

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

北京航空航天大学 学报

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

两栖攻击舰舰载直升机群出动作业
一体化调度研究

韩 维 韩啸华 苏析超 王刘松 吴浩南

4

2026

Vol.52

目次

两栖攻击舰舰载直升机群出动作业一体化调度研究 韩维, 韩啸华, 苏析超, 王刘松, 吴浩南 (973)

基于面部特征的管制员疲劳判别算法 王莉莉, 殷硕峰, 潘越 (986)

基于迁移学习和 TCN-BiGRU 的短期负荷预测 刘杰, 周博文, 田明, 韩轲 (995)

基于空中交通复杂度的大规模航迹优化 王红勇, 黄佳文, 姜高扬, 仲锋惟 (1005)

基于改进 YOLOv5-s 的交通场景小目标检测算法 王坤, 冯康威 (1015)

折叠翼飞行器的模型设计与气动特性仿真分析
..... 胡文华, 刘文举, 吴瑞琴, 陈三亚, 冯晶晶, 吴霞 (1028)

运输机尾涡对空投伞的影响与编队空投间距计算方法 魏志强, 许奔, 周鼎富 (1038)

基于自适应圆弧状路径搜索的地磁感知导航定向方法 李红, 刘恒宇, 徐晨燕 (1048)

基于 FDG-YOLO 轻量化模型的航空发动机损伤检测方法 蔡舒妤, 何冲 (1055)

一种非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器设计与实验研究
..... 张广川, 王伟宗, 任军学, 王一白, 汤海滨, 杨立军 (1064)

基于 NTRU 格上的高铁共生网络安全切换认证方案 陈永, 张冰旺, 信召凤 (1076)

特征表达能力增强的声音事件定位与检测网络 章东平, 符珍涛, 王杼涛, 林丽莉, 魏明 (1088)

基于模板更新和双特征增强的视觉跟踪算法 丁奇帅, 雷帮军, 牟乾西, 吴正平 (1096)

视觉显著性增强的双鉴别器红外与可见光图像融合 陈永, 周方春, 董珂 (1107)

基于语义分割的页岩孔隙结构智能表征方法 刘茜, 任义丽, 汪文洁, 黄睿琦, 苏乾潇 (1116)

基于局部空间深度特征的 SAR 遥感图像变化检测方法 张益天, 赵晶, 陈蒋洋, 罗喜伶 (1129)

基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标跟踪点航数据关联算法 代睿, 李洁, 何立火, 高新波 (1139)

四体模型下 2:1 DRO 附近的拟周期轨道 王明, 杨驰航, 张皓 (1148)

基于椭圆球面波函数波形成型的测控信号设计
..... 许志超, 陆发平, 康家方, 安琪, 张治霖, 杨东凯 (1160)

质子深层充放电效应诱发运算放大电路异常机理 袁润杰, 陈睿, 韩建伟, 夏清, 王璇, 陈钱 (1170)

基于 Graph-Transformer 网络的小样本实体链接预测
..... 杨荣泰, 邵玉斌, 杜庆治, 龙华, 祁雨婷, 张凤 (1180)

动态环境下基于语义分割与几何约束的视觉/惯性导航方法 张文珂, 韩鹏, 冯宇, 高东 (1189)

一种基于稀疏变换先验约束的低剂量 CT 深度展开网络
..... 王悦, 张雄, 上官宏, 崔学英, 张鹏程, 桂志国 (1199)

大气层外运载火箭上升段轨迹规划的保辛伪谱序列凸优化方法
..... 陈虹坤, 谭述君, 崔梦真, 刘玉玺 (1211)

磁悬浮万向稳定平台平动动力学建模及其自抗扰控制方法	段乐强, 李磊, 王卫杰, 朱宏业, 庞维坤, 任元 (1221)
气动弹性耦合界面插值点自动选取算法	李豪, 张晓蓉, 孙岩, 邓彦增, 朱枝茂 (1232)
高超声速变外形飞行器自适应模型预测控制	葛健豪, 郭杰, 王浩凝, 张宝超, 万泱泱, 唐胜景 (1242)
压剪载荷下复合材料层合板的失效模式	骈琰, 杨帆, 章凌, 刘丰睿, 王林娟, 赵丽滨 (1254)
引射气体组分对壁面热流和摩擦阻力的影响规律	张绪, 赵瑞, 李宇, 杨光, 王丽燕 (1261)
基于双域和全局上下文特征提取的红外小目标检测	任勇, 朵琳, 许渤雨, 杨新 (1269)
基于 VMD-CNN-BiLSTM 的变工况涡扇发动机剩余使用寿命预测	张鲁一航, 杨彦明, 陈永展, 李军亮, 戴豪民 (1279)
多目视觉下基于自动变分校正的人体 3D 姿态检测与建模	赵晓冬, 陈凯, 黄煜杰, 王鹏飞, 王子源 (1290)
空间太阳能电池应变传递机制	高红鑫, 赵寿根, 朱佳林, 余亦豪, 刘欣, 杨乐天 (1300)
基于深度强化学习的固定翼无人机纵向控制	何海洋, 赵振根, 孔飞 (1306)
某型航空发动机主燃油控制系统燃油压力脉动研究	杨艺琨, 马静, 杨军杰 (1316)
基于改进 YOLOv5s 的轻量化智能钻机管柱检测方法	牛柯, 彭斌, 杨小亮 (1325)
化学反应机理对湍流射流火焰的影响	王云帆, 金捷, 赖根鸿, 王方 (1339)

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

Vol. 52 No. 4 (Sum 398) April 2026

CONTENTS

Research on integrated scheduling of shipboard helicopters sortie operation on amphibious assault ship
..... HAN Wei, HAN Xiaohua, SU Xichao, WANG Liusong, WU Haonan (973)

Controller fatigue discrimination algorithm based on facial features
..... WANG Lili, YIN Shuofeng, PAN Yue (986)

Short-term load forecasting based on transfer learning and TCN-BiGRU
..... LIU Jie, ZHOU Bowen, TIAN Ming, HAN Ke (995)

Large-scale trajectory optimization based on air traffic complexity
..... WANG Hongyong, HUANG Jiawen, JIANG Gaoyang, ZHONG Fengwei (1005)

Small target detection algorithm for traffic scenes based on improved YOLOv5-s
..... WANG Kun, FENG Kangwei (1015)

Model design and aerodynamic characteristics simulation analysis of fold-wing aircraft
..... HU Wenhua, LIU Wenju, WU Ruiqin, CHEN Sanya, FENG Jingjing, WU Xia (1028)

Influence of transport aircraft wake vortex on parachute and calculation method of formation airdrop spacing
..... WEI Zhiqiang, XU Ben, ZHOU Dingfu (1038)

Geomagnetic perception navigation orientation method based on adaptive circular path search
..... LI Hong, LIU Hengyu, XU Chenyan (1048)

Damage detection method for aero-engine based on FDG-YOLO lightweight model
..... CAI Shuyu, HE Chong (1055)

Design and experimental study of an unclosed-loop $E \times B$ Hall thruster
..... ZHANG Guangchuan, WANG Weizong, REN Junxue, WANG Yibai, TANG Haibin, YANG Lijun (1064)

Security handover authentication scheme for high-speed railway symbiotic network based on NTRU lattice
..... CHEN Yong, ZHANG Bingwang, XIN Zhao Feng (1076)

Sound event localization and detection network with enhanced feature expression
..... ZHANG Dongping, FU Zhentao, WANG Zhutao, LIN Lili, WEI Ming (1088)

Visual tracking algorithm based on template updating and dual feature enhancement
..... DING Qishuai, LEI Bangjun, MOU Qianxi, WU Zhengping (1096)

Dual discriminator fusion of infrared and visible light images for visual saliency enhancement
..... CHEN Yong, ZHOU Fangchun, DONG Ke (1107)

Intelligent representation method of shale pore structure based on semantic segmentation
..... LIU Xi, REN Yili, WANG Wenjie, HUANG Ruiqi, SU Qianxiao (1116)

SAR remote sensing image change detection method based on local space deep feature
..... ZHANG Yitian, ZHAO Jing, CHEN Jiangyang, LUO Xiling (1129)

Light-weight BiLSTM-based data association algorithm between echoes and tracks for multi-radar multi-target tracking
..... DAI Rui, LI Jie, HE Lihuo, GAO Xinbo (1139)

Quasi-periodic orbits near 2:1 resonant DRO in the four-body problem
..... WANG Ming, YANG Chihang, ZHANG Hao (1148)

Design of tracking telemetry and command signal based on prolate spheroidal wave functions waveform forming
..... XU Zhichao, LU Faping, KANG Jiafang, AN Qi, ZHANG Zhilin, YANG Dongkai (1160)

Mechanism of anomalies in operational amplifier induced by proton deep charge-discharge effects
..... YUAN Runjie, CHEN Rui, HAN Jianwei, XIA Qing, WANG Xuan, CHEN Qian (1170)

Few-shot entity linking prediction based on Graph-Transformer network
..... YANG Rongtai, SHAO Yubin, DU Qingzhi, LONG Hua, QI Yuting, ZHANG Feng (1180)

Visual-inertial navigation method based on semantic segmentation and geometric constraints in dynamic environment	
.....	ZHANG Wenke, HAN Peng, FENG Yu, GAO Dong (1189)
A low-dose CT deep unfolding network based on a sparse transform priors constrain	
.....	WANG Yue, ZHANG Xiong, SHANGGUAN Hong, CUI Xueying, ZHANG Pengcheng, GUI Zhiguo (1199)
A symplectic pseudo-spectral successive convex optimization method for trajectory planning of ascent stage of exo-atmosphere launch vehicle	
.....	CHEN Hongkun, TAN Shujun, CUI Mengzhen, LIU Yuxi (1211)
Dynamics modeling and active disturbance rejection control method of translation in a magnetically suspended universally stabilized platform	
.....	DUAN Leqiang, LI Lei, WANG Weijie, ZHU Hongye, PANG Weikun, REN Yuan (1221)
Automatic selection algorithm of interpolation points on aeroelastic coupling interface	
.....	LI Hao, ZHANG Xiaorong, SUN Yan, DENG Yanzeng, ZHU Zhimao (1232)
Adaptive model predictive control for hypersonic morphing vehicle	
.....	GE Jianhao, GUO Jie, WANG Haoning, ZHANG Baochao, WAN Yangyang, TANG Shengjing (1242)
Failure mode of composite laminated plates under compression-shear loading	
.....	PIAN Rong, YANG Fan, ZHANG Ling, LIU Fengrui, WANG Linjuan, ZHAO Libin (1254)
Influence mechanism of gas components on wall heat flux and skin friction	
.....	ZHANG Xu, ZHAO Rui, LI Yu, YANG Guang, WANG Liyan (1261)
Infrared small target detection based on dual-domain and global context feature extraction	
.....	REN Yong, DUO Lin, XU Boyu, YANG Xin (1269)
Remaining useful life prediction of variable-operating turbofan engine based on VMD-CNN-BiLSTM	
.....	ZHANG Luyihang, YANG Yanming, CHEN Yongzhan, LI Junliang, DAI Haomin (1279)
Human 3D posture detection and modeling based on automatic variational correction in multi-vision	
.....	ZHAO Xiaodong, CHEN Kai, HUANG Yujie, WANG Pengfei, WANG Ziyuan (1290)
Strain transmission mechanism of space solar cells	
.....	GAO Hongxin, ZHAO Shougen, ZHU Jialin, YU Yihao, LIU Xin, YANG Letian (1300)
Longitudinal control of fixed-wing UAV based on deep reinforcement learning	
.....	HE Haiyang, ZHAO Zhengeng, KONG Fei (1306)
Study on fuel pressure pulsation of main fuel control system of an aircraft engine	
.....	YANG Yikun, MA Jing, YANG Junjie (1316)
Lightweight intelligent rig pipe column inspection method based on improved YOLOv5s	
.....	NIU Ke, PENG Bin, YANG Xiaoliang (1325)
Influence of chemical reaction mechanism on turbulent jet flame	
.....	WANG Yunfan, JIN Jie, LAI Genhong, WANG Fang (1339)

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0085

两栖攻击舰舰载直升机群出动作业一体化调度研究

韩维¹, 韩啸华¹, 苏析超^{2,*}, 王刘松³, 吴浩南¹

(1. 海军航空大学 航空基础学院, 烟台 264001; 2. 海军航空大学 航空作战勤务学院, 烟台 264001;

3. 中国人民解放军 91860 部队, 上海 200000)

摘 要: 甲板作业调度是提升舰载机出动率的关键技术。针对两栖攻击舰舰载直升机群出动作业多阶段、高耦合特性, 提出一种包含出库及甲板调运、机务勤务保障、出动离场在内的调度模型和优化算法。深入分析舰载直升机出动作业流程, 基于各阶段的逻辑约束和资源约束, 以最小化机群出动时间为优化目标, 建立舰载直升机群出动作业一体化调度模型; 将该问题转化为具有转移时间特征的资源受限项目调度问题, 基于串行调度生成机制, 设计一种两段编码的遗传-邻域搜索算法求解。通过对 12 架舰载直升机集中出动案例进行仿真实验, 验证了调度模型和优化算法在优化出动流程方面的有效性, 显著降低了机群出动准备时间, 进一步发现机务勤务保障阶段的决策在全局调度中更为关键。

关 键 词: 两栖攻击舰; 舰载直升机; 出动作业; 一体化调度; 资源受限项目调度

中图分类号: V355.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-0973-13

舰载直升机是两栖编队遂行兵力投送、火力打击等使命任务的核心力量, 其出动效率直接关系到两栖作战的成效, 因此, 甲板作业能力的提升显得尤为重要^[1]。由于两栖攻击舰甲板空间相对狭小, 战位人员设置有限, 勤务保障资源和能力受到较大限制, 且海战场环境下的保障时效要求又远高于陆地机场, 这就要求在复杂作业环境下能够对舰载直升机群出动作业进行科学合理的资源分配和时序规划, 确保其在需要时能够安全、高效地完成出动准备, 迅速投入作战或训练任务。

典型舰载机出动作业可划分为出库及甲板调运、机务勤务保障、出动离场 3 个阶段。目前, 针对航母舰载机已有大量研究。在出库及甲板调运阶段, 相关研究主要聚焦于如何规划舰载机的调运路径。文献 [2-3] 建立了舰载机路径规划的数学模型, 并通过启发式算法求解。文献 [4] 通过深度强

化学习提出了一种动态避障方法。由于上述方法规划的路径不能满足飞机运动学及终端约束, 文献 [5-7] 采用最优控制方法研究单/多架舰载机的轨迹规划和跟踪控制问题, 文献 [8-9] 则进一步将其与启发式算法相结合, 解决了复杂场景下最优控制方法计算效率低下、对初值敏感的问题。在机务勤务保障阶段, 文献 [10-13] 将该问题抽象为资源受限项目调度问题, 并建立了数学模型, 其中, 文献 [10-12] 研究了集中/一站式保障模式, 并采用双种群优化架构和串/并行调度生成机制来求解, 文献 [13] 研究了考虑飞机转移过程的多站式保障模式, 试验了调度生成机制和资源分配规则的组合求解性能。为了更好地提高计算性能和学习效率, 文献 [14] 通过强化学习构建了一种基于人机协同的多智能体作业调度决策方法。此外, 鲁棒调度^[15-19]和动态调度^[20-23]也有相关研究。在出动离场阶段, 文

收稿日期: 2024-02-08; 录用日期: 2024-04-02; 网络出版时间: 2024-05-30 11:38

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240529.1623.001

基金项目: 中国科协青年人才托举工程

* 通信作者. E-mail: suxich@126.com

引用格式: 韩维, 韩啸华, 苏析超, 等. 两栖攻击舰舰载直升机群出动作业一体化调度研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 973-985. HAN W, HAN XH, SU XC, et al. Research on integrated scheduling of shipboard helicopters sortie operation on amphibious assault ship [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 973-985 (in Chinese).

献 [24-29] 将该问题抽象为混合流水车间/柔性作业车间调度问题, 并建立了数学模型, 主要研究多机协同出动、混合机型出动和一体化保障出动等过程, 其中, 文献 [24-28] 采用了启发式及其改进算法求解, 文献 [29] 则探索了启发式规则与约束规划方法的联合求解方式, 仿真表明, 该方法在求解效率和实时规划能力上较启发式算法更具优势。文献 [30-31] 将该问题抽象为飞机发射任务分配/规划问题, 前者建立了 2 层集中式任务分配架构, 但随着飞机数量的增多, 系统开销增大, 为此, 后者提出了适用于求解大规模机群出动的 4 层分布式任务规划架构。

针对两栖攻击舰舰载直升机, 文献 [32] 以美国“黄蜂”级为对象, 分析了其典型任务样式和甲板作业流程, 构建了出动回收全流程仿真模型, 并通过对关键节点的敏感度分析, 给出了流程优化建议。文献 [33] 在考虑起飞点数量、升降机作业方式及出库方案的基础上, 建立了机群出库调度模型, 并通过启发式算法求解。文献 [34] 着眼两栖作战与保障, 建立了机群作战任务规划模型, 提出了一种基于参考点的多目标优化算法, 并通过仿真给出了营级规模两栖联合登陆作战想定下的机群行动方案。

可以看到, 当前舰载机甲板作业调度技术已较为成熟, 但更多以航母平台为研究背景, 对两栖攻击舰平台的研究尚处于起步阶段, 虽然现有研究能够提供一定的理论参考, 但与航母甲板作业相比, 其还面临以下挑战: ①与航母相比, 两栖攻击舰的甲板布局更为紧凑, 这导致在部分停机位上可能会发生作业上的交叉, 若采取分阶段研究的方法, 可能无法达到所需的精细化调度水平; ②直升机的出动方式与固定翼飞机有着显著差异, 这使得现有的甲板作业调度模型在某种程度上不再适用。因此, 需要对两栖攻击舰上舰载直升机的出动流程进行全面分析, 重新定义作业约束条件, 建立一体化的调度模型来适应其特有的出动需求。

本文研究思路如下: ①分析舰载直升机出动作业流程, 基于各阶段内及之间的约束, 建立舰载直升机群出动作业一体化调度模型 (integrated scheduling model of shipborne helicopters sortie operation, ISMSHSO)。考虑到舰载直升机在出动过程中需要在停机位之间进行调运, 因此, 采用文献 [9] 中的方法构建离线路径库, 即由时间和位姿构成的“时空”矩阵。预先定义路径约束并嵌入到模型中, 可极大地提升求解效率。而多机调运间的避碰问题采用文献 [27] 中基于优先级的延迟调运策

略, 即延迟会发生碰撞的低优先级直升机的开始调运时刻, 确保机群能够安全调运。②面对多阶段耦合的大型 NP-hard 问题, 传统的精确算法往往难以在有限时间内找到最优解, 因此, 有必要设计一种能够有效解决该问题的启发式算法, 确保在可接受的时间阈值内提供高质量的行动方案。③基于某型两栖攻击舰的布局, 设计舰载直升机群出动案例, 通过案例仿真分析来验证本文模型与算法的有效性。本文研究是对两栖攻击舰舰载直升机甲板作业调度领域的探索, 成果可为航空保障与指挥人员提供决策支持。

1 问题描述

严格有序且标准化的出动流程是保障舰载直升机执行飞行任务的关键, 而飞行甲板的功能区域布局直接影响着舰载直升机从准备到起飞的整个作业流程。

舰载直升机出动作业流程如图 1 所示。两栖攻击舰的飞行甲板通常按照功能划分为不同的区域, 其中, 左舷的起降区和右舷的停机区是 2 个主要的功能区域。起降区主要用于舰载直升机的起飞和着陆操作, 同时兼顾飞行前的准备工作。停机区则用于舰载直升机的停放和进行飞行前的预先准备工作。在舰载直升机的出动流程中, 直升机会先从机库调运至飞行甲板, 如果起降区有空闲的停机位, 则直升机可以直接调运至起降区, 甲板保障人员会对直升机进行一系列的机务勤务保障, 随后起飞离场; 若起降区没有空闲的机位, 则会调运至停机区进行预先机务勤务保障, 出于安全考虑, 直升机在该区域仅能完成旋翼展开前的保障作业, 如平台的外观检查、燃油的加注和机载弹药的挂载等, 一旦起降区有空余机位, 直升机会被再次调运至起降区完成剩余的保障作业, 然后起飞。

1) 出库及甲板调运阶段。该阶段贯穿整个舰载直升机的出动作业过程, 直接影响甲板作业的顺畅度。由于空间有限, 舰载直升机需要通过牵引车来在不同的停机位之间完成转移。因此, 必须根据舰载直升机的出动需求, 来对牵引车进行合理的调配, 减少因出库及甲板调运阶段导致的甲板作业时间延误。

2) 机务勤务保障阶段。该阶段是确保舰载直升机顺利起飞的关键前置环节, 是涉及多个工序和步骤的复杂过程。保障人员需要利用部署在飞行甲板的专用保障设备, 对舰载直升机进行全面而细致的检查和维护。因此, 合理分配保障人员和高效运用保障设备能有效提升甲板作业效率。

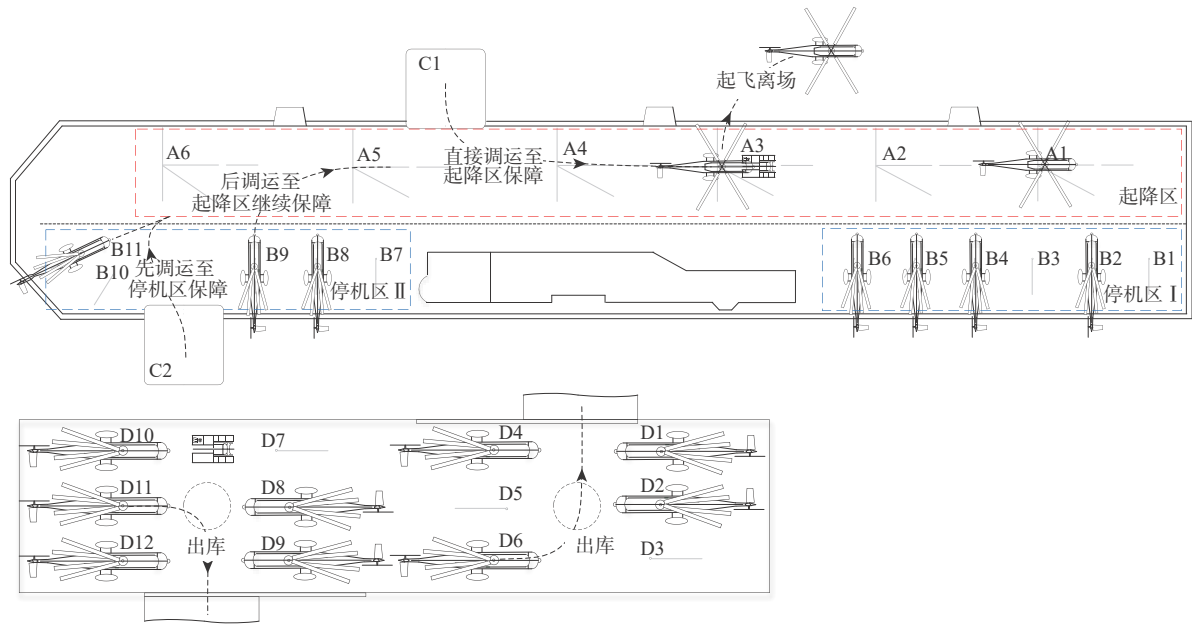


图 1 舰载直升机出动作业流程

Fig. 1 Process of shipborne helicopter sortie operation

3) 出动离场阶段。该阶段是舰载直升机整个出动作业流程的最后一环, 标志着直升机从准备状态过渡到执行飞行任务的开始。舰载直升机通常会根据任务性质和需求, 组成一个飞行编队, 按照预定的时间和顺序依次起飞。因此, 优化舰载直升机的起飞顺序, 能有效减少其在甲板上的等待时间。

若将舰载直升机的各阶段出动作业视为一个综合性的项目, 调运设备、保障人员和保障设备视为多样化的资源, 则舰载直升机群出动作业调度问题就是多架直升机在工序网络化流程和资源约束下进行出动作业时序优化和资源分配, 因此, 可将该调度问题抽象为具有转移时间的资源受限项目调度问题 (resource-constrained project scheduling problem with transfer times, RCPSPTT) 来研究。

2 模型建立

为简化 ISMSHSO 模型, 方便研究, 作出如下合理假设:

- 假设 1 任意作业过程不可中断, 各项作业之间为零延迟的结束-开始型连接关系。
- 假设 2 舰载直升机在停机区保障完旋翼展开前所有工序后, 方可到起降区继续保障。
- 假设 3 甲板各类消耗性资源总量充足。
- 假设 4 本调度为静态调度, 不考虑故障等突发因素。

2.1 模型约束

模型可划分为逻辑约束和资源约束。逻辑约束主要关注舰载直升机出动作业各阶段的顺序关系, 确保作业按照正确的时序进行。资源约束涉及

各类保障资源的分配和使用, 确保作业在资源可用的情况下进行。

2.1.1 逻辑约束

1) 出库及甲板调运阶段约束。为防止因舰船晃动而发生位移, 舰载直升机在非飞行状态下通常会通过系留装置固定在停机位上, 当需要调运时, 需要先解系留, 沿着规划好的路径调运至新的停机位后, 再次被系留, 约束表示为

$$E_{ij}^1 = S_{ij}^1 + m + T_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (1)$$

$$S_{i(j+1)}^1 \geq E_{ij}^1 + m \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (2)$$

式中: S_{ij}^1 和 E_{ij}^1 分别为第 i 架舰载直升机的第 j 道调运工序的开始时间和结束时间; m 为舰载直升机解系留时间; T_{ij} 为第 i 架舰载直升机从第 j 道调运工序所在停机位调运至第 $j+1$ 道调运工序所在停机位的时间; I 为参与出动的舰载直升机集合; J_i 为第 i 架舰载直升机的工序集合。

调运过程中的避碰问题可以视为时间和空间的交汇问题, 在路径既定的前提下, 舰载直升机之间及舰载直升机与固定障碍物需要保持一定的安全距离, 约束表示为

$$\min \|S_i(t) - S_e(t)\| \geq D \quad \forall i, e \in I \quad (3)$$

式中: $S_i(t)$ 和 $S_e(t)$ 分别为第 i 架舰载直升机和第 e 架舰载直升机在 t 时刻的空间占用点集; D 为舰载直升机之间的安全距离。

2) 机务勤务保障阶段约束。在舰载直升机成功调运至指定停机位并完成系留后, 接下来的任务便是遵循既定的保障流程, 严格按照作业顺序执行

各项保障活动,约束表示为

$$S_{i(j+1)}^2 \geq E_{ij}^1 + m \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (4)$$

$$S_{ij}^2 \geq S_{ih}^2 + d_{ih} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall h \in B_{ij} \quad (5)$$

式中: S_{ij}^2 为第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序的开始时间; d_{ih} 为第 i 架舰载直升机的第 h 道保障工序的工期; B_{ij} 为第 i 架舰载直升机的第 j 道工序的紧前工序集合。

3) 出动离场阶段约束。舰载直升机在完成必要的保障作业后,可以根据飞行调度指令有序地进行起飞离场,这一阶段通常不需要额外的资源分配,约束表示为

$$E_{ij}^2 = S_{i(j+1)}^3 \quad (6)$$

$$E_{i(j+1)}^3 = S_{i(j+1)}^3 + c_i \quad (7)$$

式中: E_{ij}^2 为第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序的结束时间; S_{ij}^3 和 E_{ij}^3 分别为第 i 架舰载直升机的第 j 道出动工序的开始时间和结束时间; c_i 为第 i 架舰载直升机的出动准备时间。

2.1.2 资源约束

1) 调运设备约束。受到单一任务牵引能力的限制,牵引车在完成一次牵引作业后,必须按照规定的流程返回到下一架待调运舰载直升机的指定停机位,以便开始新一轮的牵引作业,约束表示为

$$E_{ij}^1 + Z_{ijeg}^k z_{ijeg} \leq S_{eg}^1 + M(1 - z_{ijeg}) \quad \forall k \in Z, \forall i, e \in I, \forall j \in J_i, \forall g \in J_e \quad (8)$$

式中: Z_{ijeg}^k 为第 k 类调运设备从第 i 架舰载直升机的第 j 道调运工序所在停机位转移至第 e 架舰载直升机的第 g 道调运工序所在停机位的时间; z_{ijeg} 为决策变量,等于 1 时,表示第 i 架舰载直升机的第 j 道调运工序与第 e 架舰载直升机的第 g 道调运工序占用同一调运设备,且前者的优先级较高,否则,等于 0; Z 为调运设备类型集合; M 为足够大的实数; J_e 为第 e 架舰载直升机的工序集合。

2) 保障人员约束。保障工序的执行涉及多个专业领域和相应的人员配置,对于保障人员来说,他们需要按照既定的顺序依次完成一系列工序,即每一工序完成后,需迅速有序地转移到下一个工序所在停机位,约束表示为

$$E_{ij}^2 + P_{ijeg}^k \leq S_{eg}^2 + M(1 - p_{ijeg}^{kl}) \quad \forall i, e \in I, \forall j \in J_i, \forall g \in J_e, \forall k \in P, \forall l \in P_k \quad (9)$$

式中: P_{ijeg}^k 为第 k 类保障人员从第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序所在停机位转移至第 e 架舰载直升机的第 g 道保障工序所在停机位的时间; p_{ijeg}^{kl} 为决策变量,等于 1 时,表示第 k 类专业第 l 个保障人员执

行完第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序后执行第 e 架舰载直升机的第 g 道保障工序,否则,等于 0; P 为保障人员专业类型集合; P_k 为第 k 类专业的人员集合。

此外,由于保障工位的空间承载能力有限,在同一时间,仅有一定数量的保障人员能够在特定工位上同时进行作业,约束表示为 $\sum_{j \in A_{it}} s_{ijk} \sum_{k' \in P} p_{ijk'} \leq s_{ik}$, $\forall i \in I, \forall k \in K, \forall t > 0$ 。其中, $s_{ijk}=1$ 为执行第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序需要第 k 类工位空间,否则等于 0; $p_{ijk'}$ 为执行第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序所需的第 k' 类专业保障人员数量; s_{ik} 为第 i 架舰载直升机的第 k 类工位空间可同时容纳的保障人员数量; A_{it} 为第 i 架舰载直升机在 t 时刻执行的工序集合; K 为工位空间类型集合。

3) 保障设备约束。保障设备通常部署于甲板上特定的位置,受供给管路的长度限制,仅能为覆盖范围内的停机位上的舰载直升机提供服务和支撑,约束表示为

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in E} \sum_{l \in E_k} e_{ijkl} (1 - \lambda_{ijkl}) = 0 \quad (10)$$

式中: e_{ijkl} 为决策变量,等于 1 时,表示第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序由第 k 类第 l 个保障设备保障,否则,等于 0; $\lambda_{ijkl}=1$ 为第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序所在的停机位可以被第 k 类第 l 个保障设备覆盖到,否则,等于 0; E 为保障设备类型集合; E_k 为第 k 类保障设备集合。

此外,根据使用特性,保障设备可划分为共享式和独占式 2 类。对于共享式设备(如供电站),在保障期间可以为该架舰载直升机所有需要该设备的工序提供服务,约束表示为

$$\sum_{j \in A_{it}} e_{ijk} \cdot \text{sgn} \left(\sum_{j \in A_{it}} e_{ijkl} \right) = \sum_{j \in A_{it}} e_{ijkl} \cdot \text{sgn} \left(\sum_{j \in A_{it}} e_{ijk} \right) \quad \forall i \in I, \forall k \in E_s, \forall l \in E_k \quad (11)$$

式中: e_{ijk} 为执行第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序所需的第 k 类保障设备数量; E_s 为共享式保障设备类型集合。

而对于独占式设备(如加油站),只能为单一工序提供服务,在每次使用后需要进行重置操作,才能保障后续工序,约束表示为

$$E_{ij}^2 + E_{ijeg}^k + \Delta_k \leq S_{eg}^2 + M(1 - e_{ijeg}^{kl}) \quad \forall i, e \in I, \forall j \in J_i, \forall g \in J_e, \forall k \in E_u \wedge (k \in E_s, i \neq e), \forall l \in E_k \quad (12)$$

式中: E_{ijeg}^k 为第 k 类保障设备接口从第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序所在停机位转移至第 e 架舰载直升机的第 g 道保障工序所在停机位的时间; Δ_k 为

第 k 类保障设备的资源准备和归置时间; e_{ijeg}^{kl} 为决策变量, 等于 1 时, 表示第 k 类第 l 个保障设备执行完第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序后执行第 e 架舰载直升机的第 g 道保障工序, 反之, 等于 0; E_u 为独占式保障设备类型集合。

4) 供给性资源约束。保障设备的正常运作离不开相应的供给性资源(如燃油、电力等), 但甲板的瞬时供给能力是有限的, 这意味着在同一时间内, 能够为保障设备提供的资源数量也受到相应的制约, 约束表示为

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in A_{kl}} \sum_{l \in E_k} e_{ijkl} \rho_{kl}^{k'} \leq w_{k'} \quad \forall k \in E, \forall k' \in W, \forall t > 0 \quad (13)$$

式中: $\rho_{kl}^{k'}=1$ 为第 k 类第 l 个保障设备需要消耗第 k' 类供给性资源; $w_{k'}$ 为第 k 类供给性资源可以同时保障的工序的最大数量; W 为供给性资源集合。

5) 资源分配约束。在甲板作业过程中, 实现工序需求与资源供给之间的精准匹配是确保整个作业流程高效顺畅的关键, 必须有效配置和使用各类调运设备、保障人员、保障设备等保障主体, 确保每个工序获得必要的支持, 约束表示为

$$\sum_{l \in Z_k} z_{ijkl} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall k \in Z \quad (14)$$

$$\sum_{l \in P_k} p_{ijkl} = p_{ijk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall k \in P \quad (15)$$

$$\sum_{l \in E_k} e_{ijkl} = e_{ijk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall k \in E \quad (16)$$

式中: Z_k 为第 k 类调运设备集合; z_{ijkl} 为决策变量, 等于 1 时, 表示第 i 架舰载直升机的第 j 道调运工序由第 k 类第 l 个调运设备负责调运, 否则, 等于 0; p_{ijkl} 为决策变量, 等于 1 时, 表示第 i 架舰载直升机的第 j 道保障工序由第 k 类第 l 个保障人员保障, 否则, 等于 0。

2.2 目标函数

在评估两栖攻击舰舰载直升机群的出动效能时, 可以采取架次率作为关键的性能指标。该指标反映了一定时间内机群能够完成的出动次数, 是衡量两栖攻击舰作战能力和任务响应速度的重要标准。机群出动作业周期的缩短, 意味着相同时间段内可以有更多的舰载直升机投入作战或其他任务, 而通过优化最小化机群出动时间, 可以有效提高架次率。目标函数表示为

$$\min C_{\max} = \max_{i \in I} E_{i|J|}^3 \quad (17)$$

式中: $C_{\max}$ 为机群出动最长完工时间, 取决于最后一架舰载直升机的离场时间。

3 优化算法设计

鉴于遗传算法 (genetic algorithm, GA) 在求解 RSPSPPTT 问题时的显著效果, 本文设计了一种两段编码的遗传-邻域搜索算法 (genetic-neighborhood search algorithm, G-NSA)。首先, 利用 GA 算法的全局搜索能力, 对可能的解空间进行广泛探索, 从而获得一组具有较好初始性能的解; 然后, 通过邻域搜索策略对这些初始解进行局部优化, 以期在解空间中找到更优的解决方案。为了有效获得算法得到的解决方案, 本文采用串行调度生成机制 (serial schedule generation scheme, SSGS) 进行解码。SSGS 通过一系列规则和启发式算法, 将编码后的解转换为具体的舰载直升机群出动方案。G-NSA 流程如图 2 所示。

3.1 编 码

在舰载直升机出动的 3 个阶段中, 出库及甲板调运和机务勤务保障是决策的关键环节, 而出动离场通常是按照既定的飞行计划执行, 不需要额外的调度决策。因此, 个体采用两段编码结构。为了避免在算法的交叉和变异操作中产生不满足作业流程约束的非法解, 两段编码均采用优先级编码方式, 个体编码方案如图 3 所示。

第 1 段为舰载直升机调运的优先级, 表示为向量 $z = [z_1, z_2, \dots, z_{|J|}]$ 。第 2 段为舰载直升机工序保障的优先级, 表示为向量 $x = [x_{11}, \dots, x_{1|J_1|}, x_{21}, \dots, x_{|I||N|}]$, 其中, N 为单机保障工序数量。

为了实现个体编码与调度方案的精确对应, 有效缩小算法的搜索空间, 以调度方案中各工序开始时间修正编码, 即个体编码为向量 $S = [S_{11}^1, S_{21}^1, \dots, S_{|J_1|}^1, S_{11}^2, S_{12}^2, \dots, S_{|I||N|}^2]$ 。

3.2 解 码

SSGS 以工序为阶段变量, 共包含 $J = \sum_{i \in I} |J_i|$ 个调度阶段。定义已调度工序集 S_g 和可调度工序集 D_g , 可调度工序集为紧前工序中已完成调度的工序集合。解码过程就是不断从 D_g 中选取优先级最高的工序, 为其安排尽可能早的开始时间和资源, 直至调度完全部工序, 最终输出调度方案和目标函数值。假设 O_{ij}^k 为第 i 架舰载直升机第 j 道 k 类工序, $k=1,2,3$ 分别表示调运、保障、出动, 则解码流程如图 2 中虚线框所示。

分配给待调度工序的开始作业时刻即为满足所需资源的最早时刻, 而算法求解过程中的难点在于寻找这些资源的可行时刻。若对每个资源的搜索过程进行编解码, 则搜索空间过于庞大。因此,

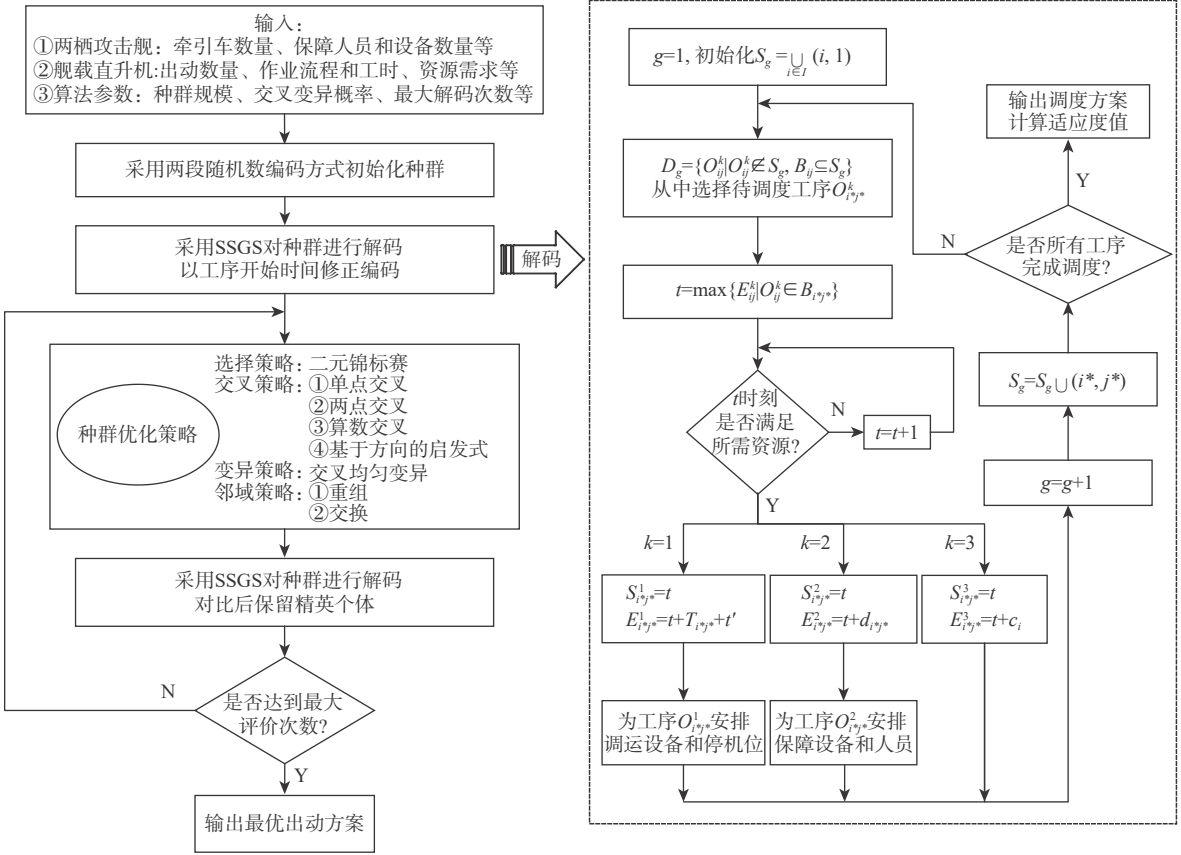


图 2 G-NSA 流程
Fig. 2 G-NSA flow

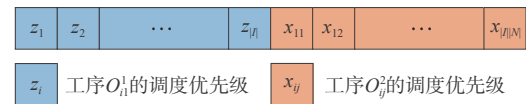


图 3 个体编码方案
Fig. 3 Individual coding scheme

本文针对实际情况，给出了不同资源的分配规则，以此来提高求解效率。

1) 停机位分配。直升机在从机库调运至甲板和从停机区调运至起降区的过程中，都涉及停机位的分配，由于所有停机位均能提供保障所需的保障设备，只需找到 t 时刻空闲的停机位。假设直升机 i 初始布列在停机位 u 上，需要调运至停机位 v 进行保障，如图 4 所示。图 4 展示了 2 种舰载直升机可以转移的情况。情况①中，停机位 v 未被安排舰载直升机保障，若 $S_{ij}^1 + A_{uv} + 2m \leq t$ ，则 t 时刻可调运至停机位 v 上；情况②中，停机位 v 已安排舰载直升机保障，直升机 i 需等待，若 $E_{j|J|}^2 + A_{uv} + 3m \leq t$ ，则 t 时刻可调运至停机位 v 上；若没有空闲停机位保障， t 需递增 1 个时间单位，直至找到有空闲保障停机位的时刻。若 t 时刻存在多个空闲保障停机位，需要根据规则选择最合适的停机位。舰载直升机出动过程应在避免调运阻塞的前提下尽可能早地完成，因此，本文根据调运经验，给出一种停机位分配

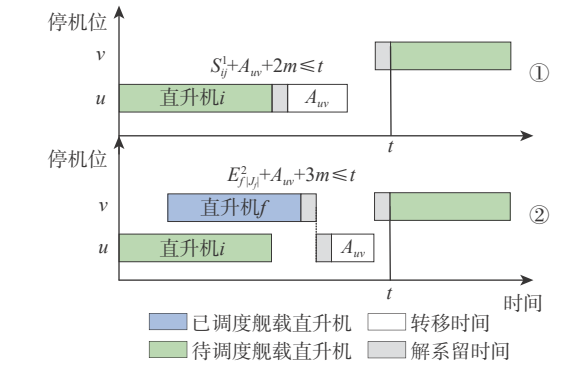


图 4 停机位分配
Fig. 4 Gate assignment

优先级规则，如表 1 所示。表中，数值表示舰载直升机由初始机位调运至目标机位的优先级，数值越低，优先级越高，考虑到两栖攻击舰甲板起降区通常设置 6 个机位，停机区机位不定，因此，不再对停机区内的机位设置优先级，若舰载直升机调运至停机区，则根据就近原则选择停机区内距离最近的停机位。

2) 保障人员、保障设备、调运设备分配。保障人员、保障设备和调运设备的过程分配类似。以保障人员为例，对于待调度工序 O_{ij}^k 所需的第 k 类保障人员，先找到 t 时刻所有空闲的该类保障人员，再根据人员状态判断每一个人员是否能够在 t 时刻进行

表 1 停机位分配优先级

Table 1 Priority for gate assignment

初始机位	目标机位						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	停机区 I
C1	1	2	3	4	6	5	7
C2	2	3	4	5	6	1	8
停机区 I	1	2	3	4	5	6	
停机区 II	6	5	4	3	2	1	

保障,如图 5 所示。图 5 展示了 4 种保障人员状态情况。情况①中,该人员未被安排保障工序, t 时刻可直接保障工序 O_{ij}^2 ;情况②中,该人员在已被安排保障工序 O_{eg}^2 且该工序的保障结束时间 $E_{eg}^2 < t$,若 $E_{eg}^2 + P_{egij}^k \leq t$,则 t 时刻该人员可保障工序 O_{ij}^2 ;情况③中,该人员在已被安排保障工序 O_{fh}^2 且该工序的保障开始时间 $S_{fh}^2 > t$,若 $t + d_{ij} + P_{ijfh}^k \leq S_{fh}^2$,则 t 时刻该人员可保障工序 O_{ij}^2 ;情况④可看作是前 2 种情况的组合,若同时满足 $E_{eg}^2 + P_{egij}^k \leq t$ 和 $t + d_{ij} + P_{ijfh}^k \leq S_{fh}^2$,则 t 时刻该人员可保障工序 O_{ij}^2 。所有可保障待调度工序 O_{ij}^2 的第 k 类机务人员编号记录在集合 F_k^i 中,对于每类人员,若 $|F_k^i| \geq p_{ijk}$,则说明人员约束条件满足。若没有足够人员保障, t 需递增 1 个时间单位,直至找到有足够的机务保障人员的时刻。

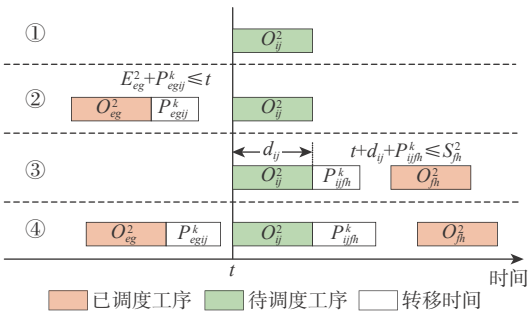


图 5 保障人员分配

Fig. 5 Support personnel assignment

需要指出的是,在寻找保障设备的步骤中,若待调度工序 O_{ij}^2 需要共享式设备,则优先为其安排当前正在保障直升机 i 的该类共享式设备。此外,若可行资源数量超过所需资源数量,可选择相应的优先规则为待调度工序分配最合适的资源,资源分配优先规则如下。

规则 1 最短转移距离优先 (shortest transfer distance first, STDF), 即优先选择距离待调度工序所在机位最近的资源。

规则 2 最少累计作业时间优先 (least accumulated execution time first, LAETF), 即优先选择累计作业最少的资源。

规则 3 最少停机位覆盖数量优先 (least number of covered parking spots first, LNCPSF), 即优先选择覆盖停机位数量最少的资源。

3) 工位空间和供给性资源。寻找工位空间和供给性资源的过程类似。以工位空间为例,对于保障待调度工序 O_{ij}^2 需要的每类工位空间,需要判断该工位空间在时间段 $[t, t + d_{ij}]$ 内是否可容纳 p_{ijk} 个保障人员,若不满足, t 需递增 1 个时间单位,直至找到有足够工位空间的时刻。

3.3 种群优化策略

G-NSA 设计的核心在于如何针对问题来平衡种群在探索与开发之间的动态关系。本文问题的机务勤务保障阶段属于文献 [11] 中的 MAISPTT 问题,该研究表明多算子遗传算法在求解该类问题时具有一定的优势。基于此,本文进一步设计了一套邻域搜索策略,通过多维邻域的协同搜索和动态交互,实现高效寻优。

1) 选择策略。采用二元锦标赛来挑选父代,即从种群中随机选择 2 个个体进行竞争,抽取其中最优的个体,重复操作直到组成新的种群。

2) 交叉策略。采用 4 个交叉策略来对父代进行交叉,进而形成后代。

① 单点交叉: 随机生成一个在 $(1, J)$ 内的整数 p ,交换父代 $[p, J]$ 间的基因片段。

② 两点交叉: 随机生成 2 个在 $(1, J)$ 不相等的整数 p_1 和 p_2 ,后交换父代 $[p_1, p_2]$ 间的基因片段。

③ 算数交叉: 令 L_1 和 L_2 为父代, L'_1 和 L'_2 为子代, a 和 b 为 $[-0.5, 1.5]$ 内的随机数,且 $a + b = 1$,则交叉公式表示为

$$\begin{cases} L'_1 = aL_1 + bL_2 \\ L'_2 = bL_1 + aL_2 \end{cases} \quad (18)$$

④ 基于方向的启发式交叉: 令 $V = L_2 - L_1$, r_{1i} 和 r_{2i} ($i = 1, 2, \dots, J$) 为 $[0, 1]$ 内的随机数, $V_1 = [r_{1i}v_i]_{1 \times J}$, $V_2 = [r_{2i}v_i]_{1 \times J}$, 步长 $\lambda = 1$,则交叉公式表示为

$$\begin{cases} L'_1 = L_1 + \lambda V_1 \\ L'_2 = L_2 + \lambda V_2 \end{cases} \quad (19)$$

3) 变异策略。采用均匀变异对子代进行变异操作,即遍历子代个体每个基因位,根据变异概率决定是否变异,若变异,则生成一个在 $\left[\min_{i \in I} S_{i|J,i}^k, \max_{i \in I} S_{i|J,i}^k\right]$ 内的随机数。

4) 邻域搜索策略。

① 采用 2 个邻域搜索策略更新个体基因。重组邻域: 随机选取基因 z_i , 找到与之对应的基因片段 $[x_{i1}, x_{i|J_i|}]$, 并生成 $|J_i|$ 个在 $[\min_{i \in I} S_{i|J_i|}^k, \max_{i \in I} S_{i|J_i|}^k]$ 内的随机数。

② 交换邻域: 随机选取 2 个基因 z_i 和 $z_{i'}$, 交换与之对应的 2 个基因片段 $[x_{i1}, x_{i|J_i|}]$ 和 $[x_{i'1}, x_{i'|J_{i'}|}]$ 。

4 仿真实验

4.1 案例设计

本文基于图 1 所示的两栖攻击舰设计仿真案例, 以舰载直升机群连续出动为仿真背景, 通过 MATLAB 编程来验证所提模型和算法的有效性。

模型参数设置如下: 两栖攻击舰共有 4 类机

位, 即甲板起降位 A1~A6、甲板停机位 B1~B11、升降机位 C1~C2、机库停机位 D1~D12、舰载直升机 I1~I12(I4~I9 为突击运输直升机, 其余为武装直升机)。直升机初始位置均布列在机库, 如图 6 所示。

甲板和机库分别配置 4 辆牵引车, 均匀部署在起降机处。甲板共有 7 个保障部位, 每个部位部署 2 个供电站和 1 个加油站, 可以覆盖到甲板任意停机位。保障人员配置方面, 特设专业人员 10 名、航电专业人员 8 名、军械专业人员 4 名、机械专业人员 8 名。舰载直升机的保障流程如图 7 所示, 各项保障工序及对资源的需求如表 2 所示, 不同机型保障工时存在差异。图 7 中数字对应表 2 中的工序号。受篇幅限制, 其余参数未在文中列出。

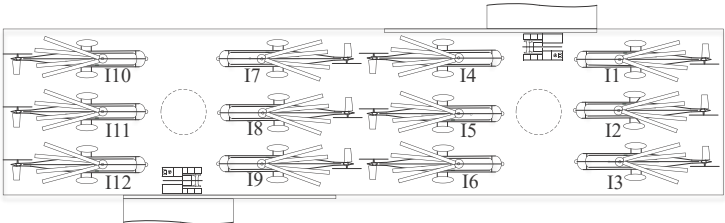


图 6 舰载直升机初始布列位置
Fig. 6 Initial position of shipboard helicopters

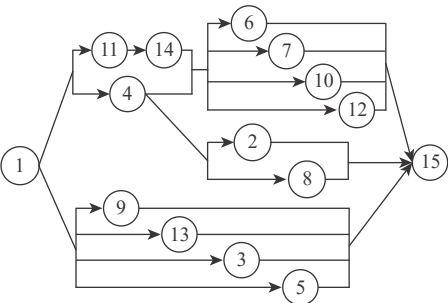


图 7 单机保障流程
Fig. 7 Support process of single-helicopter

算法参数设置如下: 根据正交实验结果, 设定种群大小为 50, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.001。算法终止条件取调度评价次数为 5 000, 通过 SSGS 生成一次调度方案记为一次调度评价。

4.2 仿真分析

1) 模型分析。模型的仿真结果如图 8~图 10 所示。图 8 为舰载直升机调度甘特图, 图中, 灰色方块表示舰载直升机解系留过程, 蓝色方块代表出库及甲板调运阶段, 编号表示从机库调运至甲板时所使用的升降机, 棕色方块表示机务勤务保障阶段, 编号表示保障时所在的停机位, 紫色方块表示出动离场阶段。只有一段机务勤务保障阶段表示该舰载直升机直接调运至起降区进行保障, 两段机

表 2 保障工序及对资源需求			
Table 2 Guaranteed processes and resource requirements			
工序号	内容	设备	专业
1	虚拟开始		
2	平台区机械检查		机械
3	下部机械检查		机械
4	旋翼展开	供电站	特设/机械
5	航电外观检查		航电
6	航电座舱检查	供电站	航电
7	任务数据加载	供电站	特设/航电
8	平台区特设检查		特设
9	下部特设检查		特设
10	特设座舱检查	供电站	特设
11	燃油加注	加油站	机械
12	惯导对准		航电
13	军械外观检查		军械
14	机载弹药挂载		军械
15	虚拟结束		

务勤务保障阶段表示舰载直升机先调运至停机区进行预先保障, 而后调运至起降区进行后续保障。图 9 为保障人员调度甘特图, 图中, 相同颜色的方块所属同一架舰载直升机, 编号为该直升机的保障工序, 灰色方块为人员转移过程。图 10 为保障设备甘特图, 图中, 方块颜色与图 8 中一致, 重叠方块

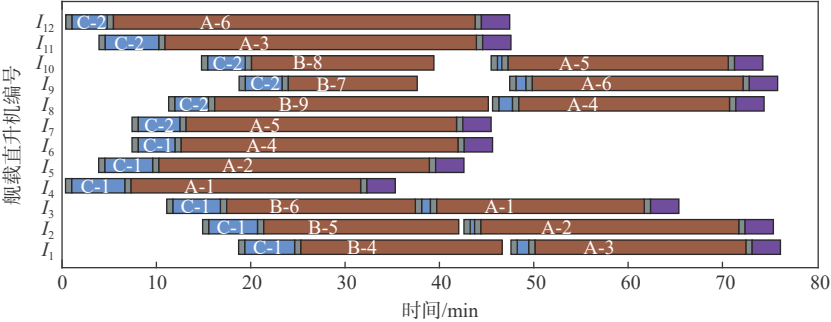


图 8 舰载直升机调度甘特图

Fig. 8 Gantt chart of shipboard helicopter scheduling

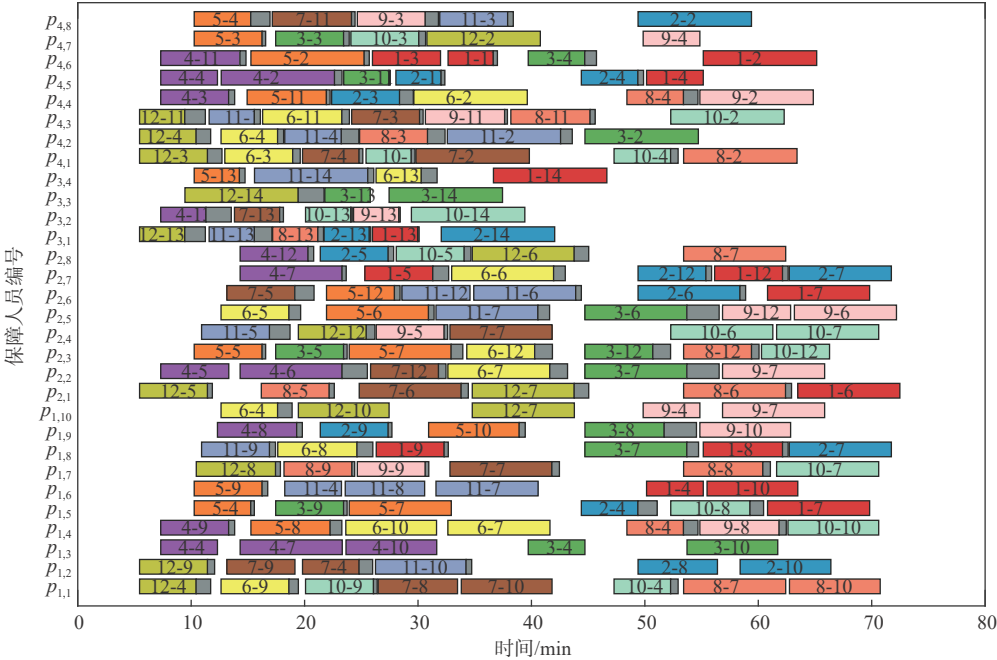


图 9 保障人员调度甘特图

Fig. 9 Gantt chart of personnel scheduling

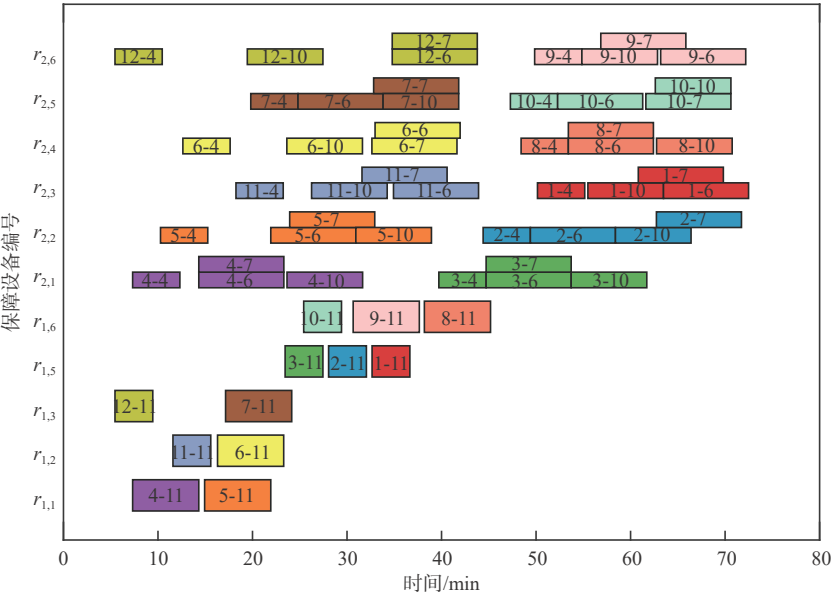


图 10 保障设备调度甘特图

Fig. 10 Gantt chart of support equipment scheduling

表示该设备为共享式设备供电站,同一时间可以保证该机不同工序。

通过对舰载直升机、保障人员和保障设备的调度过程相互印证,仿真未发生违反模型约束的情况,各资源之间不存在相互冲突,调度方案是可行的。

通过对调度模型的细致分析,可以观察到不同波次舰载直升机的保障时间存在显著差异。具体来说,第 1 波次的平均保障时间为 30 min,第 2 波次的平均保障时间为 43 min,出动时间最快与最慢之间相差达到 40 min,特别是第 2 波次的舰载直升机在完成停机区的保障后,必须等待一段时间才能调运至起降区进行后续保障。产生这一现象的根本原因在于保障工序的顺序安排未能达到最优化,从而导致停机区与起降区在保障工作上的时间不同步。

为了优化出动过程,舰载直升机应在停机区保障尽可能多的工序,以便在调运至起降区后只需进行简单的维护即可起飞。这样,在第 1 波次舰载直升机起飞后,第 2 波次舰载直升机能够迅速调运至起降区进行保障。针对该问题,本文认为可以从 2 个优化角度进行考虑:①重新设计舰载直升机的保障流程,在当前的保障流程中存在一个显著的问题,即停机区的供电站处于空闲状态。原因在于实际操作中的一项基本要求:舰载直升机在完成旋翼展开、加油和挂弹等工序后,才能进行通电检查。由于严格的工序限制,导致甲板资源分配不均衡。为了解决该问题,需要重新审视和调整保障流程中的各个环节。②提高保障人员调配的灵活性,在资源受限的情况下,应根据舰载直升机实时的保障需求和状态灵活安排保障工作,即当停机区和起降区的保障工序发生时间冲突时,保障人员应优先保障起降区的工序,确保舰载直升机在起降区的保障工作得到优先完成。通过这些优化措施,可以更有效地管理舰载直升机的保障流程,减少不必要的等待时间,提高出动效率。

此外,模型在设计和实验阶段采用了一些合理化的假设,如舰载直升机的初始位置、各类时间参数等,这些假设有助于简化模型的复杂性,便于进行初步的分析和验证,在控制变量的环境中测试模型的有效性和稳定性。然而,实际的作业调度环境可能与这些假设条件存在差异。因此,为使模型更加贴近实际操作并提高其实用性,可以根据实际情况对模型中的参数进行调整和修正,使模型更加精确地模拟和预测实际作业调度情况,从而为操作人员提供更有价值的决策支持。

2) 算法分析。为了全面评估本文提出的

G-NSA 算法在求解 ISMSHSO 模型上的性能,选择 3 种经典的优化算法作为对比基准:GA、粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法、差分进化 (differential evolution, DE) 算法。算法的编码方式均为优先数编码,根据正交实验结果,各算法的相关参数设置如下:GA 中,种群规模为 50,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.01,遗传操作与 G-NSA 一致;PSO 中,种群规模为 100,惯性权重采用自适应调整策略,最大惯性因子为 0.9,最小惯性因子为 0.4,学习因子为 0.2;DE 中,种群规模为 50,变异算子为 0.68,交叉算子为 0.6。为客观评价各算法的性能,进行 20 次独立实验。所有算法的初始种群均相同,以消除初始种群差异对结果的影响,结果如表 3 所示。各算法的收敛曲线如图 11 所示。

表 3 不同算法对比结果

算法	最小化机群出动时间/min			收敛到最优值的 最小评价次数平均值
	平均值	最优值	方差	
G-NSA	76.7	75.9	0.958	2 940
GA	77.1	75.5	1.172	3 749
PSO	78.5	75.9	2.312	3 724
DE	79.8	78.1	0.733	2 757

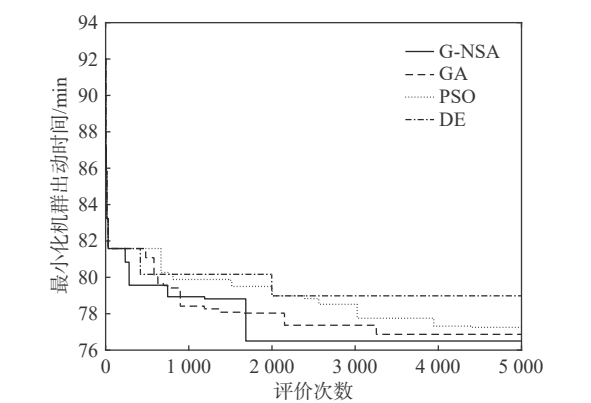


图 11 不同算法收敛曲线

Fig. 11 Convergence curves of different algorithms

通过表 3 和图 11 可以发现,DE 展现了较快的收敛速度和较高的稳定性,但容易陷入局部最优,从而限制了其求解效果;PSO 在全局探索方面表现了较好的效果,但性能不够稳定,最优值分布较为分散,随机性较大;GA 求解趋势是一个较为稳定的目标值收紧过程,总体性能较前两者好;G-NSA 经过较少迭代后便收敛到最优值,相比之下综合能力更加优秀,主要归功于:①综合了 GA 的全局搜索能力和邻域搜索的局部优势,在种群的探索和开发之间达到了平衡;②采用了基于作业时序修正的优先数编码,提高了搜索效率,使得算法能够更快地找到高质量的解。

为了进一步探究阶段作业对出动时间的影响,对两段编码进行单独优化,独立运行 20 次的结果如表 4 所示。可以看出,在舰载直升机调度过程中,单独针对出库及甲板调运阶段和机务勤务保障阶段进行优化的效果差异,针对机务勤务保障阶段的优化相较于出库及甲板调运阶段的优化,带来了更为显著的出动时间降低。分析其原因主要有:①出库及甲板调运阶段的限制,出库及甲板调运阶段的效率受到物理阻塞和停机位分配的严格限制。由于舰载直升机的调运路径和停机位资源有限,加之优先级规则的约束,使得该阶段的可行解数量相对较少。这些限制条件减少了优化空间,从而影响了优化效果。②机务勤务保障阶段的复杂性,机务勤务保障阶段涉及更多的决策要素和更长的持续时间。由于机务勤务保障阶段的操作更为多样,优化这一阶段能够通过重新安排保障工序、调整资源分配等措施,显著减少整体出动时间。

表 4 个体分段优化对比结果				
Table 4 Comparison results of individual segment optimization				
算法	最小化机群出动时间/min			收敛到最优值的 最小评价次数平均值
	平均值	最优值	方差	
G-NSA	76.7	75.9	0.958	2 940
G-NSA (第一段编码)	83.5	82.3	0.776	1833
G-NSA (第二段编码)	77.7	76.7	1.231	3 900

综上所述,虽然出库及甲板调运阶段的优化受到一定限制,但机务勤务保障阶段的优化提供了更大的改进空间。因此,在实际操作中,应当重点关注机务勤务保障阶段的流程优化和资源配置,提高整个调度过程的流畅性和响应速度,提升两栖攻击舰的综合作战能力。

5 结 论

为了提升两栖攻击舰舰载直升机群的出动效率,本文采取了一系列创新的方法和策略:

1) 模型构建。基于两栖攻击舰甲板作业的实际情况,在资源受限调度模型的基础上进行了必要的调整和改进。通过引入直观理解的约束和决策变量,成功建立了一个综合性的舰载直升机出动作业一体化调度模型,旨在精确模拟和优化舰载直升机的调度过程,确保在有限的资源条件下实现高效的作业调度。

2) 算法优化。将出动作业拆分成多个阶段,并设计了基于优先级的两段编码方式。同时,引入

SSGS 进行解码,确保了调度方案的可行性和有效性。通过开发 G-NSA 算法,实现了问题的快速优化收敛,取得了良好的求解效果。该算法结合了遗传算法的全局搜索能力和邻域搜索的局部深入挖掘,为舰载直升机的调度问题提供了一种高效的解决方案。

3) 实例仿真。为了验证本文模型和算法的有效性,设计了一个具体的两栖攻击舰舰载直升机集中出动案例。案例涵盖了甲板资源配置、保障流程等关键要素,并通过本文算法成功生成了直升机调运甘特图、机务人员保障甘特图和勤务设备保障甘特图,这些图表直观展示了各保障单元之间的协同作业过程,为实际操作提供了清晰的指导和参考。

为了进一步优化舰载直升机群的出动效率,未来的研究可以从以下 2 个方面着手:①保障工序关系研究,深入分析保障工序之间的相互关系,通过智能决策方法找到更为高效的紧前紧后约束关系;②资源配置方案研究,根据舰载直升机的具体作战任务,研究并制定合理的甲板资源配置方案。通过这些研究工作,可以期待舰载直升机群的出动效率得到显著提升,为两栖攻击舰的作战任务提供强有力的支持。

参考文献 (References)

[1] 刘翱, 刘克. 舰载机保障作业调度问题研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(1): 49-60.

LIU A, LIU K. Advances in carrier-based aircraft deck operation scheduling[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37(1): 49-60(in Chinese).

[2] WU Y, HU N, QU X J. A general trajectory optimization method for aircraft taxiing on flight deck of carrier[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(4): 1340-1353.

[3] LI Y T, WU Y, SU X C, et al. Path planning for aircraft fleet launching on the flight deck of carriers[J]. Mathematics, 2018, 6(10): 175.

[4] 薛均晓, 孔祥燕, 郭毅博, 等. 基于深度强化学习的舰载机动态避障方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(7): 1102-1112.

XUE J X, KONG X Y, GUO Y B, et al. Dynamic obstacle avoidance method for carrier aircraft based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(7): 1102-1112(in Chinese).

[5] 刘洁, 董献洲, 韩维, 等. 采用牛顿迭代保辛伪谱算法的舰载机甲板路径规划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(9): 1827-1838.

LIU J, DONG X Z, HAN W, et al. Trajectory planning for carrier aircraft on deck using Newton symplectic pseudo-spectral method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(9): 1827-1838(in Chinese).

[6] LIU J, HAN W, WANG X W, et al. Research on cooperative tra-

jectory planning and tracking problem for multiple carrier aircraft on the deck[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(2): 3027-3038.

[7] 刘洁, 韩维, 徐卫国, 等. 基于滚动时域的舰载机甲板运动轨迹跟踪最优控制[J]. 航空学报, 2019, 40(8): 322842.

LIU J, HAN W, XU W G, et al. Research on optimal path tracking control of carrier-based aircraft on the deck based on RHC[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(8): 322842(in Chinese).

[8] WANG X W, LI B, SU X C, et al. Autonomous dispatch trajectory planning on flight deck: a search-resampling-optimization framework[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 119: 105792.

[9] 韩维, 刘子玄, 苏析超, 等. 结合启发式与最优控制的舰载机甲板路径规划算法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(4): 1098-1110.

HAN W, LIU Z X, SU X C, et al. Deck path planning algorithm of carrier-based aircraft based on heuristic and optimal control[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(4): 1098-1110(in Chinese).

[10] 韩维, 崔荣伟, 苏析超, 等. 基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2751-2759.

HAN W, CUI R W, SU X C, et al. Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm[J]. Control and Decision, 2021, 36(11): 2751-2759(in Chinese).

[11] CUI R W, HAN W, SU X C, et al. A dual population multi-operator genetic algorithm for flight deck operations scheduling problem [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 32(2): 331-346.

[12] 苏析超, 韩维, 张勇, 等. 考虑人机匹配模式的舰载机甲板机务勤务保障调度算法[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 222314.

SU X C, HAN W, ZHANG Y, et al. Scheduling algorithm for maintenance and service support of carrier-based aircraft on flight deck with different man-aircraft matching patterns[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 222314(in Chinese).

[13] SU X C, CUI R W, LI C J, et al. A heuristic solution framework for the resource-constrained multi-aircraft scheduling problem with transfer of resources and aircraft[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 228: 120430.

[14] 李亚飞, 高磊, 蒿宏杰, 等. 舰载机保障作业人机协同决策方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(12): 2493-2510.

LI Y F, GAO L, HAO H J, et al. Man-machine cooperative decision-making method for carrier-based aircraft support operation [J]. Scientia Sinica Informationis, 2020, 53(12): 2493-2510(in Chinese).

[15] 万兵, 苏析超, 郭放, 等. 不确定性工时下甲板作业的前摄性鲁棒调度[J]. 航空学报, 2022, 43(12): 325971.

WAN B, SU X C, GUO F, et al. Proactive robust scheduling of aircraft carrier flight deck operations with uncertain activity durations[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(12): 325971(in Chinese).

[16] 曾斌, 陈媛媛, 李厚朴. 考虑保障装备可用度的舰载机作业调度优化[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7): 1856-1865.

ZENG B, CHEN Y Y, LI H P. Launch scheduling optimization considering availability of maintenance equipment for carrier aircraft [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(7): 1856-1865 (in Chinese).

[17] YUAN P L, XIAO W, LI Z Y, et al. A robust optimization scheduling for carrier aircraft support operation based on critical chain method[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 627(1): 012007.

[18] SU X C, HAN W, WU Y, et al. A robust scheduling optimization method for flight deck operations of aircraft carrier with ternary interval durations[J]. IEEE Access, 2018, 6: 69918-69936.

[19] SU X C, HAN W, WU Y, et al. A proactive robust scheduling method for aircraft carrier flight deck operations with stochastic durations[J]. Complexity, 2018, 2018: 6932985.

[20] 范加利, 黄葵, 朱兴动, 等. 基于禁忌算法的舰载机甲板作业动态调度优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(10): 3172-3182.

FAN J L, HUANG K, ZHU X D, et al. Carrier aircraft deck operations dynamic scheduling optimization algorithm based on the tabu algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(10): 3172-3182(in Chinese).

[21] YUAN P L, HAN W, SU X C, et al. A dynamic scheduling method for carrier aircraft support operation under uncertain conditions based on rolling horizon strategy[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1546.

[22] 刘珏, 王能建, 罗旭, 等. 采用改进遗传算法的舰载机保障调度方法[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(2): 194-205.

LIU J, WANG N J, LUO X, et al. Deck operation scheduling method of carrier-based aircraft based on improved genetic algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(2): 194-205(in Chinese).

[23] 袁培龙, 韩维, 苏析超, 等. 不确定环境下舰载机保障预反应式动态调度优化[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(6): 1265-1277.

YUAN P L, HAN W, SU X C, et al. Predictive-reactive dynamic scheduling strategy for carrier aircraft support in uncertain environment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(6): 1265-1277(in Chinese).

[24] LIU Z X, HAN W, WU Y, et al. Automated sortie scheduling optimization for fixed-wing unmanned carrier aircraft and unmanned carrier helicopter mixed fleet based on offshore platform[J]. Drones, 2022, 6(12): 375.

[25] 刘子玄, 万兵, 苏析超, 等. 基于 HA 算法的舰载机出动作业调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(5): 1691-1702.

LIU Z X, WAN B, SU X C, et al. Dispatching operation scheduling method of carrier-based aircraft based on HA algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(5): 1691-1702(in Chinese).

[26] 刘玉杰, 崔凯凯, 韩维, 等. 基于 IPSO 的舰载机出动离场规划研究[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(4): 1337-1345.

LIU Y J, CUI K K, HAN W, et al. Research on departure planning of carrier aircraft based on IPSO[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(4): 1337-1345(in Chinese).

[27] LIU J, HAN W, LI J, et al. Integration design of sortie scheduling for carrier aircrafts based on hybrid flexible flowshop[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 1503-1511.

[28] 万兵, 韩维, 苏析超, 等. 基于 CE-PF 算法的舰载机离场调度优化问题[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 771-785.

WAN B, HAN W, SU X C, et al. A survey of carrier-based aircraft departure scheduling optimization problem based on CE-PF algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 771-785(in Chinese).

[29] 万兵, 韩维, 梁勇, 等. 舰载机出动离场调度优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(12): 3624-3634.
WAN B, HAN W, LIANG Y, et al. Optimization algorithm of carrier-based aircraft sortie departure scheduling[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(12): 3624-3634(in Chinese).

[30] CUI J P, WU Y, SU X C, et al. A task allocation model for a team of aircraft launching on the carrier[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 7920806.

[31] WU Y, WANG Y Y, QU X J, et al. Exploring mission planning method for a team of carrier aircraft launching[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(5): 1256-1267.

[32] 郝桐, 黄斌, 何巍. 两栖攻击舰直升机出动回收流程分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(5): 11-16.

HAO T, HUANG B, HE W. Analysis of dispatch recovery process of helicopter on LHD[J]. Ship Engineering, 2020, 42(5): 11-16(in Chinese).

[33] 李铭鑫. 基于 UE4 的舰载直升机机群调度优化及仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022: 21-34.
LI M X. Research on scheduling optimization and simulation of shipborne helicopter fleet based on UE4[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022: 21-34(in Chinese).

[34] HAN W, WANG Y L, SU X C, et al. A multi-objective optimization problem research for amphibious operational mission of shipboard helicopters[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(9): 256-279.

Research on integrated scheduling of shipboard helicopters sortie operation on amphibious assault ship

HAN Wei¹, HAN Xiaohua¹, SU Xichao^{2,*}, WANG Liusong³, WU Haonan¹

- (1. Aeronautical Foundation College, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;
2. Aeronautical Operation College, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;
3. Unit 91860 of the PLA, Shanghai 200000, China)

Abstract: Deck operation scheduling is the key technology to improve the sortie rate of carrier-based aircraft. In view of the multi-stage and high coupling characteristics of amphibious assault ship carrier-borne helicopters operation, an integrated scheduling model and optimization algorithm were proposed, which included warehousing and deck transportation, maintenance service support, and sortie departure. First, an integrated scheduling model of carrier helicopter sortie operation was developed based on the resource and logical restrictions of each stage in order to reduce the duration of the sortie. Then, the problem is abstracted as a resource-constrained project scheduling problem with transition times, and a two-segment genetic-neighborhood search algorithm is designed to solve the problem based on a serial schedule generation scheme. Through simulation experiments conducted on the concentrated sortie cases of 12 shipboard helicopters, the effectiveness of the scheduling model and algorithm in optimizing the sortie process was verified. This significantly reduced the sortie preparation time for the helicopter group. Additionally, it was shown that the entire scheduling is more significantly impacted by decisions made during the maintenance service support phase.

Keywords: amphibious assault ship; shipboard helicopter; sortie operation; integrated scheduling; resource-constrained project scheduling

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0057

基于面部特征的管制员疲劳判别算法

王莉莉*, 殷硕峰, 潘越

(中国民航大学 天津市空管运行规划与安全技术重点实验室, 天津 300300)

摘 要: 针对现有通过管制员面部信息监测疲劳, 极少融合管制真实场景、算法鲁棒性低等特点, 提出一种考虑管制员工作特性的疲劳实时判别算法。采用 Attention Mesh 算法获取面部 468 点的三维坐标信息, 并使用特征匹配法逐样本对眼部与嘴部纵横比阈值进行标定; 引入管制员在岗时间、实时陆空通话负荷及疲劳事件发生次数 3 个指标, 将三者通过指数衰减函数动态映射至疲劳监测时间窗口, 并通过计算动态衰减时间窗内眨眼频次占比, 得出疲劳趋势指标。对某管制单位管制室 30 位成熟放单管制员班后管制测试的脑电与面部视频数据进行处理, 并对通过面部数据得到的疲劳指标 F_o 与脑电疲劳指标 F_e 进行时间维度上的相关性分析, 结果表明: 在 30 个被试样本的双变量交叉相关性分析结果中, Pearson 相关性系数整体介于 0.462~0.785 之间, Sig. 双尾显著性检验均位于 0.01 级别, 相关性显著, 验证了所提算法的有效性与可靠性。

关 键 词: 管制员; 疲劳判别; 人脸关键点检测; 陆空通话负荷; 脑电信号

中图分类号: V355.1; TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-0986-09

随着经济的持续发展和人们出行需求的不断提高, 民航领域也迎来了前所未有的发展机遇。管制员作为空中交通管制工作的重要角色, 肩负着保障航空安全和航班有效管理的重任。然而, 随着航班数量的增加, 管制员所面临的工作负荷也相应增加。因此, 如何对管制员的疲劳状态进行准确的判定和预警, 对于预防空中交通管制不安全事件的发生具有重要意义。

目前, 通过面部特征进行疲劳状态监测的研究中, 驾驶员疲劳领域相关研究成果颇多。Li 等^[1]提出基于改进的 YOLOv3-tiny 卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 和 Dlib 库的驾驶员疲劳检测方法, 在复杂背景下获取驾驶员面部区域, 通过评估驾驶员的眼部和嘴部状态, 计算闭眼时间、眨眼频率和打哈欠次数来判断驾驶员的疲劳状态, 并通过模拟驾驶实验验证该方法的准确度约为

95.1%; Ji 等^[2]采用多任务级联卷积神经网络 (multi-task cascaded convolutional neural network, MTCNN) 实现人脸和特征点定位, 通过 CNN 提取眼部疲劳特征和嘴部疲劳特征, 建立多指标融合疲劳判定模型, 判断驾驶员疲劳状态。在管制员疲劳研究领域, 通过面部特征进行疲劳监测普遍借鉴自驾驶员疲劳监测算法。汪磊等^[3]基于 OpenCV 开源计算机视觉库, 结合图像二值化和模块匹配等技术, 对管制员疲劳状况进行识别, 取得了不错的检测效果; 史增鹏^[4]采用 Adaboost 算法实现了对人脸的快速定位, 并基于统计学习的人脸检测算法, 进一步确定眼睛和嘴巴的矩形区域, 并进行状态识别和预测。以上研究在进行面部关键点定位时普遍使用二维坐标信息, 忽略了部分空间特征, 同时在疲劳判定过程中, 极少融入管制员工作场景的特点。

在基于脑电 (electroencephalogram, EEG) 信号

收稿日期: 2024-01-24; 录用日期: 2024-08-19; 网络出版时间: 2024-08-26 08:57

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240823.1416.001

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资助项目 (U1633124)

* 通信作者. E-mail: llwang317@163.com

引用格式: 王莉莉, 殷硕峰, 潘越. 基于面部特征的管制员疲劳判别算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 986-994.

WANG L L, YIN S F, PAN Y. Controller fatigue discrimination algorithm based on facial features [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 986-994 (in Chinese).

进行管制员疲劳监测的领域中, 国外已取得了丰富的成果。Lal 等^[5]提出 EEG 是衡量疲劳程度的最合理指标之一, 其能够有效捕捉大脑活动的变化, 从而反映个体的疲劳状态。Bernhardt 等^[6]在研究管制学生模拟机任务中的 EEG 信号时, 发现随着管制架次的增加和注意力分散任务的增多, 个体的感知能力和反应速度会有所下降。Aricò 等^[7]通过设计实验, 测试 12 名在校管制学员, 建立 EEG 模型, 基于大量 EEG 数据进行分析, 通过识别特定的脑电波特征, 准确衡量个体的疲劳状态。综上所述, EEG 能够直观且准确地反映个体的疲劳趋势, 但其对测试环境和成本的要求较高。鉴于 EEG 在疲劳监测领域中被广泛认为是“金标准”, 本文提出了一项研究方案, 旨在利用 EEG 数据对基于面部特征的疲劳监测算法进行有效性检验。

本文针对现有通过管制员面部信息监测疲劳, 极少融合管制真实场景、算法鲁棒性低等特点, 提出一种融合管制工作相关特性的疲劳实时判别算法。首先, 在提出的轻量化 VIT 人脸检测算法^[8]基础上, 采用精度与鲁棒性更高的 Attention Mesh^[9]三维人脸关键点检测算法, 获取面部 468 点的三维坐标信息, 计算眼睑与嘴部的三维欧几里得距离, 并在重构纵横比函数后, 采用特征匹配法逐样本对其眼部与嘴部纵横比阈值进行标定, 以缓解由个体差异引起的测试误差; 其次, 引入管制员在岗时间、实时陆空通话负荷及疲劳事件发生次数 3 个指标, 将三者通过指数衰减函数动态映射至疲劳监测时间窗口, 并通过计算动态衰减时间窗内眨眼频次占比得出疲劳趋势; 最后, 通过设计相关实验, 采集并处理了某管制单位管制室 30 位成熟放单管制员的 EEG 与面部视频数据, 将通过面部数据得到的疲劳指标 F_s 与 EEG 疲劳指标 F_e , 利用 SPSS 进行相关性分析, 验证本文算法的有效性。

1 人脸关键点检测

在以往的研究工作中, Dlib 库和 OpenFace 等常被用于面部 68 点定位。然而, 这些方法在处理非正面人脸图像时存在一些局限性。例如, 当角度倾斜或面部表情过于复杂时, Dlib 库的内置算法检测效果可能会受到影响。此外, Dlib 库和 OpenFace 在应对遮挡方面的鲁棒性较弱。针对以上问题, 本文提出使用 Google 基于 Face Mesh^[10]改进的 Attention Mesh 算法, 该算法能够检测面部 468 个关键点, 相较于 68 点定位方法更加精细。这种细粒度的检测不仅在复杂的角度和表情下依然保持较高的检测精度, 还能提供更丰富的面部特征信息, 从而显著

提升下游任务效果。其中, 算法基于 RGB 图像(不含深度信息)估计出三维网格顶点位置, 网格拓扑结构由 468 点构成, 如图 1 所示。

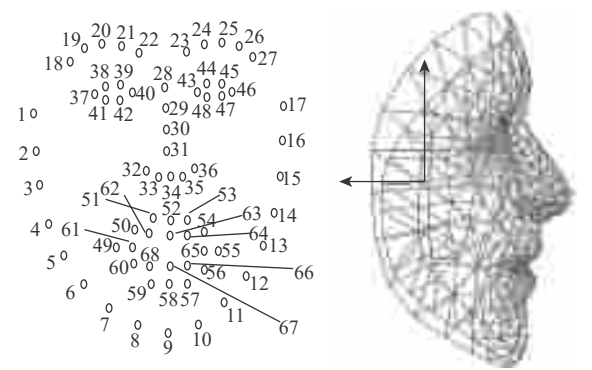


图 1 人脸二维 68 点与三维 468 点对比示意图

Fig. 1 Comparison of 2D 68-point and 3D 468-point of face

1.1 模型推理流程

在 Face Mesh 算法中, 单帧图像通过人脸检测器进行二分类, 并回归出 Boundingbox 信息与 5 个标记点位置(包括双眼、双耳与鼻尖), 这些标记点用于旋转面部矩形框并使人脸双眼之间的连线平行于图像 x 轴, 将处理后的图像剪裁缩放到 128×128 后输入至关键点检测模型, 该模型的输出为三维坐标向量与人脸置信度。将三维坐标映射回原始图像坐标系。考虑到处理每一帧图像都会调用一次人脸检测器, 会对处理实时视频流效率带来较大影响。因此, 该算法在初始帧使用人脸检测器获取人脸位置, 后续帧通过前一帧的预测结果进行人脸位置跟踪, 无需重复调用人脸检测器, 直至人脸标志预测的概率低于适当的阈值后, 则会重新调用人脸检测器^[10]。该算法可以避免人脸检测器的冗余使用, 更好地降低计算量, 提升单帧图像的处理速度。

1.2 Face Mesh 模型结构与模型训练

在模型结构上, 首先使用残差神经网络在早期进行大幅度的下采样, 以此减小模型体量, 提升计算速度。与此同时, 快速到达网络深层, 便于提取眼睛与嘴部的分类语义信息。由于视图存在轻微的仿射变换、头部姿势变化、光线变化及各种相机传感器噪声的影响^[11], 这些情况会引发肉眼可见的波动, 或者在时间上出现偏差。为处理这类时序震荡问题, 该算法采用一种特殊的低通滤波器。这种滤波器保持了固定的滚动窗口, 该窗口包含了几个时间戳样本, 用于进行速度估计; 而且该滤波器能够根据人脸的大小进行自我调整, 以适应视频流中人脸比例的变化; 能够有效平抑各种因素引起的波动和偏差, 提高了整体任务的准确度和鲁棒性。

该模型在训练层面采用了先进的自助法与增量学习策略。在训练出初始模型后, 通过初始模型

预测关键点信息并进行人工微调,将微调后的数据再次训练新的模型,如此不断进行迭代精调。其中,初始模型的数据来源于三维合成渲染模型与人工标注。

1.3 Attention Mesh 算法优势

相较于 Face Mesh 算法,本文采用的 Attention Mesh 算法为 Face Mesh 的改进模型。该算法的优势在于:利用注意力机制专注于具有语义意义的面部区域,特别是眼睛和嘴唇,从而显著提高了这些区域的预测精度。具体来说,Attention Mesh 算法将整个模型划分为几个子模型,其中,一个子模型负责预测三维人脸网格的所有坐标,并为每个兴趣区域定义裁剪边界,其余子模型则依赖于通过注意力机制获取的 24×24 特征图,以实现特定区域坐标的预测^[9]。这一特性使得算法在处理重要面部区域特征点时能够提供更高的准确度。通过该算法的应用,能够实现对人脸各部位进行更为精准的检测和识别,从而提升整个疲劳监测系统的性能。

2 疲劳行为特征处理

现实生活中,常见的疲劳行为特征可分为 3 类:①反映眨眼行为的眼睛纵横比^[12](eye aspect ratio, EAR)和眼睑闭合时间百分比^[13](percentage of eyelid closure over the pupil over time, PERCLOS),其中,EAR 主要用于检测眼睛的开合状态,其通过计算眼睛垂直方向距离与水平方向距离的比值来表示。②用于检测哈欠行为的嘴部纵横比^[14](mouth aspect ratio, MAR),其通过计算嘴部纵向距离与横向距离的比值来表示。③表征瞌睡点头行为的头部姿态自由度特征。其中,在进行眨眼与哈欠检测时,本文采用人脸 468 点关键点空间位置信息进行相关计算。然而,考虑到管制员在实际工作场景中需要频繁操作键鼠,可能会产生点头行为,因此,本文并未将头部姿态变化作为疲劳特征,以免引起误判。

2.1 眼部、嘴部纵横比函数重构

考虑到以往研究过程中大多采用二维关键点坐标作为变量构建纵横比函数,在一定程度上损失了空间特征信息,针对上述问题,本文采用人脸三维坐标信息,通过计算三维欧几里得距离,进一步重构眼部与嘴部的纵横比函数。该算法能够显著增强空间语义特征的丰富性,进而保证下游任务的质量。

三维空间欧几里得距离计算公式为

$$P_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \tag{1}$$

式中: (x_i, y_i, z_i) 、 (x_j, y_j, z_j) 分别为空间两点坐标信息。

为确保计算精度和数据平滑性,选取眼部 10 个关键点进行三维纵横比函数重构,并分别计算左右两眼纵横比再取均值,将最终结果作为评估眼部状态特征的依据。该方法可以更准确地反映眼部状态,为后续疲劳监测任务提供更可靠的数据支持。其中,眼部关键点位置如图 2 所示。

$$E_{\text{left}} = \frac{P_{i=160,j=144} + P_{i=159,j=145} + P_{i=158,j=153} + P_{i=157,j=154}}{4P_{i=33,j=133}} \tag{2}$$

$$E_{\text{right}} = \frac{P_{i=384,j=381} + P_{i=385,j=380} + P_{i=386,j=374} + P_{i=387,j=373}}{4P_{i=363,j=263}} \tag{3}$$

$$E = \frac{1}{2} (E_{\text{left}} + E_{\text{right}}) \tag{4}$$

式中: E_{left} 表示基于三维空间坐标点计算得到的左眼纵横比值; E_{right} 表示基于三维空间坐标点计算得到的右眼纵横比值; E 为二者均值。

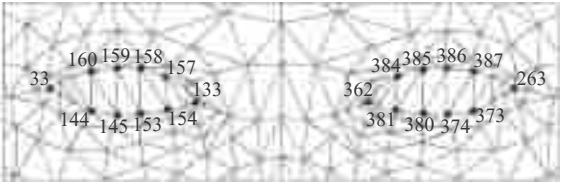


图 2 眼部关键点示意图
Fig. 2 Schematic diagram of key points of eyes

在嘴部特征数据获取方面,本文选取该部位 8 个关键点(见 图 3)进行三维纵横比函数重构,具体计算过程如下:

$$M = \frac{P_{i=81,j=178} + P_{i=13,j=14} + P_{i=311,j=402}}{3P_{i=62,j=293}} \tag{5}$$

式中: M 表示基于三维空间坐标点计算得到的嘴部纵横比值。

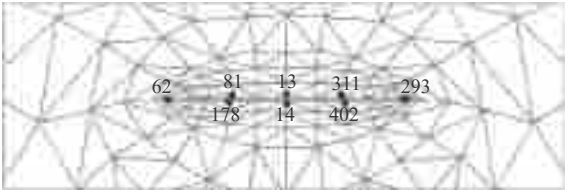


图 3 嘴部关键点示意图
Fig. 3 Schematic diagram of key points of mouth

2.2 阈值标定

考虑到以往研究过程中,确定眼部与嘴部状态大多依赖 CNN 模型进行分类,尽管这些方法具有一定的泛化能力,但在面对由个体五官差异引起的识别误差时,会受到一定限制。鉴于此,本文提出采用特征匹配法逐样本进行状态阈值标定,具体如

下: 首先, 从 30 位管制员面部数据集中选取睁眼、闭眼、半睁眼、张口、闭口 5 种状态图像。其次, 结合关键点检测模型与眼部嘴部纵横比计算公式, 针对每位被试者在不同面部状态下的 E 值与 M 值进行详尽测定, 数据记录如表 1 所示。最后, 通过分析该数值, 可以为后续不同眼部嘴部状态的判定提供清晰且准确的阈值界限。该方法显著增强了系统对由个体五官差异所导致的纵横比值变化的适应能力, 进而有效降低了在后续疲劳状态监测过程中产生的误差。

表 1 眼部与嘴部状态纵横比标定结果
Table 1 Eye and mouth condition aspect ratio test results

样本	M		E		
	张口	闭口	睁眼	闭眼	半睁眼
1	0.083 43	0.008 57	0.328 91	0.092 35	0.258 65
2	0.060 12	0.009 36	0.296 43	0.162 26	0.276 24
3	0.079 35	0.008 39	0.375 25	0.077 34	0.246 03
4	0.047 42	0.002 35	0.418 82	0.165 48	0.250 76
5	0.042 38	0.006 88	0.401 13	0.103 96	0.249 75
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	0.042 87	0.004 48	0.406 54	0.139 43	0.226 81
27	0.066 04	0.006 97	0.451 01	0.161 59	0.273 71
28	0.049 23	0.001 91	0.415 33	0.127 62	0.223 96
29	0.107 38	0.003 37	0.408 61	0.107 79	0.243 97
30	0.045 62	0.004 96	0.362 13	0.083 65	0.196 03

以样本 1 为例, 针对眼部状态, 采用半睁眼状态的 E 值作为中心阈值 0.258 65, 并据此设定了上下浮动边界, 其中上限阈值设定为 0.32, 下限为 0, 连续 3 帧(可根据实际推理速度微调)小于中心阈值 0.258 65 判定为眨眼, 并进行眨眼计数。单帧 E 大于中间阈值判定为睁眼状态。在嘴部状态判定中, 基于闭口与张口状态的 M 值构建了一个数值区间(0.008~0.08), 以有效反映嘴部开闭的变化范围, 连续 3 帧(可微调)大于闭口纵横比值 0.008 57 判定为张口状态。

3 动态衰减时间窗口设计及疲劳判别

为更有效地监测管制员的疲劳状态, 本文提出了疲劳监测时间窗口动态衰减的方案, 旨在通过动态调整监测灵敏度, 能够实时、准确地反映管制员的疲劳程度。

同时, 考虑到管制员的实际工作特性, 引入管制员在岗时间、实时陆空通话负荷与疲劳事件发生次数 3 个指标作为时间窗口衰减速率的影响因子。3 个指标的选择依据如下: ①管制员的主要工作是通过陆空通话保障航空安全, 工作模式为

24 h 轮班制。尽管单次连续执勤时间不超过 2 h, 但在岗时间与管制员的生理状态存在显著相关性, 长时间在岗容易导致疲劳积累, 从而影响工作效率和安全性。②实时陆空通话负荷直接反映了管制员的工作强度。高负荷情况下, 管制员的精神和身体疲劳感会显著增加。③疲劳事件发生次数是衡量管制员疲劳程度的重要指标。

3.1 动态衰减时间窗口设计

由于时间窗口衰减属于非线性过程, 本文通过大量实验, 选取非线性最小二乘法, 将衰减过程拟合至指数衰减形式, 有助于适应疲劳状态变化。

指数衰减函数是一种随着自变量的增加, 因变量以指数形式递减的函数, 可用于处理时间序列数据、模型参数衰减等问题, 在物理学中, 常用于描述运动物体动能衰减速率, 如物体运动时, 其动能随时间推移不断衰减的过程。

将本文研究场景进行迁移, 假设管制员的疲劳程度会随着在岗时间与语音频次的实时递增呈上升趋势, 动态时间窗 W 的衰减系数 λ 受到以上 2 个因素及表征疲劳事件(打哈欠、长时间半睁眼困倦)的偏置项影响。具体如下:

$$\lambda = \frac{kp}{\tau - 0.1b}$$
(6)

$$W = \alpha e^{-\lambda t} + \beta$$
(7)

式中: p 为语音总频次, 表征实时陆空通话负荷; k 为缩放因子, 对 p 进行合理映射, 此处取 2×10^{-6} ; τ 为衰减速率; b 为疲劳事件记录数值; 0.1 为映射系数; t 为测试时间, s; α 为函数饱和值; β 为动态时间窗口函数偏置项, 表示时间窗口大小的下限。

实验开始前, 将初始时间窗口设置为 15 min, 最小时间窗口设置为 2 min, 并使用平均帧率为 55 帧/s 来计算 W 的值为 49 500。通过使用非线性最小二乘法进行函数拟合, 得到参数 α 为 43 544.18, τ 为 5.96, β 为 6 600。理想时间窗衰减曲线如图 4

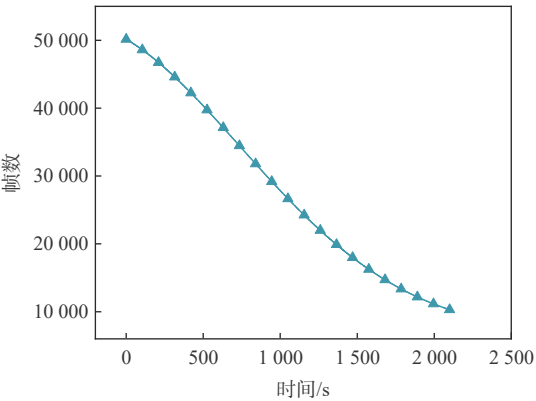


图 4 理想时间窗衰减趋势
Fig. 4 Ideal time window decay trend

所示。该初始参数为后续实验中动态时间窗衰减计算提供了重要的参考依据。

3.2 基于面部特征的疲劳监测指标选取

考虑到该疲劳状态监测任务的待处理对象是具有时序关系的实时视频流序列,因此,需要同时关注单帧图像的空间维度信息和多帧之间的时序维度信息。针对以上问题,为了更好地衡量疲劳状态,提出使用可变时间窗内眨眼次数与时间窗口大小比值 F_{δ} 作为最终的疲劳判别依据。其中, F_{δ} 受在岗时间、实时语音频次与疲劳事件发生次数影响,具体如下:

$$F_{\delta} = \frac{\mu N_{\text{blink}}}{W}$$

(8)

式中: N_{blink} 为动态时间窗内眨眼频次; μ 为尺度调整系数,本文取值为1 000,用于将该指标的数值放大至与后续 EEG 疲劳指标相同的尺度。

3.3 疲劳判别流程

由于本文所探究的问题具有时序关系,在整个

处理流程中,将实时视频流作为输入,并对单帧图像进行串行处理,具体流程如图 5 所示。首先,使用提出的模型对图像进行面部关键点检测,并计算眼部和嘴部的纵横比。使用第 2 节所述方法对眼部与嘴部状态进行判断,并写入事件队列。其中,图 5 内的数值仅为示意值,实际数值需要根据个人的标定结果进行精确调整。其次,程序可以对长时间闭眼、半睁眼困倦与打哈欠 3 种重度疲劳事件进行判定并告警,具体方案如下:

- 1) 长时间闭眼:连续 50 帧(可微调)小于中间阈值 0.258 65,判定为长时间闭眼状态,进行告警提示。
- 2) 长时间半睁眼困倦:连续 50 帧(可微调)眼部纵横比处于中间阈值上下浮动区间内,判定为半睁眼昏睡状态,进行告警提示。
- 3) 打哈欠:由于打哈欠状态嘴部纵横比要大于常规值,设定连续 120 帧(可微调)嘴部纵横比大于张口阈值数值 0.06,判定为打哈欠状态,进行告警提示。

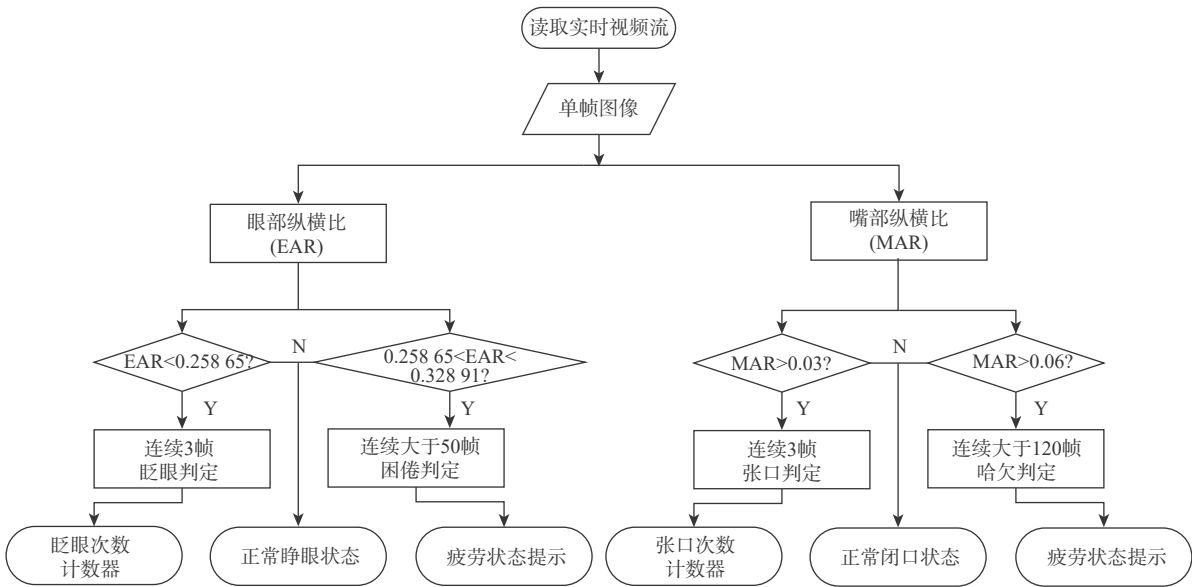


图 5 视频流逐帧处理流程

Fig. 5 Flowchart of frame-by-frame video stream processing

最后,考虑到清醒状态下,人的眨眼频率通常在 15~20 次/min 之间,通过时间与帧率的换算,将 F_{δ} 指标阈值设定为 6.5,超过该阈值后,系统会进行疲劳判定并作出预警,以便管制员根据实际情况调整个人身体状态,预防因身体疲劳导致的空中交通管制不安全事件发生。

4 评价指标选取及实验设计

4.1 脑电疲劳指标选取

EEG 作为一种生理电信号,具有较高的随机性,其节律种类繁多,不同的情绪、心理活动或外界

刺激均能影响其波形的变化。利用多导生理仪采集 EEG 的 4 种不同频率波,即 δ 波、 θ 波、 α 波和 β 波。鉴于本文中管制员 EEG 采集涵盖了多个时间段,这些不同时间节点所呈现的精神状态存在一定变化。为使 θ 波和 β 波特性更具比较价值,选择借鉴迁移学习思想,使用驾驶员疲劳研究领域 EEG 相对功率谱的方法^[15],分析管制员 EEG 数据,该方法可提高所得疲劳指标的客观性与准确性。

由于实验中被试者并未达到沉睡状态,而 δ 波通常在成年人处于麻醉、沉睡或缺氧状态时出现^[16],故在不考虑 δ 波的前提下,将慢波与快波的相对功

率谱比值作为疲劳状态判断指标 F_{ε} , 具体如下:

$$F_{\varepsilon} = P'_{\theta}/(P'_{\alpha} + P'_{\beta}) \tag{9}$$

式中: P'_{α} 为 α 波的相对功率谱; P'_{β} 为 β 波的相对功率谱; P'_{θ} 为 θ 波的相对功率谱。

4.2 实验设计

本文的主要研究目标是通过基于面部特征信息对管制员的疲劳状态进行判别, 同时利用 EEG 指标对所获取的监测数据进行评估, 从而验证本文提出的疲劳监测算法的有效性。

为此, 实验采集了某管制单位 30 位成熟放单管制员的 EEG 数据与面部视频数据。其中, 30 位均为男性, 右利手, 年龄分布为 24~46 岁, 平均年龄为 27.63 岁; 岗龄分布为 2~25 年, 平均岗龄为 5.23 年。

实验场景为 5 个区域场景(对应 5 个扇区), 各练习难度等级相当, 采集管制员班后进行 35~60 min 管制测试的各项数据。当管制员处置不当出现 STCA 告警, 即短期冲突告警时, 则停止实验。测试过程中, 若出现 STCA 虚警可忽略, 若无 STCA 告警, 则以测试结束时间为停止条件, 具体实验结束时机由教员结合现场情况而定。

在数据采集方面, 面部视频数据通过 OBS Studio 配合 HP-w300 摄像头, 在屏幕正前方进行高清视频采集。同时, 鉴于相关研究^[17]表明, 大脑前额皮质与高级认知功能紧密相关, 如决策制定、计划和注意力控制等, 因此, 在 EEG 数据收集方面使用 Mangold-10 多导生理仪, 采用单极导联法采集管制员左前额 Fp1 处的 EEG, 左耳后部为参考电极。

5 算法有效性分析

本节采用面部视频数据进行实验, 通过分析数据获得语音频次增长曲线和动态时间窗口大小的实际变化曲线, 具体单样本(被试者)数据示意如图 6 所示。在管制工作进行的过程中, 观察到语音频次随实际情况逐渐增加。与此同时, 在 0~20 min 的时间范围内, 动态时间窗口大小保持稳定(持续时间受单帧处理速度影响, 有轻微变化), 这一时段用于对 F_{δ} 指标数据进行原始累积。在数据积累完成后, 动态时间窗口的尺寸受到累积阶段时间与语音频次的影响, 进行小范围骤降, 随后呈非线性递减趋势, 窗口下限设定为 1 min。其中, 算法内部的相关参数以第 3 节中理想参数为基础进行微调。

该算法的设计旨在通过动态调整时间窗口尺寸, 实时监测管制员的疲劳状态, 以便在疲劳早期和后期阶段提供不同的监测灵敏度, 从而缓解由于监测误差引起的误判现象。为防止漏检, 程序全程

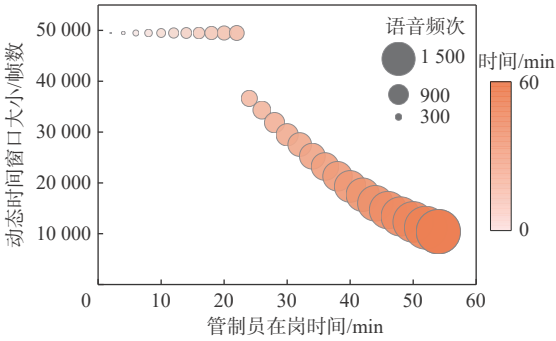


图 6 单样本语音频次与动态时间窗口大小关系
Fig. 6 Relation of single-sample speech frequency versus dynamic time window size

提供了疲劳事件(如打哈欠、长时间半睁眼困倦)的监测接口。同时, 疲劳事件的发生将直接影响时间窗口衰减速率, 以此来提高疲劳监测的灵敏度。

为验证本文算法的有效性, 通过对面部视频数据与 EEG 数据进行分析, 分别得到疲劳指标 F_{δ} 与 F_{ε} , 并将 2 个指标数据在时间维度进行对齐。具体单样本被试者数据如图 7 所示。其中, 由于算法特性, 数据累积阶段的 F_{δ} 值必然呈现单调上升趋势, 在后续分析中忽略该时间段数据。图 8 以小提琴图的形式直观呈现了针对单一被试者的疲劳指标数据分布。通过观察 2 组数据的中位数位置及小提琴图的宽度, 可以明显发现 2 个变量在中心趋势上呈现出显著的相似性, 并且数据在横轴上的分布相对均衡, 没有明显的偏态或集聚现象。

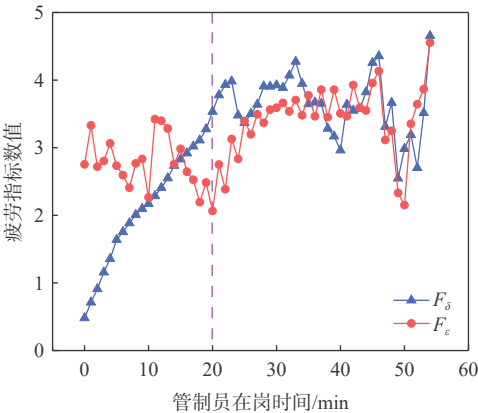


图 7 单样本疲劳指标关系
Fig. 7 Relation of single-sample fatigue indicator

在疲劳状态监测结果有效性分析方面, 选择使用 SPSS 对 30 个样本的 F_{δ} 与 F_{ε} 数据逐一进行双变量相关性分析, 完整计算结果如表 2 所示。通过观察结果可知, 在 30 个样本的双变量交叉相关性分析结果中, Pearson 相关性系数整体介于 0.462~0.785 之间, Sig. 双尾显著性检验均位于 0.01 级别, 相关性显著。

在算法对比实验中, 将本文算法(包括通过二

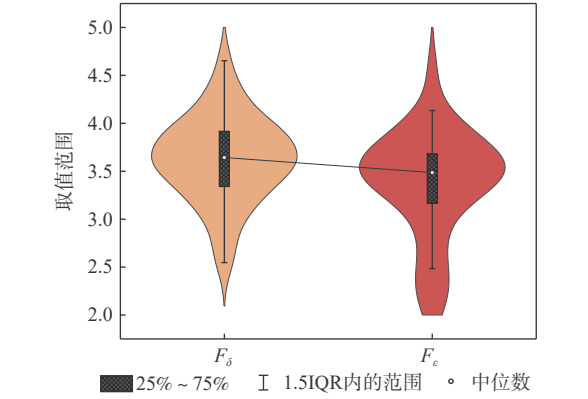


图 8 单样本疲劳指标数据分布

Fig. 8 Data distribution of single-sample fatigue indicator

表 2 F_{δ} 与 F_{ϵ} 相关性分析结果

Table 2 Results of correlation analysis between F_{δ} and F_{ϵ}			
被试者	个案数	Pearson相关性系数	Sig. (双尾)
1	36	0.462**	5×10^{-3}
2	32	0.672**	2.6×10^{-5}
3	40	0.591**	6×10^{-4}
4	31	0.556**	1×10^{-3}
5	29	0.522**	4×10^{-3}
6	34	0.712**	2×10^{-6}
7	26	0.506**	8×10^{-3}
8	37	0.785**	8.6×10^{-9}
9	25	0.646**	4.8×10^{-4}
10	27	0.536**	4×10^{-3}
11	27	0.724**	2×10^{-5}
12	30	0.629**	1.9×10^{-4}
13	24	0.653**	5.4×10^{-4}
14	26	0.561**	3×10^{-3}
15	24	0.517**	1×10^{-2}
16	33	0.731**	1×10^{-6}
17	28	0.623**	3.9×10^{-4}
18	30	0.642**	1.4×10^{-4}
19	25	0.583**	2×10^{-3}
20	27	0.679**	9.8×10^{-5}
21	36	0.482**	3×10^{-3}
22	33	0.464**	7×10^{-3}
23	29	0.651**	1.3×10^{-4}
24	27	0.589**	1×10^{-3}
25	35	0.703**	2×10^{-6}
26	30	0.728**	5×10^{-6}
27	25	0.622**	8.9×10^{-4}
28	37	0.730**	2.9×10^{-7}
29	23	0.561**	5×10^{-3}
30	29	0.601**	5.7×10^{-4}

注: **表示在0.01级别(双尾), 相关性显著。

维坐标和三维坐标计算眼部嘴部纵横比的方式)与仅依赖面部特征,特别是固定时间窗内眨眼频次的

疲劳判别算法 FT-Only (分别为 FT-Only_2D 和 FT-Only_3D)进行比较。结果表明,相较于 FT-Only 算法,本文算法在评估管制员疲劳状态时展现出了显著的性能提升,具体如表 3 所示。

表 3 算法对比分析结果

Table 3 Comparative algorithm analysis results	
算法	平均Pearson相关性系数
FT-Only_2D	0.352 9
FT-Only_3D	0.381 6
本文算法(二维)	0.599 2
本文算法(三维)	0.615 4

由此,可以验证本文算法,在使用三维空间坐标计算眼部嘴部纵横比,并融合管制员面部特征信息与其工作特性后,能够在疲劳状态实时监测中达到接近基于 EEG 数据进行疲劳监测的效果,为后续管制员无接触式疲劳监测及判别研究提供了相关思路。

6 结 论

1) 针对现有通过管制员面部信息监测疲劳极少融合管制真实场景的特点,提出一种融合管制工作相关特性的疲劳实时判别算法。

2) 通过采用 Attention Mesh 人脸关键点检测算法,获取面部 468 点三维坐标信息,使得该算法在稳定性、鲁棒性和推理速度方面表现优异,能够显著提高下游任务的质量。

3) 该算法通过将管制员在岗时间、实时陆空通话负荷及疲劳事件发生次数作为动态时间窗口衰减速率的影响因子,对时间窗口尺寸进行动态调整,从而在不同的疲劳阶段提供不同的监测灵敏度,有效缓解了由于监测误差引起的误判现象。

4) 本文将通过算法监测得到的指标 F_{δ} 与疲劳监测“金标准”EEG 指标 F_{ϵ} 进行相关性分析,结果显示相关性显著,且与其他算法相比效果更佳,从而验证了本文算法的有效性与合理性。

后续在人脸追踪算法中可以结合多中心度量学习进行优化,并进一步应用于面部疲劳监测任务,以提升系统的整体性能和鲁棒性。本文算法基于 Windows 平台进行实验,并未探究将该算法部署至边缘计算设备上的实时性、稳定性与可操作性。因此,下一步会探索算法的部署优化及交互界面的设计。

参考文献 (References)

[1] LI K N, GONG Y B, REN Z L. A fatigue driving detection algorithm based on facial multi-feature fusion[J]. IEEE Access, 2020,

8: 101244-101259.

[2] JI Y Y, WANG S G, ZHAO Y, et al. Fatigue state detection based on multi-index fusion and state recognition network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 64136-64147.

[3] 汪磊, 孙瑞山. 基于面部特征识别的管制员疲劳监测方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(7): 66-71.

WANG L, SUN R S. Research on fatigue monitoring method of controller based on facial feature recognition[J]. Chinese Safety Science Journal, 2012, 22(7): 66-71(in Chinese).

[4] 史增鹏. 基于面部识别的管制员疲劳风险评估技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015.

SHI Z P. Research on fatigue risk assessment technology for controllers based on facial recognition[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015(in Chinese).

[5] LAL S K L, CRAIG A. A critical review of the psychophysiology of driver fatigue[J]. Biological Psychology, 2001, 55(3): 173-194.

[6] BERNHARDT K A, POLTAVSKI D, PETROS T, et al. The effects of dynamic workload and experience on commercially available EEG cognitive state metrics in a high-fidelity air traffic control environment[J]. Applied Ergonomics, 2019, 77: 83-91.

[7] 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.

[8] 王莉莉, 殷硕峰, 马也. 基于轻量化 VIT 的面部疲劳监测算法研究[J]. 计算机仿真, 2025, 42(1): 317-322.

WANG L L, YIN S F, MA Y. Research on facial fatigue monitoring algorithm based on lightweight VIT[J]. Computer Simulation, 2025, 42(1): 317-322(in Chinese).

[9] GRISHCHENKO I, ABLAVATSKI A, KARTYNNIK Y, et al. Attention Mesh: high-fidelity face mesh prediction in real-time[EB/OL]. (2020-06-19)[2024-01-01]. <https://arxiv.org/abs/2006.10962>.

[10] KARTYNNIK Y, ABLAVATSKI A, GRISHCHENKO I, et al. Real-time facial surface geometry from monocular video on mobile GPUs[EB/OL]. (2019-07-15)[2024-01-01]. <https://arxiv.org/abs/1907.06724>.

[11] GROSSBERG M D, NAYAR S K. What is the space of camera response functions? [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2003.

[12] 罗元, 云明静, 王艺, 等. 基于人眼信息特征的人体疲劳检测[J]. 计算机应用, 2019, 39(7): 2098-2102.

LUO Y, YUN M J, WANG Y, et al. Human fatigue detection based on eye information characteristics[J]. Computer Applications, 2019, 39(7): 2098-2102(in Chinese).

[13] GHODDOOSIAN R, GALIB M, ATHITSOS V. A realistic dataset and baseline temporal model for early drowsiness detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2019: 178-187.

[14] WANG T S, SHI P F. Yawning detection for determining driver drowsiness[C]//Proceedings of the IEEE International Workshop on VLSI Design and Video Technology. Piscataway: IEEE Press, 2005: 373-376.

[15] 王莉莉, 朱敏. 基于脑电数据的管制架次对管制员疲劳影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(2): 173-178.

WANG L L, ZHU M. Research on influence of controlled sorties on controllers' fatigue based on EEG data[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(2): 173-178(in Chinese).

[16] 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[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013(in Chinese).

[17] MOTTAGHY F M. Interfering with working memory in humans[J]. Neuroscience, 2006, 139(1): 85-90.

Controller fatigue discrimination algorithm based on facial features

WANG Lili*, YIN Shuofeng, PAN Yue

(ATM Operation Planning and Safety Techniques Key Laboratory of Tianjin, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A real-time fatigue discrimination algorithm that takes into account the work characteristics of controllers is proposed in order to address the shortcomings of the current fatigue detection through facial information of controllers, such as the algorithm’s low robustness and infrequent integration of the actual scene of control. Firstly, the Attention Mesh algorithm is used to obtain the 3D coordinate information of 468 points on the face, and the thresholds of eye and mouth aspect ratios are calibrated sample by sample using the feature matching method. Secondly, three indicators are introduced, namely, the controller’s on-duty time, the real-time land and air call load, and the number of fatigue events, and these three indicators are dynamically mapped to the fatigue detection window through the exponential decay function and the fatigue frequency ratio of blinks within the dynamic decay time window is calculated through the calculation of the fatigue frequency ratio of blinks within the dynamic decay time window. The fatigue trend indicator is derived by calculating the percentage of blinking frequency within the dynamic decay time window. Finally, the EEG and facial video data of the post-shift control test of 30 mature release order controllers in the control room of a control unit are processed, and the fatigue indicator F_{δ} , obtained from the facial data, is correlated with the EEG fatigue indicator F_e in the time dimension. The findings demonstrated that the validity and reliability of the suggested algorithms were confirmed, and the overall Pearson correlation coefficients in the bivariate cross-correlation analysis results of the 30 subject samples ranged from 0.462 to 0.785. The Sig. two-tailed significance tests were found at the 0.01 level, indicating a significant correlation.

Keywords: controller; fatigue discrimination; face keypoint detection; land and air call load; electroencephalogram signals

Received: 2024-01-24; Accepted: 2024-08-19; Published Online: 2024-08-26 08:57
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240823.1416.001
Foundation item: Jointly Fund of National Natural Science Foundation of China and Civil Aviation Administration of China (U1633124)
* Corresponding author. E-mail: llwang317@163.com

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0056

基于迁移学习和 TCN-BiGRU 的短期负荷预测

刘杰¹, 周博文¹, 田明², 韩轲^{3,*}

(1. 哈尔滨理工大学 黑龙江省模式识别与信息感知重点实验室, 哈尔滨 150080; 2. 中国电信股份有限公司黑龙江分公司, 哈尔滨 150040; 3. 哈尔滨商业大学 计算机与信息工程学院, 哈尔滨 150028)

摘 要: 电力负荷预测对于电力系统的稳定运行有着重要意义。传统短期预测算法常使用线性回归模型进行负荷预测, 无法捕捉到复杂的负荷波动, 导致预测结果准确性受到限制, 因此, 提出一种基于迁移学习 (TL) 的时间卷积网络-双向门控循环单元 (TCN-BiGRU) 模型。采用迁移学习策略将相关性高的信息迁移到实验模型中, 利用 K-medoids 聚类算法对数据进行聚类分析, 通过并行卷积策略提取 TCN 不同尺度的特征, 利用时间注意力 (TA) 捕获相关信息, 结合 BiGRU 进一步提取 TCN 训练输出的非线性特征, 使用动态多群粒子群优化 (DMS-PSO) 算法对网络训练的超参数寻找最佳的超参数组合。实验结果表明: 相对于门控循环单元 (GRU), 所提 TL-TCN-BiGRU 算法的平均绝对误差 (MAE) 降低了 38.6%, 均方根误差 (RMSE) 降低了 40.7%, 平均绝对百分比误差 (MAPE) 降低了 30.4%, R^2 提升了 5.3%。

关 键 词: 短期负荷预测; 迁移学习; 时间卷积网络; K-medoids 聚类; 融合网络

中图分类号: V247; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-0995-10

电力负荷预测是电力系统稳定运行的基础, 准确的电力负荷预测对于维持居民生活稳定、降低电网运营成本具有重要意义^[1]。电力负荷数据通常会呈现周期性、季节性变化的规律, 根据电力负荷预测时间长短的不同, 可以将其分为短期负荷预测、中期负荷预测、长期负荷预测^[2-3]。其中, 短期负荷预测的经典算法包括移动平均法、季节性指数法、自回归移动平均模型、神经网络模型等^[4], 现阶段主要通过统计模型^[5]、机器学习^[6]、深度学习^[7]、集成学习^[8]等算法对短期电力负荷数据进行预测分析。

基于深度学习算法的数据预测主要有卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN)^[9]、循环神经网络 (recurrent neural network, RNN) 和长短期记忆 (long short term memory, LSTM) 网络^[10-12]。近年来, Bai 等^[13]提出了时间卷积网络 (temporal convolutional network, TCN), 该网络具有良好的可扩展性和平移不变性, 但对输入序列长度较为敏感。

Chung 等^[14]提出了门控循环单元 (gated recurrent unit, GRU), 后来又在其基础上进行改进, 提出双向门控循环单元 (bidirectional gated recurrent unit, BiGRU), 该网络可以很好地解决梯度消失问题^[15], 但对于某些特定的序列模式, 其可能会出现过拟合的问题。相较于单一负荷预测, 多元复合预测能够考虑不同特征间的耦合关系, 使其具有更高的预测表现力^[16-18]。邹智等^[19]提出了一种基于贝叶斯优化的 CNN-BiGRU 网络进行电力负荷预测, 模型通过对数据中的多特征进行筛选, 将匹配度较高的数据特征送入到网络中, 但该模型结构较复杂, 对结果产生的原因难以解释。Huo 等^[20]将 TCN 和 LSTM 网络结合, 与 TCN 算法相比, 提高了评价参数的预测精度。在深度学习中, 选择 CNN 内部的隐层数和激活函数等超参数直接影响网络模型的性能表现^[21], 为防止网络出现过拟合或欠拟合, 选择适合

收稿日期: 2024-01-23; 录用日期: 2024-03-26; 网络出版时间: 2024-04-07 11:22

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240403.1036.002

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (LH2020F009)

* 通信作者. E-mail: thruster@163.com

引用格式: 刘杰, 周博文, 田明, 等. 基于迁移学习和 TCN-BiGRU 的短期负荷预测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 995-1004.

LIU J, ZHOU B W, TIAN M, et al. Short-term load forecasting based on transfer learning and TCN-BiGRU [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 995-1004 (in Chinese).

的优化算法对 CNN 内部的超参数进行优化是非常关键的。Li 等^[22]使用 K-medoids 算法进行多线性时间序列预测,实验结果表明,算法能有效反映数据的多线性趋势模式,对时间序列分析具有重要意义,但在处理高维数据时会令簇中心的选择变得困难,导致算法性能下降。欧阳福莲等^[23]提出一种多尺度 CNN-BiLSTM-Attention 模型,对 CNN 层进行扩展,通过串行叠加、并行拼接的方式加大网络层数,实现更高精度的预测效果,但多层的结构可能会增加模型参数调整的难度。迁移学习(transfer learning, TL)是一种从原模型学习到内在规律转移到新问题上探索的过程^[24]。目前,将迁移学习应用于负荷预测领域的研究较少。Jin 等^[25]通过迁移学习的方式将 CNN-GRU 训练模型从一个广泛的数据集模型转移到一个较小的数据集上,实验结果显示,迁移后的模型性能得到了显著提升,但对数据质量要求较高且易出现过拟合。

上述文献多是基于 CNN 或 RNN 的算法实现,在此基础上,本文提出了一种 TL-TCN-BiGRU 电力负荷预测模型,用来进一步解决预测精度不高及模型性能下降等问题。利用迁移学习完成源域与目标域数据间的匹配,同时使用 K-medoids 聚类分析数据特征,采用并行拼接的方式对 TCN 进行扩展,提升网络对模型的依赖关系,并引入时间注意力(temporal attention, TA)增强 TCN 特征提取能力,利用 TCN-BiGRU 进一步提升网络性能。通过动态多群粒子群优化(dynamic multigroup particle swarm optimization, DMS-PSO)算法优化模型超参数。为验证模型性能,在公开数据集上进行大量实验并与其他模型进行对比,结果证明了本文模型的有效性。

1 基本算法

1.1 迁移学习

迁移学习主要针对数据集缺失或小样本数据集问题,在迁移时对源域数据与目标域数据进行相似度匹配,达到某一目标后完成迁移操作。在匹配过程中,为减小源域数据集和目标域数据集之间的分布差异,目前主要使用最大均值差异(maximum mean discrepancy, MMD)来衡量 2 个样本之间不同但相关的分布距离,其定义为

$$\text{MMD}(U, V) = \left\| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi(u_i) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \phi(v_j) \right\|^2 \quad (1)$$

式中: u_i 和 v_j 为 2 个样本; $\phi(\cdot)$ 表示映射,用于把原变量映射到再生核希尔伯特空间中; m 和 n 为样本的取值范围; $\text{MMD}(U, V)$ 表示 U 和 V 样本间的最大均值差异。

如果 2 个样本间最大均值差异足够小,则认为

两者分布相同;反之,则认为两者分布不同。

1.2 皮尔逊相关系数

PCC 是用于衡量 2 个变量间线性关系强度的统计指标,其取值范围被限定在 $[-1, 1]$ 之间,结果绝对值接近于 1 时,表示两者之间的相关度高,计算式如下:

$$r(A, B) = \frac{\text{Cov}(A, B)}{\sqrt{\text{Var}[A] \text{Var}[B]}} \quad (2)$$

式中: $\text{Cov}(A, B)$ 表示 2 个变量之间的协方差; $\text{Var}[A]$ 表示变量 A 的方差, $\text{Var}[B]$ 表示变量 B 的方差; $r(A, B)$ 表示 2 个变量的关联度。

本文通过 PCC 绘制特征相关热力图,可更直观地看出不同影响因素间的相关性。

1.3 K-medoids 聚类

K-medoids 聚类是一种基于中心点的聚类算法,该算法选择簇中的一个实际样本作为中心点,而不是使用均值,公式表示为

$$c = \sum_{C_i} \sum_{P_i \in C_i} |P_i - C_i| \quad (3)$$

式中: C_i 为质心; P_i 为非质心; c 为每个非质心点到质心距离的和。

1.4 双向门控循环单元

BiGRU 通过使用 2 个 GRU 层来解决传播方向问题。前向 GRU 从开始到结束处理输入序列,而后向 GRU 以相反方向处理。BiGRU 相较于 GRU,具有双向建模能力、更好的长期依赖建模、更准确的序列标注及强大的特征提取能力等优点,其内部隐层单元计算式如下:

$$\begin{cases} \vec{h}_t = \text{GRU} \left(i_t, \vec{h}_{t-1} \right) \\ \overleftarrow{h}_t = \text{GRU} \left(i_t, \overleftarrow{h}_{t-1} \right) \\ h_t = f \left(W_{\vec{h}_t} \vec{h}_t + W_{\overleftarrow{h}_t} \overleftarrow{h}_t + b_t \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_t 为 t 时刻输入; $\vec{h}_t$ 和 $\overleftarrow{h}_t$ 分别为 t 时刻隐藏层前向和后向状态; $W_{\vec{h}_t}$ 和 $W_{\overleftarrow{h}_t}$ 分别为 t 时刻隐藏层前向和后向权重; b_t 为 t 时刻隐藏层状态的偏置。

1.5 动态多群粒子群优化算法

传统的 PSO 算法模仿鸟类的捕食过程,利用速度和位置来标记和更新信息,其更新公式如下:

$$v_i^{(t+1)} = \omega v_i^{(t)} + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - z_i^{(t)}) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - z_i^{(t)}) \quad (5)$$

$$z_i^{(t+1)} = z_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \quad (6)$$

式中: p_{best} 为个体最优位置; g_{best} 为全局最优位置; c_1 、 c_2 为加速系数; ω 为惯性权重; $v_i^{(t)}$ 和 $z_i^{(t)}$ 分别为第 i 个粒子的速度和位置; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 内的随机变量。

从式 (5) 可以看出,惯性权重 ω 对粒子的收敛性能具有较大影响。当 ω 较大时,粒子全局搜索能力更强;当 ω 较小时,粒子局部搜索更敏锐。本文

策略对特征进行融合,并输送到改进的TA模块,其对接收到的多维特征进行信息提取,并将提取到的结果进行输出。

2.3 模型介绍

本文针对传统短期电力负荷预测算法在准确性、适应性和时效性等方面存在的问题,提出了一种TL-TCN-BiGRU电力负荷预测算法,算法整体框架如图2所示。首先,要对获取到的源域数据进行多特征分析,通过关联规则挖掘不同数据特征间的关系,并通过PCC对特征因子进行特征选择;其次,将与目标域相似的源域数据选为待迁移目标,

传递到输入样本并对其进行数据预处理,预处理时需要删除异常值、填入缺失值、量化数据以减少数据量纲不同对网络性能的影响;再次,通过K-medoids算法对数据进行聚类并确定聚类数,以更好地捕获输入数据的分布规律;然后,CNN将接收到的数据依次传入TA-TCN层、BiGRU层,通过TA-TCN结构捕获不同时间尺度的特征以提高计算效率,通过BiGRU结构更好地捕捉时间序列数据中的双向依赖关系,并通过DMS-PSO算法优化网络内部的超参数;最后,在训练过程结束后,模型会对其训练得到的参数和权重进行更新,并完成迭代,输出预测结果。

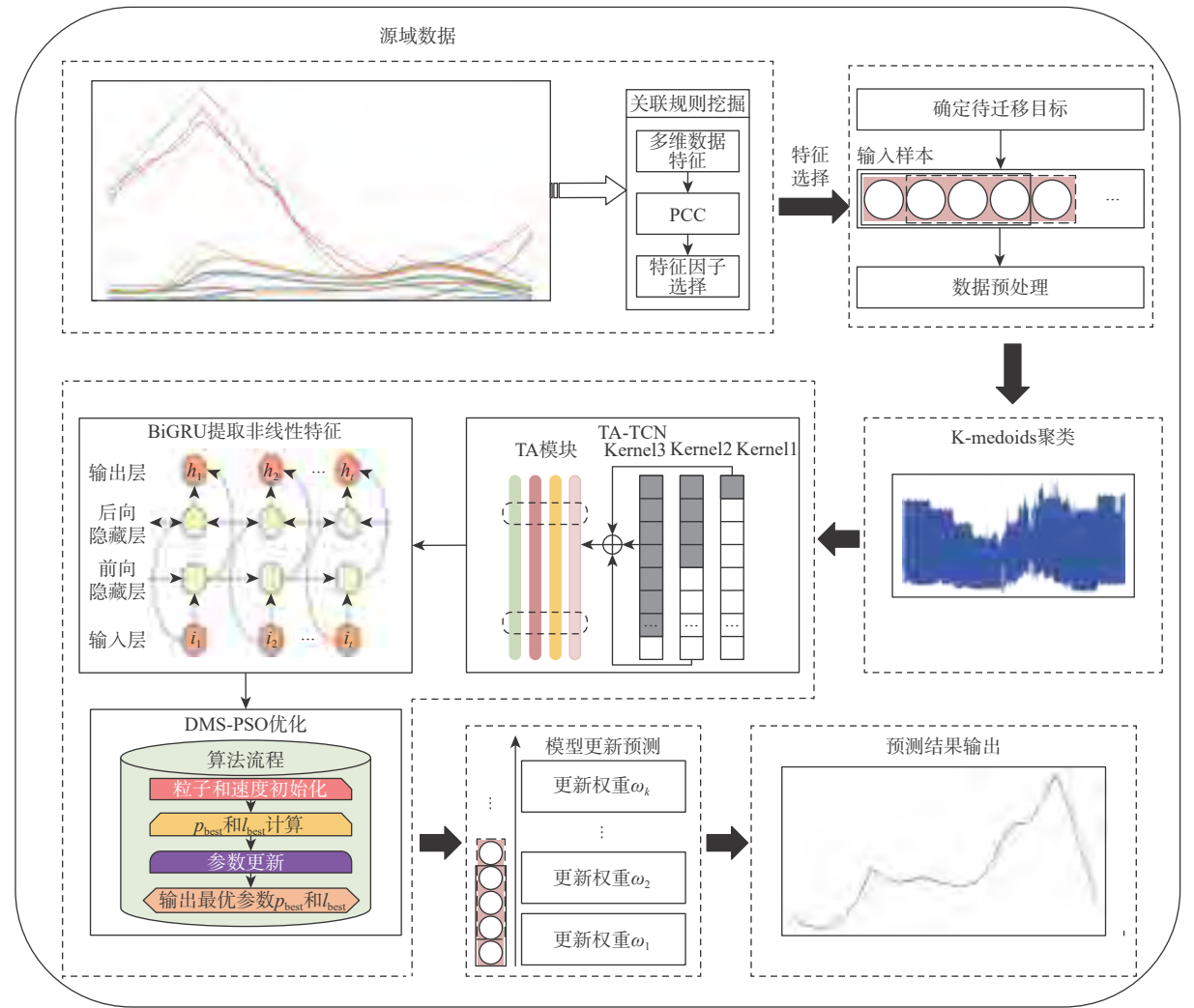


图2 TL-TCN-BiGRU模型整体框架

Fig. 2 Overall framework of TL-TCN-BiGRU model

3 实验

3.1 实验数据集及环境

数据集选用美国住宅负荷数据,包含美国各州若干地区一年内的住宅建筑电力消耗,根据建筑高低的不同分为高、中、低3个分段。实验中,将1月1日至5月31日的数据作为训练集,将6月

1日至6月30日的数据作为测试集。

实验源域数据集选择加利福尼亚州中等高度建筑下的每小时住宅负荷数据,包括照明设备、热水设备、暖通空调等用电器的电力消耗数据及住宅整体电力消耗数据,该州共包含73个地点的住宅负荷数据,选择合适地点对其负荷数据进行融合,并迁移到实验目标域中。实验目标域数据集选用洛杉矶市中等高度建筑下的每小时住宅负荷数据。

经式 (1) 计算最大均值差异, 得到 2 个数据集间分布距离为 0.023 8, 说明两者数据相似度较高。匹配完成后, 经最大最小归一化对数据量化处理。TCN 层数通过控制变量法确定为 4, 在每个 BiGRU 层后通过 Dropout 防止模型过拟合, 最终经全连接层对数据信息进行汇集后, 输出未来 1 d 内的负荷预测值。

实验采用 Windows10 操作系统, CPU 选择 Intel Core i7-7700HQ, 显卡选择 NVIDIA GeForce GTX 1050, 内存选择 16 GB RAM DDR4@2 400 MHz, 所提模型构建在 Python (3.9.12)、Tensorflow2.0 框架及 Keras 框架中运行。

3.2 评价指标

使用平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE)、拟合优度 R^2 等指标来评估模型性能, 相应的计算公式如下:

$$e_{ma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \tilde{y}_i| \tag{10}$$

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2} \tag{11}$$

$$e_{map} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \tilde{y}_i}{y_i} \right| \tag{12}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{13}$$

式中: n 为样本数量; y_i 为数据真实值; $\tilde{y}_i$ 为数据预测值; $\bar{y}$ 为数据真实值的平均值。

MAE、RMSE、MAPE 的数值越小, R^2 的结果越接近 1, 代表模型的预测准确度越高。

3.3 多特征分析

本节对目标域数据集中的多特征进行分析。通过 PCC 分析特征间的相关性, PCC 是一种常用且有效的统计量, 表征 2 个变量之间的关系。由于选择的住宅地点缺失天气数据, 对数据集其余特征 (如室内外照明设备、室内混杂设备等) 进行分析, 实验结果如图 3 所示, 图中, 数字表示皮尔逊相关系数。

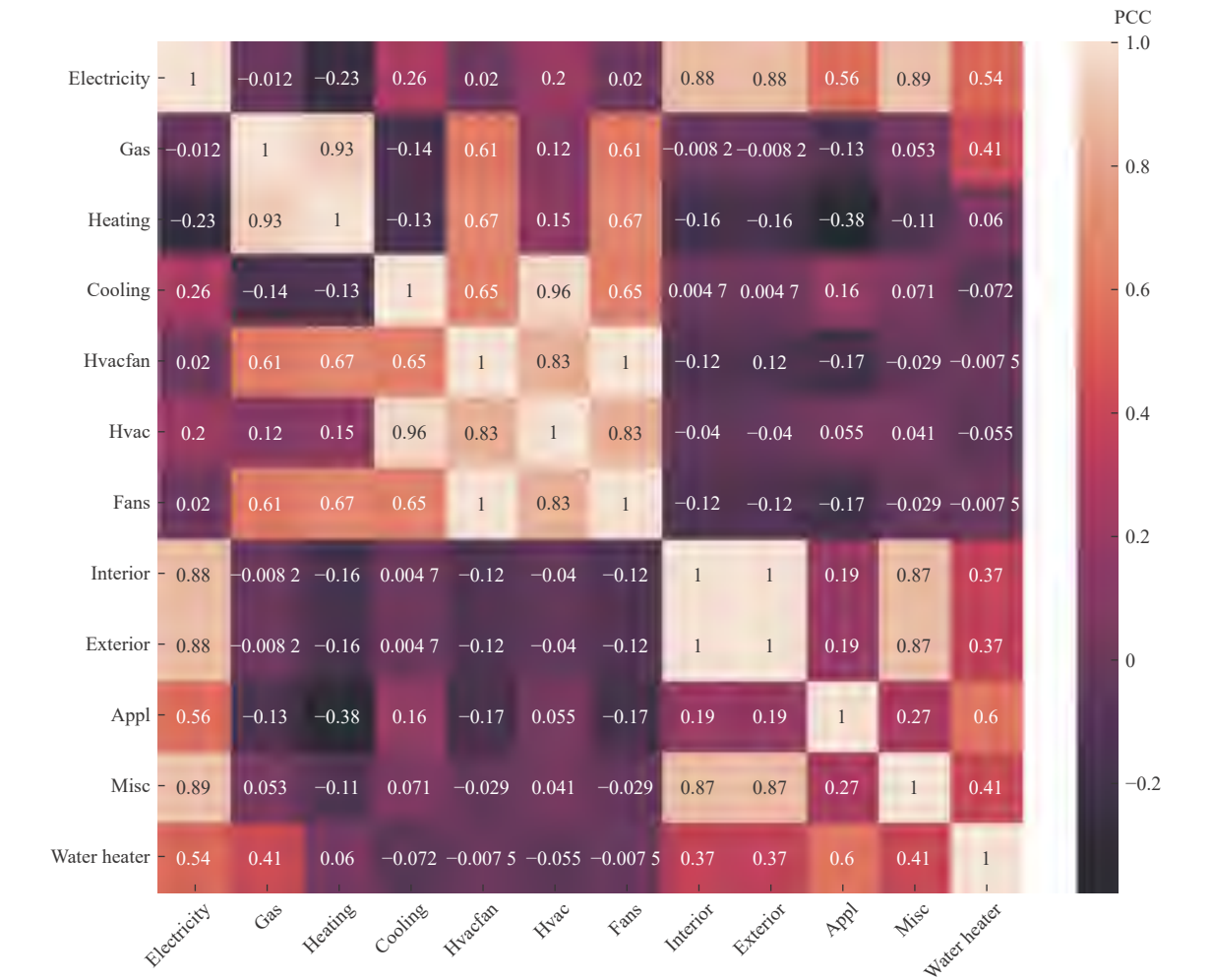


图 3 特征相关性热力图
Fig. 3 Characteristic correlation heat map

图 3 为特征相关性热力图,其数值越接近 1,说明特征间相关性越强。图 3 中删除了部分缺失数据,观察第 1 列可以看出,住宅电力总负荷与室内外的照明设备及室内的混杂设备相关性较高,因此,考虑将这些特征与住宅电力总负荷特征进行融合并输入到 CNN 中进行训练。此外,实验还通过 one-hot 编码引入季节和日期因素,进一步检验不同因素对电力负荷特征的影响情况。

3.4 聚类分析

聚类分析是典型的无监督学习,用于对未知类别的样本进行划分,按照一定的规则将不相似的样本分为不同类簇,从而揭示样本之间内在的性质及相互之间的联系规律。通过误差平方和(sum of squared error, SSE)确定聚类数,评价公式如下:

$$I_{SSE} = \sum_{i=1}^k \sum_{J_i \in R_i} |e(J_i, K_i)|^2 \tag{14}$$

式中: R_i 为类别 i 中数据点集合; k 为簇的个数; J_i 为数据点; K_i 为每类数据的样本中心; $e()$ 为误差函数,衡量数据点和样本中心的欧氏距离。

实际应用中,应同时考虑两者的取值,选取 SSE 较小且下降速度较快的点对应的作为确定的聚类数。本文对输入数据进行测试分析,得到的聚类结果如图 4 所示。

由图 4 可知,当 k 为 4 时,图 4(a) 中拐点降幅较大,附近不存在突变拐点,且趋近于最小值,图 4(b) 中轮廓系数数值较高,同时考虑到过多的聚类数会增加算法的计算复杂度,因此,最适宜的聚类数为 4 个。对归一化后的数据进行聚类,结果如图 5 所示。

根据聚类结果将输入的数据信息划分为 4 类,在每个类别中将该类别下的历史负荷数据送入模型内部进行单独训练。通过对数据进行聚类划分,构建相似日集合,可以更好地提取数据中的相似信

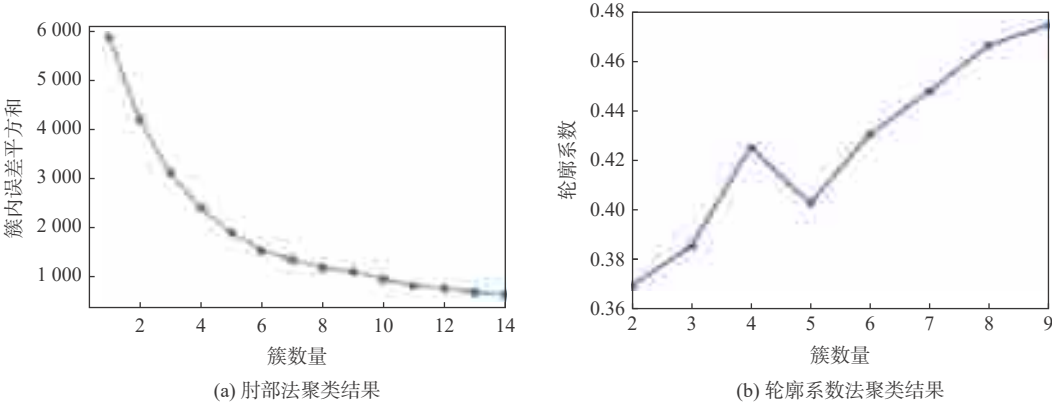


图 4 不同簇数量下 SSE 和轮廓系数的变化曲线
Fig. 4 Curves of SSE and silhouette coefficient under different cluster numbers

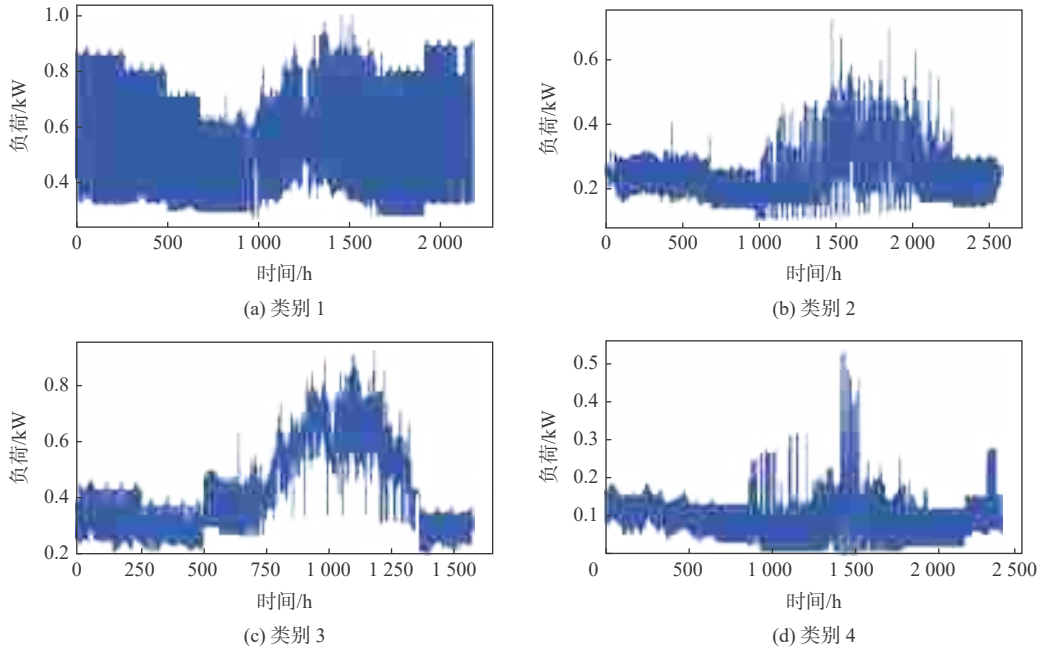


图 5 聚类数为 4 时的负荷曲线
Fig. 5 Load profile for a clustering number of 4

息,进而有效提升集合内数据预测的准确性。

3.5 实验结果与分析

3.5.1 实验参数确定

以历史 10 h 的电力负荷数据作为输入送入 TCN 层。TCN 层数设置为 4 层,TCN 改变模型尺寸大小输送到 Attention 层进行特征提取及注意力分配。Attention 层输出后送入 BiGRU 中。经实验测试,4 层的 BiGRU 可以在学习网络特征的同时获得更好的拟合效果及更低的实验误差。本文选用 Adam 优化器,激活函数选用 ReLU 函数,TCN 膨胀系数经对比实验选择 1、2、4、8,CNN 中的超参数,如 BiGRU 隐藏层神经元数量、卷积核大小、Dropout、学习率、批处理大小、迭代次数均通过改进的 PSO 算法进行优化。

本文通过 DMS-PSO 算法对实验中相关的超参数进行优化,经搜寻后得到的最优结果如表 1 所示。可以看出,经 DMS-PSO 算法优化后,模型具有更明确的参数选择,可以更高效地利用计算资源,大大提高了训练效率,在实际运行效果上具有更好的表现。

表 1 DMS-PSO 算法寻优结果

Table 1 DMS-PSO algorithm optimisation results		
寻优参数	范围	寻优结果
BiGRU隐藏层神经元数量	[1,50]	31
卷积核大小	[3,5]	4
Dropout	[0,0.5]	0.01
学习率	[0.000 1,0.01]	0.001
批处理大小	[16,32]	20
迭代次数	[100,200]	121

3.5.2 有效性分析

为说明本文 K-medoids 聚类算法的有效性,通过 DB 指数和 CH 指数对聚类效果进行评定,其计算式分别为

$$I_{DB} = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g \max_{j=1, \dots, g, j \neq i} \frac{\alpha_i + \alpha_j}{\|q_i - q_j\|_2^2} \tag{15}$$

$$I_{CH} = \frac{\text{Tr}(\boldsymbol{B}_g)}{\text{Tr}(\boldsymbol{W}_g)} \cdot \frac{n-g}{g-1} \tag{16}$$

式中: α_i 和 α_j 分别为类别 i 和 j 下样本的平均距离;

表 4 消融实验结果

Table 4 Ablation experiment results									
TCN	TA结构	BiGRU	DMS-PSO	K-medoids聚类	TL模块	MAE/kW	RMSE/kW	MAPE/%	R ²
√						0.065	0.099	0.743 5	0.908
	√					0.062	0.091	0.717 4	0.922
	√	√				0.059	0.088	0.670 9	0.928
	√	√	√			0.052	0.080	0.579 5	0.940
	√	√	√	√		0.046	0.072	0.506 1	0.964
√	√	√	√	√	√	0.035	0.054	0.418 3	0.972

$\|q_i - q_j\|_2^2$ 为类别 i 和 j 的类中心欧氏距离; n 为总样本数; g 为聚类数; $\text{Tr}(\boldsymbol{B}_g)$ 为 g 类的类间离差矩阵的迹; $\text{Tr}(\boldsymbol{W}_g)$ 为 g 类的类内离差矩阵的迹。

I_{DB} 指数越小, I_{CH} 指数越大,说明聚类效果越好。将本文算法与 K-means、DBSCAN 进行效果对比,结果如表 2 所示。

表 2 不同聚类算法指标对比

Table 2 Comparison of indicators of different clustering methods		
聚类算法	DB指数	CH指数
DBSCAN	1.459	805.715
K-means	1.368	990.687
K-medoids	1.231	1 083.451

为说明本文 DMS-PSO 算法的优越性,在使用 K-medoids 算法的基础上,将其与遗传算法 (genetic algorithm, GA)、PSO 算法进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 不同优化算法效果对比

Table 3 Comparison of effect of different optimization algorithms		
聚类算法	MAE/kW	MAPE/%
GA	0.092	0.702 3
PSO	0.075	0.523 6
DMS-PSO	0.035	0.418 3

从表 2 和表 3 可以看出采用 K-medoids 算法和 DMS-PSO 算法的优势,为进一步说明本文模型各部分模块的有效性,逐一对 TA 模块、BiGRU 模块、DMS-PSO 模块、K-medoids 模块、TL 模块的作用效果进行验证。实验以相同的评价指标 MAE、RMSE、MAPE、 R^2 作为判别依据,采用单维负荷数据特征对测试集某日 24 h 电力负荷数据进行预测,实验结果如表 4 所示。

实验测试选用测试集预测结果中 1 d 的数据,从表 4 可以看出,相较于结合 TA 及 BiGRU 的算法,直接用 TCN 进行预测的结果精度更低,说明设计的 TA 结构可以更好地关注数据的时间步长,且 BiGRU 能够有效减弱数据的随机性和非线性干扰,从而提高预测的精确度。结果显示,本文提出的各

模块均对模型具有一定增益。本文模型与 TCN 相比, MAE 降低 46.2%, RMSE 降低 45.5%, MAPE 降低 43.7%, R^2 提升 7.0%。本文提出的各模块都对模型整体效果的提升具有各自的优势,从而发挥模型整体的性能。

3.5.3 不同模型的预测结果

将本文模型与其他模型 (BP、SVR、LSTM、GRU、TCN) 进行效果对比, 对不同模型采用相同的数据处理方式, 实验结果如表 5 和图 6 所示。

表 5 不同模型评价结果

Table 5 Evaluation results of different models

模型	MAE/kW	RMSE/kW	MAPE/%	R^2
BP	0.066	0.096	0.799 5	0.914
SVR	0.076	0.101	1.166 9	0.905
LSTM	0.058	0.097	0.624 4	0.912
GRU	0.057	0.091	0.600 9	0.923
TCN	0.065	0.099	0.743 5	0.908
本文模型	0.035	0.054	0.418 3	0.972

从图 6 可以看出, 本文模型各项指标都具有最优的表现。结合表 5 可得, 与次优模型 GRU 相比, 本文指标 MAE 降低了 38.6%, RMSE 降低了 40.7%, MAPE 降低了 30.4%, R^2 提升了 5.3%。

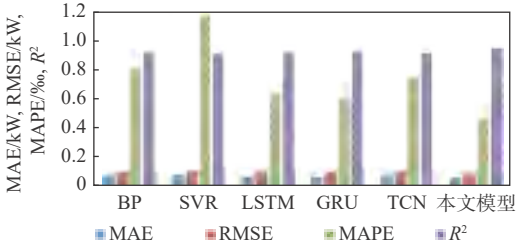


图 6 不同模型评价结果

Fig. 6 Different model evaluation result graphs

此外, 本文还对测试集预测结果中 1 d 的电力负荷数据进行提取, 并与其他模型 (BP、SVR、LSTM、GRU、TCN) 在同一时间内的负荷分布曲线进行对比, 如图 7 所示。图 7(a) 为电力数据在 1 d 内的波动情况。凌晨时刻, 用户耗电量较低, 早上耗电量增加, 在 7:00 左右达到小高峰, 又逐渐降低, 傍晚时刻用户用电需求增多, 导致实际用电量有所增加, 预测曲线也随之上升。从图 7(b) 可以看出, 本文模型预测结果平均误差为 0.026 kW, 相较于其他模型最大平均误差减小了 0.052 kW, 与真实值之间数据偏离最小。结合图 7 可知, 本文算法在整体预测方面更接近真实值, 并且具有更高的预测精度和性能。

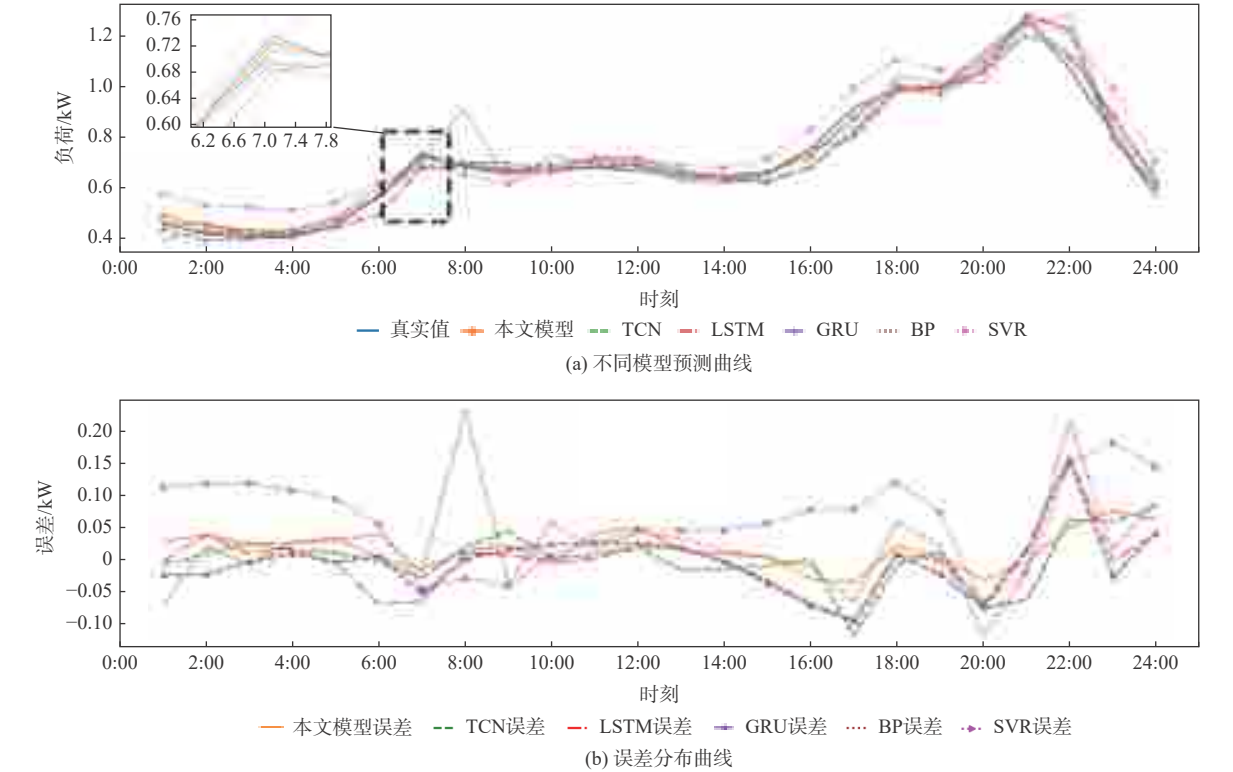


图 7 不同模型 24 h 预测结果

Fig. 7 24 h prediction results of different models

4 结 论

本文提出了一种基于迁移学习的 TCN-BiGRU

电力负荷预测模型, 在美国住宅负荷数据集上进行实验分析, 得出以下结论:

- 1) 引入迁移学习算法, 对与寻找的目标域数据

相匹配的源域数据进行模型迁移训练, 可以解决数据稀缺问题, 提高模型性能。

2) 通过并行拼接的 TCN 对输入的数据进行处理, 可以提高模型的多尺度特征提取能力; 利用时间注意力对特征进行权重分配具有实际效果; 利用 BiGRU 可以解决非线性时序数据处理问题; 利用 DMS-PSO 算法对网络内部的超参数进行优化, 可以进一步提升模型的泛化性能。

3) 与传统的机器学习模型相比, 实验结果显示, 本文模型在预测时具有更低的误差损失和更高的拟合优度。

此外, 本文实验仅在公开的电力负荷数据集上进行, 在未来的工作中, 会进一步对模型的结构和功能进行细化, 考虑融入多步预测, 并对不同领域的数据进行分析, 提高模型的整体性能。

参考文献 (References)

[1] 刘倩倩, 刘钰山, 温烨婷, 等. 基于 PCC-LSTM 模型的短期负荷预测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2529-2536.
LIU Q Q, LIU Y S, WEN Y T, et al. Short-term load forecasting method based on PCC-LSTM model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2529-2536 (in Chinese).

[2] LI X M, GUO X C, LIU L N, et al. A novel seasonal grey model for forecasting the quarterly natural gas production in China[J]. Energy Reports, 2022, 8: 9142-9157.

[3] 王艳松, 申晓阳, 李强, 等. 基于 PCA-GRD-LWR 模型的海上油田中长期最大电力负荷预测[J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2023, 47(2): 129-135.
WANG Y S, SHEN X Y, LI Q, et al. Forecasting of medium and long-term maximum power load for offshore oilfields based on PCA-GRD-LWR model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(2): 129-135(in Chinese).

[4] 李丹, 孙光帆, 缪书唯, 等. 基于多维时序信息融合的短期电力负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 94-106.
LI D, SUN G F, MIAO S W, et al. A short-term power load forecasting method based on multidimensional temporal information fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 94-106(in Chinese).

[5] ZHANG R X, ZHU Z Y, YUAN M, et al. Regional residential short-term load-interval forecasting based on SSA-LSTM and load consumption consistency analysis[J]. Energies, 2023, 16(24): 8062.

[6] BACANIN N, STOEAN C, ZIVKOVIC M, et al. On the benefits of using metaheuristics in the hyperparameter tuning of deep learning models for energy load forecasting[J]. Energies, 2023, 16(3): 1434.

[7] AL-JAMIMI H A, BINMAKHASHEN G M, WORKU M Y, et al. Advancements in household load forecasting: deep learning model with hyperparameter optimization[J]. Electronics, 2023, 12(24): 4909.

[8] WANG J Z, WANG K, LI Z W, et al. A multitask integrated deep-learning probabilistic prediction for load forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1240-1250.

[9] TRAN T N. Grid search of convolutional neural network model in the case of load forecasting[J]. Archives of Electrical Engineering, 2021, 70(1): 25-36.

[10] ESKANDARI H, IMANI M, MOGHADDAM M P. Convolutional and recurrent neural network based model for short-term load forecasting[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 195: 107173.

[11] CAICEDO-VIVAS J S, ALFONSO-MORALES W. Short-term load forecasting using an LSTM neural network for a grid operator[J]. Energies, 2023, 16(23): 7878.

[12] 李艳波, 尹轲, 陈俊硕, 等. 结合改进残差网络和 Bi-LSTM 的短期电力负荷预测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(8): 79-86.
LI Y B, YIN P, CHEN J S, et al. Short-term power load forecasting based on combination of residual network and Bi-LSTM[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(8): 79-86(in Chinese).

[13] BAI S J, KOLTER J Z, KOLTUN V. An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling[EB/OL]. (2018-04-19)[2024-01-10]. <https://arxiv.org/abs/1803.01271>.

[14] CHUNG J, ÇAGLAR G, CHO K, et al. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling[EB/OL]. (2014-12-11)[2024-01-10]. <https://arxiv.org/abs/1412.3555>.

[15] XU H S, FAN G L, KUANG G F, et al. Construction and application of short-term and mid-term power system load forecasting model based on hybrid deep learning[J]. IEEE Access, 2023, 11: 37494-37507.

[16] 吴晨, 姚菁, 薛贵元, 等. 基于 MMoE 多任务学习和长短时记忆网络的综合能源系统负荷预测[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 33-39.
WU C, YAO J, XUE G Y, et al. Load forecasting of integrated energy system based on MMoE multi-task learning and LSTM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 33-39(in Chinese).

[17] 杨国华, 郑豪丰, 张鸿皓, 等. 基于 Holt-Winters 指数平滑和时间卷积网络的短期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 73-82.
YANG G H, ZHENG H F, ZHANG H H, et al. Short-term load forecasting based on Holt-Winters exponential smoothing and temporal convolutional network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 73-82(in Chinese).

[18] 叶林, 李奕霖, 裴铭, 等. 寒潮天气小样本条件下的短期风电功率组合预测[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 543-555.
YE L, LI Y L, PEI M, et al. Combined approach for short-term wind power forecasting under cold weather with small sample[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 543-555(in Chinese).

[19] 邹智, 吴铁洲, 张晓星, 等. 基于贝叶斯优化 CNN-BiGRU 混合神经网络的短期负荷预测[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3935-3945.
ZOU Z, WU T Z, ZHANG X X, et al. Short-term load forecasting based on Bayesian optimized CNN-BiGRU hybrid neural network[J]. High Voltage Technology, 2022, 48(10): 3935-3945(in Chinese).

[20] HUO F C, CHEN Y, REN W J, et al. Prediction of reservoir key parameters in ‘sweet spot’ on the basis of particle swarm optimization to TCN-LSTM network[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 214: 110544.

[21] 苏伟, 肖小龙, 史明明, 等. 周期规律增强的多视角短期电力负荷预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(2): 477-486.

SU W, XIAO X L, SHI M M, et al. Periodic pattern-enhanced multi-view short-term load prediction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(2): 477-486(in Chinese).

[22] LI F, WANG C F. Develop a multi-linear-trend fuzzy information granule based short-term time series forecasting model with K-medoids clustering[J]. Information Sciences, 2023, 629: 358-375.

[23] 欧阳福莲, 王俊, 周杭霞. 基于改进迁移学习和多尺度 CNN-Bi-LSTM-Attention 的短期电力负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 132-140.

OUYANG F L, WANG J, ZHOU H X. Short-term power load forecasting method based on improved hierarchical transfer learning and multi-scale CNN-BiLSTM-Attention[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 132-140(in Chinese).

[24] HU Q H, ZHANG R J, ZHOU Y C. Transfer learning for short-term wind speed prediction with deep neural networks[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 83-95.

[25] JIN Y W, ACQUAH M A, SEO M, et al. Short-term electric load prediction using transfer learning with interval estimate adjustment[J]. Energy and Buildings, 2022, 258: 111846.

Short-term load forecasting based on transfer learning and TCN-BiGRU

LIU Jie¹, ZHOU Bowen¹, TIAN Ming², HAN Ke^{3,*}

- (1. Heilongjiang Province Key Laboratory of Pattern Recognition and Information Perception, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. China Telecom Heilongjiang Branch, Harbin 150040, China;
3. School of Computer and Information Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: Electricity load forecasting is of great significance to the stable operation of power systems. For load forecasting, traditional short-term forecasting techniques frequently employ linear regression models, which have low forecasting accuracy due to the models' inability to incorporate complicated load changes. A temporal convolutional network-bidirectional gated recurrent unit (TCN-BiGRU) model based on transfer learning (TL) is proposed. Highly relevant information is moved into the experimental model using a transfer learning strategy; the data is clustered and analyzed using a K-medoids clustering algorithm; features at various TCN scales are extracted using a parallel convolution strategy; pertinent information is captured using temporal attention (TA); and the TCN training is further extracted using a BiGRU. The non-linear features of the output are further extracted using the dynamic multigroup particle swarm optimization (DMS-PSO) algorithm to optimize and tune the hyperparameters of the network training in order to find the best combination of hyperparameters. The experimental results show that the proposed TL-TCN-BiGRU algorithm reduces mean absolute error (MAE) by 38.6%, root mean square error (RMSE) by 40.7%, mean absolute percentage error (MAPE) by 30.4%, and R^2 by 5.3% relative to the gated recurrent unit (GRU).

Keywords: short-term load forecasting; transfer learning; temporal convolutional network; K-medoids clustering; fusion network

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0069

基于空中交通复杂度的大规模航迹优化

王红勇^{1,*}, 黄佳文¹, 姜高扬¹, 仲锋惟²

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 中国民用航空局空中交通管理局运行管理中心, 北京 100000)

摘要: 为平衡基于航迹运行模式下的整体空域态势, 提出一种基于空中交通复杂度的大规模航迹优化方法, 并利用真实运行数据仿真验证其有效性与优化效果。基于航班间潜在交互关系构建空中交通复杂度计算模型; 基于空中交通复杂度计算模型, 构建符合空管运行要求的多目标大规模航迹优化模型, 并提出优质基因遗传求解算法; 利用 2019 年 6 月的全国航班运行数据进行基于空中交通复杂度的航迹优化仿真模拟, 并将其与无冲突航迹优化进行了对比分析。仿真结果表明: 所提方法可以解决 93.74% 的潜在冲突; 与无冲突航迹优化相比, 所提方法在面对航路点等待和区域禁行的环境扰动时, 表现出较少的空中交通复杂度波动。通过调整 21.11% 航班, 可使各时段平均复杂度平均下降 24.98%, 全天总体平均复杂度从 120.52 降低到 72.82。

关键词: 航空运输; 大规模航迹优化; 遗传算法; 空中交通复杂度; 基于航迹运行

中图分类号: V355; U8

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1005-10

近年来, 全球各国航空运输业飞速发展, 航空运输的需求量不断增加, 空域资源逐渐饱和。由于空域系统的结构限制, 通过宏观层面的扇区划分来增加空域容量的方法已经快要到达极限^[1]。在下一代空中交通管理系统中, 基于航迹运行 (trajectory based operation, TBO) 概念将会被广泛运用, 有助于提高飞行可预测性和运行效率^[2]。

面对不断增长的空中交通需求, 管制员则需要考虑航空器间的冲突及潜在冲突风险, 在有限的空域资源前提下, 不断对航空器进行调配控制。若某一时间段内的航班较为集中, 管制员没有精力形成最优的冲突解脱策略, 甚至会遗忘某些潜在冲突, 就会影响运行效率, 甚至危害飞行安全。因此, 需要从战略角度对航班航迹进行优化, 以便在冲突发生前对复杂交通进行识别和引导, 平衡空域运行态势, 减少频繁战术调配行为带来的管制压力。

在战略规划阶段对航班航迹进行优化, 已成为

国内外许多学者关注的问题。Islami 等^[3]提出一种方法来解决大规模航班规划问题, 通过分配起飞时间、水平飞行路径和飞行高度, 以尽量减少飞机轨迹之间的相互作用。通过欧洲的实际空中交通数据进行验证, 证明了该方法的可行性, 但因考虑飞机位置的不确定性, 而扩大了飞机间隔。Yan 等^[4]从无冲突角度对大规模航迹进行规划, 提出一种多目标多模因算法, 为解决 TBO 环境下的大规模航迹规划问题提供了精细化决策方案。Calvo-Fernández 等^[5]将数据驱动的空中交通管制模型和冲突解决模型相结合, 通过调整航迹减少了 85% 的航班冲突问题。Xu 等^[6]提出一种适用于大规模航迹规划的双层航迹规划模型, 上层侧重于最大限度地减少飞行时间, 而下层则旨在减少潜在冲突。谢华等^[7]综合考虑航空器动力学性能限制、可用航路限制、扇区容量约束、空中交通管制对于航班运行高度和速度的限制等, 提出容量受限下城市对“跑道-跑道”

收稿日期: 2024-01-30; 录用日期: 2024-05-31; 网络出版时间: 2024-06-19 14:30

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240618.1501.003

基金项目: 天津市应用基础多元投入基金重点项目 (21JCZDJC00840)

*通信作者. E-mail: hy_wang@cauc.edu.cn

引用格式: 王红勇, 黄佳文, 姜高扬, 等. 基于空中交通复杂度的大规模航迹优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1005-1014.

WANG H Y, HUANG J W, JIANG G Y, et al. Large-scale trajectory optimization based on air traffic complexity [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1005-1014 (in Chinese).

四维航迹多目标规划方法,为容量受限下科学配置城市对空域资源提供了方法框架。李萌等^[8]基于TBO运行模式,将容流限制和安全间隔作为约束条件,构建了航空器四维飞行轨迹规划模型,通过控制航空器到达特定航路点的时间,实现航空器四维飞行轨迹规划,减少了拥堵及冲突的概率,提高了空域资源的利用率。彭娅婷等^[9]提出一种基于复杂网络区的精细化空中交通复杂性分析模型。周逸等^[10]在无冲突的前提下,提出结合模拟退火和局部搜索算法的混合元启发式算法求解大规模多目标优化问题。常哲宁等^[11]侧重于研究风影响下的四维航迹优化问题,基于最优控制方法对航迹垂直剖面多目标优化问题进行建模,设计了梯形配点结合 ε -constraint 的模型求解方法。张盈斐等^[12]针对动态连续空域中航线优化难以保证最优性及计算效率低下的问题,提出一种非圆形涟漪扩散算法,有效提高了工程计算效率。雷刚等^[13]提出遗传个体的基因优劣对比度,作为改进遗传算法中编码基因的遗传特性,提高了遗传算法的全局优化能力和收敛速度,增强了航迹规划的实时性。

目前国内外对于大规模航迹优化的研究,主要考虑实现航班间无冲突,侧重于2架航空器间的间隔保持、冲突解脱等调配行为,缺乏对冲突产生前的复杂交通态势的识别,而且过度精细化的规划忽视了大规模交通态势演化时可能产生的多米诺效应及冲突链式反应^[14],可能会给管制员带来更频繁的战术调配。空中交通复杂态势的识别一般是通过空中交通复杂度对其进行表征,如Wang等^[15]提出的一种基于航班间交互关系的空中交通复杂度计算方法。基于航班间交互关系的空中交通复杂度能够快速评估出交通态势的复杂度,且对于宏观衡量大规模航路节点空中交通复杂态势有着较强的适应度。因此,本文提出基于航班交互的空中交通复杂度计算模型,并以降低空中交通复杂度为目标进行大规模航迹优化。

1 空中交通复杂度计算模型

在航空运输网络中,庞大的交通量对航路节点有着巨大的压力。从宏观上来说,当2个航空器在相同的时间范围和高度范围内经过同一个航路点时,就会产生一定程度的潜在交互关系,而这种潜在交互关系就是空中交通复杂态势在航路点上的体现。为确定航班间的潜在交互关系,需获取各航班经过航路点的时间范围与高度范围。本文根据2019年6月航班历史运行数据,对各航班经过航路点的时间与高度进行统计并计算出相应样本的

95% 置信区间,作为航班经过航路点的时间范围与高度范围。通过图解法,绘制航班态势框,分析航班潜在交互关系,如图1所示。

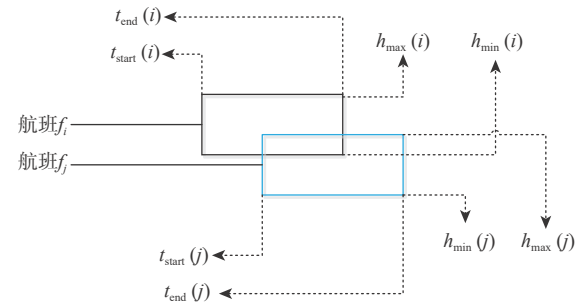


图1 航班潜在交互关系
Fig. 1 Flight potential interaction

图中, $t_{start}(i)$ 和 $h_{min}(i)$ 分别为航班 i 在经过航路点时,可能的最早时间和最小高度, $t_{end}(i)$ 和 $h_{max}(i)$ 分别为航班 i 在经过航路点时,可能的最晚时间和最大高度。此外, t_{start} 、 t_{end} 、 h_{max} 、 h_{min} 为 95% 置信区间的端点数值,需要通过样本数据的均值与方差计算得出,如下:

$$\begin{cases} t_{start} = \mu_t + 2\sigma_t \\ t_{end} = \mu_t - 2\sigma_t \\ h_{max} = \mu_h + 2\sigma_h \\ h_{min} = \mu_h - 2\sigma_h \end{cases} \quad (1)$$

式中: μ_t 为历史航迹时间数据的平均值, σ_t 为时间数据的标准差; μ_h 为历史航迹高度数据的平均值; σ_h 为高度数据的标准差;

不同的航班之间可能存在不同的交互关系,而多维度的交互则会带来更复杂的交互关系。若仅考虑时间维度,经过航路点 p_n 处的航班 i 与航班 j 的交互关系就可能会存在 6 种不同的情况,如图 2 所示。若同时考虑时间交互与高度交互,则会存在 18 种不同的交互情况。因此,探究交互关系规律,推导出交互关系通用表达式是后续研究的理论基础。

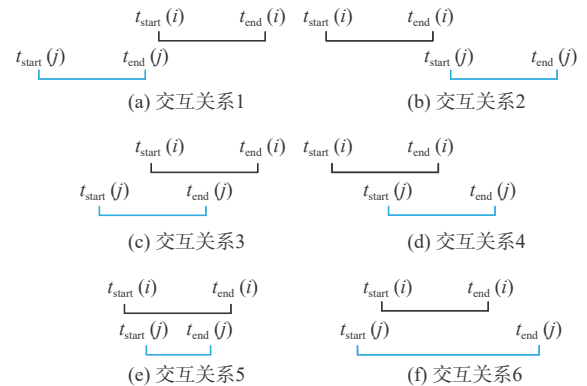


图2 时间维度交互关系
Fig. 2 Time dimension interaction

对图 2 中 6 种不同时间区间的交互关系进行分析, 发现在 $t_{\text{start}}(i)$ 、 $t_{\text{end}}(i)$ 、 $t_{\text{start}}(j)$ 、 $t_{\text{end}}(j)$ 这 4 个值中, 2 个中值的差值能够有效反映所有情况的航班间时间交互关系。为避免由于交互时长的差异较大, 无法作为统一的公式化指标, 需对其进行归一化处

$$\begin{cases} C_{\text{PTIE}}^{p_n}(i, j) = \max\left(0, \frac{\min(t_{\text{end}}(i), t_{\text{end}}(j)) - \max(t_{\text{start}}(i), t_{\text{start}}(j))}{\min(t_{\text{end}}(i) - t_{\text{start}}(i), t_{\text{end}}(j) - t_{\text{start}}(j))}\right) \\ C_{\text{PHIE}}^{p_n}(i, j) = \max\left(0, \frac{\min(h_{\text{end}}(i), h_{\text{end}}(j)) - \max(h_{\text{start}}(i), h_{\text{start}}(j))}{\min(h_{\text{end}}(i) - h_{\text{start}}(i), h_{\text{end}}(j) - h_{\text{start}}(j))}\right) \end{cases} \quad (2)$$

接下来, 考虑时间与高度的二维交互关系。考虑到时间与高度的二维交互关系对管制员的实际影响情况, 时间交互关系与高度交互关系之间存在着相互影响: 如果航班 i 与航班 j 只存在高度交互而不存在时间交互, 此时不会对管制员产生任何管制压力; 反之亦然。因此, 对于航班 i 与航班 j 之间的交互关系, 本文提出航班间潜在二维交互公式 (potential time-height interaction equation, PTHIE), 如下:

$$C_{\text{PTHE}}^{p_n}(i, j) = \begin{cases} C_{\text{PTIE}}^{p_n}(i, j) + C_{\text{PHIE}}^{p_n}(i, j) & C_{\text{PTIE}}^{p_n}, C_{\text{PHIE}}^{p_n} > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

最后, 将经过航路点 p_n 处的 M 个航班间的潜在交互汇总求和即为航路点 p_n 处的空中交通复杂度 C_{p_n} , 而全国范围的航路点复杂度态势就构成了全国总体空中交通复杂度 C_{overall} 为

$$C_{\text{overall}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_{p_n} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_{i,j=1}^M C_{\text{PTHE}}^{p_n}(i, j) \quad (4)$$

式中: N 为航路点 p_n 的数量; $C_{\text{PTHE}}^{p_n}(i, j)$ 为航班 i 与航班 j 在航路点 p_n 处的潜在二维交互关系。

2 大规模航迹优化及求解模型

2.1 问题描述

基于全国空中复杂度态势多层次、大规模等特点, 本文通过控制航空器到达特定航路点的时刻和飞行高度层对航迹进行优化, 以达到减小航班潜在交互, 平衡全国整体态势的效果。本文基于以下假设构建基于空中交通复杂度的大规模航迹优化模型:

- 1) 确定性需求, 航班总量是已知的。
- 2) 没有因管制员失误而造成的过长空中等待。
- 3) 没有航班取消。不考虑由于天气、流量控制、机械故障等原因导致的航班取消问题。
- 4) 考虑航班一定的提前, 允许一定的延误。
- 5) 管制员可以通过合理的调控, 在飞行性能允

许范围内控制飞机飞行轨迹。

6) 暂时不考虑改航问题。

2.2 模型建立

固定航路飞行条件下的空域结构可以表示为一个封闭的区域 $S \subset \mathbf{R}^3$, 如图 3 所示。按照飞行高度的不同划分出不同的飞行高度层 $l \in S$, 对于每个飞行高度层, 水平面是一个有向图 (P, E) , 其中, 节点 P 为航路点的集合, 弧 E 为航路的集合。在战略阶段, 控制航空器经过关键航路节点时的时间及空间位置是 TBO 运行模式下航迹规划的主要方式。因此, 对于在空域中飞行的航班 f , 其飞行轨迹 L^f 可以利用时间和三维空间位置表示为

$$L^f = \{(p_1^f, l_{p_1}^f, T_{p_1}^f), (p_2^f, l_{p_2}^f, T_{p_2}^f), \dots, (p_n^f, l_{p_n}^f, T_{p_n}^f)\} \quad (5)$$

式中: p_n^f 为航班 f 经过的第 n 个航路点 p_n 的位置, $p_n \in P$, $P_i^f = (x_i^f, y_i^f)$; $T_{p_n}^f$ 为航班 f 到达航路点 p_n 的时间范围, $T_{p_n}^f = [t_{\text{start}, p_n}^f, t_{\text{end}, p_n}^f]$; $l_{p_n}^f$ 为航班 f 经过航路点 p_n 时的飞行高度层。经过航路点 p_n 处有 M 个航班 f_{p_n} , 而所有的航班都属于航班集 F 。

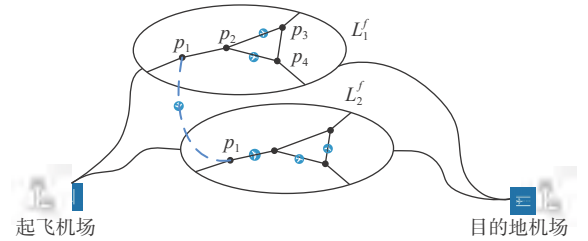


图 3 固定航路飞行条件下的空域结构

Fig. 3 Airspace structure under fixed-route flight conditions

为降低航路节点复杂度, 平衡空域运行态势, 考虑到燃料成本和安全风险等相关因素, 本文将航班飞行轨迹 L^f , 作为决策变量, 并提出以下优化目标和约束条件。

- 1) 总体空中交通复杂度最小化。在航迹优化过程中, 为避免出现局部空中交通复杂度增高而总体空中交通复杂度降低的虚假优化结果, 本文将全天的总体空中交通复杂度拆分为 24 个时段测度,

并在本节后文添加相关约束条件, 总体空中交通复杂度计算式为

$$\min C_{\text{overall}} = \min \sum_{k=1}^{24} C_{\text{overall}}^k = \min \left(\sum_{k=1}^{24} \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_{i,j=1}^M C_{\text{PTHE}}^{p_n}(i, j) \right) \quad (6)$$

式中: k 为一天的 24 个时段, 每个时段 1 h; C_{overall}^k 为 k 时段的总体空中交通复杂度。

2) 航迹改变成本最小化。航迹改变会带来相应的燃料成本及时间成本, 分为 3 部分: 地面等待成本 M_{GH} 、空中延误成本 M_{AH} 、飞行高度层改变成本 M_{FL} 。结合 3 个成本指标, 设置总体航迹优化成本 (total trajectory optimization cost, TTOC) 优化目标:

$$\min O_{\text{TTOC}} = \min(M_{\text{GH}} + M_{\text{AH}} + M_{\text{FL}}) \quad (7)$$

$$\begin{cases} M_{\text{GH}} = \sum_{f=1}^F \lambda_{\text{GH}} |t_d^f - d^f| \\ M_{\text{AH}} = \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \lambda_{\text{AH}} (W_{p_n}^f - T_{p_n}^f) \\ M_{\text{FL}} = \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \lambda_{\text{FL}} |L_{p_n}^f - K_{p_n}^f| \end{cases} \quad (8)$$

式中: t_d^f 为航班的实际起飞时间; d^f 为计划离场时间; $W_{p_n}^f$ 为航班 f 在航路点 p_n 处的计划过点时间; $T_{p_n}^f$ 为航班 f 在航路点 p_n 处的实际过点时间; $L_{p_n}^f$ 为航班 f 在航路点 p_n 处的实际飞行高度层; $K_{p_n}^f$ 为航班 f 在航路点 p_n 处的计划飞行高度层 (requested flight level, RFL)。 λ_{GH} 、 λ_{AH} 、 λ_{FL} 为 3 部分的单位成本系数。成本系数的值取决于飞机机型等其他因素, 空中延误和飞行高度层改变的成本比地面等待成本更高^[16]。总体航迹优化成本应定义成本系数关系:

$$\lambda_{\text{GH}} < \lambda_{\text{AH}} < \lambda_{\text{FL}}。$$

3) 航迹优化效率最大化。仅从飞行效率来看, 对特定轨迹的完全重新分配可能会有效降低空中交通复杂度, 但从优化效率及实际运行情况考虑, 应注重航迹优化效率, 避免对航迹的过度优化。因此, 提出最大化总体航迹优化效率 (overall trajectory optimization efficiency, OTOE) 的优化目标:

$$\max O_{\text{OTOE}} = \left(\sum_{k=1}^{24} |\Delta C_{\text{overall}}^k| \right) / \left(\sum_{f=1}^F \sum_{l=1}^{L^f} \Delta O \right) \quad (9)$$

式中: ΔO 为优化航迹中与计划航迹的差异点个数, $\sum_{f=1}^F \sum_{l=1}^{L^f} \Delta O$ 为所有航班的航迹优化后要素调整个数; $\Delta C_{\text{overall}}^k$ 为在 k 时段的总体空中交通复杂度降低量。

在大规模航迹优化问题中, 需要考虑到航空器

性能、延误时长的调整范围、飞行高度层的调配要求及变量自身特征等约束要求, 建立如下约束条件:

$$\underline{t}_d^f \leq t_d^f \leq \bar{t}_d^f \quad \forall f \in F \quad (10)$$

$$|t_d^f - d^f| \leq 15 \quad \forall f \in F \quad (11)$$

$$t_{\text{start}, p_{n+1}}^f \geq t_{\text{end}, p_n}^f + \frac{D_{\text{ED}}(p_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1}), p_n(x_n, y_n))}{S_{\text{PFM}}^{A_{\text{CT}}^{L_{p_n}^f}}(M_{\text{CS}})} \quad \forall f \in F; \forall p_n \in P \quad (12)$$

$$l_{p_n}^f = \begin{cases} l_{\text{singular}} & 0^\circ \leq T_{\text{CS}} \leq 179^\circ \\ l_{\text{plural}} & 180^\circ \leq T_{\text{CS}} \leq 359^\circ \end{cases} \quad (13)$$

$$|l_{p_{n+1}}^f - l_{p_n}^f| \leq 2 \quad l_{p_n}^f \in L^f \quad (14)$$

$$\sum_1^n |l_{p_{n+1}}^f - l_{p_n}^f| \leq \frac{n-1}{2} \quad l_{p_n}^f \in L^f \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Delta C_{\text{overall}}^k \leq 0 \\ \Delta O \in \mathbf{N}^* \end{cases} \quad (16)$$

式中: t_d^f 为飞机离场时间; $\underline{t}_d^f$ 和 $\bar{t}_d^f$ 分别为 t_d^f 的最小值和最大值; d^f 为预计起飞时间; $D_{\text{ED}}(p_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1}), p_n(x_n, y_n))$ 为航路点 p_n 及下一个航路点 p_{n+1} 之间的欧氏距离; $S_{\text{PFM}}^{A_{\text{CT}}^{L_{p_n}^f}}(M_{\text{CS}})$ 表示根据飞机性能数据得到的航空器在 $l_{p_n}^f$ 飞行高度层时的最大巡航速度 (maximum cruise speed, MCS); $A_{\text{CT}}^{L_{p_n}^f}$ 表示执行航班 f 航班计划的飞机机型; T_{CS} 表示航向。

约束 (10) 是为确保飞机离场时间 t_d^f 在区间 $[\underline{t}_d^f, \bar{t}_d^f]$ 之间, 以避免航班延误或提前起飞时间太多。约束 (11) 根据中国民用航空局的规定, 15 min 内的延误被视为正常飞行。因此, 主动延误时长 $|t_d^f - d^f|$ 不能超过 15 min。约束 (12) 考虑了飞机的航行性能, 限制了飞机通过航路点的时间, 以确保优化后的预计到达时间不会超出飞机速度的阈值。约束 (13) 是基于实际运行情况对飞行高度调配而设计的约束条件。飞行高度层的选择应遵循“东单西双”原则, l_{singular} 与 l_{plural} 分别对应不同真航线角的飞行高度层类型, $l = \{l_{\text{singular}}, l_{\text{plural}}\}$ 。约束 (14) 为飞行高度层变化的约束, 主要考虑飞机性能以及高度层变化时的安全性。在进行飞行高度层变化时, 禁止进行跨多个高度层的飞行高度层调配, $|l_{p_{n+1}}^f - l_{p_n}^f|$ 为航班在经过航路点 p_n 及下一个航路点 p_{n+1} 之间的飞行高度层差值, 结合式 (13), 飞行高度层变化不超过 2 个飞行高度层。约束 (15) 将航班 f 在整个飞行过程中的高度层改变次数限制为飞行航段数的一半, 以避免频繁地爬升与下降。其中, n 为航班 f 经过的航路点个数, $n-1$ 为航班 f 经过的航段个数。约束 (16) 中, $\Delta C_{\text{overall}}^k$ 表示在 k 时段的总体空中交通复杂度降低量, 应为负值; $\mathbf{N}^*$ 为

正整数集, 优化航迹中与计划航迹的差异点个数要求正整数。

2.3 改进的遗传算法求解方法

遗传算法具有较强的全局搜索能力, 可以通过种群的演化, 同时探索多个潜在解, 并在整个搜索空间中寻找全局最优解。但在面对大规模航迹优化时, 可行解空间过大, 传统的遗传算法存在着计算量过大且收敛性较低的缺陷。

为提升寻优速度, 通常需要将传统的遗传算法进行改进。首先, 可以通过改进初始化种群的方式提升算法性能, 如混沌映射^[17], 但大规模航迹优化问题需要基于现有飞行计划进行优化, 无法有效地改进初始化种群; 其次, 可以通过策略性优化个体进行迭代更新, 其中, 自适应遗传算法^[18]较为典型。自适应遗传算法可以通过调整个体层面的交叉概率和变异概率, 以适应不同阶段的搜索空间, 但其依然需要通过不断计算适应度选择进化方向, 是一种无方向性的个体进化。

为进一步提高本文方法的运算效率和收敛速度, 本文针对基因改进层面, 提出一种具有方向性进化能力的优质基因遗传求解算法, 通过加强对优质基因的保留, 对劣质基因的摧毁, 促进种群以更快地朝着优质的方向进化, 具体步骤如下:

- 1) 初始化种群。设定种群规模为 100。
- 2) 计算适应度。通过适应度函数的计算, 对个体适应度进行评估。

针对本节提出的优化目标, 发现不同目标之间存在着相互影响关系且多目标之间没有共同的测度标准, 多目标之间的重要程度难以定量地描述。因此, 本文采用物理规划的方法将多目标转化为单目标问题。在本文求解的多目标问题中, 前 2 个优化目标以最小值为目标, 最后一个则是以最大值为优化目标。因此, 需将最后一个优化目标转化为以最小值为目标的优化目标, 以便符合第 2 类 (Class-II) 偏好型问题的类别划分, 转化后优化目标为

$$\max O_{\text{OTOE}} = \min O_{\text{OTOE}}^{-1} = \left(\sum_{f=1}^F \sum_{l'=1}^{l'} \Delta O \right) / \left(\sum_{k=1}^{24} \Delta C_{\text{overall}}^k \right) \quad (17)$$

本文根据 3 个目标函数特点, 将偏好函数设为函数值在 [0, 1] 范围内的分段函数, 可得偏好函数如下:

$$P_i(g) = \begin{cases} \lambda(i) + \frac{\lambda(i+1) - \lambda(i) \times (g - g_i)}{g_{i+1} - g_i} & g_i \leq g \leq g_{i+1} \\ \lambda(i) e^{\frac{g - g_5}{g_5 - g_4}} & g \geq g_5 \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_i 为偏好函数; g 为目标值; $g_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 为

偏好区间的边界点, $\lambda(i)$ 为每个边界点的偏好值, 构建如下:

$$\lambda(i) = (e^{i-5})^{0.35} \quad (19)$$

式中: $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

因此, 物理规划的多目标问题转换为单目标问题的总偏好函数 P_t 表示为

$$P_t = \sum_{j=1}^J P_{tj}(g) = P_{t1}(C_{\text{overall}}) + P_{t2}(O_{\text{TTOC}}) + P_{t3}(O_{\text{OTOE}}^{-1}) \quad (20)$$

式中: $P_{tj}(g)$ 为第 j 个目标的偏好函数。根据本文的优化目标包括: $\min C_{\text{overall}}$ 、 $\min O_{\text{TTOC}}$ 、 $\min O_{\text{OTOE}}^{-1}$, 得出本文大规模航迹优化问题的适应度函数。

3) 选择精英个体。为保留上一代中适应度较好的个体, 本文方法采用精英保留策略, 将 10 个适应度值最好的个体直接进入下一代重组中而不用参与交叉变异。同时也需要将 10 个优秀个体进行复制放回种群, 以便传承优质基因, 加速种群优质进化。

4) 优质基因标记。根据对所有个体的空中交通复杂度, 筛选出高峰航路点的低复杂度个体中关键航迹标记为优质基因, 即高优质系数; 将高峰航路点中复杂度异常值的相关航迹标记为劣质基因, 即低优质系数。基因优质系数 κ_{QG} 主要作用于交叉阶段与变异阶段, 优质系数越高, 则其基因交叉倾向越高, 基因变异倾向越低; 优质系数越低, 则其基因交叉倾向越低, 基因变异倾向越高。

5) 单点交叉。本文采用单点交叉, 将选择进入交叉变异的 100 个个体随机两两组合, 按照交叉概率 $P_c = 0.9\kappa_{\text{QG}}$ 决定是否进行交叉操作。若进入交叉操作, 则随机生成 2 个点位进行基因交叉。

6) 基因变异。本文采用轮盘赌的方式选择可能变异的基因点位, 找到基因位点后还需要考虑其基因优质系数, 设置其变异概率 $P_v = 0.8(\kappa_{\text{QG}})^{-1}$ 。

7) 个体重组。将精英保留策略的 10 个个体与交叉变异的 100 个个体组合成为新的种群。跳转步骤 2 直至达到迭代次数并输出结果。

3 计算结果对比与分析

3.1 全国空中交通复杂度计算结果与分析

采集了国家空管系统 2019 年 6 月的真实运行数据, 对数据进行筛选处理后, 通过全国空中交通复杂度计算模型, 对全国空中交通态势进行识别并分析, 绘制全国空中交通复杂度地图如图 4 所示。

全国空中交通复杂度地图可以直观看出空间维度的空中交通态势分布情况, 整体空中交通态势

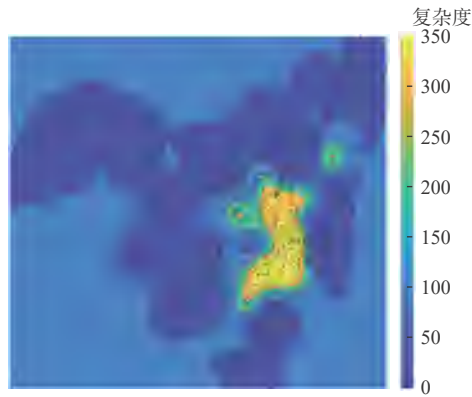


图 4 全国空中交通复杂度地图

Fig. 4 China air traffic complexity map

在空间上呈现出明显的不平衡性, 高峰航路点主要集中在全国的中部地区。从计算出的全国空中交通复杂度数据上来看, 全国航路点中 11.65% 的航路点产生的复杂度占了全国复杂度总数的 65.53%。

从时间维度对全国空中交通复杂度数据进行分析。为观察时间上航路点复杂度变化情况, 以 1 h 为一时段, 绘制全国复杂度时段图和高峰航路点 (PAVTU 航路点为例) 复杂度时段图, 如图 5 和图 6 所示。

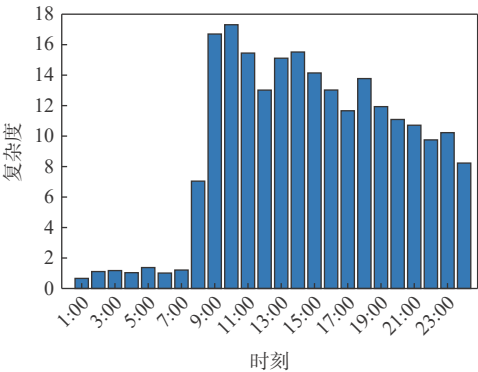


图 5 各时间段平均复杂度

Fig. 5 Average complexity for each time period

由图 5 可以明显看出, 从 0:00—9:00 时间段内, 全国平均复杂度较低, 从 9:00 开始全国平均复杂度大幅升高, 后随着时间增加缓慢减少。从单一航路点来看, 从 0:00—8:00 时间段内, 复杂度较低。在 10:00—11:00 为该点复杂度高峰时期, 随后略有降低, 但也有着较高的复杂度。总体来说, 全国的空中交通运行态势在空间和时间上均呈现出一定的不均衡性。

3.2 基于复杂度的航迹优化有效性验证

对于大规模航迹优化有效性的验证难以通过场景模拟进行验证, 需要通过真实数据进行仿真测试。本文将真实运行数据作为样本数据, 同时进行基于空中交通复杂度的航迹优化和基于无冲突的

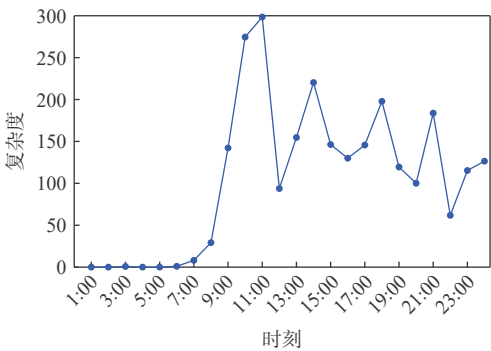
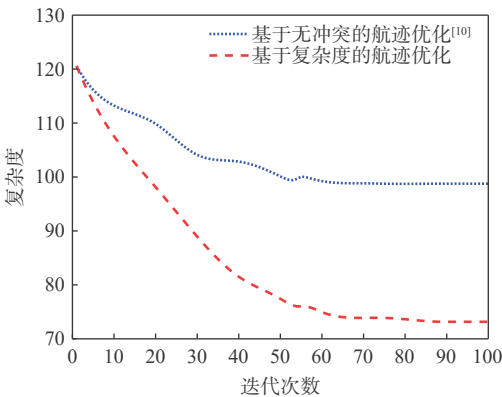


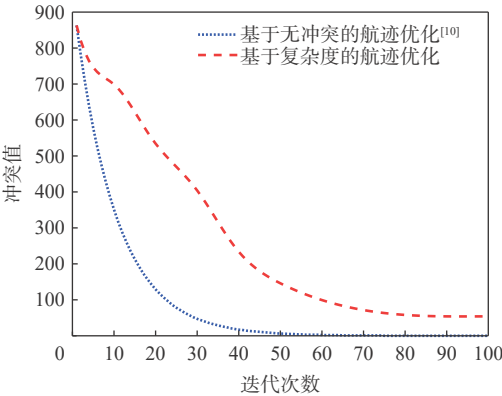
图 6 PAVTU 点复杂度变化

Fig. 6 PAVTU point complexity variation

航迹优化, 并采用相同的传统遗传算法优化方式进行优化以验证基于复杂度航迹优化的有效性, 2 种优化方式的迭代过程如图 7 所示。



(a) 不同优化方式复杂度的变化情况



(b) 不同优化方式冲突值的变化情况

图 7 2 种优化方式的迭代过程

Fig. 7 Iterative process for two optimization methods

如图 7(a) 所示, 基于空中交通复杂度的大规模航迹优化迭代过程, 随着迭代次数的增加, 空中交通复杂度逐渐减小, 至 89 代后开始收敛, 说明基于空中交通复杂度的航迹优化具有收敛性。而基于无冲突的航迹优化, 在 55 代附近出现复杂度反增的现象。图 7(b) 展示了 2 种优化方式迭代过程中冲突值的变化情况。基于无冲突的航迹优化方式的冲突值不断减少至 0, 而基于复杂度航迹优化方

式虽然还存在一定的冲突,但在迭代过程中冲突值大幅减少。

如图 8 所示,基于无冲突优化与基于复杂度优化的结果对比显示,未进行航迹优化时,整体空域表现出较高的复杂度和大量的冲突。经过基于无冲突的航迹优化后,成功实现了无冲突,但对整体空域态势来说依旧保持较高的复杂度值,高出基于复杂度航迹优化方式的 35.62%。这表明,基于无冲突的航迹优化对空域整体运行态势的优化并不明显。相比之下,在经过基于复杂度的航迹优化后,空中交通复杂度指标降低了 60.40%,大大降低空域整体态势的复杂程度,同时使冲突值降低了 93.74%,说明基于复杂度的航迹优化方式不仅在平衡空域态势方面效果显著,而且在降低冲突方面也表现出很强的有效性。

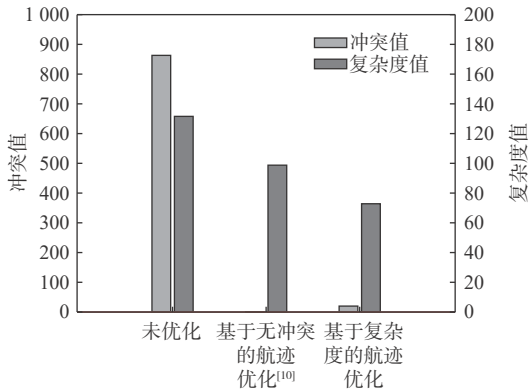


图 8 优化结果对比

Fig. 8 Optimized solution results comparison

过度精细化的规划忽视了大规模交通态势演化时可能产生的多米诺效应及冲突链式反应,为验证 2 种优化方案对交通态势演化的鲁棒性,分别模拟航路点等待情况和天气等原因造成的区域禁行情况这 2 种环境扰动,对比不同环境扰动对基于复杂度的航迹优化方案与无冲突航迹优化方案的影响程度,并绘制扰动后冲突值变化图,如图 9 所示。

图 9(a) 模拟了航路点等待对后续态势的影响,以及 2 种优化方案的反应。具体而言,选取上海 01 扇区高峰航路点 UGAGO,并设置了航路点等待,等待时间为 0.5 h,随后恢复通航。图 9(b) 则模拟了天气等原因造成的区域禁行情况,选取了郑州 01 号扇区,在其内禁行 A461、B208、H14 航路,禁行时间同样设置为 0.5 h 后恢复通航。假设管制员可以合理调配各航空器,使航班能够按照无冲突优化后的飞行计划进行飞行。

由图 9(a) 可以看出,在经历航路点等待后,基于无冲突的航迹优化方案将会比基于复杂度的航迹优化方案产生更多冲突。随着时间的发展,基于复杂度的航迹优化方案以较快的速率恢复了扰动

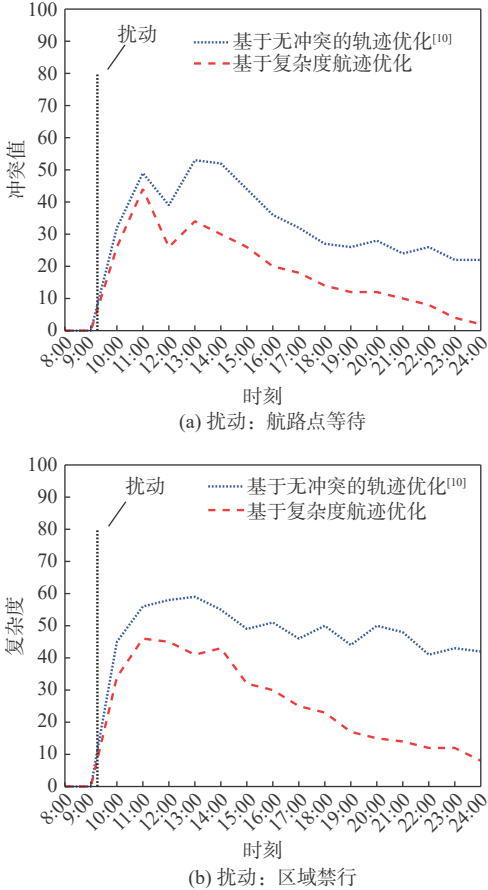


图 9 受到扰动后不同优化方式冲突值变化

Fig. 9 Conflict value variations of different optimization methods after perturbation

前的低冲突交通态势。而基于无冲突的航迹优化方案恢复速率较慢,在 20:00 时段和 22:00 时段反而因冲突链式反映出现了冲突的反增现象。在图 9(b) 中,加大了对环境的扰动,2 种优化方案的差异则更加明显。在区域航路禁行半个小时后,基于无冲突的航迹优化方案平均时段冲突值达到了 49.13,且并未呈现下降趋势。基于复杂度的航迹优化方案平均时段冲突值为 26.47,相较基于无冲突的航迹优化方案减少 53.87%,且呈现明显下降趋势。

在航路点等待和区域禁行 2 种类型的环境扰动下,对比基于无冲突的航迹优化方案与基于复杂度的航迹优化方案,可以明显看出,基于空中交通态势识别的空中交通复杂度优化可以极大程度解决冲突,且在面对大规模交通态势变化时具有着较高的鲁棒性。

3.3 航迹优化结果与分析

针对全国空中交通运行态势的不均衡性现象,采用本文大规模航迹优化模型对全国的航班航迹进行优化,以减小航班潜在交互,平衡全国空中交通运行态势。本文分别采用传统遗传算法、自适应遗传算法和优质基因遗传算法对大规模航迹优化

模型进行求解,迭代过程如图 10 所示。

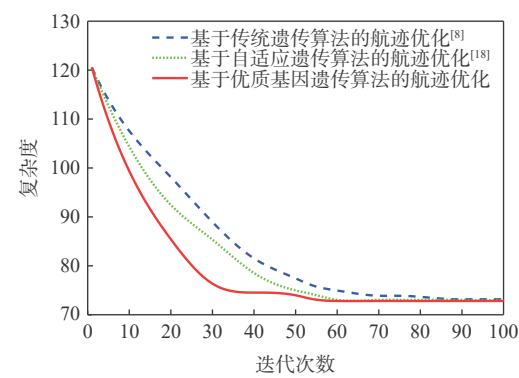


图 10 不同优化算法的航迹优化迭代

Fig. 10 Iterative plot of trajectory optimization with different optimization algorithms

在 3 种优化算法的航迹优化迭代图中,3 种优化算法的航迹优化结果基本一致。采用传统遗传算法的航迹优化方案迭代至 89 代时,空中交通复杂度值才达到最小值,而采用优质基因遗传算法和自适应遗传算法的航迹优化方案迭代至 60 代时就已经产生了收敛。因此,可以明显看出,优质基因遗传算法收敛性良好且相较于传统遗传算法与自适应遗传算法有着更强的优化效率。

经过优质遗传算法优化过后,即可得到基于空中交通复杂度航迹优化后的航迹数据。利用空中交通复杂度计算模型,计算每个时间段的复杂度并对数据进行统计分析,并绘制优化前后各时段全国复杂度对比图和高峰航路点 PAVTU 优化前后复杂度对比图,如图 11 和图 12 所示。

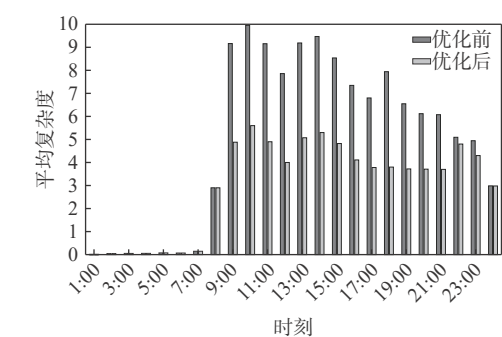


图 11 优化前后平均复杂度对比

Fig. 11 Comparison of average complexity before and after optimization

通过图 11 可以明显看出,各时段全国平均复杂度有明显的降低。在复杂度最高的 9:00—10:00 时间段,空中交通复杂度降低 43.74%;对空中交通复杂度优化最明显的时段为 20:00—21:00 时间段,降低了 52.15%。各时段优化平均下降 24.98%,对于高峰时期的复杂度降低 37.48%。对于高峰航路点的优化效果则更为明显,对于全国 312 个高峰航路点,空中复杂度整体降低了 65.84%。以 PAVTU

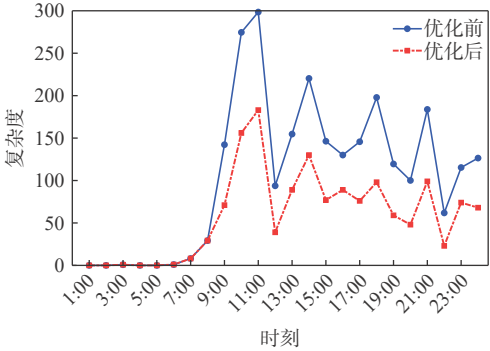


图 12 优化前后 PAVTU 复杂度变化图

Fig. 12 Plot of PAVTU complexity change before and after optimization

航路点为例,可以通过图 12 看出,空中交通复杂度明显的降低,平均降低 46.54%,最高在 21:00—22:00 时间段内航班间交互降低了 62.79%。

对比优化前后的航班飞行轨迹方案,总计调整了航班 2 108 个,占到总航班数量的 21.11%,总计调整时间约 302 h,航班平均调整时间为 8.60 min,最高延误时长仅为 13 min,全天总体平均复杂度从 120.52 降低到 72.82,降低了 39.58%。为直观表现优化效果,绘制优化前后的全国空中交通复杂度地图,如图 13 所示。可以明显看出,基于空中交通复杂度的航迹优化,可使全国空中交通复杂度更加均

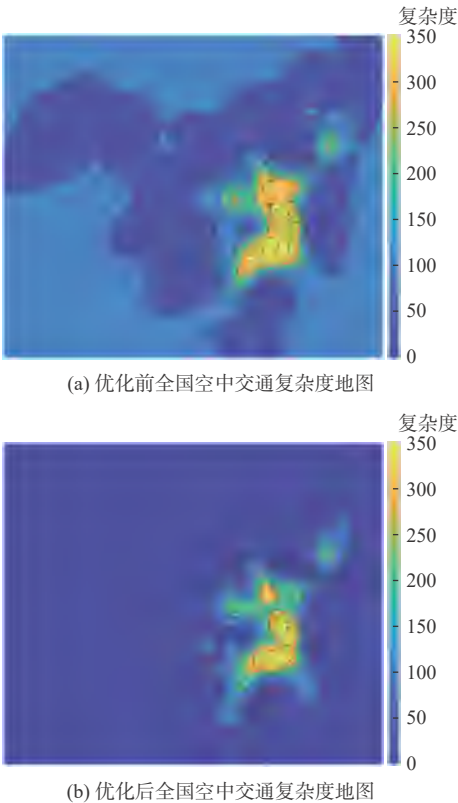


图 13 优化前后全国空中交通复杂度地图对比

Fig. 13 Comparison of national air traffic complexity maps before and after optimization

衡, 对平衡整体空域运行态势有着一定的效果。

4 结 论

1) 本文针对航迹优化中缺乏对空中交通复杂态势识别的问题, 提出一种适用于大规模航迹优化的空中交通复杂度计算模型, 可反映航路节点处交通态势的复杂程度。

2) 本文针对大规模交通态势演化可能出现的冲突链式反应问题, 基于空中交通复杂度的航迹优化方案能够在面对航路点等待和区域禁行的环境扰动时, 表现出较少的空中交通复杂度波动。

3) 本文针对大规模航迹优化难以平衡空域态势的问题, 采用优质基因遗传算法对基于空中交通复杂度的大规模航迹优化进行求解。优化结果表明, 全天总体平均空中交通复杂度降低了 39.58%。

本文是基于航空器无故障等相对稳定状态下的整体优化, 而对于大规模航迹优化中的航班运行不确定性, 还需要结合气象条件、航空器维护状况等实际因素进行进一步的研究。

参考文献 (References)

[1] CAI K Q, TANG Y W, WANG W. An evolutionary multi-objective approach for network-wide conflict-free flight trajectories planning[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1D2-1-1D2-10.

[2] TOEBBEN H, LE TALLEC C, JOULIA A, et al. Innovative future air transport system: simulation of a fully automated air transport system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2021, 225: 45-55.

[3] ISLAMI A, CHAIMATANAN S, DELAHAYE D. Large-scale 4D trajectory planning[M]//Air Traffic Management and Systems II. Berlin: Springer, 2017: 27-47.

[4] YAN S, CAI K Q. A multi-objective multi-memetic algorithm for network-wide conflict-free 4D flight trajectories planning[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(3): 1161-1173.

[5] CALVO-FERNÁNDEZ E, PEREZ-SANZ L, CORDERO-GARCÍA J M, et al. Conflict-free trajectory planning based on a data-driven conflict-resolution model[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(3): 615-627.

[6] XU M, HU M H, ZHOU Y, et al. Multi-aircraft cooperative strategic trajectory-planning method considering wind forecast uncertainty[J]. Sustainability, 2022, 14(17): 10811.

[7] 谢华, 黎子弘, 杨磊, 等. 容量受限下城市对航班四维航迹优化[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 325581.

XIE H, LI Z H, YANG L, et al. Optimization of four-dimensional trajectory of city pair with limited capacity[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(8): 325581(in Chinese).

[8] 李萌, 初建宇, 李印凤, 等. 基于航迹运行模式的航空器航迹优化模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2583-2591.

LI M, CHU J Y, LI Y F, et al. Aircraft trajectory optimization model under trajectory based on operation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9): 2583-2591(in Chinese).

[9] 彭娅婷, 温祥西, 吴明功, 等. TBO 模式下基于复杂网络的空中交通复杂性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(4): 1234-1244.

PENG Y T, WEN X X, WU M G, et al. Complex network-based air traffic complexity analysis in TBO[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1234-1244(in Chinese).

[10] 周逸, 胡明华, 张颖. 固定航路飞行条件下的无冲突航迹规划[J]. 哈尔滨商业大学学报 (自然科学版), 2021, 37(5): 550-556.

ZHOU Y, HU M H, ZHANG Y. Conflict-free trajectory planning in fixed route[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2021, 37(5): 550-556(in Chinese).

[11] 常哲宁, 胡明华, 张颖, 等. 风影响下航空器多目标最优控制航迹优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(11): 3521-3531.

CHANG Z N, HU M H, ZHANG Y, et al. A multi-objective optimal control trajectory optimization method for aircraft under wind influence[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(11): 3521-3531(in Chinese).

[12] 张盈斐, 袁莉燕, 周航, 等. 基于涟漪扩散算法的航空器自主航迹规划方法 [J/OL]. 北京航空航天大学学报, (2023-09-25)[2024-04-25]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230922.1426.001>.

ZHANG Y F, YUAN L Y, ZHOU H, et al. FAutonomous trajectory planning method of aircraft based on ripple spreading algorithm[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, (2023-09-25)[2024-04-25]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230922.1426.001>(in Chinese).

[13] 雷刚, 李云舒, 张宏强, 等. 改进麻雀搜索算法的飞行器航迹规划[J]. 电光与控制, 2024, 31(3): 41-47.

LEI G, LI Y S, ZHANG H Q, et al. An improved sparrow search algorithm for aircraft path planning[J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(3): 41-47(in Chinese).

[14] PAIELLI R A. Evaluation of tactical conflict resolution algorithms for enroute airspace[J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(1): 324-330.

[15] WANG H Y, HUANG J W, DENG T T, et al. Evaluation and optimization of air traffic complexity based on resilience metrics[J]. Journal of Advanced Transportation, 2023, 2023: 5692934.

[16] COOK A J, TANNER G. European airline delay cost reference values[EB/OL]. (2015-12-24)[2024-04-25]. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/european-airline-delay-cost-reference-values-final-report-4-1.pdf>.

[17] 王永, 王明月, 龚建. 基于多目标遗传算法的 8×8 S 盒的优化设计方法[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(3): 519-527.

WANG Y, WANG M Y, GONG J. Optimal design method of 8 × 8 S-box based on multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(3): 519-527(in Chinese).

[18] 张劼, 李宁洲, 张晓娟, 等. 基于自适应变异遗传算法的多无人机航迹协同[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(11): 18-23.

ZHANG J, LI N Z, ZHANG X J, et al. Multi-UAV track coordination based on adaptive mutation genetic algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(11): 18-23(in Chinese).

Large-scale trajectory optimization based on air traffic complexity

WANG Hongyong^{1,*}, HUANG Jiawen¹, JIANG Gaoyang¹, ZHONG Fengwei²

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Operations Management Center, Air Traffic Management Bureau.CAAC, Beijing 100000, China)

Abstract: This work provides a large-scale trajectory optimization approach based on air traffic complexity to balance the overall airspace situation under the trajectory-based operation mode. It uses real operation data simulation to verify its effectiveness and optimization effect. Firstly, an air traffic complexity calculation model is constructed based on the potential interaction relationship between flights. Secondly, a multi-objective large-scale trajectory optimization model that meets the operational requirements of air traffic control is constructed based on the air traffic complexity calculation model, and a high-quality genetic solution algorithm is proposed. Finally, using the national flight operation data from June 2019, a simulation simulation of air traffic complexity-based trajectory optimization is performed, and a comparison between conflict-free trajectory optimization and air traffic complexity-based trajectory optimization is conducted. Conflict trajectory optimization is compared and analyzed. The simulation results show that the proposed method can resolve 93.74% of potential conflicts. Compared with conflict-free trajectory optimization, its optimization scheme exhibits less air traffic complexity fluctuations when facing environmental perturbations such as waypoint waiting and area bans. By adjusting 21.11% of the flights, it can reduce the average complexity of each time period by 24.98% on average, and the overall average complexity of the whole day is reduced from 120.52 to 72.82.

Keywords: air transportation; large-scale trajectory optimization; genetic algorithm; air traffic complexity; trajectory based operation

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0003

基于改进 YOLOv5-s 的交通场景小目标检测算法

王坤*, 冯康威

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘 要: 针对交通标志和交通灯等交通场景小目标特征不明显导致检测困难的问题, 提出基于改进 YOLOv5-s 的交通场景小目标检测算法。设计特征补充模块 (FSM), 通过进一步获取浅层细节信息对相邻的深层检测层进行特征补充, 有效提高了小目标的检测效果, 并通过相邻层间的矩阵运算避免了特征冗余; 设计有效融合模块 (EFM), 分别处理特征金字塔融合时的横向浅层特征和上采样特征, 缓解二者之间的特征冲突, 使其更有效的融合; 提出超级增强交并比 (SEIOU) 损失计算方式, 通过添加真实框和预测框主对角之间的距离度量, 改善回归效果, 提升检测精度。在 CCTSDB、S2TLD、TLD 和 PASCAL VOC 数据集上进行实验, 结果表明: 所提算法在精度上分别提升了 2.54%、3.62%、4.33% 和 2.01%, 检测速度达到了 113 帧/s, 适用于实际交通场景下的检测任务。

关 键 词: YOLOv5-s 算法; 小目标检测; 特征补充; 特征融合; 损失函数

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1015-13

随着科学技术的不断进步, 近年来自动驾驶技术飞速发展, 使人们的出行、生活方式更加智能化。自动驾驶的核心可以概括为感知、规划和控制 3 个部分, 感知是指自动驾驶系统从环境中收集提取相关知识的能力, 而环境感知特指对于环境的场景理解能力^[1]。为确保对环境的理解和把握, 车辆需要获取大量的周围环境信息, 在自动驾驶时做出合理行为规划。交通标志和交通灯是自动驾驶过程中的重要环境信息, 此类场景目标的检测是高级驾驶辅助系统的重要组成部分。

传统的交通标志和交通灯检测算法主要根据目标的颜色和形状等特征进行处理, 易受到光照、车辆尾灯等因素干扰^[2-3]。相比于传统的检测算法, 基于深度学习的目标检测算法具有更好的实时性和准确性, 可以帮助自动驾驶车辆识别交通场景中的交通标志、交通灯等环境信息, 通过对信息进行

分析从而自主地控制车辆实现自动驾驶。目前, 基于深度学习的目标检测方法主要分为 2 类。一类是两阶段检测算法, 将候选框提取与分类任务分开, 其代表算法主要有快速区域卷积神经网络 (faster region-convolutional neural networks, Faster R-CNN) 算法^[4]、掩码 R-CNN (Mask R-CNN) 算法^[5]、空间金字塔池化网络 (spatial pyramid pooling-networks, SPP-Net) 算法^[6] 等。另一类是一阶段检测算法, 将目标的检测与分类任务以端到端方式完成, 其代表算法主要有 YOLO 系列^[7-9] 检测算法、一阶段单次多边框检测器 (single shot multibox detector, SSD) 算法^[10] 等。

交通标志和交通灯的检测数据有其自身的特点, 车载摄像头在采集自然场景下的检测图像时, 会受到道路环境、天气、透视变化等因素的影响, 此外, 交通标志和交通灯的尺度在原始图像中占

收稿日期: 2024-01-03; 录用日期: 2024-02-25; 网络出版时间: 2024-03-12 20:21

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240312.1540.004

基金项目: 国家自然科学基金 (62173331)

* 通信作者. E-mail: yogo_w@163.com

引用格式: 王坤, 冯康威. 基于改进 YOLOv5-s 的交通场景小目标检测算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1015-1027.

WANG K, FENG K W. Small target detection algorithm for traffic scenes based on improved YOLOv5-s [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1015-1027 (in Chinese).

