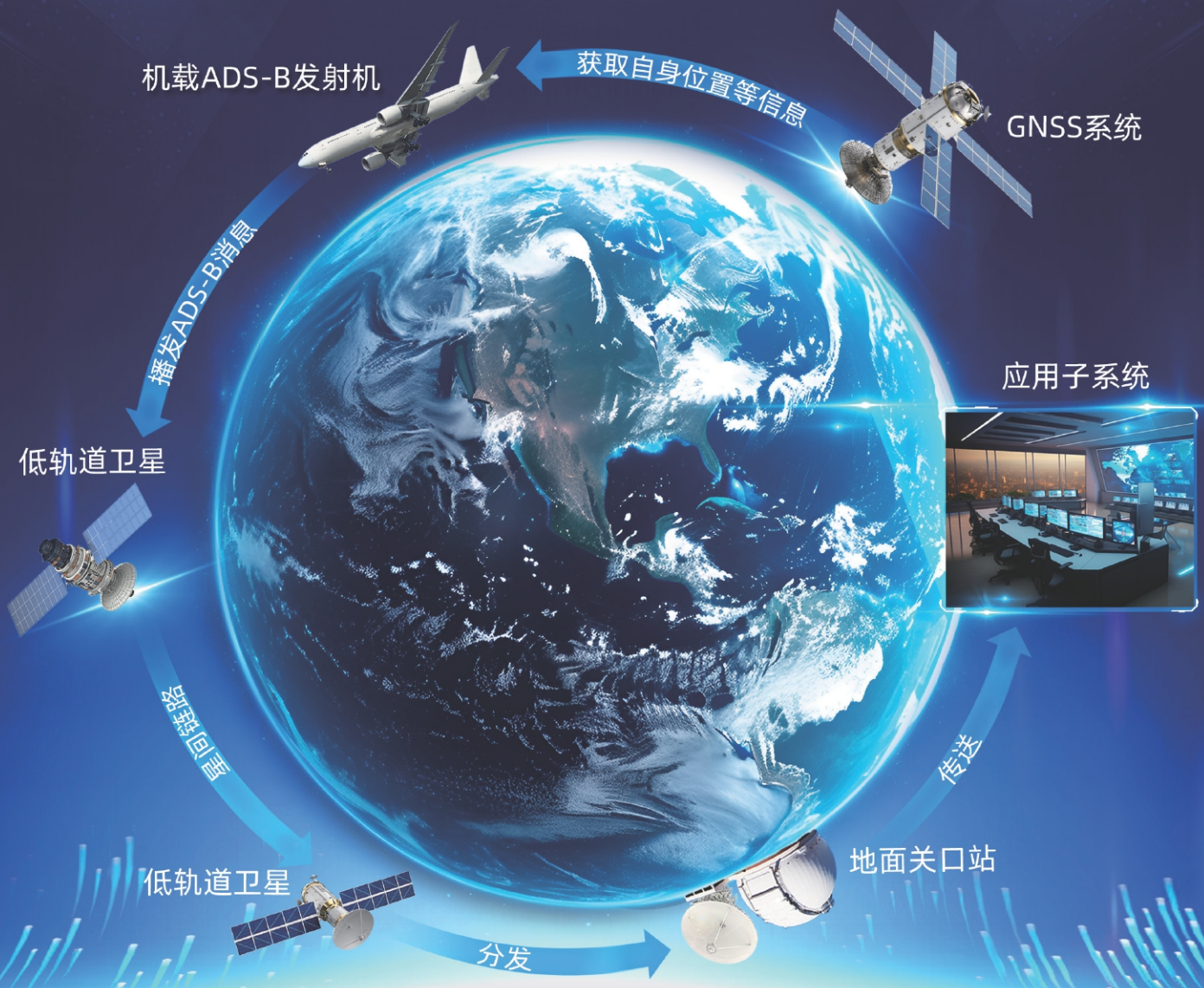
主管单位：中华人民共和国工业和信息化部
主办单位：北京航空航天大学

ISSN 1001-5965
CN 11-2625/V

# 北京航空航天大學学报

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS




**基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证**

刘海涛　冯景勃　李冬霞　王　磊

1 | 2025
Vol.51

北 京 航 空 航 天 大 学 学 报

第 51 卷　第 1 期　（总第 383 期）　2025 年 1 月

# 目　　次

基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证 …… 刘海涛，冯景勃，李冬霞，王磊（1）

空间定位与特征泛化增强的铁路异物跟踪检测 …… 陈永，王镇，周方春（9）

空间信息引导的双分支实时语义分割算法 …… 侯志强，戴楠，程敏捷，李富成，马素刚，范九伦（19）

基于 AAGC-GRU 的航班延误组合预测方法 …… 刘晓琳，郭梦娇，李卓（30）

基于指令扩展的 RISC-V 可配置故障注入检测方法 …… 刘强，李一可（43）

飞机轮胎-湿滑道面相互作用 SPH 算法仿真分析 …… 蔡靖，黄钰岱，李琪，李岳，戴轩（53）

自调节图卷积 UNet 的三维人体姿态估计方法 …… 马金林，崔琦磊，马自萍，武江涛，曹浩杰（63）

用 Critic 赋权法加权邻域粗糙集的属性约简算法 …… 吴尚智，任艺璇，葛舒悦，王立泰，王志宁（75）

基于复数卷积和注意力机制的并行磁共振成像重建 …… 段继忠，肖琛（85）

复合材料厚板结构压缩稳定性和承载能力分析 …… 王春寿，张笑宇，詹志新，肖浩（94）

弹射救生过程飞行员胸腰椎高负荷损伤分析 ……
…… 裴卉宁，陈允峰，白仲航，孙佳俐，吴梦，邵星辰（102）

地基光度数据判定 GEO 自旋稳定目标功能方法 …… 王阳，胡敏，杜小平，徐灿（113）

基于简短可验证环签名的区块链版权存证协议 …… 王杰昌，刘玉岭，张平，刘牧华，王小伟（120）

涡扇发动机等效持久试车谱适航符合性设计与验证 …… 汤鑫豪，窦英睿（133）

挠性陀螺交叉耦合影响因素分析及控制 …… 蔡曜，司玉辉，王玉琢，杜鑫，尹路（141）

传感器结冰特性及其影响规律试验研究 …… 丁亮，胡站伟，郭向东，石雅楠，易贤（152）

基于分段自适应的机械臂力/位混合控制 …… 殷文喆，练达芃，李凯悦，赵国伟（161）

高速电磁阀相移 PWM 电压驱动策略 …… 陈晓明，朱玉川，李林飞，王玉文（167）

低空时变风扰下无人机避障路径跟随方法 …… 陶江，曹云峰（175）

高超声速飞行器再入滑翔段在线制导 …… 魏昊，蔡光斌，凡永华，徐慧，王晶，周卓成（183）

基于离心泵数字孪生流场云图的叶轮故障诊断方法与应用 …… 李亚洁，刘强，李炜（193）

基于注意力引导和多样本决策的舰船检测方法 …… 吕奕龙，苟瑶，李敏，何玉杰，邢宇航（202）

基于信道互易的 PA-MIMO 雷达目标检测性能研究 …… 齐铖，谢军伟，费太勇，张浩为，杨潇（214）

面向城市道路安全的 ARAIM 保护级优化方法 …… 邓思瑜，孙蕊，张立东，胡浩亮（222）

多策略融合的改进黑猩猩优化算法 …… 张福兴，高腾，吴泓达（235）

考虑舵面效能柔性飞机阵风减缓控制系统 …… 刘易斯，杨佑绪，刘燚，成志勇，余灵富（248）

基于多尺度注意力机制的 RAW 图像重建 …… 张科，刘昱，胡凯（257）

基于共形几何代数的七杆巴氏桁架位置分析 …… 黄昔光，吴一帆，刘东裕（265）

飞轮壳体黏弹性阻尼环的仿真分析与试验研究 …… 金富蕴，王永锋，王虹，刘珊珊，马艳红（272）

基于迎风格式伴随方程的飞行器边界特性设计方法 …… 邓俊，高正红，黄江涛，赵轲，夏露（281）

基于最优探测航线椭圆拟合的战斗巡逻规划方法 ……
…… 李乐言，杨任农，王瑛，李寰宇，吴傲，岳龙飞（293）

基于 GPSSA 算法的复杂地形多无人机航迹规划 ……
…… 闫少强，杨萍，刘卫东，李新其，雷剑，赵超跃（303）

基于高次时频谱特征的 LPI 雷达信号识别 …… 李世通，金小萍，孙杰，汪晓锋（314）

基于卷积神经网络的双阶段水下图像增强方法 …… 路斯棋，管凤旭，赖海涛，杜雪（321）

高动态协同拓扑在线优化与分布式制导方法 …… 庞博文，朱建文，包为民，李小平（333）

基于改进 SuperPoint 与线性转换器的可见光红外匹配算法 ……
…… 伍薇，鲜勇，苏娟，张大巧，李少朋，李冰（340）

**期刊基本参数：**CN 11-2625/V * 1956 * m * A4 * 348 * zh * P * ￥50.00 * 400 * 36 * 2025-01

（**编　辑**　张　嵘　孙　芳　卞欢欢　王　茜　李亚泰　苏　磊）

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

Vol. 51 No. 1 （Sum 383） January 2025

## CONTENTS

Aircraft position verification with one satellite based on Doppler shift change
…… LIU Haitao，FENG Jingbo，LI Dongxia，WANG Lei （1）
Railway foreign objects tracking detection based on spatial location and feature generalization enhancement
…… CHEN Yong，WANG Zhen，ZHOU Fangchun （9）
Two-branch real-time semantic segmentation algorithm based on spatial information guidance
…… HOU Zhiqiang，DAI Nan，CHENG Minjie，LI Fucheng，MA Sugang，FAN Jiulun （19）
Combined prediction method of flight delay based on attention-based adaptive graph convolution-gated recurrent unit
…… LIU Xiaolin，GUO Mengjiao，LI Zhuo （30）
Configurable fault injection detection method for RISC-V based on instruction extension
…… LIU Qiang，LI Yike （43）
Simulation and analysis of SPH algorithm for interaction of aircraft tire-wet pavement
…… CAI Jing，HUANG Yudai，LI Qi，LI Yue，DAI Xuan （53）
Self-adjusting graph convolution UNet method for 3D human pose estimation
…… MA Jinlin，CUI Qilei，MA Ziping，WU Jiangtao，CAO Haojie （63）
An attribute reduction algorithm of weighting neighborhood rough sets with Critic method
…… WU Shangzhi，REN Yixuan，GE Shuyue，WANG Litai，WANG Zhining （75）
Parallel MRI reconstruction by using complex convolution and attention mechanism
…… DUAN Jizhong，XIAO Chen （85）
Analysis of compression stability and load capacity of thick composite plate structures
…… WANG Chunshou，ZHANG Xiaoyu，ZHAN Zhixin，XIAO Hao （94）
