} \tag{28}$$

2.4.2　电流代价函数设计

本文选取的代价函数为第 k+1 步 d-q 轴电流与其参考值的误差平方和, 代价函数可根据实际需要选择, 代价函数的选择不同会产生不同的控制效果。本文选取的代价函数e_{rr}为

$$e_{\mathrm{rr}}(i)=(i_d(k+1)-i_{d\_\mathrm{ref}})^2+(i_q(k+1)-i_{q\_\mathrm{ref}})^2 \tag{29}$$

式中: i_{d_ref}和i_{q_ref}分别为 d 轴和 q 轴电流参考值。

即仅对一步预测电流跟踪误差进行二次惩罚, 其中, d 轴电流权重系数和 q 轴电流权重系数均取 1, 控制增量权重系数取 0, 即不对控制增量施加额外惩罚。

3　仿真与实验验证

本文运用 MATLAB/Simulink 仿真软件构建了 PMSM 模型, 对比矢量控制和模型预测控制的实验结果验证模型预测控制的有效性。为进一步说明 MPC 的有效性, 本文使用对拖电机平台进行实验验证。

3.1　仿真结果

3.1.1　仿真参数

在 MATLAB/Simulink 中搭建永磁同步电机矢

量控制仿真模型和模型预测控制仿真模型。

分别使用 J60TY440 和 J60TY1100 电机为例作对比，2 种型号的电机参数如表 1 和表 2 所示。仿真中，电压 U_{dc} 为 540 V，相对误差设置为 0.000 1，仿真时间为 1.5 s，仿真步长采用 Simulink 自带的 ode23t 算法。

表 1　J60TY440 PMSM 的参数

Table 1　Parameters of J60TY440 PMSM

转动惯量/(kg·m^{-2})	极对数	黏滞摩擦系数/(N·m·s·rad^{-1})	定子电阻/Ω	定子电感/H	永磁体磁链/Wb
0.000 005 43	4	0.000 024 6	3.84	0.002 72	0.018

表 2　J60TY1100 PMSM 的参数

Table 2　Parameters of J60TY1100 PMSM

转动惯量/(kg·m^{-2})	极对数	黏滞摩擦系数/(N·m·s·rad^{-1})	定子电阻/Ω	定子电感/H	永磁体磁链/Wb
0.000 000 9	2	0.000 027 9	1.94	0.000 14	0.03

3.1.2　位置输入信号对结果的影响

以 J60TY440 电机为例，空载启动，初始给定位置 4 rad(即 229.2°)，0.5 s 阶跃至 8 rad(即 458.4°)，1 s 阶跃至−8 rad(即−458.4°)。FOC 和 MPC 仿真结果如图 3 和图 4 所示。

FOC 和 MPC 位置输出工况如表 3 和表 4 所示。

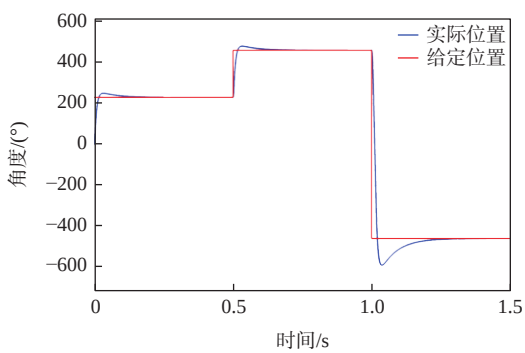


图 3　J60TY440 电机 FOC 给定位置和实际位置波形

Fig. 3　Specified position and actual position waveforms under FOC of J60TY440 motor

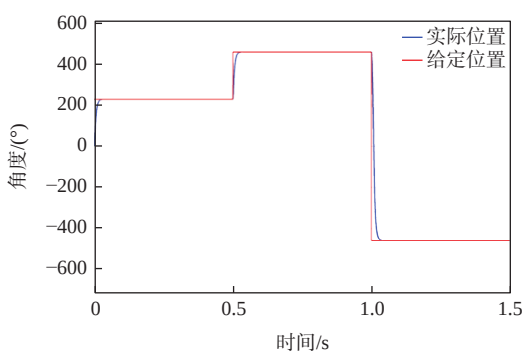


图 4　J60TY440 电机 MPC 给定位置和实际位置波形

Fig. 4　Specified position and actual position waveforms under MPC of J60TY440 motor

表 3　J60TY440 电机 FOC 位置输出工况

Table 3　Position output of FOC of J60TY440 motor

工况	稳态误差/(°)	稳定时间/s	超调量/(°)
启动	0.20	0.159	24.4
4 rad→8 rad	0.04	0.121	24.5
8 rad→−8 rad	0.04	0.227	170.6

表 4　J60TY440 电机 MPC 位置输出工况

Table 4　Position output of MPC of J60TY440 motor

工况	稳态误差/(°)	稳定时间/s	超调量/(°)
启动	0.002	0.019	0
4 rad→8 rad	0.004	0.016	0
8 rad→−8 rad	0.006	0.025	0

由表 3 和表 4 可知，MPC 在 3 种工况下均显著优于 FOC。启动时，稳态误差下降约 99%，稳定时间减少 88%，超调由 24.4°消除为 0。0.5 s 信号变化时，稳态误差下降 90%，调节时间减少约 87%，超调由 24.5°降为 0。1 s 信号变化时，稳态误差下降 85%，调节时间减少约 89%，FOC 在该大反转工况下出现 170.6°的严重过冲，而 MPC 仍保持零超调。

以 J60TY1100 电机为例，空载启动，初始给定位置 4 rad(即 229.2°)，0.5 s 阶跃至 8 rad(即 458.4°)，1 s 阶跃至−8 rad(即−458.4°)。FOC 和 MPC 仿真结果如图 5 和图 6 所示。

FOC 和 MPC 位置输出工况如表 5 和表 6 所示。

由表 5 和表 6 可知，MPC 在 3 种工况下仍均显著优于 FOC。启动时，稳态误差下降约 99.8%，稳定时间减少 95%，且完全无超调。0.5 s 信号变化时，稳态误差下降 80%，调节时间减少约 94.6%，超调由 19.6°降为 0。1 s 信号变化时，FOC 出现显著性能劣化，而 MPC 仍保持 0.040°的极小稳态误差和 0.022 s 的快速收敛，且无超调。

在使用 2 种型号的电机模拟时，均存在约 0.02 s 的滞后，这是由于电机测量与编码器信号采样间的延迟引起。工程允许范围一般是小于 0.15 s，故认

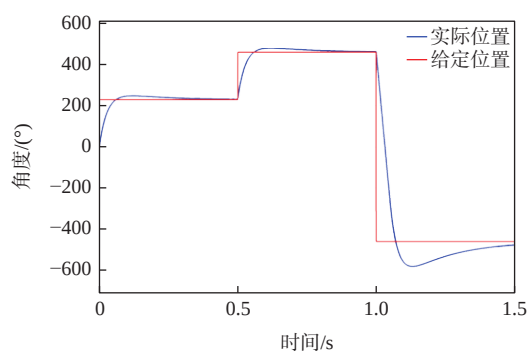


图 5　J60TY1100 电机 FOC 给定位置和实际位置波形

Fig. 5　Specified position and actual position waveforms under FOC of J60TY1100 motor

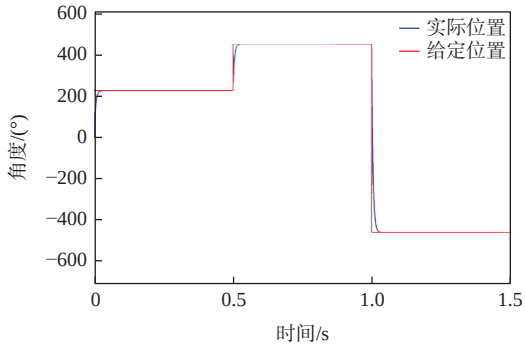


图 6　J60TY1100 电机 MPC 给定位置和实际位置波形

Fig. 6　Specified position and actual position waveforms under MPC of J60TY1100 motor

表 5　J60TY1100 电机 FOC 位置输出工况

Table 5　Position output of FOC of J60TY1100 motor

工况	稳态误差/(°)	稳定时间/s	超调量/(°)
启动	2.0	0.405	18.4
4 rad→8 rad	0.4	0.279	19.6
8 rad→−8 rad	16.6	>0.5	120.6

表 6　J60TY1100 电机 MPC 位置输出工况

Table 6　Position output of MPC of J60TY1100 motor

工况	稳态误差/(°)	稳定时间/s	超调量/(°)
启动	0.005	0.019	0
4 rad→8 rad	0.080	0.015	0
8 rad→−8 rad	0.040	0.022	0

为响应延迟可接受。

综合比较表明，MPC 在大幅度位置反转与扰动敏感场景下能同时实现零超调、更短调节时间与近乎零稳态误差，体现出对非线性与饱和效应更强的适应性与鲁棒性；而 FOC 受固定 PI 增益与约束未显式处理的限制，在大步阶与非对称工况下更易出现过冲和缓慢衰减。

3.1.3　动态跟踪性能验证

为验证控制系统在宽频域内的动态跟踪能力，仿真中将位置参考信号由阶跃输入改为线性扫频（chirp）信号。线性扫频信号形式为

$$\begin{cases} y(t)=A_{\mathrm{m}}\sin\left(2\pi\left(f_0 t+\dfrac{1}{2}kt^2\right)\right) \\ k=\dfrac{f_1-f_0}{T} \end{cases} \tag{30}$$

式中：f_0为初始频率；f_1为目标频率；T为扫频时长；A_{m}为幅值。

本次模拟选取该信号频率在 1.5 s 内由 f_0=3 Hz 线性增加至f_1=20 Hz，扫频时长为 1.5 s，幅值为 1 rad。

J60TY440 电机仿真结果如图 7 和图 8 所示。

J60TY1100 电机仿真结果如图 9 和图 10 所示。

在线性扫频位置跟踪试验中，2 种型号电机的结果一致表明：MPC 相比 FOC 具有更优的动态随动性能。低频段，MPC 能精确跟踪，而 FOC 输出已出现明显相位滞后与幅值衰减。随频率升高，FOC 输出幅值明显衰减、相位进一步落后，而 MPC 仍保持与参考几乎同幅、相位差小、误差包络平滑。跨不同电机参数，MPC 的跟踪质量与稳定性表现出良好的一致性与鲁棒性，而 FOC 对对象惯量/阻尼敏感、在高频区易失真。

3.1.4　负载变化对结果的影响

以 J60TY440 电机为例，位置信号是一个周

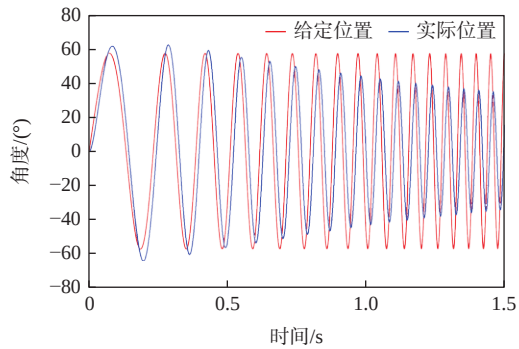


图 7　J60TY440 电机 FOC 下扫频位置跟踪响应波形

Fig. 7　Sweep-frequency position tracking response waveforms of J60TY440 motor under FOC

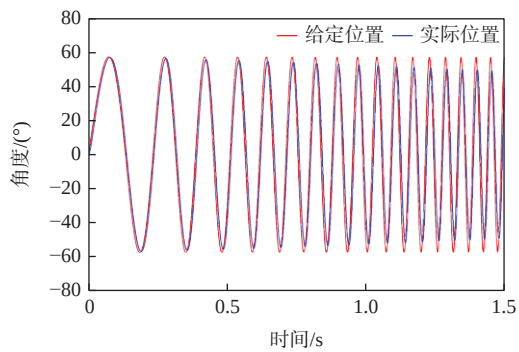


图 8　J60TY440 电机 MPC 下扫频位置跟踪响应波形

Fig. 8　Sweep-frequency position tracking response waveforms of J60TY440 motor under MPC

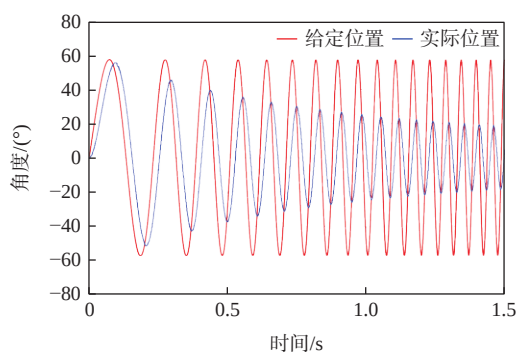


图 9　J60TY1100 电机 FOC 下扫频位置跟踪响应波形

Fig. 9　Sweep-frequency position tracking response waveforms of J60TY1100 motor under FOC

期为 1.5 s 的重复信号，输出在 0 s 时为 0，1.5 s 时为 150 rad，并以此周期重复。负载信号在 0.3 s 从 0 N·m 阶跃至 1.5 N·m，0.8 s 时阶跃至 3 N·m，仿真结果如图 11 所示。

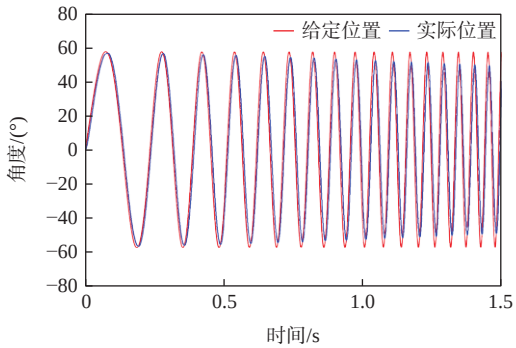
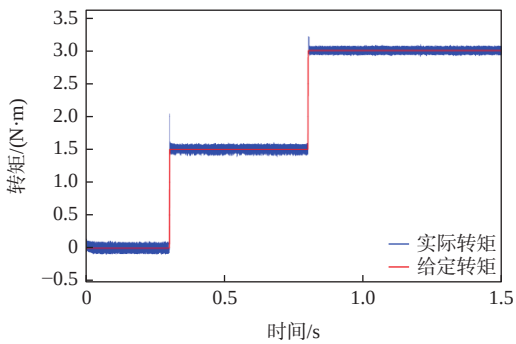
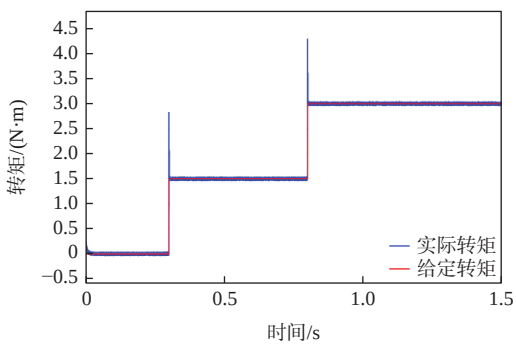


图 10 J60TY1100 电机 MPC 下扫频位置跟踪响应波形

Fig. 10 Sweep-frequency position tracking response waveforms of J60TY1100 motor under MPC



(a) FOC给定转矩和实际转矩波形



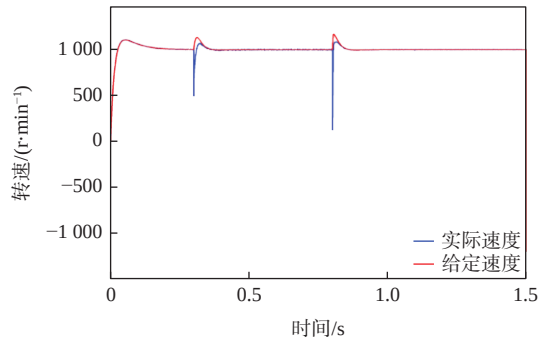
(b) MPC给定转矩和实际转矩波形

图 11 J60TY440 电机 FOC 和 MPC 转矩波形

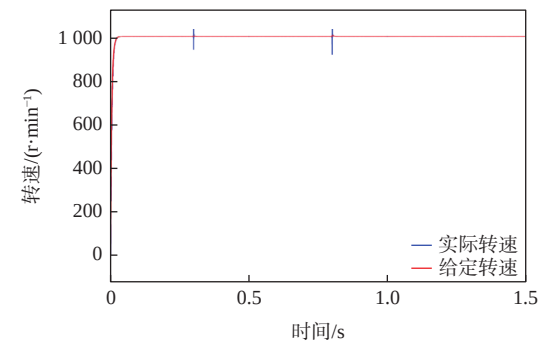
Fig. 11 Torque waveforms of FOC and MPC of J60TY440 motor

本实验不仅对给定转矩与实际转矩的跟踪情况进行比较，为评估负载变化下的控制效果，也对转速和电流也进行了追踪：电作动系统既要保持角速度平稳和位置精度，又要限制电流峰值与纹波，才能兼顾推力品质和器件可靠性。结果如图 12 和图 13 所示。

以 J60TY1100 电机为例，位置信号与上一实验相同，是一个周期为 1.5 s 的重复信号，输出在 0 s 时为 0，1.5 s 时为 150 rad，并以此周期重复。负载信号在 0.5 s 从 0 N·m 阶跃至 1 N·m，1 s 阶跃至 2 N·m，仿真结果如图 14 所示。



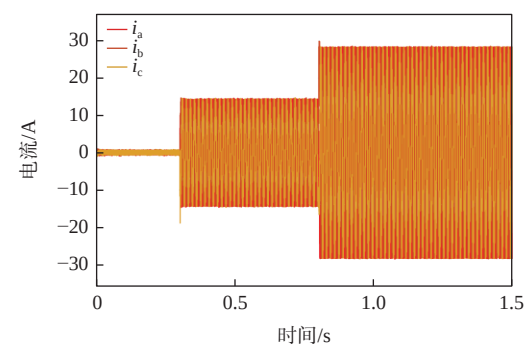
(a) FOC给定转速和实际转速波形



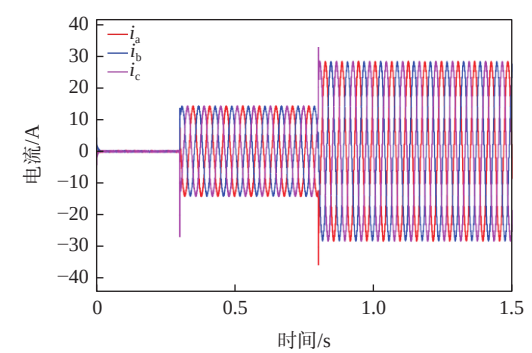
(b) MPC给定转速和实际转速波形

图 12 J60TY440 电机 FOC 和 MPC 转速波形

Fig. 12 Speed waveforms of FOC and MPC of J60TY440 motor



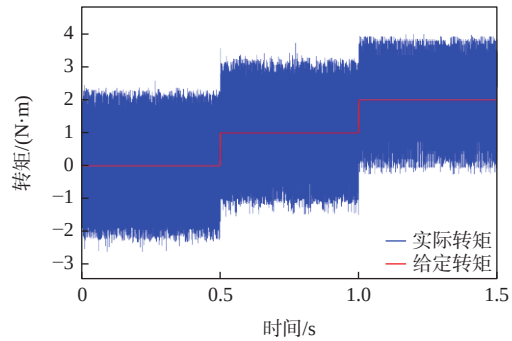
(a) FOC电流波形



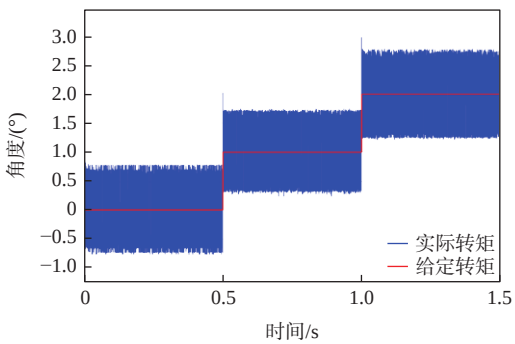
(b) MPC电流波形

图 13 J60TY440 电机 FOC 和 MPC 电流波形

Fig. 13 Current waveforms of FOC and MPC of J60TY440 motor



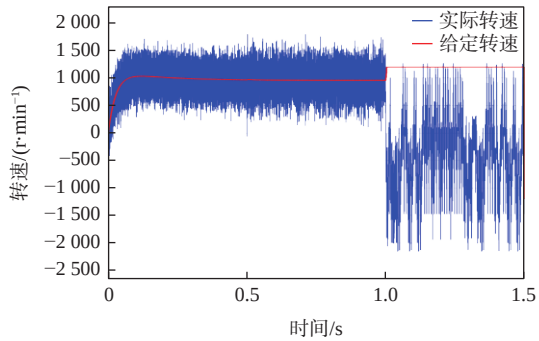
(a) FOC给定转矩和实际转矩波形



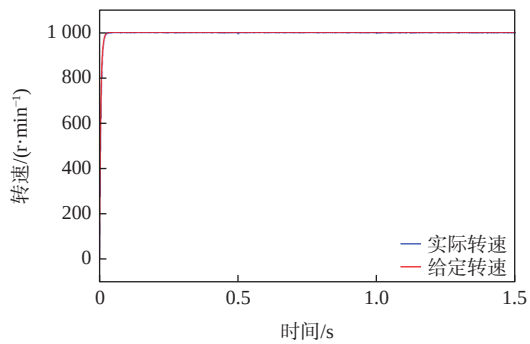
(b) MPC给定转矩和实际转矩波形

图 14　J60TY1100 电机 FOC 和 MPC 转矩波形

Fig. 14　Torque waveforms of FOC and MPC of J60TY1100 motor



(a) FOC给定转速和实际转速波形



(b) MPC给定转速和实际转速波形

图 15　J60TY1100 电机 FOC 和 MPC 转速波形

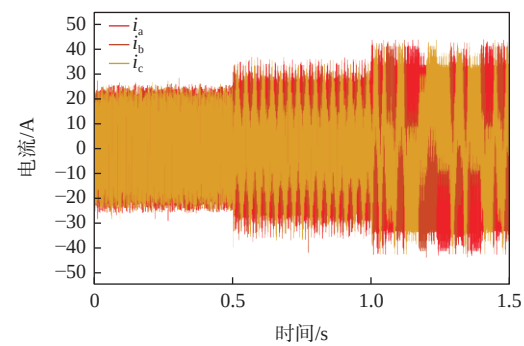
Fig. 15　Speed waveforms of FOC and MPC of J60TY1100 motor

图 11 与图 14 显示了 2 种控制策略下的转矩响应。FOC 在整个负载变化过程中始终伴随较大的高频扰动, 实际转矩波形波动显著, 表明系统在负载突变及稳态阶段均存在较强的电磁振荡。相比之下, MPC 的转矩响应整体更加平滑稳定, 但在负载阶跃时出现一定幅度的超调, 这是由于预测控制具有更强的前馈特性, 控制量调整较为激进所致。

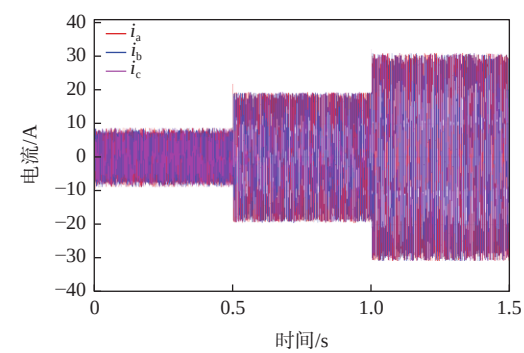
图 12 与图 15 显示了 2 种控制策略下的速度响应。FOC 在负载突变时, 速度曲线出现短时波动和明显的速度跌落, 尤其在第 2 次负载阶跃时, 系统速度偏差持续时间较长; MPC 的速度输出则能紧随参考信号变化, 扰动后的速度误差迅速衰减至 0, 转速波动幅度相较 FOC 减少约 80%。由于 MPC 能通过滚动优化实时补偿电磁转矩变化, 其速度闭环动态性能明显优于 FOC, 稳态精度更高、恢复时间更短。

图 13 与图 16 显示了 2 种控制策略下的电流响应。负载突变时, FOC 的电流波形纹波大、噪声明显, 并在高负载区段出现周期性波动。MPC 的电流变化则更加平滑稳定, 波动幅度小, 电流响应与负载变化几乎同步。说明 MPC 不仅能在电磁环节上快速建立平衡, 还能在电流层面实现更好的幅值约束与动态调节。

综合来看, MPC 在负载扰动下的动态稳定性与



(a) FOC电流波形



(b) MPC电流波形

图 16　J60TY1100 电机 FOC 和 MPC 电流波形

Fig. 16　Current waveforms of FOC and MPC of J60TY1100 motor

电流控制精度均优于 FOC。尽管转矩响应初期出现轻微超调, 但系统总体调节更快、稳态误差更小,

验证了 MPC 在应对负载突变与非线性扰动方面的鲁棒优势。

3.2 实验结果

实测实验数据来自实验室的电机对拖平台。如图 17 所示，电机对拖平台主要包括：1 块 STM32F407 控制板，2 块驱动板，2 个永磁同步电机。驱动板使用 24 V 电源供电，控制板使用自带的 12 V 适配器供电。

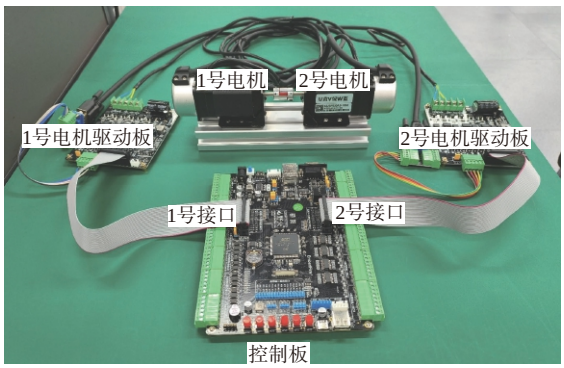


图 17 电机对拖平台

Fig. 17 Motor back-to-back test platform

永磁同步电机参数如表 7 所示。

表 7 对拖平台永磁同步电机参数

Table 7 Parameters of PMSM of back-to-back test platform

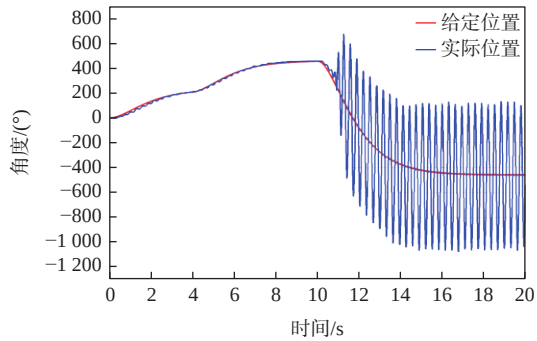
转动惯量/($kg·m^{-2}$)	极对数	额定功率/W	定子电阻/Ω	定子电感/H	永磁体磁链/($N·mA^{-1}$)
0.000 028	4	64	0.89	0.000 62	0.059

输入信号为初始给定位置 4 rad(即 229.2°)，4 s 阶跃至 8 rad(即 458.4°)，10 s 阶跃至−8 rad(即 −458.4°)，负载信号为 0。FOC 和 MPC 实验结果如图 18 所示。

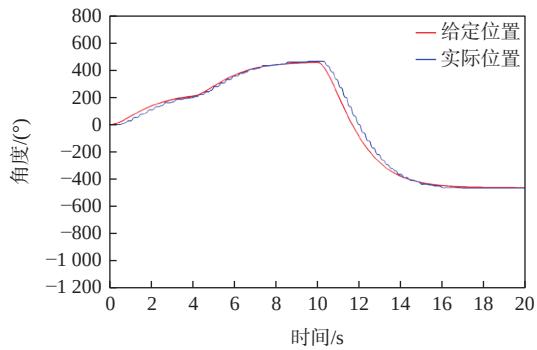
FOC 和 MPC 位置输出工况如表 8 和表 9 所示。

图 18(a) 显示 FOC 在 10 s 后出现明显的高频颤振。该现象并非由外部扰动引起，而是源于 FOC 器本身的性能局限。由于传统 PI 控制依赖误差信号进行调节，当电机运行至高转速或系统进入稳态区间后，转速及电流的微小测量噪声会被放大并频繁触发 PI 修正，使转矩输出不断微幅振荡，从而形成高频振荡。同时，双闭环之间的相位耦合及模型参数误差进一步削弱了系统的阻尼特性，导致小扰动难以被及时衰减。相比之下，如图 18(b) 所示的 MPC 通过模型预测与滚动优化抑制了高频修正，系统输出更为平滑，能更有效地预测并调整控制输入。

在后续实验中，可将对拖电机工况中的干扰优先以机械侧转矩扰动的形式注入，并辅以参数不确定性与测量扰动，如编码器噪声、速度估计抖动等，



(a) FOC给定位置和实际位置波形



(b) MPC给定位置和实际位置波形

图 18 负载模拟用的 FOC 和 MPC 位置波形

Fig. 18 Position waveforms load simulation using FOC and MPC

表 8 对拖电机平台 FOC 位置输出工况

Table 8 Position output of FOC of motor back-to-back test platform

工况	稳态误差/(°)	稳定时间/s	超调量/(°)
启动	4.2	3.6	20.5
4 rad→8 rad	4.9	2.6	30.9
8 rad→−8 rad			>200

表 9 对拖电机平台 MPC 位置输出工况

Table 9 Position output of MPC of motor back-to-back test platform

工况	稳态误差/(°)	稳定时间/s	超调量/(°)
启动	1.4	3.4	6.7
4 rad→8 rad	4.0	2.3	14.4
8 rad→−8 rad	7.8	4.7	18.6

以覆盖实际台架效应；在此框架下，MPC 依托滚动预测与在线优化，并通过对控制增量设置惩罚项，无需更改控制器参数即可抑制扰动放大，体现为扰动后的快速收敛与低纹波输出，这也合理解释了无负载工况下 FOC 出现颤振而 MPC 仍保持平滑响应的实验现象。

4 结 论

针对液体火箭发动机电作动系统中，永磁同步电机在 FOC 下位置控制精度欠佳、负载变化时转

速与转矩波动大、电流响应不稳定及输入信号变化时控制响应不平稳等问题, 建立了不同坐标系下的电机数学模型, 设计了基于 MPC 的速度和电流控制策略, 并与 FOC 进行对比, 得出如下结论:

1) 通过 MATLAB/Simulink 仿真对比 FOC 与 MPC, 以 J60TY440 和 J60TY1100 电机为例, 在位置控制方面, MPC 稳态误差更小, 响应速度更快且无超调, 优势显著。

2) 在扫频输入下, MPC 相比 FOC 具有更好的幅值保持与更小相位滞后, 动态误差更低且未出现高频颤振; FOC 随频率升高易出现幅值衰减和相位滞后。总体而言, MPC 的有效带宽与动态跟踪稳定性更优。

3) 在负载变化的工况下, 相较于 FOC, MPC 的转速和转矩输出更为平滑稳定, 运行噪声更小, 能够快速响应负载变化并保持稳定状态, 电流响应也更加稳定, 波动和噪声明显更小。

4) 利用电机对拖平台进行实验验证, 结果表明在输入信号变化时, MPC 的响应更为平滑、振荡更小; 而 FOC 在输入信号剧烈变化时鲁棒性较差。

5) 在变推力液体火箭发动机电驱系统的应用场景中, MPC 性能优于 FOC, 能够有效提升系统控制效果, 具有良好的应用前景。

不过, MPC 相关参数仍有优化空间, 可进一步提升其控制性能。本次实验所采用的对拖电机平台, 其参数存在一定局限性, 仅基于此平台进行实验, 难以全面评估 MPC 和 FOC 在不同工况下的性能表现。后续研究需选取不同类型的电机, 并在更广泛的负载变化范围内开展实验, 以进一步验证和完善研究成果。未来工作将结合在线参数辨识与学习型增益调节, 提升 MPC 在复杂非线性与时变工况下的实时性与鲁棒性。并通过嵌入式快速求解与硬件在环/实机测试, 验证在更大负载与更强扰动条件下的工程可用性。

参考文献 (References)

[1] Sun M, Long X Z, Xu B W, et al. Review of thrust regulation and system control methods of variable-thrust liquid rocket engines in space drones[J]. Actuators, 2025, 14(8): 385.

[2] 赵迎鑫, 陈克勤, 赵守军, 等. 液动机引流式液氧煤油运载火箭推力矢量伺服控制系统[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(2): 60-64.
Zhao Y X, Chen K Q, Zhao S J, et al. The servo-mechanism systems of hydraulic motor driven for liquid oxygen-kerosene launch vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(2): 60-64(in Chinese).

[3] Annaz F Y, Kaluarachchi M M. Progress in redundant electromechanical actuators for aerospace applications[J]. Aerospace, 2023, 10(9): 787.

[4] Navarro-tapia D, Simplício P, Marcos A. Fault-tolerant dynamic allocation strategies for launcher systems[J]. Aerospace, 2025, 12(5): 393.

[5] Gebremariam S F, Wondie T T. Comparative analysis of electric motor drives employed for propulsion purpose of battery electric vehicle (BEV) systems[J]. International Journal of Science and Research Archive, 2023, 10(2): 1097-1112.

[6] Khanh P Q, Dat N T, Anh H P H. Optimal fuzzy PI approach for PMSM speed control using modified jaya optimization technique[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2023, 47(4): 1429-1445.

[7] 刘宁, 柴天佑. PID 控制器参数的优化整定方法[J]. 自动化学报, 2023, 49(11): 2272-2285.
Liu N, Chai T Y. An optimal tuning method of PID controller parameters[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(11): 2272-2285(in Chinese).

[8] 洪俊杰, 何衍东, 黄健钊, 等. 采用改进复矢量的 PMSM 电流解耦控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(6): 106-115.
Hong J J, He Y D, Huang J Z, et al. Current decoupling control of PMSM based on improved complex vector[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(6): 106-115(in Chinese).

[9] Richalet J, Rault A, Testud J L, et al. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(5): 413-428.

[10] 徐立鸿。预测控制的研究现状及问题 [J]. 控制理论与应用, 1994, 11 (1): 121-125.
Xu L H. Research status and problems of predictive control[J]. Control Theory & Applications, 1994, 11(1): 121-125.

[11] Dong H L, Zhang Y. A low-complexity double vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motors [J]. Energies, 2024, 17(1): 147.

[12] Akbari E, Koozehmanesh A, Maksimov D, et al. Stationary-frame power regulation for controlling grid-connected MMCs: exact stationary-frame equivalent of the dq-PI controller[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 15864.

[13] Zhang Y F, Qi R. Flux-weakening drive for IPMSM based on model predictive control[J]. Energies, 2022, 15(7): 2543.

[14] Hu J D, Fu Z Y, Xu R W, et al. Low-complexity model predictive control for series-winding PMSM with extended voltage vectors[J]. Electronics, 2025, 14(1): 127.

[15] Hakami S S, Lee K B. Four-level hysteresis-based DTC for torque capability improvement of IPMSM fed by three-level NPC inverter[J]. Electronics, 2020, 9(10): 1558.

[16] Tsiamis A, Kalogerias D, Ribeiro A, et al. Linear quadratic control with risk constraints[J]. Automatica, 2025, 174: 112095.

[17] Youssef O, Wafa M, Shalaby R. Reinforcement learning-enhanced adaptive sliding mode control for nonlinear systems[J]. Complex & Intelligent Systems, 2025, 11(8): 351.

MPC-based servo control strategy for liquid rocket engine electromechanical actuation system

HU Hui[1, 2, *], XIE Zhiyu[3], WANG Haixing[2], WANG Hui[1], MA Bingbing[1], TIAN Yuan[1]

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;
2. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Centrale Pekin, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As a core propulsion device for spacecraft, the liquid rocket engine relies heavily on its electro-mechanical actuation system (EMAS) for precise thrust regulation and control. Permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely applied in EMAS. However, traditional proportional-integral (PI) current control exhibits inherent limitations when confronted with variations in motor electrical parameters. Accordingly, research on model predictive control (MPC) for PMSM is conducted in this paper.The mathematical models of PMSM in different coordinate systems are established, and predictive speed and current control strategies are designed based on the fundamental principles of MPC, including the corresponding prediction models and cost functions. A simulation model is built on the MATLAB/Simulink platform to compare the performance of MPC with field-oriented control (FOC). Simulation results show that compared with FOC, MPC reduces the steady-state error by approximately 99%, eliminates overshoot, and shortens the response time by about 80% in position step response. It delivers superior dynamic tracking capability under swept-frequency input and cuts the speed fluctuation amplitude by around 80% under variable load conditions. Experimental verification is carried out on a motor back-to-back test platform. The test results prove that MPC achieves smoother response and smaller oscillation when the input signal changes, and possesses stronger adaptability to large load disturbances. Applied to PMSM control in the EMAS of liquid rocket engines, MPC delivers better control performance, effectively improves the overall control effect of the EMAS, and provides an optimized solution for relevant engineering applications.

Keywords: electro mechanical actuation system of liquid rocket engines; permanent magnet synchronous motor; model predictive control; field-oriented control; control performance

Received: 2025-07-04; **Accepted**: 2025-11-21; **Published Online**: 2026-01-15 09:14
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20260114.1437.001
* **Corresponding author**. E-mail: hh13141291049@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0320

联合高效混合编码器和结构重参数化的DINO遥感目标检测算法

张文飞[1,2]，张华卫[1,*]，梅源[3]，肖楠[4]，朱秋东[5]，廉敬[1]

(1. 兰州交通大学 电子与信息工程学院，兰州 730070；2. 西安导航技术研究所，西安 710061；3. 香港理工大学 航空及民航工程学院，香港 999077；4. 平顶山市新城区城市测量队，平顶山 467000；5. 郑州煤电公司芦沟煤矿，新密 452370)

摘 要：应用于遥感图像检测的DINO算法最近受到广泛关注。遥感目标检测任务要求算法具备细粒度特征提取和广阔的空间搜索能力，但DINO算法的多层编解码结构会极大地增加算法的空间和运算复杂度，也不利于快速推理。基于此，提出改进DINO算法，从并行的大核卷积结构更适合遥感图像处理的事实出发，设计单层的高效混合编码器结构，提高了DINO算法的模型参数效率；在高效混合编码器结构内部，重新设计高效混合编码器，该编码器基于高效的卷积运算，采用结构参数化技术，使模型推理的参数量和计算量得到一定程度上的降低，进而降低了DINO算法的推理延迟。在NWPU和DOTA数据集上实验表明，改进DINO算法平均精度均值(mAP)相较原算法有1.8%、3.8%的微弱提升。值得关注的是，改进DINO算法大幅度降低了模型参数量和计算复杂度。相较目前主流算法，改进DINO算法在保持较好精度的情况下，参数量、计算复杂度和推理延迟方面取得较好的效果。

关 键 词：DINO算法；结构重参数化；梯度路径；混合编码器；遥感图像
中图分类号：TP751.1; V243
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2371-12

遥感目标检测是利用遥感数据，如卫星影像或航空影像，自动识别和提取感兴趣的目标或地物的过程，同时，遥感目标检测算法是构建现代遥感大数据智能解译的关键任务[1]。卷积操作专为图像处理领域衍生的算法在COCO数据集上表现出极佳的性能，如DYhead算法[2]、YoloX算法[3]、Yolov7算法[4]、Yolov8算法、混合任务级联(hybrid task cascade, HTC)算法[5]等。

与性能显著的卷积架构的检测算法相比，DETR是从自然语言处理迁移而来的基于Transfomer架构的检测算法，其不需要非极大值抑制(non-maximum suppression, NMS)及候选框生成等组件，实现了与快速区域卷积神经网络(faster region convolutional neural networks, Faster R-CNN)算法相当的性能，是真正意义上端到端检测器[6]。DETR类算法将检测任务视为集合预测任务，其利用Transfomer强大的搜索和建模能力来学习和检索待检测对象的存在，建模图像中的全局上下文和目标之间的关系，进而对整个图像进行全局感知。端到端的设计思想很大程度上简化了复杂的流水线流程，直接从图像中预测目标的位置和类别。但DETR类算法依旧存在诸多问题，如整体性能较差，收敛速度缓慢，需求大量的算力资源，对数据集数量和质量的要求较高，实时性较差等问题。但不容否认，将Transformer

收稿日期：2024-05-14；录用日期：2024-08-30；网络出版时间：2024-10-08 09:11
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240930.1441.003
基金项目：国家自然科学基金（62061023）
*通信作者. E-mail：1210576271@qq.com

引用格式：张文飞，张华卫，梅源，等. 联合高效混合编码器和结构重参数化的DINO遥感目标检测算法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2371-2382. Zhang W F，Zhang H W，Mei Y，et al. A DINO remote sensing target detection algorithm combining efficient hybrid encoder and structural reparameterization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2371-2382 (in Chinese).

思想应用到目标检测领域依然是一个很大胆且有效的创新，也为遥感图像目标检测提供更多的思考。

DINO算法集Transformer的改进思想，并引入加噪训练方式，使DETR-like模型取得了媲美目前的基于卷积神经网络的目标检测算法的效果。虽然DINO算法在训练方式、梯度优化等方面做出了突出贡献，其多层编码器的核心思想依旧是利用自注意力机制和全连接层来建模图像中的全局上下文和目标之间的关系，虽然引入了稀疏注意力机制来缓解收敛困难和计算量大的问题，但依旧存在模型参数量和计算复杂度高，推理实时性差的问题[7]。

得益于Transformer的长距离捕捉特征的能力，DINO算法在遥感领域表现出较好的性能水平。然而，目前较好的遥感检测模型是基于改进的卷积架构的检测器，如DyHead和HTC结合SwinV2的改进模型。虽然RT-DETR算法的推理速度接近YOLO系列，但文献[8]的数据是借助CUDA编译的Deformable attention算子，直接运行的速度还是要慢于YOLO系列。基于卷积操作能够高效地处理图像，以及并行的大核卷积结构更适合遥感场景的事实，本文设计了单层的高效混合编码器结构，在保证模型性能的前提下取代原有的6层Transformer编码器结构，使DINO算法的运算量降低。重参数化技术可以大幅度降低推理延迟。具体来说，本文创新如下：

1）针对遥感场景对上下文信息的重要性，以及缓解卷积模块的信息瓶颈问题，本文设计了基于梯度路径规划的重参数化扩展模块(parallel reparameterized dilated convolution module, PRED)，以适配遥感目标检测任务。

2）本文设计了单层的重参数高效混合编码器(reparameterized high efficiency hybrid encoder, REPEHE)取代原有的基于Transformer的编码器结构，通过卷积模块高效地对多尺度图像内容和物体位置信息进行交互，使本文改进的DINO算法相比原算法显著降低了计算成本，提高了推理速度。

3）本文采用结构重新参数化技术，改进的DINO算法在推理过程中将多个训练分支模块集成到一个完全等效的模块，并删除可能导致增加硬件访问成本的残差连接，有效降低了模型的推理延迟。

1 相关工作

1.1 DETR及其变体

Transformer架构结合扩散生成模型而诞生的ChatGPT在自然语言处理领域获得空前的成功，但应用于目标检测领域的DETR存在收敛困难，模型复杂度高，推理速度极慢，查询(query)的含义不明等问题。近些年许多算法被提出来以解决以上的问题。

facebook AI团队提出一种基于Transformer的检测算法DETR，因其不存在手工设计的组件被誉为真正意义上的端到端检测器。但是将适用于元素量较少的Transformer架构应用到元素量庞大的图像领域后，却导致了该架构在更新权重时伴随的高计算量和高空间复杂度的问题，以及对文本有意义的查询在图像领域的意义不明的问题。后续的研究者从注意力机制、查询机制、条件约束及训练方式等方面解决DETR的诸多问题。例如，文献[9]设计了可专注处理多尺度特征的动态解码器。参考可变形卷积网络(deformable convolutional networks, DCN)思想，Deformable DETR实现了一种局部到稀疏的高效注意力机制，加快了DETR的收敛速度和推理速度，缓解了Transformer更新权重伴随的高计算量和高空间复杂度问题[10]。Conditional DETR揭示了编码器(Decoder)的键(key)和查询同时包含位置和内容信息，同时使key和query两者的位置信息相互交互，两者内容信息相互交互，解码器的条件设置使模型加速收敛，提升了检测效果[11]。Group DETR引入多个object queries，利用one to many的优势提升性能，加速收敛[12]。DAB-DETR(dynamic anchor boxes are better queries for DETR)揭示了解码器的query本质是由decoder embeddings(图像语义)和learnable queries(物体位置的关注)组成，另外发现learnable queries没有显式地位置先验，其提出的Dynamic 4d Anchor Box为解码器提供位置先验的同时能够学习迭代结构，使DETR模型快速收敛，并取得极好的性能表现[13]。

1.2 遥感领域的大核卷积架构

相比通用遥感检测器，遥感目标检测面临的挑战主要源于对象的任意尺度及和上下文信息的紧密关联。一个新兴的趋势是利用大核卷积的大感受野特点针对性设计高效的特征提取模块。相关研究[14-15]证明，大的感受野是遥感目标检测成功的关键因素之一。例如，ConvNeXt的主干网络使用了7×7深度卷积，在遥感领域的下游任务中表现出极佳的性能[16]。RepLKNet使用了31×31的卷积核，随后的SlaK通过内核分解和稀疏组技术将卷积核扩展到51×51[17]。混合架构的Conv2Form表明，大内核卷积在丰富的上下文信息调制特征方面发挥着积极作用。如本节所述，一方面，航拍图像具有独特的特征，使大内核特别适合遥感任务[18]。但需要注意的是，使用大内核卷积的效率不高，还

可能会引入大量的背景噪声, 这可能不利于对小物体的准确检测。另一方面, 扩张卷积虽然可以有效地扩大感受野, 但可能会无意中忽略该领域的细粒度细节, 这可能会导致特征表示过于稀疏。使用扩张卷积, 将常用的 9×9、5×5、3×3 卷积内核并行, 等效的卷积能够在感受野中提取密集的纹理特征。这些纹理特征沿通道维度自适应融合, 从而能够收集局部上下文信息。

1.3　重参数化技术

大量研究表明。多分支结构的性能普遍优于单分支结构, 但单分支结构更有利于工业部署, 基于此, 有研究者提出训练时使用多分支结构而推理时使用单分支的重参数化技术。2021 年采用结构重参数化技术的 RepVGG, 将训练的多路分支重参数化为由计算密度极高的 3×3 卷积组成的单路架构, 节省了大量计算资源, 其效果达到当前最优(state of the art, SOTA)[19]。后续应用于遥感领域的 RepLKNet 算法同样使用了结构重参数化技术, 在效果上达到最佳。技术原理如图 1 所示, 其中, BN 表示批归一化。

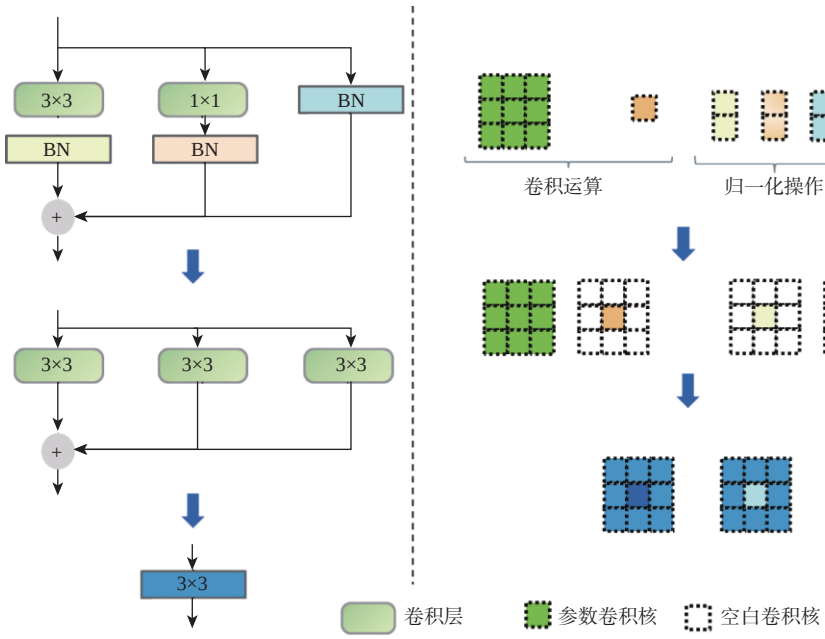


图 1　结构重参数化原理

Fig. 1　Principle of structural reparameterization

2　改进的 DINO 算法

2.1　结构重参数化

结构重参数指在推理阶段将多个计算模块合并为一个。结构重新参数化技术可以看作是一种集成技术, 这种类型的方法在训练期间将模块拆分为多个相同或不同的模块分支, 并在推理过程中将多个分支模块集成到一个完全等效的模块中。残差模块的跳跃连接会缓解网络退化现象, 但会增加硬件访问成本, 从而增加网络推理延迟。FasterVIT 提出的结构重参数化在推理过程删除网络中的跳过连接来降低内存访问成本[20]。

由于多分支架构对训练有益, 缺点是不适合推理, 因此, 通过结构重新参数化来解耦训练时多分支和推理时的架构, 这意味着转换架构, 如果某种结构的参数可以转换为另一种结构的另一组参数, 就可以等价地用后者代替前者, 从而改变整个网络架构。具体结构如图 1 所示。

2.2　并行重参数化扩张卷积模块

文献 [17] 表明, 网络的有效感受野与网络深度的平方根成正相关, 这意味着过深的网络层数会降低模型的参数效率, 但一味的使用大核心卷积操作, 会导致模型无法提取局部抽象的语义信息, 从而无法对检测目标进行分类。大内核卷积应该与并行小内核卷积一起使用, 因为后者有助于模型在训练期间捕获重要的局部信息。另外, 特征图上的像素可能与其相邻元素更相关, 除提取局部信息外, 增强大内核捕获稀疏特征的能力可能会产生更高质量的特征。捕获这些信息可以采用扩张卷积的机制, 但随之而来是膨胀卷积层的额外的推理成本[21]。

为消除额外膨胀卷积层的推理成本, 本文将整个块等价地转换为单个非膨胀卷积层进行推理。模型经过训练后, 使用结构重新参数化方法, 将批归一化层合并到卷积层, 小内核卷积可以等效地合并到大内核中进行推理。忽略输入的像素相当于

在大卷积内核中插入额外的零，因此，具有小内核的扩张卷积层可以等效地转换为具有稀疏更大内核的非扩张（即扩张率r为1，在代码中r为Dilation）的层。基于这种等价的变换，本文提出了一种并行重参数化扩张卷积模块 (parallel reparameterized dilated convolution module, PREPD)，扩张重参数块使用扩张的小内核卷积层来增强非扩张的大内核层，这种膨胀层等价于具有较大稀疏核的非膨胀卷积层。其超参数包括大内核尺寸的大小、并行卷积层尺寸的大小及膨胀率r。结构重参数化可以使整个块可以等价地转换为单个大核卷积，PREPD的具体结构如图2所示。

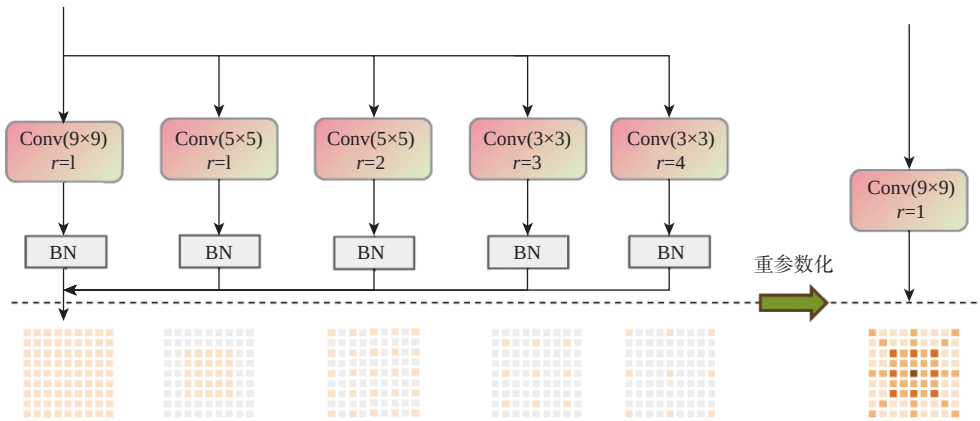


图2 PREPD的结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the PREPD

在空洞卷积层中，参数的数量不受扩张率的影响。卷积层中的参数数量由滤波器的尺寸k、输入通道的数量C_{in}和输出通道C_{out}的数量决定。

假设PREPD内每个卷积运算高效运行，且不考虑内存访问模式和硬件等因素，在不考虑其他操作，如偏置项和激活函数，另外设定每个卷积分支的输出特征尺寸固定，那么，单个空洞卷积层的参数量p计算式为

$$p = k^2 C_{\text{in}} C_{\text{out}} \tag{1}$$

扩张率r的操作方式是在卷积核内插入0的间隙，其不会增加卷积的参数量，仅会扩张滤波器的感受野。扩张卷积层的感受野r_{f}的计算如下：

$$r_{\text{f}} = k + (k-1)(r-1) \tag{2}$$

单个扩展卷积层的计算量G的估算如下：

$$G = 2k^2 H_{\text{out}} W_{\text{out}} C_{\text{in}} C_{\text{out}} \tag{3}$$

式中：H_{out}为输出特征图的高度；W_{out}为输出特征图的宽度。这里不同膨胀系数r($r \leqslant 3$)的输出图略有不同，出于估算的方便，本文假设推理阶段的PREPD模块内每个卷积分支的输出特征图尺寸是相同的。

使用式(1)～式(3)估算训练阶段PREPD的参数量和计算量，其中，浮点运算速度的计算包括将分支输出相加的操作计算量：

$$p_{\text{train}} = 149 C_{\text{in}} C_{\text{out}} \tag{4}$$

$$G_{\text{train}} = 302 H_{\text{out}} W_{\text{out}} C_{\text{in}} C_{\text{out}} \tag{5}$$

式中：p_{train}为训练阶段的参数量；G_{train}为训练阶段的计算量。

推理阶段PREPD的参数量和计算量分别为

$$p_{\text{inf}} = 81 C_{\text{in}} C_{\text{out}} \tag{6}$$

$$G_{\text{inf}} = 166 H_{\text{out}} W_{\text{out}} C_{\text{in}} C_{\text{out}} \tag{7}$$

式(1)～式(7)表明，推理阶段的PREPD相比训练阶段的，参数量大概降低了45.6%，计算量大概降低了45%。必须指出，实际上由于扩张卷积层的硬件计算逻辑和输出特征图尺寸的改变，与具有相同步长和卷积核尺寸的常规卷积相比，计算成本是增加的。本节证明了PREPD提升参数效率的有效性和合理性。技术细节如图2所示。

2.3 基于梯度路径规划的重参数化扩张模块

研究者设计高效架构常考虑因素有参数量、浮点运算速度和计算密度，但是容易忽略输入数据在前馈过程中可能具有不容忽视的信息丢失，这种信息丢失会导致有偏差的梯度流。使用这类偏差的梯度流来更新模型可能导致深度网络建立目标与输入之间存在偏差，导致训练模型产生错误的预测。缓解此问题的一种方法是增加模型的宽度大小，即使模型在数据前馈过程中会丢失信息，仍然有机会保留足够的信息来执行准确的目标检测任务。因此，大多数现代模型的宽度比深度更重要，但这样不能从根本上解决深层的神经网络中梯度不可靠的问题，更不能提升模型参数效率。对于输入数据在前馈过程中可能具有不可忽略的信息丢失的问题，文献[22]指出，来自深层网络的初始梯

度在传输目标后立即丢失了大量信息, 但 CSPNet (cross stage partial networks) 和高效层聚合网络 (efficient layer aggregation networks, ELAN) 可以保留的重要信息的比例相比大部分其他模块要高, 因为这些模块的结构是用梯度路径规划设计的[22]。

CSPVoVNet[4] 从梯度路径的角度进行分析, 认为控制最短最长梯度路径, 使不同层的权重能够学习更多样化的特征, 让更深的网络可以有效地学习和收敛, 也可以使模型推理更快、更准确。

YOLOv7 的 ELAN 模块使用 expand、shuffle、merge 操作来实现在不破坏原始梯度路径的情况下增强网络学习能力。参考表现优秀的 ELAN 结构, 结合重参数化扩张模块, 本文设计了高效的基于梯度路径规划的重参数化扩张卷积模块 (reparameterized dilated convolution module based on gradient path planning, REDG), 且该模块在权重、推理速度和准确性达到了很好的平衡。首先, 输入特征经过卷积操作, 在通道维度进行拆分操作; 然后, 将其中一部分特征输入到 REPD 模块进行处理, 再将得到的特征再次输入到 REPD; 最后, 参照 ELAN 结构将以上三部分在维度方面进行拼接。其整体架构如图 3 所示。

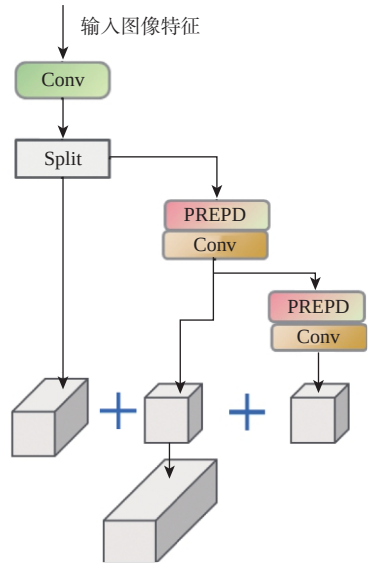
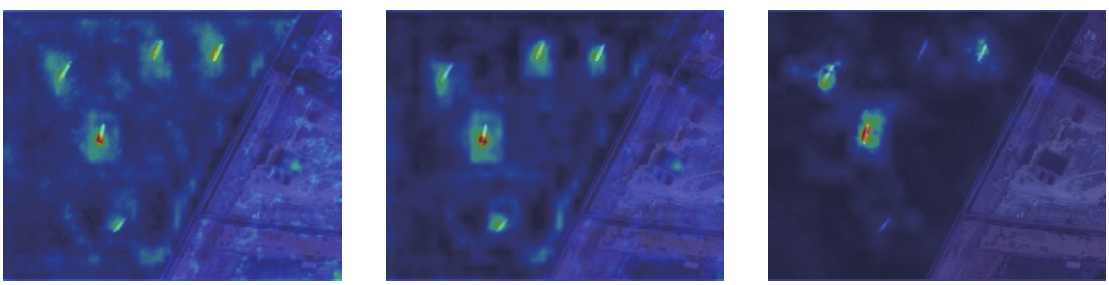


图 3　REPD 的结构示意图

Fig. 3　Structure diagram of REPD

从不同网络架构的热力图映射可视化结果(见图 4)可以看到, 不同卷积架构的信息出现不同程度的损失, 导致检测端对一些目标不重视。而 ELAN 和 REPD 能够尽可能保留完整可靠的梯度信息, 来计算目标函数。图 4 中, 红黄色区域为网络关注区域。



(a) REPD　　(b) ELAN　　(c) C2F

图 4　不同网络架构的热力图映射可视化结果

Fig. 4　Visualization results of heat map mapping of different network architectures

2.4　重参数高效混合编码器

Deformable DETR[10] 证明将多尺度特征引入到 DETR 类模型中, 可以提高性能和收敛速度, 而且其稀疏的注意力机制可以很大程度上降低 DETR 对算力的庞大需求。Deformable DETR 卷积运算模块以其简洁、滑动、专为图像处理的先天优势也获得极佳的性能表现。2023 年 RT-DETR[8] 的研究团队提出混合编码器结构, 通过尺度内交互和跨尺度融合将多尺度特征转换为一系列图像特征, 并将多尺度特征交互解耦为尺度内交互和跨尺度融合的两步操作, 显著降低了计算成本, 但相比 YOLO 系列依然存在参数量和计算量较大的问题。

结合重参数化思想和本文提出的基于梯度路径规划的重参数化扩张模块, 设计了重参数化高效混合编码器结构, 该结构可以很大程度上降低改进的 DETR 的参数量、计算复杂化, 降低推理延迟。

重参数化高效混合编码结构主要由具有多尺度可变形多头自注意力机制模块、跨尺度融合模块构成。自注意力模块是由一层编码器组成, 跨尺度融合模块由 PRED 和普通卷积操作组成类金字塔结构。首先, 将深层抽象的高层语义特征信息输入多头自注意力机制, 利用自注意力机制可以更容易捕获丰富抽象语义概念的高级特征之间的概念实体之间的连接; 然后, 通过跨尺度融合模块, 借助高

效的操作卷积，以类似特征金字塔的方式，以实现低参数量、低复杂度、低延迟、高性能的编码器结构。其结构如图5所示，其中，***Q***、***K*** 和 ***V*** 分别为查询向量、键向量和词实际包含的信息。

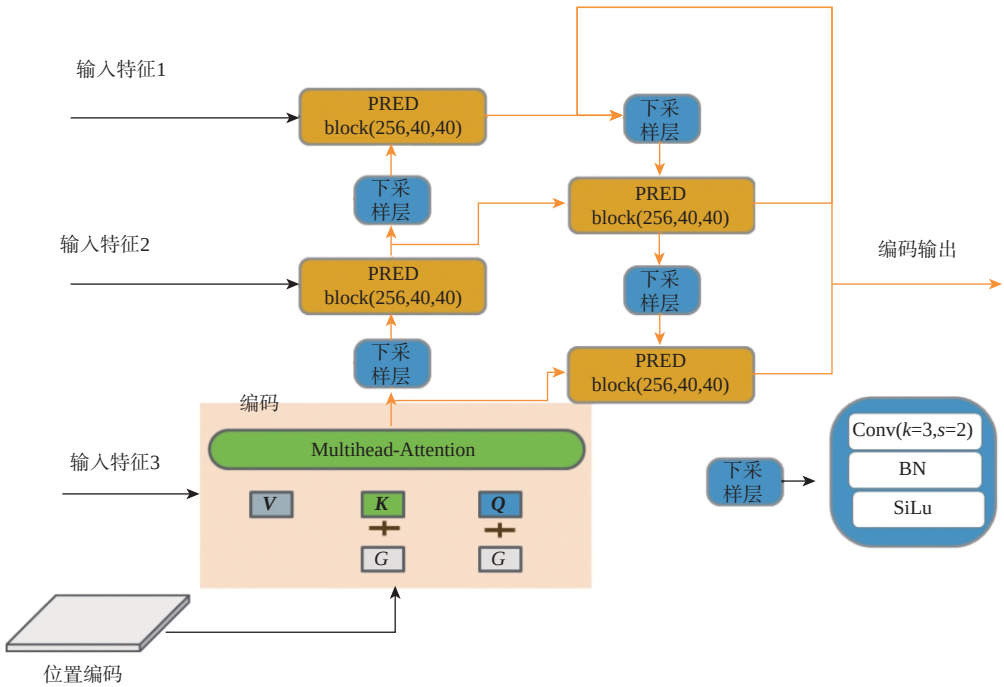


图5 重参数高效混合编码器结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of the REPEHE

2.5 改进 DINO 算法的框架图

改进的 DINO 算法主要使用对 GPU 友好的 HGNet 骨干网络，加快网络速度、进行多尺度特征融合的重参数高效混合编码器结构，以及能大幅度降低推理模型参数量、计算复杂度和推理延迟的基于梯度路径规划的重参数化扩张模块。

输入的遥感图像经过主干网络提取多尺度特征信息，32倍下采样的深层特征信息保留了遥感场景的完整的高维抽象信息，所以将32倍下采样信息输入到编码器中，并添加位置编码方便解码器的位置回归。由于多尺度特征融合有助于提升模型的整体性能，故将一层编码器的输出与来自骨干的多尺度信息输入卷积模块进行特征融合，最终由6层编码器解码预测。整体模型如图6所示。

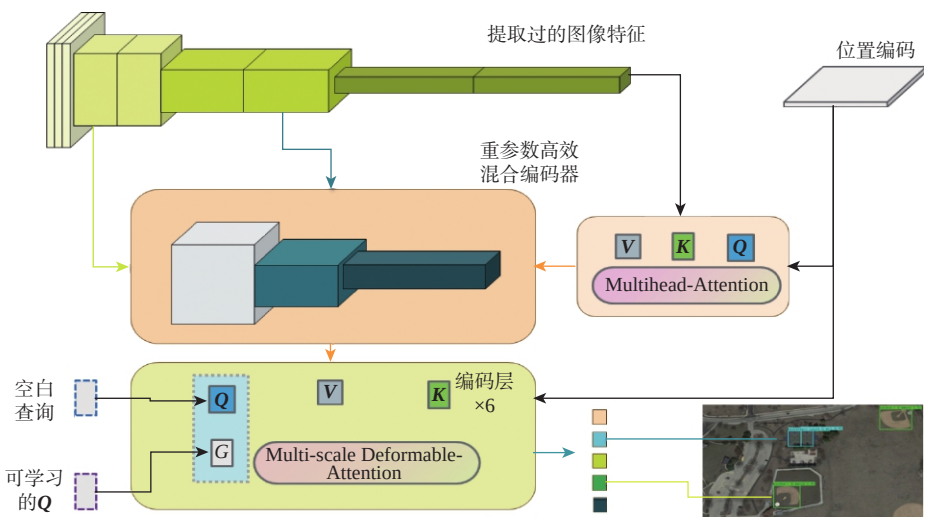


图6 改进的 DINO 算法整体结构示意图

Fig. 6 Overall structure diagram of the improved DINO algorithm

3 实　验

3.1 实验环境参数与数据集

实验基于 Pytorch11.6 版本的框架, 硬件规格为 NVIDIA RTX3080 GPU、12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700KF CPU 及 32 GB 内存。

模型训练的 epochs 为 200, batch size 为 6, 优化器为 adamW, 设置初始 learning_rate 为 5×10^{-4}, 初始 moment 为 0.9, 其余训练参数和数据增强策略均与 DINO 算法一致。

实验采用了 NWPU VHR-10 遥感数据集和 DOTA 数据集进行实验。NWPU VHR-10 数据集是西北工业大学于 2014 年推出的遥感数据集, 包含 10 类检测对象, 共有 800 张图像和 3 775 个实例。基于 7∶1∶2 进行训练集、测试集和验证集的划分。DOTA 数据集是高分辨率航空影像物体检测数据集, 具有 15 个类别的对象, 近 190 000 个实例对象。在训练前进行剪裁处理, 并经过随机筛选, 得到 21 046 张图像。数据集划分的比例是 6∶2∶2。

3.2 评价指标

为全面评价目标检测模型的性能, 本文使用的评价指标为单类平均精度(average precision, AP)和平均精度均值(mean average precision, mAP)。由于模型的帧率不仅受到硬件算力影响, 还受到诸如前处理、驱动、NMS、图片等因素影响, 实验得到的帧率值波动幅度较大, 故本文在衡量算法处理速度方面使用的参数为相对稳定的延迟 (latency)。除此之外参数 P 是衡量网络模型中需要训练的参数总量, G_P 表示模型浮点运算速度, 是来衡量网络模型的计算复杂度。P 和 G_P 数据均由 python 的 thop 库提供。

准确度和召回率有一定的互斥性, 在某一门限的条件下, 准确度高, 那么相应的召回率就相应的有降低趋势, 表示出“想要预测的越精确, 那么遗漏的物体就越多”。所以精确度 P 或召回率 R 均不能很好反应检测器的综合性能, 学术上常用 P-R 曲线的积分来展现检测器的性能好坏。AP 是目标检测领域中常用的一种性能指标, 通常被用来评估模型的精度和效率, 表达式为

$$A_P=\sum_{n}(R_n-R_{n-1})P_n \tag{8}$$

式中: n 为参考点个数, 一般取 10, 计算 A_P 是在横轴 R 上取 0.1、0.2、…、1 点上取对应的 P 值, 然后求和。A_P 是单个类别的 P-R 曲线的积分, m_{AP} 是多个类别 A_P 的平均值, 所以 A_P 和 m_{AP} 是表示检测器性能很重要的指标。m_{AP} 的定义如下:

$$m_{AP}=\sum_{q=1}^{Q_c}A_P(q)/Q_c \tag{9}$$

式中: Q_c 为待检测物体的类别。mAP50 的 50 表示定位的预测框和真实框之间的交并比(intersection over union, IOU)为 0.5, 只有当定位更精准的预测才会被认为是正样本。mAP50-95 是在 50 到 95 之间平均取 11 个 IOU 阈值求各自的 mAP, 再求平均。一般来说, mAP50 的阈值低, 要求更宽松, 而 mAP50-95 要求更严格

一般来说, 参数量少的模型, 其计算量一般较低, 但这并不绝对。如深度可分离卷积 DWConv 和 GConv, 由于频繁的内存访问导致延迟较高[23]。Latency 公式如下:

$$l=G/G_P \tag{10}$$

某一硬件的每秒运算浮点数是不同的, 网络需求的浮点运算次数也是不同的, 那么处理延迟和速度就不一样。一般学术上衡量速度的指标是同一硬件条件下每秒处理的图片数量帧率, 但实验表明帧率受相关不可控因素印象波动较大, 而延迟稳定也更能说明问题, 故本文使用 latency 指标评价模型速度。

3.3 实验结果可视化

采用改进的 DINO 算法在 NWPU 遥感数据集上进行实验, 得到的检测结果如图 7 所示。

由图 7 可以看到, 改进 DINO 算法可以对遥感图像中的各类别的目标信息进行定位与识别, 其中, 框内是检测结果。密集小目标如油气存储罐可以被准确无遗漏地检测出来, 同时检测的置信度较高。改进 DINO 算法可以在飞机目标密集的场所筛除与飞浆结构类似的物体结构, 回归框不偏离地恰好框住飞机目标。对于尺度变化较大的大桥, 回归框也可以准确地回归出位置。在 NWPU 数据集的实验表明, 改进的 DINO 算法相比原算法参数量降低 48.3%, 运算复杂度降低 73%, 推理延迟从 42.6 ms 降低到 13.5 ms。相比最新的经典算法, 改进的 DINO 算法各方面取得了优先性能。

3.4 算法比较

为比较改进 DINO 算法与其他主流目标检测算法在遥感数据集上的性能差异, 本文选取了 3 种较新的 DETR 检测算法, 如 DETR[5]、DINO[7]、RT-DETR[8], 以及 4 种主流的经典检测算法, 如 Faster RCNN[24]、YoloX-l[3]、Yolov7[4]、Yolov8-m[9] 在 NWPU 遥感数据集上进行比较, 具体结果如表 1 所示。

由图 8 可知, 本文改进的 DINO 算法可以在精度方面与主流 CNN 架构算法持平, 速度方面略微优于同规格卷积架构模型。在 Transformer 架构远远优于同类型 DETR 算法。得益于重参数高效混

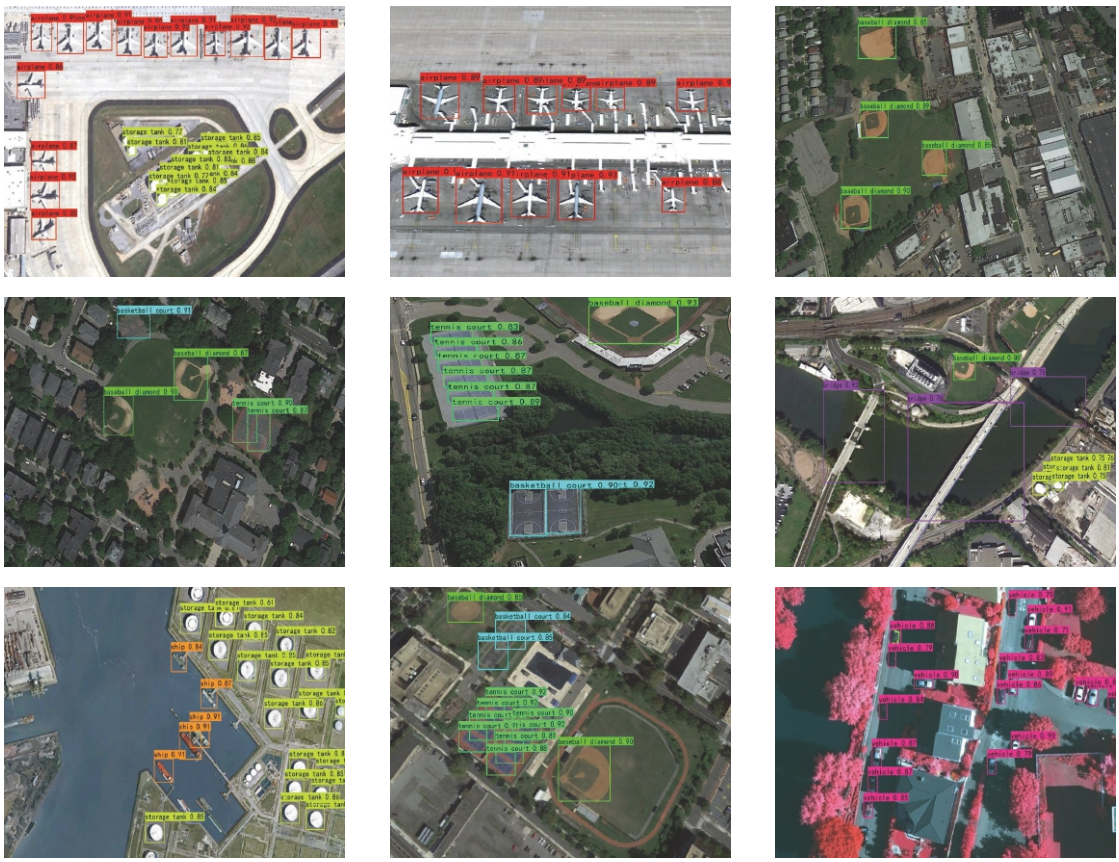


图7 本文改进DINO算法检测结果可视化

Fig. 7 Visualization of detection results of the improved DINO algorithm

表1 各算法性能比较

Table 1 Performance comparison of each algorithm

网络架构	算法	参数量	浮点计算量	延迟/ms	mAP50/%	mAP50-95/%	mAP50*/%	mAP50-95*/%
CNN	Faster RCNN[24]	137.1×10^6	370×10^9	60.2	88.80	58.9		
	Yolox-l[3]	54.2×10^6	155.6×10^9	14.6	95.60	60.2		
	Yolov7[4]	37.6×10^6	106.5×10^9	15.8	96.50	62.3		
	Yolov8m[9]	25.9×10^6	79.1×10^9	14.2	94.20	61.5	82.5	59.0
Transformer	DETR[8]	42.8×10^6	89.2×10^9	125.0	89.37	56.7		
	DINO[7]	41.2×10^6	240×10^9	42.6	94.70	60.2	80.4	57.1
	RT-DETR[8]	29.3×10^6	105.2×10^9	22.0	95.30	63.2	82.0	58.4
	改进DINO算法	21.3×10^6	64.8×10^9	13.5	96.30	64.0	83.7	59.7

注: *表示在DOTA数据集的测试结果。

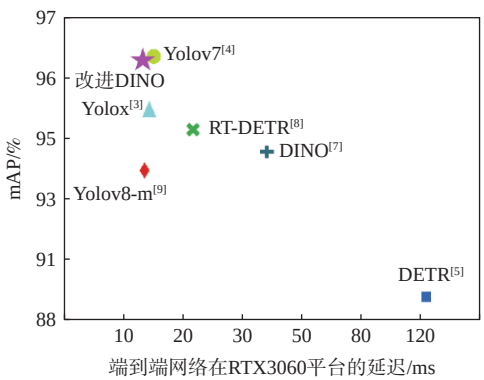
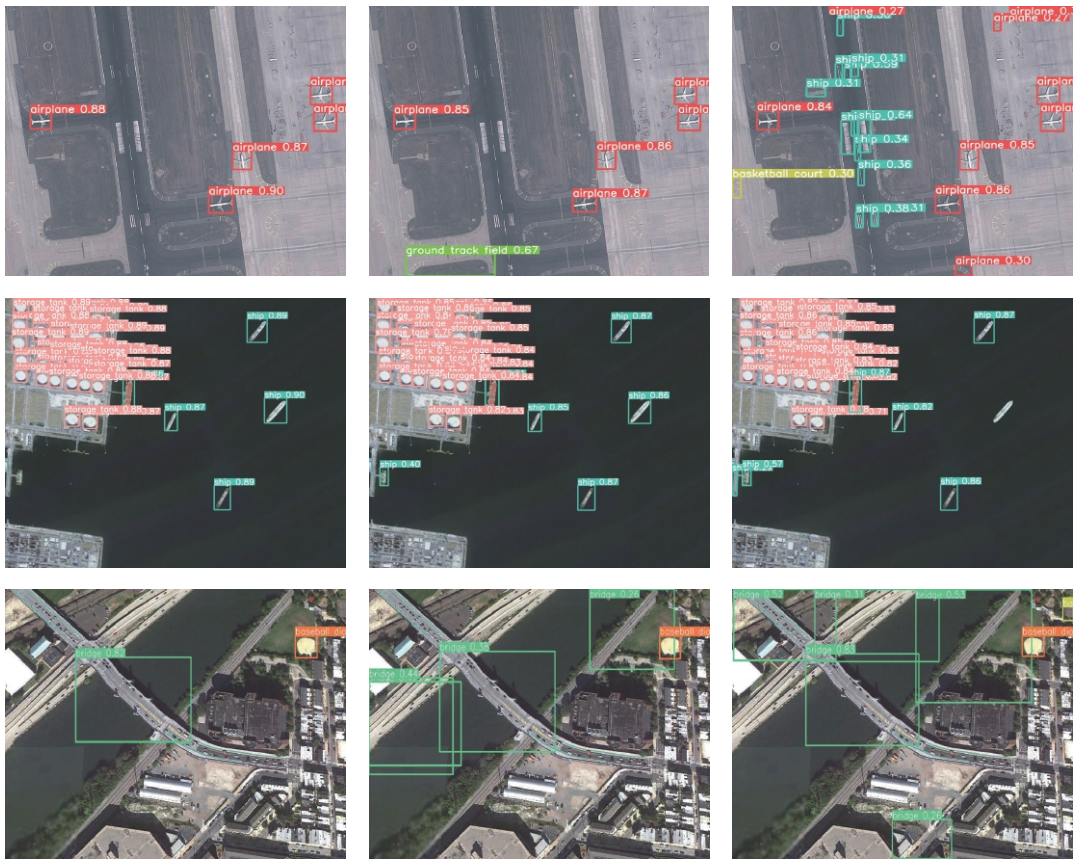


图8 改进DINO算法与其他主流算法结果对比

Fig. 8 The improved DINO algorithm is compared with other mainstream algorithms

合编码器结构具备的多尺度特征信息融合能力,以及并行扩张卷积模块的大卷积核和结构重参数思想,改进的DINO性能表现比同类型高数个百分比,而且大大减小了模型推理的速度、参数量及计算复杂度,提升了改进DINO的参数利用率。

由图9可知,采用编码器-解码器的DINO算法利用稀疏自注意力机制和感知层高效地建模遥感图像的全局信息,实现了图像的感知和检测。但是,图像在普通卷积残差网络的处理过程中丢失局部信息,而解码器利用缺失的特征来建立检测目标的映射,易导致错误检测。RT-DETR算法创新地利用混合编码器结构降低deformable multi-head-



(a) 改进DINO　　(b) DINO[7]　　(c) RT-DETR[8]

图 9　改进 DINO 算法与 DINO 算法、RT-DETR 算法的检测结果对比

Fig. 9　Comparison of detection results of the improved DINO algorithm with DINO and RT-DETR algorithms

attention 架构的编解码器的复杂度, 但其混合编码器的残差模块 C2F(convolution to feature) 很可能出现不同程度的信息损失, 不会为解码器提供可靠的梯度信息来计算目标函数。如果浅层信息在监督训练过程中丢失部分信息, 这种错误会积累, 可能导致解码器无法检索需要的信息, 从而导致检测错误。上述原始 DINO 算法缺失船只和大桥的细节信息, 从而预测错误; 可能由于部分船只的信息在网络处理过程中丢失, 导致 RT-DETR 算法漏检。

3.5　消融实验

3.5.1　改进 DINO 算法的消融实验

为验证混合编码器结构和重参数高效混合编码器在 DINO 中的改进效果, 在此进行了前后的对比实验, 结果如表 2 所示。

虽然 deformable DETR 揭示了引入多尺度特征信息有利于加速训练收敛并提高性能, 但多头自注意力机制的运算特点将导致序列输入编码器的长度显着增加, 计算成本显著增加。参考卷积神经网络的特征金字塔结构, 本文使用由一层编码器和类特征金字塔结构构成混合编码器来替代 DINO 原本 6 层的编码器结构。由于卷积模块擅长快速处理图片特征且可以直接处理多尺度特征, 同时拥有显式的位置编码信息, 那么混合编码器就可以有效快速地处理不同尺度的特征。从表 2 中可以看到, 采用普通混合编码器后, 大大降低了原本采用 6 层基于多头自注意力机制的编码器结构的参数量、计算复杂度和推理延迟, 一定程度上提升了算法检测精度。

采用重参数高效混合编码器的 DINO 算法, 模型参数量、计算复杂度和推理延迟得到进一步的降低, 算法的参数利用率进一步得到提高。由于 REPEHE 采用的卷积架构是基于梯度路径规划的

表 2　改进 DINO 算法的消融实验

Table 2　Ablation experiment of the improved DINO algorithm

架构	参数量	浮点计算量	延迟/ms	mAP50/%	mAP50*/%	mAP50-95*/%
DINO(HGNet)	41.2×10^6	240×10^9	42.6	94.7	80.4	57.1
DINO(HGNet)+ EHE(C2F)	29.3×10^6	105.2×10^9	22	95.3	82.3	59.0
DINO(HGNet)+REPEHE	21.3×10^6	64.8×10^9	13.5	96.3	83.7	59.7

注: *表示在DOTA数据集的测试结果。

设计思想，相比 Yolov8 普通的残差模块 C2F 能够最大程度避免输入数据在前馈过程丢失过量的信息，保证模型最终的的检测精度。并行重参数化扩张卷积模块具备捕捉稀疏特征信息的大核卷积模式和捕捉局部细节信息的小核卷积，这种模式对于注重上下文信息和局部细节信息的遥感图像目标检测任务是完全合理的。结构重参数化技术可以消除并行扩张卷积模块带来的额外的推理成本，模型在推理时可以将整个并行重参数化扩张卷积模块等效为一个非扩张大核卷积，大大节省了模型的推理延迟和计算复杂度。消融实验结果与理论一致，证明本文的改进是合理可行的。

3.5.2 重参数高效混合编码器结构设计

为证明采用基于梯度路径规划的重参数化扩张模块的混合编码器结构比采用常用残差模块的混合编码器更有效，在 DINO 采用混合编码器结构的前提下，采用多种残差模块进行实验，结果如表 3 所示。

表 3 由主流卷积模块构成的混合编码器在 NWPU 数据集的性能

Table 3 Performance comparison of hybrid encoders composed of mainstream convolution modules on NWPU

网络架构	参数量	浮点计算量	延迟/ms	mAP50/%
DINO(HGNet)	41.2×10^6	240×10^9	42.6	94.7
DETR(HGNet)+EHE (ELAN)	31.9×10^6	118.3×10^9	15.2	93.8
DETR(HGNet)+ EHE(C3)	32.3×10^6	121.8×10^9	16.2	94.1
DETR+EHE+(C2F)	29.3×10^6	105.2×10^9	22.0	95.3
DETR(HGNet)+REPEHE	21.3×10^6	64.8×10^9	13.5	96.3

C3 模块结构融合了 CSPNet 的分流思想和 Bottleneck 的残差思想，然后由参数去控制堆叠层数。CSPNet[25] 同样是基于梯度路径规划设计的通用卷积模块，在深层网络中可以尽量缓解由于信息瓶颈导致的信息丢失的问题。相比原本对计算量需求较大的 6 层编码器结构，C3 可以以微小的性能损失换取极低的计算复杂度和极短的推理延迟，同时模型参数也降低了约 20%，实现了更高的参数利用率。YOLOv7 的 ELAN 模块通过逐层拼接操作可以获得更加丰富的梯度信息，具备更高精度和更合理的推理延迟。C2F 模块是在 C3 的基础上参考了 ELAN 的结构进行重新设计，在降低参数量和计算复杂度的同时获得更加丰富的梯度信息，缓解输入数据在前馈过程中丢失信息的现象。REPEHE 具备更为丰富的梯度信息，其 PREPD 具备更大的有效感受野，可以同时捕获更大范围的稀疏特征和局部细节特征，尤其适合遥感场景。PREPD 可以让改进的 DINO 算法在推理阶段拥有更高的精度、更低的推理延迟、更小的参数量和更低的计算复杂度。实验证明本文的改进策略是合理有效的。

4 结 论

1）为缓解 DINO 算法 6 层编码器带来的高复杂度问题，本文引入单层的混合编码器，利用卷积对遥感影像的高效处理来辅助编码器工作，提高模型的参数效率，降低推理延迟。

2）为解决应用单层编码器导致的模型性能下降问题，本文设计了 PREPD。扩张卷积可以增强大内核卷积捕获稀疏特征的能力，同时并行的小内核有助于在训练期间捕获小规模遥感图像细节信息，多个轻量级卷积块可以提高深度以增强表示能力。

3）基于梯度路径设计的 REDG 可以缓解偏差的梯度流导致的错误的预测，消融实验证明 REDG 相比经典的 C3、C2F、ELAN 更适合遥感目标检测任务。

4）结构重参数化技术消除了额外膨胀卷积层的推理成本，降低模型推理延迟。

5）在 NWPU 数据集的实验表明，改进的 DINO 算法相比原算法参数量降低 48.3%，运算复杂度降低 73%，推理延迟从 42.6 ms 降低到 13.5 ms。相比最新的经典算法，改进的 DINO 算法各方面取得了优先性能。

参考文献（References）

[1] 成科扬, 荣兰, 蒋森林, 等. 面向目标检测的双驱自适应遥感图像超分重建方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(8): 1343-1352.
Cheng K Y, Rong L, Jiang S L, et al. Double drive adaptive super-resolution reconstruction method of remote sensing images for object detection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(8): 1343-1352(in Chinese).

[2] Dai X Y, Chen Y P, Xiao B, et al. Dynamic head: unifying object detection heads with attentions[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 7369-7378.

[3] Ge Z, Liu S T, Wang F, et al. YOLOX: exceeding YOLO series in 2021[EB/OL].(2021-07-18)[2024-04-20].https://arxiv.org/abs/2107.08430.

[4] Wang C Y, Bochkovskiy A, Liao H M. YOLOv7: trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2023: 7464-7475.

[5] Chen K, Pang J M, Wang J Q, et al. Hybrid task cascade for instance segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 4969-4978.

[6] Carion N, Massa F, Synnaeve G, et al. End-to-end object detection with transformers[C]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV. Berlin: Springer, 2020: 213-229.

[7] Zhang H, Li F, Liu S L, et al. DINO: DETR with improved DeNoising anchor boxes for end-to-end object detection[EB/OL]. (2022-03-07)[2024-04-20]. https://arxiv.org/abs/2203.03605.

[8] Zhao Y A, Lv W Y, Xu S L, et al. DETRs beat YOLOs on real-time object detection[EB/OL]. (2023-04-17)[2024-04-20]. https://arxiv.org/abs/2304.08069.

[9] Muhammad Yaseen M. What is YOLOv8: an in-depth exploration of the internal features of the next-generation object detector [EB/OL]. (2024-08-28)[2024-08-30]. https://arxiv.org/abs/2408.15857.

[10] Zhu X Z, Su W J, Lu L W, et al. Deformable DETR: deformable transformers for end-to-end object detection[EB/OL]. (2020-10-08)[2024-04-20]. https://arxiv.org/abs/2010.04159.

[11] Chen X K, Wei F Y, Zeng G, et al. Conditional DETR V2: efficient detection transformer with box queries[EB/OL]. (2022-07-18)[2024-04-21]. https://arxiv.org/abs/2207.08914.

[12] Chen Q, Chen X K, Wang J, et al. Group DETR: fast DETR training with group-wise one-to-many assignment[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2024: 6610-6619.

[13] Liu S L, Li F, Zhang H, et al. DAB-DETR: dynamic anchor boxes are better queries for DETR[EB/OL]. (2022-01-28)[2024-04-21]. https://arxiv.org/abs/2201.12329.

[14] Ranftl R, Bochkovskiy A, Koltun V. Vision transformers for dense prediction[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2022: 12159-12168.

[15] Zheng S X, Lu J C, Zhao H S, et al. Rethinking semantic segmentation from a sequence-to-sequence perspective with transformers[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 6877-6886.

[16] Liu Z, Mao H Z, Wu C Y, et al. A ConvNet for the 2020s[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 11966-11976.

[17] Ding X H, Zhang X Y, Han J G, et al. Scaling up your kernels to 31x31: revisiting large kernel design in CNNs[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 11963-11975.

[18] Hou Q B, Lu C Z, Cheng M M, et al. Conv2Former: a simple transformer-style ConvNet for visual recognition[EB/OL]. (2022-11-22)[2024-04-21]. https://arxiv.org/abs/2211.11943.

[19] Ding X H, Zhang X Y, Ma N N, et al. RepVGG: making VGG-style ConvNets great again[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 13728-13737.

[20] Hatamizadeh A, Heinrich G, Yin H X, et al. FasterViT: fast vision transformers with hierarchical attention[EB/OL]. (2023-06-09)[2024-04-21]. https://arxiv.org/abs/2306.06189.

[21] Ding X H, Zhang Y Y, Ge Y X, et al. UniRepLKNet: a universal perception large-kernel ConvNet for audio, video, point cloud, time-series and image recognition[EB/OL]. (2023-11-27)[2024-04-22]. https://arxiv.org/abs/2311.15599.

[22] Wang C Y, Yeh I H, Liao H M. YOLOv9: learning what you want to learn using programmable gradient information[EB/OL]. (2024-02-21)[2024-04-22]. https://arxiv.org/abs/2402.13616.

[23] Chen J R, Kao S H, He H, et al. Run, don't walk: chasing higher FLOPS for faster neural networks[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2023: 12021-12031.

[24] Girshick R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1440-1448.

[25] Wu W T, Liu H, Li L L, et al. Application of local fully convolutional neural network combined with YOLOv5 algorithm in small target detection of remote sensing image[J]. PLOS One, 2021, 16(10): e0259283.

A DINO remote sensing target detection algorithm combining efficient hybrid encoder and structural reparameterization

ZHANG Wenfei[1, 2], ZHANG Huawei[1, *], MEI Yuan[3], XIAO Nan[4], ZHU Qiudong[5], LIAN Jing[1]

(1. College of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Xi 'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an 710061, China;
3. School of Aeronautics and Civil Aviation Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;
4. Pingdingshan New City Urban Survey Team, Pingdingshan 467000, China;
5. Lugou Coal Mine of Zhengzhou Coal and Electricity Company, Xinmi 452370, China)

Abstract: The DINO algorithm, tailored for remote sensing image detection, has garnered significant traction in recent research circles. Remote sensing object detection mandates algorithms to excel in both fine-grained feature extraction and large-scale spatial search capabilities. However, an improved DINO algorithm is proposed, the inherent multi-layer encoder-decoder architecture of the vanilla DINO algorithm incurs substantial spatial and computational overhead, posing notable impediments to real-time inference performance. To address these limitations, this study capitalizes on the inherent suitability of parallel large-kernel convolution structures for remote sensing image processing, proposing a single-layer efficient hybrid encoder architecture to enhance the parameter efficiency of the DINO algorithm framework. Within this novel encoder structure, we redesign the core module based on high-efficiency convolution operations and integrate structural parameterization techniques. This design strategically reduces both the number of trainable parameters and floating-point operations during inference, thereby effectively mitigating the latency bottleneck of the original DINO algorithm. Experimental evaluations on the NWPU VHR and DOTA datasets demonstrate that the improved DINO algorithm achieves marginal yet consistent performance gains, with mean average precision (mAP) improvements of 1.8% and 3.8% respectively compared to the baseline. Most notably, the proposed modifications yield substantial reductions in model size and computational complexity. When benchmarked against state-of-the-art remote sensing detection algorithms, the improved DINO algorithm maintains competitive detection accuracy while outperforming counterparts in terms of parameter efficiency, computational cost, and inference speed.

Keywords: DINO algorithm; structural reparameterization; gradient path; hybrid coder; remote sensing image

Received: 2024-05-14; **Accepted**: 2024-08-30; **Published Online**: 2024-10-08 09:11
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240930.1441.003
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62061023)
* **Corresponding author**. E-mail: 1210576271@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0340

基于深度强化学习+模拟退火的地磁感知导航方法

李红*，徐晨燕，刘恒宇
(西安邮电大学 自动化学院，西安 710121)

摘 要：在无先验条件的未知环境中，水下自主潜航器（AUV）的路径规划与导航是一大挑战。基于此，提出一种无需先验地磁图的感知导航方法，该方法融合了深度强化学习（DRL）和模拟退火（SA）算法，以实现有效的路径规划和地磁图构建。通过搭建深度Q网络（DQN）对载体进行环境探索，收集局部地磁数据，进而利用所收集的数据训练一个回归模型以预测全局地磁图。与此同时，采用模拟退火算法对水下自主无人潜航器的路径进行优化，以避免载体空间搜索陷入局部极小问题。通过一系列仿真实验，验证了所提方法在路径长度、探索效率及地磁图准确性方面的有效性。研究结果表明：所提方法能够显著提高水下自主无人潜航器在未知环境中的导航性能，并为地磁图的构建提供了一种新的途径。

关 键 词：水下自主潜航器；自主导航；地磁导航；路径优化；地磁图构建
中图分类号：U666.1; TB18, V249
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2383-10

海洋作为地球上最为辽阔且神秘的领域，蕴藏着无尽的资源与奥秘。水下自主潜航器(autonomous underwater vehicle, AUV)作为人类探索海洋的重要工具，在多个领域发挥着举足轻重的作用[1]。然而，深海环境的特殊性使得AUV的导航问题成为一项极具挑战性的任务。面对该问题，科学界提出了不同的解决方案，比如利用地球物理场进行导航，如地磁[2-4]、地形[5]、重力场导航[6-7]等。

在众多导航方法中，地磁导航以其独特的优势备受关注。地磁导航作为一种天然的导航方式，利用地球磁场的变化特征来实现定位和方向判定[8-10]。相较于其他导航方式，地磁导航不依赖于外部设施，具有高度的隐蔽性和安全性，特别适用于水下、地下等复杂环境。因此，研究基于地磁场的AUV导航方法具有重要的理论和实践意义。

在复杂的未知环境中，实现高效、准确的路径规划与导航是一项具有挑战性的任务。传统的导航方法往往依赖于先验的环境地图或预设的导航规则，Chen等针对地磁导航过程中的匹配问题，提出一种基于概率神经网络的地磁矢量模式匹配方法，实现地磁匹配导航[11]。然而，在无先验条件的未知环境中，这些方法的有效性将受到严重限制。因此，探索一种无需环境地图的载体导航方法，对于提升载体在复杂环境中的自主导航能力具有重要意义。

近年来，深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)在载体导航领域展现出了巨大潜力[12]。Panda等针对动态未知环境下的路径规划问题，通过强化学习算法优化路径规划参数，提高了算法的规划能力[13]；Grando等开展了基于强化学习的混合式无人机/水下航行器无图导航算法研究，研究结果表明，其设计的基于强化学习算法导航能力优于基于行为的算法[14]。通过与环境进行交互并学习决策策略，深度Q网络(deep Q networks, DQN)能够

收稿日期：2024-05-21；**录用日期**：2024-08-30；**网络出版时间**：2024-09-24 15:39
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240924.1303.002
基金项目：陕西省科技厅自然科学基础研究计划 (2024JC-YBMS-549)；陕西省重点产业链项目 (2021ZDLGY04-04)；陕西省重点研发计划 (2022NY-087)；陕西省社科联/陕西省应急管理厅项目 (2021HZ1121)；西安邮电大学研究生创新基金 (CXJJZL2023033)
* **通信作者**. E-mail：lihong@xupt.edu.cn

引用格式：*李红，徐晨燕，刘恒宇. 基于深度强化学习+模拟退火的地磁感知导航方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2383-2392. Li H，Xu C Y，Liu H Y. Geomagnetic sensing navigation method based on deep reinforcement learning and simulated annealing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2383-2392（in Chinese）.*

使载体在未知环境中进行自主探索和学习。此外，模拟退火(simulated annealing, SA)算法作为一种优化算法，能够有效地在复杂的搜索空间中寻找最优解[15]。

鉴于此，本文提出了一种结合DQN和SA算法的载体导航方法。该方法通过DQN辅助载体进行环境探索，收集地磁数据，并利用这些数据训练一个回归模型以预测全环境的地磁图。在此基础上，采用模拟退火算法对载体的路径进行优化，以寻找更优的路径解决方案。通过本文方法旨在实现载体在未知环境中的有效路径规划和地磁图构建。实验结果表明，本文方法在路径长度、探索效率及地磁图准确性方面均表现出色，能够显著提高载体在未知环境中的导航性能。

1 问题描述

1.1 深度强化学习加模拟退火算法路径优化

深度强化学习是一种结合了深度学习和强化学习的算法，用于解决复杂的决策问题。在路径优化问题中，DQN可以用于学习从当前位置到目标位置的最优路径。然而，DQN算法可能会陷入局部最优解，特别是当环境状态空间较大或较为复杂时。模拟退火作为一种全局优化算法，可以与DRL结合使用，以提高找到全局最优路径的概率。

深度强化学习算法是Q-learning的一种改进算法，使用神经网络代替Q-learning算法中的Q表，如图1所示，其中，输入为状态向量，输出为各动作对应的动作价值A_i。

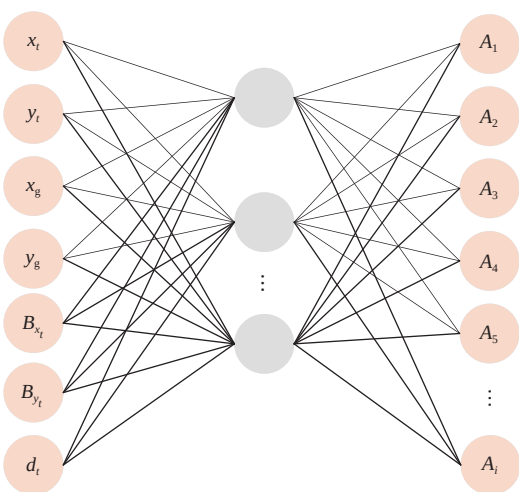


图1 神经网络结构

Fig. 1 Neural networks structure

采用神经网络近似Q值函数的方法可以有效解决维数灾难这个问题。在路径优化问题中，状态空间$\boldsymbol{S}_t$的维度可能会很大，包含载体的当前位置$\boldsymbol{p}_t=(x_t,y_t)$、目标位置$\boldsymbol{p}_g=(x_g,y_g)$及当前位置的地磁值$\boldsymbol{M}_g=(B_{x_t},B_{y_t})$等多个参数。设动作空间为$A$，表示载体在每个时间步可执行动作的集合。本文将动作离散化为$A=\{0,1,\cdots,359\}$，其中，每个动作对应一个转向角增量。图2为状态示意图。

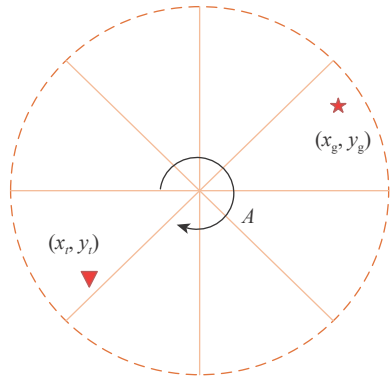


图2 状态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of state

状态向量可以表示为

$$\boldsymbol{S}_t=\left[x_t,y_t,x_g,y_g,B_{x_t},B_{y_t},d_t\right]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中：d_t为载体当前位置到目标位置的欧几里得距离，计算式为

$$d_t=\sqrt{(x_t-x_g)^2+(y_t-y_g)^2} \tag{2}$$

利用神经网络来近似代替Q值函数，使得状态空间的复杂性可以更好地被处理。

DQN的目标是学习一个策略π，该策略能够最大化期望的累积奖励。可以通过最小化以下损失函数L来实现：

$$L(\theta)=E\left(\left(r+\gamma\max_{a'}Q(\boldsymbol{s}',a';\theta)-Q(\boldsymbol{s},a;\theta)\right)^2\right) \tag{3}$$

式中：r为从状态$\boldsymbol{s}$采取动作a后获得的即时奖励；γ为折扣因子；$\boldsymbol{s}'$为下一个状态；a'表示在$\boldsymbol{s}'$上的最优动作；θ为DQN模型参数。

在确定了如何选择动作及获得即时奖励后，需要评估函数来衡量路径的质量。在路径优化问题中，DQN算法能够有效地探索从起点到目标点的路径。然而，DQN算法在复杂环境中容易陷入局部最优解，尤其是在状态空间较大的情况下。因此，为提高全局优化的能力，本文引入模拟退火算法。模拟退火算法是一种基于物理退火过程的全局优化算法，其核心思想是在搜索过程中通过逐渐降低“温度”参数，允许算法在初期接受劣解以跳出局部最优，并最终收敛到全局最优解。由于路径优化问题的搜索空间复杂且容易陷入局部最优，模拟退火算法的全局搜索能力使其成为评估路径优劣的理想选择。因此，本文结合DQN和SA算法，通过模拟退火的能量函数E来评估路径的优劣性，

不仅考虑了路径长度, 还综合考虑了路径沿途地磁值与目标位置地磁值的一致性。这种结合使得优化过程能够更有效地平衡路径的几何优化和地磁适应性, 最终找到全局最优路径。

模拟退火能量函数 J 计算式为

$$J(\pi)=\sum_{i=1}^{n-1} w_{\mathrm{d}} \sqrt{(x_{i+1}-x_i)^2+(y_{i+1}-y_i)^2}+ w_{\mathrm{m}} \sum_{i=1}^{n}\left|B(x_i,y_i)-B_{\mathrm{goal}}\right| \tag{4}$$

式中: w_{d}和w_{m}分别为路径长度和地磁适应性的权重; B_{goal}为目标位置的地磁值。

通过结合 DQN 和模拟退火算法, 旨在找到一条从起点到终点的最优路径π^*, 该路径不仅在地理上是最优的, 而且在地磁适应性上也是最优的。结合 DRL 和 SA 的优化问题可以定义为在所有可能路径的集合中找到能量函数 J 最小的路径, 即

$$\pi^*=\arg\min_{\pi\in\Pi} J(\pi) \tag{5}$$

式中: Π为所有可能路径的集合; $J(\pi)$为路径π的能量函数。

1.2　地磁图构建理论基础

地磁图构建对于依赖地磁场进行导航的自主系统至关重要。地磁图可以由载体在探索环境过程中收集的数据生成。在本文使用深度学习模型来预测未知区域的地磁值, 从而构建整个环境的地磁图。

地磁图预测模型G表示为

$$G(x,y,\phi)=B_{\mathrm{predicted}} \tag{6}$$

式中: (x,y)为载体的位置坐标; $B_{\mathrm{predicted}}$为预测的地磁值; ϕ为模型参数。地磁图预测模型G的目标是最小化预测地磁值和实际地磁值之间的误差, 这通常通过最小化均方根误差(root mean square error, RMSE)损失函数来实现:

$$L_G=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(B_i-B_{\mathrm{predicted}})^2} \tag{7}$$

式中: N为训练样本的数量; B_i为对应的实际地磁。

通过最小化L_G损失函数, 地磁图预测模型G可以学习从空间位置到地磁值的映射, 从而为载体提供准确的地磁信息。即通过调整模型参数ϕ, 使得预测模型G在所有训练数据上的 RMSE 最小:

$$\phi^*=\arg\min_{\phi} L_G \tag{8}$$

这一优化过程为载体建立了对环境地磁场的感知能力, 使其能够在导航过程中更准确地识别周围环境的地磁特征。这样, 载体就能更有效地规划路径, 以最小化能量函数 J 实现从起点到终点的最优路径。

2　本文方法

2.1　深度学习模型构建与动作选择策略

DQN 模型由多个全连接层组成, 使用 ReLU 激活函数, 并在输出层使用线性激活函数来预测每个可能动作的值。

在强化学习中, epsilon-greedy 策略是一种经典的动作选择方法, 用于在探索(exploration)和利用(exploitation)之间实现平衡。这种策略能够有效避免算法陷入早期学习过程中产生的局部最优解, 确保了状态空间的充分探索。在本文的路径规划任务中, DQN 算法需要在复杂且动态的环境中进行决策。如果完全依赖于已有的经验选择动作(即仅利用), 可能会导致模型无法发现潜在的更优路径。而通过引入 epsilon-greedy 策略, DQN 模型可以平衡探索与利用, 逐渐提高路径规划的性能。

此外, 本文对 ε 参数进行了动态调整, 使得探索概率在训练过程中逐渐减小, 以便在模型收敛后更多地依赖已学得的最优策略, 从而提高最终路径的有效性和收敛速度。具体而言, 载体计算当前位置到目标位置的角度和距离, 接着根据 epsilon-greedy 策略选择一个动作。选择动作a的概率$\pi(a|\boldsymbol{s})$分布为

$$\pi(a/\boldsymbol{s})=\begin{cases}\varepsilon/|A| & a\text{为随机探索动作}\\ 1-\varepsilon+\varepsilon/|A| & a=\arg\max_a Q(\boldsymbol{s},a;\theta)\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{9}$$

式中: ε为探索与利用间的平衡参数, ε的值随时间逐渐减小, 以减少探索的比重并增加利用已知信息的比重; $|A|$为动作空间的大小, 即载体可以执行的所有可能动作的数量; $Q(\boldsymbol{s},a;\theta)$为动作价值函数, 估计在状态$\boldsymbol{s}$下采取动作$a$的期望累积奖励; $\arg\max_a Q(\boldsymbol{s},a;\theta)$为当前状态$\boldsymbol{s}$下, 根据动作价值函数 Q 计算出的最优动作。

这个概率分布表明以$1-\varepsilon+\varepsilon/|A|$的概率, 载体会选择最优动作, 即 Q 函数预测的最大值对应的动作。以$\varepsilon/|A|$的概率, 载体会选择一个随机动作, 允许探索状态空间中未被充分探索的区域。如果动作不是最优动作也不是随机选择的动作, 那么选择该动作的概率为 0。

在导航过程中, AUV 不仅需要接近目标, 还需在复杂环境中避免陷入局部最优。因此, 本文设计了一个复合奖励函数, 结合 DQN 的即时奖励和 SA 的全局优化能力。其形式为

$$R_{\mathrm{total}}=R_{\mathrm{DQN}}+R_{\mathrm{SA}}+P_{\mathrm{explore}} \tag{10}$$

式中: R_{DQN}为基于 DQN 模型的即时奖励, 表示智能体在一步内朝目标移动时获得的正奖励或负惩罚;

R_{SA}为模拟退火算法控制下的奖励，其随时间步的增加逐渐减小，鼓励早期的大规模探索和后期的局部搜索；$P_{explore}$为对重复访问或无效探索的惩罚项，用于减少无效探索行为。

在DQN部分，主要考虑目标距离的变化和移动安全性。设当前状态下智能体的位置为$\boldsymbol{P}_t$，下一状态下的位置为$\boldsymbol{P}_{t+1}$，目标位置为$\boldsymbol{P}_g$。定义当前状态到目标的距离为$d(\boldsymbol{P}_t,\boldsymbol{P}_g)$，移动后的位置距离为$d(\boldsymbol{P}_{t+1},\boldsymbol{P}_g)$，则DQN奖励为

$$R_{DQN}=\lambda_1 d(\boldsymbol{P}_t,\boldsymbol{P}_g)-d(\boldsymbol{P}_{t+1},\boldsymbol{P}_g)+\lambda_2 I \tag{11}$$

式中：λ_1和λ_2为权重参数；I为指示函数，当移动到安全位置时为1，否则为0。

模拟退火的奖励部分基于距离衰减，并且随时间步数动态调整。使用温度控制来减少在训练后期对全局探索的影响。模拟退火的奖励可以表示为

$$R_{SA}=-d(\boldsymbol{P}_{t+1},\boldsymbol{P}_g)T(t) \tag{12}$$

式中：$T(t)$为随时间步数t变化的温度函数。模拟退火算法通过早期的高温度鼓励大范围的探索，并在后期降低温度，逐步收敛到最优路径。

为避免智能体重复访问已经探索过的区域，设置一个探索惩罚项$P_{explore}$，其形式为

$$P_{explore}=\lambda_3 I(\boldsymbol{P}_{t+1}) \qquad \boldsymbol{P}_{t+1}\in\nu \tag{13}$$

式中：λ_3为权重参数；ν表示智能体已访问的区域，当智能体访问已探索的区域时，$I(\boldsymbol{P}_{t+1})=1(\boldsymbol{P}_{t+1}\in\nu)$，否则为0。

具体对于每个探索步骤t如下：

步骤1　观察当前状态$\boldsymbol{s}_t$；

步骤2　使用DQN选择动作a_t：

$$a_t=\arg\max_{a\in A}Q(\boldsymbol{s}_t,a;\theta) \tag{14}$$

步骤3　执行动作a_t转移到新状态$\boldsymbol{s}_{t+1}$并接收奖励r_{t+1}；

步骤4　存储经验$(\boldsymbol{s}_t,a_t,r_{t+1},\boldsymbol{s}_{t+1})$添加到回放记忆memory中；

步骤5　从记忆中随机抽取小批量经验$\{(\boldsymbol{s}_j,a_j,r_j,\boldsymbol{s}_{j+1})\}_{j=1}^{m}$，使用时间差分（temporal difference, TD）误差更新DQN模型参数θ:

$$\theta_{t+1}=\theta_t+\alpha\sum_{j=1}^{m}(r_j+\gamma\max_a Q(\boldsymbol{s}_{j+1},a;\theta_t)-Q(\boldsymbol{s}_j,a_j;\theta_t))^2 \tag{15}$$

式中：α为学习率；γ为折扣因子。

2.2　地磁图构建方法

1）在载体的每个位置$\boldsymbol{P}$收集地磁数据$B(\boldsymbol{P})$

地磁图的构建过程涉及到在载体当前位置周围收集地磁数据。本文通过以当前位置$\boldsymbol{P}_t=(x,y)$周围定义一个圆形采样区域，该区域的半径r_a是一个预先设定的参数，用于控制采样点的分布[16]。合理选择半径是确保能够有效覆盖周围地磁场的关键，同时也避免了采样点过于密集或稀疏的问题。半径的设定需要与采样环境的尺寸和预期的精度相协调，以保证采样点不超出环境边界，并能在设定的精度范围内有效工作。如果地磁场在较小的区域内变化剧烈，采用较小的半径有助于更精确地捕捉这些细微的变化。相反，如果地磁场变化较为平缓，较大的半径则更为合适，因为其能够在减少计算量的同时，避免丢失重要的地磁信息。因此，半径的选择应基于地磁场的具体变化特性及计算资源的可用性，以达到数据采集的最优效果。

对于每个采样点，使用国际地磁参考场（International Geomagnetic Reference Field, IGRF）模型计算地磁值，并更新地磁地图$\boldsymbol{M}$。

在该圆形区域内，载体均匀地采样n个点，每个采样点$\boldsymbol{P}_i=(x_i,y_i)$相对于载体当前位置的偏移$\Delta\boldsymbol{P}_i=(\mathrm{d}x_i,\mathrm{d}y_i)$可以使用球面坐标系定义，其中，$\theta_i$为采样点相对于载体当前朝向的角度，$r_a$为固定的采样半径。转换为笛卡儿坐标系中有：

$$\begin{cases}\mathrm{d}x_i=r_a\cos\theta_i\\ \mathrm{d}y_i=r_a\sin\theta_i\end{cases} \tag{16}$$

对于每个采样点$\boldsymbol{P}_i$，使用IGRF模型计算地磁值。IGRF模型是一个基于地球地理位置和时间的地磁场模型。对于一个给定的采样点$\boldsymbol{P}_i$，地磁强度的北向分量B_N、东向分量B_E和垂直向下分量B_D可以通过IGRF模型计算得到。

收集到的地磁值B_i被用来更新地磁图$\boldsymbol{M}$，该图是一个二维数组，其索引对应于环境网格中的坐标。更新规则可以表示为

$$M(x_i,y_i)\leftarrow B_i \tag{17}$$

式中：$M(x_i,y_i)$为地磁图在坐标(x_i,y_i)处的值；B_i为在采样点$\boldsymbol{P}_i$处通过IGRF模型计算得到的地磁值。

2）使用收集的数据训练地磁图预测模型G

使用收集到的地磁数据训练一个地磁图预测模型。训练好地磁图预测模型G后，利用该模型更新地磁图$\boldsymbol{M}$。对于每个位置使用模型G预测地磁值，并将其更新到地磁图中相应的位置。

地磁图的构建是一个动态的过程，随着载体探索更多区域，地磁图将不断更新和优化。预测模型也将根据新的数据进行迭代训练，以提高其预测的准确性。

2.3　模拟退火算法用于路径优化

模拟退火算法是一种概率优化算法，其通过模

拟物理退火过程中的粒子运动来搜索问题的全局最优解。在本文模拟退火用于从 DQN 探索得到的路径中寻找能量最低(即最优)的路径。步骤如下:

步骤 1　从当前路径π开始, 算法随机扰动以生成新路径π';

步骤 2　计算新路径的能量$J(\pi')$;

步骤 3　根据以下准则接受或拒绝新路径:

$$P=\min\left\{1,\mathrm{e}^{-\frac{J(\pi')-J(\pi)}{T}}\right\} \tag{18}$$

式中: T为当前温度; 能量函数J考虑了路径长度和地磁适应性。根据 Metropolis 准则决定是否接受新路径, 该准则基于能量差和当前温度。

温度参数T随着模拟退火过程的进行而逐渐降低, 通常按照指数衰减的方式。温度的更新可以表示为

$$T(t)=T_0\mathrm{e}^{-\lambda t} \tag{19}$$

式中: T_0为初始温度, 表示在训练开始时的温度水平; λ为衰减率, 控制温度函数随时间的变化速度; t为时间步数, 表示训练过程中的当前时间步。本文提出的 DQN+SA 算法导航过程流程图如图 3 所示。

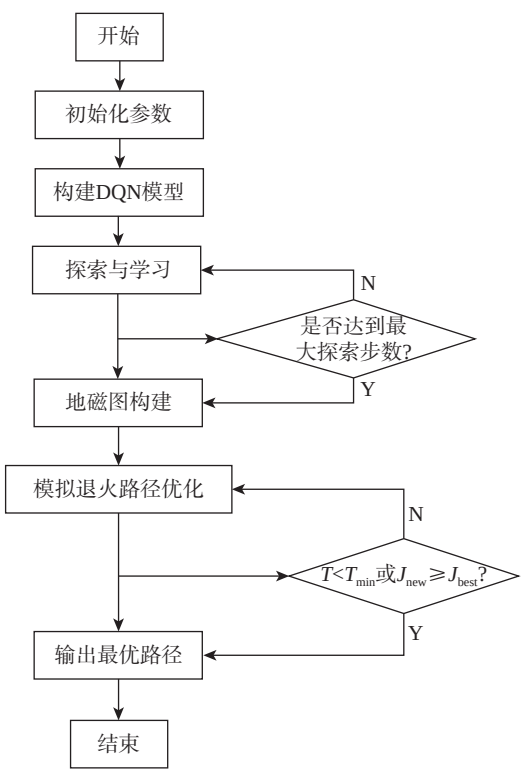


图 3　本文 DQN+SA 算法流程图

Fig. 3　Flow chart of the proposed DQN+SA algorithm

3　仿真验证

3.1　参数设置

在系统初始化阶段, 先定义探索环境的尺寸N, 该尺寸以网格单位表示, 其中, $N=L\times p$。L为环境的物理尺寸, p为网格分辨率, 即每单位物理尺寸对应的网格数, 决定了地图的精度。步长定义了载体在每个动作中能够移动的网格数, 从而决定了移动精度。实验其他参数如表 1 所示。此外, 初始化过程还包括设置载体的起始位置$\boldsymbol{P}_t$, 目标位置$\boldsymbol{P}_g$, 以及初始化地磁地图$\boldsymbol{M}$, 这是一个$N\times N$的矩阵, 用于存储环境中各点的地磁数据。

表 1　参数设置

Table 1　Parameter settings

DQN模型学习率α	DQN中折扣因子γ	探索率衰减率η	转向角度数量A_N	模拟退火初始温度T_0	模拟退火冷却率λ	年份
0.001	0.95	0.998	360	5 000	0.98	2023

仿真过程中, 记录了每个回合(episode)中的累积奖励。图 4 为每个回合 DQN[17] 及 DQN+SA 的平均奖励曲线, 其反映了智能体随着训练的进行逐步学习到最优策略。

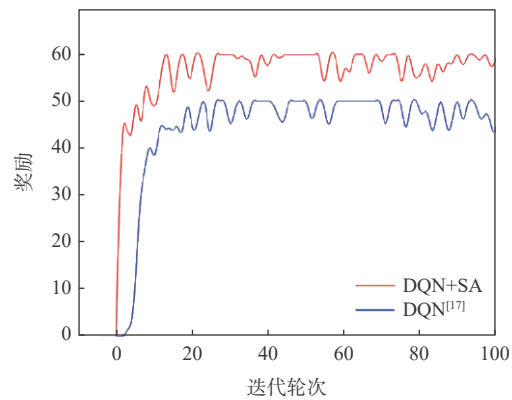


图 4　平均奖励曲线

Fig. 4　Average reward curves

奖励曲线在初始阶段迅速上升, 说明智能体在初期通过不断尝试与环境的交互, 迅速学会了部分有效的策略。本文 DQN+SA 算法的奖励值波动较小, 表明本文 DQN+SA 算法具备较高的稳定性; 相比之下, DQN 算法的奖励曲线则波动较大, 显示其稳定性略逊于本文 DQN+SA 算法。本文 DQN+SA 算法的最终奖励值高于 DQN 算法, 表明其在路径规划和环境探索任务中的表现优于 DQN 算法。

为研究探索率ε对奖励的影响, 本文将探索率分别设置为 0.8、0.7、0.5。观察奖励与成功率的变化。图 5 和图 6 分别展示了不同探索率和算法(DQN 算法与本文 DQN+SA 算法)在训练过程中的奖励值和成功率随迭代次数的变化情况。

由图 5 可知, 不同探索率和算法的奖励值随迭代次数的变化表现出明显的差异。对于较低的探索率(ε=0.5), 无论是 DQN 算法还是本文 DQN+SA 算法, 奖励值在训练初期迅速上升, 并在 50 次迭代

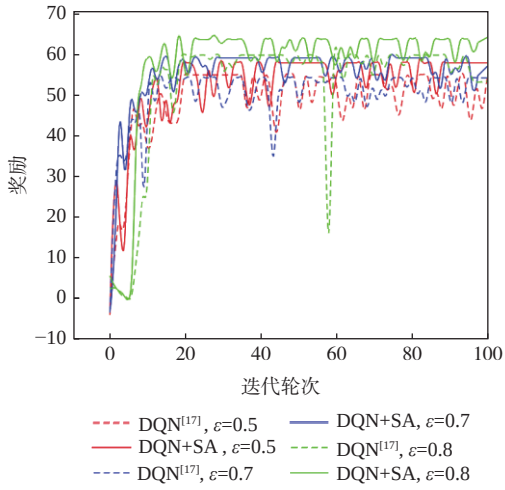


图5 不同探索率下的奖励曲线对比

Fig. 5 Comparison of reward curves under different exploration rates

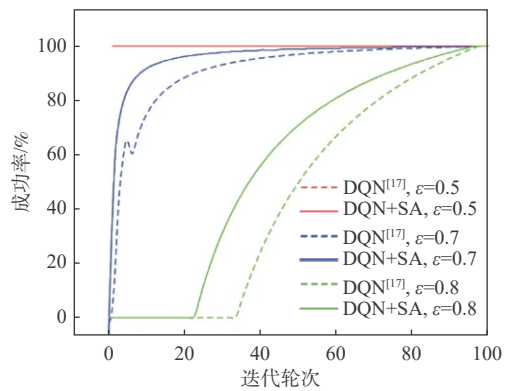


图6 不同探索率下成功率对比

Fig. 6 Comparison of success rates under different exploration rates

左右趋于稳定，奖励值大约在50左右。相较于其他探索率，这2种配置的奖励值波动较小，表明策略较为稳定。对于中等探索率(ε=0.7)，奖励值在30次迭代左右达到较高的水平(约60)，但在整个训练过程中波动较大，表明策略在不断调整和优化。对于较高的探索率(ε=0.8)，奖励值在训练初期上升较慢，但在40次迭代后迅速上升，最终在60次迭代左右达到最高奖励值(约65)，然而奖励值的波动性较大，表明策略在高探索率下仍在不断调整。总体来看，随着探索率的增加，奖励值的波动性也在增加。本文DQN+SA算法在相同探索率下的表现略优于纯DQN算法，尤其在高探索率(ε=0.8)下表现尤为明显。

由图6可知，不同探索率和算法的成功率随迭代次数的变化也表现出显著差异。对于较低的探索率，无论是DQN算法还是本文DQN+SA算法，成功率在训练初期即达到100%，并保持稳定。对于中等探索率，成功率在30次迭代左右达到接近100%。对于较高的探索率，成功率在训练初期上升较慢，但在40次迭代后迅速上升，最终在60次迭代左右达到接近100%。总体来看，较低的探索率能够更快地达到高成功率，而较高的探索率则需要更多的迭代次数来达到相同的成功率。本文DQN+SA算法在相同探索率下的成功率上升速度略快于纯DQN算法，尤其在高探索率下表现尤为明显。

通过对奖励值和成功率随迭代次数变化的分析，可以看出，较低的探索率能够更快地找到稳定的策略，成功率上升较快，但奖励值相对较低且波动较小；较高的探索率能够找到更优的策略，奖励值较高但波动较大，成功率上升较慢。本文DQN+SA算法在相同探索率下的表现优于DQN算法，尤其在高探索率下表现尤为明显。这表明本文DQN+SA算法在探索和利用的平衡上具有更好的性能。

最终实验结果如图7所示。

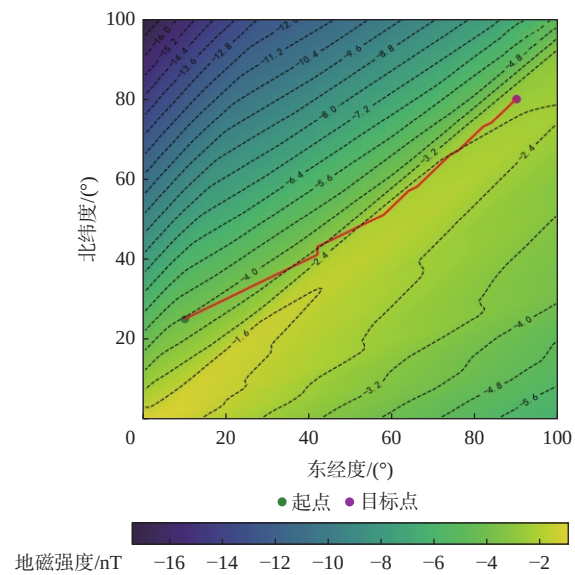


图7 实验结果

Fig. 7 Experimental results

图7中使用等值线表示不同地磁强度的地磁区域。由图7可看出，载体成功寻找到一条较优的路径并且构建出地磁图。

3.2 收敛性分析

为验证本文DQN+SA算法的优越性，在无先验磁图的情况下，将本文DQN+SA算法与SA算法、DQN算法与进化算法(evolutionary algorithm, EA)[18]进行比较，同时将各算法设置为相同步长。实验在相同的二维网格环境中进行，载体的目标是从起点到终点找到最优路径，同时构建环境的地磁图。所有算法均在100×100的网格环境运行，每个算法重复实验100次以确保结果的统计意义。

由图8和图9可以看出，在设定的区域范围

内, 各算法均能找到目标位置, 其中, 本文 DQN+SA 算法的路径最好。各算法均能收敛至目标值。其中, 本文 DQN+SA 算法到达目的地的迭代次数最小, 收敛速度最快; 其次为 DQN 算法、SA 算法与 EA 算法。

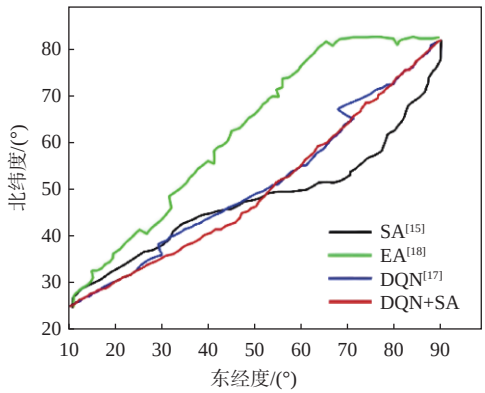


图 8　路径对比

Fig. 8　Path comparison

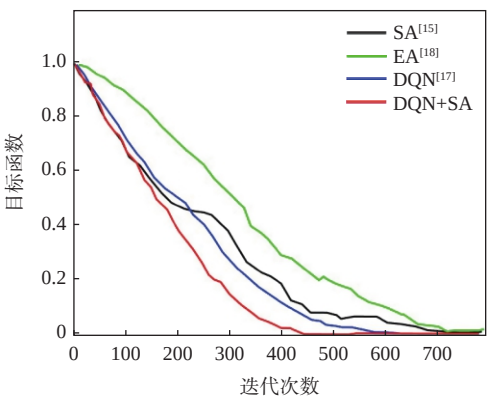


图 9　目标函数收敛

Fig. 9　Convergence of objective function

为消除随机性因素, 各算法独立运行 100 次, 得到的路径长度、迭代次数和仿真耗时的统计结果如图 10 和表 2 所示。

由图 10 和表 2 可看出, 本文 DQN+SA 算法在路径长度方面均比另外 3 个算法更短, 其次为 DQN 算法、SA 算法及 EA 算法。并且本文 DQN+SA 算法的迭代次数更短。

3.3　鲁棒性分析

本文通过对比 4 种不同的地磁场建模方法—克里金方法[19]、双三次插值法[20]、梯度提升回归[21] 及本文方法, 分析各自的模型性能。通过对比不同方法在 RMSE、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和皮尔逊积矩相关系数(Pearson product-moment correlation coefficient, PPMCC)3 个关键指标上的表现, 结果如表 3 所示。

由表 3 可见, 本文方法在 3 个指标上均表现优异。具体而言, 本文方法的 RMSE 为 4.183 5, 低于

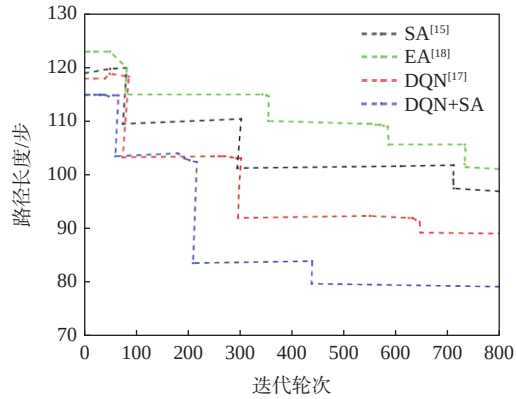


图 10　路径长度

Fig. 10　Path length

表 2　路径长度和迭代次数对比

Table 2　Comparison of path length and number of iterations

算法	路径长度/步	迭代次数	时间/s
SA[15]	97.0	712	29.35
EA[18]	101.325	745	86.70
DQN[18]	89.513	631	19.04
DQN+SA	80.328	446	21.74

表 3　不同方法地磁图准确性指标对比

Table 3　Comparison of accuracy indexes of geomagnetic maps by different methods

方法	RMSE/nT	PSNR/dB	PPMCC
克里金方法[19]	6.172 8	29.245	0.983 9
双三次插值法[20]	4.277 9	32.430	0.992 3
梯度提升回归法[21]	5.321 5	30.534	0.987 8
本文方法	4.183 5	32.624	0.992 5

其他 3 种方法中的最低值, 显示出更高的预测精度。在 PSNR 方面, 本文方法的数值为 32.624, 高于双三次插值法的 32.430, 进一步证实了其在维持地磁场数据图像质量方面的优势。同时, PPMCC 指标达到 0.992 5, 与双三次插值法相当, 都显著高于其他 2 种方法, 说明本文方法在地磁数据的相关性上表现出了较高的一致性。综上所述, 本文提出的地磁场建模方法在各评价指标上均展现了较好的性能, 尤其在保持地磁图准确性和图像质量方面表现突出。

通过设置不同的起始位置和目标位置, 本文 DQN+SA 算法均能找到较好的路径并且构建地磁图, 如图 11 所示。

从图 11 可看出, 无论是更改起始点还是目标点, 本文算法均能有效地确定优化的路径, 并成功构建地磁图。这表明本文 DQN+SA 算法具有较高的适应性和鲁棒性, 能够在不同的环境设置下维持其导航和地磁图构建的性能, 这对于动态或不确定

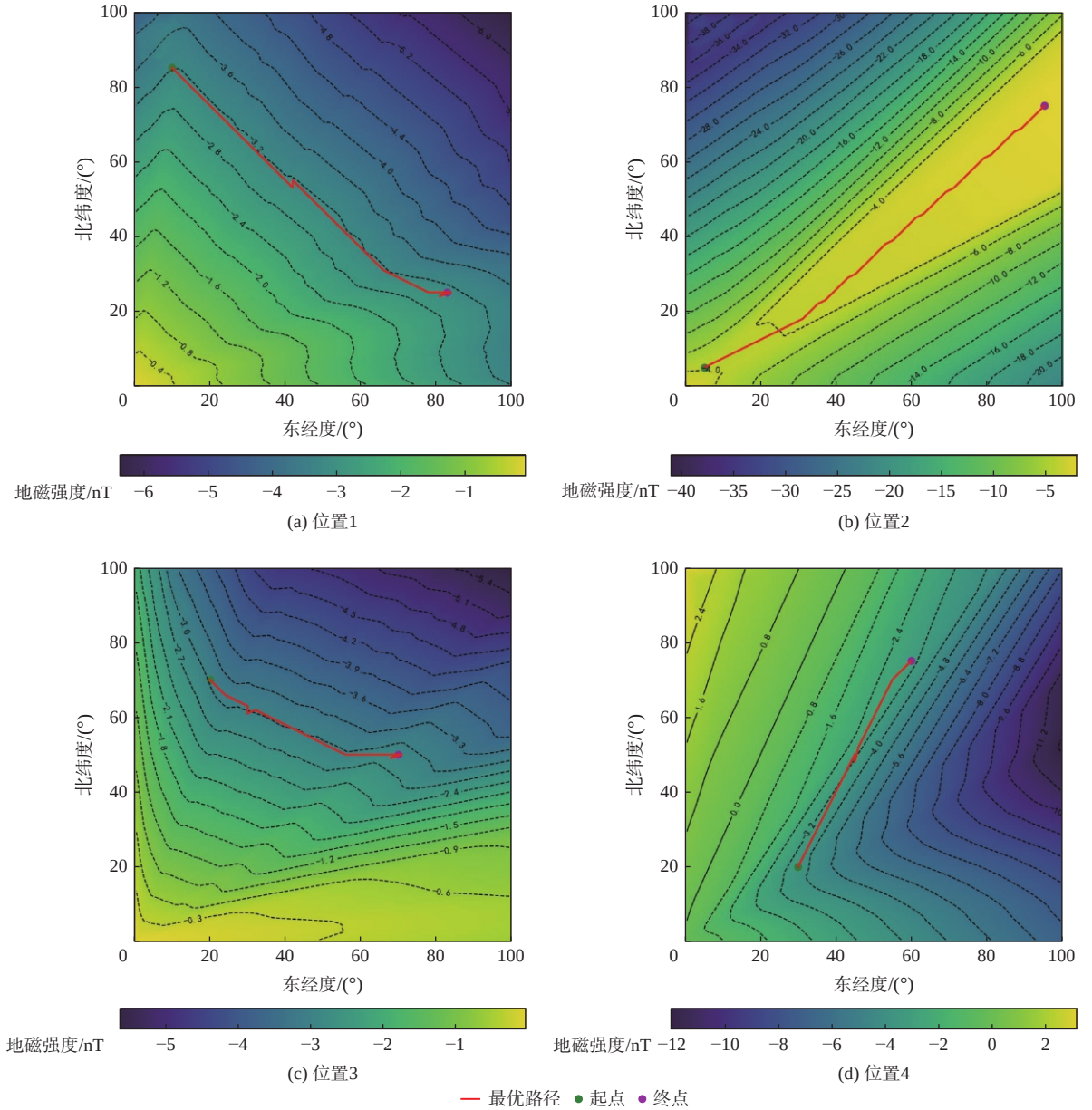


图 11 不同位置结果

Fig. 11 Results of different positions

环境中的自主导航系统尤为重要。

4 结 论

1）本文提出了一种融合深度强化学习和模拟退火算法的无需先验地磁图的地磁感知导航方法。载体通过深度Q网络探索环境，同时收集地磁数据，并利用数据训练回归模型以精确预测整个环境的地磁图。

2）引入模拟退火算法进一步优化了水下自主无人潜航器的路径规划，有效提升了路径规划的效率和优化水平，实现了在未知水域环境中的高效导航。

3）通过一系列实验验证，本文方法不仅显著减少了路径长度，提高了探索效率，还为地磁图的构建提供了新的途径。

参考文献（References）

[1] 张伟, 王乃新, 魏世琳, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289-297.
Zhang W, Wang N X, Wei S L, et al. Overview of unmanned underwater vehicle swarm development status and key technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(2): 289-297(in Chinese).

[2] 赵曦, 赵建虎. 水下地形匹配导航现状及发展趋势[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(11): 1927-1936.
Zhao X, Zhao J H. Current progress and development trend of underwater terrain-matching navigation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(11): 1927-1936(in Chinese).

[3] 张涛, 夏茂栋, 张佳宇, 等. 水下导航定位技术综述[J]. 全球定位系统, 2022, 47(4): 1-16.
Zhang T, Xia M D, Zhang J Y, et al. Review of underwater naviga-

tion and positioning technology[J]. GNSS World of China, 2022, 47(4): 1-16(in Chinese).

[4] 张小跃, 杨功流, 张春熹. 捷联惯导/里程计组合导航方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(7): 922-926.
Zhang X Y, Yang G L, Zhang C X. Integrated navigation method for SINS and odometer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(7): 922-926(in Chinese).

[5] 马腾, 李晔, 赵玉新, 等. AUV 的图优化海底地形同步定位与建图方法[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(2): 42-49.
Ma T, Li Y, Zhao Y X, et al. AUV bathymetric simultaneous localization and mapping based on graph optimization method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(2): 42-49(in Chinese).

[6] 李明, 何继玮, 王一蕾, 等. 基于重力场数据的水下无源导航[C]//第三届无人系统高峰论坛论文集. 南京: 南京理工大学, 2023: 1-7.
Li M, He J W, Wang Y L, et al. Underwater passive navigation based on gravity field data[C]//Proceedings of the 3rd Unmanned Systems Summit Forum. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023: 1-7(in Chinese).

[7] Bobrov D S. Development of methods and means for creating navigational gravity maps[D]. Mendeleevo: All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio Engineering Measurements, 2020.

[8] 林沂, 孙晶京, 闫旭. 地磁导航定位技术原理与方法综述[J]. 全球定位系统, 2023, 48(6): 32-41.
Lin Y, Sun J J, Yan X. A review of the principles and methods of geomagnetic navigation and positioning technology[J]. GNSS World of China, 2023, 48(6): 32-41(in Chinese).

[9] 王巍, 邢朝洋, 冯文帅. 自主导航技术发展现状与趋势[J]. 航空学报, 2021, 42(11): 11-29.
Wang W, Xing C Y, Feng W S. State of the art and perspectives of autonomous navigation technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(11): 11-29(in Chinese).

[10] Lohmann K J, Lohmann C M F, Ehrhart L M, et al. Geomagnetic map used in sea-turtle navigation[J]. Nature, 2004, 428(6986): 909-910.

[11] Chen Z, Liu K J, Zhang Q, et al. Geomagnetic vector pattern recognition navigation method based on probabilistic neural network[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 5909608.

[12] 董豪, 杨静, 李少波, 等. 基于深度强化学习的机器人运动控制研究进展[J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 278-292.
Dong H, Yang J, Li S B, et al. Research progress of robot motion control based on deep reinforcement learning[J]. Control and Decision, 2022, 37(2): 278-292(in Chinese).

[13] Panda J P, Mitra A, Warrior H V. A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2021, 235(1): 15-29.

[14] Grando R B, De Jesus J C, Kich V A, et al. Deep reinforcement learning for mapless navigation of a hybrid aerial underwater vehicle with medium transition[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1088-1094.

[15] 陈科胜, 鲜思东, 郭鹏. 求解旅行商问题的自适应升温模拟退火算法[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(2): 245-254.
Chen K S, Xian S D, Guo P. Adaptive temperature rising simulated annealing algorithm for traveling salesman problem[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(2): 245-254(in Chinese).

[16] 王保宪, 唐林波, 陈聪葱, 等. 基于圆形采样和稀疏表示模型的鲁棒目标跟踪[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(9): 983-990.
Wang B X, Tang L B, Chen C C, et al. Robust object tracking based on circle sampling and sparse representation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(9): 983-990(in Chinese) .

[17] Wang C, Niu Y, Liu M Y, et al. Geomagnetic navigation for AUV based on deep reinforcement learning algorithm[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway: IEEE Press, 2020: 2571-2575.

[18] 郭娇娇, 刘明雍, 刘坤, 等. 基于进化梯度搜索的 AUV 地磁仿生导航研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 5.
Guo J J, Liu M Y, Liu K, et al. Research on AUV geomagnetic bionic navigation based on evolutionary gradient search[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(5): 987-994(in Chinese) .

[19] 张晓明, 赵剡. 基于克里金插值的局部地磁图的构建[J]. 电子测量技术, 2009, 32(4): 122-125.
Zhang X M, Zhao S. Construction of local geomagnetic maps based on Kriging interpolation[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(4): 122-125(in Chinese) .

[20] Keys R. Cubic convolution interpolation for digital image processing[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1981, 29(6): 1153-1160.

[21] Friedman J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine[J]. Annals of Statistics, 2001, 29(5): 1189-1232.

Geomagnetic sensing navigation method based on deep reinforcement learning and simulated annealing

LI Hong*, XU Chenyan, LIU Hengyu

(School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In the unknown environment without prior conditions, the path planning and navigation of an underwater autonomous underwater vehicle (AUV) is a big challenge. This study presents a perceptive navigation approach without a prior geomagnetic map. It achieves efficient path planning and geomagnetic map creation by combining deep reinforcement learning (DRL) with a simulated annealing (SA) algorithm. A deep Q network (DQN) is built to explore the environment of the carrier, collect local geomagnetic data, and then use the collected data to train a regression model to predict the global geomagnetic map. At the same time, the simulated annealing algorithm is used to optimize the path of an underwater AUV to avoid the local minimum problem of carrier space search. The success of the suggested approach is confirmed through a number of simulated tests in terms of path length, exploration efficiency, and geomagnetic map correctness. The results show that this method can significantly improve the navigation performance of underwater AUV in an unknown environment, and provide a new way for the construction of geomagnetic maps.

Keywords: underwater autonomous underwater vehicle; autonomous navigation; geomagnetic navigation; path optimization; construction of geomagnetic map

Received: 2024-05-21; **Accepted**: 2024-08-30; **Published Online**: 2024-09-24 15:39

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240924.1303.002

Foundation items: Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province Department of Science and Technology (2024JC-YBMS-549); Key Industrial Chain Project of Shaanxi Province (2021ZDLGY04-04); Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2022NY-087); Project of Shaanxi Provincial Federation of Social Sciences and Shaanxi Provincial Department of Emergency Management (2021HZ1121); Graduate Innovation Fund of Xi'an University of Posts and Telecommunications (CXJJZL2023033)

* **Corresponding author**. E-mail: lihong@xupt.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0394

胰岛素泵组典型故障机理建模与仿真分析

王伟杰[1]，郭丁珲[1]，李翔宇[1,*]，耿艺璇[2]，权龙[1]

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院，太原 030024；2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘 要：胰岛素泵是糖尿病患者进行胰岛素强化治疗的先进设备，一旦发生故障会影响胰岛素的正常输注，进而引起血糖异常升高、引发酮症酸中毒等不良后果，危及生命安全。建立数学模型描述胰岛素泵组故障机理是实现其故障诊断的基础。但是胰岛素泵组涉及针头和软管的刚、弹性约束，以及胰岛素和泵管的流、固体多能域，这为胰岛素泵组故障机理建模及影响分析带来挑战。对此，基于功率流理论，针对堵塞和泄漏2种典型故障，建立胰岛素泵组健康和故障状态下的流体传动数学模型。在此基础上，定量分析了泄漏与堵塞故障对于胰岛素泵组流体流动的影响。通过计算与仿真，模型的计算结果与专业流体软件仿真结果最大误差为0.57%；定量分析了不同程度泄漏故障与堵塞故障对胰岛素泵组输出流量和腔体压力的影响程度；特别对于堵塞故障，当堵塞层厚度小于0.6 mm时，胰岛素的输出流量与腔体压力变化并不显著，当堵塞层厚度超过0.6 mm时，随着堵塞层厚度的增加，堵塞对流量和压力变化显著增大。

关 键 词：胰岛素泵组；功率流建模与仿真；故障机理分析；流体传动机理；AMESim
中图分类号：R318.6; TP391.9
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2393-10

糖尿病是一种由于胰岛素分泌绝对或相对不足导致血糖异常升高的内分泌疾病，人体长期处于高血糖状态会引起神经和血管系统的各种并发症，如酮症酸中毒，视网膜病变等[1]。糖尿病及其并发症已成为肿瘤和心脑血管病之外，严重威胁人类健康的第三大疾病。根据国际糖尿病联盟发布的全球糖尿病地图集，2021年全球约有5.37亿成年人(20～79岁)患有糖尿病，且预计2030年将上升至6.43亿，2045年将上升至7.83亿。中国是糖尿病大国，当前国内糖尿病患者数量已经达到了1.4亿，位居世界第一[2]。

胰岛素强化治疗(外源性胰岛素输注)是1型和部分2型糖尿病患者主要的临床降糖、控糖手段[3]。便携式持续皮下胰岛素输注系统(胰岛素泵)是目前先进的胰岛素输注设备，不同于传统定时分次注射，胰岛素泵可以模拟真实胰腺的分泌模式，全天候持续微量输注胰岛素，实现更优的血糖控制效果。据统计，使用胰岛素泵可使患者死亡率降低约30%[4]。目前，国内、外医院正在大力推广胰岛素泵的使用，全球胰岛素泵市场以5.60%的复合年增长率增长，预计到2027年，市场规模将达到45亿美元[5]。

作为一种可直接影响患者血糖水平的医疗设备，胰岛素的正常输注关乎患者的生命安全。然而，在胰岛素泵使用过程中，由于其组件结构复杂，不可避免的会出现故障情况。据统计，胰岛素泵组的年均故障率高达33%，且其中有13%导致了严重的不良临床后果[6]。常见的胰岛素泵组故障可以分为电子类故障与非电子类故障2种。电子类故障包括电池失效、胰岛素空库、操作按键失效等。针对这类故障，Welsh等[7]设计了一套自检软件，基于电流与泵腔内压力实现了对胰岛素泵电量不足与胰岛素空库这种故障的检测，并成功将其应用到商

收稿日期：2024-06-04；**录用日期**：2024-07-04；**网络出版时间**：2024-07-12 10:51
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240709.1410.001
基金项目：国家自然科学基金(52205065,72101173)
*通信作者. E-mail：xiangyuli@tyut.edu.cn

引用格式：王伟杰，郭丁珲，李翔宇，等. 胰岛素泵组典型故障机理建模与仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2393-2402.
Wang W J，Guo D H，Li X Y，et al. Typical fault mechanism modeling and simulation analysis of insulin pump sets[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2393-2402 (in Chinese).

用胰岛素泵中[8]。非电子类故障主要包括输注软管、针头等连接部位的泄漏[9],以及导管扭结、药物凝聚造成的堵塞等[10]。据统计,非电子类故障在实际应用中更为频发,胰岛素泵组发生堵塞故障的频率从每月几次到每周几次不等[11],且故障风险随着胰岛素泵使用时间增长而逐渐增加;同时,16.3%的胰岛素泵出现过泄漏故障[12]。然而,目前商用胰岛素泵组通常仅安装了薄膜压力传感器[13],在使用中,仅能通过压力值变化对堵塞故障进行检测与诊断[14]。这类诊断思路简单可行,但是胰岛素输注量小、传感器灵敏度较低,导致故障监测通常需要超过40 h,诊断时效性差[15]。因此,快速、精准诊断胰岛素泵组泄漏与堵塞故障,提醒患者及时采取补救措施,是保证胰岛素泵安全使用的关键。

故障机理建模与影响分析是故障诊断的基础。对此,Chakrabarti等[16]通过研究病例调查报告,根据患者的临床生理反应对胰岛素泵故障进行分类。Formo等[17]通过在MATLAB Simscape中建立胰岛素泵组机械性能的开源仿真模型以此对堵塞故障进行仿真。然而,上述研究仅定性分析了胰岛素泵组故障对泵腔体压力与流量的影响,对于胰岛素泵组故障机理及其影响分析的定量研究并不充分。

构建完整的故障机理数学模型,不仅能对胰岛素泵组故障影响进行定量分析,而且是辨识故障参数、监测故障状态的前提。目前,流体动力学分析多依赖专业的流体仿真软件实现,如AMESim等。虽然这些软件可以实现精准流体仿真,但无法直接得到胰岛素泵组的故障机理数学模型。然而,胰岛素泵组流体传动系统涉及刚、弹性约束及流、固体多能域,且泄漏、堵塞故障具有非线性流体动力学特性,传统的流体动力学分析方法难以实现多能域、非线性建模。

功率流理论是一种系统动力学建模方法。由于功率和能量的物理量纲及其流动转化规律在不同物理场、不同能量域中具有相似性。基于系统能量传递、转换、储存和耗散原理的功率流理论,可以很好地解决多物理、多能域、非线性动态系统建模问题[18]。在此基础上发展来的功率键合图理论依据能量守恒的基本原则,将基本元件以特定的连接方式用规定的符号来表示,可以准确、清晰地表达出系统模型中要考虑的物理效应,还可以按规则方便得到微分方程模型。因此,被广泛应用于统一处理涉及机、电、液等多学科领域、多种能量范畴系统工程的动态特性分析。

本文基于功率流理论对胰岛素泵组泄漏与堵塞2种典型故障进行数学建模与仿真研究。首先,基于功率流理论建立健康状态胰岛素泵组的流体传动数学模型,描述胰岛素在储药器接口、输注软管、刚性针头中的流体动态特性;然后,分析泄漏与堵塞易发生位置,建立包含泄漏与堵塞故障的胰岛素泵组流体传动数学模型;最后,通过将模型数值计算结果与仿真结果对比验证模型有效性,并定量分析泄漏与堵塞故障对胰岛素泵组流体动力学的影响。

1 胰岛素泵组故障机理建模

胰岛素在活塞作用下从腔体泵出,经过输注软管与刚性针头注入人体皮下间隙组织。如图1所示,胰岛素流体传动过程涉及储药器接口、输注软管、刚性针头3个部分。首先,建立健康状态下的胰岛素泵组流体传动数学模型,在此基础上,分析故障类型与发生位置,建立胰岛素泵组泄漏与堵塞故障流体传动数学模型。

1.1 健康状态下的胰岛素泵组流体传动数学模型

1.1.1 基于功率流的储药器接口流体传动模型

储药器接口为刚性管道且直接与泵体相连,考虑胰岛素流经储药器接口的摩擦损失、胰岛素流体可压缩性与液动力引起的能量转换,基于功率流的储药器接口流体传动模型如图2所示。

1)考虑胰岛素的可压缩性,当胰岛素流体流经储药器接口时,由于压力增大会导致胰岛素流体体积缩小,从而使得输出流量降低,即为液容效应C_1:

$$C_1=\frac{\pi d_1^2 L_1}{4B} \tag{1}$$

式中:L_1为储药器接口的管道长度,m;d_1为储药器接口的内径,m;B为胰岛素的液体体积模量,N/m^2。

2)胰岛素流体流经储药器接口时,由管壁摩擦阻力而产生压力损失,即为液阻R_1:

$$R_1=128\rho\mu L_1/\pi^4 \tag{2}$$

式中:ρ为胰岛素的密度,kg/m^3;μ为胰岛素的运动黏度,m^2/s。

3)储药器接口中的胰岛素流体由于具有质量因而具有保持运动状态不变的性质,为液感效应I_1,液感会储存压力势能:

$$I_1=\rho\frac{4L_1}{\pi d_1^2} \tag{3}$$

基于功率流方向与因果关系,得到了储药器接口的流体传动数学模型:

$$\begin{cases}\dot{Q}_1=S_{\mathrm{f}}-P_1/I_1\\ \dot{P}_1=Q_1/C_1-R_1P_1/I_1-Q_2/C_2\end{cases} \tag{4}$$

将式(1)~式(3)代入式(4)可得

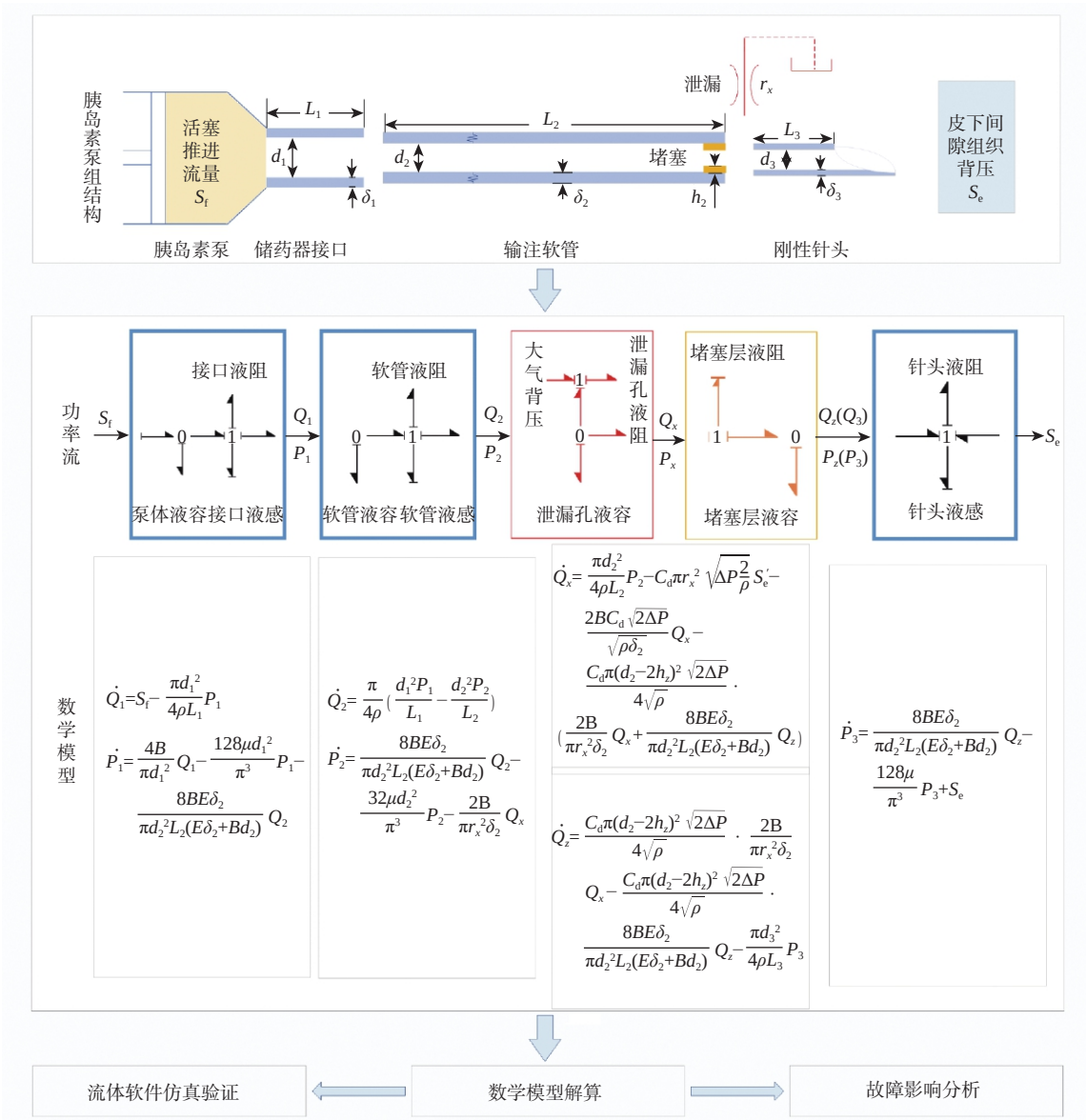


图 1　胰岛素泵组典型故障机理建模与仿真分析结构

Fig. 1　Structure of typical fault mechanism modeling and simulation of insulin pump sets

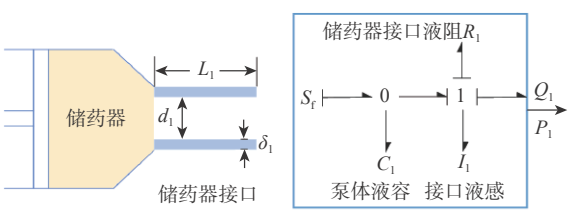


图 2　基于功率流的储药器接口流体传动模型

Fig. 2　Power-flow based fluid transmission model of reservoir interface

$$\begin{cases}\dot{Q}_1=S_f-\dfrac{\pi d_1^2}{4\rho L_1}P_1\\ \dot{P}_1=\dfrac{4B}{\pi d_1^2}Q_1-\dfrac{128\mu d_1^2}{\pi^3}P_1-\dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2L_2(E\delta_2+Bd_2)}Q_2\end{cases}\tag{5}$$

式中: S_f为胰岛素泵所提供的流量, m^3/s; Q_1为储药器接口液容效应所储存的流量, m^3/s; P_1为储药器接口液感效应所储存的压力, Pa; E为输注软管管路体积弹性模量, N/m^2; Q_2为输注软管液容效应所储存的流量, m^3/s。

1.1.2　基于功率流的输注软管流体传动模型

同储药器接口流体传动模型, 考虑胰岛素流经输注软管的摩擦损失, 软管壁弹性变形、胰岛素流体可压缩性及液动力引起的能量转换, 可得基于功率流输注软管的流体传动模型, 具体如图 3 所示。

1) 输注软管主要由聚四氟乙烯等柔性材料制成, 当内部流体压力增加时, 输注软管会径向膨胀, 同时其胰岛素流体体积缩小, 从而使得软管内储存部分胰岛素, 即为液容效应$C_{2,3}$:

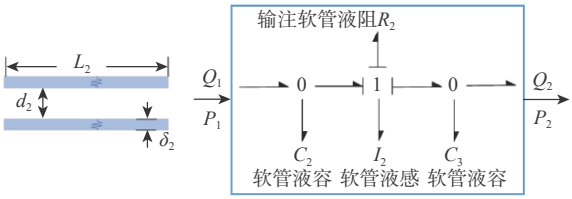


图3 基于功率流的输注软管流体传动模型

Fig. 3 Power-flow based fluid transmission model of pump infusion hose

$$C_{2,3}=\frac{\pi d_2^2 L_2}{8}\left(\frac{1}{B}+\frac{d_2}{E\delta_2}\right)\pi \tag{6}$$

式中：L_2为输注软管的管道长度，m；d_2为输注软管的内径，m；δ_2为输注软管的管壁厚度，m。

2）同储药器接口液阻，由输注软管管壁摩擦所产生的液阻效应R_2为

$$R_2=128\rho\mu L_2/\pi^4 \tag{7}$$

3）同储药器接口液感，输注软管的液感效应I_2为

$$I_2=\rho\frac{4L_2}{\pi d_2^2} \tag{8}$$

基于功率流方向与因果关系，得到了输注软管的流体传动数学模型：

$$\begin{cases}\dot{Q}_2=P_1/I_1-P_2/I_2\\ \dot{P}_2=Q_2/C_2-R_2P_2/I_2-Q_3/C_3\end{cases} \tag{9}$$

将式(6)～式(8)代入式(9)中，可得

$$\begin{cases}\dot{Q}_2=\dfrac{\pi}{4\rho}\left(\dfrac{d_1^2P_1}{L_1}-\dfrac{d_2^2P_2}{L_2}\right)\\ \dot{P}_2=\dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2L_2(E\delta_2+Bd_2)}(Q_2-Q_3)-\dfrac{32\mu d_2^2}{\pi^3}P_2\end{cases} \tag{10}$$

式中：P_2为输注软管液感效应所储存的压力，Pa；Q_3为输注软管液容效应所储存的流量，m^3/s。

1.1.3 基于功率流的刚性针头流体传动模型

刚性针头为刚性管道且与人体皮下间隙组织相连，由于针头长径比大且为刚性，胰岛素在该部件中无明显压力变化，因此，忽略液容影响，仅考虑胰岛素流经刚性针头的摩擦损失，以及液动力引起的能量转换，可得基于功率流刚性针头的流体传动模型，具体如图4所示。

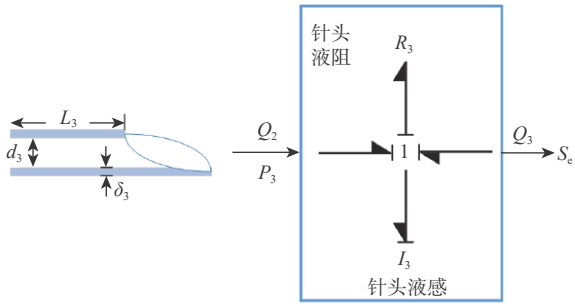


图4 基于功率流的刚性针头流体传动模型

Fig. 4 Power-flow based fluid transmission model of rigid needle

1）当胰岛素流体流经刚性针头时，由管壁摩擦会产生压力损失，即为液阻R_3：

$$R_3=128\rho\mu L_3/\pi^4 \tag{11}$$

式中：L_3为刚性针头的管道长度，m。

2）输注软管的液感效应I_3为

$$I_3=\rho\frac{4L_3}{\pi d_3^2} \tag{12}$$

式中：d_3为储药器接口的内径，m。

基于功率流方向与因果关系，得到了刚性针头的流体传动数学模型：

$$\begin{cases}\dot{Q}_3=P_2/I_2-P_3/I_3\\ \dot{P}_3=Q_3/C_3-R_3P_3/I_3+S_e\end{cases} \tag{13}$$

将式(10)～式(12)代入式(13)中，可得

$$\begin{cases}\dot{Q}_3=\dfrac{\pi}{4\rho}\left(\dfrac{d_2^2P_2}{L_2}-\dfrac{d_3^2P_3}{L_3}\right)\\ \dot{P}_3=\dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2L_2(E\delta_2+Bd_2)}Q_3-\dfrac{128\mu}{\pi^3}R_3+S_e\end{cases} \tag{14}$$

式中：P_3为刚性针头液感效应所储存的压力，Pa；S_e为人体所提供的背压，Pa。

综合式(5)、式(10)、式(14)可以得到，健康状态下胰岛素泵组的流体传动数学模型：

$$\begin{cases}\dot{Q}_1=S_f-\dfrac{\pi d_1^2}{4\rho L_1}P_1\\ \dot{P}_1=\dfrac{4B}{\pi d_1^2}Q_1-\dfrac{128\mu d_1^2}{\pi^3}P_1-\dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2L_2(E\delta_2+Bd_2)}Q_2\\ \dot{Q}_2=\dfrac{\pi}{4\rho}\left(\dfrac{d_1^2P_1}{L_1}-\dfrac{d_2^2P_2}{L_2}\right)\\ \dot{P}_2=\dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2L_2(E\delta_2+Bd_2)}(Q_2-Q_3)-\dfrac{32\mu d_2^2}{\pi^3}P_2\\ \dot{Q}_3=\dfrac{\pi}{4\rho}\left(\dfrac{d_2^2P_2}{L_2}-\dfrac{d_3^2P_3}{L_3}\right)\\ \dot{P}_3=\dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2L_2(E\delta_2+Bd_2)}Q_3-\dfrac{128\mu}{\pi^3}P_3+S_e\end{cases} \tag{15}$$

1.2 故障状态下的胰岛素泵组流体传动数学模型

1.2.1 泄漏故障下胰岛素泵组流体传动模型

对于泄漏故障，其效果可近似为在柔性管道内壁打穿一个半径为r_x的薄壁小孔。胰岛素从泄漏孔泄漏部分流量，这部分流量经过泄漏孔会有摩擦损失，且泄漏孔内外压差也会影响胰岛素流体体积变化。由此，可得到基于功率流的泄漏孔流体传动模型，如图5所示。

1）胰岛素流经泄漏孔时，泄漏孔内外压差所产生的液容效应C'为

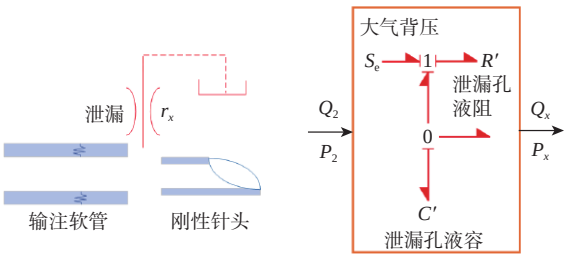


图 5　基于功率流的泄漏孔流体传动模型

Fig. 5　Power-flow based fluid transmission model of leakage hole

$$C' = \frac{\pi r_x^2 \delta_2}{2B} \tag{16}$$

式中：r_x为泄漏孔半径，m。

2）其等效节流孔液阻R'表示为

$$R' = 1/C_d \pi r_x^2 \sqrt{2/\rho} \Delta P^{-\frac{1}{2}} \tag{17}$$

式中：C_d为节流孔的流量系数；ΔP为泄漏孔前后压差，Pa。

基于功率流方向与因果关系，得到了泄漏孔处的流体传动数学模型：

$$\dot{Q}_x = \frac{P_2}{I_2} - \frac{S'_e C' + Q_x}{R' C'} - \frac{Q_x C_3 - Q_z C'}{R'' C' C_3} \tag{18}$$

将式(16)和式(17)代入式(18)中可得

$$\dot{Q}_x = \frac{\pi d_2^2}{4\rho L_2} P_2 - C_d \pi r_x^2 \sqrt{\Delta P 2/\rho} S'_e - \frac{2BC_d \sqrt{2\Delta P}}{\sqrt{\rho}\delta_2} Q_x - \frac{C_d \pi (d_2 - 2h_z)^2 \sqrt{2\Delta P}}{4\sqrt{\rho}} \left[\frac{2B}{\pi r_x^2 \delta_2} Q_x + \frac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2 L_2 (E\delta_2 + Bd_2)} Q_z \right] \tag{19}$$

式中：Q_x为泄漏孔液容效应处所储存的流量。

1.2.2　堵塞故障状态下胰岛素泵组流体传动模型

对于堵塞故障，其效果可近似为在输注软管内壁增设堵塞层。该堵塞层忽略其长度，只考虑其厚度h_z。与节流孔类似，长度忽略不计时，不考虑堵塞层（节流孔）内的液感作用。因此，堵塞故障状态下的胰岛素泵组流体传动模型，考虑胰岛素流经堵塞层的摩擦损失，胰岛素流体可压缩性引起的能量转换，可得基于功率流的堵塞层流体传动模型，具体如图 6 所示。

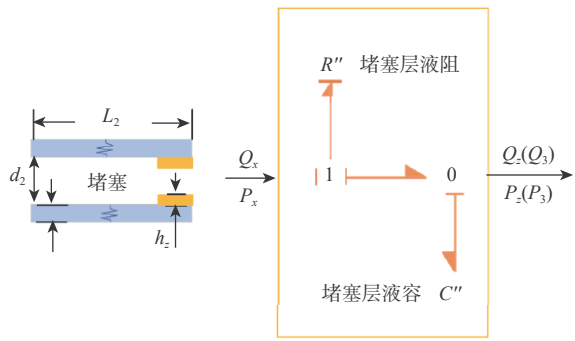


图 6　基于功率流的堵塞层流体传动模型

Fig. 6　Power-flow based fluid transmission model of plugging layer

1）胰岛素流经堵塞层时，其堵塞层前后压差所产生的液容效应C''为

$$C'' = \frac{\pi^2 (d_2 - 2h_z)^2}{2B} \tag{20}$$

式中：h_z为堵塞层厚度，m。

2）其堵塞层等效液阻为

$$R'' = \frac{4}{C_d \pi (d_2 - 2h_z)^2} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} \tag{21}$$

基于功率流方向与因果关系，得到了堵塞层处的流体传动数学模型：

$$\dot{Q}_z = \frac{Q_x C_3 - Q_z C'}{R'' C' C_3} - \frac{P_3}{I_3} \tag{22}$$

将式(20)和式(21)代入式(22)中可得

$$\dot{Q}_z = \frac{C_d \pi (d_2 - 2h_z)^2 \sqrt{2\Delta P}}{4\sqrt{\rho}} \cdot \frac{2B}{\pi r_x^2 \delta_2} Q_x - \frac{C_d \pi (d_2 - 2h_z)^2 \sqrt{2\Delta P}}{4\sqrt{\rho}} \cdot \frac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2 L_2 (E\delta_2 + Bd_2)} Q_z - \frac{\pi d_3^2}{4\rho L_3} P_3 \tag{23}$$

式中：Q_z为堵塞层液容效应处所储存的流量。

综合式(15)、式(19)、式(23)可以得到，泄漏与堵塞故障状态下胰岛素泵组的流体传动数学模型：

$$\begin{cases} \dot{Q}_1 = S_f - \dfrac{\pi d_1^2}{4\rho L_1} P_1 \\ \dot{P}_1 = \dfrac{4B}{\pi d_1^2} Q_1 - \dfrac{128\mu d_1^2}{\pi^3} P_1 - \dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2 L_2 (E\delta_2 + Bd_2)} Q_2 \\ \dot{Q}_2 = \dfrac{\pi}{4\rho} \left(\dfrac{d_1^2 P_1}{L_1} - \dfrac{d_2^2 P_2}{L_2} \right) \\ \dot{P}_2 = \dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2 L_2 (E\delta_2 + Bd_2)} Q_2 - \dfrac{32\mu d_2^2}{\pi^3} P_2 - \dfrac{2B}{\pi r_x^2 \delta_2} Q_x \\ \dot{Q}_x = \dfrac{\pi d_2^2}{4\rho L_2} P_2 - C_d \pi r_x^2 \sqrt{2\Delta P/\rho} S'_e - \dfrac{2BC_d \sqrt{2\Delta P}}{\sqrt{\rho}\delta_2} Q_x - \dfrac{C_d \pi (d_2 - 2h_z)^2 \sqrt{2\Delta P}}{4\sqrt{\rho}} \left[\dfrac{2B}{\pi r_x^2 \delta_2} Q_x + \dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2 L_2 (E\delta_2 + Bd_2)} Q_z \right] \\ \dot{Q}_z = \dfrac{C_d \pi (d_2 - 2h_z)^2 \sqrt{2\Delta P}}{4\sqrt{\rho}} \cdot \dfrac{2B}{\pi r_x^2 \delta_2} Q_x - \dfrac{C_d \pi (d_2 - 2h_z)^2 \sqrt{2\Delta P}}{4\sqrt{\rho}} \cdot \dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2 L_2 (E\delta_2 + Bd_2)} Q_z - \dfrac{\pi d_3^2}{4\rho L_3} P_3 \\ \dot{P}_3 = \dfrac{8BE\delta_2}{\pi d_2^2 L_2 (E\delta_2 + Bd_2)} Q_z - \dfrac{128\mu}{\pi^3} P_3 + S_e \end{cases} \tag{24}$$

至此，完成了胰岛素泵组泄漏与堵塞故障的故障机理建模。

2 计算与仿真

首先，对所建立的健康与故障状态下的胰岛素泵组流体传动数学模型进行求解计算，并与专业流体传动软件仿真结果进行对比。之后，设置不同故障参数，基于所建立的胰岛素泵组动力学模型计算分析胰岛素在不同故障类型、不同故障程度下的流体动力学特性。

2.1 模型参数设置

以美敦力722胰岛素泵组为例，通过测量可以得到其泵组尺寸参数。根据美敦力使用说明书可知储药器接口材料为聚碳酸酯/共聚酯合成，管路组件的输注软管其外部材料为聚氨酯，内部材料为聚乙烯，刚性针头材料为304不锈钢，查表可得各元件杨氏模量，其参数设置如表1所示。

表1 元件参数

Table 1 Component parameters

元件	长度/m	内径/m	管壁厚度/m	管壁杨氏模量/MPa
储药器接口	0.034	0.012 0	0.001 00	194 020
输注软管	1.100	0.001 3	0.000 10	147
刚性针头	0.009	0.000 4	0.000 01	194 020

对于胰岛素注射液的参数设置，以赖脯胰岛素为例，根据文献[19]得到密度、体积弹性模量、黏度等胰岛素特性参数，如表2所示。

表2 胰岛素特性参数[19]

Table 2 Insulin characteristic parameters[19]

流体	密度/(kg·m^{-3})	体积弹性模量/Pa	绝对黏度/(mPa·s)
胰岛素	1 004.6	5.1×10	1.106

由于人体皮下间隙组织背压应与标准大气压近似[20]，故皮下间隙组织背压设为101 325 Pa。

胰岛素泵组进行胰岛素输注时，Maxon行星减速电机以36 r/min的转速带动螺杆旋转，螺杆螺距为0.9 mm，螺杆每旋转一圈可推动储药器中的活塞注射0.347 mg(10 U)的胰岛素。计算仿真时间设置为10 s，其中，在前5 s胰岛素输入流量保持为0，5～10 s内切换为胰岛素输入状态(即输注速率为0.216 L/h，其中，1 L/h=2.78×10^{-7} m^3/s)。

2.2 故障参数设置与仿真参数设置

本文探索不同堵塞与泄漏故障程度下胰岛素泵组流体传动特性。因此，泄漏孔半径r_x与堵塞层厚度h_z各设置8组故障参数，具体设置如表3所示。

表3 故障参数设置

Table 3 Fault parameter setting

泄漏孔半径r_x/mm	堵塞层厚度h_z/mm
0/0.1/0.2/0.3/0.4/0.5/0.6/0.65	0/0.2/0.4/0.6/0.615/0.625/0.635/0.645/0.65

AMESim是一款专业液压仿真软件，广泛用于管道与液压领域的设计[21]。运用液压库、管道子模型库来进行构建胰岛素泵组流体传动系统物理仿真模型，使用流源元件(flowsource)代替胰岛素泵以提供流量，并采用了一种脉冲信号的方式来设定胰岛素输入流量；使用软管元件(hose)来代替储药器接口、输注软管与刚性针头管道；使用油箱元件(tank)来代替人体皮下间隙组织。在此基础上，增加节流孔(flowcontrol restrictor)元件模拟胰岛素泵组的泄漏与阻塞故障，其位置均设于输注软管内。仿真步长为0.01 s。健康与故障状态下的胰岛素泵组流体传动系统AMESim仿真模型如图7所示。

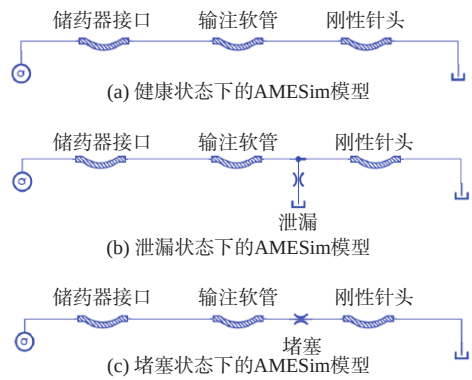


图7 胰岛素泵组流体传动系统AMESim仿真模型

Fig. 7 AMESim simulation model of fluid transmission system of insulin pump sets

3 结果与讨论

通过将模型计算结果与仿真结果对比，验证健康状态与故障状态下胰岛素泵组流体传动数学模型的有效性。之后，基于所建立模型定量分析泄漏与堵塞故障对胰岛素泵组流体流动的影响。

3.1 数学模型的有效性验证

以泄漏孔半径r_x=0.025 mm、堵塞层厚度h_z=0.61 mm为例进行模型仿真与计算，通过分别比较模型计算结果与AMESim仿真结果对于健康状态与故障状态下胰岛素泵组输出流量与腔体压力的偏差，从而可以直观验证所建立模型的有效性，其健康状态与故障状态计算与仿真结果如图8所示。

由图8可知，在健康与故障状态下，模型解算结果与仿真结果非常接近。误差分析结果如表4所示，在健康状态下，本文模型与AMESim仿真结果对比，流量与压力的相对误差分别为0.392 7%和0.005 4%，泄漏故障下分别为0.568 2%和0.001 2%，堵塞故障下分别为0.377 7%和0.002 2%，总体相对

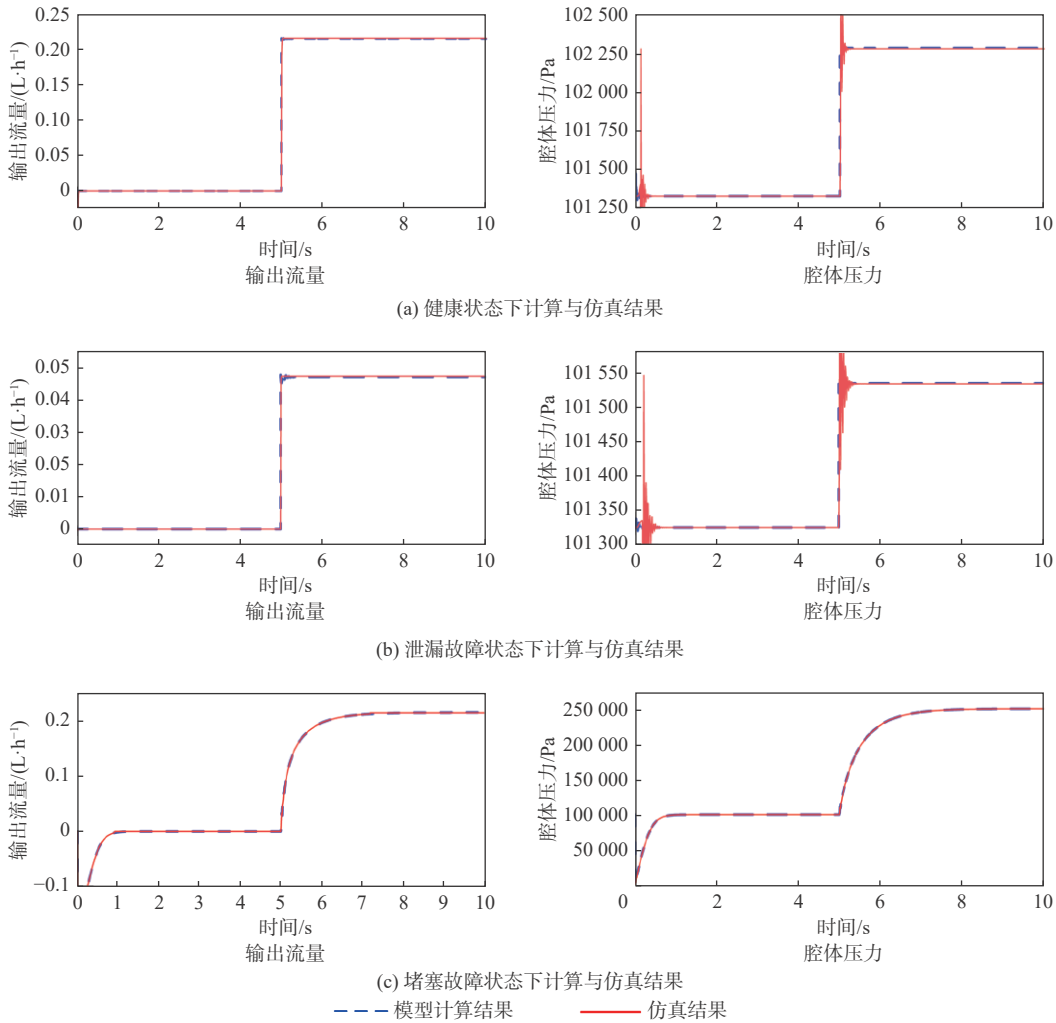


图 8　数学模型与仿真模型对比

Fig. 8　Comparison of calculated model and simulation model

表 4　计算与仿真模型误差分析

Table 4　Error analysis between calculated model and simulation model

计算与仿真结果比较	输出流量/(L·h⁻¹)			压力/Pa		
	健康状态	泄漏故障	堵塞故障	健康状态	泄漏故障	堵塞故障
模型计算	0.215 1	0.047 5	0.215 1	102 274	101 535	251 944
仿真结果	0.215 9	0.047 2	0.215 9	102 280	101 534	251 949

误差均小于 0.57%, 表明本文模型具有较高的计算精度和可靠性。

3.2　基于数学模型的胰岛素泵组故障影响分析

验证模型的有效性之后, 基于模型定量分析泄漏与堵塞故障对胰岛素泵组流体流动的影响。

首先, 探索泄漏故障对流量的影响。泄漏半径 r_x 分别为 0, 0.3, 0.6 mm 时的胰岛素输出流量随时间变化曲线如图 9 所示。5 s 开始输注胰岛素, 健康状态下, 胰岛素输速率可以按照 0.216 L/h 的预定值输注, 泄漏半径为 0.3 mm 时, 其泄漏量为 0.094 009 8 L/h, 占总输注量的 43.5%。泄漏半径为 0.6 mm 时, 其泄漏量为 0.185 884 L/h, 其泄漏量占比达到 86.1%。

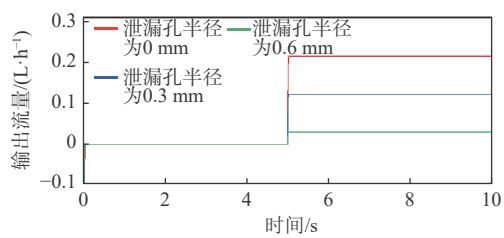


图 9　3 种泄漏半径下胰岛素泵组输出流量时域

Fig. 9　Insulin output flow rate with leakage hole radius at three leakage radius

为进一步探索不同泄漏半径下的胰岛素输注速率, 设置 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.65 mm 这 7 种泄漏半径。如图 10 所示, 随着泄漏半径的增大, 胰

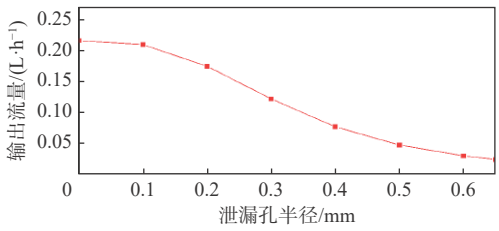


图 10 不同泄漏半径下胰岛素泵组输出流量

Fig. 10 Performances of insulin output flow with different leakage radius

岛素输注速率降低，说明其泄漏量增大。

其次，探索泄漏故障对压力的影响。泄漏半径 r_x 分别为 0, 0.3, 0.6 mm 时的胰岛素泵腔体压力随时间变化曲线如图 11 所示。同泄漏流量一样，对于胰岛素泵腔体压力，泄漏故障会使得腔体压力下降，当泄漏半径为 0.3 mm 时，腔体压力为 101 861 Pa，较健康状态下降 0.4%；当泄漏半径为 0.6 mm 时，腔体压力为 101 457 Pa，下降 0.8%。不同泄漏半径下胰岛素泵腔体压力如图 12 所示。

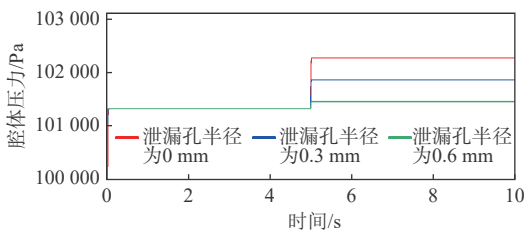


图 11 3 种泄漏半径下腔体压力时域

Fig. 11 Pump chamber pressure with leakage hole radius at three leakage radius

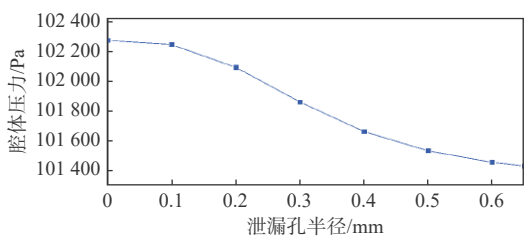


图 12 不同泄漏半径下胰岛素泵腔体压力

Fig. 12 Performances of pump chamber pressure with different leakage radius

接下来，探索堵塞故障对流量的影响。堵塞层厚度 h_z 分别为 0, 0.625, 0.65 mm 时的胰岛素输出流量随时间变化曲线如图 13 所示。5 s 开始输注胰岛素，健康状态下，胰岛素输速率可以按照 0.216 L/h 的预定值输注。当堵塞层厚度为 0.625 mm 时，胰岛素泵组输出流量需要一段时间才会接近正常值，在 10 s 时其输出流量仅达到健康状态的 87.4%。当堵塞层厚度为 0.65 mm 时，输注软管被完全堵塞，胰岛素泵组的输出流量降为 0 L/h。

进一步，通过设置 0, 0.200, 0.400, 0.600, 0.615, 0.625, 0.635, 0.645, 0.650 mm 不同堵塞厚度，探索不同堵塞程度对输出流量的影响，结果如图 14 所示。由图可知，堵塞厚度小于 0.6 mm 时，对胰岛素输出速率的影响不大，当超过 0.6 mm 时，堵塞对输出速率的影响显著增大。即堵塞程度增大时，达到正常状态流量的时间会更长。以 10 s 所能达到健康状态的流速程度来看，当堵塞层厚度为 0.635 mm，10 s 时其输出流量只达到了 45.6%。当计算时间设置为 7.5 s 时，达到健康状态流速程度更低。

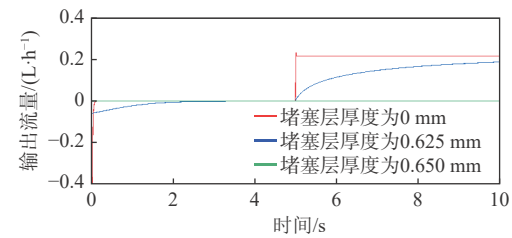


图 13 3 种堵塞厚度下胰岛素泵组输出流量时域

Fig. 13 Insulin output flow rate with plugging thickness at three leakage radius

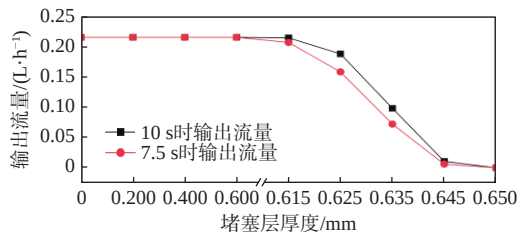


图 14 不同堵塞厚度下胰岛素泵组输出流量结果

Fig. 14 Performances of insulin output flow with different plugging thickness

最后，探索堵塞故障对压力的影响。堵塞层厚度 h_z 分别为 0, 0.625, 0.650 mm 时的胰岛素泵腔体随时间变化曲线如图 15 所示。5 s 开始输注胰岛素，健康状态下，腔体压力几乎不发生变化，为 102 289 Pa。当堵塞层厚度为 0.625 mm 时，腔体压力会逐渐升高，并随着压力升高，其变化率逐渐降低，直至压差和流量达到平衡状态，10 s 时其压力值为 833 502 Pa，达到了健康状态的 714%。可以得出，随着堵塞层厚度的增加，胰岛素泵腔体压力增大，当堵塞层厚度为 0.650 mm 即为完全堵塞状态时，压力会直线上升。

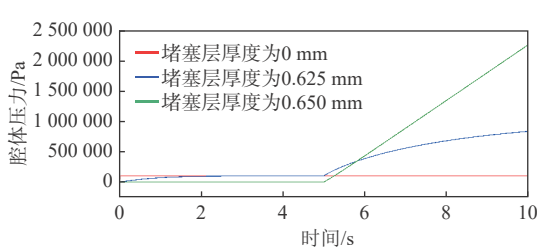


图 15 3 种堵塞厚度下腔体压力时域图

Fig. 15 Pump chamber pressure with plugging thickness at three leakage radius

同样, 通过设置不同堵塞厚度, 探索不同堵塞程度对腔体压力的影响, 结果如图 16 所示。从图中可以看出, 堵塞厚度小于 0.600 mm 时, 对泵组腔体内压力影响不大, 当超过 0.600 mm 时, 堵塞对腔体压力的影响显著增大。当堵塞层厚度为 0.635 mm, 10 s 腔体压力为 1 646 800 Pa, 达到了健康状态的 1 509%。当输注胰岛素时, 随着堵塞层厚度的增大, 其曲线斜率增大, 堵塞对胰岛素泵组的压力影响效果更为显著。这表明, 压力可能是一种潜在的敏感性故障特征参数, 可用于检测胰岛素泵组的堵塞故障。

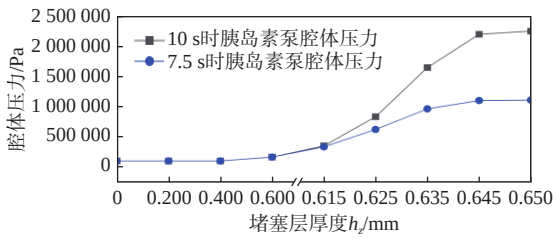


图 16　不同堵塞厚度下腔体压力结果

Fig. 16　Performances of pump chamber pressure with different plugging thickness

4　结　论

本文基于功率流理论建立了胰岛素泵组泄漏与堵塞故障状态下的流体传动数学模型, 通过仿真对模型进行检验, 并根据所建立数学模型定量地分析了故障对胰岛素泵组输出流量与腔体压力的影响机理。

1) 本文胰岛素泵组流体传动数学模型计算结果与仿真结果最大误差为 0.57%。

2) 对于泄漏故障, 泄漏程度越大, 胰岛素泵的输出流量越小, 胰岛素泵腔体压力也越小。当泄漏半径r_x为 0.3 mm 时, 其泄漏量达到 43.5%, 胰岛素泵腔体压力降低 0.4%; 当泄漏半径r_x为 0.6 mm 时, 其泄漏量达到了 86.1%, 胰岛素泵腔体压力降低 0.8%。

3) 对于堵塞故障, 当堵塞层厚度h_z小于 0.600 mm 时, 胰岛素的输出流量与输注软管压力变化并不显著; 当堵塞层厚度h_z超过 0.600 mm 时, 随着堵塞层厚度的增加, 堵塞对流量和压力变化显著(例如, 堵塞层厚度h_z为 0.625 mm, 经过 10 s 后, 压力提高到无故障状态的 714%, 流量达正常状态的 87.4%; 堵塞层厚度为 0.635 mm, 经过 10 s 后, 压力提高到无故障状态的 1 509%, 流量达正常状态的 45.6%)。

参考文献（References）

[1] Choudhury A A, Devi Rajeswari V. Gestational diabetes mellitus—a metabolic and reproductive disorder[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 143: 112183.

[2] Sun H, Saeedi P, Karuranga S, et al. IDF diabetes Atlas: global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045[J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2022, 183: 109119.

[3] Nathan D M, Genuth S, Lachin J, et al. The effect of intensive treatment of diabetes on the development and progression of long-term complications in insulin-dependent diabetes mellitus[J]. The New England Journal of Medicine, 1993, 329(14): 977-986.

[4] Nathan D M. Realising the long-term promise of insulin therapy: the DCCT/EDIC study[J]. Diabetologia, 2021, 64(5): 1049-1058.

[5] Zhang J Y, Shang T, Chattaraj S, et al. Advances in insulin pump infusion sets symposium report[J]. Journal of Diabetes Science and Technology, 2021, 15(3): 705-709.

[6] Heinemann L, Fleming G A, Petrie J R, et al. Insulin pump risks and benefits: a clinical appraisal of pump safety standards, adverse event reporting and research needs. A joint statement of the European Association for the Study of Diabetes and the American Diabetes Association Diabetes Technology Working Group[J]. Diabetologia, 2015, 58(5): 862-870.

[7] Welsh J B, Vargas S, Williams G, et al. Designing the modern pump: engineering aspects of continuous subcutaneous insulin infusion software[J]. Diabetes Technology & Therapeutics, 2010, 12(Sl): S37-S42.

[8] 姚远, 李建波. 胰岛素泵的故障分析及预防性维护[J]. 医疗装备, 2019, 32(15): 116-118.
Yao Y, Li J B. Fault analysis and preventive maintenance of insulin pump[J]. Medical Equipment, 2019, 32(15): 116-118(in Chinese).

[9] Kwa T, Zhang G, Shepard K, et al. The improved survival rate and cost-effectiveness of a 7-day continuous subcutaneous insulin infusion set[J]. Journal of Medical Economics, 2021, 24(1): 837-845.

[10] Manzoni E, Rampazzo M, Facchinetti A, et al. Monitoring statistical properties of Kalman filter residuals in an artificial pancreas to detect overnight pump malfunctions causing insulin suspension[J]. Control Engineering Practice, 2023, 141: 105673.

[11] Aiello E M, Laffel L M, Patti M E. Ketone-based alert system for insulin pump failures[J]. Journal of Diabetes Science and Technology, 2025, 19(3): 683-691.

[12] Pickup J C, Yemane N, Brackenridge A, et al. Nonmetabolic complications of continuous subcutaneous insulin infusion: a patient survey[J]. Diabetes Technology & Therapeutics, 2014, 16(3): 145-149.

[13] Mazzotta F A, Lucaccini Paoli L, Rizzi A, et al. The development and evolution of insulin pumps: from early beginnings to future prospects[J]. Minerva Endocrinology, 2024, 49(1): 85-99.

[14] Ramkissoon C M, Aufderheide B, Bequette B W, et al. A review of safety and hazards associated with the artificial pancreas[J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2017, 10: 44-62.

[15] Freckmann G, Kamecke U, Waldenmaier D, et al. Occlusion detection time in insulin pumps at two different basal rates[J]. Journal of Diabetes Science and Technology, 2018, 12(3): 608-613.

[16] Chakrabarti A, Macisaac R J, Mcauley S A. Insulin pump troubleshooting: a case vignette and systematic approach[J]. Medical Journal of Australia, 2022, 216(11): 595-596.

[17] Formo M W, Stavdahl Ø, Fougner A L. Modelling and simulation of occlusions in insulin pumps[C]//Proceedings of the 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1499-1503.

[18] 王中双. 基于键合图理论的多体系统耦合动力学建模方法的研究[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Wang Z S. Research on coupling dynamics modeling method of multi-body system based on bond graph theory [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007(in Chinese).

[19] Adams G G, Meal A, Morgan P S, et al. Characterisation of insulin analogues therapeutically available to patients[J]. PLoS One, 2018, 13(3): e0195010.

[20] Vasiliu N, Vasiliu D, Călinoiu C, et al. Simulation of fluid power systems with Simcenter Amesim[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.

[21] Keramidas M E, Kölegård R, Sköldefors H, et al. In vivo pressure-flow relation of human cutaneous vessels following prolonged iterative exposures to hypergravity[J]. American Journal of Physiology Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2023, 325(1): R21-R30.

Typical fault mechanism modeling and simulation analysis of insulin pump sets

WANG Weijie[1], GUO Dinghui[1], LI Xiangyu[1,*], GENG Yixuan[2], QUAN Long[1]

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: An insulin pump is an advanced device used for intensive insulin therapy in diabetic patients. Failure of the insulin pump sets can disrupt normal insulin delivery, leading to abnormal blood glucose elevations and potentially causing diabetic ketoacidosis, which can be life-threatening. Establishing a mathematical model to describe the fault mechanisms of insulin pump sets is fundamental for its fault diagnosis. Insulin pumps, however, provide difficulties for modeling and fault mechanism analysis due to the stiff and elastic restrictions of the needles and tubes, as well as the multi-domain interactions between the fluid (insulin) and the solid parts of the pump. In response to these challenges, this paper establishes a mathematical model of fluid transmission in insulin pumps under both healthy and faulty conditions, based on power flow theory, focusing on two typical faults: blockages and leaks. The impact of these faults on fluid flow within the insulin pump sets is quantitatively analyzed. The computational results of the proposed model showed a maximum error of 0.57% when compared with professional fluid dynamics software simulations. Furthermore, the impact of varying degrees of leakage and blockage faults on the output flow rate and pressure of the insulin pump system is analyzed. Specifically, for blockage faults, it was observed that when the blockage layer thickness is less than 0.6 mm, the changes in insulin output flow rate and the pressure within the insulin pump chamber are not significant. However, the blockage has a considerable impact on both flow rate and pressure when the thickness of the blockage layer surpasses 0.6 mm. The impact grows with the thickness of the blockage layer.

Keywords: insulin pump set; power flow modeling and simulation; failure mechanism analysis; fluid transmission mechanism; AMESim

Received: 2024-06-04; **Accepted**: 2024-07-04; **Published Online**: 2024-07-12 10:51
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240709.1410.001
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52205065,72101173)
* **Corresponding author**. E-mail: xiangyuli@tyut.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0299

多因素作用下机场滑行道桥健康承载力学性能分析

张宇辉[1,*]，廖蜀娇[1]，赵媛媛[2]

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院，天津 300300；2. 中国中元国际工程有限公司 国际院，北京 100080)

摘 要：针对滑行道桥在地震波、飞机荷载和损伤分级的复合作用下的健康承载性能问题，提出机桥耦合作用下基于振动参数的桥梁检测方法，通过有限元仿真与现场实验，建立飞机-滑行道桥耦合振动损伤模型，根据实测数据调整模型参数，模型误差控制在7%以内。输入调整后的地震波，模拟滑行道桥在不同飞机荷载、损伤程度和地震荷载情况下的力学性能，建立多因素作用下滑行道桥的振动性能分析模型，实现对桥梁健康承载力学性能的评估。选取2种工况，验证模型的可行性。以上研究成果将为滑行道桥基于振动参数的检测评估提供重要的理论基础和参考意义。

关 键 词：滑行道桥；有限元仿真；地震波；多因素作用；健康承载力学性能

中图分类号：V351.1

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2403-11

机场滑行道桥是解决与机场内外交通、河流等交叉问题的有效手段[1]。我国现有的滑行道桥多为梁式桥，飞机荷载与汽车荷载相比过大且滑行轨迹固定，易导致梁内产生弯矩过大的情况，同时会对桥面铺装造成破坏，导致飞机荷载冲击效应增大，对桥梁结构安全造成巨大影响。为确保机场安全运行，必须对滑行道桥在常荷载和大荷载机型下的实时力学状态进行检测，准确判断滑行道桥是否处于安全状态以及能否安全通行。常用的桥梁检测和状态评估方法主要有表观检测法、局部检测法、荷载试验法[2]。但由于滑行道桥具有宽度大、荷载重和断交难的特点，地震波影响下的数据更是难以进行实测，常规桥梁检测方法已不适用。综合考量以上问题，使用仿真分析与现场实验相结合的方法，结合机桥耦合振动的基本理论，建立在飞机荷载、地震荷载、桥梁损伤分级多因素作用下的滑行道桥振动性能分析模型，分析地震波作用下的滑行道桥健康承载性能。

对飞机-滑行道桥这一特种桥梁的研究集中于滑行道桥仿真建模的建立与优化性能测试分析[3-4]。其中，文献[5]通过现场实测与仿真的方法，研究飞机荷载对冲击系数的影响，建立了滑行道桥动-静荷载力学计算模型；文献[6]建立了机桥耦合振动模型，分析了飞机频率和滑行道桥基频对滑行道桥寿命的影响；文献[7]通过理论分析、数值计算和现场实验的方法，验证了基于振动参数的滑行道桥损伤识别方法的可行性；文献[8]基于模态综合法分析飞机-滑行道桥耦合系统的振动情况，建立了飞机与桥梁的振动时变方程，研究滑行道桥在移动荷载下的动态响应。这些研究成果为现阶段滑行道桥的安全评估与检测提供了理论依据。

现阶段关于滑行道桥振动分析的研究尚且不够成熟，大多参考公路、铁路系统的研究成果。文献[9]对桥梁进行了动态分析，根据桥梁的地震响应评估桥梁的状态；文献[10]研究了车辆对地震作用下桥梁的影响，发现车辆与桥梁之间的作用会影响二者的能量分配，但车辆对桥梁在水平方向的地震反应的影响很小；文献[11]基于桥梁在移动荷载

收稿日期：2024-05-08；录用日期：2024-06-14；网络出版时间：2024-06-20 13:05
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240619.1426.002
基金项目：天津市教委自然科学计划 (2018KJ245)
*通信作者. E-mail：xueyingshuang@163.com

引用格式：张宇辉，廖蜀娇，赵媛媛. 多因素作用下机场滑行道桥健康承载力学性能分析[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2403-2413.
Zhang Y H，Liao S J，Zhao Y Y. Analysis of health-based load-bearing mechanical properties of airport taxiway bridges under multifactorial effects[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2403-2413 (in Chinese).