比较小,特征信息较弱,具有天然的细粒度特征,从而使实时检测更具挑战性。在现有的交通标志和交通灯检测的研究中,井方科等^[11]针对小目标交通标志容易误检和漏检的问题,设计一种双向自适应特征金字塔网络(feature pyramid networks, FPN),引入跳跃连接和自适应特征融合因子,增强多尺度特征融合,提升小目标检测精度。钱伍等^[12]设计了记忆性特征融合网络,高效利用了高级语义信息和底层特征,增加模型对小目标的学习能力。Yao 等^[13]提出了一种基于自适应特征金字塔网络的特征融合方法,能够更好地融合骨干网络 2 个尺度特征层的输出结果,融合后的特征具有更多的语义信息和位置信息。Shi 等^[14]针对交通标志小目标的检测,考虑到主干网络下采样会导致低级特征信息融合不够,小目标部分特征信息丢失,提出了一种参数量少、特征融合能力强的密集路径聚合网络(dense path aggregation networks, DensePAN),可以有效地融合浅层细节信息和深层语义信息。上述文献提出的特征融合方法一定程度上提高了模型的检测精度,解决了小目标信息缺失,特征难区分等问题,但不同的检测通道对应的目标尺度不同,不同检测层在融合过程中不可避免存在一定程度的特征冲突,在融合过程中存在特征冗余并影响检测效果。此外,在基于 YOLO 系列检测算法的相关研究中,通常采取增加浅层检测通道的方法提高小目标的检测能力,Li 等^[15]和 Mou 等^[16]都采用该方法来对特征融合网络进行扩展。但新增浅层小目标检测通道,需要重新聚类生成对应的锚框,同时,在原来基础上继续上、下采样操作融合浅层特征,最后,添加对应的检测头执行分类回归操作,这势必会大幅度增加计算量和网络复杂程度。

针对上述问题,本文提出了基于改进 YOLOv5-s 的交通场景小目标检测算法,通过改进特征融合结构和融合方式,以轻微的参数量增长为代价,解决了检测通道中细节特征不足和下采样过程中的信息丢失问题,并且避免了融合过程中的层间特征冲突问题,提高了小目标的检测精度。本文主要创新有:

1) 在 YOLOv5-s 特征融合结构的基础上,提出特征补充模块(feature supplement module, FSM),该模块通过提取浅层的丰富细节特征,对相邻的深层特征层进行特征补充,有效的弥补了深层网络细节特征的不足,完善了小目标检测机制。此外通过对

相邻 2 层进行矩阵乘法运算突出关键信息,避免对深层造成特征冗余。

2) 在 FPN 的层间融合部分,设计了有效融合模块(effective fusion module, EFM),对来自主干的横向浅层细节特征和来自深层的上采样特征进行处理,缓解融合时的层间特征冲突,使深层抽象语义信息与浅层细粒度信息更有效融合。

3) 提出超级增强交并比(super enhanced intersection over union, SEIOU)损失计算方式,解决了完全交并比(complete intersection over union, CIOU)长宽比的模糊定义,并添加真实框和预测框的左上角及右下角之间的距离度量,综合了 2 框之间的距离和长宽关系,有效避免特殊情况下惩罚项失效的问题,使网络有更快的收敛速度和更好的定位结果。

4) 考虑到检测的快速性,本文在推理阶段将卷积层(Conv)与批量归一化(batch normalization, BN)层相融合,融合后的 Conv 包含 BN 层的特性,在不损失精度的情况下,推理速度得到显著提升。

1 YOLOv5 原理

YOLOv5 的结构可以分为主干网络、颈部及检测头 3 个部分。YOLOv5 采用 CSPDarknet53^[17]作为主干特征提取网络,对目标图像进行特征提取,提取到的特征称作特征层,在主干部分定义像素尺寸为 80×80、40×40 和 20×20 大小的 3 个特征层为有效特征层,提供不同尺度的特征信息。颈部作为特征融合部分,对来自主干的 3 个有效特征层的多尺度信息进行融合,路径聚合网络(path aggregation networks, PANet)^[18]结构先经上采样操作传递深层整体特征和语义信息,之后进行下采样传递浅层细节信息,同时结合横向连接最终实现不同层级特征间的有效融合。其中,横向特征和上、下采样特征采用拼接(Concat)方式进行融合,对特征矩阵在通道维度上直接叠加,增加描述图像本身的特征数。通过主干网络提取特征并进行特征融合后获得 3 个加强的有效特征层,每个特征层都有宽、高和通道数,将特征图看作多个特征点的集合,每个特征点都有通道数个特征,最后,通过检测头(Head)对特征点进行决策,判断特征点是否包含物体,并通过回归参数对先验信息进行调整从而获取最终的检测结果。YOLOv5 的整体网络结构如图 1 所示,其中, SPP 表示空间金字塔池化, CBS 模块包含卷积层、批归一化层和 Silu 激活函数。

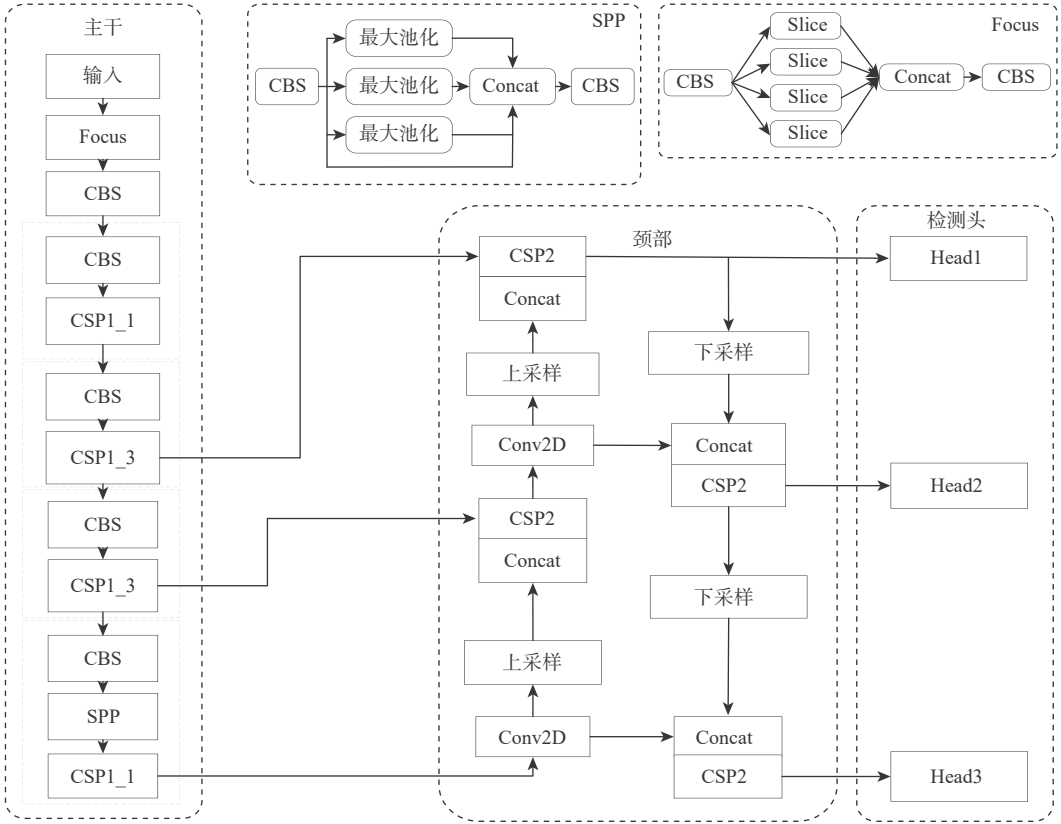


图 1 YOLOv5 整体网络结构

Fig. 1 Overall networks structure of YOLOv5

2 交通场景小目标检测算法

本文在比较网络检测的准确性、效率和模型大小的基础上,考虑到 YOLOv5-s 网络结构简单,易于训练,方便部署,有着广泛的应用背景,从而选取 YOLOv5-s 作为基准网络来完成交通场景小目标的检测任务。针对具体的检测需求,在 YOLOv5-s 基础上提出 FSM、EFM、SEIOU 等改进方案,改进后的网络结构如图 2 所示,其中, F_1 、 F_2 、 F_3 为特征输出。YOLOv5-s 的颈部仅通过 PANet 对来自主干的 3 个尺度的特征信息进行融合,改进后的网络在此基础上添加 FSM,不仅从主干网络更浅层获取更多的细节信息,而且通过感受野注意力模块 (receptive field attention module, RFAM) 对图像特征进行加权处理,扩大感受野,获取更多的上下文信息。此外,采用了浅层信息对相邻深层进行特征补充的融合策略,弥补细节特征的不足,并通过矩阵运算避免了融合带来的特征冗余。EFM 是对 PANet 融合深层上采样特征和横向浅层特征时 Concat 的替换。Concat 仅在通道维度上对特征矩阵直接叠加,增加描述图像的特征数,没有考虑不同层级间特征存在冲突,采用 EFM 模块对上采样特征和横向浅层特征进一步处理能缓解这一问题,使二者更有效融合。

2.1 特征补充模块

本文主要针对交通标志和交通灯等道路场景小目标进行检测,由于小目标具有分辨率低、视觉信息少的特点,相比大目标,小目标的检测需要更多的浅层细节特征。考虑到从更浅层获取附加细节特征能实现更多尺度的特征融合,此外,空洞卷积可以扩大小目标感受野,获取更多的上下文特征作为额外信息来指导小目标的检测,因此,在 YOLOv5-s 特征融合的基础上提出 FSM 补充浅层细节特征和上下文特征来改善小目标检测效果。首先,从图 2 的 D_2 部分开始引出有效特征层以获取更浅层细粒度特征;然后,经如图 3 所示的 RFAM 进行处理,将图像特征抽象为注意力值添加到原始的空间和信道特征中,并将处理后的加权特征图和原始特征输入 F_{in} 相加以保留更多的细粒度信息,之后将特征输出 F_{out} 经下采样操作后与相邻深层进行特征融合,使小目标的特征信息得到补充。

对于 RFAM,给定 $F_{in} \in \mathbf{R}^{C \times H \times W}$ 作为输入,RFAM 依次推出通道注意力 M_C 和空间注意力 M_S ,整个过程描述为

$$F_C = M_C(F_{in}) \otimes F_{in} \tag{1}$$

$$F_S = M_S(F_C) \otimes F_C \tag{2}$$

$$F_{out} = F_{in} \oplus F_S \tag{3}$$

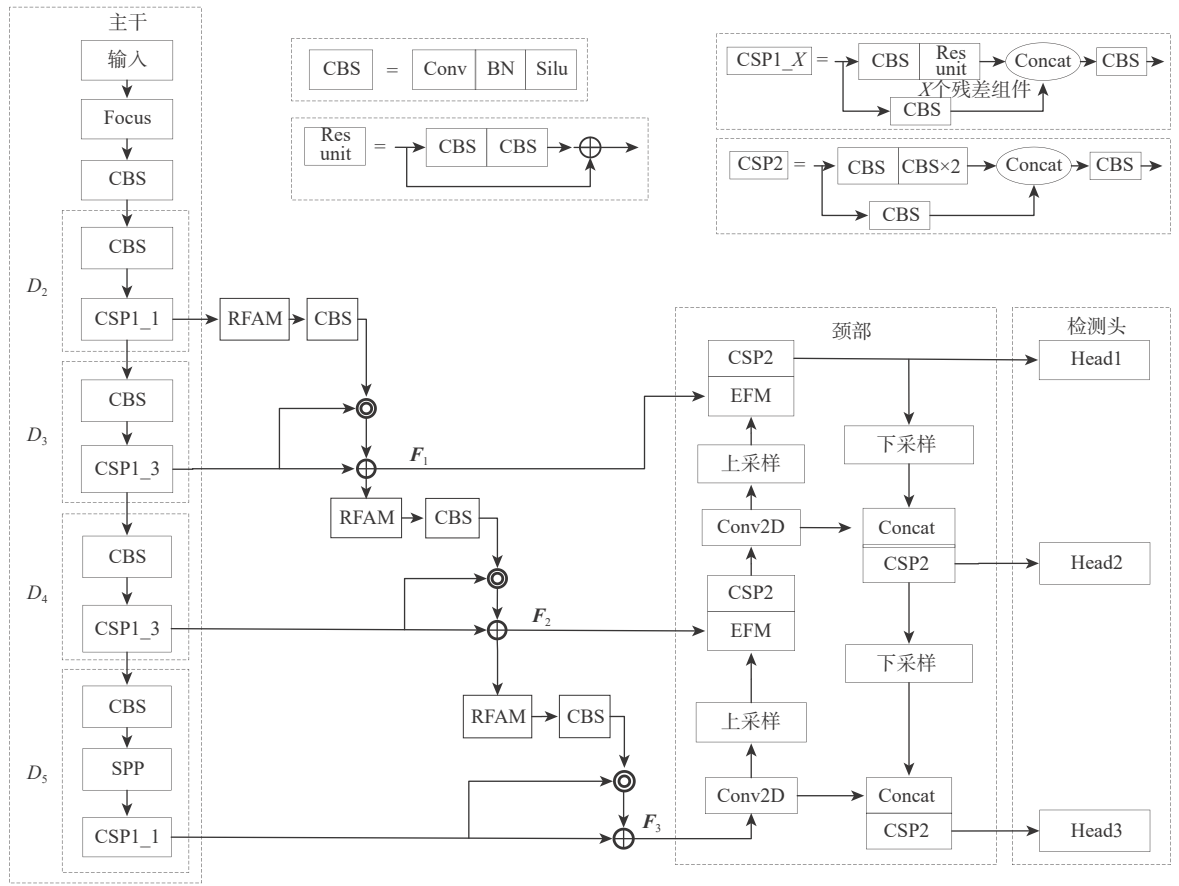


图 2 交通场景小目标检测网络

Fig. 2 Small target detection networks in traffic scenario

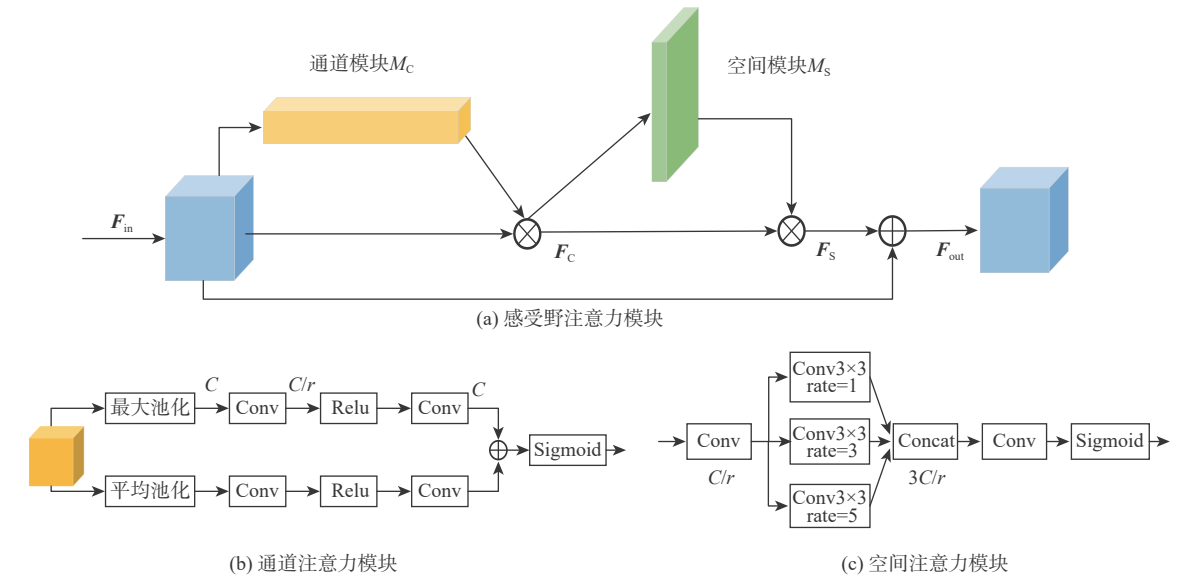


图 3 感受野注意力模块

Fig. 3 Receptive field attention module

式中： $\otimes$ 表示基于元素的乘法； $F_c \in \mathbf{R}^{C \times H \times W}$ 和 $F_s \in \mathbf{R}^{C \times H \times W}$ 分别为通道注意力和空间注意力的输出； $\oplus$ 表示基于元素的加法。

图 3 中， M_c 首先通过自适应平均池化和自适应最大池化聚合特征信息，沿着空间维度压缩特征，生成 $1 \times 1 \times C$ 的特征图 $F_{c_{avg}}$ 和 $F_{c_{max}}$ ，将二维特征通道变成具有全局感受野的实数；其次，经卷积操作先对通道降维到 C/r ，其中， r 为简约比；接着，再经卷积扩展回 C 通道，降低网络计算量的同时增加了非线性能力；最后，通过逐元素求和合并两特征图，再经 Sigmoid 函数得到 0~1 之间的权重系数，即每个特征通道的重要性，通过乘法逐通道加权到之前的

特征上完成通道维度上对原始特征的重标定。 M_C 部分计算式为

$$M_C(F_{in}) = \sigma(\text{MLP}(\text{AvgPool}(F_{in})) \oplus \text{MLP}(\text{MaxPool}(F_{in}))) \quad (4)$$

式中: σ 为 Sigmoid 函数; $\text{AvgPool}(F_{in})$ 和 $\text{MaxPool}(F_{in})$ 得到平均池化和最大池化的特征 F_{avg}^C 和 F_{max}^C ; MLP 表示通道降维并恢复的过程。

M_S 部分为进一步保留图像特征, 首先, 对输入特征图 $F_{in} \in \mathbf{R}^{C \times H \times W}$ 采用简约比 r 进行通道降维; 然后, 通过空洞卷积模块对特征图的空间权重进行学习; 最后, 经 1×1 卷积恢复通道数。空洞卷积有助于构建更有效的空间特征图, 更好地利用上下文信息, 在浅层特征中通过并行不同膨胀系数且公约数不大于 1 的空洞卷积扩大浅层小目标感受野, 学习注意分数来决定具有多个感受野的通道重要性, 保证在接下来的运算中以更少的噪声将浅层细节特征传递给相邻层, 以提高小目标的检测效果。 M_S 部分计算式为

$$M_S(F_C) = \sigma(f^{1 \times 1}(f^d(f^{1 \times 1}(F_C)))) \quad (5)$$

式中: $f^{1 \times 1}$ 表示 1×1 卷积运算; f^d 表示空洞卷积模块。

在常规的认知里, 特征融合能增强决策的预期目标特征, 但融合后的特征不仅包括期望, 还包括复杂背景噪声。浅层特征与深层特征融合时需要的仅仅是底层细粒度信息对相邻深层特征进行细节补充, 为避免融合带来的特征冗余, 将经 RFAM 处理过的浅层特征经卷积下采样后与相邻层进行矩阵乘法计算, 抑制浅层带来的背景噪声, 突出浅层关键信息对深层进行特征补充, 计算过程为

$$f_i = F_i \odot F_{i-1} \quad (6)$$

式中: F_i 表示从主干网络中得到的第 i 个有效特征层, $i=1,2,3$; $\odot$ 为哈达码积, 将计算后的结果 f_i 赋给相

邻深层通道 F_i , 如下:

$$F_i = F_i \oplus f_i \quad (7)$$

对主干网络引出的有效特征层进行该处理, 依次得到 3 个特征输出 F_1 、 F_2 、 F_3 作为新的有效特征层传入 FPN 进行后续特征融合操作。处理后的特征层具有更丰富的细节特征和上下文信息, 使得小目标检测性能得到有效提升。

2.2 有效融合模块

考虑到深层特征表示的更多是目标的整体特征和语义信息, 而浅层特征代表了目标的细节信息, 随着网络层的不断加深, 一方面网络获取更好的场景特征, 有助于区分目标与背景噪音, 另一方面, 在下采样的过程中会不断丢失细节信息, 不利于小目标的检测。因此, 在金字塔特征融合结构中, 将深层特征上采样后与横向浅层特征进行 Concat 操作, 逐层融合底层细节和深度语义信息, 实现不同层间的特征集成。然而考虑到不同检测层对应不同尺度的目标, 不难理解层间的特征融合会存在一定的信息冲突, 因此, 引入 EFM 模块对深层特征上采样过程中的 Concat 过程进行替换, 通过对上采样特征和横向浅层特征进一步处理, 合理权衡特征之间的关系以实现更有效融合的目的, 整体结构如图 4 所示。

在金字塔上采样带来深层语义信息的同时, 为避免深层的整体特征冗余对来自主干的横向浅层细节特征造成抑制, 采用图 4 中的第 2 部分, 在上采样时对深层特征进行处理。若将目标特征视为局部稀疏矩阵, 则特征在局部图像中具有奇异值, 对应着矩阵中隐含的重要信息, 且重要性和奇异值大小正相关。一般认为小奇异值由图像中的噪声引起, 并对其取 0 来去除噪声。因此, 采用全局最大池化汇聚特征, 在每个通道内对所有元素保留局

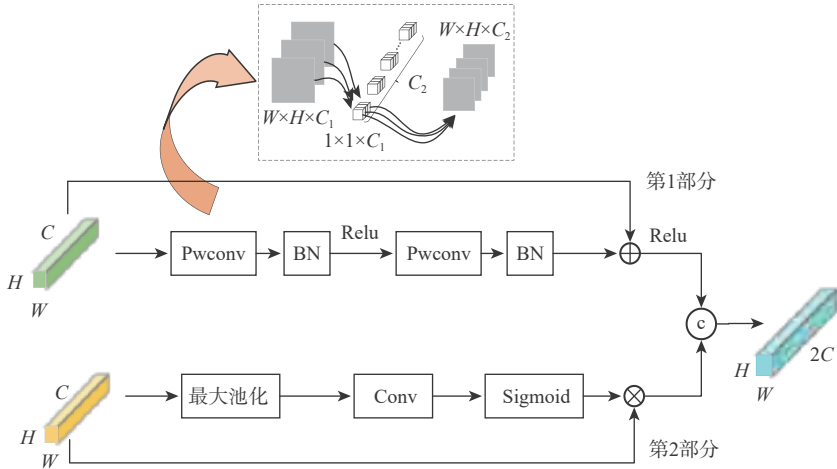


图 4 有效融合模块

Fig. 4 Effective fusion module

部最大值来代表目标整体特征,并能有效去除冗余噪声。池化后的特征经 1D 卷积进行学习,其中,卷积核的大小通过函数自适应变化,在网络的深层可以更多地跨通道交互。最后,经 Sigmoid 进行权重归一化处理,将归一化权重和原输入特征图逐通道相乘得到加权特征图,用作与横向特征 Concat 的基准。计算过程如下:

$$P_1 = \sigma(f(\tau(X))) \otimes X \quad (8)$$

式中: f 和 τ 分别表示 1D 卷积和全局最大池化。

在实际的检测过程中,目标在整个图像中占较小区域,浅层细节特征显得至关重要,因此,采用图 4 中的第 1 部分对融合中的横向有效特征层进行处理,增强目标细节特征。选择点态卷积(pointwise convolution, Pwconv)来聚合每个空间位置的局部上下文,使其与局部通道的空间信息相互作用,使网络更加关注具有局部高对比度的信息特征,以突出目标细微特征,在像素级对小目标特征进行增强,有效地解决了小目标像素和细节特征缺失的问题。计算过程如下:

$$P_2 = \beta(\text{BN}(f_{\text{PWC2}}(\beta(\text{BN}(f_{\text{PWC1}}(X))))) \oplus X) \quad (9)$$

式中: f_{PWC} 、 BN 和 β 分别表示点态卷积、批量归一化层和 Relu 激活函数。

对经 EFM 模块处理过的 P_1 与 P_2 进行 Concat 操作,将网络深层整体特征信息与浅层细节信息进行有效融合,进一步完善目标特征。

2.3 损失函数

损失函数用来度量模型预测值与真实值之间的差异程度。YOLOv5 的损失计算由分类损失,定位损失及置信度损失组成,置信度损失和分类损失采用二元交叉熵计算,而定位损失采用的是 CIOU 损失函数,计算过程如下:

$$L_{\text{CIOU}} = 1 - \Delta_2 = 1 - \left(\Delta_1 - \frac{\rho^2(b, b^{\text{gt}})}{c^2} - \alpha v \right) \quad (10)$$

式中: Δ_1 和 Δ_2 分别为 IOU 和 CIOU; b 和 b^{gt} 分别为预测框和真实框的中心点; c 为两框最小外接矩形的对角线长度; v 为长宽比的一致性; α 表示权衡参数,二者定义如下:

$$v = \frac{4}{\pi^2} \left(\arctan \frac{W^{\text{gt}}}{H^{\text{gt}}} - \arctan \frac{W}{H} \right)^2 \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{v}{(1 - \Delta_1) + v} \quad (12)$$

CIOU 虽然考虑了边界框回归的重叠面积、中心点距离、长宽比等因素,但式(11)中的 v 反映的是长宽比的差异,而不是真实框和预测框间实际的长宽差值,存在长宽比值相等时度量失效的问题。本文提出一种新的定位损失计算方法,与 CIOU 相

比,采用将长宽差异分开度量的方式,同时增加两框主对角之间距离的几何度量,弥补现有的几何度量在特殊情况下失效的情况,更好地促进定位损失的收敛和优化。计算方法如下:

$$\Delta_3 = \Delta_1 - \left(\frac{\rho^2(b, b^{\text{gt}})}{c^2} + \frac{\rho^2(W, W^{\text{gt}})}{C_w^2} + \frac{\rho^2(H, H^{\text{gt}}) + \rho^2(A, A^{\text{gt}}) + \rho^2(B, B^{\text{gt}})}{C_h^2} \right) \quad (13)$$

$$L_{\text{loc}} = 1 - \Delta_3 \quad (14)$$

式中: Δ_3 为 SEIOU; C_w 和 C_h 分别为预测框与真实框最小外接矩形的长和宽; $\rho(b, b^{\text{gt}})$ 为两框中心点间距; $\rho(W, W^{\text{gt}})$ 为两框宽度的差值; $\rho(H, H^{\text{gt}})$ 为两框长度的差值; $\rho(A, A^{\text{gt}})$ 为两框左上角间距, $\rho(B, B^{\text{gt}})$ 为两框右下角间距。

图 5 为 SEIOU 损失的边界框回归图,其中,黄色和蓝色虚线框分别为预测框和真实框,黑色实线框为两框最小外接矩形。由图 5 可知,本文提出的计算方法能兼顾重叠面积、中心点、长宽比等一系列度量,并通过分开计算长宽差异值弥补了 CIOU 有关长宽比的模糊定义,此外当预测框与真实框在没有完全重合的情况下, $\rho(A, A^{\text{gt}})$ 与 $\rho(B, B^{\text{gt}})$ 便不为 0,这大大降低了度量失效的概率,保证了惩罚项的有效性,获取更为精准的回归结果。

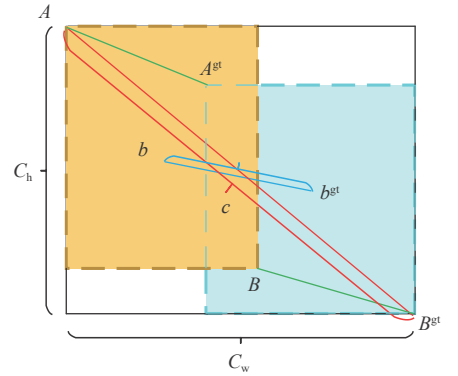


图 5 预测框回归

Fig. 5 Prediction box regression

网络整体的损失函数计算式为

$$L = \lambda_1 L_{\text{loc}} + \lambda_2 L_{\text{cls}} + \lambda_3 L_{\text{obj}} \quad (15)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为平衡系数; L_{loc} 、 L_{cls} 和 L_{obj} 分别为定位损失、分类损失和置信度损失。只针对正样本进行分类损失和定位损失的计算,置信度损失针对所有样本进行。

3 实验与结果分析

3.1 实验环境与参数设置

本文采用 Pytorch 深度学习框架搭建网络,操

作系统为 Window11, CPU 为 i5-12600KF, GPU 为 NVIDIA GeForce RTX4070Ti, 显存大小为 12 GB。CUDA 版本为 12.0, Pytorch 版本为 1.9.1, Python 版本为 3.7.11。实验共训练 100 个 epoch, Batchsize 设置为 16, IOU 阈值设置为 0.5, 初始学习率为 1×10^{-2} , 学习率下降方式为 step, 采用随机梯度下降(stochastic gradient descent, SGD)法优化学习率, 权值衰减为 5×10^{-4} , 动量为 0.937。

3.2 数据集

本文主要基于 CCTSDB^[19] 和 S2TLD^[20] 数据集开展实验。其中, CCTSDB 数据集分为指示、禁止、警告 3 个类别。根据目标检测领域 COCO 数据集的评价指标, 小目标是指目标的真实框像素

面积小于 $32\text{像素}\times32\text{像素}$ 的目标, 中目标是指像素面积在 $[32\text{像素}\times32\text{像素}, 96\text{像素}\times96\text{像素}]$ 范围的目标, 大目标是指像素面积大于 $96\text{像素}\times96\text{像素}$ 的目标。图 6 为 CCTSDB 训练集的目标大小分布情况, 可以看出, 真实框主要集中在 $[0\text{像素}, 32\text{像素}\times32\text{像素}]$ 大小, 又以 $[16\text{像素}\times16\text{像素}, 32\text{像素}\times32\text{像素}]$ 为主, 属于小目标范畴。此外, 采用 S2TLD 数据集中 $1\,280\text{像素}\times720\text{像素}$ 大小的原始图片开展实验, 分为红、黄、绿、关 4 类。为进一步验证本文网络对交通场景小目标的检测效果, 评估了在 TLD 数据集上的检测效果, TLD 数据集是在真实交通环境中采集图像自制的交通灯数据集, 包括在郊区和城市道路的白天和黑夜的数据, 分为红、黄、绿、关 4 类。

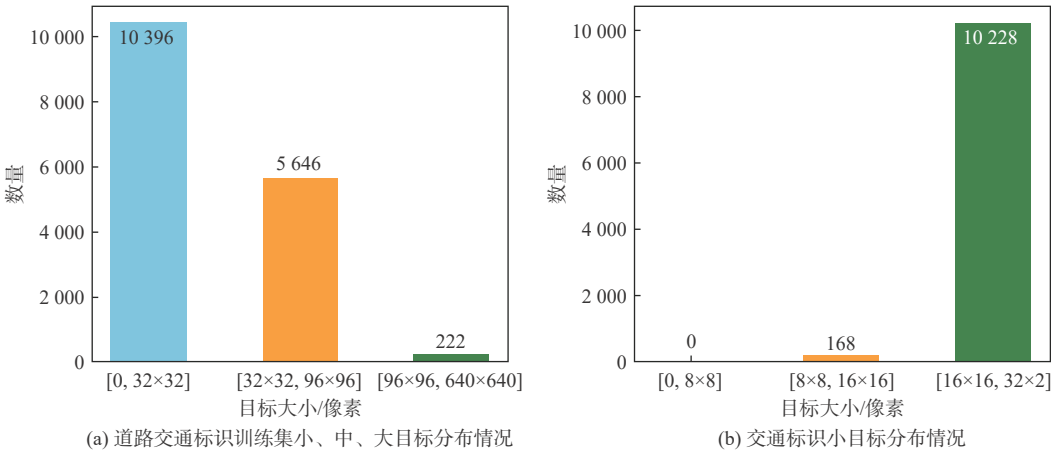


图 6 CCTSDB 训练集目标大小分布
Fig. 6 Target size distribution of CCTSDB training set

3.3 评价指标

本文采用准确率 P 、召回率 R 、均值平均精度 (mean average precision, mAP)、每秒帧数 (frames per second, FPS) 等指标来评估模型的性能。根据 IOU 将预测框分为正确正样本 (true positives, TP)、正确负样本 (true negatives, TN)、错误正样本 (false positives, FP) 和错误负样本 (false negatives, FN)。 P 和 R 计算式分别为

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \tag{16}$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \tag{17}$$

$$A_p = \int_0^1 P(R) dR \tag{18}$$

$$m_{AP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{p_i} \tag{19}$$

式中: N 为目标类别数; $P(R)$ 指的是基于 P 和 R 的曲线; A_p 为曲线下的面积, 对所有类别的 A_p 值求平均得到 m_{AP} 。

3.4 CCTSDB 数据集检测效果

3.4.1 CCTSDB 数据集消融实验

在 CCTSDB 数据集上对交通标志进行检测, 将改进模块依次加到网络中, 训练结果如表 1 所示。可以看出, 单个模块加入网络中时, mAP 相比 YOLOv5-s 分别提高了 1.52%、1.26%、0.31%, 说明了部署单个模块的有效性, 将所有改进都加入到网络中时, mAP 达到 93.04%, 比原网络提高了 2.54%, 说明了本文算法的整体有效性。

本文通过引入 FSM 等有针对性的改进措施解

表 1 CCTSDB 数据集消融实验				
Table 1 Ablation experiments of CCTSDB dataset				
YOLOv5-s	FSM	EFM	SEIOU	mAP/%
√				90.50
√	√			92.02
√		√		91.76
√			√	90.81
√	√	√		92.56
√	√	√	√	93.04

决小目标检测困难的问题,训练结果如表 2 所示,在 COCO 的评价指标下将图像分为小、中、大 3 类进行检测效果展示,其中,AP 和 AR 分别表示平均准确率和平均召回率。可以看出,在 IOU=0.5:0.95 的阈值条件下,改进前后小目标的检测效果有了明显提升,AP 和 AR 分别提升了 3.4% 和 2%,基本满足小目标检测的要求。

表 2 CCTSDB 数据集上不同尺度目标检测结果

Table 2 Detection results of different scale targets on CCTSDB dataset

算法	AP/%			AR/%		
	小目标	中目标	大目标	小目标	中目标	大目标
YOLOv5-s	38.5	67.4	83.5	47.5	74.4	89.5
本文算法	41.9	68.4	84.9	49.5	75.0	89.3

图 7 对 YOLOv5-s 算法和本文算法的检测效果进行展示对比。

从第 1 行对比图可以看出,本文算法通过获取更多的上下文信息辅助判断可以有效地避免误检,从第 2 行、第 3 行对比图可以看出,补充更浅层的细节特征能缓解漏检问题,对小目标的检测有较好的改善。虽然本文算法相比原网络有一定改善,但在第 3 行仍漏检一个目标,这是因为恶劣天气会影响图像采集质量,当目标又排列密集时会对检测精度产生一定影响。

3.4.2 CCTSDB 数据集不同算法对比实验

在 CCTSDB 数据集上将本文算法与 Faster R-CNN、Efficientdet^[21]、YOLOv8-n 和 YOLO-FR^[16]等算法的检测结果进行对比分析,验证本文算法对交通标志检测的有效性。实验在相同的参数设置和操作系统下展开,检测结果如图 8 所示。

由图 8 可知,本文算法与 Faster R-CNN 及一系列轻量化算法相比,有着很好的精度优势。YOLO-



图 7 CCTSDB 数据集上检测效果对比图
Fig. 7 Comparison of detection results on CCTSDB dataset

FR 算法通过特征重组下采样,同时利用内容感知特征重组 (content-aware reassembly of features, CARAFE) 算子完成特征融合上采样来减少特征损失,通过实验结果可以看出,在 CCTSDB 数据集上效果并不理想。

表 3 给出了不同算法的参数对比,结合图 8 进行分析。本文算法与 Faster R-CNN 算法、Efficientdet 算法、YOLOx-s 算法^[22]及 YOLO-FR 算法相比,在检测速度为 113 帧/s 占优的前提下,检测精度也取得不错的效果,与 YOLOv4-tiny 算法、YOLOv7-tiny 算法、YOLOv8-n 算法等轻量化网络算法,虽然检

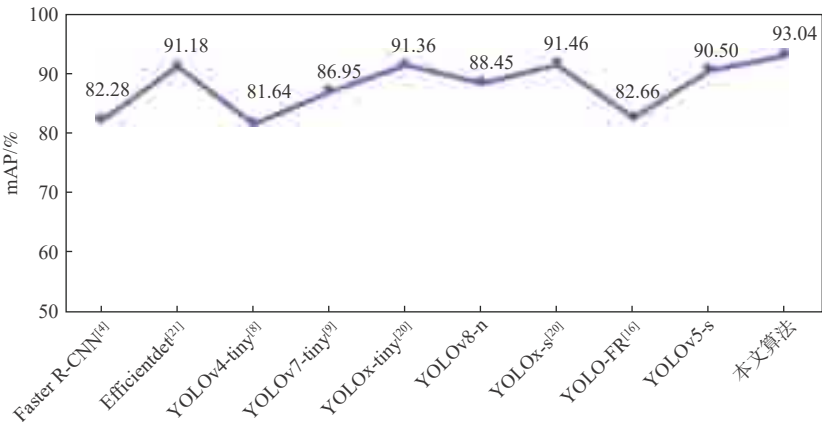


图 8 不同算法在 CCTSDB 数据集上检测结果
Fig. 8 Detection results of different algorithms on CCTSDB dataset

表 3 不同算法参数对比			
Table 3 Comparison of different algorithm parameters			
算法	mAP/%	参数量	检测速度/ (帧·s ⁻¹)
Faster R-CNN ^[4]	82.28	28.4×10 ⁶	29
Efficientdet ^[21]	91.18	6.5×10 ⁶	34
YOLOv4-tiny ^[8]	81.64	5.9×10 ⁶	271
YOLOv7-tiny ^[9]	86.95	6.0×10 ⁶	140
YOLOv8-n	91.36	3.0×10 ⁶	146
YOLOx-tiny ^[20]	88.45	5.0×10 ⁶	103
YOLOx-s ^[20]	91.46	8.9×10 ⁶	96
YOLO-FR ^[16]	82.66	6.5×10 ⁶	94
YOLOv5-s	90.50	7.1×10 ⁶	118
本文算法	93.04	8.8×10 ⁶	113

测速度稍慢,但在检测精度上分别有 11.4%、6.09%、1.68% 的优势。从参数量的角度分析,本文算法相比原 YOLOv5-s 算法以轻微的代价取得了与 YOLOx 算法、Faster R-CNN 算法、Efficientdet 算法相比时的检测速度与精度优势,与 YOLOv4-tiny 算法、YOLOv7-tiny 算法、YOLOv5-s 算法相比时的精度优势。

从推理速度的角度分析,该参数受模型并行化程度、内存访问率、模型分支数量等多个因素影响。通过表 3 可以看出,虽然 Efficientdet 算法参数量少,但运行速度较慢。分析网络结构可知, Efficientdet 算法以 Efficientnet 为主干网络、BiFPN 为特征融合部分,与常规的 FPN 相比, BiFPN 的构建更加复杂,不仅通过 5 个特征层进行多次采样和堆叠操作,而且在特征融合部分对 BiFPN 进行重复操作。

对 Efficientdet 算法和本文算法的 memory 和 MemR+MemW 进行计算,结果如表 4 所示。其中, memory 是节点推理时所需要的内存大小,直接影响模型可以处理的数据量和速度,如果内存不足,模型需要频繁进行内存交换,较大的内存交换量可能会成为性能瓶颈,导致模型推理速度下降。MemR+MemW 表示 MemRead 和 MemWrite,是网络运行时内存读写大小,如果读写较大导致速度缓慢,节点计算将受到限制,也会使得模型推理速度下降,影响模型性能。

表 4 内存相关参数量对比		
Table 4 Comparison of memory-related parameters		
算法	memory/MB	(MemR+MemW)/MB
Efficientdet ^[21]	673.26	1 320.00
本文算法	333.75	558.43

由表 4 可以看出,相比于本文算法, Efficientdet

算法的模型结构较为复杂,需要占用更多的内存,因此,虽然其参数量很小,但检测速度仍会受影响。而本文算法经 FSM、EFM 改进小目标检测性能,同时在推理阶段将 Conv 与 BN 层相融合,在不损失精度的情况下,保证了模型的推理速度,二者之间得到了很好的平衡,极大地丰富了网络的应用范围。

3.5 S2TLD 数据集检测效果

3.5.1 S2TLD 数据集消融实验

在 S2TLD 数据集上验证本文算法对交通灯的检测效果,训练结果如表 5 所示。随着改进模块加入到网络中,精度不断提升,最终达到 86.79%,相比原网络提高了 3.62%。

表 5 S2TLD 数据集上的消融实验				
Table 5 Ablation experiments on S2TLD dataset				
YOLOv5-s	FSM	EFM	SEIOU	mAP/%
√				83.17
√	√			83.35
√	√	√		86.37
√	√	√	√	86.79

表 6 为 IOU=0.5:0.95 的阈值条件下算法改进前后不同尺度目标的效果对比,可以看出小目标的 AP 和 AR 分别提升了 4% 和 3.1%。

表 6 S2TLD 数据集上不同尺度目标检测结果						
Table 6 Detection results of different scale targets on S2TLD dataset						
算法	AP/%			AR/%		
	小目标	中目标	大目标	小目标	中目标	大目标
YOLOv5-s	30.4	53.2	76.7	42.6	63.8	78.1
本文算法	34.4	54.4	76.3	45.7	64.6	81.2

图 9 展示了算法改进前后对交通灯的检测效果。可以看出,针对原网络检测过程中小目标分辨率低,缺乏像素信息的问题,本文算法通过补充目标细节特征、获取上下文信息辅助检测、采用有效特征融合策略等措施,有效避免漏检,提升了检测效果。但在第 3 行低能见环境会进一步减弱小目标的特征信息,对检测效果造成影响,导致本文算法没能完全避免漏检。

3.5.2 S2TLD 数据集不同网络对比实验

将本文算法在 S2TLD 数据集上与 YOLOv4-tiny, YOLOv8-n 等轻量网络进行对比,分析各类别及整体的检测精度的变化趋势,检测效果如图 10 所示。

由图 10 中折线图的整体趋势可以发现,与 YOLOv4-tiny 算法和 YOLOv7-tiny 算法相比,本文



图 9 S2TLD 数据集上检测效果对比

Fig. 9 Comparison of detection results on S2TLD dataset

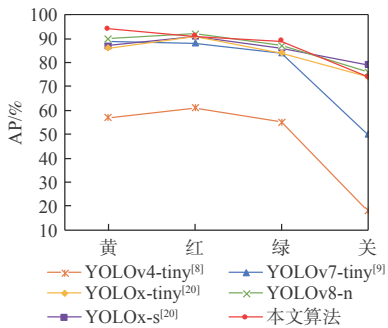


图 10 不同算法在 S2TLD 数据集上检测结果

Fig. 10 Detection results of different algorithms on S2TLD dataset

算法在各类别上检测效果差别不大,解决了“关”类的目标特征不明显导致的精度过低的问题,体现了本文算法的稳定性,能更好地应对各种复杂的路况。与包括 YOLOv8-n 算法在内的其他算法相比,本文算法在黄、绿这 2 类的检测精度上都有一定优势。

3.6 TLD 数据集检测效果

为进一步验证算法在复杂交通环境及不同光照条件下的稳定性,在 TLD 数据集上对交通灯进行检测。训练结果如表 7 所示,表 7 在不同类别及整体 mAP 上对算法改进前后的检测效果进行对比,可以看出,各类别的 AP 值分别提升了 2.42%、5.27%、3.86%、5.77%。mAP 达到 82.34%,提升了

表 7 算法改进前后 TLD 数据集上的检测结果					
Table 7 Detection results on TLD dataset before and after algorithm improvement					
算法	AP/%				mAP/%
	红	绿	黄	关	
YOLOv5-s	87.56	80.21	74.71	69.55	78.01
本文算法	89.98	85.48	78.57	75.32	82.34

4.33%,检测效果有了显著的提升。

在 TLD 数据集上对改进前后不同尺度目标的检测效果进行对比。如表 8 所示,在 IOU=0.5:0.95 的阈值条件下,可以看出,虽然大目标上的 AP、AR 略有降低,但在小目标上 AP 和 AR 分别提升了 2.2% 和 1.5%,在中等目标上 AP 和 AR 分别提升了 2.6% 和 1%。考虑到交通灯数据以小目标居多,且整体 mAP 有较大提升,因此,仍能很好地满足检测需求。

表 8 TLD 数据集上不同尺度目标检测结果						
Table 8 Detection results of different scale targets on TLD dataset						
算法	AP/%			AR/%		
	小目标	中目标	大目标	小目标	中目标	大目标
YOLOv5-s	29.3	50.0	62.3	42.9	62.5	72.3
本文算法	31.5	52.6	58.5	44.4	63.5	65.3

图 11 展示了本文算法的检测效果对比,可以看到,在郊区及城市道路的白天、黑夜环境下,都能取得很好的检测效果,有效避免漏检情况。



图 11 TLD 数据集上检测效果对比

Fig. 11 Comparison of detection results on TLD dataset

3.7 PASCAL VOC 数据集实验结果

为进一步验证本文算法的有效性,在通用数据

集 PASCAL VOC 上进行试验验证, 实验结果如表 9 所示。

由表 9 可知, 在 PASCAL VOC 数据集的 20 个类别中, 本文算法在自行车、鸟、船等 15 个类别上

有较好的精度提升, 虽然在飞机等 5 个类别上与原算法存在一些微小差距, 但可以看出, 对最终精度影响很小, mAP 提升了 2.01%, 证明了本文算法的整体有效性。

表 9 算法改进前后 PASCAL VOC 数据集上的检测结果

Table 9 Detection results on PASCAL VOC dataset before and after algorithm improvement										
算法	AP/%									
	飞机	自行车	鸟	船	瓶	巴士	汽车	猫	椅子	牛
YOLOv5-s	92.31	87.58	85.12	70.27	68.97	92.96	91.26	84.16	67.57	85.74
本文算法	91.95	90.13	92.32	74.15	69.61	95.42	91.02	86.89	69.72	89.46

算法	AP/%										mAP/%
	餐桌	狗	马	摩托车	人	盆栽	羊	沙发	火车	电视监视器	
YOLOv5-s	60.81	82.28	92.67	83.67	92.60	59.70	87.68	75.89	86.50	89.42	81.84
本文算法	62.11	85.22	95.06	85.08	92.52	63.05	90.84	75.80	88.02	88.75	83.85

3.8 将改进模块部署到 YOLOv7-tiny

为进一步验证本文提出的改进模块的有效性和普适性, 将 FSM、EFM 等模块依次部署到 YOLOv7-tiny 算法中。首先, 在 YOLOv7-tiny 的主干网络 and 原 PANet 融合网络之间, 经 FSM 从主干网络更浅层引出特征层, 对相邻深层进行细节补充后得到 3 个新的有效特征层, 传入 PANet 进行后续特征融合的操作; 此外, 采用 EFM 模块对原网络融合主干特征和上采样信息的 concat 部分进行替换, 最后, 用 SEIOU 替换 YOLOv7-tiny 的原损失函数。在 CCTSDB 数据集上检测效果如表 10 所示。

由表 10 可知, 相比 YOLOv7-tiny 原网络, 部署单个模块检测精度分别提升了 2.98%, 1.56% 和 0.58%, 整体提高了 3.98%, 体现了本文算法的有效性和普适性。表 11 给出不同尺度目标检测结果对

表 10 YOLOv7-tiny 网络消融实验

Table 10 Ablation experiment of YOLOv7-tiny network				
算法	AP/%			mAP/%
	禁止	指示	警告	
YOLOv7-tiny	88.41	88.00	84.45	86.95
+ FSM	90.42	89.09	90.28	89.93
+ EFM	89.80	89.07	86.66	88.51
+ SEIOU	88.64	88.88	85.07	87.53
+ FSM+ EFM	91.77	90.18	90.37	90.77
+FSM+EFM+SEIOU	90.80	90.62	91.38	90.93

表 11 网络改进前后不同尺度目标检测结果

Table 11 Detection results of different scale targets before and after network improvement						
算法	AP/%			AR/%		
	小目标	中目标	大目标	小目标	中目标	大目标
YOLOv7-tiny	34.9	67.1	83.3	44.4	74.8	89.7
+FSM+EFM+SEIOU	41.0	67.6	82.1	49.6	74.8	88.5

比, 可以看出, 在 IOU=0.5:0.95 的阈值条件下, 小目标的 AP 和 AR 分别提升了 6.1% 和 5.2%, 改善了交通场景小目标的检测效果, 证明了本文算法具有较好的泛化性。

4 结 论

1) 分析实验结果可看出, 本文算法在 CCTSDB、S2TLD 和 TLD 数据集上的 mAP 分别达到了 93.04%、86.79%、82.34%, 相比原 YOLOv5 算法分别提高了 2.54%、3.62%、4.33%, 检测速度达到了 113 帧/s, 在检测速度和精度上都有很好的表现。

2) 本文算法在 CCTSDB、S2TLD 和 TLD 数据集上相比原算法, 小目标的 AP 值分别提升了 3.4%、4%、2.2%, 小目标检测效果有明显提升。

3) 本文算法在 PASCAL VOC 通用数据集上相比原算法在 15 个类别上都有较好的精度优势, mAP 提高了 2.01%, 证明了本文算法的有效性。

4) 将本文的改进模块添加到 YOLOv7-tiny 算法, mAP 提高了 3.98%, 小目标的 AP 提升了 6.1%, 证明了改进的泛化性和可靠性。

考虑到交通场景中的遮挡目标存在像素重叠问题, 会进一步加大检测难度, 后续研究会针对该类问题做进一步改进。

参考文献 (References)

[1] WANG Q Y, LI X Y, LU M. An improved traffic sign detection and recognition deep model based on YOLOv5[J]. IEEE Access, 2023, 11: 54679-54691.

[2] LIU C S, LI S, CHANG F L, et al. Machine vision based traffic sign detection methods: review, analyses and perspectives[J]. IEEE Access, 2019, 7: 86578-86596.

[3] 孙迎春, 潘树国, 赵涛, 等. 基于优化 YOLOv3 算法的交通灯检测[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 143-151.

1026

北京航空航天大学学报

2026年

SUN Y C, PAN S G, ZHAO T, et al. Traffic light detection based on optimized YOLOv3 algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 143-151(in Chinese).

[4] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137-1149.

[5] HE K M, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2980-2988.

[6] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[C]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV. Beilin: Springer, 2014: 346-361.

[7] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[EB/OL]. (2018-04-08)[2024-01-02]. <https://arxiv.org/abs/1804.02767>.

[8] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection[EB/OL]. (2020-04-23) [2024-01-02]. <http://arxiv.org/abs/2004.10934>.

[9] 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.

[10] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multi-box detector[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2016: 21-37.

[11] 井方科, 任红格, 李松. 基于多尺度特征融合的小目标交通标志检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(12): 372-380.

JING F K, REN H G, LI S. Small object traffic sign detection based on multi-scale feature fusion[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2024, 61(12): 372-380(in Chinese).

[12] 钱伍, 王国中, 李国平. 改进 YOLOv5 的交通灯实时检测鲁棒算法[J]. *计算机科学与探索*, 2022, 16(1): 231-241.

QIAN W, WANG G Z, LI G P. Improved YOLOv5 traffic light real-time detection robust algorithm[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2022, 16(1): 231-241(in Chinese).

[13] YAO Y B, HAN L, DU C J, et al. Traffic sign detection algorithm based on improved YOLOv4-Tiny[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2022, 107: 116783.

[14] SHI Y L, LI X D, CHEN M M. SC-YOLO: a object detection model for small traffic signs[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 11500-11510.

[15] LI J Y, LIU C N, LU X C, et al. CME-YOLOv5: an efficient object detection network for densely spaced fish and small targets[J]. *Water*, 2022, 14(15): 2412.

[16] MOU X G, LEI S, ZHOU X. YOLO-FR: a YOLOv5 infrared small target detection algorithm based on feature reassembly sampling method[J]. *Sensors*, 2023, 23(5): 2710.

[17] WANG C Y, MARK LIAO H Y, WU Y H, et al. CSPNet: a new backbone that can enhance learning capability of CNN[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1571-1580.

[18] LIU S, QI L, QIN H F, et al. Path aggregation network for instance segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 8759-8768.

[19] ZHANG J M J, ZOU X, KUANG L D, et al. CCTSDB 2021: a more comprehensive traffic sign detection benchmark[J]. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 2022, 12: 23.

[20] YANG X, YAN J C, LIAO W L, et al. Scrnet++: detecting small, cluttered and rotated objects via instance-level feature denoising and rotation loss smoothing[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 45(2): 2384-2399.

[21] TAN M X, PANG R M, LE Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 10778-10787.

[22] CE Z, LIU S T, WANG F, et al. YOLOX: exceeding YOLO series in 2021[EB/OL]. (2021-07-18)[2024-01-02]. <https://arxiv.org/abs/2107.084>.

Small target detection algorithm for traffic scenes based on improved YOLOv5-s

WANG Kun^{*}, FENG Kangwei

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A traffic scene tiny target detection method based on enhanced YOLOv5-s was presented to address the issue that the properties of small targets in traffic scenes, such as traffic signs and traffic lights, are not readily apparent. Firstly, a feature supplement module (FSM) was designed to supplement the features of the adjacent deep detection layers by further obtaining the shallow details, which effectively improved the detection effect of small targets, and avoided feature redundancy by matrix operation between adjacent layers. Second, in order to reduce feature conflict and improve the effectiveness of the pyramid feature fusion, an effective fusion module (EFM) was created to handle the horizontal shallow feature and the upsampled feature, respectively. Then, the super enhanced intersection over union (SEIOU) loss calculation method was proposed to improve the regression effect and detection accuracy by adding the distance measurement between the main diagonal of the ground truth box and the prediction box. Finally, experiments were carried out on CCTSDB, S2TLD, the Traffic lights dataset and the PASCAL VOC dataset. According to the results, the proposed algorithm’s accuracy has increased by 2.54%, 3.62%, 4.33%, and 2.01%, respectively, and its detection speed has reached 113 frames per second, making it appropriate for detecting jobs in real-world traffic situations.

Keywords: YOLOv5-s algorithm; small target detection; feature supplement; feature fusion; loss function

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0064

折叠翼飞行器的模型设计与气动特性仿真分析

胡文华^{1,2}, 刘文举^{1,2}, 吴瑞琴^{1,2,*}, 陈三亚^{1,2}, 冯晶晶^{1,2}, 吴霞³

(1. 天津理工大学 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384; 2. 天津理工大学 机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384; 3. 天津航天机电设备研究所, 天津 300301)

摘 要: 变体飞行器在飞行过程中的构型改变、弹性变形及流场之间相互耦合, 其气动特性受到显著影响。针对折叠翼变体飞行器的机翼折展运动导致的气动特性变化和机翼弹性变形问题, 开展折叠翼的气动弹性仿真研究。采用翼身融合的三角翼方案, 建立三维模型并制作实物模型, 验证机翼的构型改变功能。简化模型并划分网格, 设置流固耦合仿真环境, 利用单向流固耦合仿真分析气流迎角、气流速度对折叠翼的升阻力特性和弹性变形的耦合影响, 开展双向流固耦合仿真, 基于机翼剖面压力分析折展运动对机翼表面压力分布的影响, 研究机翼构型改变、弹性变形及流场环境的耦合效应。研究发现: 折叠翼变体飞行器的气动特性及弹性变形与气流迎角、气流速度、机翼折展角度及折展速度都有关; 折展速度对折叠翼的气动特性和弹性变形有重要影响, 快速折展比慢速折展导致更显著的机翼气动特性变化和弹性变形。研究结果对折叠翼变体飞行器的气动特性分析、机翼弹性变形抑制, 以及飞行控制器设计有重要指导意义。

关 键 词: 折叠翼; 流固耦合; 折展运动; 气动特性; 仿真分析

中图分类号: V278⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1028-10

随着材料和飞控手段革新, 航空技术发展迅速^[1], 整机气动外形可变的变体飞行器引起了众多学者的关注^[2-3]。变体飞行器有多种类型, 常见的变体方式是机翼的大幅度变形, 如变后掠翼^[4]、伸缩翼^[5]、折叠翼^[6]等。变形机翼能够主动调节自身形状以改善飞行器任务适应性, 是飞行器设计的研究前沿^[7]。Parancheerivilakkathil 等^[8]提出一种综合变展长和变翼梢的多态变体机翼, 并制作了机翼实物。Ashir 等^[9]利用形状记忆合金和纤维增强塑料开发了自适应可变形机翼, 以电流大小和加热时间作为变量进行了机翼变形实验。田大可等^[10]基于等边 Bennett 机构提出了变形翼机构设计方案, 建立了三维模型及虚拟样机, 制作了样机并进行了实验。孙冰等^[11]为一种可变展长和弦长的变体飞行

器设计了俯仰控制系统的时变抗干扰观测器和鲁棒控制器。冯文正等^[12]通过改变飞行器的后掠角和翼型厚度, 研究了组合变形对机翼气动特性的影响。喻世杰等^[13]针对后缘连续变弯度的变体机翼颤振问题, 提出了一种参数化气动弹性建模方法。变体飞行器的设计需要综合考虑气动、结构及控制等多个目标, 但其气动特性分析是首要解决的问题^[14]。

折叠翼飞行器通过机翼折展来改变自身构型, 以适应不同的飞行任务, 是极具发展前景的变体飞行器^[15-16]。在折展过程中折叠翼发生弹性变形和大幅度构型改变, 使得折叠翼飞行器的动力学特性变得更加复杂, 其弹性变形、构型改变和流场相互耦合^[17]。偶极子网格法常被用来构建折叠翼的参数

收稿日期: 2024-01-28; 录用日期: 2024-05-24; 网络出版时间: 2024-06-06 11:01

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240605.1337.001

基金项目: 国家自然科学基金(11702188, 12002236, 12072233)

*通信作者. E-mail: ruiqinwu@163.com

引用格式: 胡文华, 刘文举, 吴瑞琴, 等. 折叠翼飞行器的模型设计与气动特性仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1028-1037. HU W H, LIU W J, WU R Q, et al. Model design and aerodynamic characteristics simulation analysis of fold-wing aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1028-1037 (in Chinese).

化气动弹性模型,但其是基于平面假设的方法^[18]。升力面法也可用于建立折叠翼构型改变运动时的气动力模型,但忽略了机翼厚度的影响^[19]。变体飞行器的受力和变形情况复杂,其气动特性分析通常需要借助数值方法^[20]。Ajaj 等^[21]调研了变形飞行器的气动弹性研究,认为数值方法、仿真软件与实验是常用的有效方法。Huang 等^[22]给出了折叠翼的参数化气动伺服弹性建模方法,并利用商业软件进行了验证。徐浩等^[23]整合了机械系统动力学自动分析(automatic dynamic analysis of mechanical systems, ADAMS)、气动计算程序及飞行控制技术,搭建了折叠翼的气动弹性仿真平台。Wen 等^[24]利用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)提出了可随折叠角变化的气动参数模型,研究了折叠翼梢变体飞行器的气动特性。张贺等^[25]针对变构型飞行器开发了能够与 CFD 求解器联合求解的开源多刚体动力学软件。现有研究工作大多是用近似理论分析变体飞行器的气动弹性问题,或者是关于刚性机翼构型改变时的气动特性和柔性机翼固定构型时的流固耦合(fluid-structure interaction, FSI)特征。折叠翼飞行器在飞行过程中既有机翼固定状态,也有机翼折展运动状态。这 2 种工作状态的气动特性都值得深入研究,尤其是构型改变时,机翼的折展运动、弹性变形及流场不可避免地相互耦合,需要利用双向流固耦合方式分析机翼的气动特性。

折叠翼飞行器是新型飞行器,开展不同工况下折叠翼的气动特性研究,具有重要的工程价值。本文针对机翼折展运动、弹性变形及流场的耦合气动弹性问题,基于三角翼方案建立折叠翼可变体飞行器三维模型,制作实物模型,验证机翼折展功能。简化模型并划分网格,利用单向流固耦合仿真分析机翼的升阻力特性和弹性变形。搭建双向流固耦合仿真环境,添加折展转动函数,调节流场动网格,对机翼折展时的气动特性进行仿真,利用流场压力云图和机翼剖面压力分析机翼压力分布规律,基于云图分析机翼弹性变形,探索机翼折展运动对其气动特性的影响规律。本文研究结果对折叠翼变体飞行器的机翼弹性变形抑制及飞行控制器设计有重要指导意义。

1 折叠翼变体飞行器模型

基于三角翼方案,设计如图 1 所示的折叠翼。其中,机身长为 1.1 m,翼展为 1.9 m,后掠角为 33°,翼面积为 0.56 m²。令折叠翼的内翼、中翼和外翼之间铰接,内翼段和机身融合。机翼 3 段之间可以

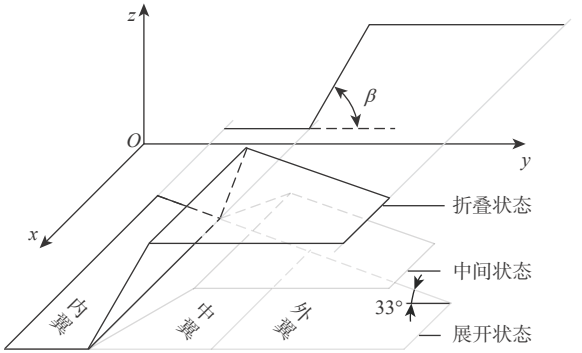


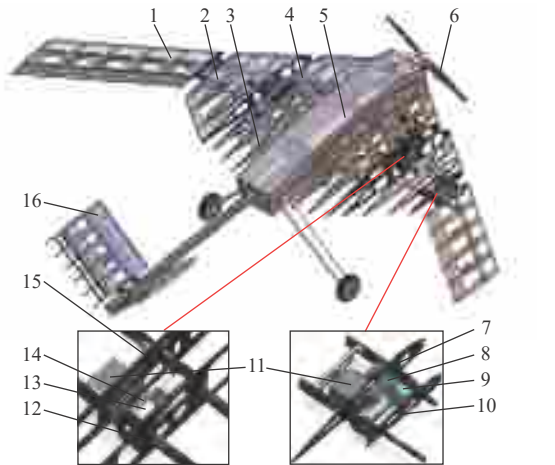
图 1 折叠翼示意图

Fig. 1 Schematic diagram of folding wing

转动,转动时设定外翼和内翼始终平行,呈“Z”字型。令中翼与内翼夹角 $\beta=0^\circ$ 为折叠翼的完全展开状态, $\beta=60^\circ$ 时为完全折叠状态。

1.1 三维模型设计

利用 Solidworks 建立变体飞行器的三维模型,如图 2 所示。考虑试飞实验,为增强飞行稳定性,对飞行器模型加装“V”尾结构。飞行器内翼与机身之间通过 2 根碳管固连。关于内翼和中翼之间的折叠机构,考虑到力矩大小、结构紧凑和传动效率等因素,选用蜗轮蜗杆传动方式。安装在内翼侧的舵机通过舵盘连接将力和运动传递给蜗杆,再由蜗杆传递给蜗轮,蜗轮固定在中翼上,进而完成内翼和中翼之间的相对转动。外翼所受载荷较小,因此,中翼和外翼之间采用齿轮传动。舵机带动主动轮旋转,主动轮和从动轮通过啮合完成中翼和外翼之间的相对转动。折叠机构的驱动选用伺服舵机。对舵机进行固定时,在机翼端部使用碳纤维肋板进行加固。



1. 外翼; 2. 中翼; 3. 襟翼; 4. 内翼; 5. 机身; 6. 螺旋桨; 7. 中翼肋板 I; 8. 主动轮; 9. 从动轮; 10. 外翼肋板; 11. 舵机; 12. 中翼肋板 II; 13. 蜗杆; 14. 蜗轮; 15. 内翼肋板; 16. 尾翼。

图 2 折叠翼变体飞行器的三维模型

Fig. 2 3D model of fold-wing morphing aircraft

1.2 实物模型制作

实现机翼折叠的折叠机构是模型制作中的关键部件。蜗轮蜗杆折叠机构如图 3(a) 所示, 其中, 舵机型号为 Futaba-blsl77sv, 蜗轮蜗杆利用结构钢进行加工。舵机与舵盘连接, 舵盘与蜗杆通过螺栓固定。舵机固定在内翼最外端的碳纤维机翼上面, 2 个铝合金角铁将舵机完全限位。蜗轮安装在内翼和外翼碳纤维铰链中, 与蜗杆进行配合。齿轮折叠机构如图 3(b) 所示, 舵机型号为 Power hdlf-20mg, 齿轮利用尼龙 Pa66 进行打印。舵机与舵盘连接, 舵盘与主动齿轮通过螺栓固定, 从动齿轮固定在外翼碳纤维铰链中。

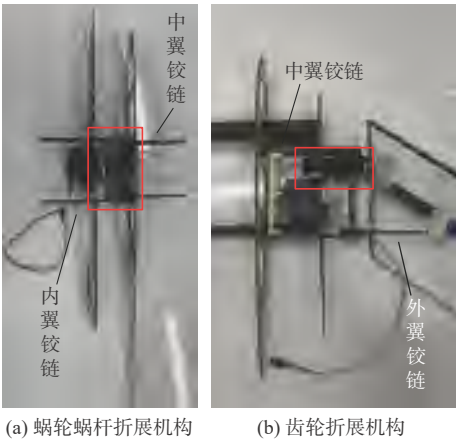


图 3 折叠机构
Fig. 3 Folding mechanism

实物模型组装完成后, 在折叠过程中令内外翼保持平行, 如图 4 所示。折叠角度 $\beta=0^\circ$ 时翼展为 1.94 m, $\beta=60^\circ$ 时翼展为 1.72 m。实物模型的机翼折叠动作平稳, 但折叠角速度较大时机身会发生轻微晃动。



图 4 折叠翼飞行器实物模型
Fig. 4 Physical model of fold-wing morphing aircraft

2 仿真参数及环境设置

因为结构对称, 并且为提高计算效率, 对仿真模型进行了简化处理, 仅使用半个飞行器并忽略其内部细节, 保留其原有外形特征和尺寸。仿真计算主要用到 Ansys Workbench 中的 Geometry、Fluid Flow、Transient Structural 和 System Coupling 这 4 个模块。

2.1 单向流固耦合计算流程

单向流固耦合主要考虑流体运动对固体的作用, 可用来分析机翼构型不变时的升阻力特性和弹性变形。将简化模型导入 Fluent 计算出流场压力, 再将压力传到结构表面上计算弹性变形, 计算流程如图 5 所示。

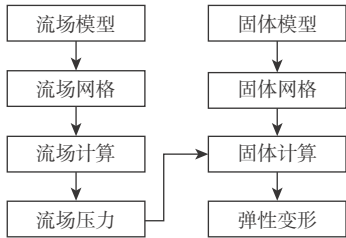


图 5 单向流固耦合计算流程

Fig. 5 Calculation flow of unidirectional fluid-solid coupling

2.2 双向流固耦合计算流程

双向流固耦合仿真需要将流场数据通过 FSI 传递到固体结构, 再将结构分析数据通过动网格技术传回流场, 迭代计算直至收敛。机翼折叠时的气动特性及结构变形耦合问题可利用双向流固耦合进行求解。流场产生的气动力通过 FSI 传递到机翼表面, 机翼的构型改变和弹性变形再通过动网格技术反馈给流场, 利用插值和迭代方法实现收敛计算, 计算流程如图 6 所示。

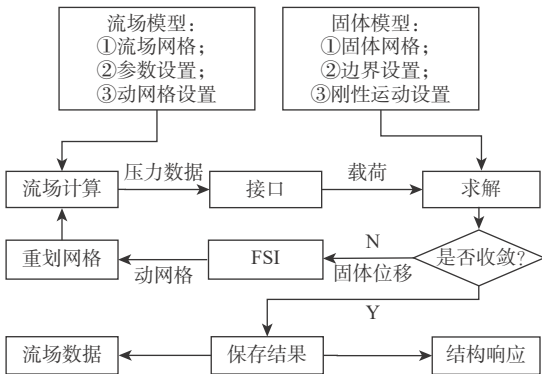


图 6 双向流固耦合计算流程

Fig. 6 Calculation flow of bidirectional fluid-solid coupling

2.3 仿真参数及网格设置

图 7 中流场由 A_1 、 A_2 和 A_3 这 3 部分组成。 A_1 和 A_3 的半径和长度均为 8 m, 采用结构网格划分。 A_2 的半径和长度分别为 8 m 和 4 m, 采用非结构网格划分, 机翼区域的网格进行局部加密。机翼结构

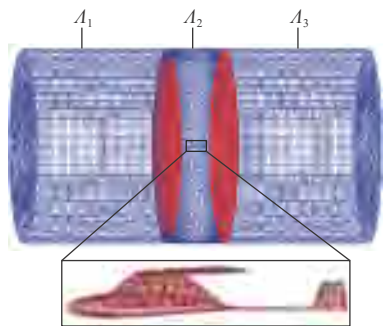


图 7 流场和结构的有限元网格

Fig. 7 Finite element mesh of fluid and solid

采用四面体单元 (Solid187) 进行网格划分。

仿真计算中所使用的流场介质为空气, 湍流模式为 $k-\epsilon$ 模式, 机翼材料为铝合金, 流固耦合界面为飞行器表面, 其他主要流场参数和结构参数设定如表 1 所示。

表 1 流场参数和结构参数

Table 1 Flow parameters and structural parameters

参数	取值
流场出口压力/Pa	0
流场密度/(kg·m ⁻³)	1.225
流场动力黏度/10 ⁻⁵ (Pa·s)	1.79
机翼密度/(kg·m ⁻³)	2 770
机翼泊松比	0.33
机翼杨氏模量/GPa	71

双向流固耦合仿真与单向流固耦合仿真的主要参数设置及网格划分保持一致, 不同的是双向流固耦合动网格设置为 Smoothing/Remeshing, 以及在瞬态模块中设置了机翼的折展角速度。

3 单向流固耦合仿真分析

定义迎角 α 为来流方向到飞行器纵轴的角度, 逆时针为正, 顺时针为负。令气流速度 $v = 20 \text{ m/s}$, 以 $\alpha = 0^\circ$ 的完全展开机翼为例, 计算流场压力, 将压力数据传递到飞行器表面上, 求解飞行器的弹性变形, 如图 8 所示。可以看出, 机翼前后缘出现较高气动压力, 最大压力出现在内翼前缘部分, 机翼的形变主要发生在外翼翼梢。

图 8 给出了特定迎角、来流速度及折叠角度下飞行器表面的压力分布及其受载后的弹性变形。飞行器的压力分布和弹性变形显然是与迎角、来流速度及折叠角度有关。

3.1 气流迎角与折叠角度的影响

定义升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 分别为

$$\begin{cases} C_L = \frac{2L}{\rho v^2 A_1} \\ C_D = \frac{2D}{\rho v^2 A_2} \end{cases} \quad (1)$$



(a) 飞行器表面的压力分布



(b) 飞行器的弹性变形

图 8 单向流固耦合算例

Fig. 8 Examples of unidirectional fluid-solid coupling

式中: ρ 为空气密度; A_1 和 A_2 分别为飞行器的俯视投影面积和前视投影面积。 L 和 D 分别为飞行器的升力和阻力。

定义最大弹性变形 $\delta_{\max}$ 为

$$\delta_{\max} = \max(\delta_t - \delta_r) \quad (2)$$

式中: δ_t 和 δ_r 分别为飞行器有限元模型中任一单元节点的总变形及其对应的刚性位移。

设迎角 α 分别为 -10° 、 -5° 、 0° 、 5° 、 10° 、 15° , β 分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° , 得到以上参数各组合状态下的升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 和最大弹性变形 $\delta_{\max}$, 如图 9 所示。

由图 9(a) 可知, 升力系数 C_L 与迎角 α 呈正比关系。 α 在 $-10^\circ \sim 0^\circ$ 范围内, C_L 随折叠角度 β 增大而增大; α 在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内, C_L 随 β 增大而减小。图 9(b) 给出了不同 α 和 β 下的阻力系数 C_D 。随 α 增大, C_D 先减小后增大, 并且在 0° 迎角附近出现最小值。同一迎角时, C_D 随着 β 的增大而减小。图 9(c) 是将气动力加载到飞行器表面产生的 $\delta_{\max}$, 随 α 增大, $\delta_{\max}$ 先减小后增大, 并且在 0° 迎角附近出现最小值。还可以观察到, 随着 β 增大, $\delta_{\max}$ 减小。

3.2 气流速度与折叠角度的影响

保持迎角 α 不变, 设气流速度为 5 m/s 、 10 m/s 、 20 m/s 、 50 m/s 、 100 m/s , 分析气流速度 v 与折叠角度 β 对机翼气动特性的影响。如图 10(a) 所示, β 固定时, C_L 随 v 的增大而升高, 并且当 $v < 20 \text{ m/s}$ 时, C_L 随 v 的增大而迅速升高, 当 $v > 20 \text{ m/s}$ 后, C_L 随 v 的增大而平缓上升。图 10(b) 给出了阻力系数 C_D 与 v 及 β 的关系。 β 固定时, C_D 随 v 的增大而降低。图 10(c) 显示的是最大弹性变形 $\delta_{\max}$ 随 v 及 β 的变化规律。可

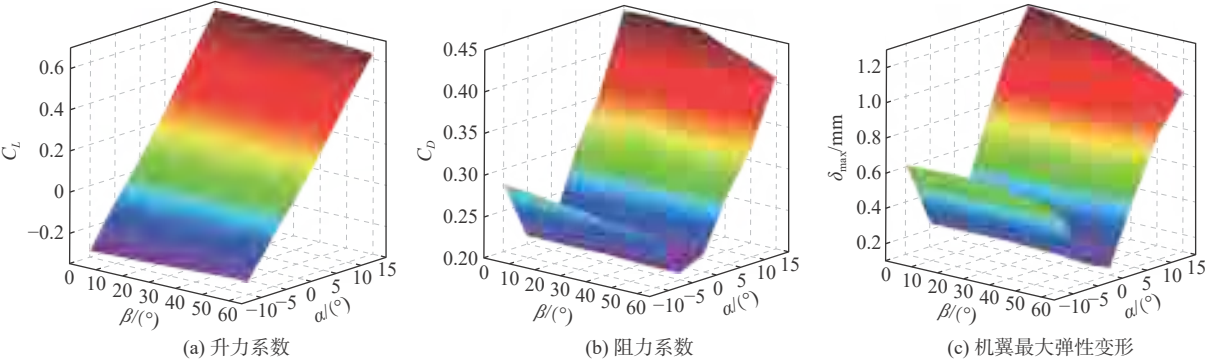


图 9 迎角与折叠角度的影响
Fig. 9 Influences of attack angle and folding angle

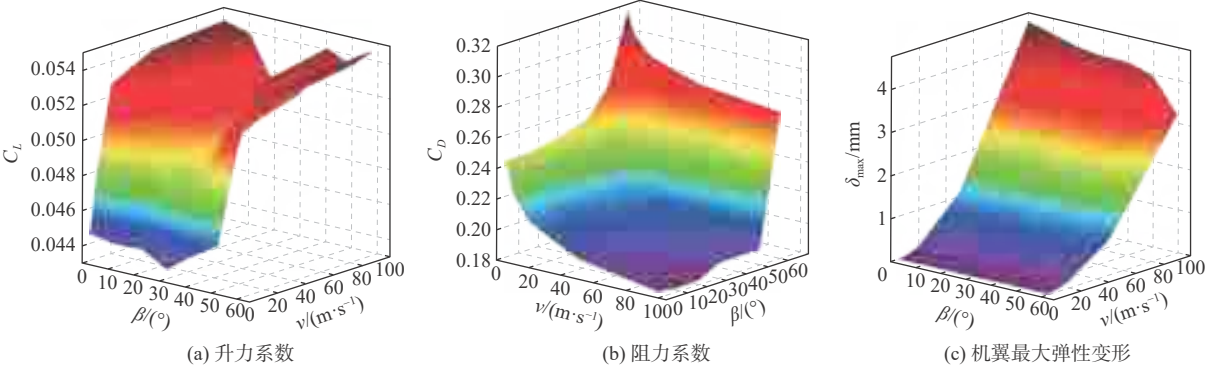


图 10 气流速度与折叠角度的影响
Fig. 10 Influences of airflow speed and folding angle

以看出， $\delta_{\max}$ 随着 v 的增加而增加。

4 双向流固耦合仿真分析

机翼折展时，流场会随之发生显著变化，其弹性变形、构型改变和流场相互耦合。设置流场动网格为“Smoothing”、“Remeshing”，令 β 初值为 30° ，

添加折展转动函数，使机翼匀速折展。以 0° 迎角下 β 减小时的展开过程和 β 增大时的折叠过程为例，进行机翼折展过程的气动特性双向流固耦合仿真分析。

4.1 气动特性分析

图 11 和图 12 给出了不同折展角速度 ω 时的机翼压力分布。压力分布情况与折叠角度 β 有关，最大

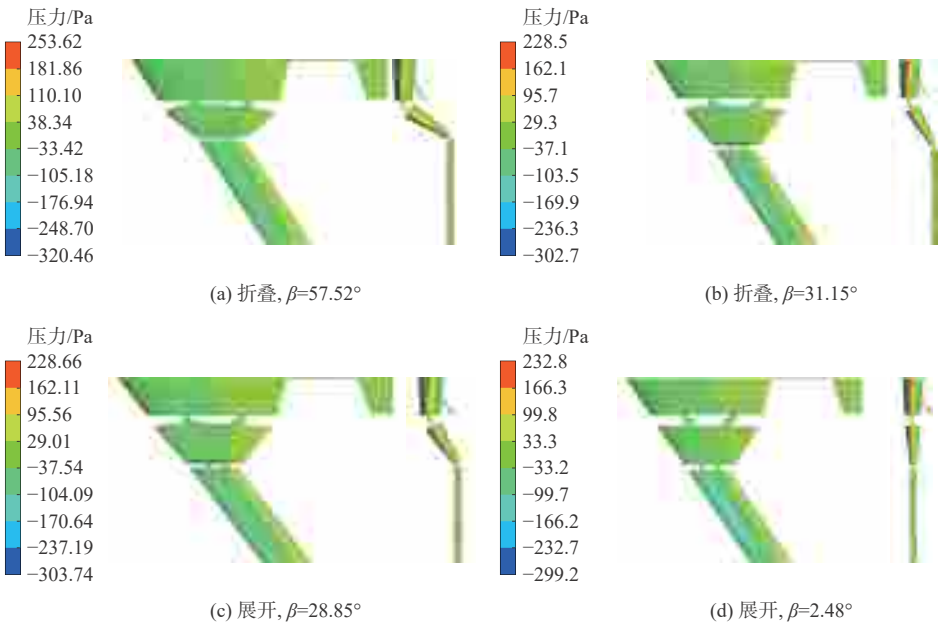


图 11 慢速折展过程， $\omega = 14.33\ (^{\circ})/\text{s}$
Fig. 11 Slow folding progress, $\omega = 14.33\ (^{\circ})/\text{s}$

压力出现在机翼前缘且其大小与 β 相关。对比图 11 和图 12 可知, 相同折叠角度时快速折展的压力分布不同于慢速折展, 而且对应同一折叠角度时快速折展的机翼最大压力均高于慢速折展。折叠角度较大时, 快速折展与慢速折展导致的机翼压力分布有相似性, 折叠角度较小时, 快速折展与慢速折展的机翼压力分布差异更明显。另外, 慢速折展时机

翼前缘一直是高压, 后缘高压分布区域占比较少, 机翼在各折叠角度的表面压力分布变化不明显。快速折展时折叠翼的外翼前缘出现了低压, 而且机翼后缘高压分布区域占比较大, 机翼在各折叠角度的表面压力分布发生了明显变化。这说明快速折展导致机翼表面压力分布变化剧烈且分布情况更为复杂。

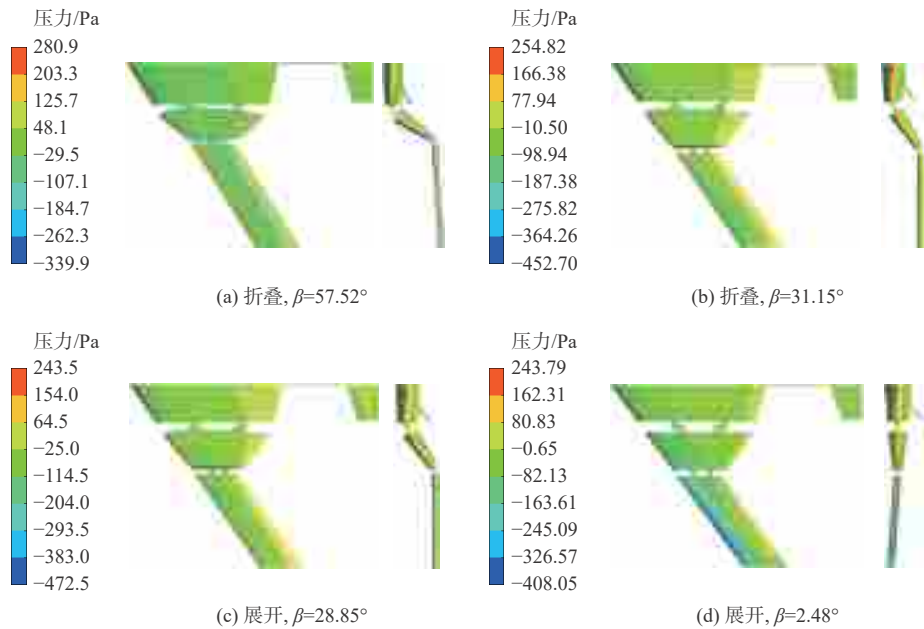


图 12 快速折展过程, $\omega = 573.25$ ($^{\circ}$)/s

Fig. 12 Quick folding progress, $\omega = 573.25$ ($^{\circ}$)/s

为观察机翼压力变化规律, 设置 3 个截面, 如图 13 所示。坐标原点在机翼和中翼的铰链处, x 轴平行于机身纵轴且指向机头, y 轴垂直于飞行器对称面。截面 P_3 的方程是 $y = 0.4$ m, 其与外翼的交线记为 S_3 。截面 P_2 的方程是 $y \cos \beta + z \sin \beta = 0.15$ m, 其与中翼的交线记为 S_2 。截面 P_1 的方程为 $y = -0.1$ m, 其对内翼的剖面的压力分布基本无变化。

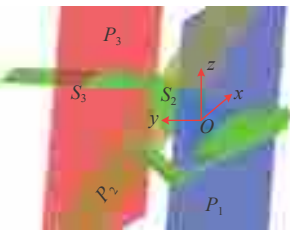


图 13 截面设置示意图

Fig. 13 Schematic diagram of sections

图 14 和图 15 给出了剖面 S_3 和 S_2 上的点在 3 个不同折叠角度下的压力。对比图 14 中同一交线在 2 种展开速度下的压力曲线, 可以看出, 以 $\omega = 573.25$ ($^{\circ}$)/s 展开比以 $\omega = 14.33$ ($^{\circ}$)/s 展开时机翼上下表面压差更大, 而且压力变化更显著。图 15 所示的折叠过程也有类似规律。对比在图 14 和图 15

中同种角速度下同一交线的压力曲线, 可以看出, 机翼展开和折叠时的气动分布有相似特征, 但数值上存在较大不同, 而且快速折展比慢速折展导致更大的压力分布差异。

4.2 弹性变形特性分析

折叠翼在折展时的结构变形如图 16 所示。以 $\omega = 14.33$ ($^{\circ}$)/s 缓慢折展, 折叠和展开的最大总变形量相近, 约为 118 mm, 此时机翼近似于刚性折展; 以 $\omega = 573.25$ ($^{\circ}$)/s 迅速折展, 折叠和展开的最大总变形量有显著差异, 且明显大于慢速折展。原因是快速折展时机翼有较大弹性变形, 外翼外端沿 z 轴上下摆动。这表明机翼折展越快其变形量越大, 且弹性变形越显著。机翼在折展角度改变时的应力如图 17 所示。可以看出, 迅速折展后的最大应力远大于缓慢折展后的最大应力。最大应力主要集中在各翼段之间的铰链连接处。

为观察机翼的弹性变形与折展角速度 ω 之间的关系, 提取机翼最大相对弹性变形 $\zeta_{\max}$ 为

$$\zeta_{\max} = \max \left(\frac{\delta_t - \delta_r}{\delta_r} \right) \tag{3}$$

图 18 中, 横坐标是以 30° 为初值时的折叠角度

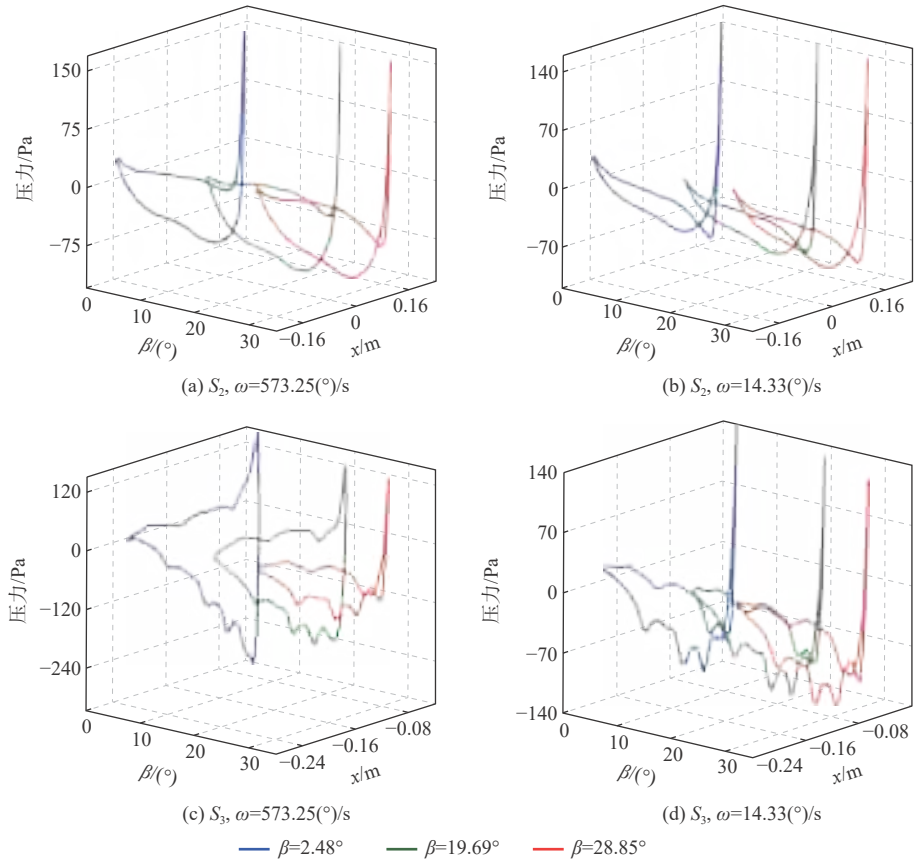


图 14 展开过程剖线的压力分布

Fig. 14 Pressure of section lines during unfolding process

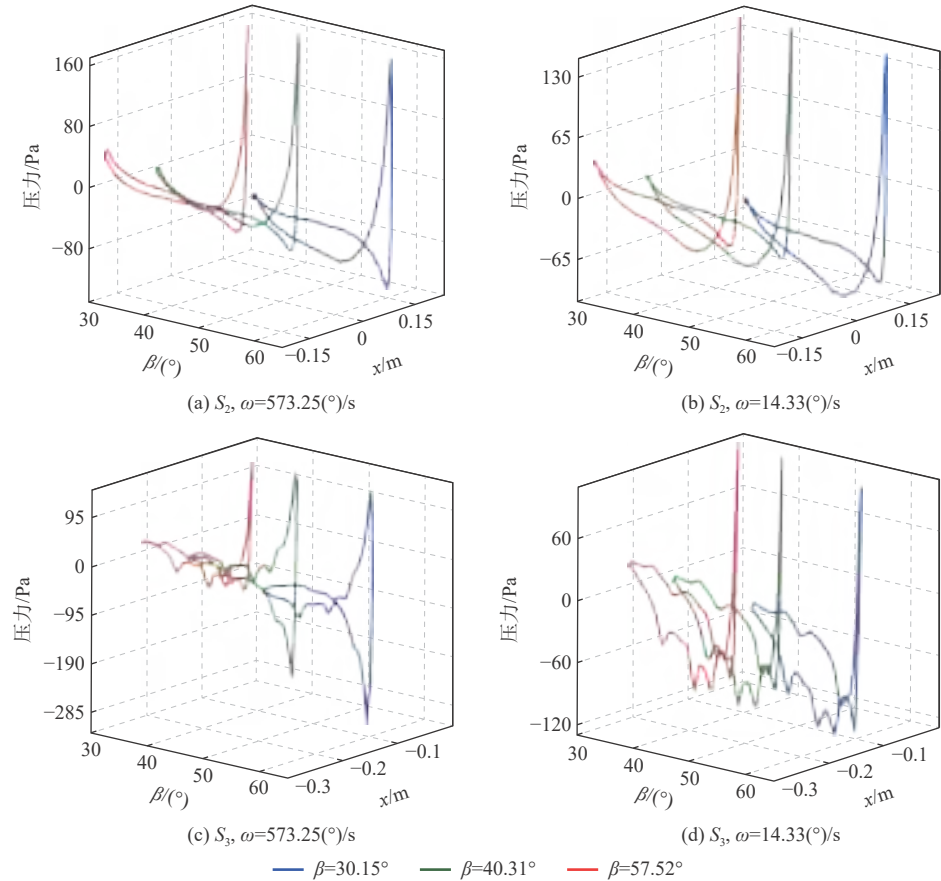


图 15 折叠过程剖线的压力分布

Fig. 15 Pressure of section lines during folding process

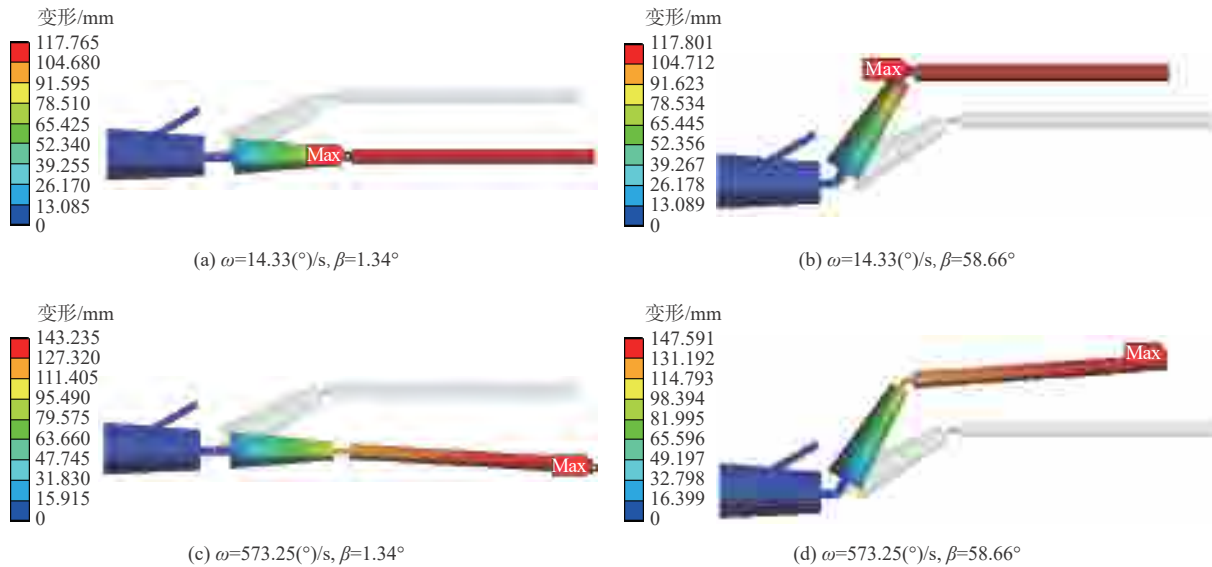


图 16 机翼的变形

Fig. 16 Deformation of wing

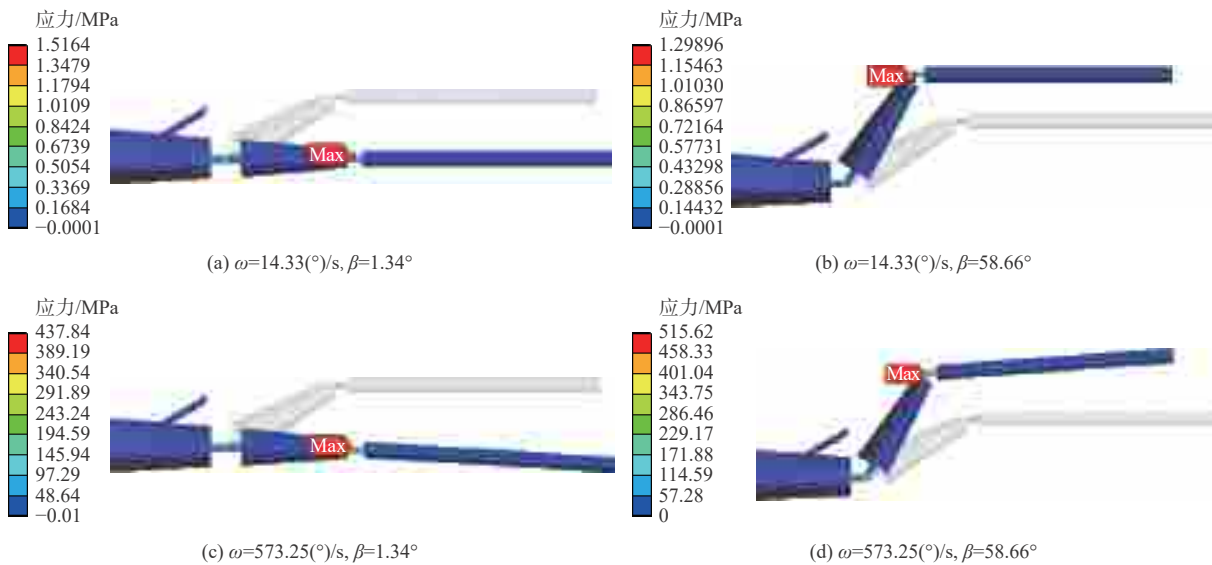


图 17 机翼的应力

Fig. 17 Stress of wing

改变量 $\bar{\beta}$, 右向箭头和左向箭头分别表示机翼的折叠和展开过程。相同角速度下折叠和展开时 $\zeta_{\max}$ 的变化趋势相同, 振荡幅值和周期相似, 而且 $\zeta_{\max}$ 的振荡幅度随 $\bar{\beta}$ 增大而增大。另外, 从图中可以看出, 在

ω 较小的慢速折叠过程中, 机翼的弹性变形也较小。以 $\omega = 14.33 (^{\circ})/\text{s}$ 为例, 此时机翼弹性变形很小, 机翼折叠近似于刚性运动。折叠角速度 ω 越大, 机翼折叠运动的振荡现象越明显, 振荡的幅值更大。以 $\omega = 573.25 (^{\circ})/\text{s}$ 为例, 开始阶段, 弹性变形导致机翼折叠滞后于其刚性运动, 一段时间后, 机翼折叠产生过冲, 总变形超过刚性位移, 随后机翼在其刚性位移附近振荡。

5 结 论

设计折叠翼变体飞行器的三维模型, 进行了气动弹性仿真分析, 主要结论如下:

1) 在折叠翼构型固定的单向流固耦合仿真中, 折叠翼飞行器的升阻力及弹性形变与折叠角度、气

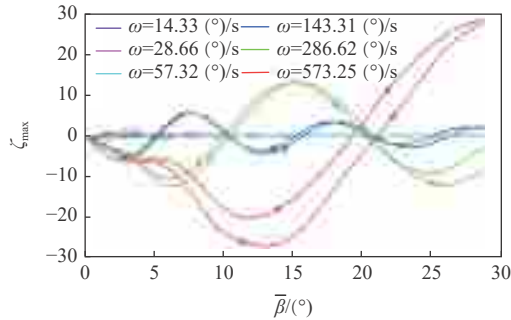


图 18 机翼折叠过程中的相对形变

Fig. 18 The relative deformation during folding progress

流迎角和速度有关,且呈现出不同特点。折叠角度与气流速度不变时,随迎角增大,飞行器的升力系数增大,而阻力系数与最大弹性变形都是先减小后增大。迎角与气流速度不变时,随着折叠角度增大,飞行器的升力系数在负迎角时增大而在正迎角时减小,阻力系数与最大弹性变形都是减小。迎角与折叠角度不变时,随着气流速度增大,飞行器的阻力系数减小,升力系数与最大弹性变形都增大。

2) 在折叠翼构型变化的双向流固耦合仿真中,折叠翼的表面压力分布和弹性变形不仅与折叠角度有关,还与折展角速度相关。对应同一折叠角度时快速折展的机翼最大压力均高于慢速折展。折叠角度较大时,快速折展与慢速折展导致的机翼压力分布有相似性,折叠角度较小时,快速折展与慢速折展的机翼压力分布差异更明显。快速折展导致机翼表面压力分布变化剧烈且分布情况更复杂,同时,机翼剖面上下边界的压力分布差异也更大。

3) 构型变化时,折叠翼的弹性变形和应力都与折叠角度及折展角速度相关。折展越快,机翼的最大总变形量越大,最大应力也更大。最大总变形量发生在翼梢处,最大应力发生在各翼段的连接处。机翼的最大相对弹性变形随着折展运动呈现出振荡现象,而且幅值随着折叠角度改变量增大而增大。

参考文献 (References)

[1] 白鹏,陈钱,徐国武,等.智能可变形飞行器关键技术发展现状及展望[J].空气动力学学报,2019,37(3):426-443.
BAI P, CHEN Q, XU G W, et al. Development status of key technologies and expectation about smart morphing aircraft[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(3): 426-443(in Chinese).

[2] 祝连庆,孙广开,李红,等.智能柔性变形机翼技术的应用与发展[J].机械工程学报,2018,54(14):28-42.
ZHU L Q, SUN G K, LI H, et al. Intelligent and flexible morphing wing technology: a review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 28-42(in Chinese).

[3] WEISSHAAR T A. Morphing aircraft systems: historical perspectives and future challenges[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(2): 337-353.

[4] 都显琛,刘学翱,董洋,等.可变后掠翼联动驱动机构设计与尺寸综合[J].北京航空航天大学学报,2022,48(12):2502-2509.
DU X C, LIU X A, DONG Y, et al. Design and dimensional synthesis of a variable wing sweep mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2502-2509 (in Chinese).

[5] TARABI A, GHASEMLOO S, MANI M. Experimental investigation of a variable-span morphing wing model for an unmanned aerial vehicle[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016, 38(7): 1833-1841.

[6] 宋慧心,金磊.折叠翼飞行器的动力学建模与稳定控制[J].力学学报,2020,52(6):1548-1559.
SONG H X, JIN L. Dynamic modeling and stability control of fold-

ing wing aircraft[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(6): 1548-1559(in Chinese).

[7] 周文雅,张宗宇,王晓明,等.机翼中小尺度主动变形研究进展及关键技术[J].机械工程学报,2021,57(2):121-138.
ZHOU W Y, ZHANG Z Y, WANG X M, et al. Research progress and key techniques of active morphing wing at medium and small scales[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(2): 121-138 (in Chinese).

[8] PARANCHEERIVILAKKATHIL M S, HAIDER Z, AJAJ R M, et al. A polymorphing wing capable of span extension and variable pitch[J]. Aerospace, 2022, 9(4): 205.

[9] ASHIR M, HINDAHL J, NOCKE A, et al. Development of an adaptive morphing wing based on fiber-reinforced plastics and shape memory alloys[J]. Journal of Industrial Textiles, 2020, 50(1): 114-129.

[10] 田大可,张珺威,金路,等.基于等边 Bennett 机构的变形翼机构设计与分析[J].北京航空航天大学学报,2025,51(3):742-752.
TTIAN D K, ZHANG J W, JIN L, et al. Design and analysis of morphing wing mechanism based on equilateral Bennett mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(3): 742-752(in Chinese).

[11] 孙冰,陈伟.基于时变观测器的变体飞行器有限时间鲁棒控制[J/OL].北京航空航天大学学报,(2024-03-07)[2024-04-16].
<https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240305.1726.004>.
SUN B, CHEN W. Finite time robust control of morphing aircraft based on time-varying gain observer[J/OL] Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, (2024-03-07)[2024-04-16].
<https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240305.1726.004>(in Chinese).

[12] 冯文正,于菲,姜涛,等.变后掠角与变翼型厚度机翼的气动特性分析[J].飞行力学,2023,41(1):9-13.
FENG W Z, YU F, JIANG T, et al. Analysis of aerodynamic characteristics of a wing with variable sweep angle and variable airfoil thickness[J]. Flight Dynamics, 2023, 41(1): 9-13(in Chinese).

[13] 喻世杰,周兴华,黄锐.变弯度机翼参数化气动弹性建模与颤振特性分析[J].航空学报,2023,44(8):227346.
YU S J, ZHOU X H, HUANG R. Parametric aeroelastic modeling and flutter characteristic analysis of variable camber wing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(8): 227346(in Chinese).

[14] AFONSO F, VALE J, LAU F, et al. Performance based multidisciplinary design optimization of morphing aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 67: 1-12.

[15] CHU L L, LI Q, GU F, et al. Design, modeling, and control of morphing aircraft: a review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(5): 220-246.

[16] 甄子洋,刘攀,陆宇平.变体飞行器智能变形与飞行控制技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2022,54(6):995-1006.
ZHEN Z Y, LIU P, LU Y P. Research progress on intelligent deformation and flight control technology of morphing aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 995-1006(in Chinese).

[17] 郭秋亭,张来平,常兴华,等.变形飞机动态气动特性数值模拟研究[J].空气动力学学报,2011,29(6):744-750.
GUO Q T, ZHANG L P, CHANG X H, et al. Numerical simulation

- of dynamic aerodynamic characteristics of a morphing aircraft[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(6): 744-750(in Chinese).
- [18] ZHANG W, LV S L, NI Y G. Parametric aeroelastic modeling based on component modal synthesis and stability analysis for horizontally folding wing with hinge joints[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 92(2): 169-179.
- [19] XU H, HAN J L, XI Y, et al. Comparative study of lifting surface and CFD methods in the simulation of morphing process of folding wing[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 2022: 2476196.
- [20] 徐伟, 段富海. 折叠翼飞机有限元和流固耦合 ANSYS 分析[J]. *机电工程技术*, 2020, 49(12): 6-9.
- XU W, DUAN F H. Finite element and fluid-structure interaction analysis of folding wing aircraft based on ANSYS[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2020, 49(12): 6-9(in Chinese).
- [21] AJAJ R M, PARANCHEERIVILAKKATHIL M S, AMOOZGAR M, et al. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2021, 120: 100682.
- [22] HUANG R, YANG Z J, YAO X J, et al. Parameterized modeling methodology for efficient aeroservoelastic analysis of a morphing wing[J]. *AIAA Journal*, 2019, 57(12): 5543-5552.
- [23] 徐浩, 韩景龙, 奚勇, 等. 折叠翼飞行器气动弹性变体飞行仿真平台[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(6): 1921-1930.
- XU H, HAN J L, XI Y, et al. Aeroelastic morphing flight simulation platform for a folding wing aircraft[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(6): 1921-1930(in Chinese).
- [24] WEN L Y, REN Q P, YANG J, et al. Longitudinal modeling and aerodynamic evaluation of morphing aircraft with symmetric folding wing tips[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 40(4): 382-400.
- [25] 张贺, 刘清扬, 李留刚, 等. 变构型飞行器多刚体非定常仿真技术[J]. *航空学报*, 2023, 44(S2): 729421.
- ZHANG H, LIU Q Y, LI L G, et al. Multibody system unsteady simulation technology for morphing aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(S2): 729421(in Chinese).

Model design and aerodynamic characteristics simulation analysis of fold-wing aircraft

HU Wenhua^{1, 2}, LIU Wenju^{1, 2}, WU Ruiqin^{1, 2, *}, CHEN Sanya^{1, 2}, FENG Jingjing^{1, 2}, WU Xia³

- (1. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
2. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
3. Tianjin Institute of Aerospace Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300301, China)

Abstract: The coupling of configuration change, elastic deformation, and the flow field significantly affects the aerodynamic characteristics of morphing aircraft during flight. Aeroelastic simulations were carried out to take into account the alteration in aerodynamics and elastic deformation of a wing brought about by the folding motion of a fold-wing morphing aircraft. A delta-wing scheme with a blend-wing-body configuration was used to establish a three-dimensional model. A physical model of the fold-wing aircraft was made and the wing's morphing function was verified. Subsequently, a simplified and meshed model was set up for aerodynamic simulations. Using unidirectional fluid-solid coupling simulations, the coupling effects of airflow angle of attack and airflow velocity on the aerodynamic properties and elastic deformation of folding wings were examined. Moreover, a bidirectional fluid-solid coupling simulation was carried out to analyze the influence of folding motion on aerodynamic characteristics of aircraft based on the pressure of the section lines of wings, and to study the coupling effects of changes in wing configuration, flexible deformation and flow field. The research revealed that the aerodynamic characteristics and elastic deformation of a fold-wing morphing aircraft are related to its flow angle of attack, flow velocity, folding angle and folding speed. Additionally, the folding velocity played a crucial role in shaping the aerodynamic characteristics and flexible deformation of the folding wings, with rapid folding leading to more distinct changes than slow folding. These results are of great significance for analyzing aerodynamic characteristics, suppressing flexible deformation, and designing flight controllers for fold-wing morphing aircraft.

Keywords: folding wing; fluid-solid coupling; folding motion; aerodynamic characteristics; simulation analysis

Received: 2024-01-28; Accepted: 2024-05-24; Published Online: 2024-06-06 11:01

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240605.1337.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (11702188,12002236,12072233)

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

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0067

运输机尾涡对空投伞的影响与 编队空投间距计算方法

魏志强^{1,*}, 许奔¹, 周鼎富²

(1. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘 要: 运输机编队空投能在最短的时间内让更多的物资投送到指定地点, 追求高效的同时也要考虑运输机尾涡给空投带来的危险。针对此问题, 提出运输机尾涡对空投伞的影响与编队空投间距计算方法。建立空投伞降落过程遭遇尾涡的风险评估模型; 对运输机编队空投的危险性计算分析; 对空投中的运输机编队飞行的安全间距计算分析。研究结果表明: “一”字形编队空投时空投伞处于尾涡危险区域的时间是“人”字形编队空投的 2.0 倍。随着空投高度的增加, 运输机飞行速度、空投伞伞冠半径、开始打开空投伞的时间点、温度偏差这 4 个因素对空投伞降落过程中处于尾涡危险区域的时间的影响都是先增加再减小。3 架 C-17 运输机“人”字形编队空投, 当空投高度从 100~1 000 m 变化时, 若左右间距为 100 m 不变, 安全的前后间距随着空投高度的升高在逐渐变大, 从 500 m 开始, 空投高度每增加 100 m, 安全的前后间距就增加 20 m。若前后间距为 3 500 m 不变, 空投高度为 100~200 m 对应安全的左右间距为 100 m; 空投高度为 300~1 000 m 对应安全的左右间距为 110 m。

关 键 词: 尾涡流场; 编队空投; 空投伞; 尾涡遭遇; 空投高度

中图分类号: V328

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1038-10

运输机编队飞行执行空投任务, 在最短的时间内让尽可能多的物资进入尽可能紧凑的降落区, 提高了执行空投任务的效率, 同时也有着潜在的尾涡遭遇危险。在空投伞打开后的降落阶段, 有卷入运输机产生的尾涡流场中的可能性, 从而造成空投伞伞冠的塌陷、空中急速下落等风险。特别在运输机编队飞行执行空投任务时, 空投伞不仅受到所在运输机尾涡流场的干扰, 还会受到前面运输机尾涡流场的干扰。

在编队飞行的经济性与尾涡风险及避撞研究方面, Hartjes 等^[1]以最小化总燃油消耗为目标, 解决了民用航空编队飞行的多阶段轨迹优化问题。Hu 等^[2]提出一种进行编队飞行轨迹优化的方法,

分析了不同优化参数影响下的油耗优化效果。Antczak 等^[3]提出利用前机尾涡对后机产生的积极影响, 确定后机的有利位置, 以获得减少燃料消耗的最大效益。Zhang 等^[4]创新性地提出一种同时考虑空间位置和时间约束的四维时空层次分解算法, 应用于无人机编队间没有通信的情况下的轨迹规划和自动避障。Sheng 等^[5]提出一种基于鲁棒 H_{∞} 控制器的联合控制方法和改进的人工势场方法, 在保持编队高精度的同时, 使无人机能够自动避开障碍物, 并在远离障碍物时快速恢复编队。徐肖豪等^[6]研究形成洲际航空编队路径规划的几何基础, 使问题复杂度依赖于航班集规模而非球面离散化网格规模, 降低了问题复杂度。谷润平等^[7]以后机的安

收稿日期: 2024-01-30; 录用日期: 2024-03-22; 网络出版时间: 2024-04-10 19:01

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240409.1334.002

基金项目: 国家自然科学基金(U2133210); 激光雷达与器件技术重点实验室开放课题(LLD2023-008)

*通信作者. E-mail: zqwei@cauc.edu.cn

引用格式: 魏志强, 许奔, 周鼎富. 运输机尾涡对空投伞的影响与编队空投间距计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1038-1047. WEI Z Q, XU B, ZHOU D F. Influence of transport aircraft wake vortex on parachute and calculation method of formation airdrop spacing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1038-1047 (in Chinese).

全性和诱导减阻效果为优化目标来确定后机在编队飞行中的最佳位置。朱战霞等^[8]分析了单架无人机执行任务时面临的问题和编队飞行的优势,介绍了国内外在无人机编队飞行方面的研究状况,对保证无人机编队飞行的关键技术进行了探讨和分析。张佳龙等^[9]提出单向网络连接结构的多无人机避障算法和基于人工势场的控制方法,能够确保编队收敛于期望的队形和稳定飞行状态。郑锐平等^[10]为实现紧密编队飞行的稳定性,所设计的控制律能够使僚机在编队飞行中保持在合适队形,使得僚机获得最大的升力。上述研究主要针对民航客机编队飞行诱导减阻达到节省燃油的目的和无人机编队飞行提高避撞能力达到鲁棒性编队效果,很少有运输机编队飞行空投遭遇尾涡风险评估的研究。

在运输机空投的安全性和精确性研究方面,Chen 等^[11]对大型运输机内有货物移动的飞行系统进行建模,分析了货物质量、移动过程等参数对飞行的影响。Xu 等^[12]综述了运输机空投过程中的建模和控制问题。Cao 等^[13]建立了六自由度刚体飞行动力学模型,预测降落伞空投系统的飞行轨迹和着陆点分布。Li 等^[14]提出了降落伞空投系统的飞行动力学模型,模拟了典型降落伞空投系统的轨迹和速度,并与实验测量结果进行了验证。马骏等^[15]建立了全量的连投模型,可完成 n 件货物的空投数值仿真。通过仿真对单投与连投时载机开环动态响应进行了量化分析,并对空投时间间距对载机影响进行了对比分析,保证了空投的安全性。李山等^[16]采用了改进后的第 2 代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II),不仅能够提升双运输机编队飞行安全性,并且使得空投点更加密集、空投精度更高。郭鲲鹏等^[17]建立了降落伞运动模型和随机风模型,评估了 3 个空投初始条件和随机风对降落伞落点散布的影响。上述研究主要针对单架运输机空投对载机操控的安全性和空投轨迹及着陆点的精确性,很少有考虑尾涡遭遇风险的多架运输机编队飞行执行空投任务的安全间距的研究。

针对运输机编队飞行空投时可能存在空投伞降落过程中遭遇尾涡危险的问题,本文提出了运输机尾涡对空投伞的影响与编队空投间距计算方法。首先,建立空投伞降落过程遭遇尾涡的风险评估模型,其中,运输机尾涡的形成与演化模型要考虑尾涡的强度及三维坐标的变化、尾涡流场最大诱导速度的变化;空投伞降落过程的运动模型要考虑空投伞的速度和三维坐标的变化;空投伞遭遇尾涡

后的动力学响应模型要考虑空投伞遭遇尾涡的安全阈值的选取。然后,对运输机编队空投的危险性计算分析,分析的影响因素有运输机编队飞行构形、运输机飞行速度、空投伞伞冠半径、开始打开空投伞的时间点、温度偏差。最后,对空投中的运输机编队飞行的安全间距计算分析,当前后间距或左右间距不变时,计算得到不同空投高度处安全的左右间距或前后间距。

1 空投伞降落过程遭遇尾涡的风险评估模型

1.1 运输机尾涡的形成与演化模型

尾涡是飞机因其升力面的上下压力差形成翼尖涡并发展的,其特征为大尺度、高能量旋涡。尾涡形成后,在翼尖涡的重力、大气湍流等因素的影响下,尾涡会向后下方运动,其环量也会逐渐减小。

尾涡的初始环量 Γ_0 计算式为

$$\Gamma_0 = \frac{mg}{\rho V b_0} \tag{1}$$

式中: m 为飞机的质量; g 为重力加速度; ρ 为大气密度; V 为飞机飞行速度; b_0 为翼尖尾涡的初始涡核间距,通常为 $(\pi/4)B$, B 为飞机的翼展。

德国宇航中心提出的 P2P 模型与激光雷达探测尾涡结果对比拟合度高,能较好地描述尾涡环量变化。

在尾涡扩散阶段,环量变化如下:

$$\Gamma_{5-15}^*(t^*) = A - \exp\left(-\frac{R^{*2}}{v_1^*(t^* - T_1^*)}\right) \tag{2}$$

式中: Γ_{5-15}^* 为归一化的 5~15 m 环量的均值; t^* 为归一化的时间; A 为调节 $\Gamma_{5-15}^*(t^*=0)$ 的常数,取值为 1.046 8; R^* 为归一化的平均半径,取值为 0.11; v_1^* 为扩散阶段的有效黏度,取值为 1.78×10^{-3} ; T_1^* 对应 $t^*=0$ 处的尾涡扩散时间,反映当时的尾涡结构,取值为-2.22;上标“*”表示归一化处理后的数据。

在尾涡快速消散阶段,环量迅速减小,与气象条件有关(即与涡流耗散率、浮力频率有关),环量变化为

$$\Gamma_{5-15}^*(t^*) = A - \exp\left(-\frac{R^{*2}}{v_1^*(t^* - T_1^*)}\right) - \exp\left(-\frac{R^{*2}}{v_2^*(t^* - T_2^*)}\right) \tag{3}$$

式中: v_2^* 为快速消散阶段的有效黏度; T_2^* 为快速衰减的起始时间。

尾涡经过时间 t (单位:s)后下沉的高度 h_{descent} 为

对尾涡的下沉速度 ω 求积分,表达式为

$$h_{\text{descent}} = \int |\omega| dt \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2\Gamma_{5-15}}{\pi^2 B} \quad (5)$$

尾涡在飞机后方位置距离等效于经时间 t 的飞机向前飞行的距离 S 为

$$S = |V|t \quad (6)$$

以飞机的重心为坐标原点 O ,过原点以飞机纵轴前后延伸为 x 轴,指向后为正方向;过原点以飞机立轴上下延伸为 y 轴,指向上为正方向;过原点以飞机横轴左右延伸为 z 轴,指向右为正方向,如图1所示。

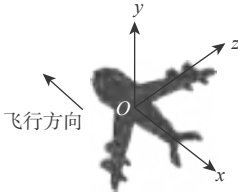


图1 坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coordinate system

尾涡物理模型中质点的位置定义在涡核处。尾涡在单位时间内的位置变化量如下:

$$\Delta x_w = |V|\Delta t \quad (7)$$

$$\Delta y_w = |\omega|\Delta t \quad (8)$$

$$\Delta z_w = |V_{\text{wind}}|\Delta t \quad (9)$$

式中: Δx_w 、 Δy_w 、 Δz_w 分别为尾涡在单位时间内在 x 轴、 y 轴、 z 轴上的位置变化量; V_{wind} 为侧风速度。

采用 Hallock-Burnham 速度模型,如式(10)所示,其与尾涡的拟合度好,速度变化相对比较平滑。

$$v(r) = \frac{r\Gamma}{2\pi(r^2 + r_c^2)} \quad (10)$$

式中: Γ 为尾涡环量; r 为尾涡周围任意一点与涡核的距离; r_c 为尾涡的涡核半径,涡核半径通常为0.052 倍的左右涡涡心间距 b_0 。

尾涡流场内任意点的诱导速度与左右涡的诱导速度有关。如图2所示,在前机之后任意给定距离的纵截面上,假设点 A 、 B 分别为左右涡核心,点 C 为任意点。

以左涡为例, A 、 C 之间的距离 r_1 为

$$r_1 = \sqrt{(y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (11)$$

左涡诱导速度 v_1 为

$$v_1 = \frac{r_1\Gamma_1}{2\pi(r_1^2 + r_{c1}^2)} \quad (12)$$

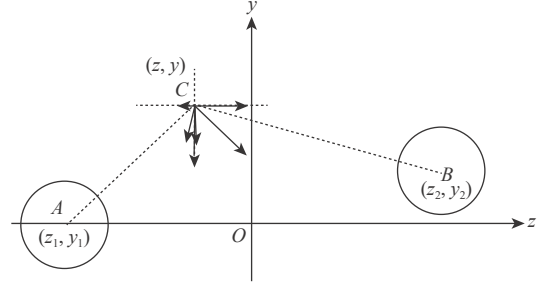


图2 尾涡流场内任意点的诱导速度计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation of induced velocity at any point in wake vortex field

v_1 在垂直方向上的诱导速度 v_{y1} 为

$$v_{y1} = v_1 \frac{z-z_1}{r_1} = \frac{\Gamma_1(z-z_1)}{2\pi[(y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 + r_{c1}^2]} \quad (13)$$

v_1 在翼展方向上的诱导速度 v_{z1} 为

$$v_{z1} = v_1 \frac{y-y_1}{r_1} = \frac{\Gamma_1(y-y_1)}{2\pi[(y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 + r_{c1}^2]} \quad (14)$$

同理可得,右涡诱导速度 v_2 在垂直方向上的诱导速度 v_{y2} 为

$$v_{y2} = v_2 \frac{z-z_2}{r_2} = \frac{\Gamma_2(z-z_2)}{2\pi[(y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 + r_{c2}^2]} \quad (15)$$

v_2 在翼展方向上的诱导速度 v_{z2} 为

$$v_{z2} = v_2 \frac{y-y_2}{r_2} = \frac{\Gamma_2(y-y_2)}{2\pi[(y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 + r_{c2}^2]} \quad (16)$$

所以,任意点 C 在垂直方向上的诱导速度 v_y 为

$$v_y = v_{y1} + v_{y2} \quad (17)$$

任意点 C 在翼展方向上的诱导速度 v_z 为

$$v_z = v_{z1} + v_{z2} \quad (18)$$

任意点 C 的诱导速度 v_c 为 v_y 和 v_z 的矢量合成:

$$v_c = \sqrt{v_y^2 + v_z^2} \quad (19)$$

1.2 空投伞降落过程的运动模型

对空投伞降落过程的运动模型做以下简化和假设:

1) 选取圆形空投伞进行研究;

2) 如图3所示,物伞系统质点的位置定义在空投伞底面圆中心处,即点 a 处,伞冠半径定义为空投伞底面圆中心到伞边缘的距离,大小为点 a 与点 b (或点 d)之间的距离;

3) 假定物伞系统出舱后可以在空中自由落体一段时间再拉开引导伞。

根据空投伞降落过程中的状态,将空投伞在空中降落的整个过程分为3个阶段:空投伞未打开、空投伞打开中、空投伞完全打开。空投伞在这3个阶段的单位动压阻力是不同的,如下:

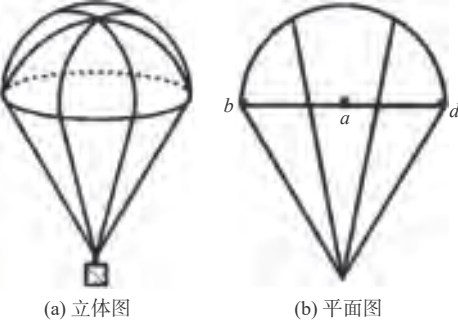


图 3 物伞系统质点位置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of particle position of parachute system

$$\begin{cases} D_q = C_{Dh} S_h & t_p < t_{istart} \\ D_q = C_{Dh} S_h + C_{Dc} \left[S_{cmin} + (S_{cmax} - S_{cmin}) \left(\frac{t - t_{istart}}{t_{iend} - t_{istart}} \right) \right] & t_{istart} \leq t_p < t_{iend} \\ D_q = C_{Dh} S_h + C_{Dc} S_{cmax} & t_p \geq t_{iend} \end{cases} \quad (20)$$

式中: D_q 为单位动压阻力; C_{Dh} 为空投伞未打开前空投物的阻力系数; S_h 为空投伞未打开前空投物的参考面积; C_{Dc} 为空投伞的阻力系数; S_{cmin} 为空投伞的最小参考面积(空投伞未打开时); S_{cmax} 为空投伞的最大参考面积(空投伞完全打开); t_p 为空投伞运动的时间点; t_{istart} 为开始打开空投伞的时间点; t_{iend} 为完全打开空投伞的时间点。

如图 4 所示, 空投伞伞冠膨胀的方向与空投伞速度方向相反, 因此, 阻力方向与空投伞速度方向相反。空投伞的重力为空投伞及附属物的总质量与重力加速度的乘积, 方向垂直向下。空投伞的运动路径角是速度方向与地平线(假设其正方向为水平向右)的夹角, 范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$, 夹角在地平线以上时为正。

利用空投伞的初始总速度、初始运动路径角和时间差, 对每个时间点的空投伞位置进行求解。在每个时间点处, 根据当前的大气密度、空投伞总速

度和单位动压阻力求出阻力, 进而求得空投伞下个时间点在 x 轴和 y 轴的分速度, 2 个分速度的矢量合成就是下个时间点空投伞的总速度。然后, 根据 y 轴分速度和总速度求得下个时间点空投伞的运动路径角。如下:

$$D_p = \frac{1}{2} \rho V_p^2 D_q \quad (21)$$

$$V_{xp} = V_p \cos \theta - \frac{D_p \cos \theta}{m_p} \Delta t \quad (22)$$

$$V_{yp} = V_p \sin \theta - \left(\frac{D_p \sin \theta}{m_p} + g \right) \Delta t \quad (23)$$

$$V_p = \sqrt{V_{xp}^2 + V_{yp}^2} \quad (24)$$

$$\theta = \arcsin(V_{yp}/V_p) \quad (25)$$

式中: D_p 为空投伞受到的阻力; ρ 为大气密度; V_p 为空投伞的总速度; θ 为空投伞的运动路径角; m_p 为空投伞及附属物的质量; Δt 为单位时间; V_{xp} 为空投伞在 x 轴方向上的速度分量; V_{yp} 为空投伞在 y 轴方向上的速度分量。

空投伞在单位时间内位置变化量如下:

$$\Delta x_p = |V_{xp}| \Delta t \quad (26)$$

$$\Delta y_p = |V_{yp}| \Delta t \quad (27)$$

$$\Delta z_p = |V_{wind}| \Delta t \quad (28)$$

式中: Δx_p 、 Δy_p 、 Δz_p 分别为空投伞在单位时间内在 x 轴、 y 轴、 z 轴上的位置变化量。

1.3 空投伞遭遇尾涡后的动力学响应模型

由 Hallock-Burnham 速度模型可以得到, 尾涡涡核半径处存在尾涡诱导速度的最大值。所以当空投伞边缘接触到尾涡涡核半径处的位置及再靠近涡核的位置处时(见 图 5), 空投伞处于最危险的尾涡遭遇情况。参考预测多机编队空投遭遇尾涡模型——GRF1, 其将空投物下落过程中稳定后和着陆前这段时间内遭遇尾涡时的诱导速度分别超过 4.572 m/s、6.096 m/s、7.620 m/s 作为空投物遇险等级为轻度、中度、重度的标准^[18]。所以将空投伞下落过程中稳定后和着陆前这段时间内处于最危险的尾涡遭遇情况时为轻度遇险作为研究空投伞遭遇尾涡的安全阈值, 若是超过安全阈值, 则标记空投伞处于尾涡危险区域。

由空投伞的三维坐标及尾涡的三维坐标计算得到空投伞与尾涡的距离 D 为

$$D = \sqrt{(x_p - x_w)^2 + (y_p - y_w)^2 + (z_p - z_w)^2} \quad (29)$$

式中: x_p 、 y_p 、 z_p 分别为空投伞在某时间点处的 x 轴、 y 轴、 z 轴坐标; x_w 、 y_w 、 z_w 分别为尾涡在某时

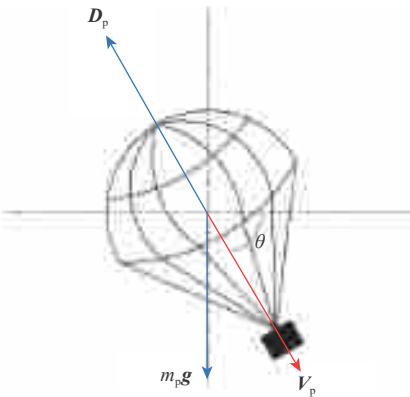


图 4 空投伞受力分析示意图
Fig. 4 Schematic diagram of force analysis of airdrop parachute



图 5 空投伞边缘接触尾涡涡核半径处的位置示意图
Fig. 5 Schematic diagram of edge of airdrop parachute at radius of wake vortex nucleus

间点处的 x 轴、 y 轴、 z 轴坐标。

空投伞处于最危险的尾涡遭遇情况时空投伞与尾涡的距离阈值 $D_{\text{threshold}}$ 为尾涡涡核半径 r_c 与空投伞伞冠半径之和 $r_{\text{parachute}}$, 表达式为

$$D_{\text{threshold}} = r_c + r_{\text{parachute}} \tag{30}$$

比较空投伞与尾涡的距离 D 与距离阈值 $D_{\text{threshold}}$, 当 $D \leq D_{\text{threshold}}$ 时, 空投伞就处于最危险的尾涡遭遇情况。

对“空投伞在下落过程中稳定后和着陆前这段时间”进行说明: 空投伞离开运输机后, 未打开时, 重力大于空气阻力, 合力向下, 与速度方向相同, 空投伞加速下落, 随着速度的增大, 空气阻力增大; 打开空投伞增大了受力面积, 空气阻力迅速增大, 大于重力后, 合力向上, 与速度方向相反, 空投伞开始减速下落, 空气阻力减小, 当空气阻力减小到等于重力时, 空投伞就开始匀速下落, 接下来空投伞是以稳定状态下落的, 如图 6 所示。

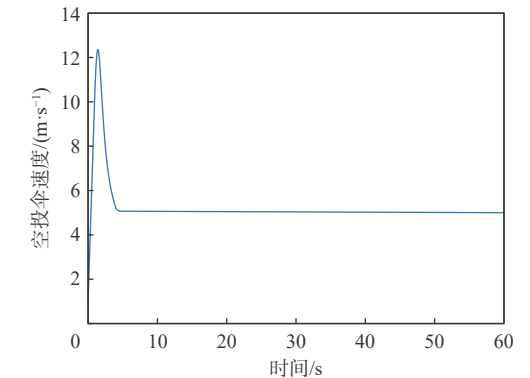


图 6 空投伞速度随时间变化关系
Fig. 6 Relationship of airdrop parachute velocity over time

2 运输机编队空投的危险性计算分析

以美军 C-17 运输机为例进行计算分析, 翼展为 51.81 m, 质量为 181 436 kg。编队飞行间距: 前后间距为 3 500 m, 左右间距为 100 m, 假定受到右侧风影响, 其速度为 2.5 m/s。选用的圆形空投伞, 主要参数如表 1 所示。用 MATLAB 编程计算分析。

表 1 空投伞参数

Table 1 Airdrop parachute parameters

空投伞及附属物的质量/kg	空投伞未打开前附属物的阻力系数	附属物的参考面积/ m^2	空投伞的最小参考面积(即空投伞未打开时)/ m^2
118	0.5	1.6	0.25

2.1 编队构形变化对编队空投遭遇尾涡的影响
3 机编队飞行常见的构形有“人”字形编队和“一”字形编队, 如图 7 和图 8 所示。

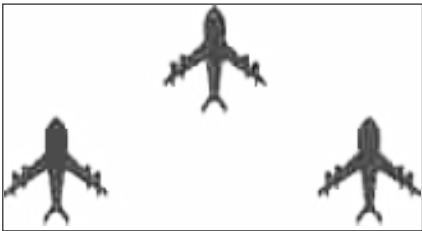


图 7 “人”字形编队
Fig. 7 Herringbone formation

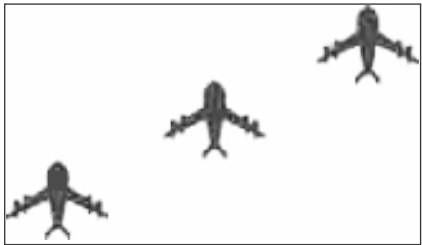


图 8 “一”字形编队
Fig. 8 Single file formation

假定 3 架运输机在 400 m 高度上以 70 m/s 的速度飞行, 空投伞伞冠半径为 2.5 m, 开始打开空投伞的时间点为第 1 s 初, 温度偏差为 0, 分析后面 2 架运输机的空投伞下落过程中遭遇尾涡的情况。在经历 140 s 后, 根据 1.1 节中的坐标系定义, “人”字形编队空投时, 以编队中左后方运输机的重心为坐标原点; “一”字形编队空投时, 以编队中后方运输机的重心为坐标原点。过原点以飞机纵轴前后延伸为 x 轴, 指向后为正方向, 因此, 其值由正到负; 过原点以飞机立轴上下延伸为 y 轴, 指向上为正方向; 过原点以飞机横轴左右延伸为 z 轴, 指向右为正方向。如图 9 和图 10 所示, “俯视图”视角为从飞机正上方朝下方看去, 横轴为坐标系中的 z 轴, 纵轴为坐标系中的 x 轴, 彩色线段代表运输机尾涡演化轨迹和空投伞降落轨迹在 xOz 平面上的投影。

由图 9 和图 10 可知, 受右侧风影响, 2 种编队飞行构形中左后方运输机的空投伞会遭遇前机右涡产生的尾涡流场的危险。像这种空投伞遭遇尾涡危险的情况, “一”字形编队存在 2 个“左后方运输机”的情况, 所以“一”字形编队空投时空投伞处于尾涡危险区域的时间是“人”字形编队空投的

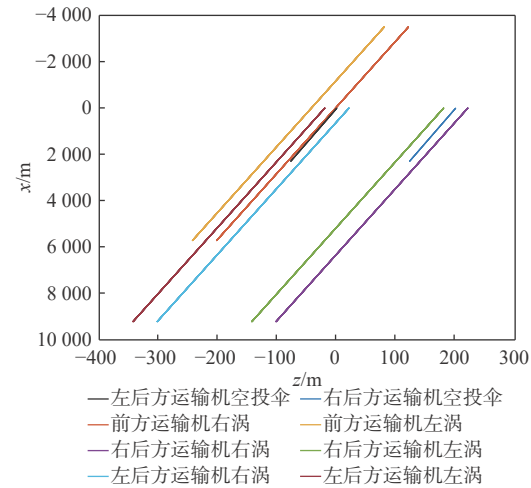


图 9 “人”字形编队飞行的运输机尾涡演化轨迹和空投伞降落轨迹

Fig. 9 Evolution trajectory of wake vortex of transport aircraft and landing trajectory of airdrop parachute in herringbone formation flight

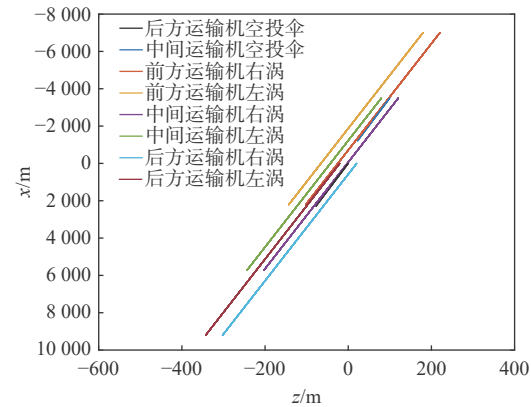


图 10 “一”字形编队飞行的运输机尾涡演化轨迹和空投伞降落轨迹

Fig. 10 Evolution trajectory of wake vortex of transport aircraft and landing trajectory of airdrop parachute in single file formation flight

2.0 倍。

2.2 飞行速度变化对编队空投遭遇尾涡的影响

假定 3 架运输机“人”字形编队飞行, 空投伞伞冠半径为 2.5 m, 开始打开空投伞的时间点为第 1 s 初, 温度偏差为 0, 分析后面 2 架运输机的空投伞下落过程中遭遇尾涡的情况。图 11 为飞行速度变化对空投伞处于尾涡危险区域的时间的影响。由图 11 可知, 同一飞行速度下随着空投高度的增加, 空投伞降落过程中处于尾涡危险区域的时间先增加再减小。飞行速度对空投伞遭遇尾涡的影响较为敏感, 不同飞行速度下空投伞降落过程中遭遇尾涡危险对应的空投高度范围差距很大, 当飞行速度为 65 m/s 时, 空投伞降落过程中遭遇尾涡危险对应的空投高度范围为 1 900~3 300 m, 当空投高度为

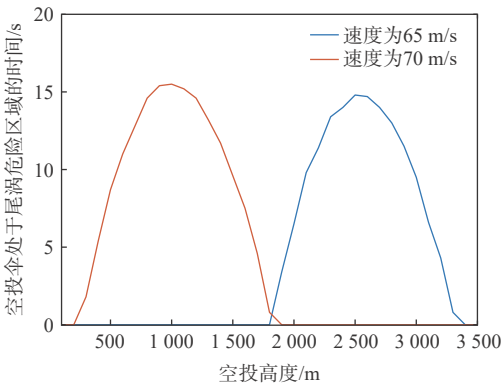


图 11 飞行速度变化对空投伞处于尾涡危险区域的时间的影响

Fig. 11 Effect of flight speed variation on time of airdrop parachute in wake vortex danger zone

2 500 m 时, 空投伞降落过程中处于尾涡危险区域的时间最久; 当飞行速度为 70 m/s 时, 空投伞降落过程中遭遇尾涡危险对应的空投高度范围为 300~1 800 m, 当空投高度为 1 000 m 时, 空投伞降落过程中处于尾涡危险区域的时间最久。这是因为飞机的飞行速度越大, 与空投伞的相对速度越大, 空投伞就会在越低的空投高度上遭遇尾涡危险。

2.3 空投伞伞冠半径变化对编队空投遭遇尾涡的影响

假定 3 架运输机“人”字形编队飞行, 飞行速度为 70 m/s, 开始打开空投伞的时间点为第 1 s 初, 温度偏差为 0, 分析后面 2 架运输机的空投伞下落过程中遭遇尾涡的情况。空投伞伞冠半径越大, 开伞用时越长, 假定 2 种空投伞伞冠半径和开伞用时的关系: ①假设伞冠半径为 2 m 时, 开伞用时为 5 s, 当伞冠半径每增加 0.5 m 时, 开伞用时增加 1 s; ②假设伞冠半径为 2 m 时, 开伞用时为 4 s, 当伞冠半径每增加 0.5 m 时, 开伞用时增加 2 s。图 12 为空投伞伞冠半径变化对空投伞处于尾涡危险区域的时间的影响, 从图中可以看出, 2 种关系影响的趋势是一致的, 同一空投伞伞冠半径时随着空投高度的增加, 空投伞处于尾涡危险区域的时间先增加再减小。同一空投高度时空投伞伞冠半径越大, 空投伞伞冠面积就越大, 与尾涡流场接触的概率就越大, 空投伞处于尾涡危险区域的时间就越长。

2.4 开始打开空投伞的时间点变化对编队空投遭遇尾涡的影响

假定 3 架运输机“人”字形编队飞行, 飞行速度为 70 m/s, 空投伞伞冠半径为 2.5 m, 温度偏差为 0, 分析后面 2 架运输机的空投伞下落过程中遭遇尾涡的情况。空投伞出舱后在空中自由下落一段时间, 那么开始打开空投伞的时间点越晚, 自由下落

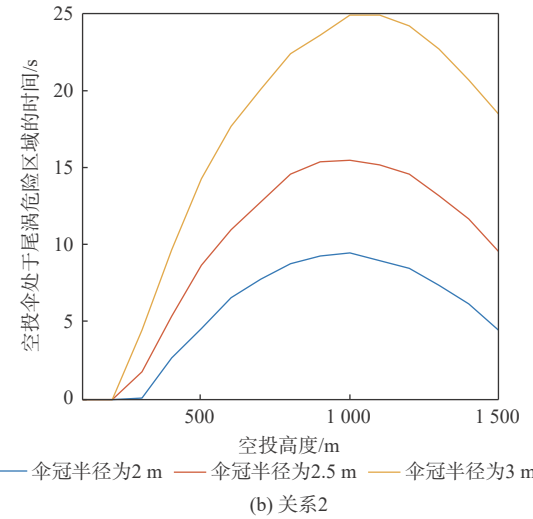
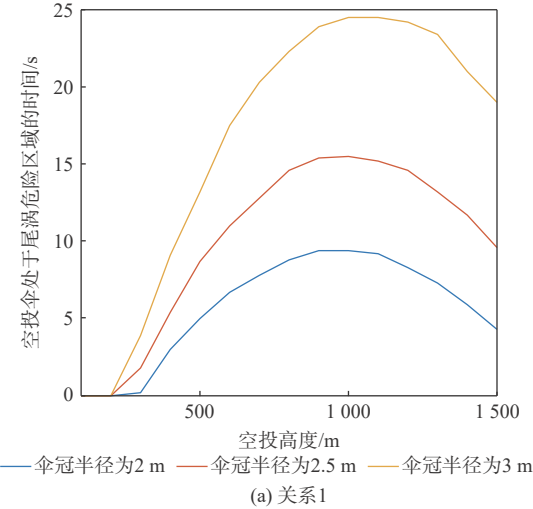


图 12 空投伞伞冠半径变化对空投伞处于尾涡危险区域时间的影响

Fig. 12 Effect of airdrop parachute canopy radius variation on time of airdrop parachute in wake vortex danger zone

的时间越长,开始打开空投伞的时间点这一时刻空投伞速度越大,开伞用时越短。假设 2 种开始打开空投伞的时间点与开伞用时的关系:①开始打开空投伞的时间点为第 0 s 初时,开伞用时为 7 s,当开始打开空投伞的时间点每推迟 1 s 时,开伞用时加快 1 s;②开始打开空投伞的时间点为第 0 s 初时,开伞用时为 8 s,当开始打开空投伞的时间点每推迟 1 s 时,开伞用时加快 2 s。图 13 为开始打开空投伞的时间点变化对空投伞处于尾涡危险区域的时间的影响,由图可知,2 种关系影响的趋势是一致的,在 100~1 000 m 范围内,空投高度越高,开始打开空投伞的时间点越早,意味着空投伞达到稳定状态的时间就越早,相同时间下空投伞下落相较于尾涡下沉越慢,越能避开尾涡危险区域,那么空投伞处于尾涡危险区域的时间就越短。在空投高度 1 000 m 附近,空投伞降落过程中处于尾涡危险区域的时间达到最大。在 1 000~1 500 m 范围内,空投高度越

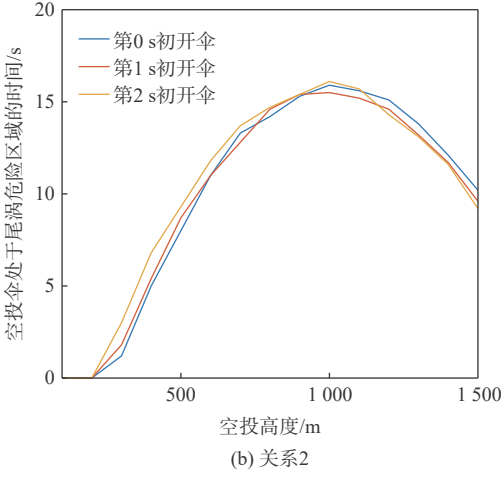
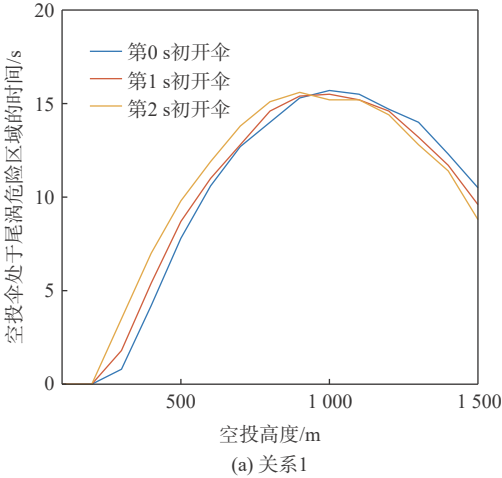


图 13 开始打开空投伞的时间点变化对空投伞处于尾涡危险区域时间的影响

Fig. 13 Effect of time to open airdrop parachute variation on time of airdrop parachute in wake vortex danger zone

高,开始打开空投伞的时间点越晚,空投伞加速下落的时间越久,比尾涡下沉得快,那么空投伞处于尾涡危险区域的时间就越短。

2.5 温度偏差变化对编队空投遭遇尾涡的影响

假定 3 架运输机“人”字形编队飞行,飞行速度为 70 m/s,空投伞伞冠半径为 2.5 m,开始打开空投伞的时间点为第 1 s 初,分析后面 2 架运输机的空投伞下落过程中遭遇尾涡的情况。图 14 为温度偏差变化对空投伞处于尾涡危险区域的时间的影响,其中,ISA 表示国际标准大气。由图可知,随着空投高度的增加,任一温度偏差下,空投伞降落过程中处于尾涡危险区域的时间都是先增加再减少的趋势,但空投伞降落过程中处于尾涡危险区域时间最长对应的空投高度不同,温度偏差从+10℃~0℃再到-10℃变化时,空投伞降落过程中处于尾涡危险区域时间最长对应的空投高度从 600~1 000 m 再到 1 400 m,也就是温度偏差每减少 10℃,空投伞降落过程中处于尾涡危险区域时间最长对应的空

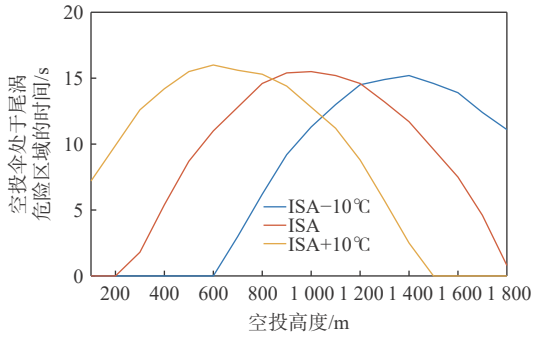


图 14 温度偏差变化对空投伞处于尾涡危险区域的时间的影响

Fig. 14 Effect of temperature deviation variation on time of airdrop parachute in wake vortex danger zone

投高度就增加 400 m。在同一空投高度下,温度偏差越大,大气密度越低,尾涡初始环量越大,空投伞降落过程中遭遇尾涡时的诱导速度越大,空投伞处于尾涡危险区域的时间持续越长,那么温度偏差越大的,空投伞降落过程中处于尾涡危险区域时间最长对应的空投高度就越低。

3 空投中的运输机编队飞行安全间距计算分析

假定 3 架运输机“人”字形编队飞行,飞行速度为 70 m/s,空投伞伞冠半径为 2.5 m,开始打开空投伞的时间点为第 1 s,温度偏差为 0。

如图 15 和图 16 所示,当左右间距为 100 m 时,不同空投高度处安全的前后间距。由图可知,空投高度从 100~200 m,安全的前后间距为 3 500 m;空投高度从 300~1 000 m,安全的前后间距在逐渐变大,从 500 m 开始,空投高度每增加 100 m,安全的前后间距就增加 20 m。

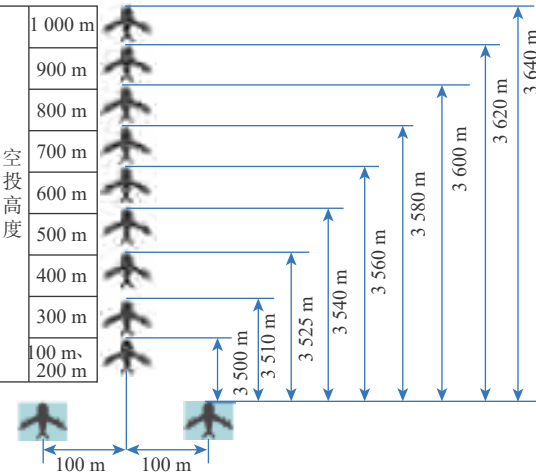


图 15 改变前后间距的编队飞行示意图

Fig. 15 Schematic diagram of formation flight with change in the front and back spacing

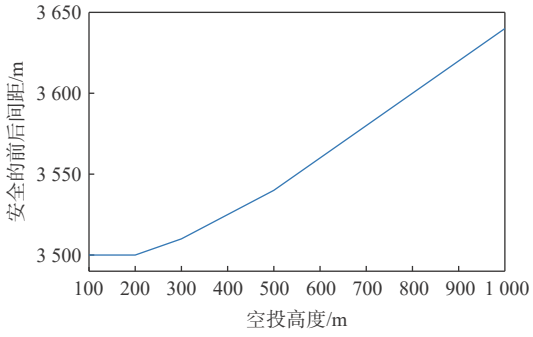


图 16 不同空投高度下安全的前后间距

Fig. 16 Safe front and back spacing at different airdrop heights

如图 17 和图 18 所示,当前后间距为 3 500 m 时,不同空投高度处安全的左右间距。由图可知,空投高度从 100~200 m,安全的左右间距为 100 m;空投高度从 300~1 000 m,安全的左右间距为 110 m。

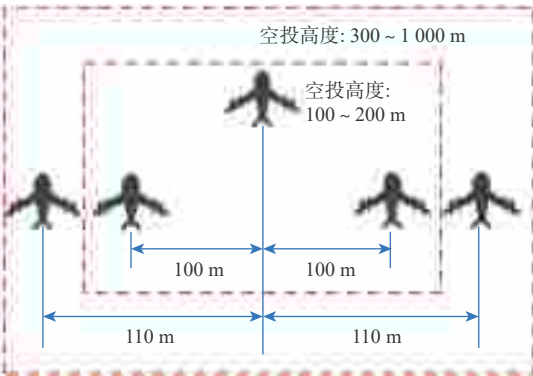


图 17 改变左右间距的编队飞行示意图

Fig. 17 Schematic diagram of formation flight with change in the left and right spacing

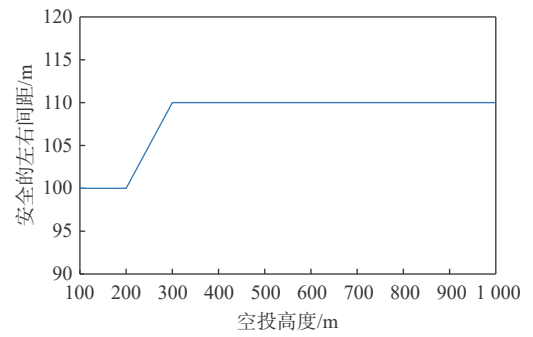


图 18 不同空投高度下安全的左右间距

Fig. 18 Safe left and right spacing at different airdrop heights

4 结 论

针对运输机编队飞行空投时面临着空投伞遭遇尾涡危险的问题,提出运输机尾涡对空投伞的影响与编队空投间距的计算方法,建立空投伞降落过程遭遇尾涡的风险评估模型,对运输机编队空投的危险性及安全间距进行了计算分析。研究结果表明:

- 1) “一”字形编队空投时空投伞处于尾涡危险

区域的时间是“人”字形编队空投的2.0倍。

2) 随着空投高度的增加,运输机飞行速度、空投伞伞冠半径、开始打开空投伞的时间点、温度偏差这4个因素对空投伞降落过程中处于尾涡危险区域的时间的影响都是先增加再减小。

3) 3架C-17运输机“人”字形编队空投,当空投高度从100~1 000 m变化时,若左右间距为100 m不变,安全的前后间距随着空投高度的升高在逐渐变大,从500 m开始,空投高度每增加100 m,安全的前后间距就增加20 m。若前后间距为3 500 m不变,空投高度从100~200 m对应安全的左右间距为100 m;空投高度从300~1 000 m对应安全的左右间距为110 m。

参考文献 (References)

[1] HARTJES S, VAN HELLENBERG HUBAR M E G, VISSER H G. Multiple-phase trajectory optimization for formation flight in civil aviation[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2019, 10(2): 453-462.

[2] HU Y, DAI W, PRATS MENÉNDEZ X. An optimization method of formation flight for minimizing fuel consumption[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(2): 306-315.

[3] ANT CZAK A, LASEK M, SIBILSKI K. Efficient positioning of two long-range passenger aircraft in formation flight[J]. Transactions on Aerospace Research, 2022(3): 21-31.

[4] ZHANG J, SHENG H L, CHEN Q, et al. A four-dimensional space-time automatic obstacle avoidance trajectory planning method for multi-UAV cooperative formation flight[J]. Drones, 2022, 6(8): 192.

[5] SHENG H L, ZHANG J, YAN Z Y, et al. New multi-UAV formation keeping method based on improved artificial potential field[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(11): 249-270.

[6] 徐肖豪, 孟令航, 赵巍飞. 基于几何方法的洲际航空编队飞行路径规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1155-1164.

XU X H, MENG L H, ZHAO Y F. Geometric approach for inter-continental formation flight path planning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(7): 1155-1164 (in Chinese).

[7] 谷润平, 代树旺, 魏志强. 基于尾流效应的编队飞行优化分析[J]. 飞行力学, 2021, 39(1): 23-28.

GU R P, DAI S W, WEI Z Q. Analysis of wake effect based formation flight optimization[J]. Flight Dynamics, 2021, 39(1): 23-28(in Chinese).

[8] 朱战霞, 袁建平. 无人机编队飞行问题初探[J]. 飞行力学, 2003, 21(2): 5-7.

ZHU Z X, YUAN J P. Discuss on formation flight of UAV[J]. Flight Dynamics, 2003, 21(2): 5-7(in Chinese).

[9] 张佳龙, 闫建国, 张普, 等. 三架固定翼无人机协同编队飞行避障策略[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 123-129.

ZHANG J L, YAN J G, ZHANG P, et al. Collision avoidance strategy of three fixed-wing unmanned aerial vehicles cooperative formation flight[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(1): 123-129(in Chinese).

[10] 郑锐平, 史静平, 屈晓波. 紧密编队飞行的建模控制与仿真[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(5): 1039-1045.

ZHENG R P, SHI J P, QU X B. Modeling, simulation, analysis and control of close formation flight[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(5): 1039-1045(in Chinese).

[11] CHEN J, SHI Z K. Aircraft modeling and simulation with cargo moving inside[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 191-197.

[12] XU B, CHEN J. Review of modeling and control during transport airdrop process[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(6): 1729881416678142.

[13] CAO Y H, WEI N. Flight trajectory simulation and aerodynamic parameter identification of large-scale parachute[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020, 2020: 5603169.

[14] LI Y J, QU C Y, LI J, et al. Modelling of parachute airborne clusters flight dynamics and parachute interactions[J]. Aerospace, 2023, 10(1): 51.

[15] 马骏, 孙秀霞, 董文瀚, 等. 运输机重装连续空投建模与特性分析[J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 66-70.

MA J, SUN X X, DONG W H, et al. Modeling and analysis of transport aircraft heavy-weight sequential airdrop[J]. Computer Simulation, 2013, 30(2): 66-70(in Chinese).

[16] 李山, 权文, 苏力德, 等. 基于改进NSGA-II算法的双运输机重装空投研究[J]. 电光与控制, 2023, 30(10): 40-45.

LI S, QUAN W, SU L D, et al. Heavy equipment airdrop of dual transport aircraft based on improved NSGA-II algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2023, 30(10): 40-45(in Chinese).

[17] 郭鲲, 黄立恒, 谢秀川. 运输机空投降落伞落点散布影响因素仿真研究[J]. 长江信息通信, 2023, 36(1): 61-64.

GUO K, HUANG L H, XIE X C. A simulation research on the impact factors of the dispersion of transport aircraft airdrop parachute's landing positions[J]. Changjiang Information & Communications, 2023, 36(1): 61-64(in Chinese).

[18] BORER N, BARROWS T, LEVINE D, et al. Formation airdrop scaling effects on aircraft wake vortex formation and interaction[C]// Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston: AIAA, 2013.

Influence of transport aircraft wake vortex on parachute and calculation method of formation airdrop spacing

WEI Zhiqiang^{1,*}, XU Ben¹, ZHOU Dingfu²

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. NORAL Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The pursuit of high efficiency should take into account the risk that the transport aircraft wake vortex poses to the parachute, even though the transport aircraft formation airdrop can carry more equipment and commodities to the designated location in the shortest amount of time. In order to solve this problem, the research on the influence of transport aircraft wake vortex on parachute and the calculation method of formation airdrop spacing is proposed. Firstly, the risk assessment model of the wake vortex encountered during the airdrop parachute landing process was established. Secondly, the danger of the transport aircraft formation airdrop was calculated and analyzed. Thirdly, the safety transport aircraft formation airdrop spacing was calculated and analyzed. The results show that the time of the single file formation airdrop in the wake vortex danger area is 2.0 times that of the herringbone formation airdrop. With the increase of the airdrop altitude, the influence of the four factors of the transport aircraft's flight speed, the radius of the parachute canopy, the time to open the parachute, and the temperature deviation on the time of the airdrop parachute during landing in the wake vortex danger area increases first and then decreases. Three C-17 transport aircraft were airdropped in a herringbone formation when the airdrop altitude changed from 100 meters to 1 000 meters. If the left and right spacing is 100 meters, the safe front and back spacing gradually increases with the increase of the airdrop altitude, starting from 500 meters, the airdrop altitude increases by 20 meters for every 100 meters. When the airdrop altitude shifts from 100 to 200 meters, the safe left and right spacing is 100 meters; when the airdrop altitude shifts from 300 to 1 000 meters, the safe left and right spacing is 110 meters if the front and rear spacing is 3 500 meters.

Keywords: wake vortex field; formation airdrop; parachute; wake vortex encounter; airdrop altitude

Received: 2024-01-30; Accepted: 2024-03-22; Published Online: 2024-04-10 19:01

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240409.1334.002

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (U2133210); Open Fund of Key Laboratory of Lidar and Device Technology (LLD2023-008)

* Corresponding author. E-mail: zqwei@cauc.edu.cn

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0011

基于自适应圆弧状路径搜索的 地磁感知导航定向方法

李红*, 刘恒宇, 徐晨燕

(西安邮电大学 自动化学院, 西安 710121)

摘 要: 水下自主无人潜航器 (AUV) 在海洋探索、军事领域上发挥着巨大的作用。针对水下自主无人潜航器在无先验信息情况下的导航问题, 提出一种圆弧状路径搜索的地磁感知导航定向方法。该方法建立载体的地磁感知导航模型, 将导航过程转化为多目标优化问题; 载体以圆弧状路径, 感知路径空间中目标函数的变化趋势, 从而确定目标方向; 该方法自适应选择不同的搜索间隔以适应不同搜索阶段, 从而实现自主无人潜航器的导航定向任务。通过仿真实验分析, 结果表明: 所提方法能够使水下自主无人潜航器在无先验数据地磁图的情况下到达预设目标地点, 通过与其他搜索算法对比, 验证了所提方法的有效性与高效性。

关 键 词: 自主导航; 地磁导航; 多目标优化; 水下自主潜航器; 磁趋向性

中图分类号: U666.1; TB18

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1048-07

海洋占据了地球上大多数的面积, 是地球上最大的生态系统之一, 其蕴含了丰富的自然资源。水下自主无人潜航器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 作为人类海洋探索主要途径之一^[1], 在军事、救援、海洋勘探等领域发挥着巨大的作用。由于深海环境中电磁波传播受到较大的制约, 也没有固定的基站提供导航服务, 因此, 水下自主无人潜航器导航问题是极具挑战性的问题。面对该问题科学界提出了不同的解决方案, 如利用地球物理场^[2-4]进行导航, 如地磁^[5]、地形^[6]、重力场导航^[7-8]等。

地磁场是地球表面存在的稳定且具有大小和方向的物理场, 并且有多种地磁分量都与地理位置信息有关, 同时地磁场导航对卫星和信号基站等设施没有依赖性, 适用于水下、地下等恶劣环境。通过传感器获取地磁场的地理参数, 从而完成定位导

航任务, 该方法具有较强的隐蔽性、安全性。

地磁场导航根据有无先验信息可划分为有先验地磁图导航和无先验地磁图导航。在有先验地磁图导航提供全局信息的情况下, 主要研究集中在地磁匹配框架下的导航方法, 其需要预先获取该地区的高精度地磁图, 利用实测地磁特征与先验地磁图进行相关匹配, 从而完成定位。Wang等^[9]提出一种基于改进粒子群优化的地磁匹配算法将修正的Metropolis准则应用于粒子群优化, 并将活动思想引入活动算法中, 从而提高传统地磁匹配算法的定位精度。Pang等^[10]提出一种基于导航误差粗略估计和搜索区域自适应的地磁导航方法, 显著减少匹配搜索区域和搜索步长, 以提高匹配精度和时效性。

由于此类导航方法需要先验高精度地磁图, 无法适用于未知区域, 这大大限制了地磁导航的适用

收稿日期: 2024-01-08; 录用日期: 2024-04-09; 网络出版时间: 2024-04-22 19:11

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240419.1038.002

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划 (2024JC-YBMS-549); 西安市先进控制与智能处理重点实验室 (2019220714SYS022CG04); 陕西省重点产业链项目 (2021ZDLGY04-04); 陕西省重点研发计划项目 (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资助项目 (CXJJZL2023033)

*通信作者. E-mail: lihong@xupt.edu.cn

引用格式: 李红, 刘恒宇, 徐晨燕. 基于自适应圆弧状路径搜索的地磁感知导航定向方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1048-1054. LI H, LIU H Y, XU C Y. Geomagnetic perception navigation orientation method based on adaptive circular path search [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1048-1054 (in Chinese).

范围。针对无先验地磁图提供全局信息的情况, 主要研究集中在贝叶斯滤波框架下^[11], 除此之外, Zhang 等^[12]提出一种具有控制和状态约束的模型预测控制算法, 该算法仅利用地磁场的赤纬分量和倾角分量进行水下导航, 无需事先构建地磁图。Zhou 等^[13]提出一种基于差分进化算法的仿生导航算法, 通过改进进化策略的突变机制, 在种群中获得更好的个体。由于进化算法不使用种群中其他个体中包含的信息, 随机生成新个体, 这使得导航轨迹随机性大、导航过程耗时长, 搜索效率低下。为此, 本文提出一种圆弧状路径搜索的地磁感知导航定向方法, 在无先验信息的条件下, 将导航过程归纳为地磁多参量目标的搜索问题, 通过圆弧状路径感知地磁信息变化并与自适应搜索步长相结合, 完成导航任务。

本文方法首先建立载体地磁感知导航模型, 将载体导航问题转换成多地磁参量收敛问题; 然后, 通过圆弧状路径搜索算法对路径上目标函数值变化大小进行比较, 寻找目标函数变化最大的航向角即朝向目标点的方向角; 同时, 根据目标函数的大小, 载体自适应调整搜索间隔, 在较短的时间内完成航向角的搜索, 从而实现自主无人潜航器的导航任务。

1 问题描述

1.1 地磁参量

地球磁场是一个包含多个分量的混合场, 其中, 地磁参量是描述某点地磁场大小和方向的物理量。在地球任意一位置的磁场均可以用一组地磁参量来描述:

$$\mathbf{B} = (B_1, B_2, \dots, B_j) \quad (1)$$

目前常用的地磁分量要素共有 7 个, 其位置关系如图 1 所示。其中, 地磁场正北分量为 B_x 、地磁场正东分量为 B_y 、地磁场垂直分量为 B_z 、地磁场总强度为 B_F 、水平磁场强度为 B_H 、地磁偏角为 B_D 、地

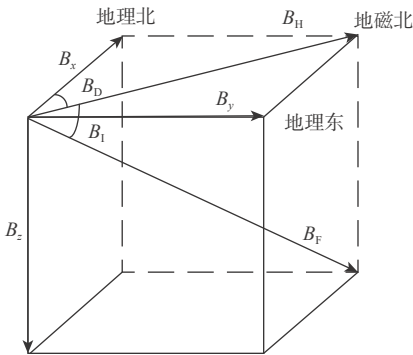


图 1 地磁参量图

Fig. 1 Geomagnetic parameters map

磁倾角为 B_I 。

1.2 AUV 运动模型

在 AUV 导航过程中, 可忽略海拔对磁参量的影响, 因此, 可建立坐标系将 AUV 地磁感知导航运动模型化为二维平面的导航问题, 其运动方程可以表示为

$$\begin{cases} x_{N+1} = x_N + v \cos \theta_N \\ y_{N+1} = y_N + v \sin \theta_N \\ \theta_{N+1} = \theta_N + \Delta \theta_N \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 为时间信息; θ_N 为 N 时刻的航向角大小; x_N 为 N 时刻时的经度大小; y_N 为 N 时刻时的纬度大小; $\Delta \theta_N$ 为偏转角的大小; v 为速度。

1.3 地磁感知导航目标函数建立

AUV 的航行过程中, 已知目标点地磁参量的情况下, 通过磁传感器实时测量所在位置的地磁参量, 把航行过程转化为一组地磁参量中第 i 个地磁参量 B_i , 由初始点地磁参量 B_i^0 向目标点 T 地磁参量 B_i^T 逐渐收敛的过程为

$$f(B_i) = (B_i^N - B_i^T)^2 \quad (3)$$

式中: B_i^N 为 N 时刻第 i 个地磁参量的值; B_i^T 为第 i 个地磁参量目标点 T 的值; $f(B_i)$ 为在 N 时刻第 i 个地磁参量的目标函数。应用到多个地磁参量, 每个地磁参量都收敛至目标点 T 地磁参量值, 各个地磁参量的目标函数 $f(B_i)$ 之和趋于 0, 即可认为到达目标点 T , 即

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^j f(B_i^N) = 0 \quad (4)$$

因此, AUV 导航的过程可以描述为一个多目标优化问题:

$$\begin{cases} \min F(B, N) = (f_1, f_2, \dots, f_j) \\ \text{s.t. } f_i(S^N, B_i^N, B_i^T) \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_i 为约束条件; S^N 为 N 时刻的路径。由于不同的地磁参数纲量不同, 因此, 需要对各个地磁参量进行归一化处理, 多参量的目标函数可以定义为

$$F(B_i^N) = \sum_{i=1}^j \frac{(B_i^N - B_i^T)^2}{(B_i^0 - B_i^T)^2} \quad (6)$$

当 AUV 接近目标点时, 式 (6) 中的分子逐渐减小, $F(B^N)$ 也随之减小, 此时测量的地磁参量值无限接近目标点 T 的地磁参量, 可描述为

$$|F(B^N)| < \varepsilon \quad (7)$$

式中: ε 为一个无限趋于 0 的极小值, 表示目标函数无限接近于目标值, 即可认为到达目标点, 在仿真中, ε 的大小决定了导航的精确度, ε 值越小导航精

准确度越高。

在相同步长的情况下,将上一时刻 $N-1$ 的目标函数值与该时刻 N 的目标函数值做差,从而来评判每步的航向角的好坏,可描述为

$$f(N) = F(B^{N-1}) - F(B^N) \quad (8)$$

若 AUV 向目标点方向移动单位步长,则 $f(N)$ 为正值,路径越优, $f(N)$ 值越大;若 AUV 向目标点反方向移动单位步长则为负值。

2 求解方法

2.1 搜索算法

本文方法是一种利用地理磁参量信息进行水下环境感知与交互的地磁感知导航方法。在载体导航过程中,各点地磁参量数值不同目标函数值也不同,因此,每航行一定间隔步长需要重新搜索最佳的航向角以保证载体没有偏航。为寻找使目标函数收敛的航向角,通过载体上安装的地磁传感器实时感知圆弧轨迹上每点的地磁参量,向目标函数减小最大的方向前进使目标函数逐渐收敛,从而引导载体完成导航任务。导航过程示意图如图 2 所示。

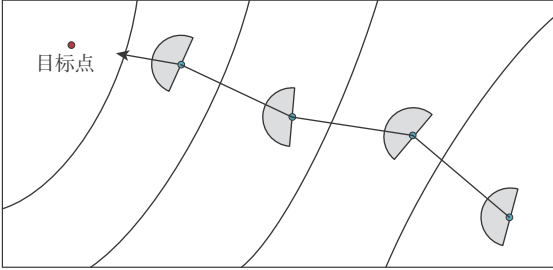


图 2 导航过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of navigation process

本文圆弧状搜索算法具体步骤如下:

步骤 1 初始化。给定起始点地磁参量 B^0 和目标点地磁参量 B^T ,设置载体步长、搜索的方向角,其中,每步搜索的偏转角大小为

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = \dots = \Delta\theta_j \\ \pi = \sum_{i=1}^j \Delta\theta_i \end{cases} \quad (9)$$

步骤 2 进入圆弧状轨迹。记录圆心处目标函数值 $F_0(B^N)$ 。

步骤 3 沿圆弧轨迹前进单位步长。记录新位置的偏转角 $\Delta\theta_i$,通过地磁传感器测得该点的地磁参量,计算目标函数 $F(B_i^N)$ 。

步骤 4 判断该点目标函数是否为极小值点。将该点与圆心处目标函数求差,即

$$f(N) = F(B_0^N) - F(B_i^N) \quad (10)$$

比较半圆弧上各点目标函数 $F(B_i^N) (i = 1, 2, \dots, j)$ 与圆心处目标函数 $F(B_0^N)$ 的差值大小,寻找目标函数下降最大的位置即 $f(N)_{\max}$ 。若是极小值点则进行步骤 5,反之重复步骤 3,搜索过程如图 3 所示。

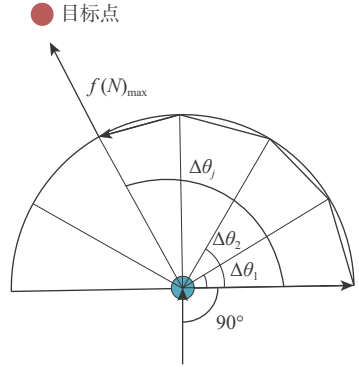


图 3 搜索过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of search process

步骤 5 移动到极小值点位置。以该位置航向角 $\theta_{N+1} = \theta_N + \Delta\theta_j$ 方向前进 α 个步长。

步骤 6 结束搜索。

2.2 自适应搜索间隔

在 AUV 导航的过程即当前地磁参量逐渐趋于目标点地磁参量的过程,也就是目标函数 $\lim_{N \rightarrow \infty} F(B^N)$ 逐渐趋于 0 的过程,如图 4 所示,其中,数字表示磁场强度, nT。

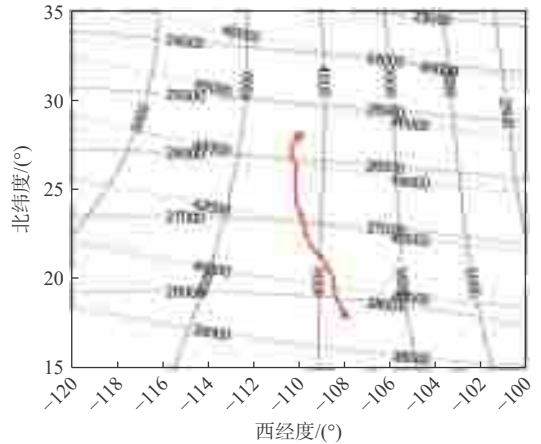


图 4 地磁感知导航过程示意图

Fig. 4 Schematic figure of geomagnetic perception navigation process

图中,用“■”表示载体的起始点,“▲”表示载体目标地点。在起始点时 $F(B^N)$ 的值为 1,随着 AUV 逐渐接近目标点,目标函数 $F(B^N)$ 的值逐渐减小并且趋于 0。通过目标函数的大小可以直观地反映出载体与目标点的距离关系。因此,可根据目标函数的大小在载体导航过程中自适应的调整合理的搜索间隔。

开始阶段 $F(B^N) \in (\xi_2, 1]$, AUV 需要快速地确定目标点方向的航向角, 需要较高频次的搜索, 因此, 可将每次搜索之间的迭代步数设置为较小的 α_1 。在 AUV 脱离开始阶段时即 $F(B^N) \in (\xi_1, \xi_2]$, 此时可设置较大的搜索间隔以减少搜索次数加快算法的收敛, 因此, 可将每次搜索之间的迭代次数设置为较大的 α_2 。在 AUV 即将抵达目标点时即 $F(B^N) \in (0, \xi_1]$, 较大的搜索间隔容易出现错过目标点、围绕目标点振荡甚至背离目标点等情况, 因此, 应该将搜索间隔设置为较小的 α_3 。导航过程流程图如图 5 所示。

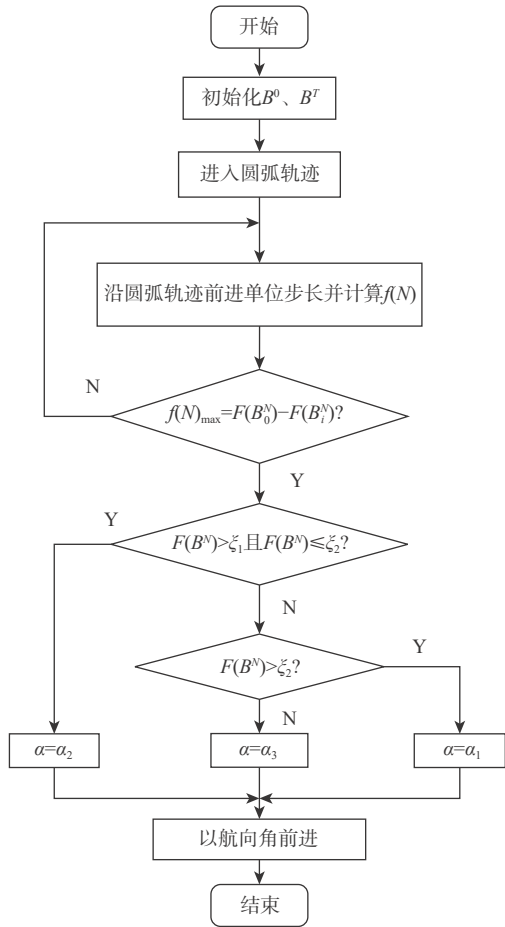


图 5 本文方法流程图
Fig. 5 Flowchart of the proposed method

3 仿真实验

3.1 参数设置

为验证本文方法的可行性, 通过国际地磁模型 (international geomagnetic reference field, IGRF) 模拟载体在航行中实时测得的地磁参量。在载体航行过程中, 从地磁参量中选取相关性^[14]较小的 3 个地磁分量 (B_x, B_y, B_z) 用作导航。在仿真实验中, 用“■”表示载体的起始点, “▲”表示载体目标地点。设定初始地点的地磁参量 $B_x^0 = 27\,971\text{ nT}$ 、 $B_y^0 = 2\,993\text{ nT}$ 、 $B_z^0 = 39\,627\text{ nT}$ 。目标点 T 的地磁参量

$B_x^T = 25\,066\text{ nT}$ 、 $B_y^T = 4\,704\text{ nT}$ 、 $B_z^T = 45\,544\text{ nT}$ 。

在自适应搜索导航方法中, 不同阶段的搜索间隔对算法的性能有着重要的影响。为选择合适的参数, 在相同的实验条件下进行 9 组独立实验各 100 次, 取平均值来比较本文方法在不同参数设置下的性能如表 1 所示。

表 1 实验结果
Table 1 Experimental results

α_1	α_2	α_3	平均步数
5	33	10	429
5	35	10	433
5	30	10	435
10	33	10	426
12	33	10	425
15	33	10	428
12	33	20	412
12	33	22	410
12	33	25	432

由表 1 可知, 若 α_1 较小则会导致在开始搜索阶段时搜索频率过大导致导航过程迭代次数增加。若 α_2 较小则会使载体在巡航阶段搜索间隔较小, 增加搜索频率。若 α_3 较大则会导致载体错过目标点。因此, 综合考虑将参数设置为 $\alpha_1 = 12$, $\alpha_2 = 33$, $\alpha_3 = 22$ 。在这种情况下, 本文方法能实现较好的性能, 其他实验参数设置如表 2 所示, 其中, ξ_1 、 ξ_2 、 v 为系数。

表 2 实验参数
Table 2 Material parameters of experimental article

ε	ξ_1	ξ_2	j	v	α_1	α_2	α_3
0.001	0.1	0.95	6	0.05	12	33	22

3.2 收敛性分析

为验证本文方法的优越性, 在无先验磁图的情况下, 将本文方法与模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法^[15]、Hexpath 算法^[15]与进化算法 (evolutionary algorithms, EA)^[15]进行比较, 同时将各算法设置为相同步长。在相同地磁场模型下, 设置相同的起始点与目标点进行 100 次仿真实验, 取最优路径进行比较。4 种算法导航路径如图 6 所示, 目标函数收敛情况如图 7 所示, 所选相关性较小的 3 个地磁分量收敛情况如图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以看出, 在设定的区域范围内, 各算法均能收敛至目标值。其中, 本文方法到达目的地的迭代次数最小, 收敛速度最快; 其次为 hexpath 算法、SA 算法与 EA。其中, EA 与本文方法的各参量收敛状态较为一致; Hexpath 算法受初始方向角选取的影响较大, 但正东分量的收敛情况表

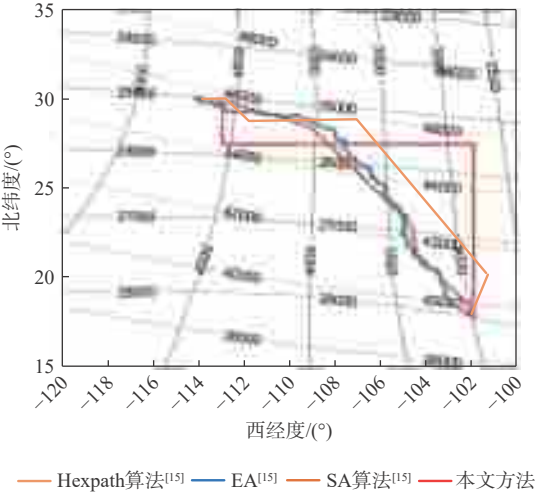


图 6 4 种不同算法路径

Fig. 6 Four different algorithms path

现为先发散再收敛;SA 算法在局部搜索中耗时较长,导致收敛速度较慢;EA 由于方向选择具有随机性,所以路径较为曲折,导致迭代步数较大。

3.3 鲁棒性分析

为验证水下机器人在复杂海底环境下遇到沉船、地下矿藏等地磁异常情况和地磁传感器测量观测系统不稳定产生的噪声等干扰对本文方法的成功率和收敛速度等性能指标的影响,对各地磁参量

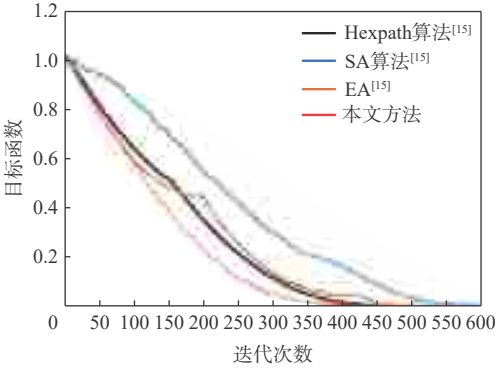


图 7 目标函数收敛图

Fig. 7 Convergence figure of objective function

叠加不同强度高斯噪声,即

$$B_j = A\zeta(t) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{11}$$

式中: A 为地磁异常强度; $\zeta(t)$ 为值域为 0 与 1 的函数; σ 为噪声的标准差; μ 为噪声的时间偏移。一般情况下水下磁异常值在 1~5 nT 之间,在相同地磁场模型和起始点与目标点的情况下,设置 50 次独立实验,验证本文方法在水下地磁干扰情况下的导航性能。

如图 9 所示,本文方法在磁异常强度为 0~2 nT 下仍能达到 99% 成功率,随着地磁异常强度增加,本文方法成功率有下降趋势,总体成功率在 92% 以

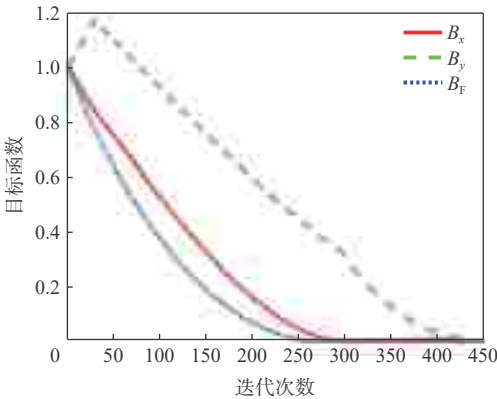
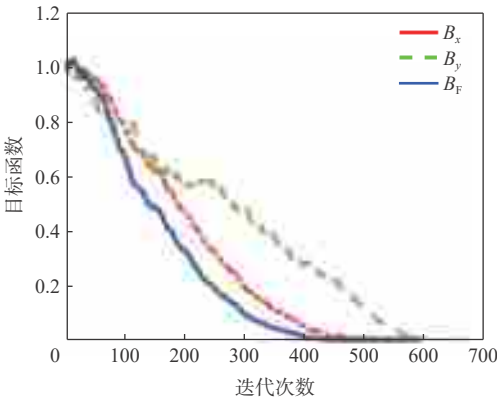
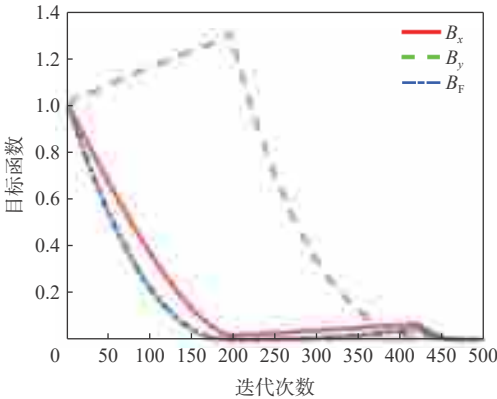
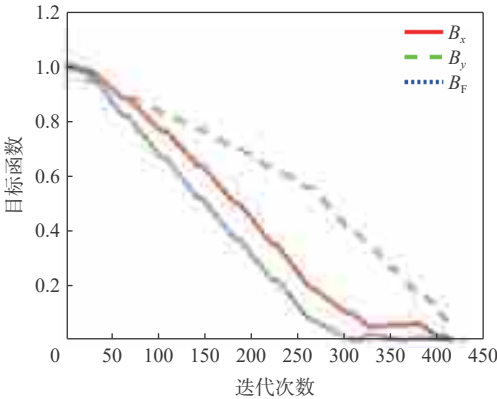


图 8 不同算法各分量收敛情况

Fig. 8 Convergence of each component of different algorithms

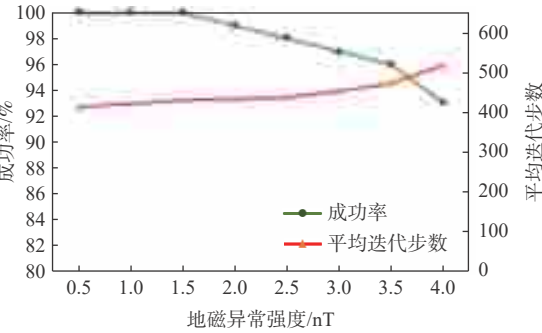


图 9 本文方法的成功率与平均迭代数

Fig. 9 Success rate and average iterations number of the proposed method

上。在 4 nT 较强地磁异常情况下, 相较于理想情况下平均迭代步数仅有小幅度增长。

为验证本文方法在导航路径上遇到大规模地磁异常区域时的导航效果, 在原有 IGRF 国际地磁场模型的基础上对比较容易受到太阳风暴等干扰的水平分量上叠加多峰函数, 模拟地磁场受到干扰。载体导航轨迹如图 10 所示, 三地磁分量收敛图如图 11 所示。

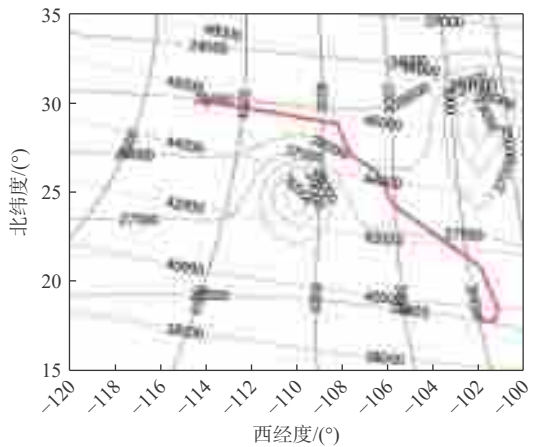


图 10 本文方法路径

Fig. 10 The proposed method path

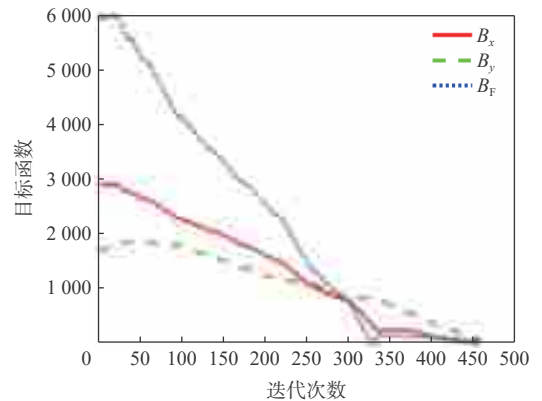


图 11 本文方法地磁分量收敛图

Fig. 11 Convergence figure of geomagnetic components of the proposed method

4 结 论

1) 本文提出一种圆弧状搜索算法的导航定向方法。在不依赖先验信息的情况下, 仅通过地磁传感器感知地磁信息, 从而实现导航任务。同时, 本文方法自适应调整运动步长, 实现较快速收敛至目标点。

2) 在无先验地磁图的情况下, 通过与六边形路径算法、遗传算法、模拟退火算法等进行仿真实验对比, 本文方法能够在较短的步数内到达目标点, 表现出良好的导航效率。

3) 通过仿真实验模拟不同强度的系统噪声及地磁场干扰, 验证了本文方法在 4 nT 地磁干扰强度情况下仍有 92% 的成功率, 表现出良好的鲁棒性。

参考文献 (References)

[1] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27-44.
SONG B W, PAN G, ZHANG L C, et al. Development trend and key technologies of autonomous underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 27-44(in Chinese).
[2] 万晓云, 吴云龙, 郭恒洋, 等. 基于重力场产品的水下匹配导航发展现状及影响因素分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 879-890.
WAN X Y, WU Y L, GUO H Y, et al. Development status and influencing factor analysis of underwater matching navigation based on gravity field products[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(6): 879-890(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 navigation and positioning technology[J]. GNSS World of China, 2022, 47(4): 1-16(in Chinese).
[4] 张小跃, 杨功流, 张春嘉. 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] 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).
[6] 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).
[7] 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: [s. n.], 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: [s. n.], 2023: 1-7(in Chinese).

[8] 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.

[9] WANG W X, LI S X, GUO C. Particle swarm optimization in geomagnetic matching navigation[C]//Proceedings of the International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education. Piscataway: IEEE Press, 2022: 450-453.

[10] PANG Y, ZHOU Z, PAN X, et al. An INS/geomagnetic integrated navigation method for coarse estimation of positioning error and search area adaption applied to high-speed aircraft[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 7766-7775.

[11] QUINTAS J, CRUZ J, PASCOAL A, et al. A comparison of nonlinear filters for underwater geomagnetic navigation[C]//Proceedings of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.

[12] ZHANG Y D, LIU X F, LUO M Z, et al. Bio-inspired approach for long-range underwater navigation using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(8): 4286-4297.

[13] ZHOU Y Q, NIU Y, LIU M Y. Bionic geomagnetic navigation method for AUV based on differential evolution algorithm[C]//Proceedings of the OCEANS 2022, Hampton Roads. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.

[14] LI H, QU J S, JIANG X K, et al. A correlation analysis of geomagnetic field characteristics in geomagnetic perceiving navigation[J]. Frontiers in Neurorobotics, 2021, 15: 785563.

[15] 李红. 基于优化搜索的地磁仿生导航及其在 AUV 中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.

LI H. Geomagnetic bionic navigation based on optimized search and its application in AUV[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018(in Chinese).

Geomagnetic perception navigation orientation method based on adaptive circular path search

LI Hong^{*}, LIU Hengyu, XU Chenyan

(School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In both military defense and ocean exploration, autonomous underwater vehicle (AUV) are crucial. To address the navigation issue of underwater autonomous unmanned submersibles in the absence of prior information, a geo-sensory navigation orientation method based on circular arc path search is proposed. By initially creating a geo-sensory navigation model for the car, this technique turns navigation into a multi-objective optimization problem. Secondly, the vehicle follows a circular arc path and perceives the variation trend of the objective function in the path space to determine the target direction. Furthermore, the method achieves the navigation orientation job of autonomous unmanned submersibles by adaptively choosing alternative search intervals to accommodate varied search stages. It is shown through simulated studies that this approach can make it possible for underwater autonomous unmanned submersibles to arrive at the predefined destination area without the need for previous magnetic field maps. By comparing with other search algorithms, the validity and efficiency of the proposed algorithm are validated.

Keywords: autonomous navigation; geomagnetic navigation; multiobjective optimization; autonomous underwater vehicles; magnetotaxis

Received: 2024-01-08; Accepted: 2024-04-09; Published Online: 2024-04-22 19:11

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240419.1038.002

Foundation items: Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Provincial Department of Science and Technology (2024JC-YBMS-549); Xi'an key laboratory of advanced control and intelligent process (2019220714SYS022CG04); Key Industrial Chain Projects of Shaanxi Province (2021ZDLGY04-04); Key Research and Development Projects of Shaanxi Province (2022NY-087); Shaanxi Provincial Federation of Social Sciences/Shaanxi Provincial Department of Emergency Management Project (2021HZ1121);Supported by 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.1001-5965.2024.0024

基于 FDG-YOLO 轻量化模型的航空发动机损伤检测方法

蔡舒舒*, 何冲

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 针对航空发动机损伤检测深度学习模型在嵌入式设备上部署应用的实时性差、检测精度低等问题, 提出一种轻量化航空发动机损伤检测模型 FDG-YOLO。引入 FasterNet 网络重构 YOLOv5 的主干网络, 解决主干网络参数量大的问题; 通过深度可分离卷积改进 YOLOv5 颈部网络的普通卷积, 减少颈部网络的冗余参数; 以 GSConv 为基础构建 GS C3 结构, 替换原模型的 C3 结构, 增强模型的表达能力和感受野; 在航空发动机损伤数据集进行实验验证。结果表明: 与 YOLOv5 原模型相比, 所提 FDG-YOLO 模型参数量降低了 52.5%, 浮点运算速度降低了 66%, 在嵌入式设备上的平均精度均值 (mAP) 达到 89.6%, 高于其他轻量化模型, 帧率达到 61 帧/s, 检测速度适配于发动机损伤图像采集速度, 能够更好地满足航空发动机损伤检测的智能化应用需求。

关键词: 损伤检测; FDG-YOLO 模型; 轻量化; FasterNet 网络; 深度可分离卷积; GSConv 技术

中图分类号: V263.6; TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1055-09

航空发动机作为飞机的心脏, 对飞机的安全运行起着决定性作用。航空发动机核心部件长期工作在高温、高压、高转速的环境下, 容易出现裂纹、卷边、材料缺失等损伤^[1]。及早检测和准确评估这些损伤对于确保发动机的可靠性、延长其寿命及避免潜在的灾难性事故具有重要意义。目前, 检测航空发动机内部损伤主要依靠孔探检测技术^[2-4], 但孔探检测严重依赖人员的专业技术和经验且检测效率低。自动化的损伤检测方法能够提高检测效率, 避免人为因素的干扰。

近年来, 深度学习技术发展迅速, 被广泛应用于各种目标检测领域。基于深度学习的目标检测模型主要分为二阶段目标检测模型和一阶段目标检测模型 2 大类。在二阶段目标检测模型中, 文献^[5]使

用改进的掩码区域卷积神经网络 (mask region-based convolutional neural networks, Mask R-CNN) 结合卷积注意力模块实现了航空发动机叶片损伤的分类和像素级分割。文献^[6]提出改进的快速区域卷积神经网络 (faster region-based convolutional neural networks, Faster R-CNN) 模型对叶片表面损伤进行检测, 实现了叶片表面高精度的自动损伤检测。二阶段模型具有较高的检测精度, 但其检测过程需要先生成候选区域, 再对这些候选区域进行分类和位置回归, 这种顺序性的处理方式导致了较慢的检测速度, 无法满足实时检测的工作需求。

当前, 工业检测对实时性、准确性和智能化技术的需求不断增加, 使得轻量化智能检测模型成为研究的新热点。以 YOLO^[7] 为代表的一阶段目标检

收稿日期: 2024-01-15; 录用日期: 2024-05-09; 网络出版时间: 2024-05-24 10:37

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240523.1424.001

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (3122023PY11); 复杂零部件智能检测与识别湖北省工程研究中心开放课题资助 (IDICP-KF-2024-07)

* 通信作者. E-mail: csy0313@163.com

引用格式: 蔡舒舒, 何冲. 基于 FDG-YOLO 轻量化模型的航空发动机损伤检测方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1055-1063.

CAI S Y, HE C. Damage detection method for aero-engine based on FDG-YOLO lightweight model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1055-1063 (in Chinese).

测模型舍弃了候选区域生成过程, 直接对目标进行分类和位置回归, 因此, 推理速度更快。文献 [8] 以 YOLOv4 作为基础模型, 在路径聚合网络结构中融合浅层特征与深层特征, 同时去除自下而上的路径增强结构, 并优化聚焦损失中的平衡参数, 改进后模型检测精度提升了 2.17%, 检测速度帧率提升了 1.58 帧/s。文献 [9] 对 YOLOv5 模型进行改进, 在主干网络部分嵌入倒置残差模块与倒置残差注意力模块, 并在特征融合部分设计多尺度特征融合模块, 改进后模型参数量减少了 12.8%, 检测精度提升了 4%, 但检测速度帧率下降了 17 帧/s。文献 [10] 使用轻量化改进的 YOLOv4 模型对航空发动机损伤进行检测, 将主干网络替换为 MobileNetv3, 引入深度可分离卷积并加入卷积注意力模块, 在电脑端检测速度提升了 1.6 倍, 但检测精度下降了 3.55%。文献 [11] 对 YOLOv3 模型进行轻量化改进, 提出 NEW-ROI 操作, 并加入通道筛选模块和沙漏金字塔网络, 实验结果表明, 该模型在嵌入式设备上检测的平均精度均值 (mean average precision, mAP) 为 70.6%, 帧率为 21.1 帧/s。

然而, 在嵌入式设备上应用深度学习模型进行航空发动机损伤检测仍然面临着诸多挑战: ①孔探仪视频采集速度帧率能够达到 60 帧/s, 而现有检测精度较高 (90% 左右) 的模型, 在嵌入式设备上的检测速度滞后于孔探仪损伤数据采集速度, 影响损伤检测应用的智能化、自动化; ②现有轻量化模型检测速度能够与损伤数据采集速度相匹配, 但轻量化

改进牺牲了部分模型检测精度。轻量化模型在嵌入式设备上的检测精度较低, 不能满足损伤检测精度要求。

本文针对深度学习模型在航空发动机损伤检测中存在的问题, 提出 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型, 该模型能够在嵌入式设备上实现航空发动机损伤快速、准确的自动化检测。

1 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型

YOLOv5 是一种基于深度学习的目标检测模型, 其将整个图像作为输入, 并直接在图像中预测目标的边界框和类别概率。YOLOv5 以鲁棒性强、泛化能力强、检测速度快和准确率高而受到广泛关注。本文基于 YOLOv5 模型, 提出一个适用于嵌入式设备的 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型, 模型结构如图 1 所示。

FDG-YOLO 主要由主干网络、颈部网络和检测头 3 部分组成。主干网络主要通过卷积操作和快速空间金字塔池化 (spatial pyramid pooling-fast, SPPF)^[12] 从图像中提取特征; 颈部网络通过特征金字塔结构, 将主干网络提取的不同尺度特征进行融合, 以获取更丰富的语义信息, 提高模型的检测性能; 检测头负责生成目标位置、种类和置信度信息, 检测头由 3 个不同尺度的输出层组成, 每个输出层负责检测不同尺寸大小的目标对象, 以提高模型对

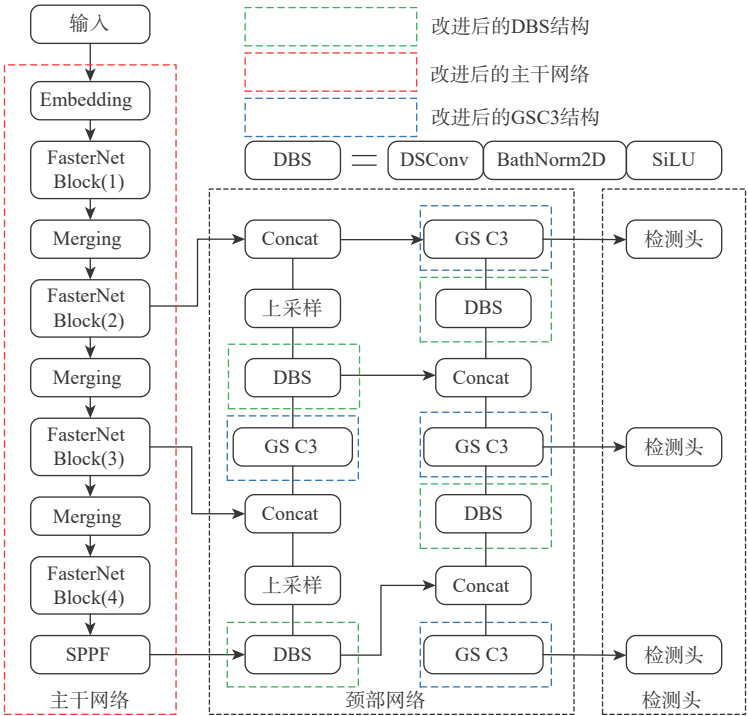


图 1 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型

Fig. 1 FDG-YOLO lightweight aero-engine damage detection model

不同尺度目标的检测能力。

相较于 YOLOv5, FDG-YOLO 主要进行了 3 方面改进: ①使用轻量级 FasterNet 网络改进 YOLOv5 模型的主干网络。在保证检测精度的前提下, 减少主干网络的冗余参数, 降低模型复杂度。②将颈部网络中的 CBS(C 表示普通卷积, B 表示 BatchNorm2D, S 表示 SiLU 激活函数)结构替换为 DBS(D 表示 DSConv, B 表示 BatchNorm2D, S 表示 SiLU 激活函数(sigmoid linear unit, SiLU))结构, 实现颈部网络的轻量化。③采用 GSConv 重新设计颈部网络中的 C3(cross stage partial network with 3 convolutions)结构, 形成 GS C3 结构, 提升模型的非线性表达能力, 从而提升模型检测精度。本文 FDG-YOLO 模型的名称来源于上述三方面改进, 其中, F 表示 FasterNet 网络, D 表示 DBS 结构, G 表示 GS C3 结构。

1.1 基于 FasterNet 的主干网络改进

YOLOv5 的主干网络结构复杂, 将其部署在嵌入式设备上检测速度无法满足使用需求。为提升模型检测速度, 对 YOLOv5 的主干网络进行轻量化改进。快速卷积神经网络(faster convolutional neural networks, FasterNet)^[13] 网络结构简单, 对设备算力要求低, 更适合部署在嵌入式设备中。采用 FasterNet 网络改进 YOLOv5 的主干网络, 能够有效降低主干网络的复杂度, 提升模型检测速度。

YOLOv5 的主干网络主要由 5 个 CBS 结构和 4 个 C3 结构组成, 每个 CBS 结构包含 1 个普通卷积, 每个 C3 结构至少包含 5 个普通卷积。普通卷积操作需要在每个输入通道上执行, 且每个通道都需要一组卷积核, 这导致网络参数量大、内存占用高, 不利于在嵌入式设备上应用。FasterNet 网络主要由嵌入层、合并层和 FasterNet 块组成, 其结构简单, 计算

复杂度低, 通过引入 FasterNet 网络, 改进 YOLOv5 的主干网络, 能够有效降低主干网络的参数量。

部分卷积(partial convolution, PConv)只在部分输入通道上使用普通卷积进行空间特征提取, 并保持其余通道不变, 保证了输入和输出具有相同的通道数, 在保留空间信息的同时有效降低了模型的计算复杂度。逐点卷积(pointwise convolution, PWConv)使用 1×1 的卷积核对输入的每个像素点进行卷积, 能够充分利用所有通道的信息。

假设 h 为特征图的高, w 为特征图的宽, k 为卷积核尺寸, c 为通道数, c_p 为 PConv 中进行运算的通道数, r 为 PConv 中 c_p 与 c 的比值。在 $r = c_p/c = 1/4$ 时, PConv 的浮点运算速度为

$$G_{FL} = h w k^2 c_p^2 \tag{1}$$

PConv 的内存访问量为

$$P_{con} = h w 2 c_p + k^2 c_p^2 \approx h w 2 c_p \tag{2}$$

PConv 的浮点运算速度仅为普通卷积的 1/16, 内存访问量仅为普通卷积的 1/4。可以看出, 与普通卷积相比, PConv 有效降低了浮点运算速度和内存访问量, 可通过引入 PConv 实现模型计算复杂度的降低。

FasterNet 块由 1 个 PConv 和 2 个 PWConv 组成, 并仅在中间 PWConv 层后使用批归一化(batch normalization, BN)和激活函数, 在保证特征多样性的同时实现了更低的延迟和更快的推理。PConv 与 PWConv 的组合结构在输入特征图上的有效感受野呈 T 形, 与统一处理的普通卷积相比, 更加强调中心位置信息。融合 PConv 与 PWConv 不仅能够有效降低计算复杂度, 还能提高输出质量。

基于 FasterNet 网络的航空发动机损伤检测模型主干网络改进如图 2 所示, 首先, 引入 FasterNet 网络的嵌入层和合并层, 用于下采样和通道数扩

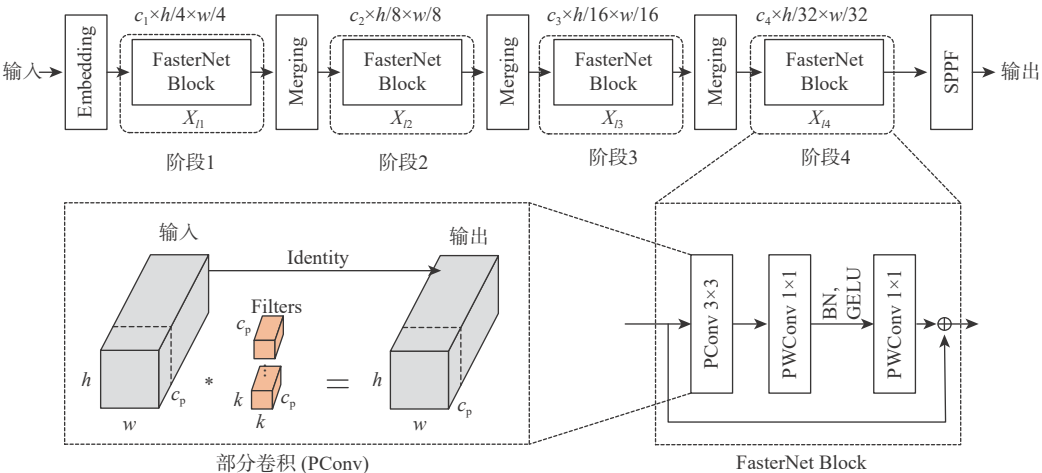


图 2 基于 FasterNet 的损伤检测模型主干网络改进

Fig. 2 Improvement of backbone network of damage detection model based on FasterNet

展;其次,引入 FasterNet 块用于特征提取;最后,保留 YOLOv5 的 SPPF 结构,增强模型对不同尺度目标的感知能力,其中, h 、 w 、 k 、 c 、 c_p 的含义与式(1)和式(2)中对应符号的含义相同。

与 YOLOv5 的主干网络相比,基于 FasterNet 的主干网络不仅降低了计算复杂度,同时充分利用了所有通道的信息,保持了较高的特征提取能力。

1.2 基于深度可分离卷积的颈部网络改进

YOLOv5 颈部网络的 CBS 结构中普通卷积参数量大、内存占用量多,导致模型检测速度慢。为减少颈部网络参数量,提升模型检测速度,对 CBS 结构中的普通卷积进行轻量化改进。深度可分离卷积(depthwise separable convolution, DSConv)^[14]

参数量小、内存占用量少。采用 DSConv 改进 CBS 结构中的普通卷积,能够有效减少颈部网络的参数量,提升模型检测速度。

YOLOv5 颈部网络中的 4 个 CBS 结构包含了 4 个普通卷积,在卷积过程中会产生较多的冗余参数。DSConv 计算效率高、更加适用于轻量化模型的构建。因此,采用 DSConv 改进 YOLOv5 颈部网络中的 CBS 结构。

DSConv 包含 2 个阶段,第 1 个阶段为逐通道卷积,这个阶段对输入的每个通道分别应用一个卷积核进行卷积,且不改变通道数;第 2 阶段为逐点卷积,该阶段对逐通道卷积的结果使用卷积进行通道数的调整。普通卷积和 DSConv 的过程如图 3 所示。

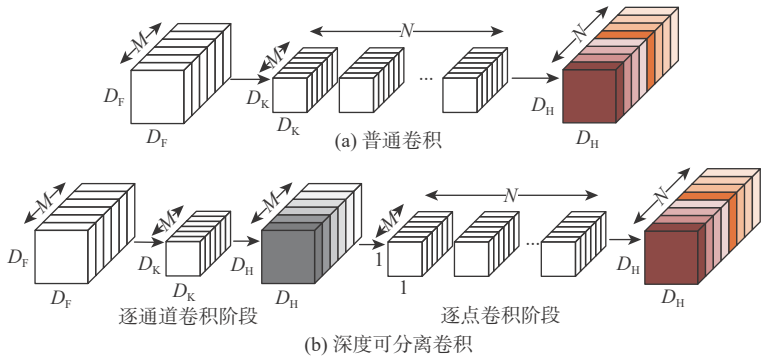


图 3 普通卷积与深度可分离卷积

Fig. 3 Ordinary convolution and depthwise separable convolution

假设 D_F 为输入特征尺寸, C_{in} 为输入通道数, D_H 为输出特征尺寸, C_{out} 为输出通道数, D_K 为卷积核尺寸。普通卷积的计算量 C_1 为

$$C_1 = C_{in} D_K^2 D_F^2 C_{out} D_F^2 \tag{3}$$

DSConv 的计算量 C_2 为

$$C_2 = C_{in} D_K^2 D_F^2 + C_{in} C_{out} D_F^2 \tag{4}$$

DSConv 与普通卷积计算量的比值为

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{C_{in} D_K^2 D_F^2 + C_{in} C_{out} D_F^2}{C_{in} D_K^2 C_{out} D_F^2} = \frac{1}{C_{out}} + \frac{1}{D_K^2} \tag{5}$$

由式(5)可知,DSConv 的计算量远小于普通卷积。

基于 DSConv 的航空发动机损伤检测模型 CBS 结构改进如图 4 所示,图中, CBS 结构由普通卷积、批归一化和 SiLU 激活函数串接组成, C 表示普通卷积 Conv2d, B 表示批归一化 BatchNorm2D, S 表示激活函数 SiLU。DBS 结构由 DSConv、批归一化和 SiLU 激活函数串接组成, D 表示 DSConv, B 表示批归一化 BatchNorm2D, S 表示激活函数 SiLU。将 DSConv 引入到 YOLOv5 的颈部网络中,将 CBS 结构中的普通卷积重构为逐通道卷积和逐点卷积,定义此结构为 DBS。这将有效降低 YOLOv5 颈部网络的参数量和内存占用量,从而提升模型检

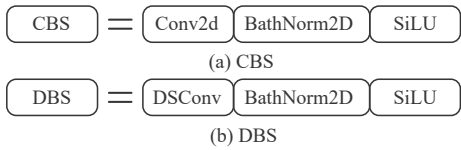


图 4 基于 DSConv 的损伤检测模型 CBS 结构改进
Fig. 4 Improvement of CBS structure in damage detection model based on DSConv

测速度。

1.3 基于 GSConv 的颈部网络改进

轻量化改进必将导致模型的检测精度下降。为提升模型的检测精度,对 YOLOv5 颈部网络中的 C3 结构进行优化。新型轻量级卷积 GSConv^[15]的时间复杂度低且非线性表达能力强,因此,以 GSConv 为基础,重新设计 C3 结构,提升模型表达能力与感受野,进而提升模型检测精度。

YOLOv5 模型中的特征图在每次空间(宽度和高度)压缩和通道扩展特征映射时都会导致部分特征信息的丢失。普通卷积最大程度地保留了每个通道之间的隐藏连接,DSConv 则完全切断了这些连接。GSConv 通过引入 shuffle 混合策略,将普通卷积提取的信息通过在不同通道上均匀交换局部

特征信息而完全混合到 DSConv 的输出中, 尽可能保留了通道间的隐藏连接, 在增强了非线性表达能力的同时, 保持较低的时间复杂度, 使 GSConv 在轻

量级模型中的优势更加明显。GSConv 的结构如图 5 所示。其中, C_{in} 表示输入通道数, C_{out} 表示输出通道数。

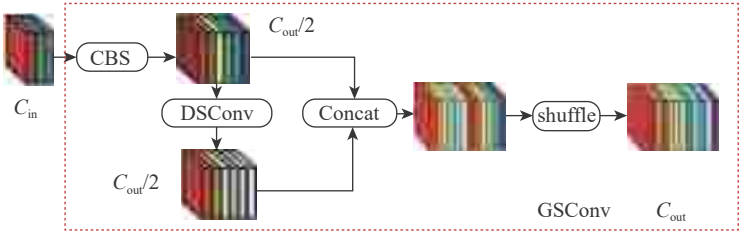


图 5 GSConv 结构

Fig. 5 GSConv structure

假设 W 和 H 为输出特征图的宽和高, $K_1 \times K_2$ 为卷积核大小, C_{in} 为输入特征图的通道数, C_{out} 为输出特征图的通道数。普通卷积、DSConv 和 GSConv 的时间复杂度分别为

$$T_{SC} \sim O(W \times H \times K_1 \times K_2 \times C_{in} \times C_{out}) \quad (6)$$

$$T_{DSC} \sim O(W \times H \times K_1 \times K_2 \times C_{out}) \quad (7)$$

$$T_{GSC} \sim O \left[W \times H \times K_1 \times K_2 \times \frac{C_{out}}{2} \times (C_{in} + 1) \right] \quad (8)$$

可以看出, GSConv 的时间复杂度介于普通卷积和 DSConv 之间。

以 GSConv 为基础, 重构 YOLOv5 颈部的 C3 结构, 称此结构为 GS C3, 如图 6 所示, 其中, CBS 结构的 C 表示普通卷积, B 表示批归一化, S 表示 SiLU 激活函数; GBS 结构的 G 表示 GSConv, B 表

示批归一化, S 表示 SiLU 激活函数。GS C3 结构将输入分为两路, 一路经过包含 N 个瓶颈模块 (BottleNeck module, BottleNeck) 的路径进行卷积, 另一路经过 CBS 结构, 然后, 将两路的输出进行连接操作 (concatenation, Concat) 结合。BottleNeck 模块也将输入分为两路, 一路经过包含 2 个 GBS 结构的路径, 另一路经过一个 CBS 结构, 然后, 将两路的输出结果相加。这种构建方式能够使不同阶段的特征图之间进行信息的交换和融合, 增加模型的表达能力和感受野。

以 GSConv 为基础构建的 GS C3 结构能够在保持较低时间复杂度的同时提升非线性表达能力。因此, 采用 GS C3 结构替换 YOLOv5 颈部的 C3 结构。

2 基于 FDG-YOLO 轻量化模型的航空发动机损伤检测方法流程

基于 FDG-YOLO 轻量化模型的航空发动机损伤检测方法流程如下:

1) 航空发动机损伤数据集构建。从航空发动机孔探报告中收集损伤图像, 进行图像增广, 并对损伤位置和种类进行标注, 获得对应的标注文件, 最后, 将损伤图像及对应的标注文件划分为训练集、验证集和测试集。

2) 航空发动机损伤检测模型构建。通过引入 FasterNet 网络、DBS 结构和 GS C3 结构对 YOLOv5 模型进行改进, 构建 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型。

3) 模型训练。将训练集和验证集导入 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型, 并设置模型的训练参数进行训练。训练集用于 FDG-YOLO 轻量化模型的训练, 验证集用于评估每轮的训练结果, 最终得到 FDG-YOLO 轻量化模型的最优权重文件。

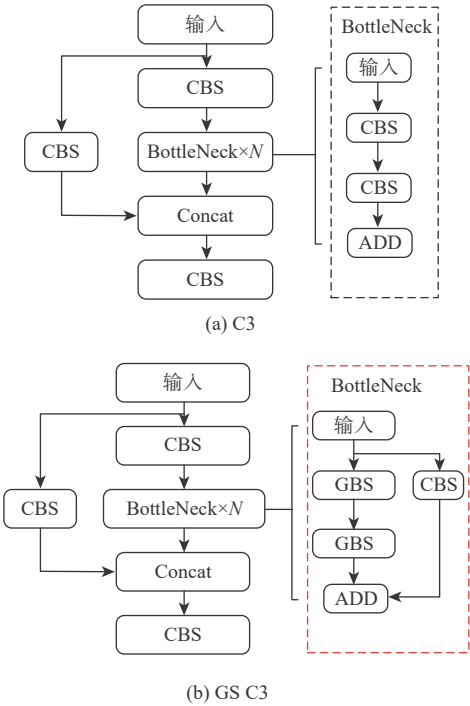


图 6 C3 结构和 GS C3 结构

Fig. 6 C3 structure and GS C3 structure

- 4) 性能测试。将测试集导入 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型,并使用最优权重文件进行推理预测,获得 FDG-YOLO 轻量化模型的性能参数。
- 5) 部署应用。将 FDG-YOLO 轻量化航空发动

机损伤检测模型部署到嵌入式设备上,对航空发动机损伤图像或视频进行检测,实现对航空发动机损伤的自动化检测。

基于 FDG-YOLO 轻量化模型的航空发动机损伤检测方法具体流程如图 7 所示。

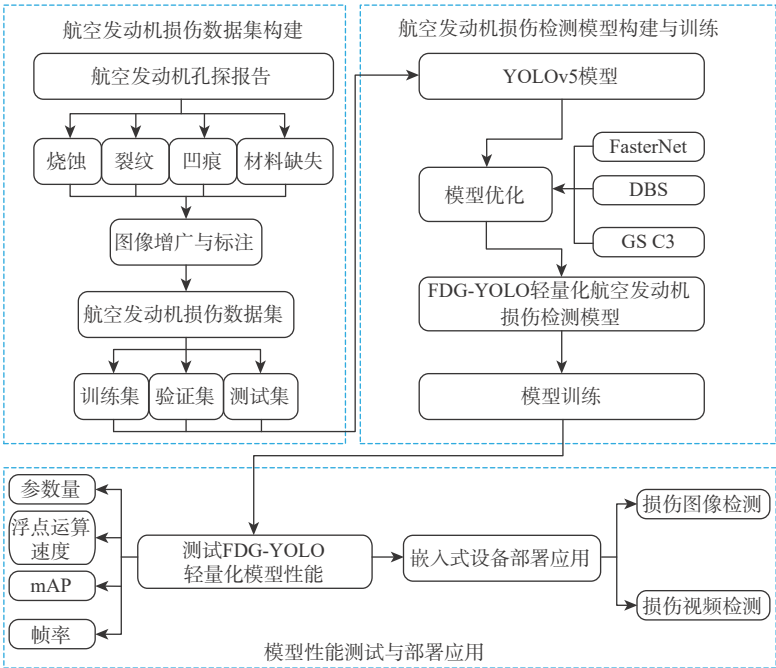


图 7 基于 FDG-YOLO 轻量化模型的航空发动机损伤检测方法流程

Fig. 7 Workflow of aero-engine damage detection method based on FDG-YOLO lightweight model

3 实验及结果分析

3.1 数据集与实验环境

通过某航空公司的发动机孔探报告制作数据集,共收集了 2 455 幅损伤图像,包含烧蚀、凹痕、裂纹和材料缺失 4 种损伤,部分损伤图像如图 8 所示。随机选择其中 445 幅损伤图像作为测试集,对剩余的损伤图像使用旋转、缩放和添加噪声的方法进行图像增广。增广后的数据集共有 6 000 幅损伤

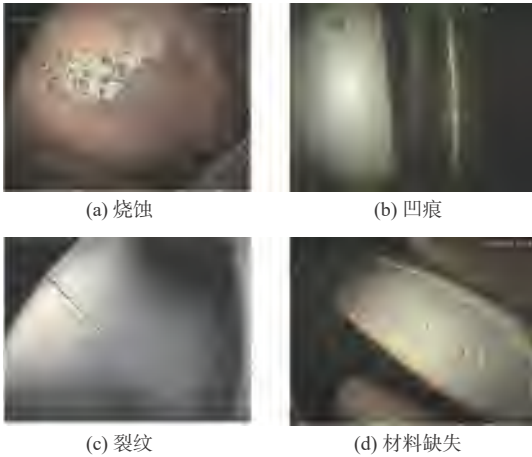


图 8 航空发动机损伤图像

Fig. 8 Aero-engine damage images

图像,将数据集按 8:2 的比例划分为训练集和验证集,数据集样本分布如表 1 所示。

表 1 数据集样本分布

Table 1 Sample distribution of dataset				幅
损伤类型	训练集	验证集	测试集	
烧蚀	1 360	343	125	
凹痕	857	140	85	
裂纹	827	136	85	
材料缺失	1 756	581	150	

电脑端实验环境:处理器为 Intel Core i7-13700F 2.10 GHz,显卡为 NVIDIA GeForce RTX 4060Ti, 8 GB 内存。嵌入式设备为 Jetson Orin Nano, 8 GB 内存, TensorRT 加速。本文训练设置批量大小为 16,初始学习率设置为 0.01,选用随机梯度下降(stochastic gradient descent, SGD)优化器,动量参数设为 0.937,总迭代次数设为 200。

3.2 评价指标

为验证模型的性能,选择 mAP、参数量、浮点运算速度和帧率作为模型的评价指标。mAP 表示在交集与并集之比(intersection over union, IoU)阈值为 0.5 时,所有损伤类别平均精度的平均值,

AP 表示以召回率 R 和准确率 P 为坐标轴形成的 P - R 曲线下的面积; 召回率、准确率、平均精度和平均精度均值的计算式分别为

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_N} \tag{9}$$

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p} \tag{10}$$

$$A_p = \int_0^1 P(R) dR \tag{11}$$

$$m_{AP} = \sum_{i=1}^c A_p / c' \tag{12}$$

式中: T_p 表示正样本预测正确的数量; F_N 表示正样本预测错误的数量; F_p 表示负样本预测错误的数量; c' 表示类别总数。

3.3 实验结果分析

3.3.1 消融实验结果分析

为验证本文方法的有效性, 设计以下消融实验对本文方法进行评估, 消融实验结果如表 2 所示。实验 a 为 YOLOv5 模型在航空发动机损伤数据集上进行训练和测试; 实验 b 为 YOLOv5 使用 FasterNet 作为主干特征提取网络; 实验 c 为 YOLOv5 使用 FasterNet 作为主干网络, 同时在颈部网络中引入 DBS 结构; 实验 d 为最终改进的 FDG-YOLO 模型, 在实验 c 的基础上加入 GS C3 结构。

表 2 消融实验结果
Table 2 Ablation experimental results

模型	参数量	mAP/%	浮点运算速度/ 10^9 s^{-1}	帧率/(帧· s^{-1})
实验a	20 865 057	92.0	47.9	92
实验b	11 654 613	88.3	22.5	139
实验c	9 633 429	88.1	20.0	150
实验d	9 909 621	90.5	16.3	142

从实验 a 与实验 b 的对比可知, 将主干网络替换为 FasterNet 后, mAP 从 92% 下降到了 88.3%, 下降了 3.7%, 这是由于轻量化导致了模型的特征提取能力下降, 但加入 FasterNet 后, 模型的参数量和浮点运算速度都仅为 YOLOv5 的 50% 左右, 帧率也提升了 51%。

从实验 b 与实验 c 的对比可知, 进一步加入深度可分离卷积后, 在 mAP 几乎不变的同时, 参数量和浮点运算速度进一步降低, 帧率进一步提升。经过 2 种轻量化改进, 在模型参数量和浮点运算速度都显著降低的同时也导致了检测精度的下降。

从实验 c 与实验 d 的对比可知, 加入 GS C3 结构后, 在参数量略微增加、帧率略微降低的同时, mAP 从 88.1% 提升到 90.5%, 提升了 2.4%, 浮点运

算速度下降了 18.5%。

综合来看, 轻量化改进后的 FDG-YOLO 模型以极小 mAP 损失, 使模型参数量减少了 52.5%, 浮点运算速度减少了 66%, 帧率提升了 54.3%。与原模型相比, FDG-YOLO 模型对设备算力要求更低, 更适合于部署到嵌入式设备上。

3.3.2 不同模型检测性能分析

为验证本文模型的检测性能, 将 FDG-YOLO 轻量化模型与轻量化模型 YOLOv3-tiny^[16] 和 YOLOv7-tiny^[17] 在相同电脑端实验环境下进行对比实验, 不同模型检测性能如表 3 所示。

表 3 不同模型检测性能对比
Table 3 Comparison of detection performance of different models

模型	参数量	mAP/%	浮点运算速度/ 10^9 s^{-1}	帧率/(帧· s^{-1})
YOLOv3-tiny	8 673 622	86.7	12.9	159
YOLOv7-tiny	6 014 737	89.5	13.0	63
FDG-YOLO	9 909 621	90.5	16.3	142

由表 3 可知, FDG-YOLO、YOLOv3-tiny 和 YOLOv7-tiny 的参数量与浮点运算速度相差不大, 处于同一水平。在检测精度方面, FDG-YOLO 的 mAP 达到 90.5%, 比 YOLOv3-tiny 高 3.8%, 比 YOLOv7-tiny 高 1%; 在检测速度方面, FDG-YOLO 的帧率达到 142, 是 YOLOv7-tiny 的 2.2 倍, 比 YOLOv3-tiny 低 17。综合来看, 本文 FDG-YOLO 模型兼顾了检测速度与检测精度, 性能优于其他模型。

为更加直观地对比 FDG-YOLO 轻量化模型与轻量化模型 YOLOv3-tiny 和 YOLOv7-tiny 对航空发动机损伤的检测效果, 从测试集中选择烧蚀、凹痕、裂纹和材料缺失 4 类典型损伤进行检测, 不同模型的检测结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 对烧蚀损伤检测时, YOLOv3-tiny 对 1 个损伤产生 2 个预测框, 将连续区域的损伤分割为 2 部分, 导致模型对烧蚀损伤计数不准; YOLOv7-tiny 的预测框未能将损伤区域完全覆盖; FDG-YOLO 模型的预测框精准覆盖了损伤区域。

对凹痕损伤检测时, YOLOv3-tiny 出现漏检; YOLOv7-tiny 出现误检, 将图像左下角孔探仪的标志误检为凹痕损伤; FDG-YOLO 模型没有出现漏检、误检, 精准的检测出了图像中的凹痕损伤。

对裂纹损伤检测时, YOLOv3-tiny 和 YOLOv7-tiny 都对 1 个损伤产生了 2 个预测框, 将 1 条裂纹识别为 2 个, 导致模型对裂纹损伤计数不准; FDG-YOLO 模型精准检测出了图像中的裂纹损伤。

对材料缺失损伤检测时, YOLOv3-tiny 和 YOLOv7-tiny 都出现了不同程度的漏检; FDG-

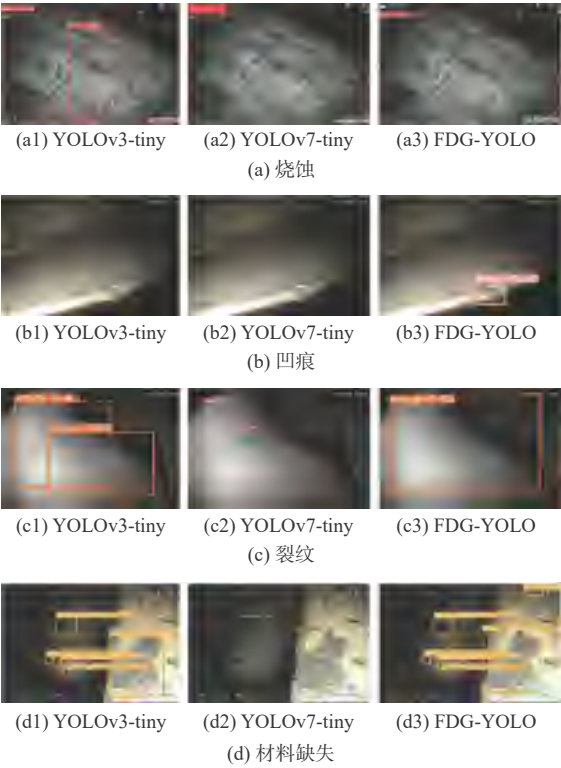


图9 不同模型检测结果对比

Fig. 9 Comparison of detection results of different models

YOLO 模型没有出现漏检,精准检测出了图像中所有的材料缺失损伤。

综上,本文 FDG-YOLO 模型降低了漏检、误检发生的概率,检测准确度更高,检测效果优于其他检测模型。

3.3.3 嵌入式设备部署实验结果分析

在同一嵌入式设备 Jetson Orin Nano 上设计以下对比实验,验证不同模型在嵌入式设备上对航空发动机损伤的检测性能,嵌入式设备上不同模型检测性能如表 4 所示。

表 4 嵌入式设备上不同模型检测性能对比

Table 4 Comparison of detection performance of different models on embedded devices

模型	mAP/%	帧率/(帧·s ⁻¹)
YOLOv3-tiny	85.4	76
YOLOv5	86.7	75
FDG-YOLO	89.6	61

由表 4 可知, YOLOv3-tiny 模型和 YOLOv5 模型帧率达到 70 帧/s 以上,检测速度满足应用需求,但 mAP 只有 85% 左右,相对较低。FDG-YOLO 模型帧率达到 61 帧/s,能够与孔探仪视频数据采集速度相匹配,同时, mAP 达到 89.6%,比 YOLOv3-tiny 模型高 4.2%,比 YOLOv5 模型高 2.9%。综合来看,本文 FDG-YOLO 模型在嵌入式设备上保证检

测速度与孔探仪视频采集速度相匹配的同时保持了较高的检测精度,综合检测性能优于其他检测模型。

4 结 论

本文为实现在嵌入式设备上对航空发动机损伤进行快速、准确检测,提出 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型,可以得到以下结论:

1) 在模型复杂度与检测速度方面,通过加入 FasterNet 网络和 DBS 结构使模型参数量显著下降、复杂度显著降低、检测速度显著提升。FDG-YOLO 模型在嵌入式设备上帧率达到 61 帧/s,使模型检测速度与损伤数据获取速度相匹配,满足在嵌入式设备上进行航空发动机损伤检测对检测速度的需求。

2) 在检测准确度方面,通过加入 GS C3 结构,提升了颈部网络的非线性表达能力。FDG-YOLO 模型在电脑端 mAP 为 90.5%,在嵌入式设备上 mAP 为 89.6%,高于其他轻量化目标检测模型。FDG-YOLO 模型在兼顾检测速度的同时保持了较高的检测精度。

3) 本文 FDG-YOLO 轻量化航空发动机损伤检测模型,该模型能够在嵌入式设备上实现航空发动机损伤自动化检测,有利于提升航空发动机孔探检测的智能化水平。

参考文献 (References)

[1] 官颂,曲培树,董文会,等.航空发动机智能内窥故障诊断[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(6):981-984.
GUAN S, QU P S, DONG W H, et al. Intelligent endoscope fault diagnose of aero engine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28(6): 981-984(in Chinese).

[2] 肖柏荣.航空发动机维护中孔探检测技术的应用[J].中国高新技术,2019(15):96-98.
XIAO B R. Application of borescope inspection technology in aero-engine maintenance[J]. China High Technology, 2019(15): 96-98 (in Chinese).

[3] 刘文凯,陈宸,袁传金.航空发动机维护中孔探检测的运用[J].科技资讯,2016,14(7):43-44.
LIU W K, CHEN C, YUAN C J. Application of borescope inspection in aero-engine maintenance[J]. Science and Technology Information, 2016, 14(7): 43-44 (in Chinese).

[4] 于辉.孔探技术及其在航空发动机维修中的应用[J].航空制造技术,2005,48(6):94-96.
YU H. Borescope and its application in the maintenance of aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(6): 94-96 (in Chinese).

[5] HE W F, LI C Z, NIE X F, et al. Recognition and detection of aero-engine blade damage based on improved cascade mask R-CNN[J]. Applied Optics, 2021, 60(17): 5124-5133.

[6] LIU Y X, WU D B, LIANG J W, et al. Aeroengine blade surface

defect detection system based on improved faster RCNN[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2023, 2023(1): 1992415.

[7] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 779-788.

[8] 李彬, 汪诚, 丁相玉, 等. 改进 YOLOv4 的表面缺陷检测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(3): 710-717.

LI B, WANG C, DING X Y, et al. Surface defect detection algorithm based on improved YOLOv4[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(3): 710-717(in Chinese).

[9] 刘树东, 刘业辉, 孙叶美, 等. 基于倒置残差注意力的无人机航拍图像小目标检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(3): 514-524.

LIU S D, LIU Y H, SUN Y M, et al. Small object detection in UAV aerial images based on inverted residual attention[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(3): 514-524(in Chinese).

[10] 蔡舒好, 闫子砚, 师利中. 基于改进 YOLOv4 的航空发动机损伤检测方法[J]. 现代制造工程, 2023(2): 99-108.

CAI S Y, YAN Z Y, SHI L Z. Aeroengine damage detection method based on improved YOLOv4[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(2): 99-108(in Chinese).

[11] 张雯婷. 基于嵌入式图像目标检测系统的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019: 45-59.

ZHANG W T. Research on object detection system for embedded platforms[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019: 45-59 (in Chinese).

[12] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[C]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV. Berlin: Springer, 2014: 346-361.

[13] 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.

[14] CHOLLET F. Xception: deep learning with depthwise separable convolutions[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1800-1807.

[15] LI H, LI J, WEI H, et al. Slim-neck by GSConv: a better design paradigm of detector architectures for autonomous vehicles[EB/OL]. (2022-06-06)[2024-01-10]. <https://arxiv.org/abs/2206.02424>.

[16] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger. [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 6517-6525.

[17] 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.

Damage detection method for aero-engine based on FDG-YOLO lightweight model

CAI Shuyu*, HE Chong

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In response to the issues of poor real-time performance and low detection accuracy when deploying deep learning models for aero-engine damage detection on embedded devices, this paper introduces the FDG-YOLO lightweight model for aviation engine damage detection. Firstly, FasterNet was introduced to restructure the backbone network of YOLOv5, addressing the issue of large parameter count in the backbone network. Second, depth-wise separable convolutions were used to eliminate superfluous parameters in the neck network of YOLOv5 by improving ordinary convolutions. In order to improve the model's expressive power and receptive field, the original C3 structure was replaced with the GS C3 structure, which was built concurrently based on GSConv. Finally, experiments were conducted and validated on an aviation engine damage dataset. In the end, experiments were conducted and validated on an aero-engine damage dataset. The findings show that the FDG-YOLO model reduces the number of parameters by 52.5% and the giga floating-point operations per second by 66% when compared to the original model. On embedded devices, the mean average precision (mAP) reaches 89.6%, surpassing other lightweight models. The frames per second achieves 61, making the detection speed suitable for the engine damage image acquisition rate. It more effectively satisfies aero-engine damage detection's intelligent application criteria.

Keywords: damage detection; FDG-YOLO models; lightweight; FasterNet network; depthwise separable convolution; GSConv technique

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0041

一种非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器设计与实验研究

张广川¹, 王伟宗^{1,2,*}, 任军学^{1,2}, 王-白^{1,2,3}, 汤海滨^{1,2}, 杨立军^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191; 2. 航天器设计优化与动态模拟技术教育部重点实验室, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学宁波创新研究院, 宁波 315100)

摘 要: 霍尔推力器是一种广泛应用于航天器的先进电推进装置。传统的环形闭环霍尔推力器由于结构限制, 无法开展放电通道内磁场构型剖切面上等离子体二维分布诊断。为解决这一问题, 设计一种带有光学诊断窗口的非闭环直线型通道电场 $E \times$ 磁场 B 的霍尔推力器, 对推力器内部磁场和流场进行了仿真分析, 提出磁场设计原则。通过稳态放电参数监测、瞬态放电振荡分析、束流区等离子体参数诊断和放电通道内部电离区等离子体分布结构成像, 验证了直线型放电通道构型对等离子体的有效约束与电磁场加速, 发现其放电模式随推进剂流量的演变趋势, 并实现基于放电电压的放电模式调控。成功获取了放电通道内部等离子体在磁场构型剖切面上二维分布精细结构。综上, 实现了简易装置下类霍尔推力器 $E \times B$ 等离子体稳定放电与模式调控, 结合等离子体二维平面上分布结构的光学诊断, 为进一步霍尔推力器典型放电振荡过程的等离子体微观表现提出了新思路。

关 键 词: 霍尔推力器; 磁场; 等离子体二维分布; 非闭环直线型通道; 放电振荡

中图分类号: V439⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1064-12

巨型低轨卫星互联网星座已经开始为全球提供商业和军事服务。极大的商业和军事需求促使多个国家相继开展了相关卫星互联网星座布局。大规模卫星星座的运行需要配备高性能空间推进装置, 以满足卫星星座多样化的空间任务和长期在轨需求。霍尔推力器是一种静电加速的先进电推进装置^[1], 凭借高比冲、高推力密度、长寿命、结构简单和可靠性高等优势, 已经广泛应用于低轨卫星星座任务中。

霍尔推力器是通过正交电磁场产生和加速离子的静电推力器。等离子体在放电通道内产生, 通道内等离子体与电磁场的分布直接决定了推力器束流分布及推力器宏观性能参数^[2-3]。因此, 对霍尔推力器放电通道内等离子体的研究越来越受到重

视。除了通过仿真计算手段获取放电通道内的等离子体参数外^[4-5], 在实验方面, 研究人员通常使用静电探针和光学手段获取放电通道内部分等离子体参数。静电探针方面, 研究人员通过使用壁面探针和快速进给探针, 获得了霍尔推力器放电通道内部空间电势、等离子体密度及电子温度分布^[6-7], 揭示了霍尔推力器放电通道内部等离子体一维分布规律^[8-10], 明晰电场和电子温度在通道出口处存在最大值, 主要电势降发生在通道出口。光学诊断方面, 研究人员使用发射光谱法, 获得了霍尔推力器放电通道内等离子体的谱线成分, 使得研究人员能够进一步分析放电通道内等离子体的组分及放电过程^[11-12]。激光诱导荧光光谱法的应用使得放电通道内的离子速度分布能够得到测量。研究结果显

收稿日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-01-30; 网络出版时间: 2024-03-12 18:00

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240312.1539.003

基金项目: 中国博士后科学基金(2023M740181); 中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-23-Q-1044)

*通信作者. E-mail: wangweizong@buaa.edu.cn

引用格式: 张广川, 王伟宗, 任军学, 等. 一种非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器设计与实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1064-1075. ZHANG G C, WANG W Z, REN J X, et al. Design and experimental study of an unclosed-loop $E \times B$ Hall thruster[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1064-1075 (in Chinese).