Analysis of high load injury of thoracolumbar spine in pilots during ejection process
…… PEI Huining，CHEN Yunfeng，BAI Zhonghang，SUN Jiali，WU Meng，SHAO Xingchen （102）
Method for function determination of GEO spin stabilized objects by ground-based photometric data
…… WANG Yang，HU Min，DU Xiaoping，XU Can （113）
Blockchain copyright storage protocol based on short verifiable ring signature
…… WANG Jiechang，LIU Yuling，ZHANG Ping，LIU Muhua，WANG Xiaowei （120）
Design and verification of airworthiness compliance of equivalent endurance test cycle of turbofan engine
…… TANG Xinhao，DOU Yingrui （133）
Analysis and control of influencing factors of cross coupling of flexible gyro
…… CAI Yao，SI Yuhui，WANG Yuzhuo，DU Xin，YIN Lu （141）
Test research on icing characteristics of sensors and their influence laws
…… DING Liang，HU Zhanwei，GUO Xiangdong，SHI Yanan，YI Xian （152）
Manipulator force/position hybrid control based on staged adaptation
…… YIN Wenzhe，LIAN Dapeng，LI Kaiyue，ZHAO Guowei （161）
Phase-shifted PWM voltage drive strategy of high-speed solenoid valve
…… CHEN Xiaoming，ZHU Yuchuan，LI Linfei，WANG Yuwen （167）
UAV obstacle avoidance path-following method under time-varying wind disturbance at low altitudes
…… TAO Jiang，CAO Yunfeng （175）
Online guidance for hypersonic vehicles in glide-reentry segment
…… WEI Hao，CAI Guangbin，FAN Yonghua，XU Hui，WANG Jing，ZHOU Zhuocheng （183）
Impeller fault diagnosis method and application based on digital twin flow field contour of centrifugal pump
…… LI Yajie，LIU Qiang，LI Wei （193）
Ship detection method based on attentional guidance and multi-sample decision
…… LYU Yilong，GOU Yao，LI Min，HE Yujie，XING Yuhang （202）

Research on target detection performance of PA-MIMO radar based on channel reciprocity
…… QI Cheng，XIE Junwei，FEI Taiyong，ZHANG Haowei，YANG Xiao （214）
Protection level optimization method of ARAIM algorithm for urban road safety
…… DENG Siyu，SUN Rui，ZHANG Lidong，HU Haoliang （222）
Improved chimpanzee search algorithm based on multi-strategy fusion and its application
…… ZHANG Fuxing，GAO Teng，WU Hongda （235）
Gust alleviation control system of flexible aircraft considering rudder efficiency
…… LIU Yisi，YANG Youxu，LIU Yi，CHENG Zhiyong，YU Lingfu （248）
RAW image reconstruction based on multi-scale attention mechanism
…… ZHANG Ke，LIU Yu，HU Kai （257）
Position analysis of seven-link Barranov truss based on conformal geometric algebra
…… HUANG Xiguang，WU Yifan，LIU Dongyu （265）
Simulation analysis and experimental study of viscoelastic damping ring of flywheel housing
…… JIN Fuyun，WANG Yongfeng，WANG Hong，LIU Shanshan，MA Yanhong （272）
Optimization design method of aircraft boundary characteristics based on upwind scheme adjoint equation
…… DENG Jun，GAO Zhenghong，HUANG Jiangtao，ZHAO Ke，XIA Lu （281）
CAP planning method based on elliptic fitting of optimal detection routes
…… LI Leyan，YANG Rennong，WANG Ying，LI Huanyu，WU Ao，YUE Longfei （293）
Multi-UAV trajectory planning for complex terrain based on GPSSA algorithm
…… YAN Shaoqiang，YANG Ping，LIU Weidong，LI Xinqi，LEI Jian，ZHAO Chaoyue （303）
LPI radar signal recognition based on high-order time-frequency spectrum features
…… LI Shitong，JIN Xiaoping，SUN Jie，WANG Xiaofeng （314）
Two-stage underwater image enhancement method based on convolutional neural networks
…… LU Siqi，GUAN Fengxu，LAI Haitao，DU Xue （321）
High dynamic cooperative topology online optimization and distributed guidance method
…… PANG Bowen，ZHU Jianwen，BAO Weimin，LI Xiaoping （333）
A matching method based on improved SuperPoint and linear Transformer for optical and infrared images
…… WU Wei，XIAN Yong，SU Juan，ZHANG Daqiao，LI Shaopeng，LI Bing （340）