作用下的动态行为的方程进行建模。研究了车速、车辆间距、桥梁刚度、跨度长度等参数对桥梁动力放大因子的影响；文献[12]基于车辆与桥梁耦合作用分析了车辆在粗糙路面上行驶即移动荷载引起桥梁动态响应的情况；文献[13]基于一座曲线梁桥进行建模，研究双向地震动和单项地震动对桥梁的影响，发现双向地震动加剧了桥梁的横向碰撞。而针对滑行道桥在地震波下的力学性能分析和安全性分析尚未发现，文献[14]建立了地震作用下的机桥耦合模型，验证了地震作用下的仿真模型的有效性，但对在地震荷载、飞机荷载的作用下桥梁的安全性并未有深入的研究。地震发生频率较低，但当飞机荷载与地震波产生协同作用时，滑行道桥发生突发性坍塌破坏风险概率激增，将产生机毁人亡的灾难性后果，造成严重的经济损失和恶劣社会影响。

有鉴于此，论文针对地震这种极端的灾害现象，分析滑行道桥在飞机荷载、桥梁损伤程度等多因素综合作用下的安全承载能力。提出仿真分析与现场实验相结合的方法对滑行道桥进行实体仿真建模，以模拟滑行道桥在地震作用时处于不同飞机荷载、损伤程度情况下的健康承载力学性能，对其进行安全性分析，达到准确判断滑行道桥是否处于健康状态并且能否安全通行的目的。

1 桥梁概述

该滑行道桥为2跨预应力(*A*类)混凝土简支梁结构，跨径为16 m+16 m，主要用于供*E*类及以下的各类飞机往来于机场的东、西飞行区之间滑行。桥梁全长为54 m，滑行通道宽为44 m，全宽以Boeing747翼展计，为65.5 m。以现行的*E*类飞机最大滑行重量为设计荷载，计算荷载为Boeing747，验算荷载为Boeing777、麦道11。桥梁支座与跨中位置分别设置横梁及横隔梁。桥面纵坡为双向0.3%，横桥向为双向1.0%。主梁采用的混凝土强度为C50，桥墩桥台采用的混凝土强度为C30。

2 仿真建模分析及精度验证

2.1 健康的滑行道桥仿真建模

对桥梁结构进行简化并且建立有限元模型。参考现有研究[15]，在建模时将滑行道桥简化为桥梁上部结构，将桥墩和桩基桥台简化为桥梁上部结构的约束，可以大幅度提高计算精度和速度。

建立桥梁钢筋网架模型。桥梁内的预应力钢束采用规格为15 mm的低松弛钢绞线，钢绞线标准强度1 860 MPa，采用后张法张拉预应力筋，张拉控制应力1 395 MPa，预应力钢筋为上下两排角度向上的弯起钢筋，位于同一排的钢筋完全相同。混凝土和钢筋分别采用C3D8R单元和T3D2单元进行分离式建模，采用Embedded技术进行自由度耦合，将钢筋置到混凝土中，有效解决钢筋与混凝土材料的重叠问题，实现钢筋混凝土的耦合。

建立桥梁支座模型。根据桥梁设计图纸可知，滑行道桥一共128个支座，一跨64个支座。该桥梁的支座采用的是板式橡胶支座，支座规格为400 mm×700 mm×78 mm。在有限元软件中将桥梁上部与支座接触处进行切分，切分出128个尺寸为400 mm×700 mm的矩形，将桥梁与支座直接接触的区域进行绑定，以达到贴近桥梁真实受力的情况的目的。桥梁与支座的网格单元采用C3D8R单元，最终建立的桥梁上部结构网格划分如图1所示。

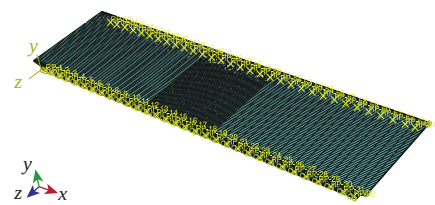


图1 桥梁上部结构网格划分图

Fig. 1 Grid division drawing of bridge superstructure

2.2 机桥耦合振动模型分析

通过施加机桥耦合荷载来增大振动频率变化幅度，从而提高桥梁损伤监测的灵敏性和准确性，实现桥梁振动参数的准确测量。桥梁的固有频率是确定桥梁结构的最常用参数，表达式为[16]

$$f=\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2\sqrt{\frac{EI}{m}} \tag{1}$$

式中：f为桥梁的固有频率，Hz；m为结构的质量，kg；EI为结构的抗弯刚度，N·m^2；l为桥梁的跨径，m。

假定桥梁结构的刚度不变，将飞机的荷载施加在桥梁结构上，桥梁结构的固有频率随之也产生一个相应的增量Δf。考虑桥梁的实际运营过程中，桥梁的刚度随使用年限与次数的增加会变小，因而在考虑刚度减小和质量增大的情况下，根据增量原理计算公式得：

$$\Delta f=-\frac{1}{\pi}\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2\sqrt{\frac{EI}{m}}\left(\frac{\Delta I}{I}-\frac{\Delta m}{m}\right) \tag{2}$$

式中：Δf为增量频率，Hz；Δm为飞机的荷载，kg；ΔI主梁截面惯性矩变化量，m^4。

对桥梁施加不同的荷载，获得不同的振动频率，更能反映出桥梁结构在耦合荷载作用下的实际振动状态[17]。选取单轴双轮B737-800，双轴双轮的B747-400、三轴双轮的B777-300作为加载机型。计算各种机型的飞机荷载参数见表1。

表 1　飞机机型及参数表

Table 1　Aircraft types and parameters table

机型	起落架构型	P_t/kN	M_{TW}/kN	m_1/kN	m_2/kN
B737-800	单轴双轮	187.63	792.6	752.97	188.24
B747-400	双轴双轮	236.15	3 978.0	3 779.06	236.69
B777-300	三轴双轮	236.50	3 002.8	2 846.66	237.22

注: ①P_t为飞机主起落架上的轮载, kN; ②M_{TW}为最大滑行重量, kN; ③m_1为最大滑行重量下的主起落架轮载, kN; ④m_2为最大滑行重量下的单轮荷载, kN。

根据表 1 和图 2 的飞机主起落架的参数与尺寸, 在桥梁实体仿真模型中分别构建以轮印为底面的柱质量块, 将质量块与桥梁绑定, 底面全自由度约束, 四棱柱的质量为耦合荷载, 影响桥梁的振动频率, 机桥耦合振动仿真模型见图 3, 其中图中的黄色部分为质量块。

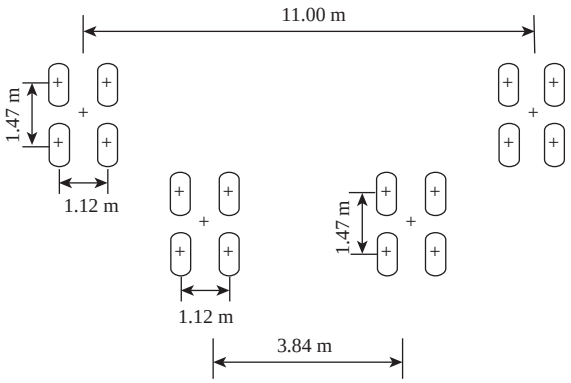


图 2　B747-400 主起落架构型图

Fig. 2　Configuration diagram of B747-400 aircraft main landing gear

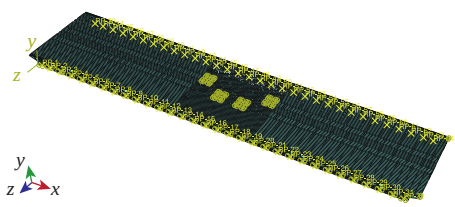


图 3　B747-400 飞机-滑行道桥耦合振动模型

Fig. 3　Coupled vibration model of B747-400 aircraft taxiway bridge

结合桥梁的实际使用情况, 在荷载作用下, 对于桥梁来说最不利的受力位置就是跨中位置, 因此在后续的研究中在桥梁的跨中位置重点加载飞机荷载。

2.3　滑行道桥的整体损伤动测模型分析

在建立的机桥耦合振动模型的基础上, 设置不同的损伤情况, 建立滑行道桥损伤动测模型, 根据桥梁的振动参数判断桥梁的损伤状态。

从结构动力学的角度, 桥梁出现损伤时, 会导致其刚度降低, 从而会出现桥梁自振频率变化的情况, 故可以通过判断桥梁自振频率的变化来进行桥梁损伤的识别。

根据平截面假定, 均质纯弯完好梁跨中挠度理论计算式[18]:

$$y=\frac{M}{9EI}\sqrt{\frac{a_d(2l-a_d)^3}{3}} \tag{3}$$

式中: M为荷载下纯弯截面的弯矩值, N·m; y为荷载下跨中截面的挠度值, mm; a_d为加载点离支座的距离, m。

参考《公路桥涵养护规范》(JTG 5120-2021)[19]把桥梁健康状况分为 5 个类别标准, 见表 2。

表 2　桥梁健康状况类别

Table 2　Bridge health condition category

桥梁状态	桥梁承载能力	重要部件损伤程度	次要部件损伤程度
完好、良好	符合设计标准	完好	3%以内
较好	达到设计标准	3%以内	10%以内
较差	设计值的90%以上	10%以内	10%～20%
差	设计值的90%～75%	10%～20%	20%以上
危险	设计值的75%以下	严重损伤	严重损伤

拟将滑行道桥的损伤分为 6 类。在有限元模型中, 运用刚度降低法, 通过降低材料的弹性模量 E, 实现桥梁不同程度损伤状态下整体承载能力降低的模拟。桥梁的整体损伤程度分级见表 3[20]。

表 3　桥梁整体损伤程度分级表

Table 3　Grading scale for overall bridge damage

损伤程度	损伤程度/%	E/MPa
无损伤	0	34 500
轻微损伤	5	32 775
中度损伤	10	31 050
较严重损伤	15	29 325
严重损伤	20	27 600
完全损伤	25	25 875

对不同整体损伤分级下的桥梁损伤模型仿真结果进行对比。选取 3 种机型, 设置 4 种不同耦合荷载、6 种损伤程度, 共计 24 种工况, 桥梁的频率与挠度变化见表 4～表 5。

表 4　桥梁不同损伤分级下的频率

Table 4　Frequency of bridges with different damage classifications

损伤程度/%	$f_{无荷载}$/Hz	$f_{B737\text{-}800}$/Hz	$f_{B777\text{-}300}$/Hz	$f_{B747\text{-}400}$/Hz
0	10.050	9.610	8.356	7.803
5	9.814	9.382	8.153	7.614
10	9.57	9.146	7.944	7.418
15	9.317	8.902	7.728	7.217
20	9.055	8.649	7.504	7.009
25	8.780	8.381	7.274	6.794

表5 桥梁不同损伤分级的跨中挠度

Table 5 Mid-span deflections of bridges with different damage classifications

损伤程度/%	$y_{无荷载}$/mm	$y_{B737\text{-}800}$/mm	$y_{B777\text{-}300}$/mm	$y_{B747\text{-}400}$/mm
0	1.607	1.874	2.165	2.367
5	1.689	1.970	2.298	2.487
10	1.779	2.076	2.400	2.621
15	1.881	2.194	2.538	2.77
20	1.995	2.328	2.693	2.938
25	2.124	2.479	2.869	3.127

不同机型作用时桥梁的频率随损伤程度的变化曲线如图4，图中 K_1～K_4 表示斜率。

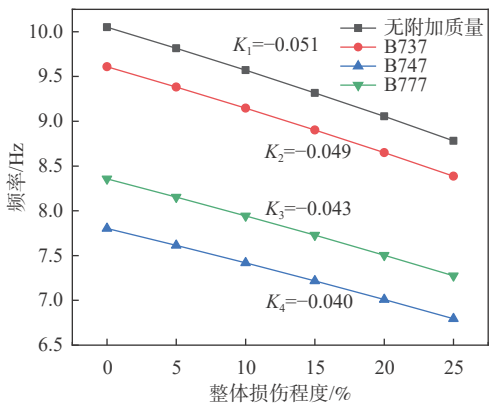


图4 不同损伤分级下的频率变化

Fig. 4 Frequency variation at different injury classifications

由图4可知，随着耦合荷载增大桥梁频率减小，同一机型作用时桥梁的频率随损伤程度的增大而减少。

不同机型作用时桥梁的跨中挠度随损伤程度的变化曲线如图5。

由图5可知，随着耦合荷载的增大跨中挠度也随之增大，同一机型作用时桥梁的跨中挠度随损伤程度的增大而增大。

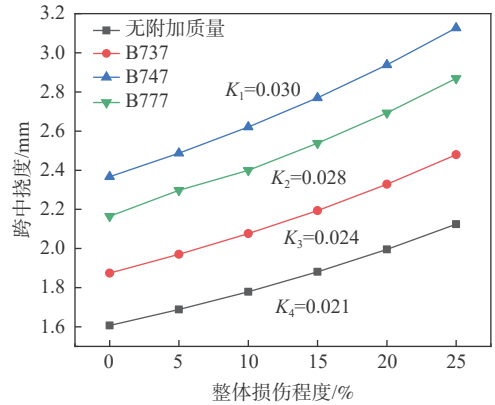


图5 不同损伤分级下的跨中挠度变化

Fig. 5 Variation of mid-span deflection for different damage classifications

2.4 精度验证

在上述建立的飞机-滑行道桥耦合振动损伤模型的基础上，根据滑行道桥的实测数据调整仿真模型精度。

对桥梁现场实测测试结果进行分析。对研究的滑行道桥现场实验，对滑行道桥的外观检测、应变测试、位移测试结果进行分析。经过人工的外观检测：发现该桥梁的状态较好，无明显结构性病害；应变测试结果分析：检测该滑行道桥的东起第一跨，在桥梁底面及跨中侧面布置7个应变传感器，布置图如图6所示，检测了该滑行道桥的东起第一跨，在桥梁底面及跨中侧面布置了6个倾角传感器，倾角传感器布置见图7所示，采集桥梁的力学响应，实测应变曲线如图8所示，实测倾角曲线如图9所示。

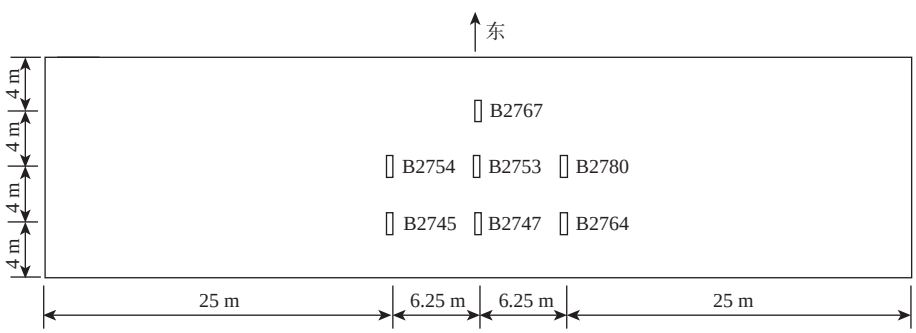


图6 应变传感器布置图

Fig. 6 Layout of strain sensor

根据实测数据，不断迭代计算，调整模型改变材料参数，使得模型的精度能够在90%以上。分别将桥梁的计算荷载B747-400和验算荷载B777-300的最大滑行重量作用在修正后桥梁模型的跨中位置，将仿真值与桥梁的实测值进行比较，误差控制在7%以内，验证了模型的准确性。具体计算结果如表6所示。

根据2.3节的计算结果，当B747-400、B777-300以最大滑行质量作用在桥梁的跨中时，健康状态下桥梁的跨中挠度分别为2.367 mm、2.165 mm，

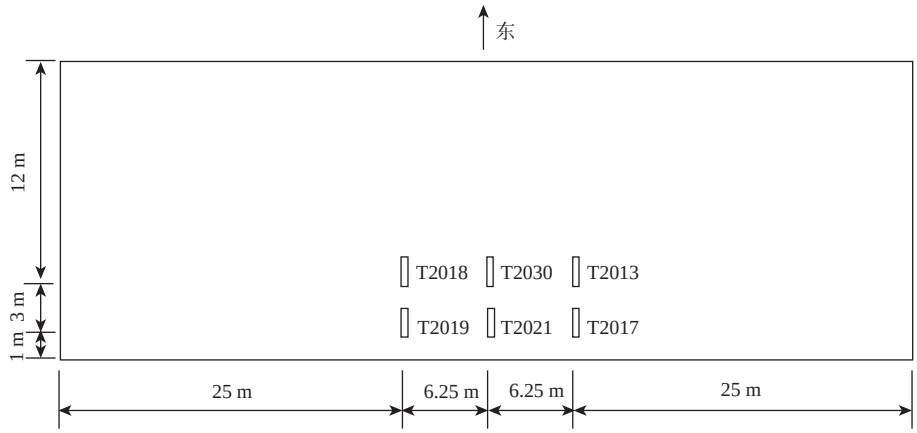


图 7　倾角传感器布置图

Fig. 7　Inclination sensor layout

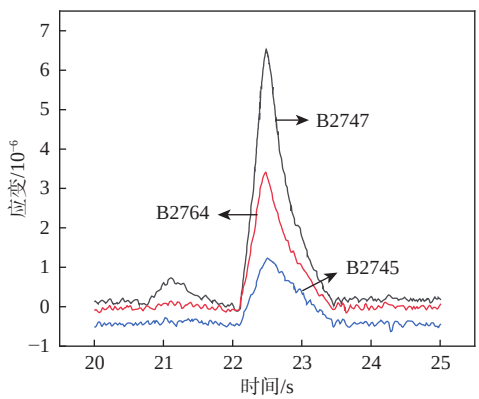


图 8　1 号测线实测应变曲线图

Fig. 8　Measured strain curve of line 1

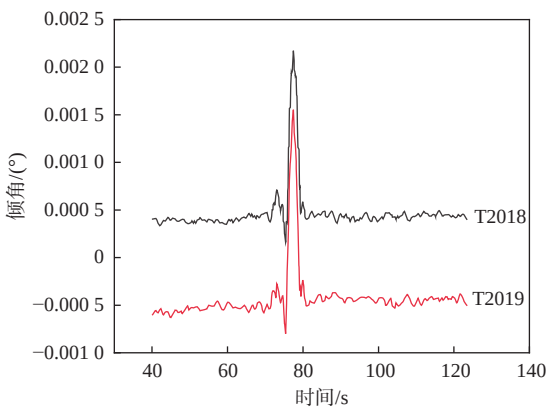


图 9　1 号测线实测倾角曲线

Fig. 9　Measured inclination curve of line 1

表 6　精度验证表

Table 6　Accuracy verification table

机型	挠度/mm		应变/10^{-5}		频率仿真值/Hz
	仿真值	实测值	仿真值	实测值	
B747-400	2.507	2.457	3.350	3.220	7.604
B777-300	2.382	2.287	2.900	2.730	8.149

注: B747-400的挠度误差为2.04%, 应变误差为4.04%, B777-300的挠度误差为4.15%, 应变误差为6.23%。

频率分别为 7.803 Hz、8.356 Hz, 轻微损伤状态下的桥梁跨中挠度分别为 2.487 mm、2.298 mm, 频率分别为 7.614 Hz、8.153 Hz, 根据挠度和频率可以判断该桥梁处于轻微损伤的状态。

3　地震波作用下的滑行道桥安全性分析

在上述建立的飞机-滑行道桥耦合振动损伤模型中输入地震波, 基于地震作用对某机场的滑行道桥进行安全性分析。

3.1　地震波的选取与输入

研究桥梁的地震设防烈度为 7 度, 所在地区属于软土地基地区, 参考《建筑抗震设计规范》[21] 中的规定, 桥梁所在地区的设计地震分组为第一组, 设计基本地震加速度为 0.1 g, 属于Ⅲ类场地, 场地周期根据场地类别进行调整后确定为 0.45 s。典型地震波中的天津波适用于课题所研究的Ⅲ类场地、软土地基场地。

为了更真实地反应地震作用下的桥梁响应, 对桥梁输入 3 方向的地震波, 根据规范, 3 个方向按照 1(顺桥向):0.85(竖向):0.65(横桥向)的比例进行加速度峰值的调整, 将天津波按照式(4)进行调整[22]:

$$a'(t)=\frac{a'_{\max}}{a_{\max}}a(t) \tag{4}$$

式中: $a'(t)$为加速度峰值调整后的地震加速度, g; $a'_{\max}$为调整后的峰值加速度, g; $a_{\max}$为原始地震波的峰值加速度, g; $a(t)$为原始地震波的加速度, g。

3.2　地震波影响下滑行道桥的安全性分析

桥梁主梁使用的混凝土的强度为 C50, 根据规范[23], C50 混凝土的抗拉强度标准值为 2.65 MPa, 桥梁主梁下表面的最大拉应力超过 2.65 MPa 时, 混凝土将裂开。由于在计算建模时使用的是弹性材料, 因而超过混凝土的抗拉强度标准值后, 仍提供了拉

应力，而在实际的桥梁受力状态中，当超过了混凝土的抗拉强度后，混凝土开裂，强度下降，在相同荷载作用下拉应力变小。综上所述，将根据混凝土的跨中最大拉应力判断桥梁是否会开裂，不再考虑混凝土开裂后的拉应力。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》[24]，梁式桥的主梁跨中最大挠度按式(5)计算：

$$Y=\frac{1}{600}l \tag{5}$$

式中：Y为桥梁上表面跨中最大挠度，mm；本文l取值1 562 cm。

通过计算，得出桥梁的跨中最大挠度值为26.03 mm，跨中超过挠度26.03 mm，桥梁将彻底损坏无法安全通行。根据桥梁跨中挠度的变化判断桥梁是否能够安全通行、是否完全破坏。

在修正后的滑行道桥模型中输入地震波，在跨中分别加载B737-800、A380-800、B747-400的最大滑行重量。经过计算，得到的加载结果如表7所示。

表7 7度地震波作用下的加载结果

Table 7 Loading results under 7 degree seismic wave action

机型	σ/MPa	Y/mm
B737-800	1.68	3.31
A380-800	4.38	6.77
B747-400	4.57	7.19

注：σ为桥梁下表面跨中最大拉应力。

根据表7，在3种重量不同的机型和7度地震波作用下，桥梁不会损毁，在B737-800作用下桥梁不会开裂，在大型飞机A380-800、B747-400的作用下桥梁跨中最大拉应力超过混凝土抗拉强度，桥梁开裂。因此在地震波的作用和飞机荷载的共同作用下，桥梁会开裂，桥梁的刚度会下降，但仍可安全通行。

4 多因素作用下滑行道桥振动性能分析

在上述调整仿真模型精度、输入地震波的基础上，对滑行道桥在地震作用和飞机荷载的共同作用下的振动性能进行研究，分析桥梁在地震波、飞机荷载和损伤分级的多因素作用下的健康承载力学性能，建立多因素作用下的滑行道振动性能分析模型，实现对桥梁健康承载性能的评估。

4.1 地震波作用下基于机桥耦合的滑行道桥振动模型振动性能分析

为探究在地震波作用下的机桥耦合振动模型的振动性能，设置5种工况，地震烈度为桥梁的设防烈度7度，考虑到飞机起落架构型以及不同飞机的最大滑行重量的不同，拟研究5种不同最大滑行重量的小中大5种机型。在已建立的5种飞机滑行道桥耦合的模型下，桥梁的状态为健康，输入3.1节调整好的烈度为7度的天津波。跨中是桥梁最易损伤的位置，将5种机型作用在跨中位置，以最大滑行重量作用在滑行道桥上的跨中最大挠度变化和跨中板底的最大拉应力变化见表8。

表8 桥梁在各机型作用下的跨中最大挠度变化和跨中板底的最大拉应力

Table 8 Maximum mid-span deflection variation and maximum tensile stress at the bottom of the span slab for bridges under the action of various models

机型	m_1/kN	σ/MPa	Y/mm
B737-800	752.97	1.67	3.12
B767-200	1 779.67	2.64	4.30
MD-11	2 239.55	2.73	4.65
B747-400	3 779.06	4.55	6.86
A380-800	3 203.40	3.93	6.40

根据3.3节的分析，将根据混凝土的跨中最大拉应力判断桥梁是否会开裂，桥梁下表面跨中最大拉应力随最大滑行重量下主起落架轮载的变化如图10所示。

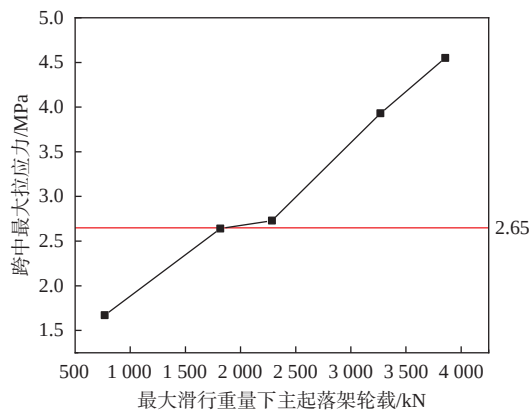


图10 跨中最大拉应力随最大滑行重量下的主起落架轮载的变化图

Fig. 10 Variation of the maximum tensile stress in the span with the main landing gear wheel load at maximum glide weight

根据图10可见当B747-400、A380-800、MD-11以最大滑行重量作用在桥梁上时，输入7度地震波后，使得桥梁的跨中最大拉应力超过混凝土抗拉强度，桥梁开裂，桥梁的力学性能开始下降。

通过相似性分析，跨中最大拉应力随主起落架轮载变化的拟合式为

$$\sigma=0.92+0.009\,3m_1 \tag{6}$$

拟合式(6)的相关系数R^2=0.995 2，符合相关性

分析要求。

桥梁跨中最大挠度随最大滑行重量下主起落架轮载的变化如图 11 所示。

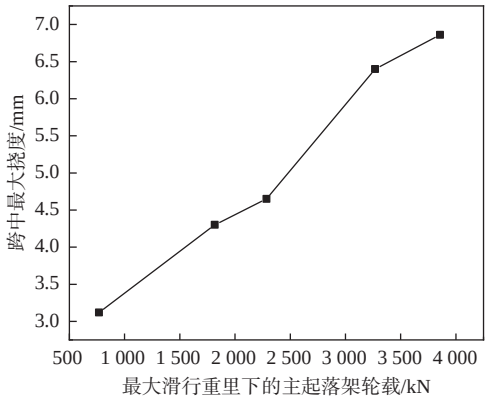


图 11　跨中最大挠度随最大滑行重量下的主起落架轮载的变化图

Fig. 11　Variation of maximum deflection in span with main landing gear wheel load at maximum glide weight

通过图 11, 桥梁在 7 度地震波的作用下, 加载的 5 种不同机型后的跨中挠度均远小于容许的跨中最大挠度值, 说明桥梁虽然开裂处于损伤状态但并未被完全破坏, 仍可承载飞机在桥上安全通行。

通过相似性分析, 跨中最大挠度随主起落架轮载变化的拟合式为

$$Y = 2.05 + 0.013m_1 \tag{7}$$

拟合式(7)的相关系数 R^2=0.979 7, 符合相关性分析要求。

通过式(6)、式(7), 健康的滑行道桥在 7 度地震波的作用下, 承受超过 1 823 kN 的飞机重量作用时, 桥梁底部会开裂, 但飞机在桥梁上仍能安全通行, 不会完全损坏。

4.2　地震波作用下基于损伤分级的机桥耦合模型振动性能分析

为探究在地震波作用下不同损伤程度的滑行道桥的振动性能, 在 4.1 节的基础上根据 2.3 节整体损伤分级, 设置了 24 种工况, 结果如表 9 所示, 研究在烈度为 7 度的地震波作用下基于损伤分级的滑行道桥振动性能。

桥梁跨中最大拉应力随损伤程度的变化如图 12。

桥梁跨中最大挠度随损伤程度的变化如图 13。

通过加载结果, 桥梁在 7 度地震波作用下, 加载机型为 B737-800 重量为 752.97 kN 时, 即使损伤程度达到 25%, 跨中最大拉应力仍小于混凝土的抗拉强度, 故在 7 度地震波作用下, B737-800 在桥梁上滑行不会导致桥梁开裂, 可以安全通行。提高加载重量, 加载 A380-800 时, 在地震波与飞机荷载的作用下, 各损伤程度下的桥梁跨中最大拉应力超过了混凝土的抗拉强度, 桥梁开始开裂, 但根据跨中

表 9　不同损伤程度下的跨中最大挠度变化和跨中的最大拉应力变化

Table 9　Variation of maximum deflection in span and variation of maximum tensile stress in span for different degrees of damage

机型	损伤程度/%	σ/MPa	Y/mm	机型	损伤程度/%	σ/MPa	Y/mm
B737-800	0	1.67	3.12	B767-200	0	2.64	4.30
	5	1.68	3.31		5	2.65	4.83
	10	1.85	3.62		10	3.13	5.40
	15	2.08	3.95		15	3.27	5.52
	20	2.28	4.36		20	3.47	5.90
	25	2.35	5.01		25	3.52	6.72
B747-400	0	2.28	2.35	A380-800	0	3.93	6.40
	5	4.36	5.01		5	4.38	6.77
	10	5.28	7.39		10	4.61	7.54
	15	5.64	7.85		15	4.76	7.72
	20	5.86	8.56		20	5.21	7.91
	25	6.51	8.65		25	6.11	8.66

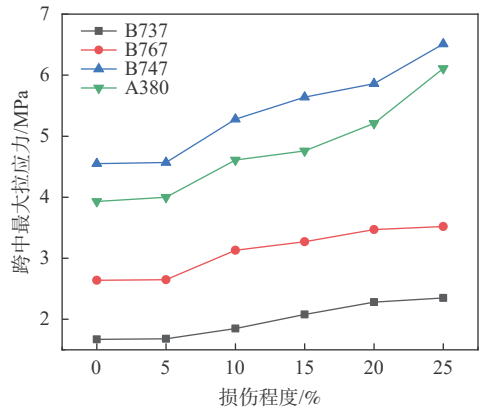


图 12　桥梁跨中最大拉应力随损伤程度变化曲线图

Fig. 12　Variation of maximum tensile stress in bridge span with degree of damage

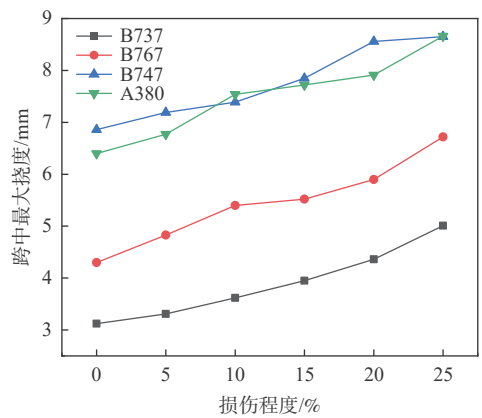


图 13　桥梁跨中最大挠度随损伤程度变化曲线图

Fig. 13　Variation of maximum deflection in span with degree of damage

最大挠度显示，桥梁在二者的作用下并未超过桥梁容许的跨中最大挠度值，桥梁并未完全损坏，但有极大可能随着荷载的增大和作用次数的增加桥梁跨中挠度会随之不断增大，最终发生事故，因此应提高桥梁检测的频率，做到对桥梁状态的监控。

4.3 基于地震波作用的机桥耦合模型振动性能分析

选取不同烈度的地震波并且进行调整。在3.1节中根据桥梁所处地区以及那个场地划分类别，选取了适合软土地基的天津波作为输入的地震波，为探究桥梁在不同烈度地震作用下的振动性能，选取6、7、8、9、10度这5种地震烈度进行分析，在《建筑抗震设计规范》[21]中，对6、7、8、9、10度的地震设防烈度的基本地震动峰值加速度作出了规定，分别对应0.05 g、0.10 g、0.20 g、0.40 g、1 g（g为重力加速度）。

将水平主向即顺桥向的地震波峰值加速度按照3.1节运用的比例调整法，分别调整为0.05 g、0.10 g、0.20 g、0.40 g、1.00 g。顺桥向、竖向、横桥向的峰值加速度按照1∶0.85∶0.65的比例调整。

在模型中输入调整为不同烈度的地震波，分别加载4种机型，桥梁状态为健康状态，共设置了20种工况，加载结果见表10。

表10 不同烈度地震波作用下桥梁跨中最大拉应力与跨中最大挠度变化

Table 10 Variation of maximum mid-span tensile stresses and maximum mid-span deflections in bridges subjected

地震波/度	σ/MPa				Y/mm			
	B737-8	B767-2	B747-4	A380-8	B737-8	B767-2	B747-4	A380-8
6	1.33	2.10	3.59	2.92	2.66	3.42	5.52	5.01
7	1.64	2.64	4.55	3.93	3.12	4.30	6.86	6.40
8	2.35	3.74	6.45	4.75	4.05	5.47	9.54	8.75
9	3.72	5.90	10.24	7.19	5.92	8.19	14.92	12.73
10	1.00	11.83	16.45	31.03	7.98	12.66	21.70	13.98

在不同地震烈度下，跨中最大拉应力、跨中最大挠度随地震烈度的变化曲线如图14～图15所示。

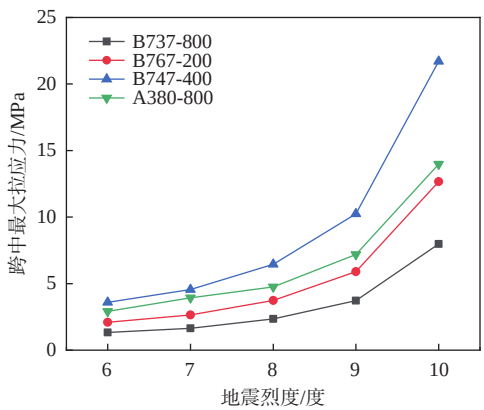


图14 跨中最大拉应力随地震烈度的变化曲线图

Fig. 14 Variation of maximum tensile stress in span with seismic intensity

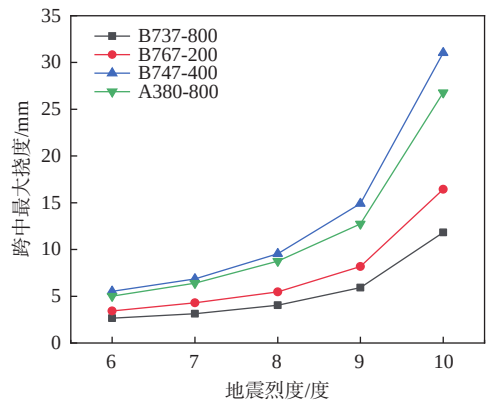


图15 跨中最大挠度随地震烈度的变化曲线图

Fig. 15 Plot of maximum deflection in span with seismic intensity

在不同机型作用下的跨中拉应力和挠度变化研究中，B737-800受到地震烈度超过9度时的影响表现为桥梁出现裂缝，跨中最大拉应力超过混凝土抗拉强度，但桥梁未完全损坏，挠度变化仍在允许的跨中挠度范围内。B767-200作用时，当地震烈度超过8度时，桥梁出现开裂，跨中最大拉应力超过混凝土抗拉强度，类似于B737-800的情况，但桥梁仍在容许的跨中挠度范围内未完全损坏。然而，对于大型荷载机型如B747-400和A380-800，当地震烈度达到6度时，桥梁跨中最大拉应力已超过混凝土抗拉强度，导致桥梁开裂，当地震烈度增至10度时，桥梁的跨中最大挠度超过了容许的跨中最大挠度值，桥梁完全损坏。

4.4 多因素作用下的滑行道桥振动性能分析

为研究在不同烈度地震波、不同荷载、不同损伤程度的多因素综合作用下，滑行道桥的振动性能分析，共设置了99种工况。运用数据分析软件SPSS对数据进行非线性回归得到桥梁跨中最大拉应力与最大滑行重量下主起落架轮载、地震波峰值加速度、桥梁整体损伤程度的关系式见式(8)，跨中最大挠度与最大滑行重量下主起落架轮载、地震波峰值加速度、桥梁整体损伤程度的关系式见式(9)。

$$\sigma = 0.848 + 0.01m + 1.796a_{\max} - 0.152a - 1.417\times 10^{-5}m^2 + 0.797a_{\max}^2 + 0.003a^2 + 0.533a_{\max}\times a + 0.038m\times a_{\max} \quad (8)$$

$$Y = 1.189 + 0.018m + 1.947a_{\max} - 0.067a - 2.429\times 10^{-5}m^2 + 1.808a_{\max}^2 + 0.002a^2 + 9.126m\times a + 9.126a\times a_{\max} + 0.058m\times a_{\max} \quad (9)$$

式中: $a_{\max}$为地震波的峰值加速度, g; a为剔除百分号后的桥梁整体损伤程度量化值, 数值大小直观反映桥梁整体结构受损轻重, 数值越大代表桥梁整体损伤越严重。

拟合式(8)～式(9)的相关系数分别为R_1^2=0.956、R_2^2=0.987, 符合相关性分析要求。

拟定 2 种工况对以上关系式进行校核。工况 1: 在 9 度的地震波作用下, B767-200 最大滑行质量作用在跨中, 桥梁的损伤程度为 10%; 工况 2: 在 6 度的地震波作用下, B747-400 最大滑行质量作用在跨中, 桥梁的损伤程度为 15%。

由表 11, 式 (8)～式 (9) 的误差均控制在 7% 以内, 可用于多因素作用下滑行道桥健康承载力学性能的评估, 跨中最大拉应力超过混凝土抗拉强度时桥梁开裂, 当桥梁跨中最大挠度超过容许最大挠度时桥梁完全损坏, 不能通行。

表 11　式（8）、式（9）精度验证表

Table 11　Equation (8)～ (9) accuracy verification table

工况	σ/MPa			Y/mm		
	仿真值	公式值	误差	仿真值	公式值	误差
工况1	7.78	7.27	0.065 6	12.03	11.45	0.048 2
工况2	3.69	3.92	0.062 3	6.40	6.16	0.037 5

5　结　论

1) 总结判断桥梁是否开裂的依据, 即桥梁跨中最大拉应力与混凝土抗拉强度的大小关系; 总结判断桥梁是否能安全通行的依据, 即桥梁跨中最大挠度与规范中的容许跨中最大挠度的大小关系。

2) 通过分析 7 度地震波作用下, 基于机桥耦合的滑行道桥模型的振动性能, 建立了跨中最大拉应力和主起落架轮载的相关性关系模型, 桥梁跨中最大拉应力σ随着最大滑行重量下的主起落架轮载质量 m 增大而增大; 建立了跨中最大挠度和主起落架轮载变化的相关性关系模型, 桥梁跨中最大挠度 Y随着最大滑行重量下的主起落架轮载质量 m 的增大而增大。在 7 度地震波作用下, 当加载质量超过 1 823 kN 时, 本文分析的桥梁会开裂, 但仍能安全通行。

3) 研究了在不同地震波、不同飞机荷载、不同损伤程度的多因素作用下桥梁的振动性能。建立了跨中最大拉应力与加载重量、地震波峰值加速度、损伤程度的关系模型; 建立了跨中最大挠度与加载重量、地震波峰值加速度、损伤程度的关系模型, 并验证了模型的精度, 可用于多因素作用下滑行道桥健康承载力学性能的评估。

4) 对于机桥耦合模型, 飞机和桥梁构成了系统整体, 飞机的存在会影响桥梁自身的模态, 这部分误差本文未完全剔除, 尚有提升和改进的空间。

参考文献（References）

[1] 中国民用航空局机场司. 飞机荷载桥梁在机场工程中的应用: IB-CA-2019-02[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
Civil Aviation Administration of China. Application of aircraft loaded bridges in airport engineering: IB-CA-2019-02[S]. Beijing: China Communications Press, 2019(in Chinese).

[2] 丁加兵. 桥梁检测和状态评估的应用与研究[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(32): 162-163.
Ding J B. Application and research of bridge detection and condition assessment[J]. Technology Innovation and Application, 2020, 10(32): 162-163(in Chinese).

[3] 戚春香, 丁丛丛, 李佳坤. 基于机桥耦合振动的滑行道桥优化设计研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16): 6744-6751.
Qi C X, Ding C C, Li J K. Optimization design of taxiway bridge based on aircraft-bridge coupling vibration[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(16): 6744-6751(in Chinese).

[4] Dong Q, Wang J H, Zhang X M, et al. Development of virtual load rating method for taxiway bridge under aircraft taxiing[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(7): 3030-3040.

[5] 张宇辉, 张献民. 飞机滑行道桥健康状况动静载力学分析[C]//第 18 届全国结构工程学术会议论文集第Ⅲ册. 广州: 中国力学学会, 2009: 565-572.
Zhang Y H, Zhang X M. The dynamie and static analysis on mechanical property of the taxiway bridge[C]//Proceedings of the China Academic Journal Electronic Publishing House. Guangzhou: Chinese Society of Mechanics, 2009: 565-572.

[6] 李佳坤. 基于多自由度飞机与滑行道桥耦合振动分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
Li J K. Coupling vibration analysis of airplane and taxiway bridge based on multi-degrees of freedom[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020(in Chinese).

[7] 王婷婷. 基于振动的飞机滑行道桥损伤识别方法的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
Wang T T. Research on method of the aircraft taxiway bridge's vibration damage identification[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007(in Chinese).

[8] 孙荣梅, 张献民. 移动飞机荷载作用下滑行道桥的动力响应分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2008, 21(4): 57-62.
Sun R M, Zhang X M. Dynamic analysis of the taxiway bridge under aircraft moving load[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2008, 21(4): 57-62(in Chinese).

[9] Brinissat M, Kuti R, Louhibi Z. Dynamic seismic analysis of bridge using response spectrum and time history methods[J]. Acta Technica Jaurinensis, 2021, 14(2): 171-185.

[10] Cui C Y, Xu Y. Mechanism study of vehicle-bridge dynamic interaction under earthquake ground motion[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(7): 1931-1947.

[11] Khadri Y, Tekili S, Daya E M, et al. Analysis of the dynamic response of bridges under moving loads[J]. International Review of Mechanical Engineering, 2009, 3(1): 91-99.

[12] Pagnoncelli A P, Miguel L F F. Methodology to obtain dynamic response of road bridges considering bridge–vehicle interactions[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2019, 24(3): 04019010.

[13] 杨孟刚, 王传坤, 乔建东. 高速铁路连续梁桥横向地震碰撞效应及挡块间隙研究[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50(9): 2252-2263.
Yang M G, Wang C K, Qiao J D. Research on transverse seismic pounding effect and shear-key gaps of high-speed railway continuous beam bridges[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(9): 2252-2263(in Chinese).

[14] 张宇辉, 丁硕旋. 地震波影响下的滑行道桥仿真建模[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2518-2524.
Zhang Y H, Ding S X. Simulation modeling of taxiway bridge under the influence of seismic waves[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2518-2524(in Chinese).

[15] 金喜莎. 基于动态试验的桥梁快速诊断技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015.
Jin X S. Research in bridge rapid diagnosis based on dynamic test[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015(in Chinese).

[16] 李惠彬. 振动理论与工程应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
Li H B. Vibration theory and engineering application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006(in Chinese).

[17] 朱彦姿. 基于荷载试验的RC简支梁桥刚度计算方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
Zhu Y Z. Research on stiffness calculating method of reinforced concrete beam bridge based on loading tests[D]. Xi'an: Changan University, 2016(in Chinese).

[18] 刘德华, 黄超. 材料力学-Ⅰ[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2011.
Liu D H, HUANG C. Mechanics of materials-Ⅰ[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2011(in Chinese).

[19] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵养护规范: JTG 5120—2021[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for maintenance of highway bridges and culverts: JTG 5120—2021[S]. Beijing: China Communications Press, 2021(in Chinese).

[20] 张志勇, 桑明丽. 基于频率校验系数快速评定桥梁损伤的方法[J]. 运输经理世界, 2022(12): 94-96.
Zhang Z Y, Sang M L. Method for quickly evaluating bridge damage based on frequency calibration coefficient[J]. Transport Business China, 2022(12): 94-96(in Chinese).

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范 (2016年版): GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.Code for seismie design of buildings: GB 50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016(in Chinese).

[22] 张沐然. 地震作用下山地米轨钢枕有砟轨道稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
Zhang M R. Research on stability of ballasted track with steel sleepers of mountain meter-gauge under earthquake[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021(in Chinese).

[23] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004(in Chinese).

[24] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concreteand prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018(in Chinese).

Analysis of health-based load-bearing mechanical properties of airport taxiway bridges under multifactorial effects

ZHANG Yuhui[1,*], LIAO Shujiao[1], ZHAO Yuanyuan[2]

(1. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. China IPPR International Engineering Co., Ltd, Beijing 100080, China)

Abstract: The vibration parameter-based bridge inspection method was proposed under the coupling effect of aircraft and bridge, aiming at the health bearing performance of taxiway bridge under the compound effect of earthquake, aircraft load, and damage grading coupling field. The aircraft-taxiway bridge coupling vibration damage model was set up through the finite element simulation and on-site experiment; the model parameters were adjusted according to the measured data, and the error of the model was controlled within 7%. Input the adjusted seismic wave, simulate the mechanical properties of the taxiway bridge under different aircraft load, damage degree and seismic load, establish the vibration performance analysis model of taxiway bridge under multi-field coupling, and realize the assessment of the mechanical properties of the bridge's healthy bearing. Two working conditions were selected to verify the feasibility of the model. The aforementioned study findings will offer a crucial theoretical foundation and point of reference for the identification and assessment of taxiway bridges using vibration characteristics.

Keywords: taxiway bridge; finite element simulation; seismic waves; multifactorial effects; healthy bearing mechanical performance

Received: 2024-05-08; **Accepted**: 2024-06-14; **Published Online**: 2024-06-20 13:05
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240619.1426.002
Foundation item: Tianjin Education Commission Natural Science Program (2018KJ245)
* **Corresponding author**. E-mail: xueyingshuang@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0351

管制员个体工作负荷差异分析

顾秋丽[1,2]，王莉莉[3,*]

(1. 中国民航大学 计算机与人工智能学院，天津 300300；2. 中国民航大学 安全科学与工程学院，天津 300300；
3. 中国民航大学 空中交通管理学院，天津 300300)

摘 要：针对空中交通管制员个体工作负荷承受力差异问题，构建管制员个体工作负荷量化模型。设计实验采集一线24名区域管制员的岗前与岗后各项指标数据，根据测试数据选择出敏感变量对个体负荷进行描述。建立包含心理感知负荷、生理反应负荷与认知工作负荷3个维度的综合评估指标体系，构建了管制员个体工作负荷综合指数模型。通过熵权-CRITIC组合法求解个体负荷指数最优权重，计算每名管制员个体工作负荷指数，发现管制员的个体工作负荷存在明显差异，认知工作负荷是决定管制员个体工作负荷指数大小的关键指标。认知工作负荷与管制员的反应能力、决策能力和搜索能力正相关。为进一步探索影响管制员认知工作负荷增长的原因，计算管制员在5种不同流量等级下的首次注视反应时间、注视时间与扫视时间，并进行岗前与岗后配对检验，以及同一指标组间的单因素方差分析，发现管制员决策能力和搜索能力受累计负荷影响较大，反应能力受流量因素影响较大。

关 键 词：空中交通管制员；个体工作负荷；熵权-CRITIC组合法；配对样本T检验；单因素方差分析法

中图分类号：V355

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2414-11

空管自动化系统的更新迭代为中国航空运输安全及运行效率提供了基础保障，但新型冠状感染“乙类乙管”后，国内和国际航班流量持续上升[1]，空中交通雷达管制员(下文简称管制员)为保障航班安全、有序与高效运行，需要适应低流量到高流量的变化，以及高流量产生的高工作负荷。过高的工作负荷不仅会影响管制员的身心健康，还会影响人机交互效率，导致“错忘漏”等不安全事件发生[2]，因此，管制员个体负荷的承受力已成为空管系统高效与安全运行的一个关键因素。如何科学量化与精准分析管制员个体工作负荷承受力对于保障航空运输安全与提升运行效率具有重要意义。

总结国内外学者研究成果发现，关于管制员的工作负荷评估方式主要包括4种。最早，学者们主要采用主观量表收集数据进行负荷评估，量表法采集数据操作简单、方便，但数据受主观影响较大[3]。于是，为弥补量表法的不足，客观评估管制员的负荷，学者们采用主任务测量法，通过统计管制员发出的指令种类和时间计算负荷。但不同管制区域差别较大，只能针对特定空域进行计算，陆空通话语音具有特殊性，常规软件分析困难，人工分析工作量巨大[4]。还有学者采用空中交通复杂度评估法，通过统计扇区动态变化或扇区内航空器的数量评估管制员的工作负荷，但管制过程中常出现各类特殊情况很难评估任务难度及产生的工作负荷[5]。生理数据测量法是目前比较新颖的测量方法，该方法可以综合考虑空中交通复杂度等情况，通过眼动仪和生理仪等采集管制员眼动数据与生理数据，实时、精准与客观地评估管制员的工作负荷[6]。

基于此，本文综合以上研究方法，以生理数据

收稿日期：2024-05-23；**录用日期**：2024-07-15；**网络出版时间**：2024-08-21 16:02
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240821.1151.001
基金项目：国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(U1633124)
*通信作者. E-mail：llwang@cauc.edu.cn

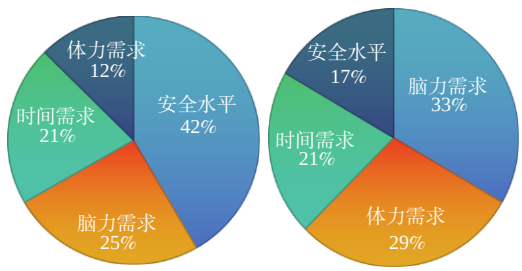
引用格式：顾秋丽，王莉莉. 管制员个体工作负荷差异分析[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2414-2424.
Gu Q L，Wang L L. Analysis of individual differences in controller workload[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2414-2424 (in Chinese).

测量法为主, 量化与分析管制员的个体工作负荷及其影响因素。眼动行为是评价管制员信息搜索能力的一个重要指标, 对于管制员做决策至关重要, 学者们通常通过管制员的注视、扫视行为及瞳孔直径评估管制员的工作负荷[7-8]。Wang 等[9] 通过对比管制员的注视与扫视行为发现, 成熟管制员比新手管制员的搜索效率更高。Ahlstrom 等[10] 发现管制员的工作负荷随着航班数量的增加而线性增加, 眨眼时间和平均扫视距离减小, 平均瞳孔直径增加。Wee 等[11] 发现随着飞行流量的增大, 管制员的平均注视持续时间更长, 注视时间占比更大。脑电信号(electroencephalogram, EEG)与管制员的工作负荷变化也有较强关联, 能够较好地评估管制员的工作负荷[12], Aricò等[13] 通过分析 12 名在校管制学员在模拟管制过程中的脑电信号, 建立基于脑电数据的工作负荷模型。陈彦峰[14] 研究发现成年人在进行需要智力支撑的有目的的活动或有意识的视觉活动时, 脑电波中的 α 波会被低幅高频的 β 波代替, 因此, 脑电 β 波能更敏感与有效地评估管制员的工作负荷。陈凤兰[15] 通过生理仪器测量发现较大的工作负荷导致人体的皮肤导电能力降低。

根据以上研究发现, 学者们采用生理数据测量法通过一次模拟管制测试, 研究被试管制员群体的平均工作负荷的变化过程, 但因管制员个体不同, 面对同样或相似的工作量产生的工作负荷也会存在差异。实际上, 管制员的工作负荷是一个累积的过程, 单次测试只能反映出管制员在当前测试中个体负荷变化, 无法排除管制员测试前的个体负荷影响。为能够准确评估管制员在一个工作周期后个体负荷的累积情况, 本文在管制员上岗前与离岗后开展 2 次测试进行对比分析。根据心理学和生理学的研究成果, 心理负荷关注个体的心理负担和反应, 生理负荷关注生理反应和变化, 认知负荷关注信息处理和认知资源的消耗。这 3 种负荷相互影响, 共同决定了管制员的工作表现和效率。由此可知, 影响管制员的个体工作负荷的因素是多维度的, 以多维度代替单一维度的评价结果更加合理[16]。因此, 结合管制员工作实际与量表数据, 构建了综合心理感知负荷、生理反应负荷与认知工作负荷的评价指标体系, 建立了管制员个体工作负荷综合指数研究模型, 并通过实验数据对模型进行量化与深入分析, 探索了影响管制员个体工作负荷的关键因素及其影响机理。

1　个体工作负荷评价指标体系构建

为构建科学与有效的管制员个体工作负荷评价指标体系, 结合一线管制员工作实际与美国国家航空航天局-任务负荷指数(National Aeronautics and Space Administration-task load index, NASA-TLX)量表中 24 名管制员作答结果, 如图 1 所示, 发现管制员在工作中为保障航空器安全运行, 内心会产生一定的心理负荷; 同时长期昼夜轮班工作, 对体力需求较大身体会产生明显的生理反应; 工作中需要保持注意力高度集中, 并在短时间内快速提取关键信息发出指令, 大脑持续运转会产生较强的认知工作负荷。因此, 选取以上 3 个对于管制员个体工作负荷影响较大关键因素, 构建了心理感知负荷、生理反应负荷和认知工作负荷的三维综合评价指标体系。



(a) NASA-TLX(岗前)　　(b) NASA-TLX(岗后)

图 1　岗前与岗后 NASA-TLX 量表统计结果

Fig. 1　Statistical results of pre-service and post-service NASA-TLX scales

心理感知负荷指管制员当前所承受的心理负担量, 包括管制员自身的紧张感和由工作产生的压力感, 研究表明, 压力知觉量表(perceived stress scale, PSS)能够有效评估管制员内在压力状态[17], NASA-TLX 量表能够有效评估管制员主观感知的工作负荷[18], 因此, 选取上述 2 个量表综合量化管制员的心理感知负荷。

生理反应负荷指管制员工作中身体产生的反应, 脑电 β 波可以反映大脑思维活跃性[19], 皮肤导电水平(skin conductance level, SCL)是由交感神经控制皮肤分泌汗液可以反映管制员警觉性[20], 瞳孔直径(pupil diameter, PD)在光照不变情况下也会产生变化可以反映管制员注意力集中性, 因此, 上述 3 个指标能够量化管制员的生理反应负荷。

认知工作负荷指管制员在管制过程中信息处理速度, 即决策速度与决策的困难程度, 其与管制员在工作中的剩余能力负相关。结合区域管制员的工作实际, 管制员的反应能力、关键信息提取能力及搜索目标航班能力十分重要。首次注视反应时间(first fixation duration, FFD)指航空器进入其管辖范围内到管制员首次识别航空器的时间间隔, 时间短说明反应快, 能够有效评估管制员反应能力。

持续注视时间(total fixation duration, TFD)指管制员识别航空器提取关键信息到做出决策的时间间隔,注视时间(大于 100 ms)短说明信息提取能力强,因此能够有效评估管制员的决策能力。扫视目标时间 (saccades duration, SD) 指眼球从一个注视运动结束到下一个注视运动开始的时间,即管制员搜索目标时间,扫视时间短说明搜索能力强,因此,可以有效评估管制员目标搜索能力。综合,首次注视反应时间、持续注视时间和扫视目标时间能够量化管制员的认知工作负荷。

管制员个体工作负荷的指标体系如图 2 所示。

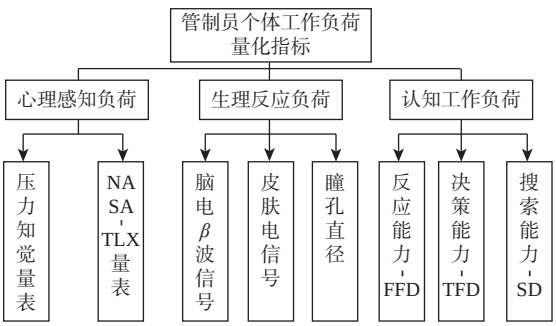


图 2 管制员个体工作负荷指标体系

Fig. 2 Individual controller workload indicator system

2 实验设计

2.1 实验内容介绍

1) 方案简介

为进一步量化分析管制员个体工作负荷及其影响机理,实验组根据某管制单位管制中心轮班时间设计了岗前和岗后的个体工作负荷对照测试,采集管制员的心理、生理及认知行为数据。根据该管制中心管制员工作 24 h、休息 48 h 安排,在管制员上岗前进行岗前测试,时间为上午 08:00—12:00;管制员结束工作后进行岗后测试,时间为凌晨 01:00—05:00。岗前和岗后测试内容相同,包括:测试前填写压力知觉量表,进行模拟管制指挥 40 min,测试后填写 NASA-TLX 量表。为减少额外变量对实验的影响,测试前告知被试人员测试流程与实验注意事项。

2) 实验对象

实验组聘请管制中心一线区域放单管制员 24 人参与实验测试,其中,23 名男性,1 名女性;均为右利手。年龄分布为 24～48 岁,平均年龄 28.83 岁;岗龄分布为 2～26 a,平均岗龄 6.25 a,具体情况如图 3 所示。

3) 实验平台

实验地点为管制中心复训模拟管制室,设备为空中交通管制模拟机、Tobii 眼动仪和 Manglod-10 多导生理仪,如图 4 所示。测试过程中,通过眼动仪和多导生理仪采集管制员的眼动和生理数据,通过量表采集管制员的心理感知数据。

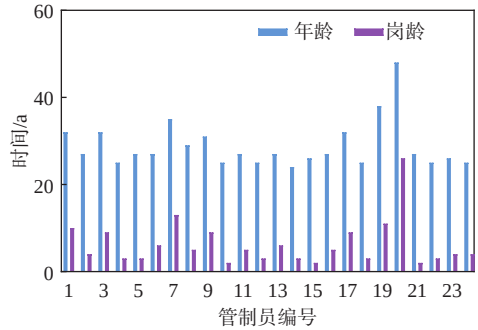


图 3 管制员年龄和岗龄分布

Fig. 3 Distribution of controllers by age and length of service



图 4 模拟管制现场

Fig. 4 Simulation control site

4) 实验过程

模拟管制测试时长为 40 min,空域为中等复杂扇区空域,交通流量由正常流量逐渐增大至大于正常流量 40%、80%、120% 和 160%,共包括 5 个等级,具体如表 1 所示。测试过程中,管制教员实时观察管制员的工作状态,记录管制员模拟测试表现,同时根据《雷达管制基础模拟机培训大纲》[21]对管制员的综合表现进行评分。

表 1 各练习不同时段的流量水平要求

Table 1 Flow level requirements for different time periods for each exercise

实验时间/min	流量水平/架次	通行能力	流量等级
0～5	8～12	正常通行流量	1
6～11	13～17	大于正常通行流量40%	2
12～21	18～22	大于正常通行流量80%	3
22～30	23～26	大于正常通行流量120%	4
31～40	27～32	大于正常通行流量160%	5

2.2 个体工作负荷指标数据计算

1) 心理感知负荷指标计算

根据心理感知负荷量化指标,按照压力知觉量表和 NASA-TLX 量表计算规则,计算 24 名被试管制员岗前和岗后个体量表分数,结果示例如表 2 所示。

2) 生理反应负荷指标计算

根据生理反应负荷量化指标,计算管制员岗前

表 2　PSS 和 NASA-TLX 量表分数统计示例

Table 2　Examples of statistics of PSS and NASA-TLX scale scores

量表名称	测试时间	量表分数						
		01	02	03	...	22	23	24
PSS	岗前	31	34	38	...	37	32	31
	岗后	33	42	46	...	43	34	33
NASA-TLX	岗前	96	111	102	...	85	71	79
	岗后	87	117	100	...	103	93	98

与岗后脑电 β 波、皮肤导电均值及瞳孔直径。以往研究表明, 右利手的人主视眼一般是右眼[22], 因此, 选择管制员的右眼瞳孔直径进行分析, 为对比岗前与岗后生理指标变化差异, 对所有被试者的 3 个指标进行了平均处理, 处理结果如图 5 所示。一个周期工作结束后, 脑电 β 波总体降低 31.953 1 μV, 皮肤导电均值总体降低 54.269 0 μs, 右眼瞳孔直径总体增加 2.780 9 mm。

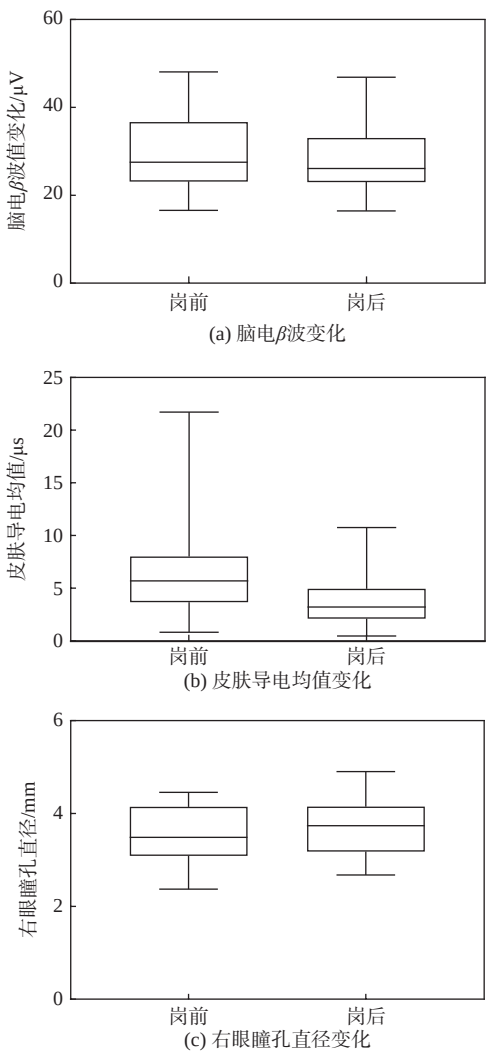


图 5　管制员生理信号变化

Fig. 5　Controller physiological signal change

3) 认知工作负荷指标计算

根据脑力工作负荷量化指标定义, 首次注视反应时间均值计算式为

$$\overline{F}_{\mathrm{FD}}=\frac{1}{N}\sum_{i}x_i \tag{1}$$

式中: $\overline{F}_{\mathrm{FD}}$ 为首次注视反应时间均值, s; x_i 为首次注视第 i 架航空器的反应时间, s; N=1, 2, ⋯, i 为航空器的架次。

持续注视时间均值计算式为

$$\overline{T}_{\mathrm{FD}}=\frac{1}{N}\sum_{i}y_i \tag{2}$$

式中: $\overline{T}_{\mathrm{FD}}$ 为持续注视时间均值, ms; y_i 为注视第 i 架航空器的总时间, ms。

扫视时间均值计算式为

$$\overline{S}_{\mathrm{D}}=\frac{1}{M}\sum_{j}z_j \tag{3}$$

式中: $\overline{S}_{\mathrm{D}}$ 为扫视时间均值, ms; z_j 为第 j 个扫视运动的时间, ms; M=1, 2, ⋯, j 为扫视的次数。

根据式(1)～式(3), 计算管制员岗前与岗后首次注视反应时间均值、持续注视时间均值和扫视时间均值, 如图 6 所示。

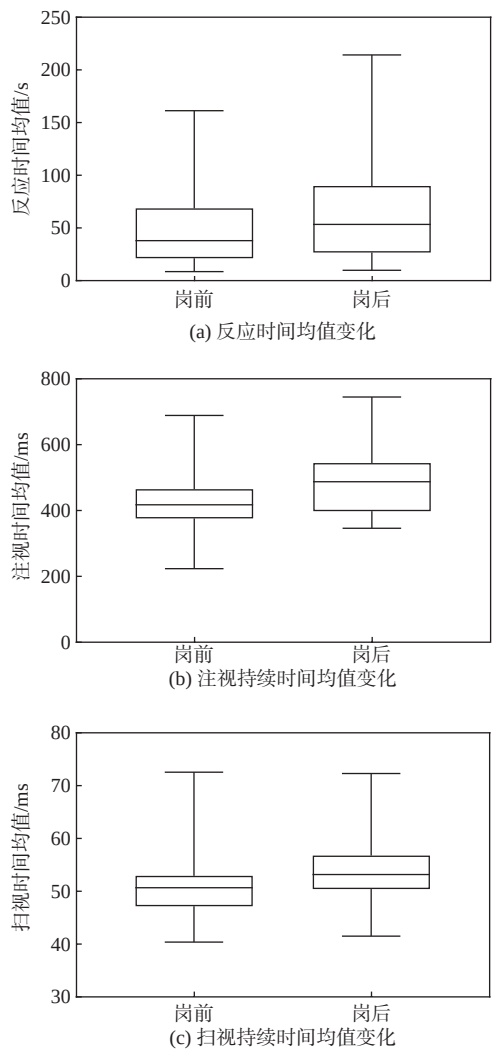


图 6　管制员认知工作负荷变化

Fig. 6　Controller cognitive workload variation

可以看出，管制员在一个工作周期后，其首次注视反应时间、持续注视时间和扫视时间均有增加，说明管制员的反应能力、决策能力与目标搜索能力均有不同程度下降。其中，反应时间均值增加13.685 6 s，注视时间均值增加了52.740 4 ms，扫视时间均值增加了2.676 5 ms。

2.3 个体工作负荷指标数据分析

根据心理感知负荷指标值、生理反应负荷指标值和认知工作负荷指标值，运用SPSS.26进行对比分析。心理感知负荷指标中压力知觉量表和NASA-TLX量表统计结果的岗前与岗后的差值分布满足正态分布，进行配对样本T检验，压力知觉量表p=0.002，NASA-TLX量表p=0.023，均小于0.05，说明岗前与岗后的量表数据有显著差异，能够有效地评估管制员心理感知负荷变化。同理，生理反应负荷指标中β波均值、皮肤导电均值及右眼瞳孔直径3个指标p值结果均小于0.05，岗前与岗后测试结果有显著差异，能够有效地评估管制员生理反应负荷。认知工作负荷指标中首次注视反应时间均值、注视时间均值及扫视时间均值3个指标岗前与岗后检验结果也有显著性差异，能够有效地评估管制员认知工作反应负荷，具体结果如表3所示。表中：双尾是配对检验的方式，Sig表示显著性，用来判断统计结果是否具有统计学意义的一个指标，即p值；t表示t统计量（t-statistic），用来衡量2组数据差异程度的一个数值，是统计学中的术语。

表3 个体负荷指标岗前与岗后配对T检验结果

Table 3 Results of paired T-tests for pre-post and post-post individual load indicators

指标名称	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值95%置信区间		t	自由度	p
				下限	上限			
压力知觉量表	−3.041 67	4.358 69	0.889 71	−4.882 18	−1.201 15	−3.419	23	0.002
NASA-TLX量表	−6.416 67	12.873 69	2.627 83	−11.852 75	−0.980 58	−2.442	23	0.023
β波均值	2.123 04	1.206 62	0.246 30	1.613 53	2.632 55	8.620	23	0
皮肤导电均值	2.261 22	3.685 17	0.752 23	0.705 11	3.817 33	3.006	23	0.006
右眼瞳孔直径	−0.129 61	0.240 76	0.049 14	−0.231 28	−0.027 95	−2.637	23	0.015
反应时间均值	−13.685 62	23.124 41	4.720 25	−23.450 20	−3.921 03	−2.899	23	0.008
注视时间均值	−52.740 38	71.131 03	14.519 56	−82.776 38	−22.704 38	−3.632	23	0.001
扫视时间均值	−2.676 52	4.937 69	1.007 90	−4.761 53	−0.591 52	−2.656	23	0.014

3 管制员个体工作负荷量化模型

3.1 管制员个体工作负荷模型的构建过程

根据第2节管制员个体工作负荷评价指标分析可知，管制员在一个工作周期后，各项指标均有显著变化，本文通过个体工作负荷指数（individual workload index, ILOI）进一步直观量化管制员岗前和岗后的个体工作负荷变化。将管制员岗前测试的状态视为初态，岗后测试的状态视为末态。因此，个体工作负荷指数定义为管制员工作期间累积的负荷值，即末态与初态之间的差值。

首先，计算评估管制员个体负荷的8个指标岗前与岗后的差值。其中，下标1表示岗前，下标2表示岗后。具体计算式如下：

压力知觉量表得分均值差值ΔP_{SS}：

$$\Delta P_{SS} = P_{SS2} - P_{SS1} \tag{4}$$

NASA-TLX量表得分均值差值ΔT_{LX}：

$$\Delta T_{LX} = T_{LX2} - T_{LX1} \tag{5}$$

脑电β波均值差值$\Delta\beta$：

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \tag{6}$$

皮肤导电均值差值ΔS_{CL}：

$$\Delta S_{CL} = S_{CL1} - S_{CL2} \tag{7}$$

右眼瞳孔直径均值差值ΔP_D：

$$\Delta P_D = P_{D2} - P_{D1} \tag{8}$$

首次注视目标反应时间均值差值ΔF_{FT}：

$$\Delta F_{FT} = F_{FT2} - F_{FT1} \tag{9}$$

注视目标持续时间均值差值ΔT_{FT}：

$$\Delta T_{FT} = T_{FT2} - T_{FT1} \tag{10}$$

扫视持续时间均值差值ΔS_D：

$$\Delta S_D = S_{D2} - S_{D1} \tag{11}$$

然后，将8个指标差值进行标准化统一量纲，得到标准化后的岗前与岗后的指标差值，分别为：$\Delta P'_{SS}$、$\Delta T'_{LX}$、$\Delta\beta'$、$\Delta G'_{SR}$、$\Delta P'_D$、$\Delta F'_{FT}$、$\Delta T'_{FT}$和$\Delta S'_D$。

根据管制员个体工作负荷评价指标体系，得到心理感知负荷指数模型：

$$P_{PLI} = a\Delta P'_{SS} + b\Delta T'_{LX} \tag{12}$$

生理反应负荷指数模型：

$$P_{RLI} = c\Delta\beta' + d\Delta G'_{SR} + e\Delta P'_D \tag{13}$$

认知工作负荷指数模型：

$$B_{\mathrm{WI}} = f\Delta F'_{\mathrm{FT}} + g\Delta T'_{\mathrm{FT}} + h\Delta S'_{\mathrm{D}} \tag{14}$$

管制员个体工作负荷综合指数模型：

$$I_{\mathrm{LOI}} = a\Delta P'_{\mathrm{SS}} + b\Delta T'_{\mathrm{LX}} + c\Delta\beta' + d\Delta G'_{\mathrm{SR}} + e\Delta P'_{\mathrm{D}} + f\Delta F'_{\mathrm{FT}} + g\Delta T'_{\mathrm{FT}} + h\Delta S'_{\mathrm{D}} \tag{15}$$

式中：a、b、c、d、e、f、g、h表示各个指标的权重。

3.2　采用熵权-CRITIC 组合法计算指标权重

熵权法是一种综合评价指标的客观赋权法，通过指标差异变化的程度大小来确定权重大小，但计算结果未考虑指标间的相关性，因此，在应用中会出现与实际不相符的情况，需要修正。CRITIC 权重法正好弥补了熵权法不足，能够兼顾指标数据间的相关性，利用数据本身所包含信息进行评价。但 2 种方法计算结果有一定差别，为平衡熵权法和 CRITIC 权重法计算结果，采用博弈论的集结模型，求解基于 2 种方法的最优权重，使评价结果更加准确与符合实际[23]，具体如表 4 所示。

将表 4 中组合权重值代入式(12)～式(15)，得到每名管制员心理感知负荷指数、生理反应负荷指数、认知工作负荷指数及个体工作负荷综合指数，具体结果如表 5 和图 7 所示。

表 4　熵权法、CRITIC 权重法及组合权重法指标权重值

Table 4　Entropy weight method, CRITIC weight method and combination weight method indicator weight value

方法	$\Delta P'_{\mathrm{SS}}$	$\Delta T'_{\mathrm{LX}}$	$\Delta\beta'$	$\Delta G'_{\mathrm{SR}}$	$\Delta P'_{\mathrm{D}}$	$\Delta F'_{\mathrm{FT}}$	$\Delta T'_{\mathrm{FT}}$	$\Delta S'_{\mathrm{D}}$
熵权法	0.096 3	0.104 0	0.153 1	0.142 5	0.184 7	0.107 7	0.082 3	0.129 3
CRITIC权重法	0.035 6	0.096 2	0.009 2	0.032 7	0.001 9	0.185 4	0.599 1	0.040 0
组合权重法	0.052 5	0.098 5	0.048 9	0.063 1	0.052 3	0.164 6	0.457 6	0.062 5

表 5　管制员个体负荷指数

Table 5　Individual load index for controllers

序号	个体综合负荷指数	心理负荷指数	生理负荷指数	认知负荷指数	心理负荷占比/%	生理负荷占比/%	认知负荷占比/%
01	0.270 9	0.044 7	0.052 6	0.173 6	16.50	19.42	64.08
02	0.487 9	0.095 2	0.074 7	0.318 0	19.51	15.31	65.18
03	0.364 4	0.078 7	0.008 4	0.277 3	21.61	2.30	76.09
04	0.549 0	0.089 8	0.072 0	0.387 1	16.37	13.11	70.52
05	0.641 8	0.128 0	0.058 4	0.455 4	19.95	9.10	70.95
06	0.541 2	0.035 3	0.102 0	0.403 9	6.52	18.85	74.63
07	0.339 7	0.052 5	0.063 0	0.224 2	15.44	18.55	66.01
08	0.357 9	0.126 4	0.067 3	0.164 2	35.32	18.79	45.89
09	0.645 0	0.038 6	0.029 6	0.576 8	5.98	4.59	89.43
10	0.474 9	0.075 1	0.062 2	0.337 6	15.81	13.11	71.08
11	0.618 3	0.095 2	0.099 3	0.423 8	15.39	16.07	68.54
12	0.570 5	0.051 7	0.052 6	0.466 2	9.06	9.22	81.72
13	0.409 7	0.072 6	0.061 4	0.275 7	17.73	14.98	67.29
14	0.461 3	0.027 9	0.054 2	0.379 1	6.05	11.76	82.19
15	0.371 5	0.071 4	0.034 1	0.265 9	19.23	9.18	71.59
16	0.383 0	0.077 6	0.072 5	0.233 0	20.25	18.92	60.83
17	0.672 4	0.093 1	0.091 7	0.487 5	13.85	13.65	72.51
18	0.459 3	0.050 9	0.082 5	0.326 0	11.07	17.96	70.97
19	0.567 5	0.078 0	0.069 4	0.420 1	13.75	12.23	74.02
20	0.301 6	0.103 8	0.113 8	0.083 9	34.43	37.73	27.83
21	0.646 8	0.104 2	0.106 7	0.435 9	16.11	16.50	67.39
22	0.574 6	0.113 2	0.059 3	0.402 1	19.71	10.32	69.97
23	0.687 3	0.108 3	0.053 2	0.525 7	15.76	7.75	76.49
24	0.639 0	0.102 2	0.076 9	0.459 9	15.99	12.03	71.97

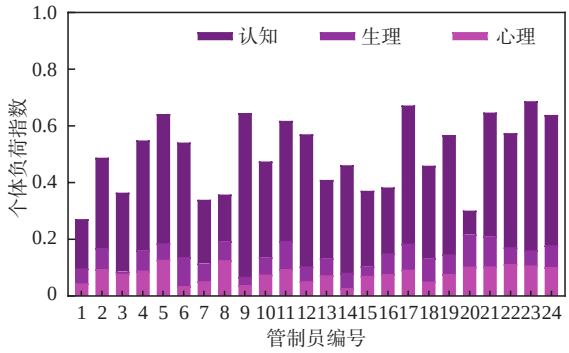


图 7 管制员负荷指数

Fig. 7 Controller load index

4 实验结果分析与讨论

4.1 管制员岗前与岗后个体工作负荷差异分析

由表 5 和图 7 可以看出，经过一个工作周期后，不同管制员的个体负荷综合指数及不同维度指数均存在差异。1 号、20 号和 7 号管制员个体负荷综合指数较小，工作后个体增长的负荷较少，而 21 号、17 号和 23 号管制员个体综合负荷指数较大，个体工作负荷增长较多。在心理感知负荷维度，14 号、6 号和 9 号管制员心理感知负荷指数增长较小，而 22 号、8 号和 5 号管制员心理感知负荷的增长较大。在生理反应负荷维度，3 号、9 号和 15 号管制员生理反应负荷指数增长较小，6 号、21 号和 20 号管制员生理反应负荷指数增长较大，生理负荷感知明显。在认知工作负荷维度，20 号、8 号和 1 号管制员认知工作负荷指数较小，17 号、23 号和 9 号管制员认知工作负荷增长较多。

通过计算心理感知负荷、生理反应负荷及认知工作负荷占个体总负荷比例，发现除 20 号管制员，其余 23 名管制员认知工作负荷占比均大于等于 45%，最高至 89%，占总人数比例的 95.8%，因此，可认为认知工作负荷是管制员个体工作负荷增长关键指标。进一步分析发现，20 号管制员为 3 级管制员，年龄 48 岁，岗龄 26 年，为 24 名管制员中年龄最大和岗龄最长管制员，能够熟练地开展管制工作，因此，一个工作周期后认知工作负荷指数最小，但是长期轮班工作制度及年龄等原因导致该名管制员生理反应负荷指数较大，与管制员实际工作情况一致。因此，不考虑 20 号管制员特例，对其余 23 名管制员的认知工作负荷进行进一步量化研究，探索影响管制员认知工作负荷机理。

4.2 不同流量下岗前与岗后认知工作负荷对比分析

为进一步评估认知工作负荷对管制员的管制能力影响，根据表 1 中的 5 种流量等级（正常流量、大于正常流量 40%、大于正常流量 80%、大于正常流量 120% 及大于正常流量 160%），分别计算管制员在不同流量下的首次注视反应时间、持续注视时间和扫视目标时间，并进行岗前与岗后的配对检验，进一步评估在不同流量下管制员的反应能力、决策能力及搜索能力的变化。

经过岗前与岗后配对检验，发现管制员的首次注视反应时间在 1 级流量和 2 级流量岗前与岗后配对检验 p 值均大于 0.05，没有显著性差异。说明流量等级较低的情况下，管制员的反应能力在岗前与岗后有差异但不显著，都能够及时发现航班。管制员的反应时间在 3 级流量到 5 级流量时，岗前与岗后产生显著性差异（p 值均小于 0.05），说明岗后管制员的反应能力相对于岗前相差较大，反应能力明显变慢，具体如表 6 所示。

表 6 首次注视反应时间岗前与岗后配对样本检验结果

Table 6 Results of pre-post and post-post paired sample tests of reaction time

流量等级	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值 95% 置信区间		t	自由度	p
				下限	上限			
1	−8.049 99	22.004 40	4.588 24	−17.565 40	1.465 43	−1.754	22	0.093
2	−5.297 39	23.700 05	4.941 80	−15.546 06	4.951 28	−1.072	22	0.295
3	−14.779 57	30.217 67	6.300 82	−27.846 67	−1.712 46	−2.346	22	0.028
4	−17.405 65	40.045 35	8.350 03	−34.722 56	−0.088 75	−2.085	22	0.049
5	−27.164 71	43.691 13	9.110 23	−46.058 17	−8.271 25	−2.982	22	0.007

管制员的注视时间在 1～5 级流量下，配对检验 p 值均小于 0.05，说明一个工作周期后工作负荷的增长对于管制员的决策能力影响较大，不同流量下均产生显著性差异，具体如表 7 所示。

管制员的扫视时间在 1～4 级流量下，配对检验 p 值均小于 0.05，说明岗前与岗后的搜索目标能力有显著性差异。在 5 级流量时，岗前与岗后配对检验 p 值大于 0.05，没有显著性差异。由此可以推测，在大于正常流量 160% 时，流量已经达到管制员能够承受负荷的上限，扫视能力有差异但是达不到显著性水平，具体如表 8 所示。

4.3 不同流量下组间认知工作负荷差异对比分析

4.2 节在不同流量下通过对比管制员岗前与岗后的首次注视反应时间、持续注视时间和扫视时间

表 7　持续注视时间岗前与岗后配对样本检验结果

Table 7　Results of paired sample tests for total gaze time pre-post and post-post

流量等级	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值 95% 置信区间		t	自由度	p
				下限	上限			
1	−62.652 95	77.781 69	16.218 60	−96.288 27	−29.017 62	−3.863	22	0.001
2	−71.830 03	95.718 42	19.958 67	−113.221 78	−30.438 28	−3.599	22	0.002
3	−63.852 32	93.745 97	19.547 39	−104.391 12	−23.313 53	−3.267	22	0.004
4	−59.508 49	81.259 26	16.943 73	−94.647 63	−24.369 35	−3.512	22	0.002
5	−56.611 33	77.238 97	16.105 44	−90.011 97	−23.210 70	−3.515	22	0.002

表 8　扫视时间岗前与岗后配对样本检验结果

Table 8　Results of paired samples test for pre-post and post-post scanning time

流量等级	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值 95% 置信区间		t	自由度	p
				下限	上限			
1	−3.684 55	7.481 56	1.560 01	−6.919 82	−0.449 28	−2.362	22	0.027
2	−2.607 07	5.535 59	1.154 25	−5.000 84	−0.213 31	−2.259	22	0.034
3	−3.034 94	5.706 20	1.189 83	−5.502 49	−0.567 40	−2.551	22	0.018
4	−3.541 09	6.662 64	1.389 26	−6.422 23	−0.659 95	−2.549	22	0.018
5	−0.214 24	6.730 17	1.403 34	−3.124 58	2.696 10	−0.153	22	0.880

发现, 在不同等级流量下管制员反应能力、决策能力及搜索目标能力有差异。相对于反应能力, 决策能力和扫视能力在岗后因个体负荷增长在不同流量下均产生显著性差异, 而反应能力在较大流量下才产生显著性差异。由此可以推测, 管制员的决策能力和扫视能力受岗后累计的负荷影响较大, 而反应能力相对于负荷变化受流量影响更大。为进一步验证以上推测, 以流量为因子, 采用单因素方差分析法, 进一步对比分析管制员在不同流量下组间首次注视反应时间、持续注视时间及扫视时间的差异。

4.3.1　岗前管制员认知工作负荷差异分析

在 1～5 级流量下, 分别计算首次注视反应时间、持续注视时间与扫视时间均值。经验证, 各组持续注视时间和扫视时间均值均满足方差齐性检验, 采用方差分析法检验, 各流量等级间没有显著性差异, 说明在不同流量等级下管制员的决策能力和扫视能力受流量影响较小, 达不到显著性水平。管制员的各组首次注视反应时间(统计结果如表 9 所示)不满足差齐性检验, 因此, 采用校正的单因素方差分析法。经 Welch 检验, F=6.396, p<0.001, 说明不同流量等级下管制员的首次注视反应时间有显著性差异, 如表 10 所示。为进一步验证岗前不同流量间的首次注视反应时间是否有差异, 采用 Games-Howell 方差检验, 如表 11 所示。管制员的首次注视反应时间, 1 级流量与 4 级和 5 级流量均有显著性差异, 2 级流量与 5 级流量有显著性差异, 其余不同流量间对比均未有显著性差异。说明管制员的反应能力在同组间 1 级、2 级和 3 级等较小流量时没有达到显著性水平, 但较小流量与 4 级、5 级较高流量时产生显著性差异, 受流量变化影响较大。

表 9　不同流量等级的岗前与岗后各组反应时间计算结果

Table 9　Calculated reaction times for pre-post and post-post groups with different flow levels

流量等级	管制员人数	岗前反应时间 (平均值±标准差)/s	岗后反应时间 (平均值±标准差)/s
1	23	24.220 3±24.104 69	32.270 3±27.165 93
2	23	38.041 3±33.045 62	43.338 7±38.176 95
3	23	47.821 7±48.596 11	62.601 1±52.036 80
4	23	60.059 2±52.234 13	75.943 1±65.516 92
5	23	78.591 1±51.912 43	105.755 5±81.602 27

表 10　岗前与岗后 Welch 平均值相等性稳健检验

Table 10　Robust test for equality of pre-post and post-post Welch means

指标名称	F分布	自由度 1	自由度 2	显著性
反应时间(岗前)	6.396	4	53.418	0
反应时间(岗后)	6.129	4	52.966	0

4.3.2　岗后认知工作负荷差异分析

与岗前相同, 分别计算 1～5 级流量下, 管制员的首次注视反应时间、持续注视时间与扫视时间。经验证, 各组持续注视时间和扫视时间均满足方差

表 11 岗前首次注视反应时间 Games-Howell 方差分析检验结果

Table 11 Results of the Games-Howell analysis of variance test for pre-service reaction time

I流量	J流量	平均值差值 (I-J)	标准错误	显著性	95% 置信区间	
					下限	上限
1	2	−13.821 00	8.528 85	0.493	−38.173 3	10.531 3
	3	−23.601 44	11.311 05	0.250	−56.271 3	9.068 4
	4	−35.838 92*	11.995 36	0.040	−70.565 7	−1.112 1
	5	−54.370 84*	11.934 49	0.001	−88.914 6	−19.827 1
2	1	13.821 00	8.528 85	0.493	−10.531 3	38.173 3
	3	−9.780 43	12.253 83	0.930	−44.830 3	25.269 4
	4	−22.017 91	12.888 18	0.441	−58.957 3	14.921 5
	5	−40.549 84*	12.831 54	0.024	−77.320 2	−3.779 4
3	1	23.601 44	11.311 05	0.250	−9.068 4	56.271 3
	2	9.780 43	12.253 83	0.930	−25.269 4	44.830 3
	4	−12.237 48	14.876 28	0.922	−54.556 4	30.081 5
	5	−30.769 40	14.827 24	0.249	−72.947 3	11.408 5
4	1	35.838 92*	11.995 36	0.040	1.112 1	70.565 7
	2	22.017 91	12.888 18	0.441	−14.921 5	58.957 3
	3	12.237 48	14.876 28	0.922	−30.081 5	54.556 4
	5	−18.531 92	15.355 65	0.747	−62.205 1	25.141 2
5	1	54.370 84*	11.934 49	0.001	19.827 1	88.914 6
	2	40.549 84*	12.831 54	0.024	3.779 4	77.320 2
	3	30.769 40	14.827 24	0.249	−11.408 5	72.947 3
	4	18.531 92	15.355 65	0.747	−25.141 2	62.205 1

注：“*”为标注2组之间的均值差异在统计学上显著的符号，表示 $p<0.05$。

齐性检验，采用方差分析法检验，各流量等级间没有显著性差异。管制员的各组首次注视反应时间（见表 9）不满足差齐性检验，因此，采用校正的单因素方差分析法。经 Welch 检验，F=6.129，p<0.001，说明不同流量等级下管制员的首次注视反应时间有显著性差异，如表 10 所示。为进一步验证岗后不同流量间的首次注视反应时间是否有差异，采用 Games-Howell 方差检验，如表 12 所示，表中，I、J 表示 1～5 级流量，反应时间组间方差分析表中，在 I 与 J 对应的流量等级下，反应时间一一比较是否有显著差异。验证结果与岗前一致，1 级流量与 4 级和 5 级流量均有显著性差异，2 级流量与 5 级流量有显著性差异，其余不同流量间对比均未有显著性差异。进一步验证了岗前单因素方差检验结果，管制员的首次反应时间相对于负荷增长的影响受流量变化影响更大。

表 12 岗后首次注视反应时间 Games-Howell 方差分析检验结果

Table 12 Results of the Games-Howell analysis of variance test for post-service reaction time

I流量	J流量	平均值差值 (I-J)	标准错误	显著性	95% 置信区间	
					下限	上限
1	2	−11.068 41	9.770 11	0.788	−38.981 4	16.844 6
	3	−30.330 80	12.240 02	0.120	−65.625 2	4.963 6
	4	−43.672 79*	14.789 03	0.045	−86.629 2	−0.716 4
	5	−73.485 24*	17.933 35	0.003	−125.887 5	−21.083 0
2	1	11.068 41	9.770 11	0.788	−16.844 6	38.981 4
	3	−19.262 39	13.457 35	0.612	−57.681 8	19.157 0
	4	−32.604 38	15.811 31	0.259	−78.035 9	12.827 2
	5	−62.416 84*	18.785 30	0.018	−116.776 9	−8.056 8
3	1	30.330 80	12.240 02	0.120	−4.963 6	65.625 2
	2	19.262 39	13.457 35	0.612	−19.157 0	57.681 8
	4	−13.341 99	17.445 94	0.939	−63.067 1	36.383 1
	5	−43.154 44	20.180 45	0.226	−100.981 1	14.672 2
4	1	43.672 79*	14.789 03	0.045	0.716 4	86.629 2
	2	32.604 38	15.811 31	0.259	−12.827 2	78.035 9
	3	13.341 99	17.445 94	0.939	−36.383 1	63.067 1
	5	−29.812 45	21.820 81	0.652	−91.995 1	32.370 2
5	1	73.485 24*	17.933 35	0.003	21.083 0	125.887 5
	2	62.416 84*	18.785 30	0.018	8.056 8	116.776 9
	3	43.154 44	20.180 45	0.226	−14.672 2	100.981 1
	4	29.812 45	21.820 81	0.652	−32.370 2	91.995 1

注：“*”为标注2组之间的均值差异在统计学上显著的符号，表示 $p<0.05$。

5 结 论

1）通过计算与分析 24 名管制员个体工作负荷指数，发现因个体不同管制员工作负荷指数存在差异，认知工作负荷占总负荷比例较高，是导致管制员个体工作负荷较大的关键指标。也说明眼动行为相较于其他生理指标能够更敏感与有效地评估管制员的工作负荷。

2）在 1～5 级流量下，针对管制员的首次注视反应时间、持续注视时间和扫视时间进行岗前与岗后配对检验，发现管制员的反应时间在流量等级大于正常流量 80% 时开始有显著性差异。管制员的注视时间在 5 种等级的流量下，均有显著性差异。管制员的扫视时间在 1～4 级流量下有显著差异，在 5 级流量下受人体负荷承受能力限制差异不显著，推测出大于正常流量 160% 的 5 级流量是管制员搜索目标能力的阈值。

3）通过单因素方差分析了不同流量下首次注视反应时间、持续注视时间和扫视时间组间的差异，进一步验证了管制员的反应能力受流量增长影

响较大, 决策能力和搜索能力受岗后负荷增长影响较大。管制单位可以通过减少交通流量、控制工作时间的方式降低管制员的工作负荷。研究结果也可应用于预警和管理管制员的高工作负荷, 进而提升航空运行安全与效率。

由于条件有限, 本文只研究了不同流量对管制员认知工作负荷的影响, 未考虑航班特情、岗龄、性别等因素对管制员认知工作负荷的影响。

参考文献（References）

[1] 中国民用航空局. 2023 年民航行业发展统计公报[EB/OL]. (2024-03-30)[2024-05-23]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202403/t20240320_223261.html.
Civil Aviation Administration of China. 2023 Civil aviation industry development statistical bulletin[EB/OL]. (2024-03-30)[2024-05-23]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202403/t20240320_223261.html(in Chinese).

[2] 董斌, 胡明华, 丛玮, 等. 基于 FCM 的扇区交通运行特征分析[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2015, 39(5): 939-943.
Dong B, Hu M H, Cong W, et al. Research on characteristics of sector traffic based on FCM[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, 39(5): 939-943(in Chinese).

[3] Pant R, Taukari A, Sharma K. Cognitive workload of air traffic controllers in area control center of mumbai enroute airspace[J]. Journal of Psychosocial Research, 2012, 7(2): 279-284.

[4] 朱聃, 徐晨, 刘继新. 基于语音识别的管制员工作负荷评估[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S1): 24-26.
Zhu D, Xu C, Liu J X. Evaluation of air traffic controller workload based on automatic speech recognition[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S1): 24-26(in Chinese).

[5] 温瑞英, 王红勇. 基于岭回归-BP 神经网络的管制工作负荷预测方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1): 123-129.
Wen R Y, Wang H Y. A forecasting method of controller's workload based on ridge regression-BP neural network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1): 123-129(in Chinese).

[6] Frank N, Le P, Mills E, et al. Micromovements and discomfort associated with flight mission with helmet operation tasks with different levels of cognitive workload[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2023, 95: 103441.

[7] 王莉莉, 许凌鹏. 基于眼动数据的管制员注意力特征评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(2): 217-224.
Wang L L, Xu L P. Evaluation of air traffic controller's attention characteristics based on eye movement data[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 217-224(in Chinese).

[8] 王艳军, 胡明华, VU D. 空中交通管制员行为动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019: 45-58.
Wang Y J, Hu M H, Vu D. Behavior dynamics of air traffic controllers[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2019: 45-58(in Chinese).

[9] Wang Y J, Wang L W, Lin S Y, et al. Effect of working experience on air traffic controller eye movement[J]. Engineering, 2021, 7(4): 488-494.

[10] Ahlstrom U, Friedman-berg F J. Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2006, 36(7): 623-636.

[11] Wee H J, Lye S W, Pinheiro J P. Real time eye tracking interface for visual monitoring of radar controllers[C]//Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Reston: AIAA, 2017.

[12] Dasari D, Crowe C, Ling C, et al. EEG pattern analysis for physiological indicators of mental fatigue in simulated air traffic control tasks[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2010, 54(3): 205-209.

[13] Aricò P, Borghini G, Di Flumeri G, et al. Reliability over time of EEG-based mental workload evaluation during Air Traffic Management (ATM) tasks[C]//Proceedings of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway: IEEE Press, 2015: 7242-7245.

[14] 陈彦峰. 睡意对脑电信号的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
Chen Y F. The effect of drowsiness on electroencephalogram (EEG)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013(in Chinese).

[15] 陈风兰. 基于多导生理信号的管制员疲劳分析方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018: 8-9.
Chen F L. Research of analysis method for controller fatigue based on multi-channel physiological signals[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018: 8-9(in Chinese).

[16] 李金波, 许百华. 人机交互过程中认知负荷的综合测评方法[J]. 心理学报, 2009, 41(1): 35-43.
Li J B, Xu B H. Synthetic assessment of cognitive load in human-machine interaction process[J]. Acta Psychologica Sinica, 2009, 41(1): 35-43(in Chinese).

[17] Cohen S, Kamarck T, Mermelstein R. A global measure of perceived stress[J]. Journal of Health and Social Behavior, 1983, 24(4): 385.

[18] Duncan C C, Barry R J, Connolly J F, et al. Event-related potentials in clinical research: guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400[J]. Clinical Neurophysiology, 2009, 120(11): 1883-1908.

[19] 钟铭恩, 吴平东, 彭军强, 等. 基于脑电信号的驾驶员情绪状态识别研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(9): 64-69.
Zhong M E, Wu P D, Peng J Q, et al. Study on an emotional state recognition technology based on drivers' EEGs[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(9): 64-69(in Chinese).

[20] 傅根跃, 陈昌凯, 缪伟, 等. 测谎问题中的“情绪成分”对皮肤电反应的影响[J]. 中国临床心理学杂志, 2005, 13(3): 321-323.
Fu G Y, Chen C K, Miao W, et al. The effect of emotionality in lie-detection questions on skin conductance response[J]. Chinese Journal of Clinical Psychology, 2005, 13(3): 321-323(in Chinese).

[21] 中国民用航空局.雷达管制基础模拟机培训大纲 [EB/OL].(2012-06-26)[2024-02-01]. www.caac.gov.cn.
Civil Aviation Administration of China. Syllabus for basic radar control simulator training[EB/OL]. (2012-06-26)[2024-02-01]. www.caac.gov.cn(in Chinese).

[22] Shim J B, Joo S H, Shim H S. The direction and level of dominant eye according to the tests[J]. Journal of Korean Ophthalmic Optics Society, 2015, 20(3): 363-368.

[23] 韩礼博, 门宝辉. 基于组合博弈论法的海河流域水资源承载力评价[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 61-64.
Han L B, Men B H. Evaluation of water resources carrying capacity in Haihe River Basin based on combinatorial game theory[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 61-64(in Chinese).

Analysis of individual differences in controller workload

GU Qiuli[1, 2], WANG Lili[3, *]

(1. College of computer Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To address the issue of individual variability in workload tolerance, this study establishes a quantitative model for assessing controller workload. A test was devised for the purpose of collecting data from 24 area controllers both before and after their workday. Based on the test data, variables were selected for analysis that were deemed to be sensitive in terms of describing the individual load. Three dimensions were included in the comprehensive evaluation index system: cognitive workload, physiological reaction load, and psychological perception load. A model for the individual load index of controllers was developed. The optimal weights of the individual load index were determined through the application of the entropy weight-CRITIC combination method. The individual workload index of each controller was subsequently calculated. It was determined that there are notable discrepancies in the individual workload of controllers. The cognitive workload index is a principal indicator of the magnitude of the individual workload index for controllers. The cognitive workload is a principal index for determining the magnitude of the controller's individual workload index. Additionally, there is a positive correlation between cognitive workload and the controller's capacity for information retrieval, decision-making, and reaction. To further investigate the factors influencing the growth of controllers' cognitive workload, the reaction time, gaze time, and sweep time of controllers under five distinct traffic levels were quantified. Additionally, pre-post and post-post paired tests were conducted, and one-way analysis of variance was performed between groups with the same indicator. The results showed that while controllers' reaction ability was more affected by flow parameters, their decision-making and searching abilities were more vulnerable to cumulative load.

Keywords: air traffic controllers; individual workload; entropy weight-CRITIC combination method; paired samples T-test; one-way analysis of variance

Received: 2024-05-23; **Accepted**: 2024-07-15; **Published Online**: 2024-08-21 16:02

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240821.1151.001

Foundation item: Joint project of the National Natural Science Foundation of China and the Civil Aviation Administration of China (U1633124)

* **Corresponding author**. E-mail: llwang@cauc.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0319

基于深度神经网络和光度序列数据的卫星平台分类识别方法

陈浩[1]，刘通[2]，张延鑫[1,*]

(1. 北京跟踪与通信技术研究所，北京 100094；2. 中国科学院空间应用工程与技术中心，北京 100094)

摘 要：空间目标的光度序列数据与目标的形状、尺寸、材质和运动等特性信息紧密相关，为利用光度序列数据反演卫星平台的类别，提出基于深度神经网络和光度序列数据的卫星平台分类识别方法。对用于神经网络训练的光度序列数据进行了距离修正、相位角修正、平滑滤波和插值等预处理分析。构建了可以同时提取空间目标时序特征和空间特征的卷积长短时记忆网络，该网络对火箭、铱星、GlobalStar卫星和空间碎片4类目标分类的平均准确率为73.80%，优于卷积神经网络的平均值70.43%。仿真了白云卫星平台（WC）、气象卫星计划平台（DMSP）、未来成像卫星平台（FIA）、空间态势感知计划卫星平台（GSSAP）等7类卫星平台的光度序列数据，并进行深度神经网络扩展验证，得到的卫星平台分类准确率大幅度提升至超过90%。

关 键 词：卫星平台分类；光度序列数据；数据预处理；长短时记忆网络；卷积神经网络

中图分类号：P171.3

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2425-09

光度序列数据是空间目标一类重要的特性数据，是目标形状、尺寸、表面材质和运动形式的综合体现，可用于目标分类识别。但是光学散射特性测量数据属于一类收发分置的测量模式，且测量状态随着时间、空间多变，因此，数据处理难度较大。从获取的光度序列数据中分析空间目标的状态参数，提取可用于目标分类识别的特征及在目标分类识别应用方面开展的研究工作较少。近些年深度学习等人工智能算法在图像分类、数据挖掘、自然语言处理等领域得到成功的应用。AlexNet网络在2012年ImageNet大规模视觉识别挑战赛(ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge, ILSVRC)中利用8层神经网络以16.4%的top-5分类错误率取得冠军[1]，后续深度卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)在图像处理领域得到了广泛研究和应用[2-3]。视觉几何组网络(visual geometry group network, VGGNet)[4-5]在2014年ILSVRC比赛中利用19层网络得到了7.3%的top-5分类错误率，Google Inception Net利用22层带参数卷积网络，在ILSVRC 2014图像分类竞赛中以6.67%的top-5分类错误率夺得冠军。微软研究院的He等提出的残差网络(residual network, ResNet)[6]以152层网络在2015年ILSVRC比赛中以3.57%的top-5分类错误率取得冠军。在这些经典的网络基础上，出现了密集卷积网络(dense convolutional network, DenseNet)[7]、移动卷积网络(mobile convolutional network, MobileNet)[8-9]、混洗卷积网络(shuffle convolutional network, ShuffleNet)[10-11]等大量的改进网络。同时，深度生成对抗网络、自编码网络等网络的出现通过数据增强等在分类问题上也得到了很好的应用。循环神经网络由于保留了数据的时序特性，在语音识别分类等方面得到了成功的应用。采用人工智能机器学习对空间目标进行分类的研究国内目前较少，国际上主要的公开研究为近年来先进毛伊光学与空间监视技术(advanced Maui optical and space surveillance technologies, AMOS)会议上美国科学家所提到

收稿日期：2024-05-13；录用日期：2024-09-25；网络出版时间：2024-09-29 17:17
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240929.1627.002
*通信作者. E-mail：zyx_sd@163.com

引用格式：陈浩，刘通，张延鑫. 基于深度神经网络和光度序列数据的卫星平台分类识别方法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2425-2433. Chen H，Liu T，Zhang Y X. Satellite platform classification method based on deep neural network using photometric data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2425-2433 (in Chinese).

的一些研究。2018 年, Furfaro 等[12]采用了大量的光度序列数据训练卷积神经网络对空间目标进行分类, 分类准确性达到 75%。2019 年, Dao 等[13]结合光度序列数据, 对高轨目标的分类进行了研究。

国内在空间目标分类领域主要利用传统的机器学习算法对空间目标进行分类分析, 近些年出现了一些深度学习应用的研究。方建等提出基于支持向量机和蚁群算法的空间目标分类算法[14]。汪洋等采用 DS(Dempster-Shafer)证据理论方法将多通道图像数据有效融合进行空间目标分类[15]。张军等结合三轴稳定卫星、自旋稳定卫星、翻滚目标和空间碎片的运动特征, 基于雷达散射截面(radar cross section, RCS)序列的对空间目标进行分类识别[16]。鹿瑶等提出基于卷积神经网络和光度序列数据的空间目标分类算法[17]。本文针对不同轨道卫星平台的实测光度序列数据进行了预处理分析, 并利用深度神经网络方法对卫星平台进行了分类研究。

1 深度神经网络构建

1.1 卷积循环神经网络

卷积神经网络在处理图片等网格状数据时, 可以利用卷积可提取图片的空间特征, 在进行图片分类、图像识别时取得了非常好的效果。但是对于时间序列数据, 仅仅用卷积神经网络可能会失去序列的时序特征。循环神经网络常用来处理时序序列数据, 但是常用的深度神经网络随着网络层数的变大会有梯度消失或梯度弥散的问题。长短时记忆 (long short time memory, LSTM) 网络通过构造输入门、遗忘门和输出门可解决这种问题。空间目标的光度序列数据中既包含了目标在空间中的位置特征, 又包含了目标随着时序变化的运动特征。为同时提取目标的空间特征和时序特征, 将 LSTM 网络和卷积神经网络相结合, 构造卷积 LSTM 网络来利用光度序列数据训练神经网络分类器, 对空间目标进行分类。

设计的网络结构包含 6 层, 除去前后的输入层和输出层, 主体包含 2 层 ConvLSTM 网络层, 之后加入一层卷积神经网络, 进一步的提取数据特征, 最后, 以一个全连接层作为分类器, 从而实现整体的智能分类网络, 如图 1 所示。ConvLSTM 的输入参数主要有 5 个, 分别为样本数量、时间、行数、列数、通道数。输出参数也主要有 5 个, 分别为样本数量、时间步长、输出行数、输出列数、滤波结果。

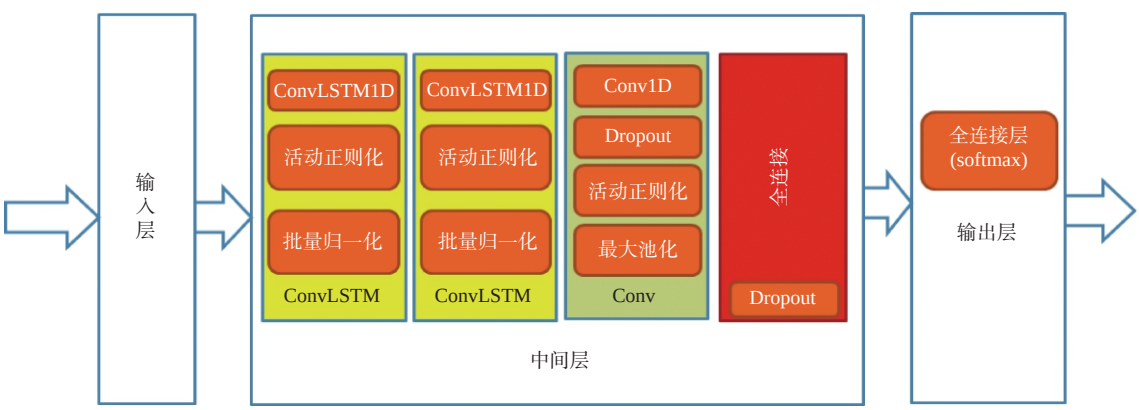


图 1 用于卫星平台分类的卷积循环神经网络

Fig. 1 Constructed convolutional recurrent neural network for satellite platform classificaiton

卷积循环神经网络的详细结构及功能设计说明如下。

1) 输入层。用于接收待训练或分类的光度序列数据, 采用等长数据序列, 模型创建时可指定输入数据的长度。一般来讲输入数据越长(即单次测量时间越长, 样本点越多), 训练的结果会越好, 在数据的观测时长足够长(数据点足够多)时, 应尽可能选用更长的观测数据。但是由于观测数据单次测量时长差异很大, 无法使所有采样段都达到足够多的数据点, 必要时就需要对数据进行 padding 或引入仿真数据, 这会导致训练样本出现偏离, 可能会导致训练或预测效果不佳。因此, 实际训练时需要针对所掌握的数据特点, 选择一个较为合适的数据段长度, 本文网络模型采用 700 个点作为单个输入数据样本的长度。

2) ConvLSTM 层。主体网络的前 2 层, 为 ConvLSTM 层, 输入数据在该层按照时序关系被分割为 4 个数据段, 对于本文所使用的长度为 700 个采样点的单个输入数据, 被分割后的每个段为 150 个数据点。这 4 段数据序列被输入到 ConvLSTM 的卷积层中进行空间特征抽取, 然后, 采用 LSTM 的处理方法进行时序特征抽取。卷积核的数量是 32(即输出的维度), 卷积核的大小是 3, 保留边界处的卷积结果, 用 ReLU 激活函数, 用于循环时间步的激活函数选择 sigmoid 函数。利用正则化和批规范化, 防止过拟合。

3) 卷积层。ConvLSTM 层得到的特征被进一步输入卷积层进行处理, 卷积波器的长度为 16(即

卷积输出的长度），卷积核大小为 30。在卷积层中增加 Dropout 预防过拟合，提高神经网络泛化能力，参数设置为 0.2，同样增加了正则化防止过拟合。随后应用了最大值池化的池化层，实现输出数据的压缩。

4）全连接层。主体网络结构最后是一个全连接层。卷积层池化后的输出被展平输入到全连接层中进行计算，将输出数据的长度降到 50，全连接层后加入 Dropout 预防过拟合，参数设置为 0.5。

5）输出层。模型的最后是一个输出层，使用 softmax 函数对全连接层的输出进行激活，得到样本相对于每个类别的预测值。

1.2　卷积神经网络

本文设计的空间目标光度序列数据分类的 CNN 如图 2 所示。

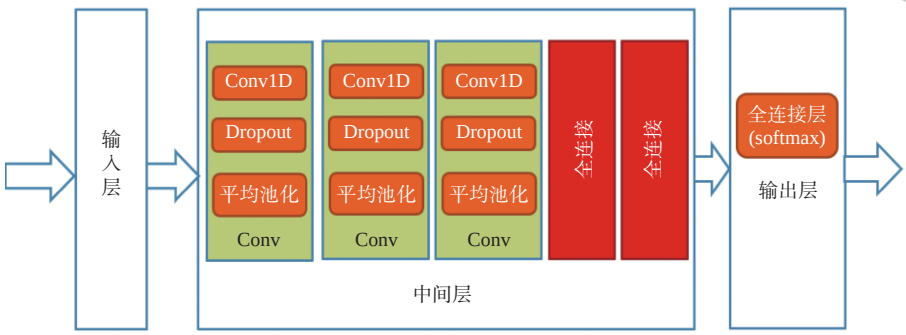


图 2　用于卫星平台分类的 CNN

Fig. 2　CNN for satellite platform classificaiton

参考卷积神经网络设计，通过 3 个卷积神经网络来实现光度序列数据中的特征提取，并将提取后特征输入到 2 层全连接神经网络，构建一个分类器，从而实现整体的智能分类网络。其中，输入层的数据格式为一个含 N 个元素的列表，其中，单个元素是一个包含了 700 个预处理数据点的列表（不足 700 点的话，末端补 0），此处 N 为所输入的光度序列数据个数。输出层为 N 个元素的列表，其中的单个元素为整数，代表预测结果类别。单个卷积层由一维卷积算子、Dropout 算子、非线性激活算子组成。

3 个卷积层都选用了一维卷积函数，滤波器的长度为 64（即卷积输出的长度），卷积核大小为 4，激活函数选取为 ReLU。第 1 个卷积层的数据形状为 700 行 1 列，卷积计算后跟随 dropout 计算。本方案 3 个卷积层的 dropout 参数分别设置为 0.25、0.2、0.2。后面是池化层，本方案 3 个卷积层都使用平均池化方法，池化尺度为 4，步长为 1。

3 个卷积层后，在进入全连接层之前，进行了 flatten 计算，实现把数据展平的处理，即将数据变成一维数据。然后，进入 2 个全连接层，分别将输出数据长度降到 300、200，最后，输出层也为全连接层，激活函数为 softmax，输出 4 类分类结果。

神经网络模型优化器使用的损失函数为稀疏交叉熵，评价函数选择为稀疏分类准确率。

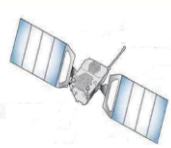
2　数据准备

2.1　目标选择与数据收集

进行深度神经网络训练和分类验证选取的 4 类目标分别是火箭体残骸类、铱星卫星类、GlobalStar 卫星类和空间碎片，选取俄罗斯 MMT 系统（具有亚秒时间分辨率的天球宽视场监测系统，构建了包含数百颗卫星、碎片等空间目标的光度数据库）测量的光度序列数据（光学望远镜在一段时间内对目标连续跟踪测量的目标光度数据序列），各类目标基本信息如表 1 所示。

表 1　4 类目标基本情况

Table 1　Basic information of four classes of objects

目标种类	目标示意图	说明
火箭残骸		猎鹰9号，1 281弧段
铱星		3 509弧段
GlobalStar卫星		3 451弧段
空间碎片		3 464弧段

2.2　数据预处理

原始光度序列数据对深度神经网络学习过程

来说，存在较多的不一致性，为更好地体现空间目标自身的某些特性对光度序列数据变化趋势的影响，需要去除原始数据中存在的不连续性、测量偏差等影响。图 3 为本文采用的主要预处理过程。

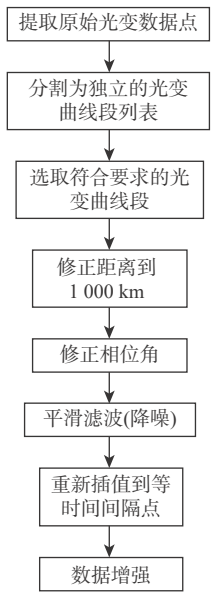


图 3 对 MMT 系统实测光度序列数据的预处理过程

Fig. 3 Preprocess steps for measured photometric data of MMT system

数据预处理主要计算过程中，包括如下几部分。

1）修正距离到 1 000 km。在获取空间目标的视星等后，为了数据的一致性，需要将观测到的空间目标视星等进行斜距的归一化。对于不同的空间目标，测量时其与测站间的距离（斜距）是不同的；即使是同一个目标，随着时间的变化，其与测站之间的距离也是变化的。因此，需要将视星等归一化到统一的距离，采用如下计算式：

$$m_1 = m - 2.5\lg\left(l^2/l_0^2\right) \tag{1}$$

式中：m 为视星等的大小；l 为斜距；l_0 为归一化距离，取 1 000 km；m_1 为修正后的视星等的大小。

2）修正相位角。对于漫反射球状卫星的视星等，其与“观测者-空间目标-太阳”相位角是相关的。对于不同观测时刻的视星等，还需要利用相位角函数修正到统一的相位角（取为 90°）。对视星等进行修正相位角的计算式为

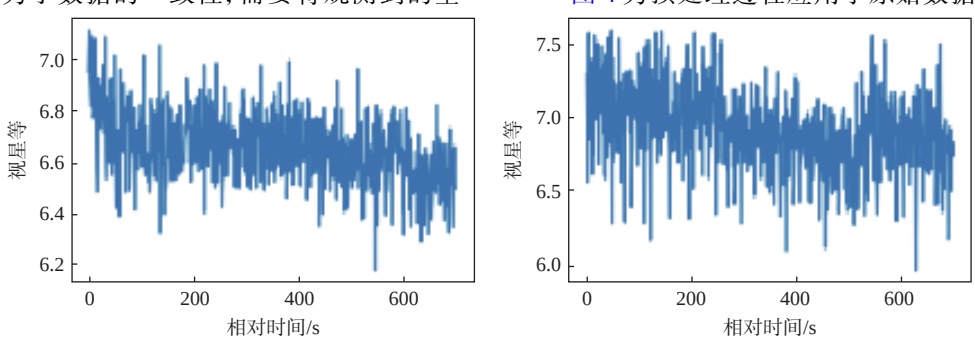
$$\Delta m_\theta = -2.5\lg(\sin\theta + (\pi - \theta)\cos\theta) \tag{2}$$

式中：θ为实际观测时的相位角；Δm_θ为相位角修正量。

3）平滑滤波（降噪）。经归一化后的视星等曲线，仍存在由于测量误差引起的噪声，可以选取一定的方法进行平滑滤波（去除噪声）。本文所选取平滑方法为 Savizky-Golay 滤波器。Savizky-Golay 滤波器广泛应用于数据流平滑除噪，是一种在时域内基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法。

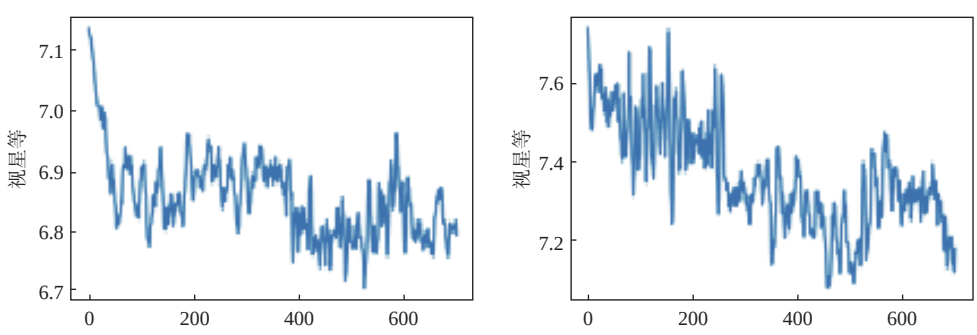
4）重新插值到等时间间隔点。原始数据点并非是时间间隔均匀一致的，可以采用数值插值方法，将数据点归一化到等时间间隔的时刻上。

图 4 为预处理过程应用于原始数据 MMT 系统



(a1) 光度序列 1 (a2) 光度序列 2

(a) 经过筛选、修正后的MMT系统实测光度序列



(b1) 光度序列 1 (b2) 光度序列 2

(b) 经过平滑滤波、插值和数据增强后的MMT系统实测光度序列

图 4 预处理过程对原始数据 MMT 系统实测光度序列的结果

Fig. 4 Results of each preprocessing steps for original measured photometric data of MMT system

实测光度序列数据的一个结果演示。

经过数据预处理后的全部光度序列数据总共 13 200 弧段，每个类别包含 3 300 弧段数据。全部数据随机分为 2 类，其中，用于训练过程的数据合计 10 560 弧段，每个类别含 2 640 弧段；用于测试过程的数据合计 2 640 弧段，每个类别含 660 弧段；测试数据与训练数据不重复，测试数据量为训练样本的 25%；验证数据和测试数据一致。

3　深度神经网络训练

输入数据的采样率与原始数据保持一致（MMT 系统光度序列数据原始观测频率为 10 Hz），这样可以最大程度的保留原始数据中的信息量，目标潜在特征更大可能性的被识别。所有输入数据采用等时间长度，保证学习过程中输入数据的一致性，对深度神经网络的训练过程是有利的。

项目采用基于 GPU 的 TensorFlow 深度学习库作为网络构建和训练平台，采用 Keras 模式进行网络训练。将样本数据分为两部分，80% 作为训练集，20% 作为测试集，验证集和测试集一致。

3.1　卷积循环神经网络训练结果

图 5 和图 6 给出了 1.1 节设计的卷积循环神经网络在某次训练测试过程的结果信息。其中，图 5 为训练时的各项指标迭代收敛过程；图 6 为 4 类分类结果的准确率，对于该次训练测试过程来说分类准确率为 73.29%，其在各类目标上的召回率如表 2 所示。

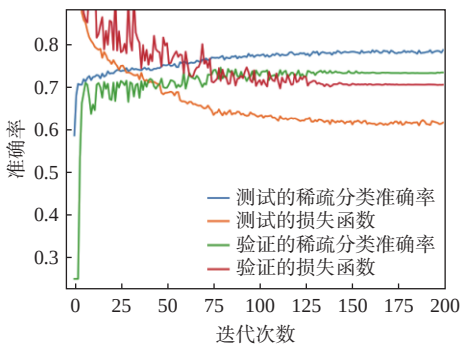


图 5　卷积循环神经网络训练过程

Fig. 5　Training process of convolutional recurrent neural network

10 次训练（训练数据和测试数据随机分配）和测试，结果的准确率如表 3 所示，平均准确率为 73.80%，最高准确率达到 74.55%。

3.2　CNN 训练结果

图 7 和图 8 给出了本文设计的用于卫星平台分类的 CNN 某次训练测试的主要结果信息。其中，图 7 为训练时的各项指标迭代收敛过程；图 8 为

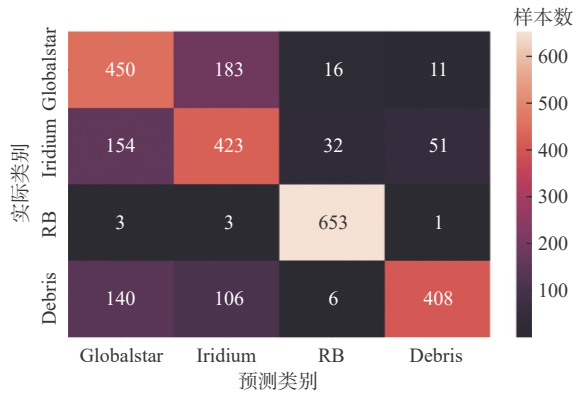


图 6　卷积循环神经网络测试结果

Fig. 6　Test results of convolutional recurrent neural network

表 2　卷积循环神经网络某次训练后测试结果的召回率

Table 2　Recall rate of test results after a training epoch of convolutional recurrent neural network

类别	召回率/%
空间碎片	68.18
铱星	64.09
火箭残骸	99.09
GlobalStar	61.82

表 3　卷积循环神经网络 10 次训练的准确率结果

Table 3　Model accuracy of 10 training epochs of recurrent neural network

训练次数	迭代次数	模型准确率/%
1	200	73.56
2	200	74.09
3	200	74.55
4	200	72.80
5	200	73.67
6	200	74.51
7	200	72.80
8	200	73.71
9	200	73.86
10	200	74.47

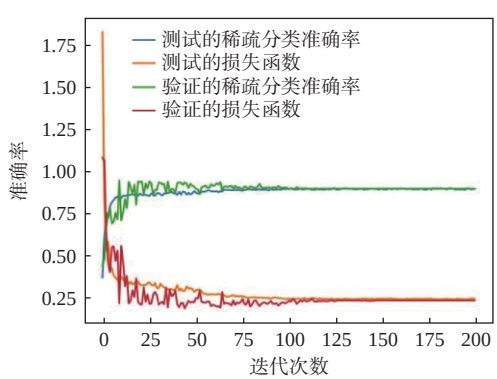


图 7　CNN 构建训练过程

Fig. 7　Training process of CNN

4类分类结果的准确率，对于该次训练测试过程来说为68.2%，各类目标的召回率如表4所示。

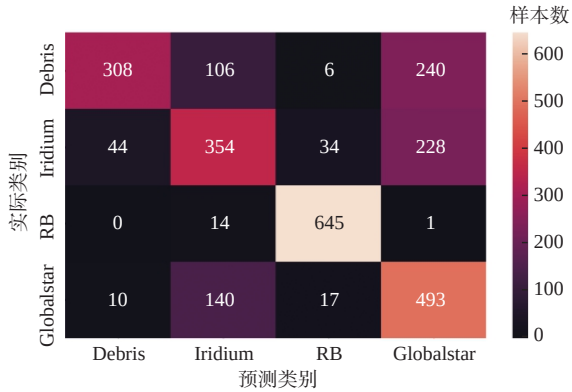


图8 CNN测试结果

Fig. 8 Test results of CNN

表4 各类别的召回率

Table 4 Recall rates by category

类别	召回率/%	类别	召回率/%
碎片	47	火箭残骸	98
铱星	54	全球星	75

对该CNN训练和测试了10次，结果记录如表5所示，可以看出，由于训练过程的差异（训练样本参与训练的先后顺序不一样），训练结果有所差异，评估结果略有波动，平均值为70.43%。

表5 CNN的准确率

Table 5 Accuracy of CNN

训练次数	迭代次数	准确率/%
1	200	71.40
2	200	69.02
3	200	71.52
4	200	70.53
5	200	72.27
6	200	69.81
7	200	68.11
8	200	70.45
9	200	70.98
10	200	70.23

从多次训练结果来看，本文构建的卷积循环神经网络的预测准确率和重复稳定性均优于的CNN。说明卷积循环神经网络采用的Conv-LSTM层在应用于光度序列数据处理时比单纯的卷积计算更具有优势，更适用于基于光变数据的空间目标分类。

4 深度神经网络扩展验证

本文选取4类低轨卫星平台（白云卫星平台（White Cloud, WC）[18]、未来成像卫星平台（future imagery architecture, FIA）[19]、空间跟踪与监视系统卫星平台（space tracking and surveillance system, STSS）[20]、气象卫星计划平台（defense meteorological satellite program, DMSP）[21]）和3类高轨卫星平台（空间态势感知计划卫星平台（geosynchronous space situational awareness program, GSSAP）[22]、宽带全球卫星通信卫星平台（wideband global SATCOM satellite, WGS）[23]、跟踪与数字中继卫星平台（tracking and data relay satellite, TDRS）[24]），以及1类火箭残骸（rocket body, RB）进行扩展验证。

4.1 目标训练数据仿真

4.1.1 目标平台轨道根数确定

对于给定的7类平台，收集了各类平台对应的现有卫星，如表6所示，使用这些卫星的轨道根数仿真对应目标运动情况。

4.1.2 仿真使用的测站情况

本次目标训练数据仿真模拟了4个测站，各测站的概略坐标信息如表7所示。

4.1.3 其他仿真条件

仿真光度序列数据主要参数设置情况如下。

1）低轨目标：跟踪弧段时间长度为5 min；设备跟踪仰角低轨大于20°；回波率为10 Hz；仿真数据跨度不小于1年（基于数据覆盖各种条件）。

2）高轨目标：跟踪弧段时间长度为100 min；设备跟踪仰角大于2°；回波率为0.5 Hz；仿真数据跨度不小于1年（基于数据覆盖各种条件）。

表6 各类平台对应的卫星Norad编号

Table 6 Norad ID of each satellite platform

卫星平台	目标数量/根	Norad编号
WC[18]	12	38 758、37 386、31 701、28 537、38 773、40 981、42 065、42 058、40 964、31 708、28 541、37 391
FIA[19]	5	38 109、39 462、37 162、41 334、43 145
STSS[20]	3	35 937、35 938、34 903
DMSP[21]	5	28 054、24 753、25 991、29 522、35 951
GSSAP[22]	4	40 100、41 744、40 099、41 745
WGS[23]	6	38 070、41 879、44 071、34 713、32 258、42 075
TDRS[24]	3	26 388、23 613、19 883

表 7　仿真选取的测站坐标

Table 7　Coordinate of simulated station

名称	东经度/(°)	北纬度/(°)	高程/m
测站1	41.43	43.64	2 000
测站2	102.79	25.03	1 000
测站3	121.19	31.09	100
测站4	97.41	22.92	600

4.2　深度神经网络验证与分析

对深度神经网络修改了数据记录的长度为 3 000 点，目标种类为 8 类，训练迭代次数为 200。训练样本总数为 37 805，测试样本总数为 9 452，各类平台的训练样本数和测试样本数如表 8 所示。

表 8　训练样本和测试样本数量

Table 8　Number of training samples and test samples

种类	训练样本个数	测试样本个数	样本总个数
WC[18]	3 210	754	3 964
DMSP[21]	3 190	842	4 032
FIA[19]	5 380	1 406	6 786
GSSAP[22]	6 322	1 599	7 921
STSS[20]	2 782	641	3 423
TDRS[24]	5 554	1 410	6 964
WGS[23]	7 605	1 850	9 455
RB	3 762	950	4 712

选取基于相同的均匀的训练样本的各类深度神经网络模型效果较好的结果进行测试，选取训练样本和验证样本之外，剩下的仿真数据样本作为测试数据。

选取的各类模型的情况及测试结果的情况如表 9 所示。

表 9　基于训练好的各类模型的测试准确率

Table 9　Test accuracy of each trained models

神经网络模型	模型验证准确率/%	仿真样本测试准确率/%
CNN	88.97	93.50
卷积循环神经网络	92.88	95.89

各类卫星平台分类的召回率如表 10 所示。

表 10　各类平台分类的召回率

Table 10　Classification recall rate of each class of satellite platform

平台类别	CNN	卷积循环神经网络
WC[18]	0.773 1	0.833 2
DMSP[21]	0.969 4	0.959 2
FIA[19]	0.834 1	0.890 1
GSSAP[22]	0.989 4	0.981 3
STSS[20]	0.732 9	0.876 7
TDRS[24]	0.936 5	0.987 5
WGS[23]	0.980 0	0.988 8

使用仿真数据对深度神经网络进行训练和测试，得到的目标分类准确率大幅度提升，从约 74% 提升至超过 90%。仿真数据准确率大幅提升是因为仿真条件设置的比实际简化很多、数据不存在间断、观测误差较小、仿真数据不需要通过插值、数据增强等处理，目标的形状尺寸和反射特性设置的较为简单。

5　结　论

本文通过构建深度神经网络利用光度序列数据对卫星平台进行了分类研究。

1）基于实测光度序列数据对火箭、铱星、GlobalStar 卫星和空间碎片 4 类目标分类平均准确率为 73.80%。

2）利用仿真的光度序列数据对 WC、DMSP、FIA、GSSAP 等 7 类卫星平台分类识别准确率超过 90%，验证了基于深度神经网络和光度序列数据进行卫星平台分类的可行性。

基于仿真数据和实测数据，对卫星平台分类准确率差别较大，下一步将仿真数据用于拓展实测数据样本进行训练，提高分类准确率，同时研究 Transformer 等新的深度神经网络模型，优化神经网络结构，提高对卫星平台的分类识别准确率。

参考文献（References）

[1] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012, 25: 1097-1105.

[2] Huang G, Liu Z, Van Der Maaten L, et al. Densely connected convolutional networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2261-2269.

[3] Szegedy C, Liu W, Jia Y Q, et al. Going deeper with convolutions[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-9.

[4] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[EB/OL]. (2015-04-10)[2024-03-10]. https://arxiv.org/abs/1409.1556.

[5] 何凯, 马红悦, 冯旭, 等. 基于改进 VGG-16 模型的英文笔迹鉴别方法[J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2020, 53(9): 984-990.
He K, Ma H Y, Feng X, et al. English handwriting identification method using an improved VGG-16 model[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(9): 984-990(in Chinese).

[6] He K M, Zhang X Y, Ren S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 770-778.

[7] Nasr-esfahani E, Rafiei S, Jafari M H, et al. Dense pooling layers in

fully convolutional network for skin lesion segmentation[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2019, 78: 101658.

[8] Howard A G, Zhu M L, Chen B, et al. MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications[EB/OL]. (2017-04-17)[2024-03-10]. https://arxiv.org/abs/1704.04861.

[9] Sandler M, Howard A, Zhu M L, et al. MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 4510-4520.

[10] Zhang X Y, Zhou X Y, Lin M X, et al. ShuffleNet: an extremely efficient convolutional neural network for mobile devices[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 6848-6856.

[11] Ma N N, Zhang X Y, Zheng H T, et al. ShuffleNet V2: practical guidelines for efficient CNN architecture design[C]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV. Berlin: Springer, 2018: 122-138.

[12] Furfaro R, Linares R, Reddy V. Space objects classification via light-curve measurements: deep convolutional neural networks and model-based transfer learning[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Development Board, Inc. , 2018.

[13] Dao P, Haynes K R, Gregory S, et al. Machine classification and sub-classification pipeline for GEO light curves[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Development Board, Inc., 2019.

[14] 方建, 曹占辉, 李言俊. 基于蚁群算法和特征融合的空间目标分类[J]. 电子技术应用, 2009, 35(2): 74-77.
Fang J, Cao Z H, Li Y J. Space object classification based on SVM and ACO[J]. Application of Electronic Technique, 2009, 35(2): 74-77(in Chinese).

[15] 汪洋, 郑亲波, 张钧屏. 用证据理论方法进行多波段数据融合的目标分类[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(3): 229-232.
Wang Y, Zheng Q B, Zhang J P. Target classification of the data fusion in multichannel using dempster-shafer method[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 21(3): 229-232(in Chinese).

[16] 张军, 马君国, 朱江, 等. 基于 RCS 序列的空间目标分类识别方法[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(12): 98-100.
Zhang J, Ma J G, Zhu J, et al. Classification and recognition based on RCS sequence of space targets[J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(12): 98-100(in Chinese).

[17] 鹿瑶, 赵长印. 基于光变曲线的空间碎片基本形状分类[J]. 天文学报, 2020, 61(6): 50-63.
Lu Y, Zhao C Y. The basic shape classification of space debris with light curves[J]. Acta Astronomica Sinica, 2020, 61(6): 50-63(in Chinese).

[18] 巫晓彤. 用于战争的美国“白云”海洋监视卫星[J]. 航天器工程, 2003(3): 63.
Wu X T. US "White Cloud" ocean surveillance satellites used in warfare[J]. Spacecraft Engineering, 2003(3): 63(in Chinese).

[19] 松堂. “未来成像结构”: 波音的滑铁卢[J]. 太空探索, 2024(12): 44-49.
Song T. "Future imagery architecture": boeing’s waterloo[J]. Space Exploration, 2024(12): 44-49(in Chinese).

[20] 朴美兰, 李斯戍, 齐艳丽, 等. 美国天基低轨预警系统发展分析[J]. 国际太空, 2022(8): 1-7.
Piao M L, Li S X, Qi Y L, et al. Development analysis of US space-based low-orbit Early warning system[J]. International Space, 2022(8): 1-7(in Chinese).

[21] 刘韬, 王丹, 武珺. 美军气象卫星的应用与管理[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(5): 1-8.
Liu T, Wang D, Wu J. Application and management of US military meteorological satellites[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2019, 40(5): 1-8(in Chinese).

[22] 王久龙, 王锐, 张鲁薇, 等. GSSAP 卫星在轨应用研究与成像仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(4): 281-291.
Wang J L, Wang R, Zhang L W, et al. On-orbit application research and imaging simulation analysis of GSSAP satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(4): 281-291(in Chinese).

[23] 佚名. 美国空军首颗 WGS 卫星投入运行[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(5): 846.
Anonymous. First WGS satellite of US air force put into operation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(5): 846(in Chinese).

[24] 李于衡, 郑军, 易克初. 中继卫星 (TDRS) 支持环月探测器的研究[J]. 空间科学学报, 2007, 27(3): 227-232.
Li Y H, Zheng J, Yi K C. Research on relay satellite (TDRS) supporting lunar orbiting detector[J]. Chinese Journal of Space Science, 2007, 27(3): 227-232(in Chinese).

Satellite platform classification method based on deep neural network using photometric data

CHEN Hao[1]，LIU Tong[2]，ZHANG Yanxin[1,*]

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology，Beijing 100094，China；
2. Technology and Engineer Center for Space Utilization，Chinese Academy of Science，Beijing 100094，China)

Abstract：There is a high correlation between an object's photometric data and its shape, size, material, and movement. In order to classify the type of satellite platform using the photometric data, a deep neural network based satellite platform classification method is proposed. Preprocessing techniques like as interpolation, smooth filtering, distance correction, and phase correction are applied to the photometric data needed for network training. Convolutional long short-term neural network is constructed to extract the spatial and temporal features of space objects from photometric data, and the average classification accuracy of rocket, satellite Iridium, satellite GlobalStar and space debris is 73.8%, better than the 70.43% accuracy of the convolution neural network. Additionally, the deep neural network is further tested using simulated photometric data from seven satellite platforms, including White Cloud (WC), defense meteorological satellite program (DMSP), future imagery architecture (FIA), and geosynchronous space situational awareness program (GSSAP). The classification accuracy of the satellite platforms is significantly increased to better than 90%.

Keywords：satellite platform classification；photometric data；data preprocessing；long short time memory network；convolutional neural network

Received：2024-05-13；**Accepted**：2024-09-25；**Published Online**：2024-09-29 17：17
URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240929.1627.002

* **Corresponding author**. E-mail：zyx_sd@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0334

地球静止轨道运行的OSR太阳吸收比变化分析

文佳佳[1]，谢荣建[1,*]，钟思源[1]，程锦铭[1,2]，陈凡胜[1]

(1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；2. 上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093)

摘 要：光学太阳反射镜（OSR）也称二次表面镜，具有很低的吸收发射比，空间应用稳定高，粘贴于辐射散热板外表面时，能够起到良好的散热或制冷效果。OSR空间环境的影响及热控性能退化机理是热控长寿命设计的重要课题。通过对地球静止轨道工作的4颗卫星载荷相机在轨7年、4年、3年及2.5年温度数据分析，结合热仿真分析模型，得到OSR的太阳吸收比退化模型。结果显示，发射第1年OSR的太阳吸收比为0.125，在轨2年后OSR的太阳吸收比退化为0.134，7年后变化为0.175，退化曲线呈线性特征，每年退化率约为0.74%。同时，根据该退化模型预测10年后的太阳吸收比为0.195，OSR空间适应性及稳定性较高，计算结果为后续在轨温控及新热控系统设计提供指导。

关 键 词：地球静止轨道；空间环境效应；光学太阳反射镜；太阳吸收比；退化率

中图分类号：V443; TK124

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2434-06

光学太阳反射镜(optical solar reflector, OSR)是采用玻璃为透明薄膜表面层的第二表面镜型热控涂层，OSR的薄膜表层可为石英玻璃或铈玻璃等，金属底层可为银或铝等，通过真空蒸发-沉积工艺制备[1]。同时，为抑制轨道环境的充放电效应、电荷累积放电效应等，防止对卫星造成损坏，在玻璃外表面镀透明导电膜，通常为掺锡氧化铟(indium tin oxide, ITO)[2]。导电型OSR片具有较丰富的在轨运行经验，应用于热控辐射散热板涂层时，通过黏接方式分布于辐射板产品表面[3]，具有很低的太阳吸收率与红外发射率比[4]，能够起到良好的散热或制冷效果，保证相机内部的正常工作环境。

OSR工作在地球静止轨道时，需长期经受太阳、行星和空间低温热沉的热循环作用[5]，受到较高剂量的紫外辐照、带电粒子辐照、原子氧腐蚀(转移阶段)等空间环境作用等[6-7]，其太阳吸收比α_s发生退化，造成寿命后期卫星内部单机温度上升。OSR热控性能衰退，是由于表面层玻璃在紫外辐照下形成自由电子，自由电子被银膜或铝膜中的空穴捕获产生色心，色心在可见光区光子吸收。此外，带电粒子辐照效应会使缺陷中心俘获辐照诱导电子在紫外区产生吸收带，这些综合作用都会引起OSR的α_s增加。

针对卫星表面的α_s性能退化问题，由于目前还不具备在轨直接测量热控涂层性能能力，较常用的方法为综合环境试验测试和航天器热控涂层数据反演方法等。综合环境试验测试设备能够提供低能电子、低能质子、近紫外光、远紫外光、等离子体、温度和真空等空间模拟环境，能够在模拟环境中测试太阳吸收率等[8]。15年地球同步轨道环境综合实验(近紫外辐照5 000等效太阳时等)作用试验结果表明，玻璃型镀铝OSR的α_s参数从0.05退化到0.128[9]；导电型掺铈玻璃型镀铝OSR在3 000等效太阳时紫外辐照前后，α_s变化0.018，电子质子综合辐照试验前后吸收0.08变化至0.106，退化0.026[3]；导电型掺铈玻璃型镀银OSR在10 000等效

收稿日期：2024-05-17；录用日期：2024-09-06；网络出版时间：2024-11-07 10:59
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241106.1653.006

*通信作者. E-mail：xierongjian@mail.sitp.ac.cn

引用格式：文佳佳，谢荣建，钟思源，等. 地球静止轨道运行的OSR太阳吸收比变化分析[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2434-2439.
Wen J J，Xie R J，Zhong S Y，et al. Analysis of solar absorptance degradation of OSR in geostationary orbit[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2434-2439 (in Chinese).

太阳时紫外辐照前后, α_s 由 0.08 上升至 0.106[10]。该方法需要对空间环境准确模拟, 且无法同时模拟空间环境综合效应, 具有一定的局限性。

国内外利用东方红二号[9]、和平号空间站、国际空间站[11-12]、美国航天飞机、长期暴露装置[13-14]等航天器进行相关的热控涂层退化研究工作, 对 OSR 及 ITO 暴露空间环境的退化数据进行收集及分析, 得到了大量的热控涂层和空间环境相互作用的数据, 为各国提供空间材料数据库[15]。OSR 在“东方红二号”OC 星上观察 4 年 4 个月, α_s 在轨 2 年从 0.122 退化至 0.139, 之后保持稳定[9]。报道的在轨热控涂层集中在以原子氧作用为主的中高轨等, 地球静止轨道相关数据缺乏。

本文通过对地球静止轨道工作的 4 颗卫星载荷相机在轨 7 年、4 年、3 年及 2.5 年温度数据分析, 对粘贴导电型铈玻璃镀银二次表面镜的辐射板温度数据进行搜集, 并通过经过地面热平衡试验校准的热仿真模型计算得到 OSR 表面太阳吸收比 α_s 变化数据和退化率结果, 为寿命后期在轨温控温度预测和热控系统设计提供指导。

1　在轨温度数据搜集

采用上海硅酸盐研究所研制的导电型铈玻璃镀银 OSR 粘贴于相机辐射散热板。该型 OSR 为层叠结构, 第 1 层为导电 ITO 膜, 第 2 层为高辐射掺铈玻璃, 掺有 5% 二氧化铈的硼硅玻璃, 第 3 层为镀银层, 第 4 层为合金膜。该 OSR 经上海硅酸盐所测量, 地面测量初期 α_s 为 0.1, 发射率 ε_h 为 0.79。

辐射散热板一般为表面铝蒙皮, 内部铝蜂窝结构, 相机内部热源热量通过槽道热管传递至辐射散热板内表面, 为提高散热面效率, 对散热面进行了等温化设计, 主要手段为预埋工字型双孔铝氨热管, 形成热管网络。同时在散热板内表面粘贴高热导材料热解石墨来增加散热面的温度均匀性。散热板外表面面向太空散热, 外表面粘贴 OSR, 降低空间热量干扰。散热板分为上下散热板 2 块, 上散热板散热面积为 2.20 m^2, 下散热板散热面积为 0.49 m^2。上散热板连接中波制冷机及短波制冷机热管, 下散热板连接电控箱热管, 结构及温度测点如图 1 所示。测温点根据卫星要求, 布置于散热热管附近, 便于进行散热板性能监测。其中, T_1 为散热面上短波脉管热管附近温度, T_2 为散热面上短波压缩机热管附近温度, T_3 为散热面上中波脉管热管附近温度, T_4 为散热面上中波压缩机热管附近温度, T_5 为散热面下电控箱热管附近温度。温度测点采用型号 MF501 的热敏电阻, 装机前经过航天认证质量检测并出具检测报告, 测温范围为−50～80 ℃, 误差优于 0.5%。

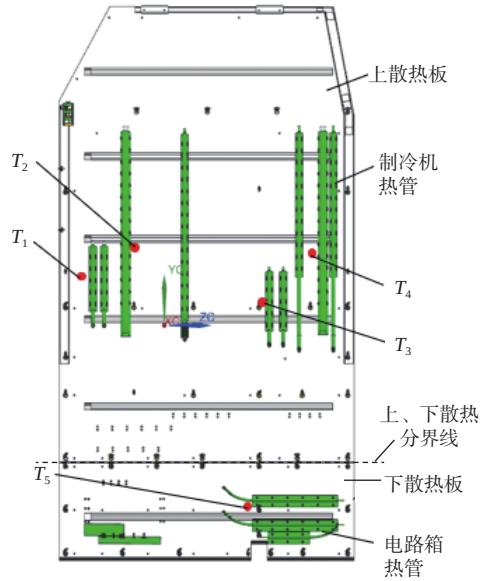


图 1　散热板模型及其温度测点

Fig. 1　Model and temperature measurement points

内部热源功耗如表 1 所示。

表 1　内部热源功耗

Table 1　Internal heat sources power consumption meter

部件	发热量/W	部件数量
电路箱1	9.3	1
电路箱2	60.0	1
制冷机	160.0	2

相机运行在地球静止轨道, 轨道高度为 35 786 km, 轨道周期为 86 400 s。对初期散热板外 OSR 热控层在 1 年内典型工况冬夏至、春秋分、太阳角为 8.8° 等节气吸收的轨道环境外热流进行计算, 如图 2 所示。可以看出, 冬至节气受到的外热流值最大且时间最长。因此, 在轨温度搜集选择冬至作为典型工况进行搜集。

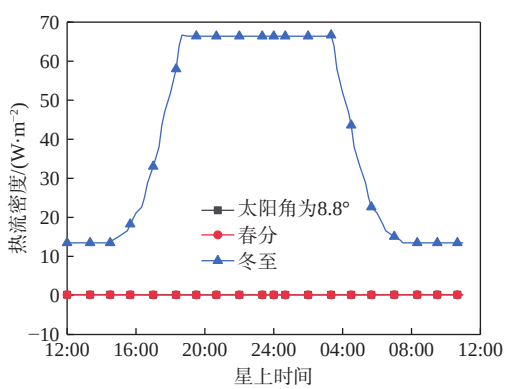


图 2　不同节气下 OSR 吸收的外热流

Fig. 2　External heat flux absorbed by OSR under different solar terms

统计4颗卫星(代号Sensor01, Sensor02, Sensor03, Sensor04)冬至节气散热面的温度波动情况如表2～表5所示。Sensor01相机散热面温度趋势变化如图3所示。Sensor01～Sensor04相机散热面温度均逐年升高,冬至Sensor01相机上散热面最高温度由−38.5 ℃上升至−27.9 ℃,下散热面最高温度由0.4 ℃上升至12.3 ℃;冬至Sensor02相机上散热面最高温度由−37.3 ℃上升至−33.4 ℃,下散热面最高温度由0.1 ℃上升至4.9 ℃;冬至Sensor03相机上散热面最高温度由−37 ℃上升至−34.9 ℃,下散热面最高温度由−0.4 ℃上升至1.3 ℃。Sensor04相机冬至上散热面最高温度由−34.4 ℃上升至−32.4 ℃,下散热面最高温度由−3.5 ℃上升至−2.8 ℃。

表2 Sensor01相机冬至散热板温度变化

Table 2 Temperature change of Sensor01 radiant heat sink during Winter Solstice

日期	T_1/℃	T_2/℃	T_3/℃	T_4/℃	T_5/℃
2017-12-22	−46.6～−38.5	−45.6～−37.5	−45.8～−36.7	−45.4～−37.6	−25.9～0.4
2018-12-22	−46.1～−36.1	−45.1～−35.5	−44.8～−35.2	−44.5～−35.6	−25.3～2.7
2019-12-22	−44.6～34.1	−44.1～33.5	−43.7～−33.2	−43.5～−34.1	−24.8～5.2
2020-12-22	−45.1～−32.9	−44.1～−31.4	−42.7～−31.7	−43～−32.5	−24.7～6.9
2021-12-22	−45.5～−30.9	−45～−29.1	−42.2～−31.1	−41.5～−31.5	−24.2～8.6
2022-12-22	−46.1～−27.9	−45～−27.3	−42.7～−27.6	−43.5～−28.4	−24.2～12.3

表3 Sensor02相机冬至散热板温度变化

Table 3 Temperature change of Sensor02 radiant heat sink during Winter Solstice

日期	T_1/℃	T_2/℃	T_3/℃	T_4/℃	T_5/℃
2020-12-22	−46.88～−37.3	−46.82～−38.1	−46.26～−34.5	−46.9～−38.6	−24.3～0.1
2021-12-22	−45.0～−35.35	−45.4～−35.65	−45.3～−35.5	−45.9～−36.7	−22.7～2.43
2022-12-22	−42.6～−33.4	−43.4～−33.7	−43.8～−33.5	−44.6～−34.7	−22.3～4.9

表4 Sensor03相机冬至散热板温度变化

Table 4 Temperature change of Sensor03 radiant heat sink during Winter Solstice

日期	T_1/℃	T_2/℃	T_3/℃	T_4/℃	T_5/℃
2021-12-22	−43.9～−37.0	−44.3～−37.1	−47.4～−38.0	−46.8～−38.0	−28.7～−0.4
2022-12-22	−43.8～−34.9	−44.1～−35.0	−47.3～−37.0	−46.5～−36.2	−28.5～1.3

表5 Sensor04相机冬至散热板温度变化

Table 5 Temperature change of Sensor04 radiant heat sink during Winter Solstice

日期	T_1/℃	T_2/℃	T_3/℃	T_4/℃	T_5/℃
2022-12-22	−42.6～−34.4	−43.9～−35.1	−43.9～−36.2	−44.1～−35.9	−20.9～−3.5
2023-12-22	−42.5～−32.4	−43.7～−33.2	−43.7～−35.1	−44.0～−34.6	−20.7～−2.8

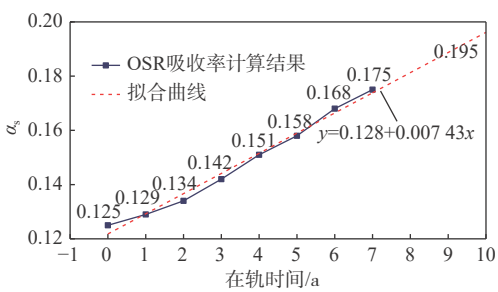


图3 OSR的太阳吸收比随在轨时间的变化

Fig. 3 OSR solar absorption ratio as a function of time in orbit

对Sensor01～Sensor04相机散热板2～7年的温度变化进行分析,散热板温度均呈现逐年升高的情况;内部热源稳定的情况下,表明OSR的太阳吸收比α_s逐年退化上升,并呈现规律性。由于相机内部及散热板外部传热复杂,需要通过整体热仿真得到导电OSR在轨太阳吸收比与散热板温度的关系,进而由散热板温度随时间的变化,计算得到OSR太阳吸收比在地球静止轨道随时间的变化情况。

2 散热板温度热仿真模型

2.1 热仿真模型

散热板布置在相机外侧,内部热源在局部与散热板接触后通过预埋热管扩散,同时,散热板吸收

的太阳外热流随相机姿态变化而变化, 无法直接通过简单公式得到散热板温度与 OSR 的 α_s 及 ε_h 的关系, 因此, 需建立在轨温度计算仿真模型。通过环境分析得到, 影响散热板的温度主要为相机遮光罩、蒙皮及蒙皮外多层、相机周围仪器等, 利用 UG/TMG 软件建立相关物理模型和网格, 并对相机模型进行如下必要的简化和假设。

1) 散热板、安装板、蒙皮和遮光罩等蜂窝结构按等效二维壳体单元处理, 减少计算资源需求; 多层组件另外建立多层单元。多层隔热组件只考虑纵向导热, 而不考虑其横向导热及周边漏热。

2) 相机周围仪器, 利用温控设定为等温边界条件, 考虑其对相机外热流的遮挡。

3) 考虑 OSR 的 ε_h 不受在轨时间影响。模型主要材料物理属性表与外表面特性如表 6 和表 7 所示。

2.2　模型计算结果

对比仿真计算结果, 热平衡试验温度与在轨运行温度数据, 如表 8 所示。热控产品均工作正常, 热模型温度与热平衡试验温度吻合程度较高。在轨发射初期温度相对于地面试验呈现增大趋势。

表 6　材料物理属性

Table 6　Physical properties of material

材料	部件	热导率/ $(W\cdot(m\cdot K)^{-1})$	比热容/ $(J\cdot(kg\cdot K)^{-1})$	密度/ $(kg\cdot m^{-3})$
铝合金	散热板蒙皮	167.0	960	2 700
铝蜂窝	散热板芯	5.0	900	100
玻璃钢G10	隔热垫	0.2	700	2 500

表 7　涂层表面辐射特性

Table 7　Surface radiation characteristics of coating surface

材料	部件	α_S(地面测试)	ε_h
聚酰亚胺二次表面镜	多层外部	0.35	0.67
OSR	散热板外立面	0.10	0.79
白漆	遮光罩外表面	0.27	0.92

表 8　仿真结果与热平衡试验及入轨一年飞行温度数据对比

Table 8　Simulation results of components compared with thermal equilibrium experiment and one-year flight temperature data in orbit

部件名称	仿真温度/℃	热平衡实验温度/℃		在轨一年温度/℃	温度判定是否正常
		转移轨道	地球静止轨道		
电路箱1	−10.4～−0.6	−16.1	−16.1～0.1	−12.3～−1	正常
电路箱2	−0.2～11.7	−2.3	10.3～10.3	3.8～11	正常
制冷机压缩机	−34.4～−29.8	−34.6	−30.5～−30.7	−34.9～−28.2	正常
制冷机脉管	−35.5～−18.4	−28.9	−43～−19.7	−43.2～−19.9	正常

3　OSR 太阳吸收比计算结果

选取散热面上制冷机短波脉管热管附近温度 T_1 在轨数据作为比对, 结合 Sensor01 仿真模型, 得到 OSR 涂层的 α_s 每年的退化规律如图 3 所示。地面实验测试初期, OSR 的 α_s 为 0.1, Sensor01 发射第 1 年后 OSR 的 α_s 变为 0.125, 在轨 2 年后 α_s 为 0.134, 7 年后变化为 0.175, 退化曲线呈线性特征, 每年退化率约为 0.74%, 预测 10 年后 α_s 为 0.195。地球静止轨道具有较复杂的紫外辐照及电子质子辐照, 原子氧影响较小, 在轨数据显示地球静止轨道综合环境效应导致 OSR 太阳吸收比逐年升高, 显示“色心”及“中心缺陷”的逐年累计, 印证了该 OSR 太阳吸收比衰退理论。

线性拟合得到 OSR 的 α_s 随在轨时间 t 的关系为

$$\alpha_s = 0.128 + 0.007\,43t \tag{1}$$

式中: α_s 为 OSR 太阳吸收比; t 为在轨时间, 年。卫星热分析设计时, 如散热板的设计时, 可以根据该线性关系, 合理设计寿命期内所需散热板的面积, 避免过大设计冗余, 降低航天器的发射成本。

对比 Sensor 01～Sensor04 散热板最高温度趋势变化如图 4 所示。由于太阳外热流照射一致, 散热面的温度变化主要与内部热源及 OSR 太阳吸收比有关。根据拟合结果, 可以预测 Sensor01～Sensor04

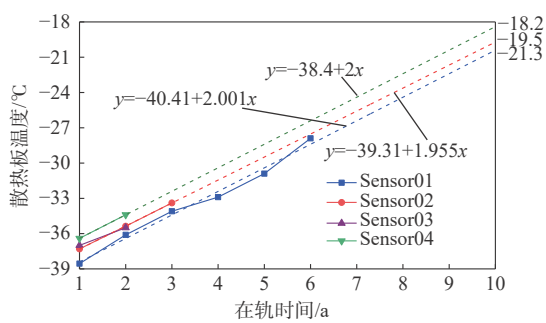


图 4　Sensor01～Sensor04 相机上散热面在冬至最高温度随在轨时间的变化及预测

Fig. 4　Maximum temperature and future prediction of heat sink temperature with on-orbit time

制冷机散热面在轨10年最高温度分别为−21.3 ℃、−19.5 ℃、−19.5 ℃及−18.2 ℃

4 结 论

本文对Sensor01相机及其同系列相机Sensor02～Sensor04相机粘贴导电型铈玻璃镀银OSR热控涂层的散热板进行温度数据搜集，并对散热板及其周围环境进行热仿真，根据仿真模型及以往卫星在轨数据，得到了导电型铈玻璃镀银OSR太阳吸收比α_s退化数据及计算公式，印证了OSR太阳吸收比退化累计机理。得到结论如下：

1）地面初期测试时，导电型铈玻璃镀银OSR的α_s为0.1，发射第1年α_s为0.125，在轨2年后α_s退化为0.134，预测10年后α_s为0.195。

2）结合变化曲线，预测Sensor01～Sensor04相机制冷机散热面在轨10年最高温度分别为−21.3 ℃、−19.5 ℃、−19.5 ℃及−18.2 ℃，满足相机10年使用寿命。

3）地球静止轨道紫外辐照及电子质子辐照影响明显，OSR太阳吸收比逐年升高，显示“色心”及“中心缺陷”的逐年累计。但是，电子或原子的空位缺氧最终会趋于饱和，使太阳吸收比稳定。目前在轨7年数据未观测到OSR太阳吸收比的稳定点，还需继续对在轨数据进行搜集并分析。

参考文献（References）

[1] 沈自才, 赵春晴, 冯伟泉, 等. 近紫外辐照对OSR二次表面镜导电性能影响研究[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 438-440.
Shen Z C, Zhao C Q, Feng W Q, et al. Influence of near ultraviolet irradiation on the electrical property of OSR second surface mirror [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5): 438-440 (in Chinese).

[2] 许阳晨, 张群. 射频磁控溅射工艺参数对掺钨氧化铟锡透明导电薄膜性能的影响[J]. 复旦学报 (自然科学版), 2024, 63(2): 169-177.
Xu Y C, Zhang Q. Effects of process parameters on the properties of W-doped ITO transparent conductive thin films prepared by RF magnetron sputtering[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2024, 63(2): 169-177(in Chinese).

[3] 常天海. 掺铈玻璃型二次表面镜热控性能稳定性研究[J]. 上海航天, 2003, 20(2): 48-51.
Chang T H. Study on the space stability of thermal-control performances of glass adulterated with cerium type of second surface mirror[J]. Aerospace Shanghai, 2003, 20(2): 48-51(in Chinese).

[4] 章俞之, 吴岭南, 曹韫真, 等. 铈玻璃镀银二次表面镜不同入射角的太阳反射率初步研究[C]//中国空间科学学会空间材料专业委员会学术交流会论文集. 长沙: 中国空间科学学会, 2009: 20-24.
Zhang Y Z, Wu L N, Cao Y Z, et al. Preliminary study on solar reflectance of silver-coated cerium glass second surface mirrors at different incident angles[C]//Proceedings of the Academic Exchange Conference of the Space Materials Professional Committee, Chinese Society of Space Science. Changsha: Chinese Society of Space Science, 2009: 20-24(in Chinese).

[5] 赵振明, 王兵, 高娟. 地球静止轨道凝视型相机热分析与热设计[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(3): 34-40.
Zhao Z M, Wang B, Gao J. Preliminary research on the thermal design methods of the geosynchronous orbit staring camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(3): 34-40(in Chinese).

[6] 丁义刚. 空间综合环境对航天器热控涂层性能退化效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
Ding Y G. Investigation of space combined environment degradation effect on spacecraft thermal control coatings[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005(in Chinese).

[7] 黄本诚, 童靖宇. 空间环境工程学[M]. 北京：中国科学技术出版社, 2010.
Huang B C, Tong J Y. Space environmental engineering[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010(in Chinese).

[8] 赵印中, 李林, 许旻, 等. 玻璃型镀铝二次表面镜的模拟空间环境辐照试验研究[J]. 真空与低温, 2011, 17(4): 213-217.
Zhao Y Z, Li L, Xu M, et al. Space environmental simulation irradiation tests of aluminized glass second surface mirrors[J]. Vacuum and Cryogenics, 2011, 17(4): 213-217(in Chinese).

[9] 冯伟泉, 丁义刚, 闫德葵, 等. 地球同步轨道长寿命卫星热控涂层太阳吸收率性能退化研究[J]. 中国空间科学技术, 2005, 25(2): 34-40.
Feng W Q, Ding Y G, Yan D K, et al. Study on long-term degradation of solar absorptance properties of geostationary satellite thermal control coatings[J]. Chinese Space Science and Technology, 2005, 25(2): 34-40(in Chinese).

[10] 章俞之, 曹韫真, 吴岭南, 等. 几种热控涂层的真空-紫外辐照试验[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 126-131.
Zhang Y Z, Cao Y Z, Wu L N, et al. Ultraviolet irradiation tests of some thermal control coatings in vacuum[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(2): 126-131(in Chinese).

[11] Pippin H G. Materials on the international space station-6 (MISSE-6): FA9550-05-2-0001[R]. Amsterdam: Elsevier Inc., 2006.

[12] Finckenor M M , Zwiener J M , Alvis A , et al. Thermal control materials on MISSE-6 with comparison to earlier flight data[C]//Proceedings of the National Space and Missile Materials Symposium. Scottsdale: NSMMS, 2010.

[13] Pippin G. Space environments and induced damage mechanisms in materials[J]. Progress in Organic Coatings, 2003, 47(3-4): 424-431.

[14] Stein B A. LDEF materials overview[C]//Proceedings of the Second LDEF Post-Retrieval Symposium Abstracts. Washington, D. C. : NASA, 1992.

[15] 王磊, 满广龙. 热控涂层搭载飞行试验进展综述[J]. 航天器工程, 2012, 21(2): 108-113.
Wang L, Man G L. Review of thermal control coatings flight test[J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(2): 108-113(in Chinese).

Analysis of solar absorptance degradation of OSR in geostationary orbit

WEN Jiajia[1], XIE Rongjian[1,*], ZHONG Siyuan[1], CHENG Jinming[1,2], CHEN Fansheng[1]

(1. Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: **Objective** Optical solar reflector (OSR) exhibit a very low absorptance-emittance ratio, ensuring stability and high performance in space applications. They efficiently aid in cooling or heat dissipation when attached to the exterior of radiative cooling panels. Understanding the impact of space environment on the OSR and the degradation mechanisms of their thermal control properties is crucial for designing long-lasting thermal control systems. Through analysis of temperature data from cameras onboard four satellites operating in geostationary orbit for 7 years, 4 years, 3 years, and 2.5 years, coupled with thermal simulation analysis models, the degradation model of the OSR solar absorptance solar absorptance is obtained. The deterioration model of the OSR solar absorptance solar absorptance is derived by analyzing temperature data from cameras on four satellites that have been in geostationary orbit for seven, four, three, and two and a half years. This data is combined with thermal simulation analysis models. The results reveal that the solar absorptance of the OSR were 0.125 in the first year of operation, degraded to 0.134 after 2 years in orbit, and changed to 0.175 after 7 years, with the degradation curve exhibiting linear characteristics and an annual degradation rate of approximately 0.74%. Additionally, based on this degradation model, the solar absorptance is predicted to be 0.195 after 10 years. OSR has strong spatial adaptability and stability and the results of this article offering guidance for subsequent in-orbit temperature control and new thermal control system designs.

Keywords: geostationary orbit; space environment effects; optical solar reflector; solar absorptance; degradation rate

Received: 2024-05-17; **Accepted**: 2024-09-06; **Published Online**: 2024-11-07 10:59
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241106.1653.006
* **Corresponding author**. E-mail: xierongjian@mail.sitp.ac.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0325

卫星数字孪生模型多粒度协商修正方法

伍学谦[1]，董云峰[1,*]，李智[2]
(1. 北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191；2. 北京空间飞行器总体设计部，北京 100094)

摘 要：受不确定性影响，数字孪生模型与真实系统存在误差，需要对其进行修正，定量评估模型的不确定性，作为使用模型时选取的依据。但是卫星数字孪生模型具有多动态、多空间尺度、多物理场耦合的特性，数值求解时会出现微分方程的刚性问题和偏微分方程的多尺度问题，如果从系统级上对众多遥测参数同时进行修正会造成结果不收敛。提出一种卫星数字孪生模型的多粒度协商修正框架。通过遥测参数的相关性和频域特征分析对参数进行分组。建立卫星各子系统和部件不同粒度的模型，按需构建多粒度数字孪生模型。研究了卫星不同层次组成结构之间的耦合关系，提出协商修正方法。利用真实在轨遥测数据对框架进行验证，研究结果表明：所提方法较未使用的均方根误差精度提升了50%以上，修正结果更具备系统性、完备性。

关 键 词：数字孪生；模型修正；聚类；多粒度建模；协商修正
中图分类号：V448.25+3
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2440-14

工业4.0是以智能制造为主导的第4次工业革命，其核心是采用先进的信息物理系统将生产过程数字化和智能化，从而显著提高生产效能和产品质量。数字孪生是工业4.0的关键技术之一，其不仅要在数字世界建立物理实体的高保真映射模型，而且还要具备在全生命周期随实物动态演化的能力。数字孪生能够对物理实体进行实时监测及分析，实现精准优化和控制，为基于模型的管理实践和决策分析提供了强大的工具，有利于取代传统高成本、高风险的物理试验。数字孪生源自美国阿波罗计划，如今其在航空航天领域发挥着越来越重要的作用[1-2]。

受到加工误差、环境扰动、测量误差、认知不准等因素的存在[3]，数字孪生模型不可避免地会存在偏差，通过真实数据来修正模型，实现虚实融合，是构建数字孪生的必要环节。模型和真实系统之间差异可以用不确定性来度量，不同粒度模型的不确定性也不同，因此，模型修正的目标不仅是提高模型精度，还要量化不确定性大小，从而决定可以取代什么样的物理实验[4]。2017年，斯坦福等研究团队在量化物理系统的不确定性(enabling quantification of uncertainty in physics systems, EQUiPS)项目中提出执行不确定性量化和不确定性下设计的综合计划，为复杂多学科系统的鲁棒性和可靠性设计提供了重要基础[5]。模型修正技术在结构有限元[6-7]、热控[8-9]、动力学与控制[10-11]、性能评估[12]等诸多领域都得到了研究和应用。

经过多年的发展，学者提出并改进了最小二乘[13-14]、滤波[15-17]、粒子群[18]、遗传算法[19]等许多模型修正算法，但是这些算法大多是针对局部或解耦的模型。卫星系统具有复杂性、庞大性和高度综合性的特点，建立完整的卫星数字孪生模型必须包含环境、卫星各个子系统及部件模型，只用简化模型会导致修正精度不足。卫星仿真模型是用常微分方程组和偏微分方程组描述的，具有多动态、多空间尺度和多物理场耦合特点。多动态是指卫星状

收稿日期：2024-05-16；录用日期：2024-08-04；网络出版时间：2024-08-16 15:38
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240816.1303.001
*通信作者. E-mail：sinosat@buaa.edu.cn

引用格式：伍学谦，董云峰，李智. 卫星数字孪生模型多粒度协商修正方法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2440-2453.
Wu X Q，Dong Y F，Li Z. Multi-granularity and negotiation model updating method for satellite digital twin[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2440-2453 (in Chinese).

态参数的变化周期不一样, 大到年为周期, 如性能参数退化, 小到微秒为周期, 如微振动。多空间尺度是指参数变化发生在不同空间尺度, 如外热流发生在天体尺度, 姿态控制在整星尺度, 陀螺轴承摩擦在微观尺度。在求解方程组的数值解时, 会出现微分方程的刚性问题和偏微分方程的多尺度问题。如果同时对整个系统、全生命周期的模型进行修正, 会造成结果不能收敛, 给模型修正带来挑战。

在复杂模型修正问题中, 有的学者采用了分层的策略进行修正。He 等研究了高温环境下机翼结构有限元模型修正问题, 将温度场模型和结构动力学模型分成 2 个阶段修正, 用温度场的修正结果为结构动力学修正提供热载荷参数[20]。Fei 等提出一种复杂装配结构有限元模型的分层更新策略, 将多参数、高度非线性的结构分解多个少参数、非线性程度较小的子结构, 并对这些子结构进行建模和修正[21]。但是从全系统级别对卫星进行修正还缺少研究。此外, 使用的模型如果粒度很细, 模型复杂度过高, 数值求解过程效率低且容易发散, 带来过拟合问题。而模型粒度太粗, 复杂度过低, 状态参数的变化规律不能被充分描述, 会导致模型精度无法进一步提升, 带来欠拟合问题。单一粒度的模型很难在修正时同时保持高精度和高效率。

针对上述问题, 本文提出一个卫星数字孪生模型多粒度协商修正框架。将遥测参数的周期和相关系数作为距离评价指标, 通过聚类算法得到最优的参数分组方案。将卫星子系统部件模型划分为不同粒度, 并建立了遥测参数与模型粒度之间的隶属度函数关系, 对每组遥测参数分别建立不同粒度组合的卫星模型, 实现按需建模。通过计算遥测参数和模型之间的相关度, 选取协商参数加入修正过程中。最后对各组分别进行修正, 实现全子系统模型的修正。

1　模型修正问题描述

卫星的状态量和遥测量的变化可以用如下方程描述:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x}, t) \\ \boldsymbol{y} = g(\boldsymbol{x}, t) \\ \boldsymbol{x}(t_0) = \boldsymbol{x}_0 \end{cases} \tag{1}$$

式中: t为时间; $\boldsymbol{x}$为状态量, 维度为n; $\boldsymbol{y}$为观测量, 维度为m; $\boldsymbol{x}_0$为初始时刻的状态量; $f(\cdot)$和$g(\cdot)$分别为状态方程和观测方程。完整的卫星状态模型和观测模型包括卫星环境、姿轨控子系统、电源子系统、热控子系统、推进子系统、载荷子系统、测控子系统等, 环境包括地球和空间环境, 每个子系统又由各种设备、结构、零件等组成, 环境与星上的部件相互作用, 形成了机电热光磁辐射的多物理场耦合系统。卫星的状态经敏感器测量、星载计算机处理、测控系统下传, 得到的遥测量有上百甚至上千种之多, 不同的运行阶段也表现出不同的动态特征, 典型的卫星遥测量如表 1 所示。

表 1　典型卫星遥测参数

Table 1　Typical satellite telemetry parameters

子系统	典型遥测量
姿轨控子系统	星上时间, 地球惯性系下轨道位置、速度, 星敏测量四元数, 陀螺测量角速度, 太敏测量太阳角, 地敏测量姿态角, 磁强计测量值, 飞轮测量转速, 飞轮控制指令, 磁力矩器指令, 推力器及各种部件的开关指令, 飞行控制模式, 帆板转角等
电源子系统	帆板、母线、负载、蓄电池的开关状态、电压、电流, 充放电调节器、分流器、电源控制器、配电器等工作状态等
推进子系统	氧化剂贮箱、燃料箱、高压气瓶的压强、流量, 各种阀门的开关指令等
热控子系统	各个节点测温敏感器的温度测量值, 温控敏感器状态, 加热器状态等
测控子系统	信噪比, 伪距, 载波多普勒值, 通信状态, 通信数据等
载荷子系统	相机开关, 拍照数据等

在给定时间范围$t \in [t_0, t_f]$内(其中, t_f表示终止时刻), 已知对第i个遥测量$\boldsymbol{y}_i$有遥测数据序列$\boldsymbol{y}_i^{\text{tele}} = [y_i^{\text{tele}}(t_0), y_i^{\text{tele}}(t_1), \cdots, y_i^{\text{tele}}(t_f)]$, 模型输出仿真值序列$\boldsymbol{y}_i^{\text{sim}} = [y_i^{\text{sim}}(t_0), y_i^{\text{sim}}(t_1), \cdots, y_i^{\text{sim}}(t_f)]$, 遥测量$\boldsymbol{y}_i$在任意时刻$t_k$的遥测值和仿真值按下式进行归一化处理:

$$\bar{y}_i(t) = \frac{y_i(t) - y_{i,\min}}{y_{i,\max} - y_{i,\min}} \tag{2}$$

式中: $y_{i,\min}$和$y_{i,\max}$分别为遥测量$\boldsymbol{y}_i$在$[t_0, t_f]$内的最小值和最大值。

模型修正的目标是通过调整各状态量的初始值$\boldsymbol{x}_0$, 使得归一化后的仿真值与遥测值的均方根误差(root mean square error, RMSE)R_{MSE}最小, 即

$$\min_{\boldsymbol{x}_0} R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=0}^{f}\left(\bar{y}_i^{\text{sim}}(t_k) - \bar{y}_i^{\text{tele}}(t_k)\right)^2}{m(f+1)-1}} \tag{3}$$

2　卫星数字孪生模型多粒度协商修正框架

卫星数字孪生模型多粒度协商修正框架包含 4 个部分, 分别是遥测参数分组、构建多粒度卫星模型、确定协商参数及按组进行参数修正。首先, 对遥测参数进行相关性分析和频域分析, 计算相关系数和变化周期, 加权合成为距离参数, 利用基于密度的带噪声空间聚类(density-based spatial clustering

of applications with noise, DBSCAN)算法对参数聚类,得到最优分组。其次,按照功能级、原理级和型号级建立不同粒度的卫星部件模型,建立遥测参数与这些模型粒度之间的隶属度函数,作为修正模型粒度的选择依据。然后,计算遥测参数和模型状态参数的相关系数,得到遥测参数和模型之间的距离,并选择与多个模型都接近的遥测参数作为组间协商参数。最后,每组用最小二乘法依次修正,直到满足停止迭代条件。在实际应用场景中,需要按照固定周期对卫星状态进行测量,结合上一周期的控制策略和实际飞行参数对策略进行评估,对未来的控制参数进行修正,制定下一周期的策略并上注给卫星。模型修正框架和应用流程如图1所示。

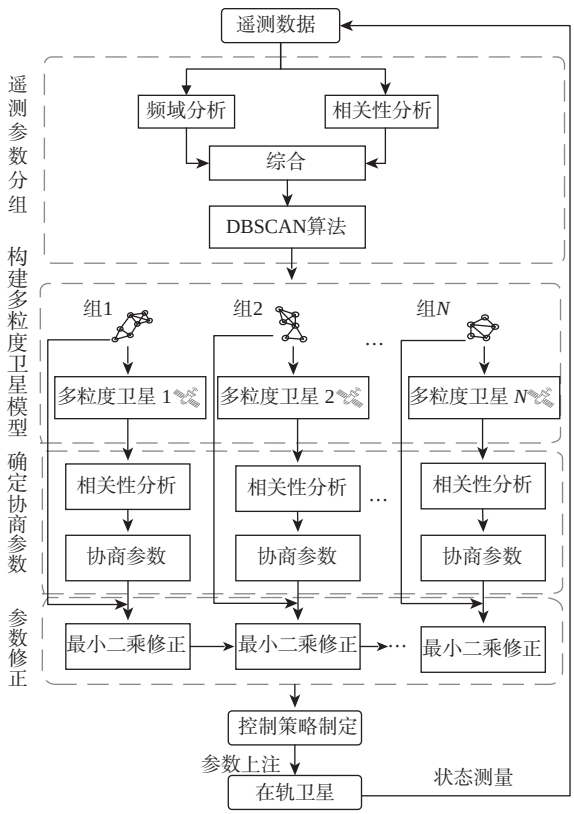


图1 卫星数字孪生模型多粒度协商修正框架和应用

Fig. 1 Framework and application of multi-granularity and negotiation model updating method for satellite digital twin

2.1 遥测参数分组方法

对$y_i(t)$序列做傅里叶变换:

$$y_i(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{N}(a_n\cos(n\omega_i t)+b_n\sin(n\omega_i t)) \tag{4}$$

式中:a_0为常值分量;a_n和b_n分别为余弦和正弦分量的幅度;n为级数的展开阶数;N为最大阶数;ω_i为$y_i(t)$序列的基频。各项详细计算过程见文献[22]。选择拟合后均方根误差首次达到10%以内时阶数n对应的角频率$n\omega_i$作为$y_i(t)$的最高频率,则参数$y_i(t)$最小周期为

$$T_i=2\pi/(n\omega_i) \tag{5}$$

获得所有遥测参数的周期后,进行归一化处理:

$$\overline{T}_i=\frac{T_i-T_{\min}}{T_{\max}-T_{\min}} \tag{6}$$

式中:$T_{\max}=\max\{T_1,T_2,\cdots,T_m\}$为最大周期;$T_{\min}=\min\{T_1,T_2,\cdots,T_m\}$为最小周期。

遥测量$y_i(t)$和$y_j(t)$之间周期性的差异通过做差表示:

$$T_{ij}=\left|T_i-T_j\right| \tag{7}$$

$\boldsymbol{y}_i$和$\boldsymbol{y}_j$之间的相关系数计算如下:

$$\rho_{ij}=\left|\frac{\sum_{k=0}^{f}(y_i(t_k)-Y_i)(y_j(t_k)-Y_j)}{\sqrt{\sum_{k=0}^{f}(y_i(t_k)-Y_i)^2}\sqrt{\sum_{k=0}^{f}(y_j(t_k)-Y_j)^2}}\right| \tag{8}$$

式中:Y_i表示这段时间内变量$\boldsymbol{y}_i$序列的均值,计算式为

$$Y_i=\frac{1}{f+1}\sum_{k=0}^{f}y_i(t_k) \tag{9}$$

分组前需要综合周期性和相关性2个特征来度量变量之间的“距离”,通过对2个特征加权进行计算:

$$d_{ij}=w_1T_{ij}+(1-w_1)(1-\rho_{ij}) \tag{10}$$

式中:w_1为加权系数。距离越小,则2个变量之间关系越紧密,越优先聚在同一组内。

通过DBSCAN算法进行聚类,将d_{ij}当作聚类时的距离指标,设置一个距离的邻域范围ε,聚类算法会将距离小于ε的参数都聚成一组,算法如下[23]。

输入:样本集$D=\{\boldsymbol{y}_1,\boldsymbol{y}_2,\cdots,\boldsymbol{y}_m\}$,聚类半径$\varepsilon$,最小聚集数$P_{\min}$。

1. 初始化核心对象集合:$\Omega=\varnothing$;
2. for $j=1,2,\cdots,m$ do
3. 确定样本$\boldsymbol{y}_j$的ε邻域$N_\varepsilon(\boldsymbol{y}_j)$;
4. if $\left|N_\varepsilon(\boldsymbol{y}_j)\right|\geqslant P_{\min}$ then
5. 将样本$\boldsymbol{y}_j$加入核心对象集合:$\Omega=\Omega\cup\{\boldsymbol{y}_j\}$
6. end if
7. end for
8. 初始化聚类簇数:$k=0$;
9. 初始化未访问的样本集合:$\Gamma=D$;
10. while $\Omega\neq\varnothing$ do
11. 记录当前未访问的样本集合:$\Gamma_{\text{old}}=\Gamma$;
12. 随机选取一个核心对象$o\in\Omega$,初始化队列$Q=<o>$
13. $\Gamma=\Gamma\backslash\{o\}$;

14. while $Q \neq \varnothing$ do

15. 取出队列Q中的首个样本q;

16. if $|N_\varepsilon(q)| \geqslant P_{\min}$ then

17. 令$\Delta = N_\varepsilon(q) \cap \Gamma$;

18. 将Δ中的样本加入队列 Q;

19. $\Gamma = \Gamma \backslash \Delta$

20. end if

21. end while

22. $k = k + 1$,生成聚类簇$C_k = \Gamma_{\text{old}} \backslash \Gamma$

23. $\Omega = \Omega \backslash C_k$

24. end while

输出: 簇划分$C = \{C_1, C_2, \cdots, C_k\}$。

最终聚类算法将特征最接近的参数分到同一组中。

2.2　多粒度建模与粒度选取方法

卫星由姿轨控、电源、推进、热控等多个子系统组成, 每个子系统又由各种部件组成。多粒度卫星仿真模型是指由多个不同粒度的子部分组成的系统。根据文献 [4], 卫星的子系统部件模型由粗到细可以分成功能级模型、原理级模型和型号级模型。功能级模型只关注各部件的输入输出, 不考虑部件具体的工作原理和实现过程, 各部件独立执行功能, 状态之间互不影响, 状态量能反映部件功能和性能的整体变化趋势, 不关心细节处的变化。原理级模型需要能够反映部件工作的规律, 能够模拟部件工作时物理、信息、能量变化, 不同部件之间会存在耦合。对于最细粒度的型号级模型, 其工作原理和电信接口都要和真实的部件保持一致。本文对卫星各子系统及其部件划分的粒度也是按该粒度划分, 每种部件在不同粒度下的动态特性、空间尺度特性和耦合特性都不同。

有了粒度的划分, 在修正参数时模型就有了多种选择。模型的粒度和每组内将要修正的遥测量有关。根据遥测参数所属的子系统或部件, 建立对应遥测参数-模型的隶属度函数, 如表 2 所示。

表中的数值为隶属度值, 划分为 1、0.5、0 这 3 个档。1 表示当前变量很大程度上由该子系统决定, 如果要修正需要尽可能建立细粒度的模型。

表 2　遥测参数-模型粒度隶属度

Table 2　Membership functions of telemetry parameters and model granularity

变量	隶属度值		
	姿轨控子系统	电源子系统	热控子系统
位置,速度,姿态角,角速度	1	0	0
飞轮转速	1	0	0
帆板输出电流, 蓄电池电压, 充放电电流	0.5	1	0.5
帆板温度	0.5	0	1

0.5 表示变量会受到对应子系统中某些变量的影响, 可以选择粒度适中的模型。0 表示变量几乎不受该子系统的影响, 建模时选择粗粒度模型就能满足。在使用上述隶属度表时, 先将每组的遥测参数按照表 2 查询对应模型粒度取值。如果有多个变量, 则按隶属度值高的进行建模。

2.3　协商参数选取方法

从建模过程可知, 对任一多粒度卫星模型, 只有一部分模型输出的遥测变量和真实遥测参数一致, 定义为直接遥测参数, 使用直接遥测参数对相关模型修正。这颗卫星模型其他组成部分不是主要研究对象, 输出的遥测参数定义为抽象遥测参数。抽象遥测参数对应着除当前组之外的其他所有真实遥测参数, 可能和原物理含义一致, 也可能是原遥测参数的统计参数。直接遥测量和抽象遥测量一起覆盖了所有遥测参数。每组数字卫星模型一旦确定, 卫星的状态参数$\boldsymbol{x}$也就确定了。

通过计算遥测参数$\boldsymbol{y}_i$和卫星仿真模型$\boldsymbol{M}_j$之间的距离来确定协商参数, 计算过程如图 2 所示。

计算真实遥测参数$\boldsymbol{y}_i$和某一粒度下的卫星仿真模型$\boldsymbol{M}_j$的状态参数$x_{j,k}$之间的相关系数, 定义遥测参数到数字卫星的距离:

$$d(\boldsymbol{y}_i, \boldsymbol{M}_j) = 1 \Big/ \sum_{x_k \in \boldsymbol{M}_j} \left|\rho(\boldsymbol{y}_i, x_{j,k})\right| \tag{11}$$

式中: j为卫星模型的序号; k为状态参数的序号。

给定卫星状态初值的范围$x_{j,k}(t_0) \in [x_{j,k,\min}, x_{j,k,\max}]$, 不同参数的取值范围不同。对每个状态参数, 从各自的范围内随机取值, 组合起来可以形成一组工

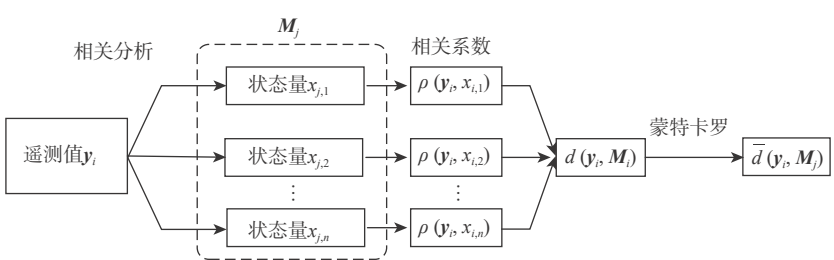


图 2　遥测量与数字卫星之间距离计算

Fig. 2　Calculation of distance between telemetry parameters and digital satellite model

况，利用式(11)可以计算一个距离。利用蒙特卡罗法，多次随机取值并组合可形成多个工况，计算多组距离值，求所有工况得到的$d(\boldsymbol{y}_i,\boldsymbol{M}_j)$的均值作为最终距离度量：

$$\bar{d}(\boldsymbol{y}_i,\boldsymbol{M}_j)=\sum_{l=1}^{L}d_l(\boldsymbol{y}_i,\boldsymbol{M}_j) \tag{12}$$

式中：l为样本序号；L为样本总数。

随着采样个数的增加，$\bar{d}(\boldsymbol{y}_i,\boldsymbol{M}_j)$会逐渐收敛于一稳定值，稳定后采样结束。

该距离反映了卫星状态参数和遥测量之间的耦合关系，值越小，耦合作用越强。当$\boldsymbol{y}_i$只有到一个数字卫星的距离显著大于到其他数字卫星的距离时，则认为当前数字卫星模型足够代表这部分遥测参数，单独修正这颗数字卫星即可。如果有2个及以上的距离都处于同一量级的水平，意味着有多个数字卫星和该遥测参数相关，只用一个数字卫星修正还不够，需要多组卫星都对其进行修正，这些遥测量即为协商参数。

2.4 最小二乘修正

遥测参数分组后，每组的参数采用最小二乘法求最优状态初值。记第k组的状态量与遥测量组合为$\boldsymbol{x}^{(k)}$与$\boldsymbol{y}^{(k)}$，最小二乘优化目标为

$$\min_{\boldsymbol{x}_0^{(k)}}R_{\mathrm{MSE}}(k)=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=0}^{f}\left(\bar{y}_j^{(k),\mathrm{sim}}(t_i)-\bar{y}_j^{(k),\mathrm{tele}}(t_i)\right)^2}{m(f+1)-1}} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{x}_0^{(k)}$表示该时间段初始时刻的状态值，是直接调整的参数。对于非线性模型通常采用牛顿迭代法求最小二乘解，即首先给定$\boldsymbol{x}_0^{(k)}$的初始值$\boldsymbol{x}_0^{(k,0)}$，此时各仿真值为$\boldsymbol{y}^{(k,0),\mathrm{sim}}$，归一化后为$\bar{\boldsymbol{y}}^{(k,0),\mathrm{sim}}$。计算仿真值与遥测值的误差：

$$\Delta\boldsymbol{y}=\bar{\boldsymbol{y}}^{(k),\mathrm{tele}}-\bar{\boldsymbol{y}}^{(k,0),\mathrm{sim}} \tag{14}$$

然后，求$\boldsymbol{y}$关于$\boldsymbol{x}$在该点的偏导数矩阵$\boldsymbol{H}$，其中，$\boldsymbol{y}$同样需要进行归一化处理：

$$\boldsymbol{H}=\left[\begin{array}{cccc}\dfrac{\partial\bar{y}_1}{\partial x_1} & \dfrac{\partial\bar{y}_1}{\partial x_2} & \cdots & \dfrac{\partial\bar{y}_1}{\partial x_n}\\ \dfrac{\partial\bar{y}_2}{\partial x_1} & \dfrac{\partial\bar{y}_2}{\partial x_2} & \cdots & \dfrac{\partial\bar{y}_2}{\partial x_n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \dfrac{\partial\bar{y}_m}{\partial x_1} & \dfrac{\partial\bar{y}_m}{\partial x_2} & \cdots & \dfrac{\partial\bar{y}_m}{\partial x_n}\end{array}\right]\Bigg|_{\boldsymbol{x}_0^{(k,0)}} \tag{15}$$

$\boldsymbol{x}$的迭代式为

$$\boldsymbol{x}_0^{(k,1)}=\boldsymbol{x}_0^{(k,0)}+\left(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\right)^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{y} \tag{16}$$

循环式(13)～式(16)直到均方根误差小于阈值δ：

$$R_{\mathrm{MSE}}(k)<\delta \tag{17}$$

3 本文案例

本文采用在轨卫星“瓢虫一号”的遥测数据用于模型修正框架验证，卫星的基本信息如图3所示。“瓢虫一号”卫星是一颗小型的技术与通信卫星，2018年12月7日由长征-2D发射入轨，发射质量为100 kg，轨道类型为太阳同步轨道，近地点为531 km，远地点为550 km，轨道倾角为97.63°。

“瓢虫一号”卫星系统组成和初始工况参数分别如表3和表4所示。

待修正的遥测量和对应要调整的状态量如表5所示。

根据式(4)和式(5)，遥测数据的频域分析结果如下。以偏航角变化为例，随时间变化过程如图4(a)所示，用傅里叶拟合得到拟合均方根误差精度随阶数的关系如图4(b)所示。由图4(b)可知，当阶数在8时均方根误差降到10%以下，此时计算对应的周期约为716 s。按此过程得到每个遥测参数的周期值，统计如图5所示。可以看到，卫星轨道位置、速度变化周期在小时级别，电源有关参数及温度受地影和光照的影响，周期和轨道周期一致。而姿态角、角速度属于姿态控制

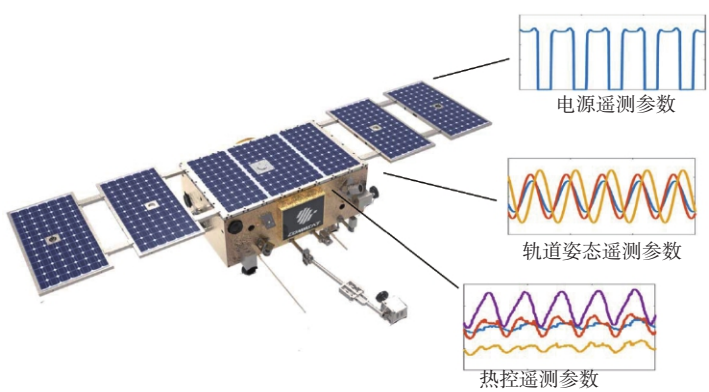


图3 瓢虫一号卫星

Fig. 3 Ladybird 1 satellite

表 3　瓢虫一号卫星系统组成

Table 3　System composition of Ladybird 1 satellite

系统组成	内容
姿轨控子系统	陀螺, 星敏, 太敏, 磁强计, 飞轮, 磁力矩器, 控制器
电源子系统	太阳帆板, 蓄电池, 各种用电部件
热控子系统	壁板, 加热器, 各种发热部件

表 4　瓢虫一号卫星工况参数

Table 4　Initial values of Ladybird 1 satellite

轨道六要素	姿态	初始时刻
{6 908 636 m, 0, 97.84°, 53.4°, 271°, 30° }	{−80.5°, 179.7°, 111.6°}	2018-12-07 13:00:02

表 5　待修正的遥测量和状态量

Table 5　Telemetry parameters and state parameters to be updated

遥测量	状态量
轨道位置、速度、姿态角、角速度、飞轮转速、帆板输出电流、蓄电池电压、充放电电流、飞轮电压、帆板温度	轨道位置初值、速度初值、姿态角初值、角速度初值、飞轮转速初值、飞轮电机电压初值、帆板光电转换因子、帆板温度补偿系数、电池充电系数和放电系数、蓄电池电池额定充放电电压、帆板初始温度

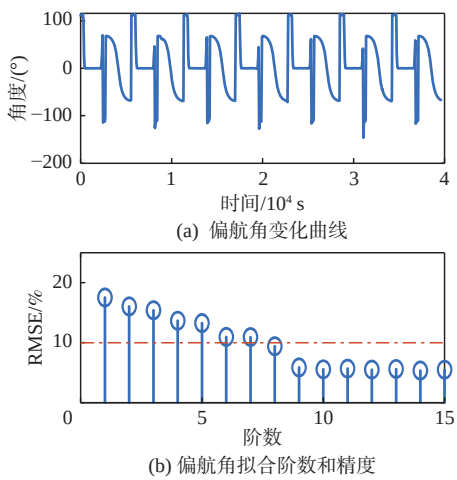


图 4　偏航角变化和拟合精度

Fig. 4　Yaw angle variation with time and its fitting accuracy

相关参数, 属于短周期变化的参数。飞轮转速则属于中等长度周期变化。

遥测参数周期性差异如图 6 所示。图中, 颜色越深, 表示变量的周期越接近。

遥测参数相关性分析结果如图 7 所示。图中, 颜色越深, 表示变量的相关程度越大。

将周期差和 1−相关系数分别取 $w_1 = 0.5$ 加权后得到的距离如图 8 所示, 图中, 颜色越深表示变量相似程度越高。

取不同的加权系数 w_1 和聚类半径 ε, 可以得到不同的分组方案。比较不同方案下, 用相同粒度的卫星模型对遥测量进行修正, 统计总遥测参数修正后的均方根误差, 如图 9 所示。

其中, 分组个数为 4 是最优聚类, 此时 $\varepsilon = 0.3$,

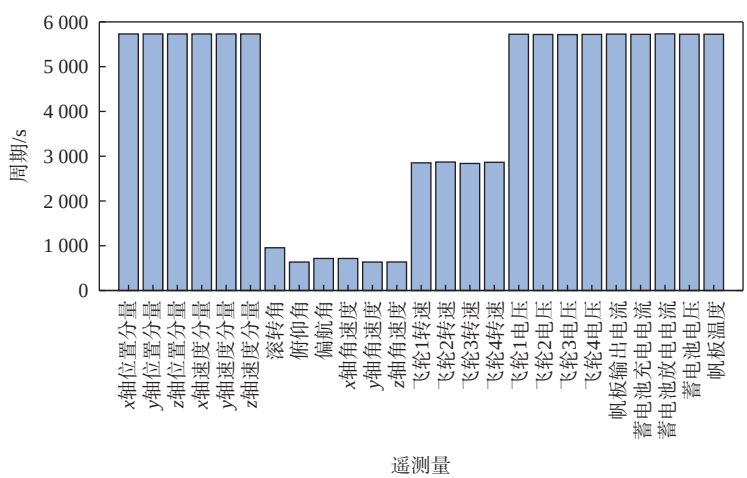


图 5　遥测参数周期值

Fig. 5　Periods of telemetry parameters

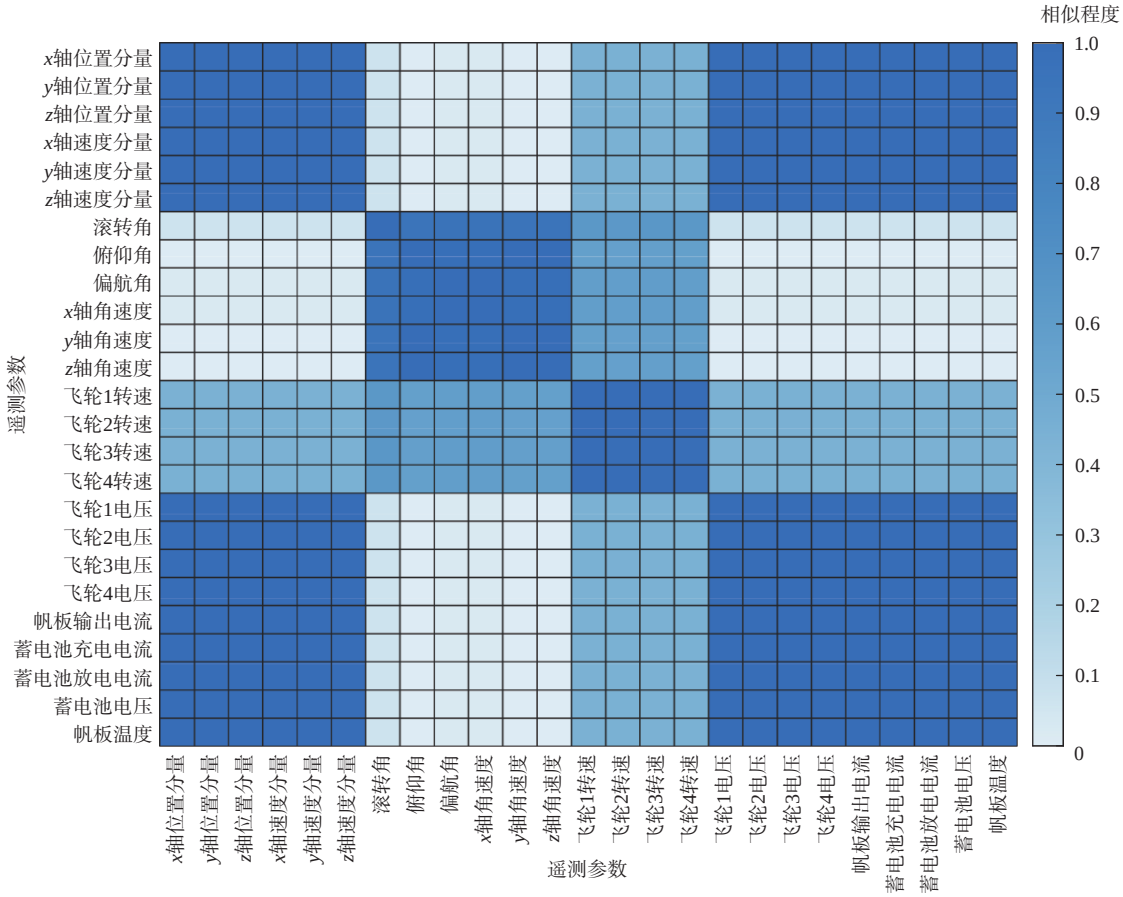


图6 遥测参数周期差异热图

Fig. 6 Heat map of telemetry parameters period difference

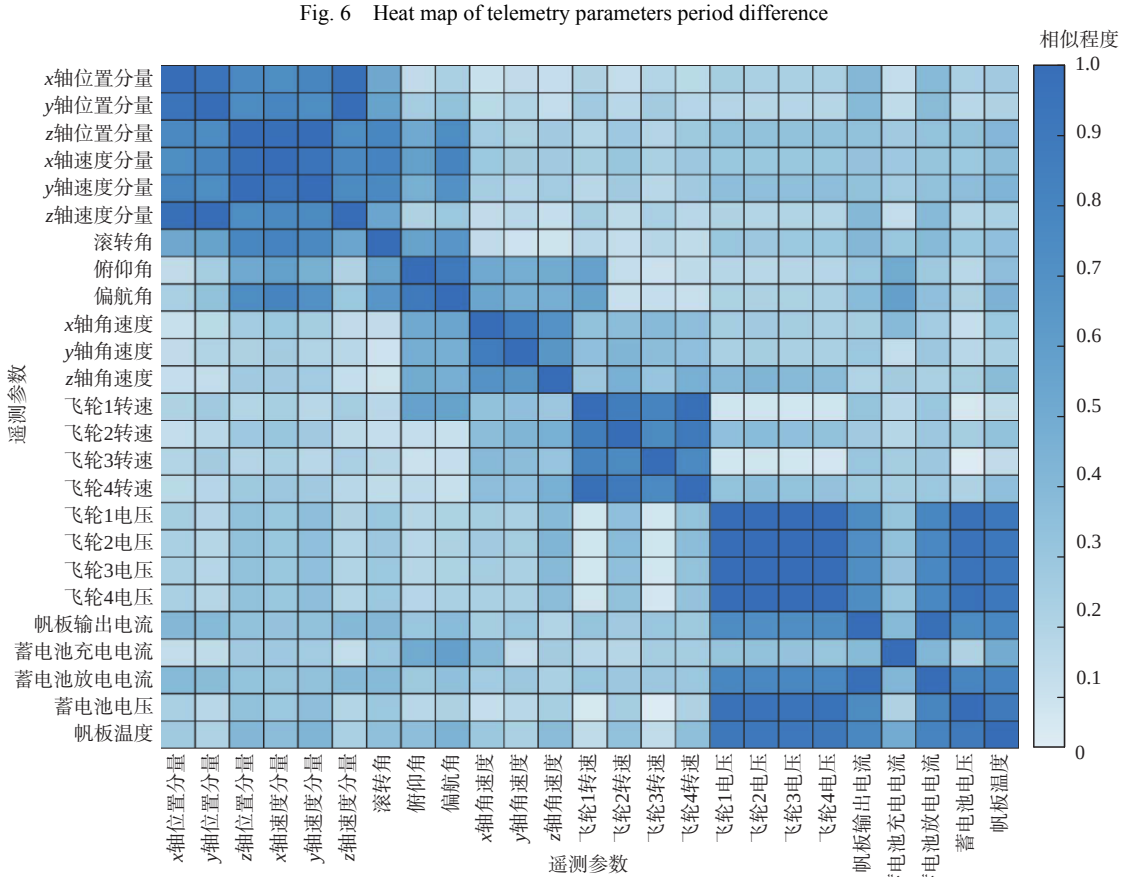


图7 遥测参数相关性热图

Fig. 7 Correlation analysis heat map

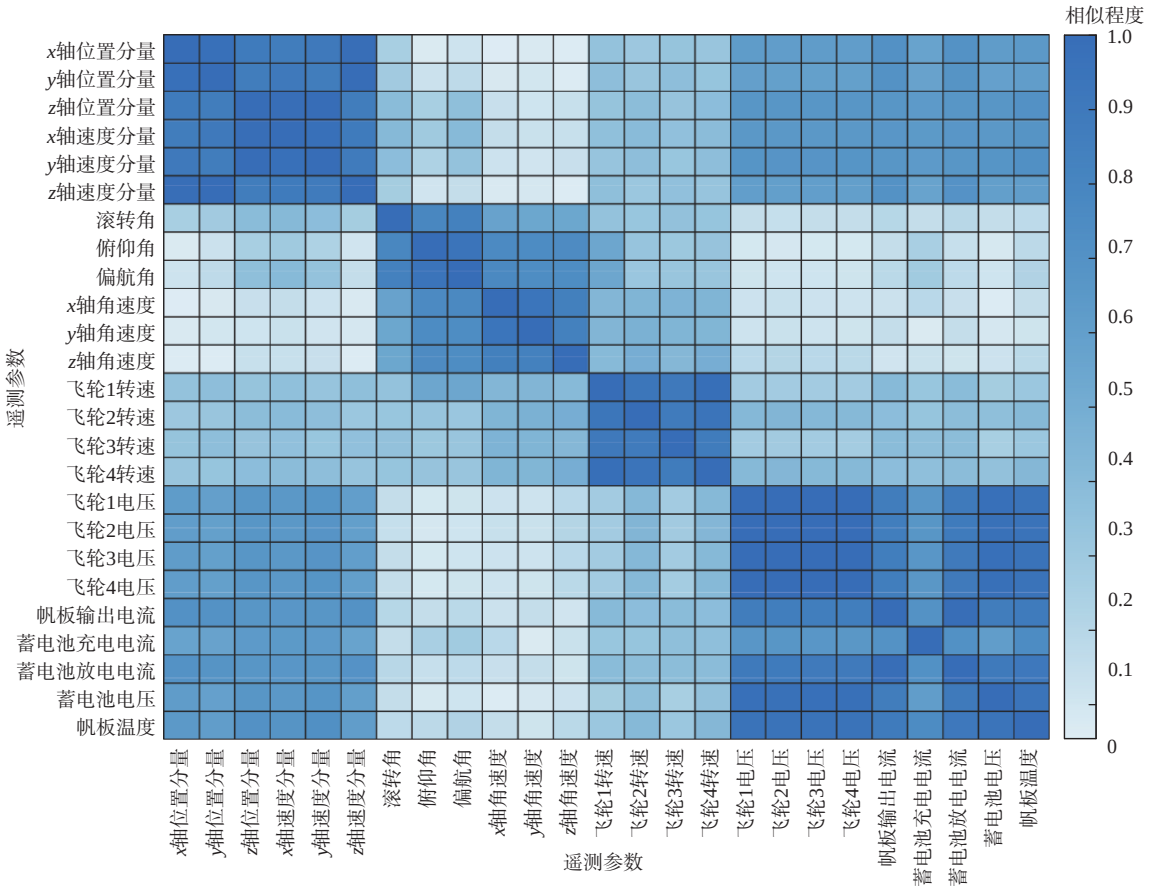


图 8　加权得到的距离指标热图

Fig. 8　Weighted distance index heat map

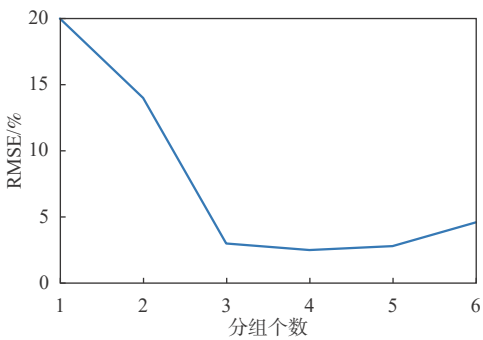


图 9　不同分组个数方案下修正结果比较

Fig. 9　Comparison of updating results under different grouping number schemes

聚类结果为: 组 1={轨道位置、速度}, 组 2={姿态角、角速度}, 组 3={飞轮转速}, 组 4={帆板输出电流、电池充电电流、电池放电电流、电池电压、飞轮电压、帆板温度}。可以看到, 使用本文方法下的分组修正结果均方根误差比其他分组修正结果更小, 结果最优。当分组个数小于 4 时, 随着分组个数增加, 修正效果呈越来越好的趋势, 这是由于变量通过分组, 降低了耦合程度, 使原本不可求解的过程变得可求解。而当分组个数大于 4 时, 修正效果随分组个数的增加而变差, 这是由于分组太多, 原本紧耦合的变量分离, 无法同时进行调节所导致的。

将分组结果代入到隶属度函数表中, 得到各组遥测参数对应的粒度组合, 结果如表 6 所示。

取相关性阈值$\alpha = 0.3$, 将大于该值的遥测参数作为协商参数。最终选择帆板面积作为第 1 组和

表 6　粒度选取结果

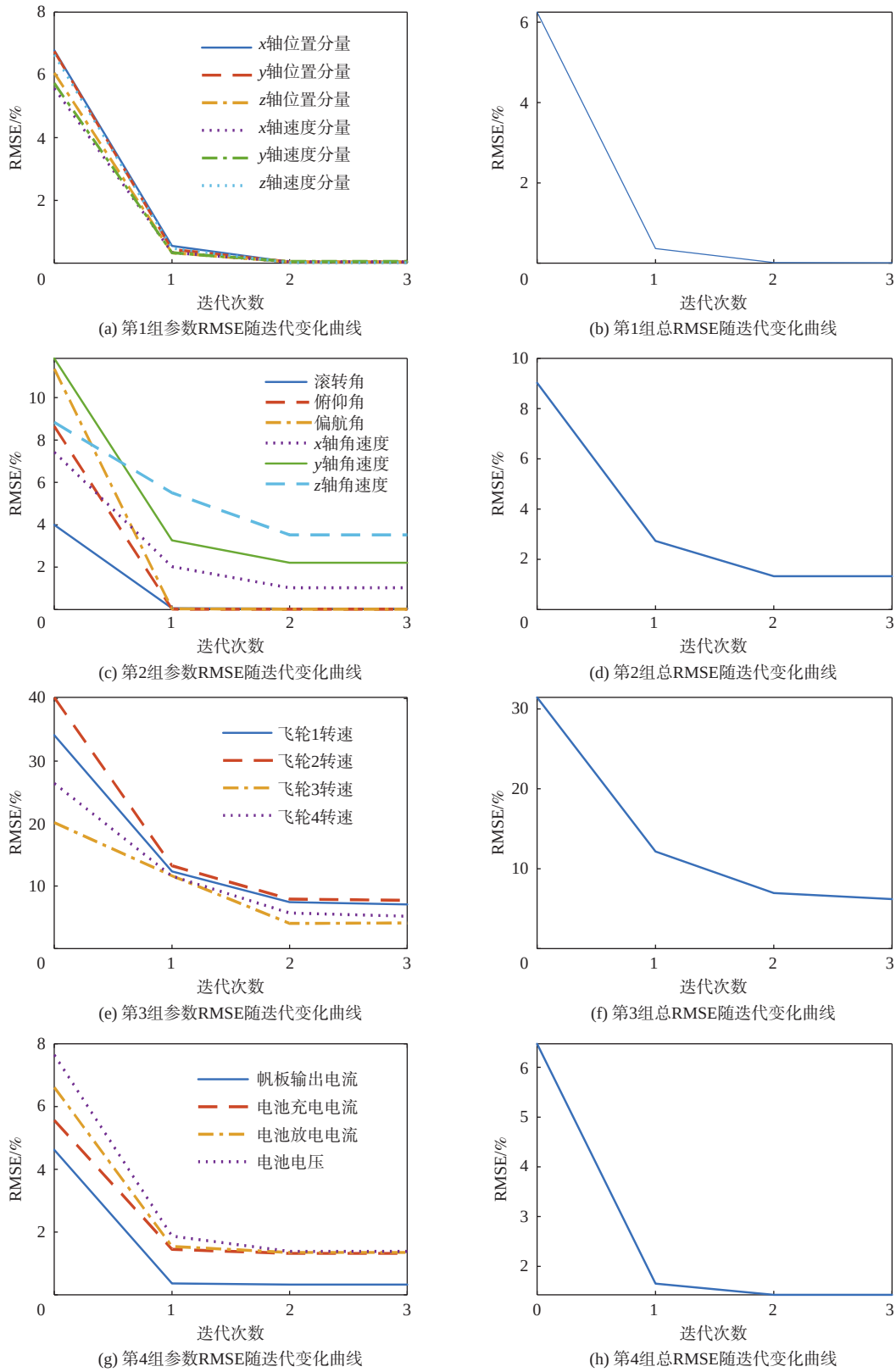
Table 6　Model granularity selection results

变量	姿轨控子系统	电源子系统	热控子系统
轨道位置、速度	原理级	功能级	功能级
姿态角、角速度	原理级	功能级	功能级
飞轮转速	原理级	功能级	功能级
帆板输出电流, 蓄电池电压, 蓄电池充电电流, 蓄电池放电电流, 飞轮电压, 帆板温度	原理级	原理级	原理级

第4组的协商参数。

修正过程中，统计每次迭代完各个遥测量在整个时间段内的均方根误差和总均方根误差，随迭代变化情况如图10所示。

修正前后，各遥测参数的均方根误差值对比如表7所示。可以看到，分组均能使各个组的遥测量均方根误差收敛至10%以内。通过引入协商参数，带协商项的均方根误差相比无协商修正可以进一步提升50%以上，说明协商参数选取的正确性及协商修正的有效性。



(a) 第1组参数RMSE随迭代变化曲线　(b) 第1组总RMSE随迭代变化曲线

(c) 第2组参数RMSE随迭代变化曲线　(d) 第2组总RMSE随迭代变化曲线

(e) 第3组参数RMSE随迭代变化曲线　(f) 第3组总RMSE随迭代变化曲线

(g) 第4组参数RMSE随迭代变化曲线　(h) 第4组总RMSE随迭代变化曲线

图10　各个遥测量均方根误差随迭代次数的变化

Fig. 10　Variation of each remote measurement root mean square error with the number of iterations

遥测参数修正后, 仿真值和遥测参数对比如图 11 所示, 误差曲线如图 12 所示。

由图可知, 经过修正后, 每个参数的仿真结果与真实遥测结果的变化趋势基本一致, 并且整个时间段内仿真误差被修正到较小值范围, 均在 0 附近变化, 证实了模型的精确性。

进一步统计不同协商参数选取的阈值和修正后总的均方根误差关系, 均方根误差随阈值变化如图 13 所示。

随着协商阈值从 1～0 变化, 均方根误差先缓慢降低, 在中间段明显降低, 最后再次缓慢变化。这是由于阈值越小, 选取协商参数的条件越宽松, 协商参数也越多, 刚开始协商参数可以有助于均方根误差进一步降低, 但是随着协商参数的增加, 有些影响很小的参数也成为协商项, 这些参数对原来的修正影响很小, 所以即使越来越多, 均方根误差降低得也越来越慢, 继续减小协商阈值对模型精度的提升也很有限, 反而会增加计算量, 因此, 依据该图将转折点阈值 δ=0.3 处作为协商阈值的最优选择。

表 7　各遥测量的均方根误差

Table 7　Root mean square error of telemetry parameters

组别	变量名	修正前均方根误差/%	修正后均方根误差/%	
			仅分组	分组+协商
第1组	*x*轴位置分量	6.784	0.043	0.042
	*y*轴位置分量	6.754	0.042	0.040
	*z*轴位置分量	6.062	0.044	0.043
	*x*轴速度分量	5.573	0.046	0.042
	*y*轴速度分量	5.734	0.055	0.052
	*z*轴速度分量	6.640	0.018	0.014
	总遥测量	6.251	0.011	0.010
第2组	滚转角	4.003	0.044	
	俯仰角	8.647	0.016	
	偏航角	11.351	0.020	
	*x*轴角速度	7.424	1.027	
	*y*轴角速度	11.849	2.206	
	*z*轴角速度	8.833	3.526	
	总遥测量	9.029	1.330	
第3组	飞轮1转速	34.164	7.071	
	飞轮2转速	40.169	7.730	
	飞轮3转速	20.167	4.110	
	飞轮4转速	26.435	5.187	
	总遥测量	31.426	6.196	
第4组	帆板输出电流	4.625	2.548	0.331
	电池充电电流	5.565	3.849	1.324
	电池放电电流	6.613	3.549	1.354
	电池电压	7.646	2.438	1.387
	飞轮1电压	6.024	5.394	1.031
	飞轮2电压	6.846	5.303	1.104
	飞轮3电压	6.248	6.129	1.435
	飞轮4电压	7.045	5.450	1.521
	帆板温度	12.540	3.671	2.671
	总遥测量	6.472	5.484	1.426

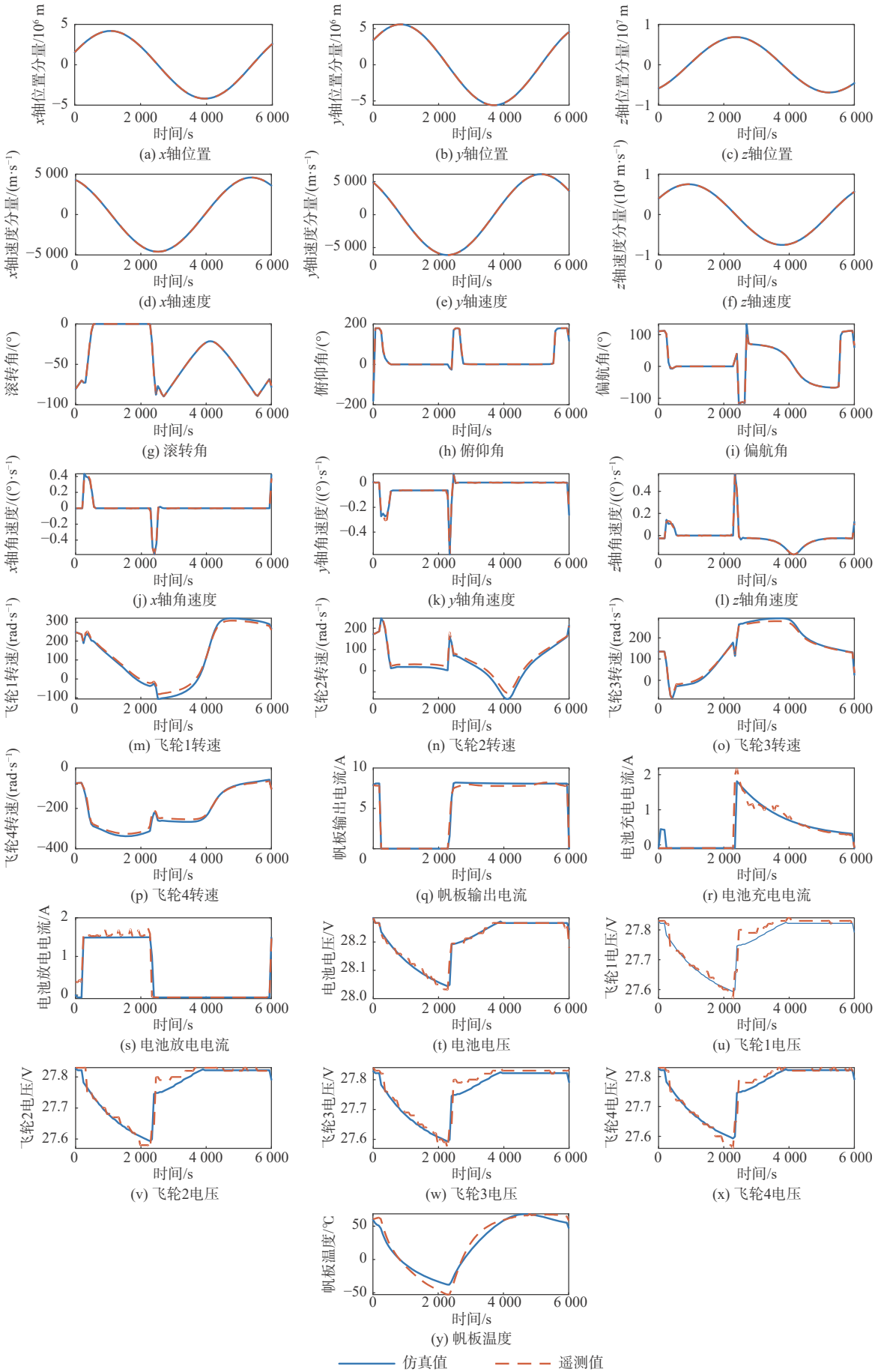


图 11 修正后仿真值与遥测值的对比

Fig. 11 Comparison of updated simulation values with telemetry values

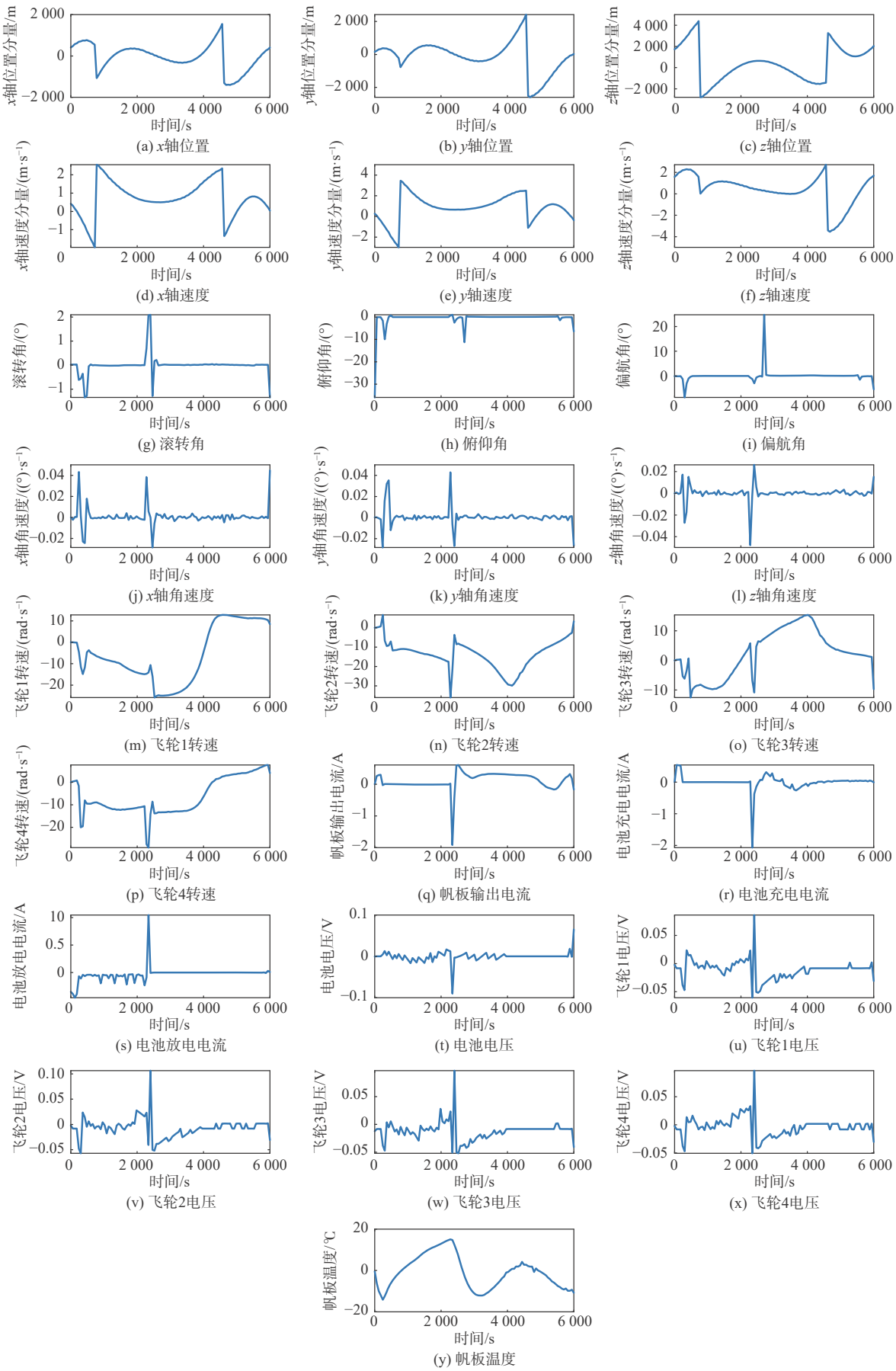


图 12　修正后仿真值与遥测值的误差

Fig. 12　Error of updated simulation values and telemetry values

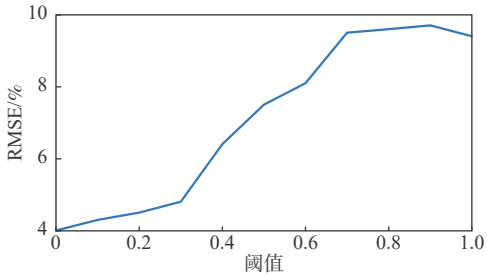


图 13 均方根误差随协商阈值的变化曲线

Fig. 13 Root mean square error change curve with the negotiation threshold

4 结 论

1）通过参数分组实现了整星级卫星模型的参数修正，模型均方根误差精度可以达到 10% 以内。

2）引入协商参数进行修正后，精度较未应用协商修正时提升了 50% 以上，展示了协商修正方法的显著优势，提升了模型的可信度，为使用者做出更精准的决策提供了可靠的支撑。

后续可围绕 2 个方面开展研究：①模型修正有离线和在线 2 种方式，在实时性要求较高时，数字孪生模型需要在线修正，②基于修正后的模型，开展数字孪生卫星一体化最优控制研究。

参考文献（References）

[1] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 1-12.
Meng S H, Ye Y M, Yang Q, et al. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 1-12(in Chinese).