示,霍尔推力器通道内部的离子轴向加速过程能够通过激光诱导荧光诊断结果显现出来^[13-14]。等离子体在放电通道内产生,沿着放电通道向外逐渐被加速,速度急剧增加的地方位于推力器放电通道出口上游 10 mm。但是在推力器放电通道出口外部(下游 20 mm 范围内)依然存在加速过程,这是因为通道内等离子与推力器外部的空心阴极形成的加速电场延伸到推力器外部,使得排出通道外的高速离子流依然被加速,直至越过阴极位置。

虽然目前已经有部分针对放电通道内部等离子体参数分布规律的研究,但是目前的研究存在 2 个重要的问题:静电探针诊断,静电探针为侵入式诊断,会给等离子体,尤其是密度较高的放电通道内部的等离子体放电过程带入干扰,破坏原来的物理过程和现象,引入测量误差,且空间分辨率不足;光学诊断手段虽然不干扰等离子体,但是目前还没有关于放电通道内部的等离子体二维平面分布及随时间涨落的相关研究,尤其是磁场对剖切面上等离子体二维分布约束作用,以及等离子体与壁面相互作用的研究。所以,需要从改进等离子体诊断手段和优化等离子体放电装置两方面分别作出努力,以探究放电通道内等离子体二维剖切面上的分布规律。

区别于传统的闭环环形霍尔推力器,研究人员曾设计出多款异形的类霍尔推力器装置,包括线性霍尔推力器(linear Hall thruster, LHT)^[15]、开放式漂移霍尔推力器(open drift thruster, ODT)^[16]或平面霍尔推力器(planar Hall thruster, PHT)^[17],以及跑道型长闭环霍尔推力器(racetrack-shaped Hall thruster, RHT)^[18]。但最终由于推力性能不佳^[19-24],未能得到广泛研究与应用。但这些异形类霍尔推力器却为本文进行电场 $E \times$ 磁场 B 漂移等离子体装置内部等离子体微观行为研究提供了很好的新思路。可以通过对传统闭环环形霍尔推力器结构进行相似变换,设计出具有与传统闭环环形霍尔推力器相似的放电原理、等离子体产生与加速过程的新型放电装置,使其具备易诊断优势,从而实现霍尔推力器内部等离子体放电基本微观过程研究。

基于此,本文设计了一种具有可视放电腔的非闭环 $E \times B$ 漂移推力器(unclosed $E \times B$ drift thruster with visible chamber 01, UDTv01),旨在利用非闭环放电腔等离子体二维诊断的便利性,开展 $E \times B$ 构型放电相关物理过程研究,尤其是放电振荡与放电通道内等离子体电离区之间的匹配关系,最终用于传统环形霍尔推力器的优化设计和性能提升。本文使用石英玻璃窗口取代陶瓷侧壁,使得能够获取放电

通道内等离子体二维分布。同时,本文对 UDTv01 开展了一系列的测试,研究了 UDTv01 的基本放电条件、放电振荡、等离子体参数分布规律。带有观察窗口的陶瓷放电通道使通道内的等离子体可见,促使本文成功获得了放电通道内的等离子体电离区的二维光学图像。

1 非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器设计

1.1 整体结构设计

图 1 为传统环形闭环霍尔推力器结构和工作原理图。闭环环形霍尔推力器核心结构包括环形放电腔室、磁场组件(内磁极/线圈、外磁极/线圈和导磁回路)、阳极气体分配器和空心阴极等。闭环环形霍尔推力器工作时,环形放电通道上游的阳极气体分配器上施加百伏级放电电压,同时向放电通道内通入周向均化的推进剂气体,以在放电通道内形成周向均匀的中性原子分布背景。通过向空心阴极内部通入推进剂气体并对发射体进行加热触发空心阴极内部放电,形成稳定的阴极电子源。由空心阴极排出的原初电子受环形放电通道内阳极电势吸引,进入环形放电通道。电子在沿 z 轴方向受电场牵引运动过程中,受径向磁场约束,沿径向磁场做回旋运动。但由于电场和磁场呈正交结构,

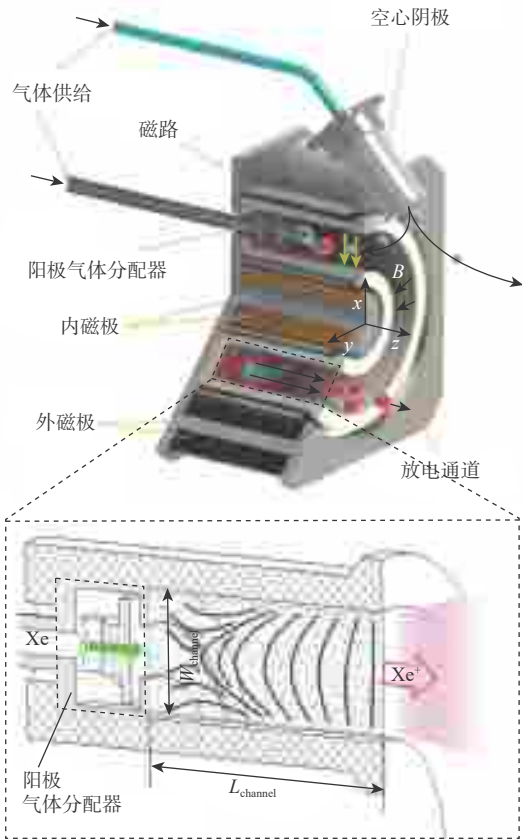


图 1 环形闭环霍尔推力器结构原理图

Fig. 1 Schematic of annular closed-loop Hall thruster structure

使得电子沿 $E \times B$ 方向做漂移运动,即形成沿环形放电通道角向的漂移运动过程。回旋和漂移运动的存在,使得电子在通道内停留时间大幅增加,使电子与背景气体原子碰撞电离,生成等离子体。产生的阳离子在阳极气体分配器高电势的加速下,沿放电通道 z 轴方向向外高速喷出,从而形成反作用推力,用于航天器的空间推进动力。正是由于 $E \times B$ 方向(周向)漂移运动的存在,使得通道内电离区沿周向分布均匀,达到高效电离与加速的效果。

但是这种环形闭环放电通道存在明显等离子体诊断弊端,只能从放电通道出口端面实现对放电通道内等离子体的静电探针及光学方法诊断。但是通道出口处呈现复杂的加速过程与流场结构,光学仪器易受到等离子体高速射流污染与损毁。更重要的是,端面诊断,只能得到放电通道内等离子体分布结构沿 z 轴方向的积分结果,无法获取通道内等离子体在磁场剖切面上(见图 1)高空间分辨率的二维分布结果。因此,为对霍尔推力器 $E \times B$ 漂移等离子体源/加速器进行进一步的放电与加速机理研究,本文设计了一种具有二维诊断剖面的直线型通道非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器(UDTv01),如图 2 所示。

UDTv01 核心部件包括陶瓷放电通道、阳极气体分配器、上下永磁体磁极、散热回路及空心阴极电子源。与图 1 所示环形闭环霍尔推力器不同,UDTv01 采用直线型放电通道。上下永磁体磁极对

向放置,形成沿 x 轴方向的纵向磁场。 x 轴方向纵向磁场与 z 轴方向的电场形成正交电磁场构型,从而约束空心阴极电子源发射的原初电子,产生沿 y 轴方向的 $E \times B$ 漂移运动,形成碰撞电离与等离子体加速微观物理过程。

1.2 光学诊断窗口设计

在直线型放电通道的基础上,UDTv01 侧面配备全通道深度光学诊断窗口,如图 3 所示。光学诊断窗口由高透光耐热石英玻璃材料制成,嵌入直线型放电通道侧壁,形成封闭式放电通道。光学诊断窗口的设置,使得 UDTv01 放电通道内部等离子体分布、电离和加速区在磁场剖面上的二维结构直接可视化,使得通过高速相机或光谱仪器对 $E \times B$ 漂移等离子体源内部等离子体微观过程进行直接的高空间分辨率二维诊断成为可能。



图 3 非闭环直线通道光学诊断窗口

Fig. 3 Optical diagnostic window for non-closed loop linear channel

1.3 磁场构型设计

为保证 UDTv01 与环形闭环霍尔推力器具有相似的放电过程,磁场结构是 UDTv01 设计的关键。UDTv01 磁场结构设计遵循如下准则:①相似的径向磁场构型与凸向阳极磁感线走势;②相似的磁场梯度分布,出口磁场强度最大;③沿通道 y 轴方向,磁场存在足够的均匀段。

UDTv01 磁场构型仿真结果如图 4~图 7 所示。其中,图 4 为放电通道 zx 平面上磁场构型与传统环形霍尔推力器典型通道内磁场。如准则①和准则②所述,“相似的磁场构型和磁感线走势”指沿放电通道 x 轴方向/径向方向的径向磁场分布结构,主要具备以下特点,首先,通道出口磁场径向分量远大于轴向,且与放电通道壁面成近似直角的角

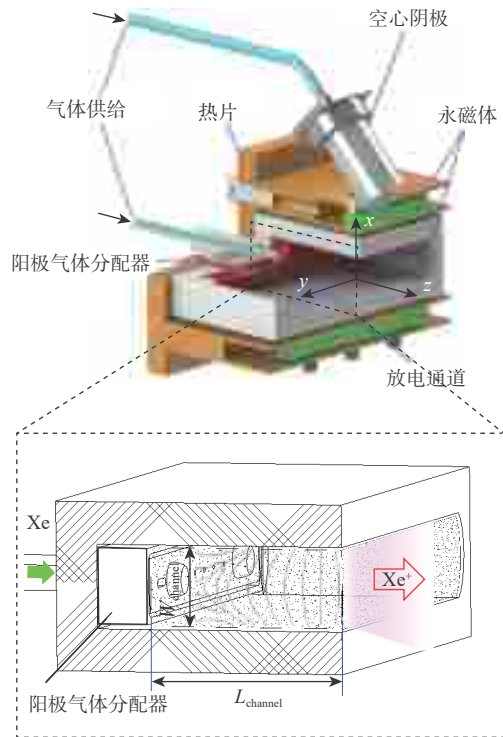


图 2 非闭环霍尔推力器结构原理图

Fig. 2 Schematic of unclosed-loop Hall thruster structure

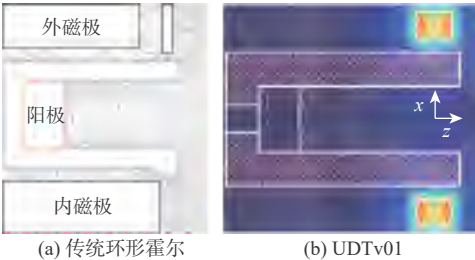


图 4 zx 平面上磁场构型

Fig. 4 Magnetic field configuration on zx profile

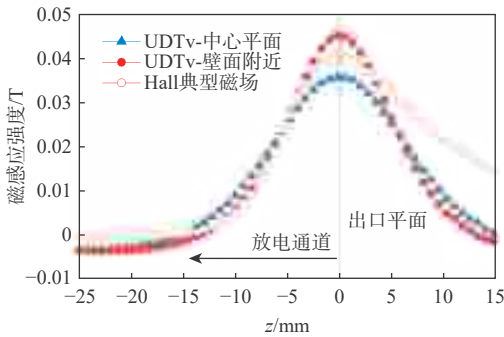


图 5 zx 平面上沿 z 轴磁场强度曲线

Fig. 5 Magnetic field strength curves along z -axis on zx profile

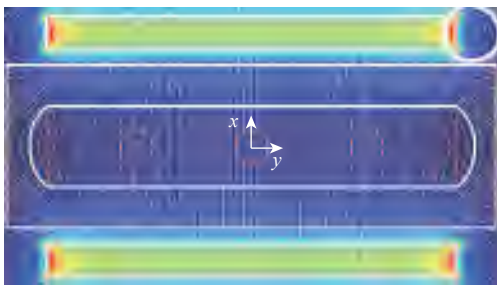


图 6 yx 平面上磁场构型

Fig. 6 Magnetic field configuration on yx profile

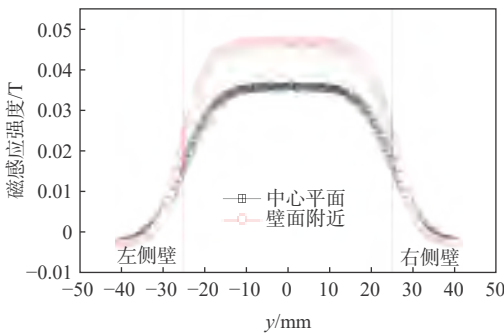


图 7 yx 平面上沿 y 轴磁场强度曲线

Fig. 7 Magnetic field strength curves along y -axis on yx profile

度相交,从而使电子绕磁感线做回旋运动,阻止电子直接轰击高电势阳极,增加电子在通道内停留时间,促进碰撞电离;其次,磁感线呈凸向上游阳极的弯曲走势,对称中心在放电通道中心平面上,形成聚焦型磁场,约束等离子体加速过程;最后,随着向上游延伸,磁感线弯曲程度逐渐增加,与壁面夹角逐渐减小。

如图 5 所示,遵循传统霍尔推力器磁场设计准则,UDTv01 采用正磁场梯度以提升霍尔推力器放电稳定性和电流利用效率。放电通道中心平面上磁场最大值约 0.036 T,确保实现放电通道内电子磁化。磁场最大值在放电通道出口上游 4 mm 处达到,以促使主要电离和加速过程集中发生于放电通道出口附近,提升原子电离效率,约束离子加速过程,减弱离子加速对放电通道的腐蚀。同时,在

x 轴方向,壁面附近磁场高于放电通道中心面上磁场强度,从而在 UDTv01 放电通道内形成纵向(径向)磁镜结构,实现壁面附近磁镜对等离子体排斥与约束效果,将等离子体约束在放电通道中心,以降低等离子体与壁面的相互作用。

在 yx 平面上,UDTv01 磁场分布结构如图 6 和图 7 所示。在 yx 剖切面,磁感线走势整体上呈与 x 轴平行方向,但是在放电通道两侧面,磁感线呈弯曲状且与陶瓷壁面基本平行。顺壁面磁感线走势用以约束电子跨场运动,降低等离子体与壁面的碰撞概率。如图 7 所示,在 y 轴方向通道宽度为 55 mm,磁场在 ± 16 mm 范围内保持恒定,从而使等离子体在 y 轴方向形成均匀稳定的电离过程,以保证 UDTv01 侧面光学诊断能得到稳定的二维等离子体分布结构。

1.4 推进剂流场设计

UDTv01 的阳极同时作为推进剂气体分配器,将推进剂供给管路输送进入 UDTv01 的推进剂气体(本文使用氙气)进行导流与均化,从而实现推进剂气体原子在放电通道内均匀分布。

图 8 为 UDTv01 的气体分配器剖切面结构。该气体分配器内部流道采用一级 y 轴方向主流道配合双 S 型均化腔体。由左侧推进剂供给管路流入的氙气原子,在管路尽头受到轴向排放小孔的约束,一部分通过排放小孔进入放电通道,另一部分受流道约束,先进入 y 轴方向一级扩散流道,使管路入口处的高密度氙气原子沿 y 轴流动。在 y 轴方向一级扩散流道沿途,分别设置宽度不同的排放口,从而将一级扩散流道内 y 轴方向非均匀分布气体引流至上下 S 型均化腔体,进一步实现二级均化引流。

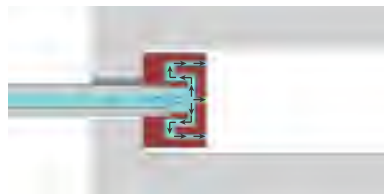


图 8 阳极气体分配器结构设计

Fig. 8 Structure design of anode gas distributor

为进一步优化通道内气体原子分布均匀性,本文通过仿真获取分配器和放电通道内部流场结构。通道内典型中性原子密度值为 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$,数密度 n 取中位数 $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,通道特征尺寸 D 取 10 mm,氙原子直径 $d = 4.05 \times 10^{-10} \text{ m}$,由克努森数计算公式($K_n = 1 / \sqrt{2} \pi d^2 n D$)得到本推力器流场的克努森数为 27.46(> 10),属于自由分子流态。

采用自由分子流方法对 UDTv01 气体分配器气体扩散过程进行微观仿真模拟,流动计算域网格划

分采用四面体网格,流道结构采用局部加密,最大网格单元为 1.7 mm,最小网格单元为 0.024 mm。计算中忽略气体原子间的碰撞,原子与固体边界碰撞满足 Knudsen 余弦定律,碰撞后气体原子速度分布概率满足:

$$P(c)=\left(\frac{m_{\text{Xe}}}{k_{\text{B}}T}\right)^2\frac{c^3}{2}\exp\left(-\frac{m_{\text{Xe}}c^2}{2k_{\text{B}}T}\right)$$

(1)

式中: c 为气体分子速率; m_{Xe} 为 Xe 原子质量; k_{B} 为玻尔兹曼常量。

图 9 为 2 mL/min 入口流量工况下 UDTv01 放电通道 zx 剖切面上 Xe 原子密度二维密度分布云图。由图可知,在通道上游,UDTv01 放电通道内原子密度分布主要由上下 S 型均化腔出口处的高浓度原子团形成,随着高浓度区域向通道下游扩散,沿 x 轴方向的密度均匀度逐渐增加,在放电通道出口上游 10 mm 处达到均匀状态。

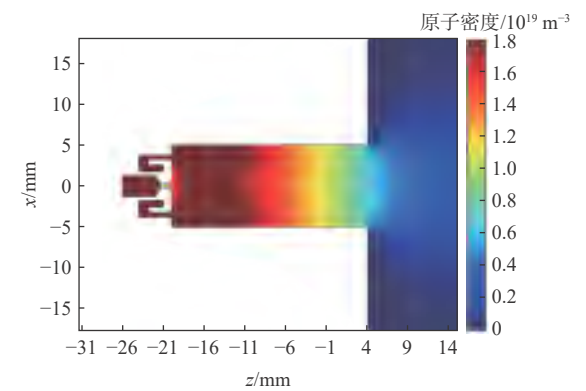


图 9 zx 平面上原子密度二维分布
Fig. 9 2D density distribution of atoms on zx profile

图 10 为放电通道中心面处和上壁面处原子密度分布随 z 轴方向变化曲线。原子密度沿 z 轴方向向外逐渐递减,通道上游阳极表面原子密度达到 $8\times10^{18}\text{ m}^{-3}$,通道出口原子密度约为 $2\times10^{18}\text{ m}^{-3}$ 。壁面附近原子密度在通道出口处呈现剧烈下降趋势,这是因为经过通道出口后,随着通道壁面的消失,原子沿 x 轴方向向外扩散,使得出口处壁面附近原

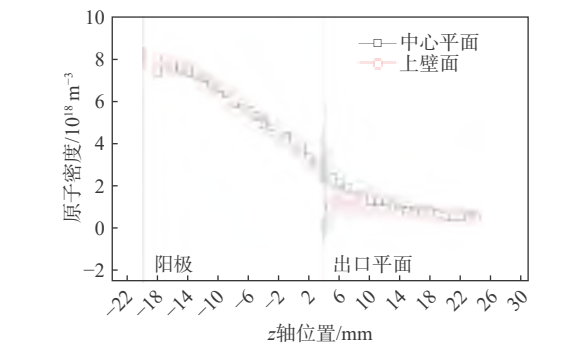


图 10 zx 平面上沿 z 轴原子密度分布
Fig. 10 Density distribution of atoms on zx profile

子密度急剧下降。而通道中心面上原子密度受周围原子密度场的约束,并未受到通道壁面消失的明显影响。

相对 x 方向 10 mm 高度,通道在 y 轴方向通道宽度达 55 mm,中性原子在 y 轴方向分布均匀性决定着通道内电离的连续性和电离效率的优劣。图 11 为 zy 剖切面上中性气体原子分布二维云图。由图 11 可知,放电通道内原子密度沿 y 方向在 55 mm 的宽度上近似均匀分布,更直观的曲线对比如图 12 所示。随着 z 轴位置的增加(距离阳极位置为 10~24 mm),通道内原子密度从 $6.5\times10^{18}\text{ m}^{-3}$ 下降到 $2.5\times10^{18}\text{ m}^{-3}$,但在 y 轴方向,原子密度呈均匀分布,波动范围为 6.75%~23.59%。最大波动出现在阳极出口附近,通道边缘原子密度明显降低。这是由于上述通道壁面约束效果的消失,使得原子向外膨胀,出口处壁面附近原子密度明显降低。但是在通道内部,并无此现象,原子密度波动范围为 6.75%~13.2%,因此,整体上该气体分配器能均化通道内原子密度的效果。

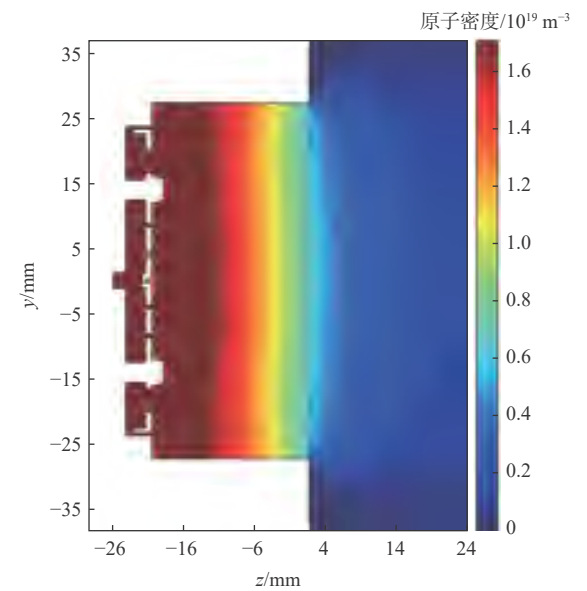


图 11 zy 平面上原子密度二维分布
Fig. 11 2D density distribution of atoms on zy profile

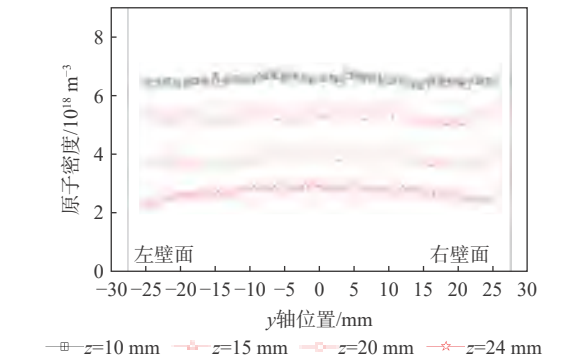


图 12 zy 平面上沿 y 轴原子密度变化曲线
Fig. 12 Density variation curves of atoms on zy profile

2 实验设备

2.1 真空环境与放电系统

图 13 为 DiWenBeng-2500(DWB-2500)真空室环境模拟, 该真空室的直径为 2.5 m, 长度为 5.5 m。真空室被束流保护板分为霍尔推力器诊断及测试设施空间及抽气泵组的舱室。DWB-2500 真空室总共配备了三级真空泵, 可以将舱内的真空环境提高到 1×10^{-5} Pa。该真空舱主要用于为各型号霍尔推力器性能测试、寿命考核、束流诊断等实验。实验中氙气和氦气被通入舱内, 动态真空度可以保持在 5×10^{-3} Pa 以下, 能够保持推力器正常放电。同时, 配备气体进给、微推力架、电参数监测、光学三维侵蚀形貌重建、强化电荷耦合器件 (intensified charge-coupled device, ICCD) 相机和光谱仪, 可以满足霍尔推力器地面测试和等离子体诊断需求^[25]。

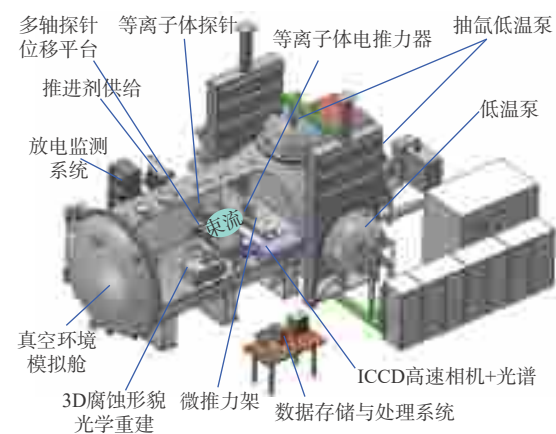


图 13 真空舱和电推进放电与诊断测试系统

Fig. 13 Vacuum chamber and electric propulsion discharge and diagnostic test system

2.2 微推力测量装置

图 14 为微小推力测量架的结构原理图。推力架由定架、动架、位移传感器、PID 控制箱、电磁反馈器等组成。推力作用于动架上产生位移, 位移信号传入 PID 控制箱后, 转化为电流信号传入电磁反馈器, 使推力架动架处于平衡状态。通过标准砝码

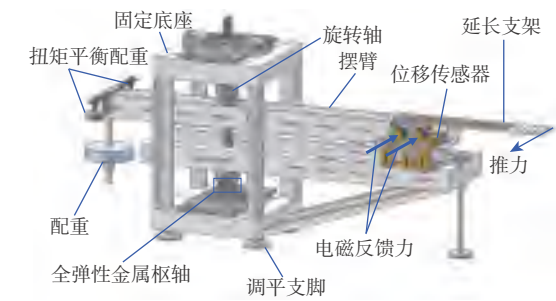


图 14 微小推力测量架

Fig. 14 Micro-thrust measurement device

对电磁力信号进行标定, 将反馈信号与推力信号一一对应, 得到推力值 T 。进一步, 通过已知的推进剂流量 $\dot{m}$ 和平均速度计算公式 ($v = F/\dot{m}$) 计算束流中重粒子平均速度 v , 这是对包括带正电离子加速和推进剂原子电离效果的综合评估。

2.3 等离子体诊断探针与成像

法拉第探针通常用于分析推力器放电通道外束流区等离子体特性^[25-28], 包括离子束电流密度、等离子体束流发散程度等, 进而推算推力器积分离子束电流、推进剂利用率和电流利用率。本文采用的带保护环法拉第探针的示意图及电路设置如图 15 所示, 由平面的钨收集器、保护环和若干陶瓷绝缘体组成。平面钨收集器直径为 4 mm, 直接暴露在等离子体束中。收集器被包围在一个不锈钢保护环内, 且保护环和收集器之间设置有绝缘陶瓷圈。

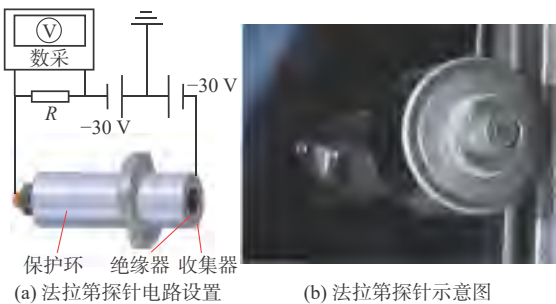


图 15 法拉第探针和电路配制

Fig. 15 Faraday probe and electrical circuit setup

在等离子体束流参数测试期间, 收集器和保护环均被设置为对地 (真空室) 的 -30 V 的偏置电压, 以排斥电子、收集离子, 同时保护环能削弱探针收集过程中的边缘效应。在实验中, 法拉第探针的扫描路径分为 2 种, 首先, 在 UDTv01 出口下游不同 z 轴距离 (10 mm、26 mm 和 38 mm) 处, 沿 y 轴方向进行扫描, 以获取 UDTv01 等离子体束流在 y 轴方向的非均匀性分布情况。其次, 沿 UDTv01 的 x 轴方向进行扫描, 以对比不同 x 轴位置处等离子体束流结构的偏心情况与阴极束流对 UDTv01 束流的影响。

3 结果与讨论

3.1 稳态伏安特性

图 16 为 UDTv01 阳极平均放电电流随放电电压变化趋势。随着放电电压的增加, 放电电流约呈线性上升, 这是因为固定推进剂流量下, 阳极放电电压的提升促进了放电通道内电子能量获取和电子与背景原子碰撞电离过程, 提升通道内等离子体密度, 从而使得阳极吸收更多电子导致阳极放电电流升高。进一步, 改变阳极推进剂流量会影响 UDTv01 的放电电流, 更高的流量对应着更大的放

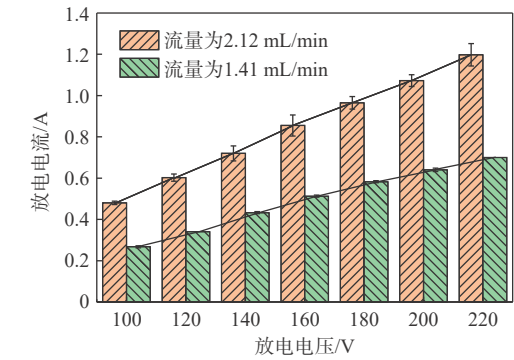


图 16 UDTv01 放电伏安特性

Fig. 16 Discharge voltametric characterization of UDTv01

电电流。这是因为阳极流量主导了放电通道内的电离过程,较高的流量能够生成较高的等离子体密度,同时也产生较大的放电电流。对比不同流量下,放电电流随放电电压的增长速度发现,相比流量为 1.41 mL/min 工况,大流量(2.12 mL/min)工况下放电电流随放电电压增长速度更快,这是因为在相同电压提升幅度的情况下,大流量工况下更多背景气体原子参与电离,电压的提升对电离促进效果更明显。

3.2 瞬态放电振荡

在实现 UDTv01 稳定放电并获取其放电电流均值随放电电压和推进剂流量演化规律的前提下,本文进一步开展 UDTv01 放电瞬态特性分析。图 17 为 1.05 mL/min 流量工况下放电电流瞬态波形和傅里叶变换频谱图。由图可知,1.05 mL/min 流量工况下,UDTv01 放电存在 2 种模式,即稳态直流放电模式和低频振荡模式。当放电电压小于 160 V 时,放电电流处于 0.2~0.35 A 的恒流模式,随着放电电压的增加,当电压超过 170 V 后,放电电流进入周期性振荡模式,周期约为 125 μs,放电电流主频为 8 kHz。

上述放电振荡是 $E \times B$ 霍尔推力器中的微观物理过程的表征,放电振荡的主要原因是背景推进剂原子的消耗与补充间的非平衡状态。放电开始时,在高电压下,由于电子获取足够能量,从而诱发放电通道内电子与原子的碰撞电离,然而随着背景原子的消耗,电离区原子密度降低,电离被抑制,因此,放电电流呈现典型的 U 型周期性振荡波形。其中,波形上升对应由电离碰撞诱发的电子雪崩效应,波形下降对应电离导致的原子消耗,进而导致等离子体密度迅速下降。电流波谷对应放电通道内中性原子的补给与电离再次建立的过程。然而,在小电压下,放电电流成稳态恒流模式,这是因为在小电压下,电子获得能量较低,在特定的小流量(1.05 mL/min)工况下,放电通道内电离效率较低,

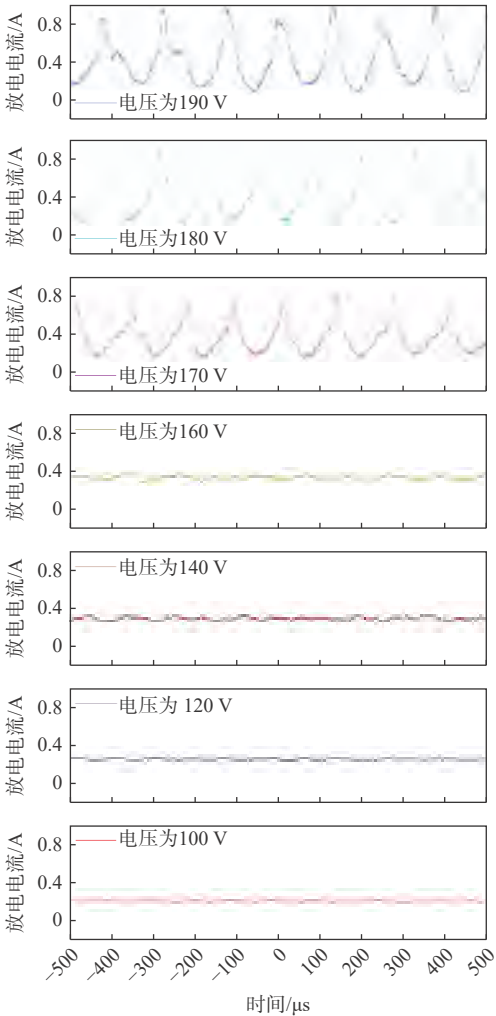


图 17 1.05 mL/min 流量工况放电电流振荡曲线

Fig. 17 Oscillation curves of discharge current at flowrate of 1.05 mL/min

不足以诱发过量的背景原子消耗,因此,该状态下背景原子的消耗与补充呈现平衡状态,放电电流呈现稳态直流现象。

然而,随着推进剂流量的增加,UDTv01 放电模式发生进一步的改变。图 18 为 1.95 mL/min 流量工况下放电电流瞬态波形和傅里叶变换频谱图。由图可知,相比 1.05 mL/min 流量下 170 V 的模式跳变点,1.95 mL/min 流量下,大电压工况模式跳变点出现明显延迟,周期性放电振荡出现在放电电压高于 220 V 的工况,且振荡周期缩短至 100 μs。当放电电压低于 220 V 时,放电电流为低幅值振荡状态,但是并不存在明显的主导振荡频率。与 1.05 mL/min 流量工况下单次模式跳变不同的是,在 1.95 mL/min 流量工况下,随着放电电压的进一步降低,放电电流再次进入周期性振荡模式,主导频率约为 15 kHz,但是该周期性振荡明显区别于高放电电压下的振荡模式。通过对比 1.05 mL/min 和 1.95 mL/min 流量工况放电模式可以发现,不同流量放电差异主要

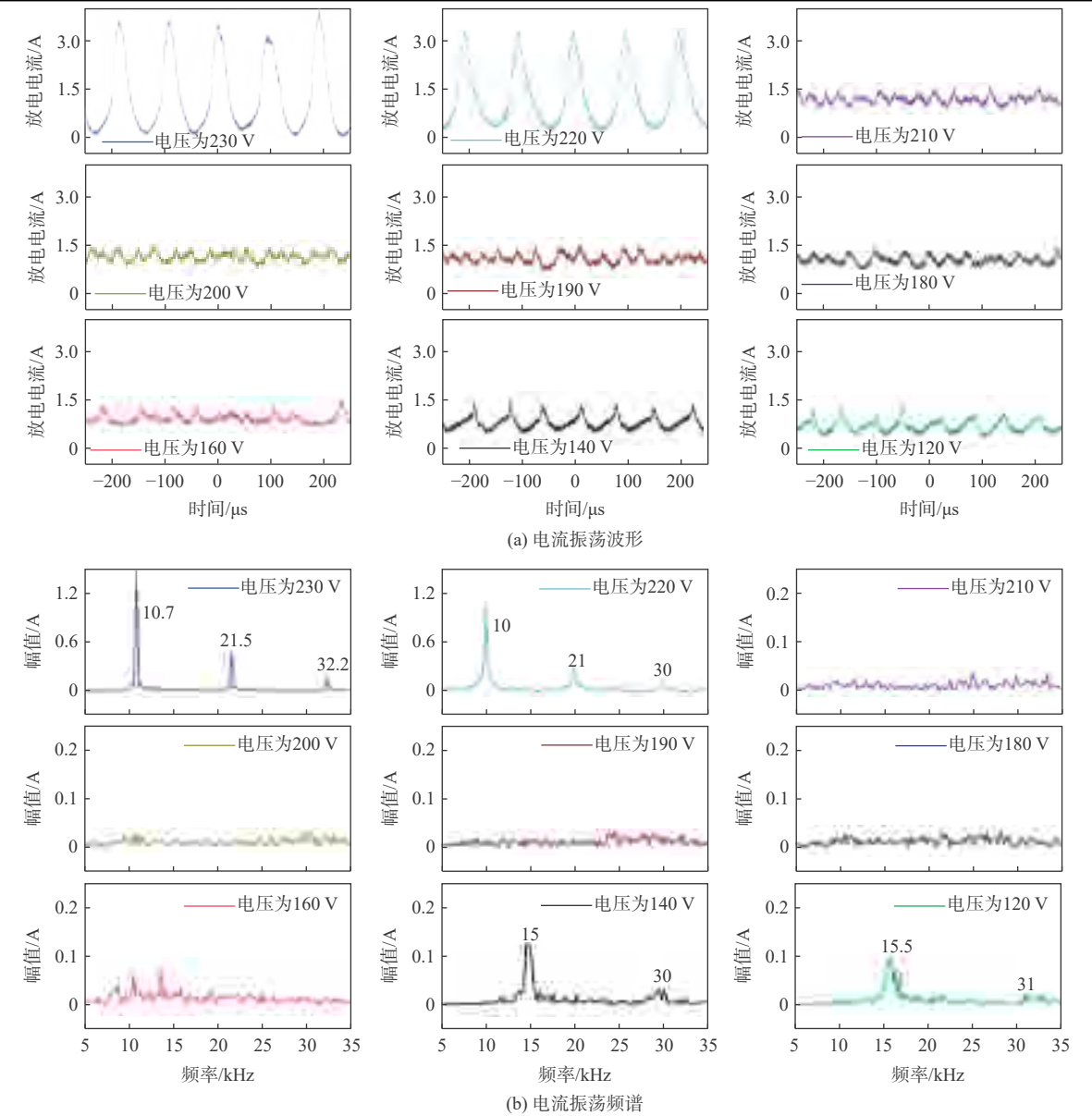


图 18 1.95 mL/min 流量工况放电电流振荡曲线

Fig. 18 Oscillation curves of discharge current at flowrate of 1.95 mL/min

体现在高电压和低电压 2 种放电状态。

为进一步分析不同电压下 UDTv01 放电模式随流量的演变规律, 其各电流波形分别提取如图 19 所示。由图 19 可知, 放电电压为 120 V 时, 随着推进剂流量从 1.05 mL/min 逐渐增加至 1.95 mL/min, UDTv01 逐渐进入放电振荡模式。这是因为, 低电压时, 推进剂流量主导电离率, 进而主导通道内放电模式。小流量下电离效率低, 原子电离消耗较慢, 难以进入振荡模式。然而, 如图 20 所示, 电压为 180 V 时, 电子能量升高诱发高电离率和快速的背景原子消耗, 因此, 小流量可以进入振荡模式。但是小流量下消耗和供给间平衡更容易被打破, 所以 UDTv01 放电振荡幅值更大。

但是, 对于高流量状态, 放电电压较低时, UDTv01 放电通道内电子能量有限, 部分原子被消

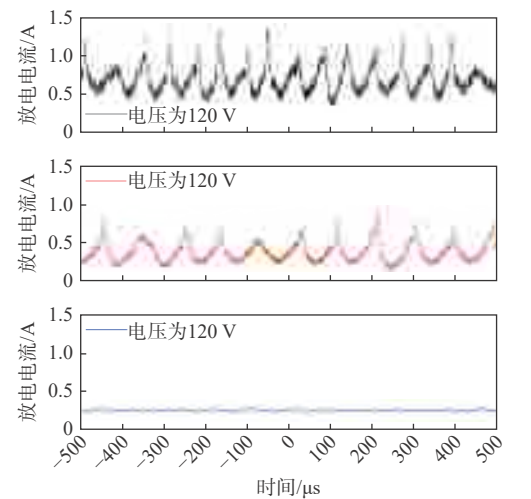


图 19 120 V 放电电压工况下放电电流振荡曲线

Fig. 19 Discharge current oscillation curves under 120 V discharge voltage condition

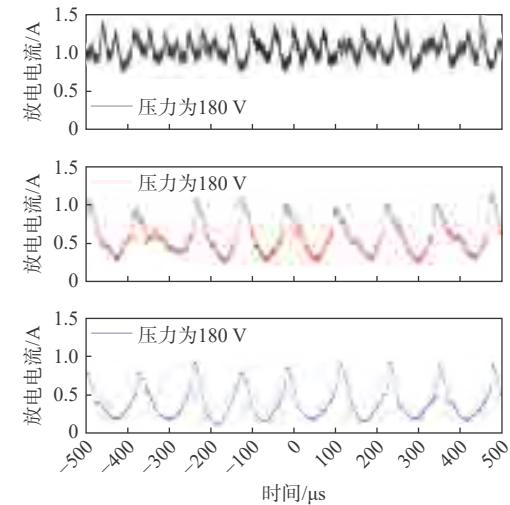


图 20 180 V 放电电压工况下放电电流振荡曲线

Fig. 20 Discharge current oscillation curves at 180 V discharge voltage condition

耗,瞬态原子密度处于电离雪崩所需阈值之下,但是补充速度较快,形成幅值较低且频率较高的振荡模式,电流振荡波谷值大于 0。随着放电电压的增加,电子能量提升,放电通道内原子消耗量增加,一个放电周期内原子消耗殆尽,因此,完全补充至电离雪崩所需阈值需要更长时间,所以在高电压模式下,放电电流呈现幅值较高且频率较低的振荡模式,放电电流振荡波谷值趋近于 0。

对于中间过渡模式下小振荡状态,本文进一步分析,提出可能原因是放电通道内电离区的结构变化。通过后续通道内电离区结构成像实验发现,在低电压下,电离区呈明显两侧分布,中心呈中空状态。此时放电主要发生在两侧窄电离区,呈现推进剂原子小规模消耗诱发的小幅度较高频率振荡。随着电压的逐步升高,中空区域等离子体密度逐渐增加,开始产生电离,通道内电离区域得到延伸,推进剂的消耗和补充区域扩大,但是此时电压不足以对大区域内推进剂原子消耗和补充动态平衡产生威胁,因此,电离较为稳定,呈现无振荡平稳过渡模式。但是,随着电压进一步的提升,电子具有足够能量对大区域内推进剂原子产生碰撞电离效应,造成推进剂原子大量消耗,此外由于电离区长度较大,补充周期长,因此,呈现出大幅值较低频率振荡模式。

3.3 束流结构

放电电流特性之外,本文获取了 UDTv01 放电通道下游等离子体束流结构参数,直观点火束流见图 21,图中 UDTv01 直线型放电通道下游形成明显锥状射流,表明通道内等离子体得到显著加速效果。利用微推力架对 UDTv01 等离子体束流重粒子宏观平均速度进行测量,测量结果如图 22 所

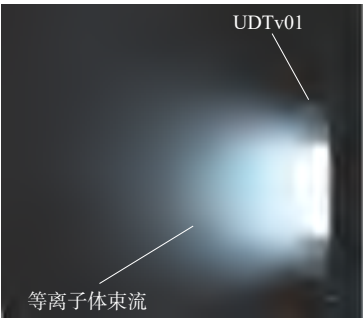


图 21 UDTv01 等离子体束流图像

Fig. 21 Plasma plume image of UDTv01

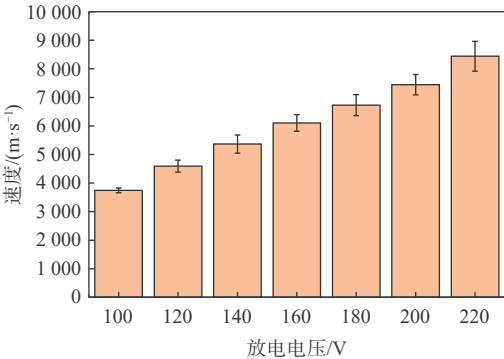


图 22 UDTv01 等离子体束流重粒子加速性能

Fig. 22 UDTv01 plasma beam heavy ion acceleration performance

示。随着放电电压从 100 V 升高至 220 V,计算得到推力器等离子体束流重粒子宏观平均速度从 3 800 m/s 升高至 8 500 m/s,表明 UDTv01 通道内产生的离子得到一定的电场加速,但由于电离效率的约束,平均加速效率较低。

在横向 y 轴方向,通道内等离子体均呈现高密度状态,但是光学图像不足以定量表明其等离子体束流沿 y 轴的分布规律,因此,通过法拉第探针针对 UDTv01 等离子体束电流密度进行进一步测量与诊断,结果如图 23 和图 24 所示。图 23 为距离 UDTv01 放电通道出口 10 mm 处不同 y 轴位置下等离子体束流密度 j(y) 曲线,包括推力器通道中心平面 (x=0 mm)、上壁面 (x=+5 mm)、下壁面 (x=

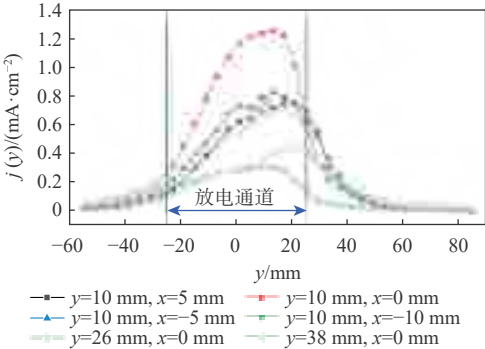


图 23 离子束流密度沿 y 轴变化曲线

Fig. 23 Variation curves of ion beam density along y-axis

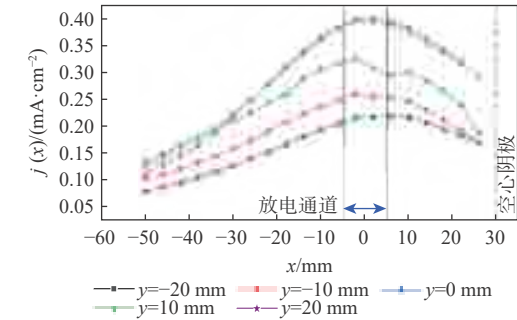


图 24 离子束流密度沿 x 轴变化曲线

Fig. 24 Variation curves of ion beam density along x -axis

-5 mm) 和外侧下壁面($x=-10$ mm)4 个 x 轴向位置处, 束流密度分布情况。由图可知, 在推力器放电通道中心平面上, 等离子体束流密度最高, 随着向 x 轴两侧延伸, 束流密度逐渐降低, 在上下壁面处, 束流密度分布相近, 随着距离的进一步增加至 -10 mm, 束流密度进一步降低。该分布结构表明, 通道内电子在 x 轴方向发生了充足的迁移与碰撞, 等离子体在 x 轴方向近似对称分布。

进一步, 在 y 轴方向, 由图 23 可知, 等离子体束流呈现一侧高的非均匀状态。从放电通道左侧($y=-25$ mm)至放电通道中心($y=0$ mm), 束流密度 $j(y)$ 呈先增加后平稳的趋势, 从放电通道中心($y=0$ mm)至通道右侧($y=17$ mm), 束流密度变化较小, 呈现出一段均匀电离区。随着 y 轴距离进一步增加, 束流密度出现锐减。随着法拉第探针与放电通道出口距离延长至 38 mm(见图 23), 束流密度逐渐降低, 上述等离子体束流非均匀现象更加明显, 这是因为随着束流的进一步向外碰撞, 束流中心的均匀区域消失, 束流逐渐演变成单峰分布结构。不同 x 轴位置下等离子体束流密度 $j(x)$ 曲线的方向仍然近似呈对称趋势(见图 24), 上侧($x>0$ mm)由于空心阴极束流区的存在, 等离子体密度略高于下侧($x<0$ mm)。

束流密度沿 y 轴方向分布结构反映出 $E \times B$ 等离子体放电结构的固有特性, 即等离子体的 $E \times B$ (y 轴方向)漂移运动。正是由于该运动的存在, 使得 UDTv01 放电通道左侧电子向右侧漂移, 使得右侧等离子体密度高于左侧。但是由于在 y 轴方向有足够长度的均匀磁场分布, 从放电通道中心处开始, 由于高频率碰撞电离效应, 使得电子漂移跨场输运减弱, 等离子体密度增长变缓, 呈现均匀状态。证明 UDTv01 在 y 轴方向磁场设计方案可行, 能够在放电通道内形成一段均匀分布等离子体, 以供进一步对通道内部等离子体进行磁场剖面上等离子体二维分布诊断。

3.4 电离区结构与形成机制

经过稳态伏安特性、瞬态放电振荡和推力器

等离子体束流诊断等多项放电测试, 可以证实 UDTv01 能够进行类霍尔推力器的稳定放电, 并对等离子体形成明显加速。此外, UDTv01 放电通道内部能够产生沿 y 轴方向均匀分布的电离区。基于此, 本文尝试对 UDTv01 放电通道内部磁场剖切面上等离子体二维分布结构进行高分辨率光学诊断成像, 结果如图 25 所示。根据图 25, 可以把 UDTv01 放电通道内磁场剖面等离子体电离区结构分为 5 个区域。其中, I 为近阳极区, II 为内电离区, III 为中空区, IV 为出口电离加速区, V 为通道外羽流膨胀区。从光学图像可知, UDTv01 放电通道内存在 II 和 IV 这 2 个近似对称分布的电离区。加在 II 和 IV 中间的是呈低密度分布的中空区域 III。通过磁场分析发现, III 的存在是因为纯径向的磁场构型直接诱导电子与放电通道壁面碰撞损失能量, 形成低能电子^[29], 降低该区域电离率, 形成中空区域。而电子在 II 和 IV 由于镜像磁镜结构受到有效约束, 电离效率较高, 等离子体密度提升。

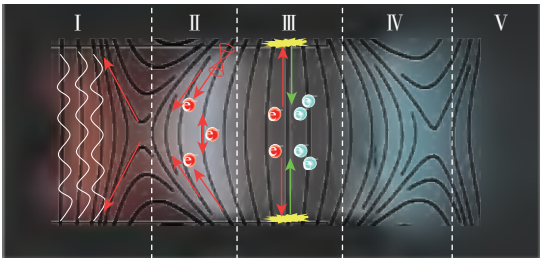


图 25 放电通道内磁场剖切面上电离区二维成像

Fig. 25 2D imaging of ionization zone on magnetic field section plane within discharge channel

通过改变阳极位置, 本文将阳极放在磁零点上游以探究磁零点对阳极附近等离子体的影响。由图 25 中近阳极区 I 可以发现, 电子在经过 I 区和 II 区的磁零点后, 受到阳极电势吸引运动获取能量, 但被阳极附近径向磁感线的约束作用, 绕磁感线做回旋运动, 沿 z 轴方向运动受阻, 致使阳极表面存在电势梯度, 从而降低了 UDTv01 阳极电压加速效率。因此, 本文提供了推力器阳极位置设计的直接证据支撑, 根据这一实验结果, 环形霍尔推力器设计时需要避免这一现象, 阳极位置不能仅出于保障电离率而过于靠近上游, 需要配合通道内磁感线走势, 阳极表面应处于凸向阳极的磁场末端, 从而实现电子向阳极稳定迁移。

环形推力器放电通道和本文的非环形推力器放电构型间最大的差距是电磁场的差异。非闭环直线型放电构型的设计, 源于霍尔推力器功率和体积逐渐放大的趋势, 当推力器径向尺寸远大于放电通道宽度时, 可以近似考虑霍尔推力器环形放电室由数个小型直线型通道圆周阵列组成。 $E \times B$ 的存

在使得等离子体沿 $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$ 方向(y 方向)产生漂移运动从而产生 y 方向的流场与电磁场分布,从而出现三维效应。由于对侧壁面的存在, y 轴方向等离子体运动加剧了与对侧陶瓷壁面的相互作用,改变等离子体近壁传导等物理过程,这是影响放电的主要因素。不过经过试验验证发现,对侧壁面的近壁传导显著降低对侧壁面附近的电子温度,从而抑制了该处推进剂原子的电离,因此,在对侧附近法拉第探针实验结果同样显示等离子体密度下降,并未在侧壁附近形成显著电离区,保证了从光学观察窗对通道内等离子体二维分布进行诊断的背景不受影响。同时,通过对 y 轴方向匀强磁场的长度进行把控,可以保证在放电通道中心形成稳定的类似环形霍尔推力器通道内等离子体产生、轴向加速与径向漂移的过程,从而保证放电和实验结果的可靠性。但是,侧壁依然会影响对侧区域阳极电流组分的形成和阳极电流效率,需要进一步优化。

4 结 论

- 1) 本文利用永磁体设计了具有可视放电腔的非闭环 $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$ 漂移推力器 UDTv01, 提出相似磁场构型、相似轴向梯度、足够的磁场均匀段 3 条设计原则。实验表明: UDTv01 呈现出与环形霍尔推力器相似的伏安特性, 验证了其工作原理相似性及可靠性。
- 2) UDTv01 中存在典型 $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$ 等离子体低频振荡, 主导频率 $8 \sim 15$ kHz, 实现不同振荡模式调控。小流量下电压主导电子能量引起电离率变化, 使之进入无振荡模式和大幅值低频振荡模式。高流量下原子密度增加碰撞电离效率, 低电压下更易进入低幅值振荡状态; 电压提升, 原子电离消耗剧增, 进入大幅值长周期振荡模式。
- 3) 实现对通道内电离区二维成像, 具备了直接实验研究霍尔推力器的放电与加速过程中二维平面上等离子体微观表现的手段。在磁镜结构主导的多区域电离区上游, 直接观测到了由阳极表面磁感线约束形成的近阳极电子阻滞电离区域, 是推力器阳极加速效率的损失来源, 为霍尔推力器磁场设计提供直接支撑。

参考文献 (References)

[1] BOEUF J P. Tutorial: physics and modeling of Hall thrusters[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121: 011101.

[2] PETERSON P, JACOBSON D, MANZELLA D, et al. The performance and wear characterization of a high-power high-isp NASA Hall thruster[C]//Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston: AIAA, 2005.

[3] GARRIGUES L, SANTHOSH S, GRIMAUD L, et al. Operation of a low-power Hall thruster: comparison between magnetically unshielded and shielded configuration[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28(3): 034003.

[4] SZABO J J. Fully kinetic numerical modeling of a plasma thruster[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001.

[5] SZABO J, WARNER N, MARTINEZ-SANCHEZ M, et al. Full particle-in-cell simulation methodology for axisymmetric Hall effect thrusters[J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(1): 197-208.

[6] LINNELL J A, GALLIMORE A D. Internal plasma potential measurements of a Hall thruster using xenon and krypton propellant[J]. Physics of Plasmas, 2006, 13(9): 093502.

[7] LINNELL J A, GALLIMORE A D. Internal plasma potential measurements of a Hall thruster using plasma lens focusing[J]. Physics of Plasmas, 2006, 13(10): 103504.

[8] MIKELLIDES I G, KATZ I, HOFER R R, et al. Magnetic shielding of a laboratory Hall thruster. I. theory and validation[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(4): 043303.

[9] HOFER R R, GOEBEL D M, MIKELLIDES I G, et al. Magnetic shielding of a laboratory Hall thruster. II. experiments[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(4): 043304.

[10] HAAS J M, GALLIMORE A D, MCFALL K, et al. Development of a high-speed, reciprocating electrostatic probe system for Hall thruster interrogation[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(11): 4131-4138.

[11] YAN S L, LI W B, DING Y J, et al. High-speed camera imaging in the discharge channel during a Hall thruster ignition[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(4): 1058-1061.

[12] ZHANG H G, NING Z X, DING Y J, et al. High-speed camera imaging of the ignition process in a heaterless hollow cathode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(2): 1487-1491.

[13] MAZOUFFRE S. Laser-induced fluorescence diagnostics of the cross-field discharge of Hall thrusters[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2013, 22(1): 013001.

[14] MAZOUFFRE S, KULAEV V, LUNA J P. Ion diagnostics of a discharge in crossed electric and magnetic fields for electric propulsion[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2009, 18(3): 034022.

[15] HARGUS Jr W A, CAPPELLI M A. Development of a linear Hall thruster[C]//Proceedings of the 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 1998.

[16] GASCON N, THOMAS C, HERMANN W, et al. Further investigations of an open drift Hall thruster with boron nitride and diamond wall [C]//Proceedings of the 28th International Electric Propulsion Conference. Reston: AIAA, 2003.

[17] ROVEY J L, GIACOMI M P, STUBBERS R A, et al. Plume profiles of a planar crossed-field thruster with hall current injection[J]. Journal of Propulsion and Power, 2009, 25(3): 737-745.

[18] MIYASAKA T, NAGAO R, FUKAGAWA K, et al. Plume interference effects of the racetrack-shaped anode-layer Hall thruster system[J]. Mechanical Engineering Journal, 2022, 9(2): 21-00347.

[19] MEEZAN N B, GASCON N, CAPPELLI M A. Linear geometry hall thruster with boron nitride and diamond walls[C]//Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference. Reston:

- AIAA, 2001.
- [20] GASCON N, THOMAS C A, HERMANN W A, et al. Operating regimes of a linear SPT with low secondary electron-induced wall conductivity[C]//Proceedings of the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2003.
- [21] SCHMIDT D P, MEEZAN N B, HARGUS Jr W A, et al. Operating characteristics of a linear Hall thruster with an open electron-drift[C]//Proceedings of the 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 1999.
- [22] GASCON N, CAPPELLI M A, HARGUS Jr W A. Ion velocity measurements in a linear Hall thruster[C]//Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston: AIAA, 2005.
- [23] CAPPELLI M, WALKER Q, MEEZAN N, et al. Performance of a linear Hall discharge with an open electron drift[C]//Proceedings of the 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2001.
- [24] BEAL B, GALLIMORE A. Development of the linear gridless ion thruster[C]//Proceedings of the 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2001.
- [25] ZHANG Z, ZHANG Z, XU S T, et al. Three-dimensional measurement of a stationary plasma plume with a Faraday probe array[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 110: 106480.
- [26] ZHANG Z, ZHANG Z, TANG H B, et al. Measurement of the distribution of charge exchange ions in a Hall-effect thruster plume[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(8): 085001.
- [27] BROWN D L, WALKER M L R, SZABO J, et al. Recommended practice for use of faraday probes in electric propulsion testing[J]. Journal of Propulsion and Power, 2017, 33(3): 582-613.
- [28] RAITSES Y, STAACK D, KEIDAR M, et al. Electron-wall interaction in Hall thrusters[J]. Physics of Plasmas, 2005, 12(5): 057104.
- [29] ZHANG G C, REN J X, TANG H B, et al. Plasma diagnosis of an unclosed $E \times B$ drift thruster with a visible ionization zone[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2022, 31(7): 075002.

Design and experimental study of an unclosed-loop $E \times B$ Hall thruster

ZHANG Guangchuan¹, WANG Weizong^{1, 2, *}, REN Junxue^{1, 2}, WANG Yibai^{1, 2, 3},
TANG Haibin^{1, 2}, YANG Lijun^{1, 2}

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Key Laboratory of Spacecraft Design Optimization & Dynamic Simulation Technologies, Ministry of Education, Beijing 100191, China;

3. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: A common form of sophisticated electric propulsion technology in spacecraft is the Hall thruster. The traditional annular closed-loop Hall thrusters are unable to carry out the 2D distribution diagnosis of plasma inside the discharge channel due to structural limitations. In order to address this issue, an unclosed-loop linear channel $E \times B$ Hall thruster with optical diagnostic windows was constructed, the magnetic and flow fields inside the thruster were simulated and evaluated, and magnetic field design principles were suggested. Further, this paper verified the effective plasma confinement and electromagnetic field acceleration by the linear discharge channel configuration through steady-state discharge parameter monitoring, transient discharge oscillation analysis, plasma parameter diagnosis in the beam region, and plasma distribution structure imaging in the ionized region inside the discharge channel. The discharge mode regulation based on the discharge voltage was realized, and the evolutionary tendency of the discharge mode with the propellant flow rate was identified. Finally, this paper successfully obtained the 2D distribution fine structure of plasma inside the discharge channel on the magnetic field configuration profile. In summary, this paper realized the stable discharge and mode regulation of the plasma in the $E \times B$ field of a Hall-like thruster under a simple device, combined with the optical diagnosis of the distribution structure of the plasma in the two-dimensional plane, and put forward a new idea for the further microscopic manifestation of the typical discharge oscillation process of a Hall thruster.

Keywords: Hall thrusters; magnetic field; 2D distribution of plasma; unclosed-loop linear channel; discharge oscillations

Received: 2024-01-18; Accepted: 2024-01-30; Published Online: 2024-03-12 18:00

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240312.1539.003

Foundation items: China Postdoctoral Science Foundation (2023M740181); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (YWF-23-Q-1044)

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

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0010

基于 NTRU 格上的高铁共生网络安全切换认证方案

陈永*, 张冰旺, 信召凤

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

摘 要: 针对高铁 GSM-R 无线通信系统向下一代 5G-R 网络演进过程中, 共生网络垂直切换时存在身份泄露、不具备前后向安全性和认证开销大等问题, 提出了一种基于 NTRU 格上的高铁共生网络安全切换认证方案。设计了基于 NTRU 格的双向认证机制, 克服了身份信息 SUPI 明文传输易泄露的缺点; 提出基于共享密钥的哈希链加密方法, 设计共享密钥生成和共生网络切换令牌策略, 实现切换认证密钥的预生成, 确保了共享密钥的动态更新及前后向安全性; 采用中国剩余定理及时间戳机制实现了会话密钥的机密性, 完成了共生网络的切换认证。通过 BAN 逻辑形式化理论证明和 TAMARIN 协议仿真验证工具对所提方法进行安全性分析, 结果表明: 与同类方法相比, 所提方法确保了身份的匿名性和密钥前后向安全性, 可有效抵抗 DoS 攻击和中间人攻击等攻击, 具有更低的切换开销, 能够满足高铁共生网络安全无缝切换认证的需求。

关 键 词: 铁路无线通信; 共生网络; 切换认证; NTRU 格加密; 通信效率

中图分类号: U285.2; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1076-12

目前, 中国高铁采用 GSM-R 无线通信系统, 但 GSM-R 属于 2G 窄带通信技术, 已无法满足未来中国高铁智能化、大带宽、多业务的发展需求^[1]。5G-R 作为中国下一代高铁无线通信系统, 具有大带宽、低时延等优点^[2]。2023 年 9 月, 随着工业和信息化部批复 5G-R 试验频率, 全国范围将逐步开展外场试验, GSM-R 网络将逐步向 5G-R 网络平滑演进。从铁路专用无线通信系统长期演进过程来看, 未来将长期出现 GSM-R 和 5G-R 网络融合共生的局面^[3-4]。然而, 高铁共生网络场景下开放的多模空中接口及 5G-R 全 IP 的扁平化网络构架, 使其更易遭受篡改、假冒欺骗等安全风险^[5-6]。因此, 如何保障高铁异构共生网络之间的安全认证, 对高速列车行车安全至关重要。

在 GSM-R 与 5G-R 共生网络间切换认证过程中, 被指出存在身份标识泄露、难以抵抗 DoS 攻

击、重放攻击、不具备前后向安全性、通信开销及计算开销大等问题^[7-9]。针对 5G-R 异构网络切换认证过程存在的安全漏洞, 国内外学者展开了大量研究。Wang 等^[7]面向铁路专用无线通信系统, 设计了一种基于无证书代理签名的垂直切换认证方案, 但其密钥参数以明文方式传输, 存在密钥泄露的风险。Cao 等^[8]提出了一种基于软件定义网络 (software-defined network, SDN) 的用户设备 (user equipment, UE) 隐私保护垂直切换认证方法, 依据授权票证技术实现了 UE 和基站间的相互认证, 但不能保证会话密钥后向安全性。Alezi 等^[9]提出了基于椭圆曲线身份授权机制的垂直切换认证方案, 确保了密钥的前后向安全性, 但采用明文 ID 检索来匹配会话密钥, 易遭受 DoS 攻击。Ma 等^[10]设计了基于非参数检验假设的物理层和上层加密方法, 实现了 5G 异构网络垂直切换认证, 但未能充分利用样本

收稿日期: 2024-01-08; 录用日期: 2024-02-23; 网络出版时间: 2024-03-12 10:00

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240311.1521.004

基金项目: 国家自然科学基金 (62462043, 61963023); 甘肃省自然科学基金 (26JRRA589)

*通信作者. E-mail: edukeylab@126.com

引用格式: 陈永, 张冰旺, 信召凤. 基于 NTRU 格上的高铁共生网络安全切换认证方案 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1076-1087. CHEN Y, ZHANG B W, XIN Z F. Security handover authentication scheme for high-speed railway symbiotic network based on NTRU lattice [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1076-1087 (in Chinese).

信息, 无法处理交互作用, 且易遭受重放攻击。Yang 等^[11] 基于 5G SDN 设计了一种由 UE 位置决定的无线链路签名切换认证, 实现了切换密钥的机密性保护。Cui 等^[12] 提出了一种支持边缘计算的统一垂直切换认证框架, 利用基于强化学习的信任评估机制识别非法 UE, 可以抵抗中间人攻击, 但无法抵抗重放攻击。Kalia 等^[13] 提出了基于逻辑回归预测的异构网络认证方案, 可抵抗伪基站的欺骗和攻击, 但对异常值较敏感, 在频繁高速切换认证时, 攻击者可引入或模拟异常值欺骗逻辑回归切换认证模型, 继而引发 DoS 攻击。Liu 等^[14] 通过依赖于随机数自循环加密结构的掩码验证实现切换, 可有效抵抗去同步攻击, 但掩码数组自循环密钥推导方式增加了计算开销。Divakaran 等^[15] 设计了一种基于模糊逻辑的切换认证模型, 降低了垂直切换认证开销, 但存在参数阈值选择主观性的问题, 且无法抵御去同步攻击及重放攻击。Sharma 等^[16] 提出了一种移动切换链路协议, 该方案基于椭圆曲线加密技术实现了 UE 跨多个集线器的切换认证, 具有前后向安全性, 但无法抵抗去同步攻击。Zhou 等^[17] 利用格密码理论, 设计了一种 UE 隐私保护的切换认证方案, UE 通过伪随机标识符 SID 与认证服务器进行通信, 保护了 UE 身份隐私, 可抵抗量子计算攻击, 但对随机标识符 SID 未识别, 攻击者可伪造大量 SID 发起对认证服务的 DoS 攻击。

综上所述, 针对高铁垂直切换认证中仍存在身份泄露、不具备前后向安全性和认证开销大等问题, 本文提出了一种基于 NTRU 格上的高铁共生网络安全切换认证方案。主要工作有: ①设计了基于 NTRU 格的双向认证机制, 通过生成临时身份信息及时间戳确保认证消息的新鲜性, 实现了列车身份匿名性; ②提出了基于共享密钥的哈希链加密方法, 设计共享密钥生成和共生网络切换令牌策略, 实现垂直切换认证的密钥预生成, 以减少切换认证开销, 同时, 确保了共享密钥的动态更新及会话密钥的前后向安全性; ③采用中国剩余定理密钥协商方法及时间戳机制, 确保了会话密钥的机密性, 完成垂直切换认证。通过 BAN 逻辑形式化理论证明和 TAMARIN 协议仿真验证工具验证了本文所提协议的安全性, 结果表明, 方案具有更高的安全性及更低的切换开销。

1 共生网络架构及切换认证机制

高铁共生网络是一种实现列车 UE 在异构体制网络内安全高效互联的网络体系结构, 由 GSM-R 网络和 5G-R 网络组成^[3-4], 如图 1 所示。图中:

AuC 为鉴权中心, MSC 为移动交换中心, MEC 为多接入边缘计算。其中, GSM-R 无线接入网采用基站控制器 (base station controller, BSC) 控制基站收发信台 (base transceiver station, BTS) 的结构。列车 UE 与接入网通过空中接口传输 UE 身份信息、行车控制信令等隐私数据。GSM-R 网络向 5G-R 网络演进过程中, 通过 5G 带宽集群通信设备 MCX 实现跨网互联, 网元设备采取按线路平稳升级更新的方法。接入控制和移动管理设备 SGSN 将演进升级为接入和移动管理服务器 (access and mobility management function, AMF), 由 AMF 负责列车 UE 接入注册管理。而归属位置寄存器 (home location register, HLR) 将演进升级为鉴权服务中心 (authentication server function, AUSF), 升级后 AUSF 将集成鉴权算法, 为列车 UE 生成切换认证向量。

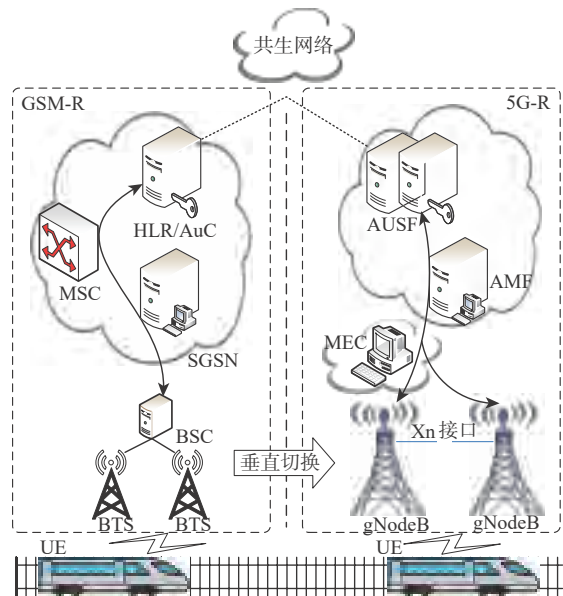


图 1 高铁共生网络架构

Fig. 1 Architecture of high-speed railway symbiotic network

图 1 中, 列车 UE 通过 GSM-R/5G-R 源接入网 BTS/gNodeB 向接入控制和移动管理设备 SGSN/AMF 发起入网请求, 将鉴权和加密信息发送至 HLR/AUSF, 通过身份权限互认证后, UE 通过源 SGSN/AMF 向目标 AMF/SGSN 发起跨网切换请求, 并根据目标 AMF/SGSN 消息响应机制与目标接入网 gNodeB/BTS 建立安全会话, 从而完成高铁共生网络垂直切换认证。GSM-R/5G-R 双向切换认证流程如下:

步骤 1 列车 UE 通过接入网 BTS/gNodeB 向 SGSN/AMF 发起接入请求, HLR/AUSF 为各通信实体生成系统加密参数。

步骤 2 SGSN/AMF 收到接入请求后, 验证列车 UE 身份, 若验证失败, 则终止会话; 否则, 生成

质询消息并发送至基站 BTS/gNodeB。

步骤 3 基站 BTS/gNodeB 收到质询信息后, 获取列车 UE 身份信息, 并计算响应消息, 来验证列车 UE 和 SGSN/AMF 身份合法性。若验证失败, 则终止接入认证协议; 否则, 列车 UE 接入 GSM-R/5G-R 共生网络。

步骤 4 列车 UE 成功接入 GSM-R/5G-R 共生网络后, 源 SGSN/AMF 和目标 AMF/SGSN 通过共享密钥计算双方身份认证消息, 完成身份互认证后, 进行后续切换认证阶段。

步骤 5 源 SGSN/AMF 和目标 AMF/SGSN 完成身份互认证后, 列车 UE 计算切换认证消息并发送至目标 gNodeB/BTS 和目标 AMF/SGSN。目标 gNodeB/BTS 和目标 AMF/SGSN 验证列车 UE 身份合法性, 若验证通过, 则列车 UE 完成切换认证, 否则, 终止会话。

2 本文方法

NTRU 密码是一种基于格理论的环上带错学习 (learning with errors over rings, RLWE) 问题的轻量级公钥加密方法, 基于格困难问题被证明在随机归约下均属于 NP-hard 类问题, 相比于椭圆曲线加密机制, 其可抵抗量子攻击, 且具有更快的计算速度和更小的密钥长度^[18]。鉴于以上优点, 本文提出了一种基于 NTRU 格的高铁共生网络垂直切换认证方案, 主要包括 5 个阶段: 系统初始化阶段、接入认证阶段、共享密钥建立阶段、令牌授权过程和垂直切换认证阶段。

2.1 系统初始化阶段

系统初始化阶段, 高速列车 UE 向移动授权实体 SGSN/AMF 和认证服务器 HLR/AUSF 发起入网注册请求。HLR/AUSF 生成系统加密参数, 该过程基于定义在如下 3 个截尾多项式环上的 NTRU 格加密机制进行设计:

$$\begin{cases} R[X] = \frac{Z[X]}{X^N - 1} \\ R_p[X] = \frac{(Z/pZ)[X]}{X^N - 1} \\ R_q[X] = \frac{(Z/qZ)[X]}{X^N - 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: N, p, q 为参数集合, N 为素数; Z 为整数环; 多项式环 R_p 和 R_q 分别由多项式环 R 的系数模上 p 和 q 所得, 整数 q, p 满足 $q \geq p$ 。此外, HLR/AUSF 认证服务器通过 4 个次数为 $N-1$ 的整系数多项式集合 $\{L_f, L_g, L_r, L_m\}$ 生成系统公钥和私钥。其中, 记 $L(d_1, d_2) = \{F \in R[X] \mid |iF_i = 1| = d_1, |iF_i = -1| = d_2\}$, 则有

$$\begin{cases} L_f = L(d_f, d_f - 1) \\ L_g = L(d_g, d_g) \\ L_r = L(d_r, d_r) \\ L_m = m \in R[X] \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 的系数位于区间 $[-(p-1)/2, (p-1)/2]$, 且 p 为素数。

系统初始化流程如图 2 所示, 步骤如下:

步骤 1 HLR/AUSF 依据 NTRU 密钥体制从环 $R[X]$ 选择公共参数 $\{N, q, p\}$, 以及 4 个度不超过 $N-1$ 的多项式集合 $\{L_f, L_g, L_r, L_m\}$ 。HLR/AUSF 选择 2 个多项式 $\{f_{\text{HLR/AUSF}} \in L_f, g_{\text{HLR/AUSF}} \in L_g\}$, 并且要求存在 $\{f_{q, \text{HLR/AUSF}}^{-1} \in R_q[X], f_{p, \text{HLR/AUSF}}^{-1} \in R_p[X]\}$, 且满足: $\{f_{q, \text{HLR/AUSF}}^{-1} * f_{\text{HLR/AUSF}} \equiv 1 \pmod{q}, f_{p, \text{HLR/AUSF}}^{-1} * f_{\text{HLR/AUSF}} \equiv 1 \pmod{p}\}$ 。其中, “*” 为 NTRU 多项式环上的卷积乘法。若 $\{f_{q, \text{UE}}^{-1}, f_{p, \text{UE}}^{-1}\}$ 在环 R_q 和环 R_p 上不存在, 则重新选择原函数。

步骤 2 HLR/AUSF 计算其公私钥对 $\{K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{PK}} = pf_{q, \text{HLR/AUSF}}^{-1} g_{\text{HLR/AUSF}} \pmod{q}, K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{SK}} = (f_{\text{HLR/AUSF}}, pf_{q, \text{HLR/AUSF}}^{-1})\}$, 并为 SGSN/AMF 随机选取一个加密密钥 $K_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{ESK}}$, 公布系统参数 $\{N, q, p, L_f, L_g, L_r, L_m, h\}$ 。其中, h 为哈希加密函数。

步骤 3 HLR/AUSF 选择 3 个多项式 $f_{\text{UE}} \in L_f, f_{\text{SGSN/AMF}} \in L_f, f_{\text{AMF/SGSN}} \in L_f$, 并计算相应的公钥 $K_{\text{UE}}^{\text{PK}} = pf_{q, \text{UE}}^{-1} * g_{\text{HLR/AUSF}} \pmod{q}, K_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{PK}} = pf_{q, \text{SGSN/AMF}}^{-1} * g_{\text{HLR/AUSF}} \pmod{q}, K_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{PK}} = pf_{q, \text{AMF/SGSN}}^{-1} * g_{\text{HLR/AUSF}} \pmod{q}$ 。

步骤 4 HLR/AUSF 向列车 UE 发送公钥信息 $(K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{PK}}, K_{\text{UE}}^{\text{PK}})$, 并分别向源 SGSN/AMF 和目标 AMF/SGSN 发送 $(K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{PK}}, K_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{PK}}, K_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{PK}})$ 。

此阶段完成后, 系统各密钥参数初始化完成。

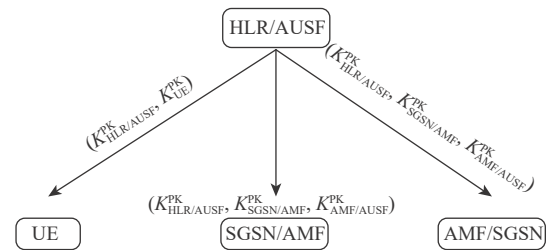


图 2 系统初始化流程

Fig. 2 System initialization process

2.2 接入认证阶段

在完成系统初始化后, 列车 UE 运行前, 通过接入认证协议安全接入 GSM-R/5G-R 共生网络。采用 NTRU 格上双向认证机制生成列车 UE 伪身份, UE 通过检验带有时间戳信息的消息认证码完成与基站 BTS/gNodeB 身份互认证, UE 安全地接入 GSM-R/5G-R 共生网络。接入认证流程如图 3 所示, 具体

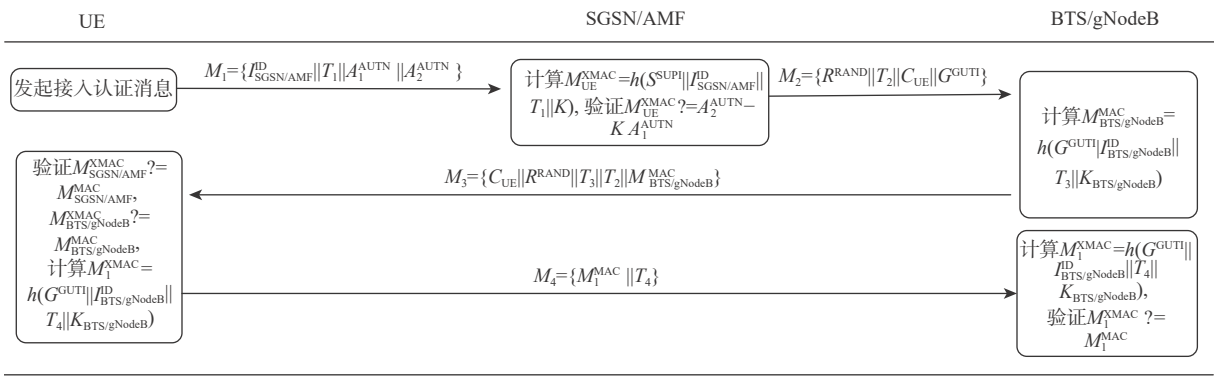


图3 接入认证流程

Fig. 3 Access authentication process

步骤如下:

步骤1 UE选取随机数 $r_{UE} \in L_r$, 同时生成时间戳消息 T_1 . 计算认证信息 $A_1^{AUTN} = r_{UE} K_{SGSN/AMF}^{PK} + S^{SUPI}$ 、 $M_{UE}^{MAC} = h(S^{SUPI} || I_{SGSN/AMF}^{ID} || T_1 || K)$ 和 $A_2^{AUTN} = KA_1^{AUTN} + M_{UE}^{MAC}$, 其中, K 为 UE 与 SGSN/AMF 的共享密钥。通过基站 BTS/gNodeB 发送信息 $M_1 = \{I_{SGSN/AMF}^{ID} || T_1 || A_1^{AUTN} || A_2^{AUTN}\}$ 至移动管理中心 SGSN/AMF。

步骤2 SGSN/AMF 收到消息 M_1 后, 计算 $a = f_{SGSN/AMF}^{-1}(A_1^{AUTN} \pmod{q})$ 和 $S^{SUPI} = f_{p,SGSN/AMF}^{-1}(a \pmod{p})$ 。依据 S^{SUPI} 查询与对应 UE 的共享密钥 K , 并计算 $M_{UE}^{XMAC} = h(S^{SUPI} || I_{SGSN/AMF}^{ID} || T_1 || K)$, 验证 $M_{UE}^{XMAC} ?= A_2^{AUTN} - KA_1^{AUTN}$, 验证通过后, 表明 SGSN/AMF 收到了来自合法 UE 的信息, 若验证失败, 则终止会话; 否则, SGSN/AMF 随机选取 R^{RAND} 和消息值有效期 V^p , 并生成时间戳信息 T_2 , 依次计算 $K_{SGSN/AMF} = h(S^{SUPI} || I_{SGSN/AMF}^{ID} || R^{RAND} || K)$ 、 $K_{BTS/gNodeB} = h(S^{SUPI} || I_{BTS/gNodeB}^{ID} || K_{SGSN/AMF})$ 、消息鉴别码 $M_{SGSN/AMF}^{MAC} = h(S^{SUPI} || I_{SGSN/AMF}^{ID} || T_2 || K_{SGSN/AMF})$ 、UE 临时身份 $G^{GUTI} = E_{ESK_{SGSN/AMF}}(S^{SUPI} || V^p)$ 和参数加密信息 $C_{UE} = E_{K_{SGSN/AMF}}(R^{RAND} || S^{SUPI} || M_{SGSN/AMF}^{MAC} || G^{GUTI} || K_{BTS/gNodeB})$ 。发送 $M_2 = \{R^{RAND} || T_2 || C_{UE} || G^{GUTI}\}$ 给基站 BTS/gNodeB。

步骤3 基站 BTS/gNodeB 收到消息 M_2 后, 从中获取 UE 临时身份信息 G^{GUTI} , 并计算 $M_{BTS/gNodeB}^{MAC} = h(G^{GUTI} || I_{BTS/gNodeB}^{ID} || T_3 || K_{BTS/gNodeB})$ 。发送消息 $M_3 = \{C_{UE} || R^{RAND} || T_3 || T_2 || M_{BTS/gNodeB}^{MAC}\}$ 至 UE。

步骤4 UE 收到 M_3 后, 计算 $K_{SGSN/AMF} = h(S^{SUPI} || I_{SGSN/AMF}^{ID} || R^{RAND} || K)$ 和 $M_{SGSN/AMF}^{XMAC} = h(S^{SUPI} || I_{SGSN/AMF}^{ID} || T_2 || K_{SGSN/AMF})$ 。验证 $M_{SGSN/AMF}^{XMAC} ?= M_{SGSN/AMF}^{MAC}$, 验证通过, 则表明 UE 成功认证 SGSN/AMF 身份。此时, UE 计算 $K_{BTS/gNodeB} = h(S^{SUPI} || I_{BTS/gNodeB}^{ID} || K_{SGSN/AMF})$ 和 $M_{BTS/gNodeB}^{XMAC} = h(G^{GUTI} || I_{BTS/gNodeB}^{ID} || T_3 || K_{BTS/gNodeB})$ 。验证 $M_{BTS/gNodeB}^{XMAC} ?= M_{BTS/gNodeB}^{MAC}$, 验证通过, 表明 UE 成功认证基站 BTS/gNodeB 身份。此时, 计算 $M_1^{XMAC} = h(G^{GUTI} || I_{BTS/gNodeB}^{ID} || T_4 || K_{BTS/gNodeB})$, 发送消息 $M_4 = \{M_1^{MAC} || T_4\}$ 给基站 BTS/gNodeB。

gNodeB。

步骤5 基站 BTS/gNodeB 收到 M_4 后, 计算 $M_1^{XMAC} = h(G^{GUTI} || I_{BTS/gNodeB}^{ID} || T_4 || K_{BTS/gNodeB})$, 验证 $M_1^{XMAC} ?= M_1^{MAC}$, 验证通过, 表明基站 BTS/gNodeB 成功认证 UE 身份。

此阶段完成后, 列车 UE、基站 BTS/gNodeB 和移动管理中心 SGSN/AMF 完成身份互认证, UE 和基站 BTS/gNodeB 基于协商的密钥 $K_{BTS/gNodeB}$ 实现接入层通信, UE 成功接入 GSM-R/5G-R 共生网络。

2.3 共享密钥建立阶段

在完成接入认证阶段后, 进一步设计了共享密钥建立阶段。为了解决现有高铁共生网络垂直切换认证中, 源 SGSN/AMF 与目标 AMF/SGSN 之间存在的共享密钥长期不更新, 无法保证列车 UE 与目标 AMF/SGSN 间建立会话密钥安全性的问题, 在生成共享密钥之前, 源 SGSN/AMF 与目标 AMF/SGSN 应完成相互身份认证。共享密钥建立流程如图4所示, 具体步骤如下:

步骤1 源 SGSN/AMF 选取 $L_{m,SGSN/AMF} \in L_m$ 和随机多项式 r , 并计算 $R_{SGSN/AMF} = p(r * K_{HLR/AUSF}^{PK} + L_{m,AMF/SGSN} \pmod{q})$, $Y_{SGSN/AMF} = L_{m,AMF/SGSN} * K_{HLR/AUSF}^{PK} \pmod{q}$, 身份匿名 $I_{SGSN/AMF}^{RID} = h(K_{SGSN/AMF}^{PK} || L_{m,SGSN/AMF} * K_{HLR/AUSF}^{PK}) \oplus I_{SGSN/AMF}^{YID}$, $I_{SGSN/AMF}^{YID} = h(I_{SGSN/AMF}^{RID} \oplus Y_{SGSN/AMF})$ 。源 SGSN/AMF 将 $\{R_{SGSN/AMF}, I_{SGSN/AMF}^{RID}, I_{SGSN/AMF}^{YID}\}$ 发送到目标 AMF/SGSN。

步骤2 目标 AMF/SGSN 选取 $L_{m,AMF/SGSN} \in L_m$, 并计算 $R_{AMF/SGSN} = p(r * K_{SGSN/AMF}^{PK} + L_{m,AMF/SGSN} \pmod{q})$, $Y_{AMF/SGSN} = L_{m,AMF/SGSN} * K_{HLR/AUSF}^{PK} \pmod{q}$, $I_{AMF/SGSN}^{RID} = h(K_{AMF/SGSN}^{PK} || L_{AMF/SGSN} * K_{HLR/AUSF}^{PK}) \oplus I_{AMF/SGSN}^{YID}$, $I_{AMF/SGSN}^{YID} = h(I_{AMF/SGSN}^{RID} \oplus Y_{AMF/SGSN})$ 。目标 AMF/SGSN 将 $\{R_{AMF/SGSN}, I_{AMF/SGSN}^{RID}, I_{AMF/SGSN}^{YID}\}$ 发送到源 SGSN/AMF。

步骤3 源 SGSN/AMF 接收到消息 $\{R_{AMF/SGSN}, I_{AMF/SGSN}^{RID}, I_{AMF/SGSN}^{YID}\}$ 后, 应用私钥 $f_{q,SGSN/AMF}^{-1}$ 解密

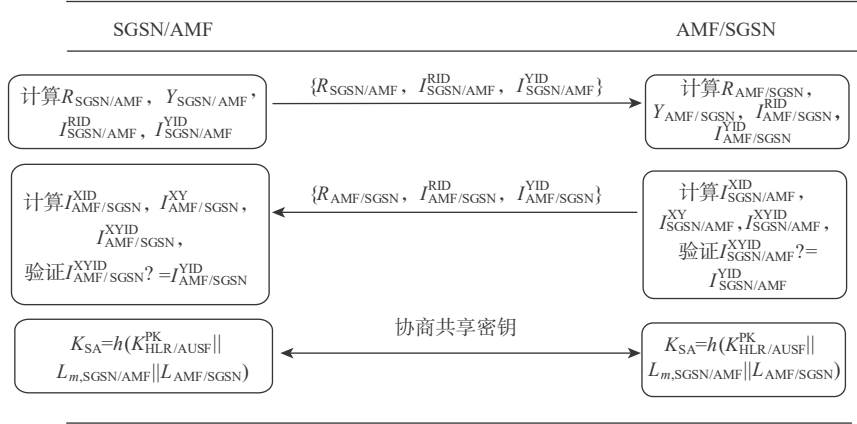


图 4 共享密钥建立流程
Fig. 4 Shared key establishment process

$R_{\text{AMF/SGSN}}$ 获得 $L_{m,\text{AMF/SGSN}}$ 。

步骤 4 源 SGSN/AMF 计算 $I_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{XID}} = h(K_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{PK}} || L_{m,\text{AMF/SGSN}} * K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{PK}}) \oplus I_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{RID}}$, $I_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{XY}} = L_{m,\text{AMF/SGSN}} * K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{PK}} \pmod{q}$, $I_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{XYID}} = H(I_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{XID}} || Y_{\text{AMF/SGSN}})$, 验证 $I_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{XYID}} = I_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{YID}}$, 验证通过, 则表明源 SGSN/AMF 成功认证目标 AMF/SGSN 身份。

步骤 5 目标 AMF/SGSN 接收到消息 $\{R_{\text{SGSN/AMF}}, I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{RID}}, I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{YID}}\}$ 后, 应用私钥 $f_{q,\text{AMF/SGSN}}^{-1}$ 解密 $R_{\text{SGSN/AMF}}$ 获得 $L_{m,\text{SGSN/AMF}}$ 。

步骤 6 目标 AMF/SGSN 计算 $I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{XID}} = h(K_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{PK}} || L_{m,\text{SGSN/AMF}} * K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{PK}}) \oplus I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{RID}}$, $I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{XY}} = L_{m,\text{SGSN/AMF}} * K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{PK}} \pmod{q}$, $I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{XYID}} = h(I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{XID}} || Y_{\text{SGSN/AMF}})$, 验证 $I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{XYID}} = I_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{YID}}$, 验证通过, 则表明目标 AMF/SGSN 成功认证源 SGSN/AMF 身份。

步骤 7 源 SGSN/AMF 和目标 AMF/SGSN 分别计算协商出共享密钥 $K_{\text{SA}} = h(K_{\text{HLR/AUSF}}^{\text{PK}} || L_{m,\text{SGSN/AMF}} || L_{m,\text{AMF/SGSN}})$ 。

此阶段完成后, 源 SGSN/AMF 和目标 AMF/SGSN 完成身份互认证, 并成功建立共享密钥 K_{SA} , 实现了密钥的动态更新, 为后续令牌授权过程提供安全保障。

2.4 令牌授权过程

UE 完成接入认证后, 需提前向共生网络请求切换令牌。依据列车 UE 行车路线可预测性, 设计

了基于共享密钥的哈希链鉴权令牌授权策略, 保证了会话密钥的前后向安全性, 目标 AMF/SGSN 为 UE 生成授权令牌, 使其能够快速与目标 AMF/SGSN 下辖的目标基站 gNode/BTS 建立会话密钥, 进行后续安全通话。令牌授权流程如图 5 所示, 具体步骤如下:

步骤 1 UE 安全接入 GSM-R/5G-R 共生网络后, 源 SGSN/AMF 使用共享密钥 K_{SA} 加密消息 $M_5 = E_{K_{\text{SA}}}(G^{\text{GUTI}})$, 并将其发送至目标 AMF/SGSN。

步骤 2 目标 AMF/SGSN 收到加密消息 M_5 后, 利用共享密钥 K_{SA} 解密消息得到 G^{GUTI} 。随机选取 $r_{\text{AMF/SGSN}}, r_{\text{gNodeB/BTS}}$, 计算会话密钥 $K_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{sk}} = h(r_{\text{AMF/SGSN}} || G^{\text{GUTI}} || I_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{ID}})$, $K_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{sk}} = h(r_{\text{gNodeB/BTS}} || G^{\text{GUTI}} || I_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{ID}})$, 计算 $x = K_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{sk}} K_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{sk}}, X_1 = K_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{sk}}$ 和 $X_2 = K_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{sk}}$, 计算令牌消息 $T_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{TOKEN}} = X_1' X(K_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{sk}} || V_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{VP}}) + X_2' X(K_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{sk}} || V_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{VP}}) \pmod{x}$ 。

步骤 3 目标 AMF/SGSN 将消息 $M_6 = \{V_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{VP}} || V_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{VP}} || r_{\text{AMF/SGSN}} || r_{\text{gNodeB/BTS}}\}$ 经源 SGSN/AMF 发送至 UE。将消息 $M_7 = \{T_{\text{AMF/SGSN}}^{\text{TOKEN}} || G^{\text{GUTI}}\}$ 发送至共生网络下的目标 gNodeB/BTS。

此阶段完成后, 通过消息令牌策略, 既实现了有效的会话密钥预生成/预分发, 又保证了密钥的前向/后向安全性。

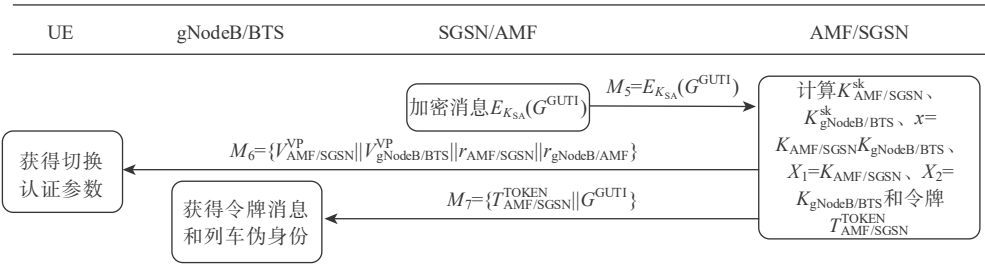


图 5 令牌授权流程
Fig. 5 Token authorization process

2.5 垂直切换认证阶段

在垂直切换认证阶段, UE、目标 gNodeB/BTS 和目标 AMF/SGSN 通过基于中国剩余定理的密钥协商机制获得会话密钥, 来实现密钥的机密性。由于列车 UE 提前获取了目标 AMF/SGSN 生成的 $\{V_{AMF/SGSN}^{VP} \| V_{gNodeB/BTS}^{VP} \| r_{AMF/SGSN} \| r_{gNodeB/BTS}\}$, 可以实现共生网络环境下的快速垂直切换认证。垂直切换认证流程如图 6 所示, 具体步骤如下:

步骤 1 UE 计算密钥 $K_{AMF/SGSN}^{sk} = h(r_{AMF/SGSN} \| G^{GUTI} \| I_{AMF/SGSN}^{ID})$ 、 $K_{gNodeB/BTS}^{sk} = h(r_{gNodeB/BTS} \| G^{GUTI} \| I_{gNodeB/BTS}^{ID})$ 、消息认证码 $M_{UE,gNodeB/BTS}^{MAC} = h(T_1 \| V_{gNodeB/BTS}^{VP} \| G^{GUTI} \| K_{gNodeB/BTS}^{sk})$ 、 $M_{UE,AMF/SGSN}^{MAC} = h(T_1 \| V_{AMF/SGSN}^{VP} \| G^{GUTI} \| K_{AMF/SGSN}^{sk})$, 发送消息 $M_8 = \{T_1 \| G^{GUTI} \| M_{UE,gNodeB/BTS}^{MAC} \| M_{UE,AMF/SGSN}^{MAC}\}$ 至目标 gNodeB/BTS。

步骤 2 目标 gNodeB/BTS 收到消息 M_8 后, 依据 G^{GUTI} 对应令牌消息 $T_{AMF/SGSN}^{TOKEN}$, 计算 $M_{UE,gNodeB/BTS}^{XMAC} = h(T_1 \| V_{gNodeB/BTS}^{VP} \| G^{GUTI} \| K_{gNodeB/BTS}^{sk})$, 验证 $M_{UE,gNodeB/BTS}^{XMAC} ? = M_{UE,gNodeB/BTS}^{MAC}$, 以及时间戳消息 T_1 新鲜性, 若验证失败, 终止会话; 否则, 证明消息 M_8 来自合法 UE, 获

取 $(K_{gNodeB/BTS}^{sk} \| V_{gNodeB/BTS}^{VP}) = T_{gNodeB/BTS}^{TOKEN} \pmod{K_{gNodeB/BTS}}$, 同时将消息 $M_9 = \{T_1 \| G^{GUTI} \| M_{UE,AMF/SGSN}^{MAC}\}$ 发送至目标 AMF/SGSN。

步骤 3 目标 AMF/SGSN 收到消息 M_9 后, 依据 G^{GUTI} 确定与对应 UE 的令牌消息 $T_{AMF/SGSN}^{TOKEN}$, 计算消息 $(K_{AMF/SGSN}^{sk} \| V_{AMF/SGSN}^{VP}) = T_{AMF/SGSN}^{TOKEN} \pmod{K_{AMF/SGSN}}$ 。验证 $M_{UE,AMF/SGSN}^{XMAC} ? = M_{UE,AMF/SGSN}^{MAC}$, 若验证成功, 表明目标 AMF/SGSN 收到来自合法 UE, 此时计算 $M^{MAC'} = h(T_2 \| V_{AMF/SGSN}^{VP} \| V_{gNodeB/BTS}^{VP} \| G^{GUTI} \| K_{AMF/SGSN}^{sk} \| K_{gNodeB/BTS}^{sk})$, 发送消息 $M_{10} = \{T_2 \| M^{MAC'}\}$ 至 UE。

步骤 4 UE 收到消息 M_{10} 后, 验证时间戳消息 T_2 新鲜性及 $M^{XMAC'} ? = M^{MAC'}$, 若不通过, 则结束会话; 否则, 使用密钥 $K_{gNodeB/BTS}^{sk}$ 、 $K_{AMF/SGSN}^{sk}$ 进行后续 UE 和目标 gNodeB/BTS、UE 和目标 AMF/SGSN 间安全会话。

上述流程完成后, UE 通过源 SGSN/AMF 成功接入目标 AMF/SGSN, 实现了 UE 与目标 gNodeB/BTS、目标 AMF/SGSN 间身份互认证, 从而完成了高铁共生网络下的切换安全认证。

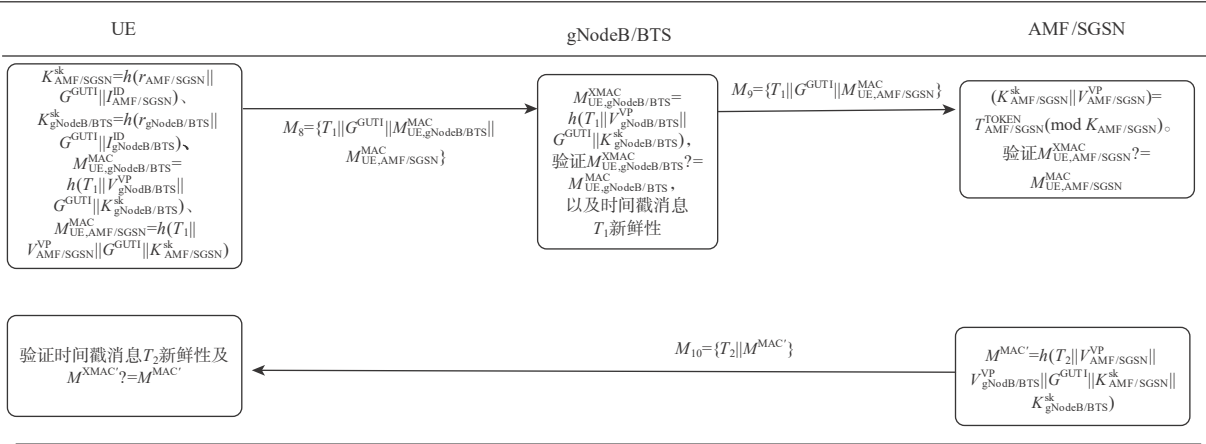


图 6 垂直切换认证流程
Fig. 6 Vertical handover authentication process

3 安全性分析

为验证本文方法的正确性, 分别采取 BAN 逻辑形式化理论证明和 TAMARIN 协议仿真工具验证的方法对所提协议进行安全性证明。

3.1 BAN 逻辑形式化理论证明

为验证本文方法的正确性, 采用 BAN 逻辑的方法对本文方法进行逻辑分析验证^[19]。本文方法验证过程分为定义推理规则、拟实现安全目标、理想化协议模型和正确性验证等 4 个阶段。

1) 定义推理规则。为分析所提协议正确性, 给出以下逻辑推理规则:

① 消息含义规则。

$$\frac{P \equiv Q \leftrightarrow P, P \triangleleft \{X_m\}_K}{P \equiv Q \mid \sim X_m}$$

如果 P 信任通信实体 P 和 Q 之间的共享密钥 K , 且 P 接收到由 K 加密的消息 $\{X_m\}_K$, 则 P 信任 Q 曾发送过消息 X_m 。

② 暂时验证规则。

$$\frac{P \equiv \#(X_m), P \equiv Q \mid \sim X_m}{P \equiv Q \equiv X_m}$$

如果 P 信任消息 X_m 是新鲜的, 并且 P 信任 Q 已经发送过消息 X_m , 则 P 信任 X_m 。

③ 管辖规则。

$$\frac{P \equiv Q \Rightarrow X_m, P \equiv Q \equiv X_m}{P \equiv X_m}$$

如果 P 信任 Q 对 X_m 有管辖权, 并且 P 信任 Q 信任 X_m , 则 P 信任消息 X_m 。

④ 新鲜度规则。

$$\frac{P| \equiv \#(X_m)}{P| \equiv \#(X_m, Y_m)}$$

如果 P 信任 X_m 是新鲜的, 则 P 信任 (X_m, Y_m) 是新鲜的。

⑤ 信任规则。

$$\frac{P| \equiv (X_m, Y_m)}{P| \equiv X_m}, \quad \frac{P| \equiv X_m, P| \equiv Y_m}{P| \equiv (X_m, Y_m)}$$

如果 P 信任 X_m 和 Y_m 的消息 (X_m, Y_m) 集合, 则 P 信任每个单独的消息。

⑥ 会话密钥规则。

$$\frac{P| \equiv \#(K), P| \equiv Q| \equiv X_m}{P| \equiv P \stackrel{K}{\leftrightarrow} Q}$$

如果 P 信任共享密钥 K 是新鲜的, 并且 P 也信任 Q 信任消息 X_m , 则 P 信任 $P \stackrel{K}{\leftrightarrow} Q$ 。

⑦ 接收规则。

$$\frac{P \triangleleft (X_m, Y_m)}{P \triangleleft X_m}, \quad \frac{P| \equiv P \stackrel{K}{\leftrightarrow} Q, P \triangleleft \{X_m\}_K}{P \triangleleft X_m}$$

如果 P 接收到一条消息, 并且 P 知道关于该消息的相关密钥, 则 P 接收该消息的组成部分。

2) 拟实现安全目标。定义接入认证阶段和垂直切换认证阶段需要达到的安全目标如下:

$$G_1: U_{UE}| \equiv I_{BTS/gNodeB}^{ID}$$

$$G_2: U_{UE}| \equiv I_{SGSN/AMF}^{ID}$$

$$G_3: B_{BTS/gNodeB}| \equiv U_{UE}$$

$$G_4: S_{SGSN/AMF}| \equiv U_{UE}$$

$$G_5: B_{BTS/gNodeB}| \equiv B_{BTS/gNodeB} \stackrel{K_{BTS/gNodeB}}{\longleftrightarrow} U_{UE}$$

$$G_6: g_{gNodeB/BTS}| \equiv g_{gNodeB/BTS} \stackrel{K_{gNodeB/BTS}^{sk}}{\longleftrightarrow} U_{UE}$$

$$G_7: A_{AMF/SGSN}| \equiv A_{AMF/SGSN} \stackrel{K_{AMF/SGSN}^{sk}}{\longleftrightarrow} U_{UE}$$

其中, 目标 G_1 、 G_2 分别表示 UE 信任基站 BTS/gNodeB 身份、UE 信任移动授权服务器 SGSN/AMF 身份; 目标 G_3 、 G_4 分别表示 BTS/gNodeB 信任 UE 身份、SGSN/AMF 信任 UE 身份; 目标 G_5 表示 BTS/gNodeB 信任 BTS/gNodeB 和 UE 之间的会话密钥 $K_{BTS/gNodeB}$, 意味着 UE 成功接入共生网络 GSM-R/5G-R; 目标 G_6 、 G_7 分别表示目标 gNodeB/BTS 信任 gNodeB/BTS 和 UE 之间的会话密钥 $K_{gNodeB/BTS}^{sk}$, 目标 AMF/SGSN 信任 AMF/SGSN 和 UE 之间的会话密钥 $K_{pAMF/gNodeB}^{sk}$, 表明 UE 成功完成垂直切换认证。

3) 理想化协议模型。对接入认证阶段和垂直切换认证阶段的通信流程及通信实体 UE、BTS/gNodeB 和 SGSN/AMF 进行描述。将实际的交互信息转化为 BAN 逻辑所能识别的公式, 定义如下:

$$\begin{aligned} S_1: & U_{UE} \rightarrow S_{SGSN/AMF} \\ & S_{SGSN/AMF} \triangleleft \{I_{SGSN/AMF}^{ID} \| T_1 \| A_1^{AUTH} \| A_2^{AUTH}\} \\ S_2: & S_{SGSN/AMF} \rightarrow B_{BTS/gNodeB} \\ & B_{BTS/gNodeB} \triangleleft \{R_{RAND} \| T_2 \| V^{VP} \| G^{GUTI}\} \\ S_3: & B_{BTS/gNodeB} \rightarrow U_{UE} \\ & U_{UE} \triangleleft \{C_{UE} \| R_{RAND} \| T_3 \| T_2 \| M_{BTS/gNodeB}^{MAC}\} \\ S_4: & U_{UE} \rightarrow B_{BTS/gNodeB} \\ & B_{BTS/gNodeB} \triangleleft \{M_1^{MAC} \| T_4\} \\ S_5: & S_{SGSN/AMF} \rightarrow A_{AMF/SGSN} \\ & A_{AMF/SGSN} \triangleleft \{E_{K_{SA}}(G^{GUTI})\} \\ S_6: & A_{AMF/SGSN} \rightarrow U_{UE} \\ & U_{UE} \triangleleft \{V_{AMF/SGSN}^{VP} \| V_{gNodeB/BTS}^{VP} \| r_{AMF/SGSN} \| r_{gNodeB/AMF}\} \\ S_7: & A_{AMF/SGSN} \rightarrow g_{gNodeB/BTS} \\ & g_{gNodeB/BTS} \triangleleft \{T^{TOKEN}_{AMF/SGSN} \| G^{GUTI}\} \\ S_8: & U_{UE} \rightarrow g_{gNodeB/BTS} \\ & g_{gNodeB/BTS} \triangleleft \{T_1 \| G^{GUTI} \| M_{UE,gNodeB/BTS}^{MAC} \| M_{UE,AMF/SGSN}^{MAC}\} \\ S_9: & g_{gNodeB/BTS} \rightarrow A_{AMF/SGSN} \\ & A_{AMF/SGSN} \triangleleft \{T_1 \| G^{GUTI} \| M_{UE,AMF/SGSN}^{MAC}\} \\ S_{10}: & A_{AMF/SGSN} \rightarrow U_{UE} \\ & U_{UE} \triangleleft \{T_2 \| M^{MAC'}\} \end{aligned}$$

对通信实体 UE、BTS/gNodeB 和 SGSN/AMF 的状态描述如下:

$$A_1: U_{UE} \triangleleft S^{SUPI}$$

$$A_2: U_{UE}| \equiv G^{GUTI}$$

$$A_3: S_{SGSN/AMF}| \equiv \#(T_1)$$

$$A_4: S_{SGSN/AMF}| \equiv \#(I_{SGSN/AMF}^{ID})$$

$$A_5: B_{BTS/gNodeB}| \equiv U_{UE} \Rightarrow B_{BTS/gNodeB} \stackrel{K_{BTS/gNodeB}}{\longleftrightarrow} U_{UE}$$

$$A_6: U_{UE}| \equiv U_{UE} \Rightarrow U_{UE} \stackrel{K_{BTS/gNodeB}}{\longleftrightarrow} B_{BTS/gNodeB}$$

$$A_7: U_{UE}| \equiv \#(T_2 \| T_3)$$

$$A_8: S_{SGSN/AMF}| \equiv S_{SGSN/AMF} \stackrel{K_{SA}}{\longleftrightarrow} A_{AMF/SGSN}$$

$$A_9: B_{BTS/gNodeB}| \equiv \#(T_4)$$

$$A_{10}: B_{BTS/gNodeB}| \equiv U_{UE} \Rightarrow B_{BTS/gNodeB} \stackrel{K_{BTS/gNodeB}}{\longleftrightarrow} U_{UE}$$

$$A_{11}: B_{BTS/gNodeB}| \equiv (S_{SGSN/AMF}| \Rightarrow$$

$$B_{BTS/gNodeB} \stackrel{K_{BTS/gNodeB}}{\longleftrightarrow} U_{UE})$$

$$A_{12}: U_{UE}| \equiv \#(V_{AMF/SGSN}^{VP} \| V_{gNodeB/BTS}^{VP})$$

$$A_{13}: A_{AMF/SGSN}| \equiv U_{UE} \Rightarrow U_{UE} \stackrel{K_{AMF/SGSN}^{sk}}{\longleftrightarrow} A_{AMF/SGSN}$$

$$A_{14}: g_{gNodeB/BTS}| \equiv U_{UE} \Rightarrow U_{UE} \stackrel{K_{BTS/gNodeB}^{sk}}{\longleftrightarrow} g_{gNodeB/BTS}$$

4) 正确性验证。完成协议模型建立后, 根据 BAN 逻辑推理规则证明待验证安全目标 $G_1 \sim G_7$, 证明如下。

由 S_1 和 A_1 及消息含义规则可得

$$\frac{U_{UE}| \equiv B_{BTS/gNodeB} \stackrel{K_{BTS/gNodeB}}{\longleftrightarrow} U_{UE}, U_{UE} \triangleleft \{I_{BTS/gNodeB}^{ID}\}_{K_{BTS/gNodeB}}}{U_{UE}| \equiv B_{BTS/gNodeB}| \sim I_{BTS/gNodeB}^{ID}} \quad (3)$$

由 S_2 、 S_3 和 A_2 及暂时验证规则和新颖度规则

可得

$$S_{\text{SGSN}/\text{AMF}}| \equiv U_{\text{UE}}| \sim \{R_{\text{RAND}} \| T_2 \| C_{\text{UE}} \| G^{\text{GUTI}}\} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)、 A_4 及接受规则可得

$$\frac{B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}| \equiv \#(M^{\text{MAC}} \| T_4), B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}| \equiv U_{\text{UE}}| \sim (M^{\text{MAC}} \| T_4)}{B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}| \equiv U_{\text{UE}}| \equiv (M^{\text{MAC}} \| T_4)} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)、 S_5 及暂时验证规则可得

$$\begin{cases} B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}| \equiv U_{\text{UE}} \\ S_{\text{SGSN}/\text{AMF}}| \equiv U_{\text{UE}} \end{cases} \quad (7)$$

$$B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}| \equiv S_{\text{SGSN}/\text{AMF}}| \sim \{K_{\text{BTS}/\text{gNodeB}} \| G^{\text{GUTI}}\} \quad (8)$$

由式(8)、 S_5 、 A_6 及会话密钥规则可得

$$\frac{U_{\text{UE}}| \equiv \#(K_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}), U_{\text{UE}}| \equiv B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}| \equiv G^{\text{GUTI}}}{U_{\text{UE}}| \equiv U_{\text{UE}} \xleftrightarrow{K_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}} B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}} \quad (9)$$

$$S_{\text{SGSN}/\text{AMF}}| \equiv B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}} \xleftrightarrow{K_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}} U_{\text{UE}} \quad (10)$$

由式(9)、式(10)及接收规则可得

$$B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}| \equiv B_{\text{BTS}/\text{gNodeB}} \xleftrightarrow{K_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}} U_{\text{UE}} \quad (11)$$

由 S_6 、 S_7 、 A_7 、 A_8 及管辖规则可得

$$\frac{A_{\text{AMF}/\text{SGSN}}| \equiv U_{\text{UE}}| \Rightarrow (M^{\text{MAC}}), A_{\text{AMF}/\text{SGSN}}| \equiv U_{\text{UE}}| \equiv (M^{\text{MAC}})}{A_{\text{AMF}/\text{SGSN}}| \equiv (M^{\text{MAC}})} \quad (16)$$

$$U_{\text{UE}}| \equiv U_{\text{UE}}| \equiv A_{\text{AMF}/\text{SGSN}}| \sim \{K_{\text{AMF}/\text{SGSN}}^{\text{sk}}\} \quad (17)$$

由式(16)、式(17)及会话密钥规则可得

$$A_{\text{AMF}/\text{SGSN}}| \equiv A_{\text{AMF}/\text{SGSN}} \xleftrightarrow{K_{\text{AMF}/\text{SGSN}}^{\text{sk}}} U_{\text{UE}} \quad (18)$$

综合式(5)、式(7)、式(11)、式(15)和式(18)可知,待验证安全目标 $G_1 \sim G_7$ 验证通过。其中,式(5)和式(7)表明UE、BTS/gNodeB和SGSN/AMF完成身份互认证。式(11)表明UE与BTS/gNodeB安全地协商密钥 $K_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}$ 用于后续通信,UE成功接入GSM-R/5G-R共生网络。式(15)和式(18)分别表明目标gNodeB/BTS和UE之间成功建立会话密钥 $K_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}^{\text{sk}}$ 、目标AMF/SGSN和UE之间的成功建立会话密钥 $K_{\text{AMF}/\text{gNodeB}}^{\text{sk}}$,UE成功完成切换认证。

通过上述BAN逻辑理论安全目标的证明,验证了本文方法的安全性。

3.2 基于TAMARIN协议仿真工具验证

为进一步验证本文方案的正确性,采用TAMARIN协议仿真工具来验证方法的安全性。TAMARIN是自动验证工具,支持异或操作和多种加密原语,可以对协议进行安全性分析^[20]。TAMARIN验证过程是对密码协议中需要验证的安全属性用lemma引理的方式进行定义,当协议具备所定义的

$$\begin{cases} U_{\text{UE}}| \equiv I_{\text{BTS}/\text{gNodeB}}^{\text{ID}} \\ U_{\text{UE}}| \equiv I_{\text{SGSN}/\text{AMF}}^{\text{ID}} \end{cases} \quad (5)$$

由 S_4 、 A_5 及信任规则可得

$$\frac{g_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}| \equiv U_{\text{UE}}| \Rightarrow (V^{\text{VP}}), g_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}| \equiv U_{\text{UE}}| \equiv (V^{\text{VP}})}{g_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}| \equiv (V^{\text{VP}})} \quad (12)$$

由式(12)、 S_8 、 A_9 、 A_{10} 及消息含义规则可得

$$\frac{U_{\text{UE}}| \equiv g_{\text{gNodeB}/\text{BTS}} \xleftrightarrow{K_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}^{\text{sk}}} U_{\text{UE}}, U_{\text{UE}} \triangleleft \{V^{\text{VP}}\}_{K_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}^{\text{sk}}}}{U_{\text{UE}}| \equiv g_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}| \sim V^{\text{VP}}} \quad (13)$$

$$U_{\text{UE}}| \equiv U_{\text{UE}}| \equiv g_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}| \sim \{K_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}^{\text{sk}}\} \quad (14)$$

由式(13)、式(12)、 A_{11} 、 A_{12} 及会话密钥规则可得

$$g_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}| \equiv g_{\text{gNodeB}/\text{BTS}} \xleftrightarrow{K_{\text{gNodeB}/\text{BTS}}^{\text{sk}}} U_{\text{UE}} \quad (15)$$

由 S_9 、 M_{10} 、 A_{13} 、 A_{14} 及管辖规则可得

安全属性时,输出结果为verified,不具备安全性时为unverified。使用TAMARIN工具对本文方案进行规范化并定义所要验证的安全属性,经Sphly语言建模后,基于Dolev-Yao攻击模型^[21],对上述引理施加可能的攻击,采用TAMARIN工具执行后,验证结果如图7所示。可以看出,所有待验证属性均为verified,表明本文方案安全性验证通过。结果①表明UE身份信息SUPI保密性得到验证,可以防止身份伪造和重放攻击。结果②表明源基站BTS/gNodeB和目标基站gNodeB/BTS身份信息具备保密性。结果③表明UE与目标AMF/SGAN间会话密钥 $K_{\text{AMF}/\text{SGSN}}^{\text{sk}}$ 具有保密性,且具有实时更新的特性,实现了会话密钥的前后安全性。结果④表明



图7 协议安全性验证结果

Fig. 7 Protocol security verification results

UE 和目标 gNodeB/BTS 间会话密钥 $K_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{sk}}$ 具备保密性,保证了认证消息仅可由合法 UE 和目标 gNodeB/BTS 生成,可抵抗重放攻击。结果⑤表明 UE 和 BTS/gNodeB、UE 和 SGSN/AMF 间实现了身份互认证,可抵抗中间人攻击。

综上,从 BAN 逻辑形式化理论证明和 TAMARIN 协议仿真工具验证可知,本文方案实现了 SUPI 身份信息匿名性,可防止身份伪造、抵抗重放攻击;此外,在共生网络垂直切换过程中,实现了密钥前后向安全性,并可抵抗中间人攻击等。

4 性能分析

4.1 安全性分析对比

进行安全性能比较,主要从 SUPI 身份保密性、UE、BTS/gNodeB 和 SGSN/AMF 身份互认证、会话密钥保密性、前后向安全性、可追溯性、抗重放攻击、抗量子计算攻击、抗 DoS 攻击及抗中间人攻击等安全性进行分析对比,比较结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,文献 [8] 使用了票据授权机制,UE 和目标基站/服务器之间可以基于先前访问的源基站/服务器生成的凭证票据完成协议实体间身份认证和密钥协商,保护了 UE 身份隐私,该方法通过随机数和 SEQ 计数机制,可以抵抗重放攻击和中间人攻击,但不具备会话密钥的后向安全性,攻击者可通过截获先前认证票据推演后续通话密钥,继而发起攻击,导致会话密钥泄露。文献 [9] 通过计数器和随机数规则,实现了 UE 和认证服务器间身份互认证,可抵抗中间人攻击,但 ID 检索号以明

文方式传输,易被攻击者截获,导致 UE 身份信息泄露,继而发起 DoS 攻击;同时,该方法基于椭圆曲线加密机制,无法抵抗量子计算攻击。文献 [14] 依据掩码数组的密钥推导方式,保证了密钥的前后向安全性,但不满足可追溯性,无法实时追踪恶意用户攻击行为;同时,该方法采用了 AES 对称加密协议,无法抵抗量子计算攻击。文献 [16] 基于椭圆曲线加密技术实现了 UE 跨多个集线器的切换认证,通过密钥衍生技术生成会话密钥,中间密钥由 Diffie-Hellman 密钥交换算法生成,确保了密钥的前后向安全性,但无法抵抗重放攻击和量子计算攻击。文献 [17] 利用格密码理论,设计了一种有条件 UE 隐私保护的切换认证方案,UE 通过伪随机标识符 SID 保护了 UE 身份隐私,该方法通过格密码密钥协商机制,可抵抗量子计算攻击,但会话密钥的生成依赖于 SID 的随机性,缺乏对 SID 识别策略,攻击者可伪造大量 SID 发起对认证服务的 DoS 攻击。本文方案中,UE 通过认证消息 $A_1^{\text{AUTN}} = r_{\text{UE}} K_{\text{SGSN/AMF}}^{\text{PK}} + S^{\text{SUPI}}$ 及临时身份 G^{GUTI} 传输 UE 身份信息 S^{SUPI} ,保护了 UE 身份隐私,而且通信实体间通过互相验证带有伪身份 G^{GUTI} 和时间戳消息的 M^{MAC} 认证码实现了身份互认证,可抵抗中间人攻击及重放攻击,并设计了切换认证令牌授权策略,保证了会话密钥的前后向安全性;此外,本文方法采用了基于多项式环上的最近、最短向量问题的 NTRU 加密算法加密协议中变量和认证消息,可抵抗量子计算攻击^[18]。综合安全性对比分析后,相较于同类方法,本文方法具有更高的安全性。

表 1 安全性能对比
Table 1 Safety performance comparison

方案对比	SUPI身份保密性	身份互认证	密钥前/后向安全性	可追溯性	抗重放攻击	抗DoS攻击	抗量子计算攻击	抗中间人攻击
文献[8]	√	√	×	√	√	√	×	√
文献[9]	×	√	√	√	√	×	×	√
文献[14]	√	√	√	×	×	×	×	√
文献[16]	√	√	√	√	×	√	×	√
文献[17]	√	×	√	√	√	×	√	×
本文方法	√	√	√	√	√	√	√	√

注:“√”表示满足相应安全属性,“×”表示不满足相应安全属性。

4.2 计算开销与通信开销对比

在完成安全性能比较后,进一步进行通信与计算开销比较。其中,通信开销指计算各个通信实体之间比特信息交互总量,在计算开销方面,主要列举了单向哈希运算耗时 T_{HASH} 、对称加解密耗时 T_{S} 、模指数运算耗时 T_{M} 、椭圆曲线点积运算耗时 T_{ECC} 、椭圆曲线点加运算耗时 T_{A} 、NTRU 加密耗时 T_{NE} 、NTRU 解密耗时 T_{ND} 、NTRU 模乘运算耗时 T_{NM} 。比

较结果如表 2 所示。可知,文献 [9,14] 虽不涉及接入认证阶段,但 2 种方法分别通过公钥随机数和身份检索规则、掩码阵列机制生成切换认证信息,过程涉及复杂的椭圆曲线点积、点加运算,造成方法切换认证耗时较高。文献 [8] 采取公钥票据授权机制,通过椭圆曲线加密机制批量生成会话密钥和加密票据,且需额外认证票据 ID,带来了较高的切换认证耗时。文献 [16] 采用密钥衍生技术来提前传

表 2 通信开销及计算开销对比						
Table 2 Comparison of communication overhead and computing overhead						
方案	UE通信量/bit	核心网通信号量/bit	总通信量/bit	预认证耗时/ms	切换认证耗时/ms	总耗时/ms
文献[8]	863	2 302	2 965	$15T_{\text{HASH}}+7T_{\text{S}}+T_{\text{M}}\approx 15.4$	$15T_{\text{HASH}}+7T_{\text{S}}+T_{\text{M}}\approx 12.7$	28.1
文献[9]	960	2 588	3 548		$5T_{\text{HASH}}+7T_{\text{A}}+T_{\text{M}}+8T_{\text{ECC}}\approx 26.8$	26.8
文献[14]	1 102	2 652	3 754		$8T_{\text{HASH}}+5T_{\text{A}}+3T_{\text{M}}+9T_{\text{ECC}}\approx 31.7$	31.7
文献[16]	1 263	2 897	4 160		$4T_{\text{HASH}}+3T_{\text{A}}+T_{\text{M}}+7T_{\text{ECC}}\approx 24.5$	24.5
文献[17]	974	2 929	3 903	$5T_{\text{HASH}}+T_{\text{NE}}+T_{\text{ND}}+T_{\text{NM}}\approx 11.6$	$9T_{\text{HASH}}+2T_{\text{NE}}+2T_{\text{ND}}+T_{\text{NM}}\approx 9.8$	21.4
本文方案	765	2 667	3 432	$4T_{\text{HASH}}+3T_{\text{NE}}+2T_{\text{ND}}+2T_{\text{NM}}\approx 12.8$	$7T_{\text{HASH}}+2T_{\text{NM}}\approx 7.4$	20.2

递中间密钥,相较于文献 [9],降低了一定的切换认证耗时,但中间密钥和参数信息由椭圆曲线密钥交换算法生成,仍存在较大的通信开销。文献 [17] 基于格的认证方法,在 6 类方法中总耗时较小,这是因为该方法在接入认证阶段采取了 NTRU 算法保护 UE 身份隐私,但在切换认证过程中需重复执行加密算法传递伪身份 SID,因此,切换认证耗时高于本文方法。本文方法在 6 种方法中总耗时最小,这是由于在接入认证阶段引入了高效的 NTRU 算法生成 UE 临时身份,仅需列车首次接入共生网络时执行一次,同时,在垂直切换认证过程中,通过哈希操作和中国剩余定理生成切换认证令牌,实现了会话密钥的预生成,减少了通信总耗时。

列车在高铁共生网络沿线运行中,将会频繁发生垂直切换,为了更清晰地得到 6 种方案的认证执行效率关系,给出了各方案切换认证次数与通信开销和计算开销关系,如图 8 和图 9 所示。可以看出,整体上,不同方法的通信开销和计算开销均随着切换认证次数的增加而呈现增加的趋势。图 8 中,文献 [14] 采用自循环加密结构及 AES 加密算法,给计算资源受限的列车 UE 带来了较高的通信开销。文献 [8] 采用票据授权技术批量生成会话密钥,在切换认证次数较少时,通信开销优于本文方法,但随着切换认证次数增加,本地密钥消耗殆尽,需重新执行切换认证协议,带来了更高的通信开销,且不具备密钥后向安全性,无法抵抗量子计算攻击。图 8 和图 9 中,本文方案切换认证耗时较其他同类方案最低,这是由于在接入认证中引入了高效的 NTRU 算法,通过中国剩余定理和哈希加密实现了认证参数及密钥预生成,当切换发生时,UE 和 SGSN/AMF 通过预分发的参数计算认证码 MAC 以会话密钥 $K_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{sk}}$,因此,直接发送由 $k_{\text{gNodeB/BTS}}^{\text{sk}}$ 计算的 MAC 即可快速保证完成切换认证。

综上,本文方案具有较高的安全性,同时也具备较高的认证效率,能够满足 GSM-R/5G-R 共生网络切换认证高安全和实时性的要求。然而,高铁共生网络场景复杂,还涉及诸多设备与设备之间的端

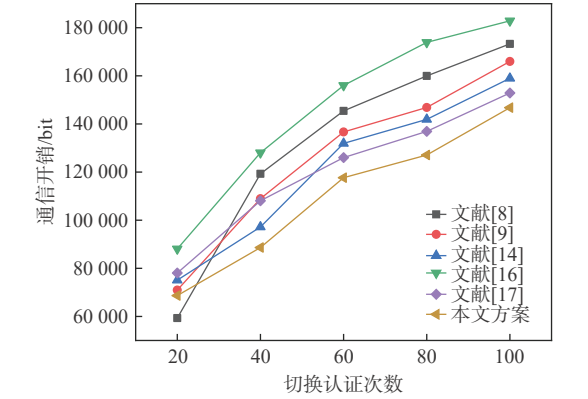


图 8 切换认证次数与通信开销对比

Fig. 8 Comparison of handover authentication frequency and communication overhead

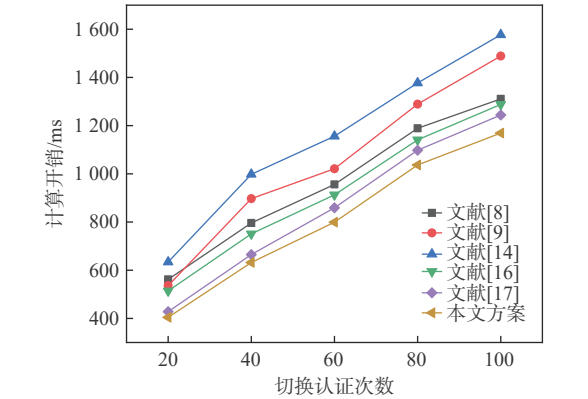


图 9 切换认证次数与计算开销对比

Fig. 9 Comparison of handover authentication frequency and computational overhead

到端认证通信安全,本文所提基于 NTRU 格上的切换认证方案仅考虑了列车与基站之间的认证问题,未涉及大量的接入终端设备,后续将进一步结合基于区块链共识技术来增强共生网络的设备间安全性。

5 结 论

- 1) 设计 NTRU 格上双向认证机制和哈希操作生成临时身份信息,完成共生网络初始接入认证,实现了列车身份匿名性,可有效抵抗重放攻击。
- 2) 基于共享密钥的哈希链加密方法,设计了共

享密钥生成和共生网络切换令牌策略,实现了垂直切换认证的密钥预生成,确保了密钥前后向安全性,减少了切换认证开销。

3) 采用中国剩余定理密钥协商方法及时间戳机制,确保了会话密钥的机密性,可抵抗 DoS 攻击,能够满足高铁共生网络高效、安全无缝切换认证的需求。

参考文献 (References)

[1] 陈永, 刘雯, 詹芝贤. 基于混合密钥增强的 LTE-R 车地认证密钥协商方案[J]. 铁道学报, 2023, 45(6): 69-79.
CHEN Y, LIU W, ZHAN Z X. A train-to-ground authentication key agreement enhanced scheme based on hybrid security key for LTE-R[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(6): 69-79(in Chinese).

[2] HE R S, AI B, ZHONG Z D, et al. 5G for railways: next generation railway dedicated communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(12): 130-136.

[3] 张馨丹, 李辉, 郭强亮. 5G-R 和 GSM-R 网络列车调度通信业务平滑过渡方案研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 166-172.
ZHANG X D, LI H, GUO Q L. Research on smooth transition scheme of 5G-R and GSM-R network train dispatching communication services[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 166-172 (in Chinese).

[4] 陈永, 康婕, 陶瑄. 改进 5G-R 自适应高速铁路越区切换算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(3): 724-731.
CHEN Y, KANG J, TAO X. An improved 5G-R adaptive high-speed railway handover algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(3): 724-731(in Chinese).

[5] TANG Q, ERMIS O, NGUYEN C D, et al. A systematic analysis of 5G networks with a focus on 5G core security[J]. IEEE Access, 2022, 10: 18298-18319.

[6] SUN B, GUO Y, YU Y J, et al. Reliability analysis of CTCs-3 train-ground communication system based on 5G-R[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(10): 12927-12940.

[7] WANG Y, ZHANG W F, WANG X M, et al. Improving the security of LTE-R for high-speed railway: from the access authentication view[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(2): 1332-1346.

[8] CAO J, MA M D, FU Y L, et al. CPPHA: capability-based privacy-protection handover authentication mechanism for SDN-based 5G HetNets[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2021, 18(3): 1182-1195.

[9] ALEZABI K A, HASHIM F, HASHIM S J, et al. Efficient authentication and re-authentication protocols for 4G/5G hetero-

geneous networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020, 2020: 105.

[10] MA T, HU F. A cross-layer collaborative handover authentication approach for 5G heterogeneous network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1169: 012066.

[11] YANG J, JI X S, HUANG K Z, et al. Unified and fast handover authentication based on link signatures in 5G SDN-based HetNet[J]. IET Communications, 2019, 13(2): 144-152.

[12] CUI Q M, ZHU Z B, NI W, et al. Edge-intelligence-empowered, unified authentication and trust evaluation for heterogeneous beyond 5G systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(2): 78-85.

[13] KALIA P, KUMAR A. 5G enabled universal seamless HO authentication in heterogeneous networks[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.

[14] LIU Y B, HUO L J, WU J, et al. MRSA: mask random array protocol for efficient secure handover authentication in 5G HetNets[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2023, 20(5): 3809-3827.

[15] DIVAKARAN J, CHAKRAPANI A, SRIHARI K. Fuzzy logic based handover authentication in 5G telecommunication heterogeneous networks[J]. Computer Systems Science and Engineering, 2023, 46(1): 1141-1152.

[16] SHARMA V, YOU I, LEU F Y, et al. Secure and efficient protocol for fast handover in 5G mobile Xhaul networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2018, 102: 38-57.

[17] ZHOU Y S, WANG L A. A lattice-based authentication scheme for roaming service in ubiquitous networks with anonymity[J]. Security and Communication Networks, 2020, 2020: 2637916.

[18] 李瑞琪, 贾春福, 王雅飞. 基于 NTRU 的多密钥同态代理重加密方案及其应用[J]. 通信学报, 2021, 42(3): 11-22.
LI R Q, JIA C F, WANG Y F. Multi-key homomorphic proxy re-encryption scheme based on NTRU and its application[J]. Journal on Communications, 2021, 42(3): 11-22(in Chinese).

[19] ABDEL-MALEK M A, AKKAYA K, BHUYAN A, et al. A proxy signature-based swarm drone authentication with leader selection in 5G networks[J]. IEEE Access, 2022, 10: 57485-57498.

[20] CORTIER V, DELAUNE S, DREIER J, et al. Automatic generation of sources lemmas in tamarin: towards automatic proofs of security protocols[J]. Journal of Computer Security, 2022, 30(4): 573-598.

[21] RAM S B, ODELU V. Security analysis of a key exchange protocol under Dolev-Yao threat model using tamarin prover[C]//Proceedings of the IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 667-672.

Security handover authentication scheme for high-speed railway symbiotic network based on NTRU lattice

CHEN Yong^{*}, ZHANG Bingwang, XIN Zhaofeng

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A high-speed railway symbiotic network security handover authentication scheme based on NTRU lattice is proposed to address the issues of identity leakage, lack of forward and backward security, and high authentication overhead during the evolution of the high-speed railway GSM-R wireless communication system to the next generation 5G-R network during vertical handover. Firstly, a bidirectional authentication mechanism based on NTRU lattice was designed to overcome the vulnerability of identity information SUPI plaintext transmission to leakage. Second, a shared key-based hash chain encryption technique is suggested. To accomplish pre-creation of handover authentication keys, shared key generation and symbiotic network switching token strategies are created, guaranteeing dynamic updates of shared keys and forward and backward security. Then, using the Chinese remainder theorem and timestamp mechanism, the confidentiality of the session key was achieved, and the handover authentication of the symbiotic network was completed. Finally, the security of the proposed method was analyzed using BAN logic theory and TAMARIN protocol simulation verification tools. The findings demonstrate that, in comparison to comparable techniques, the suggested approach guarantees identity anonymity and forward and backward key security, can successfully fend off DoS and man-in-the-middle attacks, has lower switching costs, and can satisfy the demands of seamless handover authentication for high-speed rail symbiotic network security.

Keywords: railway wireless communication; symbiotic network; handover authentication; NTRU lattice encryption; communication efficiency

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0019

特征表达能力增强的声音事件定位与检测网络

章东平^{1,*}, 符珍涛¹, 王杼涛¹, 林丽莉², 魏明³

(1. 中国计量大学 信息工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江工商大学 信息与电子工程学院, 杭州 310018;

3. 杭州爱华智能科技有限公司, 杭州 311121)

摘 要: 针对传统深度学习模型难以捕捉输入特征图中的长上下文特征关联及通道与空间维度上的关键特征信息, 导致声音事件定位与检测 (SELD) 错误率高、性能不理想的问题, 基于声学场景分类和声音事件检测挑战赛中的基线模型 SELDnet, 提出一种基于增强特征表达能力的声音事件定位与检测网络 (FE-SELDnet)。采用组归一化和 SiLU 激活函数来解决函数无法反向传播导致神经元死亡的问题; 引入卷积块注意力模块 (CBAM) 来捕捉声学特征中通道与空间 2 个维度的重要特征, 抑制不必要的特征, 加强网络对特征信息的敏感性和准确性, 提高信息流动; 引入 Transformer 模块来捕获更长的语音上下文特征关联, 并结合局部特征, 提升模型在声音事件定位与检测任务中的精确性和鲁棒性。在 TUT Sound Events 数据集上的实验结果表明: FE-SELDnet 与基线网络性能相比有较大的提升, 错误率从 0.45 降低到 0.326, SED 评分和 DOA 评分分别从 0.45 和 0.32 降至 0.26 和 0.25, F_1 分数提高到 79.4%, 验证了 FE-SELDnet 具有更高的优越性。

关 键 词: 声音事件定位与检测; 特征表达增强; 注意力机制; 深度学习; 组归一化

中图分类号: TN912.3; TP181

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1088-08

声音事件定位与检测 (sound event localization and detection, SELD) 可以分为声音事件检测 (sound event detection, SED) 和声源定位 2 个独立任务, 旨在检测声音事件及其在时间上的活动情况, 并在活动时估计其空间位置。SELD 在很多应用中发挥了重要作用, 如智能家居、生物多样性监测、智能汽车及异常声音事件检测等领域, 是当前人工智能领域的研究热点^[1-2]。

使用模板匹配法^[3]结合隐马尔可夫模型、高斯混合模型等传统模型进行声音事件检测时很难处理声音混叠的问题。为解决重叠事件识别问题, Heittola、Mesaros 等利用多个受限 Viterbi 通路检测多个重叠的声音事件^[4]。基于非负矩阵分解原理的方法也能处理混叠的声音事件^[5], 但不能处理声音

事件时域的相关性信息, 导致检测效果不理想。为提升 SED 性能, 支持向量机^[6]被用于对声音事件进行检测, 虽然能够提高检测准确率, 但训练过程烦琐, 训练时间长。

传统的声源定位方法有到达时间差、高分辨率谱估计、可控波束形成及声强估计等^[7-9], 其在噪声环境下的性能受限, 表现为特征表达力欠佳、精度不高、误差较大等问题。

深度学习网络结构, 如卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 和循环神经网络 (recurrent neural network, RNN)^[10], 被用于环境声音识别领域, 取得了相对较高的识别准确率。CNN 能够进行局部特征的学习, 而 RNN 能够对时间上下文特征联系进行学习, 于是, 结合 CNN 与

收稿日期: 2024-01-11; 录用日期: 2024-02-29; 网络出版时间: 2024-03-15 15:16

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240314.2102.001

基金项目: 浙江省重点研发计划 (2023C01034, 2023C01030, 2023C01032)

*通信作者. E-mail: 06a0303103@cjlu.edu.cn

引用格式: 章东平, 符珍涛, 王杼涛, 等. 特征表达能力增强的声音事件定位与检测网络 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1088-1095. ZHANG D P, FU Z T, WANG Z T, et al. Sound event localization and detection network with enhanced feature expression [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1088-1095 (in Chinese).

RNN 产生的 CNN-LSTM^[11] 网络同时具备 2 种网络的学习能力。文献 [12-13] 设计的 RD3Net 网络结构采用了多层 CNN 后接高效门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)的方式, 以提升模型性能。鉴于传统的 RNN 网络普遍存在训练耗时较长、参数规模较大及训练难度高等问题, 文献 [14] 提出了基于 Transformer 的 SELD 模型, 显著提高了模型训练与推理效率。也有研究尝试改进 CNN 使其产生 RNN 的学习功能。例如, Bai 等^[15] 提出了时序卷积网络(temporal convolutional network, TCN), 网络结构含有学习时间上下文特征信息的能力。文献 [16] 提出了 SELDnet 模型方案, 能够处理多通道音频输入, 通过 CNN 提取局部信息, 借助 GRU 学习语音信号时间上的信息。SELDnet 模型被用于声音领域权威比赛 DCASE 挑战赛中任务 3 的基线模型。

考虑到在 SELD 中, 声学特征的提取对模型预测能力和最终分类结果具有重要影响, 本文基于 SELDnet 基线模型, 提出了一种基于增强特征表达能力的 SELD 网络(feature enhanced SELD network, FE-SELDnet)。采用组归一化(group normalization, GN)结合 SiLU 激活函数, 同时引入卷积块注意力模块(convolutional block attention module, CBAM)及 Transformer 模块, 通过 3 个方面的改进, 增强网络对语音特征的提取, 提升了模型在 SELD 任务中的精确性和鲁棒性。

1 相关工作

近年来, 深度学习技术在计算机视觉、自然语言处理、语音与音频处理等领域中应用效果突出, 对 SELD 性能的提升起到了积极推动作用。研究初期, 深度神经网络^[17] 成为涉足这一领域的首批尝试。随后, CNN^[18-19] 与 RNN^[20-21] 也相继被引入 SELD 任务。2015 年, 由 Hirvonen 团队^[22] 开展的研究表明, 尽管 CNN 可用于声音事件定位与检测, 但在面对多事件重叠场景时, 其预测准确性不尽如人意, 误差显著增大。原因在于: CNN 善于提取局部特征, 而对于时序及语义信息的学习能力相对较弱。鉴于此, 研究者们结合 CNN 与 RNN 的优势, 构建了卷积循环神经网络(convolutional recurrent neural network, CRNN)^[23] 模型, 并取得了明显的性能提升。在此基础上, 为进一步提升网络获取音频信息的时域、频域及通道间特征能力, 研究者们对 CRNN 模型进行了扩展, 采用三维卷积操作对输入的多通道数据进行联合分析, 从而提高了对复杂声学场景下 SELD 的效能^[24]。

由坦佩雷理工大学主办的 DCASE 挑战赛作为一个国际公认的声学研究平台, 汇聚了全球众多学者的关注与积极参与。自 2019 年起, 该挑战赛中的任务 3 着重聚焦于 SELD 问题, 吸引了大量研究者投入, 并由此催生出一系列创新的方法和模型。例如, 曹寅等^[25] 提出了一种双阶段策略, 通过训练独立的 SED 和方向到达角(direction of arrival, DOA)估计模型, 将 SED 模型的输出作为掩模指导 DOA 模型预测, 该方法在提升 SELD 性能方面有所突破, 并在赛事中取得了良好的成绩。Ranjan 等^[26] 研发了一种基于残差网络架构的 RNN 算法, 有效提高了 SELD 性能, 并防止了网络退化。此外, Nguyen 等^[27] 提出了一个基于迁移学习融合 RNN 网络的通用 SELD 框架, 先通过预训练分别解决 SED 和 DOA 估计, 再利用循环层将 2 部分的估计结果有机融合以生成最终的 SELD 输出。Zhang 等^[28] 设计了一种结合 CNN 与 Conformer 模块的 CNN-Conformer 模型, 该模型能够捕捉并利用时间上下文特征信息, 成功完成了 SELD 任务。Lee 等^[29] 提出了 CMA-SELD 模型, 该模型利用跨模态注意力(cross-modal attention, CMA)机制来学习和关联 SED 与声源定位特征, 并采用参数共享策略提取用于 SELD 的必要特征, 从而提升了 SED 和声源定位的整体性能。

2 FE-SELDnet 网络

本文提出的 FE-SELDnet 模型的整体架构布局如图 1 所示。

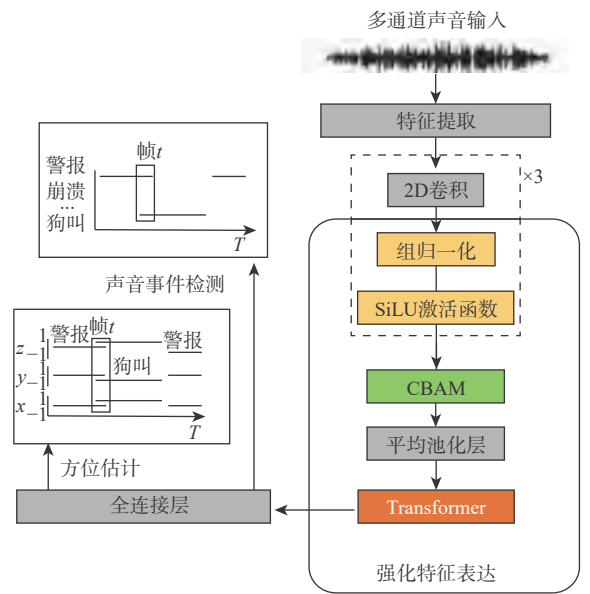


图 1 本文网络的总体结构

Fig. 1 Overall structure of the proposed network

FE-SELDnet 网络主要组成部分如下: 首先, CNN 模块通过采用组归一化和 SiLU 激活函数协同

卷积操作,以提取声音信号的局部特征信息。其次,加入 CBAM 模块,旨在强化对声学特征中重要信息的表达能力。然后,引入 Transformer 模块,能够有效捕获并整合更长时段的上下文特征关联。最后,通过上述 3 个关键模块的有机组合与协作,FE-SELDnet 模型在特征提取与表达层面得到了显著增强。这些经过深度处理和转化的特征信息将通过全连接层进行整合与分类,以实现声音事件的精准检测与定位。

2.1 SELDnet 基线模型

SELDnet 是一种专为基于麦克风阵列输入的复杂声场环境设计的 SELD 一体化神经网络模型,其架构如图 2 所示,主要由 2 部分构成: CNN 和双向 RNN。CNN 部分,网络架构包括 3 个连续的卷积层块及 1 个平均池化层。每个卷积层块内部集成了多个核心计算单元,即使用 3×3 大小的卷积核进行特征提取,辅以批归一化(batch normalization, BN)技术以稳定训练过程,并采用 ReLU 激活函数引入非线性特性。双向 RNN 部分,模型使用 BiGRU 这一 RNN 变体结构,该结构能够同步考虑序列数据的过去与未来信息,从而在预测过程中充分利用时间维度上的上下文信息,一定程度上提升了模型在 SELD 任务上的性能表现。

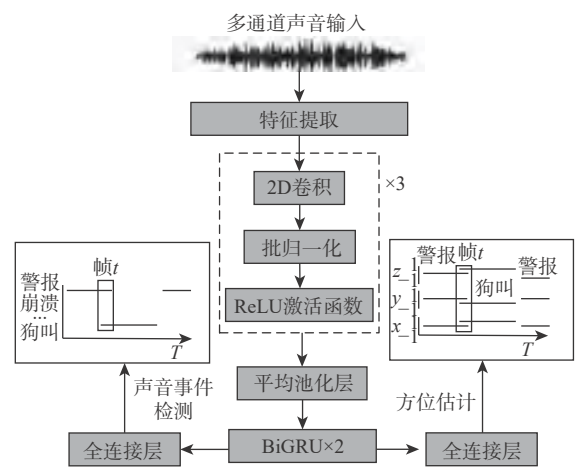


图2 SELDnet 网络结构

Fig. 2 SELDnet network structure

2.2 组归一化与 SiLU 激活函数

在网络训练进程中,模型参数经历迭代更新,其中,当前层参数的变化受到前一层参数变动的影响,因此,可能导致浅层神经网络在反向传播中出现梯度消失问题,从而影响网络的收敛性能。为缓解梯度消失难题,网络结构通常采用批归一化技术,将输入数据转化为近似标准正态分布的形式,增强非线性函数对输入数据的响应灵敏度,进而加速网络收敛速度并提高预测准确性。但是,批归一

化会因批量大小而影响效果,尤其是在小批量情况下,批归一化的应用可能导致输出结果的误差增大。因此,合理选择批量大小对保证批归一化效果的准确性至关重要。相比之下,组归一化^[30]对通道方向归一化,将特征图按预先设定的组数进行分割,每组独立计算各自的均值和方差。与批量大小无关的特性使得组归一化能够确保模型在不同批量大小下仍能够有效加快网络收敛速度,并维持稳定的性能表现。本文模型利用组归一化特性,以分组形式对特征图进行归一化处理,从而提升模型训练效率与准确性。

ReLU 激活函数将所有负值都设为 0,正向梯度设为 1,大幅提高网络模型的计算速度和收敛速率,但也使得输入值为负值时,函数负方向的梯度为 0,反向传递失败,部分神经元“死亡”,削弱了网络的学习能力。为解决上述问题,本文采用 SiLU 激活函数,其是 Swish^[31] 激活函数的特例,表示为

$$f(x) = x \cdot \text{sigmoid}(x) \tag{1}$$

如图 3 所示,曲线平滑,无上界有下界,且非单调,输入信息小于 0 时也不会丢失,能够加强特征信息的表达,对 SELD 网络性能可以发挥有利作用,对网络的预测效果相较 ReLU 函数更好,特别是在深层网络中优势更加明显。

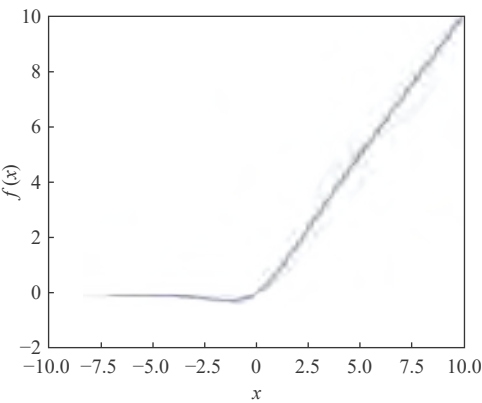


图3 SiLU 激活函数

Fig. 3 SiLU activation function

2.3 CBAM 模型

在 SELD 任务中,语音特征不仅涵盖通道层面的特性,还蕴含着时间序列上的动态演变信息。在丰富的信息集合中,区分有效信息与冗余信息至关重要,目的是使有限的计算资源优先服务于有价值的信息提取。通道注意力与时空注意力机制恰好能从输入特征图的通道维度和时空维度甄别并聚焦重要特征。因此,本文提出通道时空注意力模块^[32],通过整合通道注意力子模块与时空注意力子模块,对特征图的通道维度和时空维度进行注意力推测,

并将由此生成的注意力图与原始特征图相乘, 以实现特征的自适应优化。CBAM 作为轻量级且通用性强的模块, 可以便捷地嵌入到现有的神经网络结构中, 从而为 SELD 等任务提供精细化的注意力导向与特征提取能力。CBAM 模块结构如 图 4 所示。

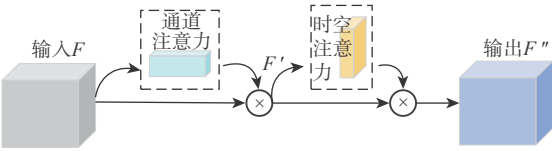


图 4 CBAM 模块结构
Fig. 4 CBAM structure

2.4 Transformer 网络结构

Transformer 网络模型主要由编码器和解码器组成。其中, 解码器^[33] 模块如 图 5 所示, 核心部分是多头自注意力模块和前馈神经网络。

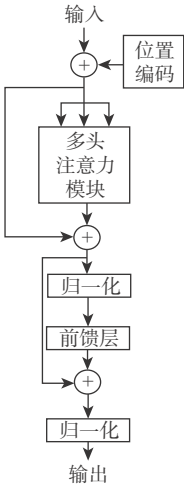


图 5 Transformer 解码器结构
Fig. 5 Transformer decoder structure

多头自注意力模块的实现如下:

$$\begin{cases} Q = W^Q I \\ K = W^K I \\ V = W^V I \end{cases} \tag{2}$$

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax} \left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} V \right) \tag{3}$$

式中: Q 、 K 和 V 分别为查询向量、键向量和值向量, 由网络接收的输入向量 I 分别通过与对应的权值矩阵 W^Q 、 W^K 和 W^V 进行矩阵乘法运算得出; d_k 为缩放因子, 用于计算 Q 与 K 的点积后进行归一化处理, 以防止内积结果的数值过大或过小影响注意力分配的稳定性。

鉴于 SELD 任务不需要依据前一时刻的声音事件去预测后一时刻的声音事件, 本文仅选用 Transformer 结构中的解码器部分进行构建和

优化。

3 实验结果与分析

3.1 数据集与评价指标

本文采用 TUT Sound Events 数据集集中的混响和合成冲激响应数据集 RESYM。

采用错误率、 F_1 分数、SED 评分、DOA 评分这 4 个评价指标来评价 SELD 的预测性能。

$$F_1 = \frac{2 \sum_{k=1}^K T_P(k)}{2 \sum_{k=1}^K T_P(k) + 2 \sum_{k=1}^K F_P(k) + 2 \sum_{k=1}^K F_N(k)} \tag{4}$$

式中: K 为每秒的帧总数; T_p 表示每秒正确识别为正类的帧数; F_p 表示每秒误判为正类的帧数; F_N 表示每秒未能正确识别为正类的帧数。

$$R_E = \frac{\sum_{k=1}^K S(k) + \sum_{k=1}^K D(k) + \sum_{k=1}^K G(k)}{\sum_{k=1}^K N(k)} \tag{5}$$

式中: R_E 为错误率; $S(k)$ 为第 k 时刻所需的帧替换数量; $D(k)$ 为第 k 时刻待删除的帧数; $G(k)$ 为需要在第 k 时刻补充的帧数目; $N(k)$ 为每秒内的总帧数。

$$S(k) = \min(F_N(k), F_P(k)) \tag{6}$$

$$D(k) = \max(0, F_N(k) - F_P(k)) \tag{7}$$

$$G(k) = \max(0, F_P(k) - F_N(k)) \tag{8}$$

在声音事件定位中, 将实际三维笛卡儿坐标定义为 (x_R, y_R, z_R) , 而预测出的对应三维笛卡儿坐标则记为 (x_P, y_P, z_P) 。对于每个坐标轴, 可以通过计算预测误差 $\Delta x = x_R - x_P$ 、 $\Delta y = y_R - y_P$ 、 $\Delta z = z_R - z_P$ 来量化预测位置与真实位置间的偏差程度, 将偏差程度定义为 E_L , 其计算公式为

$$E_L = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}{2} \right) \frac{180}{\pi} \tag{9}$$

式中: M 为整个时间段内包含声音事件的有效帧总数。

SED 评分 S_s 与 DOA 评分 D_s 是 SELD 任务的整体性能指标, 其计算公式为

$$S_s = [R_E + (1 - F_1)]/2 \tag{10}$$

$$D_s = [E_L/180 + (1 - R_F)]/2 \tag{11}$$

式中: R_F 为帧召回率。

在理想状态下, R_E 、SED 评分、DOA 评分越低, F_1 分数越高, SELD 网络的性能越好。

3.2 实验结果与对比

实验依托 Linux 操作系统环境, 在 Ubuntu 20.04 版本上运行, 采用 Python 3.8 编程语言和 TensorFlow 库的 2.5.1 版本作为开发工具和技术框架, 在 NVIDIA Tesla V100, 显存为 32 GB 的 GPU 上实现。网络学习率设置为 0.000 1, 迭代轮数为 120 轮, 批大小为 32。

为严谨验证本文提出的改进措施对模型性能的实际提升效果, 通过实验, 根据评价指标逐一分析并评估改进措施对模型在 SELD 任务上的具体贡献。

如图 6 和图 7 所示, 在训练过程中, 观察到训练损失和验证损失逐步递减并趋向平稳, 显示了网络成功地从输入数据中学习到了关键特征, 进而有效实现了声音事件识别任务。同时, F_1 分数上升并最终进入收敛阶段, 进一步证实了方法性能不断优化, 最终达到了稳定状态。

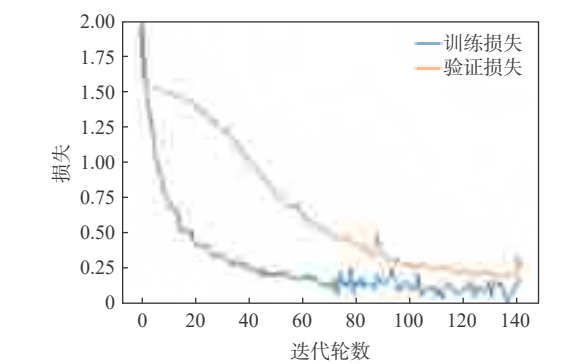


图 6 训练与验证损失
Fig. 6 Training and validation loss

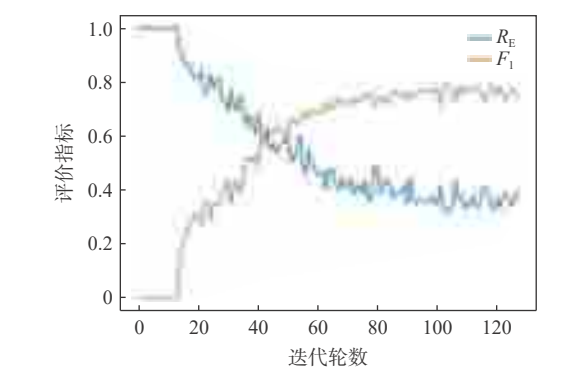


图 7 评价指标随迭代轮数变化
Fig. 7 Evaluation metrics changes with iteration rounds

图 8 显示, 本文方法的系统总体评分 (SELD)、位置识别系统评分 (DOA)、事件识别系统评分 (SED) 随着迭代轮数逐渐增大都逐步趋于稳定值。

为分析 FE-SELDnet 网络性能, 选择在 SELD 研究中的若干神经网络模型进行实验对比, 其中, 包括 CRNNnet^[34]、CNN-Conformer 及 M2MAST^[35] 3 种网络模型。通过实验对比, 利用各模型实验得出评价指标, 对 FE-SELDnet 的性能进行了深入的分析 and 验证。

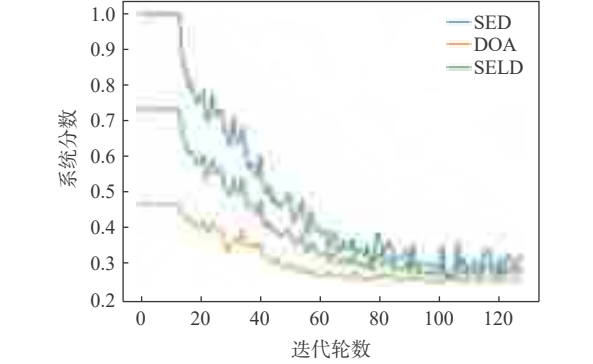


图 8 系统分数随迭代轮数变化
Fig. 8 System score changes with iteration rounds

1) CRNNnet: 采用 CRNN 作为主体架构, 通过去除检测分支简化了整体架构, 提高了性能。

2) CNN-Conformer: 利用 Conformer 模块替换 SELDnet 基线网络中的 BiGRU 模块, 提出通过联合 CNN 与 Transformer 对全局和局部上下文依赖性建模。

3) M2MAST: 使用迁移学习方法, 其权重通过修改预训练权重获得, 提出多对多音频频谱变换器 (audio spectrogram transformer, AST) 以满足 SELD 的多通道音频输入与结果输出。

表 1 为 3 种模型与本文模型在 TUT Sound Events 数据集上的实验结果, 分别对比了 F_1 分数、错误率、DOA 评分、SED 评分指标。可以看出, 本文模型错误率较其他模型分别减少 0.102、0.070、0.048; F_1 分数分别增加了 8.2%、7%、5.3%; DOA 评分和 SED 评分这 2 项综合评分与其他模型比较分别降低了 0.17、0.14、0.125 和 0.05、0.041、0.031。实验结果进一步证实了本文方法可以增强特征表达能力, 实现高性能的声音事件检测与定位。

表 1 不同模型的评价指标				
Table 1 Evaluation indexes of different models				
方法	错误率↓	F_1 分数/%↑	DOA 评分↓	SED 评分↓
CRNNnet	0.428	71.2	0.42	0.31
CNN-Conformer	0.396	72.4	0.39	0.301
M2MAST	0.374	74.1	0.375	0.291
FE-SELDnet (本文)	0.326	79.4	0.25	0.26

注: R_e 、SED 评分、DOA 评分越低, F_1 分数越高, SELD 网络的性能越好, 数据加黑表示性能最优。

3.3 消融实验

为验证每个改进部分的有效性, 分别验证每个部分对模型性能的影响。表 2 分别对比了 GN、SiLU、CBAM、Transformer 模块对模型的综合性能的影响。可以看出, 在加入 CGS 模块后, 错误率、 F_1 分数、DOA 评分、SED 评分指标均有明显提

表 2 消融实验结果比较				
Table 2 Results comparison of ablation experiment				
模型	错误率↓	F_1 分数/%↑	DOA 评分↓	SED 评分↓
SELDnet	0.45	68.7	0.32	0.45
SELDnet+GN、SiLU	0.34	76.6	0.27	0.34
SELDnet+GN、 SiLU+CBAM	0.325	78.5	0.26	0.32
SELDnet+GN、 SiLU+CBAM+Transformer	0.326	79.4	0.25	0.26

升。在此基础上加入 CBAM 结构, 错误率下降了 0.015, F_1 分数上升了 1.9%, DOA 评分、SED 评分分别下降了 0.01、0.02。而在加入 Transformer 结构后, 错误率稍有上升, 其他指标均有小幅度提升。实验结果表明, 对于 SELD, 提出的 3 部分特征表达增强的方法都是有效的: ①采用组归一化和 SiLU 激活函数来解决函数无法反向传播导致神经元死亡的问题, 提高局部特征表达。②引入 CBAM 模块捕捉声学重要特征, 抑制无关特征, 加强网络对重要特征信息表达, 提高信息流动。③引入 Transformer 模块来捕获更长的语音上下文特征关联, 并结合局部特征, 学习到了更多的语境信息, 提升模型在 SELD 任务中的精确性和鲁棒性。通过 3 个部分的改进, 增强了特征表达能力, 提高了 SELD 性能。

4 结 论

- 1) 引入组归一化与 SiLU 激活函数相结合的特征提取系统增强特征提取, 与基线网络 SELDnet 相比, 各项评价指标都有所提升, 尤其 F_1 分数从 68.7% 提升到 76.6%。
 - 2) 引入 CBAM 模块来捕捉通道与时空维度的重要声学特征, 实验结果得出, 错误率降低到 0.325, 比只引入组归一化与 SiLU 激活函数时降低了 0.015, 比基线网络降低了 0.125。
 - 3) 引入 Transformer 模块来捕获更长的语音上下文特征关联, 并结合局部特征, 提升精确性。相较于基线网络模型, F_1 分数从 68.7% 上升到 79.4%, 上升了 10.7%, DOA 评分从 0.32 下降到 0.25, 下降了 0.07, SED 评分从 0.45 下降到 0.26, 下降了 0.19。
- 在 SELD 任务中, 输入深度学习网络的语音特征是经过处理后的特征, 并不包含原始语音信号的所有特征信息, 还有大量的信息不包括, 因此也会对后续的 SELD 结果产生一些负面影响。在下一步的研究中, 准备向输入特征方向进行研究, 探索多种语音特征, 进行融合等处理步骤, 以获得包含更全面的语音信息, 增强网络的性能。

参考文献 (References)

[1] HU J, SHEN L, ALBANIE S, et al. Squeeze-and-excitation networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(8): 2011-2023.

[2] DABRAN I, ELMAKIAS O, SHMELKIN R, et al. An intelligent sound alarm recognition system for smart cars and smart homes [C]//Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4.

[3] SCHRÖDER J, MORITZ N, SCHÄDLER M R, et al. On the use of spectro-temporal features for the IEEE AASP challenge ‘detection and classification of acoustic scenes and events’ [C]//Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-4.

[4] HEITTOLA T, MESAROS A, ERONEN A, et al. Context-dependent sound event detection[J]. EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, 2013, 2013: 1.

[5] KOMATSU T, TOIZUMI T, KONDO R, et al. Acoustic event detection method using semi-supervised non-negative matrix factorization with mixtures of local dictionaries[C]//Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2016 Workshop. Budapest: [s.n.], 2016: 45-49.

[6] XU X Y, YU J D, CHEN Y Y, et al. Leveraging audio signals for early recognition of inattentive driving with smartphones[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(7): 1553-1567.

[7] VELÁZQUEZ I M, REN Y, HANEDA Y, et al. A fusion method based on class rotations for DNN-DoA estimation on spherical microphone array[C]//Proceedings of the 29th European Signal Processing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 885-889.

[8] 鄢社锋, 马远良, 侯朝焕. 宽带波束域相干信号子空间高分辨方位估计[J]. 声学学报, 2006, 31(5): 418-424.

[8] YAN S F, MA Y L, HOU C H. High resolution azimuth estimation of coherent signal subspace in broadband beam domain[J]. Journal of Acoustics, 2006, 31(5): 418-424(in Chinese).

[9] 李伟红, 汤海兵, 龚卫国. 公共场所异常声源定位中时延估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 750-756.

[9] LI W H, TANG H B, GONG W G. Research on time delay estimation method for abnormal sound source location in public places[J]. Chinese Journal of Instrumentation, 2012, 33(4): 750-756(in Chinese).

[10] CHO K, VAN MERRIENBOER B, GULCEHRE C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation[C]//Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Stroudsburg: USAACL, 2014: 1724-1734.

[11] BAI S, KOLTER J Z, KOLTUN V. An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling [EB/OL]. (2018-04-19)[2024-01-01]<https://arxiv.org/abs/1803.01271>.

[12] SHIMADA K, TAKAHASHI N, TAKAHASHI S, et al. Sound event localization and detection using activity-coupled cartesian DOA vector and RD3Net[EB/OL]. (2020-07-31)[2024-01-01]. https://dcase.community/documents/challenge2020/technical_reports/DCASE2020_Shimada_139.pdf.

[13] TAKAHASHI N, MITSUFUJI Y. D3Net: densely connected multi-dilated DenseNet for music source separation[EB/OL]. (2021-05-27)

[2024-01-01]. <https://arxiv.org/abs/2010.01733v4>.

[14] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[EB/OL]. (2023-08-02)[2024-01-01]. <https://arxiv.org/abs/1706.03762>.

[15] BAI S J, KOLTER J Z, KOLTUN V. Trellis networks for sequence modeling[EB/OL]. (2019-05-11)[2024-01-01]. <https://arxiv.org/abs/1810.06682>.

[16] ADAVANNE S, POLITIS A, NIKUNEN J, et al. Sound event localization and detection of overlapping sources using convolutional recurrent neural networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2019, 13(1): 34-48.

[17] SAMEK W, BINDER A, MONTAVON G, et al. Evaluating the visualization of what a deep neural network has learned[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 28(11): 2660-2673.

[18] BATTAGLINO D, LEPAULOUX L, EVANS N. Acoustic scene classification using convolutional neural networks[C]//Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.

[19] ZINEMANAS P, CANCELA P, ROCAMORA M. End-to-end convolutional neural networks for sound event detection in urban environments[C]//Proceedings of the 24th Conference of Open Innovations Association. Piscataway: IEEE Press, 2019: 533-539.

[20] HAYASHI T, WATANABE S, TODA T, et al. Duration-controlled LSTM for polyphonic sound event detection[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2017, 25(11): 2059-2070.

[21] ZÖHRER M, PERNKOPF F. Virtual adversarial training and data augmentation for acoustic event detection with gated recurrent neural networks[C]//Interspeech 2017. [S.l.]: ISCA, 2017: 493-497.

[22] HIRVONEN T. Classification of spatial audio location and content using convolutional neural networks[C]//Audio Engineering Society Convention 138. [S.l.]: Audio Engineering Society, 2015: 1-10.

[23] GRUMIAUX P A, KITIĆ S, GIRIN L, et al. A survey of sound source localization with deep learning methods[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2022, 152(1): 107-151.

[24] MEI P C, YANG J B, ZHANG Q, et al. A method of sound event localization and detection based on three-dimension convolution[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Image, Vision and Computing. Piscataway: IEEE Press, 2022: 872-878.

[25] CAO Y, KONG Q, IQBAL T, et al. Polyphonic sound event detection and localization using a two-stage strategy[EB/OL]. (2019-11-05)[2024-01-01]. <https://arxiv.org/abs/1905.00268>.

[26] RANJAN R, JAYABALAN S, NGUYEN T N T, et al. Sound event detection and direction of arrival estimation using ResidualNet and recurrent neural networks[C]//Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2019 Workshop. [S.l.]: DCASE, 2019: 214-218.

[27] NGUYEN T N T, NGUYEN N K, PHAN H, et al. A general network architecture for sound event localization and detection using transfer learning and recurrent neural network[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2021: 935-939.

[28] ZHANG Y, WANG S, LI Z, et al. Data augmentation and class-based ensembled CNN-Conformer networks for sound event localization and detection[R]. [S.l.]: DCASE, 2021.

[29] LEE S H, HWANG J W, SEO S B, et al. Sound event localization and detection using cross-modal attention and parameter sharing for DCASE2021 challenge[R]. [S.l.]: DCASE, 2021.

[30] WU Y, HE K. Group normalization[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018.

[31] RAMACHANDRAN P, ZOPH B, LE Q V. Swish: a self-gated active function[EB/OL]. (2017-10-27)[2024-01-01] <https://arxiv.org/abs/1710.05941>.

[32] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[M]. Berlin: Springer, 2018: 3-19.

[33] LIU Y, HOU M, LI A, et al. Automatic detection of timber-cracks in wooden architectural heritage using YOLOv3 algorithm[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, XLIII-B2-2020: 1471-1476.

[34] POLITIS A, ADAVANNE S, KRAUSE D, et al. A dataset of dynamic reverberant sound scenes with directional interferers for sound event localization and detection[EB/OL]. (2021-07-04)[2024-01-01]. <https://arxiv.org/sbs/2106.06999v2>.

[35] PARK S, JEONG Y, LEE T. Self-attention mechanism for sound event localization and detection[R]. [S.l.]: DCASE, 2021.

Sound event localization and detection network with enhanced feature expression

ZHANG Dongping^{1,*}, FU Zhentao¹, WANG Zhutao¹, LIN Lili², WEI Ming³

(1. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China;

3. Hangzhou Aihua Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou 311121, China)

Abstract: To address the problem that traditional deep learning models are difficult to capture the long-context feature correlations in input feature maps as well as the key feature information in channel and spatial dimensions, resulting in high error rates and unsatisfactory performance in sound event localization and detection (SELD). Based on the baseline model SELDnet in the acoustic scene classification and sound event detection challenge, this paper proposes a feature enhanced sound event localization and detection network (FE-SELDnet). In order to address the issue of function failure to backpropagate, which leads to neuron death, it suggests using group normalization and the SiLU activation function; introducing the convolutional block attention module (CBAM) to capture significant features in both channel and spatial dimensions of acoustic features, suppressing superfluous features, improving network sensitivity and accuracy to feature information, and improving information flow; introducing the Transformer module to capture longer speech context feature association and combine local features to improve the accuracy and robustness of the model in sound event detection and localization tasks. The proposed FE-SELDnet significantly outperforms the original baseline network, according to experimental results on the TUT Sound Events dataset. The error rate decreased from 0.45 to 0.326, the SED and DOA scores decreased from 0.45 and 0.32 to 0.26 and 0.25, respectively, and the F_1 score increased to 79.4%. The algorithm proposed in this paper has higher superiority.

Keywords: sound event localization and detection; enhanced feature expression; attention mechanism; deep learning; group normalization

Received: 2024-01-11; Accepted: 2024-02-29; Published Online: 2024-03-15 15:16

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240314.2102.001

Foundation items: Zhejiang Key R & D Project of China (2023C01034,2023C01030,2023C01032)

* Corresponding author. E-mail: 06a0303103@cjlu.edu.cn

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0020

基于模板更新和双特征增强的视觉跟踪算法

丁奇帅^{1, 2, 3}, 雷帮军^{1, 2, 3, *}, 牟乾西^{1, 2, 3}, 吴正平^{1, 2, 3}

(1. 水电工程智能视觉监测湖北省重点实验室, 宜昌 443002; 2. 三峡大学 计算机与信息学院, 宜昌 443002;

3. 水电工程视觉监测宜昌市重点实验室, 宜昌 443002)

摘 要: 针对视觉跟踪中由于目标形变、翻转和遮挡而导致的跟踪失败问题, 提出了一种基于图像结构相似性的模板更新算法, 通过动态更新模板以适应目标在跟踪过程中的变化。同时, 基于 SiamMask 网络设计了跟踪特征增强模块和分割特征增强模块。跟踪特征增强模块包括非局部操作和卷积下采样, 用于建立上下文关联, 增强目标特征, 抑制背景干扰, 提高跟踪鲁棒性, 解决由于目标被遮挡而导致的特征减弱问题。分割特征增强模块引入卷积块注意力模块和可变形卷积, 以提高网络对通道和空间特征的捕捉能力, 自适应地学习目标的形状和轮廓信息, 提升网络对跟踪目标的分割精度, 进而提高跟踪准确率。实验表明: 所提算法表现良好且稳定, 与 SiamMask 相比, 在 VOT2016、VOT2018 和 VOT2019 数据集上期望平均重叠率分别提升了 0.052、0.053 和 0.025, 鲁棒性分别提升了 0.06、0.079 和 0.156, 且达到了平均每秒 91 帧的实时速度。

关 键 词: 目标跟踪; 图像分割; SiamMask; 模板更新; 特征增强

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1096-11

目标跟踪在自动驾驶、体育分析、搜索救援、工业自动化和智能交通等领域有着广泛应用。跟踪的目的是在视频序列中, 根据初始帧目标的位置, 持续预测后续帧中目标的位置。现有的跟踪算法在部分场景中取得了不错的跟踪效果, 但在目标形变、翻转和遮挡^[1]等复杂场景下仍然面临着准确率下降、鲁棒性变差等诸多挑战。

当前, 大多数跟踪算法都基于深度学习, 尤其以孪生网络为范式, SiamFC^[2]首次将孪生网络应用于目标跟踪领域, 提升了跟踪算法的速度和准确率。Li 等将区域提议网络(regional proposal network, RPN)从目标检测引入到孪生网络中, 提出了 SiamRPN^[3], 以更精确地预测目标的位置。DaSiamRPN^[4]引入了干扰感知网络(interference perception network, IPN), 着重解决正负样本不均衡

问题。SiamRPN++^[5]提出了深度互相关, 解决搜索帧和模板帧参数数量不平衡的问题。为拓展孪生网络的产出能力, Wang 等将 SiamRPN^[3]与图像分割技术相结合, 提出了 SiamMask^[6], 该算法能够在跟踪的同时对目标进行像素级的分割, 通过分割结果来实现更精确的跟踪。然而, 以上算法在跟踪时都固定使用第 1 帧给定的模板图像, 当目标遮挡、尺度变化或形状变化时, 容易因搜索图像与模板图像不匹配而跟踪失败。

为适应目标的外观变化, 一些跟踪算法开始采用模板更新策略。Meta-Tracker^[7]采用元学习对模板图像在线更新, 该算法可能会出现过度适应的问题, 模型泛化到新的跟踪场景时效果变差。DSiam^[8]提出了动态孪生网络, 通过快速傅里叶变换的学习模型, 使网络能在线学习目标的外观变化, 但在面

收稿日期: 2024-01-11; 录用日期: 2024-01-28; 网络出版时间: 2024-02-27 13:29

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240226.1633.001

基金项目: 国家自然科学基金(61871258); 水电工程智能视觉监测湖北省重点实验室建设项目(2019ZYDD007); 宜昌市科技研究与开发项目(A201130225)

* 通信作者. E-mail: bangjun.lei@ieee.org

引用格式: 丁奇帅, 雷帮军, 牟乾西, 等. 基于模板更新和双特征增强的视觉跟踪算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1096-1106. DING Q S, LEI B J, MOU Q X, et al. Visual tracking algorithm based on template updating and dual feature enhancement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1096-1106 (in Chinese).

对复杂背景和动态环境时,鲁棒性会受到极大影响。UpdateNet^[9]通过跳跃连接形式实现残差学习,输出对下一帧模板的预测,该算法使用积累模板的特征,当积累模板误差较多时,会产生负面影响。

最近,研究人员开始研究无锚框跟踪算法,以提高目标状态估计的准确性,如 SiamFC++^[10]、SiamBAN^[11]和 SiamCAR^[12]等,这些算法为目标跟踪提供了新思路,但仅能进行跟踪,不能像 SiamMask 一样实现对目标分割和跟踪的多任务学习。

综合上述分析,本文基于 SiamMask 在目标跟踪上的优势及在模板更新方面的不足,对其进行改进,以提升其在复杂场景下的跟踪性能,主要贡献如下:

- 1) 设计了更为简单高效的模板更新算法,仅消耗少量计算资源,无须引入新的网络,通过计算当前预测的结果图像和模板图像之间的结构相似性^[13](structural similarity, SSIM)来判别是否需要更新模板,更新模板时从历史跟踪结果中匹配出更适合当前目标形态的图像作为新模板参与后续跟踪。
- 2) 设计了跟踪特征增强模块,该模块包含非局部操作^[14]和卷积下采样,通过捕获全局信息来有效增强目标所在位置的特征强度,抑制背景干扰,提升跟踪的鲁棒性。
- 3) 设计了分割特征增强模块,该模块结合了卷积块注意力模块^[15](convolutional block attention

module, CBAM)和可变形卷积网络(deformable convolution network, DCN)^[16],以更好地捕捉通道和空间特征,自适应地学习目标的形状和轮廓信息,提高分割的精度,进而提高跟踪的准确性。

4) 在多个具有挑战性的跟踪数据集(VOT2016、VOT2018 和 VOT2019)上进行实验,相比于基准算法 SiamMask,本文算法在鲁棒性和期望平均重叠率(expected average overlap, EAO)指标上取得了显著的提升。

1 本文算法

算法整体框架如图 1 所示。网络的输入由 2 部分构成: ①模板图像,大小为 $127\times127\times3$; ②搜索图像,大小为 $255\times255\times3$ 。特征提取网络采用 ResNet-50 的前 4 个阶段,每个阶段的特征图对应图 1 中的 conv1、conv2、conv3 和 conv4, Adjust 卷积块的作用是将 conv4 的特征通道从 1 024 调节到 256。conv2 经过跟踪特征增强模块处理后与 Adjust 的结果相加,通过深度互相关输出 $17\times17\times256$ 的响应得分图,得分最高点所在位置的一系列特征矩阵作为候选响应窗口(response of candidate window, RoW),大小为 $1\times1\times256$, RoW 通过特征融合来产生更准确的目标掩码。特征融合网络如图 2 所示。RoW 经过反卷积变换形状,通过多次卷积和上采样,与经过分割特征增强模块处理的低层特征 conv1、conv2 和 conv3 进行融合,最终输出精确的分割和跟踪结果。

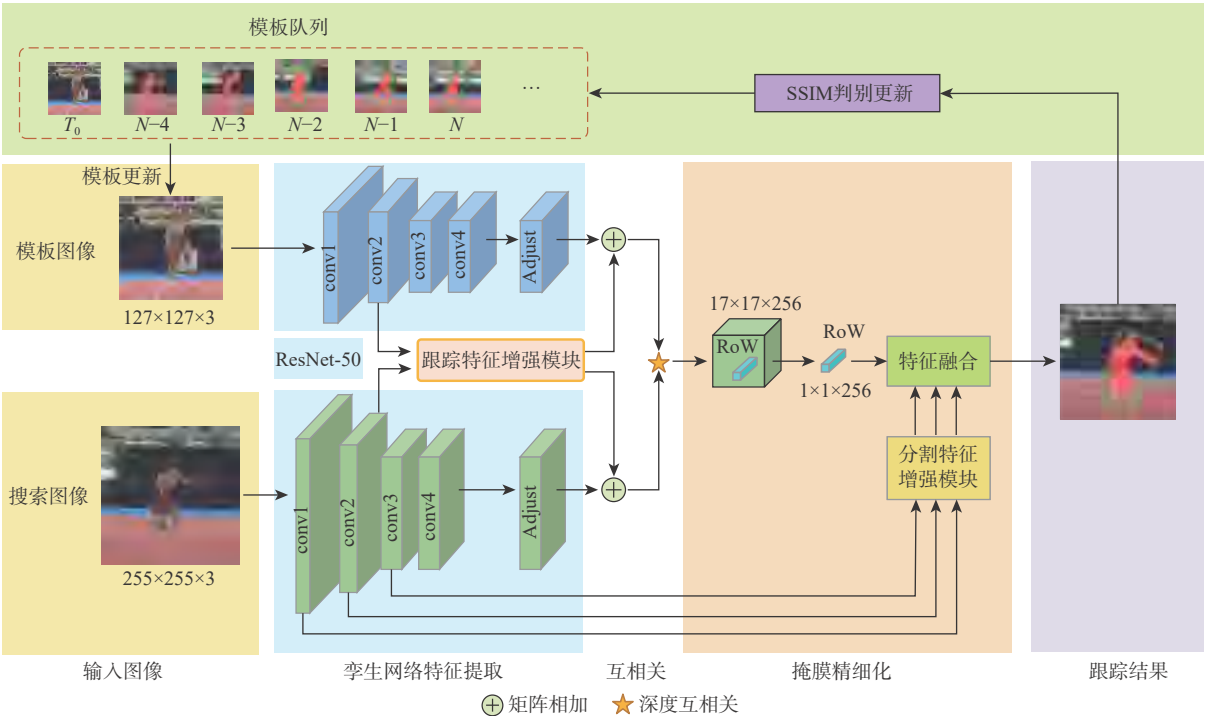


图 1 基于模板更新和双特征增强的视觉跟踪算法框架

Fig. 1 Framework of visual tracking algorithms based on template updating and dual-feature enhancement

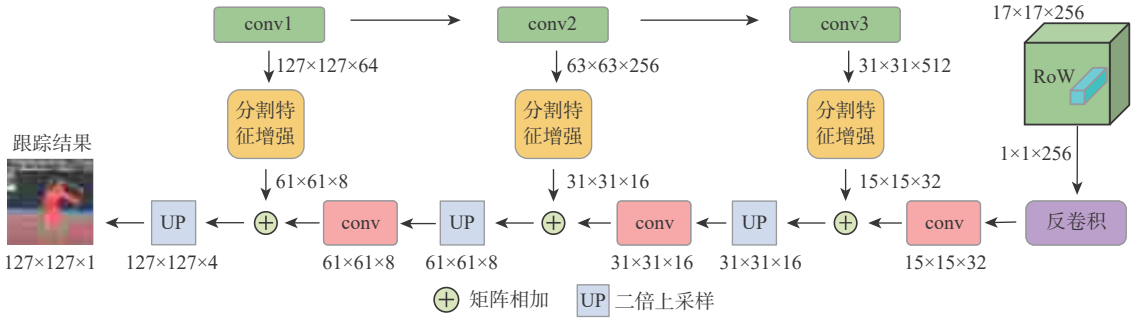


图2 特征融合网络

Fig. 2 Feature fusion network

1.1 基于结构相似性判别的模板更新算法

跟踪过程中,目标开始变化的前几帧依赖跟踪网络的泛化能力,仍然可以正确跟踪,随着目标变化越来越大,会逐渐跟踪失败,不同情况下目标的变化过程如图3所示。

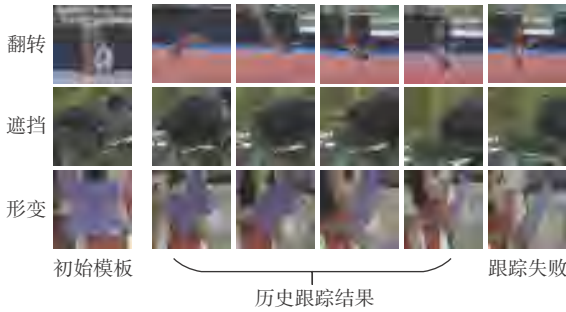


图3 目标在跟踪失败前的变化过程

Fig. 3 Process of object changes before tracking failure

图3中,运动员在经历翻转后跟踪失败,失败帧形状和初始模板相似度很低,而和跟踪失败的前2帧更接近;鸟被遮挡和书在形变时同样符合该规律,利用该特性,本文算法从历史跟踪结果中选取模板图像。同时,为了防止目标恢复为初始形状时,更新后的模板无法恢复的问题,设计了模板初始化,达到条件时,将当前模板恢复为初始模板。具体实现过程如下:

1) 判别条件。计算当前帧跟踪网络的预测结果图像和模板图像的 SSIM 得分,若当前得分 S_n 比上一帧预测结果图像和模板图像的 SSIM 得分 S_{n-1} 小,且差值大于阈值 Δ_1 ,则认为当前帧中的目标发生了明显变化,需要更新模板;同时,由于对不同场景的跟踪,SSIM 得分分布情况不同,正确跟踪目标时,跟踪结果和模板得分总是在历史 SSIM 得分的平均值附近保持平稳。因此,增加约束条件,当前 SSIM 得分 S_n 小于均值 S_m 且差值大于阈值 Δ_2 时,认为当前跟踪出现了偏差,需要更新模板,从而得到模板更新的判别条件:

$$\begin{cases} S_m - S_n > \Delta_1 \\ S_{n-1} - S_n > \Delta_2 \end{cases} \quad (1)$$

2) 算法流程。模板更新流程如算法1所示。

算法1 基于 SSIM 判别的模板更新算法。

定义: 队列 Q , 保存历史跟踪图像, 长度为 N ; score 为当前预测结果图像和模板图像 SSIM 得分; 列表 S , 保存历史 SSIM 得分; S_m 为列表 S 中得分均值; T 表示模板; T_0 为初始帧模板; f 为每帧视频序列; $P()$ 为跟踪过程, P 为跟踪预测的结果。

输入: 视频序列 f , 初始目标图像和位置 (在 T_0 中)。

输出: 分割和跟踪结果 (保存在 P 中)。

// 初始化

$T \leftarrow T_0$

$P \leftarrow P(T)$ # 用初始帧模板进行跟踪

// 跟踪过程

for f in video do

$P \leftarrow P(T)$ # 通过循环对视频序列持续跟踪

score $\leftarrow$ SSIM(T_0, P) # 计算 SSIM 得分并存入 score

$Q \leftarrow P$ # 跟踪结果存入队列 Q

if $f > N$ and $S_m - \text{score} < \Delta_1$ and $S[f-2] - \text{score} > \Delta_2$ then

for i in Q do # 遍历队列 Q

best_score $\leftarrow$ score # 假设当前得分为最优得分

$P \leftarrow P(Q[i])$ # 重新跟踪

if (score $\leftarrow$ SSIM($Q[i], P$)) > best_score then

best_score $\leftarrow$ score # 选出最优模板

$T \leftarrow Q[i]$

end

end

if best_score < $S[f-1]$ then

$T \leftarrow T_0$ # 模板初始化

end

end

end

使用初始模板对视频序列进行跟踪, 当触发

式 (1) 中的更新条件时, 将队列中的图像分别作为新的模板对当前帧进行重新跟踪, 再计算出新的 SSIM 得分, 选择 SSIM 得分最高所对应的图像作为新模板进行后续跟踪, 同时将更新模板后重新跟踪得到的 SSIM 得分和未更新前的得分进行比较, 若得分变高, 则表明更新模板后重新跟踪起到了正面作用, 得分变低则表明起到了负面作用, 此时, 应将模板更换为初始模板, 通过以上流程实现模板更新。

1.2 跟踪特征增强模块

特征提取时, 随着网络层数变深, 特征图的尺寸将会逐渐变小, 难以捕捉到全局信息, 当目标发生遮挡和形变时, 目标的形状等浅层特征丢失严重, 难以进行精准定位。同时, 考虑到在跟踪过程中, 目标的位置和运动不仅存在于局部区域, 而是涉及整个图像, 不同视频帧之间的目标往往具有连续的运动特征, 这些特征需要与周围环境和上下文进行交互, 如图 4 所示。

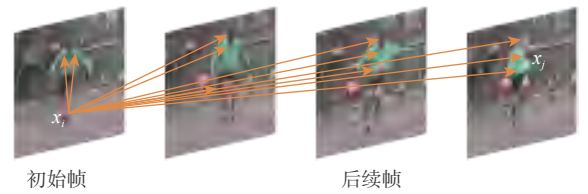


图 4 目标在不同视频帧之间的关联性

Fig. 4 Object correlation between different video frames

本文通过引入非局部操作来建立输入图像中不同像素之间长距离依赖关系, 通过卷积下采样调整特征图大小, 将增强后的特征图与 Adjust 的结果相融合, 从而获取更多的细节信息, 为最终的跟踪过程提供更准确、更稳定的特征表达。所设计的跟踪特征增强模块如图 5 所示。

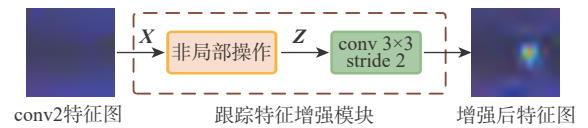


图 5 跟踪特征增强模块

Fig. 5 Tracking feature enhancement module

非局部操作在网络中的传播过程如图 6 所示, 其通过计算输入特征图中每个位置与其余所有位置之间加权和来确定关联性。计算方法如下:

$$y_i = \frac{1}{C(x)} \sum_j f(x_i, x_j) g(x_j) \tag{2}$$

式中: x 为输入特征图; y_i 为输出 i 位置的特征值; x_i 为 i 位置上与 x 相同维度的向量; x_j 为 j 位置上与 x 相同维度的向量; $f(x_i, x_j)$ 为相似性计算函数, 用于计算 x_i 和 x_j 这 2 个向量之间的相似性; $g()$ 为特征值计算函数; $C(x)$ 为归一化项, 用于对函数

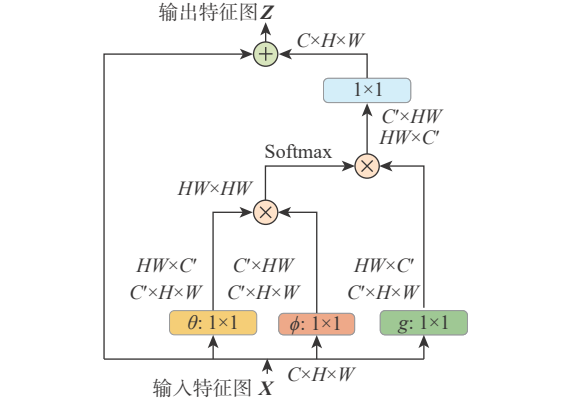


图 6 非局部操作

Fig. 6 Non-local operation

$f(x_i, x_j)$ 所有值求和, 即

$$C(x) = \sum_j f(x_i, x_j) \tag{3}$$

本文采用嵌入高斯函数来计算 2 个向量的相似性, 公式如下:

$$f(x_i, x_j) = e^{\theta(x_i)^T \phi(x_j)} \tag{4}$$

为了在卷积网络中易于实现, 特征值计算函数 $g(x)$ 、 $\theta(x)$ 和 $\phi(x)$ 分别由 1×1 卷积映射得出, 即输入特征图 x 乘上对应权重 W , 公式为

$$\begin{cases} g(x) = W_g x \\ \theta(x) = W_\theta x \\ \phi(x) = W_\phi x \end{cases} \tag{5}$$

1.3 分割特征增强模块

特征融合网络是为了产生更准确的目标掩码, 在图 2 中, RoW 通过反卷积变换后通道数减少, 尺度变大, 这意味着特征图在空间维度上需要更多信息, 但由于通道信息有限, 无法表示更多细节, 在目标分割时, 会形成模糊的分割边界。因此, 本文设计了分割特征增强模块, 旨在将对目标分割最有利的低层特征提取出来, 得到更完整的掩码信息。该模块由 CBAM 模块和 DCN 网络组成, 网络结构如图 7 所示。



图 7 分割特征增强模块

Fig. 7 Segmentation feature enhancement module

CBAM 模块由通道注意力模块和空间注意力模块串联而成, 如图 8 所示。对输入的特征图, 先分别经过平均池化和最大池化, 再通过共享多层感知机和 Sigmoid 激活函数来学习通道权重。将结果分别经过平均池化和最大池化, 通过一个 7×7 的空洞卷积和 Sigmoid 激活函数学习空间各点权重, 最

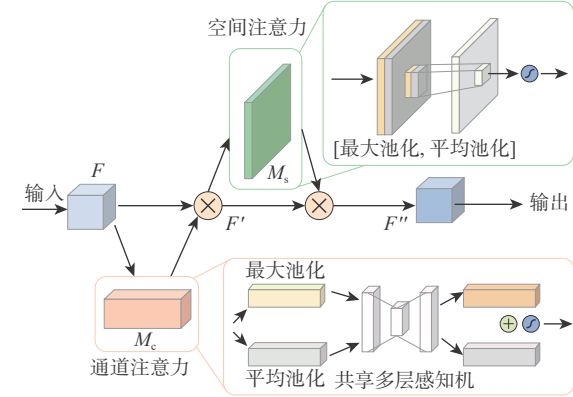


图 8 CBAM 模块

Fig. 8 Convolutional block attention module

终生成权重优化的特征图。

DCN 网络通过学习偏移量使卷积核的形状和大小能够自适应地调整,如图 9 所示。输入特征图通过普通卷积来学习每个卷积核的偏移量,对特征图进行非均匀采样,以适应感受野内特征的空间变化,输出新的特征图。实现过程表示为

$$y(p)=\sum_{k=1}^Kw_kx(p+p_k+\Delta p_k)\Delta m_k$$

(6)

式中: $y(p)$ 为输出位置 p 的特征值; $x(p)$ 为输入特征 x 映射在 p 位置的特征; K 为卷积核个数,本文使用 3×3 卷积, K 的值取 9; w_k 为 k 位置的权重; p_k 为预先设定偏移量; Δp_k 为可学习的偏移量; Δm_k 为调节

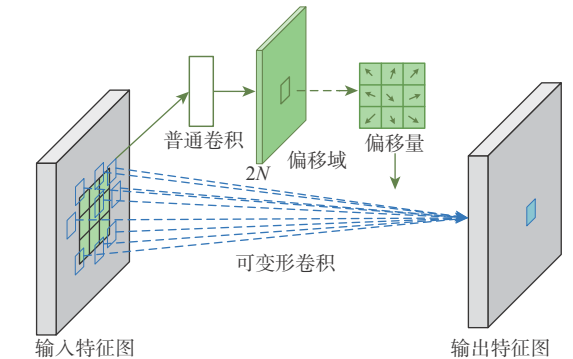


图 9 可变形卷积网络

Fig. 9 Deformable convolution network

表 1 VOT2016 数据集上不同视觉属性的实验结果

Table 1 Experimental results of different visual attributes on VOT2016 dataset

跟踪算法	总体EAO得分	EAO得分					
		遮挡	相机运动	尺度变化	光照变化	运动变化	无定义
SiamFC ^[2]	0.234	0.161	0.191	0.242	0.180	0.231	0.059
MDNet ^[17]	0.257	0.218	0.238	0.312	0.313	0.252	0.030
C-COT ^[18]	0.331	0.246	0.249	0.327	0.402	0.354	0.154
SiamRPN ^[3]	0.344	0.117	0.205	0.280	0.270	0.176	0.065
DaSiamRPN ^[4]	0.411	0.241	0.280	0.422	0.233	0.294	0.106
SiamMask ^[6]	0.433	0.325	0.394	0.444	0.463	0.409	0.109
本文	0.485	0.470	0.472	0.527	0.617	0.470	0.104

系数,范围为 [0,1],用来约束卷积核学习偏移量的范围。

2 实验结果及分析

2.1 实验设置

实验平台采用 Ubuntu18.04 操作系统,处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-10700K CPU@ 3.80 GHz,显卡为 NVIDIA GTX 3070(8 GB),采用 Pytorch 深度学习框架,相关依赖为: cuda11.3, cudnn8.3.2, python3.8, pytorch1.12.1。

训练数据集由 COCO、YouTube-VOS、ImageNet-VID 和 ImageNet-Det 组成,训练时使用 ResNet-50 预训练权重,采用 SGD 优化器,动量为 0.9,权重衰减为 10^{-5} ,batchsize 为 8,训练 20 个 epoch,前 5 个 epoch 为预热阶段,学习率从 10^{-3} 增长到 5×10^{-3} ,后 15 个 epoch 按对数下降到 2.5×10^{-3} 。

2.2 测试数据集与评价指标

1) VOT 数据集。跟踪时使用 VOT2016、VOT2018 和 VOT2019 这 3 个数据集,3 个数据集均由 60 个视频序列组成,采用旋转框标注,包含尺度变化、遮挡、光照变化、相机运动、运动变化和无定义 6 个视觉属性。使用准确率、鲁棒性和 EAO 作为评价指标。准确率衡量跟踪过程预测框和真实框的交叠程度,值越大,表明准确率越高。鲁棒性衡量跟踪算法的稳定性,值越小,表明稳定性越强。EAO 结合了准确率和鲁棒性,是衡量跟踪算法最重要的指标,值越大,性能越好。

2) DAVIS 数据集。分割时使用 DAVIS2016 和 DAVIS2017 这 2 个数据集,数据集由二进制掩码进行稠密标注,具有像素级别的分割精度。使用不同阈值下的平均交并比(mean IoU, mIoU)作为分割结果的评价指标,值越大,表明分割效果越好。

2.3 对比实验

2.3.1 VOT2016 数据集上的实验结果

1) 不同视觉属性下的结果对比。在 VOT2016 数据集上测试了本文算法和其他跟踪算法在不同视觉属性下的 EAO 得分,测试结果如表 1 和图 10

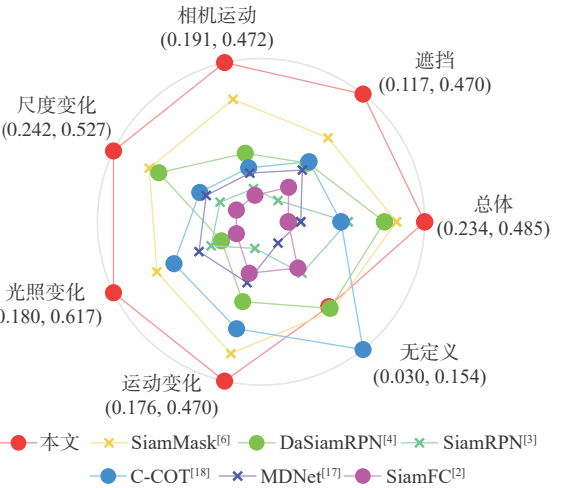


图 10 VOT2016 数据集上视觉属性对比

Fig. 10 Comparison of visual attributes on VOT2016 dataset

所示。对比 SiamMask, 在遮挡场景下, 本文算法的 EAO 提升了 0.145, 运动变化场景下提升了 0.078, 尺度变化场景下提升了 0.083, 光照变化场景下提升了 0.154, 相机运动场景下提升了 0.061, 同时也超过了其他算法, 表明本文算法可以有效应对目标形变、翻转和遮挡等复杂场景。

2) 与其他算法总体性能的对比。表 2 显示了本文算法和其他跟踪算法在 VOT2016 数据集上的比较结果。EAO 排名如图 11 所示。本文算法具有最高的 EAO 和最好的鲁棒性, 相比于 UpdateNet, 准确率高出 0.02, 鲁棒性高出 0.056, EAO 高出 0.004; 相比于 Siam R-CNN, 鲁棒性高出 0.019, EAO 高出 0.024; 相比于 SiamRPN++, 鲁棒性高出 0.046, EAO 高出 0.021。可以表明, 本文算法不仅准确跟踪了目标的位置, 而且保持了良好的稳定性。

表 2 不同跟踪算法在 VOT2016 数据集上的结果

Table 2 Results of different tracking algorithms on VOT2016 dataset

跟踪算法	准确率↑	鲁棒性↓	EAO↑
SiamMask ^[6]	0.622	0.214	0.433
SiamRPN++ ^[5]	0.640	0.200	0.464
UpdateNet ^[9]	0.610	0.210	0.481
Siam R-CNN ^[19]	0.645	0.173	0.461
ULAST-on ^[20]	0.603	0.214	0.417
本文	0.630	0.154	0.485

图 12 展示了部分复杂场景下的跟踪可视化结果。在目标快速运动时, SiamFC 存在跟丢和跟错的情况。SiamMask 的跟踪框有时无法精准锁定目标, 与目标真实形状误差较大, 受背景干扰容易跟踪失败。本文算法在目标发生形变、翻转和遮挡时, 仍能正确跟踪目标, 所产生的跟踪框与目标实际形状可以保持很好的贴合, 与真值框十分接近,

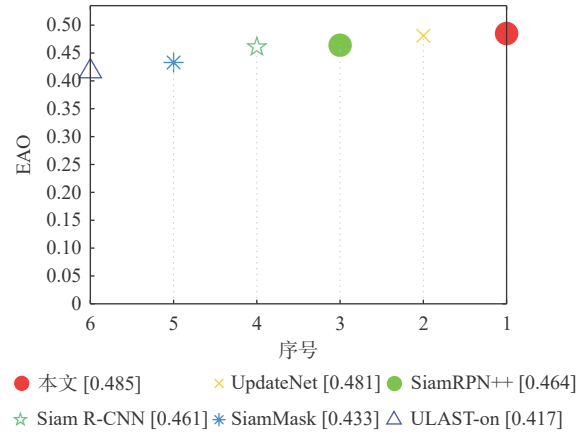


图 11 VOT2016 数据集上 EAO 排名

Fig. 11 EAO rankings on VOT2016 dataset

实现了更好的跟踪效果。

2.3.2 VOT2018 数据集上的实验结果

将本文算法在 VOT2018 数据集上与其他跟踪算法进行比较, 结果如表 3 所示, EAO 排名如图 13 所示。鲁棒性上, 本文算法为 0.197, 超越了大多数跟踪算法, 仅次于 SiamFC++。EAO 上, 本文算法达到了 0.433 的最佳分数, 比 SiamFC++ 高出 0.007, 比 Siam R-CNN 高出 0.025, 且优于其他算法, 可以表明, 本文算法整体性能表现较好。

2.3.3 VOT2019 数据集上的实验结果

在更具有挑战性的 VOT2019 数据集上进行测试, 实验结果如表 4 所示, EAO 排名如图 14 所示。本文算法在准确率、鲁棒性和 EAO 上都取得了最好的结果。相比 SiamRPN++, 本文算法准确率高出 0.002, EAO 高出 0.014, 鲁棒性高出 0.066。

2.4 消融实验

2.4.1 不同模板更新参数的实验结果对比

为验证模板更新算法中不同队列长度 N 、阈值 Δ_1 和 Δ_2 对跟踪结果和速度的影响, 在 VOT2018 数据集上进行了实验, 实验结果如表 5 所示。

通过表 5 可以发现, 当队列长度为 10、 Δ_1 和 Δ_2 分别为 0.25 和 0.2 时, EAO 取得最好结果 0.396, 分割速度为 82 帧/s; 当队列长度为 5、 Δ_1 和 Δ_2 分别为 0.25 和 0.2 时, EAO 为 0.394, 分割速度为 105 帧/s; 相比之下, 二者 EAO 相差仅为 0.002, 但分割速度相差 23 帧/s。综合考虑, 队列长度取 5 时, 分割速度最快且对最终结果提升有利, 因此, 本文在其他实验中使用模板更新算法时, 队列长度均设置为 5, Δ_1 和 Δ_2 设置为 0.25 和 0.2。

2.4.2 跟踪数据集上的消融实验

在 VOT2016、VOT2018 和 VOT2019 这 3 个跟踪数据集上进行消融实验, 用来验证本文所设计模块的有效性, 实验结果如表 6~表 8 所示。其中,

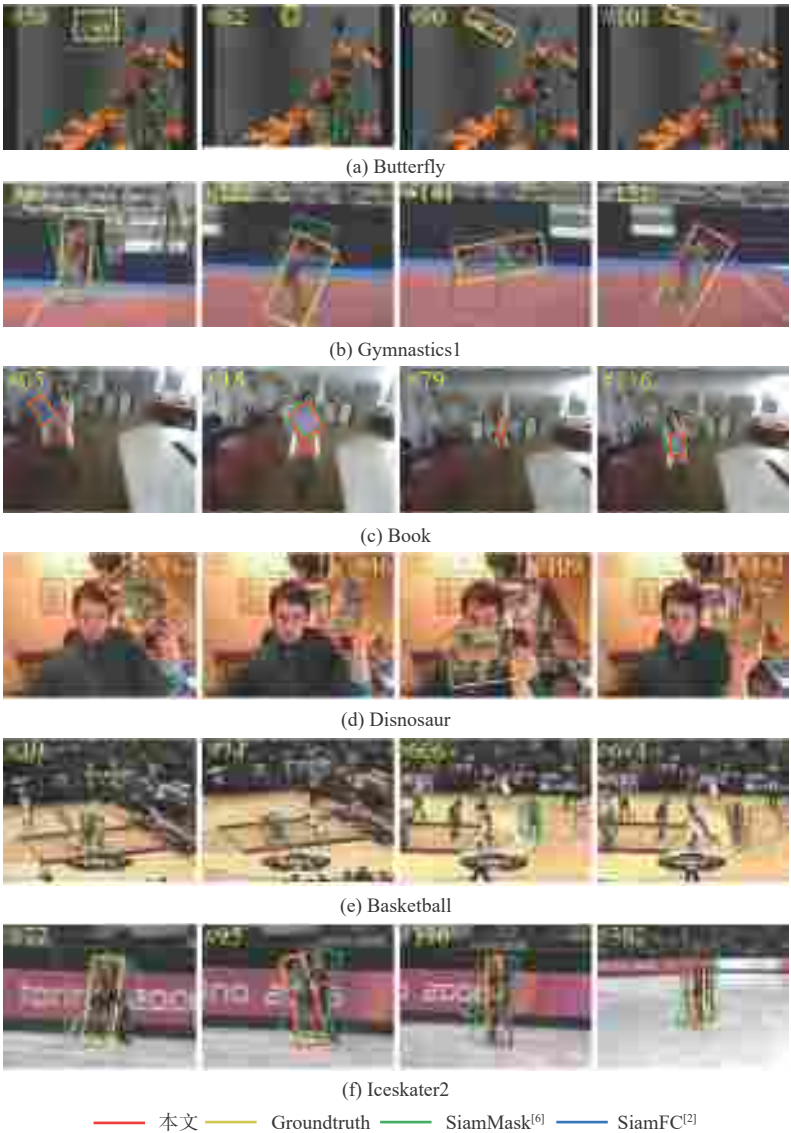


图 12 跟踪效果对比

Fig. 12 Comparison of tracking results

表 3 不同跟踪算法在 VOT2018 数据集上的结果

Table 3 Results of different tracking algorithms on VOT2018 dataset

跟踪算法	准确率↑	鲁棒性↓	EAO↑
SiamMask ^[6]	0.609	0.276	0.380
SiamRPN++ ^[5]	0.600	0.230	0.415
Siam R-CNN ^[19]	0.609	0.220	0.408
SiamFC++ ^[10]	0.587	0.183	0.426
ULAST-on ^[20]	0.571	0.286	0.355
本文	0.603	0.197	0.433

Δ EAO 表示相比于基础模型 SiamMask 在 EAO 上的提升值。

在分别加入某个模块后, EAO 有了一定的提升。将模板更新算法、跟踪特征增强模块和分割特征增强模块全部加到模型中后, 实现了最好的效果, 在 VOT2016、VOT2018 和 VOT2019 这 3 个数据集上, EAO 分别提升了 0.052、0.053 和 0.025, 鲁棒

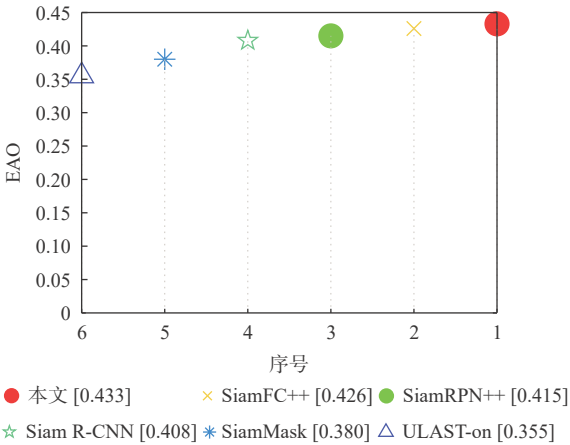


图 13 VOT2018 数据集上 EAO 排名

Fig. 13 EAO rankings on VOT2018 dataset

性分别提升了 0.06、0.079 和 0.156, 表明加入的模块是有效且兼容的, 能显著提升跟踪算法的跟踪准确率和鲁棒性。同时也注意到, 在加入 3 个模块

表 4 不同跟踪算法在 VOT2019 数据集上的结果

Table 4 Results of different tracking algorithms on VOT2019 dataset

跟踪算法	准确率↑	鲁棒性↓	EAO↑
SiamFC ^[2]	0.511	0.923	0.183
SiamRPN ^[3]	0.582	0.527	0.272
SiamMask ^[6]	0.594	0.572	0.274
SPM ^[21]	0.577	0.507	0.275
SiamRPN++ ^[15]	0.599	0.482	0.285
本文	0.601	0.416	0.299

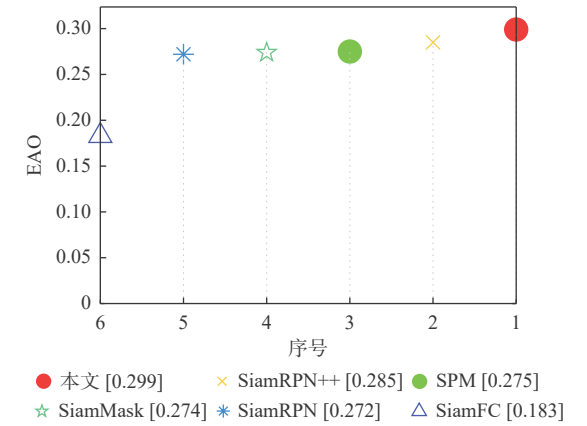


图 14 VOT2019 数据集上 EAO 排名

Fig. 14 EAO rankings on VOT2019 dataset

后, 算法的分割速度有了小幅度下降, 这是由于添加 3 个模块额外消耗了一定的计算资源, 但仍可以保持 90 帧/s 以上的实时速度, 说明加入的模块并未带来特别巨大的计算开销。

2.4.3 分割数据集上的消融实验

在 DAVIS2016 和 DAVIS2017 这 2 个分割数据集上进行消融实验, 用于验证模板更新算法、跟踪特征增强模块和分割特征增强模块对分割结果的

表 5 不同模板更新参数在 VOT2018 数据集上的结果

Table 5 Results of different template update parameters on VOT2018 dataset

VOT2018 dataset				
队列长度 N	Δ_1	Δ_2	EAO	分割速度/(帧·s ⁻¹)
5	0.2	0.15	0.362	92
		0.2	0.375	96
		0.25	0.366	98
	0.25	0.15	0.381	102
		0.2	0.394	105
		0.25	0.389	105
10	0.30	0.15	0.381	104
		0.2	0.379	105
		0.25	0.380	106
	0.2	0.15	0.373	74
		0.2	0.379	77
		0.25	0.385	80
	0.25	0.15	0.384	79
		0.2	0.396	82
		0.25	0.388	84
	0.30	0.15	0.376	88
		0.2	0.378	89
		0.25	0.380	91

影响, 实验结果如表 9 和表 10 所示。

可以发现, 在 SiamMask 基础上单独加入某个模块或组合加入某些模块, 在 2 个分割数据集上, 不同阈值下的 mIoU 都有一定提升, 在 mIoU(0.45) 指标下, 同时加入模板更新算法、跟踪特征增强模块和分割特征增强模块后, 在 DAVIS2016 数据集上提升了 0.064, 在 DAVIS2017 数据集上提升了 0.038, 达到了最好的结果, 可以验证加入的模块对于目标分割同样是有有效的。

图 15 为部分数据集上分割可视化结果。可以看出, SiamMask 对目标细节部分分割不够准确, 容

表 6 VOT2016 数据集上的消融实验结果

Table 6 Results of ablation experiments on VOT2016 dataset

SiamMask	模板更新算法	跟踪特征增强模块	分割特征增强模块	准确率↑	鲁棒性↓	EAO↑	分割速度/(帧·s ⁻¹)↑	ΔEAO↑
√				0.622	0.214	0.433	108	
√	√			0.623	0.210	0.448	106	0.015↑
√		√		0.631	0.210	0.447	107	0.014↑
√			√	0.616	0.228	0.440	98	0.007↑
√		√	√	0.637	0.182	0.470	93	0.037↑
√	√	√	√	0.630	0.154	0.485	91	0.052↑

表 7 VOT2018 数据集上的消融实验结果

Table 7 Results of ablation experiments on VOT2018 dataset

SiamMask	模板更新算法	跟踪特征增强模块	分割特征增强模块	准确率↑	鲁棒性↓	EAO↑	分割速度/(帧·s ⁻¹)↑	ΔEAO↑
√				0.609	0.276	0.380	107	
√	√			0.601	0.239	0.394	105	0.014↑
√		√		0.607	0.267	0.395	107	0.015↑
√			√	0.606	0.276	0.403	98	0.023↑
√		√	√	0.612	0.234	0.420	93	0.04↑
√	√	√	√	0.603	0.197	0.433	91	0.053↑

表 8 VOT2019 数据集上的消融实验结果								
Table 8 Results of ablation experiments on VOT2019 dataset								
SiamMask	模板更新算法	跟踪特征增强模块	分割特征增强模块	准确率↑	鲁棒性↓	EAO↑	分割速度/(帧·s ⁻¹)↑	ΔEAO↑
√				0.594	0.572	0.274	109	
√	√			0.596	0.511	0.285	106	0.011↑
√		√		0.606	0.507	0.280	108	0.006↑
√			√	0.606	0.492	0.286	98	0.012↑
√		√	√	0.611	0.477	0.287	95	0.013↑
√	√	√	√	0.601	0.416	0.299	92	0.025↑

表 9 DAVIS2016 数据集上的消融实验结果								
Table 9 Results of ablation experiments on DAVIS2016 dataset								
SiamMask	模板更新算法	跟踪特征增强模块	分割特征增强模块	mIoU (0.30)	mIoU (0.35)	mIoU (0.40)	mIoU (0.45)	分割速度/(帧·s ⁻¹)↑
√				0.637	0.637	0.633	0.626	79
√	√			0.670	0.675	0.674	0.673	71
√		√		0.674	0.670	0.662	0.649	78
√			√	0.681	0.674	0.664	0.650	73
√		√	√	0.675	0.677	0.677	0.673	71
√	√	√	√	0.686	0.690	0.692	0.690	67

表 10 DAVIS2017 数据集上的消融实验结果								
Table 10 Results of ablation experiments on DAVIS2017 dataset								
SiamMask	模板更新算法	跟踪特征增强模块	分割特征增强模块	mIoU (0.30)	mIoU (0.35)	mIoU (0.40)	mIoU (0.45)	分割速度/(帧·s ⁻¹)↑
√				0.499	0.498	0.495	0.490	84
√	√			0.505	0.508	0.509	0.507	75
√		√		0.525	0.525	0.522	0.517	83
√			√	0.514	0.511	0.505	0.496	77
√		√	√	0.526	0.527	0.526	0.522	75
√	√	√	√	0.525	0.529	0.530	0.528	70

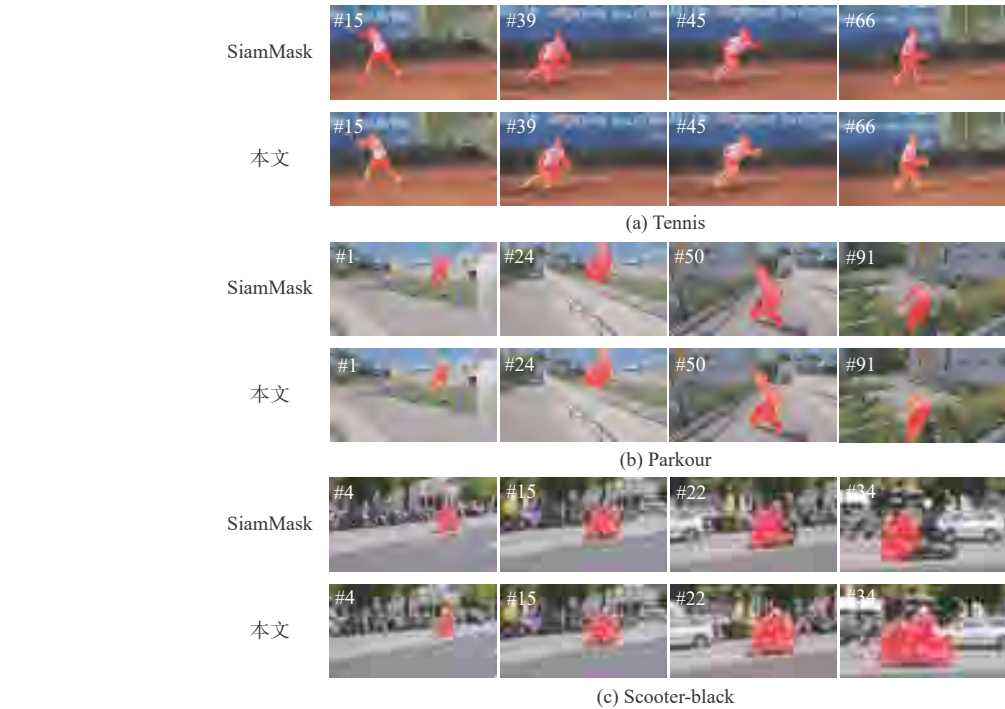


图 15 分割效果对比

Fig. 15 Comparison of segmentation effect

易受背景干扰等情况而导致分割不完整, 相比之下, 本文算法的分割结果更光滑自然, 很少有分割不完整和过度分割的情况, 整体分割结果更接近目标真实的轮廓。

3 结 论

1) 本文算法在 VOT2016、VOT2018 和 VOT2019 这 3 个数据集上取得了优异的跟踪结果, 超过了多数跟踪算法, 所设计的基于图像结构相似度判别的模板更新算法、跟踪特征增强模块和分割特征增强模块有效提升了跟踪网络在复杂场景下的准确率和鲁棒性。

2) 本文算法同时提升了目标分割的精度, 在 DAVIS2016 和 DAVIS2017 这 2 个分割数据集上, 不同阈值下的 mIoU 指标均有提升, mIoU(0.45)分别提升了 0.064 和 0.038。

然而, 本文算法牺牲了少量运行速度, 因此, 网络模型轻量化, 提升算法的实时性是下一步的研究重点。

参考文献 (References)

[1] XIAO H, LIU X. Robust target tracking based on spatio-temporal context learning[J]. Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2019, 10(1): 212-220.

[2] BERTINETTO L, VALMADRE J, HENRIQUES J F, et al. Fully-convolutional Siamese networks for object tracking[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2016: 850-865.

[3] LI B, YAN J J, WU W, et al. High performance visual tracking with Siamese region proposal network[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 8971-8980.

[4] ZHU Z, WANG Q, LI B, et al. Distractor-aware Siamese networks for visual object tracking[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 103-119.

[5] LI B, WU W, WANG Q, et al. SiamRPN: evolution of Siamese visual tracking with very deep networks[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 4277-4286.

[6] HU W M, WANG Q, ZHANG L, et al. SiamMask: a framework for fast online object tracking and segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023, 45(3): 3072-3089.

[7] PARK E, BERG A C. Meta-Tracker: fast and robust online adaptation for visual object trackers[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 587-604.

[8] GUO Q, FENG W, ZHOU C, et al. Learning dynamic Siamese network for visual object tracking[C]//Proceedings of the IEEE Inter-

national Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1781-1789.

[9] ZHANG L C, GONZALEZ-GARCIA A, VAN DE WEIJER J, et al. Learning the model update for Siamese trackers[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 4009-4018.

[10] XU Y D, WANG Z Y, LI Z X, et al. SiamFC++: towards robust and accurate visual tracking with target estimation guidelines[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(7): 12549-12556.

[11] CHEN Z D, ZHONG B N, LI G R, et al. Siamese box adaptive network for visual tracking[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 6667-6676.

[12] GUO D Y, WANG J, CUI Y, et al. SiamCAR: Siamese fully convolutional classification and regression for visual tracking[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 6268-6276.

[13] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

[14] WANG X L, GIRSHICK R, GUPTA A, et al. Non-local neural networks[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 7794-7803.

[15] 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.

[16] ZHU X Z, HU H, LIN S, et al. Deformable ConvNets V2: more deformable, better results[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 9300-9308.

[17] NAM H, HAN B. Learning multi-domain convolutional neural networks for visual tracking[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 4293-4302.

[18] DANELLJAN M, ROBINSON A, KHAN F S, et al. Beyond correlation filters: learning continuous convolution operators for visual tracking[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2016: 472-488.

[19] VOIGTLAENDER P, LUITEN J, TORR P H S, et al. Siam R-CNN: visual tracking by re-detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 6577-6587.

[20] SHEN Q H, QIAO L, GUO J Y, et al. Unsupervised learning of accurate Siamese tracking[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 8091-8100.

[21] WANG G T, LUO C, XIONG Z W, et al. SPM-Tracker: series-parallel matching for real-time visual object tracking[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 3638-3647.

Visual tracking algorithm based on template updating and dual feature enhancement

DING Qishuai^{1, 2, 3}, LEI Bangjun^{1, 2, 3, *}, MOU Qianxi^{1, 2, 3}, WU Zhengping^{1, 2, 3}

- (1. Hubei Key Laboratory of Intelligent Visual Monitoring for Hydropower Engineering, Yichang 443002, China;
- 2. College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
- 3. Yichang Key Laboratory of Hydropower Engineering Vision Supervision, Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at the problem of tracking failure due to target deformation, flipping and occlusion in visual tracking, a template updating algorithm based on image structural similarity is proposed by dynamically updating the template to adapt to the changes of the target during tracking. The tracking feature enhancement module and segmentation feature enhancement module are also designed based on the SiamMask network. The tracking feature enhancement module consists of non-local operations and convolutional downsampling, which is used to establish contextual correlation, enhance the target features, suppress the background interference, improve the tracking robustness, and solve the feature attenuation problem due to the occlusion of the target. The segmentation feature enhancement module introduces the convolutional block attention module and deformable convolution to improve the network’s ability to capture channel and spatial features, adaptively learn the shape and contour information of the target, and enhance the network’s segmentation accuracy of the tracked target, which in turn improves the tracking accuracy. In comparison to the baseline SiamMask, experiments demonstrate that the proposed algorithm performs well and steadily in solving the aforementioned problems, improving the expected average overlap rate by 0.052, 0.053, and 0.025 and the robustness by 0.06, 0.079, and 0.156 on the VOT2016, VOT2018, and VOT2019 datasets, respectively. It also achieves a real-time speed of 91 frames per second on average.

Keywords: object tracking; image segmentation; SiamMask; template update; feature enhancement

Received: 2024-01-11; **Accepted:** 2024-01-28; **Published Online:** 2024-02-27 13:29
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240226.1633.001
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61871258); Hubei Key Laboratory of Intelligent Visual Monitoring for Hydropower Engineering Project (2019ZYD007); Yichang Science and Technology Research and Development Project (A201130225)
*** Corresponding author.** E-mail: bangjun.lei@ieee.org

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0072

视觉显著性增强的双鉴别器红外与可见光图像融合

陈永^{1,2,*}, 周方春¹, 董珂¹

(1. 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省人工智能与图形图像处理工程研究中心, 兰州 730070)

摘 要: 针对红外与可见光图像融合中边缘不清晰、细节缺失等问题, 提出了一种视觉显著性增强的双鉴别器融合方法。采用局部自适应对可见光图像进行增强, 并采用各向异性扩散对红外与可见光图像分解; 通过视觉显著性检测对分解后的细节层图像和基础层图像进行视觉增强; 设计密集连接 DenseNet 生成器模型对视觉增强后图像进行特征学习; 通过与双鉴别器博弈对抗得到融合结果。在公开数据集中与 10 种融合方法进行对比, 实验结果表明: 所提方法具有更清晰的细节信息, 在主客观评估上均优于对比方法, 客观评价指标较 FusionGAN 方法在信息熵、空间频率、结构相似性和标准偏差上分别提高了 7.4%、58.8%、25.5% 和 35.7%。

关键词: 红外与可见光图像融合; 视觉显著性增强; 各向异性扩散; 双鉴别器; 生成对抗网络
中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1107-09

红外辐射是不可见光, 红外热成像利用热辐射原理形成, 受天气、光照影响小, 但红外图像存在清晰度较低、边缘结构模糊等问题^[1]。而可见光图像通过反射可见光成像, 虽细节纹理较为丰富, 但在光照较弱条件下存在辨识度低的问题^[2]。融合图像能够吸收源图像中的互补特征, 并具有更好的视觉感知效果^[3], 可广泛应用于目标检测^[4]、遥感测量^[5]、医学分析^[6]、军事^[7]等领域。

目前, 红外与可见光图像融合方法分为传统方法和基于深度学习的融合方法。传统方法通过人工设计规则融合, 如多尺度变换^[8]、稀疏表示^[9]、各向异性扩散融合 (anisotropic diffusion fusion, ADF)^[10]、视觉显著映射和加权最小二乘 (visual saliency map and weighted least square, VSMWLS)^[11]、多尺度引导图像与视频融合 (multi-scale guided image and video fusion, MGF)^[12]、引导滤波增强 (guided filter context enhancement, GFCE)^[13] 等, 但该类方法固有的数学变换无法有效提取目标特征, 未能充分考虑源图像

之间的模态差异, 易出现边缘模糊、对比度不足等问题^[14]。

深度学习的融合方法^[15-17]通过特征学习进行融合增强。文献 [18] 提出了一种基于密集连接网络的融合方法来提高融合质量, 但该方法通过单尺度卷积提出精细特征能力有限, 融合后纹理细节信息缺失比较严重。文献 [19] 提出了一种生成对抗融合方法, 但该方法仅使用可见光进行博弈对抗, 忽略了红外图像所包含的目标信息, 导致融合后的图像目标边缘信息模糊。文献 [20] 提出了一种具有多分类约束的生成对抗网络, 但该方法采用特定的内容丢失来限制生成器对源图像特征的提取和处理, 导致融合图像特征提取不足, 融合后细节对比度低。文献 [21] 提出了一种多分辨率生成对抗融合网络, 但该方法存在模型训练易崩塌的问题, 导致最终的融合图像细节纹理易丢失。文献 [22] 提出了一种具有满量程跳跃连接和双马尔可夫鉴别器的生成对抗网络, 通过全尺寸跳跃连接生成器

收稿日期: 2024-01-31; 录用日期: 2024-05-28; 网络出版时间: 2024-08-29 09:37

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240828.1354.001

基金项目: 国家自然科学基金 (62462043, 61963023); 甘肃省自然科学基金 (26JRRAS589)

* 通信作者. E-mail: edukeylab@126.com

引用格式: 陈永, 周方春, 董珂. 视觉显著性增强的双鉴别器红外与可见光图像融合 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1107-1115.
CHEN Y, ZHOU F C, DONG K. Dual discriminator fusion of infrared and visible light images for visual saliency enhancement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1107-1115 (in Chinese).

与双马尔可夫鉴别器建立对抗博弈来实现图像融合,但马尔可夫鉴别器关注于图像局部信息,难以提取完整的全局信息,融合结果存在信息缺失的问题。

综上,针对融合后边缘不清晰、细节缺失等问题,本文提出了一种视觉显著性增强的双鉴别器融合方法。通过各向异性扩散分解和视觉显著性检测^[23]来对图像特征进行增强,并通过密集网络和跳跃连接级联的方式进行特征提取,设计双鉴别器博弈对抗完成融合输出,最终利用公开数据集与 10 种有代表性的方法比较,从主观、客观角度分析并验证本文方法的融合效果。

1 本文方法

为有效提升红外与可见光图像特征提取性能,获得更好的图像融合效果,本文方法基于生成对抗的思想进行图像融合网络的构建,如图 1 所示。本文融合模型由以下工作组成:首先,对可见光图像采用自适应对比度方法增强可见光图像边缘轮廓信息,并通过各向异性扩散将待融合图像分解为细节层和基础层;其次,利用显著性检测对分解后图像进行视觉增强;然后,设计生成器,并设计基于密集连接 DenseNet 的生成器对增强后图像进行特征提取;最后,通过与双鉴别器进行博弈对抗,输出最终的融合后图像。

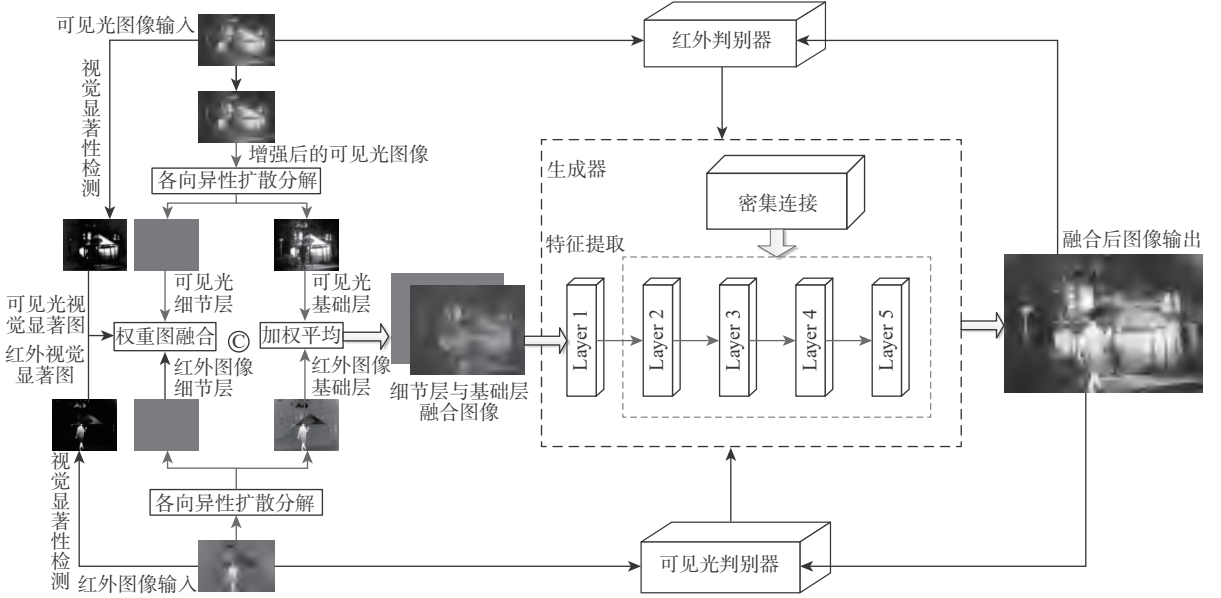


图 1 网络总体框架

Fig. 1 Overall network framework

1.1 红外与可见光图像分解

1.1.1 可见光图像增强

为增强可见光图像边缘轮廓细节信息,对可见光图像采用自适应对比度增强 (adaptive contrast enhancement, ACE) 算法^[24]进行可见光图像增强。对可见光图像分别计算像素局部均值与局部方差:

$$M_{\text{vis}}(i, j) = \frac{1}{(2n+1)(2m+1)} \sum_{s=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-m}^{j+m} f_{\text{vis}}(s, k) \quad (1)$$

$$\sigma(i, j) = \frac{1}{(2n+1)(2m+1)} \sum_{s=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-m}^{j+m} (f_{\text{vis}}(s, k) - M_{\text{vis}}(i, j))^2 \quad (2)$$

式中: $f_{\text{vis}}(s, k)$ 为坐标 (s, k) 的点像素值; $M_{\text{vis}}(i, j)$ 表示以点 (i, j) 为中心、大小为 $(2n+1) \times (2m+1)$ 区域的局部均值; $\sigma(i, j)$ 为局部的方差。

在求得局部均值与标准差后,就可以进行图像

增强,如下:

$$F_{\text{vis-ACE}}(i, j) = M_{\text{vis}}(i, j) + G(f_{\text{vis}}(i, j) - M_{\text{vis}}(i, j)) \quad (3)$$

$$G = \alpha \frac{\overline{M}_{\text{vis}}}{\sigma(i, j)} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (4)$$

式中: $F_{\text{vis-ACE}}(i, j)$ 为增强后像素值; $\overline{M}_{\text{vis}}$ 为 $M_{\text{vis}}(i, j)$ 在整个图像上的平均值,即全局均值; α 为系数。

1.1.2 各向异性扩散分解

在完成可见光图像增强的基础上,为避免红外与可见光图像未区分细节层和基础层直接融合,造成融合后出现边缘问题,本文采用各向异性扩散的方法,对待融合的红外与可见光图像分解后分别进行融合。各向异性扩散方程使用通量函数来控制原始图像的扩散,可以表示为

$$f_t = c(x, y, t) \Delta f + \nabla c \cdot \nabla f \quad (5)$$

式中: Δ 为拉普拉斯操作符; ∇ 为梯度操作符; t 为迭

代次数; $c(x, y, t)$ 为通量函数, 也称为扩散系数, 其控制扩散的程度; f 为图像灰度强度函数。

选择的非线性扩散系数为

$$c(|\nabla f|) = 1 / \left[1 + \left(\frac{|\nabla f|}{r} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: r 为常数, 可以调节扩散系数的大小, 从而控制各向异性扩散方程对于图像的平滑程度, r 值越大, 得到的图像越平滑, 但同时图像中的细节也更加模糊。

对式 (5) 进行求解的过程为

$$f_{i,j}^{t+1} = f_{i,j}^t + \lambda [c_N \bar{\nabla}_N f_{i,j}^t + c_S \bar{\nabla}_S f_{i,j}^t + c_E \bar{\nabla}_E f_{i,j}^t + c_W \bar{\nabla}_W f_{i,j}^t] \quad (7)$$

式中: $f_{i,j}^{t+1}$ 为较粗糙的图像; λ 为平滑系数; $\bar{\nabla}_N$ 、 $\bar{\nabla}_S$ 、 $\bar{\nabla}_E$ 、 $\bar{\nabla}_W$ 分别为北、南、东、西 4 个方向的最近邻差异; c_N 、 c_S 、 c_E 、 c_W 分别为北、南、东、西 4 个方向的扩散系数。

沿 4 个方向的局部图像梯度表示为

$$\bar{\nabla}_N f_{i,j} \equiv f_{i-1,j} - f_{i,j} \quad (8)$$

$$\bar{\nabla}_S f_{i,j} \equiv f_{i+1,j} - f_{i,j} \quad (9)$$

$$\bar{\nabla}_E f_{i,j} \equiv f_{i,j+1} - f_{i,j} \quad (10)$$

$$\bar{\nabla}_W f_{i,j} \equiv f_{i,j-1} - f_{i,j} \quad (11)$$

4 个方向扩散系数或通量函数可以表示为

$$c'_{N_{i,j}} = g(\|(\nabla f)_{i+1/2,j}^t\|) = g(\|\bar{\nabla}_N f_{i,j}^t\|) \quad (12)$$

$$c'_{S_{i,j}} = g(\|(\nabla f)_{i-1/2,j}^t\|) = g(\|\bar{\nabla}_S f_{i,j}^t\|) \quad (13)$$

$$c'_{E_{i,j}} = g(\|(\nabla f)_{i,j+1/2}^t\|) = g(\|\bar{\nabla}_E f_{i,j}^t\|) \quad (14)$$

$$c'_{W_{i,j}} = g(\|(\nabla f)_{i,j-1/2}^t\|) = g(\|\bar{\nabla}_W f_{i,j}^t\|) \quad (15)$$

式中: $g(\cdot)$ 为单调递减函数, 其为平滑和边缘保留之间提供权衡, 表达式为

$$g(\nabla f) = \begin{cases} \left| 1 - \frac{(\|\nabla f\|)^2}{K^2} \right|^2 & (\|\nabla f\|)^2 \leq K^2 \\ 0 & (\|\nabla f\|)^2 > K^2 \end{cases} \quad (16)$$

其中: K 为边缘导热系数。

上述各向异性扩散方法可以用 $\text{aniso}(f_n(x, y))$ 来表示, 通过边缘保持平滑的各向异性扩散过程来获得基础层 B_n 后, 细节层 D_n 的计算方法如下:

$$f_{B_n}(x, y) = \text{aniso}(f_n(x, y)) \quad (17)$$

$$f_{D_n}(x, y) = f_n(x, y) - f_{B_n}(x, y) \quad (18)$$

设原始红外图像与增强后的可见光图像分布为 f_{ir} 和 $F_{\text{vis-ACE}}$, 经过各向异性扩散分解, 则可以获得对应的基础层 $F_{\text{ir}}^B(x, y)$ 和 $F_{\text{vis}}^B(x, y)$ 如下:

$$\begin{cases} F_{\text{ir}}^B(x, y) = \text{aniso}(f_{\text{ir}}(x, y)) \\ F_{\text{vis}}^B(x, y) = \text{aniso}(F_{\text{vis-ACE}}(x, y)) \end{cases} \quad (19)$$

分解后对应的细节层图像计算如下:

$$\begin{cases} F_{\text{ir}}^D(x, y) = f_{\text{ir}} - F_{\text{ir}}^B(x, y) \\ F_{\text{vis}}^D(x, y) = F_{\text{vis-ACE}} - F_{\text{vis}}^B(x, y) \end{cases} \quad (20)$$

1.2 图像融合策略

经过上述分解操作后, 采用视觉显著性检测方法进行视觉显著性增强并进行融合操作。

1.2.1 改进视觉显著性检测模型

视觉显著性检测频率调谐 (frequency-tuned, FT) 方法是一种从频率角度出发, 利用颜色和亮度特征输出具有清晰对象边界的方法^[25]。FT 显著性检测为了消除高频噪声干扰, 使用 5×5 高斯核, 获取显著图, 计算公式为

$$S(x, y) = \|I_\mu - I_{\text{whc}}(x, y)\| \quad (21)$$

式中: I_μ 为算术平均特征向量; $I_{\text{whc}}(x, y)$ 为高斯模糊后像素值。

但原始 FT 方法利用高斯模糊滤波器, 易出现模糊的问题。为克服上述不足, 本文采用引导滤波器对原始 FT 显著性检测进行改进。引导滤波器是线性移变滤波器, 单个像素经过滤波输出的加权平均值表示为

$$q_i = \sum_j W_{ij}(\mathbf{I}) p_j \quad (22)$$

式中: i 和 j 为像素位置; W_{ij} 为滤波核函数; $\mathbf{I}$ 为引导图像; p 、 q 分别为输入、输出图像。

滤波核函数的表达式为

$$W_{ij}(\mathbf{I}) = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{h(i,j) \in \omega_k} \left[1 + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \right] \quad (23)$$

式中: ω 为窗口内的像素个数; ω_k 为第 k 个核函数窗口; μ_k 和 σ_k^2 分别为引导图像 $\mathbf{I}$ 在窗口内的均值和方差; ε 为平滑因子。

本文利用引导滤波对其进行改进:

$$S(x, y) = \|I_\mu - I_{\text{Guided}}(x, y)\| \quad (24)$$

式中: $I_{\text{Guided}}(x, y)$ 为引导滤波后的输出。

1.2.2 细节层和基础层融合

为突出融合图像的细节信息, 本文对权重图进行归一化处理, 其构建方法如下:

$$C_{\text{vis}}^D(x, y) = \frac{S_{\text{vis-ACE}}(x, y)}{S_{\text{vis-ACE}}(x, y) + S_{\text{ir}}(x, y)} \quad (25)$$

$$C_{\text{ir}}^D(x, y) = \frac{S_{\text{ir}}(x, y)}{S_{\text{vis-ACE}}(x, y) + S_{\text{ir}}(x, y)} \quad (26)$$

式中: C_{vis}^D 和 C_{ir}^D 分别为 F_{vis}^D 和 F_{ir}^D 所对应的权重图; $S_{\text{vis-ACE}}$ 和 S_{ir} 分别对应增强后的可见光和红外显著图。

利用权重图进行加权融合得到细节图 F_{fused}^D :

$$F_{\text{fused}}^D = C_{\text{ir}}^D F_{\text{ir}}^D + C_{\text{vis}}^D F_{\text{vis}}^D \quad (27)$$

采用平均相加融合规则得到融合图像的基础层 F_{fused}^B , 计算如下:

$$F_{\text{fused}}^B = \frac{1}{2} (F_{\text{vis}}^B + F_{\text{ir}}^B) \quad (28)$$

1.2.3 生成器的网络模型

完成细节层和基础层融合后, 通过生成对抗网络完成图像融合。本文设计的生成器如图2所示。

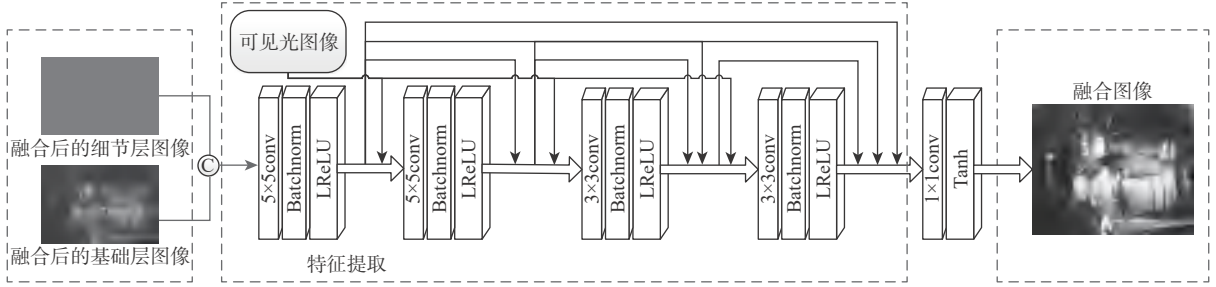


图2 生成器结构框架

Fig. 2 Network structure of generator

1.2.4 鉴别器的网络架构

在完成生成器设计后, 采用红外与可见光双鉴别器, 其均分别由4个卷积层级联1个全连接层组成。在前4层均使用LReLU函数, 最终通过线性层输出一个标签, 以获得分类结果, 表示输入图像是真实图像或融合图像。

1.2.5 损失函数

损失函数 L_G 包括多对抗性损失 L_{adv} 和内容损失 L_{con} , 可表示为

$$L_G = L_{\text{adv}} + \nu L_{\text{con}} \quad (29)$$

式中: ν 为平衡系数。

$$L_{\text{adv}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^N (D_i(F_{\text{fused}}^n) - a)^2 \quad (30)$$

式中: N 为融合图像的数量; F_{fused}^n 为融合图像; $D_i(\cdot)$ 表示鉴别器分类结果; a 为生成器希望鉴别器能相信的虚假数据值。

式(29)中内容损失函数^[22] 定义为

$$L_{\text{con}} = \frac{1}{HW} (\|F_{\text{fused}} - f_{\text{ir}}\|_F^2 + \xi \|\nabla F_{\text{fused}} - \nabla f_{\text{vis}}\|_F^2) \quad (31)$$

式中: H 为图像的高; W 为图像的宽; F_{fused} 为融合图像; ξ 为平衡参数。

本文设计的双鉴别器损失函数可表示为

$$L_{D-\text{ir}} = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (D_{\text{ir}}(f_{\text{ir}}) - b)^2 + \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (D_{\text{ir}}(F_{\text{fused}}) - d)^2 \quad (32)$$

示。其中, 生成器是具有密集块的5层卷积神经网络, 对视觉显著性增强后的细节层和基础层图像进行特征提取。第1层和第2层均使用 5×5 卷积, 第3层和第4层使用 3×3 卷积减少网络参数, 第5层采用 1×1 卷积核将串联特征降维, 实现特征融合。第1~5层形成了一个密集块卷积层, 每层中的步幅长度设置为1。为保留图像更多的有效信息, 引入密集网^[21] 的思想构造生成器模型。通过连接和卷积的方法, 将前一层的信息输出连接在一起, 作为下一个卷积层的输入。

$$L_{D-\text{vis}} = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (D_{\text{vis}}(f_{\text{vis}}) - c)^2 + \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (D_{\text{vis}}(F_{\text{fused}}) - d)^2 \quad (33)$$

式中: b 、 c 、 d 分别为红外图像、可见光图像、融合图像的真值数据。

2 实验结果与分析

2.1 实验设置与环境

本节进行不同方法的对比实验, 选取公共红外与可见光融合 TNO 数据集, 实验的仿真平台配置 Inter(R) Core i7, 3.6 GHz, 16 GB, NVIDIA GeForce GTX 1660, 操作系统 Windows10, 软件环境为 python3.6, 网络训练环境 Tensorflow1.12。参数优化器选择 Adam, 学习率设置为 0.001, epoch 设置为 100, 损失函数参数设置为: $\lambda_1=0.1$ 、 $\xi_1=2$ 、 $\xi_2=5$ 。

为验证本文方法的有效性, 将其与 10 种融合方法比较。对比方法选择的主要依据如下: 因本文方法主要涉及红外与可见光图像分解、视觉显著性增强及生成对抗深度学习融合 3 种主要技术, 因而从上述 3 个角度选择了 10 种同类比较方法。其中, 在图像分解层面选择了 ADF^[10] 方法, 该方法通过使用各向异性扩散将原始图像进行分解生成基础层和细节层, 来提高图像融合质量。在视觉显著性增强角度, 主要选择 VSMWLS^[11]、MGF^[12]、二维经验模态分解 (bidimensional empirical mode decomposition, BEMD)^[23] 3 种显著性增强方法, 方法均使用视

觉显著性方法来增强融合图像的信息获取能力。在生成对抗深度学习角度,选择包括 GFCE 方法^[13]、多分类约束的 GAN 网络 (generative adversarial network with multiclassification constraints, GANMcC)^[20]、双鉴别器 GAN 融合 (dual-discriminator conditional generative adversarial network, DDcGAN)^[21]、具有满量程跳跃连接和双马尔可夫生成对抗融合 (generative adversarial network with full-scale skip connection and dual Markovian discriminator, GAN-FM)^[22]、密集连接网络 DenseFuse^[18] 和基于生成对抗网络的图像融合 FusionGAN^[19] 等 6 种方法,其主要以生成对抗网络和密集连接网络为主完成融合。在对比实验中,通过与上述代表性的图像分解、视觉显著性增强、生成对抗深度学习方法进行对比,更好地对本文方法进行主客观评价分析。

2.2 融合图像主观评价

为进行不同融合方法的主观评价,从 TNO 数据集中选取 6 组不同场景进行对比实验,并深入验证其不同关键技术路径上的有效性,本文设计了

2 组不同的对比实验。第 1 组实验选取图像分解层面和视觉显著性增强角度与本文方法进行比较,如图 3 所示。第 2 组实验以生成对抗与深度学习核心维度,与所选的代表性方法进行针对性比对。如图 4 所示。不仅能够展示本文方法在融合结果上的整体优越性,更能清晰剖析其性能增益的具体技术来源,从而提供全面而深入的性能评估。

为进行不同融合方法的主观评价,从 TNO 数据集中选取 6 组不同场景进行对比实验,图 3 和图 4 给出了 6 组图像的主观对比结果。为能更加直观地观察,对图像中信息进行标注,从图 3 和图 4 中可以看出,DDcGAN 方法融合图像出现红外目标模糊、细节纹理信息保留较差且有严重的噪声现象。ADF、GFCE、GAN-FM 和 DenseFuse 方法结果相比于 DDcGAN 结果包含了较为清晰的轮廓信息,但仍存在部分细节不清晰的问题。如图 3 中红框所示,ADF 方法融合结果中,第 1 组图像的人物纹理模糊和第 5 组的窗户轮廓不清晰。GFCE 方法第 3 组汽车轮胎细节信息缺失,在图 4 中,GAN-FM 方



图 3 图像分解层面和视觉显著性增强角度融合方法比较

Fig. 3 Comparison of image decomposition and visual saliency enhancement fusion methods



图 4 生成对抗与深度学习融合方法比较

Fig. 4 Comparison of generative adversarial and deep learning fusion methods

法融合结果中第 3 组结果中树木和第 5 组结果中存在警示牌丢失部分细节、纹理信息的现象。在图 3 中, MGF 方法融合结果中第 2 组图像右侧边缘出现了细节信息丢失的问题, 整体画面对比度较弱。文献 [23] 的 BEMD 方法相对于 MGF 方法融合效果有所提升, 但在融合后轮廓信息存在清晰度低的问题, 如第 3 组图像中窗户边缘不够清晰。在图 4 中, DenseFuse 方法融合结果中第 1 组图像中草丛和第 5 组图像中窗户轮廓细节缺失。在图 3 中, VSMWLS 方法也出现了部分细节纹理缺失的问题, 如第 6 组中草丛与地面的轮廓不清晰, 对比度不明显。在图 4 中, GANMcC 方法和 FusionGAN 方法通过生成对抗网络进行融合, 其结果主要体现了可见光的信息, 但对于红外特征存在融合后信息缺失较多的问题。与比较方法相比, 本文方法既保留了红外目标的显著性信息, 又包含了丰富的可见光细节特征, 具有较好的融合效果。

2.3 融合图像客观评价

为增强实验的准确性和客观性, 选取信息熵、互信息、结构相似性 (structural similarity index measure, SSIM)、标准偏差、空间频率、视觉保真度等 6 种客

观评价指标对融合效果进行对比分析。指标数值越大, 融合图像质量越好。对 TNO 实验进行定量分析, 如表 1 所示。可以发现, 信息熵、SSIM、标准偏差和空间频率这 4 个客观评价指标均优于其他方法。本文方法的空间频率指标相对于 FusionGAN 方法提高了 58.8%, 图像中边缘和纹理信息更加清晰。同时, 信息熵、SSIM 和标准偏差指标也优于 FusionGAN 方法, 分别提高了 7.4%、25.5% 和 35.7%。对于图像的互信息和视觉保真度, 虽然在所有对比方法中无法达到最佳, 但相对于 FusionGAN 方法, 都有不同程度的提高。与比较方法相比, 本文融合主客观评价均优于比较方法。

2.4 消融实验

本节进行消融实验, 分别为: ①仅以生成对抗网络模型进行融合; ②ACE 算法增强生成对抗网络模型 (ACE+GAN); ③增强图像各向异性分解生成对抗网络模型 (AD+ACE+GAN); ④增强图像各向异性分割密集连接生成双对抗网络模型 (AD+ACE+DenseGAN)。以 TNO 数据集图像 “Street” 为例进行主观对比, 如图 5 所示。可以看出, 仅以 GAN 模型实验结果模糊不清, 融合结果较差; ACE

表 1 TNO 客观对比值

Table 1 Objective comparison value of TNO

方法	信息熵	互信息	SSIM	标准偏差	空间频率	视觉保真度
ADF ^[10]	7.161 7	0.688 3	0.503 0	38.450 6	0.031 8	0.707 5
VSMWLS ^[11]	7.174 8	0.659 0	0.624 8	40.063 5	0.032 3	0.740 1
GFCE ^[13]	7.161 3	0.688 3	0.503 0	36.403 6	0.043 6	0.724 1
MGF ^[12]	7.255 3	0.693 2	0.612 3	41.847	0.031 1	0.492 4
BEMD ^[23]	7.324 1	0.762 3	0.653 8	48.032 4	0.035 39	0.562 4
GANMcC ^[20]	7.396 0	0.772 5	0.605 3	42.572 9	0.039 5	0.585 3
DDcGAN ^[21]	6.632 4	0.567 4	0.442 3	31.436 7	0.025 6	0.464 0
GAN-FM ^[22]	7.665 4	0.452 5	0.436 5	52.546 6	0.038 3	0.720 6
DenseFuse ^[18]	7.136 0	0.677 0	0.547 4	35.75	0.030 9	0.652 1
FusionGAN ^[19]	7.337 4	0.642 4	0.537 0	40.354 6	0.031 1	0.530 5
本文	7.878 7	0.693 8	0.674 0	54.757 3	0.049 4	0.735 8

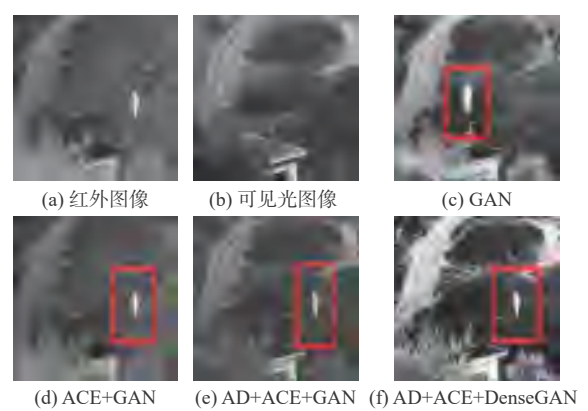


图 5 消融实验结果

Fig. 5 Results of ablation experiments

算法增强提高了清晰度;增强图像各向异性分解生成对抗网络模型融合结果改善了上述问题,但融合后结果依然存在模糊的现象;本文方法融合结果纹理信息更丰富。

选取 SSIM 和平均梯度进行量化评价,结果如表 2 所示。可以看出,各模块对最终融合性能提升均有所贡献,表明了提出的视觉显著性增强的双鉴别器红外与可见光图像融合方法的有效性。

表 2 消融实验客观指标

Table 2 Objective indicators of ablation experiment

模块	SSIM	平均梯度
GAN	0.694 4	2.084
ACE+GAN	0.757 2	2.719
AD+ACE+GAN	0.814 0	3.104
AD+ACE+DenseGAN	0.838 6	3.592

2.5 复杂度及效率分析

对模型复杂度和效率进行比较分析。与 ADF^[10]、VSMWLS^[11]、DenseFuse^[18]、FusionGAN^[19] 进行比较,结果如表 3 所示。分析得知,ADF 方法通过对图像

进行分解、融合,网络简单,因此,其计算量和运行时间在 5 种方法中最小,但从表 1 主客观评价可知,该方法融合效果较差。VSMWLS 方法采用迭代引导滤波算法对原始图像进行迭代多次,利用视觉显著映射算法,计算权重,最终进行图像融合,相比 ADF 方法能获取更多的图像细节、纹理信息,其计算开销较小。从表 3 可以看出,本文方法计算量及运行时间相较于 DenseFuse 和 FusionGAN 方法均有所减少,但其计算量和运行时间都高于 VSMWLS 方法。结合表 1 和表 3 可以得出,本文融合主客观评价虽然相较于其他 10 种对比方法取得了更好的融合效果,但从表 3 可知,本文方法在实时性方面还存在一定的不足。红外与可见光融合系统在实际应用时,会涉及具体的硬件设备和融合软件系统的部署,其对实时性、小型化及功耗都有相应的要求。本文方法目前仅从显著性增强及双鉴别器对抗技术方面来提高融合质量,在未来融合系统部署时,为了满足融合系统对实时性的要求,需要对本文方法进一步优化。主要优化提升措施有:模型轻量化与硬件并行化加速。在模型轻量化方面,对于本文模型,可以采用通道剪枝的策略,对生成网络冗余的权重参数进行剪枝,达到模型轻量化的目的,并在剪枝后采用参数微调的方法维持性能。此外,还可以采用知识蒸馏迁移学习的策略,通过利

表 3 计算量和运算时间

Table 3 Computational amount and processing time

方法	浮点运算速度/ 10^9 s^{-1}	运行时间/s
ADF ^[10]	2.874	0.786
VSMWLS ^[11]	3.024	0.793
DenseFuse ^[18]	3.592	0.881
FusionGAN ^[19]	3.648	0.867
本文	3.153	0.853

用教师-学生知识蒸馏机制, 重构本文深度学习模型, 以便轻量化后更适合硬件部署场景。在硬件并行加速方面, 后续研究中也将会进一步结合硬件加速技术来提高融合系统的实时性。例如, 采用边缘计算技术, 将嵌入式设备边缘计算推理任务在本地完成, 而红外与可见光融合操作在边缘端完成来提高融合的实时性。利用并行计算技术, 将融合处理任务采用分治法的算法思想, 分解成多个融合子任务, 通过对 FPGA 加速融合处理来提高实时性。

3 结 论

- 1) 本文提出了一种视觉显著性增强的双鉴别器红外与可见光图像融合方法, 通过各向异性扩散分解图像, 并利用视觉显著性检测方法分别增强细节层和基础层。
- 2) 通过设计密集连接 DenseNet 生成器进行特征提取, 并通过双鉴别器博弈对抗得到最好的融合结果。
- 3) 实验结果表明, 较其他对比方法, 本文方法客观评价指标都有所提高。较 FusionGAN 方法, 信息熵、空间频率、结构相似性和标准偏差分别提高了 7.4%、58.8%、25.5% 和 35.7%, 结果表明, 本文方法融合后细节信息更丰富, 有效提高了融合性能。

参考文献 (References)

[1] 陈永, 王镇, 卢晨涛, 等. 红外弱光下多特征融合与注意力增强铁路异物检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 1884-1894.
CHEN Y, WANG Z, LU C T, et al. Detection of railway object intrusion under infrared low light based on multi-feature and attention enhancement network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 1884-1894(in Chinese).

[2] GONZÁLEZ J R, DAMIÃO C, MORAN M, et al. A computational study on the role of parameters for identification of thyroid nodules by infrared images (and comparison with real data)[J]. Sensors, 2021, 21(13): 4459.

[3] MA J Y, MA Y, LI C. Infrared and visible image fusion methods and applications: a survey[J]. Information Fusion, 2019, 45: 153-178.

[4] TU Z Z, LI Z, LI C L, et al. Multi-interactive dual-decoder for RGB-thermal salient object detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 5678-5691.

[5] XIAO W X, ZHANG Y F, WANG H B, et al. Heterogeneous knowledge distillation for simultaneous infrared-visible image fusion and super-resolution[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5004015.

[6] DINH P H. Combining Gabor energy with equilibrium optimizer algorithm for multi-modality medical image fusion[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2021, 68: 102696.

[7] 陈永, 张娇娇, 王镇. 多尺度密集连接注意力的红外与可见光图像融合[J]. 光学精密工程, 2022, 30(18): 2253-2266.
CHEN Y, ZHANG J J, WANG Z. Infrared and visible image fu-

sion based on multi-scale dense attention connection network[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(18): 2253-2266(in Chinese).

[8] WANG Z S, XU J W, JIANG X L, et al. Infrared and visible image fusion via hybrid decomposition of NSCT and morphological sequential toggle operator[J]. Optik, 2020, 201: 163497.

[9] 娄熙承, 冯鑫. 潜在低秩表示框架下基于卷积神经网络结合引导滤波的红外与可见光图像融合[J]. 光子学报, 2021, 50(3): 0310004.
LOU X C, FENG X. Infrared and visible image fusion in latent low rank representation framework based on convolution neural network and guided filtering[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3): 0310004(in Chinese).

[10] VASU G T, PALANISAMY P. Multi-focus image fusion using anisotropic diffusion filter[J]. Soft Computing, 2022, 26(24): 14029-14040.

[11] MA J L, ZHOU Z Q, WANG B, et al. Infrared and visible image fusion based on visual saliency map and weighted least square optimization[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 82: 8-17.