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1024

# 基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证

刘海涛*，冯景勃，李冬霞，王磊
(中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津，300300)

**摘 要**：星基广播式自动相关监视(ADS-B)是实现广域范围内航空器监视的重要技术手段。为解决星基ADS-B系统存在的虚假目标干扰问题，提出一种基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证方法。建立星基ADS-B验证系统模型，理论分析给出空天链路多普勒频移改变量的计算方法，并采用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫（k-s）检验方法识别虚假ADS-B消息，最后，通过计算机仿真验证所提方法的正确性和有效性。仿真结果表明：所提方法的检测概率达到97.75%以上，漏警概率低于4.50%；此外，所提方法只需单颗低轨道卫星进行监视，并且对航空器和卫星的定位误差不敏感。

**关 键 词**：星基ADS-B；位置验证；多普勒频移的改变量；k-s检验；定位误差
**中图分类号**：TN925
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0001-08

星基广播式自动相关监视(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)是实现广域范围内航空器监视的重要技术手段。通过将ADS-B接收机部署在低轨道卫星上，接收航空器播发的ADS-B消息，并通过卫星链路传输至地面站，最后，通过地面网络分发给应用终端以实现航空器的监视[1-2]。相对地基监视系统，星基ADS-B系统具有覆盖范围广、不受地理环境限制、可满足航空器持续监视等多方面的优势[3-4]。因此，星基ADS-B系统在民航、军航等领域具有广泛的应用前景。由于ADS-B以广播方式工作，且ADS-B消息格式公开，此外系统没有采取任何加密认证措施，ADS-B系统存在虚假目标干扰问题，严重威胁到航空飞行安全[5-7]。相比于地基ADS-B系统，星基ADS-B系统监视范围更广，虚假目标干扰问题更加突出[8]，因此，针对星基ADS-B系统存在的虚假目标干扰问题，开展星基ADS-B位置消息验证的研究具有重要的意义。

近年来，针对地基ADS-B系统存在的虚假目标干扰问题，国内外开展了大量研究。相关研究主要分为4类：基于波达方向的方法[9]、基于信号到达时间差的方法[10-11]、基于多普勒效应的方法[12-13]和基于加密认证的方法[14-16]。

基于波达方向方法的思想是地面基站通过测向获得接收信号的来向，同时利用航空器播发的ADS-B位置消息和地面基站位置，计算得到信号来向，最后，通过比较2个信号来向以验证ADS-B位置消息的真实性。该方法存在主要问题是地面基站需要具备空间测向的能力，接收设备较复杂。基于信号到达时间差的方法思想是地面设置多个基站，同时接收航空器播发的ADS-B消息，利用信号到达时间差构建方程组，计算航空器的空间位置，最后与航空器ADS-B位置消息进行对比，以验证ADS-B消息的真实性。该方法存在的主要问题是需要多个地面基站，且多个地面基站需维持精确时间同步。基于多普勒效应方法的思想是地面基站

收稿日期：2022-12-31；录用日期：2023-03-10；网络出版时间：2023-05-10 16:58
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230510.1319.001
基金项目：国家重点研发计划(2016YFB0502402)；国家自然科学基金(U1733120)；天津市多元投入基金(21JCQNJC00770)
*通信作者. E-mail：htliucauc@qq.com

引用格式：刘海涛，冯景勃，李冬霞，等. 基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：1-8.
LIU H T，FENG J B，LI D X，et al. Aircraft position verification with one satellite based on Doppler shift change[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：1-8 (in Chinese).

通过频率估计获得信号的载波频率，同时利用航空器播发的ADS-B消息和地面基站位置，计算得到链路的多普勒频率，最后，通过计算两组频率的相关系数，以验证ADS-B位置消息的真实性。该方法存在的主要问题是在实际系统中，ADS-B发射机和接收机存在载波偏移，将影响验证性能。基于加密认证方法的思想是合法航空器通过私钥对其播发的ADS-B消息签名，而非法航空器无法获得授权秘钥，无法实现ADS-B消息的签名，地面基站利用公钥对接收的ADS-B消息核验签名，从而验证ADS-B消息的真实性。该方法存在的主要问题是与ADS-B系统现行技术规范不兼容，难以与现有的航空器监视系统融合。

针对星基ADS-B系统存在的虚假目标干扰问题，文献[8]提出基于信号到达时间差的航空器独立位置验证方法。该方法利用信号到达时间差构建一个双曲面方程，并计算航空器位置报告点与双曲面的最短距离，最后，将最短距离与阈值门限进行比较，以判定航空器播发ADS-B位置消息的真实性。文献[17]提出基于联合时差/频差的双星定位方法。该方法根据信号到达时间差、载波频率差及航空器所在球面方程，构建3个参量的方程组，并计算得到航空器的空间位置坐标，最后，与航空器播发的ADS-B位置消息进行比较以验证消息的真实性。以上2种方法存在的问题是最少需要2颗搭载ADS-B接收机的低轨道卫星，此外，要求2颗卫星保持精确的时间同步。

为解决星基ADS-B系统存在的虚假目标干扰问题，提出一种基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证方法。首先，建立星基ADS-B验证系统模型，然后，理论分析给出空天链路多普勒频移改变量的计算方法，最后，通过柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(Kolmogorov-Smirnov, k-s)检验方法以验证ADS-B消息的真实性。与已有方法相比，本文方法仅需使用单个星载ADS-B接收机，不涉及时间同步问题，并且对航空器和卫星的定位误差不敏感。

# 1 星基ADS-B验证系统

## 1.1 系统模型

图1为星基ADS-B验证系统的示意图。系统由航空器、搭载星载ADS-B接收机的低轨道卫星、地面关口站、地面验证终端、应用子系统组成。系统工作原理为：航空器通过全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)获取航空器空间位置及速度等信息，并通过1 090数据链以明文广播的方式播发ADS-B消息，星载ADS-B接收机通过接收航空器播发的ADS-B消息，获取航空器位置、速率、标识等信息，同时记录ADS-B消息的接收时刻及载波频率，相关信息通过星间链路、星地链路传输至地面关口站，与此同时，卫星通过GNSS系统获取自身空间位置、速度和相应时间信息，并同样传输至地面关口站，地面关口站将收到的信息分发给地面验证终端，地面验证终端利用本文方法对航空器位置信息进行验证。

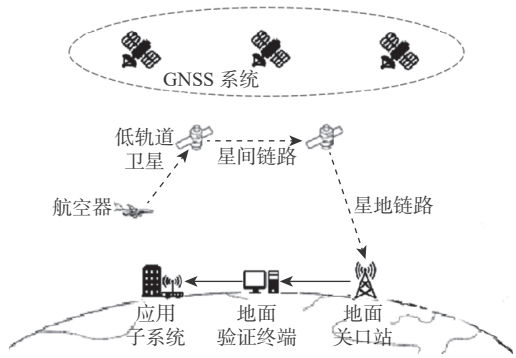



图1 星基ADS-B验证系统示意图

Fig. 1 Diagram of satellite-based ADS-B verification system

## 1.2 信号模型

$t$时刻，星载ADS-B接收机接收的ADS-B信号表示为

$$s(t)=\sqrt{P}d(t)\cos(\Phi+2\pi f)+n(t) \tag{1}$$

式中：$P$为接收信号功率；$d(t)$为ADS-B基带信号；$f$为载波频率；$\Phi$为载波的初始相位；$n(t)$为信道输入高斯白噪声。

载波频率$f$的表达式为

$$f=f_0+\Delta f_t+f_d+\Delta f_r \tag{2}$$

式中：$f_0$为ADS-B系统的标称频率；$\Delta f_t$为航空器ADS-B发射机的载波频偏；$f_d$为航空器与星载ADS-B接收机链路的多普勒频移；$\Delta f_r$为星载ADS-B接收机的载波频偏。