[2] 袁胜华, 张腾, 钮建伟. 数字孪生技术在航天制造领域中的应用[J]. 强度与环境, 2020, 47(3): 57-64.
Yuan S H, Zhang T, Niu J W. The application of digital twin technology in aerospace manufacturing[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(3): 57-64(in Chinese).

[3] Thelen A, Zhang X G, Fink O, et al. A comprehensive review of digital twin: part 2: roles of uncertainty quantification and optimization, a battery digital twin, and perspectives[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2022, 66(1): 1.

[4] 董云峰, 孙运江, 李智. 狭义数字孪生卫星构建应用平台的开放性研究[J]. 上海航天, 2023, 40(4): 1-14.
Dong Y F, Sun Y J, Li Z. Research on openness of digital twin satellite construction application platform in narrow sense[J]. Aerospace Shanghai, 2023, 40(4): 1-14(in Chinese).

[5] Alonso J J, Eldred M S, Constantine P, et al. Scalable environment for quantification of uncertainty and optimization in industrial applications (SEQUOIA)[C]// Proceedings of the 19th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference. Reston: AIAA, 2017.

[6] Raviolo D, Civera M, Zanotti Fragonara L. A comparative analysis of optimization algorithms for finite element model updating on numerical and experimental benchmarks[J]. Buildings, 2023, 13(12): 3010.

[7] Sehgal S, Kumar H. Structural dynamic model updating techniques: a state of the art review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 23(3): 515-533.

[8] 钟奇, 潘维, 王玉莹, 等. 航天器热模型修正技术进展研究[J]. 航天器工程, 2021, 30(1): 64-71.
Zhong Q, Pan W, Wang Y Y, et al. Survey of spacecraft thermal model correlation technology development[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(1): 64-71(in Chinese).

[9] 李玉涵, 杨宝玉, 吴亦农, 等. 卫星光机载荷热模型参数高效修正方法研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(6): 628814.
Li Y H, Yang B Y, Wu Y N, et al. Research on parameters correction method for thermal model of satellite optomechanical load[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(6): 628814(in Chinese).

[10] Fan L, Liu X, Cai G P. Dynamic modeling and modal parameters identification of satellite with large-scale membrane antenna[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(12): 4046-4057.

[11] Liu X F, Zhang X Y, Chen P R, et al. Inertia parameter identification for an unknown satellite in precapture scenario[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020, 2020(1): 7521434.

[12] 董威, 尹家录, 郑培英, 等. 航空发动机及燃气轮机整机性能仿真综述[J]. 航空发动机, 2023, 49(5): 8-21.
Dong W, Yin J L, Zheng P Y, et al. Review: engine-level performance simulation of aeroengine and gas turbines[J]. Aeroengine, 2023, 49(5): 8-21(in Chinese).

[13] 刘超群, 谷德峰, 黄志勇, 等. 利用加速度计数据在轨标定重力卫星质心偏差[J]. 中山大学学报 (自然科学版中英文), 2024, 63(2): 123-130.
Liu C Q, Gu D F, Huang Z Y, et al. Calibrating of the in-orbit center-of-mass offset of gravity satellite by accelerometer data[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2024, 63(2): 123-130(in Chinese).

[14] Wang K, Liu J W, Su H, et al. Real-time LEO satellite orbits based on batch least-squares orbit determination with short-term orbit prediction[J]. Remote Sensing, 2023, 15(1): 133.

[15] Wang Z P, Cao B S, Xie Z W, et al. Kinematic calibration of a space manipulator based on visual measurement system with extended Kalman filter[J]. Machines, 2023, 11(3): 409.

[16] Zhang T, Zhang T J, Hu R Y, et al. Online calibration of RIMU based on multistage EKF[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(14): 15741-15752.

[17] 张军华, 陈建林, 孙冲, 等. 微小推力下小卫星的轨道递推与推力标定[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(2): 71-81.
Zhang J H, Chen J L, Sun C, et al. Onboard orbit propagation and micro-thrust calibration for small satellites[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(2): 71-81(in Chinese).

[18] Liu Y X, Hu Z K, Fang J J. Two-step calibration method for three-axis magnetic sensor error based on particle swarm optimization[J]. Sensor Review, 2020, 40(5): 577-583.

[19] Mammeri E, Ahriche A, Necaibia A, et al. An enhanced battery model using a hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Electrical Engineering, 2023, 105(6): 4525-4548.

[20] He C, Chen G P, He H, et al. Model updating of a dynamic system in a high-temperature environment based on a hierarchical method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2013, 77: 59-68.

[21] Fei C W, Liu H T, Patricia Liem R, et al. Hierarchical model updating strategy of complex assembled structures with uncorrelated dynamic modes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(3): 281-296.

[22] 高宗升, 滕岩梅. 复变函数与积分变换[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016: 127-128.
Gao Z S, Teng Y M. Complex function and integral transform[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2016: 127-128(in Chinese).

[23] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 213.
Zhou Z H. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 213(in Chinese).

Multi-granularity and negotiation model updating method for satellite digital twin

WU Xueqian[1], DONG Yunfeng[1,*], LI Zhi[2]

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The uncertainty of the model should be statistically assessed as the foundation for model selection, as there are errors between the digital twin model and the actual system that must be reduced. However, the satellite digital twin model exhibits multi-dynamic, multi-spatial scale, and multi-physical field coupling properties. Additionally, the numerical solution will reveal the stiffness problem of ordinary differential equations and the multi-scale problem of partial differential equations. If many telemetry parameters are updated at the system level, the results will not converge. A multi-granularity and negotiation model updating framework for satellite digital twin method was proposed. The parameters were grouped by correlation analysis and frequency domain analysis. Multi-granularity digital twin models were built based on the requirements, and various granularity models of satellite subsystems and components were produced. The coupling relationship between the satellite structure of different levels was studied, and a negotiation updating method was proposed. Real on-orbit telemetry data were used to verify the framework. According to the research findings, the proposed method updating approach outperforms the unused one by over 50% in terms of accuracy, and the updating results are more thorough and methodical.

Keywords: digital twin; model updating; cluster; multi-granularity modeling; negotiation update

Received: 2024-05-16; **Accepted**: 2024-08-04; **Published Online**: 2024-08-16 15:38
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240816.1303.001

* **Corresponding author**. E-mail: sinosat@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0339

飞行器结构分区差异化安全系数设计方法

许宇声[1]，张音旋[2]，吴江鹏[2]，陈亮[2]，王磊[1]，王晓军[1,*]

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191；2. 沈阳飞机设计研究所，沈阳 110035)

摘 要：飞行器结构安全系数是设计载荷与使用载荷之比，传统的统一安全系数设计方法取值主观、难以量化不确定性，易导致设计保守，制约先进飞行器性能。为解决这一限制，在保证可靠性设计要求的前提下，更好地挖掘材料性能与设计空间，有必要发展一种分区差异化安全系数设计方法。运用概率可靠性设计优化理论来研究结构系统的不确定性，建立结构可靠度与分区差异化安全系数之间的映射关系，提出平衡安全性与经济性的分区差异化安全系数设计方法。以工程型号简化的翼尖结构等为验证算例，显示在满足结构强度可靠度99%设计要求前提下，实现了结构绝大部分子区域的分区差异化安全系数均小于统一安全系数1.45，从而使得结构设计质量相对更轻达3.926 kg。

关 键 词：分区差异化安全系数；结构概率可靠性；安全系数设计方法；嵌套优化；可靠性优化设计

中图分类号：V224

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2454-12

在飞行器设计过程中，存在着复杂多样的不确定性影响[1]。传统的结构设计方法依赖于安全系数取值的工程经验来粗略包络不确定性因素对结构系统功能和性能的影响，以确保设计的可靠性。然而，随着对轻量化、高可靠飞行器需求的增加，以及多学科分析模型精度要求的提高[2]，对不确定性影响估计保守的安全系数方法已不再适用。与此同时，随着分析、设计与制造等技术的全面进步和飞行器系统复杂度的不断增加，不确定性对飞行器结构的影响也将变得越来越明显。

安全系数方法假定当前结构的材料强度和载荷引起的应力是确定的，使用极限安全系数来考虑设计中存在的多源不确定性。尽管该方法经Verderaime[3]验证并适用于大多数结构问题，但其过于粗略地处理了不确定性在实际工程应用中带来的影响，其保守的设计结果往往直接造成结构质量的增加。

在当前的飞行器设计中，安全系数取值的确定仍依赖于以往的工程经验[4]，对结构中不同区域的不同部件采用统一的取值。然而，这种方法将导致过分保守的设计结果，并存在很大的设计空间局限性：①该方法假设材料强度和结构应力为确定值，通常采用最低的材料强度和最高的结构应力，导致设计保守；②对不同区域、结构和材料采用相同的安全系数，并不能准确反映实际服役状态，使得精细化设计变得困难；③安全系数的取值仍参考的是几十年前的标准，可能不适用于当前的材料和工艺。

想要完全消除不确定因素在设计过程中的干扰是难以实现的。将各种不确定因素的影响降到最低，保证结构特性满足设计人员的要求，才是更为可行的思路。为精细化考虑不确定性因素的影响，满足现代飞行器结构的设计要求，研究者提出基于可靠性的设计优化(reliability-based design optimization, RBDO)方法，如基于概率可靠性的设计

收稿日期：2024-05-21；**录用日期**：2024-07-10；**网络出版时间**：2024-07-30 10:03
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240729.1421.001
基金项目：国家自然科学基金 (12472193,12522205)
* **通信作者**. E-mail：xjwang@buaa.edu.cn

引用格式：*许宇声，张音旋，吴江鹏，等. 飞行器结构分区差异化安全系数设计方法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2454-2465. Xu Y S，Zhang Y X，Wu J P，et al. Sub-regional differentiated safety factors design method for aircraft structure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2454-2465 (in Chinese).*

优化(probabilistic reliability-based design optimization, PRBDO)[5]、模糊可靠性[6]和基于非概率可靠性的设计优化(non-probabilistic reliability-based design optimization, NRBDO)[7]方法。这些方法有助于提高结构利用率和解决改进设计问题。

这些优化设计方法因其能够提高产品质量和增加经济效益而受到世界各国的广泛关注。PRBDO[8]是目前不确定性分析中最成熟的理论,并已在学术和工程领域得到应用,但该方法往往需要对部件或系统的可靠性进行多次计算,计算量较大。RBDO起始于 20 世纪 60 年代初期。Frangopol 等[9]许多学者都在这一领域作出了重要贡献。近年来,该领域出现了一些新的理论和方法。Lee 等[10]将随机有限元法应用于求解结构优化设计问题。Papadrakakis 等[11]使用神经网络和 Monte Carlo 仿真计算结构的可靠度,并在此基础上给出结构基于可靠性的优化设计方案。Youn 等[12-13]发展了一种新型响应面方法和一种混合分析方法,而 Evgrafov 等[14]则发展了适用于结构拓扑优化的离散罚函数方法。Agarwal [15]和 Bae 等[16]讨论了可靠性优化的一般方法和格式,Deb 等[17]在优化过程中引入了进化算法,得到了全局意义上的最优解。Kharmanda 等[18]则对工程问题中的拓扑优化发展了相应的可靠性优化方法。在 NRBDO 方法的研究中,研究人员提出区间集模型[19-20]和凸模型[21-22]等替代模型来解决不确定性信息有限的非确定性结构分析和优化问题[23]。非概率可靠性的概念最初是由 Ben-Haim[7]基于凸模型理论提出的。在此基础上,Qiu[24]和 Wang[25]等进一步发展了一种考虑不确定但有界参数的结构优化方法。

一些学者探讨了基于可靠性的设计优化方法和安全系数方法之间的关系。Elishakoff[4]强调了安全系数与结构可靠性之间的联系,而其他研究人员寻求通过结合可靠性和安全系数来找到更有效的优化策略[26-30]。Wang 等[31]致力于将安全系数方法与可靠性概念整合用于结构设计。在另一项研究中,他分析了基于可靠性的设计优化方法与传统安全系数方法相比的优缺点[32],并对后者固有的保守性提供了解释。然而,当前阶段的许多研究仍采用先进行安全系数设计,后评估相应方案可靠性的传统设计框架[33-35]。

总之,基于可靠性的结构优化设计在不确定条件下有效地减轻了不同子区域的质量,同时确保了其安全性。然而,大型和复杂的结构工程设计仍面临计算挑战。现有的安全系数和可靠性优化方法在评估和迭代过程中仍然分离,缺乏安全系数和结构可靠度之间的全面联系。本文基于结构概率可靠性设计理论,考虑不确定性并建立结构可靠度与安全系数之间的映射关系,以确保结构安全要求的同时最小化质量。此外,本文还提出一个安全系数设计方法,以确定结构不同子区域的安全系数,实现安全与经济之间的精细平衡。

1　问题描述

先进飞行器等大型复杂结构的设计面临复杂严酷的服役环境、多变的任务需求及对轻量化设计的高标准等设计挑战。这些先进结构往往包括多种组件,每种组件都承受不同类型的载荷,具有独特的材料属性和特定的结构布局。显而易见,使用统一的安全系数对每个区域内的所有组件进行评估的传统方法已不能满足现代设计的需求。为此,引入结构概率可靠性理论至关重要。该理论考虑了不确定性的影响,并能够建立可靠度与安全系数之间的映射关系。利用这种关系,本文针对每个区域的不同组件设计不同的安全系数,这样不仅挖掘了材料性能与设计空间,还能在减轻质量和不确定性的同时,给出维持安全性要求的分区差异化安全系数。

为阐释这一方法,以一个包括机翼、机身、尾翼等组件的典型飞机结构为例,如图 1 所示。每个组件都承受特定的载荷,具有独特的结构布局方案,并拥有不同的材料特性。设计一组安全系数 $\boldsymbol{f}=[f_1^1,\cdots,f_i^j,\cdots,f_n^m]$对应的结构方案(其中,$n$为子区域的数量,$m$为失效模式的数量(包括结构强度失效、刚度失效和稳定性失效等)),并基于此结构方案进行可靠性评估,以确定每个子区域的可靠性,由此确立了分区差异化安全系数与可靠性之间的映射关系,其中包含了结构有限元分析、可靠性评估和安全系数优化设计。

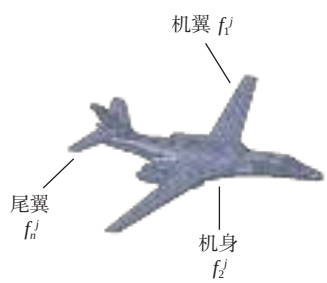


图 1　典型飞机结构不同子区域组件的安全系数

Fig. 1　Safety factors for components in different sub-regions of aircraft

一般来说,可以根据结构所有子区域的安全系数来确定某特定子区域的可靠性。结构可靠度与安全系数的关系可表示为

$$R_i^j = g_i^j(f_1^1,\cdots,f_i^j,\cdots,f_n^m) \tag{1}$$

式中：g_i^j为结构可靠度R_i^j与安全系数$\{f_1^1,\cdots,f_i^j,\cdots,f_n^m\}$的函数关系。

为找到满足可靠性要求的各子区域的安全系数，需要对各子区域在各结构失效模式下的可靠度$\boldsymbol{R}=(R_1^1,\cdots,R_i^j,\cdots,R_n^m)$进行合理设计。针对某一组安全系数$\boldsymbol{f}$与结构可靠度$\boldsymbol{R}$，将分区差异化安全系数与结构可靠度之间的关系转化为涉及分区差异化安全系数设计、基于确定安全系数的结构设计和结构可靠度分析组合而成的优化问题。通过双层嵌套优化方法，可以有效地求解出满足可靠性要求的各子区域安全系数。这一过程确保了设计出的分区差异化安全系数与期望的可靠性水平相一致。

更关键的是，传统的统一安全系数设计方法未能充分体现复杂环境中不确定性对结构各个子区域的影响。因此，本文提出一个新的设计概念，即基于结构可靠性的分区差异化安全系数设计，如图2所示。

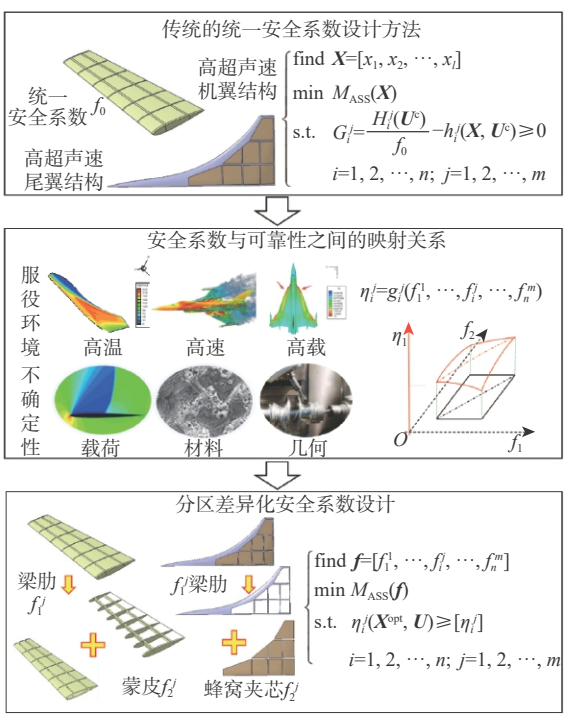


图2 基于结构可靠性的分区差异化安全系数设计过程

Fig. 2 Process of sub-regional differentiated safety factors design based on structural reliability

图中，$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_l]$为结构设计变量，$l$为设计变量的数量；$M_{\mathrm{ASS}}(\cdot)$为结构质量；$\boldsymbol{U}=[u_1,u_2,\cdots,u_L]$为分析过程中涉及的不确定性参数，$L$为不确定性参数的数量；$\boldsymbol{U}^c$为不确定性参数的名义值；$G_i^j=H_i^j(\boldsymbol{U}^c)/f_0-h_i^j(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U}^c)$表示第$i$个子区域在第$j$个失效模式下的极限状态函数；$G>0$表示结构安全，$G<0$表示结构危险；$H_i^j(\cdot)$为第$i$个子区域在第$j$个失效模式下极限状态函数的许用值，这个许用值与设计变量无关；$h_i^j(\cdot)$为第i个子区域在第j个失效模式下计算出的结构响应；f_0为统一的安全系数；$R_i^j(\boldsymbol{X}^{\mathrm{opt}},\boldsymbol{U})$为安全系数设计后的结构最优解和不确定参数影响下的可靠度；$[R_i^j]$为结构可靠度的约束值。

2 分区差异化安全系数设计模型

2.1 分区差异化安全系数与传统安全系数的区别

安全系数通常有2种定义：一种是材料的极限应力与工作中的实际应力之比；另一种将其定义为一个设计因素，旨在提供足够的结构强度和刚度，确保其安全并防止在载荷超过某一值时发生损坏。航空设计领域安全系数的定义和描述为：①许用载荷是预设正常工况下的最大载荷；②极限载荷是将许用载荷乘以一个适当的安全系数得到的；③安全系数是一个设计因素，用来防止由于设计不准确而导致工作载荷超过许用载荷的可能性。

在飞机设计领域中仍然使用传统的定义，其中，安全系数定义为设计载荷与使用载荷的比值。在飞机结构安全系数法的早期设计阶段，不同国家采用不同的安全系数值。例如，1928年，美国采用了2.0的安全系数，德国使用了1.8的安全系数，英国使用了1.15的安全系数。随着时间的推移，飞机结构设计在工程实践中不断发展，这些安全系数值也发生了变化。最终所有国家都将飞机结构设计的安全系数标准化为1.5，因为该值与铝合金的极限强度与弹性极限之比非常接近[3,36-37]。

使用安全系数理论设计的飞机众多，研究人员也广泛研究了安全系数的取值影响[33-34,2]。学者们认为安全系数的选择受飞行器结构设计中4个因素的影响：①计算载荷的准确性；②服役环境；③材料属性和制造工艺；④塑性变形和刚度标准的要求。

然而，在设计大型复杂的飞行器结构时，飞机的不同子区域承受着不同的载荷，经历不同的热环境，具有不同的材料属性，需要独特的制造规格，并遵守不同的变形和刚度限制，并且，影响这些子区域的不确定性因素也各不相同。因此，采用统一的安全系数的传统方法不足以指导飞行器结构设计。相反，应该设计出分区差异化的安全系数，考虑到每个结构部件的服役环境和设计要求，如图3所示，其中，j表示第j个失效模式，$t_i(i=1,2,3,4)$表示4个安全系数值。

本节通过某一失效模式下拥有2个子区域的

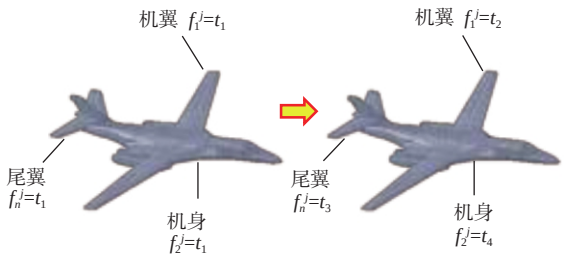


图 3　分区差异化安全系数

Fig. 3　Sub-regional differentiated safety factors

飞行器结构 $\boldsymbol{f}=[f_1',f_2']$来说明传统统一安全系数设计方法的可行域有限，而分区差异化安全系数方法扩大了设计空间。同时，还将展示分区差异化安全系数与其对应的结构可靠度之间的约束关系。

如图 4 所示，分区差异化安全系数的可行设计域远大于传统统一安全系数，大大扩展了设计空间。$\overline{f_1'}$、$\overline{f_2'}$和$\underline{f_1'}$、$\underline{f_2'}$表示的是f_1'、f_2'的上限和下限，c_{onst} 表示常数。

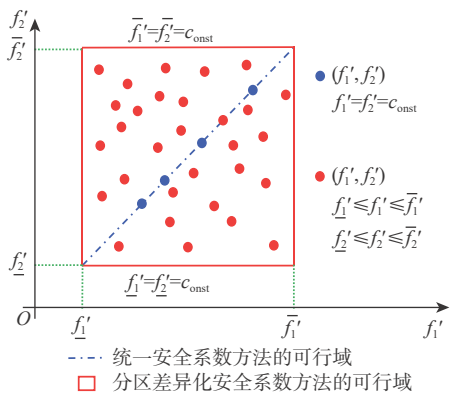


图 4　统一安全系数方法与分区差异化安全系数方法的可行设计域

Fig. 4　Feasible region of unified safety factor and sub-regional differentiated safety factor scheme

图 5 展示了统一安全系数方法和分区差异化安全系数方法对子区域 1 结构可靠度的影响。R_1' 表示子区域 1 的结构可靠度，$[R_1']$表示子区域 1 的可靠性约束值。很明显可以看出，在分区差异化安全系数方法的可行范围内，可以获得更接近子区域 1 结构可靠度约束的可行解。这表明分区差异化安全系数方法在满足可靠性约束方面提供了更大的灵活性和精确性。

图 6 展示了统一安全系数方法和分区差异化安全系数方法分别对 2 个子区域的结构可靠度的影响。R_1'、R_2'表示 2 个子区域的结构可靠度，$[R_1']$、$[R_2']$表示 2 个子区域的可靠性约束值。显然，分区差异化安全系数方法能够获得更精确和合理的可行解。在扩大设计空间的同时，它确保了约束收益的最大化。分区差异化安全系数通过针对

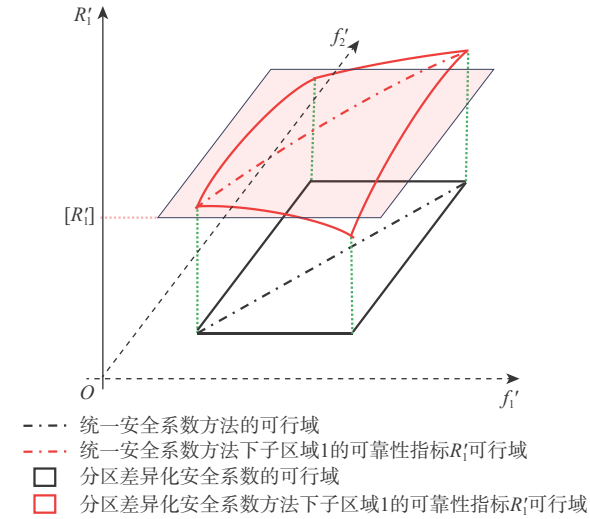


图 5　分区差异化安全系数对子区域 1 结构可靠度的影响

Fig. 5　Feasible region of unified safety factor and sub-regional differentiated safety factor scheme

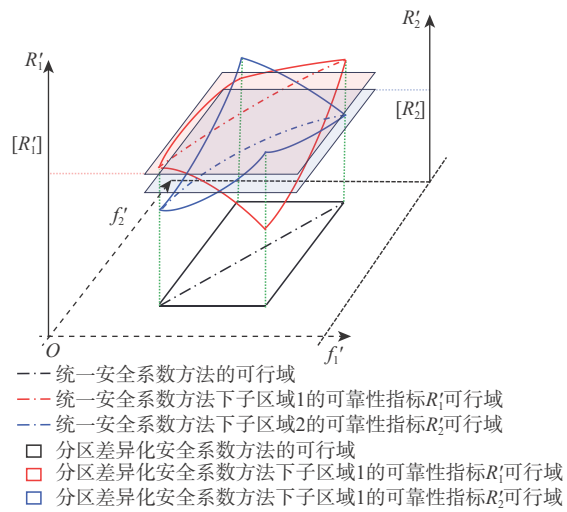


图 6　分区差异化安全系数对两子区域结构可靠度的影响

Fig. 6　Influence of sub-regional differentiated safety factors of two sub-regions on reliability index

每个子区域的特定需求调整安全系数取值，提供了更高的设计自由度和更优的结构性能。

2.2　分区差异化安全系数设计模型

在传统的安全系数设计方法中，结构中的不确定参数仅在约束函数中考虑，这些不确定参数可以转化为概率分布来表示其分散性。传统的安全系数方法的设计模型如下：

$$\begin{cases}\text{find} & \boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_l]\\ \min & M_{\text{ASS}}(\boldsymbol{X})\\ \text{s.t.} & G_i^j=\dfrac{H_i^j(\boldsymbol{U}^{\text{c}})}{f_0}-h_i^j(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U}^{\text{c}})\geqslant 0\\ & \boldsymbol{U}=[u_1,u_2,\cdots,u_L]\\ & i=1,2,\cdots,n;\quad j=1,2,\cdots,m\end{cases}\tag{2}$$

分区差异化安全系数方法的设计模型通过将

传统的安全系数设计模型扩展为每个子区域都拥有独立的安全系数作为设计变量。对于每组确定的分区差异化安全系数，可以使用传统的安全系数方法得到相应的结构方案$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_l]$。然后，评估该结构方案下的结构可靠度，建立分区差异化安全系数与结构可靠度之间的关系，其优化列式如下：

$$\begin{cases}\text{find} & \boldsymbol{f}=[f_1^1,\cdots,f_i^j,\cdots,f_n^m]\\ \min & M_{\text{ASS}}(\boldsymbol{f})\\ \text{s.t.} & R_i^j(\boldsymbol{X}^{\text{opt}},\boldsymbol{U})\geqslant[R_i^j]\\ & i=1,2,\cdots,n;\quad j=1,2,\cdots,m\end{cases}\tag{3}$$

式中：$R_i^j(\boldsymbol{X}^{\text{opt}},\boldsymbol{U})$包含了多个优化过程和分子过程，包括：安全系数设计，不确定性量化，不确定性传播和可靠性评估。这样一个双层嵌套优化设计问题的参数映射关系如图7所示。

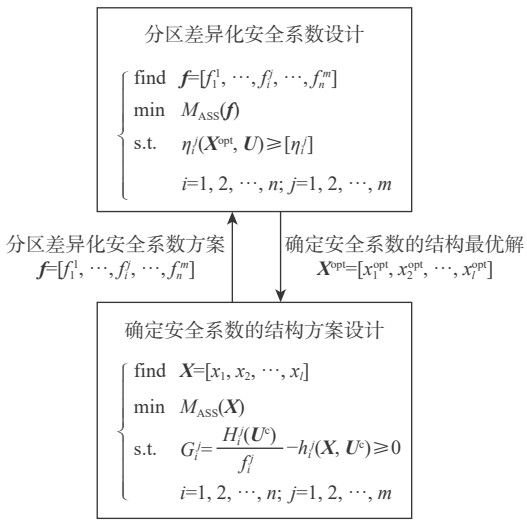


图7 双层嵌套优化设计问题的参数映射关系

Fig. 7 Parameter relationships of two-layer nested optimization

3 分区差异化安全系数设计方法

3.1 结构可靠度的建立

1947年，Freudenthal[38]研究了传统设计法中的安全系数和结构破坏概率之间的内在关系，奠定了结构可靠性的理论基础。但其全概率分析方法在实际工程应用中难以实现。于是，Ang等[39]在1968年发展了以随机变量的均值和方差为基础的适用于工程结构失效概率计算的二阶矩法。1969年，Cornell[40]提出“中心点法”，即“均值一次二阶矩法”，将功能函数在随机变量的均值处进行一阶Taylor展开，可靠度指标定义为功能函数的均值和标准差之间的比值。在此基础上，后续又发展了多种可靠性分析方法，其中，改进一次二阶矩方法和二次二阶矩方法只能处理基本变量为正态分布的情况；蒙特卡罗方法、重要抽样方法和代理模型方法均需要进行大量抽样分析，适用于有实验数据的改进设计阶段，能够大大提升效率；R-F方法将非正态变量转化为等价的正态变量，然后，再运用改进一次二阶矩方法求解可靠度指标，进而得到失效概率，适用于大多数情况。

假定非正态随机变量x服从某一分布，其分布函数为$F_X(x)$，密度函数为$f_X(x)$。为找到非正态变量x的等价正态变量$x'\sim N(\mu_x',\sigma_x'^2)$，必然要确定2个分布参数$\mu_x'$和$\sigma_x'$，R-F法提出如下所示的在特定点$x^*$处的等价变换条件：

$$\begin{cases}F_X(x^*)=\Phi\left(\dfrac{x^*-\mu_x'}{\sigma_x'}\right)\\ f_X(x)=\Phi'\left(\dfrac{x^*-\mu_x'}{\sigma_x'}\right)=\dfrac{1}{\sigma_x'}f\left(\dfrac{x^*-\mu_x'}{\sigma_x'}\right)\end{cases}\tag{4}$$

式中：$\Phi(\cdot)$和$f(\cdot)$分别为标准正态分布的分布函数和密度函数；$\Phi'(\cdot)$表示标准正态分布函数的导函数。

依据这2个条件，可以确定等价正态变量x'的2个基本分布参数为μ_x'和σ_x'。对条件取反函数有

$$x^*-\mu_x'/\sigma_x'=\Phi^{-1}(F_X(x^*))\tag{5}$$

进而得到μ_x'和σ_x'的关系为

$$\mu_x'=x^*-\sigma_x'\Phi^{-1}(F_X(x^*))\tag{6}$$

可求得参数σ_x'如下：

$$\sigma_x'=(\Phi^{-1}(F_X(x^*)))/f_X(x^*)\tag{7}$$

对于功能函数：

$$Z=g(x_1,x_2,\cdots,x_n)\tag{8}$$

式中：基本变量$x_1,x_2,\cdots,x_n$之间相互独立，分别服从某一分布，且x_i对应的分布函数和密度函数分别为$F_i(x_i)$和$f_i(x_i)(i=1,2,\cdots,n)$。

依据式(5)～式(8)得到的等价正态随机变量x_i'的均值μ_{x_i}'和标准差σ_{x_i}'，分别如下：

$$\begin{cases}\mu_{x_i}'=x_i^*-\sigma_{x_i}'\Phi^{-1}(F_i(x_i^*))\\ \sigma_{x_i}'=\dfrac{f(\Phi^{-1}(F_i(x_i^*)))}{f_i(x_i^*)}\end{cases}\tag{9}$$

为保证等价前后失效概率具有较高的近似精度，对于服从非正态分布的变量x_i，可将等价变换的特定点x_i^*取为设计点的第i个坐标值。非正态分布的等价正态变换如图8所示。

得到等价正态随机变量$\boldsymbol{x}'=(x_1',x_2',\cdots,x_n')$后，将功能函数在设计点$\boldsymbol{P}^*(x_1'^*,x_2'^*,\cdots,x_n'^*)$处展开，取线性部分有

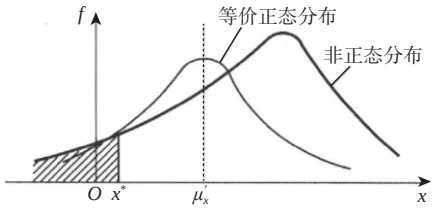


图 8　非正态分布的等价正态变换

Fig. 8　Equivalent normal transformations of non-normal distributions

$$\sum_{i=1}^{n}(\partial g/\partial x_i')_{\boldsymbol{P}^*}(x_i'-x_i'^*)=0 \tag{10}$$

将等价正态基本变量标准化, 即令

$$y_i=x_i'-\mu_{x_i}'/\sigma_{x_i}' \qquad i=1,2,\cdots,n \tag{11}$$

则在新坐标系下的极限状态方程为

$$Z=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}\left(y_i\sigma_{x_i}'+\mu_{x_i}'\right)-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}x_i'^*=0 \tag{12}$$

该方程两边乘以 $-\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}^2\sigma_{x_i}'^2\right]^{-\frac{1}{2}}$, 可得到标准正态空间中标准型法线方程如下:

$$-\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}\sigma_{x_i}'y_i\Big/\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}^2\sigma_{x_i}'^2\right]^{\frac{1}{2}}=\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}\mu_{x_i}'-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}x_i^*\right]\Big/\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}^2\sigma_{x_i}'^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{13}$$

式(13)中, 将y_i的系数设为

$$\lambda_i=-\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}\sigma_{x_i}'\Big/\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}^2\sigma_{x_i}'^2\right]^{\frac{1}{2}}=\cos\theta_i \qquad i=1,2,\cdots,n \tag{14}$$

而右端常数项即为可靠度指标β:

$$\beta=\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}\mu_{x_i}'-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}x_i^*\right]\Big/\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}^2\sigma_{x_i}'^2\right]^{\frac{1}{2}}=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}\left(\mu_{x_i}'-x_i'^*\right)\Big/\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'}\right)_{\boldsymbol{P}^*}^2\sigma_{x_i}'^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{15}$$

由此便可得到结构可靠度R:

$$R=\Phi(\beta) \tag{16}$$

3.2　分区差异化安全系数设计方法的主要流程

针对图 1 中的飞行器结构, 可以得到任意一组安全系数对应的结构方案$\boldsymbol{f}=[f_1^1,\cdots,f_i^j,\cdots,f_n^m]$。根据 3.1 节中建立的结构可靠度, 通过有限元分析和可靠性评估, 可以得到与当前结构方案相对应的结构可靠度$R=(R_1^1,\cdots,R_i^j,\cdots,R_n^m)$。$R_i^j=g_i^j\left(f_1^1,\cdots,f_i^j,\cdots,f_n^m\right)$表示可靠性与分区差异化安全系数之间的映射关系, 如图 9 所示。

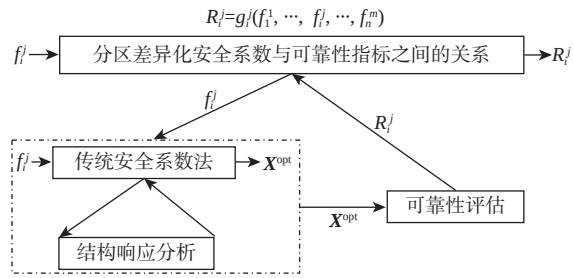


图 9　分区差异化安全系数与可靠性之间的映射关系

Fig. 9　Relationship about reliability and sub-regional differentiated safety factors

根据上述介绍的分区差异化安全系数设计模型, 建立结构可靠度, 建立分区差异化安全系数与结构可靠度之间的映射关系, 可以得到一种基于结构可靠性的分区差异化安全系数设计方法, 如图 10 所示。

在初始统一安全系数设计的基础上, 考虑结构各子区域之间的相关性与可靠性。通过建立分区差异化安全系数与结构可靠度的映射关系, 在满足可靠性要求的前提下, 通过求解隐式非线性方程, 得到一组各子区域的新安全系数组合。此方法的步骤如下。

步骤 1　根据每个结构子区域的安全系数$\boldsymbol{f}^k=\left[f_1^{1,k},f_1^{2,k},\cdots,f_i^{j,k}\right]$, 依据安全系数方法设计结构方案$\boldsymbol{X}^{opt}=\left[x_1^{opt,k},x_2^{opt,k},\cdots,x_l^{opt,k}\right]$, 其中, k为迭代次数。

步骤 2　根据结构方案$\boldsymbol{X}^{opt}=\left[x_1^{opt,k},x_2^{opt,k},\cdots,x_l^{opt,k}\right]$, 对不确定性变量$\boldsymbol{U}=[u_1,u_2,\cdots,u_L]$进行量化。

步骤 3　依据不确定性传播分析$h_i^{j,k}(\boldsymbol{X}^{opt,k},\boldsymbol{U})$和可靠性评估$R^k=\left(R_1^{1,k},R_1^{2,k},\cdots,R_i^{j,k}\right)$, 获得结构方案每个组件的结构可靠度。如果不满足$R_i^{j,k}(\boldsymbol{X}^{opt},\boldsymbol{U})\geqslant\left[R_i^{j,k}(\boldsymbol{U}^c)\right]$, 则执行步骤 4; 否则, 执行步骤 5。

步骤 4　根据选择的不同优化迭代方法, 重新获取分区差异化安全系数, 并重新计算步骤 1～步骤 3。

步骤 5　提出新的分区差异化安全系数$\boldsymbol{f}^k=\left[f_1{}^{1,k},f_1{}^{2,k},\cdots,f_i^{j,k}\right]$。其中, 不同的结构子区域对应不同的安全系数。

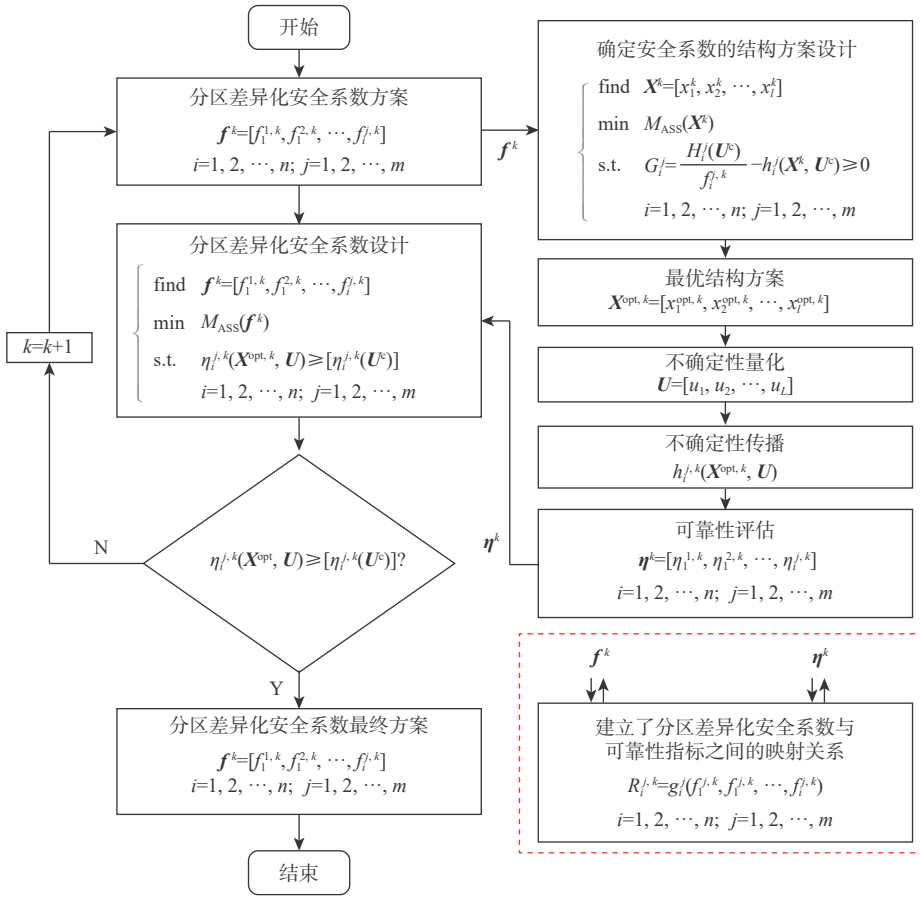


图 10 分区差异化安全系数设计的主要流程

Fig. 10 Main procedure of sub-regional differentiated safety factors design

4 数值算例

4.1 飞行器翼面结构

本节利用本文方法完成 4 子区域翼面结构的分区差异化安全系数设计。本例中的翼面结构参数与材料参数来源于某型号的简化模型，翼展为 924 mm，翼尖与翼根弦长分别为 960 mm 和 1 520 mm。整个机翼结构均由钛合金材料组成，子区域分布与翼面结构布局如图 11 所示。各项结构参数如表 1 所示。

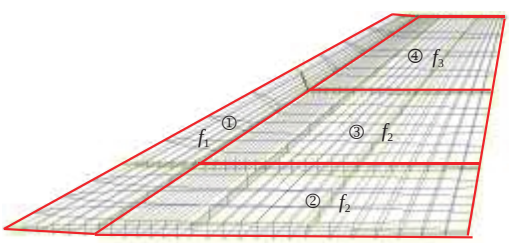


图 11 翼面结构子区域示意

Fig. 11 Sub-region label of wing structure

表 1 飞行器翼面结构的细节参数

Table 1 Detailed information of wing

弹性模量 E/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	边界条件	后掠角/(°)	强度极限 $\sigma_{\max}$/MPa
110	0.33	4 510	根部固支	40	≤465

假定弹性模量符合标准正态分布，变异系数取 0.1。本例中的设计变量为翼面结构的梁肋厚度，其中，两梁厚度为 x_1 和 x_2，初值设置为 2 mm，两肋厚度为 x_3 和 x_4，初值为 3 mm。

优化目标函数为结构质量 $M_{\mathrm{ASS}}(x_1, x_2, x_3, x_4)$，材料许用强度为 $[\sigma]^c$ = 465 MPa，许用变形为 $[D]^c$ = 8 mm。优化目标为 $R_1^1\geqslant 0.95$，$R_2^1\geqslant 0.95$，$R_3^1\geqslant 0.95$，$R_4^1\geqslant 0.95$ 和 $R_1^2\geqslant 0.95, R_2^2\geqslant 0.95, R_3^2\geqslant 0.95, R_4^2\geqslant 0.95$，其中，$R_1^1$、$R_2^1$、$R_3^1$、$R_4^1$ 为子区域在强度失效模式下的结构可靠度，R_1^2、R_2^2、R_3^2、R_4^2 为子区域在刚度失效模式下的结构可靠度，f_1^1、f_2^1、f_3^1、f_4^1 为子区域的强度安全系数，f_1^2、f_2^2、f_3^2、f_4^2 为子区域的刚度安全系数。优化列式如下：

$$\begin{cases}\text{find} & \boldsymbol{X}=[x_1, x_2, x_3, x_4]\\ \min & M_{\mathrm{ASS}}(x_1, x_2, x_3, x_4)\\ \text{s.t.} & G_i^j=\dfrac{H_i^j(E)}{f_i^j}\\ & -h_i^j(\boldsymbol{X}, E)\geqslant 0\\ & i=1,2;\quad j=1,2,3\end{cases}\tag{17}$$

根据本文方法，上述结构优化问题式(17)可以转换为一个安全系数设计问题。优化列式如下：

$$\begin{cases} \text{find} & \boldsymbol{f}=[f_1^1,f_2^1,f_3^1,f_4^1,f_1^2,f_2^2,f_3^2,f_4^2] \\ \min & M_{\mathrm{ASS}}(\boldsymbol{f}) \\ \text{s.t.} & R_i^j(\boldsymbol{X}^{\mathrm{opt}},E)\geqslant[R_i^j] \\ & i=1,2,3,4;\quad j=1,2 \end{cases} \tag{18}$$

式中: $\boldsymbol{f}=[f_1^1,f_2^1,f_3^1,f_4^1,f_1^2,f_2^2,f_3^2,f_4^2]$表示结构的强度和刚度安全系数; $M_{\mathrm{ASS}}(\boldsymbol{f})$为结构质量; $\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,x_3,x_4]$为翼面梁肋厚度; $R_i^j(\boldsymbol{X}^{\mathrm{opt}},E)$ 表示弹性模量不确定性影响下的确定安全系数下结构最优解的结构可靠度; i为翼面结构的子区域; j为结构失效模式, 包括强度失效 ($j=1$) 和刚度失效 ($j=2$)。

将初始安全系数设为 $f_1^1=f_2^1=f_3^1=f_4^1=1.35$和 $f_1^2=f_2^2=f_3^2=f_4^2=1.3$。优化算法采用序列二次规划。安全系数的求解迭代过程如图 12 和图 13 所示。

可以看到, 翼面结构的 4 个子区域的强度与刚度安全系数均不同。结构初始质量为 19.76 kg, 经过分区差异化安全系数设计后, 结构减重至 18.65 kg, 实现设计减重 1.11 kg。具体安全系数与结构可靠度的结果如表 2 所示。

综上所述, 在可靠度约束条件下, 得到了不同子区域的分区差异化安全系数。子区域 4 的强度/刚度约束和子区域 1 的刚度约束成为该结构的主要约束, 子区域 2 的强度约束为次要约束。与上述约束相比, 子区域 3 的约束对设计结果的影响最小。无论子区域 1 的强度安全系数、子区域 2 的刚度安全系数和子区域 3 的强度/刚度安全系数如何变化, 结构可靠度都不会显著降低。

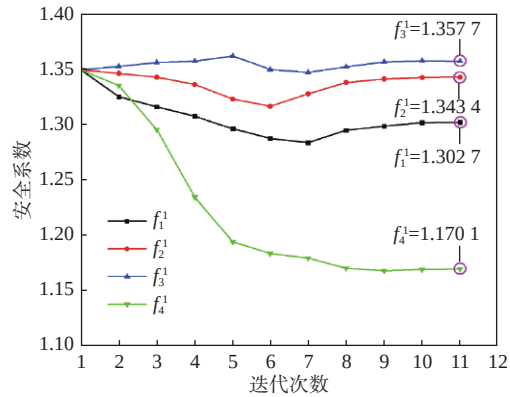


图 12　结构强度安全系数迭代曲线

Fig. 12　Structural strength safety factor iteration solution curves of wing

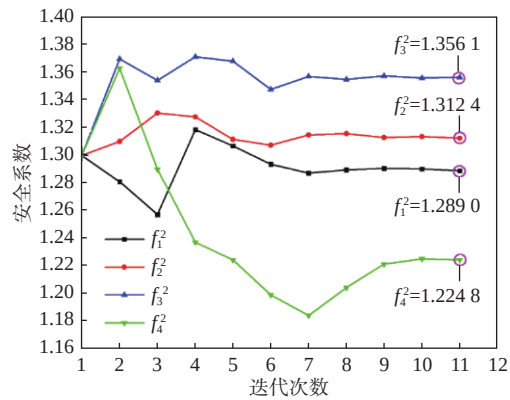


图 13　结构刚度安全系数迭代曲线

Fig. 13　Structural stiffness safety factor iteration solution curves of wing

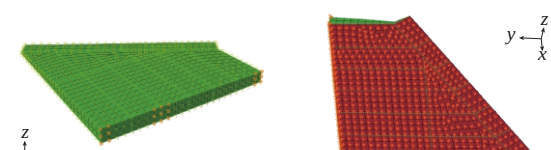
表 2　翼面结构分区差异化安全系数设计结果

Table 2　Results of sub-regional differentiated safety factors design

子区域 i	结构可靠度 η_i^j		安全系数 f_i^j	
	强度 η_i^1	刚度 η_i^2	强度 f_i^1	刚度 f_i^2
$i=1$	1	0.952 9	1.302 7	1.289 0
$i=2$	0.968 4	1	1.343 4	1.312 4
$i=3$	1	1	1.357 7	1.356 1
$i=4$	0.950 8	0.953 6	1.170 1	1.224 8

4.2　飞行器翼尖结构

本节采用如图 14(a) 所示的一个飞行器翼尖结构, 下翼面施加如图 14(b) 所示的均布载荷 $F=0.02$ MPa。



(a) 飞行器翼尖结构　　(b) 均布载荷

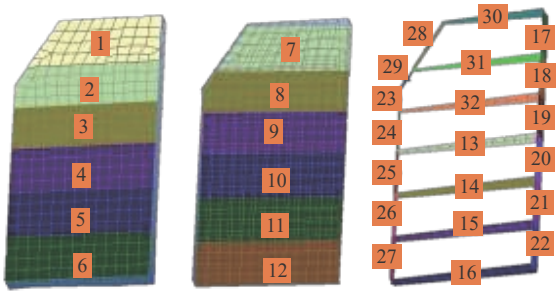
图 14　翼尖结构与载荷工况

Fig. 14　Wing tip structure and load condition

在本例中考虑了细致的 32 个子区域划分如图 15 所示与结构的强度失效模式, 设计变量为每个区域内蒙皮、梁或肋的厚度 $\boldsymbol{A}=[A_1,A_2,\cdots,A_{30}]$。结构的材料属性均满足正态分布, 变异系数为 0.1。优化目标依然是结构减重, 材料参数与 4.1 节相同, 许用应力 $[\sigma]^{\mathrm{c}}=465$ MPa, 优化列式如下:

$$\begin{cases} \text{find} & \boldsymbol{A}=[A_1,A_2,\cdots,A_{32}] \\ \min & M_{\mathrm{ASS}}(\boldsymbol{A}) \\ \text{s.t.} & G_i^j=\dfrac{H_i^j(F)}{f_i^j}-h_i^j(\boldsymbol{A},F)\geqslant 0 \\ & i=1,2,\cdots,32;\quad j=1 \end{cases} \tag{19}$$

根据本文方法, 上述结构优化问题式(19)可以



(a) 上蒙皮 (b) 下蒙皮 (c) 梁肋结构

图 15 翼尖结构子区域划分

Fig. 15 Sub-region label of wing tip structure

转换为一个安全系数设计问题。优化列式如下：

$$\begin{cases} \text{find} & \boldsymbol{f}=[f_1^1,f_2^1,\cdots,f_{32}^1] \\ \min & M_{\text{ASS}}(\boldsymbol{f}) \\ \text{s.t.} & R_i^j(\boldsymbol{A}^{\text{opt}},F)\geqslant[R_i^j] \\ & i=1,2,\cdots 32;\quad j=1 \end{cases} \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{f}=[f_1^1,f_2^1,\cdots,f_{32}^1]$为 32 个子区域的强度安全系数；$R_i^j(\boldsymbol{A}^{\text{opt}},F)$ 为均布载荷下确定安全系数的结构最优解的结构可靠度；$[R_i^j]$为结构可靠性约束值，此处取 0.99；为翼尖结构的子区域；j为结构失效模式，本例中只包括强度失效 ($j=1$)。

各子区域的初始安全系数设为 $f_1^1=f_2^1=\cdots=f_{32}^1=1.45$，采用传统的统一安全系数设计与分区差异化安全系数设计 2 种方法，对翼尖结构进行优化设计，安全系数与结构可靠度的结果如表 3 所示，结构质量结果如表 4 所示。

如表 3 所示，传统的统一安全系数每个子区域取值相同 $f_1^1=f_2^1=\cdots=f_{32}^1=1.45$，而分区差异化安全系数给出了 32 个子区域不同的安全系数，其中，27 个子区域安全系数均小于 1.45，最小安全系数 $f_4^1=1.096$，且 32 个子区域均满足结构强度可靠性设计要求。由此可见，在满足可靠性设计要求的前提下，分区差异化安全系数能够给出更小的安全系数，最大程度地合理挖掘材料性能与设计空间，从而使得结构设计质量相对更轻。如表 4 所示，分区差异化安全系数设计与统一安全系数设计相比减重 3.926 kg。图 16 给出了分区差异化安全系数中飞行器翼尖结构最大位移的概率密度函数。在实际应用中，由于气动性能与飞控特性等工程实际的不同，可以结合该概率分布和相应的位移要求进行综合可靠性评估与验证。

综上所述，传统的统一安全系数虽然能满足可靠性设计的基本要求，但未能充分挖掘设计空间，造成大部分区域的安全系数冗余。基于可靠性的分区差异化安全系数设计，在满足可靠性要求的基础上，更合理地挖掘材料性能与设计空间，给出比统一安全系数更小的分区差异化安全系数，从而实现设计减重。

表 3 统一安全系数设计与分区差异化安全系数设计结果对比

Table 3 Results comparison of traditional safety factor design and sub-regional differentiated safety factors design

子区域 i	安全系数 f_i^1		结构可靠度 R_i^1	
	传统安全系数设计	分区差异化安全系数设计	传统安全系数设计	分区差异化安全系数设计
1	1.45	1.249	1	0.999 100
2	1.45	1.152	1	0.999 720
3	1.45	1.305	1	0.995 530
4	1.45	1.096	1	0.994 800
5	1.45	1.311	1	0.996 470
6	1.45	1.152	1	0.997 200
7	1.45	1.297	0.995 34	0.990 740
8	1.45	1.413	1	0.999 400
9	1.45	1.299	1	0.999 940
10	1.45	1.210	1	0.994 090
11	1.45	1.404	1	0.994 930
12	1.45	1.261	1	0.993 180
13	1.45	1.347	1	0.994 490
14	1.45	1.449	1	0.996 570
15	1.45	1.500	1	0.996 160
16	1.45	1.500	1	0.994 830
17	1.45	1.302	1	0.996 290
18	1.45	1.402	1	0.997 290
19	1.45	1.454	0.996 97	0.990 880
20	1.45	1.189	1	0.991 960
21	1.45	1.246	1	0.992 610
22	1.45	1.307	0.994 10	0.990 072
23	1.45	1.253	1	0.999 970
24	1.45	1.352	1	0.991 330
25	1.45	1.208	1	0.991 290
26	1.45	1.247	1	0.999 390
27	1.45	1.500	1	0.999 110
28	1.45	1.451	1	0.999 350
29	1.45	1.246	1	0.999 190
30	1.45	1.303	1	0.998 580
31	1.45	1.450	1	0.998 380
32	1.45	1.401	1	0.999 320

表 4 统一安全系数设计与分区差异化安全系数设计结果质量对比

Table 4 Structural mass comparison of traditional safety factor design and sub-regional differentiated safety factors design

方法	结构质量/kg
统一安全系数设计	101.370
分区差异化安全系数设计	97.444

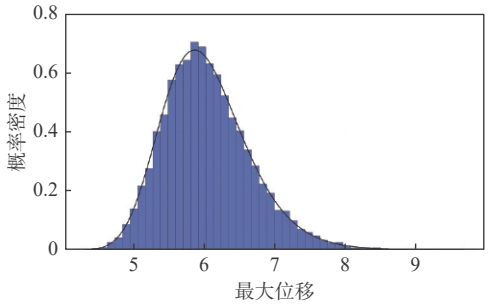


图 16　翼尖结构最大位移的概率密度分布

Fig. 16　Probability density distribution of maximum displacement of wing tip structure

5　结　论

针对复杂飞行器结构轻量化与高可靠性的设计要求, 针对结构不同部件不同子区域的安全系数设计方法进行了研究, 本文提出分区差异化安全系数设计方法, 通过一个 4 子区域翼面结构和一个 32 子区域的翼尖结构算例对本文方法进行了验证。

1) 建立了飞行器结构可靠度与分区差异化安全系数之间的映射关系, 使结构在满足可靠性约束的前提下, 对各个子区域设计不同的安全系数, 从而扩大设计空间。

2) 针对传统的统一安全系数设计方法对不确定性影响粗略估计和设计方案过于保守的问题, 建立了分区差异化安全系数设计模型, 对结构可靠性优化和安全系数优化进行双层嵌套处理, 保证最终结构方案能够同时满足精细化的不确定性影响分析要求与结构轻量化要求。

3) 针对复杂服役环境下的飞行器典型结构不同子区域的安全系数设计问题, 以 4 子区域的翼面结构为验证算例, 显示了在满足结构强度/刚度可靠度 95% 设计要求前提下, 实现了绝大部分子区域的结构强度分区差异化安全系数小于统一安全系数 1.35, 结构刚度分区差异化安全系数小于统一安全系数 1.3, 从而使得结构设计质量相对更轻达 1.11 kg。以 32 个子区域的翼尖结构为验证算例, 显示了在满足结构强度可靠度 99% 设计要求前提下, 实现了结构强度分区差异化安全系数中 27 个子区域的取值均小于统一安全系数 1.45, 从而使得结构设计质量相对更轻达 3.926 kg。通过 2 个算例验证了分区差异化安全系数设计方法的正确性、可靠性与先进性, 为未来大型先进复杂系统的结构设计提供了一种思路, 具有实际的工程意义。

参考文献（References）

[1] Wang G Y. On the development of uncertain structural mechanics [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(2): 205-211.

[2] 王宇, 黄东东, 郭士钧, 等. 变体机翼后缘多学科设计与优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 415-424.
Wang Y, Huang D D, Guo S J, et al. Multidisciplinary design and optimization of trailing edge of morphing wing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 415-424(in Chinese).

[3] Verderaime V. Aerostructural safety factor criteria using deterministic reliability[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1993, 30(2): 244-247.

[4] Elishakoff I. Safety factors and reliability: friends or foes? [M]. Berlin: Springer, 2004.

[5] Ellingwood B, Galambos T V. Probability-based criteria for structural design[J]. Structural Safety, 1983, 1(1): 15-26.

[6] Elishakoff I, Ferracuti B. Fuzzy sets based interpretation of the safety factor[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2006, 157(18): 2495-2512.

[7] Ben-haim Y. A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1994, 14(4): 227-245.

[8] Lincoln J W. Risk assessment of an aging military aircraft[J]. Journal of Aircraft, 1985, 22(8): 687-691.

[9] Frangopol D M, 刘东. 基于可靠性的结构优化概念和方法[J]. 力学进展, 1988, 18(4): 541-549.
Frangopol D M, Liu D. Concept and method of structural optimization based on reliability[J]. Advances in Mechanics, 1988, 18(4): 541-549(in Chinese).

[10] Lee B W, Lim O K. Application of stochastic finite element method to optimal design of structures[J]. Computers & Structures, 1998, 68(5): 491-497.

[11] Papadrakakis M, Lagaros N D. Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(32): 3491-3507.

[12] Youn B D, Choi K K. A new response surface methodology for reliability-based design optimization[J]. Computers & Structures, 2004, 82(2-3): 241-256.

[13] Youn B D, Choi K K, Park Y H. Hybrid analysis method for reliability-based design optimization[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(2): 221-232.

[14] Evgrafov A, Patriksson M. Stochastic structural topology optimization: discretization and penalty function approach[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2003, 25(3): 174-188.

[15] Agarwal H. Reliability based design optimization: formulations and methodologies[M]. South Bend: University of Notre Dame, 2004.

[16] Bae H R, Grandhi R, Canfield R. Reliability-based design optimization under imprecise uncertainty[C]//Proceedings of the 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2005.

[17] Deb K, Gupta S, Daum D, et al. Reliability-based optimization using evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(5): 1054-1074.

[18] Kharmanda G, Lambert S, Kourdi N, et al. Reliability-based topology optimization for different engineering applications[J]. International Journal of CAD/CAM, 2007, 7(1): 61-69.

[19] Chen X, Wang X J, Wang L, et al. Uncertainty quantification of multi-dimensional parameters for composite laminates based on

grey mathematical theory[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 55: 299-313.

[20] Elishakoff I, Elettro F. Interval, ellipsoidal, and super-ellipsoidal calculi for experimental and theoretical treatment of uncertainty: which one ought to be preferred?[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(7-8): 1576-1586.

[21] Wang L, Wang X J, Wang R X, et al. Time-dependent reliability modeling and analysis method for mechanics based on convex process[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(1): 914893.

[22] Jiang C, Bi R G, Lu G Y, et al. Structural reliability analysis using non-probabilistic convex model[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 254: 83-98.

[23] Meng Z, Zhou H L, Li G, et al. A decoupled approach for non-probabilistic reliability-based design optimization[J]. Computers & Structures, 2016, 175: 65-73.

[24] Qiu Z P, Elishakoff I. Antioptimization of structures with large uncertain-but-non-random parameters via interval analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 152(3-4): 361-372.

[25] Wang L, Cai Y R, Liu D L. Multiscale reliability-based topology optimization methodology for truss-like microstructures with unknown-but-bounded uncertainties[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 339: 358-388.

[26] Ching J. Equivalence between reliability and factor of safety[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2009, 24(2): 159-171.

[27] Zhang H W, Dong S H, Ling J T, et al. A modified method for the safety factor parameter: the use of big data to improve petroleum pipeline reliability assessment[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2020, 198(C): 106892.

[28] Yin J H, Du X P. A safety factor method for reliability-based component design[J]. Journal of Mechanical Design, 2021, 143(9): 091705.

[29] Moghaddam P T, Dehkordi P F, Ghazavi M. Reliability analysis-based safety factor for stability of footings on frictional soils[J]. Geomechanics and Engineering, 2023, 33(6): 543-552.

[30] Hao N, Li X, Li Y L, et al. A novel reliability-based method of calibrating safety factor: application to the cemented sand and gravel dams[J]. Engineering Geology, 2022, 306: 106719.

[31] Wang X J, Wang L, Qiu Z P. Safety estimation of structural systems via interval analysis[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(3): 614-623.

[32] Wang X J, Shi Q H, Fan W C, et al. Comparison of the reliability-based and safety factor methods for structural design[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 72: 68-84.

[33] Bristow J W, Irving P E. Safety factors in civil aircraft design requirements[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(3): 459-470.

[34] Sarja A, Vesikari E. Durability design of concrete structures[M]. Boca Raton: CRC Press, 2004.

[35] Wang L, Xiong C, Yang Y W. A novel methodology of reliability-based multidisciplinary design optimization under hybrid interval and fuzzy uncertainties[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 337: 439-457.

[36] Heath W G. The changing scene of structural airworthiness[J]. The Aeronautical Journal, 1980, 84(831): 81-92.

[37] Muller G E, Schmid C J. Factor of safety-USAF design practice: AFFDL-TR-78-8[R]. Dayton: Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, 1978.

[38] Freudenthal A M. The safety of structures[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1947, 112(1): 125-159.

[39] Ang A H, Amin M. Reliability of structures and structural systems[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1968, 94(2): 671-694.

[40] Cornell C A. Structural safety specification based on second-moment reliability analysis[C]//Proceedings of the Symposium on Concepts of Safety of Structures and Methods of Design. Zurich : International Association for Bridge and Structural Engineering , 1969.

Sub-regional differentiated safety factors design method for aircraft structure

XU Yusheng[1], ZHANG Yinxuan[2], WU Jiangpeng[2], CHEN Liang[2], WANG Lei[1], WANG Xiaojun[1,*]

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: The structural safety factor of an aircraft, defined as the ratio of design load to service load, is a key parameter in aircraft design. Traditional design methods rely heavily on engineering experience, leading to subjective safety factor values and insufficient objectivity in quantifying uncertainties. For advanced aircraft requiring refined design, the uniform safety factor applied across all components results in overly conservative designs that limit ultimate flight performance. In order to solve this limitation, it is necessary to develop a sub-regional differentiated safety factor design method to better explore the material properties and design space on the premise of ensuring the reliability design requirements. In this paper, probabilistic reliability design optimization theory is used to study the uncertainty of the structural system, and the mapping relationship between structural reliability and sub-regional differentiated safety factors is established, and the design method of sub-regional differentiated safety factors is developed. Using the simplified engineering model of the wing-tip structure as an example, it is demonstrated that, assuming the design requirement of 99% structural strength reliability is met, the sub-regional differentiated safety factors in the majority of the structure's subregions are less than the unified safety factor of 1.45, resulting in a relatively lighter design weight of up to 3.926 kg.

Keywords: sub-regional differentiated safety factors; structural probabilistic reliability; safety factor design method; nested optimization; reliability-based design optimization

Received: 2024-05-21; **Accepted**: 2024-07-10; **Published Online**: 2024-07-30 10:03
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240729.1421.001
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (12472193,12522205)
* **Corresponding author**. E-mail: xjwang@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0356

球舱系统俯仰/横滚通道动力学建模及控制分析

李一健[1,2]，周江华[1,2,*]，张晓军[1]，赵春阳[1]，徐国宁[1,2]

(1. 中国科学院空天信息创新研究院，北京 100094；2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘 要：作为成熟的临近空间飞行器平台，高空科学气球在天文观测上有特殊优势。忽视滚转效应的常规球舱吊舱平台姿态方位单轴控制已不再完全适用空间科学新应用场景，需深入研究球舱俯仰/横滚通道运动和控制特性，提高姿态控制系统整体性能。基于此，使用拉格朗日方程建模法对球舱俯仰/横滚通道动力学特征进行建模，并给出精确模态计算方法。对动力学模型线性化处理，并进行可控性和可观测性分析，给出力矩阻尼方式和主动补偿方式控制策略，并针对力矩阻尼控制策略设计了基于线性二次型调节器 (LQR) 的控制器和 Kalman 观测器，进行 Simulink 仿真验证。所提球舱俯仰/横滚通道动力学建模和模态计算方法进一步揭示了球舱系统运动特性，所提控制策略及仿真验证为高空科学气球吊舱姿态控制系统的设计及优化提供了重要参考。

关 键 词：高空科学气球；俯仰控制；横滚控制；拉格朗日建模；模态分析；线性二次型调节器

中图分类号：V212; TB553

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2466-11

高空科学气球在天文观测上的应用早在20世纪中叶就已经开始。美国普林斯顿大学利用高空科学气球搭载了世界上第一台球载望远镜 Stratoscope I，成功观测并获取太阳米粒组织图像[1]。这次气球平台的试验取得了巨大成功，使科学家发现了其在天文观测领域的巨大潜能。

临近空间气球平台是由气球通过绳笼连接吊舱的多自由度、多物体软连接的悬挂运动系统，其运动主要分为在水平面的转动和在铅锤面的晃动，即方位通道和俯仰/横滚通道的运动[2]。

随着各国对科学气球持续研发投入，高空科学气球已经发展成为成熟的临近空间飞行器平台。高空科学气球承载了大量的临近空间天文观测活动，其中，比较著名的计划有平流层太赫兹天文台 STO/STO-2[3-4]、球载大孔径亚毫米波望远镜 BLAST-TNG/Pol[5-8]、日出 SUNRISE I/II/III[9-11]、脉冲星 X-射线偏振望远镜 PoGO/PoGO+[12-13] 等。随着天文观测研究的深入，超远距离行星、星云等宇宙天体开始成为研究目标[14]。行星科学逐步发展对于星体局部观测有更高的要求。忽视滚转效应的常规球舱吊舱平台姿态方位单轴控制已不再完全适用以上应用场景。吊舱内精密观测仪器可以使用快摆镜等方式进行观测精度补偿，但在高精度指向控制要求下，也需要球载吊舱提供更稳定的一级指控。

在已有的高空气球平台研究中，文献 [15] 对方位通道建立了动力学模型(方位扭转-阻尼模型)，文献 [16-17] 利用双丝摆模型对方位通道进行建模。针对铅锤面的摆动，文献 [18-19] 在 FIREBall 实验及文献 [20] 在 SuperBIT 实验中，均对球载吊舱系统运动数据进行了频率分析。文献 [21] 讨论了球舱系统自然模态引起的强共振效应。相关实验数据表明，俯仰/横滚通道摆动对高精度指向性能

收稿日期：2024-05-27；**录用日期**：2024-08-23；**网络出版时间**：2024-10-08 09:13
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240930.1520.004
基金项目：国家重点研发计划 (2022YFB3901805,2022YFB390180502)；国家自然科学基金 (52227811)
* **通信作者**. E-mail：zhoufma@aoe.ac.cn

引用格式：李一健，周江华，张晓军，等. 球舱系统俯仰/横滚通道动力学建模及控制分析 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2466-2476. Li Y J，Zhou J H，Zhang X J，et al. Dynamic modeling and control analysis of pitch/roll channels for balloon-gondola system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2466-2476（in Chinese）.

有显著干扰作用。文献 [22-23] 对于俯仰/横滚采用了钟摆近似分析。文献 [24] 在研究球舱系统降落过程中及文献 [25] 在研究球舱系统发放过程中, 均采用了多体动力学分析法, 但主要用于动力学建模仿真。目前, 俯仰/横滚通道运动模态特性分析及控制在国内外文献中受到的关注较少。

为提升球载望远镜高精度指向性能, 满足超远距离宇宙天体的天文观测需求, 需要进一步对俯仰/横滚通道运动进行运动分析, 建立精确动力学模型。从动力学分析角度来看, 俯仰/横滚通道运动具有相似性, 因此, 可以进行统一分析。

本文首先对俯仰/横滚通道进行运动分析, 进而采用拉格朗日方程建模法获得精确的动力学模型, 并对模型线性化, 进行模态分析, 得到精确的模态计算方法。然后, 分析俯仰/横滚通道可控性和可观测性, 制定相应控制策略。最后, 对于力矩阻尼方式进行控制器设计, 并进行仿真验证。

1　俯仰/横滚通道运动分析

1.1　上升与平飞过程

高空科学气球上升过程中, 对流层存在因温差导致的剧烈空气流动现象, 因此, 气球吊舱系统俯仰/横滚通道有较大摆动。在高空平飞过程中, 临近空间平流层大气运动相对稳定, 因此, 气球吊舱系统俯仰/横滚通道摆动减弱, 但依旧存在气流微小变化引发大横截面气球受力大于小横截面吊舱所产生的相对摆动。塔塔基础研究院气球设施 (Tata Institute of Fundamental Research Balloon Facility, TIFR-BF) 在 2016 年的高空气球计划中对吊舱在水平面的摆动情况进行了观测[26]。实际观测结果如图 1 所示, 上升阶段具有较大摆动, 平均摆动幅度为 1°, 平飞阶段后摆动开始衰减, 平均摆动幅度为 0.05°[27]。

平飞阶段俯仰/横滚通道的摆动幅度在角分级, 以往控制要求为角度级, 不是主要干扰因素, 因此, 不采取通道控制措施。但在角秒级甚至亚角秒级精度控制要求, 应重视平飞阶段俯仰/横滚通道的摆动。

1.2　俯仰/横滚通道双摆系统

气球吊舱系统是气球-吊绳-吊舱构成的多物体软连接的悬挂运动系统, 运动特性相对复杂, 因此, 以往文献中, 通常将俯仰/横滚通道的摆动简化拆分成 2 种运动进行研究[22-23]: ①将吊舱简化为质点, 气球简化为刚体, 构成“气球质心+吊舱质点”的双摆运动; ②将气球固定, 吊舱作为刚体, 构成“吊绳+吊舱”的双摆运动。如图 2 所示。

简化运动 1 是气球重心与吊绳结合点不一致

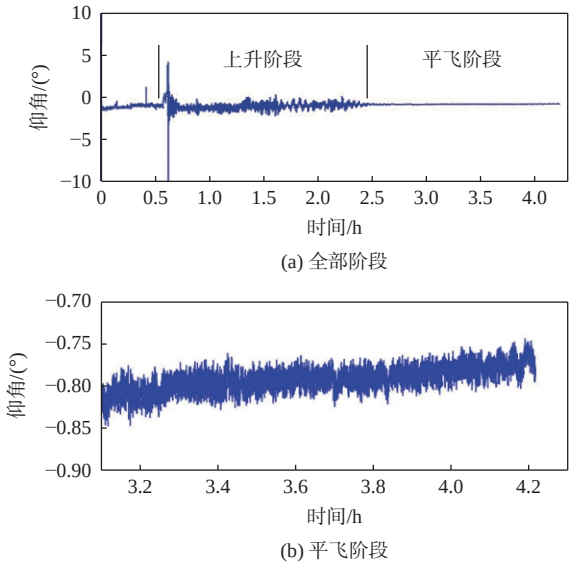


图 1　吊舱横滚通道运动特性[26]

Fig. 1　Roll channel motion characteristics of balloon-borne gondola[26]

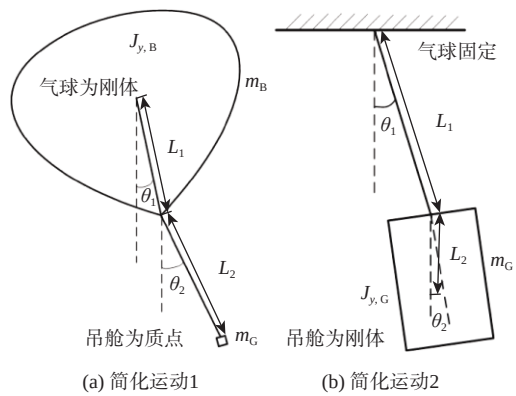


图 2　球舱系统俯仰/横滚通道近似分析

Fig. 2　Approximate analysis of pitch/roll channels of balloon-gondola system

及吊舱和气球发生水平面相对位移联合作用下造成的双摆运动, 文献 [23] 指出该双摆运动由长周期和短周期摆动组成。简化运动 2 是吊舱重心与吊绳结合点不一致所导致的双摆运动, 文献 [23] 指出该双摆运动由快周期和慢周期组成。

实际计算过程中, 忽略周期较大的慢周期模态, 保留简化运动 2 中周期较短的模态, 即快周期模态, 与简化运动 1 中长周期、短周期作为原系统的近似复摆模态。这种近似方法进行了大量简化, 与实际运动有较大差异, 因此, 获得的运动模态存在较大误差。

2　动力学建模及模态分析

2.1　拉格朗日建模

建模采用拉格朗日方程建模法。拉格朗日方程建模法不出现约束反力, 因此, 建立体系方程比

较方便，且形式简洁，便于分析和线性化。由于临近空间中空气比较稀薄，基本可忽略不计，系统的主动力只有重力，其为唯一的保守力，同时，球舱耦合系统属于多物体连接构成系统，因此，适合采用拉格朗日分析方法[28-29]。

将气球和吊舱都视为刚体，并与绳笼联合处理。该分析方法最大程度还原了气球-吊绳-吊舱作为耦合系统运动的真实情况，因此，可以更好地研究其运动本质。假定球舱系统所有的运动都发生在俯仰/横滚平面内，如图3所示，其中，O_B为气球质心，O_G为吊舱质心。

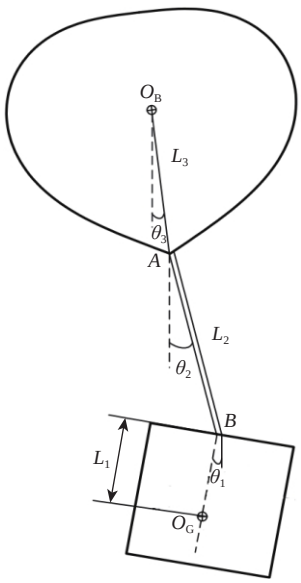


图3 球舱系统俯仰/横滚通道

Fig. 3 Pitch/roll channels of balloon-gondola system

假定气球沿x轴水平定高飞行，其质心位置用(x,z,o)表示，忽略气球方位转动及气球质心和浮心的差异，结合图3可得方程：

$$\begin{cases} x_G = x + L_3\sin\theta_3 + L_2\sin\theta_2 + L_1\sin\theta_1 \\ z_G = z - (L_3\cos\theta_3 + L_2\cos\theta_2 + L_1\cos\theta_1) \end{cases} \tag{1}$$

式中：x_G、z_G为吊舱质心位置坐标。

设该系统的动能项为T，则有

$$T = \frac{1}{2}(1+k_m)m_B\left(\dot{x}^2+\dot{z}^2\right) + \frac{1}{2}m_G\left(\dot{x}_G^2+\dot{z}_G^2\right) + \frac{1}{2}(1+k_J)J_{y,B}\dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2}J_{y,G}\dot{\theta}_1^2 \tag{2}$$

设该系统的位能为U，则

$$U = m_G g\left[z-(L_3\cos\theta_3 + L_2\cos\theta_2 + L_1\cos\theta_1)\right] + m_B g z \tag{3}$$

式中：m_G为吊舱质量；m_B为气球质量；g为重力加速度；$J_{y,B}$为气球俯仰/横滚轴惯量；$J_{y,G}$为吊舱过质心俯仰/横滚轴惯量；k_m为气球附加质量系数；k_J为气球附加惯量系数；L_1为吊舱质心到绳笼连接点的距离；L_2为绳笼长度；L_3为气球质心到绳笼连接点的距离。

则系统拉格朗日函数为

$$L = T - U \tag{4}$$

设广义坐标$q=(x,\theta_1,\theta_2,\theta_3)$，将式(1)～式(3)代入拉格朗日方程：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F_w \tag{5}$$

式中：F_w为作用于横滚通道的非保守广义外力矩；t为时间。

可得出：

1）$q=x$的微分方程为

$$[(1+k_m)m_B + m_G]\ddot{x} + \sum_{i=1}^{3} m_G L_i\left(\ddot{\theta}_i\cos\theta_i - \dot{\theta}_i^2\sin\theta_i\right) = F_x \tag{6}$$

2）$q=\theta_1$的微分方程为

$$J_{y,G}\ddot{\theta}_1 + m_G L_1(\ddot{x}\cos\theta_1 + \ddot{z}\sin\theta_1) + m_G L_1 g\sin\theta_1 + \sum_{i=1}^{3} m_G L_1 L_i\left(\ddot{\theta}_i\cos(\theta_1-\theta_i) + \dot{\theta}_i^2\sin(\theta_1-\theta_i)\right) = F_{\theta_1} \tag{7}$$

3）$q=\theta_2$的微分方程为

$$m_G L_2(\ddot{x}\cos\theta_2 + \ddot{z}\sin\theta_2) + m_G L_2 g\sin\theta_2 + \sum_{i=1}^{3} m_G L_2 L_i\left(\ddot{\theta}_i\cos(\theta_2-\theta_i) + \dot{\theta}_i^2\sin(\theta_2-\theta_i)\right) = F_{\theta_2} \tag{8}$$

4）$q=\theta_3$的微分方程为

$$(1+k_J)J_{y,B}\ddot{\theta}_3 + m_G L_3(\ddot{x}\cos\theta_3 + \ddot{z}\sin\theta_3) + m_G L_3 g\sin\theta_3 + \sum_{i=1}^{3} m_G L_3 L_i\left(\ddot{\theta}_i\cos(\theta_3-\theta_i) + \dot{\theta}_i^2\sin(\theta_3-\theta_i)\right) = F_{\theta_3} \tag{9}$$

构建矩阵引入$v_x=\dot{x}$，$\omega_i=\dot{\theta}_i$，$i=1,2,3$。

由式(6)～式(9)即可导出运动学方程：

$$\boldsymbol{M}\begin{bmatrix}\dot{v}_x\\ \dot{\omega}_1\\ \dot{\omega}_2\\ \dot{\omega}_3\end{bmatrix} + \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix}F_x\\ F_{\theta_1}\\ F_{\theta_2}\\ F_{\theta_3}\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} (1+k_m)m_B + m_G & m_G L_1\cos\theta_1 & m_G L_2\cos\theta_2 & m_G L_3\cos\theta_3 \\ m_G L_1\cos\theta_1 & J_{y,G} + m_G L_1^2 & m_G L_1 L_2\cos(\theta_1-\theta_2) & m_G L_1 L_3\cos(\theta_1-\theta_3) \\ m_G L_2\cos\theta_2 & m_G L_2 L_1\cos(\theta_2-\theta_1) & m_G L_2^2 & m_G L_2 L_3\cos(\theta_2-\theta_3) \\ m_G L_3\cos\theta_3 & m_G L_3 L_1\cos(\theta_3-\theta_1) & m_G L_3 L_2\cos(\theta_3-\theta_2) & m_G L_3^2 + (1+k_J)J_{y,B} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-\sum_{i=1}^{3}m_{\mathrm{G}}L_i\omega_i^2\sin\theta_i\\ m_{\mathrm{G}}L_1g\sin\theta_1+\sum_{i=1}^{3}m_{\mathrm{G}}L_1L_i\omega_i^2\sin(\theta_1-\theta_i)\\ m_{\mathrm{G}}L_2g\sin\theta_2+\sum_{i=1}^{3}m_{\mathrm{G}}L_2L_i\omega_i^2\sin(\theta_2-\theta_i)\\ m_{\mathrm{G}}L_3g\sin\theta_3+\sum_{i=1}^{3}m_{\mathrm{G}}L_3L_i\omega_i^2\sin(\theta_3-\theta_i)\end{bmatrix}\tag{12}$$

该运动学方程是气球吊舱系统俯仰/横滚控制通道运动模型。

2.2　模型线性化及模态分析

第 2.1 节已经得到气球吊舱系统的运动模型, 该模型是非线性系统。目前, 对于非线性系统的分析方法比较复杂, 无法直观地了解系统的运动特性, 不利于应用现有的控制算法对其动态性能进行改进, 因此, 本节通过对模型的线性化分析, 建立线性化模型, 既有利于了解气球吊舱系统的运动特性, 还有利于俯仰/横滚通道控制策略的研究[30-31]。

球舱耦合系统运动可以分为基准运动和扰动运动。本文选择最常见的无偏航、且气球-吊绳-吊舱等速直线平飞运动作为基准状态, 采用小扰动方法研究小偏离基准运动, 将θ_1、θ_2、θ_3视为小量, 对$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{B}$中元素进行泰勒级数展开, 简化可得

$$\boldsymbol{M}_1=\begin{bmatrix}(1+k_{\mathrm{m}})m_{\mathrm{B}}+m_{\mathrm{G}} & m_{\mathrm{G}}L_1 & m_{\mathrm{G}}L_2 & m_{\mathrm{G}}L_3\\ m_{\mathrm{G}}L_1 & J_{y,\mathrm{G}}+m_{\mathrm{G}}L_1^2 & m_{\mathrm{G}}L_1L_2 & m_{\mathrm{G}}L_1L_3\\ m_{\mathrm{G}}L_2 & m_{\mathrm{G}}L_2L_1 & m_{\mathrm{G}}L_2^2 & m_{\mathrm{G}}L_2L_3\\ m_{\mathrm{G}}L_3 & m_{\mathrm{G}}L_3L_1 & m_{\mathrm{G}}L_3L_2 & m_{\mathrm{G}}L_3^2+(1+k_{\mathrm{J}})J_{y,\mathrm{B}}\end{bmatrix}\tag{13}$$

$$\boldsymbol{B}_1=\begin{bmatrix}0 & m_{\mathrm{G}}gL_1\theta_1 & m_{\mathrm{G}}gL_2\theta_2 & m_{\mathrm{G}}gL_3\theta_3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\tag{14}$$

令$\boldsymbol{K}_1=\mathrm{diag}\left(0,\ m_{\mathrm{G}}gL_1,\ m_{\mathrm{G}}gL_2,\ m_{\mathrm{G}}gL_3\right)$, 则有$\boldsymbol{B}_1=\boldsymbol{K}_1\left[x,\ \theta_1,\ \theta_2,\ \theta_3\right]^{\mathrm{T}}$。

再令 $\boldsymbol{q}_1=\left[x,\ \theta_1,\ \theta_2,\ \theta_3\right]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{F}=\left[F_x,\ F_{\theta_1},\ F_{\theta_2},\ F_{\theta_3}\right]^{\mathrm{T}}$。进而球舱系统俯仰/横滚控制通道运动模型可以简化为

$$\boldsymbol{M}_1\ddot{\boldsymbol{q}}_1+\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{q}_1=\boldsymbol{F}\tag{15}$$

式 (15) 即为球舱系统俯仰/横滚控制通道运动线性模型。该方程为通用动力学方程, 忽略自由阻尼作用。可通过式 (16) 求解其模态:

$$\left(\boldsymbol{K}_1-\omega^2\boldsymbol{M}_1\right)\boldsymbol{W}=0\tag{16}$$

式中: ω 为系统的固有角频率; $\boldsymbol{W}$ 为模态振型向量。

由线化模型可知, 球舱系统俯仰/横滚控制通道是四阶系统, 有 4 个运动模态, 分别为长周期模态、短周期模态、快周期模态和质心模态(零模态)。长周期模态和短周期模态由气球-吊舱质心构成的双摆运动主导, 快周期模态由吊舱刚体摆动主导。

2.3　与传统模态分析比较

利用球舱系统俯仰/横滚控制通道运动线性模型, 按照近似思路进行简化, 与文献 [23] 中近似分析方法结果进行对比。

1) 按气球+吊舱质点简化。线性模型简化可得

$$\boldsymbol{M}_2=\begin{bmatrix}(1+k_{\mathrm{m}})m_{\mathrm{B}}+m_{\mathrm{G}} & m_{\mathrm{G}}L_2 & m_{\mathrm{G}}L_3\\ m_{\mathrm{G}}L_2 & m_{\mathrm{G}}L_2^2 & m_{\mathrm{G}}L_2L_3\\ m_{\mathrm{G}}L_3 & m_{\mathrm{G}}L_2L_3 & m_{\mathrm{G}}L_3^2+(1+k_{\mathrm{J}})J_{y,\mathrm{B}}\end{bmatrix}\tag{17}$$

$$\boldsymbol{K}_2=\mathrm{diag}\left(0,\ m_{\mathrm{G}}gL_2,\ m_{\mathrm{G}}gL_3\right)\tag{18}$$

气球+吊舱质点耦合摆动频率由式 (19) 导出:

$$\left|\omega^2\boldsymbol{M}-\boldsymbol{K}\right|=\left|\lambda\boldsymbol{M}-\boldsymbol{K}\right|=0\tag{19}$$

式中: λ为简化广义特征值求解引入的中间变量, 数值上等于耦合摆动系统的固有角频率的平方; $\boldsymbol{K}$ 为气球+吊舱耦合摆振系统的广义刚度矩阵。

导出结果为

$$\begin{vmatrix}1+\dfrac{(1+k_{\mathrm{m}})m_{\mathrm{B}}}{m_{\mathrm{G}}} & L_2 & L_3\\ \lambda & \lambda L_2-g & \lambda L_3\\ \lambda & \lambda L_2 & \lambda\left(L_3+\dfrac{(1+k_{\mathrm{m}})J_{y,\mathrm{B}}}{m_{\mathrm{G}}L_3}\right)\end{vmatrix}=0\tag{20}$$

可得到模态:

$$\begin{cases}\lambda_{1,2}=\omega_{1,2}^2=\dfrac{-b_1\pm\sqrt{b_1^2-4a_1c_1}}{2a_1}\\ a_1=\dfrac{(1+k_{\mathrm{m}})(1+k_{\mathrm{J}})m_{\mathrm{B}}J_{y,\mathrm{B}}L_2}{m_{\mathrm{G}}^2L_3}\\ b_1=-g\left[\dfrac{m_{\mathrm{B}}}{m_{\mathrm{G}}}(L_2+L_3)+\dfrac{J_{y,\mathrm{B}}}{m_{\mathrm{G}}L_3}\left(1+\dfrac{m_{\mathrm{B}}}{m_{\mathrm{G}}}\right)\right]\\ c_1=\left[1+\dfrac{(1+k_{\mathrm{m}})m_{\mathrm{B}}}{m_{\mathrm{G}}}\right]g^2\end{cases}\tag{21}$$

该结果与文献 [23] 中分析结果一致。

2) 按绳+刚性吊舱简化。线性模型简化可得

$$\boldsymbol{M}_3=\begin{bmatrix}J_{y,\mathrm{G}}+m_{\mathrm{G}}L_1^2 & m_{\mathrm{G}}L_1L_2\\ m_{\mathrm{G}}L_1L_2 & m_{\mathrm{G}}L_2^2\end{bmatrix}\tag{22}$$

$$\boldsymbol{K}_3=\mathrm{diag}(m_{\mathrm{G}}gL_1,\ m_{\mathrm{G}}gL_2)\tag{23}$$

绳+刚性吊舱耦合摆动频率由式 (19) 导出, 结果为

$$\begin{vmatrix}\lambda\left(\dfrac{J_{y,\mathrm{G}}}{m_{\mathrm{G}}L_1}+L_1\right)-g & \lambda L_2\\ \lambda L_1 & \lambda L_2-g\end{vmatrix}=0\tag{24}$$

由此得到其中的快周期模态为

$$\begin{cases}\lambda_3=\omega_3^2=\dfrac{-b_2+\sqrt{b_2^2-4a_2c_2}}{2a_2}\\ a_2=\dfrac{J_{y,G}L_2}{m_GL_1}\\ b_2=-g\left(\dfrac{J_{y,G}}{m_GL_1}+L_1+L_2\right)\\ c_2=g^2\end{cases}\tag{25}$$

该结果与文献[23]中分析结果一致。

综上所述，球舱系统俯仰/横滚控制通道运动线性模型近似处理与文献[23]结果一致，证明了本文方法的可行性。相较于传统模态分析方法，球舱系统俯仰/横滚通道运动线性模型兼顾了整体耦合关系，能够计算出更精确的运动模态。

3 控制分析

3.1 可控/可观测性分析

本节采用通用的球载吊舱整体参数，具体参数如表1所示。

表1 Simulink仿真参数

Table 1 Simulink simulation parameters

气球质量/kg	气球俯仰/横滚轴惯量/(kg·m²)	气球附加质量系数	气球附加惯量系数	吊舱质量/kg	吊舱过质心俯仰/横滚轴惯量/(kg·m²)	气球底部与气球质心距离/m	结缆长度/m	吊舱质心与反捻器距离/m
2 000	2.6×10^6	0.45	0.22	1 400	3 000	49	58	3.96

令$\boldsymbol{p}_1=\dot{\boldsymbol{q}}_1=\begin{bmatrix}\dot{x} & \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，将式(15)写为一阶方程组的形式：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_1 & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{p}}_1\\ \dot{\boldsymbol{q}}_1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_1\\ -\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{p}_1\\ \boldsymbol{q}_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}\\ \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\tag{26}$$

式中：$\boldsymbol{I}$为单位矩阵。

写成规范形式为

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{p}}_1\\ \dot{\boldsymbol{q}}_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & -\boldsymbol{M}_1^{-1}\boldsymbol{K}_1\\ \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{p}_1\\ \boldsymbol{q}_1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_1^{-1}\boldsymbol{F}\\ \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\tag{27}$$

隔离外界干扰力，控制力矩u只施加在广义坐标θ_1上，即$\boldsymbol{F}$取如下形式：

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}0, 1, 0, 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}u\tag{28}$$

则线化方程可描述为

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{p}}_1\\ \dot{\boldsymbol{q}}_1\end{bmatrix}=\boldsymbol{A}_1\begin{bmatrix}\boldsymbol{p}_1\\ \boldsymbol{q}_1\end{bmatrix}+\boldsymbol{A}_2\begin{bmatrix}u\\ 0\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & -\boldsymbol{M}_1^{-1}\boldsymbol{K}\\ \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_1^{-1}\boldsymbol{b}\\ \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{b}=\begin{bmatrix}0, 1, 0, 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{29}$$

以上为球舱系统的状态空间方程。

由可控性矩阵$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_2, \boldsymbol{A}_1\boldsymbol{A}_2, \cdots, \boldsymbol{A}_1^{n-1}\boldsymbol{A}_2\end{bmatrix}$ (n=8)可得，rank($\boldsymbol{S}$)=6<8，可知2个状态不可控，结合已有的模态分析可知，$|\boldsymbol{q}_1|=x$和$|\boldsymbol{q}_1|=x$状态不可控。

故构建三自由度的新状态空间模型。通过球舱系统俯仰/横滚控制通道运动线性模型可以得到新运动模型：

$$\begin{cases}\boldsymbol{M}_4\ddot{\boldsymbol{q}}_2+\boldsymbol{K}_4\boldsymbol{q}_2=\boldsymbol{F}\\ \boldsymbol{q}_2=[\theta_1, \theta_2, \theta_3]^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{30}$$

$$\boldsymbol{M}_4=\begin{bmatrix}J_{y,G}+m_GL_1^2 & m_GL_1L_2 & m_GL_1L_3\\ m_GL_1L_2 & m_GL_2^2 & m_GL_2L_3\\ m_GL_1L_3 & m_GL_2L_3 & J_{y,B}(1+k_J)+m_GL_3^2\end{bmatrix}\tag{31}$$

$$\boldsymbol{K}_4=\mathrm{diag}(m_Gg L_1, m_Gg L_2, m_Gg L_3)\tag{32}$$

进一步可得三角度控制通道的状态方程：

$$\dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{A}_3\boldsymbol{X}+\boldsymbol{A}_4u\tag{33}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\tag{34}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_3=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}\\ \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{A}_4=\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{b}_1\\ \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{b}_1=\begin{bmatrix}1, 0, 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{35}$$

由可控性矩阵$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_3, \boldsymbol{A}_3\boldsymbol{A}_4, \cdots, \boldsymbol{A}_3^{n-1}\boldsymbol{A}_4\end{bmatrix}$ (n=6)可得，rank($\boldsymbol{S}$)=6，可知，按照上述简化后，状态可控。

对系统的可观测性进行分析，因为俯仰/滚转角θ_1及角速率$\dot{\theta}_1$可测，故测量方程为

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\end{bmatrix}\boldsymbol{X}\tag{36}$$

式中：$\boldsymbol{Y}$为系统的测量输出向量；$\boldsymbol{C}$为观测矩阵。

利用可观测性矩阵$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}, \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}_3, \cdots, \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}_3^{n-1}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ (n=6)可得，rank($\boldsymbol{V}$)=6可知新系统可观测。

综上所述，可以得出如下结论：①通过对线化模型的分析，可知状态θ_1、θ_2、θ_3可控，说明通过对吊舱施加滚转阻尼力矩，可以将θ_1、θ_2、θ_3逐渐阻尼到零位状态；②状态θ_1、θ_2、θ_3可观测说明，虽然仅俯仰/横滚角θ_1可直接测量，但通过构造状态观测器，利用俯仰/横滚角θ_1及角速率$\dot{\theta}_1$测量信息，可得到θ_2、θ_3的估计。

3.2 控制策略

实际平飞过程中，球载吊舱系统俯仰/横滚通道的平均振荡幅度小于0.05°。对于天文观测的高精度指向要求来说，需要将干扰减小到角秒级。气球吊舱系统为悬挂系统，受吊绳的约束，且漂浮在高空无任何受力支点，因此，主动控制需要力矩发生

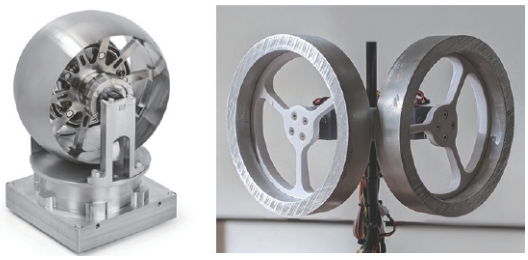
装置, 而且内在模态极容易受外界大气激发, 因此, 要实现天文观测的高精度指向要求, 需要对模态运动进行控制。

结合目前已有的控制装置, 本文提出 2 种重要的控制策略: 力矩阻尼方式和主动补偿方式。

3.2.1　力矩阻尼方式

参考球舱方位通道控制方式, 通过力矩发生装置, 将俯仰/横滚横滚角阻尼到平衡位置。不同于方位通道是完全受控通道, 由第 3.1 节可知, 气球吊舱系统俯仰/滚转通道为不完全受控通道, 因此, 使用该方式只能尽量将俯仰/横滚角阻尼到平衡位置, 而无法随意调节。

常见的力矩发生装置可以参考航天器, 采用反作用飞轮或控制力矩陀螺, 如图 4 所示。



(a) 控制力矩陀螺　　(b) 反作用飞轮

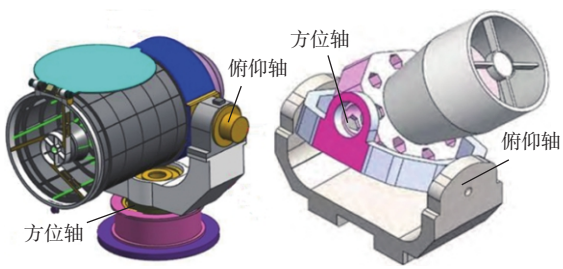
图 4　控制力矩陀螺和反作用飞轮示意图

Fig. 4　Schematic diagram of a control torque gyroscope and reaction flywheel

3.2.2　主动补偿方式

考虑到气球吊舱系统俯仰/横滚通道在平飞阶段干扰振幅较小, 因此, 不同于方位通道需要大角度机动, 俯仰/横滚通道可以设计主动实现天文观测设备的小角度转动补偿外界扰动。

俯仰通道的主动补偿方式可以利用俯仰转向结构实现, 结合方位通道有 2 种设计: 内俯仰外方位结构和内方位外俯仰结构, 如图 5 所示。



(a) 内俯仰外方位结构　　(b) 内方位外俯仰结构

图 5　内俯仰外方位结构和内方位外俯仰结构

Fig. 5　Inner pitch and outer orientation structure and inner orientation and outer pitch structure

对于横滚通道, 由于望远镜一般为长筒型, 主动补偿方式围绕望远镜的中心轴设计转动结构进行补偿, 如图 6 所示。

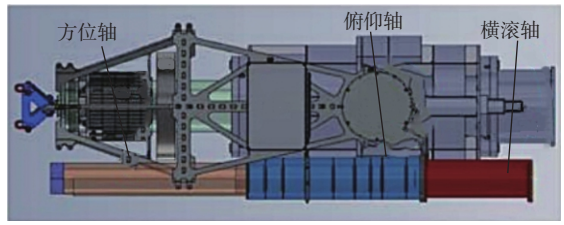


图 6　横滚通道主动补偿方式

Fig. 6　Active compensation method for roll channel

4　力矩阻尼控制器设计

由 3.2.1 节可知, 力矩阻尼方式仅可将俯仰/横滚角阻尼到平衡位置, 因此, 本节设计力矩阻尼控制器。假设仿真控制系统无阻尼, 以表 1 所示参数验证在 0.05°的干扰下, 能否将俯仰/横滚角阻尼到符合天文观测高精度指向要求 10″内。

4.1　基于 LQR 的控制器设计

通过代价函数 J 对系统的控制性能进行评价[32]:

$$J=\frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty}\left[\boldsymbol{x}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}_{\mathrm{a}}+\boldsymbol{u}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}_{\mathrm{a}}\right]\mathrm{d}t \tag{37}$$

式中: t_0 为最优控制任务的起始时刻; $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 分别为代价函数中状态量 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{a}}$ 和控制量 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{a}}$ 的权重矩阵, 决定着控制的收敛速度和能耗。

线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR) 控制的本质是通过设计出的状态反馈控制器 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}$ 使代价函数 J 取得最小值, 即找到一组控制量 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{a}}$ 同时使 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{a}}$ 足够小且 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{a}}$ 足够小, 得到最佳的控制效果。

球载吊舱系统俯仰/横滚通道的力矩阻尼 LQR 控制框图如图 7 所示, 图中, s 为拉普拉斯算子。

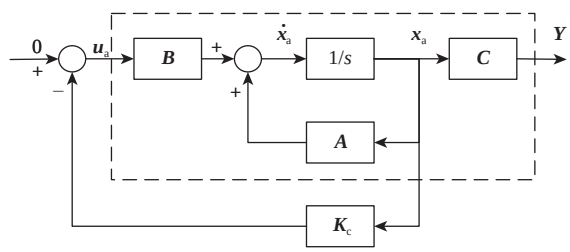


图 7　力矩阻尼 LQR 控制框图

Fig. 7　Torque damping LQR control block diagram

$\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}$ 由矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 与 $\boldsymbol{R}$ 唯一决定, 满足:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\boldsymbol{x}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}\right)=-\boldsymbol{x}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{K}\right)\boldsymbol{x}_{\mathrm{a}} \tag{38}$$

式中: $\boldsymbol{P}$ 为 LQR 代数 Riccati 方程的正定对称解矩阵。

将式 (38) 代入到式 (37) 中, 当代价函数 J 最小时, $\boldsymbol{P}$ 为 Riccati 方程式的解:

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}+\boldsymbol{Q}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}=0 \tag{39}$$

式中: $\boldsymbol{A}$ 为对应的系统状态矩阵。

选取合适的 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$, 计算出合适的状态反馈控制器 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}$, 具体参数如表 2 所示。

表 2 状态反馈控制器参数

Table 2 State feedback control device parameters

K_{c1}	K_{c2}	K_{c3}	K_{c4}	K_{c5}	K_{c6}
73 045.610 5	79 609.890 3	−29 801.605 2	42.647 0	−288.395 3	−779.409 6

4.2 Kalman 观测器设计

由 3.2.1 节可知，系统仅可获取横滚角θ_1及角速率$\dot{\theta}_1$测量信息，且系统是可观测的，因此，若要实现 LQR 控制，需要设计观测器。

设计 Kalman 观测器，其遵循线性最小方差估计准则，主要包括预测和校正 2 个部分[33]。球载吊舱系统俯仰/横滚通道的力矩阻尼 Kalman 观测框图如图 8 所示。

Kalman 观测器是通过代价最小函数策略进行求解，求解同式 (37)。选取合适的 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$，计算出适合的 Kalman 观测器 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{f}}$，具体参数如表 3 所示。

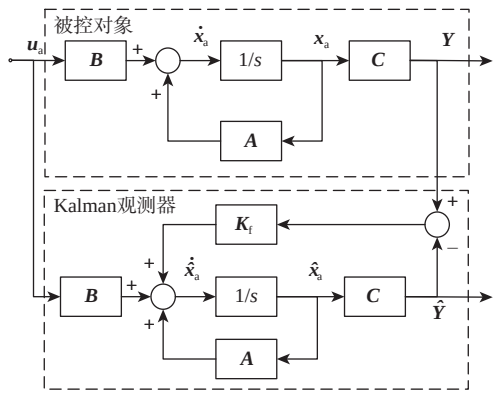


图 8 力矩阻尼 Kalman 观测框图

Fig. 8 Torque damping Kalman observation block diagram

表 3 Kalman 观测器参数

Table 3 Kalman observer parameters

K_{f1}	K_{f2}	K_{f3}	K_{f4}	K_{f5}	K_{f6}
[12.842 56, 0.111 1]	[−9.820 5, 0.578 3]	[−0.442 6, −0.314 1]	[0.111 1, 1.099 9]	[0.623 2, 1.029 4]	[1.420 6, 0.862 5]

4.3 仿真验证

搭建 Simulink 仿真程序，如图 9 所示。

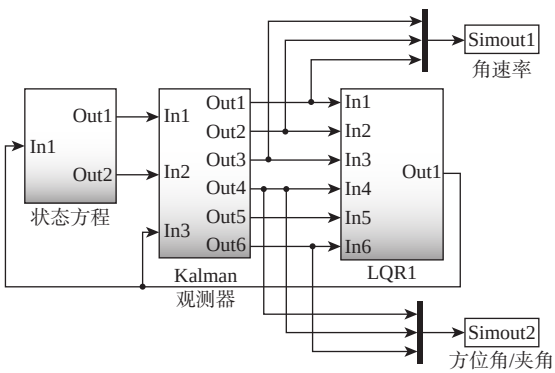


图 9 Simulink 结构

Fig. 9 Simulink structure

1）由球载吊舱系统俯仰/横滚通道对初始状态 1 的$\dot{\theta}_1=\dot{\theta}_2=\dot{\theta}_3=\theta_2=\theta_3=0$、$\theta_1=20''$响应，可得状态变量绳笼夹角和吊舱横滚角响应，如图 10 所示。对状态变量绳笼夹角和吊舱横滚角响应进行频谱分析，结果如图 11 所示。

使用基于 LQR 的控制器和 Kalman 观测器系统对于初始状态 1 响应，可得状态变量绳笼夹角和吊舱横滚角响应，如图 12 所示。对状态变量绳笼夹角和吊舱横滚角响应进行频谱分析，结果如图 13 所示。

2）由球载吊舱系统俯仰/横滚通道对初始状态 2$\dot{\theta}_1=\dot{\theta}_2=\dot{\theta}_3=\theta_2=\theta_3=0$、$\theta_1=180''$响应，可得状态变量绳笼夹角和吊舱横滚角响应，如图 14 所示。

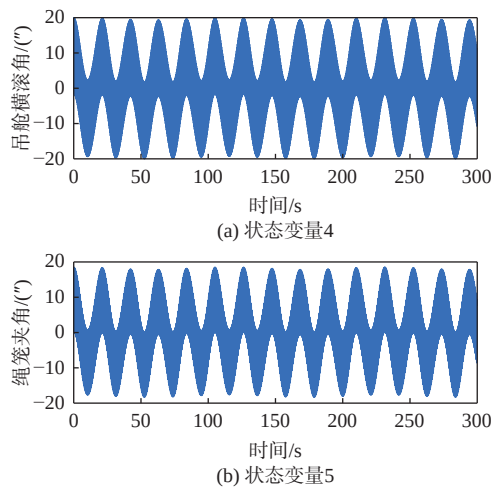


图 10 初始状态 1 下通道初始状态响应

Fig. 10 Initial state response of channel in initial state 1

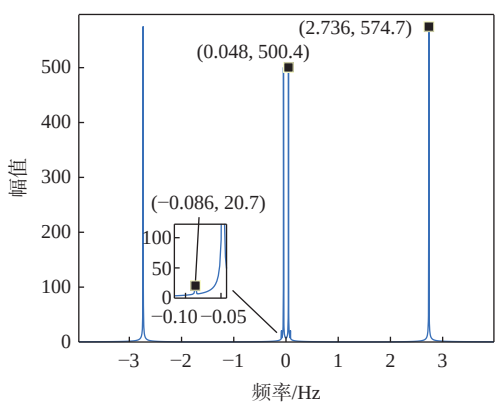


图 11 初始状态 1 下通道初始状态响应频谱分析

Fig. 11 Spectral analysis of initial state response of channel in initial state 1

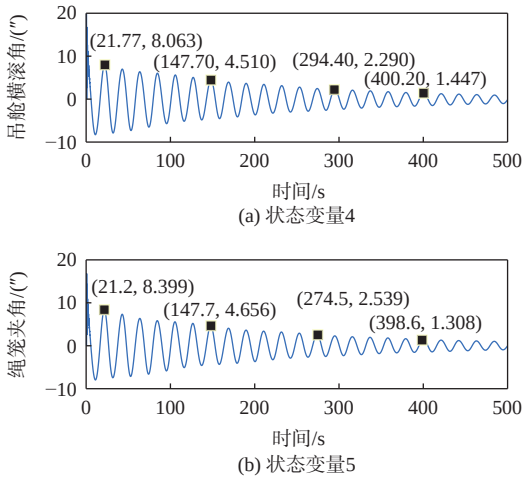


图 12　初始状态 1 下通道 LQR 控制结果

Fig. 12　Channel LQR control result in initial state 1

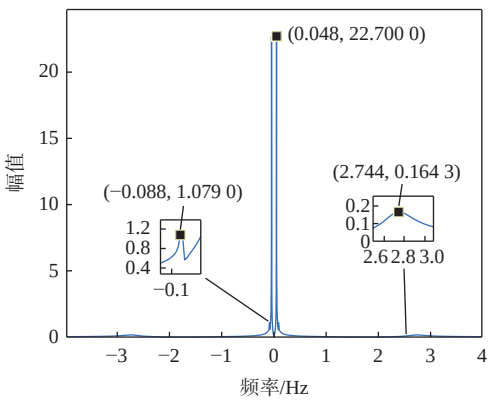


图 13　初始状态 1 下通道 LQR 控制响应频谱分析

Fig. 13　Spectral analysis of the LQR control response of channel in initial state 1

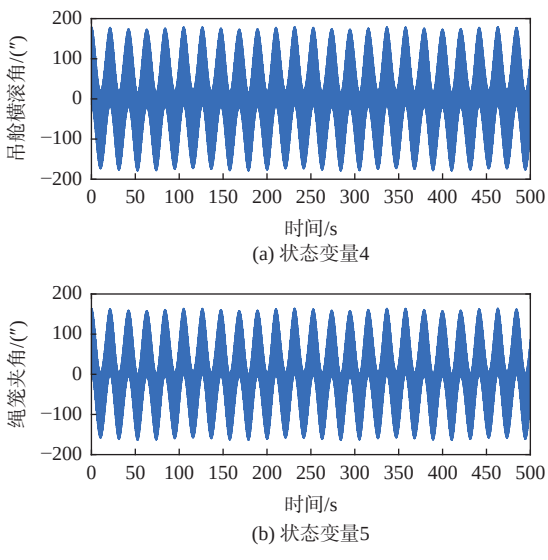


图 14　初始状态 2 下通道初始状态响应

Fig. 14　Channel initial state response in initial state 2

对状态变量绳笼夹角和吊舱横滚角响应进行频谱分析, 结果如图 15 所示。

使用基于 LQR 的控制器和 Kalman 观测器系统对于初始状态 2 响应, 可得状态变量响应, 如图 16 所示。对状态变量绳笼夹角和吊舱横滚角响应进行频谱分析, 结果如图 17 所示。

由初始状态 1 和初始状态 2 响应可知, 在无阻尼的状态响应下, 系统呈现简谐振荡运动, 频谱分

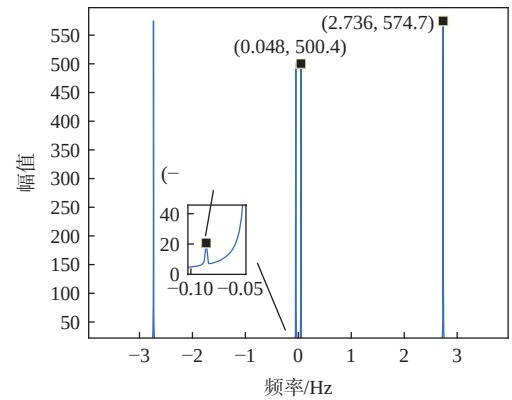


图 15　初始状态 2 下通道初始状态响应频谱分析

Fig. 15　Spectral analysis of initial state response of channel in initial state 2

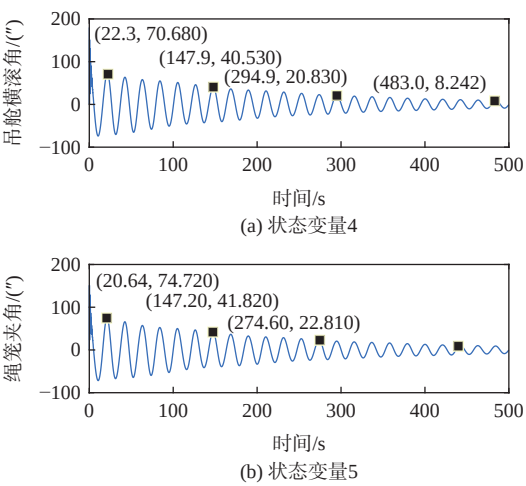


图 16　初始状态 2 下通道 LQR 控制结果

Fig. 16　Channel LQR control result in initial state 2

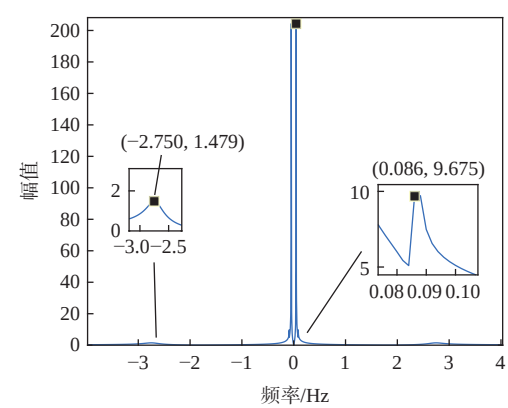


图 17　初始状态 2 下通道 LQR 控制响应频谱分析

Fig. 17　Spectral analysis of the LQR control response of channel in initial state 2

析可知,运动有3个模态,与第2.2节模态分析计算方法结果一致。

仿真结果说明,在吊舱俯仰角/横滚角为20″初始状态下,力矩阻尼器能在250 s阻尼到3″;在吊舱俯仰角/横滚角为180″初始状态下,力矩阻尼器能在480 s阻尼到10″,能够达到设计目标。

频谱结果说明,基于LQR的控制器和Kalman观测器的力矩阻尼控制方式可以有效抑制快周期模态,但对于周期较短的长周期和短周期模态的抑制效果有限。

5 结 论

1)本文全面分析了高空科学气球俯仰/横滚通道运动特性,使用拉格朗日方程建模法对球舱系统俯仰/横滚通道进行动力学建模,得到了运动模型。

2)对于球舱系统俯仰/横滚通道运动模型线性化处理,得到线性模型,并进行模态分析,明确了4种模态:长周期模态、短周期模态、快周期模态和质心模态(零模态),并得到模态精确计算方法。本文方法与传统近似方法进行对比,能够修正传统方法的误差。

3)对于俯仰/横滚通道进行可控可观性分析,提出了俯仰/横滚通道抑制模态的2种策略:力矩阻尼方式和主动补偿方式。对力矩阻尼方式进行基于LQR的控制器设计、Kalman观测器及仿真验证,结果说明可有效衰减俯仰/横滚通道的摆动,能够有效抑制快周期模态运动。

参考文献(References)

[1] Mccarthy D J. Operating characteristics of the stratoscope II balloon-borne telescope[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1969, AES-5(2): 323-329.

[2] 李一健. 基于多敏感器组合的球载吊舱姿态控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2023.
Li Y J. Research on attitude control technology of balloon borne pod based on multi-sensor fusion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023(in Chinese).

[3] Walker C, Kulesa C, Bernasconi P, et al. The stratospheric THz observatory (STO)[C]//Proceedings of the Ground-Based and Airborne Telescopes III. Bellingham: SPIE, 2010, 7733: 77330N.

[4] Walker C, Kulesa C, Kloosterman J, et al. The stratospheric THz observatory (STO): preparations for science flight[C]//Proceedings of the 22nd International Symposium on Space Terahertz Technology 2011. Tucson: International Symposium on Space Terahertz Technology, 2011: 159-161.

[5] Coppi G, Dicker S, Aguirre J E, et al. The BLAST observatory: a sensitivity study for far-IR balloon-borne polarimeters[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2024, 136(3): 035003.

[6] Gordon S, Dober B, Sinclair A, et al. An open source, FPGA-based LeKID readout for BLAST-TNG: pre-flight results[J]. Journal of Astronomical Instrumentation, 2016, 5(4): 1641003.

[7] Coppi G, Ade P A, Ashton P C, et al. In-flight performance of the BLAST-TNG telescope platform[C]//Proceedings of the Ground-based and Airborne Telescopes VIII. Bellingham: SPIE, 2020, 11445: 1144526.

[8] Galitzki N, Ade P A R, Angilè F E, et al. The balloon-borne large aperture submillimeter telescope for polarimetry-BLASTPol: performance and results from the 2012 Antarctic flight[C]//Proceedings of the Ground-Based and Airborne Telescopes V. Bellingham: SPIE, 2014, 9145: 91450R.

[9] Lecinski A, Card G, Knölker M, et al. The design and performance of the gondola pointing system for the SUNRISE II balloon-borne stratospheric solar observatory[J]. Journal of Astronomical Instrumentation, 2017, 6(2): 1740007.

[10] Kawabata Y, Katsukawa Y, Tsuzuki T, et al. Optical alignment and performance evaluation of the Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter (SCIP) for SUNRISE III[C]//Proceedings of the Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX. Bellingham: SPIE, 2022, 12184: 1218427.

[11] 刘艳霄, 宋腾飞, 张涛, 等. 欧洲球载太阳望远镜SUNRISE及相关研究成果简介[J]. 天文研究与技术, 2021, 18(3): 314-336.
Liu Y X, Song T F, Zhang T, et al. Overview of balloon-borne solar telescope-SUNRISE[J]. Astronomical Research & Technology, 2021, 18(3): 314-336(in Chinese).

[12] Chauvin M, Florén H G, Jackson M, et al. Observation of polarized hard X-ray emission from the Crab by the PoGOLite Pathfinder[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2015, 456(1): L84-L88.

[13] Iwan B. Development of the PoGOLite Star Tracker System and construction of detector units for the Polarimeter Telescope Assembly[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2007.

[14] 王赤, 白青江, 时蓬, 等. 美国行星科学2023—2032年规划及启示[J]. 科技导报, 2022, 40(15): 6-15.
Wang C, Bai Q J, Shi P, et al. NASA's planetary science decadal survey 2023—2032 and its enlightenment[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(15): 6-15(in Chinese).

[15] 李一健, 周江华, 张晓军. 球舱方位通道动力学建模及参数辨识[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(6): 2001-2008.
Li Y J, Zhou J H, Zhang X J. Dynamic modeling and parameter identification of balloon-borne gondola azimuth channel[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(6): 2001-2008(in Chinese).

[16] Aubin F, Bayman B, Hanany S, et al. Torsional balloon flight line oscillations: comparison of modelling to flight data[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(3): 702-708.

[17] Fissel L M. Probing the role played by magnetic fields in star formation with BLASTPol[D]. Toronto: University of Toronto, 2013.

[18] Hoadley K, Hamden E T, Milliard B, et al. The FIREBall-2 UV balloon telescope: 2018 flight and improvements for 2020[C]//Proceedings of the UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXI. Bellingham: SPIE, 2019: 40.

[19] Hamden E, Martin D C, Milliard B, et al. FIREBall-2: the faint intergalactic medium redshifted emission balloon telescope[J]. The

Astrophysical Journal, 2020, 898(2): 170.

[20] Romualdez J. Design, implementation, and operational methodologies for sub-arcsecond attitude determination, control, and stabilization of the super-pressure balloon-borne imaging Telescope (Super-BIT)[D]. Toronto: University of Toronto, 2018.

[21] Chaffee E A, Smith I S, Noll J, et al. The investigation and measurement of balloon dynamics at the apex and base of a scientific balloon[C]//Proceedings of the AIAA Balloon Systems Conference. Reston: AIAA, 2017: 3286.

[22] Yajima N, Kokaji S, Hashino S. Report of mechanical engineering laboratory: 135[R]. Sagamihara: ISAS, 1986.

[23] 叶祥明. 大型球载望远镜高精度姿态控制及指向技术研究[D]. 北京: 中国科学院国家天文台 (北京), 1999.
Ye X M. Research on high-precision attitude control and pointing technology for large spherical telescopes[D]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 1999(in Chinese).

[24] Quadrelli M B, Cameron J M, Kerzhanovich V. Multibody dynamics of parachute and balloon flight systems for planetary exploration[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2004, 27(4): 564-571.

[25] Zhang H Y, Yang Y C, Cai R, et al. Numerical simulation of the dynamic launching process for high-altitude balloons[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(9): 3677-3699.

[26] Safonova M, Nayak A, Sreejith A G, et al. An overview of high-altitude balloon experiments at the Indian Institute of Astrophysics [J]. Astronomical and Astrophysical Transactions, 2016, 29(3): 397-426.

[27] Safonova M, Nirmal K, Sreejith A G, et al. Measurements of gondola motion on a stratospheric balloon flight[EB/OL]. (2016-07-21)[2024-05-20]. https://arxiv.org/abs/1607.06397.

[28] 张晶敏. 绳索平流层飞行器动力学建模与仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Zhang J M. Dynamics modeling and simulation of tethered stratospheric aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese).

[29] 张彦斐, 金鹏, 宫金良, 等. 3-RPS 并联机器人粘性摩擦工况动力学建模[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 374-381.
Zhang Y F, Jin P, Gong J L, et al. Dynamic modeling of 3-RPS parallel robot considering joint friction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 374-381(in Chinese).

[30] 田卫军, 李郁, 何扣芳, 等. 四轴旋翼飞行器结构设计与模态分析[J]. 制造业自动化, 2014, 36(4): 37-39.
Tian W J, Li Y, He K F, et al. Structure design and modal analysis of the quadrotor helicopter flight[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(4): 37-39(in Chinese).

[31] 张海瑞, 李先航, 方伟光, 等. 基于变可信度模型的飞行器翼结构模态分析[J]. 宇航学报, 2023, 44(10): 1496-1502.
Zhang H R, Li X H, Fang W G, et al. Modal analysis of flight vehicle wing structure based on multi-fidelity surrogate model[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(10): 1496-1502(in Chinese).

[32] 李田, 赵又群, 徐涛, 等. 基于鲁棒最优滑模的非充气轮胎驱动车辆稳定性控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(4): 1342-1351.
Li T, Zhao Y Q, Xu T, et al. Stability control of vehicles powered by non-pneumatic wheels based on robust optimal sliding mode[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1342-1351(in Chinese).

[33] 王忻, 尹逊和, 梁华清, 等. 基于状态观测器的网络控制系统的自愈控制[J]. 机械工程学报, 2023, 59(18): 95-110.
Wang X, Yin X H, Liang H Q, et al. Self-healing control based on state observer for networked control systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(18): 95-110(in Chinese).

Dynamic modeling and control analysis of pitch/roll channels for balloon-gondola system

LI Yijian[1, 2], ZHOU Jianghua[1, 2, *], ZHANG Xiaojun[1], ZHAO Chunyang[1], XU Guoning[1, 2]

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a mature near-space aerial platform, high-altitude scientific balloons exhibit unique advantages in astronomical observations. However, the conventional single-axis attitude pointing control method for balloon-borne gondola platforms, which ignores the roll effect, can no longer fully meet the requirements of emerging space science application scenarios. Therefore, in-depth research on the motion and control characteristics of the pitch/roll channels of the balloon-gondola system is required to improve the overall performance of the attitude control system. Accordingly, the dynamic characteristics of the pitch/roll channels of the balloon-gondola system are modeled using the Lagrangian equation method, and an accurate modal calculation approach is proposed. After linearizing the established dynamic model, its controllability and observability are analyzed, and two control strategies, namely torque damping and active compensation, are put forward. For the torque damping control strategy, a linear quadratic regulator (LQR)-based controller and a Kalman observer are designed, and verification is carried out via Simulink simulation. The proposed dynamic modeling and modal calculation methods for the pitch/roll channels of the balloon-gondola system further reveal the motion characteristics of the coupled system. The proposed control strategies and corresponding simulation results provide an important reference for the design and optimization of attitude control systems for high-altitude scientific balloon gondolas.

Keywords: high altitude scientific balloons; pitch control; roll control; Lagrangian modeling; modal analysis; linear quadratic regulator

Received: 2024-05-27; **Accepted**: 2024-08-23; **Published Online**: 2024-10-08 09:13

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240930.1520.004

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2022YFB3901805,2022YFB390180502); National Natural Science Foundation of China (52227811)

* **Corresponding author**. E-mail: zhoufma@aoe.ac.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0383

刚弹耦合运载火箭自适应改进PD控制器

江星宇[1]，薛锋丰[2]，蒋方华[2]，师鹏[1]，龚胜平[1,*]

(1. 北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191；2. 清华大学 航天航空学院，北京 100084)

摘 要：针对刚弹耦合运载火箭，设计了一种具备自适应能力的改进比例-微分(PD)控制器，旨在实现对制导指令的高品质跟踪。该控制器引入自适应增广控制(AAC)模块，提升了参数调整能力，使其能同时自适应地调整比例和微分系数。此外，还融入自适应滤波器模块，其传递函数的幅相特性以滞相为主、减幅为辅，根据弹性频率的辨识结果来自适应调整滤波效果，应用于速率反馈通道时，该滤波器能有效实现一阶弹性模态的相角稳定与高阶弹性模态的幅值稳定。数值仿真结果表明：设计的自适应改进PD控制器不仅结构简单，参数易选取，还具有显著的自适应能力和弹性振动抑制效果，适用于时变系统，特别在模型参数存在明显偏差的情况下仍可以维持系统稳定，展现了较好的工程应用价值。

关 键 词：刚弹耦合运载火箭；比例-微分控制；自适应增广控制；频率辨识；自适应滤波器
中图分类号：V448.1
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2477-10

运载火箭姿控系统是运载火箭总体设计中非常关键的一环，其直接关系到发射任务的成败。在运载火箭研制的工程部门，广泛采用的是“比例-微分(proportional-derivative, PD)+校正网络”的姿态控制器设计方法[1]，该方法久经使用，表现出良好的可靠性和工程实用性。随着航天事业的发展，对运载能力的需求也越来越大，为进一步提升运载火箭的运载能力，其起飞质量和长细比也需越来越大，这将导致箭体结构固有弹性频率的降低，从而引起其与控制系统的耦合[2]，给控制器的设计带来极大的挑战。“PD+校正网络”的姿态控制器设计方法逐渐开始体现其局限性，难以适应未来的航天发展需求，需要探索新的姿态控制器设计思路。

目前，针对运载火箭姿控系统的控制器设计已经有许多研究，但绝大多数是针对刚体运载火箭的姿态控制研究，难以满足刚弹耦合运载火箭姿态控制的需要。针对刚弹耦合运载火箭姿态控制的研究主要分为3类：速率陀螺布置与融合研究、自适应增广控制(adaptive augmenting control, AAC)研究及自适应滤波器研究。

在速率陀螺布置与融合研究中，王建民等[3]提出了任意数量速率陀螺组合的斜率计算方法，降低了控制器设计对陀螺选位和振型斜率不确定度的要求。于海森等[4]将遗传算法用于加权权重系数优化，有效降低了弹性信号对系统的影响。

AAC是由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)最早提出，并用于太空发射系统(space launch system, SLS)任务[5]，其本质是在传统“PD+校正网络”姿态控制器的框架体系下增加一个自适应增益调整模块，当箭体姿态偏差较大时，会增大增益，以加快姿态角的跟踪速度，当控制回路存在明显弹性振动时，又会减小增益以抑制弹性振动，从而自适应地实现快速性与稳定性两者的动态平衡。Angelov等[6]深入分析AAC的非线性特性及其对自适应更新律各自调优的依赖关系，并提供了对AAC的非线性传递特性

收稿日期：2024-06-04；录用日期：2024-07-05；网络出版时间：2024-07-22 14:59
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240722.0948.001
*通信作者. E-mail：gongsp@buaa.edu.cn

引用格式：江星宇，薛锋丰，蒋方华，等. 刚弹耦合运载火箭自适应改进PD控制器[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2477-2486.
Jiang X Y，Xue F F，Jiang F H，et al. An adaptive improved PD controller for rigid-elastic coupled launch vehicles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2477-2486 (in Chinese).

更深入的理解。Trotta[7-8]和Navarro-Tapia[9]等研究了AAC如何进行最优调参，从而更好地提升AAC使用时的鲁棒性能。桂亮等[10]使用AAC来实现运载火箭姿控系统稳定，证明了AAC不会破坏PD控制器的稳定性，并探讨了其中各部分的参数设计方法。张亮等[11]基于正弦分析法推导了AAC的正弦响应模型，从而评估系统的稳定性。

关于自适应滤波器的研究，通常采用一种称为陷波器的自适应结构，通过弹性频率的辨识结果来调整陷波器的中心频率，以抑制实际飞行中出现的弹性模态，其研究重点主要体现在弹性频率的辨识方法上。王佩等[12]采用支持向量机来辨识弹性振动频率，韦常柱等[13]采用Steiglitz-mcBride方法辨识陷波器的相关参数，刘思等[14]采用改进离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)算法估计弹性振动频率，张玩乐等[15]利用小波变换的方法获得弹性振动相关信息。

上述3类方法的研究都是基于经典的控制框架来进行控制器的设计，因此，具有很好的传承性和工程实用性。目前，也有一些基于现代控制理论的关于弹性运载火箭姿态控制的研究。Ge等[16]提出一种自适应多变量姿态控制方法，用于在存在未知外部干扰和不确定性的情况下跟踪期望的姿态轨迹。Sagliano等[17]提出一种基于线性时不变结构H_∞控制器的姿态和位置统一控制策略，可应用到可重复使用火箭气动下降段的姿态控制系统设计中。Tian等[18]提出一种具有瞬态和稳态性能保证的新型自适应多变量控制算法，可适用于运载火箭受到有界但未知的匹配和不匹配干扰的情况。Zhang等[19]研究了运载火箭在抗风扰动和不确定气动力及发动机推力作用下的姿态跟踪与减载控制问题，基于自抗扰控制理论设计了姿态控制器。然而，这些研究大多将弹性对姿态的影响视为扰动，并没有充分考虑刚弹耦合运载火箭的特点，可能导致控制器设计过于保守。

本文融合AAC和自适应滤波器2项技术，构建可用于刚弹耦合运载火箭稳定控制的自适应改进PD控制器。该控制器在经典AAC框架基础上引入比例系数和微分系数的联动自适应，一定程度上提升了系统的跟踪性能；同时，采用滞相为主、减幅为辅的滤波器结构，只需单独作用至速率反馈通道，就可实现对一阶弹性模态的相角稳定和高阶弹性模态的幅值稳定。

1 运载火箭动力学模型

运载火箭作为一种复杂且快速时变的非线性系统，动力学规律十分复杂，在设计控制器时，通常将其在标称轨迹处进行线性化处理，将原有的时变非线性模型转化为多个特征点下的线性化模型，从而方便被控对象的分析与控制器设计。

运载火箭的运动主要体现在纵向平面内，其俯仰通道的控制最具代表意义，因此，本文主要对其俯仰通道的刚弹耦合模型进行分析，其满足如下动力学方程[20]：

$$\Delta\ddot{\varphi}+b_1\Delta\dot{\varphi}+b_2\Delta\alpha+b_3\delta_\varphi+b_3''\ddot{\delta}_\varphi+\sum_{i=1}^{n}b_{1i}\dot{q}_i+\sum_{i=1}^{n}b_{2i}q_i=-b_2\alpha_{\mathrm{w}}+\overline{M}_{\mathrm{bz}} \tag{1}$$

$$\Delta\dot{\theta}=c_1\Delta\alpha+c_2\Delta\theta+c_3\delta_\varphi+c_3''\ddot{\delta}_\varphi+\sum_{i=1}^{n}c_{1i}\dot{q}_i+\sum_{i=1}^{n}c_{2i}q_i+c_1'\alpha_{\mathrm{w}}+\overline{F}_{\mathrm{by}} \tag{2}$$

$$\ddot{q}_i+2\xi_i\omega_i\dot{q}_i+\omega_i^2q_i=D_{1i}\Delta\dot{\varphi}+D_{2i}\Delta\alpha+D_{3i}\delta_\varphi+D_{3i}''\ddot{\delta}_\varphi+D_{2i}\alpha_{\mathrm{w}}-Q_{iy} \tag{3}$$

$$\Delta\varphi=\Delta\theta+\Delta\alpha \tag{4}$$

式中：$\Delta\varphi$为俯仰角偏差；$\Delta\theta$为弹道倾角偏差；$\Delta\alpha$为攻角偏差；δ_φ为俯仰通道发动机摆角；q_i为第i阶弹性模态广义坐标；α_{w}为风攻角；$\overline{M}_{\mathrm{bz}}$、$\overline{F}_{\mathrm{by}}$和$Q_{iy}$为广义干扰力；$\xi_i$为第$i$阶弹性振动阻尼；$\omega_i$为第$i$阶弹性振动频率；$b_{1i}$为第$i$阶弹性振动附加气动阻尼力矩系数；$b_{2i}$为第$i$阶弹性振动附加气动力矩系数；$c_{1i}$为第$i$阶弹性振动附加气动阻尼力系数；$c_{2i}$为第$i$阶弹性振动附加气动力系数；$b_1$、$b_2$、$b_3$、$b_3''$、$c_1$、$c_2$、$c_3$、$c_1'$、$c_3''$、$D_{1i}$、$D_{2i}$、$D_{3i}$、$D_{3i}''$为运载火箭结构和气动相关系数。

在后文研究中均最高考虑至二阶弹性模态，并将其中发动机摆角加速度$\ddot{\delta}_\varphi$的作用(该作用通常比发动机摆角δ_φ的作用小得多)和风攻角α_{w}的作用统一算入广义干扰力。

运载火箭实际的输出信号测量依赖于所布置的惯性组件平台和速率陀螺，两者分别用于测量位移信号和速率信号，可对应如下观测方程：

$$\Delta\varphi^{\mathrm{gz}}=\Delta\varphi+R_{z1}^{\mathrm{gz}}q_1+R_{z2}^{\mathrm{gz}}q_2 \tag{5}$$

$$\Delta\dot{\varphi}^{\mathrm{st}}=\Delta\dot{\varphi}+R_{z1}^{\mathrm{st}}\dot{q}_1+R_{z2}^{\mathrm{st}}\dot{q}_2 \tag{6}$$

式中：R_{zi}为第i阶弹性对应的振型斜率；上标gz和st分别表示惯组平台和速率陀螺。

2 自适应改进PD控制器

2.1 控制器框架

本文设计的自适应改进PD控制器采用如图1所示的结构形式。

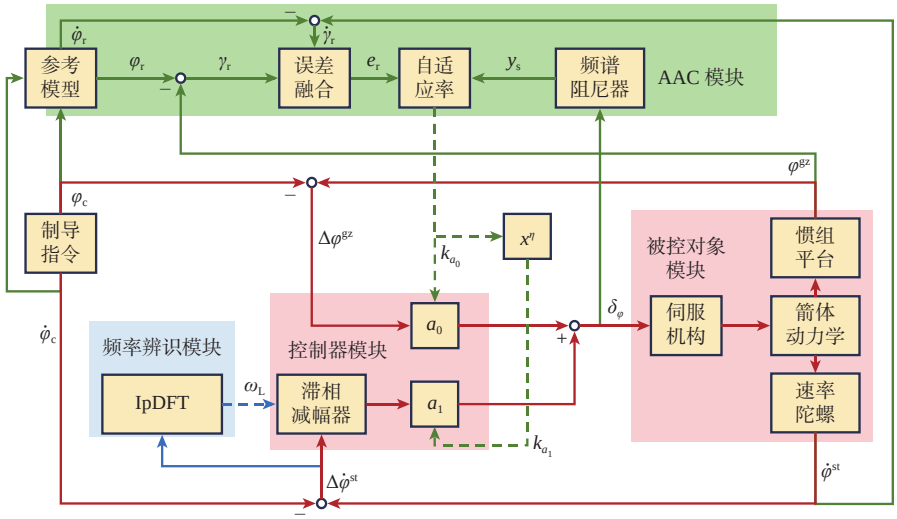


图 1　自适应改进 PD 控制器框图

Fig. 1　Block diagram of adaptive improved PD controller

该控制框架主要由 3 个模块组成: 控制器模块、AAC 模块和频率辨识模块。其中, 与传统 PD 控制采用的将 2 个通道的反馈信号乘以比例系数和微分系数加和后再进行校正的结构不同, 控制器模块取消了后续的校正网络, 在速率反馈通道增加一个自适应的滞相减幅器, 以实现对系统的稳定控制。上述滞相减幅器依赖频率辨识模块所提供的一阶弹性频率辨识值, 用于中心频率的自适应。AAC 模块仍采用经典的结构形式, 但可以同时对比例系数a_0和微分系数a_1进行自适应调整, 从而增强了对控制器性能的调整能力。

2.2　PD 系数设计

将控制器的比例系数记为a_0, 微分系数记为a_1, 分别用于对位移反馈信号和速率反馈信号进行处理。a_0和a_1的取值设计需要起到平衡低频跟踪性能和高频鲁棒性能的作用。

考虑纯刚体动力学下发动机摆角至俯仰角偏差的传递函数:

$$\frac{\Delta\varphi(s)}{\delta_\varphi(s)}=\frac{-b_3s+(b_2c_3-b_3c_1+b_3c_2)}{s^3+(b_1+c_1-c_2)s^2+(b_2+b_1c_1-b_1c_2)s-b_2c_2} \tag{7}$$

式中: s 为传递函数自变量。

不考虑弹道倾角偏差, 可忽略其中的c_1、c_2和c_3项, 得到

$$\frac{\Delta\varphi(s)}{\delta_\varphi(s)}\approx\frac{-b_3}{s^2+b_1s+b_2}=\frac{-K_0\omega_0^2}{s^2+2\xi_0\omega_0s+\omega_0^2} \tag{8}$$

$$\begin{cases}\xi_0=\dfrac{b_1}{2\sqrt{b_2}}\\ \omega_0=\sqrt{b_2}\\ K_0=\dfrac{b_3}{b_2}\end{cases} \tag{9}$$

若将其以纯比例形式进行反馈, 此时对应的开环传递函数为

$$G(s)=-a_0\frac{\Delta\varphi(s)}{\delta_\varphi(s)}\approx\frac{a_0K_0\omega_0^2}{s^2+2\xi_0\omega_0s+\omega_0^2} \tag{10}$$

可以得到其剪切频率ω_c近似满足:

$$\omega_c=\omega_0\sqrt{a_0K_0} \tag{11}$$

一般而言, ω_c应明显小于一阶弹性振动频率ω_1, 以尽可能地弱化刚弹耦合效应。

定义模态耦合率为

$$\mu=\frac{\omega_1}{\omega_c} \tag{12}$$

μ一般选取为 5～15 之间, 本文取为 10。于是, 可以得到比例系数a_0的经验取值公式:

$$a_0=\frac{1}{K_0}\left(\frac{\omega_1}{\mu\omega_0}\right)^2 \tag{13}$$

关于微分系数a_1的取值, 在刚体模型的基础上采用纯 PD 反馈, 可以得到对应开环传递函数为

$$G(s)=-(a_0+a_1s)\frac{\Delta\varphi(s)}{\delta_\varphi(s)}\approx\frac{(a_0+a_1s)b_3}{s^2+b_1s+b_2} \tag{14}$$

求得其对应的闭环传递函数, 形式为

$$H(s)=\frac{G(s)}{1+G(s)}\approx\frac{(a_0+a_1s)b_3}{s^2+(b_1+a_1b_3)s+(b_2+a_0b_3)} \tag{15}$$

其分母阻尼系数ξ满足:

$$\xi=\frac{b_1+a_1b_3}{2\sqrt{b_2+a_0b_3}} \tag{16}$$

由此可得微分系数a_1的经验取值公式为

$$a_1=\frac{2\xi\sqrt{a_0b_3+b_2}-b_1}{b_3} \tag{17}$$

阻尼系数ξ通常取 0.5～0.9 之间, 本文取为 0.7。

2.3　滞相减幅器

针对纯刚体的运载火箭动力学模型, 仅靠 PD

控制便可实现稳定控制；而对于刚弹耦合模型而言，PD控制下的闭环系统通常是不稳定的。

图2展示了PD控制下对应的开环传递函数Nyquist曲线，其中，PD控制对应的曲线可以由“比例”、“微分”的曲线加和得到。一般情况下，被控对象的传递函数中存在2个开环不稳定极点。由Nyquist判据可知，若要实现系统稳定，则只允许出现1次正穿越和0次负穿越，显然，PD控制下出现了1次负穿越，因此，系统出现了不稳定。该负穿越出现在一阶弹性模态对应的频带，这表明PD控制无法实现一阶弹性信号的稳定，在有些情况下甚至也无法保证更高阶弹性信号的稳定。

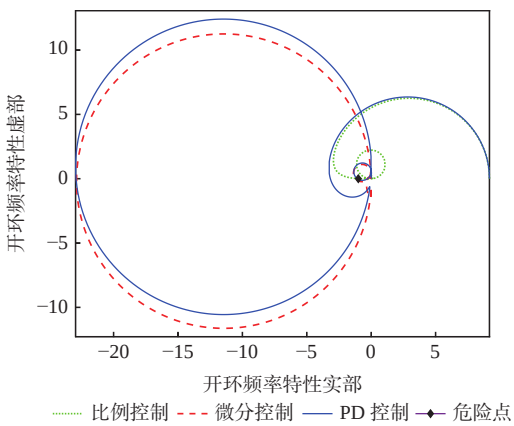


图2 PD控制下开环传递函数Nyquist曲线

Fig. 2 Nyquist plot of the open loop transfer function under PD control

因此，需要对PD控制进行改进，本文提出的改进策略为引入如下形式的最小相位二阶滤波器：

$$G_{\mathrm{F}}(s)=\frac{\dfrac{s^2}{\omega_{\mathrm{z}}^2}+2\xi\dfrac{s}{\omega_{\mathrm{z}}}+1}{\dfrac{s^2}{\omega_{\mathrm{p}}^2}+2\xi\dfrac{s}{\omega_{\mathrm{p}}}+1} \tag{18}$$

式中：ω_{z}、ω_{p}分别为分子频率、分母频率。

该滤波器分子、分母具有相同的阻尼和不同的频率。

定义

$$\begin{cases}\omega_{\mathrm{n}}=\sqrt{\omega_{\mathrm{z}}\omega_{\mathrm{p}}}\\ \alpha=\sqrt{\omega_{\mathrm{z}}/\omega_{\mathrm{p}}}\end{cases} \tag{19}$$

式中：ω_{n}为该滤波器的中心频率；α为带宽系数。

可以将式(18)改写为如下形式：

$$G_{\mathrm{F}}(s)=\frac{\alpha^{-2}s^2+2\xi\omega_{\mathrm{n}}\alpha^{-1}s+\omega_{\mathrm{n}}^2}{\alpha^2s^2+2\xi\omega_{\mathrm{n}}\alpha s+\omega_{\mathrm{n}}^2} \tag{20}$$

取阻尼系数为

$$\xi=\frac{\alpha-\alpha^{-1}}{2} \tag{21}$$

代入式(20)可得

$$G_{\mathrm{F}}(s)=\frac{\alpha^{-2}s^2+\left(1-\alpha^{-2}\right)\omega_{\mathrm{n}}s+\omega_{\mathrm{n}}^2}{\alpha^2s^2+(\alpha^2-1)\omega_{\mathrm{n}}s+\omega_{\mathrm{n}}^2} \tag{22}$$

其满足：

$$G_{\mathrm{F}}\left(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{n}}\right)=-\frac{1}{\alpha^2}\mathrm{j} \tag{23}$$

表明该结构滤波器在中心频率处可以将幅值衰减为原有的$1/\alpha^2$，相角滞后90°。

由于本文设计的滤波器同时具备滞后相角和衰减幅值2个作用，因此，得名为滞相减幅滤波器，简称为滞相减幅器。对于滞后相角为90°的情形，可称之为90°滞相减幅器。

图3给出了带宽系数α取值分别为1.5、2.0、2.5和3.0时的90°滞相减幅器的Bode图，其中心频率ω_{n}均为1 rad/s。可以看到，其中心频率的幅值衰减为最大幅值衰减的一半，相角则滞后了90°，一般在使用这种结构的滤波器时，α取值往往在2～3之间，本文取值为3。

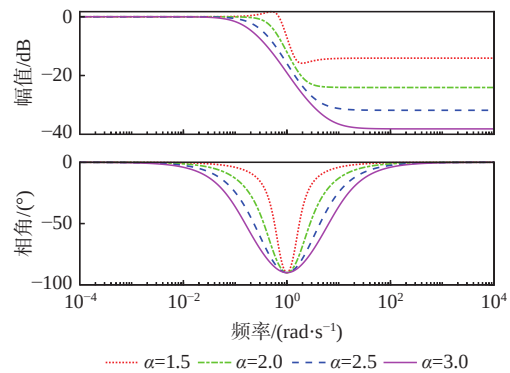


图3 滤波器参数α不同取值下的Bode图

Fig. 3 Bode plot of filter parameter α with different values

在使用上述设计的90°滞相减幅器时，需要调整其中心频率为一阶弹性频率，然后作用至速率反馈通道信号，这样可以将速率通道下的一阶弹性信号相角进行90°滞后，同时实现幅值衰减。

图4展示了施加90°滞相减幅器后微分控制下的开环传递函数Nyquist曲线，其中的改进微分控

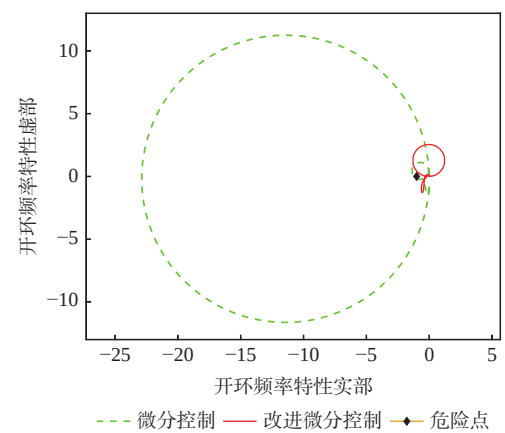


图4 微分控制下开环传递函数Nyquist曲线

Fig. 4 Nyquist plot of the open loop transfer function under derivative control

制即在施加 90°滞相减幅器作用后对应的曲线。可见, 实现了需要的“滞相”和“减幅”2 个功能。

图 5 展示了改进 PD 控制下对应的开环传递函数 Nyquist 曲线, 其中, 改进主要体现在针对速率反馈通道增添了 90°滞相减幅器这一环节。可见, 在改进的 PD 控制器作用下, 原有的 1 次正穿越得以保留, 而负穿越则成功地被消除, 实现了对系统的稳定。

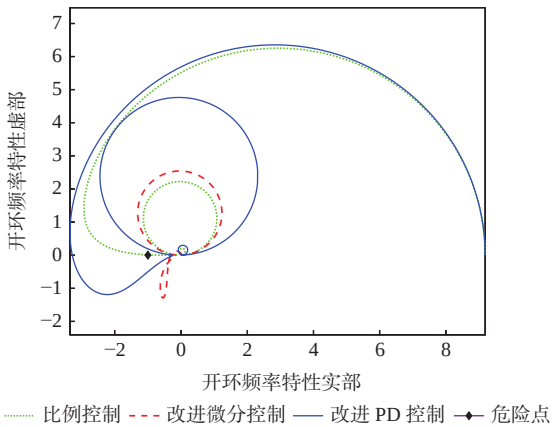


图 5　改进 PD 控制下开环传递函数 Nyquist 曲线

Fig. 5　Nyquist plot of the open loop transfer function under improved PD control

滞相减幅器在作用时需选择中心频率为一阶弹性频率, 通过对速率反馈通道中的一阶弹性信号进行 90°的相角滞后, 从而实现一阶弹性频率的相角稳定。此外, 该滤波器也起到了减幅的作用, 尤其是对于高阶弹性信号更为明显, 从而有利于实现高阶弹性频率的幅值稳定。

3　控制器参数的自适应

3.1　自适应增广控制

本文采用 AAC 来调整控制增益, 如图 6 所示, 其由参考模型、频谱阻尼器和自适应率 3 部分组成。

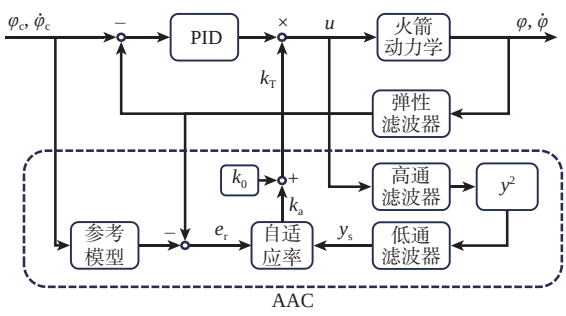


图 6　AAC 框图

Fig. 6　AAC block diagram

其中, 参考模型可以用如下动力学方程描述:

$$\begin{bmatrix}\dot{\varphi}_{\mathrm{r}}\\ \ddot{\varphi}_{\mathrm{r}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\omega_{\mathrm{r}}^2 & -2\xi_{\mathrm{r}}\omega_{\mathrm{r}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varphi_{\mathrm{r}}\\ \dot{\varphi}_{\mathrm{r}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0 & 0\\ \omega_{\mathrm{r}}^2 & 2\xi_{\mathrm{r}}\omega_{\mathrm{r}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varphi_{\mathrm{c}}\\ \dot{\varphi}_{\mathrm{c}}\end{bmatrix}\tag{24}$$

式中: φ_{r}为参考模型输出俯仰角; ω_{r}为参考模型频率; ξ_{r}为参考模型阻尼; φ_{c}为俯仰角指令。

将参考模型输出量φ_{r}与$\dot{\varphi}_{\mathrm{r}}$处理后的输出量作差后得到$\gamma_{\mathrm{r}}$和$\dot{\gamma}_{\mathrm{r}}$, 由于此时存在 2 个偏差量, 需要将其合并成一个误差量, 即有

$$e_{\mathrm{r}}=c\gamma_{\mathrm{r}}+\dot{\gamma}_{\mathrm{r}}\tag{25}$$

式中: e_{r}为融合跟踪误差; $c>0$ 为误差融合系数。

频谱阻尼器由“高通滤波器-平方项-低通滤波器”3 个环节组成, 目的在于提取控制信号中高频弹性信号的功率y_{s}。

自适应率采用如下一阶微分形式[5]:

$$\begin{cases}\dot{k}_{\mathrm{a}}=\left(\dfrac{k_{\max}-k_{\mathrm{a}}}{k_{\max}}\right)\alpha' e_{\mathrm{r}}^2-\alpha' k_{\mathrm{a}}y_{\mathrm{s}}-\beta(k_{\mathrm{T}}-1)\\ k_{\mathrm{T}}=k_0+k_{\mathrm{a}}\end{cases}\tag{26}$$

式中: a'为误差系数; α'为频谱阻尼器系数; β为回归系数; k_0为自适应增益变量基值; 自适应增益变量k_{a}的自适应由误差项、频谱阻尼项和回归项 3 部分组成。当系统跟踪性能不足时, 误差项会变大, 迫使系统增益变大以加强跟踪性能, 当k_{a}达到最大值$k_{\max}$时, 误差项变为 0, 从而停止继续增大增益。当系统弹性模态被激发时, 频谱阻尼器输出项y_{s}会变大, 迫使系统增益变小以更好地抑制高频弹性, 防止弹性失稳, k_{a}达到最小值 0 时, 频谱阻尼项变为 0, 从而停止继续减小增益。当系统稳定地实现跟踪时, 回归项会占据主导, 迫使自适应增益值k_{T}收敛至 1, 从而使控制器趋近于标称控制器。

在实际设计时, 考虑到增益裕度一般为±6 dB, 则自适应增益变量k_{a}的最大值$k_{\max}=10^{6/20}\approx 2$, 最小值$k_0=10^{-6/20}\approx 0.5$, 即比例系数的上下限分别为 2 和 0.5。

3.2　PD 系数的联动自适应

上述 AAC 框架只用于调整控制器的整体增益, 不改变系统开环形式下的 PD 关系, 即比例系数a_0和微分系数a_1具有完全相同的自适应性, 两者的比值a_1/a_0始终保持不变, 这在一定程度上限制了跟踪性能。

考虑纯刚体控制情形下的闭环近似阻尼, 有

$$\xi\approx\frac{b_1+a_1b_3}{2\sqrt{b_2+a_0b_3}}=\frac{b_1+\dfrac{a_1}{a_0}a_0b_3}{2\sqrt{b_2+a_0b_3}}\tag{27}$$

可以看到, 在比值a_1/a_0不变、a_0改变的情形下, 对应的近似闭环阻尼ξ会发生改变。若初始设计时, 闭环阻尼ξ设置在最佳阻尼附近, 其取值的改变可能会在一定程度上减弱跟踪性能。例如, 当系统跟踪性能不足时, AAC 会自适应地增大系统的控制增益, 然而, 却出现了明显的控制超调, 导致信号反复振荡, 并没有满足所需的提升跟踪性能的期望。

为避免上述情形，本文提出一种比例系数a_0和微分系数a_1的联动自适应策略，目的在于一定程度上维持系统闭环阻尼的稳定，思路如下：

定义

$$\begin{cases} x = \ln a_0 \\ y = \ln a_1 \end{cases} \tag{28}$$

根据式(17)可得

$$\mathrm{e}^y = \frac{2\xi\sqrt{b_3\mathrm{e}^x + b_2} - b_1}{b_3} \tag{29}$$

对式(29)两侧求导：

$$\mathrm{e}^y \mathrm{d}y = \frac{\xi \mathrm{e}^x}{\sqrt{b_3\mathrm{e}^x + b_2}}\mathrm{d}x \tag{30}$$

有

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = \frac{\xi a_0}{a_1\sqrt{b_3 a_0 + b_2}} \tag{31}$$

记

$$\eta = \frac{\xi a_0}{a_1\sqrt{b_3 a_0 + b_2}} \tag{32}$$

显然，有

$$y_{\mathrm{new}} - y_{\mathrm{old}} \approx \eta(x_{\mathrm{new}} - x_{\mathrm{old}}) \tag{33}$$

式中：下标new和old分别表示下一时刻和当前时刻。

于是，可得

$$\ln k_{a_1} = \ln\left(\frac{[a_1]_{\mathrm{new}}}{[a_1]_{\mathrm{old}}}\right) \approx \eta \ln\left(\frac{[a_0]_{\mathrm{new}}}{[a_0]_{\mathrm{old}}}\right) = \eta \ln k_{a_0} \tag{34}$$

即

$$k_{a_1} = \left(k_{a_0}\right)^{\eta} \tag{35}$$

式(35)表明，若对a_0乘以增广系数k_{a_0}，需要同时对a_1乘以联动的增广系数k_{a_1}，这样可以实现系统的闭环阻尼近似保持不变。

考虑到滞相减幅器在设计时可以提供一定的稳定裕度，而PD系数的自适应调整是有边界的，只要调整的边界在滞相减幅器的稳定裕度范围内，就可以确保闭环系统的稳定。对某运载火箭系统，参数η的取值在0.5～0.8之间，因此，微分系数的上下限相较于比例系数的上下限而言更为保守，可以确保闭环系统的稳定性。

3.3 滞相减幅器中心频率的自适应

滞相减幅器的中心频率选择为系统的一阶弹性频率，由于运载火箭是时变系统，该频率时刻在发生改变，需要设计频率辨识模块用于时刻获取系统的一阶弹性频率。

本文对于一阶弹性频率的辨识采用插值离散傅里叶变换(interpolated discrete Fourier transform, IpDFT)方法，其为普通DFT的改良方法。

普通DFT公式为

$$X(k) = \frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1} x(m)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}km\frac{2\pi}{N}} \tag{36}$$

式中：N为傅里叶变换采样时段个数；k为信号序号；$x(m)$为待识别的时域信号。经过DFT后得到$X(k)$为复数形式的频域信号，其中，时域信号$x(m)$和频域信号$X(k)$的起始序号均为0。

寻找$X(k)$中幅值最大时对应的k，记为k_{p}，则有

$$f = \frac{k_{\mathrm{p}}}{N} f_{\mathrm{s}} \tag{37}$$

式中：f_{s}为采样频率；f为所需的峰值频率。

IpDFT则是将式(37)改进为

$$f = \frac{k_{\mathrm{p}} + \delta}{N} f_{\mathrm{s}} \qquad |\delta| < 1 \tag{38}$$

式中：δ满足[21]：

$$\delta = \frac{\tan(\pi/N)}{\pi/N}\mathrm{Re}\left[\frac{X(k_{\mathrm{p}}-1) - X(k_{\mathrm{p}}+1)}{2X(k_{\mathrm{p}}) - X(k_{\mathrm{p}}-1) - X(k_{\mathrm{p}}+1)}\right] \tag{39}$$

为使所辨识得到的频率为一阶弹性频率，需要使待辨识信号中的一阶弹性信号作为主导。可以在不同位置布置2个速率陀螺，通过2个速率陀螺信号作差来消去其中的刚体信号，此时，一阶弹性信号成为主导信号，对该信号进行辨识即可。

IpDFT辨识得到的结果容易受噪声信号的影响而出现反复振荡，对此，需要对辨识得到的信号进行平滑处理，本文采用“预测-迭代修正”的平滑策略，具体如下：

记滞相减幅器的中心频率为ω_{L}，IpDFT方法辨识得到的频率为$\omega_{\mathrm{L}}^{\mathrm{id}}$，定义如下频率预测模型：

$$\omega_{\mathrm{L}} = at + b \tag{40}$$

式中：t为当前飞行时刻；参数a和b为自适应系数。

即使参数a和b不发生改变，滞相减幅器的中心频率ω_{L}也会按照预测模型进行时变，此时，IpDFT所获得的频率辨识结果便用于迭代修正上述预测模型，即

$$\begin{cases} a_{\mathrm{new}} = a_{\mathrm{old}} + \Delta a \\ b_{\mathrm{new}} = b_{\mathrm{old}} + \Delta b \end{cases} \tag{41}$$

修正量满足：

$$\begin{cases} \Delta a = \varepsilon_a \mathrm{sgn}\left[\omega_{\mathrm{L}}^{\mathrm{id}} - (at + b)\right] \\ \Delta b = -t\Delta a \end{cases} \tag{42}$$

式中：ε_a为待设计的固定参数。假设某型号运载火箭的一阶弹性频率的平均变化斜率为$\bar{k}$，可取$\varepsilon_a = 0.1\bar{k}$。

Δa的修正含义为：当辨识结果大于预测模型结果时，增大预测模型的斜率，反之，则减小预测模型

的斜率, 每次增大或减小的斜率改变量均为ε_a。Δb的修正则是为了保证修正前后预测值的连续。

通常, 预测模型的斜率a取值不能偏离初值过大, 可以定义其上界值$a_{\max}$和下界值$a_{\min}$, 需要始终满足$a_{\min} \leqslant a \leqslant a_{\max}$。

4　仿真验证

4.1　仿真环境设定

仿真对象为某运载火箭一级飞行段俯仰通道线性化动力学模型, 考虑刚体状态和最高二阶的弹性模态。仿真总时长为 140 s, 数值积分步长为 1 ms, 此期间被控对象状态方程在进行时变, 以此来测试本文自适应方法的适用性。

表 1 和表 2 分别列举了 AAC 模块和自适应滤波器模块的重要参数取值。

表 1　AAC 参数取值

Table 1　AAC parameter values

误差系数	频谱阻尼器系数	回归系数	增益基值	增益最大改变值	误差融合系数
2 000	10 000	0.5	0.5	1.5	1.0

表 2　自适应滤波器参数取值

Table 2　Adaptive filter parameter values

IpDFT采样时间间隔/s	IpDFT采样总时长/s	迭代修正时间间隔/s	频率预测模型截距初值	频率预测模型斜率初值	频率预测模型斜率最大值	频率预测模型斜率最小值	频率预测模型斜率修正值
0.05	10	1	8.0	0.025	0.050	0	0.001

为检测本文设计的自适应控制器的鲁棒性, 对表 3 所示的参数进行线性时变拉偏, 初始拉偏量为零, 直到飞行终端时刻拉偏量达到最大。

除参数拉偏外, 还增加了如表 4 所示的外部扰动。

表 3　拉偏参数取值

Table 3　Deflected parameter values

b_2/%	b_3/%	$2\xi_1\omega_1$/%	ω_1^2/%	D_{31}/%	R_{z1}^{gz}/%	R_{z1}^{st}/%	$2\xi_2\omega_2$/%	ω_2^2/%	D_{32}/%	R_{z2}^{gz}/%	R_{z2}^{st}/%
+50	−50	−30	−30	+50	−150	−150	−30	−30	+50	−200	−200

表 4　外部扰动取值

Table 4　External disturbance values

扰动名称	扰动形式	扰动大小	施加时刻
控制量扰动	正态分布	0.1°	所有时刻
俯仰角观测量扰动	正态分布	0.1°	所有时刻
俯仰角速率观测量扰动	正态分布	0.1(°)/s	所有时刻
俯仰角状态量扰动	突变扰动	2°	飞行第75 s

4.2　结果与分析

为更好地展现本文设计自适应控制器的性能, 采用“PD+校正网络”的思想设计了一个用于对比的控制器, 该控制器称为经典控制器。

经典控制器的 PD 参数取值同 2.2 节, 校正网络采用如下结构形式:

$$G_{\mathrm{NF}}=\frac{\left(\frac{1}{\omega_1^2}s^2+\frac{2\xi_1}{\omega_1}s+1\right)}{\left(\frac{1}{\omega_2^2}s^2+\frac{2\xi_2}{\omega_2}s+1\right)}\cdot\frac{\left(\frac{1}{\omega_3^2}s^2+\frac{2\xi_3}{\omega_3}s+1\right)}{\left(\frac{1}{\omega_4^2}s^2+\frac{2\xi_4}{\omega_4}s+1\right)}\cdot\frac{\left(\frac{s}{\omega_5}+1\right)\left(\frac{s}{\omega_7}+1\right)}{\left(\frac{s}{\omega_6}+1\right)\left(\frac{s}{\omega_8}+1\right)} \tag{43}$$

通过一定的优化算法来设计相关参数取值。校正网络是针对某时刻的线性化模型来设计的, 无法用于全程, 因此, 需要在不同时间节点设计相应的校正网络, 实际飞行过程中, 对多个控制器进行插值即可。

时域仿真结果如图 7 所示。可见, 在面对突发干扰时, 本文设计的自适应控制器具有着更快的收敛速度, 迅速地减小了俯仰角和俯仰角速率误差, 且超调很小。在飞行后期, 参数的拉偏达到最大, 此时, 经典控制器已无法很好地抑制弹性信号, 控制量出现了缓慢的发散, 而本文设计的自适应控制器仍实现了对系统的稳定控制。

图 8 展示了增广系数k_{a_0}和k_{a_1}的自适应变化曲线, 其初值在 1 附近, 前期也一直维持在 1 附近, 在 75 s 发生突发扰动时, AAC 模块能够迅速反应并增

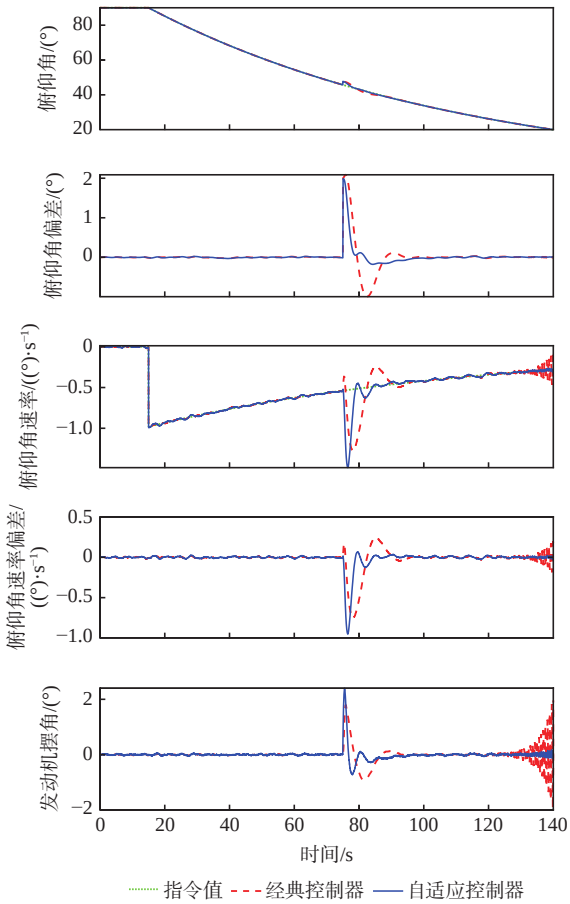


图7 状态量和控制量的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of state values and control values

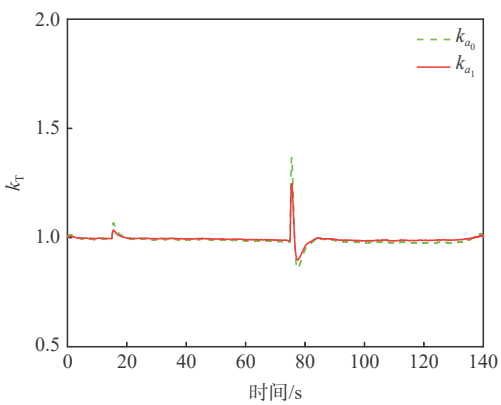


图8 增广系数仿真结果

Fig. 8 Simulation results of augmenting parameters

大控制增益，此时，k_{a_0}和k_{a_1}的变化是联动的，但并非完全相同。由于控制增益迅速变大，误差可以在短时间内被消除，此时，增益自动下降，维持在1附近，从而确保了系统的稳定。

如图9所示，直接辨识得到的一阶弹性频率存在明显的振荡，无法直接用于滞相减幅器中心频率的自适应，在采用“预测-迭代修正”的平滑策略后，实际采纳的频率值与理论值十分接近，且变化较为平滑，可以用于滞相减幅器中心频率的自适应调整。

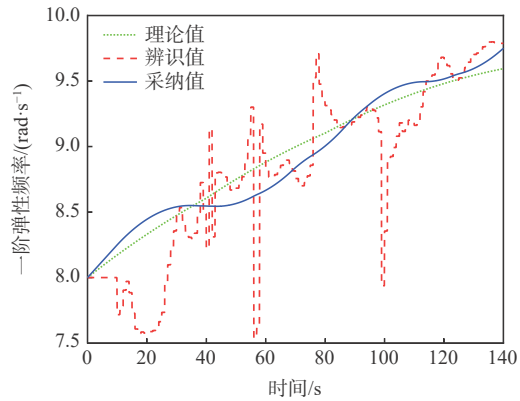


图9 一阶弹性频率的辨识仿真结果

Fig. 9 Simulation results of first order elastic frequency identification

5 结 论

本文针对刚弹耦合的运载火箭模型，设计了一种自适应改进PD控制器，其有如下优点：

1）基础控制器为改进形式的PD控制器，结构形式简单，无需额外设计校正网络便可实现系统的稳定控制，且各参数含义明确，适用于时变系统。此外，由于该结构先对2个反馈通道进行了独立校正，再进行PD加和，相比先进行PD加和再进行校正的设计思路，一定程度上拓宽了控制器的设计空间。

2）在传统AAC的基础上引入了PD系数的联动自适应调整，进一步增强了AAC对系统性能的调整。

3）针对速率通道的校正环节采用具有“滞相-减幅”作用的滤波器，以维持弹性信号的稳定。该滤波器结构形式简单，可以根据弹性频率辨识结果自适应地调整中心频率。其中心频率的自适应采用“预测-迭代修正”的平滑策略，一定程度上改善了弹性频率辨识结果不稳定的问题。

参考文献（References）

[1] 吴燕生. 中国运载火箭姿态控制技术发展与展望[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 509-518.
Wu Y S. Review and prospect of attitude control technologies for China’s launch vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(4): 509-518(in Chinese).

[2] 李平岐, 何巍, 杨云飞. 液体运载火箭长细比设计研究[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(3): 12-18.
Li P Q, He W, Yang Y F. The research of liquid launch vehicle slenderness ratio design[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3(3): 12-18(in Chinese).

[3] 王建民, 张冬梅, 洪良友, 等. 运载火箭姿态控制稳定性多速率陀螺组合策略[J]. 宇航学报, 2020, 41(3): 337-342.

Wang J M, Zhang D M, Hong L Y, et al. Strategy on multi-rate gyroscopes application to attitude control of launch vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(3): 337-342(in Chinese).

[4] 于海森, 王长亮, 谭述君, 等. 运载火箭姿态控制多速率陀螺融合方法[J]. 上海航天 (中英文), 2023, 40(1): 144-149.
Yu H S, Wang C L, Tan S J, et al. Multi-rate gyro fusion method for launch vehicle attitude control[J]. Aerospace Shanghai, 2023, 40(1): 144-149(in Chinese).

[5] Orr J S, Van Zwieten T S. Robust, practical adaptive control for launch vehicles[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2012: 4549.

[6] Angelov J, Yoon Y E, Johnson E N, et al. Analytical derivation of the sinusoidal input describing function for adaptive augmenting control algorithms[C]//Proceedings of the 2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2018: 1310.

[7] Trotta D, Zavoli A, De Matteis G, et al. Optimal tuning of adaptive augmenting controller for launch vehicles in atmospheric flight[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2020, 43(11): 2133-2140.

[8] Trotta D, Zavoli A, De Matteis G, et al. Tracking filter integration in the adaptive augmenting controller of a launch vehicle[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2021, 44(12): 2327-2336.

[9] Navarro-tapia D, Marcos A, Bennani S. Envelope extension via adaptive augmented thrust vector control system[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2021, 44(5): 1044-1052.

[10] 桂亮, 佘宇琛, 胡存明, 等. 一种运载火箭自适应增广控制器设计方法[J]. 航天控制, 2022, 40(3): 50-55.
Gui L, She Y C, Hu C M, et al. A new approach to design the adaptive augmentation controller for launch vehicle[J]. Aerospace Control, 2022, 40(3): 50-55(in Chinese).

[11] 张亮, 刘思, 赵康伟, 等. 运载火箭自适应增广控制参数设计及稳定性裕度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(1): 271-279.
Zhang L, Liu S, Zhao K W, et al. Parameters design and stability margin analysis of adaptive augmenting control for launch vehicle[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(1): 271-279(in Chinese).

[12] 王佩, 张科, 吕梅柏, 等. 基于微分估计和弹性辨识的火箭姿态控制器设计[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(4): 578-585.
Wang P, Zhang K, Lyu M B, et al. Launch vehicle attitude controller design based on differential estimation and elastic identification[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(4): 578-585(in Chinese).

[13] 韦常柱, 琚啸哲, 张亮, 等. 弹性体运载火箭建模及控制器设计[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(1): 21-26.
Wei C Z, Ju X Z, Zhang L, et al. The modeling and controller design for aeroelastic rocket launcher[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2017, 1(1): 21-26(in Chinese).

[14] 刘思, 贺从园, 胡存明, 等. 基于弹性辨识的运载火箭改进 AAC 控制方法[J]. 航天控制, 2020, 38(2): 20-24.
Liu S, He C Y, Hu C M, et al. Improved AAC method of launch vehicle based on elastic recognition[J]. Aerospace Control, 2020, 38(2): 20-24(in Chinese).

[15] 张玩乐, 王小虎, 张志健. 基于小波变换与奇异值分解的航空器弹性自适应陷波方法[J]. 航天控制, 2018, 36(4): 59-64.
Zhang W L, Wang X H, Zhang Z J. A WT & SVD based adaptive Notch filter for aircraft elastic constraint[J]. Aerospace Control, 2018, 36(4): 59-64(in Chinese).

[16] Ge T S, Chai R Q, Zhu Q H, et al. Adaptive multivariate reusable launch vehicles reentry attitude control with pre-specified performance in the presence of unmatched disturbances[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 145: 108858.

[17] Sagliano M, Hernández J A M, Farì S, et al. Unified-loop structured H-infinity control for aerodynamic steering of reusable rockets[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2023, 46(5): 815-837.

[18] Tian B L, Li Z Y, Zhang X Y, et al. Adaptive prescribed performance attitude control for RLV with mismatched disturbance[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 117: 106918.

[19] Zhang X Y, Xue W C, Liu Z B, et al. Compensated acceleration feedback based active disturbance rejection control for launch vehicles[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(4): 464-478.

[20] 徐延万. 控制系统 (上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1989: 514-517.
Xu Y W. Control systems (volume 1)[M]. Beijing: Astronautics Press, 1989: 514-517(in Chinese).

[21] Candan Ç. A method for fine resolution frequency estimation from three DFT samples[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(6): 351-354.

An adaptive improved PD controller for rigid-elastic coupled launch vehicles

JIANG Xingyu[1], XUE Fengfeng[2], JIANG Fanghua[2], SHI Peng[1], GONG Shengping[1,*]

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An improved proportional-derivative (PD) controller with adaptive capability is designed for the rigid-elastic coupled launch vehicle, aiming to achieve high-quality tracking of guidance instructions. The controller introduces an adaptive augmenting control (AAC) module, enhancing its parameter adjustment capabilities so that it can adaptively adjust both proportional and derivative coefficients simultaneously. Furthermore, an adaptive filter module is incorporated, with amplitude reduction complementing phase lag in the amplitude-phase characteristics of the transfer function. This filter adjusts its filtering effect adaptively based on the identification results of the elastic frequency. When applied to the pitch angle rate feedback channel, this filter effectively stabilizes the phase angle of the first-order elastic mode and the amplitude of the higher-order elastic mode. Numerical simulation results demonstrate that the designed adaptive improved PD controller not only has a simple structure and is easy to select parameters, but also exhibits excellent adaptive capabilities and significant elastic vibration suppression effects. Its remarkable engineering application value is demonstrated by its suitability for time-varying systems and its capacity to preserve system stability even in the presence of large model parameter variations.

Keywords: rigid-elastic coupled launch vehicle; proportional-derivative control; adaptive augmenting control; frequency identification; adaptive filter

Received: 2024-06-04; **Accepted**: 2024-07-05; **Published Online**: 2024-07-22 14:59
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240722.0948.001
* **Corresponding author**. E-mail: gongsp@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0419

基于 Epsilon 约束列生成的机场停机位应急调整

朱少川[1,2]，郑磊[1,2]，杜文博[1,2,*]

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191；2. 北京航空航天大学 空地一体新航行系统技术全国重点实验室，北京 100191)

摘 要：停机位分配方案直接影响航班运行效率和机场服务水平。在实际运行中，场面事故等突发事件常导致局部停机位临时关闭，计划分配方案失效，亟需开展资源受限条件下的停机位应急调整。为此，提出 Epsilon 约束列生成优化算法，旨在生成兼顾稳定性和效率的调整方案。构建基于集分割的双目标优化模型，最小化计划扰动的同时，最大化调整偏好，保证航班调整的公平性；提出基于 Epsilon 约束的列生成启发式，快速获取高质量分配方案；基于某国际机场的运行数据设计了数值实验。结果表明：所提方法在受扰航班靠桥率和受扰航班跨区调整比例等指标上均有较好的表现，受扰航班跨区调整比例为 52.34%，显著低于其他方法，有效提高了应急场景下机场停机位的调度效率。

关 键 词：机场停机位；资源分配；应急调整；Epsilon 约束法；列生成
中图分类号：V351
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2487-09

停机位是机场的核心资源，其分配方案直接关系到航班的运行效率和机场的服务水平[1-4]。在实际运行中，存在着诸多突发事件，如廊桥设备故障、场面航空器碰撞等，这些事件导致部分停机位临时关闭、服务中断，计划的停机位分配方案无法正常执行。例如，2024 年 1 月，汉莎航空一架 A321 机型航班在法兰克福机场遭到地面保障车辆撞击，致使该片区数个停机位临时停用[5]。停机位临时关闭属于突发性扰动，其不可预测性对机场应急保障能力提出了极高要求。若停机位调度不及时、不合理，极易引发机场场面拥堵和航班延误传播，给机场和航空公司造成巨大的经济损失和负面影响[6]。因此，资源受限下的停机位应急调整是机场运行决策亟需解决的关键问题。

停机位调整是国内外学者研究的热点问题[7-11]。早期，停机位调整主要采用人工调整法，在可视化交互系统上通过甘特图工具拖拽航班位置实现可行方案的生成，但该方法存在调整效率低、仅局部优化等明显缺点。近年来，研究人员基于数学优化的思想开展了停机位再分配优化工作。Maharjan 等建立了一种基于 0-1 整数规划的停机位再分配模型，旨在最大限度地减少停机位调整导致的旅客转移步行距离[8]。为解决航班延误导致停机位分配计划失效的问题，Zhang 等提出多商品流模型来最小化航班延误、停机位交换和旅客误机的总代价[9]。姜雨等在对航班延误等级界定基础上，设计了差异化目标的停机位实时指派模型，有效提高了旅客出行满意度和机坪运作效率[12]。Yu 等提出一种规则启发式方法，用于实现停机位再分配和滑行路径的联合优化[13]。Skorupski 等提出一种多准则动态分配方法，利用模糊逻辑生成不确定条件下的决策，用于求解运行扰动导致的停机位计划方案不可行问题[11]。可以发现，上述研究主要以计划扰动为优化准则，在固有数量停机位上进行重新安排，主要适用于响应航班延误的停机位日常再分配。

与上述停机位日常再分配不同，停机位应急调

收稿日期：2024-06-12；**录用日期**：2024-07-12；**网络出版时间**：2024-08-05 15:34
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240805.1409.001
基金项目：国家自然科学基金 (U2333218)
* **通信作者**. E-mail：wenbodu@buaa.edu.cn

引用格式：朱少川，郑磊，杜文博. 基于 Epsilon 约束列生成的机场停机位应急调整 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2487-2495.
Zhu S C，Zheng L，Du W B. An Epsilon constraint-based column generation for airport gate emergency reassignment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2487-2495（in Chinese）.