[12] BAVIRISSETTI D P, XIAO G, ZHAO J H, et al. Multi-scale guided image and video fusion: a fast and efficient approach[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2019, 38(12): 5576-5605.

[13] ZHOU Z Q, DONG M J, XIE X Z, et al. Fusion of infrared and visible images for night-vision context enhancement[J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6480-6490.

[14] SUN C Q, ZHANG C, XIONG N X. Infrared and visible image fusion techniques based on deep learning: a review[J]. Electronics, 2020, 9(12): 2162.

[15] LI J, ZHU J M, LI C, et al. CGTF: convolution-guided Transformer for infrared and visible image fusion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5012314.

[16] WANG Z S, WANG J Y, WU Y Y, et al. UNFusion: a unified multi-scale densely connected network for infrared and visible image fusion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2022, 32(6): 3360-3374.

[17] LI H, WU X J, KITTLER J. RFN-Nest: an end-to-end residual fusion network for infrared and visible images[J]. Information Fusion, 2021, 73: 72-86.

[18] LI H, WU X J. DenseFuse: a fusion approach to infrared and visible images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(5): 2614-2623.

[19] MA J Y, YU W, LIANG P W, et al. FusionGAN: a generative adversarial network for infrared and visible image fusion[J]. Information Fusion, 2019, 48: 11-26.

[20] MA J Y, ZHANG H, SHAO Z F, et al. GANMcC: a generative adversarial network with multiclassification constraints for infrared and visible image fusion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 5005014.

[21] MA J Y, XU H, JIANG J J, et al. DDcGAN: a dual-discriminator conditional generative adversarial network for multi-resolution image fusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 4980-4995.

[22] ZHANG H, YUAN J T, TIAN X, et al. GAN-FM: infrared and visible image fusion using GAN with full-scale skip connection and dual Markovian discriminators[J]. IEEE Transactions on Computa-

ational Imaging, 2021, 7: 1134-1147.

[23] 崔晓荣, 沈涛, 黄建鲁, 等. 基于 BEMD 改进的视觉显著性红外和可见光图像融合[J]. 红外技术, 2020, 42(11): 1061-1071.

CUI X R, SHEN T, HUANG J L, et al. Infrared and visible image fusion based on BEMD and improved visual saliency[J]. Infrared Technology, 2022, 42(11): 1061-1071(in Chinese).

[24] YE X Y, GAO S L, LI F M. ACE-STDN: an infrared small target detection network with adaptive contrast enhancement[J]. Journal of Infrared Millim Waves, 2023, 42(5): 701-708.

[25] JOO M G, LEE K T, SANG P, et al. Laser-generated focused ultrasound transmitters with frequency-tuned outputs over sub-10-MHz range[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(15): 154103.

Dual discriminator fusion of infrared and visible light images for visual saliency enhancement

CHEN Yong^{1, 2, *}, ZHOU Fangchun¹, DONG Ke¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Gansu Provincial Engineering Research Center for Artificial Intelligence and Graphics & Image Processing, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to solve the problem of unclear edges and missing details in infrared and visible light image fusion, a saliency enhanced dual discriminator generation adversarial infrared and visible light image fusion method is proposed. First, infrared and visible light images are broken down using anisotropic diffusion, while visible light images are improved using local adaptation. Then, visual saliency detection is used to visually enhance the decomposed detail layer image and the base layer image. Next, a dense connected DenseNet generator model is designed to perform feature learning on visually enhanced images. Finally, the fusion result is obtained by competing with the dual discriminator game. Experimental results demonstrate that the suggested approach has more precise information and performs better than the comparison algorithm in both subjective and objective assessments when compared to ten fusion techniques in a public dataset. Compared with the FusionGAN algorithm, the proposed method has improved objective evaluation indicators such as information entropy, spatial frequency, structural similarity, and standard deviation by 7.4%, 58.8%, 25.5%, and 35.7%, respectively.

Keywords: infrared and visible light image fusion; visual saliency enhancement; anisotropic diffusion; dual-discriminator; generate adversarial network

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0018

基于语义分割的页岩孔隙结构智能表征方法

刘茜, 任义丽*, 汪文洁, 黄睿琦, 苏乾潇

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘 要: 页岩孔隙类型和结构参数影响储层流体的富集和运移, 是页岩储层评价的重要内容。现有评价方法存在主观性强、效率低及量化程度低等问题, 难以满足快速、精准分析页岩样品的迫切需求。基于此, 提出一种基于语义分割的页岩孔隙结构智能表征方法。利用扫描电子显微镜 (SEM) 和多尺度采集与处理软件 (MAPS) 获取页岩二维灰度图像; 由岩矿鉴定专家进行数据标注, 分为有机孔、无机孔、裂缝和有机质; 提出一种面向页岩孔隙结构分析任务的组合网络 ShaleSeger 及其训练范式, 建立基于深度学习的页岩孔隙智能识别模型, 形成基于多视域拼接的超大尺寸图像孔隙识别方案, 从而实现基于 MAPS 图像的孔隙提取; 利用图像处理技术实现孔隙结构特征智能表征。目前已实现古龙页岩孔隙结构定量分析, 能够在孔隙边缘提取和类型识别的基础上自动计算各类型孔隙的面积占比, 统计诸如孔径、视孔隙比表面、形状因子等孔隙结构参数。所提方法可以拓展应用于 CO₂ 复合压裂效果评估, 对 CO₂ 复合压裂前后的微观结构特征改变进行定量比较。

关 键 词: 致密页岩油; 微纳米; 孔隙结构; 扫描电镜; 古龙页岩

中图分类号: P583; O235

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1116-13

孔隙结构特征能够直接体现储层油量的大小及储层油量的分布情况, 不仅影响着油气的运移和聚集, 而且在一定程度上影响着油气采收率, 对页岩油的预测和储层的评价具有重要意义。与常规储层相比, 页岩储层的孔隙结构更为复杂, 孔隙类型更为多样。

根据实验过程与方法的不同, 传统储层孔隙结构分析技术可分为人工观察描述和物理模型实验 2 大类型。其中, 人工观察描述是指专家采用光学显微镜、扫描电子显微镜 (canning electron microscopy, SEM) 等技术手段, 直观描述储层孔隙的几何形态等结构参数。该方法存在着主观性强、工作量大及量化程度低的问题。物理模型实验方法的技术手段一般包括压汞实验、气体吸附、核磁共振等方法。其中, 压汞实验法存在试剂毒性和实验过程中

可能会造成人工裂隙的问题; 气体吸附法主要用于测定微孔, 存在一定的局限性; 核磁共振法不能分辨孔隙的不规则形态和微孔。

综合考虑页岩孔隙的特点, 图像观察法在页岩微观分析中最为常用。利用 SEM 和多尺度采集与处理软件 (multi-scale acquisition and processing software, MAPS) 可以直接观察页岩微观组分的分布与形态, 是目前分析页岩储层最有效的途径。虽然显微设备目前已经达到很高的技术水平, 可以实现纳米级的分析, 然而分析技术仍然停留在半人工的阶段, 行业专家结合知识和经验利用诸如 Avizo、ImageJ 等图像处理软件实现。

现有图像处理软件大都是基于传统图像处理算法实现的, 如阈值分割、分水岭、二维直方图分割等。其中, 阈值分割法是页岩孔隙提取中最为常

收稿日期: 2024-01-11; 录用日期: 2024-02-23; 网络出版时间: 2024-04-10 11:30

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240408.1803.002

基金项目: 国家自然科学基金 (42372175)

*通信作者. E-mail: renyili@petrochina.com.cn

引用格式: 刘茜, 任义丽, 汪文洁, 等. 基于语义分割的页岩孔隙结构智能表征方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1116-1128.
LIU X, REN Y L, WANG W J, et al. Intelligent representation method of shale pore structure based on semantic segmentation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1116-1128 (in Chinese).

用的算法,但由于其固有缺陷,容易出现过分割和欠分割;分水岭算法基于图像的梯度实现,认为图像像素极值点(变化明显的地方)就是边缘,但往往一张图片会有很多极值区域存在,容易造成图像过度分割;二维直方图分割算法结合了灰度和空间信息使分割精度提高,但计算复杂度急剧增加,并且传统二维直方图分割算法对噪声和边缘像素的处理不够准确。在上述算法中,合理选取图像特征和恰当的分割参数至关重要,决定了图像分割精度和效率。由于上述算法需要复杂的交互设置与参数调整过程,对专家依赖度高,且与鉴定结果的精准度直接相关,不能实现样本数据的批量处理。而且,基于上述算法的分割无法实现语义信息的提取,不能直接实现微观组分间(如有机孔、无机孔、裂缝)类型的区分。

随着人工智能新技术的蓬勃发展,深度学习技术已越来越多地应用到岩石图像的处理中^[1-7],并在储层孔隙分析中取得了一定的研究进展。廖广志等^[8]利用压汞毛管压力数据,提出基于单层卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和双层卷积神经网络来预测储层微观孔隙结构的方法。陈雁等^[9]利用语义分割全卷积神经网络 FLU-net,并结合孔隙尺度分类统计方法,对页岩孔隙识别并分析孔径大小、孔隙度等参数,实现页岩储层微观孔隙结构的自动化定量表征。Yu 等^[10]以 SEM 采集到的砂岩图像为训练数据集,提出一种基于语义图像分割网络模型进行分析孔隙特征的技术方法,解决了传统图像识别方法无法获得 SEM 图像的完整孔隙空间特征、分割效果差、准确率低等局限性,提高了岩石样品孔隙识别的准确性。Zhang 等^[11]以 X 射线计算机体层成像(computed tomography, CT)切片为数据集,采用改进的掩码区域卷积神经网络(mask region-based convolutional neural network, Mask R-CNN)算法训练孔隙识别模型,该模型在孔隙分割和识别上具有较好的收敛性和准确性。陈宗铭等^[12]针对牛蹄塘组页岩 2 000 余张离子抛光 SEM 图像,基于 Mask R-CNN、全卷积神经网络(fully convolutional network, FCN)及 U-Net 这 3 种深度学习模型对图像数据集进行孔隙结构参数研究,实验结果表明:基于深度学习 U-Net 模型的训练集准确率达到 89.5%。毕飞宇等^[13]通过聚焦离子束采集 58 张高分辨率数字岩心扫描电镜图像,利用基于深层卷积神经网络模型对页岩储层的孔隙类型进行了自动智能检测。蔡宇恒等^[14]以高清显微相机采集到的铸体图像为数据集,构建基于 U-net 模型的孔隙区域自动提取算法,较好、较完整地

提取出图像的孔隙区域。王庆等^[15]利用高分辨率数码相机采集 189 个碳酸盐岩孔洞作为训练样本,以 Mask R-CNN 为基础,提出基于多尺度区域卷积神经网络孔洞检测新方法。

虽然上述方法已经实现了基于分割网络的孔隙识别,但是将其应用于页岩孔隙结构识别领域仍面临巨大挑战。页岩孔隙结构识别任务具有“数据特殊性”和“场景特殊性”,如通用算法通常对于小目标的定义是占比 3% 以下,页岩孔隙占比通常为 0.3% 以下,通用小目标分割算法无法直接适用,亟须针对页岩孔隙结构识别任务研发专用智能识别算法。在此背景下,本文深入分析页岩孔隙的特点,研发了适用于页岩孔隙结构识别的组合网络 ShaleSeger,实现无机孔、有机孔、裂缝、有机质 4 类页岩组分的识别分析,并基于拼接技术形成超大尺度页岩 SEM 成像孔缝识别方案,并基于此计算孔隙度等结构特征参数,从而实现微观结构的自动识别分析,助力储层评价。

1 图像语义分割

1.1 图像语义分割技术

语义分割不区分物体每个实例,而是对图像中的每个像素预测其对应的类别,即像素级的分类。由于在页岩孔隙分析中联通的孔隙可视为同一个孔隙,因此,基于扫描电镜的页岩油孔缝识别是典型的语义分割场景。

FCN^[16]是语义分割网络的奠基之作,其基于上采样和反卷积实现高分辨率特征图的提取与像素级的分类。之后的数年中,研究人员关注模型架构的精妙设计,从编解码结构、特征工程、多尺度处理、空洞卷积等多个方面不断优化。SegNet^[17]将自编码器结构引入语义分割领域的模型;U-Net^[18]利用编码器-解码器结构实现语义分割;目标上下文表征网络(object contextual representations networks, OCRNet)^[19]利用目标区域特征增强其像素表示的方法获得了更好的特征表示;DeepLabv1^[20]将空洞卷积和条件随机场融入网络。DeepLabv3^[21]通过级联或并行多个不同大小的空洞卷积实现多尺度背景的捕获;金字塔场景解析网络(pyramid scene parsing networks, PSPNet)^[22]利用金字塔池化模块实现不同区域上下文信息的提取。

Transformer 是自然语言处理领域得到广泛应用的方法,Vit^[23]网络将其引入计算机视觉领域,实现图像到语义向量的转换,并取得了优异的效果。Transformer 在上下文建模中具有独到的优势,运用注意力机制来获取内容之间交互的信息,具有较

CNN 有更大的感受野和对长距离依赖关系学习的能力。SETR^[24] 使用 Transformer 编码器替换 CNN 的骨干网络,在每层中都进行全局上下文建模。Segformer^[25] 使用有重叠的语义块划分保证了局部的连续性,使用混合前馈网络(mix feed-forward networks, Mix FFN)替代位置编码,并设计轻量级的解码器实现语义分割。Transformer 技术在图像语义分割中的应用具有里程碑式的意义,使得网络性能进一步提升,并衍生出更多更好更精炼的模型架构。

1.2 半监督学习策略

深度学习模型训练是一个通过训练迭代,寻找最佳的拟合函数和最佳的泛化函数的过程,标注数据不足会导致模型过拟合。页岩油岩心样本获取成本高,可以获取的扫描电镜图像有限。同时,有机质孔、无机质孔、有机质、裂缝的标注需要丰富的专家经验,标注成本高,可供深度学习模型训练的标注数据少。因此,如何充分利用未标注数据来解决页岩油孔隙结构分析过程中面临的“小样本”问题是本文要解决的主要难题。半监督学习是一种综合利用标注样本和无标注样本进行训练提升模型性能的方法,其在语义分割中的应用可以分为 2 类:基于一致性正则化的半监督方法和基于熵最小化的半监督方法。

基于一致性正则化的半监督语义分割在分割损失之外增加了一致性损失,用于测量未标注数据的分割结果,并使其靠近某一种约束。具体为对于有标签的数据照常计算分割损失并用于网络训练,对于无标签的数据进行数据增强和扰动,并给其增加约束,使得其输出不发生改变。Ouali 等^[26] 通过对特征增加扰动,并计算均方误差损失,通过交叉一致性训练实现了半监督语义分割;Liu 等^[27] 在训练中使用平均教师的网络架构,通过指数移动平均值(exponential moving average, EMA)的方式更新教师网络,增加弱扰动和强扰动的未标注数据分别输入教师和学生网络,并在之间计算带权值的交叉熵损失,从而将无标签数据引入网络训练;Lai 等^[28] 聚焦于同一物体在不同上下文的一致性,对于无标签数据有重叠的裁剪同一张图的不同部分,重叠区域的特征具有一致性,通过改进后的损失函数让置信度低的特征向着置信度高的特征学习。

基于熵最小化的半监督语义分割对有标签数据的训练方式不变,无标签数据的训练通过伪标签实现,目的在于使网络对于无标签数据的预测更有信心。Hung 等^[29] 利用对抗学习的思想,在语义分割网络后增加了判别器网络,用于输出分割结果的

置信度,将置信度大于某阈值时的分割结果作为伪标签从而计算分割损失。Wang 等^[30] 直接利用分割网络的输出,将高置信度的结果作为伪标签,分析低置信度的结果中不可能是哪些类别,将其作为负样本计算对比损失。

半监督语义分割从数据分布和分类熵出发充分挖掘无标签数据的特征,可以为网络训练提供更多、更有效的先验信息,有效增强网络的特征表示能力。

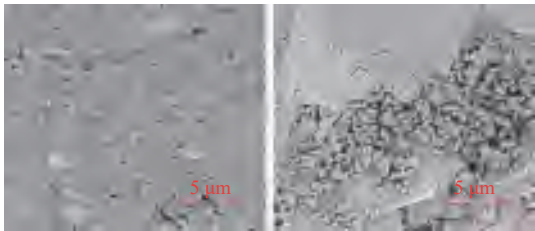
2 孔隙结构智能表征方法

页岩孔隙结构智能分析是通过构建语义分割深度学习模型,实现不同类型孔隙、缝和基质边缘的提取和类别的判定,并在此基础上进行孔隙结构参数的统计分析,如孔径、孔隙形状因子、面孔率等。

本文针对页岩孔隙分析这一特定业务场景改进研发新的语义分割网络,实现孔隙、有机质的自动提取和类别的智能判定。同时,通过图像拼接技术实现全视域、大尺度扫描电镜孔隙结构的提取,并基于以上结果实现整个样本孔隙结构参数的统计分析。

2.1 页岩油孔隙智能识别半监督语义分割模型

高精度页岩油孔隙智能识别模型的构建面临诸多难点:①建模面临少样本的问题,模型训练往往会出现过拟合的现象,由于数据标注流程复杂、专家经验依赖度高,页岩孔隙结构数据集中标注好的数据非常少,而深度学习模型训练依赖于数据驱动;②页岩孔隙智能识别是典型的密集小目标识别任务。页岩孔缝具有细小、无规则散布的特点,如图 1 所示。在深度神经网络特征提取中,由于特征图不断缩小,小目标信息容易丢失。此外,由于孔隙分割不准确的部分往往位于物体的边缘,对于大目标的分割,分割边缘不准带来的影响相对少,而对于像页岩孔缝这种小目标,边缘分割不准确就会对面孔率等结构参数带来极大的扰动。而且通常情况下网络获得的分割结果边缘处都倾向于平滑,与实际不符。如图 2 所示,蓝色标注为 mask 标签,红色为预测的 mask 标签。因此,如何实现细小孔



(a) 细小孔隙样本 (b) 孔隙不规则分布样本

图 1 页岩样本示例

Fig. 1 Example of shale samples

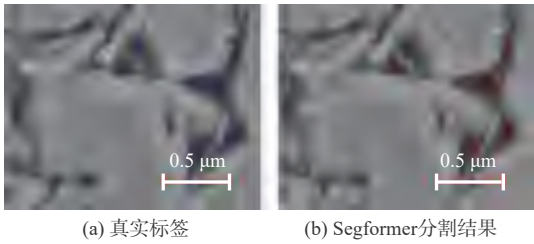


图 2 网络分割结果与标签的对比

Fig. 2 Comparison between network segmentation results and labels

缝及其边缘的精准识别是页岩孔隙结构智能分析研究的重点。

针对上述难点,本文基于语义分割网络 SegFormer^[25]提出 ShaleSegger 网络,实现了基于页岩扫描电镜的孔隙提取与识别。SegFormer 由 Transformer 结构的编码器和轻量级、全多层感知机 (multilayer perceptron, MLP) 解码器构成,是一个结构简单但性能优越的语义分割网络,其精度与速度均不逊于目

前基于 CNN 架构的优秀语义分割网络 OCRNet。

本文在 SegFormer 的基础上从网络结构、训练方式 3 个方面进行改进,提出适用于页岩孔隙结构识别的组合网络 ShaleSegger 及其训练范式:①增加了边缘特征提取模块,利用边缘特征细化分割特征,以此提升网络对细节的分割精度,同时提高小目标的检出性能;②为缓解少样本问题带来的不利影响,参考 U2PL^[30] 的思想引入了半监督学习的方法,使网络可以通过监督学习与无监督学习相结合的方式自动从未标注数据中学到知识,提高算法模型的预测精度,避免由于训练数据过少而造成的网络过拟合问题;③在训练和预测时将输入图像由缩小的原图更改为原图的局部切片,从某种意义上放大了小目标的尺度,提升了网络对小目标的识别能力。组合网络 ShaleSegger 的结构如图 3 所示,由主干特征提取模块、边缘特征提取模块和解码模块 3 个部分构成。

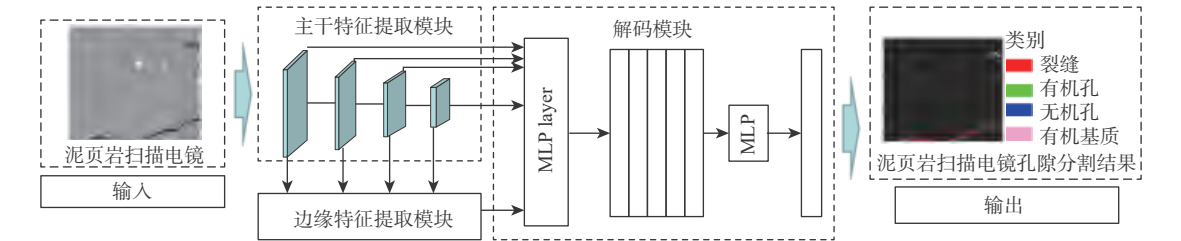


图 3 ShaleSegger 的网络结构

Fig. 3 Network Architecture of ShaleSegger

2.1.1 基于 MiT 的主干特征提取

主干特征提取模块由混合 Transformer(mix Transformer, MiT) 编码器结构构成,用于生成表示局部信息的高分辨率精细特征和表示全局信息的低分辨率的粗特征,如图 4 所示,图中,Overlap Patch Embeddings 表示重叠块的特征嵌入,Overlap Patch Merging 表示重叠的块合并,Efficient Self-Attn 指高效的自注意力。MiT 拥有名为 MiT-B0 到 MiT-B5 的结构相似但大小不同的 5 种结构。考虑到页岩孔隙结构智能分析识别任务中分割精确度较模型运行效率更为重要,因此,选用计算量级虽大但模型性能更好的 MiT-B5。基于 MiT 的主干特征提取模块具有以下特点。

- 1) 层次结构的特征表示。基于 Transformer 的 MiT 网络通过 patch(块)的合并实现了类似池化下采样的效果,生成与 CNN 网络类似的不同分辨率的多层次特征。将这种多层次特征用于分割有助于提高模型对上下文信息的提取能力。
- 2) 重叠的块合并。重叠的块合并较不重叠的块合并能够保持这些块周围的局部连续性,并使得

- 特征图缩小。
- 3) 高效的自注意力。MiT 在自注意计算部分引入序列缩减,通过设置还原比来减少序列的长度,将计算复杂度由传统的多头自注意 $O(n^2)$ 降低为 $O(n^2/R)$,从而实现高效的自注意力。
- 4) 混合前馈网络。考虑到位置编码对于语义分割任务的非必要性,仅通过 3×3 的卷积就足以动态表达 patch 间的位置关系和 0 填充对位置的影响,直接将 3×3 的卷积放入前馈网络 (feed-forward networks, FFN) 中,组成 Mix-FFN。

2.1.2 边缘特征提取

边缘特征提取模块的引入是 ShaleSegger 结构的一大亮点。传统语义分割网络仅通过单一网络实现图像复杂语义信息的获取,包括底层的颜色、纹理等低级信息和顶层的高级语义信息,这些信息对语义分割任务的贡献度不同,杂糅在一起可能会导致对识别重要的信息不那么突出,而目标边缘的精确定位需要更多的局部细节信息。为增强模型对边缘的识别能力,ShaleSegger 网络参考门控形状 CNN(gated-shape CNN, GSCNN)^[31] 和双路网络^[32] 的

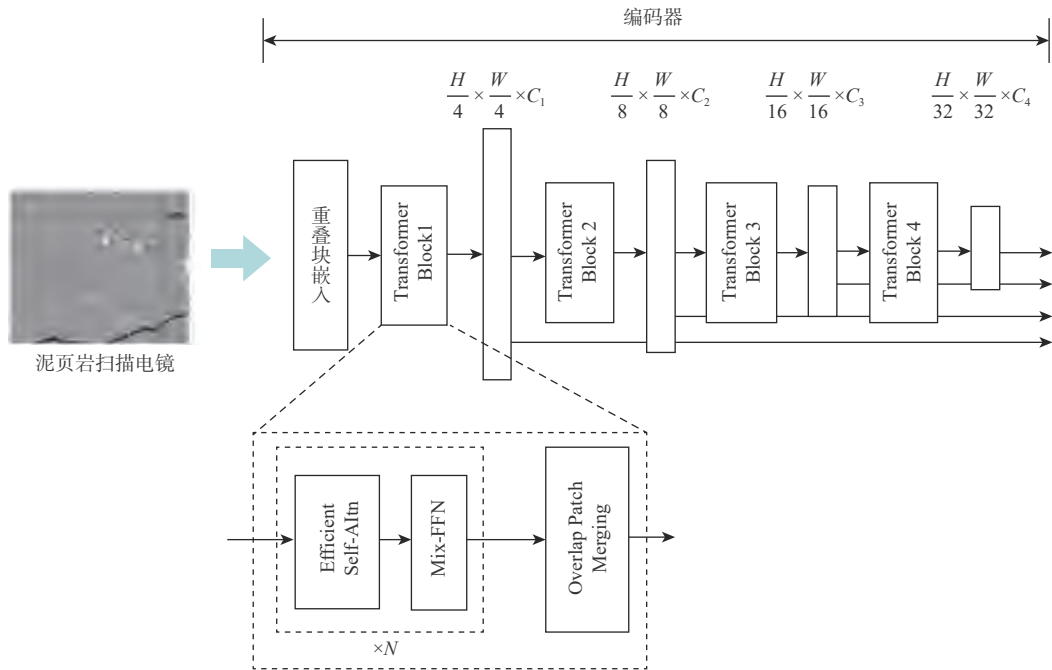


图 4 基于 MiT 的主干特征提取
Fig. 4 Backbone feature extraction based on MiT

结构和思想,在本文网络中增加边缘特征提取模块,以便于基于主干特征提取模块输出的多层级语义区域特征构建边缘特征,以加强对边界的识别,实现更精细的分割,从而提升细微边缘小物体的识别能力。

边缘特征提取模块的网络结构如图 5 所示。此模块通过门控卷积层 (gate conv layer, GCL) 和局部监督使此分支网络只关注边界相关的信息,并输出边缘图,以达到通过边缘图指导分割的目的。具体为,主干特征提取模块输出的多尺度语义特征 (M2、M3、M4、M5) 是边缘特征提取模块的输入, M3、M4、M5 分别通过一个 1×1 的卷积将多尺度语义特征降维 (通道数=1)。M2 虽然也经过 1×1 卷积

但通道数保持不变。其次,将所有特征图通过双线性插值上采样到原图大小。M2 经过 1×1 卷积和残差块得到 s_1 、M3 经过 1×1 卷积的输出 r_1 、 s_1 、 r_1 为 GCL1 层的 2 个输入。GCL 层的结构如图 5 所示,通过拼接 r_i 、 s_i ,并顺序进行 1×1 卷积、Sigmoid 后获得注意力权重 a_i (见式 (1))。将 a_i 和 s_i 点乘并与 s_i 相加经卷积后获得的 feature map 作为 GCL 的输出。GCL1 经过残差模块的结果和降维后的 M4 是 GCL2 的输入。通过类似的共 3 次 GCL 操作,之后经过一个 1×1 卷积即可输出最终的边缘特征图。

注意力权重 a_i 的计算式为

$$a_i = \text{Sigmoid}(C_{1\times 1}(s_i\|r_i)) \tag{1}$$

式中: $\|$ 表示 concat 拼接特征图 r_i 、 s_i ; $C_{1\times 1}()$ 表示归

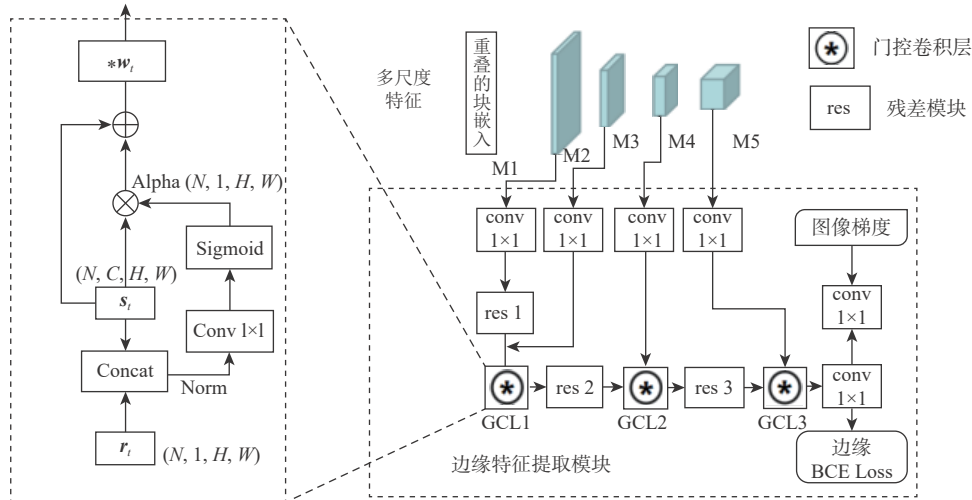


图 5 边缘特征提取模块
Fig. 5 Edge feature extraction module

一化的 1×1 卷积层。

GCL 的计算式为

$$\tilde{s}_t = [s_{t(i,j)} \odot a_{t(i,j)} + s_{t(i,j)}]^T w_t \tag{2}$$

式中: $\tilde{s}_t$ 表示 GCL 模块的输出; $\odot$ 表示像素级的点乘。

设定 BCE Loss 作为边缘特征提取模块的训练损失函数, 以便于基于数据驱动, 在逐轮迭代训练中不断提高模型边缘特征的提取能力。

2.1.3 All-MLP 解码器

ShaleSeger 的解码器是与 Segformer 类似的轻

量级 All-MLP, 区别在于不仅聚合由主干特征提取模块得到的多层级语义特征, 还聚合了边缘特征提取模块获得的边界特征。此方法有助于产生更精确的语义分割掩码, 尤其是围绕边界的分割结果。

解码器结构如图 6 所示。首先, 通过一个 MLP 层将来自 MiT 主干特征提取模块的多层级特征和边缘特征提取模块的边缘特征统一信道维度。然后, 将特征上采样到原始图像分辨率的 1/4, 并并联在一起。

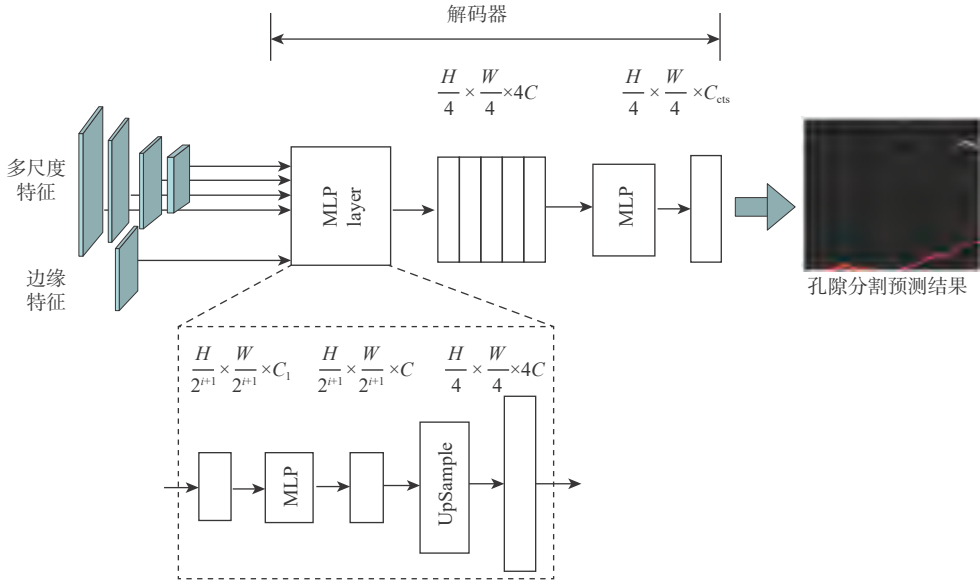


图 6 All-MLP 解码器结构
Fig. 6 All-MLP decoder structure

其次, 采用 MLP 层融合连接的特征 f 。最后, 使用另一个 MLP 层预测分割掩码。

2.1.4 优化的训练策略

ShaleSeger 网络使用半监督的方式进行训练, 以便于从无标签数据中学习有益于页岩孔隙结构识别任务的知识, 减少数据标注量不足对模型训练带来的不利影响。具体的训练方法参考 U2PL 的训练方式, 如图 7 所示。

此方法的中心思想是熵最小化, 采用典型的自我训练框架 (momentum teacher) 实现, 利用教师网络来指导模型的训练。具体为构建 2 个与 ShaleSeger 网络结构完全相同的模型, 分别命名为教师网络和学生网络, 并采用不同的方式更新其权重。学生模型权值的更新与传统的更新方式一致, 而教师模型的权值更新设置为学生模型权值更新的 EMA。通过教师网络筛选出置信度高于某阈值的结果作为伪标签, 并将伪标签引入模型训练。此外, 对于那些没有获得伪标签的像素点, 通过对置信度高的类型排除, 可以知道其不可能是哪些类别, 将其作为负样本通过对比损失引入模型训练。本文损失函

数由赋予不同的权重 5 个部分组成, 包括来自有标签数据的分割损失 L_{Seg1} (FocalLoss)、边缘损失 L_{Edg1} (BCELoss)、来自于无标签数据和伪标签的分割损失 L_{Seg2} (FocalLoss)、边缘损失 L_{Edg2} (BCELoss) 和对比损失 L_c (infoNCELoss)。由于本文在 Segformer 的基础上增加了边缘特征提取分支, 边缘预测只有是边缘和不是边缘 2 个类别, 因此, 边缘预测分支不需要计算对比损失, 只需根据伪标签计算分割损失和边缘损失。

infoNCELoss 是经典的对比学习损失函数, 本文使用的是像素级的 infoNCELoss, 其计算式为

$$L_c = -\frac{1}{CM} \sum_{c=0}^{C-1} \sum_{i=1}^M \ln \left[\frac{e^{\langle z_{ci}, z_{ci}^+ \rangle / \tau}}{e^{\langle z_{ci}, z_{ci}^+ \rangle / \tau} + \sum_{j=1}^N e^{\langle z_{ci}, z_{ci,j}^- \rangle / \tau}} \right] \tag{3}$$

式中: M 为像素的总数; z_{ci} 为类别 c 的第 i 个锚的表示; 每个锚像素后面跟着一个正样本和 N 个负样本分别为 z_{ci}^+ 和 $z_{ci,j}^-$; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示 2 个不同像素的特征之间的余弦相似性; τ 为温度系数。

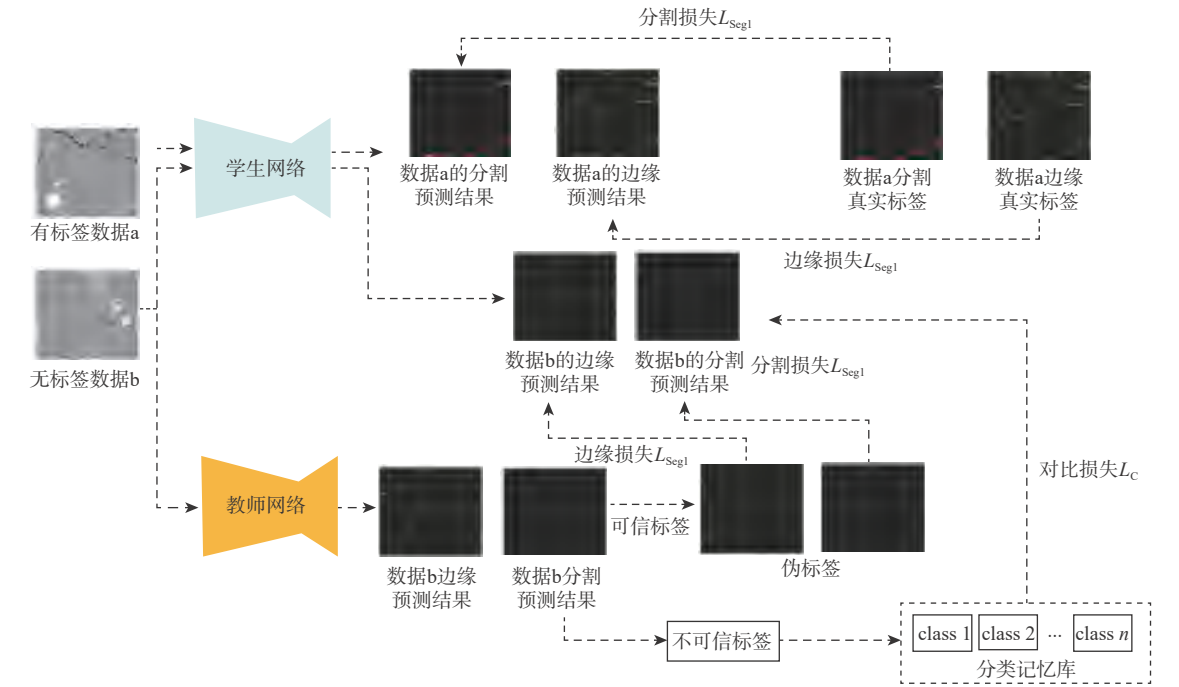


图7 ShaleSeger 网络半监督训练方案

Fig. 7 Semi-supervised training scheme for ShaleSeger

在传统语义分割任务中,分割损失通常设置为交叉熵损失(CELoss)。基于页岩数据集中无机孔多、有机孔少、样本不均衡的特点,将分割损失调整为 FocalLoss 以解决数据呈长尾分布的问题。FocalLoss 的计算如式(4)所示。此损失函数通过动态调整权重降低了分类正确的样本在 Loss 中的影响,使模型训练过程更关注难分样本。

$$l_n = -(1 - p_i)^r \ln p_i \tag{4}$$

式中: l_n 表示 FocalLoss; p_i 为预测值与真实值的接近程度; r 为调节因子。

在训练和预测时放大输入图像是提升网络小目标检测能力的常用方法。然而图像分辨率的放大将导致模型训练、推理时显存占用量的显著提升。综合这2个方面考虑,在同样的图像输入尺度的基础上,将这个图像变为原图的局部,从某种意义上实现了小目标尺度的提升。需要注意的是,应对训练输入的模型局部区域的大小做出限制,不宜过小,以免破坏裂缝、有机质在图像中展现的形态特征。在测试时采用同样的方法获得网络输出,并利用2.2节所描述的方法获得整张图像的推理结果。

2.2 基于 MAPS 的全视域页岩孔隙结构统计

SEM 硬件起初只能实现单个小视域的扫描,随着 MAPS 技术出现,使得全样本分析成为可能。

然而大尺寸图像分割结果的获取面临2点困难:①受到油田一线及实验室硬件算力的限制,网络模型的大小及输入图像的大小会限制在一定的范围内,超大尺寸的扫描电镜全视域图像无法以原

始分辨率读入网络;②如果将超大尺寸图像缩小后读入网络,虽然减轻了对计算机硬件的要求,但是其特征的分辨率将降低,而高分辨率特征是保障小目标检测效果的重要条件。

基于上述情况,本文提出一种基于多视域拼接的超大尺寸页岩孔隙识别方法,如图8所示,将超大尺寸的扫描电镜图像按局部块处理分析并拼接,实现超大尺度图像的孔隙结构识别。具体为:首先,将超大尺寸图像按照一定的重叠率(如10%)切分成小片;其次,将这些小片读入构建的模型中,取网络最后一层没有经过 argmax 之前的结果,即每个像素点分别对应每个类别的概率;之后,将每个小片的分割结果按照切分方式拼接,重叠处的各类别概率通过求均值实现;最后,通过取最大概率的类别获得全视域的分割 Mask。

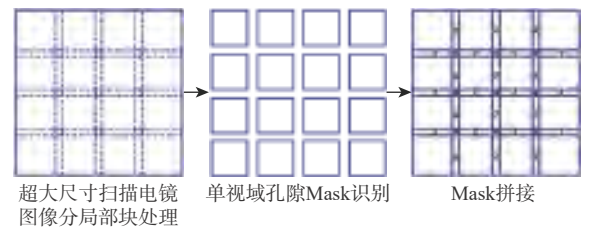


图8 基于多视域拼接的超大尺寸页岩孔隙识别方法

Fig. 8 Pore recognition scheme of super large image based on multi-view mosaics

2.3 孔隙结构参数统计分析

页岩孔隙智能分析的关键参数包括孔隙度、孔径、视孔隙比表面、孔隙形状因子等。本文在相关

行业标准的指导下,利用图像处理技术,实现了上述核心参数的定量计算。具体实现方法如下:首先,利用 ShaleSeger 网络获取包括有机孔、无机孔、裂缝、有机质在内的 4 个类型的分割 Mask;然后,利用图像处理算法 (opencv 库) 在 Mask 图的基础上提取孔隙轮廓并结合 cv2.contourArea() 和 cv2.arcLength() 函数实现孔隙面积、周长的精准量化数值计算;最后,代入式(5)~式(8)计算具体的孔隙结构特征参数。

孔隙度、有机孔占比、无机孔占比、面缝率、有机质绝对占比的计算式为

$$\phi = \sum_{i=1}^N \frac{A_{pi}}{A} \times 100\% \tag{5}$$

式中: A_{pi} 为检测样本中第 i 个孔隙/有机孔/无机孔/裂缝/有机质的占比, nm^2 ; A 为检测样本的面积, nm^2 ; N 为检测样本中的孔隙/有机孔/无机孔/裂缝/有机质的个数。

孔隙直径的计算式为

$$D_p = 2 \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} \tag{6}$$

式中: A_p 为孔隙面积, nm^2 ; D_p 为孔隙直径, nm 。

视孔隙比表面的计算式为

$$S_o = 2 \frac{4L_p}{\pi A_p} \tag{7}$$

式中: L_p 为孔隙周边长, nm ; S_o 为视孔比表面, nm^{-1} 。

孔隙形状因子的计算式为

$$F = \frac{4\pi A_p}{L_p^2} \tag{8}$$

3 实验与结果分析

3.1 实验数据与标注

本文共收集了来自古龙地区的 16 个具有多样性的页岩样本,并通过 MAPS 技术获取扫描电镜图作为研究所用数据。其中,每个样本可扫描 400~840 个不等的小视域,全数据集视域数共 10 570 个。

深度学习是一种基于数据驱动的科学,网络通过损失函数基于数据和标签不断迭代训练从而学习输入与输出间的特征映射,标签的准确与否直接影响模型的构建效果。页岩孔隙结构识别是一个典型的分割任务,标签标注有很高的要求:①类型准确,②Mask 边缘标注精准。本文深入剖析页岩孔隙结构识别任务的需求,参考传统页岩孔隙结构分析的方法与手段,提出如图 9 所示的孔隙结构标注方案。

孔隙结构标注方案具体步骤如下。

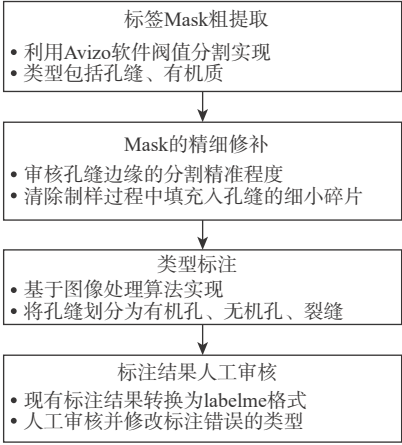


图 9 孔隙结构标注方案
Fig. 9 Pore Structure Annotation Scheme

步骤 1 标签 Mask 的粗提取。在页岩样品中,有机孔、无机孔、裂缝、有机质在扫描电镜下呈现出与无机质、自生矿物差异明显的深灰黑色,且有机质的灰度较孔缝稍浅。因此,本文利用业内通用的页岩孔缝分割方法,利用 Avizo 软件中的阈值分割等功能实现孔缝、有机质 Mask 的获取。考虑到:①有机质与孔缝的灰度值范围有时十分接近,仅凭阈值不能直接准确地区分有机质和孔缝;②页岩在制样过程中打磨等操作极易造成孔隙、裂缝被细小碎屑填充,而阈值分割无法实现语义信息的获取,缝隙提取很容易出现间断;③由于阈值分割方法本身的限制,往往容易产生过分割和欠分割。因此,此步骤只实现了 Mask 的粗提取。

步骤 2 Mask 的精细修补。此步骤的主要内容包含 2 个方面:①对于过分割和欠分割问题造成的孔缝边缘处分割不准确,可以直接通过涂抹的方式实现标签 Mask 的修正;②清除制样过程中填充入孔隙和裂缝的细小碎屑,首先,可以通过获取 Mask 外轮廓并进行 Mask 填充,从而将那些不与孔隙边缘产生接触的小碎屑造成的 Mask 空洞填补,之后通过人工涂抹的方式修正那些与孔缝边缘接触的填充碎屑造成的 Mask 错误。

步骤 3 类型标注。类型标注流程可细分为孔隙类型划分和裂缝识别。有机孔位于有机质内部,首先,将有机质内部的孔隙初步定为有机孔。业内通常将长宽比大于 10 的孔隙称之为裂缝,小于 10 称之为孔。本文利用图像处理算法 OpenCV 库和骨架提取算法获取孔缝长宽,并基于长宽比初步划分孔缝。

步骤 4 标注结果人工审核。由于页岩孔隙形态复杂多样,有时会出现圈环状的孔,或者两边大中间小的孔,或者连成一片的孔,而仅从长宽比判断裂缝较为生硬,难免会造成误判。因此,在类型

标注后需人工审核,以保障标签的精准程度。具体为将现有标注结果转为 labelme 标注格式后通过 labelme 标注软件审核,发现标注错误后手动修正标签类型。

3.2 实验方案

由于数据的标注过程繁琐,经验丰富的专家一天也只能完成 3~4 个视域样本的处理,因此,在数据标注阶段本文仅标注了 200 个具有代表性的视域。在模型训练过程中,应用标注样本的 80% 作为训练集、10% 作为测试集、剩下的 10% 作为验证集。其他未标注的样本统一应用于训练过程。

此外,考虑到模型随机初始化参数训练需要更多的时间成本,且通用领域预训练模型提取的通用特征可能对专有业务领域页岩孔隙识别任务带来有益的影响,能帮助模型更好地应对目标领域中的变化和复杂性,提高模型的泛化能力,从而使目标领域数据有限的情况下仍能取得良好的效果。本文利用迁移学习的方法,把模型训练步骤分成 2 个阶段。首先,预训练阶段模型 ShaleSegger 在 Cityscapes 数据集上进行预训练,从而获得预训练模型。然后,以预训练模型为基础参数,利用半监督训练方法,训练基于 ShaleSegger 的页岩孔隙智能识别模型。

为证明本文模型架构及模型构建方法的有效性和先进性,本文通过消融实验对比了增加边缘特征提取分支前后和优化训练方式前后的分割效果。此外,还将本文网络与经典语义分割网络 OCRNet、DeepLabv3、PSPNet 进行对比。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 基于语义分割的页岩孔隙提取结果

本文通过消融实验定性对比了增加边缘特征提取分支之前 (SegFormer)、之后 (ShaleSegger) 的实验结果,如图 10 所示,可以清晰的看出增加边缘特征后的分割结果更准确,对小目标和边缘的识别效果更好。在数据集上的对比结果如表 1 所示,边缘特征提取模块增加后,平均交并比、平均 F_1 分数、平均精确率指标数值获得提升,定量证明了边缘特征增强模块引入的有效性。对比优化网络训练前后所得的实验结果,结果表明,本文半监督、放大目标尺度的训练方式效果显著。与此同时,本文还将 ShaleSegger 与在 CNN 语义分割网络中性能优越的 OCRNet、DeepLabv3、PSPNet 的结果进行比较。对比实验的结果显示:本文网络在评估指标上取得了更好的性能,证明了本文模型具有较当前优秀的 CNN 架构的语义分割网络模型更好的识别能力。

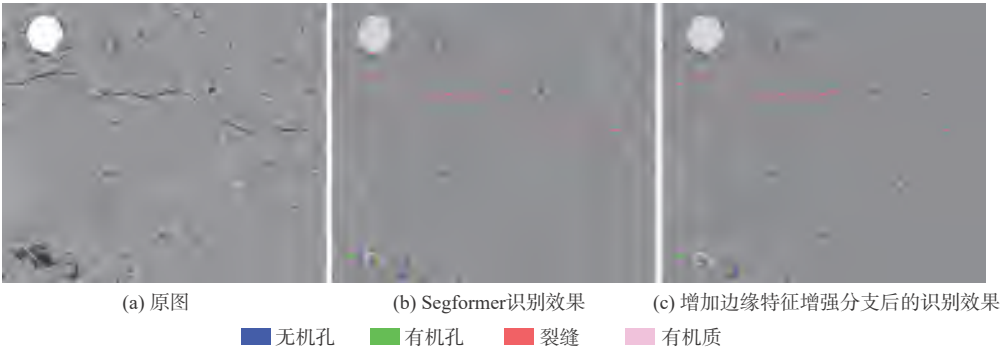


图 10 边缘特征提取分支增加前后的实验结果对比

Fig. 10 Comparison of experimental results before and after the addition of edge feature extraction branches

表 1 分割效果定量对比

Table 1 Quantitative comparison of segmentation effects

模型	半监督训练	像素准确率/%	平均交并比/%	平均准确率/%	平均 F_1 分数/%	平均精确率/%	平均召回率/%
SegFormer ^[25]	否	99.25	66.70	75.57	77.82	80.64	75.57
OCRNet ^[19]	否	98.99	61.59	71.94	73.48	75.47	71.94
DeepLabv3 ^[21]	否	98.57	52.43	59.49	64.11	71.37	59.49
PSPNet ^[22]	否	98.54	53.95	62.67	65.94	70.04	62.67
SegFormer+边缘特征增强	否	99.25	66.84	75.49	77.84	81.06	75.49
ShaleSegger	是	99.50	72.28	79.67	82.06	85.03	79.67

3.3.2 页岩孔隙结构定量表征效果

图 11 为本文 ShaleSegger 模型在古龙地区的页岩样本孔隙分割结果。

图 11(a)为古龙地区页岩样本的扫描电镜 MAPS 图像智能分析结果,裂缝、无机孔发育,并少量发育有机孔;图 11(b)为古龙地区页岩样本的

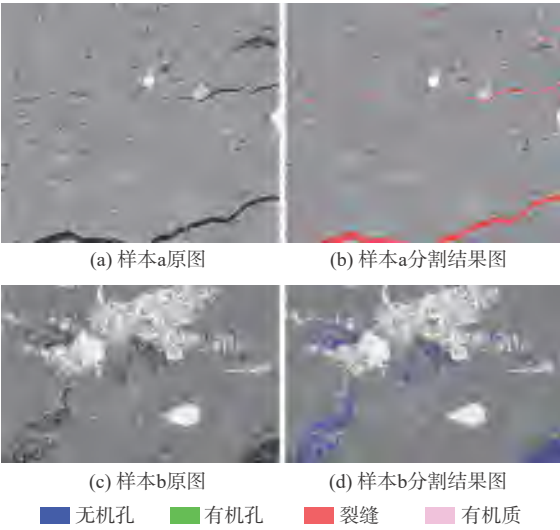


图 11 孔隙分割结果

Fig. 11 Pore segmentation results

SEM 图像分析结果,发育有微量裂缝和无机孔。在此基础上计算出各类型孔隙的面积占比,结果如表 2 所示。

在孔隙边缘提取和类型识别的基础上,可以实现分类型统计孔隙结构参数,以及逐个孔隙统计单个孔隙的结构参数。表 3 为图 10 中样本 a 计算得到的每个孔隙的结构特征参数。

表 2 各类型孔隙、有机质面积占比

Table 2 Area proportion of various types pores and organic matter					
样本名称	无机孔 占比/%	有机孔 占比/%	裂缝 占比/%	有机质 占比/%	其他 占比/%
样本a	0.400	0.014	1.997	0.213	97.377
样本b	2.953	0	5.93×10^{-3}	0	97.041

表 3 每个孔隙的特征参数

Table 3 Characteristic parameters of each pore				
面积/mm ²	直径/nm	周长/nm	视孔隙比 表面/nm ⁻¹	形状因子
214.577	16.529	246.510	1.463	0.044
643.728	28.629	153.593	0.304	0.343
5 257.087	81.814	367.252	0.089	0.490
1 823.911	48.190	208.632	0.146	0.527
858.308	33.058	146.484	0.217	0.503
751.023	30.923	150.039	0.254	0.419
2 253.051	53.560	208.632	0.118	0.650
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4 184.242	72.990	403.657	0.123	0.323

此外,基于 MAPS 扫描结果与多视域拼接处理,页岩油孔隙结构智能表征技术还能实现厘米级样品纳米精度下的孔隙结构分析,如图 12 所示,能降低高分辨率小视域样品的非均质性影响,提高分

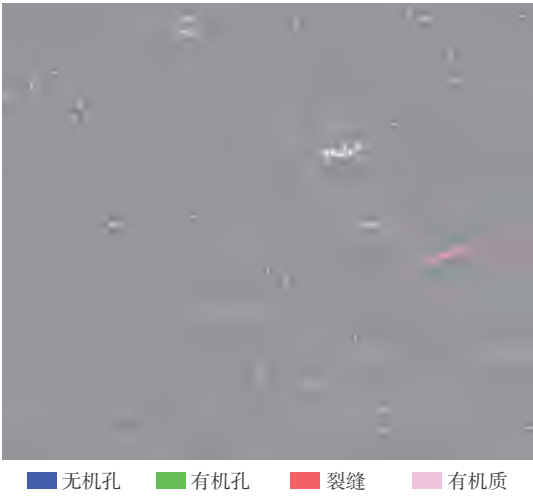


图 12 大尺度孔缝识别结果

Fig. 12 Large scale hole and seam recognition results

析结果的代表性。

如表 4 所示,本文方法能够对复杂的孔隙结构进行从内到外地定性分析与量化计算,实现对孔隙结构的智能化、可视化提取识别,并实现了大尺度 MAPS 图像的全尺寸分析,为页岩孔隙结构分析提供了新途径。依托于页岩油孔隙结构智能表征技术的高处理速度,研究人员能够对古龙页岩油进行高精度连续孔隙结构表征,从而提升甜点评价效率,减轻相关人员或机构的成本负担,使专家从繁杂重复的体力劳动中解脱,精力可以更多地放在研究中,助力古龙页岩油高效开发。

表 4 基于 MAPS 图像的各类型孔隙、有机质面积占比

Table 4 Area proportion of various types pores and organic matter based on MAPS				
无机孔占比/%	有机孔占比/%	裂缝占比/%	有机质占比/%	面孔率/%
0.529	0.016	0.305	0.353	0.849

4 应用实例与成效

4.1 提高页岩储层分析效率

本文方法可对甜点储层在统一标准下进行高效、高精度、大数据量的分析。陆相沉积下,古龙页岩具有极强的纵向与水平非均质性,储层特征变化快,为明确最具开发价值的甜点层段,需进行大量实验表征。传统的 SEM 扫描分析+Avzio 表征尽管能实现纳米级孔隙结构分析,但分析结果受实验人员主观影响大,处理速度慢,不能直接识别出孔隙的组分,需要专家人工辨别,处理的数据量难以快速提升。受页岩孔隙复杂结构的影响,其分析技术仍停留在半自动化的阶段。相较于人工识别,基于语义分割的页岩油孔隙结构智能表征技术能够在统一的标准下进行快速、精准的结果分析,如

3.4.2 节页岩孔隙结构定量表征效果所示, 每张 SEM 处理耗时仅需要约 3 s, 每像素识别准确率超过 99%, 且与人工分析的结果对比具有很高的相似性, 可有效替代人工分析。

4.2 实现改造储层的效果评估

本文方法还可应用于多种改造储层的效果评估和实验研究分析中, 如二氧化碳(carbon dioxide, CO₂)复合压裂等。

CO₂ 复合压裂技术是大庆油田发展出的一种尽可能改善页岩油开发效果的技术, 通过依次向地层中注入水基压裂液与 CO₂ 压裂液, 通过 CO₂-水-页岩反应溶蚀部分矿物, 改变页岩原有的孔隙结构, 提高裂缝复杂程度、页岩油可流动性、降低水敏伤害, 并充分发挥 CO₂ 混相、降黏、增能效果, 充分提高一次采收率。在复杂矿物反应下, CO₂ 作用后页岩孔隙结构变化难以定量评价, 前人研究多通过孔渗参数进行间接表征。基于页岩油孔隙结构智能表征技术, 能够通过高精度 SEM 扫描在同一视域下进行量化评价分析, 从而量化 CO₂ 作用对页岩孔隙结构影响。

图 13 为 6 个页岩样品进行 CO₂ 复合压裂后各类型孔隙占比的变换情况。可以清晰地看出, CO₂ 复合压裂技术对有机质和某些矿物具有溶解作用, 其含量较 CO₂ 复合压裂前降低。观察孔隙度的变化情况, 可以看出, CO₂ 复合压裂技术对孔隙结构的改造有积极作用。

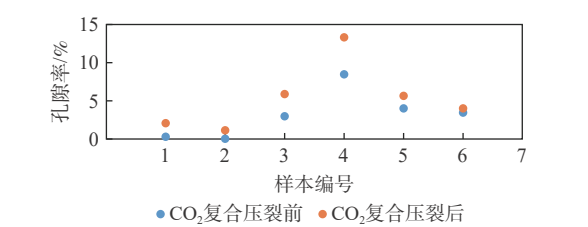


图 13 CO₂ 复合压裂实验前后孔隙度变化
Fig. 13 Changes in porosity before and after CO₂ composite fracturing experiment

图 14 为 CO₂ 复合压裂后对孔隙结构改变的直观效果展示。页岩原始孔隙结构扫描图像如图 14(a) 和图 14(c) 所示, 页岩表面发育有少量原生孔隙, 面孔率为 4.399%; CO₂ 处理后同一视域下页岩孔隙结构如图 14(b) 和图 14(d) 左侧所示, 可见页岩表面产生大量新生溶蚀孔, CO₂ 溶蚀使得处理后页岩面孔率增加为 4.791%。

表 5 为 CO₂ 复合压裂前后各类孔隙占比的定量结果。由表 5 可知, CO₂ 处理后页岩表面孔隙结构发生显著变化, 面孔率增加, 从而有效改善页岩孔渗参数。

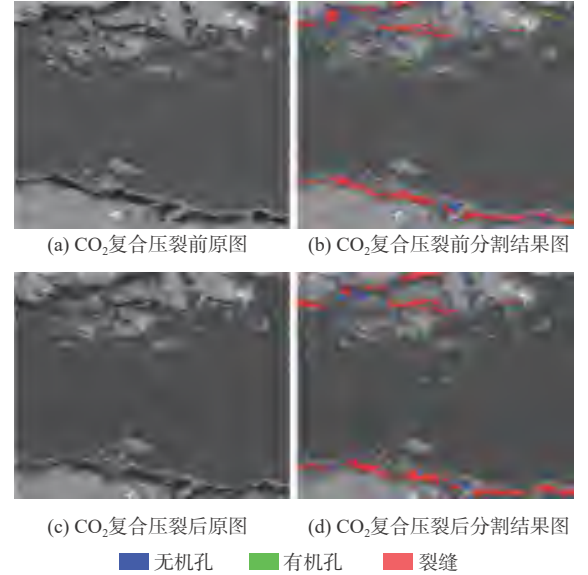


图 14 CO₂ 复合压裂对孔隙结构改变的直观效果展示
Fig. 14 Visual display of the effect of CO₂ composite fracturing on pore structure changes

表 5 CO₂ 复合压裂前后孔隙结构变化
Table 5 Changes in pore structure before and after CO₂ composite fracturing

状态	无机孔占比/%	有机孔占比/%	裂缝占比/%	其他占比/%
复合压裂前	1.107	0.541	2.751	95.601
复合压裂后	1.019	0.561	3.211	95.209

5 结 论

1) 本文深入剖析了页岩孔隙的特点和识别不够精准的原因, 从网络结构、损失函数、训练方式 3 个方面入手提出适用于页岩孔缝识别的神经网络 ShaleSegger, 并基于此构建孔隙结构智能识别模型。本文模型具有相对较高的精度和效率, 识别像素级准确率达到 99.5%。

2) 针对页岩非均质性导致局部视野分析结果代表性不足的问题, 本文提出一种基于多视域拼接的超大尺寸页岩孔隙识别方法。该方法通过对全样本进行无缝拼接与智能分析, 实现了孔隙大视域、全样本分割结果的自动提取, 从而确保分析结果能够更真实、全面地代表样本整体的地质特征。

3) 在孔隙分割的基础上构建孔隙结构量化评价体系, 实现多种孔隙结构的定量分析与参数的准确统计计算, 为定量分析页岩油孔隙度和孔隙结构提供了新途径。

4) 本文方法应用范围广泛, 不仅可以支持储层孔隙结构特征参数的定量计算, 而且可以推广应用到改造储层的效果评估中。

参考文献 (References)

[1] 朱林奇, 张冲, 周雪晴, 等. 融合深度置信网络与与核极限学习机算法的核磁共振测井储层渗透率预测方法[J]. 计算机应用, 2017, 37(10): 3034-3038.

ZHU L Q, ZHANG C, ZHOU X Q, et al. Nuclear magnetic resonance logging reservoir permeability prediction method based on deep belief network and kernel extreme learning machine algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(10): 3034-3038 (in Chinese).

[2] 张益明, 张繁昌, 丁继才, 等. 基于混合深度学习网络的致密砂岩甜点预测[J]. 石油物探, 2021, 60(6): 995-1002.

ZHANG Y M, ZHANG F C, DING J C, et al. Sweet spot prediction in tight sand reservoirs by a hybrid deep-learning network[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(6): 995-1002(in Chinese).

[3] ZHOU S X, SHENG W, WEI X, et al. Fast image analysis on pore structure of concrete based on deep learning[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(5): 653-663.

[4] ZHOU S X, SHENG W, WANG Z P, et al. Quick image analysis of concrete pore structure based on deep learning[J]. Construction and Building Materials, 2019, 208: 144-157.

[5] CARPENTER C. Machine-learning techniques characterize source-rock images at the pore scale[J]. Journal of Petroleum Technology, 2022, 74(1): 92-95.

[6] LIU M L, MUKERJI T. Multiscale fusion of digital rock images based on deep generative adversarial networks[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(9): e2022GL098342.

[7] WANG H, GUO R, DALTON L E, et al. Comparative assessment of U-net-based deep learning models for segmenting microfractures and pore spaces in digital rocks[J]. SPE Journal, 2024, 29(11): 5779-5791.

[8] 廖广志, 李远征, 肖立志, 等. 利用卷积神经网络模型预测致密储层微观孔隙结构[J]. 石油科学通报, 2020, 5(1): 26-38.

LIAO G Z, LI Y Z, XIAO L Z, et al. Prediction of microscopic pore structure of tight reservoirs using convolutional neural network model[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(1): 26-38(in Chinese).

[9] 陈雁, 李祉呈, 程超, 等. FLU-Net: 用于表征页岩储层微观孔隙的深度全卷积网络[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(8): 34-43.

CHEN Y, LI Z C, CHENG C, et al. Flu-net: a deep fully convolutional neural network for shale reservoir micro-pore characterization[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(8): 34-43(in Chinese).

[10] YU Q Y, XIONG Z W, DU C, et al. Identification of rock pore structures and permeabilities using electron microscopy experiments and deep learning interpretations[J]. Fuel, 2020, 268: 117416.

[11] ZHANG H, ZHANG R, SUN D Q, et al. Analyzing the pore structure of pervious concrete based on the deep learning framework of Mask R-CNN[J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 125987.

[12] 陈宗铭, 唐玄, 梁国栋, 等. 基于深度学习的页岩扫描电镜图像有机质孔隙识别与比较[J]. 地学前缘, 2023(3): 208-220.

CHEN Z M, TANG X, LIANG G D, et al. Identification and comparison of organic matter pores in shale scanning electron microscopy images based on deep learning[J]. Geological Frontiers, 2023(3): 208-220(in Chinese).

[13] 毕飞宇, 肖占山, 张学忠, 等. 基于深度学习的页岩孔隙类型自动识别方法[J]. 测井技术, 2022, 46(4): 439-445.

BI F Y, XIAO Z S, ZHANG X Z, et al. Automated identification method of shale pore types based on deep learning[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(4): 439-445(in Chinese).

[14] 蔡宇恒, 滕奇志, 涂秉宇. 基于深度学习的岩石铸体薄片图像孔隙自动提取[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(28): 11685-11692.

CAI Y H, TENG Q Z, TU B Y. Automatic extraction of pores in thin slice images of rock castings based on deep learning[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(28): 11685-11692(in Chinese).

[15] 王庆, 曾齐红, 张友焱, 等. 基于多尺度区域卷积神经网络的露头孔洞自动提取[J]. 现代地质, 2021, 35(4): 1147-1154.

WANG Q, ZENG Q H, ZHANG Y Y, et al. Automatic extraction of outcrop cavity based on multi-scale regional convolution neural network[J]. Geoscience, 2021, 35(4): 1147-1154(in Chinese).

[16] 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.

[17] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(12): 2481-2495.

[18] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[M]. Berlin: Springer, 2015: 234-241.

[19] YUAN Y H, CHEN X L, WANG J D. Object-contextual representations for semantic segmentation[C]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV. Berlin: Springer, 2020: 173-190.

[20] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(4): 834-848.

[21] CHEN L C, PAPANDREOU G, SCHROFF F, et al. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation[EB/OL]. (2017-12-05)[2023-07-01]. <https://arxiv.org/abs/1706.05587>.

[22] ZHAO H S, SHI J P, QI X J, et al. Pyramid scene parsing network. [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 6230-6239.

[23] DOSOVITSKIY A, BEYER L, KOLESNIKOV A, et al. An image is worth 16×16 words: transformers for image recognition at scale[EB/OL]. (2021-06-03)[2023-07-01]. <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.

[24] 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.

[25] XIE E, WANG W, YU Z, et al. SegFormer: simple and efficient design for semantic segmentation with transformers[EB/OL]. (2021-10-28)[2023-07-01]. <https://arxiv.org/abs/2105.15203>.

[26] OUALI Y, HUDELOT C, TAMI M. Semi-supervised semantic segmentation with cross-consistency training[C]//Proceedings of the

IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 12671-12681.

[27] LIU Y Y, TIAN Y, CHEN Y H, et al. Perturbed and strict mean teachers for semi-supervised semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 4248-4257.

[28] LAI X, TIAN Z T, JIANG L, et al. Semi-supervised semantic segmentation with directional context-aware consistency[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1205-1214.

[29] HUNG W C, TSAI Y H, LIOU Y T, et al. Adversarial learning for semi-supervised semantic segmentation[EB/OL]. (2018-07-24) [2023-07-01]. <https://arxiv.org/abs/1802.07934>.

[30] WANG Y C, WANG H C, SHEN Y J, et al. Semi-supervised semantic segmentation using unreliable pseudo-labels[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 4238-4247.

[31] TAKIKAWA T, ACUNA D, JAMPANI V, et al. Gated-SCNN: gated shape CNNs for semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 5228-5237.

[32] 杨运龙, 梁路, 滕少华. 一种双路网络语义分割模型[J]. 广东工业大学学报, 2022, 39(1): 63-70.

YANG Y L, LIANG L, TENG S H. A two-way network model for semantic segmentation[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2022, 39(1): 63-70(in Chinese).

Intelligent representation method of shale pore structure
based on semantic segmentation

LIU Xi, REN Yili*, WANG Wenjie, HUANG Ruiqi, SU Qianxiao

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The enrichment and migration of reservoir fluids are affected by the types and structural parameters of shale pores, which are significant components of shale reservoir evaluation. Due to issues with current assessment methods, including high subjectivity, low efficiency, and low degree of quantification, it is challenging to address the urgent needs of quick and accurate examination of shale samples. Based on this, an intelligent characterization method for shale pore structure based on semantic segmentation is proposed. Firstly, the two-dimensional gray images of shale are obtained by scanning electron microscopy (SEM) and multi-scale acquisition and processing software (MAPS). Secondly, these images are annotated by the rock mineral identification experts, and divided into organic pores, inorganic pores, fractures and organic matter. Then, a combination network Shale Seger and its training paradigm for shale pore structure analysis tasks is innovatively proposed, an intelligent recognition model of shale pores based on deep learning is constructed, as well as, a pore recognition scheme of super large image based on multi-view mosaicism established to extract pore from MAPS images. Lastly, intelligent characterisation of pore structural features is achieved by applying image processing techniques. As of right now, this study has produced a quantitative analysis of the Gulong shale's pore structure that can statistically compute pore structure parameters like pore diameter, apparent pore ratio surface, shape factor, and so forth, as well as automatically determine the area proportion of each type of pore based on pore edge extraction and type recognition. In addition, the technique described in this article can also be extended to the evaluation of CO₂ composite fracturing, through which the change of microstructure characteristics before and after CO₂ composite fracturing can be quantitatively compared.

Keywords: tight shale oil; micro nano; pore structure; scanning electron microscopy; Gulong shale

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0152

基于局部空间深度特征的 SAR 遥感图像变化检测方法

张益天¹, 赵晶^{2,*}, 陈蒋洋³, 罗喜伶^{4,5}

(1. 工业和信息化部网络安全产业发展中心(工业和信息化部信息中心), 北京 100846;

2. 北京航空航天大学 科学技术研究院, 北京 100191; 3. 中国久远高新技术装备有限公司, 北京 100094;

4. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191; 5. 北京航空航天大学 杭州创新研究院, 杭州 310051)

摘 要: 为提高卷积神经网络(CNN)在变化检测任务中的鲁棒性能和泛化能力, 提出一种基于拉普拉斯支持向量机(LapSVM)的卷积小波神经网络(CWNLSN)模型。通过样本标记方法, 获得高置信度的“伪标签”, 划分出网络训练集、分类训练集和待测集; 在CNN中, 引入离散小波池化, 用于提取局部空间深度特征; 设计基于LapSVM的局部空间深度特征分类(LSDC)模块, 对特征进行分类, 判别待测集的变化情况; 设置对比实验和消融实验, 在多组真实遥感数据集上进行测试。结果表明, 所提方法获得了更显著的变化检测效果。

关键词: 变化检测; 卷积神经网络; 离散小波池化; 拉普拉斯支持向量机; 局部空间深度特征

中图分类号: TP751

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1129-10

遥感技术^[1]起源于20世纪60年代, 是指在不直接接触的情况下, 对目标或自然现象进行远距离探测和感知的综合性探测技术, 是采集时空信息的重要手段。变化检测^[2-3]是指对同一地区、不同时刻获取的遥感图像进行分析, 提取变化区域的过程。变化检测是遥感领域重要的研究方向, 作为监测地表状况的关键技术, 已被应用于城市变迁检测^[4]、农林监测^[5]、灾害监测^[6]、国土监测^[7]等诸多领域。

近年来, 随着计算技术、存储技术和网络技术的不断发展, 深度学习作为机器学习重要的分支发展迅速, 推动着变化检测进入人工智能时代。根据是否使用标签数据(即先验知识), 深度学习算法可分为监督、无监督和半监督学习。然而, 大量用于图像变化检测的多时相图像通常没有人工标记的标签, 限制了监督深度学习算法在变化检测领域的应用。为解决上述问题, 许多学者往往采用如下范

式: 首先, 生成两时相遥感图像的差异图; 其次, 采用无监督图像分割, 将差异图分为高概率变化区域、高概率不变区域和中间区域, 以构建用于训练深度学习模型的高置信度训练样本集和待测集; 最后, 通过监督训练深度学习模型, 对待测集进行判别, 确定变化区域和非变化区域。究其根本, 上述范式是一个由粗到细的检测框架, 存在3个难点: ①需要构建高置信度的样本集, 用于深度学习模型的监督训练; ②需要设计泛化能力和特征表征能力较强的深度学习模型, 对图像变化情况进行精细化甄别; ③需要尽可能抑制图像噪声, 降低其对变化检测效果的干扰。

在高置信度样本集的构建上, 诸多学者基于模糊C均值聚类(fuzzy C-means clustering, FCM)算法^[8], 并结合阈值法^[9]、显著性检测^[10]、稀疏学习^[11]等其他方法, 提出了多种样本标记方法。然而, 上

收稿日期: 2024-03-18; 录用日期: 2024-05-31; 网络出版时间: 2024-07-18 10:30

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240716.1533.001

*通信作者. E-mail: zhao_jing@buaa.edu.cn

引用格式: 张益天, 赵晶, 陈蒋洋, 等. 基于局部空间深度特征的 SAR 遥感图像变化检测方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1129-1138. ZHANG Y T, ZHAO J, CHEN J Y, et al. SAR remote sensing image change detection method based on local space deep feature [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1129-1138 (in Chinese).

述标记方法的结果生成主要依赖 FCM 算法的聚类过程,其他方法仅作为辅助手段,未直接完整地生成标记结果。对此,研究人员提出基于最大类间方差和 Gabor 小波特征聚类的样本标记 (Otsu and Gabor wavelet feature-based labeling, OGFL) 方法^[12],获得多组标记结果,再通过图像融合将多组标记结果结合,生成高置信度“伪标签”,从而提升训练集的构建质量。基于上述优势,本文通过上述方法设计训练集和待测集,为有监督模型提供训练样本。

在深度学习模型的搭建上,近年来,卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 极大提高了许多视觉任务的性能,研究人员也设计了诸多基于 CNN 的变化检测方法^[13-15]。尽管基于 CNN 的变化检测方法取得了优异的性能,但其二值分类判别仅通过 Softmax 层的激活函数。CNN 模型的激活函数一旦选定,则无法根据给定的样本数据自适应调整,束缚了 CNN 模型的效果。为了弥补上述缺陷,本文设计判别模型,代替 Softmax 层的激活函数,对全连接层的输出特征进行判别,提升 CNN 模型的泛化能力。

在噪声干扰的抑制上, CNN 模型提取浅层的基本视觉特征,将其逐步累计形成后续深层的高级特征^[16]。如果训练样本中含有大量散斑噪声,则会出现噪声累计的情况,其高级特征无法更好地耦合变化检测任务。针对上述问题,本文在池化层中引入滤波机制,提升变化检测精度。

本文提出基于局部空间深度特征的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 遥感图像变化检测方法,融合深度学习模型和统计机器学习算法,实现了像素块级变化检测,为遥感科学技术应用提供了解决方案。首先,通过样本标记方法,构建网络训练集、分类训练集和待测集;然后,在 CNN 中,引入离散小波池化,提取局部空间深度特征;最后,设计基于拉普拉斯支持向量机 (Laplace support vector machines, LapSVM) 的局部空间深度特征分类 (local space deep feature classification, LSDC) 模块,判别待测集的变化情况,获得变化检测结果。

1 样本标记及样本数据集构成

通过 OGFL 方法^[12]获得样本数据的“伪标签”,构建网络训练集、分类训练集和待测集,分别用于深度学习模型的监督训练、分类器的半监督训练及待测区域的精细化判别,其流程如图 1 所示。

1.1 样本标记

对同一地区、不同时相获取的 2 张遥感图像进行去噪处理^[17-18],得到基于对数比算子^[19]的差

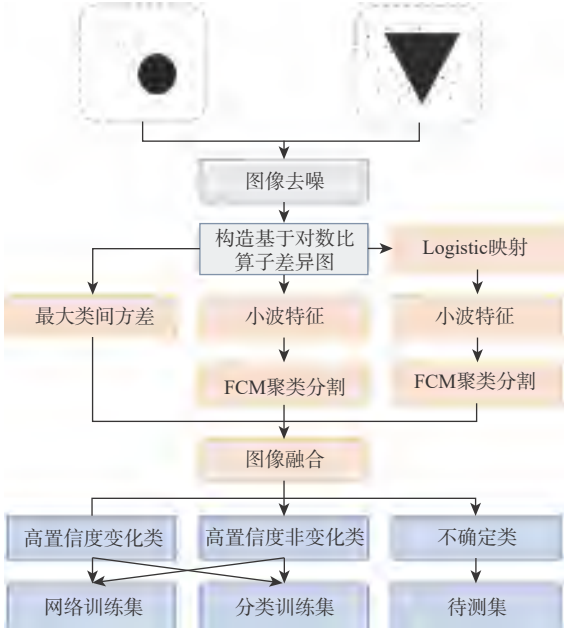


图 1 OGFL 方法流程

Fig. 1 Flow chart of OGFL method

异图。

通过最大类间方差^[20]提取灰度阈值,实现差异图的二值化分割,生成第 1 组低置信度标记结果 L_1 。

提取差异图的 Gabor 小波特征^[18] $\chi_1 = [x_1, x_2, \dots, x_{MN}]^T$,通过 FCM 算法^[8],生成第 2 组低置信度标记结果 L_2 。

提取 Logistic 映射后的差异图的 Gabor 小波特征^[18] $\chi_2 = [x_1, x_2, \dots, x_{MN}]^T$,通过 FCM 算法,生成第 3 组低置信度标记结果 L_3 。

将第 1 组低置信度标记结果 L_1 和第 2 组低置信度标记结果 L_2 相融合。若对于像素位置 (m, n) ,第 1 组低置信度标记结果 L_1 和第 2 组低置信度标记结果 L_2 均为变化类,则像素位置 (m, n) 属于变化类区域 Ω_c ;第 3 组低置信度标记结果 L_3 为非变化类,则像素位置 (m, n) 属于非变化类区域 Ω_u ;其他像素位置 (m, n) 属于不确定类区域 Ω_L 。综合上述结果,构成高置信度“伪标签”矩阵 Y 。上述过程表示如下:

$$Y_j = \begin{cases} 0 & (L_1^j L_2^j)^2 + (L_3^j)^2 = 0 \\ 1 & L_1^j + L_2^j = 2 \\ 0.5 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: j 表示像素位置位于 $(m-1)M+n$ 的像素; L_i^j 为 L_i 中第 j 个像素的标记结果; Y_j 为 Y 中第 j 个像素的高置信度“伪标签”。

1.2 样本数据集构成

首先,在 1.1 节的 2 幅遥感图像中,以 Ω_u 和 Ω_c 区域里的像素位置 j 为中心,取长和宽均为 k 的像素块 p_1^j 和 p_2^j ,将其级联成长和宽分别为 $2k \times k$ 的样本块

$P_j = [p_j^1, p_j^2]$ 。

然后, 在样本块 P_j 中, 随机选取 500 个变化类和 500 个非变化类样本, 构成网络训练集 P_{HN} , 用于深度学习模型的训练; 再利用同样的方法生成分类训练集 P_{HC} , 用于半监督分类器的训练。如果变化类或非变化类真实样本数不足 500, 则生成虚拟样本 $P_k^{[14]}$, 将变化类或非变化类样本个数补至 500 个。同时, P_{HN} 和 P_{HC} 中的真实样本所对应的像素位置 j 不重叠。

最后, 在 1.1 节的 2 幅遥感图像中, 以 Ω_L 区域里的像素位置 j 为中心, 取长和宽均为 k 的像素块, 构成待测集 P_L 。

2 检测方法

本节重点研究统计机器学习算法和深度学习模型相结合的变化检测方法, 讨论 LapSVM 引入 CNN 模型的可能性。CNN 模型包括卷积层、最大池化层、全连接层和 Softmax 层, 可提取基本的视觉特征, 并实现特征分类。基于 LapSVM 的卷积小波神经网络 (convolutional-wavelet neural networks based on LapSVM, CWNLSN) 模型通过对 CNN 模型进行改进, 共包括 2 个部分: 卷积-小波特征提取 (convolutional-wavelet neural networks feature extraction, CWNFE) 模型和基于 LapSVM 的 LSDC 模块, 分别用于特征提取和特征判别。CWNLSN 模型结构如图 2 所示。

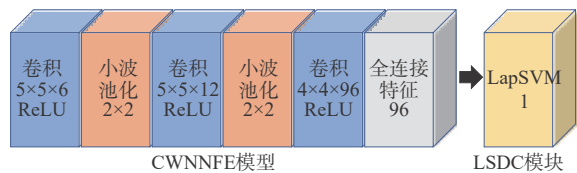


图 2 CWNLSN 模型结构

Fig. 2 CWNLSN model structure

2.1 执行流程

首先, 以网络训练集 P_{HN} 为输入数据, 迭代训练基于卷积小波神经网络 (convolutional-wavelet neural networks, CWNN) 模型, 获得模型参数, 并将其作为 CWNFE 模型参数在下一步使用。CWNN 模型与 CNN 模型的区别在于: CWNN 模型使用离散小波作为下采样方法, 进行池化操作, 而 CNN 模型使用最大池化法, 实现池化操作。

其次, 将分类训练集 P_{HC} 和待测集 P_L 输入已训练完成的 CWNFE 模型中, 获取全连接层输出特征, 将其作为局部空间深度特征。

然后, 将分类训练集 P_{HC} 和待测集 P_L 的局部空间深度特征及部分分类训练集 P_{HC} 的“伪标签”输

入基于 LapSVM 的 LSDC 模块, 重复执行 T 次, 获得 T 组待测集的分类结果。

最后, 综合分析上述 T 组分类结果, 获得最终的变化检测结果。综合分析方法包括投票方法和均值方法。

2.2 卷积-小波特征提取模型

近年来, CNN 被广泛应用于变化检测中, 取得了良好的效果, 但仍存在 2 个局限: ① CNN 模型中的最大池化, 默认以矩形窗口中的最大值作为输出, 无法很好地捕捉前一层特征图的结构纹理, 导致丢失了图像的部分结构, 如边、端点、角等; ② 对于含有大量散斑噪声的遥感图像, 在 CNN 模型提取其深度特征的过程中会出现噪声累计的情况, 使其高级特征无法更好耦合变化检测任务。

针对上述局限, 小波变换^[21]是有效的解决方案。在提取图像特征时, 小波变换考虑了图像结构, 与人类视觉系统相匹配。低频子带中的小波系数越大, 代表平均亮度越高; 高频子带中的小波系数越大, 代表纹理和边缘越复杂。研究人员已将小波变化引入 CNN 模型, Duan 等^[22]提出基于双数复小波池化的图像分割方法, 通过双数复小波池化层代替 CNN 模型的最大池化层。Gao 等^[14]受此启发, 将双数复小波池化引入变化检测领域。双数复小波池化过程产生了 2 个低频子带分量, Duan 和 Gao^[14,22]等取其平均值作为下采样输出, 导致图像结构信息损失。相比之下, 离散小波池化仅产生 1 个低频子带分量, 其下采样输出可直接作为池化层输出, 保留了更加完整的结构信息。

基于上述分析, 设计 CWNFE 模型。其以离散小波变换构造低通池化方式, 实现对深度网络中下采样操作的优化, 用于局部空间深度特征的提取。CWNFE 模型的创新性在于: 通过离散小波池化代替 CNN 模型的最大池化, 保留了更多的结构信息, 抑制了散斑噪声对变化检测精度的影响。CWNFE 模型中的离散小波池化过程如下:

通过离散小波对输入特征 x 实现行列滤波, 获得 4 个子带分量 L_L 、 L_H 、 H_L 、 H_H , 用于生成子带宽度的离散小波的映射函数 $f(\cdot)$ 表达式, 如下:

$\{L_L, L_H, H_L, H_H\} = f(x)$ (2)

选择低频子带分量 L_L 作为小波池化层的输出, 原因有 2 点: ① 低频子带分量可保持输入样本的结构, 更好地表示输入样本; ② 提出高频子带分量, 可以有效地抑制散斑噪声。

综上, CWNFE 模型可表示为 $\{I_1, C_2, W_3, C_4, W_5, F_6\}$ 。 I_1 为输入层, 所有输入样本集均被重新采样为 28×14 大小; C_2 为卷积层, 包含 6 个卷积核, 其

大小为 5×3 ; W_3 为小波池化层, 使用离散小波池化作为小波池化, 代替原有 CNN 模型的最大池化; C_4 为卷积层, 包含 12 个卷积核, 大小为 5×3 ; W_5 为小波池化层; F_6 为全连接层, 共 96 个单元。

2.3 基于 LapSVM 的 LSDC 模块

Chan 等^[23] 提出 PCANet 网络, 通过主成分分析 (principal component analysis, PCA) 代替卷积滤波器提取图像深度特征, 再引入支持向量机 (support vector machine, SVM) 作为监督分类器完成图像分类任务。Gao 等^[24] 受此启发, 提出一种基于 PCANet 的图像变化检测方法, 样本标记方法采用 Gabor 小波变换和 FCM 算法 (Gabor wavelet transform combined with FCM algorithm, GFCM), 特征提取方法采用 PCANet 网络, 特征判别方法采用 SVM 分类器, 取得了良好的变化检测效果。在特征提取环节, 与 PCANet^[24] 类似, CWNNE 模型也是用于提取局部深度特征的网络, 可与分类器相结合, 实现变化检测任务。然而, 在样本标记环节, 与 GFCM 样本标记方法^[24] 不同, OGFL 方法^[12] 判别高置信度“伪标签”的条件更为苛刻, 可用于监督训练的高置信度“伪标签”样本数量相对较少, 不利于 SVM 等监督分类器的训练。因此, 在特征判别方法的设计上, 需要采用对标签样本数量不敏感的分类器, 以便更好地完成变化检测任务。

半监督学习是无监督学习和监督学习相结合的一种学习方法, 通过少量标签数据和大量无标签数据进行学习。当标签数据有限时, 通过半监督学习, 可以获得更准确的分类结果, 大量无标签数据也可改进半监督学习的性能, 有效提升变化检测方法的泛化能力, 适合样本标记结果质量高、数量少的特点。因此, 在特征判别方法的设计上, 将半监督学习引入 SVM 分类器, 降低训练分类器过程中对标签数据的依赖。LapSVM 是一种半监督学习方法, 由拉普拉斯流形正则化和传统 SVM 组成, 通过构建图拉普拉斯算子, 从训练样本的空间分布中进行估算, 表示标签和无标签数据的关系, 具有对标签样本数目不敏感的特点, 适用于对 CWNNE 模型输出的局部空间深度特征进行半监督分类。

基于上述分析, 设计基于 LapSVM 的 LSDC 模块。LSDC 模块以 LapSVM 为半监督分类器, 用于二值化判别由 CWNNE 模型提取的图像深度特征, 其与 CWNNE 模型共同构成 CWNLSN 模型, 创新性在于: LSDC 模块代替了 CNN 模型的 Softmax 层, 解决了激活函数无法根据给定的样本数据自适应调整的局限, 可对 F_6 层输出的局部空间深度特征进行半监督分类, 提升了变化检测精度, 增强了方法

的泛化能力。LSDC 模块的执行流程如下:

首先, 选取 w_1 个有标签数据 $\{(a_i, b_i), 1 \leq i \leq w_1\}$, 其中, a 为在分类训练集 P_{HC} 中选取的局部空间深度特征, b 为其对应的“伪标签”; 选取 w_u 个无标签数据 $\{a_i, w_1 \leq i \leq w_1 + w_u\}$, 其中, a 为在全部待测集 P_L 和部分分类训练集 P_{HC} 中选取的局部空间深度特征。选取的有标签数据和无标签数据中的局部空间深度特征 a 来自于分类训练集 P_{HC} 中不同的训练样本。

然后, 将选取的有标签数据和无标签数据作为 LapSVM 输入数据, 训练半监督分类器。如果训练过程所用的有标签数据发生变化, 可能导致分类器的模型参数和待测集的分类结果也发生变化。因此, 设置 T 为分类判决执行次数, 以随机的方式选取有标签数据 T 次, 分别执行 T 次分类判决, 共获取 T 组待测集 P_L 的分类结果。

最后, 基于 T 组分类结果, 结合“伪标签”矩阵 Y_L 中的变化区域和非变化区域, 获取最终的变化检测结果。具体而言, T 组分类结果的分析方法有 2 种:

1) 投票方法。半监督学习的分类结果易受少量标签数据的影响, 产生差异化的分类结果。因此, 引入集成学习思想, 对 LapSVM 的待测集 P_L 分类结果进行投票表决, 进一步提升变化检测的效果, 其流程如图 3 所示。基于 LapSVM 的 LSDC 模块的投票流程如下:

以待测集 P_L 的像素位置 (m, n) 为单位, 统计 T 组待测集 P_L 的分类结果, 设置阈值比例 τ , 进行投票表决, 获得像素位置 (m, n) 的变化检测结果 $Y_{CD}(m, n)$ 。当某一像素位置 (m, n) 所有的分类结果 $y_{cd}(m, n)$ 为变化类的比例大于阈值比例 τ 时, 判定像素位置 (m, n) 的变化检测结果为变化类; 否则, 判定为非变化类。上述方法如图 3 所示。

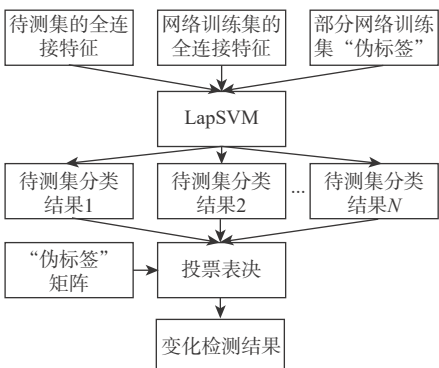


图 3 基于 LapSVM 的 LSDC 模块的投票方法执行流程

Fig. 3 The execution process of voting method for local space deep feature classification module based on LapSVM

$$Y_{CD}(m,n)=\begin{cases} 1 & \sum_{k=1}^T y_{cd}^k(m,n)/T \geq \tau \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

取“伪标签”矩阵 Y_L 中的变化区域、非变化区域及待测集 P_L 投票结果 Y_{CD} 的并集, 构成最终的变化检测结果, 其结果包括 1 张二值结果图和 6 种客观评价指标结果。

2) 均值方法。基于 T 组待测集 P_L 的分类结果, 结合“伪标签”矩阵, 生成 T 组变化检测结果, 每组包括 1 张二值结果图和 6 种客观评价指标结果, 再取上述 T 组结果的均值作为变化检测结果, 其流程如图 4 所示。

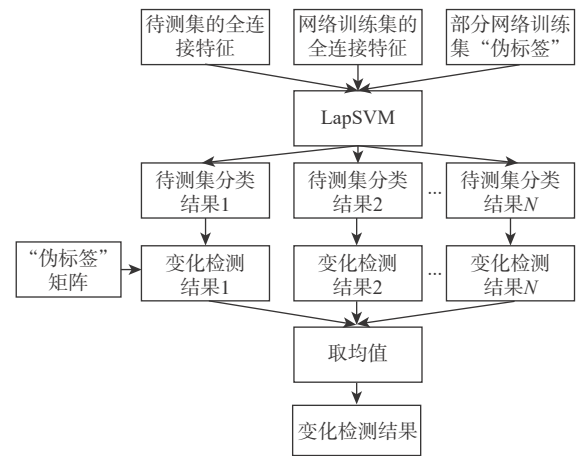


图 4 基于 LapSVM 的 LSDC 模块的均值方法执行流程

Fig. 4 The execution process of the mean method for local space deep feature classification module based on LapSVM

由于 T 张二值结果图的均值无法构成二值图像, 均值方法的输出结果中不含二值结果图。均值方法的均值结果包括 6 种客观评价指标结果, 主要用于评估方法的平均性能。

3 实验设置与结果分析

本文方法的硬件测试平台为处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-6700K、主频为 4.00 GHz、内存为 32.0 GB 的台式机, 软件测试平台为 Windows 操作系统和 MATLAB 软件。

3.1 客观评价指标

为评估本文方法的性能, 选取错检数、漏检数、准确率、 F_1 分数、Kappa 系数和用时等 6 种评估变化检测效果的指标, 其具体含义如下:

- 1) 错检数是指变化检测方法的预测结果为变化类, 而地面真实变化情况为非变化类的像素总数。
- 2) 漏检数是指地面真实变化情况为变化类, 而变化检测方法的预测结果为非变化类的像素总数。

3) 准确率是指变化检测方法预测结果正确的样本数量与总样本数量的百分比。

4) Kappa 系数用于衡量变化检测方法的检测效果, 其数值越趋近于 1, 检测结果与地面真实情况越接近; 其数值越趋近于 0, 则反之。

5) F_1 分数是统计学中用于评估二分类问题精确度的综合指标, 平衡了二分类问题的准确率和召回率。

6) 用时是评估变化检测方法效率的指标, 自方法执行时开始计时, 至获得变化检测结果为止。

3.2 实验方法

本文选取的对比方法包括 PCAK^[25]、PCANet^[24]、CDWNN^[14]、TFCDWNN^[18]、SCapsNet^[12] 等。同时, 为了更好地验证 CWNLSN 模型的性能, 将最大池化、双数复小波池化和离散小波池化等 3 种池化方式, 以及激活函数和 LapSVM 等 2 种特征分类方式交叉组合, 构成 CNN 及其改进模型, 如表 1 所示。

表 1 CNN 及其改进模型

Table 1 CNN model and improved CNN models			
序号	模型	池化方式	特征分类方式
1	CNN	最大池化	激活函数
2	CDWNN	双数复小波池化	激活函数
3	CWNN	离散小波池化	激活函数
4	CNLSN	最大池化	LapSVM
5	CDWNLSN	双数复小波池化	LapSVM
6	CWNLSN	离散小波池化	LapSVM

表 1 中的 CNLSN、CDWNLSN、CWNLSN 模型均包括投票方法和均值方法, 下文以“模型名称-方法名称”表示模型的具体方法, 如 CNLSN 模型的均值方法表示为“CNLSN-mean”。

3.3 数据集

SAR 图像作为一种遥感图像, 受雷达回波特性的限制, 存在较多的散斑噪声^[26], 有效抑制噪声是一项有挑战性的工作。为了检验变化检测方法的性能, 选取多组 SAR 图像数据集, 简要介绍如下:

- 1) 旧金山数据集^[24]是由欧洲 ERS-2 资源遥感卫星拍摄的 SAR 图像, 记录了美国旧金山地区在经受洪水淹没前后的地表变化情况, 分别拍摄于 2003 年 8 月和 2004 年 5 月。
- 2) 黄河数据集^[9]是由 Radarsat-2 号雷达卫星在中国黄河口地区拍摄的 2 幅 SAR 图像, 拍摄时间分别为 2008 年 6 月和 2009 年 6 月。选取 2 个代表性区域, 分别命名为黄河海岸线数据集和黄河农田数据集。第 1 个数据集记录了由于河水冲击导致的河道形状的改变, 第 2 个数据集记录由于农田耕种活动导致的地表覆盖情况的变化情况。

3) 贵州数据集^[27]是由 COSMO-Skymed 卫星传感器采集的联合配准和几何校正的 SAR 图像, 分别于 2016 年 6 月 10 日和 2017 年 4 月 26 日获得。原始图像中包括丘陵、平原和建筑物等不同景观, 明显存在散斑噪声。

3.4 参数设置

为获得准确率随邻域大小的变化曲线, 设置变化曲线横坐标邻域大小为 3、5、7、9、11 和 13, 分类判决执行次数 T 设为 20, 阈值比例 τ 设为 0.5, 取 CWNLSN-vote 投票结果中的准确率为变化曲线纵坐标结果, 如图 5 所示。

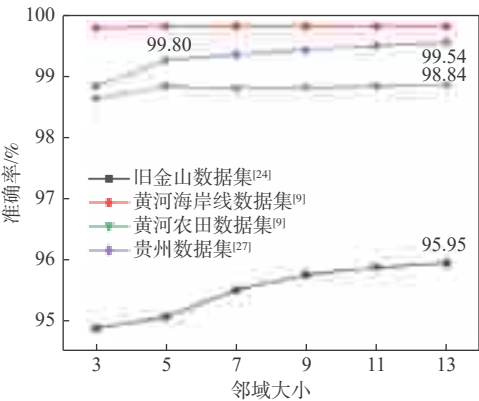


图 5 CWNLSN-vote 投票结果准确率随邻域大小的变化曲线
Fig. 5 Curves of the accuracy of CWNLSN-vote with neighborhood size

在旧金山、黄河农田和贵州数据集上, 准确率均随邻域扩大而升高, 当邻域大小为 13 时, 准确率取得最优解。而在黄河海岸线数据集上, 准确率均随邻域扩大先升高后下降, 当邻域大小为 5 时, 准确率取得最优解。

因此, 为发挥方法的最佳性能, 获得最佳参数, 对于旧金山、黄河农田和贵州数据集, 设置邻域大

小为 13; 对于黄河海岸线数据集, 设置邻域大小为 5。

3.5 对比实验

基于 3.4 节参数设置, 开展对比实验, 实验结果如图 6 和表 2 所示。

在旧金山数据集上, PCANet、TFCDWNN 的结果中存在大量错检像素, PCAK、CDWNN 的结果中存在大量漏检像素。SCapsNet 丢失了部分细节信息, 相比于 CWNLSN-vote, 其精度指标略低, 用时明显更少。与 CDWNN、TFCDWNN 相比, CWNLSN-vote 在 F_1 分数上分别提升 15.37%、8.49%, 在 Kappa 系数上分别提升 19.93%、9.02%, 在用时上分别降低 0.59%、提升 27.43%。

在黄河海岸线数据集上, PCAK、PCANet、CDWNN 方法受散斑噪声影响较大, 尽管其变化检测结果中的错检像素较少, 但均含有大量的漏检像素, 因此, 主观视觉效果较差; 而 TFCDWNN、SCapsNet、CWNLSN-vote 方法的错检像素和漏检像素均较少, 取得了良好主观视觉效果。与 TFCDWNN、SCapsNet 相比, CWNLSN-vote 在 F_1 分数上分别提升 0.80%、0.33%, 在 Kappa 系数上分别提升 0.82%、0.33%, 但在用时上分别提升 21.49%、611.30%。

在黄河农田数据集, PCAK、PCANet、CDWNN 的错检数或漏检数较高, 视觉效果较差。SCapsNet、CWNLSN-vote 取得了良好的视觉效果, 但与 SCapsNet 相比, CWNLSN-vote 在准确率、 F_1 分数、Kappa 系数上均略低, 在用时上更高。从整体上看, CWNLSN-vote 取得次优效果。

在贵州数据集上, TFCDWNN、SCapsNet、CWNLSN-vote 方法的漏检和错检像素之和远小于 PCAK、PCANet、CDWNN 方法的检像素。相比于

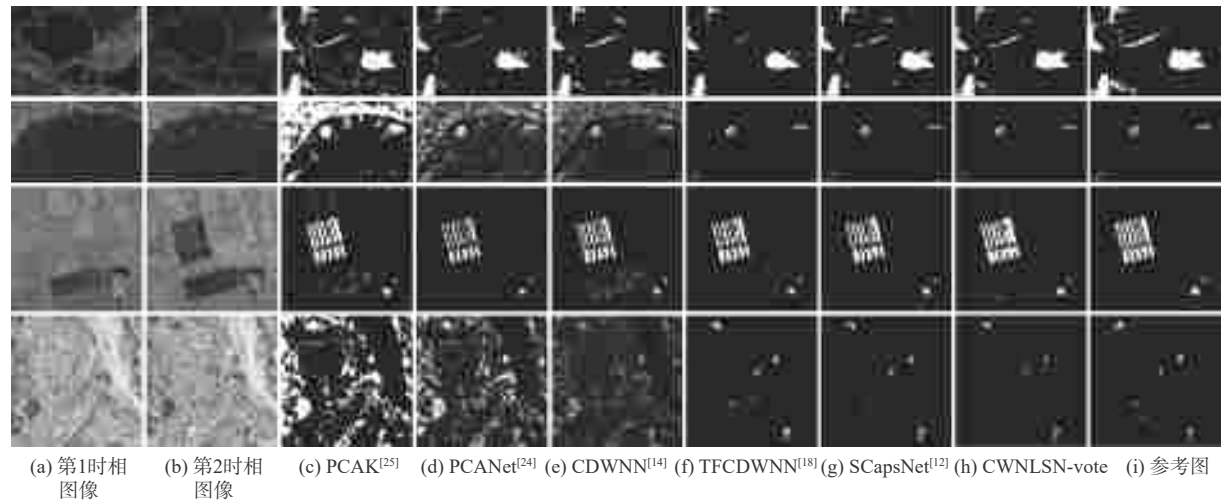


图 6 在旧金山数据集、黄河海岸线数据集、黄河农田数据集、贵州数据集中不同变化检测方法的可视化结果
Fig. 6 Visualization results of different change detection methods in the San Francisco dataset, Yellow River coastline dataset, Yellow River farmland dataset, and Guizhou dataset

表 2 对比实验中多个数据集上变化检测结果的客观评估

Table 2 Objective evaluation of change detection results on multiple datasets in comparative experiments												
方法	错检数				漏检数				准确率/%			
	旧金山	黄河海岸线	黄河农田	贵州	旧金山	黄河海岸线	黄河农田	贵州	旧金山	黄河海岸线	黄河农田	贵州
PCAK ^[25]	2 047	0	490	99	4 033	38 217	1 279	38 768	94.47	69.67	98.01	75.71
PCANet ^[24]	5 122	4	1 345	106	720	28 335	201	31 990	94.69	77.51	98.26	79.94
CDWNN ^[14]	226	51	734	383	13 647	20 258	969	19 069	87.39	83.88	98.09	87.84
TFCDWNN ^[18]	5 849	137	811	324	54	152	213	701	94.63	99.77	98.85	99.36
SCapsNet ^[12]	4 241	171	771	450	723	96	173	451	95.49	99.79	98.94	99.44
CWNLSN-vote	3 929	192	473	582	592	61	560	153	95.95	99.80	98.84	99.54

方法	F_1 分数/%				Kappa系数/%				用时/s			
	旧金山	黄河海岸线	黄河农田	贵州	旧金山	黄河海岸线	黄河农田	贵州	旧金山	黄河海岸线	黄河农田	贵州
PCAK ^[25]	79.68	6.59	84.39	75.71	76.50	4.62	83.33	4.98	0.3	0.5	0.2	0.7
PCANet ^[24]	75.18	8.66	83.54	79.94	72.32	6.76	82.64	6.28	1 262.3	2 491.7	994.2	2 717.5
CDWNN ^[14]	66.46	11.33	84.19	87.84	59.67	9.50	83.18	8.65	607	618	590.8	642.1
TFCDWNN ^[18]	73.34	89.34	89.70	99.36	70.58	89.22	89.09	69.18	473.5	492.4	446.3	225
SCapsNet ^[12]	79.67	89.81	90.50	99.44	77.19	89.71	89.95	69.53	99.8	84.1	204.4	248.6
CWNLSN-vote	81.83	90.14	90.28	99.54	79.60	90.04	89.66	71.01	603.4	598.2	579.2	692.5

TFCDWNN、SCapsNet、CWNLSN-vote 在 Kappa 系数上分别提升 1.83%、1.48%，在 F_1 分数上分别提升 0.18%、0.10%，但在用时上分别增加 207.78%、178.56%。

综上，CWNLSN-vote 方法抑制了散斑噪声，变化检测精度较高，但耗时相对较长。

3.6 消融实验

根据是否采用离散小波池化和基于 LapSVM 的

LSDC 模块，构成 CNN、CWNN、CNLSN、CWNLSN 等 4 种变化检测模型，如表 1 所示。消融实验选择 CNN、CWNN、CWNLSN 模型的均值方法（CWNLSN-mean）、CNLSN 模型的均值方法（CNLSN-mean），检验在 CNN 模型中引入离散小波池化和基于 LapSVM 的 LSDC 模块是否能分别提升变化检测精度。消融实验的实验结果如表 3 所示。

表 3 消融实验中多个数据集上变化检测结果的客观评估

Table 3 Objective evaluation of change detection results on multiple datasets in ablation experiments															
方法	错检数			漏检数			准确率/%			F_1 分数/%			Kappa系数/%		
	旧金山	黄河农田	贵州	旧金山	黄河农田	贵州	旧金山	黄河农田	贵州	旧金山	黄河农田	贵州	旧金山	黄河农田	贵州
CNN	4 378	864	463	515	239	603	95.55	98.76	99.33	79.68	88.88	65.88	77.25	88.22	65.54
CWNN	4 284	852	416	500	215	515	95.65	98.80	99.42	80.19	89.23	69.80	77.82	88.59	69.51
CNLSN-mean	3 996	498	622	559	575	141	95.86	98.79	99.52	81.39	89.89	69.46	79.11	89.25	69.23
CWNLSN-mean	3 837	489	579	559	534	154	96.00	98.85	99.54	82.15	90.34	71.35	79.95	89.73	71.13

通过分析表 3 可知，在旧金山、黄河农田和贵州数据集上，CNN 的 Kappa 系数平均结果为 77.00%，CWNN 的 Kappa 系数平均结果为 78.64%，CNLSN-mean 的 Kappa 系数平均结果为 79.20%，CWNLSN-mean 的 Kappa 系数平均结果为 80.27%。离散小波池化的引入，使 CWNN 相比于 CNN，在 Kappa 系数上提升了 1.64%；使 CWNLSN-mean 相比于 CNLSN-mean，在 Kappa 系数上提升了 1.07%。LSDC 模块的引入，使 CWNLSN-mean 相比于 CWNN，在 Kappa 系数上提升了 1.63%；使 CNLSN-mean 相比于 CNN，在 Kappa 系数上提升了 2.20%。

综上，在 CNN 模型中引入的离散小波池化和基于 LapSVM 的 LSDC 模块均可提升变化检测精度。

3.7 不同池化模块的对比实验

选择采用最大池化的 CNN、CNLSN-mean，采用双数复小波池化的 CDWNN、CDWNLSN-mean，采用离散小波池化的 CWNN、CWNLSN-mean 等 6 种变化检测方法，设置邻域大小为 3、5、7、9、11 和 13，得到不同变化检测结果的 Kappa 系数和 F_1 分数随邻域大小变化的柱状图，如图 7~图 9 所示。当邻域大小为 3~13 时，取不同方法的平均

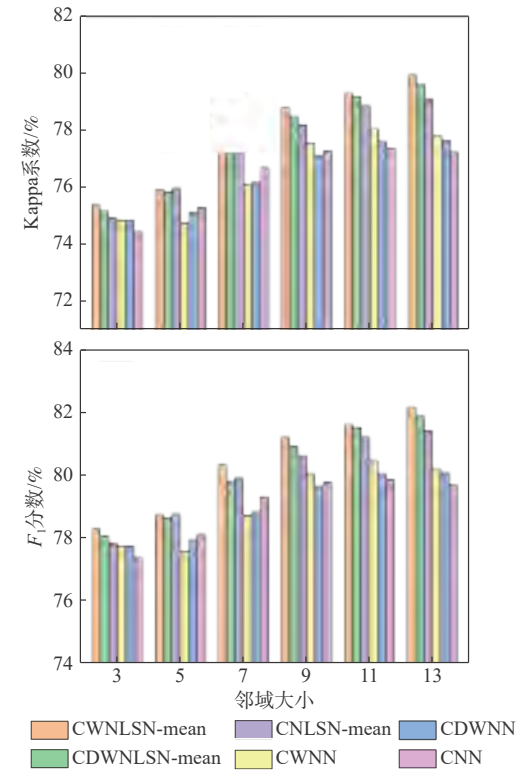


图 7 旧金山数据集上不同变化检测方法的 Kappa 系数和 F_1 分数随邻域大小的变化

Fig. 7 Kappa coefficients and F_1 scores for different change detection methods on the San Francisco dataset as a function of neighborhood size

Kappa 系数和 F_1 分数, 结果如图 10 所示。

由图 7 可知, 在旧金山数据集中, 当邻域较大时, CWNN 的变化检测效果明显优于 CDWNN 和 CNN 方法, CWNN-mean 的变化检测效果明显优于 CDWNLSN-mean 和 CNN-mean 方法。

由图 8 可知, 在黄河农田数据集中, 当邻域大小较小时, CWNN 的变化检测效果明显优于 CDWNN 和 CNN 方法; 当邻域大小较小或较大时, CWNN-mean 的变化检测效果明显优于 CDWNLSN-mean 和 CNN-mean 方法。

由图 9 可知, 在贵州数据集中, CWNN 的变化检测效果均明显优于 CDWNN 和 CNN 方法, CWNN-mean 的变化检测效果明显优于 CDWNLSN-mean 和 CNN-mean 方法。

从图 10 可知, CWNLSN-mean 的变化检测效果明显优于 CDWNLSN-mean 和 CNLSN-mean 方法, 在 Kappa 系数上分别平均提升 0.63%、0.93%, 在 F_1 分数上分别平均提升 0.61%、0.91%; CWNN 的变化检测效果明显优于 CDWNN 和 CNN 方法, 在 Kappa 系数上分别平均提升 0.96%、1.47%, 在 F_1 分数上分别平均提升 0.93%、1.44%。

因此, 相比于最大池化和双数复小波池化, 离

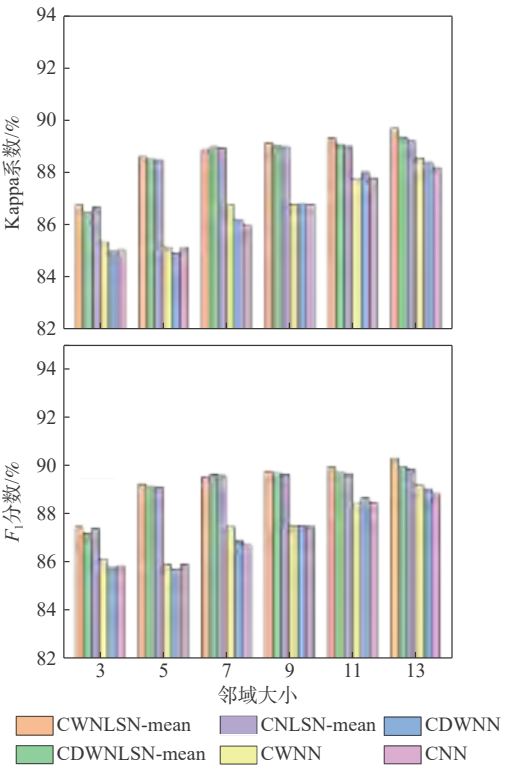


图 8 黄河农田数据集上不同变化检测方法的 Kappa 系数和 F_1 分数随邻域大小的变化

Fig. 8 Kappa coefficients and F_1 scores for different change detection methods on the Yellow River farmland dataset as a function of neighborhood size

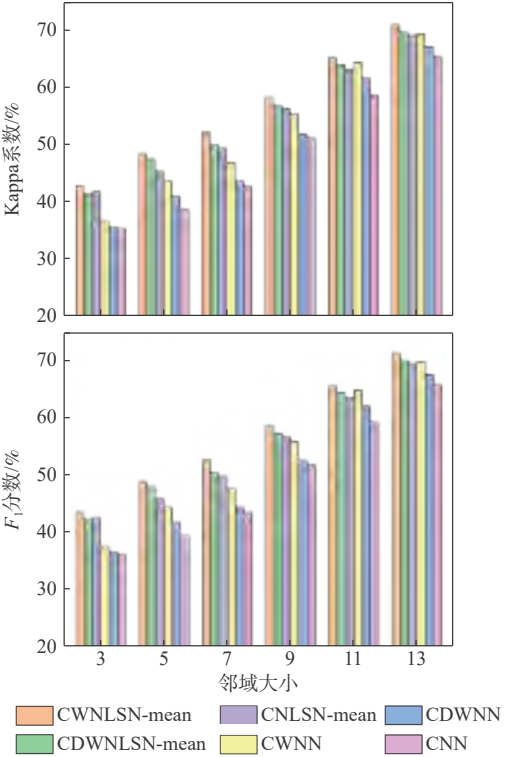


图 9 贵州数据集上不同变化检测方法的 Kappa 系数和 F_1 分数随邻域大小的变化

Fig. 9 Kappa coefficients and F_1 scores of different change detection methods on the Guizhou dataset as a function of neighborhood size

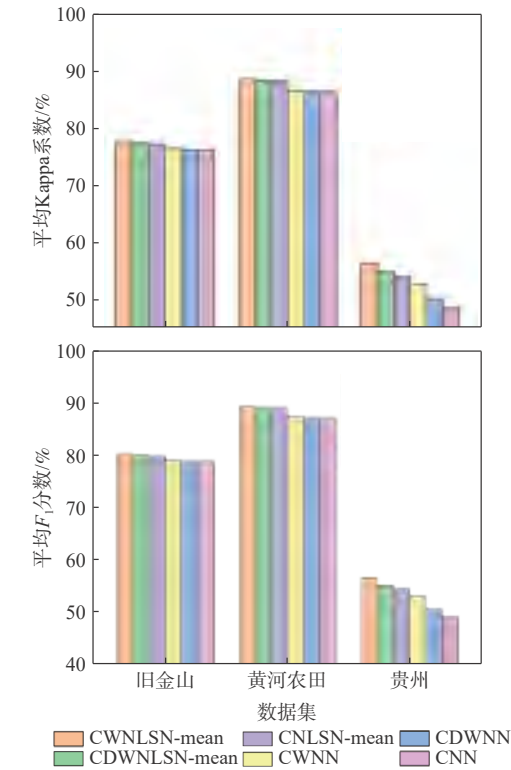


图 10 不同数据集上不同变化检测方法的平均 Kappa 系数和 F_1 分数

Fig. 10 Average Kappa coefficients and F_1 scores for different change detection methods on different datasets

散小波池化对散斑噪声的鲁棒性能更佳。

4 结 论

本文提出基于局部空间深度特征的 SAR 遥感图像变化检测方法, 实现了像素块级变化检测, 结论如下:

- 1) 使用 OGFL 方法, 获得高置信度训练样本, 为实现监督学习模型的有监督训练奠定基础。
- 2) 设计了 CWNFE 模型, 通过离散小波池化代替 CNN 模型的最大池化, 使池化过程保留了更多基本结构信息, 抑制 SAR 图像中的散斑噪声对变化检测精度的影响。
- 3) 设计了 LSDC 模块, 通过 LapSVM 代替 Softmax 层, 解决了激活函数无法根据给定的样本数据自适应调整的局限, 提升了变化检测精度, 增强了变化检测方法的泛化能力。

参考文献 (References)

[1] 杨刚. 基于特征学习与聚类分析的 SAR 图像变化检测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.

YANG G. SAR image change detection based on feature learning and clustering analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021(in Chinese).

[2] 刘国强, 房胜, 李哲. 用于遥感图像变化检测的全尺度特征聚合

网络[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(8): 1464-1470.

LIU G Q, FANG S, LI Z. A full-scale feature aggregation network for remote sensing image change detection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(8): 1464-1470 (in Chinese).

[3] 周圆, 李祥瑞, 杨晶. 基于混合网络的异源遥感图像变化检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(3): 451-460.

ZHOU Y, LI X R, YANG J. Heterogeneous remote sensing image change detection based on hybrid network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(3): 451-460 (in Chinese).

[4] SUN Y L, LEI L, LI X, et al. Nonlocal patch similarity based heterogeneous remote sensing change detection[J]. Pattern Recognition, 2021, 109: 107598.

[5] NAVARRO A, ROLIM J, MIGUEL I, et al. Crop monitoring based on SPOT-5 Take-5 and Sentinel-1A data for the estimation of crop water requirements[J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): 525.

[6] OTHMAN A A, GLOAGUEN R. River courses affected by landslides and implications for hazard assessment: a high resolution remote sensing case study in NE Iraq-W Iran[J]. Remote Sensing, 2013, 5(3): 1024-1044.

[7] GONG M G, ZHOU Z Q, MA J J. Change detection in synthetic aperture radar images based on image fusion and fuzzy clustering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 2141-2151.

[8] BEZDEK J C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms[M]. New York: Plenum Press, 1981.

[9] GONG M G, ZHAO J J, LIU J, et al. Change detection in synthetic aperture radar images based on deep neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(1): 125-138.

[10] LI M K, LI M, ZHANG P, et al. SAR image change detection using PCANet guided by saliency detection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(3): 402-406.

[11] WANG S N, WANG Y N, LIU Y, et al. SAR image change detection based on sparse representation and a capsule network[J]. Remote Sensing Letters, 2021, 12(9): 890-899.

[12] 张益天, 罗喜伶, 王宇鹏. 基于轻量胶囊网络的自监督图像变化检测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(5): 1705-1715.

ZHANG Y T, LUO X L, WANG Y P. Self-supervised image change detection method based on lightweight capsule network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(5): 1705-1715(in Chinese).

[13] LIU F, JIAO L C, TANG X, et al. Local restricted convolutional neural network for change detection in polarimetric SAR images[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(3): 818-833.

[14] GAO F, WANG X, GAO Y H, et al. Sea ice change detection in SAR images based on convolutional-wavelet neural networks[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(8): 1240-1244.

[15] WANG Q, YUAN Z H, DU Q, et al. GETNET: a general end-to-end 2-D CNN framework for hyperspectral image change detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(1): 3-13.

[16] 刘过. 基于深度学习的 SAR 图像变化检测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
LIU G. Study on deep learning-based SAR images change detection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020(in Chinese).

[17] D'HAeyer J P F. Gaussian filtering of images: a regularization approach[J]. Signal Processing, 1989, 18(2): 169-181.

[18] ZHANG X Z, SU H, ZHANG C, et al. Robust unsupervised small area change detection from SAR imagery using deep learning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 173: 79-94.

[19] BOVOLO F, BRUZZONE L. A detail-preserving scale-driven approach to change detection in multitemporal SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(12): 2963-2972.

[20] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.

[21] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.

[22] DUAN Y P, LIU F, JIAO L C, et al. SAR image segmentation based on convolutional-wavelet neural network and Markov random field[J]. Pattern Recognition, 2017, 64: 255-267.

[23] CHAN T H, JIA K, GAO S H, et al. PCANet: a simple deep learning baseline for image classification[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 5017-5032.

[24] GAO F, DONG J Y, LI B, et al. Automatic change detection in synthetic aperture radar images based on PCANet[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(12): 1792-1796.

[25] CELIK T. Unsupervised change detection in satellite images using principal component analysis and K-means clustering[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4): 772-776.

[26] BAZI Y, BRUZZONE L, MELGANI F. An unsupervised approach based on the generalized Gaussian model to automatic change detection in multitemporal SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4): 874-887.

[27] ZHANG X Z, LIU G, ZHANG C, et al. Two-phase object-based deep learning for multi-temporal SAR image change detection[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 548.

SAR remote sensing image change detection method based on local space deep feature

ZHANG Yitian¹, ZHAO Jing^{2,*}, CHEN Jiangyang³, LUO Xiling^{4, 5}

- (1. Cyber Security Industry Development Center (Information Center), Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100846, China;
2. Institute of Science and Technology, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. China Jiuyuan High-Tech Equipment Corporation, Beijing 100094, China;
4. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
5. Hangzhou Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou 310051, China)

Abstract: This research offers an image change detection strategy based on convolutional-wavelet neural networks based on Laplace support vector machine (LapSVM) (CWNLSN) to enhance the generalization and robustness of convolutional neural network (CNN) in change detection applications. Firstly, by using the sample labeling method, high confidence "pseudo labels" are obtained, and the network training set, classification training set, and test set are divided. Secondly, discrete wavelet pooling is used to retrieve local space deep characteristics in CNN. Then, design a local space deep feature classification (LSDC) module based on LapSVM to classify the deep features and distinguish the changed information in the test set. Finally, comparative experiments and ablation experiments were conducted on multiple sets of real remote sensing datasets for testing. The results indicate that the proposed method achieved a more significant change detection effect.

Keywords: change detection; convolutional neural network; discrete wavelet pooling; Laplace support vector machine; local space deep features

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0013

基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标跟踪点航数据关联算法

代睿*, 李洁, 何立火, 高新波

(西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071)

摘 要: 针对密集杂波环境下多源雷达多目标跟踪容易出现数据关联错误、精细化建模数据关联算法计算量大的问题, 提出一种基于轻量化双向长短期记忆 (BiLSTM) 网络的多源雷达多目标跟踪点航数据关联算法。构造杂波环境下雷达回波与目标航迹之间的多源雷达关联事件矩阵; 基于多源雷达点迹与多目标航迹量测预测, 借助最小最大化处理, 设计归一化的距离特征张量; 以归一化的距离特征张量为输入、以关联事件矩阵为输出, 建立基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标点迹/航迹数据关联网络模型。针对每个目标航迹, 以每个雷达输出的最大概率对应的雷达点迹作为关联量测, 利用卡尔曼滤波实现航迹更新。密集杂波环境下多雷达协同跟踪多目标仿真结果表明: 所提算法在关联准确率与跟踪精度方面与集中式联合概率数据关联滤波结果基本一致, 明显优于概率数据关联滤波、最近邻数据关联滤波、基于全连接层的点航关联滤波算法和基于长短期记忆 (LSTM) 网络的点航关联滤波算法; 但平均运行时间明显小于联合概率数据关联滤波, 与最近邻数据关联滤波几乎一致。

关键词: 数据关联; 多目标跟踪; 多源雷达; 双向长短期记忆网络; 轻量化神经网络

中图分类号: TN953

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1139-09

随着雷达技术日新月异的快速发展, 雷达多目标跟踪技术在诸如反导拦截、空中搏斗、交通管控、无人驾驶等军民领域受到了越来越多的关注^[1-3]。随着实际环境的复杂多变, 系统规模的与日俱增, 跟踪质量需求的日益提升, 利用单雷达提供的感知信息对探测视野内感兴趣目标进行实时跟踪已很难满足要求^[3]。因此, 往往需要多平台多源雷达协同实现高质量多目标跟踪^[6]。作为多目标跟踪核心技术之一的数据关联, 也逐渐从单一雷达情况发展至多源雷达情况, 成为制约跟踪质量的关键因素, 受到国内外学者的广泛关注^[1-2,6]。

早期多目标跟踪数据关联算法往往针对单雷

达展开。基于近邻思想, Singer 等提出最近邻数据关联 (nearest neighbor data association, NNDA) 算法, 通过在跟踪波门内判定统计距离最近的雷达点迹并将其作为目标有效回波, 利用卡尔曼滤波获得目标位置、速度等在线递推估计, 实现稀疏杂波下多批次目标跟踪^[7]。考虑雷达回波往往受杂波干扰, 且跟踪波门内可能存在多个雷达点迹, Bar-Shalom 等提出概率数据关联 (probabilistic data association, PDA) 算法, 实现波门内所有雷达点迹对目标状态的加权更新^[8]。考虑到不同目标航迹对应的跟踪波门可能相交, 并导致同一回波落入多个波门之内, Bar-Shalom 等提出联合概率数据关联 (joint PDA,

收稿日期: 2024-01-10; 录用日期: 2024-03-21; 网络出版时间: 2024-04-15 20:01

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240412.1504.003

基金项目: 国家自然科学基金 (62036007, 62276203)

* 通信作者. E-mail: dairui168@126.com

引用格式: 代睿, 李洁, 何立火, 等. 基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标跟踪点航数据关联算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1139-1147. DAI R, LI J, HE L H, et al. Light-weight BiLSTM-based data association algorithm between echoes and tracks for multi-radar multi-target tracking [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1139-1147 (in Chinese).

JPDA)算法,通过关联事件的有效拆分,保证同一雷达回波仅更新一个目标航迹,实现了密集杂波下多目标数据关联^[8]。基于上述关联思想,相关学者提出了一系列改进算法,例如,基于所有目标统计距离最小的全局 NNDA(global NNDA, GNNDA)、考虑目标存在概率的综合 PDA(integrated PDA, IPDA)、考虑关联准确率与计算代价折中的集合 JPDA(set JPDA, SJPDA)等^[9-11]。此外,考虑每个新接收到雷达点迹可能来自新目标、虚警或已有航迹,Reid 提出多假设跟踪(multiple hypothesis tracking, MHT)方法^[12],通过对建立的时间窗内多个候选假设的概率评估及管理来实现多目标跟踪,并衍生出面向假设和面向航迹的 MHT 两类经典实现^[12-13]。

借助随机有限集理论建模观测视域内多目标/多回波模型, Mahler 提出概率假设密度(probability hypothesis density, PHD)滤波^[14],避免了显式的数据关联求解,受到了多目标跟踪领域的广泛关注,并衍生出一系列诸如势 PHD(cardinalized PHD, CPHD)滤波、多伯努利滤波、广义标签多伯努利滤波等衍生方法^[14-15]。

上述无论经典数据关联算法还是 PHD 滤波方法,往往都是基于模型驱动实现的,如 JPDA 算法依赖于雷达点迹似然分布、PHD 滤波依赖于杂波分布模型等。事实上,在复杂环境下,对多目标跟踪系统进行准确建模往往非常困难。近年来,随着计算机算力的飞速发展,以海量样本数据为驱动并结合实际应用的深度学习^[16]正逐步改变,甚至替代基于严格数学推导的模型驱动方法,其在目标跟踪领域也逐渐崭露头角,受到越来越多关注^[17-18]。借助长短期记忆(long short- term memory, LSTM)网络表征目标机动运动, Liu 等提出无杂波环境下基于深度学习的机动目标跟踪方法,在训练样本充裕的条件下,相比于传统跟踪算法,获得了更高的跟踪精度^[19]。考虑状态空间建模存在先验未知参数, Revach 等提出神经网络辅助下卡尔曼滤波方法,在非合作单目标跟踪中进行了仿真验证^[20]。针对杂波环境下多目标跟踪, Milan 等借助循环神经网络,提出基于 LSTM 的多目标数据关联方法,实现新生目标、持续目标与拟消失目标的有效跟踪^[21]。Liu 等利用 LSTM 构造了 DeepDA,通过时间反向传播算法结合 RMSProp 优化实现对 DeepDA 的监督训练,直接得到杂波环境下雷达点迹/目标航迹的关联概率,在多目标交叉等典型场景进行了验证^[22]。Verma 等针对三维强机动目标跟踪,构建了包括状态预测、状态滤波更新、航迹管理及数据关联等模块化端到端的雷达多目标跟踪方法,并在广义最优次模式分配

度量下验证了所提方法的有效性^[23]。此外,李文娜等设计了一种基于 Transformer 网络的多目标跟踪数据关联方法,利用掩蔽交叉熵损失与重叠度损失相结合的损失函数来优化网络参数,解决了多目标与多量测的匹配问题^[24]。

然而,上述深度学习多目标数据关联方法仅针对单一雷达情况。对于多源雷达多目标跟踪数据关联而言,传统模型驱动数据关联方法在单雷达数据关联基础上,要么采取雷达点迹扩维形式进行处理,要么利用序贯方式对多源雷达点迹一一关联^[6]。针对多源雷达多目标跟踪数据关联,如何既能继承网络的泛化能力和自学习能力,又能充分挖掘多源雷达数据特征,以保证数据关联的准确性,从而获得优于单雷达多目标跟踪的航迹质量,具有重要的工程应用价值但仍然是一个开放的问题。

基于上述讨论,考虑多源雷达数据关联本质上是一类依赖于历史数据推理当前决策的过程,本文提出基于轻量化 BiLSTM(bi-directional LSTM)的多源雷达多目标跟踪点航数据关联算法。具体创新点如下:首先,设计了多源雷达点迹数据归一化预处理方法,以构造适应于深度神经网络的特征张量输入;其次,构建了面向多源雷达多目标跟踪的轻量化 BiLSTM 数据关联网络,实现多雷达下关联概率矩阵的在线学习;最后,借助关联概率矩阵最优寻优,完成可变目标数量的 0/1 关联结果输出,并借助卡尔曼滤波实现目标状态的更新输出。仿真结果表明,在密集杂波环境下,本文算法在运行时间较少的情况下获得了满意的跟踪精度。

1 问题描述

考虑 S 个雷达协同对感兴趣区域进行多目标跟踪,目标个数最大为 N 。记第 i 个目标服从的离散时间动力学运动方程为

$$\mathbf{x}_{i,k} = \mathbf{F}_{i,k-1}\mathbf{x}_{i,k-1} + \mathbf{w}_{i,k-1} \tag{1}$$

式中: $\mathbf{x}_{i,k} \in \mathbf{R}^{n_x}$,表示 k 时刻第 i 个目标的状态向量; $\mathbf{F}_{i,k-1}$ 为第 i 个目标的状态转移矩阵; $\mathbf{w}_{i,k-1}$ 为均值为 0、协方差为 $\mathbf{Q}_{i,k-1}$ 的高斯白噪声,即 $\mathbf{w}_{i,k-1} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{Q}_{i,k-1})$,其代表目标运动建模的不确定性。

假设第 i 个目标被第 j 个雷达 ($j = 1, 2, \cdots, S$) 有效探测且获得的相应雷达点迹为 $\mathbf{z}_{j,k}^\ell$,则相应量测模型为

$$\mathbf{z}_{j,k}^\ell = \mathbf{H}_{j,k}^\ell \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{v}_{j,k}^\ell \tag{2}$$

式中: $\mathbf{H}_{j,k}^\ell$ 为第 j 个雷达中第 ℓ 个量测的量测矩阵; $\mathbf{v}_{j,k}^\ell$ 为量测噪声,其为零均值、协方差为 $\mathbf{R}_{j,k}$ 的高斯白噪声。对于第 j 个雷达而言,受复杂环境的影响,

其在 k 时刻获得的雷达点迹可能仅包含部分(受检测概率限制,往往并非全部)真实目标回波,且可能包含虚假杂波。因此,记 k 时刻第 j 个雷达获得的雷达点迹集合 $Z_{j,k} = \{z_{j,k}^\ell, \ell = 1, 2, \dots, m_{j,k}\}$ 。 $m_{j,k}$ 表示第 j 个雷达在 k 时刻获得的雷达点迹总个数。

假设 k 时刻存在 N_k 条目标航迹需要与各雷达点迹集合 $\{Z_{1,k}, Z_{2,k}, \dots, Z_{S,k}\}$ 中相应点迹进行关联,并在此基础上利用卡尔曼滤波获得各目标航迹的状态更新。本文假定每个雷达点迹至多与一条目标航迹关联,且每条目标航迹至多关联每个雷达的一个点迹。换言之,多源雷达多目标数据关联即寻找关联矩阵:

$$\mathbf{A}_k = [\mathbf{A}_{1,k} \quad \mathbf{A}_{2,k} \quad \dots \quad \mathbf{A}_{S,k}] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}_{j,k}$ 表示 k 时刻第 j 个雷达点迹集合 $Z_{j,k}$ 与 N_k 个目标航迹的关联结果,且 $\mathbf{A}_{j,k} = [a_{j,k}^{\tau\ell}]$,其中, $\tau = 1, 2, \dots, N_k$ 表示第 τ 个目标航迹, $\ell = 1, 2, \dots, m_{j,k}$ 表示集合 $Z_{j,k}$ 中第 ℓ 个雷达点迹。进一步地:

$$a_{j,k}^{\tau\ell} = \begin{cases} 1 & z_{j,k}^\ell \text{来自目标}\tau \\ 0 & z_{j,k}^\ell \text{与目标}\tau \text{无关} \end{cases} \quad (4)$$

且

$$\begin{cases} \sum_{\tau=1}^{T_k} a_{j,k}^{\tau\ell} \leq 1 \\ \sum_{\ell=1}^{m_{j,k}} a_{j,k}^{\tau\ell} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

即 $Z_{j,k}$ 中第 ℓ 个雷达点迹可能来自某个目标、也可能为杂波;第 τ 个目标可能与某个雷达点迹关联,也可能未关联到任一雷达点迹。

在获得 k 时刻多源雷达关联结果后,基于式(1)和式(2),借助卡尔曼滤波即可获得相应目标航迹的状态更新,并继续进行第 $k+1$ 步的多源雷达多目标数据关联跟踪。依次递推,即可获得探测视野内多目标跟踪航迹。

模型驱动的多源雷达数据关联方法在假设量测噪声分布、杂波分布先验已知的前提下,类似于单一雷达数据关联方法,借助式(5)的约束条件并进行适当变形,通过复杂地在线寻优来获得式(3)的近似求解。然而,可靠的先验建模,特别是杂波分布模型,往往难以事先获得,且实际应用环境的复杂多变也常常造成先验建模存在失配风险。事实上,相比于跟踪系统准确建模,利用累积/仿真的大量经人工判定的雷达点迹/目标航迹关联结果,学习其内在结构特征,构建多源雷达多目标跟踪数据关联深度神经网络,相比于模型驱动数据关联方法,往往能够获得更快、且准确性更高的雷达点迹/

目标航迹关联结果,从而为高质量目标跟踪提供可靠量测数据。

2 本文算法

考虑不同雷达获得的雷达点迹数据取值范围不同,不利于后续深神经网络的处理,首先,对所有雷达点迹数据进行预处理,构造归一化的特征张量。在此基础上,考虑数据关联本质上是一类利用历史累积事件决策当前事件的过程,借助 BiLSTM 在时序处理、自学习和非线性变换等方面的优势,构造基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标数据关联深度神经网络,输出取值在 $[0,1]$ 之间的概率关联矩阵。最后,利用最值寻优,实现可变目标数目的0/1关联结果输出。考虑到重杂波环境或多目标交叉运动等典型场景,雷达点迹/目标航迹关联结果与过去时刻和未来时刻关联结果都有直接相关性,因此,采取 BiLSTM 进行关联事件学习。同时,“轻量化”是指采取少层或单层 BiLSTM 模块来实现数据关联网络,以便进行快速的网络训练,适用不同场景下多源雷达多目标跟踪。

2.1 多源雷达点迹数据特征张量构造

k 时刻多源雷达协同跟踪 $N_k(N_k \leq N)$ 个目标,记 $k-1$ 时刻第 i 个目标航迹的状态估计为 $\hat{\mathbf{x}}_{i,k-1}$,借助卡尔曼滤波,可获得 k 时刻该目标在全局坐标系对应的量测预测为 $\hat{z}_{i,k|k-1}$ 。

对于雷达 j 在 k 时刻获得的所有雷达点迹 $z_{j,k}^\ell$ (假设其已转换至全局统一坐标系), $\ell = 1, 2, \dots, m_{j,k}$,构造其与 $\hat{z}_{i,k|k-1}$ 的距离度量,即

$$d_{j,k}^{\ell} \triangleq \|\hat{z}_{i,k|k-1} - z_{j,k}^\ell\| \quad (6)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示合适的距离范数,如欧氏距离或考虑量测噪声标准差的马氏距离^[25]。

针对每个目标航迹与每个雷达的任一点迹,进行上述距离求取操作,进而组成特征张量 $\mathbf{D}_k \in \mathbf{R}^{N \times \sum_{j=1}^S m_{j,k}}$ 。若此时被跟踪航迹个数小于 N ,则对最后的 $N - N_k$ 行填0。考虑不同雷达点迹之间、雷达点迹/预测量测间的距离远近不一,为进一步提高深度神经网络模型精度和收敛速度,对特征张量进行如下最大最小标准化处理,即

$$\tilde{d}_k^{\tau q} = \frac{d_k^{\tau q} - \min\{d_k^{\tau q}\}}{\max\{d_k^{\tau q}\} - \min\{d_k^{\tau q}\}} \quad (7)$$

式中: $\tau = 1, 2, \dots, N, q = 1, 2, \dots, \sum_{j=1}^S m_{j,k}$, $d_k^{\tau q}$ 为 $\mathbf{D}_k$ 中第 τ 行、第 q 列元素; $\min\{d_k^{\tau q}\}$ 和 $\max\{d_k^{\tau q}\}$ 分别表示 $\mathbf{D}_k$ 中的最小值和最大值。经过式(7)转换,以 $\tilde{d}_k^{\tau q} \in [0,1]$

作为元素构造归一化特征张量 $\tilde{D}_k$,将 $\tilde{D}_k$ 作为后续深度神经网络的输入。

2.2 基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标点迹/航迹关联

本节给出多源雷达多目标点航数据关联深度神经网络,本文以归一化特征张量 $\tilde{D}_k=[\tilde{D}_{1,k},\tilde{D}_{2,k},\cdots,\tilde{D}_{S,k}]$ 为输入,输出各雷达点迹集合与目标航迹的关联矩阵 $A'_k\in\mathbf{R}^{(N+1)\times\sum_{j=1}^N m_{jk}}$,其中,第 $\sum_{r=1}^{j-1} m_{r,k}+1$ 到 $\sum_{r=1}^j m_{r,k}$ 列表示第 j 个雷达的关联概率矩阵 A'_{jk} ,最后一行表示相应雷达点迹未关联到任一目标航迹。

基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标点迹/航迹关联深度神经网络如图 1 所示。“轻量化”是相对于多层 BiLSTM 网络而言,轻量化网络可以明显降低网络模型复杂程度、减少参数量,以提升多平台多目标点迹/航迹关联的时间效率。在本文后续仿真中,采取一层 BiLSTM 网络。

如图 1 所示, ℓ_j 表示第 j 个雷达的第 ℓ_j 个点迹,且 $j=1,2,\cdots,S$ 。同时, $\ell_j=1,2,\cdots,M$,对于第 j 个雷达点迹集合而言,若 $m_{jk}<M$,则剩余雷达点迹通过 0

补齐。

首先,归一化的距离特征张量输入 BiLSTM 层,BiLSTM 包含前向 LSTM 和后向 LSTM 单元,用于学习时间顺序关联事件和时间逆序关联事件的结构特征,同时把输入的低维特征向量映射到高维空间进行表示。本文 h_τ^f 和 h_τ^b 分别表示第 τ 个前向 LSTM 和后向 LSTM 的隐层状态, $\tau=0$ 代表相应的初始输入,该模块将前向和后向的隐向量进行拼接后输出。经过 BiLSTM 层,网络输出维数为 $N\times Q$,其中, Q 表示该 BiLSTM 层神经元个数。随后,BiLSTM 的输出通过维度重整,获得每个雷达对应的高维特征,从而将上一层输出的各目标特征向量重构为多通道向量,且通道数与雷达个数保持一致。维度重整后输出维数为 $1\times S\times Q'$,其中, $Q'=Q/S$ 。再次,应用一维卷积核进行特征降维,将高维特征的维数映射到每一平台最大回波维数,本文卷积核大小为 3×3 。通过多通道卷积滤波后,输出维数为 $1\times S\times M'$,其中, $M'=M+1$ 。最后,Softmax 层将输出的低维向量转换为范围在(0,1)且相加为 1 的概率分布,通过拉平多通道内各航迹与相应雷达点迹

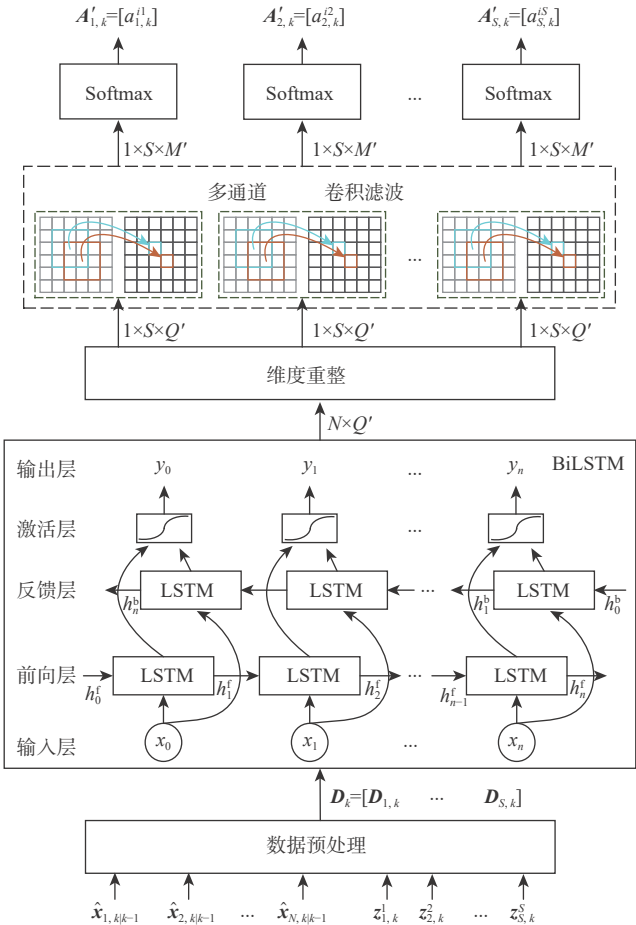


图 1 基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标点航关联

Fig. 1 Light-weight BiLSTM-based data association between multiple echoes and multiple tracks for multiple radars tracking multiple targets

的概率分布向量得到最终的关联概率矩阵。

对于多源雷达多目标跟踪点航数据关联,不同雷达点航关联结果相互影响,由于 BiLSTM 网络自身结构特性,其可以充分考虑各雷达点迹关联结果间的影响,这也是选择 BiLSTM 网络设计数据关联深度神经网络的主体网络的关键因素。

此外,多源雷达多目标数据关联深度神经网络的损失函数表示如下:

$$l_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^N \|A'_{jk}(i, \cdot) - A^*_{jk}(i, \cdot)\|_2 \quad (8)$$

式中: $A'_{jk}(i, \cdot)$ 和 $A^*_{jk}(i, \cdot)$ 分别为网络输出的第 i 个目标与雷达 j 点迹集合 Z_{jk} 的关联概率和相应的真实关联概率; $\|\cdot\|_2$ 表示向量 2 范数。

2.3 关联结果判决

在获得关联概率矩阵后,对于每个雷达点迹 $z_{jk}^\ell (\ell = 1, 2, \dots, m_{jk}, j = 1, 2, \dots, S)$, 若有:

$$\tilde{a}_{jk}^{\ell} = \max\{a_{jk}^{\ell}, \dots, a_{jk}^{N\ell}, a_{jk}^{(N+1)\ell}\} \quad (9)$$

则当 $1 \leq i' \leq T_k$ 时,该雷达点迹与第 i' 条目标航迹关联,基于式 (1) 和式 (2),利用卡尔曼滤波可获得该航迹在 k 时刻的状态更新;当 $i' > T_k$ 时,该雷达点迹未关联到任意一条目标航迹,其或为杂波点,或为新生目标点迹,应转至航迹起始过程进行处理。

3 仿真实验

考虑二维平面直角坐标系 $O\xi\eta$ 下多源雷达多目标跟踪。本文雷达数目 $S = 3$ 。所有目标均进行匀速直线运动,目标状态皆为 $\mathbf{x}_k \triangleq [\xi_k, \dot{\xi}_k, \eta_k, \dot{\eta}_k]^\top$, 其中, ξ_k 和 η_k 分别表示 ξ 轴和 η 轴的位置, $\dot{\xi}_k$ 和 $\dot{\eta}_k$ 分别表示 ξ 轴和 η 轴的速度。本文所有目标皆进行近似匀速直线运动,运动方程如式 (1) 所示,且状态转移矩阵和过程噪声协方差如下:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{Q}_{i,k} = \begin{bmatrix} \frac{T^3}{3} & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^2}{2} & 1 \end{bmatrix} \otimes (\varepsilon \mathbf{I}_2) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon = 10^{-4}$; “ $\otimes$ ” 表示克罗内克积; T 为采样时刻,本文 $T = 1$ s; $\mathbf{I}_2$ 为 2×2 的单位矩阵。

各雷达进行坐标转换后均位于坐标原点,且相应量测模型中 $\mathbf{H}_k = [10] \otimes \mathbf{I}_2$, $\mathbf{R}_k = 15^2 \mathbf{I}_2$ 。考虑密集杂波场景,杂波均匀分布在探测视域内,杂波密度 $\lambda = 10^{-3}$,且杂波数目皆服从参数为 λ 的泊松分布。

在 Windows10 系统上进行实验,采取 Pytorch 深度学习框架。实验平台硬件配置如下: CPU 参数 Intel Core i7-10700k, GPU 参数 NVIDIA GeForce

RTX 2070 SUPER 8 GB,内存为 32 GB。训练过程中,使用 Adam 算法,进行 BiLSTM 网络参数学习。

在仿真实验中,仿真直线运动轨迹共 280 000 条,每 4 条轨迹形成一个多目标场景,总计仿真 70 000 个场景,其中,50 000 个场景用于训练深度神经网络,20 000 个场景用于算法测试。在每个场景中,所有目标同时出现,同时消失,目标运动时间为 30 s。需要说明,所有训练场景和测试场景,目标过程噪声不同、杂波出现位置及时刻不同且量测噪声不同。同时,50 000 个训练场景和 20 000 个测试场景不存在重复场景。本文在所构建的多源雷达多目标数据关联深度神经网络中,采取一层 BiLSTM 层,隐藏单元数 160 个,卷积核大小为 3×3 。图 2 为密集杂波多目标仿真轨迹与多源雷达点迹示意图。图中,4 个目标皆从左至右运动,在 12 s 左右 4 个目标存在两两航迹交叉;在 20 s 左右,目标 1 和目标 2、目标 3 和目标 4 再次出现航迹交叉。

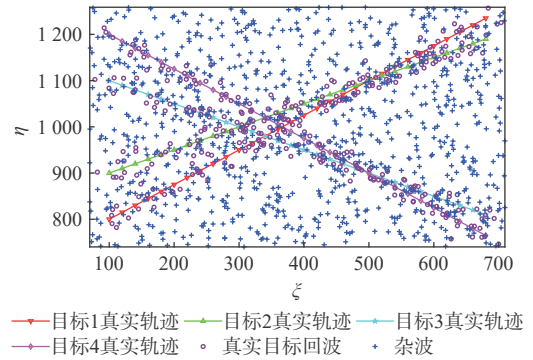


图2 密集杂波环境下多目标轨迹与多源雷达点迹示意图
Fig. 2 Illustration of multiple target trajectories and echoes from multiple radars in dense clutter environment

本文算法与集中式 JPDA、PDA 和 NNDA 等概率统计框架下点航关联算法(分别记为 JPDAF、PDAF 和 NNDAF)及将 BiLSTM 替换为全连接层和 LSTM 等数据驱动下点航关联算法(分别记为 FCL 和 LSTM)进行仿真对比。同时,皆采取卡尔曼滤波实现目标航迹更新。LSTM 和 FCL 的网络层数及神经元个数设置与本文算法保持一致。

图 3 和图 4 为单次测试下目标真实轨迹与跟踪航迹的对比示意图。明显地,对于 JPDAF 和本文算法而言,皆能准确地获得所有目标的跟踪航迹;对于 PDAF 和 NNDAF 而言,由于其不能适应密集杂波环境,总是会有跟偏的情况;对于 FCL 和 LSTM 而言,由于两者皆无法可靠学习不同雷达点航关联结果的相关性,也出现了部分航迹跟踪误差较大的现象。为清晰对比不同算法的跟踪结果,并未采取航迹终结措施。

针对测试场景,图 5 和图 6 给出了各对比算法

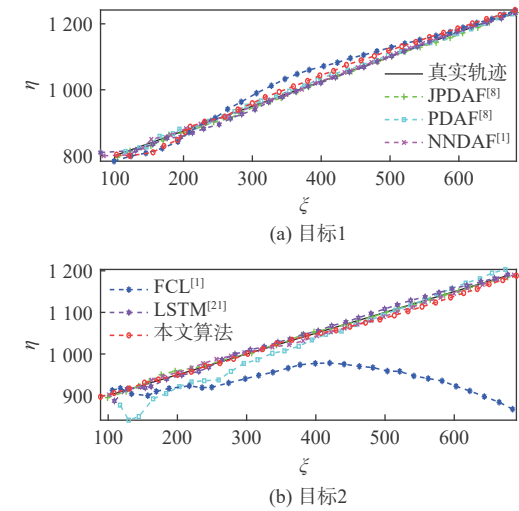


图3 单次测试下目标1和目标2真实轨迹与跟踪航迹对比
Fig. 3 Comparison between true trajectories and estimated tracks of targets 1 and 2 in a single testing scenario

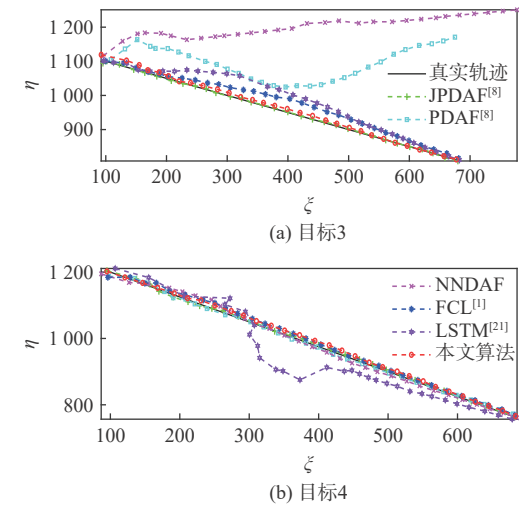


图4 单次测试下目标3和目标4真实轨迹与跟踪航迹对比
Fig. 4 Comparison between true trajectories and estimated tracks of targets 3 and 4 in a single testing scenario

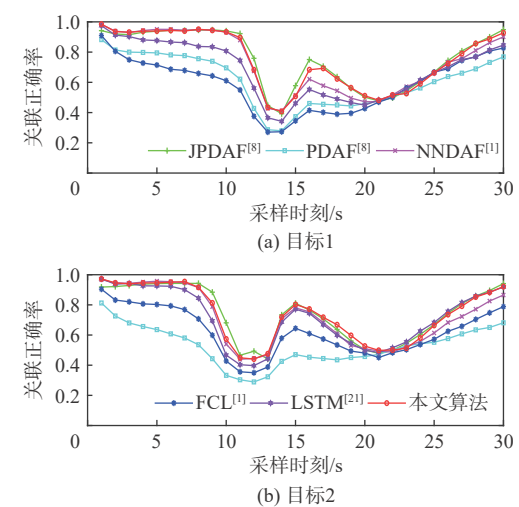


图5 测试场景下目标1和目标2的关联正确率
Fig. 5 Association accuracies of targets 1 and 2 in the testing scenario

针对不同目标所统计的关联准确率。此外,图7和图8给出了各对比算法针对不同目标的位置估计均方根误差曲线,同时,表1给出了各对比算法的平均运行时间。本文针对目标*i*,其关联准确率计算如下:

$$\bar{\rho}_{i,k} \triangleq \sum_{t=1}^M \sum_{j=1}^S \rho_{jk}^{i(t)} / (S \times M) \quad (11)$$

式中:*k*为采样时刻; $\rho_{jk}^{i(t)}$ 为相应算法在第*t*次测试中目标*i*与雷达*j*正确的回波点的关联概率;*M*为测试总次数。针对目标*i*,其位置估计均方根误差计算如下:

$$R_{\text{MSE},k}^i = \sqrt{\sum_{t=1}^M \left((\xi_k^{i(t)} - \hat{\xi}_k^{i(t)})^2 + (\eta_k^{i(t)} - \hat{\eta}_k^{i(t)})^2 \right) / M} \quad (12)$$

式中: $[\xi_k^{i(t)}, \eta_k^{i(t)}]^T$ 为第*t*次测试中目标*i*的真实位置;

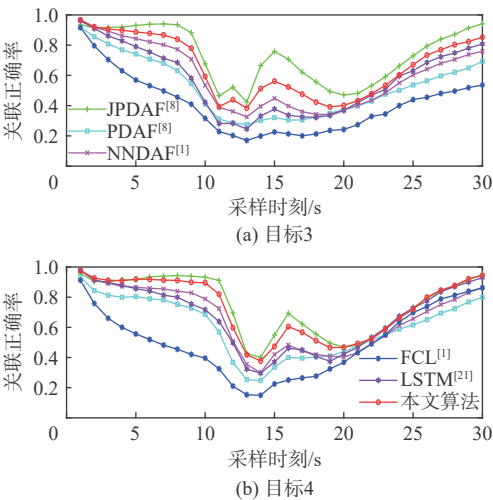


图6 测试场景下目标3和目标4的关联正确率
Fig. 6 Association accuracies of targets 3 and 4 in the testing scenario

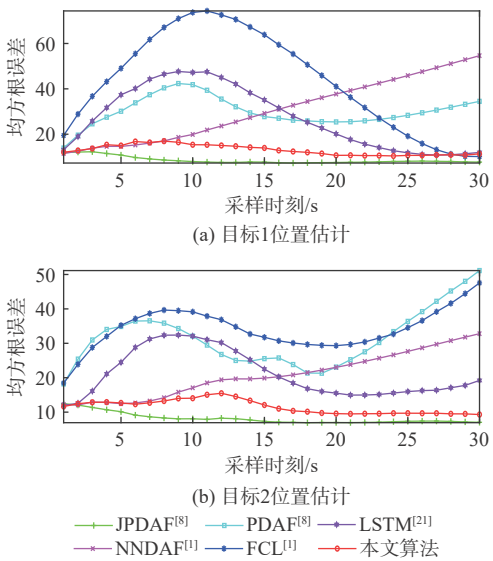


图7 测试场景下目标1和目标2的位置估计均方根误差
Fig. 7 Root mean square errors of estimated positions of targets 1 and 2 in the testing scenario

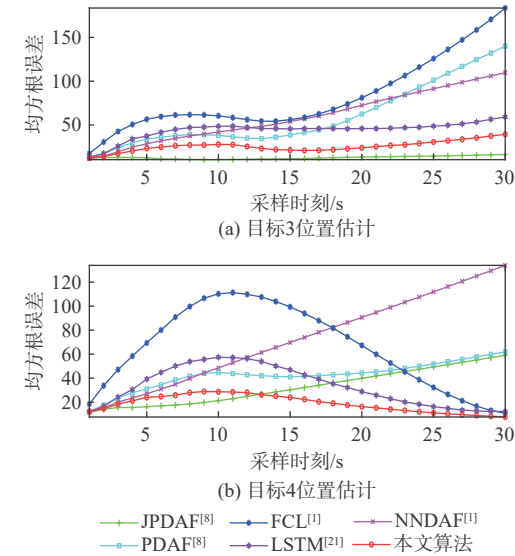


图 8 测试场景下目标 3 和目标 4 的位置估计均方根误差
Fig. 8 Root mean square errors of estimated positions of targets 3 and 4 in the testing scenario

$[\hat{x}_k^{(i)}, \hat{y}_k^{(i)}]^T$ 为相应航迹的位置估计。

如图 5 和图 6 所示, 本文算法的关联准确率仅次于最优的 JPDAF 算法, 两者皆优于 PDAF、NNDAF、FCL 和 LSTM 算法。同时, 如图 7 和 8 所示, 针对目标 1、目标 2 和目标 3, 本文算法的位置估计均方根误差大于相应的最优 JPDA 算法; 针对目标 4, 本文算法的位置估计均方根误差在第 13 s~第 30 s 小于相应的最优 JPDAF。更为关键地, 针对所跟踪的所有目标, 本文算法的位置估计均方根误差皆小于相应的 PDAF、NNDAF、FCL 和 LSTM 的位置估计均方根误差。此外, 由表 1 可知, 在该测试场景下, 本文算法的平均运行时间与 FCL、LSTM 的平均运行时间基本一致, 且与 NNDAF 的平均运行时间相当, 小于 PDAF 的平均运行时间。JPDAF 的平均运行时间是其他对比算法的 10 倍左右。

综上所述, 本文算法在关联准确率及跟踪精度方面与集中式最优 JPDAF 算法基本相当, 而平均运行时间仅是 JPDAF 算法的 7.3%。同时, 相比于概率统计框架下 PDAF 和 NNDAF 算法及数据驱动

表 1 测试场景下不同对比算法平均运行时间

Table 1 Average running time of different compared algorithms in testing scenarios	
算法	平均运行时间/s
JPDAF ^[8]	9.504 6
PDAF ^[8]	0.989 5
NNDAF ^[1]	0.692 4
FCL ^[1]	0.701 3
LSTM ^[21]	0.665 5
本文算法	0.696 2

下 FCL 和 LSTM 算法, 本文算法具有更小的跟踪误差和更高的关联准确率, 且上述算法的平均运行时间基本维持在同一数量级。因此, 针对非合作目标跟踪中对跟踪精度与实时性都要求较高的场景, 相比于对比算法, 本文算法具有更优性能。

4 结 论

为解决密集杂波下多源雷达多目标跟踪时易关联错误且计算量大的问题, 本文提出一种基于轻量化 BiLSTM 的多源雷达多目标跟踪点航数据关联算法。

1) 通过将多源雷达多目标数据关联看作时间序列预测问题, 构建了轻量化 BiLSTM 的多雷达数据关联深度神经网络, 实现了密集杂波下端到端的多源雷达多目标可靠关联。

2) 本文算法的关联准确率及跟踪精度与多源雷达下集中式联合概率数据关联滤波算法基本相当, 与相应的概率数据关联滤波、最近邻数据关联滤波、基于全连接网络的点航关联滤波和基于 LSTM 的点航关联滤波算法相比, 具有更好的跟踪精度和关联准确率。

3) 本文算法由于采取轻量化结构, 其平均运行时间相比集中式联合概率数据关联滤波算法缩短了 10 倍左右, 基本与最近邻数据关联滤波相当。

参考文献 (References)

[1] 何友, 修建娟, 刘瑜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2022.
HE Y, XIU J J, LIU Y, et al. Radar data processing with applications[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2022(in Chinese).

[2] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2022.
HAN C Z, ZHU H Y, DUAN Z S. Multisource information fusion[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2022(in Chinese).

[3] 罗亚伦, 廖育荣, 李兆铭, 等. 高超目标强跟踪 CKF 自适应交互多模型跟踪算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(7): 2272-2283.
LUO Y L, LIAO Y R, LI Z M, et al. Strong tracking CKF adaptive interactive multiple model tracking algorithm based on hypersonic target[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(7): 2272-2283(in Chinese).

[4] 胡浩然, 陈树新, 吴昊, 等. 基于变分贝叶斯的连续-离散最大相关熵 CKF 算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(10): 2859-2866.
HU H R, CHEN S X, WU H, et al. Continuous-discrete maximum correntropy CKF algorithm based on variational Bayes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(10): 2859-2866(in Chinese).

[5] 宋丽萍, 陈德峰, 田甜, 等. 基于雷达测距和测速的 GEO 目标实

时关联算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 2167-2175.

SONG L P, CHEN D F, TIAN T, et al. A real-time correlation algorithm for GEO targets based on radar ranging and velocity measurement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 2167-2175(in Chinese).

[6] 曾雅俊, 王俊, 魏少明, 等. 分布式多传感器多目标跟踪方法综述[J]. 雷达学报, 2023, 12(1): 197-213.

ZENG Y J, WANG J, WEI S M, et al. Review of the method for distributed multi-sensor multi-target tracking[J]. Journal of Radars, 2023, 12(1): 197-213(in Chinese).

[7] SINGER R A, SEA R G. New results in optimizing surveillance system tracking and data correlation performance in dense multitarget environment[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1973, 18(6): 571-582.

[8] BAR-SHALOM Y, DAUM F, HUANG J. The probabilistic data association filter[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2009, 29(6): 82-100.

[9] SINHA A, DING Z, KIRUBARAJAN T, et al. Track quality based multitarget tracking approach for global nearest-neighbor association[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2): 1179-1191.

[10] MUSICKI D, SUVOROVA S. Tracking in clutter using IMM-IPDA-based algorithms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 111-126.

[11] SVENSSON L, SVENSSON D, GUERRIERO M, et al. Set JPDA filter for multitarget tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(10): 4677-4691.

[12] REID D B. An algorithm for tracking multiple targets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1979, AC-24: 843-854.

[13] KIM C, LI F X, CIPTADI A, et al. Multiple hypothesis tracking revisited[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2015: 4696-4704.

[14] MAHLER R P. Statistical multisource-multitarget information fusion[M]. Norwood: Artech House, 2007.

[15] 陆小科, 张志国, 孙进平, 等. 基于杂波量测集约束的改进 MS-MeMber 滤波器[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(9): 1748-1755.

LU X K, ZHANG Z G, SUN J P, et al. An improved multi-sensor MeMber filter based on clutter measurement set constraint[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1748-1755(in Chinese).

[16] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.

[17] WRABEL A, GRAEF R, BROSCHE T. A survey of artificial intelligence approaches for target surveillance with radar sensors[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2021, 36(7): 26-43.

[18] CHONG C Y. An overview of machine learning methods for multiple target tracking[C]//Proceedings of the IEEE 24th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-9.

[19] LIU J X, WANG Z L, XU M. DeepMTT: a deep learning maneuvering target-tracking algorithm based on bidirectional LSTM network[J]. Information Fusion, 2020, 53: 289-304.

[20] REVACH G, SHLEZINGER N, NI X Y, et al. KalmanNet: neural network aided Kalman filtering for partially known dynamics[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2022, 70: 1532-1547.

[21] MILAN A, REZATOFIGHI S H, DICK A, et al. Online multi-target tracking using recurrent neural networks[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2017, 31(1): 4225-4232.

[22] LIU H J, ZHANG H, MERTZ C. DeepDA: LSTM-based deep data association network for multi-targets tracking in clutter[C]//Proceedings of the 22th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-8.

[23] VERMA R, RAJESH R, EASWARAN M S. Modular multitarget tracking using long short-term memory networks[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2021, 18(10): 751-754.

[24] 李文娜, 张顺生, 王文钦. 基于 Transformer 网络的机载雷达多目标跟踪方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(3): 469-478.

LI W N, ZHANG S S, WANG W Q. Multi-target tracking method for airborne radar based on transformer network[J]. Journal of Radar, 2022, 11(3): 469-478(in Chinese).

[25] ZENG S, WANG X Y, DUAN X J, et al. Kernelized Mahalanobis distance for fuzzy clustering[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(10): 3103-3117.

Light-weight BiLSTM-based data association algorithm between echoes and tracks for multi-radar multi-target tracking

DAI Rui*, LI Jie, HE Lihuo, GAO Xinbo

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: This paper proposes a data-driven algorithm, i.e., a light-weight bi-directional long short-term memory (BiLSTM) network-based intelligent data association between echoes and tracks for multi-radar multi-target tracking, in light of the issue that data association is prone to error and that exact modeling-based algorithms have enormous computational costs for multi-radar multi-target tracking in dense clutter environments. The first step is to build the multi-radar association matrix, whose constituent is the association result between target tracks and radar echoes. Based on multi-radar echoes and predicted measurements, the distance tensor is designed based on max-min normalization. The light-weight BiLSTM networks-based multi-radar multi-target data association network is put forward, by taking the above normalized distance tensor and multi-radar association matrix as the input and output. And the measurement corresponding to the maximum probability is treated as the associated one to update every track through implementing a Kalman filter for each radar. The simulation results of multi-radar tracking multi-target in dense clutter environment show that the association accuracy and tracking precision of the proposed algorithm are similar with those of the centralized joint probability data association filter, which are much better than those of probability data association filter, nearest neighbor data association filter, fully connected layer-based data association filter and long short-term memory (LSTM) networks-based data association filter. Furthermore, compared to the centralized joint probability data association filter, which is nearly equal to the nearest neighbor data association filter, the proposed algorithm's average running time is significantly shorter.

Keywords: data association; multi-target tracking; multi-radar; bi-directional long short-term memory networks; light-weight neural networks

Received: 2024-01-10; **Accepted:** 2024-03-21; **Published Online:** 2024-04-15 20:01

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240412.1504.003

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62036007, 62276203)

* **Corresponding author.** E-mail: dairui168@126.com

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0061

四体模型下 2:1 DRO 附近的拟周期轨道

王明^{1,2,3}, 杨驰航⁴, 张皓^{2,3,*}

(1. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院太空应用重点实验室 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 4. 北京控制工程研究所, 北京 100094)

摘 要: 地月空间 2:1 共振远距离逆行轨道 (DRO) 因其长期稳定和全域可达的良好特性, 在当前地月空间任务探索中具有重要的战略意义。为进一步理解 2:1 DRO 附近的相空间结构, 同时提供更多的可供选择的停泊轨道, 在双圆限制性四体模型 (BCR4BP) 下对 2 种不同构型的 2:1 DRO 附近的拟周期轨道进行了计算。针对目前数值延拓计算拟周期轨道过程较为繁复的缺点, 提出一种自适应延拓算法, 该算法可自动调节延拓步长及添加表征环面所需的离散节点数量, 从而在保证环面精度的情况下越过共振区, 同时平衡了计算时间。在此基础上, 针对 BCR4BP 中 2 种不同构型的 2:1 DRO, 分别计算了其附近存在的 2D 拟 DRO 族, 进一步分析了其稳定特性。仿真结果表明: 所提算法能有效差异化处理采样阶次不足与共振奇异, 从而得到较为完整的轨道族。

关键词: 远距离逆行轨道; 双圆限制性四体模型; 拟周期轨道; 地月空间; 数值延拓

中图分类号: V221⁺.3; TB553

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1148-12

近年来, 探月热潮再次兴起, 地月空间成为人类探索研究的焦点。在过去的几年中, CAPSTONE、KPLO、ARTEMIS-I 等探月任务相继发射成功, 对地月空间的探索呈现出繁荣的前景。作为地月空间一类适合长期稳定停泊的轨道族^[1], 远距离逆行轨道 (distant retrograde orbit, DRO) 因其稳定特性及重要的战略意义备受国内外研究机构关注。例如, ARTEMIS-I 任务已经验证猎户座飞船进入 DRO 并返回地球的能力^[2]。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的月球门户计划提出在必要时可将航天器转移至 DRO^[3]。得益于 DRO 良好的轨道结构特性和长期的动力学稳定性, DRO 将在未来的月空间和深空探索中发挥重要作用。

尽管 DRO 族的动力学和结构特性已经得到了广泛研究^[4], 但对于实际的工程任务来讲是远远不够的。例如, DRO 上的日食条件是不理想的, 这极

大地影响航天器在轨工作的稳定性, 而 DRO 附近的三维拟周期轨道可很好地改善日食条件^[5]。此外, DRO 在高精度星历模型下是拟周期的, 如果在任务之初就将拟周期轨道纳入设计过程, 将能提供更为精确的初始猜测^[6]。从动力学的角度来讲, 对 DRO 附近拟周期运动的研究将有助于深入了解地月空间复杂的动力学环境。由于拟周期轨道相比周期轨道而言更为丰富和普遍, 其不仅保留了周期轨道的众多优点, 而且扩展了停泊轨道的设计空间^[7]。

拟周期轨道的计算在过去几十年得到了重要发展。早期, 学者们采用解析或半解析的方法来计算拟周期轨道, 如 Poincaré-Lindsted 方法和中心流形降维方法^[8-11], 然而, 这些方法的收敛域很小。随着计算机技术的发展, 数值方法逐渐得到学者们的青睐。早在 20 世纪 80 年代, 学者们就开始使用微分校正的方法计算三体系统中的周期轨道或拟周期轨道^[12-13]。为提高拟周期轨道的计算效率, 学者开发出基于庞

收稿日期: 2024-01-25; 录用日期: 2024-03-13; 网络出版时间: 2024-03-27 08:31

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240325.1503.003

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA30010200)

* 通信作者. E-mail: hao.zhang.zhr@csu.ac.cn

引用格式: 王明, 杨驰航, 张皓. 四体模型下 2:1 DRO 附近的拟周期轨道 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1148-1159.

WANG M, YANG C H, ZHANG H. Quasi-periodic orbits near 2:1 resonant DRO in the four-body problem [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1148-1159 (in Chinese).

加莱截面^[14-15]和基于频闪映射截面^[16-17]2 类数值方法。这 2 类方法的共同特点是利用高维拟周期环面在低维投影截面上的某种不变特性,从而降低了计算量。2018 年, Baresi 等对当前计算拟周期环面的方法进行了性能对比,其研究表明:在运行时间大致相同的情况下, GMOS 算法较其他算法具备更高的精度和灵活性^[18]。此后,学者多基于此算法进行拟周期轨道的计算与延拓。Olikara 等计算了地月 L_1 点的 Lissajous 轨道族^[19]。Jorba 等探索了 L_1 附近的拟周期运动^[20]。对于地月 L_2 点附近的拟周期运动,文献 [21-23] 均进行了深入的研究。此外, Jorba 等提供了 L_3 附近相空间的深刻见解^[24]。目前,平动点附近的拟周期轨道族已经得到了充分研究,然而,关于 DRO 附近的拟周期运动的研究尚不充分。尽管有学者对圆型限制性三体模型(circular restricted three-body problem, CR3BP)中的拟 DRO 轨道进行了计算^[25],但目前尚未见在双圆限制性四体模型(bicircular restricted four-body problem, BCR4BP)中对 DRO 拟周期轨道的研究。考虑到 2:1 DRO 实际上处于日地月共同的引力作用区域^[26],因此,对 BCR4BP 中拟 DRO 的研究将进一步为星历下长基线的 DRO 设计提供更为准确的初值猜测。

在上述文献中,拟周期轨道族的呈现往往作为研究的结果而给出。此外,文献 [27-28] 致力于提高拟周期轨道的计算效率。拟周期轨道的数值计算方法已经得到了充分发展。然而,关于拟周期延拓过程中经常遇到延拓失败的问题,很少有文献讨论其是因为遇到了共振区或采样节点不足而造成的。具体而言,如果拟周期环面的傅里叶阶次(对应采样节点)不足以表征高度非线性的环面,那么延拓过程将因难以收敛而终止;而一开始即设置较大的采样节点将浪费大量计算资源,同时,随着延拓进行轨道族仍面临采样节点不足的问题。此外,当拟周期轨道族位于共振区时,其会偏离原始延拓方向从而使不变环面变得扭曲,从而导致延拓失败。

基于此,本文提出一种能够差异化处理采样阶次不足与共振奇异现象所引起延拓失败的自适应延拓算法。在 GMOS 算法的基础上,引入不变环面检验精度的概念,通过衡量不变环面检验精度的变化率,从而差异化处理采样阶次不足与共振奇异现象。仿真结果表明:本文算法不仅能够顺利越过延拓过程中的一系列共振区,从而得到较为完整的拟 DRO 轨道族,同时平衡了拟 DRO 轨道族的计算时间。

1 基础知识

1.1 双圆限制性四体模型

本文基于双圆限制性四体模型进行分析。通

常在地月质心旋转系中描述航天器的运动状态,其中, x 轴沿地球指向月球的方向, z 轴与系统角动量方向重合, y 轴则由右手定则确定。在该系中,地月绕其质心做圆周运动,太阳绕地月质心顺时针运行,如图 1 所示。

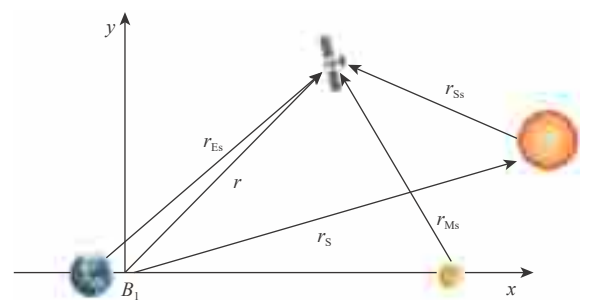


图 1 平面双圆限制性四体模型
Fig. 1 Planar bicircular restricted four-body problem

在质心旋转系中,航天器的动力学模型为

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2\dot{y} = \frac{\partial \Omega_4}{\partial x} \\ \ddot{y} + 2\dot{x} = \frac{\partial \Omega_4}{\partial y} \\ \ddot{z} = \frac{\partial \Omega_4}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$\Omega_4(x,y) = \frac{1}{2}(x^2 + y^2) + \frac{1-\mu}{r_{Es}} + \frac{\mu}{r_{Ms}} + \frac{m_S}{r_{Ss}} - \frac{m_S}{r_S^2}(x\cos(\omega_S t) + y\sin(\omega_S t)) \quad (2)$$

其中: μ 为地月质量参数; r_{Es} 、 r_{Ms} 和 r_{Ss} 分别为航天器与地球、月球和太阳之间的距离; r_S 为太阳到地月质心的距离; m_S 为无量纲太阳质量; ω_S 为太阳在地月质心旋转系中的角速度。表 1 总结了地月系统下相关物理常数的取值及其单位与物理意义。

表 1 地月系统相关物理常数	
Table 1 Physical constants in the Earth-Moon system	
物理常数	数值
地月质量参数 μ	0.012 5
无量纲太阳质量 m_S	328 900.541
无量纲太阳角速度 ω_S	-0.925 20
无量纲太阳-地月质心距离 r_S	388.811 14
地月距离 D_U/km	384 405
归一化时间 T_U/s	375 197.583 23
归一化速度 $V_U/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	1.024 54

1.2 双圆限制性四体模型中的 2:1 共振 DRO

BCR4BP 可以看作是一个具有周期性外界激励的哈密顿系统。因此, BCR4BP 中的周期轨道是孤立存在的,其轨道周期须与外界激励周期共振,即一

个朔望月,约 29.5 天。BCR4BP 中存在 2 种 2:1 DRO 共振轨道,如图 2 所示。其中,构型 1 的起始状态 $\mathbf{X}_0 = [0.79355, 0, 0, 0, 0.53750, 0]$, 构型 2 起始状态 $\mathbf{X}_0 = [1.185805, 0, 0, 0, -0.50261, 0]$ 。2 种构型的初始太阳相角均为 0。

为更清楚地表征上述 2 种构型的不同,记录上述 2 种构型与庞加莱截面 $\Sigma: y = 0$ 的交点,并将状态量 $(x, \dot{x})$ 投影在二维庞加莱截面上,如图 3 所示。由图可知,构型 1 的 2 个垂直穿越点均位于月球左侧,而位于月球右侧的 2 个投影点则具备速度分量

$\dot{x}$ 。对于构型 2 而言,情况则正好相反。

2 拟周期轨道的计算方法

研究动力学系统相空间的一个典型方法是寻找系统的不变集并分析其稳定性^[22]。所谓动力学系统的不变集,即系统中的平动点、周期轨道和拟周期轨道。这些不变集及其相关的不变流形提供了动力学系统在相空间中的演化信息。通常而言,拟周期运动发生在二维或高维环面上,在不做区分的情况下,本文拟周期轨道和不变环面等价。根据表征不变集所需的相角维度的个数,平动点可视为零维不变环面,而周期轨道可以看作是一维不变环面,如图 4 所示。



图 4 周期轨道和拟周期轨道示意图

Fig. 4 Diagram of periodic and quasi-periodic orbit

2.1 拟周期轨道的初值猜测

拟周期轨道或不变环面的线性近似通常与周期轨道的中心流形有关^[21]。由于周期轨道可以视为一维不变环面,因此,存在微分同胚双映射:

$$\bar{\mathbf{u}}(\theta_1) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}(\theta_1) \\ \mathbf{v}(\theta_1) \end{bmatrix} : T^1 \rightarrow \mathbf{R}^n \tag{3}$$

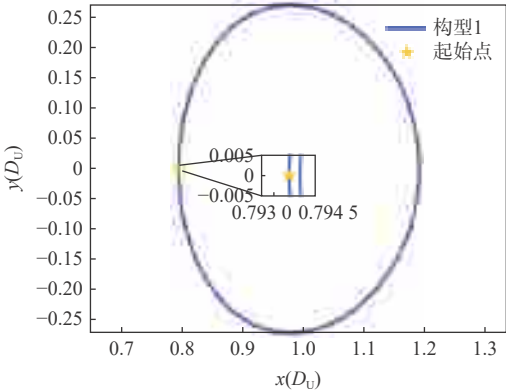
式中: $\mathbf{r}(\theta_1)$ 为周期轨道位置的微分同胚映射; $\mathbf{v}(\theta_1)$ 为周期轨道速度的微分同胚映射; θ_1 为环面的第 1 维相角; T^1 表示将一维映射转换到 n 维空间。

使得周期轨道可以由 6 自由度状态空间映射为一维相角空间。定义 $\Phi_T(\bar{\mathbf{u}}(\theta_1))$ 为以 $\bar{\mathbf{u}}(\theta_1)$ 为起始点的周期轨道的单值矩阵。记与单值矩阵 $\Phi_T(\bar{\mathbf{u}}(\theta_1))$ 相对应的复特征值 $\lambda_{j+1} = e^{i\alpha_{j+1}}$, 相应的特征向量为 $\mathbf{y}_{j+1}(\bar{\mathbf{u}}(\theta_1))$, $j = 1, 2, \dots, m$, 则拟周期轨道的线性化初始猜测可表示为

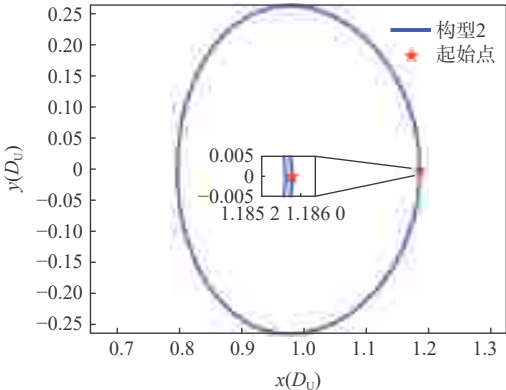
$$\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1}) = \bar{\mathbf{u}}(\theta_1) + \kappa \text{Re} \left[\sum_{j=1}^m e^{i\theta_{j+1}} \mathbf{y}_{j+1} \right] \tag{4}$$

式中: $\text{Re}[\cdot]$ 表示复数的实部; κ 为一小量。固定 θ_1 , 将上述初值猜测积分一个频闪映射周期 T , 末端状态仍位于同一频闪映射截面上, 然而在相位上相比于初值旋转了 $(0, \alpha_2, \dots, \alpha_{m+1})$, 这满足不变集的概念, 也是计算拟周期轨道的基础。

相应的, 表征拟周期环面的旋转相角 ρ 及角频率 ω 的初值可取为



(a) 2:1DRO-构型1



(b) 2:1DRO-构型2

图 2 双圆限制性四体模型中的 2 种 2:1 DRO 构型
Fig. 2 Two different configurations of 2:1 DRO in BCR4BP

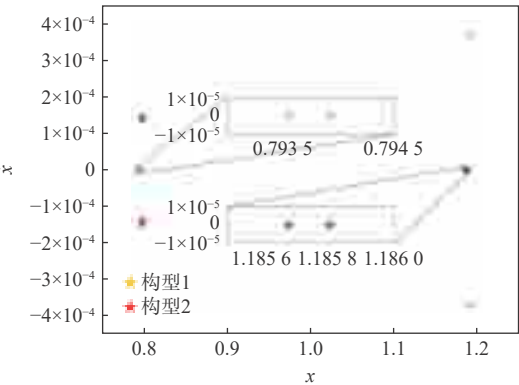


图 3 2 种 DRO 构型在庞加莱截面上的投影
Fig. 3 Two different configurations of 2:1 DRO projected on the Poincaré section

$$\begin{cases} \rho_0 = [2\pi, \alpha_2, \dots, \alpha_{m+1}] \\ \omega_0 = \left[\frac{2\pi}{T}, \frac{\alpha_2}{T}, \dots, \frac{\alpha_{m+1}}{T} \right] \end{cases} \quad (5)$$

为研究方便, 通常固定 θ_1 , 然后, 以频闪映射截面上的环面为研究对象(少一维度), 后文除非另有说明, 不变环面特指频闪映射截面上环面。

2.2 拟周期轨道的不变环面约束

对于不变环面上的任一点而言, 当其积分一定时间后, 末端状态仍位于该不变环面上, 但是各个周期分量相比于初始状态旋转了一个固定的角度。这个性质是计算不变环面或拟周期轨道的基础, 亦即, 不变环面约束。

一般而言, 动力学系统通常可以写成如下状态空间形式的常微分方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \boldsymbol{\gamma}) \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\gamma}$ 为外界扰动参数, 对于 BCR4BP 而言, $\boldsymbol{\gamma}$ 为无量纲太阳质量。

至此, 不变环面的求解可描述为: 假设拟周期轨道由 $m+1$ 个相角分量 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})$ 所表征, 存在映射 $P: T^{m+1} \rightarrow \mathbf{R}^6$ 使得 $\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})$ 为拟周期轨道的同胚映射。假设 $\phi_T(\mathbf{x}_0)$ 为拟周期轨道上以 $\mathbf{x}_0$ 为起点的流函数, 将 $\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})$ 由 0 时刻积分一个频闪映射周期 T 后, 积分末端状态为

$$\begin{aligned} \phi_T(\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})) = \\ \mathbf{u}(\theta_1 + 2\pi, \theta_2 + \omega_2 T, \dots, \theta_{m+1} + \omega_{m+1} T) = \\ \mathbf{u}(\theta_1, \hat{\boldsymbol{\theta}}^T + \hat{\boldsymbol{\rho}}^T) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\theta}} = [\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{m+1}]^T \\ \hat{\boldsymbol{\rho}} = \frac{2\pi}{\omega_1} [\omega_2, \omega_3, \dots, \omega_{m+1}]^T \end{cases} \quad (8)$$

若定义旋转算子 $\mathbf{R}_{-\rho}[\cdot]$ 用于消除旋转相角 ρ , 则不变环面约束如下:

$$\mathbf{R}_{-\rho}[\phi_T(\mathbf{u}([\cdot, \hat{\boldsymbol{\theta}}^T]^T))] - \mathbf{u}([\cdot, \hat{\boldsymbol{\theta}}^T]^T) = \mathbf{0} \quad (9)$$

因此, 从数值计算的角度来讲, 计算拟周期轨道等价于求解不变环面约束式 (9)。另外, 值得说明的是, 由于 BCR4BP 中的轨道周期须相合于太阳会合周期 $T_{\text{syn}} = 2\pi/\omega_S$, 因此, 对于 BCR4BP 中的拟周期不变环而言, 其首个周期频率 ω_1 应为太阳角速度 ω_S 的倍数。

通常将频闪映射截面上的高维不变环面表示为(截断)傅里叶级数的形式, 即:

$$\mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \dots \sum_{k_m=0}^{N_m-1} \mathbf{C}_k e^{i(k_1\theta_2 + k_2\theta_3 + \dots + k_m\theta_{m+1})} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{k} = [k_1, k_2, \dots, k_m]^T$ 为高维傅里叶级数的谐波

集, $\mathbf{C}_k \in \mathbf{C}^6$ 为傅里叶系数。 N_j 为相角分量 θ_{j+1} 的离散个数 ($j = 1, 2, \dots, m$)。对每维相角分量 θ_{j+1} 而言, 其可依次离散为如下集合中的元素:

$$\theta_{j+1} \in \{0 \quad 2\pi/N_j \quad \dots \quad 2\pi(N_j-1)/N_j\} \quad (11)$$

将不变环面离散后, 傅里叶系数 $\mathbf{C}_k \in \mathbf{C}^6$ 可通过对离散状态量进行傅里叶变换得到, 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_k(\mathbf{k}) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \dots \sum_{n_m=0}^{N_m-1} \mathbf{u}(0, \theta_{2,n_1}, \dots, \theta_{m+1,n_m}) \cdot \\ e^{-i(k_1\theta_{2,n_1} + k_2\theta_{3,n_2} + \dots + k_m\theta_{m+1,n_m})} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: 当 $n_l = 0$ 时, $\theta_{j+1,n_l} = 0$, 当 $n_l = N_j - 1$ 时, $\theta_{j+1,n_l} = 2\pi(N_j - 1)/N_j$, 以此类推。

令 $[\mathbf{D}]$ 和 $[\mathbf{D}]^{-1}$ 分别表示矩阵形式的傅里叶变换和逆傅里叶变换算子, 则旋转算子可表示为

$$[\mathbf{R}_{-\rho}] = [\mathbf{D}^{-1}][\mathbf{Q}_{-\rho}][\mathbf{D}] \quad (13)$$

式中: $[\mathbf{Q}_{-\rho}]$ 为对角矩阵, 其可将 $\mathbf{C}_k \in \mathbf{C}^6$ 在频域上旋转得到 $\mathbf{C}'_k = \mathbf{C}_k e^{-i\langle \mathbf{k}, \boldsymbol{\rho} \rangle}$ 。

2.3 拟周期轨道的一般延拓方法

不变环面的初值猜测源于对周期轨道中心流形的线性化, 在使用 2.1 节所示初值猜测并使用数值方法得到第 1 个收敛的拟周期轨道后, 就可以进行延拓, 以得到拟 DRO 轨道族。在本文中, 为保证结果的准确性, 同时采用了伪弧长延拓和自然参数延拓以相互验证。

令 $\mathbf{U}_0$ 为不变环面的所有离散状态按一定顺序组成的列向量, $\mathbf{U}_1$ 为由 $\mathbf{U}_0$ 积分一个频闪映射周期 T 之后积分末端状态的集合。那么, 环面的求解过程纳入标准的预测-校正框架中, 然后, 使用牛顿迭代法进行求解。其中, 自由变量可写为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{U}_0; \boldsymbol{\rho}; T] \quad (14)$$

不变环面约束可记作:

$$\mathbf{F}_{\text{tori}} = [\mathbf{D}^{-1}][\mathbf{Q}_{-\rho}][\mathbf{D}]\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_0 = \mathbf{0} \quad (15)$$

注意到 $\mathbf{X}$ 的维度比 $\mathbf{F}_{\text{tori}}$ 的维度大 $m+1$, 因此, 仍需添加 m 个约束 $\mathbf{F}_{\text{extra}}$ 使得拟 DRO 沿着某一特定的轨道族延拓。可参考文献 [21] 添加额外约束 $\mathbf{F}_{\text{extra}}$ 。

在进行延拓之前, 需要添加一些额外的相角约束来确保延拓沿着正确的方向进行, 即过渡到下一个拟周期环面。这是因为对于某一不变环面 $\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})$ 而言, 收敛的不变环面的任一点均满足上述 2 个约束向量。如果不对环面的相角加以约束, 新的拟周期解有可能仍然位于同一条不变环面上。假设 $\hat{\mathbf{u}}$ 为上一条收敛的不变环面, $\mathbf{u}$ 为待计算环面, 则相角约束可表示为

$$\mathbf{F}_{\text{phase}} = \left[\left\langle \mathbf{u}, \frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial \theta_2} \right\rangle, \left\langle \mathbf{u}, \frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial \theta_3} \right\rangle, \dots, \left\langle \mathbf{u}, \frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial \theta_{m+1}} \right\rangle \right]^T \quad (16)$$

式中: $\langle \rangle$ 表示点乘运算。

至此, 总约束矩阵 $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_{\text{tori}}^T, \mathbf{F}_{\text{phase}}^T, \mathbf{F}_{\text{extra}}^T]^T$, 梯度矩阵 $\mathbf{D}_F = \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{X}$ 。需要说明的是, 由于动力学模型式 (1) 已然包含与 θ_1 相关的物理量 ω_s , 因此, 在式 (16) 中无需对相角 θ_1 进行约束。此外, 由于式 (16) 仅仅约束了延拓方向, 并没有改变梯度矩阵的零空间维数, 因此, $\mathbf{D}_F$ 矩阵的零空间仍为 1 维, 可采用伪弧长延拓或自然参数延拓进行计算, 从而确保延拓过程中拟周期轨道族是唯一的。

2.4 自适应延拓框架设计

2.1 节 ~ 2.3 节介绍了 GMOS 算法的一般流程。然而, 拟周期轨道更加复杂的动力学特性及其相空间的康托尔集特性给计算带来了更大的难度。有 2 个因素经常导致环面的延拓失败, 即: 采样不足和共振奇异现象。

Rosales 等^[22]指出, 牛顿迭代法的收敛并不意味着解是环面的良好表示。假设 $\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})$ 为精确的不变环面, $\hat{\mathbf{u}}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})$ 为采用 (截断) 傅里叶级数表征的不变环面。则牛顿迭代法的收敛仅意味着 $\hat{\mathbf{u}}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})$ 在采样点处不变环面约束是满足的, 仍需检验其在其他节点处是否满足不变环面约束, 通常的做法是在更为密集的随机采样节点处检验上述不变环面约束是否满足, 即

$$\max_{\hat{\mathbf{u}}} \left\| [\mathbf{D}^{-1}][\mathbf{Q}_{-p}][\mathbf{D}]\phi_T(\hat{\mathbf{u}}) - \hat{\mathbf{u}} \right\| < \eta \quad (17)$$

本文称 η 为检验精度, 而判断牛顿迭代法是否收敛的精度则称之为收敛精度。如果检验精度不满足, 则需要添加更多的采样点来表征不变环面 $\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+1})$, 并重新进行微分校正。因此, 在整个延拓过程中, 采样点的个数并不是固定的, 一般而言, 不变环的形状越复杂, 扭曲程度越高, 尺度越大, 则需要的采样节点越多。

拟周期环面在相角空间为康托尔集, 表征环面的所有相角之间是非共振的。然而在延拓的过程中, 共振区域横亘在相角空间中, 相角之间的共振不可避免。在相角之间发生共振时, 拟周期环面退化为周期轨道或更低维的环面, 如果继续计算, 环面通常会偏离原始轨道族的延拓方向并变得高度扭曲化, 需要表征环面的采样点将大大增加, 因而容易导致延拓失败。一个可行的策略是当发生奇异时, 在一定范围内动态调整延拓步长, 直至越过共振区域。此外, 为保证结果的可靠性, 可同时比较不同延拓步长和延拓方法 (伪弧长延拓和自然参数延

拓) 下的拟周期轨道族。上述自适应延拓框架总结如图 5 所示。

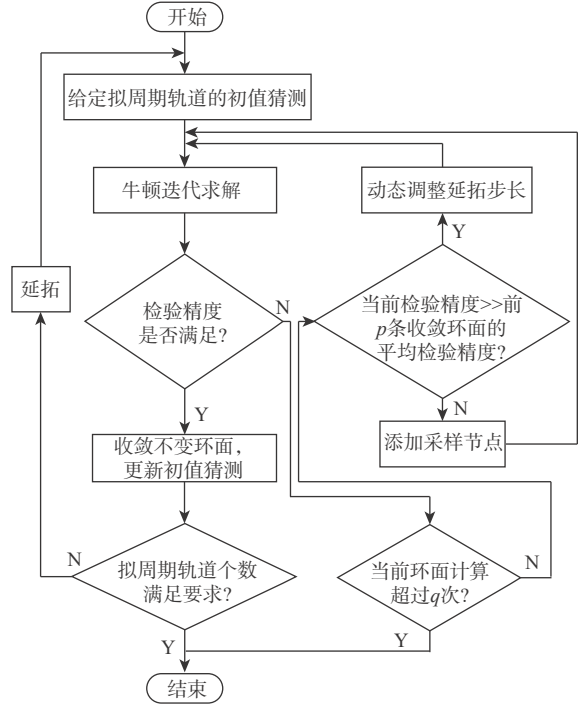


图 5 自适应延拓框架

Fig. 5 Adaptive continuation framework

在图 5 中, p 取 3, q 取 10, 检验精度和收敛精度取 1×10^{-10} 即可。本文采取检验精度的变化率作为差异化处理的指标, 即: 在非共振区, 如果保持采样节点的数量不变, 那么随着环面尺寸的增加, 环面的检验精度将平稳下降, 当检验精度不满足时, 须添加采样节点; 而在共振区, 不变环面高度扭曲, 检验精度将急剧下降, 此时需要调整步长越过共振区。

3 拟周期轨道的稳定性计算方法

假设 $\delta \mathbf{u}(\theta) \in \mathbf{R}^n$ 为不变环面 $\mathbf{u}(\theta) \in \mathbf{R}^n$ 的小扰动, 则积分一个频闪映射周期后, 末端状态的变分可写为

$$\delta \phi_T(\mathbf{u}(\theta)) = \Phi_T(\mathbf{u}(\theta)) \delta \mathbf{u}(\theta) \quad (18)$$

式中: $\Phi_T(\mathbf{u}(\theta))$ 为状态转移矩阵。在可约的情况下, 存在变换 $\delta \mathbf{v}(\theta) = \mathbf{C}(\theta) \delta \mathbf{u}(\theta)$, 使得

$$\delta \phi_T(\mathbf{v}(\theta)) = \mathbf{B} \delta \mathbf{v}(\theta) \quad (19)$$

其中, 矩阵 $\mathbf{B} = \mathbf{C}^{-1}(\theta + \rho) \Phi_T(\mathbf{u}(\theta)) \mathbf{C}(\theta)$ 为 Floquet 矩阵, 其与相角 θ 无关。至此, 拟周期轨道的稳定性分析可转化为求矩阵 $\mathbf{B}$ 的特征结构。

由于矩阵 $\mathbf{B}$ 的特征结构与 $\mathbf{R}_{-p}[\Phi_T(\mathbf{u}(\theta))]$ 的特征结构等价, 而后者可通过离散的方式求出, 因此, 拟周期稳定性分析将基于 $\mathbf{R}_{-p}[\Phi_T(\mathbf{u}(\theta))]$ 。假设矩阵 $\mathbf{B}$ 的特征结构 $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, 那么对于

$R_{-\rho}[\Phi_T(u(\theta))]$ 而言, $\lambda_i e^{(k,\rho)}$ 同样为其特征值, 这些特征值在复平面上呈同心圆结构。因此, 为从众多特征值中筛选出基础特征值 λ_i , 本文采取的策略如下:

- 1) 检测位于实轴上的特征值 λ_{real} , 并判断 $\lambda_{\text{real}} e^{(k,\rho)}$ 是否位于特征值集合中, 若存在, 则 λ_{real} 为基础特征值之一; 否则, 属于误检;
- 2) 在集合中去除 $\lambda_{\text{real}} e^{(k,\rho)}$, 则剩余的特征值均为复特征值。由于当 $k=0$ 时, $\lambda_{\text{imag}} e^{(k,\rho)}$ 等价于 λ_{imag} ; 当 $k \neq 0$ 时, $\lambda_{\text{imag}} e^{(k,\rho)}$ 的相角互不相等。因此, 若某个相角出现 2 次, 则其所对应的复特征值即为基础特征值。

由于共振现象对上述检测流程的精度存在很大影响, 应尽量规避。特征值的模反映了系统的稳定性信息。本文采用稳定性指数来衡量系统的稳定性, 定义为

$$\nu_i = \frac{1}{2} (\|\lambda_i\| + 1/\|\lambda_i\|)$$

(20)

如果所有稳定性 ν_i 均为 1, 拟周期轨道稳定; 否则, 轨道不稳定, 其附近存在双曲不变流形。

4 数值仿真结果与分析

2D 拟周期轨道可由 2 个相角进行表征, 其中, 第 1 个相位 θ_1 为周期轨道的相位, 而第 2 个相位 θ_2 则表示频闪映射截面上的环面。本文以 DRO 起始点处的频闪映射截面为研究对象, 进行拟周期轨道的计算。为得到一族 2D 拟周期轨道族, 需要额外添加一个约束。由于 BCR4BP 中的拟周期轨道的一个相角频率须相合于太阳角频率 ω_S , 因此, 本文固定频闪映射时间(等于 2:1 DRO 周期), 从而延拓得到一族 2D 拟周期轨道族。

表 2 统计了 1.2 节所述 2 种不同 DRO 构型的单值矩阵特征值及中心流形相角。可见, 构型 1 具有 3 对中心流形, 因而是稳定的; 构型 2 具有 2 对中心流形和 1 对不稳定流形, 因而不稳定的。为便于后文表示, 记构型 1 的 3 对中心流形的旋转相

角分别为 $\rho_{s,p1}$ 、 $\rho_{s,p2}$ 和 $\rho_{s,v1}$; 记构型 2 的 2 对中心流形的旋转相角分别为 $\rho_{u,p1}$ 和 $\rho_{u,v1}$ 。

4.1 构型 1 附近的拟周期轨道

由表 2 可知, 构型 1 所对应的 2:1 共振 DRO 附近有 3 个中心流形, 每个中心流形可以演化出一种 2D 不变环面, 因此, 其附近存在 3 种不同类型的 2D 拟周期轨道族, 接下来将分别展示。

如图 6 所示, 红色节点表示构型 1 所示的 DRO 轨道, 延拓过程拟周期轨道变化如图 7 所示。在延拓初始阶段, $x_{\min}$ 随着 $\rho_{s,p1}$ 的增加而逐渐减小, 如图 7(a) 和图 7(b) 所示, 并在 $\rho_{s,p1} = 1.197\ 26$ 时达到极小值, 在此阶段, 不变环面由近椭圆形逐渐演变为如图 7(c) 所示的两圈相互嵌套的形状。随后, 随着延拓的进行, $\rho_{s,p1}$ 略有减小而 $x_{\min}$ 逐渐增加, 不变环面内圈的幅值逐渐增长而外圈的幅值略微减小, 当轨道族抵达图 6 中的黑色节点时, 内外两圈相互重合, 如图 7(d) 所示。之后, 不变环面的变化趋势与上述过程相反, 并逐渐收缩于 DRO 轨道。在延拓过程中, 遇到 4/21 这一较大共振区。

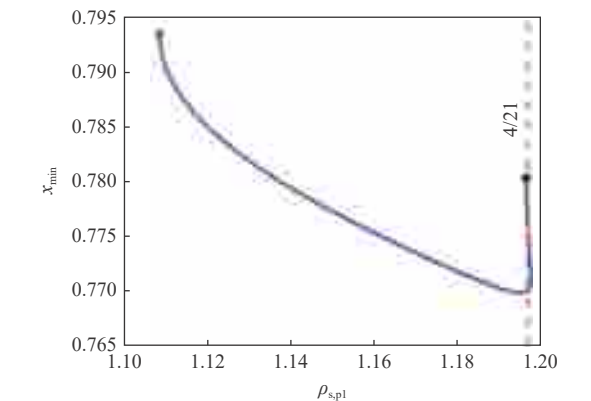


图 6 $\rho_{s,p1}$ 所对应的平面拟 DRO 轨道族在 x 方向的最小值随 $\rho_{s,p1}$ 的变化关系图

Fig. 6 Relationship between the minimum value of plane quasi-DRO corresponding to $\rho_{s,p1}$ in x direction and rotation angle $\rho_{s,p1}$

旋转相角 $\rho_{s,p2}$ 所对应的拟 DRO 同样为平面 2D 拟周期轨道族, 其拟周期轨道族的 $x_{\min}$ 关于 $\rho_{s,p2}$ 的关系如图 8 所示, 延拓过程拟周期轨道变化如图 9 所示。可以看到, 轨道族延拓过程中存在一些“间隔”, 这是由于在这些“间隔”处旋转相角(或角频率)之间发生了共振, 即 ω_2 与 ω_S 共振。在本文中, 延拓依次遇到 10/27、4/11、5/14、6/17 等一系列共振区, 其中, 10/27 和 5/14 共振区较小, 而 4/11 和 6/17 共振区间隔较大, 本文延拓策略成功越过了 4/11 共振区, 但是未能成功越过 6/17 共振区。因此, 图 9(a)~图 9(c) 得到的拟周期不变环形态正常, 当延拓至 6/17 共振区时, 会陷入奇异, 此时不变环面约束虽然收敛, 但是不变环发生扭曲, 非线性增

表 2 BCR4BP 中 2 种 2:1 DRO 的单值矩阵特征值及中心流形相角			
Table 2 Eigenvalues and types of center manifolds associated with two types of 2:1 DRO in BCR4BP			
DRO 构型	单值矩阵的特征值	中心流形相角/rad	中心流形方向
构型1	$\lambda_{1,2} = 0.460\ 64 \pm 0.895\ 00\ i$	1.108 43	平面
	$\lambda_{3,4} = -0.758\ 00 \pm 0.652\ 25\ i$	2.431 04	平面
	$\lambda_{5,6} = -0.978\ 14 \pm 0.207\ 95\ i$	2.932 11	法向
构型2	$\lambda_{1,2} = 0.460\ 64 \pm 0.895\ 00\ i$	1.686 08	平面
	$\lambda_{3,4} = -0.915\ 50 \pm 0.402\ 31\ i$	2.727 55	法向
	$\lambda_5 = 10.823\ 37, \lambda_6 = 0.092\ 39$		

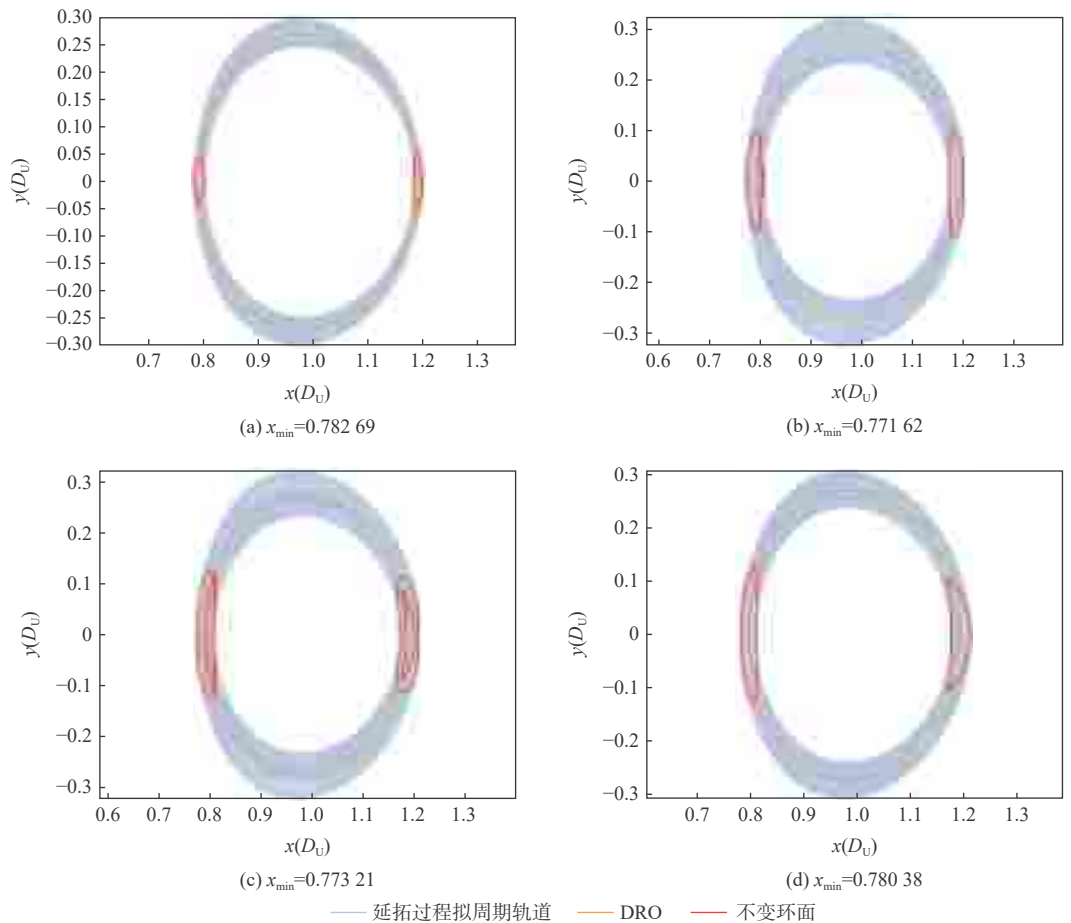


图 7 与 $\rho_{s,p1}$ 相对应的平面 2D 拟 DRO 族中的 4 条轨道

Fig. 7 Four members of 2D plane quasi-DRO family corresponding to $\rho_{s,p1}$

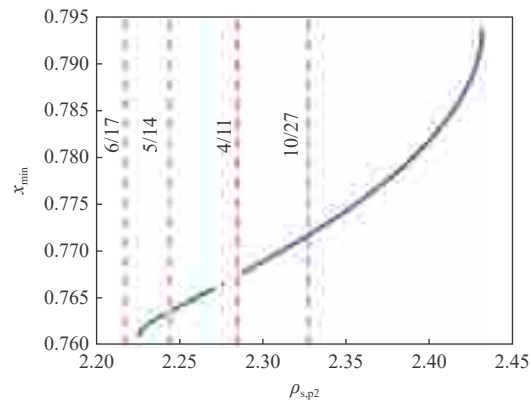


图 8 $\rho_{s,p2}$ 所对应的平面拟 DRO 轨道族在 x 方向的最小值随 $\rho_{s,p2}$ 的变化关系

Fig. 8 Relationship between the minimum value of plane quasi-DROs corresponding to $\rho_{s,p2}$ in x direction and rotation angle $\rho_{s,p2}$

加,表征不变环面的采样点数急剧增加,如图 9(d)所示。

旋转相角 $\rho_{s,v1}$ 所对应的拟 DRO 为法向 2D 拟周期轨道族,其拟周期轨道族在月球左侧的 z 向最大值 $z_{\max,\text{left}}$ 关于 $\rho_{s,v1}$ 的变化关系如图 10 所示,延拓过程拟周期轨道变化如图 11 所示。在延拓的过程中,

依次会遇到 31/66、10/21、12/25、19/39 等一系列共振区。其中,31/66 和 10/21 共振区较小,而 12/25 和 19/39 共振区间隔较大,本文延拓策略成功越过了 12/25 共振区,但是未能成功越过 19/39 共振区。因此,图 11(a)~图 11(c)得到的拟周期不变环形态正常,当延拓 19/39 共振区时,会陷入奇异,此时不变环面约束虽然收敛,但是不变环发生扭曲,非线性增加,表征不变环面的采样点数急剧增加,如图 11(d)所示。

4.2 构型 2 附近的拟周期轨道

构型 2 所示的 2:1 DRO 有 2 个中心流形,每个中心流形可演化出一种 2D 不变环面,因此,其附近存在 2 种不同类型的 2D 拟 DRO 轨道族。

由于不稳定构型的垂直穿越点位于月球右侧,因此,本节记录拟 DRO 轨道族位于月球右侧的集合变化情况。和之前计算轨道族遇到的挑战一样,由于拟周期轨道族是康托尔集,并不连续,共振“间隔”和共振奇异现象同样在构型 2 附近的拟周期轨道族中出现。例如,在延拓的过程中, $\rho_{u,v1}$ 所对应的平面拟 DRO 轨道族依次遇到了 3/11、2/7、5/17 和 3/10 等一系列共振区。其中,当延拓至 2/7 和 3/10

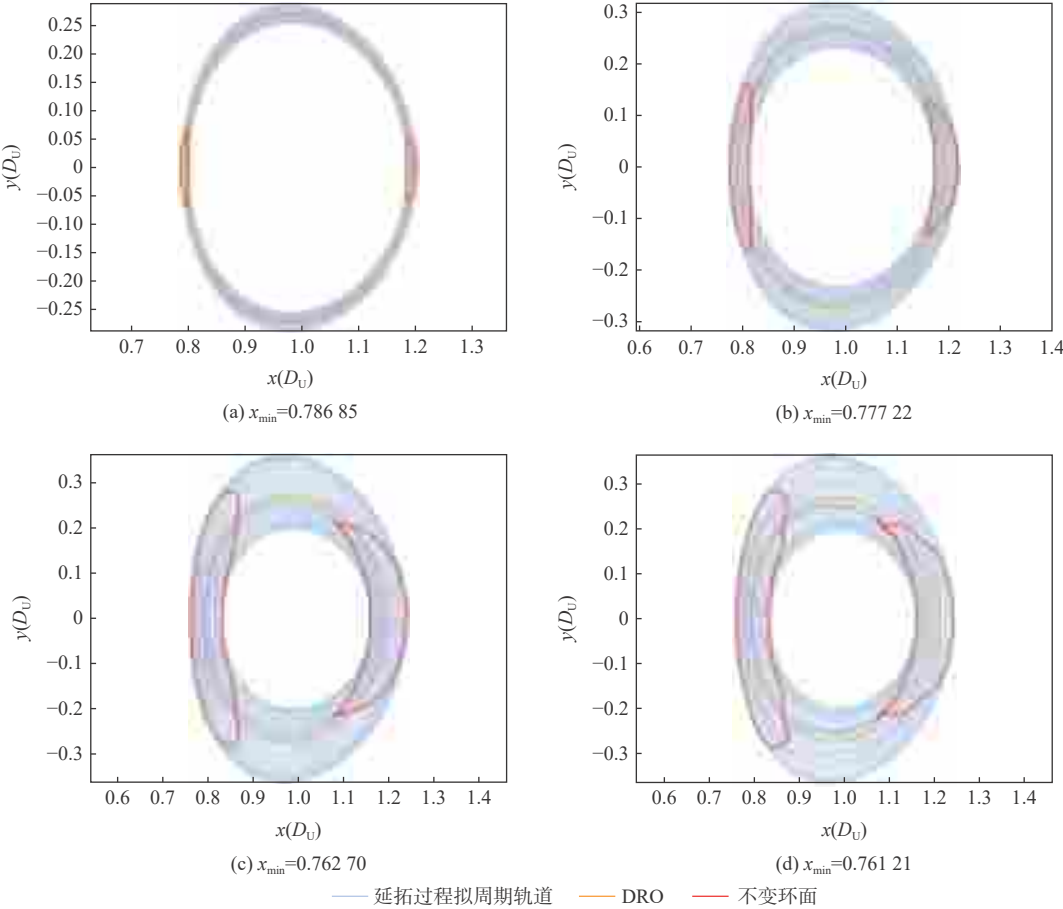


图 9 与 $\rho_{s,p2}$ 相对应的平面 2D 拟 DRO 轨道族中的 4 条轨道

Fig. 9 Four members of 2D plane quasi-DRO family corresponding to $\rho_{s,p2}$

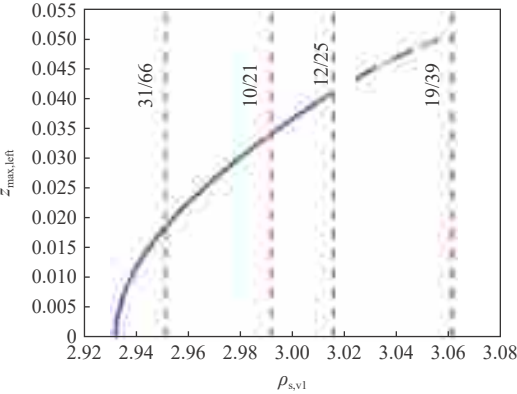


图 10 $\rho_{s,v1}$ 所对应的法向拟 DRO 在月球左侧 z 方向的最大值随 $\rho_{s,v1}$ 的变化关系图

Fig. 10 Relationship between the maximum value of vertical quasi-DROs on left of the Moon in z direction and rotation angle $\rho_{s,v1}$

共振区时,此时共振区的间隔较大,延拓会陷入奇异。本文延拓策略成功越过了 2/7 共振区,但是未能成功越过 3/10 共振区,如图 12(a) 所示。

旋转相角 $\rho_{u,v1}$ 所对应的拟 DRO 为法向 2D 拟周期轨道族,其拟周期轨道族在月球右侧 z 向的最大值 $z_{\max,\text{right}}$ 关于 $\rho_{u,v1}$ 的变化关系如图 12(b) 所示。其在

延拓过程中遇到 4/9 和 9/20 这 2 个共振区,此外,可以看到,轨道族不能越过 9/20 共振而陷入奇异,随着延拓的进行,轨道族脱离原始的延拓“路线”而沿着奇异的方向前行,此时,轨道的 $z_{\max,\text{right}}$ 随着 $\rho_{u,v1}$ 的减小而增加,不变环面发生扭曲,非线性增加。

不稳定构型附近的拟周期轨道仍然是不稳定的。仿真结果显示,在 1 年的积分时间内,轨道仍保持有界;在积分 2 年后,轨道发散,并逃逸到地月空间,如图 13 和图 14 所示,该类型 DRO 可用于短期任务,随后利用其不稳定特性进行 DRO 离轨设计。

4.3 稳定性分析

对于具有 6 维状态空间的哈密顿系统而言(包括 BCR4BP),不变集的 Floquet 矩阵是辛矩阵,其特征值以倒数对的形式出现。由于频闪映射曲面在上述 2 种模型中都是自治的,因此,所有环面都具有 1 对为 1 的特征值,从而 $e^{(k,\rho)}$ 也是环面的特征值。因此,拟周期轨道的稳定性依赖于剩余的 2 对特征值的类型。模值为 1 的特征值要么表示环面自身的切线方向,要么表示其他中心流形的方向,而模值不为 1 的特征值表示双曲不变流形的方向。

进一步仿真结果显示,对于构型 1 而言,其

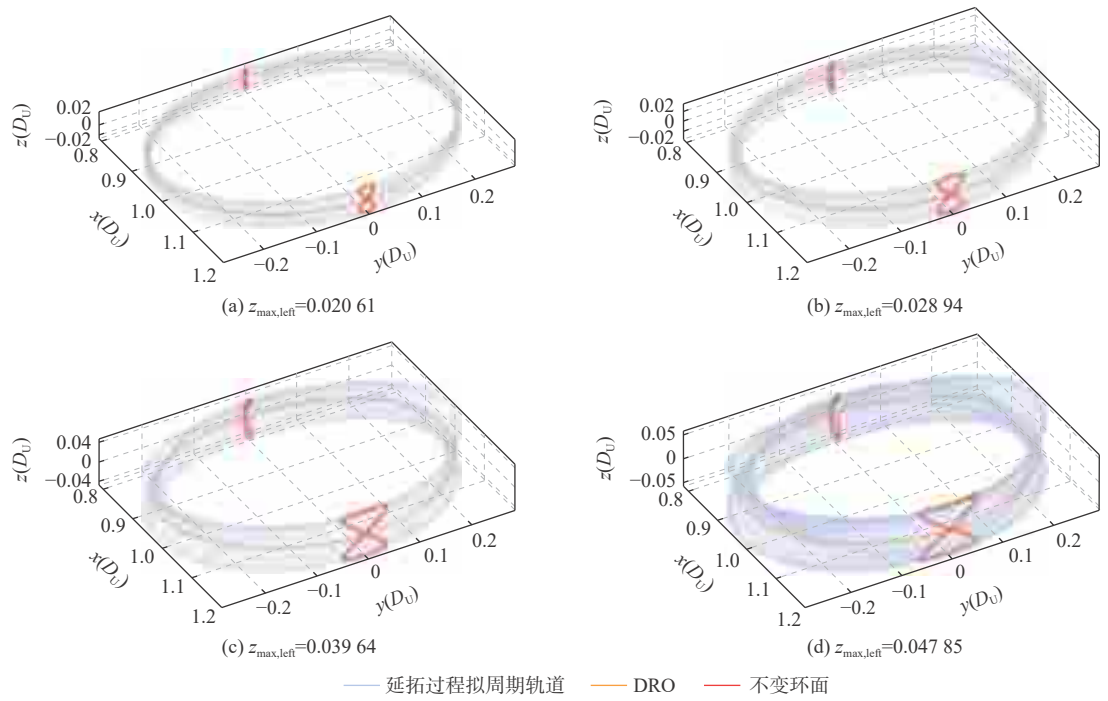


图 11 与 $\rho_{s,v1}$ 相对应的法向 2D 拟 DRO 轨道族中的 4 条轨道

Fig. 11 Four members of the 2D vertical quasi-DRO family corresponding to $\rho_{s,v1}$

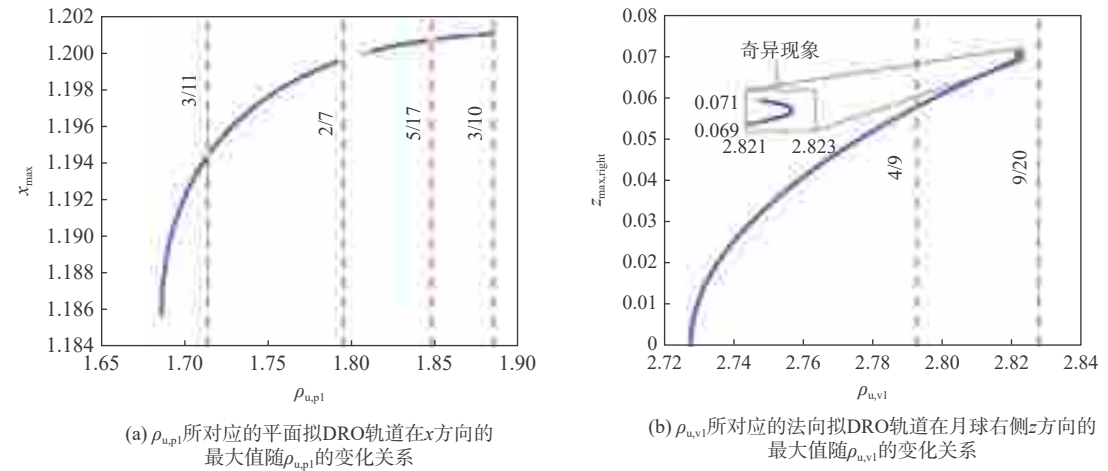


图 12 不稳定构型附近的拟 DRO 的几何参数随旋转相角的变化关系

Fig. 12 Relationship between the geometric parameters of quasi-DRO families near the unstable 2:1 DRO and rotation phase angles

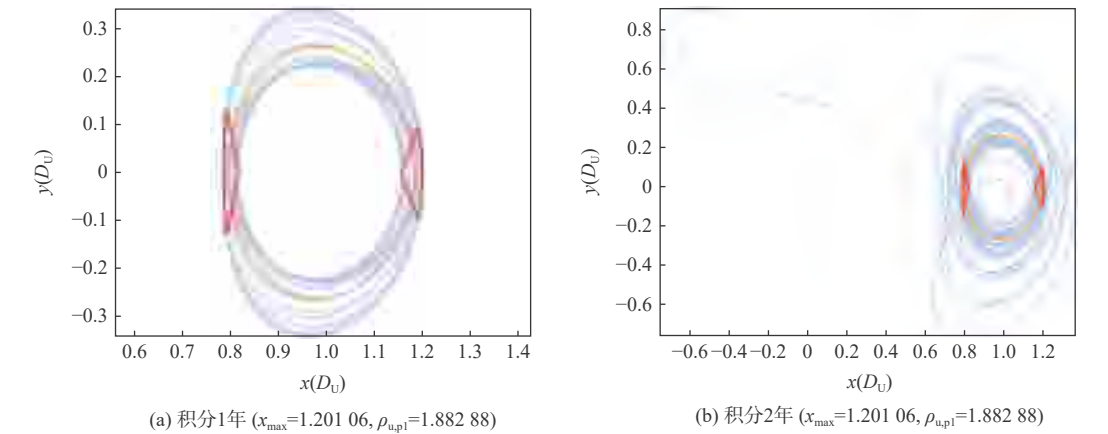


图 13 $\rho_{u,p1}$ 所对应的平面拟周期轨道族中的拟 DRO 示例

Fig. 13 Example of plane quasi-DRO corresponding to $\rho_{u,p1}$

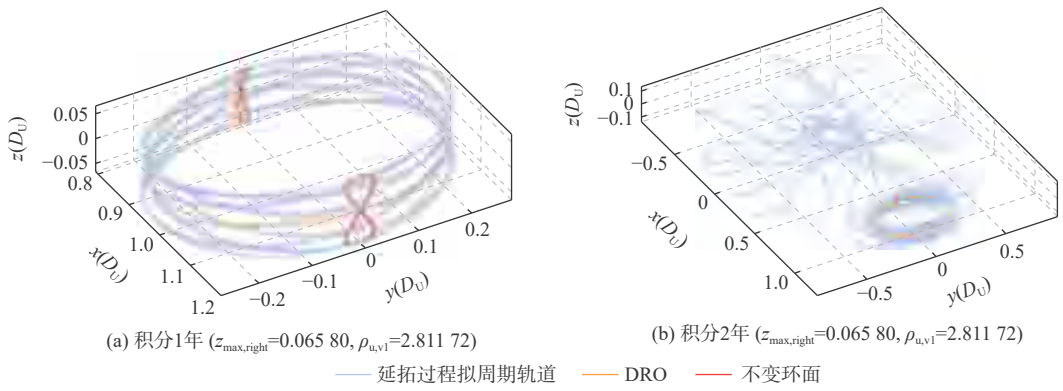


图 14 $\rho_{u,v1}$ 所对应的法向拟周期轨道族中的拟 DRO 示例

Fig. 14 Example of vertical quasi-DRO corresponding to $\rho_{u,v1}$

2D 不变环面的 3 对特征值所对应的方向分别为不变环面自身的切线方向和其余 2 个中心流形方向。而对于构型 2 而言,其 2D 环面的 3 对特征值分别为 1 对为 1 的特征值、1 对模值为 1 的复特征值和 1 对模值不为 1 的实特征值。图 15 展示了不

稳定构型 DRO 附近的 2 类拟 DRO 轨道族的稳定性指数关于旋转相角的变化关系。可以看到,2 类拟 DRO 轨道族的稳定性指数的最大值均在 5.45 附近,这种弱不稳定性是其可以在 1 年的积分时间内保持有界的原因。

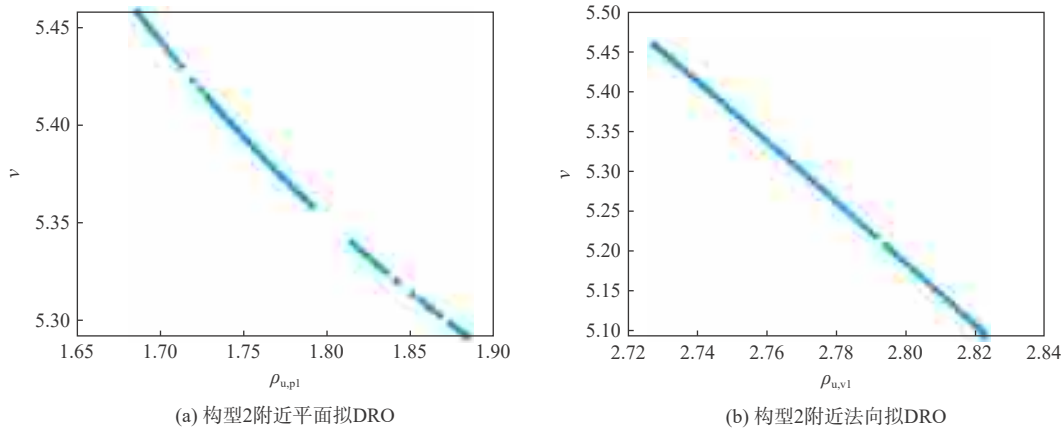


图 15 构型 2 附近 2 类 2D 拟周期轨道的稳定性指数关于旋转相角的变化关系

Fig. 15 Relationship between stability index of two types of 2D quasi-DROs with respect to rotation phase angle near unstable 2:1 DRO

5 结 论

- 1) 本文提出一种可差异化处理采样节点不足和共振奇异现象频繁造成延拓失败的自适应延拓框架,有效地越过了拟周期轨道族中的一系列共振区,节约了不必要的计算时间。
- 2) 在 BCR4BP 中,对 2 种不同 DRO 构型下共计 5 种 2D 拟周期轨道进行了计算和稳定性分析。其中,稳定 DRO 构型附近存在 2 种 2D 平面拟 DRO 轨道族和 1 种法向拟 DRO 轨道族,其均是长期稳定的;不稳定构型附近存在 1 种 2D 平面拟周期轨道族和 1 种 2D 法向拟周期轨道族,其均不稳定。仿真结果显示,其在 1 年的时间内仍保持有界,可利用这一特性进行短期任务设计。
- 3) 本文框架与动力学模型和轨道类型无关,可迁移到 BCR4BP 或其他动力学模型下周周期轨道附

近的不变环面计算过程中。

参考文献 (References)

[1] BEZROUK C J, PARKER J. Long duration stability of distant retrograde orbits[C]//Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Reston: AIAA, 2014.

[2] DAWN T F, GUTKOWSKI J, BATCHA A, et al. Trajectory design considerations for exploration mission 1[C]//Proceedings of the Space Flight Mechanics Meeting. Reston: AIAA, 2018.

[3] 张晨. 基于数值延拓的日月综合借力 DRO 入轨策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(4): 1176-1186.
ZHANG C. Low-energy transfer from Earth into DRO with hybrid gravity assist and numerical continuation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(4): 1176-1186(in Chinese).

[4] 陈冠华, 杨驰航, 张晨, 等. 地月空间的远距离逆行轨道族及其分岔研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2576-2588.
CHEN G H, YANG C H, ZHANG C, et al. Distant retrograde or-

bits and its bifurcations in Earth-Moon system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2576-2588(in Chinese).

[5] MCCARTHY B P, HOWELL K C. Leveraging quasi-periodic orbits for trajectory design in cislunar space[J]. Astrodynamics, 2021, 5(2): 139-165.

[6] MCCARTHY B P, HOWELL K C. Trajectory design using quasi-periodic orbits in the multi-body problem[C]//Proceedings of the 29th AAS/AIAA space flight mechanics meeting. Reston: AIAA, 2019.

[7] WANG M, YANG C H, SUN Y, et al. Family of 2: 1 resonant quasi-periodic distant retrograde orbits in cislunar space[J]. Advances in Space Research, 2024, 73(12): 6166-6181.

[8] FARQUHAR R W, KAMEL A A. Quasi-periodic orbits about the translunar libration point[J]. Celestial Mechanics, 1973, 7(4): 458-473.

[9] RICHARDSON D L, CARY N D. A uniformly valid solution for motion about the interior libration point of the perturbed elliptic-restricted problem[C]//Proceedings of the AIAA Conference on the Exploration of the Outer Planets. Reston: AIAA, 1975.

[10] GÓMEZ G, MASDEMONT J, SIMÓ C. Quasihalo orbits associated with libration points[J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 1998, 46(2): 135-176.

[11] JORBA À, MASDEMONT J. Dynamics in the center manifold of the collinear points of the restricted three body problem[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1999, 132(1-2): 189-213.

[12] GÓMEZ G, NOGUERA M. Some manifolds of periodic orbits in the restricted three-body problem[J]. Celestial Mechanics, 1985, 35(3): 235-255.

[13] HOWELL K C, PERNICKA H J. Numerical determination of Lissajous trajectories in the restricted three-body problem[J]. Celestial Mechanics, 1987, 41(1): 107-124.

[14] KOLEMEN E, KASDIN N J, GURFIL P. Quasi-periodic orbits of the restricted three-body problem made easy[J]. AIP Conference Proceedings, 2007, 886(1): 68-77.

[15] KOLEMEN E, KASDIN N J, GURFIL P. Multiple Poincaré sections method for finding the quasiperiodic orbits of the restricted three body problem[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2012, 112(1): 47-74.

[16] GÓMEZ G, MONDELO J M. The dynamics around the collinear equilibrium points of the RTBP[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2001, 157(4): 283-321.

[17] OLIKARA Z P, SCHEERES D J. Numerical method for computing quasi-periodic orbits and their stability in the restricted three-body problem[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2012, 145: 911-930.

[18] BARESI N, OLIKARA Z P, SCHEERES D J. Fully numerical methods for continuing families of quasi-periodic invariant tori in astrodynamics[J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 2018, 65(2): 157-182.

[19] OLIKARA Z P, HOWELL K C. Computation of quasi-periodic invariant tori in the restricted three-body problem[C]//Proceedings of the AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Reston: AIAA, 2010.

[20] JORBA À, JORBA-CUSCÓ M, ROSALES J J. The vicinity of the Earth-Moon L1 point in the bicircular problem[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2020, 132(2): 11.

[21] LUJAN D, SCHEERES D J. Earth-Moon L2 quasi-halo orbit family: characteristics and manifold applications[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2022, 45(11): 2029-2045.

[22] ROSALES J J, JORBA À, JORBA-CUSCÓ M. Families of halo-like invariant tori around L2 in the Earth-Moon bicircular problem[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2021, 133(4): 16.

[23] MCCARTHY B P, HOWELL K C. Quasi-periodic orbits in the Sun-Earth-Moon bicircular restricted four-body problem[C]//Proceedings of the 31st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Reston: AIAA, 2021.

[24] JORBA À, NICOLÁS B. Transport and invariant manifolds near L3 in the Earth-Moon bicircular model[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2020, 89: 105327.

[25] 李瑞龙, 朱战霞. 一种适用于大幅值 Quasi 周期轨道的数值构造方法[J]. 宇航学报, 2023, 44(1): 52-61.

LI R L, ZHU Z X. A numerical construction method for large-amplitude Quasi periodic orbits[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(1): 52-61(in Chinese).

[26] CIRCI C, TEOFILATTO P. On the dynamics of weak stability boundary lunar transfers[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2001, 79(1): 41-72.

[27] SÁNCHEZ J, NET M. A parallel algorithm for the computation of invariant tori in large-scale dissipative systems[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2013, 252: 22-33.

[28] VILLEGAS-PINTO D, BARESI N, HESTROFFER D, et al. On the numerical computation of quasi-periodic families and applications to the Martian Moons exploration mission[C]//Proceedings of the International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques. Paris : European Space Agency , 2021.

Quasi-periodic orbits near 2:1 resonant DRO in the four-body problem

WANG Ming^{1, 2, 3}, YANG Chihang⁴, ZHANG Hao^{2, 3, *}

(1. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

4. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The 2:1 resonant distant retrograde orbit (DRO), owing to its long-term stability and extensive global accessibility in the Earth-Moon space, holds strategic significance in contemporary space exploration missions. Investigations of quasi-periodic orbits near two distinct configurations of the 2:1 DRO were carried out in the bicircular restricted four-body problem (BCR4BP) in order to better understand the phase space structure near the 2:1 DRO and offer more parking orbit alternatives. Firstly, addressing the complexity in the numerical continuation of quasi-periodic orbits, an adaptive continuation scheme was proposed. This approach ensures the overstep of the resonance region while maintaining torus accuracy by automatically adjusting the continuation step size and the number of discrete nodes representing the torus. Based on this scheme, we computed quasi-periodic families near the 2:1 DRO for both configurations in the BCR4BP and conducted a comprehensive analysis of their stability characteristics. The simulation results demonstrate the efficacy of the proposed method in differentiating and handling issues related to insufficient sampling orders and resonance singularities, yielding a more complete set of orbit families.

Keywords: distant retrograde orbit; bicircular restricted four-body problem; quasi-periodic orbits; cislunar space; numerical continuation

Received: 2024-01-25; Accepted: 2024-03-13; Published Online: 2024-03-27 08:31

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240325.1503.003

Foundation item: Strategic Priority Program on Space Science of the Chinese Academy of Sciences(XDA30010200)

* Corresponding author. E-mail: hao.zhang.zhr@csu.ac.cn

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0068

基于椭圆球面波函数波形成型的测控信号设计

许志超^{1, 2, 3}, 陆发平^{2, 3}, 康家方^{2, 3}, 安琪^{2, 3}, 张治霖^{2, 3}, 杨东凯^{1, *}

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191; 2. 海军航空大学, 烟台 264001;

3. 山东省信号与信息处理重点实验室, 烟台 264001)

摘 要: 如何提高信号波形功率效率、信息传输效率是目前测控系统 (TT&C) 波形设计面临的难题之一。研究发现具有双正交性、最佳时频能量聚集性、频谱可控性等基础特性的椭圆球面波函数 (PSWF) 非常适合测控系统信号波形, 并将 PSWF 引入测控系统信号波形设计, 提出基于 PSWF 波形成型的四维统一扩频测控系统信号波形设计方法。该方法利用高能量聚集度 PSWF 作为波形成型函数, 具有更高的功率效率和信息传输速率、更优的抗干扰和抗截获能力, 能够为测控系统信号波形设计提供一种更优的波形方案。仿真结果表明: 相对于传统基于矩形脉冲函数的测控系统信号, 在相同系统误码性能的条件下, 所提方法信息传输速率可提升 1 倍, 扩频增益提升为 3.44 dB。

关 键 词: 椭圆球面波函数; 波形成型; 测控信号; 功率效率; 信息传输速率

中图分类号: V443.1; TN975

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1160-10

近年来, 商用航空航天技术快速发展, 测控系统 (tracking, telemetry, and command, TT&C) 是连接卫星、无人机等航空航天器和地面站的唯一纽带, 其技术体制直接决定航空航天测控系统效能的发挥^[1-3]。国际上对测控技术体制的研究历程可以大致分为分离测控体制、统一载波测控体制、统一扩频测控体制 3 个阶段, 其中, 统一扩频测控体制将直接序列扩频通信技术引入到测控领域, 利用直接序列扩频通信技术良好的测距、跟踪、数据传输能力, 实现测控数传一体化, 该技术体制既简化了系统设计, 又提高了测控系统的抗干扰抗截获能力。

目前, 统一扩频测控技术已在深空测控通信中得到应用^[4-5], 主要采用基于矩形脉冲函数的二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 调制信号波形^[6], 存在 2 方面的问题: ①调制信号功率谱外泄严重, 第 1 旁瓣衰减仅为 -13 dB, 主瓣带宽内的信号能量仅占信号能量的 94%, 易造成邻道间干

扰, 且带限接收会造成信号失真, 降低了测控精度; ②数据传输能力弱, 仅利用了一个信号空间维度, 不能满足当前较大容量的数据传输需求。此外, 采用滤波成型处理的正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK) 或高阶振幅移相键控 (amplitude phase shift keying, APSK) 技术^[7], 利用了同相和正交 2 个信号空间维度, 可以一定程度上提高数据传输能力, 但带来了测距精度降低的问题。

椭圆球面波函数 (prolate spheroidal wave functions, PSWF) 作为一类特殊的非正弦波函数, 其具有最佳的时频能量聚集性^[8-10], 已被研究用于卫星导航信号设计, 可提高卫星导航系统接收机码跟踪精度和灵敏度^[11-13]; 文献 [14-15] 将其用在极高频 (extremely high frequency, EHF) 频段的卫星通信波形设计, 展现了更优的传输性能。基于 PSWF 的信号波形设计在卫星通信中也展现了极佳的应用前景, 文献 [16-17] 提出基于 PSWF 的索引调制方法,

收稿日期: 2024-01-30; 录用日期: 2024-02-29; 网络出版时间: 2024-04-10 09:44

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240408.1806.003

基金项目: 博士后创新人才支持计划 (BX20200039); 山东省“泰山学者”建设工程专项 (ts20081130)

* 通信作者. E-mail: edkyang@buaa.edu.cn

引用格式: 许志超, 陆发平, 康家方, 等. 基于椭圆球面波函数波形成型的测控信号设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1160-1169. XU Z C, LU F P, KANG J F, et al. Design of tracking telemetry and command signal based on prolate spheroidal wave functions waveform forming [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1160-1169 (in Chinese).