ADS-B信号载波频率的估计值可表示为[18]

$$\hat{f}=f+\sigma \tag{3}$$

式中：$\sigma$为载波频率估计的误差，目前精度已达$10^{-1}$ Hz[18]。

# 2 空天链路的多普勒频移

## 2.1 航空器与卫星通信链路的多普勒频移

图2为地心地固坐标系下某时刻航空器与卫星的位置关系。图中：$O$为地心地固坐标系的原点，该时刻，航空器位于$P$点，$(x_p,y_p,z_p)$为航空器的位置坐标，$\boldsymbol{v}_p=[v_{p,x},v_{p,y},v_{p,z}]$为航空器的速度矢量。卫星位于$S$点，$(x_s,y_s,z_s)$为卫星的位置坐标，$\boldsymbol{v}_s=[v_{s,x},v_{s,y},v_{s,z}]$为卫星的速度矢量。$\boldsymbol{r}_{sp}$为矢量$\boldsymbol{OS}$与矢

量 $\boldsymbol{OP}$ 的位置差矢量, $\boldsymbol{v}_{\mathrm{sp}}$ 为矢量 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}$ 与 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}}$ 的速度差矢量, $\theta$ 为位置差矢量 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{sp}}$ 与速度差矢量 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{sp}}$ 的夹角。

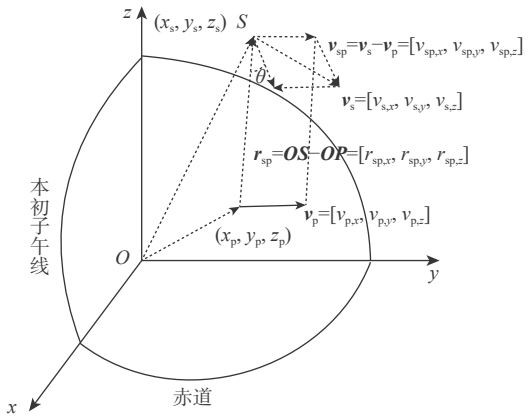



图 2　航空器与卫星的位置关系

Fig. 2　Position relationship between aircraft and satellite

航空器与星载 ADS-B 接收机链路的多普勒频移为[19]

$$f_{\mathrm{d}}=\frac{f_{\mathrm{ot}}\left\|\boldsymbol{v}_{\mathrm{sp}}\right\|}{c}\cos\theta=\frac{f_{\mathrm{ot}}(r_{\mathrm{sp},x}v_{\mathrm{sp},x}+r_{\mathrm{sp},y}v_{\mathrm{sp},y}+r_{\mathrm{sp},z}v_{\mathrm{sp},z})}{c\sqrt{r_{\mathrm{sp},x}^2+r_{\mathrm{sp},y}^2+r_{\mathrm{sp},z}^2}}\tag{4}$$

式中: $f_{\mathrm{ot}}=f_0+\Delta f_{\mathrm{t}}$ 为航空器 ADS-B 发射机发射信号的载波频率, 由于 $f_0\gg\Delta f_{\mathrm{t}}$, 故 $f_{\mathrm{ot}}\approx 1\,090$ MHz; $c=3\times10^8$ m/s为光速。

### 2.2　基于 ADS-B 位置消息的多普勒频移

在地面验证终端中, ADS-B 位置消息的接收时刻记为 $t_{\mathrm{p}}(i)$, $i=1,2,\cdots,I$, 相应 ADS-B 位置消息为 $m_{\mathrm{p}}(i)$, $i=1,2,\cdots,I$, ADS-B 速度消息为 $m_{\mathrm{v}}(i)$, $i=1,2,\cdots,I$。对 ADS-B 位置消息 $m_{\mathrm{p}}(i)$ 进行译码并通过坐标变换, 得到航空器在地心地固坐标系下的位置坐标 $\left(x_{\mathrm{p}}(i),y_{\mathrm{p}}(i),z_{\mathrm{p}}(i)\right)$, $i=1,2,\cdots,I$; 对 ADS-B 速度消息 $m_{\mathrm{v}}(i)$ 进行译码并通过坐标变换, 得到航空器在地心地固坐标系下速度矢量 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}}(i)=\left[v_{\mathrm{p},x}(i),v_{\mathrm{p},y}(i),v_{\mathrm{p},z}(i)\right]$, $i=1,2,\cdots,I$。

与此同时, 在地面验证终端中提取相应时刻卫星在地心地固坐标系下的位置坐标 $(x_{\mathrm{s}}(i),y_{\mathrm{s}}(i),z_{\mathrm{s}}(i))$, $i=1,2,\cdots,I$ 及速度矢量[20-22] $\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}(i)=\left[v_{\mathrm{s},x}(i),v_{\mathrm{s},y}(i),v_{\mathrm{s},z}(i)\right]$, $i=1,2,\cdots,I$。

通过 $\left(x_{\mathrm{p}}(i),y_{\mathrm{p}}(i),z_{\mathrm{p}}(i)\right)$ 和 $(x_{\mathrm{s}}(i),y_{\mathrm{s}}(i),z_{\mathrm{s}}(i))$ 计算得到一组位置差矢量 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{sp}}(i),i=1,2,\cdots,I$; 并且通过 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}}(i)$ 和 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}(i)$ 计算得到一组速度差矢量 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{sp}}(i)$, $i=1,2,\cdots,I$。

最后, 将位置差矢量 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{sp}}(i)$ 和速度差矢量 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{sp}}(i)$ 代入 2.1 节中式(4), 得到一组航空器与星载 ADS-B 接收机链路的多普勒频移 $f_{\mathrm{d}}(i),i=1,2,\cdots,I$。

进一步得到一组多普勒频移的改变量为

$$\Delta f_{\mathrm{d}}(i)=f_{\mathrm{d}}(i+1)-f_{\mathrm{d}}(i)\quad i=1,2,\cdots,I-1\tag{5}$$

### 2.3　基于载波频率估计的多普勒频移

在地面验证终端中, 提取 ADS-B 位置消息相应信号的载波频率估计值, 并且记为 $\hat{f}(i),i=1,2,\cdots,I$。进一步计算得到载波频率的改变量为

$$\Delta\hat{f}(i)=\hat{f}(i+1)-\hat{f}(i)=f_{\mathrm{d}}(i+1)-f_{\mathrm{d}}(i)+\sigma(i+1)-\sigma(i)=\Delta f_{\mathrm{d}}(i)+\Delta\sigma(i)\quad i=1,2,\cdots,I-1\tag{6}$$

由于载波频率估计的误差较小[18], $\Delta\hat{f}(i)\approx\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$, 故信号载波频率的改变量近似等于多普勒频移的改变量。

## 3　位置验证方法

根据 2.2 节和 2.3 节, 利用 2 种不同方法得到航空器与星载 ADS-B 接收机通信链路的多普勒频移改变量 $\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 及 $\Delta\hat{f}(i)$。

进一步采用非参数假设检验中的 k-s 检验方法, 通过判断 $\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 与 $\Delta\hat{f}(i)$ 服从的分布是否具有显著性差异, 来完成 ADS-B 信号来源的验证。与其他检验方法相比, k-s 检验具有良好的统计特性, 广泛应用于判断 2 组样本服从的分布是否一致的场景[23-24], 检验过程如下。

**步骤 1**　首先, 建立如下假设:

$H_0$: $\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 与 $\Delta\hat{f}(i)$ 服从的分布没有显著性差异

$H_1$: $\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 与 $\Delta\hat{f}(i)$ 服从的分布具有显著性差异