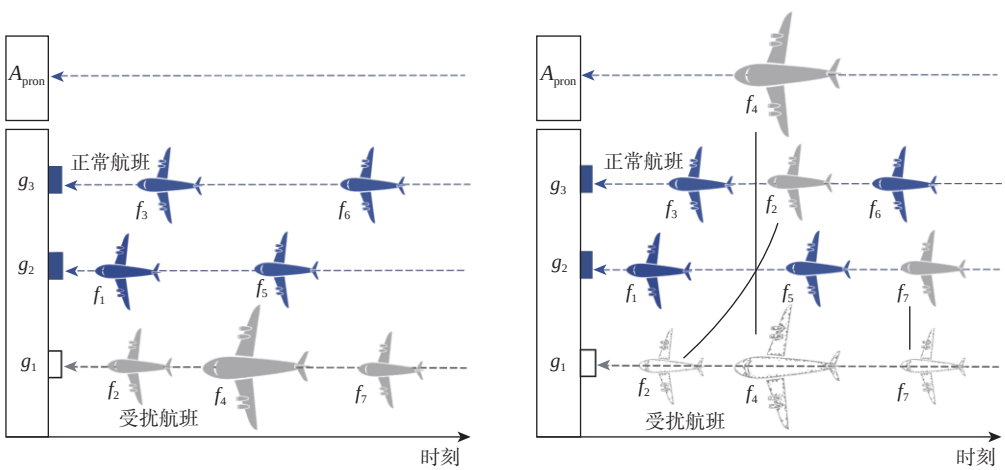
整具有资源骤减、调整幅度大等特点，所有航班仅能在仍正常服务的停机位上进行调整方案生成，优化求解难度更大，该问题的核心在于如何高效地将受扰停机位的航班转移到其他可行停机位上。为应对机场服务短暂关闭的停机位调整，Yan 等提出一种多商品网络流优化模型，基于实际机场数据验证了所提方法的时效性[14]。Tang 提出了考虑停机位临时短缺和随机延误的停机位调整问题，在模型中采用一种允许违背的分配约束来提高模型的实用性[15]。乐美龙等建立了一种异常运行条件下的实时分配模型，并设置了设备故障等突发场景检验模型性能[16]。Poyraz 等提出一种最大化原始分配和近机位数量的指派模型，并设计了一种非支配目标向量生成方法用于求解模型[17]。尽管上述研究关注了突发事件下的停机位调整，但未考虑正常停机位航班与受扰停机位航班的调整偏好差异，所生成的调整方案难以保证航班之间的公平性。

为此，本文提出 Epsilon 约束列生成优化算法，用于求解资源受限下的停机位应急调整问题，旨在生成兼顾稳定性和效率的调整方案。首先，提出“稳定性-效率”优化准则，稳定性准则用于度量正常航班的计划扰动，效率准则用于度量受扰航班的调整偏好。其次，考虑航班机型、停机位类型等实际约束，将停机位调整问题构建成基于集分割的双目标优化模型。最后，提出 Epsilon 约束列生成优化算法，通过引入 Epsilon 约束将原始模型转化为单目标优化模型，并设计列生成启发式方法，快速获取高质量解。基于某国际机场的运行数据设计数值实验，与现有方法相比，本文方法在受扰航班靠桥率和受扰航班跨区调整比例等指标上表现更好，验证了本文方法的实用性和优势。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

资源受限下的停机位应急调整问题旨在满足停机位类型、航班类型等规则约束下，基于设定的优化目标，将计划分配在关闭停机位 G^{off} 的航班 F^{d} 调整到其他可用停机位 G^{on} 中。本问题中，航班被分为 2 类：正常航班和受扰航班。正常航班是计划分配到停机位 G^{on} 的航班，而受扰航班是计划分配到停机位 G^{off} 的航班。如图 1 所示，当停机位 $G^{\text{off}}=\{g_1\}$ 临时关闭后，则需将航班 $F^{\text{d}}=\{f_2,f_4,f_7\}$ 转移到其他正常服务且规则适配的停机位 $G^{\text{on}}=\{g_2,g_3,A_{\text{pron}}\}$，其中，$A_{\text{pron}}$ 指远机位。



(a) 停机位计划方案　　(b) 停机位调整方案

图 1　局部停机位关闭下的航班调整示意图

Fig. 1　Schematic diagram of flight adjustments during partial stand closure

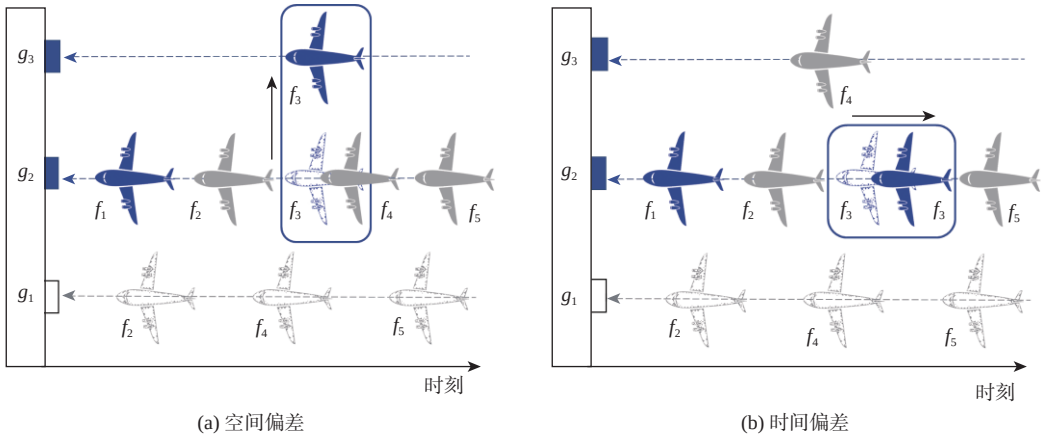
传统的停机位调整优化主要以计划扰动作为准则。但在停机位关闭场景下，受扰航班无法继续在计划停机位被服务，用计划扰动来衡量调整方案的质量是不合理的。考虑到正常航班与受扰航班优化调整的公平性，本文提出一种新的“稳定性-效率”优化准则。

1.1.1　稳定性准则

稳定性主要度量调整方案与计划方案的偏差，是评价正常航班调整的重要准则。本文中，偏差主要从 2 个维度来考虑：①空间维度，当调整停机位与计划停机位不同时，航班发生停机位变更，即空间偏差，如图 2(a) 所示；②时间维度，当航班实际进入停机位时刻晚于计划进入停机位时刻时，航班出现延误等待，即时间偏差，如图 2(b) 所示。一般认为，计划偏差值越大，调整方案的稳定性越差。

1.1.2　效率准则

效率主要用于评价航班在停机位服务的便捷

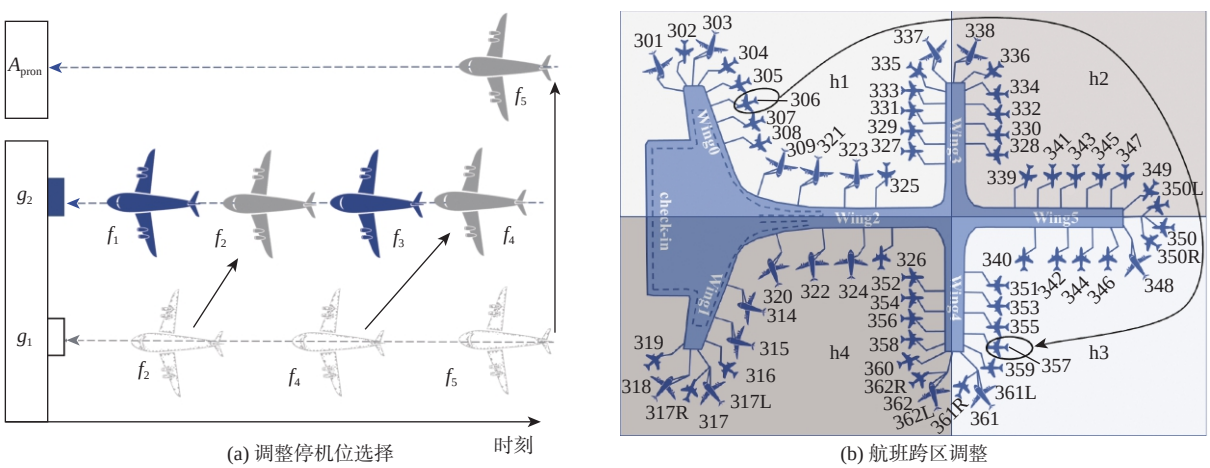


(a) 空间偏差　　(b) 时间偏差

图 2　停机位调整偏差示意图

Fig. 2　The deviation diagram of gate adjustment

性, 本文采用停机位调整偏好来衡量受扰航班的调整效率。从 2 个维度考虑偏好: ①受扰航班靠桥率, 其表示分配到廊桥停机位/近机位的航班占总航班数量的比例。如图 3(a) 所示, 受扰航班要么被分配到远机位, 要么被插入到有时间空窗的近机位 g_2, 因此, 当转移到近机位的受扰航班越多, 航班靠桥率越高。②受扰航班跨区调整比例, 当前大型机场结构主要指廊型航站楼, 停机位一般会因航站楼结构和机坪设计被划分在不同区域。当航班调整后的停机位与停计划机位处于不同停机坪片区时, 航班及其保障资源需要进行较大幅度的调整及转移。如图 3(b) 所示, 若将计划停靠区域 h1-306 的航班调整到区域 h3-357, 会大大增加机场保障作业的工作量和航班在场的周转时间, 给机场和航空公司带来极大的不便。因此, 跨区调整越少, 方案的效率就越高。



(a) 调整停机位选择　　(b) 航班跨区调整

图 3　停机位调整偏好示意图

Fig. 3　The preference diagram of gate adjustment

1.2　双目标优化模型

基于 1.1 节问题分析, 本节提出一种兼顾稳定性和效率的双目标优化模型, 旨在保证方案稳定性的同时, 提高航班的调整效率。G^{on}为正常开放的停机位集合, $g \in G^{on}$; F为航班集合, $f \in F$; F^r和F^d分别为正常航班集合和受扰航班集合; K_g为停机位g的候选分配方案, $k \in K_g$; t_f^{dep}和t_f^{arr}分别为航班f的计划离港时刻和计划到港时刻; c_f^{swap}为航班f的停机位变更成本; c_f^{delay}为航班f的延误成本; c_f^{near}为航班f调整到近机位的成本; c_f^{region}为航班f的跨区调整成本; c_{gk}^r为停机位g分配方案k的稳定性成本, 即 $c_{gk}^r = \sum_{f \in F^r} \left(c_f^{swap} + c_f^{delay}\right) \delta_{fk}$; c_{gk}^d为停机位g分配方案k的效率成本, 即 $c_{gk}^d = \sum_{f \in F^d} \left(c_f^{near} + c_f^{region}\right) \delta_{fk}$; δ_{fk}为 0-1 参数, 当航班f属于停机位分配方案k时为 1, 否则为 0; x_{gk}为 0-1 变量, 当停机位g选择分配方案k时为 1, 否则为 0。

将停机位应急调整问题构建为基于集分割的混合整数规划模型, 记为 SEM。

$$\min \sum_{g \in G^{on}} \sum_{k \in K_g} c_{gk}^r x_{gk} \tag{1}$$

$$\max \sum_{g \in G^{on}} \sum_{k \in K_g} c_{gk}^d x_{gk} \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\sum_{g\in G^{\text{on}}}\sum_{k\in K_g}\delta_{fk}x_{gk}=1\quad \forall f\in F \tag{3}$$

$$\text{s.t.}\sum_{k\in K_g}x_{gk}\leqslant 1\quad \forall g\in G^{\text{on}} \tag{4}$$

$$\text{s.t.}\ x_{gk}\in\{0,1\}\quad \forall g\in G^{\text{on}},k\in K_g \tag{5}$$

SEM模型包含2个目标函数：目标函数(1)用于度量方案的稳定性，即最小化正常航班的计划偏差；目标函数(2)用于度量方案的效率，即最大化受扰航班的停机位调整偏好。约束(3)表示每架航班都必须被安排到一个停机位(近机位或停机坪)。约束(4)表示对于每个正常运行的停机位$g\in G^{\text{on}}$，至多执行一个分配方案。约束(5)给出了决策变量的定义域。

2 算法设计

求解SEM模型面临两大难点：①随着调整航班数量增加，模型的决策变量规模呈指数增长，直接求解难以满足机场资源运行调度的时效性要求；②模型的2个目标间存在一定的冲突，如受扰航班调整偏好的提高会降低正常航班计划的稳定性，且单目标优化方法无法直接适用于求解SEM模型。为此，本文设计了Epsilon约束列生成优化算法，用于获取高质量应急调整方案，其总体框架如图4所示。首先，引入Epsilon约束法将原始模型对等转化为单目标优化模型；其次，设计一种启发式列生成算法用于获取最优解；最后，通过不断更新控制参数ε，获取Pareto前沿解集。

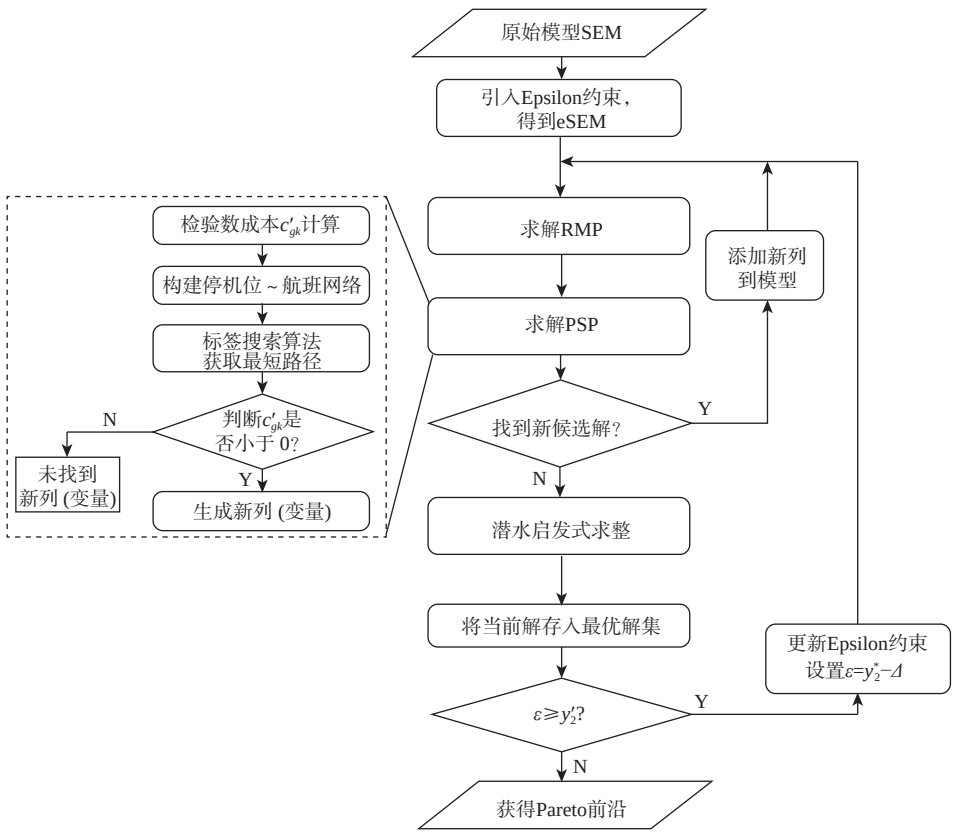


图4 本文算法总体求解框架

Fig. 4 Overall solution framework of the proposed algorithm

2.1 Epsilon约束法

由于所构建的SEM模型为双目标优化模型，采用Epsilon约束法进行处理[18]。具体地，将目标函数(1)作为模型的主目标，引入Epsilon约束将目标函数(2)转化为带有边界的约束(6)，即

$$\sum_{g\in G^{\text{on}}}\sum_{k\in K_g}c_{gk}^{\text{d}}x_{gk}\geqslant\varepsilon \tag{6}$$

其中，约束(6)表示所生成方案集的偏好值之和必须大于或等于ε。转化后的模型记为eSEM。该方法通过控制ε取值来获取一组解，形成Pareto前沿。具体算法流程如下所示：

1）分别以式(1)和式(2)为优化目标求解SEM模型，获得边界值，确定ε的初始范围。其中，边界值计算公式为：$y_1^1(x)=\min\{y_1(x)\}$；$y_2^1(x)=\max\{y_2(x)\}$；$y_1^N(x)=\{y_1(x):y_2(x)=y_2^1(x)\}$；$y_2^N(x)=\{y_2(x):y_1(x)=y_1^1(x)\}$。

2）采用均匀间隔法将ε值在目标函数的最小值和最大值之间均匀分布。求解$y'=\{(y_1^N(x),y_2^N(x))\}$，

令$\varepsilon = y_2^N - \Delta$, 其中, Δ为步长。

3) 当$\varepsilon \leqslant y_2^1(x)$时: ①求解 eSEM 模型, 记录当前解$\left(y_1^*(x), y_2^*(x)\right)$, 并添加到集合 Y; ②更新参数$\varepsilon = y_2^* - \Delta$。

4) 从集合 Y中移除非占有解, 得到 Pareto 前沿 Y。

采用 Epsilon 约束法处理有 2 个优势: ①可通过控制ε获取一系列最优解, 为机场运行决策者提供多元的调整方案选择, 保证解的多样性和灵活性; ②能够有效地与列生成算法进行结合, 加快收敛速度, 同时确保解的质量。

2.2 潜水列生成算法

eSEM 模型属于非确定性多项式时间难解问题, 且决策变量规模大, 很难在合理时间内找到最优解。为此, 本文利用列生成算法求解模型的线性松弛问题, 在线性解的基础上设计了潜水启发式, 快速获取整数解。

2.2.1 列生成算法

列生成是一类求解大规模线性规划问题的主流算法, 已经被广泛应用于分配、调度、路由等问题中[19-21]。本文基于原始问题 eSEM, 建立变量规模极小的限制主问题(restricted master problem, RMP), 利用 CPLEX 等商业求解器进行求解。根据 RMP 得到的对偶信息, 构建独立于每个停机位的定价子问题(pricing subproblem, PSP), 设计双属性标签搜索算法进行求解, 获取新的停机位候选分配方案(变量/列), 并将其添加到 RMP 中。通过 RMP 与 PSP 的不断迭代求解, 直到没有新列生成, 得到原始问题的线性最优解。

模型约束的对偶变量定义如下: λ_f、λ_g、α分别为约束 (3)、(4)、(8) 对应的对偶变量。对于任意一个停机位g分配方案k, 其检验数成本c'_{gk}的计算可表示为

$$c'_{gk} = \sum_{f \in F^{\mathrm{r}}} \left(c_f^{\mathrm{swap}} + c_f^{\mathrm{delay}}\right) \delta_{fk} - \sum_{f \in F} \lambda_f \delta_{fk} - \lambda_g - \alpha \tag{7}$$

对于每个 PSP, 目标是找到检验数成本c'_{gk}最小且为负的新列。子问题模型可表示为

$$\min c'_{gk} \tag{8}$$

$$\text{s.t. } t_f^{\mathrm{dep}} \theta_{fk} + \sigma \leqslant t_{f'}^{\mathrm{arr}} \theta_{f'k} \quad \forall f, f' \in F \tag{9}$$

$$\text{s.t. } \psi_{fg} \theta_{fk} \leqslant 1 \quad \forall f \in F \tag{10}$$

$$\text{s.t. } \zeta_{fg} \theta_{fk} \leqslant 1 \quad \forall f \in F \tag{11}$$

$$\text{s.t. } \theta_{fk} \in \{0,1\} \quad \forall f \in F \tag{12}$$

在子问题中, θ_{fk}为 0-1 变量, 当航班f被方案k选择时为 1, 否则为 0; ψ_{fg}为 0-1 参数, 当航班f的机型符合停机位g时为 1, 否则为 0; ζ_{fg}为 0-1 参数, 当航班f符合停机位g的分配属性要求(如国际航班、国内航班、地区航班、混合航班等)时为 1, 否则为 0。约束 (11) 表示连续 2 个航班的进出停机位时间差应该满足最小间隔要求; σ为同一停机位前后 2 架次飞机的最小间隔时间, 根据中国民用航空局《运输机场机坪运行管理规则》[22] 和深圳宝安国际机场的实际运行需求, 本文将σ的取值设置为 15 min。约束 (12) 和约束 (13) 表示将航班f分配到停机位g必须符合机型、区域类型的实际要求。可以发现, 该模型为典型的带资源约束最短路径问题(shortest path problem with resource constraints, SPPRC), 可以描述为一个有向无环图, 并利用动态规划算法进行求解。

令$G_{\mathrm{r}} = (V, A)$为有向无环图, 其中, V为顶点集, 由航班和 2 个虚拟节点组成, 即$V = \{i \in f : f \in F\} \cup \{v_{\mathrm{o}}, v_{\mathrm{d}}\}$, v_{o}和v_{d}分别为虚拟源点和终点; A为连边集, 在本文构建的网络图中, 有 3 种类型的连边, 即$A = A_{\mathrm{o}} \cup A_{\mathrm{d}} \cup A_f$, A_{o}为源点连边集, 表示源点与任意航班之间的连接, 即$A_{\mathrm{o}} = \{(v_{\mathrm{o}}, i) | i \in F\}$, A_{d}为终点连边集, 表示任意航班与终点之间的连接, 即$A_{\mathrm{d}} = \{(i, v_{\mathrm{d}}) | i \in F\}$, A_f为航班连边集, 当且仅当前一个航班的离开时刻加上最小航班时间间隔小于后一个航班的到达时刻时, 航班连边生成, 即$A_f = \left\{\left(i_{\mathrm{p}}, i_{\mathrm{s}}\right) \middle| t_{i_{\mathrm{p}}}^{\mathrm{dep}} + \sigma \leqslant t_{i_{\mathrm{s}}}^{\mathrm{arr}}, \forall i_{\mathrm{p}}, i_{\mathrm{s}} \in F\right\}$。根据子问题的目标函数 (10), 将系数成本作为权值赋予到图的连边上, 具体可表示为

$$r_a = \begin{cases} 0 & a \in A_{\mathrm{o}} \text{或} A_{\mathrm{d}} \\ \lambda_f & a \in A_f,\ i_{\mathrm{s}} \in F^{\mathrm{d}} \\ c_f^{\mathrm{swap}} + c_f^{\mathrm{delay}} + \lambda_f & a \in A_f,\ i_{\mathrm{s}} \in F^{\mathrm{r}} \end{cases} \tag{13}$$

式中: r_a为连边 a 的权值。

SPPRC 的目标是在图中寻找从源点到终点的最小成本路径。为加速获取最优路径, 本文提出一种双属性标签搜索算法。标签z_j是用于描述节点状态的变量, 每个标签包含 2 个属性r_j和q_j, 其中, r_j为从源点到顶点 j 的路径成本, q_j为从源点到顶点 j 的累计偏好值。每个顶点可以保存多个标签, 随着标签的向后扩展, 标签数量呈指数增长。为避免枚举所有标签, 算法设计了支配规则来识别和删除劣势标签。对于任意 2 个标签z_1和z_2, 如果满足条件"$r_1 \leqslant r_2$, $q_1 \leqslant q_2$, 且至少有一个不等式严格成立", 则z_1支配z_2, 将非占优标签z_2从该顶点删除。在标签扩展到终点时, 将该停机位的对偶成本λ_g加到当前的路径代价中, 计算当前的检验数成本, 即$\bar{r}_i^* - \lambda_g$。如果$\bar{r}_i^* - \lambda_g < 0$, 表示当前路径所代表的分配方案更优, 则通过回溯标签来获取该路径的节

点，组成新变量，并将其加入当前的RMP。

RMP和PSP不断迭代求解，直到没有新列（变量）生成，则得到了原始问题的最优线性解。每个停机位对应的PSP都可以独立求解，因此，采用并行处理，以加快整体算法的计算速度。

2.2.2 潜水启发式

模型具有强线性松弛性，因此，可以应用启发式方法来获得整数解。在得到线性松弛解的基础上，采用潜水启发式进一步生成整数解，其基本思想是：在给定当前RMP的线性解中，选择一个分数最大的变量解，圆整该变量，将其下界固定为1，调用列生成算法重新求解，不断重复上述过程，直到不存在小数解，停止迭代。整个潜水操作次数不超过$|K|$次，有效提高了整数解的求解效率。

3 实例验证

3.1 数据描述

采用国内某大型国际机场的数据集设计数值案例，该机场共有270个停机位，包括66个近机位和204个远机位。在给定的计划停机位分配方案基础上，设计了不同规模的停机位关闭场景，生成12组测试案例，用于检验本文方法的有效性。所构建测试场景中，恢复时间窗长度为5 h，涉及航班数量为235架次；关闭停机位最小数量为1个，最大数量为30个；受影响机位的航班最少为3架次，最大为100架次，设置的案例能够反映不同规模的应急调整场景。在获得Pareto前沿后，根据机场管理需求选择最符合决策者偏好的解作为最终调整方案。

为证明本文方法的优势，设计2种对比方法在相同案例上进行实验。其中，对比方法1（记为SM）旨在最小化计划扰动（Yan等[14]），对比方法2（记为SUM）旨在最小化计划扰动和最大化靠桥率的加权惩罚（Poyraz等[17]）。不同于上述对比方法，本文方法强调航班跨区调整带来的影响，即所构建模型同时最小化航班跨区调整数量，以兼顾停机位调整的稳定性和偏好。所有数学模型和优化算法均基于Visual Studio 2017 C++实现，所有线性规划问题均采用CPLEX 12.9求解。

3.2 计算结果

表1给出了不同案例规模下的方案性能对比结果。选取3个重要的指标：正常航班停机位变更比例、受扰航班靠桥率和受扰航班跨区调整比例。正常航班停机位变更比例表示正常航班中出现停机位变更的航班占比，受扰航班靠桥率表示受扰航班中被转移到近机位的航班占比，受扰航班跨区调整比例表示受扰航班中调整停机位与计划停机位不在同一片区的航班占比。在SM的结果中，随着关闭停机位数量的增加，正常航班机位变更比例均为0，表明正常航班没有受到干扰，保持较好的稳定性；而受扰航班靠桥率均小于22%，受扰航班跨区调整比例均大于90%，表明受扰航班靠桥率始终较低，且受扰航班跨区调整比例大，调整方案难以保证应急场景下机场运行效率。在SUM中，随着关闭停机位数量的增加，正常航班机位变更比例不断增大，受扰航班靠桥率不断减小，表明该方法通过适当调整正常航班的停机位来平衡受扰航班的靠桥率，但生成方案的受扰航班跨区调整比例始终保持较大值。相比之下，本文eSEM生成方案的受扰航班跨区调整比例始终保持较低的水平，表明本文

表1 不同案例规模下的方案性能对比

Table 1 Comparison of solution performance in different case sizes

案例（关闭停机位数量，受扰航班数量）	正常航班机位变更比例/%			受扰航班靠桥率/%			受扰航班跨区调整比例/%			eSEM计算时间/s
	SM	SUM	eSEM	SM	SUM	eSEM	SM	SUM	eSEM	
C1(1,3)	**0**	0.99	0.50	0	**100.00**	**100.00**	100.00	**66.67**	**66.67**	19.3
C2(3,9)	**0**	2.55	0.51	0	**100.00**	**100.00**	100.00	**66.67**	77.78	21.6
C3(5,16)	**0**	4.23	2.12	0	**100.00**	**100.00**	100.00	81.25	**50.00**	23.6
C4(7,23)	**0**	5.49	2.75	13.04	**100.00**	**100.00**	100.00	95.65	**60.87**	27.7
C5(9,30)	**0**	6.29	4.00	16.67	96.67	**100.00**	100.00	86.67	**50.00**	23.4
C6(11,39)	**0**	7.23	4.82	17.95	89.74	**97.44**	92.31	82.05	**46.15**	32.2
C7(13,43)	**0**	10.49	7.41	18.60	93.02	**95.35**	95.35	83.72	**44.19**	26.3
C8(15,49)	**0**	9.62	8.33	10.20	81.63	**93.88**	100.00	87.76	**53.06**	26.8
C9(17,56)	**0**	9.40	10.07	21.43	73.21	**87.50**	98.21	85.71	**41.07**	36.3
C10(19,65)	**0**	14.29	12.14	18.46	75.38	**86.15**	92.31	81.54	**36.92**	35.8
C11(25,82)	**0**	13.01	13.01	10.98	57.32	**70.73**	97.56	82.93	**46.34**	38.5
C12(30,100)	**0**	14.29	10.48	11.00	49.00	**57.00**	97.00	87.00	**55.00**	37.1

注：加粗数字表示最优值。

方法能够有效降低受扰航班的跨区调整比例, 较大程度减少了场面的运行冲突。此外, 所有案例的平均计算时间为 29.05 s, 最大计算时间为 38.5 s, 均能够满足机场运行调控的时效性要求。

图 5 展示了 3 种方法的平均性能对比。可以发现, 在正常航班机位变更比例指标上, SM 表现最好, 即正常航班变更比例为 0, 说明该方法能最大程度地减少计划方案的扰动。在受扰航班靠桥率方面, SM 表现最差, 仅有 11.53%, SUM 和 eSEM 表现较好。在受扰航班跨区调整比例方面, 本文 eSEM 表现最好(52.34%)。相比现有方法, 本文方法在保证较低正常航班变更的同时, 有效降低了受扰航班的靠桥率和跨区调整比例。

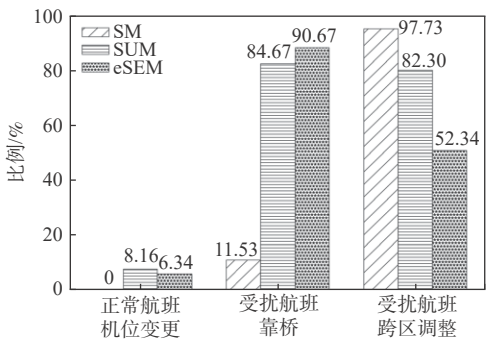


图 5　3 种方法的平均性能对比

Fig. 5　Comparison of the average performance of three methods

航班的停机位调整直接影响机场场面运行效率, 特别是当航班出现跨区域调整时, 会对场面保障资源及人员造成极大的不便。图 6 给出了停机位关闭占比与受扰航班跨区调整比例的关系。可以发现, 在大部分情况下, 本文方法 eSEM 的受扰航班跨区调整比例远低于对比方法 SUM, 这一优势能大大降低场面运行冲突, 同时, 有助于提高航班在场周转时间。

本文在稳定性准则上同时考虑了停机位变更和航班主动延误 2 种策略。图 7 给出了正常航班

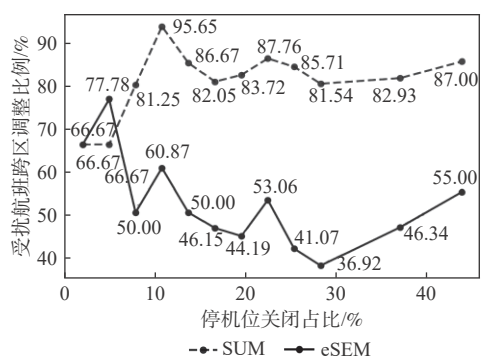


图 6　停机位关闭占比与受扰航班跨区调整比例的关系

Fig. 6　Relationship between the proportion of closed gates and cross-region adjustment proportion of disturbed flight

延误比例在不同场景下的表现。正常航班延误比例平均值为 6.71%; 随着停机位关闭占比增大, 正常航班延误比例也随之增加; 当停机位关闭占比低于 20% 时, 正常航班延误比例均维持在 6% 以下; 当停机位关闭达到一定数量(30%)时, 正常航班延误比例维持在一定水平(15%), 表明本文方法在停机位关闭数量增加的情况下, 并不会出现大面积的航班延误。采取适当的延误策略能减少停机位变更数量, 减少场面活动, 有利于降低场面运行复杂度。

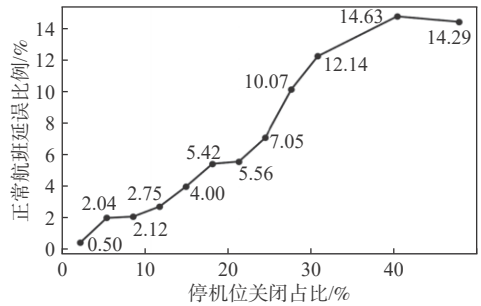


图 7　停机位关闭占比与正常航班延误比例的关系

Fig. 7　Relationship between the proportion of closed gates and the rate of delayed flights

3.3　敏感性分析

在多目标优化中, 目标函数间的权重影响着解的质量。稳定性和效率之间的权衡是停机位应急调整问题需考虑的关键因素, 本文通过具体案例来分析不同参数ε下各指标的变化情况。图 8 给出了 Pareto 前沿下 2 个关键指标的表现情况。可以看出, 随着正常航班机位变更比例增大, 受扰航班跨区调整比例逐渐减小; 当正常航班机位变更比例较小(小于 2%)时, 受扰航班跨区调整比例较为敏感; 当正常航班机位变更比例超过 18% 时, 受扰航班跨区调整比例已趋近于平缓。因此, 机场运行管理决策者应根据机场的实际需求选择合适的调整方案来应对停机位的应急调整。

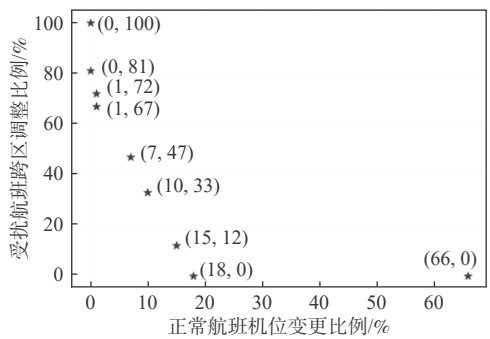


图 8　不同参数 ε 下的方案性能

Fig. 8　Solution performance in different ε parameters

4　结　论

本文研究了机场停机位应急调整问题, 提出了

一种Epsilon约束列生成优化算法。主要结论如下：

1）针对局部停机位临时关闭下的停机位航班应急调整问题，建立了兼顾稳定性和效率的双目标优化模型，所生成方案在减少计划方案扰动的同时，提高了航班调整效率，保障了突发场景下航班调整的公平性。

2）针对双目标优化模型，设计了基于Epsilon约束列生成启发式求解算法，有效解决了实际问题中决策变量规模大、最优解难搜索等难题。

3）采用机场实际运行数据进行了数值实验验证，结果表明，与现有方法相比，本文方法能够更好地平衡停机位调整方案的稳定性和效率。特别是在受扰航班跨区调整比例上，本文方法（52.34%）显著优于现有方法。

参考文献（References）

[1] Daş G S, Gzara F, Stützle T. A review on airport gate assignment problems: single versus multi objective approaches[J]. Omega, 2020, 92: 102146.

[2] Cai X Y, Sun W X, Misir M, et al. A bi-objective constrained robust gate assignment problem: formulation, instances and algorithm[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(9): 4488-4500.

[3] Du W B, Zhu S C, Tong L, et al. Robust gate assignment to minimise aircraft conflicts[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2023, 11(1): 2185497.

[4] 寇伟彬, 于凯任, 王佳玉, 等. 韧性导向的机场航空器滑行路径及停机位分配联合优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(2): 426-435.
Kou W B, Yu K R, Wang J Y, et al. Resilience-oriented joint optimization of aircraft taxiing route and apron assignment in airport[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(2): 426-435(in Chinese).

[5] Reid C. Catering vehicle smashes into lufthansa airbus A321 leaving parts stuck in fuselage[EB/OL]. (2024-01-14)[2024-06-05]. https://simpleflying.com/lufthansa-airbus-a321-catering-truck-collision.

[6] 张颖, 黎晓英, 尹嘉男, 等. 基于概率滑行时间的航空器离场推出柔性控制[J]. 航空学报, 2023, 44(10): 327452.
Zhang Y, Li X Y, Yin J N, et al. Flexible control of aircraft departure pushback time based on probabilistic taxiing time[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(10): 327452(in Chinese).

[7] Tang C H, Yan S Y, Hou Y Z. A gate reassignment framework for real time flight delays[J]. 4OR, 2010, 8(3): 299-318.

[8] Maharjan B, Matis T I. An optimization model for gate reassignment in response to flight delays[J]. Journal of Air Transport Management, 2011, 17(4): 256-261.

[9] Zhang D, Klabjan D. Optimization for gate re-assignment[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 95: 260-284.

[10] Pternea M, Haghani A. Mathematical models for flight-to-gate reassignment with passenger flows: state-of-the-art comparative analysis, formulation improvement, and a new multidimensional assignment model[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 123: 103-118.

[11] Skorupski J, Żarów P. Dynamic management of aircraft stand allocation[J]. Journal of Air Transport Management, 2021, 90: 101964.

[12] 姜雨, 胡志韬, 童楚, 等. 面向航班延误的停机位实时指派优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 185-190.
Jiang Y, Hu Z T, Tong C, et al. An optimization model for gate reassignment under flight delays[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(5): 185-190(in Chinese).

[13] Yu C H, Zhang D, Lau H Y K H. A heuristic approach for solving an integrated gate reassignment and taxi scheduling problem[J]. Journal of Air Transport Management, 2017, 62(C): 189-196.

[14] Yan S Y, Chen C Y, Tang C H. Airport gate reassignment following temporary airport closures[J]. Transportmetrica, 2009, 5(1): 25-41.

[15] Tang C H. A gate reassignment model for the Taiwan Taoyuan Airport under temporary gate shortages and stochastic flight delays[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2011, 41(4): 637-650.

[16] 乐美龙, 檀财茂. 非正常运行下机场停机位实时分配模型[J]. 工业工程, 2014, 17(1): 12-16.
Le M L, Tan C M. Research on the airport gate real-time allocation model in considering irregular operations[J]. Industrial Engineering Journal, 2014, 17(1): 12-16(in Chinese).

[17] Poyraz D D, Azizoğlu M. An airport gate reassignment problem with gate closures[J]. Journal of Air Transport Management, 2024, 115: 102529.

[18] Mavrotas G. Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 213(2): 455-465.

[19] Desaulniers G, Desrosiers J, Solomon M M. Column generation[M]. Berlin: Springer, 2005.

[20] Xiao F, Guo S Q, Huang L, et al. Integrated aircraft tail assignment and cargo routing problem with through cargo consideration[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 162: 328-351.

[21] Breugem T, Van Rossum B T C, Dollevoet T, et al. A column generation approach for the integrated crew re-planning problem[J]. Omega, 2022, 107: 102555.

[22] 中国民用航空局. 运输机场机坪运行管理规则：民航规[2022]20号 (AP-140-CA-2022-07) [EB/OL]. (2022-06-15)[2024-06-05]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202207/t20220704_213952.html.
Civil Aviation Administration of China. Administrative rules for apron operation and management of transport airports: CAAC regulations[2022] No. 20 (AP-140-CA-2022-07)[EB/OL]. (2022-06-15)[2024-06-05]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202207/t20220704_213952.html.

An Epsilon constraint-based column generation for airport gate emergency reassignment

ZHU Shaochuan[1, 2], ZHENG Lei[1, 2], DU Wenbo[1, 2, *]

(1. School of Electronic Information and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. State Key Laboratory of CNS/ATM, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The effectiveness of flight operations and the quality of airport services are directly impacted by airport gate assignment options. In real-world operations, unexpected events such as airfield accidents may lead to the temporary closure of local gates and an infeasible assignment plan. It is urgent to implement gate emergency reassignment under resource constraints. This paper proposes an Epsilon constraint-based column generation optimization algorithm for this problem. In particular, we develop a bi-objective optimization model based on set partitioning with the goal of minimizing assignment plan deviation and increasing solution efficiency. Then, an Epsilon constraint-based column generation optimization algorithm is designed to efficiently obtain high-quality solutions. Numerical experiments are conducted based on real-world operational data from an international airport. The results demonstrate that the proposed method performs well on main metrics such as the bridge boarding rate and flights adjustment efficiency. In particular, the cross-region adjustment proportion of our solution is 52.34%, which is significantly lower than the comparison methods, and effectively improves the airport operational efficiency in emergency scenarios.

Keywords: airport gates; resource allocation; emergency reassignment; Epsilon constraint; column generation

Received: 2024-06-12; **Accepted**: 2024-07-12; **Published Online**: 2024-08-05 15:34
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240805.1409.001
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U2333218)
* **Corresponding author**. E-mail: wenbodu@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0308

重力辅助惯性导航可观测度分析

万宏发，李姗姗*，李新星，谭勖立，裴宪勇
(信息工程大学 地理空间信息学院，郑州 450001)

摘 要：重力辅助惯性导航是水下潜器实现长期自主导航的重要技术，但重力异常观测与惯性导航状态参数之间存在复杂耦合关系，估计参数选取不当易导致滤波精度下降甚至发散。为明确不同导航状态参数的实时估计效能，围绕重力辅助惯性导航系统状态参数的可观测度开展建模、分析与验证研究。建立误差状态形式下的重力辅助惯性导航滤波模型，选取姿态误差、速度误差、位置误差、陀螺零偏和加速度计零偏等13维状态参数，推导重力异常观测方程及其对各状态参数的偏导关系，明确观测矩阵与导航参数估计能力之间的联系。分别构建基于协方差矩阵、可观测性矩阵和李导数的可观测度分析模型，对不同方法的适用性和一致性进行比较。基于某海域水下潜器仿真航迹，分析不同状态参数可观测度随航行时间、重力场特征和机动方式的变化规律。实验结果表明，经度、纬度、东向速度和北向速度具有较高可观测度，是重力辅助惯性导航中较优的估计状态组合；陀螺和加速度计零偏可观测度较低，不宜直接作为主要反馈校正参数。在此基础上，进一步设计固定参数组合和基于可观测度阈值的动态参数组合进行滤波验证，结果显示：位置与水平速度联合估计可使导航定位精度提升42%，动态调整状态参数组合可进一步将导航定位精度提升5%。研究结果可为重力辅助惯性导航滤波状态选取、方程结构设计和机动条件下的反馈校正策略提供依据。

关 键 词：可观测性；可观测度；惯性导航；重力辅助惯性导航；扩展卡尔曼滤波
中图分类号：P223.39
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2496-13

利用重力观测信息对惯性导航系统进行修正，从而实现长期、自主、精确航行，已经成为水下潜器中一项重要而又具有挑战性的课题。由于重力场与导航参数之间复杂的耦合关系，并没有明确的解析函数表达式，因此，重力场的观测值对导航参数的实时估计效能一直缺乏清晰的认知。在不同重力场特征和机动条件下，不同导航参数组合呈现出多样化行为。此外，不同机动条件(如加减速、航向变化、上浮下潜等)也会影响导航参数的表现，要求导航系统能够实时动态调整参数组合，以确保导航的准确性和稳定性。可观测度分析可以在启用重力辅助惯性导航之前就进行预测分析估计效能，这就需要导航参数根据可观测度灵活调整，以应对复杂多变的海洋水下环境。

国内外对重力辅助惯性导航系统的可观测度研究较少，主要集中在导航算法研究及算法结果的精度分析上，很少深入追踪其精度变化的机理因素。文献[1]对重力辅助惯性导航的可观测性进行研究，并给出了各参数可观测性的定性指标，为初步选定设计估计状态指明了方向。文献[2]对重力辅助惯性导航的可观测性进行分析，得出的结论与文献[1]相同，并依据分析选定的估计参数进行导航实验。文献[3-4]分别选取了不同的导航参数，实验说明，重力信息辅助在适当的条件下对位置和速度

收稿日期：2024-05-11；录用日期：2024-08-09；网络出版时间：2024-09-10 13:43
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240910.1119.001
基金项目：国家自然科学基金(42174007,42204009)
*通信作者. E-mail：zzy_lily@sina.com

引用格式：万宏发，李姗姗，李新星，等. 重力辅助惯性导航可观测度分析[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2496-2508.
Wan H F，Li S S，Li X X，et al. Analysis of observable degree of gravity aided inertial navigation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2496-2508 (in Chinese).

等状态量均有校正效果。文献 [5] 基于协方差对可观测性进行了阐述, 并说明了其在惯性导航可观测性中的分析应用。文献 [6] 说明了直接使用可观测性矩阵进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD)对于量纲相差较大的参数存在理论缺陷, 于是, 文献 [7] 提出改进的 SVD 方法来进行可观测度分析, 解决奇异值基准不统一的问题, 并将可观测度作为反馈因子调节状态校正, 以提高导航定位精度。文献 [8] 提出概率半数值算法, 在多项式时间内解决了可观测性概率的问题, 并为可观测性弱的变量提供了概率信息。文献 [9] 对线性和非线性系统的可观测性分别展开研究, 并给出了基于可观测性矩阵和基于李导数分析可观测性的定义和判据。文献 [10] 采用分段定常系统(piece-wise constant system, PWCS)假设对惯性导航传递对准过程的可观测度进行分析, 准确预测了不同可观测度状态的收敛速度。文献 [11] 对惯性导航的可观测性矩阵解析表达式进行分析, 实验结果和理论推导同时证明了自旋转使加速度计和陀螺零偏的可观, 也说明了在适合的机动条件下可提高特定参数的可观测度。文献 [12] 提出解耦高维状态可观测度的分析方法, 将 18 维状态解耦为多组 6 维状态量, 降低了可观测度的分析难度。现有的可观测度分析方法有 2 类: 采用卡尔曼滤波算法中状态协方差的特征值确定可观测度[13] 和对可观测性矩阵进行 SVD 的方法[14-16]。

综上所述, 现有重力辅助惯性导航研究主要是关于可观测性的定性研究, 对可观测度研究较少, 尤其是尚未针对动态实时可观测度进行深入分析。实际应用中, 导航系统的可观测度会随着观测条件、机动方式而产生较明显的变化, 因此, 对重力辅助惯性导航的实时动态可观测度研究是深入挖掘其误差机理和设计算法流程的关键前提。本文基于现有的可观测性分析方法, 针对重力辅助惯性导航系统可观测度开展研究, 采用基于可观测性矩阵的可观测度分析方法定量给出不同估计状态参数的可观测度, 并深入分析不同机动条件下各状态参数可观测度的变化, 解决无法预测各导航参数精度变化趋势来动态调整导航参数等问题, 并对其统计结果和评判效能进行分析。

1　重力辅助惯性导航数学模型

1.1　滤波算法模型

算法模型是构建观测值与导航状态参数之间关系的数学表达式, 采用误差形式的状态方程和观测方程表示为

$$\begin{cases}\delta\breve{\boldsymbol{X}}_k=\boldsymbol{A}_k\delta\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1}+\boldsymbol{G}_k\boldsymbol{W}_k\\ Y_k=\boldsymbol{H}_k\delta\breve{\boldsymbol{X}}_k+E_k\end{cases}\tag{1}$$

式中: $\delta\breve{\boldsymbol{X}}_k$为 k 时刻导航参数的先验估计; $\delta\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1}$为 $k-1$ 时刻导航参数的后验估计; $\boldsymbol{A}_k$为 k 时刻一步状态转移矩阵; $\boldsymbol{W}_k$为 k 时刻状态过程噪声向量, 由陀螺仪角速度白噪声和加速度计比力白噪声组成; $\boldsymbol{G}_k$为 k 时刻噪声转移矩阵; Y_k为 k 时刻观测值(重力异常观测与基准图上惯性导航指示点重力异常差值); $\boldsymbol{H}_k$为 k 时刻观测矩阵; E_k为 k 时刻观测噪声, 由重力仪观测、重力基准图误差噪声及线性化误差组成。

式(1)中状态方程的状态转移矩阵为惯性导航误差传播方程, 显而易见, 状态方程仅与惯性导航设备相关; 观测值与导航参数的关系表现在观测矩阵中, 对于不同的导航参数, 观测矩阵的形式不尽相同。合适的观测矩阵将使导航参数精确性和收敛性大大提升, 而当引入不可观测的导航参数时, 方程整体都将面临发散的风险。因此, 在滤波的算法模型中, 对于观测矩阵的可观测度分析是对重力辅助惯性导航算法效能评定的重要定性指标。本文选取 13 维状态参数进行分析, 使用误差形式表示为

$$\delta\boldsymbol{X}=\left[\phi_{\mathrm{E}},\phi_{\mathrm{N}},\phi_{\mathrm{U}},\delta v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}},\delta v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}},\delta B,\delta L,\varepsilon_x^{\mathrm{b}},\varepsilon_y^{\mathrm{b}},\varepsilon_z^{\mathrm{b}},\nabla_x^{\mathrm{b}},\nabla_y^{\mathrm{b}},\nabla_z^{\mathrm{b}}\right]^{\mathrm{T}}\tag{2}$$

式中: ϕ_{E}、ϕ_{N}和ϕ_{U}为三轴姿态角误差; $\delta v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}$、$\delta v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}$分别为在当地地理坐标系下的东向、北向速度误差; δB、δL分别为纬度、经度误差; $\varepsilon_x^{\mathrm{b}}$、$\varepsilon_y^{\mathrm{b}}$、$\varepsilon_z^{\mathrm{b}}$和$\nabla_x^{\mathrm{b}}$、$\nabla_y^{\mathrm{b}}$、$\nabla_z^{\mathrm{b}}$分别为惯性导航中陀螺和加速计零偏。

式(1)中状态转移矩阵$\boldsymbol{A}_k$及其矩阵内元素具体形式[17-18] 为

$$\boldsymbol{A}_k=\boldsymbol{I}+T_{\mathrm{s}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{\mathrm{aa}}&\boldsymbol{M}_{\mathrm{av}}&\boldsymbol{M}_{\mathrm{ap}}&-\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}&\boldsymbol{0}_{3\times3}\\ \boldsymbol{M}_{\mathrm{va}}&\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}&\boldsymbol{M}_{\mathrm{vp}}&\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\\ \boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{M}_{\mathrm{pv}}&\boldsymbol{M}_{\mathrm{pp}}&\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{0}_{3\times3}\\ \boldsymbol{0}_{6\times3}&\boldsymbol{0}_{6\times2}&\boldsymbol{0}_{6\times2}&\boldsymbol{0}_{6\times3}&\boldsymbol{0}_{6\times3}\end{bmatrix}\tag{3}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{aa}}=\begin{bmatrix}0&\omega_{\mathrm{ie}}\sin B+\dfrac{v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\tan B}{R_{\mathrm{N}}+h}&-\omega_{\mathrm{ie}}\cos B-\dfrac{v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{N}}+h}\\ -\omega_{\mathrm{ie}}\sin B-\dfrac{v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\tan B}{R_{\mathrm{N}}+h}&0&-\dfrac{v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{M}}+h}\\ \omega_{\mathrm{ie}}\cos B+\dfrac{v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{N}}+h}&\dfrac{v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{M}}+h}&0\end{bmatrix}\tag{4}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{av}}=\begin{bmatrix}0 & -1/(R_{\mathrm{M}}+h)\\ 1/(R_{\mathrm{N}}+h) & 0\\ (\tan B)/(R_{\mathrm{N}}+h) & 0\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{ap}}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ -\omega_{\mathrm{ie}}\sin B & 0\\ \omega_{\mathrm{ie}}\cos B+\left(v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\sec^2 B\right)/(R_{\mathrm{N}}+h) & 0\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{va}}=\begin{bmatrix}0 & -f_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}} & f_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}\\ f_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}} & 0 & -f_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}=\begin{bmatrix}\dfrac{-v_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{N}}+h}+\dfrac{v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}\tan B}{R_{\mathrm{N}}+h} & \dfrac{-v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\tan B}{R_{\mathrm{N}}+h}\\ 0 & \dfrac{-v_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{M}}+h}\end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{vp}}=\begin{bmatrix}2\omega_{\mathrm{ie}}(v_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}\sin B+v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}\cos B)+\dfrac{v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}\sec^2 B}{R_{\mathrm{N}}+h} & 0\\ -2v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\omega_{\mathrm{ie}}\cos B-\dfrac{(v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\sec B)^2}{R_{\mathrm{N}}+h} & 0\end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{pv}}=\begin{bmatrix}0 & 1/(R_{\mathrm{M}}+h)\\ (\sec B)/(R_{\mathrm{N}}+h) & 0\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{pp}}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ \left(v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\sec B\tan B\right)/(R_{\mathrm{N}}+h) & 0\end{bmatrix} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{I}$为单位矩阵；T_{s}为采样离散化时间间隔；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}$为载体坐标系b至当地地理坐标系n的姿态矩阵；$\omega_{\mathrm{ie}}$为地球自转角速度，取为15(°)/h(7.292×10^{-5} rad/s)；B为纬度；$v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}$、$v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}$、$v_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}$分别为在当地地理坐标系下的东向、北向、天向速度；$R_{\mathrm{N}}$、$R_{\mathrm{M}}$分别为卯酉圈、子午圈主曲率半径；$h$为大地高；$f_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}$、$f_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}$和$f_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}$表示重力仪3个轴向测量的比力通过姿态矩阵$\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}$转换到当地地理坐标系上。

式(1)中噪声转移矩阵$\boldsymbol{G}_k$的具体形式为

$$\boldsymbol{G}_k=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}} & \boldsymbol{0}_{3\times3}\\ \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\\ \boldsymbol{0}_{9\times3} & \boldsymbol{0}_{9\times3}\end{bmatrix}+\frac{T_{\mathrm{s}}}{2}\begin{bmatrix}-\boldsymbol{M}_{\mathrm{aa}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}} & \boldsymbol{M}_{\mathrm{av}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\\ -\boldsymbol{M}_{\mathrm{va}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}} & \boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\\ \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{M}_{\mathrm{pv}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\\ \boldsymbol{0}_{6\times3} & \boldsymbol{0}_{6\times3}\end{bmatrix} \tag{12}$$

观测矩阵$\boldsymbol{H}$的具体形式为

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial Y}{\partial\boldsymbol{\phi}} & \dfrac{\partial Y}{\partial\delta\boldsymbol{v}^{\mathrm{n}}} & \dfrac{\partial Y}{\partial\delta\boldsymbol{p}} & \dfrac{\partial Y}{\partial\boldsymbol{\varepsilon}} & \dfrac{\partial Y}{\partial\nabla}\end{bmatrix} \tag{13}$$

式中：Y为观测值；$\boldsymbol{\phi}=[\phi_{\mathrm{E}},\phi_{\mathrm{N}},\phi_{\mathrm{U}}]$为姿态误差向量；$\delta\boldsymbol{v}^{\mathrm{n}}=[\delta v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}},\delta v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}]$为速度误差向量；$\delta\boldsymbol{p}=[\delta B,\delta L]$为位置误差向量；$\boldsymbol{\varepsilon}=[\varepsilon_x^{\mathrm{b}},\varepsilon_y^{\mathrm{b}},\varepsilon_z^{\mathrm{b}}]$和$\nabla=\left[\nabla_x^{\mathrm{b}},\nabla_y^{\mathrm{b}},\nabla_z^{\mathrm{b}}\right]$分别为三轴陀螺零偏和加速度计零偏向量。

考虑水下动态重力测量公式，可以给出重力异常值关于13维状态的关系为

$$\Delta g_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}=\dot{v}_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}-f_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}-\left(2\omega_{\mathrm{ie}}\cos B+\frac{v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{N}}+h}\right)v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}+\left(-\frac{v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{M}}+h}\right)v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}-\gamma \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix}f_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\\ f_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}\\ f_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\begin{bmatrix}f_x^{\mathrm{b}}\\ f_y^{\mathrm{b}}\\ f_z^{\mathrm{b}}\end{bmatrix} \tag{15}$$

$$Y=\Delta g_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}-\Delta g_{\mathrm{map}} \tag{16}$$

式中：$\Delta g_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}$为重力异常测量值；$f_x^{\mathrm{b}}$、$f_y^{\mathrm{b}}$和$f_z^{\mathrm{b}}$为重力仪载体坐标系下输出的矢量比力值；当地地理坐标系下的速度分量$\boldsymbol{v}^{\mathrm{n}}=\left[v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}},v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}},v_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}\right]^{\mathrm{T}}$；式(14)中第3、4项为科里奥利加速度的第3分量，也称为厄特沃什改正；Δg_{map}为重力基准图上对应位置处的重力异常值；γ为计算点对应椭球面上的正常重力值，其与纬度的关系为

$$\gamma=\gamma_{\mathrm{e}}(1+\beta\sin^2 B-\beta_1\sin^2(2B)) \tag{17}$$

其中：γ_{e}为赤道上的正常重力；β为重力扁率，取为5.302×10^{-3}；β_1为克莱罗公式系数，取为5.870×10^{-6}。

略去二阶以上误差项，考虑式(14)，给出误差方程为

$$\begin{aligned}\delta Y=\delta\Delta g_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}-\delta\Delta g_{\mathrm{map}}=&f_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}\phi_{\mathrm{E}}-f_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\phi_{\mathrm{N}}-\\ &2\left(\omega_{\mathrm{N}}+\frac{v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{N}}+h}\right)\delta v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}-\frac{2v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{M}}+h}\delta v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}+\delta\dot{v}_{\mathrm{U}}^{\mathrm{n}}+\\ &\left(2\omega_{\mathrm{U}}v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}-\frac{\partial g_{\mathrm{map}}}{\partial B}-\gamma_{\mathrm{e}}\beta\sin(2B)+2\gamma_{\mathrm{e}}\beta_1\sin(4B)\right)\cdot\\ &\delta B-\frac{\partial g_{\mathrm{map}}}{\partial L}\delta L\end{aligned} \tag{18}$$

式中：ω_{N}和ω_{U}分别为地球自转在当地地理坐标系下北向和天向投影；L为经度。

根据式(18)中误差方程，可以给出观测值对于13维状态的偏导数为

$$\begin{cases}\dfrac{\partial Y}{\partial\phi_{\mathrm{E}}}=f_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}\\ \dfrac{\partial Y}{\partial\phi_{\mathrm{N}}}=-f_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}\end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial Y}{\partial v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}}=-2\left(\omega_{\mathrm{N}}+\dfrac{v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{N}}+h}\right)\\ \dfrac{\partial Y}{\partial v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}}=-\dfrac{2v_{\mathrm{N}}^{\mathrm{n}}}{R_{\mathrm{M}}+h}\end{cases} \tag{20}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial Y}{\partial B}=2\omega_{\mathrm{U}}v_{\mathrm{E}}^{\mathrm{n}}-\dfrac{\partial g_{\mathrm{map}}}{\partial B}-\gamma_{\mathrm{e}}\beta\sin(2B)+2\gamma_{\mathrm{e}}\beta_1\sin(4B)\\ \dfrac{\partial Y}{\partial L}=-\dfrac{\partial g_{\mathrm{map}}}{\partial L}\end{cases} \tag{21}$$

由于重力辅助惯性导航依靠重力场基准图进行滤波校正，而现有1′×1′(1 855 m×1 855 m)海洋重力场基准图只有与经纬度的相关信息，因此，只能给出局部重力场基准图关于经度和纬度方向拟合导数$\partial g_{\mathrm{map}}/\partial B$和$\partial g_{\mathrm{map}}/\partial L$。

1.2　可观测性矩阵与导航模型的关系

可观测性说明的是依据当前和历史时刻观测能否估计出对应状态的能力, 而可观测性矩阵是构建观测与状态之间的直接关系, 对式(1)中所有时刻的观测方程重新排列:

$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_0\delta\breve{\boldsymbol{X}}_0 \\ \boldsymbol{H}_1\delta\breve{\boldsymbol{X}}_1 \\ \boldsymbol{H}_2\delta\breve{\boldsymbol{X}}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{H}_n\delta\breve{\boldsymbol{X}}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \tag{22}$$

考虑式(1)中的状态方程, 式(22)可以改写为

$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_0 \\ \boldsymbol{H}_1\boldsymbol{A}_1 \\ \boldsymbol{H}_2\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{A}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{H}_n\boldsymbol{A}_n\cdots\boldsymbol{A}_1 \end{bmatrix} \delta\breve{\boldsymbol{X}}_0 + \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{H}_1\boldsymbol{G}_1\boldsymbol{W}_1 \\ \boldsymbol{H}_2\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{G}_1\boldsymbol{W}_1 + \boldsymbol{H}_2\boldsymbol{G}_2\boldsymbol{W}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{H}_n\left(\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{m=k+1}^{n}\boldsymbol{A}_m\right)\boldsymbol{G}_k\boldsymbol{W}_k\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \tag{23}$$

由式(23)可以得出所有观测值对初始状态的估计关系, 当其系数矩阵列满秩时, 即可由一段时间内的观测向量估计出初始状态参数; 如果系统矩阵列不满秩, 则无法求解出状态参数。同时, 根据其误差向量可以得出, 距离初始时刻越远的观测值估计的效果越差。如果在一段时间内, 其状态方程和观测方程都变化缓慢, 则可以假设为 PWCS(即时不变系统), 认为状态转移矩阵和观测矩阵保持不变, 将式(23)重新整理为

$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_k \\ \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{A}_k \\ \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{A}_k^2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{A}_k^n \end{bmatrix} \delta\breve{\boldsymbol{X}}_0 + \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{G}_k\boldsymbol{W}_k \\ \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{G}_k\boldsymbol{W}_k + \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{G}_k\boldsymbol{W}_k \\ \vdots \\ \boldsymbol{H}_k\left(\sum_{i=0}^{n-1}\boldsymbol{A}_k^i\boldsymbol{G}_k\boldsymbol{W}_k\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \tag{24}$$

式(24)中定义其系数矩阵为可观测性矩阵, 可观测性问题包括解耦状态变量与输出及其时间导数的绑定关系, 从而在已有可测量量的情况下, 在局部唯一地确定状态变量。式(24)中, 当选定不同时刻作为初始时刻时, 即可评判不同时刻下观测值对状态参数的可观测性。对于具体分析状态向量 $\delta\breve{\boldsymbol{X}}_k$ 中某个参数的可观测性, 则需要对可观测性矩阵作进一步分解。

2　可观测度分析的数学模型

2.1　基于协方差矩阵的可观测度分析

以重力辅助惯性导航扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法为例, 其对于式(1)的递推求解形式为

$$\begin{cases} \delta\breve{\boldsymbol{X}}_k = \boldsymbol{A}_k\delta\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1} \\ \breve{\boldsymbol{P}}_k = \boldsymbol{A}_k\hat{\boldsymbol{P}}_{k-1}\boldsymbol{A}_k^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_k \\ \boldsymbol{K}_k = \breve{\boldsymbol{P}}_k\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_k\breve{\boldsymbol{P}}_k\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} + R_k)^{-1} \\ \delta\hat{\boldsymbol{X}}_k = \delta\breve{\boldsymbol{X}}_k + \boldsymbol{K}_k\left(Y_k - \boldsymbol{H}_k\delta\breve{\boldsymbol{X}}_k\right) \\ \hat{\boldsymbol{P}}_k = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}_k)\breve{\boldsymbol{P}}_k \end{cases} \tag{25}$$

式中: $\hat{\boldsymbol{P}}_{k-1}$ 为 k–1 时刻估计参数的后验协方差; $\breve{\boldsymbol{P}}_k$ 为 k 时刻估计参数的先验协方差; $\boldsymbol{Q}_k$ 为状态过程噪声协方差矩阵; $\boldsymbol{K}_k$ 为滤波增益矩阵; R_k 为观测噪声协方差矩阵。

过程噪声协方差矩阵 $\boldsymbol{Q}_k$ 和观测噪声协方差 R_k 由式(1)得到, 其与陀螺仪和加速度计测量白噪声及重力仪观测和重力基准图噪声之间的关系为

$$\begin{cases} \boldsymbol{Q}_k = \boldsymbol{G}_k E\left[\boldsymbol{W}_k\boldsymbol{W}_k^{\mathrm{T}}\right]\boldsymbol{G}_k^{\mathrm{T}} \\ R_k = E[E_kE_k] \end{cases} \tag{26}$$

式中: $E[\cdot]$ 为取期望算术符, 假设陀螺仪与加速度计不同轴向白噪声不相关, 因此, $E\left[\boldsymbol{W}_k\boldsymbol{W}_k^{\mathrm{T}}\right]$ 为对角矩阵, 对角线元素为 $q_{\mathrm{g}M}^{\mathrm{b}}$ 和 $q_{\mathrm{a}M}^{\mathrm{b}}$($M = x,y,z$), 其分别为陀螺仪角度随机游走系数和加速度计速度随机游走系数的平方, 由静基座条件下对惯性导航输出作阿仑方差分析得到。

EKF 主要是每一步的导航参数更新和协方差更新过程, 其中, 协方差表示对参数估计的置信度、精度描述和误差变化, 协方差矩阵在一定程度上反映了各状态分量估计效果的强弱, 因此, 对每个估计量的可观测度描述为

$$\sigma_{k(j)} = \sqrt{\frac{\hat{P}_{0(jj)}}{\hat{P}_{k(jj)}}} \tag{27}$$

式中: $\sigma_{k(j)}$ 为第 j 个状态量 $\delta\hat{\boldsymbol{X}}_{k(j)}$ 在 k 时刻的可观测度; $\hat{P}_{k(jj)}$ 为 k 时刻后验状态协方差。

k 时刻滤波方差与同一状态量初始 0 时刻的方差之比的平方根反映了状态量在滤波过程中的估计误差下降程度, k 时刻状态的方差越小, 表示可观测度越高, 反之, 可观测度越低。

2.2　基于可观测性矩阵 SVD 的可观测度分析

确定性系统与随机系统[19]的可观测性矩阵区别在于是否考虑每一时刻观测噪声协方差 R_k 的影响, 当观测噪声协方差 R_k 为常值, 不随时间变化时,

确定性系统与随机系统的可观测性矩阵定义等价，以确定性系统的可观测性矩阵[20]为例，其表示形式与输入输出的关系可表示为

$$\begin{cases}\boldsymbol{O}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}\\ \boldsymbol{H}\boldsymbol{A}\\ \vdots\\ \boldsymbol{H}\boldsymbol{A}^{n-1}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{\Theta}=\boldsymbol{O}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{O}\end{cases} \tag{28}$$

$$\boldsymbol{Y}'=\begin{bmatrix}Y_1\\ Y_1^{(1)}\\ \vdots\\ Y_1^{(n)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_1\\ \boldsymbol{H}_1\boldsymbol{A}_1\\ \vdots\\ \boldsymbol{H}_1\boldsymbol{A}_1^{n-1}\end{bmatrix}\delta\breve{\boldsymbol{X}}_1 \tag{29}$$

可观测性矩阵$\boldsymbol{O}$的列秩或矩阵$\boldsymbol{\Theta}$的正定性决定了状态量是否能被精确估计[21]，由于可观测性矩阵$\boldsymbol{O}$和矩阵$\boldsymbol{\Theta}$的判据等价，以可观测性矩阵为例。当可观测性矩阵$\boldsymbol{O}$列不满秩时，表示在该观测条件下某些状态量不可观。文献[16,22]指出，对于可观测性矩阵进行SVD分解后，其最大奇异值对应的右奇异向量表示各状态量可观测度的大小：

$$\begin{cases}\boldsymbol{O}_k=\left[\boldsymbol{H}_k,\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{A}_k,\cdots,\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{A}_k^{n-1}\right]\\ \boldsymbol{O}_k=\boldsymbol{U}_k\boldsymbol{\Sigma}_k\boldsymbol{V}_k^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{30}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{Y}'=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\delta\breve{\boldsymbol{X}}\\ \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}'=\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\delta\breve{\boldsymbol{X}}\end{cases} \tag{31}$$

式中：$\boldsymbol{O}_k$为k时刻可观测性矩阵；$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{\Sigma}$、$\boldsymbol{V}$分别为SVD左奇异向量、奇异值矩阵、SVD右奇异向量；k时刻SVD左奇异向量$\boldsymbol{U}_k=\left[\boldsymbol{u}_{(1)k},\boldsymbol{u}_{(2)k},\cdots,\boldsymbol{u}_{(n)k}\right]$，$\boldsymbol{u}_{(n)k}$为第$n$个状态对应的左奇异向量；$k$时刻SVD右奇异向量$\boldsymbol{V}_k=\left[\boldsymbol{v}_{(1)k},\boldsymbol{v}_{(2)k},\cdots,\boldsymbol{v}_{(n)k}\right]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{v}_{(n)k}$为第$n$个状态对应的右奇异向量；$k$时刻奇异值矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_k=\mathrm{diag}\left[s_{(1)k},s_{(2)k},\cdots,s_{(n)k}\right]$，$s_{(n)k}$为第$n$个状态对应的奇异值。

由式(31)可知，奇异值矩阵$\boldsymbol{\Sigma}$实际反映的是状态量的组合$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\delta\breve{\boldsymbol{X}}$在多阶观测值组合$\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}'$下的比重。当可观测性矩阵中观测方程和状态方程为确定性常值时，其只能定性分析可观测性，即通过奇异值s是否非零说明哪些状态量在导航中可观；而采用PWCS[23]，即原可观测性矩阵(式(28))采用每一时刻滤波的观测方程和状态方程，并认为往后n个时刻的观测方程和状态方程保持不变，其对应SVD分解后右奇异向量含义为描述可观测度最大的组合状态中各状态之间的权重。文献[7]提出可观测性矩阵的分析中存在观测值量纲不一致的问题，当外部量测信息反映的状态在数量级上差异较大时，会导致其各自对应的奇异值也相差较大，因此，仅选择最大奇异值对应的右奇异向量是不严密的，需要将不同奇异值对应的观测值量级影响扣除。由于观测矩阵$\boldsymbol{H}$的行维数为1，左奇异矩阵$\boldsymbol{U}$既是酉矩阵，也是方阵，因此，可将式(31)中矩阵进行变换，定义新的可观测性矩阵形式为

$$\boldsymbol{O}_k=\boldsymbol{U}_k\boldsymbol{V}_k^{\mathrm{T}}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{u}_{(i)k}\boldsymbol{v}_{(i)k}^{\mathrm{T}} \tag{32}$$

可观测性矩阵$\boldsymbol{O}_k$的第一行即表示k时刻各参数对应当前时刻观测值的可观测度。

2.3 基于李导数的可观测度分析

李导数源于对非线性系统的可观测性分析研究[24-25]，而重力观测与导航状态之间为高度非线性函数。给出非线性形式的状态方程和观测方程：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X})\\ \boldsymbol{Y}'=\boldsymbol{C}(\boldsymbol{X})\end{cases} \tag{33}$$

式中：$\boldsymbol{F}(\cdot)$为连续系统的非线性状态方程；$\boldsymbol{C}(\cdot)$为非线性观测方程。

$\boldsymbol{F}(\cdot)$和$\boldsymbol{C}(\cdot)$为光滑的向量场，因此，相对于状态量$\boldsymbol{X}$的可观测空间即是包含多重高阶李导数相对于状态量$\boldsymbol{X}$的梯度空间，由李导数给出非线性系统的可观测性矩阵[26-27]为

$$\boldsymbol{O}=\begin{bmatrix}\mathrm{d}L_{\boldsymbol{F}}^0\boldsymbol{C}\\ \mathrm{d}L_{\boldsymbol{F}}^1\boldsymbol{C}\\ \vdots\\ \mathrm{d}L_{\boldsymbol{F}}^{n-1}\boldsymbol{C}\end{bmatrix} \tag{34}$$

式中：$\mathrm{d}L_{\boldsymbol{F}}^k\boldsymbol{C}$为李导数的梯度，具体形式表示为

$$\begin{cases}\mathrm{d}L_{\boldsymbol{F}}^k\boldsymbol{C}=\dfrac{\partial L_{\boldsymbol{F}}^k\boldsymbol{C}}{\partial\boldsymbol{X}}\\ L_{\boldsymbol{F}}^k\boldsymbol{C}=\nabla\left[L_{\boldsymbol{F}}^{k-1}\boldsymbol{C}\right]\cdot\boldsymbol{F}\end{cases} \tag{35}$$

对于式(35)，可以给出李导数的前几阶形式：

$$\begin{cases}L_{\boldsymbol{F}}^0\boldsymbol{C}=\boldsymbol{C}\\ L_{\boldsymbol{F}}^1\boldsymbol{C}=\nabla\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{F}\\ L_{\boldsymbol{F}}^2\boldsymbol{C}=\nabla\left[L_{\boldsymbol{F}}^1\boldsymbol{C}\right]\cdot\boldsymbol{F}\\ \quad\vdots\\ L_{\boldsymbol{F}}^n\boldsymbol{C}=\nabla\left[L_{\boldsymbol{F}}^{n-1}\boldsymbol{C}\right]\cdot\boldsymbol{F}\end{cases} \tag{36}$$

式中：$\nabla\boldsymbol{C}$为非线性观测方程对状态量的梯度，表示为

$$\nabla\boldsymbol{C}=\frac{\partial\boldsymbol{C}}{\partial\boldsymbol{X}}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial C_1}{\partial x_1}&\dfrac{\partial C_1}{\partial x_2}&\cdots&\dfrac{\partial C_1}{\partial x_{n'}}\\ \dfrac{\partial C_2}{\partial x_1}&\dfrac{\partial C_2}{\partial x_2}&\cdots&\dfrac{\partial C_2}{\partial x_{n'}}\\ \vdots&\vdots&&\vdots\\ \dfrac{\partial C_{m'}}{\partial x_1}&\dfrac{\partial C_{m'}}{\partial x_2}&\cdots&\dfrac{\partial C_{m'}}{\partial x_{n'}}\end{bmatrix} \tag{37}$$

$$\boldsymbol{H}=\frac{\partial\boldsymbol{C}}{\partial\boldsymbol{X}}=\nabla\boldsymbol{C} \tag{38}$$

根据李导数的定义[28]，可知当状态方程和观测方程为线性方程时，李导数的可观测性矩阵与线性

系统的可观测性矩阵(式(28))一致。在重力辅助惯性导航中, 式(38)观测方程由随机线性化技术得到, 其一阶展开为线性方程, 因此, 基于李导数的可观测度分析在一阶近似的条件下, 与基于可观测性矩阵的可观测度分析理论上结论一致。对应于式(1), 可以推导出关于李导数的可观测性矩阵具体形式为

$$\boldsymbol{O}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}\\ \boldsymbol{HA}\\ \nabla\boldsymbol{HA}+\boldsymbol{HA}^2\\ \vdots\\ \sum_{i=1}^{n-1}\nabla^{(n-i-1)}\boldsymbol{HA}^i\end{bmatrix} \tag{39}$$

式(39)中, 可观测性矩阵$\boldsymbol{O}$中行代表量测空间, 列代表状态空间[29], 李导数则表示量测空间中的向量场在状态空间中的流动情况[30]。式(39)中, 观测矩阵$\boldsymbol{H}$和观测矩阵对状态变量的高阶导数$\nabla\boldsymbol{H}$表示重力场的平坦度, 当重力场特征变化平缓时(重力场近似为一个空间平面, 相对于状态变量为线性关系), 观测矩阵高阶导数为零, 李导数的可观测性矩阵退化为式(28); 而当重力场特征变化剧烈时, 观测矩阵的高阶导数对可观测性矩阵$\boldsymbol{O}$秩的影响不可忽略。

3　重力辅助惯性导航实时可观测度实验

长航时实验选取南海某海域, 采用丹麦科技大学(Technical University of Denmark, DTU)发布的重力异常基准图(分辨率为 1′×1′(1 855 m×1 855 m))对一段 24 h 的水下潜器轨迹进行仿真模拟, 潜深为 100 m, 全程等深航行。采用的陀螺仪和重力仪参数如表 1 所示, 其中, 重力仪参考 ZL11 型海洋重力仪指标参数。

表 1　仿真参数设置

Table 1　Parameter settings for simulation

误差项	仪器	常值零偏	随机游走
惯导误差项	陀螺仪(x、y、z轴)	0.002 (°)/h	0.001 (°)/ $\sqrt{\text{h}}$
	加速度计(x、y、z轴)	1×10^{-4} m/s^2	5×10^{-5} m/s^2 $\sqrt{\text{h}}$
重力仪误差项	水平加速度计(x、y轴)	5×10^{-4} m/s^2	5×10^{-5} m/s^2 $\sqrt{\text{h}}$
	垂向加速度计(z轴)	3×10^{-5} m/s^2	3×10^{-6} m/s^2 $\sqrt{\text{h}}$

为充分激励各导航参数的可观测性, 在仿真轨迹中综合多种运动特征, 并设计经过重力场特征变化剧烈区域。初始 30 min 为加速阶段, 匀加速至 10 kn(5.14 m/s), 匀速航行 7 h, 进行定常回转运动, 航向由正北调整为正西方向, 继续匀速航行 8.2 h, 定常回转调整航向由正西变为正北方向后, 再匀速航行 8.2 h, 到达终点。按设计的仪器参数, 惯性导航仿真轨迹结果如图 1 所示。

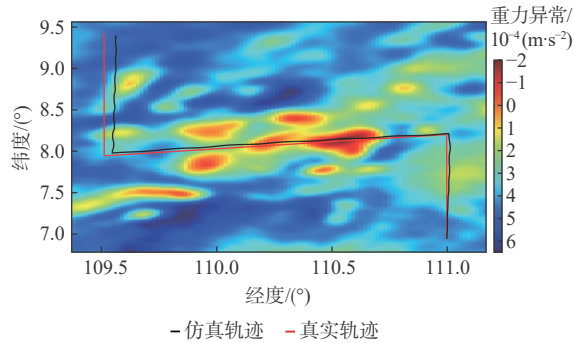


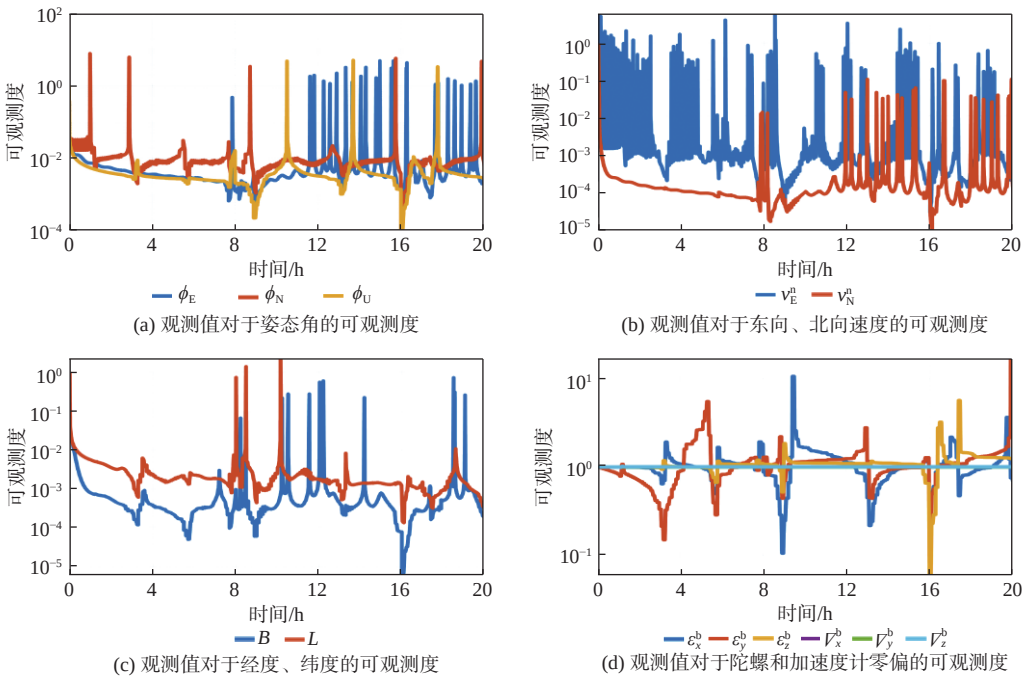
图 1　仿真轨迹与 DTU 重力异常基准图

Fig. 1　Simulated trajectory and DTU gravity anomaly reference map

其中, 惯性导航采样频率为 100 Hz, 观测校正间隔为 360 s。对于轨迹上的每一点, 分别采用基于协方差和基于可观测性矩阵进行统计分析, 并绘制可观测度随时间的变化曲线, 如图 2 和表 2 所示。

由于基于协方差矩阵的可观测度定义(式(27))中, 状态量的实时协方差与初始协方差相除消除了同一类型状态量单位的影响, 但不同类型状态量之间由于单位量级不同而无法比较, 根据图 2 也可以看出, 陀螺、加速度计零偏和姿态的可观测度甚至高于对经纬度位置的可观测度, 不符合实际情况, 因此, 基于协方差矩阵的可观测度只能在同一单位类型状态量之间分析。

图 2 中规则的跳变是由于设置的校正间隔在经过不同重力格网进行观测校正时的影响。对于图 2(a), 由式(18)可知, 在经过不同重力格网时, 对于东向、北向和天向姿态的可观测度主要与东向和北向比力有关, 载体朝东向、北向加速运动或拐弯时产生的离心力均会造成其可观测度变化。对于图 2(b), 东向速度的可观测度略高于北向速度。由式(18)可知, 观测方程中东向速度的系数比北向速度多一个 2 倍的地球自转在当地地理坐标系北向的投影分量, 因此, 重力异常观测对于东向速度的导数大于北向速度的导数, 从而滤波器中将重力基准图中变化的重力值反向校正为东向速度的分量更多, 认为东向速度更加可观。图 2(c)对经度和纬度的可观测度主要是由式(21)中重力基准图对经纬向的导数决定的, 因此, 其与重力场特征相关性较大, 可观测度增大的地方恰好处在重力场特征变化明显区域。图 2(d)反映了重力异常观测对陀螺和加速度计零偏的可观测度基本上较为一致, 而 5 h 处载体处于拐弯机动和 13 h 处重力场变化较为剧烈, 导致陀螺零偏的可观测度变化较大。



(a) 观测值对于姿态角的可观测度 (b) 观测值对于东向、北向速度的可观测度

(c) 观测值对于经度、纬度的可观测度 (d) 观测值对于陀螺和加速度计零偏的可观测度

图 2 基于协方差矩阵的可观测度分析

Fig. 2 Observable degree analysis based on covariance matrix

表 2 基于协方差矩阵的可观测度统计

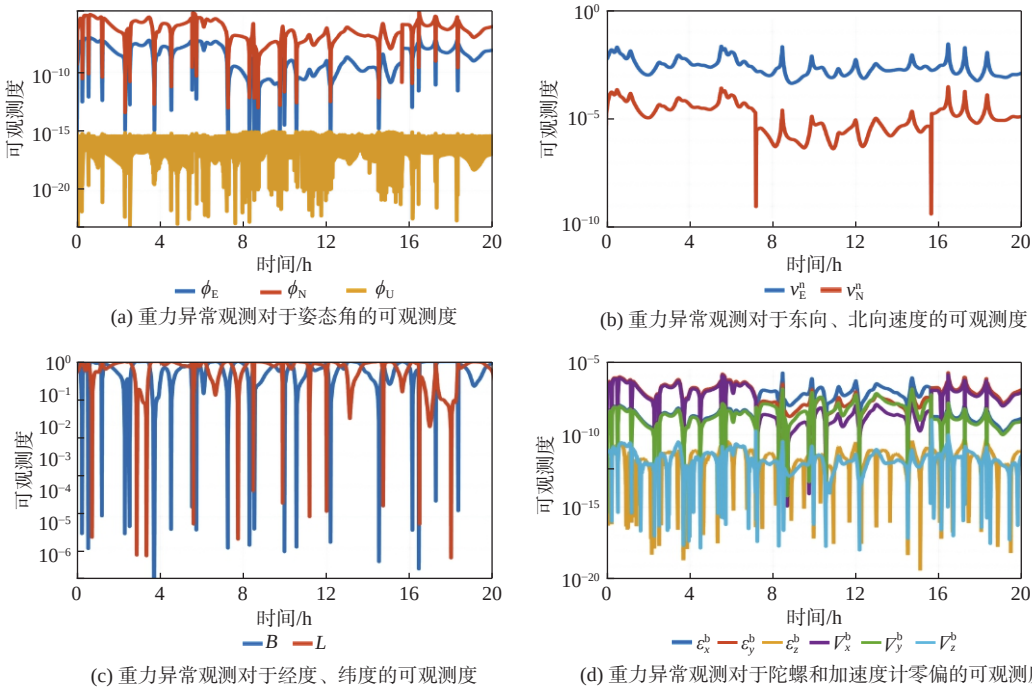
Table 2 Observable degree statistics based on covariance matrix

状态量	可观测度			
	平均值	最大值	最小值	中位数
东向姿态角ϕ_E	0.004 9	4.984 6	$1.477\,6\times10^{-4}$	0.003 6
北向姿态角ϕ_N	0.009 2	7.821 4	$2.768\,7\times10^{-4}$	0.008 1
天向姿态角ϕ_U	0.004 4	5.218 5	$1.059\,1\times10^{-4}$	0.003 2
东向速度v_E^n	0.001 8	6.252 3	$2.084\,8\times10^{-5}$	$8.041\,5\times10^{-4}$
北向速度v_N^n	$1.807\,5\times10^{-4}$	1.000 0	$6.524\,5\times10^{-6}$	$8.252\,8\times10^{-4}$
纬度B	$7.477\,2\times10^{-4}$	1.000 0	$5.877\,5\times10^{-6}$	$3.526\,3\times10^{-4}$
经度L	0.002 2	2.405 8	$1.312\,6\times10^{-4}$	0.001 5
陀螺仪x轴零偏ε_x^b	1.059 6	10.594 2	0.106 0	0.997 6
陀螺仪y轴零偏ε_y^b	1.253 0	16.824 6	0.144 2	1.114 4
陀螺仪z轴零偏ε_z^b	1.142 0	5.658 5	0.059 2	1.095 4
加速度计x轴零偏∇_x^b	1.000 0	1.000 1	0.998 3	1.000 0
加速度计y轴零偏∇_y^b	1.000 0	1.000 0	0.999 9	1.000 0
加速度计z轴零偏∇_z^b	1.005 3	1.018 5	0.996 4	1.005 6

同样，绘制基于可观测性矩阵的可观测度随时间变化曲线并进行统计，如图 3 和表 3 所示。

基于可观测性矩阵的可观测度分析中，由于其定义中并不包含不同状态量单位量级的影响，可以比较不同类别状态量的可观测度大小。由图 3 可知，在重力辅助惯性导航的 13 维状态量中，整体可观测度较高的状态量有经度、纬度、东向速度和北向速度，其结论正好印证了不同文献对重力辅助惯性导航估计参数的选择。

图 3(a)说明东向和北向姿态角较天向姿态角更为可观，且天向姿态角的可观测度存在上界，约在 10^{-15} 处；图 3(b)中，东向速度和北向速度可观测性的差异相较于基于协方差矩阵分析结果更加明显；图 3(c)中，经纬度更加可观的结论与基于协方差矩阵的可观测度分析结论一致，说明在现有最高分辨率为 1′×1′(1 855 m×1 855 m)的重力异常格网基准图中，可以对经纬度位置信息进行有效校正；图 3(d)中，陀螺和加速度计的 z 轴零偏可观测度较其余轴向零偏可观测度偏小，由于潜器在水下平稳航行并未进行大角度机动，姿态接近单位矩阵，陀



(a) 重力异常观测对于姿态角的可观测度

(b) 重力异常观测对于东向、北向速度的可观测度

(c) 重力异常观测对于经度、纬度的可观测度

(d) 重力异常观测对于陀螺和加速度计零偏的可观测度

图 3　基于可观测性矩阵的可观测度分析

Fig. 3　Observable degree analysis based on observability matrix

表 3　基于可观测性矩阵的可观测度统计

Table 3　Observable degree statistics based on observability matrix

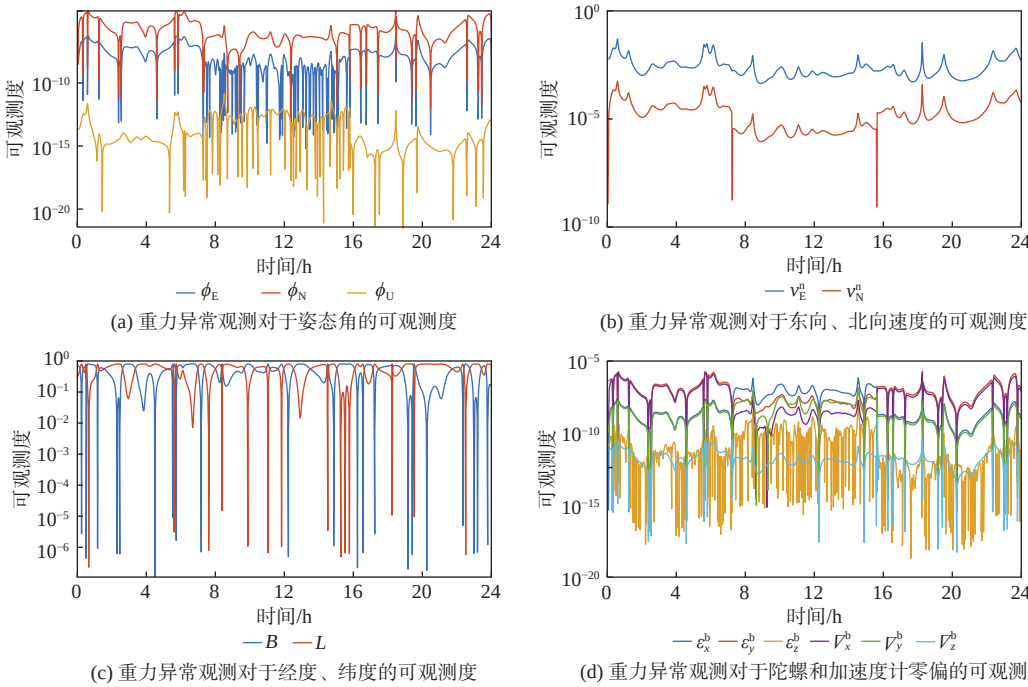
状态量	可观测度			
	平均值	最大值	最小值	中位数
东向姿态角ϕ_E	$1.274\,4\times10^{-8}$	$2.333\,7\times10^{-7}$	$6.234\,1\times10^{-17}$	$4.114\,4\times10^{-9}$
北向姿态角ϕ_N	$1.178\,4\times10^{-6}$	$2.007\,2\times10^{-5}$	$4.106\,3\times10^{-14}$	$4.341\,2\times10^{-7}$
天向姿态角ϕ_U	$1.153\,4\times10^{-16}$	$1.152\,0\times10^{-15}$	$8.804\,8\times10^{-24}$	$1.097\,9\times10^{-16}$
东向速度v_E^n	0.003 4	0.073 9	$4.220\,4\times10^{-4}$	0.002 0
北向速度v_N^n	$3.113\,7\times10^{-5}$	$8.615\,0\times10^{-4}$	$4.250\,6\times10^{-10}$	$1.236\,7\times10^{-5}$
纬度B	0.592 1	1.000 0	$9.655\,1\times10^{-8}$	0.621 8
经度L	0.674 6	1.000 0	$4.888\,4\times10^{-7}$	0.783 2
陀螺仪x轴零偏ε_x^b	$3.822\,1\times10^{-8}$	$1.699\,9\times10^{-6}$	$6.495\,4\times10^{-17}$	$3.734\,1\times10^{-9}$
陀螺仪y轴零偏ε_y^b	$1.652\,0\times10^{-7}$	$3.123\,8\times10^{-5}$	$2.032\,7\times10^{-14}$	$6.060\,1\times10^{-8}$
陀螺仪z轴零偏ε_z^b	$8.465\,9\times10^{-12}$	$1.500\,3\times10^{-9}$	$4.534\,5\times10^{-20}$	$2.956\,9\times10^{-12}$
加速度计x轴零偏∇_x^b	$1.163\,9\times10^{-7}$	$2.052\,3\times10^{-6}$	$1.005\,3\times10^{-15}$	$3.927\,3\times10^{-8}$
加速度计y轴零偏∇_y^b	$6.199\,9\times10^{-9}$	$1.345\,7\times10^{-7}$	$7.224\,3\times10^{-17}$	$2.027\,5\times10^{-9}$
加速度计z轴零偏∇_z^b	$5.757\,2\times10^{-12}$	$1.047\,1\times10^{-9}$	$2.668\,7\times10^{-19}$	$1.685\,7\times10^{-12}$

螺和加速度计的三轴指向与当地地理坐标系接近一致, 因此, 水平运动并不直接受天向零偏的影响, 对其可观测度自然偏低。

为考虑重力辅助惯性导航非线性观测方程对可观测度的影响, 对基于李导数的可观测度随时间变化进行统计, 如图 4 和表 4 所示。

基于李导数的可观测度分析方法较基于可观测性矩阵的可观测度分析方法, 仅是在式(34)中考虑观测矩阵的高阶导数和状态转移矩阵乘积的叠加, 因此, 李导数可以看作叠加上在非线性条件下对观测矩阵高阶导数对于导航状态参数可观测度的描述。由于李导数中观测方程的导数采用离散化求导方式, 其阶数受数据量的限制, 此处取至 3 阶进行分析。

基于李导数中速度和位置的分析结果基本上与基于可观测性矩阵的结果整体保持一致, 但对于图 4(a)和图 4(d)中方位角和陀螺的天向零偏, 其主要是由于李导数考虑的非线性影响, 从而使不可观参数的可观测度随其余参数的高阶导数而变化。从式(39)和式(18)可以看出, 观测矩阵高阶导



(a) 重力异常观测对于姿态角的可观测度

(b) 重力异常观测对于东向、北向速度的可观测度

(c) 重力异常观测对于经度、纬度的可观测度

(d) 重力异常观测对于陀螺和加速度计零偏的可观测度

图 4 基于李导数的可观测度分析

Fig. 4 Observable degree analysis based on Li derivatives

表 4 基于李导数的可观测度统计

Table 4 Observability statistics based on Li derivative

统计量	可观测度			
	平均值	最大值	最小值	中位数
东向姿态角ϕ_E	$1.630\,1\times10^{-8}$	$1.970\,3\times10^{-7}$	$2.551\,1\times10^{-16}$	$4.343\,3\times10^{-9}$
北向姿态角ϕ_N	$1.425\,4\times10^{-6}$	$1.675\,8\times10^{-5}$	$3.577\,1\times10^{-14}$	$3.617\,9\times10^{-7}$
天向姿态角ϕ_U	$7.324\,0\times10^{-14}$	$5.514\,6\times10^{-12}$	$1.428\,7\times10^{-22}$	$2.661\,1\times10^{-15}$
东向速度v_E^n	0.004 0	0.055 7	$4.773\,4\times10^{-4}$	0.002 0
北向速度v_N^n	$3.932\,1\times10^{-5}$	$6.270\,3\times10^{-4}$	$8.694\,8\times10^{-10}$	$1.437\,6\times10^{-5}$
纬度B	0.594 7	1.000 0	$3.471\,6\times10^{-7}$	0.632 8
经度L	0.682 3	1.000 0	$8.663\,6\times10^{-7}$	0.774 3
陀螺仪x轴零偏ε_x^b	$4.112\,2\times10^{-8}$	$7.653\,6\times10^{-7}$	$4.748\,8\times10^{-16}$	$4.012\,8\times10^{-9}$
陀螺仪y轴零偏ε_y^b	$1.977\,9\times10^{-7}$	$2.178\,8\times10^{-6}$	$2.289\,2\times10^{-14}$	$5.138\,3\times10^{-8}$
陀螺仪z轴零偏ε_z^b	$1.081\,6\times10^{-10}$	$6.287\,1\times10^{-9}$	$2.079\,6\times10^{-19}$	$9.429\,2\times10^{-12}$
加速度计x轴零偏∇_x^b	$1.413\,3\times10^{-7}$	$1.713\,5\times10^{-6}$	$7.328\,9\times10^{-16}$	$3.478\,7\times10^{-8}$
加速度计y轴零偏∇_y^b	$6.932\,1\times10^{-9}$	$1.188\,4\times10^{-7}$	$3.454\,9\times10^{-16}$	$2.321\,5\times10^{-9}$
加速度计z轴零偏∇_z^b	$4.823\,8\times10^{-12}$	$1.235\,3\times10^{-9}$	$5.507\,0\times10^{-19}$	$1.666\,7\times10^{-12}$

数主要由重力异常相对于经纬度的导数构成，因此，其余参数的可观测度变化只能受经纬度高阶导数间接影响，而不受观测值的直接影响，从而在李导数中位置和速度的可观测度较可观测性矩阵中变化不大。对于基于李导数分析统计结果，其相同类型参数的可观测度大小关系与基于可观测性矩阵和基于协方差矩阵的相同，说明这 3 类方法内在的一致性。基于李导数的方法和基于可观测性矩阵的方法在理论和实验结果方面相似，但基于李导数的方法计算复杂度高，计算时间长，因此，后续实验均采用基于可观测性矩阵的方法。

由上述分析可知，不同参数可观测度变化较大，且不同运动状态下可观测度的变化情况也不同，而重力辅助惯性导航中引入可观测度较小的导航参数可能会导致滤波器发散。为设计最优的方程参数结构，重点关注经度、纬度、东向速度和北向速度的可观测度。对于图 1 中仿真轨迹同时采取位置组合及位置和速度组合，分别采用 EKF 进行重力辅助惯性导航实验，并统计其最终的误差大小。此处简记纬度和经度组合量为第 1 组合；纬度、经度和东向速度组合量为第 2 组合；纬度、经度、东向速度和北向速度组合量为第 3 组合；纬度、

经度和动态调整的东向速度、北向速度状态组合量为第 4 组合。在第 4 组合中设置经验阈值为 10^{-5}。当导航参数的可观测度大于阈值时, 添加估计量; 当导航参数的可观测度小于阈值时, 删除估计量, 同时对式(1)中的状态方程和观测方程进行相应的调整。

表 5 依据前述可观测度最高的前 4 个状态量进行组合, 并进行重力辅助惯性导航精度统计。第 3 组合较第 1 组合的位置估计精度提升 42%, 第 4 组合较第 3 组合的位置估计精度提升 5%, 实验结果表明, 状态估计参数组合对最终滤波器整体的估计精度有较大影响, 在该仿真轨迹上, 最优选择为第 4 组合的导航参数组合量。第 2 组合中的统计结果表明, 由于东向速度和北向速度是耦合关系, 而仅将可观测度高的东向速度进行滤波校正, 虽然可使东向速度的估计精度有一定的提高, 但由于水平速度估计量的东向和北向精度不匹配, 根据式(1)中水平速度的耦合关系, 北向速度误差累积将进一步影响东向速度和位置, 从而导致滤波效果降低。第 4 组合根据可观测度进行实时调整校正, 相较于第 3 组合, 根据可观测度调整方程结构, 避免了在低可观测度下的错误校正, 对于低可观测度的北向速度, 其估计精度的提升可以进一步提高对位置估计的精度。

表 5　不同状态量组合下的 EKF 算法精度对比

Table 5　Comparison of EKF algorithm accuracy under different combinations of state variables

导航组合量	纬度均方误差/m	经度均方误差/m	东向速度均方误差/($m\cdot s^{-2}$)	北向速度均方误差/($m\cdot s^{-2}$)	纬度绝对平均误差/m	经度绝对平均误差/m	东向速度绝对平均误差/($m\cdot s^{-2}$)	北向速度绝对平均误差/($m\cdot s^{-2}$)	纬度绝对中误差/m	经度绝对中误差/m	东向速度绝对中误差/($m\cdot s^{-2}$)	北向速度绝对中误差/($m\cdot s^{-2}$)
纬度	504.855 2	340.397 6	0.360 7	0.267 6	292.430 8	229.462 8	0.289 9	0.217 6	154.271 6	146.308 0	0.251 6	0.201 8
纬度 经度	559.304 0	397.068 8	0.350 4	0.283 4	322.433 2	223.721 6	0.200 6	0.229 6	163.346 4	101.860 0	0.107 1	0.193 9
纬度 经度 东向速度	306.320 8	171.310 0	0.105 4	0.211 5	193.163 6	117.972 4	0.084 1	0.167 9	112.046 0	69.079 6	0.069 6	0.136 9
纬度 经度 东向速度 北向速度	285.208 0	172.236 0	0.105 9	0.209 5	186.126 0	120.565 2	0.083 3	0.167 5	111.305 2	70.376 0	0.067 3	0.138 0
(动态调整) 纬度 经度 东向速度 北向速度												

考虑到惯性导航误差传播方程中不同运动状态下状态转移矩阵系数的变化, 可对水下潜器不同的机动条件进行实验, 分别选取加速和减速、上浮和下潜、左回转和右回转运动, 采用基于可观测性矩阵方法对可观测度进行对比分析, 如图 5 所示。

图 5(a)为水下潜器的加减速机动, 前半段为加速运动, 加速到 10 kn(5.14 m/s), 后半段为减速运动。可以看出, 经度的可观测度与速度成反比, 而纬度和北向速度的可观测度与速度成正比。水下潜器朝北向加速时, 重力异常的观测主要由纬度和北向速度变化引起, 而当速度降低时, 纬度和北向速度的可观测度均降低。图 5(b)为水下潜器的上浮和下潜机动, 前半段为下潜, 后半段为上浮。在上浮过程中, 纬度的可观测度在上浮期间陡然下

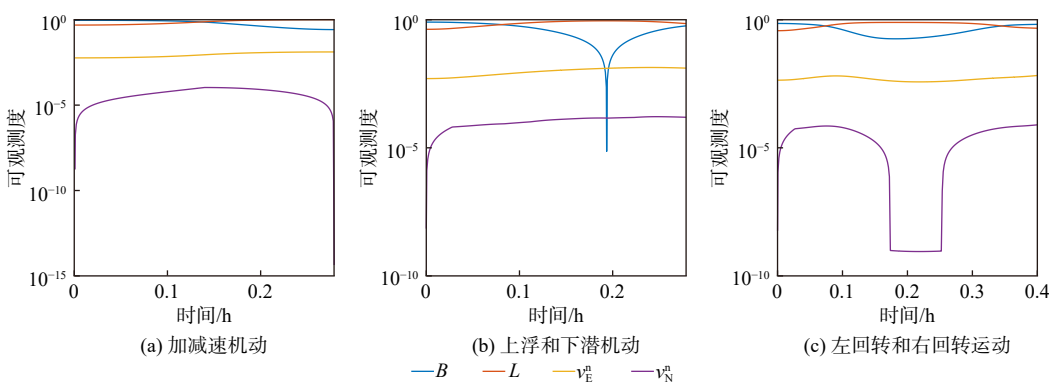


图 5　水下潜器不同机动条件下的纬度、经度、东向速度和北向速度可观测度变化

Fig. 5　Variations in the observable degree of latitude, longitude, eastward velocity and northward velocity of submarines under different maneuvering conditions

降，此处的重力异常变化对纬度的导数较小，且上浮过程中，高度和速度的双重变化均会影响重力异常测量，因此，纬度的可观测度明显下降。实际重力辅助导航中，需要定高航行，并消去对深度的估计参数，以加强滤波器对纬度的估计效能。图5(c)为水下潜器的左回转和右回转运动，初始方向向北，前半段为左回转，后半段为右回转。纬度、经度的可观测度和速度方向相关性较强，而这也正好符合在不同方向上需要估计的导航参数。北向速度可观测度的变化主要是由于地球曲率引起的角速度在当地地理坐标系中的投影变化导致的，当北向速度分量减少时，由地球曲率引起的角速度也将相应降低。

4 结 论

本文提出的实时可观测度分析方法可以很好地预测重力异常观测对不同导航参数的估计效能，仿真实验结果分析表明：

1）实时可观测度分析可以更加灵活地解决动态情况下的估计效能无法表示的问题，而传统可观测性分析只能给出定性指标，无法实现对导航精度的预测和对导航参数的动态调整。

2）在重力辅助惯性导航方面，基于可观测性矩阵和基于李导数的分析方法相比于协方差更加可靠直观，可用作评估不同单位类型参数之间的可观测度，且不需要进行滤波解算，即可实现对可观测度的分析。

3）在重力辅助惯性导航系统设计中，最优选取经度、纬度、东向速度和北向速度作为导航估计参数。

4）在航行中，选择特定机动条件下可观测度大的条件进行反馈校正，可以提高对导航参数的估计精度。

5）重力异常观测对加速度计和陀螺零偏的可观测度较低，无法实现直接对惯性导航内部固有零偏的反馈校正。

参考文献（References）

[1] 汪凤林, 蔡体菁, 王东霞. 惯性/重力匹配组合导航系统可观测性研究[J]. 安徽大学学报 (自然科学版), 2008, 32(6): 27-31.
Wang F L, Cai T J, Wang D X. Inertial/gravity matching integrated navigation system[J]. Journal of Anhui University (Natural Sciences), 2008, 32(6): 27-31(in Chinese).

[2] 毛宁, 李安, 许江宁, 等. 惯性/重力组合导航可观测性分析及鲁棒滤波方法[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, 49(11): 2113-2121.
Mao N, Li A, Xu J N, et al. Observability analysis and robust fusion algorithms of INS/gravity integrated navigation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(11): 2113-2121(in Chinese).

[3] 李姗姗. 水下重力辅助惯性导航的理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
Li S S. Research on the theory and method of underwater gravity-aided inertial navigation[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010(in Chinese).

[4] 彭富清. 海洋重力辅助导航方法及应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
Peng F Q. Marine gravity aided navigation methods with their applications[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009(in Chinese).

[5] Ham F M, Brown R G. Observability, eigenvalues, and Kalman filtering[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, AES-19(2): 269-273.

[6] 马艳红, 胡军. 基于SVD理论的可观测度分析方法的几个反例[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(4): 448-452.
Ma Y H, Hu J. Counterexamples for degree of observability analysis method based on SVD theory[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(4): 448-452(in Chinese).

[7] 周广涛, 邵剑波, 韩少卫, 等. SVD可观测度分析方法的改进及组合导航中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(4): 52-57.
Zhou G T, Shao J B, Han S W, et al. Improvement of observable degree analysis method based on SVD and application in integrated navigation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(4): 52-57(in Chinese).

[8] Sedoglavic A. A probabilistic algorithm to test local algebraic observability in polynomial time[J]. Journal of Symbolic Computation, 2002, 33(5): 735-755.

[9] Quan Q. Introduction to multicopter design and control[M]. Berlin: Springer, 2017.

[10] 孔星炜, 董景新, 吉庆昌, 等. 一种基于PWCS的惯导系统可观测度分析方法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(6): 631-636.
Kong X W, Dong J X, Ji Q C, et al. INS observable degree analysis method based on PWCS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(6): 631-636(in Chinese).

[11] Du S, Sun W, Gao Y. Improving observability of an inertial system by rotary motions of an IMU[J]. Sensors, 2017, 17(4): 698.

[12] Ma Y H, Fang J C, Wang W, et al. Decoupled observability analyses of error states in INS/GPS integration[J]. Journal of Navigation, 2014, 67(3): 473-494.

[13] 马金艳. 基于可观测度理论的智能滤波算法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.
Ma J Y. Research on smart Kalman filtering algorithm on observable degree theory[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2017(in Chinese).

[14] 成研, 李强, 付强文, 等. 一种改进的可观测度分析方法[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(6): 17-21.
Cheng Y, Li Q, Fu Q W, et al. An improved method for observability analysis[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(6): 17-21(in Chinese).

[15] 马朋, 张福斌, 徐德民, 等. 基于条件数的多自主水下航行器协同定位系统可观测度分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 138-143.
Ma P, Zhang F B, Xu D M, et al. Observability analysis of cooperative localization system for MAUV based on condition number[J].

Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 138-143(in Chinese).

[16] 杨晓霞, 阴玉梅. 可观测度的探讨及其在捷联惯导系统可观测性分析中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(4): 405-409.
Yang X X, Yin Y M. Discussions on observability and its applications in SINS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(4): 405-409(in Chinese).

[17] 严恭敏. 捷联惯导算法及车载组合导航系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
Yan G M. Research on strapdown inertial navigation algorithm and vehicle integrated navigation system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004(in Chinese).

[18] Yang Y L, Huang G Q. Aided inertial navigation with geometric features: observability analysis[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2018: 2334-2340.

[19] Ge Z Q. Exact observability and stability of stochastic implicit systems[J]. Systems & Control Letters, 2021, 157: 105029.

[20] Wang Q, Wang L X, Qin W W, et al. A local observability analysis method for a time-varying nonlinear system and its application in the continuous self-calibration system[J]. Science China Information Sciences, 2020, 64(1): 11920.

[21] Li J L, Wang Y, Lu Z X, et al. Instantaneous observable degree modeling based on movement measurement for airborne POS[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 84: 916-925.

[22] Bernard P. Observer design for nonlinear systems[M]. Berlin: Springer, 2019.

[23] Lu J Z, Xie L L, Zhang C X, et al. A simplified method of PWCS observability analysis theory by research of general expressions [C]//Proceedings of the 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer. Piscataway: IEEE Press, 2014: 154-162.

[24] Naim M, Lahmidi F, Namir A. Controllability and observability analysis of nonlinear positive discrete systems[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2018, 2018(1): 3279290.

[25] Butcher E A, Wang J W, Lovell T A. On Kalman filtering and observability in nonlinear sequential relative orbit estimation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(9): 2167-2182.

[26] Rosik M, Dehnert R, Lerch S, et al. Observability analysis of nonlinear input-linear systems based on lie derivations using interval arithmetic[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 11th International Conference on Systems and Control. Piscataway: IEEE Press, 2024: 931-937.

[27] Martinelli A. Observability: a new theory based on the group of invariance[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2020.

[28] Kruger J, D'amico S. Observability analysis and optimization for angles-only navigation of distributed space systems[J]. Advances in Space Research, 2024, 73(11): 5464-5483.

[29] Hermann R, Krener A. Nonlinear controllability and observability[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(5): 728-740.

[30] Rouhani A, Abur A. Measurement selection for observability in dynamic state estimation[C]//Proceedings of the 2016 Power Systems Computation Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

Analysis of observable degree of gravity aided inertial navigation

WAN Hongfa，LI Shanshan*，LI Xinxing，TAN Xuli，PEI Xianyong

(School of Geospatial Information，Information Engineering University，Zhengzhou 450001，China)

Abstract：Gravity-aided inertial navigation is an important technology for enabling long-term autonomous navigation of underwater vehicles. However, the gravity anomaly observation is coupled with inertial navigation state parameters in a complex manner, and improper selection of estimated parameters may lead to reduced filtering accuracy or even filter divergence. To clarify the real-time estimation effectiveness of different navigation state parameters, this paper conducts modeling, analysis, and verification of the observabal degree of state parameters in a gravity-aided inertial navigation system. First, an error-state filtering model for gravity-aided inertial navigation is established. A 13-dimensional state vector is selected, including attitude errors, velocity errors, position errors, gyroscope biases, and accelerometer biases. The gravity anomaly observation equation and its partial derivatives with respect to each state parameter are derived, thereby clarifying the relationship between the observability matrix and the estimability of navigation parameters. Second, observabal degree analysis models based on the covariance matrix, observability matrix, and Lie derivatives are constructed, respectively, and the applicability and consistency of different methods are compared. Based on a simulated underwater vehicle trajectory in a certain sea area, the variation patterns of the observabal degree of different state parameters with navigation time, gravity field characteristics, and maneuvering conditions are analyzed. The experimental results show that longitude, latitude, eastward velocity, and northward velocity have relatively high observabal degrees and constitute a preferable combination of estimated states for gravity-aided inertial navigation. In contrast, gyroscope and accelerometer biases have relatively low observabal degrees and are not suitable to be directly used as the main feedback correction parameters. On this basis, fixed parameter combinations and a dynamic parameter combination based on an observabal degree threshold are further designed for filtering verification. The results indicate that joint estimation of position and horizontal velocity improves navigation positioning accuracy by 42%, while dynamically adjusting the state parameter combination further improves positioning accuracy by 5%. The research results provide a basis for filtering-state selection, equation-structure design, and feedback correction strategies under maneuvering conditions in gravity-aided inertial navigation.

Keywords：observability；observabal degree；inertial navigation；gravity-aided inertial navigation；extended Kalman filtering

Received：2024-05-11；**Accepted**：2024-08-09；**Published Online**：2024-09-10 13：43

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240910.1119.001

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (42174007,42204009)

* **Corresponding author**. E-mail：zzy_lily@sina.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0413

平衡隐私与效用的联邦学习航班运行数据共享算法

李鑫焱[1]，陈信涛[2]，赵慧敏[2]，邓武[2,*]

(1. 中国民航大学 安全科学与工程学院，天津 300300；2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津 300300)

摘 要：数据安全与隐私保护的需要导致部分航班运行数据难以直接进行共享。联邦学习(FL)实现了数据可用不可见，但FL面对诚实但好奇的敌手时，仍面临反转攻击的威胁，存在隐私泄露的风险。针对FL在平衡隐私保护和模型效用方面的较差性能，提出基于人工蜂群和双Rényi差分隐私的联邦学习(ABC-2RDP-FL)航班运行数据数据共享算法。在ABC-2RDP-FL中，设计了双Rényi差分隐私(RDP)隐私保护机制，以更严格地测量隐私预算，提升隐私保护性能。提出基于人工蜂群(ABC)的FL超参数优化算法，提升模型性能，平衡隐私保护与模型效用。使用公共数据和航班运行数据验证了所提算法的有效性。

关 键 词：航班运行数据共享；联邦学习；Rényi差分隐私；超参数优化；人工蜂群算法
中图分类号：V221+.3; TB553
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2509-10

互联网、大数据分析、移动边缘计算等技术爆发式增长推动了“共享经济”的发展。随着海量航班运行数据的产生及时代发展的需求，航班运行数据共享得到了民航业从业人员的广泛关注。若能通过数据共享技术、大数据分析技术充分利用分散在各个机场、航空公司、空管等部门的航班运行数据，将民航运营的宝贵经验转化为标准化的知识基础，使数据驱动服务为民航业人员和旅客出行提供决策依据，会大大提高整个民航业的运营效率，给整个社会带来巨大的收益。但航班运行数据涉及相关民航单位的敏感数据和旅客的隐私数据，且独立存储于各民航单位的数据库中，存在“数据孤岛”的困境，无法直接进行数据共享[1-2]。

因此，利用航班运行数据需要考虑共享过程中的隐私保护和效率。当前，少有关于航班运行数据共享的相关研究。随着联邦学习(federated learning, FL)技术[3]的发展，解决数据共享中的隐私保护问题有了新突破，其可以在没有数据共享或收集的情况下从多源分散数据库中学习，使数据请求者不再需要收集大量数据就可以研究和挖掘数据中潜在的价值。FL算法作为一种数据共享技术，已应用于医疗[4-5]、车联网[6-7]、工业物联网[8]、机械设备故障诊断[9]、无人机调度[10]等场景。FL可作为打破航班运行数据“数据孤岛”、实现航班运行数据安全共享的一个备选方案。

FL实现了数据隔离，保护了用户的数据隐私。然而，随着后门攻击[11]、拜占庭攻击[12]、梯度反推[13]等技术的发展，基本的FL算法难以满足更高的隐私保护需求。FL需要结合其他算法以进一步提升其隐私保护性能。FL的隐私保护算法主要有同态加密[14]、安全多方计算[15]、差分隐私(differential privacy, DP)[16]等。同态加密、安全多方计算技术效率较低，DP技术效率较高，可定量评价隐私保护性能，且可有效保护FL模型的梯度、参数信息，从而保护参与方的数据隐私。

近年来，很多领域的学者致力于联邦差分隐私

收稿日期：2024-06-07；录用日期：2024-07-19；网络出版时间：2024-08-06 16:11
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240805.1417.003
基金项目：国家自然科学基金(U2133205)；中央高校基本科研业务费专项资金(3122023004)
*通信作者. E-mail：wdeng@cauc.edu.cn

引用格式：李鑫焱，陈信涛，赵慧敏，等. 平衡隐私与效用的联邦学习航班运行数据共享算法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2509-2518. Li X Y，Chen X T，Zhao H M，et al. A federated learning flight operation data sharing algorithm for balancing privacy and utility[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2509-2518 (in Chinese).

技术的相关研究[17-20]。为进一步提升联邦差分隐私的隐私保护性能，很多新的联邦差分隐私算法被提出。Hao等[21]提出Privacy-enhanced Federated Learning算法，将DP与同态加密技术结合，应用于FL隐私保护中。Wei等[22]提出聚合前加噪联邦学习(noising before model aggregation federated learning, NbAFL)算法，在客户端上传和下载阶段均向参数中加入DP噪声，进一步提升了联邦差分隐私的隐私保护性能。Lu等[23]将本地DP应用于异步FL中。Zhang等[24]提出自适应联邦差分隐私算法，可在FL的训练过程中向模型梯度参数动态添加噪声。

然而，DP技术的引入会对FL的性能造成损失，如何在保护用户隐私的同时提升FL的性能仍是一个有待研究的问题。FL中超参数的设置对其训练精度有很大影响，绝大多数研究手动设置这些参数，低效且耗时。FL超参数的自适应选择有助于开发可靠、高效的FL模型。智能优化算法具有无需先验知识、求解精度高等优势，被广泛应用于各类优化问题[25-27]，也可用于FL超参数的搜索。Yamany等[28]提出优化的基于量子的联邦学习(optimized quantum-based federated learning, OQFL)框架算法，将量子行为粒子群优化(quantum-behaved particle swarm optimization, QPSO)用于FL超参数优化中，能够提升模型训练精度，并抵抗攻击。Kishore等[29]将粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法用于FL超参数优化，提升了模型的训练精度。Qolomany等[30]将PSO算法用于FL超参数优化，并应用在工业物联网场景。

人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法由土耳其学者Karaboga等[31]提出，其基本思想启发于蜂群通过个体分工和信息交流，相互协作完成采蜜任务。虽然单个蜜蜂的自身能力有限，但在没有统一指挥的情况下，整个蜂群却总能较容易地发现优质蜜源。与经典的优化算法相比，ABC算法对目标函数和约束几乎没有要求，在搜索过程中基本不利用外部信息，仅以适应度函数作为进化的依据，具有操作简单、控制参数少、搜索精度较高和鲁棒性较强的特点。ABC算法可用于搜索较好的FL超参数，提升FL算法的性能。

综上所述，为进一步提升联邦差分隐私技术的隐私保护性能，更精确地度量隐私预算，在隐私保护的同时提升联邦差分隐私模型的训练精度，本文提出人工蜂群和双Rényi差分隐私的联邦学习(artificial bee colony and dual Rényi differential privacy federated learning, ABC-2RDP-FL)算法。在客户端参数上传阶段和服务器参数下载阶段向模型参数中添加Rényi差分隐私(Rényi differential privacy, RDP)噪声，并使用ABC算法优化FL超参数。RDP可以更精准地度量隐私预算，保护客户端和服务器端的数据隐私，抵抗服务器和客户端相勾结的成员推理攻击和模型反转攻击等。ABC算法优化FL超参数能够提升FL训练精度。ABC-2RDP-FL可以在保护用户数据隐私的同时，有较高的训练精度。本文的主要贡献为：提出ABC-2RDP-FL算法，并应用于航班运行数据共享中；提出一种2RDP隐私保护机制，在FL模型参数上传和下载阶段均添加了RDP噪声，并分析其收敛上界；提出基于ABC算法的FL超参数优化算法。

1 相关理论

1.1 联邦学习

本文考虑有中央服务器参加的横向FL架构。各客户端将本地训练好的模型参数上传至服务器端，并由服务器端进行模型参数的加权聚合。其目标为训练出一个较优的全局模型，目标函数为

$$\boldsymbol{w}^* = \arg\min_{\boldsymbol{w}} \sum_{i=1}^{N} p_i \boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w}, \boldsymbol{D}_i) \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{w}$和$\boldsymbol{w}^*$分别为本地模型参数和全局模型参数；N为参与FL训练的客户端数目；p_i、$\boldsymbol{F}_i(\cdot)$、$\boldsymbol{D}_i$分别为第i个客户端的聚合权重、本地损失函数、本地训练数据集。

联邦平均(federated average, FedAVG)算法是解决横向FL问题的典型算法，主要包括4个步骤：

1）下载。在每一轮通信的开始，服务器选择若干个客户端，并向其广播全局模型的参数$\boldsymbol{w}^0$。

2）更新。假设有N个客户端，每个客户端$n=1,2,\cdots,N$具有固定的本地数据集$D^n=(x_i^n,\boldsymbol{y}_i^n)_{i=1}^{I_n}$。其中，$x_i^n$为输入样本；对应样本$x_i^n$的标签由独热编码向量$\boldsymbol{y}_i^n=[y_{i,1}^n,y_{i,2}^n,\cdots,y_{i,J}^n]$表示，如果第$j$个标签为真值，$y_{i,j}^k=1$，否则，$y_{i,j}^k=0$；$J$为目标类别的个数；$I_n$为客户端$n$本地数据集中的样本数量。中央服务器从中选择$K$个客户端作为每轮参与训练的客户端。每个选定的客户端使用其本地的私有数据集基于随机梯度下降算法来训练局部机器学习模型。以如下方式更新模型参数：

$$\boldsymbol{w}^k \leftarrow \boldsymbol{w}^0 - \eta \boldsymbol{g}^0 \leftarrow \boldsymbol{w}^0 - \eta\phi(\boldsymbol{D}^k, Y^k; \boldsymbol{w}^0) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{g}$为该步骤中客户端模型参数的梯度；η为学习率；Y^k为数据集$\boldsymbol{D}^k$的标签。

局部模型被更新迭代若干次，直到目标函数收敛。为此，$\phi\left(\boldsymbol{D}^k, Y^k; \boldsymbol{w}^k\right)$定义为

$$\phi(\boldsymbol{D}^k, Y^k; \boldsymbol{w}^k) = -\sum_{i\in\zeta}\sum_{m\in M} y_{i,m}^k \lg F_m(x_i^k; \boldsymbol{w}^k) \tag{3}$$

式中: $F_m(x_i^k;\boldsymbol{w}^k)$为$\boldsymbol{F}(x_i^k;\boldsymbol{w}^k)$的第 m 个元素; $\zeta = 1,2,\cdots, N_{\mathrm{L}}$, N_{L}为标签数目; m为参与训练的小批量数据集索引。

3) 上传。客户端上传更新后的模型$\boldsymbol{w}^k$到服务器。

4) 聚合。上传的模型参数由服务器聚合以构建全局模型 $\boldsymbol{w}$:

$$\boldsymbol{w} = \sum_{k=1}^{K} \frac{I_k}{I} \boldsymbol{w}^k \tag{4}$$

式中: I_k为客户端数据集中的样本数; $I = \sum_{k=1}^{K} I_k$。

服务器聚合的全局模型是下一轮客户端训练的初始模型。重复上述步骤直到得到较优的全局模型。

1.2 Rényi 差分隐私

RDP[32] 是 DP 概念的一个变种, 旨在通过定义更广泛的隐私损失度量, 提供更为灵活的隐私保护机制。在 DP 的框架中, 数据发布或分析结果通过添加噪声来保护个人隐私, 而 RDP 进一步明确了这种噪声的添加方式和度量算法。在 RDP 中, 隐私损失被定义为相邻数据集(即只有一个数据项不同的 2 个数据集)上机制输出的概率分布之间的 Rényi 散度。通过限制散度的大小, 可以确保个人隐私得到保护。相较于传统的 DP, RDP 提供了更为精确的隐私损失度量和更强的隐私保证。在实际应用中, 还需要根据具体的数据类型、应用场景和隐私需求来选择合适的 DP 机制和参数, 以达到最佳的隐私保护和数据效用权衡。

定义 1 (Rényi 散度) 对于R上定义的 2 个概率分布P和Q, 当$\alpha > 1$时, Rényi 散度定义为

$$D_\alpha(P(x)\|Q(x)) \triangleq \frac{1}{\alpha-1}\lg E_{x\sim Q}\left(\frac{P(x)}{Q(x)}\right)^\alpha \tag{5}$$

式中: $E_{x\sim Q}$表示以分布 Q 为采样基准求期望, 随机变量 x 服从分布 Q。

定义 2 ((α,ε)-RDP) 随机机制$f: \boldsymbol{S}\to\boldsymbol{R}$对于任意 2 个相邻的数据集$\boldsymbol{D},\boldsymbol{D}'\in\boldsymbol{S}$, $\boldsymbol{R}$满足(α,ε)-RDP, 当

$$D_\alpha(f(\boldsymbol{D})\|f(\boldsymbol{D}')) < \varepsilon \tag{6}$$

式中: ε为隐私预算。

定义 3 (敏感度) 随机机制$f: \boldsymbol{S}\to\boldsymbol{R}$的敏感度定义为

$$\Delta f = \max_{\boldsymbol{D},\boldsymbol{D}'\in\boldsymbol{S}} \|f(\boldsymbol{D}) - f(\boldsymbol{D}')\| \tag{7}$$

定义 4 (基于高斯噪声的 RDP) 一个随机机制 M: $M(\boldsymbol{D})+\eta$, 学习率$\eta\sim N(0,\sigma^2)$, 对任何邻域数据集$\boldsymbol{D},\boldsymbol{D}'\in\boldsymbol{D}$且$\alpha>1$, 满足:

$$D_\alpha(M(\boldsymbol{D})\|M(\boldsymbol{D}')) \leqslant \alpha(\Delta f)^2/(2\sigma^2) < \varepsilon \tag{8}$$

定义 5 若随机机制$f: \boldsymbol{S}\to\boldsymbol{R}$满足$(\alpha,\varepsilon)$-RDP, 则对任意$0<\delta<1$, 满足$\left(\varepsilon+\frac{\lg(1/\delta)}{\alpha-1},\delta\right)$-DP。

性质 1 (组合定理) 给定$\forall M_i\in\{M_0,\cdots,M_k\}$的随机算法序列$\{M_0,\cdots,M_k\}$: M_i满足ε_i-RDP, 则$M(\boldsymbol{D}) =< M_0(\boldsymbol{D}),\cdots,M_k(\boldsymbol{D}) >$满足$\sum_{i=0}^{k}\varepsilon_i$-RDP。

1.3 ABC 算法

ABC 算法具有收敛速度快、收敛精度高、无需先验知识等优点。为自适应调节 FL 中的超参数设置, 提升 FL 的训练精度, 选取 ABC 算法进行 FL 超参数优化。在 ABC 算法中, 蜜蜂被分为 3 种类型: 雇佣蜂、跟随蜂和侦查蜂。雇佣蜂负责随机搜索蜜源信息; 当雇佣蜂搜索到蜜源时, 通过“8 字”舞蹈方式招募跟随蜂; 跟随蜂跟随雇佣蜂进行采蜜。当算法更新停滞时, 雇佣蜂变成侦查蜂进行搜索。由于该 FL 超参数优化问题为组合优化问题, 为进一步提高 ABC 算法搜索效率, 在雇佣蜂和跟随蜂的种群更新阶段, 采用全维更新操作而不是传统的单维更新操作。ABC 算法的超参数搜索步骤如下:

1) 初始化阶段。在初始化阶段, 蜜源$x_{i,j}$通过式(9)在搜索空间中随机生成:

$$x_{i,j} = x_{i,j}^{\min} + \mathrm{rand}(0,1)(x_{i,j}^{\max} - x_{i,j}^{\min}) \tag{9}$$

式中: $i\in\{1,2,\cdots,S_{\mathrm{N}}\}$和$j\in\{1,2,\cdots,G\}$, S_{N}和 G 分别为蜂群的个体总数和搜索参数的维度; $x_{i,j}^{\min}$和$x_{i,j}^{\max}$分别为第 j维的下界和上界; rand(0,1)为 [0,1] 之间的随机数。

初始化后, 评估蜂源的适应度函数值:

$$f_{\mathrm{it},i} = \begin{cases} 1/(1+g_i) & g_i \geqslant 0 \\ 1+\mathrm{abs}(g_i) & g_i < 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中: g_i为目标函数。

2) 雇佣蜂阶段。在蜜源附近, 每只蜜蜂根据式 (11) 生成候选蜜源$v_{i,j}$:

$$v_{i,j} = x_{i,j} + \mathrm{rand}(-1,1)(x_{i,j} - x_{k,j}) \tag{11}$$

式中: $x_{k,j}$为蜜源$x_{i,j}$的邻域蜜源, 且$i\neq k$。随后通过贪婪选择机制, 在$v_{i,j}$和$x_{i,j}$之间选择一个质量较优的蜜源。如果更新失败, 相应蜜源的限制次数增加 1, 否则, 设置为 0。

3) 跟随蜂阶段。雇佣蜂通过“八字舞”将蜜源信息分享给跟随蜂。跟随蜂根据轮盘赌策略选择被雇佣的蜜蜂。在轮盘赌策略中, 蜂源的质量越好, 相应雇佣蜂被跟随的概率越大。选择概率为

$$p_{\mathrm{ro},i} = \mathrm{fit}(x_i) \Big/ \sum_{i=1}^{S_{\mathrm{N}}} \mathrm{fit}(x_i) \tag{12}$$

式中：fit(·)为适应度函数。

跟随蜂确定要跟随的雇佣蜜蜂，并通过式(11)在相应的蜜源邻域中生成候选蜜源$v_{i,j}$。通过贪婪策略，在$v_{i,j}$和$x_{i,j}$之间选择较好的一个。如果更新失败，相应蜜源的限制次数增加1，否则，设置为0。

4）侦察蜂阶段。如果蜜源未能在限定次数内连续更新，相应的雇佣蜂转换为侦察蜂，并根据式(9)随机生成一个新的蜜源以替换以前的蜜源，相应的蜜源限定次数设置为0。

2 ABC-2RDP-FL算法

2.1 总体框架

针对FL在对抗成员推理、模型反演等攻击时表现不佳、隐私预算测量不准确及训练精度低的问题，本文提出了ABC-2RDP-FL算法。在ABC-2RDP-FL算法中，在客户端模型参数的上传和下载阶段，将隐私预算更紧的RDP噪声添加到模型参数中，以提高隐私保护性能。使用收敛速度快、收敛精度高的ABC算法对FL模型的超参数进行优化，构建优化后的ABC-2RDP-FL模型以提高其训练精度，流程如图1所示。

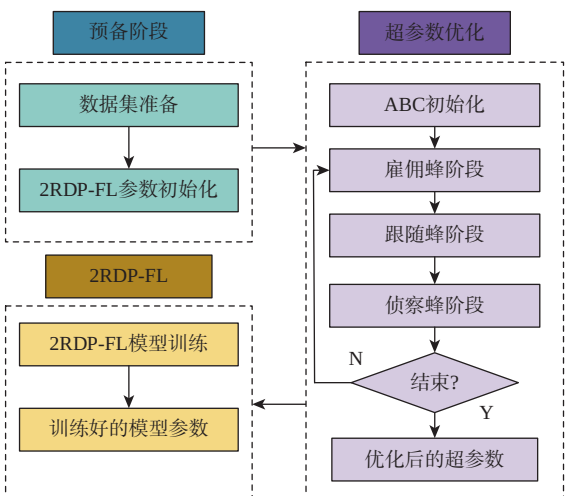


图1 ABC-2RDP-FL算法流程

Fig. 1 ABC-2RDP-FL algorithm flow

2.2 双Rényi差分隐私联邦学习

2RDP-FL是ABC-2RDP-FL的主要部分，其主要流程包含随机选择参与训练的客户端，客户端本地训练，向客户端训练好的参数中添加噪声，服务器端聚合参数并添加噪声，客户端下载参数进行新一轮的训练。2RDP-FL的流程如图2所示。

2RDP-FL的客户端训练阶段可定义为

$$\boldsymbol{w}_i=\arg\min_{\boldsymbol{w}}\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w},\boldsymbol{D}_i)=\frac{1}{|\boldsymbol{D}_i|}\sum_{j=1}^{|\boldsymbol{D}_i|}\arg\min_{\boldsymbol{w}}\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w},D_{i,j}) \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{w}_i$为第i个客户端的参数；$D_{i,j}$为数据集$\boldsymbol{D}_i$的第j个数据。

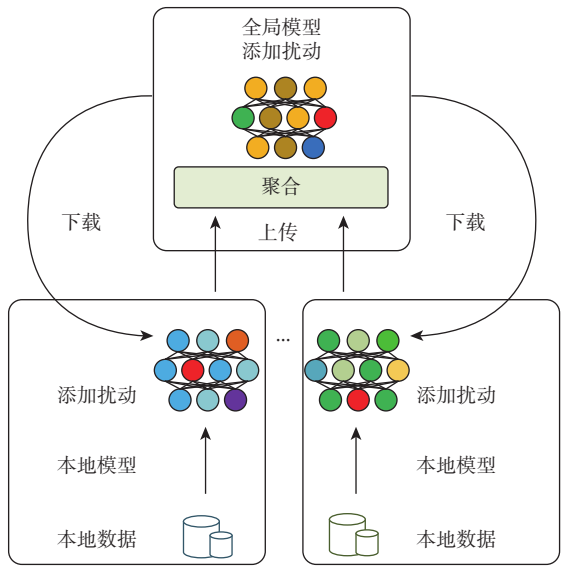


图2 2RDP-FL算法流程

Fig. 2 2RDP-FL algorithm flow

为防止梯度爆炸问题，并确保梯度信息在可控范围内，以进行有效的模型训练，对客户端模型参数进行参数裁剪：

$$\boldsymbol{w}_i^t=\boldsymbol{w}_i^t/\max\left(1,\frac{\|\boldsymbol{w}_i^t\|}{C}\right) \tag{14}$$

在客户端参数上传阶段，通过参数裁剪可以得到$\|\boldsymbol{w}_i\|\leqslant C$，$C$为裁剪阈值。结合定义3，可以得到客户端参数上传阶段的参数敏感度：

$$\Delta f_i=\max_{\boldsymbol{D}_i,\boldsymbol{D}_i'}\|\frac{1}{|\boldsymbol{D}_i|}\sum_{j=1}^{|\boldsymbol{D}_i|}\arg\min_{\boldsymbol{w}_i}\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w}_i,D_{i,j})-$$

$$\frac{1}{|\boldsymbol{D}_i'|}\sum_{j=1}^{|\boldsymbol{D}_i'|}\arg\min_{\boldsymbol{w}_i}\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w}_i',D_{i,j}')=\frac{2C}{|\boldsymbol{D}_i|} \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{D}_i'$为$\boldsymbol{D}_i$的相邻数据集；$D_{i,j}'$为数据集$\boldsymbol{D}_i'$的第j个数据。由于客户端的训练过程彼此独立，客户端参数上传阶段的所有客户端的总敏感度定义为$\Delta f_i=\max\{\Delta f_i\}$。

在客户端训练完成后，采用高斯噪声机制$N(0,\sigma_{\mathrm{u}}^2)$向客户端参数添加$(\alpha,\varepsilon)$-RDP噪声。由定义4可得向模型参数中添加的噪声大小为

$$\sigma_i^2=\alpha(\Delta f_i)^2/2\varepsilon \tag{16}$$

向客户端模型参数中加入RDP噪声：

$$\tilde{\boldsymbol{w}}_i^t=\boldsymbol{w}_i^t+N(0,\sigma_i^2) \tag{17}$$

在服务器端参数聚集阶段，对模型参数加权平均，全局参数为

$$\boldsymbol{w}=\sum_{i=1}^{K}p_i\tilde{\boldsymbol{w}}_i^t \tag{18}$$

式中：K为参加本轮数据共享的客户端个数，$1\leqslant i\leqslant K\leqslant N$；$p_i=|\boldsymbol{D}_i|\Big/\sum_{i=1}^{K}|\boldsymbol{D}_i|$。对于本轮参与训

练的客户端, 由定义 3 和式 (15) 可得, 其参数下载阶段的敏感度为

$$\Delta f_{\mathrm{d}}=\max_{D_i,D_i'}\|p_i\boldsymbol{w}_i-p_i\boldsymbol{w}_i'\|=2p_iC \tag{19}$$

在参数下载阶段, 采用高斯噪声机制$N(0,\sigma_{\mathrm{d}}^2)$向模型参数中添加 RDP 噪声。由定义 4 可得[22]

$$\sigma_{\mathrm{d}}=\begin{cases}\dfrac{2cC\sqrt{\dfrac{T^2}{b^2}-L^2K}}{2K(\varepsilon-\lg(1/\delta)/(\alpha-1))} & T>\dfrac{\varepsilon-\lg(1/\delta)}{\alpha-1}\\ 0 & T\leqslant\dfrac{\varepsilon-\lg(1/\delta)}{\alpha-1}\end{cases}\gamma \tag{20}$$

式中: $b=-\dfrac{T}{\varepsilon-\dfrac{\lg(1/\delta)}{\alpha-1}}\ln\left(1-\dfrac{N}{K}+\dfrac{N}{K}\mathrm{e}^{\frac{-\left(\varepsilon-\frac{\lg(1/\delta)}{\alpha-1}\right)}{T}}\right)$;

$\gamma=-\ln\left(1-\dfrac{N}{K}+\dfrac{N}{K}\mathrm{e}^{\frac{-\left(\varepsilon-\frac{\lg(1/\delta)}{\alpha-1}\right)}{L\sqrt{K}}}\right)$; c 为高斯差分隐私机制的常数系数; L 为限制次数; T 为全局聚合次数。

服务器添加噪声后下发给客户端的模型参数为

$$\tilde{\boldsymbol{w}}=\boldsymbol{w}+N(0,\sigma_{\mathrm{d}}^2) \tag{21}$$

以上即为 2RDP-FL 中的一轮数据共享过程, 重复此过程直到满足终止条件。

2RDP-FL 算法流程如下:

输入: 初始参数$\boldsymbol{w}^0$、学习率η、客户端本地训练次数H、全局聚合次数T。

输出: $\tilde{w}^{(T)}$。

1. 初始化 $t=1$, $\boldsymbol{w}_i^0=\boldsymbol{w}^0$
2. while $t\leqslant T$ do
//客户端训练阶段
3. 随机选择K个客户端($K\leqslant N$)
4. for $C_i\in\{C_1,C_2,\cdots,C_K\}$ do
5. while $h\leqslant H$ do
6. 本地模型训练(式 (13))
7. 参数裁剪(式 (14))
8. 本地模型加入 RDP 噪声(式 (17))
9. 将本地模型上传至服务器
//服务器聚合阶段
10. 加权聚合客户端模型(式 (18))
11. 全局模型加入 RDP 噪声(式 (21))
12. 将服务器模型下发给客户端

2.3　超参数优化

FL 作为一种分布式机器学习技术, 包含众多超参数, 如深度学习算法本身的学习率、批大小、动量值、训练次数等, 也有其本身的全局聚合次数、客户端参与数目等。这些超参数影响 FL 算法的模型精度和训练时长。具体来说, 学习率影响 FL 的训练精度和时长, 客户端训练次数和批参数影响 FL 对客户端的占用时长, 也影响 FL 的训练精度, 动量值影响随机梯度下降法跳出局部最优解的性能。本文选取学习率、客户端本地训练次数、批大小、动量 4 个参数进行优化, 这是一个组合优化问题, 其目标函数可以构建为

$$(\eta^*,H^*,B^*,Z^*)=\arg\max A(\eta,H,B,Z) \tag{22}$$

式中: $A(\cdot)$为 FL 算法的测试精度函数; B、Z分别为批大小、动量; η^*、H^*、B^*,Z^*为其组合优化后求取的最优参数集。

PSO 算法[29-30] 由于粒子速度和位置的更新机制这种较为简单的算法设计, 存在易陷入局部最优解的缺点。而 ABC 具有全局搜索能力强和动态平衡的优势。由于侦查蜂机制, ABC 算法更不容易陷入局部最优。由于雇佣蜂和跟随蜂的机制, ABC 算法能够有效平衡探索(全局搜索)与开发(局部搜索)。因此, 本文选用 ABC 算法进行超参数优化。由于该 FL 超参数优化问题为组合优化问题, 为进一步提高 ABC 算法搜索效率, 在雇佣蜂和跟随蜂的种群更新阶段, 采用全维更新操作而不是传统的单维更新操作。其蜜源更新公式为

$$V_i=X_i+\mathrm{rand}(-1,1)(X_i-X_k) \tag{23}$$

式中: $X_i=(\eta_i,H_i,B_i,Z_i)$, $1\leqslant i\leqslant N$, N为种群大小; V_i为随机进化出的新解个体。

如果更新失败, 相应蜜源的限制次数增加 1, 否则, 设置为 0。

2.4　理论分析

2.4.1　隐私性分析

定理 1(K客户机随机选择的 DP 保证)[22]　在每轮具有 K 客户端随机参与 FL 的联邦双差分隐私算法中, 为满足全局 (ε,δ)-DP, 下行链路信道的加性高斯噪声项的标准偏差σ_{d}应设置为

$$\sigma_{\mathrm{d}}=\begin{cases}\dfrac{2cC\sqrt{\dfrac{T^2}{b^2}-L^2K}}{mK\varepsilon} & T>\dfrac{\varepsilon}{\gamma}\\ 0 & T\leqslant\dfrac{\varepsilon}{\gamma}\end{cases} \tag{24}$$

式中: $b=-\dfrac{T}{\varepsilon}\ln\left(1-\dfrac{N}{K}+\dfrac{N}{K}\mathrm{e}^{\frac{-\varepsilon}{T}}\right)$; $\gamma=-\ln\left(1-\dfrac{N}{K}+\dfrac{N}{K}\mathrm{e}^{\frac{-\varepsilon}{L\sqrt{K}}}\right)$。

因此, 根据定理 1 和定义 5, 为使 ABC-2RDP-FL 满足全局(α,ε)-RDP, 则可以得到向服务器模型中的添加噪声规模为

$$\sigma_{\mathrm{d}}=\begin{cases}\dfrac{2cC\sqrt{\dfrac{T^2}{b^2}-L^2K}}{2K(\varepsilon-\lg(1/\delta)/(\alpha-1))} & T>\dfrac{\varepsilon-\lg(1/\delta)}{\dfrac{\alpha-1}{\gamma}}\\ 0 & T\leqslant\dfrac{\varepsilon-\lg(1/\delta)}{\dfrac{\alpha-1}{\gamma}}\end{cases} \tag{25}$$

2.4.2 收敛性分析

假设：①$\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w})$凸；②$\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w})$满足 Polyak-Lojasiewicz 条件，即 $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{w})-\boldsymbol{F}(\boldsymbol{w}^*)\leqslant\dfrac{1}{2l}\|\nabla\boldsymbol{F}(\boldsymbol{w})\|^2$，其中，$l$为正实数，$\boldsymbol{w}^*$为最优参数；③对$\forall\boldsymbol{w}$、$\boldsymbol{w}'$，$\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w})$满足$\beta$-Lipschitz 连续，即 $\|\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w})-\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w}')\|\leqslant\beta\|\boldsymbol{w}-\boldsymbol{w}'\|$；④对$\forall\boldsymbol{w}$、$\boldsymbol{w}'$，$\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w})$满足 ρ-Lipschitz 平滑，即 $\|\nabla\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w})-\nabla\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{w}')\|\leqslant\rho\|\boldsymbol{w}-\boldsymbol{w}'\|$，其中，$\rho$为由损失函数确定的常数。

定理 2[22] 在满足上述条件的前提下，ABC-2RDP-FL 算法T轮的损失函数期望均方梯度满足以下边界：

$$E\{F(\tilde{w}^{(T)})-F(w^*)\}\leqslant Q^T\Theta+\frac{1-Q^T}{1-Q}\left(\frac{\alpha\alpha_1\beta}{-mK\ln\left(1-\dfrac{N}{K}+\dfrac{N}{K}\mathrm{e}^{-\varepsilon/T}\right)}+\frac{\alpha^2\alpha_0}{m^2K^2\ln^2\left(1-\dfrac{N}{K}+\dfrac{N}{K}\mathrm{e}^{-\varepsilon/T}\right)}\right) \tag{26}$$

式中：Θ为模型初始损失常数；β为局部损失函数的 Lipschitz 连续常数；$\alpha_0=2\rho K/N+\rho$；$\alpha_1=1+2\rho B/\mu+2\rho B\sqrt{K}/\mu N$；$Q=1+2l(1/\mu^2(\rho B^2/2+\rho B+\rho B^2/K+2\rho B^2/\sqrt{K}+\mu B/\sqrt{K}-\mu))$。

3 实验结果与分析

本文实验在服务器上进行，该服务器配备 AMD 7402 CPU、2 个 NVIDIA RTX 3080Ti 超级 GPU，每个 GPU 具有 12 GB DRAM 和 256 GB 内存。实验代码采用 Python 3.9 和 torch 1.11.0 编写。本节在改进版美国国家标准与技术研究院（modified National Institute of Standards and Technology，MNIST）数据集、加拿大高级研究所 10 类（Canadian Institute for Advanced Research 10，CIFAR10）图像数据集及航班延误数据集测试了 ABC-2RDP-FL 的性能。

1）MNIST 数据集是一个大型的手写数字数据库，其包含 2 部分数据：①训练集 60 000 个样本，用于模型的训练；②测试集 10 000 个样本，用于模型的测试。这些图像都是灰度图像，大小为 28 像素×28 像素，每个图像都相应地标记了 0～9 的数字，代表图像中的手写数字。

2）CIFAR10 数据集包含 10 个类别的彩色图像，包括飞机、汽车、鸟、猫、鹿、狗、青蛙、马、船和卡车。数据集由 50 000 个训练图像和 10 000 个测试图像组成，每个图像都是 32 像素×32 像素的彩色图像。

3）航班延误数据集包括 198 971 条欧洲航空公司 2016—2018 年的空中交通活动数据和从爱荷华州环境网络检索的天气数据。航班延误数据包括 55 个特征，如出发机场、到达机场、出发机场风速、到达机场风速、飞机类型和航班延误等级标签数据。根据航班的到达延迟时间，标签分为 5 类。航班延误数据的部分数据特征如表 1 所示。

表 1 航班延误数据信息

Table 1 Flight delay data information

航班信息	环境信息
机型代码、起飞机场、计划起飞日期、实际起飞日期、落地日期、入位日期（飞机滑入停机位日期）、计划到达日期	起飞机场气温、起飞机场风向、起飞机场风速、起飞机场能见度、起飞机场云量等级、起飞机场云底高度、目的地机场气温、目的地机场风向、目的地机场风速、目的地机场能见度、目的地机场云量等级、目的地机场云底高度

对于 MNIST 数据集，设置 RDP 参数$\alpha=3$，$\varepsilon=1.5$。对于 CIFAR10 数据集，设置 RDP 参数$\alpha=3$，$\varepsilon=2$。对于这 2 个数据集，FL 全局训练次数为 30，客户端数量$N=50$，每个客户端平均分配训练数据，每轮中参与训练的客户端数量$K=10$。采用的深度学习模型为 Resnet18。对于航班延误数据集，训练数据平均分配给 100 个客户，每个客户端分配 1 791 条数据，服务器分配 19 871 条数据用于验证。设置 RDP 参数$\alpha=3$，$\varepsilon=8$，FL 全局迭代次数为 100，每轮中参与训练的客户数量$K=20$。采用包含一个残差块的一维残差网络模型。对于 ABC 算法，迭代次数为 5，限制次数为 3，种群大小为 20。MNIST、CIFAR10 和航班延误数据集中的超参数范围、经验值设置及 ABC 算法搜索出的超参数值如表 2 所示。

MNIST、CIFAR10 和航班延误数据集中 FL、2RDP-FL、ABC-FL 和 ABC-2RDP-FL 算法的测试结果如图 3 和表 3 所示。可以看出，超参数优化后，FL 算法和 2RDP-FL 算法的测试精度都得到了提高。对于 MNIST 数据集，ABC-FL 算法的测试精度比 FL 算法高 1.57%。ABC-2RDP-FL 算法的测试精度比 2RDP-FL 算法高 2.2%，即使加入 RDP 噪声，精度也可以达到 99% 以上。对于 CIFAR10 数据集，

表 2　ABC 算法搜索出的超参数值

Table 2　Hyperparameter values searched by ABC algorithm

超参数	算法	η	H	B	Z
超参数经验值		0.01	3	128	0.000 1
超参数搜索范围		0.000 01～0.1	1～15	4～512	0.000 01～1
MNIST数据集超参数搜索结果	ABC-FL	0.007 4	10	5	0.662 3
	ABC-2RDP-FL	0.007 6	10	24	0.249 2
CIFAR10数据集超参数搜索结果	ABC-FL	0.004 8	3	135	0.838 4
	ABC-2RDP-FL	0.004 3	9	56	0.839 3
航班延误数据集超参数搜索结果	ABC-FL	0.007 9	11	146	0.967 7
	ABC-2RDP-FL	0.003 1	12	436	0.913 7

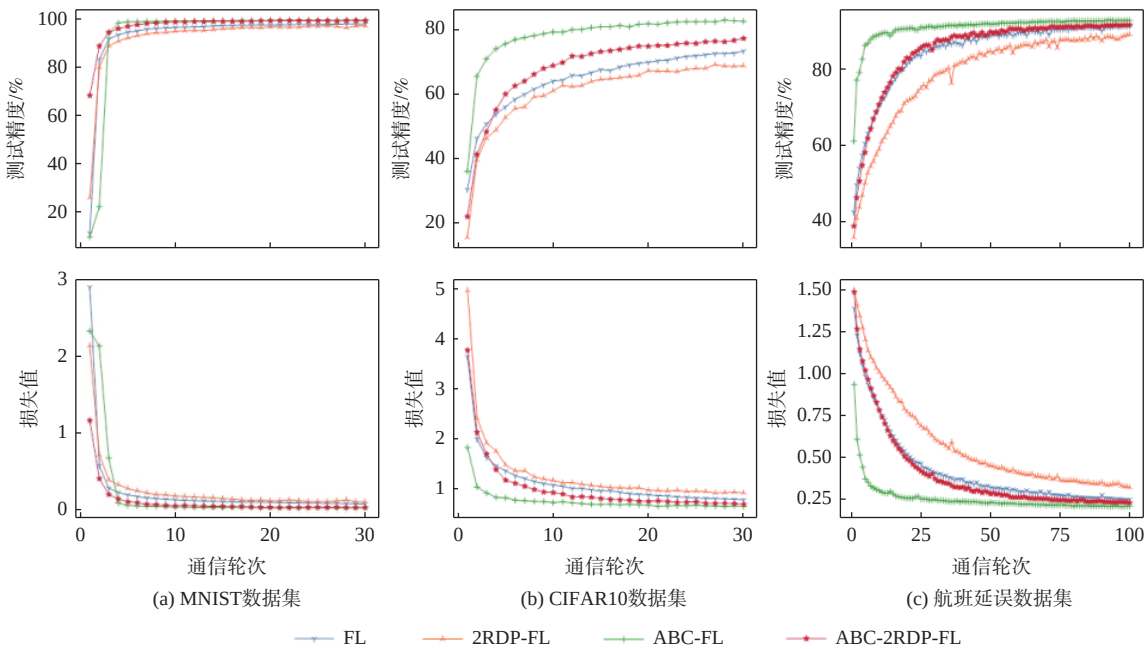


图 3　超参数优化前后算法性能对比

Fig. 3　Comparison of algorithm performance before and after hyperparameter optimization

表 3　超参数优化前后算法测试结果

Table 3　Algorithm test results before and after hyperparameter optimization

算法	测试精度/%			损失值		
	MNIST数据集	CIFAR10数据集	航班延误数据集	MNIST数据集	CIFAR10数据集	航班延误数据集
FL	97.74	73.27	91.05	0.076 9	0.776 2	0.246 3
2RDP-FL	96.86	68.70	88.95	0.102 8	0.917 0	0.318 5
ABC-FL	99.31	82.51	92.62	0.024 9	0.645 8	0.205 4
ABC-2RDP-FL	99.06	77.16	91.46	0.028 2	0.689 0	0.227 4

ABC-FL 算法的测试精度比 FL 算法提高 9.24%, ABC-2RDP-FL 算法的测试精度比 2RDP-FL 算法提高 8.46%。对于航班延误数据集, ABC-FL 算法的测试精度比 FL 算法高 1.57%, ABC-2RDP-FL 算法的测试精度比 2RDP-FL 算法高 2.51%。为保护隐私, 2RDP-FL 算法和 ABC-2RDP-FL 算法在上传和下载阶段, 将高斯噪声添加到模型参数中。与 ABC-FL 算法相比, ABC-2RDP-FL 算法的测试精度较低。然而, 与 FL 算法相比, ABC-2RDP-FL 算法具有更高的测试精度, 这表明 ABC-2RDP-FL 算法具有平衡隐私保护和模型效用的能力。

为说明 ABC 算法超参数优化的性能, 在 FL 航班延误预测任务下, 将 ABC 算法与 PSO 算法的收敛过程进行对比。PSO 算法种群规模和迭代次数与 ABC 算法保持一致, 惯性权重、个体学习因子和社会学习因子分别设置为 0.5、2、2。实验结果如图 4 所示。可以看出, 相较于 PSO 算法, ABC 算法有更快的收敛速度和更高的收敛精度。这种性能的提升可以归因于 ABC 算法的搜索机制, 通过雇佣蜂、跟随蜂和侦查蜂 3 种角色的协同工作, 实现了对解空间全面而有效的探索与开发。由于计算时间的限制, 平衡效率和效用, 只对种群进行 5 次

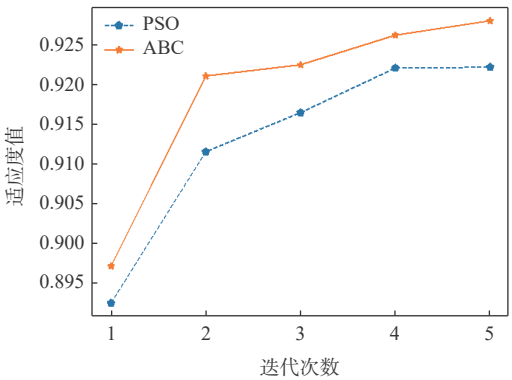
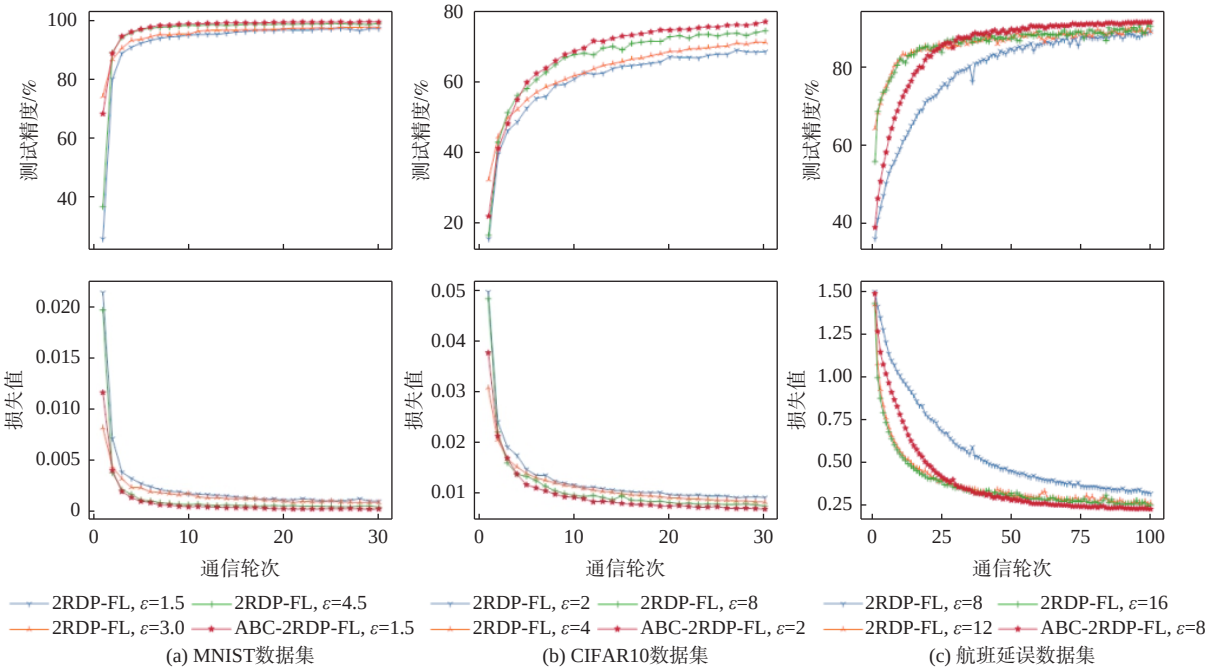


图4 优化算法迭代曲线

Fig. 4 Optimization algorithm iteration curve

迭代。可以看出，如果增加迭代次数，ABC算法适应度函数仍有继续提升的趋势。

为进一步说明ABC-2RDP-FL算法对收敛精度的提高，将其与有着更高隐私预算的2RDP-FL算法进行比较，实验结果如图5所示。可以看出，2RDP-FL算法的收敛精度随着隐私预算的减少而降低。然而，在MNIST、CIFAR10和航班延误数据集中，当ABC-2RDP-FL算法的隐私预算为$\varepsilon=1.5$、$\varepsilon=2$和$\varepsilon=8$时，收敛精度仍然高于$\varepsilon=4.5$、$\varepsilon=8$和$\varepsilon=16$的2RDP-FL算法。这进一步表明，ABC-2RDP-FL算法既能有效提高收敛精度，又能保证较高的隐私保护性能。



(a) MNIST数据集 (b) CIFAR10数据集 (c) 航班延误数据集

图5 不同隐私预算下的算法性能对比

Fig. 5 Comparison of algorithm performance under different privacy budgets

为进一步说明ABC-2RDP-FL算法的有效性，将其与相同隐私预算下的中央服务器差分隐私联邦学习(centralized differential privacy federated learning, DP-FL)算法、客户端本地差分隐私联邦学习(local differential privacy federated learning, LDP-FL)算法和NbAFL算法进行比较，实验结果如表4所示。可以看出，在相同的隐私预算下，DP-FL、LDP-FL和NbAFL算法具有相近的收敛精度和损失值。RDP算法相较于DP算法有着更精确的隐私预算度量，DP算法的噪声值大于RDP算法，因此，2RDP-FL算法的收敛精度高于DP-FL、LDP-FL和NbAFL算法。由于通过超参数优化选择了更好的超参数，ABC-2RDP-FL算法的收敛精度高于2RDP-FL算法。ABC-2RDP-FL算法可以平衡隐私保护和模型效用。

表4 相同隐私预算下算法对比实验结果

Table 4 Comparative experiment results of algorithms under the same privacy budget

算法	测试精度/%			损失值		
	MNIST数据集（$\varepsilon=1.5$）	CIFAR10数据集（$\varepsilon=2$）	航班延误数据集（$\varepsilon=8$）	MNIST数据集（$\varepsilon=1.5$）	CIFAR10数据集（$\varepsilon=2$）	航班延误数据集（$\varepsilon=8$）
DP-FL	96.23	67.50	86.51	0.121 0	0.934 7	0.338 5
LDP-FL	96.61	66.64	85.26	0.113 6	0.986 2	0.421 2
NbAFL	96.44	67.23	86.89	0.116 7	0.968 2	0.332 6
2RDP-FL	96.86	68.70	88.95	0.102 8	0.917 0	0.318 5
ABC-2RDP-FL	99.06	77.16	91.46	0.028 2	0.688 9	0.227 4

4 结　论

1) 针对横向航班运行数据的隐私保护与效用相平衡的问题, 本文提出 ABC-2RDP-FL 算法。该算法在客户端参数上传和下载阶段均向模型参数中添加 RDP 噪声, 并提出全维更新 ABC 算法优化 FL 超参数。理论分析论证了本文算法的隐私和收敛性能。

2) 本文算法在 MNIST 和 CIFAR10 公共图像数据集上的测试精度分别为 99.06% 和 77.16%, 在具有较高隐私保护性能的同时, 有着较高的分类精度。本文构建了航班运行数据共享场景, 在航班延误数据集的测试精度为 91.46%, 已具备航班运行数据共享实际应用的潜能。本文研究为实际的横向航班运行数据共享提供了一种备选方案。

参考文献（References）

[1] Fu A M, Yu S, Zhang Y Q, et al. NPP: a new privacy-aware public auditing scheme for cloud data sharing with group users[J]. IEEE Transactions on Big Data, 2022, 8(1): 14-24.

[2] Su Z, Wang Y T, Xu Q C, et al. LVBS: lightweight vehicular blockchain for secure data sharing in disaster rescue[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2022, 19(1): 19-32.

[3] Mcmahan H B, Moore E, Ramage D, et al. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data[C]//Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. San Juan: PMLR, 2016: 1273-1282.

[4] Chen Y Q, Qin X, Wang J D, et al. FedHealth: a federated transfer learning framework for wearable healthcare[J]. IEEE Intelligent Systems, 2020, 35(4): 83-93.

[5] Tan L, Yu K P, Shi N, et al. Towards secure and privacy-preserving data sharing for COVID-19 medical records: a blockchain-empowered approach[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2022, 9(1): 271-281.

[6] Xiao H Z, Zhao J, Pei Q Q, et al. Vehicle selection and resource optimization for federated learning in vehicular edge computing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 11073-11087.

[7] Kong Q L, Yin F, Lu R X, et al. Privacy-preserving aggregation for federated learning-based navigation in vehicular fog[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(12): 8453-8463.

[8] Lu Y L, Huang X H, Dai Y Y, et al. Blockchain and federated learning for privacy-preserved data sharing in industrial IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(6): 4177-4186.

[9] Ma X, Wen C L, Wen T. An asynchronous and real-time update paradigm of federated learning for fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(12): 8531-8540.

[10] Wang Y T, Su Z, Zhang N, et al. Learning in the air: secure federated learning for UAV-assisted crowdsensing[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 8(2): 1055-1069.

[11] Zhang J L, Chen B, Cheng X, et al. PoisonGAN: generative poisoning attacks against federated learning in edge computing systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(5): 3310-3322.

[12] Li Z H, Yu H F, Zhou T Y, et al. Byzantine resistant secure blockchained federated learning at the edge[J]. IEEE Network, 2021, 35(4): 295-301.

[13] Shokri R, Shmatikov V. Privacy-preserving deep learning[C]//Proceedings of the 2015 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Piscataway: IEEE Press, 2016: 909-910.

[14] Zhou C Y, Fu A M, Yu S, et al. Privacy-preserving federated learning in fog computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(11): 10782-10793.

[15] Li Y R, Li H W, Xu G W, et al. Practical privacy-preserving federated learning in vehicular fog computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5): 4692-4705.

[16] Abadi M, Chu A, Goodfellow I, et al. Deep learning with differential privacy[C]//Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. New York: ACM, 2016: 308-318.

[17] Zhang L L, Shen B C, Barnawi A, et al. FedDPGAN: federated differentially private generative adversarial networks framework for the detection of COVID-19 pneumonia[J]. Information Systems Frontiers, 2021, 23(6): 1403-1415.

[18] Xin B Z, Geng Y Y, Hu T, et al. Federated synthetic data generation with differential privacy[J]. Neurocomputing, 2022, 468: 1-10.

[19] Chen S Z, Yu D X, Zou Y F, et al. Decentralized wireless federated learning with differential privacy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(9): 6273-6282.

[20] Ribero M, Henderson J, Williamson S, et al. Federating recommendations using differentially private prototypes[J]. Pattern Recognition, 2022, 129: 108746.

[21] Hao M, Li H W, Luo X Z, et al. Efficient and privacy-enhanced federated learning for industrial artificial intelligence[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6532-6542.

[22] Wei K, Li J, Ding M, et al. Federated learning with differential privacy: algorithms and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 15: 3454-3469.

[23] Lu Y L, Huang X H, Dai Y Y, et al. Differentially private asynchronous federated learning for mobile edge computing in urban informatics[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(3): 2134-2143.

[24] Zhang T, Song A X, Dong X W, et al. Privacy-preserving asynchronous grouped federated learning for IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(7): 5511-5523.

[25] Deng W, Liu H L, Xu J J, et al. An improved quantum-inspired differential evolution algorithm for deep belief network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7319-7327.

[26] Deng W, Xu J J, Gao X Z, et al. An enhanced MSIQDE algorithm with novel multiple strategies for global optimization problems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(3): 1578-1587.

[27] Deng W, Xu J J, Zhao H M, et al. A novel gate resource allocation method using improved PSO-based QEA[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(3): 1737-1745.

[28] Yamany W, Moustafa N, Turnbull B. OQFL: an optimized quantum-based federated learning framework for defending against adversarial attacks in intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(1): 893-903.

[29] Kishore P, Barisal S K, Mohapatra D P. Particle swarm optimized federated learning for securing IoT devices[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.

[30] Qolomany B, Ahmad K, Al-fuqaha A, et al. Particle swarm optimized federated learning for industrial IoT and smart city services[C]//Proceedings of the 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.

[31] Karaboga D, Basturk B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 687-697.

[32] Mironov I. Rényi differential privacy[C]//Proceedings of the 2017 IEEE 30th Computer Security Foundations Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2017: 263-275.

A federated learning flight operation data sharing algorithm for balancing privacy and utility

LI Xinyan[1], CHEN Xintao[2], ZHAO Huimin[2], DENG Wu[2,*]

(1. School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The need for data security and privacy protection makes it difficult to directly share some flight operation data. Federated learning (FL) achieves data availability that is invisible, but when faced with honest but curious opponents, it still faces the threat of reverse attacks and the risk of privacy leakage. The inadequate performance of FL in striking a balance between privacy protection and model utility is addressed by the suggested artificial bee colony and dual Rényi differential privacy federated learning (ABC-2RDP-FL) flight operation data privacy protection algorithm, which is based on dual Rényi differential privacy (RDP) and artificial bee colony (ABC). In ABC-2RDP-FL, a dual RDP protection mechanism is designed to measure privacy budgets more strictly and improve privacy protection performance. After that, an ABC-based FL hyperparameter optimization approach is suggested to enhance model performance while striking a compromise between model utility and privacy protection. Finally, the effectiveness of the proposed method was validated using public data and flight operation data.

Keywords: flight operation data sharing; federated learning; Rényi differential privacy; hyperparameter optimization; artificial bee colony algorithm

Received: 2024-06-07; **Accepted**: 2024-07-19; **Published Online**: 2024-08-06 16:11

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240805.1417.003

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (U2133205); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122023004)

* **Corresponding author**. E-mail: wdeng@cauc.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0323

基于旅游领域的细粒度情感词典构建方法

李琳[1]，韩虎[1,2,*]，范雅婷[2]
(1. 兰州交通大学 数理学院，兰州 730070；2. 兰州交通大学 电子与信息工程学院，兰州 730070)

摘 要：情感词典作为识别词汇情感的重要先验知识，对旅游评论文本的情感分析至关重要。在领域情感词典构建过程中，种子词集的筛选标准通常仅依赖于词频统计或语义向量，导致种子词集的情感代表性不足，进而影响词汇情绪识别的准确率。针对上述问题，提出一种基于多元特征融合策略与表情符号集成的情感种子词集筛选方法。该方法通过整合语料统计特征、情感强度特征和词汇语义特征，形成各类情绪种子词集的筛选依据，确保种子词汇与语料特性高度匹配，有效提升种子词集的代表性和覆盖率。同时，引入表情符号辅助情感词汇捕获情感特征，增强种子词集的情感表达能力，提高词汇归类精度，构建面向旅游领域的细粒度情感词典。实验结果表明：与通用情感词典相比，使用构建的领域情感词典在旅游评论情感分析任务上的精确率平均提升0.094 9，召回率平均提升0.089 6，F_1值平均提升0.092 3。

关 键 词：情感词典；情感分析；多元特征；细粒度；种子集
中图分类号：TP391.1
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2519-10

随着经济的快速增长，“互联网+旅游”的新模式和新业态应运而生。根据文化和旅游部调查数据显示，2023年前三季度，国内旅游总人次达36.74亿，同比增长75.5%，标志着旅游业的蓬勃发展(数据来源：https://www.mct.gov.cn/)。旅游在线评论作为游客情感表达最直接的方式之一，蕴含着关于旅游体验最真实的用户反馈，具有重要的研究价值。如何从海量评论中自动化提取有效信息已成为当前的研究热点，因此，以数字化赋能，利用情感分析技术挖掘消费者偏好及情感倾向，对于各地旅游机构和景区潜在游客具有重要参考意义。

情感词典是情感挖掘和情感分析研究的基础[1]，故高质量的情感词典对于提升情感分析任务的性能至关重要。但现有的通用情感词典在应对领域特定的情感分析任务时面临诸多挑战：①随着新兴词汇和网络热词层出不穷，传统手工构建的通用情感词典在更新速度和适应性上难以满足目标领域的个性化需求；②部分情感词汇具有领域依赖性或领域特异性[2]，如“探险”一词，在旅游领域中的描述通常呈现积极的情感色彩，而在其他领域可能仅表示一种行为或活动；③人们在真实场景中的表达往往错综复杂，一条评论可能同时包含对景点、服务等多方面的情绪，但现有的中文通用情感词典主要对词汇提供积极或消极的粗粒度情感标注，无法实现对文本情感更细腻的捕捉。因此，自动化构建领域特定的细粒度情感词典显得尤为重要。情绪分类是情感分类中细粒度的文本分析任务，情感关注文本的整体极性(积极、中性或消极)，情绪则是一种由感觉驱动的复杂心理状态[3]，常见的情绪包括快乐、喜爱、悲伤、愤怒、恐惧和厌恶等。尽管情绪和情感在定义上有所区别，但实际上两者密切相关[4-5]。例如，情绪快乐和喜爱，本质上均与积极情感相关；同样，愤怒、厌恶和恐惧则均带有消极的情感色彩，因此，本文提及的情绪是对情感细粒度

收稿日期：2024-05-15；**录用日期**：2024-07-19；**网络出版时间**：2024-08-22 11:18
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240821.1955.002
基金项目：国家自然科学基金 (62166024)
* **通信作者**. E-mail：hanhu_lzjtu@mail.lzjtu.cn

引用格式：李琳，韩虎，范雅婷. 基于旅游领域的细粒度情感词典构建方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2519-2528.
Li L，Han H，Fan Y T. Construction method of fine-grained sentiment lexicon based on tourism field[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2519-2528（in Chinese）.

划分的表征。

种子词选取是基于自动化方法构建领域情感词典的关键环节，其质量直接影响词典的功能性和规模，常用的情感种子词集筛选方法包括人工选取[6-9]、词频统计[10-12]或语义向量[13-15]，但上述方法仅从单一维度捕获词汇的情感信息，缺乏对种子词集情感更全面的概括，导致最终词汇的情绪识别结果不佳。因此，为提高种子词集的聚类效果，本文将甘肃景区的旅游在线评论作为研究数据，提出一种基于多元特征融合策略与表情符号集成的情感种子词集筛选方法。主要贡献如下：

1）构建了融合多元特征的细粒度种子词集，扩展了筛选标准，有效提高了种子词集的代表性和覆盖率。

2）提出利用表情符号辅助情感词汇捕获情感特征，增强补充了评论文本无法识别的情感信息，丰富了种子词集的情感表达维度。

3）构建了面向旅游领域的细粒度情感词典，验证了所构建领域情感词典在旅游评论情感分析任务中的有效性，相比通用情感词典，精确率、召回率和 F_1 值分别平均提升 0.094 9、0.089 6 和 0.092 3。

1 相关工作

情感词典作为挖掘文本情绪色彩的重要工具，关乎评论情感分析的准确性和应用范围。情感词典的构建方法主要分为 2 类：手动方法和自动化扩展。现有的通用情感词典大多依赖于人工编纂，英文情感词典主要有 General Inquirer[16] 和 SentiWordNet[17] 等，而具有代表性的中文情感词典，如台湾大学简体中文情感极性词典 NTUSD[18]、知网情感词典 HowNet[19]、大连理工大学情感词汇本体库 DUT[20] 及清华大学的李军中文褒贬义词典 TSING[6]，为文本情感分析提供了重要资源。然而，随着网络信息的爆炸式增长和新兴词汇的不断涌现，手工构建情感词典的方法已难以满足日益增长的需求。因此，情感词典的自动化构建方法正逐渐成为研究领域的焦点。自动化构建方法主要分为 3 类：基于语料库的方法、基于语义知识库扩展的方法和基于词向量的方法。

1.1 基于语料库的情感词典构建方法

基于语料库的情感词典构建方法通过量化待测词语与情感基准词间的共现程度或搭配关系，利用统计学原理自动识别情感词汇及其极性特征。例如，Hatzivassiloglou 等[21] 证明了形容词之间的连词能够间接提供语义倾向。Wiebe[22] 探索了分布相似性词聚类方法可以自动学习词汇语义。Turney[23] 通过计算候选词与正负种子词间的点互信息 (pointwise mutual information, PMI) 确定词汇的情感极性和强度。近年来，改进 PMI 算法及融入其他特征的方法在领域情感词典构建研究中得到了广泛应用，如单睿康等[10] 提出一种基于 PMI 的语义倾向（semantic orientation using PMI, SO-PMI）的藏文情感词典自动构建方法，其他学者通过结合关联规则[24]、句法模板[6] 和用户评分[25] 等特征，有效提高了词汇情感倾向捕捉的准确性。但该方法主要利用少量已标注基准词或词汇间关系，导致词典的覆盖范围不够全面。

1.2 基于语义知识库扩展的情感词典构建方法

基于语义知识库扩展的情感词典构建方法主要利用如 WordNet 和 HowNet 等语义知识库中的结构化信息，通过挖掘词汇间的语义关系或释义，对未知词汇的情感倾向进行判定。例如，Kamps 等[26] 利用 WordNet 中的同义词关系度量语义倾向。Hu 等[27] 基于词汇间的反义关系，不断迭代预测词汇的情感极性。中文方面，朱嫣岚等[28] 使用 HowNet 中的语义相似度和语义相关场对比判别词汇语义倾向。路斌等[29] 通过扩展同义词词林中的同义词词群，构建了更大规模的褒贬义词集合。此外，部分学者利用中英文词典的协同互补来构建情感词典。例如，周咏梅等[30] 提出一种融合 HowNet 和 SentiWordNet 的词典构建方法，通过检索中文词语对应的英文义元，利用 SentiWordNet 确定中文词汇的情感权重。左任衔等[9] 基于 Opinion Finder 情感词典，构建了优化的引文领域情感词典。然而，基于语义知识库的构建方法在词典质量上极大程度依赖于所选用的基础知识库，容易受到新兴词汇及含义问题的干扰。

1.3 基于词向量的情感词典构建方法

基于词向量的方法通过自动学习文本间的隐含语义，利用向量空间模型度量词汇间的语义相关性。目前，已有大量研究利用 Word2Vec 模型训练词向量来构造情感词典。例如，Li 等[31] 结合人工标注的情感分数和 Word2Vec 引入的语义相似度信息，提出一种数据驱动的词典构建方法。陈俊等[13] 基于词向量模型提取语言特征，利用“情绪对”结合词语的概率统计特征，构建了多分类教育领域情感词典。但该方法在应对复杂情感或相似情绪表达时，词汇的情绪识别性能不佳。

2 旅游领域细粒度情感词典构建

2.1 细粒度领域情感词典构建框架

为挖掘旅游在线评论中的细粒度情感并进行量化分析，本文借鉴情感词汇本体库[20] 的分类框架，将旅游评论情感划分为 7 种基本情绪：乐、好、

哀、怒、惧、恶、惊; 分别包含 1、3、5、7、9 这 5 个等级的情感强度。

种子词集筛选是领域情感词典构建的关键步骤, 先前研究大多使用词频统计或语义向量作为筛选标准, 并未考虑扩展筛选维度及表情符号的应用, 导致种子词集的情感聚集度不足, 进而影响词汇情绪识别的准确率。因此, 本文提出一种基于多元特征融合策略与表情符号集成的情感种子词集筛选方法, 运用多元特征融合策略将语料统计特征、情感强度特征和词汇语义特征先后融合作用于种子词集的构建过程, 具体包含 2 个阶段:

1) 情感强度特征与语料统计特征的初融合。该阶段通过 2 个并行且互补的词汇筛选通道构建了初步的种子候选词集。其中, 通道 1 利用情感词汇本体库提供的先验知识, 依据词汇的情感强度信息, 筛选出情感特征强烈的词汇作为基础情感词。通道 2 结合词性筛选和词频-逆文档频率(term frequency-inverse document frequency, TF-IDF)算法, 从语料词表中获取统计特征显著的词汇作为领域特征词。将基础情感词集和领域特征词集合并优化后, 形成融合语料统计特征和情感强度特征的种子候选词集。

2) 词汇语义特征、情感强度特征与阶段 1)结果的再融合。该阶段定义了一种结合词汇间语义相似度和情感强度差值的筛选标准, 通过运算获取词汇的语义特征和情感强度特征, 进而对种子候选词集中的词汇进行逐一评估, 最终选取超出阈值的词汇形成各类情绪的种子词集。通过运用以两阶段方式呈现的多元特征融合策略, 构建了具备高度代表性和区分度的细粒度情感种子词集。基于旅游领域的细粒度情感词典构建过程主要包括: 语料预处理、情感种子词集构建(包括情感词汇种子词集构建和表情符号种子词集构建)、候选情感词筛选及情感倾向性判定, 流程如图 1 所示。

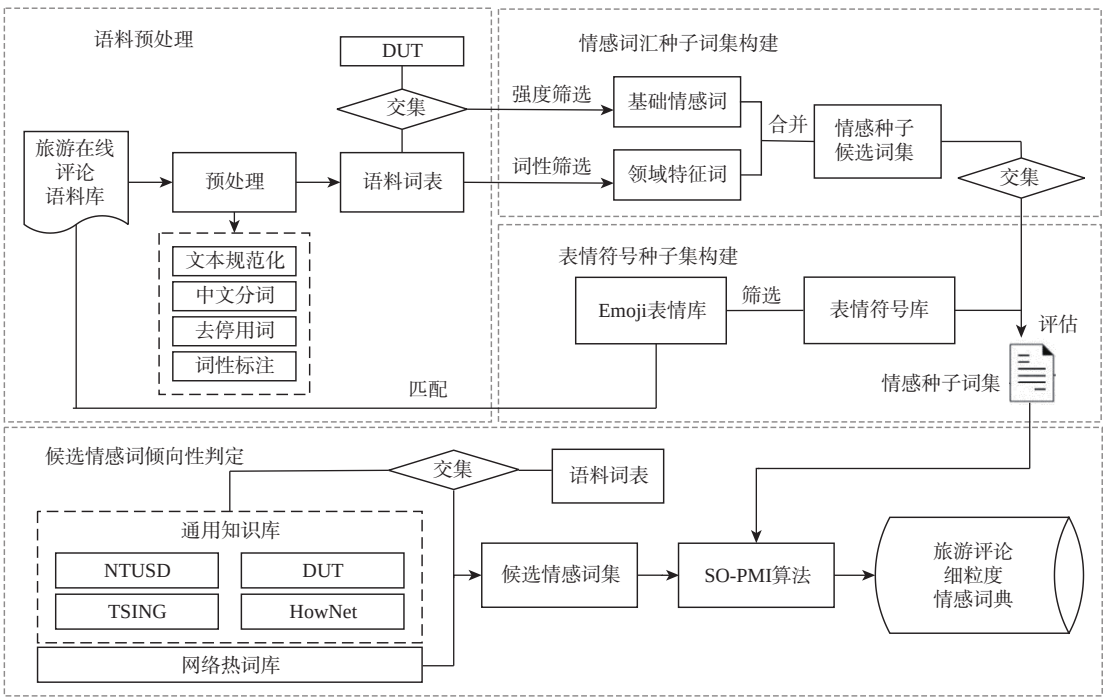


图 1　旅游领域细粒度情感词典构建框架

Fig. 1　Framework for the construction of fine-grained sentiment dictionary in the tourism domain

2.2　细粒度领域情感词典构建方法

2.2.1　语料采集与预处理

通过综合对比不同旅游平台的景评数据量等因素, 选取携程、美团和同程旅行作为评论数据来源。采集内容包括评论正文、发表时间及用户 IP 属地等关键信息, 涵盖甘肃省内的主要旅游资源, 包括敦煌鸣沙山月牙泉景区、张掖七彩丹霞景区及天水麦积山景区等共计 17 个景点, 原始评论 50 000 余条, 为进一步的领域情感词典构建提供数据支撑。经统计发现, 旅游语料中有约 10% 的评论文本包含表情符号。

鉴于原始旅游在线评论通常包含非规范化用语及评论质量参差不齐, 采取以下措施清洗语料以增强数据的可靠性: ①删除评论中的重复项及评论内容中的重复性描述; ②删除与旅游主题无关的字符, 如广告、网址链接及超出评论时间阈值的自动默认评论; ③保留评论中的表情符号; ④选用 jieba 工具进行文本分词, 添加景点专有名词用户词典作

为补充以提升分词准确率，同时，对词语的词性进行标注；⑤利用哈工大停用词词表，剔除其中带有感情色彩的词汇，如“一般”“唉”等，补充如“兰州”“石窟”“酒店”等地域和领域相关的情感不明显词汇。最后，利用修正过的词表处理语料。

2.2.2 情感种子词集构建

基于多元特征融合策略与表情符号集成的情感种子词集构建步骤包括种子词集初筛和种子词集评估（即二次筛选）。在构建过程中，本文对情感词汇和表情符号2种情感表达资源给予双重关注，兼顾种子词汇的情感强度和语义深度，扩展种子词集的筛选维度，增强了种子词集的情感表达能力，从而满足细粒度分析任务的需求。

1）情感词汇种子词集构建。情感词汇种子词集的构建主要利用情感词汇本体库提供的先验知识，选取情感表达强烈和出现频次高的词汇作为情感词汇种子候选集。通道1将语料词表映射到情感词汇本体库中，选取高强度值词汇以匹配情绪特征，形成各情绪类别的基础情感词。鉴于旅游评论中的情感表达主要集中在形容词（adj.）、动词（verb.）、成语（idiom.）和名词（noun.），设置通道2筛选出具有上述情感潜力的词性类别词汇，并计算TF-IDF值，选取超出阈值的词汇作为领域特征词，与上一步的基础情感词集取交集，将结果分为2类：已知情感强度及情绪类别信息的词汇（Set1）和情感信息未知的词汇（Set2），针对Set2中的词汇，利用表情符号辅助Set1对其情感信息进行标注。

2）表情符号种子词集构建。表情符号种子词集的构建目的在于通过检索旅游在线评论中的表情符号，辅助情感信息已知词汇来捕获情感信息未知词汇的情绪属性。首先，通过python的emoji表情库识别并匹配语料库中所有出现的表情符号，共计665个；其次，利用表情符号与其中文释义间的映射关系，依据2.1节所述7种情绪类别进行预先分类；然后，为每类情绪选取4个情感强烈的表情符号，标注情感强度，进而形成种子情感符集合Edict。观察语料发现，表情符号与情感词汇之间存在显著的相关性：正面表情符号通常伴随正面词汇出现，而负面词汇与负面表情符号共现。因此，本文利用表情符号与情感词汇间的共现信息建立情感种子词汇标注规则，对Set2中词汇的情感信息完成标注。

PMI值通常用于衡量词语间的相关性，基本思想是统计2个词语在文本中同时出现的概率，概率值越大，关联度越高，计算公式如下：

$$\mathrm{PMI}(w_1,w_2)=\log_2\frac{p(w_1,w_2)}{p(w_1)p(w_2)} \tag{1}$$

式中：$p(w_1,w_2)$为词语w_1和w_2共同出现的概率；$p(w_1)$和$p(w_2)$分别为词语w_1和w_2单独出现的概率。

情感种子词汇标注规则为：同一单句中的情感倾向往往保持一致，若一个词汇与某类情绪种子词或表情符号频繁共现，则该词更可能具有相似的情绪属性[32]。考虑到一些词汇不存在共现情况，本文邀请3位项目组成员共同参与情感标注，通过投票机制解决对特定词语的异议。研究发现，新标注的词汇中存在较多具有情感倾向的单字词，如“晒”“赞”“贵”等。

3）情感种子词集评估。为确保种子词集具备优质的聚类效果，采用Word2Vec中的Skip-gram模型[13]对语料词汇进行向量化表征，考虑到词汇间的情感强度差值可能影响语义相似度的计算结果，提出情感密集度（emotional intensity degree, EID）来精准评估种子词汇的情感代表性，即通过计算每个种子候选词与其所属情绪类别中其他词汇间的平均语义相似度来定义该词的情感密集度，计算公式如下：

$$\mathrm{EID}(w_{ai})=\frac{1}{n}\sum_{i,j=1}^{n}d_{ij}^{-1}\frac{\boldsymbol{h}_{ai}\boldsymbol{h}_{aj}}{\|\boldsymbol{h}_{ai}\|\|\boldsymbol{h}_{aj}\|} \tag{2}$$

$$d_{ij}=\frac{\left|S_{ai}-S_{aj}\right|+1}{S_{\max}} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{h}_{ai}$和$\boldsymbol{h}_{aj}$分别为情绪类别为a的第i个和第j个词汇的词向量；d_{ij}为第i个和第j个词汇的情感强度相对差值，2个词语间的强度差异越小，d_{ij}^{-1}越大，则2个词的情感强度特征越相似，从而对$\mathrm{EID}(w_{ai})$的贡献度越大；S_{ai}和S_{aj}分别为第i个和第j个词汇的情感强度值，$S\in\{1,3,5,7,9\}$；$S_{\max}$为情感强度值的最大值，用于归一化处理；n为情绪类别为a的词汇总数。

为进一步筛选各类情绪的高情感代表性词汇，利用式(4)进行过滤：

$$E_{\mathrm{threshold},a}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{EID}(w_{ai}) \tag{4}$$

式中：$E_{\mathrm{threshold},a}$为情绪类别为a的情感代表性阈值。当$\mathrm{EID}(w_{ai})>E_{\mathrm{threshold},a}$时，将词语$w_{ai}$录入种子词集，并标注其情绪类别为$a$。经上述处理，得到包含7类情绪的情感种子词集SeedSet-EM，共计272个（词汇244个，表情28个）。部分情感种子词集示例如表1所示。

2.2.3 候选情感词筛选

候选情感词指旅游语料中可能具有情感但情感属性未知的词汇。首先，整合通用情感词表，包

表 1　情感种子词集示例

Table 1　Examples of emotion seed set

情绪类别	情感词汇示例(部分)	表情符号
乐(30个)	意外之喜、畅通无阻、自由自在、欢声笑语、畅快、超爽、无拘无束、手舞足蹈、心旷神怡、满载而归、兴高采烈	😃😆🤐😜
好(40个)	推荐、鬼斧神工、完美、超赞、气势磅礴、巧夺天工、无与伦比、顶级、回味无穷、哇塞、赞不绝口、历久弥坚	😘😍💯😍
哀(30个)	心心念念、孤零零、鬼哭狼嚎、大失所望、悲怆、惨不忍睹、空落落、凄凉、萧瑟、落寞、摧毁、痛苦、苍凉、衰败	😕😒😫😭
怒(35个)	投诉、爆发、瞪眼、恼羞成怒、催促、强词夺理、蛮横无理、过分、拥挤、忽悠、急眼、怒气冲冲、勃然大怒、强制	😤💢👿😡
惧(32个)	悬崖峭壁、震惊、毛骨悚然、震慑、胆战心惊、不堪设想、手忙脚乱、不知所措、阴森森、惊恐、惊慌、瞠目结舌	😨😱😰❗
恶(40个)	恶劣、一塌糊涂、凌乱不堪、脏乱差、毒辣、令人窒息、无赖、崩溃、烦躁、臭气熏天、践踏、肆无忌惮、暴殄天物	😖🤢🤮🖤
惊(37个)	震撼人心、叹为观止、千奇百怪、不可思议、惊叹、惊喜惊讶、目瞪口呆、惊诧、动人心魄、不得了、惊愕	😳😯😲😳

括 HowNet、NTUSD、TSING 和 DUT; 其次, 将其与语料词表取交集, 删除其中情感歧义及不常用的词汇, 如“蝇营狗苟”等类似的成语或俗语; 然后, 考虑到网络用语作为一种独特的情感表达方式, 具有不同于汉语规范用语及口语的特征, 本文从社交媒体和旅游网站中收集与旅游领域相关的网络热词和流行表达, 使候选词汇空间进一步扩展; 最后, 将 2 部分词集合并作为候选情感词集。

2.2.4　情感倾向性判定

情感词典构建的核心内容是情感词汇的极性判断和权重计量。鉴于经典 SO-PMI 算法主要适用于二分类情感, 因此, 本文根据文献 [11] 提出的改进 SO-PMI 算法, 通过计算候选词与 7 类情绪种子词集间的 PMI 值, 判定该词汇的情绪种类。SO-PMI(w_x, T_k)是待测词语w_x与第 k 类情绪种子词集$T_k(1 \leqslant k \leqslant 7)$中每个词汇的PMI 值总和, 计算公式如下:

$$\text{SO-PMI}(w_x, T_k) = \sum_{t_{km} \in T_k} \log_2 \left(\frac{NC(w_x, t_{km})}{1 + M_k dC(w_x)C(t_{km})} \right) \tag{5}$$

式中: t_{km}为第k类情绪种子词集T_k中的第m个情感词; $C(w_x, t_{km})$为词语w_x和t_{km}在语料中共同出现的次数; $C(w_x)$和$C(t_{km})$分别为词语w_x和t_{km}单独出现的次数; N 为语料库中词汇的总数; $M_k(1 \leqslant k \leqslant 7)$为第$k$类情绪种子词集$T_k$中词汇的数量; d 为 2 个词语在同一评论中共现距离的最小值。

2.2.5　词典整合

在旅游评论的撰写过程中, 情感表达往往通过运用程度副词、否定词及语气词等修饰性词汇来增强或削弱情感色彩, 如“非常喜欢”表达了强烈的正面情绪, “没见到”减弱了对应情感, “耶”增添了评论的愉悦度。但现有的基础情感词典可能并未充分考虑这些词汇的情感加权作用, 导致情感分析的精确度受限。因此, 本文基于语料, 利用统计方法选取情感强烈的修饰性词汇以辅助领域情感词典。修饰词[8]示例如表 2 所示。

通过整合领域情感词典和修饰词表, 最终得到

表 2　修饰词示例

Table 2　Examples of modifier word

类别	修饰词	情感强度
程度副词	最、极、无比	2
	很、非常、太	1.7
	颇、挺、蛮	1.2
	稍、略、有点	0.8
否定词	不	−1
	没有	−1
	别	−1
	勿	−1
语气词	哇、耶	2
	啦、哩	1
	呃、唉	−1
	呜、呸	−2

包含 8 261 个词汇的旅游情感词典 Tourdict, 扩充新词如表 3 所示。表中的情感强度用于区分词汇的情感强弱, 情感极性则表示情感倾向, 1 为积极情感倾向, 2 为消极情感倾向。

表 3　扩充新词示例

Table 3　Examples of expanded new words

新词类别	词语	词性种类	情绪类别	情感强度	情感极性
领域新词	看头	noun.	好	3	1
	审美疲劳	idiom.	哀	7	2
	出片	verb.	好	3	1
	深度游	noun.	好	5	1
网络新词	针不戳	nw.	好	5	1
	避大坑	nw.	恶	7	2
	鸡肋	nw.	哀	7	2
	泰酷辣	nw.	乐	9	1

注: nw.表示网络新词。

3　实　验

实验依托于 Windows 10 操作系统平台, 采用 python3.7 版本, 并利用 pycharm 进行代码编译。

3.1　实验数据

随机抽取 500 个情感词汇和 2 570 条旅游评论

作为情感种子词集质量评估和领域情感词典性能分析的实验数据。数据集基本信息如表 4 所示。

表 4 实验数据

Table 4 Experimental data

评估方面	类别	数目
情感种子词集评估	乐	76
	好	107
	哀	69
	怒	51
	惧	57
	恶	98
	惊	42
情感词典评估	积极	1 452
	消极	1 118

3.2 评价指标

验证通过实验与人工标注结果进行对比，采用精确率 P、召回率 R 和 F_1 值作为评价指标进行分类效果评估：

$$P=\frac{N_{TP}}{N_{FP}+N_{TP}} \tag{6}$$

$$R=\frac{N_{TP}}{N_{TP}+N_{FN}} \tag{7}$$

$$F_1=\frac{2PR}{P+R} \tag{8}$$

式中：N_{TP}为人工标注为正样本且预测为正样本的样本数量；N_{FP}为人工标注为负样本却被预测为正样本的样本数量；N_{FN}为人工标注为正样本却被预测为负样本的样本数量。

3.3 实验分析

3.3.1 多元特征融合策略的有效性验证

为验证基于多元特征融合策略的种子词集筛选方法在领域情感词典构建中的应用效果，将其与词频统计（TF-IDF）、语义向量（Word2Vec）[14]算法进行对比评估。使用经典 SO-PMI 算法将旅游评论情感词汇的情绪类别判定性能作为评估依据。表 5 展示了通过 3 种方法构建的种子词集在各类情绪上的识别结果。可知，TF-IDF 算法通过有效识别领域特征显著的词汇，在乐、好、恶的精确率指标上表现良好，但其缺乏对词汇语义的深度理解，导致在处理复杂情绪时表现不佳；Word2Vec 算法通过自动学习词汇语义特征，在精确率上整体优于 TF-IDF 算法，但在区分相似情绪类别时存在局限，如怒、惧、惊；相比而言，多元特征融合策略（Mul-feature）在情绪乐、恶、惊上的精确率提升显著，均高于 0.806 0；并在情绪“好”上的召回率取值最优，证明了基于多元特征融合策略构建的种子词集能够有效代表各类情绪的情感表达。

表 5 不同种子词集构建方法实验结果

Table 5 Experimental results of different seed word set construction methods

情绪	P			R			F_1		
	TF-IDF	Word2Vec	Mul-feature	TF-IDF	Word2Vec	Mul-feature	TF-IDF	Word2Vec	Mul-feature
乐	0.671 1	0.776 3	0.815 8	0.764 7	0.796 6	0.822 6	0.717 9	0.786 5	0.819 2
好	0.719 6	0.747 7	0.775 7	0.753 2	0.850 0	0.879 5	0.736 4	0.798 8	0.827 6
哀	0.405 8	0.507 2	0.608 7	0.535 7	0.685 7	0.714 3	0.470 8	0.596 5	0.661 5
怒	0.568 6	0.627 5	0.705 9	0.689 7	0.656 3	0.666 7	0.629 1	0.641 9	0.686 3
惧	0.543 9	0.614 0	0.666 7	0.612 9	0.600 0	0.657 9	0.578 4	0.607 0	0.662 3
恶	0.724 5	0.755 1	0.806 1	0.718 3	0.743 2	0.759 5	0.721 4	0.749 2	0.782 8
惊	0.690 5	0.761 9	0.833 3	0.482 8	0.468 8	0.571 4	0.586 6	0.615 3	0.702 4

3.3.2 表情符号有效性评估

1）引入表情符号的情感种子词集评估。为评估情感种子词集中引入表情符号的有效性，将利用词频统计（TF-IDF）、语义向量（Word2Vec）及多元特征（Mul-feature）算法构建的种子词集分别标注为 SeedSet1、SeedSet2、SeedSet3，与融入表情符号的情感种子词集 SeedSet-EM 展开对比实验，实验结果如图 2 所示。可知，SeedSet-EM 对待测词汇情绪类型识别的精确率和召回率均显著优于其他种子词集，表明引入表情符号与多元特征策略集成有利于识别词汇情绪。

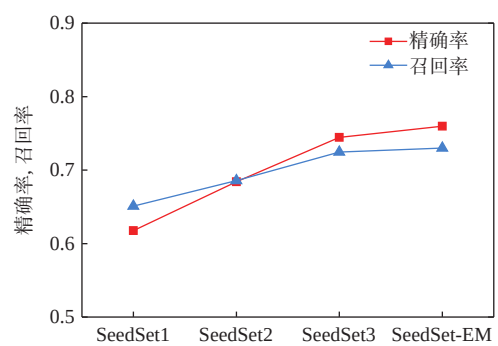
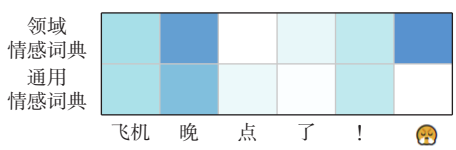


图 2 不同情感种子词集性能评估

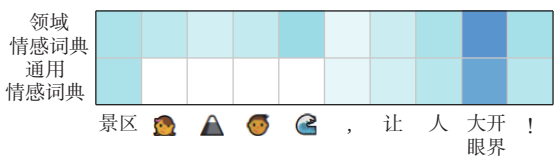
Fig. 2 Performance evaluation of different emotion seed sets

2) 表情符号可视化分析。为可视化表情符号的有效性和多功能性, 在通用情感词典和领域情感词典上进行对比分析, 通过将情感词典的权重信息映射到文本表示中, 以此呈现基于不同情感词典对旅游在线评论的情感关注度。关注程度越高, 对应的色块区域越深。

如图 3(a)所示, 尽管“晚”字可能只是陈述客观情况, 但使用通用情感词典会重点关注“晚”字的负面意义, 从而导致对评论文本情感倾向的识别结果出现偏差。相比而言, 领域情感词典可以有效识别“晚”字及表情符号“😠”, 进一步增强了评论文本的情感色彩。此外, 旅游评论文本中的表情符号还可以替代文字表述, 如图 3(b)所示, 表情组合“👧🗻🧑🌊”表示“人山人海”, 在使用通用情感词典的分析中, 该句评论被误解为正面评价“景区让人大开眼界!”, 而领域情感词典则能通过表情符号有效反映评论的真实情感。因此, 可视化结果表明, 引入领域相关元素和表情符号是提高旅游在线评论情感分析准确性的关键。



(a) 单表情符号的评论情感关注权重



(b) 多表情符号的评论情感关注权重

图 3　表情符号可视化示意图

Fig. 3　The visualization diagram of emoticons

3.3.3　词典性能评估

1) 本文情感词典与通用情感词典对比。为评估 Tourdict 情感词典的可用性, 将其与多个通用情感词典及所有通用情感词典的合并集合进行对比, 采用基于词典的情感计算方法[33], 在实验中加入统一的修饰性词表, 对旅游在线评论中的正、负文本分别展开情感倾向性分析。通用情感词典主要将词汇的情感标注为积极或消极, 因此, 本节以多维情绪映射到二元情感的方式实施评估。

根据表 6 实验结果, 本文构建的 Tourdict 情感词典对旅游评论文本的情感分类效果显著。其中, 与通用情感词典相比, 本文词典在正面评论上的精确率平均提升 0.090 8, 召回率平均提升 0.091 6, F_1 值平均提升 0.091 2, 在负面评论上的精确率平均提升 0.099 0, 召回率平均提升 0.087 5, F_1 值平均提升 0.093 3, 在正负评论上的精确率平均提升 0.094 9, 召回率平均提升 0.089 6, F_1 值平均提升 0.092 3, 表明 Tourdict 情感词典在旅游领域应用中的可行性和有效性。此外, 无论是使用 Tourdict 情感词典, 还是其他通用情感词典, 对负面评论的分类性能均优于正面评论。这一现象可能与中文语言结构的复杂性有关, 其对正面情感的表达往往采用更为含蓄或间接的方式, 如使用双重否定句或看似客观但蕴含主观情感的句子等, 这些语言特性增加了基于情感词典分析方法在识别隐含情感倾向上的难度。

表 6　领域情感词典与通用情感词典在正负评论上的实验结果

Table 6　Experimental results of domain-specific sentiment lexicon and general sentiment lexicons on positive and negative reviews

情感词典	P		R		F_1	
	正面评论	负面评论	正面评论	负面评论	正面评论	负面评论
NTUSD	0.647 2	0.652 6	0.719 7	0.731 8	0.683 5	0.692 2
HowNet	0.634 9	0.654 8	0.742 2	0.752 6	0.688 6	0.703 7
DUT	0.703 1	0.710 5	0.778 9	0.784 7	0.741 0	0.747 6
TSING	0.667 3	0.689 1	0.745 3	0.752 5	0.706 3	0.720 8
ALL	0.699 6	0.718 2	0.783 7	0.804 3	0.741 7	0.761 3
Tourdict	**0.761 2**	**0.784 0**	**0.845 6**	**0.852 7**	**0.803 4**	**0.818 4**

注: 加粗数值表示性能最优; ALL为NTUSD、HowNet、DUT、TSING这4种情感词典的并集。

图 4 进一步揭示了 Tourdict 情感词典在整体实验数据上的性能表现。可以看出, NTUSD 与 HowNet、DUT 与 ALL 的分类表现相当, Tourdict 情感词典的表现更加优异。

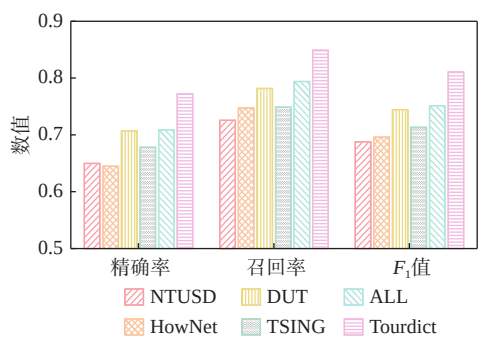


图 4　不同情感词典综合性能对比

Fig. 4　Comprehensive performance comparison among different sentiment lexicons

2) 错误案例分析。为更好地展示本文情感词典的有效性, 选取基于通用情感词典判定失误的典型案例进行分析, 其中包含 3 种类型: “歧义句”“网络热词”和“无情感信息”。以人工标注结果为依据, 对比分析不同情感词典的判定结果, 如表 7 所示。

以评论“8 号车师傅问我要小费…🙄”为例,

表7 旅游评论案例分析

Table 7 Case study of tourism reviews

例句	评论类型	人工标注	通用情感词典	领域情感词典	领域词典判定结果
“8号车师傅问我要小费…”	歧义句	消极	中性	消极	(√)
“导游的讲解虽然枯燥,但奈何他帅啊,耐了。”	网络热词	积极	消极	积极	(√)
“卫生真的很****,没事,我讲话得礼貌!”	无情感信息	消极	积极	消极	(√)

“小费”的表述往往存在歧义性,通用情感词典无法识别其中明确的情感倾向,而领域情感词典通过识别表情符号辅助文本语义,实现了对评论情感倾向的正确预测。此外,通用情感词典在识别“网络热词”和“无情感信息”类的评论文本中也存在局限,导致对评论情感倾向产生误解,有必要借助表情符号增强文本情感表达的准确性。以上例句充分证明了在词典中引入表情符号和网络用语的重要性。

4 结 论

1)本文提出一种基于多元特征融合策略与表情符号集成的情感种子词集筛选方法,主要包括3部分内容:构建了融合多元特征的细粒度情感种子词集,解决了现有种子词集情感代表性不足的问题;引入表情符号,扩展了词典的表达维度,增强了种子词集的情感传播能力;通过扩展候选词汇空间,结合改进SO-PMI算法,识别词汇情绪属性,构建了面向旅游领域的细粒度情感词典。

2)在利用本文构建的多元特征与表情符号集成的情感种子词集对未知词汇的情绪识别任务中,在乐、好、怒上的精确率提升显著,除哀、惧外,各情绪的精确率均达0.705 9,在情绪类别“好”上的召回率达到0.879 5,表明在多元特征基础上,引入游客高频使用的表情符号共同构建种子词集,有利于扩展领域词典的覆盖范围。

3)与通用感情词典相比,本文构建的领域情感词典在旅游评论情感分析任务上的精确率、召回率和F_1值分别平均提升0.094 9、0.089 6和0.092 3。

本文构建的领域情感词典仍存在改进空间,如评论中的标点符号和颜文字能否有效辅助词汇的情绪判定是后续研究的一个方向。此外,引入深度学习模型对本文构建的领域情感词典进一步优化和修正也值得开展研究。

参考文献(References)

[1] Xiong G, Fang Y L, Liu Q. Automatic construction of domain-specific sentiment lexicon based on the semantics graph[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

[2] Barik K, Misra S. Analysis of customer reviews with an improved VADER lexicon classifier[J]. Journal of Big Data, 2024, 11(1): 10.