文献 [18] 研究了其在移动通信中的应用, 提高了通信系统的频谱效率。这为解决目前统一扩频测控面临的信号功率谱外泄严重、数据传输能力弱的问题提供了新思路。

基于 PSWF 在卫星通信、移动通信等通信系统中提升功率效率和频谱效率的优势, 本文将 PSWF 引入测控信号波形设计。同时, 为降低测控通信系统接收机带宽造成的信噪比损失问题, 依据 PSWF 随阶数增加能量聚集度不断下降的特点, 利用参数优化的 PSWF 进行波形成型, 提出基于 PSWF 波形成型的四维统一扩频测控信号波形设计方法。本文创新点如下:

1) 本文提出基于 PSWF 波形成型的扩频测控信号设计方法, 并构建了基于 I/Q 双通道的 PSWF 扩频调制、解调模型。该方法通过加大信号空间的时间带宽积, 选取时频能量聚集性更好的 0 阶、1 阶 PSWF 作为波形成型, 提高测控信号波形的功率效率, 通过 I/Q 双通道进行信号处理, 有效降低了系统实现复杂度。

2) 分析本文方法的系统信息传输效率、系统误码性能、系统抗干扰与抗截获性能、滤波处理对系统性能影响, 论证了相对于采用基于矩形脉冲函数的扩频测控信号波形, 本文方法具有更高的功率效率和信息传输速率、更优的抗干扰和抗截获能力, 能够为测控信号波形设计提供一种更优的波形方案。

3) 设计了基于 PSWF 波形成型的测控系统原理验证样机, 利用 Agilent 4 GSps 射频采样示波器 MSO7104B、8.4 GHz 矢量信号分析仪 N9020 和 12 GSps 任意波形发生器等实验测试, 进一步验证本文方法的可行性与有效性。

1 PSWF 适用性分析

本节以 PSWF 已知的双正交性、最佳时频能量聚集性等特性为基础, 剖析了时间带宽积为 $2\text{ Hz}\cdot\text{s}$ 约束条件下, 扩频系统信号集空间维度上限, 剖析 PSWF 在扩频测控信号波形设计中的可行性。

1.1 PSWF 定义及特性

PSWF 作为一类特殊的非正弦波函数, 第 n 阶 PSWF $\varphi_n(c, t)$ 的积分表达式为^[19]

$$\int_{-T/2}^{T/2} \varphi_n(c, \tau) h(t) d\tau = \lambda_n \varphi_n(c, t) \tag{1}$$

式中: $c = WT$ 为函数时间带宽积; $T > 0$ 为 PSWF 时宽; $W > 0$ 为 PSWF 带宽; λ_n 为特征值; $h(t)$ 为理想滤波器。

自 PSWF 提出后, 相关领域专家学者对 PSWF

基础特性展开了大量研究, 发现了完备正交性、高时频能量聚集性、时宽与带宽及频谱灵活可控等诸多在波形设计、信息加载与检测等信号处理中有重要应用的基础特性。

1) 完备正交性。在时间带宽积为 c 的空间中, 在时间区间 $[-T/2, T/2]$, 式 (1) 所示 PSWF 相互正交, 即^[20]

$$\int_{-T/2}^{T/2} \varphi_n(c, t) \varphi_m(c, t) dt = \lambda_n(c) \delta_{n-m} \tag{2}$$

式中: δ_{n-m} 为单位冲激函数, $m, n = 0, 1, \dots, 2c - 2$ 。式 (2) 是其在通信系统中, 作为载体进行信息加载、检测的基础, 也是用于测控信号波形设计的基础。

2) 高时频能量聚集性。在给定带宽的条件下, PSWF 能量能够最大限度的集中在时间区间 $[-T/2, T/2]$ 内, 是目前时频能量聚集性最优的带限函数^[20], 这也是 PSWF 区别于其他函数最为重要的基础特性之一。

3) 时宽、带宽及频谱灵活可控。由式 (2) 可知, PSWF 不仅可以通过改变参数 T 和 W , 灵活控制时宽、带宽^[20], 产生任意时宽、任意带宽、任意频段 PSWF。

1.2 PSWF 用作码片波形的可行性分析

信号作为信息传输的载体, 其特性包括时间特性和频率特性 2 个基本特性。信号空间理论指出: 在持续时间为 T , 频带宽度为 W 的时间带宽范围内, 信号的空间维度为 $2WT$ 。这一结论限定了测控信号所能使用的最大空间维度, 是信息传输的基本约束之一。

在传统的统一扩频测控系统中, 采用矩形脉冲函数作为码片波形, 其持续时长与带宽宽度的乘积 (即时间带宽积) 为 $WT = 2\text{ Hz}\cdot\text{s}$, 相应的其对应的空间维度为 4。然而, 在传统的统一扩频系统基带信号设计中, 只用到了矩形脉冲函数这 1 个信号维度, 这也是传统统一扩频测控系统信息传输速率低的原因所在。

需要指出的是, 在时间带宽积为 2 的约束下, 时长完全限定在 T 、带宽完全限定在 $2/T$ 的 4 个完备、正交的函数是理想的波形设计, 但是即时限又带限的函数是不存在的。因此, 如何设计最优的四维函数信号集, 是高效测控信号波形设计的一个基础理论问题。

PSWF 具有最佳的时频域能量聚集性, 在所有绝对时限 (带限) 函数中, PSWF 在给定带限 (时限) 区间内, 频域 (时域) 能量聚集性最佳。同时, 得益于 PSWF 频谱灵活可控的特性, 可知, 直接在测控系统相应时长、相应频段内, 直接设计基于 PSWF

的四维信号集。例如,在中心频率为 20 MHz、带宽为 2 MHz,码片时宽为 1 μ s 的约束下,根据时间带宽积与信号空间维度的关系,可设计 4 路相互正交的 PSWF,记 0 阶、1 阶、2 阶、3 阶 PSWF 为 $\varphi_0(t)$ 、 $\varphi_1(t)$ 、 $\varphi_2(t)$ 、 $\varphi_3(t)$,函数时域波形和功率谱密度(power spectral density, PSD) 分别如图 1 和图 2 所示。

波形,得益于其高时频能量聚集性的优势,可有效提升信号波形能量聚集性;同时,将传统测控信号波形码元信号空间维度由一维扩展为四维,可有效提升信息传输速率。然而,由于 PSWF 随着阶数增加信号能量聚集度将不断降低,特别是高阶 PSWF,其带外能量泄露同样比较严重。这是由其特征值特性决定的,由此带来的影响是,测控波形在设计带宽外将存在大量的能量泄露,若以接收机前端带宽为 PSWF 设计带宽,存在信噪比损失降低系统性能的问题。

图 3 给出了当 PSWF 作为码片波形时,基于 PSWF 波形调制的测控信号的信噪比损失与滤波器带宽之间的关系。从仿真结果可知,接收机前端带宽越小造成的信噪比损失越大,由于矩形脉冲函数功率谱的零点特性,其在设计带宽整数倍带宽时(2, 4, 6, $\cdots$),信噪比损失值几乎不变。当接收机带宽为设计带宽(2 MHz)时,基于 PSWF 波形调制的测控信号的接收机信噪比损失约为 0.52 dB,此时基于矩形脉冲函数的测控信号信噪比损失为 0.44 dB。接收机带宽约为 2.1 MHz 时,二者的信噪比损失相同,均为约 0.44 dB。当接收机带宽更大时,基于 PSWF 波形调制的测控信号的信噪比损失小于基于矩形脉冲函数的测控信号信噪比。

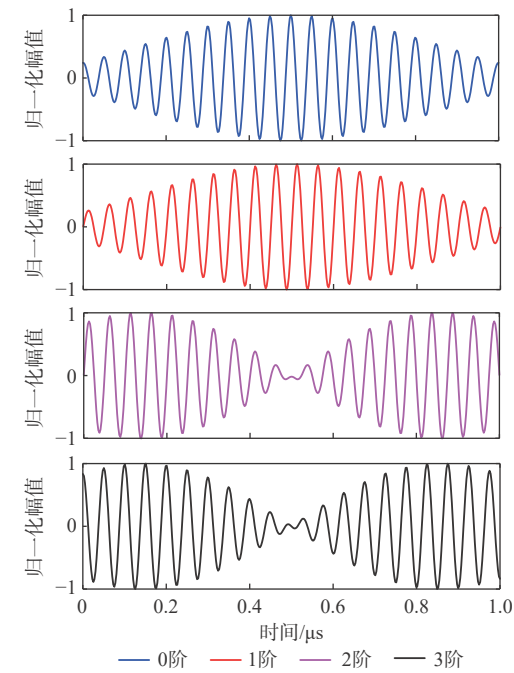


图 1 PSWF 的时域波形

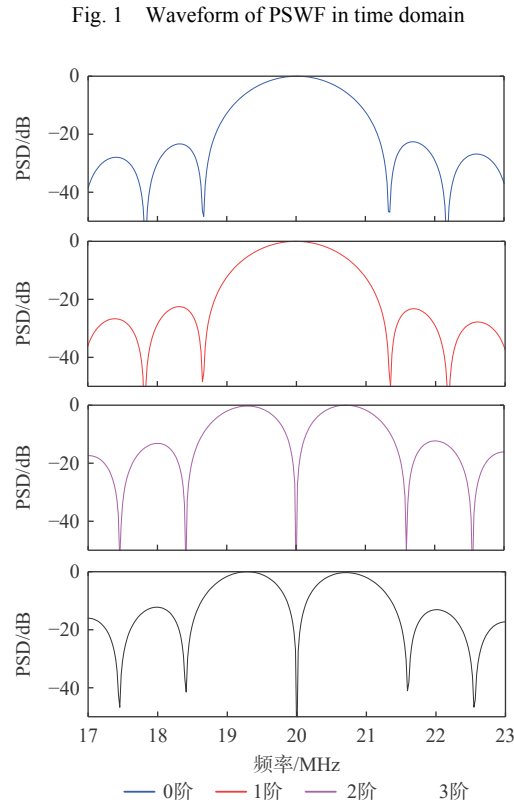


图 2 PSWF 的功率谱

Fig. 2 PSD of PSWF

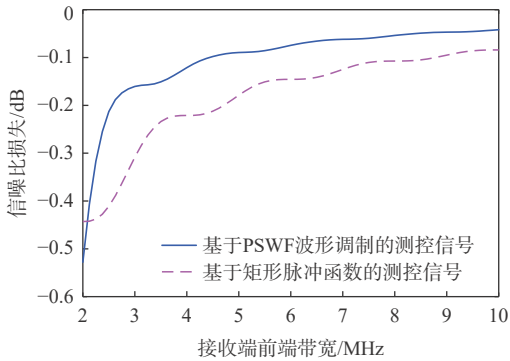


图 3 接收机带宽造成的信噪比损失

Fig. 3 Signal-to-noise ratio loss from receiver bandwidth

通过上述分析可知,若用 PSWF 的设计带宽为接收机带宽,会造成 0.52 dB 的信噪比损失,降低系统性能。这一问题是高阶 PSWF 的能量聚集性引起的,其实质是在时间带宽积为 2 的信号空间中,设计出 4 路具有较好能量聚集性的正交信号是非常困难的。此外,众所周知 PSWF 是时频能量聚集性最好的函数,采用 PSWF 设计尚存在 0.52 dB 的信噪比损失,采用其他类型函数时,系统的信噪比损失将会更大。

鉴于此,本文考虑采用 PSWF 作为基础信号波形,从脉冲波形成型的角度,采用“加大信号空间的时间带宽积,选取时频能量聚集性更好的 PSWF”的

由图 1 和图 2 可知, PSWF 作为测控系统码片

新思路, 分析 PSWF 用作波形成型函数的可行性。

1.3 PSWF 用作波形成型的可行性分析

鉴于 PSWF 成型信号的时长为 2 倍的码片时间, 相对于 PSWF 用作码片波形, PSWF 用作波形成型时, 其设计时宽可变为原来的 2 倍。同时, 由于时宽扩展为原来 2 倍, 相应的扩频调制信号码片的交叠度为 50%, 此时 0 阶和 1 阶 PSWF 成型信号将直接叠加, 相互间也会产生干扰。

图 4 给出了设计时宽为 2 μs , 带宽为 $[-1, 1]$ MHz 的 0 阶和 1 阶 PSWF 的时域波形, 以及其作为成型函数相互间干扰示意图。其中, 实线表示 0 阶 PSWF 成型函数, 虚线表示 1 阶 PSWF 成型函数, 带方框的数字和不带方框的数字均为扩频的码片序列。实际中实线和虚线信号是叠加在一起的, 本文为便于说明, 示意性给出码片之间的相互关系。从示意图中可以看出, 波形持续时间为 2 个码片, 前后码片波形相互交叠 1 个码片。利用正交性单独解调码片时, 将产生严重的干扰, 干扰项包括 2 类: 第 1 类是支路扩频码片间的自干扰, 第 2 类是支路之间扩频码片的互干扰。

的特性, 扩频码片干扰将出现相互抵消的情况, 而整个码元的相关接收能量随 N 的增大不断提高。

采用 1 023 位 M 序列作为扩频码, 大量仿真得到的 0 阶和 1 阶 PSWF 波形成型码元与扩频调制码元信号的相关值, 也就是接收机本地模板与接收到的码元信号的相关值, 如表 1 所示。

表 1 模板信号与接收码元信号的相关值

Table 1 Correlation values of template signal and received symbol signal

函数	相关值	
	0阶PSWF	1阶PSWF
0阶PSWF	0.999 4	4.6×10^{-4}
1阶PSWF	4.6×10^{-4}	0.998 9

由于前后扩频码元的干扰, 模板信号与接收信号的相关值减小, 该干扰值的影响约为 0.001, 阶数不同的码元模板与接收信号的相关值为 10^{-4} 量级。2 种干扰对信号解调性能的影响极小, 约为 0.007 dB。值得注意的是, 当扩频码片位数减小时, 干扰值会有所增大, 但扩频系统的扩频倍数通常很大, 这一干扰几乎可以忽略。

综上所述, 具有双正交性、最佳时频能量聚集性、频谱可控性等基础特性的 PSWF 可用作测控系统的波形成型函数, 且将具有更高的功率效率、信息传输速率。

2 基于 PSWF 波形成型的四维统一扩频测控系统模型构建

鉴于相对于 PSWF 用作测控系统码片波形, 在相同信息传输速率的前提下, PSWF 用作测控系统波形成型函数, 信号波形将具有更高的时频能量聚集度, 能够更为有效的提升测控系统功率效率。本节从波形成型角度出发, 结合扩频码的优良特性, 构建基于 PSWF 波形成型的四维统一扩频测控系统模型。

2.1 基于 PSWF 波形成型的扩频系统调制端模型

鉴于测控系统通常工作在微波频段, 其频率较高, 若直接数字产生微波频段的 PSWF, 对数字处理和数模转换器件提出很高的要求, 采用等效低通原理, 引入 I/Q 双通道信号处理, 构建了基于 I/Q 双通道的 PSWF 波形成型扩频调制模型, 如图 5 所示。

该模型包括串并转换、调制符号映射与扩频、PSWFs 波形成型、上变频处理 4 个模块。调制信号产生流程如下:

步骤 1 串并转换。将待传输的测控数据进行串并转换, 将串行数据转换为 4 路并行数据, 其中,

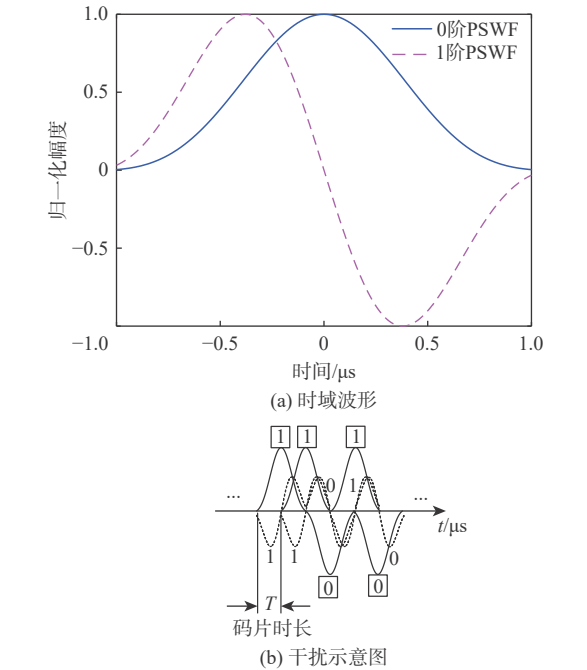


图 4 PSWF 波形与码片干扰示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PSWF function waveform and code chip interference

现考虑对扩频调制码元进行相关接收解调的情况, 扩频调制码元由 N 个扩频码片组成, 码片之间的干扰值与前后码片是“0”或“1”有关。对于扩频码元而言, 在进行相关接收时, N 个码片干扰的和即为码元干扰, 但由于扩频码码片“0”和“1”出现的随机性, 以及“0”和“1”出现的个数近似相等

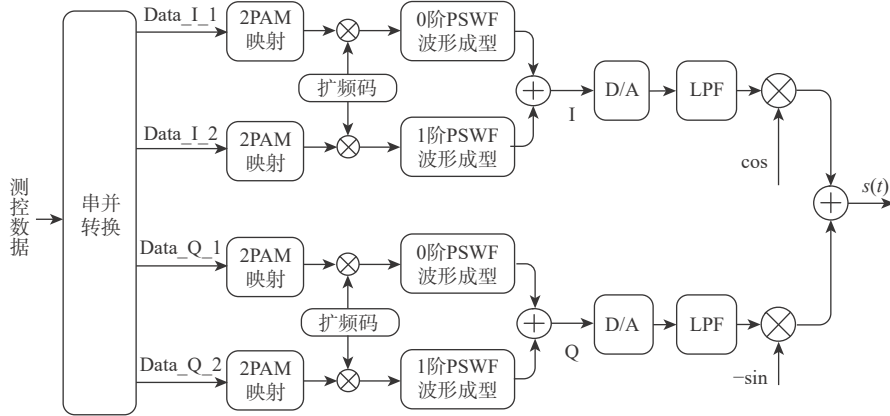


图 5 基于 PSWF 波形成型的扩频测控系统调制端模型

Fig. 5 Modulation end model of spread spectrum TT&C based on PSWF waveform shaping

I/Q 支路各 2 路。

步骤 2 二进制脉冲幅度调制 (pulse amplitude modulation, PAM) 映射。对经串并转换后的二进制数据作 2PAM 映射, 也就是码型变换, 本文把 0、1 二进制数据转换为 +1、-1 双极性码。

步骤 3 扩频调制。用相同的扩频码分别对双极性数据进行扩频, 得到 4 路数字基带的扩频调制信号。

步骤 4 PSWF 波形成型。采用时间带宽积为 2 的基带 0 阶和 1 阶 PSWF, 分别对第 1、第 2 和第 3、第 4 路数字基带扩频信号进行波形成型, 再把第 1、第 2 和第 3、第 4 路信号叠加输出, 形成 I 支路和 Q 支路的双通道信号。

步骤 5 载波调制上变频。对 PSWF 波形成型后的测控信号(数字信号)进行 D/A 处理, 变为模拟信号, 并进行低通滤波(low-pass filter, LPF)处理, 进而进行载波调制, 分别用正弦和余弦载波, 对 I 和 Q 支路信号进行载波调制, 再将 2 路载波调制后的信号叠加, 形成射频信号。

2.2 基于 PSWF 波形成型的扩频系统解调端模型

鉴于测控系统接收端的信号处理是发射端信号产生的逆过程, 构建了基于 PSWF 波形成型的四维统一扩频测控系统解调端模型, 如图 6 所示。该模型包括下变频处理、解扩与调制符号逆映射、并串转换 3 个模块。调制信号检测与解调流程如下:

步骤 1 接收信号下变频。分别用正弦和余弦载波对接收信号进行下变频, 获取对 I/Q 支路基带信号, 并进行 LPF 处理, 进而进行 A/D 处理, 获取 I/Q 支路数字信号。

步骤 2 匹配滤波与解扩。分别对 2 个通道各自包含的 2 路 0 阶和 1 阶 PSWF 基带信号进行匹配滤波, 并在扩频码元时间内对码片数据进行积分并判决即可得到 4 路解调数据。

步骤 3 2PAM 逆映射。将 +1、-1 双极性码转

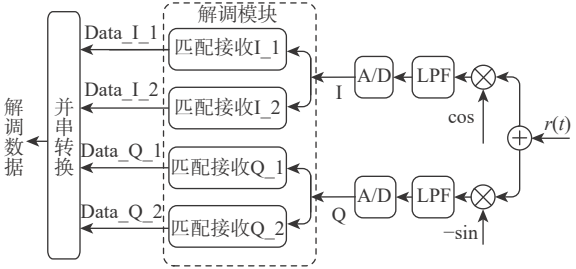


图 6 基于 PSWF 波形成型的扩频测控系统解调端模型

Fig. 6 Demodulation end model of spread spectrum TT&C system based on PSWF waveform shaping

换为 0、1 二进制数据。

步骤 4 并串转换。将 4 路并行数据转换为串行数据, 恢复传输的测控数据。

3 系统性能理论与仿真分析

鉴于目前扩频测控系统几乎均采用基于矩形脉冲函数的信号波形, 本节从信号功率谱、峰均功率比、信息传输效率、系统误码性能、系统抗干扰与抗截获性能等方面, 对比分析本文方法与采用基于矩形脉冲函数的扩频测控信号波形间的性能差异。为便于分析且不失一般性, 假设测控系统的设计要求是传输带宽为 2.046 MHz, 信息速率为 2 Kbit/s, 时间带宽积为 4 Hz·s, 具体参数如表 2 所示。

3.1 信号功率谱与峰均功率比特性

图 7 为 I 通道和 Q 通道时域信号波形, 其中, 黄色为 I 通道调制信号, 蓝色为 Q 通道调制信号。2 个通道内分别包含 2 路基于 PSWF 波形成型的基带扩频调制信号。

图 8 为本文方法的信号功率谱。从仿真结果可知, 本文方法信号波形的带外能量衰减较大, 信号具有更好的能量聚集性, 99.9% 能量带宽为 2.069 MHz, 仅比信号设计带宽 2.046 MHz 大 0.023 MHz。调制信号 99.8% 以上的能量集中在设计带宽内, 展现了

表 2 设计方案参数

Table 2 Design scheme parameters	
参数	数值
码片时长/s	9.775×10^{-5}
成型波形	0阶、1阶PSWF
传输带宽/MHz	2.046
信息速率/(Kbit·s ⁻¹)	2
扩频码码长/码片	2 046
码元时长/s	0.002

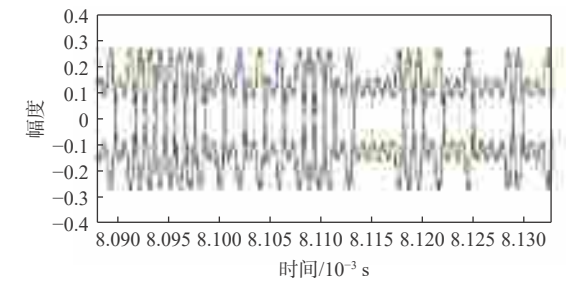


图 7 调制信号时域波形

Fig. 7 Modulation signal waveform in time domain

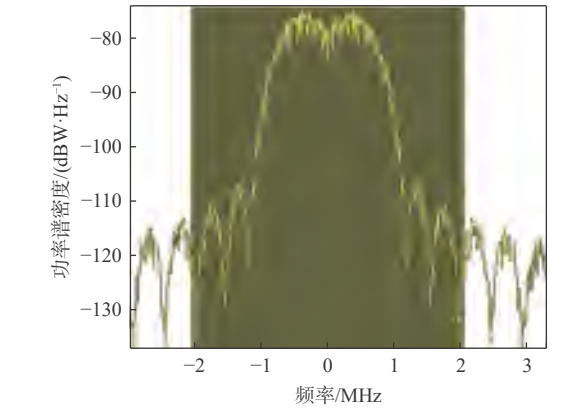


图 8 信号波形功率谱密度

Fig. 8 PSD of modulation signal waveform

本文方法信号波形很好的频谱能量分布特性。

图 9 为本文方法的信号互补累计分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF) 曲线。从仿真结果可知, 本文方法信号波形的最大峰均功率比为 6.97 dB, 1% 概率下调制信号的峰均功率比为 4.44 dB, 0.1% 概率下的峰均功率比为 4.72 dB, 反映了本文方法信号波形较好的峰均比特性。

3.2 PSWF 测控系统信息传输效率

本文方法的频谱效率 C_{DS}/W 与扩频因子 K 倒数的 2 倍成正比, 即满足:

$$\frac{C_{DS}}{W} \propto \frac{2}{K} \tag{3}$$

图 10 为频谱效率与扩频因子倒数的关系, 由图中可知, 本文方法的理论传输效率是传统直接序列扩频调制系统的 2 倍。

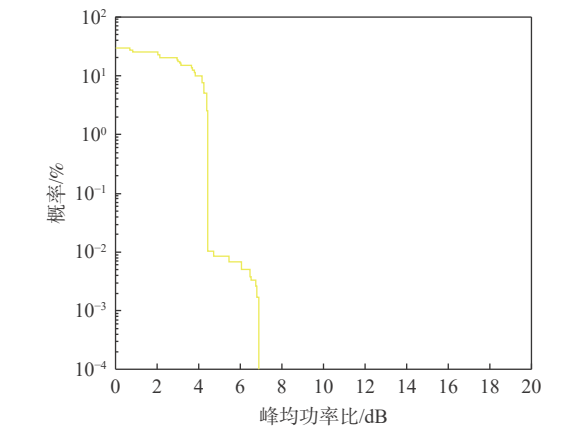


图 9 信号 CCDF 曲线

Fig. 9 CCDF of signal waveform

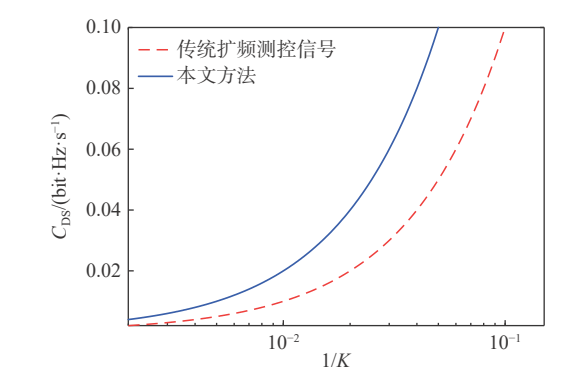


图 10 频谱效率与扩频因子倒数的关系

Fig. 10 Relationship between spectrum efficiency and the reciprocal of spreading factor

3.3 系统误码性能与抗干扰性能分析

对比传统基于矩形脉冲成型的扩频测控调制易知, 在高斯白噪声信道条件下, 本文方法与传统的直接序列扩频 BPSK 调制性能相同, 误码率为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{E_b/N_0} \right) \tag{4}$$

式中: erfc 为互补累积分布函数; N_0 为高斯白噪声功率谱密度; E_b 为每比特平均能量。

采用蒙特卡罗仿真实验的方式, 对系统的误码性能进行仿真分析, 理论误码率与仿真误码率, 如图 11 所示。从仿真结果可知, 在高斯白噪声信道下, 系统的仿真误码性能与理论误码性能一致, 验证理论了误码率分析的正确性, 同时这也展现了本文方法的可行性和优越性。

当干扰信号的功率与调制信号相同时, 干扰为窄带 BPSK 调制信号、宽带 BPSK 调制信号、其他直接序列扩频调制信号条件下, 本文方法的误码率曲线如图 12 所示。从仿真结果可知, 3 种干扰都降低了系统的误码性能。误码率为 10^{-5} 时, 直扩调制信号干扰使误码性能下降约 0.8 dB, 其他 2 种干扰对误码性能的影响略小。这一结果反映了本文方

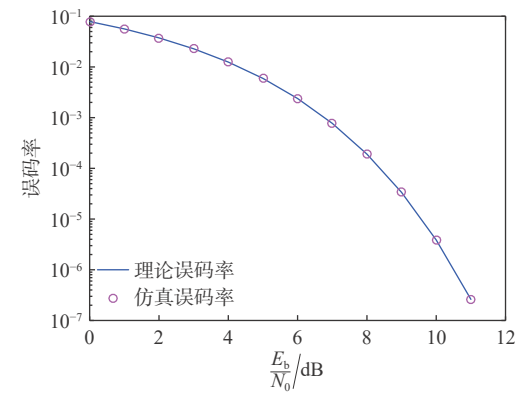


图 11 理论和仿真误码率曲线

Fig. 11 Error rate curve of theoretic and simulate results

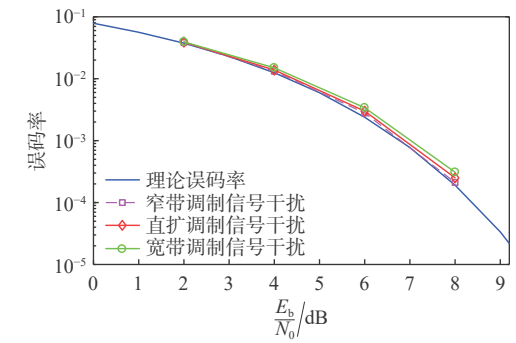


图 12 系统抗干扰能力误码率仿真曲线

Fig. 12 Curves of system anti-interference ability

法具有良好的对抗窄带、宽带和其他扩频干扰的能力,对其应用研究具有重要指导意义。

3.4 滤波器对系统性能影响及系统抗截获性能

图 13 为本文方法的信噪比损失与滤波器带宽之间的关系。从仿真结果可知,相对于基于矩形脉冲函数成型的测控信号、基于 PSWF 波形调制的测控信号,本文方法几乎没有信噪比损失,这也说明本文方法将 PSWF 用作波形成型函数的正确性。

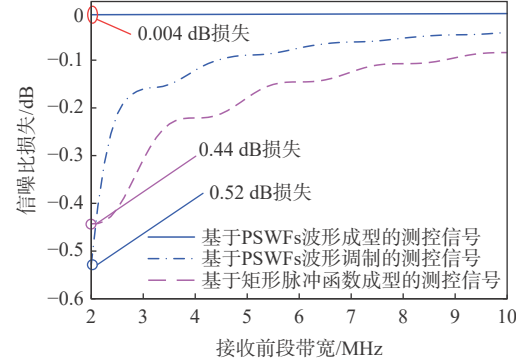


图 13 接收机带宽造成的信噪比损失

Fig. 13 SNR loss from receiver bandwidth

值得注意的是,从局部放大中可以看出,在设计带宽为 2 MHz 时,信噪比损失约为 0.004 dB,可以忽略。

此外,本文方法提供了更多的信号空间维度冗余,具有更高的频谱效率,下面将把这些技术体制优势转化为系统抗截获能力的提升。在相同的测控信息传输速率、相同的传输带宽和相同的误码率要求下,对比分析本文方法与基于矩形脉冲函数成型的测控信号在抗截获性能间的差异。为更直观地展现系统的测控性能,本文通过典型设计的形式来研究分析系统的抗截获性能。

不妨假设测控系统的设计要求是传输带宽为 2.046 MHz,信息速率为 2 Kbit/s。可以采用得到 2 种技术方法的设计方案如表 3 所示。上述设计参数带来的抗截获效果包括 2 个层面:①非合作方侦察截获该测控信号的难度大大增加,原因就是扩频码序列长度从 1 023 码片增加到了 2 046 码片;②系统的扩频增益将由 30.1 dB 提高到 33.1 dB,使得系统的抗干扰能力提高了 3 dB,在对抗相同干扰的条件下(非高斯白噪声干扰),可以将系统的发射功率降低 3 dB,进而将信号的功率谱压低 3 dB。

表 3 设计方案参数对比

Table 3 Comparison of parameters in design scheme						
类型	成型函数	码片时长/s	传输带宽/MHz	信息速率/(Kbit·s ⁻¹)	码元时长/s	扩频码码长/码片
基于矩形脉冲函数波形成型的测控信号	矩形脉冲函数	9.775×10 ⁻⁵	2.046	2	0.001	1 023
基于PSWF波形成型的测控信号	0阶、1阶PSWF	9.775×10 ⁻⁵	2.046	2	0.002	2 046

对比基于矩形脉冲函数成型的测控信号,在相同发射功率、相同测控信息速率、相同传输带宽、相同误码率条件下,在设计带宽内(2 MHz),考虑到矩形脉冲函数统一扩频系统 0.44 dB 的信噪比损失,本文方法的扩频增益提升为 3.44 dB。

通过上述分析可知,本文方法具有更高的功率效率和信息传输速率、更优的抗干扰和抗截获能力,有望为测控信号波形设计提供一种更优的波形方案。

4 基于软件无线电平台的原理样机设计实验与测试

为更好地验证本文方法的可行性及理论与仿真分析的准确性,本节采用软件无线电平台设计了原理样机验证系统,并进行实验测试。

4.1 基于软件无线电的原理样机系统构建

系统 PSWF 波形、码元、扩频码码长等参数仍沿用第 3 节中的设置,信源为 TXT 文本文档,样机

系统的其他参数设置如表 4 所示。

表 4 样机系统参数设置

Table 4 Prototype system parameter settings

信源/KB	采样频率/(MSa·s ⁻¹)	载波频率/GHz	信道条件
46(368 000 bit)	5.115(5倍过采样)	2	短距离室内传输

构建的原理样机实验测试系统如图 14 所示。其中, 图 14(a)左侧自上而下分别为 Agilent 4 GSa/s 射频采样示波器 MSO7104B、8.4 GHz 矢量信号分析仪 N9020 和 12 GSps 任意波形发生器; 右侧前排为 2 台软件无线电设备, 一台用于发射、另一台用于接收。图 14(b)为软件无线电设备的内部结构, 底板为 FPGA 处理板, 底板上的可插拔板为射频频板, 射频信号频率范围为 $50\sim2.2\times10^3$ MHz, 传输信号最大带宽为 40 MHz, 时钟精度为 2.5×10^{-6} s。



图 14 原理样机实验测试系统

Fig. 14 Principle prototype experimental test system

4.2 硬件测试结果与分析

图 15 为实测得到的射频信号时域波形、峰均功率比及功率谱。从测试结果可知:

- 1) 射频信号码片时间与设计信号码片时长一致, 且对比图 7 基带仿真波形和图 15(a)示波器实际观测的信号时域波形可知, 二者的包络特性一致, 理论、仿真和实测信号时域波形具有很好的一致性。
- 2) 对比图 9 基带信号峰均功率仿真曲线与图 15(b)矢量信号分析仪测试得到的射频调制信号的峰均功率比分布特性曲线可知, 实测与仿真得到的信号峰均功率比分布曲线基本一致。其中, 本文



图 15 硬件射频信号实测结果

Fig. 15 Test results of hardware RF signals

方法最大峰均功率比为 7.08 dB, 仿真结果为 6.97 dB, 二者差异仅为 0.11 dB; 射频信号 1%和 0.1%概率条件下的峰均功率比分别为 4.89 dB 和 4.99 dB, 略大于仿真结果 4.44 dB 和 4.72 dB, 但与仿真结果基本一致。

- 3) 由图 15(c)矢量信号分析仪测试得到的射频调制信号的峰均功率比分布特性曲线可知, 信号中心频率为 2 GHz, 99.9% 能量带宽为 2.052 MHz, -26 dB 衰减带宽为 2.107 MHz, 信号设计带宽 (2.046 MHz) 外的衰减约为 -25 dB。此外, 结合图 8 基带信号功率谱及功率带宽仿真可知, 实测功率谱及功率带宽与仿真结果和理论分析结果几乎完全一致。

此外, 在传输帧格式设计中, 每帧数据长度为 2 s, 包含 1 000 个扩频调制码元 (4×1 000 个基带

PSWF 波形成型码元), 其中, 前 4 个扩频调制码元为帧同步头, 后 996 个码元为信息数据。也就是信道速率为 2 Kbit/s, 实际信息速率为 1.992 Kbit/s。由于信道环境为室内短距离无线信道, 2 GHz 频段的干扰和噪声很小, 解调恢复的 TXT 文本文档与发送文档完全相同, 整个传输过程无误码。

上述实测分析验证理论与仿真分析的准确性, 表明本文方法是可行的, 这为后续基于 PSWF 的测控系统设计提供了参考依据。

5 结 论

本文相对于基于矩形脉冲函数的传统测控信号波形, 提出基于 PSWF 波形成型的测控信号波形具有如下优势:

1) 具有更高的能量聚集度, 调制信号 99.8% 以上的能量集中在设计带宽内, 能够有效提高测控信号波形功率效率;

2) 具有更高的信息传输速率, 理论传输效率是传统直接序列扩频调制系统的 2 倍, 能够有效提高测控系统信息传输速率;

3) 具有更优的抗窄带、宽带和其他扩频干扰的能力, 如误码率为 10^{-5} 时, 直扩调制信号干扰使误码性能下降约 0.8 dB, 窄带、宽带干扰对误码性能的影响更小。

4) 具有更优的抗滤波器带宽影响和抗截获性能力, 如在信号设计带宽、滤波器带宽为 2 MHz 时, 传统基于矩形脉冲函数的扩频系统信噪比损失为 0.44 dB, 本文方法信噪比损失约为 0.004 dB, 可以忽略; 同时, 本文方法的扩频增益提升为 3.44 dB, 能够有效提高测控系统抗截获性能力。

5) 本文设计的基于 PSWF 波形成型测控系统原理验证样机实测结果与理论分析基本一致, 进一步验证本文方法的可行性与有效性。这表明本文测控信号波形能够为测控信号波形设计提供一种更优的波形方案, 有效提高测控系统功率效率和信息传输速率, 提升系统抗干扰和抗截获能力。

然而, 值得注意的是, 本文基于 PSWF 的测控信号波形将信号维度由一维扩展为四维, 系统复杂度增加。同时, 由于 PSWF 是在椭圆球面坐标系下定义的一类特殊函数, 鲜有相关领域专家学者给出 PSWF 的准确解析表达式, 主要采用依据 PSWF 的微分定义式、积分定义式进行数值求解的方式获得, 当系统码片时长发生变化时, 需要重新产生与之相对应的 PSWF, 系统复杂度将进一步增加。这也是本文基于 PSWF 的测控信号波形设计实现难点问题, 因此, 如何降低 PSWF 求解产生复杂度是

目前急需解决的关键问题之一, 这也是我们下一步的研究重点。

参考文献 (References)

[1] MODENINI A, RIPANI B. A tutorial on the tracking, telemetry, and command (TT&C) for space missions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(3): 1510-1542.

[2] 马雅楠, 王建, 范广腾, 等. FSK 调制系统的干扰对抗效果[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(2): 507-517.
MA Y N, WANG J, FAN G T, et al. Countermeasure effect of jamming to FSK modulation system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(2): 507-517(in Chinese).

[3] XUE L S, LI X, WU W R, et al. Design of tracking, telemetry, command (TT&C) and data transmission integrated signal in TDD mode[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3340.

[4] TOWFIC Z J, VOSS T J, SHIHABI M M, et al. X-band PN delta DOR signal design and implementation on the JPL iris transponder[C]// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.

[5] CHEN A, TONG L, ZHENG W M. Design and simulation of a new PN-DOR Beacon modulated by gold code used in the VLBI[J]. Progress in Astronomy, 2022, 40(2): 271-283.

[6] BAO D Z, XING S R, SUN W, et al. Design of baseband system of satellite spread spectrum TT&C[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(9): 81-85.

[7] YANG H F. Design and implementation of laser TT&C system based on QPSK digital coherence system: invited Paper[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Optical Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1.

[8] GHAFFARI H B, HOGAN J A, LAKEY J D. New properties of clifford prolate spheroidal wave functions[C]// Proceedings of the International Conference on Sampling Theory and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.

[9] MURUGESAN P P K, SIVABALIN V P G, NANJAN S M, et al. Orthogonal modes using prolate spheroidal wave function in holographic communication systems[C]// Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Computation, Electronics, Power and Telecommunication. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.

[10] JAFFAL Y, ALVARADO A. Pulses with minimum residual intersymbol interference for faster than nyquist signaling[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(11): 2670-2674.

[11] 倪育德, 邹玲, 刘瑞华, 等. 北斗系统 C 波段导航信号调制方式及性能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(12): 3800-3810.
NI Y D, ZOU L, LIU R H, et al. C-band navigation signal modulation mode and performance evaluation of BeiDou system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(12): 3800-3810(in Chinese).

[12] XUE R, XIE M M. Partial response continuous phase modulation with a prolate spheroidal wave function for compass system in the S-band[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2023, 2023(1): 88.

[13] BECK F C, ENNEKING C, THÖLERT S, et al. Comparison of constant and non-constant envelope signals for satellite navigation[C]// Proceedings of the 10th Workshop on Satellite Navigation Techno-

logy. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-9.

[14] DE SANCTIS M, CIANCA E, ROSSI T, et al. Waveform design solutions for EHF broadband satellite communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 18-23.

[15] SACCHI C, ROSSI T, RUGGIERI M, et al. Efficient waveform design for high-bit-rate W-band satellite transmissions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 974-995.

[16] 王红星, 陆发平, 刘传辉, 等. 基于信号分组优化的椭圆球面波多载波调制解调方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51(7): 1168-1182.

WANG H X, LU F P, LIU C H, et al. Multi-carrier modulation scheme based on prolate spheroidal wave functions with signal grouping optimization[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2021, 51(7): 1168-1182(in Chinese).

[17] 王红星, 陆发平, 刘传辉, 等. 基于广义信号索引的椭圆球面波函数多载波调制解调方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51(9): 1524-1539.

WANG H X, LU F P, LIU C H, et al. Multi-carrier modulation scheme based on prolate spheroidal wave functions with generalized index modulation[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2021, 51(9): 1524-1539(in Chinese).

[18] WANG H X, LU F P, LIU C H, et al. Frequency domain multi-carrier modulation based on prolate spheroidal wave functions[J]. IEEE Access, 2020, 8: 99665-99680.

[19] LANDAU H J, POLLAK H O. Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty: II[J]. Bell System Technical Journal, 1961, 40(1): 65-84.

[20] OSIPOV A, ROKHLIN V, XIAO H. Prolate spheroidal wave functions of order zero[M]. Berlin: Springer, 2013: 1-30.

Design of tracking telemetry and command signal based on prolate spheroidal wave functions waveform forming

XU Zhichao^{1, 2, 3}, LU Faping^{2, 3}, KANG Jiafang^{2, 3}, AN Qi^{2, 3}, ZHANG Zhilin^{2, 3}, YANG Dongkai^{1, *}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

3. Key Laboratory on Signal & Information Processing of Shandong Province, Yantai 264001, China)

Abstract: Enhancing the signal waveform's power efficiency and information transmission efficiency is one of the issues in tracking, telemetry, and command (TT&C) system waveform design. It is found that the basic characteristics such as biorthogonal, optimal time-frequency energy aggregate, and spectral controllable of prolate spheroidal wave functions (PSWFs) make it be a reliable candidate for TT&C signal waveform design. In this paper, PSWF are introduced into TT&C signal waveform design, and a four-dimensional unified spread spectrum TT&C signal waveform design method based on PSWF waveform shaping is proposed. This new idea, by using high-energy aggregation PSWF as waveform shaping functions, can obtain higher power efficiency and information transmission rate, better anti-interference and anti-interception capabilities. It provides a better waveform scheme for the design of TT&C signal waveforms. For instance, the suggested approach can boost the spread spectrum gain by 3.44 dB and the information transmission rate by one when compared to conventional TT&C signals based on rectangular pulse functions under the same system error performance.

Keywords: prolate spheroidal wave functions; waveform forming; tracking telemetry and command signal; power efficiency; information transmission rate

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0060

质子深层充放电效应诱发运算放大电路异常机理

袁润杰^{1,2}, 陈睿^{1,2,*}, 韩建伟^{1,2}, 夏清¹, 王璇^{1,2}, 陈钱¹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘 要: 中高能太阳质子和银河宇宙线作为在深空轨道运行的航天器主要遭遇的辐射环境, 大量入射至电介质材料将诱发深层充放电效应, 导致电子器件工作状态异常。以 LM124 运算放大电路为研究示例, 使用中高能质子加速器研究深空质子致深层充放电效应诱发电路产生异常的特征规律, 同时结合 H-集成电路性能分析电路仿真程序 (HSPICE) 仿真研究运算放大电路的深层充放电效应敏感区域与机理。结果表明: 质子深层充电诱发的航天器静电放电 (SESD) 将导致运算放大电路输出异常瞬态, 输出瞬态的幅值与 SESD 脉冲的幅值正相关, 瞬态的持续时间与电路工作状态有关; 电路的负电源输入端是 SESD 的敏感区域; 输入控制晶体管与增益晶体管受 SESD 影响输出电流瞬态并导致电路输出异常是主要的故障机理。

关键词: 空间静电放电; 质子深层充放电效应; 运算放大电路; SPICE 仿真; 聚酰亚胺

中图分类号: V221⁺.3; TB553

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1170-10

国内外大量航天实践活动表明, 空间带电粒子充电诱发的航天器静电放电 (spacecraft charging induced electrostatic discharge, SESD) 是导致航天器在轨故障与异常的重要原因之一^[1-3]。在低地球轨道或地球同步轨道上运行的航天器通常受到等离子体或高能电子的影响, 进而诱发电子的充电和放电事件, 其造成的危害已被国内外广泛重视。经过多年研究, 电子诱发充放电效应的内在机理研究较为充分, 并且初步归纳了电子充电诱发放电脉冲的特征规律^[2,4]。但是近年来, 随着航天器在范艾伦带内部、月球表面或太阳系其他行星周围等区域的活动更加频繁, 银河宇宙线和太阳质子事件成为航天器遭遇的主要的辐射环境^[5]。其成分中占绝大部分的中高能质子成为诱发充放电效应的主要粒子之一, 对深空探测航天器的电子系统产生严重的影响与危害。

目前, 国内外针对 SESD 诱发电子器件故障的研究集中于电子积累、二次电子效应或光辐射效应等, 主要以电子枪、辐照源或电子加速器作为辐照

源进行实验^[6-15]。2005 年, 英国萨里大学采用 Sr-90 放射源模拟高能电子环境, 针对载有 D 触发器的电路板进行辐照实验, 观测到大量的放电脉冲信号及触发器输出状态的翻转^[7]。2013 年, 北京卫星环境工程研究所使用 25 kV 电子枪模拟实验研究了地球同步轨道卫星表面充放电导致的卫星地电位瞬态干扰, 以及进一步造成的 DC-DC 电源模块输出干扰^[8-9]。2009—2022 年, 中国科学院国家空间科学中心使用 500~10 000 kV 电子枪模拟 SESD 对运算放大器与 SRAM 电路的影响, 观察到被测电路输出大量瞬态与存储数据的翻转^[10-15]。

深空环境中以质子为主导的中高能粒子辐射电介质同样会产生累积电荷, 其诱发的放电脉冲将导致电子器件故障。然而, 国内外针对质子充放电脉冲作用线性电路诱发故障的特征规律、敏感区域与机理研究相对较少^[16-17]。2008 年, 美国 JPL 实验室对多种典型的航天用绝缘聚合物进行质子辐照实验, 结果表明, 质子充电效应与电子充电存在明显不同, 需要采用更精确的模型和更多的实验来解释质

收稿日期: 2024-01-25; 录用日期: 2024-04-19; 网络出版时间: 2024-05-09 15:14

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240508.1551.001

基金项目: 国家自然科学基金 (12275303)

* 通信作者. E-mail: chenrui2010@nssc.ac.cn

引用格式: 袁润杰, 陈睿, 韩建伟, 等. 质子深层充放电效应诱发运算放大电路异常机理 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1170-1179. YUAN R J, CHEN R, HAN J W, et al. Mechanism of anomalies in operational amplifier induced by proton deep charge-discharge effects [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1170-1179 (in Chinese).

子充放电问题^[16]。这导致在航天实践中难以对质子充放电效应诱发线性电路的故障特征进行有效的识别, 并且难以分辨故障电路的 SESD 敏感区域。

为研究深空中高能质子深层充放电效应诱发 SESD 导致线性电路异常的特征规律、敏感区域与故障机理, 本文采用中国科学院国家空间科学中心 50 MeV 质子加速器作为辐照源对不同厚度的聚酰亚胺介质进行深层充电, 研究 SESD 诱发 LM124 运算放大电路输出异常的影响规律、敏感区域与内在机理。

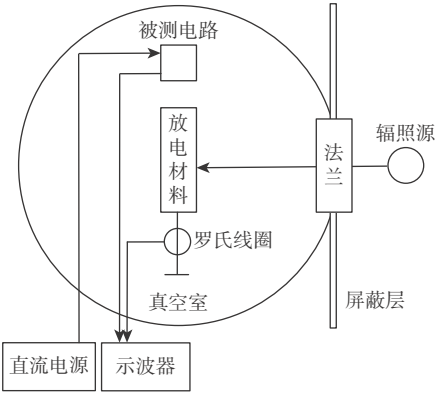
1 实验条件和样品

1.1 模拟质子深层充放电实验条件

利用中国科学院国家空间科学中心的 50 MeV 质子加速器模拟真空环境下质子诱发介质深层充电的辐射环境, 进而研究 SESD 导致运算放大电路故障的特征规律, 实验现场如图 1(a) 所示。质子充放电模拟实验的建立如图 1(b) 所示, 放电材料选用厚度为 15.5 mm 和 21.5 mm, 长和宽均为 100 mm 的聚酰亚胺电介质, 使用注量率为 $1 \times 10^{10}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 的 40 MeV 质子束流分别对电介质进行辐照。不同厚度的聚酰亚胺材料布置于真空靶室系统内部且正对真空靶室系统钛金属窗, 钛金属窗直径为 100 mm, 其周围使用铝金属屏蔽。实验过程中真空靶室系统内部的真空度保持在 1×10^{-3} Pa 量级。被测电路通过绝缘材料固定于距离电介质约 50 mm 位置, 避免其被质子束流直接辐照。放电材料背部通过导线与地连接, 使用罗氏线圈、上位控制计算机及示波器监测试验过程中材料的放电电流脉冲与被测电路的输出信号。



(a) 实验现场



(b) 质子充放电效应模拟实验示意图

图 1 实验建立

Fig. 1 Experiment set up

1.2 实验样品

线性器件具有处理模拟信号等功能, 是许多复杂信息处理设备和数模混合电路的固有组成部分, 是空间应用中常用的集成电路。本文采用 LM124 星用运算放大电路作为研究对象, 研究质子深层充电效应产生的 SESD 诱发电路输出瞬态的特征与敏感区域。LM124 运算放大电路的电路信息通过显微镜提取, 详细电路结构如图 2 所示。测试电路板将运算放大电路配置为 3 种模式: 电压跟随、非反相增益 (101 倍增益) 和反相增益 (101 倍增益) 模

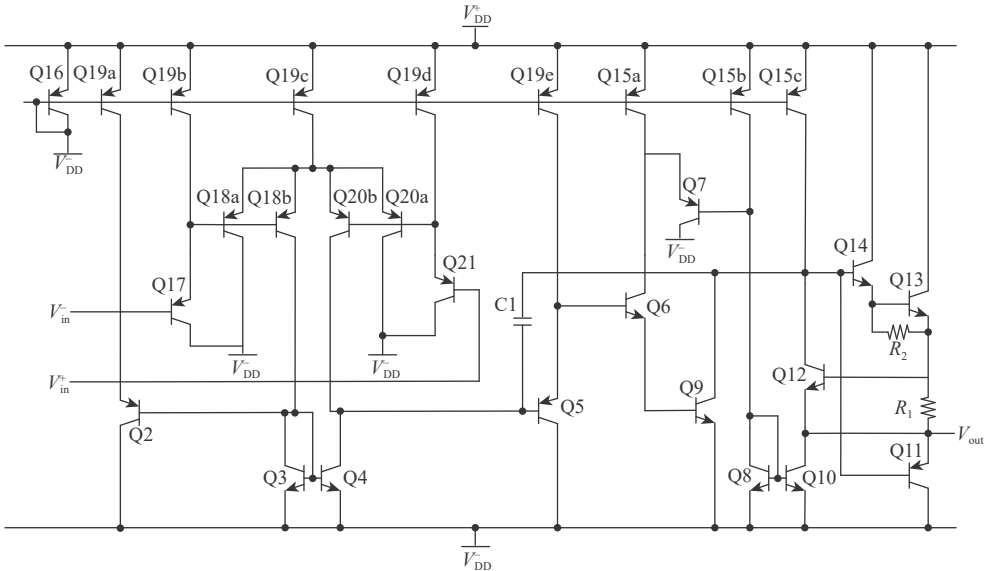


图 2 LM124 运算放大电路详细电路

Fig. 2 Detailed circuit of LM124 operational amplifier circuit

式。其中,电路正电源管脚(V_{DD}^+)输入电压为 15 V、负电源管脚(V_{DD}^-)输入电压为-15 V,辐照期间电路各个模式的正输入(V_{in}^+)或负输入(V_{in}^-)管脚输入偏置条件如下:

- 1) 电压跟随模式, V_{in}^+ 管脚输入电压为 5 V。
- 2) 非反相增益模式, V_{in}^+ 管脚输入电压为 0.05 V。
- 3) 反相增益模式, V_{in}^- 管脚输入电压为-0.05 V。

被测电路的输入和输出通过屏蔽传输线连接至直流电源与示波器。直流电源分别为电压跟随、非反相增益和反相增益电路输入端供电。示波器监测实验过程中被测电路三路输出的状态,并以此捕获输出的瞬态波形。

2 实验结果

图 3 和图 4 分别为 15.5 mm 和 21.5 mm 厚度的聚酰亚胺放电对电路的影响。由质子深层充电诱发的 SESD 脉冲电流波形如图 3(a) 和图 4(a) 所示。SESD 诱发运算放大 LM124 电路的电压跟随、非反相增益和反相增益三路输出产生瞬态的波形如图 3(b)~图 3(d) 和图 4(b)~图 4(d) 所示。

15.5 mm 聚酰亚胺介质在注量率为 $1\times10^{10}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 的质子束辐照 270 s 时发生放电,质子辐照注量为

$2.7\times10^{12}/\text{cm}^2$ 。电介质 SESD 脉冲电流如图 3(a) 所示,脉冲特征呈现为指数衰减的振荡特性。SESD 脉冲电流幅值为 2.8 A,脉冲宽度为 0.39 μs ,放电电荷量约为 $4\times10^{-7}\text{ C}$ 。SESD 对 LM124 电路三路输出产生影响,如图 3(b)~图 3(d) 所示。电压跟随模式输出产生瞬态,输出电压在约 0.25 μs 振荡后,呈现双极性衰减波形。反相与非反相增益模式输出产生振荡后,输出电压线性衰减至-0.5 V,随后逐渐恢复至正常工作电压。

21.5 mm 聚酰亚胺介质在注量率为 $1\times10^{10}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 的质子束辐照 120 s 时发生放电,质子辐照注量为 $1.2\times10^{12}/\text{cm}^2$ 。电介质 SESD 脉冲电流如图 4(a) 所示,脉冲特征呈现为指数衰减的振荡特性。SESD 脉冲电流幅值为 2.2 A,脉冲宽度为 0.57 μs ,放电电荷量为 $4\times10^{-7}\text{ C}$ 。SESD 对 LM124 电路三路输出产生影响,如图 4(b)~图 4(d) 所示。电压跟随模式输出产生瞬态,输出电压振荡的幅值为 1.7 V, 0.25 μs 后呈现双极性衰减波形。非反相增益模式输出产生振荡后,输出电压呈双极性线性衰减,随后逐渐恢复至正常工作电压。反相增益模式输出产生振荡后,输出电压线性衰减至-0.8 V,随后逐渐恢复至正常工作电压。

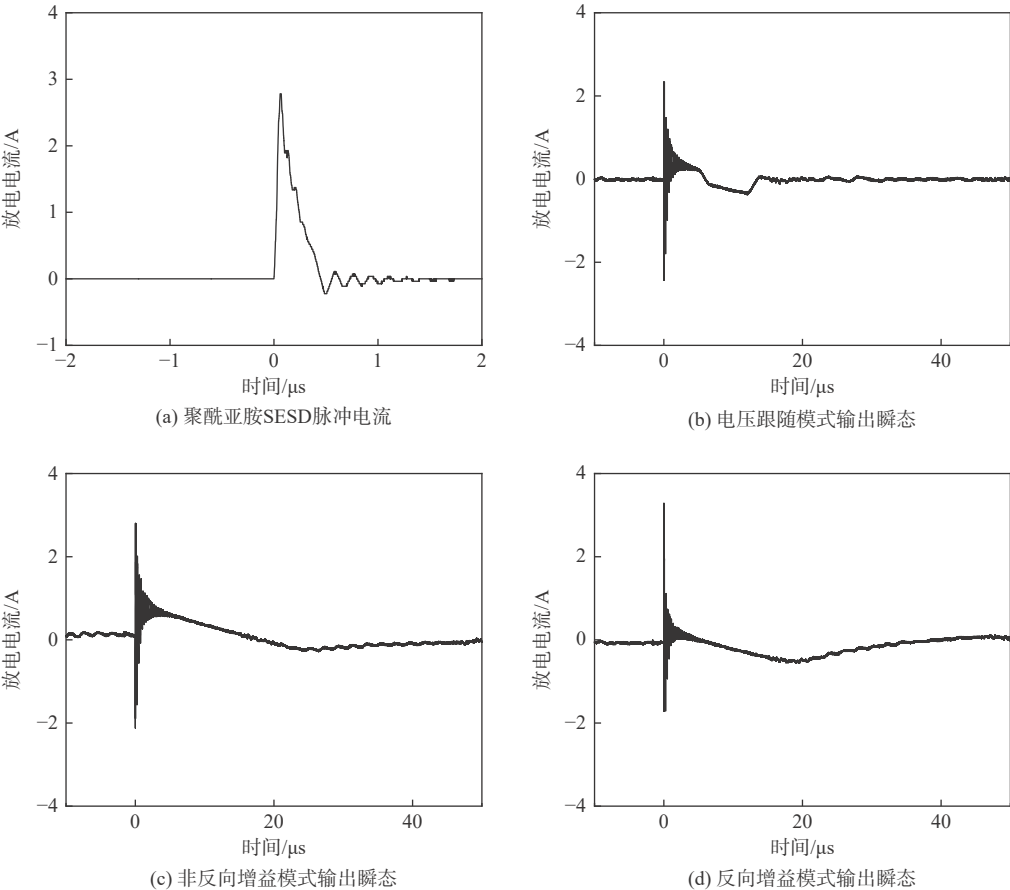


图 3 15.5 mm 聚酰亚胺 SESD 对电路的影响

Fig. 3 Anomalies caused by 15.5 mm polyimide SESD

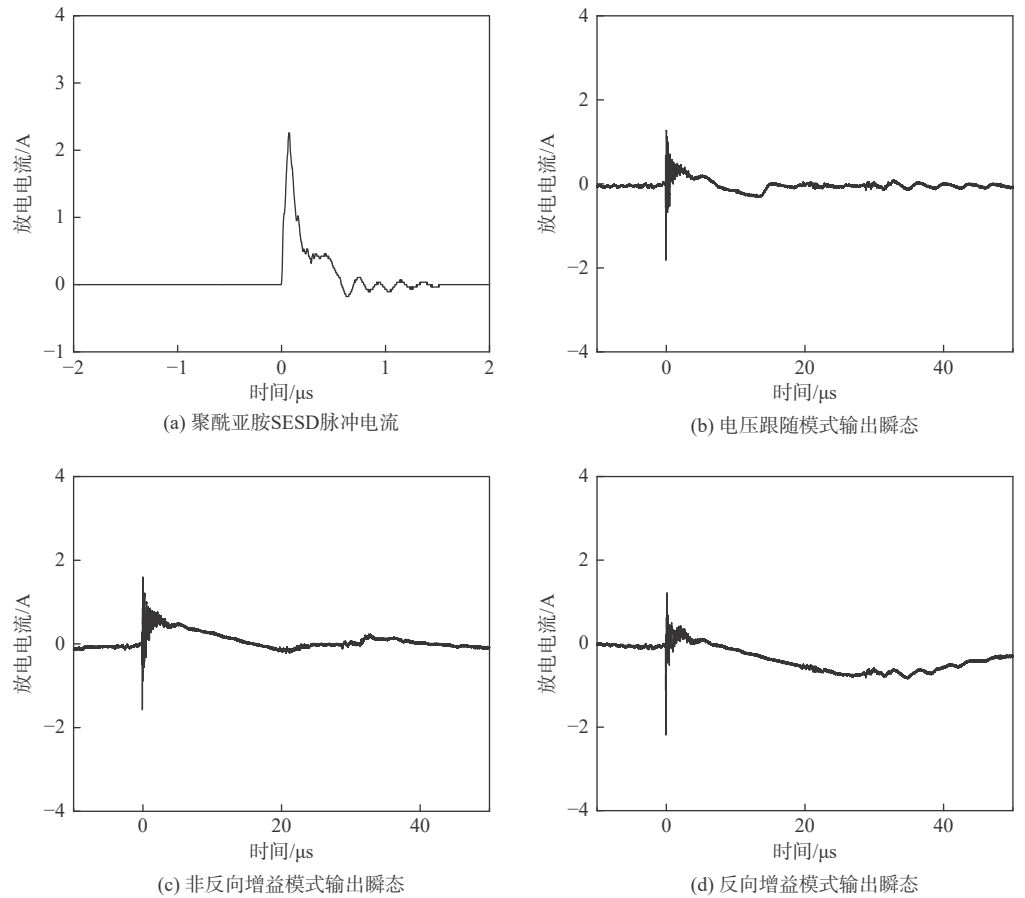


图 4 21.5 mm 聚酰亚胺 SEDS 对电路的影响

Fig. 4 Anomalies caused by 21.5 mm polyimide SEDS

3 实验结果分析

3.1 SEDS 特征对电路输出瞬态的影响

为研究放电脉冲特征对电路输出瞬态的影响, 本文对不同厚度聚酰亚胺多次放电后电路输出瞬态的平均幅值与脉宽进行分析, SEDS 对 LM124 输出瞬态的影响如表 1 所示。15.5 mm 聚酰亚胺材料放电影响下, 电压跟随、非反向增益与反向增益的电路输出瞬态振幅分别为 7.1 V、7.3 V、7.4 V; 21.5 mm 聚酰亚胺放电影响下, 3 种模式的电路输出瞬态振幅降低至 2.9 V、2.8 V、3.2 V。由图 3(a) 与图 4(a) 可知, 15.5 mm 聚酰亚胺 SEDS 脉冲幅值高于 21.5 mm 聚酰亚胺 SEDS 脉冲幅值, 当 SEDS 脉冲幅值由 2.8 A 降低至 2.2 A, 电路各个模式输出瞬态幅值分别降低 59%、61%、57%。同时当聚酰亚胺 SEDS 脉冲宽度由 0.39 μs 上升至 0.56 μs, 电路

跟随与增益模式输出瞬态的持续时间变化不明显。因此, SEDS 脉冲的幅值是影响运放电路输出瞬态幅值的主要因素之一^[13]。

3.2 电路不同状态下 SEDS 对电路输出的影响

SESD 对运算放大电路不同工作状态下输出瞬态的影响如表 1 所示, 相同 SEDS 所诱发其输出瞬态的幅值基本相同, 约为 7.1 ~ 7.4 V(15.5 mm 聚酰亚胺)与 2.8 ~ 3.2 V(21.5 mm 聚酰亚胺)。但不同工作状态下输出瞬态的持续时间存在差异。如图 5 所示, 由于增益模式的反馈通道的电阻 R_2 (1 000 Ω) 远高于跟随模式反馈通道的电阻, 根据式(1)可知, 电压放大模式的时间常数 τ_{RC} 高于电压跟随模式的时间常数, 导致电压增益模式下瞬态的持续时间明显高于跟随模式^[18]。

$$\tau_{RC} = RC$$

(1)

表 1 运算放大电路输出瞬态特征

Table 1 Transient characteristics of operational amplifier circuit outputs

放电材料 厚度/mm	振幅/V			持续时间/μs		
	电压跟随	非反向增益	反向增益	电压跟随	非反向增益	反向增益
15.5	7.1	7.3	7.4	13.8	24.1	18.7
21.5	2.9	2.8	3.2	14.9	21.2	26.5

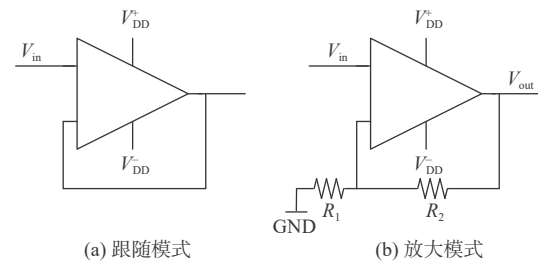


图 5 电路连接结构

Fig. 5 Connection diagram of circuit

式中: R 为电路等效电阻; C 为电路等效电容。

由图 3 和图 4 可知,电压跟随与增益模式输出瞬态在衰减阶段表现为双极性。这是由于运放电路反馈回路的电阻与运放电路中的电容构成了电阻-电容 (resistor-capacitor, RC) 微分电路,使其在单极性脉冲的输入下输出负向的脉冲^[18]。

3.3 运算放大电路 SESD 故障特征、敏感区域及机理的分析

为研究 SESD 诱发 LM124 电路输出异常的特征、敏感区域及内在机理,本文使用 H-集成电路性能分析电路仿真程序 (H-simulation program with integrated circuit emphasis, HSPICE) 模拟 SESD 作用电路诱发故障,并结合实验结果分析故障特征。本文通过仿真将 SESD 脉冲依次注入电路节点分析 SESD 诱发电路故障的敏感区域,进而分析影响实验中电路输出异常的因素,并研究其内在机理。

3.3.1 HSPICE 仿真模型建立

LM124 运算放大电路的详细电路结构如图 2 所示,电路所有晶体管的参数通过探针进行测量,并进一步生成 SPICE 网表。之后将 SPICE 模型的参数与先前的研究进行校准^[19]。仿真电路的电压跟随、非反相增益与反相增益 3 种配置模式通过与实验相同的电路连接方式实现。

为研究 SESD 特征对运算放大电路输出的影响,仿真采用阻尼衰减的正弦振荡模型作为等效充放电故障注入源:

$$V_{\text{SESD}}(t) = Ae^{\beta t} \sin(\pi t/\tau)$$

(2)

式中: A 为脉冲幅值; β 为衰减因子; τ 为脉冲宽度。本文将实验所采集的 SESD 脉冲参数代入模型作为故障源开展研究。该等效 SESD 故障注入源可以有效的模拟 SESD 对被测电路的影响,并在前期多项研究中得到验证与应用^[12,20-22]。

3.3.2 电路 SESD 故障特征仿真分析

为研究 SESD 诱发运算放大电路输出异常的规律特征,本文根据式 (2) 使用幅值为 0.8 V,脉冲宽度为 0.5 μs 的 SESD 脉冲同时注入电路的正电源、负电源与输入管脚,并将故障特征与实验结果中电路输出异常的特征进行对比。仿真结果如图 6 所示,对于电压跟随模式,输出电压在短暂振荡后上升至 1.74 V,并线性衰减至 0 后缓慢下降至 -0.22 V,随后迅速恢复至 0,呈现出锯齿状双极性衰减波形,与实验结果图 3(b)~图 3(d) 和图 4(b)~图 4(d) 呈现出基本相同的故障特征。对于电压增益模式,仿真输出电压在短暂振荡后上升至 1.72 V,并线性衰减至 -0.54 V,随后缓慢恢复至 0,呈现双极性衰减波形,与实验结果图 3(b)~图 3(d) 和图 4(b)~图 4(d) 呈现出基本相同的故障特征。并且仿真电压增益模式下异常的持续时间明显高于跟随模式,因此,仿真中 SESD 诱发电路异常的主要特征规律与实验结果具有高度一致性。

3.3.3 电路 SESD 敏感区域分析

为研究 LM124 电路的 SESD 敏感管脚,并分析影响实验结果中电路输出异常的因素,使用 HSPICE 仿真依次将 SESD 脉冲注入运算放大电路的正电源、负电源与输入管脚。电压跟随与增益模式下电路输出瞬态的幅值与脉宽如表 2 所示。SESD 脉冲通过 3 个管脚依次作用于电压跟随与增益模式的运放电路诱发的输出瞬态如图 7 所示。根据仿真结果可知,SESD 脉冲注入 V_{DD} 管脚诱发输出瞬态的幅值 (3.28 V 与 2.75 V) 远大于 SESD 脉冲注入 V_{DD} 诱发瞬态的幅值 (0.03 V 与 0.04 V); SESD 脉冲注入

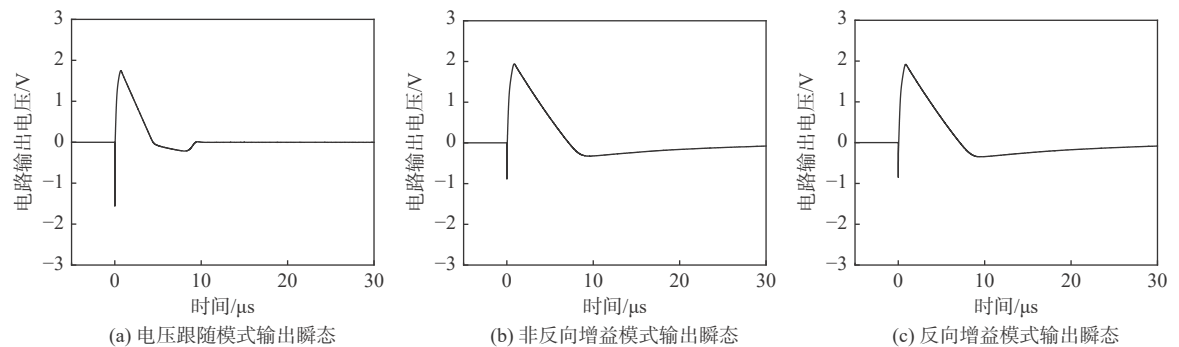


图 6 全管脚注入模式 SESD 诱发电路输出瞬态

Fig. 6 Circuit output transients with SESD all pin injection mode

表 2 运算放大电路 SEDS 敏感区域

Table 2 SEDS sensitive regions of operational amplifier circuits

SESD脉冲 注入位置	振幅/V		持续时间/ μ s	
	电压跟随模式	增益模式	电压跟随模式	增益模式
V_{DD}^{+}	0.03	0.04	0.21	0.23
V_{DD}^{-}	3.28	2.75	10.18	25.00
V_{in}	0.01	0.08	0.79	0.01

V_{DD}^{-} 管脚诱发输出瞬态的幅值远大于 SEDS 脉冲注入 V_{in} 诱发瞬态的幅值 (0.01 V 与 0.08 V)。因此, 运算放大电路 V_{DD}^{-} 管脚是主要 SEDS 敏感管脚。

为研究 LM124 运算放大电路跟随模式的 SEDS 敏感区域, 本文依次将 SEDS 脉冲注入与 V_{DD}^{-} 管脚连接的晶体管。由图 2 可知, Q3、Q4、Q5、Q8、Q9、Q10 和 Q11 晶体管直接与 V_{DD}^{-} 管脚连接, 电压跟随

模式下, 放电脉冲分别注入 Q3、Q4和 Q10 晶体管发射极将导致运算放大器产生瞬态, 注入至其他位置则对电路输出无影响, 如图 8所示。因此, Q3、Q4 和 Q10 是 SEDS 脉冲作用运算放大电路跟随模式的主要敏感区域。

同时, 图 8 仿真结果表明, 跟随模式电路输出的正极性瞬态主要由 Q4 晶体管异常导致, 电路输出的负极性瞬态主要由 Q3 与 Q10 晶体管异常导致。根据电路跟随模式下故障特征的分析可知, 仿真结果的主要故障特征与实验结果基本一致, 因此, 实验中 SEDS 诱发电路输出正极性瞬态主要由 Q4 晶体管异常导致, 电路输出负极性瞬态主要由 Q3 与 Q10 晶体管异常导致。

为研究运算放大电路增益模式的 SEDS 敏感区域, 本文依次将 SEDS 脉冲注入与 V_{DD}^{-} 管脚连接的

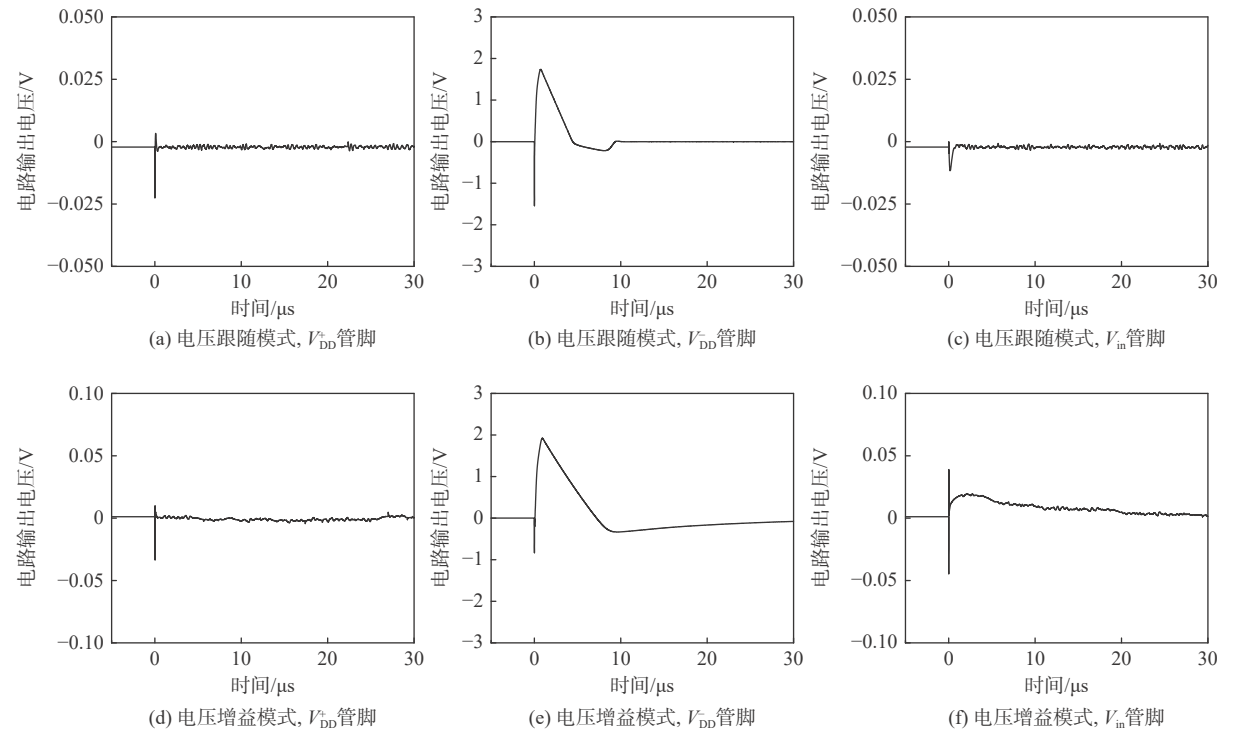


图 7 单管脚注入模式 SEDS 诱发电路输出瞬态

Fig. 7 Circuit output transients with SEDS single pin injection mode

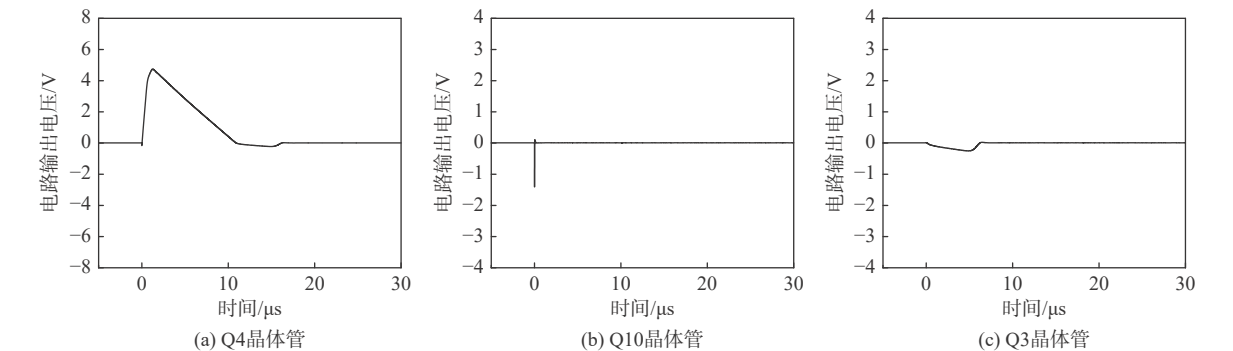


图 8 SEDS 脉冲注入晶体管诱发电压跟随模式输出瞬态特征

Fig. 8 Characteristics of output voltage in transistor caused by SEDS transient with voltage following mode

晶体管。SESD 脉冲分别注入至 Q3、Q4 和 Q9 晶体管发射极将导致运算放大器输出瞬态,注入至其他位置则对电路输出无影响。因此,增益模式下运算放大电路的 SESD 敏感区域为 Q3、Q4 和 Q9 晶体管。

如图 9 所示,SESD 脉冲注入 Q4 晶体管将诱发增益模式电路输出正极性瞬态,SESD 脉冲注入 Q3 与 Q9 晶体管将诱发电路输出负极性瞬态,注入至其他位置则对电路输出无影响。根据电路增益模式下故障特征分析可知,仿真结果的主要故障特征与实验结果基本一致,因此,实验中 SESD 诱发电路输出正极性瞬态主要由 Q4 晶体管异常导致,电路输出负极性瞬态主要由 Q3 与 Q9 晶体管异常导致。

3.3.4 SESD 诱发电路输出瞬态机理分析

质子深层充电诱发的 SESD 脉冲耦合至芯片管脚,从而在管脚产生瞬态电压脉冲。根据运算放大电路结构(见图 2),Q3、Q4 为电路输入控制晶体管,Q5、Q6 和 Q9 为实现运算放大电路主要功能的增益晶体管。

SESD 电压脉冲经 V_{DD} 管脚注入运放电路,分别作用于 Q3 和 Q4 晶体管的发射极与 Q5 晶体管的集电极。SESD 脉冲注入 Q3 晶体管发射极,导致其发射-集电极间产生峰值为 0.81 mA 持续时间为

0.032 ns 的电流脉冲,如图 10 所示。该电流脉冲由运放电路输入晶体管注入增益晶体管,在增益结构等效电阻的作用下于 Q6 和 Q9 晶体管输入端形成电压瞬态。瞬态的脉宽被增益晶体管进一步放大^[12],于 Q9 晶体管发射-集电极间形成幅值为 8.1 μ A 持续时间为 8 ns 的电流瞬态。

SESD 脉冲注入至 Q4 晶体管发射极,导致其发射-集电极间产生峰值为 3.5 mA 持续时间为 0.028 ns 的电流脉冲,如图 11 所示。该电流脉冲由运放电路输入晶体管注入增益晶体管,在增益结构等效电阻的作用下于 Q6 和 Q9 晶体管输入端形成电压瞬态。瞬态的脉宽被增益晶体管进一步放大^[12],于 Q9 晶体管发射-集电极间形成幅值为 24 μ A 持续时间为 11 ns 的电流脉冲。

SESD 脉冲注入增益结构晶体管 Q9 时,同样诱发其输出电流脉冲,如图 12 所示。于 Q9 晶体管发射-集电极间形成幅值为 1.4 mA 持续时间为 0.23 ns 的电流脉冲。当 SESD 脉冲注入偏置结构晶体管 Q10 时,于 Q10 晶体管发射-集电极间形成幅值为 13 mA 持续时间为 0.027 ns 的电流脉冲。上述电流脉冲在负载电阻与反馈电阻作用下诱发电路输出电压脉冲,电压脉冲通过反馈通道重新注入电路输

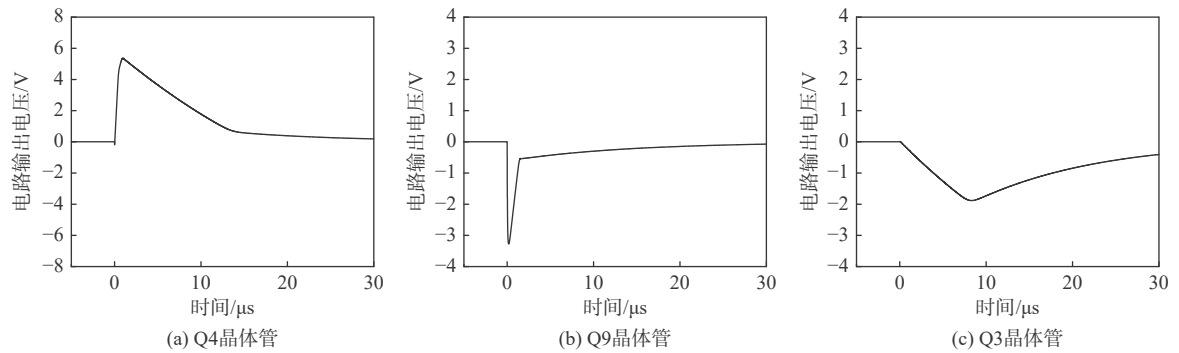


图 9 SESD 脉冲注入晶体管诱发电路增益模式输出瞬态特征

Fig. 9 Characteristics of output voltage in transistor caused by SESD transient with voltage gain mode

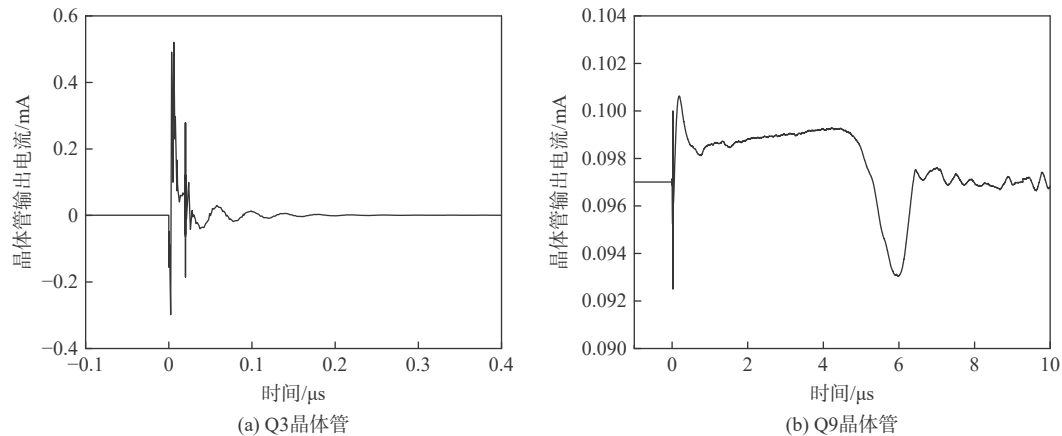


图 10 SESD 脉冲注入输入控制晶体管 Q3 发射极诱发 Q3 与 Q9 产生的电流瞬态

Fig. 10 Current transients in Q3 and Q9 induced by SESD transient injected into source of Q3

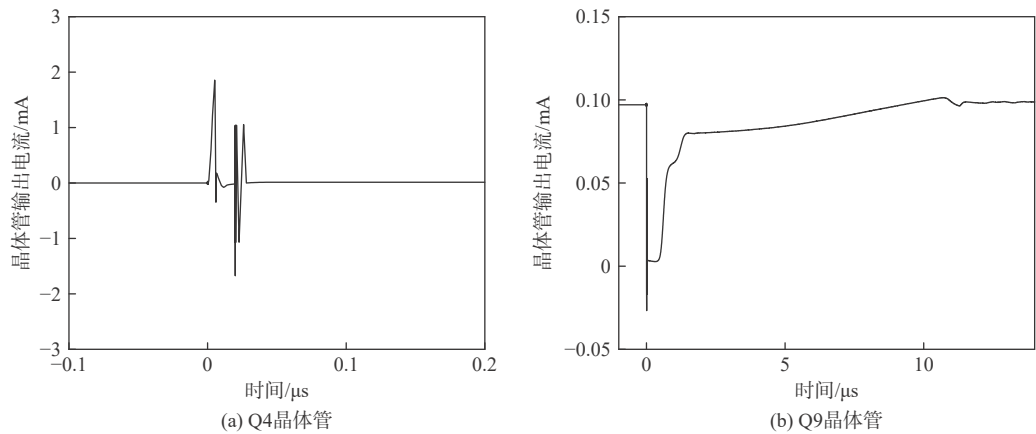


图 11 SESD 脉冲注入输入控制晶体管 Q4 发射极诱发 Q4 与 Q9 产生的电流瞬态
Fig. 11 Current transients in Q4 and Q9 induced by SESD transient injected into source of Q4

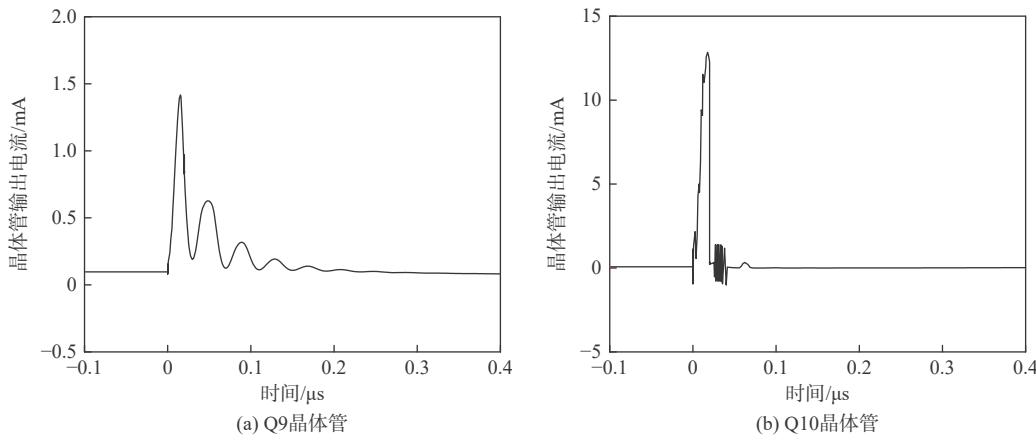


图 12 SESD 脉冲注入增益晶体管 Q9 与偏置晶体管 Q10 发射极对其发射-集电电流的影响
Fig. 12 Current transients in Q9 and Q10 induced by SESD transient injected into source of Q9 and Q10

入端,其幅值随时间衰减,直至输出电压恢复至正常值。电路恢复稳定的速率取决于运算放大器的转换速率,根据 LM124 系列运算放大器手册中的参数可知,其转换速率约为 0.4 V/μs。

综上所述,SESD 脉冲由负电源输入端注入至输入控制与增益区域的相应晶体管的电极,并于晶体管发射-集电极间形成电流瞬态。电流瞬态在电路等效电阻与负载电阻作用下于输出端形成电压瞬态,该电压瞬态通过反馈回路作用在电路信号输入端导致电路输出异常。异常的反馈输入瞬态在电路负反馈特性下逐渐衰减并使电路输出恢复至正常状态。

4 结 论

- 1) 质子深层充电导致的 SESD 将诱发运算放大电路输出瞬态,输出瞬态的幅值与 SESD 脉冲的幅值正相关。
- 2) 输出瞬态的持续时间与电路工作状态相关,处于增益状态的运放电路受 SESD 影响后,由于反馈电路电阻的影响导致输出瞬态的持续时间高于

- 电压跟随状态的运放电路。
- 3) 根据仿真结果可知,运算放大电路的负电源输入管脚是 SESD 主要敏感区域。
 - 4) SESD 脉冲通过负电源管脚注入至输入级与增益级晶体管,并使其发射-集电极间产生瞬态电流。瞬态电流在电路的等效电阻作用下形成电压瞬态反馈至信号输入端,电压瞬态将改变电路电压并导致电路输出异常。

参考文献 (References)

[1] LEACH R. Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment[C]//Proceedings of the Space Programs and Technologies Conference. Reston: AIAA, 1995.

[2] KOONS H C, MAZUR J E, SELESNICK R S, et al. The impact of the space environment on space systems[C]//Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Conference. Washington, D. C. : NASA, 2000.

[3] ECOFFET R. Overview of in-orbit radiation induced spacecraft anomalies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 1791-1815.

[4] BAKER D N. The occurrence of operational anomalies in spacecraft and their relationship to space weather[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(6): 2007-2016.

[5] VAMPOLA A L. The hazardous space particle environment[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(6): 1831-1839.

[6] NUMATA S, MIYAKE H, TANAKA Y, et al. Dielectric characteristic evaluation of proton beam irradiated polyimide films[C]//Proceedings of the Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-4.

[7] RYDEN K A, MORRIS P A, RODGERS D J, et al. Improved demonstration of internal charging hazards using the realistic electron environment facility(REFF)[C]//Proceedings of the 9th Spacecraft Charging Technology Conference. Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2005.

[8] FENG W Q, DING Y G, DEKUIWANG Y. Laboratory simulation of spacecraft surface charging and discharging caused structural potential transients and its interference test method on DC-DC converter[C]//Proceedings of the Spacecraft Charging Technology Conference. Washington, D. C.: NASA, 2001.

[9] 冯伟泉, 王志浩, 万成安, 等. GEO 卫星表面充放电引起卫星地电位瞬变及对二次电源干扰试验研究[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(1): 54-57.
FENG W Q, WANG Z H, WAN C A, et al. GEO satellite ground potential transients caused by surface charging & discharging and their interferences on secondary power supply[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(1): 54-57(in Chinese).

[10] WANG J L, ZHANG Z L. The ground simulation of spacecraft discharge impacts on the space environment detectors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(7): 1247-1253.

[11] 张振龙, 韩建伟, 全荣辉, 等. 空间材料深层充放电效应试验研究[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(3): 210-213.
ZHANG Z L, HAN J W, QUAN R H, et al. Experiment on deep dielectric charging and discharging of space materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(3): 210-213(in Chinese).

[12] CHEN R, CHEN L, LI S, et al. Comparative study on the transients induced by single event effect and space electrostatic discharge[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2019, 19(4): 733-740.

[13] 郑汉生, 朱翔, 陈睿, 等. 空间静电放电对集成运算放大器的干扰影响模拟试验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(1): 80-88.
ZHENG H S, ZHU X, CHEN R, et al. Simulated experiment research on SESD interference with integrated operational amplifier[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(1): 80-88(in Chinese).

[14] WANG X, CHEN R, YUAN R J, et al. Experimental study on the space electrostatic discharge effect and the single event effect of SRAM devices for satellites[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7129.

[15] WANG X, CHEN R, HAN J W, et al. Comparative experimental study on space electrostatic discharge effect and single event effect of 130 nm SOI D flip-flop chains[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(12): 2191-2200.

[16] GREEN N W, DENNISON J R. Deep dielectric charging of spacecraft polymers by energetic protons[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2482-2490.

[17] 秦晓刚, 贺德衍, 杨生胜, 等. 行星际空间质子引起介质深层充电的 GEANT4 模拟研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 526-530.
QIN X G, HE D Y, YANG S S, et al. Geant4 simulation of interplanetary proton induced deep dielectrics charging[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 526-530(in Chinese).

[18] 齐晓华. 基础物理实验中 RC 微积分电路的 Multisim 仿真[J]. 电子设计工程, 2012, 20(3): 37-38.
QI X H. Multisim simulation on RC calculus circuit in fundamental physics experiments[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(3): 37-38(in Chinese).

[19] BOULGHASSOUL Y, MASSENGILL L W, STERNBERG A L, et al. Circuit modeling of the LM124 operational amplifier for analog single-event transient analysis[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(6): 3090-3096.

[20] CHEN R, HAN J W, ZHENG H S, et al. Comparative research on “high currents” induced by single event latch-up and transient-induced latch-up[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(4): 046103.

[21] KER M D, HSU S F. Component-level measurement for transient-induced latch-up in CMOS ICs under system-level ESD considerations[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2006, 6(3): 461-472.

[22] KER M D, HSU K C. Native-NMOS-triggered SCR with faster turn-on speed for effective ESD protection in a 0.13- μm CMOS process[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2005, 5(3): 543-554.

Mechanism of anomalies in operational amplifier induced by proton deep charge-discharge effects

YUAN Runjie^{1,2}, CHEN Rui^{1,2,*}, HAN Jianwei^{1,2}, XIA Qing¹, WANG Xuan^{1,2}, CHEN Qian¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: When solar protons and galactic cosmic rays, the primary radiation environments in deep space, accumulate in the dielectric material, they can cause spacecraft electrostatic discharge induced by charging (SESD), which can cause abnormalities in electronic devices. The LM124 integrated operational amplifier are used to study the characteristics of anomalies. The H-simulation program with integrated circuit emphasis (HSPICE) simulation is used to study the SESD sensitive region and mechanism of anomalies. The findings suggest that the output pin may experience transients due to the SESD transient. The amplitude of the output transient is positively associated with the amplitude of the SESD transient, and the duration of the output transient is associated with the circuit operating state. The negative power pin is the SESD sensitive region. The current transient in the input-control transistors and gain transistors caused by SESD induces output voltage anomalies.

Keywords: space electrostatic discharge; proton deep charge-discharge effect; operational amplifier; SPICE simulation; polyimide

Received: 2024-01-25; Accepted: 2024-04-19; Published Online: 2024-05-09 15:14

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240508.1551.001

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12275303)

* Corresponding author. E-mail: chenrui2010@nssc.ac.cn

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0023

基于 Graph-Transformer 网络的小样本实体链接预测

杨荣泰¹, 邵玉斌^{1,*}, 杜庆治¹, 龙华^{1,2}, 祁雨婷¹, 张凤¹

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500; 2. 云南省媒体融合重点实验室, 昆明 650032)

摘 要: 小样本场景下的实体链接预测旨在利用少量参考三元组推断查询三元组中缺失的实体。针对主流方法在实体编码阶段忽视节点所在图结构信息的问题, 提出一种 Graph-Transformer 网络 (GTNet)。为了增强实体表示, 设计一种结构感知图池化层来学习并融合节点的图结构特征。拼接头尾实体得到实体对嵌入, 并将参考实体对投影到语义原型空间中, 得到参考实体对的原型嵌入。计算查询实体对嵌入与参考实体对原型嵌入相似度作为链接预测分数。实验表明: 所提模型在 NELL-One 和 Wiki-One 数据集中分别对比平均倒数排名 (MRR)、Hits@10、Hits@5、Hits@1 指标下最优的基线模型, 分别有 0.012、0.015、0.028、0.023 及 0.012、0.05、0.033、0.031 的提升, 表明所提模型能通过挖掘节点所在的图结构信息来增强实体表示, 从而有效预测三元组中缺失的实体, 泛化性更好。

关 键 词: 小样本场景; 链接预测; 实体表示; 结构感知; 图池化; Graph-Transformer 网络
中图分类号: TP391.1

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2026)04-1180-09

知识是人们通过观察和总结客观世界而获得的被认为是正确的信息, 大量的知识互相联系构成知识图谱。为了方便计算机处理, 往往将知识表示为(头实体、关系、尾实体)三元组形式。知识图谱广泛用于搜索推荐、知识问答及大语言模型幻觉消除等场景中, 但由于可用知识数据标记少、人工标记成本高、标记效率低下, 难以提供较为完备的知识图谱, 工程应用效果仍然有待提高。Wu 等^[1]统计了现有知识图谱数据分布特点, 发现图谱中大量关系只有少量的参考样本。因此, 小样本实体链接预测的目的是在参考样本数量受限条件下自动构建较为完备的知识图谱, 这对于提升下游应用效果具有重要意义。

在主流的小样本实体链接预测工作中, Yuan 等^[2]设计了一种分层注意力编码器来聚合邻居中关系级和实体级的信息, 并通过一种关系编码验证

器来捕获不同关系之间的交互。Liang 等^[3]设计了一种注意力掩码机制来编码头尾实体的位置, 使用全局注意力机制来捕获实体之间的交互。Li 等^[4]设计了一种交互注意力编码器来捕获头实体与尾实体、实体与关系之间的交互语义。该类方法的共同点在于基于度量学习机制来构建实体编码器, 将实体或关系学习到一个向量度量空间中, 在该空间下, 相似的实体或关系彼此距离越近, 语义相关性越强。Niu 等^[5]构建了一个基于关系的超平面参数, 结合学习率及梯度来更新这个参数, 以此实现对复杂关系的建模。Zhang 等^[6]在基于关系的梯度更新中为不同关系赋予不同的权重。Cai 等^[7]为了融合同一关系的不同语义特征, 使用注意力机制设计了一种关系元学习器。该类方法的核心在于让网络自动找出对任务敏感的参数, 该参数也被称为元。使网络在学习过程中自动优化这些元, 以提升

收稿日期: 2024-01-15; 录用日期: 2024-04-12; 网络出版时间: 2024-05-08 07:01

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240506.1634.002

基金项目: 云南省媒体融合重点实验室项目 (220235205)

*通信作者. E-mail: shaoyubin999@qq.com

引用格式: 杨荣泰, 邵玉斌, 杜庆治, 等. 基于 Graph-Transformer 网络的小样本实体链接预测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1180-1188. YANG R T, SHAO Y B, DU Q Z, et al. Few-shot entity linking prediction based on Graph-Transformer network [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1180-1188 (in Chinese).

模型性能。

以上 2 类方法只是从实体的词语义上对实体进行表示, 并没有有效融合实体的图结构信息。近年来, 图结构学习及实体位置编码研究工作不断取得进展。Dwivedi 等^[8]提出一种基于图拉普拉斯特征向量的位置编码策略。Chen 等^[9]提出将图谱拆分成更小的子图, 再使用神经网络学习子图中核心节点的表示, 以此作为子图的图特征。Ying 等^[10]使用空间编码、边编码及中心性编码来表征知识图谱的图结构, 用中心性编码代替 Transformer^[11]中的位置编码, 并在计算注意力时加入空间编码及边编码。Luo 等^[12]设计了一种有向无环图位置编码来替换 Transformer 中的位置编码。

现有图结构学习方法均是在充足的样本条件下被证明有效, 然而, 在小样本条件下, 图的邻接矩阵往往呈现出稀疏性, 现有图结构学习方法带来了巨大挑战。

为了解决现有小样本实体链接预测任务在实体编码过程中缺乏考虑图结构信息的问题, 本文设计了一种 Graph-Transformer 网络 (Graph-Transformer network, GTNet) 模型。该模型的创新点在于: 受图神经网络邻域聚合机制及 Transformer 神经网络的启发, 设计了一种 GTNet, 通过一种结构感知图池化层来学习并融合节点的子图拓扑结构信息, 增强实体的语义表示, 弥补 Transformer 网络难以学习节点所在图结构特征的问题。此外, 该模型使用语义原型相似度计算方法来计算查询样本与参考样本原型之间的相似度, 从而提升小样本条件下的实体链接预测效果。

1 小样本实体链接预测

一般地, 设三元组为 (H, R, T) , 其中, H 、 R 、 T 分别表示头实体、关系、尾实体。小样本知识图谱补全任务通常被分为 2 类: ①预测三元组中缺失的实体, 即 $(H^q, R, ?)$; ②预测三元组中缺失的关系, 即 $(H^q, ?, T^q)$ 。

本文研究的是预测三元组中缺失的尾实体 T^q , 即 $(H^q, R, ?)$ 。该三元组被称为查询三元组。小样本实体链接预测在已知少量支持三元组的条件下, 对支持三元组进行学习, 从候选集中预测最佳的尾实体 T^q 。其中, 候选集表示为 $C^p = \{T_1^q, T_2^q, \dots, T_n^q\}$ 。若支持三元组的数量为 k , 则该任务被称为 k -shot 链接预测任务。其中, 支持三元组构成的三元组集合称为支持集, 表示为 $S = \{(H_1^s, R, T_1^s), (H_2^s, R, T_2^s), \dots, (H_k^s, R, T_k^s)\}$ 。所述小样本实体链接预测任务过程如图 1 所示。图中, 为了预测甲某的朋友是谁, 首

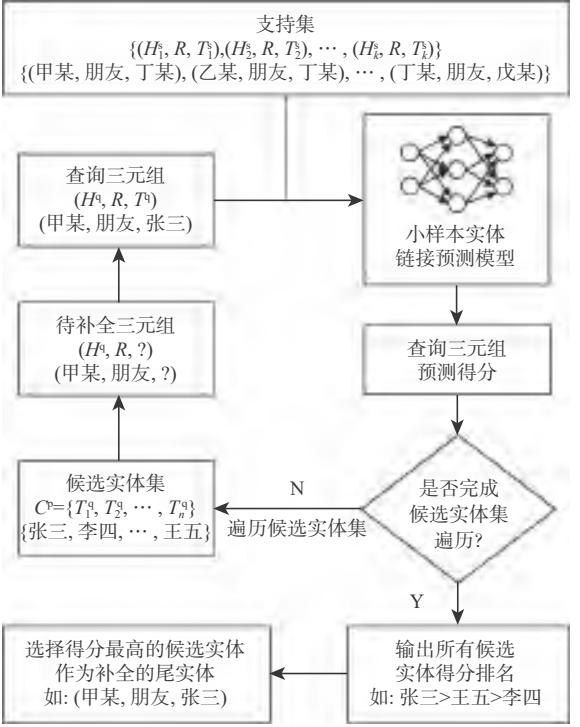


图 1 k -shot 实体链接预测过程
Fig. 1 Process of k -shot entity linking prediction

先, 从候选实体集中遍历每个尾实体, 先将其视为甲某的朋友, 构造得到查询三元组; 然后, 将查询三元组和支持集中的支持三元组输入到模型中, 计算查询三元组的预测得分, 遍历完候选实体集后, 选出得分最高的尾实体作为待补全三元组中缺失的尾实体。因此, 小样本实体链接预测任务最终转化为查询三元组与支持三元组的相似性评估任务。在整个预测过程中, 对实体的表示越准确, 最终的三元组预测得分才可能越高。

对 NELL-One 数据集^[13]中 291 个关系所对应的三元组数量进行统计, 得到关系的三元组数量分布统计图, 如图 2 所示。可见, 对应三元组数量最多的关系的身份索引为 1, 对应三元组数量最少的关

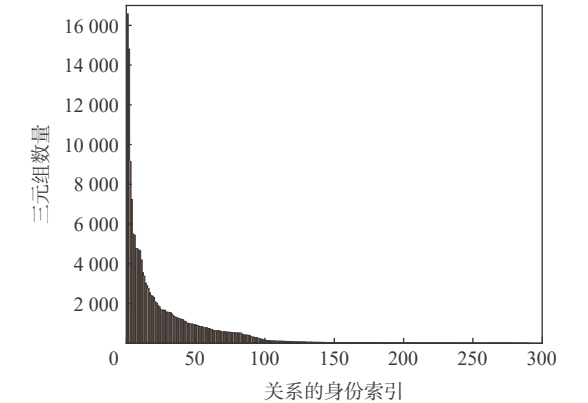


图 2 NELL-One 数据集中关系的长尾分布
Fig. 2 Long tail distribution of the relation in NELL-One datasets

系的身份索引为 291。说明在真实的知识图谱中，大多数关系只对应很少的三元组。

本文认为小样本实体链接预测任务所面临的挑战包括以下 3 个方面：①现有知识图谱中关系往往呈现长尾分布，无法为知识嵌入表示学习提供充足的样本，导致训练后得到的实体和关系的词向量本身所包含的语义信息有限，影响下游任务效果；②知识图谱中的实体具有语义多样性，现有方法在

表征实体之间的复杂关系时效果不够好；③利用节点之间的拓扑结构关系来增强实体的语义表示还需要开展更多的研究。

基于此，提出一种 GTNet 模型来尝试解决小样本实体链接预测中存在的上述问题。

2 模型设计与实现

本文所提 GTNet 模型框架如图 3 所示。

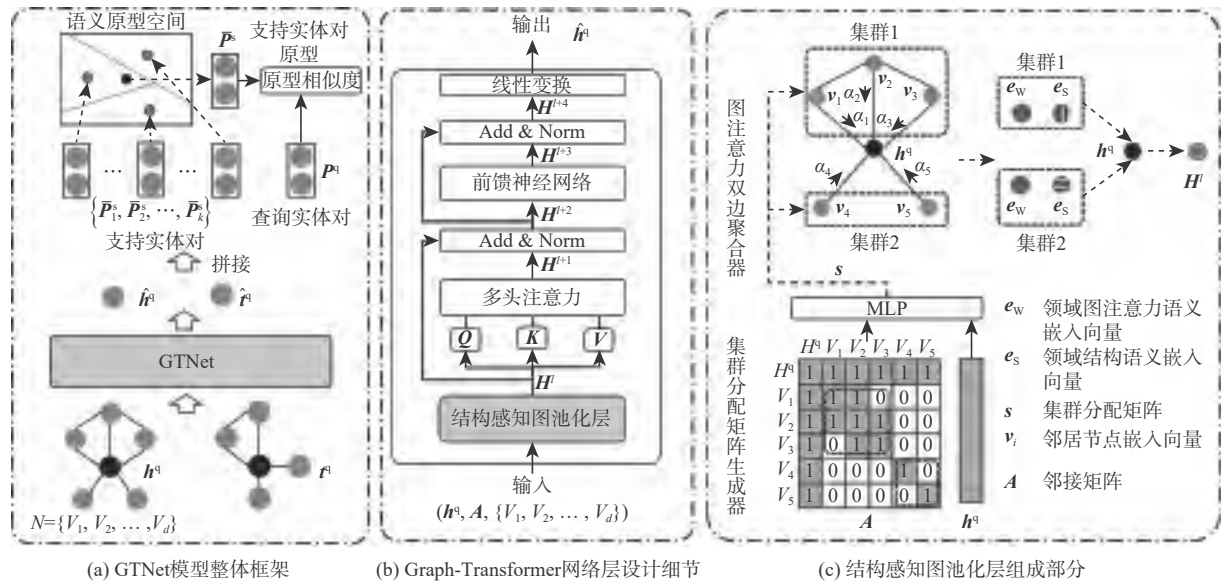


图 3 GTNet 模型框架

Fig. 3 Framework of GTNet model

图 3(a) 为 GTNet 模型整体框架。首先，通过 GTNet 来学习得到融合图结构语义的实体表示。然后，拼接头实体和尾实体得到实体对的嵌入表示，将参考实体对投影到原型空间中，计算这些参考实体对的原型中心，得到参考实体对原型嵌入。最后，计算查询实体对嵌入与参考实体对原型嵌入的余弦相似度，作为链接预测分数。

图 3(b) 为 Graph-Transformer 网络层设计细节。为弥补 Transformer 位置编码策略无法有效学习节点图位置特征的缺陷，设计一种结构感知图池化层来挖掘并融合节点所在的图结构特征。

图 3(c) 为结构感知图池化层组成部分。邻接矩阵的稠密和稀疏反映了节点之间连接的强弱程度。依据邻接矩阵的疏密程度将邻居节点分为不同的集群，从而更精细化地衡量不同集群中邻居节点对实体的贡献。基于此，首先，设计集群分配矩阵生成器来学习节点的图拓扑结构特征，生成分配矩阵 s 。该分配矩阵被用于图注意力双边聚合器，以区分不同类别的邻居节点在结构信息上的贡献程度。然后，在图注意力双边聚合器中融合邻域图注意力语义信息和邻域结构语义信息，增强实体的

语义表示。

2.1 Graph-Transformer 网络设计

Transformer 采用正弦函数对序列信息进行位置编码，默认输入节点的排列不变，这是一种绝对位置编码策略。以机器翻译任务为例，本文的位置嵌入主要是当前词在整个词序列中的绝对位置信息。但知识图谱中节点的排列是可变的，节点的绝对位置没有明确的概念，采用绝对位置编码存在缺陷。因此，如图 3(c) 所示，结构感知图池化层的目的在于通过学习邻接矩阵特点，得到节点的图结构特征，并融合该特征得到邻居节点的结构语义编码，解决 Transformer 网络无法有效编码知识图谱中实体所在子图位置信息的问题。该池化层由集群分配矩阵生成器和图注意力双边聚合器 2 部分构成。

2.1.1 集群分配矩阵生成器

消息传递也被称为邻域聚合，是图注意力机制最大的优势，即每个节点能够通过收集邻域节点的特征更新自身的表示。刘丹阳等^[14]直接将使用图注意力网络来实现邻域信息聚合这一过程视为图池化过程，将聚合邻域信息得到的实体嵌入视为图

的表示。然而,图注意力机制在将所有邻居信息聚合到实体的过程中无法感知节点之间的拓扑结构。

受 Bianchi 等^[15]在图节点分类任务上提出的集群分配矩阵的启发,设计一种图结构分配矩阵生成器,用于感知实体与邻居节点之间的图拓扑结构。

设一个实体节点有 d 个邻居,由 d 个邻居节点构成的邻域为 $N = \{V_1, V_2, \dots, V_d\}$ 。邻接矩阵 A 记录节点之间的拓扑连接信息。若 2 个节点之间存在连接,则对应矩阵中的元素值为 1,否则为 0。从邻接矩阵上看,稠密的部分表明该组节点连接紧密,潜在的关联性高,反之,则是该组节点连接稀疏,潜在的关联性低。如图 3(c) 所示,当前邻接矩阵表明,节点 H^q 、 V_1 、 V_2 、 V_3 之间呈现出较强的关联性;节点 H^q 、 V_4 、 V_5 之间呈现出较弱的关联性。结构感知图池化操作的目的在于学习邻接矩阵所反映的节点关联性强弱程度,将这种结构影响力传递到实体的表示过程,从而弥补图注意力机制难以捕捉图拓扑结构信息的不足。

首先,设计一种含有 softmax 的多层感知机 (multilayer perceptron, MLP),通过对邻接矩阵的学习,实现节点集群分类,将结构上呈现聚集性的节点分为一个集群,再学习不同集群对中心实体的贡献程度,得到一个集群分配矩阵:

$$s = \text{MLP}(A) \quad (1)$$

式中: $\text{MLP}(\cdot)$ 为多层感知机。

集群分配矩阵作为一种权重矩阵,区分了邻居节点所在集群对中心实体的结构影响力。

然后,用集群分配矩阵的转置乘以邻居嵌入,并在邻域内求和,得到邻域结构语义嵌入:

$$e_s = \sum_{i=1}^d s^T v_i \quad (2)$$

邻域结构语义嵌入本质上通过邻居特征加权得到。由于所加权重表征了邻居节点的结构重要性,因此,该邻域嵌入可视为邻域的结构语义嵌入。

2.1.2 图注意力双边聚合器

图注意力双边聚合器旨在融合通过图注意力机制得到的邻域注意力语义嵌入和通过结构感知图池化层得到的邻域结构语义嵌入,得到最终的实体嵌入。

首先,在评估一个查询三元组 (H^q, R, T^q) 的合理性时,先提取查询实体对 (H^q, T^q) ,在关系 R 空间下计算头实体和尾实体嵌入的相似度,相似度越高,说明传递的消息越重要。

$$\psi(h^q, r, t^q) = (W_r t^q)^T \tanh(W_r h^q + r) \quad (3)$$

式中: $\psi(\cdot)$ 为相似度计算函数; h^q 、 r 、 t^q 分别为头

实体、关系、尾实体向量; $W_r \in \mathbf{R}^{d \times d}$ 为关系空间下的权重矩阵。

在邻域内使用 softmax 归一化操作将相似度转化为图注意力系数:

$$\alpha_i = \frac{\exp(\psi(h^q, r, t^q))}{\sum_{i=1}^d \exp(\psi(h^q, r_i^n, v_i))} \quad (4)$$

式中: r_i^n 为实体 H^q 与邻居节点 V_i 的关系嵌入。

其次,通过加权邻居特征,得到邻域图注意力语义嵌入:

$$e_w = \sum_{i=1}^d \alpha_i v_i \quad (5)$$

然后,通过非线性融合邻域的图注意力语义和结构语义,得到最终的邻域嵌入:

$$e = \text{ReLU}(W_{B1} e_w + W_{B2} e_s) \quad (6)$$

式中: $\text{ReLU}(\cdot)$ 为非线性激活函数; $W_{B1} \in \mathbf{R}^{d \times d}$ 、 $W_{B2} \in \mathbf{R}^{d \times d}$ 为神经网络权重矩阵。

最后,融合邻域信息实现实体聚合。在聚合时,为了增强语义交互,分别对实体与邻居求和,并求哈达玛积,分别通过一个非线性变化层,得到融合邻域信息的中间实体嵌入。

$$H' = \text{ReLU}(W_{C1}(h^q + e)) + \text{ReLU}(W_{C2}(h^q \odot e)) \quad (7)$$

式中: $W_{C1} \in \mathbf{R}^{d \times d}$ 、 $W_{C2} \in \mathbf{R}^{d \times d}$ 为神经网络权重矩阵。

2.1.3 实体编码

利用 Transformer 的注意力机制,对图注意力双边聚合器的输出(中间实体嵌入 H')做进一步语义特征提取,以得到细粒度的实体表示。

1) 将中间实体嵌入 H' 通过 3 个线性层,生成 Transformer 编码器的查询 Q 、键 K 、值 V :

$$\begin{cases} Q = H' W_Q \\ K = H' W_K \\ V = H' W_V \end{cases} \quad (8)$$

式中: $W_Q \in \mathbf{R}^{d \times d}$ 、 $W_K \in \mathbf{R}^{d \times d}$ 、 $W_V \in \mathbf{R}^{d \times d}$ 为权重矩阵。

2) 使用多头注意力机制学习 Q 、 K 、 V 中包含的实体语义信息:

$$H^{l+1} = \text{MutiHead}(Q, K, V) = \text{Concat}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_y) W^M \quad (9)$$

式中: $\text{MutiHead}(\cdot)$ 为多头注意力机制; $\text{Concat}(\cdot)$ 为向量拼接函数; $\tilde{h}_y$ 为一组注意力,可进一步表示为

$$\tilde{h}_y = \text{Attention}(Q W_y^Q, K W_y^K, V W_y^V) \quad (10)$$

其中: $\text{Attention}(\cdot)$ 为注意力机制; $W^M \in \mathbf{R}^{(n \times d_{\text{model}}) \times d_k}$ 、 $W_y^Q \in \mathbf{R}^{d_{\text{model}} \times d_k}$ 、 $W_y^K \in \mathbf{R}^{d_{\text{model}} \times d_k}$ 、 $W_y^V \in \mathbf{R}^{d_{\text{model}} \times d_v}$ 为权重矩阵,均参照 Transformer 模型设置,其中,参数

$d_{\text{model}} = 512$ 。

3) 通过归一化处理, 得到实体的隐藏嵌入:

$$\mathbf{H}^{l+2} = \text{Norm}(\mathbf{H}^l + \mathbf{H}^{l+1}) \quad (11)$$

式中: $\text{Norm}(\cdot)$ 为归一化函数。

4) 使用前馈神经网络对实体的隐藏嵌入 $\mathbf{H}^{l+1}$ 进行非线性变换和特征提取:

$$\mathbf{H}^{l+3} = \text{FFN}(\mathbf{H}^{l+2}) = \text{ReLU}(\mathbf{H}^{l+2} \mathbf{W}_{\text{F1}} + \mathbf{b}_{\text{F1}}) \mathbf{W}_{\text{F2}} + \mathbf{b}_{\text{F2}} \quad (12)$$

式中: $\text{FFN}(\cdot)$ 为前馈神经网络函数; $\mathbf{W}_{\text{F1}} \in \mathbf{R}^{d_{\text{model}} \times d_{\text{ff}}}$ 、 $\mathbf{W}_{\text{F2}} \in \mathbf{R}^{d_{\text{ff}} \times d_{\text{model}}}$ 为权重矩阵, 其中, 参数 $d_{\text{ff}} = 2048$; $\mathbf{b}_{\text{F1}} \in \mathbf{R}^{1 \times d_{\text{ff}}}$ 、 $\mathbf{b}_{\text{F2}} \in \mathbf{R}^{1 \times d_{\text{model}}}$ 为偏置矩阵。均参照 Transformer 模型设置。

5) 进一步做归一化处理, 得到最后一次隐藏嵌入:

$$\mathbf{H}^{l+4} = \text{Norm}(\mathbf{H}^{l+2} + \mathbf{H}^{l+3}) \quad (13)$$

6) 对最后一次隐藏嵌入 $\mathbf{H}^{l+4}$ 做线性变换, 调整输出特征的维度, 得到最终的实体嵌入:

$$\hat{\mathbf{h}}^q = \mathbf{H}^{l+4} \mathbf{W}_L + \mathbf{b}_L \quad (14)$$

式中: $\mathbf{W}_L \in \mathbf{R}^{d \times p}$ 为线性层权重矩阵, p 为矩阵维度; $\mathbf{b}_L \in \mathbf{R}^{1 \times p}$ 为偏置矩阵。

最终得到的实体嵌入 $\hat{\mathbf{h}}^q$ 不仅包含实体的词语信息, 还充分融合了实体所在的图结构信息。

2.2 语义原型相似度

若直接计算查询实体对与 k 个参考实体对之间的平均相似度得分作为实体链接预测得分, 则最终得分极易受个别参考实体对影响。为了削弱这种影响, 将 k 个参考实体对表示为 1 个参考原型实体对, 再计算查询实体对与该参考原型实体对的相似度得分作为最终的链接预测得分。

1) 实体表示。式 (1)~式 (14) 为头实体表示过程, 可简化表示为

$$\hat{\mathbf{h}}^q = \text{GTEmb}(\mathbf{h}^q, \mathbf{A}, \{V_1, V_2, \dots, V_d\}) \quad (15)$$

式中: $\text{GTEmb}(\cdot)$ 为编码过程的简化表示方法。

同理, 尾实体可表示为

$$\hat{\mathbf{t}}^q = \text{GTEmb}(\mathbf{t}^q, \mathbf{A}, \{V_1, V_2, \dots, V_d\}) \quad (16)$$

2) 实体对表示。对头尾实体进行拼接得到实体对嵌入:

$$\mathbf{P}^s = \text{Concat}(\hat{\mathbf{h}}^q, \hat{\mathbf{t}}^q) \quad (17)$$

以同样方式得到 k 个支持实体对的嵌入向量 $\{\mathbf{P}_1^s, \mathbf{P}_2^s, \dots, \mathbf{P}_k^s\}$ 。

3) 参考实体对原型嵌入向量。如图 3(a) 所示, 将每个参考实体对投影到确定的向量空间中, 该向量空间代表语义原型空间。在语义原型空间中, 每

个参考实体对都有确定的位置, 从几何上看, 这些实体对分布在一个中心点周围, 将该中心点称为语义原型中心。将该语义原型中心视为参考实体对原型嵌入 $\bar{\mathbf{P}}^s$:

$$\bar{\mathbf{P}}^s = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \mathbf{P}_j^s \quad (18)$$

4) 语义原型相似度。计算参考实体对原型嵌入 $\bar{\mathbf{P}}^s$ 与查询实体对嵌入 $\mathbf{P}^q$ 的余弦相似度得分, 作为链接预测的分数:

$$\varphi(\bar{\mathbf{P}}^s, \mathbf{P}^q) = \frac{\bar{\mathbf{P}}^s \cdot \mathbf{P}^q}{\|\bar{\mathbf{P}}^s\| \|\mathbf{P}^q\|} \quad (19)$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 为相似度计算函数。

3 实验设计与结果分析

3.1 数据集与评价指标

为了评估 GTNet 模型在小样本实体链接预测任务上的有效性, 在 NELL-One 和 Wiki-One^[13] 2 个公共数据集上进行实验。

如表 1 所示, NELL-One 数据集包含 67 组预测任务, 其中, 训练集、验证集、测试集的数量分别为 51、5、11; Wiki-One 数据集包含 183 组预测任务, 其中, 训练集、验证集、测试集的数量分别为 133、16、34。每组预测任务包含的待预测三元组数量在 50~500 之间。例如, NELL-One 测试集中的一组预测任务为: (microsoft_visio, producedby, microsoft)、(aix, producedby, ibm)、(wii, producedby, nintendo) 等。为方便表示, 通常使用任务关系 producedby 来命名该组预测任务。所提 GTNet 模型的目的在于准确地预测这些三元组中的尾实体。

表 1 NELL-One 和 Wiki-One 数据集^[13]

Table 1 Datasets of NELL-One and Wiki-One ^[13]				
数据集	实体数量	关系数量	三元组数量	预测任务组数量
NELL-One	68 545	358	181 109	67
Wiki-One	4 838 244	822	5 859 240	183

使用常用的平均倒数排名 (mean reciprocal ranking, MRR) 指标 M 和 Hits@ n 指标 H_n 评估模型效果:

$$M = \frac{1}{|Q|} \sum_{m=1}^{|Q|} \frac{1}{A_m} \quad (20)$$

式中: $|Q|$ 为查询集样本数量; A_m 为第 m 个查询实体对的得分排名。

$$H_n = \frac{1}{|Q|} \sum_{m=1}^{|Q|} I(A_m \leq n) \quad (21)$$

式中: $I(\cdot)$ 为计数函数, 当第 m 个查询实体的得分排

名在前 n 位时, 计数加 1, 否则, 计数为 0。因此, H_n 统计的是排名在前 n 位的查询实体对占比。

MRR 和 Hits@ n 这 2 个指标越大, 表明模型预测效果越好。

3.2 损失函数与模型训练

知识图谱中存放的都是正确的三元组, 直接用于模型训练会导致模型过度拟合训练数据, 导致在未见过的数据上表现不佳。因此, 需要构建虚假三元组来训练模型, 保证模型具备较强的泛化性和鲁棒能力。本文通过替换正样本查询实体对中的尾实体来构建负样本查询实体对(H^q, T^q)。负样本查询实体对的嵌入向量 P^q 通过式 (1)~式 (17) 得到。使用正负样本训练策略训练模型:

$$L = \max(0, (\gamma + \varphi(\overline{P^s}, P^q) - \varphi(\overline{P^s}, P^s))) \quad (22)$$

式中: γ 为最小间隔距离。

在 3-shot 小样本条件下训练 GTNet 模型, 在 NELL-One 和 Wiki-One 数据集上的实验参数设置为: GTNet 的层数均设置为 3, Graph-Transformer 的头数均设置为 4, 最大采样邻居数量均设置为 50, 批量训练大小均为 128, 学习率分别为 5×10^{-5} 、 6×10^{-5} 。训练所用服务器参数为: GPU 为 NVIDIA RTX3080, CPU 为 Intel(R) Core(TM)i7-10700F 2.90 GHz。

3.3 基线模型对比

在基于度量学习的基线模型中, MFEN^[1] 利用卷积神经网络设计了一种异构近邻编码器来编码实体, 以捕获实体之间异构特征。TransAM^[3] 设计了一种局部注意力机制, 利用掩码来学习实体的位置信息, 使用一种全局注意力机制捕获三元组间实体的交互语义。APINet^[4] 设计了一种交互注意力编码器, 利用注意力机制学习实体与实体、任务与关系之间的语义。在基于元学习的基线模型中, GANA^[5] 设计了一种以任务关系为核心的超参数更新机制, 将关系元转移到查询集中, 并通过损失更新关系元这个超参数。ADK-KG^[6] 设计了一种结合知识蒸馏的元学习优化机制来优化模型参数。DARL^[7] 设计

了一种关系元学习器, 从参考集中学习需要迁移的元知识, 转移到查询集中。

表 2 中, 由于 APINet 和 DARL 模型并未开源代码, 无法复现其实验结果, 直接对比论文中的实验结果。其中, DARL 模型 3-shot 链接预测结果从文献 [7] 的小样本变量探究实验得到。其余 4 个基线模型实验结果均按照作者提供的开源代码及文献中的参数设置, 并在同一台服务器上进行复现得到。表 2 中展示的是每个评估指标下, NELL-One 测试集上的 11 组预测任务的平均分数及 Wiki-One 测试集上的 34 组预测任务的平均分数。表 3 展示的是 NELL-One 测试集中的 6 组预测任务实例的得分。

分析表 2 可知, 本文模型优于所有基于度量学习的基线模型, 对比表现最好的 APINet 模型, 在 NELL-One 和 Wiki-One 数据集上, MRR、Hits@10、Hits@5、Hits@1 指标分别提升了 0.018、0.015、0.036、0.039 及 0.015、0.05、0.033、0.038。实验结果表明, 基于度量学习的方法在同一语义嵌入空间中寻找相似的样本, 当预训练词向量训练不充分时, 将影响样本之间的深层次语义挖掘, 导致在链接预测任务中准确性不够高。而本文模型能更好地通过捕捉实体所在邻域的子图结构信息来增强实体表示, 一定程度上弥补了预训练词向量语义不充分的缺陷。

本文模型优于所有基于元学习的基线模型, 在 NELL-One 数据集上, 对比表现最好的 GANA 模型, MRR、Hits@10、Hits@5、Hits@1 指标分别提升了 0.012、0.03、0.028、0.026。在 Wiki-One 数据集上, 对比表现较好的 DARL 模型, MRR、Hits@10、Hits@5、Hits@1 指标分别提升了 0.012、0.077、0.052、0.031。实验结果表明, 基于元学习的方法虽然能利用神经网络自动更新对任务敏感的超参数, 从而优化模型的学习过程, 但对样本之间语义挖掘不足, 影响链接预测模型的效果。而本文模型能更好地

表 2 不同模型在 NELL-One 和 Wiki-One 数据集上的 3-shot 链接预测结果

模型	MRR		Hits@10		Hits@5		Hits@1	
	NELL-One 数据集	Wiki-One 数据集	NELL-One 数据集	Wiki-One 数据集	NELL-One 数据集	Wiki-One 数据集	NELL-One 数据集	Wiki-One 数据集
MFEN ^[1]	0.226	0.268	0.401	0.372	0.287	0.322	0.179	0.201
TransAM ^[3]	0.215	0.302	0.348	0.346	0.245	0.341	0.164	0.264
APINet ^[4]	0.305	0.342	0.496	0.473	0.405	0.419	0.208	0.283
GANA ^[5]	0.311	0.322	0.481	0.418	0.413	0.379	0.221	0.276
ADK-KG ^[6]	0.302	0.265	0.379	0.346	0.301	0.283	0.224	0.231
DARL ^[7]	0.213	0.345	0.374	0.446	0.326	0.400	0.138	0.290
GTNet	0.323	0.357	0.511	0.523	0.441	0.452	0.247	0.321

表 3 本文模型在 3-shot 条件下 NELL-One 测试集部分任务的预测评分

Table 3 Some task prediction scores of the model on the NELL-One test set under the 3-shot conditions				
预测任务实例组	MRR	Hits@10	Hits@5	Hits@1
sports game sport	0.977	0.986	0.986	0.971
automobile maker dealers in country	0.601	0.835	0.736	0.484
sport school in country	0.572	0.745	0.653	0.500
produced by	0.479	0.654	0.615	0.370
athlete injured his body part	0.444	0.703	0.641	0.312
animal such as invertebrate	0.381	0.622	0.510	0.263

挖掘实体与邻居之间的结构关系,所设计的 GTNet 模型能较好地利用邻居实体所在的位置信息。

本文模型在 NELL-One 和 Wiki-One 数据集中分别对比 MRR、Hits@10、Hits@5、Hits@1 指标下最优的基线模型,分别提升了 0.012、0.015、0.028、0.023 及 0.012、0.05、0.033、0.031。对比结果表明,本文模型优于所有基线模型,其中,APINet、GANA、ADK-KG、DARL 模型只在单个数据集的部分指标上表现较好,而本文模型在 2 个数据集上表现最佳。综合对表 2 实验结果的分析及表 3 所展示的部分预测任务评分来看,本文所提 GTNet 模型在小样本条件下,能够有效学习到实体所在子图的图结构信息,增强实体本身的语义表示,有效提高最终实体链接预测的效果,且泛化性更好。

3.4 消融实验

本文所提 GTNet 在对实体进行编码的过程中,通过结构感知图池化层融合图结构信息,达到增强实体表示、提高实体链接预测准确性的目的。为了探究该池化层对链接预测效果的作用,在 3-shot 条件下设计消融实验,实验结果如表 4 所示。

表 4 显示,当 GTNet 无结构感知图池化层时,变为标准的 Transformer 网络,该网络通过绝对位置编码实体的位置信息。实验结果显示,在 NELL-One 数据集上,对比没有结构感知图池化层的 Transformer 网络,拥有结构感知图池化层的 GTNet 提升了链接预测模型的效果, MRR、Hits@10、Hits@5、Hits@1 指标分别提升了 0.022、0.034、0.038、0.041。实验表明,Transformer 的位置编码策略无法有效编码节点的拓扑结构位置信息,而本文所提结

表 4 结构感知图池化层对链接预测效果的影响
Table 4 The influence of the structure-aware graph pooling layer on the linking prediction effect

结构感知图池化层	MRR	Hits@10	Hits@5	Hits@1
×	0.301	0.477	0.403	0.206
√	0.323	0.511	0.441	0.247

构感知图池化层能够利用实体所在的图结构信息引导模型对实体进行更细粒度的编码,从而提升小样本实体链接预测的准确性。

3.5 小样本实体编码能力分析

为了评估 GTNet 模型小样本条件下的编码能力,以 MRR 为评测指标,在 Wiki-One 数据集上进行实验,实验结果如图 4 所示。

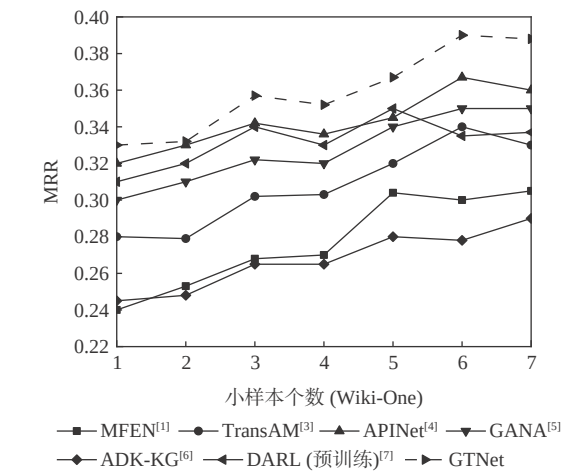


图 4 实体编码 MRR 性能
Fig. 4 MRR performance of entity coding

图 4 表明,样本个数的增加确实能够提升实体链接预测的准确性,但并不能保证每次增加样本都能增加预测准确性,这是因为受到数据集的限制,随机增加的样本实体并不一定有多个邻居节点,图的邻接矩阵较为稀疏,导致 GTNet 难以提取到有用的图结构特征,对实体的语义增强效果不佳。从曲线变化的趋势上看,增加样本个数对小样本推理有效,GTNet 模型对实体编码的能力整体上不断增强。

4 结 论

- 1) 本文提出一种 GTNet 小样本实体链接预测模型,该模型通过一种新颖的 GTNet 融合实体的图结构信息,增强实体的语义表示,并采用语义原型相似度计算方法来计算链接预测得分。
- 2) 在 GTNet 中设计了一种结构感知图池化层,解决了 Transformer 网络无法有效学习图拓扑结构的问题。
- 3) 在 2 个公开数据集上,本文模型优于所对比的基线模型。实验表明,在小样本条件下,本文模型更能有效学习到实体的图拓扑结构信息,提升实体链接预测的效果,泛化性更好。

参考文献 (References)

[1] WU T, MA H Y, WANG C, et al. Heterogeneous representation learning and matching for few-shot relation prediction[J]. Pattern

Recognition, 2022, 131: 108830.

[2] YUAN X, XU C C, LI P, et al. Relational learning with hierarchical attention encoder and recoding validator for few-shot knowledge graph completion[C]//Proceedings of the 37th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing. New York: ACM, 2022: 786-794.

[3] LIANG Y, ZHAO S, CHENG B, et al. TransAM: Transformer appending matcher for few-shot knowledge graph completion[J]. Neurocomputing, 2023, 537: 61-72.

[4] LI Y L, YU K, ZHANG Y H, et al. Adaptive prototype interaction network for few-shot knowledge graph completion[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024, 35(11): 15237-15250.

[5] NIU G L, LI Y, TANG C G, et al. Relational learning with gated and attentive neighbor aggregator for few-shot knowledge graph completion[C]//Proceedings of the 44th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. New York: ACM, 2021: 213-222.

[6] ZHANG Y, QIAN Y, YE Y, et al. Adapting distilled knowledge for few-shot relation reasoning over knowledge graphs[C]//Proceedings of the 2022 SIAM International Conference on Data Mining. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2022: 666-674.

[7] CAI L Q, WANG L J, YUAN R D, et al. Meta-learning based dynamic adaptive relation learning for few-shot knowledge graph completion[J]. Big Data Research, 2023, 33: 100394.

[8] DWIVEDI V P, BRESSON X. A generalization of Transformer networks to graphs[EB/OL]. (2021-01-24)[2024-01-05]. <https://arxiv.org/abs/2012.09699>.

[9] CHEN D X, O'BRAY L, BORWARDT K M. Structure-aware Transformer for graph representation learning[C]//Proceedings of the International Conference on Machine Learning. Baltimore: PMLR, 2022: 3469-3489.

[10] YING C X, CAI T L, LUO S J, et al. Do Transformers really perform badly for graph representation[C]//Proceedings of the Neural Information Processing Systems. Red Hook: Curran Associates, 2021: 28877-28888.

[11] 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.

[12] LUO Y, THOST V, SHI L. Transformers over directed acyclic graphs[C]//Proceedings of the Neural Information Processing Systems. Red Hook: Curran Associates, 2022: 47764-47782.

[13] SHENG J W, GUO S, CHEN Z Y, et al. Adaptive attentional network for few-shot knowledge graph completion[C]//Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Kerrville: Association for Computational Linguistics, 2020: 1681-1691.

[14] 刘丹阳, 方全, 张晓伟, 等. 基于图对比注意力网络的知识图谱补全[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(8): 1428-1435.

LIU D Y, FANG Q, ZHANG X W, et al. Knowledge graph completion based on graph contrastive attention network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(8): 1428-1435(in Chinese).

[15] BIANCHI F M, GRATAROLA D, ALIPPI C. Spectral clustering with graph neural networks for graph pooling[C]//Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. New York: ACM, 2020: 874-883.

Few-shot entity linking prediction based on Graph-Transformer network

YANG Rongtai¹, SHAO Yubin^{1,*}, DU Qingzhi¹, LONG Hua^{1,2}, QI Yuting¹, ZHANG Feng¹

(1. School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Yunnan Province Key Laboratory of Media Convergence, Kunming 650032, China)

Abstract: In the context of small sample scenarios, entity linking prediction aims to infer missing entities in query triples using a few reference triples. Nevertheless, the graph structure information of nodes in the entity encoding step is disregarded by popular entity linking prediction techniques. To address this issue, a Graph-Transformer network (GTNet) is proposed. In order to improve entity representation, we first create a structure-aware graph pooling layer that learns and fuses node graph structure information. The entity pair embeddings are then created by concatenating the head and tail entities, and their prototype embeddings are obtained by projecting reference entity pairs into a semantic prototype space. Finally, we calculate the similarity between the entity pair embeddings of the query and the reference entity pair prototype embeddings, and use this similarity as the link prediction score. Experiments on the NELL-One and Wiki-One datasets show that our proposed model outperforms the best baseline models by 0.012, 0.015, 0.028, 0.023 and 0.012, 0.05, 0.033, 0.031 in terms of mean reciprocal ranking (MRR), Hits@10, Hits@5, and Hits@1 metrics, respectively. This shows that by mining the graph structure information of nodes, our model may improve the entity representation ability, effectively predicting missing entities in triples and demonstrating improved generalization.

Keywords: small sample scenarios; linking prediction; entity representation; structure-aware; graph pooling; Graph-Transformer network

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0016

动态环境下基于语义分割与几何约束的 视觉/惯性导航方法

张文珂^{1,2}, 韩鹏^{1,*}, 冯宇¹, 高东¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 计算科学与技术学院, 北京 100049)

摘 要: 在实际同时定位与地图构建 (SLAM) 应用场景中, 针对大量运动物体的成像特征点参与特征追踪进而降低算法精度和鲁棒性的问题, 以及传统的以剔除动态特征为策略的动态 SLAM 方案中存在剩余静态特征不足而影响 SLAM 效果的问题, 提出一种基于语义分割与几何约束的动态视觉/惯性组合导航方法。使用语义分割网络及不同类别物体的动态性信任程度生成先验动态掩码, 并利用改进的抑制先验动态特征方法提取特征点, 进而利用惯性测量单元 (IMU) 预积分分量结合几何约束技术判断特征点的真实动态性, 并制定特征点剔除策略进行剔除, 最终使用剩余静态特征点进行追踪与定位。相比于 ORB-SLAM3, 所提算法在室内动态场景数据集 TUM 下, 定位精度平均提升了 73.05%, 在室外动态场景数据集 KITTI 下, 定位精度平均提升了 19.85%; 与传统的动态 SLAM 算法对比, 精度也更优。

关 键 词: 动态场景; 同时定位与地图构建; 语义信息; 特征提取; 几何约束

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1189-10

同时定位与地图构建 (simultaneous localization and mapping, SLAM) 技术使移动机器人能够在未知环境中自主定位, 同时构建环境地图。视觉 SLAM 是以单目、双目、RGB-D 等视觉传感器为中心的 SLAM 算法, 具有成本低、语义信息丰富等优势, 同时, 也存在易受运动物体影响、快速运动时容易丢失等问题, 与利用惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 的导航方法有较好的互补性, 因此, 视觉/惯性组合导航系统 (visual-inertial navigation system, VINS) 受到广泛关注^[1]。

大部分视觉 SLAM 和 VINS 算法假定工作环境是静态场景, 但实际的生产生活场景中有大量车辆、行人等动态物体, 使 ORB-SLAM3^[2]、VINS-Fusion^[3]

等性能优秀的 SLAM 算法无法满足真实场景的应用需求。近年来, 为了解决该问题, 许多动态 SLAM 算法被提出, 大部分动态 SLAM 方案将基于深度学习的方法结合基于几何的方法或基于光流的方法, 以增强算法的精度和鲁棒性。Yu 等^[4]提出的 DS-SLAM 将语义分割网络 SegNet^[5]和移动一致性检测方法相结合滤除动态物体干扰, 使用的基于极线约束的外点检测方法失效, 语义分割算法分割效果有待提升。Zhong 等^[6]提出的 Detect-SLAM 仅对关键帧目标检测, 普通帧特征点的动态性结果通过运动概率传播得到, 无法得到先验动态物体的真实动态性, 可能剔除大量静态特征点。Zhang 等^[7]提出的 VDO-SLAM 利用语义信息将机器人位姿、动态

收稿日期: 2024-01-10; 录用日期: 2024-02-23; 网络出版时间: 2024-03-18 17:59

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240316.1342.001

基金项目: 中国科学院基金 (8091A100113)

* 通信作者. E-mail: hanpeng@nssc.ac.cn

引用格式: 张文珂, 韩鹏, 冯宇, 等. 动态环境下基于语义分割与几何约束的视觉/惯性导航方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1189-1198. ZHANG W K, HAN P, FENG Y, et al. Visual-inertial navigation method based on semantic segmentation and geometric constraints in dynamic environment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1189-1198 (in Chinese).

对象、静态结构集成到统一的 SLAM 框架。Dai 等^[8]提出的动态 SLAM 方案利用点云相关性将环境中的物体分组,最大的组别被认为是可靠的静态地图点。Cheng 等^[9]提出的 DM-SLAM 结合实例分割与光流法剔除动态特征,将运动范围不大的动态物体上的特征点保留以应对可能的静态特征点不足的情况。蒋畅江等^[10]融合改进的轻量化目标检测网络与稀疏光流法,以实现实时的动态 SLAM 效果;Yuan 等^[11]提出的 SaD-SLAM 结合语义信息和深度信息识别特征点的真实动态性,并使用静态特征点对姿态估计进行微调;Li 等^[12]提出的 DP-SLAM 基于贝叶斯概率估计模型进行动态特征点跟踪。文献^[10-12]3 个动态 SLAM 方案仅在室内动态数据集测试,应用场景有局限性。

现有动态 SLAM 方案存在以下问题:①部分现有的动态 SLAM 方案仅针对室内场景,仅使用 RGB-D 数据集 TUM^[13]的室内动态场景序列进行验证,而机器人的应用场景还包括室外场景,无法满足部分场景需求;②以剔除动态特征为策略的动态 SLAM 方案可能导致剔除动态特征后剩余静态特征不足,影响 SLAM 系统的稳定性;③大部分基于几何的真实动态性检验方法从极线、基础矩阵估计、重投影误差等中构建约束,不同的约束构建方法有其局限性,如通过匹配点到其对应的核线距离来判断真实动态性的方法在载体沿核线方向运动时会失效,通过在成像平面上计算重投影误差的方法会损失深度方向的动态信息。

本文针对上述问题,提出一种面向室内和室外动态环境的视觉/惯性组合导航方法,将基于深度学习的语义分割算法和基于 IMU 预积分的几何方法与 ORB-SLAM3 算法相结合,有效识别环境中的动态物体并剔除动态特征点,并尽可能保留更多的静态特征点用于跟踪、优化及地图构建。提出动态场景下抑制先验动态特征的特征提取方法,以应对剩余静态特征不足的问题,提出基于 IMU 预积分与几何约束的特征点真实动态性判断方法,以更全面地评估真实动态性。本文改进算法能够提高复杂动态环境条件下 SLAM 系统的精度和鲁棒性,为机器人在真实动态环境中的路径规划、动作控制等提供鲁棒、稳定的位姿和导航信息。

1 基于语义分割与几何约束的动态 SLAM 算法

1.1 算法整体架构

本文算法以 ORB-SLAM3 为基础算法,ORB-SLAM3 是 VINS,包括跟踪线程、局部建图线程、回环检测线程及多地图系统。真实动态环境中,ORB-SLAM3 采用的随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)算法能够在一定程度上解决占据画面较小且数量较少的动态目标带来的问题,但存在大型或大量动态物体时,会受到较大影响。针对真实动态环境的特点对 ORB-SLAM3 的跟踪线程进行改进,改进算法整体架构如图 1 所示。

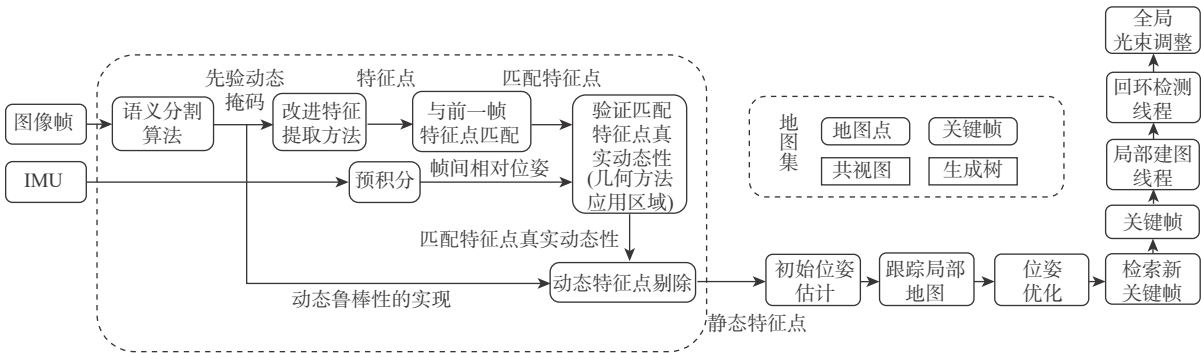


图 1 基于语义分割与几何约束的动态 SLAM 算法整体框架

Fig. 1 Overall framework of dynamic SLAM algorithm based on semantic segmentation and geometric constraints

改进算法在当前帧创建后,首先,运用预训练的语义分割网络分割图像生成原始掩码,并根据对不同类别物体的动态性信任程度,生成先验动态掩码,同时,进行 IMU 预积分,得到当前帧与前一帧的帧间位姿相对变换关系。然后,应用改进的特征提取方法进行特征点的提取,并将当前帧提取的特征点与前一帧原始特征点进行特征点匹配,得到匹配特征点对。在几何方法应用区域验证匹配特征

点的真实动态性,并进行特征点的剔除。最后,利用剩余静态特征点进行初始位姿估计,并检索新的关键帧,输出关键帧进行局部建图及回环检测,实现真实动态场景的高精度定位与地图构建。

1.2 基于 YOLOv5s 改进的语义分割算法

动态 SLAM 中,基于深度学习的动态物体识别方法可以分为目标检测、语义分割和实例分割。其中,目标检测算法能够识别不同个体,但无法获得

准确的物体边界, 导致以检测框为基准进行的特征点剔除会剔除大量静态背景特征, 影响地图点的数量和质量, 进而降低系统的精度和鲁棒性; 实例分割算法能够精准分割并区分不同个体, 但耗时过长。考虑速度与精度的平衡, 改进算法采用语义分割算法进行动态物体的识别。语义分割算法能够进行精准分割并生成像素级的掩码, 但不能识别不同个体, 通过特征点的真实动态性判断及剔除策略来降低其不利影响。

Multi YOLOv5 是基于 YOLOv5 改进的同时目标检测与语义分割网络。将 YOLOv5 与 Yu 等^[14]提出的 BiSeNet 实时轻量级双边语义分割网络相结合, Multi YOLOv5s 在 YOLOv5s 的模型基础上, 在头部结构 head 部分保留原有 YOLOv3 Head 的同时, 增加了 BiSeNet 分割头, 同时完成目标检测和语义分割任务。改进算法采用 Multi YOLOv5s 实现语义分割任务, 使用 KITTI^[15]数据集进行网络效果测试, 其目标检测与语义分割叠加效果如图 2 所示。



图 2 KITTI 数据集测试 Multi YOLOv5s 同时目标检测与语义分割叠加效果

Fig. 2 The KITTI dataset evaluation of Multi YOLOv5s for simultaneous object detection and semantic segmentation overlay effects

1.3 动态场景下抑制先验动态特征的特征提取方法

为解决以剔除动态特征为策略的动态 SLAM 面临的剩余静态特征点数量和质量不足的问题, 提出动态场景下抑制先验动态特征的特征提取方法。四叉树筛选是一种非极大值抑制策略, 保留的特征点数目固定, 因此, 本文提出的改进方法通过抑制先验动态区域特征点的提取和保留, 提高剩余静态特征点及生成地图点的数量和质量, 进而提高追踪、定位和建图的精度和鲁棒性。

将预训练的物体种类根据其动态性的信任程度划分为完全信任物体、完全不信任物体及潜在运动物体。完全信任物体包括“红绿灯”、“指示牌”等; 完全不信任物体包括“行人”、“骑车的人”等; 潜在运动物体包括“汽车”、“卡车”等。

首先, 生成由 3 种不同信任程度构成的先验动态掩码; 然后, 根据图像金字塔的缩放系数生成先验动态掩码金字塔; 最后, 在各层图像金字塔上分别进行特征点的提取, 每层金字塔上特征点的提取

流程如图 3 所示。

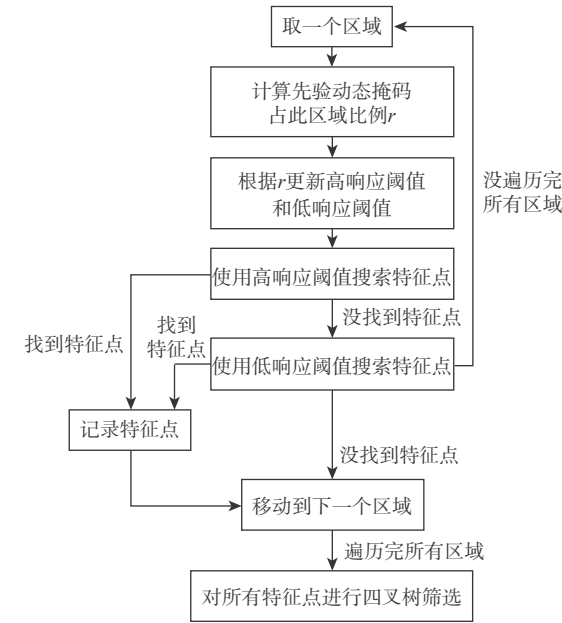


图 3 改进特征提取方法每层金字塔上特征点提取流程
Fig. 3 Improved feature extraction method and feature point extraction process on each pyramid

对于每个图像金字塔层级, 首先, 将其均匀分为若干个区域, 将完全不信任物体及潜在运动物体标记区域称为先验动态区域, 定义高响应阈值 $Y_{iniThFAST}$ 、低响应阈值 $Y_{minThFAST}$, 对每个区域记录其先验动态区域的像素占全部像素的比例为参数 r 。然后, 计算新的高响应阈值 $Y_{newiniThFAST}$ 和低响应阈值 $Y_{newminThFAST}$:

$$Y_{newiniThFAST}=Y_{iniThFAST}(1+r/m) \tag{1}$$

$$Y_{newminThFAST}=Y_{minThFAST}(1+r/m) \tag{2}$$

式中: m 为稀释 r 的倍数, 可以通过调整该参数控制对先验动态区域特征点提取的抑制程度, m 越小, 抑制程度越强。在每个区域按照高响应阈值 $Y_{newiniThFAST}$ 搜索特征点, 若该区域特征点响应值普遍较小, 没有提取到特征点, 则降低标准, 按照低响应阈值 $Y_{newminThFAST}$ 再次搜索。最后, 对得到的所有特征点进行四叉树筛选, 实现特征点的均匀化, 避免某区域特征点过于密集, 并将四叉树筛选保留的特征点总数规定为 1000。在 TUM 数据集的 walking_xyz 序列上进行稀释倍数 m 选取实验, 取不同的 m 并对结果进行评估。对比不同 m 下绝对轨迹误差 (absolute trajectory error, ATE) 的均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 及平均每帧剔除特征点数目, 结果如图 4 所示。

m 过高时, 对先验动态区域特征点提取抑制程度不足, 使保留的静态特征点数量和质量仍然不足; m 过低时, 对先验动态区域特征点提取的抑制

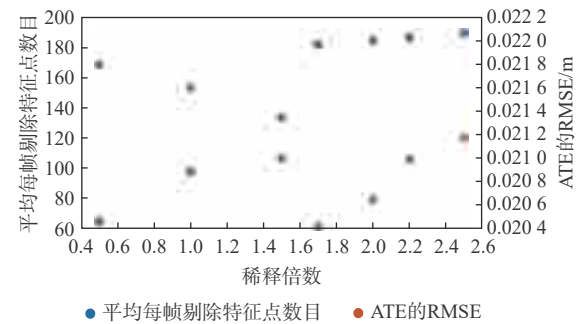


图 4 不同稀释倍数下 ATE 的 RMSE 和平均每帧剔除特征点数目对比

Fig. 4 Comparison of the RMSE of the ATE and the average number of feature points culled per frame under different dilution times

程度过高,导致在非先验动态区域一些质量不好、响应值很低的特征点被保留,这些特征点可能会导致误匹配,进而影响定位和建图的精度。最终结合多次实验结果,将 m 设置为 1.7。

2 特征点真实动态性判断

2.1 特征点真实动态性判断方法整体框架

“汽车”等潜在运动物体可能是静止的或动态的,如道路上的行车是动态的,路边的泊车是静止的,仅使用语义分割算法将“汽车”这个类别全部

剔除会丢失大量静止“汽车”上的静态特征点。针对该问题,提出基于 IMU 预积分与几何约束的特征点真实动态性判断方法,判断潜在运动物体上提取特征点的真实动态性,该方法适用于 RGB-D 相机+IMU 和双目相机+IMU 的传感器组合方式系统。以双目相机为例,特征点真实动态性判断方法的整体框架如图 5 所示。

首先,通过双目立体匹配计算当前帧使用改进方法提取的特征点深度;然后,通过词袋(bag of ‘words’, BoW)^[16]加速当前帧与前一帧的特征匹配,进而利用 IMU 预积分分量详细计算帧间相对位姿,使用静态特征点和该点在相邻帧上成像点的几何约束关系,判断潜在运动物体标记区域特征点的真实动态性;最后,根据匹配特征点真实动态性及特征点剔除策略进行特征点剔除。

特征点剔除策略如下:①对于完全不信任物体,由于其状态有很大的不确定性,不判断其真实动态性,将该区域特征点全部剔除;②对于完全信任物体,不判断其真实动态性,将该区域特征点全部保留;③对于潜在运动物体,通过几何方法判断其真实动态性,仅保留该区域判断为静态的特征点,剔除该区域判断为动态的特征点和未匹配特征点。

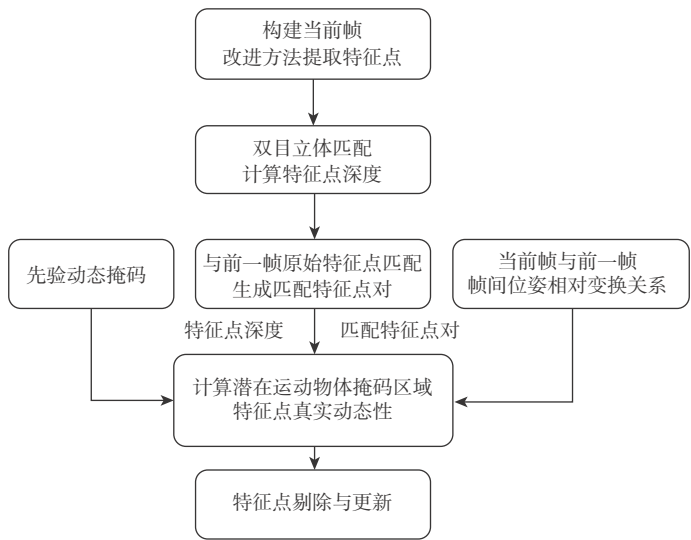


图 5 特征点真实动态性判断方法整体框架

Fig. 5 The overall framework of the method for judging the real dynamics of feature points

2.2 基于 IMU 预积分与几何约束的特征点真实动态性判断方法

提出一种 3D 距离误差判断特征点真实动态性的方法,约束构建方法为:运动物体的实际空间特征点、在相邻帧上的成像点及对应时刻的光心不满足对极约束关系。该方法不损失任一方向的动态信息,更加精准地判断特征点的真实动态性。3D 距离

误差判断特征点真实动态性的示意图如图 6 所示。

当匹配特征点对 p_1 、 p_2 为动态特征点时,观测的 3D 路标点为同个动态目标上的同个特征点,但在世界坐标系下的坐标不同,如图 6 中的 P_1 、 P_2 。为减少计算量,将 p_1 、 p_2 均投影到 I_1 相机坐标系下,并结合深度信息计算 3D 距离误差。

已知当前帧特征点 p_2 的像素坐标系坐标 (u_2, v_2) ,

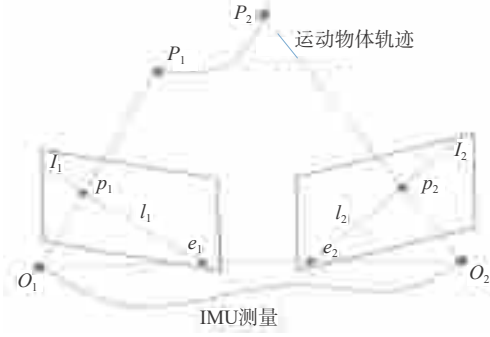


图6 3D距离误差判断特征点真实动态性示意图

Fig. 6 3D distance error judgment feature point real dynamic schematic diagram

计算 p_2 在 I_2 相机坐标系下的坐标 $P_2^{c_2}(X_2^{c_2}, Y_2^{c_2}, Z_2^{c_2})$:

$$\begin{cases} u_2 = f_x X_2^{c_2} / Z_2^{c_2} + c_x \\ v_2 = f_y Y_2^{c_2} / Z_2^{c_2} + c_y \\ Z_2^{c_2} = d_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_x 、 f_y 、 c_x 、 c_y 为相机内参; d_2 为双目立体匹配或深度图得到的 p_2 在相机坐标系下的深度。

已知 p_2 在上一帧的匹配特征点 p_1 的像素坐标系坐标 (u_1, v_1) , 计算 p_1 在 I_1 相机坐标系下的坐标 $P_1^{c_1}(X_1^{c_1}, Y_1^{c_1}, Z_1^{c_1})$:

$$\begin{cases} u_1 = f_x X_1^{c_1} / Z_1^{c_1} + c_x \\ v_1 = f_y Y_1^{c_1} / Z_1^{c_1} + c_y \\ Z_1^{c_1} = d_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: d_1 为 p_1 在相机坐标系下的深度。

利用标定得到的相机坐标系到 IMU 载体坐标系的旋转矩阵 R^{bc} 和平移向量 t^{bc} , 计算 p_2 在 I_2 载体坐标系下的坐标 $P_2^{b_2}(X_2^{b_2}, Y_2^{b_2}, Z_2^{b_2})$:

$$P_2^{b_2} = R^{bc} P_2^{c_2} + t^{bc} \quad (5)$$

利用 IMU 预积分信息计算 p_2 在 I_1 载体坐标系下的坐标 $P_2^{b_1}(X_2^{b_1}, Y_2^{b_1}, Z_2^{b_1})$, 预积分得到的平移向量中包含重力, 因此, 先计算世界坐标系下 2 帧间的平移向量 t_{12}^{bw} , 再将其转换到 I_1 载体坐标系下, 即 $t_{12}^{b_1}$ 。

$$t_{12}^{bw} = v_1^{wb} \Delta T + \frac{1}{2} g (\Delta T)^2 + R_1^{wb} t_{12}^{borin} \quad (6)$$

$$t_{12}^{b_1} = (R_1^{wb})^T t_{12}^{bw} \quad (7)$$

$$P_2^{b_1} = R_{12}^{b_1} P_2^{b_2} + t_{12}^{b_1} \quad (8)$$

式中: v_1^{wb} 和 R_1^{wb} 分别为 I_1 时刻载体坐标系相对于世界坐标系的速度向量和旋转矩阵; $R_{12}^{b_1}$ 和 t_{12}^{borin} 分别为 IMU 预积分分量代入运动学公式计算得到的 I_2 载体坐标系相对于 I_1 载体坐标系的旋转矩阵和平移向量; ΔT 为 2 帧间的 IMU 采样间隔之和; g 为重力向量。

利用标定得到的 IMU 载体坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 R^{cb} 和平移向量 t^{cb} , 计算 p_2 在 I_1 相机坐标系下的坐标 $P_2^{c_1}(X_2^{c_1}, Y_2^{c_1}, Z_2^{c_1})$:

$$P_2^{c_1} = R^{cb} P_2^{b_1} + t^{cb} \quad (9)$$

在 I_1 相机坐标系下, 计算 $P_1^{c_1}$ 与 $P_2^{c_1}$ 的距离误差 δ :

$$\delta = \sqrt{(X_2^{c_1} - X_1^{c_1})^2 + (Y_2^{c_1} - Y_1^{c_1})^2 + (Z_2^{c_1} - Z_1^{c_1})^2} \quad (10)$$

为了获得特征点真实动态性判断方法的最优阈值, 在仅有动态汽车的 KITTI 数据集 04 序列进行阈值设计的实验。采用精确率 J 和召回率 Z 设计阈值的方法, 认为完全信任物体掩码标记区域的特征点真实动态性是静态的, 潜在运动物体掩码标记区域的特征点真实动态性是动态的, 设计不同阈值计算完全信任物体和潜在运动物体标记区域提取到的特征点的动态性, 并将结果记录为估计动态性。该改进方法更看重精确率, 因此, 选择使 $0.9J + 0.1Z$ 能够最大化的阈值, 最终将基于 IMU 预积分与几何约束的特征点真实动态性判断方法的阈值设计为 0.6。

对于潜在运动物体标记区域的匹配特征点, 计算其距离误差 δ 后与阈值比较, 低于阈值则标记为静态特征点, 高于阈值则标记为动态特征点。

3 实验结果与分析

算法运行测试的平台为 Jetson AGX Orin 64 GB 边缘计算机, 运行环境为 Ubuntu 20.04。选用相对位姿误差 (relative pose error, RPE) 和 ATE 指标对算法进行评价。RPE 描述的是相隔固定时间差 Δ 的 2 帧位姿差的精度, 关注局部一致性; ATE 是估计位姿和真实位姿的直接差值, 关注全局一致性。设算法估计位姿: $P_{\text{esti},1}, P_{\text{esti},2}, \dots, P_{\text{esti},n} \in \text{SE}(3)$, 真实位姿: $P_{\text{gt},1}, P_{\text{gt},2}, \dots, P_{\text{gt},n} \in \text{SE}(3)$, 其中, $\text{SE}(3)$ 为特殊欧氏群, 用于描述在三维空间中的位置和姿态。则第 i 帧的相对位姿误差 E_i 、绝对轨迹误差 F_i 定义如下:

$$E_i = (P_{\text{gt},i}^{-1} P_{\text{gt},i+\Delta})^{-1} (P_{\text{esti},i}^{-1} P_{\text{esti},i+\Delta}) \quad (11)$$

$$F_i = P_{\text{gt},i}^{-1} P_{\text{esti},i} \quad (12)$$

3.1 TUM 数据集

使用 TUM 数据集中针对动态 SLAM 任务的数据集进行抑制先验动态特征的特征提取方法的效果验证及改进算法在室内动态环境的精度和鲁棒性测试。测试改进算法时, 由于 TUM 数据集不包含 IMU 数据, 仅使用基于语义分割的方法剔除“人”标记区域的特征点。

选取数据集中 walking 类别的 4 个序列进行测试。在相同设备、环境下分别测试 ORB-SLAM3 的纯 RGB-D 模式、仅使用语义分割网络的改进算法及改进特征提取方法后的改进算法运行效果对比, 如图 7 所示。



图 7 TUM 数据集下改进算法运行效果对比

Fig. 7 Comparison of the running effect of the improved algorithm under the TUM dataset

图 7 中,绿色点为剔除后剩余的特征点通过三角化生成的三维地图点,是 SLAM 系统用于定位和构建地图的关键,红色点是动态目标上剔除的二维特征点,由图 7(a) 可以看到,ORB-SLAM3 由于动态物体的影响,在该帧仅生成了少量地图点,且部分位于动态物体“人”上,图 7(c) 加入改进的特征提取方法后的改进算法能够正确剔除“人”上的所有特征点,相比于未使用改进特征提取方法的图 7(b),剔除的特征点更少,体现了改进算法对先验动态区域特征点提取的抑制效果。

TUM 数据集下,ORB-SLAM3、仅使用语义分割网络的改进算法及改进特征提取方法后的改进算法估计轨迹与真实轨迹对比如图 8 所示。可以看到,加入改进特征提取方法后的改进算法与真实轨迹基本吻合,且在一些地方的效果比仅使用语义分割网络的改进算法更加精准。

TUM 数据集测试 ORB-SLAM3、仅使用语义分割网络的改进算法及改进特征提取方法后的改进算法的 ATE 和 RPE 对比如表 1 和表 2 所示。评估整条轨迹的误差需要用到统计量,使用标准差

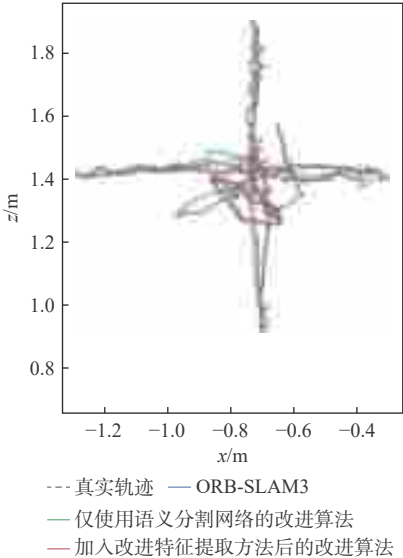


图 8 TUM 数据集测试各算法估计轨迹与真实轨迹对比
Fig. 8 Comparison of the estimated trajectories of various algorithm with the real trajectories on the TUM dataset

(standard deviation, STD)和 RMSE 这 2 个统计量。STD 指一组数据与其平均值之差的平方和与数据个数的比值的平方根,反映数据的离散程度;

表 1 TUM 数据集测试各算法的绝对轨迹误差对比

序列	STD/m			RMSE/m			RMSE 提升率1/%	RMSE 提升率2/%
	ORB-SLAM3	仅使用语义分割	改进特征提取	ORB-SLAM3	仅使用语义分割	改进特征提取		
	(RGB-D模式)	网络的改进算法	方法的改进算法	(RGB-D模式)	网络的改进算法	方法的改进算法		
walking_xyz	0.114 6	0.009 9	0.008 3	0.270 4	0.022 3	0.020 4	8.52	92.46
walking_rpy	0.078 5	0.035 0	0.028 7	0.160 8	0.054 1	0.048 7	9.98	69.71
walking_halfsphere	0.165 8	0.040 6	0.033 1	0.291 3	0.054 8	0.046 7	14.78	83.97
walking_static	0.008 6	0.003 3	0.003 2	0.015 2	0.008 8	0.008 2	6.82	46.05

表 2 TUM 数据集测试各算法的相对位姿误差对比

序列	STD/m			RMSE/m			RMSE 提升率1/%	RMSE 提升率2/%
	ORB-SLAM3	仅使用语义分割	改进特征提取	ORB-SLAM3	仅使用语义分割	改进特征提取		
	(RGB-D模式)	网络的改进算法	方法的改进算法	(RGB-D模式)	网络的改进算法	方法的改进算法		
walking_xyz	0.008 9	0.009 1	0.008 8	0.017 0	0.015 6	0.015 3	1.92	10.00
walking_rpy	0.030 3	0.027 1	0.023 0	0.035 7	0.034 1	0.030 1	11.73	15.69
walking_halfsphere	0.017 7	0.015 1	0.010 2	0.024 0	0.021 9	0.018 8	14.16	21.67
walking_static	0.012 5	0.003 9	0.003 7	0.015 2	0.007 4	0.007 2	2.70	52.63

RMSE 指一组观测值与真值差的平方和与数据个数的比值的平方根, 反映观测值的精确度。评估 RPE 时, 同时考虑旋转和平移误差; 由于 ATE 评价轨迹全局一致性, 整条轨迹上旋转出现误差后, 随后的轨迹也会出现误差, 因此, 评估 ATE 时只评估其平移部分。

RMSE 提升率 1 指加入改进特征提取方法后的改进算法相比于仅使用语义分割网络的改进算法的提升率, RMSE 提升率 2 指加入改进特征提取方法后的改进算法相比于 ORB-SLAM3 的提升率。可以看到, 加入改进特征提取方法的改进算法相比于 ORB-SLAM3, 在各个序列均有较大的精度提升,

且相比于仅使用语义分割网络的改进算法, 也有一定精度提升。

加入改进特征提取方法的改进算法相比于仅使用语义分割网络的改进算法 ATE 的 RMSE 平均提升率为 10.03%, RPE 的 RMSE 平均提升率为 7.63%; 加入改进特征提取方法的改进算法相比于 ORB-SLAM3 的 ATE 的 RMSE 平均提升率为 73.05%, RPE 的 RMSE 平均提升率为 25%。验证了本文提出的抑制先验动态特征的特征提取方法能够提高以剔除动态特征为策略的动态 SLAM 的精度和鲁棒性。

将改进算法与优秀的动态 SLAM 算法对比, ATE 的 RMSE 对比如表 3 所示。

表 3 TUM 数据集下本文改进算法与其他动态 SLAM 算法的 ATE 的 RMSE 对比
Table 3 RMSE comparison of ATE of the improved algorithm and other dynamic SLAM algorithms on

TUM dataset						m
序列	ORB-SLAM3 ^[2]	DS-SLAM ^[4]	Detect-SLAM ^[6]	ReFusion ^[17]	D ³ FlowSLAM ^[18]	本文改进算法
walking_xyz	0.270 4	0.024 7	0.024 1	0.099	0.018	0.020 4
walking_rpy	0.160 8	0.444 2	0.295 9		0.057	0.048 7
walking_halfsphere	0.291 3	0.030 3	0.051 4	0.104	0.42	0.046 7
walking_static	0.015 2	0.008 1		0.017	0.007	0.008 2

注: 加粗数字表示性能最优。

对比的 4 个动态 SLAM 算法中, DS-SLAM 结合实例分割和几何方法, Detect-SLAM 仅基于目标检测, ReFusion 采用纯几何法, D³FlowSLAM 基于光流法。本文改进算法在 walking_rpy 序列取得了最小误差, 在其他序列与取得最小误差的 DS-SLAM 和 D³FlowSLAM 误差相近。

3.2 KITTI 数据集

使用 KITTI 进行特征点真实动态性判断方法效果验证及基于语义分割与几何约束的动态 SLAM 算法在室外动态环境的效果验证。使用 01、04、07、09 这 4 个动态性较高的序列进行算法的性能测试。

01、04 序列是其中动态性最高的序列, 采集场景为城市宽阔道路场景, 数据集中包含较多动态车辆, 本文提出的基于语义分割与几何约束的动态 SLAM 算法运行效果及与数据集原图对比如图 9 所示。原图中黄色圆圈中是运动的车辆, 橙色圆圈中是运动的骑行者, 可以看到, 本文改进算法能够正确剔除动态车辆、骑行者上的所有特征点, 避免了动态物体对 SLAM 系统的干扰。改进算法运行时会判断潜在运动物体“汽车”上特征点的真实动态性, 车辆上均未出现绿色的地图点, 未出现将动态特征点判断为静态的情况。

07、09 序列的动态性一般, 为城市居民区狭小街道场景, 包含大量泊车及少量行车、骑行者和行人, 改进算法运行效果如图 10 所示。图中, 橙色圆

圈中是完全不信任物体, 如图 10(a) 中的骑自行车的人, 其上特征点被认为是动态的全部剔除。黄色圆圈中是泊车, 红色圆圈中是行车, 行车上特征点被全部剔除, 泊车上存在绿色地图点, 说明其上部分特征点被判断为静态而被保留后生成了地图点, 泊车上仍存在红色被剔除的特征点, 这是因为本文提出的特征点真实动态性判断方法需要特征点的深度及与前一帧匹配生成的匹配点对信息, 在潜在运动物体标记区域仅有被判断为静态的特征点能够被保留。图 10(a) 中蓝色三角中是由于语义分割网络将完全信任物体错误识别为潜在运动物体造成的特征点误剔除, 但在该区域存在被判断为静态



图 9 01、04 序列下本文改进算法运行效果与原图对比
Fig. 9 Comparison between the improved algorithm running effect and the original image under 01 and 04 sequences

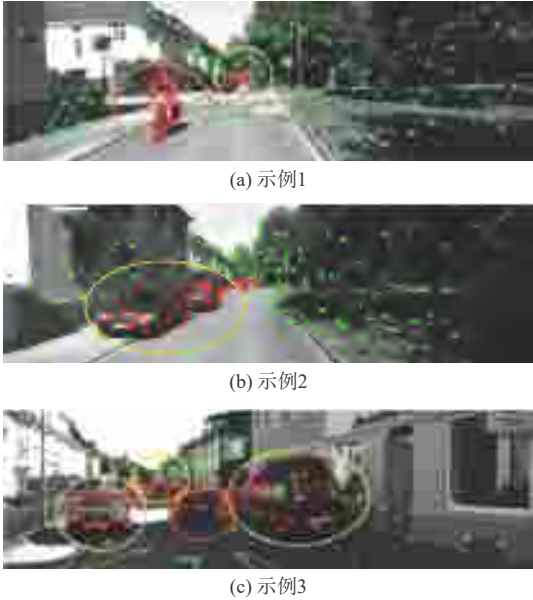


图 10 07、09 序列下本文改进算法运行效果

Fig. 10 Running effect of improved algorithm under 07 and 09 sequences

而被保留生成的地图点,体现了特征点真实动态性判断方法能够一定程度降低分割错误带来的干扰。

在相同设备和环境条件下分别测试 ORB-SLAM3 的双目视觉/惯性模式、未使用几何方法的动态 SLAM 方案及加入几何方法的基于语义分割与几何约束的动态 SLAM 算法, ATE 和 RPE 对比如表 4 和表 5 所示。未使用几何方法的动态 SLAM 方案指不判断特征点的真实动态性并剔除完全不信任物体和潜在运动物体标记区域的所有特征点。

序列 01 中含有大量动态车辆,但语义分割算法在运行过程中会出现一些将远处楼宇误识别为车辆的情况,而特征点真实动态性判断方法能够抑制这种误识别对 SLAM 效果的消极影响,因此, RMSE 提升率 1 和 RMSE 提升率 2 都较高。序列 04 中含有大量动态车辆,且没有出现误分割的情况,因此, RMSE 提升率 1 较小,而 RMSE 提升率 2 较大。序列 07 和序列 09 中大部分帧不包含动态物体,且有大量泊车,仅有一小部分场景包含动态车辆,因此,未使用几何方法的动态 SLAM 方案由于过多剔除了潜在运动物体标记区域的静态特征点而导致精度不如 ORB-SLAM3 原算法,而基于语义分割与几何约束的动态 SLAM 算法,一方面,能够完全剔除动态物体上的特征点,另一方面,能够保留较多静态潜在运动物体上的特征点,因此,相比于 ORB-SLAM3,有较多精度提升。计算各个序列 ATE 的 RMSE 提升率平均值, RMSE 提升率 1 的平均值为 17.78%, RMSE 提升率 2 的平均值为 19.85%。

改进算法与其他动态 SLAM 算法的 ATE 的 RMSE 对比如表 6 所示。由于各个动态 SLAM 算法的传感器类型及基础算法不同,同时对比各算法相比于基础算法的 ATE 的 RMSE 提升率。DynaSLAM 是以 ORB-SLAM2^[19] 为基础算法,将实例分割算法与多视图几何相结合进行动态物体检测与剔除的视觉 SLAM 方案,表中对比的是其双目视觉模式; Dynamic-SLAM 是以 ORB-SLAM2 为基础算法,基

表 4 KITTI 数据集测试各算法的绝对轨迹误差对比

Table 4 Comparison of absolute trajectory errors of various algorithms tested on the KITTI dataset

序列	STD/m			RMSE/m			RMSE 提升率1/%	RMSE 提升率2/%
	ORB-SLAM3 (双目视觉/ 惯性模式)	未使用几何方法的 动态SLAM方案	基于语义分割与 几何约束的 动态SLAM算法	ORB-SLAM3 (双目视觉/ 惯性模式)	未使用几何方法的 动态SLAM方案	基于语义分割与 几何约束的 动态SLAM算法		
01	1.12	1.145 5	0.941 7	2.667 3	2.581 5	1.975 9	23.46	25.92
04	0.107 3	0.055 8	0.053 4	0.228 3	0.150 3	0.146 9	2.26	35.65
07	0.502 9	0.499 1	0.458 3	0.892 6	0.924 4	0.858 3	7.15	3.84
09	0.594 3	0.908 6	0.536 2	1.308 6	1.822 2	1.125 4	38.24	14.00

表 5 KITTI 数据集测试各算法的相对位姿误差对比

Table 5 Comparison of relative pose errors of various algorithms tested on KITTI dataset

序列	STD/m			RMSE/m			RMSE 提升率1/%	RMSE 提升率2/%
	ORB-SLAM3 (双目视觉/ 惯性模式)	未使用几何方法的 动态SLAM方案	基于语义分割与 几何约束的 动态SLAM算法	ORB-SLAM3 (双目视觉/ 惯性模式)	未使用几何方法的 动态SLAM方案	基于语义分割与 几何约束的 动态SLAM算法		
01	0.042 9	0.03	0.024 2	0.066 2	0.051	0.045 7	10.39	30.97
04	0.011 9	0.011 5	0.007 6	0.022 4	0.019 1	0.015 6	18.32	30.36
07	0.01	0.009 5	0.008 5	0.019 4	0.017 6	0.015 8	10.23	18.56
09	0.011 4	0.009 2	0.009 1	0.022 3	0.019 8	0.019 1	3.54	14.35

表 6 KITTI 数据集下本文改进算法与其他动态 SLAM 算法的 ATE 的 RMSE 对比

序列	ATE的RMSE/m			相对基础算法提升率/%		
	DynaSLAM ^[20]	Dynamic-SLAM ^[21]	本文改进算法	DynaSLAM ^[20]	Dynamic-SLAM ^[21]	本文改进算法
01	9.4		1.975 9	9.62		25.92
04	0.2	1.109	0.146 9	0	10.06	35.65
07	0.5	1.823	0.858 3	0	7.08	3.84
09	1.6	9.285	1.125 4	50	10.50	14.00

注: 加粗数字表示性能最优。

于目标检测的单目视觉 SLAM 方案。DynaSLAM 剔除“汽车”、“人”等所有先验运动物体特征, 仅使用稳定的结构物体建图, 使其回环检测方法更加鲁棒, 因此, 在轨迹有回环的 07 和 09 序列表现较好。本文改进算法剔除动态特征更加精准, 保留了更多静态特征, 在除 07 序列外的 3 个序列的 ATE 的 RMSE 最小, 且在 01 序列和 04 序列, 相对基础算法提升率最高。

4 结 论

1) 提出的基于双目/RGB-D 相机面向动态场景的视觉/惯性组合导航方法能够正确识别环境中的先验动态物体, 并剔除动态特征点, 排除动态物体对 SLAM 系统的定位干扰, 并尽可能保留更多静态特征点, 提高了 SLAM 系统的精度和鲁棒性。

2) 在 TUM 数据集上测试的实验结果表明, 加入本文提出的改进特征提取方法后, 定位精度相比于未加入时平均提升了 10.03%, 相比于 ORB-SLAM3 平均提升了 73.05%。

3) 在 KITTI 数据集上测试的实验结果表明, 加入本文提出的基于 IMU 预积分与几何约束的特征点真实动态性判断方法后, 定位精度相比于未加入前平均提升了 17.78%, 相比于 ORB-SLAM3 平均提升了 19.85%。

4) 与其他动态 SLAM 算法相比, 本文提出的改进算法在室内动态环境定位精度相当, 在室外动态环境的定位精度更高。

下一步将开展算法在边缘计算设备的实时性实现工作, 一方面, 将 Multi YOLOv5s 的骨干网络替换为 GhostNet 等轻量化网络, 并进行网络的剪枝与量化, 另一方面, 将优化基于 IMU 预积分与几何约束的特征点真实动态性判断方法, 提高算法的运行速度。

参考文献 (References)

[1] 刘哲, 史殿习, 杨绍武, 等. 视觉惯性导航系统初始化方法综述[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(2): 15-26.
LIU Z, SHI D X, YANG S W, et al. Review of visual-inertial navig-

ation system initialization method[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(2): 15-26(in Chinese).
[2] 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.
[3] QIN T, CAO S Z, PAN J, et al. A general optimization-based framework for global pose estimation with multiple sensors[EB/OL]. (2019-01-11)[2024-01-05]. <https://arxiv.org/abs/1901.03642>.
[4] YU C, LIU Z X, LIU X J, et al. DS-SLAM: a semantic visual SLAM towards dynamic environments[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1168-1174.
[5] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(12): 2481-2495.
[6] ZHONG F W, WANG S, ZHANG Z Q, et al. Detect-SLAM: making object detection and SLAM mutually beneficial[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1001-1010.
[7] ZHANG J, HENEIN M, MAHONY R, et al. VDO-SLAM: a visual dynamic object-aware SLAM system[EB/OL]. (2021-12-14)[2024-01-05]. <https://arxiv.org/abs/2005.11052>.
[8] DAI W C, ZHANG Y, LI P, et al. RGB-D SLAM in dynamic environments using point correlations[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(1): 373-389.
[9] CHENG J H, WANG Z, ZHOU H Y, et al. DM-SLAM: a feature-based SLAM system for rigid dynamic scenes[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(4): 202.
[10] 蒋畅江, 刘朋, 舒鹏. 基于改进 YOLOv5s 的动态视觉 SLAM 算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(3): 763-771.
JIANG C J, LIU P, SHU P. Dynamic visual SLAM algorithm based on improved YOLOv5s[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(3): 763-771(in Chinese).
[11] YUAN X, CHEN S. SaD-SLAM: a visual SLAM based on semantic and depth information[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2021: 4930-4935.
[12] LI A, WANG J K, XU M, et al. DP-SLAM: a visual SLAM with moving probability towards dynamic environments[J]. Information Sciences, 2021, 556: 128-142.
[13] STURM J, ENGELHARD N, ENDRES F, et al. A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems[C]//Proceedings of the

2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2012: 573-580.

[14] YU C Q, WANG J B, PENG C, et al. BiSeNet: bilateral segmentation network for real-time semantic segmentation[C]//European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 334-349.

[15] GEIGER A, LENZ P, STILLER C, et al. Vision meets robotics: the KITTI dataset[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(11): 1231-1237.

[16] GALVEZ-LÓPEZ D, TARDOS J D. Bags of binary words for fast place recognition in image sequences[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(5): 1188-1197.

[17] PALAZZOLO E, BEHLEY J, LOTTES P, et al. ReFusion: 3D reconstruction in dynamic environments for RGB-D cameras exploiting residuals[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2020: 7855-7862.

[18] YU X Y, YE W C, GUO X Y, et al. D³FlowSLAM: self-supervised dynamic SLAM with flow motion decomposition and DINO guidance[EB/OL]. (2024-08-21)[2026-01-07]. <https://arxiv.org/abs/2207.08794>.

[19] MUR-ARTAL R, TARDÓS J D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.

[20] BESCOS B, FÁCIL J M, CIVERA J, et al. DynaSLAM: tracking, mapping, and inpainting in dynamic scenes[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 4076-4083.

[21] XIAO L H, WANG J G, QIU X S, et al. Dynamic-SLAM: semantic monocular visual localization and mapping based on deep learning in dynamic environment[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 117: 1-16.

Visual-inertial navigation method based on semantic segmentation and geometric constraints in dynamic environment

ZHANG Wenke^{1, 2}, HAN Peng^{1, *}, FENG Yu¹, GAO Dong¹

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the actual simultaneous localization and mapping (SLAM) application scenario, in order to solve the problem that a large number of imaging feature points of moving objects participate in feature tracking, which reduces the accuracy and robustness of the algorithm, as well as the problem that the traditional dynamic SLAM scheme with the strategy of eliminating dynamic features has insufficient residual static features and affects the SLAM effect, a dynamic vision-inertial integrated navigation method based on semantic segmentation and geometric constraints is proposed. A priori dynamic masks are created using the semantic segmentation network and the dynamic trust degree of various object types. Feature points are then extracted using an improved method of suppressing prior dynamic features. The real dynamic of feature points is then assessed using inertial measurement unit (IMU) pre-integration in conjunction with geometric constraint technology, and a feature point elimination strategy is developed for elimination. Finally, the remaining static feature points are used for tracking and positioning. Compared with the ORB-SLAM3, the positioning accuracy of the algorithm is improved by 73.05% on average in the indoor dynamic scene dataset TUM, and 19.85% in the outdoor dynamic scene dataset KITTI. Additionally, the accuracy is higher than that of the conventional dynamic SLAM approach.

Keywords: dynamic scenes; simultaneous localization and mapping; semantic information; feature extraction; geometric constraints

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0049

一种基于稀疏变换先验约束的低剂量 CT 深度展开网络

王悦¹, 张雄^{1,*}, 上官宏^{1,2}, 崔学英¹, 张鹏程², 桂志国²

(1. 太原科技大学 电子信息工程学院, 太原 030024; 2. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

摘 要: 深度展开网络由于可解释性高和学习能力强的特点受到广泛关注。现有 CT 图像重建算法的正则化项大多只关注某一类域中的信息, 重建结果常存在边缘模糊等信息丢失的问题。基于此, 提出一种基于稀疏变换先验约束的深度展开网络, 用于进行稀疏角度 CT 重建。考虑像素域信息和变换域信息对图像重建具有重要作用, 构建结合变换域稀疏正则化项和像素域一致性正则化项 2 种具有信息互补作用的正则化项, 据此重新设计稀疏角度 CT 重建的目标函数。根据所构建的目标函数进行迭代优化求解, 将得到的一系列约束关系映射为新的深度展开网络, 用于低剂量 CT 图像的迭代重建。实验结果表明: 所提算法得到的重建结果与经典的 FISTA 算法相比, 平均峰值信噪比 (PSNR) 和视觉信息保真度 (VIF) 均有较大改善。

关 键 词: CT 图像; 稀疏角度 CT 重建; 正则化项; 深度展开网络; 迭代重建

中图分类号: TN911.73; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1199-12

X 射线 CT 重建是一种断层成像技术, 其原理可简述为: ①通过一定的物理技术测定 X 射线在人体某剖面内的衰减系数; ②采用一定的数学方法求解衰减系数在人体某剖面上的二维分布矩阵; ③将二维分布矩阵映射为图像画面上的灰度分布^[1]。在实际应用中, 数据采集时间或 CT 系统射线探测器位置等因素常导致采集到的投影数据不完备。如何在有限角度或稀疏角度下利用获取的不完备投影数据进行高质量 CT 图像重建成为近年来该领域的研究热点。本文聚焦于稀疏角度 CT 重建问题^[2], 探索改进先验函数弥补投影数据不完备对 X 射线 CT 精确重建影响的方案。目前, 主流的重建算法大致可分为 2 类: 传统重建算法和基于深度学习的重建算法。

传统重建算法主要包括以 Radon 变换为理论基

础的解析重建算法和以解方程为主要思想的迭代重建算法^[2]。解析重建算法重建速度较快, 典型代表是用于二维重建的滤波反投影 (filtered back projection, FBP) 算法和用于三维重建的 FDK 算法^[3], 这类算法的主要缺点是对投影数据中的噪声比较敏感, 当投影数据不完备时, 重建图像质量会明显下降。迭代重建算法将 CT 重建看作目标函数优化问题, 以待重建 CT 的像素值为自变量, 根据成像系统物理模型和含噪投影数据的统计特性, 在图像域建立相应的能量函数方程并求解^[4]。CT 重建是一个不适定的求逆问题, 实际中常通过在目标函数中引入能够反映待重建 CT 先验信息的正则化项来提高算法的鲁棒性。目标函数中的正则化项能否高效表征图像先验信息是重建问题研究的关键点和难点^[5]。近年来, 学者们设计的典型先验函数包括全变分 (total

收稿日期: 2024-01-22; 录用日期: 2024-04-08; 网络出版时间: 2024-06-04 14:46

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240604.1118.002

基金项目: 国家自然科学基金 (62001321); 山西省基础研究计划 (202103021224265, 202303021221144); 太原科技大学研究生教育创新项目 (SY2022026, CX212026)

* 通信作者. E-mail: zx@tyust.edu.cn

引用格式: 王悦, 张雄, 上官宏, 等. 一种基于稀疏变换先验约束的低剂量 CT 深度展开网络 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1199-1210. WANG Y, ZHANG X, SHANGGUAN H, et al. A low-dose CT deep unfolding network based on a sparse transform priors constrain [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1199-1210 (in Chinese).

variation, TV)^[6] 及其改进形式(如高阶 TV^[7] 及 TV-Stokes^[8])的 L_1 范数、小波变换(如 Haar 小波^[9]、紧框架变换^[10]、剪切波^[11])的 L_1 范数、基于图像低秩特性的先验^[12] 和基于字典学习^[13] 的先验等^[4]。与解析重建算法相比,迭代重建算法计算量大,重建速度较慢,但对数据完备性要求低,抗噪声性能较好。近年来,深度学习被迅速应用于 CT 成像,在稀疏角度 CT 重建方面取得了较大进展。根据深度学习在重建算法中所起的作用,可将其分为 3 类:域转换类算法、迭代展开类算法、基于模型-即插即用的重建算法。

域转换类算法主要研究如何采用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)实现投影域与图像域的映射关系。一些学者^[14-17] 研究如何使用网络来替代 Radon 逆变换层,如 AUTOMAP^[14]、iRadonMAP^[15]、DSigNet^[16]、iCTNet^[17] 等。也有一些学者^[18-22] 通过设计投影域网络(或图像域网络)来进行投影(或图像)滤波或数据增强。例如,FBP-Net^[18] 以投影数据为分析对象,在投影域设计频域滤波器,通过抑制投影中的噪声来提高重建图像的质量;残差密集空间通道注意力网络(residual dense spatial-channel attention network, RedSCAN)^[19] 直接对经过 FBP 的重建图像进行处理,通过在图像域进行伪影抑制网络设计来改善网络性能。也有许多学者聚焦于“投影域滤波网络+Radon 逆变换层+图像域增强网络”的双域重建网络的设计,双域网络(dual domain network, DuDoNET)^[20]、双域数据一致性循环网络(dual-domain data consistent recurrent network, DuDoDR-Net)^[21]、交互式双域并行网络(interactive dual-domain parallel network, IDOL-Net)^[22] 等是该类工作的典型代表。

迭代展开类算法主要研究如何采用 CNN 实现统计重建算法的迭代求解过程。例如,Adler 等^[23] 利用端到端网络学习对偶算子的解,降低了采用原始对偶法求解 CT 重建问题的复杂度。图像超分辨率展开网络(unfolding network for image super-resolution, USRNet)^[24] 和边缘引导的可解释图像压缩感知网络(edge guided interpretable image compressive sensing network, EGINet)^[25] 采用半二次分裂(half quadratic splitting, HQS)算法将含多个待估计变量的一个目标函数最小化问题转化为分别含单个待估计变量的多个子问题交替迭代求解问题。Mou 等^[26] 提出一种基于近端梯度下降算法的深度展开网络模型,采用特征融合策略来提高不同阶段之间的信息交互能力。用于图像压缩感知的交替方向乘法网络(alternating direction method of multipliers network

for image compressive sensing, ADMM-CSNet)^[27] 是近年来采用交替方向乘法法求解不适定逆问题的优秀代表,以数据流形式展开深度网络,网络中的所有参数都是可学习的^[28]。基于迭代收缩阈值法的记忆增强型深度展开网络(memory-augmented deep unfolding network, MADUN)^[29] 在网络中采用高通量短期记忆和跨阶段长期记忆机制,大大提高了网络的特征表示能力。该类算法利用不同的优化算法对重建目标函数进行求解,并将交替求解的过程网络化,网络可解释性较强。

基于模型-即插即用的重建算法主要研究如何采用 CNN 替代先验信息。例如,Chen 等提出的基于“fields of experts”先验^[30]、Wu 等提出的基于 K-稀疏自动编码器的非线性稀疏先验^[31]、Kang 等提出的基于小波紧框架的变换域先验^[32]、Gao 等提出的基于人体解剖信息的先验^[33] 等都是近年来该类工作的典型代表。此外,根据网络训练方式的区别可将其分为预先训练类^[34] 和动态训练类^[35-36]。Gupta 等^[34] 采用残差网络预训练投影算子,设计了一种可学习的松弛投影梯度下降法,用于稀疏角度 CT 重建。块坐标下降网络(block coordinate descent network, BCD-Net)^[35] 和 Shen 等^[36] 设计的带有强化学习思想的参数微调网络在迭代过程中进行动态参数更新。与传统重建算法需要人工设计正则化项不同,该类算法能够反映 CT 图像的先验信息是可学习的^[37]。

深度展开网络虽然为 CT 重建任务提供了一种兼具可解释性和强大学习能力的网络设计思路,但仍存在目标函数中正则化项过于简单、先验信息对待估计 CT 图像描述能力不足的问题。重建图像中,伪影噪声等干扰信息是否被很好地抑制和 CT 中的组织结构、低密度病变等的细节边缘等有用信息是否被很好保留是衡量重建算法性能的 2 个重要因素。鉴于此,本文提出一种基于稀疏变换先验约束的深度展开网络(sparse transform priors constrained deep unfolding network, STPC-DUN)用于稀疏角度 CT 重建。首先,构建互补双正则化项约束的目标函数,其中,互补双正则化项由变换域稀疏正则化项和像素域一致性正则化项组成。像素域一致性正则化项可以通过自适应控制图像像素点的信息来对图像中的噪声和伪影进行滤除,在目标函数中的作用是平滑噪声和抑制伪影;变换域稀疏正则化项可以为重建图像提供细节、边缘等的变换域信息,在目标函数中的作用是保留细节边缘等有用信息。其次,对所构建的目标函数进行子问题分解和交替迭代求解,将迭代求解过程展开成深度卷积神

神经网络。最后, 在 Mayo 数据集上进行 4 种不同稀疏角度下的 CT 重建实验, 实验结果证明了本文算法的有效性。

1 本文算法

1.1 目标函数

本文提出的重建算法目标函数如下:

$$\|\mathbf{u}\| = \arg \min_{\mathbf{u}} \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{u} - \mathbf{g}\|_2^2 + \alpha \text{FS}(\mathbf{u}) + \gamma T_{\text{PDC}}(\mathbf{u}) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为系统矩阵; $\mathbf{u}$ 为待重建图像; $\mathbf{g}$ 为投影数据; $T_{\text{PDC}}(\mathbf{u})$ 为像素域一致性正则化项; α 和 γ 为超参数; $\text{FS}(\mathbf{u})$ 为变换域稀疏正则化项, 定义为

$$\text{FS}(\mathbf{u}) = \|\mathbf{D}(\mathbf{u})\|_1 \quad (2)$$

式中: 算子 $\mathbf{D}(\cdot)$ 是傅里叶变换、离散余弦变换或离散小波变换中的任意一种。

像素域一致性正则化项定义如下:

$$T_{\text{PDC}}(\mathbf{u}) = \|\mathbf{u} - \mathbf{M}(\mathbf{u})\mathbf{A}\|_2^2 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}(\cdot)$ 为自适应的非线性滤波算子; $\mathbf{A}$ 为可靠性矩阵。

1.2 模型优化求解

直接求解式(1)极其困难, 因此, 依据优化转换原理, 通过 HQS 算法^[38]将上述问题转换成变量可分离、求解更简便的新优化问题, 其求解可以采用迭代算法实现。引入辅助变量 $\mathbf{v}$, 则式(1)可转换成以下有约束的优化问题:

$$\begin{cases} \|\mathbf{u}\|, \|\mathbf{v}\| = \arg \min_{\mathbf{u}, \mathbf{v}} \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{v} - \mathbf{g}\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{D}(\mathbf{v})\|_1 + \\ \gamma \|\mathbf{u} - \mathbf{M}(\mathbf{u})\mathbf{A}\|_2^2 \\ \text{s.t. } \mathbf{u} = \mathbf{v} \end{cases} \quad (4)$$

根据拉格朗日定理可将式(4)的有约束优化问题转化为等价的无约束优化问题:

$$\|\mathbf{u}\|, \|\mathbf{v}\| = \arg \min_{\mathbf{u}, \mathbf{v}} \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{v} - \mathbf{g}\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{D}(\mathbf{v})\|_1 + \beta \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2 + \gamma \|\mathbf{u} - \mathbf{M}(\mathbf{u})\mathbf{A}\|_2^2 \quad (5)$$

式中: β 为辅助项的比例系数。

式(5)所示目标函数是一个联合估计问题, 采用恒等变形, 将其分解为 2 个子问题:

$$\|\mathbf{v}\| = \arg \min_{\mathbf{v}} \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{v} - \mathbf{g}\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{D}(\mathbf{v})\|_1 + \beta \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2 \quad (6)$$

$$\|\mathbf{u}\| = \arg \min_{\mathbf{u}} \beta \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2 + \gamma \|\mathbf{u} - \mathbf{M}(\mathbf{u})\mathbf{A}\|_2^2 \quad (7)$$

1.2.1 子问题 1 的求解

采用文献 [39] 中的快速迭代阈值收缩算法求解式(6)所示的子问题 1, 可得

$$\mathbf{x}_{(k)} = \varphi_{\omega}(\mathbf{u}_{(k-1)} - \rho \mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{u}_{(k-1)} - \mathbf{g})) \quad (8a)$$

$$b_{(k)} = 1 + \sqrt{4b_{(k-1)}^2 + 1} / 2 \quad (8b)$$

$$\mathbf{v}_{(k)} = \mathbf{x}_{(k)} + \left(\frac{b_{(k-1)} - 1}{b_{(k)}} \right) (\mathbf{x}_{(k)} - \mathbf{u}_{(k-1)}) \quad (8c)$$

式中: ρ 为可学习的权重张量; k 为迭代次数; φ_{ω} 为与 $\alpha \|\mathbf{D}(\mathbf{v})\|_1$ 相关的阈值收缩算子; $\mathbf{x}_{(k)}$ 为算法的中间过渡变量; $b_{(k)}$ 为控制更新程度的变量。

进一步可得

$$\mathbf{y}_{(k)} = \mathbf{u}_{(k-1)} - \rho_{(k)}(\mathbf{Z}_{(k)})^T(\mathbf{H}\mathbf{u}_{(k-1)} - \mathbf{g}) \quad (9a)$$

$$\mathbf{r}_{(k)} = \varphi_{w_{(k)}}(\mathbf{y}_{(k)}) \quad (9b)$$

$$\mathbf{v}_{(k)} = \mathbf{r}_{(k)} + \theta_{(k)}(\mathbf{r}_{(k)} - \mathbf{u}_{(k-1)}) \quad (9c)$$

式中: $\mathbf{y}_{(k)}$ 为 $\mathbf{v}_{(k)}$ 的中间变量; $\mathbf{Z}_{(k)}$ 为梯度算子; $\varphi_{w_{(k)}}$ 为非线性近端算子; $\theta_{(k)}$ 为动量更新步长。上述变量均可通过网络学习得到。

1.2.2 子问题 2 的求解

一般地, 将图像由像素域变换到高维特征域中, 图像中的有用信息和干扰信息能够较好地分离开。若将第 k 个阶段子问题 1 的更新结果表示为 $\mathbf{v}_{(k)}$, $F(\cdot)$ 为将图像从像素域转化到高维特征域的算子, 则式(7)所示的子问题 2 可改写为

$$\|\mathbf{u}\| = \arg \min_{\mathbf{u}} \beta \|F(\mathbf{v}_{(k)}) - F(\mathbf{u})\|^2 + \gamma \|\mathbf{u} - \mathbf{M}(\mathbf{u})\mathbf{A}\|_2^2 \quad (10)$$

若令 $F(\mathbf{v}) = \mathbf{V}$, $F(\mathbf{u}) = \mathbf{U}$, 则有

$$\|\mathbf{u}\| = \arg \min_{\mathbf{u}} \beta \|\mathbf{V}_{(k)} - \mathbf{U}\|_2^2 + \gamma \|\mathbf{U} - \mathbf{M}(\mathbf{U})\mathbf{A}\|_2^2 \quad (11)$$

令 $\mathbf{U}_{(k-1)} + \Delta\mathbf{U} = \mathbf{U}$, $\mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)} + \Delta\mathbf{U})$ 可以用第 k 次迭代周围的 Taylor 级数来近似:

$$\mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)} + \Delta\mathbf{U}) \approx \mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)}) + \mathbf{J}_{(k-1)}\Delta\mathbf{U} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{J}_{(k-1)}$ 为雅可比矩阵, 通过推导可得

$$\begin{aligned} \|\mathbf{U} - \mathbf{M}(\mathbf{U})\mathbf{A}\|_2^2 &\approx \|(\mathbf{U} - \mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)}))\mathbf{A}\|_2^2 + \\ &\|(\mathbf{J}_{(k)}\Delta\mathbf{U})\mathbf{A}\|_2^2 - 2(\mathbf{U} - \mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)}))^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{J}_{(k-1)} \Delta\mathbf{U} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: 第 2 项和第 3 项对 $\Delta\mathbf{U}$ 趋于 0。

当 $\mathbf{U}$ 在 $\mathbf{U}_{(k-1)}$ 附近时, 可得到一个近似的结果。利用该结果将式(11)进行转化, 即

$$\|\mathbf{u}\| = \arg \min_{\mathbf{u}} \beta \|\mathbf{V}_{(k)} - \mathbf{U}\|_2^2 + \gamma \|(\mathbf{U} - \mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)}))\mathbf{A}\|_2^2 \quad (14)$$

对于式(14), 梯度为 0 时, 可得

$$(\mathbf{E} + \gamma \mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{U} = \mathbf{V}_{(k)} + \gamma \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)}) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为单位矩阵; $\mathbf{A} = N(a_1, \dots, a_l, \dots, a_{nm})$ 为对角

可靠性矩阵。不难推得, $(\mathbf{E} + \gamma \mathbf{A}^T \mathbf{A})$ 也为可逆对角矩阵。

进一步可以得到像素级迭代方程:

$$[\mathbf{U}_{(k)}, l] = \frac{[\mathbf{V}_{(k)}, l] + \gamma a_l^2 [\mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)}), l]}{1 + \gamma a_l^2} \quad (16)$$

式中: $[\mathbf{U}_{(k)}, l]$ 、 $[\mathbf{V}_{(k)}, l]$ 、 $[\mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)}), l]$ 分别为张量的第 l 个元素。 $\rho_l = \frac{1}{1 + \gamma a_l^2} \in (0, 1)$, ρ_l 的集合 $\boldsymbol{\rho}$ 可由式 (17) 求得

$$\mathbf{U}_{(k)} = \boldsymbol{\rho} \otimes \mathbf{V}_{(k)} + (\mathbf{E} - \boldsymbol{\rho}) \otimes \mathbf{M}(\mathbf{U}_{(k-1)}) \quad (17)$$

而 $F(\mathbf{v}) = \mathbf{V}$, $F(\mathbf{u}) = \mathbf{U}$, $\Phi(\mathbf{U}) = \mathbf{u}$, 且有子问题 1 的更新结果 $\mathbf{v}_{(k)}$, 则子问题 2 的更新结果为

$$\mathbf{u}_{(k)} = \Phi[\boldsymbol{\rho} \otimes F(\mathbf{v}_{(k)}) + (\mathbf{E} - \boldsymbol{\rho}) \otimes \mathbf{M}(F(\mathbf{u}_{(k-1)}))] \quad (18)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为从高维特征域向低维像素域的转化算子。

1.2.3 子问题 1 和子问题 2 的交替更新

如图 1 所示, 将子问题 1 和子问题 2 的迭代更新过程展开成深度神经网络, 可得本文提出的 STPC-DUN。

子问题 1 的优化更新分为 3 个步骤: ①输入 $\mathbf{u}_{(k-1)}$, 利用梯度下降模块(式(9(a)))进行更新, 得到 $\mathbf{y}_{(k)}$; ②将 $\mathbf{y}_{(k)}$ 输入式(9(b))所表示的近端映射模块中, 得到中间结果 $\mathbf{r}_{(k)}$; ③将 $\mathbf{r}_{(k)}$ 和 $\mathbf{u}_{(k-1)}$ 按照式(9(c))的比例相加, 得到子问题 1 第 k 次迭代的重建结果 $\mathbf{v}_{(k)}$ 。

子问题 2 的优化更新分为 4 个步骤: ①利用高维变换模块代替子问题 2 更新式(18)中的 $F(\cdot)$ 算子, 以 $\mathbf{u}_{(k-1)}$ 作为输入得到 $F(\mathbf{u}_{(k-1)})$, 以 $\mathbf{v}_{(k)}$ 作为输入得到步骤①的输出结果 $F(\mathbf{v}_{(k)})$; ②对于 $F(\mathbf{u}_{(k-1)})$, 通过非线性滤波函数 $\mathbf{M}(\cdot)$, 即残差滤波网络, 得到 $\mathbf{M}(F(\mathbf{u}_{(k-1)}))$; ③利用自适应特征融合模块生成的权重 $\boldsymbol{\rho}$ 和 $(\mathbf{E} - \boldsymbol{\rho})$, 分别对步骤①的输出结果 $F(\mathbf{v}_{(k)})$ 和步骤②的输出结果 $\mathbf{M}(F(\mathbf{u}_{(k-1)}))$ 进行融合, 得到步骤③的融合结果; ④利用图像恢复模块代替子问题 2 更新式(18)中的 $\Phi(\cdot)$ 算子, 以步骤③的融合结果作为输入得到最终更新的 $\mathbf{u}_{(k)}$ 。

具体地, 对于高维变换模块和图像恢复模块, 使用 3 层卷积和 2 层激活函数的网络结构来实现初步浅层特征提取和图像恢复; 如图 2 所示, 输入为 m 、 n , 输出为 f 。首先, m 使用 Conv 层 $\text{gc}(\cdot)$ 进行调整, 与 n 进行级联, 即 $f_0 = \text{Concat}(\text{gc}(m), n)$ 。 f_0 发送到权重生成操作步骤中, 先使用 1×1 Conv 层 $C_1(\cdot)$ 生成 $C_1(f_0)$ 降低维度。再使用 2 个具有 3×3 卷积核的卷积层和 1 个 ReLU 层 ($C_{\text{erc}}(\cdot)$) 来生成稳定性和非线性的初始元素级特征权值 $C_{\text{erc}}(C_1(f_0))$ 。使用 Sigmoid 激活层 $S(\cdot)$ 将权值归一化在区间 $(0, 1)$, 生成加权张量 $\boldsymbol{\rho}$ 。可以表示为

$$\boldsymbol{\rho} = S(C_{\text{erc}}(C_1(f_0))) \quad (19)$$

进行张量化操作, 分别为 m 和 n 生成 2 个权重张量(即 $\rho_1 = \boldsymbol{\rho}$, $\rho_2 = \mathbf{E} - \boldsymbol{\rho}$)。该自适应特征融合模块输出可表示为

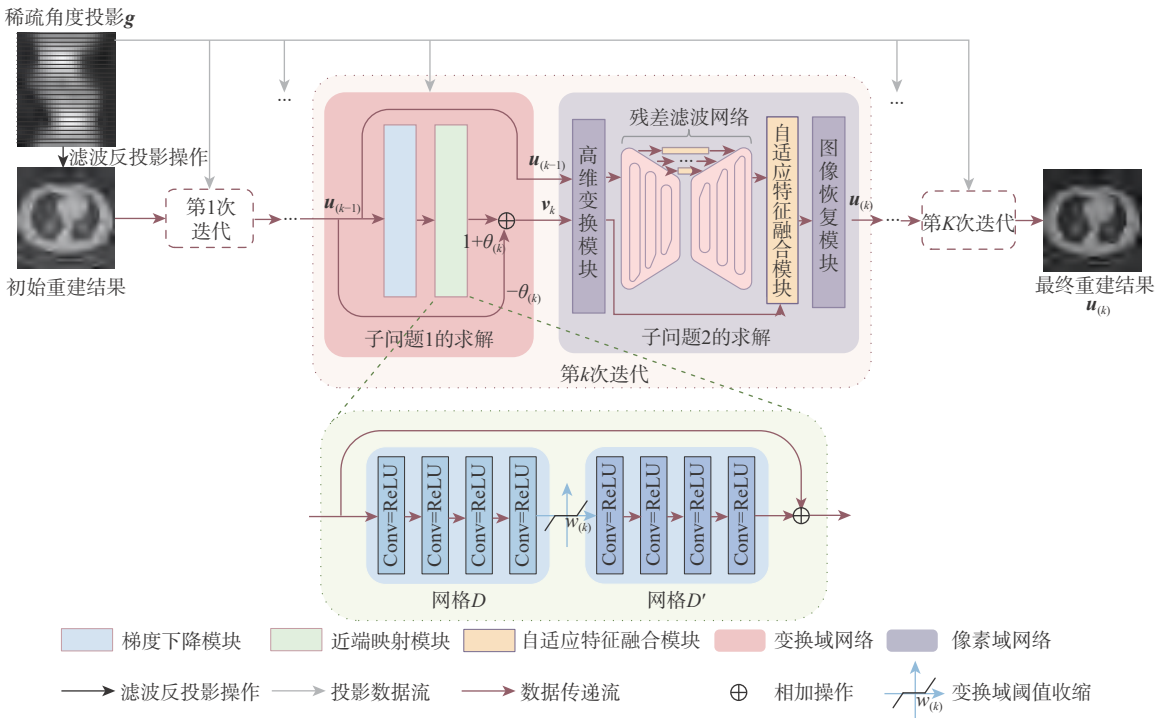


图 1 稀疏变换先验约束的深度展开网络整体框架

Fig. 1 Overall structure diagram of sparse transform priors constrained deep unfolding network

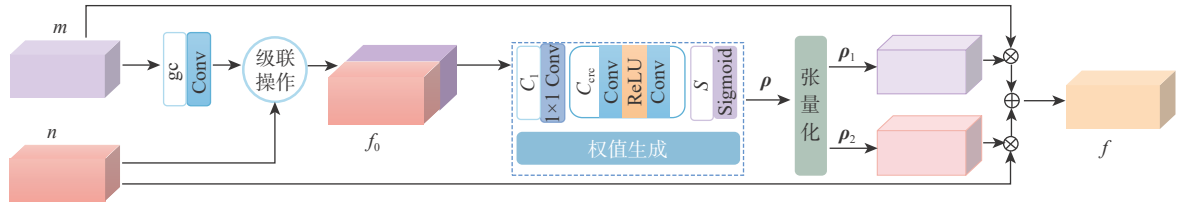


图 2 自适应特征融合模块结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of adaptive feature fusion module

$$f = \rho_1 \otimes m + \rho_2 \otimes n = \rho \otimes m + (E - \rho) \otimes n \quad (20)$$
式中: E 为与加权张量 ρ 维度大小相同的单位张量;
 f 为该模块的最终输出结果。

如图 3 所示, 将残差滤波网络设计为编解码结构, 采用自适应特征融合模块融合编码特征和解码特征, 以增强网络的噪声抑制能力。

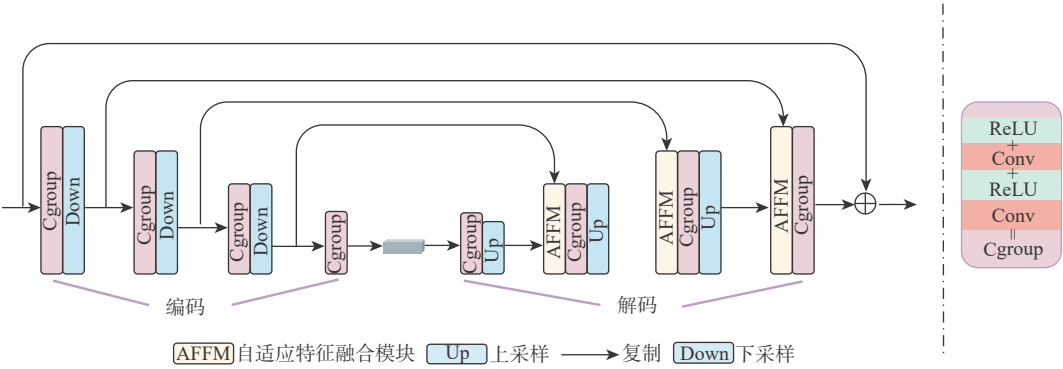


图 3 残差滤波网络结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the residual filter network structure

1.3 损失函数

所提 STPC-DUN 的损失函数包括 2 部分: 平均均方误差 (mean square error, MSE) 损失^[40] 和变换损失。将总损失函数定义为 L_{Total} , 则有

$$L_{\text{Total}}(\theta) = L_{\text{MSE}}(u_{(K)}, u_i) + L_D \quad (21)$$

式中: MSE 损失 $L_{\text{MSE}}(u_{(K)}, u_i)$ 用来约束重建图像和参考图像的像素级信息, 以保证重建图像与参考图像更接近, $u_{(K)}$ 为在最后一个阶段重构出的 CT 图像, u_i 为第 i 张与之对应的参考图像。考虑到数学上稀疏变换是可逆的, 应满足 $D'D = C$, C 为恒等算子, 但本文通过网络实现 D 和 D' 及迭代阈值收缩的过程。因此, 受稀疏自动编码器^[41] 的损失函数启发, 将变换损失 L_D 定义为

$$L_D = \epsilon_{\text{SI}} L_{\text{SI}} + \epsilon_{\text{SC}} L_{\text{SC}} = \epsilon_{\text{SI}} \sum_{k=1}^K \|D'(D(y_{(k)})) - y_{(k)}\|_2^2 + \epsilon_{\text{SC}} \sum_{k=1}^K \|D(y_{(k)})\|_1 \quad (22)$$

式中: L_{SI} 为反演对称损失; L_{SC} 为稀疏约束损失; K 为总阶段数; 本文中, $K=5$, $\epsilon_{\text{SI}} = 0.01$, $\epsilon_{\text{SC}} = 0.001$ 。本文提出的 STPC-DUN 中, 可学习参数集记为 θ , 则有 $\theta = \{\rho_{(k)}, Z_{(k)}, \varphi_{w_{(k)}}, \theta_{(k)}, M, F, \Phi\}$ 。

2 实验与结果分析

2.1 实验设置

实验数据来自 Mayo 数据集^[42]。训练集包括 1 800 张 CT 图像, 测试集包括 277 张 CT 图像。在训练和测试过程中, 利用 ODL^[43] 对所提供的全剂量 CT 图像进行正向投影, 以获得不同采样角度数 (60、90、180、270 个采样角度) 下的二维扇形束 CT 稀疏投影数据。为了验证 STPC-DUN 的性能, 选用 6 种流行的 CT 重建算法与之进行性能对比, 分别为传统解析重建算法 FBP、域转换类算法 RED-CNN^[44] 和 FBP ConvNet^[45] 及迭代展开类算法 Learned Primal-Dual^[23]、AirNet^[46] 和 FISTA-Net^[39]。实验中, STPC-DUN 和对比算法均在 python 平台上实现。实验环境为: CPU 为 Intel® Xeon(R) Gold 6230 CPU @ 2.10 GHz×40, GPU 为 NVIDIA Geforce RTX 3090, 运行内存为 24 GB。在训练过程中, 使用 Adam^[47] 算法优化网络参数, 初始学习率为 10^{-4} 。此外, 采用结构相似性指数 (structural similarity index measure, SSIM)^[48]、峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR)^[49]、视觉信息保真度 (visual information fidelity, VIF)^[50] 和 MSE^[40] 评估各种重建算法的性能。其中, PSNR、SSIM、VIF 越大, MSE 越小, 表明

重建图像质量越好。

2.2 对比实验

2.2.1 视觉效果分析

通过分析不同算法重建结果与标签图像(即 Ground truth)的差值图中伪影噪声的残留量或细节边缘的保留程度来区分不同算法的重建性能。其中,差值图中伪影和噪声越少,表明重建结果与标签图像越接近;特别地,差值图中细节边缘残留越少,表明该重建算法对细节和边缘等的保留效果越好。如图 4 所示,图 4(a2)~图 4(a8) 括号中数值表示重建结果的 PSNR 和 SSIM 指标值,图 4(b) 依次

为不同算法重建结果与标签图像的差值图。不难看出,图 4(b2)~图 4(b4) 存在的噪声和伪影十分明显,对比图 4(b5)~图 4(b8) 中圆圈和箭头指示的位置,可以发现,图 4(b8) 的重建结果与标签图像的结构最接近,反映了 STPC-DUN 对伪影抑制能力更强,对于组织结构的重建更完整。

图 5 展示了采用不同算法对在 90(图 5(a))、180(图 5(b)) 和 270(图 5(c)) 个采样角度下获取的投影数据进行重建所得的实验结果。特别地,图 5(a) 展示了在 90 个采样角度下不同算法带病灶 CT 图像重建结果,ROI2(感兴趣区域(region of interest, ROI))

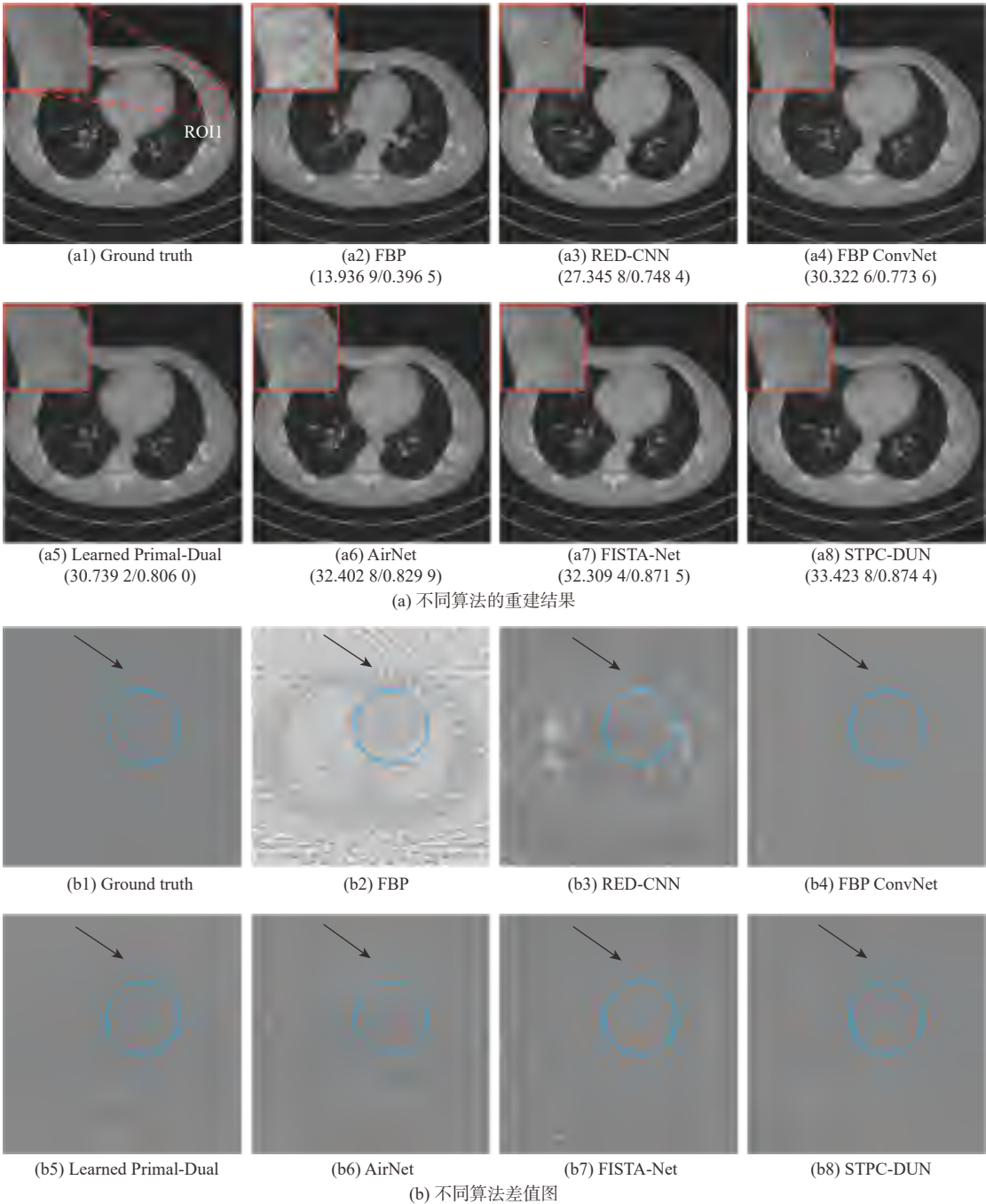


图 4 采样角度数为 60 时,不同算法的重建结果和差值图结果示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of reconstruction results and difference using different algorithms on 60 views

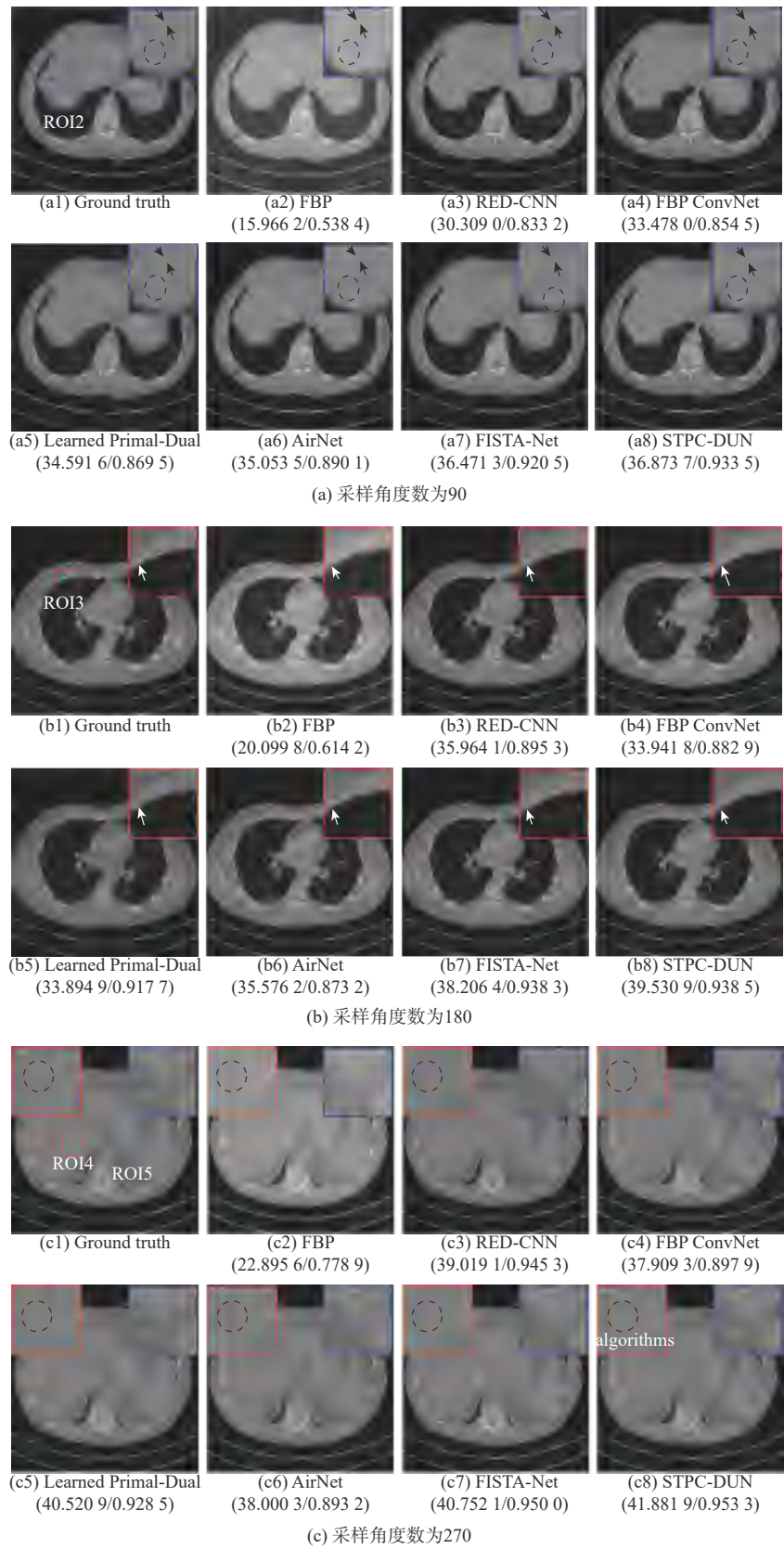


图 5 采样角度数分别为 90、180、270 时, 不同算法所获腹部 CT 重建结果示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of abdominal CT reconstruction results by different algorithms on 90, 180 and 270 views

圆圈指示的位置为病灶区域, FBP 的病灶区域明显存在较多伪影残留, 图 5(a3)~图 5(a4) 的病灶区域趋于过平滑的状态, 而图 5(a8) 的病灶区域灰度值高于图 5(a5)~图 5(a7), 可以证明, STPC-DUN 在病灶区域指示上也有较优的性能。对 3 种采样角度数的实验结果进行分析: ①在同一采样角度数下, 传统 FBP 的重建图像(图 5(a2)、图 5(b2)、图 5(c2))中仍然存在较多的失真和结构变形问题。而 RED-

CNN、FBP ConvNet 由于在 FBP 重建结果的基础上又进行了去噪处理,得到的重建结果(图 5(a3)、图 5(b3)、图 5(c3)、图 5(a4)、图 5(b4)、图 5(c4))噪声含量较少,但存在边缘平滑现象。作为迭代展开类代表算法的重建结果(图 5(a5)~图 5(a7)),观察其重建图像的 ROI2~ROI5,边缘平滑现象有所缓解,细节结构也得到一定恢复。此外,不难发现,STPC-DUN 的重建结果(图 5(a8)、图 5(b8)、图 5(c8))的图像质量和指标较同采样角度数下的其他对比算法都更具竞争力。②在不同采样角度数下观察得到,随着采样角度数量递增,每种对比算法的重建图像质量都有不同程度提升。

2.2.2 定量指标分析

为了更准确地对比各算法的平均指标结果表现,绘制不同算法 4 种采样角度数下的平均定量指标结果,如表 1 所示。对比同一采样角度数下的指标结果均值可以发现,STPC-DUN 在 180 个采样角度下,PSNR 比 FISTA-Net 高 1.986 6 dB,在 SSIM 和 VIF 指标上也有所领先,MSE 在所有对比算法中最小,表明 STPC-DUN 在定量指标上的优越性;对比同一采样角度数下的指标结果标准差可以发现,STPC-DUN 对应的 PSNR、SSIM 和 MSE 这 3 种指标的标准差在所有对比算法中为最小或次小,证明 STPC-DUN 的稳定性较强。

表 1 不同算法在 4 种采样角度数下的重建结果量化分析值

Table 1 Quantitative values for reconstruction results by different algorithms on 4 kinds of views					
采样角度数	重建算法	SSIM(均值±标准差)↑	PSNR(均值±标准差)/dB↑	VIF(均值±标准差)↑	MSE(均值±标准差)↓
60	FBP	0.455 7±0.051 2	14.507 6±1.151 9	0.223 4±0.017 4	2 386.2±646.831 6
	RED-CNN ^[44]	0.777 5±0.035 5	27.919 1±2.201 0	0.279 2±0.016 1	121.390 3±79.500 0
	FBP ConvNet ^[45]	0.807 8±0.029 4	30.814 9±1.682 8	0.334 6±0.019 7	58.116 2±23.988 5
	Learned Primal-Dual ^[23]	0.847 5±0.014 4	31.307 8±1.392 0	0.344 5±0.018 6	50.803 7±18.565 9
	AirNet ^[46]	0.843 4±0.022 9	32.076 5±1.718 9	0.374 4±0.021 4	44.141 5±23.213 4
	FISTA-Net ^[39]	0.886 5±0.017 1	31.841 8±2.089 6	0.341 3±0.017 7	48.318 4±27.718 6
	STPC-DUN	0.892 7±0.015 5	33.087 6±1.842 1	0.515 2±0.039 8	35.428 6±19.869 7
90	FBP	0.518 1±0.045 5	16.908 9±1.146 5	0.286 1±0.019 3	1 373.2±381.621 6
	RED-CNN ^[44]	0.834 8±0.027 3	31.502 3±1.897 6	0.366 7±0.017 0	50.889 2±25.990 4
	FBP ConvNet ^[45]	0.844 3±0.024 3	32.608 4±1.865 9	0.393 2±0.022 4	39.410 3±19.684 9
	Learned Primal-Dual ^[23]	0.845 6±0.024 5	32.786 4±1.943 8	0.512 3±0.026 1	39.438 6±33.438 5
	AirNet ^[46]	0.8880±0.020 1	35.169 1±1.757 4	0.493 3±0.019 9	21.772 6±11.977 8
	FISTA-Net ^[39]	0.907 3±0.012 8	34.514 8±1.893 8	0.395 7±0.019 2	25.616 0±14.152 3
	STPC-DUN	0.912 5±0.016 9	35.704 3±1.671 3	0.585 9±0.036 0	18.972 4±8.845 1
180	FBP	0.645 2±0.042 3	20.985 5±2.003 7	0.356 7±0.025 1	576.463 9±280.378 5
	RED-CNN ^[44]	0.901 2±0.015 9	35.243 1±1.611 3	0.560 1±0.018 8	20.909 9±8.950 2
	FBP ConvNet ^[45]	0.901 6±0.021 5	36.505 5±2.066 9	0.602 2±0.028 9	16.391 3±9.172 3
	Learned Primal-Dual ^[23]	0.941 3±0.017 4	36.775 3±2.618 3	0.595 8±0.025 9	16.927 4±13.962 1
	AirNet ^[46]	0.922 3±0.021 5	38.049 4±2.043 7	0.638 4±0.025 3	11.689 9±8.416 9
	FISTA-Net ^[39]	0.940 8±0.009 0	37.148 6±2.144 9	0.550 0±0.025 2	14.390 9±8.833 7
	STPC-DUN	0.946 0±0.008 2	39.135 2±1.589 3	0.760 3±0.038 0	8.509 2±3.429 7
270	FBP	0.662 7±0.030 8	21.947 0±1.660 8	0.410 9±0.021 0	447.671 9±181.347 6
	RED-CNN ^[44]	0.944 3±0.008 9	38.666 0±1.434 5	0.701 5±0.018 9	9.345 5±3.308 0
	FBP ConvNet ^[45]	0.933 9±0.022 8	38.939 6±2.511 8	0.702 6±0.029 4	10.183 2±8.732 1
	Learned Primal-Dual ^[23]	0.944 9±0.020 7	39.592 6±1.960 4	0.727 9±0.023 2	7.958 5±4.385 4
	AirNet ^[46]	0.944 1±0.020 3	40.207 5±2.253 9	0.758 5±0.021 8	7.203 5±4.729 7
	FISTA-Net ^[39]	0.958 3±0.007 1	40.117 4±1.745 9	0.676 5±0.022 2	6.917 5±3.351 7
	STPC-DUN	0.963 7±0.007 6	40.925 3±1.620 7	0.825 6±0.038 4	5.650 4±2.304 7

注:“↑”表示该指标数值越大,图像与真实图像越接近;“↓”表示该指标数值越小,图像与真实图像越接近;加粗数值表示最优值。

2.3 消融实验

正则化项的选取为 STPC-DUN 尤为重要的方面。为了证明本文所选正则化项的有效性,对正则化项进行消融实验。包括目标函数为数据保真项加傅里叶叶域稀疏正则化项的深度展开网络(Fourier sparse transform deep unfolding network, FSNet)和目标函数为数据保真项加深层先验约束的深度展开网络(priors deep constrained unfolding network, PDCNet)

2 种不同的情况。对于该 2 种消融情况,求解子问题对应选取与 STPC-DUN 相同的优化算法进行展开推导,并设置相同的网络结构和超参数以保证消融实验的公平性,进而得到使用不同正则化项时深度展开网络的重建结果。

如图 6 所示,对 60 个采样角度下消融实验的重建结果及其 ROI 进行视觉上的对比。对比图 6(b)和图 6(c)可以明显观察到,ROI6 和 ROI7 箭头所指

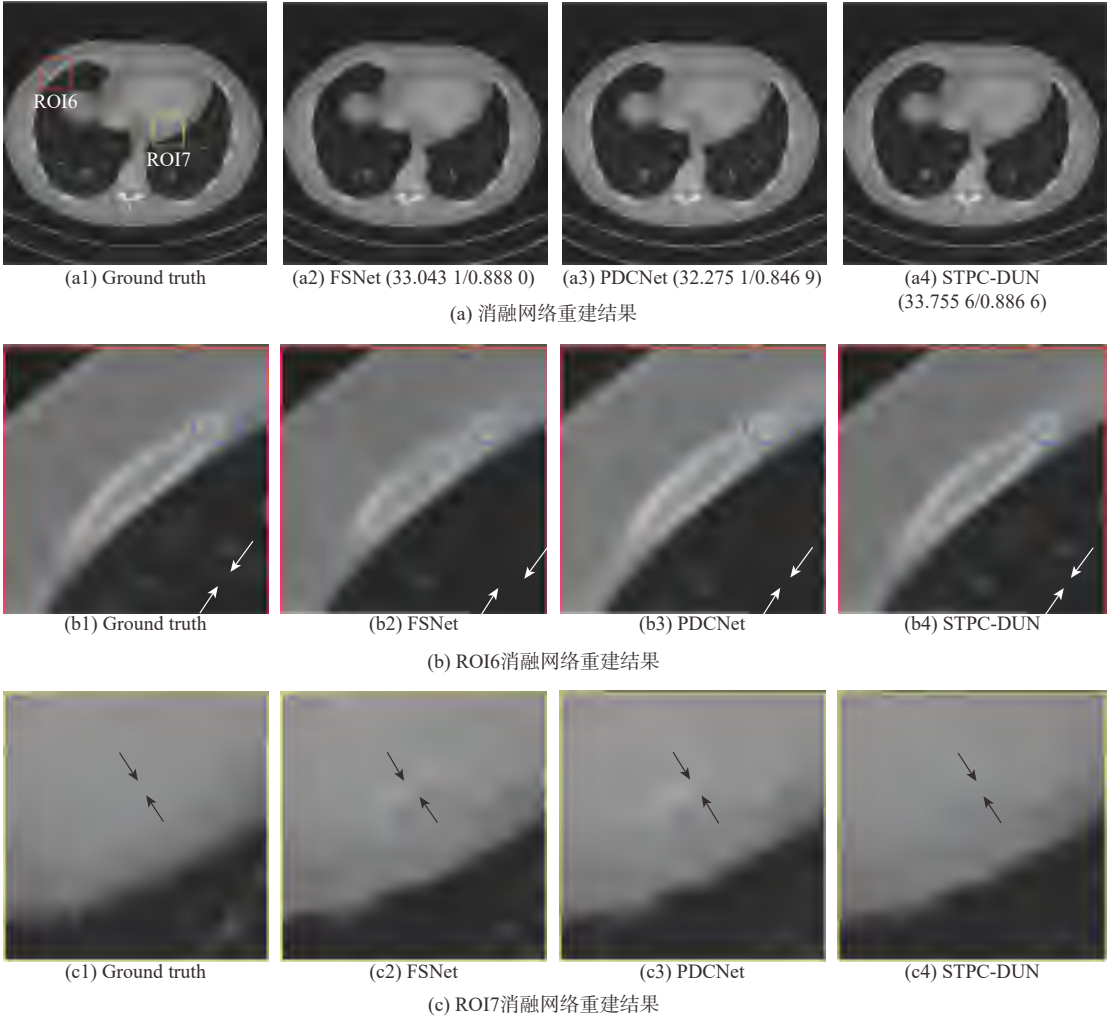


图 6 60 个采样角度下的消融网络重建结果及 ROI
Fig. 6 Reconstruction results and ROI using ablation networks on 60 views

示的区域和虚线圈所指示的边缘结构在图 6(b4)和图 6(c4)中被完整地重建,虽然在图 6(b2)和图 6(b3)中也可以看到结构的重建,但还存在如图 6(b3)所示的边缘模糊现象和如图 6(c2)所示的一些不存在的细节边缘被过度重建的现象,因此,可以从侧面证明 STPC-DUN 加入的 2 项正则化项可以相互促进,达到更优的重建效果。

表 2 为不同采样角度数下消融研究的定量结果。可以发现,在 90 个采样角度时,PDCNet 相对于 FSNet,在 PSNR 指标方面效果显著,证明在较稀疏的采样角度下,PDCNet 的噪声去除能力更强。

表 2 不同消融网络所获重建结果的平均量化分析值						
Table 2 Average quantitative values for reconstruction results by different ablation networks						
采样角度数	正则化类型		PSNR/dB↑	SSIM↑	VIF↑	MSE↓
	FSNet	PDCNet				
90	√	×	34.760 7	0.894 6	0.536 0	24.721 6
	×	√	35.175 3	0.905 6	0.566 2	21.130 0
	√	√	35.704 3	0.912 5	0.585 9	18.972 4
180	√	×	37.703 5	0.941 9	0.687 1	13.206 6
	×	√	37.683 1	0.924 2	0.715 2	11.967 6
	√	√	39.135 2	0.946 0	0.760 3	8.509 2

在 180 个采样角度时,FSNet 的平均 SSIM 值有显著提高,证明重建图像的细节和边缘结构恢复比较好,进而证明了变换域稀疏正则化项的细节保存特性。综合比较而言,在 4 种采样角度数下,分析消融实验视觉效果和定量指标评价结果,从不同角度证明了 STPC-DUN 加入的 2 项正则化项的有效性。

3 结 论

目前,迭代展开类重建算法已广泛应用于 CT 重建领域,并展示出显著优势,然而,此类算法大都采用在像素域对图像进行泛化先验约束的形式构建目标函数,忽略了像素域信息与变换域信息的互补作用,可能会降低重建图像的质量。

1) 本文构建的多约束目标函数(保真项、像素域一致性正则化项、变换域稀疏正则化项)可有效弥补传统迭代展开类重建算法忽略像素域与变换域信息互补性的缺陷,为提升重建质量提供了可靠的目标函数支撑。

2) 基于分裂算法、交替迭代策略及深度卷积神经网络展开构建的 STPC-DUN 算法重建性能优异,相较于 FISTA-Net 模型,PSNR 指标提升 1.986 6 dB。

3) STPC-DUN 模型具有较强的可解释性,其网络结构和迭代求解过程具备明确的数学物理意义,突破了传统深度学习模型可解释性差的局限。

但网络计算量较高是目前的不足之处。未来,如何减小可解释性网络的复杂度将成为深度迭代展开重建网络的研究热点。

参考文献 (References)

[1] 吉强,洪洋. 医学影像物理学[M]. 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 2010: 8-15.

Ji Q, Hong Y. Medical imaging physics[M]. 3rd ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2010: 8-15(in Chinese).

[2] 闫铤,李磊. CT 图像重建算法[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 12-13.

Yan B, Li L. CT image reconstruction algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2014: 12-13(in Chinese).

[3] 罗立民,胡轶宁,陈阳. 低剂量 CT 成像的研究现状与展望[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(1): 24-34.

LUO L M, HU Y N, CHEN Y. Research status and prospect for low-dose CT imaging[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(1): 24-34(in Chinese).

[4] 上官宏. 低剂量 X 线 CT 统计迭代重建方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2016: 6-19.

SHANGGUAN H. Study on statistical iterative reconstruction methods for low-dose X-ray CT[D]. Taiyuan: North University of China, 2016: 6-19(in Chinese).

[5] ZHANG H, WANG J, MA J H, et al. Statistical models and regularization strategies in statistical image reconstruction of low-dose X-ray CT: a survey[EB/OL]. (2015-05-14)[2024-01-06]. <https://arxiv.org/abs/1412.1732>.