**步骤 2**　计算 $\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 与 $\Delta\hat{f}(i)$ 的经验分布函数。$\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 的经验分布函数为 $S_{\Delta f_{\mathrm{d}}}(x)=\dfrac{\Delta f_{\mathrm{d}}(i)\leqslant x\text{的个数}}{I-1}$。$\Delta\hat{f}(i)$ 的经验分布函数为 $S_{\Delta\hat{f}}(x)=\dfrac{\Delta\hat{f}(i)\leqslant x\text{的个数}}{I-1}$。

**步骤 3**　计算 k-s 检验的检验统计量 $D$, $D=\max\limits_{x}\left|S_{\Delta f_{\mathrm{d}}}(x)-S_{\Delta\hat{f}}(x)\right|$。

**步骤 4**　依据检验统计量 $D$ 及 $\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 与 $\Delta\hat{f}(i)$ 的样本数 $I-1$, 通过查 k-s 检验临界值表或利用 $p$ 值近似公式得到 $p$ 值。

**步骤 5**　比较 $p$ 值与显著性水平 $\alpha$ 的大小, 通常取 $\alpha=0.05$。当 $p>\alpha$ 时, 接受原假设 $H_0$, $\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 与 $\Delta\hat{f}(i)$ 服从的分布无明显差异, 判定 ADS-B 信号来源为航空器; 当 $p<\alpha$ 时, 接受备择假设 $H_1$, $\Delta f_{\mathrm{d}}(i)$ 与 $\Delta\hat{f}(i)$ 服从的分布具有显著性差异, 判定 ADS-B 信号来源为欺骗源。

## 4　仿真实验

### 4.1　仿真参数

为验证本文方法的正确性, 构建基于多普勒频移改变量的星基 ADS-B 验证仿真系统。仿真系统由航空器、欺骗源、卫星 3 个节点构成, 表 1 为仿真系统的主要技术参数。

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 频率估计误差的标准差[18]/Hz | 1.0 |
| 卫星定轨误差的标准差[20-22]/m | 10.0 |
| ADS-B水平位置误差的标准差[25]/m | 4.0 |
| ADS-B垂直位置误差的标准差[25]/m | 6.6 |

### 4.2 仿真场景

图3为利用卫星仿真软件STK构建的仿真场景A。其中，包括200架速度为900 km/h、高度为10 km、飞行方向任意的航空器的航迹；1颗高度为700 km的低轨道卫星的轨迹；200个位于地表的静止欺骗源，均匀分布于航迹群中心的正下方区域A处。在卫星仿真软件中可见，卫星飞过整个航迹群的时间约为85 s，航空器每秒播发2条ADS-B位置消息和速度消息，则对于每条航迹，星载ADS-B接收机可接收到170条ADS-B位置消息和170条ADS-B速度消息。

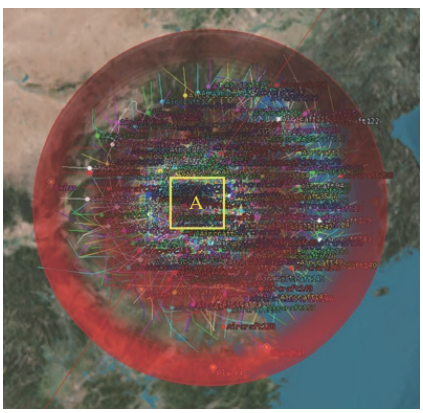



图3 仿真场景A

Fig. 3 Simulation scenario A

图4为利用卫星仿真软件STK构建的仿真场景B。其中，包括200架速度为900 km/h、高度为10 km、飞行方向任意的航空器的航迹；1颗高度为700 km的低轨道卫星的轨迹；4组200个位于地表的静止欺骗源，分别均匀分布于航迹群的东南西北4个方向处。

### 4.3 仿真结果

通过4.1节和4.2节的仿真参数和场景设置，并假设200条航迹对应的ADS-B消息由相应航空器或某欺骗源发送，得到的仿真结果如图5所示（仿真场景A）。

图5(a)为ADS-B信号来源为航空器或欺骗源时的$p$值分布。仿真结果表明：①当信号来源为航空器时，200条航迹的$p$值均大于显著性水平0.05，虚警概率为0；②当信号来源为欺骗源时，200条航迹的$p$值绝大多数小于显著性水平0.05，漏警概率约为4.50%，检测概率为97.75%。可见利用本文方法可有效识别ADS-B信号来源。

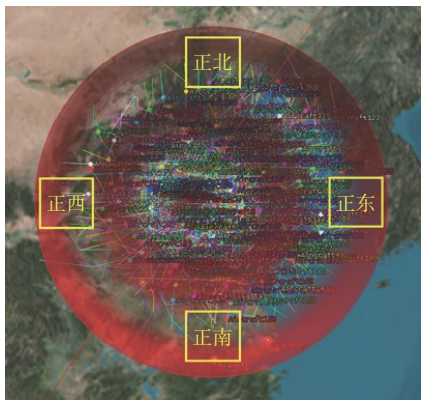
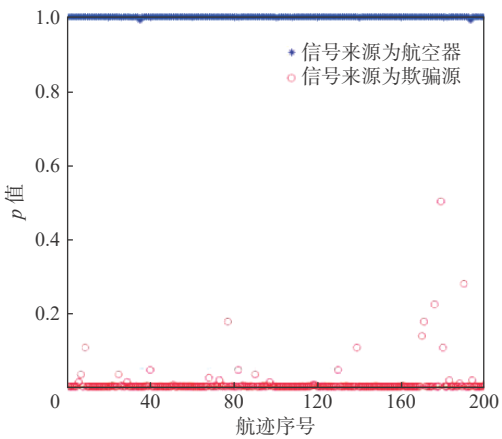


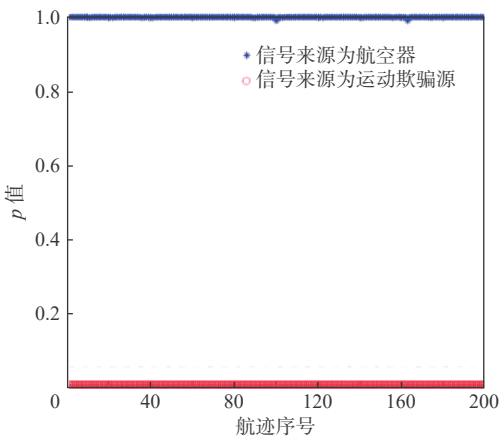

图4 仿真场景B

Fig. 4 Simulation scenario B

欺骗源的运动状态可能会影响ADS-B信号来源的判定，故在仿真场景A的区域A处生成200个速度为100 km/h、行驶方向任意、沿地表行驶的运动欺骗源，得到的仿真结果如图5(b)所示。仿真结果表明：①当信号来源为航空器时，200条航迹的$p$值均大于显著性水平0.05，虚警概率为0；②当信




(a) ADS-B信号来源为航空器或欺骗源




(b) ADS-B信号来源为航空器或运动欺骗源

图5 $p$值分布（仿真场景A）

Fig. 5 $p$-value distribution (simulation scenario A)

号来源为运动欺骗源时, 200 条航迹的 $p$ 值均小于显著性水平 0.05, 漏警概率为 0, 检测概率为 100%。可见本文方法对欺骗源的运动状态具有一定的稳健性。

欺骗源的空间位置可能会影响 ADS-B 信号来源的判定, 故在航迹群的东南西北 4 个方向, 分别设置了 4 组包含 200 个静止欺骗源的欺骗源群组, 得到的仿真结果如表 2 所示(仿真场景 B)。