[3] Wang Y B, Huang G M, Li M L, et al. Automatically constructing a fine-grained sentiment lexicon for sentiment analysis[J]. Cognitive Computation, 2023, 15(1): 254-271.

[4] Myint P Y W, Lo S L, Zhang Y H. Unveiling the dynamics of crisis events: sentiment and emotion analysis via multi-task learning with attention mechanism and subject-based intent prediction[J]. Information Processing & Management, 2024, 61(4): 103695.

[5] Sharma M, Kandasamy I, Vasantha W B. Emotion quantification and classification using the neutrosophic approach to deep learning[J]. Applied Soft Computing, 2023, 148: 110896.

[6] Zeng X K, Yang C, Tu C C, et al. Chinese LIWC lexicon expansion via hierarchical classification of word embeddings with sememe attention[C]//Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence and Thirtieth Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference and Eighth AAAI Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence. New York: ACM, 2018: 5650-5657.

[7] 叶霞, 曹军博, 许飞翔, 等. 中文领域情感词典自适应学习方法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(8): 2231-2237.
Ye X, Cao J B, Xu F X, et al. Sentiment dictionary adaptive learning method in Chinese domain[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(8): 2231-2237(in Chinese).

[8] 汪韬, 张再跃. 面向电影评论的情感词典构建方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(4): 843-848.
Wang T, Zhang Z Y. Research on the construction method of emotion lexicon for movie review[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50(4): 843-848(in Chinese).

[9] 左任衔, 唐振华, 黄晓, 等. 基于情感词典的引文文本情感识别研究[J]. 数字图书馆论坛, 2022, 18(2): 10-17.
Zuo R X, Tang Z H, Huang X, et al. Research on emotion recognition of citation text based on sentiment dictionary[J]. Digital Library Forum, 2022, 18(2): 10-17(in Chinese).

[10] 单睿康, 江涛, 张婷婷, 等. 基于改进SO-PMI的藏文情感词典自动构建方法[J]. 高原科学研究, 2022, 6(1): 104-112.
Shan R K, Jiang T, Zhang T T, et al. Study on the method of automatic construction of Tibetan sentiment lexicon based on the improved SO-PMI[J]. Plateau Science Research, 2022, 6(1): 104-112(in Chinese).

[11] 郭顺利, 张向先. 面向中文图书评论的情感词典构建方法研究[J]. 现代图书情报技术, 2016(2): 67-74.
Guo S L, Zhang X X. Building sentiment analysis dictionary for Chinese book reviews[J]. New Technology of Library and Information Service, 2016(2): 67-74(in Chinese).

[12] Li J, Li Y K. Constructing dictionary to analyze features sentiment

of a movie based on danmakus[C]//Proceedings of the Advanced Data Mining and Applications. Berlin: Springer, 2019: 474-488.

[13] 陈俊, 席宁丽, 李佳敏, 等. 融合 Skip-gram 与 R-SOPMI 的教育领域情感词典构建[J]. 应用科学学报, 2023, 41(5): 870-880.
Chen J, Xi N L, Li J M, et al. Constructing sentiment lexicon in the education field by integrating Skip-gram and R-SOPMI[J]. Journal of Applied Sciences, 2023, 41(5): 870-880(in Chinese).

[14] 严仲培, 陆文星, 束柬, 等. 面向旅游在线评论情感词典构建方法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(6): 1660-1664.
Yan Z P, Lu W X, Shu J, et al. Construction method of sentiment lexicon for online travel reviews[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(6): 1660-1664(in Chinese).

[15] Yuan Z W, Duan L. Construction method of sentiment lexicon based on Word2Vec[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 848-851.

[16] 赵妍妍, 秦兵, 刘挺. 文本情感分析[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 1834-1848.
Zhao Y Y, Qin B, Liu T. Sentiment analysis[J]. Journal of Software, 2010, 21(8): 1834-1848(in Chinese).

[17] Baccianella S, Esuli A, Sebastiani F. SentiWordNet 3.0: an enhanced lexical resource for sentiment analysis and opinion mining[C]//Proceedings of the Seventh International Conference on Language Resources and Evaluation. Kerrville: Association for Computational Linguistics, 2010: 2200-2204.

[18] Ku L W, Liang Y T, Chen H H. Opinion extraction, summarization and tracking in news and blog Corpora[C]//Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Computational Approaches to Analyzing Weblogs. Menlo Park: AAAI Press, 2006: 100-107.

[19] Fu X H, Liu G, Guo Y Y, et al. Multi-aspect sentiment analysis for Chinese online social reviews based on topic modeling and HowNet lexicon[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 37: 186-195.

[20] 徐琳宏, 林鸿飞, 潘宇, 等. 情感词汇本体的构造[J]. 情报学报, 2008, 27(2): 180-185.
Xu L H, Lin H F, Pan Y, et al. Constructing the affective lexicon ontology[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2008, 27(2): 180-185(in Chinese).

[21] Hatzivassiloglou V, Mckeown K R. Predicting the semantic orientation of adjectives[C]//Proceedings of the 35th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and Eighth Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics. New York: ACM, 1997: 174-181.

[22] Wiebe J. Learning subjective adjectives from Corpora[C]//Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence and Twelfth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence. New York: ACM, 2000: 735-740.

[23] Turney P D. Thumbs up or thumbs down: semantic orientation applied to unsupervised classification of reviews[C]//Proceedings of the 40th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics. Morristown: Association for Computational Linguistics, 2001: 417.

[24] 钟敏娟, 万常选, 刘德喜. 基于关联规则挖掘和极性分析的商品评论情感词典构建[J]. 情报学报, 2016, 35(5): 501-509.
Zhong M J, Wan C X, Liu D X. Opinion lexicon construction based on association rule and orientation analysis for production review [J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2016, 35(5): 501-509(in Chinese).

[25] 周知, 王春迎, 朱佳丽. 基于超短评论的图书领域情感词典构建研究[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(9): 183-189.
Zhou Z, Wang C Y, Zhu J L. Research on the construction of sentiment lexicon in book field based on extreme short reviews[J]. Information Studies (Theory & Application), 2021, 44(9): 183-189 (in Chinese).

[26] Kamps J, Marx M, Mokken R J, et al. Using WordNet to measure semantic orientations of adjectives[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Language Resources and Evaluation. Paris: ELRA, 2004: 1115-1118.

[27] Hu M Q, Liu B. Mining and summarizing customer reviews [C]//Proceedings of the Tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2004: 168-177.

[28] 朱嫣岚, 闵锦, 周雅倩, 等. 基于 HowNet 的词汇语义倾向计算[J]. 中文信息学报, 2006, 20(1): 14-20.
Zhu Y L, Min J, Zhou Y Q, et al. Semantic orientation computing based on HowNet[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2006, 20(1): 14-20(in Chinese).

[29] 路斌, 万小军, 杨建武, 等. 基于同义词词林的词汇褒贬计算[C]//第七届中文信息处理国际会议. 北京: 中国中文信息学会, 2007: 17-23.
Lu B, Wan X J, Yang J W, et al. Using tongyici cilin to compute word semantic polarity[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Chinese Computing. Beijing: The Chinese Information Processing Society of China, 2007: 17-23(in Chinese).

[30] 周咏梅, 阳爱民, 林江豪. 中文微博情感词典构建方法[J]. 山东大学学报 (工学版), 2014, 44(3): 36-40.
Zhou Y M, Yang A M, Lin J H. A method of building Chinese microblog sentiment lexicon[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2014, 44(3): 36-40(in Chinese).

[31] Li W, Zhu L Y, Guo K, et al. Build a tourism-specific sentiment lexicon via Word2Vec[J]. Annals of Data Science, 2018, 5(1): 1-7.

[32] 卫青蓝, 何雨, 宋金宝. 基于语义规则的自适应情感词典自动构建算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(7): 2450-2459.
Wei Q L, He Y, Song J B. An adaptive automatic construction algorithm for sentiment dictionaries based on semantic rules[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(7): 2450-2459(in Chinese).

[33] 姜杰, 夏睿. 机器学习与语义规则融合的微博情感分类方法[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2017, 53(2): 247-254.
Jiang J, Xia R. Microblog sentiment classification via combining rule-based and machine learning methods[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(2): 247-254(in Chinese).

Construction method of fine-grained sentiment lexicon based on tourism field

LI Lin[1], HAN Hu[1, 2, *], FAN Yating[2]

(1. School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Sentiment dictionaries are essential for sentiment analysis in tourism reviews since they provide valuable prior knowledge for identifying lexical emotions. The selection criteria for seed word sets in the conventional method of building the domain sentiment dictionary typically only utilize semantic vectors or term frequency statistics, which leaves the seed word set with insufficient emotional representation and, consequently, impairs the vocabulary emotion recognition accuracy. Therefore, we propose a method of sentiment seed word set selection based on a multiple feature fusion strategy and emoji integration. This method integrates corpus statistical features, emotional intensity features, and lexical semantic features as the screening criteria for various emotional seed word sets, ensuring a high match between seed vocabulary and corpus characteristics, improving the representativeness and coverage of the seed word set effectively. At the same time, emoticons are introduced to enhance the emotional expressive capabilities of the seed set and improve the accuracy of emotional classification of vocabulary by adding emotional aspects that emotional vocabulary might overlook. Finally, it constructed a fine-grained sentiment dictionary for the tourism field. According to experiments, sentiment analysis employing the tourism field's sentiment dictionary enhances the accuracy rate by 0.094 9, recall rate by 0.089 6, and F_1 value by 0.092 3 on average when compared to other Chinese general dictionaries in the tourism corpus.

Keywords: sentiment lexicon; sentiment analysis; multivariate feature; fine-grained; seed set

Received: 2024-05-15; **Accepted**: 2024-07-19; **Published Online**: 2024-08-22 11:18

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240821.1955.002

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62166024)

* **Corresponding author**. E-mail: hanhu_lzjtu@mail.lzjtu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0311

基于机器学习的高压线数据库创建方法

张衡[1]，高艳辉[2,*]，陆洋[1]
(1. 南京航空航天大学 直升机动力学全国重点实验室，南京 210016；2. 南京航空航天大学 无人机研究院，南京 210016)

摘 要：直升机执行近地飞行任务时，时常发生撞击高压线事故。直升机近地告警系统(HTAWS)是直升机近地防撞的重要手段，但高压线数据库缺失导致其难以有效保障直升机飞行安全。针对该问题，提出一种基于机器学习利用卫星影像创建高压线数据库的方法。针对YOLOv5对卫星影像中小目标检测不敏感、漏检率较高的问题，设计了一种改进YOLOv5目标检测算法，用于识别卫星影像中的高压线塔，采用开源栅格空间数据转换库(GDAL)模块计算得到高压线塔的经纬度。提出一种基于高压线塔阴影获取塔高的方法。基于图神经网络与高压线塔的群组特征，研究了高压线塔连线预测。仿真结果表明：高压线塔的经纬度识别准确，塔高预测平均准确率为94.65%，高压线塔连线预测的马修斯相关系数(MCC)为0.479，所建立的高压线数据库满足直升机高压线防撞告警需求。

关 键 词：直升机；飞行安全；高压线；机器学习；卫星影像
中图分类号：V275.1
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2529-11

直升机在执行低空任务时，常因碰撞低空障碍物而坠毁。高压线由于体积小、不易察觉等特点，成为直升机低空飞行安全的主要威胁之一[1]。根据美国联邦航空管理局的调查，2005—2018年间，仅在美国就发生了214起直升机撞击高压线事故，并造成124人死亡[2]。随着我国直升机普及率的不断提高，此类事故也明显增加。

为减少直升机撞击高压线事故，国内外对各种可行的方法开展了广泛研究。目前，针对直升机高压线防撞的方法主要包括2种：物理式防撞和预测式防撞。

1980年，Chan[3]提出的直升机线缆切割器是一种典型的物理式高压线防撞方法，这是目前应用最广泛的直升机高压线防撞方法，但该方法会损坏高压线，代价巨大。

预测式防撞方面，直升机近地告警系统(helicopter terrain awareness and warning system, HTAWS)已被广泛使用。HTAWS利用地形数据库和飞行参数计算直升机与地形的接近程度，当直升机达到告警区域时，HTAWS立即产生告警，提醒飞行员采取措施，避免地形碰撞。国外一些公司已将部分区域的高压线数据库加入地形数据库，使用HTAWS即可实现该区域高压线防撞有效预警。然而，受知识产权等诸多因素影响，完整的高压线数据库获取与建立非常困难。

因此，利用公共信息建立可靠的高压线数据库，对直升机高压线防撞具有重要意义。有学者已经对此开展了相关研究。2021年，Harris等[4]提出一种基于机器学习利用卫星影像创建城市内输电线数据库的方法，首先，使用U-net神经网络从卫星影像中获取电线杆的位置，然后，设置一个合理的统计平均高度作为电线杆的高度，最后，利用电线杆沿道路分布的特点，采用Dijkstra最短路径算法构建电线杆线路图。2023年，美国联邦航空管理

收稿日期：2024-05-11；录用日期：2024-11-29；网络出版时间：2024-12-24 10:59
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241223.1713.001
*通信作者. E-mail：gyh2005@nuaa.edu.cn

引用格式：张衡，高艳辉，陆洋. 基于机器学习的高压线数据库创建方法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2529-2539.
Zhang H，Gao Y H，Lu Y. Power line database creating method based on machine learning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2529-2539 (in Chinese).

局[5]开始使用该方法建立电子飞行包，为飞行员显示城市内输电塔线的位置。

然而，直升机执行任务的区域大部分处于田野、山川等非城市内区域。在这些区域，直升机飞行安全的重大威胁是高压塔线，而非普通电线杆。为此，本文借鉴文献[4]的思路研究高压线数据库的创建方法。但需要解决的难题是：与城市内电线杆不同，高压线塔的类型很多，高度差异也非常大，不能用一个统一高度替代，必须获取较为准确的高压线塔高度；此外，位于野外的高压线塔无法利用城市内的道路分布规律，需要探索新的方法预测高压线塔之间的连线。

本文结合卫星影像研究基于机器学习的高压线数据库建立方法，通过仿真对高压线塔经纬度定位方法、高度提取方法及高压线塔连线预测方法进行验证。

1 研究方法

高压线数据库建立的具体流程如图1所示。可见，基于机器学习利用卫星影像建立高压线数据库方法主要包括3个步骤：

1）高压线塔经纬度位置定位。采用改进的YOLOv5对卫星影像进行目标检测，获取高压线塔像素位置，利用空间数据转换库(geospatial data abstraction library, GDAL)计算高压线塔经纬度位置。

2）高压线塔高度提取。对卫星影像进行阴影检测，提取图像中的阴影。为提高计算阴影长度的准确性，对阴影图像进行后处理，减少图像中的孤立点和空洞。通过卫星影像拍摄的时间和经纬度，计算太阳高度角和方位角，结合高压线塔在图像的位置计算高压线塔的阴影长度，通过阴影长度反推高压线塔高度。

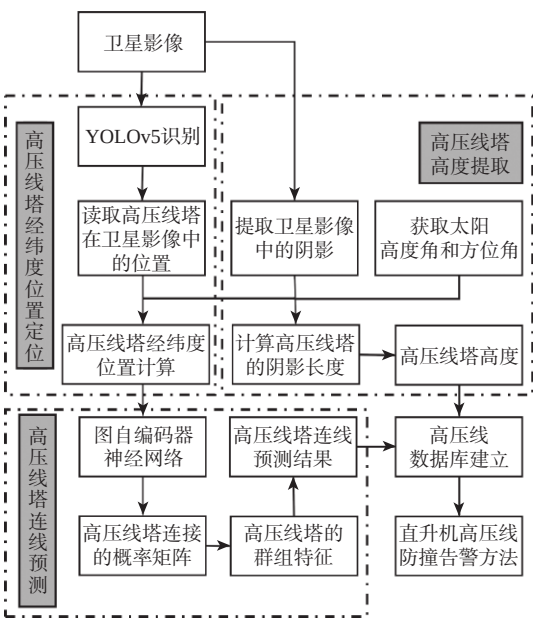


图1 建立高压线数据库技术流程

Fig. 1 Technical flowchart for establishing database of power line

3）高压线塔连线预测。使用高压线塔的经纬度位置及其之间的连线关系输入图自编码器神经网络进行训练，获取训练好的模型。将需要预测的高压线塔经纬度输入模型，输出高压线塔的连接概率。使用高压线塔的群组特征生成预测结果。根据获取的结果建立高压线数据库。

1.1 基于机器学习的高压线塔经纬度定位方法

由于高压线塔尺寸相比普通电线杆尺寸差别很大，文献[4]采用的U-net只能检测尺寸相近的物体。而YOLOv5包含多个检测层，适用于识别不同大小的高压线塔，故本文选择YOLOv5识别高压线塔。基于机器学习定位高压线塔经纬度主要步骤为：①使用改进YOLOv5对卫星影像进行识别，获取卫星影像中高压线塔的像素位置；②根据高压线塔的像素位置计算出高压线塔的经纬度位置。

1.1.1 YOLOv5目标检测算法

YOLO系列[6]是一种基于卷积神经网络、具有高精度的多目标检测模型。YOLOv5是YOLO系列目前应用最广泛的目标检测算法，包含YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l、YOLOv5x共4个模型。其中，YOLOv5x为精度最高的网络，包括4部分：输入端、骨干网络、路径聚合网络和检测端。输入端将卫星影像调整为640像素×640像素大小的图像；骨干网络采用不同的网络模块以提取不同尺度的特征图；路径聚合网络将主干网络提取的不同尺度特征图进行融合以增强特征表达能力，输出3个不同尺度的特征图以供检测，其中，大尺度的特征图用来检测小物体，小尺寸的特征图用来检测大物体；检测端针对特征图输出多个预测框和置信度，最终通过非极大抑制筛选输出的预测框，生成最终的预测框。

1.1.2 改进的YOLOv5目标检测算法

由于高压线塔目标较小，且背景复杂，YOLOv5x直接用于卫星影像检测高压线塔存在漏检率、误检率较高的问题。本文针对该问题，对YOLOv5x进行了改进。YOLOv5x骨干网络由卷积层Conv、跨阶段局部网络模块C3和快速空间金字塔池化(spatial pyramid pooling fast, SPPF)模块构成，用于实现多尺度特征提取与融合。针对卫星影像背景复杂的问题，在骨干网络中增加高效通道注意力机制(efficient channel attention, ECA)模块[7]，该模块通过引入压缩和激励来建模通道之间的关系，使网络能更好地关注重要特征通道，从而提高模型的特征

提取能力。具体步骤为: 首先, 将输入的特征图进行全局平均池化操作; 其次, 进行卷积核大小为 K 的一维卷积操作, 并经过激活函数得到各通道的权重 w; 最后, 将权重与原始输入特征图对应元素相乘, 得到输出特征图。具体流程如图 2 所示。

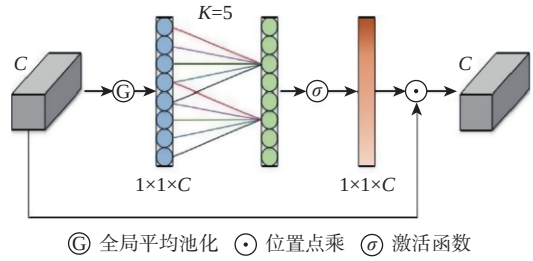


图 2　ECA 模块流程

Fig. 2　Diagram of ECA module

ECA 相比于其他注意力模块, 由于采用了局部卷积模块, 计算复杂度低, 目标检测性能得到明显提升。YOLOv5 网络中, 增加更大尺度检测层可提高小目标的检测精度[8]。因此, 增加一个大小为 80×80×255 的检测层, 负责检测小目标。改进 YOLOv5 网络结构如图 3 所示, 其中, 红框部分为相较 YOLOv5 的改进部分, Concat 表示拼接操作, Upsample 表示上采样操作。

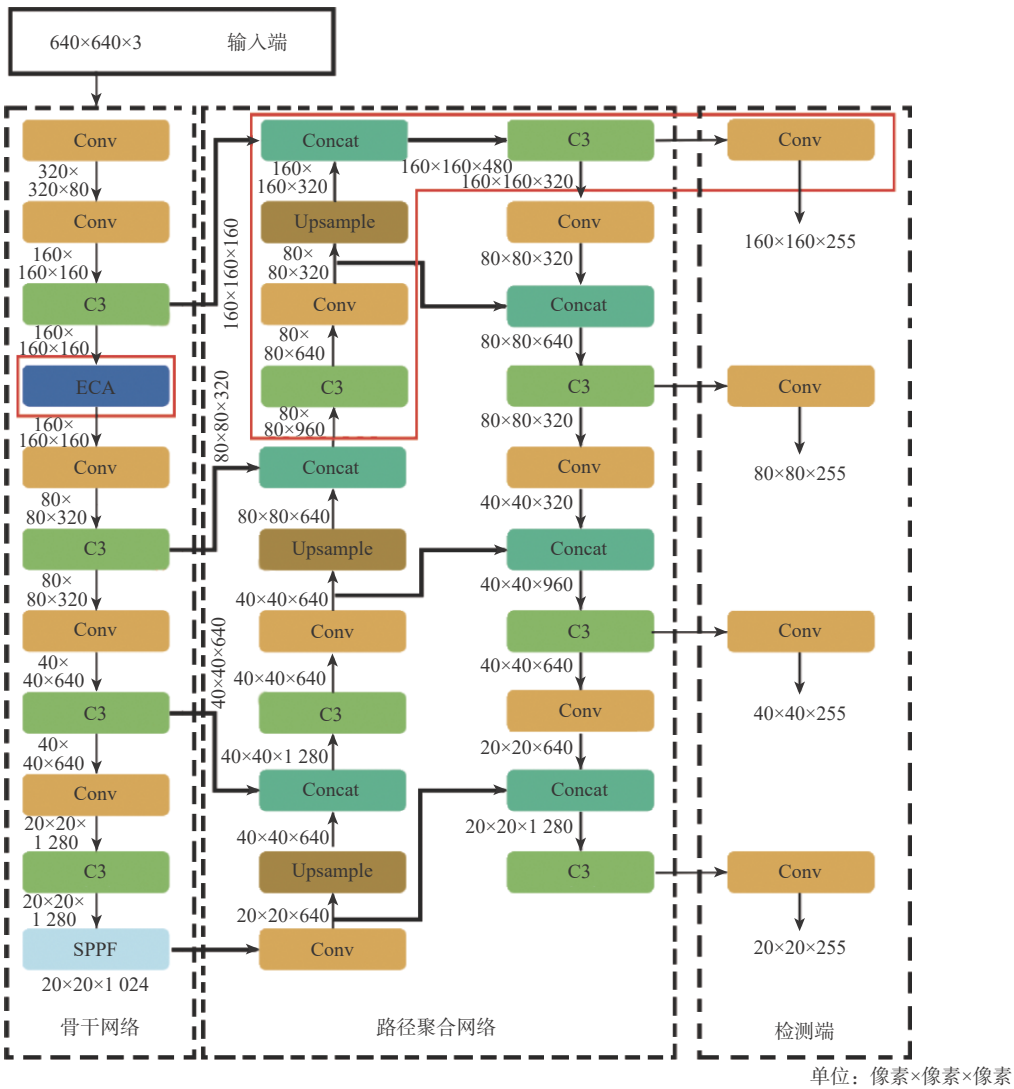


图 3　改进 YOLOv5 网络结构

Fig. 3　Improved YOLOv5 network architecture

1.1.3　高压线塔经纬度计算方法

卫星影像文件通常采用的图像文件格式为 TIFF。该格式图像文件包含图像坐标系、比例尺等信息。卫星影像经 YOLOv5 检测后, 计算出高压线塔所在的像素位置。基于高压线塔像素位置, 通过 GDAL 仿射变换, 即可计算得到对应高压线塔的经纬度坐标。高压线塔的经纬度计算公式为

$$\lambda = \lambda_0 + xe_{\text{lon}} + yR_{\text{row}} \tag{1}$$

$$L = L_0 + ye_{\text{lat}} + xR_{\text{col}} \tag{2}$$

式中: λ、L分别为目标像素点的经度、纬度; λ_0、L_0分别为图像左上角像素点的经度、纬度; x、y为目标像素点的像素位置; e_{lon}、e_{lat}分别为经纬度分

辨率，即每个像素点对应的经纬度大小；R_{row}、R_{col}分别为行旋转、列旋转。

1.2 基于阴影长度的高压线塔高度提取方法

使用阴影反演法获取高压线塔高度，主要步骤为：首先，对卫星影像进行阴影检测，获取卫星影像中的阴影；然后，为除去影像中的孤立点和高压线塔阴影中的空洞，对图像进行后处理，以提高提取高压线塔阴影长度的准确性；最后，为准确获取高压塔的阴影长度，并与其他物体产生的阴影区分，提出一种高压线塔影长的提取方法。

1.2.1 高压线塔高度提取原理

在卫星影像中，高压线塔阴影长度主要受太阳高度角和自身高度的影响。根据成像原理，阴影长度可计算如下[9]：

$$S = H\cot\alpha \tag{3}$$

其中：S为阴影长度；H为高压线塔高度；α为太阳高度角。

故高压线塔的高度为

$$H = S/\cot\alpha \tag{4}$$

太阳的高度角和方位角受经纬度和时间影响，表示如下：

$$\sin\alpha = \sin\omega\sin\delta + \cos\omega\cos\delta\cos t \tag{5}$$

$$\cos\beta = (\sin\alpha\sin\omega - \sin\delta)/(\cos\alpha\sin\omega) \tag{6}$$

式中：β为太阳方位角；ω为纬度；t为时角；δ为太阳赤纬。

此外，卫星影像中的高压线塔阴影长度还与太阳和卫星的位置有关。当卫星与太阳处于同一角度时，高压线塔在卫星影像中的投影与高压线塔的阴影重叠，对于高压线塔的阴影获取存在一定的盲区。因此，为获取完整的高压线塔阴影，应当选择卫星的正视影像或卫星与太阳处于不同角度时的影像。

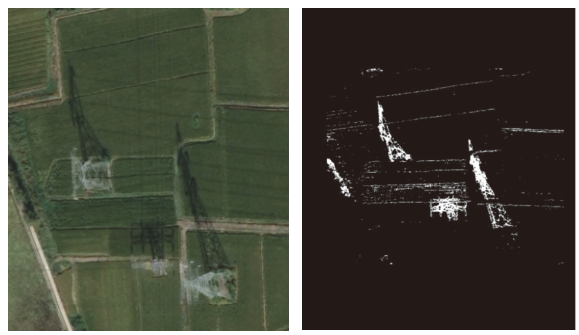
1.2.2 卫星影像阴影提取算法

为获取卫星影像中高压线塔阴影长度，需要提取卫星影像中的阴影。在RGB颜色空间中，卫星影像中阴影区域的亮度值一般低于非阴影区域，特别是R和G分量较小，但B分量较大。其原因主要是：以太阳光为光源的成像过程中，环境对B分量的散射较强。因此，可以将B分量与R、G分量的比值作为判断是否为阴影区域的依据。彩色模型C3是描述B分量与R、G分量比值的数值，计算如下[10]：

$$C_3 = \arctan\left(\frac{B}{\max(G,R)}\right) \tag{7}$$

式中：C_3为彩虹模型特征值；R为影像红色通道分量值；G为影像绿色通道分量值；B为影像蓝色通道分量值。

本文采用三阈值进行阴影检测。针对阴影R、G分量较小，B分量较大的特点，选择C3作为条件，C3分量小的区域判为非阴影区域；与此同时，B分量虽然在阴影区域相对较大，但由于阴影区域亮度相对较低，B分量绝对值并不大，故B分量较高的区域判为非阴影区域；阴影检测过程中，植被常因亮度低被误检为阴影，为减少误检，针对植被G分量较高的特点，选择G分量作为条件，G分量较高的像素判为非阴影区域。综上所述，当某区域C3分量大于T1、B分量小于T2、G分量小于T3时，就可判定为阴影区域。本文选取阈值T1、T2、T3分别为0.2、90、60，阴影检测结果如图4所示。



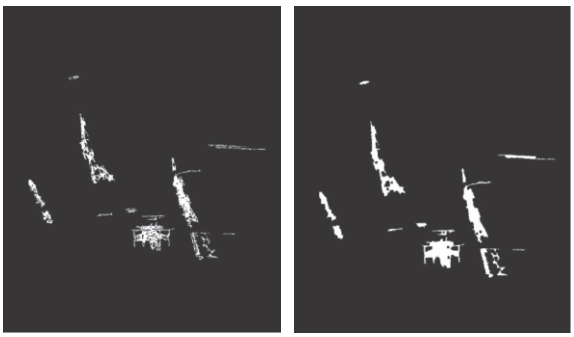
(a) 原图 (b) 阴影检测结果

图4 卫星影像原图与阴影检测结果

Fig. 4 Satellite image and shadow detection results

1.2.3 卫星影像阴影图像后处理

从图4可以看出，获取卫星影像中的阴影后，图像中仍然存在一些难以去除的孤立点，且高压线塔的阴影中存在一些空洞。针对该问题，采用连通分量的方法去除孤立点，再采用数学形态学中的闭运算去除高压线塔阴影中的空洞[11]。连通区域是指具有相同像素值且互相连接在一起的像素组成的区域。设置一个阈值，当区域面积小于该阈值时，就认为该区域为孤立点，将孤立点去除。数学形态学是一门建立在集合理论基础上的学科，被广泛运用于计算机视觉领域。闭运算是先进行膨胀、再进行腐蚀的组合操作。膨胀操作主要步骤有2个：①定义一个结构元素，本文定义的结构元素为5×5正方形核；②从图像左上角开始，沿着每个像素点进行扫描。如果结构元素与图像区域中的像素匹配，即结构元素覆盖的区域至少存在一个值为1像素的像素点，则将结构元素覆盖的区域像素点的值都变为1像素。腐蚀操作第1步与膨胀操作相同；第2步则相反，如果结构元素覆盖区域不是所有像素点的值为1像素，则结构元素覆盖区域像素点的值变为0像素。后处理结果如图5所示。



(a) 连通分量去除孤立点　　(b) 数学形态学闭运算

图 5　阴影图像后处理结果

Fig. 5　Shadow image post-processing results

1.2.4　高压线塔阴影长度获取

从图 5 可以看出, 获取卫星影像的阴影中也包含非高压线塔阴影。针对卫星影像阴影背景复杂、高压线塔影长与其他物体影长难以区分的问题, 本文提出一种高压线塔阴影长度提取方法。首先, 使用此前建立的改进 YOLOv5 获取高压线塔在图像中的位置。其次, 输入本地的经纬度和获取影像的时间, 计算太阳的高度角和方位角。以高压线塔的位置为起点, 太阳的方位角为方向, 引出一条射线; 射线在延长过程中判断射线所在像素是否为阴影区域, 如果射线顶端所在像素不为阴影区域, 计算射线顶端到阴影区域的像素距离。设置一个阈值, 当像素距离大于该阈值时, 射线停止延长, 并计算线段的长度。高压线塔阴影的长度即为线段长度与阈值的差值。为减小误差, 引出 10 条平行于该射线的射线, 重复相同的操作, 计算线段的长度。图 6 为高压线塔阴影长度提取, 图中, 红线为测量高压线塔阴影长度的线段。

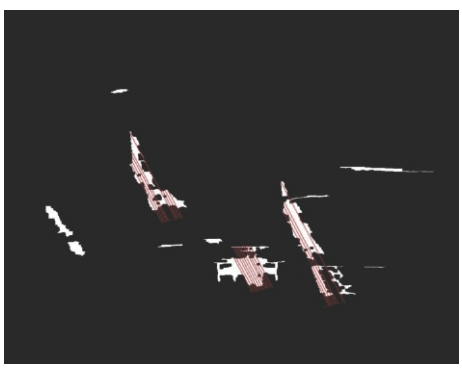


图 6　高压线塔阴影长度提取

Fig. 6　Extraction of shadow lengths for pylons

从图 6 可以看出, 部分线段长度与高压线塔的阴影长度差别很大, 需要进行离群点检测, 去除离群点后再求阴影长度。本文采用 Z-score 离群点检测方法求出各点的标准差, 若一个点与均值相差 2 个标准差, 则作为离群点剔除。剔除离群点后, 求平均值即为高压线塔阴影的长度。

1.3　基于图神经网络的高压线塔连线预测方法

获取高压线塔的经纬度后, 即可预测高压线塔的连线, 以高压线塔的连线代替真实的高压线。将高压线塔的地理坐标与高压线塔的连线定义为图结构, 其中, 地理坐标为节点的特征, 连线为边。将高压线塔连线预测问题推广为图的链路预测问题。由于基于图卷积神经网络的图自编码器[12] 在链路预测领域已经取得了良好效果, 本文使用图自编码器对高压线塔的连接进行预测, 获取概率邻接矩阵后, 使用高压线塔的群组特征将概率邻接矩阵转换为邻接矩阵, 进一步基于邻接矩阵和高压线塔的经纬度构建高压线数据库。

1.3.1　高压线塔连线预测方法

图自编码器是一种端到端的、无监督学习的框架, 由编码器与解码器 2 部分组成, 如图 7 所示。

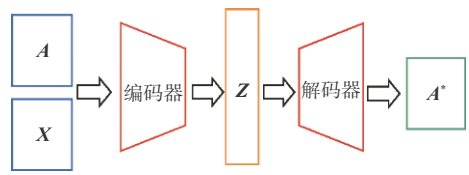


图 7　图自编码器模型

Fig. 7　Graph autoencoder model

图 7 中, $\boldsymbol{A}$为高压线塔的连接关系, $\boldsymbol{X}$为高压线塔的地理坐标。将$\boldsymbol{A}$和$\boldsymbol{X}$输入编码器, 得到节点特征向量 $\boldsymbol{Z}$。编码器由堆叠 2 次的图神经网络组成。解码器是一个内积层加上一个激活函数。为检测不同图神经网络对预测结果的影响, 分别采用 3 种不同图神经网络作为编码器, 分别为图卷积神经网络 (graph convolutional network, GCN)[13]、图注意力 (graph attention, GAT) 神经网络[14] 和图采样聚合 (graph sample and aggregation, GraphSAGE) 神经网络[15], 可分别表示为

$$\boldsymbol{Z}=\mathrm{GCN}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{A}) \tag{8}$$

$$\boldsymbol{Z}=\mathrm{GAT}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{A}) \tag{9}$$

$$\boldsymbol{Z}=\mathrm{GraphSAGE}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{A}) \tag{10}$$

其中, 解码器公式可以表示为

$$\boldsymbol{A}^{*}=\mathrm{sigmoid}(\boldsymbol{Z}\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}) \tag{11}$$

式中: $\boldsymbol{A}^{*}$为概率邻接矩阵; sigmoid 为激活函数。

将高压线塔的经纬度坐标及第 1 个点为原点构建的地理坐标为节点特征作为输入。输出为 $N\times N$ 大小的概率邻接矩阵 $\boldsymbol{A}^{*}$, N 为预测的高压线塔个数, 每个元素为两点之间有连接的概率。

1.3.2　高压线塔群组特征

使用图自编码器进行预测后, 即可获取高压线塔之间的连线概率。为将概率邻接矩阵转化为邻

接矩阵，需要利用高压线塔的群组特征。邻接矩阵与概率邻接矩阵大小均为 $N\times N$，与概率邻接矩阵不同的是，邻接矩阵的元素只有 0 和 1。其中，0 表示 2 个高压线塔没有相连，1 表示相连。通过查阅国家高压线塔相关规划，可以总结出高压线塔群组特征为：①2 个相连高压线塔之间的距离通常为 50～1 300 m 之间；②1 个高压线塔一般只会与其最近的 4 个高压线塔相连；③1 个高压线塔只与另外 2 个高压线塔相连。

计算各点之间的距离，生成大小为 $N\times N$ 的距离矩阵，矩阵每个元素为高压线塔之间的距离。利用距离矩阵构造判别矩阵。利用第 1 个特征构造判别矩阵 $\boldsymbol{S}_1$，当距离矩阵中的元素大于 1 300 m 或小于 50 m 时，判别矩阵 $\boldsymbol{S}_1$ 对应的元素为 0，其余元素变为 1。利用第 2 个特征构造判别矩阵 $\boldsymbol{S}_2$，计算出每个高压线塔距离最近的 4 个高压线塔，将判别矩阵 $\boldsymbol{S}_2$ 中对应元素变为 1，其余变为 0。使用概率邻接矩阵乘以判别矩阵后，利用第 3 个特性，将概率邻接矩阵每行的最大值变为 1，其余变为 0。公式可表示为

$$\boldsymbol{A}=\mathrm{MAX}(\boldsymbol{A}^{*}\boldsymbol{S}_1\boldsymbol{S}_2) \tag{12}$$

式中：MAX(·) 表示将矩阵每行最大值变为 1，其余变为 0。

由于高压线塔网络可视为一个无向图，所生成的邻接矩阵需要满足无向图的条件，即 $\boldsymbol{A}$ 为对称矩阵。将邻接矩阵转换为对称矩阵可表示为

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{fin}}=\mathrm{ONE}(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}) \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{A}_{\mathrm{fin}}$ 为最终生成的邻接矩阵；ONE(·) 表示将矩阵的非零值变为 1。

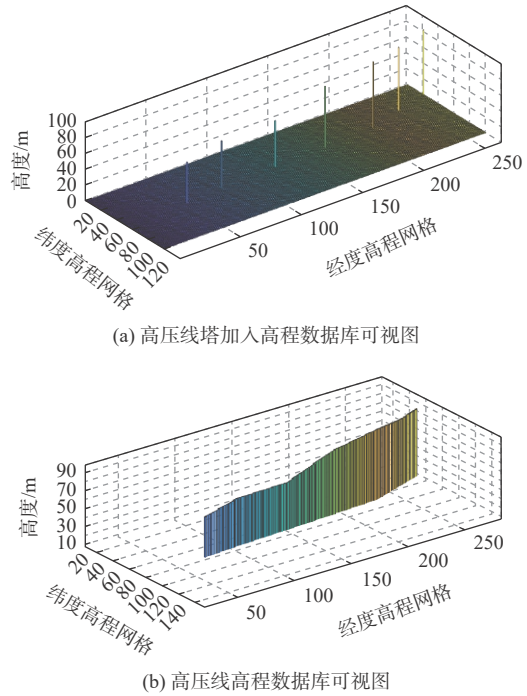
1.4 高压线高程数据库建立与直升机高压线防撞告警方法

1.4.1 高压线高程数据库建立方法

为给飞行员提供高压线防撞告警功能，将高压线数据库加入直升机前视告警系统。直升机前视告警系统的数据核心是地形高程数据库[16]，需要创建一个高压线高程数据库加入到地形高程数据库中。本文利用获取的高压线塔经纬度、高度及高压线塔的连线关系，给出了高压线高程数据库生成算法。算法流程如下：①将高压线塔所在的地形高程增加一个高压线塔的高度；②对于高压线而言，需要计算其跨越了哪些高程网格，每个网格均增加一个高压线塔的高度。高压线高程数据库可视化结果如图 8 所示。

1.4.2 直升机高压线防撞告警方法

高压线高程数据库建立后，即可利用其进行直升机撞击高压线告警。本文采用一种基于逃逸轨迹预测的告警方法[17-18]进行直升机高压线防撞告警。首先，利用输入的直升机飞行参数，采用 6 自由度运动方程积分法[17]预测直升机逃逸轨迹。其次，在逃逸轨迹的基础上，采用不确定度圆[18]扫描所构建的高压线高程数据库。然后，根据直升机逃逸轨迹与高压线的相交情况判断是否进行告警。如果判断直升机有撞击高压线的风险，将生成声音告警信息、可视化告警信息和高压线显示信息。最后，以声音、灯光和显示的形式给飞行员发出告警信息。其流程如图 9 所示。



(a) 高压线塔加入高程数据库可视图

(b) 高压线高程数据库可视图

图 8 高压线高程数据库可视化结果

Fig. 8 Visualization results of power line elevation database

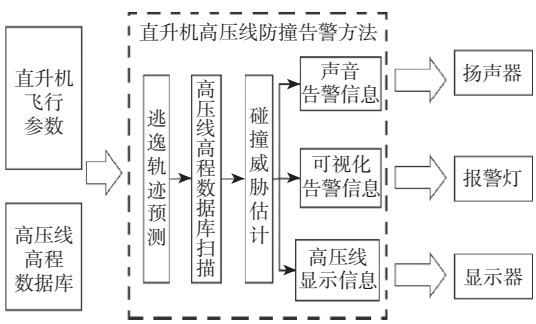


图 9 直升机高压线防撞告警方法流程

Fig. 9 Flowchart of helicopter power line collision alarm method

2 仿真试验验证

为验证算法的有效性，开展 3 个层次的验证。①为验证改进 YOLOv5 方法获取高压线塔经纬度位置的能力，将包含高压线塔的卫星影像分别输入单

次多框检测器(single shot multibox detector, SSD)[19]、YOLOv5x、改进的 YOLOv5, 分别进行高压线塔识别测试, 对比验证目标检测算法的有效性; 读取高压线塔在图像中的位置, 通过 GDAL 计算出高压线塔经纬度位置, 并与实际高压线塔经纬度位置进行比较。②为验证提取高压线塔高度方法的准确性, 将提取的高压线塔高度与实际塔高进行对比。③计算高压线塔连线预测方法的准确率, 同时, 探究不同图神经网络和学习率对连线预测准确率的影响, 将预测连线与实际连线进行对比。

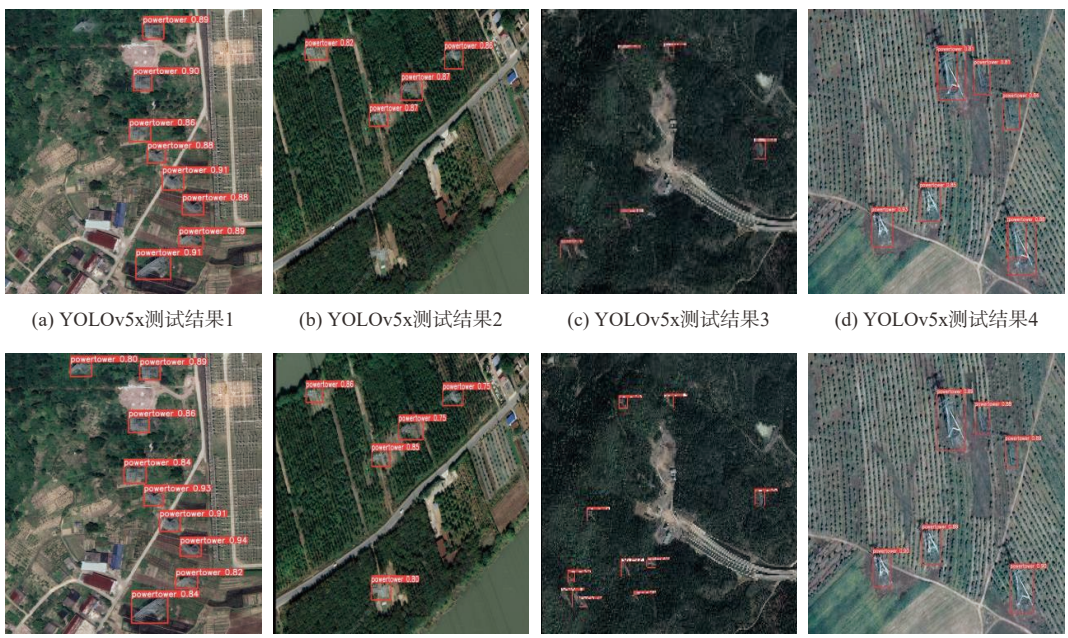
2.1　高压线塔识别仿真验证

2.1.1　数据集与评价指标

从谷歌地图影像采集了约 800 张高压线塔图像进行标注, 通过旋转、缩放、添加噪声、镜像等手段拓展到 4 000 张。标注完成后, 按照 8∶1∶1 的比例划分训练集、验证集、测试集。每张图像包含 1～10 个高压线塔不等。数据集中图像背景包括森林、农田、裸土、水体、建筑等。本文采用平均精度均值 (mean average precision, mAP)、精准率 P、召回率 R 作为评价指标[20]。

2.1.2　对比测试分析

使用 YOLOv5x 和改进 YOLOv5 对测试集分别进行测试, 选取部分测试结果, 如图 10 所示。可以看出, 本文提出的改进 YOLOv5 比 YOLOv5x 具有更好的小目标检测能力, 一定程度上降低了小目标漏检率, 同时, 降低了误检率。图 10(a)～10(d)为 YOLOv5x 检测结果, 其中, 图 10(a)～图 10(c)存在漏检情况, 图 10(d)存在误检情况, YOLOv5x 将 1 个高压线塔识别为 2 个。而改进 YOLOv5 在对应图像目标检测中不存在上述问题。



(a) YOLOv5x测试结果1　(b) YOLOv5x测试结果2　(c) YOLOv5x测试结果3　(d) YOLOv5x测试结果4

(e) 改进YOLOv5测试结果1　(f) 改进YOLOv5测试结果2　(g) 改进YOLOv5测试结果3　(h) 改进YOLOv5测试结果4

图 10　可视化检测结果

Fig. 10　Visual detection results

目前, 目标检测领域主要采用精准率 P、召回率 R、平均精度均值 mAP 作为评价模型准确率的指标, 计算如下:

$$P=\frac{T_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{P}}+F_{\mathrm{P}}} \tag{14}$$

$$R=\frac{T_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{P}}+F_{\mathrm{N}}} \tag{15}$$

$$m_{\mathrm{AP}}=\sum_{k=1}^{n}(R_k-R_{k-1})P_k \tag{16}$$

式中: m_{AP}为平均精度均值; T_{P}为判定一个正样本为正样本的次数; F_{P}为判定一个负样本为正样本的次数; F_{N}为判定一个正样本为负样本的次数; n 为样本点总数; R_k和 P_k分别为第 k 点的召回率和精准率。

针对选定测试集, SSD、YOLOv5x 与改进 YOLOv5 高压线塔识别测试评价指标对比结果如表 1 所示。改进 YOLOv5 相比于 YOLOv5x 的 mAP 提升了 0.021, 精准率 P 提升了 0.025, 召回率 R 提

表 1　评价指标对比

Table 1　Comparison of evaluation indicators

算法	P	R	mAP
SSD	0.798	0.773	0.794
YOLOv5x	0.927	0.906	0.921
改进YOLOv5	0.952	0.927	0.942

升了 0.021，有较大提升。相比于 SSD，改进 YOLOv5 在 mAP、精准率 P 和召回率 R 都有较大优势。

2.1.3 计算高压线塔经纬度位置验证

将一张包含高压线塔卫星影像的 TIFF 格式图像输入到改进 YOLOv5 模型中进行识别。改进 YOLOv5 目标检测结果共识别出 8 个高压线塔，同时，获取了高压线塔在图中的像素位置，如图 11 所示。可以发现，存在部分高压线塔漏检的情况。这是由于将卫星影像输入到 YOLOv5 模型时，YOLOv5 自动将卫星影像的分辨率调整为 640 像素×640 像素，以此进行目标检测任务。需要注意的是，在上述目标检测机制下，目标物体至少需要占据 4 像素×4 像素才能够被有效检测到，而图中未被检测到的高压线塔在影像中所占像素过少，导致无法满足检测条件。通过 GDAL 模块计算出高压线塔的经纬度，高压线塔在图像中的位置及计算得到的经纬度如表 2 所示。在谷歌地球中依次输入表 2 中的经纬度坐标进行定位，定位结果均能与高压线塔的实际位置吻合。对比分析表明，基于机器学习的高压线塔经纬度定位方法能够有效地获取高压线塔的经纬度位置。



图 11 卫星影像目标检测结果

Fig. 11 Satellite image target detection results

表 2 高压线塔位置信息

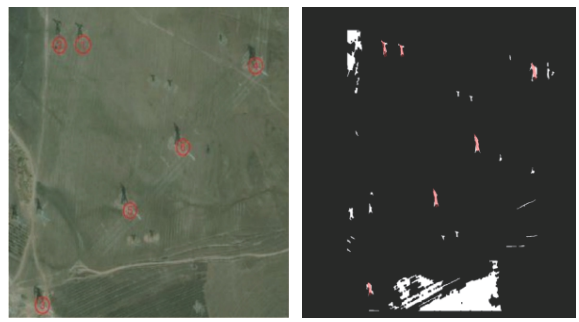
Table 2 Pylons location information

高压线塔编号	x像素位置/像素	y像素位置/像素	经度/(°)	纬度/(°)
1	487	203	122.288 545 84	46.067 907 69
2	584	222	122.289 588 68	46.067 768 12
3	410	1202	122.287 728 31	46.060 468 11
4	1321	311	122.297 493 70	46.067 102 83
5	767	837	122.291 552 07	46.063 190 02
6	998	614	122.294 030 42	46.064 846 38
7	297	886	122.286 511 65	46.062 827 11
8	398	864	122.287 599 56	46.062 985 31

2.2 高压线塔高度仿真验证

由于高压线塔的实际高度难以获取，选用参考文献 [21] 中的高压线塔高度用于仿真。本文选取的卫星影像分辨率 r=0.8 m，太阳高度角α = 59.036°，太阳方位角β = 164.56°，地点位于乌兰浩特市，该区域地面无较大倾斜。

选取 6 个高压线塔进行高度提取。图 12 给出了卫星影像和卫星影像阴影提取图像。



(a) 卫星影象 (b) 阴影提取图像

图 12 卫星影像阴影检测

Fig. 12 Satellite image shadow detection

从表 3 可知，6 个高压线塔的高度预测平均准确率为 94.65%，说明本文提出的高压线塔高度提取方法准确率较高，能够满足后续直升机高压线告警的需求。在第 1 组数据中，预测高度的准确率偏低，误差来源一方面可能是在图像处理的过程中，造成图像信息损失，进而影响阴影长度；另一方面，地形起伏也会对影响阴影长度。通过分析卫星影像中第 1 组高压线塔阴影发现：地形存在一定的倾斜，倾斜角度为 5°，其他组无倾斜或倾斜角度较小，因此，地形的起伏可能是造成第 1 组误差偏大的原因。

表 3 高压线塔仿真预测高度与实际高度对比

Table 3 Comparison between measured heights and actual heights of pylons

序号	经度/(°)	纬度/(°)	像素长度/像素	阴影长度/m	测量塔高/m	实际塔高/m	准确率/%
1	122.291 176 4	46.067 198	39.0	31.2	52.0	60.0	86.7
2	122.291 838 8	46.067 074 9	45.2	36.2	60.3	61.0	98.9
3	122.286 799 3	46.062 314 1	44.6	35.7	59.5	57.0	95.7
4	122.295 097 4	46.067 565 6	58.6	46.9	78.2	72.5	92.7
5	122.292 218 0	46.065 767 7	63.5	50.8	84.7	83.5	98.6
6	122.290 155 2	46.064 421 2	60.2	48.2	80.3	76.5	95.3

2.3 高压线塔连线预测仿真验证

2.3.1 数据集

试验数据集来源于谷歌地球卫星影像，收集了约 2 000 个高压线塔的经纬度坐标及其连线关系作为数据集。其中，1 000 个作为训练集，200 个作为验证集，800 个作为测试集。

2.3.2 评价指标

选用马修斯相关系数（Matthews correlation coeff-

icient, MCC)作为评价指标[4]。MCC 是一种用于评估二元分类器性能的指标, 计算公式为

$$M_{cc}=\frac{T_P T_N-F_P F_N}{\sqrt{(T_P+F_P)(T_P+F_N)(T_N+F_P)(T_N+F_N)}} \quad (17)$$

式中: M_{cc}为马修斯相关系数; T_N 为判定一个负样本为负样本的次数。通过计算 MCC 值, 可以评价高压线塔连线预测的准确性。

2.3.3　不同参数对预测准确性的影响

本节主要采用 MCC 来评估不同图神经网络和学习率对高压线塔连线预测准确性的影响。

1) 通过评估 MCC 研究 GCN、GAT 和 GraphSAGE 这 3 个图神经网络对连线预测的影响。将 3 个图神经网络分别作为图自编码器的编码器部分, 输入高压线塔的经纬度, 计算 MCC 值。仿真结果如表 4 所示。可以得出, 使用 GCN 作为编码器时效果最好, GAT 与 Graph SAGE 效果相当。

表 4　图神经网络对 MCC 的影响

Table 4　Influence of graph neural networks on MCC

图神经网络	MCC
GCN	0.479
GAT	0.45
GraphSAGE	0.449

2) 通过 MCC 值评估不同学习率对连线预测准确性的影响。学习率取值分别为 0.1、0.01、0.007、0.005、0.003、0.001、0.000 8, 选用的图神经网络为 GCN。测试结果如表 5 所示。可以看出, 连线预测的准确性对学习率较为敏感, 当学习率取 0.001 时, 可以取得最好的结果。

表 5　学习率对 MCC 的影响

Table 5　Impact of learning rate on MCC

学习率	MCC
0.1	0.372
0.01	0.398
0.007	0.396
0.005	0.393
0.003	0.445
0.001	0.479
0.000 8	0.478

2.3.4　连线预测与实际连线的对比

为验证预测连线的准确性, 需要将测试集中的高压线塔预测连线结果与真实连线进行对比。在本次测试中, 使用图卷积神经网络作为图自编码器中的编码器, 学习率为 0.001, 选取 4 个不同地区进行测试。预测结果与真实连线对比如图 13 所示。可以看出, 当高压线网络较为简单时, 连线预测准确性较高; 相反, 当高压线网络复杂时, 连接预测准确性相对较低。区域 1 只有一条高压线路, 高压线连线预测准确性相对较高。区域 2、3、4 为多个高压线路, 高压线网络较复杂, 连线预测准确性相对较低。

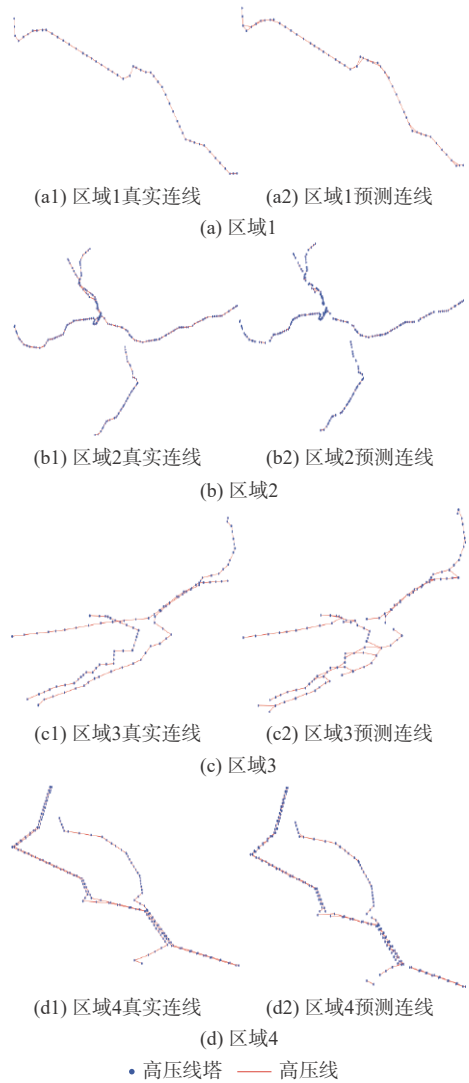


图 13　高压线塔预测连线与实际连线的对比

Fig. 13　Comparison between predicted and actual connection of pylons

3　结　论

针对 HTAWS 缺少高压线数据库的工程痛点, 本文设计了一套完整的高压线数据库构建方法。

1) 提出了改进 YOLOv5 目标检测算法, 可有效识别卫星影像中的高压线塔, 结合 GDAL 模块, 实现了高压线塔经纬度的精准计算。

2) 建立了基于卫星影像阴影的高压线塔高度反演方法, 可自动化获取塔高参数。

3) 设计了基于图自编码器与高压线塔群组特征的连线预测方法, 实现了高压线线路的精准预测。

4) 仿真验证表明, 本文方法可基于公开卫星影像构建可靠的高压线数据库, 为直升机高压线防撞

告警提供核心数据支撑,有效保障直升机飞行安全。

参考文献(References)

[1] Iseler L, De Maio J. An analysis of U.S. civil rotorcraft accidents by cost and injury (1990-1996): NASA/TM-2002-2096/5[R]. Moffett Field: NASA Ames Research Center, 2002: 17-26.

[2] Chandrasekaran R, Payan A P, Collins K B, et al. Helicopter wire strike protection and prevention devices: review, challenges, and recommendations[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 98: 105665.

[3] Chan N. Cable-cutting device: US 4215833A[P]. 1980-08-05.

[4] Harris C M, Achour G, Payan A P, et al. Use of machine learning to create a database of wires for helicopter wire strike prevention[C]// Proceedings of the AIAA Scitech 2021 Forum. Reston: AIAA, 2021: 0527.

[5] Achour N, Peck E, Johnson R, et al. Rotorcraft wire strike prevention and protection: wire database creation, sensor package design, wire cutter modeling, data fusion, and helicopter operators' inputs: DOT/FAA/AM-23/12[R]. Washington, D.C.: U.S. Federal Aviation Administration, 2023.

[6] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 779-788.

[7] Wang Q L, Wu B G, Zhu P F, et al. ECA-net: efficient channel attention for deep convolutional neural networks[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 11531-11539.

[8] Ju M R, Luo H B, Wang Z B, et al. The application of improved YOLO V3 in multi-scale target detection[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 1-14.

[9] 刘同华, 景文博, 姜淑华. 一种基于遥感的快速提取建筑物高度的方法[J]. 科技创新导报, 2016, 13(31): 87-88.
Liu T H, Jing W B, Jiang S H. A method for quickly extracting building height based on remote sensing[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(31): 87-88(in Chinese).

[10] 赵显富, 胡晓雯, 赵轩. 一种基于彩色模型的遥感影像阴影检测方法[J]. 测绘通报, 2014(5): 20-22.
Zhao X F, Hu X W, Zhao X. A method of remote sensing images shadow detection based on color models[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(5): 20-22(in Chinese).

[11] 李嘉良, 张超, 齐红甲. 遥感影像提取建筑物高度的方法[J]. 河北联合大学学报 (自然科学版), 2013, 35(2): 121-125.
Li J L, Zhang C, Qi H J. Analysis of remote sensing images to extract building height[J]. Journal of Hebei United University (Natural Sclence Edition), 2013, 35(2): 121-125(in Chinese).

[12] 李晶慈. 基于图自动编码器的链路预测方法研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2023.
Li J C. Research on link prediction methods based on graph autoencoder[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2023(in Chinese).

[13] Niepert M, Ahmed M, Kutzkov K. Learning convolutional neural networks for graphs[C]//Proceedings of the 33rd International Conference on International Conference on Machine Learning-Volume 48. New York: ACM, 2016: 2014-2023.

[14] Thekumparampil K K, Wang C, Oh S, et al. Attention-based graph neural network for semi-supervised learning[EB/OL]. (2018-03-10)[2024-05-06]. https://arxiv.org/abs/1803.03735.

[15] Hamilton W L, Ying R, Leskovec J. Inductive representation learning on large graphs[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2017: 1025-1035.

[16] 吴旭峰, 陆洋, 刘玉虎. 基于多传感器信息融合的直升机城市内障碍物主动探测方法[J]. 飞行力学, 2023, 41(2): 64-70.
Wu X F, Lu Y, Liu Y H. Active detection method for helicopter urban flight based on multi-sensor information fusion[J]. Flight Dynamics, 2023, 41(2): 64-70(in Chinese).

[17] 周成中, 陆洋. 直升机前视地形告警算法研究[J]. 飞行力学, 2016, 34(3): 30-33.
Zhou C Z, Lu Y. Research on forward looking terrain alerting algorithm for helicopter[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(3): 30-33(in Chinese).

[18] 黄山笑. 直升机预测式防撞地告警算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
Huang S X. Research on predictive ground collision avoidance warning algorithm for helicopter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021(in Chinese).

[19] 汪宋, 费树岷. SSD(Single Shot MultiBox Detector) 目标检测算法的研究与改进[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(4): 103-105.
Wang S, Fei S M. Research and improvement of SSD (Single Shot MultiBox Detector) target detection algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(4): 103-105(in Chinese).

[20] 迟盛元, 白岩, 孟祥民. 基于 YOLOv5 的 PCB 缺陷检测算法研究[J]. 科学技术创新, 2024(1): 106-109.
Chi S Y, Bai Y, Meng X M. Research on the PCB defect detection algorithm based on YOLOv5[J]. Scientific and Technological Innovation, 2024(1): 106-109(in Chinese).

[21] 李乐依. 基于遥感卫星光学影像的输电通道巡检技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
Li L Y. Research on power transmission channel inspection technology based on remote sensing satellite optical image[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022(in Chinese).

Power line database creating method based on machine learning

ZHANG Heng[1]，GAO Yanhui[2,*]，LU Yang[1]

(1. National Key Laboratory of Helicopter Aeromechanics，Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing 210016，China；
2. Unmanned Aerial Vehicles Research Institute，Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing 210016，China)

Abstract：During close-range flying tasks, helicopters are frequently struck electrical lines. Helicopter terrain awareness and warning system (HTAWS) is an essential instrument for preventing helicopter crashes, however it is challenging to reliably assure helicopter flight safety in the absence of a power line database. This research suggests a machine learning-based approach for building a power line database using satellite imagery. Aiming at the problem that YOLOv5 is insensitive to small target detection and has a high rate of missed detection, an improved YOLOv5 is proposed to identify the pylons in satellite images. Than the geospatial data abstraction library (GDAL) module was then used to calculate the longitude and latitude of the pylons. A pylons height acquisition method based on the shadow of pylons was proposed. The prediction of pylon connections was investigated using group features of pylons and graph neural networks. The simulation results demonstrate that the approach presented in this research can determine the longitude and latitude of pylons with 94.65% accuracy when determining the tower's height. The Matthews correlation coefficient (MCC) value predicted for the connection of pylons is 0.479, which can establish a power line database that meets the requirements of helicopter power line collision warning.

Keywords：helicopter；flight safety；power line；machine learning；satellite imagery

Received：2024-05-11；**Accepted**：2024-11-29；**Published Online**：2024-12-24 10：59
URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241223.1713.001
* **Corresponding author**. E-mail：gyh2005@nuaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0370

基于流场均匀性的大型复合材料固化炉设计仿真

王得权，赵宇轩，袁湘月，王青春，陈忠加*
(北京林业大学 工学院，北京 100083)

摘 要：大型复合材料固化炉内部的流场均匀性会直接影响热固性树脂基复合材料固化件的固化质量，为提高固化炉内的固化效果，基于计算流体力学(CFD)理论建立包含固化件的大型复合材料固化炉模型，针对固化炉送风方式和送风口数量，以及固化件数量和固化件在炉内空间摆放位置对固化炉内部流场影响进行仿真分析。仿真结果表明：上送下回送风方式在速度场和温度场均匀性上总体优于侧送侧回送风方式；送风口数量为5时，固化炉内速度场和温度场表现更好；随着固化件数量的增多，固化炉内部的空气流速和温度会降低，速度场和温度场均匀性会减弱；当固化件“正三角”布置时，固化炉内速度场和温度场表现优异。试验结果表明：仿真数据和试验数据的最大温度误差为4.2 ℃，误差在合理范围内，证明仿真结果可靠，能够对设计工作提供参考。

关 键 词：固化炉；流场设计；温度场均匀性；速度场均匀性；计算流体力学
中图分类号：V261.97
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2540-14

轻量化是航空航天等领域发展的一个重要趋势，复合材料以其高比强度、比模量、耐腐蚀和耐高温等优异性能够实现构件轻量化而被广泛应用，其中，复合材料筒状结构在航空航天等领域为较常见的结构[1-2]。在复合材料固化成型过程中，固化的非均匀性将直接影响复合材料结构的工作性能和使用寿命[3]。热固化成型方法是热固性树脂基复合材料固化成型的重要方法之一[4]。热固化成型使用的设备主要为大型复合材料固化炉，炉内流场是复合材料结构固化时温度分布的影响因素之一，较大温度梯度会导致复合材料固化不均匀[5-7]，因此，合理设计固化炉的结构及固化件空间布局，优化固化炉内部温度场和速度场均匀性，对于提高复合材料部件固化效果尤为重要。

一些学者研究了不同加热方式对温度场均匀性的影响。文献[8]研究直热模具温度场均匀性，认为镶嵌在模具内电加热管的间距和功率是影响模具表面温度均匀性的主要因素。文献[9]提出均匀加热可一定程度减小材料温度梯度和其导致的内应力影响。文献[10]采用新型线圈提高电磁感应加热过程中的温度均匀性。一些学者通过优化流场相关参数和物理结构参数，以达到改善温度场和速度场均匀性的效果。对流场参数方面的研究，文献[11]研究热风循环隧道烘箱的内部流场分布得出，气流速度分布是影响烘干品质的主要因素。文献[12]认为炉内气流的流动形式直接影响炉内温度均匀性，分散状态的气流相较于聚集状态的气流能明显提高炉内温度均匀性。文献[13]采用单因素试验方法，表明送风温度对虎坚果干燥的各项指标影响显著，送风湿度对干燥时间和能耗影响显著，送风风速对干燥效果影响显著。文献[14]研究回风和新风温度、回风比对飞机座舱内温度场及速度场分布的影响，当供风温度为50 ℃、回风比为0.5时，舱内部分位置温度较高。部分学者将研究聚焦于改变和优化设备物理结构参数。文献[15]研究了不同进、回风口形式的箱体结构参数，有效

收稿日期：2024-05-30；录用日期：2024-08-01；网络出版时间：2024-08-27 16:31
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240827.1046.001
基金项目：国家自然科学基金(51475255)
*通信作者. E-mail：chenzhongjia@bjfu.edu.cn

引用格式：王得权，赵宇轩，袁湘月，等. 基于流场均匀性的大型复合材料固化炉设计仿真[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2540-2553. Wang D Q，Zhao Y X，Yuan X Y，et al. Design and simulation of large composite material curing oven based on flow field uniformity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2540-2553 (in Chinese).

改善了固化设备内速度场和温度场均匀性。文献 [16] 认为干燥性能主要取决于高温空气分布的均匀性, 其均以设置导流板或均流板的方法来改善室内流场均匀性。文献 [17] 研究如何改善卧铺动车客室温度场均匀性, 提出增设挡板和引流道结合方案的优化效果优于增加送风口面积方案的优化效果。文献 [18] 在风道内通过增加引流板和整流板的方式优化风道出风均匀性。文献 [19] 改变烘箱内的风扇位置及其数量, 探究其对内部零件表面温度场分布的影响, 结果表明新型烘箱结构在固化成型中有优势。

关于固化成型设备内部流场的研究, 多针对空载时流场均匀性进行探讨, 而对考虑负载时固化炉内流场均匀性研究较少。本文在已有研究基础上, 建立包含负载的大型复合材料固化炉模型, 采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对固化炉内流场进行仿真研究, 以平均温度、平均速度、温度不均匀系数和速度不均匀系数为指标, 探究送风方式、送风口数量、固化件数量及固化件在炉内空间摆放位置等物理结构参数对炉内温度场和速度场均匀性的影响, 为大型复合材料固化炉的设计提供一定参考。

1　固化炉的结构及工作原理

1.1　固化炉整体结构及参数

复合材料固化炉结构简图如图 1 所示。固化炉主要由箱体、加热系统、固化件旋转装置 3 部分组成。设备侧面安装有新风口, 能控制新风进风量; 设备的顶部设有废气排放口用于废气排出。根据设计要求, 固化炉的循环风量为 43 200 m^3/h, 进风量为循环风量的 1/10, 即 4 320 m^3/h。加热系统包含循环风机、控制柜和加热器; 固化件旋转装置由电机、减速机和链条组成。固化炉基本参数如表 1 所示。

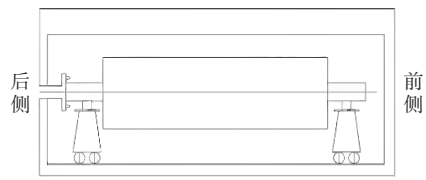


图 1　固化炉结构简图

Fig. 1　Structural diagram of curing oven

表 1　固化炉设计参数

Table 1　Design parameters of curing oven

温度范围/℃	温度均匀度/℃	温度波动度/℃	送风口尺寸/(mm×mm)	回风口尺寸/(mm×mm)	固化件尺寸/(mm×mm×mm)	固化炉尺寸/(mm×mm×mm)
室温～250	±3	±1	400×400	1 180×613	ϕ800×5 000	8 500×3 500×3 500

1.2　固化炉壁面温度计算

复合材料固化炉内的保温墙壁由两侧为 1.0 mm 的钢板和中间 120 mm 的隔热保温材料组成。以固化炉内温度为 150 ℃、环境温度为 20 ℃ 为例, 进行固定壁面温度计算[20]。

热流密度公式为

$$q=\frac{t_1-t_0}{\frac{1}{h_1}+\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{\delta_3}{\lambda_3}+\frac{1}{h_2}} \tag{1}$$

式中: q为热流密度, W/m^2; λ为导热系数, W/(m·K); δ为材料厚度, m; t_1为工作温度, ℃; t_0为环境温度, ℃; h为对流表面传热系数, W/(m^2·K)。

通常, 利用雷诺数 Re 来判定流体的状态, 一般雷诺数 Re>2 300 为湍流状态, Re<2 300 为层流状态。雷诺数 Re 为[21-23]

$$Re=\frac{v_F\rho L}{\mu}=\frac{v_F D_r}{\upsilon} \tag{2}$$

式中: v_F为流体流速, m/s; ρ为流体密度, kg/m^3; L为特征尺寸, m; μ为动力黏度, Pa·s; υ为运动黏度, m^2/s; D_r为特征长度, m。

由于固化炉的送风口为正方形, 固化炉内流场流动为非圆形管道流动, 特征长度可表示为

$$D_r=4\frac{A}{S} \tag{3}$$

式中: A为循环风道截面积, m^2; S为流体与管道接触的周长, m。

对流表面传热系数 h 采用如下关联式计算[24]:

$$Nu=0.644Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}=\frac{hL}{\lambda} \tag{4}$$

式中: Nu 为努塞尔数; Pr 为普朗特数。

根据热阻可知, 烘房保温壁面中各层材料的内外温差计算公式如下:

$$\Delta t=q\frac{\delta}{\lambda} \tag{5}$$

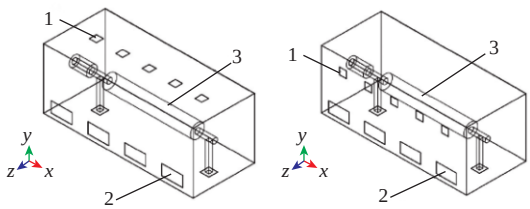
由式(5)计算得出不锈钢板两侧温差为 0.001 05 ℃, 隔热保温材料温差为 117.455 17 ℃。固化炉内壁温度为 137.5 ℃。其余工况壁面温度计算方法与此相同。

2　数值模型建立

2.1　模型简化

复合材料固化炉多采用侧送侧回和上送下回 2 种送风方式, 根据固化炉结构及基本参数对固化炉进行简化处理, 固化炉尺寸的长、宽、高(8 500 mm、3 500 mm、3 500 mm)与实际固化炉尺寸一致。送风

口尺寸为 400 mm×400 mm，回风口尺寸为 1 180 mm×613 mm。根据设计要求，上送下回模型的送风口位于模型上表面，送风口中心与上表面对称轴重合且沿 x 方向分布，回风口位于模型侧面距离底部 230 mm；侧送侧回模型的送风口与回风口位于模型同一侧，送风口距离模型上表面 600 mm，回风口距离模型底部 230 mm。选取固化炉内为研究目标，简化台车结构为固化件支架，简化固化件为圆柱结构，建立固化炉 3 维模型。图 2 为模型示意图。图中，坐标轴原点位于箱体内侧左下角，x 方向为横向，z 方向为深度方向，y 方向为箱体竖直方向。



(a) 上送下回 (b) 侧送侧回

1. 送风口；2. 回风口；3. 固化件。

图 2 2 种固化炉简化模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simplified model of two curing ovens

2.2 网格划分和无关性验证

针对 2 种不同送风方式模型进行网格划分，网格采用标准化四面体网格。为提高计算精准度，降低计算成本，需要对模型进行无关性检验，为后续研究选择一个合适的网格数量。采用网格数量分别为 575 447、740 459、977 839、1 132 248、1 329 494、1 598 502 等 6 种网格方案进行无关性验证。送风参数保持不变，以 x=5.7 m 处，炉内 yz 截面的平均温度和温度不均匀系数为参考依据。由图 3 可知，当网格数量从 575 447 增加到 1 132 248 后，继续增加网格数量，平均温度变化幅度很小。由图 4 可知，随着网格数量的增加，温度不均匀系数逐渐降低，且网格数量为 1 132 248、1 329 494、1 598 502 的 3 种网格方案的温度不均匀系数变化幅值很小。说明当网格数量为 1 132 248 时，网格数量继续增加，对计算结果的影响不大，因此在保证计算精度的前提下，为尽可能降低运算时间和成本，本文选择网格数量为 1 132 248 时进行后续模拟计算。模型网格划分如图 5 所示。

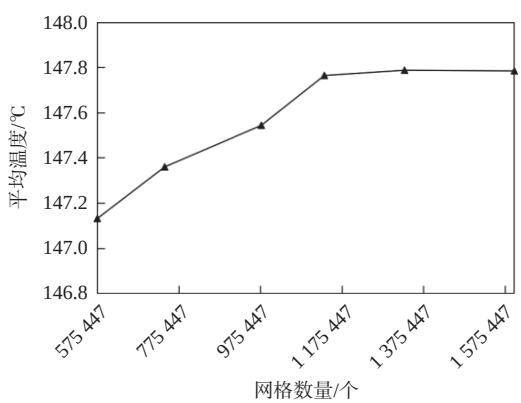


图 3 网格数量与平均温度的关系

Fig. 3 Relationship between number of grids and average temperature

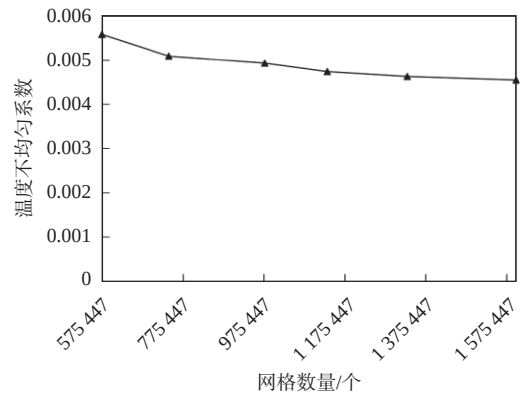
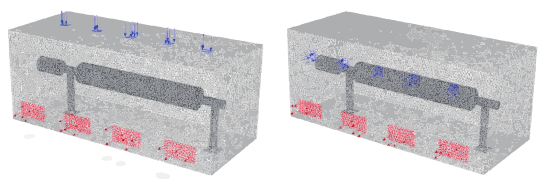


图 4 网格数量与温度不均匀系数的关系

Fig. 4 Relationship between number of grids and temperature non-uniformity coefficient



(a) 上送下回 (b) 侧送侧回

图 5 2 种固化炉网格划分模型

Fig. 5 Mesh partitioning model for two curing ovens

2.3 数学模型

2.3.1 控制方程

固化炉内设置的最大风速为 12 m/s，依据流体力学理论，对马赫数小于 0.3 的流动通常看成不可压缩流动，故可认为内部空气为不可压缩流体[25]。固化过程中，流体的流动模拟应基于 3 个最基本的守恒方程：质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程[26]。

1）质量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial (\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial (\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial (\rho w)}{\partial z}=0 \tag{6}$$

式中：u、v、w 分别为 x、y、z 方向上流体的速度分量，m/s。

2）动量守恒方程。

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho F_x-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \tag{7a}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=\rho F_y-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{7b}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=\rho F_z-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \tag{7c}$$

式中: F_x、F_y、F_z 分别为微元体在 x、y、z 方向上的体积力, N; P 为微元体上的压力, N。

3) 能量守恒方程。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vT)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wT)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{c_p}\cdot\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k}{c_p}\cdot\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{c_p}\cdot\frac{\partial T}{\partial z}\right)+S_{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中: c_p 为比热容, kJ/(kg·℃); t 为时间, s; T 为温度, ℃; k 为流体传热系数, W/(m²·K); S_{T} 为黏性耗散项, W。

2.3.2　动网格技术

在基于弹性光顺的网格变形方法中, 固化件转动时, 其周围网格的每个边被看作一个弹簧单元随固化件转动作微小变形。利用胡克定律, 作用于网格节点 i 上的力 F_i 可以写为[27]

$$F_i=\sum_{j=1}^{n_i}K_{ij}\left(\Delta x_j-\Delta x_i\right) \tag{9}$$

式中: n_i 为连接于网格节点 i 的相邻节点数量; K_{ij} 为网格节点 i 与相邻节点 j 之间的弹性系数, N/m; Δx_i 和 Δx_j 分别为网格节点 i 与相邻节点 j 的位移距离, m。

$$K_{ij}=1/I_{ij} \tag{10}$$

式中: I_{ij} 为节点 i 与节点 j 的边长。

2.3.3　模型假设

综合考虑复合材料固化炉结构特点及热风循环固化原理, 为便于模型求解, 作出以下假设:

1) 将固化炉内部的流体视为不可压缩气体。

2) 固化炉外壁面会向外界传递热量, 壁面不可认为是绝热壁面, 由 1.2 节计算结果, 可将壁面设为固定壁面。

3) 由于本文固化炉采用对流传热的加热方式, 换热过程仅考虑对流换热, 不考虑辐射换热的影响。

4) 台车和固化件质量相较于整个固化炉和炉内加热空气的质量很小, 对固化室内温度场影响相对较小, 将固化件和台车壁面设为绝热壁面。

2.4　边界条件及求解器设置

本文研究的流体为不可压缩流体, 已知进口尺寸和流体速度, 故采用速度进口边界条件, 出口边界条件设定为压力出口边界条件。将出口压力设定为 0 Pa。壁面热边界条件设置为固定温度壁面。选用 Pressure-Based 压力求解器求解。同时, 为提高计算精确性, 选用二阶迎风格式计算动量方程, 计算湍流模型选择标准 k-ε 模型。

2.5　固化炉流场均匀性评价指标

为判断固化炉内部流场的优劣, 本文以平均速度 $\bar{v}$ 及平均温度 $\bar{t}$ 为评价指标, 且固化炉内温度均匀度应满足≤±3 ℃ 的设计要求。同时以速度不均匀系数 K_v、温度不均匀系数 K_t 分别作为炉内速度场均匀性和温度场均匀性的评价指标[28]。不均匀系数值越小, 表明固化炉内流场均匀性越好。

均方差根:

$$\begin{cases}\sigma_t=\sqrt{\dfrac{\sum\left(t_i-\bar{t}\right)^2}{n}}\\ \sigma_v=\sqrt{\dfrac{\sum\left(v_i-\bar{v}\right)^2}{n}}\end{cases} \tag{11}$$

不均匀系数:

$$\begin{cases}K_t=\sigma_t/\bar{t}\\ K_v=\sigma_v/\bar{v}\end{cases} \tag{12}$$

式中: K_v 为速度不均匀系数; σ_v 为速度的均方根差; $\bar{v}$ 为平均速度, m/s; K_t 为温度不均匀系数; σ_t 为温度的均方根差; $\bar{t}$ 为平均温度, ℃。

3　送风方案设计仿真及试验验证

3.1　不同送风方式对流场的影响

在保证进出风口尺寸一致的情况下, 选择送风口数量为 5, 送风角度为 0°, 送风速度为 12 m/s, 送风温度为 150 ℃, 同时设置固化件旋转速度为 5 rad/s, 对上送下回和侧送侧回 2 种送风方式进行仿真模拟。

截取 x=5.7 m 处的速度、温度云图和流线图。该截面位于中部区域, 同时包含送风口和出风口, 能更好地观测 2 种送风方式的流场分布, 具有较好的代表性。分析图 6 和图 7 可知, 上送下回送风方式, 顶部输送出速度较高的射流, 经固化件后, 射流沿固化件向两侧扩散, 在固化件周围形成高速区, 流速多集中在 7.2～9.6 m/s, 有利于热交换的进行; 侧送侧回送风方式, 从送风口输出的速度较高射流, 在触碰到箱体壁面后速度迅速衰减, 固化件周围空间流速几乎为零, 不利于热交换, 且回风效果较差, 在截面中出现了 2 个涡旋区域, 相较于上送下回流线更混乱, 射流无法均匀流过固化件表面, 影响换热效果。分析图 8 可知, 2 种送风方式的温

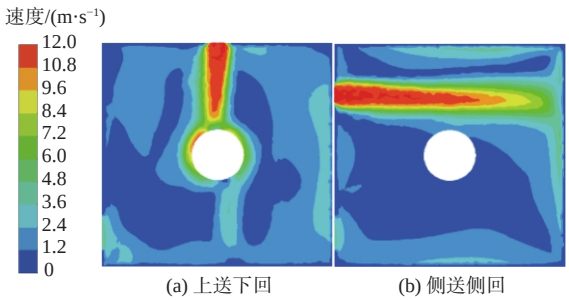


图 6 2 种不同送风方式在 x=5.7 m 截面处的速度云图

Fig. 6 Velocity cloud map of two different air supply methods at x=5.7 m section

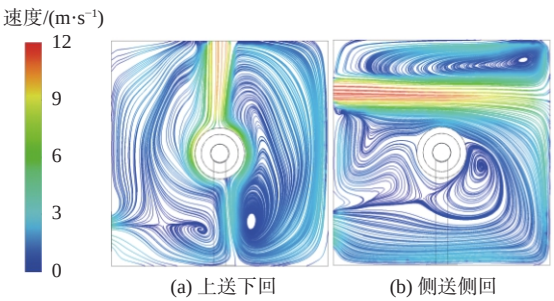


图 7 2 种不同送风方式在 x=5.7 m 截面处的流线图

Fig. 7 Flow line diagram of two different air supply methods at x =5.7 m section

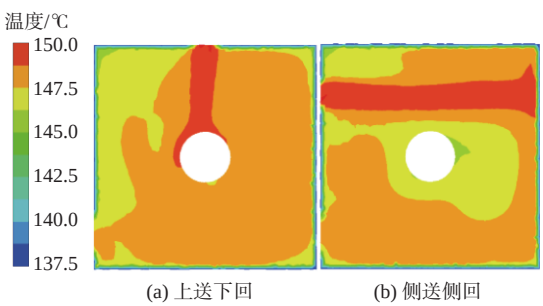


图 8 2 种不同送风方式在 x=5.7 m 截面处的温度云图

Fig. 8 Temperature cloud map of two different air supply methods at x=5.7 m section

度场和速度场的分布情况基本吻合。上送下回送风方式中，147.5 ℃ 以上区域相较于侧送侧回送风方式的分布更广，固化件周围温度分布更加均匀，且 147.5 ℃ 以上温区集中于固化件周围。侧送侧回送风方式的温度分布云图呈“C”字型分布，但其中心区域温度基本分布在 146.3～147.5 ℃，且有 145 ℃ 以下温区，温度相对较低，不利于固化。

固化件所在的区域位于箱体竖直方向上 1～3 m 处，在 y 方向上 1～3 m 等距选取 5 个流场区域截面作为监测面，记录各个面的速度、温度及不均匀系数。每个截面各设置 100 个监测点，这 100 个监测点的分布情况是：在监测面的 x 方向上等距离设置 10 行，在监测面 z 方向上等距离设置 10 列。具体分布情况如图 9 所示。后续固化炉内部速度场和温度场的仿真监测面的选取方法与此相同。

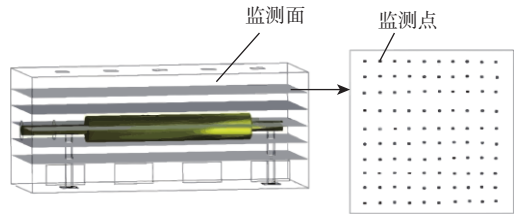


图 9 监测面及监测点分布

Fig. 9 Distribution of monitoring surface and monitoring points

由图 10 可知，对比 2 种送风方式的平均速度和速度不均匀系数，上送下回送风方式在 1～3 m 截面上平均速度波动小于 0.7 m/s，侧送侧回送风方式的速度不均匀系数整体低于上送下回送风方式。在固化炉中心区域，上送下回送风方式的平均速度高于侧送侧回送风方式，有利于对流换热的进行；并且在 1 m 截面所处的回风口高度处，上送下回送风方式的空气流速大于侧送侧回送风方式，有利于炉内气体循环。

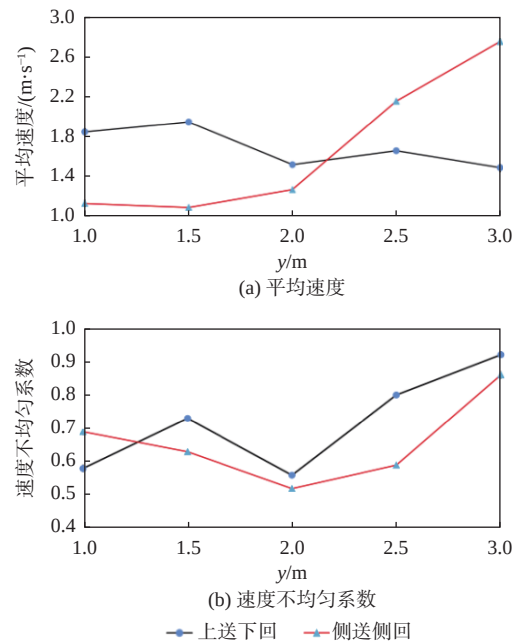
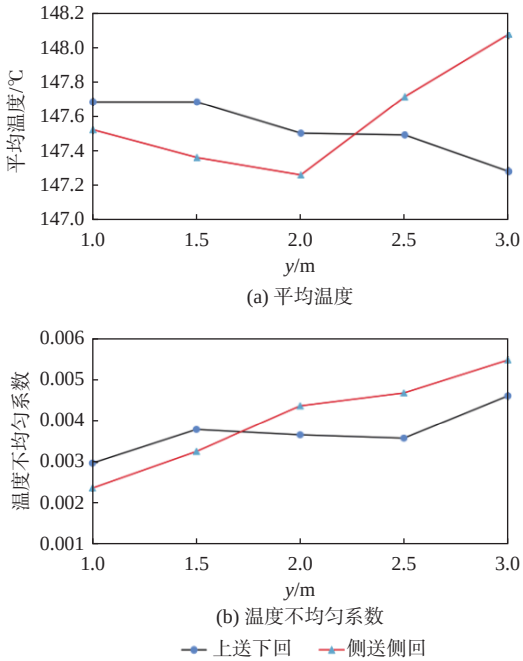


图 10 不同送风方式下平均速度及速度不均匀系数分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of average velocity and velocity non-uniformity coefficient under different air supply methods

由图 11 可知，对比 2 种送风方式的平均温度及温度不均匀系数，上送下回送风方式在 1～3 m 截面上平均温度分布在 147.2～147.8 ℃ 内，最大温差小于 0.6 ℃，满足温度均匀度≤±3 ℃ 的设计要求；同时，上送下回送风方式的温度不均匀系数整体低于侧送侧回送风方式，说明上送下回送风方式的温度均匀性要优于侧送侧回送风方式。



(a) 平均温度

(b) 温度不均匀系数

图 11　不同送风方式下平均温度及温度不均匀系数分布曲线

Fig. 11　Distribution curves of average temperature and temperature non-uniformity coefficient under different air supply methods

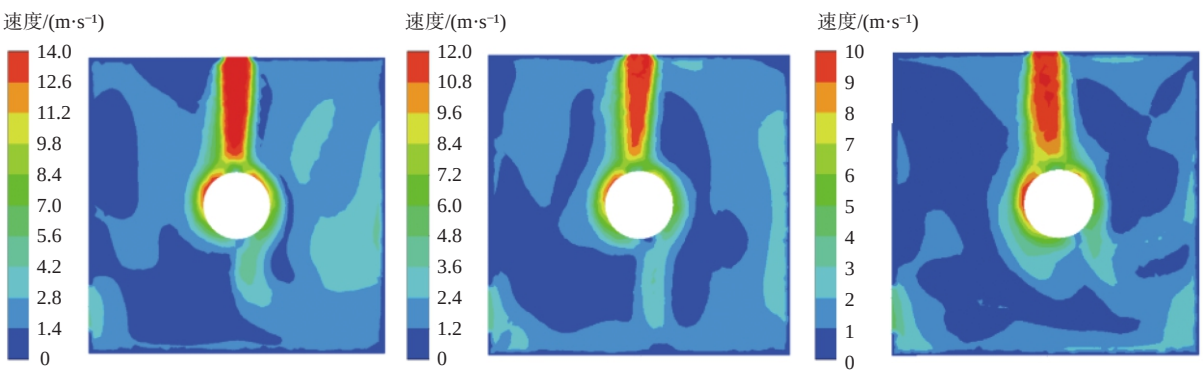
综合以上分析，上送下回送风方式速度场和温度场的表现要优于侧送侧回送风方式，后续的研究将基于上送下回送风方式展开。

3.2　送风口数量对流场的影响

为探究不同送风口数量对固化炉内速度场和温度场均匀性的影响，根据设计要求及炉体尺寸，选择送风口数量为 4、5、6 时分析炉内速度场和温度场均匀性，根据送风量 43 200 m^3/h 的设计要求，送风口数量为 4、5、6 时，对应的送风速度分别为 14、12、10 m/s。同时，设定送风角度为 0°，送风温度为 150 ℃，固化件旋转速度为 5 rad/s，对固化炉内流场进行仿真，分析 x=5.7 m 截面处的速度和温度云图及流线图。

图 12 为速度云图。3 种送风口数量下的速度场分布基本一致，送风口数量为 4 时，截面平均速度为 2.5 m/s；送风口数量为 5 时，截面平均速度为 2 m/s；送风口数量为 6 时，截面平均速度为 1.7 m/s。随着送风口数量的增加，固化炉内 x=5.7 m 截面处的平均速度在逐渐缩小。从图 13 流线图可看出，随着送风口数量增加，炉内流线逐步趋于混乱，送风口数量为 6 时，炉内出现 4 个涡旋区域，流线混乱，流动不稳定性增加，不利于固化。

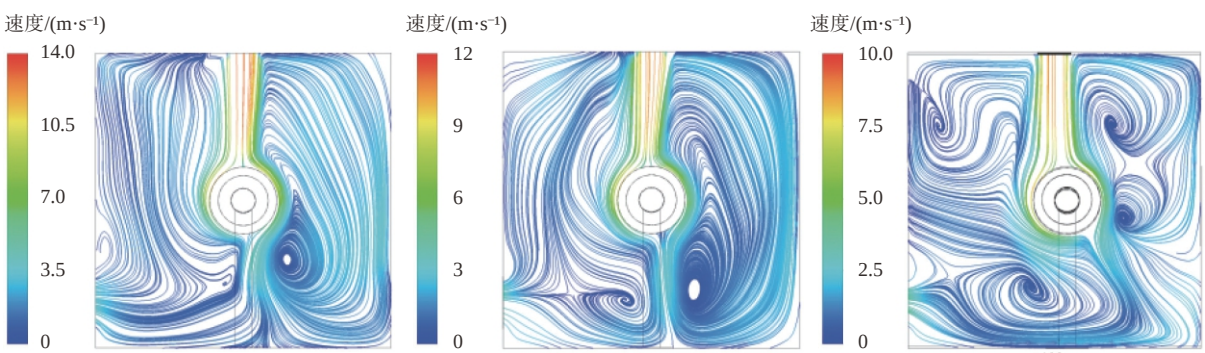
图 14 为温度云图。3 种送风口数量下温度分布基本一致，固化件周围区域温度基本在 147.5 ℃以上。送风口数量为 5 时，固化炉内温度在 147.5 ℃以上区域占截面面积的 76%，相较于送风口数量为



(a) 送风口数量为4　　(b) 送风口数量为5　　(c) 送风口数量为6

图 12　不同送风口数量在 x=5.7 m 截面处的速度云图

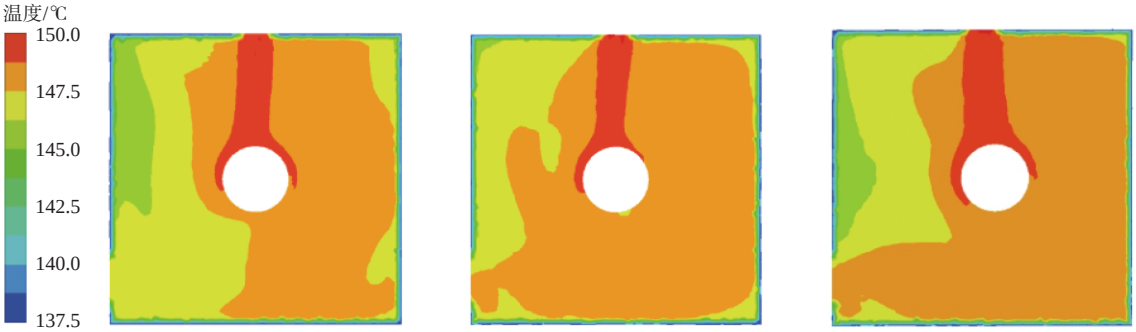
Fig. 12　Velocity cloud map of different air supply inlets at x =5.7 m section



(a) 送风口数量为4　　(b) 送风口数量为5　　(c) 送风口数量为6

图 13　不同送风口数量在 x=5.7 m 截面处的流线图

Fig. 13　Flow line diagram of different air supply inlets at x =5.7 m section



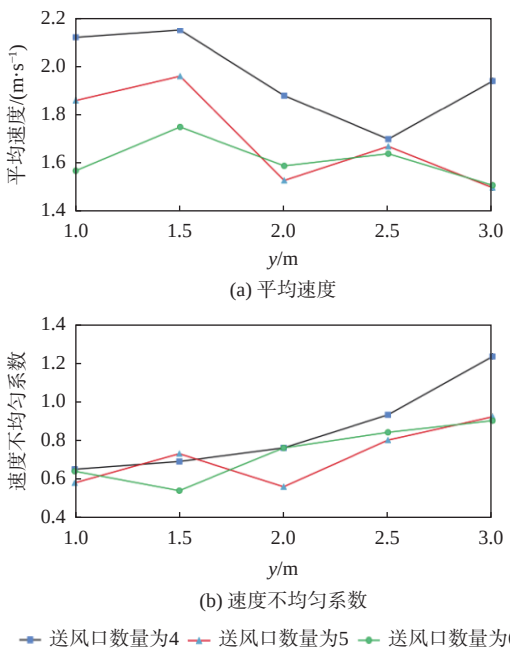
(a) 送风口数量为4 (b) 送风口数量为5 (c) 送风口数量为6

图 14 不同送风口数量在 x=5.7 m 截面处的温度云图

Fig. 14 Temperature cloud map of different air supply inlets at x =5.7 m section

4 时的 59% 和送风口数量为 6 时的 73% 更大，分布更均匀，且基本分布在固化件周围，更有利于提高固化件的固化质量。

在 y 方向上 1～3 m 等距选取 5 个截面作为监测面。由图 15 可知，随着送风口数量的增加，炉体内部空气平均速度逐步降低，送风口数量为 6 时的平均速度不超过 1.8 m/s；3 种送风口数量的速度不均匀系数变化基本一致，送风口数量为 5 的固化炉，在 y=1.5～2.5 m 时固化件周围速度不均匀系数整体最低，速度均匀性较好。



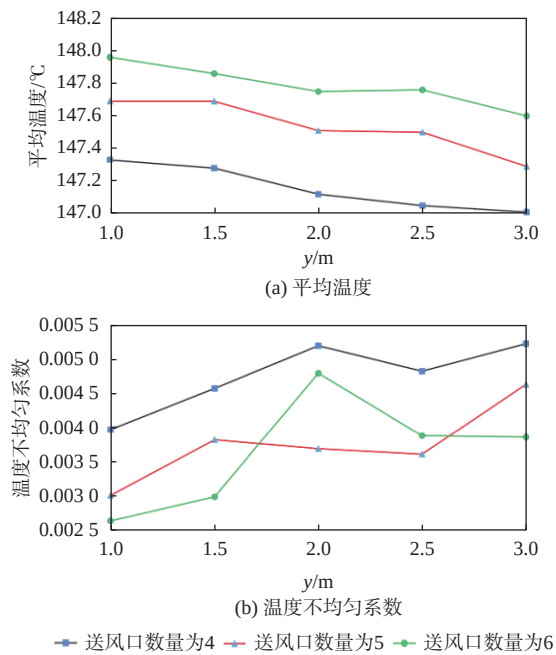
(a) 平均速度

(b) 速度不均匀系数

图 15 不同送风口数量下平均速度及速度不均匀系数分布曲线

Fig. 15 Distribution curves of average velocity and velocity non-uniformity coefficient under different number of air supply inlets

由图 16 可知，随着送风口数量的增加，固化炉内平均温度逐步升高，送风口数量为 6 时的平均温度整体最高；在温度均匀性方面，送风口数量为 4 的固化炉内温度不均匀系数最高，在 y=1.5～2.5 m 高度的固化件附近，送风口数量为 6 的固化炉整体



(a) 平均温度

(b) 温度不均匀系数

图 16 不同送风口数量下平均温度及温度不均匀系数分布曲线

Fig. 16 Distribution curves of average temperature and temperature non-uniformity coefficient under different number of air supply inlets

温度不均匀系数高于送风口数量为 5 的固化炉。

综合考虑，送风口数量为 5 时，固化炉内速度场和温度场表现更好，后续研究将基于送风口数量为 5 的固化炉进行。

3.3 试验验证

由前文的仿真模拟，研究了送风方式、送风口数量对大型复合材料固化炉速度均匀性和温度均匀性的影响，为固化炉的设计思路提供一定的参考。为验证仿真结果的可靠性，在固化炉内部加装一根固化件的情况下进行温度试验验证。根据试验测得温度数据，并与仿真结果进行对照，检验模拟仿真的准确性。

3.3.1 试验方案确立

1）在固化炉工作室内选择上、中、下 3 个水平

面，在 3 个水平面上进行布点测值。其中，上平面与工作室顶面的距离为工作室高度的 1/10，中平面通过工作室几何中心，下平面与工作室底部距离为工作室高度的 1/10。

2）工作室的容积大于 2 m^3，根据 GB/T 30435—2013[29] 的要求，共布置 13 个温度测试点，测试点位于 3 个平面上，中心测试点位于工作室几何中心，其余测试点到工作室壁面的距离为各自边长的 1/10，测试点布置位置如图 17 所示，其中，*A*，*B*，…，*M* 为温度监测点。

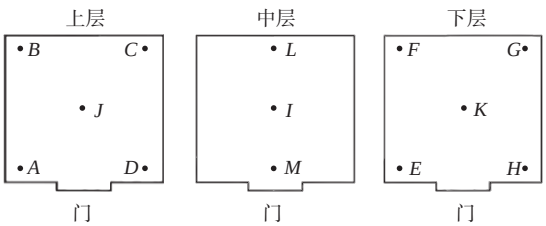


图 17　固化炉内温度传感器布点位置

Fig. 17　Location of temperature sensors in curing oven

试验数据采集系统主要由 PT100 温度传感器、KEYSIGHT 巡检仪和监控电脑组成。

考虑到实际情况，固化件位于固化室内中心位置，图中，*L*、*I*、*M* 监测点无法布置传感器，故将监测点 *L*、*I*、*M* 移动至固化件下方距固化件最低点 10 cm 处，实际温度布置如图 18 所示。

在测温点布置后，根据方案进行试验，图 19 为固化炉内传感器布点图；图 20 为固化炉外巡检仪和监控电脑图。将相关试验设备准备好后，将单根固化件通过台车运送至固化室内，以送风速度 12 m/s、送风角度 0°进行试验。根据使用要求，本次试验分为 3 组进行，分别为送风温度 80，150，220 ℃。待固化炉内温度达到规定值并稳定后，通过巡检仪，每隔 1 min 采集 1 次数据，共采集 15 组数据，记录

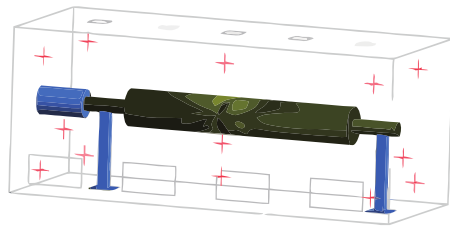


图 18　温度传感器实际布点位置

Fig. 18　Actual location of temperature sensors



图 19　固化炉内温度传感器布点

Fig. 19　Layout of temperature sensors in curing oven

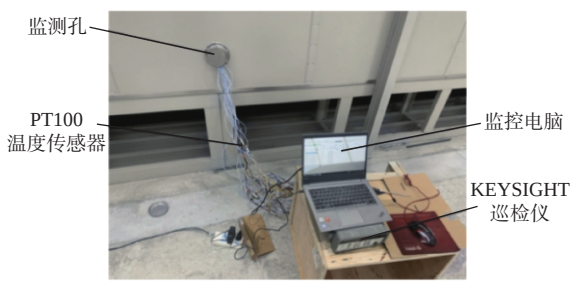


图 20　固化炉外巡检仪和监控电脑

Fig. 20　External inspection instrument and monitoring computer for curing oven

各个测量点的温度值。

3.3.2　试验结果分析

对试验和仿真分别进行测试点数据的测量，将各点测得的 30 个数据取平均值。由表 2 可知，试

表 2　固化炉温度试验值与仿真值对比

Table 2　Comparison between test and simulation values of curing oven temperature

监测点序号	试验值/℃			仿真值/℃			误差/℃		
	80 ℃	150 ℃	220 ℃	80 ℃	150 ℃	220 ℃	80 ℃	150 ℃	220 ℃
A	79.1	148.7	218.2	78.0	147.5	217.1	1.1	1.2	1.1
B	79.0	147.8	221.5	78.8	147.6	218.9	0.2	0.2	2.6
C	79.2	149.1	219.5	78.3	147.5	217.9	0.9	1.6	1.6
D	81.2	152.1	220.2	79.5	147.9	218.0	1.7	4.2	2.2
E	79.0	148.0	217.9	77.5	147.1	217.2	1.5	0.9	0.7
F	79.7	148.3	222.4	78.5	147.2	219.9	1.2	1.1	2.5
G	79.9	149.8	219.8	78.7	147.9	217.5	1.2	1.9	2.3
H	79.7	149.7	220.3	78.2	147.9	217.8	1.5	1.8	2.5
I	78.7	148.2	219.1	79.2	147.3	217.9	0.5	0.9	1.2
J	78.9	148.0	219.5	78.2	147.1	217.5	0.7	0.9	2.0
K	79.8	149.0	218.0	78.7	147.7	219.5	1.1	1.3	1.5
L	80.2	150.0	221.6	79.6	147.8	219.5	0.6	2.2	2.1
M	80.8	151.5	220.3	79.9	149.5	219.3	0.9	2.0	1.0

验值与仿真值高度吻合，最大温度误差为 4.2 ℃，误差在合理范围内，通过试验验证了仿真的准确性。同时，根据试验值与仿真值的误差可以发现，随着固化炉内温度的升高，试验值与仿真值之间误差变大，80 ℃ 时，平均误差为 1.0 ℃，150 ℃ 时，平均误差为 1.6 ℃，220 ℃ 时，平均误差为 1.8 ℃。

4 多固化件对流场影响情况仿真

4.1 固化件数量对流场的影响

前文只对单个固化件进行了仿真模拟，还需考虑多固化件时对固化炉内流场的影响。根据设计要求，保证固化件尺寸形状与前文相同，固化件数量为 3 时，研究固化件数量对炉内空气速度场和温度场的影响。设置送风口数量为 5，送风角度为 0°，送风速度为 12 m/s，送风温度为 150 ℃，同时设置固化件旋转速度为 5 rad/s，截取 x=5.7 m 截面处的速度、温度云图和流线图进行分析。

根据图 21 和图 22，单固化件时，高温空气从顶部送风口射流进入固化室，经固化件阻碍后沿着固化件两侧向下移动，固化件周围区域空气流速较高。固化件数量为 3 时，与单固化件的固化炉情况类似，但由于固化件水平摆放，固化件本身位置阻碍了回流，导致其固化件上部的固化炉内速度整体偏低，同时，固化件数量增多会扰乱流线，内部出现 4 处涡旋区域，不利于固化。

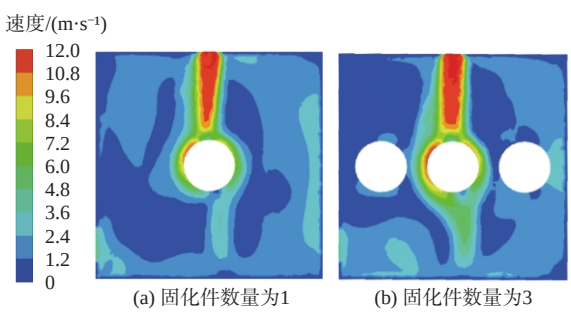


图 21 不同固化件数量在 x=5.7 m 截面处的速度云图

Fig. 21 Velocity cloud map of different cured parts quantity at x=5.7 m section

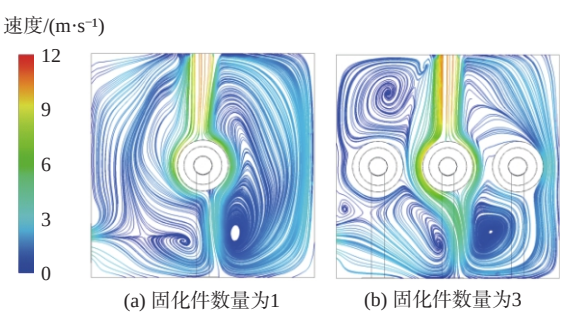


图 22 不同固化件数量在 x=5.7 m 截面处的流线图

Fig. 22 Flow line diagram of different cured parts quantity at x=5.7 m section

根据图 23，单固化件的固化炉中，147.5 ℃ 以上区域面积占截面面积的 76%，固化件周围温度分布更加均匀；固化件数量为 3 时，固化炉固化件更多，热空气难以上升，炉内以固化件为界限，下部温度较高，上部较低，147.5 ℃ 以上的空气在炉内呈倒“T”型分布，占截面面积的 45%，147.5 ℃ 以上面积比单固化件低 31%。

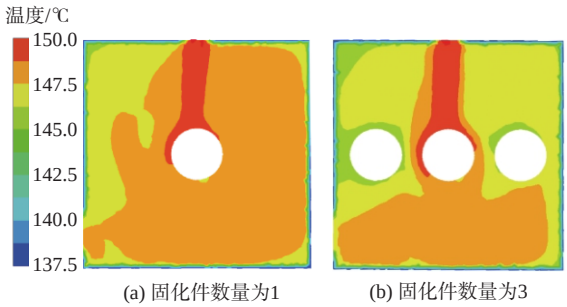


图 23 不同固化件数量在 x=5.7 m 截面处的温度云图

Fig. 23 Temperature cloud map of different cured parts quantity at x=5.7 m section

在 y 方向上 1～3 m 等距选取 5 个截面作为监测面。根据图 24(a)，总体上单固化件平均速度略高于固化件数量为 3 的平均速度。由图 24(b)，单固化件的速度不均匀系数低于固化件数量为 3 时的速度不均匀系数，单固化件时固化室内气流分布更均匀。

根据图 25(a)，对比固化件数量不同的情况，固化炉内平均温度的变化趋势基本一致，单固化件的

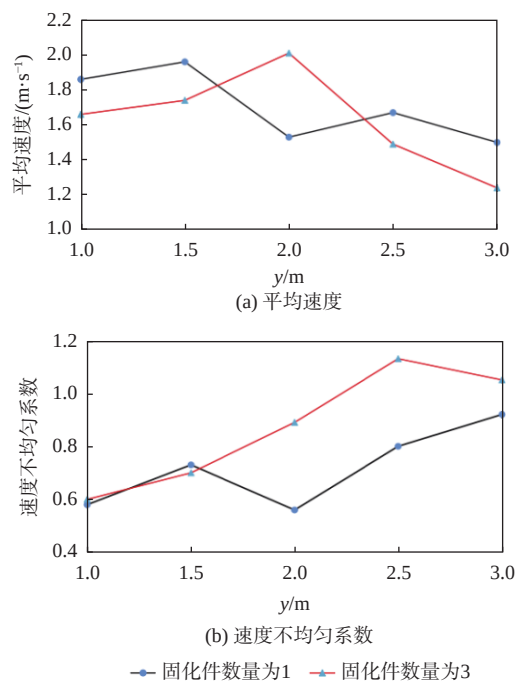
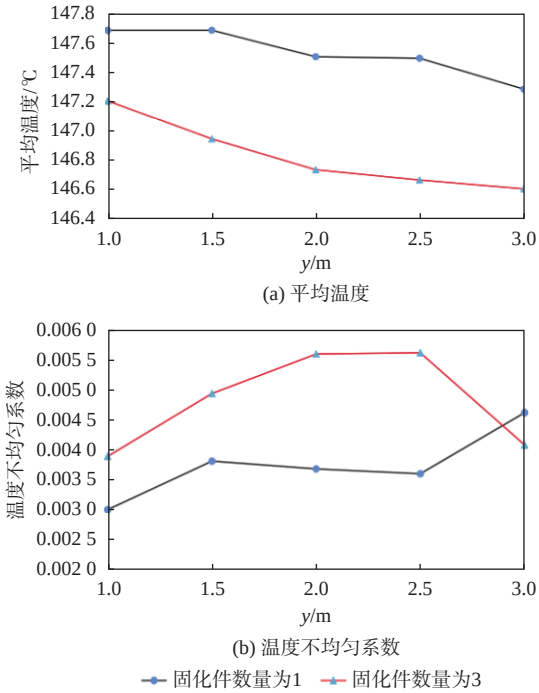


图 24 不同固化件数量下平均速度及速度不均匀系数分布曲线

Fig. 24 Distribution curves of average velocity and velocity non-uniformity coefficient under different number of cured pieces



(a) 平均温度

(b) 温度不均匀系数

图 25　不同固化件数量下平均温度及温度不均匀系数分布曲线

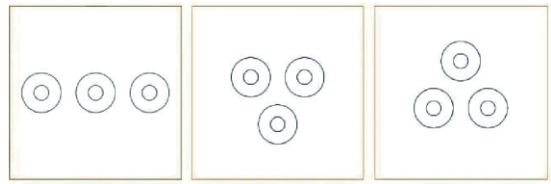
Fig. 25　Distribution curves of average temperature and temperature non-uniformity coefficient under different number of cured pieces

固化炉内平均温度在 147.3 ℃ 以上，3 固化件的固化炉内平均温度在 147.2 ℃ 以下；根据图 25(b)，单固化件的固化炉内温度不均匀系数整体低于固化件数量为 3 时的固化炉。

综合分析，随着固化件数量的增多，固化炉内部的空气流速和温度会降低，速度场和温度场均匀性会逐步减弱。

4.2　多固化件空间位置对流场的影响

由 4.1 节研究结果得出，固化件数量增加会导致固化炉内流场变差，从而影响复合材料的固化效果。为解决该问题，按要求对固化件数量为 3 时的摆放情况进行仿真，空间位置如图 26 所示，研究固化炉内固化件数量为 3 时的空间位置对炉内空气



(a) 水平布置　(b) 倒三角布置　(c) 正三角布置

图 26　3 种固化件空间位置

Fig. 26　Space positions of three types of cured parts

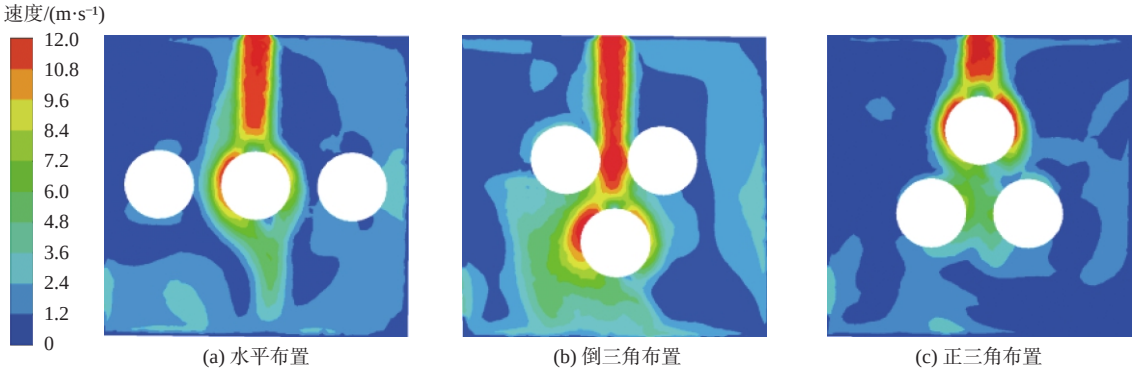
速度场和温度场的影响。设置送风口数量为 5，送风角度为 0°，送风速度为 12 m/s，送风温度为 150 ℃，同时设置固化件旋转速度为 5 rad/s，并截取 x=5.7 m 截面处的速度和温度云图进行分析。

根据图 27，固化件水平布置时，中间固化件周围区域空气流速较高，两边固化件周围的空气流速较低；固化件倒三角布置时，炉体中下部产生小片空气流速较高的区域；固化件正三角布置时，流速较高的区域主要分布于固化件区域的中上部分。造成这种现象的原因是：在固化件倒三角布置下，高温空气经进风口射流进入固化炉后只经最下方工件阻碍而造成速度衰减，而固化件正三角布置下，高温空气经进风口射流进入固化炉在经过第 1 个工件阻碍后还会受到下方 2 个工件阻碍，速度进一步衰减。

根据图 28，固化件倒三角布置时炉内流线相较于固化件水平布置时更均匀，固化件正三角布置相较于前两者流线最均匀且涡旋区域明显减少，换热效果优于前两者。

根据图 29，固化件水平布置时，固化炉内以固化件为界限，下部温度较高，上部较低；固化件倒三角布置时，下方固化件周围空气温度大于 148 ℃，上方 2 个固化件周围温度低于 147 ℃；固化件正三角布置时，147.5 ℃ 以上区域主要存在于 3 个固化件之间，整体温度分布更均匀。

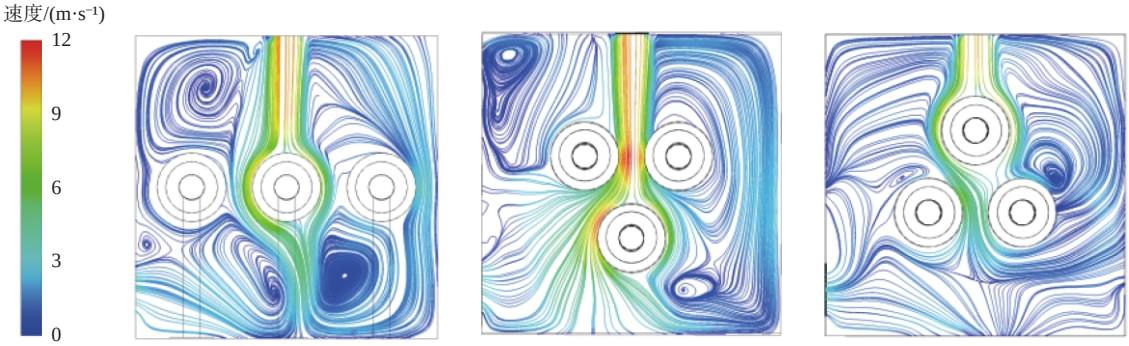
在 y 方向上 1～3 m 等距选取 5 个截面作为监测面。根据图 30(a)，固化件水平摆放时平均速度最



(a) 水平布置　(b) 倒三角布置　(c) 正三角布置

图 27　固化件不同布置方式在 x=5.7 m 截面处的速度云图

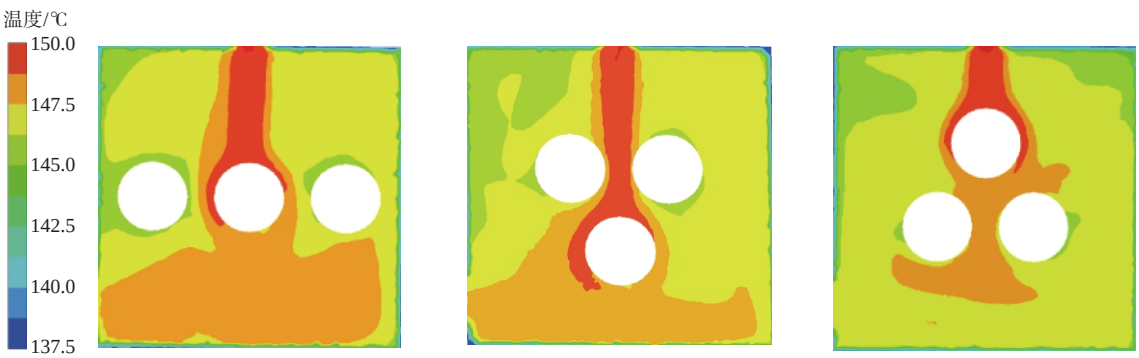
Fig. 27　Velocity cloud map of different arrangements of cured parts at x=5.7 m section



(a) 水平布置 (b) 倒三角布置 (c) 正三角布置

图 28 固化件不同布置方式在 x=5.7 m 截面处的流线图

Fig. 28 Flow line diagram of different arrangements of cured parts at x =5.7 m section



(a) 水平布置 (b) 倒三角布置 (c) 正三角布置

图 29 固化件不同布置方式在 x=5.7 m 截面处的温度云图

Fig. 29 Temperature cloud map of different arrangements of cured parts at x =5.7 m section

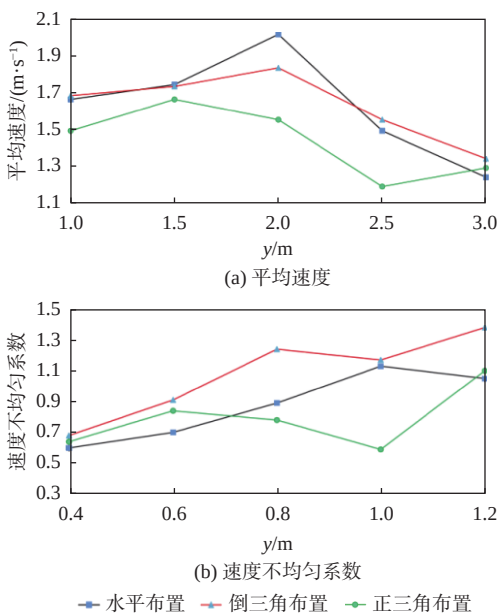


图 30 不同布置方式下平均速度及速度不均匀系数分布曲线

Fig. 30 Distribution curves of average velocity and velocity non-uniformity coefficient under different layout methods

高,固化件正三角摆放时平均速度最低;根据图 30(b),正三角摆放时固化炉内速度不均匀系数整体最低,在 y=1 m 高度上达到最低,倒三角摆放时固化炉内速度不均匀系数整体最高,水平摆放时固化炉内速度不均匀系数介于两者之间。

根据图 31(a),正三角摆放时固化炉内平均温度均在 147 ℃ 以上,在 y=2 m 高度上,温度超过水

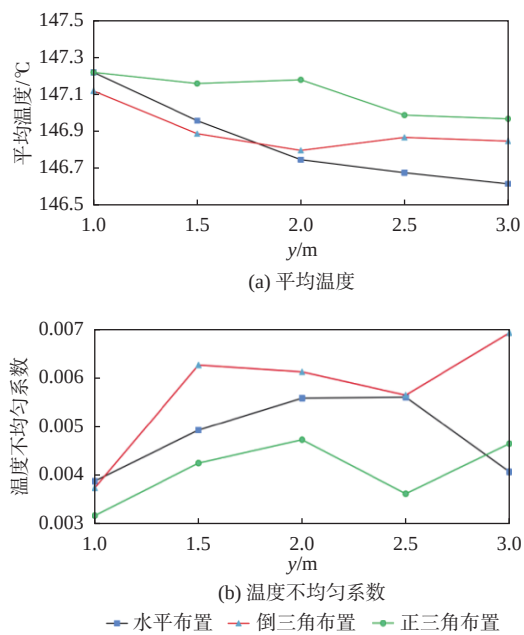


图 31 不同布置方式下平均温度及温度不均匀系数分布曲线

Fig. 31 Distribution curves of average temperature and temperature non-uniformity coefficient under different layout methods

平摆放时固化炉 0.5 ℃, 水平摆放时固化炉内在 y=2～3 m 处平均温度比倒三角摆放时固化炉低; 根据图 31(b), 固化件正三角摆放时, 固化室内部温度不均匀系数最低, 温度场更均匀, 倒三角摆放时固化炉内温度不均匀系数最高。

综合以上分析, 在 3 种固化件空间位置中, 固化件正三角摆放时, 固化炉内在速度和温度及其均匀性上整体优于其余 2 种摆放方式。说明当复合材料固化炉在多固化件固化工况下, 通过合理设置固化件在固化炉内空间摆放位置, 可以有效提高固化炉内流场环境, 进而提高复合材料固化质量。

5　结　论

本文建立了包含固化件的大型复合材料固化炉模型, 利用计算流体力学的方法探究炉内温度场和速度场的均匀性与固化炉的送风方式、送风口数量、固化件数量及空间位置之间的关系。

1) 以平均温度、平均速度、温度不均匀系数和速度不均匀系数作为评价指标, 根据仿真结果, 上送下回送风方式在速度场和温度场的表现总体优于侧送侧回送风方式; 送风口数量为 5 时, 固化炉内速度场和温度场表现更好。

2) 通过试验验证, 仿真数据和试验数据高度吻合, 最大温度误差为 4.2 ℃, 误差在合理范围内, 证明仿真结果可靠, 能够对设计工作提供参考。

3) 对 3 个固化件情况进行流场仿真, 与单固化件相比, 固化炉内速度场和温度场的表现减弱。3 个固化件空间位置不同的情况下, 正三角摆放时炉内速度场和温度场表现优异, 表明通过合理布置固化件在炉内空间位置, 可以有效提高固化炉内流场均匀性, 进而提高复合材料固化质量。

参考文献（References）

[1] 刘嘉鸣, 全东, 赵国群. 航空复合材料连接成形技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 119-142.
Liu J M, Quan D, Zhao G Q. Progress in joint forming technology of aviation composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 119-142(in Chinese).

[2] 熊健, 李志彬, 刘惠彬, 等. 航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1629-1650.
Xiong J, Li Z B, Liu H B, et al. Advances in aerospace lightweight composite shell structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1629-1650(in Chinese).

[3] 林源, 关志东. BP 神经网络预测复合材料热压罐成型均匀性[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(6): 1271-1276.
Lin Y, Guan Z D. Predicting the formation uniformity of composite autoclave by BP neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(6): 1271-1276(in Chinese).

[4] 王俊敏, 郑志镇, 陈荣创, 等. 树脂基复合材料固化过程固化度场和温度场的均匀性优化[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(4): 55-61.
Wang J M, Zheng Z Z, Chen R C, et al. Curing degree field and temperature field uniformity optimization during curing process of resin matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4): 55-61(in Chinese).

[5] 梁群, 陈书华, 冯喜平, 等. 复合材料壳体固化过程温度场数值分析[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(4): 498-502.
Liang Q, Chen S H, Feng X P, et al. Numerical study of temperature field evolution during composite case curing process[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(4): 498-502(in Chinese).

[6] 顾涛, 耿争言, 郑宇飞, 等. 大型复合材料容器旋转固化测温装置性能实验研究[J]. 纤维复合材料, 2018, 35(2): 32-35.
Gu T, Geng Z Y, Zheng Y F, et al. Investigation on performance of temperature measuring device for large composite vessel during rotational curing process[J]. Fiber Composites, 2018, 35(2): 32-35(in Chinese).

[7] 张铖, 张博明, 王永贵, 等. 复合材料结构固化温度场精化模拟[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(3): 41-46.
Zhang C, Zhang B M, Wang Y G, et al. Refined simulation on curing temperature field of composite structures[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(3): 41-46(in Chinese).

[8] 陆阳, 齐俊伟, 肖军, 等. 复合材料固化工艺的直热模具温度场均匀性分析[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2946-2955.
Lu Y, Qi J W, Xiao J, et al. Analysis on the uniformity of temperature field of direct heating mold for composite material curing process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 2946-2955(in Chinese).

[9] 龙习坤, 李树健, 陈蓉, 等. 树脂基复合材料制件微波固化数值模拟[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2415-2426.
Long X K, Li S J, Chen R, et al. Numerical simulation of microwave curing of resin matrix composites workpiece[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2415-2426(in Chinese).

[10] Uzzell J P N, Pickard L R, Hamerton I, et al. Novel cellular coil design for improved temperature uniformity in inductive heating of carbon fibre composites[J]. Materials & Design, 2024, 237: 112551.

[11] 王志奇, 邹玉洁, 刘柏希, 等. 热风循环隧道烘箱的流场模拟及结构优化[J]. 过程工程学报, 2020, 20(5): 531-539.
Wang Z Q, Zou Y J, Liu B X, et al. Flow field simulation and structure optimization of hot air circulation tunnel oven[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(5): 531-539(in Chinese).

[12] 李萍, 王乃帅, 潘再勇, 等. 内置均流板箱式热处理炉流场与温度场仿真优化[J]. 热处理技术与装备, 2023, 44(2): 47-53.
Li P, Wang N S, Pan Z Y, et al. Numerical simulation optimization of flow and temperature field of box-type heat treatment furnace with built-in flow equalizing plate[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2023, 44(2): 47-53(in Chinese).

[13] Li H, Niu X X, Chai J J, et al. Optimization of hot air drying process for tiger nut and analysis of fatty acid composition of tiger nut oil[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(6): 228-236.

[14] 高经诚, 陈维建, 胡万俊, 等. 民用飞机客舱 CO_2 分布特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(9): 2510-2517.
Gao J C, Chen W J, Hu W J, et al. Analysis of CO_2 distribution characteristics in cabin of civil aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(9): 2510-2517(in

Chinese).

[15] 张学峰, 贾力伟. 复合材料固化设备的温度场数值模拟与结构优化[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告 (第七卷)——中国核学会 2021 年学术年会论文集第 4 册 (同位素分离分卷). 天津: 核工业理化工程研究院, 2021: 7.
Zhang X F, Jia L W. Numerical simulation of temperature field and structural optimization of composite material curing equipment [C]//Chinese Nuclear Society. Progress Report on Nuclear Science and Technology in China (Volume 7) - Proceedings of the 2021 Academic Annual Meeting of the Chinese Nuclear Society, Volume 4 (Isotope Separation Volume). Tianjin: Institute of Physical and Chemical Engineering in the Nuclear Industry, 2021: 7(in Chinese).

[16] Shi M Y, Zhang Y, Wang Y F, et al. Flow field analysis and design optimisation of Tibetan medicine double heat pump drying room[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107141.

[17] 孟添, 张继业, 李田. 卧铺动车组客室温度场数值模拟及优化[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 17-22.
Meng T, Zhang J Y, Li T. Numerical simulation and optimization for the temperature field of the coach in the sleeping EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 17-22(in Chinese).

[18] 蔡路, 张继业, 李田. 双层客车通风模拟与送风均匀性优化[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 129-137.
Cai L, Zhang J Y, Li T. Ventilation simulation and uniformity optimization of air supply for double-deck passenger cars[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 129-137(in Chinese).

[19] 王垒, 袁端鹏, 郝留成, 等. 烘箱结构对绝缘子固化过程温度场分布的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2748-2757.
Wang L, Yuan D P, Hao L C, et al. Effect of oven structure on insulator temperature field distribution during curing process[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2748-2757(in Chinese).

[20] 雷雯雯. 汽车零部件烘房流场设计及仿真[D]. 北京: 北京林业大学, 2022: 14.
Lei W W. Flow field design and simulation of auto parts drying room[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022: 14(in Chinese).

[21] 于春放, 靖洪淼, 张记涛, 等. 不同雷诺数下 4∶1 圆角矩形柱气动力特性及流场数值模拟研究[J]. 工程力学, 2024, 41(增刊 1): 332-338.
Yu C F, Jing H M, Zhang J T, et al. LES study on aerodynamic characteristics and flow field of a 4∶1 rectangular cylinder with different Reynolds numbers[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(Sup 1): 332-338(in Chinese).

[22] 陈云霞, 刘王佳. 考虑喷油润滑的附件机匣温度场分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1171-1176.
Chen Y X, Liu W J. Accessory gearbox temperature field analysis considering fuel injection lubrication[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(7): 1171-1176(in Chinese).

[23] Gui X L, Luo X B, Wang X P, et al. Computational fluid dynamic (CFD) investigation of thermal uniformity in a thermal cycling based calibration chamber for MEMS[J]. Heat and Mass Transfer, 2015, 51(12): 1705-1715.

[24] 胡燕飞. 高低温环境试验箱体的结构设计与内部流场分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2016: 34.
Hu Y F. Structural design and flow field analysis on high-low temperature environment test chamber[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016: 34(in Chinese) .

[25] 蔡建程, 谢新俊, Mochalin I, 等. 管道不可压缩流动压力脉动 (伪声) 的数值研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 10-17.
Cai J C, Xie X J, Mochalin I, et al. Numerical study on the hydraulic pressure fluctuations (pseudo-sound) of incompressible flows in pipes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(14): 10-17(in Chinese).

[26] 陈忠加, 卢丰源, 雷雯雯, 等. 基于强迫对流的热风干燥烘房送风速度及温度优选[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊 1): 37-46.
Chen Z J, Lu F Y, Lei W W, et al. Air supply velocity and temperature optimization of hot air drying room based on forced convection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(Sup 1): 37-46(in Chinese).

[27] 江帆, 陈维平, 王一军, 等. 基于动网格的离心泵内部流场数值模拟[J]. 流体机械, 2007, 35(7): 20-24.
Jiang F, Chen W P, Wang Y J, et al. Numerical simulation of flow field inside of centrifugal pump based on dynamics mesh[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(7): 20-24(in Chinese).

[28] 陈忠加, 雷雯雯, 王青春. 基于温度和速度均匀性的侧送风烘房设计及仿真[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 18-26.
Chen Z J, Lei W W, Wang Q C. Design and simulation of side air supply drying room based on temperature and velocity homogeneity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 18-26(in Chinese).

[29] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电热干燥箱及电热鼓风干燥箱: GB/T 30435—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 3-6.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electric gravity convection and forced ventilation ovens: GB/T 30435—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014: 3-6(in Chinese) .

Design and simulation of large composite material curing oven based on flow field uniformity

WANG Dequan，ZHAO Yuxuan，YUAN Xiangyue，WANG Qingchun，CHEN Zhongjia*

(School of Technology，Beijing Forestry University，Beijing 100083，China)

Abstract：The uniformity of the flow field inside a large composite material curing oven directly affects the curing quality of thermosetting resin composite parts. To improve the curing effect within the curing oven, this paper establishes a model of a large composite material curing oven including cured parts, based on computational fluid dynamics (CFD) theory. The simulation study focuses on how the curing oven's internal flow field is affected by the air supply method, the number of air supply inlets, the number of cured pieces, and their spatial layout within the oven. The results indicate that the top supply and bottom return air supply method generally outperforms the side supply and side return air supply method in terms of velocity field uniformity and temperature field uniformity. When the number of air supply inlets is 5, the velocity field and temperature field within the curing oven exhibit better performance. As the number of cured parts increases, the air velocity and temperature inside the curing oven decrease, and the uniformity of the velocity field and temperature field will weaken. The temperature field and velocity field inside the curing oven operate exceptionally well when the cured pieces are positioned in a "triangular" pattern. The experimental results show that the maximum temperature error between simulation data and experimental data is 4.2 ℃, which is within a reasonable range. This proves that the simulation results are reliable and can provide a reference for design work.

Keywords：curing oven；flow field design；temperature field uniformity；velocity field uniformity；computational fluid dynamics

Received：2024-05-30；**Accepted**：2024-08-01；**Published Online**：2024-08-27 16：31

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240827.1046.001

Foundation item：National Natural Science Foundation of China (51475255)

* **Corresponding author**. E-mail：chenzhongjia@bjfu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0369

基于 SVM 与 K-means 的多层级雷达信号开集识别

翁雪慧，汪晓锋*，应鹏，刘重安，周芳，全大英
(中国计量大学 信息工程学院，杭州 310018)

摘 要：针对常见雷达信号调制识别方法在真实场景中难以有效识别未知调制信号的问题，提出一种基于支持向量机 (SVM) 预训练和 K-means 聚类的多层级雷达信号开集识别方法。通过将雷达信号进行多重同步压缩 (MSST) 时频变换后，利用小波变换 (DWT) 对预处理后的时频图像进行特征提取。在训练阶段，利用已知雷达信号数据来训练一个 SVM 分类器。在测试阶段，利用该分类器来划分已知调制方式和未知调制方式，并完成已知雷达信号的闭集识别。对未知类信号则利用 K-means 进行聚类分析，将未知调制方式进一步划分到不同类别，以扩展雷达信号调制方式的识别范围。实验结果表明：所提方法在信噪比 (SNR) 为−4 dB 时对已知信号和未知信号的识别准确率均达到 90% 以上，实现了对未知调制方式的有效识别。

关 键 词：雷达信号识别；多重同步压缩；小波变换；开集识别；K-means 聚类
中图分类号：V221+.3; TB553
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2554-09

雷达信号调制识别是电子侦察系统的重要组成部分，在民用和军事应用中发挥着至关重要的作用。雷达信号调制识别技术广泛应用于电子侦察、空间探测、通信和安全监测等众多领域[1]。雷达信号识别技术通过对雷达信号进行自动地分类和识别，有助于判断信号源的特征、位置和意图，从而有效支持进一步的决策与行动，因此，雷达信号调制识别已成为雷达对抗领域的研究热点[2-3]。随着电磁环境的日益复杂化，在实际雷达对抗场景中存在着多种多样的雷达信号，且相互混叠[4-5]，同时新体制雷达信号和新型信号调制方式不断涌现。传统雷达信号调制识别方法通常利用信号的脉间参数[6-8]，即载频、脉冲宽度、功率、到达时间和到达角，通过既定规则和模板进行信号识别。在当前复杂的电磁环境下，传统的调制识别方法面临着前所未有的挑战。由于电磁信号种类日益增多和调制方式的复杂化，这些传统方法已无法适应这种快速变化的应用场景。

随着计算机视觉和深度学习技术的发展，国内外众多学者尝试利用图像处理技术从时频分布图中提取丰富的脉内调制特征用于雷达信号识别，并取得了大量研究成果[9-13]。文献 [13] 提出了一种基于 AlexNet 模型的雷达信号脉调制类型识别方法，该方法将基于雷达信号的时频图像和卷积神经网络相结合，实现低信噪比下有效提取图像各类特征进行分类识别。文献 [14] 提出了一种基于时频特征提取和残差神经网络的雷达信号识别方法。该方法使用分数阶傅里叶变换对信号进行 Chirp 基分解，按照 Chirp 基载频与调频率的不同组合对信号划分类别，然后，通过信号的伪 Wigner-Ville 时频分布提取 Zernike 矩，最后，将特征矢量送入残差神经网络分类器进行雷达信号识别。当信噪比为 −2 dB 时该方法识别准确率平均可达到 93%。然而，现有雷达信号识别方法主要针对特定种类调制方式进行闭集识别[11-16]，即对已知调制类型信号进行分类识别，当面对未知雷达信号时这种方式将

收稿日期：2024-05-30；**录用日期**：2025-03-21；**网络出版时间**：2025-04-14 11:03
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250414.1037.002
基金项目：国家自然科学基金 (62261014)
* **通信作者**. E-mail：xfwang@cjlu.edu.cn

引用格式：翁雪慧，汪晓锋，应鹏，等. 基于 SVM 与 K-means 的多层级雷达信号开集识别 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2554-2562.
Weng X H，Wang X F，Ying P，et al. Multi-level radar signal open-set recognition based on SVM and K-means [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2554-2562（in Chinese）.

会导致错误的分类。因此, 传统闭集分类方法具有明显的局限性, 已难以满足实际应用需求。因此, 雷达信号开集识别成为当前亟待解决的重要问题。

雷达信号开集识别旨在对接收的信号进行分类与识别, 这包括对已知和未知雷达信号类型的辨识[17-18]。其核心挑战在于对未知信号的有效识别, 这些信号可能具有未预见的特征或调制方式。文献 [17] 提出了一种基于生成对抗网络的雷达信号调制开集识别模型, 其通过一维数据的重构判别网络模型, 对每一种已知的信号调制方式都生成一种对抗网络, 重构网络和对抗网络相辅相成, 能够最大化准确识别信号的调制类型。但该方法只适用于小样本的信号识别, 当已知的调试方式数目增加时, 所需生成的对抗网络数量增加, 系统的工作量也随之增大而导致效率较低。文献 [18] 提出了一种基于粒子群优化的具有噪声的密度聚类算法和半监督条件生成对抗网络的单脉冲未知雷达信号处理方法。文献 [19] 提出了一种数据重建和极值理论生成对抗网络模型 (reconstructed data and extreme value theory GAN, RE-GAN), 通过建立信号间的激活矢量集来区分不同调制信号, 该方法在−4 dB 下能达到 75% 的识别准确率。尽管如此, 上述方法在低信噪比条件下对未知信号的识别准确率仍有待提高。同时, 随着电子对抗愈来愈激烈, 仅仅把未知类别信号从已知类别里面分离出来已经无法满足当前需求。

因此, 本文提出了一种基于支持向量机 (support vector machine, SVM) 和 K-means 聚类的多层级雷达信号开集识别方法。该方法采用多重同步压缩 (multi-synchrosqueezing transform, MSST) 技术获得的信号时频域图像作为输入, 通过一定的置信度阈值将已知类和未知类信号分离, 并使用 SVM 对已知类信号进行闭集识别、分类, 未知类信号则将通过 K-means 聚类方法进行聚类, 然后将聚类算法输出的簇拓展到雷达样本库中, 实现雷达信号的开集识别。本文采用 10 种典型的雷达信号进行仿真测试, 对实验结果的分析可知, 在−4 dB 的信噪比下已知信号和未知信号的识别准确率均达到 90% 以上, 且能很好地将未知类信号区分开, 证明了该方法的有效性。

1　雷达信号开集识别

为实现更有效地雷达信号开集识别, 本文提出了一种基于 SVM 和 K-means 聚类的多层级雷达开集识别方法。首先, 该方法对已知雷达信号进行 MSST 时频变换和一系列预处理操作, 依次为灰度化、维纳滤波、形态学梯度、双三插值; 其次, 采用小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 技术对处理后的信号进行特征提取; 然后, 利用已知类型的雷达信号训练 SVM 分类模型, 得到预训练的 SVM 分类器。待识别信号在经过时频变换、图像预处理、特征提取后经预训练的 SVM 分类器进行识别与判决, 置信度高于阈值的归类为已知信号中的类别, 置信度低于阈值的则判为未知信号。最后, 再对未知信号使用 K-Means 方法进行无监督聚类, 从而完成雷达信号开集识别任务。利用该方法获得的聚类结果, 可以进一步扩大已知雷达信号的识别范围。本文方法的整体过程如图 1 所示, 其主要包括 MSST 时频变换、时频图像预处理、DWT 特征提取及开集识别 4 个部分。下面将对各部分进行详细描述。

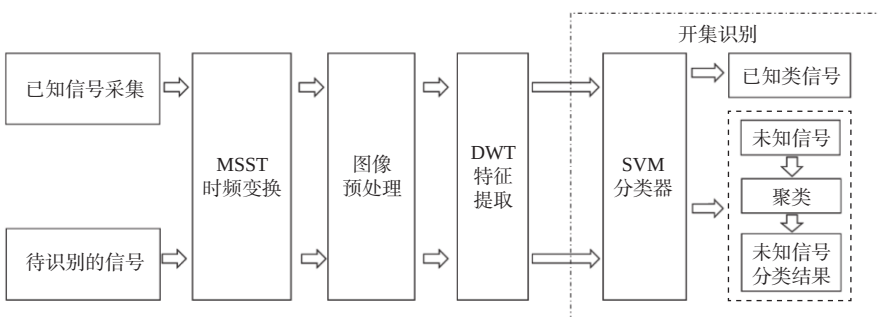


图 1　本文方法整体流程图

Fig. 1　Overall process of the proposed method

1.1　MSST 时频变换

MSST 变换作为时频信号处理领域中一种经典时频重排算法, 其通过迭代重分配技术对信号的时频分量能量分布进行多次同步压缩变换短时傅里叶变换 (short-time Fourier transform, STFT), 以提高非稳态信号时频分布中特征信号分量的能量集中度。而且, 相比崔-威廉斯分布 (Choi-Williams distribution, CWD) 和经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 时频分析方法有效减少了交叉项和模态混叠造成的影响, 因此, 在时频分析中

具有一定优势[1,18,20-22]。下面简要介绍 STFT 和 MSST 时频变换。

设雷达信号为 $s(t)$, 对应信号模型为

$$s(t)=A(t)R(t,T)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi(f,t)}+v(t) \tag{1}$$

式中: $A(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别为信号的幅度和相位; $R(t,T)$ 为矩形函数, T 为脉冲宽度; $v(t)$ 表示均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯白噪声。

信号 STFT 和时频图同步压缩表达式[23-24] 分别为

$$G(t,w)=\int_{-\infty}^{+\infty}g(u-t)s(u)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}w(u-t)}\mathrm{d}u \tag{2}$$

$$T_s(t,\eta)=\int_{-\infty}^{+\infty}G(t,w)\delta(\eta-\hat{w}(t,w))\mathrm{d}w \tag{3}$$

式中: $G(t,w)$为雷达信号 $s(u)$的 s 变换; $\delta(\eta-\hat{w}(t,w))$ 表示脉冲函数。通过对$G(t,w)$进行同步压缩实现对 STFT 时频谱在频率方向的压缩, 提高信号能量的聚集性。然后再对时频图进行 MSST 迭代变换:

$$T_s^{[N]}(t,\eta)=\int_{-\infty}^{+\infty}G(t,w)\delta\left(\eta-\hat{w}^{[N]}(t,w)\right)\mathrm{d}w \tag{4}$$

$$\hat{w}^{[N]}(t,w)=\varphi'(t)+\left(\frac{\varphi''(t)^2}{1+\varphi''(t)^2}\right)^N(w-\varphi'(t)) \tag{5}$$

式中: $N(N\geqslant 2)$为迭代次数, $\varphi'(t)$为 $s(t)$的瞬时相位 $\varphi(t)$的一阶导数。由式 (4) 迭代过程可知, 经N重 SST 迭代变换, 信号时频谱能量很大程度集中在中心频率附近, 最终实现信号瞬时频率的有效压缩。本文实验所采用的部分典型雷达信号 MSST 时频变换图像如图 2 所示, 横坐标是时间维度, 反映了信号随时间的变化过程; 纵坐标是频率维度, 是信号在不同时刻的频率值。

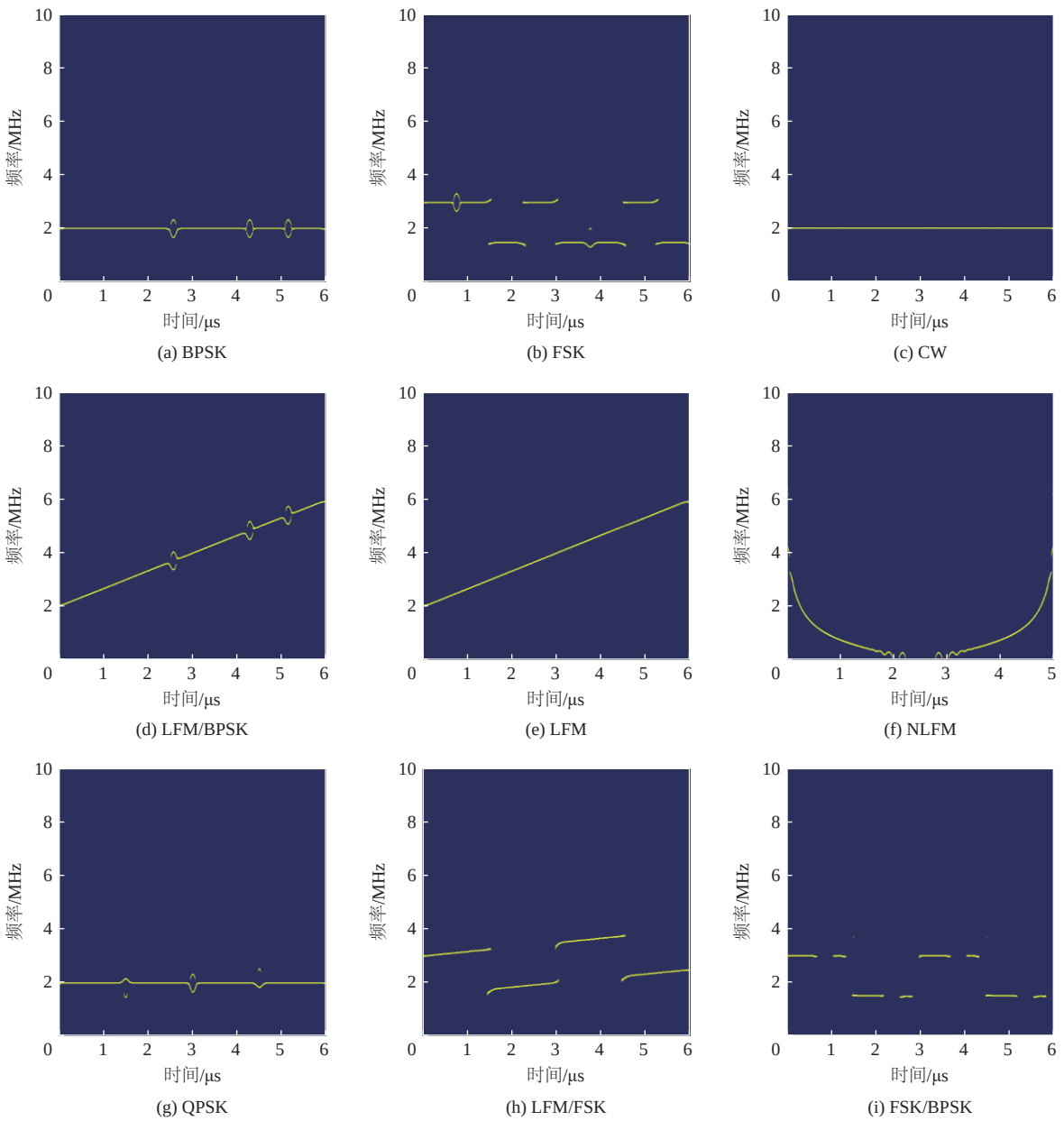


图 2 多种典型雷达信号 MSST 时频图

Fig. 2 MSST time-frequency images of multiple typical radar signals

1.2　时频图像预处理

为更好降低时频图中的噪声干扰进而提取时频图像的有效特征, 对 MSST 所得时频图像进行一系列预处理操作。流程如图 3 所示, 具体操作过程描述如下: 为降低预处理过程的计算量, 提高信息处理效率, 对像素尺寸为 656 像素×875 像素的原始图像进行裁剪和灰度化处理, 得到像素尺寸为 535 像素×679 像素的灰度图; 利用维纳滤波抑制灰度图中噪声, 提高信号的平滑度; 通过形态学梯度处理提升时频图像质量, 使得图像能凸显信号轮廓而且保留更多的细节; 再利用双三插值降低图像矩阵数量来降低后续操作的运算复杂度, 最终得到像素尺寸为 224 像素×224 像素的图像。

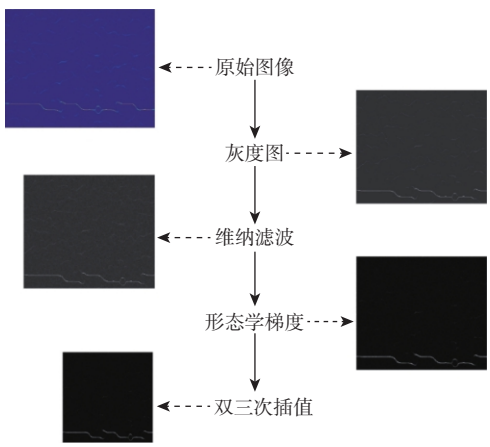


图 3　时频图像预处理

Fig. 3　Time-frequency image preprocessing

1.3　DWT 特征提取

本文选择基于 DWT 对预处理后的图像进行特征提取。DWT 旨在从原始数据中提取有意义的特征来减少数据的维度, 并捕捉到数据的结构和模式, 以便于后续的识别任务。原始信号一般可大致分为低频部分和高频部分。在小波变换中, 原始信号可分别通过高通滤波器和低通滤波器可得到 2 种不同的信号特征, 高通滤波器抑制了原始信号中的低频部分, 而低通滤波器抑制了高频部分同时保留低频特征。低通和高通部分的近似小波系数计算如下:

$$A_\alpha = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(2n-k)g(k) \tag{6}$$

$$D_\alpha = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(2n-k)h(k) \tag{7}$$

式中: $x(n)$为输入的雷达信号; $g(n)$为低通滤波器; $h(n)$为高通滤波器; A和D分别为近似小波系数和细节小波系数[25-30], 其中, 细节小波系数包括水平、垂直、对角细节小波系数。小波基函数选用 db4 小波[30]产生$g(n)$和$h(n)$。图 4 描述了 3 层分解过程, 第 1 层利用高通滤波器(H)和低通滤波器(L)对雷达信号$x(n)$进行分解, 产生细节小波系数 d_1 和近似小波系数 a_1, 同理可得系数 d_2 和 a_2, d_3 和 a_3。在此分解的基础上的 DWT 特征为 $\boldsymbol{Q}=[a_3, d_3, d_2, d_1]$, 其大小为 224×224=50 176。

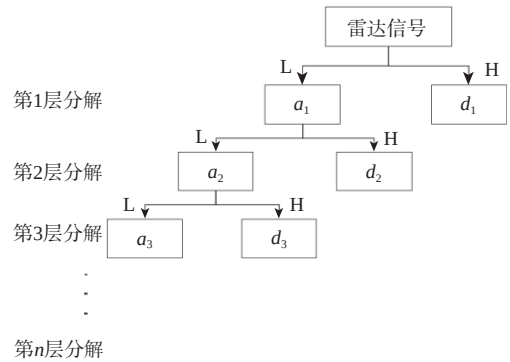


图 4　小波变换分解过程

Fig. 4　Decomposition process of wavelet transform

1.4　信号开集识别过程

为实现雷达信号的开集识别, 本文引入了一种基于 SVM 分类和 K-means 聚类的多层级雷达信号调开集识别模型。首先, 该模型以简单高效的 SVM 分类器作为 1 级分类器, 并采用已知调制类型的信号作为训练集进行预训练。在测试阶段, 模型以同时包含已知和未知雷达信号作为输入, 经过 1 级分类器进行判别, 进而识别已知信号类别和未知信号。对于未知信号再利用 K-means 聚类模型进行 2 级分类, 从而完成信号开集识别。

1.4.1　预训练与闭集识别

考虑到真实场景下计算资源受限的情况, 本文采用具有较好泛化能力和计算效率的 SVM 作为基分类器。SVM 是定义在特征空间上的间隔最大化的分类器, 通过在高维数据上构造超平面来进行决策分类[30-31]。此外, SVM 无需大规模数据来进行训练, 在处理小数据集时更加有效, 同时可以提供更好的数据解释性。雷达信号经过 MSST 时频变换、预处理及 DWT 特征提取过程后, 模型利用已知调制类型的雷达信号对 SVM 分类器进行预训练以调整模型参数。

在测试阶段, 本文采用部分已知信号和未知信号混合的形式组成测试集, 输入预训练后的分类器。对于输入的每个雷达信号, SVM 分类器会根据预训练后的参数计算该信号属于某类的概率, 即置信度, 再根据该置信度与设定的置信度阈值Θ进行比较, 若置信度大于Θ则将该信号划分到对应类别, 反之, 则为未知信号。通过上述过程对每个输入的雷达信号进行判别, 从而完成雷达信号的闭集识别, 对获得已知类信号的分类结果。

1.4.2 未知信号聚类

上述过程在完成已知雷达信号的分类同时，实现了未知信号的识别。然而在实际应用场景下，仅分离出未知信号仍然难以满足实际需求，特别是存在多种未知雷达信号类型的情况下。因此，本文对未知信号进行2级分类，以便雷达侦察系统进行后续的分析与决策。本文采用K-Means++聚类算法[32-35]对未知雷达信号实现进一步的分类与识别。具体地，K-Means++首先通过给定的K值并随机选取聚类中心，计算每个样本点x_i到已有聚类中心的欧氏距离：

$$D(\boldsymbol{x}_i)=\min\{\|\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{Z}_r\|,r=1,2,\cdots,K\} \tag{8}$$

$$\eta_i=D(\boldsymbol{x}_i)\Big/\sum_{i=1}^{n}D(\boldsymbol{x}_i) \tag{9}$$

式中：$D(\boldsymbol{x}_i)$为样本$\boldsymbol{x}_i$到聚类中心$\boldsymbol{Z}_r$的最小距离；η_i为样本选为聚类中心的概率，并随机生成一个随机数，将第1个累积概率超过随机数的样本设置为下一个聚类中心，循环K次，选出个聚类中心。然后进行K类的K-means聚类，其聚类算法如下：

$$\boldsymbol{\mu}_k=\frac{1}{N_k}\sum_{\boldsymbol{x}_i\in c_k}\boldsymbol{x}_i \tag{10}$$

$$J=\sum_{k=1}^{K}\sum_{\boldsymbol{x}_i\in c_k}\|\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{\mu}_k\|_2^2 \tag{11}$$

式中：c_k为$\boldsymbol{x}_i$所属簇；N_k为c_k中包含样本数目；$\boldsymbol{\mu}_k$为各个族内样本点的均值向量；J为损失函数，设置最大的迭代数目，计算下一个样本点与各个聚类中心的欧氏距离使得损失函数收敛，并更新聚类分配得到聚类结果$\boldsymbol{C}=[c_1,c_2,\cdots,c_k]$，如果聚类分配$\boldsymbol{C}$不再更新则结束迭代，否则继续循环直到达到最大迭代数目。对于未知信号的聚类划分$\boldsymbol{C}$，可结合信号分析方法来确定其信号类型，从而扩展雷达信号的识别范围。

2 实验与分析

为了验证本文方法的可行性，本文使用雷达信号数据集进行仿真实验，并通过对比实验来验证本文方法的有效性。

2.1 数据集

本实验以10种常见典型雷达信号的MSST时频域图像进行仿真，其中，6种作为已知类信号，分别为2FSK、BPSK、CW、LFM、FSK/BPSK、LFM/BPSK；其余4种作为未知类信号，分别为LFM/FSK、NLFM、QPSK和T1。雷达信号参数设置如表1所示。

表1 雷达信号参数

Table 1 Radar signal parameters

雷达信号参数	取值
CW载频/MHz	20
QPSK载频/MHz	20
LFM载频/MHz	20
NLFM载频/MHz	20
FSK/BPSK载频/MHz	20
LFM/BPSK载频/MHz	20
LFM/FSK载频/MHz	20
2FSK两频率点选取范围/MHz	10～30
BPSK载频/MHz	20
T1载频/MHz	20
T1序列段数	{4,5,6}

注：采样频率为200 MHz，脉宽为3.5 μm。

为更好地体现本文方法的有效性，在进行识别准确率分析时，已知信号分类实验选取的信噪比（signal-to-noise ratio, SNR）范围为−10～2 dB，未知信号分类实验选取的SNR范围为−4～2 dB，SNR步长设置为2 dB。由于实际应用环境下信号采集数量较少，故本文在小规模样本条件下进行实验。在不同SNR下，每类信号生成600个样本，其中选用400个样本用于模型训练，剩下200个样本用于信号分类测试。对于单信噪比下的10种雷达信号，训练集和测试集分别包含4 000和2 000个样本数据。

2.2 性能分析

2.2.1 闭集识别实验

为验证本文方法对已知信号的识别效果，将本文方法与基于局部二值方差模式（local binary variance mode, LBPV）灰度共生矩阵（gray-level co-occurrence matrix, GLCM）双通道法[20]、HOG法[35]和对称Holder系数[36]进行识别准确率的实验对比，实验结果如图5所示。

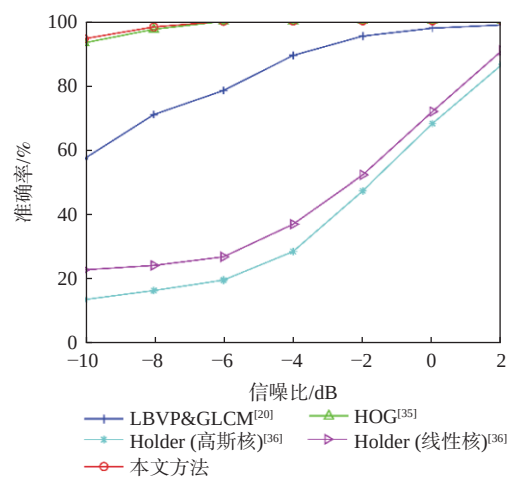


图5 4种方法的平均识别准确率

Fig. 5 The average recognition accuracy of four method

通过观察图 5 可见, 在−10 dB 的信噪比下, Holder 系数[36]方法的整体识别率低于 25%, LBVP&GLCM[20]方法的识别率为 40%, HOG[35]方法的识别率低于本文方法。综上, 本文方法比其他 3 种方法的平均识别准确率要高。由于低信噪比下时频图成像的质量下降, 时频图的有效信号特征减少, 从而导致方法识别的准确率降低。随着信噪比的逐渐增加, 方法的识别准确率也逐渐增大。本文方法在−6 dB 时, 整体的识别率接近 100%, 而 LBVP&GLCM[20]方法的识别率低于 80%, Holder 系数方法仅接近 30%。这表明, 本文方法在低信噪比下具有良好的识别能力。

同时, 实验进一步分析了本文方法对不同雷达信号的识别能力, 实验结果如图 6 所示。信噪比为−10 dB 时, 6 类已知信号的识别准确率均能超过 80%。其中, CW 和 LFM 这 2 类信号的识别率低于 85%, FSK/BPSK 和 2FSK 这 2 类信号的识别率超过 98%。这是因为 FSK/BPSK 和 2FSK 信号通过频率或相位的变化来表示数字信息, 并且在频率变化上相对明显和稳定, 因此, 在信号识别过程中更容易区分和判别。在−8 dB 时, FSK/BPSK、2FSK 和 LFM/BPSK 这 3 类信号均接近 100%。信噪比为−2 dB 时, 对 6 类已知信号的识别率均接近 100%。

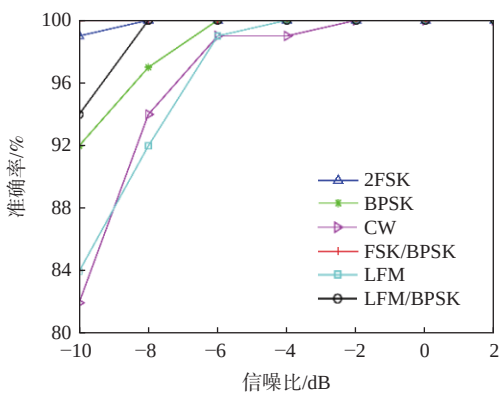


图 6　6 类已知信号的识别准确率

Fig. 6　Recognition accuracy of 6 types of known signals

2.2.2　开集识别实验

为验证本文方法对雷达信号开集识别的准确性, 实验将 6 类已知信号和一定数量的未知信号同时作为输入的雷达信号, 利用预先训练好的 SVM 分类模型对输入信号进行置信度的判断, 再通过置信度阈值Θ的大小比较, 以区分已知信号和未知信号。在实验中, 置信度阈值Θ根据经验设为 0.3, 从而通过 SVM 模型将已知类信号和未知类信号进行区分。

图 7 为 6 类已知信号和一定数量的未知信号在不同信噪比下的识别准确率对比。在低信噪比情况下, 雷达信号的噪声干扰增加, 信号质量下降, 导致信号特征变得不明显。如图 7 所示, 在−10 dB 信噪比下, 部分已知信号的置信度会很接近Θ值, 从而被误判为未知信号。这导致已知信号分类的准确率下降, 但未知信号的识别准确率接近 100%, 总体识别率低于 75%。由于未知信号识别率的计算方法为: 未知信号准确率=正确分类的未知信号/设定的未知信号样本数, 所以已知信号被误判为未知信号不会影响未知信号的识别率。当信噪比增加到−2 dB 时, 各类输入信号的识别率均超过 98%, 信号的总体识别率接近 100%。

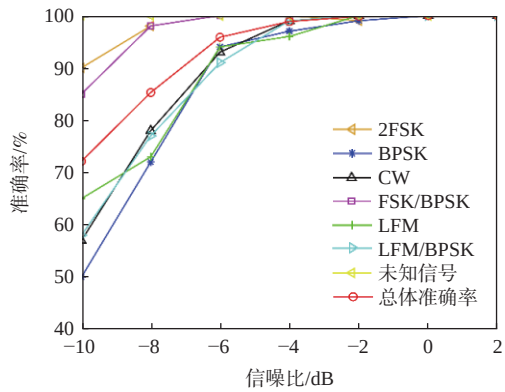


图 7　开集识别准确率

Fig. 7　Open-set recognition accuracy

图 8 为−2 dB 信噪比下信号识别准确率的混淆矩阵。由图可知, 在信噪比为−2 dB 时, 除 CW 和 LFM 之外的信号识别率均达到 100%, 而 CW 和 LFM 由于频率特性相对固定, 缺乏明显的频率或相位变化来表示信息, 有极少量样本被误判为未知信号, 但总体的识别率仍接近 100%。

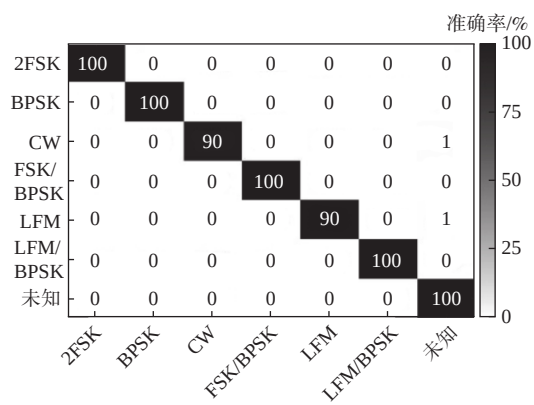


图 8　−2 dB 下的识别混淆矩阵

Fig. 8　Confusion matrix of identification at −2 dB

2.2.3　未知信号聚类实验

为进一步对未知信号进行区分, 本文将未知信号从输入信号中分离出来之后, 再进行聚类分类, 即未知类信号通过 K-means 聚类算法进行聚类得到不同聚类。本实验通过增加未知类雷达信号数

量的方式来测试算法的聚类效果，实验结果如图 9 所示。在计算信号识别准确率时，将 K-means 聚类后赋予信号的标签与信号的原标签进行对比，得出识别准确率。

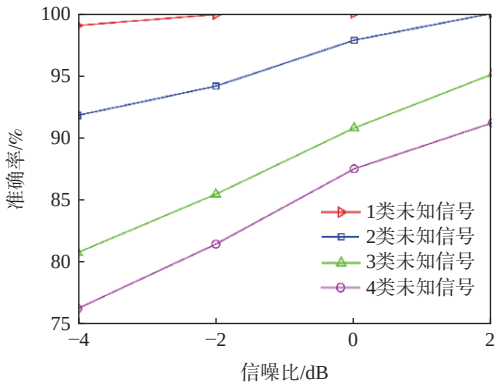


图 9 未知雷达信号聚类准确率

Fig. 9 Clustering accuracy of unknown radar signals

由图 9 可知，随着未知信号数目的增加，聚类的不确定性随之增大，低信噪比下未知信号识别的准确率逐渐降低。在−4 dB 的信噪比下，未知信号的数量小于 4 时，信号的平均识别准确率大于 80%。但是未知信号的数量大于等于 4 时，平均识别准确率降到了 80% 以下。当信噪比超过 0 dB 时，未知信号的数量对整体识别率的影响就非常有限，此时信号的识别率均超过 90%，故本文方法在较高信噪比下具有良好的识别性能。

2.3 不同置信度的准确率对比

为验证所选取的置信度阈值Θ的合理性，本文讨论了 LFM/FSK 信号在不同置信度阈值Θ及不同信噪比条件下的雷达信号开集识别准确率，并进行了比较。

对比图 10 中不同信噪比下的识别率可得，Θ取值在 0～0.25 范围时，随着Θ的增加，识别准确率也逐渐增大。当Θ范围处于 0.25～0.3 时，−4 dB 信噪比下算法识别准确率最高，其余信噪比均接近 99%。但是Θ超过 0.3 之后，低信噪比下信号的识别准确率逐渐减小。因此，本文方法选取置信度阈值Θ为 0.3 来判别已知类和未知类雷达信号。

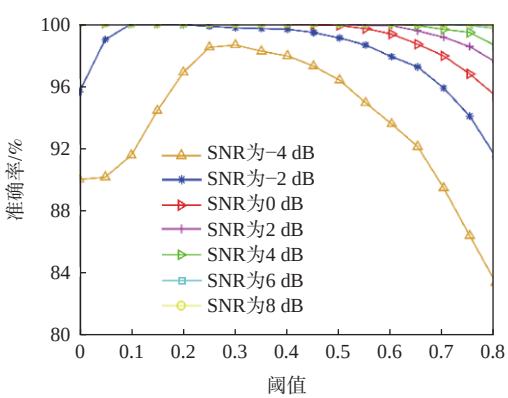


图 10 不同置信度下的准确率

Fig. 10 Accuracy under different confidence levels

3 结 论

1）针对雷达信号开集识别问题，本文提出了一种基于 SVM 分类和 K-means 聚类的多层级雷达信号开集识别方法。

2）该方法通过预训练 SVM 分类器将输入的雷达信号划分为已知信号和未知信号，在完成雷达信号闭集识别的同时，利用 K-means 聚类算法对未知类信号进行 2 级分类，以进一步拓展到雷达信号的识别范围。

3）实验结果表明，在−4 dB 的信噪比下，本文方法对各类雷达信号的平均识别准确率仍达到 90% 以上，能够很好地实现雷达信号的开集识别，为未知雷达信号调制识别提供了简单而有效的解决方案。

参考文献（References）

[1] 李猛. 现代雷达信号处理的技术和发展趋势[J]. 电子通信与计算机科学, 2023, 5(2): 7-9.
Li M. Technology and development trend of modern radar signal processing[J]. Electronic Communication and Computer Science, 2023, 5(2): 7-9(in Chinese).

[2] 张怀国. 雷达信号识别关键技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2020, 9(10): 85-87.
Zhang H G. Research on key technologies of radar signal recognition[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020, 9(10): 85-87(in Chinese).

[3] 熊孝华, 杨安会. 现代雷达信号处理及发展趋势研究[J]. 中国高新技术企业, 2011(13): 23-24.
Xiong X H, Yang A H. Research on modern radar signal processing and its development trend[J]. China High-Tech Enterprises, 2011(13): 23-24(in Chinese).

[4] 蒋千军, 张明安, 卢敏, 等. 现代雷达信号处理的技术和发展趋势探讨[J]. 电子通信与计算机科学, 2023, 5(3): 131-133.
Jiang Q J, Zhang M A, Lu M, et al. Discussion on the technology and development trend of modern radar signal processing[J]. Electronic Communication and Computer Science, 2023, 5(3): 131-133 (in Chinese).

[5] 王海英, 张群英, 成文海, 等. LPI 雷达信号调制识别及参数估计研究进展[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(6): 1908-1924.
Wang H Y, Zhang Q Y, Cheng W H, et al. Research progress on LPI radar signal modulation recognition and parameter estimation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(6): 1908-1924(in Chinese).

[6] 管飞, 宁云晖, 李超, 等. 雷达侦察接收机电磁环境评估和分级方法[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(1): 209-213.
Guan F, Ning Y H, Li C, et al. Evaluation and classification of electromagnetic environment of radar reconnaissance receiver[J]. Ship Electronic Engineering, 2024, 44(1): 209-213(in Chinese).

[7] 刘歌, 张国毅, 于岩. 基于随机森林的雷达信号脉内调制识别[J]. 电信科学, 2016, 32(5): 69-76.
Liu G, Zhang G Y, Yu Y. Intra-pulse modulation recognition of radar signal based on random forest[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 69-76(in Chinese).

[8] 杨志远, 张玉玺, 孙进平, 等. 基于 CNN 的雷达辐射源信号开集识别方法[C]//第十四届全国 DSP 应用技术学术会议论文集. 北京: 中国电子学会数字信号处理专家委员会, 2022: 113-117.
Yang Z Y, Zhang Y X, Sun J P, et al. Open set recognition method of radar emitter signal based on CNN[C]//Proceedings of the 14th National DSP Application Technology Academic Conference. Beijing: Expert Committee on Digital Signal Processing of the Chinese Electronics Society, 2022: 113-117(in Chinese).

[9] 张静, 于蕾, 侯长波, 等. 基于时频特征的跳频信号调制识别[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(1): 40-46.
Zhang J, Yu L, Hou C B, et al. Frequency-hopping signal modulation recognition based on time-frequency features[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(1): 40-46(in Chinese).

[10] 李世通, 全大英, 唐泽雨, 等. 基于时频图像和高次频谱特征的雷达信号识别[J]. 电信科学, 2022, 38(2): 84-91.
Li S T, Quan D Y, Tang Z Y, et al. Time-frequency image and high-order spectrum characteristics based radar signal recognition[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(2): 84-91(in Chinese).

[11] Qu Z Y, Hou C F, Hou C B, et al. Radar signal intra-pulse modulation recognition based on convolutional neural network and deep Q-learning network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 49125-49136.

[12] 姬丽彬, 朱岩, 崔天舒, 等. 基于时频重排算法的 LPI 雷达信号识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(4): 1324-1331.
Ji L B, Zhu Y, Cui T S, et al. LPI radar signal recognition based on time-frequency reassignment algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1324-1331(in Chinese).

[13] 郭立民, 陈鑫, 陈涛. 基于 AlexNet 模型的雷达信号调制类型识别[J]. 吉林大学学报 (工学版), 2019, 49(3): 1000-1008.
Guo L M, Chen X, Chen T. Radar signal modulation type recognition based on AlexNet model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3): 1000-1008(in Chinese).

[14] 谢存祥, 张立民, 钟兆根. 基于时频特征提取和残差神经网络的雷达信号识别[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(4): 917-926.
Xie C X, Zhang L M, Zhong Z G. Radar signal recognition based on time-frequency feature extraction and residual neural network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(4): 917-926(in Chinese).

[15] Li P. Research on radar signal recognition based on automatic machine learning[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(7): 1959-1969.

[16] 韩啸, 陈世文, 陈蒙, 等. 基于互易点学习的 LPI 信号开集识别[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(9): 2752-2759.
Han X, Chen S W, Chen M, et al. Open-set recognition of LPI radar signal based on reciprocal point learning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(9): 2752-2759(in Chinese).

[17] 郝云飞, 刘章孟, 郭福成, 等. 基于生成对抗网络的信号调制方式的开集识别[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2619-2624.
Hao Y F, Liu Z M, Guo F C, et al. Open-set recognition of signal modulation based on generative adversarial networks[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(11): 2619-2624(in Chinese).

[18] 曹鹏宇, 杨承志, 石礼盟, 等. 基于 PSO-DBSCAN 和 SCGAN 的未知雷达信号处理方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(4): 1158-1165.
Cao P Y, Yang C Z, Shi L M, et al. Unknown radar signal processing based on PSO-DBSCAN and SCGAN[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(4): 1158-1165(in Chinese).

[19] 秦博伟, 蒋磊, 许华, 等. 基于 RE-GAN 的调制信号开集识别算法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(10): 3321-3328.
Qin B W, Jiang L, Xu H, et al. Open-set recognition algorithm for modulation signal based on RE-GAN[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(10): 3321-3328(in Chinese).

[20] Shi Y L, Quan D Y, Zhang Z, et al. Radar signal recognition based on MSST and dual channel feature extraction[C]//Proceedings of the IEEE 18th Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 358-364.

[21] Guo S Z, Akhtar S, Mella A. A method for radar model identification using time-domain transient signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(5): 3132-3149.

[22] Li R N, Yang Z W, He S, et al. Ship target micro-Doppler feature extracted by multi-synchrosqueezing transform and inverse radon transform[C]//Proceedings of the CIE International Conference on Radar. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1545-1549.

[23] Li X Y, Zhao H M, Yu L, et al. Feature extraction using parameterized multisynchrosqueezing transform[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(14): 14263-14272.

[24] Syed S H, Muralidharan V. Feature extraction using Discrete Wavelet Transform for fault classification of planetary gearbox–A comparative study[J]. Applied Acoustics, 2022, 188: 108572.

[25] Kirti, Rajpal N, Yadav J. A novel DWT and deep learning based feature extraction technique for plant disease identification[C]//Proceedings of the Second Doctoral Symposium on Computational Intelligence. Singapore: Springer, 2022: 355-367.

[26] Xiong L Z, Zhong X W, Yang C N. DWT-SISA: a secure and effective discrete wavelet transform-based secret image sharing with authentication[J]. Signal Processing, 2020, 173: 107571.

[27] Kumar A, Tomar H, Mehla V K, et al. Stationary wavelet transform based ECG signal denoising method[J]. ISA Transactions, 2021, 114: 251-262.

[28] Barjasteh A, Ghafouri S H, Hashemi M. A hybrid model based on discrete wavelet transform (DWT) and bidirectional recurrent neural networks for wind speed prediction[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 127: 107340.

[29] Omidvar M, Zahedi A, Bakhshi H. EEG signal processing for epilepsy seizure detection using 5-level Db4 discrete wavelet transform, GA-based feature selection and ANN/SVM classifiers[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12(11): 10395-10403.

[30] Jiang J, Ma K, Wen M, et al. An audio fingerprint algorithm based on statistical characteristics of db4 wavelet[J]. Journal of Information and Computational Science, 2011, 8(14): 3027-3034.

[31] Chandra M A, Bedi S S. Survey on SVM and their application in imageclassification[J]. International Journal of Information Techno-

logy, 2021, 13(5): 1-11.

[32] Sinaga K P, Yang M S. Unsupervised K-means clustering algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 80716-80727.

[33] Ghazal T M, Zahid Hussain M, Said R A, et al. Performances of K-means clustering algorithm with different distance metrics[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2021, 29(3): 735-742.

[34] Ikotun A M, Ezugwu A E, Abualigah L, et al. K-means clustering algorithms: a comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data[J]. Information Sciences, 2023, 622: 178-210.

[35] 全大英, 唐泽雨, 陈赟, 等. 基于 MSST 及 HOG 特征提取的雷达辐射源信号识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(3): 538-547.
Quan D Y, Tang Z Y, Chen Y, et al. Radar emitter signal recognition based on MSST and HOG feature extraction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(3): 538-547(in Chinese).

[36] 王功明. 雷达信号脉内特征分析与识别关键技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2019.
Wang G M. Research on key technology of radar signal intra-pulse features analysis and recognition[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2019(in Chinese).

Multi-level radar signal open-set recognition based on SVM and K-means

WENG Xuehui，WANG Xiaofeng*，YING Peng，LIU Chongan，ZHOU Fang，QUAN Daying

(College of Information Engineering，China Jiliang University，Hangzhou 310018，China)

Abstract：In order to address the issue that traditional radar signal recognition techniques have trouble successfully identifying unknown modulated signals in practical situations, this paper suggests a multi-level radar signal open-set identification technique based on K-means clustering and Support Vector Machine (SVM) pre-training. After performing the multisynchro squeezing transform (MSST) on radar signals, the discrete wavelet transform (DWT) is employed to extract features from the preprocessed time-frequency images. An SVM classifier is trained using known radar signal data during the training phase. The classifier is used to distinguish between known and unknown modulation types during the testing phase in order to achieve open-set radar signal identification. Subsequently, K-means cluster analysis is applied to unknown radar signals, further classifying unknown modulation modes into different clusters, thereby expanding the recognition scope of radar signal modulation types. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves a recognition accuracy of over 90% for both known and unknown signals at a signal-to-noise ratio (SNR) of −4 dB, effectively recognizing unknown modulation types.

Keywords：radar signal recognition；multiple synchronous compression；wavelet transform；open-set recognition；K-means clustering

Received：2024-05-30；**Accepted**：2025-03-21；**Published Online**：2025-04-14 11：03

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250414.1037.002

Foundation item：National Natural Science Foundation of China (62261014)

* **Corresponding author**. E-mail：xfwang@cjlu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0366

基于改进线性注意力 Transformer 轻量化滚动轴承故障诊断

张海燕，吴红兰*，刘豪，孙有朝
(南京航空航天大学 民航学院，南京 210016)

摘　　要：针对基于 Transformer 滚动轴承故障诊断算法计算复杂度随输入时间窗口呈二次增长，导致模型推理实时性能下降的问题，提出一种基于改进线性注意力 Transformer 轻量化故障诊断模型。提出改进线性注意力使用交换点积计算次序策略，降低二次计算复杂度；提出改进的线性注意力特征恢复模块，通过特征偏置映射函数代替 Softmax 全局映射，缓解使用全局接受域的计算开销，该偏置函数具有高效的特征聚焦机制，通过强化相似特征间的联系并削弱不相似特征间的耦合，展现出显著的抗噪声干扰特性；使用特征多样性恢复模块，近似获得原始自注意力全局激活后的性能，恢复对长期依赖关系的建模能力。在来自西安交通大学和渥太华大学的 3 个机械故障数据集上进行实验，相比 CLFormer、ConvFormer-NSE、MCSwin-T、MobileNet、MobileNet-V2、ResNet18、MK-ResCNN 这 7 种典型模型，结果表明，所提模型在准确率和实时性方面优于对比模型，同时在高噪声环境下有良好的鲁棒性。可视化特征偏置函数模块的权重信息，建立所提模型与预测结果的可解释关系。通过消融实验验证了所提模块（特征偏置函数，特征多样性恢复模块）的有效性。

关　键　词：故障诊断；高噪声；轻量化；线性注意力；特征多样性
中图分类号：TH133.33
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2026)07-2563-17

滚动轴承作为旋转机械设备的关键部件，其健康状态对整个机械设备的正常运行有着极其重要的影响[1]。由于长期处于复杂工作环境，导致设备出现各种性能退化或故障[2]。因此，研究先进有效的故障诊断方法对于提高机械设备的运行可靠性和安全性至关重要[3]。

现有的故障诊断方法一般分为 2 大类：基于物理模型的方法和深度学习方法[4]。基于物理模型的方法依赖于先验知识和专家经验[5]，如文献 [6] 提出基于熵的状态空间模型，实现滚动轴承的动态退化监测和剩余使用寿命估计；文献 [7] 通过构建燃气轮机发动机的性能模型来提升故障诊断的准确性和效率。然而，这些方法通常过度依赖先验知识，不适用于复杂工况下的故障诊断[8]。深度学习方法可以直接从复杂的高维数据中获取关键特征，成为故障诊断的流行方法之一[9]。基于循环神经网络（recurrent neural network, RNN）和卷积神经网络 (convolutional neural networks, CNN) 的深度学习方法在故障诊断领域得到了广泛应用[10-11]。长短期记忆网络（long short-term memory, LSTM）作为 RNN 的一种变体，适用于解决一般递归神经网络中存在的长期依赖问题[12-14]，但基于 LSTM 方法在处理长序列数据时，仍面临梯度问题且计算量大、耗时长[15]；同时，CNN 方法通过传感器提取局部特征时，极易

收稿日期：2024-05-29；**录用日期**：2024-07-19；**网络出版时间**：2024-09-10 10:57
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240909.1755.013
基金项目：国家自然科学基金 (U2033202,U1333119,52172387)；南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划 (xcxjh20230708)
* **通信作者**. E-mail：wuhonglan@nuaa.edu.cn

引用格式：张海燕，吴红兰，刘豪，等. 基于改进线性注意力 Transformer 轻量化滚动轴承故障诊断 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2563-2579. Zhang H Y，Wu H L，Liu H，et al. Lightweight fault diagnosis of rolling bearings based on improved linear attention Transformer [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2563-2579（in Chinese）.