[6] SIDKY E Y, KAO C M, PAN X C. Accurate image reconstruction from few-views and limited-angle data in divergent-beam CT[J]. Journal of X-Ray Science and Technology: Clinical Applications of Diagnosis and Therapeutics, 2006, 14(2): 119-139.

[7] DO S, KARL W C, KALRA M K, et al. Clinical low dose CT image reconstruction using high-order total variation techniques[J]. Medical Imaging 2010: Physics of Medical Imaging, 2010, 7622: 76225D.

[8] LIU Y, LIANG Z R, MA J H, et al. Total variation-Stokes strategy for sparse-view X-ray CT image reconstruction[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2014, 33(3): 749-763.

[9] GARDUÑO E, HERMAN G T, DAVIDI R. Reconstruction from a few projections by ℓ_1 -minimization of the Haar transform[J]. Inverse Problems, 2011, 27(5): 055006.

[10] JIA X, DONG B, LOU Y F, et al. GPU-based iterative cone-beam CT reconstruction using tight frame regularization[J]. Physics in Medicine and Biology, 2011, 56(13): 3787-3807.

[11] VANDEGHINSTE B, GOOSSENS B, VAN HOLEN R, et al. Iterative CT reconstruction using shearlet-based regularization[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(5): 3305-3317.

[12] WU W W, LIU F L, ZHANG Y B, et al. Non-local low-rank cube-based tensor factorization for spectral CT reconstruction[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38(4): 1079-1093.

[13] XU Q, YU H Y, MOU X Q, et al. Low-dose X-ray CT reconstruction via dictionary learning[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2012, 31(9): 1682-1697.

[14] ZHU B, LIU J Z, CAULEY S F, et al. Image reconstruction by domain-transform manifold learning[J]. Nature, 2018, 555(7697): 487-492.

[15] HE J, WANG Y B, MA J H. Radon inversion via deep learning[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2020, 39(6): 2076-2087.

[16] HE J, CHEN S L, ZHANG H, et al. Downsampled imaging geometric modeling for accurate CT reconstruction via deep learning[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2021, 40(11): 2976-2985.

[17] LI Y S, LI K, ZHANG C Z, et al. Learning to reconstruct computed tomography images directly from sinogram data under a variety of data acquisition conditions[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38(10): 2469-2481.

[18] WANG B, LIU H F. FBP-Net for direct reconstruction of dynamic PET images[J]. Physics in Medicine and Biology, 2020, 65(23): 235008.

[19] ZHOU B, ZHOU S K, DUNCAN J S, et al. Limited view tomographic reconstruction using a cascaded residual dense spatial-channel attention network with projection data fidelity layer[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2021, 40(7): 1792-1804.

[20] LIN W A, LIAO H F, PENG C, et al. DuDoNet: dual domain network for CT metal artifact reduction[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 10504-10513.

[21] ZHOU B, CHEN X C, ZHOU S K, et al. DuDoDR-Net: dual-domain data consistent recurrent network for simultaneous sparse view and metal artifact reduction in computed tomography[J]. Medical Image Analysis, 2022, 75: 102289.

[22] WANG T, LU Z X, YANG Z Y, et al. IDOL-Net: an interactive

dual-domain parallel network for CT metal artifact reduction[J]. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2022, 6(8): 874-885.

[23] ADLER J, ÖKTEM O. Learned primal-dual reconstruction[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 37(6): 1322-1332.

[24] ZHANG K, VAN GOOL L, TIMOFTE R. Deep unfolding network for image super-resolution[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 3214-3223.

[25] ZHAO L J, WANG X L, ZHANG J J, et al. Boundary-constrained interpretable image reconstruction network for deep compressive sensing[J]. Knowledge-Based Systems, 2023, 275: 110681.

[26] MOU C, WANG Q, ZHANG J. Deep generalized unfolding networks for image restoration[C]//Proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 17378-17389.

[27] YANG Y, SUN J, LI H B, et al. ADMM-CSNet: a deep learning approach for image compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(3): 521-538.

[28] 耿梦凡, 张虎, 李哲, 等. 基于迭代优化展开的 Cherenkov 激发的荧光扫描成像重建算法[J]. 中国激光, 2023, 50(15): 1507106.

GENG M F, ZHANG H, LI Z, et al. A reconstruction algorithm for Cherenkov-excited luminescence scanning imaging based on unrolled iterative optimization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(15): 1507106(in Chinese).

[29] SONG J C, CHEN B, ZHANG J. Memory-augmented deep unfolding network for compressive sensing[C]//Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM, 2021: 4249-4258.

[30] CHEN H, ZHANG Y, CHEN Y J, et al. LEARN: learned experts' assessment-based reconstruction network for sparse-data CT[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 37(6): 1333-1347.

[31] WU D F, KIM K, EL FAKHRI G, et al. Iterative low-dose CT reconstruction with priors trained by artificial neural network[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2017, 36(12): 2479-2486.

[32] KANG E, CHANG W, YOO J, et al. Deep convolutional framelet denosing for low-dose CT via wavelet residual network[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 37(6): 1358-1369.

[33] GAO Y F, LIANG Z R, MOORE W, et al. A feasibility study of extracting tissue textures from a previous full-dose CT database as prior knowledge for Bayesian reconstruction of current low-dose CT images[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38(8): 1981-1992.

[34] GUPTA H, JIN K H, NGUYEN H Q, et al. CNN-based projected gradient descent for consistent CT image reconstruction[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 37(6): 1440-1453.

[35] CHUN I Y, ZHENG X H, LONG Y, et al. BCD-Net for low-dose CT reconstruction: acceleration, convergence, and generalization[C]//Proceedings of the Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. Berlin: Springer, 2019: 31-40.

[36] SHEN C Y, GONZALEZ Y, CHEN L Y, et al. Intelligent parameter tuning in optimization-based iterative CT reconstruction via deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 37(6): 1430-1439.

[37] 韩泽芳, 上官宏, 张雄, 等. 基于深度学习的低剂量 CT 成像算法研究进展[J]. CT 理论与应用研究, 2022, 31(1): 117-134.

HAN Z F, SHANGGUAN H, ZHANG X, et al. Advances in research on low-dose CT imaging algorithm based on deep learning[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2022, 31(1): 117-134(in Chinese).

[38] GEMAN D, YANG C D. Nonlinear image recovery with half-quadratic regularization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(7): 932-946.

[39] XIANG J X, DONG Y G, YANG Y J. FISTA-Net: learning a fast iterative shrinkage thresholding network for inverse problems in imaging[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2021, 40(5): 1329-1339.

[40] BAUER E, KOHAVI R. An empirical comparison of voting classification algorithms: bagging, boosting, and variants[J]. Machine Learning, 1999, 36(1): 105-139.

[41] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A. Deep learning [M]. Cambridge: MIT Press, 2016.

[42] KYUNGSANG K, LI Z Q, MIN J H, et al. Low dose CT grand challenge[EB/OL]. (2016-06-15)[2024-01-06]. <http://www.aapm.org/GrandChallenge/LowDoseCT/>.

[43] ADLER J, KOHR H, OKTEM O. Operator discretization library (ODL)[EB/OL]. (2017-09-05)[2024-01-06]. <https://github.com/odlgroup/odl>.

[44] CHEN H, ZHANG Y, KALRA M K, et al. Low-dose CT with a residual encoder-decoder convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2017, 36(12): 2524-2535.

[45] JIN K H, MCCANN M T, FROUSTEY E, et al. Deep convolutional neural network for inverse problems in imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(9): 4509-4522.

[46] CHEN G Y, HONG X, DING Q Q, et al. AirNet: fused analytical and iterative reconstruction with deep neural network regularization for sparse-data CT[J]. Medical Physics, 2020, 47(7): 2916-2930.

[47] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization [EB/OL]. (2017-01-30)[2024-01-06]. <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.

[48] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

[49] YAO S S, LIN W S, ONG E, et al. Contrast signal-to-noise ratio for image quality assessment[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing 2005. Piscataway: IEEE Press, 2005: 1-397.

[50] HAN Y, CAI Y Z, CAO Y, et al. A new image fusion performance metric based on visual information fidelity[J]. Information Fusion, 2013, 14(2): 127-135.

A low-dose CT deep unfolding network based on a sparse transform priors constrain

WANG Yue¹, ZHANG Xiong^{1,*}, SHANGGUAN Hong^{1,2}, CUI Xueying¹, ZHANG Pengcheng², GUI Zhiguo²

(1. School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Provincial and Ministerial Co-constructed State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Deep iterative unfolding networks have garnered a lot of attention lately because of their great learning capabilities and good interpretability. The regularization terms in existing CT image reconstruction methods mostly focus on information within a specific domain, leading to issues such as edge blurring and information loss in the reconstructed results. Therefore, a sparse transform prior constrain based deep unfolding network is proposed for sparse-view CT reconstruction. Two regularization terms with complementary information—transform-domain sparse regularization and pixel-domain consistency regularization—are created in consideration of the important roles that both pixel-domain and transform-domain information play in picture reconstruction. Based on these, the objective function for sparse-view CT reconstruction is redesigned. Furthermore, a new deep unfolding network for iterative reconstruction of low-dose CT is created by mapping a set of constraint relationships established from an iterative optimization solution for the constructed objective function. Experimental results demonstrate that the algorithm presented in this paper achieves a great improvement on average peak signal to noise ratio (PSNR) and visual information fidelity (VIF) compared to the classical FISTA algorithms.

Keywords: CT image; sparse-view CT reconstruction; regularization terms; deep unfolding network; iterative reconstruction

Received: 2024-01-22; **Accepted:** 2024-04-08; **Published Online:** 2024-06-04 14:46
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240604.1118.002
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62001321); Fundamental Research Program of Shanxi Province (202103021224265,202303021221144); Graduate Education Innovation Project of Taiyuan University of Science and Technology (SY2022026,XCX212026)

* Corresponding author. E-mail: zx@tyust.edu.cn

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0052

大气层外运载火箭上升段轨迹规划的 保辛伪谱序列凸优化方法

陈虹坤¹, 谭述君^{1, 2, *}, 崔梦真¹, 刘玉玺³

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116024; 2. 大连理工大学
辽宁省空天飞行器前沿技术重点实验室, 大连 116024; 3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 为完成对运载火箭入轨飞行段轨迹的优化, 提高算法的计算效率及收敛性, 从拉格朗日力学出发, 在离散力学与最优控制 (DMOC) 计算方法的基础上结合伪谱法高精度的优点, 推导出伪谱离散拉格朗日方程, 并结合序列凸优化方法提出了基于保辛伪谱序列凸优化的轨迹优化方法。保辛伪谱序列凸优化方法可使离散动力学系统保留原连续系统的结构特征, 同时使离散系统状态变量的维数大幅度降低, 有效提升收敛性及计算效率。仿真结果表明: 相比于经典的伪谱序列凸优化方法, 保辛伪谱序列凸优化方法在不损失精度的情况下大幅度提高了计算效率, 并且对初值扰动具有很好的适应性。

关键词: 运载火箭; 轨迹优化; 保辛; 伪谱法; 序列凸优化

中图分类号: V448.13

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1211-10

近年来, 我国在航空航天领域取得了巨大的突破。嫦娥五号探月工程的圆满成功、天宫实验室的建立及火星探测器“天问一号”的成功着陆等, 表明我国对航天领域的极大重视及人力、物力的巨大投入。运载火箭是目前最主要的航天运载器, 其上升段入轨飞行段作为火箭的最后阶段, 关乎运载火箭能否成功将卫星、载人飞船和其他航天器等送入目标轨道, 故该阶段的轨迹规划问题至关重要。而在此过程中, 各种扰动、不确定性及故障等会导致不能按照原来规划的轨迹精确入轨, 需要在线进行轨迹重新规划, 因此, 针对该阶段研究高效率、高收敛性轨迹规划算法很有必要。

轨迹优化问题的本质是一个连续性的最优控制问题, 针对该类问题的主流解决方法是将连续的最优控制问题离散化处理, 转化为非线性规划问题进行求解。现有的离散方法中, 主要包括零阶保持

离散、梯形离散和伪谱离散。伪谱法最大的优势在于能够用较少的参数得到较高的计算精度, 被广泛应用于轨迹优化问题。对于非线性规划问题, 序列二次规划算法的求解效率低, 并且极易陷入局部最小值, 其应用受到了限制。近年来, 基于凸优化方法的轨迹优化方法成为研究热点^[1]。凸优化方法最早应用于解决特定的最优控制问题^[2-4], 能在多项式时间内得到物理可行问题的全局最优解, 从而使得在线求解轨迹优化成为可能^[5]。张志国等^[6]针对运载火箭垂直回收问题, 对模型进行无损凸化处理, 将原问题转化为二阶锥问题进行求解, 大幅度提高了求解效率。Sagliano^[7]将伪谱法与无损凸优化方法应用于火星着陆段轨迹优化问题, 相比于传统凸优化方法可大幅度提升求解精度。针对垂直回收问题, Wang 等^[8]将伪谱法和序列凸优化方法结合, 在相同离散点情况下大幅度提升了求解精度。Pinson

收稿日期: 2024-01-22; 录用日期: 2024-04-07; 网络出版时间: 2024-04-19 19:49

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240419.1305.003

基金项目: 国家自然科学基金 (11972101)

* 通信作者. E-mail: tansj@dlut.edu.cn

引用格式: 陈虹坤, 谭述君, 崔梦真, 等. 大气层外运载火箭上升段轨迹规划的保辛伪谱序列凸优化方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1211-1220. CHEN H K, TAN S J, CUI M Z, et al. A symplectic pseudo-spectral successive convex optimization method for trajectory planning of ascent stage of exo-atmosphere launch vehicle [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1211-1220 (in Chinese).

等^[9]将序列凸优化应用于不规则小行星软着陆轨迹优化问题,通过松弛技术将非线性最优控制问题转化为松弛问题进行求解,仿真结果表明,该方法具有可靠性高及收敛速度快等特点。林晓辉等^[10]采用凸优化方法求解月球软着陆问题,并结合内点法,仿真结果表明,该方法在收敛速度方面有一定优势,同时具有一定的稳定性。对于运载火箭的飞行入轨段,许多学者针对该阶段出现的推力故障下的自主轨迹规划问题进行了大量研究。宋征宇等^[11]针对该阶段的轨迹优化问题,采用梯形离散动力学方程结合序列凸优化方法快速求解,大幅度减少了轨迹优化问题的求解时间。李源^[12]为简化约束,提高求解效率,在近焦点坐标系下建立入轨段轨迹优化问题,采用伪谱离散动力学方程结合序列凸优化方法进行求解,并结合滚动时域方法和迭代制导切换策略形成制导指令,获得了较高的入轨精度。

上述轨迹优化方法中,针对动力学方程的离散未考虑动力学系统原本的固有结构,对于保守的动力学系统来说,其哈密顿系统具有辛对称的结构,故对动力学方程进行离散时应采用保辛算法保证系统的辛对称结构不变及能量不耗散。而对于存在外部激励及阻尼耗散等非保守力,采用保辛算法求解则能保证系统能量的变化是正确的,不会产生由数值离散引起的耗散^[13]。针对保辛算法,诸多学者进行了大量研究。Marsden 等^[13]在动力学中提出变分积分方法,并广泛应用于空间双连杆机械臂^[14]、无人机编队^[15]和轨道控制^[16]等动力学建模与控制研究中,变分积分方法在解决这些问题时,可以保持结构特性的优势,克服数值方法中的误差累计及能量耗散。之后,Marsden 等^[17]为解决最优控制问题,从达朗贝尔原理出发离散动力学方程,在直接法框架下提出一种基于离散力学与最优控制(discrete mechanics and optimal control, DMOC)的离散方法,该方法不仅使算法计算效率大幅度提高,还兼具保辛的性质。高强等^[18]从间接法出发提出了最优控制系统的保辛算法,基于对偶变分原理,以时间一端状态和另一端协态变量作为独立变量,将最优控制问题转化为非线性方程组的求解。彭海军^[19]将保辛数值方法引入航天器控制应用中,在控制精度和求解效率上都得到了大幅度提升。王昕炜^[20]将伪谱法与计算最优控制问题的保辛方法相结合,提出了非线性最优控制问题的保辛伪谱法,可有效提高计算最优控制问题的计算效率与计算精度。在上述研究中,保辛数值算法已被广泛应用于航空航天领域中,但在运载火箭轨迹优化问题中的应用还比较少见。

本文针对运载火箭入轨飞行段轨迹优化问题,从拉格朗日力学出发,在 DMOC 计算方法的基础上

结合伪谱法高精度的优点,对动力学方程采用保辛离散方法,并结合序列凸优化方法,提出了保辛伪谱序列凸优化方法,可有效提升方法的收敛性与效率。

1 问题描述

1.1 坐标系定义

运载火箭入轨飞行段需在惯性坐标系建立动力学方程。由于终端约束是关于轨道六要素的约束,惯性坐标系选择不同,终端约束的复杂程度也不同。根据在线轨迹规划需求,建立近焦点坐标系^[21],便于终端约束的建立和凸化^[12]。本节定义如下 2 个坐标系:①地心惯性坐标系 $O_1x_1y_1z_1$,原点 O_1 位于地球地心, x_1 轴位于赤道平面指向春分点, z_1 轴为地球自转轴指向北极, y_1 轴与 x_1 轴、 z_1 轴满足右手系法则。②近焦点惯性坐标系 $O_2x_2y_2z_2$,原点 O_2 位于地球地心, x_2 轴位于轨道平面并指向近地点方向, z_2 轴指向轨道动量矩方向, y_2 轴与 x_2 轴、 z_2 轴满足右手系法则,可得 z_2 轴垂直于轨道平面。 x_2 轴和 y_2 轴位于轨道平面。近焦点坐标系如图 1 所示。

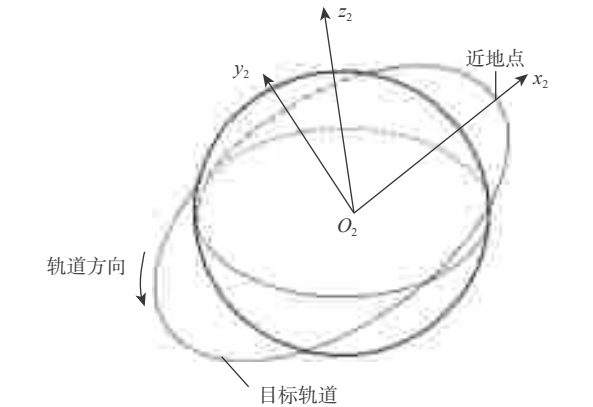


图 1 近焦点坐标系

Fig. 1 Perifocal coordinate system

1.2 动力学方程

本节在近焦点坐标系中建立火箭的上升段二级飞行动力学方程^[22]。在该阶段,大气稀薄,不考虑气动力,推力大小为常值,火箭的质心运动方程、动力学方程和质量消耗方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{V} \\ \dot{\boldsymbol{V}} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{u}/m - \mu\boldsymbol{r}/\|\boldsymbol{r}\|^3 \\ \dot{m} = -P/(I_{sp}g_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{r} = [x \ y \ z]^T$ 、 $\boldsymbol{V} = [V_x \ V_y \ V_z]^T$ 分别为火箭质心在赤道坐标系下的位置坐标、速度; $\boldsymbol{u} = [u_x \ u_y \ u_z]^T$ 为赤道坐标系下推力方向矢量; m 为火箭质量; P 为火箭推力幅值; μ 为地球引力常数; I_{sp} 为火箭发动机比冲; g_0 为地球重力加速度。定义 $\boldsymbol{S} = [\boldsymbol{r}^T \ \boldsymbol{V}^T \ m]^T$ 为状态变量, $\boldsymbol{u}$ 为控制变量, $\boldsymbol{u}$ 需要满足物理可行约束,即

$$\|u\|_2 = 1 \tag{2}$$

1.3 轨迹优化问题

在该阶段中, 轨迹优化问题可以描述为运载火箭从初始状态出发, 以运载火箭推力方向矢量作为控制变量, 在满足推力方向矢量约束与动力学方程约束条件下, 以最少燃料消耗为性能指标进入目标轨道的过程, 即

$$J = -m_f \tag{3}$$

其中, 初始状态约束可以表达为

$$S_0 = S(t_0) \tag{4}$$

在赤道坐标系下进入目标轨道的终端约束可以隐式表达为

$$R(S_f) = [a_{tg} \quad e_{tg} \quad i_{tg} \quad \Omega_{tg} \quad \omega_{tg}]^T \tag{5}$$

式中: 下标 0 表示初始时刻; 下标 f 表示终端时刻; a_{tg} 为目标轨道半长轴; e_{tg} 为目标轨道偏心率; i_{tg} 为目标轨道的轨道倾角; Ω_{tg} 为目标轨道升交点经度; ω_{tg} 为目标轨道近地点幅角。

终端约束在赤道坐标系下的表达式较复杂, 对后续求解不利, 在近焦点坐标系下描述终端约束可以降低其复杂程度, 因此可以转化为近焦点坐标系下的表达式, 如下:

$$\begin{cases} z_f = 0 \\ V_{zf} = 0 \\ x_f V_{yf} - y_f V_{xf} - h_{tg} = 0 \\ \frac{h_{tg} V_{yf}}{\mu} - \frac{x_f}{\sqrt{x_f^2 + y_f^2}} - e_{tg} = 0 \\ -\frac{h_{tg} V_{xf}}{\mu} - \frac{y_f}{\sqrt{x_f^2 + y_f^2}} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

式中: $h_{tg} = \sqrt{\mu a_{tg} (1 - e_{tg}^2)}$ 为目标轨道的动量矩。

在近焦点坐标系下, 运载火箭二级入轨飞行段轨迹优化问题可以表示为

$$\min J = -m_f$$

s.t.

Dynamics:

$$\begin{cases} \dot{r} = V \\ \dot{V} = Pu/m - \mu r/\|r\|^3 \\ \dot{m} = -P/(I_{sp} g_0) \end{cases}$$

Constraints:

$$\begin{cases} \|u\|_2 = 1 \\ S_0 = S(t_0) \\ z_f = 0 \\ V_{zf} = 0 \\ x_f V_{yf} - y_f V_{xf} - h_{tg} = 0 \\ \frac{h_{tg} V_{yf}}{\mu} - \frac{x_f}{\sqrt{x_f^2 + y_f^2}} - e_{tg} = 0 \\ -\frac{h_{tg} V_{xf}}{\mu} - \frac{y_f}{\sqrt{x_f^2 + y_f^2}} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

2 保辛伪谱序列凸优化

2.1 保辛的概念

针对保守动力学系统, 从哈密顿力学出发可得正则方程为

$$\begin{cases} \dot{q} = \partial H / \partial p \\ \dot{p} = -\partial H / \partial q \end{cases} \tag{8}$$

式 (8) 也为系统的动力学方程。式中: H 为系统的哈密顿函数; $q \in \mathbf{R}^n$ 为系统广义位移; $p \in \mathbf{R}^n$ 为系统的广义动量。

将哈密顿系统广义位移和广义动量具有类似对称的性质称为辛对称, 引入变量 $v = [q^T, p^T]^T$, 则式 (8) 可以表示为

$$\dot{v} = J_s \partial H / \partial v \tag{9}$$

式中: $J_s \in \mathbf{R}^{2n \times 2n}$ 为单位辛矩阵, 表达式为

$$J_s = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -I_{n \times n} & 0_{n \times n} \end{bmatrix} \tag{10}$$

上述是对连续哈密顿系统进行辛对称的定义, 而求解该系统的数值算法是在离散系统下进行的, 因此, 在该系统离散时, 也需要考虑原哈密顿系统辛对称的性质。针对哈密顿系统的求解, 假设一种数值算法可以使系统相邻离散节点处的变量满足:

$$v_{k+1} = \Lambda(v_k) \tag{11}$$

式中: v_k 为第 k 个时间节点处的系统变量; Λ 为状态空间的映射函数, 其雅可比矩阵 K 可以表示为

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_{k+1}}{\partial q_k} & \frac{\partial q_{k+1}}{\partial p_k} \\ \frac{\partial p_{k+1}}{\partial q_k} & \frac{\partial p_{k+1}}{\partial p_k} \end{bmatrix} \tag{12}$$

若雅可比矩阵 K 满足:

$$K^T J_s K = J_s \tag{13}$$

则说明该算法是保辛的。辛对称是保守动力学系统非常重要的一个性质, 离散数值算法需具备保辛性质。

2.2 保辛伪谱离散

对于连续最优控制问题的求解十分困难, 目前, 最常见的处理方式是将连续的最优控制问题离散, 转化为非线性规划问题进行求解。针对非线性规划问题, 可以采用序列二次规划算法等成熟的非线性规划算法快速求解。常见的伪谱离散及梯形离散等方法直接针对动力学方程进行离散时, 未考虑原系统结构的特性, 会在离散过程中造成不必要的能量耗散。在拉格朗日变分体系下, 对保守系统的变分离散能保证原连续系统固有结构的性质, 而对含有非保守系统的离散则能保证系统能量的变化是正确的, 不会产生由数值离散引起的耗散。本节

在 DMOC 方法的基础上结合伪谱法高精度的优点,在拉格朗日力学体系下推导出保辛伪谱离散动力学方程,并结合序列凸优化方法提出了求解运载火箭入轨飞行段轨迹优化问题的保辛伪谱序列凸优化方法。

从拉格朗日力学出发,假设系统的拉格朗日量可以表示为

$$L = T - U \tag{14}$$

式中: T 为系统动能; U 为系统势能。

系统受到非保守力 f , 根据最小作用量原理, 可得

$$\delta \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) dt + \int_{t_0}^{t_f} \delta \mathbf{r}^T \mathbf{f}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) dt = 0 \tag{15}$$

式 (15) 变分后得

$$\int_{t_0}^{t_f} \delta \mathbf{r}^T \left[\frac{\partial L}{\partial \mathbf{r}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \right) + \mathbf{f} \right] dt + \delta \mathbf{r}^T \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \Big|_{t_0}^{t_f} = 0 \tag{16}$$

考虑 $\delta \mathbf{r}^T$ 的任意性, 可以推导出拉格朗日方程为

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{r}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \right) + \mathbf{f} = \mathbf{0} \tag{17}$$

式 (17) 即为连续系统动力学方程。Marsden 等^[17]从方程 (15) 出发, 采用差分离散将动力学方程离散化, 提出了离散动力学方程具有保辛性质的 DMOC 方法, 考虑到伪谱法具有高精度的性质, 本文将 DMOC 方法和伪谱法结合, 推导具有保辛性质的离散动力学方程。

将时间区间从 $t \in [t_0, t_f]$ 转化为 $\tau \in [-1, 1]$, 最小作用原理转化为

$$\frac{t_f - t_0}{2} \delta \int_{-1}^1 L(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \tau) d\tau + \frac{t_f - t_0}{2} \int_{-1}^1 \delta \mathbf{r}^T \mathbf{f}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \tau) d\tau = 0 \tag{18}$$

将式 (18) 中位置矢量、位置矢量导数进行 Radau 伪谱点处拉格朗日插值处理, 如下:

$$\begin{cases} \mathbf{r} = \sum_{i=0}^K l_i(\tau) \mathbf{r}_i \\ \dot{\mathbf{r}} = \sum_{i=0}^K D_i(\tau) \mathbf{r}_i \end{cases} \tag{19}$$

式中: 插值函数 $l_i(\tau)$ 与微分矩阵元素 $D_i(\tau)$ 的表达式为

$$\begin{cases} l_i(\tau) = \prod_{j \neq i, j=0}^K \frac{\tau - \tau_j}{\tau_i - \tau_j} \\ D_i(\tau) = \frac{dl_i(\tau)}{d\tau} \end{cases} \tag{20}$$

将式 (19) 代入式 (18) 中, 得

$$\begin{aligned} & \frac{t_f - t_0}{2} \delta \int_{-1}^1 L(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_K, \tau) d\tau + \\ & \frac{t_f - t_0}{2} \int_{-1}^1 \delta \left[\sum_{i=0}^K l_i(\tau) \mathbf{r}_i^T \right] \mathbf{f}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_K, \tau) d\tau = 0 \end{aligned} \tag{21}$$

将式 (21) 中积分项采用节点处高斯积分, 得

$$\frac{t_f - t_0}{2} \left\{ \sum_{k=0}^K w_k \left(\sum_{i=0}^K \delta \mathbf{r}_i^T \frac{\partial L_k}{\partial \mathbf{r}_i} \right) + \sum_{k=0}^K w_k \delta \mathbf{r}_k^T \mathbf{f}_k \right\} = 0 \tag{22}$$

式中: 下标 k 表示在 τ_k 处的取值; w_k 为第 k 个 Radau 伪谱点对应的权重。

式 (22) 整理后得

$$\sum_{i=0}^K \delta \mathbf{r}_i^T \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial L_k}{\partial \mathbf{r}_i} + w_i \mathbf{f}_i \right] = 0 \tag{23}$$

$\mathbf{r}_i (i = 1, 2, \dots, K-1)$ 是自由变化的, 故取 $\delta \mathbf{r}_i^T$ 前的系数为 0, 得到

$$\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial L_k}{\partial \mathbf{r}_i} + w_i \mathbf{f}_i = \mathbf{0} \quad i = 1, 2, \dots, K-1 \tag{24}$$

式 (24) 即为伪谱离散拉格朗日方程, 由于该离散方法是在拉格朗日力学体系下进行离散的, 该类离散方法具有保辛性质, 故该离散方程也为保辛伪谱离散动力学方程。

当求解轨迹优化问题时, 若初始状态和末端状态位置矢量导数有约束, 可以采用勒让德变换, 得

$$\begin{cases} -\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \Big|_{t_0} = \frac{t_f - t_0}{2} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial L_k}{\partial \mathbf{r}_0} + w_0 \mathbf{f}_0 \right] \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \Big|_{t_f} = \frac{t_f - t_0}{2} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial L_k}{\partial \mathbf{r}_K} + w_K \mathbf{f}_K \right] \end{cases} \tag{25}$$

为了从最小作用量原理导出与式 (1) 描述一致的动力学方程, 本文给出修正拉格朗日量和修正非保守力, 如下:

$$\begin{cases} \tilde{L} = \|\dot{\mathbf{r}}\|^2/2 + \mu \|\mathbf{r}\| \\ \tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{P}\mathbf{u}/m \end{cases} \tag{26}$$

可以验证, 将式 (26) 代入拉格朗日方程即可得到运载火箭动力学方程。从哈密顿力学出发, 推导其动力学方程, 取

$$\begin{cases} \mathbf{q} = \mathbf{r} \\ \mathbf{p} = \dot{\mathbf{r}} \\ \tilde{L} = \dot{\mathbf{q}}^T \dot{\mathbf{q}}/2 + \mu \|\mathbf{q}\| \\ \tilde{H}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \mathbf{p}^T \dot{\mathbf{q}} - \tilde{L}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \end{cases} \tag{27}$$

故最小作用量原理可以等价

$$\delta \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{p}^T \dot{\mathbf{q}} - \tilde{H}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dt + \int_{t_0}^{t_f} \delta \mathbf{q}^T \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dt = 0 \tag{28}$$

变分后可以得到

$$\begin{aligned} & \delta \int_{t_0}^{t_f} \delta \mathbf{p}^T (\dot{\mathbf{q}} - \partial \tilde{H} / \partial \mathbf{p}) - \delta \mathbf{q}^T (\partial \tilde{H} / \partial \mathbf{q} + \dot{\mathbf{p}} - \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{q})) dt + \\ & \mathbf{p}^T \delta \mathbf{q} \Big|_{t_0}^{t_f} = 0 \end{aligned} \tag{29}$$

取积分域内 $\delta \mathbf{q}^T$ 和 $\delta \mathbf{p}^T$ 前的系数为 0, 得到哈密顿体系下的动力学方程为

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{J}_s \frac{\partial H}{\partial \mathbf{v}} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \end{bmatrix} \tag{30}$$

由式 (30) 可知, 运载火箭动力学方程相比于式 (9) 多出外部激励项, 采用上述基于拉格朗日体系下的变分保辛算法求解能保证系统能量的变化是正确的, 不会产生由数值离散引起的耗散。将式 (26) 的时域转化到 $[-1, 1]$ 并代入式 (24) 和式 (25) 中, 即可得到运载火箭动力学方程保辛伪谱离散方法的离散形式及初始速度约束的勒让德变换, 即

$$\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial \mathbf{r}_i} + w_i \tilde{\mathbf{f}}_i = \mathbf{0} \quad i = 1, 2, \dots, K-1 \tag{31}$$

$$\begin{cases} \mathbf{V}_0 = -\frac{t_f - t_0}{2} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial \mathbf{r}_0} + w_0 \tilde{\mathbf{f}}_0 \right] \\ \mathbf{V}_f = \frac{t_f - t_0}{2} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial \mathbf{r}_K} + w_K \tilde{\mathbf{f}}_K \right] \end{cases} \tag{32}$$

式中: $\frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial \mathbf{r}_i}$ 可以表示为

$$\frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial \mathbf{r}_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial x_i} & \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial y_i} & \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial z_i} \end{bmatrix}^T \tag{33}$$

其中: $\frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial x_i}$ 的展开式为

$$\frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial x_i} = \begin{cases} \left[\left(\sum_{l=0}^K D_l(\tau_k) x_l \right) D_i(\tau_k) \right] \left(\frac{2}{t_f - t_0} \right)^2 & i \neq k \\ \frac{\mu x_i}{[x_i^2 + y_i^2 + z_i^2]^{1.5}} & i = k \end{cases} \tag{34}$$

$\frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial y_i}$ 与 $\frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial z_i}$ 的展开式与 $\frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial x_i}$ 类似, 为简洁此处不再描述。针对质量方程及过程约束, 可直接采用伪谱离散方式, 其展开式为

$$\sum_{k=0}^K D_{ik} \dot{\mathbf{r}}_k + \frac{t_f - t_0}{2} \cdot \frac{\mathbf{P} \mathbf{u}_i}{I_{sp} g_0} = \mathbf{0} \quad i = 1, 2, \dots, K \tag{35}$$

$$\|\mathbf{u}_i\|_2 = 1 \quad i = 1, 2, \dots, K \tag{36}$$

将式 (32) 代入式 (4) 中得到离散状态下的初始约束, 展开式为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}(t_0) = \mathbf{0} \\ -\frac{t_f - t_0}{2} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial \mathbf{r}_0} + w_0 \tilde{\mathbf{f}}_0 \right] - \mathbf{V}(t_0) = \mathbf{0} \\ m_0 - m(t_0) = 0 \end{cases} \tag{37}$$

将式 (32) 代入式 (6) 中得到离散状态下的终端约束, 展开式为

$$\begin{cases} z_K = 0 \\ V_{zK} = 0 \\ x_K \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial y_K} + w_K \tilde{f}_{yK} \right] - \\ y_K \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial x_K} + w_K \tilde{f}_{xK} \right] - \frac{2}{t_f - t_0} h_{tg} = 0 \\ h_{tg} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial L_k}{\partial y_K} + w_K \tilde{f}_{yK} \right] - \\ \frac{\mu}{\frac{2}{t_f - t_0} \left[\frac{x_K}{\sqrt{x_K^2 + y_K^2}} + e_{tg} \right]} = 0 \\ h_{tg} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial L_k}{\partial x_K} + w_K \tilde{f}_{xK} \right] - \frac{2}{t_f - t_0} \cdot \frac{y_K}{\sqrt{x_K^2 + y_K^2}} = 0 \end{cases} \tag{38}$$

经过以上转化, 可将轨迹优化问题转化为一系列参数优化问题^[23], 连续系统轨迹优化模型 (7) 转化为非线性规划问题, 如下:

$$\begin{aligned} \min J &= -m_K \\ \text{s.t.} \\ \text{Dynamics:} \\ \sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial \mathbf{r}_i} + w_i \tilde{\mathbf{f}}_i &= \mathbf{0} \quad i = 1, 2, \dots, K-1 \\ \text{Constraints:} \\ \sum_{k=0}^K D_{ik} \dot{\mathbf{r}}_k + \frac{t_f - t_0}{2} \cdot \frac{\mathbf{P} \mathbf{u}_i}{I_{sp} g_0} &= \mathbf{0} \quad i = 1, 2, \dots, K \\ \|\mathbf{u}_i\|_2 &= 1 \quad i = 1, 2, \dots, K \\ \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}(t_0) &= \mathbf{0} \\ -\frac{t_f - t_0}{2} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial \mathbf{r}_0} + w_0 \tilde{\mathbf{f}}_0 \right] - \mathbf{V}(t_0) &= \mathbf{0} \\ m_0 - m(t_0) &= 0 \\ z_K &= 0 \\ V_{zK} &= 0 \\ x_K \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial y_K} + w_K \tilde{f}_{yK} \right] - \\ y_K \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial \tilde{L}_k}{\partial x_K} + w_K \tilde{f}_{xK} \right] - \frac{2}{t_f - t_0} h_{tg} &= 0 \\ h_{tg} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial L_k}{\partial y_K} + w_K \tilde{f}_{yK} \right] - \\ \frac{\mu}{\frac{2}{t_f - t_0} \left[\frac{x_K}{\sqrt{x_K^2 + y_K^2}} + e_{tg} \right]} &= 0 \\ h_{tg} \left[\sum_{k=0}^K w_k \frac{\partial L_k}{\partial x_K} + w_K \tilde{f}_{xK} \right] - \frac{2}{t_f - t_0} \cdot \frac{y_K}{\sqrt{x_K^2 + y_K^2}} &= 0 \end{aligned} \tag{39}$$

优化变量 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}^T \ \mathbf{y}^T \ \mathbf{z}^T \ \mathbf{m}^T \ \mathbf{u}_x^T \ \mathbf{u}_y^T \ \mathbf{u}_z^T \ t_f^T]^T$, 其中, $\mathbf{x}^T$ 为位置矢量分量 x 在离散节点处的值形成的列向量, 优化变量中的其他参数与 $\mathbf{x}^T$ 表示的含义类似。

2.3 序列凸优化处理

对于非线性规划问题 (39), 可以采用序列二次规划算法直接求解, 但该算法求解速度慢, 对于初值的选取较为敏感, 收敛性较差, 不满足在线求解要求。凸优化方法全局寻优且求解效率高, 但轨迹优化模型 (39) 中存在很多非凸约束, 因此, 需要对非线性规划问题 (39) 中的非凸约束进行凸化处理, 而本算例中终端时间自由, 故采用序列凸优化方法处理。序列凸优化方法的思想是将原问题中的非凸项线性化, 而最常用的线性化方法就是在迭代初始值处进行一阶泰勒展开, 得到原问题在展开点处的近似子问题, 通过求解一系列凸优化子问题, 获得逐步逼近原问题的解^[24]。

在非线性规划问题 (39) 中, 除了性能指标外, 其他约束均不是凸约束, 路径约束为球壳约束:

$$\sqrt{u_{xk}^2 + u_{yk}^2 + u_{zk}^2} = 1 \tag{40}$$

将式 (40) 进行松弛处理, 即

$$\|\mathbf{u}_k\| \leq 1 \tag{41}$$

根据文献 [12] 中对推力幅值无损凸化方法的证明可知, 式 (40) 与式 (41) 是等价的, 而式 (41) 是二阶锥约束, 也是凸约束。为方便描述, 记动力学方程约束 (31) 为 $\mathbf{F}_{\text{dyn}} = \mathbf{0}$, 其线性化后的约束为

$$\mathbf{A}_{\text{dyn}}\mathbf{X} + \mathbf{b}_{\text{dyn}} = \mathbf{0} \tag{42}$$

式中: $\mathbf{A}_{\text{dyn}} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}_{\text{dyn}}}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\bar{\mathbf{X}}}$; $\mathbf{b}_{\text{dyn}} = \mathbf{F}_{\text{dyn}}|_{\bar{\mathbf{X}}} - \left. \frac{\partial \mathbf{F}_{\text{dyn}}}{\partial \mathbf{X}} \mathbf{X} \right|_{\bar{\mathbf{X}}}$; $\bar{\mathbf{X}}$ 为初始迭代值。

记质量消耗方程约束 (35) 为 $\mathbf{F}_m = \mathbf{0}$, 其线性化后的约束为

$$\mathbf{A}_m\mathbf{X} + \mathbf{b}_m = \mathbf{0} \tag{43}$$

式中: $\mathbf{A}_m = \left. \frac{\partial \mathbf{F}_m}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\bar{\mathbf{X}}}$; $\mathbf{b}_m = \mathbf{F}_m|_{\bar{\mathbf{X}}} - \left. \frac{\partial \mathbf{F}_m}{\partial \mathbf{X}} \mathbf{X} \right|_{\bar{\mathbf{X}}}$ 。

记初始条件约束 (37) 为 $\mathbf{F}_{\text{ini}} = \mathbf{0}$, 其线性化后的约束为

$$\mathbf{A}_{\text{ini}}\mathbf{X} + \mathbf{b}_{\text{ini}} = \mathbf{0} \tag{44}$$

式中: $\mathbf{A}_{\text{ini}} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}_{\text{ini}}}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\bar{\mathbf{X}}}$; $\mathbf{b}_{\text{ini}} = \mathbf{F}_{\text{ini}}|_{\bar{\mathbf{X}}} - \left. \frac{\partial \mathbf{F}_{\text{ini}}}{\partial \mathbf{X}} \mathbf{X} \right|_{\bar{\mathbf{X}}}$ 。

记终端条件约束 (38) 为 $\mathbf{F}_{\text{ter}} = \mathbf{0}$, 其线性化后的约束为

$$\mathbf{A}_{\text{ter}}\mathbf{X} + \mathbf{b}_{\text{ter}} = \mathbf{0} \tag{45}$$

式中: $\mathbf{A}_{\text{ter}} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}_{\text{ter}}}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\bar{\mathbf{X}}}$; $\mathbf{b}_{\text{ter}} = \mathbf{F}_{\text{ter}}|_{\bar{\mathbf{X}}} - \left. \frac{\partial \mathbf{F}_{\text{ter}}}{\partial \mathbf{X}} \mathbf{X} \right|_{\bar{\mathbf{X}}}$ 。

优化模型 (39) 转化为二阶锥问题 (SOCP 问题):

$$\begin{aligned} \min J &= -m_K \\ \text{s.t.} \\ \text{Dynamics:} \\ \mathbf{A}_{\text{dyn}}\mathbf{X} + \mathbf{b}_{\text{dyn}} &= \mathbf{0} \\ \text{Constraints:} \\ \begin{cases} \|\mathbf{u}_k\| \leq 1 \\ \mathbf{A}_m\mathbf{X} + \mathbf{b}_m = \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{\text{ini}}\mathbf{X} + \mathbf{b}_{\text{ini}} = \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{\text{ter}}\mathbf{X} + \mathbf{b}_{\text{ter}} = \mathbf{0} \end{cases} \end{aligned} \tag{46}$$

至此凸化处理完成, 将求解优化模型 (46) 得到的解 $\mathbf{X}$ 作为新的 $\bar{\mathbf{X}}$, 不断求解优化模型 (46), 直到满足收敛条件。

3 仿真分析

本节仿真对所提出的保辛伪谱序列凸优化方法进行验证, 并与经典的伪谱序列凸优化方法进行对比, 分析方法的计算效率、计算精度及收敛性能。

仿真算例为运载火箭在入轨前大气层外二级飞行段轨迹优化问题, 在仿真实验中, 初始位置为 $\mathbf{r}_0 = [2\ 054\ 569.6, -2\ 801\ 426.2, -6\ 936\ 281.9]^T$ m, 初始速度为 $\mathbf{V}_0 = [648.2, -4\ 218.7, 497.7]^T$ m/s, 目标轨道参数及部分仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters	
参数	数值
a_{ig}/m	7 218 871.485
e_{ig}	0.001 503
$i_{\text{ig}}/(^{\circ})$	42
$\Omega_{\text{ig}}/(^{\circ})$	288.528 6
$\omega_{\text{ig}}/(^{\circ})$	155.738 4
P/kN	150
I_{sp}/s	342.786 4
m_0/kg	29 125.718
R_c/m	6 378 140
$g_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.806 6
$\mu/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2})$	3.986×10^{14}

求解 SOCP 问题 (46) 可采用成熟的求解器, 如 ECOS、CVX 等, 本文仿真结果均是在 MATLAB 编程语言下, 由 ECOS 求解器求解得到的, 收敛误差为 1×10^{-9} , 选取 40 个离散点数。为仿真配置 3.70 GHz i5-12600KF 处理器、16 GB 内存的 PC 机。为了提高收敛性, 初始迭代参数采用 4 个离散点的优化结果的线性插值得到。为验证本文方法

结果的正确性与优势, 将其与经典伪谱序列凸优化方法的仿真结果进行对比。

仿真曲线如图 2~图 5 所示, 分别表示近焦点坐标系下推力分量与推力的比值、位置、质量及速

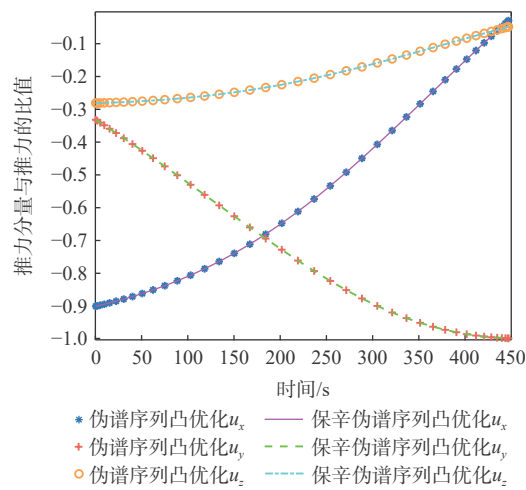


图 2 推力分量与推力的比值-时间曲线

Fig. 2 Ratio of thrust components to thrust-time curves

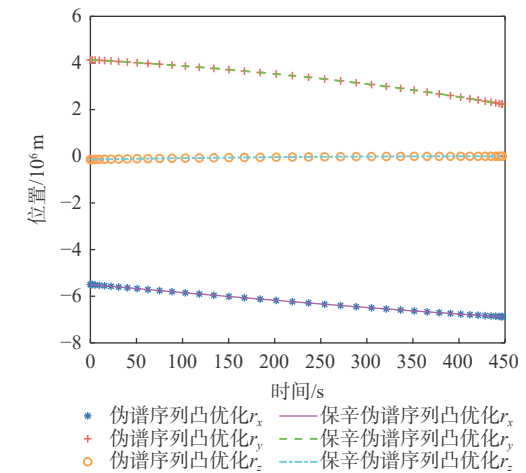


图 3 位置-时间曲线

Fig. 3 Position-time curves

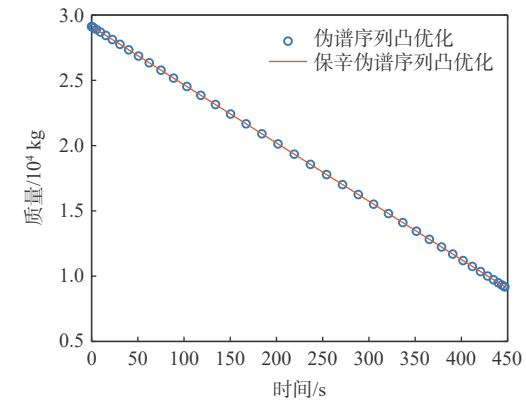


图 4 质量-时间曲线

Fig. 4 Quality-time curves

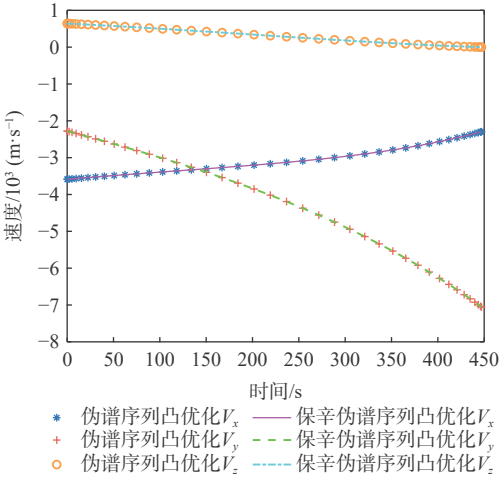


图 5 速度-时间曲线

Fig. 5 Velocity-time curves

度随时间的变化。可见, 保辛伪谱序列凸优化方法与伪谱序列凸优化方法的仿真曲线几乎重合, 说明了保辛伪谱序列凸优化方法的正确性。

保辛伪谱序列凸优化方法与伪谱序列凸优化方法的计算效率如表 2 所示, 表中数据为统计 1 000 次获得的平均数据, ECOS 求解器总耗时为求解一次轨迹规划问题迭代 6 次 ECOS 求解器花费的总时间, 计算总时间为 MATLAB 代码第一行到最后一行的运行总耗时。采用保辛伪谱序列凸优化方法的 ECOS 求解器需要 58.7 ms, 而伪谱序列凸优化方法则需要 110.7 ms, 这是因为保辛伪谱序列凸优化方法对动力学方程的离散能保证系统能量正确变化, 且优化变量比伪谱离散方法更少, 因此, 保辛伪谱序列凸优化方法的计算总时间大幅度缩短, 只需要伪谱序列凸优化方法计算时间的 54.1%。

表 2 计算效率

Table 2 Calculate efficiency

计算方法	迭代次数	ECOS求解器 总耗时/ms	计算 总时间/ms
伪谱序列凸优化	6	110.7	116.6
保辛伪谱序列凸优化	6	58.7	63.1

为了对比 2 种方法的入轨精度, 将得到的离散点处的推力方向矢量与质量采用拉格朗日插值得到其他时间点处的值, 并将其代入 MATLAB 微分求解器 ode45 中进行积分, 得到 2 种方法的入轨误差, 如表 3 所示。可见, 保辛伪谱序列凸优化方法和伪谱序列凸优化方法在求解偏心率、轨道倾角、经度、半长轴与真近角时的精度都很高, 均能满足入轨要求, 二者精度几乎在一个数量级且相差不大, 说明保辛伪谱序列凸优化方法相比于伪谱序列

表 3 入轨误差
Table 3 Orbital insertion

计算方法	$\Delta a/\text{m}$	Δe	$\Delta i/^{\circ}$	$\Delta \Omega/^{\circ}$	$\Delta \omega/^{\circ}$
伪谱序列凸优化	-0.195 8	$2.991\ 0\times 10^{-8}$	$-6.146\ 8\times 10^{-8}$	$-4.184\ 0\times 10^{-8}$	0.221 9
保辛伪谱序列凸优化	-0.322 6	$2.233\ 2\times 10^{-8}$	$-4.110\ 5\times 10^{-8}$	$-8.650\ 0\times 10^{-8}$	0.221 0

凸优化方法,可在不损失精度的情况下大幅度提高计算效率。

上述仿真计算中,在初始状态没有扰动的情況下采用 4 个离散点下的解作为初始迭代值时,2 种方法均在第 6 次收敛。但在实际飞行过程中,飞行器初始状态往往会受到扰动,而初始迭代值是未经扰动得到的值,因此,需要考验方法对初始状态扰动的适应性。做如下初始扰动处理:初始位置 1 000 m 以内随机扰动,初始速度 500 m/s 以内随机扰动,初始质量 1 000 kg 以内随机扰动。对该扰动处理进行 10 000 次试验,得到 2 种方法收敛所需迭代次数统计图,如图 6 所示。测试样本 CPU 计算时间如图 7 所示。由图 6 可见,当初始状态出现上述扰动情况时,2 种方法对所有样本均能在 5~9 次内收敛;其中,迭代次数≤7 的样本中,保辛伪谱序列凸优化方法和伪谱序列凸优化方法的占比分别为 93.71% 和 84.65%,说明保辛伪谱序列凸优化方法具有更好的收敛速度。由图 7 可知,伪谱序列凸优化方法平均耗时 121 ms,保辛伪谱序列凸优化方法平均耗时 69 ms,保辛伪谱序列凸优化方法的 CPU 计算时间相比于伪谱序列凸优化方法减少了 43.0%。从 99% 分位线可以看出,伪谱序列凸优化方法处于 167 ms,保辛伪谱序列凸优化方法处于 89 ms,相比于伪谱序列凸优化方法,保辛伪谱序列凸优化方法时间减少 46.7%,说明即使初始状态受到扰动,本文方法也能大幅度提高计算效率。

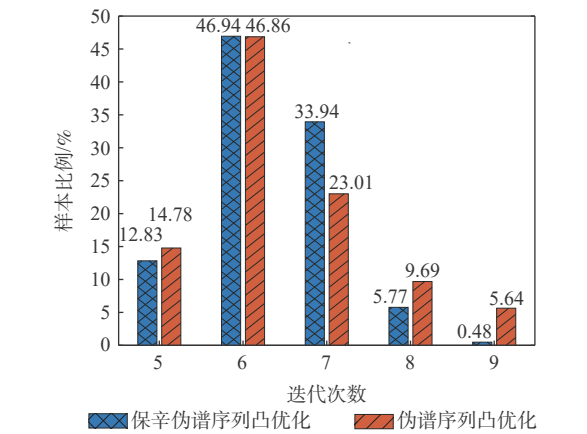


图 6 收敛所需迭代次数
Fig. 6 Number of iterations required for convergence

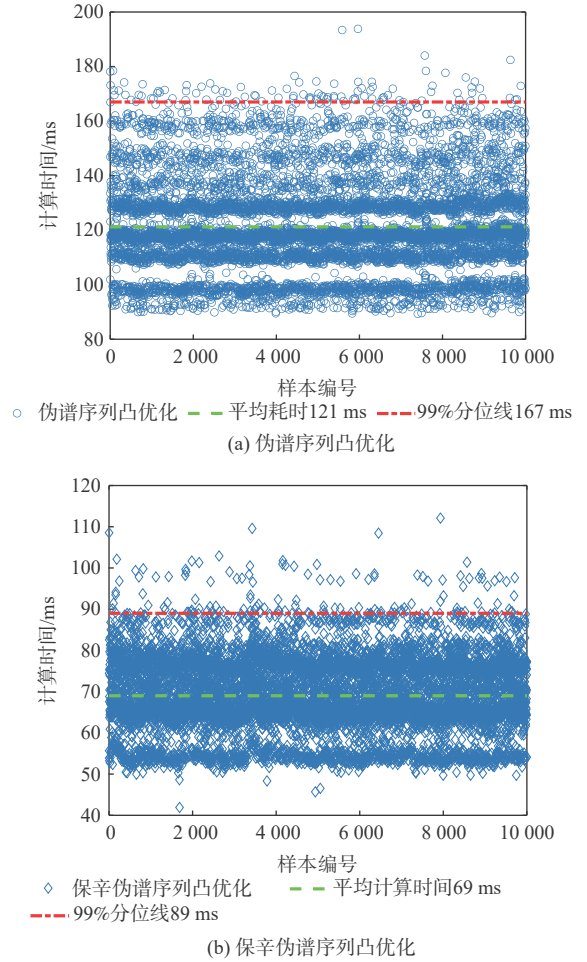


图 7 测试样本 CPU 计算时间
Fig. 7 Test CPU computing time

4 结 论

本文针对运载火箭入轨飞行段的轨迹优化问题,提出了基于保辛伪谱序列凸优化的在线轨迹规划方法。

1) 在 DMOC 方法的基础上结合伪谱法高精度的优点,并将动力学方程采用保辛离散方法,结合序列凸优化提出了保辛伪谱序列凸优化方法。

2) 仿真结果显示,相比于经典的伪谱序列凸优化方法,本文所提出的保辛伪谱序列凸优化方法在不损失精度的情况下大幅度地提高了计算效率,对于在线轨迹的规划具有一定的指导意义。

参考文献 (References)

[1] 王嘉伟,张冉,郝泽明,等. 基于 Proximal-Newton-Kantorovich 凸

规划的空天飞行器实时轨迹优化[J]. 航空学报, 2020, 41(11): 121-130.

WANG J W, ZHANG R, HAO Z M, et al. Real-time trajectory optimization for hypersonic vehicles with Proximal-Newton-Kantorovich convex programming[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(11): 121-130(in Chinese).

[2] AÇIKMEŞE B, BLACKMORE L. Lossless convexification of a class of optimal control problems with non-convex control constraints[J]. *Automatica*, 2011, 47(2): 341-347.

[3] HARRIS M W, AÇIKMEŞE B. Lossless convexification of non-convex optimal control problems for state constrained linear systems[J]. *Automatica*, 2014, 50(9): 2304-2311.

[4] ZHANG Z, WANG J, LI J. Lossless convexification of nonconvex MINLP on the UAV pathplanning problem[J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2018, 39(2): 845-859.

[5] 宋雨, 张伟, 苗新元, 等. 可回收火箭动力着陆段在线制导算法[J]. 清华大学学报, 2021, 61(3): 230-239.

SONG Y, ZHANG W, MIAO X Y, et al. Onboard guidance algorithm for the powered landing phase of a reusable rocket[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2021, 61(3): 230-239(in Chinese).

[6] 张志国, 马英, 耿光有, 等. 火箭垂直回收着陆段在线制导凸优化方法[J]. 弹道学报, 2017, 29(1): 9-16.

ZHANG Z G, MA Y, GENG G Y, et al. Convex optimization method used in the landing-phase on-line guidance of rocket vertical recovery[J]. *Journal of Ballistics*, 2017, 29(1): 9-16(in Chinese).

[7] SAGLIANO M. Pseudospectral convex optimization for powered descent and landing[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, 41(2): 320-334.

[8] WANG J B, CUI N G. A pseudospectral-convex optimization algorithm for rocket landing guidance[C]//*Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Reston: AIAA, 2018: 8-12.

[9] PINSON R, LU P. Trajectory design employing convex optimization for landing on irregularly shaped asteroids[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2018, 41(6): 1243-1256.

[10] 林晓辉, 于文进. 基于凸优化理论的含约束月球定点着陆轨道优化[J]. 宇航学报, 2013, 34(7): 901-908.

LIN X H, YU W J. Constrained trajectory optimization for lunar pin-point landing based on convex optimization theory[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(7): 901-908(in Chinese).

[11] 宋征宇, 王聪, 巩庆海. 运载火箭上升段推力下降故障的自主轨迹规划方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(11): 1472-1487.

SONG Z Y, WANG C, GONG Q H. Autonomous trajectory planning for launch vehicle under thrust drop failure[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2019, 49(11): 1472-1487(in Chinese).

[12] 李源. 运载火箭动力故障下在线轨迹规划与自适应制导方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 53-73.

LI Y. Research on online trajectory optimization and adaptive guidance for power system fault of launch vehicle[D]. Harbin: Harbin Institution of Technology, 2022: 53-73(in Chinese).

[13] MARSDEN J E, WEST M. Discrete mechanics and variational integrators[J]. *Acta Numerica*, 2001, 10: 357-514.

[14] 李亚男. 基于李群的多体系统动力学仿真[D]. 青岛: 青岛大学, 2019: 43-53.

LI Y N. Dynamic simulation of multi-body system based on Lie group[D]. Qingdao: Qingdao University, 2019: 43-53(in Chinese).

[15] 杨盛庆. 基于几何力学与最优控制的无人机编队方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014: 71-91.

YANG S Q. Geometric mechanics and optimal control of UAVs formation[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014: 71-91(in Chinese).

[16] LEE T, LEOK M, MCCLAMROCH N H. Lie group variational integrators for full body problem[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2007, 196: 2907-2924.

[17] OBER-BLOBAUM S, JUNGE O, MARSDEN J E. Discrete mechanics and optimal control: an analysis[J]. *ESAIM*, 2011, 17(2): 322-352.

[18] 高强, 彭海军, 吴志刚, 等. 非线性动力学系统最优控制问题的保辛求解方法[J]. 动力学与控制学报, 2010, 8(1): 1-7.

GAO Q, PENG H J, WU Z G, et al. Symplectic method for solving optimal control problem of nonlinear dynamical systems[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2010, 8(1): 1-7(in Chinese).

[19] 彭海军. 计算最优控制的保辛数值方法及其在平动点附近航天器控制中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 142-153.

PENG H J. Symplectic numerical method for computational optimal control and its application in the control of spacecraft near the libration point[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 142-153(in Chinese).

[20] 王昕炜. 非线性最优控制问题的保辛伪谱方法及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 40-54.

WANG X W. Symplectic pseudospectral methods for nonlinear optimal control problems and their applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020: 40-54(in Chinese).

[21] LIU X. Autonomous trajectory planning by convex optimization [D]. Ames: Iowa State University, 2013: 11-18.

[22] 谭述君, 何晓, 张立勇, 等. 运载火箭推力故障下基于智能决策的在线轨迹重规划方法[J]. 宇航学报, 2021, 42(10): 1228-1236.

TAN S J, HE X, ZHANG L Y, et al. Online trajectory replanning method based on intelligent decision-making for launch vehicles under thrust drop failure[J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(10): 1228-1236(in Chinese).

[23] 罗淑贞, 孙青林, 檀盼龙, 等. 基于高斯伪谱法的翼伞系统复杂多约束轨迹规划[J]. 航空学报, 2017, 38(3): 220-230.

LUO S Z, SUN Q L, TAN P L, et al. Trajectory planning of parafoil system with intricate constraints based on Gauss pseudo-spectral method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(3): 220-230(in Chinese).

[24] 李瑾, 王永海, 赵雅心, 等. 基于可变信赖域的飞行器轨迹快速优化[J]. 计算机仿真, 2023, 40(6): 32-37.

LI J, WANG Y H, ZHAO Y X, et al. Fast optimization of aircraft trajectory based on variable trust region[J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(6): 32-37(in Chinese).

A symplectic pseudo-spectral successive convex optimization method for trajectory planning of ascent stage of exo-atmosphere launch vehicle

CHEN Hongkun¹, TAN Shujun^{1, 2, *}, CUI Mengzhen¹, LIU Yuxi³

- (1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
- 2. Key Laboratory of Advanced Technology for Aerospace Vehicles of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
- 3. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to improve the computational efficiency and convergence of the algorithm, this paper derives the pseudo-spectral discrete Lagrange equation based on Lagrange mechanics, discrete mechanics and optimal control (DMOC) calculation method, combining with the advantages of high accuracy of the pseudo-spectral method. In conjunction with the successive convex optimization technique, a symplectic pseudo-spectral successive convex optimization-based trajectory optimization method is suggested. By significantly reducing the dimension of the discrete system’s state variables, the symplectic pseudo-spectral sequential convex optimization method can considerably increase convergence and computational efficiency while maintaining the structural features of the original continuous system. In contrast to the classical pseudo-spectral successive convex optimization method, the simulation results demonstrate that the symplectic pseudo-spectral successive convex optimization method has a good adoptability to the initial disturbance and can significantly increase computational efficiency without sacrificing accuracy.

Keywords: launch vehicle; trajectory optimization; symplectic; pseudo-spectral method; successive convex optimization

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0065

磁悬浮万向稳定平台平动动力学建模及其自抗扰控制方法

段乐强¹, 李磊¹, 王卫杰^{2,3}, 朱宏业¹, 庞维坤¹, 任元^{3,4,*}

(1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学 宇航科学与技术系, 北京 101416;

3. 航天工程大学 前沿基础交叉中心, 北京 101416; 4. 航天工程大学 基础部, 北京 101416)

摘 要: 针对空间激光通信等复杂航天任务对卫星平台高精高稳指向控制技术的迫切需求, 开展球面磁悬浮万向稳定平台 (MSUSP) 构型设计与控制方法研究。分析 MSUSP 万向稳定悬浮特性, 设计直角-正三棱锥构型的空间结构, 建立球面磁轴承 3 自由度动力学模型, 通过坐标变换实现磁轴承动子平动测量解耦。在此基础上, 为实现外部扰动条件下的磁轴承动子稳定控制, 设计基于坐标变换的 3 通道自抗扰控制器, 将各通道之间的未建模动态及外部扰动当作合并外扰, 进行跟踪、补偿, 从而提高扰动条件下控制器的快速性和稳定性。分析仿真结果表明: 相较于传统方法, 所提方法平动阶跃响应时间缩短 42.86%, 不同频率正弦扰动下的磁轴承动子抗干扰性均得到大幅提升, 证明了所提方法的有效性和优越性。

关 键 词: 磁悬浮万向稳定平台; 动力学建模; 扰动抑制; 坐标变换; 自抗扰控制

中图分类号: V448.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1221-11

随着高分辨率卫星对地观测、卫星空间激光通信、深空高精度观测的快速发展, 以及当下航天器的载荷越来越精密, 对卫星载荷平台提出了超高指向精度、超高稳定度(“双超”)的需求^[1]。制约卫星载荷平台超精超稳的主要因素是卫星上的活动部件(如控制卫星姿态的飞轮、推力器)和挠性部件(如卫星的太阳帆板阵列、巨型天线展开回收时振动所引发的平台干扰)。活动部件和挠性部件所带来的随机振动低频模态影响控制系统的带宽, 降低系统控制性能^[2-3]。

传统的机械固连式航天器平台隔振的方式比较单一, 通过增加主动或被动器件(能量阻尼器)以减少振源进入载荷系统的能量。这种隔振装置结构简单, 经济实惠便于实现, 且无需外部控制, 但也

存在一定不足, 接触式隔振与振源存在物理连接, 不能有效隔绝卫星载荷平台受到的微振动, 且接触式隔振器件寿命短^[4-5]。

为了减弱振动对卫星载荷工作的影响, 国内高校及相关科研单位也做了大量研究, 并取得了不错的成果。目前, 国内自主研制的“风云四号”卫星采用飞轮隔振支架隔振, 属于接触式隔振, 不能彻底隔绝微振动, 减振效率达到 80%^[6]。也有科研单位采用高性能磁悬浮力矩陀螺实现隔振, 稳定度能达到 1×10^{-4} (°)/s 量级^[7-8]。但上述隔振方法带宽和精度有限, 质量大, 能耗高, 可靠性有待进一步验证。

为了实现载荷高精度和高稳定姿态控制的目标, 美国 Lockheed Martin 公司率先提出载荷扰动隔离 (disturbance-free payload, DFP) 卫星设计概念^[9-12],

收稿日期: 2024-01-28; 录用日期: 2024-03-30; 网络出版时间: 2024-04-03 18:24

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240403.1059.004

基金项目: 国家自然科学基金 (52075545)

* 通信作者. E-mail: renyuan_823@aliyun.com

引用格式: 段乐强, 李磊, 王卫杰, 等. 磁悬浮万向稳定平台平动动力学建模及其自抗扰控制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1221-1231. DUAN L Q, LI L, WANG W J, et al. Dynamics modeling and active disturbance rejection control method of translation in a magnetically suspended universally stabilized platform [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1221-1231 (in Chinese).

这属于真正意义上的非接触隔振,DFP 将卫星设计为平台舱和载荷舱,通过非接触磁悬浮机构联系,2 个舱体相对独立又相互联合,实现振源与载荷的动静隔离。2017 年,NASA 和 Lockheed Martin 公司启动了针对非接触交互界面的联合研究^[13],有效载荷的控制输入由 6 个非接触执行器提供,通过非接触磁浮机构产生的洛伦兹力推动卫星主体结构,实现有效载荷 3 自由度的平移和 3 自由度的姿态旋转。Lockheed Martin 公司开发的 DFP 架构服务于大型紫外/光学/红外巡天望远镜 (large ultraviolet/optical/infrared surveyor, LUVOIR)。由于通过非接触方式进行扰动隔离,可以将振动隔离至零频率,且不会将无源隔离器的高频结构动力学引入系统中。

哈尔滨工业大学针对 DFP 这一卫星设计概念,提出一种 8 执行器磁悬浮主动隔振平台,该平台用于双体卫星上,在隔振的同时实现了载荷舱和平台舱的高精度、高稳定度的姿态控制,针对太阳帆板带来的星体抖动问题,设计非线性姿态控制器,并进行仿真验证,证明了其可行性^[14-16]。

上海航天八院 509 所研发的高分试验卫星平台,采用磁悬浮机构取代载荷与卫星间的机械连接,实现了动静隔离、主从协同,并应用于“羲和号”试验卫星^[17-18]。

航天工程大学团队参考 DFP 卫星设计概念,设计了球面磁悬浮万向稳定平台 (magnetically suspended universally stabilized platform, MSUSP),采用电磁轴承 6 自由度全主动控制,使平台具有平衡位置稳定悬浮和小角度机动能力。

MSUSP 稳定悬浮及小角度机动控制是一个复杂的系统,考虑 MSUSP 输入受限及空间环境干扰力矩,所设计控制器必须有强鲁棒性,且可以抗干扰、稳定跟随^[19]。比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制原理简单,控制方法成熟,便于工程实现,但机动性差,无法应对复杂工况,对指令跟踪滞后^[20-21];线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR) 控制拥有很好的鲁棒性,但对于控制对象的模型参数准确性要求很高,且对初始条件敏感,需要选取合适的权重矩阵^[22];滑模变结构控制拥有快响应、参数变化不敏感等优点,但在结构切换过程中容易激起系统抖振^[23-24]。因此,上述控制方法不能满足 MSUSP 对指令快速跟随和扰动抑制的需求。

自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 是一种不需要被控对象精确模型的控制器,能够有效抑制外部扰动对系统的干扰,具有很强的鲁棒性,且对于多输入多输出 (multiple input multiple

output, MIMO) 系统,ADRC 具有天然的解耦特性,将各通道之间的耦合当作外扰,分别进行跟踪、补偿,实现解耦控制^[25-27]。

本文建立了 MSUSP 3 自由度动力学模型,基于 ADRC 方法设计了 MSUSP 磁轴承动子 3 自由度状态跟踪控制器,并对灵敏性和抗干扰性进行了仿真分析。

1 MSUSP 总体构型设计

1.1 MSUSP 结构方案

MSUSP 通过磁悬浮技术实现卫星平台的载荷舱和平台舱物理隔离,保证平台舱振动不传递到载荷舱上。MSUSP 结构如图 1 所示。平台采用磁悬浮支撑,避免了机械轴承磨损,磁阻力平动磁轴承控制载荷舱平动悬浮,结合偏转洛伦兹力磁轴承实现载荷舱万向偏转、周向旋转抑制,同时,由于采用电磁轴承 6 自由度全主动控制,平台具有平衡位置稳定悬浮和小角度机动能力。平台实物图如图 2 所示。相较于一般的磁悬浮平台,MSUSP 的平动磁

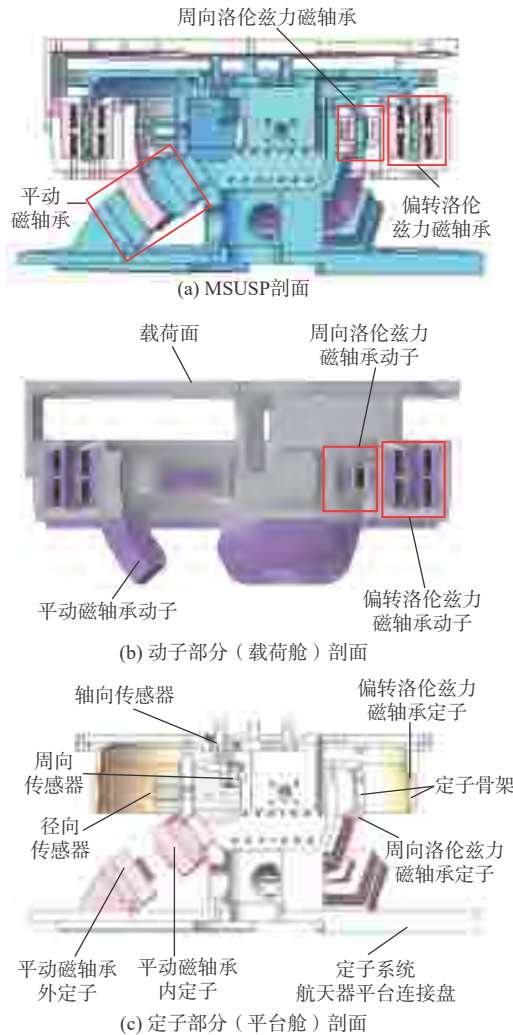


图 1 MSUSP 结构示意图
Fig. 1 Schematic of MSUSP structure



图 2 MSUSP 照片
Fig. 2 MSUSP picture

轴承并不像传统磁轴承对称装在动子两侧,而是采用空间直角正三棱锥式分布,可减少平台体积,节约空间,提高载荷能力,同时,改进磁悬浮轴承的定子和动子,采用球面磁悬浮动子和定子,提高了磁场的均匀度,间接提升了电磁力的出力稳定性。

MSUSP 的 3 个自由度平动由三正交磁阻力磁轴承差动驱动实现,三正交磁阻力平动磁轴承的 3 组磁极在同一径向平面内沿圆周均匀分布,即两两相邻磁极的夹角为 120° ,3 组磁极均采用斜装方式,单通道结构示意图如图 3 所示。定义各组磁极的轴为其电磁力方向,3 组磁极的轴在空间上构成直角正三棱锥(侧面为等腰直角三角形的正三棱锥),底面即为磁极所在的径向平面,根据等体积法和等边三角形性质可得三棱锥侧棱与径向平面夹角 $\theta = 35.26^\circ$ 。

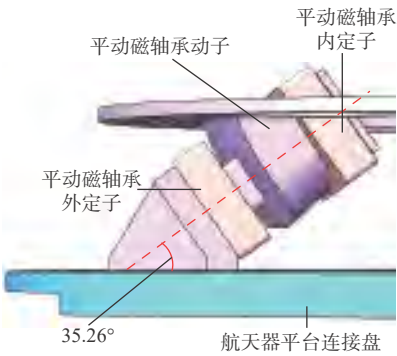


图 3 磁轴承与径向平面夹角示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the angle between the magnetic bearing and the radial plane

1.2 MSUSP 平动悬浮原理分析

MSUSP 的 3 自由度平动悬浮通过调节流经磁轴承线圈的电流大小来改变磁轴承定子对动子的电磁吸力,从而实现动子在平衡位置的稳定悬浮及小角度偏转。为了避免动子发生偏转后的磁极面气隙不均匀,导致磁极面的电磁吸力不一致而产生扭动力矩,3 自由度平动磁轴承的内外极面均采用球面结构,与磁极对应的动子面也是球面,由于球

面磁极的电磁力始终经过磁轴承动子磁极面球心,可以避免由于安装装配误差导致定子磁极错位带来的附加力矩,实现了平动和偏转之间的解耦。

3 自由度磁轴承动子系统中共有 3 个通道 a 、 b 、 c ,每个通道的电磁力都由 2 个出力方向相反的电磁铁提供,驱动模式为差动控制。以 a 通道为例,如图 4 所示,在差动控制模式下,磁轴承的动子受到动子方向合力 F_a 为内磁极与外磁极产生电磁力(分别为 F_{a+} 和 F_{a-})的差,即

$$F_a = F_{a+} - F_{a-} = \frac{\mu_0 S_a n^2}{4} \left[\frac{(I_0 + i_a)^2}{(\delta + x)^2} - \frac{(I_0 - i_a)^2}{(\delta - x)^2} \right] \cos \alpha_0 \quad (1)$$

式中: I_0 为偏置电流; i_a 为 a 通道的控制电流; δ 为磁轴承动子和定子的单边气隙; μ_0 为真空磁导率; S_a 为 a 通道的磁轴承定子磁极面积; x 为动子离开平衡位置的位移量; n 为磁轴承单个磁极绕线匝数; α_0 为磁轴承相邻 2 个磁极之间夹角的一半。

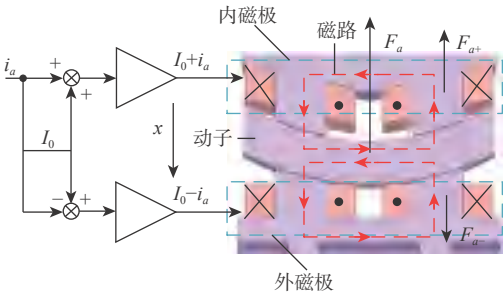


图 4 磁阻力磁轴承单通道工作示意图
Fig. 4 Schematic diagram of single-channel operation of magnetic resistance magnetic bearing

在工程应用时,一般对动子在平衡位置的非线性关系进行线性化处理,对式(1)进行泰勒展开并舍去高阶项,得到动子单自由度线性化后的电磁合力:

$$F_a = F_{a+} - F_{a-} = -K_s x_a + K_i i_a \quad (2)$$

式中: x_a 为 a 通道的动子离开平衡位置的位移量; K_i 为电流刚度, $K_i = \frac{4\mu_0 S_a n^2 I_0}{\delta^2} \cos \alpha_0$; K_s 为位移刚度, $K_s = \frac{4\mu_0 S_a N^2 I_0^2}{\delta^3} \cos \alpha_0$ 。

同理,可得 b 、 c 通道线性化后的电磁合力为

$$F_b = F_{b+} - F_{b-} = -K_s x_b + K_i i_b \quad (3)$$

$$F_c = F_{c+} - F_{c-} = -K_s x_c + K_i i_c \quad (4)$$

式中: x_b 、 x_c 分别为 b 、 c 通道的动子离开平衡位置的位移量; i_b 、 i_c 分别为 b 、 c 通道的控制电流。

2 MSUSP 坐标变换及动力学建模

2.1 坐标变换方案

对 MSUSP 进行动力学分析和控制算法设计建

立在其对动子系统的动力学模型基础上。为便于对位移传感器安装位置进行描述和动子的动力学建模,定义如下 2 个坐标系:

1) 以三棱锥的顶点为原点 O' 建立磁轴承坐标系,用来描述磁轴承动子相对于电磁力方向的位移关系,3 个坐标轴沿三棱锥的 3 条侧棱 α 、 β 、 γ 指向三棱锥底面方向,坐标系满足笛卡儿右手定则;磁轴承坐标系 $O'\alpha\beta\gamma$ 的 3 个坐标轴分别对应磁轴承动子系统的 3 个通道 a 、 b 、 c ,即 α 轴对应通道 a 、 β 轴对应通道 b 、 γ 轴对应通道 c 。

2) 以三棱锥底面(径向平面)的中心 O 为原点建立位移坐标系,用来描述位移传感器所测得动子位移量, x 轴为 α 轴在径向平面的投影, z 轴沿 OO' , y 轴位于径向平面内,满足右手定则。磁轴承坐标系 $O'\alpha\beta\gamma$ 和位移坐标系 $Oxyz$ 相对位置示意图如图 5 所示。

位移传感器与磁阻力磁轴承的相对位置示意图如图 6 所示。

求解磁轴承坐标系 $O'\alpha\beta\gamma$ 与位移坐标系 $Oxyz$ 之间的转换矩阵 $\mathbf{P}$,如图 7(a) 所示,先将位移坐标系 $Oxyz$ 绕 y 轴旋转 θ 得到过渡系 $Ox'y'z'$,其 x' 轴与磁轴承坐标系 $O'\alpha\beta\gamma$ 的 α 轴重合,如图 7(b) 所示,再将坐标系 $Ox'y'z'$ 绕 x' 轴旋转 ω ,易知,此时位移坐标系 $Oxyz$ 已旋转至磁轴承坐标系 $O'\alpha\beta\gamma$ 。

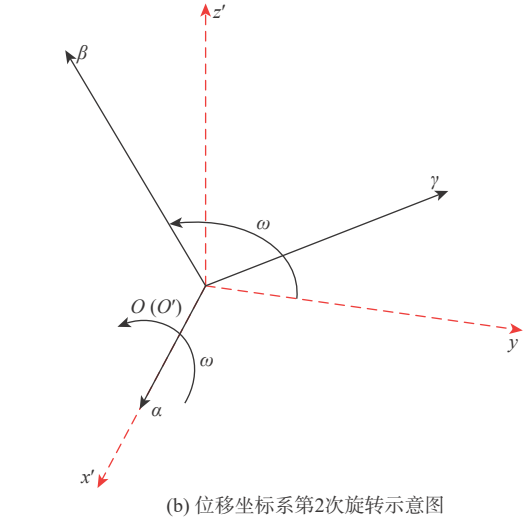
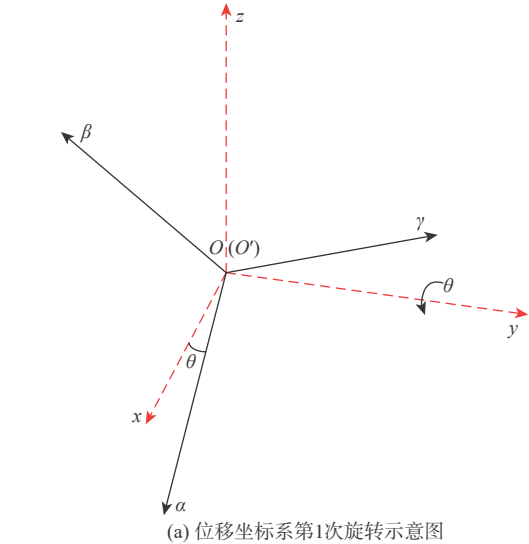


图 7 位移坐标系转换示意图

Fig. 7 Schematic diagram of displacement coordinate system conversion

基于上述分析可得,第 1 次、第 2 次旋转时的初等转换矩阵分别为

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据方向余弦阵的传递性有

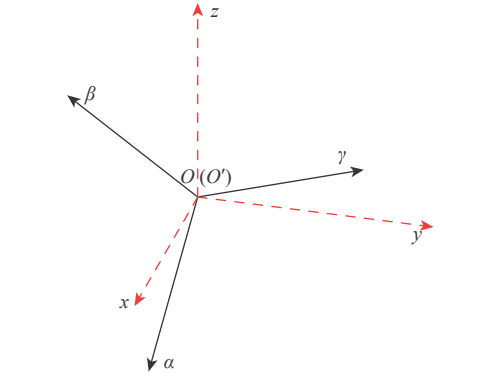


图 5 磁轴承坐标系与位移坐标系相对位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the relative positions of the magnetic bearing coordinate system and the displacement coordinate system

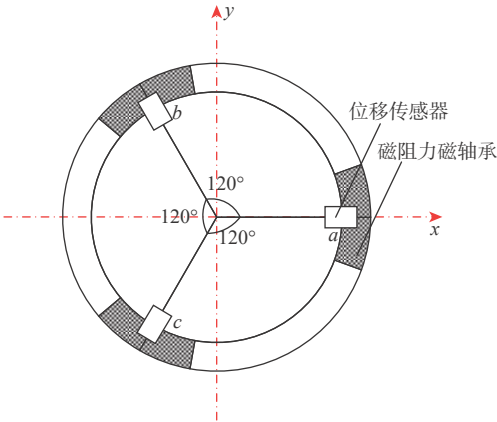


图 6 位移传感器相对位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the relative position of the displacement sensor

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \omega & \sin \theta \cos \omega \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \omega & \cos \theta \cos \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据直角正三棱锥的空间几何关系得到 $\omega = 225^\circ$ 。

2.2 MSUSP 平动动力学建模方案

将电磁吸力合力 F_x 、 F_y 、 F_z 通过转换矩阵 $\mathbf{P}$ 与磁阻力磁轴承所提供的电磁吸力 F_α 、 F_β 、 F_γ 联系起来, 得到动子的 3 自由度平动动力学模型, $\mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z]^\top$, $\tilde{\mathbf{F}} = [F_\alpha \ F_\beta \ F_\gamma]^\top$, 其中, $\tilde{\mathbf{F}} = \mathbf{P}\mathbf{F}$, 得到 $\mathbf{F} = \mathbf{P}^{-1}\tilde{\mathbf{F}}$, 根据式(2)~式(4)可知:

$$\tilde{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \\ F_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_s x_a + K_i i_a + f(\varphi_\alpha) \\ -K_s x_b + K_i i_b + f(\varphi_\beta) \\ -K_s x_c + K_i i_c + f(\varphi_\gamma) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $f(\varphi_\alpha)$ 、 $f(\varphi_\beta)$ 、 $f(\varphi_\gamma)$ 为由于载荷舱偏离平衡位置所导致球面磁悬动子球心与传感器检测面所在球心不重合导致的检测误差。

对矩阵 $\mathbf{P}$ 求逆得

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \theta \sin \omega & \cos \omega & \cos \theta \sin \omega \\ \sin \theta \cos \omega & -\sin \omega & \cos \theta \cos \omega \end{bmatrix} \quad (9)$$

结合 $\mathbf{F} = \mathbf{P}^{-1}\tilde{\mathbf{F}}$, 得

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \theta \sin \omega & \cos \omega & \cos \theta \sin \omega \\ \sin \theta \cos \omega & -\sin \omega & \cos \theta \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \\ F_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \theta \sin \omega & \cos \omega & \cos \theta \sin \omega \\ \sin \theta \cos \omega & -\sin \omega & \cos \theta \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -K_s x_a + K_i i_a + f(\varphi_\alpha) \\ -K_s x_b + K_i i_b + f(\varphi_\beta) \\ -K_s x_c + K_i i_c + f(\varphi_\gamma) \end{bmatrix} \quad (10)$$

整理得到 3 个平动方程:

$$\begin{cases} F_x = -K_s(x_a \cos \theta - x_c \sin \theta) + K_i(i_a \cos \theta - i_c \sin \theta) + f(\varphi_\alpha) \cos \theta - f(\varphi_\gamma) \sin \theta \\ F_y = -K_s(x_a \sin \theta \sin \omega + x_b \cos \omega + x_c \cos \theta \sin \omega) + K_i(i_a \sin \theta \sin \omega + i_b \cos \omega + i_c \cos \theta \sin \omega) + f(\varphi_\alpha) \sin \theta \sin \omega + f(\varphi_\beta) \cos \omega + f(\varphi_\gamma) \cos \theta \sin \omega \\ F_z = -K_s(x_a \sin \theta \cos \omega - x_b \sin \omega + x_c \cos \theta \cos \omega) + K_i(i_a \sin \theta \cos \omega - i_b \sin \omega + i_c \cos \theta \cos \omega) + f(\varphi_\alpha) \sin \theta \cos \omega - f(\varphi_\beta) \sin \omega + f(\varphi_\gamma) \cos \theta \cos \omega \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 单个磁轴承动子的动力学方程有外部扰动影响, 且每个自由度的动力学方程都与其他 2 个自由度动力学方程存在耦合项。

3 三正交磁轴承控制器设计

3 个平动磁轴承通过电磁力支撑动子, 使其稳定悬浮在平衡位置, 但电磁力本身是非线性力, 且

MSUSP 自身结构不稳定, 使控制问题变得复杂, 影响系统的准确性、稳定性和快速性。同时, MSUSP 的 3 个平动磁轴承动子与定子之间的间隙仅有 0.5 mm, 需要避免调节过程中碰撞到任何一侧磁极, 要求控制器在调节动子过程中不能出现大超调量。

3.1 自抗扰控制器设计

针对系统不稳定性、复杂性及传感器检测位移耦合项导致的扰动, 选择 ADRC 方法作为控制器设计的核心, 将作用于 MSUSP 的不确定因素, 如平台舱传递其他器件工作带来的抖动、位移传感器安装误差, 都归结为“未知扰动”, 用 MSUSP 的位移数据和电流反馈对其进行估计, 并给予补偿。

ADRC 基本结构框图如图 8 所示。图中, $v(t)$ 为目标值, $v_1(t)$ 为误差信号, $v_2(t)$ 为误差的微分信号, $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$ 为状态变量信号, $z_3(t)$ 为系统扰动的观测值, $w(t)$ 为系统受到的外部扰动, $y(t)$ 为输出, e_1 和 e_2 分别为过渡过程与对象输出之间的误差及其微分, b_0 为扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 对 $u(t)$ 的观测系数。ADRC 主要由跟踪微分器 (tracking differentiator, TD)、ESO 和非线性状态误差反馈控制律 (nonlinear state error feedback, NLSEF) 构成。其中, TD 主要解决信号不连续和随机噪声的问题, 同时, 可快跟踪输入给出微分信号; ESO 采用状态观测器的思想, 将影响被控对象输出的扰动扩张成为一个新的状态变量, 给出对象状态变量估计值及系统模型和外扰实时总和作用的估计值; NLSEF 是将 TD 产生的过渡过程误差信号 $v_1(t)$ 及误差的微分信号 $v_2(t)$ 与 ESO 状态变量信号 $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$ 进行非线性组合, 从而得到非线性状态误差反馈控制量 $u_0(t)$, $u_0(t)$ 与总扰动补偿量结合形成总控制量 u 。

根据自抗扰理论, 可以将 MSUSP 的动子 3 自由度动力学方程之间存在的耦合项作为一种外扰, 使用 ESO 对耦合项进行估计补偿。因此, MSUSP 动子 3 自由度运动学方程可以转化为

$$\begin{cases} \ddot{x} = k_1 S_x + w_1 + b_1 i_x \\ \ddot{y} = k_2 S_y + w_2 + b_2 i_y \\ \ddot{z} = k_3 S_z + w_3 + b_3 i_z \end{cases} \quad (12)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 分别为平台动子 3 自由度的状态变量; S_x 、 S_y 、 S_z 为系数; w_1 、 w_2 、 w_3 分别为平台动子 3 自由度的外部扰动; b_1 、 b_2 、 b_3 分别为平台动子 3 自由度控制量 i_x 、 i_y 、 i_z 的系数。

MSUSP 动子 3 自由度动力学模型可采用 3 个二阶单输入单输出 (single input single output, SISO) 系统利用 ADRC 进行解耦控制。ESO 对每个通道的扰动进行实时估计, 并进行补偿, MSUSP 的动子 3 自由度系统被转换为 3 输入 3 输出的二阶无耦合

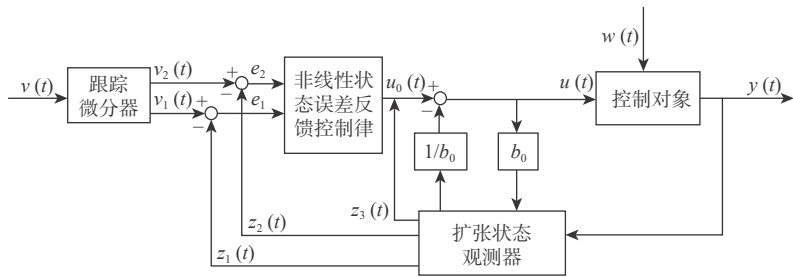


图 8 ADRC 基本结构框图

Fig. 8 Block diagram of ADRC basic structure

线性系统。设计的 3 通道 ADRC 系统框图如图 9 所示。左侧“坐标变换”是将电磁合力 F_x 、 F_y 、 F_z 与磁阻力磁轴承所提供的电磁吸力 F_α 、 F_β 、 F_γ 联系起来，右侧“坐标变换”是将位移传感器采集的磁轴承动子位移量 x_a 、 x_b 、 x_c 转换到位移坐标系中。图中， x_i 、 y_i 、 z_i 为平台位移坐标系的输入， x_o 、 y_o 、 z_o 为平台的输出位移量。

对于 MSUSP，经过解耦的磁轴承动子控制可以简化为二阶系统，对动子任意方向单自由度状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = S(x_1, x_2, w(t), t) + b_0 u(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中： S 为动子的状态空间。

将 $S(x_1, x_2, w(t), t)$ 扩张为动子系统的新的状态变量 x_3 ，则 $x_3 = f(x_1, x_2, w(t), t)$ 。令 $\dot{x}_3 = \xi(t)$ ，动子系统可扩张为如下线性系统：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u(t) \\ \dot{x}_3 = \xi(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (14)$$

对系统建立 ESO：

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - c_1 g_1(e_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + b_0 u - c_2 g_2(e_1) \\ \dot{z}_3 = -c_3 g_3(e_1) \end{cases} \quad (15)$$

式中： c_1 、 c_2 、 c_3 为对应的状态增益系数； g 函数需要与 e_1 保持同号，其常用的表达式为

$$\text{fal}(e_g, \alpha_g, \delta_g) = \begin{cases} |e_g|^{\alpha_g} \text{sgn}(e_g) & |e_g| > \delta_g \\ e_g / \delta_g^{(1-\alpha_g)} & |e_g| \leq \delta_g \end{cases} \quad (16)$$

式中： e_g 为 fal 函数的输入； α_g 和 δ_g 为控制 fal 函数形状的参数。

安排过渡过程的目的是降低初始误差，降低初始阶段对系统的冲击，有效解决超调与快速性矛盾。采用 TD 的数学模型作为安排过渡过程，对于 MSUSP 单自由度的动力学方程，TD 形式为

$$\begin{cases} \dot{v}_1(t) = v_2(t) \\ v_2(t) = \text{fhan}(v_1 - v, v_2, r, h_0) \end{cases} \quad (17)$$

式中： h_0 为积分步长； v 为动子单自由度参考输入位移； v_1 为对 v 安排的过渡过程； v_2 为过渡过程的微分信号； r 为速度因子； $\text{fhan}(v_1 - v, v_2, r, h_0)$ 为最速控制函数，具体表达式如下：

$$\begin{cases} d = rh_0 \\ d_0 = h_0 d \\ \ell = v_1 - v + h_0 v_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|\ell|} \\ a_f = \begin{cases} v_2 + \frac{a_0 - d}{2} & |\ell| > d_0 \\ v_2 + \frac{y}{h_0} & |\ell| \leq d_0 \end{cases} \\ \text{fhan} = - \begin{cases} r \text{sgn} a_f & |a_f| > d \\ r \frac{a_f}{d} & |a_f| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

ESO 得到实时的状态估计值后，设计 NLSEF：

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha_{n1}, \delta_n) + \beta_2 \text{fal}(e_2, \alpha_{n2}, \delta_n) \end{cases} \quad (19)$$

系统状态误差为 $e_1 = v_1 - z_1$ 、 $e_2 = v_2 - z_2$ ， β_1 、 β_2

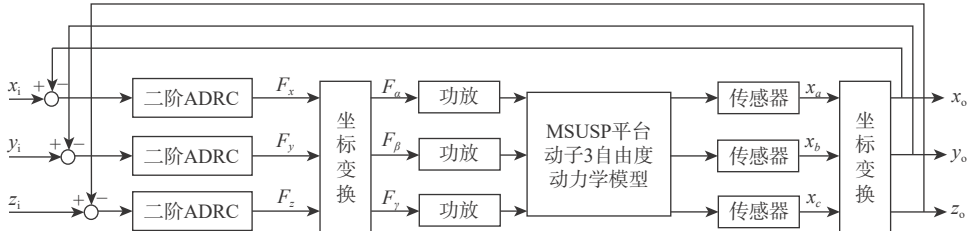


图 9 3 通道 ADRC 系统框图

Fig. 9 Block diagram of a three-channel ADRC system

决定 NLSEF 增益, α_{n1} 、 α_{n2} 决定跟踪效果, δ_n 决定滤波效果。

通过 ESO, 原动子系统扰动状态变量 x_3 能够被 z_3 跟踪, 并在控制律中进行补偿, 使 MSUSP 单自由度模型转换为积分器串联型, 控制量可以表示为

$$u(t) = u_0(t) - \frac{1}{b_0} z_3 \quad (20)$$

式中: $u_0(t)$ 为反馈控制量; $u(t)$ 为控制量。

3.2 控制器性能分析

根据 MSUSP 动子 3 自由度动力学模型和构建的 ESO 模型, 可以将平台动子 ADRC 的状态空间表示为

$$\dot{X} = A_t X + B_t u + B_t \tilde{H}_d \quad (21)$$

式中: H_d 为平台受到的扰动; $A_t = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $B_t = [0 \quad b_0 \quad 0]^T$; $B_t = [0 \quad 0 \quad 1]^T$ 。

经过 ESO 观测后状态变量可表示为

$$\dot{Z} = A_t Z + B_t u + B_t \tilde{H}_d + C_0(X - Z) \quad (22)$$

式中: $Z = [z_1 \quad z_2 \quad z_3]^T$ 为 ESO 的观测量; $\tilde{H}_d$ 为观测到的扰动量; $C_0 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ c_2 & 0 & 0 \\ c_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

联立式(21)和式(22)可得

$$\dot{X} - \dot{Z} = (A_t - C_0)(X - Z) + B_t(H_d - \tilde{H}_d) \quad (23)$$

根据式(23)可计算出

$$|\lambda E_{n+1} - (A_t - C_0)| = \lambda^{n+1} + c_1 \lambda^n + \dots + c_{n+1} \quad (24)$$

式中: λ 为特征值; E_{n+1} 为 $n+1$ 阶单位矩阵。

估计误差稳定趋于 0 的前提为 $A_t - C_0$ 矩阵是 Hurwitz 的, 即方程的特征根含负实部, 为便于分析, 选取

$$\lambda^{n+1} + c_1 \lambda^n + \dots + c_{n+1} = (\lambda + \vartheta)^{n+1} \quad (25)$$

式中: $\vartheta > 0$ 。

由式(25)可知

$$c_i = \frac{(n+1)! \vartheta^i}{i!(n+1-i)!} \quad i = 1, 2, \dots, n+1 \quad (26)$$

将式(26)代入式(23)得

$$\begin{cases} \dot{x}_i - \dot{z}_i = -\frac{(n+1)! \vartheta^i}{i!(n+1-i)!} (x_i - z_i) \\ \dot{x}_{n+1} - \dot{z}_{n+1} = -\vartheta^{n+1} + (H_d - \tilde{H}_d) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

式(27)等式两边分别除以 ϑ^{i-1} 和 ϑ^n 得

$$\begin{cases} \frac{\dot{x}_i - \dot{z}_i}{\vartheta^{i-1}} = -\frac{(n+1)!}{i!(n+1-i)!} \vartheta (x_i - z_i) \\ \frac{\dot{x}_{n+1} - \dot{z}_{n+1}}{\vartheta^n} = -\vartheta + \frac{H_d - \tilde{H}_d}{\vartheta^n} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

记 $\psi_i = \frac{x_i - z_i}{\vartheta^{i-1}}$, $T_i = \frac{(n+1)!}{i!(n+1-i)!}$, 2 个方程可合并为

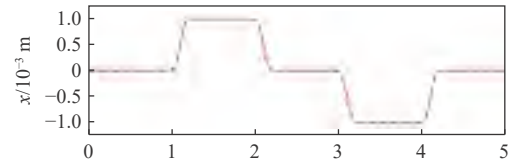
$$\dot{\psi} = \vartheta T_i \psi + B_t \frac{H_d - \tilde{H}_d}{\vartheta^n} \quad (29)$$

式中:

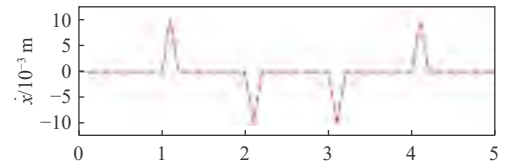
$$T_i = \begin{bmatrix} -T_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -T_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -T_n & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -T_{n+1} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}; \psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{n+1}]。$$

式(29)能够保证观测误差渐进趋于 0, 因此, 观测量能够稳定跟踪状态变量。图 10 和图 11 为输入正弦信号和方波信号时, ESO 对输入状态量的观测效果。

根据图 10 和图 11 可知, ESO 状态观测量 z_1 和



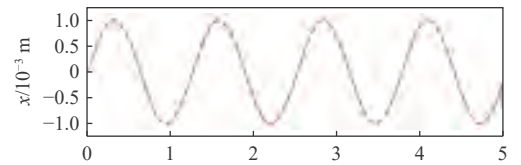
(a) 方波信号观测



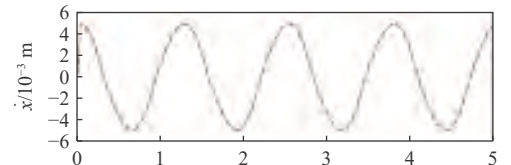
(b) 方波信号一阶导数观测

图 10 方波信号及其一阶导数的 ESO 观测效果

Fig. 10 Effect of ESO observation of square wave signals and their first-order derivatives



(a) 正弦信号观测



(b) 正弦信号一阶导数观测

图 11 正弦信号及其一阶导数的 ESO 观测效果

Fig. 11 Effects of ESO observations of sinusoidal signals and their first-order derivatives

z_2 能够跟随系统的输入状态变量 x_1 和 x_2 ,只有在系统输入发生跳变时,才会产生跟踪误差,且产生的误差能在短时间内消除。因此,构造的ESO具有较好的效果。

4 仿真结果及分析

为了验证ADRC方法应用在MSUSP的3自由度平动的有效性和优越性,将ADRC和传统分散PID控制作对比仿真,MSUSP参数和控制系统仿真参数如表1~表3所示。其中, m 为平台动子的质量, L_m 和 R_m 分别为动子线圈电感值和电阻值, K_P 、 K_I 、 K_D 为PID控制器的3个参数。

表1 MSUSP 参数

Table 1 MSUSP parameters

$K_I/(\text{N}\cdot\text{A}^{-1})$	$K_s/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	m/kg	L_m/mH	R_m/Ω
225	0.315	14.7	4	13.5

表2 ADRC 参数

Table 2 ADRC parameters

r	h_0	δ_g	(c_1, c_2, c_3)	(β_1, β_2)	$(\alpha_{n1}, \alpha_{n2})$	δ_n
160	0.001	0.01	(63,77,12)	(100,20)	(0.75,1.5)	0.08

表3 PID 控制器参数

Table 3 PID controller parameters

K_P	K_I	K_D
3	0.5	10

4.1 灵敏性验证

MSUSP的目标是载荷舱平衡位置稳定悬浮和小角度机动,这对控制器的指令跟随速度有较高的要求,既要满足载荷舱的3自由度高精度姿态指向,还需要达到无超调快速跟随指令,MSUSP的动子与两侧磁极中间气隙为0.5 mm,避免调节过程中碰撞到任何一侧磁极。对比仿真条件设置如下:假设平台动子在初始时刻处于平衡位置,且未受到外力矩干扰,在1 s时使动子沿 x 轴正方向移动0.2 mm,3 s时使动子回到平衡位置,5 s时使动子沿 x 轴负方向移动0.2 mm,7 s时使动子回到平衡位置。

仿真结果如图12所示。采用分散式PID控制,动子的过渡过程为0.14 s,最大超调量为25%;采用ADRC,动子的过渡过程为0.08 s,无超调量。结果表明,采用2种控制方式都能在短时间内使动子稳定跟随输入信号,与分散式PID控制相比,ADRC动态响应能力效果更好,响应时间缩短了42.86%,动子的响应速度明显提高。

4.2 抗干扰性能验证

为验证MSUSP在受到干扰时控制器的抗干扰

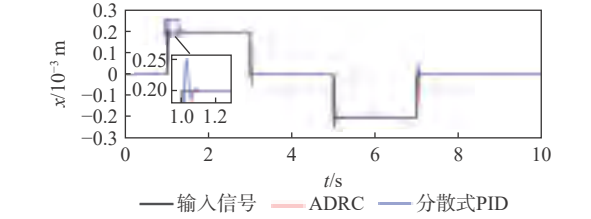


图 12 灵敏性验证
Fig. 12 Sensitivity validation

性能,给平台动子单自由度施加不同频率正弦干扰信号,观察平台动子在平衡位置振幅情况。图13为抗干扰性能验证。如图13(a)所示,在1 s时,对处于平衡状态的动子施加沿 x 轴正方向的正弦干扰信号 $\sin(5\pi t)$,定义动子平动位移等于0 mm时为平衡位置,对比分散式PID控制和ADRC的仿真结果可知,采用分散式PID控制方法,能将扰动幅值限制在0.88 mm以内,同时,动子在扰动信号下产生幅值为0.88 mm的往复运动,作用在动子上的干扰量为原来干扰信号的88%;采用ADRC能将扰动幅值限制在0.50 mm以内,同时,动子在扰动信号

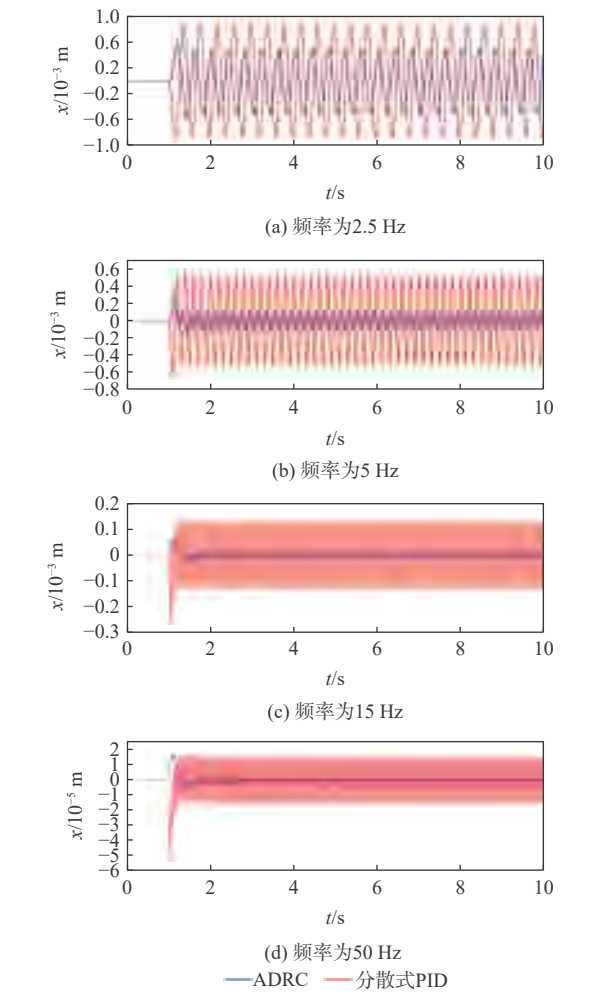


图 13 不同频率下抗干扰性能验证
Fig. 13 Verification of anti-interference performance at different frequencies

下产生幅值为 0.49 mm 的往复运动,作用在动子上的干扰量为原来干扰信号的 49%。对比发现,在低频扰动下,采用 ADRC 方法的磁轴承动子悬浮稳定性提高 44.32%。

在其他条件不变的前提下,提高干扰信号频率,图 13(b) 为外加正弦干扰信号 $\sin(10\pi t)$ 时系统的仿真结果。采用分散式 PID 控制方法,施加的干扰使动子产生幅值为 0.52 mm 的往复运动;采用 ADRC 方法,动子往复运动幅值为 0.12 mm。进一步提高干扰信号频率为 $\sin(30\pi t)$ 和 $\sin(100\pi t)$,根据图 13(c) 和图 13(d) 可知,采用 ADRC 方法能够有效抑制干扰信号对 MSUSP 动子的影响。

通过对不同频率的扰动信号仿真分析可知,干扰信号从 2.5 Hz 到 50 Hz,采用 ADRC 方法的抗干扰性能均优于采用分散式 PID 控制方法,且随着频率上升,抗干扰性能越突出。

5 结 论

1) 基于 MSUSP 的工作原理,设计呈直角-正三棱锥式分布的球面磁轴承结构,并在此基础上进行平动测量解耦,分析 3 个磁轴承的工作原理,建立磁轴承动子位移量与位移传感器的关系,推导得到 MSUSP 的 3 自由度平动动力学方程。

2) 考虑载荷舱平衡位置稳定悬浮和小角度机动的工况,强调兼顾控制器的灵敏性和抗扰性,结合工程实践,采用 ADRC 方法。仿真结果表明,ADRC 方法的响应时间比分散式 PID 控制方法缩短 42.86%,在不同频率正弦扰动下的磁轴承动子抗干扰性均得到了大幅提升。

综上,本文控制方法能够提升系统的响应速度,还能主动抑制磁轴承动子所受的外部扰动,对 MSUSP 的 3 自由度运动具有良好的控制效果。

参考文献 (References)

- [1] 刘磊. 航天器主动隔振及精确定向控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- LIU L. Research on active vibration isolation and precision pointing control for spacecraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011(in Chinese).
- [2] 柏林. 三轴稳定卫星姿态确定和姿态控制系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- BAI L. Research on attitude control system of three-axis stabilized satellite[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001(in Chinese).
- [3] 张洪华, 王芳, 胡锦涛, 等. 欠驱动挠性航天器的全姿态控制[J]. 宇航学报, 2015, 36(4): 419-429.
- ZHANG H H, WANG F, HU J C, et al. All-attitude control for underactuated flexible spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(4): 419-429(in Chinese).
- [4] 于开平, 焦健, 吴迎. 基于并联平台的卫星微振动控制研究进展[J]. 力学与实践, 2017, 39(3): 219-225.
- YU K P, JIAO J, WU Y. Recent progress of satellite micro-vibration control based on the parallel platform[J]. Mechanics in Engineering, 2017, 39(3): 219-225(in Chinese).
- [5] 罗婕, 檀傑猛, 罗敏, 等. 卫星载荷隔振装置特性的微振动试验及分析[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(3): 659-664.
- LUO J, TAN L M, LUO M, et al. Micro-vibration experiment and analysis on characteristic of satellite payload isolation device[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(3): 659-664(in Chinese).
- [6] 孟光, 董瑶海, 周徐斌, 等. 风云四号卫星微振动抑制和试验技术研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(2): 70-80.
- MENG G, DONG Y H, ZHOU X B, et al. Research on micro-vibration control and testing of FY-4 meteorological satellite[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2019, 49(2): 70-80(in Chinese).
- [7] 舒适, 房建成, 张伟, 等. 基于 MSCMG 大型遥感卫星高精度姿态控制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(4): 421-431.
- SHU S, FANG J C, ZHANG W, et al. High-precision attitude control method based on MSCMG for large-scale remote sensing satellite[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(4): 421-431(in Chinese).
- [8] 魏彤, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承的变工作点线性化自适应控制方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 110-115.
- WEI T, FANG J C. Adaptive control based on variant operating-point linearization in magnetic bearings of MSCMG[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 110-115(in Chinese).
- [9] JONES D I, OWENS A R, OWEN R G. A control system for a microgravity isolation mount[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1996, 4(4): 313-325.
- [10] LASKIN R A, SIRLIN S W. Future payload isolation and pointing system technology[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1986, 9(4): 469-477.
- [11] PEDREIRO N. Spacecraft architecture for disturbance-free payload[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2003, 26(5): 794-804.
- [12] CHEN C C, HEMMATI H, BISWAS A, et al. Simplified lasercom system architecture using a disturbance-free platform[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies XVIII. Bellinham: SPIE, 2006: 610505.
- [13] DEWELL L D, BELL R M, TAJDARAN K, et al. Dynamic stability with the disturbance-free payload architecture as applied to the Large UV/Optical/Infrared (LUVOIR) mission[C]//Proceedings of the UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VIII. Bellinham: SPIE, 2017: 12.
- [14] 王俊. 扰动隔离载荷与卫星平台一体化控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- WANG J. Integrated control for disturbance-free payload and satellite platform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [15] 屠善澄. 卫星姿态动力学与控制[M]. 北京: 宇航出版社, 2001.
- TU S C. Satellite attitude dynamics and control[M]. Beijing: China

Astronautics Publishing House, 2001(in Chinese).

[16] 王京发. 卫星振动隔离系统的隔振与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

WANG J F. The study of isolation and control for the vibration isolation system of the satellite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).

[17] 张伟, 赵艳彬, 廖鹤, 等. 动静隔离、主从协同控制双超卫星平台设计[J]. 上海航天, 2014, 31(5): 7-11.

ZHANG W, ZHAO Y B, LIAO H, et al. Design of an active-quiet isolated and master-slave coordination controlled dual-super satellite platform[J]. Aerospace Shanghai, 2014, 31(5): 7-11(in Chinese).

[18] 赵同爽, 张激扬, 王英广, 等. 磁悬浮旋转关节建模及解耦控制方法研究[J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48(2): 71-79.

ZHAO T S, ZHANG J Y, WANG Y G, et al. Modeling and decoupling control method of magnetically levitated rotary joints[J]. Aerospace Control and Application, 2022, 48(2): 71-79(in Chinese).

[19] 刘钢, 李圣怡, 范大鹏. 机电伺服系统的预测函数控制算法研究[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(2): 89-93.

LIU G, LI S Y, FAN D P. Studies of predictive functional control arithmetic in electromechanical servo system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(2): 89-93(in Chinese).

[20] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.

HAN J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18(in Chinese).

[21] BASARAN S, SIVRIOGLU S. Novel repulsive magnetic bearing flywheel system with composite adaptive control[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(5): 676-685.

[22] TAO C W, TAUR J S, CHEN Y C. Design of a parallel distributed fuzzy LQR controller for the twin rotor multi-input multi-output system[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2010, 161(15): 2081-2103.

[23] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

LIU J K. MATLAB simulation for sliding mode control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005(in Chinese).

[24] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

WANG F Y. Sliding mode variable structure control[M]. Beijing: China Machine Press, 1995(in Chinese).

[25] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.

HAN J Q. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23(in Chinese).

[26] 魏永清, 许江宁, 马恒. 自抗扰控制器在陀螺稳定平台控制系统中的应用[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(1): 39-44.

WEI Y Q, XU J N, MA H. Application of active disturbance rejection controller in gyro-stabilized platform control system[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(1): 39-44(in Chinese).

[27] LUO S Z, SUN Q L, SUN M W, et al. On decoupling trajectory tracking control of unmanned powered parafoil using ADRC-based coupling analysis and dynamic feedforward compensation[J]. Non-linear Dynamics, 2018, 92(4): 1619-1635.

Dynamics modeling and active disturbance rejection control method of translation in a magnetically suspended universally stabilized platform

DUAN Leqiang¹, LI Lei¹, WANG Weijie^{2,3}, ZHU Hongye¹, PANG Weikun¹, REN Yuan^{3,4,*}

(1. Company of Postgraduate Management, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

3. Center for Basic and Advanced Interdisciplinary Studies, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

4. Department of Basic Course, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: In response to the urgent demand for high-precision and high-stability pointing control technology of satellite platforms for complex space missions such as space laser communication, research has been conducted on the configuration design and control method of a spherical magnetically suspended universally stabilized platform (MSUSP). Firstly, the omnidirectional stable suspension characteristics of the MSUSP were analyzed, and a space structure with a right-angled equilateral triangular pyramid configuration was designed. Coordinate transformation was used to decouple the magnetic bearing rotor translation, and a three-degree-of-freedom dynamic model of the spherical magnetic bearing was created. Based on this, in order to achieve stable control of the magnetic bearing rotor under external disturbance conditions, a three-channel self-disturbance rejection controller based on coordinate transformation was designed, which treated the unmodeled dynamics and external disturbances between each channel as merged disturbances for tracking and compensation, thereby improving the speed and stability of the controller under disturbance conditions. The effectiveness and superiority of the suggested method were demonstrated by the analysis of simulation results, which revealed that this method significantly improved the anti-interference performance of the magnetic bearing rotor under various frequency sinusoidal disturbances and reduced the step response time for translational motion by 42.86% when compared to traditional methods.

Keywords: magnetically suspended universally stabilized platform; dynamics modeling; disturbance suppression; coordinate transformation; active disturbance rejection control

Received: 2024-01-28; Accepted: 2024-03-30; Published Online: 2024-04-03 18:24

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240403.1059.004

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52075545)

* Corresponding author. E-mail: renyuan_823@aliyun.com

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0079

气动弹性耦合界面插值点自动选取算法

李豪^{1,2}, 张晓蓉¹, 孙岩^{1,2,3,*}, 邓彦增², 朱枝茂²

(1. 西南科技大学 计算机科学与技术学院, 绵阳 621010; 2. 中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 绵阳 621000;

3. 中国空气动力研究与发展中心 空天飞行空气动力科学与技术全国重点实验室, 绵阳 621000)

摘 要: 气动弹性模拟中, 为了降低耦合数据插值传递矩阵规模, 提升耦合数据传递效率, 通常采用选取部分界面网格点构建插值矩阵的策略。目前, 耦合界面插值点主要通过人工手动的方式选取得到, 在网格点数量较大情况下存在耗时长、易错选/漏选的问题。针对手动选点带来的问题, 发展了一种耦合界面插值点自动选择算法, 通过边界网格点提取、边界网格点精简 2 步实现。基于结构有限元模型中网格单元的节点信息, 建立单元之间的邻接信息, 根据邻接信息对网格点进行分类, 提取结构有限元模型的边界网格点。基于径向基函数 (RBF) 插值, 借鉴网格变形中的贪婪选点策略, 逐步将几何表征误差最大的点选入插值点集, 实现边界网格点的精简和耦合界面插值点集的构建。通过飞翼外形结构有限元模型对所提算法及参数影响进行测试, 并将算法应用于 AGARD445.6 和 DLR-F6 模型的静气动弹性耦合模拟中, 测试及模拟结果表明: 所提算法能够实现耦合界面插值点的自动选取, 并获得与手动选点方式一致的气动弹性计算结果。

关键词: 气动弹性; 耦合界面; 插值点; 径向基函数插值; 贪婪法

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1232-10

近年来, 随着计算机硬件和数值计算方法的飞速发展, 计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术被广泛用于各种复杂流动数值模拟中, 在科学研究中发挥了显著作用^[1-2]。基于 CFD 与计算结构动力学 (computational structural dynamics, CSD) 耦合的气动弹性数值模拟技术也逐步在航空航天领域的工程问题中得到应用, 有力支撑了产品的设计与性能评估^[3-4]。

为了降低耦合求解实现的难度, 现有的气动弹性耦合数值模拟主要采用分离式的架构, 即流场和结构分别采用独立的离散网格和求解器, 不同求解器在每个迭代步中通过耦合界面进行数据和信息的传递^[5-6]。在基于 CFD/CSD 的分离式耦合气动弹性数值模拟中, 首先, CFD 计算绕流流场, 获取飞行

器表面气动载荷, 通过耦合界面数据转换将气动载荷数据转换成结构输入的外载荷, 传递给 CSD; 其次, CSD 基于输入外载荷计算结构的响应, 再通过耦合界面数据转换将结构的位移、速度等响应转换成流场边界的位移和速度, 传递给 CFD; 然后, CFD 根据输入的边界位移、速度更新流场, 计算网格和边界条件, 以及新状态下的绕流流场; 如此反复迭代, 直至耦合达到稳定或收敛^[7]。

气动弹性耦合模拟流程中, 耦合界面数据转换定义了 CFD 与 CSD 之间载荷、位移等数据的传递关系, 是影响气动弹性耦合模拟准确度和计算效率的关键因素^[8-9], 高精度数据传递能够显著改善气动弹性耦合模拟的稳定性和预测结果的精准度^[10]。根据能量守恒关系, 气动弹性计算中, 耦合数据的

收稿日期: 2024-02-02; 录用日期: 2024-04-05; 网络出版时间: 2024-04-26 15:33

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240426.1411.002

基金项目: 国家数值风洞工程 (NNW-FSI)

* 通信作者. E-mail: y.sun@cardc.cn

引用格式: 李豪, 张晓蓉, 孙岩, 等. 气动弹性耦合界面插值点自动选取算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1232-1241.

LI H, ZHANG X R, SUN Y, et al. Automatic selection algorithm of interpolation points on aeroelastic coupling interface [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1232-1241 (in Chinese).

传递转换关系可以通过插值矩阵进行描述, 通常基于结构分析中的耦合界面网格点坐标来构建插值矩阵。但当耦合界面网格点数目较大时, 会使插值矩阵的构建耗时增加, 并引起数据传递效率和精度的降低^[11]。因此, 实际气动弹性仿真计算中, 经常选择结构有限元模型中的部分界面网格点来构建插值矩阵, 以降低矩阵规模, 提高数据传递效率及精度^[12]。

当前, 耦合界面网格点选取主要通过人工手动选取的方式实现, 不仅需要耗费大量的前处理时间, 而且在网格规模较大时, 极易发生错选、漏选的问题, 造成选点失败。针对气动弹性数值模拟工程应用中面临的耦合界面插值点选择问题, 比较好的自动化选点方案有限。为此, 面向常用的结构分析模型, 本文发展了一种耦合界面插值点自动选取算法。先根据单元邻接关系提取结构分析模型的边界网格点, 再利用贪婪更新策略, 选择边界网格点的精简点集, 表征全部耦合界面网格点的特征, 实现耦合数据插值矩阵的自动构建。

1 耦合界面插值点选取

1.1 问题描述

为了保证气动弹性耦合计算中的能量守恒, 根据虚功原理有^[13]

$$\delta W = \delta \mathbf{u}_s^T \mathbf{f}_s = \delta \mathbf{u}_a^T \mathbf{f}_a \quad (1)$$

式中: δW 为载荷所做的虚功; $\delta \mathbf{u}$ 为虚位移矢量; $\mathbf{f}$ 为载荷矢量; 下标 s 表示结构; 下标 a 表示气动。结构网格点位移 $\mathbf{u}_s$ 与气动网格点位移 $\mathbf{u}_a$ 之间可以通过系数矩阵 $\mathbf{H}$ 进行描述:

$$\mathbf{u}_a = \mathbf{H} \mathbf{u}_s \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1), 可得

$$\delta \mathbf{u}_s^T \mathbf{f}_s = \delta \mathbf{u}_s^T \mathbf{H}^T \mathbf{f}_a \quad (3)$$

对于任意的结构虚位移 $\delta \mathbf{u}_s$, 式 (3) 要成立, 需要满足:

$$\mathbf{f}_s = \mathbf{H}^T \mathbf{f}_a \quad (4)$$

因此, 通过系数矩阵 $\mathbf{H}$ 即可定义气动与结构求解器之间的载荷、位移传递关系。例如, 对于常用的薄板样条插值 (thin plate spline, TPS) 方法, 系数矩阵 $\mathbf{H}$ 可以表示为^[14]

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{P}^T \\ \mathbf{P} & \mathbf{M} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{H}_0$ 为基础系数矩阵, 由耦合界面上气动网格点和结构网格点的坐标计算得到; 矩阵 $\mathbf{P}$ 由耦合界面上的结构网格点坐标组成; 矩阵 $\mathbf{M}$ 通过耦合界

面上的结构网格点坐标计算得到; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

$$\mathbf{H}_0 = \begin{bmatrix} 1 & x_{a,1} & y_{a,1} & z_{a,1} & \varphi_{a,1,s,1} & \cdots & \varphi_{a,1,s,N_s} \\ 1 & x_{a,2} & y_{a,2} & z_{a,2} & \varphi_{a,2,s,1} & \cdots & \varphi_{a,2,s,N_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{a,N_a} & y_{a,N_a} & z_{a,N_a} & \varphi_{a,N_a,s,1} & \cdots & \varphi_{a,N_a,s,N_s} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & x_{s,1} & y_{s,1} & z_{s,1} \\ 1 & x_{s,2} & y_{s,2} & z_{s,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{s,N_s} & y_{s,N_s} & z_{s,N_s} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \varphi_{s,1,s,1} & \varphi_{s,1,s,2} & \cdots & \varphi_{s,1,s,N_s} \\ \varphi_{s,2,s,1} & \varphi_{s,2,s,2} & \cdots & \varphi_{s,2,s,N_s} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \varphi_{s,N_s,s,1} & \varphi_{s,N_s,s,2} & \cdots & \varphi_{s,N_s,s,N_s} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: x 、 y 、 z 分别为 3 个坐标方向的坐标值; N_a 和 N_s 分别为耦合界面上的气动网格点数目和结构网格点数目; φ 为基函数, 对于 TPS 函数, 可以表示为

$$\varphi_{s,i,s,j} = r_{i,j}^2 \ln r_{i,j}^2 \quad (9)$$

其中:

$$r_{i,j}^2 = (x_{s,j} - x_{s,i})^2 + (y_{s,j} - y_{s,i})^2 + (z_{s,j} - z_{s,i})^2 \quad (10)$$

式中: i 和 j 分别为耦合界面上的气动网格点编号和结构网格点编号。

基于式 (6)~式 (8) 可以得到, 系数矩阵 $\mathbf{H}$ 的规模与耦合界面上的结构网格点数目 N_s 呈正相关, 且系数矩阵 $\mathbf{H}$ 的构建需要矩阵的求逆操作, 矩阵求逆的计算量也与耦合界面上的结构网格点数目 N_s 呈正相关。因此, 耦合界面上的结构网格点数目 N_s 的大小直接影响耦合数据传递的效率。且当网格点数目 N_s 较大时, 网格点之间距离较小, 相邻网格点比较近, 式 (8) 中矩阵 $\mathbf{M}$ 对应行之间的值将非常接近, 引起矩阵 $\mathbf{M}$ 的条件数增加, 导致式 (5) 中组合矩阵求逆难度和误差增大, 从而影响系数矩阵 $\mathbf{H}$ 的构建精度。

在气动弹性耦合数值模拟中, 为了提高效率和精度, 常选择耦合界面上的部分结构网格点作为插值点, 构建减缩的耦合数据传递矩阵, 如图 1 所示。耦合界面插值点通常采用在交互界面中人工

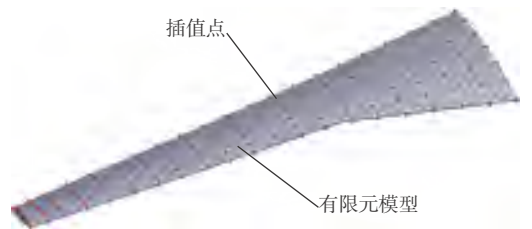


图 1 耦合界面插值点选择

Fig. 1 Selection of interpolation points on coupling interface

拾取的方式得到,该方式不仅依赖人员的经验,还比较耗时,且容易出现漏选、错选等问题,增加了气动弹性数值模拟前处理过程的时间成本。

1.2 选取算法

气动弹性耦合界面是流场求解器与结构求解器之间进行信息传递和产生作用的载体,位于流体与结构求解域的边界。针对耦合界面插值点拾取困难、耗时多的问题,本文发展了一种 2 步的插值点自动选取算法:①基于结构有限元分析模型,通过网格信息重构计算出单元的邻接单元信息,再根据邻接单元信息对网格点类型进行分类,具有邻接单元的单元边界面上的网格点定义为内部网格点,不具有邻接单元的单元边界面上的网格点定义为边界网格点,将所有标记为边界的网格点全部提取得到边界网格点集合;②对边界网格点集合中的点根据一定的选取准则进行精简,得到能够描述耦合界面信息和进行载荷、位移传递的精简插值点集,并基于精简后的插值点坐标利用式 (5)~式 (10) 构建传递系数矩阵 $\boldsymbol{H}$ 。

1.3 边界网格点提取

给定结构有限元分析模型后,能够获取模型中网格节点的坐标和网格单元的节点编号。基于网格单元的节点编号信息,即可重构出单元之间的拓扑连接关系,从而区分哪些网格点是边界网格点、哪些网格点是内部网格点。

一种简单的方法是将每个网格单元与模型中的其他网格单元依次进行匹配,找出当前网格单元是否存在邻接网格单元,并构造出邻接网格单元信息。该方法思路简单,不需要特殊的数据结构,但查找过程存在大量的无效运算,算法复杂度为 $O(n^2)$,当网格单元数量多时,查找计算量呈指数增加,查找过程非常耗时。

本文发展了一种网格单元拓扑关系快速构建方法^[15],可以将网格单元连接关系的查找时间复杂度降低为 $O(n)$,大幅降低查找的时间消耗,详细的算法流程如下:

1) 遍历全部网格单元,根据网格单元的节点编号信息,更新网格点的邻接网格单元数量及编号。节点编号出现 1 次,网格点的邻接网格单元数量加 1,该邻接网格单元编号为当前遍历的网格单元编号。

2) 遍历全部网格单元,对网格单元每个面的全部网格点,查询其邻接网格单元中是否存在非当前遍历单元的公共网格单元。如果存在,将该公共网格单元标记为网格单元的邻接单元,将网格单元和邻接网格单元的公共面标记为内部面;如果不存

在,将网格单元的当前网格面标记为边界面。

3) 遍历全部网格单元,循环每个网格面,如果网格面为边界网格面,则将网格面上的网格点全部标记为边界网格点。

4) 遍历全部网格点,将标记为边界的网格点提取,获得结构有限元分析模型的边界网格点集。

本文算法主要对三维单元(四面体、六面体)组成的结构有限元模型进行边界网格点提取。对于一些退化单元(如壳、板、梁、杆)组成的结构有限元分析模型,可以通过单元属性标记的方式直接提取边界的网格点。图 2 展示了球形结构分析模型边界网格点的提取,图中,黄色圆点为提取出的圆球模型的边界网格点。

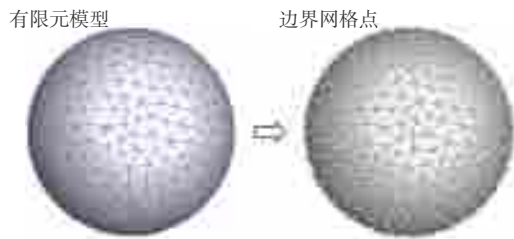


图 2 圆球模型边界网格点提取

Fig. 2 Boundary mesh points extraction of spherical model

1.4 边界网格点精简

边界网格点精简的结果是从边界网格点集中选取部分网格点构建精简网格点集,基于该精简网格点集构建耦合数据传递矩阵,实现耦合数据(载荷、位移)的插值传递。因此,精简网格点集是对全部网格点的一种近似,可以通过空间插值的方式进行描述。

径向基函数(radial basis functions, RBF)提供了一种通用的插值方式,可以通过空间点子集表征全部网格点。RBF 插值的一般形式可以表示为^[16]

$$f(\boldsymbol{X}) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \varphi(\|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_k\|) + q(\boldsymbol{X}) \quad (11)$$

式中: $f(\boldsymbol{X})$ 为位置 $\boldsymbol{X}$ 的函数值; $\boldsymbol{X}_k$ 为 RBF 基点的位置; $\|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_k\|$ 表示 2 点之间的距离; N 为 RBF 基点的数量; $\alpha_k (k=1,2,\cdots,N)$ 为插值系数; $q(\boldsymbol{X})$ 为关于 $\boldsymbol{X}$ 分量的线性多项式。针对本文空间点插值问题,可以不考虑线性多项式 $q(\boldsymbol{X})$ 的作用,简化后的 RBF 插值可以表示为

$$f(\boldsymbol{X}) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \varphi(\|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_k\|) \quad (12)$$

已知 N 个位置的函数值,利用式 (12) 可以构建关于系数 $\alpha_k (k=1,2,\cdots,N)$ 的线性方程组,求解方程组得到系数 α_k 。使用式 (12) 即可获得任意位置的函

数值。考虑结构有限元模型已有的数据信息, 插值函数 $f(\mathbf{X})$ 选择网格点的坐标 $\mathbf{X}$, 借鉴 Rendall 等在网格变形领域中提出的 RBF 插值贪婪选点策略^[17-18], 随机选用有限的网格点来插值表征整个边界网格点集, 逐步将插值误差最大的点选入精简网格点集, 直至整体插值误差降低到允许的范围之内。

为了避免网格点插值的全局效应, RBF 插值中基函数选择了紧支型的基函数, 常用的紧支型基函数如表 1 所示。对于紧支型基函数, 定义 $\eta=\|\mathbf{X}-\mathbf{X}_k\|/R$, 其中, R 为基函数的支撑半径。

表 1 紧支型基函数	
Table 1 Compact basis function	
类型	定义
Wendland's C0 (C0)	$\varphi(\eta) = (1 - \eta)^2$
Wendland's C2 (C2)	$\varphi(\eta) = (1 - \eta)^4 (4\eta + 1)$
Wendland's C4 (C4)	$\varphi(\eta) = (1 - \eta)^6 (35\eta^2 + 18\eta + 3)$
Wendland's C6 (C6)	$\varphi(\eta) = (1 - \eta)^8 (35\eta^3 + 25\eta^2 + 8\eta + 1)$

图 3 给出了圆球模型边界网格点的精简, 图中, 红色圆点为精简后的边界网格点。选取过程中, 基函数选择 Wendland's C2 函数, 基函数支撑半径 R 选择为圆球结构有限元模型长方体包络空间的对角线长度 L , 选点数量 n_p 为 200。

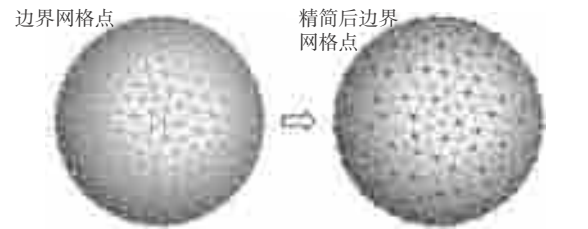


图 3 圆球模型边界网格点精简

Fig. 3 Boundary mesh points reduction of spherical model

2 算法测试

本节基于飞翼外形的结构有限元模型, 对提出的气动弹性耦合界面插值点自动选取算法开展验证和测试, 研究不同参数对边界网格点精简结果的影响规律, 为耦合界面插值点精简过程中参数选择提供依据。

2.1 边界网格点提取测试

图 4 展示了飞翼外形结构有限元模型边界网格点的提取过程。左侧图为结构有限元模型, 右侧图为提取后的边界网格点(黄色圆点), 整个结构有限元模型采用六面体网格单元进行离散, 包含 43 304 个网格点、31 608 个六面体单元。可以看出, 飞翼外形结构有限元模型的边界网格点被全部成功提取, 共有 22 808 个边界网格点。

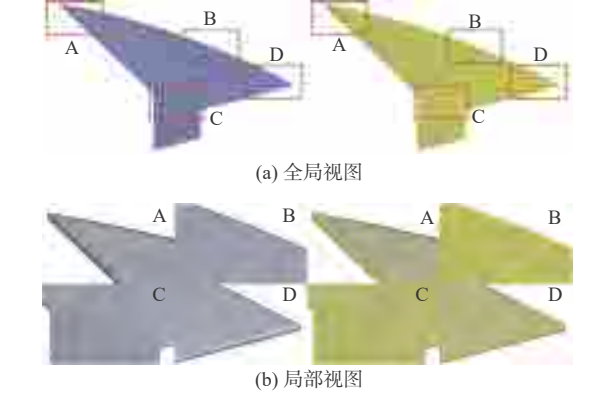


图 4 飞翼外形结构有限元模型边界网格点提取

Fig. 4 Boundary mesh points extraction of finite element model for flying wing aircraft structure

2.2 边界网格点精简测试

边界网格点精简通过 RBF 插值贪婪选取得到, 因此, 选点数量、基函数类型、基函数支撑半径的选择均会影响精简后的插值点集。分别测试不同参数对边界网格点精简的影响, 可以指导算法参数的选择, 通过对不同算法参数进行组合调优, 获得符合气动弹性数值仿真的精简插值点集。

图 5 给出了不同选点数量下飞翼外形结构有限元模型边界网格点精简结果, 图中, 红色圆点为精简后的边界网格点。精简过程中, 基函数选择 Wendland's C4 函数, 基函数支撑半径 R 选择为飞翼外形结构有限元模型长方体包络空间的对角线长度 L , 选点数量 n_p 分别为 100、200、300 和 400。

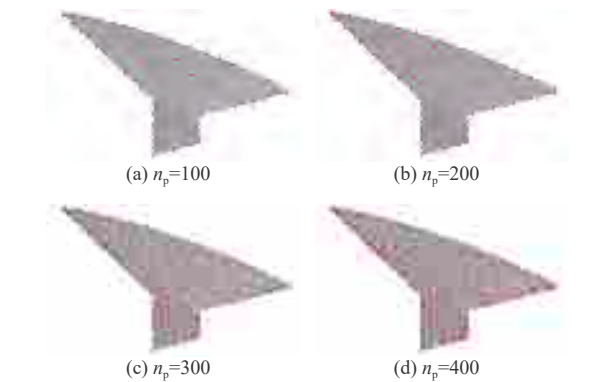


图 5 飞翼外形结构有限元模型边界网格点精简(不同选点数量)

Fig. 5 Boundary mesh points reduction of finite element model for flying wing aircraft structure (different numbers of selected points)

可以看出, 随着选点数量的增加, 精简后的边界网格点覆盖了更多的几何特征, 能够更加均匀地分布在飞翼表面, 但当插值点数量增加到一定规模 ($n_p=400$) 时, 在局部区域(前缘、后缘)存在少量网格点聚集的现象。初步分析认为, 局部位置网格点聚集说明 RBF 插值整体误差已经很小, 开始在局部位置进行振荡, 此时, 选出网格点的坐标残差降不

下来或下降得很慢,继续选入的网格点已经冗余,且聚集的网格点还会引起 RBF 插值矩阵病态,并导致插值误差增加,可以终止选点过程。因此,选点局部聚集可以作为确定选点数量或选点过程终止的一个判断准则。

图 6 给出了不同类型基函数下飞翼外形结构有限元模型边界网格点精简结果。精简过程中,选点数量 n_p 设为 300,基函数支撑半径 R 仍然选择飞翼外形结构有限元模型长方体包络空间的对角线长度 L 。

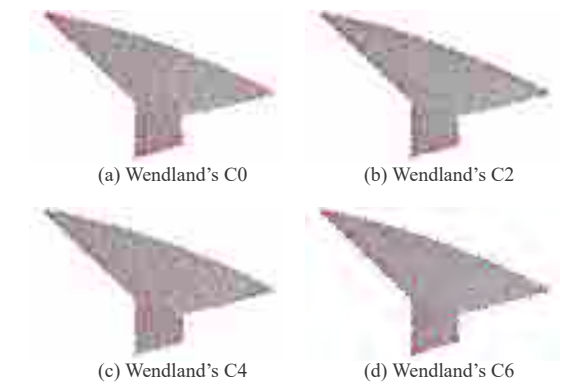


图 6 飞翼外形结构有限元模型边界网格点精简(不同基函数)
Fig. 6 Boundary mesh points reduction of finite element model for flying wing aircraft structure (different basis functions)

可以看出,对于飞翼算例,不同基函数的选点结果存在明显的差异,并没有特定的变化规律。在当前的精简参数下,直观地看精简网格点分布,Wendland's C4 函数获得的精简点集更合理一些,Wendland's C0 和 Wendland's C6 函数接近,存在局部少量网格点聚集,Wendland's C2 函数表现不理想,存在机翼中部网格点缺失和局部聚集的现象。针对特定的模型外形开展更多测试,通过参数适配,发现不同类型基函数均能获得均匀合理的精简网格点分布,只是高阶基函数在支撑半径较大情况下,容易发生局部点缺失情况,低阶基函数在支撑半径较小情况下,容易发生局部聚集的情况。因此,基函数类型需要根据模型外形和插值参数进行适配和调整。

图 7 给出了不同基函数支撑半径下飞翼外形结构有限元模型边界网格点精简结果,图中, L 为飞翼外形结构有限元模型长方体包络空间的对角线长度。精简过程中,选点数量 n_p 设为 300,基函数选择 Wendland's C4 函数。可以看出,随着 RBF 支撑半径 R 的变化,插值点集存在明显不同,当支撑半径较大($R/L=2.0$)或较小($R/L=0.5$)时,插值点集均有不均匀和局部集中的现象,而当支撑半径为 $1.0L$ 和 $1.5L$ 时,插值点集选点分布较均匀合理。图 7 结果说明,支撑半径是影响选点结果的关键参数,需要根据模型外形、基函数类型进行调整优化。

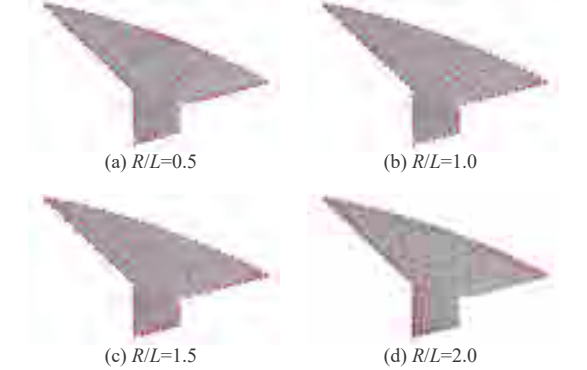


图 7 飞翼外形结构有限元模型边界网格点精简
(不同基函数支撑半径)
Fig. 7 Boundary mesh points reduction of finite element model for flying wing aircraft structure (different support radius of basis functions)

综上,选点数量、基函数类型、基函数支撑半径对边界网格点精简过程均有比较明显的影响,且各参数之间不是相互独立的,需要根据结构有限元模型的几何特征进行参数匹配和调整。根据上述参数的影响特点,结合有限元模型的几何特征复杂程度,首先,可以初步估算出描述几何特征的网格点数量,然后,根据网格点数量匹配一种基函数类型,最后,调整基函数支撑半径大小,获得合理的精简网格点分布。

3 算法应用

本节将发展的耦合界面插值点自动选取算法应用于实际算例的静气动弹性耦合分析,验证算法的有效性。模拟算例选择气动弹性验证中经常使用的 2 个标准算例: AGARD445.6^[19] 和 DLR-F6^[20-21],分别开展 2 个算例的静气动弹性耦合数值模拟,对比不同选点结果下结构变形、压力分布的变化。静气动弹性耦合计算通过国家数值风洞工程发展的流固耦合模拟软件 NNW-FSI 开展,关于 NNW-FSI 软件的功能和精准度验证可以参考文献 [22]。

3.1 AGARD445.6 静气动弹性分析

3.1.1 计算参数

AGARD445.6 是气动弹性数值计算程序验证中用到的经典模型之一。AGARD445.6 模型外形是一个后掠机翼,1/4 弦长位置的后掠角为 45°,翼根弦长为 0.558 m,翼梢弦长为 0.368 m,机翼半展长 $b/2$ 为 0.762 m,展弦比为 3.3,梢根比为 0.66。AGARD445.6 展向剖面为 NACA 65A004 对称翼型,沿展向机翼无扭转。

图 8 给出了 AGARD445.6 机翼气动弹性分析的计算网格。其中,流场计算网格采用 H 型拓扑结构,物面周围包裹 O 型网格用于模拟边界层内部流

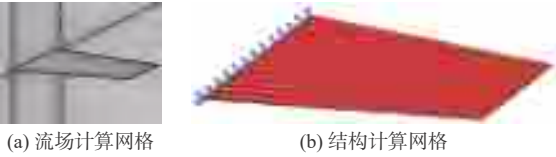


图 8 AGARD445.6 模型计算网格

Fig. 8 Computational grid of AGARD445.6 model

动,第 1 层网格高度为 1.8×10^{-5} m,计算网格共包含 36 个网格块、1 489 704 个网格点、1 366 528 个网格单元;结构计算网格采用四边形壳单元,展向分布 33 个点,弦向分布 13 个点,共 429 个网格点、384 个网格单元,翼根位置的节点通过固支方式进行约束,壳单元厚度通过翼型形状和弦向尺寸进行定义。

流场计算马赫数 Ma 为 0.85,基于平均气动弦长的雷诺数 Re_c 为 5.6×10^5 ,机翼攻角 α 为 5° ,来流速度 q 为 3.073 kPa。结构有限元模型采用正交各向异性材料,纵向弹性模量 E_x 为 3.151 1 GPa,横向弹性模量 E_y 为 0.4162 GPa,平面剪切模量 G_{xy} 为 0.439 2 GPa,泊松比 ν 为 0.31,密度 ρ 为 381.98 kg/m^3 。流场湍流模拟采用两方程 SST 模型^[23],结构静变形求解采用柔度矩阵方法,耦合数据传递采用无限板样条(infinite plate spline, IPS)法^[13],流场网格更新采用径向基函数-超限插值(radial basis function-transfinite interpolation, RBF_TFI)方法^[24]。

3.1.2 选点结果

图 9 给出了 AGARD445.6 模型耦合界面插值点的选取结果,由于 AGARD445.6 模型结构有限元分析采用壳单元离散,不需要进行边界网格点提取,直接利用 RBF 插值进行精简。选取过程中,基函数选择 Wendland's C2 函数,基函数支撑半径选择 0.18 m,共给出 4 组不同数量的选取结果,其中, $n_p=429$ 为选择全部耦合界面网格点的结果,用作参考值对其他精简点集结果进行评估。可以看出,不同选点数量下,精简点集近似均匀分布,没有出现明显的局部聚集,仅在 n_p 为 100 时,在翼根前缘出现了局部角点缺失的情况。

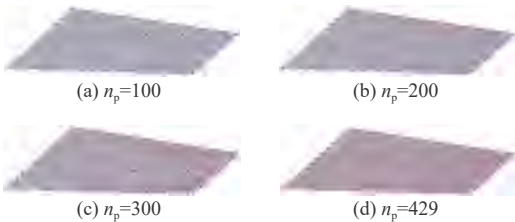


图 9 AGARD445.6 模型选点结果

Fig. 9 Results of AGARD445.6 model selecting points

3.1.3 计算结果

图 10 给出了 AGARD445.6 模型结构变形计算结果。图中,Ref 表示选取全部 429 个网格点获得

的结构变形结果,用做参考数据进行对比。可以看出,本文自动选取算法获得的机翼结构变形与使用全部网格点获得的机翼结构变形十分吻合,差异非常小,验证了发展的算法能够建立准确的耦合数据传递,获得准确的结构变形。不同选点数量下的结构变形也基本一致,弯曲变形基本没有差异(见图 10(a)),扭转角在靠近翼梢位置存在微小差异,但差异量相比整体变形基本可以忽略(图 10(b)),说明对于 AGARD445.6 算例,较小的耦合插值点也可以获得精确的变形结果。

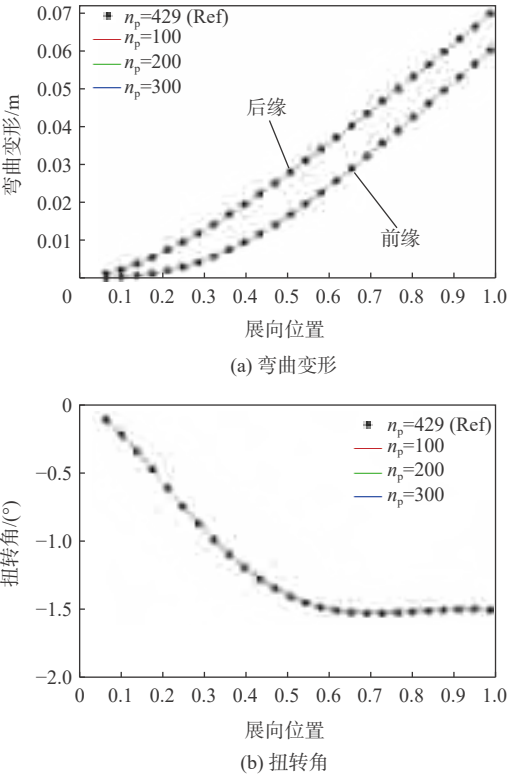


图 10 AGARD445.6 模型变形计算结果

Fig. 10 Computational deformation results of AGARD445.6 model

图 11 给出了 AGARD445.6 模型不同翼剖面压力系数计算结果,分别选取了 $\eta_b=0.34$ 和 $\eta_b=0.95$ 这 2 个剖面(η_b 为从翼根到翼梢方向的长度与展长的比值)。可以看出,自动选取算法获得的压力分布与使用全部网格点获得的压力分析十分吻合,且不同选点数量的压力分布结果基本一致,再次验证了算法的可行性和有效性。

3.2 DLR-F6 静气动弹性分析

3.2.1 计算参数

DLR-F6 模型是 20 世纪 80 年代由德国宇航研究院 DLR 设计的双引擎飞机外形,代表一类现代宽体运输机。因为具有丰富的风洞试验数据,且外形具有一定的代表性,DLR-F6 模型 2 次被选为 AIAA 阻力预测会议 DPW 的标准算例,用于评估世

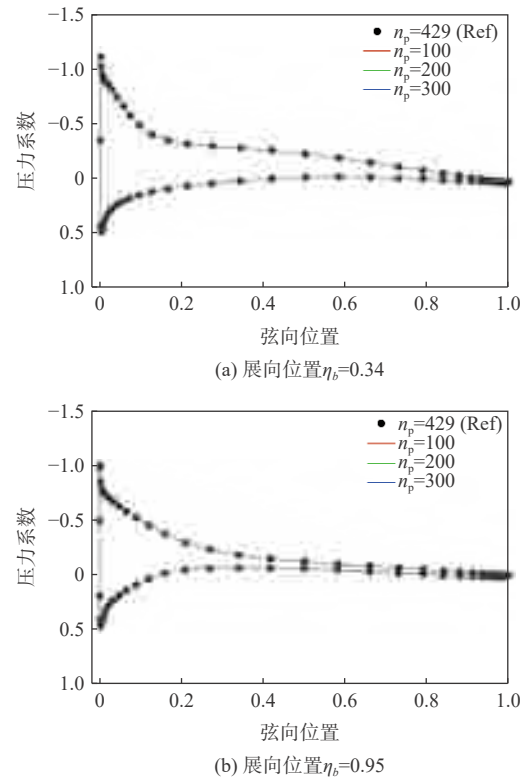


图 11 AGARD445.6 模型压力系数计算结果
Fig. 11 Computational pressure coefficient results of AGARD445.6 model

界范围内 CFD 软件的发展水平。

DLR-F6 模型机身长度 L_B 为 1.192 m, 机翼展长 b 为 1.173 m, 机翼参考面积 S 为 0.145 4 m², 平均气动弦长 c 为 0.141 2 m, 机翼展弦比为 9.5, 1/4 弦向位置后掠角为 25°, 力矩参考点 X_{ref} 、 Y_{ref} 、 Z_{ref} 分别为 0.1579 m、0 m、-0.033 92 m。DLR-F6 飞机巡航点设计马赫数 Ma 为 0.75、升力系数 C_L 为 0.50, 基于平均气动弦长 c 的雷诺数 Re_c 为 3.0×10^6 。

图 12 给出了 DLR-F6 翼身组合体模型的气动弹性计算网格。其中, 流场网格整体采用 H 型拓扑, 在机身和机翼周围分别包裹 O 型网格用于模拟边界层内部的流动, 第 1 层网格高度为 1.5×10^{-6} m, O 型网格沿着物面法向分布有 33 个网格点, 流场计算网格共包含 106 个网格块、2 656 378 个网格点、2 402 304 个六面体网格单元; 结构有限元采用六面体实体单元进行建模, 共包含 1 652 个网格节点,

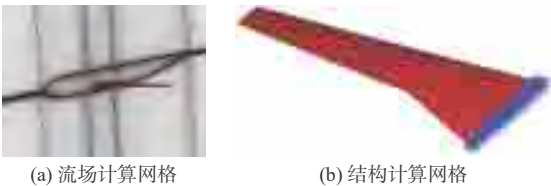


图 12 DLR-F6 模型计算网格
Fig. 12 Computational grid of DLR-F6 model

754 个六面体网格单元, 固支约束添加在机翼根部, 不考虑机身的变形。

流场计算来流马赫数 Ma 为 0.75, 基于平均气动弦长的雷诺数 Re_c 为 3.0×10^6 , 模型攻角 α 为 0.175°, 来流速压 q 根据风洞试验条件定为 40 kPa。DLR-F6 模型机翼材料为 90MnV8 合金钢, 弹性模量 E 为 200 GPa, 泊松比选为 0.3。流场湍流模拟采用两方程 SST 模型^[23], 结构静变形求解采用柔度矩阵方法, 耦合数据传递采用 IPS^[13], 流场网格更新采用 RBF_TFI 方法^[24]。

3.2.2 选点结果

图 13 给出了 DLR-F6 模型耦合界面插值点的选取结果, 从 DLR-F6 的结构有限元模型中得到边界网格点集, 再利用 RBF 插值进行精简。选取过程中, 基函数选择 Wendland’s C0, 基函数支撑半径选择 1.257 m, 共给出 4 组不同数量的选取结果, 其中, $n_p=336$ 为人工手动选取耦合界面网格点的结果, 用作参考值对其他精简点集结果进行评估。可以看出, 不同选点数量下, 精简点集近似均匀分布, 没有出现明显的局部聚集。

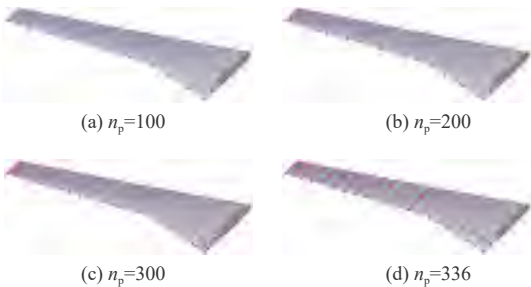


图 13 DLR-F6 模型选点结果
Fig. 13 Results of DLR-F6 model selecting points

3.2.3 计算结果

图 14 给出了 DLR-F6 模型结构变形计算结果。图中, Ref 表示人工选取 336 个网格点获得的结构变形结果, 用做参考数据进行对比。可以看出, 本文自动选取算法获得的机翼结构变形与使用人工选取 336 个网格点获得的机翼结构变形十分吻合, 差异非常小, 验证了发展的算法能够建立准确的耦合数据传递, 获得准确的结构变形。不同选点数量下的结构变形也基本一致, 弯曲变形基本没有差异(见图 14(a)), 扭转角在翼尖位置存在微小差异, 但差异量相比整体变形基本可以忽略(见图 14(b)), 说明对于 DLR-F6 算例, 较小的耦合插值点也可以获得精确的变形结果。

图 15 给出了 DLR-F6 模型不同翼剖面压力系数计算结果, 分别选取 $\eta_b=0.34$ 和 $\eta_b=0.95$ 这 2 个剖面。可以看出, 自动选取算法获得的压力分布与使

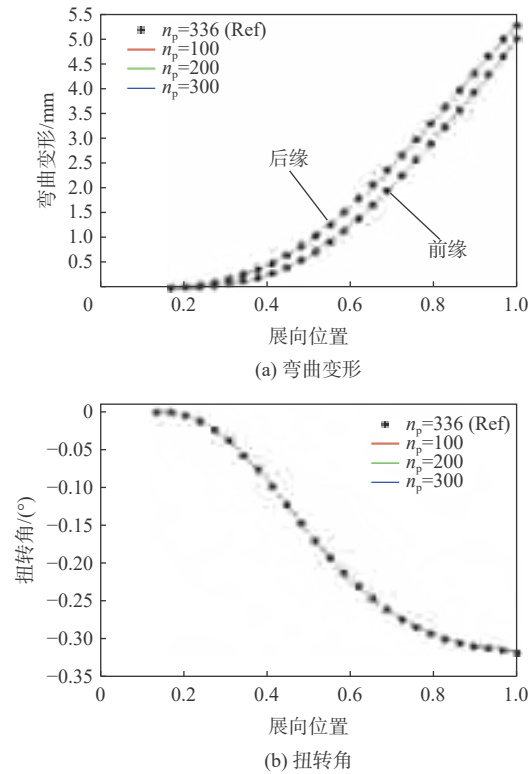


图 14 DLR-F6 模型变形计算结果

Fig. 14 Computational deformation results of DLR-F6 model

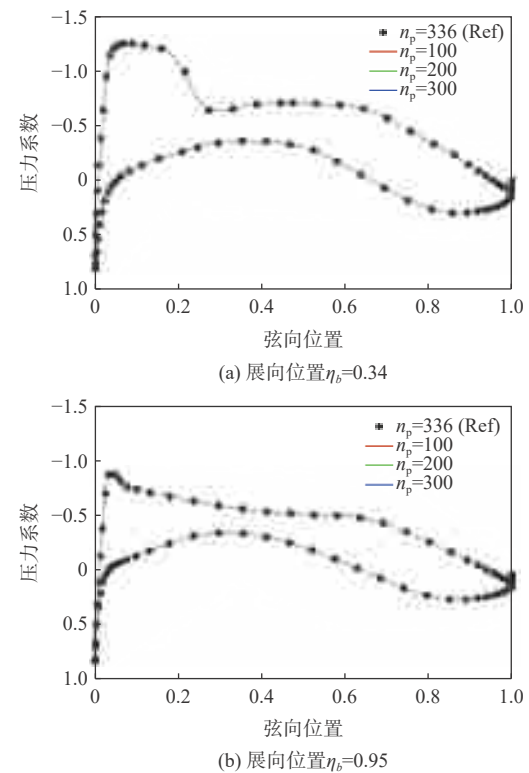


图 15 DLR-F6 模型压力系数计算结果

Fig. 15 Computational pressure coefficient results of DLR-F6 model

用全部网格点获得的压力分析十分吻合,且不同选点数量的压力分布结果基本一致,再次验证了选点算法的可行性和有效性。图中,后缘压力系数存在

一定的上翘现象,这是由于机翼后缘存在厚度,上翼面气流流过后缘时发生膨胀,在后缘底部产生低速低压死流区,导致后缘底部压力降低,对机翼整体气动特性的影响比较小。

4 结 论

针对气动弹性耦合界面插值点手动选择效率低的问题,发展了一种自动选取算法,并基于不同的算例对自动选取算法进行了测试、应用及验证,结果表明:

- 1) 算法能够实现耦合界面插值点的自动选取,并能够获得与手动选点方式一致的气动弹性耦合计算结果,从而大幅提高耦合界面插值点的选取效率。
- 2) 算法对基函数类型、基函数支撑半径、选点数量等参数具有较强的敏感性,获取好的选点结果需要不同参数之间进行组合优化实现,针对特定外形,如何评价选点结果优劣及自动获取最优选点参数仍是需要进一步研究的工作。

致谢 感谢国家数值风洞流固耦合模拟软件开发团队许赞泉在飞翼结构有限元模型、赵梓斌在论文撰写方面提供的帮助。

参考文献 (References)

[1] 陈坚强. 国家数值风洞 (NNW) 工程关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(11): 1326-1347.
CHEN J Q. Advances in the key technologies of Chinese national numerical windtunnel project[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(11): 1326-1347(in Chinese).

[2] 张森, 刘铁军, 马涂亮, 等. 基于 CFD 方法的大型客机高速气动设计[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 244-254.
ZHANG M, LIU T J, MA T L, et al. High speed aerodynamic design of large civil transporter based on CFD method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 244-254(in Chinese).

[3] 王运涛, 孟德虹, 孙岩, 等. 超大规模气动弹性数值模拟软件研制 (2017)[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(6): 1019-1026.
WANG Y T, MENG D H, SUN Y, et al. Software development of ultra-scale numerical simulaiton for aero-elastic problem(2017)[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(6): 1019-1026(in Chinese).

[4] 相倩. 基于 CFD/CSD 耦合的跨声速非线性气动弹性研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(7): 11-16.
XIANG Q. Nonlinear aeroelasticity research of transonic flow based on CFD/CSD coupled algorithm[J]. Aeronautical Science and Technology, 2015, 26(7): 11-16(in Chinese).

[5] BENJAMIN W U. Partitioned fluid-structure interaction on massively parallel systems[D]. Munchen: Technischen Universitat Munch, 2016.

[6] MATTHIES H G, STEINDORF J. Partitioned but strongly coupled iteration schemes for nonlinear fluid-structure interaction[J]. Com-

puters & Structures, 2002, 80(27-30): 1991-1999.

[7] 李宫旭. 流固耦合界面数据传递方法研究与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.

LI G X. Study and implementation of data transfer methods for interfaces of fluid-structure interaction[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021(in Chinese).

[8] TOTOUNFEROUSH A, SIMONIS F, UEKERMANN B, et al. Efficient and scalable initialization of partitioned coupled simulations with preCICE[J]. Algorithms, 2021, 14(6): 166.

[9] 刘晓晨. 弹性载荷设计中插值方法的研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(4): 52-56.

LIU X C. The interpolation method in elasticity load design[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2020(4): 52-56(in Chinese).

[10] GAO X W, CHEN P C, TANG L. Deforming mesh for computational aeroelasticity using a nonlinear elastic boundary element method[J]. AIAA Journal, 2002, 40(8): 1512-1517.

[11] RENDALL T C S, ALLEN C B. Unified fluid-structure interpolation and mesh motion using radial basis functions[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 74(10): 1519-1559.

[12] 孙岩, 黄勇, 王运涛, 等. TRIP 软件的静气动弹性计算模块开发及精度验证[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(5): 620-624.

SUN Y, HUANG Y, WANG Y T, et al. Development and precision validation of static aeroelastic computational module on flow solver TRIP[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2017, 35(5): 620-624(in Chinese).

[13] 赵永辉, 黄锐. 高等气动弹性力学与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

ZHAO Y H, HUANG R. Advanced aeroelastic mechanics and control[M]. Beijing: Science Press, 2015(in Chinese).

[14] 赵永辉. 气动弹性力学与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

ZHAO Y H. Aeroelastic mechanics and control[M]. Beijing: Science Press, 2007(in Chinese).

[15] 李豪, 孙岩, 孟德虹, 等. 一种结构有限元的边界点提取方法、装置及设备 and 介质: CN116415470A[P]. 2023-07-11.

LI H, SUN Y, MENG D H, et al. Method, device, equipment and medium for extracting boundary points of structural finite element: CN116415470A[P]. 2023-07-11(in Chinese).

[16] BUHMANN M D. Radial basis functions[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

[17] RENDALL T C S, ALLEN C B. Efficient mesh motion using radial basis functions with data reduction algorithms[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(17): 6231-6249.

[18] RENDALL T C S, ALLEN C B. Reduced surface point selection options for efficient mesh deformation using radial basis functions[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229(8): 2810-2820.

[19] 容浩然, 戴玉婷, 许云涛, 等. 基于非定常气动力降阶的 AGARD445.6 硬机翼不同迎角颤振研究[J]. 工程力学, 2022, 39(12): 232-247.

RONG H R, DAI Y T, XU Y T, et al. Research on the flutter characteristics of AGARD445.6 solid wing considering the initial angle of attack based on reduced order model[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(12): 232-247(in Chinese).

[20] VASSBERG J C, TINOCO E N, MANI M, et al. Abridged summary of the third AIAA computational fluid dynamics drag prediction workshop[J]. Journal of Aircraft, 2008, 45(3): 781-798.

[21] BURNER A W, GOAD W K, MASSEY E A, et al. Wing deformation measurements of the DLR-F6 transport configuration in the national transonic facility: AIAA-2008-6921[R]. Reston: AIAA, 2008.

[22] 孙岩, 王昊, 江盟, 等. NNW-FSI 软件静气动弹性耦合加速策略设计与实现[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 216-225.

SUN Y, WANG H, JIANG M, et al. Design and implementation of coupling acceleration strategy in static aeroelastic module of NNW-FSI software[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 216-225(in Chinese).

[23] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.

[24] 孙岩, 邓小刚, 王运涛, 等. RBF_TFI 结构动网格技术在风洞静气动弹性修正中的应用[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 228-233.

SUN Y, DENG X G, WANG Y T, et al. Application of structural dynamic grid method based on RBF_TFI on wind tunnel static aeroelastic modification[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 228-233(in Chinese).

Automatic selection algorithm of interpolation points on aeroelastic coupling interface

LI Hao^{1, 2}, ZHANG Xiaorong¹, SUN Yan^{1, 2, 3, *}, DENG Yanzeng², ZHU Zhimao²

- (1. School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2. Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;
3. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The method of selecting partial grid points on the coupling interface to build the interpolation matrix of coupling data is typically used in aeroelastic modeling in order to decrease the interpolation matrix's scale and increase its efficiency. Now, the selection of the interpolation points from the coupling interface is achieved manually and has issues of high time cost, wrong selection or missing selection when the number of grid points is large. In order to solve the problem caused by manual selection, a two-step automatic selection algorithm of the interpolation points on the coupled interface, which is based on the extraction and reduction of boundary grid points, is presented. Firstly, the adjacent information of grid elements is reconstructed through the node index data of each element in the structural finite element model. The grid points are classified into boundary and interior points with the use of the adjacent information and the boundary grid points are extracted directly. Secondly, the boundary grid points are reduced to create the coupling interface's interpolation point set using the greedy algorithm and radial basis function (RBF) interpolation, which is frequently used in grid deformation. The grid point with the largest interpolation error is then gradually added to the point set. Finally, the automatic selection algorithm is tested to investigate the influence of parameters through the flying wing case and applied to the static aeroelasticity simulation of AGARD445.6 and DLR-F6 models. The test and simulation data demonstrate that the present algorithm can construct the interpolation point set of the coupling interface automatically and obtain approximate simulation results as manual selection.

Keywords: aeroelasticity; coupling interface; interpolation point; radial basis function interpolation; greedy method

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0081

高超声速变外形飞行器自适应模型预测控制

葛健豪, 郭杰*, 王浩凝, 张宝超, 万泱泱, 唐胜景

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 针对状态受限条件下高超声速变外形飞行器的高精度控制问题, 提出一种基于强化学习的参数自适应模型预测控制 (MPC) 方法。考虑传统组合体外形难以在高超声速条件下表现良好的气动性能, 设计一种基于乘波体为基准外形的变外形飞行器气动布局, 并建立该类飞行器的面向控制的姿态动力学模型。针对飞行过程中控制约束与飞行器状态约束问题, 基于 MPC 滚动生成控制指令。进一步考虑飞行器连续变形过程中参数时变引起的控制器性能变化问题, 设计一种基于近端策略优化 (PPO) 的在线参数自适应方案。理论分析和仿真结果证明, 所提方法能够在满足飞行器约束条件下, 提高控制精度, 并降低计算耗时。

关键词: 高超声速变外形飞行器; 姿态控制; 模型预测控制; 强化学习; 气动特性分析

中图分类号: V448

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1242-12

高超声速滑翔飞行器 (hypersonic glide vehicle, HGV) 具有长航程、强机动性、任务灵活等飞行特点, 是应对未来远距离作战需求、突破导弹防御系统、实现精确快速打击的重要手段^[1-2]。随着 HGV 的使用效益逐渐体现, 如何增强其飞行性能成为值得进一步研究的问题。将变形技术引入高超声速飞行器中, 以变形量作为可控参数融入飞行器设计环节, 使其能够适用于更宽范围内的飞行空域和速域, 从而提高飞行器飞行性能, 获得更高的任务灵活性和环境适应性^[3-5]。

在当前研究中, 诸多先进控制策略已经逐渐应用于高超声速飞行器控制系统设计。滑模控制由于具有优秀的鲁棒性和控制性能, 得到了较为深入的研究和发展^[6-7]。文献 [8] 通过设计预设性能函数, 结合反步控制方法, 满足控制系统对稳态精度和动态过程的任务需求, 并采用神经网络对不确定项进行拟合, 增强系统鲁棒性。文献 [9] 采用自适应双启发式动态规划 (adaptive dual heuristic dynamic programming, ADHDP) 算法与容错控制结合, 设计飞行器容错控制系统, 实现在执行机构故障下的容

错控制。由于高超声速飞行器在再入过程中存在较强的内外扰动, 部分研究将自适应律与非线性控制器结合, 实现在外界干扰条件下的鲁棒控制^[10-11]。

但变形技术在提升飞行器性能的同时, 也为飞行器控制系统带来更多的困难, 主要包含以下 3 点: ①变形过程中产生复杂附加力矩, 难以建立精确的动力学模型; ②飞行器外形变化导致气动参数摄动及操稳性能的剧烈变化, 难以通过地面风洞试验等方式获得准确的气动数据, 为控制系统设计带来时变效应和大不确定性; ③为保证飞行器的安全边界, 需引入额外的飞行状态约束。针对高超声速变外形飞行器姿态控制问题, 文献 [12] 设计了有限时间收敛滑模控制器, 结合固定时间模糊干扰观测器, 实现对多元不确定干扰的补偿。文献 [13] 将有限时间控制方法应用于高超声速变体飞行器姿态控制过程, 通过有限时间收敛指令滤波器, 有效解决常规滤波器指令跟踪慢、精度低的问题, 实现不同变形速率下的飞行器姿态跟踪控制。文献 [14] 将有限时间滑模与事件触发机制相结合, 有效降低

收稿日期: 2024-02-05; 录用日期: 2024-04-26; 网络出版时间: 2024-05-19 12:17

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240517.1541.001

*通信作者. E-mail: guojie1981@bit.edu.cn

引用格式: 葛健豪, 郭杰, 王浩凝, 等. 高超声速变外形飞行器自适应模型预测控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1242-1253.

GE J H, GUO J, WANG H N, et al. Adaptive model predictive control for hypersonic morphing vehicle [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1242-1253 (in Chinese).

舵面操作频率,且未带来明显控制损失。文献 [15] 采用基于障碍李雅普诺夫函数的模型预测控制器,结合扰动观测器,实现了在角度和角速度约束下的变外形飞行器姿态控制。综上,当前研究在实现变外形飞行器姿态控制的基础上,针对提高控制品质、满足过程约束、减少飞行资源消耗等多种任务需求,取得了一定研究成果,但对变形过程中参数变化引起的控制能力下降问题研究较少。

模型预测控制 (model predictive control, MPC) 方法通过预测系统状态,以滚动优化的形式得到控制指令,并满足状态约束。文献 [16] 将 MPC 应用于月球着陆问题,能够在燃料晃动和参数时变条件下满足着陆任务需求。文献 [17] 利用 MPC,通过优化模型滚动求解特点,结合深度学习在多参数寻优上的优势,将深度学习算法替代二次优化算法在线应用,实现低硬件需求下的智能控制。文献 [18] 将基于障碍李雅普诺夫函数的 MPC 应用于高超声速飞行器控制问题,实现全状态约束下飞行器姿态控制。可见,MPC 控制器在强参数摄动条件下能够取得良好的控制效果。因此,采用 MPC 作为基线姿态控制器,通过构建包含控制性能和状态约束的优化模型,能够在满足状态约束的前提下,实现系统快速跟踪,且具有较强的鲁棒性。

但飞行器变形过程中控制能力时刻变化,以及 MPC 中缩短控制耗时的需求,对 MPC 控制参数的自适应整定能力提出更高要求。随着计算机性能的提高,深度学习、强化学习等智能算法逐渐应用于飞行器控制系统中,以增强控制系统在复杂环境下的自适应能力。文献 [19] 采用双重神经网络的自适应控制方法,神经网络分别用来近似飞行器未建模动力学及控制输出,实现了在不确定扰动下的鲁棒控制。文献 [20] 将离线训练后的强化学习智能体应用于速度子系统在线控制,并在高度子系统中引入基于事件触发机制和确定学习思想的控制方案,有效降低了控制所需的计算和通信资源。

综合上述研究思路,针对变外形飞行器状态约束下姿态控制问题,本文将基于强化学习的参数自适应 MPC 方法应用于高超声速变外形飞行器姿态控制,提升控制系统在状态受限下的鲁棒性和控制性能。为提高变外形飞行器气动性能,设计以乘波体为基准外形的高超声速变外形乘波体 (hypersonic

morphing waverider, HMW) 气动布局,给出适用于该类飞行器的动力学建模方案。进一步,在该模型基础上,设计面向 HMW 的模型预测控制器,实现状态约束下的姿态跟踪。针对参数摄动引起的控制精度不足问题,设计近端策略优化 (proximal policy optimization, PPO) 智能体实现自适应参数整定,有效提高控制系统跟踪精度,并降低控制指令生成耗时。

1 高超声速变外形飞行器动力学模型

1.1 高超声速变外形飞行器气动模型

考虑乘波体构型在高超声速条件下具有相较于组合体布局更高的升阻比和均匀的下表面流场^[21],HMW 以根据锥导乘波理论在马赫数 $Ma = 15$ 下获得的乘波体作为基础构型。变形部分由左、右可变机翼组成,2 个机翼可在飞行过程中由智能蒙皮实现后掠角与展长的同时变化,减弱乘波体在非设计工况下的气动性能下降问题,各状态下 HMW 外形与总体参数如图 1 和表 1 所示。

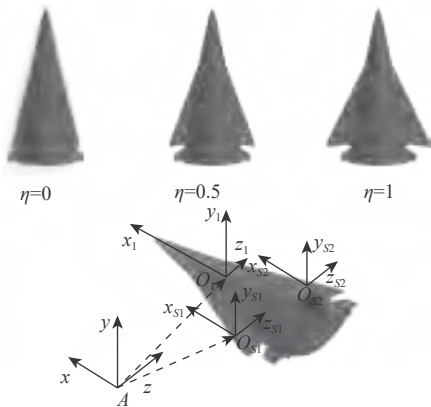


图 1 高超声速变外形乘波体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HMW

根据表 1 所列参数,以飞行器翼展 b 为特征量对 HMW 变形量 η 定义如下:

$$\eta = \frac{b - b_{\min}}{b_{\max} - b_{\min}} \tag{1}$$

由式(1)可知,变形量 $\eta = 0$ 时,机翼面积最小; $\eta = 1$ 时,机翼面积最大; $0 < \eta < 1$ 时,为飞行器连续变形过程中的过渡状态。

针对图 1 中飞行器各变形状态,在 CFD 软件的 Fluent 中分析不同工况下的气动性能,各仿真条件下飞行环境和飞行器舵偏角范围如表 2 所示。

表 1 高超声速变外形乘波体飞行器总体设计参数

Table 1 Overall designed parameters of HMW

固定机身 质量 m_0/kg	可变机翼 质量 m_w/kg	参考长度 L_{ref}/m	参考面积 $S_{\text{ref}}/\text{m}^2$	最小翼展 $b_{\min}/\text{m}$	最大翼展 $b_{\max}/\text{m}$	绕机体 x 轴转动 惯量 $I_{xx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	绕机体 y 轴转动 惯量 $I_{yy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	绕机体 z 轴转动 惯量 $I_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	惯性积 $I_{xy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
1 000	50	2.4	1.2	0.1	0.5	63	508	467	106

表 2 气动仿真工况条件

Table 2 Aerodynamic simulation conditions

高度 <i>H</i> /km	马赫数 <i>Ma</i>	迎角 <i>α</i> /(°)	侧滑角 <i>β</i> /(°)	左升降舵偏角 <i>δ</i> _{D1} /(°)	右升降舵偏角 <i>δ</i> _{D2} /(°)	方向舵偏角 <i>δ</i> _{D3} /(°)
25	3~15(2)	0~20(4)	-3~3(3)	-30~30(10)	-30~30(10)	-30~30(10)

注: 括号中数字表示取值间隔。

对仿真结果进行分析,可以得到零舵偏角下不同变形状态 HMW 升阻比特性和俯仰力矩系数的变化曲线,如图 2 和图 3 所示。

对于传统固定外形飞行器,气动模型可由迎角、马赫数、飞行高度和舵偏角等共同决定,在此基础上,引入表征飞行器变形量的参数 η ,通过最小二乘法拟合轴向力系数 C_x 、法向力系数 C_y 、侧向力系数 C_z 、滚转力矩系数 C_{mx} 、偏航力矩系数 C_{my} 和俯仰力矩系数 C_{mz} 关于 Ma 、 η 、 α 、 β 、 δ_{D1} 、 δ_{D2} 和 δ_{D3} 的多项式函数关系式,获得不同构型和不同状态下的气动系数,拟合公式形式可以表示为

$$C_i = C_{i0}(Ma, \eta, \alpha, \beta) + \Delta C_{i/\delta_{D1}}(Ma, \eta, \alpha, \beta, \delta_{D1}) + \Delta C_{i/\delta_{D2}}(Ma, \eta, \alpha, \beta, \delta_{D2}) + \Delta C_{i/\delta_{D3}}(Ma, \eta, \alpha, \beta, \delta_{D3})$$

(2)

式中: $i = x, y, z, mx, my, mz$; C_{i0} 为飞行器在零舵偏角状态下的气动系数; $\Delta C_{i/\delta_{D1}}$ 、 $\Delta C_{i/\delta_{D2}}$ 和 $\Delta C_{i/\delta_{D3}}$ 为飞行器在升降舵和方向舵影响下的气动增量。

1.2 姿态动力学模型

考虑变外形飞行器飞行过程中,外形变化对飞行器整体质心位置、转动惯量等产生影响,以固定机身质心位置为飞行器旋转中心,建立机体坐标系。忽略翼面变形引起的机翼质量变化, HMW 飞行器姿态动力学模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = -\omega_x \cos \alpha \tan \beta + \omega_y \sin \alpha \tan \beta + \omega_z \\ \dot{\beta} = \omega_x \sin \alpha + \omega_y \cos \alpha \\ \dot{\sigma} = \omega_x \cos \alpha \tan \beta - \omega_y \sin \alpha \cos \beta + \omega_z \sin \beta \\ \dot{\omega}_x = \frac{I_{xy}(M_x + M_{Dx} + M_{Gx})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} + \frac{I_{xy}(M_y + M_{Dy} + M_{Gy})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} + \frac{I_{xy}(I_{zz} - I_{xx} - I_{yy})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} \omega_x \omega_z + \frac{(I_{yy} - I_{zz})I_{yy} + I_{xy}^2}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} \omega_y \omega_z \\ \dot{\omega}_y = \frac{I_{xx}(M_y + M_{Dy} + M_{Gy})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} + \frac{I_{xy}(M_x + M_{Dx} + M_{Gx})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} + \frac{I_{xy}(I_{yy} + I_{xx} - I_{zz})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} \omega_y \omega_z + \frac{(I_{zz} - I_{xx})I_{xx} + I_{xy}^2}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} \omega_x \omega_z \\ \dot{\omega}_z = \frac{M_z + M_{Dz} + M_{Gz}}{I_{zz}} + \frac{I_{xy}(\omega_x^2 - \omega_y^2)}{I_{zz}} + \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{cases}$$

(3)

式中: σ 为倾侧角; ω_x 、 ω_y 和 ω_z 分别为滚转、偏航和俯仰角速度; M_x 、 M_y 和 M_z 分别为飞行器所受滚转、偏航和俯仰气动力矩; M_{Gx} 、 M_{Gy} 、 M_{Gz} 分别为机翼质心位置变化产生的 3 通道变形重力力矩,可由几何关系得出; M_{Dx} 、 M_{Dy} 和 M_{Dz} 分别为飞行器所受的 3 通道变形动态力矩,其表达式为

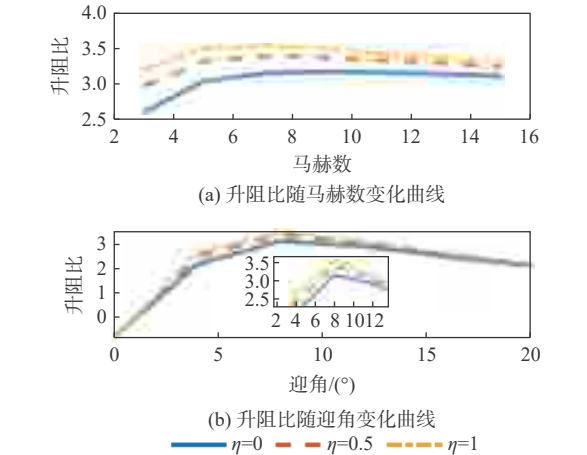


图 2 高超声速变外形乘波体升阻比特性

Fig. 2 Lift-drag ratio characteristics of HMW

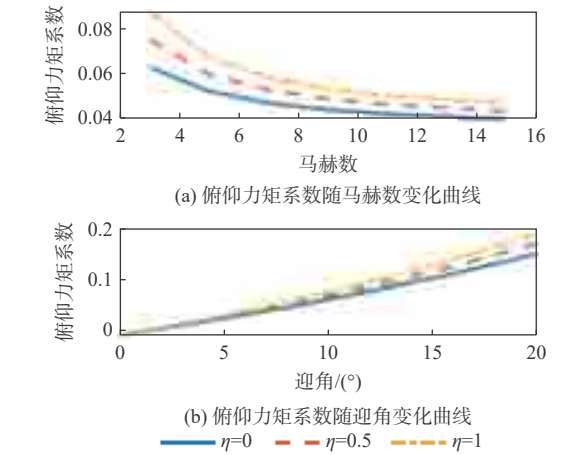


图 3 高超声速变外形乘波体俯仰力矩特性

Fig. 3 Pitching moment characteristics of HMW

从图 2 可以看出, HMW 在迎角 $\alpha = 8^\circ$ 呈现最佳升阻比状态。其中, $\eta = 1$ 下具有最大升阻比, 约为 3.5。随马赫数降低, 乘波体产生的波阻逐渐减弱, 使变形对气动性能提升更加显著, 在 $Ma = 3$ 状态下, HMW 升阻比最大提升 23%。

图 3 给出了 HMW 的俯仰力矩特性曲线。可以看出, 飞行器呈现静不稳定状态, 即质心处于气动压心之后, 且随着机翼展开, 飞行器静不稳定性进一步增强, 增大了控制系统的设计难度。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_D = \begin{bmatrix} M_{Dx} \\ M_{Dy} \\ M_{Dz} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\omega_z I_{yy} \omega_{yy} + \omega_y I_{zz} \omega_z \\ \omega_z I_{xx} \omega_x - \omega_x I_{zz} \omega_z \\ -\omega_y I_{xx} \omega_x + \omega_x I_{yy} \omega_{yy} \end{bmatrix} + \\ m_w \left(\begin{bmatrix} -\omega_z (S_z \dot{S}_x - S_x \dot{S}_z) + \omega_y (-S_y \dot{S}_x + S_x \dot{S}_y) \\ \omega_z (-S_z \dot{S}_y + S_y \dot{S}_z) - \omega_x (-S_y \dot{S}_x + S_x \dot{S}_y) \\ \omega_y (-S_z \dot{S}_y + S_y \dot{S}_z) + \omega_x (-S_y \dot{S}_x + S_x \dot{S}_y) \end{bmatrix} + \right. \\ &\quad \left. \begin{bmatrix} -\dot{S}_z V_y + \dot{S}_y V_z \\ \dot{S}_z V_x - \dot{S}_x V_z \\ -\dot{S}_y V_x + \dot{S}_x V_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -S_z \ddot{S}_y + S_y \ddot{S}_z \\ S_z \ddot{S}_x - S_x \ddot{S}_z \\ -S_y \ddot{S}_x + S_x \ddot{S}_y \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{S} = [S_x, S_y, S_z]$ 为 HMW 固定机身质心到可变机翼质心间矢量; $\mathbf{V} = [V_x, V_y, V_z]$ 为弹体坐标系下飞行器速度。

飞行器所受气动力矩表达式为

$$\begin{cases} M_x = qS_{\text{ref}} L_{\text{ref}} C_{mx} \\ M_y = qS_{\text{ref}} L_{\text{ref}} C_{my} \\ M_z = qS_{\text{ref}} L_{\text{ref}} C_{mz} \end{cases} \quad (5)$$

式中: q 为动压。

2 参数自适应模型预测控制器设计

由于 MPC 能够显示处理约束并优化求解最优控制量, 而 HMW 飞行过程中, 存在参数时变摄动难点和飞行器状态约束要求, 因此, MPC 适用于 HMW 的姿态控制任务。但考虑姿态动力学的强耦合和高度非线性, 直接使用 MPC 算法需要在线求解非线性规划问题, 将极大增加计算量。因此, 首先, 采用反馈线性化方法构建面向控制的姿态模型到线性解耦模型的映射; 然后, 针对线性模型得到飞行器状态预测矩阵, 构建考虑约束的优化模型, 通过滚动优化形式输出最优控制量; 最后, 针对参数时变引起的控制能力下降问题, 设计能够在线整定控制参数的强化学习智能体, 增强系统在变形过程中的控制性能, 并减少计算时间。控制系统总体框图如图 4 所示。

2.1 反馈线性化

选择飞行器 3 通道气动力矩 $\mathbf{M}$ 作为控制输入, 姿态角矢量 $\boldsymbol{\Omega}$ 作为控制输出, 则面向控制的非线性姿态动力学可写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{d} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x} = [\alpha, \beta, \sigma, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 为系统状态矢量; $\mathbf{y} = [\alpha, \beta, \sigma]^T$ 为输出矢量; $\mathbf{u} = [M_x, M_y, M_z]^T$ 为控制矢量; $\mathbf{d}$ 为系统不确定项; $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = [\alpha, \beta, \sigma]^T$ 为输出函数; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 分别计算如下:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}), f_4(\mathbf{x}), f_5(\mathbf{x}), f_6(\mathbf{x})]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{I_{yy}}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} & \frac{I_{yx}}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} & 0 \\ \frac{I_{yx}}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} & \frac{I_{xx}}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_{zz}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} f_1(\mathbf{x}) = -\omega_x \cos \alpha \tan \beta + \omega_y \sin \alpha \tan \beta + \omega_z \\ f_2(\mathbf{x}) = \omega_x \sin \alpha + \omega_y \cos \alpha \\ f_3(\mathbf{x}) = \omega_x \cos \alpha \tan \beta - \omega_y \sin \alpha \tan \beta + \omega_z \sin \beta \\ f_4(\mathbf{x}) = \frac{I_{yy}(M_{Dx} + M_{Gx})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} + \frac{I_{xy}(M_{Dy} + M_{Gy})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} + \\ \quad \frac{I_{xy}(I_{zz} - I_{xx} - I_{yy})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} \omega_x \omega_z + \frac{(I_{yy} - I_{zz})I_{yy} + I_{xy}^2}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} \omega_y \omega_z \\ f_5(\mathbf{x}) = \frac{I_{xx}(M_{Dy} + M_{Gy})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} + \frac{I_{xy}(M_{Dx} + M_{Gx})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} + \\ \quad \frac{I_{xy}(I_{yy} + I_{xx} - I_{zz})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} \omega_y \omega_z + \frac{(I_{zz} - I_{xx})I_{xx} + I_{xy}^2}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2} \omega_x \omega_z \\ f_6(\mathbf{x}) = \frac{M_{Dz} + M_{Gz}}{I_{zz}} + \frac{I_{xy}(\omega_x^2 - \omega_y^2)}{I_{zz}} + \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{cases} \quad (9)$$

系统的相对阶向量为 (2, 2, 2), 因此, 在对输出矢量 $\mathbf{y}$ 微分 2 次后, 控制输入 $\mathbf{u}$ 可显示表达:

$$\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{K}\mathbf{u} + \mathbf{B} + \Delta\mathbf{v} \quad (10)$$

式中: $\Delta\mathbf{v}$ 为聚合不确定项; $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{B}$ 可分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{K}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f h_1(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_f h_1(\mathbf{x}) & L_{g_3} L_f h_1(\mathbf{x}) \\ L_{g_1} L_f h_2(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_f h_2(\mathbf{x}) & L_{g_3} L_f h_2(\mathbf{x}) \\ L_{g_1} L_f h_3(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_f h_3(\mathbf{x}) & L_{g_3} L_f h_3(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}(\mathbf{x}) = [L_f^2 h_1(\mathbf{x}) \quad L_f^2 h_2(\mathbf{x}) \quad L_f^2 h_3(\mathbf{x})]^T \end{cases} \quad (11)$$

其中: $L_{g_i} L_f h_j(\mathbf{x})$ 为输出函数 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 对 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 的李导数; $L_f^2 h_i(\mathbf{x})$ 为输出函数 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 对 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 的二阶李导数。

由于飞行器采用倾斜机动转弯 (bank-to-turn, BTT) 飞行方式, 飞行过程中 $\cos \beta \approx 1$, 可知, 矩阵 $\mathbf{K}$ 非奇异。因此, 可设计如下形式反馈控制律:

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\vartheta}(\mathbf{x})\mathbf{v} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{v} = [v_1, v_2, v_3]^T$ 为新的控制输入; $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ 和 $\boldsymbol{\vartheta}(\mathbf{x})$ 表示分别为

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = -\mathbf{K}^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{B}(\mathbf{x}) \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\vartheta}(\mathbf{x}) = \mathbf{K}^{-1} \quad (14)$$

此时, 系统可以完全线性化, 考虑输出 $\mathbf{y}$ 和新输入 $\mathbf{v}$ 之间的关系, 得到如下线性系统:

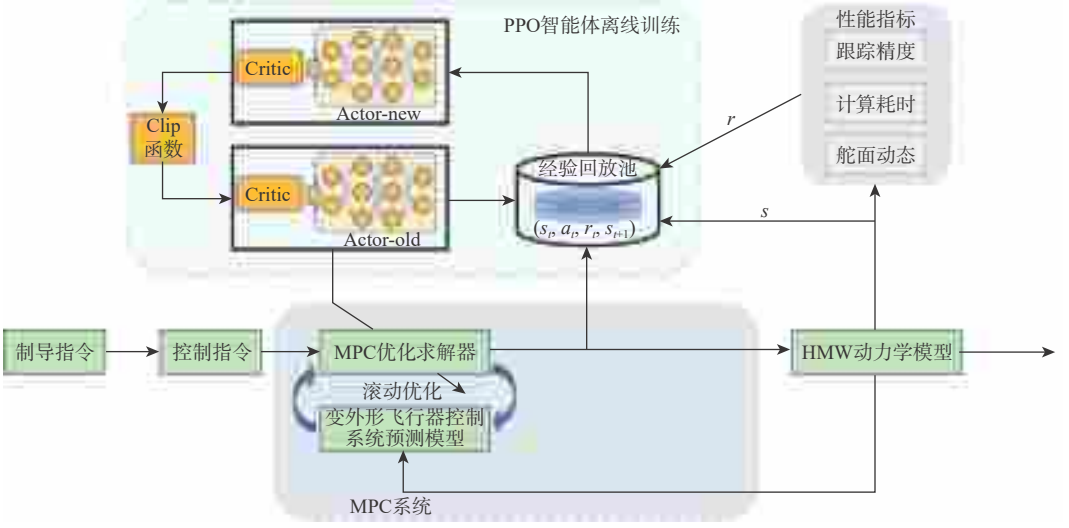


图4 基于PPO-MPC的高超声速变外形乘波体姿态控制系统设计框图

Fig. 4 Attitude controller designed structure diagram for HMW based on PPO-MPC

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi + Bv \\ y = C\xi \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\xi = [\alpha \ \dot{\alpha} \ \beta \ \dot{\beta} \ \sigma \ \dot{\sigma}]^T$ 为飞行器状态量; A_b 、 B_b 、 C_b 为布鲁诺夫斯基标准型。

2.2 模型预测控制

2.2.1 模型预测矩阵

将反馈线性化后系统(式(15))以采样时间 T_s 进行离散, 可得

$$\begin{cases} \xi(k+1) = A_k \xi(k) + B_k v(k) \\ y(k) = C_k \xi(k) \end{cases} \quad (16)$$

式中: C_k 为输出矩阵; A_k 和 B_k 为系统矩阵, 可以表示为

$$A_k = T_s A + I \quad (17)$$

$$B_k = T_s B \quad (18)$$

式中: I 为单位矩阵。

离散时间线性模型(式(16))是 MPC 中预测模型。为减少计算资源, 采用有限预测范围控制概念设计控制器, 通过设计合适的预测范围, 可保证控制系统稳定性和鲁棒性^[22]。设定预测时域为 N_p , 控制时域为 N_c , 预测时域内系统状态量 Y 可表示为

$$Y = Fx(k) + \Phi U \quad (19)$$

式中: $U = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{N_p}]^T$ 为控制量矩阵; F 和 Φ 为系统的递归矩阵, 可以表示为

$$F = [CA_k \ CA_k^2 \ \dots \ CA_k^{N_p}]^T \quad (20)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB_k & 0 & \dots & 0 \\ CA_k B_k & CB_k & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA_k^{N_p} B_k & CA_k^{N_p-1} B_k & \dots & CA_k^{N_p-N_c} B_k \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.2.2 滚动优化

MPC 控制器通过优化控制量求解得到控制指令, 因此, 设计合理的优化目标和状态约束形式, 才能在期望条件下实现高性能控制。

对于优化目标, 主要考虑变外形过程中的稳定控制, 使系统能够尽快且平稳地实现对指令的跟踪, 同时, 在目标函数中引入控制量, 以实现减小执行机构负担并抑制控制量跳变的效果, 最终设计如下所示的目标函数:

$$J = (Y_{\text{ref}}(k_{\text{step}}) - Y(k_{\text{step}}))^T (Y_{\text{ref}}(k_{\text{step}}) - Y(k_{\text{step}})) + U^T(k_{\text{step}}) R_u U(k_{\text{step}}) \quad (22)$$

式中: Y_{ref} 为参考输出轨迹; $Y(k_{\text{step}})$ 和 $U(k_{\text{step}})$ 分别为系统输出和控制量; R_u 为控制量权重对角矩阵; k_{step} 为当前步数。

由式(19)可得

$$J = (Y_{\text{ref}} - Fx - \Phi U)^T (Y_{\text{ref}} - Fx - \Phi U) + U^T R_u U \quad (23)$$

在 HMW 飞行过程中, 需考虑细长体弹性影响、测量元件饱和问题及任务要求, 引入角速度约束。考虑舵机性能, 引入执行机构舵偏角约束和舵偏角速率约束, 各项约束可表示为

$$\begin{cases} \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ \dot{u}_{\min} \leq (u(k_{\text{step}} - 1) - u(k_{\text{step}}))/T_s \leq \dot{u}_{\max} \end{cases} \quad (24)$$

各项约束均需构建飞行器控制模型向线性模型的反馈映射。控制量反馈映射可由式(2)和式(12)得到。对于 HMW 角速度约束映射, 根据线性化系统(16)与坐标系转换关系可得

$$\begin{cases} \omega_{\min}(k_{\text{step}}) \leq C_{\omega} \xi(k_{\text{step}}) \leq \omega_{\max}(k_{\text{step}}) \\ C_{\omega} = B_V^{-1} \cdot \text{diag}(0, 1, 0, 1, 0, 1) \end{cases} \quad (25)$$

式中: B_V 为飞行器弹体坐标系到速度坐标系的方向余弦矩阵。

在飞行器控制过程中, 随着状态量的变化, 式(25)中 C_ω 和式(12)中 φ 不恒为正定矩阵, 为保持约束算法的通用性, 构建如下形式的控制量约束矩阵:

$$\begin{bmatrix} C_\omega B_{k_{\text{step}}} \\ -C_\omega B_{k_{\text{step}}} \end{bmatrix} v(k) \geq \begin{bmatrix} \omega_{\max}(k_{\text{step}}) - C_\omega A_{k_{\text{step}}} \xi(k_{\text{step}} - 1) \\ C_\omega A_{k_{\text{step}}} \xi(k_{\text{step}} - 1) - u_{\min}(k_{\text{step}}) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} \vartheta(x(k_{\text{step}})) \\ -\vartheta(x(k_{\text{step}})) \end{bmatrix} v(k) \geq \begin{bmatrix} u_{\max}(k_{\text{step}}) - \varphi(x(k_{\text{step}})) \\ \varphi(x(k_{\text{step}})) - u_{\min}(k_{\text{step}}) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} \vartheta(x(k_{\text{step}})) \\ -\vartheta(x(k_{\text{step}})) \end{bmatrix} v(k) \geq \begin{bmatrix} \dot{u}_{\max}(k_{\text{step}}) - u(k_{\text{step}} - 1) - \varphi(x(k_{\text{step}})) \\ \varphi(x(k_{\text{step}})) + u(k_{\text{step}} - 1) - \dot{u}_{\min}(k_{\text{step}}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

将式(23)~式(28)通过矩阵运算整理, 并写作标准二次规划形式:

$$\begin{cases} \min_x J = \frac{1}{2} U^T H U + \kappa^T U \\ \text{s.t.} \begin{cases} A_{\text{neq}} U \leq b_{\text{neq}} \\ A_{\text{eq}} U = b_{\text{eq}} \\ b_{\text{low}} \leq U \leq b_{\text{up}} \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

式中: A_{neq} 、 b_{neq} 为不等式约束; A_{eq} 、 b_{eq} 为等式约束; b_{low} 、 b_{up} 为边界约束; H 、 κ 为标准二次规划矩阵。

$$\begin{cases} H = 2 [\Phi^T F x - \Phi^T (Y_{\text{ref}} - F x)] \\ \kappa = 2 (\Phi^T \Phi + R_u) \end{cases} \quad (30)$$

通过屏障内点法对式中不等式约束下的二次规划问题进行求解^[23], 即可求得当前状态下与控制时域所对应的控制量, 在下一控制周期重复进行模型预测控制量求解, 通过滚动优化形式实现高超声速变外形飞行器姿态最优控制。

2.3 基于 PPO 算法的模型预测控制器参数优化

对于变外形飞行器, 飞行器气动参数随时间摄动, 将在飞行过程中改变执行机构控制能力, 在固定控制参数下, 控制系统将出现控制性能下降的现象。为解决该问题, 本节判断 HMW 姿态控制问题的马尔可夫性, 设计针对 MPC 参数自适应整定的 PPO 智能体, 经离线训练后, 应用于 HMW 变外形过程中姿态控制问题。

2.3.1 马尔可夫决策过程

对于 HMW 控制问题, 飞行器状态变化仅与当前状态和控制指令相关, 在给定飞行状态下, 控制系统可通过生成合适的舵偏角指令实现对飞行器控制, 若飞行器建模准确, 则下一时刻的状态是明确的, 即飞行器未来状态的条件概率分布仅依赖于当前飞行器状态和控制指令, 与过去状态无关, 此

外, 下一时刻状态也可以通过设计经验确定奖励值大小。因此, 高超声速变外形飞行器的飞行状态变化具有马尔可夫性质, 是马尔可夫决策过程。

2.3.2 PPO 算法

PPO-CLIP 算法由信赖域策略优化算法改进而来, 通过直接对策略进行学习, 可以避免值函数强化学习方法中的策略退化现象。由于具有易实现和较强稳定性的优势, PPO 算法已经成为强化学习领域最主流算法, 在工业界(如 chatGPT)和学术界中被广泛应用。因此, 采用 PPO 算法作为强化学习算法。

策略梯度算法不通过价值函数选择动作策略, 而是直接学习策略本身, 通过一组参数(通常以 θ 表示)对策略进行参数化, 并通过神经网络方式优化参数 θ 。基于策略的强化学习采用参数化概率分布 $\pi_\theta(a|s) = P(a|s; \theta)$, 定义参数化策略学习的最大化目标函数为

$$\max_{\theta} J_{\text{PPO}}(\theta) = \max_{\theta} E_{\tau \sim \pi_{\theta}}(R(\tau)) = \max_{\theta} \sum_{\tau} P(\tau; \theta) R(\tau) \quad (31)$$

式中: $\tau = (s_1, a_1, \dots, s_T, a_T)$ 为智能体与环境交互产生的状态动作轨迹, 对 τ 求和表示与环境交互可能产生的所有情况。通过调整参数 θ 使更大奖励的轨迹出现概率更高。

为使目标函数获得最大收益, 策略梯度算法通过计算目标函数梯度优化参数 θ 。目标函数 $J(\theta)$ 对参数 θ 的梯度可以表示为

$$\begin{aligned} \nabla_{\theta} J_{\text{PPO}}(\theta) &\approx \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \nabla_{\theta} \lg P(\tau^{(l)}; \theta) R(\tau^{(l)}) = \\ &\frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \left(\sum_{t=0}^{T^{(l)}} l \right) (\nabla_{\theta} \lg \pi_{\theta}(a_{t^{(l)}} | s_{t^{(l)}})) R(\tau^{(l)}) \approx \\ &\frac{1}{n} (\nabla_{\theta} \lg \pi_{\theta}(a_{t^{(0)}} | s_{t^{(0)}})) R(t^{(l)}) \end{aligned} \quad (32)$$

式中: $R(\cdot)$ 为累计奖励; π_{θ} 为参数化概率分布; τ 为智能体与环境交互产生的状态动作轨迹; s 和 a 分别为强化学习环境 and 动作。

此时, 可以计算目标函数对 θ 的梯度, 在更新率 α_r 下, 策略梯度更新规则为

$$\theta \leftarrow \theta + \alpha_r \nabla_{\theta} J_{\text{PPO}}(\theta) \quad (33)$$

在策略学习过程中, 可能会出现过冲和下冲现象, 导致训练缓慢, 甚至陷入较差的策略区域, 因此, 引入 PPO-Clip 算法, 当重要性采样超出规定的上下限后, 返回所对应的上下限, 此时, 返回值不依赖于参数 θ , 产生的梯度为 0, 对样本更新不产生影响, 避免过大的更新。

2.3.3 强化学习智能体设计

PPO 算法离线训练和在线应用需要设计状态空间、动作空间、奖励函数等。针对 HMW 控制问题,飞行器飞行姿态状态 $\boldsymbol{\Omega}$ 均应为状态空间部分参数,此外,考虑飞行器控制目标为令飞行器姿态快速满足控制指令要求,将飞行器当前状态与预期状态偏差作为智能体状态引入状态空间。因此,飞行器状态量包括迎角 α 、侧滑角 β 、倾侧角 σ 、滚转角速度 ω_x 、偏航角速度 ω_y 、俯仰角速度 ω_z 、变形量 η 、迎角偏差 $\Delta\alpha$ 、侧滑角偏差 $\Delta\beta$ 和倾侧角偏差 $\Delta\sigma$ 。

MPC 方法通过预测飞行器未来时刻状态优化当前控制指令,实现飞行器姿态控制。MPC 效果与预测时域 N_p 、控制时域 N_c 和控制量权重 R_c 相关。在控制时域为有限个情况下,预测周期越长,该控制量周期对未来状态的影响越大,使系统更专注于控制过程整体的平稳性,减小超调会减弱系统对于控制指令的响应速度;反之,预测周期短使系统专注于短周期内跟踪情况,控制输出倾向于加速系统响应,但可能会导致超调量增大。对于控制量权重,大控制量权重将提高控制量在优化函数中比重,得到较小控制输出,降低系统响应性能;小控制量权重易生成较为激进的控制输出,增强系统跟踪速度可能会破坏系统稳定性。设置 MPC 控制时域 $N_c=1$,通过调整预测时域 N_p 和控制量权重 R_c 在姿态控制过程中自适应调整控制策略,提升 MPC 的控制能力。同时,为降低训练难度,将智能体的动作空间设置为离散动作,预测时域和权重参数两两组合得到动作输出。因此,智能体的动作空间设计为 $R_c \in \{0.005, 0.002, 0.001, 0.000\ 5, 0.000\ 3\}$ 、 $N_p \in \{20, 30, 40, 50, 60, 70, 80\}$ 的组合形式。

强化学习的训练目标依赖于奖励函数的设计,良好的奖励函数能够显著提高训练的效率和控制精度。本文设计的奖励函数遵循以下原则:

- 1) 由于附加力矩干扰可能会引起飞行器姿态失控,为激励智能体完成单组控制训练,当飞行器姿态在可控范围内,可获得单步固定奖励值,反之,若飞行器姿态发散,则控制终止并给予惩罚。
- 2) 为提高控制器控制能力,基于状态误差设计指数形式误差惩罚,提高控制器大误差下的快速跟踪控制能力和小误差下的高精度控制能力。
- 3) 考虑舵面偏转速率对飞行器执行机构影响,建立关联舵面偏转的奖励函数。
- 4) 预测时域过大,将增加控制器计算时间,因此,应在合适飞行状态下,适当降低预测时域,以减少控制器计算需求。

具体的奖励函数 r 表达式为

$$\begin{cases} r_\alpha = a_\alpha e^{-\left|\frac{\alpha-\alpha_c}{\alpha_{c0}}\right|} k_\alpha - b_\alpha \\ r_\beta = a_\beta e^{-\left|\frac{\beta-\beta_c}{\beta_{c0}}\right|} k_\beta - b_\beta \\ r_\sigma = a_\sigma e^{-\left|\frac{\sigma-\sigma_c}{\sigma_{c0}}\right|} k_\sigma - b_\sigma \\ r_{\delta_D} = -k_{\delta_D} \sum_{N=1}^3 |\dot{\delta}_{DN}| \\ r_{N_p} = k_{N_p} \frac{1}{N_p} \\ r = r_\alpha + r_\beta + r_\sigma + r_s + r_{\delta} + r_{N_p} \end{cases} \quad (34)$$

式中: k_α 、 k_β 、 k_σ 为 3 通道状态误差权重系数; k_{δ_D} 为舵偏角速度权重; k_{N_p} 为预测时域权重; a_α 、 a_β 、 a_σ 、 b_α 、 b_β 、 b_σ 为基线修正系数。具体参数设置如表 3 所示。

表 3 PPO 智能体离线训练奖励参数

Table 3 Reward parameters of PPO intelligent agents
offline training

a_α	a_β	a_σ	k_α	k_σ	k_{N_p}	b_α	b_β	b_σ	k_β	k_{δ_D}	r_s
3	3	3	10	5	3	2	2	2	2	2×10^{-3}	0.05

2.3.4 PPO 智能体离线训练

本文采用的 Actor 网络中包含七维状态输入、3 层含有 255 个神经元的隐藏层及二维动作输出的全连接结构;Critic 网络包含七维状态输入、3 层含有 255 个神经元的隐藏层及最终输出一维动作价值函数的全连接结构。网络中各个隐藏层激活函数选择为 ReLU 函数,输出层选择 softmax 策略获得离散动作,该策略通过将各离散值神经元输出,以概率形式映射至 (0,1),并在输出时选择最大概率值项作为预测值。

对 PPO 算法训练超参数进行调试,最终以如表 4 所示超参数对 PPO 算法智能体进行离线训练,训练过程中奖励值如图 5 所示。

表 4 PPO 智能体离线训练超参数

Table 4 Offline training hyperparameters of
PPO intelligent agents

学习率	折扣因子	采样时间	批学习数	经验回放池样本数量	截断因子
3×10^{-4}	0.99	0.1	128	25 600	0.2

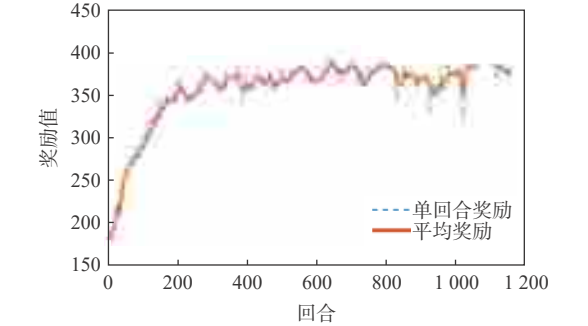


图 5 PPO 智能体离线训练奖励曲线

Fig. 5 Offline training reward curves of PPO intelligent agent

从图 5 可以看出, 奖励曲线在经历 500 回合训练后呈现出收敛态势, 可用于 MPC 控制器中, 实现不同飞行状态下的自适应参数整定。

3 仿真分析

为验证本文所设计控制器的有效性, 设计 2 种场景进行仿真验证: ①验证控制器在飞行器变形过程中对控制指令的跟踪能力; ②验证飞行器在外部扰动下 PPO 智能体的在线参数调整能力和状态约束满足情况。硬件配置为 i3-12100(3.30 GHz)、16 GB RAM 计算机。选取飞行过程中特征点进行姿态控制仿真, 飞行器总体参数如表 1 所示, 仿真中初始状态参数如表 5 所示。

表 5 高超声速变外形乘液体初始状态参数

Table 5 Initial state parameters of HMW

H/km	$V_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\alpha_0/(^{\circ})$	$\beta_0/(^{\circ})$	$\sigma_0/(^{\circ})$	$\omega_{x0}/((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	$\omega_{y0}/((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	$\omega_{z0}/((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$
30	2 500	0	0	0	0	0	0

MPC 控制器中舵面偏转约束、舵面偏转速率约束和飞行器姿态角速度约束满足以下条件:

$$\begin{cases} |\delta_{DN}| \leq 30 & N = 1, 2, 3 \\ |\dot{\delta}_{DN}| \leq 200 & N = 1, 2, 3 \\ |\omega_x| \leq 10 \\ |\omega_y| \leq 3 \\ |\omega_z| \leq 5 \end{cases} \quad (35)$$

为验证控制器控制性能, 令飞行器在第 3 s 时开始变形过程, 并于第 5 s 达到机翼完全展开状态后结束变形并保持最大翼展状态, 设计控制指令如下:

$$\begin{cases} \alpha_c = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq 3 \\ 8 \cos \frac{t-3}{6\pi} & 3 < t \leq 6 \\ 8 & 6 < t \leq 10 \end{cases} \\ \beta_c = 0 \\ \sigma_c = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq 3 \\ 20 \cos \frac{t-3}{6\pi} & 3 < t \leq 6 \\ 20 & 6 < t \leq 10 \end{cases} \end{cases} \quad (36)$$

3.1 控制器控制能力验证

将本文 PPO-MPC 方法与传统 MPC 方法进行对比。考虑 HMW 变形过程参数摄动, 设置传统 MPC 预测时域 $N_p = 70$ 、控制量权重 $R_c = 0.001$ 。如表 5 所示, 在飞行器初始状态和式(36)指令输入下进行 HMW 飞行器姿态控制仿真, 结果如图 6~图 11 所示。

图 6 和图 7 分别给出了飞行器姿态角响应曲线和跟踪误差曲线。可以看出, 2 种控制器均可实现飞行器姿态稳定和指令跟踪, 跟踪过程状态变化平

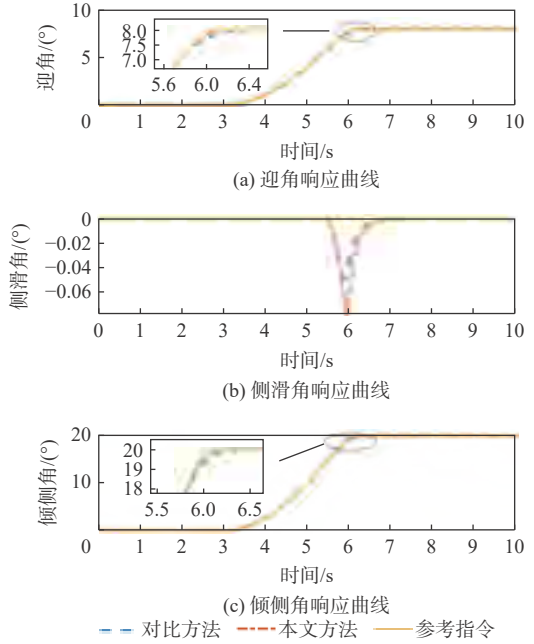


图 6 姿态角响应曲线

Fig. 6 Responses curves of attitude angles

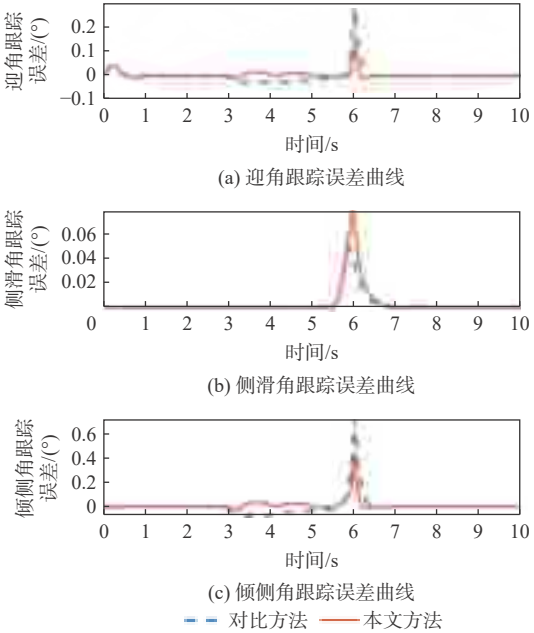


图 7 姿态角跟踪误差曲线

Fig. 7 Tracking error curves of attitude angle

滑、无高频振荡。PPO-MPC 控制器迎角和倾侧角跟踪误差最大值分别为 0.13° 和 0.42°, 相较于对比方法, 本文方法最大误差分别降低 50% 和 40%。在侧滑通道中, PPO-MPC 控制器相比传统 MPC 控制方法, 误差增大 0.025°, 该现象由控制系统耦合条件下 PPO-MPC 为加速响应产生更大控制量引起, 且该通道误差小于其他通道误差 1 个数量级。此外, 在控制指令跟踪过程中, PPO-MPC 控制器大部分时间的控制误差低于传统 MPC 控制器, 证明本文方法相较于传统 MPC 方法的优越性。

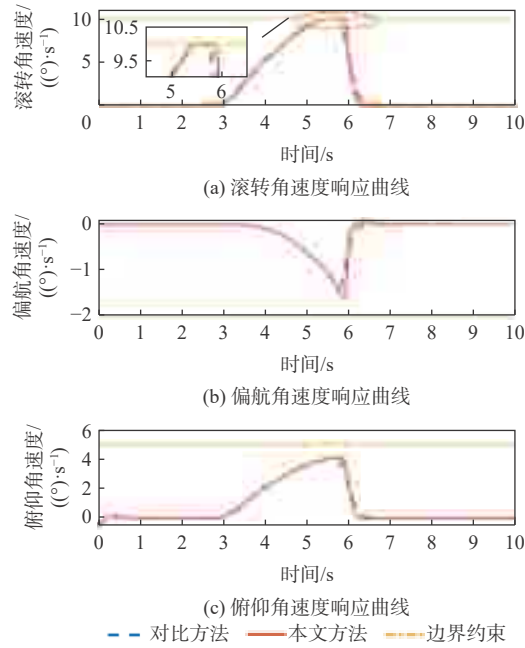


图 8 姿态角速度响应曲线

Fig. 8 Response curves of attitude angular velocity

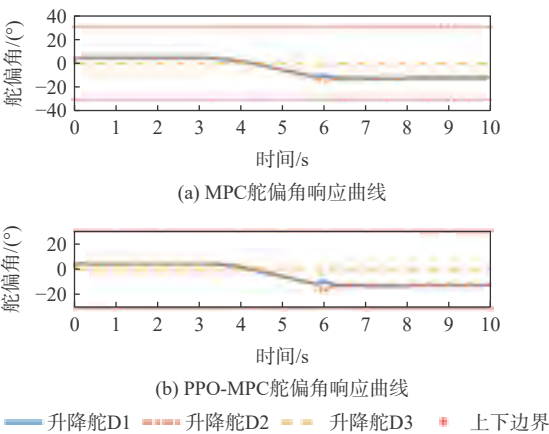


图 9 舵偏角响应曲线

Fig. 9 Response curves of rudder deflection angle

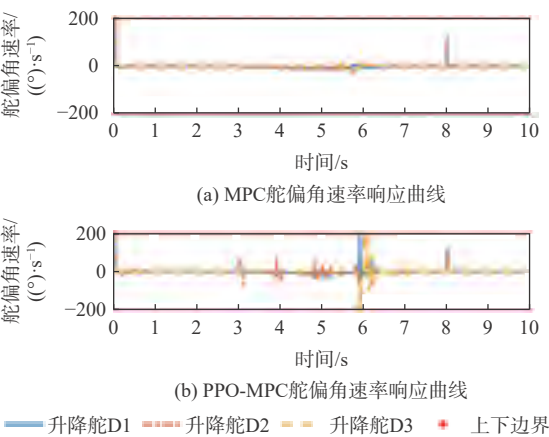


图 10 舵偏角速率响应曲线

Fig. 10 Response curves of the rudder deflection angular velocity

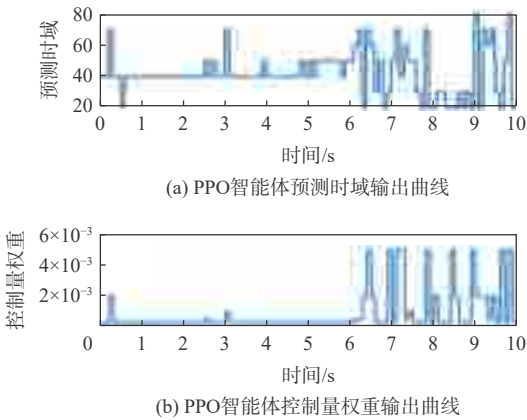


图 11 PPO 智能体控制参数输出曲线

Fig. 11 Control parameters output curves of PPO intelligent agent

图 8 给出了角速度响应曲线。飞行器角速度变化平滑,且控制过程中状态量均满足控制要求。图 9 和图 10 给出了舵偏角和舵偏角速率响应曲线。可以看出,由于 PPO-MPC 控制指令的在线调整,舵偏角速率出现一定振荡,但舵偏角和舵偏角速率均满足控制约束要求,证明了本文方法的有效性。

图 11 给出了 PPO 智能体控制参数的在线输出,表 6 给出了控制方法的平均单步计算耗时。可以看出,相较于传统 MPC 算法,本文方法通过调节预测时域 N_p 以调节预测矩阵规模,降低计算与二次规划算法负担,令平均单步计算耗时降低 45%,一定程度上解决了 MPC 控制器在工程实现过程中计算耗时较长的问题。

表 6 不同控制器平均单步计算耗时

Table 6 Averaged single step calculation time in different controllers

控制方法	计算耗时/ms
MPC	1.027 7
PPO-MPC	0.561 6

3.2 蒙特卡罗仿真

在上述仿真参数基础上,考虑气动力矩系数、大气密度、变形时间等偏差,具体偏差条件设置如表 7 所示。

表 7 偏差条件设置

Table 7 Deviation condition settings

偏差/%		变形时间 偏差/s	偏差/(°)		
气动力矩系数	大气密度		$\Delta\alpha_0$	$\Delta\beta_0$	$\Delta\sigma_0$
± 20	± 20	± 2	± 2	± 1	± 5

采用表 7 所示偏差设定对 PPO-MPC 控制器进行 200 次蒙特卡罗仿真,所有偏差服从正态分布,仿真结果如图 12~图 14 所示。

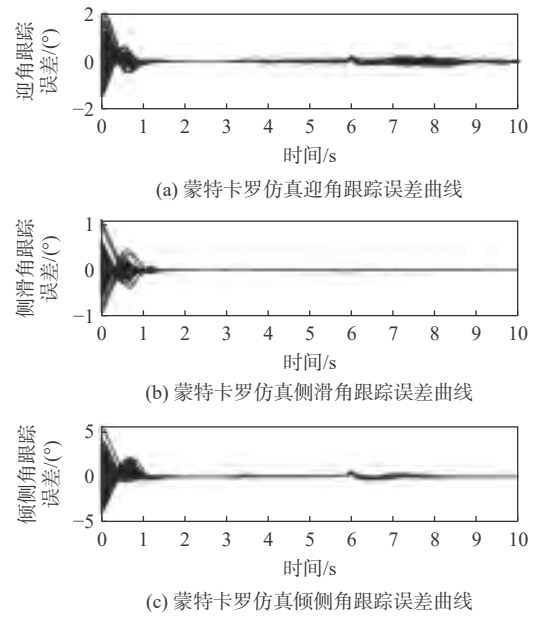


图 12 蒙特卡罗仿真姿态角跟踪误差曲线
Fig. 12 Attitude angle tracking error curves of Monte Carlo simulation

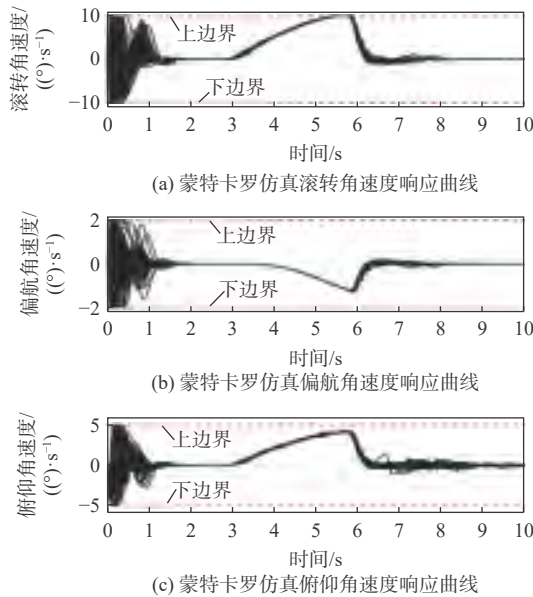


图 13 蒙特卡罗仿真姿态角速度响应曲线
Fig. 13 Attitude angular velocity response curves of Monte Carlo simulation

图 12 给出了飞行器在偏差条件下姿态角跟踪误差。可以看出,在存在扰动的条件下,飞行器在 1.5 s 内重新稳定至给定控制指令,指令跟踪过程中,PPO 智能体能够通过在线调节控制参数增强偏差条件下控制器控制性能,最大迎角稳态误差精度为 0.06°,最大侧倾角稳态误差精度为 0.02°,说明控制器在扰动条件下能够实现高精度控制,具有较强鲁棒性。

图 13 给出了飞行器偏差条件下的姿态角速度响应曲线,图 14 给出了飞行器舵偏角和舵偏角速

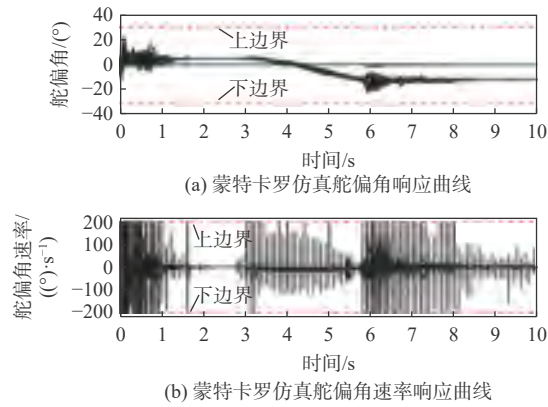


图 14 蒙特卡罗仿真控制量响应曲线
Fig. 14 Control response curves of Monte Carlo simulation

率响应曲线。可以看出,飞行器在存在偏差情况下,仍可以满足各项约束指标,证明本文所设计的控制器通过滚动优化实现控制的有效性。

图 15 给出了 PPO 智能体在蒙特卡罗仿真条件下的部分控制量参数输出(20 次)。表明本文所设计的智能体能够在外部环境扰动状态下保持自身稳定输出,具有较强的鲁棒性。

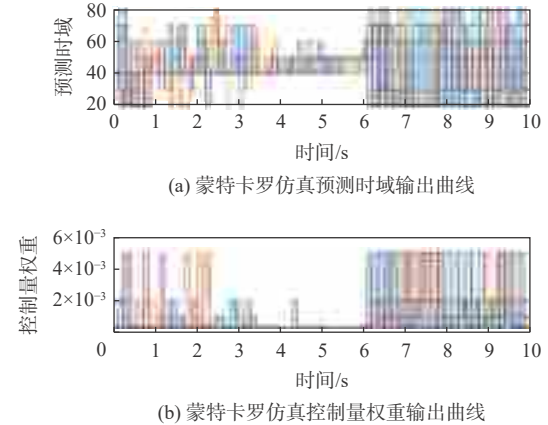


图 15 蒙特卡罗仿真控制量参数输出曲线
Fig. 15 Control parameters output curves of Monte Carlo simulation

4 结 论

针对状态约束下的变外形飞行器姿态控制问题,本文提出 PPO-MPC 方法,通过理论分析和仿真验证,得到如下结论:

- 1) 基于乘波理论设计了 HMW 气动布局,能够在宽速域条件下改善飞行器气动性能,并给出气动数据可行的处理方案。
- 2) 设计的模型预测方法能够满足飞行器控制约束和姿态约束要求,使系统在状态受限条件下对控制指令进行快速跟踪。
- 3) 设计的 PPO 强化学习智能体能够根据飞行状态自适应整定控制参数,有效提高控制精度,并

降低计算耗时。

参考文献（References）

[1] 董泽洪, 李颖晖, 吕茂隆, 等. 迎角受限的高超声速飞行器固定时间鲁棒控制[J]. 宇航学报, 2022, 43(12): 1708-1721.
DONG Z H, LI Y H, LYU M L, et al. Fixed-time robust control for hypersonic flight vehicle with constrained angle of attack[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(12): 1708-1721(in Chinese).

[2] ZHAO D, REN W J. Resilient control of flexible hypersonic vehicles against unmatched distributed faults[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(5): 60-70.

[3] AJAJ R M, BEAVERSTOCK C S, FRISWELL M I. Morphing aircraft: the need for a new design philosophy[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 49: 154-166.

[4] 岳彩红, 唐胜景, 王肖, 等. 高超声速伸缩式变形飞行器再入制导方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(6): 1288-1298.
YUE C H, TANG S J, WANG X, et al. Reentry guidance method of hypersonic telescopic deformable vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(6): 1288-1298(in Chinese).

[5] BAO C Y, WANG P, TANG G J. Integrated method of guidance, control and morphing for hypersonic morphing vehicle in glide phase[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 535-553.

[6] 王忠森, 廖宇新, 魏才盛, 等. 高超声速飞行器快速终端滑模保性能容错控制[J]. 航空学报, 2023, 44(24): 157-170.
WANG Z S, LIAO Y X, WEI C S, et al. Fast terminal sliding mode fault-tolerant control of hypersonic vehicle with guaranteed performance[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 157-170(in Chinese).

[7] ZHANG B L, ZHOU D. Optimal predictive sliding-mode guidance law for intercepting near-space hypersonic maneuvering target[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(4): 320-331.

[8] 李小兵, 赵思源, 卜祥伟, 等. 高超声速飞行器预设性能反演控制方法设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(4): 650-661.
LI X B, ZHAO S Y, BU X W, et al. Design of prescribed performance backstepping control method for hypersonic flight vehicles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(4): 650-661(in Chinese).

[9] WANG L, QI R Y, JIANG B. Adaptive fault-tolerant control for non-minimum phase hypersonic vehicles based on adaptive dynamic programming[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(3): 290-311.

[10] 胡军. 高超声速飞行器非线性自适应姿态控制[J]. 宇航学报, 2017, 38(12): 1281-1288.
HU J. The nonlinear adaptive attitude control for hypersonic vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(12): 1281-1288(in Chinese).

[11] 刘继承, 江驹, 阴浩博, 等. 高超声速飞行器自适应固定时间抗饱和和控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(7): 1013-1022.
LIU J C, JIANG J, YIN H B, et al. Fixed-time antisaturation adaptive control of a hypersonic vehicle[J]. Journal of Harbin Engineer-

ing University, 2022, 43(7): 1013-1022(in Chinese).

[12] ZHANG H, WANG P, TANG G J, et al. Fuzzy disturbance observer-based dynamic sliding mode control for hypersonic morphing vehicles[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 142: 108633.

[13] 张远, 黄万伟, 路坤峰, 等. 高超声速变外形飞行器建模与有限时间控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(10): 1979-1993.
ZHANG Y, HUANG W W, LU K F, et al. Modeling and finite-time control for hypersonic morphing flight vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(10): 1979-1993 (in Chinese).

[14] 张豪, 王鹏, 汤国建, 等. 高超声速变外形飞行器事件触发有限时间控制[J]. 航空学报, 2023, 44(15): 325-338.
ZHANG H, WANG P, TANG G J, et al. Event-triggered fast finite time control for hypersonic morphing vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(15): 325-338(in Chinese).

[15] DAI P, YAN B B, HAN T, et al. Barrier Lyapunov function based model predictive control of a morphing waverider with input saturation and full-state constraints[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(3): 3071-3081.

[16] SONG Z Y, YAN G F, ZHAO D J. ESO-based robust predictive control of lunar module with fuel sloshing dynamics[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(3): 589-598.

[17] 康国华, 金晨迪, 郭玉洁, 等. 基于深度学习的组合体航天器模型预测控制[J]. 宇航学报, 2019, 40(11): 1322-1331.
KANG G H, JIN C D, GUO Y J, et al. Model predictive control of combined spacecraft based on deep learning[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(11): 1322-1331(in Chinese).

[18] NIU X J, GUO J G, ZHOU J, et al. Robust attitude predictive control design for hypersonic vehicles with state constraints[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(7): 2592-2609.

[19] CHENG L, WANG Z B, GONG S P. Adaptive control of hypersonic vehicles with unknown dynamics based on dual network architecture[J]. Acta Astronautica, 2022, 193: 197-208.

[20] 王冠, 夏红伟. 一种基于学习的高超声速飞行器智能控制方法[J]. 宇航学报, 2023, 44(2): 233-242.
WANG G, XIA H W. A learning-based intelligent control method for hypersonic flight vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(2): 233-242(in Chinese).

[21] 刘深深, 罗磊, 韩青华, 等. 动量增升高升阻比飞行器横航向稳定性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(11): 3010-3021.
LIU S S, LUO L, HAN Q H, et al. Study on lateral-directional stability of a practical high lift-to-drag ratio hypersonic vehicle with momentum lift augmentation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(11): 3010-3021(in Chinese).

[22] VAN SOEST W R, CHU Q P, MULDER J A. Combined feedback linearization and constrained model predictive control for entry flight[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(2): 427-434.

[23] NOCEDAL J, WRIGHT S J. Numerical optimization second edition[M]. Singapore: World Scientific, 1999.

Adaptive model predictive control for hypersonic morphing vehicle

GE Jianhao, GUO Jie*, WANG Haoning, ZHANG Baochao, WAN Yangyang, TANG Shengjing

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The attitude control system is affected by hypersonic morphing vehicles due to complex disturbances, unknown dynamics, and state constraints. To address these problems, an adaptive model predictive control (MPC) system is proposed in this paper. Focusing on the low aerodynamic character of traditionally combined aircraft, a hypersonic morphing waverider is designed to achieve higher flight performance, and a control-oriented model is established for attitude control. Furthermore, in order to solve the problems of state constraints, including rudder and angular velocity limits, a MPC method is used to optimize the control command online. However, a model predictive controller based on a fixed control parameter usually faces performance degradation under time-varying parameters perturbation. A proximal policy optimization (PPO) agent is designed to adaptively output control parameter online. In addition to improving control accuracy and saving computational resources, the developed controller can accomplish high performance control under aircraft state limitations. Simulation results prove the effectiveness and superiority of the method.

Keywords: hypersonic morphing vehicle; attitude control; model predictive control; reinforcement learning; aerodynamic characteristic analysis

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0084

压剪载荷下复合材料层合板的失效模式

骈璐^{1,2}, 杨帆³, 章凌³, 刘丰睿^{1,2,*}, 王林娟^{1,2}, 赵丽滨^{4,5,6}

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学 航天器设计优化与动态模拟技术教育部重点实验室, 北京 100191; 3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 4. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401; 5. 先进智能防护装备技术教育部重点实验室, 天津 300401; 6. 河北省跨尺度智能装备技术重点实验室, 天津 300401)

摘 要: 复合材料层合板是飞行器中的重要承载结构, 在压剪载荷作用下会发生屈曲或静力失效。采用复合材料层合板线性屈曲和首层失效的理论分析方法, 对碳纤维/环氧树脂层合板在不同压剪载荷比、边长比、边长厚度比和铺层角度下开展失效分析, 得到2种失效出现的顺序和失效载荷的变化情况。结果表明:在不同的压剪载荷比下, 层合板屈曲和首层失效发生的顺序不同; 2种失效发生的压剪载荷比范围会受到层合板边长比、边长厚度比和铺层角度的影响; 屈曲模态主要受压剪载荷比、边长比和铺层角度的影响, 首层失效模式主要受压剪载荷比和铺层角度的影响。

关 键 词: 复合材料层合板; 失效分析; 屈曲; 首层失效; 压剪载荷

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1254-07

层合板是连续碳纤维增强环氧树脂复合材料在飞行器结构中应用的典型构形之一^[1-3], 作为蒙皮主要承受面内拉伸、压缩、剪切和面外的压强载荷。其中, 在面内压缩和剪切载荷作用下, 蒙皮等层合板结构不仅可能由于面内载荷超过许用应力而直接发生静力失效, 还可能在静力失效前发生失稳而产生面外大变形, 即结构屈曲。在实际应用中, 屈曲和静力失效均会危害飞行器的安全性和可靠性^[4-5]。因此, 为了揭示层合板的失效规律, 学者们针对复合材料层合板的屈曲失稳和静力失效行为开展了大量研究工作。

在复合材料层合板的稳定性研究方面, Nemeth^[6-7]考虑不同的边界条件和面内组合载荷, 采用瑞利-里兹方法研究了无限长对称层合板的屈曲行为, 并在此基础上给出了复合材料层合板在不同载荷下的屈曲性能曲线。Narita等^[8]基于瑞利-里兹方法推导了5种面内载荷下对称层合板的屈曲载荷, 进一步研究了不同材料体系、长宽比和铺层角度下层

合板的屈曲性能。Yeter等^[9]采用试验和有限元方法研究了纤维类型、铺层角度和结构尺寸对杂化复合材料板压缩屈曲性能的影响。Loughlan^[10]采用有限条法研究了弯曲各向异性对层合板压剪屈曲和薄壁管扭转屈曲性能的影响, 强调了面内剪切或扭矩载荷方向的重要性。李政等^[3]通过数值模拟方法研究了压剪载荷下层合板的非线性屈曲载荷和后屈曲刚度。王春寿等^[11]采用试验、有限元和工程分析法研究了筋条刚度对加筋板压缩稳定性的影响。调研表明, 目前已经采用理论方法、数值方法和试验方法对层合板屈曲和后屈曲及参数影响进行了研究。

另外, 对于复合材料层合板的静力失效问题, Singh等^[12]采用渐进损伤方法研究了层合板在面内剪切载荷下的失效问题, 讨论了边界条件、铺层、尺寸和材料性能等因素对层合板首层失效载荷和极限载荷的影响。Jain等^[13]采用考虑几何非线性的有限元法对层合板开展了单轴压缩/平面内剪切

收稿日期: 2024-02-07; 录用日期: 2024-05-10; 网络出版时间: 2024-05-17 17:01

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240516.1813.001

基金项目: 国家自然科学基金(12072005, U23A2067); 河北省全职引进高端人才科研项目(2021HBQZYCSB009)

*通信作者. E-mail: frliu@buaa.edu.cn

引用格式: 骈璐, 杨帆, 章凌, 等. 压剪载荷下复合材料层合板的失效模式[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1254-1260.

PIAN R, YANG F, ZHANG L, et al. Failure mode of composite laminated plates under compression-shear loading[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1254-1260 (in Chinese).