**表 2　欺骗源的空间位置对检测性能的影响**

**Table 2　Influence of spatial location of spoofing source on detection performance**

| 欺骗源的空间位置 | 虚警概率/% | 漏警概率/% | 检测概率/% |
|---|---|---|---|
| 正东 | 0 | 1.00 | 99.50 |
| 正西 | 0 | 2.00 | 99.00 |
| 正南 | 0 | 1.50 | 99.25 |
| 正北 | 0 | 3.50 | 98.25 |

由表 2 可知, ①欺骗源的空间位置不会影响虚警概率的大小; ②欺骗源的空间位置会轻微影响漏警概率, 且漏警概率均低于 3.50%, 检测概率达到 98.25% 以上。可见本文方法对欺骗源的空间位置具有稳健性。

由于星基 ADS-B 系统存在信号碰撞问题, 因此, 分别假设接收端每 2 秒丢失 1 条 ADS-B 消息(消息丢失率为 25%)、每秒丢失 1 条 ADS-B 消息(消息丢失率为 50%)、每 2 秒丢失 3 条 ADS-B 消息(消息丢失率为 75%), 并与消息无丢失(消息丢失率为 0)的情况进行对比, 得到的仿真结果如表 3 所示。

由表 3 可知, ①当消息丢失率为 0 时, 漏警概率约为 4.50%, 检测概率为 97.75%; ②当消息丢失率为 25% 时, 漏警概率约为 5.00%, 检测概率为 97.50%; ③当消息丢失率为 50% 时, 漏警概率约为 6.00%, 检测概率为 97.00%; ④当消息丢失率为 75% 时, 漏警概率约为 31.50%, 检测概率为 84.25%。综上结果表明, 本文方法对 ADS-B 消息的丢失具有一定的稳健性, 在 ADS-B 消息丢失一半的情况下(每秒接收 1 条 ADS-B 位置消息和速度消息), 仍具有较好的检测性能。

**表 3　消息丢失率对检测性能的影响**

**Table 3　Influence of message loss rate on detection performance**

| 消息丢失率/% | 虚警概率/% | 漏警概率/% | 检测概率/% |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 4.50 | 97.75 |
| 25 | 0 | 5.00 | 97.50 |
| 50 | 0 | 6.00 | 97.00 |
| 75 | 0 | 31.50 | 84.25 |

由于 ADS-B 信号的频率估计误差会对检测性能产生影响, 因此, 分析了频率估计误差范围为 1～100 Hz 时[26-28], 本文方法的检测性能, 仿真结果如图 6 所示。

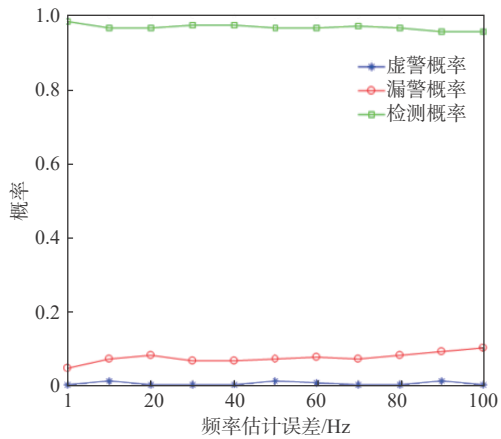



图 6　频率估计误差对检测性能的影响

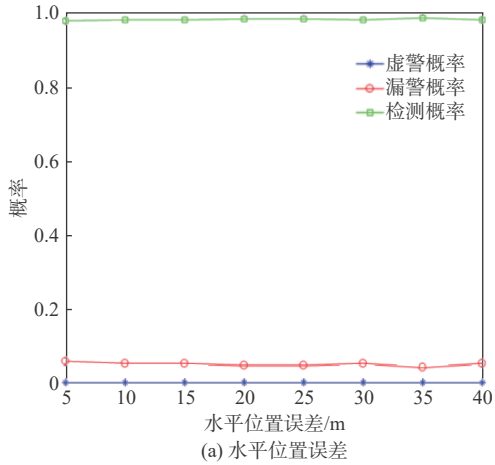
Fig. 6　Influence of frequency estimation error on detection performance

仿真结果表明: ①频率估计误差对虚警概率的影响较小, 虚警概率始终保持在 0 附近; ②漏警概率随着频率估计误差的减小而减小, 随着频率估计误差由 100 Hz 减小至 1 Hz, 漏警概率减小至 4.50% 左右, 检测概率增大至 97.75% 左右, 并且检测概率始终大于 95.00%。3 条曲线表明: 本文方法在 ADS-B 信号的频率估计误差已达 $10^{-1}$ Hz 精度时, 具有较好的检测性能。

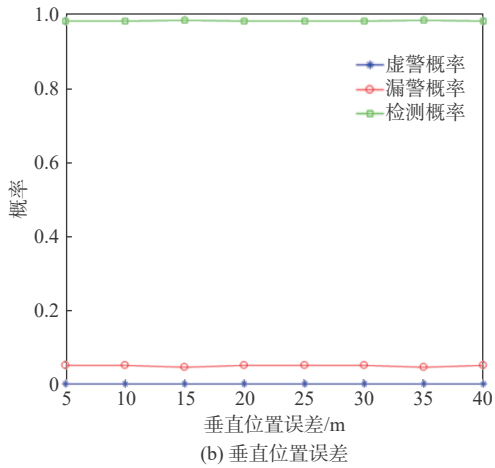
图 7(a) 为 ADS-B 水平位置误差对检测性能的影响 (仿真场景 A)。仿真结果表明: ①随着 ADS-B 水平位置误差由 5 m 增大至 40 m, 虚警概率始终保持在 0 左右; ②漏警概率始终保持在 4.50% 左右; ③检测概率始终大于 97.75%。3 条曲线表明: 本文方法对 ADS-B 水平位置误差不敏感。

图 7(b) 为 ADS-B 垂直位置误差对检测性能的影响 (仿真场景 A)。仿真结果表明: ①随着 ADS-B 垂直位置误差由 5 m 增大至 40 m, 虚警概率始终保持在 0 左右; ②漏警概率始终保持在 4.50% 左右; ③检测概率始终大于 97.75%。3 条曲线表明: 本文方法对 ADS-B 垂直位置误差不敏感。

图 8 为卫星定轨误差对检测性能的影响(仿真场景 A)。仿真结果表明: ①随着卫星定轨误差由 10 m 增大至 100 m, 虚警概率始终保持在 0 左右; ②漏警概率略微增大, 由 4.50% 增大至 6.00% 左右; ③检测概率略微降低, 且始终大于 97.00%。3 条曲线表明: 本文方法对卫星定轨误差较不敏感, 在卫星定轨误差已达到几米的精度时, 具有较好的检测性能。



(a) 水平位置误差



(b) 垂直位置误差

图 7 ADS-B 水平和垂直位置误差对检测性能的影响(仿真场景 A)

Fig. 7 Influence of ADS-B horizontal and vertical position error on detection performance (simulation scenario A)

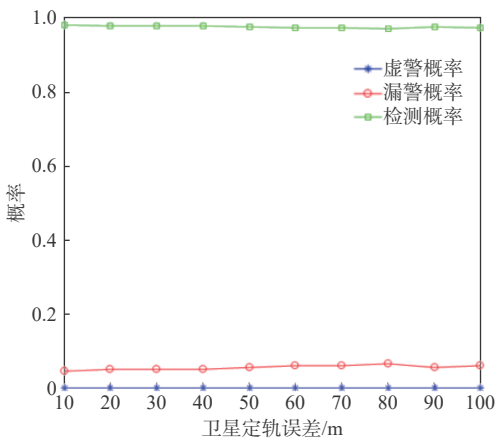



图 8 卫星定轨误差对检测性能的影响(仿真场景 A)

Fig. 8 Influence of satellite orbit determination error on detection performance (simulation scenario A)