受到噪声干扰，难以获得准确的故障信息[16]。

由于Transformer具有全局特征提取能力，学者们大量使用该方法进行机械故障诊断[17]。在时域分析中，文献[18]提出贝叶斯Transformer以增强可解释性和可信度；文献[19]引入变分注意力Transformer，通过实验验证其高准确率和可解释性；文献[20]设计多通道移位窗口校准Transformer，提高模型在变工况下的诊断精度和稳定性。在频域分析方面，文献[21]探索时频Transformer对故障诊断任务的影响；文献[22]利用高阶同步压缩变换，通过时频包络识别滚动轴承的故障特征频率；文献[23]提出基于频域GAF-MAT Transformer的方法，降低样本间时移对诊断结果的影响。此外，部分学者提出卷积与Transformer相结合的方法[24-26]，融合两者在局部特征提取和全局自注意力上的性能优势，提高模型的特征挖掘能力。尽管基于Transformer及其变体方法在故障诊断性能上取得了先进成果，但由于Transformer固有特性，在有限运行场景下实时实现故障诊断任务仍面临挑战：①基于Transformer的故障诊断算法计算复杂度随输入时间窗口呈2次增长[27]；②Softmax映射方法从全局角度映射特征权重，带来全局域激活的计算开销[28]；③高噪声环境阻碍了模型在特征提取和决策过程中的准确性，使得模型难以精确地捕捉关键信息并作出可靠判断[29]。

针对以上问题，设计基于Transformer轻量化和鲁棒性的网络架构成为研究重点。在轻量化设计方面，部分学者运用稀疏矩阵来实现。例如，文献[30]使用图稀疏化技术，引入Watts-Strogatz图模型，实现输入序列的线性复杂度。文献[31]提出带窗口局部注意力的Longformer，对于大小为w的窗口，每个令牌仅关注其邻近的$w/2$个令牌，同时配合特殊任务令牌实现全局注意力汇总，降低计算负担。但基于稀疏矩阵操作的Transformer可能需要稀疏矩阵乘法操作，并通过堆叠额外的注意力层来弥补稀疏性，从而导致总体计算量的增加。一些研究采用线性注意力替换原始自注意力，以进一步降低计算成本。例如，文献[32]提出线性Transformer，通过矩阵乘积的结合性减少计算量。文献[33]提出一种新型线性复杂度注意力机制，模拟原始点积自注意力的效果，同时降低计算成本。文献[34]提出不使用Softmax的线性Transformer，通过高斯核函数近似获得原始Softmax激活后的模型性能。针对高噪声环境下的鲁棒性问题，文献[35]结合增强的残差结构与Transformer机制，通过结构信息搜索与互补信息提取双重策略，提升模型的去噪能力。文献[36]通过白盒攻击实验，揭示视觉Transformer因其低层特征信息的丰富性而在对抗攻击下展现出良好的鲁棒性。文献[37]则设计令牌感知平均池模块与注意力分散损失模块，通过增强令牌间的参与度和注意力差异，实现模型稳定性和多样性的双重提升，进而增强鲁棒性。然而，当前方法难以在轻量化和鲁棒性之间取得平衡，通常需要牺牲其中一个性能指标以实现另一指标的优化。

综合上述研究，本文提出一个基于改进线性注意力Transformer轻量化滚动轴承故障诊断模型。改进线性注意力机制通过交换点积计算次序降低2次计算复杂度，并通过特征偏置映射函数代替Softmax全局映射，缓解使用全局接受域的计算开销，降低与原始信号特征相似度低的噪声对模型性能的影响。同时提出特征恢复模块，近似获得原始自注意力全局激活后的性能，恢复对长期依赖关系的建模能力。

1 相关工作

本节将分别从多头自注意力和线性自注意力2方面对本文工作进行阐述。

1.1 多头自注意力

自注意力机制中，使用3个不同线性变换将输入矩阵$\boldsymbol{X}$映射成为3组新的矩阵$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$和$\boldsymbol{V}$，如下：

$$\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{Q}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{K}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{V}} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{Q}$为查询矩阵；$\boldsymbol{K}$为键矩阵；$\boldsymbol{V}$为值矩阵；$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{Q}}$、$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{K}}$、$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{V}}$分别为$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{V}$对应的权重矩阵。

自注意力机制计算公式如下：

$$\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V})=\mathrm{Softmax}\left(\frac{\boldsymbol{Q}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{d_{\mathrm{k}}}}\right)\boldsymbol{V} \tag{4}$$

式中：d_{k}为$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$的维度，将矩阵$\boldsymbol{Q}$和矩阵$\boldsymbol{K}$进行点积运算，得到权重矩阵；除以d_{k}对点积进行缩放，实现模型的加速收敛；Softmax(·)函数将结果全局激活；将激活后得到的相似度权重矩阵与矩阵$\boldsymbol{V}$相乘。

如图1所示，通过Concat(·)对每个头进行拼接，其结果与权重矩阵$\boldsymbol{W}^{\mathrm{O}}$相乘，多头自注意力输出结果如下：

$$\mathrm{MultiHead}(\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V})=\mathrm{Concat}(\boldsymbol{H}_1,\boldsymbol{H}_2,\cdots,\boldsymbol{H}_h)\boldsymbol{W}^{\mathrm{O}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{H}_i=\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{W}_i^{\boldsymbol{Q}},\boldsymbol{K}\boldsymbol{W}_i^{\boldsymbol{K}},\boldsymbol{V}\boldsymbol{W}_i^{\boldsymbol{V}}) \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{W}^{\mathrm{O}}$为权重矩阵；$\boldsymbol{W}_i^{\boldsymbol{Q}}$，$\boldsymbol{W}_i^{\boldsymbol{K}}$，$\boldsymbol{W}_i^{\boldsymbol{V}}$为第$i$个头的投影矩阵，$i$的范围为$i\in[1,h]$，$h$为头的数量大小。

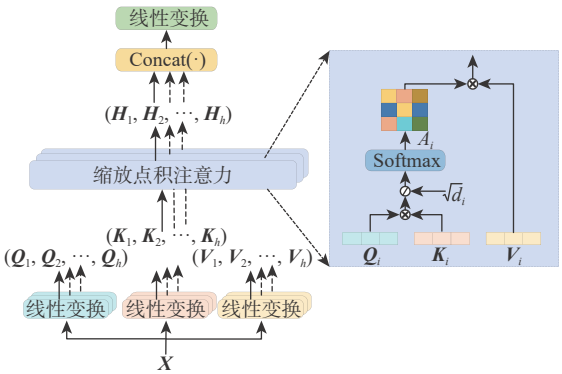


图 1　多头自注意力模块

Fig. 1　Multi-head self-attention block

1.2　线性自注意力

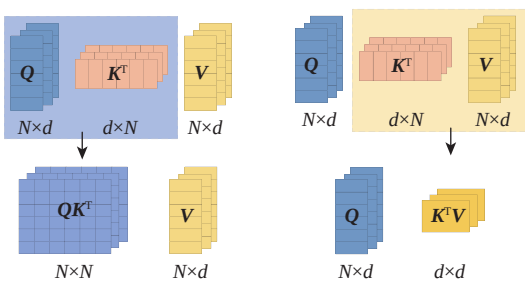
对于特征表示$\phi(\boldsymbol{x})$, Transformer 自注意力如式(7)所示, 其中, $\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V}\in\mathbf{R}^{N\times d}$, N为输入序列时间长度, d为通道维度, $\phi(\cdot)$为特征映射函数[32]。

$$\boldsymbol{O}_i=\sum_{j=1}^{N}\frac{\phi(\boldsymbol{Q}_i)\phi(\boldsymbol{K}_j)^{\mathrm{T}}}{\sum_{j=1}^{N}\phi(\boldsymbol{Q}_i)\phi(\boldsymbol{K}_j)^{\mathrm{T}}}\boldsymbol{V}_j \tag{7}$$

线性自注意力如下:

$$\boldsymbol{O}_i=\frac{\phi(\boldsymbol{Q}_i)\left(\sum_{j=1}^{N}\phi(\boldsymbol{K}_j)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}_j\right)}{\phi(\boldsymbol{Q}_i)\left(\sum_{j=1}^{N}\phi(\boldsymbol{K}_j)^{\mathrm{T}}\right)} \tag{8}$$

线性自注意力通过 2 个独立的核函数代替 Softmax 操作, 近似缓解 Transformer 高计算复杂度问题。如图 2 所示, 将自注意力计算视为核特征映射的线性点积, 利用矩阵乘积的结合性, 将计算顺序由$(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{V}$变换为$\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V})$, 其计算复杂度将由$O(N^2d)$转变为$O(Nd^2)$。



(a) Transformer自注意力复杂度: $O(N^2d)$　　(b) 线性自注意力复杂度:$O(Nd^2)$

图 2　Transformer 和线性自注意力计算复杂度对比

Fig. 2　Comparison of computational complexity of Transformer and linear self-attention

尽管线性自注意力机制在计算复杂度方面具有一定的优势, 相较于 Softmax 的全局激活方式, 其局部激活特性在模型性能方面仍存在一定的差距[38]。全局激活确保$\boldsymbol{Q}$与$\boldsymbol{K}$在时间维度N上进行信息交互, 而局部激活则考虑$\boldsymbol{K}$与$\boldsymbol{V}$在通道维度d上的信息交互[39]。相较于 Softmax 激活函数能够在时间维度上全局地捕捉和强化重要特征, 线性自注意力主要在通道维度上提取特征, 缩短了信息交互的时间长度, 更多地关注于局部信息处理, 一定程度上限制模型在全局上下文理解和长距离依赖关系建模方面的能力[40]。为改善线性注意力的局部特征提取问题, 本文提出一种基于改进线性注意力的方法, 从激活映射函数和特征多样性两方面对线性注意力进行改进和优化, 增强线性注意力的全局表达能力。

2　本文模型

轻量化模型设计主要包含 2 个部分, 分别为轻量化故障诊断框架和线性注意力特征恢复模块。

2.1　轻量化故障诊断框架

图 3 为本文轻量化故障诊断框架, 中间部分为轻量化模型, 主要由 3 个模块组成: 输入层、轻量化特征提取层和输出层。

输入层首先通过一维平均池化层, 在保留特征信息的同时降低特征维度、减少计算量、提高训练速度。随后通过卷积层、批量化归一层和 GeLU 激活层, 将信息映射到高维空间, 扩大注意力关注范围。

第 2 个模块为轻量化特征提取层。第 1 步通过线性注意力特征恢复模块, 和先前 Transformer 自注意力研究一致[23], 使用 3 个不同线性变换将输入序列映射成 3 组矩阵$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$和$\boldsymbol{V}$; 改进的线性注意力通过特征偏置映射函数$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})$改善线性注意力局部激活性能, 同时利用特征多样性恢复模块 DC 恢复特征多样性; 使用残差连接和层归一化稳定特征分布, 并使用前馈网络层对特征进行非线性映射; 通过残差连接和层归一化得到输出。

最后为输出层。通过一维平均池化层, 在时间维度将特征池化。然后使用全连接层, 将前一层得到的高维特征空间映射到输出维度。

表 1 为本文模型各层网络结构参数。在模型参数中, s为步长, k为核大小, d_{in}为输入通道数, d_{out}为输出通道数, c为旋转机械健康状态类别。序列尺寸记为: 批大小×通道数×时间长度。

2.2　线性注意力特征恢复模块

线性注意力特征恢复模块是轻量化特征提取层核心, 由特征偏置映射函数和特征多样性恢复模块组成。

2.2.1　特征偏置映射函数设计

本文提出一个特征偏置映射函数$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})$, 该函数满足输入$\boldsymbol{x}$的值保持不变, 仅通过$\boldsymbol{x}$幂次方调整$\boldsymbol{x}$的

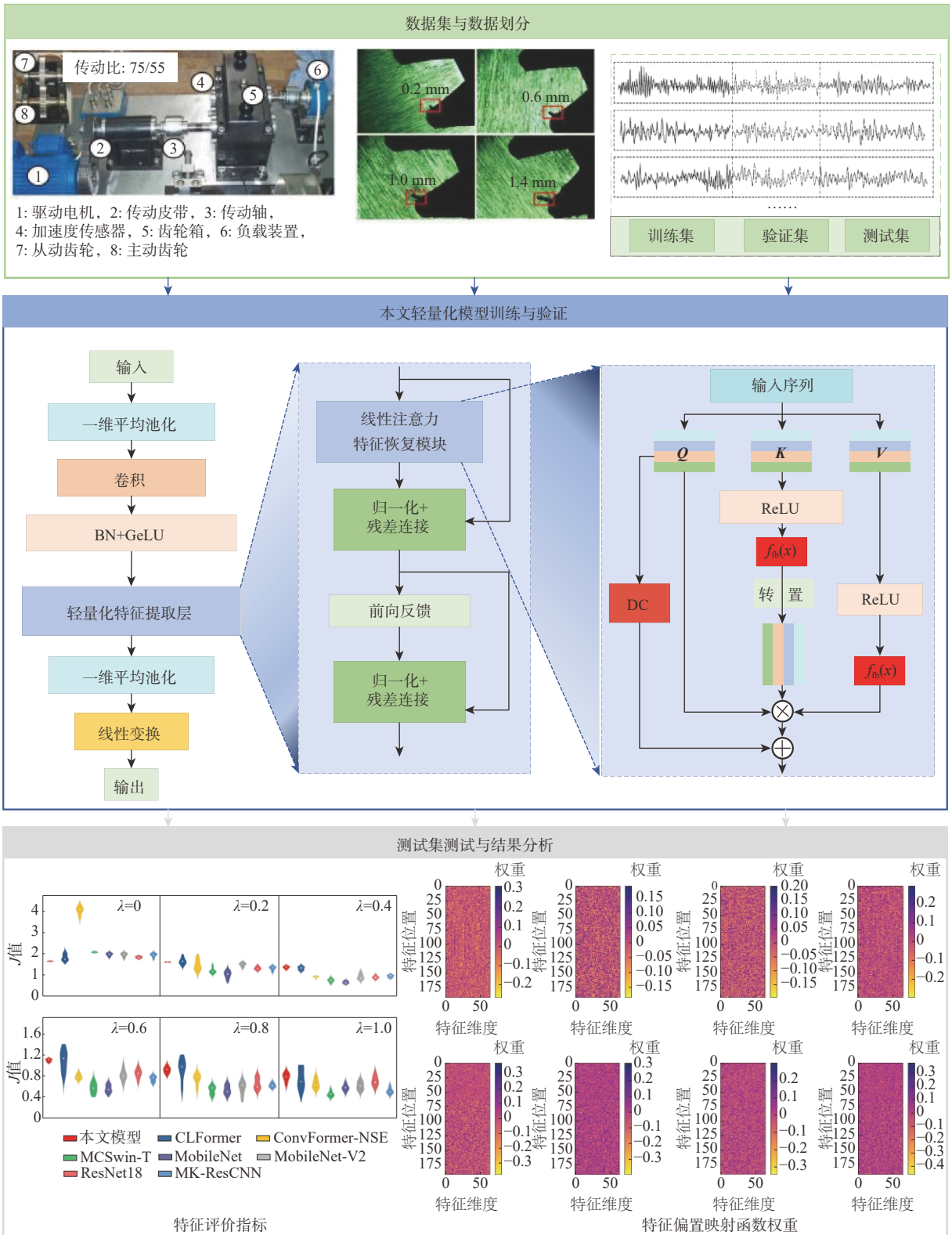


图 3 本文轻量化故障诊断框架

Fig. 3 Proposed lightweight fault diagnosis framework

表 1 本文模型各层网络结构参数

Table 1 Structural parameters of network at each layer of the proposed model

模型结构	模型参数	尺寸变换/像素×像素×像素
一维平均池化层	s=2	32×1×1024 → 32×1×512
卷积层	d_{out}=64,k=15,s=2	32×64×256 → 32×64×256
轻量化特征提取层	d_{in}=d_{out}=64	32×1×512 → 32×64×256
一维平均池化层	N=1	32×64×256 → 32×64×1
全连接层	d_{out}=c	32×64×1 → 32×c

方向, 使相似的特征更加接近, 不相似的特征互相远离。计算式如下:

$$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})=\frac{\boldsymbol{x}^{\alpha}}{\|\boldsymbol{x}^{\alpha}\|}\|\boldsymbol{x}\| \tag{9}$$

式中: α为偏置因子。

对于任意n维向量$\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{y}$($\boldsymbol{x}\neq\boldsymbol{y}$):

$$\boldsymbol{x}=(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_k,\cdots,\boldsymbol{x}_n) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{y}=(\boldsymbol{y}_1,\boldsymbol{y}_2,\cdots,\boldsymbol{y}_l,\cdots,\boldsymbol{y}_n) \tag{11}$$

式中: $\forall \boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{y}_i>0, i\in[1,n]$。假定$\boldsymbol{x}_k$, $\boldsymbol{y}_l$分别为$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$中的最大值, 则$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$的相似度为

$$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})\cdot f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{y})=\|\boldsymbol{x}\|\cdot\|\boldsymbol{y}\|\cdot\left(\frac{\boldsymbol{x}^{\alpha}}{\|\boldsymbol{x}^{\alpha}\|}\cdot\frac{\boldsymbol{y}^{\alpha}}{\|\boldsymbol{y}^{\alpha}\|}\right)=\|\boldsymbol{x}\|\cdot\|\boldsymbol{y}\|\cdot\frac{\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{x}_i^{\alpha}\boldsymbol{y}_i^{\alpha}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{x}_i^{2\alpha}\right)\left(\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{y}_i^{2\alpha}\right)}} \tag{12}$$

若令

$$\begin{cases}\eta_i=\boldsymbol{x}_i/\boldsymbol{x}_k\\ \zeta_i=\boldsymbol{y}_i/\boldsymbol{y}_l\end{cases} \tag{13}$$

式中: $\eta_i\in(0,1],\zeta_i\in(0,1]$, 有且仅有$\eta_k=\zeta_l=1$, 则

$$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})\cdot f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{y})=\|\boldsymbol{x}\|\cdot\|\boldsymbol{y}\|\cdot\frac{\sum_{i=1}^{n}\eta_i^{\alpha}\zeta_i^{\alpha}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\eta_i^{2\alpha}\right)\left(\sum_{i=1}^{n}\zeta_i^{2\alpha}\right)}} \tag{14}$$

对于级数u^v有

$$\lim_{v\to\infty}u^v=\begin{cases}1 & u=1\\ 0 & u\in(0,1)\end{cases} \tag{15}$$

针对极限情况$v\to\infty$, 也即$\alpha\to\infty$时, 式(14)的值将取决于η和ζ是否在同一维度上取 1, 即$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$是否在同一时刻取最大值, 当$k=l$时, 即$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$在同一方向上取得最显著特征:

$$\lim_{\alpha\to\infty}f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})\cdot f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{y})=\|\boldsymbol{x}\|\cdot\|\boldsymbol{y}\|>\boldsymbol{x}\cdot\boldsymbol{y} \tag{16}$$

当$k\neq l$时, 即$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$最显著特征不在同一方向:

$$\lim_{\alpha\to\infty}f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})\cdot f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{y})=0<\boldsymbol{x}\cdot\boldsymbol{y} \tag{17}$$

故存在$\alpha>1$, 当$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$的显著性特征更多的在相同维度, 即$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$相似时, 相似度特征放大:

$$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})\cdot f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{y})>\boldsymbol{x}\cdot\boldsymbol{y} \tag{18}$$

反之, 当$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$的显著性特征不在相同维度, 即$\boldsymbol{x}$与$\boldsymbol{y}$不相似时, 相似度特征降低:

$$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})\cdot f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{y})<\boldsymbol{x}\cdot\boldsymbol{y} \tag{19}$$

此外, 输入$\boldsymbol{x}$需通过ReLU(·)激活函数进行处理, 以确保输入的非负性, 处理后的值作为特征偏置映射函数$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})$的输入, 即

$$\phi_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})=f_{\mathrm{fb}}(\mathrm{ReLU}(\boldsymbol{x})) \tag{20}$$

故$\boldsymbol{K}$和$\boldsymbol{V}$矩阵的相似度计算式为

$$\mathrm{Sim}(\boldsymbol{K}_i,\boldsymbol{V}_j)=\phi_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{K}_i)^{\mathrm{T}}\phi_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{V}_j) \tag{21}$$

通过选择适当的α值, 调整$\boldsymbol{K}$和$\boldsymbol{V}$矩阵的方向, 可实现相似$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{V}$矩阵对之间的相似度特征放大, 不相似对之间的相似度特征减小。在高噪声环境下, 由于噪声和原始数据相似度极低, 其对相似度计算的影响很小; 在真实环境下, 这种机制可引导模型更加聚焦于关注有用的信号。这样的结构特点既能实现组内相似度提高, 组间相似度下降的目的, 又能使线性注意力忽略噪声, 专注于关键特征, 从而改善线性注意力局部激活性能, 同时提高模型抗噪能力。

2.2.2　特征多样性恢复模块设计

在线性注意力中, 注意力矩阵的秩由输入序列时间长度N和通道维度d中较小的数值所确定, 如下:

$$\mathrm{rank}\left(\phi(\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}}\phi(\boldsymbol{V})\right)\leqslant\min\{\mathrm{rank}(\phi(\boldsymbol{K})),\mathrm{rank}(\phi(\boldsymbol{V}))\}\leqslant\min\{\boldsymbol{N},d\} \tag{22}$$

对于长序列的机械系统识别模式, 通常d比N小, 故矩阵秩的上界受到d限制, 无法得到满秩N的注意力矩阵, 导致不同特征权重之间存在冗余性。而由注意力计算公式可知, 其输出是这些权重对同一组$\boldsymbol{V}$的加权和, 故权重冗余性将导致输出特征的多样性降低, 即线性注意力相较于 Softmax 在特征多样性上性能下降。

为改善线性注意力的特征多样性, 本文通过在注意力矩阵中加入轻量化的深度卷积(depthwise convolution, DC)来达到满秩的要求。同时 DC 具有局部关注的特性, 对于 2 个相似矩阵$\boldsymbol{Q}$, 模型可以从 DC 局部特性中得到不同输出, 从而保持特征多样性。因此, 线性注意力特征恢复模块的输出可表示为

$$\boldsymbol{O}=\boldsymbol{Q}\mathrm{Sim}(\boldsymbol{K},\boldsymbol{V})+\mathrm{DC}(\boldsymbol{Q})=\boldsymbol{Q}\phi(\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}}\phi(\boldsymbol{V})+\mathrm{DC}(\boldsymbol{Q}) \tag{23}$$

该模块通过改变注意力计算顺序, 将计算复杂度由$O(N^2d)$转为$O(Nd^2)$。所设计的特征偏置函数和特征多样性恢复模块分别改善线性注意力局部激活的性能及恢复线性注意力的特征多样性。

3　模型验证与性能分析

为验证本文方法的性能, 选择几种典型的故

障诊断模型与本文模型进行对比：CLFormer[41]，ConvFormer-NSE[31]，MCSwin-T[42]，MobileNet[43]，MobileNet-V2[44]，ResNet18[45]，MK-ResCNN[46]，包括本文模型，共验证 8 个模型性能。所选模型涵盖从传统 CNN 到先进的 Transformer 变体架构，其中，CLFormer、ConvFormer-NSE 和 MCSwin-T 是基于 CNN-Transformer 的代表性架构，融合局部特征与全局依赖实现高效建模；MobileNet 和 MobileNet-V2 是轻量级网络设计的典范；ResNet18 和 MK-ResCNN 则是残差网络的经典模型。故障诊断算法流程如图 4 所示。

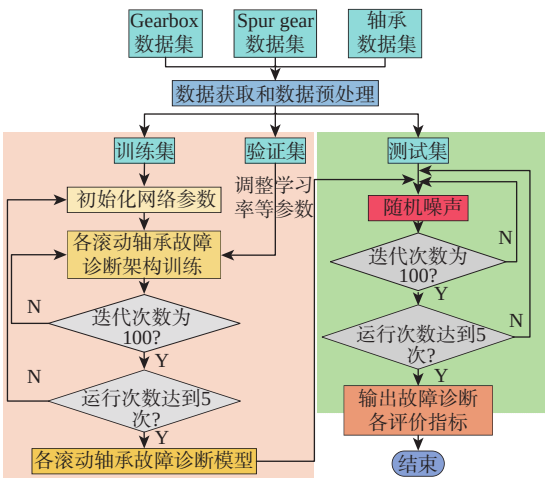


图 4 故障诊断算法流程

Fig. 4 Flow chart of fault diagnosis algorithm

输入数据来源于 3 个机械故障数据集，每个数据集按照不同比例分为训练集、验证集和测试集。实验环境如下：运行系统为 Windows 10，64 位操作系统；处理器为 i9-11900k；运行软件版本为 torch 1.8.0+cu111，Python 3.7.11。实验中参数设置如下：采用 0-1 归一化操作；批大小设置为 32；学习率采用自适应衰减模式，模型初始学习率基于验证集准确率来设置，学习率下限设置为 e^{-5}；迭代次数设置为 100。为保证实验结果的准确性，每次实验重复 5 次取平均值。

为验证模型抗噪声性能，在测试集中添加 2 种不同类型的噪声，以此模拟现实环境中测试集和训练集的差异，如下：

RandomGaussian：

$$s_i = s_i + \varepsilon \tag{24}$$

RandomScale：

$$s_i = s_i \sigma \tag{25}$$

式中：s_i为样本第i个采样点；ε为随机添加的高斯噪声，$\varepsilon \sim N(0,\lambda)$；$\sigma$为比例因子，$\sigma \sim N(1,\lambda)$，$\lambda$为方差。每个样本中，2 类噪声随机相加概率均为 50%。

基于对模型复杂度和推理时间的考虑，本文评价指标包括准确率、参数量、浮点运算量、训练时间和推理时间。此外为定量比较各方法输出特征质量，引入特征评价指标 J[47]，其定义为类间协方差与类内协方差的比值，计算式如下：

$$J = \|\boldsymbol{S}_{\mathrm{b}}\| / \|\boldsymbol{S}_{\mathrm{w}}\| \tag{26}$$

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{b}} = \sum_{c=1}^{C} A_c \left(\hat{\boldsymbol{f}}^c - \hat{\boldsymbol{f}}\right)\left(\hat{\boldsymbol{f}}^c - \hat{\boldsymbol{f}}\right)^{\mathrm{T}} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{w}} = \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{A_c} \left(\boldsymbol{f}_i^c - \hat{\boldsymbol{f}}^c\right)\left(\boldsymbol{f}_i^c - \hat{\boldsymbol{f}}^c\right)^{\mathrm{T}} \tag{28}$$

$$\hat{\boldsymbol{f}}^c = \frac{1}{A_c}\sum_{i=1}^{A_c} \boldsymbol{f}_i^c \tag{29}$$

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{A} \boldsymbol{f}_i \tag{30}$$

式中：$\boldsymbol{S}_{\mathrm{b}}$为类间协方差；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{w}}$为类内协方差；$\boldsymbol{f}_i$为第$i$个样本的输出特征；$\hat{\boldsymbol{f}}$为所有样本的平均输出特征；$\|\cdot\|$为 L2 归一化范数；$C$为健康状态数；$A$为样本总数。

3.1 基于 Gearbox 数据集的模型验证

3.1.1 Gearbox 数据集

实验数据来源于西安交通大学[48]，实验平台由驱动电机、控制器、齿轮箱等组件组成。实验中电机转速设置为 1 800 r/min，采样频率设置为 20 480 Hz。共采集到 9 种健康状态，数据集具体描述如表 2 所示。

表 2 Gearbox 数据集

Table 2 Gearbox dataset

故障编码	故障模式
1	滚珠故障
2	内滚道故障
3	混合故障(滚珠+内滚道+外滚道)
4	外滚道故障
5	断齿故障
6	缺齿故障
7	齿根裂纹故障
8	齿面磨损故障
9	正常状态

实验使用滑动窗口截断数据，窗口长度为 1 024，从每种振动信号中选择 1 200 个样本，共 10 800 个样本，每个样本包含 1 024 个采样点。根据先前研究，以 5∶3∶4 的比例将样本随机设置为训练集、验证集和测试集[49]。

3.1.2 Gearbox 数据集结果分析

如表 3 所示，在噪声水平 λ=0、0.2、0.4、0.6、

表 3　不同模型在 Gearbox 数据集上的准确率和复杂度比较结果

Table 3　Comparative results of accuracy and complexity of different models on Gearbox dataset

模型	准确率/%						参数量	浮点运算量/10^6次	运行时间/s	
	λ=0	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.8	λ=1			训练时间	推理时间
本文模型	99.88	**97.81**	**84.66**	**73.22**	**67.40**	**62.13**	6×10^3	2.869	**36.15**	**0.31**
CLFormer[41]	90.23	84.96	71.91	63.82	56.99	54.24	**5×10^3**	**0.144**	203.08	0.54
ConvFormer-NSE[31]	82.68	76.91	70.80	63.18	53.25	51.47	2.45×10^5	6.270	259.34	0.66
MCSwin-T[42]	**99.92**	97.39	82.17	70.88	65.06	60.52	1.937×10^6	227.003	258.30	0.61
MobileNet[43]	99.47	89.01	74.61	67.59	58.21	54.99	3.186×10^6	333.620	201.75	0.85
MobileNet-V2[44]	98.53	89.87	75.96	69.59	60.18	55.03	2.192×10^6	96.955	324.04	0.76
ResNet18[45]	99.63	94.56	80.95	70.67	61.41	54.51	3.854×10^6	175.920	171.80	0.55
MK-ResCNN[46]	99.79	96.13	80.88	69.46	61.65	57.12	2.117×10^6	83.893	189.90	0.53

0.8 和 1 下, 本实验分别测试了各模型的准准确率、参数量、浮点运算量、训练时间和推理时间, 其中加粗数据表示对应列中的最优结果, 准确率以最大值为优, 参数量、浮点运算量和运行时间以最小值为优。可见, 在噪声加入时, 本文模型在准确率方面明显优于其他模型。对于 MobileNet、MobileNet-V2、ResNet18 及 MK-ResCNN 这 4 种 CNN 方法, 当 λ为 0 时, 准确率较高; 当加入噪声干扰后, 这些模型准确率均显著下降, 表现出较弱的抗噪声能力。这是因为 CNN 模型使用卷积核进行局部特征提取, 对于噪声的适应性较差; 而本文提出的基于 Transformer 的模型能够有效捕捉输入数据的全局时序依赖关系, 同时通过所设计的特征偏置映射函数实现局部特征提取, 并在高噪声场景下聚焦于相似特征, 提高分类效果。此外, 在模型复杂度方面, 尽管 CLFormer 与本文模型参数量相当, 但其准确率远低于本文模型, 从λ=0 到λ=1 各阶段, 其准确率分别比本文模型低 9.66%、13.14%、15.06%、12.84%、15.45%、12.7%。这是因为 CLFormer 通过减少参数来保证模型的轻量化, 导致特征信息的部分丢失; 而本文模型在考虑轻量化的同时, 通过特征恢复模块提高了特征多样性, 保证了准确率。

表 4 显示了不同噪声水平下各方法的特征评价指标 J 值, 其中加粗数据表示对应噪声水平下的最优结果。随着噪声水平的提高, 各模型 J 值均呈现出不同程度的下降。在λ=0.6、0.8 和 1 这几个高噪声干扰下, 本文模型均表现出最高的 J 值, 进一步验证了本文模型出色的抗噪声性能。同时, 相较于其他模型, 本文模型在本实验运行环境下的运行时间最短, 这表明本文模型可在有限运行环境下实时推理。

表 4　不同模型在 Gearbox 数据集上的特征评价指标比较结果

Table 4　Comparative results of feature evaluation index of different models on Gearbox dataset

模型	J					
	λ=0	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.8	λ=1
本文模型	2.78	2.35	1.68	**1.53**	**1.21**	**1.12**
CLFormer[41]	2.34	1.98	1.22	1.06	1.00	0.82
ConvFormer-NSE[31]	**3.70**	**3.08**	**2.00**	1.31	0.83	0.73
MCSwin-T[42]	3.62	2.78	1.94	1.32	1.09	0.99
MobileNet[43]	2.96	2.36	1.45	1.06	0.64	0.59
MobileNet-V2[44]	2.72	2.31	1.52	1.28	0.91	0.73
ResNet18[45]	2.86	2.30	1.61	1.26	0.91	0.78
MK-ResCNN[46]	2.76	2.32	1.51	1.02	0.85	0.70

为更直观的比较各模型性能, 将不同噪声水平下各方法平均准确率和模型复杂度可视化, 如图 5 所示。本文模型参数量仅为 6.0×10^3, 浮点运算量为 2.869×10^6 次, 在各噪声水平下的平均准确率达到 80.85%, 综合诊断精度和复杂度表现最优。可见, CLFormer 和 ConvFormer-NSE 分布在图中左下角区域, 虽然在复杂度上有一定优势, 但诊断精度相对较低。这是因为这 2 种方法采用压缩特征维度的策略, 导致振动信号中部分特征的丢失, 从而导致模型无法充分学习信号中包含的多维信息。MobileNet、MobileNet-V2、ResNet18 及 MK-ResCNN 分布在图中右半部分, 复杂度过高同时诊断精度一般。本文模型兼顾准确率和模型复杂度, 展现其轻量化和鲁棒性的优势。

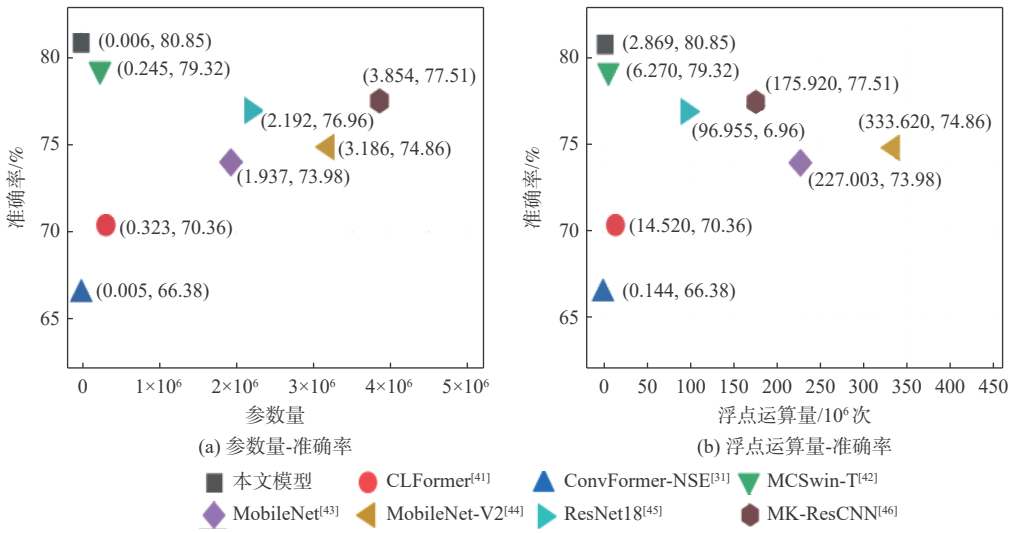


图 5 不同模型在 Gearbox 数据集上的平均准确率和复杂度比较结果

Fig. 5 Comparative results of average accuracy and complexity of different models on Gearbox dataset

图 6 记录了 5 次实验各模型的平均损失和准确率。在训练集中，第 10 次迭代时，各模型趋于稳定，第 50 次迭代时，模型基本稳定；在验证集中，前期各模型的波动均比训练集大，当第 50 次迭代时，各模型逐渐稳定。

3.2 基于 Spur gear 数据集的模型验证

3.2.1 Spur gear 数据集

数据集来源于西安交通大学[48]，该平台由驱动电机、皮带、轴和齿轮箱等组成。电机转速设置为 900 r/min 和 1 200 r/min，采样频率设置为 10 kHz。表 5 描述了 5 种不同健康状态。

将原始数据集按照不同转速分为 2 个数据集 D_1 和 D_2，如表 6 所示。从不同健康状态中选取 600 个样本，共 3 000 个样本，每个样本包含 1 024 个采样点。2 个数据集的源域样本以 2∶1 的比例随机设置为训练集和验证集，目标域中所有样本设置为测试集[49]。

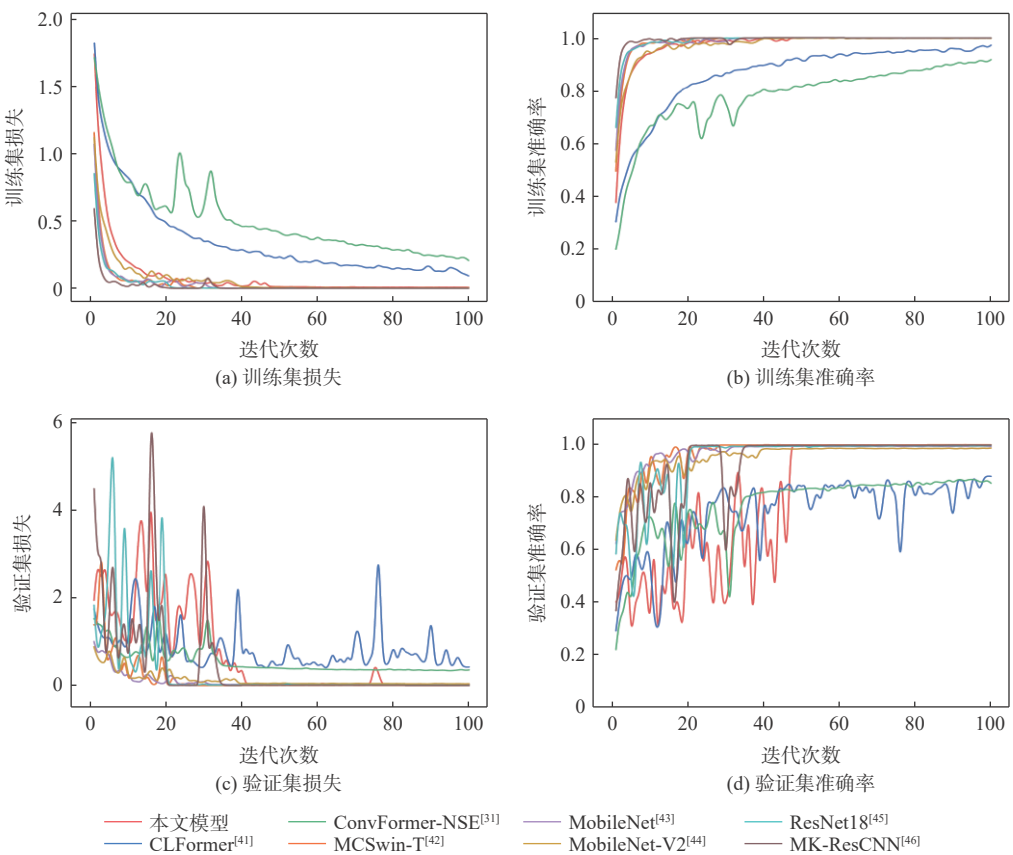


图 6 不同模型在 Gearbox 数据集上的平均损失和准确率比较结果

Fig. 6 Comparative results of average loss and accuracy of different models on Gearbox dataset

表 5　Spur gear 数据集

Table 5　Spur gear dataset

数据集	裂纹程度/mm
1	0.0
2	0.2
3	0.6
4	1.0
5	1.4

表 6　Spur gear 数据集转速

Table 6　Spur gear dataset rotational speed

数据集	源域转速/(r·min^{-1})	目标域转速/(r·min^{-1})
D_1	900	1 200
D_2	1 200	900

3.2.2　Spur gear 数据集结果分析

表 7 显示了数据集 D_1 与 D_2 在不同噪声水平下各模型的准确率、复杂度和运行时间。在 2 个数据集上, 本文模型在各噪声水平下都表现出最高的准确率。在数据集 D_1 中, 当噪声水平在 λ=0.2、0.4 和 0.6 时, 本文模型的平均准确率分别为 86.25%、77.45% 和 69.14%, 相较于次优 MCSwin-T 的准确率分别提高 2.13%、3.03% 和 5.43%。在数据集 D_2 中, 本文模型比次优模型 MCSwin-T 的准确率分别提高 5.71%、6.57% 和 9.72%。

表 8 显示了数据集 D_1 和 D_2 在 6 种不同噪声水平干扰下各模型的特征评价指标 J 值。在数据集 D_1 中, 当λ=0.4、0.6、0.8 和 1 时, 本文模型 J 值均最高。其中λ=1 时, 其他 7 个模型 J 值相比于本文模型分别降低 25.00%、22.62%、15.48%、63.10%、30.95%、23.81% 和 26.19%, 凸显了本文模型在高噪声环境下的鲁棒性。在数据集 D_2 中, 本文模型在λ=0.2、0.4、0.6、0.8 和 1 均表现最佳, 比次优 MCSwin-T 分别提高 4.28%、3.05%、7.07%、12.82% 和 11.27%。随着噪声水平增加, 各对比模型性能下降, 而本文模型由于特征偏置映射函数机制的应用, 有效削弱噪声干扰, 提升诊断精度, 再次验证本文模型在高噪声环境下良好的诊断性能。

将 2 个数据集在不同噪声水平下的平均准确率可视化, 如图 7 所示。从图中可以直观的看出, 在无噪声加入时, 各模型准确率均在 90% 以上。随着噪声的加入, 本文模型在各实验中均表现出更高的准确率。

为进一步展示本文模型在不同健康状态下的输出特征性能, 利用数据集 D2 绘制了三维混淆矩阵, 选取次优模型 MCSwin-T 与本文模型作为对比, 如图 8 所示。图中, 横纵坐标分别表示预测

表 7　不同模型在 Spur gear 数据集上的准确率和复杂度比较结果

Table 7　Comparative results of accuracy and complexity of different models on Spur gear dataset

模型	D_1-准确率/%			D_2-准确率/%			参数量	浮点运算量/10^6次	运行时间/s	
	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6			训练时间	推理时间
本文模型	**86.25**	**77.45**	**69.14**	**88.81**	**79.85**	**70.65**	2.5×10^4	13.032	**31.86**	**0.92**
CLFormer[41]	71.79	62.17	54.61	71.12	60.13	53.12	**5×10^3**	**0.246**	102.50	1.14
ConvFormer-NSE[31]	73.50	62.32	56.45	70.77	56.80	54.29	2.45×10^5	6.760	129.28	1.13
MCSwin-T[42]	84.45	75.17	65.58	84.01	74.93	64.39	1.946×10^6	231.959	132.08	1.10
MobileNet[43]	69.43	58.96	53.09	73.75	59.95	53.55	3.183×10^6	334.599	92.79	1.26
MobileNet-V2[44]	74.93	61.66	56.95	71.25	59.32	54.13	2.188×10^6	97.441	155.67	1.21
ResNet18[45]	83.82	71.09	61.29	80.95	63.69	58.71	3.856×10^6	178.212	85.32	0.99
MK-ResCNN[46]	79.88	66.49	57.68	80.26	64.94	57.10	2.119×10^6	86.184	97.26	0.99

表 8　不同模型在 Spur gear 数据集上的特征评价指标比较结果

Table 8　Comparative results of feature evaluation index of different models on Spur gear dataset

模型	D_1-J						D_2-J					
	λ=0	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.8	λ=1	λ=0	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.8	λ=1
本文模型	2.79	1.91	**1.40**	**1.20**	**0.94**	**0.84**	3.15	**1.95**	**1.35**	**1.06**	**0.88**	**0.79**
CLFormer[41]	2.92	1.29	0.93	0.75	0.65	0.63	3.89	1.19	0.87	0.70	0.66	0.59
ConvFormer-NSE[31]	**3.89**	1.45	0.97	0.78	0.69	0.65	**3.60**	1.27	0.88	0.73	0.70	0.62
MCSwin-T[42]	2.80	**2.06**	1.37	1.15	0.87	0.71	3.40	1.87	1.31	0.99	0.78	0.71
MobileNet[43]	2.64	0.92	0.62	0.48	0.32	0.31	2.59	1.06	0.63	0.59	0.44	0.38
MobileNet-V2[44]	2.65	1.17	0.83	0.72	0.64	0.58	3.29	1.13	0.81	0.67	0.60	0.59
ResNet18[45]	2.53	1.50	1.12	0.85	0.72	0.64	2.79	1.40	0.93	0.83	0.72	0.60
MK-ResCNN[46]	2.61	1.38	0.96	0.79	0.62	0.62	3.08	1.43	0.98	0.79	0.67	0.61

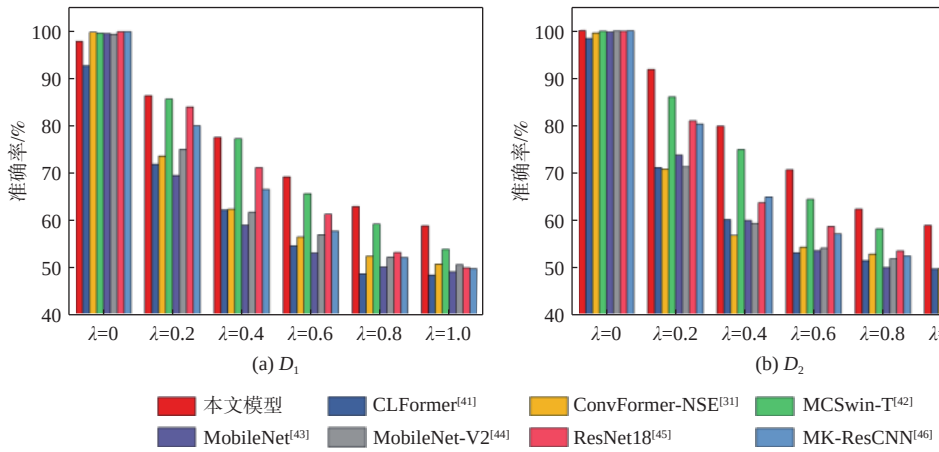


图 7 不同模型在 Spur gear 数据集上的准确率比较结果

Fig. 7 Comparative results of accuracy of different models on Spur gear dataset

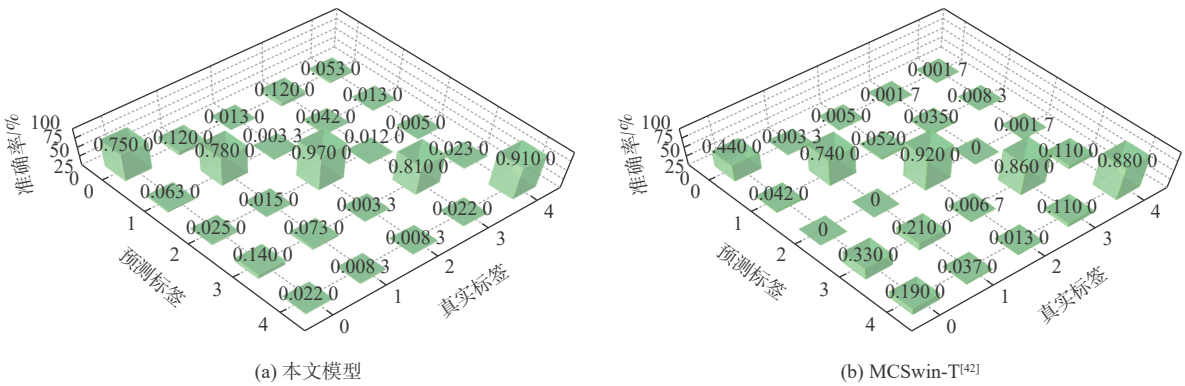


图 8 数据集 D_2 三维混淆矩阵[42]

Fig. 8 Three-dimensional confusion matrix for dataset D_2

标签和真实标签，0～4 表示 5 种健康状态，对应表 5 中 5 种不同裂纹程度。从图中可以明显地看到，MCSwin-T 的错误判别概率较为突出，而本文模型在正确分类概率上远高于 MCSwin-T，进一步验证了本文模型在故障诊断任务的优势。

3.3 基于轴承数据集的模型验证

3.3.1 轴承数据集

实验数据来源于渥太华大学[50]，实验平台为 SpectraQuest 机械故障模拟器。安装 2 个 ER16K 球轴承，轴由电机驱动，转速由交流驱动器控制。采样频率为 200 kHz，采样时间为 10 s。表 9 为轴承的 5 种不同健康状态。

采用滑动窗口采集数据，窗口长度为 1 024，从不同采样过程中选择 1 200 个样本，按照 2∶1∶1 的比例分配为训练集、验证集和测试集[49]。

表 9 轴承数据集

Table 9 Bearing dataset

数据集	故障模式
1	正常状态
2	内滚道故障
3	外滚道故障
4	滚珠故障
5	混合故障

3.3.2 轴承数据集结果分析

表 10 显示了在 6 种不同噪声水平干扰下各模型的诊断准确率、模型复杂度和运行时间。随着 λ 值的增大，各模型的准确率均有所降低。在相同噪声水平下，本文模型展现出其良好的抗噪声性能。同时在模型复杂度方面，本文模型参数量相比其他模型均更低。此外，在本实验运行环境下，相较于其他几种模型，本文模型在运行时间上更短，硬件要求更低。

表 11 记录了 6 种噪声水平下各模型 5 次实验的平均 J 值。在不同水平噪声干扰下，本文模型均取得最大的特征评价指标 J，同表 10 所示准确率趋势一致。

利用小提琴图将不同噪声水平下 5 次实验的 J 值可视化，如图 9 所示。在低噪声水平下，各模型 J 值均较高；在 λ 达到 0.4 及以上时，各模型 5 次实验的 J 值均小于 2。随着噪声水平增大，各模型 J 值平均水平均呈下降趋势，同表 11 中准确率变化趋势一致。本文模型在高噪声水平下均能保持稳定

表 10　不同模型在轴承数据集上的准确率和复杂度比较结果

Table 10　Comparative results of accuracy and complexity of different models on Bearing dataset

模型	准确率/%						参数量	浮点运算量/10^6次	运行时间/s	
	λ=0	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.8	λ=1			训练时间	推理时间
本文模型	96.45	**95.43**	**88.79**	**78.52**	**70.13**	**64.35**	**4×10^3**	1.852	**24.07**	**0.11**
CLFormer[41]	91.57	84.91	74.87	68.59	63.96	59.84	5×10^3	**0.100**	132.25	0.21
ConvFormer-NSE[31]	95.12	69.36	59.21	58.87	58.43	56.33	2×10^5	6.220	166.06	0.25
MCSwin-T[42]	97.79	75.60	65.77	62.08	59.12	58.40	1.936×10^6	226.507	173.94	0.25
MobileNet[43]	96.33	65.49	62.99	60.08	58.92	57.47	3.182×10^6	333.518	133.07	0.34
MobileNet-V2[44]	96.24	80.81	66.72	62.91	58.37	55.67	2.187×10^6	96.901	203.35	0.29
ResNet18[45]	97.61	82.35	69.11	66.36	65.13	64.25	3.851×10^6	175.689	114.69	0.21
MK-ResCNN[46]	**98.44**	84.87	72.35	68.81	64.09	61.23	2.114×10^6	83.661	131.69	0.21

表 11　不同模型在轴承数据集上的特征评价指标比较结果

Table 11　Comparative results of feature evaluation index of different models on Bearing dataset

方法	J					
	λ=0	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.8	λ=1
本文模型	1.64	**1.61**	**1.37**	**1.10**	**0.91**	**0.77**
CLFormer[41]	1.82	1.60	1.32	1.08	0.93	0.75
ConvFormer-NSE[31]	**4.06**	1.47	0.91	0.78	0.73	0.64
MCSwin-T[42]	2.07	1.20	0.75	0.57	0.53	0.45
MobileNet[43]	1.96	1.02	0.66	0.56	0.53	0.51
MobileNet-V2[44]	1.94	1.49	0.92	0.81	0.60	0.56
ResNet18[45]	1.83	1.32	0.89	0.84	0.70	0.65
MK-ResCNN[46]	1.93	1.31	0.95	0.74	0.61	0.50

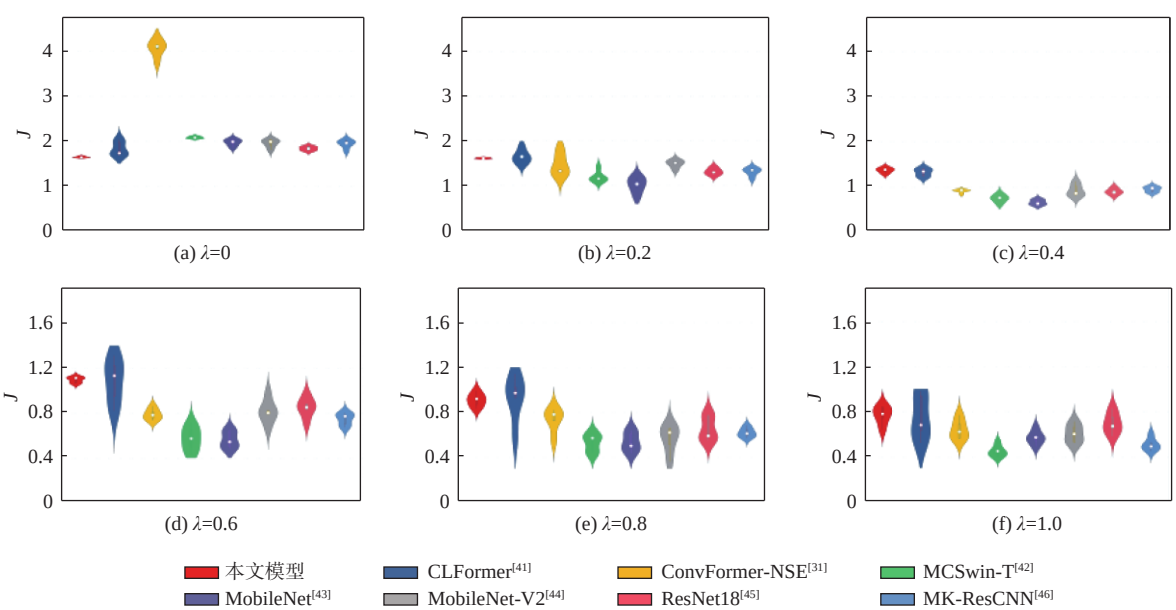


图 9　不同模型在轴承数据集上的特征评价指标比较结果

Fig. 9　Comparative results of feature evaluation index of different models on Bearing dataset

且较高的特征评价指标值, 抗噪声能力强。

3.4　模型抗噪性能分析

为探索特征偏置映射函数 $f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})$对模型在噪声环境下性能的影响, 在上述 3 个数据集上对有/无特征偏置映射函数的投影权重信息进行可视化, 如图 10 所示,其中图 10(a)～图 10(d)有$f_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{x})$,图 10(e)～

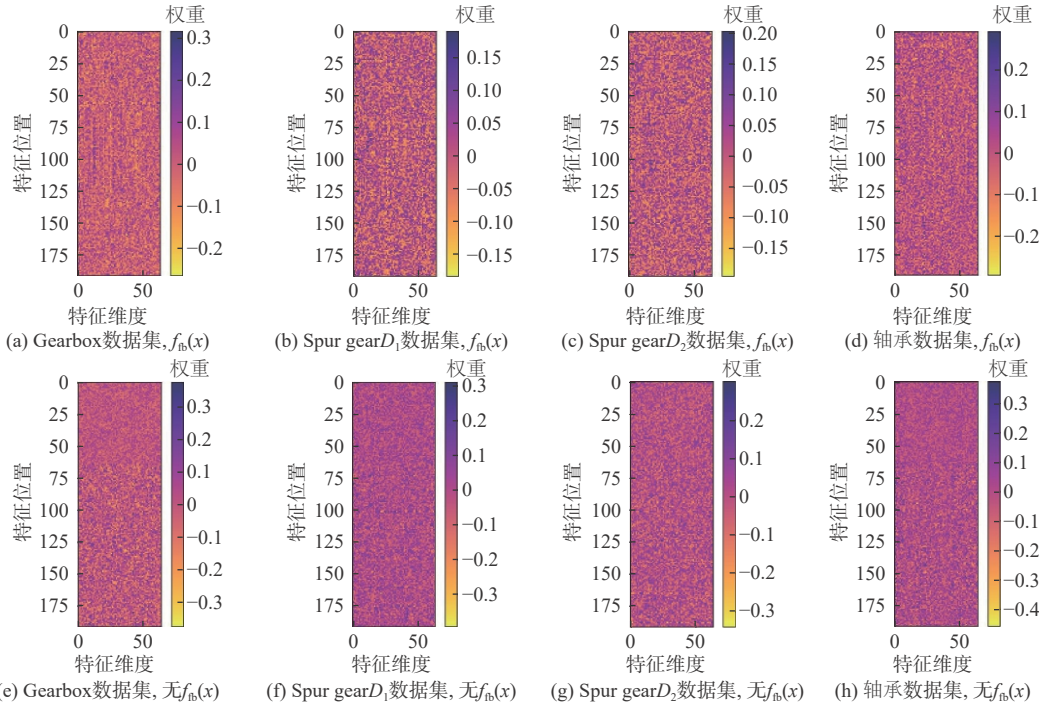


图 10 有/无 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$的 *qkv* 权重对比

Fig. 10 Comparison of *qkv* weights with/without $f_{fb}(\boldsymbol{x})$

图 10(h)无 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$。相较于无 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$, 有 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$时的投影权重分布更加集中。具体来说, 这些权重数据点分布更为紧密, 最大值与最小值之间差距明显更小, 整体变化范围更为有限。如图 10(b)的权重变化主要在−0.15～0.15 之间, 与之对应的图 10(f)变化主要在−0.3～0.3 之间, 图 10(b)的变化范围明显小于图 10(f)的变化范围。这是因为 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$能够增强相似矩阵对之间的相似度特征, 同时削弱不相似对之间的相似度。因此, 在应对高噪声的影响时, 模型能够凭借这一机制有效忽略噪声影响, 维持稳定的分类性能。

同时, 分别在上述 3 个数据集上可视化有/无特征偏置映射函数的注意力权重, 如图 11 所示, 图 11(a)～图 11(d)有 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$, 图 11(e)～图 11(h)无 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$。从图中可以看出, 图 11(a)～图 11(d)的权重主要变化范围分别为 0.35、0.25、0.20 和 0.35, 而图 11(e)～图 11(h)的主要变化范围分别为 0.50、0.40、0.40 及 0.50。该可视化结果进一步证实了 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$的作用, 即通过优化注意力权重的分布, 使权重数据变化范围更为集中, 从而缩小模型的关注范围。该机制使得模型能够更精准地聚焦于关键特征, 从而在高噪声环境中忽略与原始数据信号相似度较低的噪声, 保持对关键信息的持续关注。这一特性充分展现了特征偏置映射函数的优越性。

3.5 性能指标综合分析

对本文轻量化故障诊断模型性能进行综合评价, 评价指标包括输出质量评价: 准确率和 *J* 值; 复杂度评价: 参数量和浮点运算量; 以及实时推理时间评价。

在 λ=0.2 至 λ=0.8 时, 分别计算 3 个数据集的平均准确率和特征评价指标 *J* 值, 同时综合计算整体的平均准确率和 *J* 值, 将其可视化如图 12 所示。从图中可以看出, 本文模型在 3 个数据集的准确率和 *J* 值表现均更优。

图 13 为各模型在 3 个数据集下的平均参数量和浮点运算量。综合图 10 可以看出, 本文模型在保证准确率的同时, 还兼具极低计算复杂度的优势, 表现出本文模型轻量化的优势。

图 14 综合对比了 3 个数据集的推理时间。从图中可以明显看出, 相较于其他各模型, 本文模型在 3 个数据集上的推理时间均最短, 在硬件计算资源有限的情况下, 为实时推理提供了可能性, 展现了模型的实际应用价值。

3.6 消融实验

通过消融实验, 对本文模块的有效性和敏感性进行分析。

3.6.1 线性注意力特征恢复模块

为探讨线性注意力特征恢复模块的效用, 分别对本文提出的特征偏置映射函数 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$和特征多样性恢复模块进行实验验证。以 3.3 节的轴承数据集为例进行实验, 表 12 为各模块的准确率和复杂度。

图 15 将各模块在不同噪声水平下的准确率进行可视化。比较 $f_{fb}(\boldsymbol{x})$+DC 和 Softmax+DC 可知, 采

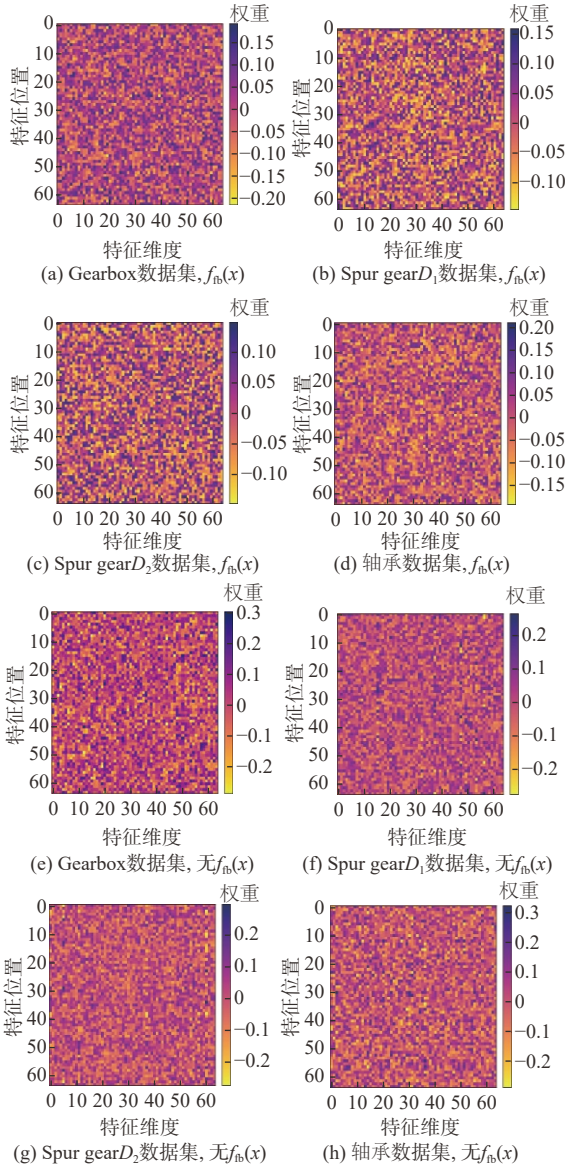


图 11　有/无$f_{fb}(\boldsymbol{x})$的注意力权重对比

Fig. 11　Comparison of attention weights with/without $f_{fb}(\boldsymbol{x})$

用特征偏置映射函数$f_{fb}(\boldsymbol{x})$, 模型准确率提高, 这是因为$f_{fb}(\boldsymbol{x})$改善了线性注意力局部激活的特性, 使其更加聚焦于相似特征, 降低对噪声及其他不相似特征的关注, 从而获得更好的性能。比较$f_{fb}(\boldsymbol{x})$+DC和$f_{fb}(\boldsymbol{x})$可知, 增加特征多样性恢复模块, 恢复线性注意力的特征多样性, 模型准确率会大量提高。综合比较线性注意力特征恢复模块, 即比较$f_{fb}(\boldsymbol{x})$+DC与 Softmax 可知, 本文提出的改进线性注意力可获得比 Transformer 原始自注意力全局激活更好的性能, 实现更高的准确率和高噪声下的强鲁棒性。

3.6.2　偏置因子α

偏置因子α是影响特征偏置映射函数$f_{fb}(\boldsymbol{x})$性能的重要参数, 本节对该参数进行分析。表 13 展示了不同α值下, 本文模型在各噪声水平下对轴承数据集进行实验的准确率。

将表 13 得到的结果通过折线图可视化, 如图 16

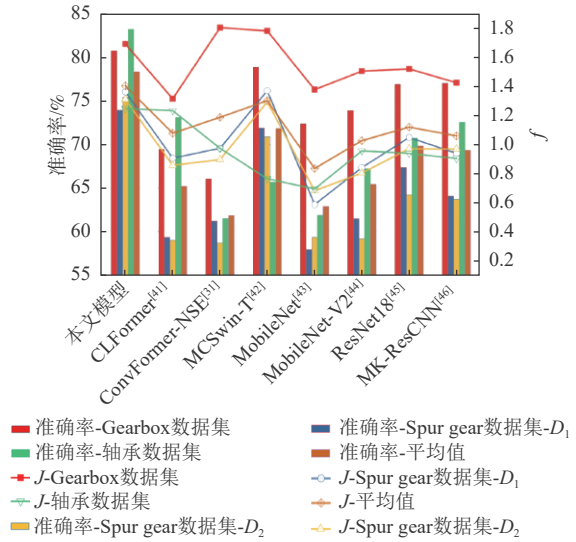


图 12　综合准确率与特征评价指标对比结果

Fig. 12　Comparative results of comprehensive accuracy and feature evaluation index

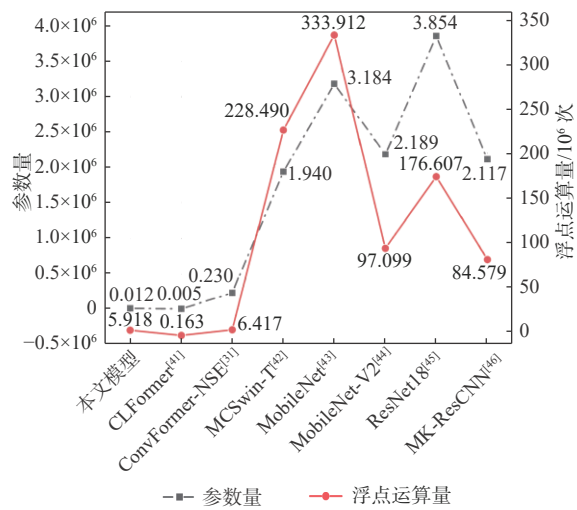


图 13　平均复杂度对比结果

Fig. 13　Comparative results of average complexity

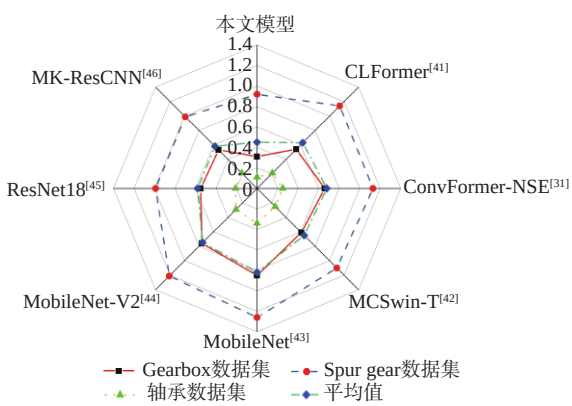


图 14　综合推理时间对比结果

Fig. 14　Comparative results of comprehensive inference times

表 12 各模块在轴承数据集上的准确率对比结果

Table 12 Comparative results of accuracy of each block on Bearing dataset

不同模块	准确率/%						参数量	浮点运算量/10^6次	运行时间/s	
	λ=0	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.8	λ=1			训练时间	推理时间
$f_{\text{fb}}(\boldsymbol{x})$+DC	**96.45**	**95.43**	**88.79**	**78.52**	**70.13**	**64.35**	4×10^3	1.852	24.07	**0.11**
Softmax+DC	96.17	95.20	87.73	77.03	67.80	61.40	4×10^3	1.852	25.41	0.12
Softmax	95.83	94.65	87.13	76.56	67.10	60.87	4×10^3	1.852	24.12	0.12
$f_{\text{fb}}(\boldsymbol{x})$	95.42	93.25	86.07	76.10	66.70	60.10	4×10^3	1.852	**22.31**	**0.11**

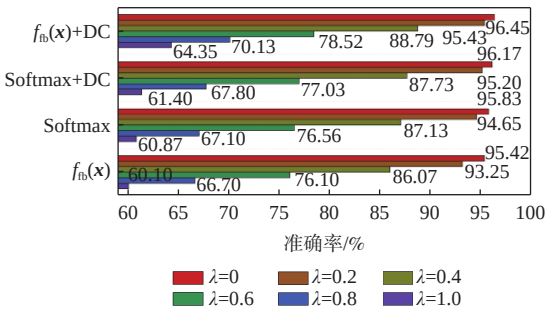


图 15 各模块在轴承数据集上的准确率对比结果

Fig. 15 Comparative results of accuracy of each block on Bearing dataset

所示。可以看出，在各噪声水平下，α=3 的准确率略高。α太低时，会导致放缩不足，无法准确提取各特征之间差异，噪声影响也难以忽略；α太高时，会过度放缩原始信号特征，使部分相似信号远离。故本文在各数据集中与其他模型进行对比实验时，固定α为 3。

表 13 不同α在轴承数据集上的准确率对比结果

Table 13 Comparative results of accuracy of different α on Bearing dataset

α	准确率/%					
	λ=0	λ=0.2	λ=0.4	λ=0.6	λ=0.8	λ=1
2	95.20	94.00	86.20	75.93	70.01	63.53
3	**96.45**	**95.43**	**88.79**	**78.52**	**70.13**	**64.35**
4	96.36	95.28	86.25	77.60	68.29	62.07
5	96.22	95.19	87.40	78.16	69.00	63.39
6	95.87	94.80	86.25	77.48	70.02	63.33

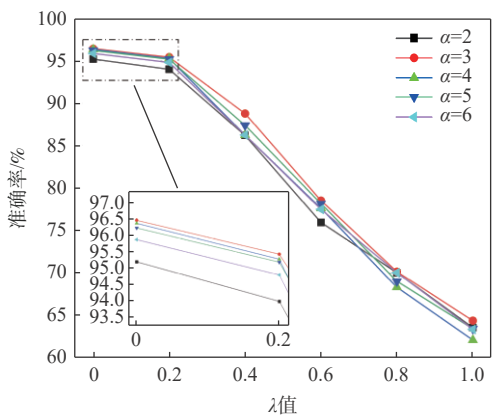


图 16 不同α在轴承数据集上的准确率对比结果

Fig. 16 Comparative results of accuracy of different α on Bearing dataset

4 结 论

针对当前 Transformer 及其变体在长序列故障诊断中计算复杂度随输入时间窗口呈 2 次增长，导致其在工业上难以实时部署的问题，提出一种基于改进线性注意力轻量级 Transformer 故障诊断模型。通过实验分析得出如下结论：

1）本文通过线性注意力近似替代 Softmax 操作，提升模型实时性；通过交换点积计算次序，降低计算复杂度，使模型能够高效处理长序列数据。

2）针对线性注意力在激活映射和特征多样性方面的局限性，设计特征偏置映射函数$f_{\text{fb}}(\boldsymbol{x})$和特征多样性恢复模块 DC，并提出线性注意力特征恢复模块。改进的线性注意力可以使模型更好的聚焦于相似特征，疏远不相似的特征，提高模型的抗噪性能；同时还能保持特征多样性，实现比全局激活更好的性能。通过权重可视化和消融实验对本文模块有效性进行了验证。

3）在 3 个机械故障数据集上进行实验验证，本文模型在准确率和抗噪性能等方面均优于文中比较的其他几种典型诊断模型。同时，本文模型的复杂度和运行时间远低于其他诊断模型，展现出模型的实时推理能力和工业应用价值。

参考文献（References）

[1] Zhou G H, Zhao E K, Yang R H, et al. A new complex system fault detection method based on belief rule base for unreliable interval values[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(8): 084007.

[2] 邵海东, 林健, 闵志闪, 等. 分布外样本干扰下基于改进半监督原型网络的齿轮箱跨域故障诊断[J]. 机械工程学报, 2024, 60(4): 212-221.
Shao H D, Lin J, Min Z S, et al. Improved semi-supervised prototype network for cross-domain fault diagnosis of gearbox under out-of-distribution interference samples[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(4): 212-221(in Chinese).

[3] 邵海东, 李伟, 刘翊, 等. 时变转速下基于双阈值注意力生成对抗

网络和小样本的转子-轴承系统故障诊断[J]. 机械工程学报, 2023, 59(12): 215-224.
Shao H D, Li W, Liu Y, et al. Fault diagnosis of rotor-bearing system under time-varying speeds by using dual-threshold attention-embedded GAN and small samples[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(12): 215-224(in Chinese).

[4] Gao Z W, Cecati C, Ding S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques: part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3757-3767.

[5] Zhu L H, Liu J F, Liu J, et al. Frequent pattern extraction based on data and prior knowledge fusion in gas turbine combustion system[C]//Proceedings of the Prognostics and System Health Management Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-8.

[6] Kumar A, Parkash C, Vashishtha G, et al. State-space modeling and novel entropy-based health indicator for dynamic degradation monitoring of rolling element bearing[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 221: 108356.

[7] Chen Y Z, Zhao X D, Xiang H C, et al. A sequential model-based approach for gas turbine performance diagnostics[J]. Energy, 2021, 220: 119657.

[8] Zhang L W, Lin J, Liu B, et al. A review on deep learning applications in prognostics and health management[J]. IEEE Access, 2019, 7: 162415-162438.

[9] 邵海东, 肖一鸣, 颜深. 仿真数据驱动的改进无监督域适应轴承故障诊断[J]. 机械工程学报, 2023, 59(3): 76-85.
Shao H D, Xiao Y M, Yan S. Simulation data-driven enhanced unsupervised domain adaptation for bearing fault diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(3): 76-85 (in Chinese).

[10] 曹洁, 尹浩楠, 雷晓刚, 等. 基于领域自适应的变工况轴承故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(8): 2382-2390.
Cao J, Yin H N, Lei X G, et al. Bearing fault diagnosis in variable working conditions based on domain adaptation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(8): 2382-2390(in Chinese).

[11] 邵海东, 陈星恺, 曹鸿儒, 等. 内对抗指导无监督多域适配网络的轴承协同故障诊断[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(7): 1229-1240.
Shao H D, Chen X K, Cao H R, et al. Internal adversarial guided unsupervised multi-domain adaptation network for collaborative fault diagnosis of bearing[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2023, 53(7): 1229-1240(in Chinese).

[12] Zhou H Y, Ying Y L, Li J C, et al. Long-short term memory and gas path analysis based gas turbine fault diagnosis and prognosis[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(8): 1-12.

[13] Bai M L, Liu J F, Ma Y J, et al. Long short-term memory network-based normal pattern group for fault detection of three-shaft marine gas turbine[J]. Energies, 2020, 14(1): 13.

[14] Li X G, Jiang X X, Wang Q, et al. Multi-perspective deep transfer learning model: a promising tool for bearing intelligent fault diagnosis under varying working conditions[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 243: 108443.

[15] Han S Y, Shao H D, Huo Z Q, et al. End-to-end chiller fault diagnosis using fused attention mechanism and dynamic cross-entropy under imbalanced datasets[J]. Building and Environment, 2022, 212: 108821.

[16] Fang H R, Deng J, Chen D S, et al. You can get smaller: a lightweight self-activation convolution unit modified by transformer for fault diagnosis[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 55: 101890.

[17] Han K, Wang Y H, Chen H T, et al. A survey on vision transformer[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023, 45(1): 87-110.

[18] Xiao Y M, Shao H D, Feng M J, et al. Towards trustworthy rotating machinery fault diagnosis via attention uncertainty in transformer [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 70: 186-201.

[19] Li Y S, Zhou Z, Sun C, et al. Variational attention-based interpretable transformer network for rotary machine fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024, 35(5): 6180-6193.

[20] Chen Z H, Chen J L, Liu S, et al. Multi-channel Calibrated Transformer with Shifted Windows for few-shot fault diagnosis under sharp speed variation[J]. ISA Transactions, 2022, 131: 501-515.

[21] Ding Y F, Jia M P, Miao Q H, et al. A novel time-frequency Transformer based on self-attention mechanism and its application in fault diagnosis of rolling bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 168: 108616.

[22] Liu W, Chen W, Zhang Z H. A novel fault diagnosis approach for rolling bearing based on high-order synchrosqueezing transform and detrended fluctuation analysis[J]. IEEE Access, 2020, 8: 12533-12541.

[23] Wu R, Liu C, Han T, et al. A planetary gearbox fault diagnosis method based on time-series imaging feature fusion and a transformer model[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(2): 024006.

[24] Ding Y F, Jia M P. Convolutional transformer: an enhanced attention mechanism architecture for remaining useful life estimation of bearings[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3515010.

[25] Han S Y, Shao H D, Cheng J S, et al. Convformer-NSE: a novel end-to-end gearbox fault diagnosis framework under heavy noise using joint global and local information[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(1): 340-349.

[26] 赵洪利, 杨佳强. 基于融合卷积 Transformer 的航空发动机故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(4): 1117-1126.
Zhao H L, Yang J Q. Aero-engine fault diagnosis based on fusion convolutional Transformer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1117-1126(in Chinese).

[27] Choromanski K, Likhosherstov V, Dohan D, et al. Rethinking attention with performers[EB/OL]. (2020-09-30)[2023-10-20]. https://arxiv.org/abs/2009.14794.

[28] Bolya D, Fu C Y, Dai X L, et al. Hydra attention: efficient attention with many heads[EB/OL]. (2022-09-15)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2209.07484.

[29] Wang R, Zhang S J, Liu S Q, et al. A bearing fault diagnosis method for high-noise and unbalanced dataset[J]. Smart and Resilient Transportation, 2023, 5(1): 28-45.

[30] Zaheer M, Guruganesh G, Dubey A, et al. Big bird: transformers for longer sequences[EB/OL]. (2020-07-28)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2007.14062.

[31] Beltagy I, Peters M E, Cohan A. Longformer: the long-document transformer[EB/OL]. (2020-04-10)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2004.05150.

[32] Katharopoulos A, Vyas A, Pappas N, et al. Transformers are RNNs: fast autoregressive transformers with linear attention[EB/OL]. (2020-06-29)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2006.16236.

[33] Shen Z R, Zhang M Y, Zhao H Y, et al. Efficient attention: attention with linear complexities[EB/OL]. (2018-12-04)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/1812.01243.

[34] Lu J C, Yao J H, Zhang J G, et al. SOFT: softmax-free transformer with linear complexity[EB/OL]. (2021-10-22)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2110.11945.

[35] Tian C W, Zheng M H, Zuo W M, et al. A cross Transformer for image denoising[J]. Information Fusion, 2024, 102: 102043.

[36] Shao R, Shi Z, Yi J, et al. On the adversarial robustness of vision Transformers[EB/OL]. (2021-03-29)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2103.15670.

[37] Guo Y, Stutz D, Schiele B. Robustifying token attention for vision transformers[EB/OL]. (2023-03-20)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2303.11126.

[38] Wang S N, Li B Z, Khabsa M, et al. Linformer: self-attention with linear complexity[EB/OL]. (2020-06-08)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2006.04768.

[39] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al. Attention is all you need[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2017: 6000-6010.

[40] Xiong Y Y, Zeng Z P, Chakraborty R, et al. Nyströmformer: a Nyström-based algorithm for approximating self-attention[EB/OL]. (2021-02-07)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/2102.03902.

[41] Fang H R, Deng J, Bai Y X, et al. CLFormer: a lightweight transformer based on convolutional embedding and linear self-attention with strong robustness for bearing fault diagnosis under limited sample conditions[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3504608.

[42] Dong X Y, Bao J M, Chen D D, et al. CSWin transformer: a general vision transformer backbone with cross-shaped windows[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 12114-12124.

[43] Howard A G, Zhu M L, Chen B, et al. MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications[EB/OL]. (2017-04-17)[2026-04-15]. https://arxiv.org/abs/1704.04861.

[44] Sandler M, Howard A, Zhu M L, et al. MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 4510-4520.

[45] He K M, Zhang X Y, Ren S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 770-778.

[46] Liu R N, Wang F, Yang B Y, et al. Multiscale kernel based residual convolutional neural network for motor fault diagnosis under nonstationary conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(6): 3797-3806.

[47] Zhao X L, Yao J Y, Deng W X, et al. Intelligent fault diagnosis of gearbox under variable working conditions with adaptive intraclass and interclass convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023, 34(9): 6339-6353.

[48] Li T F, Zhou Z, Li S N, et al. The emerging graph neural networks for intelligent fault diagnostics and prognostics: a guideline and a benchmark study[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 168: 108653.

[49] Yan S, Shao H D, Wang J, et al. LiConvFormer: a lightweight fault diagnosis framework using separable multiscale convolution and broadcast self-attention[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 237: 121338.

[50] Huang H, Baddour N. Bearing vibration data collected under time-varying rotational speed conditions[J]. Data in Brief, 2018, 21: 1745-1749.

Lightweight fault diagnosis of rolling bearings based on improved linear attention Transformer

ZHANG Haiyan，WU Honglan*，LIU Hao，SUN Youchao

(College of Civil Aviation，Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing 210016，China)

Abstract: The Transformer-based rolling bearing fault diagnosis algorithms have a quadratic increase in computational complexity with the input time window, leading to a decrease in the real-time performance of the model inference. To address this problem, a lightweight Transformer fault diagnosis model based on improved linear attention is proposed. Firstly, the improved linear attention is proposed to reduce the quadratic computational complexity, which uses the strategy of changing the computation order of the dot product. Secondly, by substituting the suggested feature bias mapping function for the Softmax global mapping function, the enhanced linear attention feature recovery block is suggested, which reduces the computational burden of utilizing the global acceptance field. At the same time, the bias function has an efficient feature focusing mechanism, which demonstrates significant anti-noise interference properties by strengthening the connection between similar features and weakening the coupling between dissimilar features. Then, the feature diversity recovery block is used to approximate the performance of the original self-attention after global activation and to recover the modeling ability for long-term temporal dependencies. Experiments are conducted on three mechanical failure datasets from Xi'an Jiaotong University and the University of Ottawa. Compared with seven typical models, namely CLFormer, ConvFormer-NSE, MCSwin-T, MobileNet, MobileNet-V2, ResNet18 and MK-ResCNN, the results show that the proposed model outperforms the above models in terms of accuracy and real time performance, and has good robustness in heavy noise environments at the same time. To create a comprehensible connection between the suggested approach and the prediction outcomes, visualize the feature bias mapping function's weight information. Finally, the effectiveness of the proposed modules (feature bias mapping function, feature diversity recovery module) is verified by ablation experiments.

Keywords: fault diagnosis; heavy noise; lightweight; linear attention; feature diversity

Received：2024-05-29；**Accepted**：2024-07-19；**Published Online**：2024-09-10 10：57

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240909.1755.013

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (U2033202,U1333119,52172387); The Postgraduate Research & Practice Innovation Program of NUAA (xcxjh20230708)

* **Corresponding author**. E-mail：wuhonglan@nuaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0365

基于改进 VAE-WGAN 的飞机不稳定进近检测

丁聪[1,2]，李啸宇[2]，王文涛[2]，张琦[1,*]，张小贝[1]

(1. 上海大学 通信与信息工程学院，上海 200444；2. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院，上海 201210)

摘 要：随着航空业的快速发展，保证飞机的安全飞行显得尤为重要。为针对性开展航空领域异常事件检测，以飞机进近阶段的不稳定进近事件为目标，提出一种飞行级异常检测方法。该方法融合了变分自编码器 (VAE) 和 Wasserstein 生成对抗网络 (WGAN)，并使用帕累托分布来模拟异常情况的概率分布，简称 PVAE-WGAN。将 VAE 和 WGAN 的生成器共享，以正态分布和帕累托分布中随机采样的隐变量作为生成器输入，输出的重构样本分别作为正负样本。使用 Wasserstein 距离作为模型拟合正负样本的分布与真实分布之间的度量，使生成器和鉴别器都获得区分异常的能力，从而实现对不稳定进近事件的精确检测。以真实飞行数据记录器 (FDR) 记录的数据为例，对所提方法进行训练与测试，与其他适用于不稳定进近检测的多维时间序列异常检测方法相比有显著提升。所提方法的 F_1 值可达 0.935，相对其他方法的 F_1 值平均提升 12.95%。

关 键 词：不稳定进近；异常检测；变分自编码器；生成对抗网络；帕累托分布

中图分类号：V328.2; TP183

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2580-09

根据国际民航组织统计[1]，飞行风险多集中发生在飞行过程的起飞与降落阶段，风险概率高达80%。空客公司和波音公司最新的商业飞机事故统计汇总中都明确指出，所有飞行阶段里约有 50% 的致命事件和 32% 的机上死亡人数发生在最终进近和着陆阶段[2]。而不稳定进近是降落时的主要安全问题之一，因此，监测此类事件已成为飞行监控的重要任务。

对于航空器的安全分析及异常检测研究，大都基于可获取的快速存取记录器(quick access recorder, QAR)或飞行数据记录器(flight data recorder, FDR)的数据建立模型或以数据驱动的方法进行。随着飞机传感器及互联网的快速发展，出现了各种开源航空器数据平台，其提供大量可供研究的数据集，推动了数据驱动方法在航空安全领域的应用研究。

文献 [3] 基于能量管理提出了一种不稳定进近检测方法，可使分析中所需参数更少，且阈值随时间变化而变化。文献 [4] 通过分析飞机进近过程中的能量状态，实现了大型民机进近着陆过程中的风险预警。能量状态可以理解为飞行高度和速度的复杂关系表达，但进近过程中应关注的飞行参数还应有飞机姿态变化和距离跑道相对位置等，且复杂多样的异常情况很难基于预定义的一种复杂关系来评估。

文献 [5] 利用基于密度的噪声空间聚类算法(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)来检测飞机进近过程中的异常航班，结果显示，由进近异常的飞行数据所得出的异常分数明显高于正常飞行。文献 [6] 使用局部异常值因子(local outlier factor, LOF)算法来检测进近着陆过程中飞行数据的异常情况[6]，相较于 DBSCAN 进行的二分类操作，LOF 量化了离群值的异常程

收稿日期：2024-05-29；录用日期：2024-08-30；网络出版时间：2024-10-11 15:24
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241011.1335.001
基金项目：民用飞机专项科研项目 (MJZ2-6N21-2)
*通信作者. E-mail：qzhang9@shu.edu.cn

引用格式：丁聪，李啸宇，王文涛，等. 基于改进 VAE-WGAN 的飞机不稳定进近检测 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2580-2588. Ding C，Li X Y，Wang W T，et al. Unstable approach detection of aircraft based on modified VAE-WGAN[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2580-2588 （in Chinese）.

度。但由于数据稀疏性, 传统机器学习方法均难以应对高维数据, 且无法捕获数据在时间上的关联性。

由多个飞行参数组成的飞行数据本质上是一种多维时间序列, 为捕获飞行数据中更复杂的隐藏特征和时间相关性, 国际上展开了深度神经网络技术在航空领域的异常检测研究[7]。文献 [8] 针对飞行参数异常样本稀少的问题, 利用不同架次飞行数据的相似性, 构建了带有梯度惩罚(gradient penalty, GP)的 Wasserstein 生成对抗网络(Wasserstein generative adversarial networks, WGAN)模型以实现对飞行参数中异常数据的检测。但仅凭生成对抗网络(generative adversarial networks, GAN)生成的数据难以控制数据质量, 当飞行数据增多时无法拟合所有正常飞行情况。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)数据研究组开发了一种用于多维时间序列数据异常检测的卷积变分自编码器(convolutional variational auto-encoder, CVAE), 该模型可拟合正常飞行的概率分布[9]。文献 [10] 融合长短期记忆(long short-term memory, LSTM)和变分自编码器(variational auto-encoder, VAE)研发了具有多头自注意力机制的 VAE-LSTM 模型, 可以有效检测短期异常和长期异常。但基于一般的 VAE 模型在进行训练时存在后验崩溃问题, 一旦发生这种情况, VAE 就会过度拟合现有数据的正态分布, 从而导致正常数据被错误分类为异常。

针对后验崩溃问题, 本文提出一个假设: 正常数据的先验分布近似为正态分布, 而异常数据的先验分布近似为帕累托分布, 两者的峰值部分存在重叠。通过研究和分析上述方法在不稳定进近检测中的应用及所提出的假设, 本文提出基于一维卷积网络架构的 PVAE-WGAN 不稳定进近检测方法, 该方法引入帕累托分布模拟飞机进近过程中的异常情况, 结合 VAE 和 WGAN 的特点以对比学习和对抗学习的方式提升模型的异常识别能力。测试阶段中, 通过方差倒数法计算重构误差, 结合鉴别误差计算异常分数, 当异常分数高于阈值时则判定为不稳定进近事件。

1　相关理论知识

1.1　生成对抗网络

GAN 自文献 [11] 提出以来就迅速应用于各个领域, 文献 [12] 开展了基于 GAN 的无监督异常监测研究。GAN 主要由生成器 G 和鉴别器 D 组成, 如图 1 所示。其中, G 用来捕获数据的分布并生成新的样本数据; D 作为鉴别器, 用来判断输入的样本数据是真实数据还是生成的数据。

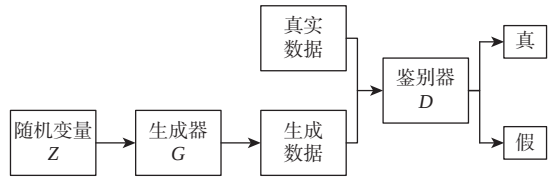


图 1　GAN 结构

Fig. 1　Structure of GAN

针对原始 GAN 的梯度消失模型坍塌等问题, 文献 [13] 提出将 Wasserstein 距离定义为生成器的损失函数的方法。原始 GAN 使用詹森-香农(Jensen-Shannon, JS)散度作为相似度标准, 难以衡量 2 个重叠测度为 0 的分布, 而 Wasserstein 距离则能反应 2 个分布的远近。但 WGAN 存在训练困难、收敛速度慢等问题, 因此, 文献 [14] 在 WGAN 的基础上再加入 GP, 从而显著提高训练速度且使训练更加稳定。

在飞机进近异常事件检测中, 训练结果会得到与正常数据相似的生成数据样本, 再结合测试集样本与生成数据样本之间的差异及鉴别器的结果来检测待测数据是否异常。

1.2　变分自编码器

自编码器是一种前馈多层神经网络, 经过训练可以通过最小化重建误差将其输入复制到输出, 可以视为一种非线性主成分分析的推广。VAE 则是由文献 [15] 将变分推理和自编码器相结合提出的一种生成模型。VAE 可分为编码器和解码器 2 部分, 编码器通过学习数据的分布, 并将原始数据映射到遵循一个概率分布的低维隐变量空间中。解码器则接收隐变量空间的采样, 并依据概率分布生成原始数据。

基于 VAE 进行的飞机不稳定进近异常检测, 在只使用正常飞机进近数据进行训练后, 模型可以对正常飞行提供准确的估计。当输入异常数据时则会出现较大的重构误差, 以此达到异常检测的目的。由于 VAE 是以时间序列中潜在变量分布参数的重建概率作为异常检测的度量, 该方法不受数据结构的限制, 因此, 相比只计算数据本身的重构误差更加客观和合理。

1.3　帕累托分布

帕累托分布是从大量真实世界的现象中发现的幂定律分布[16], 是通常用来描述不平衡现象的概率分布模型, 其核心思想是, 在许多情况下大部分结果都来自于少数的原因或因素。在帕累托分布中, 如果 X 是一个随机变量, 则 X 的概率分布为

$$P(X>X')=\left(\frac{X'}{x_{\min}}\right)^{-k} \tag{1}$$

式中：X'为任何一个大于$x_{\min}$的数；k为形状参数，决定了分布的尾部衰减速度；$x_{\min}$为尺度参数，是分布的最小可能值。

帕累托分布曲线族则是由这2个数量参数化，其分布密度为

$$p(X')=\begin{cases}0 & X'<x_{\min}\\ \dfrac{kX'^{k}_{\min}}{X'^{k+1}} & X'>x_{\min}\end{cases} \tag{2}$$

帕累托分布的期望值μ和方差σ^2为

$$\begin{cases}\mu=\dfrac{k}{k-1}x_{\min}\\ \sigma^2=\dfrac{x^2_{\min}}{(k-1)^2(k-2)}\end{cases} \tag{3}$$

为确保期望值和方差存在，应保证$k>2$。

在飞行数据异常检测中，关注的经常是与正常情况显著不同的异常事件，而帕累托分布的特点正好能够帮助识别这些异常。通过分析这些异常和正常数据的差异，可以更有效地发现和处理异常情况。

2 不稳定进近判定标准

不稳定进近是指在飞机进近着陆过程中，没有按照预期进行或偏离既定标准的情况。事故分析表明，不稳定进近带来的意外因素可能导致飞机着陆速度过快、偏离跑道中心线，从而发生飞机损坏、冲出跑道等不安全事件，这不仅会增加机组成员的工作量，导致跑道占用时间延长、跑道容量下降等问题，严重情况甚至会影响乘客与机组成员的人身安全[17]。

进近过程中飞行的稳定性是根据美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)关于稳定进近的指南来确定，而不稳定进近的检测标准则是基于预定值的超限检测。通过选择特定参数并设置阈值，从而判定飞机是否属于稳定进近状态。本文所采用的飞行参数及阈值源自于欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)、国内航司等航空机构的建议及一些文献[18-19]，表1总结了这些参数并详细给出了各个参数的阈值。

表1 飞行变量的超限标准

Table 1 Exceed criteria for flight variable

惯性垂直速度/(m·s^{-1})	校正空速/(m·s^{-1})	俯仰角/rad	横滚角/rad	航道偏差	下滑道偏差
>7.62	56.59～77.17	−0.17～0.17	−0.26～0.26	>3	>3

注：本文定义航道偏差、下滑偏差超限判据为3倍标准差，表中简写为3。

下滑道偏差指飞行路径与跑道之间3度角的垂直偏差，而航向道偏差指与跑道中心线的水平偏差。由于稳定条件指定飞机必须在稳定高度保持进近速度和稳定推力，仪表气象条件(instrument meteorological conditions, IMC)时稳定高度为3 048 m(1 ft)，目视气象条件(visual meteorological conditions, VMC)时为1 524 m，因此，超限检测是在飞机距离机场地面高度为3 048 m与1 524 m之间进行的。在拒绝着陆的情况下，复飞前距地面的最低高度标志着稳定性检查窗口的结束。为防止因传感器噪声而导致错误触发不稳定事件，基于EASA设立的不稳定进近标准，本文设立了3 s的持续触发条件。FAA规定的成功着陆的时间窗口如图2所示。

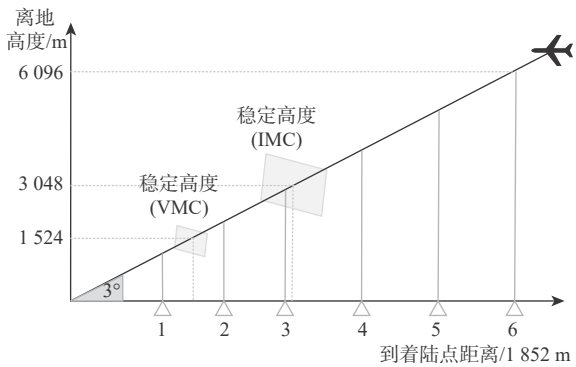


图2 稳定进近标准检查点

Fig. 2 Stable approach standard checkpoint

3 PVAE-WGAN模型

本文模型检测的目标是飞行级异常，即飞行数据中聚集为异常形状的序列或子序列[20]。通过PVAE-WGAN模型给予飞机进近阶段数据一个异常分数，从而实现不稳定进近检测。不稳定进近检测整体架构由离线训练和在线检测2部分组成，如图3所示。

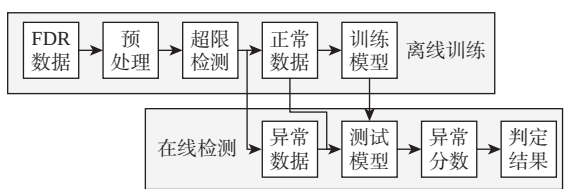


图3 不稳定进近检测的整体架构

Fig. 3 The overall structure of unstable approach detection

与一般VAE仅以证据下界(evidence lower bound, ELBO)作为目标函数不同，本文在离线部分通过3个目标进行训练：VAE的基础重构能力、鉴别器对于正负样本的区分能力和生成器对于正负样本的区分能力。采用一维卷积神经网络对原始多维时间序列进行编码以捕获时间序列之间的复杂关系，再用不同的线性变换分别生成一组正态分布参数和帕累托分布参数。假设正态分布

代表正常数据的分布, 而帕累托分布代表异常数据的分布, 通过对 2 个分布进行随机采样并分别生成得出正常重构数据和异常重构数据。最大化异常重构数据和真实数据的误差以训练 WGAN; 最大化 2 种重构数据的误差并最小化正常重构数据和真实数据的误差以训练 VAE, 再通过最大化由鉴别器输出的 2 种重构数据的判别误差辅助训练 VAE, 从而强化整个模型对于异常数据的区分能力。

在线检测模块使用已训练好的模型, 根据重构误差及鉴别器输出的鉴别误差来计算异常分数, 异常分数将用于识别飞机进近过程中是否发生异常。为更加契合飞行数据的特点, 分别计算每个飞行参数的重构误差, 并根据方差倒数法确定各个飞行参数的权重, 加权相加得出整体的重构误差。鉴别器在训练阶段用于输出正常数据和异常数据的分数并使其差异最大化, 因此, 鉴别器的输出可直接作为异常分数的一部分。

3.1　网络架构

PVAE-WGAN 的网络架构如图 4 所示, 共包含 3 个网络, 即编码器、生成器和鉴别器。s_d、s_{dp}、s 分别为输入为 $\boldsymbol{y}$、$\boldsymbol{y}_p$、$\boldsymbol{x}$ 时鉴别器输出的异常分数。WGAN 的生成器同时也是 PVAE 的解码器。编码器和生成器组成 PVAE-WGAN 的 PVAE 模块, 生成器和鉴别器组成 PVAE-WGAN 的 WGAN 模块。

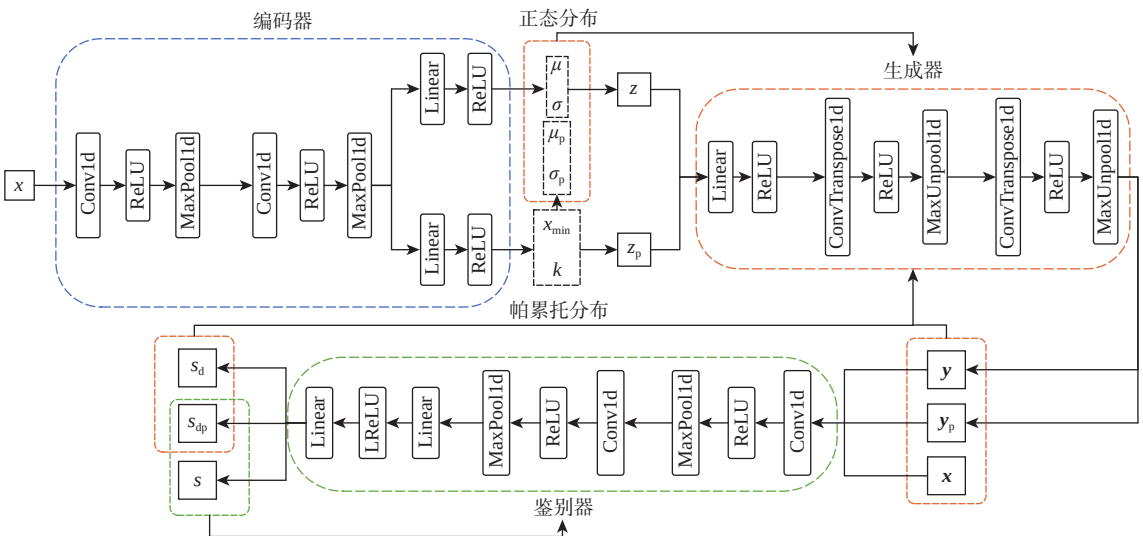


图 4　PVAE-WGAN 的网络架构

Fig. 4　The network structure of PVAE-WGAN

一般的解码器在训练多次后容易忽略隐变量 z 中所表示的信息, 从而独立于 z 重建输入, 这称为后验崩溃。如果不限制解码器, 模型会过拟合数据的正态分布, 从而导致一些不良后果。为解决该问题, 本文引入帕累托分布来获得有效的正则化, 使解码器也具有一定的辨识能力。

在一般 VAE 中, 编码器负责将输入数据 $\boldsymbol{x}$ 映射到潜在空间的一个概率分布(通常是正态分布), 正态分布参数 μ 和 σ 均由编码器生成。因此, 本文提出的模型在拟合帕累托分布时, 其形状参数 k 和尺度参数 $x_{\min}$ 也由编码器生成, 且每个样本拟合出的参数均不相同, 不需人为设定阈值。

如图 4 所示, 先由编码器计算正常潜在表示的正态分布参数 μ 和 σ 及异常潜在表示的帕累托分布参数 $x_{\min}$ 和 k, 计算过程为

$$\begin{cases}(\mu,\sigma)=H_1(F(\boldsymbol{x}))\\(x_{\min},k)=H_2(F(\boldsymbol{x}))\end{cases}\tag{4}$$

式中: F 为特征提取部分, 由多层卷积池化网络组成, 可用来捕获输入时间序列 $\boldsymbol{x}$ 的复杂关系; H_1、H_2 分别为计算正态分布参数和帕累托分布参数的非线性网络。随后, 通过重参数化技巧获得隐变量 z 和 z_p:

$$\begin{cases}z=\mu+\sigma\odot\epsilon\\z_p=x_{\min}/\epsilon^{\frac{1}{k}}\end{cases}\tag{5}$$

式中: $\epsilon\sim N(\boldsymbol{0},I)$。

利用式(3)将帕累托分布近似为一个正态分布, 其均值和方差分别为 μ_p 和 σ_p, 并最小化 2 个分布的距离, 即尝试生成类似的异常潜在表示 z_p 来迷惑 G, G 则尝试将 2 个相似分布的随机采样变量 z 和 z_p 分别解码为 2 个不同的样本 $\boldsymbol{y}$ 和 $\boldsymbol{y}_p$, 最大化 2 个生成样本的差异来提升 G 的区分能力。因此, 一个对抗过程的损失函数可描述为

$$L_A=L_{Ap}+L_{Ag}\tag{6}$$

式中:

$$L_{Ap}=D_{KL}\left(N\left(z;\mu,\sigma^2\right)\|N\left(z_p;\mu_p,\sigma_p^2\right)\right)\tag{7}$$

$$L_{\mathrm{Ag}} = -\mathrm{MSE}(G(z), G(z_{\mathrm{p}})) = -\mathrm{MSE}(\boldsymbol{y}, \boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}) \tag{8}$$

式中：D_{KL}为KL散度，用于衡量2个概率分布之间的差异距离，数值越大差异越大；MSE为均方误差，用于衡量重建数据与原始数据的特征误差，值越大重建效果越差。

结合以上对抗部分生成器可输出一个正常样本$\boldsymbol{y}$和一个异常样本$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}$，引入对比学习来分析其关系。本文添加了一个鉴别器$D$，与编码器$E$相似，同样使用一维卷积加非线性变换的架构输出表示样本的异常程度。训练目标是使$\boldsymbol{y}$和$\boldsymbol{x}$的Wasserstein距离相近而$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}$与$\boldsymbol{x}$的距离相对较远。对比过程的损失函数为

$$L_{\mathrm{C}} = L_{\mathrm{C1}} + L_{\mathrm{C2}} \tag{9}$$

式中：

$$L_{\mathrm{C1}} = \mathcal{E}_{\boldsymbol{x}\sim P_x}[D(\boldsymbol{x})] - \mathcal{E}_{\boldsymbol{y}\sim P_y}[D(\boldsymbol{y})] \tag{10}$$

$$L_{\mathrm{C2}} = \mathcal{E}_{\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}\sim P_{y_{\mathrm{p}}}}[D(\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}})] - \mathcal{E}_{\boldsymbol{x}\sim P_x}[D(\boldsymbol{x})] \tag{11}$$

式中：$P_{\boldsymbol{x}}$、$P_{\boldsymbol{y}}$和$P_{\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}}$分别为$\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{y}$和$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}$的概率分布；$D(\cdot)$为鉴别器函数；$\mathcal{E}(\cdot)$为期望值函数。VAE的基础损失函数为

$$L_{\mathrm{B}} = \mathrm{MSE}(x, G(E_1(x))) - D_{\mathrm{KL}}\left(q_\phi(z\mid x)\|p_\theta(z)\right) \tag{12}$$

式中：$E(\cdot)$为编码器函数，$G(\cdot)$为生成器函数；MSE用来衡量原始样本x和重建样本$G(E_1(x))$的差异；$D_{\mathrm{KL}}(\cdot)$为KL散度，用于衡量2个概率分布之间的距离；q为近似后验分布（编码器输出的分布），代表给定输入时隐变量的条件概率分布；p为先验分布，本文设定为标准正态分布；$\|$为KL散度的排布规范，$P\|Q$表示以Q为基准度量P和Q的差异。

WGAN的鉴别器损失函数同样使用Wasserstein距离来进行计算，为使D能更好地区分真实数据和重构数据，通过最大化两者分布的距离来达到训练目的，其目标函数为

$$\min_G \max_{\|D\|\leqslant 1} V(D,G) = \mathcal{E}_{\boldsymbol{x}\sim P_x}[D(\boldsymbol{x})] - \mathcal{E}_{\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}\sim P_{y_{\mathrm{p}}}}[D(\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}})] \tag{13}$$

3.2 模型训练

整个离线部分采用异步训练法，通过D的损失函数训练WGAN模块。由于D在训练阶段只涉及自身，因此，可直接将$\boldsymbol{x}$和$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}$作为输入样本进行训练。而WGAN的生成器又是PVAE的解码器，因此，使用L_{B}作为基础损失函数，L_{A}和L_{C}的加权和作为其正则化项，结合起来共同作为VAE的最终损失函数：

$$L_{\mathrm{VAE}} = L_{\mathrm{B}} + \lambda L_{\mathrm{A}} + (1-\lambda)L_{\mathrm{C}} \tag{14}$$

式中：λ为损失函数权重系数，用于控制不同损失函数的相对重要性，$\lambda \in (0,1)$。

实验发现，当λ取0.5时，模型取得最佳的检测效果。通过设计这样的目标函数，可以很好地训练网络结构复杂的PVAE-WGAN。训练过程如下：

输入：飞行数据集输出$\boldsymbol{x}$、编码器参数$\boldsymbol{\Phi}$、生成器参数$\boldsymbol{\Theta}$、鉴别器参数ω。

1: For epoch in range(总训练次数)

2: For x in 批数据集

3: For a in range(N训练次数)

4: 使用VAE输出$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}$

5: 将$\boldsymbol{x}$和$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}$输入$N$中，利用WGAN-GP方法计算其距离

6: 更新N的参数ω

7: End for

8: 将真实数据输入VAE得到$\boldsymbol{y}$和$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}$及相应的均值和方差

9: 将$\boldsymbol{y}$和$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}$输入$N$中，利用WGAN-GP方法计算其距离

10: 计算L_{VAE}

11: 更新VAE的参数$\boldsymbol{\Phi}$和$\boldsymbol{\Theta}$

12: End for

13: End for

3.3 异常检测

在线异常检测部分由不引入帕累托分布的部分编码器及生成器和鉴别器组成。由于训练阶段模型只使用了正常数据，因此，当异常数据输入到已训练好的模型中时，所产生的异常分数会高于正常数据的异常分数。当异常分数高于预先设定的阈值时则判定为不稳定进近事件。

PVAE-WGAN生成的重构序列与原始序列的误差包括VAE的重构误差和D的鉴别误差，异常分数则由这2种误差组成。

对于每个原始序列$\boldsymbol{x} = [\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{1}}, \boldsymbol{x}^{\boldsymbol{2}}, \cdots, \boldsymbol{x}^{\boldsymbol{N}}]$，$\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{n}}$表示第$n$个特征的时间序列向量，$N$为特征数量，利用已训练好的PVAE-WGAN生成的重构序列为$\hat{\boldsymbol{x}} = [\hat{\boldsymbol{x}}^{\boldsymbol{1}}, \hat{\boldsymbol{x}}^{\boldsymbol{2}}, \cdots, \hat{\boldsymbol{x}}^{\boldsymbol{N}}]$。VAE的重构误差$S_{\mathrm{MSE}}$则由每个特征的原始序列$x_{ij}$和重构序列$\hat{x}_{ij}$的误差加权相加所得：

$$S_{\mathrm{MSE}} = \sum_{j=1}^{n} w_j \cdot \sum_{i=1}^{m} \left\| x_{ij} - \hat{x}_{ij} \right\|^2 \tag{15}$$

式中：w_j为第j个特征的权重系数，通过方差倒数法确定。

首先，计算训练数据中所有特征的方差，然后，求出每个特征方差倒数的平方根，最后，对权重进行归一化处理。

本文使用WGAN作为生成对抗部分，与普

通 GAN 输出二分类结果不同, WGAN 输出的是 Wasserstein 距离, 表达了重构样本与真实样本的差异程度。因此, 鉴别器的输出结果可直接当作鉴别误差 S_D, 输出值越小则证明与真实样本越相似, 反之则与真实样本差异程度越大。可表示为

$$S_D = D(\hat{\boldsymbol{x}}) \tag{16}$$

由于重构误差和鉴别误差的量级不同, 因此, 先对 S_{MSE} 和 S_D 进行 Z-score 标准化处理, 输出为 Z_{MSE} 和 Z_D, 随后, 将两者组合作为最终的异常分数, 可表示为

$$S_{\mathrm{com}} = \alpha Z_{\mathrm{MSE}} + (1-\alpha) Z_D \tag{17}$$

式中: Z_{MSE} 和 Z_D 分别为 S_{MSE} 和 S_D 进行 Z-score 标准化处理后的结果; α 为控制 Z_{MSE} 和 Z_D 相对重要性的参数, $\alpha \in (0,1)$。其取值可在最大化 F_1 值的过程中遍历获取。经实验发现, 当 α 取 0.72 时效果最佳, 也间接证明 2 种误差在异常检测中都能发挥作用。

4　实验与分析

本文实验数据为公开的 NASA DASH-link 样本飞行数据[21], 由美国某支线航空公司提供的匿名 FDR 数据, 以下统称飞行数据。从中获取了 1 033 个在明尼阿波利斯—圣保罗国际机场降落的航班, 通过超限检测发现其中有 978 个航班为稳定进近, 55 个航班发生了不稳定进近。随后, 从稳定进近航班中随机选取 80% 作为训练数据, 另外 20% 的稳定进近航班和所有不稳定进近航班组成测试数据[8]。

实验的软件环境为 Python3.8.18, pytorch1.12.0, Windows11 64 位操作系统; 硬件环境为 CPU AMD Ryzen 7, 16 GB 内存, GPU NVIDIA 4060。实验流程如图 3 所示, 训练过程中共训练了 200 个 epoch, 每次训练 batch size 的个数设置为 32 个。训练细节上, VAE 部分使用 Adam 优化器来进行优化梯度, WGAN 部分则使用不基于动量的 RMSprop 优化器进行优化, 学习率统一为 0.000 1。对于本文比较的其他深度学习模型, 以上超参数均适用, 其他传统机器学习方法的超参数则以最大化 F_1 值为标准来设定。

4.1　数据预处理

由于数据传输等问题, 真实飞行数据中会存在一些零值或离群点, 本文采用窗口为 15 的移动中值法作为异常值检测的方法, 并通过线性插值的方式填充异常值。飞行数据的采样频率范围为 0.25～16 Hz, 中值采样频率为 4 Hz, 因此, 本文所分析的飞行特征变量均以 4 Hz 的速率重新采样, 以保持所有的特征变量采样频率相同。随后, 对数据应用 10 s(4 Hz 下为 40 个样本)的移动中值滤波器, 过滤数据中的轻微噪声。

由于飞行数据单位不统一, 数值范围差异较大, 为方便后续模型训练保证训练效果, 对训练数据及测试数据进行归一化处理, 处理过程为

$$r_{ij} = \left(x_{ij} - x_j^{\min}\right) / \left(x_j^{\max} - x_j^{\min}\right) \tag{18}$$

式中: x_{ij} 为第 j 个飞行参数在 i 时刻的值; $x_j^{\max}$、$x_j^{\min}$ 分别为整个数据集中第 j 个飞行参数的最大值和最小值; r_{ij} 为 x_{ij} 的归一化数据。

进近阶段数据是按照无线电高度截取, 由于飞机在进近时受到多种因素的影响, 因此, 每个航班的进近时间有所不同。为确保数据的一致性和可比性, 对每个航班进行线性插值处理, 从而使飞行数据便于批量训练。

4.2　可视化分析

为评估本文模型是否适用于不稳定进近检测, 对其实验结果进行可视化分析。测试集共有 251 次航班, 前 196 个航班为稳定进近, 后 55 个航班为不稳定进近。最终的异常分数如图 5 所示, 不稳定进近航班的异常分数明显高于正常航班, 证明本文模型能准确识别不稳定进近。重构误差和鉴别误差的数值在区分度上也有所不同, 其中, PVAE 部分的重构误差区分效果更好。

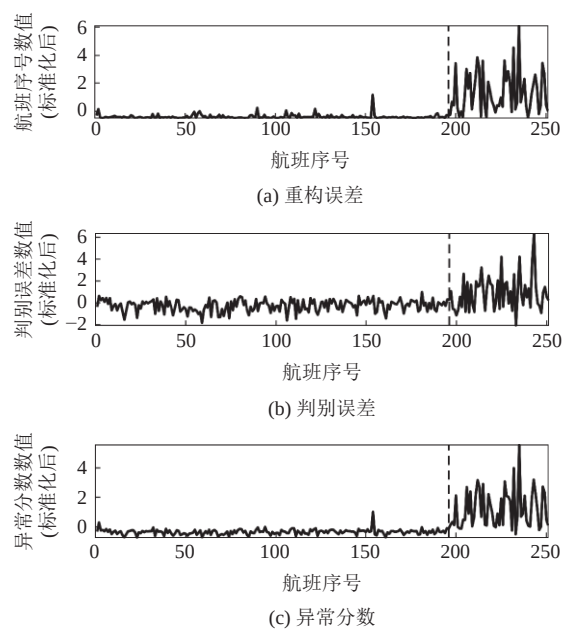


图 5　异常分数结果

Fig. 5　Anomaly score result

对于飞行参数波动明显且变化不规律、但数值仍在正常范围内的航班, PVAE 的重构难度较大。而飞行参数变化规律符合稳定进近的模式、但极值超过安全阈值的航班则相对容易重构。这种差异是影响 PVAE 在识别不稳定进近航班时准确性的一个关键因素。与此同时, WGAN 在异常检测方面采取了与 PVAE 不同的策略, 其鉴别器不需要对数

据做出某种分布的假设，而是通过区分生成器产生的正样本和负样本来增强其异常检测能力，因此，WGAN的鉴别器对于飞参参数超出正常范围的航班更为敏感，一定程度上弥补了PVAE在捕捉轻微超限异常方面的不足。

图6、图7分别展示了整体异常分数最大和稳定进近中异常分数最大航班的飞行参数变化，其航班序号分别是234和153。

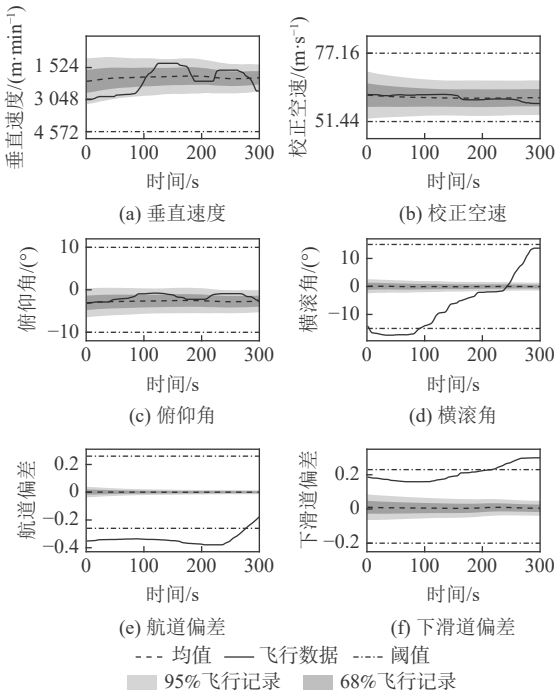


图6 航班序号234的飞行参数

Fig. 6 Flight parameter of flight ID 234

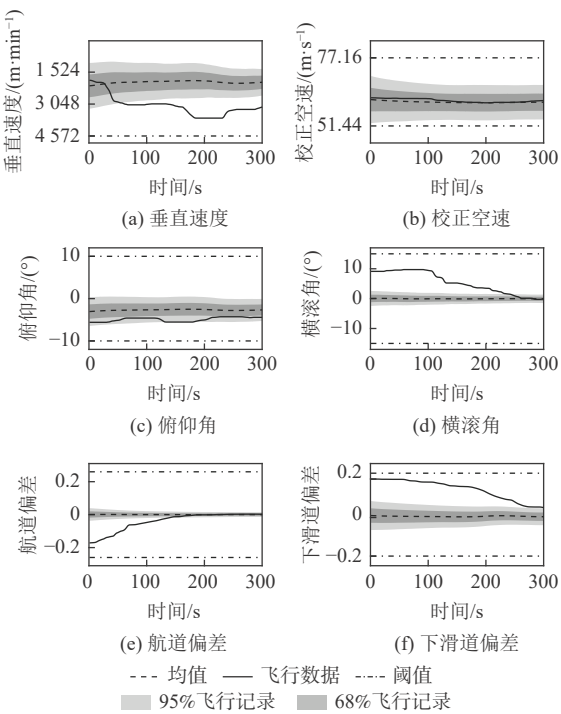


图7 航班序号153的飞行参数

Fig. 7 Flight parameter of flight ID 153

由图6可知，有3项飞参数据都长时间超过超限检测的阈值标准，且波动幅度较大，因此，可被判定为不稳定进近。图7中的飞参数据虽然都没有超过超限检测的阈值标准，但有4项特征的变化与95%的正常飞行不同，包括垂直速度过快、横滚角较大、下滑道偏差和定位偏差变化幅度较大等问题，因此，也被本文模型认定为不稳定进近。

4.3 实验结果对比分析

本文通过精确率、召回率和F_1值来衡量检测方法的性能，其计算方式为

$$\begin{cases} P = \dfrac{T_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{P}} + F_{\mathrm{P}}} \\ R = \dfrac{T_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{P}} + F_{\mathrm{N}}} \\ F_1 = \dfrac{2PR}{P+R} \end{cases} \tag{19}$$

式中：T_{P}（真阳）为不稳定进近的航班判定为异常数据；F_{P}（假阳）为稳定进近的航班判定为异常数据；F_{N}（假阴）为不稳定进近的航班判定为正常数据。

为验证本文方法的优越性，与Isolation Forest、DBSCAN[5]、LOF[6]、CVAE[9]、VAE-LSTM[10]、WGAN-GP[8]共6种不同方法在本文数据集上进行比较。经实验验证和可视化分析，上述方法均可用于不稳定进近检测。所有方法都以取得最优综合性能为标准，因此，以F_1值最高对应的阈值作为判定阈值。

实验结果如表2所示，显示了所列方法的精确率、召回率和F_1值。可见，PVAE-WGAN的F_1值高于所有基线，同时，其精确率和召回率都高于0.9。

表2 不同模型的性能对比

Table 2 Performance comparison of different models

方法	精确率	召回率	F_1值
Isolation Forest	0.671	0.855	0.752
DBSCAN[5]	0.765	0.935	0.846
LOF[6]	0.810	0.855	0.832
WGAN-GP[8]	0.830	0.786	0.807
CVAE[9]	0.875	0.890	0.883
VAE-LSTM[10]	0.792	**0.941**	0.860
PVAE-WGAN	**0.962**	0.909	**0.935**

注：加粗数字表示最优值。

对比列出的所有方法可知，传统机器学习方法的性能相对较差。因为其对于数据的假设虽符合飞行数据的基础规律，但无法捕获各个飞参之间的复杂关系。其中，DBSCAN的召回率虽高于本文方法，但其精确率仅为0.765，这是因为高维空间中，数据点之间的距离通常会随着维度的增加而变得更加紧密，且容易受到单个维度极端值的影响。DBSCAN作为一种基于密度的异常检测算法，在处

理本文数据集时, 可能难以明确区分正常数据和异常数据的密度差异。在追求最大化 F_1 值的过程中, DBSCAN 可能会将包含飞行参数微小波动或偏离的正常数据与异常数据的中低密度区域一同视为不稳定进近数据, 从而导致其召回率较高但精确率较低。

神经网络通常不会做出严格的假设, 而是对函数进行近似, 因此, 基于神经网络的方法在高维大数据中表现更好、更稳定。但 GAN 一般只能生成单一的正常模式, 无法模拟真实飞行过程中的不同情况, 因此, 在飞机进近数据集中表现不佳。一般的 VAE 模型通过添加记忆单元或卷积模块可捕获高维数据间的复杂关系, 如 VAE-LSTM 在处理时间序列数据时能够很好地捕获序列在时间上的依赖关系。但其在训练大量正常数据后会过拟合数据的正态分布产生后验崩溃, 这种过拟合会导致模型对训练数据的特定特征过于敏感, 从而将与训练数据略有差异的正常数据错误地分类为不稳定进近。虽然这种策略能够提高模型在检测不稳定进近方面的召回率, 但也会导致假阳率过高, 从而拉低精确率。

综上所述, 本文模型 PVAE-WGAN 能成功捕获数据间的复杂关系以应对飞参数据, 不仅通过引入帕累托分布减轻了 VAE 模型后验崩溃问题, 而且通过与 WGAN 组合训练, 使生成器和鉴别器都具备了识别异常的能力, 弥补了传统 VAE 精确率低的缺陷。

4.4　消融实验

为验证本文模型中各部分是有效的, 在 FDR 数据集上进行消融实验。具体模型框架如下:

1) VAE-WGAN: 未引入帕累托分布假设。即编码器只输出一组正态分布参数, 随机采样后由生成器输出重构数据, 不再反馈正常重构数据和异常重构数据的差别来强化生成器的区分能力。

2) PVAE: 未引入鉴别器。仅使用 VAE 的编码器和解码器来评估飞行数据的异常程度。

3) PVAE-WGAN: 本文所使用的模型。

从表 3 可知, 引入帕累托分布使模型在精确率上提高了 12%。由于帕累托分布可以模拟生成负样本, 使生成器也具有识别异常的能力, 从而大大降低了假阳率。而添加 WGAN 的鉴别器模块使精确率和召回率都提高了 8.7%, 证明引入生成对抗机制可以弥补 PVAE 无法识别轻微超限异常事件的缺陷, 从而有效提升模型整体的异常识别能力。

表 3　消融实验

Table 3　Ablation experiments

方法	精确率	召回率	F_1值
VAE-WGAN	0.839	**0.945**	0.889
PVAE	0.885	0.836	0.859
PVAE-WGAN	**0.962**	0.909	**0.935**

5　结　论

1) 本文方法可实现较为优异的不稳定进近检测效果。通过真实的 FDR 数据集测试, 本文方法性能高于所有基线, 其 F_1 值为 0.935, 精确率为 0.962, 召回率为 90.9%。

2) 本文方法引入的帕累托分布能更好地拟合异常数据的分布, 通过结合对抗学习的方式能减小 VAE 的后验崩溃问题, 并使生成器也具有一定的辨识能力。

3) 利用 WGAN 的鉴别器辅助 VAE 调整训练参数, 并综合重构误差和鉴别误差 2 种标准计算异常分数, 可以更全面、准确地检测进近过程中的各类异常。

由于本文面向飞行级异常检测, 无法实时判定异常情况, 未来可针对瞬时异常检测构建模型以应对更多情况。

参考文献 (References)

[1] International Civil Aviation Organization. Safety management manual(DOC9859)[R/OL]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2009[2024-04-16] https://www.afeonline.com/shop/icaodoc-9859.html.

[2] Airplanes B C. Statistical summary of commercial jet airplane accidents[R]. Virginia: Boeing, 2023: 8-14.

[3] Sembiring J, Liu C W, Koppitz P, et al. Energy management for unstable approach detection[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.

[4] 鲁志东, 张曙光, 戴闰志, 等. 大型民机进近着陆段异常能量风险判据[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 91-104.
Lu Z D, Zhang S G, Dai R Z, et al. Abnormal energy risk criteria of large civil airplanes in approach and landing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 91-104(in Chinese).

[5] Sheridan K, Puranik T G, Mangortey E, et al. An application of DBSCAN clustering for flight anomaly detection during the approach phase[C]//Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: 1851.

[6] Jasra S K, Valentino G, Muscat A, et al. Hybrid machine learning-statistical method for anomaly detection in flight data[J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10261.

[7] 陈农田, 满永政, 李俊辉. 基于 QAR 数据的民机高高原进近着陆风险评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 77-85.
Chen N T, Man Y Z, Li J H. Risk assessment method for civil aircraft approach and landing at high plateau based on QAR data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 77-85(in Chinese).

[8] 张鹏, 田子都, 王浩. 基于改进生成对抗网络的飞参数据异常检测方法[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56(10): 1967-1976.

Zhang P, Tian Z D, Wang H. Flight parameter data anomaly detection method based on improved generative adversarial network[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(10): 1967-1976 (in Chinese).

[9] Memarzadeh M, Matthews B, Avrekh I. Unsupervised anomaly detection in flight data using convolutional variational auto-encoder [J]. Aerospace, 2020, 7(8): 115.

[10] Rong C T, Ouyang S X, Sun H B. Anomaly detection in QAR data using VAE-LSTM with multihead self-attention mechanism[J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022(1): 8378187.

[11] Goodfellow I J, Pouget-abadie J, Mirza M, et al. Generative adversarial nets[C]//Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 2. New York: ACM, 2014: 2672-2680.

[12] Schlegl T, Seeböck P, Waldstein S M, et al. Unsupervised anomaly detection with generative adversarial networks to guide marker discovery[C]//Proceedings of the Information Processing in Medical Imaging. Berlin: Springer, 2017: 146-157.

[13] Arjovsky M, Chintala S, Bottou L. Wasserstein generative adversarial networks[C]//Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning - Volume 70. New York: ACM, 2017: 214-223.

[14] Gulrajani I, Ahmed F, Arjovsky M, et al. Improved training of Wasserstein GANs[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2017: 5769-5779.

[15] Kingma D P, Welling M. Auto-encoding variational Bayes[EB/OL]. (2013-12-20)[2024-04-16]. https://arxiv.org/abs/1312.6114.

[16] Arnold B C. Pareto distribution[EB/OL]. (2014-12-24)[2024-4-16]. https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat01100.

[17] 卢晓光, 许忠睿, 张喆, 等. ECOD 算法在飞机不稳定进近检测中的应用[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(5): 1872-1878.
Lu X G, Xu Z R, Zhang Z, et al. Application of ECOD algorithm for detection of aircraft unstable approach[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(5): 1872-1878(in Chinese).

[18] Kinders G. Guidance for identifying unstable approach with flight data[EB/OL]. (2022-05-01)[2024-04-16]. https://www.easa.europa.eu/en/downloads/136957/en.

[19] Garcia E J, Mulvihill M L, Kharab M S, et al. Capturing multivariate time series interactions to detect high-risk instability during approach[C]//Proceedings of the AIAA AVIATION 2023 Forum. Reston: AIAA, 2023: 3548.

[20] 彭宇, 何永福, 王少军, 等. 飞行数据异常检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 1-13.
Peng Y, He Y F, Wang S J, et al. Flight data anomaly detection: a survey[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 1-13(in Chinese).

[21] NASA. DASHlink-sample flight data[EB/OL]. (2012-12-29)[2024-04-16]. https://c3.ndc.nasa.gov/dashlink/projects/85/.

Unstable approach detection of aircraft based on modified VAE-WGAN

DING Cong[1,2], LI Xiaoyu[2], WANG Wentao[2], ZHANG Qi[1,*], ZHANG Xiaobei[1]

(1. School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: With the rapid development of the aviation industry, the safe flight of aircraft has become particularly important. A flight-level anomaly identification method based on unstable approach events during aircraft approach is presented to identify anomalous events in the aviation field. The method, called PVAE-WGAN, combines variational auto-encoders (VAE) and Wasserstein generative adversarial networks (WGAN), and uses a Pareto distribution to simulate the probability distribution of anomalous cases. The generators of VAE and WGAN are shared, and the hidden variables randomly sampled from the normal distribution and Pareto distribution are taken as input to the generator. The reconstructed output samples are taken as positive and negative samples, respectively. The Wasserstein distance is used as a measure between the distribution of positive and negative samples fitted by the model and the true distribution, so that both the generator and the discriminator gain the ability to distinguish anomalies, thereby achieving accurate detection of unstable approach events. The method was trained and tested using the real flight data recorder (FDR) data as an example, and it was found to be much better than existing multi-dimensional time series anomaly identification techniques that are appropriate for unstable approach detection. The F_1 score of the proposed method in this paper can reach 0.935, which is an average increase of 12.95% compared with other methods.

Keywords: unstable approach; anomaly detection; variational auto-encoder; generative adversarial network; Pareto distribution

Received: 2024-05-29; **Accepted**: 2024-08-30; **Published Online**: 2024-10-11 15:24

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241011.1335.001

Foundation item: Special Scientific Research Project for Civil Aircraft (MJZ2-6N21-2)

* **Corresponding author**. E-mail: qzhang9@shu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0353

基于区域监测网的北斗DCB参数解算方法与影响因素分析

李文迪[1]，曹月玲[2]，孟轶男[3, 4, 5, *]，戴吾蛟[1]，潘林[1]，周善石[2]

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院，长沙 410083；2. 中国科学院上海天文台，上海 200030；3. 北京跟踪与通信技术研究所，北京 100094；4. 国防科技大学 电子科学学院，长沙 410073；5. 智慧地球重点实验室，北京 100010)

摘 要：北斗三号利用地面区域网及星间链路数据向全球提供导航定位授时服务。目前，北斗三号广播电文轨道、钟差产品已达到较高精度。由于地面区域网对卫星覆盖不足，卫星播发的差分码偏差(DCB)参数精度较其他导航系统参数及事后精密产品存在较大差距。针对上述问题，通过对比分析监测站分布、多全球导航卫星系统(GNSS)组合、解算DCB参数时电离层延迟改正模型等影响因素对区域监测网DCB参数解算精度的影响，提出了区域网估计DCB参数的最优策略。以中国科学院(CAS)发布的DCB产品为参考值，分析其稳定性及一致性，以空间信号测距误差(SISRE)评估DCB产品精度，并利用BDS-3 B1I/B3I双频数据开展单点定位精度验证。结果表明：区域监测网下卫星端DCB相比于CAS采用全球监测网解算卫星端DCB的稳定性下降约2倍，均方根差异约0.4 ns，双系统观测数据解算卫星端DCB的稳定性更优，BDS-3卫星DCB与CAS DCB产品具有更好的一致性。区域监测网下接收机端DCB与CAS DCB产品具有相同的稳定性，其中，双系统观测数据解算的接收机DCB一致性更优。与采用广播星历播发的TGD1参数解算的BDS-3的SISRE结果相比，区域监测网DCB产品对BDS-3的SISRE解算精度提升了47.6%。双频单点定位(SPP)定位结果提升了14.1%，与采用CAS DCB产品的提升效果大致相当。

关 键 词：区域监测网；卫星DCB参数解算；接收机DCB参数解算；空间信号测距误差；单点定位

中图分类号：P228.1

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2589-12

全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)信号受卫星端和接收机端硬件影响，各频点观测量存在与频率有关的硬件延迟。将不同频率码观测值之间的硬件延迟差异称为差分码偏差(differential code bias, DCB)[1]。根据引起硬件延迟的原因不同，将DCB参数分为卫星和接收机DCB。各卫星导航系统在用户接口控制文件中定义了广播电文参考点和不同频率间DCB参数。用户根据使用的伪距观测量，通过卫星播发的DCB参数，将广播电文参考点，转换至用户使用的频率参考点。由此可以看出，DCB参数是GNSS数据处理所需修正的误差源之一，播发高精度DCB参数对提升GNSS服务性能至关重要。此外，DCB参数还是利用双频GNSS伪距观测值计算电离层总电子含量(ionospheric total electron content, TEC)必须修正的误差之一，其对利用GNSS观测值进行TEC建模精度的影响可达数米[2]。

GNSS导航电文中播发的卫星钟差参数是基于

收稿日期：2024-05-23；**录用日期**：2024-09-27；**网络出版时间**：2024-11-13 16:19
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241113.1339.001
基金项目：国家自然科学基金 (12373077,12273096,12173072,41674041)
* **通信作者**. E-mail：mengyn@163.com

引用格式：*李文迪，曹月玲，孟轶男，等. 基于区域监测网的北斗DCB参数解算方法与影响因素分析[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2589-2600. Li W D，Cao Y L，Meng Y N，et al. Methods and influence factors analysis of BeiDou DCB parameter solving based on regional monitoring networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2589-2600 (in Chinese)*.

双频观测量的消电离层(ionosphere-free, IF)组合观测值解算得到的[3-4]。因此,该参数含有卫星端的硬件延迟影响。为扣除这一偏差对导航用户的影响,引入了时间群延迟(time group delay, TGD)参数进行不同码信号的钟差改正。全球定位系统(global positioning system, GPS)的卫星钟差参数基于L1/L2P(Y)码观测的IF组合,L1天线相位中心与L1/L2P(Y)码IF组合参考点间的时间延迟定义为GPS-TGD参数[5]。而Galileo定义了基于E1/E5a和E1/E5b的2种卫星钟差参数,通过F/NAV(freely accessible navigation)和I/NAV(freely accessible navigation)信号广播各自的时钟校正参数,F/NAV播发E1/E5a组合,I/NAV播发E1/E5b组合[6]。

除了GNSS系统播发DCB产品,目前国际上多家国际全球导航卫星系统服务(international GNSS service, IGS)分析中心均对外公布DCB参数产品,如欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)、德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR)和中国科学院(Chinese Academy of Science, CAS)等[7-9],可以通过ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/访问下载各机构DCB参数产品。为了保证发布的DCB参数产品解算精度,各IGS分析中心均采用全球监测网数据用于解算全球电离层延迟模型,同步解算GNSS卫星和监测站接收机的DCB参数产品。其中,CAS分析中心采用单一GNSS星座中全部卫星端DCB参数之和为0作为解算基准,利用广义三角级数进行单站电离层建模,实现电离层延迟与DCB参数解耦[10]。与CODE和DLR等分析中心产品相比,CAS与CODE和DLR发布的卫星DCB参数互差均值优于0.30 ns,月标准偏差优于0.15 ns[11]。目前,CAS分析中心发布的DCB参数产品信息较为全面,已广泛应用于GNSS事后数据处理中,并可作为评估DCB参数解算精度的参考。CAS提供的卫星和测站DCB产品文件每天生成一个,延迟为2～3天,由每日的BSX文件中提供。

北斗三号卫星导航系统采用地面区域监测网和星间链路向全球提供导航定位授时服务。星间链路可以实现境外卫星轨道和钟差的全覆盖。对于卫星L波段天线不同频率产生的码偏差,无法通过星间链路测量提供较好观测。因此,北斗三号卫星仍采用地面区域监测网实现卫星DCB参数估计[12]。研究表明,在地面区域监测网条件下,受外部电离层模型在亚太地区建模精度及更新频率的影响,北斗三号播发的DCB参数精度和稳定性较其他系统存在较大差距。

本文首先给出电离层观测提取、电离层建模以及DCB参数估计方法,然后,利用全球网解算DCB参数,分析双系统对DCB参数估计精度提升的贡献。在此基础上,重点研究基于区域监测网的DCB参数解算策略,分析监测站分布、多GNSS系统组合,以及电离层延迟改正模型对区域监测网DCB参数解算精度的影响。最后通过分析本文解算DCB对BDS-3系统空间信号测距误差(signal in space range error, SISRE)和双频定位精度的影响,评估本文方法在区域监测网下的有效性。

1 DCB参数解算模型

本文采用相位平滑伪距法提取电离层原始观测值,联合双系统双频观测值根据监测站分布范围选择适用的电离层延迟改正模型以分离电离层延迟,同时解算各系统双频DCB参数。同时,卫星DCB和接收机DCB间线性相关,使得误差方程秩亏,因此引入卫星DCB参数之和为零作为基准约束条件,分离卫星端DCB与接收机端DCB。

1.1 电离层观测量提取

GNSS信号主要包括伪距和载波相位,观测方程可表示为

$$\begin{cases} P_{r,i}^s = \rho_r^s + c(\delta_r - \delta^s) + d_{\mathrm{orb}}^s + T_r^s + I_{r,i}^s - \\ \qquad cD_{r,i} - cD_i^s + \eta_{r,i}^s + \varepsilon_r^s \\ \Phi_{r,i}^s = \rho_r^s + c(\delta_r - \delta^s) + d_{\mathrm{orb}}^s + T_r^s + I_{r,i}^s - \\ \qquad cb_{r,i} - cb_i^s + \eta_{\mathrm{r},i}^s + \lambda_i N_{r,i}^s + \xi_r^s \end{cases} \tag{1}$$

式中:$P_{r,i}^s$和$\Phi_{r,i}^s$分别为接收机r与观测卫星s在第i个频率上的伪距和相位观测值;ρ_r^s为接收机到卫星的几何距离;c为光速;δ_r和δ^s为接收机和卫星的钟差;d_{orb}^s为卫星轨道误差;T_r^s为对流层延迟;$I_{r,i}^s$为电离层延迟;D_i^s和$D_{r,i}$为卫星端与接收机端的伪距硬件延迟;$b_{r,i}$和b_i^s为接收机端与卫星端的相位小数偏差;$\eta_{r,i}^s$为相对论效应;λ_i为波长;$N_{r,i}^s$为载波相位观测量对应的整周模糊度;ε_r^s和ξ_r^s为伪距和相位观测值的观测值噪声以及未模型化的误差(如多路径效应等)。

采用无几何距离组合,消除与频率无关误差项;同时,利用相位平滑伪距,不考虑相位小数偏差或将小数偏差合并到整周模糊度中,对连续弧段取平均求模糊度[13],整理后得到化简的观测方程,即

$$\widetilde{P}_r^s = \Phi_r^s - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(\Phi_r^s + P_r^s) = -(\gamma_{r_1} - \gamma_{r_2})I + cD_{r,i} + cD_i^s \tag{2}$$

式中:$\widetilde{P}_r^s$为平滑后的无几何距离的伪距观测值;Φ_r^s为无几何距离的相位观测值;$\gamma_{r_i} = \dfrac{f_i}{f_0}$为基准频率下不同频率电离层延迟的比值;此时,相位平滑后的双

频组合观测值, 仅包含斜路径电离层延迟和 DCB 参数组合, 在单层模型假设下利用投影函数, 可将斜向总电子含量(slant total electron content, STEC)转换为垂直总电子含量 (vertical total electron content, VTEC)。

1.2　电离层延迟改正模型

为消除电离层延迟影响, 可对 VTEC 进行建模, 将电离层模型系数与 DCB 参数同时作为未知参数进行估计。建立电离层延迟改正模型时, 根据监测站分布范围选择适用的电离层延迟改正模型, 通常在全球监测网条件下采用 15 阶球谐函数建模; 在区域监测网条件下对比分析了 6 阶多项式函数模型和 6 阶球冠谐函数模型[14]。

其中, 基于球谐函数的电离层延迟改正模型可表达为

$$I_{\mathrm{VTEC}}(\varphi,s)=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{n}\widetilde{P}_{mn}(\sin\varphi)\left[A_{mn}\cos(ms)+B_{mn}\sin(ms)\right] \tag{3}$$

式中: φ和s为在日固地磁坐标系中电离层穿刺点(ionospheric pierce point, IPP)的纬度和经度; n和m为电离层延迟改正模型的阶数和级数; $\widetilde{P}_{mn}$为归一化德函数; A_{mn}和B_{mn}为全球电离层建模中需要估计的归一化电离层模型参数。

对于区域电离层延迟改正模型, 通常采用球冠谐模型, 即将球谐模型的中心点改至区域监测网的中心, 具体可表示为

$$I_{\mathrm{VTEC}}(\varphi,s)=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}\widetilde{P}_{mn}(\cos\varphi)\left[A_{mn}\cos(ms)+B_{mn}\sin(ms)\right] \tag{4}$$

式中: n和m为电离层延迟改正模型的最大阶数和级数, m通常小于n, m且不大于i。

基于多项式函数的电离层延迟改正模型可表示为

$$I_{\mathrm{VTEC}}(\varphi,s)=\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}E_{ij}(\varphi-\varphi_0)^i(s-s_0)^j \tag{5}$$

式中: φ_0和s_0表示该区域中几何中心的经纬度; E_{ij}表示区域电离层模型参数。

1.3　DCB 估计方法

在相位平滑伪距电离层组合观测值中, 利用上述电离层延迟 TEC 函数表达电离层延迟改正后, 残余项即为 GNSS 卫星与监测接收机的 DCB 参数组合观测值, 利用最小二乘平差可计算得到电离层延迟 TEC 函数模型系数、GNSS 卫星 DCB 参数与接收机 DCB 参数。观测方程可表示为

$$\boldsymbol{v}^S=\boldsymbol{A}^S\hat{\boldsymbol{x}}-\boldsymbol{l}^S \tag{6}$$

式中: $\hat{\boldsymbol{x}}$表示待估参数向量, 包含卫星 DCB、接收机 DCB 和电离层模型参数; $\boldsymbol{A}^S$表示参数的设计矩阵; $\boldsymbol{l}^S$和$\boldsymbol{v}^S$表示实际观测值和观测残差。卫星 DCB 和接收机 DCB 间线性相关, 使得误差方程秩亏, 因此引入卫星 DCB 参数之和为 0 作为基准约束条件。

$$\sum_{i=0}^{k}D^i=0 \tag{7}$$

式中: k表示可观测卫星个数。在区域监测网条件下, 可能出现卫星缺失情况, 若不同天内缺失卫星情况不同, 仅利用观测卫星 DCB 参数之和为 0, 会导致解算基准不一致, 需进行基准转换修正。基准转换可表示为[15]

$$D^{i'}=D^i-\frac{d}{k-j} \tag{8}$$

式中: $D^{i'}$为可观测卫星和为 0 解算 DCB; D^i为全部卫星和为 0 解算 DCB; j为缺失卫星个数; d为 2 种基准下共有卫星 DCB 之和。

1.4　DCB 精度估计方法

本文采用电离层模型系数与 DCB 系数一起解算的策略, 其中, 电离层模型系数每 2 小时解算一组, DCB 参数每天解算一组。通常情况下全球监测网选择 15 阶球谐函数模型进行电离层建模, 同步解算出 DCB 参数并对其展开分析, 统计其月稳定性以及与 CAS MGEX DCB 产品的一致性。一致性以 GPS 卫星 DCB 与 CAS 分析中心处理结果的 30 天均值偏差表示; 月稳定性以一个月计算结果的标准偏差表示, 计算公式为

$$\partial=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-x)^2} \tag{9}$$

式中: ∂为标准偏差; n为观测数据总数; x_i为第i个观测数据; x为观测数据平均值。

在结果统计及分析过程中, 以 CAS 分析中心发布的 MGEX DCB 产品为参考值, 分别对解算的卫星 DCB 参数及接收机 DCB 参数的解算精度进行评估。由于解算时间内存在卫星可用性变化, 或监测网对某颗卫星观测数据缺失的情况, 导致解算基准不同。本文在统计时, 剔除了对应时间的结果, 在保证卫星 DCB 基准一致的情况下, 与 CAS 发布结果进行比较。

同时, 本文将利用区域监测网计算的 DCB 参数与 CAS MGEX DCB 产品及北斗广播星历中播发的 DCB 参数进行比较, 通过 DCB 对空间信号误差 SISRE、双频伪距定位误差的影响, 分析本文解算 DCB 参数的精度。

解算的 DCB 参数包含卫星 DCB 参数和接收机

DCB 参数。卫星 DCB 参数因受环境因素影响小，相对比较稳定，接收机 DCB 受接收机硬件设备稳定性、观测环境温度变化等影响，相对稳定性较差。

2 全球监测网解算精度分析

本节比较分析了全球监测网条件下单、双系统对卫星和接收机 DCB 参数估计精度的影响。

2.1 全球网数据及处理策略

截至目前，全球已有超过 400 个 MGEX 测站支持观测多 GNSS 数据，为当前各种精密产品处理及研究提供了丰富的数据源。本文选取全球 233 个 MGEX 测站的实测数据进行 DCB 参数估计。基于全球监测网条件下解算的 DCB 参数，与 CAS 分析中心处理结果进行比较，评估本文采用算法的正确性。

为了分析太阳活动高峰年影响，试验数据选取时间为 2024 年 2 月 1 日至 3 月 1 日，共计 30 天。表 1 给出了试验时段内，实际参与 DCB 参数解算的基准站数量与具体信号频点，同步解算的电离层延迟模型。在解算过程中，分别采用 GPS(G)、BDS(C)以及 GPS+BDS 双系统(G+C)这 3 种处理模式，其中，GPS 系统选用 233 个基准站的 L1/L2 双频观测值，BDS 系统选用 171 个基准站的 B1I/B3I 双频观测值。卫星轨道与钟差产品均采用德国地学研究中心(GFZ)发布的 MGEX 精密轨道产品，参考 DCB 基准则选取 CAS 发布的 MGEX DCB 产品，以保证系统间偏差的一致性。截止高度角统一设置为 20°。在不同系统权重设置时，将 GPS 的权重设置为 1，BDS 的权重设置为 1/2。其中，北斗观测数据包括 BDS-2 和 BDS-3，为了与 CAS 分析中心处理结果保持基准统一，本文将 BDS-2 和 BDS-3 进行统一解算，由于 BDS-2 卫星观测数据质量较差，因此将整个 BDS 权重设为 1/2，以减小对实验结果的影响。针对法方程秩亏问题，采用零均值条件作为 DCB 基准约束。参数估计采用经典最小二乘平差方法，通过迭代求解误差方程，同步估计电离层 TEC 函数模型系数、GNSS 卫星 DCB 参数及监测接收机 DCB 参数。

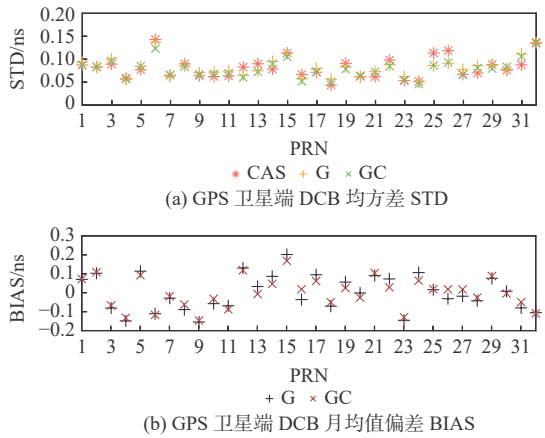
表 1 实际参与 DCB 参数解算的基准站数量

Table 1 Number of reference stations actually involved in solving DCB parameters

监测网	电离层模型	基准站数量	
		GPS L1 L2	BDS B1I B3I
全球监测网	球谐函数15×15	233	171

2.2 卫星 DCB 参数估计精度

通过 GPS 单系统与 GPS+BDS 双系统估计的 GPS 卫星 DCB 参数精度比较，以及 BDS 单系统与 GPS+BDS 双系统估计的 BDS 卫星 DCB 参数精度比较，评估不同 GNSS 系统对 DCB 估计精度影响。图 1(a) 分别给出了 CAS 产品、本文 GPS 单系统，本文 GPS+BDS 双系统估计的各星 DCB 参数均方差(standard deviation, STD)。图 1(b) 给出了单、双系统种情况下 DCB 参数估计值与 CAS 产品互差的均值。



(a) GPS 卫星端 DCB 均方差 STD

(b) GPS 卫星端 DCB 月均值偏差 BIAS

图 1 全球监测网 GPS 卫星 DCB 统计结果

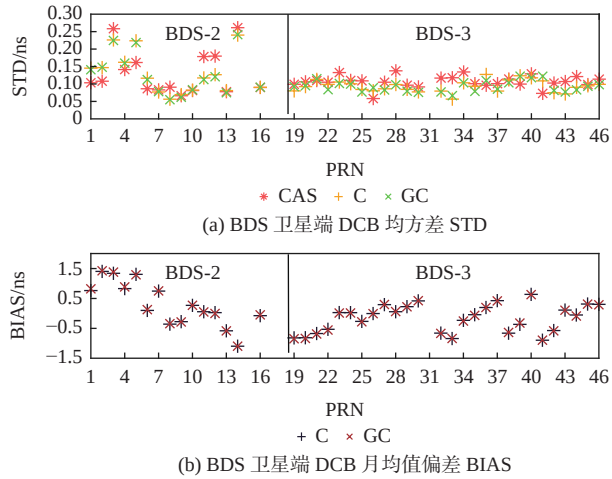
Fig. 1 Global monitoring network GPS satellite DCB statistics results

从图 1 可以看出，本文基于全球网估计的 GPS 卫星 DCB 月标准偏差与 CAS 产品大致相当。个别星，如 G25、G26，标准偏差优于 CAS，各星平均优于 0.1 ns。单、双系统全球网估计与 CAS 互差优于 0.2 ns。

图 2(a) 分别给出了 CAS 产品、本文 BDS 单系统，本文 GPS+BDS 双系统估计的各星 DCB 的 STD。图 2(b) 给出了单、双系统种情况下 DCB 参数估计值与 CAS 产品互差的均值。

通过图 2 可以看出，无论本文计算的 DCB 参数还是 CAS 计算的 DCB 参数，BDS-3 卫星的均方差较小，而 BDS-2 卫星的均方差较大；同时，BDS-2 卫星与 CAS 互差显著大于 BDS-3 卫星。初步分析其原因为，虽然本文所选全球监测网测站中均包含 BDS-2 卫星与 BDS-3 卫星观测数据，但 BDS-2 卫星观测数据量变化较大，观测稳定性低，因此 BDS-2 卫星 DCB 低于 BDS-3 卫星 DCB 解算精度。与 GPS 卫星相比，BDS-3 卫星的均方差略大，与 CAS 产品的月均值偏差小于 1 ns，精度低于 GPS 卫星结果，初步分析原因是本文选用的全球监测网中 BDS 监测站数量少于 GPS 监测站数量，降低了电离层建模精度。

在全球监测网下，对比单系统计算结果，双系统没有明显提升 DCB 参数估计精度，可能原因为



(a) BDS 卫星端 DCB 均方差 STD

(b) BDS 卫星端 DCB 月均值偏差 BIAS

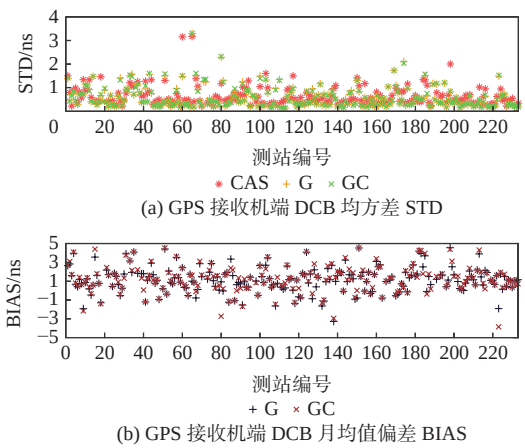
图 2　全球监测网 BDS 卫星 DCB 统计结果

Fig. 2　Global monitoring network BDS satellite DCB statistics results

增加的 BDS 测站与原 GPS 测站重合, 对电离层建模提升效果有限。

2.3　接收机 DCB 参数估计精度

接收机 DCB 是利用导航数据建立电离层模型时的产品之一, 对其进行稳定性及偏差分析对于监测接收机的硬件性能以及实时电离层变化具有重要意义。图 3(a) 分别给出了 CAS 产品、本文 GPS 单系统, 本文 GPS+BDS 双系统估计的各接收机 DCB 的 STD。图 3(b) 给出了单、双系统种情况下接收机 DCB 参数估计值与 CAS 产品互差的均值, 其中部分接收机 DCB 因 CAS 未提供而未参与对比。



(a) GPS 接收机端 DCB 均方差 STD

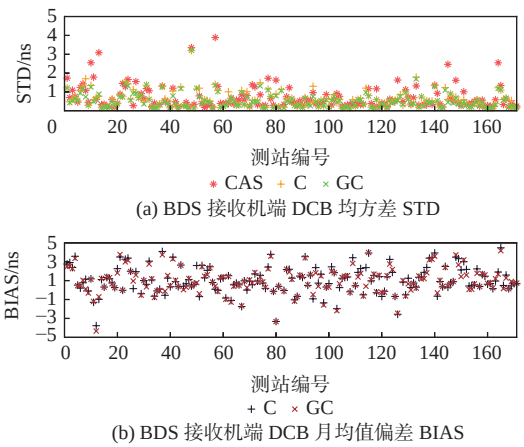
(b) GPS 接收机端 DCB 月均值偏差 BIAS

图 3　全球监测网 GPS 接收机端 DCB 统计结果

Fig. 3　DCB statistics at the GPS receiver of the global monitoring network

图 4(a) 分别给出了 CAS 产品、本文 BDS 单系统, 本文 GPS+BDS 双系统估计的各接收机 DCB 的 STD。图 4(b) 给出了单、双系统种情况下接收机端 DCB 参数估计值与 CAS 产品互差的均值。

由图 3 及图 4 的统计结果可知, GPS 接收机 DCB 和 BDS 接收机 DCB 的均方根 STD 大多数在



(a) BDS 接收机端 DCB 均方差 STD

(b) BDS 接收机端 DCB 月均值偏差 BIAS

图 4　全球监测网 BDS 接收机端 DCB 统计结果

Fig. 4　DCB statistics at the BDS receiver of the global monitoring network

2 ns 以内, 接收机 DCB 的稳定性明显比卫星 DCB 差, 且单系统和双系统解算的接收机 DCB 稳定性无明显差别。此外, GPS、BDS 的接收机 DCB 与 CAS MGEX DCB 产品的月均值偏差 BIAS 均不超过 5 ns, 大部分在 4 ns 以内, 但均存在明显 1 ns 的系统性偏移, 出现系统性偏移的原因需要进一步研究。

3　区域监测网解算精度分析

3.1　区域网数据及处理策略

在区域监测网下, 本文分别采用多项式函数、球冠谐函数拟合区域电离层, 同步解算 DCB 参数, 分别统计卫星 DCB 与接收机 DCB 的月稳定性, 计算与 CAS MGEX DCB 产品的月均值偏差 BIAS 评估其一致性, 分析不同电离层模型对区域网条件下 DCB 产品解算精度的影响。基于区域监测网解算 DCB 参数, 选取中国及周边区域的 27 个 IGS 测站, 其中, 全部测站均采用 GPS 系统 L1/L2 双频观测

值进行 DCB 参数的解算，而用于 BDS 系统采用 B1I/B3I 双频观测值进行 DCB 参数解算的测站共计 17 个。

在区域监测网条件下解算 DCB 参数时，为保留高阶函数对电离层 TEC 的精确描述能力，同时降低模型的播发参数个数，较好地实现模型播发个数与高精度电离层 TEC 模拟之间的平衡[13]，电离层模型分别采用 6 阶 4 次多项式函数模型与 6 阶 4 次的球冠谐函数模型，对比采用不同电离层函数建模对 DCB 参数解算精度的影响。本文还对比分析了仅应用 GPS 单系统、BDS 单系统和 GPS 与 BDS 双系统观测数据，进行电离层延迟建模与 DCB 参数解算，增加观测数据源对 DCB 参数解算精度的影响。在结果统计及分析过程中，同样以 CAS 分析中心发布的 MGEX DCB 产品为参考值，在保证卫星 DCB 基准一致的情况下，与 CAS 发布结果进行比较，分别对解算的卫星 DCB 参数及接收机 DCB 参数的解算精度进行评估。表 2 给出了试验时段内，区域监测网下实际参与 DCB 参数解算的基准站数量与具体信号频点，同步解算的电离层延迟模型。

表 2　区域监测网实际参与 DCB 参数解算的基准站数量

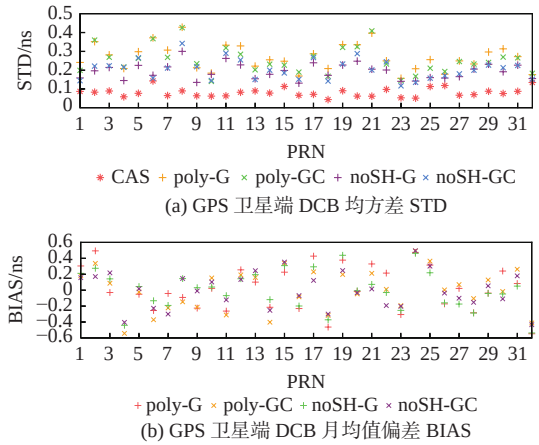
Table 2　Number of reference stations of the regional monitoring network actually involved in the solving of DCB parameters

监测网	电离层模型	基准站数量	
		GPS	BDS
		L1 L2	B1I B3I
区域监测网	多项式函数	27	17
	球冠谐函数	27	17

3.2　卫星 DCB 参数估计精度分析

图 5(a) 给出了区域监测网下，多项式函数、球冠谐函数拟合区域电离层解算 GPS 卫星 DCB 的均方差结果，横轴为卫星 PRN，纵轴为 DCB 的均方差。其中，橙色表示 CAS 中心发布的 DCB 产品；黄色表示利用 GPS 单系统与区域多项式电离层模型计算的 DCB 结果（以 Poly-G 表示）；绿色表示利用 GPS 与 BDS 双系统及区域多项式电离层模型，计算的 DCB 结果（以 Poly-GC 表示）；紫色表示利用 GPS 单系统与区域球冠谐电离层模型计算的 DCB 结果（以 noSH-G 表示）；蓝色表示利用 GPS 与 BDS 双系统及区域球冠谐电离层模型计算的 DCB 结果（以 noSH-GC 表示）。图 5(b) 统计了 30 天内区域监测网下 GPS 卫星 DCB 与 CAS 分析中心处理结果的均值偏差。

从图 5 中可以看出，CAS 利用全球网解算 GPS



(a) GPS 卫星端 DCB 均方差 STD

(b) GPS 卫星端 DCB 月均值偏差 BIAS

图 5　区域监测网 GPS 卫星端 DCB 统计结果

Fig. 5　DCB statistics of the GPS satellite side of the regional monitoring network

DCB 标准偏差约为 0.1 ns，而本文利用区域监测网解算的 DCB 标准偏差，最优策略下平均约为 0.2 ns，全球网计算 DCB 精度明显优于区域监测网解算结果，说明监测站分布对 DCB 参数解算精度具有决定性的影响。GPS 单系统与 GPS+BDS 双系统解算的 DCB 参数稳定性大致相当，原因为 BDS 监测站与 GPS 监测站并置，增加 BDS 观测数据后不能明显扩大电离层穿刺点分布范围，因此不能提升电离层模型的拟合精度。相比于多项式模型，采用球冠谐模型做电离层修正模型计算的 DCB 参数精度更高，月标准偏差约 0.2 ns。基于区域监测网解算的 DCB 与 CAS 解算 DCB 的均值偏差优于 0.6 ns。具体标准偏差和均值偏差的统计结果见表 3 与表 4。

表 3　GPS 和 BDS 相对于 CAS 卫星端 DCB 的 STD 均值比较

Table 3　Comparison of mean STD values between GPS and BDS relative to CAS satellite-side DCBs　ns

卫星系统	观测值类型	解算策略		
		CAS	多项式	球冠谐
GPS	G	0.08	0.27	0.19
	G+C		0.25	0.20
BDS	C	0.12	0.26	0.29
	G+C		0.25	0.28

图 6(a) 给出了区域监测网下，多项式函数、球冠谐函数拟合区域电离层解算 BDS 卫星 DCB 的均方差结果。图 6(b) 统计了 30 天内区域监测网下 BDS 卫星 DCB 与 CAS 分析中心处理结果的均值偏差。

从图 6 可以看出，CAS 利用全球网解算 BDS DCB 标准偏差约为 0.1 ns，而本文利用区域监测网解算的 DCB 标准偏差平均约为 0.3 ns。BDS 单系统与 GPS+BDS 双系统解算的 DCB 参数稳定性大

表 4　GPS 和 BDS 相对于 CAS 卫星端 DCB 的 BIAS 均值比较

Table 4　Comparison of GPS and BDS mean BIAS values relative to CAS satellite-side DCB　　ns

卫星系统	观测值类型	解算策略	
		多项式	球冠谐
GPS	G	0.55	0.54
	G+C	0.41	0.43
BDS-2	C	0.6	0.59
	G+C	0.65	0.61
BDS-3	C	−0.33	−0.36
	G+C	−0.33	−0.34

致相当, 相比于球冠谐模型, 采用多项式模型做电离层修正模型计算的 DCB 参数精度更高。基于区域监测网解算的 BDS 卫星 DCB, BDS-2 均值为正, BDS-3 均值为负。BDS-2 卫星与 CAS 全球网 DCB 均值偏差约为 0.6 ns, BDS-3 卫星与 CAS 发布 DCB 的均值偏差约为−0.4 ns。虽然区域监测网下本文所选测站中 BDS-2 数据量远多于 BDS-3 数据量, 但 BDS-2 观测数据稳定性较差, 数据量变化程度较大, 因此 BDS-2 卫星与 CAS 全球网 DCB 均值偏差大于 BDS-3 卫星与 CAS 发布 DCB 的均值偏差。具体标准偏差和均值偏差的统计结果见表 3 与表 4。

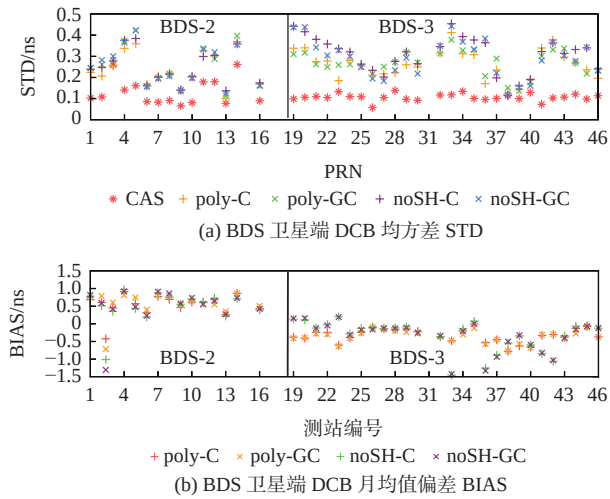


图 6　区域监测网 BDS 卫星端 DCB 统计结果

Fig. 6　DCB statistics of the BDS satellite side of the regional monitoring network

从图 6 中可以看出, BDS 卫星解算的 DCB 精度比 GPS 卫星 DCB 精度略低, 与使用 BDS 监测数量较少有关。通过表 3 和表 4 可以看出, GPS 卫星使用双系统解算可略提升 DCB 解算精度; BDS-2 卫星采用双系统解算则没有提升 DCB 参数解算精度, 但双系统解算可提升 BDS-3 卫星 DCB 解算精度, 其原因可能与本文选择监测网中 BDS-2 卫星可观测数据量较少有关。采用多项式做区域电离层模型, GPS 卫星与 BDS 卫星的 DCB 参数解算月标准偏差大致相当, 均约为 0.27 ns; 采用球冠谐做区域电离层模型, GPS 卫星 DCB 解算月标准偏差约为 0.2 ns, 明显优于 BDS 卫星 DCB 解算的月标准偏差约 0.3 ns。初步分析原因为当使用的监测站数量较多时, 利用球冠谐函数拟合区域电离层模型的精度更高, 但当使用的监测站数量较少时, 更推荐多项式函数拟合电离层模型。

3.3　接收机 DCB 参数估计精度分析

图 7(a) 给出了区域监测网下, 多项式函数、球冠谐函数拟合区域电离层解算 GPS 接收机端 DCB 的均方差结果, 横轴为接收机编号, 纵轴为 DCB 的均方差。图 7(b) 统计了 30 天内区域监测网下 GPS 接收机端 DCB 与 CAS 分析中心处理结果的均值偏差。

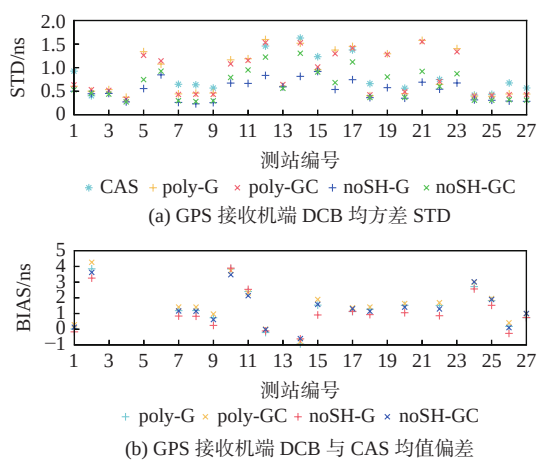


图 7　区域监测网 GPS 接收机端 DCB 统计结果

Fig. 7　DCB statistics at the GPS receiver end of the regional monitoring network

图 8(a) 给出了区域监测网下, 多项式函数、球冠谐函数拟合区域电离层解算 BDS 接收机端 DCB

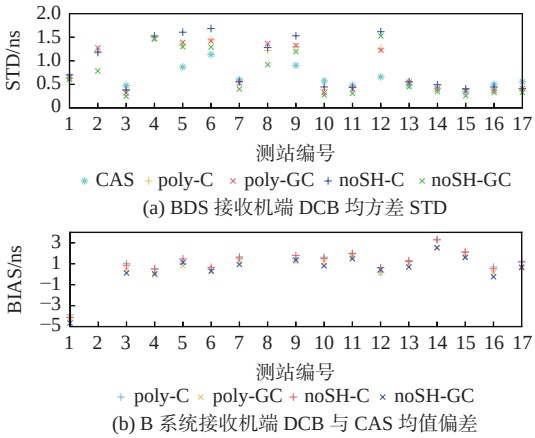


图 8 区域监测网 BDS 接收机端 DCB 统计结果

Fig. 8 DCB statistics at the BDS receiver end of the regional monitoring network

的均方差结果。图 8(b) 统计了 30 天内区域监测网下 BDS 接收机端 DCB 与 CAS 分析中心处理结果的均值偏差。

在区域监测网下电离层分别采用多项式函数及球冠谐函数进行拟合时，图 7(a) 和图 8(a) 统计了不同解算策略下得到的 GPS、BDS 接收机端 DCB 的标准差 STD，统计结果表明：对于 GPS 和 BDS 的大部分接收机 DCB 的月稳定性保持在 1.5 ns 以内，与 CAS 提供的 DCB 产品月稳定性保持一致。

评估一致性时，部分接收机 DCB 因 CAS 未提供而未参与对比，图 7(b) 和图 8(b) 分别统计了区域监测网下不同解算策略得到的 GPS 接收机端 DCB 及 BDS 接收机端 DCB 与 CAS MGEX DCB 产品的月均值偏差，统计结果见表 5。从表中可以得到，相比 GPS，BDS 的接收机端 DCB 与 CAS 提供的接收机 DCB 的均值偏差的平均值更小，其中双系统观测数据解算的接收机 DCB 与 CAS MGEX DCB 产品具有更好的一致性。

表 5 GPS 和 BDS 相对于 CAS 接收机端 DCB 的 BIAS 均值比较

Table 5 Comparison of GPS and BDS with respect to the mean BIAS value of the DCB at the CAS receiver side ns

卫星系统	观测值类型	解算策略	
		多项式	球冠谐
GPS	G	1.36	1.12
	G+C	1.55	1.36
BDS	C	0.97	0.58
	G+C	1.01	0.48

4 空间信号测距精度评估

卫星空间信号测距误差 (signal-in-space range error, SISRE) 是评估 GNSS 服务精度的重要指标，可通过广播的导航电文与精密产品计算的卫星广播星历误差和钟差参数误差来表示[16-17]。空间信号测距误差的计算公式为

$$S = \sqrt{[R(w_R\Delta r_R - \Delta\delta)]^2 + w_{A,C}^2(A^2 + C^2)} \tag{10}$$

式中：S 为卫星空间信号测距误差；R 表示进行均方根(RMS)统计；$w_R = 0.981$ 和 $w_{A,C} = 0.136$ 分别为 Montenbruck 等[18] 提出的 BDS-3 MEO 卫星轨道径向和切法平面误差投影系数；Δr_R、A、C 分别为轨道参考系下径向轨道误差、迹向轨道误差和法向轨道误差；$\Delta\delta$ 为广播星历钟差偏移误差。

北斗系统精密产品播发的钟差参数基准频点为 B1 B3 频点，而北斗导航电文中播发的钟差参数基准频点为 B3 频点。因此，针对北斗系统计算 SISRE 时要考虑不同钟差产品的基准频点不同的问题，需要采用 DCB 产品将其归化至相同基准频点。

$$\Delta\delta = S_{\text{clk}} - B_{\text{clk}} - D\left(\frac{f_{1^2}}{f_{1^2} - f_{3^2}}\right) \tag{11}$$

式中：S_{clk} 为精密钟差；B_{clk} 为广播星历钟差；D 为 B1I B3I 双频组合 DCB 偏差；$f_1 = 1\,561.098$ MHz、$f_3 = 1\,268.52$ MHz 分别为 B1、B3 频段的中心频率。目前，DCB 产品主要有广播星历播发的时间群延迟(timing group delay, TGD)产品和 IGS 分析中心提供的高精度后处理 (DCB 产品[19]。DCB 参数可影响空间信号测距误差的计算精度，因此可通过采用不同 DCB 产品计算的 SISRE 来验证不同 DCB 产品精度。本文主要分析 BDS 系统的 SISRE 精度，使用的 DCB 参数包括：

1) CAS 基于全球监测网解算提供的 BDS B1I B3I 双频 DCB 改正产品，以 CAS-DCB 表示。

2) 本文基于区域监测网下 GPS+BDS 双系统及多项式电离层模型解算得到的 BDS B1I B3I 双频 DCB 改正产品，以 Regional-DCB 表示。

3) 广播星历播发的 B1 频点相对 B3 频点的设备时延偏差参数 TGD1。

选取 2024 年 2 月 1 日至 3 月 1 日 30 天的广播星历、精密星历和 DCB 参数数据，分析本文解算 DCB 产品对 SISRE 精度的影响。

针对 BDS-3 卫星计算每天 SISRE 均方差，30 天 SISRE 均方差的均值如图 9 所示。其中，蓝色代表 CAS DCB 计算结果，橙色代表基于本文区域监测网 DCB 计算结果，黄色代表基于北斗广播星历的 TGD 计算结果。

从图 9 中可以看出，基于北斗广播星历 TGD 计

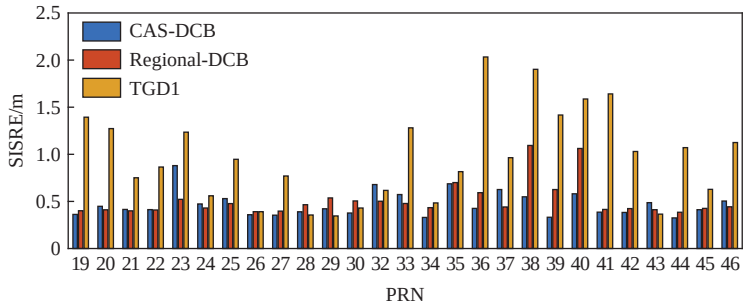


图 9　BDS-3 空间信号测距误差 SISRE 统计结果

Fig. 9　BDS-3 spatial signal ranging error SISRE statistical results

算的 SISRE 精度最低, 约为 1 m, 基于本文区域监测网 DCB 计算的 SISRE 与 CAS 全球网 DCB 计算 SISRE 精度相当, 约为 0.5 m。本文计算的 DCB 参数可将 BDS-3 卫星的 SISRE 精度提升约 48%。其中, 北斗系统播发的 TGD 参数在解算时扣除的电离层延迟为外部机构所提供的电离层模型, 且北斗系统播发的 TGD 参数更新周期通常为 1 个月。受外部电离层模型在亚太地区建模精度及更新频率的影响, 北斗系统播发的 TGD 参数精度较低。基于 3 种 DCB 计算的 SISRE 精度统计结果如表 6 所示。

表 6　BDS-3 空间信号测距误差 SISRE 精度提升统计

Table 6　BDS-3 spatial signal ranging error SISRE accuracy improvement statistics

策略	SISRE/m	精度提升/%
TGD1	0.97	
Regional-DCB	0.51	47.6
CAS-DCB	0.47	51.7

5　单点定位精度评估

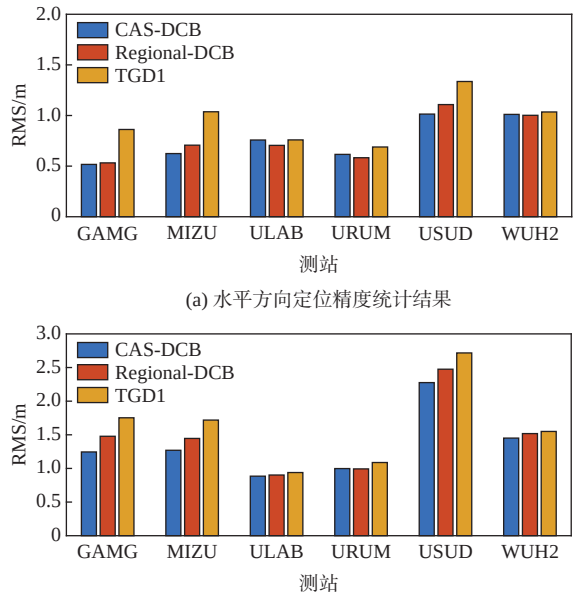
为分析 DCB 产品对 BDS-3 双频单点定位(single point positioning, SPP)定位精度的影响, 本文选取 2024 年 2 月 13—19 日共 7 天 6 个 IGS 基准站的实测数据进行分析。基准站参考坐标为 IGS SINEX 文件提供坐标。分别统计了不同测站水平和高程定位误差的均方根误差。进行 BDS-3 双频单点定位时接收机端 DCB 被接收机钟差吸收, 仅对卫星端 DCB 进行修正, 实验中选择的卫星端 DCB 参数如下:

1) CAS 基于全球监测网解算提供的 BDS-3 B1I B3I 双频 DCB 改正产品, 以 CAS-DCB 表示。

2) 本文第 3 节中基于区域监测网、GPS+BDS 双系统、多项式电离层模型解算的 BDS-3 B1I B3I 双频 DCB 改正产品, 以 Regional-DCB 表示。

3) 广播星历播发的 B1 频点相对 B3 频点的设备时延偏差参数 TGD1。

各测站双频 SPP 水平和高程定位误差统计结果如图 10 所示。



(a) 水平方向定位精度统计结果

(b) 高程方向定位精度统计结果

图 10　不同基准站 BDS-3 B1I B3I 双频 SPP 定位精度统计

Fig. 10　Statistical results of BDS-3 B1I B3I dual-frequency SPP positioning accuracy for different reference stations.

从图 10 中可以看出, 基于北斗广播星历 TGD 计算的双频 SPP 定位精度最低, 水平 RMS 约为 1 m、高程 RMS 约为 1.7 m, 基于本文区域监测网 DCB 计算的定位精度与 CAS 全球网 DCB 计算定位精度相当, 水平 RMS 约为 0.7 m、高程 RMS 约为 1.5 m。相对于北斗广播星历播发的 TGD 参数, 本文解算的 DCB 参数可将水平和高程方向定位精度分别提升约 18.9%、9.2%。详细的定位误差统计结果如表 7 所示。

以 MIZU 基准站为例, 给出其中一天的定位误差序列, 如图 11 所示。其中, U 表示水平方向, H 表示高程方向。

从图 11 中可以看出, 相对于广播星历播发 TGD 参数, 使用 CAS 利用全球网解算 DCB 和本文利用区域网解算的 DCB 参数, 定位误差序列变化更加平稳, 尤其是高程方向。

表7 BDS-3 B1I B3I SPP水平和高程方向的精度提升统计

Table 7 Accuracy improvement statistics of BDS-3 B1I B3I SPP in horizontal and elevation directions

策略	方向	RMS/m	精度提升/%
TGD1	水平	0.953	
	高程	1.628	
Regional-DCB	水平	0.773	18.9
	高程	1.469	9.2
CAS-DCB	水平	0.757	19.5
	高程	1.354	15.3

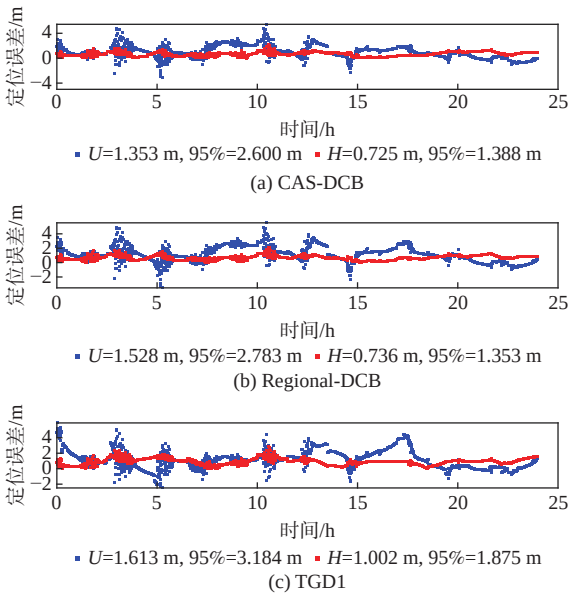


图11 MIZU定位误差时间序列

Fig. 11 MIZU localization error time series

6 结 论

本文主要研究了区域监测网条件下不同GNSS组合观测数据、不同电离层延迟改正模型对DCB参数解算精度的影响。首先,采用全球网监测数据解算DCB并与CAS分析中心发布的DCB精度进行比较,解算精度相当,说明本文数据处理的正确性。然后,对区域网监测数据解算的GPS卫星、BDS卫星及接收机的DCB精度进行详细分析,得出以下结论:

1)全球监测网条件下,基于单系统与双系统观测数据解算的卫星DCB月标准偏差大致相当。与CAS分析中心发布的卫星DCB相比,月标准偏差量级相当。GPS卫星DCB月均值偏差优于0.2 ns,BDS -2卫星月均值偏差约为1.5 ns,BDS-3卫星月均值偏差约为1 ns。

2)相比于CAS采用全球监测网解算卫星DCB,区域监测网下GPS与BDS卫星DCB的稳定性均下降约2倍。同时,双系统观测数据解算结果卫星端DCB的稳定性更优,相比单系统观测数据卫星端DCB稳定性提升约8%。

3)区域监测网条件下,单系统与双系统解算的卫星和接收机DCB参数精度相当。若监测站数量较多且分布均匀,建议选择球冠谐模型解算电离层延迟,若监测站数量较少,建议选择多项式模型解算电离层延迟。由于本文采用的GPS监测站数量较多,GPS卫星DCB参数解算精度优于BDS卫星DCB参数解算精度。GPS卫星的DCB月标准偏差约为0.2 ns,与CAS DCB产品的月均值偏差约为0.2 ns,BDS卫星的DCB月标准偏差约为0.3 ns,与CAS DCB产品的月均值偏差约为0.5 ns。

4)区域监测网条件下,接收机DCB不受卫星端DCB解算差异的影响,接收机DCB解算的月标准偏差约为0.8 ns,与CAS接收机DCB的月均值偏差约为1 ns大致相当。

5)北斗系统广播星历中播发的TGD参数基于区域监测网数据计算,精度较低,采用本文研究方法解算的DCB参数,与北斗广播星历中播发的TGD参数相比,可将BDS-3卫星的SISRE精度提升约48%,将BDS-3 B1I B3I双频SPP水平和高程方向定位精度分别提升约18.9%、9.2%。

参考文献(References)

[1] Coor D S, Coker C, Dahlke S R, et al. Variability of GPS satellite differential group delay biases[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(6): 931-938.

[2] 袁运斌, 欧吉坤. GPS观测数据中的仪器偏差对确定电离层延迟的影响及处理方法[J]. 测绘学报, 1999, 28(2): 110-114.
Yuan Y B, Ou J K. The effects of Instrumental Bias in GPS observations on determining ionospheric delays and the methods of its calibration[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(2): 110-114(in Chinese).

[3] Prange L, Orliac E, Dach R, et al. CODE's five-system orbit and clock solution the challenges of multi-GNSS data analysis[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(4): 345-360.

[4] Deng Z, Ge M, Uhlemann M, et al. Precise orbit determination of Beidou Satellites at GFZ[C]//Proceedings of the EGU General Assembly Conference, Vienna. Austria: EGU, 2014.

[5] Lassiter E M. NAVSTAR GPS space segment/navigation user interfaces, (Rev. D): IS-GPS-200D[S]. EI Segundo: GPS Joint Program Office, 2006.

[6] European Commission. Galileo open service—signal in space interface control document (OS SIS ICD), Issue 1.2[S]. Brussels: European Commission, 2015.

[7] Schaer S. CODE DCB data archive initiated[EB/OL]. (2001-02-23)[2024-02-06]. https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2001/004585.html.

[8] Li Z S, Wang N B, Hernández-pajares M, et al. IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling

[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(3): 32.

[9] Wang N B, Li Z S, Montenbruck O, et al. Quality assessment of GPS, Galileo and BeiDou-2/3 satellite broadcast group delays[J]. Advances in Space Research, 2019, 64(9): 1764-1779.

[10] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(3): 209-228.

[11] 李子申, 王宁波, 袁运斌. 多模多频卫星导航系统码偏差统一定义与处理方法[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 10-20.
Li Z S, Wang N B, Yuan Y B. A unified definition and processing method of observable-specific signal biases for multi-mode and multi-frequency global navigation satellite system[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(5): 10-20(in Chinese).

[12] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 (2.0 版)[M]. 北京; 中国卫星导航系统管理办公室, 2013.
China Satellite Navigation Office. BeiDou satellite navigation system space signal interface control document open service signal (Version 2.0) [M]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2013(in Chinese).

[13] 王宁波. GNSS 差分码偏差处理方法及全球广播电离层模型研究[J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 1069.
Wang N B. Study on GNSS differential code biases and global broadcast ionospheric models of GPS, Galileo and BDS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(8): 1069(in Chinese).

[14] Zhou C, Yang L, Li B, et al. M_GIM: a MATLAB-based software for multi-system global and regional ionospheric modeling[J]. GPS Solutions, 2023, 27(1): 42.

[15] 张强, 赵齐乐, 章红平, 等. 利用北斗观测实验网解算北斗卫星差分码偏差[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2016, 41(12): 1649-1655.
Zhang Q, Zhao Q L, Zhang H P, et al. BDS differential code bias estimation using BeiDou experimental tracking stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(12): 1649-1655.

[16] Chen G C, Hu Z G, Wang G X, et al. Assessment of BDS signal-in-space accuracy and standard positioning performance during 2013 and 2014[M]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume I. Berlin: Springer, 2015: 437-453.

[17] Hu Z H, Chen G, Zhang Q, et al. An initial evaluation about BDS navigation message accuracy[M]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Berlin: Springer, 2013: 479-491.

[18] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment–Methodology and results[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(12): 3020-3038.

[19] 邢楠. 广域差分技术在 COMPASS 系统定位服务中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
Xing N. Application of wide-area difference technology in positioning service of COMPASS system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013(in Chinese).

Methods and influence factors analysis of BeiDou DCB parameter solving based on regional monitoring networks

LI Wendi[1], CAO Yueling[2], MENG Yinan[3, 4, 5, *], DAI Wujiao[1], PAN Lin[1], ZHOU Shanshi[2]

(1. The School of Earth Science and Information Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Shanghai Astronomy Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;
4. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
5. Key Laboratory of Smart Earth, Beijing 100010, China)

Abstract: Through the use of intersatellite link data and ground regional networks, the BeiDou-3 system offers worldwide navigation, location, and timing services. Currently, the precision of the BeiDou-3 broadcast ephemeris orbit and clock offset products has reached a high level. However, due to insufficient satellite coverage from the ground regional network, the accuracy of the differential code bias (DCB) parameters broadcast by the satellites shows a significant gap compared to other navigation system parameters and post-processed precision products. In order to tackle these problems, this study examines how the accuracy of DCB parameter estimation in a regional monitoring network is affected by variables like the distribution of monitoring stations, multi-GNSS combinations, and ionospheric delay correction models. It proposes an optimal strategy for estimating DCB parameters within this network. Using the DCB products released by the Chinese Academy of Sciences (CAS) as a reference, the stability and consistency of the DCB products are analyzed, and their accuracy is evaluated through the signal in space range error (SISRE). Single-point positioning accuracy tests are conducted using BDS-3 B1I/B3I dual-frequency data. The findings show that, with a root mean square difference of roughly 0.4 ns, the satellite-end DCB stability in the regional monitoring network is roughly twice as poor as that of the satellite-end DCB determined using the CAS global monitoring network. The stability of satellite-end DCB calculated from dual-system observation data is superior, and the BDS-3 satellite DCB shows better consistency with the CAS DCB products. The receiver-end DCB in the regional monitoring network exhibits the same stability as the CAS DCB products, with dual-system observation data yielding better consistency for the receiver DCB. Compared to the SISRE results of BDS-3 calculated using TGD1 parameters from broadcast ephemeris, the regional monitoring network DCB products enhance the SISRE calculation accuracy for BDS-3 by 47.6%. The dual-frequency SPP positioning results improve by 14.1%, similar to the enhancement effect observed with the CAS DCB products.

Keywords: regional monitoring network; satellite DCB parameter solving; receiver DCB parameter solving; signal in space range error; single point positioning

Received: 2024-05-23; **Accepted**: 2024-09-27; **Published Online**: 2024-11-13 16:19

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241113.1339.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (12373077,12273096,12173072,41674041)

* **Corresponding author**. E-mail: mengyn@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0407

一种基于任务流图结构重构的极化码 BP 译码算法

曹皓，陈亦欧*，张润泽
(电子科技大学 通信抗干扰全国重点实验室，成都 611731)

摘 要：极化 (Polar) 码因其信道容量特征和具有较低的编译码复杂度，现已广泛应用于第五代移动通信技术 (5G) 当中。置信传播 (BP) 译码算法具有并行执行、高吞吐率的特点，是常用的极化码译码算法，为降低其译码复杂度和译码延时，提出了一种基于任务流图结构重构 (TGR) 的极化码 BP 译码算法，通过图等价关系，对译码算法进行两步结构优化。采用冗余消除算法去掉 BP 译码算法中的冗余计算，简化算法运算结构；采用分支变换算法调整运算顺序，缩减关键路径延时。与 3 种典型的结构优化 BP 译码算法相比，所提的 BP-TGR 译码算法可以至少降低 2.3% 的关键路径延时，减少 4.2% 的浮点运算量，且几乎没有纠错性能损失，具有更优秀的综合性能，尤其是在延时敏感和信道条件较恶劣的应用场景中。

关 键 词：极化码；置信传播译码；任务流图；等价结构优化；关键路径
中图分类号：TN911
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2601-09

极化码是目前唯一一种被严格证明达到信道容量的信道编码方法[1]。连续取消算法 (successive cancelation,SC)[1] 译码算法和置信传播 (belief propagation,BP)[2] 译码算法是两种经典的极化码译码算法，以往研究人员对 SC 译码器做了诸多研究[3-5]，但是由于其串行译码的特征，具有较高的译码延时和较低的吞吐率，BP 译码算法是一种并行的迭代译码算法，在译码延时和吞吐率上具有良好的表现[6]，但是计算较复杂，硬件实现难度较大。

随着码长增大，BP 译码的因子图规模越来越大，会导致越来越大的浮点运算量。为了降低 BP 译码的浮点运算量，文献 [7-9] 提出了几种改进因子图的结构优化方法，Zhang 等[7] 利用冻结节点的先验概率简化译码过程。Abbas 等[8] 在每次迭代期间冻结部分子因子图，提高整个译码过程相对于完整因子图其余部分的收敛性，从而降低浮点运算量。Feng 和 Liu[9] 将因子图划分为不同的成分码，简化因子图的消息更新规则，从而减少译码延时和浮点运算量。此外，Cammerer 等[10] 将因子图转换为稀疏图 (sparse graph,SG)，利用类低密度奇偶校验 (LDPC-like) BP 算法降低极化码的译码复杂度，但会损失纠错性能。Gong 等[11] 通过翻转稀疏图中不可靠的变量节点 (variable nodes,VN)，改善译码性能。Chen 等[12] 通过构造扩展的稀疏图，降低迭代次数。Liu 等[13] 结合列表译码的方法，提出稀疏图列表译码器，进一步提高性能。Li 等[14] 通过添加辅助 VN 降低稀疏图的密度，提高短码的性能。

在文献 [7-9] 中，BP 译码算法的译码延时和浮点运算量仅通过减少每次迭代的计算量和迭代时间来降低。但是，在 BP 译码中，相邻的迭代之间存在数据依赖关系，这些关系是否存在新的因子图简化规则，对于改进 BP 译码具有一定的研究价值。任务流图是一种有效的算法规范表示方法，通过将算法高层次的数学公式转换为图形化表示方法，可以有效分析算法运算流程中的结构特征和数据依赖关系。因此，通过简化任务流图可以简化算法的

收稿日期：2024-06-06；录用日期：2024-08-23；网络出版时间：2024-09-24 16:08
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240924.1350.003
*通信作者. E-mail：chenyiou@uestc.edu.cn

引用格式：曹皓，陈亦欧，张润泽. 一种基于任务流图结构重构的极化码 BP 译码算法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2601-2609.
Cao H，Chen Y O，Zhang R Z. A BP decoding algorithm for polar codes based on task graph reconstruction [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2601-2609（in Chinese）.

运算流程。通过上述分析，为了研究不同迭代次数之间的关系，本文将极化码BP译码中消息多次迭代更新的运算过程展开为任务流图，引入图论的思想，提出一种基于任务流图结构重构(task graph reconstruction, TGR)的BP译码算法。该算法包含2个创新点：①设计冗余消除算法，通过图的等价关系构造新的简化结构，消除算法中大量的冗余计算，降低译码延时和浮点运算量；②设计分支变换算法，通过寻找任务流图中潜在的并行运算结构，优化操作执行顺序，进一步降低译码延时。冗余消除和分支变换均只对任务流图做等价变换，所以本文提出的BP-TGR译码算法不改变纠错性能。与文献[7-9]中典型的结构优化BP译码算法相比，本文算法具有更优秀的综合性能，尤其是在延时敏感和信道条件较恶劣的应用场景中。

1 极化码原理与建模综述

1.1 极化码

极化码源于信道极化理论[15]，通过对已知信道的组合和分离，使得部分子信道的信道容量趋近于1，另一部分子信道的信道容量趋近于0。极化编码的思想就是在信道容量趋近于1的信息位上传输信息比特，在信道容量趋近于0的冻结位上传输冗余比特[1]，以保证信息传输过程中的可靠性。

1.2 置信传播译码算法

BP译码算法的核心思想是因子图理论[16]，一个码长为N的极化码的因子图通常被划分为$n=\log_2 N$个阶段，由$N(n+1)$个节点组成。图1为一个(8,4)极化码的BP因子图，最左列的节点为输入信号，其中实心节点代表信息比特，其余空心节点代表冻结比特。

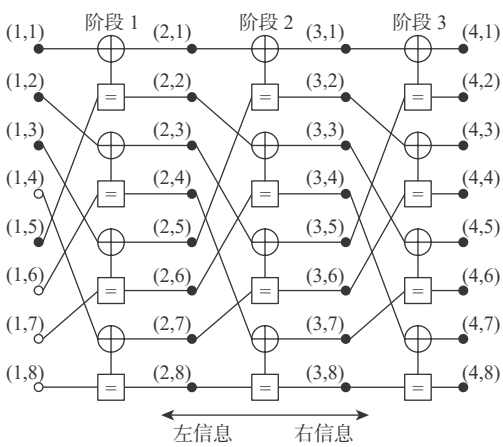


图1 (8,4)码BP译码因子图(N=8)

Fig. 1 Factor graph of (8,4) polar code with code length N=8

该因子图包括$\log_2 8=3$个阶段，每个阶段都含有$N/2=4$个处理单元(processing element,PE)，用于更新因子图的信息，如图2所示。

每个PE单元都有2个输入和2个输出，$R_{i,j}^T$和$L_{i,j}^T$分别表示向右和向左传播消息，$T=0,1,2,3,\cdots$表示当前迭代次数，i,j分别表示节点的列数和行数，且满足$1\leqslant i\leqslant n+1$，$1\leqslant j\leqslant N$。

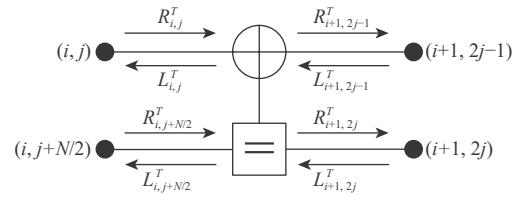


图2 PE单元

Fig. 2 Processing element

PE的更新方程为

$$\begin{cases} R_{i+1,2j-1}^T=g(R_{i,j}^{T-1},L_{i+1,2j}^{T-1}+R_{i,j+N/2}^{T-1}) \\ R_{i+1,2j}^T=g(R_{i,j}^{T-1},L_{i+1,2j-1}^{T-1})+R_{i,j+N/2}^{T-1} \\ L_{i,j}^T=g(L_{i+1,2j-1}^{T-1},L_{i+1,2j}^{T-1}+R_{i,j+N/2}^{T-1}) \\ L_{i,j+N/2}^T=g(R_{i,j}^{T-1},L_{i+1,2j-1}^{T-1})+L_{i+1,2j}^{T-1} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$g(x,y)$表示为

$$g(x,y)=\ln\frac{(1+\mathrm{e}^{x+y})}{\mathrm{e}^x+\mathrm{e}^y} \tag{2}$$

由于对数域的运算不利于硬件实现，故采用MS-BP[17]译码算法，近似后的$g(x,y)$表达式为

$$g(x,y)=\operatorname{sign}x\operatorname{sign}y\min(|x|,|y|) \tag{3}$$

式中：$g(\cdot)$为取g运算；sign(·)为取符号运算；min(·)为取最小值。

在首次迭代时，需要进行数据初始化。所有节点的左信息和右信息可以组成两个维度为$(n+1)\times N$的方阵$\boldsymbol{L}$和$\boldsymbol{R}$，初始化$\boldsymbol{L}$，$\boldsymbol{R}$值为

$$\begin{cases} R_{1,j}=\begin{cases}0, j\in A\\ +\infty, j\in A^{\mathrm{c}}\end{cases} \\ R_{2,j}=\cdots=R_{n+1,j}=0 \\ L_{1,j}=\cdots=L_{n,j}=0 \\ L_{n+1,j}=\mathrm{LLR}(x_j)=\ln\dfrac{P(x_j=0|y_j)}{P(x_j=1|y_j)} \end{cases} \tag{4}$$

式中：A为信息比特；A^{c}为冻结比特；$R_{2,j},\cdots,R_{n+1,j}$和$L_{1,j},\cdots,L_{n,j}$均为因子图的中间传播值；x_j为第j个编码信号，x_j通过信道后接收得到信号y_j；LLR(x_j)为x_j的对数似然比。

译码时，初始化后，先根据式(1)从最左边一列$i=1$开始，逐一向右更新$\boldsymbol{R}$的值直到$i=n$，接着再从最右边一列$i=n$开始，逐一向左更新$\boldsymbol{L}$的值直到$i=1$结束，这样算完成一次迭代，当达到迭代次数上限时，MS-BP译码算法停止，输出译码结果，值得注意的是，译码结果是由对数似然比信息经过硬判决得到的[2]。

1.3　MS-BP 的任务流图建模与分析

任务流图是由节点$v_i(\forall v_i \in V, i=1,2,\cdots,|V|)$和有向边$e_{i,j}(\forall e_{i,j} \in E, i,j=1,2,\cdots,|E|)$组成的描述算法运算流程的有向无环图, 其中, 每一个节点代表一个计算操作, 每一条有向边代表一条数据通路, $e_{i,j}$代表数据经过计算节点v_i处理后输出数据至节点v_j, 任务流图用$G(V,E)$表示, 节点个数为$|V|$, 数据通路数为$|E|$。此外, $I_{i,j}(i=1,2,\cdots,|V|, j=1,2)$代表节点$v_i$的第$j$个输入值, 若输入是一条有向边, 则标记为'Dedge', $T_i(i=1,2,\cdots,|V|)$代表v_i的节点类型。任务流图中, 输入-输出路径(以下简称为"路径P")是指以原始比特作为输入, 以多次迭代的最终译码比特作为输出之间的所有路径, $|P|$表示路径延时, 其中, 延时最长的路径就是"关键路径P_c"。如图 2 所示, BP 译码算法的 1 个 PE 单元包含 2 个操作: 1 次g函数计算和 1 次加法操作, g函数采用式 (3) 计算, 将这 2 种计算操作分别作为 BP 译码任务流图中的 2 类节点: ⊙节点和⊕节点, 任务流图将因子图中消息多次迭代更新的过程展开, 因为每次迭代的过程相同, 所以下面用一次迭代为例进行分析。取 N=8 的极化码 BP 译码为例, 其任务流图中单个比特$L_{1,1}^{(1)}$首次迭代过程如图 3 所示, 图中包含 17 个⊙节点和 17 个⊕节点。

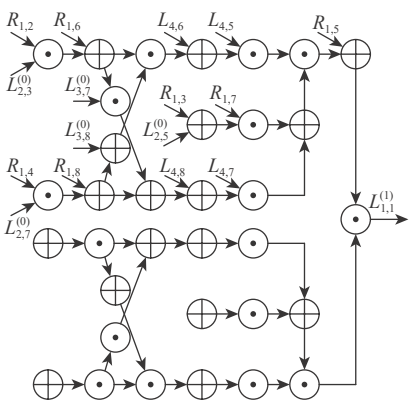


图 3　单比特首次迭代 BP 译码的任务流图(N=8)

Fig. 3　Task flow diagram for single-bit first iteration BP decoding with code length N=8

2　基于任务流图结构重构的 BP 译码算法

2.1　基于任务流图结构重构的 BP 译码算法

BP 译码算法的任务流图中存在很多冗余的运算结构和较长的串行运算链。例如, 对存在多个输入的节点, 如果其中有输入的值是固定值, 则根据等价关系可推导出节点输出也是固定值, 无需进行节点的运算操作。另外, 在串行运算链路中可能存在可以并行运算的节点, 如果能将其变为并行运算, 可缩短运算链路长度。

针对上述 2 种情况, 设计了基于任务流图结构重构的两步优化的 BP 译码算法, 对原始任务流图做结构等价变换, 既能简化冗余的运算结构、降低关键路径延时, 也不会改变纠错性能, 算法流程如图 4 所示。首先, 分析任务流图中各节点的拓扑结构和输入特征, 寻找冗余结构, 消除其中的冗余节点(具有固定输入值的节点), 降低冗余结构所在路径的延时; 然后, 寻找分支链路(2 个同类节点相连组成的链路), 做分支变换, 降低关键路径延时, 得到关键路径延时和浮点运算量最优的任务流图, 具体流程如下。

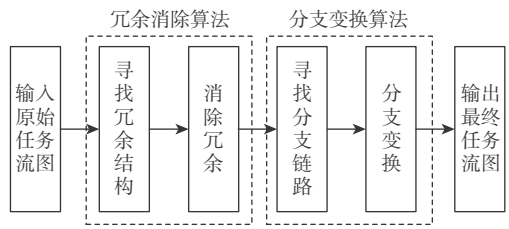


图 4　基于任务流图结构重构的 BP 译码算法流程

Fig. 4　Flow chart of BP decoding algorithm based on task graph reconstruction

2.2　冗余消除算法

冗余消除算法包括 2 个步骤: 首先, 找到冗余节点(以下简称为"R 节点"), 并将其扩展为对应的冗余结构, 然后进行等价变换消除 R 节点。

2.2.1　寻找冗余结构

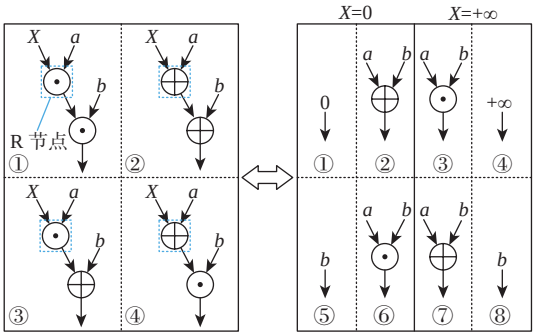
R 节点 ($v_R \in V$) 至少存在一个输入为 0 或$+\infty$, 根据式 (4), 其与输入信号(冻结和信息)的比特相连, 同时, 在首次迭代译码中, 以中间传播值为输入的节点也是 R 节点。

利用式 (4) 对任务流图中所有节点初始化赋值, 根据上述 R 节点的特征, 采用广度优先搜索算法找到任务流图中所有 R 节点, 并扩展为 R 节点所在的冗余结构。通过分析, 有 4 种基础的冗余结构, 其包含 1 个 R 节点和 1 个 R 节点的后继节点, 这些基础结构中存在至少 1 个节点的运算冗余, 并可等价变换为一个化简结构。证明如下:

证明　列出⊕节点和⊙节点一共 4 种相邻结构, 根据式 (4), 初始化固定值有 3 种情况, 只有 2 种取值: 0 和+∞, 由式 (3), 画出 4 种v_R对应的基础冗余结构以及消除v_R后的新结构, 如图 5(a)和图 5(d) 分别代表 4 种冗余结构, 箭头左边为原始任务流图, 虚线框内是v_R, 箭头右边为简化后的任务流图。

4 种冗余结构的简化规则如下:

v_R存在 2 个输入: $i_1 = X(X$为0或$+\infty)$, $i_2 = a(a$为任意值), v'_R是v_R的后继节点, 其存在 2 个输入:



(a) 原始任务流图 (b) 简化后的任务流图

图 5 冗余结构等价变换示意

Fig. 5 Schematic diagram of the redundant structural equivalence transformation

$i_3=o_1$, $i_4=b$(b为任意值), v'_{R}的输出o_2作为冗余结构的最终输出。下面分别以$i_1=0$为情况 1, $i_1=+\infty$为情况 2 进行说明。(注: $i_1,i_2,i_3,i_4,o_1,o_2\in E$)

1): v_{R}和v'_{R}都是⊙节点。

情况 1: 删除v_{R}和v'_{R}, $o_2=0$。

情况 2: 删除v_{R}, 保留v'_{R}, $i_3=a$, $i_4=b$。

2): v_{R}和v'_{R}都是⊕节点。

情况 1: 删除v_{R}, 保留v'_{R}, $i_3=a$。

情况 2: 删除v_{R}和v'_{R}, $o_2=+\infty$。

3): v_{R}是⊙节点, 而v'_{R}是⊕节点。

情况 1: 删除v_{R}和v'_{R}, $o_2=b$。

情况 2: 删除v_{R}, 保留v'_{R}, $i_3=a$, $i_4=b$。

4): v_{R}是⊕节点, 而v'_{R}是⊙节点。

情况 1: 删除v_{R}, 保留v'_{R}, $i_3=a$, $i_4=b$。

情况 2: 删除v_{R}和v'_{R}, $o_2=b$。

有 4 种情况的冗余结构存在 1 个节点的运算冗余, 另外 4 种情况的冗余结构存在 2 个节点的运算冗余。冗余结构的等价关系得证。

2.2.2 消除冗余

由图 5 可以看出, 冗余结构经过等价变换后又可能转变成一个新的冗余节点, 产生新的冗余结构, 所以需要广度优先遍历所有节点, 找出所有已有的和新产生的冗余结构, 根据 R 节点类型和固定输入值, 采用对应的等价简化规则, 替换原始任务流图。该算法的代码实现思路如下:

输入: G,T。

输出: G_Redu. //冗余消除后的任务流图。

1. Initialize I according to Eq. (4);
2. for each v_i in G //广度优先遍历
3. while $I_{i,1}$ or $I_{i,2}\in X$ //$v_i\in v_{\mathrm{R}}$
4. $v_o=v'_i$; //v_j是v_i的后继节点
5. Match $T_i$and$T_o$with rules (1)(2)(3)(4);
6. Remove v_{R} and update G,I,T;
7. end while
8. end
9. G_Redu = G;

2.3 分支变换算法

针对 BP 译码算法任务流图中的串行链路, 利用节点运算顺序的等价性, 将较长的串行链路切割分段, 经过重新组合变换成等价的可并行执行的具有分支结构的链路, 缩短运算级数。

2.3.1 寻找分支链路

采用广度优先搜索算法找到任务流图中所有的分支链路。2 个具有邻接关系且类型相同的节点组成一条分支链路, 链路内的前驱节点即为分支节点(以下简称为“T 节点”), 为了减少关键路径上的计算节点数量, 通过分析, 分支链路上的多个输入, 可以互相调换顺序且不会影响最终译码的结果。

证明 要证明上述结论, 即需证明 T 节点($v_{\mathrm{T}}\in V$)满足交换律和结合律。由图 3 可知, T 节点只能是⊕节点或⊙节点, 故只需要证明⊙节点满足交换律和结合律。由式 (3) 可知, 显然⊙节点满足交换律。下面证明⊙节点满足结合律。

假设$a\geqslant b\geqslant c$, 则

$$(a\odot b)\odot c=[\mathrm{sign}(a)\mathrm{sign}(b)\min(|a|,|b|)]\odot c \tag{5}$$

令$\mathrm{sign}(a)\mathrm{sign}(b)\min(|a|,|b|)=\alpha$, 则式 (5) 变换为$\mathrm{sign}(\alpha)\mathrm{sign}(c)\min(|\alpha|,|c|)$。

又$\mathrm{sign}(\alpha)=\alpha$且$\min(|\alpha|,|c|)=\min(|a|,|b|,|c|)$, 所以式 (5) 可展开为

$$(a\odot b)\odot c=\mathrm{sign}(a)\mathrm{sign}(b)\mathrm{sign}(c)\min(|a|,|b|,|c|) \tag{6}$$

所以有

$$(a\odot b)\odot c=(b\odot c)\odot a=(c\odot a)\odot b=\mathrm{sign}(a)\mathrm{sign}(b)\mathrm{sign}(c)\min(|a|,|b|,|c|) \tag{7}$$

故⊙节点也与⊕节点一样满足交换律和结合律, 得证。

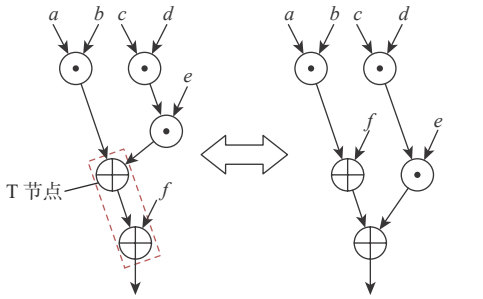
2.3.2 分支变换

利用 2.3.1 节的结论, 在不改变任务流图功能的基础上, 将分支链路的结构做等价变换, 把关键路径上的部分节点转移到非关键路径上, 减少关键路径上的节点数量, 优化关键路径延时。具体操作如下。

以图 6 为例, 虚线框中是一个由 2 加法节点构成的加法链, 其是一条分支链路且v_{T}是⊕节点。该分支链路有 3 个外部输入$P_{i1},P_{i2},P_{i3}\in E$, 其中, $P_{i1}=a\odot b$(a,b为任意值), $P_{i1}=(c\odot d)\odot e$(c,d,e为任意值), $P_{i1}=f$(f为任意值)。计算 3 条输入路径延时$|P_i|:|P_{i1}|=1\times\odot,|P_{i2}|=2\times\odot,|P_{i3}|=0$, 由于$|P_{i2}|>|P_{i1}|>|P_{i3}|$, 且$i_3$是$v_{\mathrm{T}}$的输入, 所以调换“最长”输入$i_2$和“最短”输入$i_3$的位置, 产生等价的任务流图,

如图 6 箭头右侧所示, 分支变换后的任务流图的关键路径延时减少了一个⊕节点操作。具体的表达式变换过程如式 (8) 所示, ⊙节点同理:

$$\{a\odot b+[(c\odot d)\odot e]\}+f=[a\odot b+f]+[(c\odot d)\odot e] \quad (8)$$



(a) 原始任务流图　　(b) 分支变换后的任务流图

图 6　分支变换示例

Fig. 6　Example of branching transformation

需要注意的是, 当 T 节点的出度大于 1 时, 为了保证变换后当前分支链路外的节点计算结果正确, 需要复制 T 节点, 拆分出当前分支链路, 如图 7 所示, 实线框和虚线框内分别为当前分支链路和其他链路。

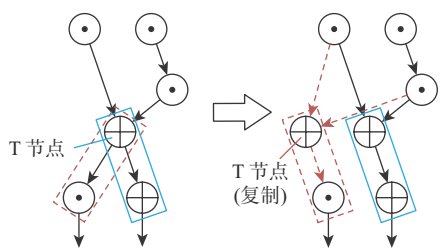


图 7　分支变化的特殊情况

Fig. 7　A special case of branching transformation

在计算关键路径延时时, 需要将节点的计算时间转换为有向边的权重 W, 在一个简单的 PE 结构中, 一个⊕节点的运算周期为 $1\times T_{\text{adder}}$, 一个⊙节点的运算周期约为 $3\times T_{\text{adder}}$ [18], 故将⊕节点出向边的权重设为 1, ⊙节点出向边的权重设为 3。分支变化算法的代码实现思路如下。

输入: G,T,I。

输出: G_Bran. //分支变换后的任务流图。

1. Initialize $W_{i,j}$ for $1\leqslant i\leqslant|V|,1\leqslant j\leqslant|V|$;
2. $j\leftarrow 1$
3. repeat
4. Find P_c and compute $|P_c|$;
5. $|P_c|^{(j)}=|P_c|$;
6. 遍历 v_i in each P_c;
7. while $T_i==T_o$ //$v_i\in v_T$
8. Clone v_i according to Fig. 7;
9. Exchange P_{i1},P_{i2},P_{i3} with $|P_{i1}|,|P_{i2}|,|P_{i3}|$;
10. end while
11. $j=j+1$;
12. until($|P_c|^{(j-1)}=|P_c|^{(j)}$)
13. G_Bran $=G$.