和面外载荷组合作用下的首层失效分析, 给出了面内单一方向载荷和横向载荷组合作用时, 层合板失效载荷的相互作用曲线、破坏模式和横向挠度的变化规律。刘鹏洋^[14]采用二维有限元方法对比研究了不同压剪载荷比下层合板和加筋板的失效模式变化。Li 等^[15-16]和 Kolanu 等^[17]采用试验与有限元结合的方法, 分别研究了不同形状和尺寸的预置开口对层合板剪切失效的影响。

实际结构中, 首层失效或屈曲失效中的一种发生后, 结构将失去使用价值, 先发生的失效代表结构的失效模式。目前对圆柱壳已开展了屈曲和首层失效的发生顺序研究^[18-19]。对于层合板, Singh 等^[12]的计算结果表明, 边界条件和铺层的变化会影响层合板在剪切载荷下发生屈曲和静力失效的顺序。Pian 等^[20]对不同材料时复合材料层合板结构在压剪载荷下的屈曲和首层失效发生顺序开展了研究。

本文针对复合材料层合板开展压剪载荷下几何和铺层参数对屈曲和首层失效顺序关系的影响研究。给出采用的屈曲失效和首层失效分析方法, 设计研究方案, 分析压剪载荷比在 $(-\infty, +\infty)$ 范围内时, 层合板在不同边长比、边长厚度比和铺层角度下的失效载荷和失效模式, 探究各参数对屈曲和首层失效发生顺序的影响, 为压剪载荷下复合材料层合板的设计提供支持。

1 层合板压剪失效分析

1.1 压剪载荷下层合板结构

考虑一个对称铺层的矩形层合板结构, 长度为 a , 宽度为 b , 厚度为 t , 四边简支, 受 x 方向压缩载荷 N_x 和面内剪切载荷 N_{xy} ($N_{xy} = \eta N_x$) 作用, 压剪载荷比为 η , 如图 1 所示。图 1 中所示载荷方向均为正方向, N_x 取 0 或正值, N_{xy} 取 0、正值或负值。分别计算不同压剪载荷比时层合板屈曲载荷和首层失效载荷, 绘制失效分析曲线, 根据曲线确定结构实际失效模式。

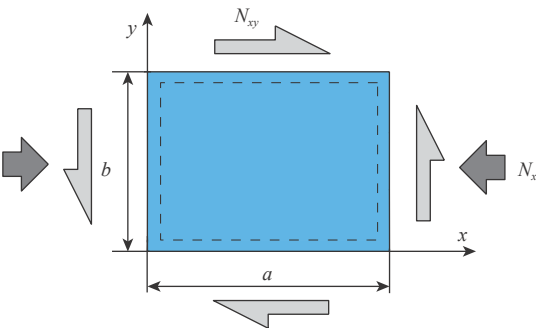


图 1 层合板结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the laminated plate

1.2 层合板线性屈曲分析方法

采用瑞利-里兹变分方法求解层合板在压剪载荷下的线性屈曲问题^[8]。根据四边简支条件假设, 层合板的面外位移场满足

$$w = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij} \sin\left(\frac{i\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{j\pi y}{b}\right) \tag{1}$$

式中: w 为板的 z 方向位移; W_{ij} 为待确定的未知系数; i 和 j 分别为在 $(1, I)$ 和 $(1, J)$ 范围内变化的整数系数; I 和 J 分别为控制方程的最高阶数和求解特征值的个数。

将面外位移场假设代入总势能 Π 的表达式:
$$\Pi = U + K \tag{2}$$

$$U = \frac{1}{2} \int_A \int \left[D_{11} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + 2D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4D_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + 4D_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + 4D_{66} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \tag{3}$$

$$W = \frac{1}{2} \int_A \int \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy \tag{4}$$

式中: U 为总应变能; W 为载荷做功; A 为板的面积; D_{ij} 为板的弯曲刚度参数。

根据最小势能原理计算变分得到齐次方程组:
$$\frac{\partial \Pi}{\partial W_{ij}} = 0 \tag{5}$$

根据推导, 方程组的求解问题可以转化为特征值求解问题:

$$(\mathbf{K} + \lambda \mathbf{M} \mathbf{N}) \{W_{ij}\} = 0 \tag{6}$$

式中: $\mathbf{K}$ 为结构的刚度矩阵; $\mathbf{M}$ 为结构的几何刚度矩阵; $\mathbf{N}$ 为初始载荷向量。求解得到的最小特征值为结构的临界屈曲特征值 λ_{cr} , 与施加载荷相乘, 可得到结构发生线性屈曲时的压缩和剪切载荷。

1.3 层合板首层失效分析方法

通过应力分析计算得到每个单层的材料主方向应力 σ_1 、 σ_2 和 τ_{12} , 采用退化到二维的 Lessard 失效准则^[21]计算各层的失效状态变量:

纤维拉伸变量: $\hat{S}_k^1 = \left(\frac{\sigma_1}{X_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 \quad \sigma_{11} > 0 \tag{7a}$

纤维压缩变量: $\hat{S}_k^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_C} \right)^2 \quad \sigma_{11} < 0 \tag{7b}$

基体拉伸变量: $\hat{S}_k^3 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 \quad \sigma_{22} > 0 \tag{7c}$

基体压缩变量： $\hat{S}_k^4 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \sigma_{22} < 0 \quad (7d)$

纤维剪切变量： $\hat{S}_k^5 = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \sigma_{11} < 0 \quad (7e)$

式中： $\hat{S}_k^m (k=1,2,\cdots,n;m=1,2,3,4,5)$ 为层合板第 k 层的失效状态变量,其中, n 为层合板总层数; σ_1 和 σ_2 分别为单层板 1 方向和 2 方向的正应力; τ_{12} 为单层板的 12 平面内剪应力; X_T 、 X_C 、 Y_T 、 Y_C 和 S_{12} 分别为复合材料单向板各方向的强度。当全部 $\hat{S}_k^m$ 中的最大值达到 1 时,层合板中至少有一个单层中发生了至少一种失效,即层合板发生首层失效。由此定义层合板的临界静强度因子 R_{cr} :

$$R_{cr} = \frac{1}{\sqrt{\max(\hat{S}_k^m)}} \quad k=1,2,\cdots,n;m=1,2,3,4,5 \quad (8)$$

在线性应力应变关系下,当施加载荷为当前载

荷的 R_{cr} 倍时:

$$\hat{S}_k^{'m} = \frac{\hat{S}_k^m}{\max(\hat{S}_k^m)} \tag{9}$$

即载荷增大后,失效状态变量 $\hat{S}_k^{'m}$ 最大值达到 1。因此,将当前载荷乘以 R_{cr} 即可得到结构的首层失效载荷^[22]。

2 研究方案

设计了 5 种边长比、4 种边长厚度比和 5 种铺层角度共 12 种结构方案,如表 1 所示。各组层合板总铺层数均为 4 层,总厚度为 1 mm。其中,C1 方案为基准算例,结构参数 $a=b=50\text{ mm}$, $t=1\text{ mm}$,铺层顺序为 $[\pm 45]_s$ 。采用的材料为碳纤维/环氧树脂复合材料,材料性能参数如表 2 所示^[23]。 E_1 、 E_2 、 ν_{12} 、 G_{12} 分别为材料沿纤维方向弹性模量、垂直纤维方向弹性模量、纤维所在平面泊松比以及剪切弹性模量。

表 1 参数影响研究算例设计
Table 1 Design of the parametric impact study cases

组号	算例编号	长度 a/mm	宽度 b/mm	总厚度 t/mm	铺层顺序
1	C1~C5	50	150,60,50,40,30	1	$[\pm 45]_s$
2	C1,C6~C8	60,50,40,30	60,50,40,30	1	$[\pm 45]_s$
3	C1,C9~C12	50	50	1	$[0]_4, [\pm 30]_s, [\pm 45]_s, [\pm 60]_s, [90]_4$

表 2 碳纤维/环氧树脂材料性能参数
Table 2 Performance parameters of the graphite/epoxy material

E_1/GPa	E_2/GPa	ν_{12}	G_{12}/GPa	
148	9.65	0.3	4.55	
X_T/MPa	X_C/MPa	Y_T/MPa	Y_C/MPa	S_{12}/MPa
1 314	1 220	43	168	48

3 失效分析曲线

采用第 1 节方法计算每个层合板在不同压剪载荷比 η 下发生屈曲失效时的压缩和剪切载荷 N_{xb}^η 和 N_{yxb}^η ,以及发生首层失效时的压缩和剪切载荷 N_{xs}^η 和 N_{yys}^η 。对屈曲和首层失效载荷进行归一化处理,将失效时的压缩载荷 N_{xb}^η 和 N_{xs}^η 除以该层合板纯压缩载荷时的首层失效载荷 N_{xs}^0 ,将失效时的剪切载荷 N_{yxb}^η 和 N_{yys}^η 除以该层合板纯剪切载荷时的首层失效载荷 N_{yys}^∞ 。采用归一化后的屈曲和首层失效载荷绘制层合板的屈曲曲线、首层失效曲线如图 2 所示(以 C1 方案为例, $b/a=1$, $a/t=50$,铺层顺序为 $[\pm 45]_s$)。2 条曲线的内包络为失效曲线。

由图 2 可知,屈曲曲线和首层失效曲线在 A、B 处有 2 个交点,2 个交点将失效曲线分为 3 个区

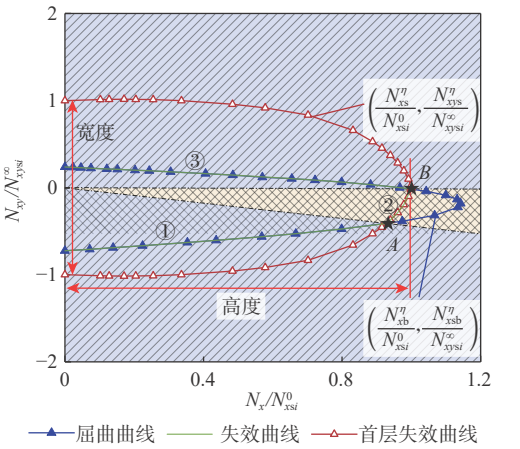


图 2 失效分析结果示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the failure analysis results

域。压剪载荷坐标系下,每条从原点出发的射线对应一种压剪载荷比 η 。其中,A、B 两点所对应的压剪载荷比 η_A 和 η_B 为失效模式变化的临界压剪载荷比。在压剪载荷比小于 η_A 的区域①和压剪载荷比大于 η_B 的区域③,结构发生屈曲失效;在压剪载荷比介于 η_A 和 η_B 之间的区域②,结构发生首层失效。下文中,按照失效模式对每条曲线进行分段,并按照从 y 轴负方向向 y 轴正方向逆时针旋转的顺序,将每段曲线依次命名为分段①、分段②等。当首层

失效区域内存在多种首层失效类型时, 根据失效类型对该范围内曲线进一步分段。例如, 此处的区域①对应分段①; 若区域②范围内首层失效对应同一种失效类型时, 则区域②内曲线段全部为分段②; 若区域②范围内首层失效对应两种不同失效类型时, 则区域②内曲线段又按照各失效类型对应的载荷比范围分为分段②和分段③。其他情况依此类推。

另外, 从2条失效曲线的高度和宽度特征上分析, 图2中首层失效曲线比屈曲曲线更宽, 导致压剪载荷比绝对值较大时, 失效模式为屈曲失效; 屈曲曲线比首层失效曲线更高, 导致压剪载荷比绝对值较小时, 失效模式为首层失效。

4 参数对层合板失效的影响

4.1 边长比对失效行为顺序的影响

当 $a=50\text{ mm}$ 、 $t=1\text{ mm}$ 、铺层顺序为 $[\pm 45]_s$, 边长比 $b/a=3, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6$ 时, 层合板失效曲线如图3所示。

所示, 失效曲线上各分段对应的失效模式如表3所示。

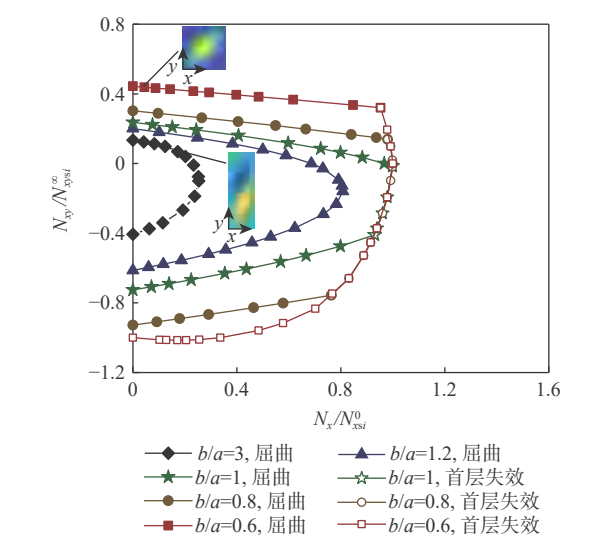


图3 不同边长比时层合板的失效曲线对比
Fig. 3 Comparison of failure curves for laminated plates with different side length ratios

表3 不同边长比时层合板的失效模式对比

边长比	η 范围			失效模式		
	分段①	分段②	分段③	分段①	分段②	分段③
3	$(-\infty, 7.08)$	$(7.08, +\infty)$		(1,1)屈曲	(1,2)屈曲	
1.2	$(-\infty, +\infty)$			(1,1)屈曲		
1.0	$(-\infty, -2.25)$	$(-2.25, -0.08)$	$(-0.08, +\infty)$	(1,1)屈曲	纤维剪切	(1,1)屈曲
0.8	$(-\infty, -4.00)$	$(-4.00, 0.71)$	$(0.71, +\infty)$	(1,1)屈曲	纤维剪切	(1,1)屈曲
0.6	$(-\infty, -5.08)$	$(-5.08, 1.70)$	$(1.70, +\infty)$	基体拉伸	纤维剪切	(1,1)屈曲

注: “(1,2)屈曲”表示屈曲模态在x和y方向的半波数分别为1和2。

由图3可以看出, 不同边长比的首层失效曲线部分重叠。这表明边长比的变化不会导致首层失效曲线改变, 仅通过影响屈曲曲线的形状改变失效曲线的组成。结合图3和表3可以看出, b/a 越小, 屈曲曲线越高、越宽, 先发生屈曲的情况占比越小, 先发生首层失效的情况占比越大, 不同压剪载荷比下, 还可能出现不同的首层失效模式, 如 $b/a=1$ 和 0.8 时, 出现了纤维剪切失效, $b/a=0.6$ 时, 出现了基体拉伸和纤维剪切失效。另外, 随着 b/a 增大, 结构发生屈曲时, 其y方向的半波数也会随之增加, 如 $b/a \leq 1.2$ 时, 层合板的屈曲模态均为(1,1), 而 $b/a=3$ 时, 层合板在 $\eta > 7.08$ 的工况下, 屈曲模态为(1,2)。

4.2 边长厚度比对失效行为顺序的影响

当 $a=b$ 、 $t=1\text{ mm}$ 、铺层顺序为 $[\pm 45]_s$ 、 $a/t=60, 50, 40, 30$ 时, 层合板失效曲线如图4所示, 失效曲线上各分段对应的失效模式如表4所示。

由图4可以看出, 边长厚度比的变化也不会改变首层失效曲线。结合图4和表4可以看出, a/t 越

小, 屈曲曲线越高、越宽, 先发生屈曲的情况占比越小, 先发生首层失效的情况占比越大, 不同压剪载

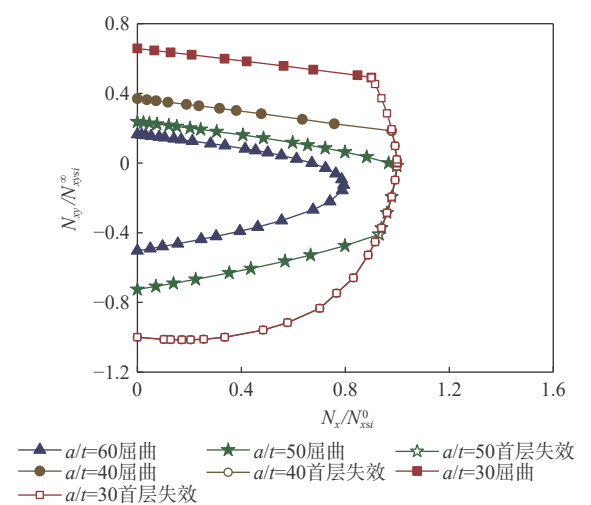


图4 不同边长厚度比时层合板的失效曲线对比
Fig. 4 Comparison of failure curves for laminated plates with different side length-to-thickness ratios

表 4 不同边长厚度比层合板的失效模式对比

边长厚度比	η 范围			失效模式		
	分段①	分段②	分段③	分段①	分段②	分段③
60	$(-\infty, +\infty)$			(1,1)屈曲		
50	$(-\infty, -2.25)$	$(-2.25, -0.08)$	$(-0.08, +\infty)$	(1,1)屈曲	纤维剪切	(1,1)屈曲
40	$(-\infty, -5.08)$	$(-5.08, 0.89)$	$(0.89, +\infty)$	基体拉伸	纤维剪切	(1,1)屈曲
30	$(-\infty, -5.08)$	$(-5.08, 2.76)$	$(2.76, +\infty)$	基体拉伸	纤维剪切	(1,1)屈曲

荷比下, 还可能出现不同的首层失效模式(如 $a/t=50$ 和 40 时, 出现纤维剪切失效, $a/t=30$ 时, 出现基体拉伸和纤维剪切失效)。

4.3 铺层角度对失效行为顺序的影响

当 $a=b=50\text{ mm}$ 、 $t=1\text{ mm}$ 、铺层顺序为 $[\pm\theta]_s$ 、 $\theta=0^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时, 层合板失效曲线如图 5 所示, 失效曲线上各分段对应的失效模式如表 5 所示。

由图 5 可以看出, θ 接近 0° 或 90° 时, 屈曲曲线更矮且更宽, 压剪载荷比绝对值较大时, 倾向于引发结构出现首层失效, 压剪载荷比绝对值较小时, 倾向于先引发结构屈曲。 θ 接近 45° 时, 屈曲曲线更高且更窄, 压剪载荷比绝对值较大时, 倾向于先引发结构屈曲, 压剪载荷比绝对值较小时, 倾向于引发结构先出现首层失效。

对于屈曲模态, 随着 θ 从 0° 增大到 90° , 层合板 x 方向的半波数会由 1 个增长为 2 个。上述变化均从压剪载荷比绝对值小的工况开始发生, 随着 θ 增大发展到压剪载荷比绝对值大的工况中。首层失

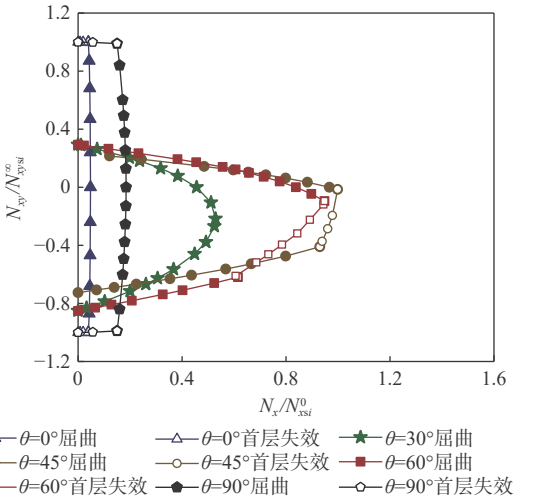


图 5 不同铺层角度时层合板的失效曲线对比
Fig. 5 Comparison of failure curves for laminated plates with different layering angle

效方面, 层合板中主要出现了纤维剪切和基体压缩 2 种失效模式。

表 5 不同铺层角度时层合板的失效模式对比

铺层 角度 $\theta/(^\circ)$	η 范围					失效模式				
	分段①	分段②	分段③	分段④	分段⑤	分段①	分段②	分段③	分段④	分段⑤
0	$(-\infty, -0.95)$	$(-0.95, 0.95)$	$(0.95, +\infty)$			纤维剪切	(1,1)屈曲	纤维剪切		
30	$(-\infty, +\infty)$					(1,1)屈曲				
45	$(-\infty, -2.25)$	$(-2.25, -0.08)$	$(-0.08, +\infty)$			(1,1)屈曲	纤维剪切	(1,1)屈曲		
60	$(-\infty, -4.27)$	$(-4.27, -1.49)$	$(-1.49, -0.42)$	$(-0.42, 0.83)$	$(0.83, +\infty)$	(1,1)屈曲	纤维剪切	基体压缩	(2,1)屈曲	(1,1)屈曲
90	$(-\infty, <-10^3)$	$(<-10^3, -1.88)$	$(-1.88, 1.88)$	$(1.88, >10^3)$	$(>10^3, +\infty)$	基体压缩+纤维剪切	基体压缩	(2,1)屈曲	基体压缩	基体压缩+纤维剪切

5 结 论

本文采用复合材料层合板失效分析理论方法, 开展了四边简支对称层合板的压剪失效研究, 揭示了不同压剪载荷比、边长比、边长厚度比和铺层角度下, 碳纤维/环氧树脂层合板屈曲和首层失效发生的顺序关系, 主要结论如下:

1) 2 种失效发生的压剪载荷比范围会受到层合板边长比、边长厚度比和铺层角度的影响; 其中, 屈曲失效模态主要受压剪载荷比、边长比和铺层角

度的影响, 首层失效模式主要受压剪载荷比和铺层角度的影响。

2) 边长比 b/a 越小, 先发生屈曲的压剪载荷比范围越小, 先发生首层失效的压剪载荷比范围越大。

3) 边长厚度比 a/t 越小, 先发生屈曲的压剪载荷比范围越小, 先发生首层失效的压剪载荷比范围越大。

4) 对于 $[\pm\theta]_s$ 铺层合板, 当 θ 接近 0° 或 90° 时, 压剪载荷比绝对值较大时, 层合板先发生首层失效, 压剪载荷比绝对值较小时, 先屈曲; 当 θ 接近

45°时, 压剪载荷比绝对值较大时, 先屈曲, 压剪载荷比绝对值较小时, 先发生首层失效。

参考文献 (References)

[1] WANG Y N, WANG X, ZHAO W, et al. Hygrothermal and temperature effects on load-carrying capacity and failure mechanism of open-hole laminates prepared with narrow tape prepreg of GFRP[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2022, 32(3): 392-399.

[2] 邓金鑫, 陈林, 卢思彤, 等. 某型飞机复合材料结构损伤分布规律[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(3): 920-930.

DENG J X, CHEN L, LU S T, et al. Damage distribution of composite structures of a certain type aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(3): 920-930(in Chinese).

[3] 李政, 梁珂. 压剪联合载荷作用下复合材料壁板屈曲及后屈曲性能计算与优化方法研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(6): 20-26.

LI Z, LIANG K. A novel method for calculation and optimization of buckling and post-buckling performance of composite panels under combined compression and shear loads[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(6): 20-26(in Chinese).

[4] WANG B W, CHEN X M, SUN X S, et al. Interaction formulae for buckling and failure of orthotropic plates under combined axial compression/tension and shear[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(3): 272-280.

[5] SUN Q P, ZHOU G W, GUO H D, et al. Failure mechanisms of cross-ply carbon fiber reinforced polymer laminates under longitudinal compression with experimental and computational analyses[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 167: 147-160.

[6] NEMETH M P. Buckling of symmetrically laminated plates with compression, shear, and in-plane bending[J]. AIAA Journal, 1992, 30(12): 2959-2965.

[7] NEMETH M. Buckling behavior of long anisotropic plates subjected to combined loads[C]//Proceedings of the 36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 1995: 1455.

[8] NARITA Y, LEISSA A W. Buckling studies for simply supported symmetrically laminated rectangular plates[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1990, 32(11): 909-924.

[9] YETER E, ERKLIĞ A, BULUT M. Hybridization effects on the buckling behavior of laminated composite plates[J]. Composite Structures, 2014, 118: 19-27.

[10] LOUGHLAN J. The buckling of CFRP composite plates in compression and shear and thin-walled composite tubes in torsion—The effects of bend-twist coupling and the applied shear direction on buckling performance[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 138: 392-403.

[11] 王春寿, 张笑宇, 詹志新, 等. 复合材料厚板结构压缩稳定性和承载能力分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(1): 94-101.

WANG C S, ZHANG X Y, ZHAN Z X, et al. The analysis of compression stability and load capacity of the thick composite plate structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(1): 94-101(in Chinese).

[12] SINGH S B, KUMAR A. Postbuckling response and failure of symmetric laminates under in-plane shear[J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(12): 1949-1960.

[13] JAIN P, KUMAR A. Postbuckling response of square laminates with a central circular/elliptical cutout[J]. Composite Structures, 2004, 65(2): 179-185.

[14] 刘鹏洋. 复合材料加筋层合板屈曲分析理论及数值实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 28-67.

LIU P Y. Analytical buckling analysis and numerical simulation of stiffened composite laminated plate[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020: 28-67(in Chinese).

[15] LI X L, GAO W C, LIU W. The bearing behavior and failure characteristic of CFRP laminate with cutout under shearing load: Part I. Experiments[J]. Composite Structures, 2016, 141: 355-365.

[16] LI X L, GAO W C, LIU W. The bearing behavior and failure characteristic of CFRP laminate with cutout under shearing load: Part II. Numerical simulations[J]. Composite Structures, 2016, 141: 366-374.

[17] KOLANU N R, RAJU G, RAMJI M. Damage assessment studies in CFRP composite laminate with cut-out subjected to in-plane shear loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 166: 257-271.

[18] DONG L, MISTRY J. An experimental study of the failure of composite cylinders subjected to combined external pressure and axial compression[J]. Composite Structures, 1997, 40(1): 81-94.

[19] MAHDY W M, ZHAO L B, LIU F R, et al. Buckling and stress-competitive failure analyses of composite laminated cylindrical shell under axial compression and torsional loads[J]. Composite Structures, 2021, 255: 112977.

[20] PIAN R, ZHANG L, YANG F, et al. The competition between buckling and overstress failure of composite laminated plates in compression and shear loads[J]. Composites Communications, 2023, 43: 101714.

[21] LESSARD L B. Compression failure in laminated composites containing an open hole[D]. Stanford: Stanford University, 1989.

[22] KAW A K. Mechanics of composite materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.

[23] KOLLÁR L P, SPRINGER G S. Mechanics of composite structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 465-467.

Failure mode of composite laminated plates under
compression-shear loading

PIAN Rong^{1, 2}, YANG Fan³, ZHANG Ling³, LIU Fengrui^{1, 2, *}, WANG Linjuan^{1, 2}, ZHAO Libin^{4, 5, 6}

- (1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;
- 2. Key Laboratory of Spacecraft Design Optimization and Dynamic Simulation Technologies, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China;
- 3. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;
- 4. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
- 5. Key Laboratory of Advanced Intelligent Protective Equipment Technology, Ministry of Education, Tianjin 300401, China;
- 6. Key Laboratory of Hebei Province on Scale-pan Intelligent Equipment Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Under compressive and shear pressures, composite laminates, which are crucial load-bearing components in airplanes, are vulnerable to buckling or overstress failure. In this paper, the theoretical analysis methods for buckling and first-ply-failure were adopted to predict the failure of composite laminated plates. The investigation was carried out on graphite/epoxy plates, with different load ratios, side length ratios, side length-thickness ratios, and lay-up angles. Two failure categories' occurrence sequence as well as the failure loads' variance were found. It is revealed that buckling and first-ply-failure occur in different orders under various load ratios. The load ratio ranges corresponding to buckling and first-ply-failure are affected by the side length ratio, side length-thickness ratio, and lay-up angle of the plate. The buckling mode is primarily influenced by the load ratio, side length ratio and lay-up angle, while the first-layer-failure mode is mainly affected by the load ratio and lay-up angle.

Keywords: composite laminated plate; failure analysis; buckling; first-ply failure; compression-shear loading

Received: 2024-02-07; **Accepted:** 2024-05-10; **Published Online:** 2024-05-17 17:01
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240516.1813.001
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (12072005,U23A2067); Project of High-Level Talents Introduction of Hebei Province (2021HBQZYCSB009)

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

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0009

引射气体组分对壁面热流和摩擦阻力的影响规律

张绪¹, 赵瑞^{1, 2, *}, 李宇³, 杨光³, 王丽燕³

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 重庆创新中心, 重庆 401135;

3. 中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘 要: 壁面质量引射可有效降低壁面热流和摩擦阻力, 是解决高超声速飞行器热防护问题的备选方案之一。选取二维钝楔为计算模型, 展开质量引射对降热减阻的数值模拟研究, 对比分析了3种不同工质引射气体(热解气体、水蒸气和二氧化碳)对气动力热特性的影响。将热流分解为对流热流和扩散热流可知, 热解气体引射降低了对流热流和扩散热流; 而水蒸气和二氧化碳引射虽然降低了对流热流, 但增大了扩散热流, 且水蒸气增大扩散热流的效果更明显, 使得总热流增加。此外, 3种不同工质引射气体均通过降低壁面附近的速度梯度来降低壁面的摩擦阻力, 其中, 热解气体引射降低的速度梯度最大, 减阻效果最好。

关键词: 壁面质量引射; 气体组分; 降热减阻; 高超声速; 计算流体力学

中图分类号: V221.3; TB553

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1261-08

当高超声速飞行器的飞行速度加快时, 气动加热环境逐渐严峻, 飞行器表面的温度急剧升高, 有效的热防护是保证飞行器飞行安全的关键^[1-3]。传统的隔热材料, 如航天飞机表面的隔热瓦, 属于非烧蚀型隔热材料^[4]。隔热瓦长期在高温和高速气流环境下会受到磨损, 需要定期检查和更换。例如, 美国“哥伦比亚”号航天飞机, 在高速飞行中由于机体外部的隔热瓦脱落造成飞机失事^[5]。

相比于传统的隔热材料, 烧蚀型热防护材料具有隔热效率高、安全系数高等优点, 是目前飞行器的主要隔热材料之一^[6]。烧蚀热防护材料的工作原理是利用材料表面形成的烧蚀层吸收和分散热量, 通过自身的机械剥蚀和热化学反应等形式, 带走热量并保护底层结构不受热损伤^[7-8]。在这个过程中会产生热解气体引射, 可降低壁面热流和摩擦阻力^[9]。李瑾等^[10]研究了质量引射对高超声速钝板边界层流动稳定性的影响, 结果表明, 引射速度越大, 速度剖面变形越严重, 对第二模态中性曲线的

影响越大。文献^[1, 11]以半球为研究对象, 发现质量引射可增加边界层厚度, 并导致速度剖面发生变化。Marvin等^[12]研究了引射不同类型轻质气体对壁面热流的影响, 发现轻质气体会在一定程度上降低热流。Miro等^[13]研究了注入轻质气体对边界层稳定性的影响, 结果表明: 轻质气体的注入增大了边界层厚度并稳定了第二模态。Schneider等^[14]在高超声速条件下进行了气体引射实验, 研究了不同气体引射对边界层转捩的影响, 发现轻质气体及较高的吹气速率都会使边界层更不稳定, 并诱导更早转捩。朱广生等^[15]研究了质量引射对三角翼壁面热流和摩擦阻力的影响, 发现引射温度对下游的摩擦阻力和热流影响较大, 高温真实气体效应使质量引射的降热减阻效果减弱。周伟江等^[16]研究了局部构件上质量引射对表面热环境的影响及其机理, 结果表明: 质量引射可有效地降低表面热流峰值并改变热流分布。聂春生等^[17]展开主动引射气体对高超声速流场调控和降热规律的试验研究, 发现在

收稿日期: 2024-01-08; 录用日期: 2024-04-07; 网络出版时间: 2024-05-22 10:05

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240521.1321.002

* 通信作者. E-mail: zr@bit.edu.cn

引用格式: 张绪, 赵瑞, 李宇, 等. 引射气体组分对壁面热流和摩擦阻力的影响规律[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1261-1268.
ZHANG X, ZHAO R, LI Y, et al. Influence mechanism of gas components on wall heat flux and skin friction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1261-1268 (in Chinese).

空气舵上游通过主动引射气体进行流场调控,可有效减弱平板和空气舵的干扰加热。樊宇翔等^[18]针对高超声速钝楔模型,展开不同引射气体对壁面降热减阻效果的研究,研究表明:热解气体引射降热减阻效果比空气引射更显著。需要注意的是,在制备烧蚀耐热材料时,各种元素的配比对耐热材料的性能会产生较大影响。同时在烧蚀过程中也会产生不同的引射气体,如材料中的碳元素与氧气反应会生成二氧化碳、一氧化碳等气体^[19];材料中的氢元素与氧气反应时,会产生水蒸气等。然而,单一气体组分对壁面热流的影响规律尚不清楚,因此,研究单一气体质量引射对壁面热流和摩擦阻力的影响规律,有利于耐热材料元素配比的进一步优化。本文针对高超声速二维钝楔外形,展开3种不同工质引射气体(热解气体、水蒸气和二氧化碳)对壁面热流和摩擦阻力的影响规律研究。

1 数值方法

三维直角坐标系下,考虑热化学非平衡过程的Navier-Stokes 方程为^[20-21]

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial y} + \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial z} = \frac{\partial \boldsymbol{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{G}_v}{\partial y} + \frac{\partial \boldsymbol{H}_v}{\partial z} + \boldsymbol{W} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \boldsymbol{Q} &= \begin{bmatrix} \rho_s \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \\ \rho e_v \end{bmatrix}; \boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} \omega_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_v \end{bmatrix}; \boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \rho_s u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho Bu \\ \rho e_v u \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G} &= \begin{bmatrix} \rho_s v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ \rho Bv \\ \rho e_v v \end{bmatrix}; \boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \rho_s w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ \rho Bw \\ \rho e_v w \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{F}_v &= \begin{bmatrix} \rho D_s \frac{\partial Y_s}{\partial x} \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \\ -q_{v,x} + \rho \sum_{s=1}^{ns} D_s h_s^a \frac{\partial Y_s}{\partial x} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_v &= \begin{bmatrix} \rho D_s \frac{\partial Y_s}{\partial y} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \\ -q_{v,y} + \rho \sum_{s=1}^{ns} D_s h_s^a \frac{\partial Y_s}{\partial y} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{H}_v &= \begin{bmatrix} \rho D_s \frac{\partial Y_s}{\partial z} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{xz} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} - q_z \\ -q_{v,z} + \rho \sum_{s=1}^{ns} D_s h_s^a \frac{\partial Y_s}{\partial z} \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{Q}$ 为守恒变量张量; $\boldsymbol{F}$ 、 $\boldsymbol{G}$ 、 $\boldsymbol{H}$ 分别为 x 、 y 、 z 方向无黏通量; $\boldsymbol{F}_v$ 、 $\boldsymbol{G}_v$ 、 $\boldsymbol{H}_v$ 分别为 x 、 y 、 z 方向黏性通量; $\boldsymbol{u}$ 为化学反应源项; D_s 为单位质量组分 s 的扩散系数; Y_s 为组分 s 的质量分数; h_s^a 为组分 s 的单位质量焓值; ρ_s 为组分 s 的密度, $s=1,2,\cdots,n$; ρ 为混合气体的密度; p 为混合气体的压力; $\boldsymbol{u}$ 、 $\boldsymbol{v}$ 、 $\boldsymbol{w}$ 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量; q 为热流密度; e_v 、 E 、 B 分别为单位体积混合气体的振动能、总能、总焓; ω_v 为振动能源项; ω_s 为组分 s 的生成率源项^[22]。

输运系数采用碰撞截面法计算^[23],其中,黏性系数和热传导系数均由Gupta混合律计算。混合气体的黏性系数 μ 计算式为

$$\mu = \sum_{s \neq e} \frac{m_s \gamma_s}{\sum_{r \neq e} \gamma_r A_{sr}^{(2)}(T_{ir}) + \gamma_e A_{se}^{(2)}(T_{ve})} + \frac{m_e \gamma_e}{\sum_r \gamma_r A_{er}^{(2)}(T_{ve})} \quad (3)$$

式中: γ_s 和 γ_e 分别为组分 s 和电子的物质的量浓度; m_s 为组分 s 的分子(或原子)质量; m_e 为电子质量; T_{ir} 为平动-转动温度; T_{ve} 为振动-电子温度; A_{sr} 、 A_{se} 分别为在控制温度 T_{ir} 、 T_{ve} 下的碰撞项。

采用空气5组分(N_2 、 O_2 、 N 、 O 、 NO)化学反应模型进行计算^[24],考虑水蒸气(H_2O)、二氧化碳(CO_2)和热解气体(H_2O 、 H_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2)与空气5组分之间的反应^[25-26]。壁面热流 q_w 包括对流热流 q_t 和组分扩散热流 q_d ,如下:

$$q_w = q_t + q_d = k \frac{\partial T}{\partial y^*} + \rho \sum_{s=1}^{ns} D_s h_s^a \frac{\partial Y_s}{\partial y^*} \quad (4)$$

式中: k 为平动温度热传导系数; ρ 和 Y_s 分别为气体的密度和组分 s 的质量分数; D_s 为单位质量组分 s 的扩散系数^[27]; y^* 为沿壁面法向距离; h_s^a 为气体组分 s 的单位质量焓值^[28],包括热焓 h_s (与温度有关的部分称为热焓)与生成焓 h_s^0 ; T 为平动温度。

组分 s 的热焓为

$$h_s = R_s \left(a_{1,s} T + \frac{a_{2,s}}{2} T^2 + \frac{a_{3,s}}{3} T^3 + \frac{a_{4,s}}{4} T^4 + \frac{a_{5,s}}{5} T^5 \right) \quad (5)$$

组分 s 的生成焓为

$$h_s^0 = R_s a_{6,s} \quad (6)$$

式中: R_s 为组分 s 的气体常数;参数 $a_{1,s}$ 、 $a_{2,s}$ 、 $a_{3,s}$ 、 $a_{4,s}$ 、 $a_{5,s}$ 分别为组分 s 的多项式系数,具体数值见文献^[28]附录。

已知壁面上组分 s 的质量分数 Y_s 、壁面温度 T_w 和质量流率 m_w ,通过动量守恒关系,建立质量引射边界条件^[18]。

采用课题组自研的高超声速多物理场效应数值仿真软件 multiCFDhyper 进行计算。其中,时间

推进采用隐式 DPLR 格式^[29]; 黏性通量使用二阶中心差分格式离散; 无黏通量采用 Roe 迎风格式离散。为验证数值方法的准确性, 与 Martin 等^[30]对“星尘号”返回舱的计算结果进行比较验证。“星尘号”返回舱外形见图 1。计算来流速度 $U_\infty=11\,900\text{ m/s}$; 来流静温 $T_\infty=224\text{ K}$; 来流密度 $\rho_\infty=7.72\times 10^{-4}\text{ kg/m}^3$; 迎角为 0° ; 壁面温度 $T_w=3\,310\text{ K}$, 采用层流计算。表 1 为引射气体各组分占比, 引射质量流率为 $0.054\,9\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$, 数值计算结果如图 2 所示。

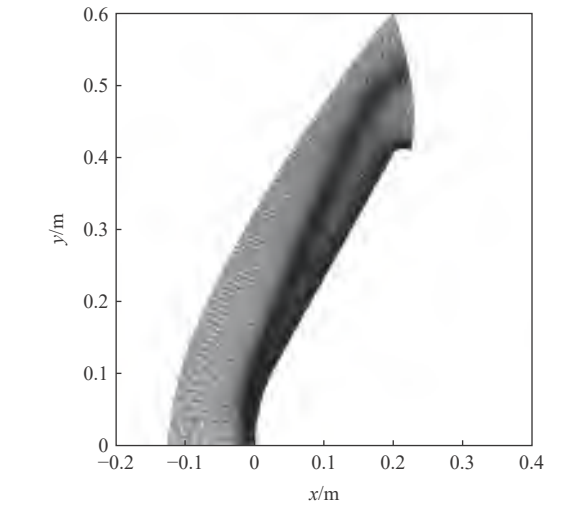


图 1 “星尘号”计算网格

Fig. 1 Computational mesh of stardust reentry

表 1 引射工质质量分数

Table 1 Mass injection conditions	
引射工质	质量分数/%
H ₂ O	3.08
CO ₂	1.22
N ₂	67.80
H ₂	0.72
O ₂	2.44
CO	12.50
OH	3.71
NO	2.08
N	0.007 8
O	6.46

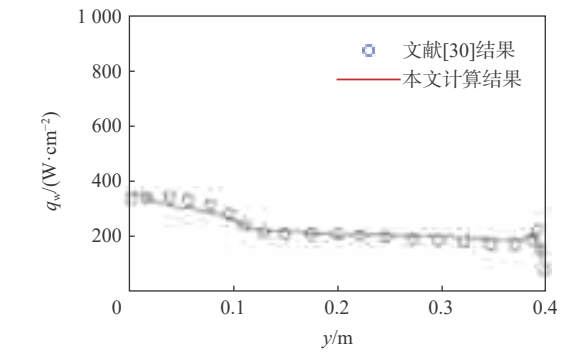


图 2 数值计算结果对比

Fig. 2 Comparison of numerical results

可见, 本文热流 q_w 计算结果与 Martin 等^[30]的结果呈相似趋势, 且具有较好的一致性, 验证了本文数值方法的准确性。

2 数值计算结果分析

2.1 计算模型和工况

钝楔模型全长为 2 m, 头部半径 $R_n=10\text{ mm}$, 背风面无质量引射, 迎风面质量引射范围为后端 $0.4\sim 2\text{ m}$, 如图 3 所示。壁温 $T_w=1\,500\text{ K}$, 采用层流计算来流工况如表 2 所示。

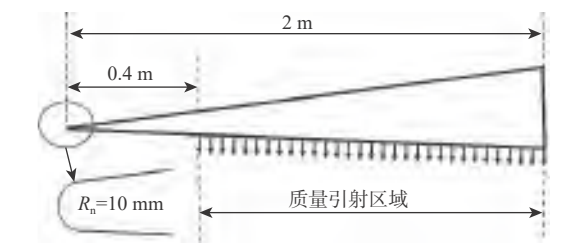


图 3 钝楔计算模型

Fig. 3 Computational model of blunt wedge

表 2 来流工况

Table 2 Flow condition			
速度/(m·s ⁻¹)	来流密度/(kg·m ⁻³)	温度/K	迎角/(°)
7 349	1.6×10^{-4}	233	9.5

钝楔网格拓扑如图 4 所示, 总网格数量为 5.5 万, 第 1 层网格高度为 0.05 mm, 网格雷诺数 $Re_{\Delta x}=4$, 并在流场激波附近及 $x=0.4\text{ m}$ (光滑区域与引射区域交接点) 处进行加密。网格收敛性已在文献^[18]验证。

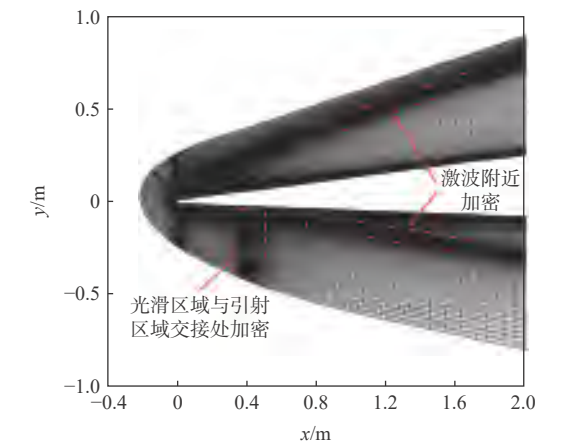


图 4 钝楔计算网格

Fig. 4 Computational mesh of blunt wedge

本文通过高温流场和材料烧蚀响应程序耦合计算得到热解气体的各组分占比及引射质量流率。表 3 给出了本文使用的引射工质包括热解气体、水蒸气 and 二氧化碳, 引射质量流率为 $0.005\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 。

表 3 质量引射工质					
Table 3 Mass injection conditions					
引射工质	各组分占比				
	H ₂ O	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂
水蒸气	1	0	0	0	0
二氧化碳	0	0	0	0	1
热解气体	0.66	0.23	0.06	0.01	0.01

2.2 结果与讨论

2.2.1 不同引射工质流场分析

钝楔流场结构示意图如图 5 所示,可见,高超声速气流在钝化前缘附近会诱导产生一道弓形激波,并向下游发展逐渐形成斜激波。激波后气流受到强烈的压缩,流体动能转化为热能,由于 9.5°迎角时,迎风面激波更加贴体。相比于无引射工况,3 种不同工质引射气体均使迎风面激波脱体距离增大,其中,热解气体引射增大效果最显著。

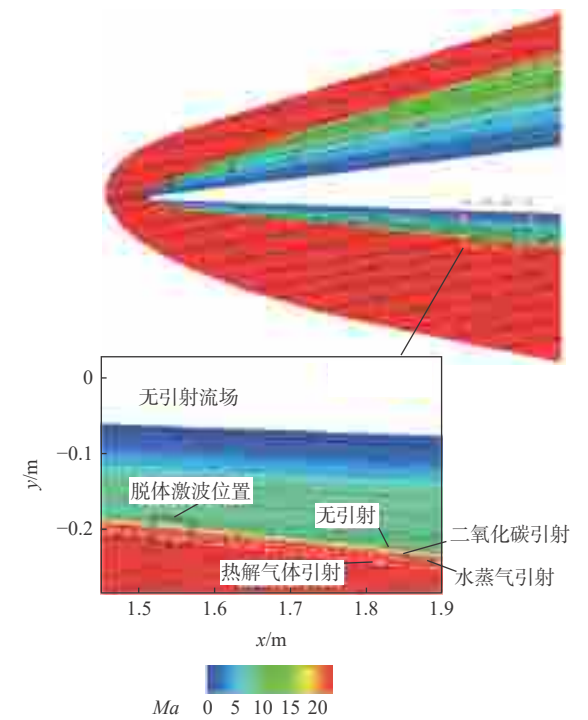


图 5 钝楔流场结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of blunt wedge flow features

空气的摩尔质量为 28.96 g/mol,引射气体摩尔质量如表 4 所示,可见,二氧化碳的摩尔质量比空气大,热解气体和水蒸气的摩尔质量比空气小。在相同的引射质量流率($m_w=\rho v$)下,气体的摩尔质量越大,相同体积内其密度越大,引射速度越小。故二氧化碳的引射速度最小,热解气体的引射速度最大。因此,当引射热解气体时,迎风面激波外推距离最大。

图 6 为不同工质引射气体迎风面的边界层厚度 δ 分布,相比于无引射工况,3 种不同工质引射气

表 4 引射气体摩尔质量		
Table 4 Molar mass of injection gas		
热解气体	水蒸气	二氧化碳
14.04	18.02	44.01

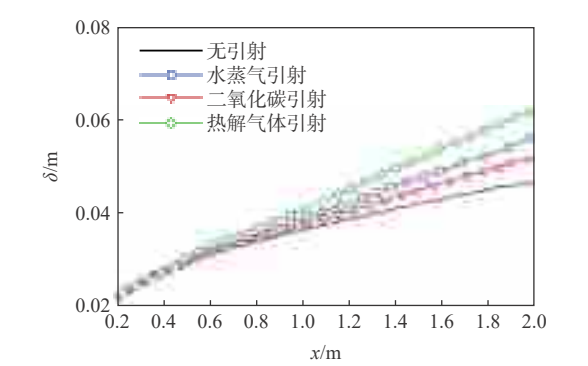


图 6 钝楔迎风面边界层厚度分布

Fig. 6 Boundary layer thickness distributions along the windward of the blunt wedge

体均使边界层抬升。同等引射质量流率下,二氧化碳的引射速度最小,对边界层的抬升效果最弱;热解气体的引射速度最大,对边界层的抬升效果最显著。

2.2.2 不同引射工质对热流影响规律分析

图 7 为迎风面壁面热法分布,相比于无引射工况,热解气体引射显著降低了壁面热流。引射水蒸气时,壁面热流在引射区域显著增大;引射二氧化碳时,壁面热流在 (0.4, 1) m 区域内显著增大,在 (1, 2) m 区域内,壁面热流略微降低。

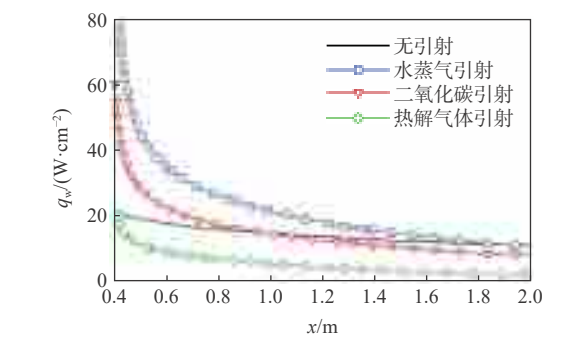


图 7 钝楔迎风面壁面热流分布

Fig. 7 Heat flux distributions on windward of the blunt wedge

为进一步分析水蒸气和二氧化碳引射导致壁面热流增大的原因,图 8 和图 9 分别给出了不同工质引射气体迎风面对流热流和扩散热流分布。可见,相比于无引射工况,3 种不同工质引射气体均减小了对流热流,且热解气体引射减小效果最显著。对于扩散热流,热解气体引射略微降低了扩散热流,而水蒸气和二氧化碳引射均增大了扩散热流,其中,水蒸气引射增大效果最显著。

首先,分析不同工质引射气体对对流热流的影

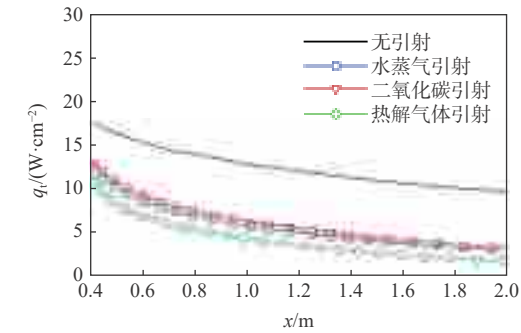


图 8 钝楔迎风面对流热流分布

Fig. 8 Convection heat flux distributions on windward of the blunt wedge

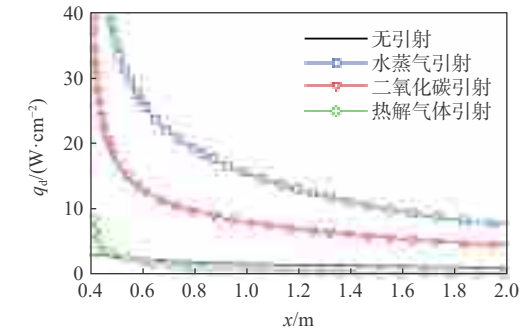


图 9 钝楔迎风面扩散热流分布

Fig. 9 Diffusion heat flux distributions on windward of the blunt wedge

响机制。由式 (4) 可知, 对流热流由壁面附近温度梯度和热传导系数决定。 $x=1.2\text{ m}$ 位置处, 钝楔迎风面的无量纲温度 T/T_∞ 沿壁面法向分布如图 10 所示, 其中, y^* 为沿壁面法向距离。相比于无引射工况, 由于引射二氧化碳时速度较小, 其对边界层的抬升效果较弱, 该位置处的温度梯度略微减小; 而水蒸气和热解气体的引射速度较大, 对边界层的抬升效果较强, 该位置处的温度边界层变厚, 温度梯度减小, 且热解气体引射降低壁面附近温度梯度的效果最显著。

不同工质引射气体的热传导系数 k 分布如图 11

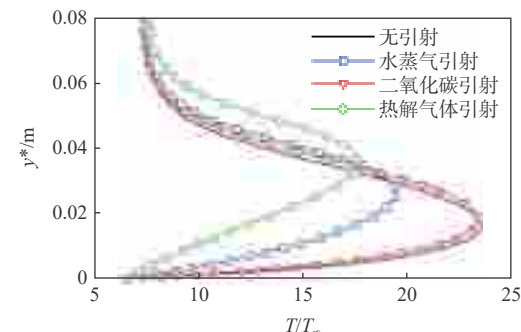


图 10 钝楔迎风面 $x=1.2\text{ m}$ 处 T/T_∞ 沿壁面法向分布

Fig. 10 Distributions of T/T_∞ on windward of the blunt wedge along the wall-normal direction at $x=1.2\text{ m}$

所示。可见, 二氧化碳的热传导系数最低, 水蒸气的热传导系数较高, 热解气体的热传导系数最高。水蒸气和热解气体引射通过减小壁面附近的温度梯度从而降低对流热流; 二氧化碳引射因具有较低的热传导系数, 因此, 也降低了对流热流。

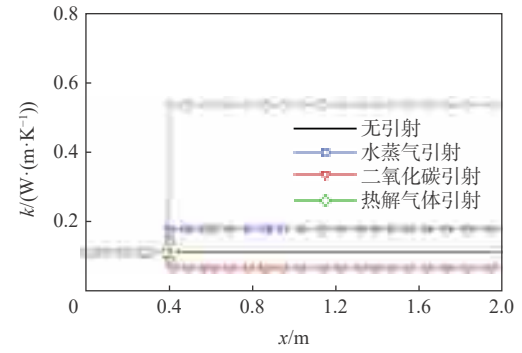


图 11 钝楔迎风面 k 分布

Fig. 11 Distributions of k on windward of the blunt wedge

接下来, 分析不同工质引射气体对扩散热流的影响机制。热解气体引射略微降低了扩散热流, 水蒸气和二氧化碳引射均增大了扩散热流, 其中, 水蒸气引射增大效果最显著。由式 (4) 可知, 扩散热流主要是由组分扩散系数、焓值和组分的质量分数梯度决定。虽然水蒸气和二氧化碳引射会与空气发生化学反应产生 OH 、 CO 等其他组分, 但在壁面附近主要是 H_2O 和 CO_2 组分, 因此, 在下文中仅讨论 H_2O 和 CO_2 组分带来的影响。

图 12 为 $x=1.2\text{ m}$ 处各组分质量分数梯度分布, 3 种不同工质引射气体的组分质量分数均沿着壁面法向方向减小, 组分质量分数梯度均为负值。由式 (4) 可知, 相比于无引射工况, 焓值为正的气体组分使扩散热流降低^[26]; 反之, 焓值为负的气体组分使扩散热流增大。

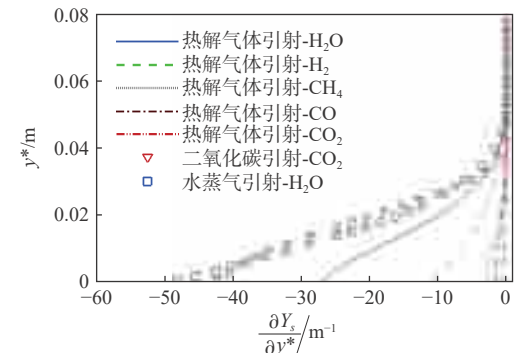


图 12 钝楔迎风面 $x=1.2\text{ m}$ 处组分质量分数梯度分布

Fig. 12 Distributions of component mass fraction gradient on windward of the blunt wedge at $x=1.2\text{ m}$

不同工质引射气体各组分扩散系数和焓值如表 5 所示。由于热解气体中 H_2 占比较高, 且焓值为正, 故其对扩散热流的降低效果明显。 CO_2 焓值

表 5 引射气体各组分扩散系数和焓值

Table 5 Diffusion coefficient and enthalpy of each component of injection gas

引射工质	组分	扩散系数 $D_s/$ ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	焓值 $h_s^o/$ ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\sum_{s=1}^{ns} D_s h_s^o \frac{\partial Y_s}{\partial n} /$ ($(\text{m}^2\cdot\text{MJ})\cdot(\text{s}\cdot\text{kg})^{-1}$)
热解气体	H_2O	0.25	-10.75	21.17
	H_2	0.28	18.02	
	CH_4	0.14	0.35	
	CO	0.16	-2.56	
	CO_2	0.13	-7.54	
水蒸气	H_2O	0.25	-10.75	133.54
二氧化碳	CO_2	0.13	-7.54	42.38

为负，相比于无引射工况，二氧化碳引射使得扩散热流增大。由于边界层厚度沿流向不断增大，组分质量分数梯度变小，扩散热流沿流向逐渐减小，使得壁面热流在(1, 2)m 区域内低于无引射工况。与引射二氧化碳相比，当引射水蒸气时，因 H_2O 的扩散系数、焓值和质量分数梯度更大，增大扩散热流的效果更显著，故壁面热流增大。

2.2.3 不同引射工质对摩擦阻力影响规律分析

图 13 为迎风面壁面摩擦阻力系数 C_f 分布。相比于无引射工况，3 种不同工质引射气体均可降低壁面的摩擦阻力。壁面剪切应力取决于近壁处黏性系数和速度梯度，计算如下：

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial y}$$

(7)

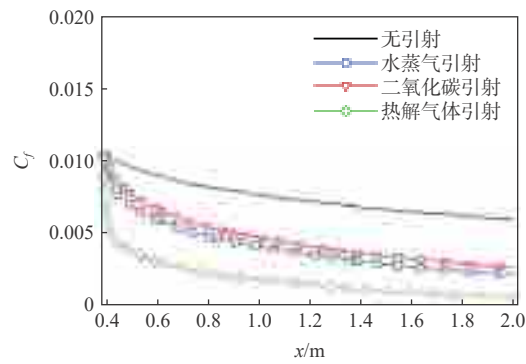


图 13 钝楔迎风面壁面 C_f 分布

Fig. 13 Distributions of C_f on windward of the blunt wedge

图 14 为 3 种不同工质引射气体近壁面处的黏性系数分布。引射水蒸气时，混合气体的黏性系数略高于无引射工况下混合气体的黏性系数。引射热解气体和二氧化碳时，混合气体的黏性系数比无引射工况下混合气体的黏性系数低。

$x=1.2$ m 位置处，钝楔迎风面的无量纲速度 U/U_∞ 沿壁面法向分布如图 15 所示。相比于无引射工况，质量引射导致速度剖面发生变化，使边界层抬升，速度边界层变厚。引射热解气体时对边界层

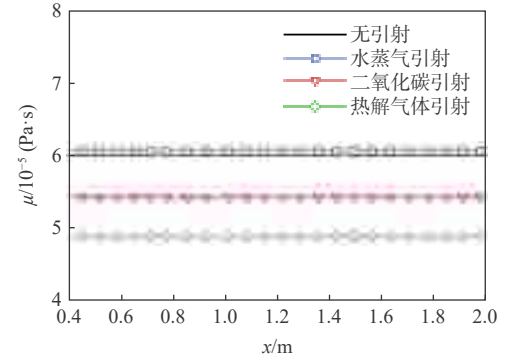


图 14 钝楔迎风面 μ 分布

Fig. 14 Distributions of μ on windward of the blunt wedge

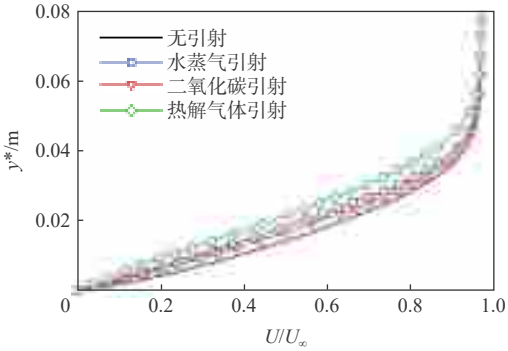


图 15 钝楔迎风面 $x=1.2$ m 处 U/U_∞ 沿壁面法向分布

Fig. 15 Distributions of U/U_∞ on windward of the blunt wedge along the wall-normal direction at $x=1.2$ m

的抬升效果最明显，相同的近壁面法向距离流向速度最小，降低速度梯度的效果最显著。二氧化碳引射速度最小，对边界层的抬升效果最弱，但具有较低的黏性系数，也可降低壁面摩擦阻力。而引射水蒸气时，黏性系数比无引射工况略高，主要通过降低壁面附近的速度梯度降低壁面的摩擦阻力。

3 结 论

本文选取二维钝楔为计算模型，展开了 3 种不同工质引射气体降热减阻的数值模拟研究，研究表明：

- 1) 相比于无引射工况，3 种不同工质引射气体均使脱体激波远离壁面。二氧化碳的引射速度最小，边界层抬升效果较弱；热解气体的引射速度最大，边界层抬升效果最明显，使得迎风面脱体激波远离壁面距离最远。
- 2) 相比于无引射工况，热解气体引射降低了壁面热流，水蒸气和二氧化碳引射增大了壁面热流。将壁面热流分解为对流热流和扩散热流可知，3 种不同工质引射气体均降低了对流热流，其中，热解气体引射降低对流热流的效果最显著。由于热解气体中 H_2 占比较高，故其对扩散热流的降低效果明显。水蒸气和二氧化碳引射均增大了扩散热流，

其中, 水蒸气引射增大扩散热流的效果最显著。

3) 相比于无引射工况, 质量引射可以增加边界层厚度, 导致速度剖面发生变化, 近壁面相同法向距离流向速度变小, 进而降低壁面的摩擦阻力。引射热解气体时速度梯度最小, 降低壁面摩擦阻力的效果最显著。

参考文献 (References)

[1] 李海燕, 唐志共, 杨彦广, 等. 高超声速飞行器高温流场数值模拟面临的问题[J]. 航空学报, 2015, 36(1): 176-191.
LI H Y, TANG Z G, YANG Y G, et al. Problems of numerical simulation of high-temperature gas flow fields for hypersonic vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(1): 176-191(in Chinese).

[2] 杜晨慧. 高超声速飞行器综合热管理及关键技术研究进展[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 43-51.
DU C H. Research progress on integrated thermal management and key technology of hypersonic vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 43-51(in Chinese).

[3] 林友达. 高超声速空气动力学研究进展与趋势[J]. 科学通报, 2015, 60(12): 1095-1103.
LIN Y D. Advances and prospects in hypersonic aerodynamics[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(12): 1095-1103(in Chinese).

[4] 周立鸣, 周宇衡. 非烧蚀隔热材料在高超声速飞行器中的发展[J]. 飞航导弹, 2018(1): 14-24.
ZHOU L M, ZHOU Y H. Development of non-ablative thermal protection materials for hypersonic vehicles[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(1): 14-24(in Chinese).

[5] 尹凯军. 隔热瓦式热防护系统结构技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 9-13.
YIN K J. A research on structure of ceramic tile thermal protection system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010: 9-13(in Chinese).

[6] 吴晓宏, 陆小龙, 李涛, 等. 轻质烧蚀材料研究综述[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(4): 313-317.
WU X H, LU X L, LI T, et al. Review of light ablative materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(4): 313-317(in Chinese).

[7] 薛华飞, 姚秀荣, 程海明, 等. 热防护用轻质烧蚀材料现状与发展[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(1): 123-128.
XUE H F, YAO X R, CHENG H M, et al. Current situation development of lightweight ablation materials for thermal protection[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(1): 123-128(in Chinese).

[8] 伊翠云, 刘甲秋, 陈英函. 轻质烧蚀材料的研究现状与展望[J]. 纤维复合材料, 2023, 40(2): 82-85.
YI C Y, LIU J Q, CHEN Y H. Research status and prospects of lightweight ablative materials[J]. Fiber Composites, 2023, 40(2): 82-85(in Chinese).

[9] 董维中, 高铁锁, 丁明松, 等. 硅基材料烧蚀产物对再入体流场特性影响的数值计算[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(6): 708-714.
DONG W Z, GAO T S, DING M S, et al. Numerical analysis for the effect of silicon based material ablation on the flowfield around

re-entry blunt body[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(6): 708-714(in Chinese).

[10] 李瑾, 苏伟, 黄章峰, 等. 质量引射对边界层稳定性的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(2): 280-293.
LI J, SU W, HUANG Z F, et al. Effect of mass ejection on boundary layers stability[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2): 280-293(in Chinese).

[11] DEMETRIADES A, LADERMAN A J, VON SEGGERN L, et al. Effect of mass addition on the boundary layer of a hemi-sphere at Mach 6[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1976, 13(8): 508-509.

[12] MARVIN J G, AKIN C M. Combined effects of mass addition an nose bluntness on boundary-layer transition[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1970, 8(5): 857-863.

[13] MIRO F M, PINNA F. Injection-gas-composition effects on hypersonic boundary-layer transition[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 890(R4): 4-14.

[14] SCHNEIDER S P. Hypersonic boundary-layer transition with ablation and blowing[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2010, 47(2): 225-237.

[15] 朱广生, 段毅, 姚世勇, 等. 壁面质量引射对高速飞行器减阻降热影响的研究[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(8): 59-70.
ZHU G S, DUAN Y, YAO S Y, et al. Effects of wall mass injection on drag and heat reduction characteristics of high-speed flight vehicles[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2023, 41(8): 59-70(in Chinese).

[16] 周伟江, 姜贵庆. 高超声速流中局部构件上质量引射的热防护特性研究[J]. 航空学报, 1999, 20(3): 193-196.
ZHOU W J, JIANG G Q. Study of heating protection features bu mass injection over the local structure in a hypersonic flow[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(3): 193-196(in Chinese).

[17] 聂春生, 袁野, 马伟, 等. 主动引射气体参数对平板空气舵气动热影响[J]. 航空学报, 2022, 43(S2): 170.
NIE C S, YUAN Y, MA W, et al. Effect of active injection gas parameters on thermal environment of plate and air rudder[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(S2): 170(in Chinese).

[18] 樊宇翔, 赵瑞, 左政玄, 等. 气体引射效应对壁面热流和摩擦阻力的影响规律研究[J]. 航空学报, 2023, 44(21): 528587.
FAN Y X, ZHAO R, ZUO Z X, et al. Gas-injection effects on wall heat flux and skin-friction of vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(21): 528587(in Chinese).

[19] 张威, 曾明, 肖凌飞, 等. 碳-酚醛材料烧蚀热解对再入流场特性影响的数值计算[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(4): 41-48.
ZHANG W, ZENG M, XIAO L F, et al. Numerical study for the effects of ablation and pyrolysis on the hypersonic reentry flow[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(4): 41-48(in Chinese).

[20] 周禹. 高超声速热化学非平衡流场数值模拟研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009: 45-55.
ZHOU Y. Numerical simulation of hypersonic thermochemical non-equilibrium flow field[D]. Beijing: Beihang University, 2009: 45-55 (in Chinese).

[21] GNOFFO P A, GUPTA R N, SHINN J L. Conservation equations and physical models for hypersonic air flows in thermal and chemical nonequilibrium: NASA-TP-2867[R]. Washington, D.C: NASA,

1989: 1-3.

[22] SARMA G S R. Physico-chemical modelling in hypersonic flow simulation[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2000, 36(3): 281-349.

[23] LEONARDO S, LAIN B. Numerical simulation of weakly ionized hypersonic flow for reentry configurations[C]//*Proceedings of the 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*. Reston: AIAA, 2006.

[24] GUPTA R N, YOS J M, THOMPSON R A, et al. A review of reaction rates and thermodynamic and transport properties for an 11-species air model for chemical and thermal nonequilibrium calculations to 30000 K: NASA-RP-1232[R]. Washington, D.C: NASA, 1990: 11-17.

[25] PARK C. Review of chemical-kinetic problems of future NASA missions. I-Earth entries[J]. *Journal of Thermo-physics and Heat Transfer*, 1993, 7(3): 385-398.

[26] PARK C, HOWE J T, JAFFE R L, et al. Review of chemical-kinetic problems of future NASA missions. II-Mars entries[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1994, 8(1): 9-23.

[27] 李海燕. 高超声速高温气体流场的数值模拟[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2007: 19-24.

LI H Y. Numerical simulation of hypersonic and high temperature gas flowfields[D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2007: 19-24(in Chinese).

[28] 赵一朴. 含化学非平衡效应的钝体绕流的发汗型降热减阻数值研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022: 28-29.

ZHAO Y P. Numerical study on heat and drag reduction of transpiration with chemical nonequilibrium flow past a blunt body[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022: 28-29(in Chinese).

[29] MICHAEL J W, GRAHAM C, DEEPAK B, et al. A data-parallel line relaxation method for the navier-stokes equations[C]//*Proceedings of the 13th Computational Fluid Dynamics Conference*. Reston: AIAA, 1997.

[30] MARTIN A, BOYD I D. Modeling of heat transfer attenuation by ablative gases during the stardust reentry[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2015, 29(3): 450-466.

Influence mechanism of gas components on wall heat flux and skin friction

ZHANG Xu¹, ZHAO Rui^{1, 2, *}, LI Yu³, YANG Guang³, WANG Liyan³

- (1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401135, China;
3. Science and Technology on Space Physics Laboratory, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: One way to address the thermal protection issue of hypersonic vehicles is through wall mass injection, which can successfully lower skin friction and wall heat flow. The effects of three distinct gases (pyrolysis gas, water vapor, and carbon dioxide) on aerodynamic force and thermal characteristics are compared and analyzed, and the numerical simulation of mass injection on the heat flux and skin friction of the wall is investigated using a two-dimensional blunt wedge as the calculation model. It is possible to determine that the pyrolysis gas injection lowers the convective and diffusion heat flux by splitting the heat flux into these two categories. Both carbon dioxide injection and water vapor enhance the diffusion heat flux while decreasing the convective heat flow. The effect of water vapor raising the diffusion heat flux is more noticeable, leading to an increase in the overall heat flux. Additionally, by lowering the velocity gradient close to the wall, all three gases can lessen the skin-friction of the wall, with pyrolysis gas injection having a greater impact.

Keywords: wall mass injection; gas component; heat flux and skin-friction reduction; hypersonic; computational fluid dynamics

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0048

基于双域和全局上下文特征提取的红外小目标检测

任勇, 朵琳*, 许渤雨, 杨新

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500)

摘 要: 针对单帧红外小目标检测 (ISTD) 中存在的 2 个固有问题: 小目标缺乏颜色、纹理和形状等局部信息; 在检测模型通过连续下采样获取高级语义信息和全局感受野的过程中, 小目标极易丢失, 提出一种准确、快速的双域和全局上下文特征提取网络 (DDGC-FENet)。该模型包括双域特征提取 (DDFE) 模块和全局上下文特征提取 (GCFE) 模块。DDFE 模块同时在空间域和频域学习小目标与背景的局部对比信息, 以此将目标与背景分离开来。GCFE 模块可以对经多次下采样的特征图进行全局建模, 以提取全局上下文, 防止目标特征在网络深层丢失。此外, 模型还使用双向注意力融合模块 (TWAF) 从行和列 2 个方向融合低级与高级特征。在多个公开数据集上进行实验, 结果表明, 所提方法在平均交并比、归一化交并比和 F_1 指标上明显优于 AGPCNet、DNANet、ISNet 等目前较先进的方法。

关 键 词: 小目标检测; 红外图像; 中心差分卷积; 快速傅里叶卷积; 深度学习

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1269-10

红外小目标检测 (infrared small target detection, ISTD) 在许多领域都发挥着重要作用, 其全天候、远距离和隐蔽的特性使其在森林防火、海上监视、预警系统及无人机搜索跟踪等领域具有广泛的应用^[1-3]。与传统的可见光成像相比, 红外成像技术不受光照条件的影响, 能够在夜间或低光照条件下正常工作, 同时还能提供更远的探测距离和更强的抗干扰能力。然而, 这些优点也带来新的挑战。由于成像距离较远, 红外目标通常很弱小, 甚至可能淹没在背景噪声中。此外, 由于缺乏颜色和纹理信息, 目标的形状和特征难以识别。因此, ISTD 成为一项极具挑战性的任务, 同时也是目前的研究热点^[4]。

当前的 ISTD 方法主要包含 2 类: 传统的模型驱动方法和基于深度学习数据驱动的方法。传统的模型驱动方法依赖于对图像特征的分析, 通过获取先验知识, 并基于合理的假设来手动调整超参

数, 主要包括基于滤波器的方法^[5-6]、基于人类视觉系统 (human visual system, HVS) 的方法^[7-10] 和基于图像数据结构的方法^[11-14]。然而, 传统方法过于依赖先验知识, 对超参数的变化非常敏感, 泛化能力有限。此外, 当面对目标尺寸、形状变化、低信噪比及背景复杂或噪声干扰严重的图像时, 传统方法往往效果不佳, 难以满足实际应用的需求。

深度学习^[15] 在计算机视觉领域已经取得了显著成功, 尤其在 ISTD 方面。研究者利用深度神经网络, 推动了该领域的显著进步。Wang 等^[16] 设计一种新颖的方法, 使用 2 个生成器分别处理漏检和误报问题, 并通过一个鉴别器来平衡两者的结果。Dai 等^[17] 提出一种名为非对称上下文调制 (asymmetric contextual modulation, ACM) 的特征融合方法, 将深层特征与浅层特征进行有效融合。Zhang 等^[18] 引入注意力引导上下文模块 (attention-

收稿日期: 2024-01-22; 录用日期: 2024-05-31; 网络出版时间: 2024-06-20 16:07

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240620.1044.001

基金项目: 云南省科技厅重大科技专项计划 (202302AD080006)

* 通信作者. E-mail: duolin2003@126.com

引用格式: 任勇, 朵琳, 许渤雨, 等. 基于双域和全局上下文特征提取的红外小目标检测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1269-1278. REN Y, DUO L, XU B Y, et al. Infrared small target detection based on dual-domain and global context feature extraction [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1269-1278 (in Chinese).

guided context block, AGCB), 帮助网络更好地关注红外小目标。Li 等^[19] 设计一个密集嵌套交互模块 (dense nested interactive module, DNIM), 旨在实现低层与高层特征之间的渐进交互, 从而更好地保留深层红外小目标的信息。Zhang 等^[20] 提出一种基于泰勒有限差分 (Taylor finite difference, TFD) 的边缘块, 用于检测红外目标的形状信息。尽管这些基于深度学习的方法取得了显著的效果, 但大多侧重于特征融合的研究, 在一定程度上忽略了 ISTD 任务中存在的 2 个关键问题: ① 红外小目标缺乏足够的颜色、纹理和形状等局部信息; ② 小物体在过多的下采样层中容易淹没在背景中。

本文的目标是针对 ISTD 任务中的 2 个核心问题, 提出更有效的解决方案。为此, 本文设计一个类似 U-Net^[21] 架构的 ISTD 网络, 并将其命名为双域与全局上下文特征提取网络 (double-domain and global context feature extraction network, DDGC-FENet)。该网络具有 3 个关键模块: ① 受基于局部对比的 HVS 的启发, 设计双域特征提取 (dual-domain feature extraction, DDFE) 模块, 从空间域和频域来学习小目标与背景的局部对比信息; ② 全局上下文特征提取 (global context feature extraction, GCFE) 模块位于网络的深层, 其能从经过多次下采

样的特征图中提取更为精细的全局语义信息, 防止目标特征丢失; ③ 双向注意力融合 (two-way attention fusion, TWAF) 模块通过从行和列方向提取低级特征, 并通过注意力方式与高级特征实现跨级特征融合。本文的主要贡献如下:

- 1) 提出 DDFE 模块, 有效地从红外图像中将缺乏局部信息的目标分离出来。
- 2) 设计 GCFE 模块, 可以更为精细地处理深层特征, 防止目标特征在网络深层丢失。
- 3) 建立 TWAF 模块, 从行和列 2 个方向实现了低级与高级特征的有效融合。
- 4) 在多个公开红外小目标数据集上进行实验, 本文方法均实现了最优性能。

1 基于 DDGC-FENet 的红外小目标检测

1.1 DDGC-FENet 架构

DDGC-FENet 架构如图 1 所示。其整体架构类似于 U-Net 的编码器-解码器结构。编码器由 1 个卷积模块 (convolution module, CM) 和 3 个 DDFE 模块组成, 解码器由 4 个 CM 组成。GCFE 模块作为过渡层。TWAF 模块代替 U-Net 中传统的跳跃连接。通过逐点卷积作为分割头来生成分割结果。

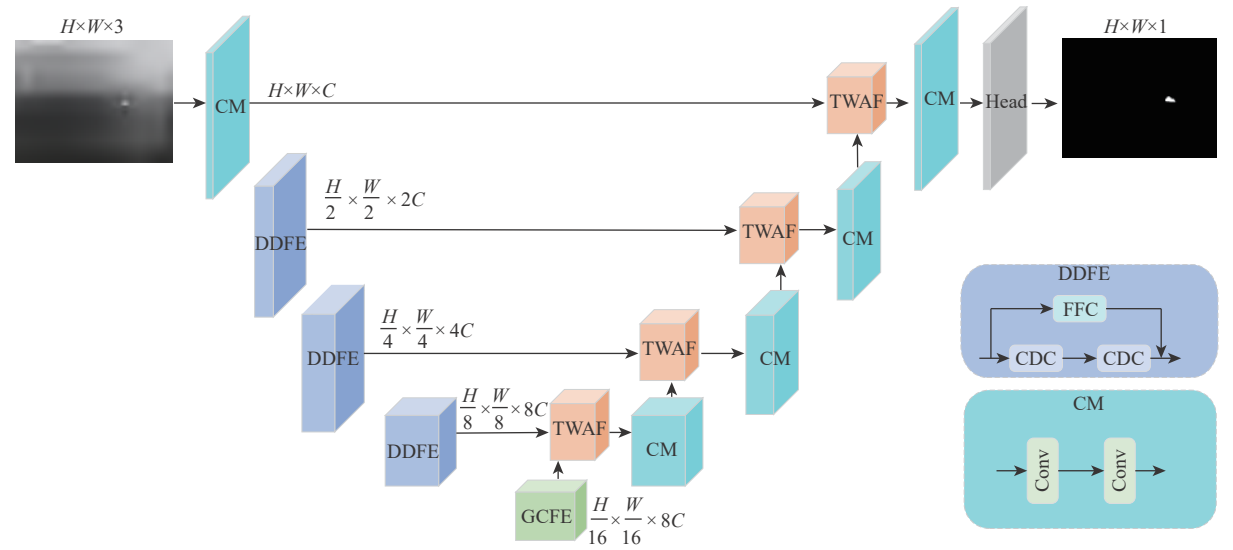


图 1 DDGC-FENet 架构

Fig. 1 Architecture of double-domain and global context feature extraction network

1.2 双域特征提取模块

ISTD 不同于传统的目标检测任务, 其目标缺乏颜色、纹理和形状等局部信息, 目标能够提取的特征有限。因此, 本文从如何将小目标与背景分离的角度出发, 根据目标特征的特性, 设计 DDFE 模块, 其结构如图 1 所示, 该模块由中心差分卷积 (center difference convolution, CDC)^[22] 和快速傅里

叶卷积 (fast Fourier convolution, FFC) 组成。CDC 在图像域通过学习小目标与背景之间的对比度信息, 能够更有效地关注目标特征。基于图像背景是低频的, 而具有较高强度的目标则是高频的这一事实, FFC 可以有效地在频域分离目标与背景特征。

1.2.1 中心差分卷积

卷积在提取纹理、形状和颜色等局部信息方面

具有优势。然而,由于红外小目标通常缺乏这些特征,普通卷积的性能受到一定的限制。为克服这一挑战,本文采用 CDC 来指导网络学习。CDC 的结构如图 2 所示,其通过计算卷积窗口内中心点与其他点之间的差异,引入额外的对比度信息,从而更有效地关注目标特征。其可以描述为

$$f(x,y) = \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W w_{i,j} (F_{x+i,y+j} - F_{x,y}) \quad (1)$$

式中: H 和 W 分别为卷积窗口的高度和宽度; w 为卷积核; F 为特征图。此外,为保留传统特征提取能力以及增强模型的泛化性, CDC 一般与普通卷积结合使用。因此,可以将 CDC 描述为

$$\begin{aligned} \text{CDC}(x,y) = & \theta \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W w_{i,j} (F_{x+i,y+j} - F_{x,y}) + \\ & (1-\theta) \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W w_{i,j} F_{x+i,y+j} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:超参数 $\theta \in [0,1]$,用于调节 CDC 和普通卷积在模型中的权重。为在深度学习框架中高效地实现 CDC,将式(2)进行分解合并,可以得到一个更简洁的表达式:

$$\text{CDC}(x,y) = \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W w_{i,j} F_{x+i,y+j} - \theta F_{x,y} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W w_{i,j} \quad (3)$$

在卷积神经网络中,对于固定大小的卷积核,通过前向传播过程中的下采样操作,可以逐级扩大感受野。该特点使 CDC 能够提取多级对比度信息,从而有助于网络识别不同大小的红外小目标,进而显著提升网络性能。

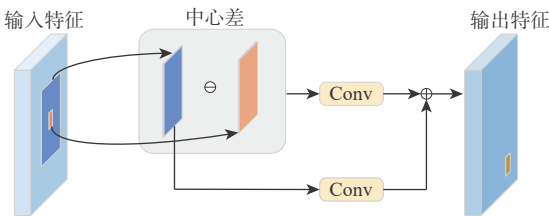


图2 中心差分卷积

Fig. 2 Center difference convolution

1.2.2 快速傅里叶卷积

在红外图像中,虽然目标比较弱小,但和周围的暗淡背景依然存在一定的对比度差异,傅里叶变换恰好可以捕捉图像的这种梯度信息。因此,本文利用该特点设计了 FFC 模块,其结构如图 3 所示,通过对图像做傅里叶变换,FFC 可以将目标与背景分离开,进而独立提取双方特征。FFC 以空间域特征 f_{input} 作为输入,并生成精细化的空间域特征 f_{output} 。首先,通过 1×1 卷积操作,将输入特征图 f_{input} 映射到 f_1 ,确保其通道数与期望的输出相匹配:

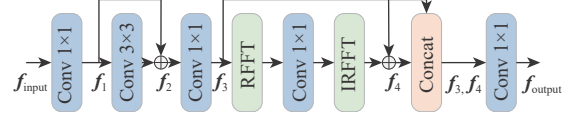


图3 快速傅里叶卷积

Fig. 3 Fast Fourier convolution

$$f_1 = \text{LR}(\text{IN}(\text{Conv}_{1 \times 1}(f_{\text{input}}))) \quad (4)$$

式中: LR 为 Leaky ReLU 激活函数; IN 为实例归一化; $\text{Conv}_{1 \times 1}$ 表示 1×1 卷积。之后,将处理后的特征 f_1 输入 3×3 卷积中,以增强局部感受野的覆盖范围,并进一步细化不同位置和通道的特征:

$$f_2 = \text{LR}(\text{IN}(\text{Conv}_{3 \times 3}(f_1))) + f_1 \quad (5)$$

然后,将 f_2 通过一个 1×1 卷积,以调整通道信息:

$$f_3 = \text{LR}(\text{IN}(\text{Conv}_{1 \times 1}(f_2))) + f_2 \quad (6)$$

随后,为提取频域特征,采用带有残差连接的跨域 1×1 卷积。首先,对 f_3 进行实快速傅里叶变换 (real fast Fourier transformation, RFFT) 操作,在频域中分离出目标与背景特征。接着,通过 1×1 卷积进一步细化频域特征。最后,使用逆实数快速傅里叶变换 (inverse real fast Fourier transformation, IRFFT) 将卷积的输出转换回图像域:

$$f_4 = F^{-1}(\text{LR}(\text{IN}(\text{Conv}_{1 \times 1}(F(f_3))))) + f_3 \quad (7)$$

式中: F^{-1} 表示 IRFFT; F 表示 RFFT。

值得注意的是,在处理实值图像信号时,傅里叶变换得到的频域数据是共轭对称的,这意味着频率信息中有一半的数据是冗余的。为实现模型的轻量化,采用 RFFT 来提取必要的频域信息。

最后,使用 1×1 卷积来挑选合适的特征,并调整通道数量:

$$f_{\text{output}} = \text{LR}(\text{IN}(\text{Conv}_{1 \times 1}([f_3, f_4]))) \quad (8)$$

通过对图像梯度的提取,FFC 可以有效分离目标和背景特征。

1.3 全局上下文特征提取模块

经过 DDFE 模块后,此时的特征图已经经历了 4 次下采样操作,若再进一步进行下采样操作以获取高级语义特征和全局感受野,则小目标特征极易丢失。GCFE 模块可以在保持高分辨率特征图的同时,有效扩大感受野,从而在不丢失小目标的情况下提取全局上下文,更好地保留目标特征,其结构如图 4 所示,该模块是由 CM 和混合空洞卷积 (hybrid dilated convolution, HDC)^[23] 组成的迭代结构。HDC 由不同膨胀系数的空洞卷积组成,可以在不增加网络参数的情况下,有效增加感受野,进而提取全局特征,而 CM 用于局部特征补偿。将 2 种

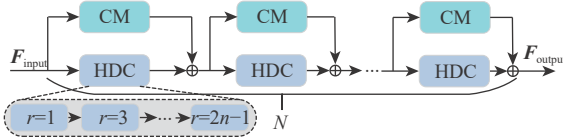


图4 全局上下文特征提取

Fig. 4 Global context feature extraction

特征做简单的相加融合操作。给定输入为 F_{input} ，输出为 F_{output} ，则 GCFE 模块可以描述为

$$\begin{cases} F_{output} = \underbrace{\text{Iter}}_N \{ \text{CM}(F_{input}) + \text{HDC}(F_{input}) \} \\ \text{CM}(F_{input}) = R(\text{BN}(\text{Conv}_{3 \times 3}(R(\text{BN}(\text{Conv}_{3 \times 3}(F_{input})))))) \\ \text{HDC}(F_{input}) = R(\text{BN}(\text{Conv}_{3 \times 3}(F_{input}, r = i))), i = 1, 3, \dots, 2n-1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\text{CM}(\cdot)$ 、 $\text{HDC}(\cdot)$ 为模块学习的映射函数; R 、 BN 分别为 ReLU 激活函数和批量归一化; N 、 n 、 r 分别为 HDC 迭代次数、卷积层数、膨胀系数。

在引入空洞卷积以增加卷积感受野的同时,也要面对一个挑战: 网格效应 (the gridding effect, TGE), 如图 5 所示, 该效应会导致某些像素无法被有效利用, 进而丢失局部信息。为解决该问题, Wang 等^[23] 提出一种创新的 HDC 结构。通过结合 HDC 结构, 空洞卷积能够更有效地避免 TGE。HDC 定义了空洞卷积中 2 个非零值之间的最大距离:

$$M_i = \text{Max}[M_{i+1} - 2r_i, M_{i+1} - 2(M_{i+1} - r_i), r_i] \quad (10)$$

式中: 规定 $M_n = r_n$, n 为 HDC 中的卷积层数; M_i 为第 i 层卷积 2 个非零值之间的最大距离; r_i 为第 i 层卷积的膨胀系数。HDC 规定, 当空洞卷积组合满足以下 3 个要求时, 可以避免 TGE: ① $M_2 \leq k$, k 表示卷积核的大小, 即第 2 个卷积层 2 个非零元素之间的最大近距离不得超过卷积核的大小; ② 空洞卷积组合的膨胀率之间不能具有除 1 以外的公因子; ③ 空洞卷积组合的扩张系数应为锯齿形状的迭代结构, 如 $[1, 3, 5, 1, 3, 5]$ 。

GCFE 模块中的 HDC 结构采用膨胀系数组合 $r = \{[1, 3, \dots, 2n-1], [1, 3, \dots, 2n-1], \dots, [1, 3, \dots, 2n-1]\}$ 。显然, 膨胀组合满足第 2 个和第 3 个条件。只需证明 $M_2 \leq 3$, 证明过程如下:

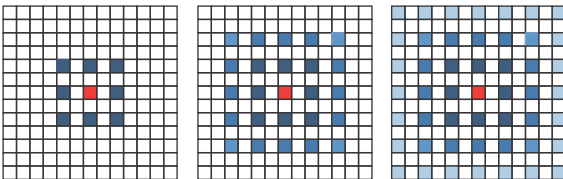


图5 网格效应

Fig. 5 The gridding effect

根据定义可知: $M_n = r_n = 2n - 1$

当 $n = 2$ 时, $M_2 = 3$, 满足设计要求。

以下讨论 $n \geq 3$ 的情况:

$$\begin{aligned} M_{n-1} &= \text{Max}[M_n - 2r_{n-1}, M_n - 2(M_n - r_{n-1}), r_{n-1}] = \\ &= \text{Max}[5 - 2n, 2n - 5, 2n - 3] = 2n - 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{n-2} &= \text{Max}[M_{n-1} - 2r_{n-2}, M_{n-1} - 2(M_{n-1} - r_{n-2}), r_{n-2}] = \\ &= \text{Max}[7 - 2n, 2n - 7, 2n - 5] = 2n - 5 \end{aligned}$$

可知: $M_{n-a} = 2(n-a) - 1$

取 $a = n - 2$, 则 $M_2 = 3 \leq k = 3$, 满足设计要求。

故膨胀系数组合符合 HDC 结构设计。

1.4 双向注意力融合模块

由于低级特征通常包含目标细节, 而高级特征中不存在这些细节。因此, 设计 TWAF 模块, 旨在细化高级特征, 以便更好地融合低级和高级特征。如图 6 所示, TWAF 模块由 2 个并行的注意力模块构成, 每个模块独立地在行或列方向上生成一个注意力图; 然后, 使用这些注意力图来调制高级特征; 最后, 将 2 个注意力特征汇聚在一起, 形成 TWAF 模块的最终输出。该过程可以描述为

$$F_{\text{TWAF}} = \text{TWAF}(F_{\text{low}}, F_{\text{high}}) = \text{Conv}_{1 \times 1}([F_{\text{row}}, F_{\text{column}}]) \quad (11)$$

式中: $\text{TWAF}(\cdot)$ 为模块学习的映射函数; F_{low} 和 F_{high} 分别为 DDGC-FENet 中的低级和高级特征; F_{row} 和 F_{column} 分别为行和列方向关注的特征, 可通过式 (12) 和式 (13) 获取:

$$F_{\text{row}} = S(F_r(F_b(F_{\text{low}})))F_b(F_{\text{high}}) + F_b(F_{\text{low}}) \quad (12)$$

$$F_{\text{column}} = S(F_c(F_b(F_{\text{low}})))F_b(F_{\text{high}}) + F_b(F_{\text{low}}) \quad (13)$$

式中: $S(\cdot)$ 为 Sigmoid 函数; $F_b(\cdot)$ 为瓶颈结构, 包括 2 个 1×1 卷积以约束高频噪声, 瓶颈结构的作用类似于非负矩阵分解 (nonnegative matrix factorization, NMF) 的作用, 可以保留有用的特征, 同时滤除多余的高频噪声^[24]; F_r 为行方向上的 1×5 中心差分卷积;

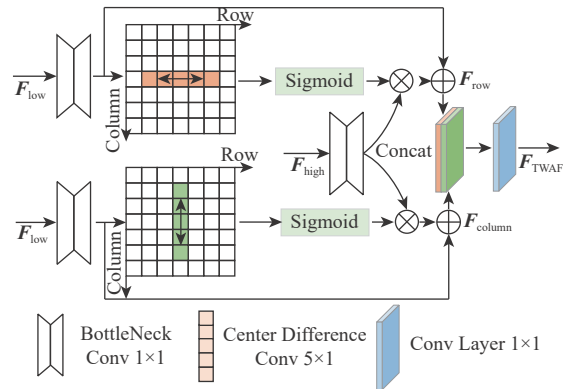


图6 双向注意力融合

Fig. 6 Two-way attention fusion

F_c 为列方向上的 5×1 中心差分卷积。TWAF 模块中的双向注意机制可增强模块从 2 个方向的低级特征中提取细节信息的能力, 从而指导高级特征的细化。

2 实 验

2.1 数据集与评价指标

在 ISTD 任务中广泛使用的 NUAA^[17]、IRSTD1k^[20]、SIRSTAUG^[18] 和 NUDT^[19] 4 个数据集上进行实验。

表 1 不同数据集参数设置

Table 1 Parameter settings of different datasets

数据集	迭代次数	批次大小/张	学习率	图片数量划分	
				训练验证集	测试集
NUAA ^[17]	1 500	2	0.000 3	341	86
IRSTD1k ^[20]	500	2	0.000 1	800	201
SIRSTAUG ^[18]	500	8	0.000 1	8 525	545
NUDT ^[19]	1 500	8	0.000 1	1 027	300

实验使用像素级别的指标平均交并比 (mean intersection-over-union, mIoU)、归一化交并比 (normalized intersection-over-union, nIoU) 和 F_1 分数作为评估指标。其中, mIoU 表示整个样本预测掩码和真实掩码的交集和并集之比; nIoU 将单个样本的交并比求平均; F_1 分数可以评估模型的综合能力。定义分别为

$$r_{\text{mIoU}} = \frac{\sum_{i=1}^C n_{\text{TP}i}}{\sum_{i=1}^C (n_{\text{TP}i} + n_{\text{FP}i} + n_{\text{FN}i})} \tag{14}$$

$$r_{\text{nIoU}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^C \frac{n_{\text{TP}i}}{n_{\text{TP}i} + n_{\text{FP}i} + n_{\text{FN}i}} \tag{15}$$

$$F_1 = \frac{2n_{\text{TP}}}{2n_{\text{TP}} + n_{\text{FP}} + n_{\text{FN}}} \tag{16}$$

式中: C 为样本总数; n_{TP} 、 n_{FP} 和 n_{FN} 分别为真阳性、假阳性和假阴性像素的数量。

2.2 实验环境与实施细节

实验在配置为 Inter Core i5-12400F 处理器、16 GB 内存、单张 NVIDIA RTX3060 显卡 (12 GB 显存)、Pytorch1.12 框架及 64 位 Windows10 操作系统的服务器上完成。选择 Adam 优化器对模型进行优化, 并使用深监督训练策略, 损失函数采用 SoftIoU^[25]。如表 1 所示, 由于 4 个数据集在分布和分辨率上存在差异。针对每个数据集, 实验都设置了不同的参数。

2.3 实验结果与分析

将本文方法与传统方法 (IPI^[11]、RIPT^[13]、PSTNN^[26])

其中, NUAA 是从数百个红外小目标序列中选择代表性帧构建的数据集; IRSTD1k 由 1 001 张具有不同形状、尺寸及杂波背景复杂的真实图像组成; 对 NUAA 中的图像进行大小调整、裁剪、旋转后得到数据集 SIRSTAUG; NUDT 是包含城市、田野、高光、海洋和云层背景的合成数据集。对每个数据集中训练集和测试集图像数量的划分见表 1 第 5 列和第 6 列。

和深度学习方法 (ACM^[17]、AGPCNet^[18]、DNANet^[19]、ISNet^[20]) 等先进方法进行比较。如表 2 所示, 在 NUAA 和 IRSTD1k 2 个数据集上, 本文方法在 3 个评价指标上均表现出最佳性能。特别是在 IRSTD1k 数据集上, 本文方法在 mIoU、nIoU 和 F_1 分数上较第 2 名分别提升 3.71、1.34 和 2.35。传统方法在这些数据集上的性能普遍较低, 主要是因为图像背景较为复杂, 导致传统方法难以有效区分红外小目标和噪声。尽管基于深度学习的方法通过大量数据训练能够处理这些噪声, 但并未充分考虑目标与背景的分离, 同时, 也未能解决网络深层目标特征丢失的问题。相比之下, 本文方法根据红外小目标的特性, 能够有效分离目标与背景噪声, 并确保网络深层目标特征有效保留。因此, 本文方法性能更加卓越。

为了验证本文方法的泛化性, 在 SIRSTAUG 和 NUDT 数据集上进行实验, 结果如表 3 所示。结果表明, 本文方法在这 2 种数据集上均表现最佳。在 SIRSTAUG 数据集上, 相较于 ISNet, 本文方法在 mIoU、nIoU 和 F_1 分数上分别提升 1.57、0.69 和 1.09。由此可见, 本文方法在 ISTD 方面始终保持着最优的检测性能。

图 7 展示了不同方法在 NUAA 和 IRSTD1k 数据集上的 ROC 曲线。研究结果表明, 在不同分割阈值设置下, 本文方法展现出显著优于其他方法的性能。

图 8 是不同阶段红外图像的特征图可视化。第 1 张图像是原始图像。第 2 张图像是经过一个 CM 后的特征图, 有明显的噪声干扰, 且目标与背景

表 2 不同方法在 NUAA 和 IRSTD1k 数据集上的检测效果

方法	mIoU		nIoU		F_1	
	NUAA ^[17]	IRSTD1k ^[20]	NUAA ^[17]	IRSTD1k ^[20]	NUAA ^[17]	IRSTD1k ^[20]
IPI ^[11]	57.62	14.95	63.75	34.53	73.11	26.02
RIPT ^[13]	28.36	11.37	35.87	17.51	44.24	20.40
PSTNN ^[26]	51.52	15.94	62.00	32.72	67.98	27.51
ACM ^[17]	72.88	63.39	72.20	60.81	84.35	77.59
AGPCNet ^[18]	77.12	68.81	75.13	66.18	87.05	81.52
DNANet ^[19]	74.91	68.87	75.10	67.53	85.65	81.57
ISNet ^[20]	80.02	68.77	78.12	64.84	88.90	81.47
DDGC-FENet	81.24	72.58	80.03	68.87	89.65	83.92

注: 加粗数值表示最优。

表 3 不同方法在 SIRSTAUG 和 NUDT 数据集上的检测效果

方法	mIoU		nIoU		F_1	
	SIRSTAUG ^[18]	NUDT ^[19]	SIRSTAUG ^[18]	NUDT ^[19]	SIRSTAUG ^[18]	NUDT ^[19]
IPI ^[11]	37.74	37.51	45.27	48.39	54.75	54.55
RIPT ^[13]	24.15	29.17	33.40	36.13	38.91	45.19
PSTNN ^[26]	19.03	27.72	27.08	39.80	32.11	43.42
ACM ^[17]	73.84	68.48	69.83	69.26	84.95	81.29
AGPCNet ^[18]	74.70	88.67	71.47	87.40	85.50	93.95
DNANet ^[19]	74.90	92.67	70.25	92.05	85.66	96.17
ISNet ^[20]	74.96	92.01	71.27	91.63	85.62	95.86
DDGC-FENet	76.53	93.28	71.96	93.34	86.71	96.52

注: 加粗数值表示最优。

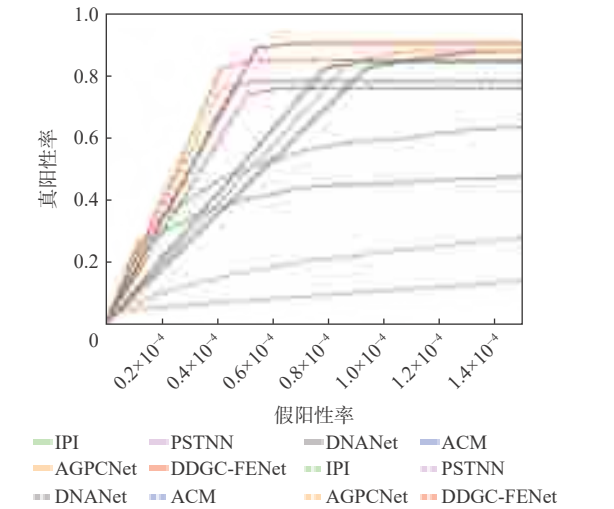


图 7 不同方法在 NUAA(实线) 和 IRSTD1k(虚线) 上的 ROC 曲线

Fig. 7 ROC curves of different methods on NUAA (solid line) and IRSTD1k (dotted line)

黏着在一起。第 3 张图像是经过 DDFE 模块之后的特征图, 滤除了大部分噪声, 并将目标与背景分离, 但此时的目标特征比较微弱。第 4 张图像是经

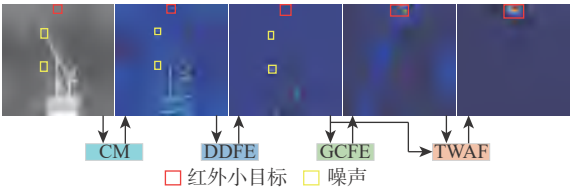


图 8 不同阶段的红外图像特征图可视化

Fig. 8 Visualization of infrared image feature maps at different stages

过 GCFE 模块后的特征图, 有效地保留增强了目标特征, 且进一步抑制了噪声。第 5 张图像是第 3 张与第 4 张图像经过 TWAF 模块后的特征图, 可以看出, 噪声已经基本消除, 目标特征尤为显著。

图 9 对不同方法在 NUAA 和 IRSTD1k 数据集上的某些图像检测结果进行可视化比较。可以明显看出, DDGC-FENet 的检测效果始终处于领先地位。以第 1 张图像为例, 当存在与红外小目标类似噪声的情况下, 其他对比方法容易发生误检, 然而, 由于 TWAF 模块的出色性能, DDGC-FENet 能够有效地抑制噪声, 从而避免误检。在第 2 张图像中, 当遇到非常微弱的目标时, 其他方法容易漏检, 而

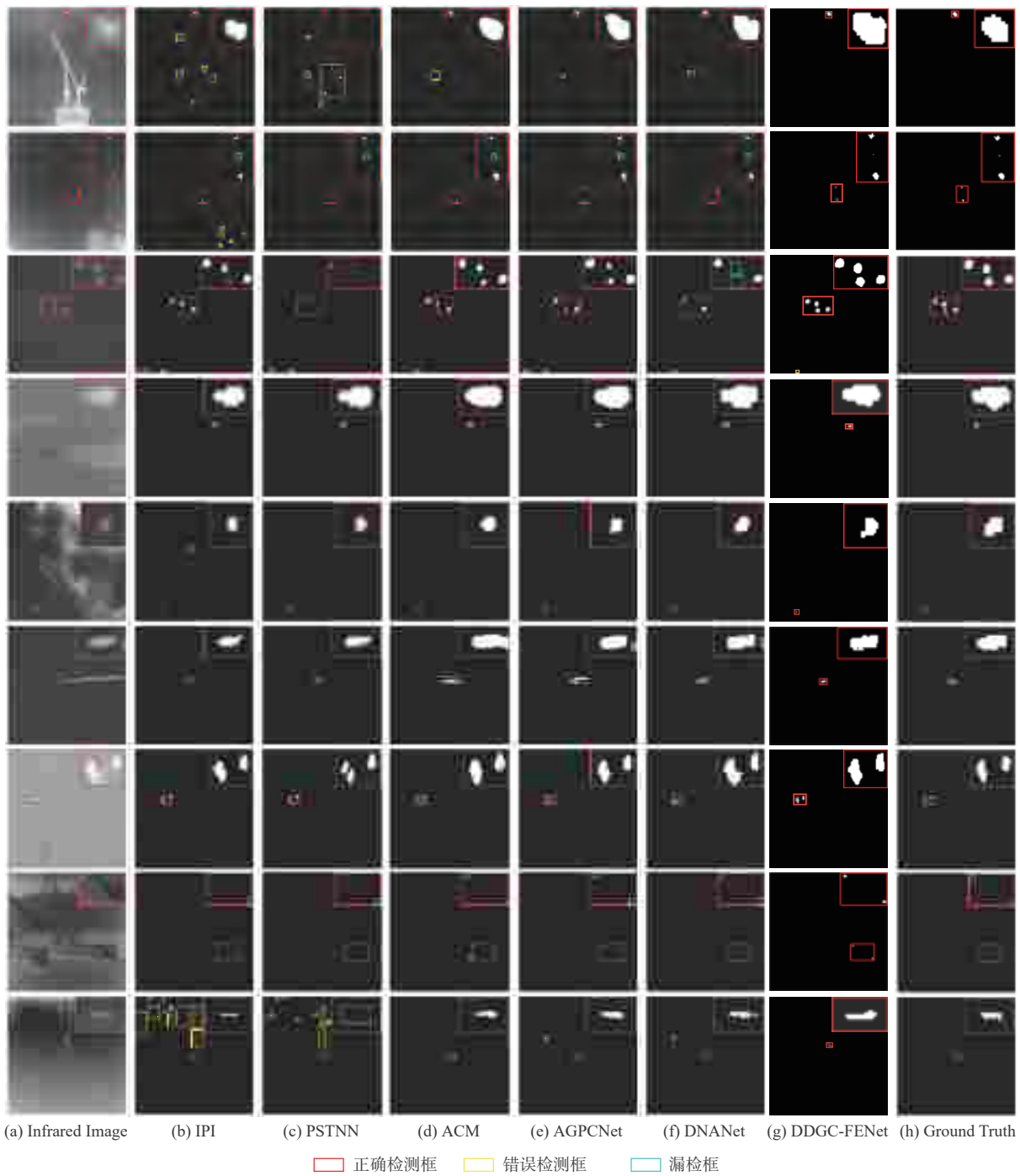


图 9 不同方法在 NUAA 和 IIRSTD1k 数据集上的可视化结果

Fig. 9 Visualization results of different methods on NUAA and IIRSTD1k datasets

本文方法得益于 GCFE 模块, 能够有效地检测到这些非常微弱的目标。在第 6 张图像中, 当目标与高亮背景紧密相连时, 其他方法难以分离目标与背景, 由于 DDFE 模块的独特设计, 本文方法能够有效地提取目标特征, 并实现准确的检测。

2.4 性能分析

模型推理速度的量化评估可通过单位时间图像吞吐量实现, 浮点运算速度的数值特征直接反映了模型架构的存储需求和计算密集度。在 NUAA 数据集上, 不同方法在 NUAA 数据集上的性能比较

如表 4 所示。其中, 浮点运算速度通过 thop 库计算得到, 模型推理速度在单张 RTX3060 上测量得到。实验根据不同的输入维度 C 将本文模型分为小模型 DDGC-FENet_S($C=16$)、中模型 DDGC-FENet_B($C=24$)和大模型 DDGC-FENet_L($C=32$)。从表 4 可以看出, 虽然 ACM 具有最低的计算复杂度和最高的模型推理速度, 但其检测效果与其他先进方法相比, 存在较大差距。DDGC-FENet 在保证最佳检测效果的同时, 与 AGPCNet 和 DNANet 相比, 也具有更低的浮点运算速度和更高的模型推理

表 4 不同方法在 NUA A 数据集上的性能比较					
Table 4 Performance comparison of different methods on NUA A dataset					%
模块	浮点运算 速度/ 10^9 s^{-1}	模型推理 速度/(帧· s^{-1})	mIoU	nIoU	F_1
ACM ^[17]	1.14	50	72.88	72.20	84.35
AGPCNet ^[18]	327.54	7	77.12	75.13	87.05
DNANet ^[19]	57.12	18	74.91	75.10	85.65
DDGC-FENet_S	16.36	31	80.41	79.25	89.14
DDGC-FENet_B	36.47	29	80.92	80.03	89.46
DDGC-FENet_L	64.55	28	81.24	80.03	89.65

注: 加粗数值表示最优。

速度。此外, DDGC-FENet_S 具有更出色的浮点运算速度和模型推理速度, 且检测效果也优于其他对比方法。

2.5 消融实验

在 NUA A 数据集上, 本文以 U-Net 模型作为基准模型进行消融实验。如表 5 所示, 第 2 行是保留 DDFE 的结果, 第 3 行是保留全局特征提取的结果, 第 4 行是保留 TWAF 的结果, 相较于基准模型, 各项指标都有不错的提升。从第 5 行和第 6 行可以看出, 当逐步添加各模块时, 模型的检测效果逐步上升, 当同时使用 3 个模块时, 性能达到最优, 表明这 3 个模块对 ISTD 的有效性。

表 5 本文模型消融实验结果					
Table 5 The ablation experimental results of the proposed model					%
U-Net			mIoU	nIoU	F_1
DDFE	GCFE	TWAF			
×	×	×	76.45	77.24	86.67
√	×	×	79.99	78.11	88.88
×	√	×	80.05	78.20	88.92
×	×	√	76.72	77.51	86.89
×	√	√	80.37	78.47	89.12
√	√	√	81.24	80.03	89.65

注: 加粗数值表示最优。

表 6 验证了 GCFE 模块中 HDC 迭代次数 N 和卷积层数 n 对模块性能的影响。可以看出, 当 $N=4$ 、 $n=3$ 时, 模型取得了最佳效果。

表 7 研究了不同输入维度 C 对模型检测效果的影响。将输入维度 C 默认设置为 32。当实验将 C 分别设置为 16、24 和 32 时, 模型性能得到了一定程度的提升。然而, 当将 C 继续增加到 48 时, 性能开始下降。基于实验结果的分析, 认为由于红外图像缺乏明确的语义信息, 当输入维度过大时, 模型容易受到归纳偏差的影响, 导致其无法有效地提取目标特征。

为探究超参数 θ 对 CDC 性能的影响, 表 8 研究了不同 θ 值下的模型表现。实验结果表明, 通过深入挖掘必要的局部对比信息, CDC 的性能总体上优于传统的卷积方法。同时, 当 θ 设为 0.5 时, 模型的性能表现最佳。

表 6 混合空洞卷积迭代次数 N 和卷积层数 n 的消融实验结果				
Table 6 The ablation experimental results of the number of iterations N and the number of convolutional layers n of the hybrid dilated convolution				
指标	数值	mIoU	nIoU	F_1
迭代次数	2	79.87	78.08	88.81
	4	80.05	78.20	88.92
	6	79.74	77.68	88.73
卷积层数	2	80.00	78.06	88.89
	4	80.05	78.20	88.92
	6	79.88	78.17	88.82

注: 加粗数值表示最优。

表 7 输入维度 C 的消融实验结果			
Table 7 The ablation experimental results of input dimension C			
C	mIoU	nIoU	F_1
16	80.41	79.25	89.14
24	80.92	80.03	89.46
32	81.24	80.03	89.65
48	81.07	79.94	89.55

注: 加粗数值表示最优。

表 8 超参数 θ 的消融实验结果			
Table 8 The ablation experimental results of hyperparameters θ			
θ	mIoU	nIoU	F_1
0.0	80.17	78.51	89.00
0.3	80.94	79.28	89.46
0.5	81.24	80.03	89.65
0.7	81.08	79.13	89.55
1.0	80.99	78.98	89.50

注: 加粗数值表示最优。

3 结 论

- 1) 针对 ISTD 任务中存在的 2 个基础问题, 本文提出类似于 U-Net 架构的 ISTD 方法。在 NUA A、IRSTD1k、SIRSTAUG 和 NUDT 数据集上, 本文方法在检测效果、浮点运算速度和推理速度方面均展现出优异的性能。
- 2) 为解决 ISTD 中的第 1 个问题, 设计 DDFE

模块,有效地分离目标与背景的特征。针对第2个问题,设计 GCFE 模块,通过从特征图提取全局信息来防止小目标被淹没,从而提高检测的准确性。

3) 设计 TWAF 模块,不仅能够有效地滤除低级特征中的噪声,而且能够从行和列2个方向实现低级与高级特征的优化融合。

尽管本文方法在检测红外小目标时表现良好,但在处理具有复杂噪声和微弱目标的情况时,仍可能出现错检和漏检。为进一步提高目标检测的准确性和推理速度,将继续围绕 ISTD 中的2个核心问题展开研究,进一步改进方法。

参考文献 (References)

- [1] HUANG S Q, LIU Y H, HE Y M, et al. Structure-adaptive clutter suppression for infrared small target detection: chain-growth filtering[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 47.
- [2] TEUTSCH M, KRÜGER W. Classification of small boats in infrared images for maritime surveillance[C]//*Proceedings of the 2010 International WaterSide Security Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-7.
- [3] RAWAT S S, VERMA S K, KUMAR Y. Review on recent development in infrared small target detection algorithms[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 167: 2496-2505.
- [4] WANG X Y, PENG Z M, ZHANG P, et al. Infrared small target detection via nonnegativity-constrained variational mode decomposition[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(10): 1700-1704.
- [5] DESHPANDE S D, ER M H, VENKATESWARLU R, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small-targets[C]//*Proceedings of the Conference on Signal and Data Processing of Small Targets 1999*. Bellingham: SPIE, 1999: 74-83.
- [6] ANJU T S, NELWIN RAJ N R. Shearlet transform based image denoising using histogram thresholding[C]//*Proceedings of the 2016 International Conference on Communication Systems and Networks*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 162-166.
- [7] HAN J H, LIANG K, ZHOU B, et al. Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(4): 612-616.
- [8] CHEN Y W, XIN Y H. An efficient infrared small target detection method based on visual contrast mechanism[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(7): 962-966.
- [9] DENG H, SUN X P, LIU M L, et al. Small infrared target detection based on weighted local difference measure[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4204-4214.
- [10] HAN J H, LIU S B, QIN G, et al. A local contrast method combined with adaptive background estimation for infrared small target detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(9): 1442-1446.
- [11] GAO C Q, MENG D Y, YANG Y, et al. Infrared patch-image model for small target detection in a single image[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 4996-5009.
- [12] WANG X Y, PENG Z M, KONG D H, et al. Infrared dim and small target detection based on stable multisubspace learning in heterogeneous scene[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(10): 5481-5493.
- [13] DAI Y M, WU Y Q. Reweighted infrared patch-tensor model with both nonlocal and local priors for single-frame small target detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(8): 3752-3767.
- [14] ZHU H, LIU S M, DENG L Z, et al. Infrared small target detection via low-rank tensor completion with Top-Hat regularization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(2): 1004-1016.
- [15] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436-444.
- [16] WANG H, ZHOU L P, WANG L. Miss detection vs. false alarm: adversarial learning for small object segmentation in infrared images[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 8508-8517.
- [17] DAI Y M, WU Y Q, ZHOU F, et al. Asymmetric contextual modulation for infrared small target detection[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 949-958.
- [18] ZHANG T F, LI L, CAO S Y, et al. Attention-guided pyramid context networks for detecting infrared small target under complex background[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(4): 4250-4261.
- [19] LI B Y, XIAO C, WANG L G, et al. Dense nested attention network for infrared small target detection[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2022, 32: 1745-1758.
- [20] ZHANG M J, ZHANG R, YANG Y X, et al. ISNet: shape matters for infrared small target detection[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 867-876.
- [21] 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 2015*. Berlin: Springer, 2015: 234-241.
- [22] YU Z T, ZHAO C X, WANG Z Z, et al. Searching central difference convolutional networks for face anti-spoofing[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 5294-5304.
- [23] WANG P Q, CHEN P F, YUAN Y, et al. Understanding convolution for semantic segmentation[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1451-1460.
- [24] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//*Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 770-778.
- [25] RAHMAN M A, WANG Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation[C]//*Proceedings of the International Symposium on Visual Computing*. Berlin: Springer, 2016: 234-244.
- [26] ZHANG L D, PENG Z M. Infrared small target detection based on partial sum of the tensor nuclear norm[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 382.

Infrared small target detection based on dual-domain and
global context feature extraction

REN Yong, DUO Lin^{*}, XU Boyu, YANG Xin

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at two inherent problems in single frame infrared small target detection (ISTD): The small target lacks local information such as color, texture and shape; The small targets are readily lost during the continuous down-sampling process that yields high-level semantic information and the global receptive field. A double-domain and global context feature extraction network (DDGC-FENet) that is both precise and quick is suggested. The model includes a dual-domain feature extraction (DDFE) module and a global context feature extraction (GCFE) module. The DDFE module simultaneously learns the local contrast information of the small target and the background in the spatial domain and the frequency domain, so as to separate the target from the background. The GCFE module can globally model the feature map after multiple down-sampling to extract the global context and prevent the loss of target features in the deep layer of the network. Furthermore, the model fuses low-level and high-level features from both row and column directions using a two-way attention fusion (TWAF) module. The suggested approach outperforms cutting-edge techniques like AGPCNet, DNANet, and ISNet in terms of mIoU, nIoU, and F1, according to experiments conducted on a number of public datasets.

Keywords: small target detection; infrared image; central differential convolution; fast Fourier convolution; deep learning

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0051

基于 VMD-CNN-BiLSTM 的变工况 涡扇发动机剩余使用寿命预测

张鲁一航, 杨彦明*, 陈永展, 李军亮, 戴豪民

(海军航空大学青岛校区, 青岛 266041)

摘 要: 为解决传统预测方法变工况涡扇发动机剩余寿命预测精度较低的问题, 提出一种变工况涡扇发动机剩余使用寿命 (RUL) 预测模型。采用归一化处理和变分模态分解 (VMD) 将数据分解为预定个数的特定区间内的子数据, 充分挖掘多维数据中的隐藏时序特征, 消除奇异样本和不同量纲的影响; 构建基于 VMD-CNN-BiLSTM 的变工况涡扇发动机 RUL 预测模型, 卷积神经网络 (CNN) 用于特征提取和融合生成若干映射, 将数据映射输入双向长短时神经网络 (BiLSTM) 进行训练, 捕捉时序数据的时间依赖性, 输出 RUL 预测结果; 采用麻雀搜索算法 (SSA) 选取超参数最优解, 提升模型的预测性能。涡扇发动机 RUL 预测实验结果表明: VMD-CNN-BiLSTM 在变工况涡扇发动机 RUL 预测中, 均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 分别达到 13.74 ± 0.51 和 11.24 ± 0.49 , 且在噪声环境下仍具有较高的精度和泛化性能。

关 键 词: 航空发动机; 剩余使用寿命预测; 变分模态分解; 麻雀优化; 深度学习

中图分类号: TP183; V23

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1279-11

航空发动机是为飞行器提供动力的核心装置, 其可靠性和安全性是发动机设计、使用和维护需要考虑的必要条件。然而, 航空发动机系统间高度耦合、结构精密且设计复杂, 随着使用寿命的增加, 其性能会发生一定退化, 最终导致运行异常或故障, 产生严重的安全风险和经济损失, 而故障预测和健康管理 (prognostics health management, PHM) 可以有效应对发动机性能退化造成的安全风险, 并降低使用费用。剩余使用寿命 (remaining useful life, RUL) 预测是 PHM 的重要环节, 对于制订维护计划、避免计划外的停机、及时对发动机进行维护具有重要意义^[1-3]。

现有的 RUL 预测方法主要有基于模型的预测方法和基于数据驱动的预测方法^[4]。

基于模型的预测方法主要利用大量的先验知

识对具体部件的退化过程进行数学建模, 准确率和模型建立具有直接联系, 一般来说, 模型建立越精准, 越能有效预测 RUL。然而, 航空发动机的模型复杂度高, 难以建立准确的退化模型, 该预测方法在具体应用中受到限制。

预测模型主要有回归模型、Wiener 随机过程和马尔可夫模型等。Li 等^[5]提出一种融合线性模型和二次回归模型的 RUL 预测方法, 在故障率恒定时, 采用线性回归模型, 当故障率发生变化时, 采用二次回归模型, 实现了罗罗公司 AVON1535 的 RUL 预测。Son 等^[6]提出一种结合 Wiener 随机过程和主成分分析的组件退化 RUL 预测方法, 通过主成分分析选取退化指标, 并用 Wiener 随机过程建模分析预测 RUL, 取得较高的预测精度。Chiachio 等^[7]

收稿日期: 2024-01-22; 录用日期: 2024-03-22; 网络出版时间: 2024-04-09 16:00

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240407.1854.003

基金项目: 国家社科基金 (SKJJ-2022-B-037); 山东省自然科学基金 (ZR2020ME131)

*通信作者. E-mail: yymqd@126.com

引用格式: 张鲁一航, 杨彦明, 陈永展, 等. 基于 VMD-CNN-BiLSTM 的变工况涡扇发动机剩余使用寿命预测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1279-1289. ZHANG L Y H, YANG Y M, CHEN Y Z, et al. Remaining useful life prediction of variable-operating turbofan engine based on VMD-CNN-BiLSTM [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1279-1289 (in Chinese).

提出一种基于马尔可夫链随机损伤模型的 RUL 预测方法,在金属结构疲劳裂纹扩展的案例研究中得到验证。

基于数据驱动的预测方法可以进一步划分为机器学习方法和深度学习方法,其中,机器学习方法包括支持向量机 (support vector machines, SVM)、随机森林 (random forest, RF) 等,深度学习方法包括 CNN、长短期记忆 (long short-term memory, LSTM) 网络等。机器学习方法采用的是浅层网络,对数据的学习挖掘程序有限,同时,依赖人工提取特征,在预测精度上和深度学习方法有一定差距。基于深度学习方法的预测, Li 等^[8] 提出一种基于深度卷积神经网络 (deep convolutional neural network, DCNN) 的数据驱动预测方法,输入归一化后的数据,在商用模块化航空推进系统仿真 (commercial modular aero-propulsion system simulation, C-MAPSS) 数据集上进行航空发动机 RUL 预测实验,均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 达到了 17.73。Zhang 等^[9] 提出一种具有时间自注意机制的双向门控循环单元 (bidirectional gated recurrent unit with temporal self-attention mechanism, BiGRU-TSAM) 的航空发动机 RUL 预测方法,采用时间自注意力机制,根据重要程度,为每个考虑的时间实例分配自学习权值,实现在线预测 RUL。赵昱宇等^[10] 提出一种双向长短期记忆网络-基于注意力机制的变分自编码器-回归器 (BiLSTM-variational autoencoder based on the self-attention mechanism-regression, BSVAR) 模型的航空发动机 RUL 预测方法,能够提取传感器数据的深层次退化信息,并对退化特征进行聚类。然而,卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 与循环神经网络结合,相比 CNN 和以门控循环单元、LSTM 网络为代表的循环神经网络 2 个独立个体,预测精度更高。林荣祥等^[11] 提出一种堆叠卷积融合长短期记忆网络 (stacked convolutional and LSTM neural network, SDCNN-LSTM) 模型,并引入 Hyperband 优化算法来优化模型的关键参数,显著提升了航空发动机 RUL 预测精度。然而,上述深度学习方法对结构复杂度高度敏感,通常分工况进行寿命预测,在低工况时,精度较高,复杂工况时,精度不甚理想,且作为一种端到端的预测模型,预测精度很大程度上由输入数据的挖掘程度决定,因此,将高维深层信息提供给深度学习模型利于模型精度的进一步提升。

由于变工况航空发动机时间序列数据大多是非平稳序列数据,对非平稳序列数据直接进行预测会造成较大的误差,从而无法得到理想的预测结

果。然而,通过分解非平稳的时间序列数据,能有效降低时间序列数据的复杂度和非平稳性,从而获得理想的变工况航空发动机 RUL 预测精度。常用的分解算法有快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)^[12]、经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD)^[13] 和变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD)^[14]。FFT 算法不够重视时间序列数据的局部特性,导致处理非周期性信号的效果不够理想。与此同时,EMD 算法虽然有自适应性好的优势,但计算效率很低,导致一定程度的模态混叠问题,影响最终结果^[15]。而 VMD 算法充分利用自身优异的自适应性和可重构性,能在一定程度上解决 EMD 算法造成的模态混叠问题,且降噪效果较好,得到更高的预测精度。龚循强等^[15] 提出一种交通流量组合预测模型,在所提模型的消融实验中发现,引入 VMD 使 RMSE 和平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 分别缩小约 25% 和 33%。秦志沁等^[16] 在异常用电检测中引入 VMD,有效减少数据噪点,提高对含噪数据的检测性能。

针对上述问题,本文提出一种 VMD-CNN-BiLSTM 变工况涡扇发动机 RUL 预测模型,以涡扇发动机的高维多类型传感器数据为输入,经 VMD 后,进入 CNN-BiLSTM 中训练,并使用麻雀搜索算法 (sparrow search algorithm, SSA) 对其进行超参数寻优,提升变工况航空发动机 RUL 预测精度。

1 理论基础

1.1 变分模态分解

VMD 是一种信号分解方法,用于从时域中提取不同频率和振幅的模态分量^[17],可以应用于信号处理、数据挖掘、图像处理等领域。

VMD 的基本原理是将信号分解为多个固定频率带宽的模态分量,每个模态分量对应信号中的一个特定频率和振幅。此分量通过解决最小化一个变分正则化函数的优化问题得到,优势在于能够自适应地分解信号,即不需要事先知道信号中的频率信息。VMD 通过迭代优化求解过程逐步提取信号中不同频率的模态分量。每次迭代根据已经得到的模态分量更新信号的残差,并继续寻找下一个频率的模态分量,直到满足停止准则。

VMD 分解公式如下^[17]:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^n \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + j \frac{1}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^n u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_k 为 VMD 分解得到的 k 个模态分量; ω_k 为 VMD 分解得到的 k 个中心频率; “*” 表示卷积运算; $\delta(t)$ 为狄拉克函数; ∂_t 为梯度求解的数学运算; $f(t)$ 为输入待分解的信号序列。

通过引入惩罚因子 α 和拉格朗日算子 $\lambda(t)$ 改变原有约束条件, 具体为

$$L = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + j \frac{1}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\rangle \quad (2)$$

为寻找约束变分方程的最优解, 引入交替乘法算子, 则由 u_k 、 ω_k 、 λ_k 求解所对应的傅里叶变换的更新公式为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{f(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) - \hat{\lambda}^n(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (3)$$

$$\hat{w}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|_2^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|_2^2 d\omega} \quad (4)$$

$$\hat{\lambda}_k^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left(\hat{f}(\omega) - \sum_{k=1}^n \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right) \quad (5)$$

式中: $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 、 $\hat{w}_k^{n+1}(\omega)$ 、 $\hat{\lambda}_k^{n+1}(\omega)$ 为 u_k 、 ω_k 、 λ_k 经傅里叶变换更新后的值。

迭代停止准则为

$$\sum_{k=1}^n \frac{\|\hat{u}_k^{n+1}(\omega) - \hat{u}_k^n(\omega)\|_2^2}{\|\hat{u}_k^{n+1}(\omega)\|_2^2} < \varepsilon \quad (6)$$

式中: ε 为收敛阈值。

1.2 CNN-BiLSTM 模型

1.2.1 CNN 网络

CNN 是一种典型的前馈神经网络, 在图像和自然语言处理等领域应用广泛, 具有局部连接和权值共享的特点^[18]。CNN 的基本结构包括卷积层、池化层和全连接层。其中, 卷积层作为最关键的环节, 主要以卷积核对输入的多特征复杂数据进行卷积运算, 从而提取数据潜在特征; 池化层为降采样输入数据, 降低计算量, 同时, 保留重要特征; 全连接层将卷积层和池化层的输出进行连接, 最终输出分类结果或回归值^[19]。在训练 CNN 时, 通常采用反向传播算法进行权值更新。

卷积层计算公式如下:

$$x_j' = \sigma \left(\sum_{i \in M_j} x_i^{l-1} \times w_{ij}^l + b_j^l \right) \quad (7)$$

式中: x_j' 为第 σ 层第 j 个卷积核的输入, 同时也是第

σ 层的输出; σ 为激活函数; M_j 为输入映射层的集合; w_{ij}^l 为第 b_j^l 层第 j 个卷积核的权重矩阵; b_j^l 为偏置项。

池化层通过最大池化及平均池化等方法对卷积层的输出结果进行降维处理, 以便提取特征。

全连接层将池化层的输出结果全部连接, 并输出至分类器。全连接层正向传播输出为

$$x^{(l+1)(j)} = \sum_{i=1}^n w_{ij}^l x_i^l + b_j^l \quad (8)$$

式中: $x^{(l+1)(j)}$ 为第 $l+1$ 层第 j 个输出神经元值。

1.2.2 BiLSTM 网络

CNN 虽然具有从大数据中自动提取多维度空间特征的能力, 但对时间依赖性较强的时序数据处理能力较差, 相比之下, LSTM 由于引进门控单元, 可以有效地解决长期依赖性问题。将两者结合, 能够增强空间、时序特征的提取能力, 并相对减少计算时间。LSTM 采用输入门、输出门和遗忘门来控制信息的选择性流通, 解决梯度消失和梯度爆炸问题, 在时间序列中得到广泛应用^[20]。LSTM 网络的具体计算公式如下^[21]:

$$f_t = \sigma(W_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (9)$$

$$i_t = \sigma(W_i * [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (10)$$

$$g_t = \tanh(W_c * [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (11)$$

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * g_t \quad (12)$$

$$o_t = \sigma(W_o * [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (13)$$

$$h_t = o_t * \tanh C_t \quad (14)$$

式中: f_t 为遗忘门的激活值; W_f 为遗忘门的权重向量; h_{t-1} 为 $t-1$ 时刻记忆单元的输出; x_t 为 t 时刻记忆单元的输入; b_f 为遗忘门的偏置; i_t 为输入门的激活值; W_i 为输入门的权重向量; b_i 为输入门输入控制的偏置; g_t 为记忆单元的候选状态; W_c 为输入门候选状态的权重向量; b_c 为输入门候选状态的偏置; C_t 为 t 时刻记忆单元的状态; o_t 为输出门的激活值; W_o 为输出门的权重向量; b_o 为输出门的偏置。

BiLSTM 由前向 LSTM 和反向 LSTM 组成, 其示意图如图 1 所示。

通过前向 LSTM 计算出 $h_0, h_1, \dots, h_t$, 通过后向 LSTM 计算出 $l_0, l_1, \dots, l_t$, 将 2 个方向的特征进行拼接, 得到最终的输出 R_t :

$$R_t = [h_t, l_t] \quad (15)$$

式中: h_t 为 t 时刻记忆单元的正向输出; l_t 为 t 时刻记忆单元的反向输出。

CNN-BiLSTM 模型中, CNN 的主要作用为提取

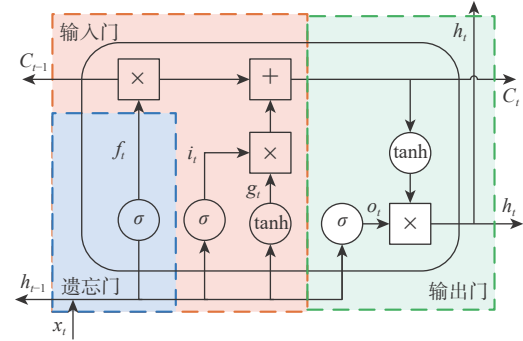


图 1 BiLSTM 网络示意图
Fig. 1 BiLSTM network diagram

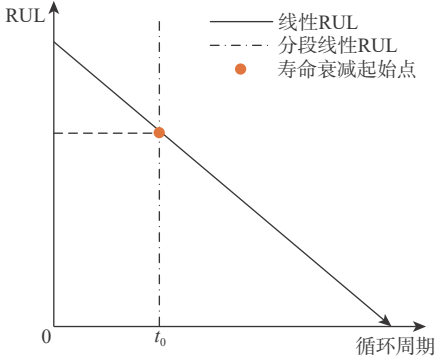


图 2 分段线性寿命衰减模型
Fig. 2 Piecewise linear life decay model

变工况涡扇发动机数据中的局部特征,通过卷积操作可以有效捕捉传感器数据中的空间特征,并提供给后续 BiLSTM 进行预测;数据进入 BiLSTM 进行预测,BiLSTM 负责学习输入数据中的时间依赖关系。航空发动机的 RUL 预测通常需要考虑过去的状态和行为对当前 RUL 的影响。BiLSTM 可以同时考虑过去和未来的数据,并学习他们之间的依赖关系。通过该方式,BiLSTM 可以帮助模型捕捉输入数据中的时间模式和趋势,从而更好地预测航空发动机 RUL。

综上所述,CNN 和 BiLSTM 在预测发动机 RUL 中分别起到特征提取和时间建模的作用。CNN 能够提取输入数据中的空间特征,而 BiLSTM 可以学习输入数据中的时间依赖关系,两者的结合能够提高发动机 RUL 预测的准确性和鲁棒性。

1.3 涡扇发动机分段线性寿命衰减模型

采用分段线性模型来表示航空发动机 RUL 衰减,为增加模型预测的准确性,假设在发动机的初始运行阶段不存在退化现象,其寿命一直保持不变;只有当超过寿命衰减转折点时,发动机 RUL 才开始线性退化,且其寿命变成实际值,具体如图 2 所示。

2 基于 VMD-CNN-BiLSTM 的剩余使用寿命预测模型

2.1 VMD-CNN-LSTM 模型原理

基于变分模态分解结合卷积-双向长短时记忆神经网络 (variational mode decomposition convolutional neural network bidirectional long short-term memory, VMD-CNN-BiLSTM) 的航空发动机 RUL 预测模型如图 3 所示,具体原理为:

- ① 输入 N 条特征数据及对应的 N 个 RUL 值,每条数据共有 D 维特征,则输入特征矩阵为 $N \times D$ 维,第 i 条特征数据为 $\mathbf{x}_i = N_i \times D (i = 1, 2, \dots, N)$;采用 VMD 将每条数据分解为 K 条子数据,此时第 i 条特征数据为 $\mathbf{x}_i = [K_1 \ K_2 \ \dots \ K_i]^T \times D (i = 1, 2, \dots, K)$,同时,将数据集按比例划分为训练集、测试集和验证集;
- ② 分解完毕的数据进入 CNN 网络进行特征提取和融合,生成若干特征图 $H_{\text{CNN}} = \text{CNN}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$;
- ③ 将特征图及对应的 RUL 值输入 BiLSTM 进行训练,输出变量为 RUL 值 $H_{\text{out}} = \text{BiLSTM}(H_{\text{CNN}})$,并采用 SSA 在验证集中选取 RMSE 作为适应度函数来确定适合 CNN-BiLSTM 的超参数值;
- ④ 将测试集数据输入训练完毕的模型

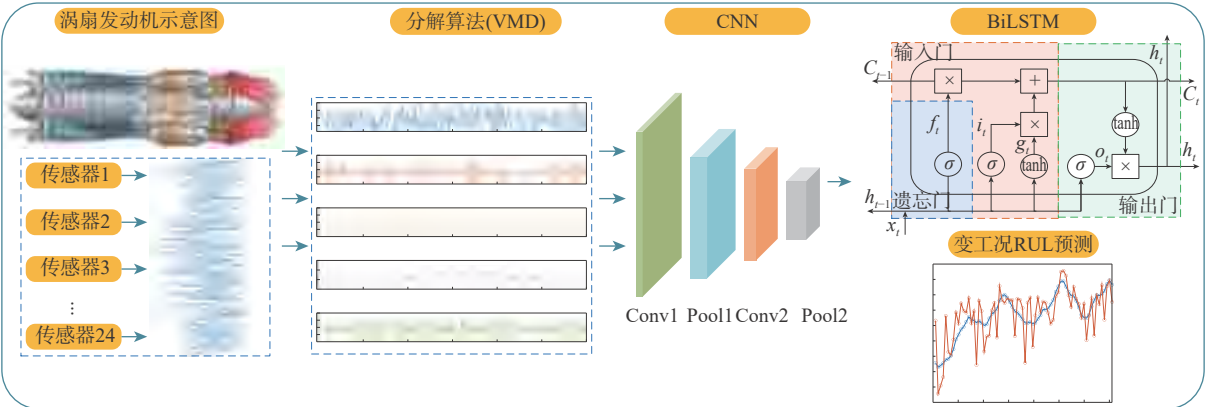


图 3 基于 VMD-CNN-BiLSTM 的航空发动机剩余使用寿命预测模型
Fig. 3 RUL prediction model of aero engine based on VMD-CNN-BiLSTM

中,输出预测结果。

为防止模型过拟合,采用添加批归一化 (batch normalization, BN) 层^[22]、随机丢弃^[23]、早停^[24]的方法,具体介绍如下:

1) 添加 BN 层。BN 层可以降低数据分布变化对网络训练的影响,使每层网络输入保持同分布,该方法将数据划分为小批次,在前向传递时对每一层进行标准化处理,实现自适应重新参数化,BN 法具体计算方法如下:

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{x_{\text{var}}} = \frac{x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}}$$

(16)

式中: $\bar{x}$ 为均值; x_{var} 为标准差。

2) 随机丢弃。随机丢弃可以在前向传播中随机丢弃一定比例的神经元权重,达到模型平均法集成和增加稀疏性的作用,防止特征检测器之间产生共适应关系。本模型随机丢弃 BiLSTM 层部分权重。

3) 早停法。在连续多个迭代次数内,将训练验证集误差停止下降时的模型参数确定为最终参数,可以有效解决训练过程中的过拟合问题。

2.2 模型流程

如图 4 所示,基于 VMD-CNN-BiLSTM 的航空

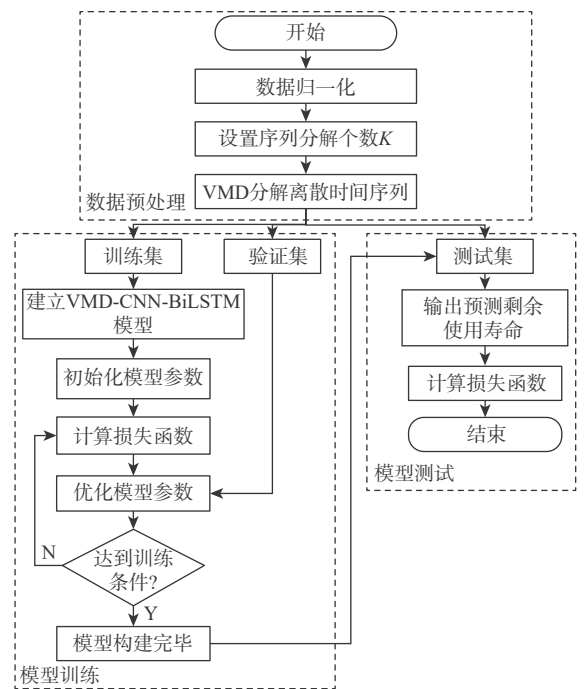


图 4 基于 VMD-CNN-BiLSTM 的航空发动机剩余使用寿命预测流程

Fig. 4 Prediction process of aeroengine remaining useful life based on VMD-CNN-BiLSTM

发动机 RUL 预测流程主要包括数据预处理、模型训练和模型测试 3 部分。

- 1) 对数据进行归一化。
- 2) 设置序列分解个数 K , 将每条航空发动机的全部离散时间序列数据进行 VMD 分解, 分解为 K 条数据。
- 3) 设置对应的 RUL 标签, 按 8:1:1 的比例划分训练集、验证集和测试集。
- 4) 构建 VMD-CNN-BiLSTM 模型, 设置初始超参数训练, 计算 RMSE 损失函数, 超参数经验证集修正后, 保存模型权重, 导入测试集进行测试。
- 5) 输出预测 RUL, 计算 RMSE, 并与其他算法进行对比分析。

3 涡扇发动机剩余使用寿命预测实验及分析

3.1 实验数据

实验数据采用美国宇航局的 C-MAPSS 涡扇发动机退化数据集 (<https://data.nasa.gov/Aeospace/CMAPSS-Jet-Engine-Simulated-Data/ff5v-kuh6>), 由于该数据集共包含 707 个不同工况不同故障模式下的全寿命监测数据, 因此, 为变工况且混合故障模式的涡扇发动机 RUL 数据集, 具体信息见表 1。采集数据集时, 发动机在每个时间序列开始时正常运行, 在该序列的某个时间点出现故障。在训练集中, 故障逐渐增大, 直到系统失效。在测试集中, 时间序列在系统故障之前的某个时间结束, 记录此刻对应的 RUL。因此, C-MAPSS 涡扇发动机退化的每条数据通过采集并记录 3 个操作条件、21 维传感器数据及对应的 RUL 而生成, 具体采集数据见表 2。VMD 分解的对象为每 1 条数据的特征序号 1~24。

表 1 C-MAPSS 数据集介绍

Table 1 Description of C-MAPSS datasets

数据集	发动机数量/个	工况种类/个	故障类型
FD001	100	1	1类
FD002	259	6	1类
FD003	100	1	2类
FD004	248	6	2类

3.2 寿命预测评价指标

为对比不同预测模型的 RUL 预测结果, 选取回归算法常用的 RMSE 和 MAE 作为对比评价指标。RMSE 是衡量输出模型预测值与真实值之间差异的指标, MAE 是绝对误差的平均值, 具体计算公式如下:

表2 涡扇发动机剩余使用寿命预测数据描述

Table 2 Description of remaining useful life prediction data of turbofan engine

特征序号	特征描述	符号
1	飞行高度/km	H
2	油门杆角度/%	θ_{TRA}
3	马赫数	Ma
4	风扇进气温度/℃	T_2
5	低压压气机排气温度/℃	T_{24}
6	高压压气机排气温度/℃	T_{30}
7	低压涡轮排气温度/℃	T_{50}
8	风扇入口气压/kPa	P_2
9	外涵道总压力/kPa	P_{15}
10	高压压气机出口总压/kPa	P_{30}
11	未修正的风扇转速/(r·min ⁻¹)	N_F
12	未修正的核心机转速/(r·min ⁻¹)	N_C
13	发动机压比	θ_{EPR}
14	高压压气机出口静压/kPa	P_{S30}
15	燃油流量和高压压气机出口总压比值	θ_{PHI}
16	风扇修正转速/(r·min ⁻¹)	N_{RF}
17	核心机修正转速/(r·min ⁻¹)	N_{RC}
18	涵道比	θ_{BPR}
19	燃烧室燃气比	θ_{FARB}
20	引气焓值/kg	H_{T_BLEED}
21	风扇转速命令值/(r·min ⁻¹)	N_{F_DMD}
22	风扇修正量转速命令值/(r·min ⁻¹)	θ_{PCNFR_DMD}
23	高压涡轮冷却空气流量/(kg·s ⁻¹)	W_{31}
24	低压涡轮冷却空气流量/(kg·s ⁻¹)	W_{32}

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (17)$$

$$e_{\text{MAE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (18)$$

式中: $\hat{y}_i$ 为 RUL 预测值; y_i 为 RUL 真实值。

3.3 参数设置与优化

基于 VMD-CNN-BiLSTM 的航空发动机 RUL 预测模型性能受超参数设置影响较大, 合适的超参数选取十分重要。本模型涉及的超参数主要有序列分解个数 K 、训练轮数、批大小 B 、卷积层中特征层的数量、BiLSTM 神经元数量和步长, 其中, 前三者通过对比分析确定, 后三者由 SSA 确定。

3.3.1 对比分析优化

选取序列分解个数 K (取值为 1~6, 间隔为 1)、训练轮数 (取值为 10~100, 间隔为 10) 和批大小 B (取值为 100~200, 间隔为 10) 进行实验, 实验在 Matlab2021a 上进行, CPU 为 Intel(R)Core(TM)i7-7700HQ, 2.80 GHz, GPU 为 GTX1060。为避免偶然性影响, 每组实验均

独立重复 10 次, 记录各次实验的均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和平方绝对误差 (mean absolute error, MAE) 的均值, 结果如图 5~图 7 所示。

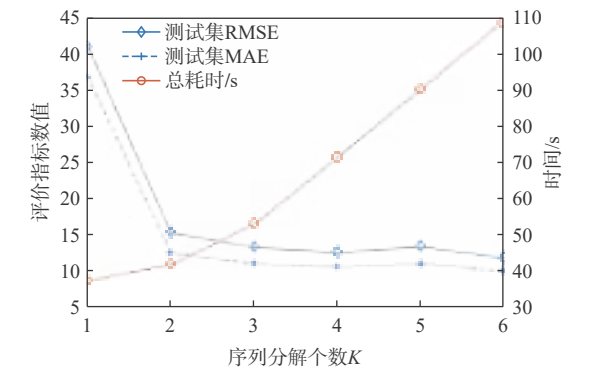


图5 不同序列分解个数 K 下的 RMSE、MAE 和总耗时

Fig. 5 RMSE, MAE and total time spent under different sequence decomposition numbers K

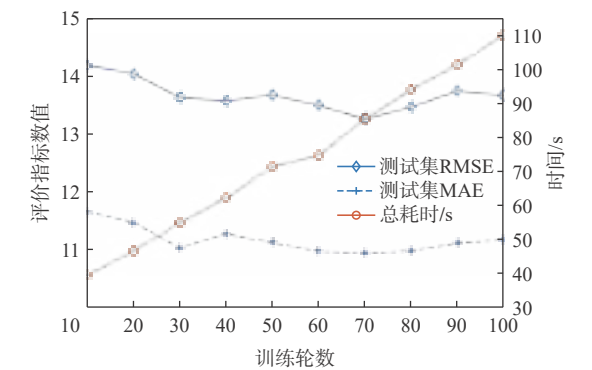


图6 不同训练轮数下的 RMSE、MAE 和总耗时

Fig. 6 RMSE, MAE and total time spent under different training rounds

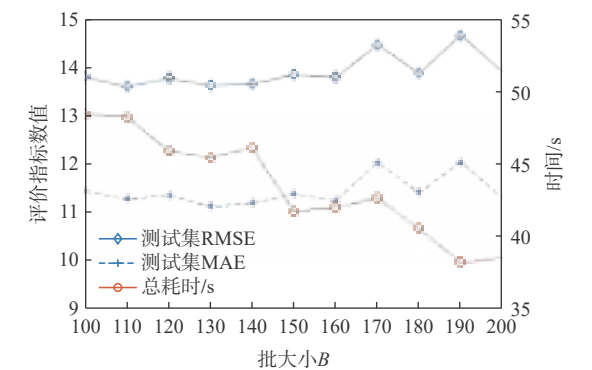


图7 不同批大小 B 下的 RMSE、MAE 和总耗时

Fig. 7 RMSE, MAE, and total time spent for different batch sizes B

序列分解个数 K 影响时间序列分解的结果, K 越大, 提供的数据信息越详细, 但计算复杂度也会增加。图 5 中, 分解数为 1, 表示不参与分解, 以原单条数据进行输入。可知, 随着序列分解个数 K 的增加, 模型总耗时持续上升, 然而, RMSE 和 MAE 总体上呈下降趋势, 且 K 为 1~2 时, RMSE

和MAE降幅明显,当 $K \geq 3$ 时, RMSE和MAE小范围上下波动。综合考虑总耗时和评价指标,选定序列分解个数 K 为3。

输入原始数据和序列分解个数 K 为3时的分解生成数据如图8所示。图8(a)为原始数据,图8(b)~图8(d)为分解生成数据,按高频至低频排列,图8(e)为分解残差。可以发现,原始数据熵值较大,波动较为杂乱,难以发现其中蕴含的规律性,通过VMD分解生成的数据熵值较小,波动较清晰,能够更好地挖掘原始数据的深层信息。

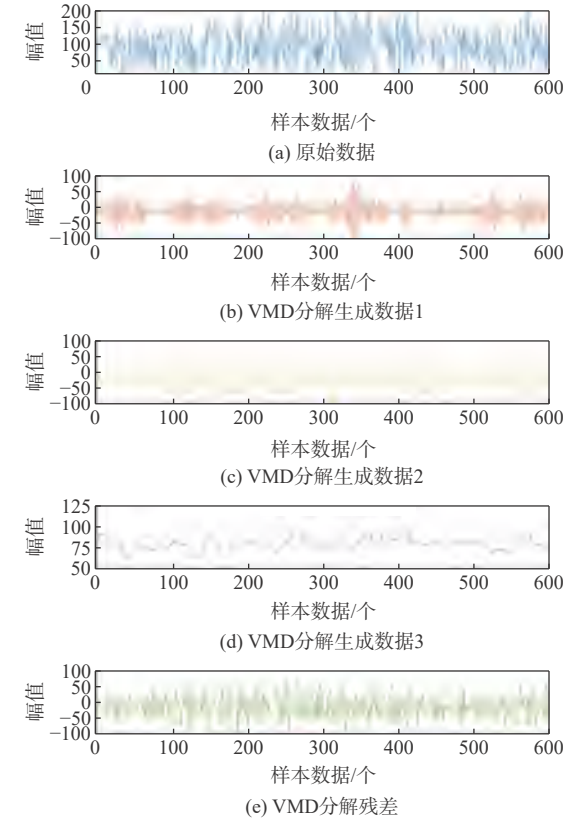


图8 原始数据和VMD生成数据
Fig. 8 Raw data and generated data of VMD

从图6可以发现,总耗时随着训练轮数的增加而增加;RMSE曲线在训练轮数为10~70时,总体呈下降趋势,当轮数超过70时, RMSE曲线有所上升;MAE曲线在训练轮数为10~30时,出现明显下降,且训练轮数为30时,其MAE与训练轮数为60、70、80的MAE相近,表现较好。综合考虑总耗时和评价指标,选定训练轮数为30。

从图7可以发现,总耗时随着批大小 B 的增加,总体呈现下降趋势,在批大小 B 为100~110、120~140和150~170的区间内部波动较小,但3个区间的总耗时差异较大,呈阶梯递减;RMSE和MAE曲线在批大小 B 为100~160时较为稳定,批大小 B 为170~200时,波动幅度明显增大,说明批大小 B 过大,不适合训练和测试模型。综合考虑总

耗时和评价指标,选定批大小 B 为160。

3.3.2 麻雀搜索算法

SSA受麻雀觅食行为启发,具有寻优能力强、收敛速度快等特点^[20]。选择SSA进行VMD-CNN-BiLSTM模型的超参数寻优,寻优对象为卷积层数及步长、BiLSTM神经元数量及步长和随机丢弃比例。

假设由卷积层数及步长、BiLSTM神经元数量及步长和随机丢弃按比例构成的搜索空间潜在解个数为 n ,待优化的数量为 d ,则潜在解空间表示为^[20]

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1d} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nd} \end{bmatrix} \tag{19}$$

所对应的适应度矩阵 F_x 为

$$F_x = \begin{bmatrix} f([x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1d}]) \\ f([x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2d}]) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f([x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nd}]) \end{bmatrix} \tag{20}$$

根据SSA,发现者的位置更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot t_{\max}}\right) & R_2 < S \\ X_{i,j}^t + QL & R_2 \geq S \end{cases} \tag{21}$$

式中: t 为当前迭代次数; $t_{\max}$ 为最大迭代次数; $X_{i,j}^t$ 为第 t 次迭代时第 i 个麻雀在第 j 维的位置; $\alpha \in [0,1]$ 为随机数; $R_2 \in [0,1]$ 为报警值; $S \in [0.5,1]$ 为安全阈值; Q 为服从正态分布的随机数; L 表示 $1 \times d$ 的矩阵且矩阵内各激活值均为1。

加入者的位置更新公式如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right) & i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L & \text{其他} \end{cases} \tag{22}$$

式中: X_p^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代发现者占据的最佳位置; X_{worst}^t 为第 t 次迭代时全局最差位置; $X_{i,j}^t$ 为第 t 次迭代时第 i 个麻雀在第 j 维的位置; A 为 $1 \times d$ 的矩阵且矩阵内各激活值随机赋值1或-1, $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。

经SSA确定后,基于VMD-CNN-BiLSTM的航空发动机RUL预测模型参数如表3所示。

3.4 实验结果与分析

图9为在变工况且混合故障模式的发动机数据集, VMD-CNN-BiLSTM模型在测试集的输出预测值与真实值的对比。

从图9可以发现,大部分预测值与真实值的绝对误差在20个周期以内,个别发动机预测差值达到30个周期左右,预测结果整体较为准确和可靠。

表 3 VMD-CNN-BiLSTM 模型参数

Table 3 VMD-CNN-BiLSTM model parameters															
输入层尺寸	卷积层数	BiLSTM层数	卷积核尺寸		卷积核数量		卷积步长		最大池化层尺寸		池化步长	BiLSTM隐藏单元数	随机丢弃比例	序列分解个数	训练轮数
			第1层	第2层	第1层	第2层	第1层	第2层	第1层	第2层					
24	2	1	[2, 1]	[2, 1]	27	22	[1, 1]	[1, 1]	[2, 1]	[2, 1]	[2, 2]	61	0.3	3	30
															160

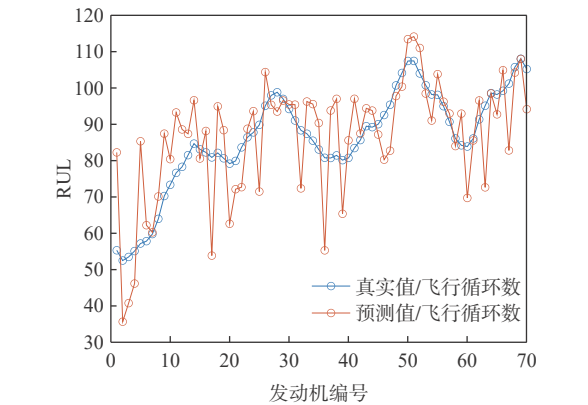


图 9 不同发动机剩余使用寿命的真实值和预测值
Fig. 9 Real and predicted RUL of different engine

为验证本文模型在变工况涡扇发动机退化过程中的 RUL 预测能力,选取包含 6 个工况的 FD002 中的 1 号发动机数据(该数据共有 258 个循环周期)进行实验,具体如图 10 所示。可以看出,在第 0~200 个循环周期内,实际寿命为 90 个周期,预测寿命波动较为稳定,在 80~100 个周期区间内变化,少数离群点的预测误差较大,在第 200~258 个循环周期中,实际寿命呈线性下降趋势,预测误差较寿命衰减起始点前略大,但整体上看,预测寿命围绕实际寿命波动变化,说明模型对变工况且混合故障的涡扇发动机 RUL 预测较为可靠,具有良好的泛化性能。

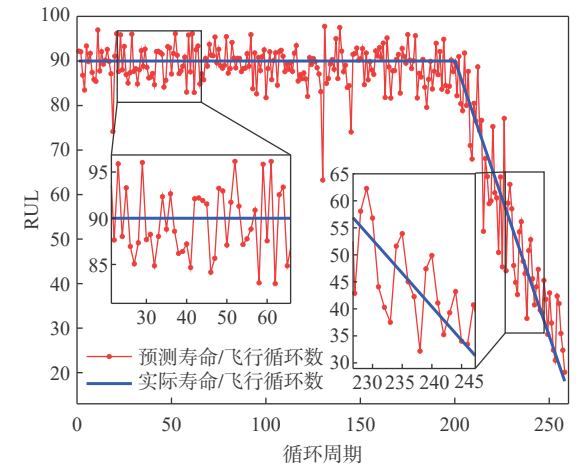


图 10 FD002 中 1 号发动机的真实寿命和预测寿命
Fig. 10 Real and predicted life of engine No. 1 in FD002

3.4.1 不同预测方法实验结果对比与分析

为验证 VMD-CNN-BiLSTM 模型的性能,对比

其与 SVM、RF、LSTM、DCNN^[8]、基于块的残差图单元-时空注意模块(block-based residual graph unit-temporal spatial attention module, BRGU-TSAM^[9])和 BSVAR^[10] 在变工况涡扇发动机 RUL 预测实验中的精度,具体如表 4 所示。SVM、RF 为浅层的机器学习算法,在寿命预测问题中, RMSE 和 MAE 均达到 30 左右,精度较差; LSTM 为深度学习中的典型长时间序列预测算法,能够达到 23.95 的 RMSE 和 20.80 的 MAE,较传统机器学习算法有较大提升。DCNN、BGRU-TSAM、BSVAR 的预测精度均有所提升,但在变工况且混合故障模式的涡扇发动机 RUL 预测实验中,精度仍不如 VMD-CNN-BiLSTM 模型。

表 4 不同预测方法精度对比

Table 4 Precision comparison of different forecasting methods		
预测方法	RMSE	MAE
SVM	35.28±2.03	27.97±1.87
RF	33.44±1.96	26.09±1.80
LSTM	23.95±1.21	20.80±1.06
DCNN ^[8]	17.72±0.64	16.43±0.89
BGRU-TSAM ^[9]	16.10±0.89	14.26±0.65
BSVAR ^[10]	13.94±0.62	11.35±0.51
VMD-CNN-BiLSTM	13.74±0.51	11.24±0.49

注:加粗数值表示最优结果。

3.4.2 消融实验

为验证本文模型对个体学习器预测能力的提升效果,选择 CNN、BiLSTM 和 CNN-BiLSTM 这 3 种结构,在保持超参数设置不变的前提下,以 RMSE 和 MAE 作为评定指标作,对比结果如表 5 所示。可以发现, CNN、BiLSTM 和 CNN-BiLSTM 作为个体学习器,其预测精度不如 VMD-CNN-BiLSTM,且集成学习之后的模型较个体学习器精度提升约 40%,提升幅度较大。

3.4.3 噪声环境下剩余使用寿命预测实验结果与分析

涡扇航空发动机 RUL 预测实验中噪声的主要来源有传感器误差、人为测量误差和人为记录误差等。为验证模型在噪声环境下的 RUL 预测性能,在 C-MAPSS 数据集加入高斯白噪声进行 RUL

表 5 集成模型与个体学习器预测对比

Table 5 Comparison of integrated model and individual learner prediction

预测方法	RMSE	MAE
CNN	22.56±1.67	19.61±1.70
BiLSTM	22.94±1.87	20.11±1.94
CNN-BiLSTM	21.09±1.92	19.74±1.51
VMD-CNN-BiLSTM	13.74±0.51	11.24±0.49

注: 加粗数值表示最优结果。

预测实验。为方便对比分析, VMD-CNN-BiLSTM 模型保持原有参数设置不变。

输入数据信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 分别设置为 8、6、4 和 2, 不同信噪比下, VMD-CNN-BiLSTM 对变工况且混合故障的涡扇发动机 RUL 预测误差的箱型图如图 11 所示, 各对比算法的 RMSE 上界如图 12 所示。结合图 11 和图 12 可以发现, 随着噪声强度的增大, 误差波动范围逐渐扩大, 其中, 位数由 SNR=8 时的 13.89 上升至 22.77, RMSE 上界由 14.51 上升至 24.50。然而, VMD-CNN-BiLSTM 的预测误差上界均低于其他对比算法, 说明该模型在噪声环境下仍有较好的预测性能。

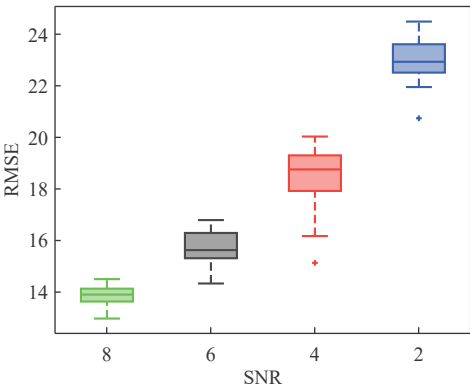


图 11 加噪数据下预测误差箱型图

Fig. 11 Prediction error box pattern with noisy data

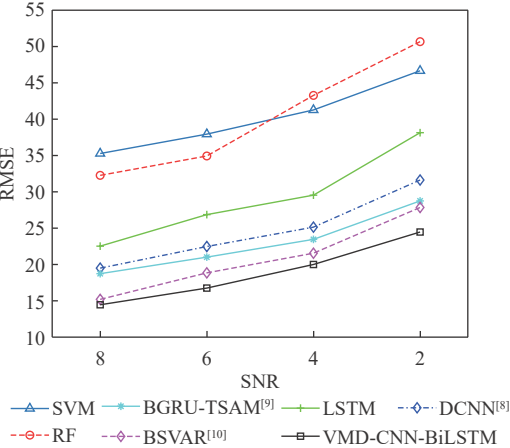


图 12 各对比算法的 RMSE 上界

Fig. 12 RMSE upper bound of each comparison algorithm

4 结 论

为解决传统预测方法对变工况涡扇发动机 RUL 预测精度较低的问题, 提出一种 VMD-CNN-BiLSTM 涡扇发动机 RUL 预测模型, 该模型融合集成学习和深度学习的优点, 实现端到端的寿命预测。得到以下结论:

- 1) VMD-CNN-BiLSTM 模型在变工况涡扇发动机 RUL 预测实验中, RMSE 和 MAE 分别达到 13.74±0.51 和 11.24±0.49, 具有较高的预测精度。
- 2) VMD-CNN-BiLSTM 模型在变工况涡扇发动机 RUL 预测实验中表现较好, 数据经过 VMD 分解后, 预测精度提升了约 40%。
- 3) VMD-CNN-BiLSTM 模型相较于传统机器学习模型、个体学习器和简单组合模型, 具有更高的预测精度。

参考文献 (References)

[1] 郭晓静, 徐晓慧, 郭佳豪. 基于改进 GRU 的航空发动机寿命预测自注意力优化算法[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 447-457.
GUO X J, XU X H, GUO J H. Improved GRU-based self-attention optimization algorithm for aero-engine remaining useful life prediction[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 447-457(in Chinese).

[2] 郭晓静, 负玉晶, 徐晓慧. 基于深度学习方法的航空发动机寿命预测模型[J]. 振动. 测试与诊断, 2024, 44(2): 330-336.
GUO X J, YUN Y J, XU X H. Prediction model of aero-engine remaining useful life based on deep learning method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(2): 330-336(in Chinese).

[3] 车鲁阳, 高军伟, 付惠琛. 基于双通道模型的航空发动机剩余寿命预测[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 42-49.
CHE L Y, GAO J W, FU H C. Remaining life prediction of aero-engine based on dual-channel model[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 42-49(in Chinese).

[4] 宋慧, 陶冠叶, 曲大义, 等. 基于 LSTM 网络参数优化的航空发动机寿命预测[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(5): 112-117.
SONG H, TAO G Y, QU D Y, et al. Aeroengine life prediction based on LSTM network parameter optimization[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(5): 112-117(in Chinese).

[5] LI Y G, NILKITSARANONT P. Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance[J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 2152-2161.

[6] SON K L, FOULADIRAD M, BARROS A, et al. Remaining useful life estimation based on stochastic deterioration models: a comparative study[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 112: 165-175.

[7] CHIACHIO J, JALÓN M L, CHIACHIO M, et al. A Markov chains prognostics framework for complex degradation processes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 195: 106621.

[8] LI X, DING Q, SUN J Q. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 172: 1-11.

[9] ZHANG J S, JIANG Y C, WU S M, et al. Prediction of remaining useful life based on bidirectional gated recurrent unit with temporal self-attention mechanism[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 221: 108297.

[10] 赵昱宇, 索超, 王雨潇. 基于 BSVAR 的航空发动机剩余使用寿命预测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(11): 3790-3798.

ZHAO Y Y, SUO C, WANG Y X. BSVAR-based remaining useful life prediction method for aircraft engines[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(11): 3790-3798(in Chinese).

[11] 林荣祥, 王海瑞, 朱贵富. 一种融合神经网络的航空发动机寿命预测方法研究[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(11): 2034-2046.

LIN R X, WANG H R, ZHU G F. An aero-engine life prediction method incorporating neural networks[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(11): 2034-2046(in Chinese).

[12] 魏震波, 余雷. 基于 FFT, DC-HC 及 LSTM 的短期负荷预测方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(3): 37-43.

WEI Z B, YU L. Short-term load forecasting method based on FFT, DC-HC and LSTM[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 37-43(in Chinese).

[13] 杨德州, 刘嘉明, 宋汶秦, 等. 基于改进型自适应白噪声完备集成经验模态分解的工业用户负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 36-43.

YANG D Z, LIU J M, SONG W Q, et al. A load forecasting method for industrial customers based on the ICEEMDAN algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 36-43(in Chinese).

[14] 李练兵, 代亮亮, 李静鹏, 等. 基于改进 VMD-CNN 的电缆短路电流预测研究[J]. 中国测试, 2025, 51(8): 137-146.

LI L B, DAI L L, LI J P, et al. Research on cable short-circuit current prediction based on improved VMD-CNN[J]. China Measurement & Test, 2025, 51(8): 137-146(in Chinese).

[15] 龚循强, 邱万锦, 吕开云, 等. 变分模态分解与自适应图卷积门控循环网络的交通流量组合预测模型[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, 49(12): 2329-2341.

GONG X Q, QIU W J, LYU K Y, et al. A combined traffic flow prediction model based on variational mode decomposition and adaptive graph convolutional gated recurrent network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(12): 2329-2341(in Chinese).

[16] 秦志沁, 韩玉环, 张毅, 等. 基于 VMD 分解和随机矩阵理论的异常用电状态检测[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(1): 66-72.

QIN Z Q, HAN Y H, ZHANG Y, et al. Detection of abnormal power consumption state based on VMD decomposition and random matrix theory[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2024, 55(1): 66-72(in Chinese).

[17] 邵必林, 纪丹阳. 基于 VMD-SE 的电力负荷分量的多特征短期预测[J]. 中国电力, 2024, 57(4): 162-170.

SHAO B L, JI D Y. Multi-feature short-term prediction of power load components based on VMD-SE[J]. Electric Power, 2024, 57(4): 162-170(in Chinese).

[18] 王勇, 李邑灵, 苗奇谦, 等. 基于 Transformer-CNN 混合架构的跨模态融合抓取检测[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3607-3616.

WANG Y, LI Y L, MIAO D Q, et al. Cross-modal interaction fusion grasping detection based on Transformer-CNN hybrid architecture[J]. Control and Decision, 2024, 39(11): 3607-3616(in Chinese).

[19] 孙兴伟, 杨铜铜, 杨赫然, 等. 基于 CNN-GRU 组合神经网络的数控机床进给系统热误差研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 219-226.

SUN X W, YANG T T, YANG H R, et al. Research on thermal error of CNC machine tool feed system based on CNN-GRU combined neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 219-226(in Chinese).

[20] 杨沛东, 黄华, 尉卫卫, 等. 基于注意力机制改进的 PSO-BiLSTM 刀具磨损预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(10): 3589-3598.

YANG P D, HUANG H, WEI W W. Tool wear prediction based on attention mechanism and PSO-BiLSTM[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(10): 3589-3598(in Chinese).

[21] 方斯顿, 刘龙真, 孔赖强, 等. 基于双向长短期记忆网络含间接健康指标的锂电池 SOH 估计[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 160-168.

FANG S D, LIU L Z, KONG L Q. State-of-health estimation for lithium-ion batteries incorporating indirect health indicators based on bi-directional long short-term memory networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 160-168(in Chinese).

[22] 陶唐飞, 周文洁, 况佳臣, 等. 融合多小波分解的深度卷积神经网络轴承故障诊断方法[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(5): 31-41.

TAO T F, ZHOU W J, KUANG J C. Bearing fault diagnosis method of deep convolutional neural network based on multiwavelet decomposition[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(5): 31-41(in Chinese).

[23] 单伽铨, 张茜, 吕西林, 等. 多元特征驱动的超高层建筑变形状态智能学习与预测[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(3): 101-112.

SHAN J Z, ZHANG X, LYU X L, et al. Multi-feature driven intelligent learning and prediction of deformation state of super-tall buildings[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(3): 101-112(in Chinese).

[24] 丁丁, 刘文哲, 盛常冲, 等. 神经网络架构搜索研究进展与展望[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(6): 100-131.

DING D, LIU W Z, SHENG C C, et al. State of the art and prospects of neural architecture search[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(6): 100-131(in Chinese).

Remaining useful life prediction of variable-operating turbofan engine based on VMD-CNN-BiLSTM

ZHANG Luyihang, YANG Yanming*, CHEN Yongzhan, LI Junliang, DAI Haomin

(Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to address the issue of low prediction accuracy in traditional forecasting methods for residual life of turbofan engines under variable working conditions, a variational mode decomposition convolutional neural network bidirectional long short term memory (VMD-CNN-BiLSTM) model is proposed. Firstly, variational mode decomposition (VMD) is used to normalize the data and split it into sub-data at predetermined intervals. This allows for the thorough extraction of hidden temporal features in multidimensional data as well as the removal of singular samples and dimensional variations. Secondly, a VMD-CNN-BiLSTM model is constructed for predicting the residual life of turbofan engines under variable working conditions. The convolutional neural network (CNN) is employed for feature extraction and fusion to generate multiple mappings. These mappings are then input into the BiLSTM network to capture time dependencies in the time series data and produce accurate predictions of remaining engine life. Finally, hyperparameter optimization using the Sparrow algorithm enhances the prediction performance of the model. As shown by root mean squared error (RMSE) values of 13.74 ± 0.51 and mean absolute error (MAE) values of 11.24 ± 0.49 when predicting remaining engine life under variable operating conditions, experimental results on the commercial modular aero-propulsion system simulation (C-MAPSS) dataset show that VMD-CNN-BiLSTM achieves high accuracy and generalization performance even with noisy data.

Keywords: aeroengine; remaining useful life prediction; variational mode decomposition; sparrow optimization; deep learning

Received: 2024-01-22; Accepted: 2024-03-22; Published Online: 2024-04-09 16:00

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240407.1854.003

Foundation items: National Fund for Social Science (SKJJ-2022-B-037); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020ME131)

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

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0070

多目视觉下基于自动变分校正的人体 3D 姿态检测与建模

赵晓冬¹, 陈凯^{1,*}, 黄煜杰¹, 王鹏飞², 王子源¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2. 中国电子科技集团第二十八研究所, 南京 210007)

摘 要: 针对现有基于 2D 人体表面姿态点构建人体 3D 模型的方法大多会导致连续建模抖动及建模结果局部扭曲等问题, 提出基于蒙皮多人线性模型 (SMPL) 的人体内部 3D 姿态点检测方法, 通过聚类算法将多视角下体内 2D 姿态点映射真实场景中 3D 姿态点, 引入卡尔曼滤波对人体姿态点进行去噪。基于 3D 姿态点构建人体 3D 模型的过程中, 基于自动变分方法对梯度下降回归网络进行校正, 构建端到端的人体 3D 建模网络 SMPL-VAE, 在保持整体比例的同时, 更加符合人体运动结构的局部建模。在公开数据集 Shelf 上进行测试, 结果显示, 所提方法的平均每关节位置误差 (MPJPE) 相比其他方法分别提升 3.88、7.56 和 12.88, 正确关键点百分比 (PCK) 分别提升 3.5、6.91 和 9, 针对不同目标也能准确匹配姿态点。

关键词: 多目视觉; 蒙皮多人线性模型; 3D 姿态检测; 卡尔曼滤波; 变分自编码器

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1290-10

随着科学技术的不断发展及城市信息化水平的显著提高, 未来现实世界中的机器人和智能系统需从视觉输入中感知和理解人类, 并与现实世界进行互动, 如智能化工厂数字孪生建模、车载全景影像系统等技术。因此, 三维空间中的人体 3D 建模具有重要意义。

多目标检测与 3D 建模一般指未知目标数量时, 对设备视角下的行人进行检测, 在三维空间中进行建模, 以便开展后续的轨迹预测与分析等工作。在实际应用场景中, 多目标检测需要在每帧的不同目标之间实时完成, 由于目标在不同摄像机之间的视角差异及各种遮挡导致的姿态点之间复杂的关联情况, 对模型的鲁棒性和泛化能力提出了更高的要求。现有多目标检测算法^[1-4]大多从人体表

面展开, 主要从准确率、计算资源及算法^[5-7]上进行改进, 但无法很好地解决目标受遮挡及目标与姿态点相匹配的问题。在建模方面, 虽然现有方法^[8-10]在重建误差、每秒浮点运算次数等方面取得了较好的建模效果, 但当遮挡较多、目标层叠关系较复杂时, 容易产生局部姿态的扭曲及连续建模时的抖动等现象。

针对多目视觉下密集行人的 2D 人体表面姿态点检测与建模的现存问题, 本文主要创新点如下:

1) 不同于 OpenPose^[1] 的人体表面点检测, 人体的内部关键点在柔性运动过程中产生的误差更小, 更符合人体建模需求。因此, 本文提出基于蒙皮多人线性 (skinned multi-person linear, SMPL) 模型^[11] 的人体内部 3D 姿态点检测方法, 该方法借助多视角人

收稿日期: 2024-01-30; 录用日期: 2024-05-14; 网络出版时间: 2024-06-14 11:55

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240613.1541.001

基金项目: 国家自然科学基金 (52202417); 中国博士后科学基金 (2022TQ0155, 2022M721605); 虚拟现实技术与系统全国重点实验室 (北京航空航天大学) 开放课题基金 (VRLAB2023A02); 中国科协青年科技人才托举工程 (2023QNRC001); 江苏省科协青年科技人才托举工程 (JSTJ-2023-XH032)

* 通信作者. E-mail: chen_kai@nuaa.edu.cn

引用格式: 赵晓冬, 陈凯, 黄煜杰, 等. 多目视觉下基于自动变分校正的人体 3D 姿态检测与建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1290-1299. ZHAO X D, CHEN K, HUANG Y J, et al. Human 3D posture detection and modeling based on automatic variational correction in multi-vision [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1290-1299 (in Chinese).

体 3D 姿态估计系统(Multi-View SPIN, MVSPIN)^[12]在每个视角下的检测结果与其相应的预测相机矩阵, 获得单目视觉下的体内 2D 姿态点。

2) 基于聚类算法回归得到的 3D 姿态点不可避免会产生噪声, 从而导致回归结果的抖动。因此, 本文基于卡尔曼滤波对人体内部 3D 姿态点进行降噪平滑, 解决局部姿态波动较大的问题, 使 3D 姿态检测结果更加符合实际。

3) 为提高人体 3D 建模的鲁棒性, 本文参考变分自编码器(variational autoencoder, VAE)^[13]模型的思想, 在梯度下降回归网络的基础上, 构建端到端 SMPL-VAE 人体回归模型: 采用分步训练和联合训练相结合的方式, 通过 VAE 的训练结果对 SMPL 的建模结果进行校正, 兼顾整体比例的同时, 保证局部的建模结果更加符合人体运动结构。

1 相关工作

得益于深度学习技术的广泛应用, 2D 人体姿态检测领域取得了显著的发展。DeepPose^[4]对 Alex-Net^[14]网络进行拓展, 采用深度神经网络(deep neural network, DNN)^[15]学习人体姿态点特征表示, 通过级联结构对前步处理的结果进行优化; OpenPose^[1]提出一种 PAF+置信度关联的检测网络, 对单张 RGB 图像进行特征提取, 有效解决了部分遮挡导致的关键人体姿态检测准确率低等问题。但仅对 2D 图像表面姿态进行关联, 无法准确反映人体复杂的身体姿态, 也会因为忽略人体本身的厚度而导致最终的 3D 骨架投影和身体建模失去立体感; 此外, 随着目标数量的增多, 2D 姿态检测方法在处理多人遮挡等问题时, 检测性能和效率较差。

为解决 2D 人体姿态检测技术的不足及深度信息的缺失等问题, 3D 人体姿态检测技术^[16-18]发展起来。Tekin 等^[16]建立卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)与循环神经网络(recurrent neural network, RNN)融合的深度学习回归框架; Moon 等^[17]提出一种相机距离感知框架, 从 2D 图像中提取目标, 采用 RootNet 定位人体根节点, PoseNet 定位人体相对根节点, 维持空间的一致性, 进行 3D 人体姿态检测; VoxelPose^[18]直接在 3D 空间中进行操作, 避免了每个相机视角的误检情况。虽然这些方法取得了较好的检测结果, 但在面对密集场景时, 仍然不能有效解决目标受遮挡及姿态点之间关联和匹配等问题。

随着人体 3D 建模在各个领域展现出巨大应用前景, 此项技术正逐渐吸引学者投入研究。SMPLify^[19]采用 CNN 对 2D 人体表面姿态点进行估

计, 再采用统计模型拟合到 2D 关节上; Kocabas 等^[20]提出的人体姿态检测网络 SPEC 将图像、相机俯仰及滚动作为网络输入进行建模, 同时, 采用自主设计的损失函数对训练网络, 将相机校准与图像特征连接起来; MVPOSE^[21]引入递归贝叶斯滤波函数单独检测每个行人, 以减少行人三维姿态点之间的关联判定问题。虽然这些方法也取得了丰硕的成果, 但当面对巨大状态空间的人体检测建模情况时, 由于对密集状态下个体的局部姿态处理欠佳, 在某些腕关节等处依旧呈现明显的扭曲建模结果。

2 本文方法

针对相关工作中多目视觉下密集行人之间相互遮挡、复杂的层叠关系所导致的姿态点错误关联和匹配、局部姿态不佳及连续建模结果的抖动问题, 本节详细介绍本文方法, 基于作者此前的研究^[22-23]得到的跟踪结果, 主要从 3D 人体内姿态检测及建模 2 个方面展开。

2.1 多目标人体内 3D 姿态检测

在实际多视角下的行人检测应用中, 不同摄像机的参数型号、拍摄角度及视角范围等存在差异, 也可能出现不同视角之间的遮挡问题, 因此, 难以获得精确的姿态点数据, 从而增加行人轨迹预测和 3D 建模等任务的复杂性。因此, 进一步改进人体姿态检测方法就显得尤为重要, 以实现更真实且有效的多视角行人关联。

OpenPose^[1]是一个广泛使用的姿态点检测模型, 在单一视角图像上使用部分亲和域方法进行检测和关联, 为每个姿态点分配标签。然而, 部分亲和域方法面对复杂的遮挡情况时, 容易导致目标姿态点的缺失和关联错误。此外, 该方法本质上忽略了人体的深度信息, 对后续的人体 3D 建模的完整性产生重要影响。

如图 1 所示, 本文提出基于 SMPL 的人体内部 3D 姿态点检测方法, 通过 MVSPIN 模型获取单视角的 SMPL 渲染模型及关节姿态先验矩阵, 进而计算包含深度预测信息的 3D 预测姿态点。为了融合各视角信息, 增强关联性, 采用弱透视模型^[23]生成的相机矩阵对 3D 预测姿态点进行映射, 得到对应视角下的 2D 姿态点; 再采用真实的相机矩阵, 对各视角 2D 姿态点进行关联, 回归到 3D 空间; 同时, 引入卡尔曼滤波器对人体姿态点进行平滑处理, 解决连续建模的抖动问题, 最终实现空间场景下多目标人体姿态检测。

2.1.1 基于 MVSPIN 的 2D 图像姿态点检测

使用 MVSPIN 模型获取平面图像中每个目标

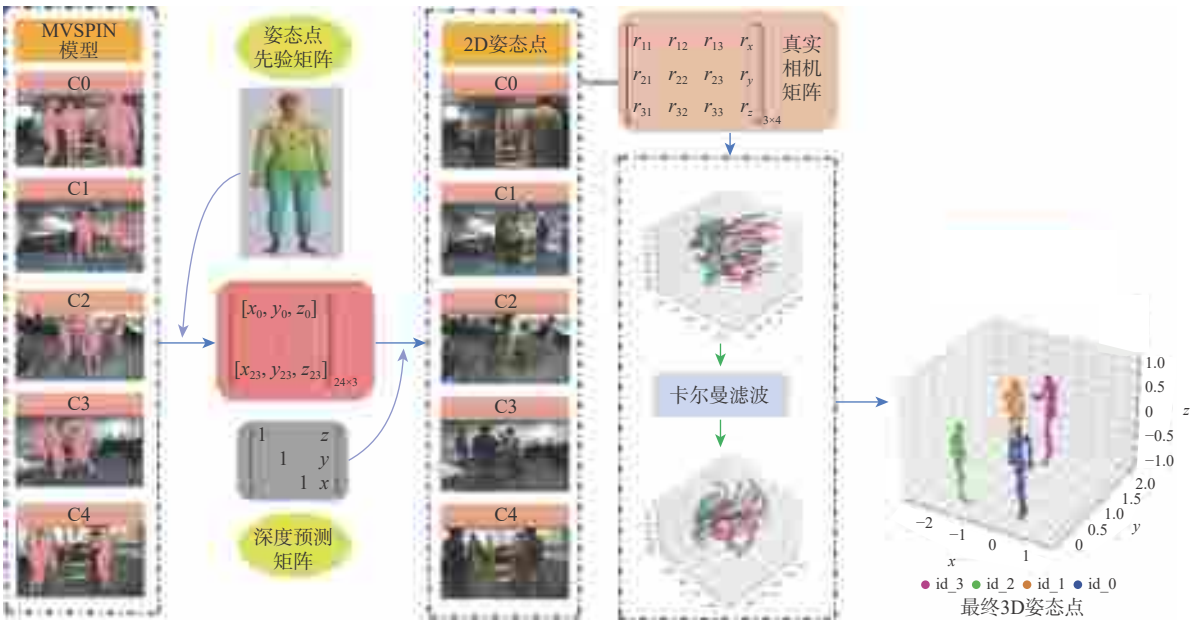


图 1 多视角下 3D 姿态点检测获取框架示意图

Fig. 1 Pipeline of 3D pose points detection in multi-view

的渲染模型信息,提取 6 890 个人体表面姿态点坐标,同时,从 SMPL 基本模型中获得关节回归先验矩阵,进而计算广义人体模型中的 24 个三维预测位姿态点的坐标。

$$\boldsymbol{p}_{\text{pre\_result}} = \boldsymbol{J}_{\text{regressor\_prior}} \boldsymbol{v}_{\text{posed}} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{J}_{\text{regressor\_prior}}$ 为联合回归先验矩阵; $\boldsymbol{p}_{\text{pre\_result}}$ 为包含 24 个三维姿态点的矩阵; $\boldsymbol{v}_{\text{posed}}$ 为 6 890 个人体表面姿态点坐标。

由于 MVSPIN 模型基于单视图对三维姿态点进行检测,单视角下具有的局限性使纵向深度方向存在误差。此外,由于相机角度、遮挡等,不同视角的图像对于所预测的三维位姿和原始图像之间也

存在偏差。为解决该问题,考虑消除每个视图所预测的深度数据,根据每个目标模型构建过程中生成的深度预测矩阵,将三维坐标恢复到原始图像的二维平面。通过该方式,为更准确地还原图像上的三维信息做准备。

如图 2 所示, (a) 为摄像机预测参数通过单位矩阵变换为 3×4 摄像机预测矩阵; (b) 为将 SMPL 模型预测的三维位姿点转化为 $1 \times 24 \times 3 \times 1$ 位姿矩阵; (c) 将 2 个矩阵相乘,得到平面二维位姿点 $1 \times 24 \times 2 \times 1$ 的坐标。通过构造一个 4×4 单位矩阵,将预测的 3D 姿态点进行矩阵变换,并与摄像机预测矩阵相乘,得到图像预测的相机方向上的姿态点坐标。为

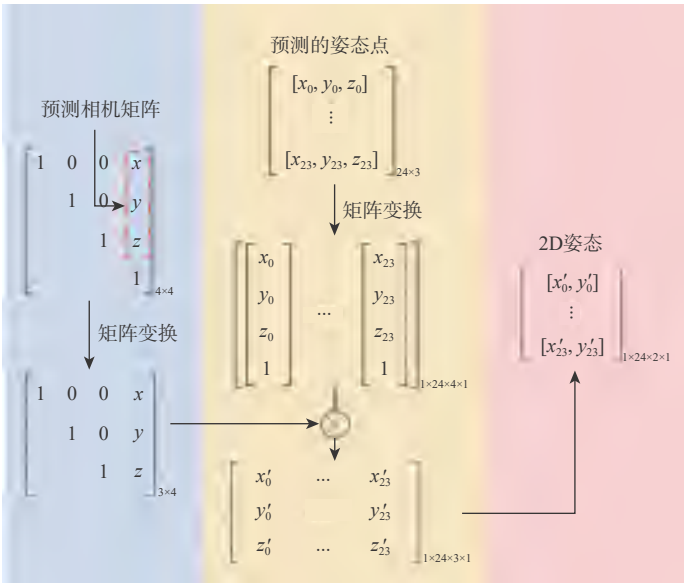


图 2 各视角下 2D 姿态点还原过程示意图

Fig. 2 Schematic of 2D pose point reduction process in each view angle

消除深度预测的误差,消除相机方向的深度分量,得到2D姿态点坐标。该方法保证了单个目标位姿点的完整性,且考虑了行人的厚度,为2D姿态点到3D姿态点的回归打下了良好的基础。

2.1.2 3D姿态点回归与滤波处理

使用真实的相机矩阵将2.1.1中所有视图的2D姿态点重新投影到3D空间中。由于3D姿态点检测是在多个视图中的进行的,不需要对每个2D视

图预测深度。通过每个视角垂直投影的2D坐标及真实摄像机矩阵来回归3D坐标即可。

如图3所示,基于2.1.1中计算得到的2D姿态点坐标,对每个视图用真实摄像机矩阵进行处理,根平面之间存在的单应性约束^[24]通过三角剖分^[25]实现两平面对应点之间的匹配和重建,得到包含人体厚度的3D姿态点坐标,以更好地表征行人在空间中的真实位置。

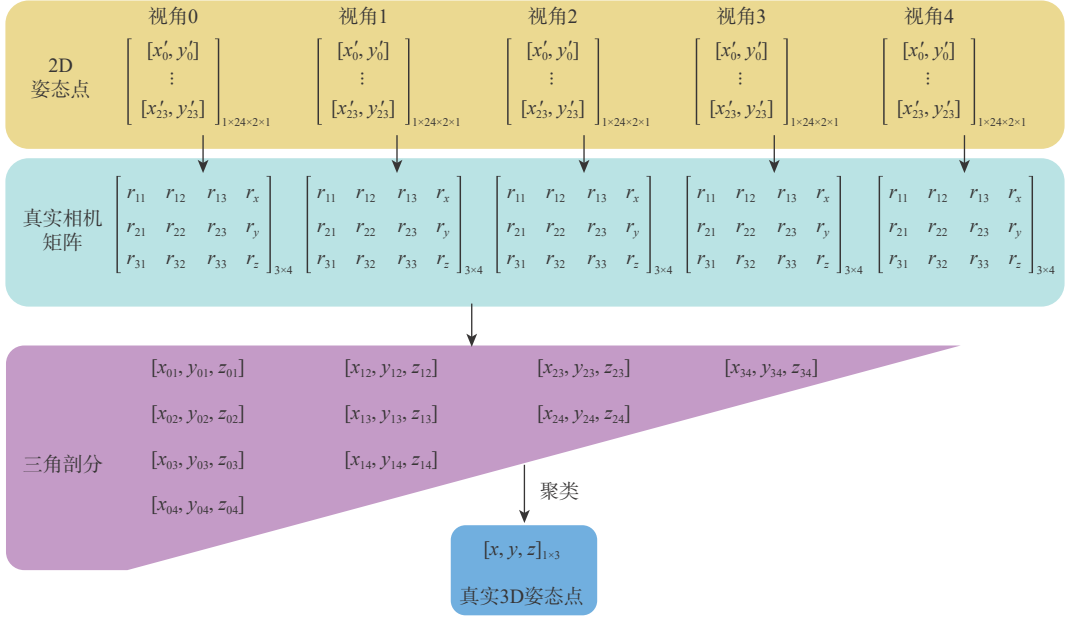


图3 3D坐标回归

Fig. 3 3D coordinate regression

由于在应用场景中,空间目标的变化都是实时动态的,局部身体部位不确定性高,灵活性强,部分姿态可能会出现短时的大幅变化,导致人体建模误差变大,降低建模效果。因此,将人体每个姿态点 (x, y, z) 视为一个状态,并采用卡尔曼滤波来估计这些状态的变化。

由于人的行动具有自主意识,不受外部的干预和控制,本文的控制输入 $\mathbf{B}$ 和过程噪声协方差 $\mathbf{Q}$ 都是以 3×3 的零矩阵的初始形态参与预测和更新的,同时,观测状态直接通过测量矩阵 $\mathbf{H}$ 得到,没有通过复杂的非线性变换。因此,将 $\mathbf{H}$ 也初始化为 3×3 的单位矩阵,用初始观测值对状态向量进行初始化,并将状态协方差矩阵设置为一个较大的值,以反映对初始状态的不确定性。

整个滤波过程分为预测和更新^[21]2步进行,采用系统模型对下一个时间步的状态 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 进行预测,如式(2)所示。同时对状态协方差 $\mathbf{P}_k$ 进行预测,以判断预测的不确定性,如式(3)所示。

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{F} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_k \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{F} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{B}$ 为控制输入矩阵; $\mathbf{u}_k$ 为控制输入,将其初始化为长度为3的一维行向量。

式(5)和式(6)通过测量值 z_k 及卡尔曼增益 $\mathbf{K}_k$ 来校正预测的状态估计,进而更新协方差矩阵,以跟踪系统状态估计的不确定性,提供最优状态估计。

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_k \mathbf{H}^T}{\mathbf{H} \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R}} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_k (z_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_k) \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k \quad (6)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{R}$ 为测量噪声协方差矩阵。

图4为卡尔曼滤波效果对比,选取0-骨盆、10-左脚、11-右脚、15-下巴、18-左肘和19-右肘等活动范围较大的姿态点进行对比,可见,卡尔曼滤波后的运动轨迹更加平滑。

经过各视角的2D姿态点获取及3D姿态回归,再对姿态点轨迹进行卡尔曼滤波处理,最终获得了姿态良好且连续建模平滑的3D人体姿态点,为人体3D建模奠定了良好的基础。

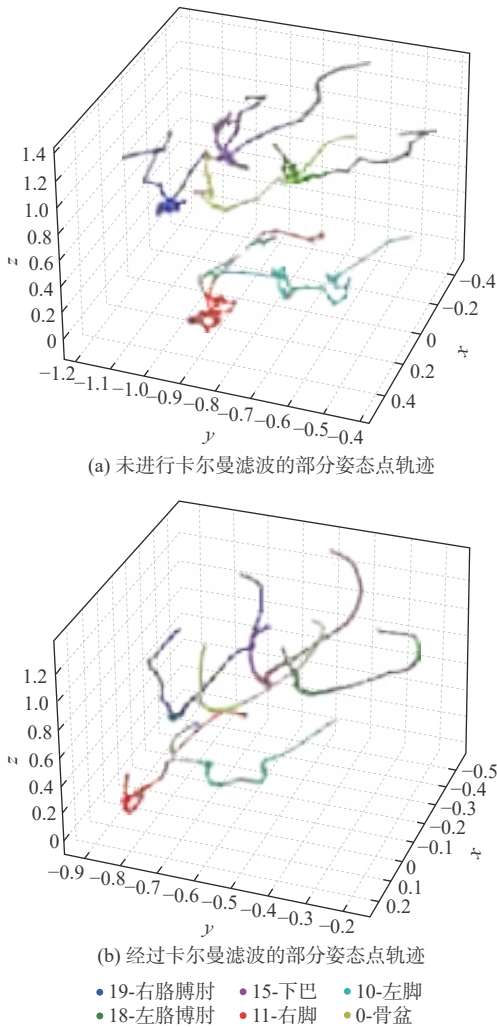


图4 卡尔曼滤波处理效果对比

Fig. 4 Comparison of Kalman filter processing effect

2.2 基于 SMPL-VAE 的人体 3D 建模

由于 2.1 中的工作都是针对每个目标整体的全局处理,而未对其局部细节进行优化,如果直接采用这些姿态点对人体 3D 建模,人体关节的局部姿态可能产生失真。

因此,针对处理后姿态点的人体 3D 建模问题,参考 VAE^[13] 思想,提出 SMPL-VAE 模型,如图 5 所示,其将分步训练与联合训练相结合来生成人体 3D 建模结果,以获取更加符合运动学约束的姿态细节。

分步训练 1 将 2.1 中最终获得的 3D 姿态点 $\mathbf{X}$ 作为输入,以地面真值作为标准,采用梯度下降^[26-27] 的迭代优化方式对 SMPL 参数 $\theta_s(\theta, \beta)$ 进行训练, θ 为姿态参数, β 为体型参数,不断拟合数据使其更加贴近地面真实值。由于目标活动的高度自主性和无规律性,需要一个对异常值鲁棒性强的损失函数,因此,本文使用 Smooth L1 Loss^[26], 其强大的鲁棒性提供了比其他损失函数更稳定的收敛性和更可靠的误差梯度。该损失函数在均方误差和绝对误差之间取得了平衡,从而减少了大误差值的影响,确保了更平滑、更渐进的优化过程,如式(7)所示。

$$L_{Smpl} = \begin{cases} \frac{1}{2}(\mathbf{X}_{gt} - \mathbf{J})^2 & |\mathbf{X}_{gt} - \mathbf{J}| < 1 \\ |\mathbf{X}_{gt} - \mathbf{J}| - \frac{1}{2} & |\mathbf{X}_{gt} - \mathbf{J}| \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{J}$ 为模型输出的人体关节坐标矩阵; $\mathbf{X}_{gt}$ 为人体关节点的地面真实矩阵。

通过上述方式,得到人体的网格顶点矩阵 $\mathbf{v}$ 及

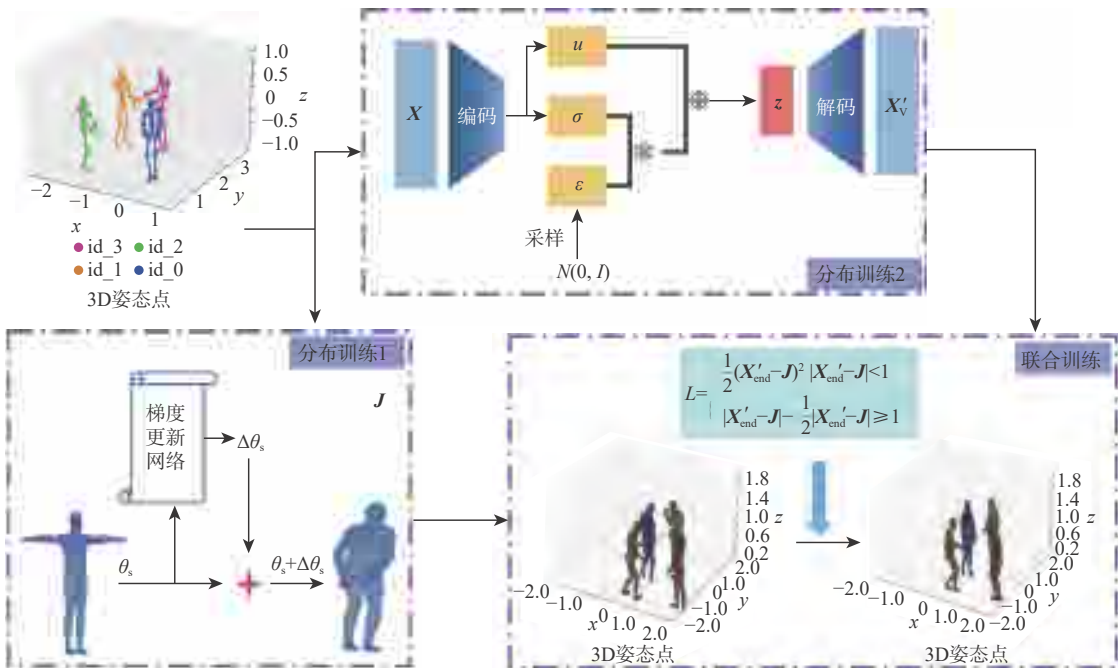


图5 基于自动变分校正的人体 3D 建模框架

Fig. 5 A framework for human body 3D modeling based on automatic variational correction

人体关节坐标矩阵 $\mathbf{J}$, 其中, $\mathbf{v}$ 大小为 $n \times 6890 \times 3$, n 为建模时场景中的目标数量, $\mathbf{J}$ 大小为 $n \times 24 \times 3$ 。该方法的本质在于能够在迭代过程中精炼模型参数, 使数据更贴合准确代表人体姿态 3D 分步的地面真实值。至此, 分步训练一获得初步的人体 3D 建模结果, 但在人体的局部关节处, 仍然存在违背人体运动学规律的现象, 不能满足最终的建模需求。

分步训练 2 采用 VAE 框架对过滤后的数据集进行编码和解码。VAE 通过学习输入数据 $\mathbf{X}$ 的潜在空间表示, 使用该潜在空间重构输入, 得到生成的 3D 姿态点 $\mathbf{X}'_v$ 。这一过程引入了一种放松机制, 旨在学习潜在空间上的分步, 允许生成遵循已学习分步的新样本, 从而容纳符合运动学约束的人体姿态变换。

编码阶段扮演了重要的角色, 将 $\mathbf{X}$ 压缩到一个更低维度的空间, 捕获重构所需潜在变量 $\mathbf{z}$ 的分步特征。解码阶段尝试从这一压缩表示中重构输入数据, 保持关键结构的同时, 也不损害人体 3D 建模全局与局部的真实性, 如式(8)、式(9)所示。

$$\mathbf{z} \sim q(\mathbf{z}|\mathbf{X}) \quad (8)$$

$$\mathbf{X}'_v \sim p(\mathbf{X}|\mathbf{z}) \quad (9)$$

式中: $q(\mathbf{z}|\mathbf{X})$ 为编码器定义的潜在变量分步; $p(\mathbf{X}|\mathbf{z})$ 为生成器定义的条件分步。

训练过程是对 VAE 中的参数 $\theta_v(\phi_{en}, \phi_{de})$ 进行训练, 其中, ϕ_{en} 和 ϕ_{de} 分别表示编码器和解码器参数, 需要通过最大化数据的似然来进行。然而, 由于 VAE 中的潜在变量是连续的, 因此, 直接求解似然函数比较困难。为解决该问题, VAE 使用正则化项, 学习潜在变量的分布以简化似然函数的求解。损失函数包括 2 个部分: 重建损失和正则化损失。重建损失是指在 VAE 中, 将输入样本通过编码器转化为潜在变量后, 再通过解码器生成输出样本时, 输出样本与原始样本之间的差异。重建损失越小, 表示生成器的性能越好。正则化损失则是指在 VAE 中, 通过引入 KL 散度^[28]来衡量潜在变量的分步与先验分步之间的差异。该差异用 KL 散度来量化, KL 散度越小, 表示潜在变量越接近于先验分步。综上, VAE 的损失函数可以表示为

$$L_{vae} = \alpha \cdot \text{KL}(q(\mathbf{z}|\mathbf{X})\|p(\mathbf{z})) - E[\ln p(\mathbf{X}|\mathbf{z})] \quad (10)$$

式中: α 为权衡参数; $p(\mathbf{z})$ 为先验分步函数。由于重建损失和正则化损失对模型性能的影响是同向的, 为了让 KL 散度项成为一个正则化项, 从而促使潜在变量的分布更接近于先验分布, 将权衡参数设定为 -1^[13]。

将分步训练的结果融合并进行联合训练。分

步训练一的结果作为起点, 根据分步训练二的结果对训练一的输出进行校正, 以更好地贴近实际情况。而对分步训练中训练好的参数 $\theta(\theta_s, \theta_v)$ 依旧采用 Smooth L1 Loss 进行二次训练, 如式(11)所示, 得到最终修正后的人体姿态点 $\mathbf{X}'_{end}$ 。

$$L = \begin{cases} \frac{1}{2}(\mathbf{X}'_{end} - \mathbf{J})^2 & |\mathbf{X}'_{end} - \mathbf{J}| < 1 \\ |\mathbf{X}'_{end} - \mathbf{J}| - \frac{1}{2} & |\mathbf{X}'_{end} - \mathbf{J}| \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{X}'_{end}$ 为联合训练后最终获得的人体关节点坐标。

这种联合训练模式允许 2 种方法之间的知识转移。参数的迭代细化通过 VAE 施加的放松约束得到增强, 整体模型的优良结果受益于调整局部建模效果的能力。这种结合训练方法不仅提高了姿态估计的准确性, 而且确保了模型能够适应人类运动的多样性, 有助于人与数字环境之间更自然和直观地互动。

3 实验结果与分析

3.1 公开数据集与评价指标介绍

采用 Shelf 数据集^[29]作为模型测试基准。该数据集包含室内场景中 4 个人近距离搬运货架的情景, 并配备了 5 台经过校准的摄像机。每个视图都呈现不同程度的遮挡, 且行人可能会出现新增、完全消失、重现等复杂情况, 这为算法测试提供了有利条件。该数据集不仅能够较真实地展现行人的动作姿态, 还考虑了对检测、跟踪和特征关联等任务可能产生影响的因素。

在人体 3D 姿态检测与建模的过程中, 将完整的 3D 行人姿态点坐标的地面真实值作为训练过程中的标准, 由于 Shelf 数据集提供的真实值存在目标缺失和 ID 错误等问题, 基于 SMPL 模型的 24 个位姿点, 在 5 个视图中重新标注了数据集的 1 500 幅图像。

考虑到平均每关节位置误差^[30](mean position error per joint, MPJPE) 是以关节点的物理位置误差表示, 使结果更直观且易于理解, 每个关节的误差可以帮助分析模型在不同部位的表现, 从而提供更详细的反馈。因此, 选取 MPJPE 作为定量评价指标, 其数值越小, 表示模型在估计关节位置上的性能越好, 如式(12)所示。

$$e_{\text{MPJPE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{P}_i - \hat{\mathbf{P}}_i\| \quad (12)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示欧氏距离, 即真实关节位置与模型预测关节位置之间的距离; N 为人体的 24 个关节点; $\mathbf{P}_i$ 为每个关节点的真实位置; $\hat{\mathbf{P}}_i$ 为模型预测的位置。

正确关键点百分比^[31](percentage of correct key points, PCK) 聚焦关键点位置, 提供直观的百分比表示关键点准确性, 适用于不同的阈值, 灵活且通用, 便于比较不同模型在相同任务上的性能, 因此, 选取 PCK 作为评价指标, 如式(13)所示。

$$P_{CK} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta \left(\frac{\|\hat{P}_i - P_i\|}{D} \leq T \right) \times 100\% \quad (13)$$

式中: T 为阈值, 本文选取 $T = 160 \text{ mm}$; D 为参考长度, 设定为单个目标的归一化因子; δ 为指示函数, 条件为真, 则取值为 1, 否则为 0。

由表 1 可以看出, 本文方法在 MPJPE 指标上, 相较于表现较好的 Shape-aware 提升了 3.88, 在 PCK 指标上, 相较于表现较好的 SMPLify 提升了 3.5, 均呈现出理想的测试结果。

3.2 人体姿态检测与建模实验

不同视点之间目标的相对位置和遮挡模式差异较大, 检测算法中出现 ID 匹配错误和遗漏的情况较多^[32]。以多目视觉下的密集行人为背景, 本文解决了行人姿态点检测与关联匹配、连续建模的抖

动及局部姿态失真的问题。抽取视频流中的几个关键帧以展示本文方法的运行效果。

如图 6 所示, 第 1 行只有 2 个行人, 但其中 1 个目标在视角 0 中是侧身姿势, 虽然在别的视角中有更优越的角度进行弥补, 但本文方法在该视角依然完整准确地检测到了人体姿态点; 第 2 行视角 0 左侧 2 个目标相互重叠遮挡, 姿态点分布复杂, 本文方法正确区分了 2 个目标, 并给出了对应 ID 正确的姿态点; 第 4 行中场景较为复杂, 视角 0 有 1 个目标距离摄像头很近, 虽然遮挡了场景大部分信息, 但仍然没有影响本文方法的检测效果。

如图 7 所示, 将本文方法和 Shape-aware 进行对比, 本文框架在处理复杂的人类交互情况下, 能够稳定且准确地检测人体 3D 姿态点, 即使出现遮挡或行人重叠的情况, 本文方法依然取得了较好的效果, 但 Shape-aware 可能会产生不同类型的误差, 如图 7(c) 中 Shape-aware 在处理边框中的人时, 得到了失真的姿态检测, 不符合实际, 图 7(d) 和 (e) 中均出现了将检测到的姿态点匹配到错误的行人目标的情况。

如图 8 所示, 第 1 行 Shape-aware 和 SPEC 方法的人体 3D 建模结果都表现为局部姿态的扭曲, 如上半身形态扭曲, 腿部形态失真及脚的非正常扭曲, 虽然 SMPL 方法使建模结果得到了一定的优化, 但包含 VAE 模块的 SMPL-VAE 得到了更好的校正效果。第 2 行 Shape-aware 出现了漏检的情况, SPEC 和 SMPL 分别在脚部和头部出现了违背人体的正常扭转规律, 而这些在 SMPL-VAE 的建模过程中都被优化。第 3 行 Shape-aware 在人体姿态点检

表 1 基于 Shelf 数据集与以往工作的比较

Table 1 Comparison with previous work

based on the Shelf dataset

方法	e_{MPJPE}	P_{CK}
SMPL ^[11]	107.12	86.24
SMPLify ^[19]	109.30	88.76
SPEC ^[20]	108.62	86.42
Shape-aware ^[10]	105.62	85.35
本文	101.74	92.26

注: 加粗数值表示最优结果。



图 6 人体姿态点检测在各视角下关键帧中的效果展示

Fig. 6 Effectiveness demonstration of human body pose point detection in key frames across various perspectives

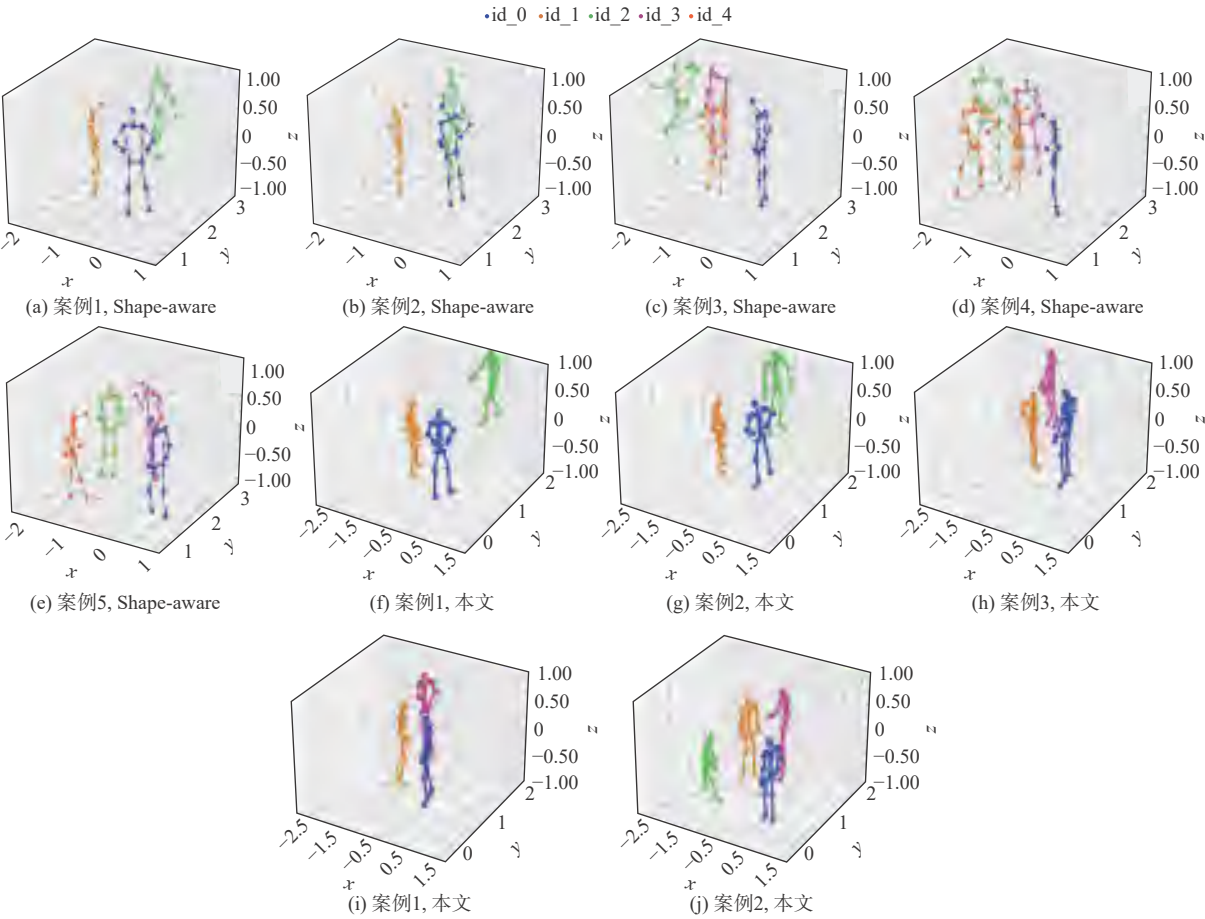


图 7 关键帧中 3D 姿态检测结果

Fig. 7 3D pose detection result in key frame

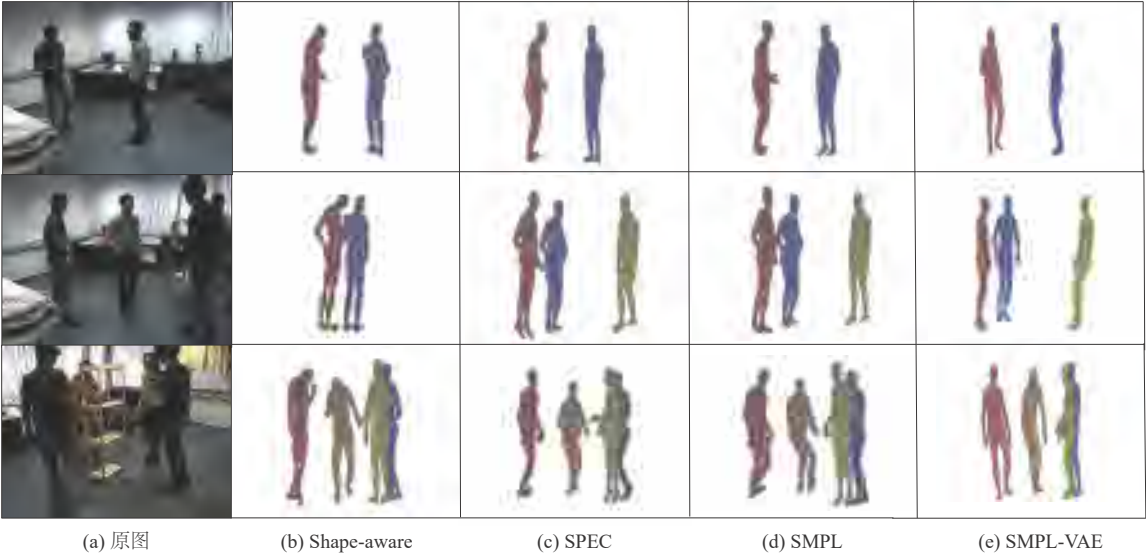


图 8 人体 3D 建模结果

Fig. 8 Human body 3D modeling results

测的过程中出现问题, 导致了后续错误的建模结果, SPEC 和 SMPL 出现了不同程度的建模结果失真(橙色人体腹部、蓝色行人上半身), 且与实际形态不符, 而这些在 SMPL-VAE 中都得到了改善。

开源代码见 <https://github.com/XiaodZhao/Smpl-Vae>。

4 结 论

- 1) 本文基于 SMPL 模型的人体内部 3D 姿态点检测方法表现优异, MPJPE 为 101.74, PCK 为 92.26%, 且针对不同的目标匹配到了准确的姿态点。
- 2) 针对聚类算法将多视角下的人体内部 2D 姿

态点映射到真实场景中的 3D 姿态点所产生的噪声问题, 本文通过卡尔曼滤波的方式进行去噪处理, 有效解决了行人连续建模时的抖动问题。

3) 算法在考虑全局优化建模结果的基础上, 关注局部姿态的优化, 通过自动变分方法, 对梯度下降回归网络进行校正, 构建了端到端的人体 3D 建模网络 SMPL-VAE, 在保持整体比例的同时, 更加符合人体运动结构的局部建模。

未来工作的目标是研发更为高效的检测和建模方法, 以提升算法在真实场景中的应用兼容性, 尤其在多种条件下的应用。团队将不断努力改进技术, 以适应更为复杂、多样的现实环境, 确保团队的方法在不同条件下都能表现出色。

参考文献 (References)

[1] CAO Z, HIDALGO G, SIMON T, et al. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(1): 172-186.

[2] ZHANG W Q, FANG J M, WANG X G, et al. EfficientPose: efficient human pose estimation with neural architecture search[J]. Computational Visual Media, 2021, 7(3): 335-347.

[3] SUN K, XIAO B, LIU D, et al. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 5686-5696.

[4] TOSHEV A, SZEGEDY C. DeepPose: human pose estimation via deep neural networks[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1653-1660.

[5] SUN Y, YE Y, LIU W, et al. Human mesh recovery from monocular images via a skeleton-disentangled representation[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 5348-5357.

[6] PAVLAKOS G, CHOUTAS V, GHORBANI N, et al. Expressive body capture: 3D hands, face, and body from a single image[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 10967-10977.

[7] LIU S C, SAITO S, CHEN W K, et al. Learning to infer implicit surfaces without 3D supervision[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2019, 32: 8295-8306.

[8] FANG H S, XIE S Q, TAI Y W, et al. RMPE: Regional multi-person pose estimation[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2353-2362.

[9] LI W B, WANG Z, YIN B Y, et al. Rethinking on multi-stage networks for human pose estimation[EB/OL]. (2019-01-01) [2023-11-25]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.00148>.

[10] DONG Z J, SONG J, CHEN X, et al. Shape-aware multi-person pose estimation from multi-view images[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2021: 11138-11148.

[11] LOPER M, MAHMOOD N, ROMERO J, et al. SMPL: a skinned multi-person linear model[J]. ACM transactions on graphics, 2015, 34(6): 248.

[12] LI Z G, OSKARSSON M, HEYDEN A. 3D human pose and shape estimation through collaborative learning and multi-view model-fitting[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1887-1896.

[13] DIEDERIK P K, MAX W. Auto-encoding variational Bayes [EB/OL]. (2013-11-20) [2023-11-30]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114>.

[14] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84-90.

[15] ISHWARYA K, ALICE NITHYA A. Squirrel search optimization with deep convolutional neural network for human pose estimation[J]. Computers, Materials & Continua, 2023, 74(3): 6081-6099.

[16] TEKIN B, KATIRCIOGLU I, SALZMANN M, et al. Structured prediction of 3D human pose with deep neural networks[EB/OL]. (2016-05-17) [2023-12-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.05180>.

[17] MOON G, CHANG J Y, LEE K M. Camera distance-aware top-down approach for 3D multi-person pose estimation from a single rgb image[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 10132-10141.

[18] TU H Y, WANG C Y, ZENG W G. VoxelPose: towards multi-camera 3D human pose estimation in wild environment[C]//Computer Vision—ECCV 2020. Berlin: Springer, 2020: 197-212.

[19] BOGO F, KANAZAWA A, LASSNER C, et al. Keep it SMPL: automatic estimation of 3D human pose and shape from a single image[C]//Computer Vision—ECCV. Berlin: Springer, 2016: 561-578.

[20] KOCABAS M, HUANG C P, TESCH J, et al. SPEC: seeing people in the wild with an estimated camera[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2021: 11015-11025.

[21] KANAZAWA A, BLACK M J, JACOBS D W, et al. End-to-end recovery of human shape and pose[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 7122-7131.

[22] KWON O H, TANKE J, GALL J. Recursive Bayesian filtering for multiple human pose tracking from multiple cameras[C]//Computer Vision—ACCV 2020. Berlin: Springer, 2021: 438-453.

[23] 黄煜杰, 陈凯, 王子源, 等. 多目视觉下基于融合特征的密集行人跟踪方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(7): 2513-2525.

HUANG Y J, CHEN K, WANG Z Y, et al. A dense pedestrian tracking method based on fusion features under multi-vision[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(7): 2513-2525(in Chinese).

[24] FIERARU M, ZANFIR M, SZENTE T, et al. Remips: physically consistent 3d reconstruction of multiple interacting people under weak supervision[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021, 34: 19385-19397.

[25] TULSIANI S, EFROS A A, MALIK J. Multi-view consistency as supervisory signal for learning shape and pose prediction[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision

- and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 2897-2905.
- [26] KE S R, ZHU L J, HWANG J N, et al. Real-time 3D human pose estimation from monocular view with applications to event detection and video gaming[C]//Proceedings of the 2010 7th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. Piscataway: IEEE Press, 2010: 489-496.
- [27] 史加荣, 王丹, 尚凡华, 等. 随机梯度下降算法研究进展[J]. 自动化学报, 2021, 47(9): 2103-2119.
- SHI J R, WANG D, SHANG F H, et al. Research advances on stochastic gradient descent algorithms[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(9): 2103-2119(in Chinese).
- [28] WEI L H, ZHENG C, HU Y J. Oriented object detection in aerial images based on the scaled smooth L1 loss function[J]. Remote Sensing, 2023, 15(5): 1350.
- [29] RAMAKRISHNA V, MUNOZ D, HEBERT M, et al. Pose machines: Articulated pose estimation via inference machines[C]//Computer Vision-ECCV 2014. Berlin: Springer, 2014: 33-47.
- [30] BELAGIANNIS V, AMIN S, ANDRILUKA M, et al. 3D pictorial structures for multiple human pose estimation[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1669-1676.
- [31] TIAN W, GAO Z, TAN D Y. Single-view multi-human pose estimation by attentive cross-dimension matching[J]. Frontiers in Neuroscience, 2023, 17: 1201088.
- [32] RANI C J, DEVARAKONDA N, KUMARI K W S N, et al. A monadic and effective frame work for single human pose estimation of 2D images and videos[C]//Proceedings of the Second International Conference on Image Processing and Capsule Networks. Berlin: Springer, 2022: 254-268.

Human 3D posture detection and modeling based on automatic variational correction in multi-vision

ZHAO Xiaodong¹, CHEN Kai^{1,*}, HUANG Yujie¹, WANG Pengfei², WANG Ziyuan¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanhang University, Nanjing 210016, China;

2. China Electronics Technology Group 28th Research Institute, Nanjing 210007, China)

Abstract: This paper proposed a method for detecting 3D pose points inside the human body based on skin multi-person linear (SMPL) model and mapped 2D pose points inside the human body from multiple perspectives to 3D pose points in real scenes using a clustering algorithm in order to address issues such as continuous modeling jitter and local distortion of model results caused by the existing methods of constructing 3D human body models based on 2D human body surface pose points. The Kalman filter is introduced to denoise the attitude points of the human body. In the process of constructing a human 3D model based on 3D pose points, this paper corrects the gradient descent regression network based on an automatic variational method and constructs an end-to-end human 3D modeling network SMPL-VAE, which is more in line with the local modeling of human motion structure while maintaining the overall proportion. The test on the open data set Shelf revealed that the attitude points could be correctly matched for various targets, and the mean position error per joint (MPJPE) was improved by 3.88, 7.56, 12.88, respectively, compared with other methods. Additionally, the percentage of correct key points (PCK) was improved by 3.5, 6.91, and 9, respectively, compared with other methods.

Keywords: multi-vision; skin multi-person linear model; 3D pose detection; Kalman filter; variational autoencoder

Received: 2024-01-30; **Accepted:** 2024-05-14; **Published Online:** 2024-06-14 11:55

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240613.1541.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52202417); China Postdoctoral Science Foundation(2022TQ0155,2022M721605); Open Project Program of State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University(VRLAB2023A02); Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST(2023QNRC001); Young Elite Scientists Sponsorship Program by JSTJ(JSTJ-2023-XH032)

* **Corresponding author.** E-mail: chen_kai@nuaa.edu.cn

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0074

空间太阳能电池应变传递机制

高红鑫¹, 赵寿根^{1,*}, 朱佳林², 余亦豪¹, 刘欣¹, 杨乐天¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院 强度与结构完整性全国重点实验室, 北京 100191;

2. 中电科蓝天科技股份有限公司, 天津 300392)

摘 要: 空间太阳能电池是航天能源系统的关键主件, 其所受应变主要由太阳能基板通过黏接层传递, 准确表征基板到电池的应变传递规律, 可为空间太阳能电池的抗力学性能研究提供技术支撑。基于此, 根据剪滞理论建立了空间太阳能电池的应变传递理论计算模型, 从理论上分析了空间太阳能电池的应变传递规律, 推导了均匀应变场和典型非均匀应变场下的结果, 并利用 ANSYS 有限元模型和实物实验进行了验证, 结果表明理论模型的正确性。同时, 还具体分析了空间太阳能电池几何参数和物理参数对应变传递率的影响, 为空间太阳能电池的设计提供了理论依据。

关 键 词: 空间太阳能电池; 应变传递; 黏接层; ANSYS 有限元模型; 剪滞理论

中图分类号: TP18; O34

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1300-06

空间太阳能电池作为太空科学和技术领域的关键组件, 为完成太空任务提供了可靠的电力供应。然而, 太空环境的极端条件, 包括温度变化、机械振动和辐射等, 对太阳能电池的性能和可靠性提出了严峻的挑战^[1-5]。空间太阳能电池是采用层压工艺制造的多层结构^[6-7], 包括玻璃盖片、盖片胶和电池层, 通过底片胶黏贴在太阳阵基板上。由于电池层内埋于底片胶和盖片胶中, 这种内埋形式给电池片的应力测量及应力分析计算带来困难^[8-9]。同时, 在轨空间太阳能电池阵会面临数十次的真空高低温冷热交变, 而盖片胶和底片胶是硅橡胶, 其剪切模量与温度密切相关, 温度降低, 其剪切模量升高, 从而引起电池片应力的增加^[10-11]。由于空间太阳能电池片不具备可维护性, 若在轨太阳能电池片发生机械碎裂, 极易引发卫星功率输出降低等问题。因此, 研究空间太阳能电池在多应力场条件下的应力应变问题迫在眉睫^[12-13]。

在空间太阳能电池的应变传递过程中, 基板的变形首先导致底片胶产生剪应变, 并将载荷传递至

电池层, 然后, 电池层的变形导致盖片胶产生剪应变并将载荷传递至玻璃盖片, 从而实现结构的整个应变传递。当前对多层胶结构的应变传递问题的研究不断深入。王晓燕等^[8]研究了在热交变过程中, 材料弹性模量、热膨胀系数和泊松比等对太阳能电池板热应力、热应变的影响。黎之奇^[14]从理论上探究了乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(ethylene vinyl acetate copolymer, EVA)胶膜弹性模量对晶体硅电池应力场的影响, 并与有限元结果进行了比较。Tan 等^[15]定量评估了多层胶层光纤传感器在任意应变场下的应变传递理论, 并通过仿真和实验验证了该理论的有效性。

本文根据剪滞理论建立了空间太阳能电池的应变传递理论计算模型, 从理论上分析了空间太阳能电池的应变传递机制, 推导了均匀应变场和非均匀应变场下的结果, 并利用数值模拟进行了验证。同时, 还具体分析了空间太阳能电池几何参数和物理参数对应变传递率的影响, 为空间太阳能电池的设计提供了理论依据。

收稿日期: 2024-01-31; 录用日期: 2024-05-31; 网络出版时间: 2024-06-17 11:12

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240616.1843.002

*通信作者. E-mail: zshougen@buaa.edu.cn

引用格式: 高红鑫, 赵寿根, 朱佳林, 等. 空间太阳能电池应变传递机制[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1300-1305.

GAO H X, ZHAO S G, ZHU J L, et al. Strain transmission mechanism of space solar cells[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1300-1305 (in Chinese).

1 空间太阳能电池理论分析简化模型

如图 1 所示, 目前, 某空间太阳能电池构造形式从上到下依次为 0.12 mm 的玻璃盖片、0.04 mm 的盖片胶、0.145 mm 的电池层, 经过层压后形成多层组合结构, 通过 0.1 mm 的底片胶黏贴在厚度为 8 mm 的基板上。当基板受到外载荷, 发生拉伸、弯曲等变形时, 底片胶发生剪切变形, 将载荷传递至电池层, 在电池层内产生应力。

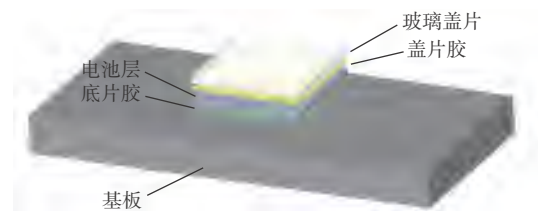


图 1 空间太阳能电池示意图
Fig. 1 Diagram of space solar cells

考虑到电池层、玻璃盖片的受力情况, 本文的理论分析基于以下几个假设:

- 1) 忽略垂直于电池层表面和玻璃盖片表面的正应力, 仅考虑电池层和玻璃盖片的面内应力。
- 2) 所有材料均为线弹性各向同性材料, 仅考虑小位移和小应变。
- 3) 由于电池层和玻璃盖片的厚度远远小于基板厚度, 将其视为偏离基板中性面的薄层。当基板弯曲时, 电池层和玻璃盖片受到拉伸和弯曲的组合作用, 但弯曲应力是次要的, 因此, 可以忽略弯曲应力, 认为电池层和玻璃盖片的面内应力沿厚度方向不变。
- 4) 由于基板的尺寸远大于空间太阳能电池的尺寸, 认为可以忽略空间太阳能电池对基板原本应变场的影响。
- 5) 基板与底片胶、底片胶与电池层、电池层与

盖片胶、盖片胶与玻璃盖片交界面结合紧密, 不发生相对滑移。

6) 空间太阳能电池不直接承受外力, 仅受基板变形的影响。

7) 如图 2 所示, 对基板和空间太阳能电池任取一段微元 dx 进行受力分析, 可得

$$h_g d\sigma_g(x) + \tau_i(x) dx = 0 \tag{1}$$

$$h_i d\sigma_i(x) + \tau_i(x, y) dy = \tau_i(x) dx \quad y_g \leq y \leq y_i \tag{2}$$

$$h_b d\sigma_b(x) + \tau_o(x, y_o) dx = \tau_i(x, y_i) dx \tag{3}$$

$$h_o d\sigma_o(x) + \tau_o(x, y) dx = \tau_o(x, y_b) dx \quad y_b \leq y \leq y_o \tag{4}$$

式中: h_g 、 h_i 、 h_b 、 h_o 分别为玻璃盖片、盖片胶、电池层、底片胶的厚度; $\sigma_g(x)$ 、 $\sigma_i(x)$ 、 $\sigma_b(x)$ 、 $\sigma_o(x)$ 分别为玻璃盖片、盖片胶、电池层、底片胶的轴向应力; $\tau_i(x, y)$ 、 $\tau_o(x, y)$ 分别为盖片胶、底片胶的剪应力。

考虑到 $x = 0$ 处没有直接对底片胶和盖片胶施加力, 将式(2)和式(4)从 0 到 x 积分为

$$h_i \sigma_i(x) + \tau_i(x, y) x = \tau_i(x) x \quad y_g \leq y \leq y_i \tag{5}$$

$$h_o \sigma_o(x) + \tau_o(x, y) x = \tau_o(x, y_b) x \quad y_b \leq y \leq y_o \tag{6}$$

电池的厚度远小于电池长度, 因此, 除了靠近电池两端处, 其他位置可以忽视式(5)和式(6)的第一项, 可得

$$\tau_i(x, y) = \tau_i(x) \tag{7}$$

$$\tau_o(x, y) = \tau_o(x, y_b) \tag{8}$$

即可以认为在底片胶和盖片胶中, 切应力沿厚度无变化。

根据假设 2), 铝基板、电池层和玻璃盖片沿 x 方向的纵向应变可表示为

$$\delta_h = \varepsilon_h dx \tag{9}$$

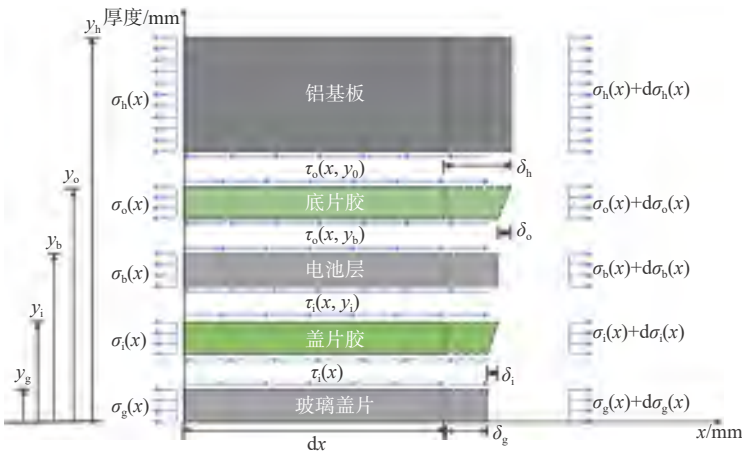


图 2 黏贴在基板上的空间太阳能电池应力传递图
Fig. 2 Stress transmission diagram of space solar cells attached to the substrate

$$\delta_b = \varepsilon_b dx$$

(10)

$$\delta_g = \varepsilon_g dx$$

(11)

式中： δ_h 、 δ_b 、 δ_g 分别为铝基板、电池层、玻璃盖片的轴向变形； ε_h 、 ε_b 、 ε_g 分别为铝基板、电池层、玻璃盖片的轴向应变。

根据假设5)，可得

$$\delta_h = \delta_g + \delta_i + \delta_o$$

(12)

$$\delta_b = \delta_g + \delta_i$$

(13)

式中： δ_i 和 δ_o 分别为盖片胶和底片胶的轴向变形。

对于底片胶和盖片胶的轴向应变，有

$$\delta_o = \int_0^{h_o} d\gamma_o(x) dy = \frac{h_o}{G_o} d\tau_o(x)$$

(14)

$$\delta_i = \int_0^{h_i} d\gamma_i(x) dy = \frac{h_i}{G_i} d\tau_i(x)$$

(15)

式中： $\gamma_o(x)$ 和 $\gamma_i(x)$ 分别为底片胶和盖片胶的剪切应变； G_o 和 G_i 分别为底片胶和盖片胶的剪切模量。

由式(1)和式(3)可知：

$$\tau_i(x) = -h_g \frac{d\sigma_g(x)}{dx} = -E_g h_g \frac{d\varepsilon_g(x)}{dx}$$

(16)

$$\tau_o(x) = \tau_i(x) - h_b \frac{d\sigma_b(x)}{dx} = -E_g h_g \frac{d\varepsilon_g(x)}{dx} - E_b h_b \frac{d\varepsilon_b(x)}{dx}$$

(17)

式中： E_g 和 E_b 分别为玻璃盖片和电池层的弹性模量。

将式(16)和式(17)代入式(12)和式(13)可得

$$\varepsilon_h = \varepsilon_g - \frac{2E_g h_g h_i}{G_i} \cdot \frac{d^2 \varepsilon_g(x)}{dx^2} - \frac{E_b h_b h_o}{G_o} \cdot \frac{d^2 \varepsilon_b(x)}{dx^2}$$

(18)

$$\varepsilon_b = \varepsilon_g - \frac{E_g h_g h_i}{G_i} \cdot \frac{d^2 \varepsilon_g(x)}{dx^2}$$

(19)

将式(19)代入式(18)可得

$$\varepsilon_h(x) = \varepsilon_g - \left(\frac{2E_g h_g h_i}{G_i} + \frac{E_b h_b h_o}{G_o} \right) \frac{d^2 \varepsilon_g(x)}{dx^2} + \frac{E_b h_b h_o}{G_o} \cdot \frac{E_g h_g h_i}{G_i} \cdot \frac{d^4 \varepsilon_g(x)}{dx^4}$$

(20)

式(20)即空间太阳能电池的应变传递控制方程。

由于电池层、玻璃盖片的端面为自由端，没有应力传递，故边界条件为

$$\varepsilon_g(0) = \varepsilon_g(L) = 0$$

(21)

$$\varepsilon_b(0) = \varepsilon_b(L) = 0$$

(22)

式中： L 为空间太阳能电池的长度。

一般来说， $\varepsilon_h(x)$ 的形式因具体问题而异，因此式(20)对应的特解也可以相应地变化。对于任意

条件， $\varepsilon_h(x)$ 可以用泰勒级数表示为

$$\varepsilon_h(x) = \sum_{j=0}^m a_j x^j$$

(23)

式中： m 为阶次； $a_j(j=0,1,2,\cdots,m)$ 为系数。

将式(23)代入式(20)即可得到任意应变场下空间太阳能电池的应变控制方程，可表示为

$$\sum_{j=0}^m a_j x^j = \varepsilon_g - \left(\frac{2E_g h_g h_i}{G_i} + \frac{E_b h_b h_o}{G_o} \right) \frac{d^2 \varepsilon_g(x)}{dx^2} + \frac{E_b h_b h_o}{G_o} \cdot \frac{E_g h_g h_i}{G_i} \cdot \frac{d^4 \varepsilon_g(x)}{dx^4}$$

(24)

由式(24)可知，太阳能电池层的材料及组分比会对应变控制方程产生影响。

2 结果分析

2.1 均匀应变场

在基板受均匀应变场下，空间太阳能电池结构示意图如图3所示，根据表1给出的材料参数、应变传递控制方程式(24)、边界条件式(21)和式(22)，计算电池层和玻璃盖片沿轴向的应变分布作为理论结果。同时，为了验证上述理论模型的合理性，利用ANSYS建立空间太阳能电池黏贴在基板上的三维有限元模型，在进行网格划分时，采用八节点六面体线性缩减积分单元(solid185)，并对应变传递区域进行网格加密，如图4所示。理论结果和仿真结果如图5所示。

从图5可以看出，理论计算结果与仿真结果基本一致，2种分析方法得到的电池层和玻璃盖片的沿轴向应变分布规律完全一致，即中间的应变最

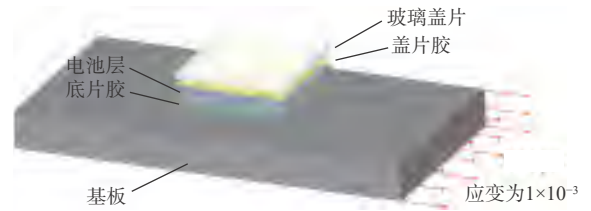


图3 在基板均匀应变场下的空间太阳能电池
Fig. 3 Space solar cells under uniform strain field on the substrate

表1 基板和空间太阳能电池的尺寸和力学性能参数 Table 1 Dimensions and mechanical performance parameters of substrate and space solar cells				
材料	弹性模量/MPa	泊松比	长度/mm	厚度/mm
基板	71	0.33	3 000	8
底片胶	0.002	0.47	120	0.1
电池层	120	0.26	120	0.145
盖片胶	0.000 25	0.49	120	0.04
玻璃盖片	75.56	0.209	120	0.12

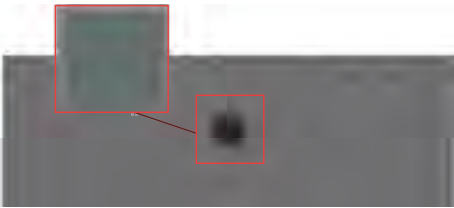


图 4 黏贴在基板上的空间太阳能电池三维有限元模型

Fig. 4 Three-dimensional finite element model of space solar cells attached to the substrate

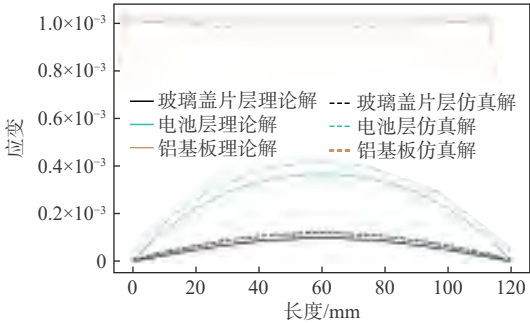


图 5 均匀应变条件下基板、电池层和玻璃盖片沿轴向的应变分布

Fig. 5 Axial strain distribution of the substrate, battery layer, and glass cover under uniform strain condition

大, 两端的轴向应变接近于 0, 应变理论计算结果小于仿真结果, 最大误差小于 12%, 其主要原因是玻璃盖片层和电池层无剪应变假设, 以及两者在边界条件上的自由端假设造成了应变理论值计算偏小。造成铝基板应变理论值偏大的原因是假设 4), 即忽略空间太阳能电池对基板原本应变场的影响, 实际上, 太阳能电池会增加黏贴处的刚度, 因此, 铝基板应变理论值偏大。

2.2 非均匀应变场

空间太阳能电池受非均匀应变场的一个典型代表为基板受三点弯, 如图 6 所示。三点弯的跨度为 240 mm, 空间太阳能电池的长度为 120 mm, 黏贴在铝基板的中央。对铝基板进行力学分析, 在中点施加载荷 F , 可以得到中点的挠度、弯矩和应变分布, 如式 (25)~式 (27) 所示。

$$d = \frac{FL_h^3}{48EI}$$
 (25)

$$M(x) = \begin{cases} \frac{Fx}{2} & 0 < x < \frac{L_h}{2} \\ \frac{F(L_h - x)}{2} & \frac{L_h}{2} < x < L_h \end{cases}$$
 (26)

$$e(x) = \frac{M(x)}{EI} \cdot \frac{h}{2}$$
 (27)

式中: d 为铝基板中点的挠度; E 为弹性模量; I 为惯性矩; M 为弯矩; $e(x)$ 为拉伸应变; L_h 为跨距; h 为铝基板的厚度。通过调整 F 的大小可以使铝基板中点

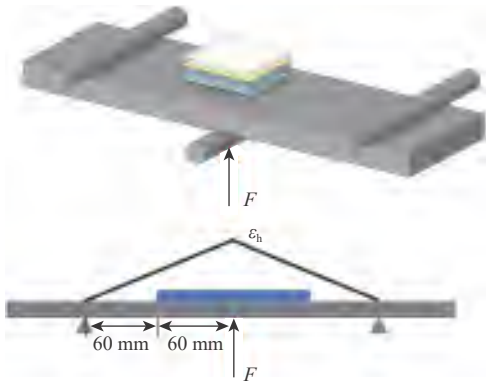


图 6 三点弯条件下黏贴在基板上的空间太阳能电池

Fig. 6 Space solar cells attached to the substrate under three-point bending conditions

的应变为 1×10^{-3} , 此时, 空间太阳能电池受非均匀应变场, 可以表示为

$$\epsilon_h(x) = \begin{cases} 500 + \frac{1\,000 - 500}{60}x = 500 + \frac{25}{3}x, 0 < x < L/2 \\ 1000 - \frac{1\,000 - 500}{60}x = 1\,000 - \frac{25}{3}x, L/2 < x < L \end{cases}$$
 (28)

将式 (28) 代入应变控制方程, 结合边界条件, 并通过数值求解方法可以得到此应变场下玻璃盖片和电池层沿轴向应变分布的理论解。为了验证上述理论模型的合理性, 利用 ANSYS 建立了三点弯条件下空间太阳能电池黏贴在基板上的三维有限元模型, 如图 7 所示。同时进行了 4 组实物实验, 实验中在铝基板中点位置和空间太阳能电池中点位置黏贴应变片, 如图 8 所示。在实验过程中, 记录当铝基板中点应变达到 $1\,000 \mu\epsilon$ 时, 空间太阳能电池应变即空间太阳能电池玻璃盖片的应变。

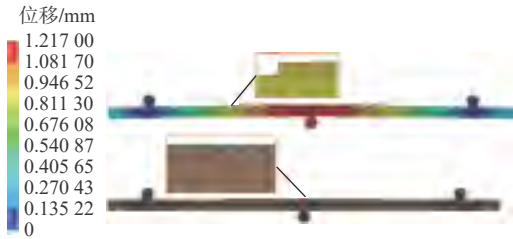


图 7 三点弯条件下黏贴在基板上的空间太阳能电池有限元模型

Fig. 7 Finite element model of space solar cells attached to the substrate under three-point bending conditions

图 9 给出了黏贴在铝基板上的空间太阳电池在非均匀应变场(三点弯条件)下, 玻璃盖片和电池层沿轴向应变的理论解、仿真解和实验测量值。可知, 理论解与仿真解吻合得较好, 误差在 10% 以内。理论解和仿真解的玻璃盖片最大应变小于实



图 8 黏贴在铝基板上的空间太阳能电池三点弯曲试验示意图
Fig. 8 Schematic diagram of three-point bending test of space solar cells attached to aluminum substrate

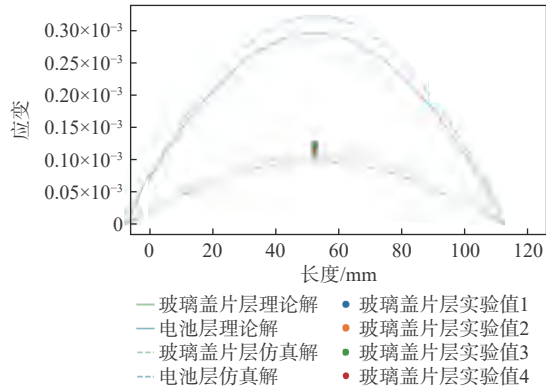


图 9 三点弯条件下空间太阳能电池玻璃盖片和电池层沿轴向应变的理论解、仿真解和实验测量值
Fig. 9 Theoretical solutions, simulation results, and experimental measurements of the axial strain in the glass cover and battery layer of a space solar cell under three-point bending conditions

验测量值,造成此情况的原因可能是真实情况的胶层厚度不均和底片胶并非完全覆盖电池层底部。在更复杂的应变场情况下,需要进一步的研究来验证理论解的正确性。

2.3 参数影响

2.3.1 空间太阳能电池参数影响

空间太阳能电池的型号有很多,每个型号的尺寸及电池层厚度也各不相同,如有 30 mm×40 mm×0.04 mm, 40 mm×60 mm×0.04 mm, 67.7 mm×120 mm×0.145 mm, 87.7 mm×138.2 mm×0.145 mm 等尺寸。因此,需要探究空间太阳能电池长度及电池层厚度对应变传递率的影响,其中,应变传递率 α 定义为 $\alpha = \frac{\max\{\varepsilon_g\}}{\max\{\varepsilon_h\}}$,即玻璃盖片最大应变与铝基板最大应变的比值。图 10 展示了在均匀应变 1×10^{-3} 下,空间太阳能电池长度及电池层厚度对应变传递率的影响。可以看出,空间太阳能电池长度越小,应变传递率越小,空间太阳能电池安全性越高。

2.3.2 底片胶参数影响

当空间太阳能电池黏贴在不同的基板上时,需

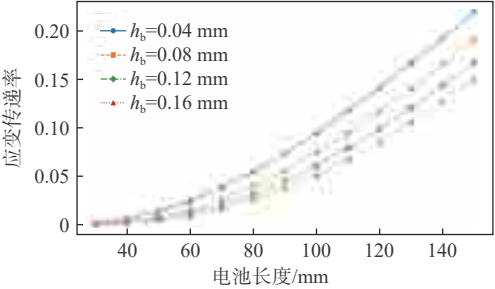


图 10 空间太阳能电池长度及电池层厚度对应变传递率的影响
Fig. 10 The impact of the length of space solar cells and the thickness of the battery layer on the strain transfer rate

要用到不同的底片胶参数。如图 11 所示,分析了在均匀应变 1×10^{-3} 下,底片胶厚度和剪切模量对应变传递率的影响。可知,随着底片胶厚度的增加,应变传递率降低,且在底片胶剪切模量较小时,降低幅度更大。此外,在底片胶厚度一定的情况下,选择剪切模量更小的底片胶可以更好地降低应变传递率,保证空间太阳能电池的安全。

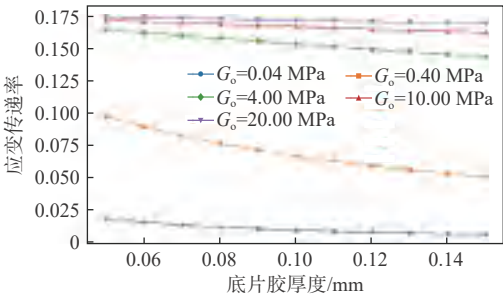


图 11 底片胶剪切模量及厚度对应变传递率的影响
Fig. 11 The effect of the shear modulus and thickness of the adhesive film on the strain transfer rate

3 结 论

- 1) 本文成功建立了空间太阳能电池的应变传递理论模型,并通过数值模拟与实验验证了模型的准确性。结果显示,在均匀和非均匀应变场条件下,理论模型能够可靠地预测玻璃盖片和电池层的应力分布。
- 2) 本文表明空间太阳能电池的长度、电池层厚度、底片胶厚度及剪切模量会显著影响玻璃盖片和电池层的应变分布,通过选取合适的参数,可以进一步提高空间太阳能电池的可靠性。

参考文献 (References)

[1] 王凯,王训春,钱斌,等. 高效太阳能电池及其阵列技术的空间应用研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(5): 1436-1446.
WANG K, WANG X C, QIAN B, et al. Recent development on space application for high-efficiency solar cells and array techno-

logy[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(5): 1436-1446(in Chinese).