图 9 为不同数据比较方法对检测性能的影响(仿真场景 A)。仿真结果表明:①使用 k-s 检验达到最高的检测概率,约为 97% 以上;②使用 3 种非参数假设检验的检测概率均大于使用相关系数法的检测概率。几条曲线比较表明:k-s 检验更适用于星基 ADS-B 系统基于本文方法对 ADS-B 位置消息进行验证。

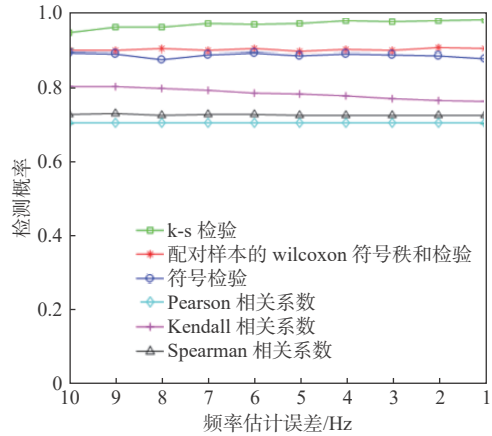



图 9 不同数据比较方法对检测性能的影响(仿真场景 A)

Fig. 9 Influence of different data comparison methods on detection performance (simulation scenario A)

导致结果②的原因为:对于星基 ADS-B 系统,空天链路的多普勒频移受卫星速度和高度的影响较大,所以当欺骗源与待伪造的航迹距离较近时,2 组多普勒频移改变量的变化趋势近似一致,而相关系数主要检测的是数据变化趋势,因此,使用相关系数法的检测性能较差;而非参数假设检验可从中位数、分布函数等方面对 2 组数据进行分析比较,充分利用数据的统计特性,具有更高的检测概率。

## 5 结 论

为克服星基 ADS-B 系统存在的虚假目标干扰问题,提出一种基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证方法。通过仿真验证可得如下结论:

1)本文方法的检测概率达到 97.75%,漏警概率低于 4.50%;

2)对欺骗源的空间位置和运动状态具有稳健性;

3)在 ADS-B 消息丢失一半的情况下仍具有较好的检测性能;

4)对航空器和卫星的定位误差不敏感。

## 参考文献(References)

[1] 刘海涛, 杨宁, 李冬霞, 等. “北航空事卫星一号”监视载荷的统计性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(11): 2883-2889.
LIU H T, YANG N, LI D X, et al. Statistical performance of surveillance payload of Beihang Aeronautical Satellite-1[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(11): 2883-2889(in Chinese).

[2] 张学军, 谭元晧, 李雪缘, 等. 星基 ADS-B 系统及关键技术发展

综述[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1589-1604.
ZHANG X J, TAN Y H, LI X Y, et al. A review of development of space-based ADS-B system and its key technologies[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9): 1589-1604(in Chinese).

[3] BLOMENHOFER H, PAWLITZKI A, ROSENTHAL P, et al. Space-based automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) payload for In-orbit demonstration[C]//Proceedings of the 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2012: 160-165.

[4] WERNER K, BREDEMEYER J, DELOVSKI T. ADS-B over satellite: Global air traffic surveillance from space[C]//Proceedings of the Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Piscataway: IEEE Press, 2014: 47-52.

[5] SCHAFER M, LENDERS V, MARTINOVIC I. Experimental analysis of attacks on next generation air traffic communication [C]// Applied Cryptography and Network Security. Berlin: Springer, 2013: 253-271.

[6] COSTIN A, FRANCILLON A. Ghost in the Air(Traffic): On insecurity of ADS-B protocol and practical attacks on ADS-B devices [EB/OL]. (2012-07-21)[2022-10-10]. https://www.eurecom.fr/publication/3788.

[7] FINKE C, BUTTS J, MILLS R, et al. Enhancing the security of aircraft surveillance in the next generation air traffic control system[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2013, 6(1): 3-11.

[8] DOLAN J, GARCIA M A. Aireon independent validation of aircraft position via space-based ADS-B[C]//Proceedings of the Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications Conference.[s.l.]: [s.n.], 2018.

[9] WANG W Y, CHEN G, WU R B, et al. A low-complexity spoofing detection and suppression approach for ADS-B[C]//Proceedings of the Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: K2-1-K2-8.

[10] NAGANAWA J, MIYAZAKI H. A theory of aircraft position verification using TDOA[C]//Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 833-835.

[11] 王文益, 李文静, 卢丹, 等. 利用 TDOA 相关系数的 ADS-B 欺骗式干扰检测[J]. 信号处理, 2019, 35(11): 1784-1790.
WANG W Y, LI W J, LU D, et al. ADS-B spoofing detection method using TDOA correlation coefficient[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(11): 1784-1790(in Chinese).

[12] 陈蕾, 吴仁彪, 卢丹. 利用多普勒效应的 ADS-B 欺骗式干扰检测方法[J]. 信号处理, 2018, 34(6): 722-728.
CHEN L, WU R B, LU D. ADS-B spoofing detection method using Doppler effect[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(6): 722-728(in Chinese).

[13] GHOSE N, LAZOS L. Verifying ADS-B navigation information through Doppler shift measurements[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-27.

[14] LI W, KAMAL P. Integrated aviation security for defense-in-depth of next generation air transportation system[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security. Piscataway: IEEE Press, 2011: 136-142.

[15] HABLEEL E, BAEK J, BYON Y J, et al. How to protect ADS-B: Confidentiality framework for future air traffic communication [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2015: 155-160.

[16] AMIN S, CLARK T, OFFUTT R, et al. Design of a cyber security framework for ADS-B based surveillance systems[C]//Proceedings of the Systems and Information Engineering Design Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2014: 304-309.

[17] 李桓, 李洪星, 王晋, 等. 基于频率补偿的双星时差频差联合无源定位装置及方法: CN110068340B[P]. 2020-08-18.
LI H, LI H X, WANG J, et al. A passive location device and method for binary time difference and frequency difference based on frequency compensation: CN110068340B[P]. 2020-08-18(in Chinese).

[18] TAO F, JUN L. Parameter estimation of weak space-based ADS-B signals using genetic algorithm[J]. ETRI Journal, 2021, 43(2): 324-331.

[19] 仲伟志, 郭庆. 基于高动态运动模型的多普勒频移仿真[J]. 计算机工程, 2010, 36(20): 22-24.
ZHONG W Z, GUO Q. Doppler frequency shift simulation based on high dynamic motion model[J]. Computer Engineering, 2010, 36(20): 22-24(in Chinese).

[20] CZAB C, SZ A, BPA B, et al. Real-time orbit determination of Low Earth orbit satellite based on RINEX/DORIS 3.0 phase data and spaceborne GPS data-ScienceDirect[J]. Advances in Space Research, 2020, 66(7): 1700-1712.

[21] WANG F H, GONG X W, SANG J Z, et al. A novel method for precise onboard real-time orbit determination with a standalone GPS receiver[J]. Sensors, 2015, 15(12): 30403-30418.

[22] MONTENBRUCK O, RAMOS-BOSCH P. Precision real-time navigation of LEO satellites using global positioning system measurements[J]. GPS Solutions, 2008, 12(3): 187-198.

[23] 方坤, 何怡刚, 黄源, 等. 基于 K-S 检验的瑞利衰落信道统计特性评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 36-41.
FANG K, HE Y G, HUANG Y, et al. Evaluation for statistical characteristics of Rayleigh fading channels via Kolmogorov-Smirnov test[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8): 36-41(in Chinese).

[24] WANG F G, WANG X D. Fast and robust modulation classification via kolmogorov-smirnov test[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(8): 2324-2332.

[25] DEPARTMENT O. Global positioning system standard positioning service performance standard[J]. GPS & Its Augmentation Systems, 2008, 35(2): 197-216.