3　仿真结果与分析

为评估本文提出的 BP-TGR 算法对 BP 译码的实现结构的优化效果, 本节选取原始 BP 译码算法[17] 以及业内 3 种典型的结构优化的 BP 译码算法 (SBP[7] 算法、BP-HTEE[8] 算法、BP-EMLL[9] 算法) 和本文算法进行译码纠错性能、关键路径延时和浮点运算量 3 个方面的对比和分析。

3.1　纠错性能分析

为了验证 BP-TGR 译码算法的纠错性能, 本文在二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 调制和加性高斯白噪声 (additive white gaussian noise, AWGN) 信道条件下, 对 (1 024,512) 的极化码进行蒙特卡罗模拟, 评估 5 种译码算法的误比特率 (bit error rate, BER), 如图 8 所示。

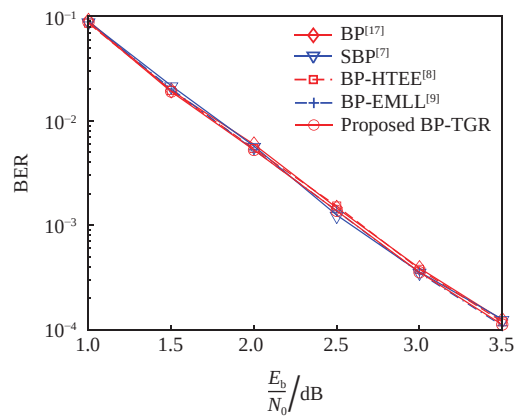


图 8　5 种算法的译码性能

Fig. 8　Performance of five BP decoding algorithms

从图 8 可以看出, 与原始 BP 译码算法相比, 本文提出的 BP-TGR 译码算法及 3 种对比算法都没有明显的性能损失, 证明 BP-TGR 译码算法仅对译码任务流图的结构进行了等价变换, 不会改变原始 BP 译码算法的纠错性能。

3.2　关键路径延时分析

关键路径延时是指任务流图中以原始比特作为输入, 以最终译码结果作为输出之间的所有路径中最长路径的延时, 通信算法需要对实时输入数据进行快速响应, 因此通信算法的关键路径延时可以反映其结构优化算法的优化效果, 是一项重要的性能指标。在任务流图中, 关键路径延迟被量化为⊕节点的运算周期数 (CAs)。

首先, 评估在不同码长下, 码率 R=0.5, E_b/N_0=

3 dB时，5种译码算法的关键路径延时，仿真结果如图9所示。从图9可以看出，本文提出的BP-TGR译码算法在5种码长下都具有最小的关键路径延时，相比于其他4种算法，该算法可以至少减少4.2%的关键路径延时，当N=2 048时，可以至少减少7.7%的关键路径延时。

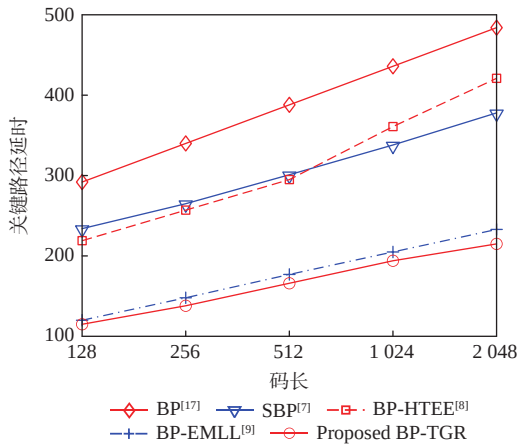


图9 5种算法在不同码长下的关键路径延时

Fig. 9 Critical path delay of five BP decoding algorithms at different code lengths

其次，评估(1 024,512)的极化码在不同E_b/N_0条件下，5种译码算法的关键路径延时，如图10所示。从图中可以看出，随着E_b/N_0增加，关键路径延时越来越小，相比于其他4种算法，本文算法可以至少降低3.6%的关键路径延时，在低E_b/N_0=1.5 dB时，可以降低至少16.7%的关键路径延时，明显提高了译码速度。

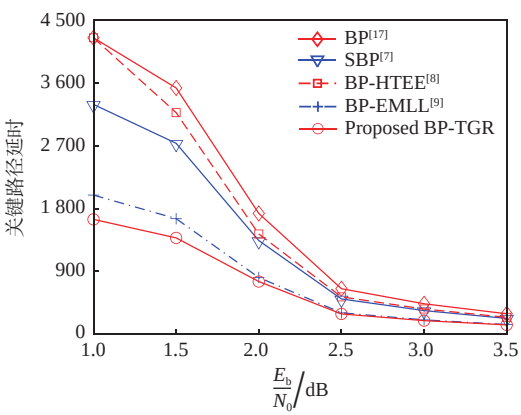


图10 5种算法在不同E_b/N_0下的关键路径延时

Fig. 10 Critical path delay of five BP decoding algorithms with different E_b/N_0

此外，码率也是影响算法优化性能的因素，因为大多数冗余节点都和冻结、信息节点相连，码率越大或者越小，会使冻结节点和信息节点数量越不平衡，出现更多的冗余结构和分支链路。图11展示了5种算法在不同码率下解码(1 024,512)极化码的关键路径延时。从图中可以看出，本文提出的BP-TGR算法具有5种算法中最小的关键路径延时，相比于其他4种译码算法，该算法可以至少降低2.3%的关键路径延时，且在低码率下优势更明显，当R=0.375时，可以至少降低14.9%的关键路径延时。

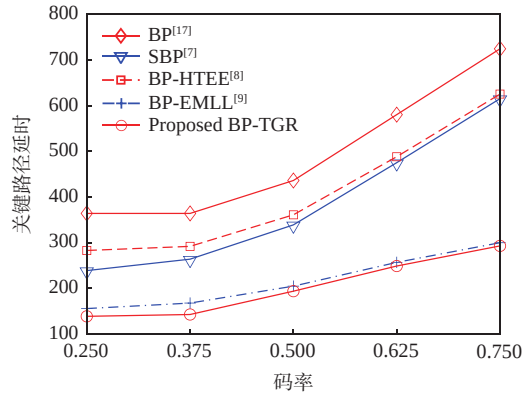


图11 5种算法在不同码率下的关键路径延时

Fig. 11 Critical path delay of five BP decoding algorithms with different code rates

3.3 浮点运算量分析

浮点运算量是另一项衡量算法对实现结构优化效果的重要性能指标，浮点运算量越低，算法对结构的优化效果就越好。其可以被量化为译码所需的浮点运算量[19]，具体而言，每次加法需要浮点运算量为2，每次乘法需要浮点运算量为6。

首先，评估在不同码长下，R=0.5，E_b/N_0=3 dB时，5种译码算法译出所有码字平均消耗的浮点运算量，结果如图12所示。随着码长增加，译码越来越复杂，所需迭代次数i也会增加，而节点数量为$2nN\times i$，故随着码长的增加，浮点运算量的增长速度比图9中的关键路径延时更快。从图12可以看出，相比于其他4种算法，本文提出的BP-TGR译码算法浮点运算量最低，可以至少降低5.8%的浮

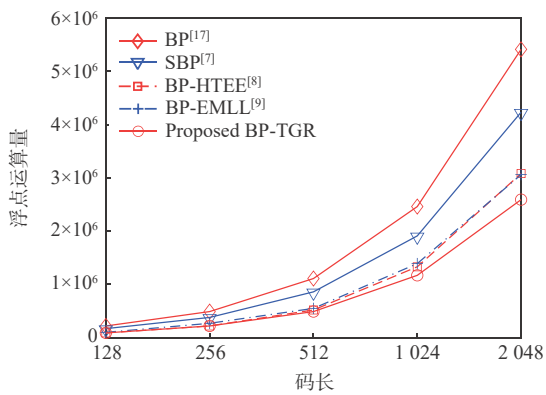


图12 5种算法在不同码长下的浮点运算量

Fig. 12 Computational complexity of five BP decoding algorithms at different code lengths

点运算量, 同时, 该译码算法在更高的码长下优化效果更明显, 当 N=2 048 时, 可以至少降低 15.4% 的计算量。

其次, 评估 (1 024,512) 的极化码在不同 E_b/N_0 条件下, 5 种译码算法的浮点运算量, 如图 13 所示。在低 E_b/N_0 条件下, BP-EMLL 算法的浮点运算量略低于本文算法, 这是因为, 本文算法是对关键路径延时和浮点运算量 2 个性能指标进行优化, 考虑到通信算法的实时性要求, 将关键路径延时这项指标的优化放在首位。当 E_b/N_0=1 dB 时, 如图 10 所示, 相比于 BP-EMLL 算法, 本文算法的关键路径延时可以降低 17.4%, 但只增加了 3.7% 的浮点运算量, 如图 13 所示, 在延时敏感的场景下, 这一综合性能是可以接受的。随着 E_b/N_0 增大, 信道条件越来越好, 译码复杂度会逐渐变低。与其他 4 种译码算法相比, 在 E_b/N_0=2 dB 时, 本文提出的 BP-TGR 译码算法可以至少减少 4.4% 的计算量, 且随着 E_b/N_0 的增大, 该译码算法的优势更明显, 当 E_b/N_0=3.5 dB 时, 可以至少减少 19.1% 的计算量。

最后, 图 14 显示了 5 种算法在不同码率下解

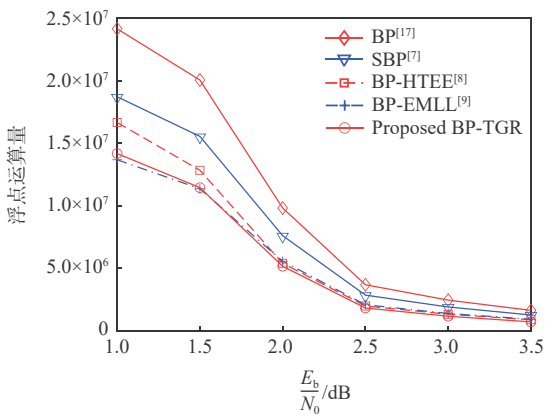


图 13　5 种算法在不同 E_b/N_0 下的浮点运算量

Fig. 13　Computational complexity of five BP decoding algorithms with different E_b/N_0

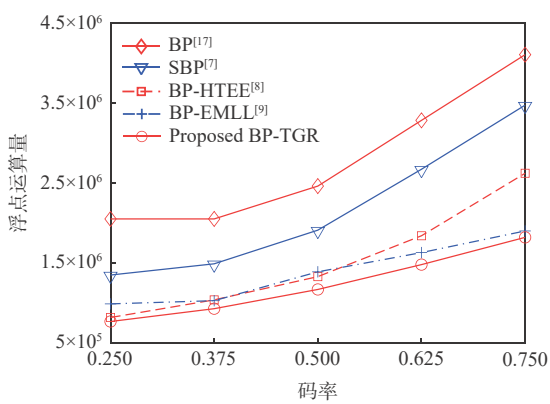


图 14　5 种算法在不同码率下的浮点运算量

Fig. 14　Computational complexity of five BP decoding algorithms with different code rates

码 (1 024,512) 极化码的浮点运算量。从图中可以看出, 浮点运算量随着码率变大而增加。相比于原始 BP 算法, 本文所提出的 BP-TGR 译码算法在较低和较高码率时能减少更多的计算量, 相比于其他 3 种译码算法, 该算法可以至少减少 4.2% 的计算量, 当 R=0.5 时, 可以至少减少 12% 的计算量。

3.4　消融实验

为了验证本文提出的 BP-TGR 译码算法中各个部分的有效性和必要性, 分别对其各自的优化效果进行测试对比。表 1 对比了任务流图仅做分支变换、仅做冗余消除以及联合优化后的情况, 测试在 E_b/N_0=3 dB 下 (1 024,512) 极化码译码的关键路径延时和浮点运算量。由表 1 可知, 仅对 BP 译码原始任务流图做冗余消除可以减少 51.1% 的关键路径延时和 54.5% 的浮点运算量。而相比于仅做分支变换, 联合优化后的效果更明显, 这是因为在多数冗余结构中, 同时包含分支链路, 所以冗余消除算法的优先级大于分支变换算法。联合优化后, 浮点运算量比仅冗余消除增加了 4.5%, 关键路径延时则进一步降低了 8.9%, 验证了 BP-TGR 译码算法中各个部分的有效性和必要性。

表 1　BP-TGR 译码算法的消融实验

Table 1　Ablation experiment for BP-TGR

实验	关键路径延时	浮点运算量
Origin-BP	436	2.46×10^6
仅分支变换	412	2.79×10^6
仅冗余消除	213	1.12×10^6
联合优化	194	1.17×10^6

4　结　论

本文研究了极化码 BP 译码因子图中的结构优化问题, 提出了 BP-TGR 算法, 并与原始 BP 译码算法和 3 种典型的结构优化 BP 译码算法进行了仿真对比实验。主要结论如下:

1) BP-TGR 算法利用图的等价关系, 通过冗余消除和分支变换算法对译码任务流图进行结构化简, 既能降低译码延时和译码复杂度, 也不改变原始 BP 译码算法的纠错性能。

2) 相比于 4 种对比算法, BP-TGR 算法在不同码长和码率条件下均表现出最优的关键路径延时和浮点运算量。

3) BP-TGR 算法以关键路径延时作为首要优化指标, 当信道条件较差时, 分支变换通过引入少量额外的浮点运算量, 可以更多地减少关键路径延时, 获得更好的综合性能。

稀疏图是极化码 BP 译码因子图的另一种表征

方式,今后可研究本文的结构优化算法与稀疏图的关系,进一步降低译码延时和译码复杂度。

参考文献(References)

[1] Arikan E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.

[2] Arikan E. Polar codes: a pipelined implementation[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Broadband Communication. Piscataway: IEEE Press, 2010: 11-14.

[3] Alamdar-Yazdi A, Kschischang F R. A simplified successive-cancellation decoder for polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(12): 1378-1380.

[4] Tal I, Vardy A. List decoding of polar codes[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. Saint piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.

[5] Fayyaz U U, Barry J R. Low-complexity soft-output decoding of polar codes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(5): 958-966.

[6] Hussami N, Korada S B, Urbanke R. Performance of polar codes for channel and source coding[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1488-1492.

[7] Zhang Y, Zhang Q, Pan X, et al. A simplified belief propagation decoder for polar codes[C]//Proceedings of the 2014 IEEE International Wireless Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-4.

[8] Abbas S M, Fan Y Z, Chen J, et al. High-throughput and energy-efficient belief propagation polar code decoder[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2017, 25(3): 1098-1111.

[9] Feng B P, Liu R K. Efficient-memory and low-latency BP decoding algorithm for polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(6): 1236-1239.

[10] Cammerer S, Ebada M, Elkelesh A, et al. Sparse graphs for belief propagation decoding of polar codes[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1465-1469.

[11] Gong Z H, Shen Y F, Ji H R, et al. Bipartite belief propagation polar decoding with bit-flipping[C]//ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Barcelona: IEEE Press, 2020: 1703-1707.

[12] Chen Z Y, Zhao H, Hou L. Sparse factor graph-based expanded iterative detection and decoding scheme for uplink polar coded SCMA system[C]//2022 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Bilbao: IEEE Press, 2022: 1-6.

[13] Liu H, Gunawan E, Hu Y Y, et al. BP-based sparse graph list decoding of polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(5): 1257-1261.

[14] Li Z Y, Shen Y F, Ren Y Q, et al. Belief propagation decoding for short-length codes based on sparse tanner graph[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(5): 969-973.

[15] Arikan E. Channel combining and splitting for cutoff rate improvement[C]//Proceedings of International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE Press, 2005: 671-675.

[16] Kschischang F R, Frey B J, Loeliger H A. Factor graphs and the sum-product algorithm[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 498-519.

[17] Pamuk A. An FPGA implementation architecture for decoding of polar codes[C]//Proceedings of the 2011 8th International Symposium on Wireless Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2012: 437-441.

[18] Yuan B, Parhi K K. Architecture optimizations for BP polar decoders[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech And Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2013: 2654-2658.

[19] Balogun P R, Marsland I D, Gohary R H, et al. Polar code design for irregular multidimensional constellations[J]. IEEE Access, 2017, 5: 21941-21953.

A BP decoding algorithm for polar codes based on task graph reconstruction

CAO Hao，CHEN Yiou*，ZHANG Runze

(National Key Laboratory of Wireless Communications，University of Electronic Science and Technology of China，Chengdu 611731，China)

Abstract：Polar codes have become prevalent in the fifth-generation mobile communication technology (5G) owing to their capacity characteristics and straightforward compilation. The belief propagation (BP) decoding algorithm, which demonstrates parallel execution and a high throughput rate, is a commonly employed polar code decoding algorithm. This paper proposes a BP decoding algorithm based on task graph reconstruction (TGR) to reduce the algorithm's decoding complexity and delay. Using graph equivalence relations, the decoding algorithm is structurally optimized in two steps. Firstly, the redundancy elimination algorithm is used to remove the redundant calculations in the BP decoding algorithm and simplify the algorithm's operation structure. Subsequently, the branch transformation algorithm is used to optimize the operation order and reduce the critical path delay. The suggested BP algorithm has a better overall performance, particularly in application scenarios with sensitive delay and harsh channel conditions, than the three BP decoding algorithms that aim for structural optimization. It can reduce the critical path delay by at least 2.3%, reduce the computational complexity by at least 4.2%, and virtually eliminate the loss of error correction performance.

Keywords：polar codes; belief propagation decoding; task graph; equivalent structure optimization; critical path

Received：2024-06-06；**Accepted**：2024-08-23；**Published Online**：2024-09-24 16：08

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240924.1350.003

* **Corresponding author**. E-mail：chenyiou@uestc.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0418

基于FCM-ARIMAX模型的氧气浓缩器性能退化建模

张依[1]，李娟[1,*]，戴洪德[2]，焦晓璇[3]，屈慧妍[1]

(1. 鲁东大学 数学与统计科学学院，烟台 264025；2. 海军航空大学 航空基础学院，烟台 264001；
3. 空军工程大学 航空工程学院，西安 710038)

摘　　要：氧气浓缩器是构成飞机生命保障系统的重要机载部分，其性能退化数据具有多变量、强噪声等特点。针对氧气浓缩器寿命预测中存在单变量信息少、预测精度低的问题，考虑多维退化变量间的相关性筛选合适变量，通过在氧分压变量中引入影响因素氧体积分数，结合Hodrick Prescott (HP)滤波提取序列中的长期趋势，利用模糊C均值(FCM)方法对氧分压进行分段处理，建立多阶段动态回归模型。对氧气浓缩器进行退化建模，结果表明：与单变量的自回归滑动平均(ARIMA)模型、单阶段多变量ARIMA模型、多阶段动态回归模型相比，结合HP滤波的多变量ARIMA模型预测精度分别平均提升了98.20%、81.21%和77.87%。

关　键　词：退化建模；氧气浓缩器；健康因子；模糊C均值；多阶段模型
中图分类号：V245.3+1
文献标志码：A　　**文章编号：**1001-5965(2026)07-2610-11

氧气浓缩器是飞机生命保障系统的关键机载部件，对确保飞行员的飞行安全和任务顺利执行至关重要。分子筛氧气浓缩器运用分子筛床的变压吸附原理，从空气中分离氮气，获得富氧空气，使氧气供应不受时间空间限制，摆脱对地面后勤支持的依赖，解决传统携氧局限性。机载氧气浓缩器能够在高空稀薄空气中为飞行员提供必要的氧气，以维持其正常生理功能和飞行操作，是飞行员飞行安全的关键保障。为确保机载氧气浓缩器的持续性能和可靠性，必须对其进行定期的退化分析。通过持续检测和评估，掌握其实际性能状态及性能变化趋势，并根据实时监测和诊断的结果做出合理的维修安排[1]。

对于多变量退化数据，现有的方法难以直接对其进行异常检测和非线性退化过程分析，常用方法为模型融合和变量筛选[2]。机械设备易受随机相依性[3]、多源随机性、外部协变量等影响，导致设备的退化复杂，极大地增加多变量退化建模难度。在退化建模中加入影响因素已得到较为广泛的应用[4]。在多变量情形中，Li等[5]考虑温度对维纳过程和copula函数参数的影响，建立多变量退化模型。Peng等[6]考虑工况因素和工作负载对车床退化过程的影响，建立一种广义的多元混合退化模型，对多个性能指标展开退化过程研究。Barraza-Barraza等[7]建立结合外生变量的自回归模型，并用广义蒙特卡罗模拟评估剩余使用寿命(residual useful life, RUL)性能。Sun等[8]结合电应力对振动信号的影响，利用copula函数表征多个退化特征的相关性，建立直流电动机的多元退化模型。Song等[9]研究随机冲击对设备部件发生故障的影响，考虑部件退化过程的相依性建立退化模型。

研究表明，大量设备和部件退化过程呈现明显的多阶段特性[10]。Li等[11]提出一种局部加权线性回归方法，用于构建机载轴承的多个退化模型，通过集成学习方法，实现在线模式实时识别。Xiao等[12]提出一种结合内模高斯混合模型(Gaussian mixture model, GM)和最小二乘支持向量机(least squares

收稿日期：2024-06-12；录用日期：2024-09-20；网络出版时间：2024-10-12 16:22
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241012.1300.002
基金项目：陕西省自然科学基金(2022JQ-586)；鲁东大学研究生创新项目(IPGS2024-045)
*通信作者. E-mail：daidaiquanquan123@126.com

引用格式：张依，李娟，戴洪德，等. 基于FCM-ARIMAX模型的氧气浓缩器性能退化建模[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2610-2620. Zhang Y，Li J，Dai H D，et al. Performance degradation modeling of oxygen concentrators based on FCM-ARIMAX approach[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2610-2620 (in Chinese).

support vector machine, LSSVM) 的融合模型, 并证明该方法在提高预测准确方面的显著优势。Wang 等[13]利用纯机器学习的方法对设备退化信号进行特征选择, 确定特征与标签的关联度后对设备退化进行分析。Zhang 等[14] 基于维纳过程对随机跳跃退化现象建立多阶段退化模型。刘君强等[15] 基于超统计理论进行突变点检测, 通过非线性拟合对航空发动机建立多阶段退化模型。Feng 等[16] 通过 2 个性能指标对电池的退化过程进行识别, 基于极大似然估计和贝叶斯方法估计漂移系数和扩展系数, 用维纳过程刻画电池的退化状态。以上研究均证明对不同阶段进行估计能提高模型的精度。

针对氧气浓缩器的退化过程多阶段和多变量的特征, 本文提出一种结合 Hodrick Prescott(HP) 滤波和模糊 C 均值 (fuzzy C-means, FCM) 的融合模型, 将设备的多阶段退化和设备退化数据的多变量性作为先验知识, 首先, 分析多变量退化设备寿命预测的特点和不同变量之间的影响, 建立健康因子。然后, 进行退化过程的划分, 通过 FCM 确定退化过程中的拐点, 通过拐点划分不同退化阶段, 利用 HP 滤波提取不同阶段的长期趋势并去噪。最后, 针对氧气浓缩器的不同设备退化阶段, 分别采用结合影响因素的自回归滑动平均 (autoregressive integrated moving average with exogenous variables, ARIMAX) 模型方法进行寿命预测, 以克服自回归滑动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型无法结合影响因素的局限[17], 避免在未知先验知识的情况下进行多变量多阶段退化数据寿命预测。为验证本文方法的有效性, 采用氧气浓缩器退化数据开展试验验证。

1　氧气浓缩器退化数据获取

1.1　试验方案

实际服役过程中, 氧气浓缩器的退化数据存在强噪声、样本量缺失等特点, 其中蕴涵的设备信息非常有限, 若不结合影响因素, 模型的拟合优良性难以达到理想结果, 同时, 也存在试验环境数据与实际服役环境数据差异过大的问题。基于以上问题, 以 YNQ-8 氧气浓缩器设计退化试验方案, 模拟在实际服役环境下引气湿度、氧分压、温度等参数变化, 以观察氧气浓缩器的退化规律[18]。以氧气浓缩器地面测试为例, 结合影响因素对氧分压进行建模。

氧气浓缩器的结构如图 1 所示。试验台由试验箱、真空泵、空气压缩器等组成。飞机在高空作业时, 空气在空气压缩器中压缩后进入管道, 所得高压氧气通过过滤器过滤杂质和水汽, 通过加湿器控制气体中的水汽, 进而影响机器的退化; 气体与试验箱中的分子筛床充分接触, 留下富氧气体的同时也影响分子筛床的退化, 随后气体离开试验箱从管道排出。试验台设有温度传感器、压力传感器等仪器, 以监控氧气浓缩器的性能和试验台的工作状况。

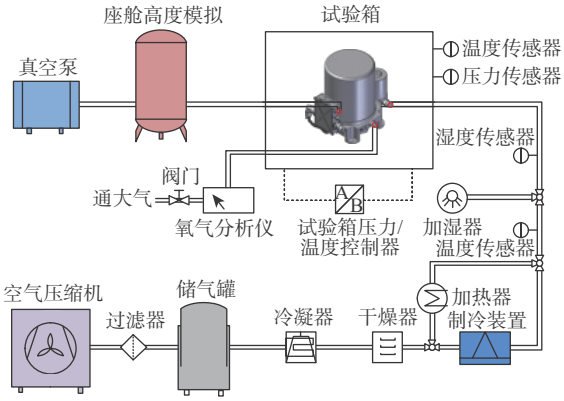


图 1　氧气浓缩器退化试验硬件连接

Fig. 1　Hardware connection of oxygen concentrator degradation test

1.2　试验数据获取

飞机的一次航行起落以 4 h 为一个工作周期来进行模拟。考虑到飞机上产生的输入压力通常不超过 1.0 MPa, 工作输入压力应不低于 0.14 MPa, 因此, 设计一个周期性的压力测试方案: 每 30 min, 进行一次周期循环试验, 并实时检测氧气浓缩器的性能退化状态, 衡量不同引气条件下对设备性能的影响程度。

分子筛吸附性能受水汽影响发生变化是一个缓慢的过程, 分子筛在短时间内不会出现急剧的性能变化, 为充分研究退化趋势, 设定工作总时长为 250 h。

2　健康因子生成

2.1　变量筛选

在试验的过程中, 试验设置空气中的含水量是通过加湿器来改变的, 与引力压力和引气湿度 2 个变量高度相关, 各变量之间的相关关系如图 2 所示。

图 2 中颜色越浅、色块越小, 变量之间的相关性越弱, 反之则表示相关性越强, 负值表示负相关, 正值表示正相关, 正相关为红色, 负相关为蓝色。结合图 2 和试验原理可知, 引气温度为无关变量, 与其他变量极弱相关或无相关。氧体积分数与氧分压极强相关, 引气湿度和输入压力极强相关。由试验方案可知, 加湿器件不可控导致引气湿度与输入压力 2 个变量数据高度相关, 输入压力变动伴随气体中水蒸气含量变化, 导致 2 个变量同比例线性变化。

氧气浓缩器退化数据全寿命时序如图 3 所示, 可以看出, 氧体积分数和氧分压具有明显的性能退化趋势, 可分别对氧体积分数和氧分压建立健康因子。由于输入压力为周期循环数据, 进行分位数处理后没有实际意义, 引气湿度为无关变量, 仅对氧分压、氧体积分数进行分位数处理, 提取健康因子。

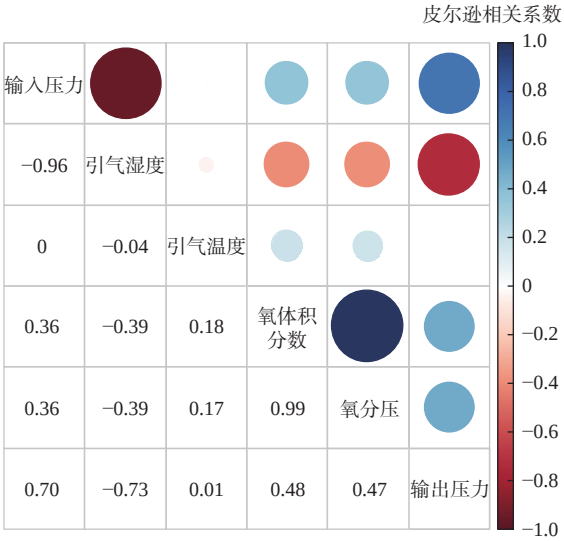


图2 各变量相关关系

Fig. 2 Correlation of each variable

2.2 构建健康因子

氧气浓缩器氧分压退化曲线如图3(c)所示，由于在每个循环周期内，输入压力的持续波动导致氧分压也随之变化。从全寿命周期数据来看，退化过程缓慢，多变量之间相互影响和输入压力的循环变化，掩盖了氧分压等数据的整体退化趋势，难以识别捕捉退化趋势。

基于以上原因，需从氧气浓缩器的全寿命周期中提取健康指标，构建能准确表征退化过程的健康因子，以探究氧气浓缩器的退化过程和失效规律。

设t_i为氧气浓缩器第i次循环次数，$X_{i1},X_{i2},\cdots,X_{i7}$为氧气浓缩器第$i$个循环的样本数据，$X_{(i1)}\leqslant X_{(i2)}\leqslant\cdots\leqslant X_{(i7)}$为其对应的次序统计量。氧气浓缩器样本的分位数定义为

$$\begin{cases} m_p = X_{(k)} \\ k = [np]+1 \end{cases} \tag{1}$$

式中：m_p为样本p分位数；n为样本数量；$p\in(0,1)$，为分位数的位置参数；k为顺序统计量的序号；$[\cdot]$表示取整运算[19]。

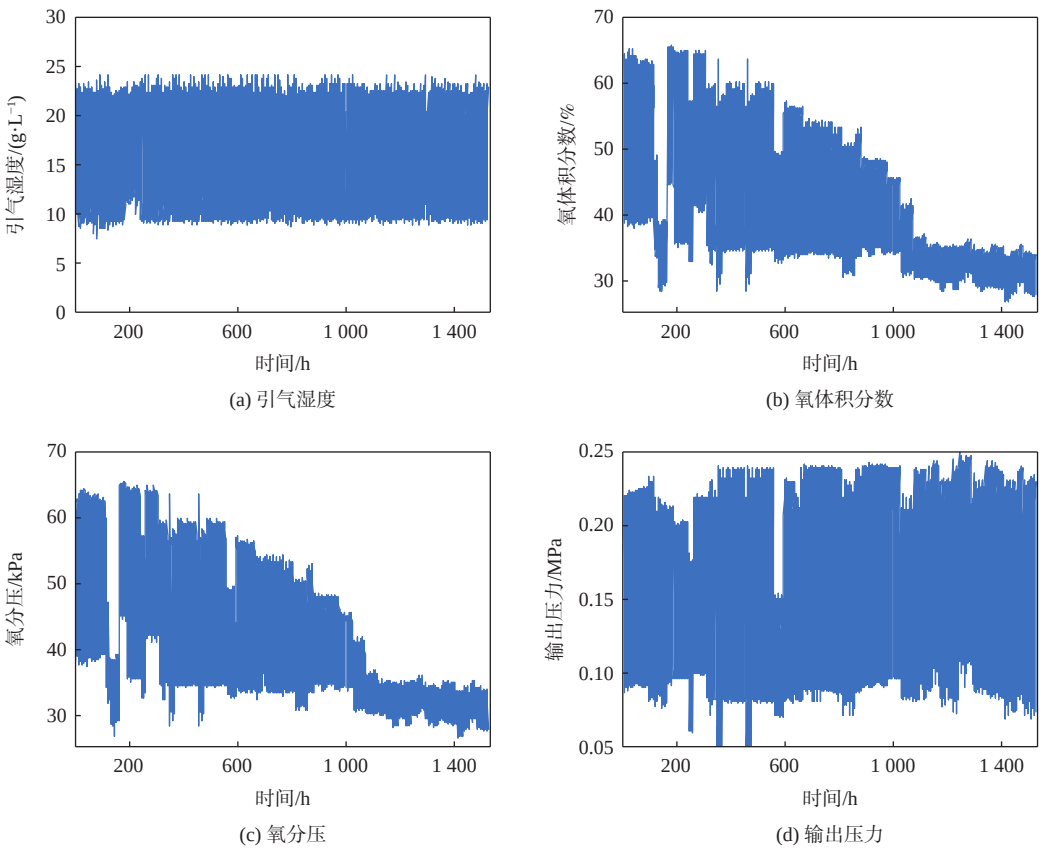
根据对建模难点的分析，选取每个循环周期数据的90%分位数与10%分位数的差值为健康因子。以氧分压为例建立健康因子：

$$I_{\mathrm{H}} = k_{1i} - k_{2i} \tag{2}$$

式中：k_{1i}为氧分压数据中每i个循环周期的90%分位数；k_{2i}为氧分压数据中每i个循环周期的10%分位数。

由于氧气浓缩器的退化数据为循环数据，直接用HP滤波提取长期趋势会导致大量有效数据损失，因此，分别对输入压力S为1 MPa、0.7 MPa、0.3 MPa、0.14 MPa的氧体积分数序列和氧分压序列通过HP滤波提取长期趋势。

图4和图5展示不同输入压力S下的退化数

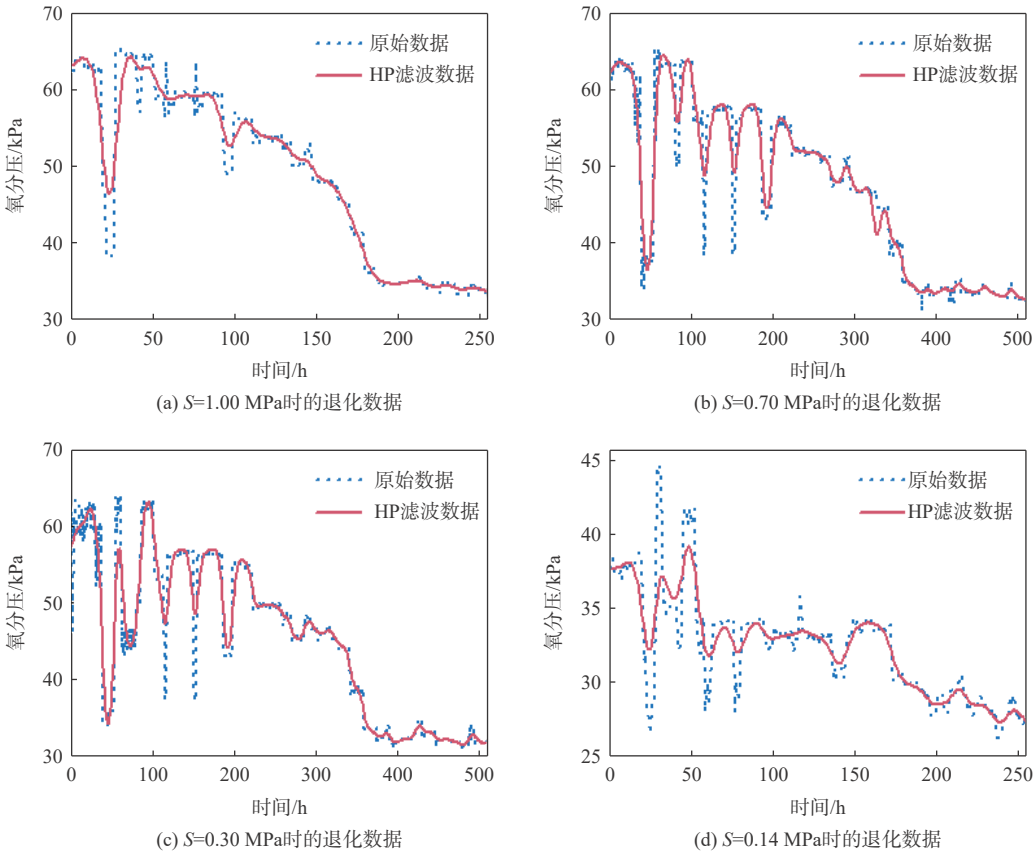


(a) 引气湿度 (b) 氧体积分数

(c) 氧分压 (d) 输出压力

图3 氧气浓缩器退化数据全寿命时序

Fig. 3 Lifetime sequence of oxygen concentrator degradation data

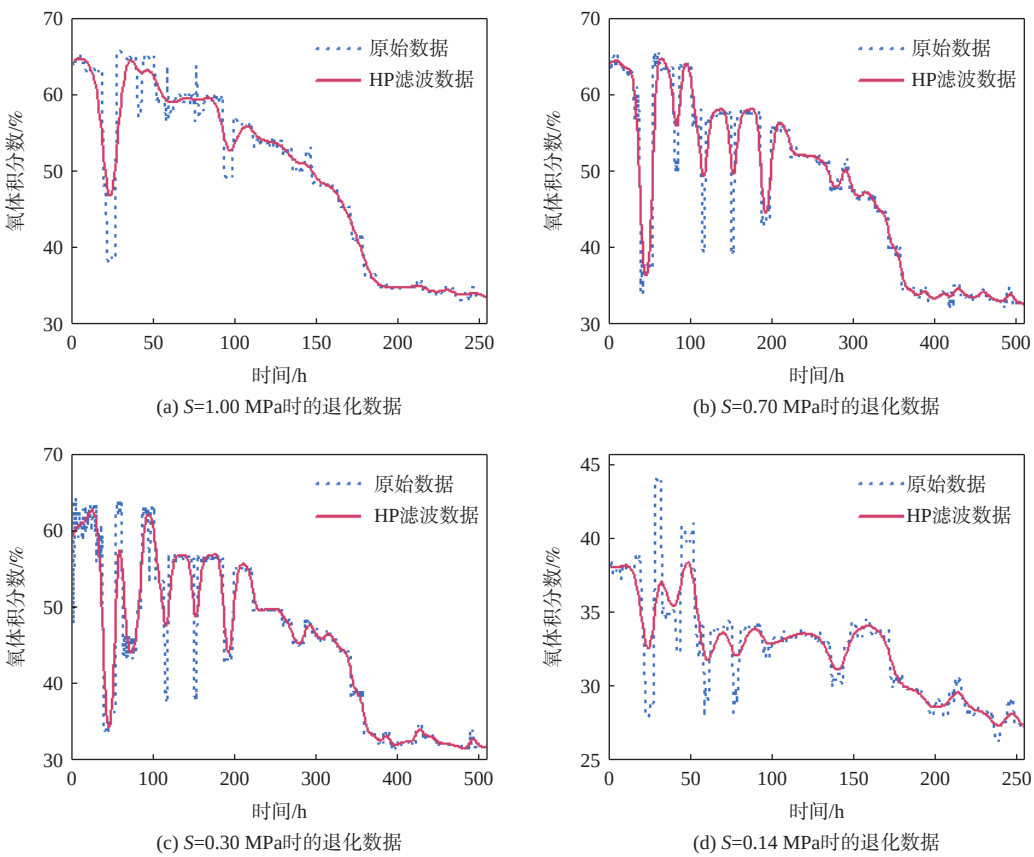


(a) S=1.00 MPa时的退化数据　(b) S=0.70 MPa时的退化数据

(c) S=0.30 MPa时的退化数据　(d) S=0.14 MPa时的退化数据

图 4　不同输入压力氧分压时序

Fig. 4　Time series of oxygen partial pressure at different input pressures



(a) S=1.00 MPa时的退化数据　(b) S=0.70 MPa时的退化数据

(c) S=0.30 MPa时的退化数据　(d) S=0.14 MPa时的退化数据

图 5　不同输入压力氧体积分数时序

Fig. 5　Time series of oxygen concentration at different input pressures

据。结合使用HP滤波提取不同输入压力的长期趋势，提取氧体积分数和氧分压每一周期内分位数健康因子所得时序，如图6和图7所示。所提取的健康因子可对退化数据进行表征，且退化数据呈现出多阶段特性。为在提取氧气浓缩器退化数据长期趋势的同时消除退化数据中的噪声，使用HP滤波对氧气浓缩器退化数据进行分解，进而提取长期趋势项。

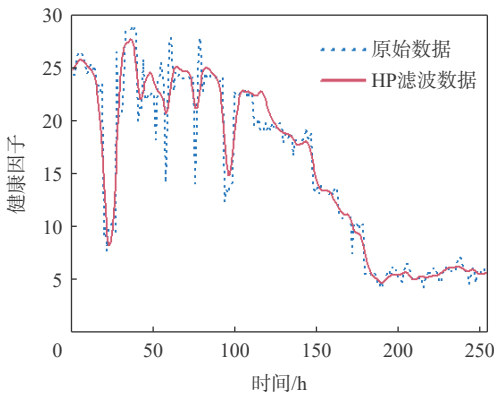


图6 氧分压健康因子时序

Fig. 6 Time series of health indicators based on oxygen partial pressure

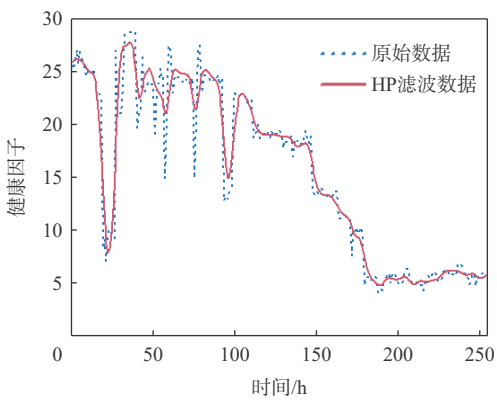


图7 氧体积分数健康因子时序

Fig. 7 Time series of health indicators based on oxygen concentration

3 FCM-ARIMAX多阶段动态退化模型构建

氧气浓缩器在压力、温度等因素的影响下，内腔零件磨损变形，产生性能退化规律。针对氧气浓缩器退化数据的多阶段多变量特性，单变量模型仅基于自身的历史数据，无法考虑其他变量的影响，多元时间序列可对变化规律进行更好的表达，结合以上分析考虑建立结合影响因素的多阶段模型。

3.1 HP滤波

HP滤波简单易行，无需先验条件，在提取氧气浓缩器退化数据中长期趋势的同时消除短期波动，针对氧气浓缩器工作过程中不可控因素所致的噪点和坏值，HP滤波能有效解决其引发的建模困难。

HP滤波可将时间序列Y_t分解为2项：

$$Y_t = X_t + C_t \tag{3}$$

式中：X_t为长期趋势项；C_t为具有随机波动特性的短期波动项。

时间序列Y_t分解时遵循损失函数最小原则得到趋势序列X_t：

$$\min\left\{\sum_{t=1}^{n}(Y_t - X_t)^2 + \lambda\sum_{t=1}^{n}[(X_{t+1} - X_t) - (X_t - X_{t-1})]^2\right\} \tag{4}$$

式中：λ为平滑系数。

λ的取值决定实际序列的跟踪程度和趋势平滑度，λ越趋近于0，X_t对序列的跟踪程度越大，λ越趋近于∞，X_t对序列的光滑度越大。考虑氧气浓缩器退化数据特性，结合Choudhary等[20]对平滑系数λ的选择方法，选取$\lambda = 100$。

3.2 结合影响因素的ARIMAX动态回归退化模型

相比于传统的ARIMA，ARIMAX可以结合影响因素提高模型的准确率。氧气浓缩器的退化数据为多变量数据，ARIMAX是多变量时间序列预测方法之一。ARIMAX结合自身数据和影响因素，能够更全面地捕捉数据的信息。本文结合多维退化变量间的相关性筛选合适变量建立ARIMAX模型。因变量序列为氧分压序列y_t，自变量序列（输入序列）为氧体积分数序列x_{1t}，先构建因变量序列和自变量序列的回归模型，如下所示：

$$y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k}\frac{\Theta_i(B)}{\Phi_i(B)}B^{l_i}x_{it} + \varepsilon_t \tag{5}$$

式中：$\Phi_i(B)$为第i个输入变量x_{it}，即氧气浓缩器退化数据所选自变量序列的自回归系数多项式，B为延迟算法；$\Theta_i(B)$为第i个选取的输入变量x_{it}的移动平均系数多项式；β_0为常数项；l_i为第i个选取的输入变量x_{it}的延迟阶数；ε_t为回归残差序列。

氧气浓缩器试验退化数据中，选取氧分压数据为因变量序列，氧体积分数为自变量序列。若因变量氧分压序列和自变量氧体积分数序列均为非平稳序列，进行差分处理获取平稳序列，线性组合后的平稳序列依然保持平稳特性，因此，残差序列ε_t为平稳序列，如下所示：

$$\varepsilon_t = y_t - \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^{k}\frac{\Theta_i(B)}{\Phi_i(B)}B^{l_i}x_{it}\right) \tag{6}$$

通过ARIMA模型获取残差序列ε_t中的信息，

构建 ARIMAX 模型, 如下所示:

$$\begin{cases} y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \dfrac{\Theta_i(B)}{\Phi_i(B)} B^{l_i} x_{it} + \varepsilon_t \\ \varepsilon_t = \dfrac{\Psi_i(B)}{Y_i(B)} a_t \end{cases} \tag{7}$$

式中: $\Psi_i(B)$为残差序列自回归系数多项式; $Y_i(B)$为残差序列移动平均序列多项式; a_t为零均值白噪声序列。

3.3　FCM 阶段识别模型

聚类分析可对相似数据进行分类, 进而区分不同退化阶段。针对氧气浓缩器的退化数据, 采用 FCM 聚类方法进行分段处理。样本集 $X=\{x_1,\cdots,x_n\}$即氧气浓缩器的退化数据, 每个退化样本中的多个特征用 $x_i=\{a_1,\cdots,a_k\}$表示, c为分类数, FCM 的目标函数为

$$J(X,\boldsymbol{U},\boldsymbol{V}) = \sum_{m=1}^{c}\sum_{i=1}^{n} \leqslant (u_{im})^{\sigma} d_{im}^2 \tag{8}$$

$$d_{im} = \|x_i - v_m\| \tag{9}$$

限制条件为

$$\begin{cases} 0 \leqslant u_{im} \leqslant 1 \\ \sum_{m=1}^{c} u_{im} = 1 \\ c \leqslant n \end{cases} \tag{10}$$

式中: $\boldsymbol{U}$为氧气浓缩器退化数据不同退化状态聚类中心所对应的隶属度矩阵; $\boldsymbol{V}$为所有聚类中心构成的矩阵; n为样本总数; u_{im}为样本 x_i属于类别 m的隶属度; 加权指数 $\sigma \geqslant 1$; d_{im}为样本 x_i与聚类中心 v_m的欧氏距离。

4　基于 FCM-ARIMAX 的氧气浓缩器退化建模

4.1　基于影响因素的氧气浓缩器退化建模

氧气浓缩器受到温度、压力等多种外部因素影响, 导致退化过程复杂, 极大增加了多变量退化建模难度。在退化建模中加入影响因素已得到较为广泛的应用。

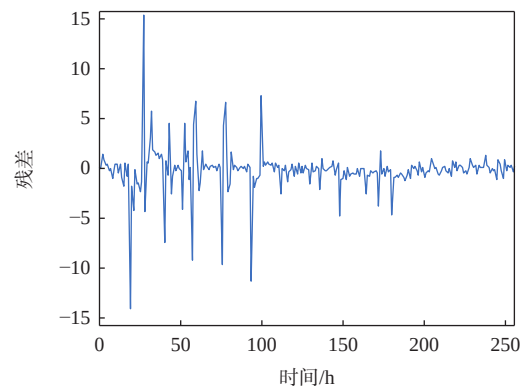
获取氧气浓缩器的退化数据后, 通过试验原理和多维退化变量间的相关性筛选出氧体积分数和氧分压作为退化指标, 对退化指标进行分析后提取健康因子, 通过格兰杰因果关系 (Granger causality, GC) 检验对输入变量和输出变量进行筛选。GC 检验是一种分析时间序列因果关系的方法, 假设条件为

$$\begin{aligned} &H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \cdots = \alpha_q = 0 \leftrightarrow \\ &H_1: \alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_q \text{不全为} 0 \end{aligned} \tag{11}$$

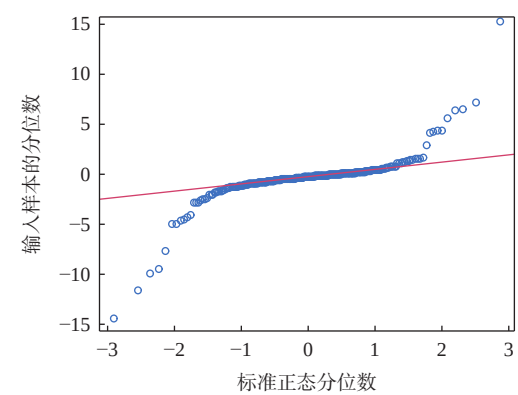
本文采用 F 检验统计量建立格兰杰因果统计量[21]。

基于健康因子建立中对多维退化变量间的相关性分析, 探究不同变量之间的因果关系, 选择合适的解释变量提高模型的可行性。GC 检验结果表明, 氧体积分数可以作为氧分压的输入序列。

图 8 为仅用氧分压建立 ARIMA 模型的残差序列和分位数-分位数 (quantile-quantile, QQ) 图, 图 9 为结合氧体积分数为影响因素建立的 ARIMAX 模型, 结合影响因素的 ARIMAX 残差序列为白噪声序列, 单变量 ARIMA 模型的残差波动比结合影响因素的 ARIMAX 大。QQ 图可用来对残差序列的正态性进行检验, QQ 图的横轴为正态分布的分位数, 纵轴为样本分位数, 从图 8 和图 9 可知, ARIMAX 模型的残差相比于 ARIMA 模型的残差更多地分布在对角线上, QQ 图也同样反映出 ARIMAX 优于 ARIMA 模型。



(a) 残差序列

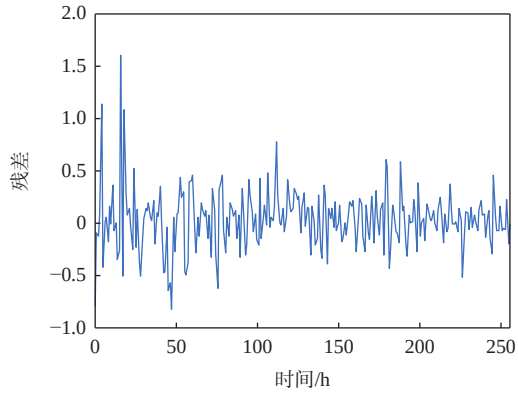


(b) QQ图

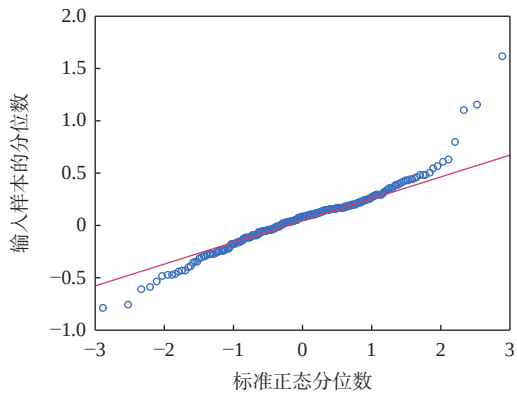
图 8　ARIMA 残差序列

Fig. 8　ARIMA residual sequence

图 10 和图 11 分别为单独对氧分压数据进行预测和结合影响因素对氧分压数据进行预测的结果。单变量建模预测曲线存在一定的滞后性, 结合氧体积分数建立的单阶段模型预测值更贴近于真实值, 进一步证明结合影响因素可以提升模型的可行性, 进而提高模型的预测精度。



(a) 残差序列



(b) QQ图

图 9 ARIMAX 残差序列

Fig. 9 ARIMAX residual sequence

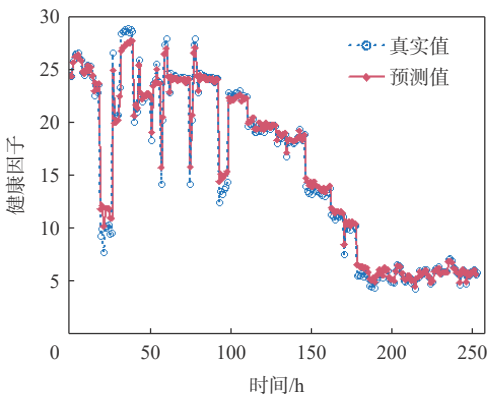


图 10 ARIMA 预测结果

Fig. 10 The prediction results of ARIMA

4.2 基于 FCM 的氧气浓缩器退化阶段识别

在氧气浓缩器工作时，由于设备材料、压力、温度、湿度等多种因素的不可控性，退化数据波动大，存在多种不同的退化状态。通过 FCM 进行聚类，将历史数据根据一定原理进行区分。对氧气浓缩器的氧分压退化数据健康因子进行数据可视化，结果如图 6 所示，氧气浓缩器的退化阶段不是持续的，存在明显的多阶段特性。多阶段的退化数据可能出现拐点，拐点形成取决于其固有的退化特征，且拐点出现具有随机性[22]。对于单变量的时间序列，RUL 建模完全基于历史数据，预测具有随机性，精度大大降低。本文采用 FCM 进行退化阶段的分阶段处理，考虑影响因素的多变量 ARIMAX 模型进行寿命预测，实现对多阶段多变量的数据的预测，图 12 为 FCM 聚类结果。

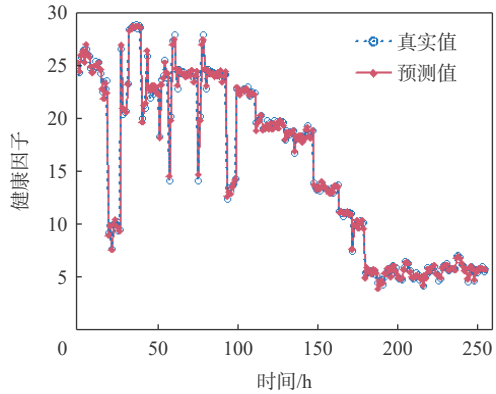
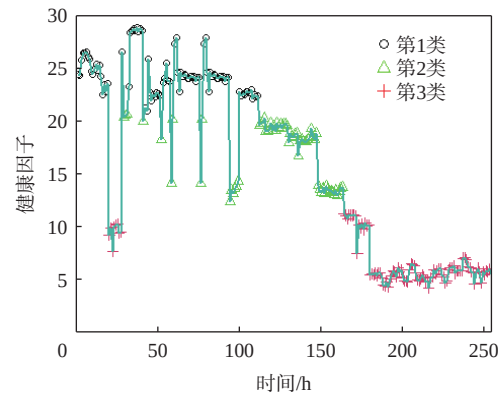
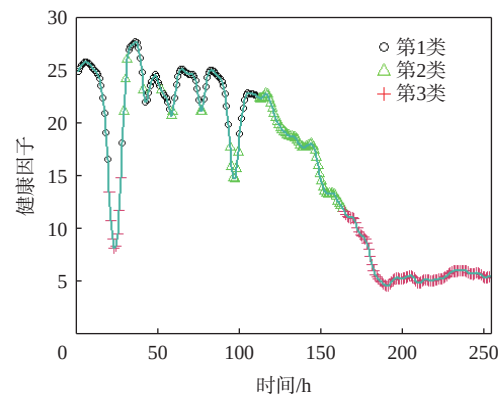


图 11 ARIMAX 预测结果

Fig. 11 The prediction results of ARIMAX



(a) 原始数据聚类结果



(b) 滤波数据聚类结果

图 12 FCM 聚类结果

Fig. 12 FCM clustering results

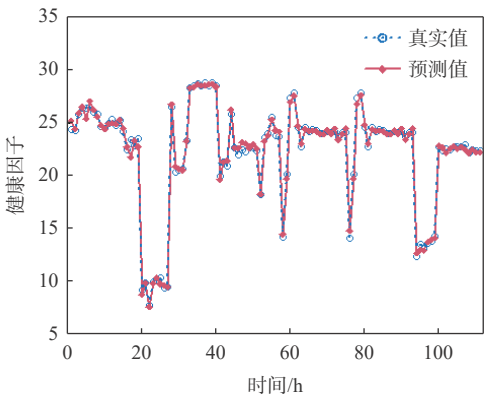
基于 FCM 聚类对氧气浓缩器退化数据提取的健康因子进行分段，如图 12 所示。从退化数据进行聚类的结果可以比较直观地看出，设备的退化过程分为 3 段，不同阶段之间的退化速率有较大区别，如第 1 阶段的退化速率明显低于第 2 阶段，因

此, 将退化过程进行分段处理后再开展寿命预测是合理的。

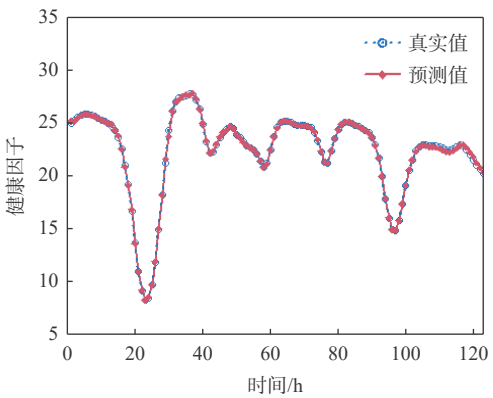
氧气浓缩器的工作存在一定的不稳定性导致数据存在较大波动, 因此, 第 1 阶段中存在少量其他类别, 通过 HP 滤波提取趋势项后, 第 1 阶段中存在其他类别减少了 5.09%, 表明 HP 滤波进行去噪合理有效。第 2 阶段为加速退化阶段, 退化速率变大, 氧气浓缩器磨损率开始增大。第 3 阶段退化速率逐渐趋于平稳, 氧气浓缩器以相对稳定的状态进入退化后期, 直至器件损坏。将设备退化的 2 个拐点定为 123 和 169, 数据分为 3 段, 分别对 3 段建立 ARIMAX 模型。

4.3　基于 ARIMAX 的氧气浓缩器分阶段预测

通过 FCM 对氧气浓缩器进行退化阶段识别, 氧气浓缩器的退化阶段可以分为 3 个阶段。氧气浓缩器退化模式单一, 但退化数据非线性, 不同退化阶段的模型参数存在差异, 因此, 分别对 3 个阶段结合影响因素进行退化建模, 分阶段预测如图 13～图 15 所示。



(a) 原始数据预测结果

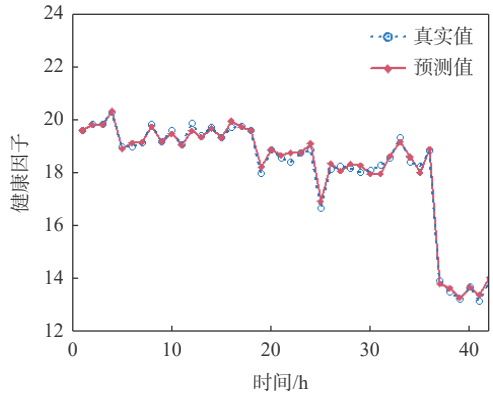


(b) 平滑数据预测结果

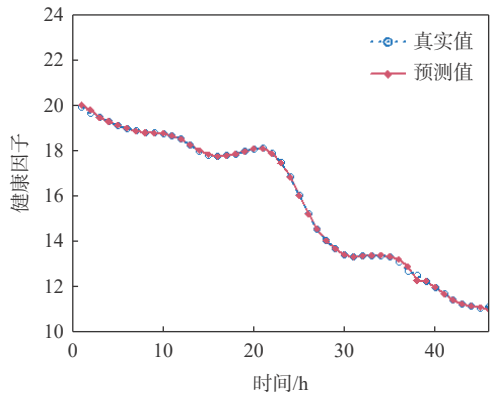
图 13　第 1 阶段预测结果

Fig. 13　The forecast renderings of phase one

如图 13～图 15 所示, 相比单变量的自回归滑动平均模型, 分阶段预测精度大幅提高。这说明, 通过多维变量之间相关性筛选的退化指标建立结合影响因素的 FCM-ARIMAX 融合模型更能获取氧气浓缩器的退化趋势, 集成多个变量的信息来提高预测的准确性和鲁棒性。结合影响因素的单阶段 ARIMAX 及经过 FCM 分段后建立的模型 FCM-ARIMA 和 HP-FCM-ARIMAX 精度都很高, 为进一步展现分段预测的拟合效果和预测效果, 选择以下标准进行比较:



(a) 原始数据预测结果



(b) 平滑数据预测结果

图 14　第 2 阶段预测结果

Fig. 14　The forecast renderings of phase two

1) 赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC):

$$M_{\mathrm{AIC}} = -2\ln L + 2K \tag{12}$$

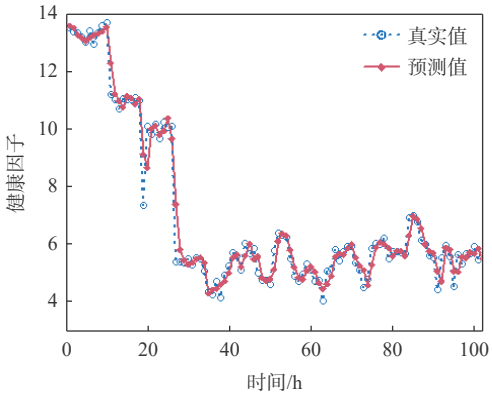
式中: L 为模型的极大似然函数值; K 为模型中未知参数的个数。M_{AIC} 越小, 说明模型拟合程度越好。

2) 均方根误差 (root mean square error, RMSE):

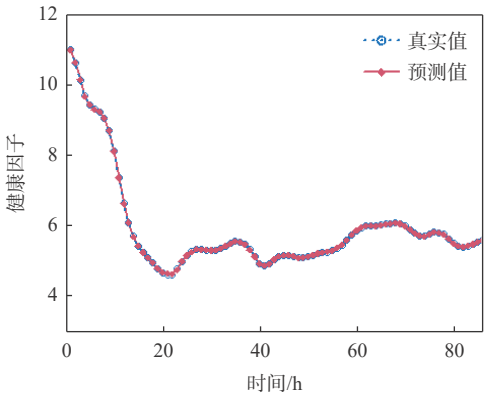
$$M_{\mathrm{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad M_{\mathrm{RMSE}} \in [0, +\infty) \tag{13}$$

式中: y_i 为第 i 个时刻的数据实测值; $\hat{y}_i$ 为模型在第 i 个时刻的预测值; N 为样本数量。M_{RMSE} 越接近零, 预测误差越小。

结合 AIC 信息准则以 RMSE 最小原则为建模标准, 单变量的自回归滑动平均模型 ARIMA 的 AIC 为 1 160.049, RMSE 为 3.113。结合氧体积分数为影



(a) 原始数据预测结果



(b) 平滑数据预测结果

图 15 第 3 阶段预测结果

Fig. 15 The forecast renderings of phase three

响因素建立的单阶段 ARIMAX 模型, AIC 为−138.224, RMSE 为 0.298。采用 HP 滤波提取退化数据中趋势项建立的 HP-ARIMAX 模型对退化阶段分段后, 模型的精度得到进一步提高。

预测结果如表 1 所示, 对单变量的自回归滑动平均模型、单阶段结合影响因素的多变量 ARIMAX 模型、分阶段结合影响因素的多变量 FCM-ARIMAX 模型、结合 HP 滤波的 HP-FCM-ARIMAX 融合模型的 RMSE 进行比较。分阶段预测如图 13～图 15 所示, 单变量的自回归滑动平均模型预测图如图 10 所示。结合表 1 可知, HD-ARIMA 相比 ARIMA 模型精度提升了 92.07%, 采用 FCM-ARIMAX 融合模型进行分析, 第 1 阶段 RMSE 为 0.350, 第 2 阶段 RMSE 为 0.164, 第 3 阶段 RMSE 为 0.188, 远低于不结合影响因素直接进行预测的单变量 ARIMA 模型的 RMSE3.113, 分别降低了 88.76%、94.73% 和 93.96%。第 2 阶段与第 3 阶段的 FCM-ARIMAX 模型相比单阶段 ARIMAX 预测 RMSE 也有明显降低, 分别降低了 44.97% 和 36.91%, 相比单阶段 HP-ARIMAX 融合模型精度分别提升了 51.67%、69.44% 和 93.89%。结合 HP 滤波提取趋势项的 HP-FCM-ARIMAX 融合模型相比 FCM-ARIMAX 融合模型预测的 RMSE 分别降低了 75.14%、66.46%、94.15%。与单变量的自回归滑动平均模型、单阶段多变量自回归滑动平均模型、多阶段动态回归模型相比, 结合 HP 滤波的多变量自回归滑动平均模型预测精度分别平均提升了 98.20%、81.21% 和 77.83%。分析其中原因, 自回归移动平均模型是完全基于历史数据进行预测, 然而对于多阶段多变量的数据, 拐点出现具有随机性, 用单变量的模型预测精度往往不高。在对退化数据进行降噪处理后, 考虑影响因素, 采用退化阶段识别与寿命预测结合, 对每一段进行抽象学习, 重新获取历史信息, 从而提高模型的预测精度。

表 1 模型对比

Table 1 Model comparison

方法	RMSE
ARIMA	3.113
ARIMAX	0.298
HP-ARIMA	0.247
HP-ARIMAX	0.180
FCM-ARIMAX(第1阶段)	0.350
FCM-ARIMAX(第2阶段)	0.164
FCM-ARIMAX(第3阶段)	0.188
HP-FCM-ARIMAX(第1阶段)	0.087
HP-FCM-ARIMAX(第2阶段)	0.055
HP-FCM-ARIMAX(第3阶段)	0.011

5 结 论

本文提出的 HP-FCM-ARIMAX 模型把 HP 滤波、FCM 聚类和多元时间序列模型相结合, 具有思路清晰、逻辑严谨、实时性好、预测精度高等特点。结合氧气浓缩器的退化数据验证本文方法的可行性, 得到以下结论:

1) 通过对氧气浓缩器的工作原理和退化数据分析, 考虑多维退化变量间的相关性筛选合适变量, 提出一种结合影响因素的 RUL 融合模型。

2) 结合 HP 滤波建立氧气浓缩器退化的分位数健康因子, 克服了离群点对数据的影响, HP-ARIMA 相比 ARIMA 模型精度提升了 92.07%, 3 个退化阶段的 HP-FCM-ARIMAX 相比 FCM-ARIMAX 分别提升了 75.14%、66.46% 和 94.15%, 进一步提升了模型的预测精度。

3) 通过 FCM 对退化数据进行分段处理, 确立不同的退化阶段, 分别建立 ARIMAX 模型, 相比单阶段 HP-ARIMAX 精度分别提升了 51.67%、69.44% 和 93.89%, HP-FCM-ARIMAX 方法适用于多变量多阶段数据, 可实时跟踪退化状态变化, 准确获取退

化轨迹。

参考文献（References）

[1] 杨立乾, 赵金楼, 李根. 基于性能退化的船舶关键部件视情维修策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 613-618.
Yang L Q, Zhao J L, Li G. Condition-based maintenance strategy for critical ship components based on performance degradation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 613-618(in Chinese).

[2] Dhariyal B, Le Nguyen T, Ifrim G. Scalable classifier-agnostic channel selection for multivariate time series classification[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2023, 37(2): 1010-1054.

[3] Zhai Q Q, Ye Z S. A multivariate stochastic degradation model for dependent performance characteristics[J]. Technometrics, 2023, 65(3): 315-327.

[4] 孔雪峰, 潘骏, 钱萍, 等. 机械产品多变量相依退化建模方法研究综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 470-488.
Kong X F, Pan J, Qian P, et al. Review of multivariate dependent degeneration modeling methods for mechanical products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 470-488(in Chinese).

[5] Li X G, Xue P. Multivariate storage degradation modeling based on copula function[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 503407.

[6] Peng W W, Li Y F, Mi J H, et al. Reliability of complex systems under dynamic conditions: a Bayesian multivariate degradation perspective[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 153: 75-87.

[7] Barraza-Barraza D, Tercero-Gómez V G, Beruvides M G, et al. An adaptive ARX model to estimate the RUL of aluminum plates based on its crack growth[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 519-536.

[8] Sun F Q, Liu J C, Li X Y, et al. Reliability analysis with multiple dependent features from a vibration-based accelerated degradation test[J]. Shock and Vibration, 2016, 2016: 2315916.

[9] Song S L, Coit D W, Feng Q M, et al. Reliability analysis for multi-component systems subject to multiple dependent competing failure processes[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 63(1): 331-345.

[10] Zhang J X, Hu C H, He X, et al. A novel lifetime estimation method for two-phase degrading systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2019, 68(2): 689-709.

[11] Li Z X, Wu D Z, Hu C, et al. An ensemble learning-based prognostic approach with degradation-dependent weights for remaining useful life prediction[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 184: 110-122.

[12] Xiao Y C, Hua Z. Misalignment fault prediction of wind turbines based on combined forecasting model[J]. Algorithms, 2020, 13(3): 56.

[13] Wang C S, Lu N Y, Cheng Y H, et al. A data-driven aero-engine degradation prognostic strategy[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(3): 1531-1541.

[14] Zhang J X, Si X S, Du D B, et al. Lifetime estimation for multi-phase deteriorating process with random abrupt jumps[J]. Sensors, 2019, 19(6): 1472.

[15] 刘君强, 胡东斌, 潘春露, 等. 基于超统计的多阶段航空发动机剩余寿命预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(1): 56-64.
Liu J Q, Hu D B, Pan C L, et al. Remaining useful life prediction of multi-stage aero-engine based on super statistics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(1): 56-64(in Chinese).

[16] Feng J, Kvam P, Tang Y Z. Remaining useful lifetime prediction based on the damage-marker bivariate degradation model: a case study on lithium-ion batteries used in electric vehicles[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 70: 323-342.

[17] Tique S, Noureen S, Roy V, et al. Forecasting of total daily solar energy generation using ARIMA: a case study[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 114-119.

[18] 潘晋新, 景博, 焦晓璇, 等. 多应力耦合条件下氧气浓缩器退化建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(2): 472-481.
Pan J X, Jing B, Jiao X X, et al. Degradation modeling of oxygen concentrator in multiple stress coupling condition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(2): 472-481(in Chinese).

[19] 李娟, 景博, 羌晓清, 等. 基于样本分位数的机载燃油泵故障状态特征提取及实验研究[J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2851-2863.
Li J, Jing B, Qiang X Q, et al. Fault states feature extraction and experimental study for airborne fuel pumps based on sample quantile[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2851-2863(in Chinese).

[20] Choudhary M, Ali M, Hanif M N, et al. On smoothing macroeconomic time series using the modified HP filter[J]. Applied Economics, 2014, 46(19): 2205-2214.

[21] Enders W. Applied econometric time series[M]. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2015: 305-306.

[22] 黄崧琳, 景博, 潘晋新, 等. 基于退化阶段识别与 LSTM-fine-tune 的氧气浓缩器多阶段退化预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 136-143.
Huang S L, Jing B, Pan J X, et al. Multistage degradation prediction of oxygen concentrator based on degradation pattern recognition and LSTM-fine-tune[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 136-143(in Chinese).

Performance degradation modeling of oxygen concentrators based on FCM-ARIMAX approach

ZHANG Yi[1], LI Juan[1,*], DAI Hongde[2], JIAO Xiaoxuan[3], QU Huiyan[1]

(1. College of Mathematics and Statistics, Ludong University, Yantai 264025, China;
2. School of Basic Sciences for Aviation, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;
3. College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The oxygen concentrator is an important airborne part of the aircraft life support system, and its performance degradation data has the characteristics of multivariate and strong noise. In order to solve the problem of lack of univariate information and low prediction accuracy in the prediction of oxygen concentrator life, the correlation between multi-dimensional degradation variables was considered to select suitable variables. By introducing the influencing factor of oxygen concentration into the oxygen partial pressure variable, the long-term trend in the sequence was extracted with the Hodrick Prescott (HP) filter, and the fuzzy C-means (FCM) method was used to stage the oxygen partial pressure to establish a multi-stage dynamic regression model. Modeling the degradation of an oxygen concentrator. The findings indicate that the multivariate autoregressive integrated moving average (ARIMA) model with HP filtering improves prediction accuracy by 98.20%, 81.21%, and 77.87%, respectively, when compared to the univariate ARIMA model, single-stage multivariate ARIMA model, and multi-stage dynamic regression model.

Keywords: degradation modeling; oxygen concentrator; health factor; fuzzy C-means; multi-stage model

Received: 2024-06-12; **Accepted**: 2024-09-20; **Published Online**: 2024-10-12 16:22

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241012.1300.002

Foundation items: Provincial Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2022JQ-586); Innovation Project for Graduate Students of Ludong University (IPGS2024-045)

* **Corresponding author**. E-mail: daidaiquanquan123@126.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0302

基于端到端深度学习网络的大容量图像隐写算法

李凡[1]，刘晨阳[1,2,*]，孙智博[1]，董振博[1]，钱伟鹏[1]

(1. 海南大学 信息与通信工程学院，海口 570228；2. 海南大学 物理与光电工程学院，海口 570228)

摘 要：图像具有纹理复杂、冗余空间大、应用普遍广泛等特点，以图像为载体的隐写算法是隐写术的主流方向。近年来，基于深度学习网络的图像隐写算法获得了越来越好的隐写性能，成为图像隐写领域的研究热点。基于此，基于生成对抗网络 (GAN) 提出了一种大容量的图像隐写算法。算法设计了以预处理模块、卷积神经网络 (CNN) 模块和 U-Net 为主体的信息嵌入提取网络，通过损失函数的约束，联合训练嵌入、提取和判别网络，实现了良好的隐写视觉效果。实验结果表明：所提算法的嵌入容量达到 24 bit/像素。在此大容量嵌入的前提下，所提算法生成的载密图像和提取的秘密图像无论在主观视觉质量还是客观视觉指标峰值信噪比 (PSNR) 上都高于其他同类算法，说明了设计的端到端隐写网络的整体优越性。

关 键 词：图像隐写；深度学习；生成对抗网络；U-Net；信息隐藏

中图分类号：TN918.9

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2621-09

隐写术是将秘密信息以隐蔽的方式嵌入载体中，通过不引起怀疑的多媒体载体来掩盖秘密信息的技术。其不仅保证了秘密信息本身的安全，还提升了信息传输过程的安全性。隐写术的载体包括文本、图像、音频、视频等。由于图像具有纹理复杂、冗余空间大等特点，图像隐写成为隐写术的主流方向之一。

图像隐写算法可划分为传统图像隐写算法和基于深度学习的图像隐写算法 2 种。传统图像隐写算法[1-3] 基于定义的失真函数，通常将秘密信息嵌入具有复杂纹理和丰富特征的区域中，需要不断尝试手动设计性能良好的失真函数，但在鲁棒性和嵌入容量等性能上都有表现不足的地方。基于深度学习的方法已成为计算机视觉任务中采用的主流技术[4-7]。Ahmadi 等[8] 将预定义的嵌入算法应用于自动编码器特征图中，并通过深度学习网络将特征转换至变换域中。Liu 等[9] 和 Cui 等[10] 采用深度学习网络，对已有载体图像进行修改，但提取时需要依靠额外的 mask 网络。Volkhonskiy 等[11] 最早提出基于生成对抗网络 (generative adversarial networks, GAN) 的隐写模型 Steganographic GAN (SGAN)。Hayes 等[12] 提出的 HayesGAN 模型则利用对抗学习直接生成载密图像。Zhu 等[13] 基于 HayesGAN 的思想，提出另一种生成对抗网络 Hiding Data With Deep Networks (HiDDeN)，该模型具有类似 HayesGAN 的网络结构，利用对抗样本对图像变化的鲁棒性，使生成的载密样本在经过高斯模糊、JPEG 压缩等多种攻击后仍保持较高的隐秘信息提取率。Wang 等[14] 和 Wu 等[15] 基于相近理论改进了算法。Subramanian 等[16] 提出的算法将图像作为秘密信息嵌入载体图像中，但仍存在提取图像画面质量较差、载体图像失真等不足。

上述这些基于深度学习技术的图像隐写算法由于存在对噪声类型的考虑有限、网络分层设计不合理等问题，在信息提取准确率、嵌入容量和图像质量等方面存在改善空间。综上，本文采用卷积

收稿日期：2024-05-09；**录用日期**：2024-05-24；**网络出版时间**：2024-06-14 15:29
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240614.1326.001
基金项目：国家自然科学基金 (62205092)
* **通信作者**. E-mail：chenyang9015@163.com

引用格式：李凡，刘晨阳，孙智博，等. 基于端到端深度学习网络的大容量图像隐写算法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2621-2629.
Li F，Liu C Y，Sun Z B，et al. A high-capacity image steganography algorithm based on end-to-end deep learning networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2621-2629（in Chinese）.

神经网络(convolutional neural network, CNN)结合U-Net设计了主体的嵌入网络和提取网络,并构建了一个判别网络与嵌入网络共同组成GAN,以此提高载密图像的视觉质量,从而实现一个端到端的大容量图像隐写算法。本文提出的隐写算法在容量和视觉质量上均优于现有算法,体现了本文设计网络的有效性和优越性。

1 算法流程

本文提出了一个深度学习网络的端到端图像隐写模型,通过对嵌入、提取和判别器的训练来实现隐写嵌入策略,而不需要人工设计图像隐写算法。网络整体结构如图1所示。

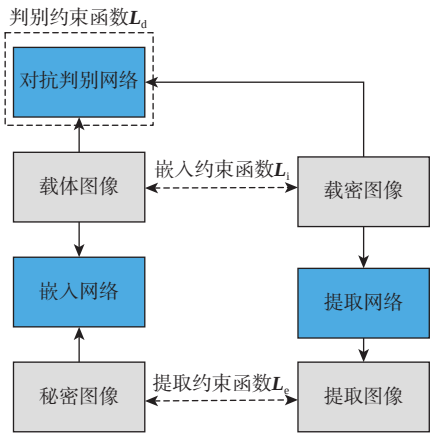


图1 隐写网络整体结构

Fig. 1 The overall structure of information hiding network

该模型分别设计了嵌入、提取和判别器3个深度学习网络。嵌入网络的功能是将载体图像嵌入隐秘图像中,其生成的载密图像与原载体图像通过嵌入约束函数L_i进行计算反馈,尽可能保持两者画面质量一致。除此以外,载密图像和原载体图像也输入对抗判别网络,使用判别约束函数L_d进行对抗训练,期望两者进一步保持相似,实现载密图像不被察觉已嵌入信息的隐写目标。提取网络的功能是从载密图像中尽可能完整地提取隐秘图像信息,并使用提取约束函数L_e计算提取图像与隐秘图像的差值,反馈网络训练。通过3个深度学习网络的训练,该算法结构实现了对载密图像的安全保护及隐秘图像的嵌入和提取。

2 端到端图像水印网络的设计

2.1 嵌入网络设计

嵌入网络是图像隐写网络中的关键组件,其主要任务是将秘密图像嵌入载体图像中,并确保生成的载密图像在视觉上与载体图像无法被辨别。在进行秘密图像嵌入时,需要考虑2个方面的要求:①嵌入的秘密图像应该在载体图像中难以被人眼察觉,以保证秘密图像的隐蔽性;②嵌入的秘密图像必须能够在提取网络中被有效地提取和恢复,以保证隐写的可靠性。

图2为本文的嵌入网络结构,网络由预处理模块、卷积模块、维度拼接模块及U-Net组成。这些模块分别用不同的颜色进行标注,卷积模块中参数设置依次为卷积核大小、步长、填充。箭头表示嵌入网络的方向,上方参数为$H\times W\times C$,其中,H、W、C分别表示图像的高、宽和通道数,图2中以256像素×256像素的彩色图像为例。

预处理模块负责提取秘密图像的关键特征。通过这些特征,嵌入网络可以更好地理解图像内容,为后续的秘密图像嵌入提供有用的信息。卷积模块用于提取图像特征,通过不同的卷积核大小来

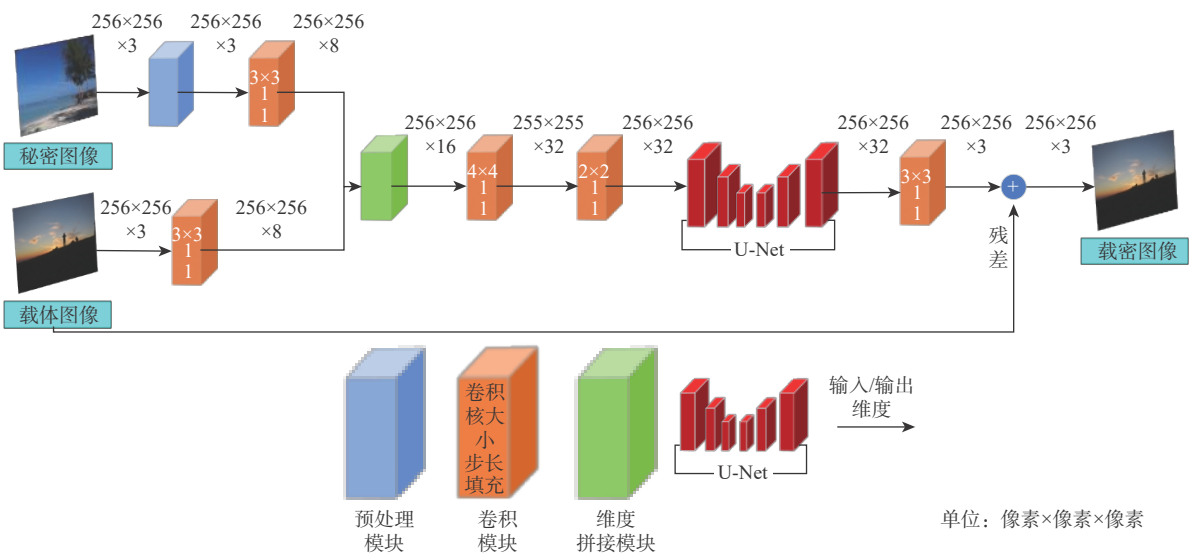


图2 嵌入网络模块

Fig. 2 The modules of embedding network

改变特征的感受野, 较小的卷积核可以捕捉局部细节和纹理等细粒度特征, 而较大的卷积核可以感知更大范围的上下文信息和全局结构。通过选择不同大小的卷积核, 可以在特征提取过程中平衡对局部细节和全局语义的关注。维度拼接模块将得到的秘密图像特征与载体图像特征进行组合, 以确保秘密图像在载体图像中的嵌入效果。通过卷积模块和 U-Net 模块的组合生成嵌入后的图像。对生成的图像与载体图像做残差进行细微调整, 以进一步提升视觉质量和秘密图像的隐蔽性。

为与现有方法进行对比, 设置图像 $H\times W\times C$ 中的长 H 与宽 W 相等, 图 2 中使用 $H=W=256$(即秘密图像和载体图像大小为 256 像素×256 像素)进行展示。对秘密图像进行预处理时分别采用 3×3、5×5 和 7×7 的卷积核对通道数为 3 的彩色图像进行卷积并降维至通道数为 1, 此时, 获得 3 个 $H\times W\times 1$ 的特征, 再对这 3 个 $H\times W\times 1$ 的特征进行拼接得到一个 $H\times W\times 3$ 的特征。这样做的目的是从不同大小的感受野获取图像的特征, 并将这些特征进行融合, 至此完成对秘密图像的预处理。为保护载体图像的质量, 防止由于多维度卷积产生质量损失, 对载体图像不进行预处理。

随后将预处理得到秘密信息的 $H\times W\times 3$ 特征嵌入载体图像中, 具体步骤如下:

1) 对秘密图像的 $H\times W\times 3$ 特征和载体图像分别采用 3×3 的卷积, 设置步长为 1, 填充为 1, 输出通道数为 8。获得 2 个 $H\times W\times 8$ 的特征。

2) 将秘密图像特征和载体图像特征进行维度拼接, 获得一个 $H\times W\times 16$ 的融合特征。将融合得到的 $H\times W\times 16$ 特征依次经过 4×4 和 2×2 的卷积层(注意, 当图像尺寸改变时, 为保证输入输出特征大小相同, 需要对步长和填充参数进行相应的修改)进行编码得到 $H\times W\times 64$ 的特征。值得注意的是, 本文采用了偶数卷积核, 这是由于偶数卷积核具有对称性, 其权重在水平和垂直方向上是对称分布的。这种对称性可以在卷积操作中提供一种平衡性, 使卷积核在捕捉图像特征时能够考虑更全面的信息。并且还具有零相移, 即在卷积操作中不会引入平移偏差。这意味着, 卷积核的中心像素与输出特征图的中心像素位置对齐, 不会导致特征图整体发生平移。偶数卷积核还可以更好地处理边界像素, 减少边界效应。这对于保持特征图的尺寸和减少信息丢失是有益的。综合以上特点, 选择偶数卷积核提取特征。

3) 将得到的 $H\times W\times 64$ 特征送入修改后的 U-Net 中进行特征深度融合。U-Net 于 2015 年由 Ronneberger 等[17] 提出, 由于网络结构的形状类似于字母 U 而命名为 U-Net。U-Net 由编码器和解码器 2 部分组成, U-Net 具有较大的容量和表达能力, 可以学习复杂的特征和模式。因此, 选择 U-Net 来进行特征深度融合。基于 U-Net 改变了其输入输出通道数来满足任务要求。U-Net 网络结构如图 3 所示, U-Net 网络由输入/输出、卷积、复制维度拼接、最大池化及上采样组成。由于每个步骤都采用了相同的卷积大小, 在图中仅用不同颜色箭头标注了对应的过程。表 1 中为各个模块参数。输入特征通过 U-Net 网络进行深度融合, 以提高载密图像的质量。

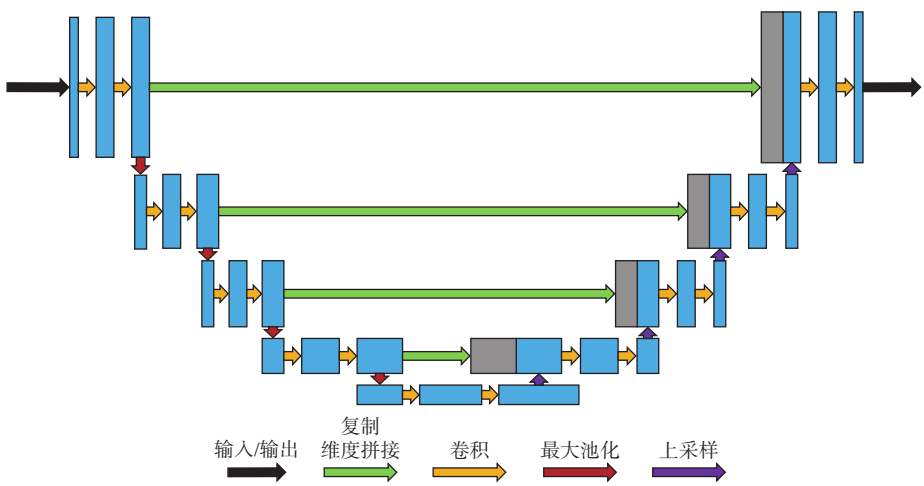


图 3　U-Net 模块

Fig. 3　The modules of U-Net

4) 得到深度融合的特征后, 利用 3×3 卷积将特征进行降维处理, 生成 $H\times W\times 3$ 的特征图像。

5) 最后将生成特征图像与载体图像做残差处理增加细节质量, 得到隐写图像。在残差处理中, 采用 ResNet 的方式。具体而言, 输入生成特征图像与载体图像相加得到输出载密图像。

表1 U-Net详细参数配置

Table 1 U-Net detailed parameter configuration

输入维度大小/像素×像素×像素	处理方式	卷积核大小	步长	填充	输出维度大小/像素×像素×像素
256×256×32	输入/输出				256×256×32
	卷积	3×3	1	1	
	复制维度拼接				
	最大池化		2		
	上采样	2×2	2	0	

对应嵌入网络结构图2，表2中给出了各个模块的输入/输出维度大小、通道数及卷积核大小。

如表2所示，在嵌入过程中，特征尺寸大小除了在4×4卷积处理时输出大小为255像素×255像素，其余操作都保持了与载体图像和载密图像相同的尺寸大小，这是为了尽可能保存特征与图像尺寸大小相同，防止特征在卷积过程中出现偏差。嵌入网络的目标是将秘密图像嵌入到载体图像中生成载密图像，且载密图像要尽可能接近载体图像。

表2 嵌入式网络详细参数配置

Table 2 Detailed parameter configuration of embedding network

输入维度大小	处理方式	卷积核大小	通道数	输出维度大小
256×256×3	预处理	3×3	1	256×256×1
256×256×3	预处理	5×5	1	256×256×1
256×256×3	预处理	7×7	1	256×256×1
256×256×1	预处理	3×3	3	256×256×3
256×256×1	预处理	3×3	3	256×256×3
256×256×1	预处理	3×3	3	256×256×3
256×256×3	卷积模块	3×3	8	256×256×8
256×256×8	维度拼接	3×3	16	256×256×16
256×256×8	维度拼接	3×3	16	256×256×16
256×256×16	卷积模块	4×4	32	255×255×32
255×255×32	卷积模块	2×2	32	256×256×32
256×256×32	U-Net		32	256×256×32
255×255×64	卷积模块	3×3	3	256×256×3
256×256×3	残差模块			256×256×3

2.2 提取网络设计

在图像隐写中，提取网络的目的是将隐藏在载密图像中的秘密图像提取并还原。提取网络通过学习图像的特征、统计模型来实现。

图4为提取网络的结构。提取网络由4个卷积模块和U-Net组成，通过对载密图像检测、提取、解码得到秘密图像。由于嵌入网络使用了偶数卷积核大小，为了秘密图像能够更好地被提取，在提取网络中相应地也采用了4×4、2×2这2层偶数卷积，具体提取步骤如下：首先，载密图像经过3×3卷积得到256像素×256像素×32像素的融合特征，将融合特征输入与嵌入网络相同的修改后U-Net网络中进一步分解特征；然后，依次经过4×4和2×2卷积提取256像素×256像素×3像素秘密图像特征；最后，经过3×3卷积得到秘密图像。表3为提取网络的详细参数配置。

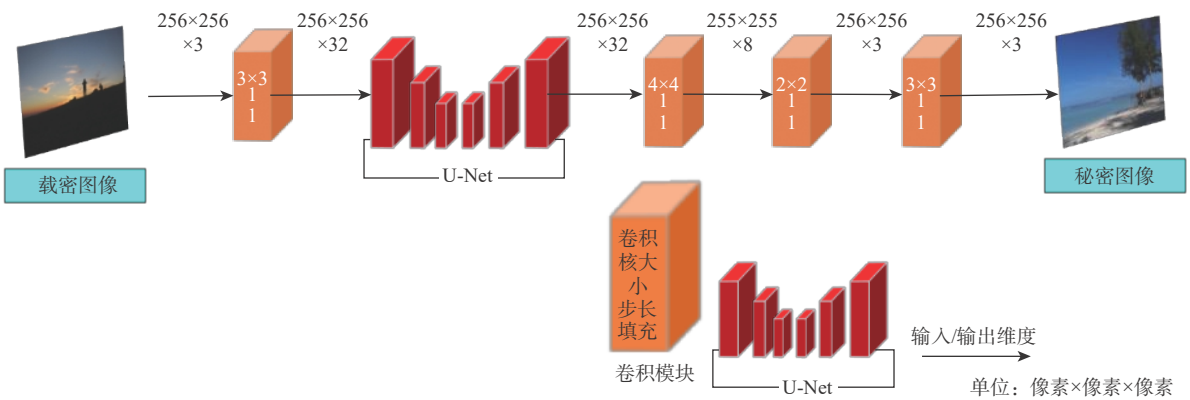


图4 提取网络模块

Fig. 4 The modules of extraction network

表3 提取网络的详细参数配置

Table 3 Detailed parameter configuration of Extraction Network

输入维度大小/像素×像素×像素	处理方式	卷积核大小	通道数	输出维度大小/像素×像素×像素
256×256×3	卷积模块	3×3	32	256×256×32
256×256×32	U-Net		32	256×256×32
256×256×32	卷积模块	4×4	8	255×255×8
255×255×8	卷积模块	2×2	3	256×256×3
256×256×3	卷积模块	3×3	3	256×256×3

提取网络的总体思想为嵌入网络的逆过程，又有区别于嵌入网络。嵌入网络需要将载体图像特征与秘密图像特征进行融合，而提取网络需要从载密图像特征中分离出秘密图像特征并重构为秘密图像。提取网络的目标是，从载密图像中提取出的秘密图像尽可能接近原始秘密图像。

2.3 判别网络设计

在鲁棒隐写算法中，载密图像经过压缩等攻击后很容易产生失真引起监听者的怀疑。因此，引入

判别网络与嵌入网络共同构成 GAN 网络。判别网络的目标是区分包含隐写信息的载体图像和未包含隐写信息的图像。也就是说, 判别网络需要学习识别出哪些图像经过了隐写处理, 哪些图像未经隐写处理。通过判别网络与嵌入网络联合训练, 提高载密图像的质量。判别网络结构如图 5 所示。

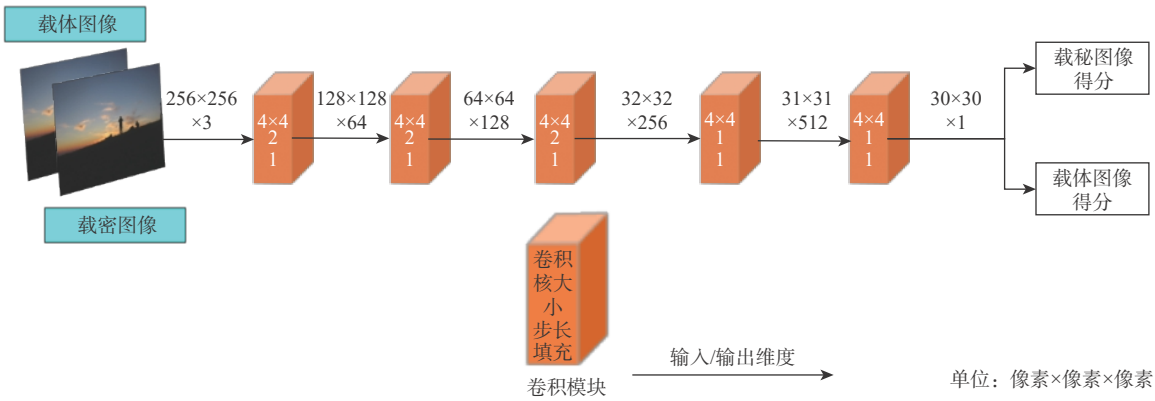


图 5　判别网络结构

Fig. 5　Discriminator network structure

判别网络训练过程中采用 2 组样本, 分别为载体图像和载密图像, 输出为 0～1 的图像评分。当输入为载体图像时判别网络给出评分接近 1, 而输入为图像质量差的载密图像时判别网络给出评分接近 0。当嵌入网络生成的载密图像输入到判别网络时给出评分接近 1 时, 代表嵌入网络生成的载密图像质量接近于载体图像。式(1)为判别网络约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$。

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}=\log_2(1-D(\boldsymbol{I}_{\mathrm{cover}}))+\log_2(D(\boldsymbol{I}_{\mathrm{stego}})) \tag{1}$$

式中: $D(\cdot)\in[0,1]$为判别网络输出的评分, 范围为 0～1; $\boldsymbol{I}_{\mathrm{cover}}$为载体图像; $\boldsymbol{I}_{\mathrm{stego}}$为嵌入网络生成的载密图像。判别网络要求能够分辨出载体图像和载密图像, 当判别网络错误地将载体图像评分为接近 0 时, 判别网络约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$值会升高, 同样当判别网络错误将载密图像评分为接近 1 时, 判别网络约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$值也会升高。因此, $\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$值越低代表判别网络能够正确分辨载体图像和载密图像。

判别网络由 5 个卷积模块组成, 卷积核大小为 4×4。图 5 对各个卷积层的卷积核大小、步长、填充进行了详细的标注。

2.4　网络约束函数

网络训练时采用嵌入-判别网络与嵌入-提取网络交替训练的方式。首先, 固定提取网络, 训练嵌入-判别网络, 通过降低判别损失函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$反向传播更新判别网络的参数, 使判别网络能够正确区分载体图像与载密图像。然后, 固定这次训练得到的判别网络, 开始训练嵌入-提取网络, 通过嵌入约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{i}}$和提取约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{e}}$进行约束训练嵌入网络和提取网络, 同时使这一轮训练中保存的判别网络无法分辨出载体图像与载密图像。训练过程中, 嵌入-判别网络与嵌入-提取网络相互对抗、相互约束, 最终使嵌入网络生成载密图像质量更接近载体图像。同时, 通过最小化网络整体约束函数来达到网络的最佳效果。整体网络结构在图 1 展示, 由嵌入网络、提取网络、判别网络 3 部分组成。整体约束函数 $\boldsymbol{L}$为

$$\boldsymbol{L}=\alpha\boldsymbol{L}_{\mathrm{i}}+\beta\boldsymbol{L}_{\mathrm{e}}+\gamma\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}} \tag{2}$$

整体约束函数 $\boldsymbol{L}$ 由嵌入约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{i}}$、提取约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{e}}$、判别约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$组成。其中, α为图像嵌入约束函数权重, β为图像提取约束函数权重, γ为判别约束函数权重。根据网络训练情况调整各部分的权重, 使生成隐写图像质量更好。约束训练网络在图 1 中使用虚线表示。其中, 嵌入约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{i}}$约束嵌入网络生成的载密图像与载体图像之间的距离, 提取约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{e}}$约束提取网络从载密图像中提取出的秘密图像与原始秘密图像之间的距离, 判别约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$约束判别网络更好地区分载体图像与载密图像, 进而与嵌入提取网络进行对抗。网络在数据集上进行训练一定轮次, 使网络参数在最优值附近时嵌入网络, 提取网络及判别网络的效果都达到最佳, 此时, 各个网络都能够达到对应的目标。判别约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$在式(1)给出。嵌入约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{i}}$和提取约束函数 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{e}}$都采用均方差(mean squared error, MSE)进行约束, 如式(3)和式(4)所示。

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{i}}=\mathrm{MSE}\left(\boldsymbol{I}_{\mathrm{cover}},\boldsymbol{I}_{\mathrm{stego}}\right)=\frac{\sum_{z=1}^{C}\sum_{x=1}^{H}\sum_{y=1}^{W}\left(\boldsymbol{I}_{\mathrm{cover}_{(x,y,z)}}-\boldsymbol{I}_{\mathrm{stego}_{(x,y,z)}}\right)^2}{CHW} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{e}}=\mathrm{MSE}(\boldsymbol{S}_{\mathrm{ori}},\boldsymbol{S}_{\mathrm{ext}})=\frac{\sum_{z=1}^{C}\sum_{x=1}^{H}\sum_{y=1}^{W}\left(\boldsymbol{S}_{\mathrm{ori}_{(x,y,z)}}-\boldsymbol{S}_{\mathrm{ext}_{(x,y,z)}}\right)^2}{CHW} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{(x,y,z)}$为z通道上图像第x行、第y列上0～255范围内的像素值；$\boldsymbol{I}_{\text{cover}}$为载体图像；$\boldsymbol{I}_{\text{stego}}$为嵌入网络生成的载密图像；$\boldsymbol{S}_{\text{ori}}$为原始秘密图像；$\boldsymbol{S}_{\text{ext}}$为提取出的秘密图像。

在训练过程中主要包括2个关键步骤：前向传播和反向传播。

前向传播：在前向传播过程中，输入一个秘密图像和一个载体图像作为网络的输入。这些图像将通过网络的层和参数进行处理，生成载密图像。

反向传播：反向传播是为计算网络中的梯度，以便更新网络的参数。其基于损失函数来度量生成的载密图像与载体图像之间的差异。通过计算损失函数对网络参数的梯度，可以确定参数的调整方向。通过梯度下降来更新网络参数，使生成的载密图像更接近载体图像。

通过以上训练过程，网络的参数会不断地进行调整，使生成的载密图像能够与载体图像之间达到更好的相似性，提取出的秘密图像与原始秘密图像之间达到更好的相似性。这样，在训练结束后，网络就可以将秘密图像隐藏到载体图像中，且能够提取出秘密图像。

3 实验结果与分析

衡量图像隐写算法的好坏，一方面可以从嵌入载体图像的有效载荷进行衡量；另一方面可以比较原始秘密图像和提取出的秘密图像的主观视觉质量和客观的视觉指标。本节主要从嵌入容量、载体图像与载密图像之间的视觉质量及原始秘密图像和提取图像之间的视觉质量3个方面对本文隐写算法进行评估和对比。

3.1 实验配置

采用NVIDIA GeForce RTX 3 080显卡进行神经网络训练，并采用pytorch框架实现网络设计。神经网络的训练轮数为100，优化算法采用Adam[18]，训练学习率为0.001，学习率减半轮数为20。本文将数据集的原始图像裁剪为不重叠的256×256大小图形块作为输入图像，以提升网络训练效率，且输入图像均为随机读取，确保网络模型的泛化能力。经多轮对比实验比较，嵌入约束函数的权重和提取约束函数的权重分别设置为0.5和1.5可获得最佳实验表现。实验采用的数据集为COCO数据集[19]，该数据集是一个大型的图像数据集，主要从复杂的日常场景中截取。实验的训练图像样本为COCO数据集中随机选取的15 000张图像，非重复的另外2 000张图像作为验证样本。样本数据集的一半作为秘密图像，另一半作为载体图像，分别组成7 500个训练样本图像对和1 000个验证样本图像对。

3.2 隐写算法的嵌入容量对比

隐写算法的嵌入容量通常用载体图像最多能够容纳的秘密信息比特数进行量化衡量。对比时，需保持载体图像的失真在允许范围之内，使人眼无法察觉嵌入载体的画面变化。本文使用单位嵌入容量来表示嵌入容量，如下所示：

$$U=B/(HW) \tag{5}$$

式中：B为总嵌入容量，即一幅载体图像嵌入的总比特位数，bit；U为单位嵌入容量，即载体图像中平均每像素嵌入的比特位数，bit/像素。

表4展示了本文提出的图像隐写算法嵌入容量表现及与不同图像隐写算法的对比。实验中，本文提出的图像水印算法采用尺寸为256像素×256像素的载体图像和256像素×256像素的原始秘密图像，根据式(5)可得本文算法的单位嵌入容量高达24 bit/像素。

表4 隐写算法的单位嵌入容量对比

Table 4 Comparison of unit embedding capacity of steganography algorithms

隐写算法	单位嵌入容量/(bit·像素$^{-1}$)
Zhang等[20]	8
Subramanian等[16]	8
UR Rehman等[21]	24
本文算法	24

表4的实验数据表明，Zhang等[20]和UR Rahim等[21]隐写算法的单位嵌入容量为8 bit/像素，Subramanian等[16]和本文算法的单位嵌入容量为24 bit/像素，实现了3倍单位嵌入容量的提升。

3.3 图像的主观视觉质量

图像隐写算法在此类嵌入信息为载密图像同样大小的图像算法中，需要同时衡量2个视觉质量：①嵌入秘密信息的载密图像与原始载体图像的视觉质量，视觉质量失真越大越不安全，因此，需要保持载密图像与载体图像的视觉一致性，使人眼无法分辨出两者的差别；②提取的秘密图像与原始的秘密图像的视觉质量，同样需要保证提取的秘密图像尽可能地与原始秘密图像在视觉上没有差异，否则提取的秘密图像失真严重将极大地影响秘密信息的正确传递。由此，首先关注算法实现的人眼主观视觉质量。

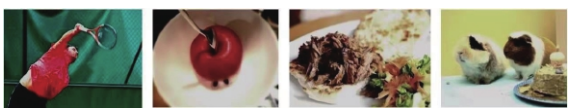
1）载密图像和载体图像（图6）。如图6(c)所示，在Subramanian等[16]提出的算法中，虽然载密图像的峰值信噪比（peak signal-to-noise ratio，PSNR）值



(a) 原始载体图像



(b) 本文算法生成的载密图像



(c) Subramanian等[16]算法生成的载密图像

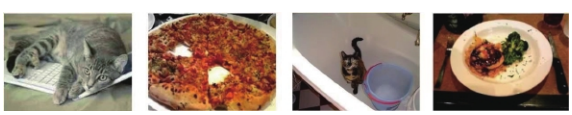
图 6　载体图像与载密图像

Fig. 6　Cover image and cover encrypted image

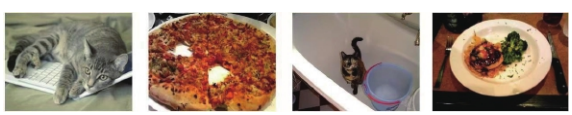
高于 30 dB, 但在图 6 中可以清晰地看到, 载密图像与载体图像相比存在严重的颜色失真问题。

通过图 6 结果可以得出结论: 本文算法将秘密图像嵌入载体图像中生成的载密图像与载体图像基本相同, 视觉上难以辨别差异, 且难以观察到修改痕迹, 使水印图像的存在难以被肉眼察觉。此外, 本文算法明显解决了 Subramanian 等[16] 算法中载密图像存在视觉变化的问题。

2) 嵌入的秘密图像和重建的提取图像。除了关注载密图像的视觉质量以外, 因为本文算法嵌入的秘密信息也是一个完整的图像, 所以为确保隐写算法的完整性和有效性, 同样需要保证提取的秘密图像在视觉上和嵌入的秘密图像高度接近。相应的视觉质量结果如图 7 所示。



(a) 原始秘密图像



(b) 本文算法生成的秘密图像



(c) Subramanian等[16]算法生成的秘密图像

图 7　嵌入的秘密图像和重建的提取图像

Fig. 7　Embedded secret image and reconstructed extracted image

如图 7 中 Subramanian 等[16] 算法的提取结果所示, 提取的秘密图像和原始的秘密图像在视觉质量上存在视觉问题。但本文设计的提取网络成功从载密图像中提取出了秘密图像, 且提取图像与嵌入的秘密图像高度相似, 人眼几乎无法分辨其之间的区别。这是因为本文算法采用了单卷积层对输入图像进行预处理, 能够提取最关键的图像特性信息。进行多次图像特征信息的拼接操作, 即密集连接, 将秘密图像的特征信息巧妙地融入载体图像的特征信息中。通过残差连接, 将最终训练好的图像特征信息与输入的载体图像特征信息相加, 从而使嵌入网络中的其他部分相当于进行了残差训练。

不论从载密图像, 还是提取图像的主观视觉上来看, 本文算法都呈现出不错的视觉效果。基于此, 进一步用客观视觉衡量指标 PSNR 对本文算法进行测试, 并与已有的算法进行对比分析。

3.4　客观视觉质量的对比与分析

在评估图像隐写算法性能时, 既需要从主观视觉方面考虑, 也需要从客观指标方面进行比较, 本文采用了 PSNR 来分析和对比载体图像与载密图像、秘密图像与提取图像之间的视觉质量。

如表 5 所示, 本文算法同时获得了载密图像和提取秘密图像的最高 PSNR 值, 分别达到 34.68 dB 和 31.92 dB。其中, 与相同容量下的 Subramanian 等[16] 算法相比, 分别提高了 2.47 dB 和 4.02 dB。另外, 虽然载密图像的 PSNR 只比 Zhang 等[20] 算法略高, 但本文的隐写算法的隐藏容量是 Zhang 等[20] 算法的 3 倍。综合嵌入容量和 PSNR 值, 本文的隐写算法不仅在嵌入容量方面有很大的提升, 在载密图像和提取图像的视觉质量方面也具有一定的优势, 因此, 本文算法获得了最佳的图像隐写效果。

表 5　客观视觉指标 PSNR 的对比

Table 5　Comparison of objective visual indicators

	PSNR	dB
算法	载密图像的PSNR	提取图像的PSNR
Zhang等[20] 算法	34.12	
UR Rehman等[21] 算法	29.89	
Subramanian等[16]算法	32.21	27.90
本文算法	**34.68**	**31.92**

注: 加粗数值表示性能最优。

3.5　分辨率对 PSNR 的影响

在实验中, 除了使用 256 像素×256 像素大小的图像进行对比外, 还增加了 128 像素×128 像素和 512 像素×512 像素这 2 种常用的分辨率图像进行测试。结果如图 8 所示。可以看出, 不同分辨率图像的载密 PSNR 值波动范围在 0.52 左右, 提取 PSNR 值波动范围在 0.49 左右。这表明, 嵌入网络生成的载密图像和提取网络提取的图像 PSNR 值几乎不受图像分辨率的影响。

总的来说, 在 128 像素×128 像素、256 像素×

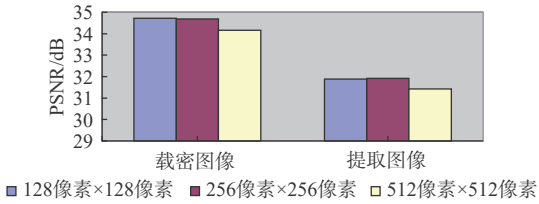


图 8 不同分辨率图像 PSNR 变化

Fig. 8 PSNR variation of images with different resolutions

256像素和512像素×512像素这3种常见分辨率下，本文方法生成和提取的图像质量保持稳定，PSNR值变化很小，说明本文方法对分辨率的适应性较强，生成和提取的图像质量能保持稳定，不会因分辨率的改变而显著影响隐写性能。

4 结 论

本文基于端到端深度学习网络实现了一种大容量的图像隐写算法，主要工作包括嵌入网络、提取网络和判别网络的网络结构设计，并通过约束函数的设定联合训练整个网络。

1）本文算法在嵌入容量上达到24 bit/像素。

2）在主观视觉质量上，本文算法生成的载密图像和提取图像都没有明显的视觉失真，获得了人眼的良好视觉效果。

综合实验结果表明，本文提出的隐写算法在重要的性能指标如嵌入容量、载密图像和提取图像的视觉质量上均优于其他同类算法，说明本文设计的嵌入网络和提取网络的有效性和优越性。

在将来的工作中，将进一步考虑算法抵抗图像常见攻击的能力，增加抗攻击的网络模块等。

参考文献（References）

[1] Wang C, Ni J. An efficient JPEG steganographic scheme based on the block entropy of DCT coefficients[C]//Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1785-1788.

[2] Guo L J, Ni J Q, Shi Y Q. Uniform embedding for efficient JPEG steganography[J]. IEEE transactions on Information Forensics and Security, 2014, 9(5): 814-825.

[3] Guo L J, Ni J Q, Su W K, et al. Using statistical image model for JPEG steganography: uniform embedding revisited[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2015, 10(12): 2669-2680.

[4] Salunkhe S, Bhosale S, Narkhede S V. An efficient video steganography for pixel location optimization using Fr-WEWO algorithm based deep CNN model[J]. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, 2023, 15(3): 14-30.

[5] Khandelwal J, Sharma V K. Extensive dual tree complex wavelet transform-based image steganography using SVD and CNN subspace[J]. Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography, 2023, 26(3): 617-627.

[6] Wang Z H, Byrnes O, Wang H, et al. Data hiding with deep learning: a survey unifying digital watermarking and steganography[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2023, 10(6): 2985-2999.

[7] Rehman H A, Bajwa U I, Raza R H, et al. Leveraging coverless image steganography to hide secret information by generating anime characters using GAN[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 248: 123420.

[8] Ahmadi M, Norouzi A, Karimi N, et al. ReDMark: framework for residual diffusion watermarking based on deep networks[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 146: 113157.

[9] Liu J, Zhou T P, Zhang Z, et al. Digital cardan grille: a modern approach for information hiding[C]//Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence. New York: ACM, 2018: 441-446.

[10] Cui Q, Zhou Z L, Fu Z J, et al. Image steganography based on foreground object generation by generative adversarial networks in mobile edge computing with Internet of Things[J]. IEEE Access, 2019, 7: 90815-90824.

[11] Volkhonskiy D, Nazarov I, Burnaev E. Steganographic generative adversarial networks[C]//Proceedings of the Twelfth International Conference on Machine Vision. Amsterdam: SPIE, 2020: 97.

[12] Hayes J, Danezis G. Generating steganographic images via adversarial training[C]//Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Ins., 2017: 30.

[13] Zhu J R, Kaplan R, Johnson J, et al. HiDDeN: hiding data with deep networks[M]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV 2018. Berlin: Springer, 2018: 682-697.

[14] Wang Z H, Gao N, Wang X, et al. SSteGAN: self-learning steganography based on generative adversarial networks[C]//Proceedings of the Neural Information Processing. Berlin: Springer, 2018: 253-264.

[15] Wu P, Yang Y, Li X Q. StegNet: mega image steganography capacity with deep convolutional network[J]. Future Internet, 2018, 10(6): 54.

[16] Subramanian N, Cheheb I, Elharrouss O, et al. End-to-end image steganography using deep convolutional autoencoders[J]. IEEE Access, 2021, 9: 135585-135593.

[17] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Proceedings of the Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015. Berlin: Springer, 2015, 9351: 234-241.

[18] Kingma D P, Ba J. Adam: a method for stochastic optimization [EB/OL]. (2017-01-30)[2024-03-06]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980.

[19] Lin T Y, Maire M, Belongie S, et al. Microsoft COCO: Common objects in context[C]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV 2014. Berlin: Springer, 2014: 740-755.

[20] Zhang K A, Cuesta-infante A, Xu L, et al. SteganoGAN: high capacity image steganography with GANs[EB/OL]. (2019-01-30)[2024-03-10]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.03892.

[21] Ur Rehman A, Rahim R, Nadeem S, et al. End-to-end trained CNN encoder-decoder networks for image steganography[C]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV 2018 Workshops. Berlin: Springer, 2019: 723-729.

A high-capacity image steganography algorithm based on end-to-end deep learning networks

LI Fan[1]，LIU Chenyang[1, 2, *]，SUN Zhibo[1]，DONG Zhenbo[1]，QIAN Weipeng[1]

(1. School of Information and Engineering，Hainan University，Haikou 570228，China；
2. School of Physics and Optoelectronic Engineering，Hainan University，Haikou 570228，China)

Abstract: Due to the complex texture, large redundant space, and widespread application of images, image based steganography algorithms are still the mainstream direction of steganography. Deep neural network-based picture steganography algorithms have become a research hotspot in the field of image steganography in recent years due to their increasingly good steganographic performance. This article proposes a high-capacity image steganography algorithm based on a generative adversarial network (GAN). The algorithm designed an information embedding and extraction network with a preprocessing module, a convolutional neural networks (CNN) module, and a U-Net as the main components. Through the constraint of the loss function, the embedding, extraction, and discrimination networks were jointly trained to achieve good steganographic visual effects. The experimental results show that our algorithm achieves an embedding capacity of 24 bpp. The overall superiority of the end-to-end steganography network designed in this paper is demonstrated by the fact that, under the assumption of high-capacity embedding, the encrypted images produced by the algorithm in this paper and the extracted secret images are higher than other comparable algorithms in both subjective visual quality and objective visual indicator peak signal-to-noise ratio (PSNR).

Keywords: image steganography; deep learning; GNN; U-Net; information hiding

Received：2024-05-09；**Accepted**：2024-05-24；**Published Online**：2024-06-14 15：29
URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240614.1326.001
Foundation item：National Natural Science Foundation of China (62205092)
*** Corresponding author**. E-mail：chenyang9015@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0414

基于最大后验概率估计的多星座 ARAIM 故障排除方法

李亮，程力，李瑞杰*，时秀芸，危亦林
(哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院，哈尔滨 150001)

摘 要：针对异常观测量的准确检测与排除是高级接收机自主完好性监测 (ARAIM) 保障航空导航安全的关键。随着包括北斗、格洛纳斯等新兴星座的部署，待监测故障模式数量急剧上升，导致传统 ARAIM 故障排除算法难以同时顾及故障排除的成功率与计算效率。基于此，提出一种基于最大后验概率 (MAP) 估计的多星座 ARAIM 故障排除方法。通过结合观测量的异常先验概率信息实现健康卫星误排风险的控制；基于极大似然估计准确构建潜在故障模式假设下异常观测量的后验概率分布模型，避免异常观测量漏排事件的发生。此外，为提升故障排除的效率，结合所提 MAP 故障排除方法设计了一种基于异常观测量特征决策策略的 ARAIM 故障排除框架。仿真与实验结果表明：与传统 ARAIM 故障排除相比，所提方法可在提升 ARAIM 故障排除效率的同时保障单星及多星故障场景下异常观测量排除的准确性。

关 键 词：异常观测量；ARAIM；故障排除；最大后验概率；多星座
中图分类号：V249.3
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2630-09

针对异常观测量的检测与排除是高级接收机自主完好性监测(advanced receiver autonomous integrity monitoring, ARAIM)用于保障导航定位服务可靠性的核心功能[1-3]。由于 ARAIM 对故障检测算法已有较为完整的讨论与研究，本文研究重点是针对 ARAIM 的故障排除。传统的故障排除多通过针对冗余观测量信息的一致性检验，快速识别与排除由于卫星故障所产生的异常观测量。然而，多频多星座的引入导致多星同时发生故障的概率不断上升[4-5]。根据 Blanch 等[6]研究结论，多星座下卫星数量的大幅上升及精密进近航段更严格的所需导航性能(required navigation performance, RNP)导致多星同时发生故障的概率无法再被忽视。面对多星故障场景，传统 ARAIM 故障排除采用递归搜索的方式逐一检验待监测故障卫星子集，通过对全局观测量进行一致性检验保障多观测量异常场景下的排除准确性[7]。然而，多星座的引入将导致需监测故障卫星子集的数量呈指数级增加，传统基于递归搜索方式实现多星故障排除的策略难以满足机载端完好性的实时监测需求。

目前，主要存在 2 类提升 ARAIM 故障排除效率的方法。第 1 类方法基于卫星子集筛选策略，通过卫星健康标志位、仰角以及先验故障概率[8-11]等信息开展卫星预筛选，以缓解故障排除所引入的计算负担。然而，该方法存在 2 个缺陷：①易导致健康卫星的过多排除；②虽然可一定程度上缓解在航设备解算负担，但在冗余观测量较多或卫星先验故障概率较大的情形下，仍无法避免递归搜索所引入的巨大计算耗时。为避免递归搜索所引入的过重计算负担，基于观测量异常特征决策(fault feature decision, FFD)的 ARAIM 故障排除方法被提出。经典方法包括奇偶矢量决策方法和卡方检验决策方

收稿日期：2024-06-07；**录用日期**：2024-09-27；**网络出版时间**：2024-11-06 14:20
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241106.1028.002
基金项目：国家重点研发项目 (2021YFB3901300)；国家自然科学基金 (62373117,62403158)
* **通信作者**. E-mail：liruijie_heu@hrbeu.edu.cn

引用格式：李亮，程力，李瑞杰，等. 基于最大后验概率估计的多星座 ARAIM 故障排除方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2630-2638. Li L，Cheng L，Li R J，et al. Fault exclusion method based on maximum a posteriori probability estimation for multi-constellation ARAIM [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2630-2638 (in Chinese).

法。其中, 奇偶矢量决策方法通过选择奇偶矢量在故障模式识别线上的最大投影作为最终排除选项[12]。卡方检验判定法则是利用卡方检验统计量最小化特征实现故障排除[13]。根据仿真分析验证[14], 上述方法避免了递归排除所需的大量迭代过程。然而, 这些方法仍存在 2 个关键限制, 即存在异常观测量的漏排与健康观测量的误排风险, 统称为具有错误排除的风险。

根据上述分析, 目前的 ARAIM 故障排除方法主要受限于需兼顾异常观测量排除的成功率与效率。最大后验概率(maximum a posteriori probability, MAP)估计是一种对误差分析和处理的重要统计方法, 其利用经验数据和先验信息有效地对目标参数进行估计, 从而在给定数据条件下找到使后验概率最大化的参数取值[15]。本文提出基于 MAP 估计的 ARAIM 故障排除方法, 将测距观测量在奇偶空间进行故障影响分解, 并通过极大似然估计分析观测量异常偏差幅值, MAP 方法通过对卫星先验故障概率及异常观测量误差后验概率分布信息的综合利用, 实现故障卫星的快速识别及排除。

1　观测量异常模型

本节描述 ARAIM 中顾及卫星故障影响下的异常观测量模型。ARAIM 的观测量向量 $\tilde{\boldsymbol{z}}$ 主要包含载波平滑后的伪距观测量, 观测量误差分别由标称观测量误差 $\tilde{\boldsymbol{v}}$ 和非标称(异常)观测量误差 $\tilde{\boldsymbol{f}}$ 组成, 其中, $\tilde{\boldsymbol{v}}$ 可被建模为服从零均值、协方差为 $\tilde{\boldsymbol{V}}$ 的独立同分布正态分布随机变量。将观测量预先乘以标称误差协方差矩阵 $\tilde{\boldsymbol{V}}^{-1/2}$ 以获得标准化的观测量模型[16-17]:

$$\boldsymbol{z}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{v}+\boldsymbol{f} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{z}=\tilde{\boldsymbol{V}}^{-1/2}\tilde{\boldsymbol{z}}$ 为 $n\times1$ 维标准化的观测量向量; $\boldsymbol{H}$ 为 $n\times m$ 维标准化的观测矩阵[16], 由协方差矩阵 $\tilde{\boldsymbol{V}}^{-1/2}$ 乘以原始观测矩阵获取, 原始观测矩阵由视线向量及元素 1 组成, m 为待估状态的数目, n 为可视卫星的数目; $\boldsymbol{x}$ 为 $m\times1$ 维状态向量, 其中包括接收机三维位置及接收机钟差; $\boldsymbol{v}$ 为 $n\times1$ 维标准化的噪声向量, 由服从零均值且各观测量噪声相互独立的多个标准正态分布组成; $\boldsymbol{f}$ 为 $n\times1$ 维标准化的故障向量。

故障向量 $\boldsymbol{f}$ 可进一步分解为故障卫星矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 及观测量偏差向量 $\boldsymbol{b}_i$:

$$\boldsymbol{f}_i=\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{b}_i \tag{2}$$

式中: 故障卫星矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 为由故障模式 i 决定的 $n\times s$ 维矩阵, 包含元素 0 和 1, 元素 0 表示卫星健康, 元素 1 表示卫星故障; $\boldsymbol{b}_i$ 为 $s\times1$ 维故障偏差向量, 由故障卫星所产生的观测量偏差组成; s 为故障卫星数。

通过奇偶变换可将标准化的观测量投影至奇偶空间中, 实现对观测误差的提取。奇偶矢量 $\boldsymbol{p}$ 可详细表示为

$$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{z}=\boldsymbol{R}(\boldsymbol{v}+\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{b}_i) \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{R}$ 为 $(n-m)\times n$ 维奇偶空间投影矩阵, 可通过对观测矩阵 $\boldsymbol{H}$ 进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD)获取:

$$\boldsymbol{H}_{n\times m}=\boldsymbol{U}_{n\times n}\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{m\times m}\\ \boldsymbol{0}_{(n-m)\times m}\end{bmatrix}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}_{m\times m} \tag{4}$$

式中: 矩阵 $\boldsymbol{U}_{n\times n}=\left[\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}_{m\times n},\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}_{(n-m)\times n}\right]$ 由 $m\times n$ 维矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 及 $(n-m)\times n$ 维矩阵 $\boldsymbol{R}$ 组成, 并有 $\boldsymbol{R}\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{I}_{n-m}$, $\boldsymbol{R}\boldsymbol{H}=\boldsymbol{0}_{(n-m)\times m}$, 记 $\boldsymbol{R}\boldsymbol{A}_i$ 为 $\boldsymbol{R}_i$ 方便后续公式推导; 矩阵 $\boldsymbol{S}_{m\times m}$ 为 $m\times m$ 维特征值矩阵; 矩阵 $\boldsymbol{L}_{m\times m}$ 为 $m\times m$ 维正交矩阵。

奇偶变换实现了异常观测量中故障偏差和观测量噪声的提取。

2　基于 MAP 的 ARAIM 故障排除方法

本节介绍基于 MAP 估计的 ARAIM 故障排除方法, 其核心是估计和比较各类潜在故障模式的后验发生概率, 并将具有 MAP 的故障模式作为最终的排除选项。本节将详细介绍各类故障模式后验发生概率的估计方法。

当包含观测量异常先验信息的故障先验概率及包含观测量误差信息的奇偶矢量 $\boldsymbol{p}$ 更新后, 故障模式假设 H_i 发生的后验概率模型可表示为

$$P(H_i|\boldsymbol{p})=\frac{f(\boldsymbol{p}|H_i)P(H_i)}{\sum_{j=1}^{h}f(\boldsymbol{p}|H_j)P(H_j)} \tag{5}$$

式中: h 为故障模式总数; $f(\cdot)$ 为概率密度函数。

式 (5) 右侧分子表示故障模式 H_i 下观测量发生异常的概率; 分母则表示各类潜在故障模式发生的概率总和。由于式 (5) 中分母取值并不影响待排除故障模式的确定, 因此式 (5) 可简化为

$$H_i=\max_{H_i}P(H_i|\boldsymbol{p})\Leftrightarrow\max_{H_i}f(\boldsymbol{p}|H_i)P(H_i) \tag{6}$$

从式 (6) 可以观察到, 最终待排除故障模式的确定与故障模式先验概率 $P(H_i)$ 和似然函数 $f(\boldsymbol{p}|H_i)$ 这 2 部分有关。对上述 2 个相关参数进行详细分析。首先, 介绍先验故障概率的确定方法, 根据完好性支持信息(integrity support message, ISM)中提供的星座先验故障概率和卫星先验故障概率, 可对故障模式的先验概率进行计算。卫星故障和星座故障的定义为

$$P_{\mathrm{event},i}=P_{\mathrm{sat},i},i\in\{1,\cdots,n\} \tag{7}$$

$$P_{\mathrm{event},n+j}=P_{\mathrm{const},j},j\in\{1,\cdots,N_{\mathrm{const}}\} \tag{8}$$

式中：$P_{\text{sat},i}$为卫星i故障事件(窄故障)发生的先验概率；$P_{\text{const},j}$为星座j故障事件(宽故障)发生的先验概率；N_{const}为星座数量；故障模式对应单个或多个故障事件的组合，具体故障模式发生的先验概率$P(H_i)$可根据式(9)和式(10)计算：

$$P(H_0)=\prod_{k=1}^{n+N_{\text{const}}}\left(1-P_{\text{event},k}\right) \tag{9}$$

$$P(H_i)=\prod_{k\in E_{\text{idx}}}\left(P_{\text{event},k}\right)\prod_{j\notin E_{\text{idx}}}\left(1-P_{\text{event},j}\right) \tag{10}$$

式中：E_{idx}为上述故障模式中的故障事件。由于多星座冗余观测量数目的大幅提升，使同时监测所有潜在故障模式在时间维度不具备可行性。然而，由于大量潜在故障模式的发生概率极低，需监测故障模式子集$\{H_i\,|\,i=0,1,\cdots,N_{\text{f}}\}$，可基于式(11)进行精简[13]：

$$P_{\text{thres}}\geqslant P_{\text{NM}}=1-\sum_{j=0}^{N_{\text{f}}}P(H_j) \tag{11}$$

式中：P_{NM}为未监测故障模式所导致的完好性风险上限；P_{thres}为由未监测故障模式所导致的完好性风险损失阈值；N_{f}为需监测故障模式总数。需要说明的是，满足式(11)的故障模式子集并非唯一，本文所需监测的子集为令N_{f}最大的故障模式集合。

此外，似然函数$f(\boldsymbol{p}|H_i)$反映了假设的故障模式H_i及故障偏差与实际奇偶矢量$\boldsymbol{p}$的符合程度。与实际故障相对应的故障模式假设H_i及故障偏差向量$\boldsymbol{b}_i$应与奇偶矢量$\boldsymbol{p}$具有最高的相似度，即似然函数达到最大。直观上，可以通过遍历全部潜在故障模式及其对应故障卫星上的偏差值来确定令似然函数最大的故障模式。但这将引入巨大的计算负担从而不利于实时故障排除操作。因此，引入最大似然估计确定故障偏差。

似然函数$f(\boldsymbol{p}|H_i)$可以进一步表示为

$$f(\boldsymbol{p}|H_i)=\int_{-\infty}^{\infty}f(\boldsymbol{p}|\boldsymbol{b}_i,H_i)f_{\boldsymbol{b}}(\boldsymbol{b}_i|H_i)\mathrm{d}\boldsymbol{b}_i \tag{12}$$

式中：$f_{\boldsymbol{b}}(\boldsymbol{b}_i|H_i)$为故障模式$H_i$下未知故障偏差向量的条件密度函数。

由于单一时刻下故障偏差幅值的确定性，未知故障偏差向量的似然函数是以实际故障偏差向量为中心的狄拉克函数，此时，式(12)可进一步表示为[15]

$$\max_{\boldsymbol{b}_i}\int_{-\infty}^{\infty}f(\boldsymbol{p}|\boldsymbol{b}_i,H_i)f_{\boldsymbol{b}}(\boldsymbol{b}_i|H_i)\mathrm{d}\boldsymbol{b}_i=\int_{-\infty}^{\infty}f(\boldsymbol{p}|\boldsymbol{b}_i,H_i)\delta(\boldsymbol{b}_i-\boldsymbol{b}_i^{*}|H_i)\mathrm{d}\boldsymbol{b}_i=f(\boldsymbol{p}|\boldsymbol{b}_i^{*},H_i) \tag{13}$$

式中：$\delta(\cdot)$为狄拉克函数；$\boldsymbol{b}_i^{*}$为实际故障偏差向量。将式(3)代入式(13)即可得到故障模式H_i下利用奇偶矢量表达的似然函数，其服从均值为$\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{b}_i$、方差为$\boldsymbol{I}_{n-m}$的正态分布。

$$f(\boldsymbol{p}|\boldsymbol{b}_i,H_i)=N(\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{b}_i,\boldsymbol{I}_{n-m})=\frac{1}{2\pi^{(n-m)/2}}\exp\left\{-\frac{(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{b}_i)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{b}_i)}{2}\right\} \tag{14}$$

将式(14)中似然函数最大化等价于将其中的$(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{b}_i)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{b}_i)$最小化，其本质可转化为最小二乘(least square, LS)对未知故障偏差向量$\boldsymbol{b}_i$的估计问题，即

$$\hat{\boldsymbol{b}}_i=(\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{R}_i^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{R}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p} \tag{15}$$

将式(15)中估计的故障偏差向量$\hat{\boldsymbol{b}}_i$代入式(6)和式(14)，以确定最终排除的故障模式。

本文设计了一套特征信息决策策略的故障排除流程，如图1所示。该流程为基于本文提出的一

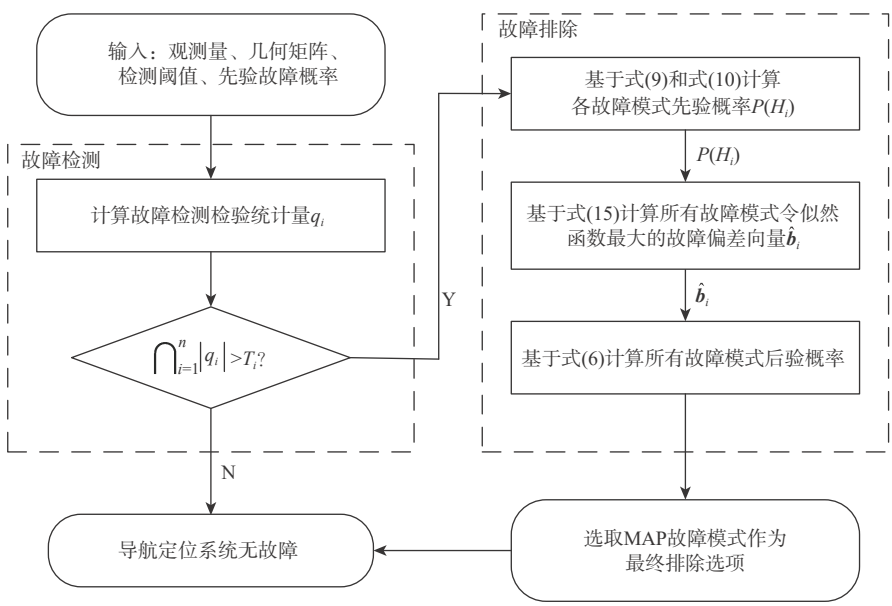


图1 基于MAP估计的ARAIM故障排除流程

Fig. 1 ARAIM fault exclusion flow chart based on MAP estimation

种基于 MAP 估计的多星座 ARAIM 故障排除方法。一方面, 该方法通过结合观测量的异常先验概率信息实现健康卫星误排风险的控制; 另一方面, 基于极大似然估计准确构建潜在故障模式假设下异常观测量的后验概率分布模型, 避免异常观测量漏排事件的发生。

3　仿真与实验

通过仿真与实验分析, 验证本文方法在不同故障场景下的排除能力及计算效率的提升。仿真分析选用斯坦福大学的 MAAST 软件模拟卫星运行轨迹及生成卫星故障场景。选用全球定位系统(global positioning system, GPS)单星座配置, 卫星数目为 23 颗。仿真分别测试了单星故障场景下本文方法在避免误排与漏排事件下的优势及双星故障场景下本文方法的故障排除成功率。本文卫星故障场景的设置选择指定的卫星作为故障卫星, 并向其观测量中注入测距偏差。

实验选取国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)中心的 COCO 观测站, 首先, 对 0～50 m 故障偏差下各类排除方法的排除成功率进行对比, 然后, 选择 50 m 故障偏差作为故障条件连续分析 2024 年 1 月 1—3 日 3 天的观测数据, 采样间隔为 30 s, 共包含 8 640 个历元。在实验中, 采用 2 种多星座配置: GPS/Galileo 和 GPS/Galileo/BDS。分别在每个站点的 3 天实验阶段设置 3 种故障场景: ①向卫星 1 伪距观测量中注入 50 m 的阶跃故障偏差; ②向卫星 1 伪距观测量中注入 0～50 m 的缓变故障偏差; ③向卫星 1 和卫星 2 伪距观测量中分别注入 50 m 的阶跃故障偏差。

各类误差源模型的详细描述及其余仿真参数的配置可参考表 1。

表 1　完好性支持参数

Table 1　Integrity support parameters

与完好性相关的空间信号用户测距误差的标准差/m	与精度和连续性相关的空间信号用户测距误差的标准差/m	完好性风险指标	误警率	卫星故障先验概率	星座级故障先验概率	水平告警极限/m	未监测故障模式所导致的完好性风险上限
2.4	1.6	1×10^{-7}	5×10^{-6}	GPS: 10^{-5}[6] Galileo: 10^{-4}; BDS: 10^{-4}	10^{-8}	185	6×10^{-8}

3.1　仿真分析

通过仿真验证本文方法在避免误排与漏排事件下的优势。基于式 (14) 可知, 故障模式后验发生概率主要取决于 $\Delta\boldsymbol{p}_i=\boldsymbol{p}-\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{b}_i$, 其取值在故障发生时的变化被更清晰地展示在奇偶空间中。该示例中包含 7 颗可视卫星, 具体卫星的几何构型见图 2, 图中 G 表示 GPS 卫星, 数字 02、07 和 10 等表示 PRN 编号, 并将所有可视卫星按 PRN 编号从小到大简称为卫星 1～7。为更清晰地在二维奇偶空间中展示本文所提故障排除算法的原理, 选择该示例的前 6 颗卫星作为仿真条件, 并向卫星 2 中注入 10 m 的故障偏差, 暂不考虑噪声的影响, 二维奇偶空间中的奇偶矢量及单故障假设的故障线如图 3 所示。可以看出, 奇偶矢量 $\boldsymbol{p}$ 的方向与故障卫星所对应故障线的方向保持一致; 反之, 其他错误排除的故障线将与奇偶矢量形成夹角。其中, 奇偶矢量在各故障线上的垂线即为 $\Delta\boldsymbol{p}_i$, 在无噪声假设下其在正确排除时值为 0, 反之, 在漏排情形发生时非零。

此外, 根据式 (14) 可知, $\Delta\boldsymbol{p}_i$ 的变化将直接影响似然函数的大小。图 4 展示了正确排除与漏排事件下的似然函数值对比, 由于各漏排事件对应的似然函数值没有明显差异, 仅使用排除卫星 1 后的漏排事件似然函数值表征所有漏排事件的似然函数值。从图 4 可以看出, 随着故障偏差的增大, $\Delta\boldsymbol{p}_i$ 的取值变化将导致漏检事件下的似然函数值急剧减小; 相反, 正确排除下由于 $\Delta\boldsymbol{p}_i$ 始终为 0, 此时相对应的似然函数值维持不变。正确排除与漏排情况下似然函数的显著差异有助于避免漏排的发生。

与漏排事件不同, 仅借助似然函数的差异性并不能准确区分误排与正确排除事件。图 5 展示了在同一历元下, 向卫星 2 注入 10 m 的故障偏差后正确排除和误排的似然函数及后验概率。根据图 5,

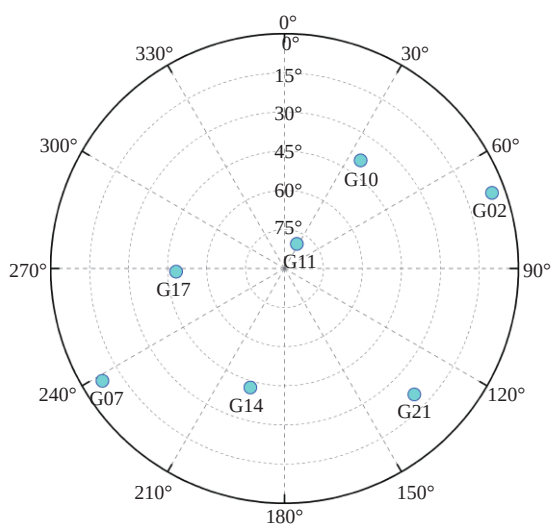


图 2　当前历元可视卫星高度角和方位角

Fig. 2　Elevating angles and azimuth angles of visible satellites in current epoch

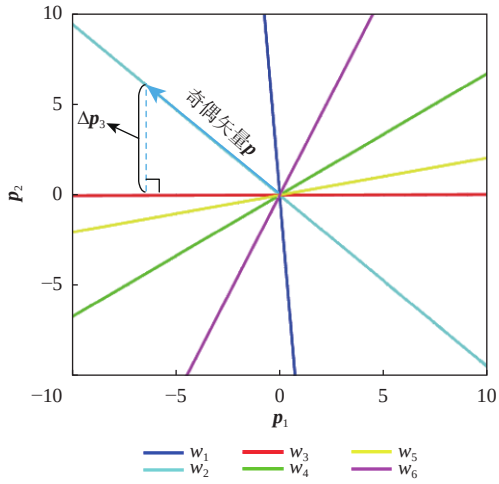


图3 二维奇偶空间中奇偶矢量和故障线

Fig. 3 Parity vector and fault lines in two-dimensional parity space

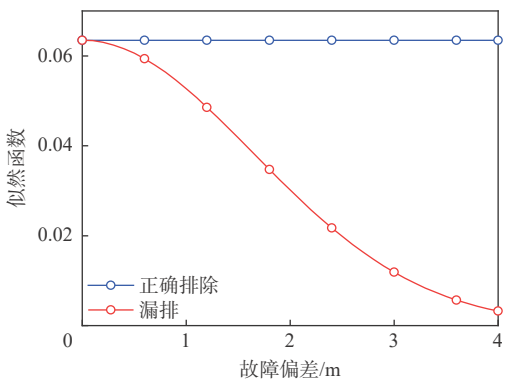


图4 正确排除与漏排似然函数对比

Fig. 4 Comparison of likelihood function of correct exclusion and incomplete exclusion

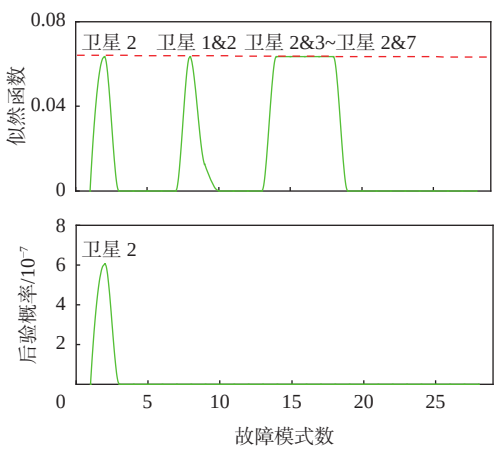


图5 正确排除与误排似然函数及后验概率对比

Fig. 5 Comparison of likelihood function and posterior probability of correct exclusion and incomplete exclusion

正确排除与误排的似然概率基本一致，这是由于误排发生时故障卫星已经被全部排除，并不会对$\Delta \boldsymbol{p}_i$产生影响。此时，结合观测量的异常先验概率信息将有利于避免健康卫星的误排，这是因为多星同时发生故障的先验概率远低于单星故障，此时的先验概率与似然函数相乘得到误排对应的后验概率也将远小于正确排除所对应的后验概率，故可有效避免误排。

如图5所示，当实际故障场景为卫星2故障时，仅依赖似然函数值极易导致误排的发生。相反，考虑先验概率可避免误排事件的发生。

上述结果是在无噪声假设下获取的。下文以双星故障场景为例，验证本文方法在顾及噪声影响下的排除成功率，其中，排除成功率指不发生误排与漏排事件的比率。向卫星1、2上均注入0～20 m的故障偏差，噪声服从标准正态分布，在每一组故障偏差下进行1 000次蒙特卡罗仿真，得出双星故障下的故障排除成功率，如图6所示。

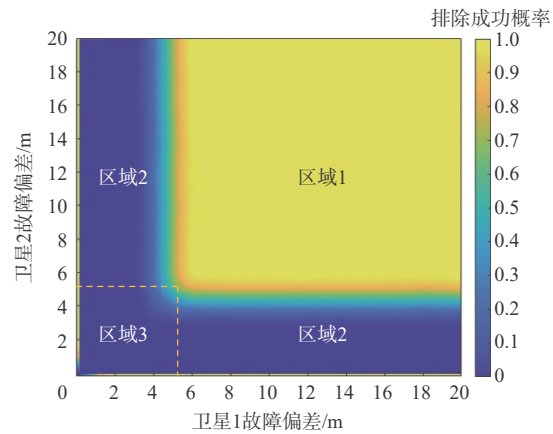


图6 双星故障场景下本文方法故障排除成功率

Fig. 6 The success rate of fault exclusion of the proposed method under two-fault satellite scenario

整个图6被划分为3个区域。区域1内2个故障卫星的故障偏差均较大，根据前文分析，此时正确排除对应的后验概率将远大于错误排除，故排除成功率较高。区域2内2个故障卫星中的一颗故障偏差较小，本文方法仅识别出一颗故障卫星，从而导致漏排。区域3内2个故障卫星故障偏差均较小，排除成功率较低。区域2和区域3内均存在小偏差故障，此时故障先验概率将会在后验概率中产生主要影响，正确排除对应的似然函数值低于单星故障与双星故障模式先验概率之差，从而导致排除成功率较低。另外，在区域2和区域3计算排除成功率时，可能会出现错误排除后剩余故障卫星的故障偏差不会引发故障检测器报警，此时也将其认定为排除失败，但对本文方法故障排除性能分析不产生影响。区域2和区域3内未被排除的故障卫星大部分受较小的测距观测量影响，其对定位结果的影响在实际数据实验中将被进一步分析。

3.2 实际数据分析

为测试本文方法的故障排除性能，选取真实

COCO 站点数据进行实验。从排除故障卫星成功率和效率 2 个方面对本文方法与传统方法进行比较。其中, 传统方法包括递归搜索法、奇偶矢量决策法、卡方检验决策法。为简化后续讨论, 将上述 3 种传统方法依次称为 RS、PV、Chi。

为验证本文方法在使用实测数据情况下依然维持算法性能, 向卫星 1 及卫星 1、2 中注入 0～50 m 的故障偏差, 每组间隔为 5 m, 其中, 注入双星故障时卫星 1、2 的故障偏差增长幅度一致, 对比上述 4 种方法的故障排除成功率如图 7 所示。图 7 中红色线条表示所提方法在各故障偏差下的排除成功率。

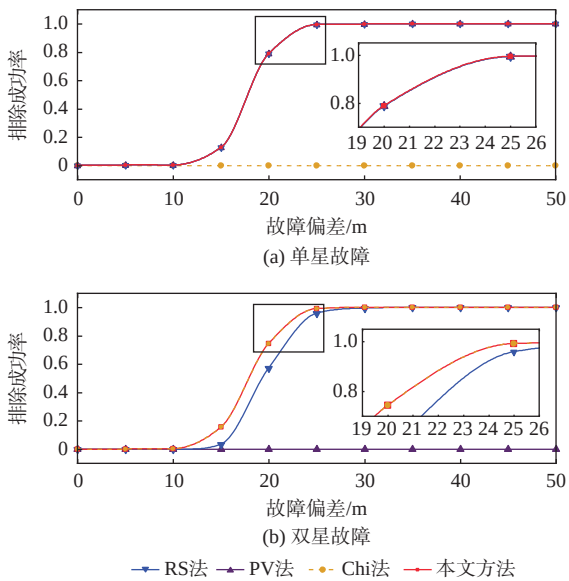


图 7　不同故障偏差下, 4 类排除方法排除成功率

Fig. 7　The success rate of fault exclusion of four kinds under different fault deviations

可见, 在单星故障情况下, RS 法、PV 法和本文方法的故障排除成功率没有明显差异, 而 Chi 法由于存在误排情况导致其排除成功率几乎为零; 双星故障情况下, 本文方法依旧保持高故障排除率, 高于 RS 法和 PV 法。其中, RS 法的排除成功率在故障偏差增加到 30 m 之前略低于本文方法, 随着故障偏差的逐渐增大将与本文方法相当, 而 PV 法在双星故障情况下无法正常对故障卫星进行排除, 原因将在后续实验中进行详细分析。

为进一步从不同维度分析本文算法的性能, 本文选取 50 m 故障偏差作为后续实验分析的故障注入条件, 选择该故障偏差的原因是该条件下各类方法的故障排除率均保持在较高水平。图 8 展示了 COCO 站点连续 3 天观测数据故障注入情况。

图 9 展示了使用 COCO 站数据的 4 种故障排除方法的结果。首先, 关注阶跃故障, 即故障场景 1 和 3, 从图 9 可以看出, RS 法在各故障场景下排除

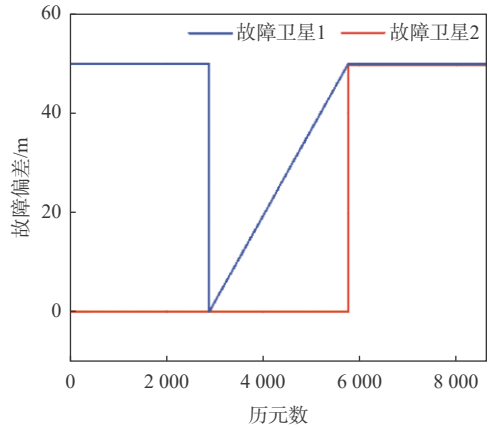


图 8　注入故障类型、幅值与引入时间情况

Fig. 8　Injection fault type, magnitude and injection time

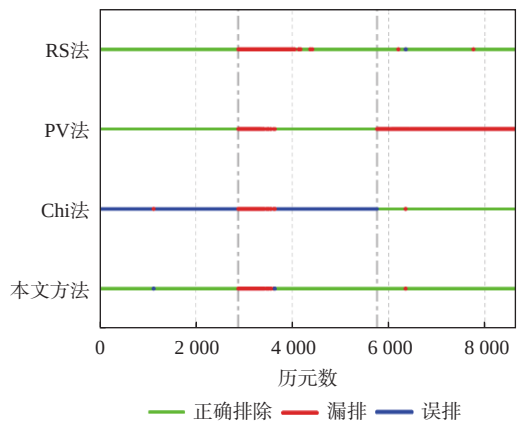


图 9　不同故障场景下 4 类故障排除方法性能对比

Fig. 9　Performance comparison of four fault exclusion methods under different fault scenarios

成功率均较高, 单星故障和双星故障场景下分别达到 100.00% 和 99.69%。但由于采用递归搜索法, 该方法无法在保证高排除成功率的同时维持计算效率, 与本文方法计算效率详细对比如图 10 所示, 单星故障场景下与 RS 方法相同, PV 法表现出 100.00% 的高排除成功率, 这得益于奇偶矢量对单星故障较

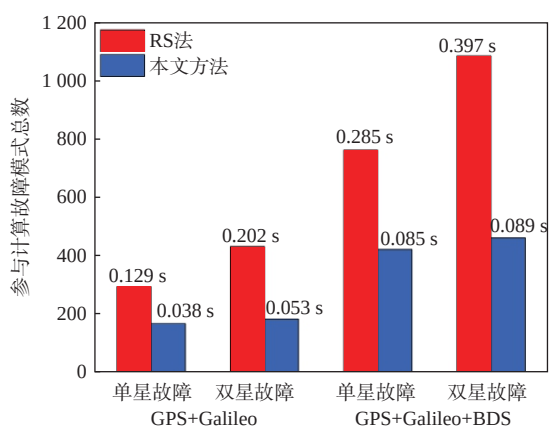


图 10　本文方法与 RS 法计算效率对比

Fig. 10　Comparison of calculation efficiency between the proposed method and RS method

高的敏感性，能够将故障卫星与健康卫星严格区分。而在双星故障情况下，各检验统计量之间存在强相关性，实际的故障并不一定产生最大的检验统计量[18]，故无法延用单星故障下的特性实现故障卫星准确排除。相比之下，Chi法在双星故障时能够保证高的排除成功率，而在单星故障时极易出现误排情况。这是由于该方法在正确排除与误排时具有相似的检测统计量。

与3种方法不同，本文方法在各故障场景下均展现较高的排除成功率，单星故障和双星故障场景下能分别达到99.97%和99.97%，这是由于本文方法引入了故障先验信息，在单故障及多故障场景下的后验概率对故障卫星是否完全排除高度敏感。

与RS法相比，本文方法将在计算效率上大幅提升。在单/双星故障及双/三星座4种场景下，统计2类方法在整个故障排除过程中的总耗时及参与计算的故障模式总数。算法基于MATLAB平台在个人电脑上运行，电脑配置为：Intel(R) Core(TM) i9-12900K CPU @3.90 GHz and 128.00 GB RAM。在图10中展示了2类方法在各场景下单历元的最大故障排除计算时间和所计算故障模式的平均值。相同星座配置下，双星故障场景与单星故障场景相比，RS法的最大故障排除计算时间及平均所计算故障模式有明显增加，而本文方法在2类场景下对比差异较小。与双星座相比，在三星座配置下，RS法计算效率进一步降低，本文方法计算效率也呈现降低趋势。三星座下待监测故障模式数量的上升是导致计算效率相比双星座进一步降低的原因。RS法进行迭代的次数不断增加，对应计算时间也大幅上升。而本文方法面对不同星座场景时，均一步确定故障模式作为最终排除选项，无需进行额外迭代，仅通过一次遍历待监测故障模式即可实现最终排除选项的确定，故在星座数增多时并不会导致本文方法的计算效率明显下降。

图11展示了3类基于FFD排除方法故障情况下的定位结果。虽然RS法的排除成功率与本文方法相当，但其排除效率与本文方法相比较低。因此，仅展示PV、Chi和本文方法的定位结果对比。

从图11可以看出，单星故障场景下，3类方法的定位误差均较小。这是因为PV法与本文方法均能以较高的排除成功率排除故障卫星。而Chi法将会误排导致排除后的可视卫星数低于本文方法，但由于此时观测量大量冗余，损失1～2颗卫星并不一定会对定位误差造成影响。然而，误排所产生的影响主要表现在ARAIM的可用性上，健康可视卫星的剔除可能会导致卫星几何急剧恶化，降低

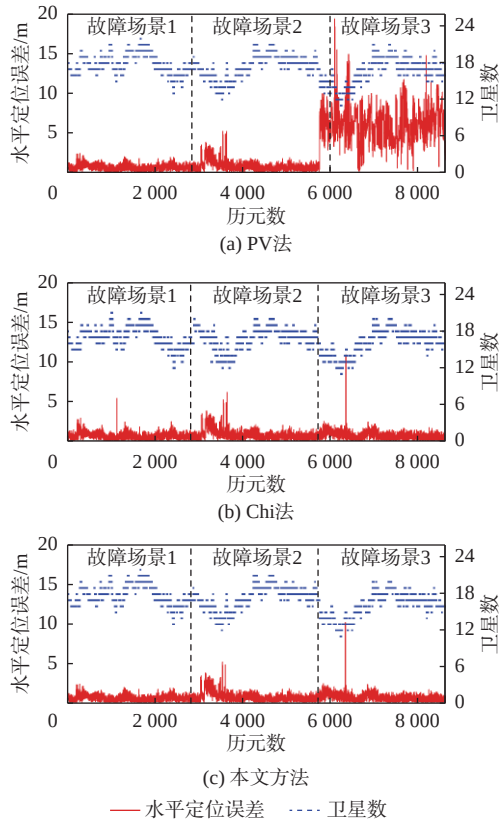


图11 3类基于FFD故障排除方法定位误差对比

Fig. 11 Comparison of positioning errors of three kinds of fault exclusion methods based on FFD

ARAIM可用性，将结合后续实验进行详细讨论。双星故障场景下，PV法的定位误差显著增加，这是由于在多故障场景下该方法会产生较多漏排，导致故障卫星参与定位影响定位精度，与PV法相比，在双星座、双星故障场景下本文方法可减少ARAIM 59.55%的定位误差。

通过上述分析，在充足的冗余观测量下，Chi法存在的误排虽然并不一定会导致定位误差明显增加，但其对ARAIM保护水平(protection level, PL)的影响极为明显[19]。PL是ARAIM重要的输出参数，当PL小于告警限值(alarm limit, AL)时，表明当前的ARAIM结果可用，否则不可用[13,20]。本文的PL计算是依据文献[13]推导的PL计算方法。通过对比2类方法的水平保护水平(horizontal protection level, HPL)进一步分析误排对ARAIM可用性的威胁。图12展示了分别根据Chi法和本文方法排除故障卫星后的HPL。根据图12，本文方法的HPL明显小于Chi法，从而能够更严格地限制定位误差。除此以外，统计其他站点的HPL发现少数历元会有HPL值大于水平告警极限(horizontal alarm limit, HAL)的情况，这将会导致ARAIM在这些时刻不可用。若导航服务过程中HPL过于保守，ARAIM将频繁不可用，从而导致导航服务中断。

与 Chi 法相比, 本文方法最多可将平均 HPL 降低 4.5%。

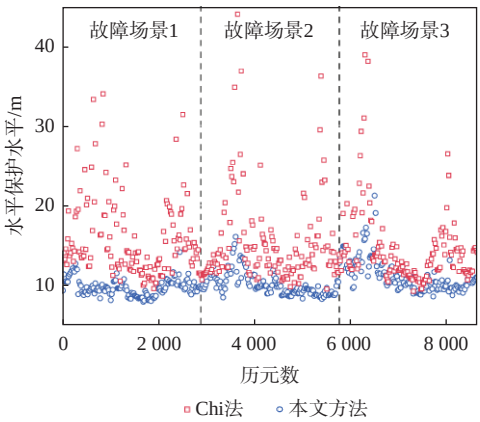


图 12　本文方法与 Chi 法 HPL 对比

Fig. 12　Comparison of the HPL between the proposed method and Chi method

4　结　论

故障检测与排除是 ARAIM 的核心功能, 为解决传统递归式故障排除方法计算负担较大及目前基于 FFD 的故障排除方法错误排除风险较高的问题, 本文基于 MAP 估计提出了一种异常观测量特征决策策略的 ARAIM 故障排除框架。通过仿真分析验证本文方法的优势, 并选取 IGS 中心 COCO 站点实测数据实验分析, 与 3 类传统方法进行对比验证, 得出如下结论:

1) 本文方法可有效避免故障错误排除, 进而提升排除成功率。考虑故障先验信息将极大程度地避免健康观测量误排情况, 因而借助各故障模式的似然函数显著差异可有效控制异常观测量漏排事件发生。

2) 本文方法在计算效率、定位精度及可用性方面对比 3 类传统方法均有提升。本文方法与 RS 法相比, 在各故障场景下减少计算时间最高可达 77.58%, 与 PV 法相比, 在双星座、双星故障场景下减小 ARAIM 定位误差达 59.55%, 与 Chi 法相比, 在各故障场景下降低 ARAIM 平均 HPL 达 4.5%。

总的来说, 本文基于 MAP 估计提出的一种异常观测量特征决策策略的 ARAIM 故障排除框架实现了导航定位过程中异常观测量的准确排除, 严格保证了 ARAIM 的可用性和连续性。

参考文献（References）

[1] 喻思琪, 张小红, 郭斐, 等. 卫星导航进近技术进展[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 11-32.
Yu S Q, Zhang X H, Guo F, et al. Recent advances in precision approach based on GNSS[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 11-32(in Chinese).

[2] 赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. GNSS 单系统及多系统组合完好性分析[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2020, 45(1): 72-80.
Zhao A, Yang Y X, Xu Y Y, et al. Integrity analysis of gnss single system and multi-system combination[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(1): 72-80(in Chinese).

[3] 王尔申, 杨福霞, 庞涛, 等. BDS/GPS 组合导航接收机自主完好性监测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 684-690.
Wang E S, Yang F X, Pang T, et al. BDS/GPS combined navigation receiver autonomous integrity monitoring algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(4): 684-690(in Chinese).

[4] Zhai Y W, Joerger M, Pervan B. Continuity and availability in dual-frequency multi-constellation ARAIM[C]//Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015). Tampa: ION, 2015: 664-674.

[5] 程春, 赵玉新, 李亮, 等. BDS 空间信号异常实时检测与排除方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(4): 603-616.
Cheng C, Zhao Y X, Li L, et al. Real-time detection and elimination method for BDS signal-in-space anomalies[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(4): 603-616(in Chinese).

[6] Blanch J, Walter T, Enge P. RAIM with optimal integrity and continuity allocations under multiple failures[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(3): 1235-1247.

[7] Joerger M, Pervan B. Fault detection and exclusion using solution separation and Chi-squared ARAIM[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(2): 726-742.

[8] Ge Y S, Wang Z P, Zhu Y B. Reduced ARAIM monitoring subset method based on satellites in different orbital planes[J]. GPS Solutions, 2017, 21(4): 1443-1456.

[9] Wang S Z, Zhai Y W, Chi C, et al. Implementation and analysis of fault grouping for multi-constellation advanced RAIM[J]. Advances in Space Research, 2023, 71(11): 4765-4786.

[10] Gerbeth D, Felux M, Circiu M S, et al. Optimized selection of satellite subsets for a multi-constellation GBAS[C]//Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Monterey: ION, 2016: 360-367.

[11] Walter T, Blanch J, Kropp V. Satellite selection for multi-constellation SBAS[C]//Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016). Portland: ION, 2016: 1350-1359.

[12] Zhai Y W, Pervan B, Joerger M. H-ARAIM exclusion: requirements and performance[C]//Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016). Portland: ION, 2016: 1713-1725.

[13] Blanch J, Walter T, Enge P, et al. Baseline advanced RAIM user algorithm and possible improvements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(1): 713-732.

[14] Zhai Y W, Zhan X Q, Chang J. An integrated fault detection and exclusion scheme to support aviation navigation[J]. Aerospace Systems, 2020, 3(1): 29-39.

[15] Chan F C, Joerger M, Khanafseh S, et al. Bayesian fault-tolerant position estimator and integrity risk bound for GNSS navigation[J]. Journal of Navigation, 2014, 67(5): 753-775.

[16] Joerger M, Chan F C, Pervan B. Solution separation versus residual-

based RAIM: solution separation versus residual-based RAIM[J]. Navigation, 2014, 61(4): 273-291.

[17] Joerger M, Chan F C, Langel S, et al. RAIM detector and estimator design to minimize the integrity risk[C]//Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012). Nashville: ION, 2012: 2785-2807.

[18] Bang E, Milner C, Macabiau C. Cross-correlation effect of ARAIM test statistic on false alarm risk[J]. GPS Solutions, 2020, 24(4): 107.

[19] Blanch J, Walter T, Enge P. Exclusion for advanced RAIM: requirements and a baseline algorithm[C]//Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. San Diego: ION, 2014: 99-107.

[20] 李瑞杰, 李亮, 蒋家昌, 等. 基于多星最差故障搜索的 RAIM 完好性风险估计方法[J]. 航空学报, 2024, 45(2): 328684.
Li R J, Li L, Jiang J C, et al. RAIM integrity risk estimation method based on worst multi-satellite faults searching[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(2): 328684(in Chinese).

Fault exclusion method based on maximum a posteriori probability estimation for multi-constellation ARAIM

LI Liang, CHENG Li, LI Ruijie*, SHI Xiuyun, WEI Yilin

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Accurate detection and exclusion of faulty measurements is the key for advanced receiver autonomous integrity monitoring (ARAIM) to ensure the safety of navigation service in the aviation field. With the deployment of new constellations such as Beidou and GLONASS, the number of fault modes to be monitored increases sharply, and it is difficult for traditional ARAIM to take into account the success rate and computational efficiency at the same time by using recursive search method. This paper presents a multi-constellation ARAIM fault exclusion method based on maximum a posteriori probability (MAP). On the one hand, this method realizes the risk control of misarrangement of healthy satellites by combining the prior probability information of faulty measurements. On the other hand, the posterior probability distribution model of faulty measurements under the hypothesis of potential failure mode is accurately constructed based on the maximum likelihood estimation to avoid the occurrence of incomplete exclusion events of faulty measurements. Additionally, this article incorporates the suggested MAP fault exclusion approach with the fault feature judgment of faulty measurements to create an ARAIM fault exclusion framework that enhances fault exclusion efficiency. Simulation and experimental results show that, compared with the traditional ARAIM fault exclusion method, the proposed method can improve ARAIM fault exclusion efficiency and ensure the accuracy of fault exclusion in both single-satellite and multi-satellite fault scenarios.

Keywords: faulty measurements; ARAIM; fault exclusion; maximum a posteriori probability; multi-constellation

Received: 2024-06-07; **Accepted**: 2024-09-27; **Published Online**: 2024-11-06 14:20

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241106.1028.002

Foundation items: National Key Research and Development Program (2021YFB3901300); the National Natural Science Foundation of China (62373117,62403158)

* **Corresponding author**. E-mail: liruijie_heu@hrbeu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0333

不规则引力场下的航天器自适应预设性能姿轨跟踪控制

李俊，朱宏玉*
(北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191)

摘 要：深空探测是当今世界高新科技中极具挑战性的领域之一，小行星探测作为深空探测的重要方向，其具有重要的科学意义。研究了小行星引力场不规则项参数及航天器质量特性参数同时存在不确定性时刚体航天器的姿轨跟踪控制问题，基于不规则引力场下李群描述的航天器预设性能误差运动模型，提出一种复合自适应姿轨跟踪控制器。针对航天器质量特性参数的不确定性，基于浸入与不变（I&I）理论和动态回归扩展方法，设计了收敛性能良好的参数更新律对其进行估计。利用质量特性参数估计值设计了扩张状态观测器，对由引力场不规则项的不确定及外部干扰构成的系统总扰动进行估计。基于上述参数更新律和扰动估计补偿得到了复合自适应预设性能终端滑模控制器。通过 Lyapunov 理论证明了所提控制器保证姿轨跟踪误差、扰动估计误差及质量特性参数估计误差有界。仿真结果表明：动态回归扩展方法的引入提高了质量特性参数估计的收敛性能，在此基础上，扰动估计补偿的加入提高了姿轨跟踪控制精度。

关 键 词：航天器姿轨一体化控制；不规则引力场；参数不确定；扩张状态观测器；自适应预设性能控制
中图分类号：V448.2
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2639-12

小行星探测作为深空探测的重要方向，具有重要的科学意义[1]。科学探索、行星防御及矿产资源这 3 个方面驱动人们开展对小行星的探索[2]。迄今，各个航天国家开展了一系列的小行星探测任务，如美国的 NEAR Shoemaker、欧洲的 Rosetta 号探测器、日本的 Hayabusa 和 Hayabusa 2 及中国的“嫦娥 2 号”探测器[3]。航天器的轨道和姿态控制技术是小行星近距离探测任务（如绕飞、着陆及悬停）中的一项关键技术，但小行星附近复杂的动力学环境，如不规则引力场、引力姿轨耦合效应[4]、太阳光压等外部干扰及航天器姿轨运动本身的耦合关系，导致单独对姿轨进行控制难以获得满意的控制结果，因此，要实现小行星附近姿轨的高精度控制，需要进行姿轨一体化控制。

针对不规则小行星附近的航天器姿轨一体化控制问题，滑模控制、自适应控制及鲁棒控制等方法被广泛应用。文献 [5] 针对小行星自主悬停任务，在几何力学的框架下，设计了基于线性滑模的全局姿轨跟踪控制器。文献 [6] 在李群 SE(3) 的框架下，提出一种有限时间控制方案用于刚体航天器在翻滚小行星的定点悬停任务，但上述控制器的设计是在不规则引力场参数及质量特性参数确定情况下进行设计的。Vukovich 等针对小行星附近刚体航天器的姿轨耦合控制问题[7]，开发了鲁棒自适应控制算法来处理参数不确定性和外部扰动，并在小行星着陆和悬停任务中验证了上述方法的有效性。文献 [8] 针对小行星绕飞任务，基于对偶四元数提出了一种非奇异自适应终端滑模控制器来处

收稿日期：2024-05-17；录用日期：2024-08-09；网络出版时间：2024-09-11 12:14
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240910.1426.003
*通信作者. E-mail：henry.jewel@139.com

引用格式：李俊，朱宏玉. 不规则引力场下的航天器自适应预设性能姿轨跟踪控制 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2639-2650.
Li J，Zhu H Y. Adaptive prescribed performance attitude and orbit tracking control of spacecraft in irregular gravitational fields [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2639-2650（in Chinese）.

理参数不确定、外部干扰等问题。但上述自适应控制器是基于等价确定性原则进行设计的，这将导致参数估计误差与状态跟踪误差之间相互耦合，进而导致系统闭环性能的下降。文献[9-10]针对惯量参数不确定情况下的姿态跟踪控制问题，设计了基于动态放缩法的浸入与不变(immersion and invariance, I&I)控制器，并与传统的基于等价确定性原则的自适应控制器进行了仿真对比分析，结果表明，I&I控制器在控制精度上有较大优势。文献[11]为航天器在小行星附近的闭合轨道和悬停控制开发了一种基于I&I的自适应轨道控制器，以Eros433为目标星进行数值仿真，验证了其有效性。另外，在某些情况下，自适应控制器除了能够实现状态的跟踪控制，还应提供参数信息，而I&I理论虽然在控制性能上得到了提升，但与等价确定性原则一样，只有在满足持续激励条件的前提下才能实现参数估计误差的收敛。文献[12-13]针对惯量不确定情况下的刚体航天器姿态跟踪控制问题，提出了基于I&I理论和动态回归扩展的自适应控制器，实现了姿态误差的渐进收敛到0及有限激励条件下的惯量估计误差收敛到0。文献[14]开发了一种基于动态回归扩展的自适应控制系统，用于对围绕小行星的航天器姿态轨迹进行跟踪，仿真结果表明，该系统能够精确估计模型参数。但上述自适应控制器是在系统无外扰的前提下进行设计的。

小行星近距离探测任务中，航天器的燃料消耗及配置变化会导致其质量特性发生变化。同时，目前对小行星的近距离探测任务较少，缺少准确的小行星质量分布等数据，因此，小行星引力场不规则项参数无法准确获得，该参数存在不确定性。本文主要研究上述2种不确定同时存在时航天器高精度姿轨跟踪控制器的设计问题。

本文主要创新点如下：

1) 将I&I理论、动态回归扩展方法与扩张状态观测器相结合，使航天器可以在质量特性参数不确定、存在由小行星引力场不规则项参数不确定及外部干扰构成的系统总扰动的情况下，实现姿轨的高精度控制。

2) 将预设性能控制、终端滑模控制引入控制器的设计中，保证了系统的动态响应和稳态精度满足要求。

1 不规则引力场下的航天器姿轨一体化运动模型

基于小行星惯性坐标系$F_{\mathrm{I}}(O_{\mathrm{I}}x_{\mathrm{I}}y_{\mathrm{I}}z_{\mathrm{I}})$、固连坐标系$F_{\mathrm{O}}(O_{\mathrm{O}}x_{\mathrm{O}}y_{\mathrm{O}}z_{\mathrm{O}})$及航天器本体坐标系$F_{\mathrm{B}}(O_{\mathrm{B}}x_{\mathrm{B}}y_{\mathrm{B}}z_{\mathrm{B}})$建立不规则引力场下基于李群SE(3)的姿轨一体化运动模型，坐标系示意图如图1所示。

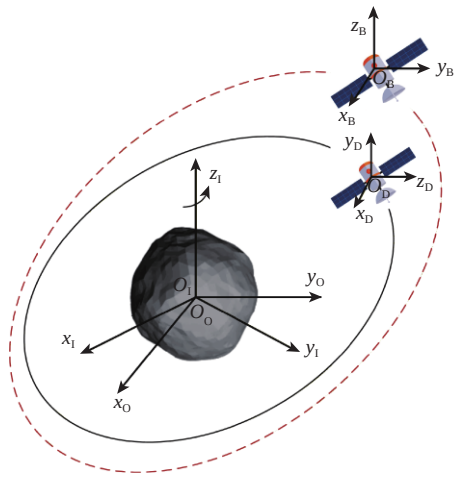


图1 参考坐标系示意

Fig. 1 Diagram of reference coordinate system

1.1 基于SE(3)的航天器姿轨一体化模型

李群SE(3)是刚体上平动和转动运动的集合，具体表示为$\mathrm{SE}(3)=\mathbf{R}^3\ltimes\mathrm{SO}(3)$，即$\mathbf{R}^3$与SO(3)的半直积，半直积表示作用于平移上的旋转，其中，$\mathbf{R}^3$为航天器的位置向量，SO(3)为特殊正交群，表示航天器的姿态，SE(3)以4×4的矩阵$\boldsymbol{g}$来表示航天器在三维空间内的位姿信息，具体表示形式为[15]

$$\boldsymbol{g}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}} & \boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}\\ \boldsymbol{0}_{1\times3} & 1\end{bmatrix}\in\mathrm{SE}(3) \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}$为本体系到惯性系的坐标变化矩阵；$\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}$为航天器位置矢量在惯性系下的分量。航天器的一体化速度向量$\boldsymbol{\xi}$定义为

$$\boldsymbol{\xi}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}\\ \boldsymbol{v}^{\mathrm{B}}\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^6 \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{v}^{\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}$为航天器本体坐标系相对于惯性系的速度和角速度在本体系下的投影。

为在李群下描述航天器动力学方程，需要定义李群SE(3)和李代数se(3)对应的伴随算子。$\boldsymbol{g}\in\mathrm{SE}(3)$的伴随算子定义为

$$A_{\mathrm{d},\boldsymbol{g}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}} & \boldsymbol{0}_{3\times3}\\ \left(\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}\right)^{\times}\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^{6\times6} \tag{3}$$

式中：$(\cdot)^{\times}$为向量的叉乘反对称矩阵；$A_{\mathrm{d},\boldsymbol{g}}$为位姿的伴随算子；$a_{\mathrm{d}}$为速度矢量的伴随算子。算子$(\cdot)^{\vee}$表示映射$\mathbf{R}^6\rightarrow\mathrm{se}(3)$速度向量$\boldsymbol{\xi}$到se(3)的映射为

$$\boldsymbol{\xi}^{\vee}=\begin{bmatrix}\left(\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}\right)^{\times} & \boldsymbol{v}^{\mathrm{B}}\\ \boldsymbol{0}_{1\times3} & 0\end{bmatrix}\in\mathrm{se}(3)\in\mathbf{R}^{4\times4} \tag{4}$$

$\boldsymbol{\xi}^{\vee}\in\mathrm{se}(3)$对应的伴随算子为

$$a_{\mathrm{d},\boldsymbol{\xi}}=\begin{bmatrix}\left(\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}\right)^{\times} & \boldsymbol{0}_{3\times3}\\ \left(\boldsymbol{v}^{\mathrm{B}}\right)^{\times} & \left(\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}\right)^{\times}\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^{6\times6} \tag{5}$$

航天器姿轨动力学与运动学方程为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{R}}^{\mathrm{I}}=\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}\boldsymbol{v}^{\mathrm{B}}\\ \dot{\boldsymbol{C}}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}=\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}(\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}})^{\times}\end{cases}\tag{6}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{\omega}}^{\mathrm{B}}+(\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}})^{\times}\boldsymbol{J}\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}=\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{d}}+\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{g}}\\ m\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{B}}+m(\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}})^{\times}\boldsymbol{v}^{\mathrm{B}}=\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{f}_{\mathrm{d}}+\boldsymbol{f}_{\mathrm{g}}\end{cases}\tag{7}$$

可以得到基于 SE(3) 的姿轨一体化运动模型:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{g}}=\boldsymbol{g}\boldsymbol{\xi}^{\vee}\\ \boldsymbol{\Xi}\dot{\boldsymbol{\xi}}=\boldsymbol{a}_{\mathrm{d},\boldsymbol{\xi}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Xi}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{d}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g}}\end{cases}\tag{8}$$

式中:

$$\boldsymbol{\Xi}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}&\boldsymbol{0}_{3\times3}\\ \boldsymbol{0}_{3\times3}&m\boldsymbol{I}_{3\times3}\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^{6\times6}\tag{9}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{c}}\\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^{6},\\ \boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{d}}\\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{d}}\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^{6}\\ \boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{g}}\\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{g}}\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^{6}\end{cases}\tag{10}$$

其中, $\boldsymbol{J}$ 为航天器的惯性矩阵; m 为航天器质量; $\boldsymbol{\Xi}$ 为航天器转动惯量和质量构成质量特性矩阵; $\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}$、$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g}}$ 分别为航天器的控制输入、太阳光压、未建模项等外部干扰及小行星引力项; $\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{c}}$、$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{g}}$、$\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}$、$\boldsymbol{f}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{f}_{\mathrm{g}}$ 分别为控制力和力矩、干扰力和力矩、重力和重力梯度力矩。采用球谐函数对不规则引力场进行建模, 由于高阶项的影响较小[16], 因此, 采用前 2 阶项来描述引力场, 将高阶项视为未建模项, 最终得到小行星固连坐标系下采用直角坐标描述的引力加速度函数:

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{g}}=\left[\frac{\partial U}{\partial x},\frac{\partial U}{\partial y},\frac{\partial U}{\partial z}\right]^{\mathrm{T}}\tag{11}$$

式中:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial U}{\partial x}=-\dfrac{\mu x}{\|\boldsymbol{r}\|^{3}}-\dfrac{\mu C_{20}x}{\|\boldsymbol{r}\|^{5}}+\dfrac{6\mu C_{22}x}{\|\boldsymbol{r}\|^{5}}+\\ \quad\dfrac{5\mu C_{20}x(x^{2}+y^{2}-2z^{2})}{2\|\boldsymbol{r}\|^{7}}-\dfrac{15\mu C_{22}x(x^{2}-y^{2})}{\|\boldsymbol{r}\|^{7}}\\ \dfrac{\partial U}{\partial y}=-\dfrac{\mu y}{\|\boldsymbol{r}\|^{3}}-\dfrac{\mu C_{20}y}{\|\boldsymbol{r}\|^{5}}-\dfrac{6\mu C_{22}y}{\|\boldsymbol{r}\|^{5}}+\\ \quad\dfrac{5\mu C_{20}y(x^{2}+y^{2}-2z^{2})}{2\|\boldsymbol{r}\|^{7}}-\dfrac{15\mu C_{22}y(x^{2}-y^{2})}{\|\boldsymbol{r}\|^{7}}\\ \dfrac{\partial U}{\partial z}=-\dfrac{\mu z}{\|\boldsymbol{r}\|^{3}}+\dfrac{2\mu C_{20}z}{\|\boldsymbol{r}\|^{5}}+\\ \quad\dfrac{5\mu C_{20}z(x^{2}+y^{2}-2z^{2})}{2\|\boldsymbol{r}\|^{7}}-\dfrac{15\mu C_{22}z(x^{2}-y^{2})}{\|\boldsymbol{r}\|^{7}}\end{cases}\tag{12}$$

式中: μ 为小行星引力常数; $\boldsymbol{r}$ 为航天器位置矢量。

对上述加速度进行积分, 并将其投影到航天器本体系中, 同时考虑航天器与小行星不规则引力场之间的相互作用而产生的作用于航天器上的力, 最终得到刚体航天器所受到的小行星不规则引力为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{f}_{\mathrm{g}}=\boldsymbol{C}_{\mathrm{O}}^{\mathrm{B}}\int\boldsymbol{a}_{\mathrm{g}}\mathrm{d}m+\left(\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{gs}}=\boldsymbol{f}_{\mathrm{g0}}+\boldsymbol{f}_{\mathrm{gC2}}-\\ \frac{3\mu}{\|\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}\|^{5}}\left(\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}-\frac{3\mu\mathrm{tr}(\boldsymbol{J})}{2\|\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}\|^{5}}\left(\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}+\\ \frac{15\mu}{2\|\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}\|^{5}}\left(\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}\left(\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}\end{aligned}\tag{13}$$

式中: $\boldsymbol{f}_{\mathrm{g0}}$ 为球谐函数中的主项; $\boldsymbol{f}_{\mathrm{gC2}}$ 为小行星不规则形状导致的引力项; $\boldsymbol{f}_{\mathrm{gs}}$ 为航天器自身惯量分布导致的引力梯度修正力; $\boldsymbol{C}_{\mathrm{O}}^{\mathrm{B}}=\left(\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{O}}^{\mathrm{I}}$, $\boldsymbol{C}_{\mathrm{O}}^{\mathrm{I}}$ 为小行星固连坐标系到惯性坐标系的坐标变换矩阵; $\mathrm{tr}(\boldsymbol{J})$ 为惯量的迹。同样, 航天器与小行星不规则引力场之间的相互作用会产生作用于航天器的重力梯度力矩, 形式如下:

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{g}}=\frac{3\mu}{\|\boldsymbol{R}^{\mathrm{B}}\|^{5}}\boldsymbol{R}^{\mathrm{B}}\times\boldsymbol{J}\boldsymbol{R}^{\mathrm{B}}\tag{14}$$

1.2　航天器姿轨一体化误差运动模型

本文需要解决的问题是小行星不规则引力场中航天器姿轨跟踪控制问题, 因此, 需要根据上述基于 SE(3) 的航天器姿轨一体化动力学模型, 求解姿轨一体化误差动力学模型, 用于后续姿轨跟踪控制器的设计。

设航天器的期望位姿为 $\boldsymbol{g}_{\mathrm{d}}$, 实际位姿为 $\boldsymbol{g}$, 则航天器的位姿误差 $\boldsymbol{g}_{\mathrm{e}}$ 为

$$\boldsymbol{g}_{\mathrm{e}}=\boldsymbol{g}_{\mathrm{d}}^{-1}\boldsymbol{g}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}&\boldsymbol{R}_{\mathrm{e}}\\ \boldsymbol{0}_{1\times3}&1\end{bmatrix}\tag{15}$$

式中: $\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}=(\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}})_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}}$, $\boldsymbol{R}_{\mathrm{e}}=(\boldsymbol{C}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{I}})_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}-\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{I}})$, 下标 d 表示期望位姿的相关参数。

上述位姿误差 $\boldsymbol{g}_{\mathrm{e}}$ 的矩阵结构不便于控制器的设计, 因此, 常用 SE(3) 对应的指数坐标来描述位姿误差[17], 指数坐标的相关定义及求解公式为

$$\boldsymbol{\eta}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Phi}\\ \boldsymbol{\phi}\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^{6}\tag{16}$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}$ 为姿态误差; $\boldsymbol{\phi}$ 为位置误差。指数坐标通过对数映射得到, 具体公式为

$$\boldsymbol{\eta}^{\vee}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Phi}^{\times}&\boldsymbol{\phi}\\ \boldsymbol{0}_{1\times3}&0\end{bmatrix}\in\mathbf{R}^{4\times4}\tag{17}$$

$\boldsymbol{\Phi}^{\times}$ 和 $\boldsymbol{\phi}$ 可以通过对误差构型 $\boldsymbol{g}_{\mathrm{e}}$ 的相关计算得到, 具体求解公式见文献 [17]。

在航天器本体坐标系下描述航天器速度误差为

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}}=\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}\\ \Delta\boldsymbol{v}^{\mathrm{B}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{\xi}-A_{\mathrm{d},\boldsymbol{g}_{\mathrm{e}}^{-1}}\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{d}}\tag{18}$$

式中: $\boldsymbol{\xi}$ 为航天器实际速度; $\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}$ 和 $\boldsymbol{v}^{\mathrm{B}}$ 分别为角速度

误差和速度误差；$\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{d}}$为期望速度。

因此，得到误差运动学方程为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}=\boldsymbol{G}(\boldsymbol{\eta})\tilde{\boldsymbol{\xi}} \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{\eta})$的具体形式见文献[15]。

进一步对速度误差式(18)进行求导[5]，可以得到航天器姿轨一体化相对动力学模型为

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}}=\boldsymbol{H}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g0}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}\right)+\Delta\boldsymbol{d} \tag{20}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{d}$为外部干扰项。

$$\begin{cases}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g0}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_{\mathrm{g0}}\\ \boldsymbol{0}_{3\times1}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_{\mathrm{gC2}}\\ \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{g}}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{\Xi}^{-1}a^{*}_{\mathrm{d},\tilde{\boldsymbol{\xi}}}\boldsymbol{\Xi}\tilde{\boldsymbol{\xi}}+a_{\mathrm{d},\tilde{\boldsymbol{\xi}}}A_{\mathrm{d},\boldsymbol{g}_{\mathrm{c}}^{-1}}\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{d}}-A_{\mathrm{d},\boldsymbol{g}_{\mathrm{c}}^{-1}}\dot{\boldsymbol{\xi}}_{\mathrm{d}} \tag{22}$$

进一步地，为使小行星探测器满足预定的性能指标，实现姿轨高精度控制，考虑对航天器的姿轨误差$\boldsymbol{\eta}$实施约束使其收敛时间、超调量及稳态误差处于设定范围内，姿轨误差$\boldsymbol{\eta}$满足以下不等式约束：

$$\left|(\boldsymbol{\eta})_i\right|<(\rho_{0i}-\rho_{\infty i})\mathrm{e}^{-\beta_i t}+\rho_{\infty i}\qquad i\in\{1,2,\cdots,6\} \tag{23}$$

式中：$(\boldsymbol{\eta})_i$为姿轨误差向量$\boldsymbol{\eta}$的第i个分量；ρ_{0i}为位姿初始误差；$\rho_{\infty i}$为位姿稳态控制精度；β_i与位姿收敛时间有关。

由于系统式(20)具有较强的非线性和耦合特性，直接基于其设计控制器以保证姿轨误差满足不等式约束式(23)较难实现，因此，需要利用归一化和对数映射函数$f(x)=\frac{1}{2}\ln\frac{1+x}{1-x}$对上述姿轨误差的不等式约束进行转化以方便控制器的设计，最终可得到如下转化后的误差变量：

$$(\boldsymbol{\varepsilon})_i=\frac{1}{2}\ln\frac{1+(\boldsymbol{e})_i}{1-(\boldsymbol{e})_i} \tag{24}$$

式中：$(\boldsymbol{\varepsilon})_i\in(-\infty,+\infty)$；$(\boldsymbol{e})_i=\dfrac{(\boldsymbol{\eta})_i}{\rho_i}$。

根据映射函数$f(x)$的数学特性可知：当位姿误差$\boldsymbol{\eta}$满足性能函数约束时，归一化误差$\boldsymbol{e}\in(-1,1)$，进而对数映射后的变量$\boldsymbol{\varepsilon}$有界。因此，反过来只需要控制变量$\boldsymbol{\varepsilon}$有界，就可以保证位姿误差$\boldsymbol{\eta}$满足性能约束，即通过上述流程，将位姿误差存在不等式约束下的控制器设计问题转化为状态量有界的控制器设计问题。

基于对数映射后的变量$\boldsymbol{\varepsilon}$和系统模型式(20)求解新的系统模型。为便于描述新的系统模型，定义以下变量：

$$\boldsymbol{Q}=-\boldsymbol{P}^{-1}\dot{\boldsymbol{P}} \tag{25}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{P}^{-1} \tag{26}$$

式中：

$$\boldsymbol{P}=\mathrm{diag}(\rho_i)\in\mathbf{R}^{6\times6}\qquad i\in\{1,2,3,\cdots,6\} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{\eta} \tag{28}$$

$$\boldsymbol{T}=\mathrm{diag}\left(\frac{\partial(\boldsymbol{\varepsilon})_i}{\partial(\boldsymbol{e})_i}\right)=\mathrm{diag}\left(\frac{1}{1-(\boldsymbol{e})_i^2}\right)\qquad i\in\{1,2,\cdots,6\} \tag{29}$$

推导变量$\boldsymbol{\varepsilon}$的等效运动学模型，对式(24)求导可得

$$(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}})_i=\frac{\partial(\boldsymbol{\varepsilon})_i}{\partial(\boldsymbol{e})_i}(\dot{\boldsymbol{e}})_i \tag{30}$$

最终可以得到预设性能误差运动模型为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}=\boldsymbol{\Gamma}\left(\boldsymbol{G}\left(\boldsymbol{\eta}\right)\tilde{\boldsymbol{\xi}}+\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\eta}\right)\\ \dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}}=\boldsymbol{H}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g0}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}\right)+\Delta\boldsymbol{d}\end{cases} \tag{31}$$

2 不确定条件下姿轨跟踪控制器设计

本节研究质量特性参数和小行星引力场不规则项C_{20}、C_{22}参数存在不确定情况下，航天器高精度姿轨跟踪控制器的设计问题。针对小行星引力场不规则项C_{20}、C_{22}参数的不确定性，采用扩张状态观测器对引力场的不规则项不确定影响进行估计并补偿到控制系统中。同时，由于上述扩张状态观测器的设计过程中需要质量特性参数信息，因此，基于I&I理论和动态回归扩展方法设计一种收敛性能较好的参数更新律对质量特性参数进行估计，并利用估计结果进行扩张状态观测器的设计。基于上述扩张状态观测器和参数更新律可以得到复合自适应预设性能终端滑模控制器。上述控制系统框架如图2所示。

2.1 终端滑模面构建

基于上述动力学模型构建如下形式的滑模面：

$$\boldsymbol{S}=\tilde{\boldsymbol{\xi}}+\boldsymbol{C}_1\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{C}_2\mathrm{sig}^{\alpha}(\boldsymbol{\varepsilon}) \tag{32}$$

式中：$\boldsymbol{C}_1$、$\boldsymbol{C}_2\in\mathbf{R}^{6\times6}$为滑模面参数，$\alpha$取值范围为0～1。

对滑模面式(32)进行求导，将姿轨误差转化后的动力学模型式(31)代入其中可得

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Xi}\dot{\boldsymbol{S}}=&\boldsymbol{\Xi}\boldsymbol{H}+\boldsymbol{\Xi}\left(\boldsymbol{C}_1+\alpha\boldsymbol{C}_2\Lambda^{\alpha-1}(\boldsymbol{\varepsilon})\right)\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}+\\ &\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g0}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}+\Delta\boldsymbol{d}=\\ &\boldsymbol{\Xi}\boldsymbol{H}_1+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g0}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}+\boldsymbol{\Xi}\Delta\boldsymbol{d}\end{aligned} \tag{33}$$

式中：$\boldsymbol{H}_1=\boldsymbol{H}+\left(\boldsymbol{C}_1+\alpha\boldsymbol{C}_2\Lambda^{\alpha-1}(\boldsymbol{\varepsilon})\right)\boldsymbol{\Gamma}\left(\boldsymbol{G}\left(\boldsymbol{\eta}\right)\tilde{\boldsymbol{\xi}}+\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\eta}\right)$。

进一步考虑引力场不规则项C_{20}、C_{22}参数的不确定性后，$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}=\boldsymbol{\Gamma}^{0}_{\mathrm{gC2}}+\Delta\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}$，代入式(32)中，可得如下动力学方程：

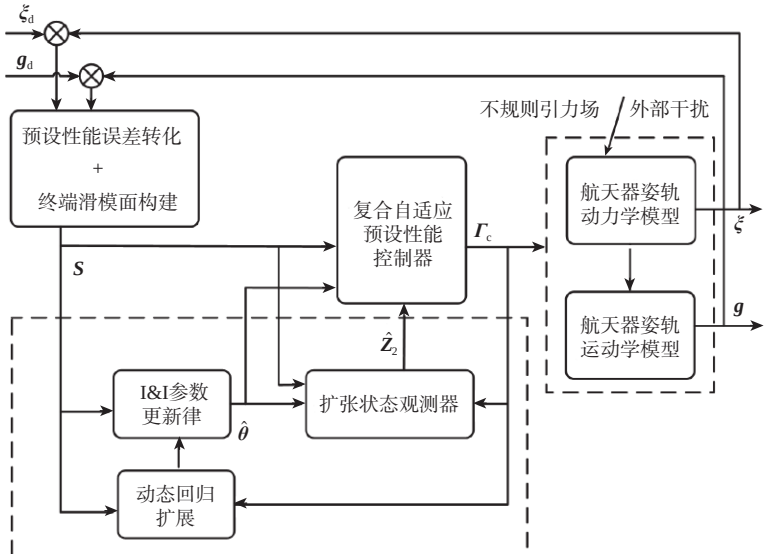


图 2　控制系统框架

Fig. 2　Control system frame

$$\Xi\dot{S}=\Xi H_1+\Gamma_c+\Gamma_{g0}+\Gamma_{gC2}^0+\Delta d_1 \tag{34}$$

式中: $\Delta d_1=\Xi\Delta d+\Delta\Gamma_{gC2}^0$, $\Delta\Gamma_{gC2}^0$为小行星引力不规则项的不确定项; Γ_{gC2}^0为小行星引力不规则项的观测值。

后续自适应控制器和扩张状态观测器的设计基于式(34)动力学方程。

2.2　引力场不规则项参数不确定

从动力学方程式 (34) 可得, 引力场不规则项参数不确定的表现形式为干扰力, 因此, 本节设计扩张状态观测器, 对由引力场不规则项参数的不确定性及外部干扰构成的系统总扰动进行估计, 并补偿到控制输入中, 以此提高姿轨控制效果, 实现高精度控制。同时, 在扩张状态观测器的设计过程中, 先假定质量特性参数已知, 后续设计具有参数辨识功能的参数更新律, 将参数估计值输入到扩张状态观测器中替代真值。

针对动力学方程式 (34), 将ΞS定义为系统状态Z_1, Δd_1为扩张状态Z_2, 可得新的动力学方程为

$$\begin{cases}\dot{Z}_1=\Xi H_1+\Gamma_c+\Gamma_{g0}+\Gamma_{gC2}^0+Z_2\\ \dot{Z}_2=g(t)\end{cases} \tag{35}$$

式中: $g(t)$为扩张状态的一阶导数。

根据上述动力学模型设计扩张状态观测器为

$$\begin{cases}\dot{\hat{Z}}_1=\Xi H_1+\Gamma_c+\Gamma_{g0}+\Gamma_{gC2}^0+\hat{Z}_2-b_1e_1\\ \dot{\hat{Z}}_2=-b_2e_1\end{cases} \tag{36}$$

式中: b_1、$b_2>0$; $\hat{Z}_1$、$\hat{Z}_2$为状态的观测值; e_1、e_2为观测误差, $e_1=\hat{Z}_1-Z_1$, $e_2=\hat{Z}_2-Z_2$。

对上述扩张状态观测器的收敛性进行证明, 首先做出如下假设:

假设 1　航天器动力学系统的总扰动Δd_1的导数$g(t)$是有界的, 且满足不等式:

$$\|g(t)\|\leqslant\bar{g} \tag{37}$$

式中: $\bar{g}$为正常数。

由外部干扰和引力场参数不规则项参数的不确定性构成的系统总扰动的变化是缓慢的, 其变换速率不可能是无界的, 因此, 上述假设是合理的。进一步地, 由动力学方程式 (35) 和扩张状态观测器式 (36) 可以得到观测器误差动力学方程:

$$\begin{cases}\dot{e}_1=\dot{\hat{Z}}_1-\dot{Z}_1=e_2-b_1e_1\\ \dot{e}_2=\dot{\hat{Z}}_2-\dot{Z}_2=-b_2e_1-g(t)\end{cases} \tag{38}$$

选择如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V_1=\frac{1}{2}e_1^{\mathrm{T}}e_1+\frac{1}{2}e_2^{\mathrm{T}}e_2 \tag{39}$$

式(39)对时间进行求导可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1=&e_1^{\mathrm{T}}\dot{e}_1+e_2^{\mathrm{T}}\dot{e}_2=\\ &e_1^{\mathrm{T}}(e_2-b_1e_1)+e_2^{\mathrm{T}}(-b_2e_1-g(t))=\\ &-b_1e_1^{\mathrm{T}}e_1+(1-b_2)e_1^{\mathrm{T}}e_2-e_2^{\mathrm{T}}g(t)\leqslant\\ &-b_1\|e_1\|^2+\frac{(1-b_2)}{2}\left(\|e_2\|^2+\|e_1\|^2\right)+\\ &\frac{1}{2}\left(\|e_2\|^2+\|g(t)\|^2\right)\leqslant\\ &\frac{(1-b_2-2b_1)}{2}\|e_1\|^2+\frac{(2-b_2)}{2}\|e_2\|^2+\\ &\frac{1}{2}\|g(t)\|^2\leqslant-e^{\mathrm{T}}Pe+\frac{1}{2}\bar{g}^2\end{aligned} \tag{40}$$

式中: $e=\left[e_1,e_2\right]^{\mathrm{T}}$; $P=\begin{bmatrix}\dfrac{(2b_1-b_2-1)}{2} & 0\\ 0 & \dfrac{(b_2-2)}{2}\end{bmatrix}$。

对参数b_1、b_2选取合适的值, 可以使矩阵P为正定矩阵, 因此, 可以得到

$$\dot{V}_1\leqslant-\lambda_{\max}(P)\|e\|^2+\frac{1}{2}\bar{g}^2 \tag{41}$$

式中：$\lambda_{\max}$为求解矩阵的最大特征值。

从式(41)可知，当$\|\boldsymbol{e}\|>\dfrac{\bar{g}^2}{2\lambda_{\max}(\boldsymbol{P})}$时，$\dot{V}_1<0$，根据Lyapunov理论可知，观测误差将向0方向收敛，但当收敛到$\dfrac{\bar{g}^2}{2\lambda_{\max}(\boldsymbol{P})}$后，$\dot{V}_1>0$。因此，观测误差最终将收敛到如下邻域内：

$$\Delta_1=\left\{\boldsymbol{e}\in\mathbf{R}^{12}\left|\|\boldsymbol{e}\|\leqslant\frac{\bar{g}^2}{2\lambda_{\max}(\boldsymbol{P})}\right.\right\} \tag{42}$$

调节参数b_1、b_2可以使总扰动的估计值$\hat{\boldsymbol{Z}}_2$收敛到真实值附近的小邻域内，因此，可以将上述总扰动的估计值补偿到控制输入中。下文设计具有参数辨识功能的参数更新律，以参数估计值替代真值。

2.3 质量特性参数不确定

2.2节中基于扩张状态观测器的扰动估计器是在航天器质量特性参数已知的假设下进行设计的。本节开发具有参数辨识功能的参数更新律，单独使用I&I理论无法实现参数辨识，在I&I理论的基础上，引入动态回归扩张方法来提高参数估计的收敛性能，实现质量特性参数的辨识，具体设计过程如下。

2.3.1 参数线性化

对动力学模型式(34)进行如下变化：

$$\dot{\boldsymbol{S}}=-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{H}_1+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g0}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}^{0}+\Delta\boldsymbol{d}_1+\boldsymbol{k}\boldsymbol{\Xi}\boldsymbol{S}\right) \tag{43}$$

式中：$\boldsymbol{k}$为正数，设计过程中将$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}$和$\Delta\boldsymbol{d}_1$视为一个广义控制力$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{cd}}$。

由于质量特性参数是以矩阵的形式存在于上述姿轨误差动力学方程中，不便于自适应控制器的设计，因此，第1步需要将质量特性参数从动力学方程中分离成向量的形式，分离后的形式如下：

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{S}}=&-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{cd}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{g0}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{gC2}}^{0}+\boldsymbol{H}\right)+\\&\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left[\boldsymbol{k}\boldsymbol{\Xi}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{\Xi}\left(\boldsymbol{C}_1+\alpha\boldsymbol{C}_2\Lambda^{\alpha-1}(\boldsymbol{\varepsilon})\right)\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\right]=\\&-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{cd}}+\boldsymbol{W}_3\boldsymbol{\theta}+\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{\theta}+\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{\theta}\right)=\\&-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{cd}}+\boldsymbol{W}\boldsymbol{\theta}\right)\end{aligned} \tag{44}$$

式中：$\boldsymbol{\theta}\in\boldsymbol{R}^7$为向量形式的质量特性参数，具体定义为

$$\boldsymbol{\theta}=\left[J_{11},J_{22},J_{33},J_{12},J_{13},J_{23},m\right]^{\mathrm{T}} \tag{45}$$