[2] 殷茂淑, 杨广, 王训春, 等. 空间太阳能电池阵应变规律研究[J]. 物理学报, 2021, 70(19): 337-343.

YIN M S, YANG G, WANG X C, et al. Strain-testing research of space solar cell array[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(19): 337-343(in Chinese).

[3] SHIN G H, KIM D G, KWON S J, et al. Simulation and ground test for the solar array using GaInP/GaAs/Ge cells for space verification[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2019, 74(11): 1079-1084.

[4] ALMUBARAK H O, MASUI H, CHO M. Environment test campaign of triple junction photovoltaic on aluminium substrate solar panel for lean-satellite[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2016, 14(30): 9-14.

[5] 金海雯, 于辉, 赵颖, 等. 半刚性太阳能电池阵抗力学环境设计与分析[J]. 电源技术, 2012, 36(6): 813-815.

JIN H W, YU H, ZHAO Y, et al. Against mechanical environmental design and analysis of semi-rigid solar array[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(6): 813-815(in Chinese).

[6] WILT D M, BEAUCHEMIN R, MCPHEETERS C, et al. Bend testing of IMM and triple junction solar cells[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Piscataway: IEEE Press, 2018: 3773-3776.

[7] YAMAGUCHI H, IJICHI R, SUZUKI Y, et al. Development of space solar sheet with inverted triple-junction cells[C]//Proceedings of the 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.

[8] 王晓燕, 何世禹, 郑双. 太阳能电池板结构应力-应变状态分析[J]. 太阳能学报, 2005, 26(5): 631-634.

WANG X Y, HE S Y, ZHENG S. Stress-strain analysis of photovoltaic panel structure[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2005, 26(5): 631-634(in Chinese).

[9] WANG X Y, GENG H B, HE S Y, et al. Effect of thermal expansion coefficient on the stress distribution in solar panel[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27(4): 288-297.

[10] JONES P A, SPENCE B R. Spacecraft solar array technology trends[C]//Proceedings of the 1998 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 1998: 141-152.

[11] BERMUDEZ-GARCIA A, VOARINO P, RACCURT O. Environments, needs and opportunities for future space photovoltaic power generation: a review[J]. Applied Energy, 2021, 290: 116757.

[12] 张伟, 兰志成, 吴致丞. 卫星卷绕式柔性太阳能电池阵关键技术研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(6): 10-13.

ZHANG W, LAN Z C, WU Z C. The key technical analysis of the roll-out solar array[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(6): 10-13(in Chinese).

[13] 于辉, 张伟, 崔新宇, 等. 空间太阳能电池阵技术现状及发展趋势[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1552-1557.

YU H, ZHANG W, CUI X Y, et al. Recent research and developing trend of space solar cell array technology[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(10): 1552-1557(in Chinese).

[14] 黎之奇. 晶体硅太阳能电池应力的理论分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9): 137-143.

LI Z Q. Theoretical analysis of stresses for crystalline cells in PV modules[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(9): 137-143(in Chinese).

[15] TAN X, BAO Y, ZHANG Q H, et al. Strain transfer effect in distributed fiber optic sensors under an arbitrary field[J]. Automation in Construction, 2021, 124: 103597.

Strain transmission mechanism of space solar cells

GAO Hongxin¹, ZHAO Shougen^{1,*}, ZHU Jialin², YU Yihao¹, LIU Xin¹, YANG Letian¹

(1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. China Electronics Technology Blue Sky Technology Co., Ltd., Tianjin 300392, China)

Abstract: Space solar cells are critical components of aerospace energy systems. The strain they experience is primarily transmitted from the solar array substrate through the adhesive layer. Accurately characterizing the strain transfer from the substrate to the cell is crucial for understanding the mechanical resistance performance of space solar cells. This paper establishes a theoretical model for strain transfer in space solar cells based on shear-lag theory. It provides data for both uniform and typical non-uniform strain fields and theoretically examines the strain transmission mechanism in space solar cells. The model’s validity was confirmed through ANSYS finite element analysis and physical experiments, demonstrating the correctness of the theoretical model. The study also investigates how the physical and geometric characteristics of space solar cells impact the strain transfer rate, offering a theoretical basis for their design.

Keywords: space solar cells; strain transfer; adhesive layer; ANSYS finite element model; shear lag theory

基于深度强化学习的固定翼无人机纵向控制

何海洋, 赵振根*, 孔飞

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘 要: 固定翼无人机 (UAV) 作为典型的非线性系统, 其动态特性变得越来越复杂。传统的控制方法主要基于模型和经验设计, 缺乏对复杂环境和任务的适应性。基于多维连续状态输入、多维连续动作输出的深度确定性策略梯度 (DDPG) 算法, 设计了一种固定翼无人机的纵向飞行控制器, 以多个时刻的速度、俯仰角跟踪误差及相关量作为控制器的输入, 输出为升降舵舵偏角和发动机推力信号。为提高算法的学习效率, 减轻稀疏奖励对算法学习的影响, 奖励函数中除跟踪误差的密集惩罚项外, 还引入了正值激励因子, 当跟踪误差控制在一定范围内并快速跟踪目标时给予正值奖励。实现了从无人机状态到控制面的端到端控制, 并使用比例-积分-微分 (PID) 控制器进行了变控制目标与模型参数摄动的飞行仿真对比, 仿真结果表明, 基于深度强化学习 (DRL) 算法构建的控制系统不仅能实现控制目标, 还具备一定的泛化能力和鲁棒性, 控制性能在部分情况下优于 PID 控制器。

关 键 词: 深度确定性策略梯度; 固定翼无人机; 纵向控制; 模型不确定性; 稀疏奖励

中图分类号: V249.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1306-10

随着科技的飞速发展, 无人机在军事侦察、环境监测、救灾物资输送等各个领域发挥着越来越重要的作用^[1-2]。为了在复杂环境下完成各种任务, 对无人机的控制系统提出了更高的要求。姿态控制是无人机控制系统中的一项关键技术, 其性能直接影响到无人机的稳定性和可靠性^[3]。为此, 研究人员做了大量的研究工作, 常用的控制方法有比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制^[4]、 H_∞ 控制^[5]、反步控制^[6]、滑模结构控制^[7]和自适应控制^[8]等。然而, 传统的控制方法在处理无人机非线性、不确定性和外部干扰方面逐渐暴露出其局限性, 为了使无人机能在极端的环境中保持稳定, 完成艰难而繁杂的工作, 其控制系统需要具备强大的自适应能力, 能够根据环境变化快速做出反应, 并调整控制策略。

近年来, 深度强化学习 (deep reinforcement

learning, DRL) 理论不断发展, DRL 算法也持续更新, 因其在非线性系统建模和决策方面的优异性能, 成为解决复杂控制问题的研究热点。通过结合深度学习与强化学习技术, DRL 实现了策略空间的自动搜索和优化, 具有较强的泛化能力和鲁棒性^[9]。因此, 许多科研人员在 DRL 与无人机的飞行控制器设计结合方面做了许多工作。文献^[10-11]介绍了 DRL 的基本原理及其在无人机领域的控制和决策方面的应用, 分析了将 DRL 方法应用于飞行器控制中存在的问题, 并预测了未来发展方向。针对旋翼无人机, 文献^[12]提出了一种基于无模型强化学习的神经网络的低阶四旋翼控制算法, 并探讨了该算法在四旋翼悬停和跟踪任务中的性能。文献^[13]提出带积分补偿的改进深度确定性策略梯度 (deep deterministic policy gradient, DDPG) 算法, 仿真结果表明, 积分补偿的加入能够有效消除四旋翼无

收稿日期: 2024-02-01; 录用日期: 2024-03-29; 网络出版时间: 2024-04-28 10:27

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240426.1301.001

基金项目: 国家自然科学基金 (62233009, 62003161)

* 通信作者. E-mail: zhaozhengen@nuaa.edu.cn

引用格式: 何海洋, 赵振根, 孔飞. 基于深度强化学习的固定翼无人机纵向控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52 (4): 1306-1315.

HE H Y, ZHAO Z G, KONG F. Longitudinal control of fixed-wing UAV based on deep reinforcement learning [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52 (4): 1306-1315 (in Chinese).

人机位置跟踪静差, 提高控制的准确性, 增强系统的稳定性。文献 [14] 将经典控制器与强化学习策略集成, 使其线性组合, 仿真和实验结果表明, 该算法具有更快的收敛速度和更好的控制性能。文献 [15] 在小角度约束下, 将四旋翼动力学分解为 6 个子系统, 提出一种基于 DRL 的级联四旋翼飞行控制器。文献 [16] 在软演员-评论家 (soft actor-critic, SAC) 算法的基础上引入专家信息, 提出进化式软演员-评论家 (evolution-based soft actor-critic, ESAC) 算法, 以增强控制策略的易用性和扩展性。文献 [17] 利用专家经验对强化学习算法进行改进, 提出基于示教知识辅助的无人机强化学习控制算法, 用来解决强化学习在无人机控制应用中学习率低的问题。相比于上述引入专家信息或将 DRL 算法与传统方法相结合的做法, 文献 [18] 选择对奖励函数进行更细致的构造, 仿真结果表明, 该控制器能够引导平流层浮空器较好地实现变高度的跟踪控制。

针对固定翼无人机, 文献 [19] 表明, DRL 可以成功学习直接在原始非线性动力学上操作的固定翼无人机姿态控制, 只需要 3 min 的飞行数据, 并展示了与最先进的 ArduPlane PID 姿态控制器相当的性能。之后, 该团队使用近端策略优化 (proximal policy optimization, PPO) 算法设计了一种 DRL 控制器来处理非线性姿态控制问题, 使固定翼无人机能够从大量初始条件稳定到参考滚转、俯仰和空速值扩展飞行包线^[20]。针对全尺寸固定翼飞行器, 文献 [21] 使用 DDPG 算法设计了从飞行状态到舵面/推力控制的端到端六自由度一体化智能控制器, 并通过引入偏航角误差作为控制器输入, 实现近零侧滑的稳定巡航飞行。从上述文献不难看出, DRL 的理论已经发展得较为成熟, 且已经应用到许多无人机研究过程中, 但大部分研究对象为四旋翼无人机, 对于固定翼无人机的研究较少, 且 DRL 需要不断试错, 学习效率较低。为此, 本文提出基于 DDPG 算法的固定翼无人机 DRL 控制方法, 同时, 为了提高智能体的学习效率, 对智能体的状态空间、动作空间、奖励函数与神经网络结构进行设计并训练。通过仿真对比验证该控制器与 PID 控制器的控制效果、泛化能力和鲁棒性。

1 固定翼无人机建模

仿真对象为小型固定翼无人机 Aerosonde^[22], 飞行器的坐标系和受力如图 1 所示。定义飞行器机体坐标系 $O_b x_b y_b z_b$ 及地面坐标系 $O_g x_g y_g z_g$ 。原点 O_b 位于无人机质心, 机体坐标系与机体固连, $O_b x_b$

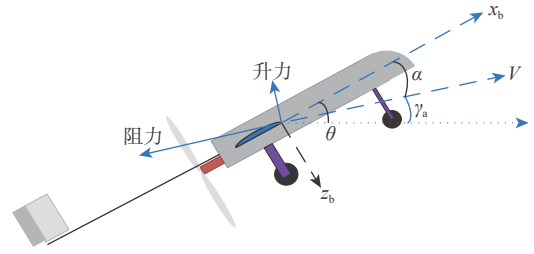


图 1 无人机系统坐标、角度与空气动力学示意图

Fig. 1 Illustration of UAV system coordinates, angles, and aerodynamics forces

轴在无人机对称面内指向头部, $O_b y_b$ 轴垂直于飞行器对称面指向机身右方, $O_b z_b$ 轴在飞行器对称面内与 $O_b x_b$ 垂直指向机身下方。地面坐标系固定于地面, 原点 O_g 位于地面某点, $O_g x_g$ 轴在地平面内指向某一方向, $O_g y_g$ 轴垂直于地面并指向地心, $O_g z_g$ 轴位于地平面内并垂直于 $O_g x_g$ 轴, 其方向通过右手定则确定。

针对水平无侧滑条件下的固定翼无人机, 对其连续状态下的非线性动力方程进行建模, 得到连续状态下的纵向非线性模型。无人机纵向状态主要有 4 个变量, 分别为速度 V 、航迹角 γ_a 、攻角 α 和俯仰角速度 q , 俯仰角 $\theta = \alpha + \gamma_a$ 。

$$\begin{cases} \dot{V} = \frac{T \cos \alpha - D}{m} - g \sin \gamma_a \\ \dot{\gamma}_a = \frac{T \sin \alpha + L}{mV} - \frac{g \cos \gamma_a}{V} \\ \dot{\alpha} = q - \dot{\gamma}_a \\ \dot{q} = \frac{M}{I_y} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_y = 1.135 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 为转动惯量; $m = 13.5 \text{ kg}$ 为无人机质量; $g = 9.8 \text{ kg/m}^2$ 为重力加速度; L 为升力; T 为推力; D 为阻力; M 为俯仰力矩。

升力 L 、推力 T 、阻力 D 和俯仰力矩 M 都可以表示为无人机参数、状态和控制输入的相关函数, 计算公式如下:

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \\ D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \\ T = \frac{1}{2} \rho S_{\text{prop}} C_{\text{prop}} ((K_{\text{motor}} \delta_T)^2 - V^2) \\ M = \frac{1}{2} \rho V^2 S c C_M \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\rho = 1.268 2 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度; $S = 0.55 \text{ m}^2$ 为机翼面积; $S_{\text{prop}} = 0.202 7 \text{ m}^2$ 为螺旋桨旋转面积; $c = 0.189 94 \text{ m}$ 为平均气动弦长; $C_{\text{prop}} = 1.0$ 为螺旋桨平均弦长; $K_{\text{motor}} = 80$ 为发动机常数; δ_T 为发动机推力信号。

气动参数为

$$\begin{cases} C_L = C_{L_0} + C_{L_\alpha} \alpha + C_{L_{\delta_e}} \delta_e \\ C_D = C_{D_0} + \frac{(C_{L_0} + C_{L_\alpha} \alpha)^2}{\pi e R_A} + C_{D_{\delta_e}} \delta_e \\ C_M = C_{M_0} + C_{M_\alpha} \alpha + C_{M_{\delta_e}} \delta_e \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_L 为升力系数; C_D 为阻力系数; C_M 为俯仰力矩系数; $C_{L_0} = 0.28$ 为零迎角引起的升力系数; $C_{L_\alpha} = 3.45$ 为迎角引起的升力系数; $C_{L_{\delta_e}} = -0.36$ 为升降舵偏转引起的升力系数; $C_{D_0} = 0.0437$ 为寄生阻力引起的阻力系数; $C_{D_{\delta_e}} = 0$ 为升降舵偏转引起的阻力系数; $C_{M_0} = -0.023\ 38$ 为零状态俯仰力矩系数, $C_{M_\alpha} = -0.38$ 为迎角引起的力矩系数, $C_{M_{\delta_e}} = -0.5$ 为升降舵偏转引起的俯仰力矩系数; $e = 0.9$ 为奥斯瓦尔德效率因子, 用来修正校正理想情况下的机翼最小诱导阻力系数与实际诱导阻力系数之间的差异; $R_A = 0.152$ 为机翼展弦比; δ_e 为升降舵偏角信号 ($-0.4 \leq \delta_e \leq 0.4$), rad。

2 基于 DRL 的无人机纵向控制方案设计

2.1 DDPG 算法原理与更新策略

强化学习本质上是一种试错学习算法, 通过与环境的持续交互和信息互换来改进策略, 其框架由智能体与马尔可夫决策过程 (Markov decision process, MDP) 组成: 智能体在当前状态 s_t 根据策略 $\pi(s_t)$ 输出动作 a_t , 环境接收到该动作, 通过奖励函数向智能体反馈奖励信号 r_t , 并进入下一个状态 s_{t+1} , 智能体结合反馈信息调整策略生成下一个动作 a_{t+1} , 持续学习直到获得使累计奖励最大的动作策略。MDP 由状态空间集合、动作空间集合、状态转移函数和奖励函数组成。 R 表示为学习周期中奖励函数 r 的折扣求和, 即

$$R = \sum_{i=1}^T \gamma^i r_i \quad (4)$$

式中: $\gamma \in (0, 1]$ 为折扣系数; T 为周期长度。

DDPG 算法由深度 Q 网络 (deep Q network, DQN) 算法发展而来, 用于解决“连续动作”问题, 是一种采用 Actor-Critic 结构的离线策略 DRL 算法。该算法使用神经网络表示 Actor-Critic 结构。其中, Actor 网络用来拟合确定性策略 $\mu(s; \theta^\mu)$, 输入观察到的状态, 并输出计算得到的动作, θ^μ 为 Actor 网络参数, 而 Critic 网络拟合动作价值函数 $Q(s, \mu(s; \theta^\mu) | \theta^Q)$, 用以评价确定性策略 $\mu(s; \theta^\mu)$ 的优劣, θ^Q 为 Critic 网络参数。由于 DDPG 算法训练的目的是找到使式 (4) 中的累积奖励最大的策略, 其使用在策略 $\mu(s; \theta^\mu)$ 下执行动作得到的动作价值函数来近似给

定 s_t 、 a_t 时 R_t 的期望值。

$$Q^\mu(s_t, a_t) = E^\mu[R_t | s_t, a_t] \quad (5)$$

式中: E 为期望。

故 Actor 网络参数沿着目标函数 $J(\mu_\theta) = E^\mu[R_t | s_t, a_t]$ 的梯度方向进行更新:

$$\nabla_{\theta^\mu} J(\mu_\theta) = E[\nabla_{\theta^\mu} \mu(s | \theta^\mu)_{s=s_t} \nabla_a Q^\mu(s, a | \theta^Q)_{s=s_t, a=\mu(s_t)}] \quad (6)$$

$$\theta_{t+1}^\mu = \theta_t^\mu + \alpha_\mu \nabla_{\theta^\mu} J(\mu_\theta) \quad (7)$$

式中: α_μ 为 Actor 网络的学习率。

Critic 网络通过采用时间差分算法来设定误差函数, 通过最小化动作价值函数的估计值与预测值之间的误差构建损失函数 $L(\theta^Q)$ 来更新网络参数 θ^Q :

$$y_t = r_{t+1} + \gamma Q'(s_{t+1}, \mu'(s_{t+1} | \theta^{\mu'}) | \theta^{Q'}) \quad (8)$$

$$L(\theta^Q) = E[(y_t - Q(s_t, a_t | \theta^Q))^2] \quad (9)$$

$$\theta_{t+1}^Q = \theta_t^Q + \beta_Q (y_t - Q(s_t, a_t | \theta^Q) \nabla_{\theta^Q} Q(s_t, a_t | \theta^Q)) \quad (10)$$

式中: y_t 为动作价值函数的估计值; β_Q 为 Critic 网络的学习率。

为避免单个 Critic 网络在更新参数的同时也用于计算目标值, 最终导致 Critic 网络容易发散的问题, DDPG 算法借鉴 DQN 引入目标 Actor 网络 $\mu'(s | \theta^{\mu'})$ 和目标 Critic 网络 $Q'(s, a | \theta^{Q'})$, 通过降低目标动作价值函数的更新速度来提高神经网络稳定性。目标网络的结构与对应的神经网络相同, 对应的网络参数分别为 $\theta^{\mu'}$ 和 $\theta^{Q'}$, 更新方式如下:

$$\begin{aligned} \theta^{\mu'} &= \tau \theta^\mu + (1 - \tau) \theta^{\mu'} \\ \theta^{Q'} &= \tau \theta^Q + (1 - \tau) \theta^{Q'} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: τ 为惯性更新率。

DDPG 还引入经验回放, 将经验数据 (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) 存储在经验回放池中, 并通过 mini-batch 采样经验数据来消除连续样本数据的相关性, 使数据满足独立同分布, 从而减小参数更新的方差, 提高收敛速度, 且能够提高数据利用率。则式 (6)~式 (10) 调整为

$$y_i = r_{i+1} + \gamma Q'(s_{i+1}, \mu'(s_{i+1} | \theta^{\mu'}) | \theta^{Q'}) \quad (12)$$

$$L(\theta^Q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - Q(s_i, a_i | \theta^Q))^2 \quad (13)$$

$$\nabla_{\theta^Q} L(\theta^Q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - Q(s_i, a_i)) \nabla_{\theta^Q} Q(s_i, a_i) \quad (14)$$

$$\theta_{t+1}^Q = \theta_t^Q + \beta_Q \nabla_{\theta^Q} L(\theta^Q) \quad (15)$$

$$\nabla_{\theta^{\mu}} J(\theta^{\mu}) \approx \frac{1}{N} \sum_i \nabla_a Q(s, a | \theta^Q) |_{s=s_i, a=\mu(s_i)} \nabla_{\theta^{\mu}} \mu(s | \theta^{\mu}) |_{s_i} \quad (16)$$

$$\theta_{i+1}^{\mu} = \theta_i^{\mu} + \alpha_{\mu} \nabla_{\theta^{\mu}} J(\theta^{\mu}) \quad (17)$$

式中: N 为 mini-batch 样本大小; i 为抽取的样本序号。

由于 DDPG 算法是确定性策略, 为确保其对环境的探索与利用, 在与环境交互时, Actor 网络的输出动作与 OU(Ornstein-Uhlenbeck) 噪声 $\mathcal{N}$ 叠加后作为最后的控制信号。

$$a_t = \mu(s_t | \theta^{\mu}) + \mathcal{N} \quad (18)$$

2.2 基于 DDPG 的无人机纵向控制设计

本文设计的固定翼无人机飞行控制器飞行任务为跟踪目标俯仰角 θ_c 和目标速度 V_c 。为使 DDPG 算法能够训练并学习到符合期望的无人机控制策略, 结合控制对象与控制目标对 MDP 过程进行设计, 算法结构如图 2 所示。

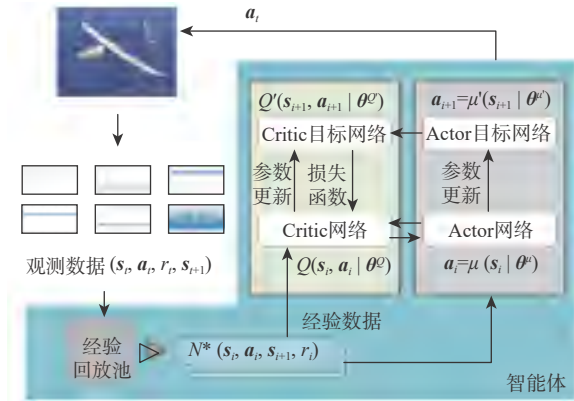


图 2 DDPG 算法结构

Fig. 2 DDPG algorithm structure

对于智能体所能观察到的状态空间, 若只使用当前时刻的无人机状态作为智能体的观测量, 由于缺乏控制目标的针对性, 以及神经网络在拟合动作价值函数时会存在误差, 会导致训练出的智能体在进行飞行控制时出现稳态误差及训练时间过长的问题。针对存在稳态误差的问题, 有研究引入 PID 中积分器的概念, 在观测状态中加入历史误差信息来提升控制器性能, 将过去时刻的误差进行累积作为补偿后的状态误差, 则输入策略网络中的状态包含了当前的状态误差和过去的累积误差, 如果稳态误差存在, 策略网络就会持续输出动作, 以减小稳态误差, 直到降为零^[13]。

$$s'_e = s'_e + \beta \sum_{i=1}^t \lambda^{t-i} s'_e \quad (19)$$

式中: s'_e 为 t 时刻补偿后的状态误差; s'_e 为 t 时刻的

状态误差; s'_e 为 i 时刻补偿后的状态误差; β 为系数; λ 为权重因子, 用于调节过去时刻误差在累积误差中的比重。

故本文参考 PID 控制器中使用历史跟踪误差和误差变化量来减小稳态误差的理念, 将当前时刻与上一时刻的速度跟踪误差 ΔV 、速度误差变化量 $\Delta \dot{V}$ 、俯仰角误差 $\Delta \theta$ 、俯仰角误差变化量 $\Delta \dot{\theta}$ 、俯仰角速度 q 共计 10 维作为智能体当前时刻的观测量:

$$s_t = [\Delta V_t, \Delta \dot{V}_t, \Delta \theta_t, \Delta \dot{\theta}_t, q_t, \Delta V_{t-1}, \Delta \dot{V}_{t-1}, \Delta \theta_{t-1}, \Delta \dot{\theta}_{t-1}, q_{t-1}]^T \quad (20)$$

对于固定翼无人机的纵向平面, 控制输入为升降舵舵偏角和发动机推力信号, 因此, 智能体的动作输出为升降舵舵偏角 δ_e 和发动机推力信号 δ_T :

$$a_t = [\delta_e, \delta_T]^T \quad (21)$$

通过更细致地设置奖励函数, 可以提高控制器的性能, 减小跟踪时的稳态误差。针对无人机特性和控制目标, 奖励函数根据跟踪误差及跟踪速度进行设置和调整, 同时考虑控制信号的影响:

$$\begin{cases} r_1 = -\omega_v |\Delta V_t| - \omega_{\theta} |\Delta \theta_t| - \omega_q |q_t| \\ r_2 = \omega_1 (|\Delta V_t| < |\Delta V_{t-1}|) + \omega_2 (|\Delta \theta_t| < |\Delta \theta_{t-1}|) + \omega_3 (|q_t| < |q_{t-1}|) \\ r_3 = r_v^+ + r_{\theta}^+ \\ r_4 = -\omega_{\delta_e} |\delta_{e,t-1}| - \omega_{\delta_T} |\delta_{T,t-1}| \\ r_t = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 \end{cases} \quad (22)$$

式中: ω 表示对应无人机变量在达成某种判定后的奖励系数。

即时奖励 r_t 中将所有的跟踪误差 (速度跟踪误差 $|\Delta V_t|$ 、俯仰角跟踪误差 $|\Delta \theta_t|$) 和俯仰角速度 ($|q_t|$) 设为惩罚项, 这些项乘以一定的比例系数构建奖励函数 r_1 , 当无人机状态接近控制目标时, 惩罚项的值逐渐减小直至接近零。

为提高算法的学习效率, 避免探索的过程中难以获得正奖励, 导致学习缓慢甚至无法进行学习的稀疏奖励问题, 同时满足飞行控制器的控制要求, 引入正值激励因子, 当 DDPG 输出的控制策略在控制无人机过程中达到激励因子的判断条件时, 会得到一定的正值奖励, 正值奖励激励智能体更快学习到哪些行为是有益的, 并倾向于更快收敛到最优或接近最优策略。

考虑到控制的快速性, 引入误差变化量及俯仰角速度在飞行过程中的变化情况构建奖励函数 r_2 , 即当前时刻的跟踪误差和俯仰角速度小于上一时刻时, 给出正值奖励, 值分别为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 , 否则, 奖励为 0, 当跟踪误差和俯仰角速度快速变小时, r_2 给出的奖励变大, 从而促使 DDPG 智能体输出的控制信号能使无人机快速接近目标状态。接着, 引

入奖励函数 r_3 , 其中, r_v^+ 为速度正值激励因子, 当速度跟踪误差 ΔV_t 的绝对值在某个范围内时, 给予正值奖励, 否则, 奖励为 0。类似地, r_θ^+ 为俯仰角正值激励因子, 当俯仰角跟踪误差 $\Delta\theta_t$ 的绝对值在某个范围内时, 给予正值奖励, 否则, 奖励为 0。这些奖励激励因子在每个时间步均需要进行判断, 当控制精度越高时, 正值奖励越大, 从而影响智能体改进控制策略。

最后, 引入控制信号构建奖励函数 r_4 , 以求在飞行过程中尽可能降低能量消耗和减小升降舵舵面的偏转幅度。

本文采用全连接前馈多隐层结构神经网络构建 DDPG 神经网络结构: 在 DDPG 算法中, 目标网络与对应的神经网络结构一致, Actor 网络有 5 层, 其输入层包含 10 个神经元, 中间有 3 个全连接的隐藏层, 隐藏层每层都有 64 个神经元, 前 4 层激活函数为线性整流 (ReLU) 函数, 输出层有 2 个神经元, 激活函数为双曲正切 (tanh) 函数, 对该函数进行修改, 使其更适配无人机对象的控制信号数值变化

范围。Critic 网络有 5 层, 其输入层包含 12 个神经元, 输出层有 1 个神经元, 中间有 3 个全连接的隐藏层, 每个隐藏层包含 64 个神经元, 激活函数都为 ReLU 函数。

3 DDPG 控制算法仿真与鲁棒性测试

3.1 智能体训练

基于 MATLAB R2021b/simulink 环境搭建了固定翼无人机纵向非线性模型, 整个固定翼无人机智能飞行控制器的训练过程在一台搭载 i7-10700 CPU 和 NVIDIA Quadro P1000 GPU 的戴尔服务器上进行。

在训练中, 给定的速度指令为 $V_c = 10\text{ m/s}$, 俯仰角指令为 $\theta_c = 2^\circ$, 每个周期内选定一个不稳定状态作为无人机的初始状态, 即在速度为 0.1 m/s 、迎角为 0.01 rad 、航迹角为 0.01 rad 、俯仰角速度为 0 rad/s 附近选取。当 DDPG 算法学习的控制策略能使无人机从不稳定状态达到目标状态并能保持稳定, 则认为策略是优秀的, 其训练参数如表 1 所示。

表 1 DDPG 训练参数
Table 1 DDPG training parameters

Critic 学习率	Actor 学习率	优化器	批数量	经验回放池大小	惯性更新率	折扣系数	单次训练周期/个
0.001	0.000 5	Adam	128	1 000 000	0.001	0.98	1 000

注: 一个单次训练周期为 10 s。

经过多次训练, 并对奖励函数参数进行调整, 最终奖励函数中的参数设置如下: r_1 中的参数设置为 $\omega_v = 1, \omega_\theta = 1, \omega_q = 0.5$ 。俯仰角速度的惩罚因子小于其余两项的原因是避免俯仰角速度优先收敛到 0 时使无人机提前达到非控制目标的某个稳态点。 r_2 中的参数设置为 $\omega_1 = 1.5, \omega_2 = 2, \omega_3 = 3$ 。分别在 1 m/s 、 0.1 m/s 、 0.01 m/s 时分别给出 3、10、25 的正值奖励, 否则, 奖励为 0。类似地, 当俯仰角跟踪误差 $\Delta\theta_t$ 的绝对值在 1° 、 0.1° 、 0.01° 时, 分别给出 5、10、35 的正值奖励, 否则, 奖励为 0。 ω_{δ_c} 和 ω_{δ_r} 的值均取 -0.005 。

为了验证加入的正值激励因子可以有效提高算法的学习效率, 将奖励函数中的激励因子去除, 其余设置与保留激励因子的算法相同, 训练相同的回合数, 进行控制效果对比, 奖励变化如图 3 所示。可以看到, 训练一定回合数后, 奖励曲线基本上收敛。取训练了 600 回合的 2 个智能体分别构建飞行控制器进行仿真测试, 控制结果如图 4 所示。从俯仰角跟踪和速度跟踪任务的表现来看, 加入了激励因子的智能体已经可以有效跟踪俯仰角和速度, 未加入激励因子的智能体并不能有效跟踪

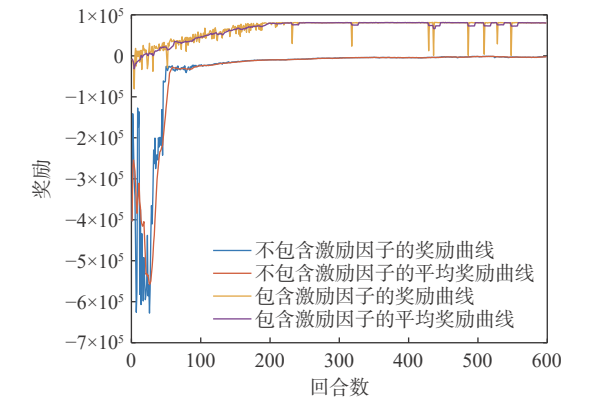


图 3 奖励变化对比曲线

Fig. 3 Comparison of reward variation curves

目标俯仰角, 且速度跟踪振荡较大。可以看出, 激励因子的加入可以有效提高算法的学习效率。

由于 DRL 并不能保证智能体性能可以持续改善, 即可能出现训练次数增加、智能体学习的控制策略控制效果反而变差的情况, 因此, 本文选取在一定训练次数后, 训练效果较好的智能体来构建飞行控制器, 并进行仿真测试。

图 5 为使用 DDPG 智能体和 PID 方法构建的飞行控制器控制效果对比。可以看到, DDPG 控制

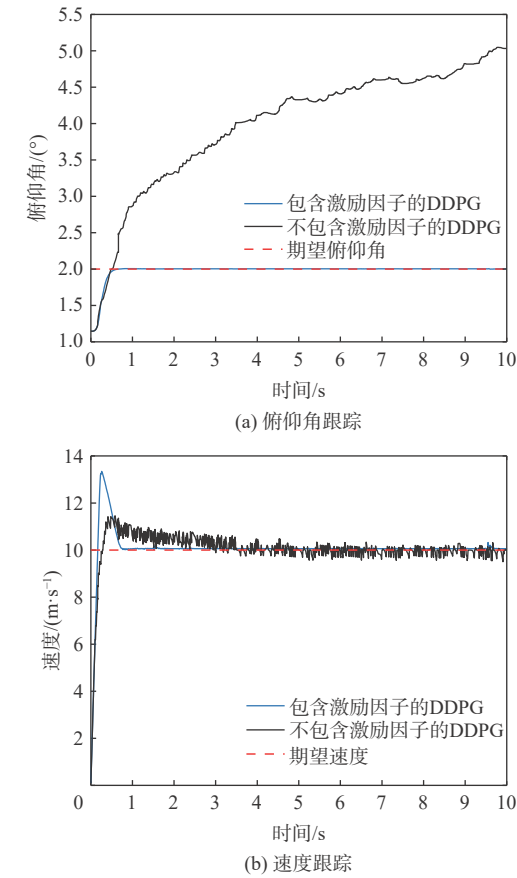


图 4 DDPG 控制结果对比

Fig. 4 Comparison of DDPG control results

的无人机在 0.67 s 达到目标俯仰角, 超调在 0.01° 以内, 稳态误差在 0.000 44° 以内; 而 PID 控制器在 1.86 s 达到目标俯仰角, 稳态误差为 0.000 5°。对于无人机速度跟踪任务, DDPG 控制器在 0.15 s 达到目标速度, 超调为 0.25 m/s, 稳态误差在 0.050 3 m/s 以内; PID 控制器在 0.2 s 达到目标速度, 超调为 0.06 m/s, 稳态误差为 0.003 m/s。从上述仿真结果可以看出, DDPG 控制器的跟踪速度更快, 在俯仰角跟踪任务中的控制精度比 PID 控制器更高。

从图 6 可以看出, DDPG 控制器在完成跟踪任务的同时, 其他状态量也达到了稳定状态。图 7 为 DDPG 控制器输出的控制信号。可以看出, 控制信号最终都趋于收敛, 且在收敛前的波动较小。

为了进一步测试 DRL 飞行控制器的性能, 进行控制目标变化仿真, 改变控制目标, 在 4 s 后将期望俯仰角从 2° 跳变为 3°, 期望速度不变, 与 PID 控制器的对比仿真结果如图 8 所示。

在期望俯仰角仍为 2° 时, 仿真结果与图 5 相同, DDPG 控制器相比于 PID 控制器具备更快的跟踪速度, 在第 4 s 期望俯仰角跳变至 3° 后, DDPG 控制器在期望俯仰角跳变后仍然能进行有效跟踪, 无超调, 且稳态误差仅为 0.000 15°, 而 PID 控制器在期望俯仰角跳变后, 出现了 0.093 5° 的超调, 且调节

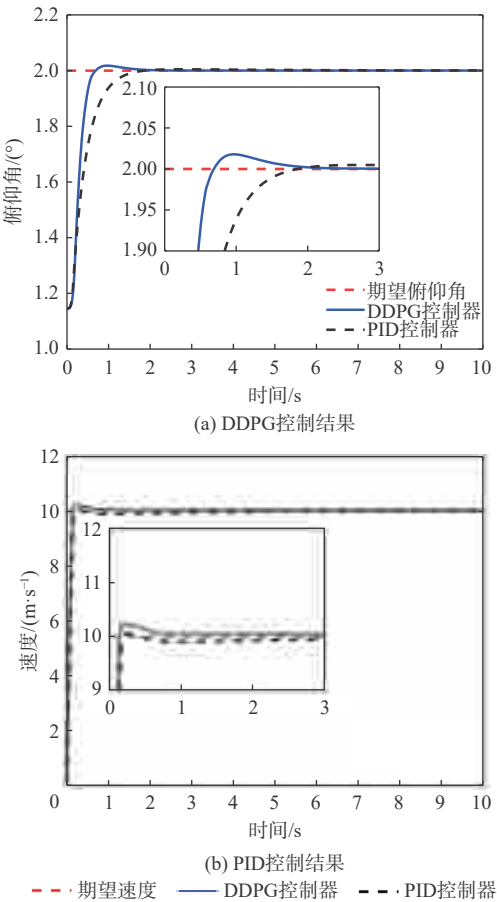


图 5 DDPG 与 PID 控制结果对比

Fig. 5 Comparison of control results between DDPG and PID

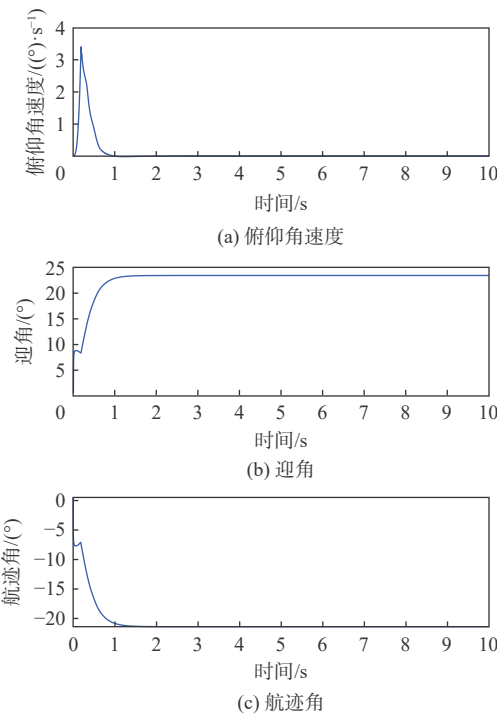


图 6 DDPG 控制器控制结果

Fig. 6 Control results of DDPG controller

时间较长, 未能有效跟踪期望俯仰角。可以看出, DDPG 控制器在俯仰角跟踪任务的表现优于 PID

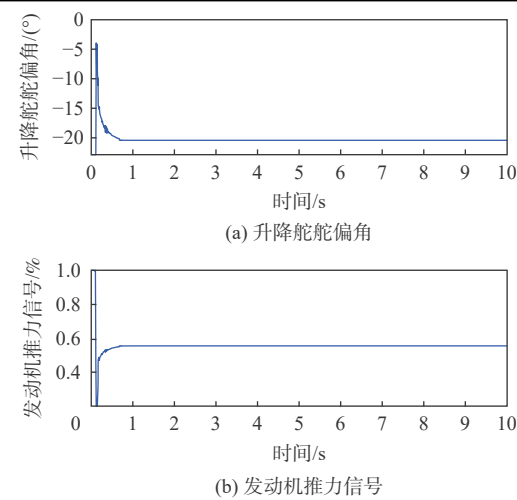


图 7 DDPG 输出的控制信号
Fig. 7 Control signal output of DDPG

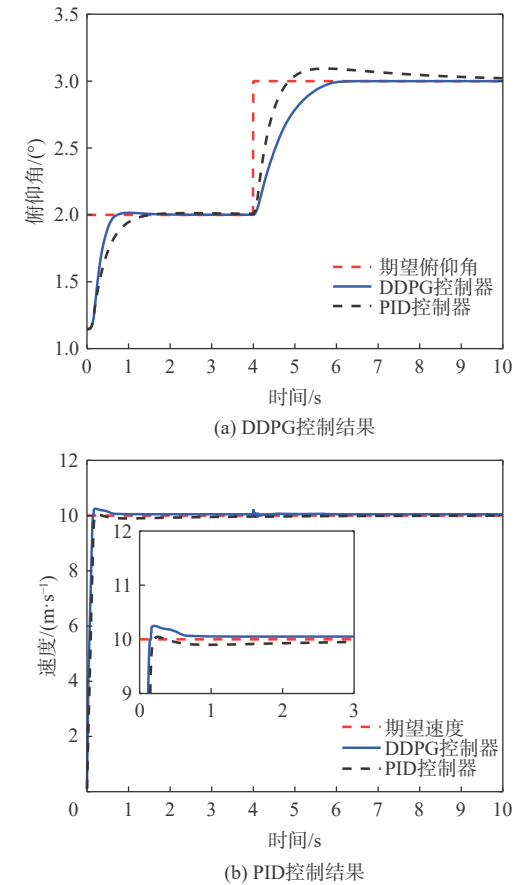


图 8 变期望俯仰角后 DDPG 与 PID 控制结果对比
Fig. 8 Comparison of DDPG and PID control results after changing desired pitch angle

控制器。在速度跟踪任务中,DDPG 控制器相比于 PID 控制器,跟踪速度更快,在期望俯仰角跳变后虽然出现轻微扰动,但能快速稳定到期望速度。

图 9 为 DDPG 控制器控制下无人机的其他状态量变化曲线。可以看到,其他状态量在仿真初始阶段稍微波动后达到稳态,在目标状态出现跳变

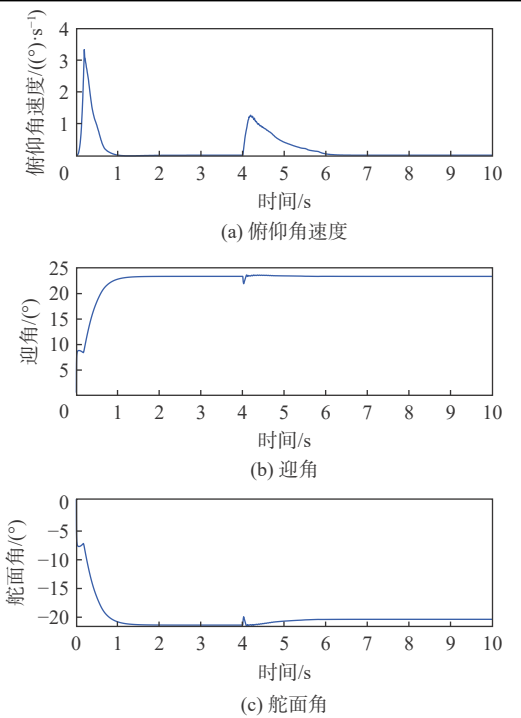


图 9 变期望俯仰角的 DDPG 控制结果
Fig. 9 DDPG control results for changing desired pitch angle

后,其他状态也能在调整后重新收敛到稳定状态。

3.2 参数不确定性测试

由于无人机模型中的参数不确定性影响无人机飞行任务的执行,在训练过程中未考虑模型不确定性的情况下,对质量、转动惯量、大气密度及气动参数分别引入一定比例的摄动,摄动比例如表 2 所示。测试了 DDPG 控制器的鲁棒性,仿真结果如图 10 所示,在无人机模型参数大比例摄动的情况下,DDPG 控制器在跟踪速度和俯仰角的超调都比 PID 控制器小,表明在当前情况下,DDPG 控制器性能优于 PID 控制器。

表 2 控制器对比仿真使用的参数不确定性

Table 2 Parameters uncertainties used for controllers comparison simulation	
参数	不确定性/%
m	25
I_y	25
ρ	25
$C_{L_{\alpha}}$	25
C_{L_0}	10
$C_{L_{\alpha^2}}$	10
C_{m_0}	-20
$C_{m_{\alpha}}$	-20
$C_{m_{\alpha^2}}$	-20

如图 11 所示,在不同比例的参数摄动情况下,DDPG 控制器仍然能够完成飞行任务,并且仍然保

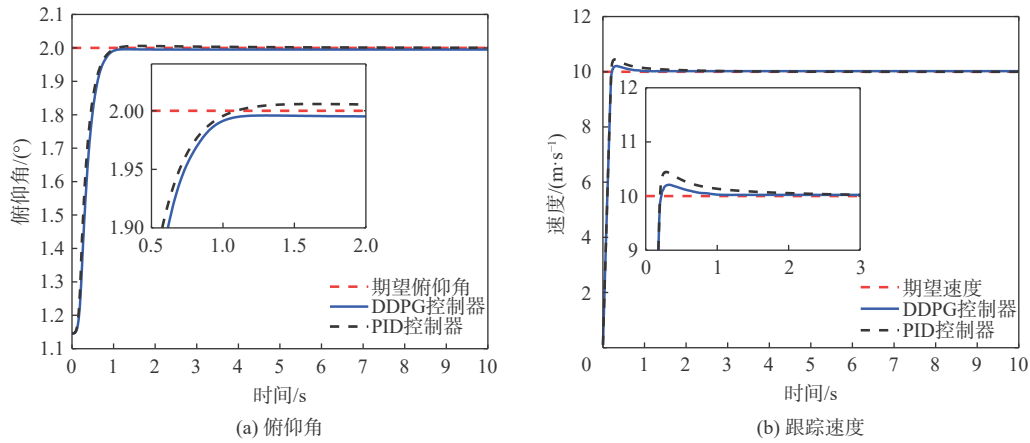


图 10 DDPG 和 PID 在模型参数摄动下的控制结果对比

Fig. 10 Comparison of control results between DDPG and PID controllers under perturbed model parameters

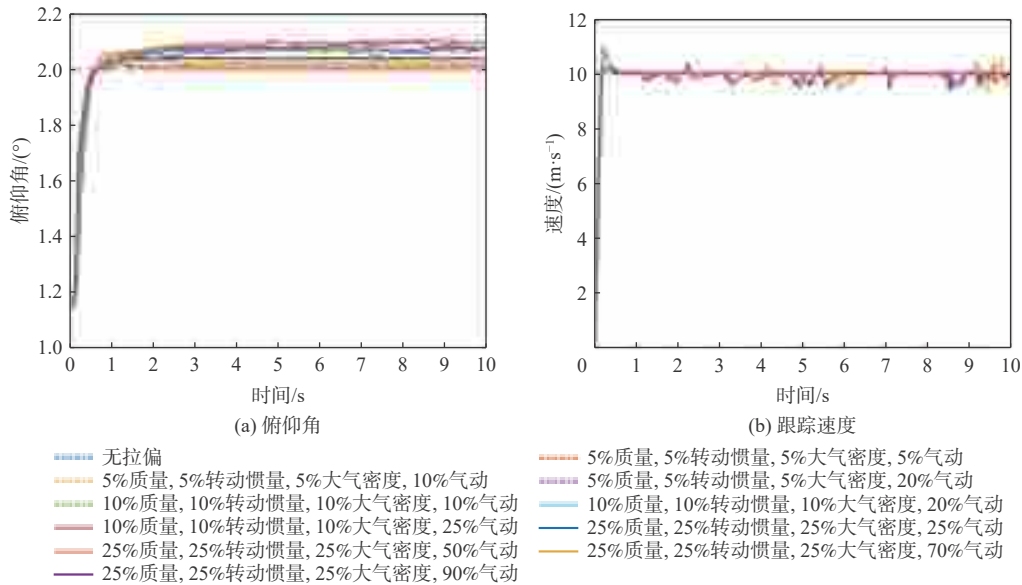


图 11 DDPG 在模型参数摄动的控制结果

Fig. 11 Control results of DDPG with model parameter perturbation

持一定的控制精度。这表明训练出的控制器在面对一定范围内的模型参数变化时,具备一定的鲁棒性。继续拉大摄动比例以测试该控制器的极限性能,当质量、转动惯量和大气密度拉偏 25%、气动参数拉偏 50% 及以上时,控制性能开始显著下降,虽然仍能保持在跟踪目标附近,但已经开始出现较大的稳态误差和振荡。

4 结 论

本文使用 DDPG 算法训练智能体,进行固定翼无人机纵向控制器设计,实现了从无人机状态到控制面的端到端控制。智能体训练和仿真结果表明:

1) 相对于将当前时刻的无人机状态作为智能体的观测状态,将多时刻的跟踪误差信息作为输入能有效减小稳态误差。

2) 针对控制目标及控制要求,根据跟踪误差、跟踪速度及无人机控制信号对奖励函数进行细致

地设置可以在提高智能体学习的效率的同时,使智能体学习到更优秀的控制策略。

3) 作为无模型的 DRL 算法,DDPG 智能体学习到的控制策略在完成训练的飞行任务时,不仅具备比 PID 控制器更快的跟踪速度,还能在控制目标变化和引入模型参数不确定性的情况下完成飞行任务,且控制性能优于 PID 控制器,体现了 DDPG 控制器具有一定的泛化能力和鲁棒性。

参考文献 (References)

[1] GHAMARI M, RANGEL P, MEHRUBEOGLU M, et al. Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: a review[J]. IEEE Access, 2022, 10: 102492-102531.

[2] 符文星,郭行,闫杰. 智能无人飞行器技术发展趋势综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(4): 31-37.

FU W X, GUO H, YAN J. Overview on the technology development trend of intelligent unmanned aerial vehicle[J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2(4): 31-37(in Chinese).

[3] SHAN Y Q, WANG S, KONVISAROVA A, et al. Attitude control of flying wing UAV based on advanced ADRC[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 677(5): 137-142.

[4] YU Z Q, ZHANG Y M, JIANG B. PID-type fault-tolerant prescribed performance control of fixed-wing UAV[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 32(5): 1053-1061.

[5] ZHAO X C, YUAN M N, CHENG P Y, et al. Robust H_∞ /S-plane controller of longitudinal control for UAVs[J]. IEEE Access, 2019, 7: 91367-91374.

[6] ZHENG F Y, ZHEN Z Y, GONG H J. Observer-based backstepping longitudinal control for carrier-based UAV with actuator faults[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(2): 322-377.

[7] SEOKWON L, JIHOON L, SOMANG L, et al. Sliding mode guidance and control for UAV carrier landing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(2): 951-966.

[8] ZHANG J L, ZHANG P, YAN J G. Distributed adaptive finite-time compensation control for UAV swarm with uncertain disturbances [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021, 68(2): 829-841.

[9] YU K Y, JIN K, DENG X Y. Review of deep reinforcement learning[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 5th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 41-48.

[10] 甄岩, 袁健全, 池庆玺, 等. 深度强化学习方法在飞行器控制中的应用研究[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 112-118.

 ZHEN Y, YUAN J Q, CHI Q X, et al. Research on application of deep reinforcement learning method in aircraft control[J]. Tactical Missile Technology, 2020(4): 112-118(in Chinese).

[11] 程林, 蒋方华, 李俊峰. 深度学习在飞行器动力学与控制中的应用研究综述[J]. 力学与实践, 2020, 42(3): 267-276.

 CHENG L, JIANG F H, LI J F. A review on the applications of deep learning in aircraft dynamics and control[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(3): 267-276(in Chinese).

[12] PI C H, HU K C, CHENG S, et al. Low-level autonomous control and tracking of quadrotor using reinforcement learning[J]. Control Engineering Practice, 2020, 95: 104222.

[13] 孙丹, 高东, 郑建华, 等. 引入积分补偿的四旋翼确定性策略梯度控制器[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(1): 255-261.

 SUN D, GAO D, ZHENG J H, et al. Deterministic policy gradient controller with integral compensator for quadrotor[J]. Computer Engineering and Design, 2023, 44(1): 255-261(in Chinese).

[14] YOO J, JANG D, KIM H J, et al. Hybrid reinforcement learning control for a micro quadrotor flight[J]. IEEE Control Systems Letters, 2021, 5(2): 505-510.

[15] HAN H R, CHENG J, XI Z L, et al. Cascade flight control of quadrotors based on deep reinforcement learning[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 11134-11141.

[16] 梁吉, 王立松, 黄昱洲, 等. 基于深度强化学习的四旋翼无人机自主控制方法[J]. 计算机科学, 2023, 50(增刊 2): 13-19.

 LIANG J, WANG L S, HUANG Y Z, et al. Autonomous control method of quadrotor UAV based on deep reinforcement learning[J]. Computer Science, 2023, 50(Sup 2): 13-19(in Chinese).

[17] 孙丹, 高东, 郑建华, 等. 示教知识辅助的无人机强化学习控制算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(6): 1424-1433.

 SUN D, GAO D, ZHENG J H, et al. UAV reinforcement learning control algorithm with demonstrations[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(6): 1424-1433(in Chinese).

[18] 张经伦, 杨希祥, 邓小龙, 等. 基于深度强化学习的平流层浮空器高度控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 2062-2070.

 ZHANG J L, YANG X X, DENG X L, et al. Altitude control of stratospheric aerostat based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 2062-2070(in Chinese).

[19] BØHN E, COATES E M, REINHARDT D, et al. Data-efficient deep reinforcement learning for attitude control of fixed-wing UAVs: field experiments[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023, 35(3): 3168-3180.

[20] BOHN E, COATES E M, MOE S, et al. Deep reinforcement learning attitude control of fixed-wing UAVs using proximal policy optimization[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Piscataway: IEEE Press, 2019: 523-533.

[21] 章胜, 杜昕, 肖娟, 等. 基于深度强化学习的固定翼飞行器六自由度飞行智能控制[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(2): 179-188.

 ZHANG S, DU X, XIAO J, et al. Fixed-wing aircraft 6-DOF flight control based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(2): 179-188(in Chinese).

[22] BEARD R W, MCLAIN T W. Small unmanned aircraft: theory and practice[M]. Princeton: Princeton University Press, 2012: 43-52.

Longitudinal control of fixed-wing UAV based on deep reinforcement learning

HE Haiyang, ZHAO Zhengeng*, KONG Fei

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: As a typical nonlinear system, the dynamic characteristics of a fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV) become more and more complex. Traditional control methods are mainly designed based on model and experience, and lack adaptability to complex environments and tasks. Based on the deep deterministic policy gradient (DDPG) algorithm of multi-dimensional continuous state input and multi-dimensional continuous action output, a longitudinal flight controller of a fixed-wing UAV was designed. The speed, pitch angle tracking errors, and related quantities of multiple moments were taken as the input of the controller, and the output was the elevator deflection and throttle setting signals. To improve the learning efficiency of the algorithm and mitigate the impact of sparse rewards on learning, the reward function introduced positive reward incentives in addition to the dense penalty for tracking errors. These positive rewards were given when the tracking error fell within a certain range and when the agent quickly reached the tracking target. Ultimately, end-to-end control from the longitudinal state of the UAV to the control surface was achieved, and under various control targets and model parameter perturbations, simulations were performed to compare the proportional-integral-derivative (PID) controller with a deep reinforcement learning-based control system. According to the simulation results, the deep reinforcement learning (DRL)-based control system may accomplish control goals and show some degree of robustness and generalization, with control performance sometimes outperforming the PID controller.

Keywords: deep deterministic policy gradient; fixed-wing UAV; longitudinal control; model uncertainties; sparse reward

Received: 2024-02-01; Accepted: 2024-03-29; Published Online: 2024-04-28 10:27

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240426.1301.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(62233009,62003161)

* Corresponding author. E-mail: zhaozhengen@nuaa.edu.cn

某型航空发动机主燃油控制系统燃油压力脉动研究

杨艺琨¹, 马静^{1,*}, 杨军杰²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072; 2. 中国航发西安动力控制科技有限公司, 西安 710077)

摘 要: 针对某型航空发动机主燃油控制系统出口压力脉动现象, 系统分析了液压系统脉动原因, 并列出了某型航空发动机主燃油控制系统压力脉动故障树, 完成了故障定位。通过流场仿真手段重点研究了故障工况下不规则开口回油活门的稳态液动力及相关参数, 指出理论公式对不规则开口活门稳态液动力计算的不适用性及出口射流角的变化; 在稳态点采用小偏离线性化建立等压差模块的传递函数和 Simulink 仿真模型, 对其固有频率和主要影响因素进行研究。研究表明: 燃油压力脉动是由于回油活门在外部激励作用下产生了共振, 而影响回油活门固有频率的关键因素为阀芯所受稳态液动力, 通过对活门不规则开口形状进行研究, 给出了故障改进措施, 为系统的优化设计提供了理论支持。

关 键 词: 主燃油控制系统; 压力脉动; 流场仿真; 固有频率; 故障改进

中图分类号: V271.4; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1316-09

航空发动机工作环境苛刻、工况调节范围大、性能指标要求高, 主燃油控制系统作为发动机自动控制的核心部件, 其动态性能直接影响发动机的动态特性, 因此, 对主燃油控制系统的设计提出了很高的要求^[1-2]。主燃油控制系统作为液压控制系统, 对燃油压力的稳定和精确控制有重大影响, 而压力脉动是造成液压系统振动和噪声的根源之一, 这不仅使各参数的监测变得困难, 而且降低了系统工作的可靠性; 压力脉动是一种周期性的压力波动, 往往是系统中流量有变化时, 经过阻抗作用就会产生对应的压力脉动^[3]。研究燃油压力脉动的产生原因和影响因素, 对于提升主燃油控制系统性能和可靠性具有重要意义。

目前, 对于液压系统的压力脉动研究工作主要集中在2个方面: ①从压力脉动根源(各类泵、阀门和管道等)着手, 通过优化结构降低脉动^[4]; ②从影响脉动的外部因素入手, 在系统中添加相应的吸收装置, 减弱脉动影响^[5]。李惟祥^[6]从控制

理论和阀口结构上深入研究了液压锥阀, 发现由于阀口形状发生变化, 导致稳态液动力反向, 加剧了阀芯振动。鲍文等^[7]针对某涡喷发动机燃油压力高频脉动现象, 建立了供油调节系统的动态非线性数学模型, 指出了脉动原因, 并提出了解决措施。李秋莲^[8]对综合实验台的振动现象进行了分析排除, 指出阀芯阻尼结构变化会使溢流阀静特性变差而产生振动。阎耀保等^[9]以某飞行器用小尺寸减压阀为研究对象, 发现整机无振动时, 调压弹簧刚度越大, 阀共振频率越高; 压力感受腔容积越大, 阀共振频率越低。杜润等^[10]研究了液压系统脉动衰减器多种形状参数对系统压力脉动的影响。刘丽等^[11]分析了某装置管路振动现象, 提出了在阀门后流道增加隔板的措施, 结果表明, 该措施减振效果明显。

综上所述, 在液压系统压力脉动研究工作中, 研究的大多是系统中单一液压元件对压力脉动的影响, 而不是以完整液压系统为研究对象; 并且现

收稿日期: 2024-02-02; 录用日期: 2024-05-09; 网络出版时间: 2024-06-29 15:38

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240628.0923.002

基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-DB-V-001-001)

*通信作者. E-mail: 15291404812@163.com

引用格式: 杨艺琨, 马静, 杨军杰. 某型航空发动机主燃油控制系统燃油压力脉动研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1316-1324. YANG Y K, MA J, YANG J J. Study on fuel pressure pulsation of main fuel control system of an aircraft engine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1316-1324 (in Chinese).

有研究未全面考虑系统中压力脉动的影响因素, 因此, 应对这些影响因素进行更加全面深入的分析。本文针对某型航空发动机的主燃油控制系统出口油液压力脉动现象, 通过故障树系统分析了脉动现象的产生原因, 并对关键活门进行流场仿真, 确定了稳态液动力相关参数, 通过小偏离线性化建立故障模块的 Simulink 仿真模型, 对某稳态点下的模块固有频率进行理论计算, 并对其主要影响因素进行研究, 同时结合实验结果对故障原因进行对比验证, 给出了故障改进方案, 为主燃油控制系统的优化设计提供理论依据。

1 主燃油控制系统工作原理

某型航空发动机主燃油控制系统的工作原理框图如图 1 所示, 其中, Q_p 为齿轮泵出口流量、 n 为经减速齿轮换算后的齿轮泵转速、 P_c 为回油活门弹

簧腔油压、 Q_j 为计量活门后流量、 X_j 为计量活门阀芯位移、 U 为位移传感器输出的电信号。其中, 等差活门和回油活门联合工作保证计量活门前后压差基本不变, 此时, 通过计量活门的燃油流量仅与计量活门的打开面积相关。工作过程中, 电子控制器接收计量活门阀芯位移交换反馈信号, 并与输入信号相比较, 通过比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制器构成闭环控制, 调节电液伺服阀的流量, 进而改变计量活门左右两腔压力, 使得计量活门过流面积发生变化, 实现燃油计量。同时主燃油控制系统还具备根据电子控制器指令实现停车等功能, 控制器发出停车信号, 使停车电磁阀接通, 齿轮泵后高压油经停车活门流向关断活门弹簧腔, 使关断活门向左移动, 切断向发动机燃烧室的供油。将主燃油控制系统划分为等压差模块、主燃油计量模块及停车控制模块。

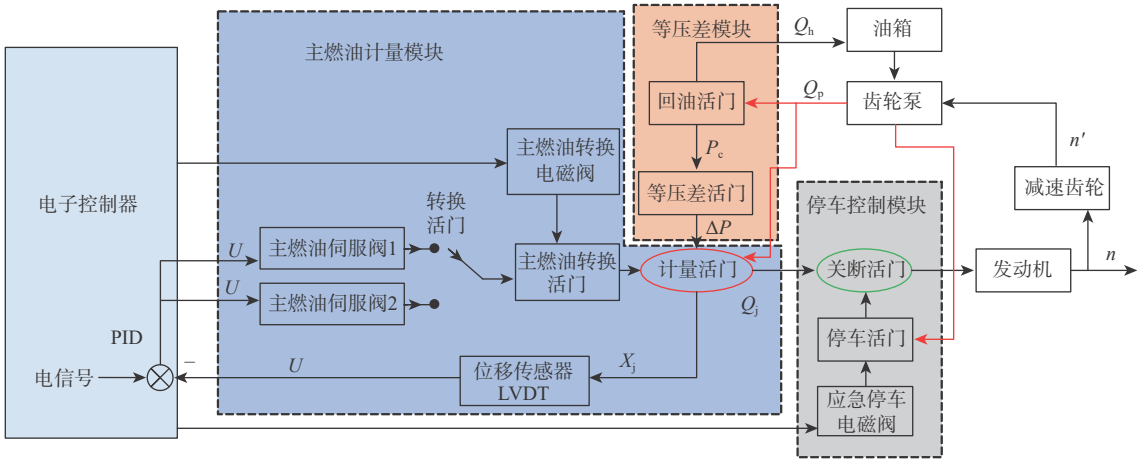


图 1 某型主燃油控制系统框图
Fig. 1 Block diagram of a certain type of main fuel control system

2 压力脉动故障研究

2.1 故障描述

某型航空发动机主燃油控制系统在使用过程中出现出口燃油脉动现象。地面试车中, 当系统计量流量在 3 000 kg/h 附近时, 关断活门喷嘴前压力出现了正弦脉动现象, 压力脉动频率为 25 Hz, 测点压力采集信号如图 2 所示, 初步分析与控制回路频率特性相关。

2.2 液压系统脉动产生机理

压力脉动是一种周期性的压力波动, 当液压系统中流量有变化时, 遇到系统负载阻抗后就会导致系统压力出现波动, 由此可知, 流量脉动引起了压力脉动。

由于液压泵容积的工作特性或元件的缺陷, 压力流体总是以一定的振荡输出。实际工作中, 液压

系统自液压泵出口开始输出的流量 Q 就不是绝对稳定。而当脉动流体的压力振荡频率与元件或系统的固有频率一致或接近时, 会使系统无法正常工作, 出现振幅不稳定的共振现象, 严重时可破坏液压元件。

常见的齿轮泵流量脉动包括几何流量脉动、压缩流量脉动和内泄漏流量脉动, 其中, 几何流量脉



图 2 测点采集压力信号
Fig. 2 Pressure signal collection at measurement points

动是齿轮泵流量脉动的核心组成部分。

而常见的液压阀门在不同的应用场合中,工作条件与结构形式有很大差别,其振动产生的机理也有所不同,主要可以分为外激振动与流激振动2大类。其中,不稳定流动和流体弹性不稳定导致的流激振动较为常见,不稳定流动导致的振动是指流体力随着流动形式变化而变化引发的结构振动响应。流体弹性不稳定导致的振动是指由于流体力、弹性力和惯性力的耦合作用导致弹性结构发生振幅不衰减的自激振动。在航空领域中,流体弹性不稳定导致的振动又称为颤振。

2.3 压力脉动故障定位

结合液压系统脉动机理与主燃油控制系统工作原理,列出燃油系统出口压力脉动故障树,如图3

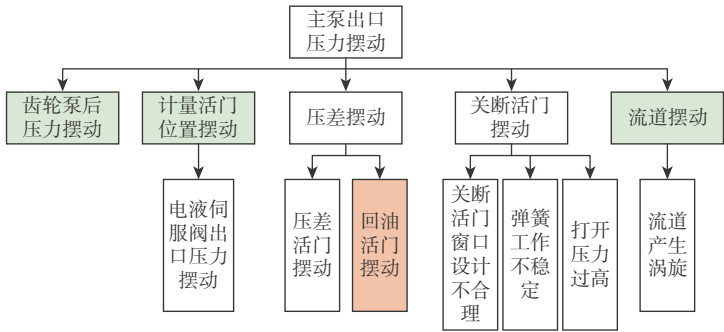


图3 压力脉动故障树
Fig. 3 Pressure pulsation fault tree

3 脉动研究

在主燃油控制系统建模中,引入以下假设:①忽略温度变化引起的流体黏度变化;②忽略管壁的弹性及管路与阀门的振动;③忽略燃油泄漏。

3.1 等压差模块模型建立

等压差模块原理如图4所示,等压差活门无弹簧端作用于计量活门前油压 P_s ,弹簧端作用于计量活门后油压 P_L 并产生弹簧力,根据两端压差进行移

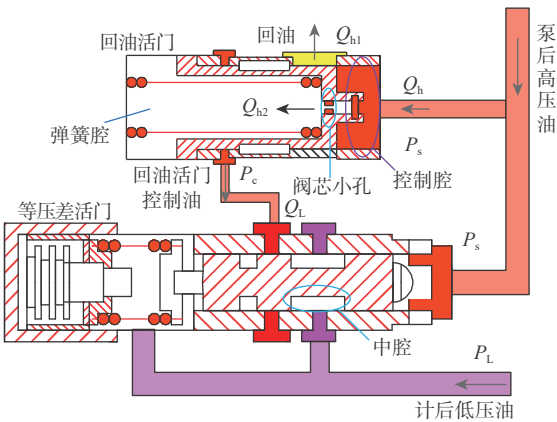


图4 等压差模块原理
Fig. 4 Schematic diagram of equal pressure differential module

所示。

其中,根据实验中线性可变差动变压器(linear variable differential transformer, LVDT)反馈数据的稳定性,可以直接排除“计量活门位置摆动”项;由流道仿真结果,可以排除计量活门到关断活门流道产生涡旋而引起的“流道摆动”项;由于齿轮泵工作原理引起的供油脉动属于高频振动,其中,齿轮泵的供油脉动频率 f_Q 与转速正相关:

$$f_Q = \frac{Zn}{60} \tag{1}$$

式中: Z 、 n 分别为齿数和转速, r/min; 代入实验数据计算可得此时流量脉动频率为1 102 Hz,可排除“齿轮泵后压力摆动”。之后,从故障树出发,对“压差摆动”和“关断活门摆动”进行分析。

动,同时改变计后油通往回油活门弹簧腔的油压 P_c ,使回油活门移动,改变泵后高压油通往回油活门中腔阀口面积,以此保持计量活门前后压差稳定。

3.1.1 等压差模块数学模型

由回油活门工作原理,结合力平衡与流量平衡方程可得回油活门以回油流量为输出,两侧压差为输入的传递函数^[12]为

$$G(s) = \frac{Q_h(s)}{P_s(s) - P_c(s)} = \frac{A_h(A_h s + n_{h1})}{M_h s^2 + B_h s + K_h} \tag{2}$$

式中: M_h 为阀芯和弹簧等效质量及阀芯内当量质量之和; B_h 为黏性阻尼系数; A_h 为活门阀芯截面积; n_{h1} 为位移流量系数; K_h 为等效弹簧系数, $K_h = k_{h1} + m_{hf}$, $m_{hf} = \frac{\partial F_{hw}}{\partial x_h} \Big|_q = 2C_d C_v A'_h (p_{s0} - p_0) \cos \theta$, F_{hw} 为稳态液动力, m_{hf} 为稳态液动力等效系数; k_{h1} 为回油活门弹簧刚度, x_h 为回油活门位移, C_d 为流量系数, C_v 为速度系数, P_{s0} 为计前压力稳态值, P_0 回油压力稳态值, θ 为射流角。 Q_h 为回油流量。

而等差活门作为等压差模块的敏感元件,在模块分析中更关注的是活门中腔流量随阀芯位移的变化,由图4可得等差活门中腔流量连续方程为

$$Q_{h2} = Q_L = C_d A_L \sqrt{\frac{2(P_c - P_L)}{\rho}} \quad (3)$$

式中: Q_{h2} 为回油活门中腔小孔流量; C_d 为流量系数; A_L 为等差活门的中间阀口流通面积; ρ 为流体密度; Q_L 为计后流量。

对式(3)在平衡工作点处进行小偏线性化, 并进行拉氏变换可得

$$Q_L(s) = n_{d1} X_d(s) + n_{d2}(P_c(s) - P_L(s)) \quad (4)$$

$$\begin{cases} n_{d1} = \left. \frac{\partial Q_L}{\partial x_{d1}} \right|_q = C_d A'_{L0} \sqrt{\frac{2(P_{c0} - P_{L0})}{\rho}} \\ n_{d2} = \left. \frac{\partial Q_L}{\partial (P_c - P_{L1})} \right|_q = \frac{1}{2} C_d A_{L0} \sqrt{\frac{2}{\rho(P_c - P_L)}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: n_d 为位移流量系数; A_{L0} 为稳态工作点的阀口流通面积; A'_{L0} 为阀口流通面积对 x_d 导数在稳态工作点的值; P_{c0} 为回油活门弹簧腔压力稳态值; P_{L0} 为计后压力稳态值。

等压差活门阀芯力平衡方程拉氏形式为

$$P_s(s)A_d = P_L(s)A_d + (M_d s^2 + B_d s + K_d)X_d(s) \quad (6)$$

$$G_d(s) = \frac{Q_h(s)}{P_s(s) - P_L(s)} = \frac{1}{n_{d2}} \frac{A_d n_{d1} A_h (A_h s + n_{h1}) + A_h (A_h s + n_{h1}) (M_d s^2 + B_d s + K_d)}{\left(1 + \frac{n_{h3}}{n_{d2}}\right) (M_d s^2 + B_d s + K_d) (M_h s^2 + B_h s + K_h)} \quad (7)$$

3.1.2 稳态液动力

液体流经阀口时, 流动方向和流速的变化会造成液体动量的改变, 因此, 阀芯上会受到附加的作用力, 该作用力称为液动力^[13]。液动力分为稳态液动力和瞬态液动力 2 种, 稳态液动力指阀芯停止动作时, 通过阀口的油液由于流动速度和方向的改变带来的动量变化, 从而附加作用在阀芯上的力, 如图 6 所示。瞬态液动力指阀芯移动过程中, 油液流动时因动量改变而作用在阀芯上的力。与稳态液动力相比, 瞬态液动力数值相对较小, 仅在研究精密液压元件时需要考虑瞬态液动力的影响^[14]。

液动力是流体对阀芯的作用力, 其方向应与流

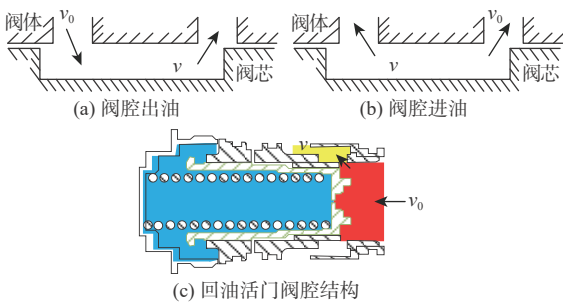


图 6 稳态液动力分析示意图

Fig. 6 Schematic diagram of steady-state hydrodynamic analysis

式中: A_d 为等压差活门阀芯面积; M_d 为等效阀芯质量; B_d 为等压差活门黏性摩擦系数; K_d 为等效弹簧系数。

模块稳态工作时流经回油活门小孔的流量与等差活门中腔流量相等, 由此确定等压差模块的动态特性, 得出其系统框图, 如图 5 所示。

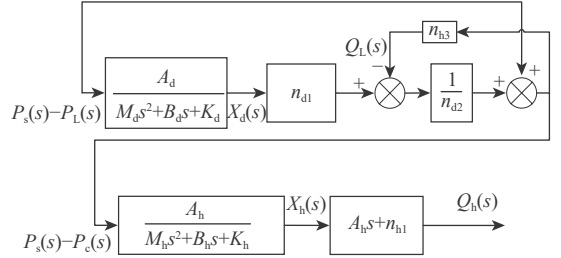


图 5 等压差模块系统框图

Fig. 5 System block diagram of equal pressure differential module

由此可得等压差模块以计前计后压差为输入、回油流量为输出的传递函数为

体自身动量改变的方向相反。图 6(a) 和图 6(b) 对应的液动力理论计算公式分别为

$$F_{sfa} = -\frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{\rho Q v \Delta t \cos \theta - \rho Q v_0 \Delta t \cos \theta_0}{\Delta t} \quad (8)$$

$$F_{sfb} = -\frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{\rho Q v_0 \Delta t \cos \theta_0 - \rho Q v \Delta t \cos \theta}{\Delta t} \quad (9)$$

式中: ΔI 为流体动量改变量; Q 为单位时间通过阀口的流量; Δt 为时间; v_0 为上下游流速; θ_0 为上下游射流角, 即流束轴线与阀芯轴线夹角; v 为阀口处流速; θ 为阀口处射流角, 一般为 69° 。

在流量稳定的情况下, 通常阀口处的流速远大于上下游流速, 因此, 关于 v_0 的流体动量可忽略不计, 同时考虑流速方向, 可知, 滑阀稳态液动力的方向始终朝向阀口关闭的方向, 稳态液动力计算公式可整合为

$$F_{sf} = \rho Q v \cos \theta \quad (10)$$

$$\begin{cases} v = C_v \sqrt{2\Delta p / \rho} \\ Q = C_d A \sqrt{2\Delta p / \rho} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)可得

$$F_{sf} = 2C_d C_v \omega x \Delta p \cos \theta \quad (12)$$

式中: C_v 为速度系数, 一般取 $0.95\sim 0.98$; C_d 为流量系数, 一般取 $0.65\sim 0.75$; Δp 为进出口压差; ω 为阀口面积梯度; x 为阀芯位移; A 为阀口流通面积, $A = \omega x$ 。

3.1.3 稳态液动力仿真研究

对于规则开口滑阀, 可采用经验公式式 (12) 对稳态液动力进行理论计算, 但本文活门开口均为不规则结构, 其中, 回油活门和关断活门三维结构剖图如图 7 所示, 其中, Q_w 为通往计量活门的燃油流量, Q_{gd} 为通往关断活门的燃油流量, Q_{pl} 为通往喷嘴的燃油流量。

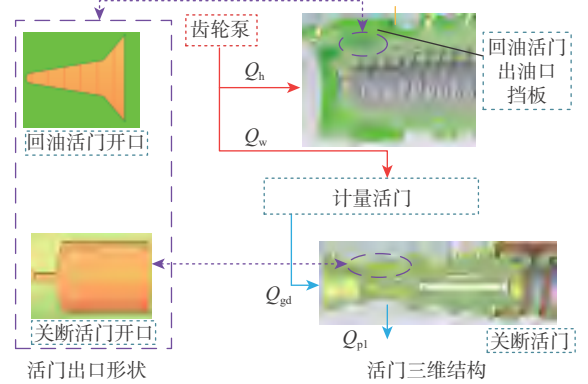


图 7 活门三维结构及出口形状

Fig. 7 Three dimensional structure and outlet shape of the valve

考虑到活门结构对射流角的影响, 同时为对活门所受稳态液动力进行定量分析, 通过流场仿真对稳态液动力进行分析计算。

1) 仿真条件

通过流场仿真软件建立回油活门的流体仿真模型, 并完成网格划分。结合图 7 回油活门结构与稳态液动力产生机理可知, 回油活门阀芯稳态液动力作用于活门非弹簧腔, 且作用力方向与活门开口打开方向相反, 由此可对回油活门流场仿真结构进行简化。图 8 为简化结构的回油活门内流道识别及网格划分结果。仿真中设定阀为理想滑阀, 壁面无滑移; 介质为液压油, 为不可压缩黏性牛顿流体, 定常流动, 无热传导, 密度为 780 kg/m^3 , 动力黏度为 $0.001\ 107\ 6\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

在流体机械的仿真模拟中使用最为广泛的湍流模型是 RNG $k-\epsilon$ 、Realizable $k-\epsilon$ 、SST $k-\omega$ 模型, 这些模型是由 Jones 与 Launder 提出的标准模型 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 模型发展而来的^[15]。与其他湍流模型相比, Realizable $k-\epsilon$ 模型在计算求解复杂漩涡和旋转时适用性更佳, 因此, 本文采用非定常流动, Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型选择二阶迎风格式进行离散化, 控制方程采取 couple, 选择压力入口及压力出口对回油活门流场进行仿真计算。

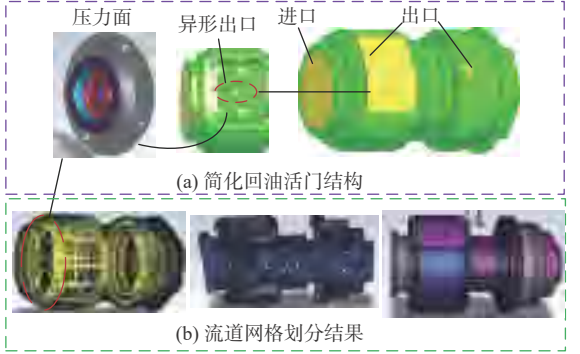


图 8 回油活门内流道网格划分

Fig. 8 Grid division of the flow channel inside the oil return valve

2) 仿真结果

对回油活门不同稳态点下的流场模型进行仿真, 同时, 结合仿真软件提供的受力面压力积分^[15]与阀芯受力稳态方程计算各稳态下的稳态液动力, 其中, 仿真工况为齿轮泵转速分别为 $5\ 510\text{ r/min}$ 和 $5\ 275\text{ r/min}$ 时, 计量流量为 $2\ 000\text{ kg/h}$ 、 $2\ 500\text{ kg/h}$ 、 $3\ 000\text{ kg/h}$ 、 $3\ 500\text{ kg/h}$ 和 $4\ 000\text{ kg/h}$ 下的回油活门状态。将仿真计算结果与理论计算结果 (式 (12)) 对比, 如图 9(a) 所示。图 9(b) 为对回油活门各开度下

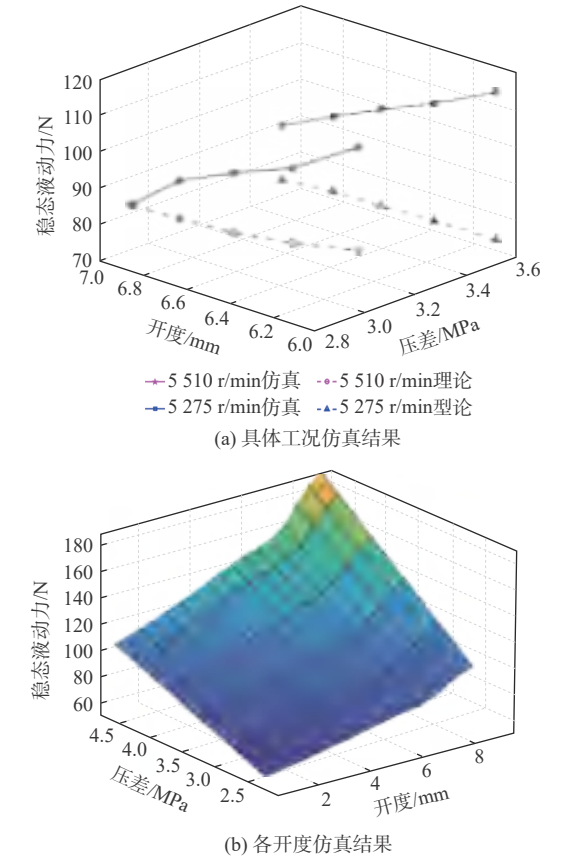


图 9 回油活门稳态液动力计算结果

Fig. 9 Steady state hydrodynamic calculation results of the return oil valve

的稳态液动力仿真结果, 将具体工况仿真结果与各开度仿真结果对比, 可见, 两者仿真趋势相同, 稳态液动力随压差的增大而增大, 随开度的增大而增大。

由图 9(a) 可见, 理论计算与实际仿真结果趋势不同, 结合式 (12) 进行分析: 流量系数和速度系数变化不大, 在不同工况下, 随着流量增加, 回油活门开度减小, 进出口压差增大。在理论计算中认为射流角不变, 会导致理论计算值随开度减小而减小。从上述对比可见, 在回油活门不同工况下的出口射流角应是变化的。对上述仿真数据进一步处理可得不同工况下射流角与流量系数的计算结果, 如表 1 所示, 可见射流角变化较大。

表 1 各工况下的回油活门仿真数据计算
Table 1 Simulation data calculation of return oil valve under various operating conditions

计量流量/ (kg·h ⁻¹)	计前压力/ MPa	活门开度/ mm	射流角/(°)	流量系数
2 000	3.315	7.1	61.71	0.758
2 500	3.389	7.2	62.276	0.749 1
3 000	3.495	7	60.53	0.749 3
3 500	3.596	6.8	59.7	0.781 4
4 000	3.771	6.65	58.71	0.782 2

图 10 为不同稳态点下回油活门内部流场的压力速度云图。可见不同稳态点下该型回油活门射流角的变化, 不可直接用式 (12) 计算液动力数值。

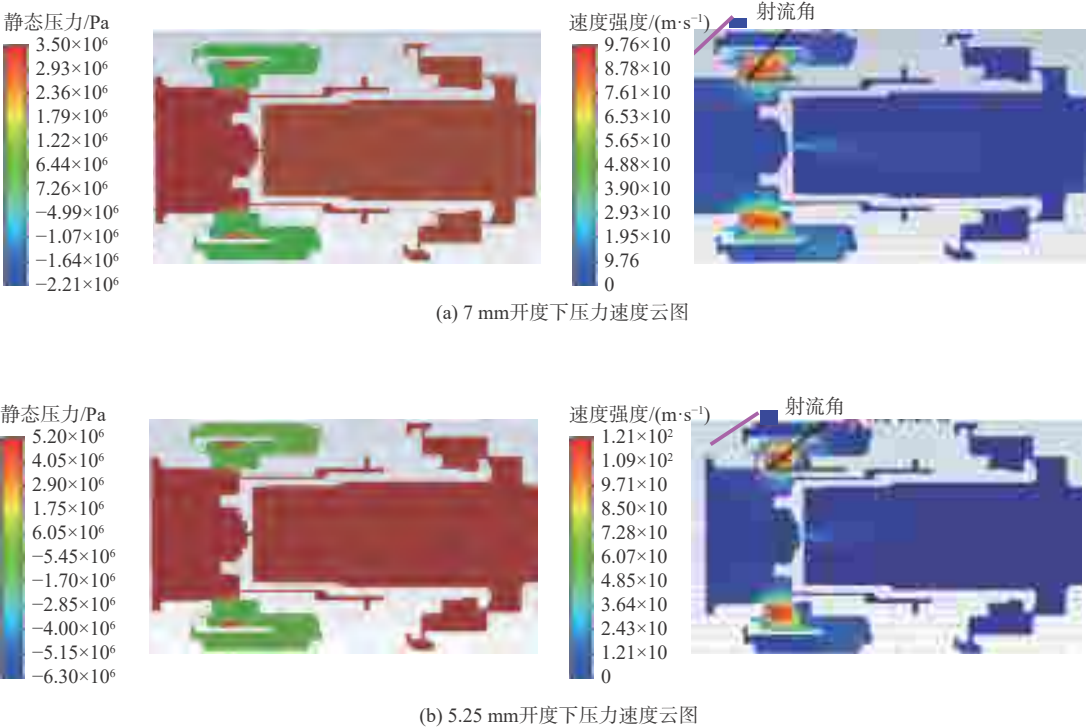


图 10 不同稳态点下回油活门流场仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the flow field of the return oil valve at different steady-state points

由此计算主燃油控制系统 3 000 kg/h 稳态点下回油活门阀芯所受稳态液动力增量系数为

$$m_{hr} = \frac{\partial F_{hw}}{\partial x_h} \Big|_q = \frac{2.07}{0.3 \times 10^{-3}} = 6\,900 \text{ N/m} \tag{13}$$

同理计算得到 2 000~4 000 kg/h 对应稳态液动力刚度为 12 061.2 N/m、5 000 N/m、8 666.7 N/m 和 10 534.5 N/m, 可以看到, 稳态液动力等效刚度从低流量到高流量有一个先减小后增加的过程, 因此, 回油活门固有频率也会有变化, 变化范围为 21.9~29.2 Hz。值得注意的是, 此时稳态液动力的计算是对前述仿真规律的总结, 计算数值具有一定的参考

性, 可能与实际数值有一定的误差, 但证实了稳态液动力对活门固有频率的影响, 为后续的相关分析奠定了基础。

3.2 等压差模块固有频率分析

3.2.1 固有频率计算

将稳态点计算参数代入式 (7) 可得

$$G_d(s) = \frac{2.253\,8 \times 10^{-7} (s + 2\,264) (s^2 + 221.3s + 3.472 \times 10^6)}{(s^2 + 67.99s + 2.529 \times 10^4) (s^2 + 221.3s + 1.428 \times 10^5)} \tag{14}$$

模块传递函数零极点均在左半平面, 系统稳

定。考虑到四阶系统的固有频率没有明确的表达式进行计算,此处由主导极点出发对传递函数进行降阶处理(特性与回油活门一致),可得

$$G(s)=\frac{0.012\,406}{s^2+67.99s+2.529\times10^4}\tag{15}$$

由此可计算等压差模块固有频率为

$$\begin{cases}\omega_n=\sqrt{\frac{K_h}{M_h}}=159\text{ rad/s}\\f=25.3\text{ Hz}\end{cases}\tag{16}$$

式中: f 表示赫兹频率。

同理计算可得,关断活门固有频率为 74.76 Hz,与故障现象不符,可以排除“由于关断活门摆动引起系统脉动”项。

由此可见,主燃油控制系统压力脉动频率与回油活门固有频率基本一致,脉动产生原因应是外部激励频率与回油活门固有频率相近,使回油活门产生共振,导致控制系统输出产生压力脉动。

3.2.2 固有频率影响因素研究

等压差模块固有频率计算公式为

$$\omega_n=\sqrt{\frac{K_h}{M_h}}=\sqrt{\frac{k_{h1}+m_{mf}}{M_h}}\tag{17}$$

式中: M_h 为活门等效惯性力,当活门结构固定时,其一般不会出现大的变化; k_{h1} 为弹簧弹性系数; m_{mf} 为稳态液动力折算的等效弹簧系数。 k_{h1} 和 m_{mf} 数值为同一数量级。弹簧弹性系数会随油液温度及压缩量的变化而变化,但一般在整个工况中变化量很小;回油活门的整个工况中,稳态液动力折算的弹簧系数也会有相应的变化,随着工况改变,对应的回油活门开度也会变化,此时相应的射流角和面积梯度都会发生较大变化,因此,影响活门固有频率的主要是稳态液动力等效刚度。

3.3 故障改进

由式(17)可知,改变等压差模块固有频率可以通过调整回油活门弹簧刚度或调整稳态液动力等效刚度,在不改变系统稳态工况的前提下,可通过调整回油窗口面积来调整稳态液动力等效刚度。

由式(12)可知,稳态液动力等效刚度与流通面积梯度和活门出口压差密切相关,同一开度下,面积梯度越大,稳态液动力等效刚度越大;压差越大,稳态液动力等效刚度越大。因此,可在保证活门稳态点回油量不变的前提下,对活门回油孔型进行调整,使相应的稳态液动力等效刚度发生变化。

图 11 给出了几种孔型的改进思路,主要是在

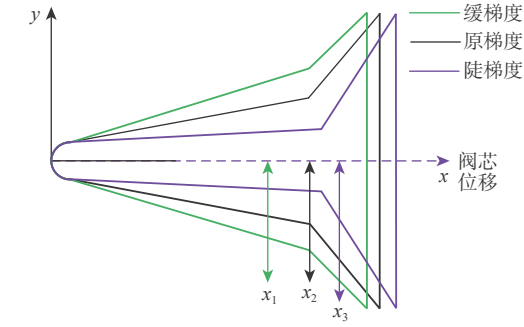


图 11 3 种不同放油窗口

Fig. 11 Three different oil discharge windows

保证孔型总面积不变的前提下,对其不同位置的斜率进行改进,以改变稳态液动力刚度。最终确定新型放油窗口结构如图 12 所示,并在软件平台 UG 中对回油活门结构进行调整,以便后续流场仿真验证。

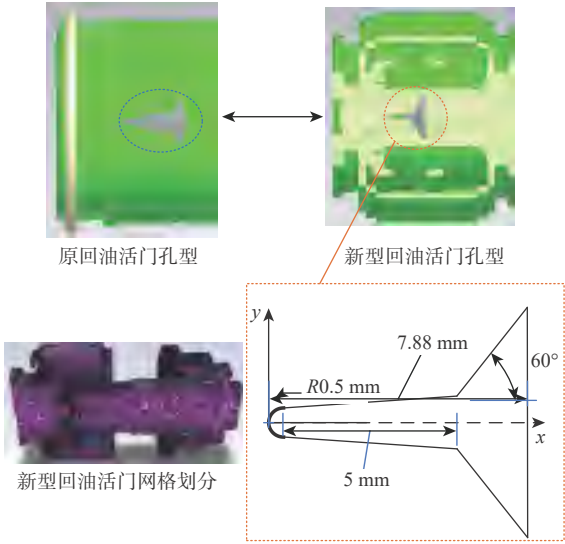


图 12 新型放油窗口

Fig. 12 New oil discharge window

由 3.1.3 节仿真可得,当计量流量一致时,新型回油活门结构的稳态液动力等效刚度为 22 000 N/m,此时,回油活门固有频率为 35.24 Hz。在新孔型下,回油活门固有频率相较原固有频率提高了 10 Hz 左右,由工程经验知,当激励频率与固有频率相差 4 Hz 以上时,可以避免共振的发生。因此,认为新孔型设计合理,可避免脉动的发生。

将修改前后的孔型结构参数代入模型进行仿真分析,设定对应频率的干扰脉动,仿真结果如图 13 所示。可见,调整孔型后的共振频率发生变化,由原来的 25.3 Hz 变为 35.24 Hz,在对应频率下的脉动幅值最大。证明该方法可在该工作点避免系统共振的发生。

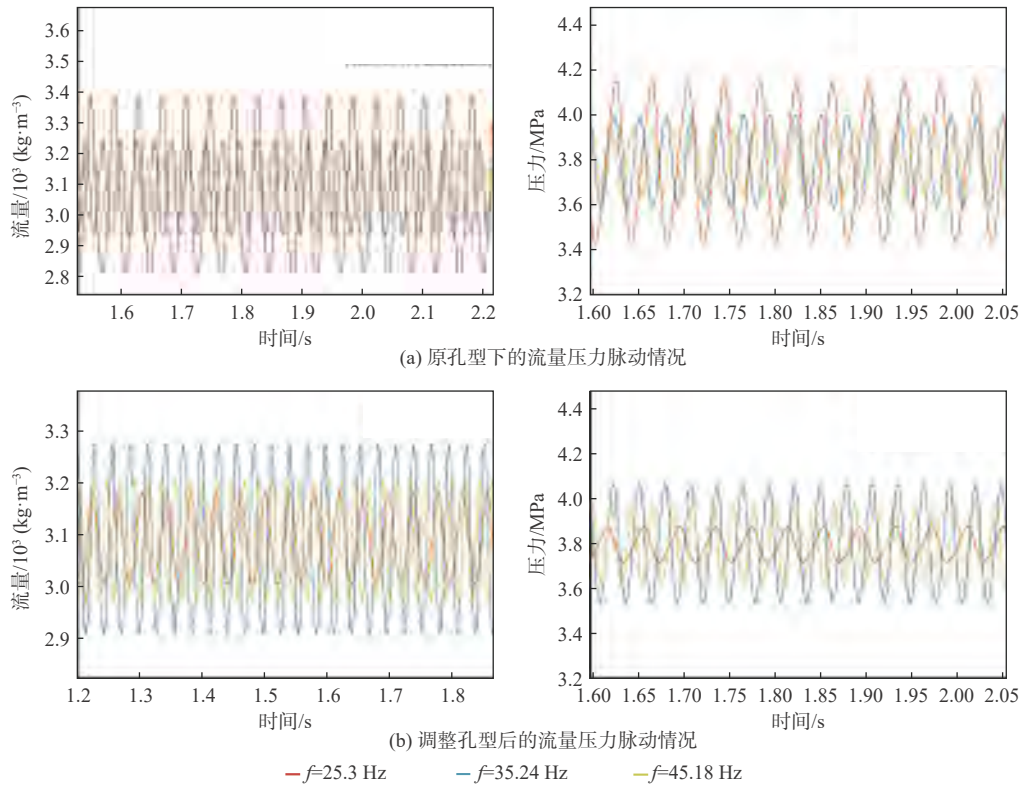


图 13 调整孔型前后流量压力脉动对比

Fig. 13 Comparison of flow and pressure fluctuations before and after pass adjustment

4 结 论

- 1) 分类研究了液压系统振动原因, 结合主燃油控制系统工作原理, 列出了出口压力脉动故障树, 并进行故障定位。
- 2) 通过流场仿真软件对等压差模块进行建模分析, 求解其在稳态点下的稳态液动力等效系数, 为建模分析提供了准确的参数数据, 并指出对于不规则开口稳态液动力理论计算公式的局限性, 其中, 射流角并不是固定不变的, 其与不规则阀芯开口有关, 会影响活门固有频率。
- 3) 在 3 000 kg/h 稳态点通过小偏离线性化方法建立了等压差模块的传递函数, 并计算得到其固有频率为 25.3 Hz, 与脉动频率基本一致, 即压力脉动原因为回油活门在外部激励下发生共振。
- 4) 指出影响回油活门固有频率的主要因素为稳态液动力等效刚度, 并由此设计了新型回油窗口, 调整了其固有频率, 为系统优化设计提供了理论指导。

参考文献 (References)

[1] QUINN R, SIMS J, BEHBAHANI A, et al. Improved turbine engine performance, responsiveness, and prognostics using model-based control in a hardware-in-the-loop simulation[C]//Proceedings of 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference &Exhibit. Reston: AIAA, 2007: 5712.

[2] JAW L, GARG S. Propulsion control technology development in the United States-A historical perspective NASA-TM-2005-213978[R]. Hanover: NASA Center for Aerospace Information, 2005.

[3] 陈飞, 马彪, 李耿标, 等. 离合器液压供油系统压力脉动特性研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(19): 1-7.

CHEN F, MA B, LI G B, et al. Study on characteristic of pressure pulsation of oil supply system in wet clutch[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(19): 1-7(in Chinese).

[4] SVISHCHEV A V, AISTOV I P. The theoretical and experimental studies comparison of the pressure pulsation in the discharge chamber of the gear pump[J]. Procedia Engineering, 2015, 113: 186-191.

[5] CALABRESE M A, SKARBEB L F, SHAH P H, et al. Using a diaital fuel control stem and diaital engine controller for U. S. Navy LM2500 engines[C]//ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air. New York: ASME, 2002(2): 1035-1039.

[6] 李惟祥. 液压锥阀的振动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

LI W X. Research on the vibration characteristics of hydraulic cone valves [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012(in Chinese).

[7] 鲍文, 闫志刚, 于达仁, 等. 某涡喷发动机燃油压力高频脉动现象的分析及解决[J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 109.

BAO W, YAN Z G, YU D R, et al. Analysis of fuel pressure high-frequency pulsation in a turbo jet[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 109(in Chinese).

[8] 李秋莲. 某型阀综合试验台的振动分析与排除[J]. 流体传动与控制, 2014(1): 37-38.

LI Q L. Eliminating and analysis of the vibration of synthesized

test-bed for valves[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2014(1): 37-38(in Chinese).

[9] 阎耀保, 邹为宏, 刘洪宇. 振动环境下小尺寸减压阀的建模与分析[J]. 飞控与探测, 2019, 2(6): 74-81.
YIN Y B, ZOU W H, LIU H Y. Modeling and analysis of small size pressure reducing valve in vibration environment[J]. Flight Control & Detection, 2019, 2(6): 74-81(in Chinese).

[10] 杜润, 柯坚, 于兰英. 分支谐振型液压脉动衰减器动态特性分析[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(6): 932-936.
DU R, KE J, YU L Y. Analyzing dynamic characteristics of side-branch resonant hydraulic pulsation dampers[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(6): 932-936(in Chinese).

[11] 刘丽, 张小斌, 邱利民. 大流量气体管道中阀门诱发振动机理研究[J]. 低温工程, 2016(4): 50-55.
LIU L, ZHANG X B, QIU L M. Mechanisms of valve-induced vibration in a gas pipeline with large flow rate[J]. Cryogenics, 2016(4): 50-55(in Chinese).

[12] 李洪胜, 王曦, 王华威, 等. 压差控制器的稳定性分析和设计参数的研究[J]. 航空发动机, 2016, 42(3): 12-16.
LI H S, WANG X, WANG H W, et al. Differential pressure controller stability analysis and research of design parameters[J]. Aeroengine, 2016, 42(3): 12-16(in Chinese).

[13] 马继超. 液压锥阀阀口特性及稳态液动力研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
MA J C. Research on the characteristics of the hydraulic cone valve port and the steady-state hydrodynamic force[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021(in Chinese).

[14] 张宏, 关天元, 周思聪, 等. 大流量多路阀稳态液动力仿真分析[J]. 液压与气动, 2020, 44(7): 132-137.
ZHANG H, GUAN T Y, ZHOU S C, et al. Steady flow force simulation analysis of large flow multi-way valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, 44(7): 132-137(in Chinese).

[15] 张立亭, 袁红兵, 廖瑶瑶. 不规则阀腔液压阀稳态液动力研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(8): 217-220.
ZHANG L T, YUAN H B, LIAO Y Y. Study on steady-state hydraulic flow force of irregular valve cavity hydraulic valve[J]. Coal Technology, 2018, 37(8): 217-220(in Chinese).

Study on fuel pressure pulsation of main fuel control
system of an aircraft engine

YANG Yikun¹, MA Jing^{1,*}, YANG Junjie²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AECC Xi'an Engine Control Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of pressure pulsation at the outlet of the main fuel control system of an aeroengine, this paper systematically analyzes the reasons for the pulsation of the hydraulic system, lists the fault tree of the pressure pulsation of the main fuel control system of an aeroengine, and completes the fault location. The steady-state hydrodynamic force and associated parameters of the irregular opening fuel return valve under fault conditions are primarily investigated through flow field simulation, and it is noted that the theoretical formula is not applicable to the steady-state hydrodynamic calculation of the irregular opening valve and the change of the outlet jet angle. Then the transfer function and Simulink simulation model of the constant differential pressure module are established by small deviation linearization at the steady point, and its natural frequency and main influencing factors are studied. The findings demonstrate that the fuel pressure pulsation is caused by the return valve's resonance under external stimulation, and the steady-state hydrodynamic force acting on the valve core is the primary factor influencing the return valve's natural frequency. Through the study of the irregular opening shape of the valve, the fault improvement measures are given, which provide theoretical support for the optimal design of the system.

Keywords: main fuel control system; pressure pulsation; flow field simulation; natural frequency; fault improvement

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0088

基于改进 YOLOv5s 的轻量化智能钻机管柱检测方法

牛柯¹, 彭斌^{1,*}, 杨小亮^{1,2}

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州兰石石油装备工程股份有限公司, 兰州 730050)

摘 要: 针对钻井平台管柱自动化转运及上卸扣作业水平较低的问题, 提出一种改进的多目标检测算法以实现钻杆与管柱接头的精确识别。所提方法以轻量化 EfficientNetV2 为特征提取网络, 引入 SPPF 模块降低参数量, 并在 Backbone 中融合 CBAM 注意力机制以抑制背景干扰; 采用 BiFPN 替代 PANet 提升多尺度特征融合能力, 引入 CARAFE 算子增强上采样特征表达; 在 Head 部分使用 GhostConv 减少计算复杂度, 以 SIOU 损失函数优化边界回归精度, 通过 AdamW 优化器提升模型收敛性与泛化能力。基于自建数据集的实验结果表明: 改进模型在复杂工况下对不同姿态管柱具有良好识别性能, 检测准确率达到 90.6%, 平均精度均值达到 94.6%, 较原模型分别提升 3.9% 和 4.5%, 验证了所提方法的有效性与鲁棒性。

关键词: 计算机应用技术; YOLOv5s 算法; 智能钻机; 钻杆; 管柱接头; 目标检测; 算法改进

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1325-14

在当代全球石油产业的迅猛增长背景下, 钻井行业的市场竞争愈发激烈。钻井服务提供商正致力于通过增强钻机的自动化和智能化功能, 旨在提升作业效率, 减少安全风险, 同时减轻操作人员的劳动负担, 以期缩短整个钻井流程的周期, 并降低整体作业成本。在钻井操作中, 特别是深井作业时, 起下钻杆和管柱处理等环节占用了相当多的时间。传统的管柱操作主要依赖于人工, 这不仅效率不高, 而且频繁重复, 劳动强度大, 特别是在进行起下钻杆作业时, 存在安全隐患^[1]。

为了解决这些问题, 钻井服务提供商迫切需要探索新的解决策略。随着钻井设备技术的进步, 自动控制技术的应用日益广泛, 智能控制器和执行机构的使用开始取代那些需要高强度体力劳动的任务。这种转变不仅能够减轻操作人员的劳动负担, 还能减少由于恶劣工作环境和操作者疲劳所引起

的安全风险。随着石油钻探技术向机械化、自动化、信息化和智能化的转型, 开发和实施自动化、智能化的管柱操作设备变得更为紧迫和重要^[2]。

基于视觉引导的机器人自动转运方式, 是实现钻井平台管柱自动化转运的一种较为合理可行的解决方案。针对管柱转运环节, 首先通过视觉定位技术, 先完成对待转运管柱的自动识别与定位, 再利用双目视觉系统完成对井口对扣区域定位和识别, 以获取机器人自主作业所需数据信息; 再利用机械臂完成管柱的抓取、搬运、对接等操作, 替代传统人工作业模式, 实现管柱转运自动化。基于视觉的目标识别定位方式, 能实现无接触式的自动目标定位, 其与机器人技术结合, 已在多种工业自动化场景成功应用。但是针对钻井平台管柱转运场景, 并没有较为成熟的视觉定位方案及相应的视觉定位算法, 限制了视觉引导机器人自主作业的实现。因此, 本文针对钻井平台的管柱检测问题展开研究, 为基于机械臂的管柱自动转运和上、卸扣的

收稿日期: 2024-02-22; 录用日期: 2024-04-19; 网络出版时间: 2024-05-07 17:24

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240507.1056.001

基金项目: 国家自然科学基金(51675254, 51966009); 国家重点研发计划(SQ2020YFF0420989); 中央引导地方科技发展资金项目(23ZYQA312)

*通信作者. E-mail: pengb2000@lut.edu.cn

引用格式: 牛柯, 彭斌, 杨小亮. 基于改进 YOLOv5s 的轻量化智能钻机管柱检测方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1325-1338.
NIU K, PENG B, YANG X L. Lightweight intelligent rig pipe column inspection method based on improved YOLOv5s [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1325-1338 (in Chinese).

实现提供技术基础,也为钻井平台作业过程自动化程度的提升、人员需求的减少、作业效率的提高和作业风险的降低提供了依据^[3]。

管状物体的目标检测方法主要包括基于图像处理和机器学习的技术。其中,图像处理技术通过分析图像中的纹理、颜色、形状等特征,实现对管状物体的识别和定位。机器学习技术则利用分类器对大量数据进行学习,进而提高检测精度和效率。然而,受到管状物体形态多样、背景复杂等因素的影响。近年来,深度学习的发展为管状物体的目标检测提供了新的解决方案。在管状物体检测中,可以利用目标检测算法对图像进行扫描,并识别出管状物体及其位置。同时,结合背景抑制、区域增长等算法,可以进一步提高检测精度和效率。本文的主要创新点如下:

- 1) 提出了一种面向复杂作业环境的轻量化石油管柱目标检测方法。该方法基于 YOLOv5s 架构进行针对性改进,在保证模型轻量化特性的同时,显著提升了对多姿态管柱目标的检测精度与实时性。
- 2) 构建了一种兼顾检测精度与推理速度的网络优化策略,使模型能够在不同作业工况下保持稳定且高效的检测性能,满足石油现场快速感知的实际需求。
- 3) 通过与多种主流目标检测算法的系统对比,验证了所提出方法在石油管柱目标检测任务中的综合性能优势。

1 基于 YOLOv5 的管柱检测方法

为了提高钻机管柱自动化处理水平,本文构建了一个基于 YOLOv5s 的管柱实时检测框架。首先,通过双目相机在钻井平台进行管柱检测,获取实时管柱图像数据。然后,通过部署在移动端的网络模型对获取的数据自动分析。在数据处理设备中,对收集到的图像数据进行筛选,只传输与管柱相关的关键图像。这样可以减少数据传输量,提高传输效率。采用改进的 YOLOv5s 算法对筛选后的图像数据进行管柱检测。YOLOv5s 为一种快速且准确的目标检测模型,经过改进后,能够有效地识别出复杂钻井环境中的管柱,为后续的自动化作业提供准确的目标位置信息。最后,根据检测到的管柱位置信息,自动化作业系统可以控制钻台面的机械手和铁钻工分别进行相应的抓取或上/卸扣作业。本文检测对象为钻杆、管柱接头、工人。具体检测要求为:①下钻时,钻铤(用于连接管柱并传递钻探力量的重型钻杆)和立根(已连接安装在钻井平台上的管柱)的对扣检测与定位;②建立根时,钻杆间的对扣(钻井中传递力量和运动稳定性的专用接

口,确保连接的牢固性和密封性)检测与定位;③出入钻杆盒时,立根的检测与定位;④钻井作业时,确保工人与作业现场保持安全距离。如图 1 所示为管柱检测示意图。

YOLOv5^[4] 为 Ultralytics 提出的一种目标检测算法,YOLOv5 的特点是速度快、准确率高,非常适合在计算资源有限的设备上部署。与先前版本相比,YOLOv5 在确保检测速度的同时,实现了较为精确的目标识别与定位。根据模型的宽度和深度,YOLOv5 可以分为 YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l、YOLOv5x 这 4 种。针对图 2 所示管柱自动化检测框架和后期方便在移动设备部署,选择参数量和计算

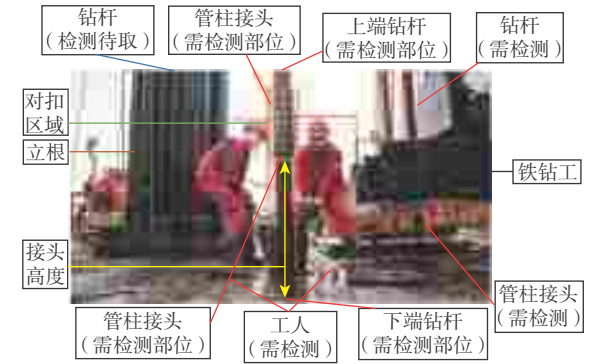


图 1 管柱检测示意图

Fig. 1 Detection schematic of pipe columns



图 2 基于深度学习的管柱实时检测框架

Fig. 2 Deep learning-based framework for real-time detection of pipe columns

量较少的 YOLOv5s 模型作为基础模型。

YOLOv5s 采用了一种轻量级的网络结构设计, 包括输入端(input)、主干网络(backbone)、颈端(neck)和预测端(prediction)。其模型结构如图 3 所示。主干网络使用 CSPDarknet53 作为特征提取器, 其通过卷积块和跨层连接来构建更加复杂的特征表示。路径聚合网络(path aggregation network, PAN)^[5]

用于处理不同尺度的特征图, 并生成多尺度的预测。预测头部(head)对不同尺度的特征进行目标分类和定位预测。YOLOv5s 引入了自适应的数据增强策略, 根据目标的大小和位置调整图像的增强方式。通过在预测过程中应用 Kalman 滤波器来提供目标跟踪的功能, 该滤波器可以预测目标的位置, 在检测结果稳定之前提供连续的目标跟踪。

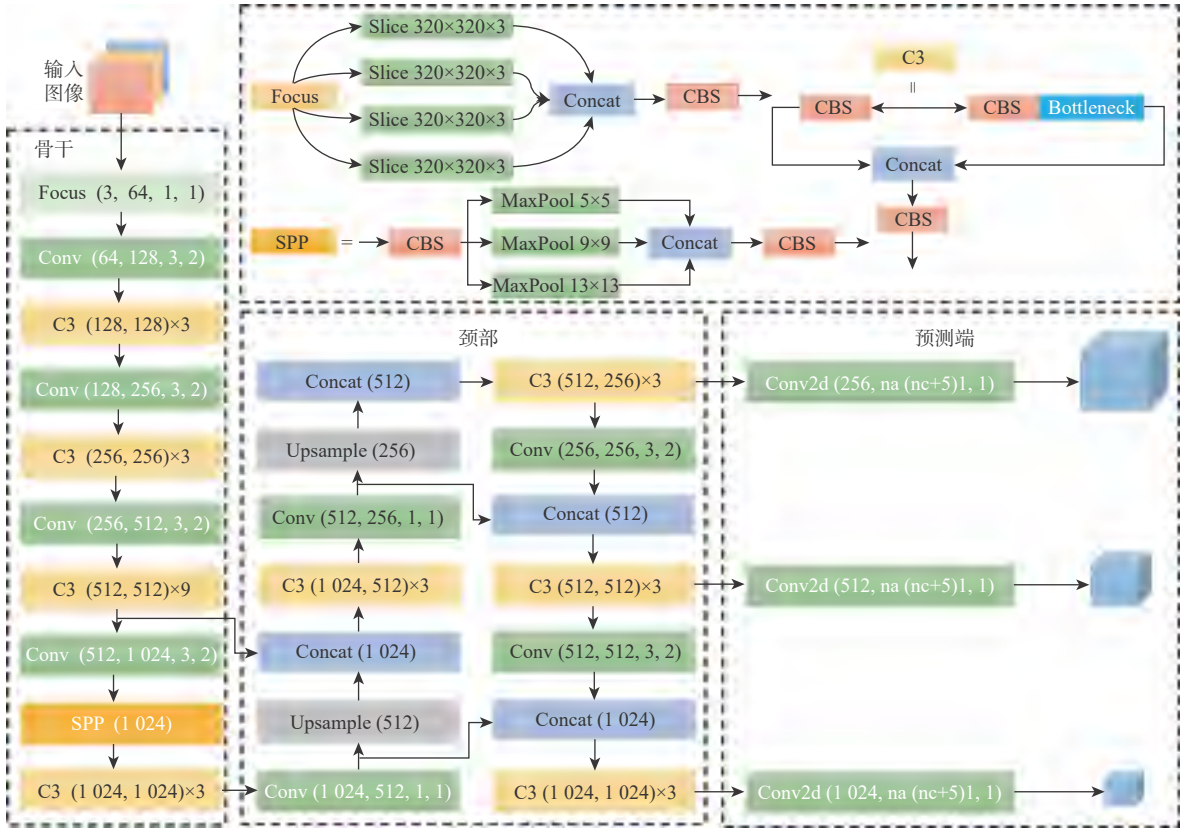


图 3 传统 YOLOv5s 网络模型

Fig. 3 Traditional YOLOv5s model structure

2 算法原理

2.1 混合 CBAM 注意力机制

在管柱检测中, 钻井平台作业现场环境复杂, 管柱接头和钻杆相似度较高, 同时有其他管状零部件的影响, 目标容易被忽略或混淆。为了对目标进行更好的特征提取, 在 YOLOv5s 的 Neck 端引入卷积块注意力模块(convolutional block attention module, CBAM)^[6]。CBAM 模块由通道注意力(channel attention, CA)和空间注意力(spatial attention, SA)组成。结构如图 4 所示。CA 操作提取每个通道的特征统计信息的方式有 2 种: 融合全局平均池化和全局最大池化, 然后通过全连接层和激活函数共同生成通道的权重。SA 将特征图分别进行平均池化和最大池化, 然后通过全连接层和激活函数来生成空间权重^[7]。计算公式如下:

$$S_1 = M_c(S) \otimes S \quad (1)$$

$$S_2 = M_s(S_1) \otimes S_1 \quad (2)$$

式中: $\otimes$ 为逐元素的乘法; S 为中间层特征; M_c 为通道注意力特征; M_s 为空间注意力特征; S_1 为 $M_c(S)$ 和 S 的乘积; S_2 为 $M_s(S_1)$ 和 S_1 的乘积。

CBAM 通过调节权重大小来区分特征信息的重要程度。模型加入 CBAM 模块后, 每一次特征融合之前都要对特征图加强处理, 提高了目标的定位精度, 降低了计算量, 提升了模型速度。

2.2 加入 EfficientNetv2 轻量化网络

在管柱和工人检测中, 为适应不同尺度图像, 保持小型模型规模, 在 YOLOv5s 中加入 EfficientNetv2 轻量化网络模型。EfficientNetv2 为文献 [8] 在 EfficientNet 基础上进行优化而来的一种轻量级卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)网络。其特点是参数量少, 检测精度高, 在此基础上训练和

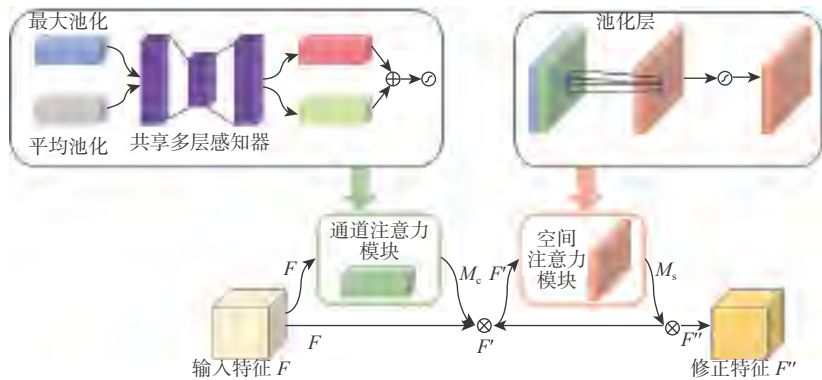


图 4 注意力机制模块
Fig. 4 Convolutional block attention module

推理速度也表现优异。EfficientNetv2 将 EfficientNet 中的 MBConv 结构替换为 Fused-MBConv 结构,使 GPU 的性能得到充分利用。图 5 所示为 MBConv 和 Fused-MBConv 结构图。表 1 中可见经过优化后的 EfficientNetv2-B0 结构。

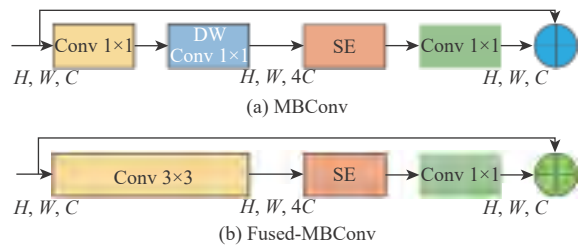


图 5 MBConv 和 Fused-MBConv 结构图
Fig. 5 MBConv and Fused-MBConv structure diagrams

2.3 CARAFE 上采样

在图像分类和目标检测领域中,上采样操作非常重要。上采样方法有插值上采样与反卷积上采样 2 种,尽管这 2 种方法在某些方面具有优势,但也存在局限性。其中,插值上采样在处理图像时仅关注局部特征,不能准确反映图像的整体特征。反卷积上采样无法根据特征进行调整,容易忽略图像的语义特征。

为了克服上述方法的不足,本文提出了一种 CARAFE 上采样模块^[9]。该模块能够关注全局语义

信息,同时具有较大的感受野,可以更好地反映图像的全局特征。此外,CARAFE 上采样模块的结构如图 6 所示,其具有轻量级、高效率等优点,能够适应各种网络模型的需求。

为了解决上采样方法的局限,采用 Pixelshuffle 方法。重新排列特征图的高度、宽度和通道数,获取预测上采样核,其形状是 $\sigma_H \times \sigma_W \times K_{up} \times K_{up}$ 。经过 Softmax 归一化处理后,将特征图输入到重组模块中,每一层特征图与预测的上采样核相乘,得出上采样结果。与插值上采样方法相比,CARAFE 方法在参数量增加较小的情况下,增强了特征的检测能力和提取能力。

2.4 改进的多尺度特征融合结构

基础 YOLOv5s 模型的 neck 端为特征金字塔网络 (feature pyramid network, FPN)^[10],结构如图 7 (a) 所示。FPN 通过自顶向下的方式传递强语义信息。但是这种方法不适合在深层神经网络中进行特征融合。金字塔注意力网络(pyramid attention network, PANet)是在 FPN 的基础上进行改进,其网络结构如图 7(b) 所示,其缩短了浅层特征传递到深层特征的距离,优化了 FPN 网络的特征融合方式,但同时也加大了网络参数量和计算量。2020 年文献 [11] 提出了加权双向特征金字塔网络 (bidirectional feature pyramid network, BiFPN)优化了 PANet 网络,

表 1 EfficientNetv2-B0 结构
Table 1 EfficientNetv2-B0 structure

网络阶段	结构	卷积核步距	通道数	层数
1	Stem3×3	2	32	1
2	Fused-MBConv1, k 3×3	1	16	1
3	Fused-MBConv8, k 3×3	2	32	2
4	Fused-MBConv4, k 3×3	2	48	2
5	MBConv8, k 3×3, SE0.25 MBConv6, k 3×3, SE0.25	2	96	3
6	MBConv8, k 3×3, SE0.25 MBConv6, k 3×3, SE0.25	1	112	5
7	MBConv8, k 3×3, SE0.25 MBConv6, k 3×3, SE0.25	2	192	8
8	Conv1×1&Pooling&FC		1 280	1

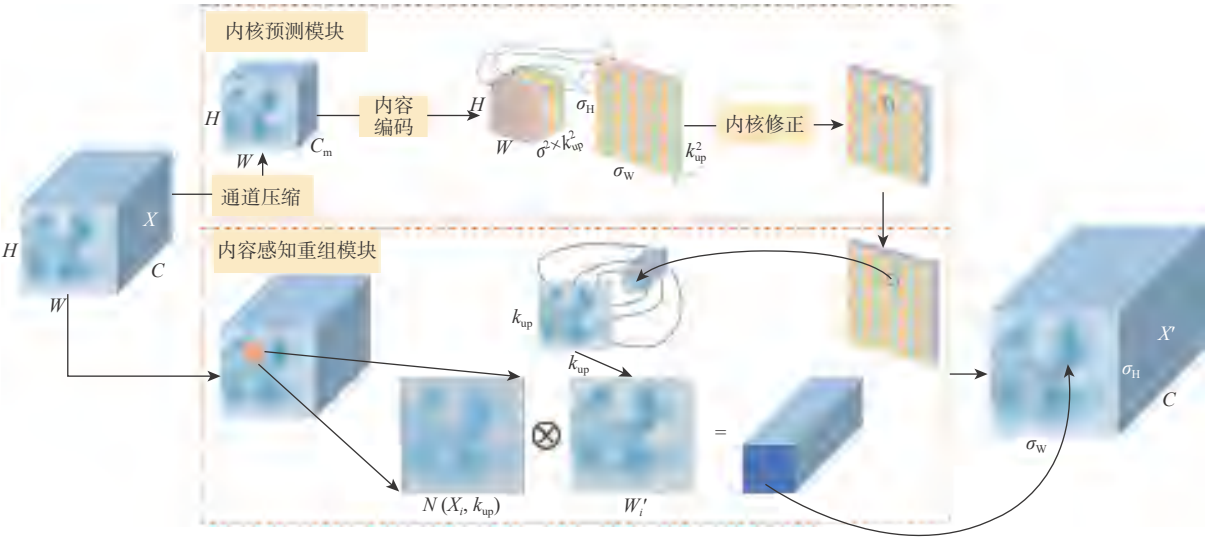


图 6 CARAFE 结构图

Fig. 6 CARAFE module structure

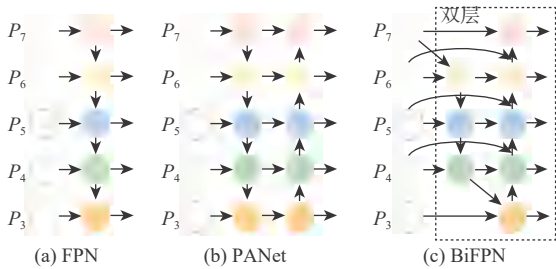


图 7 多尺度特征融合网络架构

Fig. 7 Multi-scale feature fusion network architecture

网络结构如图 7(c) 所示。证明双向特征融合是有效的。BiFPN 的计算表达式如下：

$$O = \sum_i \frac{\omega_i}{\varepsilon + \sum_j \omega_j} I_i \tag{3}$$

式中： ω_i 为学习到的参数； I_i 对应一个可学习的权重。

P_6 层的 2 个特征融合过程计算式为

$$P_6^{\text{td}} = \text{Conv} \left(\frac{\omega_1 P_6^{\text{in}} + \omega_2 O_{\text{Resize}}(P_7^{\text{in}})}{\omega_1 + \omega_2 + \varepsilon} \right) \tag{4}$$

$$P_6^{\text{out}} = \text{Conv} \left(\frac{\omega'_1 P_6^{\text{in}} + \omega'_2 P_6^{\text{td}} + \omega'_3 O_{\text{Resize}}(P_5^{\text{in}})}{\omega'_1 + \omega'_2 + \omega'_3 + \varepsilon} \right) \tag{5}$$

式中： P_i^{in} 为第 i 级的输入特征； P_i^{td} 为第 i 级的中间特征； P_i^{out} 为第 i 级的输出特征； O_{Resize} 表示下采样或上采样操作。

PANet 的设计目标是解决 FPN 在处理多尺度特征时的一些限制。但是在钻井管柱的检测中，由于作业环境比较复杂，通常需要处理不同尺度和角度的检测管柱，且对扣定位精度要达到 $\pm 5 \text{ mm}$ ，PANet 的优势并不明显。同时，随着引入 CBAM 注意力机制和 EfficientNetv2 网络结构，网络层数也在不断加深，特征图的语义信息越来越丰富，细节信

息也逐渐减少，对小目标检测极为不利。因此，本文使用 BiFPN 替代 PANet。与 PANet 相比，BiFPN 在钻井管柱检测中主要有以下优势：

1) 多尺度特征融合^[12]：对于管柱需检测区域，通常需要处理不同尺度和角度的检测目标，BiFPN 能够更好地处理多尺度特征，提高目标检测的准确性。对小目标的检测，BiFPN 通过多尺度的特征融合增强小目标的表达能力，对不同尺度的管柱接头特征赋予不同的权重，提供更丰富的上下文信息，从而改善管柱的检测和定位精度。

2) 更高的检测精度：BiFPN 能够关注全局语义信息，具有更大的感受野，能够更好地反映图像的全局特征，从而更准确地检测出管柱。这有助于提高管柱检测的准确性和精度。

3) 更高的灵活性：BiFPN 具有更高的灵活性，可以根据不同的任务需求进行调整和优化，以适应不同场景下的管柱检测任务。

2.5 改进 head 轻量级卷积网络

通过 BiFPN 和 CARAFE 算子强化了远距离目标检测和被遮挡目标的细节特征提取，但这些网络模型的引入也增加整体的参数量和计算量。为了更好地利用特征冗余部分来降低模型的参数量，本文参考了 GhostNet^[13] 网络的卷积思想，结合 head 部分的 Conv，设计了 GhostConv 结构以构建轻量化卷积网络。GhostConv 模块初始阶段通过标准卷积操作来捕获基础特征映射，随后对每个通道执行一次线性变换，以产生一组简化的特征映射。这些简化映射通过线性变换生成，通常与标准卷积中产生的冗余特征映射相对应。最终，将捕获的基础特征映射与简化的特征映射在通道层面进行合并，形成最终的输出特征映射。普通卷积和改进的 Ghost 卷积结构图如图 8 所示。

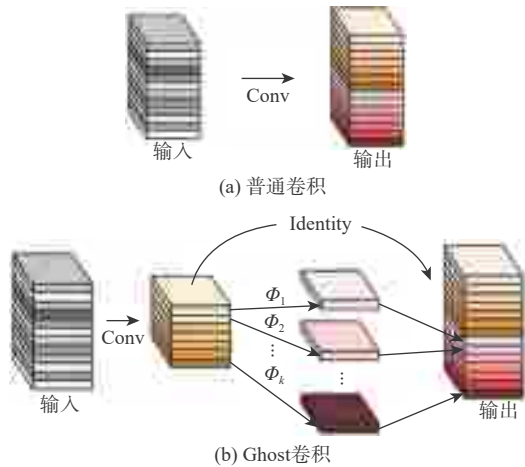


图 8 普通卷积和 Ghost 卷积结构图

Fig. 8 Structural diagrams of ordinary convolution and Ghost convolution

GhostConv 通过共享权重和分组卷积的方式,显著减少了模型的参数量和计算量,使得模型在同样硬件条件下实现更快的推理速度,这对于部署在边缘设备或移动端的环境中十分重要。在对目标检测任务中,由于 GhostConv 层的参数更少,模型对于过拟合的抵抗力更强,有助于提升模型在不同场景下的泛化能力。

2.6 损失函数改进

研究表明,GIoU^[14]在训练中存在发散的问题,所以提出 CIoU^[15]代替 GIoU,并且引入 SIoU Loss 损失函数。与 CIoU 相比,文献 [16]考虑了方向性,并且在推理性能上效果更好。该损失函数由角度成本、距离成本、形状成本和 IoU 成本构成。

1) 角度成本。角度成本示意图如图 9 所示。

原始角度成本表达式如下:

$$\varphi = 1 - 2\sin^2(\arcsin x - \pi/4) \tag{6}$$

其中:

$$\begin{cases} x = C_h/\sigma = \sin \alpha \\ \sigma = \left[(b_{cx}^{gt} - b_{cx})^2 + (b_{cy}^{gt} - b_{cy})^2 \right]^{1/2} \\ C_h = \max(b_{cy}^{gt} - b_{cy}) - \min(b_{cy}^{gt} - b_{cy}) \end{cases} \tag{7}$$

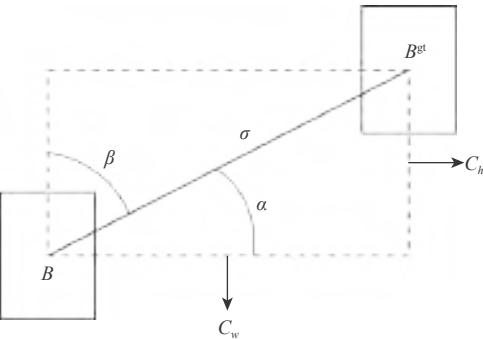


图 9 角度成本

Fig. 9 Angle cost

式中: σ 为 2 个框的质心距离; C_h 为 2 个框的质心纵坐标之差; b_{cx}^{gt} 为真实框的质心横坐标; b_{cy}^{gt} 为真实框的质心纵坐标; b_{cx} 为预测框的质心横坐标; b_{cy} 为预测框的质心纵坐标。

最终角度成本表达式如下:

$$\begin{aligned} \varphi &= 1 - 2\sin^2(\arcsin x - \pi/4) = 1 - 2\sin^2(\alpha - \pi/4) = \\ &= \cos^2(\alpha - \pi/4) - \sin^2(\alpha - \pi/4) = \\ &= \cos^2(2\alpha - \pi/2) = \sin(2\alpha) \end{aligned} \tag{8}$$

2) 距离成本。根据角度成本,定义距离成本为

$$\Delta = \sum_{t=x,y} (1 - e^{-\gamma \rho_t}) \tag{9}$$

其中:

$$\begin{cases} \rho_x = \left(\frac{b_{cx}^{gt} - b_{cx}}{C_w} \right)^2 \\ \rho_y = \left(\frac{b_{cy}^{gt} - b_{cy}}{C_h} \right)^2 \\ \gamma = 2 - \varphi \end{cases} \tag{10}$$

式中: C_w 为 2 个框的质心横坐标之差。

3) 形状成本。形状成本表达式如下。

$$\Omega = \sum_{t=w,h} (1 - e^{-\omega_t})^\theta \tag{11}$$

式中: w 、 h 为预测框的宽和高; w^{gt} 、 h^{gt} 为真实框的宽和高。

4) 交并比(intersection over union, IoU)的成本。IoU 的成本表达式如下。

$$C_{IoU} = \frac{|B \cap B^{gt}|}{|B \cup B^{gt}|} \tag{12}$$

式中: B 为预测框; B^{gt} 为真实框。

SIoU_Loss 表达式为

$$L_{box} = 1 - C_{IoU} + (\Delta + \Omega)/2 \tag{13}$$

2.7 优化函数改进

2.7.1 随机梯度下降 SGD

YOLOv5 默认的优化器是随机梯度下降(stochastic gradient descent, SGD)^[17],SGD 通过对单一样本使用梯度下降的方法进行优化,每次只进行一个样本的更新。然而,SGD 算法的一次性单个样本迭代更新方式可能会导致网络在整体最优方向上的收敛速度减慢,准确率有所降低。同时,为了解决 SGD 需要预先设置合适的学习率的问题,选择一种自适应学习算法来改进现有的 SGD 优化器。

2.7.2 改进的自适应矩估计 AdamW

文献 [18] 在 2017 年提出了 AdamW 优化算法,将权重衰减项与 Adam^[19] 优化算法解耦,只在参数更新后再加入权重衰减运算。AdamW 最初在自然语言处理的 BERT 模型中得以应用,在 Transformer 架构的训练过程中取得了显著成就。随着在计算

机视觉领域, 如 Swin Transformer 等模型的性能超越, AdamW 优化器也开始在 CV 的 Transformer 模型训练中被广泛采纳。此外, 2022 年, 随着 ConvNet 模型的提出, AdamW 优化器在 CNN 训练中的有效性得到了进一步的证明, 并且促进了模型性能的提高^[20]。

2.8 改进 YOLOv5s 的管柱检测算法

本文首先将 neck 结构的空 间金字塔池化 (spatial pyramid pooling, SPP) 模块替换为快速空间金字塔池化 (spatial pyramid pooling-fast, SPPF) 模块, 在 neck 端引入 CBAM 注意力机制, 减小背景的干扰, 更好地聚焦于重要的特征通道和空间位置, 提升了模型对管柱特征的提取能力与模型的检测精度。在主干网络中加入 EfficientNetv2 轻量化网络, 有效地平衡了模型的深度、宽度和分辨率, 加快了

模型的收敛速度。将 FPN+PAN 特征融合更 换为更加有效的多尺度特征融合网络 BiFPN, 解决特征信息融合尺度不一致问题, 加强了特征图的跨层连接和信息传递, 提升了模型对于不同尺度管柱接头的识别能力, 使模型整体性能更佳。采用 CARAFE 算子替代传统的上采样操作, 提高分辨率和语义信息的传递。替换完全交并比 (complete intersection and union, CIoU) 为形状感知交并比损失 (shape perception intersection union, SIOU), 优化边界误差, 提高小目标定位准确性。AdamW 替换 SGD 优化模型参数的方法对模型收敛结果进一步改良, 提高了模型的泛化能力。

图 10 所示为改进后的 YOLOv5s 管柱轻量化检测网络结构。

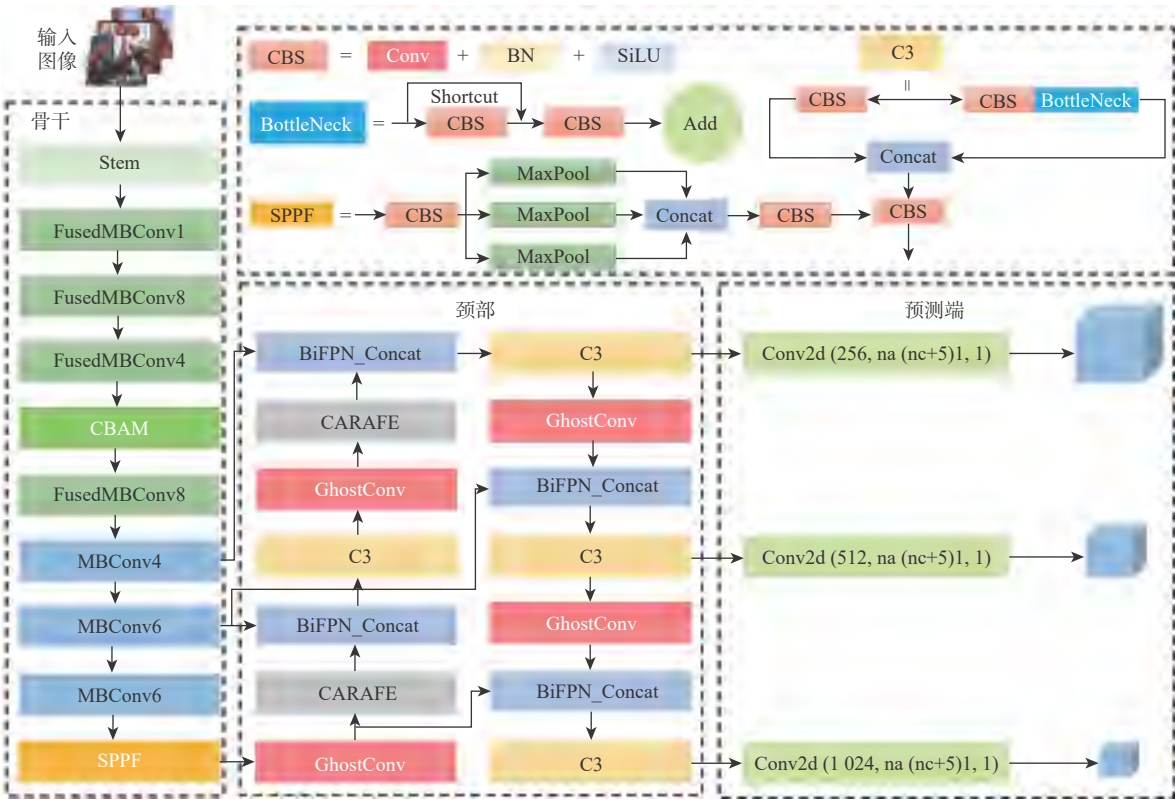


图 10 改进后的 YOLOv5s 网络结构

Fig. 10 Improved YOLOv5s network structure

3 算法原理

3.1 实验环境与参数配置

本文在 Windows10 操作系统下, 采用硬件配置如下:

处理器: Intel(R) Cor(TM) i7-9700 CPU@3.00 GHz;
显卡: NVIDIA GeForce GTX 3060 6 GB; 系统: 为 64 位操作系统; 主机内存: 16 GB; 深度学习框架: PyTorch; 开发环境: PyCharm。
软件环境配置包括 CUDA 11.1 和 torch 版本

1.8.1, 使用 Python 3.8 编程语言进行开发。确定训练参数配置如表 2 所示。

表 2 模型训练参数
Table 2 Model training parameters

训练参数	参数值
迭代次数/轮	200
批量大小 ^[21] /B	16
初始学习速率	0.01
动量	0.937
图片尺寸/(像素×像素)	640×640

3.2 数据集构建

数据集图像的选择需要满足管柱自动化应用的需求。由于管柱的图像较少且没有公开的数据集,本文使用自制的管柱检测数据集。管柱的图像数据在甘肃省兰州市兰石油装备工程有限公司采集。拍摄不同环境下管柱的图像,拍摄时间分别在早上、中午和下午,并且不断改变拍摄距离和角度,其中,包括重叠遮挡、与背景图像视觉外观相似、目标密集、改变光照和改变拍摄角度等多种情况,获取的图像保存为.jpg 格式。为使

数据集更具多样性,对已获得的数据集进行图像镜像、图像噪声、亮度增强、对比度比较和图像旋转等数据增强处理操作。这样可以在训练中避免过拟合问题。图 11 所示为采集的部分样本图像。最后获得 3 120 张图像。该数据集涵盖了 3 类检测对象(钻杆、管柱接头、工人)。用 Labellmg 标注软件标注数据,标注格式保存为.txt。为了获得更准确的训练效果,将数据集以 7:3 的比例随机划分,得到训练集 2 184 张和验证集 936 张。



图 11 部分管柱检测数据集
Fig. 11 Partial sample image

通过分析数据集来掌握图像类别和锚框的分布特性。图 12(a)中可见,3 种目标类别的图像数量比例分布呈均衡状态。对于视觉相似性较高的钻杆和管柱接头 2 类图像占数据集的 85%。锚框的中心位置主要集中在图像的中部,分布均衡,如图 12(b)所示。从图 12(c)中可见数据集以中小尺寸的锚框为主。这些特征表明,该数据集能有效模拟现场管柱检测任务。

3.3 评价指标

在目标检测过程中,模型在对输入图像进行计算后输出若干个预测框,这些预测框按照其分类结果可分为 TruePositive(T_p)、FalsePositive(F_p)、FalseNegative(F_n)、TrueNegative(T_n)4 个类别,根据预测框判断正确与否计算相应的评价指标。其中: T_p 表示真实目标 A 被正确预测为目标 A, T_n 表示真实目标 B 被正确预测为目标 B, F_n 表示真实目标 A 被错误预测为目标 B, F_p 表示真实目标 B 被错

误预测为目标 A,4 类情况如图 13 所示。

根据以上 4 个类别样本的情况,可以得到模型的各种评价指标如下:

1) 召回率指被正确识别出的物体数量与实际物体总数之间的比率。表达式如下所示:

$$R_{Recall} = \frac{T_p}{T_p + T_n}$$
 (14)

2) 精准率指正确检测的物体个数占总检测物体个数的比例。表达式如下所示:

$$R_{Precision} = \frac{T_p}{T_p + F_p}$$
 (15)

3) 平均精度表示单类别模型的平均检测精度,是以召回率作为横坐标、精准率作为纵坐标建立的坐标系,在一定阈值的基础上形成的 P-R 曲线下方面围成的面积。表达式如下所示:

$$A_p = \int_0^1 P(r) dr$$
 (16)

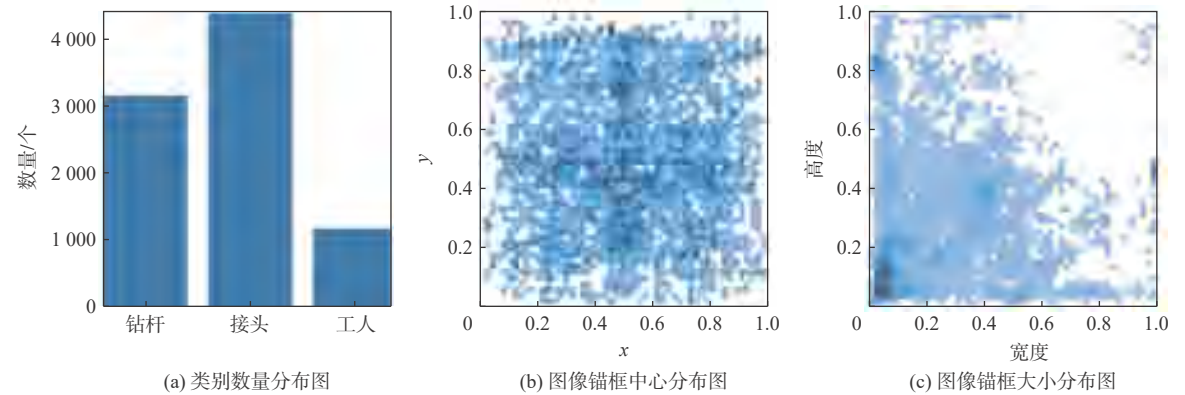


图 12 数据集类别数量分布图和图像标注锚框的分布图

Fig. 12 Plot of the distribution of the number of categories in the dataset and the distribution of the image labeling anchor frames

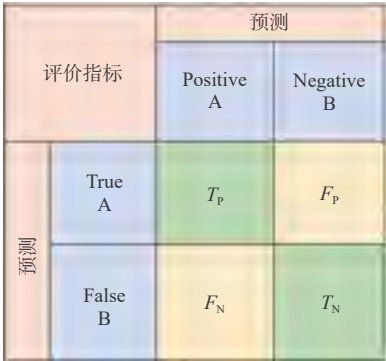


图 13 评价指标

Fig. 13 Evaluation indices

表 3 YOLOv5 不同版本性能比较

Table 3 Comparison of the performance of different versions of YOLOv5

模型	浮点运算速度/ 10 ⁹ s ⁻¹	参数量	G _{mAP} /%	检测速度/ (帧·s ⁻¹)	权重大小/ MB
YOLOv5s	16.3	7.06×10 ⁶	91.6	73.167	14.4
YOLOv5m	47.9	21.6×10 ⁶	91.2	72.4	42.1
YOLOv5l	107.7	46.1×10 ⁶	91.7	86.7	92.8
YOLOv5x	204.7	86.2×10 ⁶	90.4	91.6	86.4

高了 3 到 13 倍,这导致了运行速度的减慢和模型文件的大幅增加,从整体上看,这些增加并没有带来 G_{mAP} 的显著提升。这种现象可能是因为检测任务的特点所导致的。在处理特定目标,如管柱时,网络中残差结构和卷积核数量的增加虽然增加了特征提取的深度,但同时也可能导致了部分关键特征的丢失,从而使得检测精度提升有限。在管柱检测任务中,需要将模型搭载到移动端设备上,YOLOv5s 在保持较高检测精度的同时,具有较小的模型尺寸和较低的计算量,并采用了高效的特征提取和预测策略,使其在处理实时检测任务时具有较好的速度和稳定性,因此,更适合在移动设备上运行。综上所述,本文选择 YOLOv5s 作为基础模型进行改进。

4.2 不同注意力机制性能比较

为了选择加入最优注意力机制,分别将 CBAM、压缩和激励注意力模块 (compress and excite the attention, SE)^[22]、CA^[23]、高效通道注意力模块 (high-efficiency channel attention, ECA)^[24] 分别单独加入到 YOLOv5s 模型中进行试验,结果如表 4 所示。可见,加入几种注意力机制模块后的模型在整体性能上相差不大,加入 CBAM 后的 G_{mAP} 最好,权重也最小,因此选用 CBAM 融入模型效果最好。

为了验证注意力机制在感受野内捕捉全局和局部上下文信息的能力,通过 Grad-CAM^[25] 进行热力图可视化。热力图可以表示输入图像中像素对

式中: P 为 Precision; r 为 recall。以 r 为横轴, P 为纵轴,绘制得到 PR 曲线。通过积分计算 PR 曲线与坐标轴围成的面积,解得 A_p 。

4) 平均精度均值表示所有类别 N 的平均精度,其值越大表示目标检测模型的精度越高,具体表达式如下所示:

$$G_{mAP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{p,i}$$

(17)

式中: N 为总的类别数量。

5) 帧速率即模型每秒传输的帧数量,用来表示模型实时性的重要指标。

4 实验结果与分析

4.1 YOLOv5 不同版本对比实验

YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l 和 YOLOv5x 为 YOLOv5 的 4 个版本,在处理速度与识别准确度上各有侧重,为满足不同的计算资源和实时处理需求提供了多样化的选择。为了选择合适的基础模型,进行了一项针对 YOLOv5 这 4 个版本的比较试验。试验结果如表 3 所示。

通过对比 YOLOv5 的不同版本,可见虽然模型的 G_{mAP} 提升幅度不大,但其参数数量和浮点运算量却有显著增长。YOLOv5x 系列模型的复杂度提

表 4 注意力机制性能对比				
Table 4 Attention mechanism performance comparison				
模型	参数量	$G_{mAP}/\%$	检测速度/ (帧·s ⁻¹)	权重大小/ MB
YOLOv5s	7.06×10^6	91.6	73.167	14.4
YOLOv5s+CBAM	6.41×10^6	92.0	101.919	13.2
YOLOv5s+SE	7.23×10^6	89.8	97.313	14.8
YOLOv5s+CA	6.42×10^6	91.6	101.542	13.2
YOLOv5s+ECA	7.20×10^6	90.4	103.465	14.7

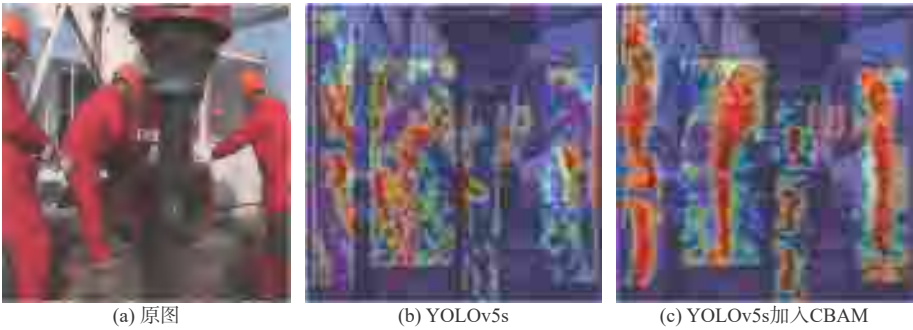


图 14 热力图分析
Fig. 14 Heat map analysis

4.3 不同损失函数性能对比

为了验证 SIoU 的性能, 本文分别将损失函数 CIoU、GIoU、EIoU 和 SIoU 引入 YOLOv5s 中作性能对比。图 15 为 4 种损失函数曲线对比; 表 5 为 4 种损失函数的模型检测性能结果。

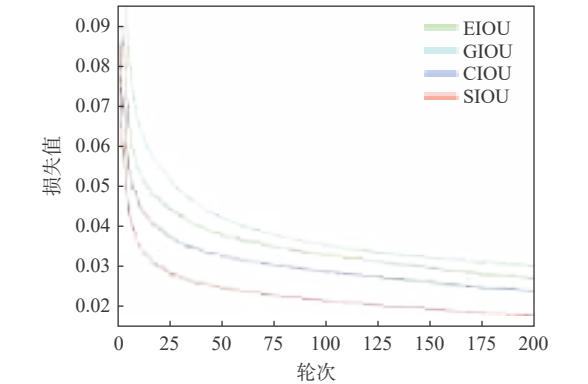


图 15 不同损失函数曲线
Fig. 15 Different loss function curves

表 5 不同损失函数检测性能				
Table 5 Detection performance of different loss functions				
损失函数	$G_{mAP}/\%$	精确率/%	召回率/%	训练时长/h
CIoU	86.2	86.6	82.6	8.724
GIoU	85.8	85.3	88.4	26.561
EIoU	83.9	88.0	77.3	8.355
SIoU	89.4	88.5	89.6	8.207

通过图 15 可知, SIoU 损失函数在训练中收敛速度很快, 同时收敛后损失值处于最低点。

预测输出的贡献分布。温度越高, 原始图像对应区域对网络的响应和贡献越大。对图 14(a)进行热力分析, 原始 YOLOv5s 模型热力图如图 14(b)所示, 加入 CBAM 注意力机制后的模型热力图如图 14(c)所示。从图中可以得知, 加入 CBAM 后, 模型可以充分提取空间和通道级信息, 减少对冗余信息的关注, 将注意力集中在目标本身, 受背景干扰的程度也比 YOLOv5s 小, 使得模型在小目标区域上呈现更高的热度。

根据表 5 可得, SIoU 的 G_{mAP} 值和精确度均优于其他损失函数, 所需运行时间最少。在召回率上, SIoU 只比 GIoU 低 0.8%。综上所述, 本文使用 SIoU 损失函数后网络性能更优。

4.4 不同优化器性能对比

为了验证 3 种优化器的性能, 分别在改进 YOLOv5s 模型中设置 SGD、Adam 和 AdamW 进行对比试验, 比较模型的损失函数和精准度随着训练层数 epoch 收敛变化的情况, 如图 16 所示。

由图 16(a)可知, AdamW 损失在第 15 轮开始收敛于 0.07, SGD 损失从第 25 轮左右开始收敛, Adam 损失在 30 轮左右才开始收敛。AdamW 收敛速度明显优于 SGD 与 Adam。由图 16(b)可知, AdamW 模型的精准率最终收敛于 89%, SGD 模型的精准率收敛于 86%, AdamWm 明显比 SGD 的平均准确率高, 而 Adam 模型的精准率最终收敛于 84%, 并且前期有较大的波动, 鲁棒性较差。所以训练自定义管柱数据集, AdamW 是更合适的选择。

4.5 消融实验

本文在基础 YOLOv5s 模型中引入 CBAM 注意力机制、融入 EfficientNetv2 轻量化网络结构、更换特征金字塔网络为 BIFPN。为了对比算法各模块对整体的影响效果, 做消融实验^[26-27]。结果如表 6 所示。

由表 6 可知, 实验 1 为原 YOLOv5s 算法的基础实验, 平均精度为 90.1%。实验 2 加入 EfficientNetv2

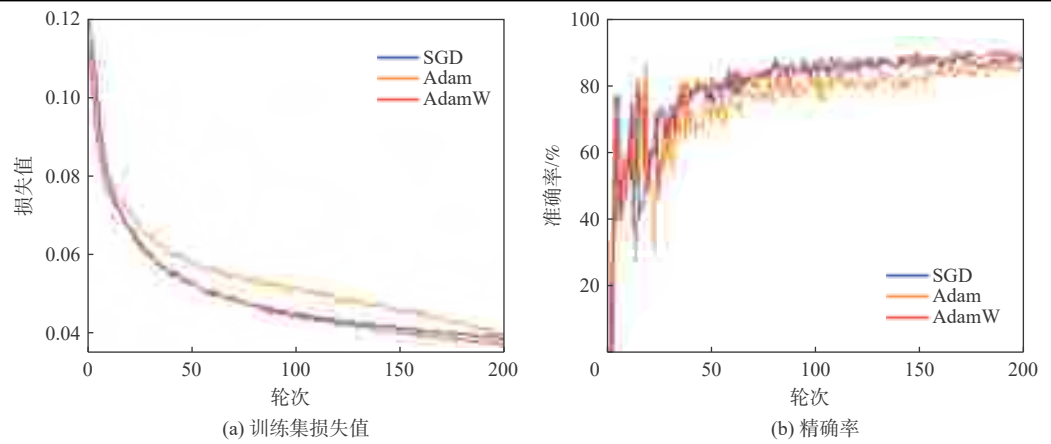


图 16 优化器性能对比图

Fig. 16 Performance comparison diagram of the optimizer

表 6 消融实验评价指标

Table 6 Results of ablation experiments						
实验	准确率/%	召回率/%	$G_{\text{mAP}}/\%$	参数量	浮点运算速度/ 10^9 s^{-1}	推理时间/(帧· s^{-1})
1	86.7	91.7	90.1	7.06×10^6	15.8	10.4
2	88.1	90.4	89.8	5.42×10^6	6.9	6.2
3	86.6	92.6	92	6.41×10^6	16	11.7
4	86.4	91.2	89.6	7.17×10^6	16.4	10.8
5	87.8	91.3	91.2	6.82×10^6	15.9	11.2
6	88.5	89.6	90.4	7.06×10^6	15.8	10.2
7	88.8	89.1	90.7	5.57×10^6	12.1	8.2
8	87.4	88.6	89.8	5.61×10^6	13.6	8.5
9	89.5	88.4	93.7	5.75×10^6	13.8	8.9
10	90.3	91.4	94.2	5.75×10^6	14.2	9.5
11	90.6	91.2	94.6	5.24×10^6	13.4	8.4

轻量化网络,平均精度相较基础模型下降了 0.3%,但模型参数也降低了 20%。实验 3 加入 CBAM 注意力机制,平均精度提升了 1.9%,改善了模型对目标的特征提取能力,且召回率有了较大提升。实验 4 替换特征融合网络为 BIFPN 后,模型 G_{mAP} 下降了 0.5%,但模型体积也缩小为基础模型的 56%,表明 BIFPN 能融合更多的特征。实验 5 替换上采样算子为 CARAFE,在参数量下降的情况下提高了平均精度,说明 CARAFE 增强了特征表达能力,同时计算量降低。实验 6 将 SIOU 损失函数替换为 CIOU 损失函数, G_{mAP} 提升了 0.3%,提高了模型的收敛速度。实验 7、8、9、10、11 分别依次结合 EfficientNetv2+CBAM+BIFPN+CARAFE+SIOU+GhostConv,各类别平均精度都有上涨,且参数量降低。实验 11 验证了结合以上所有改进方法优点的检测效果,计算量由原来的 15.8 GB 减少到 13.4 GB,模型对于单幅图像的推理时间由 10.4 ms 缩短至 8.4 ms,表明 EfficientNetv2 中的 Fused MBConv 模块和 GhostConv 模块都能够有效减少特征图像卷积操作时的参数量以及计算量;平均精度为 94.6%,相比于 YOLOv5s 算法提升了 4.5%,各类别检测精度也是对比结果中

最高的。证明本文改进能够满足提高管柱检测精度的要求。

混淆矩阵的对比如图 17 所示,图 17(a)为初始 YOLOv5s 算法,图 17(b)为改进 YOLOv5s 算法。纵坐标代表预测的类别,横坐标代表真实的类别。每一列的值之和等于 1,每一行的值表示对应预测的比例。从图中可以看出,改进的算法对“钻杆”、“接头”和“工人”类别的准确率高于初始 YOLOv5s,漏检率和误检率都比基础 YOLOv5s 模型低,表明改进后的模型具有较好的性能。

4.6 主流目标检测算法对比实验

为了对比改进后的网络模型与当前主流的 YOLO 系列目标检测网络模性能,进行对比实验。结果如表 7 所示。

基础 YOLOv5s 模型在拥有较少的参数量和计算量的同时,检测精度较好。这使其成为一个可行的选择。YOLOv3 网络模型的 G_{mAP} 值最低,且生成的权重文件大小也较大,说明其检测性能相对较差;YOLOv6 权重、计算量和参数量较大,不适合后期部署;YOLOv7-tiny 网络模型的计算量最小,由于较小的模型容量,精度与 YOLOv5s 相比较低;

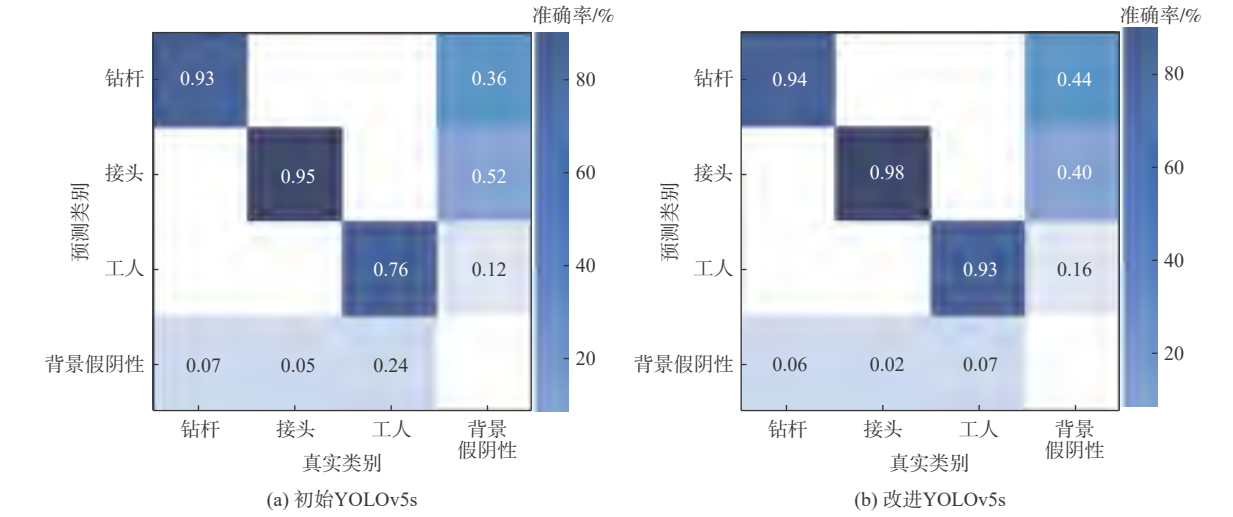


图 17 初始 YOLOv5s 和改进 YOLOv5s 混淆矩阵对比

Fig. 17 Comparison of initial yolov5s and improved algorithm confusion matrices

表 7 YOLO 系列主流模型对比实验

模型	AP/%			$G_{mAP}@0.5\%$	参数量	权重大小/MB	浮点运算速度/ 10^9 s^{-1}	检测速度/(帧· s^{-1})
	钻杆	接头	工人					
YOLOv3 ^[28]	81.3	87.7	84.9	88	8.67×10^6	17.4	12.9	39.6
YOLOv5s	84.8	90.2	85.3	90.1	7.06×10^6	14.4	16.3	42.6
YOLOv6 ^[29]	82.4	86.5	81.6	90	18.5×10^6	38.7	45.2	104
YOLOv7-tiny ^[30]	85.5	89.9	85.5	91.4	6.01×10^6	11.6	13.0	84
YOLOv8 ^[31]	84.8	91.3	85.7	92	11.1×10^6	22.5	28.4	108
YOLOX ^[32]	88.6	85.4	86.2	90.4	8.94×10^6	12.4	26.8	86
本文	93.9	92.9	87.6	94.6	5.24×10^6	10.9	13.4	86.4

YOLOv8 的整体检测性能较好,检测速度也最快,但参数量较大,不适合后期的部署;改进后的 YOLOv5s 模型的全类别检测精度最高, G_{mAP} 也最优,参数量和权重都最小,与初始 YOLOv5s 相比分别下降了 1.82% 和 6.5%,FPS 提高了 50.7%。根据实时检测要求,每秒检测图片张数要大于 24 张,根据试验结果看出,本文改进模型远大于 24 帧/s 的最低要求,能够满足管柱实时检测的要求。

4.7 应用检测评价

为了进一步验证改进算法对管柱检测的有效性,对 YOLOv5s 初始算法和改进算法在实际钻井平台作业场景进行可视化比较。本文选取了 4 种不同环境的场景进行测试。如图 18 所示。为了方便观察,放大了部分较小残缺目标所在区域的面积。红色实线框表示待检测的残缺目标。

通过对比可见,在不同复杂环境的作业条件下。图 18 第 1 列和第 2 列分别为雨天和晴天,初始 YOLOv5s 均存在钻杆和管柱接头漏检的情况;图 18 第 3 列光照条件充足, YOLOv5s 对管柱接头重复检测增加了参数量,影响下一步机械臂的操作;图 18 第 4 列为光照较弱且比较模糊的图像, YOLOv5s 都



图 18 算法改进前后效果对比

Fig. 18 Comparison of effects before and after algorithm improvement

准确检测到目标,但定位精度较低,置信度没有改进 YOLOv5s 好。4 项实验表明改进后的 YOLOv5s 能够准确检测到钻杆、管柱接头和工人,定位置信度高,并且不存在重复识别和缺检漏检的情况,检测速度也满足实时检测的需求,权重较低,更适合在移动端工业机械手上部署。

5 结 论

针对自动化钻机管柱处理中的管柱检测问题, 提出了一种改进的 YOLOv5s 算法。模型以 YOLOv5s 网络为基础, 引入 EfficientNetv2 轻量级网络和 CBAM 注意力机制模块来改进骨干和颈部, 减少了网络的参数量, 增强了特征图与残缺目标相关的通道和空间信息, 有效抑制了背景干扰; 采用加权双向特征金字塔网络 BIFPN 和 CARAFE 算子替代原网络的结构和上采样操作, 提高了分辨率和语义信息的传递, 提高了目标检测精度; 改进传统的卷积层 Conv 为轻量级卷积层 GhostConv, 进一步减少了模型的参数量和计算量, 增强了网络的效能; 用 Siou 损失函数替换 CIoU, 从而增强了目标边界框的回归稳定性, 提升了对小型目标的定位精确度; SGD 优化器替换为 AdamW, 改善了模型的收敛性能, 增强了模型的泛化和鲁棒性。在自定义的管柱检测数据集上进行训练与验证后, 得出模型在检测准确度上提高了 4.1%, 同时参数数量减少了 20%, 模型文件大小也减少了 2.7 MB。

尽管模型的参数规模已经符合嵌入式系统的部署标准, 但模型的检测速率还有一定的提升空间。未来研究需要在保持检测精度的前提下, 进一步提升模型的检测速率, 以更好地满足钻井现场的检测需求。

参考文献 (References)

[1] 白尚懿, 杨小亮, 何生兵, 等. 自动化钻机管柱处理系统研究现状与发展趋势[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(5): 203-207.
BAI S Y, YANG X L, HE S B, et al. Research status and development trend of pipe handling system for automated drilling rig[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(5): 203-207(in Chinese).

[2] 杨传书, 张好林, 肖莉. 自动化钻井关键技术进展与发展趋势[J]. 石油机械, 2017, 45(5): 10-17.
YANG C S, ZHANG H L, XIAO L. Key technical progress and development trend of automated drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(5): 10-17(in Chinese).

[3] 康亮, 李亚伟, 黎善猛, 等. 石油钻机管柱处理系统研究现状和发展趋势分析[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(5): 1-5.
KANG L, LI Y W, LI S M, et al. Research present situation and development trend analysis of pipeline handling system for drill rig[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2019, 39(5): 1-5(in Chinese).

[4] JOCHER G, STOKEN A, BOROVEC J, et al. Ultralytics/yolov5: v3.0 [EB/OL]. (2020-08-13)[2023-12-20]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3983579>.

[5] LIU S, QI L, QIN H F, et al. Path aggregation network for instance segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 8759-8768.

[6] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]//Proceedings of the Computer Vision-ECCV 2018. Cham: Springer, 2018: 3-19.

[7] WANG D C, CHEN X N, JIANG M Y, et al. ADS-Net: an attention-based deeply supervised network for remote sensing image change detection[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 101: 102348.

[8] TAN M X, LE Q V. EfficientNetV2: smaller models and faster training[C]//Proceedings of the International Conference on Machine Learning. New York: PMLR, 2021: 10096-10106.

[9] WANG J Q, CHEN K, XU R, et al. CARAFE: content-aware ReAssembly of FEatures[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 3007-3016.

[10] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 936-944.

[11] TAN M X, PANG R M, LE Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 10778-10787.

[12] ZHU L L, GENG X, LI Z, et al. Improving YOLOv5 with attention mechanism for detecting boulders from planetary images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3776.

[13] HAN K, WANG Y H, TIAN Q, et al. GhostNet: more features from cheap operations[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1577-1586.

[14] ZHOU D F, FANG J, SONG X B, et al. IoU loss for 2D/3D object detection[C]//Proceedings of the 1 International Conference on 3D Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 85-94.

[15] ZHENG Z H, WANG P, LIU W, et al. Distance-IoU loss: faster and better learning for bounding box regression[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(7): 12993-13000.

[16] GEVORGYAN Z. Siou loss: more powerful learning for bounding box regression[EB/OL]. (2022-05-25)[2023-12-20]. <https://arxiv.org/abs/2107.08430>.

[17] WANG J Y, JOSHI G. Cooperative SGD: a unified framework for the design and analysis of local-update SGD algorithms[J]. Journal of Machine Learning Research, 2021, 22(1): 9709-9758.

[18] LOSHCHILOV I, HUTTER F. Decoupled weight decay regularization[EB/OL]. (2017-11-14) [2023-12-20]. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1711.05101>.

[19] ZHOU P, FENG J, MA C, et al. Towards theoretically understanding why sgd generalizes better than adam in deep learning[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2020, 33: 21285-21296.

[20] 杨波, 何金平, 张立娜. 基于改进 SPP-x 的 YOLOv5 神经网络水稻叶片病害识别检测[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 190-197.
YANG B, HE J P, ZHANG L N. Identification and detection of rice leaf diseases by YOLOv5 neural network based on improved SPP-x[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 190-197(in Chinese).

[21] XUE B, HE Y, JING F, et al. Robot target recognition using deep federated learning[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2021, 36(12): 7754-7769.

[22] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks [C]// Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 7132-7141.

[23] QIN Z Q, ZHANG P Y, WU F, et al. FcaNet: frequency channel attention networks[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2021: 763-772.

[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] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-CAM: visual explanations from deep networks *via* gradient-based localization[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 618-626.

[26] WANG Y B, WANG H F, PENG Z H. Rice diseases detection and classification using attention based neural network and Bayesian optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 178: 114770.

[27] PENG S D, JIANG W, PI H J, et al. Deep snake for real-time instance segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 8530-8539.

[28] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[EB/OL]. (2021-10-18) [2023-12-20]. <https://arxiv.org/abs/1804.02767>.

[29] DANG F Y, CHEN D, LU Y Z, et al. YOLOWeeds: a novel benchmark of YOLO object detectors for multi-class weed detection in cotton production systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107655.

[30] 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.

[31] REIS D, KUPEC J, HONG J, et al. Real-time flying object detection with YOLOv8[EB/OL]. (2023-05-17)[2023-12-20]. <https://arxiv.org/abs/2305.09972>.

[32] GE Z, LIU S T, WANG F, et al. YOLOX: exceeding YOLO series in 2021[EB/OL]. (2021-08-06)[2023-12-20]. <https://arxiv.org/abs/2107.08430>.

Lightweight intelligent rig pipe column inspection method based on improved YOLOv5s

NIU Ke¹, PENG Bin^{1,*}, YANG Xiaoliang^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Lanzhou Lanshi Petroleum Equipment Engineering Co., Lanzhou 730050, China)

Abstract: To address the low level of automation in drill string handling and make-up/break-out operations on drilling platforms, an improved multi-object detection algorithm is proposed for accurate identification of drill pipes and tool joints. The model employs a lightweight EfficientNetV2 as the backbone, with an SPPF module to reduce parameters. A CBAM attention module is integrated to suppress background interference. BiFPN replaces PANet to enhance multi-scale feature fusion, while CARAFE is adopted to improve upsampling quality and feature representation. In the detection head, GhostConv is used to reduce computational cost, and the SIoU loss is introduced to improve bounding box regression. The AdamW optimizer is applied to accelerate convergence and enhance generalization. Experiments on a self-built dataset demonstrate that the proposed method achieves robust performance under complex conditions, accurately detecting drill strings with varying poses. The detection accuracy reaches 90.6% and mAP reaches 94.6%, representing improvements of 3.9% and 4.5% over the baseline, respectively, confirming its effectiveness and robustness.

Keywords: computer application technology; YOLOv5s algorithm; automated drilling rig; drill pipe; pipe column joint; target detection; algorithm improvement

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0093

化学反应机理对湍流射流火焰的影响

王云帆¹, 金捷^{1, 2, 3}, 赖根鸿¹, 王方^{1, 2, 3, *}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学 江西研究院, 南昌 330096;

3. 北航成都航空动力创新研究院, 成都 611930)

摘 要: 湍流燃烧在工业与运输业中的应用广泛, 燃烧过程中流动与化学反应强烈耦合, 且耦合机理复杂, 因而燃烧模拟中需要引入化学反应机理。化学反应机理种类多、数量大, 且机理的选择对于模拟结果的影响巨大。为了探究化学反应机理对于湍流射流火焰模拟的影响, 选择了 11 种不同的化学反应机理, 对其进行了反应动力学分析, 选择 Sandia Flame D 湍流射流火焰作为研究对象, 提取了计算稳定后的温度、组分浓度等数据进行对比分析。结果表明: 不同化学机理的动力学表现差异较大, 其中, 总包机理 J14 由于省略了过多的中间产物, 导致点火延迟时间过短, 而 SMOOKE 和 z42 机理由于省略了多碳原子组分, 导致点火延迟时间较实验值更长; 不同机理的计算结果随流场的发展而差异增大, 靠近燃料进口处的差异主要来源于动力学表现的差异, 而远离燃料进口处的差异则更多来源于不同化学反应机理中参与的组分、反应种类不同; 对于所有的化学机理, 存在当中使用的组分数越多, 化学反应的高释热率区域越集中, 火焰长度越短, 全场最高温度越高的趋势。

关 键 词: 化学反应机理; 大涡模拟-运输概率密度函数; 湍流火焰; 燃烧仿真; Sandia Flame D 湍流射流火焰

中图分类号: V

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1339-16

航空发动机燃烧室内数字化研究需求日益增加, 在航空发动机主燃烧室与加力燃烧室内发生的是高雷诺数的湍流燃烧, 包含了剧烈的湍流流动与多组分的快速化学反应等一系列现象, 是一个复杂的流动-化学反应耦合过程。因此, 深入研究湍流燃烧现象, 对于优化燃烧室设计、提高能源利用效率以及推动相关领域的技术进步具有重要意义。天然气是当今能源产业重要的替代燃料之一, 广泛应用于车辆、航空航天等多领域。甲烷作为天然气的主要成分及重要的低碳碳氢燃料, 甲烷是最简单的有机物, 其结构特点使其反应过程相对较为简单和明确, 有助于深入理解和分析反应机理。同时, 甲烷的燃烧等现象也易于实验观察和测量, 为反应机理的研究提供了便利。因此, 探究适用于真实燃烧条件的甲烷化学反应机理, 能够为燃烧室的数值

模拟研究提供重要理论支撑。

用于各项燃烧模拟的反应机理主要有总包机理、详细机理、骨架机理、准稳态机理。总包机理是最简洁的, 主要由一些经验反应组成, 给出的是燃烧过程的整体反应路径。详细机理含有最详尽的化学反应, 能相对较全面地描述燃烧过程中各种物质的反应变化途径, 揭示燃烧现象。由于详细机理的复杂性, 在数值模拟中的计算量也是相当庞大的, 所以详细机理一般只能用于结构简单的模型^[1]。然而, 在模拟复杂模型的燃烧时则需要相对简单的机理, 继而出现了骨架机理、准稳态机理。骨架机理则是采用分类化学反应和集总的概念, 主要使用主成分分析法、敏感性分析法等, 选用能够代表反应进程的一系列复合的化学动力学步骤^[2]。准稳态机理是基于准稳态假设, 即是找出反应系统中浓度

收稿日期: 2024-02-26; 录用日期: 2024-06-26; 网络出版时间: 2024-07-24 16:51

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240724.1137.001

基金项目: 国家自然科学基金 (20232ACB204026, 12172345, 92041001)

*通信作者. E-mail: fwang@buaa.edu.cn

引用格式: 王云帆, 金捷, 赖根鸿, 等. 化学反应机理对湍流射流火焰的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1339-1354.

WANG Y F, JIN J, LAI G H, et al. Influence of chemical reaction mechanism on turbulent jet flame[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1339-1354 (in Chinese).

较低,反应相对较快的组分假定为稳态组分,这些组分的浓度通过其他主要组分的浓度来得到,而只对主要组分求解微分方程,最后简化得到计算量更小的总包反应机理^[3]。

用于甲烷-空气燃烧的反应机理的简化方法众多,不同反应机理的适用范围不同,对于不同湍流火焰模型的计算精度有差异。因而,不少研究人员针对不同甲烷燃烧机理对于燃烧流场的模拟影响这一问题进行了对比分析。

文献 [4] 在 CH₄+O₂+N₂ 火焰中当预混当量比为 1.5~1.9 时通过激光诊断技术实验测得的数据与使用 3 种详细的动力学模型进行评估: GRI-Mech 3.0、Konnov、AramcoMech 1.3,发现 GRI-Mech 3.0 机理显著高估了所有情况下的单态 CH₂ 浓度导致温度数值模拟预测与实验结果不够一致。

文献 [5] 将 VCARS 实验法测得的数据与使用 GRI-Mech 3.0、San Diego、Giovangigli 这 3 种机理在当量比为 1.35 时的甲烷与空气对冲火焰模型模拟预测得到的数据进行对比,发现 San Diego 机理所得数值最为贴合实验数据;文献 [6] 在高压低当量比的甲烷与空气火焰中使用 GRI-Mech2.1、GRI-Mech 3.0 及 GDFkin@3.0_NCN 这 3 种机理模拟预测的数据与实际数据进行了验证对比,并通过对比更好地理解 3 种机理之间的差异,最终修改了 GRI-Mech 3.0 机理来完成对含 N 物质后续的模拟预测。

以上的研究主要采用 0 维或者 1 维模型进行模拟和对比分析,在一定程度上能够指导不同化学反应机理在真实火焰模拟当中的应用。然而真实火焰通常是一个三维的非各向同性的现象,因而研究不同机理对 CFD 模拟也很重要。

文献 [7] 采用 GRI3.0、GRI2.11、GRI1.2、sp24、sp21、Skeletal16 这 6 种甲烷化学反应机理,分别采用涡耗散概念(eddy dissipation concept, EDC)模型和概率密度函数(probability density function, PDF)模型对甲烷射流火焰 Flame D 进行了仿真,结果表明,采用 EDC 模型和 PDF 模型时不同机理的结果与实验值定性吻合,而不同机理结果中次要组分差异较大,其中使用 EDC 模型时的 sp21 机理的结果准确性和计算成本较为优秀。

文献 [8] 使用不同化学反应机理对甲烷射流扩散燃烧进行模拟,发现和 W 机理相比, Y 机理较好的反映了燃烧实际情况,并能提供燃烧过程中自由基和中间产物的信息,其结果表明,甲烷氧化反应中的退化分支过程是比较重要的。而 4 步简化机理具有计算量小的优点,但计算结果表明,燃烧过程中的反应速度过快,燃烧产物浓度和燃烧温度偏高。

综上所述,当前对于甲烷化学机理的研究多集

中在新的简化方法以及新机理的提出,对于不同机理在燃烧模拟当中应用的对比研究很少,而现有不同机理对燃烧影响研究又存在一些问题:参与对比的机理数量少,分析对象较为局限;多针对低维模型进行研究,缺少对真实三维火焰模拟的分析。因此,已有对比研究对于反应机理在燃烧模拟应用的指导性不足。

为了探究化学反应机理对于湍流射流火焰模拟结果的影响,本文选择了 11 种不同的化学反应机理,对这 11 种机理进行了反应动力学分析,选择 Sandia Flame D 湍流射流火焰作为研究对象,提取了计算稳定后的温度、速度、组分浓度、释热率等数据,使用实验数据进行验证,并进行对比分析。

1 方 法

1.1 AECSC 程序及计算方法

本文中的燃烧模拟采用北京航空航天大学仿真中心发展的燃烧仿真软件 AECSC,其核心算法基于大涡模拟(large eddy simulation, LES)与运输概率密度函数(transported probability density function, TPDF)湍流燃烧模型^[8]结合。AECSC 软件已经得到了广泛的开发和验证,具有很好的准确性和可靠性。

AECSC 程序基于有限体积法,动量和标量输运方程均使用二阶中心差分格式(central difference scheme, CDS)进行空间离散,时间的离散选取了 Crack-Nicholson 格式。LES 的亚格子应力模型选取了动力 Smagorinsky-Lilly 模型,PDF 方程的求解选取了 Euler 形式的 Ito 随机场解法,可自定义随机场的个数。在化学反应计算中,AECSC 使用折半时间步方法进行计算,使用牛顿-拉普森方法加速迭代收敛速度。

1.2 物理模型与网格划分

Sandia Flame 系列火焰是美国 Sandia 国家实验室^[9]开展的高雷诺数湍流射流火焰,众多学者对其进行了实验研究,具有丰富的实验数据,其火焰图像及结构示意图如图 1 所示。本文选择 Flame D 作为模拟对象。Flame D 雷诺数为 22 400,存在强烈的湍流脉动与燃烧反应相互作用,是湍流燃烧火焰模拟的典型算例。

在实验中,体积分数 25% 的甲烷和 75% 的空气以平均 49.9 m/s 的速度从直径 7.2 mm 的燃料喷口喷出,被周围直径为 18.2 mm 的值班火焰 1 880 K 的高温混合气点燃,形成稳定的湍流射流火焰。外围为温度 293 K,流速 0.9 m/s 的空气伴流。

算例网格采用 ICEM-CFD 软件划分。计算域为直径 0.3 m,高 0.8 m 的圆柱体,计算网格节点总数 174 万,为了便于并行计算将网格划分为 64 个

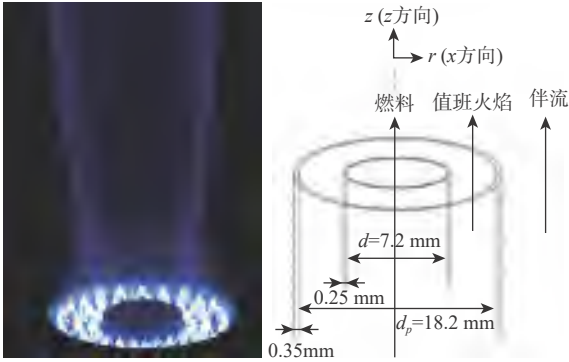


图 1 Sandia Flame 实验图像与结构示意图

Fig. 1 Sandia Flame experimental image and structure schematic

block。同时,对进口和中心预混区域进行了一定的加密,提高了计算精度。其中,最小网格尺寸为 0.4 mm,最大网格尺寸为 4 mm,此网格的网格无关性已经在之前的研究中进行验证^[10]。网格划分示意图如图 2 所示。



图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid mesh

1.3 甲烷化学反应机理选择与验证

用于各项燃烧模拟的反应机理种类主要分为详细机理、骨架机理、总包机理、准稳态机理等。化学反应机理简化方式多种多样,针对不同的需求、研究对象往往会选择不同简化方法得出的化学反应简化机理。在简化过程中往往要考虑很多因素,包括化学反应中关键反应的识别,考虑化学反应动力学中的不确定性,考虑计算效率和计算精度的平衡等。为探究不同种类化学反应机理对于燃烧模拟的影响,本文选择 5 个种类共 11 种采用不同简化方法的机理^[11-19]进行对比分析,并对其部分机理进行热力学与动力学验证。本文中所使用的全部 11 中机理详情如下表 1 所示,这些不同的机理包含的组分以及单个反应存在大量重合的情况,具体组分及单步反应的情况如附录 A 和附录 B 所示。

燃烧化学反应机理的热力学与动力学检验多基于激波管、定容燃烧弹、对冲火焰等实验。燃烧化学反应机理的热力学与动力学验证中可以选择

表 1 本文使用的甲烷化学反应机理

Table 1 The chemical reaction mechanism of methane used in this paper

机理名称	组分数	步数/步	机理类型	文献来源
JL4	7	4	总包机理	[11]
CML10	14	10(175个反应)	准稳态机理	[12]
15step	19	15(323个反应)	准稳态机理	[13]
Sk17	17	73	骨架机理	[14]
Sk30	30	184	骨架机理	[15]
SMOKE	16	35	骨架机理	[16]
Z42	18	42	骨架机理	[17]
DRM19	21	84	半详细机理	[18]
DRM22	24	104	半详细机理	[18]
GRI1.2	32	177	详细机理	[19]
GRI3.0	53	325	详细机理	[19]

一些关键的参数来评判检验结果。绝热火焰温度是一个关键的热力学参数,其反映了在理想化条件下燃烧反应的最大可能温度;层流火焰传播速度对于理解和预测燃烧过程中的化学反应动力学至关重要,因为其直接影响燃烧效率、污染物生成以及火焰稳定性等多个方面;点火延迟时间也是评估燃料性能的一个重要指标,其直接影响到燃料的自燃能力和燃烧效率。本节基于 Chemkin-Pro 软件的 0 维反应器模型和层流火焰模型,计算了不同甲烷机理在标准大气压下的绝热火焰温度 T_{ab} 、点火延迟时间 τ_{ig} 与层流火焰传播速度 s_l , 并与实验值进行了对比验证,见图 3~图 5。其中, T_{ab} 、 τ_{ig} 、 s_l 的实验值分别来自文献 [20-22] 的实验结果。特别规定, τ_{ig} 在模拟中定义为达到最大温度梯度所需的时间。

在全部 11 种机理中, 15(step) 机理、CML10 机理机理由于不方便导入 Chemkin-Pro 进行计算, 并且已经在文献 [12-13] 当中进行过充分的化学动力学验证, 所以此处仅对剩余的 9 种机理进行化学热力学与动力学验证。

参与验证的 9 种反应机理的绝热火焰温度 T_{ab} 基本相同, 这主要是由于在计算过程中反应物和生成物相同, 且采用的热力学数据相似。而这 9 种反应机理的点火延迟时间 τ_{ig} 与火焰传播速度 s_l 的验证中, 不同机理的模拟结果差异较大。

在点火延迟时间的计算当中, JL4 的点火延迟时间最短, 这主要是由于其省略了大量的中间组分, 缺少对于点火过程中次要组分的模拟, 导致点火延迟时间最短。而 sk17 机理适用于稀薄甲烷-氧气燃烧, 因而在恰当比附近点火延迟时间的计算中出现点火延迟过慢的情况。SMOKE 机理与 z42 机理均为骨架机理, 其简化过程中将原有的所有含碳组分简化到仅保留只含单个碳原子的组分, 缺失了某些点火时的反应路径, 因而低估了点火过程时的反应速度。

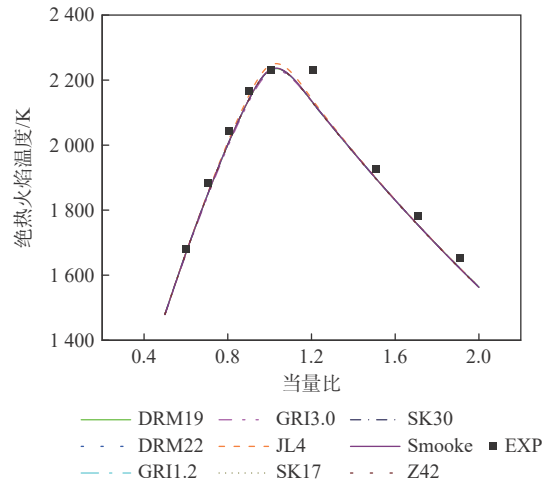


图 3 不同化学机理绝热火焰温度

Fig. 3 Adiabatic flame temperature for different mechanisms

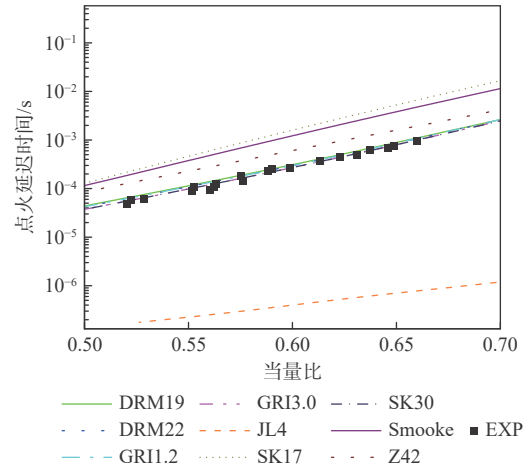


图 4 不同化学机理点火延迟时间

Fig. 4 Ignition delay time for different mechanisms

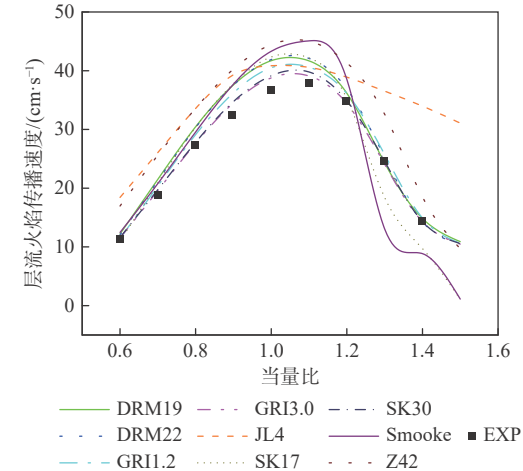


图 5 不同化学机理层流火焰传播速度

Fig. 5 Laminar flame propagation velocity for different mechanisms

在层流火焰传播速度的计算当中,在低当量比部分,除 z42 机理与 JL4 机理外,其余机理的层流火焰传播速度比较接近。在当量比接近 1 的部分,所有反应机理普遍高估了层流火焰传播速度。而在

当量比较高的部分,JL4 机理与 Z42 机理高估了层流火焰传播速度,而 SMOOKE 机理与 sk17 机理则低估了火焰传播速度。这些速度差异将导致不同机理在真实火焰模拟中表现有较大差异,下文将对此进行讨论。

2 结果与讨论

2.1 时均温度和时均释热率云图对比分析

不同机理时均温度云图的对比能够明显看出,不同火焰的高温区长度区别较大,其中, JL4 机理的火焰最长,平均温度最高。这是由于 JL4 机理的点火延迟时间的预测较其他机理明显过短,导致其在喷嘴附近就已经大量释热,因而在湍流射流火焰模拟中出现了着火抬升高度较低且流场前方时均温度偏高的现象;同时,过早的释热加速了流场前段的流动速度,导致高温区更长。与 JL4 机理相反的是, Smooke 和 Z42 机理由于在简化过程中删除了多碳原子组分,导致点火延迟时间较长,因而在流场前部的释热较少,因而其温度时均模拟结果中相较于其他机理的时均温度结果偏低。通过对图 6 和图 7 的观察还可以发现,除了 JL4 机理外,对于本文选用所有的化学机理的计算结果存在一个定性趋势,即化学机理涉及的组分数越多,化学反应的高释热率区域越集中,火焰长度越短,全场最高温度越高。

不同机理时均释热率云图的对比能够明显看出,不同火焰的高释热率区长度与高温区长度的规律一致。对于所有的机理的释热率时均云图,均存在明显的沿轴向分层的 2 个释热率高峰。而所有的机理的结果中,仅有 JL4、sk17、sk30、GRI3.0、GRI1.2 这 5 种机理能够明显观察到从轴线开始沿径向出现 2 个峰值。通过提取组分消耗率数据分析得到,从内向外 2 个高峰分别对应甲烷的消耗率高峰以及 CO 和 H2 的消耗率高峰。对于 JL4 机理来说,其仅包含 4 个反应,因而径向分层情况最为明显。对于上述其余的 4 种机理,其含有的反应数和组分数较多,而其余机理由于在简化时删除了某些中间组分和反应,这导致了缺少了对某些中间反应过程的考虑,两类反应的释热率的过渡区被忽略了,因而高释热率区域径向分层不明显。

2.2 不同化学反应机理对不同截面各物理量分布的影响

为了对比不同机理在不同截面的结果,本文选择了具有代表性的 3 个截面: z/d=3 截面、z/d=15 截面和 z/d=45 截面,提取这 3 个截面的时均温度、时均组分质量分数进行对比分析。

z/d=3 截面为靠近燃料进口的一个截面,在此处不同机理的温度、组分浓度的结果近似,但仍然

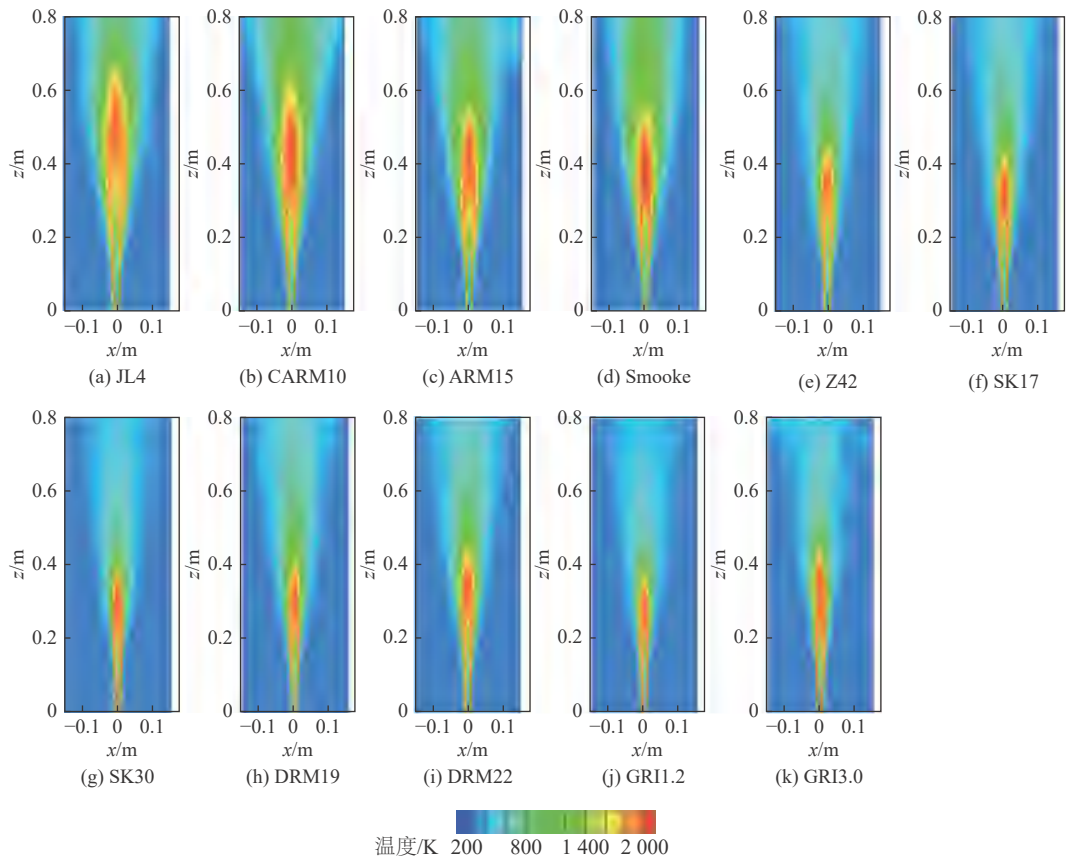


图 6 不同机理时均温度云图

Fig. 6 Time-averaged temperature contour for different mechanisms

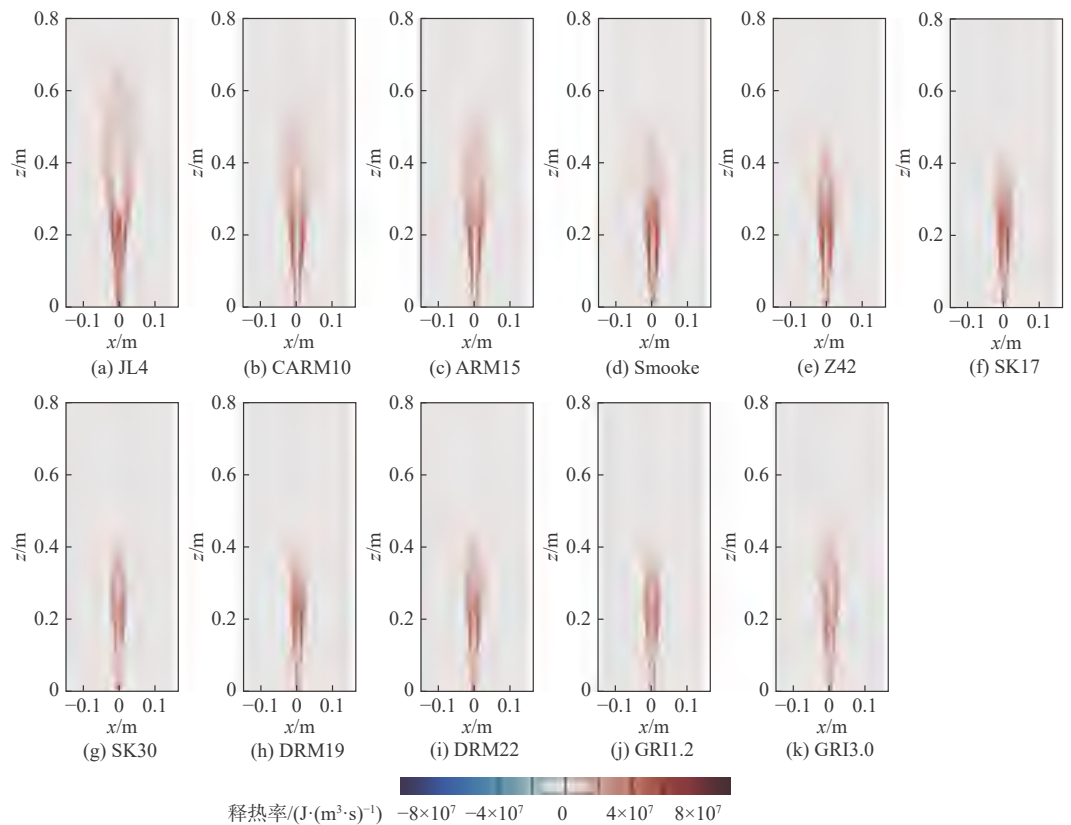


图 7 不同机理时均释热率云图

Fig. 7 Time-averaged heat release rate contour for different mechanisms

有细微差别。观察图 8, 从所有机理的温度分布图可以发现, JL4 机理的温度分布稍异于其他机理的温度分布, 其温度极值的径向位置明显偏大, 其原因仍如上文所推测, 由于 JL4 为总包机理, 不能对点火过程进行准确描述, 其释热较其他所有反应机理都更早发生, 因而加速了径向流动。除 JL4 以外, 在 $x=0.006\text{ m}$ 到 $x=0.009\text{ m}$ 的位置, GRI1.2、GRI3.0 和 sk30 机理的时均温度结果明显高于其他机理, 这可能是由于这 3 种机理具有最多的组分数, 因而在点火过程的模拟中可能存在更多的反应路径, 使得总体反应速率更快, 并且局部释热率更高。

所有机理的 CO 的时均质量分数极值所在的径向位置接近, 但质量分数大小存在较大差别, 其中

JL4 机理的浓度明显偏大, 而 sk17 机理、SMOOKE 机理的浓度则明显偏小。流场此处当量比较大, 各反应机理的 CO 浓度大小关系与层流火焰传播速度在当量比较大处的大小关系基本相似, 存在明显的关联现象。这可能是由于靠近燃料进口处, 火焰结构较为简单, 燃烧现象主要受化学反应动力学控制, 因而此处不同机理的结果差别与不同机理的动力学差别相关联。

观察图 9, 从 $z/d=15$ 截面不同机理时均温度分布图 9(a) 可以发现, 全部的 11 种机理均高估了时均温度。其中 JL4 的温度最大值径向位置最大, 而其他机理的温度最大值的径向位置则相近, 其原因在上文已经分析过。而剩余的 10 种机理的计算结

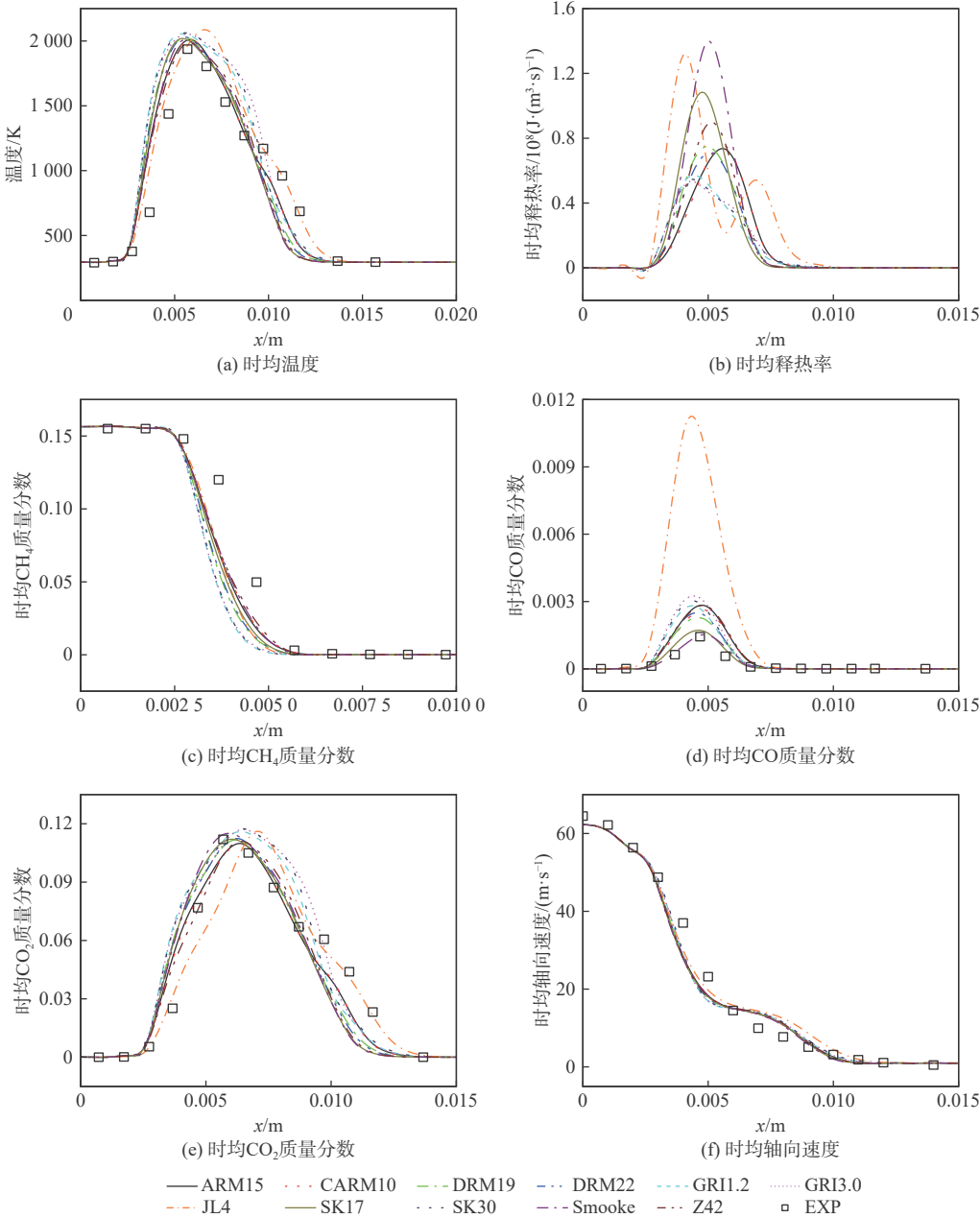


图 8 $z/d=3$ 截面不同机理下各物理量时均结果分布图

Fig. 8 $z/d=3$ section time-averaged distribution of each physical quantity for different mechanisms

果则可根据温度极值的大小分为 2 类, 其中 SMOOKE、z42、CML10、15step 这 4 种机理的温度极值较小。

从 $z/d=15$ 截面不同机理的各组分质量分数分布图 9(c)~图 9(e), 可以发现不同机理的 CH_4 分布结果差异较大。除 SMOOKE 机理与 JL4 机理外, 其他机理的 CH_4 分布存在着组分数越多, 在相同位置 CH_4 浓度越低的现象, 这可能与组分数越多的机理, CH_4 转换为中间产物的量越大。JL4 机理虽然中间产物种类少, 但是反应相较其他机理更激烈, 更多的 CH_4 转换为了 CO 。SMOOKE 机理虽然组分数与 CML10 相近, 然而 CML10 为准稳态机理, 使用数学方法将参与所有反应的组分映射到少数几个组分, 因而其真实的反应数远远大于 SMOOKE, 因而更多的 CH_4 被消耗。

$z/d=45$ 截面为靠近火焰尾部的一个截面, 如图 10 所示, 此处的 CH_4 基本消耗完毕, 但仍存在大量的 CO 、 H_2 及其他燃烧的中间组分。由于不同机理计算结果中火焰长度差异较大, 因而在 $z/d=45$ 截面, 温度分布差异较大。其中, CARM10、ARM15、Smooke、Z42 机理包含的组分数较少, 因而总体的反应速度较慢, 使得火焰总体长度较长, 低温的未燃燃料能够到达更远的距离, 因此在 $z/d=45$ 截面的温度分布仍呈双峰分布, 这一点可以在 CH_4 的质量分数分布中得到印证。影响 JL4 机理的各物理量表现的结果则与上述 4 种机理不一样。JL4 机理则由于其点火较早, 且反应更为剧烈, 因而其 CH_4 的消耗量也更大, 因而虽然温度曲线呈的双峰分布, CH_4 的浓度也较低。这一结论可以对比 JL4 机理和上

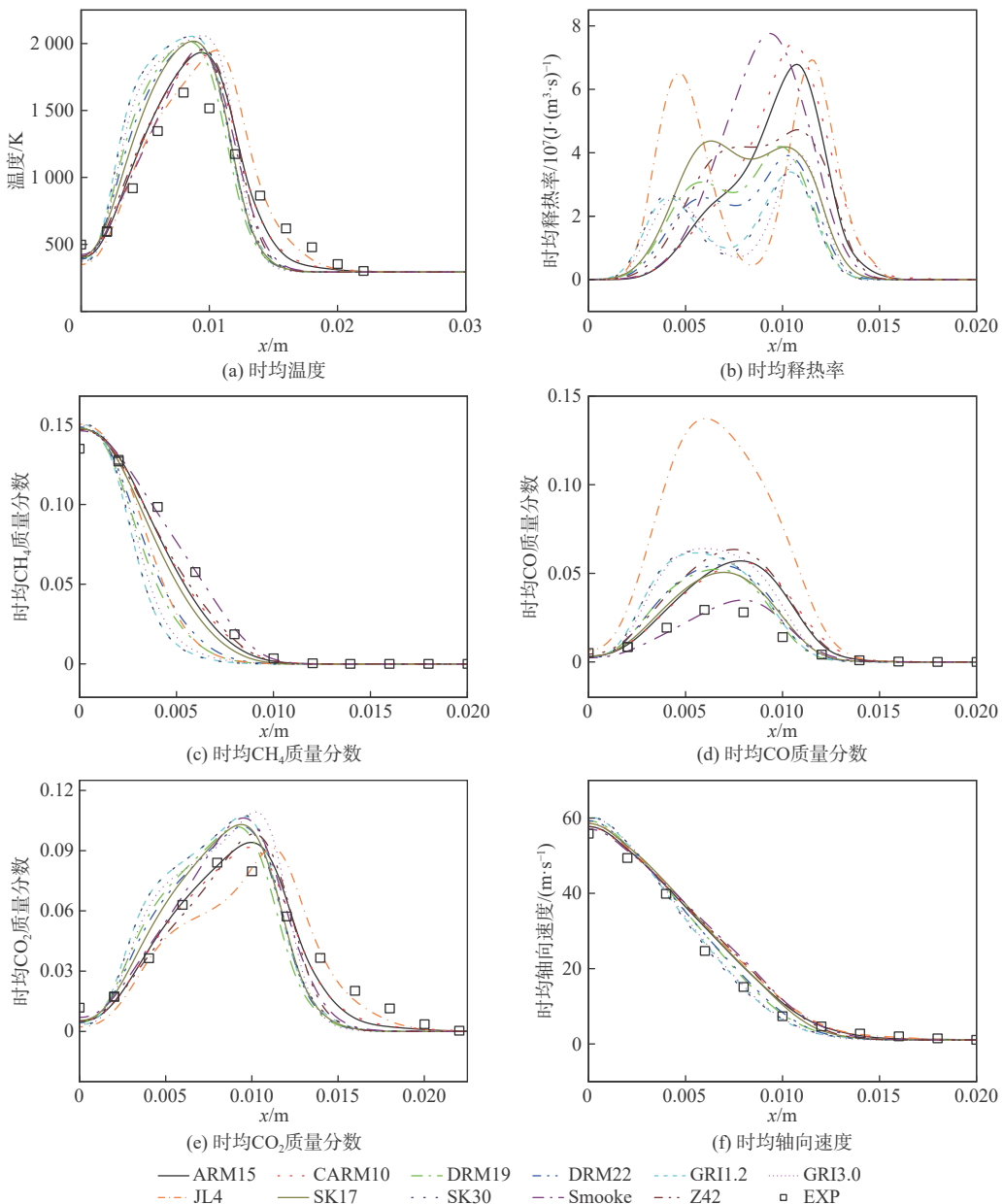


图 9 $z/d=15$ 截面不同机理下各物理量时均结果分布图

Fig. 9 $z/d=15$ section time-averaged distribution of each physical quantity for different mechanisms

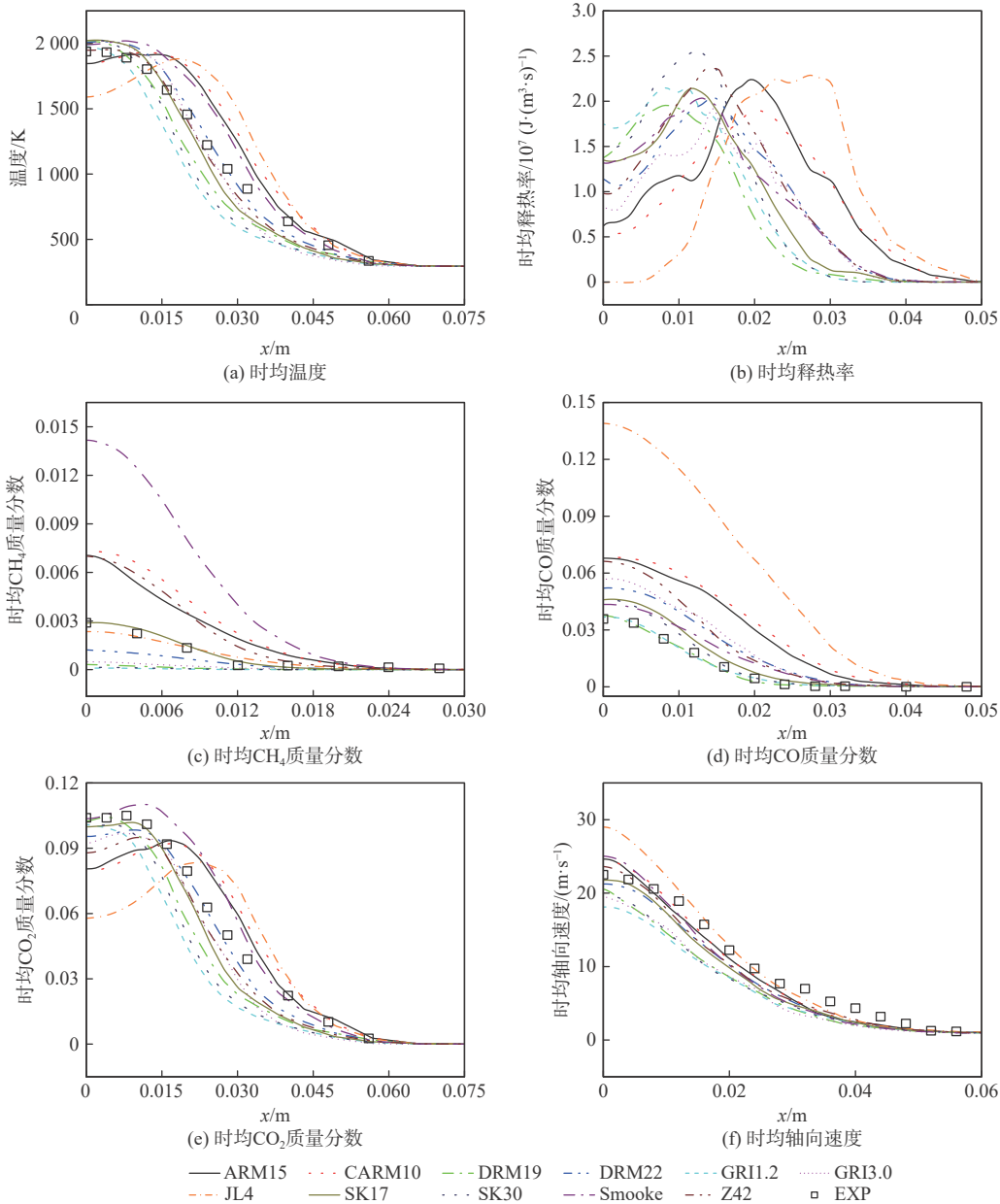


图 10 $z/d=45$ 截面不同机理下各物理量时均结果分布图

Fig. 10 $z/d=45$ section time-averaged distribution of each physical quantity for different mechanisms

述 4 种机理的 CH_4 的质量分数差异结果证明。

综上所述,不同机理的计算结果之间的差异会随流场发展而增大。其中,在靠近燃料进口处的温度与组分差异主要与动力学表现的差异有关;在靠近燃料进口处的温度与组分差异主要与动力学表现的表现接近,由于不同化学反应机理参与的组分、反应种类及同种反应参数不同,不同化学反应机理的温度与组分分布差异巨大。

2.3 不同化学反应机理计算时间分析

AECSC 中涉及化学反应计算时使用的迭代方法为折半迭代法和牛顿-拉普森迭代法相结合。在所有的机理计算中,使用较复杂机理进行计算时,参与的组分数较多,计算刚度较大,因而化学反应

计算收敛更慢,所需的计算时间更长。由于流动的计算量基本不变,因而化学反应计算量在总的计算量中占比较大。在上述所有反应机理的计算的时间差异巨大,总的计算速度主要取决于参与反应的网格数以及单个网格的计算量。

观察图 11,从不同反应机理每万网格计算时间-组分数散点图可以发现,组分数和计算时间呈明显的正相关,说明不同机理的计算时间差异主要取决于该机理包含的组分数的差异。观察图 12,从不同反应机理每万网格计算时间-反应数散点图可以发现,反应数与计算时间则无明显的相关性。但是可以发现,在组分数相近的机理中,准稳态机理由于计算了更多的反应,计算时间会相较于其他种类的机理更长。

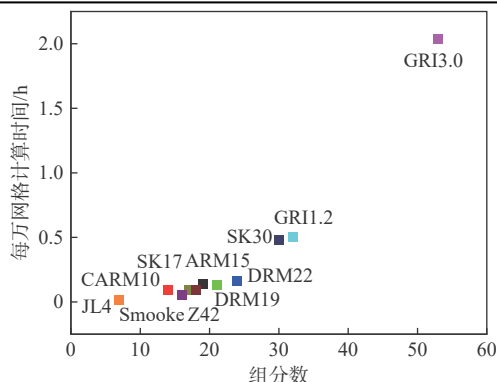


图 11 不同反应机理每万网格计算时间-组分数散点图

Fig. 11 Scatterplot of calculation time per 10,000 grids and number of species for different reaction mechanisms

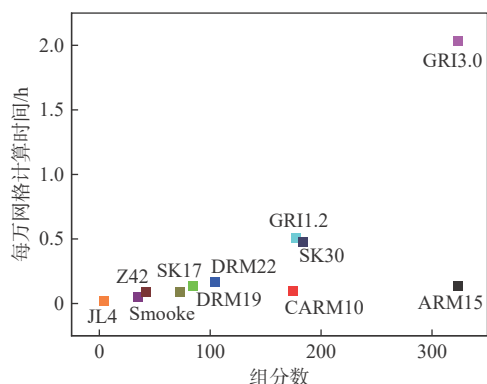


图 12 不同反应机理每万网格计算时间-反应数散点图

Fig. 12 Scatterplot of calculation time per 10,000 grids and number of reactions for different reaction mechanisms

3 结 论

本文使用基于 LES-TPDF 方法的燃烧仿真软件 AECSC, 使用了 11 种不同种类的化学机理对 Sandia Flame D 火焰进行模拟, 并通过对比不同化学反应机理的结果分析化学机理对湍流射流火焰模拟的影响。分析发现, 不同机理的动力学表现差异较大, 过少的组分数或过少的反应数会影响其点火延迟时间的预测。在湍流射流火焰模拟中, 化学机理组分数越多或者反应数越多, 化学反应的高释热率区域越集中, 火焰长度越短, 全场最高温度越高。所有的模拟结果中, 靠近燃料进口处的温度与组分差异主要与动力学表现的差异有关, 但在远离喷口处, 组分与反应路径的差异则成为影响湍流燃烧模拟的重要因素。

参考文献 (References)

[1] 张全. 简化燃烧化学反应机理的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2001.
ZHANG Q. Simplified study of combustion chemical reaction mechanism[D]. Hefei: University of Science and Technology of

China, 2001(in Chinese).
[2] 谭海. 甲烷扩散火焰的富氧燃烧特性及总包反应机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
TAN X. Oxy-fuel combustion characteristics and the global chemistry mechanism for methane diffusion flame[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014(in Chinese).
[3] 林志勇, 周进, 黄玉辉. 基于敏感性分析和准稳态假设简化详细反应机理[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(1): 16-20.
LIN Z Y, ZHOU J, HUANG Y H. Simplification of detailed reaction mechanism based on the sensitivity analysis and quasi-steady state assumption[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(1): 16-20(in Chinese).
[4] FOMIN A, ZAVLEV T, ALEKSEEV V A, et al. Experimental and modelling study of 1CH₂ in premixed very rich methane flames[J]. Combustion and Flame, 2016, 171: 198-210.
[5] SATIJA A, YUAN S L, NAIK S V, et al. Vibrational CARS thermometry and one-dimensional numerical simulations in CH₄/H₂/air partially-premixed flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(21): 6959-6969.
[6] PILLIER L, IDIR M, MOLET J, et al. Experimental study and modelling of NO_x formation in high pressure counter-flow premixed CH₄/air flames[J]. Fuel, 2015, 150: 394-407.
[7] HE D, YU Y S, KUANG Y C, et al. Model comparisons of flow and chemical kinetic mechanisms for methane-air combustion for engineering applications[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4107.
[8] 董刚, 黄鹰, 陈义良. 不同化学反应机理对甲烷射流湍流扩散火焰计算结果影响的研究[J]. 燃料化学学报, 2000, 28(1): 49-54.
DONG G, HUANG Y, CHEN Y L. Study of effects of different chemical reaction mechanisms on computation results for methane jet turbulence diffusion flame[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2000, 28(1): 49-54(in Chinese).
[9] BARLOW R S, FRANK J H. Effects of turbulence on species mass fractions in methane/air jet flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1998, 27(1): 1087-1095.
[10] 宋绪光, 金捷, 张敏琦, 等. 基于 LES 的射流火焰湍流辐射交互作用研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(8): 2667-2676.
SONG X G, JIN J, ZHANG M Q, et al. Turbulence-radiation interaction in turbulent jet flame based on large-eddy simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(8): 2667-2676(in Chinese).
[11] JONES W P, LINDSTEDT R P. Global reaction schemes for hydrocarbon combustion[J]. Combustion and Flame, 1988, 73(3): 233-249.
[12] CHANG W C, CHEN J Y. Reduced mechanisms based on GRI-Mech 1.2[EB/OL]. (2020-01-22)[2023-01-22]. <http://firebrand.me.berkeley.edu/reduced>.
[13] SUNG C J, LAW C K, CHEN J Y. Augmented reduced mechanisms for NO emission in methane oxidation[J]. Combustion and Flame, 2001, 125(1-2): 906-919.
[14] SANKARAN R, HAWKES E R, CHEN J H, et al. Structure of a spatially developing turbulent lean methane-air Bunsen flame[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 1291-1298.
[15] LU T F, LAW C K. A criterion based on computational singular perturbation for the identification of quasi steady state species: a reduced mechanism for methane oxidation with NO chemistry[J]. Combustion and Flame, 2008, 154(4): 761-774.
[16] SMOOKE M D. Reduced kinetic mechanisms and asymptotic ap-

proximations for methane-air flames[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.

[17] LARSSON A, ZETTERVALL N, HURTIG T, et al. Skeletal methane-air reaction mechanism for large eddy simulation of turbulent microwave-assisted combustion[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(2): 1904-1926.

[18] Kazakov A, Frenklach M. Reduced reaction sets based on GRI-mech 1.2 [EB/OL]. (2023-11-19)[2023-12-20]. <http://www.me.berkeley.edu/drm/>.

[19] MICHAEL F. GRI-Mech home page[EB/OL]. (2021-03-01)[2023-12-20]. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech>.

[20] LAW C K, MAKINO A, LU T F. On the off-stoichiometric peaking of adiabatic flame temperature[J]. Combustion and Flame, 2006, 145(4): 808-819.

[21] PARK O, VELOO P S, LIU N, et al. Combustion characteristics of alternative gaseous fuels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 887-894.

[22] HU E J, LI X T, MENG X, et al. Laminar flame speeds and ignition delay times of methane-air mixtures at elevated temperatures and pressures[J]. Fuel, 2015, 158: 1-10.

附录 A 不同化学机理组分包含关系汇总表

种类	JL4	SMOOKE	Z42	sk17	sk30	DRM19	DRM22	GRI1.2	GRI3.0	求和
CH4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
CO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
CO2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
H2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
H2O	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
N2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
O2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
CH2O	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
CH3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
HCO	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
HO2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
O	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
OH	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
CH2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7
CH3O	0	1	1	0	1	1	1	1	1	7
CH2(S)	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
H2O2	0	1	1	0	1	0	1	1	1	6
C2H4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
C2H5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
C2H6	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
AR	0	0	0	0	0	1	1	1	1	4
C2H2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
C2H3	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
CH	0	0	1	0	1	0	0	1	1	4
CH2OH	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
C	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3OH	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
HCCO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
C2H	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
CH2CHO	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
HCCOH	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
C3H7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
C3H8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3CHO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
H2CN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HOCN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N2O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NCO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NH	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NH2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NH3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NNH	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NO2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

注: 1为包含, 0为不包含。

附录 B 不同化学机理反应包含关系汇总表

化学反应	JL4	SMOOKE	Z42	sk17	sk30	DRM19	DRM22	GRI1.2	GRI3.0	求和
O+H2=H+OH	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
O+CH3=H+CH2O	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+O2+M=HO2+M	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+O2=O+OH	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
2H+M=H2+M	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+OH+M=H2O+M	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+HO2=O2+H2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+HO2=2OH	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+CH3+M=CH4+M	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+CH4=CH3+H2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+HCO=H2+CO	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
H+CH2O=HCO+H2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
OH+H2=H+H2O	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
2OH=O+H2O	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
OH+HO2=O2+H2O	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
OH+CH4=CH3+H2O	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
OH+CO=H+CO2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
OH+CH2O=HCO+H2O	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
HCO+M=H+CO+M	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
OH+CH3=CH2+H2O	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7
CH3+O2=O+CH3O	0	1	1	0	1	1	1	1	1	7
O+H+M=OH+M	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O+HO2=OH+O2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O+CH2=H+HCO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O+CH4=OH+CH3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O+CO+M=CO2+M	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O+HCO=OH+CO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O+HCO=H+CO2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O+CH2O=OH+HCO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O2+CO=O+CO2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
O2+CH2O=HO2+HCO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
H+2O2=HO2+O2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
H+O2+H2O=HO2+H2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
H+O2+N2=HO2+N2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
2H+H2O=H2+H2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
2H+CO2=H2+CO2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
H+CH2+M=CH3+M	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
H+HCO+M=CH2O+M	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
H2+CO+M=CH2O+M	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
OH+CH2=H+CH2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
OH+CH2(S)=H+CH2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
OH+CH3=CH2(S)+H2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
OH+HCO=H2O+CO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
HO2+CH2=OH+CH2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
HO2+CH3=O2+CH4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
HO2+CO=OH+CO2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2+H2=H+CH3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2+CH4=2CH3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+N2=CH2+N2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+O2=H+OH+CO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+O2=CO+H2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+H2=CH3+H	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+H2O=CH2+H2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+CH4=2CH3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+CO=CH2+CO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+CO2=CH2+CO2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH2(S)+CO2=CO+CH2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH3+O2=OH+CH2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH3+HCO=CH4+CO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
CH3+CH2O=HCO+CH4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
HCO+H2O=H+CO+H2O	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
HCO+O2=HO2+CO	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
2OH+M=H2O2+M	0	1	1	0	1	0	1	1	1	6
OH+H2O2=HO2+H2O	0	1	1	0	1	0	1	1	1	6
2HO2=O2+H2O2	0	1	1	0	1	0	1	1	1	6
O+CH2(S)=H+HCO	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
O+C2H4=CH3+HCO	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
O+C2H5=CH3+CH2O	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
O+C2H6=OH+C2H5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
H+CH2O+M=CH3O+M	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5

续表

化学反应	JL4	SMOOKE	Z42	sk17	sk30	DRM19	DRM22	GRI1.2	GRI3.0	求和
H+CH3O=OH+CH3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
H+C2H4+M=C2H5+M	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
H+C2H5+M=C2H6+M	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
H+C2H6=C2H5+H2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
OH+C2H6=C2H5+H2O	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
HO2+CH3=OH+CH3O	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
CH2+CH3=H+C2H4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
CH2(S)+CH3=H+C2H4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
2CH3+M=C2H6+M	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
2CH3=H+C2H5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
CH3+C2H6=C2H5+CH4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
CH3O+O2=HO2+CH2O	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
C2H5+O2=HO2+C2H4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
CH3O+H=H2+CH2O	0	1	1	0	1	0	0	1	1	5
H+O2+AR=HO2+AR	0	0	0	0	0	1	1	1	1	4
CH2+O2=OH+HCO	0	0	0	1	0	1	1	1	0	4
CH2(S)+AR=CH2+AR	0	0	0	0	0	1	1	1	1	4
O+C2H2=CO+CH2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
H+H2O2=HO2+H2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
H+C2H2+M=C2H3+M	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
H+C2H3+M=C2H4+M	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
H+C2H3=H2+C2H2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
H+C2H4=C2H3+H2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
OH+C2H2=CH3+CO	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
OH+C2H3=H2O+C2H2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
OH+C2H4=C2H3+H2O	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
HO2+CH2O=HCO+H2O2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
2CH2=H2+C2H2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
CH3+H2O2=HO2+CH4	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
CH3+C2H4=C2H3+CH4	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
C2H3+O2=HCO+CH2O	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
C2H4+M=H2+C2H2+M	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
2O+M=O2+M	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
HO2+H=O+H2O	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
CH+O=H+CO	0	0	1	0	1	0	0	1	1	4
CH+OH=H+HCO	0	0	1	0	1	0	0	1	1	4
CH+O2=O+HCO	0	0	1	0	1	0	0	1	1	4
CH+CO2=HCO+CO	0	0	1	0	1	0	0	1	1	4
CH2+OH=CH+H2O	0	0	1	0	1	0	0	1	1	4
CH2OH+H=H2+CH2O	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
CH2OH+H=OH+CH3	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
CH2OH+H=CH2(S)+H2O	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
CH2OH+O=OH+CH2O	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
CH2OH+OH=H2O+CH2O	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
CH2OH+O2=HO2+CH2O	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
O+CH2(S)=H2+CO	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
H+CH2O+M=CH2OH+M	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
H2O2+H=OH+H2O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
H2O2+O=OH+HO2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
C+OH=H+CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
C+O2=O+CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH+H=C+H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH+H2=H+CH2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH+H2O=H+CH2O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH+CO+H=HCCO+M	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2+CH=H+C2H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2(S)+H=CH+H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2(S)+H2O+M=CH3OH+M	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2O+CH=H+CH2CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3+OH+M=CH3OH+M	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3+C=H+C2H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3+CH=H+C2H3	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3O+H+M=CH3OH+M	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3O+H=H+CH2OH	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3O+H=CH2(S)+H2O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3O+O=OH+CH2O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3O+OH=H2O+CH2O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2OH+H+M=CH3OH+M	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH4+CH=H+C2H4	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3OH+H=CH2OH+H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3OH+H=CH3O+H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3OH+O=OH+CH2OH	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3

续表

化学反应	JL4	SMOOKE	Z42	sk17	sk30	DRM19	DRM22	GRI1.2	GRI3.0	求和
CH3OH+O=OH+CH3O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3OH+OH=CH2OH+H2O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3OH+OH=CH3O+H2O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3OH+CH3=CH2OH+CH4	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH3OH+CH3=CH3O+CH4	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
HCCO+H=CH2(S)+CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
HCCO+O=H+2CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
HCCO+O2=OH+2CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
HCCO+CH=CO+C2H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
HCCO+CH2=C2H3+CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
2HCCO=2CO+C2H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
C2H2+O=H+HCCO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
C2H2+OH=H+CH2CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2+CO+M=CH2CO+M	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2CO+H=HCCO+H2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2CO+H=CH3+CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2CO+O=OH+HCCO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2CO+O=CH2+CO2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
CH2CO+OH=HCCO+H2O	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
C2H3+O=H+CH2CO	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
C2H5+H=H2+C2H4	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
C2H6+CH2(S)=CH3+C2H5	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
H2O2+M=2OH+M	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
CH+H2+M=CH3+M	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2+O2=OH+H+CO	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2+O2=2H+CO2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2+O2=O+CH2O	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2+C=H+C2H	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
2CH2=2H+C2H2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2(S)+H2O=H2+CH2O	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH3+O=H+H2+CO	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH3+OH=H2+CH2O	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH3O+M=H+CH2O+M	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
C2H+H+M=C2H2+M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
C2H+O=CH+CO	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
C2H+OH=H+HCCO	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
C2H+H2=H+C2H2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
C2H+O2=HCO+CO	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
C2H2+OH=C2H+H2O	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
C2H3+O2=CH2CHO+O	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
C2H3+O2=C2H2+HO2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2CHO+H=CH3+HCO	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2CHO+H=CH2CO+H2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2CHO+O=H+CH2+CO2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2CHO+OH=H2O+CH2CO	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2CHO+OH=HCO+CH2OH	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
CH2CHO+O2=OH+CO+CH2O	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
C2H4+O=H+CH2CHO	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
O+C2H2=OH+C2H	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
H+HCCOH=H+CH2CO	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
OH+C2H2=H+HCCOH	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
H+CH2CO+M=CH2CHO+M	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
O2+CH2CHO=OH+2HCO	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
O+OH=O2+H	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
OH+H=O+H2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
H2O+H=H2+OH	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
H2O+O=OH+OH	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
CO2+H=CO+OH	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
CH4=CH3+H	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
CH3+H2=CH4+H	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
CH3+H2O=CH4+OH	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
H2O+HO2=H2O2+OH	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
O+C2H2=CH2(S)+CO	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
CH3CHO+H=CH2CHO+H2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3CHO+O=OH+CH2CHO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
C2H5+O=H+CH3CHO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N+NO=N2+O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N+O2=NO+O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N+OH=NO+H	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N2O+O=N2+O2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N2O+O=2NO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N2O+H=N2+OH	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

续表

化学反应	JL4	SMOOKE	Z42	sk17	sk30	DRM19	DRM22	GRI1.2	GRI3.0	求和
HCNN+O=CO+H+N2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNN+O=HCN+NO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNN+O2=O+HCO+N2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNN+OH=H+HCO+N2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNN+H=CH2+N2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO+O=NH+CO2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO+O=HNO+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO+O=NCO+OH	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO+H=NH2+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO+H=H2+NCO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO+OH=NCO+H2O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO+OH=NH2+CO2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HNCO+M=NH+CO+M	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNO+H=H+HNCO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNO+H=OH+HCN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCNO+H=NH2+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HOCN+H=H+HNCO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HCCO+NO=HCNO+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3+N=H2CN+H	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3+N=HCN+H2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NH3+H=NH2+H2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NH3+OH=NH2+H2O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NH3+O=NH2+OH	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NH+CO2=HNO+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CN+NO2=NCO+NO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NCO+NO2=N2O+CO2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
N+CO2=NO+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
O+CH3CHO=OH+CH3+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
O2+CH3CHO=HO2+CH3+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
H+CH3CHO=CH3+H2+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
OH+CH3CHO=CH3+H2O+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HO2+CH3CHO=CH3+H2O2+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3+CH3CHO=CH3+CH4+CO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3+C2H5+M=C3H8+M	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
O+C3H8=OH+C3H7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
H+C3H8=C3H7+H2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
OH+C3H8=C3H7+H2O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
C3H7+H2O2=HO2+C3H8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3+C3H8=C3H7+CH4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3+C2H4+M=C3H7+M	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
O+C3H7=C2H5+CH2O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
H+C3H7+M=C3H8+M	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
H+C3H7=CH3+C2H5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
OH+C3H7=C2H5+CH2OH	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HO2+C3H7=O2+C3H8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HO2+C3H7=OH+C2H5+CH2O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CH3+C3H7=2C2H5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
H2+0.5O2=1H2O	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H2O+CO=H2+CO2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CH4+H2O=1CO+3H2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CH4+0.5O2=1CO+2H2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CH2+O=CO+H2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

注: 1为包含, 0为不包含。

Influence of chemical reaction mechanism on turbulent jet flame

WANG Yunfan¹, JIN Jie^{1, 2, 3}, LAI Genhong¹, WANG Fang^{1, 2, 3, *}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191;

2. Jiangxi Research Institute, Beihang University, Nanchang 330096;

3. Chengdu Innovation Research Institute on Aircraft Power of Beihang University, Chengdu 611930)

Abstract: Turbulent combustion is extensively employed in industry and transportation, where the flow and chemical reactions are intricately interconnected. Due to the complexity of this coupling mechanism, it is essential to incorporate the chemical reaction mechanism in combustion simulations. However, there are many kinds and quantities of chemical reaction mechanisms, and the choice of mechanism has great influence on the simulation results. In this article, 11 distinct chemical reaction mechanisms were chosen and their reaction kinetics examined in order to investigate the impact of chemical reaction mechanisms on the simulation of turbulent jet flame. Then Sandia Flame D turbulent jet flame was selected as the research object, and the temperature and component concentration data after calculation and stability were extracted for comparative analysis. The findings demonstrate the stark differences in the kinetic performance of several chemical processes. The ignition delay time of the global mechanism JL4 is too short due to the omission of too many intermediate species. The ignition delay time of the SMOOKE mechanism and the z42 mechanism is longer than the experimental value due to the omission of multi-carbon species. As the flow field develops, the disparity between the computation outputs of various methods grows. Whereas the difference away from the fuel inlet is mostly caused by the various species and elementary processes involved in various chemical reaction mechanisms, the difference near the fuel inlet is primarily caused by the difference in kinetic performance. For all chemical mechanisms, there is a tendency that the more species used in the chemical reaction, the more concentrated the region of high heat release rate, the shorter the flame length, and the higher the maximum temperature throughout the field.

Keywords: chemical mechanisms; LES-TPDF; turbulent flame; combustion simulation; sandia flame D turbulent jet flame

《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人,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与工程、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 红	江 洁	刘 强	闫 鹏	朱天乐	刘铁钢
	陈万春	邹正平	苏东林	杨世春	沈成平	邱志平
	杨树斌	张晓林	杨晓奕	杨继萍	李惠峰	吴新开
	杨照华	宋凝芳	周 锐	林宇震	林贵平	战 强
	胡庆雷	赵秋红	段海滨	赵巍胜	席 平	郭 宏
	徐世杰	郭洪波	康 锐	翟 锦	熊华钢	徐 洁

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4期 2026年4月

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS (JBUA)

(Monthly, Started in 1956)

Vol.52 No.4 April 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 jbuua@ 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 Qinpeng
Edited and Published by Editorial Board of JBUA
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.
Distributed by Editorial Board of JBUA
Telephone (010) 82316698 82316981
82315499 82317448
E-mail jbuua@ 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



微信公众号



超星电子书

ISSN 1001-5965



国内定价: 50.00 元 / 期