$\boldsymbol{W}_1$、$\boldsymbol{W}_2$、$\boldsymbol{W}_3$、$\boldsymbol{W}$为参数回归矩阵，可通过式(46)定义的回归矩阵算子$\boldsymbol{M}(\cdot)$：$\mathbf{R}^7\to\mathbf{R}^{6\times7}$求解得到，具体求解公式为

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix}x_1&0&0&x_2&x_3&0&0\\0&x_2&0&x_1&0&x_3&0\\0&0&x_3&0&x_1&x_2&0\\0&0&0&0&0&0&x_4\\0&0&0&0&0&0&x_5\\0&0&0&0&0&0&x_6\end{bmatrix} \tag{46}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{W}_1=a_{\mathrm{d},\xi}^{*}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\xi})+\boldsymbol{M}(\boldsymbol{L}_1)\\\boldsymbol{L}_1=a_{\mathrm{d},\tilde{\xi}}A_{\mathrm{d},\boldsymbol{g}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}}\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{d}}-A_{\mathrm{d},\boldsymbol{g}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}}\dot{\boldsymbol{\xi}}_{\mathrm{d}}\end{cases} \tag{47}$$

$$\boldsymbol{W}_2=\boldsymbol{M}\left[\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}+\left(\boldsymbol{C}_1+\alpha\boldsymbol{C}_2\Lambda^{\alpha-1}(\boldsymbol{\varepsilon})\right)\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\right] \tag{48}$$

$$\boldsymbol{W}_3=\boldsymbol{M}[0,0,0,\boldsymbol{a}_{\mathrm{gx}},\boldsymbol{a}_{\mathrm{gy}},\boldsymbol{a}_{\mathrm{gz}}] \tag{49}$$

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{W}_1+\boldsymbol{W}_2+\boldsymbol{W}_3 \tag{50}$$

2.3.2 基于I&I理论的参数更新律设计

根据参数线性化后的动力学模型式(44)进行基于I&I理论的自适应控制器设计。按照I&I理论，求解自适应控制器需要求解一个偏微分方程，而偏微分方程有解的条件是参数回归矩阵$\boldsymbol{W}$为雅可比矩阵，但由于回归矩阵$\boldsymbol{W}$中叉乘项$a_{\mathrm{d},\xi}^{*}$的存在，不满足上述条件，因此，需要采取其他方法来解决上述问题。

本文采用文献[10]中的滤波思想来解决上述问题，主要思想在于通过滤波方法来构建一个指数收敛的滤波系统，基于滤波系统来设计I&I自适应控制器。在滤波系统中，滤波后的参数回归矩阵及导数可以通过滤波器得到，进而有关参数回归矩阵的偏微分方程有解。滤波系统的设计规避了偏微分方程求解的严格要求，滤波系统的具体构造流程如下：

根据系统式(44)，设计如下形式的线性滤波器：

$$\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{S} \tag{51}$$

$$\dot{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{W} \tag{52}$$

$$\dot{\boldsymbol{\Gamma}}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{cd}} \tag{53}$$

式中：$\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}$、$\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}$和$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}$为滤波后的变量；$\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}>0$。

$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{cd}}$相关的线性滤波器仅用于控制系统的稳定性分析，将上述线性滤波器代入动力学模型式(44)可得

$$\begin{aligned}\ddot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}=&-\boldsymbol{k}\left(\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}\right)+\\&\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left[\dot{\boldsymbol{\Gamma}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}+\left(\dot{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\right)\boldsymbol{\theta}\right]\end{aligned} \tag{54}$$

对式(45)进行整理可得

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\theta}\right)\right)=&\\-\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\left(\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\theta}\right)\right)&\end{aligned} \tag{55}$$

定义如下变量：

$$\boldsymbol{\gamma}=\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\theta}\right) \tag{56}$$

通过式(56)可以得到以下结论：

$$\boldsymbol{\gamma}(t)=\boldsymbol{\gamma}(0)\mathrm{e}^{-\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}t} \tag{57}$$

即$\boldsymbol{\gamma}$是指数收敛的，收敛速度与$\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}$的取值有关，最终可以得到指数收敛的滤波系统动力学方程：

$$\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\theta}\right)+\boldsymbol{\gamma} \tag{58}$$

基于上述滤波后的动力学方程进行 I&I 控制器设计, 选择如下形式的控制器:

$$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}} \tag{59}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{cd}}=\dot{\boldsymbol{\Gamma}}_{\mathrm{f}}+\lambda_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}=-\dot{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}-\lambda_{\mathrm{f}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}} \tag{60}$$

$\boldsymbol{W}$与航天器的位姿状态有关, 可以实时得到, 进一步, $\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}$、$\dot{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{f}}$可以通过滤波方程式 (52) 求解得到, $\hat{\boldsymbol{\theta}}=\hat{\boldsymbol{\alpha}}+\hat{\boldsymbol{\beta}}$为质量特性参数向量$\boldsymbol{\theta}$的估计值, 通过自适应更新律求解得到。进行参数更新律的设计, 对$\boldsymbol{\beta}$进行设计, 具体表达式为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\beta}}}=\nu\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}} \tag{61}$$

对$\hat{\boldsymbol{\theta}}$进行求导, 并将线性滤波器式 (51)～式 (53) 和滤波系统方程式 (58) 代入其中可得

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}=\dot{\hat{\boldsymbol{\alpha}}}+\dot{\hat{\boldsymbol{\beta}}}=\dot{\hat{\boldsymbol{\alpha}}}+\nu\left(\dot{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}\right)=\\ \dot{\hat{\boldsymbol{\alpha}}}-\nu\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\left(\lambda_{\mathrm{f}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}\right)+\nu\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\\ \nu\left(\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}\right)\end{aligned} \tag{62}$$

式中: $\nu>0$; $\tilde{\boldsymbol{\theta}}=\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{\theta}$为参数估计误差。

为使质量特性参数的更新律中包含参数估计误差项, $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$设计为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\alpha}}}=\nu\left[\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\left(\lambda_{\mathrm{f}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}\right)-\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}\right] \tag{63}$$

上述$\hat{\boldsymbol{\alpha}}$、$\hat{\boldsymbol{\beta}}$求解公式中的$\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}$、$\boldsymbol{W}$、$\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}$可通过线性滤波器求解得到, 最终通过式 (61) 和式 (63) 可以得到参数估计值$\hat{\boldsymbol{\theta}}$, 但上述参数更新律无法保证参数估计值收敛到真值附近, 在后续的证明中将说明这一点, 因此, 考虑将动态回归扩展方法与上述参数更新律相结合来提高参数的收敛性能。

2.3.3　基于动态回归扩展方法的复合参数更新律设计

对上述滤波后的系统式 (58) 进行如下变化:

$$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{\Xi}\left(\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}\right)-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\theta}-\boldsymbol{\Xi}\boldsymbol{\gamma} \tag{64}$$

进一步进行参数线性化, 可得

$$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}=\left[\boldsymbol{M}\left(\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{\gamma}\right)-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\right]\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{\theta} \tag{65}$$

$\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}$、$\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}$可以通过滤波器求解得到, $\boldsymbol{\gamma}$在初值已知的情况下通过式 (57) 可得, 因此, 新的参数回归矩阵$\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}$可以实时得到, 显然滤波后的系统控制输入$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}$中包含质量特性参数$\boldsymbol{\theta}$的相关信息, 因此, 可以用于参数估计。采用文献 [18] 中的动态回归扩展与混合(dynamic regressor extension and mixing, DREM)方法来进行自适应控制器的设计, 对参数回归矩阵$\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}$进行如下操作:

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{\theta} \tag{66}$$

对式 (66) 进行滤波操作:

$$\dot{\boldsymbol{A}}(t)=-\sigma\boldsymbol{A}(t)+\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}} \tag{67}$$

$$\dot{\boldsymbol{B}}(t)=-\sigma\boldsymbol{B}(t)+\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}} \tag{68}$$

两者的初值分别为: $\boldsymbol{A}(0)=\boldsymbol{0}_{7\times7}$, $\boldsymbol{B}(0)=\boldsymbol{0}_{7\times1}$, σ为正常数, 对式 (67) 和式 (68) 进行求解可得

$$\boldsymbol{A}(t)=\int_0^t\mathrm{e}^{-\sigma(t-\tau)}\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}(\tau)\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{69}$$

$$\boldsymbol{B}(t)=\int_0^t\mathrm{e}^{-\sigma(t-\tau)}\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}(\tau)\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{f}}(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{70}$$

进一步可知$\boldsymbol{A}(t)$、$\boldsymbol{B}(t)$有如下关系:

$$\boldsymbol{B}(t)=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{\theta} \tag{71}$$

从式 (69) 可以看出, 如果回归矩阵$\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}$满足有限激励条件[13], 即满足式 (72) 时:

$$\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+T}\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}(\tau)\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}(\tau)\mathrm{d}\tau\geqslant\alpha\boldsymbol{I}_{7\times7} \tag{72}$$

信息矩阵$\boldsymbol{A}(t)$的秩随着时间的推移逐渐增加, 最终在某一时刻达到满秩状态, 具体证明如下:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{A}(t_{\mathrm{s}}+T)=\int_0^{t_{\mathrm{s}}+T}\mathrm{e}^{-\sigma(t_{\mathrm{s}}+T-\tau)}\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}(\tau)\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}(\tau)\mathrm{d}\tau\geqslant\\ \mathrm{e}^{-\sigma(t_{\mathrm{s}}+T)}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+T}\mathrm{e}^{\sigma\tau}\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}(\tau)\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}(\tau)\mathrm{d}\tau\geqslant\\ \mathrm{e}^{-\sigma T}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+T}\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}(\tau)\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}(\tau)\mathrm{d}\tau\geqslant\\ \alpha\mathrm{e}^{-\sigma T}\boldsymbol{I}_{7\times7}>0\end{aligned} \tag{73}$$

即信息矩阵$\boldsymbol{A}(t)$将在$t_{\mathrm{s}}+T$时刻之后达到满秩状态, 通过上述流程将参数回归矩阵是否满足有限激励转化成了信息矩阵是否满秩。基于上述推导并结合 2.3.2 小节设计的基于 I&I 理论的参数更新律, 设计如下自适应参数更新律:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}=\dot{\hat{\boldsymbol{\alpha}}}+\dot{\hat{\boldsymbol{\beta}}}-\boldsymbol{k}_{\mathrm{l}}\left(\boldsymbol{A}(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{B}(t)\right) \tag{74}$$

式中: $\boldsymbol{k}_{\mathrm{l}}$为自适应参数更新律的增益系数。

2.4　复合自适应预设性能控制器设计及稳定性证明

将 2.2 节中通过扩张状态观测器估计得到的总扰动与自适应控制器式 (60) 相结合, 最终可得到如下复合自适应预设性能控制器:

$$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{c}}=-\dot{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}-\lambda_{\mathrm{f}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}}-\hat{\boldsymbol{Z}}_2 \tag{75}$$

定理 1　针对误差转化后的航天器姿轨一体化动力学和运动学方程式 (31), 在质量特性参数$\boldsymbol{\Xi}$和小行星引力场不规则项C_{20}和C_{22}参数不确定及存在外部干扰的情况下, 设计的基于 I&I 理论和动态回归扩展方法的参数更新律式 (74) 和基于扩张状态观测器的复合自适应预设性能控制器式 (75) 可以使位姿误差$\boldsymbol{\eta}$、广义速度误差$\tilde{\boldsymbol{\xi}}$有界, 同时保证位姿误差$\boldsymbol{\eta}$满足预设的性能要求, 实现姿轨的高精度控制, 且当参考轨迹满足有限激励条件时, 参数估计值收敛到真值附近。

基于 Lyapunov 理论对定理 1 进行证明, 选取如

下形式的 Lyapunov 函数：

$$V_1=\frac{1}{2}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}+\frac{1}{2\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{\theta}} \tag{76}$$

式中：$\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})$为矩阵$\boldsymbol{\Xi}$的最小特征值。将自适应控制器式 (75) 代入动力学方程式 (44) 中可得

$$\dot{\boldsymbol{S}}=-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(-\dot{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}-\lambda_{\mathrm{f}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{e}_2+\boldsymbol{W}\boldsymbol{\theta}\right) \tag{77}$$

对总扰动估计误差$\boldsymbol{e}_2$进行滤波并将滤波器方程代入式 (77)，可得

$$\begin{aligned}&\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\theta}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{e}_{2\mathrm{f}}\right)\right]=\\&\quad-\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}\left[\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\theta}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{e}_{2\mathrm{f}}\right)\right]\end{aligned} \tag{78}$$

最终可得如下滤波系统：

$$\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}+\boldsymbol{e}_{2\mathrm{f}}\right)+\boldsymbol{\gamma} \tag{79}$$

对式 (76) 进行求导，并将上述滤波系统方程和参数更新律式 (74) 代入其中，可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1=&\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{f}}+\frac{1}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}=\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\left[-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{\Xi}^{-1}\left(\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}+\boldsymbol{e}_{2\mathrm{f}}\right)\right]-\\&\frac{\boldsymbol{v}}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}-\frac{\boldsymbol{k}_1}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{A}(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{B}(t)\right)\end{aligned} \tag{80}$$

进行不等式变化可以得到

$$\begin{aligned}\dot{V}_1=&-\boldsymbol{k}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{e}_{2\mathrm{f}}-\\&\frac{\boldsymbol{v}}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}-\\&\frac{\boldsymbol{k}_1}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{A}(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}-\boldsymbol{B}(t)\right)\leqslant\\&-\boldsymbol{k}\|\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}\|^2+\|\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}\|^2-\left(\boldsymbol{v}-\frac{1}{2}\boldsymbol{I}\right)\left\|\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}\right\|^2-\\&\frac{\boldsymbol{k}_1\lambda_{\min}(\boldsymbol{A})}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})}\left\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\right\|^2+\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{e}_{2\mathrm{f}}\right\|^2\leqslant\\&-(\boldsymbol{k}-1\boldsymbol{I})\|\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}\|^2-\left(\boldsymbol{v}-\frac{1}{2}\boldsymbol{I}\right)\left\|\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}\right\|^2-\\&\frac{\boldsymbol{k}_1\lambda_{\min}(\boldsymbol{A})}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Xi})}\left\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\right\|^2+\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{e}_{2\mathrm{f}}\right\|^2\end{aligned} \tag{81}$$

从式 (81) 可知，当总扰动估计误差为 0 时，对$\boldsymbol{k}$和$\boldsymbol{v}$进行合适取值可使$V_1\geqslant 0$且$\dot{V}_1\leqslant 0$，且$\lim\limits_{T\to\infty}\int_0^T\dot{V}_1\mathrm{d}t$存在且有界，通过 Barbalat 引理可得

$$\lim_{t\to\infty}\left[\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}},\boldsymbol{\Xi}^{-1}\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}\right]=\boldsymbol{0} \tag{82}$$

进一步地，根据滤波器方程可以得到$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{S}=\boldsymbol{0}$，根据$\boldsymbol{S}$的定义可得$\boldsymbol{\varepsilon}$有界，根据预设性能误差转化过程可得：当位姿转化误差$\boldsymbol{\varepsilon}$有界时，位姿误差$\boldsymbol{\varepsilon}$处于性能函数的约束范围内，满足控制指标的要求。同时，由于$\boldsymbol{\Xi}^{-1}$的正定性，自适应控制律会使系统收敛到如下流形中：

$$\boldsymbol{M}=\left\{\tilde{\boldsymbol{\theta}}\in\mathbf{R}^7\,\middle|\,\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}=\boldsymbol{0}\right\} \tag{83}$$

这是 I&I 方法的特点，通过调节自适应律相关参数的大小，可以调整流形收敛的速度。由于会收敛到流形$\boldsymbol{M}$上，参数估计值与实际值的不匹配不会对理想情况（无参数不确定性）下的闭环系统施加外部干扰，增强了闭环系统的稳定性。同时，当矩阵$\boldsymbol{A}$满秩即满足有限激励条件时，进一步可以得到参数估计误差$\tilde{\boldsymbol{\theta}}$收敛到 0，而单独使用 I&I 理论得到的参数更新律无法在有限激励时收敛到真值。另外，由于 2.2 节中得到总扰动的估计值只能收敛到真值附近的邻域内，因此，上述参数估计值也只能收敛到真值附近，证明完毕。

3 仿真验证与分析

为验证上述所设计的复合自适应预设性能控制器的有效性，本节以航天器在小行星 Eros433 附近近距离绕飞任务为背景进行 MATLAB 数值仿真验证分析，小行星相关参数见表 1。

任务目标为绕小行星赤道面上的圆形轨道进行绕飞，且绕飞过程中航天器相对于惯性坐标系保持不变。在给定目标初始位姿状态的情况下，实时目标轨迹可以依据式 (8) 得到，此时目标位姿轨迹不满足持续激励条件[13]。航天器质量特性参数、目标位姿初始状态、初始位姿误差、初始速度误差等信息见表 2～表 4。仿真中控制器无法获得准确的质量、惯量及不规则项系数（C_{20}和C_{22}）等参数信

表 1 Eros433 相关参数

Table 1 Eros433 related parameters

万有引力常数/$(\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{kg}^{-2})$	质量/kg	密度/$(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	自转角速度/$(\mathrm{rad}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	自转周期/h	小行星引力场相关参数C_{20}/km²	小行星引力场相关参数C_{22}/km²
$6.673\,8\times10^{-11}$	$6.690\,4\times10^{15}$	2 670	$3.311\,7\times10^{-4}$	5.57	−27.755	12.752

表 2 追踪航天器相关参数

Table 2 Tracking spacecraft related parameters

质量/kg	惯量/$(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2)$
20	$\begin{bmatrix}5.5 & 0.03 & 0.05\\ 0.03 & 6.5 & 0.02\\ 0.05 & 0.02 & 5.8\end{bmatrix}$

表 3 目标初始位姿参数

Table 3 Target initial position and attitude parameters

目标轨道初始位置/m	目标轨道初始速度/$(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	目标姿态	目标姿态角速度/$(\mathrm{rad}\cdot\mathrm{s}^{-1})$
$[25\times10^3,\ 0,\ 0]^{\mathrm{T}}$	$[0,\ 4.226\,1,\ 0]^{\mathrm{T}}$	$\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$	$[0,\ 0,\ 0]^{\mathrm{T}}$

表 4　初始位姿参数

Table 4　Initial position and attitude parameters

初始位置/m	初始速度/(m·s^{-1})	初始姿态	初始姿态角速度/(rad·s^{-1})
$[25\times10^3+15,\ -10,\ -15]^{\mathrm{T}}$	$[0.141\quad 4.226\,1+0.27\quad 0.27]^{\mathrm{T}}$	$\begin{bmatrix}0.852\,0 & 0.256\,5 & 0.454\,8\\ -0.150\,4 & 0.954\,8 & -0.256\,5\\ -0.5 & 0.150\,4 & 0.852\,9\end{bmatrix}$	$[1.2\times10^{-2},\ -1.1\times10^{-2},\ 1.3\times10^{-2}]^{\mathrm{T}}$

息, 质量特性参数真值的 50% 用于参数估计的初值, 不规则项系数C_{20}和C_{22}真值的 25% 用于控制器中不规则引力计算。

追踪航天器所受到的外部干扰主要来源于不规则引力场中的未建模项、第三体引力及太阳光压, 选择如下量级的外部干扰力和干扰力矩:

$$\begin{cases}\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{d}}=\left[3+\sin(\omega t)\quad 2-1.5\cos(\omega t)\quad 1+2\sin(\omega t)\right]^{\mathrm{T}}\times\\ \qquad 10^{-4}\ \mathrm{N\cdot m}\\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{d}}=\left[1+\cos(\omega t)\quad 2-1.5\sin(\omega t)\quad 2+\sin(\omega t)\right]^{\mathrm{T}}\times\\ \qquad 10^{-5}\ \mathrm{N}\end{cases}\tag{84}$$

式中: $\omega=8.73\times10^{-4}\mathrm{rad/s}$。

性能函数相关参数设置为

$$\begin{cases}\rho_{0i}=\begin{cases}0.87 & i=1,2,3\\ 35 & i=4,5,6\end{cases}\\ \rho_{\infty i}=\begin{cases}0.015 & i=1,2,3\\ 0.01 & i=4,5,6\end{cases}\\ \beta_i=\begin{cases}0.05 & i=1,2,3\\ 0.006 & i=4,5,6\end{cases}\end{cases}\tag{85}$$

控制器相关参数设置见表 5。

对上述提出的基于 I&I 和动态回归扩展方法的参数更新律及基于扩张状态观测器的复合自适应预设性能控制器进行仿真验证, 仿真时间为 2 000 s, 仿真步长为 0.01 s。位置和姿态误差及速度和角速度误差的仿真结果如图 3 和图 4所示。可以看出: 复合自适应预设性能控制器可以实现位姿和速度的跟踪控制, 同时, 位姿误差保持在预先设定的性能函数内, 具体控制精度为: 姿态跟踪误差量级为2×10^{-3}(°)/s, 角速度跟踪误差量级为10^{-5}(°)/s, 位置跟踪误差量级为2×10^{-3} m, 速度跟踪误差量级为10^{-5} m/s, 实现了姿轨的高精度控制, 且实际控制精度优于预设的性能指标, 即预设性能控制的引入保证了系统控制精度的下限。同时, 从角速度与速度跟踪误差曲线可以看出, 角速度的快速变化保证了航天器姿轨动态响应过程满足性能函数的约束。扩张状态观测器的观测误差结果图如图 5 和图 6 所示。

扩张状态观测器在质量特性参数为估计值的情况下, 在有限时间内实现了对系统状态$\boldsymbol{\Xi S}$和系统总扰动$\boldsymbol{Z}_2$的观测。观测器分别在 5 s 和 150 s 左右完成了对系统状态中姿态分量和位置分量的估计, 估计误差量级为5×10^{-5}。观测器分别在 100 s 和 500 s 左右完成了对系统总扰动中力矩分量和力分量的估计, 估计误差分别为2×10^{-5} N·m和5×10^{-5} N。

航天器完成姿轨跟踪任务产生的控制力矩和控制力仿真曲线如图 7 所示。可以看出, 在姿轨跟

表 5　复合自适应预设性能控制器相关参数

Table 5　Composite adaptive prescribed performance controller related parameters

滑模面相关参数	线性滤波器相关参数	控制器相关参数	参数更新律相关参数	扩张状态观测器相关参数
$\boldsymbol{C}_1=\mathrm{diag}([0.1\boldsymbol{I}_{3\times1},0.05\boldsymbol{I}_{3\times1}])$ $\boldsymbol{C}_2=\mathrm{diag}(0.001\boldsymbol{I}_{6\times1})$	$\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}=\mathrm{diag}([0.2\boldsymbol{I}_{3\times1},0.02\boldsymbol{I}_{3\times1}])$	$\boldsymbol{k}=\mathrm{diag}([1.5\boldsymbol{I}_{3\times1},1.2\boldsymbol{I}_{3\times1}])$	$\boldsymbol{v}=\mathrm{diag}(10\boldsymbol{I}_{6\times1})$ $\boldsymbol{k}_1=\mathrm{diag}([5\boldsymbol{I}_{3\times1},0.01\boldsymbol{I}_{3\times1},0.04]),\sigma=0.1$	$b_1=b_2=10$

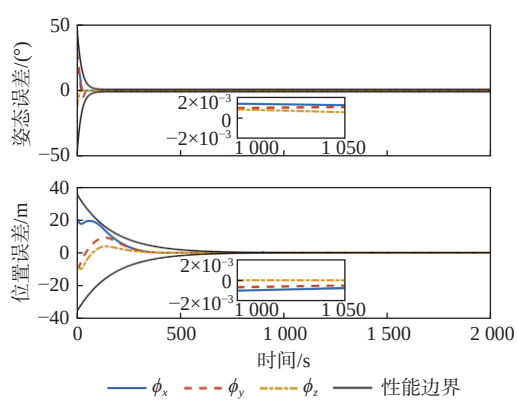


图 3　姿态与位置跟踪误差

Fig. 3　Attitude and position tracking error

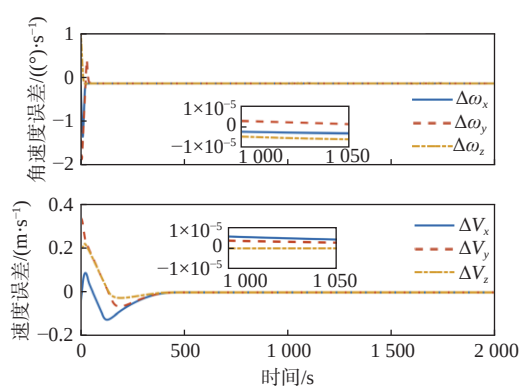


图 4　角速度与速度跟踪误差

Fig. 4　Angular velocity and velocity tracking error

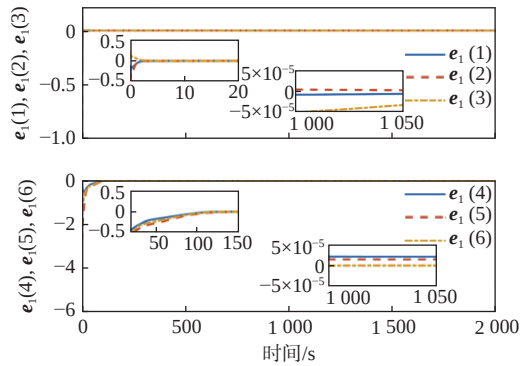


图5 扩张状态观测器观测误差$\boldsymbol{e}_1$

Fig. 5 Observation error $\boldsymbol{e}_1$ of extended state observer

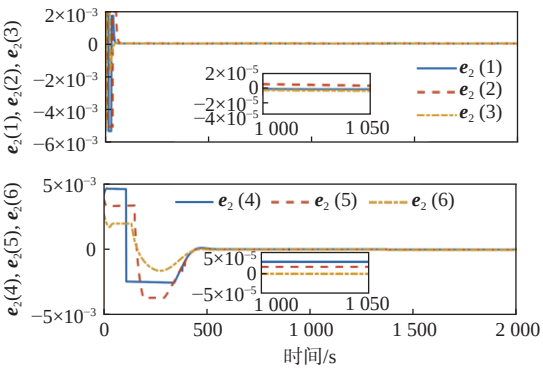


图6 扩张状态观测器观测误差$\boldsymbol{e}_2$

Fig. 6 Observation error $\boldsymbol{e}_2$ of extended state observer

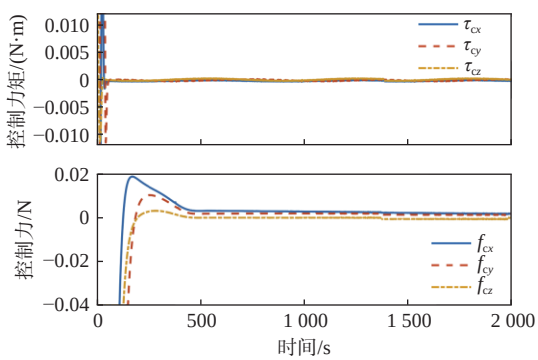


图7 控制力矩与控制力

Fig. 7 Control torque and force

踪过程中出现了执行机构饱和的状况，且为应对角速度的快速变化，控制力矩在仿真初期也快速变化。

进一步，为分析上述复合自适应预设性能控制器在提高姿轨控制精度上的有效性，增设对照试验。参考文献[12-14]中的自适应控制器，设计得到如下用于对照的自适应控制器：

$$\boldsymbol{\Gamma}_c = -\dot{\boldsymbol{W}}_f\hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{W}_f\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}} - \lambda_f\boldsymbol{W}_f\hat{\boldsymbol{\theta}} \tag{86}$$

控制器中的相关变量信息见2.3节，参数设置见表5。对照组的位置和姿态误差及速度和角速度误差的仿真结果如图8和图9所示。可以看出：对照组的控制器也能在不规则项参数存在不确定情

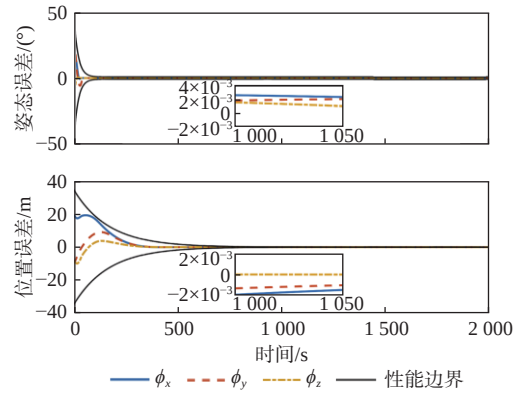


图8 对照组姿态与位置跟踪误差

Fig. 8 Attitude and position tracking error of comparison group

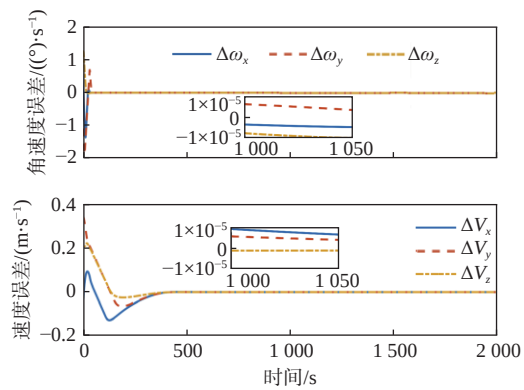


图9 对照组角速度与速度跟踪误差

Fig. 9 Angular velocity and velocity tracking error of comparison group

况下实现姿轨跟踪控制，但基于扩张状态观测器的复合自适应预设性能控制器的姿轨跟踪控制精度优于对照组。

分析基于I&I理论和动态回归扩张方法的参数更新律的有效性。为说明所提出的参数更新律在参数估计上的优势，增设对照试验，以2.3.2节的I&I参数更新律为对照组，对照组中相关参数的设置见表5。2组试验的质量特性参数估计误差如图10和图11所示。可以看出，由于参考轨迹不满

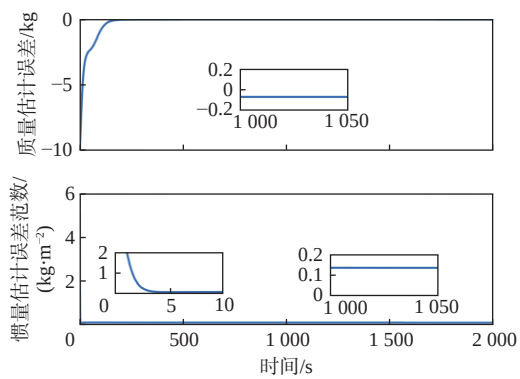


图10 质量估计误差及惯量估计误差

Fig. 10 Mass estimation error and inertia estimation error

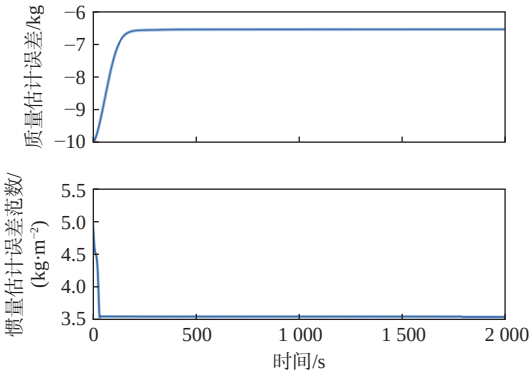


图 11　对照组参数估计误差

Fig. 11　Parameter estimation error of comparison group

足持续激励条件, 对照组的 I&I 参数更新律的参数估计值无法收敛到真值附近。本文提出的参数更新律中新增误差阻尼项的存在使航天器质量估计误差和惯量估计误差范数分别在 150 s 和 5 s 左右收敛到 0 附近的邻域内。

4　结　论

针对小行星引力场不规则项参数及航天器质量特性同时存在不确定性时刚体航天器的姿轨跟踪控制问题, 本文提出了复合自适应预设性能终端滑模控制器。

1) 参数更新律中动态回归扩展方法的引入放松了对激励条件的要求, 提高了参数的收敛性能。

2) 基于收敛性能更好的质量特性参数估计, 引入设计的扰动估计补偿部分, 提高了姿轨控制精度。

3) 预设性能控制与终端滑模控制的引入使复合自适应预设性能终端滑模控制器在收敛时间和稳态精度上有较好的效果。

参考文献（References）

[1] 杨洪伟, 宝音贺西. 小行星附近制导与控制研究综述[J]. 深空探测学报, 2019, 6(2): 179-188.
Yang H W, Baoyin H X. Review of guidance and control in the vicinity of asteroids[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(2): 179-188(in Chinese).

[2] Feng J, Hou X, Armellin R. Survey on studies about model uncertainties in small body explorations[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2019, 110: 100549.

[3] 李俊峰, 曾祥远. 不规则小行星引力场内的飞行动力学[J]. 力学进展, 2017, 47(1): 429-451.
Li J F, Zeng X Y. Flight dynamics in the gravitational fields of irregular asteroids[J]. Advances in Mechanics, 2017, 47(1): 429-451(in Chinese).

[4] Wang Y, Xu S. Orbital dynamics and equilibrium points around an asteroid with gravitational orbit–attitude coupling perturbation[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2016, 125: 265-285.

[5] Lee D, Sanyal A K, Butcher E A, et al. Almost global asymptotic tracking control for spacecraft body-fixed hovering over an asteroid[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 38: 105-115.

[6] Lee D, Sanyal A K, Butcher E A, et al. Finite-time control for spacecraft body-fixed hovering over an asteroid[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(1): 506-520.

[7] Vukovich G, Gui H C. Robust adaptive tracking of rigid-body motion with applications to asteroid proximity operations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(1): 419-430.

[8] 潘菲, 朱宏玉. 航天器非奇异自适应终端滑模姿轨联合控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(7): 1354-1362.
Pan F, Zhu H Y. Spacecraft non-singular adaptive terminal sliding mode attitude-orbit coupling control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(7): 1354-1362(in Chinese).

[9] 夏冬冬, 岳晓奎. 基于浸入与不变理论的航天器姿态跟踪自适应控制[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 307-318.
Xia D D, Yue X K. Immersion and invariance based attitude adaptive tracking control for spacecraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 307-318(in Chinese).

[10] Seo D, Akella M R. High-performance spacecraft adaptive attitude-tracking control through attracting-manifold design[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(4): 884-891.

[11] Lee K W, Singh S N. Immersion-and invariance-based adaptive control of asteroid-orbiting and-hovering spacecraft[J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 2019, 66(4): 537-553.

[12] Xu Y Q, Hu Q L, Shao X D. Composite adaptive attitude control for combined spacecraft with inertia uncertainties[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 131: 107984.

[13] Shao X D, Hu Q L, Shi Y, et al. Data-driven immersion and invariance adaptive attitude control for rigid bodies with double-level state constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(2): 779-794.

[14] Lee K W, Singh S N. Composite adaptive attitude control of asteroid-orbiting spacecraft with regressor integral excitation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(5): 4814-4823.

[15] 张剑桥. 航天器姿轨一体化建模与控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Zhang J Q. Research on spacecraft integrated orbit-attitude modeling and control methods[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020(in Chinese).

[16] Scheeres D J. Orbit mechanics about asteroids and comets[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(3): 987-997.

[17] Jiang L, Wang Y, Xu S J. Integrated 6-DOF orbit-attitude dynamical modeling and control using geometric mechanics[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2017: 4034328.

[18] Aranovskiy S, Bobtsov A, Ortega R, et al. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(7): 3546-3550.

Adaptive prescribed performance attitude and orbit tracking control of spacecraft in irregular gravitational fields

LI Jun，ZHU Hongyu*

(School of Astronautics，Beihang University，Beijing 100191，China)

Abstract：This paper examines the attitude and orbit tracking control problem of rigid spacecraft when there are uncertainties in both the irregular terms of the asteroid's gravitational field and the spacecraft's mass characteristic parameters. Based on the spacecraft's prescribed performance error motion model described by Lie groups under irregular gravitational fields, a composite adaptive attitude and orbit tracking controller is proposed. A parameter update rule with higher convergence performance is devised based on the dynamic regression extension method and the immersion and invariance (I&I) theory to estimate the mass characteristic parameters with the goal of minimizing their uncertainty. Utilizing the estimated values of the mass characteristic parameters, an extended state observer is devised to estimate the overall system disturbance, which stems from the irregularity of the gravitational field and external disturbances. Building upon this parameter update law and disturbance estimation compensation, a composite adaptive prescribed performance terminal sliding mode controller is formulated. By using Lyapunov theory, it is demonstrated that the suggested controller guarantees that the errors in mass characteristic parameter estimate, disturbance estimation, and attitude and orbit tracking stay within a certain bound. Simulation results demonstrate that the incorporation of the dynamic regression extension method enhances the convergence performance of mass characteristic parameter estimation, and further, the addition of disturbance estimation compensation improves the accuracy of attitude and orbit tracking control.

Keywords：integrated attitude and orbit control of spacecraft；irregular gravitational field；parameter uncertainty；extended state observer；adaptive prescribed performance control

Received：2024-05-17；**Accepted**：2024-08-09；**Published Online**：2024-09-11 12：14

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240910.1426.003

* **Corresponding author**. E-mail：henry.jewel@139.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0332

考虑带时间窗的多机型航班加油车三阶段调度优化

邢志伟*，周芳宇，孙恪，李雅婷
(中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津 300300)

摘 要：为解决机场航班保障过程中加油车调度效率低下的问题，在航班安全作业的前提下确定航班的加油时间窗和可开始加油时间窗双约束条件，并对机坪位置与机位编号进行标准化处理，研究3种应用场景下的核心变量，构建3种双约束条件下的以加油车数量为优化目标的整数规划模型。针对不同的模型，根据机场实际运行情况提出引入精英策略的遗传优化算法对模型进行求解。在第①阶段的独立调度中，设计了兼顾适应度和种群多样性2种能力的评估机制，保证种群的多样性。在第②、③阶段协同调度中，设计惩罚因子引入算法，能够有效避免不满足目标约束的种群出现。仿真结果表明：与传统的人工调度和遗传算法对比，所提算法调度加油车数量平均降低了27.6%和21.8%，能够为机场加油车调度提供有效的决策支持。

关 键 词：航空运输；机场；航班保障；改进遗传算法；加油车调度
中图分类号：U268.6
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2651-09

机坪上服务车辆的协同运行是影响大型繁忙机场航班运行效率的关键因素。以加油车为例，由于加油车必须在飞机上客服务开始前为每个停机位的飞机完成加油服务，同时，不同机型的加油时间不同且存在不确定性，对航班地面保障效率影响显著，因此，加油车优化调度是实现有效地面作业的基础。

机场车辆调度问题属于带时间窗车辆路径问题（vehicle routing problem with time windows, VRPTW）。大型机场机坪保障车辆动态调度问题的本质是带时间窗的动态车辆路径问题[1]。VRPTW[2]是指在考虑车辆行驶时间窗限制的情况下，对一组需求点进行有效调度，使所有需求点能够在规定时间窗内被服务，并最小化车辆行驶距离或成本的问题。Ghoseiri等[3]将该问题视为多目标问题，其中，总行驶距离和车辆数量必须最小化。VRPTW是组合优化问题中的经典案例，涉及优化车辆路线、时间分配和资源利用等方面[4]。

目前对于机场车辆调度的研究中，多以启发式算法为主。Yang[5]研究了加油车调度问题，考虑了加油车服务的硬时间窗约束，建立了以总服务成本最低为目标的机场专用车调度模型，并设计了遗传算法进行求解。Heng等[6]考虑航班到达的不确定性，建立了考虑动态规划时间窗的车辆调度模型，并采用自适应分支定价算法对模型进行求解。Zhong[7]对飞机牵引车进行了优化调度，建立了多目标优化模型，以保证航班总延误时间最短和机场专用车运行时间最短。Zhou等[8]在分析传统机场拖车调度规则的基础上，结合服务流程和拖车应急调度特点，建立了带滚动窗口的多目标调度模型。Zhang等[9]提出以保证车辆对当前运行需求的响应性为目标，建立了基于初始运行时间、时间窗和闸门位置分布约束的加油车辆调度模型，并应用改进蚁群算法对算例进行了求解。Wang等[10]提出一种

收稿日期：2024-05-17；**录用日期**：2024-09-06；**网络出版时间**：2024-09-24 10:33
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240923.1846.006
基金项目：国家自然科学基金(U2333205)；中国民航大学研究生科研创新项目(2023YJSKC02012)
*通信作者. E-mail：cauc_xzw@163.com

引用格式：邢志伟，周芳宇，孙恪，等. 考虑带时间窗的多机型航班加油车三阶段调度优化[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(7)：2651-2659. Xing Z W，Zhou F Y，Sun K，et al. Considering three-stage scheduling optimization of multi-type flight refueling vehicles with time windows[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(7)：2651-2659 (in Chinese).

基于贪婪策略的机场加油车调度算法来进行研究。Zhu等[11]探讨了航班到达时间不确定条件下，机场场面摆渡车和加油车的协同调度问题。Zhao等[12]引入虚拟航班，经过简化将问题转化为可有效求解的网络最大流问题。冯明端等[13]面向机场地面特种设备车辆，构建了带有容量限制和时间窗的联合调度模型。

现在有关机场作业车辆调度问题的研究大多只关注独立调度问题[14]，缺少面对机场实际运行时多目标协同的研究。本文在现有研究基础上，进一步考虑不同航站楼对车辆调度的影响及多类型航班加油车协同分配、调度，构建了更符合机场实际运行场景的机场加油车车调度优化模型，并给出了求解模型的改进遗传算法，基于现实某机场的案例研究结果表明算法稳定有效，且该调度方案显著优于人工调度方案。本文可为大型机场机坪保障车辆调度决策提供一定的指导意义。

1 问题描述

机场加油车的类型分为罐式和管道式2种，本文讨论的加油车均为管道式加油车。根据中国民用航空局颁布的《航班安全运行保障标准》中的有关规定[15]：管道式加油车利用各机位的“油井”加油，每辆加油车从基地驶出后，先到其第1个加油任务的机位，为该机位的飞机加油，完成任务后驶往第2个加油任务的机位，为停靠该机位的飞机加油，依次执行加油任务，直到完成最后一个加油任务后返回基地。机场加油车工作路线如图1所示。

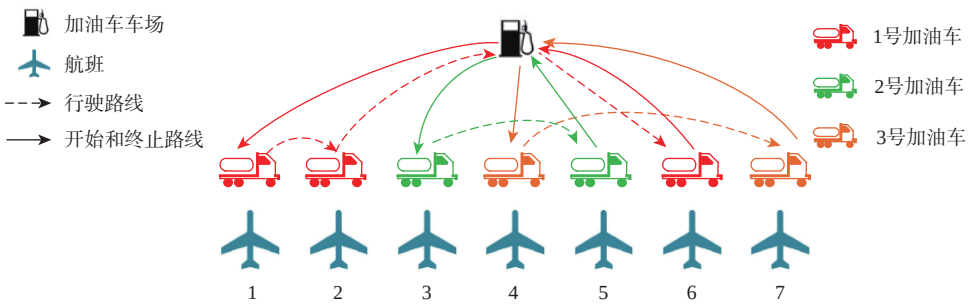


图1 加油车工作路线示意

Fig. 1 Schematic diagram of the working route of the refueling truck

设某机场有加油车n辆，每天完成m个($n<m$)出发航班的加油任务。该机场有p个停机位($p<m$)，每个停机位都属于某块机坪k，机坪k的第i个停机位的编号是a_{ik}，机坪k到机坪u的距离d_{ku}定义为2个机坪1号停机位之间的距离(单位：m)。如果2个机位a_{ik}和a_{ju}在同一机坪，即k=u，加油车行驶速度为5 km/h，如图2所示，则该2个机位之间的距离为

$$d(a_{ik},a_{jk})=100|j-i| \tag{1}$$

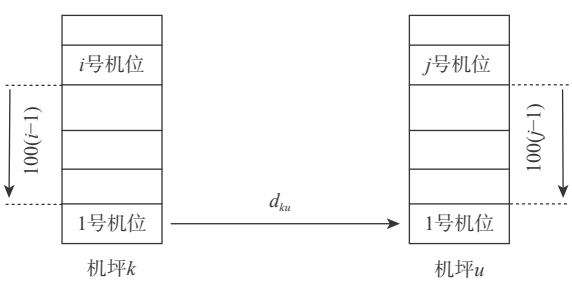


图2 位于2个不同机坪的停机位之间的行驶路线和距离

Fig. 2 Travel route and distance between parking stands located on two different aprons

如果2个停机位a_{ik}和a_{ju}不在同一机坪，加油车行驶速度为20 km/h，则加油车首先从机坪k的i号停机位行驶到机坪k的1号停机位，然后，行驶到机坪u的1号停机位，最后，到机坪u的j号停机位，如图2所示，总的距离为

$$d(a_{ik},a_{ju})=d_{ku}+100(i+j-2) \tag{2}$$

对于航班f来说，航班推出时刻为t_f，各航班要求加油任务在上客服务开始前完成，每个航班都有最早开始加油时刻t_f^s，上客服务时间为s_f，因此，最早开始加油时刻和航班加油时间满足：

$$t_s\leqslant t_f-s_f-t_f^s\leqslant T-s_f \tag{3}$$

式中：T为最小过站时间；t_s为加油车s加油所需时间。

加油车型号无差异，需要提前5 min到达航班所在停机位，到达后5 min开始接油管，3 min接管任务完成后开始加油，加油结束后卸下油管并将加油单送给机长签字，需要7 min。加油车的加油速率V_p和加油量与航班机型p有关，机型越大，加油速率和加油量越大。

机场油料管理部门的目标是在航班不延误的基础上，尽量少安排加油车和合理安排加油班次与顺序。因此，本文为应对现实中的多种情况，以3种角度拆分机场加油车调度总问题，分成3个阶段调度，具体如下：①单航站楼单机型加油车独立

调度; ②多航站楼单机型加油车协同调度; ③多航站楼多机型加油车协同调度。

2　数学模型

2.1　模型假设

围绕机场高峰时段加油车调度问题, 基于出发航班的加油任务、最早开始加油时刻、最小过站时间、停机坪和停机位等相关参数, 结合机场各航站楼的数据, 构建相对应问题的模型, 针对本题题设与相关要求, 提出假设前提如下: ①每个航班都需要加满油, 每辆加油车可服务多个航班; ②研究的加油车为管道式加油车且同一类型, 其在行驶过程的速度是匀速的; ③加油服务过程连续, 在加油服务完成前不会中断; ④由于接收加油的方式不同, 不同型的飞机使用各自的专用加油车。

2.2　单航站楼单机型加油车独立调度

单航站楼单机型加油车独立调度模型为

$$\min \sum_{s=1}^{n} z_s \tag{4}$$

$$\sum_{s=1}^{n}\sum_{h=1}^{H} L_{sf}^{h} = 1 \tag{5}$$

$$t_s \in V_{\text{start}} \tag{6}$$

$$(F_f - 7) \in V_{\text{work}} \tag{7}$$

$$\sum_{s=1}^{n} z_s \leqslant m^e \tag{8}$$

式中: m^e 为机场加油车的最大数量。

$$\begin{cases} F_f = B_f + 3 + t_s + 7 \\ B_f = \max\left\{t_f^s, F_{f_1} L_{sf_1}^{h-1} + 5 + t_{f_2 f_1}\right\} \\ L_{sf}^{h} = 1 \\ L_{sf_1}^{h-1} = 1 \end{cases} \tag{9}$$

$$t_{f_1 f_2} = \begin{cases} \dfrac{100 \mid g_2^{f_1} - g_2^{f_2} \mid}{5\,000} \times 60 & g_1^{f_1} = g_1^{f_2} \\ \left(\dfrac{d_{g_1^{f_1} g_1^{f_2}}}{20\,000} + \dfrac{100(g_2^{f_1} - g_2^{f_2} - 2)}{5\,000}\right) \times 60 & g_1^{f_1} \neq g_1^{f_2} \end{cases} \tag{10}$$

其中: s 为加油车编号; h 为加油任务编号; $g_1^{f_1}$ 为航班 f_1 的机坪位置; $g_1^{f_2}$ 为航班 f_2 的停机位编号; B_f 为航班 f 的开始加油时间; F_f 为完成航班 f 加油任务离开时刻; $d_{g_1^{f_1} g_1^{f_2}}$ 为从航班 f_1 的机坪位置 $g_1^{f_1}$ 移动到航班 f_2 的机坪位置 $g_1^{f_2}$ 的距离; $t_{f_1 f_2}$ 为加油车从航班 f_1 到航班 f_2 所需要的时间; L_{sf}^{h} 为决策变量, 表示航班 f 是否是加油车 s 的第 h 个加油任务, 是则取值为 1, 否则取 0; z_s 为决策变量, 表示加油车 s 是否被使用, 是则取值为 1, 否则取 0; V_{start} 为航班开始加油时间窗口; V_{work} 为加油作业时间窗口。

式 (4) 表示加油车车辆数目最少; 式 (5) 保证每个航班都可以加满油; 式 (6) 保证每次加油车的作业开始时刻均处在航班开始加油时间窗口 V_{start} 中; 式 (7) 保证每次加油完成时刻均处在航班加油窗口中; 式 (8) 保证航站楼可以调用的加油车数量不超过机场最大数量。由于航班在最小过站时间 T 内停留航站楼并设置轮挡, 故而仅可以在设置轮挡时刻 $(t_f - T)$ 后进行加油作业, 因此, 加油服务的最早开始时刻 t_f^s 满足:

$$t_f^s > t_f - T \tag{11}$$

由于在加油操作时乘客禁止登机, 同时, 加油单签字与乘客登机可以并行, 因此, 加油车结束加油并送交加油单时刻 $(F_f - 7)$ 须在乘客登机时刻 $(t_f - s_f)$ 之前。则加油服务的最早开始时刻 t_f^s 和加油车离开时刻 F_f 满足:

$$t_s \leqslant t_f - s_f - t_f^s \tag{12}$$

$$F_f - 7 \leqslant t_f - s_f \tag{13}$$

根据以上条件可得航班的可开始加油时间窗口 V_{start} 及加油作业窗口 V_{work}, 时间窗口示意如图 3 所示。

$$V_{\text{start}} = [t_f - T, t_f - s_f - t_s] \tag{14}$$

$$V_{\text{work}} = [t_f - T, t_f - s_f] \tag{15}$$

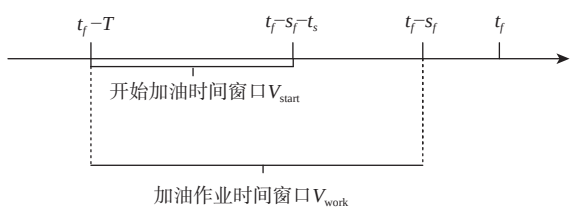


图 3　时间窗口示意

Fig. 3　Schematic diagram of the time window

决策变量定义为

$$L_{sf}^{h} = \begin{cases} 1 & \text{航班}f\text{是加油车}s\text{的第}h\text{个加油任务} \\ 0 & \text{航班}f\text{不是加油车}s\text{的第}h\text{个加油任务} \end{cases} \tag{16}$$

$$z_s = \begin{cases} 1 & \text{加油车}s\text{被使用} \\ 0 & \text{加油车}s\text{未被使用} \end{cases} \tag{17}$$

2.3　多航站楼单机型加油车协同调度

2 个航站楼共享加油车辆, 可以在加油车等待时间段内对其进行跨航站楼调度, 因此, 产生一个等待时间 W_s^f。

由于最小过站时间 T 的限制, 航班 f_i 的加油窗口允许的最早开始加油时刻与加油车 s 在

完成航班f_j加油任务后赶往f_i机坪的到达时刻$F_{f_j}L_{sf_j}^{h-1}+5+t_{f_if_j}$并不完全重合，当且仅当加油车到达时刻$(F_{f_j}L_{sf_j}^{h-1}+5+t_{f_if_j})\in V_{\text{start}}$时，$F_{f_j}L_{sf_j}^{h-1}+5+t_{f_if_j}=t_{f_i}^{s}$。如果到达时刻$F_{f_j}L_{sf_j}^{h-1}+5+t_{f_if_j}<t_{f_i}^{s}-T$，则加油车会产生等待时间$W_s^f$：

$$W_s^f=\begin{cases}0 & F_{f_j}L_{sf_j}^{h-1}+5+t_{f_if_j}<t_{f_i}^{s}-T\\ t_{f_i}^{s}-T-(F_{f_j}L_{sf_j}^{h-1}+5+t_{f_if_j}) & F_{f_j}L_{sf_j}^{h-1}+5+t_{f_if_j}\geqslant t_{f_i}^{s}-T\end{cases} \tag{18}$$

为使加油车资源得到充分利用，加强航站楼之间的协同调度能力，将加油车闲置时间引入模型。由于加油车得到充分利用，协同调度环境下需要的最少加油车数量$\sum_{s=1}^{n}z_s^{1+2}$与独立调度环境下的最少车辆$\sum_{s=1}^{n}z_s^1$和$\sum_{s=1}^{n}z_s^2$应当满足以下关系：

$$\sum_{s=1}^{n}z_s^{1+2}\leqslant\sum_{s=1}^{n}z_s^1+\sum_{s=1}^{n}z_s^2 \tag{19}$$

建立如下整数规划模型：

$$\min\sum_{s=1}^{n}z_s \tag{20}$$

$$\sum_{s=1}^{n}\sum_{h=1}^{H}L_{sf}^h=1 \tag{21}$$

$$t_s\in V_{\text{start}} \tag{22}$$

$$(F_f-7)\in V_{\text{work}} \tag{23}$$

$$\sum_{s=1}^{n}z_s\leqslant m^w \tag{24}$$

$$\sum_{s=1}^{n}z_s^{1+2}\leqslant\sum_{s=1}^{n}z_s^1+\sum_{s=1}^{n}z_s^2 \tag{25}$$

式(25)表示2个航站楼协同调度所需车辆不超过每个航站楼单独调度所需要的车辆。

2.4 多航站楼多机型加油车协同调度

针对多机型加油车调度问题，在规划模型中引入新变量加油时间t_s。为航班进行加油服务的加油车数量$\sum_{s=1}^{n}\sum_{h=1}^{H}L_{sf}^h$受到航班飞机分类的影响。

$$\min\left(\sum_{s_1-1}^{n}z_{s_1}+\sum_{s_2-1}^{n}z_{s_2}\right) \tag{26}$$

$$\sum_{s_1=1}^{n}\sum_{h=1}^{H}L_{s_1f_p}^h=1\qquad p=\text{C,D} \tag{27}$$

$$\sum_{s_2=1}^{n}\sum_{h=1}^{H}L_{s_2f_p}^h\geqslant 2\qquad p=\text{E} \tag{28}$$

$$\sum_{s_2=1}^{n}\sum_{h=1}^{H}L_{s_2f_p}^h\geqslant 3\qquad p=\text{F} \tag{29}$$

$$V_p\sum_{s_2=1}^{n}L_{s_2f_p}^h t_{s_2f_p}^h=C_{f_p} \tag{30}$$

$$t_{s_1},t_{s_2}\in V_{\text{start}} \tag{31}$$

$$(F_f-7)\in V_{\text{work}} \tag{32}$$

式中：$t_{s_2f_p}^h$为航班类型为f_p的航班执行加油车s_2的第h个加油任务所需要的时间；C_f为航班需要的加油量。

式(26)表示该分类下的加油车车辆数目最少；式(27)表示仅需要一辆加油车即可以在允许时间内将C型飞机或D型飞机加满油；式(28)对于E型飞机，则至少需要2台加油车为其加油，而且加油车工作时间存在重合部分；式(29)对于F型飞机，则至少需要3台加油车为其加油，而且加油车工作时间同样存在重合部分；式(30)表示无论航班类型如何，航班都可以加满油。其中：

$$\begin{cases}F_f=B_f+3+t_{s_{1,2}}+7\\ B_f=\max\left\{t_f^{s_{1,2}},F_{f_1}L_{s_{1,2}f_1}^{h-1}+5+t_{f_2f_1}\right\}\\ L_{s_{1,2}f}^h=1\\ L_{s_{1,2}f_1}^{h-1}=1\end{cases} \tag{33}$$

$$t_{f_1f_2}=\begin{cases}\dfrac{100\mid g_2^{f_1}-g_2^{f_2}\mid}{5\,000}\times 60 & g_1^{f_1}=g_1^{f_2}\\ \left(\dfrac{d_{g_1^{f_1}g_1^{f_2}}}{20\,000}+\dfrac{100(g_2^{f_1}-g_2^{f_2}-2)}{5\,000}\right)\times 60 & g_1^{f_1}\neq g_1^{f_2}\end{cases} \tag{34}$$

3 求解算法

建立的模型是整数规划模型，而且是一个组合优化问题，难以使用常规方法进行求解，故而使用遗传算法进行求解。

编码操作：使用遗传算法解决组合优化问题时，变量的编码方式通常成为算法编写的难点，该算法将加油车的工作状态Z_s与实数编码方式相结合进行编码。

选择操作：因为遗传算法不易收敛于局部最优，所以可以通过添加精英策略加速收敛，提高最优值精度。精英策略将一小部分最优的候选解整体复制到下一代中，这会对性能产生巨大的影响，因为这保证了整个过程不会浪费时间且重新发现以前拒绝的部分解。通过精英主义被保留下来的个体仍然有资格被选为下一代的父代。

交叉操作：选择两点交叉，在个体编码串中随机设置了2个交叉点，再进行部分基因交换。交叉

概率公式为

$$P_c=\begin{cases}P_{c\max}-\dfrac{(P_{c\max}-P_{c\min})(f'-\bar{f})}{f_{\max}-\bar{f}} & f'\geqslant\bar{f}\\ P_{c\max} & f'<\bar{f}\end{cases}\tag{35}$$

式中: f'为要交叉 2 个体中适应度较大的个体适应度值; $\bar{f}$为种群中的平均适应度值; $f_{\max}$为种群中适应度最大值; $P_{c\max}$为最大交叉概率, 避免概率过大导致搜索过程过于随机, 取 0.9; $P_{c\min}$为最小交叉概率, 避免概率过小导致搜索过程过于局限, 取 0.6。

变异操作: 依据变异概率将个体编码串中的某些基因值用其他基因值来替换, 从而形成一个新的个体。算法中的变异运算是产生新个体的辅助方法, 其决定了算法的局部搜索能力, 同时保持种群的多样性。交叉运算和变异运算的相互配合共同完成对搜索空间的全局搜索和局部搜索。变异概率公式为

$$P_m=\begin{cases}P_{m\max}-\dfrac{(P_{m\max}-P_{m\min})(f'-\bar{f})}{f_{\max}-\bar{f}} & f'_m\geqslant\bar{f}\\ P_{m\max} & f'_m<\bar{f}\end{cases}\tag{36}$$

式中: $P_{m\max}$为最大变异概率, 避免概率过大导致高阶模式被破坏, 取 0.1; $P_{m\min}$为最小变异概率, 避免概率过小导致种群多样性下降太快, 取 0.01; f'_m为要变异的个体的适应度值。

惩罚因子操作: 对变量进行编码, 在遗传算法的交叉变异过程中, 交叉变异的种群可能会出现不满足约束的个体, 当这种情况出现时, 通常需要对种群进行修正, 使种群中的个体均满足约束。考虑到修正算子编制的复杂性, 本算法中添加惩罚因子对交叉变异结果进行约束, 使生成的种群个体可以更大程度地满足约束, 大大降低了算法的复杂性。

评估机制操作: 交叉、变异操作之后, 设计一个评估机制(如式 (37) 所示), 通过该机制可以使种群在种群评价中兼顾适应度和多样性这 2 种能力。

$$v(s)=w\frac{D(P)-D(P_1)}{D(P)}+(1-w)\frac{f_{\text{fit}1}-f_{\text{fit}}}{f_{\text{fit}}}\tag{37}$$

式中: $w\in[0,1]$为平衡种群多样性和适应度的权重; f_{fit}为父代适应度之和; $f_{\text{fit}1}$为子代的适应度之和; $D(P)$和$D(P_1)$分别表示父代种群和后代种群的距离多样性, 其定义为式 (38)。在式 (38) 中, 从适应度的角度对种群的多样性进行评估。

$$D(P)=\text{var}(f_{\text{fit}})\tag{38}$$

式中: var 为方差函数, 用于评估种群适应度的方差。

在交叉和变异之后, 对于每一对, 生成 2 个子个体。如果式 (31) 为负, 则 2 个子个体被淘汰。获得较大价值的 2 个个体可以保留到下一代。

算法整体流程如图 4 所示。

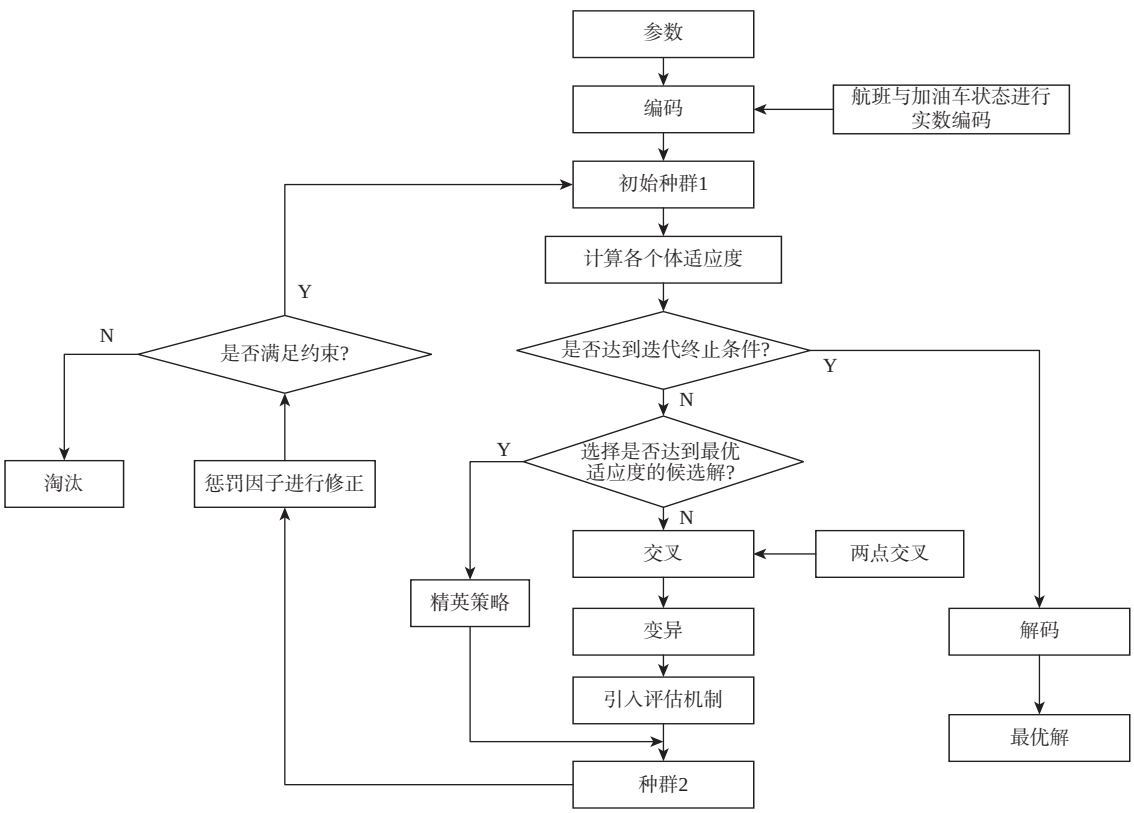


图 4　本文改进的带精英策略的遗传算法流程

Fig. 4　Flowchart of genetic algorithm with elite strategy improved in this paper

4 案例分析

4.1 案 例

以中国某大型机场T1、T2、T3航站楼实际运行数据为例，选取某日高峰时刻进离港航班数据，其中，T1航站楼81次航班，T2航站楼271次航班，T3航站楼404次航班。图5给出了该机场的机位分布示意，部分航班计划如表1所示。

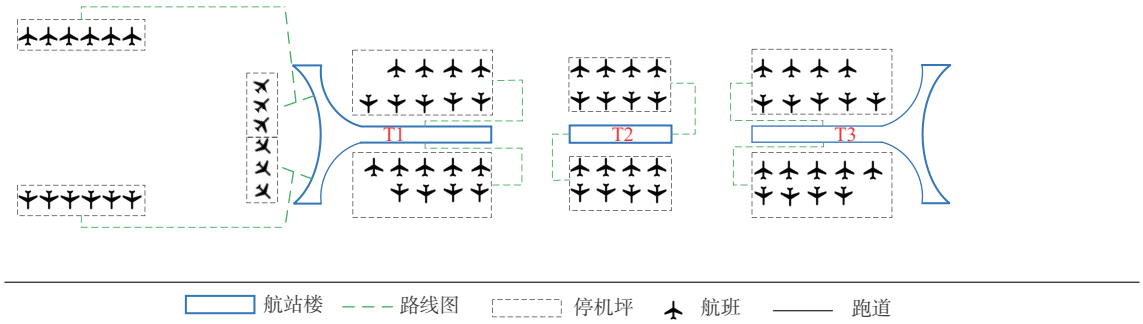


图5 机场机位分布示意

Fig. 5 Schematic diagram of airport stands

表1 航班计划

Table 1 Flight schedule

航班号	航班性质	机型分类	分配停机位	推出时刻	机型最小过站时间/min	最长可加油时间/min	旅客登机时间/min	加油量/kL
CA4132	离港	C	552	7:05	65	50	15	22
NH160	离港	D	520	14:20	75	50	25	50
TG615	离港	E	512	17:05	90	55	35	160
LH721	离港	F	509	10:30	90	50	40	250

不同机型的加油信息主要包括最小油量、加油速率、单车加油时间、允许加油时间、至少需要加油车数量，如表2所示。

表2 航班飞机类型加油方式对比

Table 2 Comparison of aircraft types and refueling methods for flights

机型信息	最小油量/L	加油速率/(L·s^{-1})	单车加油时间/min	允许加油时间/min	至少需要加油车数量
C	15 000	10	25	[35,60]	1
D	35 000	15	38.8	[50,55]	1
E	140 000	30	77.8	[40,55]	2
F	250 000	40	104	50	3

4.2 结果分析

第1阶段单航站楼单机型加油车独立调度中，T1航站楼共有81个航班，T2航站楼共有271个航班。由图6可知，迭代500次后，车辆数为4时趋于稳定，因此，T1航站楼共需要4辆车完成调度结果；由表3可知，4辆加油车都有各自工作的航班编号顺序，以1号加油车为例：需要对航班编号为5-9-12-17-24-26-28等等的航班进行加油工作。由图7可知，迭代500次后，车辆数为9时趋于稳定，因此，T2航站楼共需要9辆车完成调度；由表4可知，9辆加油车有各自工作的航班编号顺序，以2号加油车为例：需要对航班编号为113-122-138-145等等的航班进行加油工作。

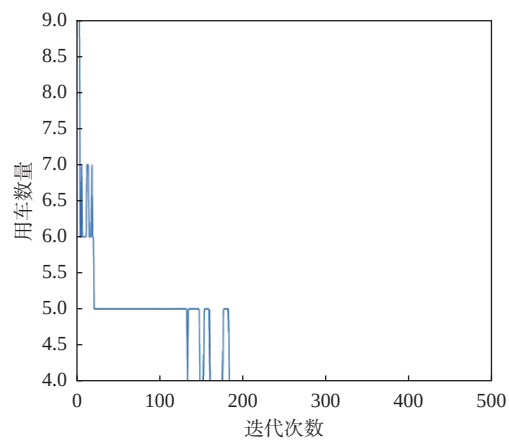


图6 T1航站楼迭代结果

Fig. 6 Iterative results of T1 terminal

表3 T1航站楼调度结果

Table 3 T1 terminal scheduling results

加油车编号	调度结果(航班编号)
1号加油车	5 9 12 17 24 26 28 43 47 53 55 57 62 65 71 76
2号加油车	2 6 8 11 13 16 20 30 35 38 45 49 51 54 58 63 67 78 81
3号加油车	10 15 18 19 21 23 29 33 37 39 41 44 46 48 50 52 60 69 74
4号加油车	1 3 4 7 14 22 25 27 31 32 34 36 40 42 56 59 61 64 66 68 70 72 73 75 77 79 80

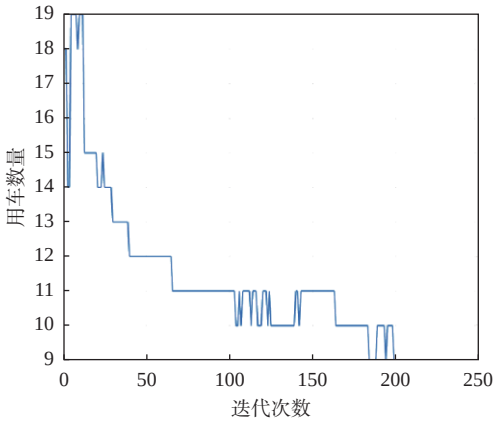


图 7　T2 航站楼迭代结果

Fig. 7　Iterative results of T2 terminal

第 2 阶段多航站楼单机型加油车协同调度中, T1 和 T2 共有航班 352 次。由图 8 可知, 迭代 500 次后, 车辆数为 30 时趋于稳定, 因此, 至少需要 30 辆车完成 2 个航站楼的任务。由表 5 可知, 30 辆加油车都有各自工作的航班编号顺序, 以 3 号加油车为例: 需要对航班编号为 21-72-83-94-99-218 等等的航班进行加油工作。

第 3 阶段多航站楼多机型加油车协同调度中, T1 和 T2、T3 共有航班 756 次, 共有 4 种不同机型的航班类型。T1、T2 及 T3 航站楼至少需要 45 辆加油车完成所有加油任务。由图 9 可知, 其中 36 辆加油车仅为 C 型和 D 型航班提供加油服务, 其余 9 辆加油车为 E 型和 F 型航班提供加油服务。加油调度执行的加油任务航班编号如表 6 所示, 每辆车都有各自工作的航班编号顺序。

表 4　T2 航站楼调度结果

Table 4　T2 terminal scheduling results

加油车编号	调度结果(航班编号)
1号加油车	4 12 19 23 27 34 52 54 62 67 76 82 84 90 94 101 103 114 133 135 140 143 146 155 162 170 172 185 207 209 211 213 216 222 229 236
2号加油车	113 122 138 145 148 165 167 175 177 181 186 198 200 202 217 219 226 228 237 251
3号加油车	2 6 15 29 32 38 39 41 57 63 74 79 86 91 95 97 100 116 124 126 128 134 157 160 163 168 182 192 215 225 234 240 243 260
4号加油车	3 13 17 45 55 64 72 77 87 99 105 107 111 121 125 127 136 151 174 183 189 196 199 212 223 235 238 252 255 261 263 265
5号加油车	5 7 16 22 35 43 48 51 58 60 81 115 139 153 164 166 193 208 214 218 220 227 248 256
6号加油车	14 21 24 30 33 36 40 46 53 66 70 104 108 117 137 154 156 158 169 171 178 190 203 206 210 221 232 244 246 249 254 264 267 269
7号加油车	1 10 26 28 44 47 59 69 71 88 93 96 102 106 109 119 129 132 147 149 176 179 197 241 245 266 271
8号加油车	8 20 31 50 56 61 68 83 98 112 118 123 131 142 144 152 159 161 173 180 184 187 195 201 204 224 231 239 242 247 250 253 258 262 270
9号加油车	9 11 18 25 37 42 49 65 73 75 78 80 85 89 92 110 120 130 141 150 188 191 194 205 230 233 257 259 268

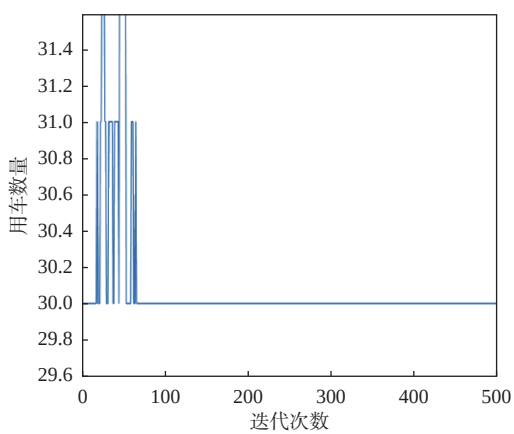


图 8　T1、T2 航站楼迭代结果

Fig. 8　Iterative results of T1 and T2 terminals

表 5　T1、T2 航站楼调度结果

Table 5　Scheduling results of T1 and T2 terminals

加油车编号	调度结果(航班编号)
1号加油车	19 47 106 137 162 163 177 178 213 222 267 290 306 324 351
2号加油车	29 39 89 115 117 132 165 198 214 239 286
3号加油车	21 72 83 94 99 218 252 271 277 319 323
⋮	⋮
28号加油车	27 64 120 121 167 170 236 253 295 313 339 349
29号加油车	18 81 122 154 181 207 232 251 298 308 338 348
30号加油车	8 17 68 114 131 156 158 212 242 283 305 333 352

4.3　调度方案对比

使用改进的遗传算法对 3 个阶段模型依次求解, 与人工调度、传统遗传算法的对比结果如表 7 所示, 此处人工调度方法与传统启发式算法类似。可知, 在第 1 阶段模型求解中, 改进的算法相比人工调度和遗传算法, 车辆数量分别减少了 2 辆、10 辆和 1 辆、8 辆, 降幅分别为 33.3%、52.6%。在第 2 阶段中, 改进的算法相比较人工调度与遗传算法, 在车辆数量分别减少了 5 辆和 4 辆, 降幅为 14.3%。在第 3 阶段中, 改进的算法相比人工调度和遗传算法, 车辆数量分别

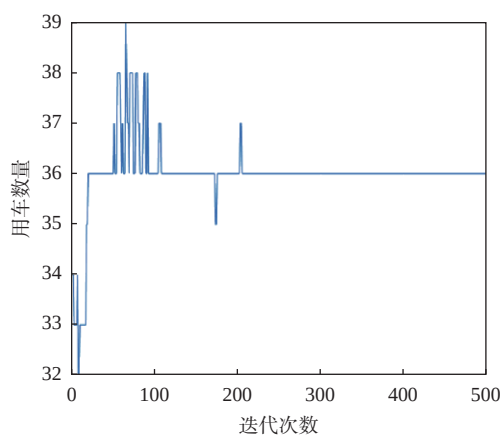


图 9　T1、T2、T3 航站楼迭代结果

Fig. 9　Iterative results of T1, T2, and T3 terminals

表6 T1、T2、T3航站楼调度结果

Table 6 Scheduling results of T1, T2, and T3 terminals

航班类型	加油车编号	调度结果(航班编号)/C、D型航班
C、D型	1号加油车	53 149 162 226 227 240 260 319 334 349 374 470 495 512 558 576
	2号加油车	50 126 188 193 215 257 278 309 331 369 383 406 454 459 468 497 523 541 593
	⋮	⋮
	35号加油车	27 46 204 292 370 458 476 493 520 590 605
	36号加油车	43 68 75 79 84 110 113 118 124 127 142 207 228 231 237 315 339 342 352 355 373 387 450 466 486 587
E、F型	37号加油车	147 156 160 195 200 246 248 286 390 397 420 430 465 496 506 530 572 581 595
	38号加油车	77 85 155 171 191 222 251 259 325 353 362 372 448 484 535 543 554 564 566 574 602
	⋮	⋮
	44号加油车	86 114 139 175 183 341 393 402 415 427 456 464 503 524 575
	45号加油车	120 133 217 242 271 351 429 600

表7 不同调度方案结果对比

Table 7 Comparison of the results from different scheduling schemes

调度类型	T1航站楼用车数量	T2航站楼用车数量	T1、T2航站楼用车数量	T1、T2、T3航站楼用车数量
人工调度	6	19	35	50
遗传算法	5	17	34	49
改进遗传算法	4	9	30	45

减少了5辆和4辆,降幅为8.2%,本文算法相比传统的人工调度算法和遗传算法,三阶段调度加油车数量分别平均降低了27.6%和21.8%。由以上数据得到了3种调度方法的对比图,如图10所示。

图11给出了上述3种调度方法的最佳个体的适应度曲线。可知,在前20代左右,红色的改进遗传算法曲线比其他2种方法的曲线收敛速度更快;在20～50代,改进遗传算法曲线收敛速度进一步加快,扩大了与其他2种方法的收敛速度差异,体现了算法的高效性能。

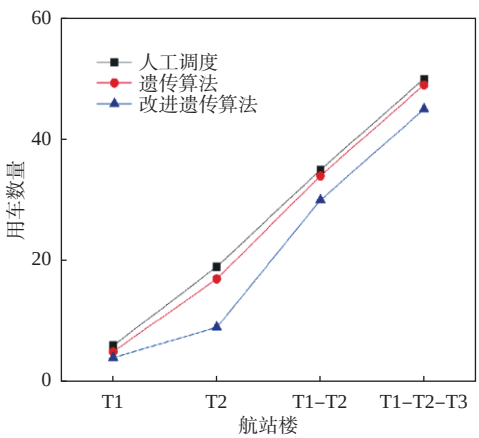


图10 实验对比

Fig. 10 Experimental comparison

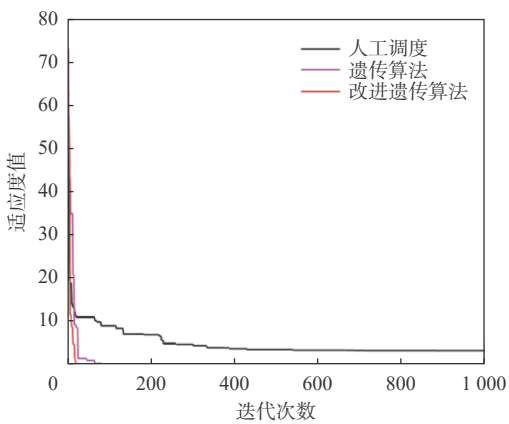


图11 最优个体适应度曲线

Fig. 11 Optimal individual fitness curve

5 结 论

本文综合考虑不同航站楼、不同机型所需要的油量等3种不同模式车辆运行约束差异,从更贴合机场实际运行视角构建了机场加油车调度问题的整数线性规划模型,并以某机场的具体数据为背景开展了数值实验研究,所得主要研究结论如下:

1)考虑到更贴合机场实际运行所面对的单航站楼单机型、多航站楼单机型及多航站楼多机型的情况展开研究,对推动智慧机场发展、提高机场运营管理水平具有重要意义。

2)改进遗传算法引入精英策略,同时,考虑到航班数量大大增加,为避免大量不满足约束的种群个体的出现,设计惩罚因子并引入算法中,大大提高了收敛速度,简化了计算过程。

3)对比人工调度和遗传算法,所改进的遗传算法在调度方面的表现上有较大的提高,仿真结果表明,与人工调度和遗传算法对比,调度加油车数量平均降低了27.6%和21.8%,能够为机场加油车调度提供有效的决策支持。

参考文献(References)

[1] Xue G Q, Wang Y, Guan X Y, et al. A combined GA-TS algorithm for two-echelon dynamic vehicle routing with proactive satellite stations[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 164: 107899.

[2] 王庞伟, 邓辉, 于洪斌, 等. 车路协同系统下区域路径实时决策方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(7): 1349-1360.

Wang P W, Deng H, Yu H B, et al. Real-time regional path decision method in cooperative vehicle infrastructure system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(7): 1349-1360(in Chinese).

[3] Ghoseiri K, Ghannadpour S F. Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(4): 1096-1107.

[4] Hu C, Lu J, Liu X, et al. Robust vehicle routing problem with hard time windows under demand and travel time uncertainty[J]. Computers & Operations Research, 2018, 94(C): 139-153.

[5] Yang J. Research on the application of airport special vehicle scheduling based on genetic algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2019, 29: 164-168.

[6] Heng H, Qi X. Dynamic refueling vehicle scheduling considering task balance[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42(5): 923.

[7] Zhong J. Aircraft tractor safety scheduling based on improved NSGA-II algorithm[J]. Technology and Industry, 2020, 20(4): 175-180.

[8] Zhou Z Q, Liu S, Huang K Y. Research on airport trailer emergency scheduling model based on genetic simulation annealing algorithm[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 383(1): 012044.

[9] Zhang Y, Chen Y, Zhang Y, et al. Improved ant colony algorithm for vehicle scheduling problem in airport ground service support[J]. Journal of Harbin Institute of Technology: English Edition, 2023, 30(1): 1-12.

[10] Wang Z R, Li Y, Hei X H, et al. Research on airport refueling vehicle scheduling problem based on greedy algorithm[C]//Proceedings of the Intelligent Computing Theories and Application. Berlin: Springer, 2018: 717-728.

[11] Zhu S R, Sun H J, Guo X. Cooperative scheduling optimization for ground-handling vehicles by considering flights' uncertainty[J]. Computers& Industrial Engineering, 2022, 169: 108092.

[12] Zhao P X, Han X, Wan D. Evaluation of the airport ferry vehicle scheduling based on network maximum flow model[J]. Omega, 2021, 99: 102178.

[13] 冯明端, 肖雪, 周航. 机场地面保障多车型车辆联合调度模型研究[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2023, 47(1): 67-72.
Feng M D, Xiao X, Zhou H. Research on the multi-type joint scheduling model of airport ground support vehicles[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023, 47(1): 67-72(in Chinese).

[14] 衡红军, 戚馨桐. 考虑任务均衡的加油车动态调度问题[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(5): 923-930.
Heng H J, Qi X T. Dynamic refueling vehicle scheduling considering task balance[J]. Computer Engineering and Science, 2020, 42(5): 923-930(in Chinese).

[15] 中国民用航空局. 航班安全运行保障标准: 民航发〔2020〕4 号.[S]. 北京: 中国民用航空局, 2020.
Civil Aviation Administration of China. Flight safety operation guarantee standards: CAAC〔2020〕No. 4.[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2020(in Chinese).

Considering three-stage scheduling optimization of multi-type flight refueling vehicles with time windows

XING Zhiwei*, ZHOU Fangyu, SUN Ke, LI Yating

(School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To address the issue of inefficient refueling vehicle scheduling during airport flight support operations, this study establishes dual constraints for flight refueling time windows and permissible commencement time windows while prioritizing flight safety. It creates three integer programming models that optimize refueling vehicle allocation under these two limitations, standardizes stand designations and apron positions, and looks at key variables in three operational situations. According to the actual operation of the airport, a genetic optimization algorithm with elite strategy was proposed to solve the model according to the actual operation of the airport. In the first stage of independent scheduling, an evaluation mechanism that takes into account the two abilities of adaptability and population diversity was designed to ensure the diversity of the population. In the second and third stages of collaborative scheduling, a penalty factor introduction algorithm is designed, which can effectively avoid the emergence of populations that do not meet the target constraints. The simulation results show that compared with the traditional manual scheduling and genetic algorithm, the number of dispatched fuel trucks is reduced by 27.6% and 21.8% on average, which can provide effective decision support for airport fuel truck scheduling.

Keywords: air transportation; airport; flight guarantee; improved genetic algorithm; refueling vehicle scheduling

Received: 2024-05-17; **Accepted**: 2024-09-06; **Published Online**: 2024-09-24 10:33

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240923.1846.006

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (U2333205); Civil Aviation University of China Research Innovation Project for Postgraduate Students (2023YJSKC02012)

* **Corresponding author**. E-mail: cauc_xzw@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0371

大跨度柔性支架光伏组件安装设备网络时延补偿策略

李金键[1]，王海波[1,2,*]，宋泓霖[1]，杨青波[1]，包茂成[1]，钱华政[3]，李博[3]

(1. 西南交通大学 机械工程学院，成都 610031；2. 轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室，成都 610031；
3. 通威股份有限公司，成都 610014)

摘　　要：针对“渔光一体”柔性支架体系光伏电站的建设，提出柔性支架缆索与光伏组件一体化同步安装方式，并设计安装设备。对于柔性支架位置与张力控制器的研究，建立柔性支架动力学模型研究柔性支架系统特性，并针对水上远距离通信存在的随机延迟设计延迟预测算法，将预测后的延迟补偿到位置、张力控制器。通过仿真模拟和试验验证，在考虑随机延迟和加工误差等影响时，基于柔性支架体系的光伏组件安装设备的位置差和张力差分别被控制在 0.006 45 m 和 327.3 N 以内，证明了控制器设计的准确性，为柔性支架体系光伏电站自动化建设提供新的解决方案。

关　键　词：光伏安装；柔性支架系统；动力学建模；时延预测；协同控制
中图分类号：TP274^{+}.2
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2026)07-2660-12

在鱼塘上架设光伏电站能够大大提高土地利用率，缓解土地资源紧缺，但在大跨度的水面安装光伏组件，施工难度大，人工成本高[1]。对此，设计一种大跨度柔性支架体系光伏组件自动安装设备，关于设备及安装方法详见文献 [2]。该设备可在远距离水面上一体化同步架设柔性支架并安装光伏组件，两岸设备同步控制来实现柔性缆索的恒张力收放，远距离无线通信的传输延迟成为影响设备控制系统的重要因素。

准确可控的柔性支架模型对控制器设计仿真有重要借鉴意义，光伏电站柔性支架大多采用预应力钢绞线，国内外有众多对于钢绞线等缆索系统动力学模型的研究，针对刚柔耦合定位平台中柔性铰链采用浮动坐标法建立其力学模型，将模型求解结果与 ABAQUS 软件仿真结果比较证明其模型具有较高的精度[3]。使用绝对节点坐标法建立缆索单元，构建分段连续绝对节点坐标法缆索单元，对输电线路架设中突然断线的情况进行动力学分析[4]。使用机械系统动力学自动分析软件 ADAMS 轴套力方式，利用宏命令对起重机吊重系统钢丝绳建模，将钢丝绳离散成小刚体圆柱，每段之间通过轴套力连接模拟工作特性，仿真获得了较好的动态响应效果[5]。采用轴套力建模方法对缆索进行建模，结合 Matlab/simulink 模块进行仿真，提高了含缆索系统的仿真精度和仿真速度[6-7]。

对于工况要求远距离通信控制方式存在的随机延迟预测补偿问题，国内外存在该方面的研究，针对网络控制系统受随机时滞和丢包影响的问题，设计随机时延超时方案，并设计 p 步超前状态估计的模型预测控制策略，使网络时滞和丢包稳定可控[8]；对随机时延大于采样周期的情况研究，由时间戳估计

收稿日期：2024-05-31；录用日期：2024-09-06；网络出版时间：2024-10-24 11:05
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241023.1441.001
基金项目：四川省科技规划项目 (2019YFSY0003)
*通信作者. E-mail：haibowang@home.swjtu.edu.cn

引用格式：李金键，王海波，宋泓霖，等. 大跨度柔性支架光伏组件安装设备网络时延补偿策略 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2660-2671. Li J J，Wang H B，Song H L，et al. Network delay compensation strategy for large-span flexible support photovoltaic module installation equipment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2660-2671（in Chinese）.

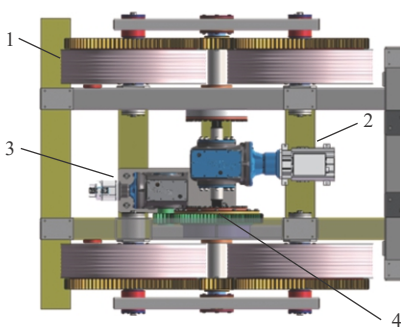
控制时延, 将其考虑到预测控制器的输出中[9]; 可以对系统中存在的时延进行 Markov 链建模, 分析网络控制系统的结构, 设计带有远端补偿器的预测控制器[10]; 或者建立时钟状态空间模型和观测模型, 并构建反向自适应卡尔曼滤波器滤除噪声干扰, 验证反向自适应卡尔曼方法对时间同步稳定性提高[11]; 亦可建立基于时间戳的 Smith 预估补偿器, 对网络进行预测控制[12]。

在工业现场对缆索系统的位置和张力控制方面, 多数学者采用比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制器[13]、自抗扰控制器[14]和模糊控制器[15]等不基于模型的控制器, 更加适用于施工现场进行可靠控制。

1　柔性支架系统建模

1.1　光伏组件安装设备协同控制系统分析

水上光伏组件自动安装设备的原理是在“渔光一体”光伏电站的两岸设置双摩擦卷筒, 如图 1 所示。设备收放线侧原理示意如图 2 所示, 放线侧双摩擦卷筒驱动放出钢绞线, 收线侧摩擦卷筒驱动收回钢丝绳, 钢丝绳和钢绞线连接处使用中间连接板相连。水上光伏电站试验场的环境为: 每隔 15.6 m 为一跨, 每跨有一个由锚桩支撑的 H 型钢支架, 每行有 30 跨, 共 468 m。钢绞线和钢丝绳均在 H 型钢上运动, 通过钢丝绳拉拽钢绞线的方式将钢绞线铺设在 H 型钢上, 过程中同步安装光伏组件, 将光伏组件纵置固定在钢绞线上, 施工场景如图 3 所示。

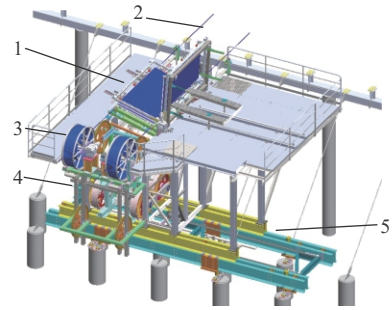


1-绕线卷筒; 2-主传动伺服电机; 3-微调伺服电机; 4-传动行星轮系。

图 1　双摩擦卷筒结构原理

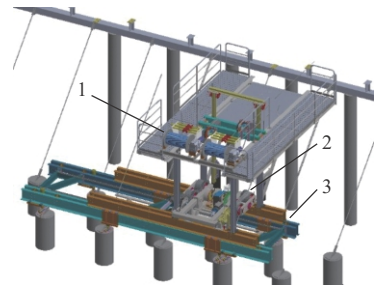
Fig. 1　Double friction drum structure schematic

由于“渔光一体”光伏电站产生大规模经济效益的前提是组件集中架设, 因此, 大跨度且需换行施工导致收放线侧设备的协同控制需采用无线通信。收放线侧设备主要作用在于驱动钢绞线和钢丝绳 2 种柔性缆索运动, 钢绞线和钢丝绳通过中间



1-组件同步安装装置; 2-柔性缆索; 3-放线侧卷扬机; 4-放线侧双摩擦卷筒; 5-放线侧换行走行装置。

(a) 放线侧设备



1-收线侧卷扬机; 2-收线侧双摩擦卷筒; 3-收线侧换行走行装置。

(b) 收线侧设备

图 2　光伏组件安装设备原理

Fig. 2　Schematic diagram of photovoltaic module installation equipment

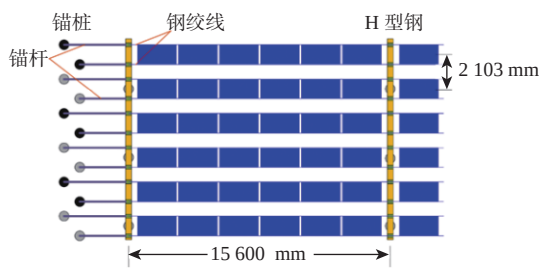


图 3　六行一跨横置光伏组件施工场景

Fig. 3　Six rows and one span horizontal photovoltaic module construction scenario

连接板相连, 因此, 对收放线侧设备的协同控制可以转化为柔性缆索的驱动控制, 在驱动过程中需要保证柔性缆索的张力和中间连接板的位置稳定, 以防组件损坏。在无线通信存在随机时延情况下, 对收放线侧柔性缆索的协同控制进行研究, 并最终保证位置张力可控。

1.2　受力分析与柔性化建模

柔性支架钢绞线架设在 H 型钢上面, 钢绞线和钢丝绳通过中间连接板连接, 由于中间连接板无法直接跨越 H 型钢, 因此, 设计了过索器使连接板可以跟随柔性支架一同在 H 型钢上运动, 如图 4 所示。在实际工程中, 柔性支架与过索器直接接触存在碰撞和摩擦, 因此, 虚拟样机模型中需要计算柔性支架和过索器的接触力[16]。ADAMS

中的接触力由2个接触物体的摩擦力和正压力组成，摩擦力的参数主要包括摩擦系数和静摩擦系数，法向力与摩擦力参数如表1所示；过索器的材质是铝，柔性支架外面包裹着聚四氟乙烯。

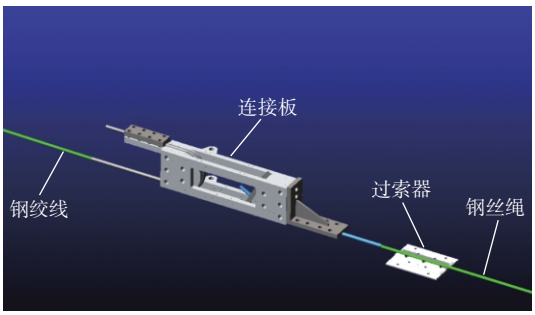


图4 连接板和过索器

Fig. 4 Connecting plate and cable lever

表1 法向力与摩擦力参数

Table 1 Normal force and friction force parameters

接触刚度/(N·m^{-1})	力指数	阻尼/(N·s·m^{-1})	穿透深度/m	静摩擦系数	动摩擦系数	静平移速度/(m·s^{-1})	摩擦平移速度/(m·s^{-1})
2.86×10^6	1.1	577	0.000 1	0.1	0.1	0.001	0.01

使用冲击函数法基于Impact函数计算接触力，计算公式为

$$F_{\text{contact}}=\begin{cases}\text{Max}\,(0,k(x_1-x)^e-\\ \qquad \text{STEP}(x,x_1-d,c_{\max},x_1,0)\cdot\dot{x}) & x<x_1\\ 0 & x>x_1\end{cases} \tag{1}$$

式中：x为当前接触体的位移，m；x_1为接触开始位置，m；k为接触刚度系数，N/m；e为力指数，用于定义接触力随穿透深度的非线性关系；d为阻尼作用的过渡距离，m；$c_{\max}$为最大阻尼系数，(N·s)/m；$\dot{x}$为接触体的相对速度，m/s。

通过离散柔性连接件建模把刚性构件分解为有限个刚性小圆柱，圆柱体之间通过Bushing连接模拟缆索系统，配合ADAMS宏命令建模可正确反应缆索系统的动力学状态。在运动和受力发生变形时实质上是Bushing连接之间的变形而非离散的刚体圆柱体的变形，刚性圆柱体上任意2点无法相对位移，因此，使用Bushing连接模拟缆索系统，本质上仍是在刚性构件的范畴内。在理想情况下，离散的小刚体数量越多，离散柔性连接件仿真的精度与实际情况越接近。在ADAMS为需要柔性连接的两端离散小刚体添加Marker点，分别记为I-Marker和J-Marker，轴套力的作用力F和作用力矩T计算公式如下：

$$\begin{bmatrix}F_x\\F_y\\F_z\\T_x\\T_y\\T_z\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}k_{11}&0&0&0&0&0\\0&k_{22}&0&0&0&0\\0&0&k_{33}&0&0&0\\0&0&0&k_{44}&0&0\\0&0&0&0&k_{55}&0\\0&0&0&0&0&k_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\y\\z\\\theta_x\\\theta_y\\\theta_z\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}c_{11}&0&0&0&0&0\\0&c_{22}&0&0&0&0\\0&0&c_{33}&0&0&0\\0&0&0&c_{44}&0&0\\0&0&0&0&c_{55}&0\\0&0&0&0&0&c_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_x\\v_y\\v_z\\\omega_x\\\omega_y\\\omega_z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}f_{x0}\\f_{y0}\\f_{z0}\\t_{x0}\\t_{y0}\\t_{z0}\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：T_x, T_y, T_z为轴套力在x, y, z方向的平动力分量，N；T_x, T_y, T_z为轴套力绕x, y, z轴的力矩分量，N·m；k_{11}～k_{66}为轴套力的刚度系数；x, y, z为两Marker点之间的相对线位移，m；θ_x, θ_y, θ_z为相对角位移，rad；c_{11}～c_{66}为阻尼系数；v_x, v_y, v_z为相对线速度，m/s；ω_x, ω_y, ω_z为相对角速度，rad/s；f_{x0}, f_{y0}, f_{z0}为初始预加载力分量，N；t_{x0}, t_{y0}, t_{z0}为初始预加载力矩分量，N·m。

由式(2)可知，需确定k、c。根据刚性系数$k=EA/L$可得轴套力的刚性系数计算公式为

$$\begin{cases}k_{11}=EA/L\\k_{22}=k_{33}=GA/L\end{cases} \tag{3}$$

式中：E为弹性模量；A为截面积；L为分段缆索长度；G为剪切模量。

对于实心圆截面，轴的抗扭惯性矩I_{T}等于极惯性矩I_{P}，抗扭刚度系数k_{44}为

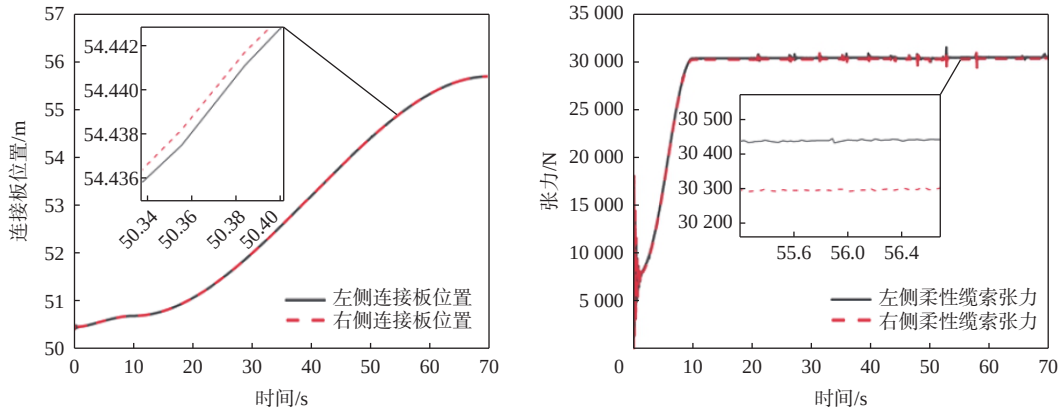
$$k_{44}=GI_{\text{P}}=\frac{G\pi d^4}{32} \tag{4}$$

实心圆截面对于坐标轴的惯性矩为$\pi d^4/64$，因此，k_{55}和k_{66}为

$$\begin{cases}k_{55}=EI_y=\dfrac{E\pi d^4}{64}\\k_{66}=EI_z=\dfrac{E\pi d^4}{64}\end{cases} \tag{5}$$

式中：I_y和I_z分别表示实心圆截面对y轴和的抗弯惯性矩。

将柔性支架离散后添加轴套力，并将离散的柔性支架分别与过索器添加接触力，对2根柔性支架模型添加驱动，设置仿真条件进行效果验证。条件为：光伏组件已经安装在钢绞线上，每块组件38 kg，在0 s时放线侧钢绞线不动，令收线侧钢丝绳收卷，直至柔性支架内部张力达到30 000 N左右，钢绞线和钢丝绳在60 s内同步收放5 m。观察整个过程中运动的平稳性、中间连接板位置的稳定性及2根柔性支架张力的同步性，如图5所示。



(a) 柔性支架连接板位置　　(b) 柔性支架张力

图 5　柔性支架驱动仿真

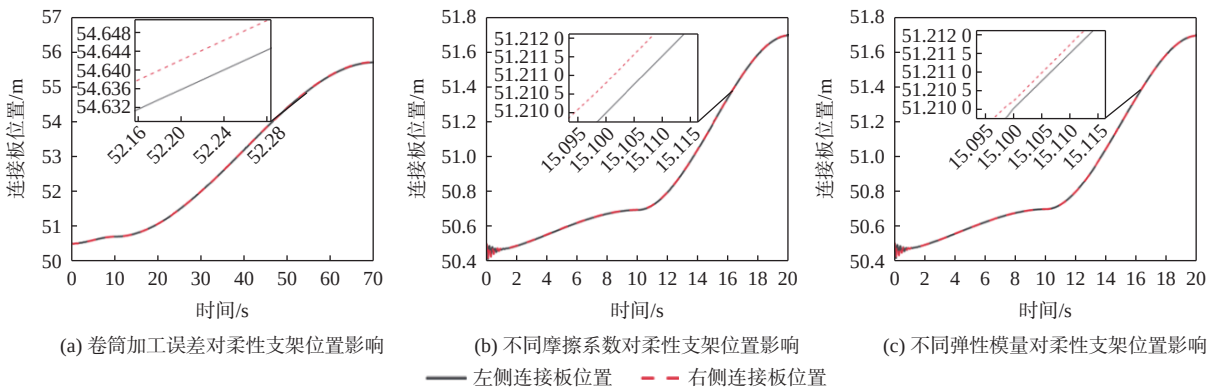
Fig. 5　Driving simulation of flexible supports

1.3　系统特性分析

将系统中可能产生的误差分为 2 类: ①已知误差, 即在同类设备试验时已被证实会使位置和张力产生误差的因素; ②原理误差, 即由材料特性决定的可能会产生的误差。

已知误差为双摩擦卷筒加工误差, 由于驱动电机直接驱动双摩擦卷筒的旋转, 将收放线长度计算为电机旋转的角度, 双摩擦卷筒直径加工产生误差会循环累计地产生收放线误差。放线侧双摩擦卷筒直径为 985 mm, 收线侧双摩擦卷筒直径为 450 mm, 根据《一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差》(GB/T1804—2000)[17] 对未注公差的线性和角度尺寸公差的规定, 在加工精度米级的情况下, 放线侧卷筒的直径公差为±0.8 mm, 收线侧卷筒的直径公差为±0.8 mm。不同误差对柔性支架位置和张力的影响如图 6 和图 7 所示。

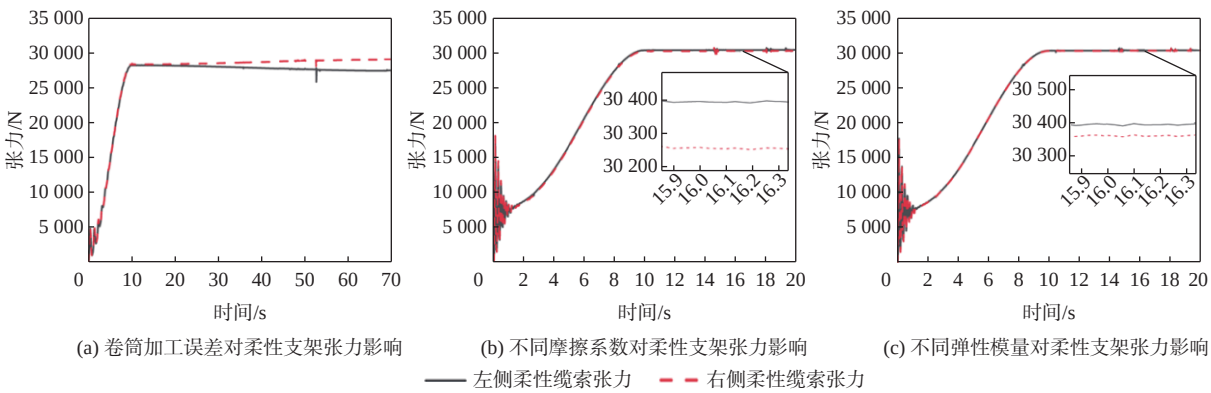
由于双柔性支架的动力学模型建立主要由轴套力和接触力组成。因此, 2 根柔性支架的参数差



(a) 卷筒加工误差对柔性支架位置影响　(b) 不同摩擦系数对柔性支架位置影响　(c) 不同弹性模量对柔性支架位置影响

图 6　不同误差对柔性支架位置的影响

Fig. 6　The influence of different errors on the position of flexible supports



(a) 卷筒加工误差对柔性支架张力影响　(b) 不同摩擦系数对柔性支架张力影响　(c) 不同弹性模量对柔性支架张力影响

图 7　不同误差对柔性支架张力的影响

Fig. 7　The influence of different errors on the tension of flexible supports

异应为误差的主要影响因素。原理误差包括接触力摩擦系数和轴套力弹性模量。考虑极端情况，2根柔性支架与过索器的摩擦系数分别为0.04和0.1；在符合国标要求的范围内，钢绞线的弹性模量可能在195～215 GPa波动，2根柔性支架轴套力中的弹性模量分别为195 GPa和215 GPa。不同误差对柔性支架系统位置和张力的影响最大值如表2所示。

表2 不同误差对柔性支架系统的影响

Table 2 The impact of different errors on flexible support systems

误差类型	位置影响/mm	张力影响/N
双摩擦卷筒加工误差	8.1	3 376.289 1
接触力摩擦系数	2.9	611.892 1
轴套力弹性模量	1.1	341.318 6

2 远距离水面通信延迟预测

2.1 网络控制系统建模

在网络控制系统中抽象出一个变量——网络状态，其无法直接测量，但可以由随机时延和数据丢包等网络性能反映，将丢包视作特殊的长时延，因此，将该变量简化为由时延反映，可以通过测量时延来获得网络状态这个抽象的变量。由于网络状态和时延存在隐含关系，使用隐Markov模型对网络状态建模。考虑准确性和运算效率，选择半连续时间隐Markov模型（semi-continuous time hidden Markov model, SCHMM）继续研究。

假设N种网络状态，初始状态转移概率为η，一步转移概率矩阵为A，混合高斯分布函数为B，则Markov链模型$\lambda=(\eta,A,B)$。其中，网络状态之间Markov跳变条件概率为

$$\Pr\left\{q_{\gamma+1}|q_\gamma,q_{\gamma-1},\cdots,q_1\right\}=\Pr\left\{q_{\gamma+1}|q_\gamma\right\} \tag{6}$$

式中：q_γ为网络状态。

对三元组λ，扩展有

$$\begin{cases} a_{ij}=\Pr\left\{q_{\gamma+1}|q_\gamma\right\} \qquad i,j\in Q \\ \eta_j=P(q_1=j) \\ b_j(\tau_\gamma^{sc})=\sum\limits_{l=1}^{M_j}c_{jl}G(\tau_\gamma^{sc}|\mu_{jl},\sigma_{jl})=\sum\limits_{l=1}^{M_j}c_{jl}g_{jl}(\tau_\gamma^{sc}) \end{cases} \tag{7}$$

式中：a_{ij}表示网络状态由状态i转移到状态j的一步转移概率；Q为网络状态空间；η_j为第1步状态转移概率；$b_j(\tau_\gamma^{sc})$为观测输出τ_γ^{sc}概率密度函数；G为高斯概率密度函数；c_{jl}为第l个高斯分布权重；$g_{jl}(\tau_\gamma^{sc})$为单高斯概率密度函数；μ_{jl}和σ_{jl}为网络状态为j时每个高斯分布函数对应的均值和方差。

单高斯概率密度与网络状态无关，有

$$g_{jl}(\tau_\gamma^{sc})=\frac{1}{\sqrt{2\eta\sigma_{jl}}}\mathrm{e}^{-\frac{\left(\tau_\gamma^{sc}-\mu_{jl}\right)^2}{2\sigma_{jl}}} \tag{8}$$

时延观测概率需用权重将高斯分布函数加权，权重与网络状态相关，在SCHMM中将式(7)和式(8)改写为

$$\begin{cases} b_j(\tau_\gamma^{sc})=\sum\limits_{l=1}^{M_j}c_{jl}g_l(\tau_\gamma^{sc}) \\ g_l(\tau_\gamma^{sc})=\dfrac{1}{\sqrt{2\eta\sigma_l}}\mathrm{e}^{-\frac{\left(\tau_\gamma^{sc}-\mu_l\right)^2}{2\sigma_l}} \end{cases} \tag{9}$$

由于λ参数未知，可初始化参数后在采样数据增多时逐步优化，在有限采样周期内获得理想最优参数。采用最大期望（expectation-maximization, EM）算法对λ极大似然估计，EM算法分E步和M步：E步，根据观测序列和前一步估计得的λ'计算条件期望；M步，得到期望最大参数λ^*，更新模型参数λ'。重复2个步骤，似然函数随着迭代而增大，最终收敛于极大似然估计值。

获得$\lambda=(\eta,A,B)$网络控制系统随机时延模型每一步的参数，通过EM算法将参数不断迭代，根据琴生不等式判断似然函数单调增长，最终得到模型最优参数如式(10)所示。

$$\begin{cases} \eta_i^*=\Pr\{q_1=i|\tau^{sc},\lambda'\} \\ a_{ij}^*=\dfrac{\sum\limits_{r=2}^{k-1}\Pr\{q_{r-1}=i,q_r=j|\tau^{sc},\lambda'\}}{\sum\limits_{r=2}^{k-1}\Pr\{q_{k-1}=i|\tau^{sc},\lambda'\}} \\ c_{il}^*=\dfrac{\sum\limits_{r=1}^{k-1}P(q_r=i,m_r=l|\tau^{sc},\lambda')}{\sum\limits_{r=1}^{k-1}P(q_r=i|\tau^{sc},\lambda')} \\ \mu_l^*=\dfrac{\sum\limits_{r=1}^{k-1}\tau_r^{sc}P(m_r=l|\tau^{sc},\lambda')}{\sum\limits_{r=1}^{k-1}P(m_r=l|\tau^{sc},\lambda')} \\ \sigma_l^*=\dfrac{\sum\limits_{r=1}^{k-1}\left(\tau_r^{sc}-\mu_l\right)^2P(m_r=l|\tau^{sc},\lambda')}{\sum\limits_{r=1}^{k-1}P(m_r=l|\tau^{sc},\lambda')} \end{cases} \tag{10}$$

式中：m_r表示第r个观测样本所属的高斯混合分量隐变量。

2.2 延迟预测

根据SCHMM网络控制系统模型进行预测算法设计，需解决隐马尔可夫模型（hidden Markov model, HMM）评估问题、解码问题和学习问题，对于评估和解码问题，使用前向后向算法进行研究，分3个步骤：初始概率、递归运算、结束输出，根据

该算法思想对计算程序进行设计[18]。

1) 初始概率。初始周期生成每个状态的随机均值和方差, 初始化u和σ。初始化状态转移矩阵, 随机生成$Q\times Q$矩阵表示每个状态之间的转移概率, 处理数据使每个状态之间转移概率满足归一化条件。

2) 递归运算。取对数后可能下溢, 需要计算尺度因子缩放每个时间步的前向概率和后向概率, 有

$$\begin{cases}\alpha_r(j)=P\left(\tau_1^{sc},\cdots,\tau_r^{sc},q_r=j|\lambda'\right)=\\ \quad\sum_{i=1}^{N}\left[\alpha_{r-1}(i)a_{ij}\right]b_j\left(\tau_r^{sc}\right)\\ \beta_{r-1}(i)=P\left(\tau_r^{sc},\cdots,\tau_\gamma^{sc},q_r=i|\lambda'\right)=\\ \quad\sum_{M}^{N}\left[a_{ij}b_j\left(\tau_r^{sc}\right)\right]\beta_r(j)\end{cases}\tag{11}$$

3) 结束输出。采用 Viterbi 搜索算法处理 HMM 中的解码问题, 定义网络状态在r时刻处于状态i的后验概率为$\varsigma_r(i)$; 网络状态从时刻r处于状态i跳变到时刻$r+1$处于状态j的后验概率为$\varsigma_r(i,j)$, 有

$$\begin{cases}\varsigma_r(i)=P(q_r=i|\tau^{sc},\lambda')=\dfrac{P(\tau^{sc},q_r=i|\lambda')}{P(\tau^{sc}|\lambda')}\\ \varsigma_r(i,j)=P(q_r=i,q_{r+1}=j|\tau^{sc},\lambda')=\\ \quad\dfrac{P(\tau^{sc},q_r=i,q_{r+1}=j|\lambda')}{P(\tau^{sc}|\lambda')}\end{cases}\tag{12}$$

对于$\varsigma_r(i)$和$\varsigma_r(i,j)$有

$$\varsigma_r(i)=\frac{P(\tau^{sc},q_r=i|\lambda')}{P(\tau^{sc}|\lambda')}=\frac{\alpha_r(i)\beta_r(i)}{\sum_{i=1}^{N}\alpha_r(i)\beta_r(i)}=\sum_{j=1}^{N}\varsigma_r(i,j)\tag{13}$$

$$\varsigma_r(i,j)=\frac{P(\tau^{sc},q_r=i,q_{r+1}=j|\lambda')}{P(\tau^{sc}|\lambda')}=\frac{\alpha_r(i)\beta_{r+1}(j)a_{ij}b_j\left(\tau_{r+1}^{sc}\right)}{\sum_{i=1}^{N}\alpha_r(i)\beta_r(i)}\tag{14}$$

将更新后的估计值定义为$\hat{\eta}_i$和$\hat{a}_{ij}$, 当$r=1$时, 根据式(10), 有

$$\hat{\eta}_i=P(q_1=i|\tau^{sc},\lambda')=\varsigma_1(i)\tag{15}$$

$$\hat{a}_{ij}=\frac{\sum_{r=2}^{k-1}\varsigma_{r-1}(i,j)}{\sum_{r=2}^{k-1}\varsigma_{r-1}(i)}\tag{16}$$

第r个采样周期且网络状态为i时, 选择第l个高斯分布产生的时延为τ_r^{sc}的概率重新定义为$\xi_r(i,l)$, 有

$$\xi_r(i,l)=P(q_r=i,m_r=l|\tau^{sc},\lambda')=\frac{P(\tau^{sc},q_r=i,m_r=l|\lambda')}{P(\tau^{sc}|\lambda')}=\frac{P\left(\tau_1^{sc},\cdots,\tau_{r-1}^{sc},q_r=i,\tau_r^{sc},m_r=l|\lambda'\right)}{\sum_{l=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}P(q_r=i,m_r=l,\tau^{sc}|\lambda')}\tag{17}$$

化简后可得

$$\xi_r(i,l)=\xi_r(i)\frac{c_{il}\mathrm{g}_l(\tau_r^{sc})}{\sum_{l=1}^{M}c_{il}\mathrm{g}_l(\tau_r^{sc})}\tag{18}$$

式(18)需满足网络状态为i, 由于只考虑单高斯混合分布, 对不同网络状态下的$\xi_r(i,l)$求和, 得到全网络状态相关变量$\xi_r(l)$:

$$\xi_r(l)=\sum_{i=1}^{N}\xi_r(i,l)\tag{19}$$

$$\begin{cases}\hat{c}_{ij}=\dfrac{\sum_{r=1}^{k-1}\xi_r(i,l)}{\sum_{r=1}^{k-1}\xi_r(i)} & i\in Q,l\in M\\ \hat{\mu}_l=\dfrac{\sum_{r=1}^{k-1}\tau_r^{sc}\xi(l)}{\sum_{r=1}^{k-1}\xi(l)} & l\in M\\ \hat{\sigma}_l=\dfrac{\sum_{r=1}^{k-1}\left(\tau_r^{sc}-\hat{\mu}_l\right)^2\xi_r(l)}{\sum_{r=1}^{k-1}\xi_r(l)} & l\in M\end{cases}\tag{20}$$

式中: $\hat{c}_{ij}$表示经 EM 算法当前迭代更新后得到的高斯混合权重估计值; $\hat{\mu}_l$表示经 EM 算法当前迭代更新后得到的高斯均值估计值; $\hat{\sigma}_l$表示经 EM 算法当前迭代更新后得到的高斯方差的估计值。

使用最优估计模型进行时延仿真预测, 处理 3 s 数据, 设置迭代上限为 50 次, 阈值为 0.001。第 301 个采样周期实际迭代 17 次, 最优化估计更新后的模型数据为

$$\begin{cases}\eta^*=[1,0,0,0,0]\\ A^*=\begin{bmatrix}0.891\,2 & 0.054\,2 & 0 & 0.054\,6 & 0\\ 0.038\,6 & 0.961\,4 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0.976\,8 & 0 & 0.023\,2\\ 0.030\,9 & 0 & 0 & 0.907\,8 & 0.061\,3\\ 0 & 0 & 0.034\,6 & 0.051\,8 & 0.913\,6\end{bmatrix}\\ c^*=\begin{bmatrix}0.015\,8 & 0.461\,4 & 0.269\,3 & 0.047\,1 & 0.206\,4\\ 0.010\,3 & 0.256\,6 & 0.462\,1 & 0.074\,2 & 0.196\,8\\ 0.014\,9 & 0.459\,2 & 0.276\,6 & 0.051\,2 & 0.198\,1\\ 0.015\,5 & 0.460\,3 & 0.281\,1 & 0.046\,5 & 0.196\,6\\ 0.012\,2 & 0.367\,5 & 0.405\,9 & 0.032\,5 & 0.181\,9\end{bmatrix}\\ \mu^*=[22.678,9.458,41.921,29.049,34.45]\\ \sigma^*=[2.087,34.535,20.759,4.721,0.845]\end{cases}\tag{21}$$

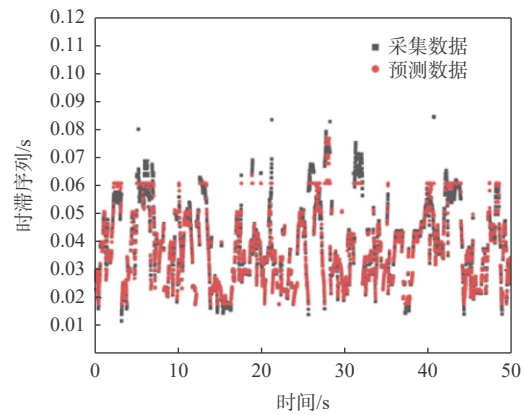
由A^*和c^*概率分布可以看出, 网络状态转移和高斯分布权重均符合 Markov 性质, 该随机时延可由 Markov 方法进行预测。

为保证预测效果的准确性和鲁棒性, 选择

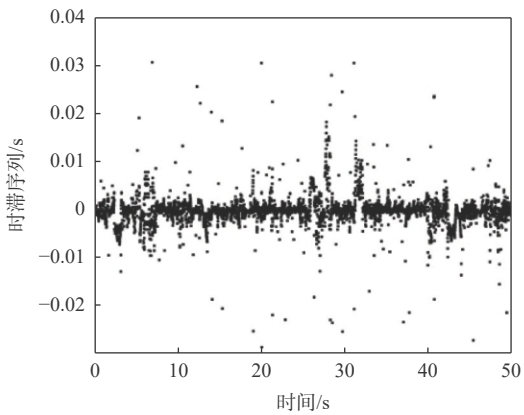
式(21)平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)和均方根误差(root mean square error, RMSE)作为最终评价指标。对第301个采样周期的预测时延序列进行评价，得到P_{MAPE}=0.030 6，R_{RMSE}=0.004 3。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{MAPE}} = \sum_{r=1}^{k} \left| \dfrac{\tau_r^{sc} - \hat{\tau}_r^{sc}}{\tau_r^{sc}} \right| \times \dfrac{1}{k} \\ R_{\mathrm{RMSE}} = \sqrt{\dfrac{1}{k} \sum_{r=1}^{k} \left(\tau_r^{sc} - \hat{\tau}_r^{sc}\right)^2} \end{cases} \tag{22}$$

进行50 s时延预测仿真，随机时延采集和预测对比如图8(a)所示。图8(b)为时延预测值与实际采集数据差值，预测值与实际值的差值集中控制在10 ms以内，部分数据因网络状态的快速切换导致偏差较大，后续在控制中设计数据处理，消除较大偏差。



(a) 预测跟随效果



(b) 预测与实际差值

图8 随机时延预测算法仿真结果

Fig. 8 Simulation results of random time delay prediction algorithm

3 误差影响下柔性支架协同控制研究

3.1 自适应指数加权移动平均滤波器设计

指数加权移动平均(exponential moving average, EMA)是一种常用的滤波方法，其通过判断当前数据的可信程度来给予不同的权重，相对于简单移动平均滤波，更能反映数据的近期变化趋势[19-20]。EMA的计算公式如下：

$$S_t = \alpha X_t + (1-\alpha) S_{t-1} \tag{23}$$

式中：S_t为在时刻t的EMA值；X_t为在时刻t的观测值；α为平滑系数，取值范围为0～1。平滑系数决定观测值权重，α越大，滤波数据越接近观测值，设计算法使α自适应调整大小。

定义α有$\alpha_t = \mathrm{e}^{-\rho\beta}$，$\alpha_t$为$t$时刻的平滑系数，$\mathrm{e}^{-\beta\rho}$为指数衰减函数，$\beta$为数据确定程度参数，$\rho$为控制权重下降速度的参数。

β越大，α越小，EMA越远离观测值，引入信息熵方法引入，信息熵可表达数据不确定性或混乱程度，因此，可使β与信息熵建立联系，将α改写为

$$\alpha_t = \mathrm{e}^{-\rho H(X_t)} \tag{24}$$

式中：$H(X_t)$为信息熵，计算公式为

$$H(X_t) = -\sum_{t=1}^{n} P(x_t) \cdot \log_2(P(x_t)) \tag{25}$$

式中：P表示某个观测特征值出现的概率；x_t为观测数据特征的第t个可能取值。

引入加1平滑避免零概率，将式(24)改写为

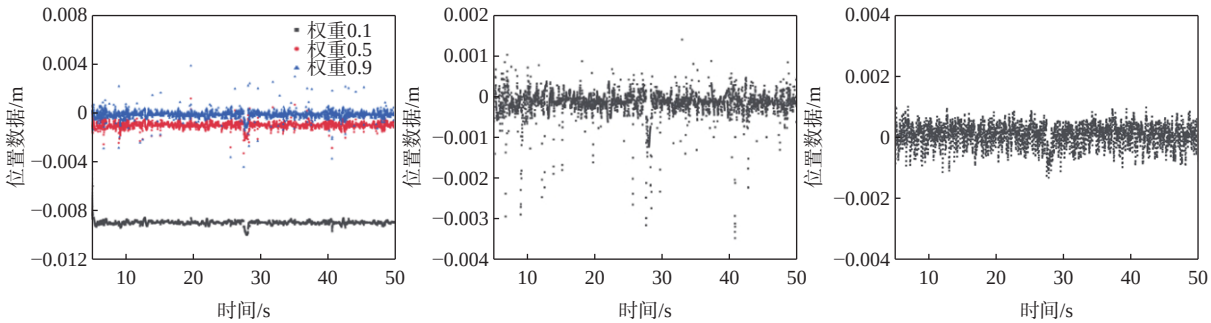
$$\alpha_t = \mathrm{e}^{k\sum_{t=1}^{n} \frac{\mathrm{count}(x_t)\cdot\log_2\left(\frac{\mathrm{count}(x_t)+1}{N}\right)+\log_2\left(\frac{\mathrm{count}(x_t)+1}{N}\right)}{N}} \tag{26}$$

引入方差作为观测数据的特征计算信息熵。参考VIDYA指数动态平均线的思想，将短周期方差和长周期方差比值作为观测特征，计算如下[21-22]：

$$\begin{cases} \bar{s}_t = \dfrac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \\ \sigma_{s_t} = \dfrac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{s}_t) \\ \bar{s}_l = \dfrac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} x_j \\ \sigma_{s_l} = \dfrac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \left(x_j - \bar{s}_t\right) \\ x_t = \dfrac{\sigma_{s_t}}{\sigma_{s_l}} = \dfrac{m \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{s}_t)}{n \sum_{j=0}^{m-1} \left(x_j - \bar{s}_t\right)} \end{cases} \tag{27}$$

式中：n为短周期样本量；m为长周期样本量；$\bar{s}_t$为短周期观测数据平均值；σ_{s_t}为短周期观测数据方差；$\bar{s}_l$为长周期观测数据平均值；σ_{s_l}为长周期观测数据方差；x_t为观测数据特征。

根据上述算法在Simulink中搭建滤波器，对50 s内时延预测补偿后中间连接板位置数据滤波处理，分别比较3种滤波器性能如图9所示，具体对比数据如表3所示，综合评价后，选择自适应EMA滤波



(a) 指定不同权重滤波　(b) 根据方差调整权重滤波　(c) 自适应指数加权滤波

图 9　不同平滑滤波器效果对比

Fig. 9　Comparison of different smoothing filter effects

表 3　不同滤波器对数据处理的性能对比

Table 3　Comparison of performance of different filters in data processing

滤波器类型	最大误差/m	平均误差/m
权重0.1 EMA	0.010 001 09	0.008 475 22
权重0.5 EMA	0.005 675 47	0.000 990 45
权重0.9 EMA	0.006 164 81	0.000 326 68
方差调整EMA	0.006 075 82	0.000 533 89
自适应EMA	0.004 203 74	0.000 461 35

器作为控制系统数据平滑滤波器。

3.2　误差影响下的控制器设计与样机试验

考虑系统特性分析得到的 2 类柔性支架系统误差, 分别对柔性支架系统设计 PID、自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)、模糊 PID 控制器, 不同控制器对比数据如表 4、表 5 所示, 其中, 模糊 PID 联合仿真位置与张力效果如图 10 所示。模糊控制在双柔性支架控制系统中对张力和位置的控制均有较好表现。同时, 模糊 PID 在工业控制现场适应性强, 复杂程度低, 选择模糊 PID 作为该控制系统的控制器。

表 4　张力差对比

Table 4　Comparison of tension difference

控制器	最大张力差/N	平均张力差/N
PID	1 464.888 348	279.478 507
ADRC	961.795 641	210.484 957
模糊PID	450.692 574	100.283 365

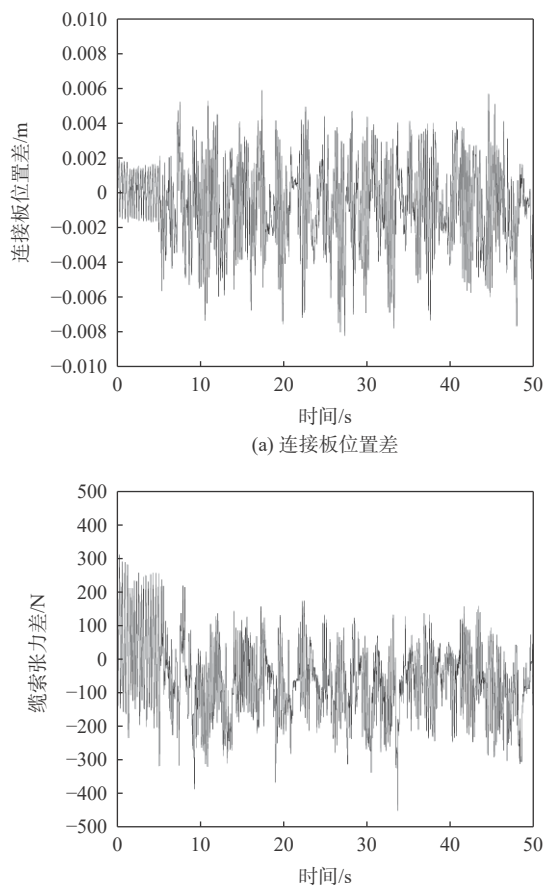
对设备样机进行设计, 选择 S7-1200 作为控制器, 上位机 PLC-Recorder 录波采集系统导入 S7-1200 处理后的时间延迟数据, 在 Matlab 内运行时延预测模型。可将控制系统简化为图 11 形式, 主控柜如图 12 所示。

对 6 s 采样周期数据进行处理并迭代计算, 设置迭代上限为 50 次, 阈值设为 0.001, 最后一个采样周期的实际迭代次数为 15 次, 最优化估计更新后的模型数据为

表 5　中间连接板位置差对比

Table 5　Comparison of intermediate connecting plate positional differences

控制器	最大位置差/mm	平均位置差/mm
PID	30.709	6.369
ADRC	23.387	4.972
模糊PID	8.208	1.911



(a) 连接板位置差

(b) 双缆索张力差

图 10　模糊 PID 联合仿真控制效果

Fig. 10　Fuzzy PID joint simulation control effect

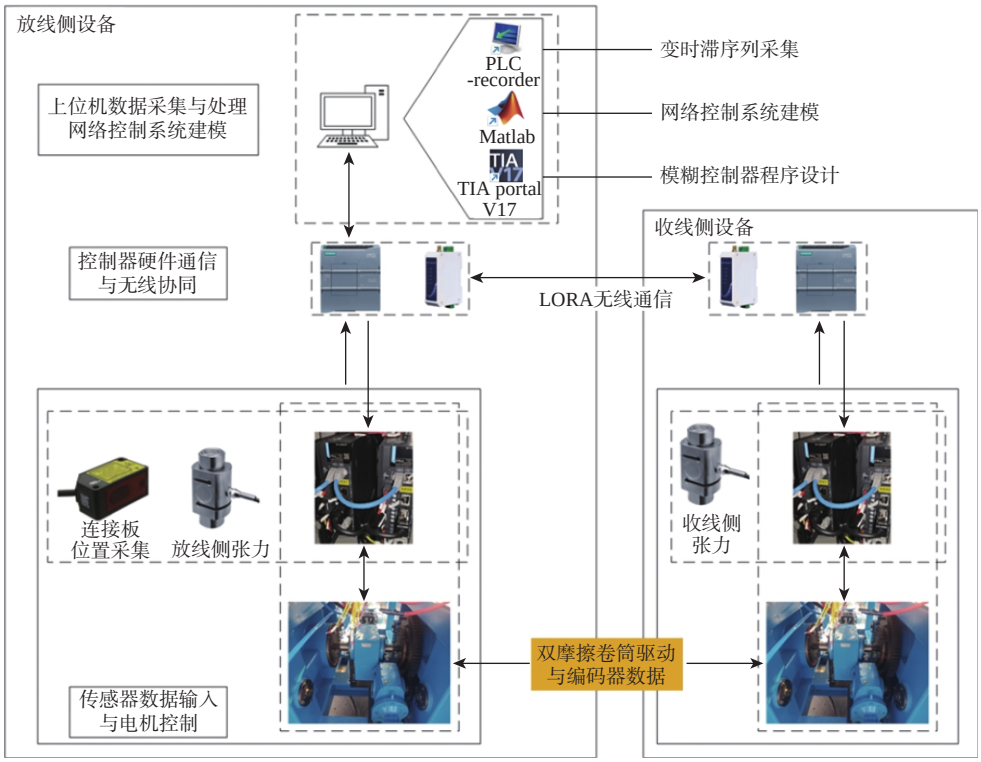


图 11 光伏组件安装控制系统

Fig. 11 Photovoltaic module installation control system



图 12 主控柜布局

Fig. 12 Main control cabinet layout

$$\begin{cases} \eta^* = [0,0,1,0,0] \\ A^* = \begin{bmatrix} 0 & 0.015\,0 & 0.970\,0 & 0 & 0.015\,0 \\ 0 & 0 & 0.017\,4 & 0.052\,4 & 0.930\,2 \\ 0.942\,0 & 0.058\,0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.005\,1 & 0 & 0 & 0.987\,7 & 0.008\,2 \\ 0.041\,8 & 0.927\,2 & 0.031\,0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ c^* = \begin{bmatrix} 0.013\,6 & 0.451\,1 & 0.253\,3 & 0.059\,2 & 0.222\,8 \\ 0.012\,2 & 0.261\,2 & 0.470\,1 & 0.035\,7 & 0.220\,8 \\ 0.012\,8 & 0.453\,9 & 0.241\,1 & 0.042\,5 & 0.249\,7 \\ 0.013\,1 & 0.452\,4 & 0.231\,2 & 0.251\,6 & 0.051\,7 \\ 0.016\,1 & 0.287\,1 & 0.501\,2 & 0.027\,5 & 0.168\,1 \end{bmatrix} \\ \mu^* = [19.5,24.3,33.0,57.4,46.8] \\ \sigma^* = [5.035\,2,1.155\,7,6.045\,2,4.494,13.951] \end{cases} \tag{28}$$

对第 601 个采样周期的预测序列进行评价：MAPE=0.007 135, RMSE= 0.003 225。

将模型参数导入 1 200CPU 后继续采集 50 s 的时延序列和预测序列，如图 13 所示。可以看出，预测序列与时滞序列的差值集中分布在 ±5 ms 区间内。试验表明，时延预测算法具有工程实际应用价值。

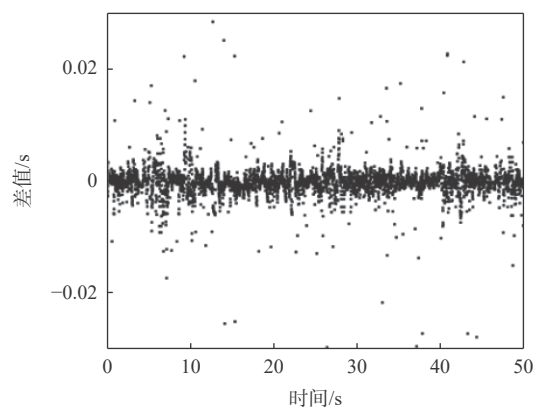
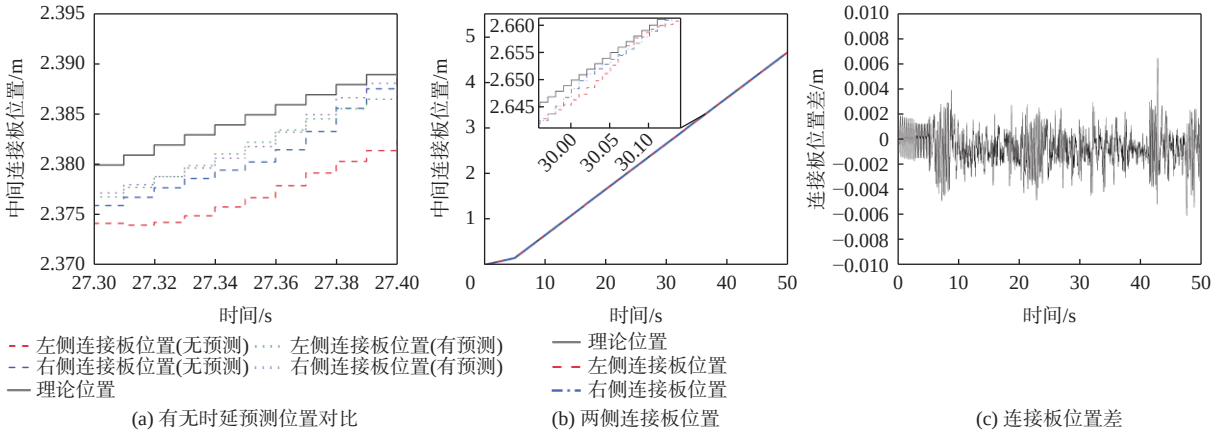


图 13 随机时延预测算法试验效果

Fig. 13 Experimental results of random time delay prediction algorithm

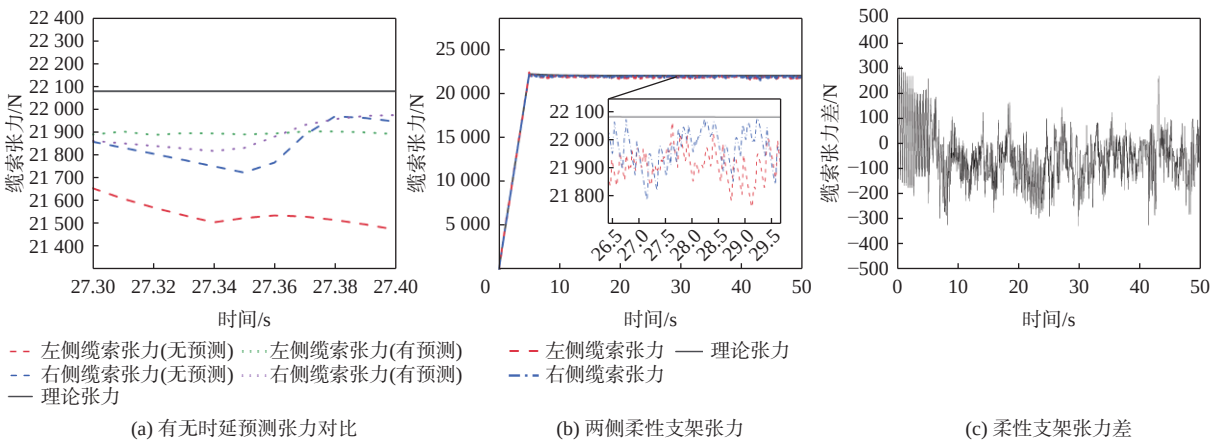
通过对 50 s 内设备连续运行状态下的张力和位置数据进行采集，同样采取张力提升 5 s 后同步收放钢绞线和钢丝绳的驱动条件，对双柔性支架系统位置和张力进行控制。在试验中同时引入随机时延预测算法及模糊控制算法对控制系统进行处理，如图 14(a)、15(a) 所示的有无时滞预测对试验控制效果的对比，可以看出，有时延预测的控制系统对位置和张力的控制效果均优于无预测控制系统，



(a) 有无时延预测位置对比　(b) 两侧连接板位置　(c) 连接板位置差

图 14　位置控制样机试验

Fig. 14　Position control prototype test



(a) 有无时延预测张力对比　(b) 两侧柔性支架张力　(c) 柔性支架张力差

图 15　张力控制样机试验

Fig. 15　Tension control prototype test

且与理论位置和理论张力保持了良好的跟随效果。没有时延预测的控制试验数据处理后得出的结果为: 连接板位置差最大为 0.023 65 m、平均绝对误差为 0.004 74 m; 张力差最大为 851.8 N、平均绝对误差为 225.9 N。无时延预测的张力差控制效果不满足工况需求, 有时延预测的试验结果对比无时延预测的位置差和张力差控制效果分别提升 298.3% 和 156.9%。

由图 14、图 15 位置和张力控制数据可以得出, 经试验设计的随机时延预测算法和控制算法处理后, 连接板位置差最大为 0.006 45 m、平均绝对误差为 0.001 19 m; 张力差最大为 327.3 N、平均绝对误差为 87.9 N, 样机试验结果满足现场施工提出的需同时满足控制两侧柔性支架位置差在 0.1 m 内、张力差在 500 N 内的要求。

4　结　论

针对柔性支架体系的“渔光一体”集中式光伏电站设计电站缆索组件一体化架设设备及控制策略, 能够满足工况所要求架设柔性支架的同时安装光伏组件的条件。在对柔性支架系统动力学建模后分析其系统特性, 发现其主要误差来源, 并考虑误差设计柔性支架协同控制器。在控制系统中, 由于集中式光伏电站的长距离特性, 两侧设备之间远距离通信存在随机延迟, 将该延迟通过半连续隐 Markov 建模准确预测, 将预测部分引入控制系统可以显著增加位置和张力控制的稳定性。通过该设计, 可以得出以下结论:

1) 使用轴套力建模方法刚体柔性化可以准确反映柔性支架的动力学状态, 对柔性支架系统特性进行研究发现, 其误差主要来源于双摩擦卷筒的加工误差、柔性支架与过索器之间的摩擦系数及柔性支架自身的弹性模量。

2) 针对远距离通信存在随机延迟的情况设计的 SCHMM 延迟预测算法具有实际工程应用价值, 且广泛适用于有线与无线通信的随机延迟场景。

3) 由于光伏电站建设的关键在于光伏组件的稳定安装, 因此, 柔性支架的协同控制关键在于双柔性支架之间的位置和张力同步, 模糊控制算法在样机测试中取得了较好的控制效果。

参考文献（References）

[1] 汤俊超, 吴宜文, 张姚, 等. 浅谈“光伏+农业”产业的发展模式[J]. 中国农学通报, 2022, 38(11): 144-152.
Tang J C, Wu Y W, Zhang Y, et al. A brief introduction on the industrial development mode of photovoltaic agriculture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(11): 144-152(in Chinese).

[2] 吴小平, 翁晓军, 黄松和, 等. 一种光伏组件智能安装系统: CN217256312U[P]. 2022-08-23.
Wu X P, Weng X J, Huang S H, et al. Intelligent installation system for photovoltaic modules: CN217256312U[P]. 2022-08-23(in Chinese).

[3] 杨志军, 张驰, 黄观新. 基于浮动坐标法的刚柔耦合定位平台力学模型[J]. 吉林大学学报 (工学版), 2024, 54(2): 385-393.
Yang Z J, Zhang C, Huang G X. Mechanical model of rigid-flexible coupling positioning stage based on floating coordinate method[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(2): 385-393(in Chinese).

[4] 於祖庆, 兰朋, 李昆昆, 等. 基于分段连续 ANCF 缆索单元的输电线缆动力学建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 70-77.
Yu Z Q, Lan P, Li K K, et al. Dynamic simulation of electrical wire based on the piecewise absolute nodal coordinate formulation cable element[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(19): 70-77(in Chinese).

[5] 桂洪斌, 杨佳朋, 张岩, 等. 基于缩尺试验的船舶大分段吊装动力学研究与验证[J]. 振动与冲击, 2023, 42(18): 11-18.
Gui H B, Yang J P, Zhang Y, et al. Dynamic study and verification of a ship large section hoisting system based on scale experiments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(18): 11-18(in Chinese).

[6] 董兵兵. 矿用挖掘机提升机构动力学性能优化[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 142-145.
Dong B B. Dynamic performance optimization of lifting mechanism of mining excavator[J]. Machinery Design and Manufacture, 2019(9): 142-145(in Chinese).

[7] 杨芳, 马喜强, 薛玉君, 等. 多绳缠绕提升系统的虚拟样机建模方法研究[J]. 矿山机械, 2016, 44(7): 31-35.
Yang F, Ma X Q, Xue Y J, et al. Research on modeling method of virtual prototype of multi-rope winding hoisting system[J]. Mining & Processing Equipment, 2016, 44(7): 31-35(in Chinese).

[8] Kim J M, Park J B, Choi Y H. Stochastic observer based Hoo control of networked systems with packet dropouts[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Control Automation and Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 2524-2528.

[9] 张奇智, 张卫东. 网络控制系统中的时戳预测函数控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 126-130.
Zhang Q Z, Zhang W D. Time-stamped predictive functional control in networked control systems[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(1): 126-130(in Chinese).

[10] Boukas E K, Liu Z K, Shi P. Delay-dependent stability and output feedback stabilisation of Markov jump system with time-delay[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 2002, 149(5): 379-386.

[11] Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1996, 29(1): 7106-7111.

[12] 陈鹏, 戴连奎. 自适应 Smith 补偿器在基于 IP 的网络控制系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 115-118.
Chen P, Dai L K. Adaptive Smith compensator for NCSs over IP networks[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(1): 115-118(in Chinese).

[13] Elbadawy A A, Shehata M M G. Anti-sway control of marine cranes under the disturbance of a parallel manipulator[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 82(1): 415-434.

[14] 刘鹏, 周利, 刘仁伟, 等. 用于船舶主动式升沉补偿的自抗扰控制方法[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(22): 83-88.
Liu P, Zhou L, Liu R W, et al. Research on ADRC applied to active heave compensation control system for ship[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(22): 83-88(in Chinese).

[15] Oliveira E J, Honorio L M, Anzai A H, et al. Linear programming for optimum PID controller tuning[J]. Applied Mathematics, 2014, 5(6): 886-897.

[16] 王定贤, 殷亮, 李颖, 等. 钢丝绳的建模及动力学仿真分析[J]. 矿山机械, 2010, 38(8): 20-23.
Wang D X, Yin L, Li Y, et al. Modeling and dynamics simulation analysis for steel rope[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(8): 20-23(in Chinese).

[17] 中国国家标准化管理委员会. 一般公差未注公差的线性和角度尺寸的公差: GB/T 1804—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
Standardization Administration of China. General tolerances—Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications: GB/T 1804—2000[S]. Beijing: China Standards Press, 2000.

[18] 董洁, 游培航, 彭开香. 基于动态内部主元分析和隐马尔科夫模型的动态过程故障检测与分类方法[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(10): 2073-2080.
Dong J, You P H, Peng K X. Dynamic processes fault detection and classification based on dynamic-inner principal component analysis and hidden Markov model[J]. Control Theory and Applications, 2020, 37(10): 2073-2080(in Chinese).

[19] Abbas N, Riaz M, Does R J M M. Mixed Exponentially weighted moving average–cumulative sum charts for process monitoring[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2013, 29(3): 345-356.

[20] Graham M A, Chakraborti S, Human S W. A nonparametric exponentially weighted moving average signed-rank chart for monitoring location[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2011, 55(8): 2490-2503.

[21] Liu L, Peng Q, Lai X, et al. An adaptive nonparametric exponentially weighted moving average control chart with dynamic sampling intervals[J]. Statistical Analysis and Data Mining: the ASA Data Science Journal, 2021, 14(1): 74-87.

[22] Alevizakos V, Chatterjee K, Koukouvinos C. Nonparametric triple exponentially weighted moving average signed-rank control chart for monitoring shifts in the process location[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2021, 37(6): 2622-2645.

Network delay compensation strategy for large-span flexible support photovoltaic module installation equipment

LI Jinjian[1], WANG Haibo[1, 2, *], SONG Honglin[1], YANG Qingbo[1], BAO Maocheng[1], QIAN Huazheng[3], LI Bo[3]

(1. School of Mechanical Engineering, University of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Technology and Equipment of Rail Transit Operation and Maintenance Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610031, China;
3. Tongwei Co., LTD., Chengdu 610014, China)

Abstract: This paper propose a synchronous installation method for the integration of flexible bracket cables and photovoltaic modules, and design installation equipment, in response to the construction of a photovoltaic power station with a "Fishery-PV Integration" flexible bracket system. In order to investigate position and tension controllers for flexible supports, a dynamic model of the flexible support must be established in order to examine the features of the system. Additionally, a delay prediction method must be designed to account for the random delay in long-distance communication across water. The position and tension controls adjust for the anticipated delay. Through simulation and experimental verification, it has been found that the position error and tension error of photovoltaic module installation equipment based on a flexible support system are controlled within the range of 0.006 45 m and 327.3 N, respectively, when considering the effects of random delay and processing errors. This proves the accuracy of the controller design and provides a new solution for the automation construction of photovoltaic power stations with a flexible support system.

Keywords: photovoltaic installation; flexible support system; dynamic modeling; delay prediction; collaborative control

Received: 2024-05-31; **Accepted**: 2024-09-06; **Published Online**: 2024-10-24 11:05
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241023.1441.001
Foundation item: Science and Technology Project of Sichuan Province, China (2019YFSY0003)
* **Corresponding author**. E-mail: haibowang@home.swjtu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0416

基于 Mamba-CNN 的多尺度异常行为检测方法

石洋宇[1]，谢承杰[1]，郑棣文[1]，卢树华[1,2,*]

(1. 中国人民公安大学 信息网络安全学院，北京 102600；2. 公安部 安全防范技术与风险评估重点实验室，北京 102600)

摘 要：针对无监督异常行为检测任务中预测器易衍生出异常泛化及被检目标存在尺度差异等问题，提出一种基于 Mamba 模型改进的 U 型异常行为检测网络。网络从全局特征和局部特征 2 个方面改进，约束预测不良泛化能力。在编码器部分引入状态空间模型加强提取全局特征能力；设计多尺度空间通道融合 (M-SCF) 策略，融合不同感受野下特征信息，降低尺度差异对局部特征干扰；解码器采用跳跃连接丰富浅层特征信息，增强捕捉上下文信息的能力。所提方法在 UCSD Ped2、Avenue 和 ShanghaiTech 等公开数据集进行验证，识别准确率分别达到 98.1%、89.8% 和 78.5%，与近年诸多先进算法相比，具有较高的准确度。结果表明，Mamba 可有效提升异常行为检测精度。

关 键 词：异常行为检测；无监督学习；Mamba 模型；多尺度；特征融合

中图分类号：TP391.4

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)07-2672-09

异常行为检测是社会公共安全领域和计算机视觉领域高度关注的热点和难点之一[1-3]。异常行为通常被解释为在某一场景下监管主体在主观上不希望发生的事，例如单向通行路上出现往返行走的人。然而，主体需求存在多样性，导致关于异常的界定难以明确。针对异常标签稀缺、多样的特点，基于无监督学习的检测方法克服了对先验信息的依赖[4]，可通过对比不同时空信息下的行为轨迹识别异常行为，是一种缺少先验信息时有效的异常行为检测方法。

近年来，无监督异常行为检测方法得到广泛的应用[5]，这类研究方法的实现原则为：通过学习检测目标的正常运动规律，进而预测或重建目标所有可能出现的状态，最终通过状态差异对比选择出异常状态。在学习运动规律的过程中，正常模式复杂多样且卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 强大的兼容性，导致模型在训练过程中将一些异常行为视为允许存在的误差[6-10]。针对这一现象，当前较为有效的解决方法是通过加强全局特征或局部特征学习约束模型表达能力。首先，全局特征规律可理解为目标运动的形状、位置变化等。对于全局特征的学习，如 Park 等[6]通过设计记忆模块记录正常模式样本特征，辅助编码器提取特征信息，削弱网络表示能力。其次，局部特征规律可理解为目标动作的边缘、纹理变化等。对于局部特征的约束，如 Liu 等[10]通过二尺寸偏移矢量变形估计器约束局部特征粗细变化，同时，采用二进制掩码消除背景干扰，使变形估计器专注测量前景偏移量。

最近，Mamba 模型[11]在视觉领域显现出优秀的长序列建模性能。受此启发，将 Mamba 作为异常检测模型的编码器，加强全局特征提取能力。同时，采用 CNN 约束局部特征。此外，针对固定场景下运动目标存在近大远小、形状变化等问题，提出多尺度空间通道融合 (multi-scale spatial channel fusion, M-SCF) 策略。本文主要贡献总结如下：① 提

收稿日期：2024-06-07；**录用日期**：2024-10-04；**网络出版时间**：2024-11-15 11:37
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241115.0909.001
基金项目：中国人民公安大学双一流创新研究项目 (2024yjsky036)
* **通信作者**. E-mail：lushuhua@ppsuc.edu.cn

引用格式：石洋宇，谢承杰，郑棣文，等. 基于 Mamba-CNN 的多尺度异常行为检测方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（7）：2672-2680.
Shi Y Y，Xie C J，Zheng D W，et al. Multi-scale anomaly behavior detection method based on Mamba-CNN[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（7）：2672-2680（in Chinese）.

出一种有效且可行的 Mamba 与 CNN 协同方法, 利用 2 种网络特征处理能力, 提取人体运动行为在不同层面的特征信息, 相互约束克服不良泛化; ② 提出一种新颖的 M-SCF 策略, 通过将不同尺寸的空间与通道特征信息融合, 提升抗尺度干扰能力; ③ 3 个公开数据集的实验结果表明, 本文方法在当前先进的异常行为检测模型中具有极高的竞争力, 展示了 Mamba 模型在异常检测中的潜力。

1　相关工作

1.1　异常检测

在基于无监督异常行为检测方法中, 模型利用无异常数据, 通过训练任务学习样本相邻帧间的行为轨迹, 进而根据所学习的运动规律对物体异常状态进行分析。根据不同训练任务规则, 无监督方法可以分为基于重构和基于预测的异常行为检测方法。基于重构的方法[12−15]是指通过训练模型学习正常样本特征, 生成大量可能存在的正常样本重构图, 在该过程中, 模型学习正常样本的特征表示, 生成与实际正常样本相似的图像。当待测样本与重构图差异大于某个阈值时, 系统就会判定这种差异为异常行为。基于预测的方法[16−18]是通过训练模型学习正常样本运动规律, 建立对正常行为的预期, 使模型能够预测相邻帧间可能出现的动作。在待测样本输入后, 根据模型生成的预测图与待测样本之间差异大小判断异常行为与否。

1.2　Mamba

近期, 新的序列架构 Mamba 模型的出现引起广泛关注, 其强大中长距离建模能力在检测、分割、多模态等众多领域[19−23]均展现出显著优势。Mamba 采用硬件感知的并行算法对结构化状态空间序列模型 (structured state space sequence models, S4)[24]进行改进, 通过选择性扫描机制解决计算复杂度过高的问题, 从而提升模型处理长序列时的效率和性能。然而, Mamba 模型是一种一维序列建模方法, 虽然在具有顺序性质和涉及时间信息的自然语言处理任务中效果显著, 但直接应用在二维图像任务时, 由于缺少空间相邻信息, 导致其仍面临一定挑战。针对这一问题, Liu 等[22]将 Mamba 模型引入图像视觉领域, 通过 Cross-Scan 模块采用四向扫描策略确保每个元素之间存在不同方向的信息, 解决 Mamba 处理二维图像信息缺乏位置感知问题, 实现了全局感受野。

2　基本原理

2.1　网络结构

为使预测模型能够生成更符合预期的未来帧图像, 本文采用与经典生成模型 U-Net[25]相似的编码器加解码器结构, 提出一种状态空间与神经网络协同的异常行为检测方法。其中, 编码器为 Mamba 架构, 利用四向扫描策略进行序列建模, 记录输入图像的空间信息 (全局特征)。解码器与跳跃连接为 CNN 结构, 采用逐步卷积提取并恢复特征信息, 实现图像特征细化 (局部特征), 具体网络框架如图 1 所示。整个异常检测任务可以概述为: 将正常行为的视频图像序列 $\boldsymbol{I}(\boldsymbol{I}_i,\boldsymbol{I}_{i+1},\boldsymbol{I}_{i+2},\cdots,\boldsymbol{I}_{i+m})$作为输入, 通过编码器提取图像特征信息, 再将特征信息传入编码器进行上采样得到预测图像 $\hat{\boldsymbol{I}}_{i+m+1}$, 在特征信息传播过程中, 采用 M-SCF 策略提取并融合不同尺寸下特征信息的通道和空间属性, 削弱尺度变化造成的影响。最终将预测图像 $\hat{\boldsymbol{I}}_{i+m+1}$与实际图像 $\boldsymbol{I}_{i+m+1}$进行比对得到异常评分, 根据评分大小判断检测目标是否存在异常行为, 若预测与实际差异较大则判定为异常。

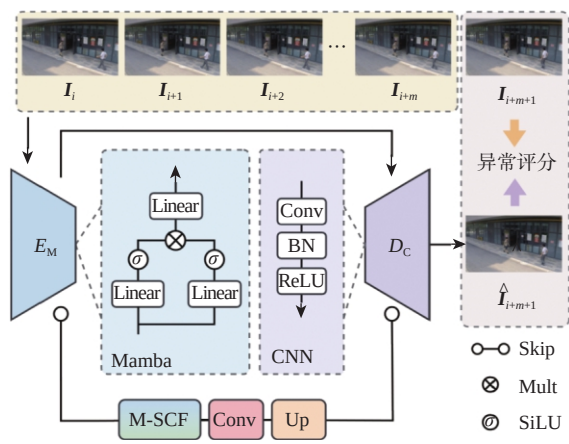


图 1　异常行为检测网络结构

Fig. 1　Network structure of anomaly behavior detection

2.2　编码器

人体的动作和行为具有一定的连续性, 为提取并记录相邻帧之间动作的潜在状态与循环过程, 编码器 E_{M}采用状态空间架构, 通过连续的长序列建模记录正常序列中的动作依赖关系, 其网络结构如图 2 所示, 整个编码器由 Patch Embedding、视觉状态空间 (visual state space, VSS)、Patch Merging 这 3 部分组成。其中, Patch Embedding 和 Patch Merging 均为下采样操作, 改变特征尺寸和通道。编码器输入由连续 m 帧图像在通道维度拼接而成, 即拼接后特征通道数为 $m\times3$。在特征提取整个过程中, 输入特征共进行 4 次下采样 (1/4, 1/8, 1/16, 1/32)得到最终输出 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{E}}$, 保留第 2、3、4 次下采样得到的特征 $\boldsymbol{f}_1$、$\boldsymbol{f}_2$、$\boldsymbol{f}_3$作为传入编码器跳跃连接的输入。

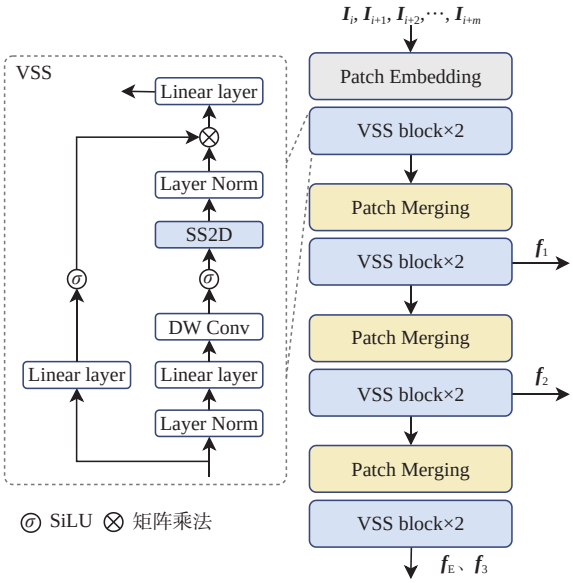


图 2 编码器网络结构

Fig. 2 Network structure of encoder

VSS为Mamba模型在视觉图像空间的衍生结构，是编码器提取全局特征信息的核心，VSS网络结构如图2所示。VSS通过二维选择性扫描(2D-selective-scan, SS2D)，沿着4种方向(左到右、上到下、右到左、下到上)将图像展开成含有不同空间信息的序列，提取特征信息并合并恢复成原大小，扫描展开过程如图3所示。SS2D分别对4个序列进行独立特征提取，每个序列均通过选择性扫描S4过滤无关信息提取关注特征，其计算公式为

$$\boldsymbol{h}_t = \overline{\boldsymbol{A}}_{t-1}\boldsymbol{h}_{t-1} + \overline{\boldsymbol{B}}_t x_t \tag{1}$$

$$y_t = \boldsymbol{G}_t \boldsymbol{h}_t \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{A} \in \mathbf{R}^{N\times N}$为状态矩阵；$\boldsymbol{B}, \boldsymbol{G} \in \mathbf{R}^{N}$为投影参数，$N$为状态大小；$\boldsymbol{h}$表示将输入激励$x$映射到输出响应$y$的隐藏状态；$\overline{\boldsymbol{A}}_t = \exp(\boldsymbol{A}_t \Delta_t)$，$\overline{\boldsymbol{B}}_t = \mathrm{d}\boldsymbol{B}_t \Delta_t$，$\Delta_t = \mathrm{d}x_{t-1}^t$。此时，得到4个具有不同空间属性的特征序列，将这4个序列进行扫描合并重塑成图像继续向下传播。通过Layer Norm对SS2D输出信息特征分布进行正则化，最终通过线性层融合残差连接特征信息。



图 3 SS2D扫描机制

Fig. 3 SS2D scan mechanism

2.3 M-SCF策略

在摄像机记录的视频中，行人与镜头之间由远及近的运动状态使检测目标在图像中呈现出近大远小的空间分布。这样的尺度变化使模型在学习目标发展规律时，不仅要适应目标动作上的形变，同时也要理解目标的尺度大小变换。因此，为使模型重点关注学习目标运动变换规律，提出M-SCF融合不同尺度视觉下的特征信息，削弱检测目标尺度变换对模型的干扰。其策略机制如图4所示。

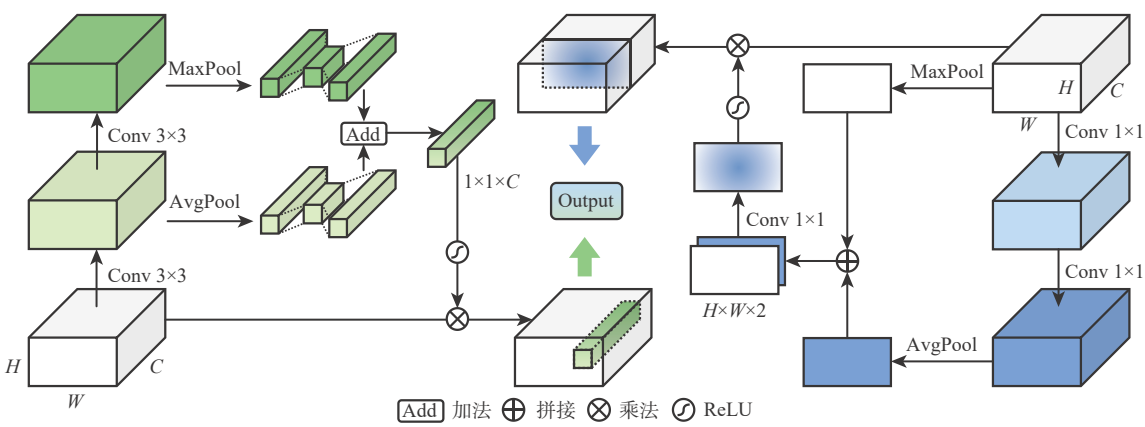


图 4 M-SCF策略机制

Fig. 4 M-SCF strategy mechanism

M-SCF 由通道组和空间组 2 部分组成, 融合 3 种1×1、3×3、5×5不同尺度下的特征信息。具体融合过程为: 输入的连续时间帧图像经过一系列编码器卷积操作后得到特征 $\boldsymbol{f}_a \in \mathbf{R}^{H\times W\times C}$ (H、W、C分别为特征图的高度、宽度、通道数, $a=\{1,2,3\}$), $\boldsymbol{f}_a$进入 M-SCF 后分别向通道组和空间组中传播, 得到具有通道权重的特征 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{Ch}} \in \mathbf{R}^{H\times W\times C}$和具有空间权重的特征 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{S}} \in \mathbf{R}^{H\times W\times C}$。其中, 空间组中 $\boldsymbol{f}_a$通过 2 次连续 3×3卷积操作, 通过第 1 个卷积时特征图 $\boldsymbol{f}_{3\times3}$具有 3×3的感受野, 通过第 2 个卷积时特征图 $\boldsymbol{f}_{5\times5}$具有 5×5的感受野。对 2 个不同感受野的特征在空间维度上进行池化操作, 得到 2 个1×1×C的空间特征。将 2 个空间特征进行通道缩放相加操作, 得到 2 个感受野融合的空间特征信息, 实现不同通道之间空间信息交互。最终通过 Sigmoid 函数将空间特征信息转化为空间权重 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}}$, 将 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}}$加权到 $\boldsymbol{f}_a$, 从而得到 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{S}}$。池化组中, $\boldsymbol{f}_a$通过 2 次连续1×1卷积操作得到1×1感受野的特征 $\boldsymbol{f}_{1\times1}$。对 $\boldsymbol{f}_a$和 $\boldsymbol{f}_{1\times1}$沿着通道方向进行池化操作, 得到 2 个$H\times W\times1$的通道特征, 将 2 个通道特征拼接, 再通过卷积操作得到通道融合特征。最终通过 Sigmoid 函数将通道特征信息转化为通道权重 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{Ch}}$, 将 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{Ch}}$加权到 $\boldsymbol{f}_a$, 从而得到 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{Ch}}$。将 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{S}}$和 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{Ch}}$进行通道拼接操作得到 M-SCF 的最终输出, 因此, M-SCF 的计算规则为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}} = \sigma\{\mathrm{MLP}(\mathrm{Avgpool}(\boldsymbol{f}_{3\times3})) + \mathrm{MLP}(\mathrm{Maxpool}(\boldsymbol{f}_{5\times5}))\} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{Ch}} = \sigma\{\mathrm{Conv}[\mathrm{cat}(\mathrm{Avgpool}(\boldsymbol{f}_{1\times1}), \mathrm{Maxpool}(\boldsymbol{f}_a))]\} \tag{4}$$

$$g_{\mathrm{M-SCF}}(\boldsymbol{f}_a) = \mathrm{cat}((\boldsymbol{f}_a\times\boldsymbol{M}_{\mathrm{Ch}}),(\boldsymbol{f}_a\times\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}})) \tag{5}$$

式中: $\sigma\{\cdot\}$为 Sigmoid 激活函数将特征信息转化为 0～1 的权重; $\mathrm{cat}(\cdot,\cdot)$为通道维度拼接操作; Conv 为1×1的卷积操作; MLP 为特征通过 2 层卷积达到通道缩放效果; Avgpool 为平均池化操作; Maxpool 为最大池化操作。

2.4　解码器

编码器中 SS2D 具有过滤无关信息的特点, 为弥补 SS2D 造成的细节特征缺失, 解码器采用经典的卷积操作对编码器提取的特征信息进行复原。同时, 对编码器状态空间采用逐层跳跃连接, 及时保留局部特征信息。解码器 D_{C}与编码器 E_{M}为非对称式结构, 解码器采用逐级复原的操作, 因编码器将图像大小降为 1/32, 故整个过程包括 5 次上采样操作(1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1), 其网络结构如图 5 所示。

解码器输入由编码器输出 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{E}}$和跳跃连接 $\boldsymbol{k}_a$这 2 部分组成, 最终输出为编码器输入下一帧图像的预测帧 $\hat{\boldsymbol{I}}_{i+m+1}$, 其中, 跳跃连接由编码器输出 $\boldsymbol{f}_1$、$\boldsymbol{f}_2$、$\boldsymbol{f}_3$经过一系列 CNN 结构处理所得, 其转化公式为

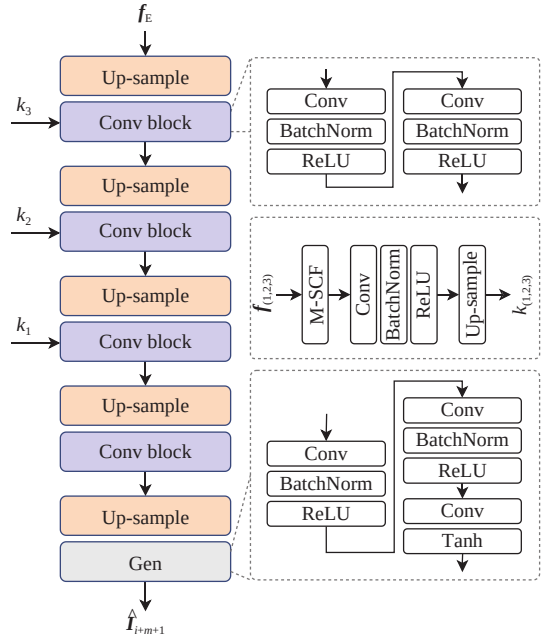


图 5　解码器网络结构

Fig. 5　Network structure of decoder

$$\boldsymbol{s}_a = g_{\mathrm{M-SCF}}(\boldsymbol{f}_a) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{k}_a = \mathrm{up}\{\mathrm{ReLU}[\mathrm{BN}(\mathrm{Conv}(\boldsymbol{s}_a))]\} \tag{7}$$

式中: $a=\{1,2,3\}$; $\mathrm{up}\{\cdot\}$为上采样操作将特征长和宽的尺寸扩大 2 倍; $\mathrm{ReLU}[\cdot]$为非线性运算; $\mathrm{BN}(\cdot)$为正则化操作; $\mathrm{Conv}(\cdot)$为3×3大小的卷积操作; $g_{\mathrm{M-SCF}}(\cdot)$为 M-SCF 操作; $\boldsymbol{f}_a$来自编码器提取的浅层特征。

浅层特征通常具有更多的边缘、纹理等信息, 通过对这些特征信息进行处理并进行跳跃传递, 拼接到解码器各层将全局特征与局部特征结合, 辅助约束特征重构成原始图像尺寸。

2.5　损失函数

均方误差 (mean squared error, MSE) 是一种回归任务中常见的损失函数, 通过计算 2 个被测目标之间的距离来衡量其重合程度, 如式 (8) 所示。

$$L_{\mathrm{MSE}}(\boldsymbol{I},\hat{\boldsymbol{I}}) = \frac{\sum_{j}^{n}(\boldsymbol{I}_j - \hat{\boldsymbol{I}}_j)^2}{n} \tag{8}$$

式中: $n=H\times W$, 为每张图像的像素点总和; j为每个像素点; $\boldsymbol{I}$为原始图像输入; $\hat{\boldsymbol{I}}$为模型预测图像; L_{MSE}为 2 个张量中对应元素之间的距离差, 取值越接近 0, 表示 2 个张量在同一平面上越相似。在异常行为检测任务中, 将计算所得预测图像与真实图像之间的差距作为训练过程中评价模型拟合程度的指标。在训练过程中, 模型只接触不存在异常的

片段，因此，模型应只具备预测目标正常形变的能力，但神经网络强大的学习能力能够将异常形变扩展到预测能力中，为解决上述问题，受文献[10,26]启发，通过衡量输入重建与原始输入之间的可测形变L_{df}，约束模型预测能力，其计算公式为

$$\boldsymbol{O}=\mathrm{up}\left\{\mathrm{D}\left[\mathrm{PE}\left(\mathrm{down}\left(\boldsymbol{I}\right)\right)\right]\right\} \tag{9}$$

$$L_{\mathrm{df}}=\|\boldsymbol{O}\|_2 \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{O}$为偏移量；down(·)为下采样操作；PE(·)为位置嵌入符；D[·]为变形估计器，用来生成偏移向量。

因此，训练过程的总体损失为

$$L=L_{\mathrm{MSE}}+L_{\mathrm{df}} \tag{11}$$

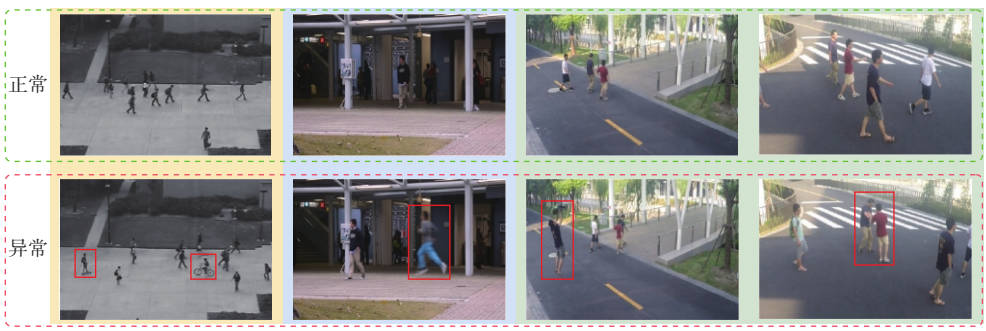
3 实验与结果分析

3.1 实验配置

实验在Ubuntu22.04.2LTS操作系统和NVIDIA GeForce RTX 2080Ti图形处理器上运行，采用Python3.8和Thorch2.0框架构建异常行为检测模型。实验训练的输入为连续5帧的视频图像，其中，前4帧为模型特征提取对象，第5帧为判别对象。在训练过程中，将输入图像的长宽规定为256×256。

3.2 数据集

选择UCSD Ped2[27]、Avenue[28]和ShanghaiTech[29]3个公开数据集作为评估模型性能的基准数据集，这些数据集均通过街边摄像机获取，记录随机发生的情况。如图6(a)所示，UCSD Ped2数据集中出现的异常为在人行道上的自行车、滑板、汽车3种异常。Avenue数据集中出现的异常与奔跑、投掷物体或朝错误方向行走有关，如图6(b)所示。ShanghaiTech数据集相较于前2个数据集具有更为复杂的光线条件和相机角度，如图6(c)所示，图中展示数据集中2个不同场景下的异常行为，该数据集从13个不同的场景下获取，具有更多且更复杂的异常类别，如奔跑、打架、抢劫、跳跃等。3个数据集的数量分布情况如表1所示，UCSD Ped2、Avenue、ShanghaiTech分别由28个、37个、437个视频片段逐帧抽取制作而成，具有不同的分辨率大小。其中，训练集中不包含存在异常行为的视频片段，训练集与测试集之间按照原数据集比例划分。



(a) UCSD Ped2数据集[27] (b) Avenue数据集[28] (c) ShanghaiTech数据集[29]

图6 数据集异常行为展示

Fig. 6 Some samples of abnormal events of datasets

表1 数据集详细信息

Table 1 Details of datasets

数据集	总计/帧	训练集/帧	测试集/帧	尺寸/像素×像素
UCSD Ped2[27]	4 560	2 550	2 010	360×240
Avenue[28]	30 652	15 328	15 324	640×360
ShanghaiTech[29]	317 398	274 515	42 883	856×480

3.3 评价指标

基于无监督的异常行为检测研究以二分类为检测目标，即正常或异常2种情况。因此，实验采用曲线下面积(area under the curve, AUC)评估所提模型性能。AUC通常被用来评估二元分类器性能，其取值与受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)有关，ROC曲线横坐标为假阳性率(false positive rate, FPR)，纵坐标为真阳性率(true positive rate, TPR)，FPR和TPR计算分别如式(12)和式(13)所示：

$$r_{\mathrm{FP}}=\frac{c_{\mathrm{FP}}}{c_{\mathrm{FP}}+c_{\mathrm{TP}}} \tag{12}$$

$$r_{\mathrm{TP}}=\frac{c_{\mathrm{TP}}}{c_{\mathrm{TP}}+c_{\mathrm{FN}}} \tag{13}$$

式中：r_{FP}为假阳性率(误检率)，r_{TP}为真阳性率(召回率)；c_{FP}为假阳性样本数(实际正常、预测异常，即误检)，c_{TN}为真阴性样本数(实际正常、预测正常)，c_{TP}为真阳性样本数(实际异常、预测异常)，c_{FN}为假阴性样本数(实际异常、预测正常，即漏检)。AUC为ROC曲线与$r_{\mathrm{FP}}=1$、$r_{\mathrm{TP}}=0$所围图形面积，取值范围为[0,1]，AUC值越大，说明分类器效果越好。

3.4　结果分析

为验证本文方法先进性, 在 3 个公开数据集 UCSD Ped2[27]、Avenue[28] 和 ShanghaiTech[29] 上进行训练与测试, 实验在重构类 (表 2 中 Re) 和预测类 (表 2 中 Pr) 任务中, 分别选取近年来具有代表性或性能较为优异的模型进行对比, 结果如表 2 所示。可见, 本文方法在 UCSD Ped2、Avenue 和 ShanghaiTech 数据集上的检测结果分别达到 98.1%、89.8% 和 78.5%。

表 2　不同数据集上的 AUC 结果对比

Table 2　Comparison of AUC on different datasets

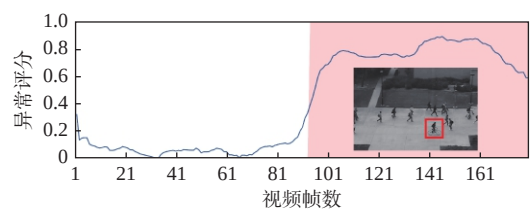
类别	方法	年份	AUC/%		
			UCSD Ped2 数据集[27]	Avenue 数据集[28]	ShanghaiTech 数据集[29]
Re	Conv-AE[12]	2016	85.0	80.0	60.9
	MemAE[13]	2019	94.1	83.3	71.2
	MNAD[6]	2020	90.2	82.8	69.8
	sRNN-AE[14]	2021	92.2	83.5	69.6
	Huang等[15]	2023	95.5	87.6	76.6
Pr	FFP[16]	2018	95.4	84.9	72.8
	MNAD[6]	2020	97.0	88.5	70.5
	Multisapce[17]	2021	95.4	86.8	73.6
	AMMC-Net[18]	2021	96.9	86.6	73.7
	STC-Net[30]	2022	96.7	87.8	73.1
	LGN-Net[8]	2022	97.1	89.3	73.0
	AMUM-AE[31]	2023	96.6	86.2	
	Le等[32]	2023	97.4	86.7	73.6
	Wang 等[33]	2023	97.7	90.9	71.3
	Wang等[34]	2023	96.5	**92.2**	75.4
	USTN-DSC[35]	2023	**98.1**	89.9	74.7
	TransMem[36]	2024	**98.1**	88.5	72.5
	本文	2024	**98.1**	89.8	**78.5**

注: 加粗数值表示性能最优。

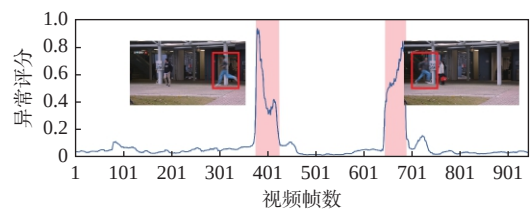
相较于重构类经典模型 Conv-AE, 在 3 个数据集上分别提升 13.1%、9.8% 和 17.6%, 同时, 相较于近期重构类模型亦有不同程度提升。推测原因为: 预测类模型相较重构模型, 在训练时输入更多图像帧, 具有空间信息和时间信息, 能够捕捉更多特征用于恢复图像细节, 因此, 在性能上展现出一定优势。

相较于预测类经典模型 FFP, 在 3 个数据集上分别提升 2.7%、4.9% 和 5.7%, 与近期较为先进的预测类模型相比, 在 Avenue 数据集上虽未达到最佳, 但同样具有较强竞争力, 其可能的关键影响因素为 Avenue 数据集在同一场景中存在较为明显的高低光照差距(如图 6 所示), 而 SS2D 扫描机制与 M-SCF 策略在特征处理过程中采用分块提取的方式, 在处理不同光照区域时存在一定干扰, 而 Wang 等[34] 采用噪声扩散对图像进行逐步去噪的方法, 使其在处理多峰分布噪声时具有一定的优势, 但在另外 2 个场景相对均匀的数据集优势不明显; 此外, 在 UCSD Ped2 和 ShanghaiTech数据集上本文方法均达到表中列出模型中最佳效果, 原因可能是所提 Mamba 与 CNN 协同方法, 既保留了状态空间长序列记录更多运动规律的优点, 同时也融合了卷积的刻画细节能力, 是一种新颖且有竞争性的异常行为检测方法, 具有较好的先进性。

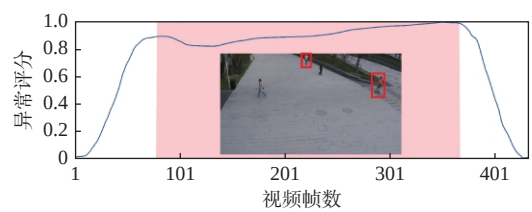
图 7 展示了本文方法在 3 个数据集上的可视化异常评分, 可以看出, 均展现出良好的检测效果。为更清晰地展现异常分数与异常行为之间的相关性, 分别选取 3 个数据中的 1 个视频片段进行展示, 其中, 图 7(a) 为 UCSD Ped2 测试集中第 2 个视频片段, 图 7(b) 为 Avenue 测试集中第 4 个视频片段, 图 7(c) 为 ShanghaiTech 测试集中第 2 个视频片段。无监督异常行为检测任务中, 对于测试集的标注形式为: 对存在异常的帧数赋值为“1”, 对不存在异常的帧数赋值为“0”。图中矩形表示标注信息为“1”的视频片段, 即图像帧中存在异常。图中曲线由本文模型对选取片段逐帧检测进行异常评分所得, 异常得分越高表明当前图像帧内出现异常可能性越大, 可以看出, 检测曲线与实际标注信息具有较高的相关性。图中照片为异常分数较高的图像帧数展示, 框线内为展示帧存在的异常行为。图 7(c) 中在矩形标注两侧的检测曲线仍有较高的异常得分, 其原因为原始标注在整个异常目标完全出现在图像中时视为异常行为的开始, 而本文模型在异常



(a) UCSD Ped2数据集[27]



(b) Avenue数据集[28]



(c) ShanghaiTech数据集[29]

图 7　检测结果异常分数曲线

Fig. 7　Anomaly score curve of detection results

目标未完全进入或退出时进行预判断，即图 7(c) 图像中玩滑板的人只有半个身体进入监控区域时被模型检测出疑似异常。

3.5 消融实验

为验证本文方法的有效性，并探究对模型性能的影响，在 UCSD Ped2 数据集[27] 上进行 5 组对比实验，以 U-Net 为基线网络，依次改进损失函数、Mamba 模型、跳跃连接、M-SCF。实验过程中，5 种网络提取特征深度保持一致 (将输入特征尺寸降到1/32)，其他参数保持一致，实验结果如表 3 所示。可见，引入L_{df}后，检测效果得到初步提升，表明模型在训练过程中可以更好地评价生成帧与实际帧之间的质量差距，有助于后续工作的评估。当编码器采用 Mamba 结构时，其检测结果相较传统卷积结构略有提升，而将浅层特征通过跳跃连接引入编码器时，其检测效果相较单独使用 Mamba 有更大提升。当对特征信息进行 M-SCF 策略改进后，相较于原始结构提升 2.2%，达到最佳检测效果。为进一步探究每个改进效果的可解释性，将后 4 组对比实验的结果进行可视化展示，如图 8 所示。

表 3 UCSD Ped2 数据集上消融实验

Table 3 Ablation study on UCSD Ped2 dataset

L_{df}	Mamba	Skip	M-SCF	AUC/%
				95.9
√				96.2
√	√			96.5
√	√	√		97.3
√	√	√	√	98.1

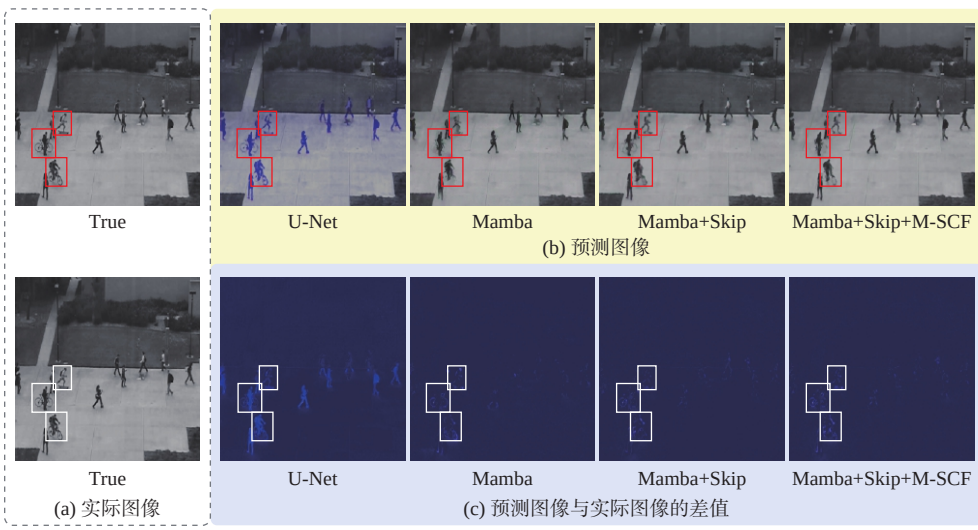


图 8 消融实验结果对比

Fig. 8 Comparison of the ablation study results

其中，图 8(a) 为输入图像序列的下一帧实际图像，图 8(b) 为表 3 中 4 种模型对应的预测图像，图 8(c) 为预测图像与实际图像的差值，框线内为当前图像中存在的异常行为。由于模型仅学习正常运动规律，因此，预测图像原则上应排除异常信息。从图 8(b) 可见：U-Net 对局部信息提取能力具有明显优势，其检测目标预测的边缘信息具有清晰展现，但预测效果不好。而 Mamba 模型具有广泛的上下文信息处理能力，对检测目标的动作预测相较于 U-Net 更为准确，但由于选择性扫描的特点，缺少对局部特征信息的约束，因此，预测图像较为模糊。例如，Mamba 预测图中，预测器虽成功将图中异常信息消除，但对于人体的边缘、颜色等信息的恢复效果不佳，同时，部分行人身体出现缺失的现象。当在 Mamba 模型引入跳跃连接后，融合了全局信息与局部信息，图像质量有一定的提升，但预测效果出现回退。继续进行 M-SCF 改进后，将局部特征进行多尺度融合，保留上下文信息的同时增强解码器对局部特征的感知能力。从图 8(c) 可见，最终模型预测图与实际图像之间的差值实现了框线内最大、框线外最小的预测效果，即模型排除了异常行为，且没有受到其他正常行为的干扰，达到最佳预测效果。

3.6 M-SCF 嵌入性分析

由消融实验可知，本文提出的 M-SCF 策略对模型整体效果有较大的提升，为进一步验证 M-SCF 的性能，在公开异常行为检测模型 MNAD[6] 和 LGN-Net[8] 基础上加入 M-SCF 策略进行对比实验，实验结果如表 4 所示。表中，“*” 表示模型未调整参数的实际复现结果，由于计算环境和参数设置等因素影响，实际复现结果与原始结果具有一定差异，仅用来评估 M-SCF 的提升效果。模型在引入

表 4　M-SCF 策略消融实验

Table 4　Ablation study of M-SCF

方法	UCSD Ped2 AUC/%
MNAD*	96.3
MNAD* + M-SCF	97.0
LGN-Net*	95.4
LGN-Net* + M-SCF	96.3

注: “*” 表示模型未调整参数的实际复现结果。

M-SCF 时, 保持原有参数设置, 同时, 不改变特征提取及特征恢复过程中的采样比例。通过 UCSD Ped2 数据集的测试结果可知, 加入 M-SCF 后, 2 个模型 MNAD 和 LGN-Net 相较原模型分别提升 0.7% 和 0.9%, 表明本文提出的策略有效地削弱了检测目标尺度变化带来的影响, 是一种有效且具有一定泛化性能的多尺度融合策略。

4　结　论

1) 本文提出一种基于状态空间的 U 型异常行为检测网络结构, 通过 Mamba 强大的中长距离建模能力, 使编码器在处理预测类异常检测时, 面对连续多帧图像形成的长序列输入, 能够提取更多全局特征信息。

2) 本文设计 M-SCF 和 CNN 结构, 深化跳跃连接, 获得具有多尺度的浅层特征信息, 使解码器在处理全局特征信息时, 可通过边缘纹理信息进行特征约束。防止预测器在学习正常运动规律时, 不良泛化能力过强, 将部分异常视为允许存在的正常范围。

3) 本文在 3 个公开数据集 UCSD Ped2、Avenue 和 ShanghaiTech 的测试结果表明, 本文方法相较于其他先进算法具有较强的竞争力。

在下一步研究工作中, 将针对当前大多数模型由于增加模型复杂度或设计内存模块导致权重文件较大等问题, 进一步探索模型轻量化方向。同时, Mamba 模型在异常检测任务中的应用值得未来更深入地探索。

参考文献（References）

[1] Yu J, Lee Y, Yow K C, et al. Abnormal event detection and localization via adversarial event prediction[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 33(8): 3572-3586.

[2] Chen D Y, Wang P T, Yue L Y, et al. Anomaly detection in surveillance video based on bidirectional prediction[J]. Image and Vision Computing, 2020, 98: 103915.

[3] Dong F, Zhang Y, Nie X S. Dual discriminator generative adversarial network for video anomaly detection[J]. IEEE Access, 2020, 8: 88170-88176.

[4] Lee S, Kim H G, Ro Y M. BMAN: bidirectional multi-scale aggregation networks for abnormal event detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 2395-2408.

[5] Pang G S, Shen C H, Cao L B, et al. Deep learning for anomaly detection: a review[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2021, 54(2): 1-38.

[6] Park H, Noh J, Ham B. Learning memory-guided normality for anomaly detection[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 14360-14369.

[7] V H, Chen C, Cui Z, et al. Learning normal dynamics in videos with meta prototype network[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 15420-15429.

[8] Zhao M Y, Zeng X H, Liu Y, et al. LGN-Net: local-global normality network for video anomaly detection[EB/OL]. (2023-01-08)[2024-02-03]. https://doi.org/10.48550/arXiv.07454.

[9] Gong M G, Zeng H M, Xie Y, et al. Local distinguishability aggrandizing network for human anomaly detection[J]. Neural Networks, 2020, 122(C): 364-373.

[10] Liu W R, Chang H, Ma B P, et al. Diversity-measurable anomaly detection[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2023: 12147-12156.

[11] Gu A, Dao T. Mamba: linear-time sequence modeling with selective state spaces[EB/OL]. (2023-12-01)[2024-02-04]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.00752.

[12] Hasan M, Choi J, Neumann J, et al. Learning temporal regularity in video sequences[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 733-742.

[13] Gong D, Liu L Q, Le V, et al. Memorizing normality to detect anomaly: memory-augmented deep autoencoder for unsupervised anomaly detection[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1705-1714.

[14] Luo W X, Liu W, Lian D Z, et al. Video anomaly detection with sparse coding inspired deep neural networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(3): 1070-1084.

[15] Huang X Y, Zhao C D, Gao C X, et al. Synthetic pseudo anomalies for unsupervised video anomaly detection: a simple yet efficient framework based on masked autoencoder[C]//Proceedings of the ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.

[16] Liu W, Luo W X, Lian D Z, et al. Future frame prediction for anomaly detection-a new baseline[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 6536-6545.

[17] Hang Y, Nie X S, He R D, et al. Normality learning in multispace for video anomaly detection[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 31(9): 3694-3706.

[18] Cai R C, Zhang H, Liu W, et al. Appearance-motion memory consistency network for video anomaly detection[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2021, 35(2): 938-946.

[19] Wang J, Chen J, Chen D, et al. Large window-based mamba unet for medical image segmentation: beyond convolution and self-attention[EB/OL]. arXiv preprint arXiv: 2403.07332, 2024.

[20] Ruan J C, Li J C, Xiang S C. VM-UNet: vision mamba UNet for medical image segmentation[EB/OL]. (2024-02-04)[2024-03-02]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.02491.

[21] Ma J, Li F F, Wang B. U-mamba: enhancing long-range dependency for biomedical image segmentation[EB/OL]. (2024-01-09)[2024-03-02]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.04722.

[22] Liu Y, Tian Y J, Zhao Y Z, et al. VMamba: visual state space model[EB/OL]. (2024-01-18)[2024-03-03]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10166.

[23] Liu J R, Yang H, Zhou H Y, et al. Swin-UMamba: mamba-based UNet with ImageNet-based pretraining[EB/OL]. (2024-02-05)[2024-03-05]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.03302.

[24] Gu A, Goel K, Ré C. Efficiently modeling long sequences with structured state spaces[EB/OL]. (2022-08-05)[2024-03-06]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00396.

[25] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Proceedings of the Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015. Berlin: Springer, 2015: 234-241.

[26] Dai J F, Qi H Z, Xiong Y W, et al. Deformable convolutional networks[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 764-773.

[27] Wang S, Miao Z J. Anomaly detection in crowd scene[C]//Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1220-1223.

[28] Lu C W, Shi J P, Jia J Y. Abnormal event detection at 150 FPS in MATLAB[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2720-2727.

[29] Luo W X, Liu W, Gao S H. A revisit of sparse coding based anomaly detection in stacked RNN framework[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 341-349.

[30] Zhao M Y, Liu Y, Liu J, et al. Exploiting spatial-temporal correlations for video anomaly detection[C]//Proceedings of the 2022 26th International Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1727-1733.

[31] Jin Z H, Zhao Y X. Appearance-motion united memory autoencoder for video anomaly detection[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Piscataway: IEEE Press, 2024: 179-187.

[32] Le V T, Kim Y G. Attention-based residual autoencoder for video anomaly detection[J]. Applied Intelligence, 2023, 53(3): 3240-3254.

[33] Wang L, Tian J W, Zhou S P, et al. Memory-augmented appearance-motion network for video anomaly detection[J]. Pattern Recognition, 2023, 138: 109335.

[34] Wang Z Q, Gu X J, Hu J Y, et al. Ensemble anomaly score for video anomaly detection using denoise diffusion model and motion filters[J]. Neurocomputing, 2023, 553: 126589.

[35] Yang Z W, Liu J, Wu Z Y, et al. Video event restoration based on keyframes for video anomaly detection[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2023: 14592-14601.

[36] Wang Z Q, Gu X J, Gu X S, et al. Enhancing video anomaly detection with learnable memory network: a new approach to memory-based auto-encoders[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2024, 241: 103946.

Multi-scale anomaly behavior detection method based on Mamba-CNN

SHI Yangyu[1], XIE Chengjie[1], ZHENG Diwen[1], LU Shuhua[1, 2, *]

(1. College of Information and Cyber Security, People's Public Security University of China, Beijing 102600, China;
2. Key Laboratory of Security Technology and Risk Assessment, Ministry of Public Security, Beijing 102600, China)

Abstract: A U-shaped network is suggested for anomaly behavior recognition based on Mamba in order to overcome difficulties in unsupervised anomaly behavior detection, such as the predictor's propensity for abnormal generalization and the target objects' scale disparities. The network improves both global and local features to constrain undesired generalization ability in predictions. A state space model is introduced in the encoder to strengthen the extraction of global features. A multi-scale spatial channel fusion (M-SCF) strategy is designed to integrate feature information from different receptive fields, thereby reducing the interference of scale differences on local features. Skip connections are used in the decoder to enrich shallow feature information and enhance the ability to capture contextual information. The proposed method has been extensively validated on the UCSD Ped2, Avenue, and Shanghai Tech datasets, with respective recognition accuracies of 98.1%, 89.8%, and 78.5%. Mamba can successfully increase the accuracy of abnormal behavior identification, as evidenced by the findings, which demonstrate superior accuracy when compared to several sophisticated algorithms in recent years.

Keywords: anomaly behavior detection; unsupervised learning; Mamba model; multi-scale; feature fusion

Received: 2024-06-07; **Accepted**: 2024-10-04; **Published Online**: 2024-11-15 11:37

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241115.0909.001

Foundation item: Double First-Class Innovation Research Project for People's Public Security University of China (2024yjsky036)

* **Corresponding author**. E-mail: lushuhua@ppsuc.edu.cn

《北京航空航天大学学报》征稿简则

《北京航空航天大学学报》是北京航空航天大学主办的以航空航天科学技术为特色的综合性自然科学学术期刊(月刊)。本刊以反映航空航天领域研究成果与动态、促进学术交流、培养科技人才和推动科技成果向社会生产力转化为办刊宗旨。本刊为中国自然科学技术核心期刊,并被 Ei Compendex 等国内外权威文献检索系统收录。本刊向国内外公开发行,为进一步提高办刊质量和所刊出文章的学术水平,特制定本简则。

1 论文作者及内容

1.1 本刊面向海内外所有学者。

1.2 主要刊载与航空航天科学技术有关的材料科学及工程、飞行器设计与制造、宇航科学与工程、信息与电子技术、控制技术和自动化工程、流体力学和动力工程、计算机科学及应用技术、可靠性工程与失效分析等领域的研究文章。航空航天科学技术民用方面以及具有航空航天工程背景的应用数学、应用物理、应用力学和工程管理等方面的文章也在本刊优先考虑之列。

2 来稿要求

2.1 论文应具有创新性、科学性、学术性和可读性。

2.2 论文为原创作品,尚未公开发表过,并且不涉及泄密问题。若发生侵权或泄密问题,一切责任由作者承担。

2.3 主题明确,数据可靠,图表清晰,逻辑严谨,文字精练,公式符号标准规范,标点符号正确。

2.4 文稿撰写顺序:中文题名(一般不超过 20 个汉字),作者中文姓名、单位、所在城市、邮政编码(作者顺序始终不得更改),中文摘要(包括目的、方法、结果及结论),中文关键词(5 ~ 8 个),中图分类号,引言,正文,参考文献,英文题名,作者英文姓名、单位、所在城市、邮政编码、国别,英文摘要,英文关键词。首、末页下角注明基金项目名称及编号,作者信息。

2.5 作者请登录本刊网页进行在线投稿。

3 稿件的审核、录用与版权

3.1 来稿须经专家两审和主编、编委讨论后决定刊用与否。

3.2 若来稿经审查后认定不宜在本刊发表,将及时告知作者。如果在投稿满 3 个月后仍未收到本刊任何通知,作者有权改投其他刊。在此之前,请勿一稿多投,否则一切后果自负。

3.3 来稿一经作者签字并在本刊刊出,即表明所有作者都已经认可其版权转至本刊编辑部。本刊在与国内外文献数据库或检索系统进行交流及合作时,不再征询作者意见。

邮寄地址:100191 北京市海淀区学院路 37 号 《北京航空航天大学学报》编辑部
办公地点:北京航空航天大学办公楼西配楼412~416房间
电　　话:(010)82316698,82316981,82315499,82317448
E-mail: jbuaa@ buaa. edu. cn
http://bhxb. buaa. edu. cn
http://www. buaa. edu. cn

集群成员期刊

《北京航空航天大学学报》
第五届编辑委员会

主　任（主　编）：赵沁平

（以下按姓氏笔画为序）

副主任（副主编）：丁希仑　王少萍　孙志梅　李秋实　李焕喜　杨嘉陵
苗俊刚　相　艳　徐立军　钱德沛　曹晋滨

编　委：马殿富　王　琪　王　聪　邓小燕　王青云　王荣明　刘　宇
刘　红　江　洁　刘　强　闫　鹏　朱天乐　刘铁钢　齐铂金
陈万春　邹正平　苏东林　杨世春　沈成平　邱志平　宋知人
杨树斌　张晓林　杨晓奕　杨继萍　李惠峰　吴新开　张瑞丰
杨照华　宋凝芳　周　锐　林宇震　林贵平　战　强　姚仰平
胡庆雷　赵秋红　段海滨　赵巍胜　席　平　郭　宏　徐　洁
徐世杰　郭洪波　康　锐　翟　锦　熊华钢

编辑部主任：张　嵘

编　　辑：孙　芳　万玉敏　王　茜　卞欢欢　李亚泰

北京航空航天大学学报

Beijing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao

（原《北京航空学院学报》）

（月刊　1956 年创刊）

第52卷 第7期　2026年7月

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS (JBUAA)

(Monthly, Started in 1956)

Vol.52 No.7　July 2026

主管单位　中华人民共和国工业和信息化部
主办单位　北京航空航天大学
主　　编　赵沁平
编辑出版　《北京航空航天大学学报》编辑部
邮　　编　100191
地　　址　北京市海淀区学院路37号
印　　刷　北京科信印刷有限公司
发　　行　《北京航空航天大学学报》编辑部
发行范围　国内外发行
联系电话　(010) 82316698 82316981
82315499 82317448
电子信箱　jbuaa@ buaa.edu.cn

Administrated by Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China
Sponsored by Beijing University of Aeronautics and Astronautics (BUAA)
(Beijing 100191, P. R. China)
Chief Editor ZHAO Qinping
Edited and Published by Editorial Board of JBUAA
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.
Distributed by Editorial Board of JBUAA
Telephone (010) 82316698 82316981
82315499 82317448
E-mail jbuaa@buaa.edu.cn
http: //bhxb.buaa.edu.cn

中国标准连续出版物号：ISSN 1001-5965 / CN 11-2625/V

ISSN 1001-5965

国内定价：50.00元／期

微信公众号　超星电子书