[26] 陆安南, 杨小牛. 单星测频测相位差无源定位[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 244-247.
LU A N, YANG X N. Passive location from the combined set of frequency and phase difference measurements by single satellite[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 244-247(in Chinese).

[27] 黄静, 赵薇薇, 陈雪华, 等. 单星测频静态目标无源定位研究[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(4): 11-17.
HUANG J, ZHAO W W, CHEN X H, et al. Passive positoning algorithm based on single satellite frequency measurement[J]. Chi-

nese Space Science and Technology, 2019, 39(4): 11-17(in Chinese).
[28] 朱重儒, 朱立东. 一种基于加权最小二乘载频估计的单星定位算法[J]. 空间电子技术, 2021, 18(2): 9-15.
ZHU Z R, ZHU L D. A single satellite location algorithm based on weighted least square carrier frequency estimation[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(2): 9-15(in Chinese).

# Aircraft position verification with one satellite based on Doppler shift change

LIU Haitao*, FENG Jingbo, LI Dongxia, WANG Lei

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

**Abstract**: Satellite-based automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) is an important technology for wide-area aircraft surveillance. To solve the problem of false target interference existing in the satellite-based ADS-B system, a position verification method with one satellite based on Doppler shift change was proposed. First, the system model of satellite-based ADS-B was presented. Then, the formula for the Doppler shift change of aerospace link was theoretically provided. Furthermore, the Kolmogorov-Smirnoff (k-s) test was used to verify the authenticity of the ADS-B position message. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed scheme were verified by computer simulation. The simulation results show that the probability of detection of the proposed method is more than 97.75%, and the false dismissal probability is less than 4.50%. In addition, only one low-orbit satellite is required for monitoring, and it is not sensitive to positioning errors of aircraft and satellites.

**Keywords**: satellite-based ADS-B; position verification; Doppler shift change; Kolmogorov-Smirnoff test; positioning error

**Received**: 2022-12-31; **Accepted**: 2023-03-10; **Published Online**: 2023-05-10 16:58
**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230510.1319.001
**Foundation items**: National Key Research and Development Program of China (2016YFB0502402); National Natural Science Foundation of China (U1733120); Multiple Input Foundation of Tianjin in China (21JCQNJC00770)
* **Corresponding author**. E-mail: htliucauc@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0974

# 空间定位与特征泛化增强的铁路异物跟踪检测

陈永[1,2,*]，王镇[1]，周方春[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**：针对现有深度学习异物跟踪检测算法易受复杂环境、目标遮挡等影响，导致出现漏检及检测精度低等问题，提出了一种空间定位与特征泛化增强的铁路异物跟踪检测算法。提出改进多尺度级联 GhostNet 特征提取网络，提升对红外目标的特征提取能力；利用异物空间位置定位与泛化形态信息，设计空间定位与特征泛化增强模块，增强对复杂场景下位置移动与跟踪轨迹变化目标的检测精度；构建金字塔预测网络，得到红外铁路异物的检测锚框、类别及置信度信息；通过改进类别和置信度显示的 DeepSORT 跟踪算法，结合卡尔曼滤波与匈牙利算法实现红外弱光环境下铁路异物跟踪检测。实验结果表明：所提算法对铁路异物的跟踪检测精确度达到 83.3%，平均检测速度为 11.3 帧/s；与比较算法相比，所提算法检测精度更高，对红外弱光场景下铁路异物跟踪检测具有较好的性能。

**关 键 词**：机器视觉；异物检测；红外弱光；空间定位；特征泛化增强；目标跟踪
**中图分类号**：TP391.4
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0009-10

随着中国高速铁路建设的快速发展，列车运行速度不断提高，异物侵入铁路限界极易造成交通事故，严重危及列车及人身安全。鉴于此，对铁路异物采取的监测手段提出了更高的要求，实现对入侵铁路限界异物的跟踪检测至关重要[1]。列车全天候运营检测过程中，基于可见光成像的跟踪算法易受到弱光等低照度环境的影响，无法实现全天候检测，而基于红外光成像的检测算法，利用红外光辐射波段长、成像鲁棒性高的特点，能够弥补可见光成像铁路异物的不足[2]。但红外成像属于被动式热辐射成像，在夜间弱光环境下，红外图像存在对比度低、清晰度差的问题，而且容易受到复杂场景噪声的干扰，导致红外弱光场景下目标特征不明显[3]。

目前，针对红外场景中的目标跟踪检测，主要分为传统目标跟踪检测算法与基于深度学习的红外目标跟踪检测算法。传统目标跟踪算法主要采用帧差法[4]、轨迹关联[5]，或利用卡尔曼滤波预测等算法[6]，通过对红外目标进行特征搜索与匹配，实现视频序列的检测，但其无法有效识别异物目标语义，且存在检测鲁棒性差的问题。近年来，随着深度学习技术的发展，基于深度学习的红外目标跟踪检测成为研究热点。Yao 等[7] 基于孪生网络，利用目标特征与模板匹配的方法进行检测，但对发生遮挡、快速运动的红外目标进行检测时，存在漏检和误检等问题。Liu 等[8] 提出一种基于多模态训练的深度学习检测模型，结合可见光与红外光数据特点，通过深层卷积神经网络方式实现检测，但跟踪检测实时性差。Xu 和 Fan[9] 采用 MobileNet 网络实现轻量红外特征提取，结合孪生与区域建议网络进行轻量红外目标跟踪检测，但网络结构单一，存在模型特征提取能力弱的问题，导致整体跟踪检测效果较差。Li 等[10] 基于卷积神经网络，采用注意力增强的方法进行目标跟踪检测，但红外目标运动和轨迹变化时，检测精度低。Yang 等[11] 提出一种级联

**收稿日期**：2022-12-07；**录用日期**：2023-03-10；**网络出版时间**：2023-03-29 09:50
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230328.1708.002
**基金项目**：国家自然科学基金 (62462043,61963023)；兰州交通大学重点研发项目 (ZDYF2304)
* **通信作者**. E-mail：edukeylab@126.com

*引用格式*：陈永，王镇，周方春. 空间定位与特征泛化增强的铁路异物跟踪检测 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：9-18.
CHEN Y，WANG Z，ZHOU F C. Railway foreign objects tracking detection based on spatial location and feature generalization enhancement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：9-18（in Chinese）.

增强的单点多盒检测SSD算法，但对目标运动与特征遮挡红外目标存在跟踪检测效果差的问题。Lee等[12]利用单阶段YOLO深度学习检测模型进行目标的跟踪检测，但对快速移动与特征遮挡的目标存在漏检、断检的情况。Cui等[13]以端到端的深度学习网络为基础，利用区域建议网络实现实时目标识别与跟踪，但对红外目标存在特征提取不充分的问题。Soliman等[14]提出一种基于长短期记忆网络的红外目标跟踪检测算法，但网络结构复杂导致计算量偏大，不利于实时跟踪检测。

综上，现有深度学习异物跟踪检测算法易受复杂环境、目标遮挡等影响，导致模型特征提取不充分，影响跟踪检测精度，甚至出现断检、漏检的问题[15]。基于此，本文提出了一种空间定位与特征泛化增强的红外铁路异物侵限跟踪检测算法。主要工作有：①提出改进多尺度级联的GhostNet特征提取网络，丰富红外目标的特征信息，改善红外弱光环境下模型提取目标特征不充分的问题；②对采样增强后的红外特征进行空间定位与特征泛化增强模块处理，结合异物空间坐标与边缘纹理形态信息，增强对复杂场景下位置移动与跟踪轨迹变化目标的检测精度；③构建金字塔预测网络，增强模型对近远景红外目标的检测能力，得到红外铁路异物的检测锚框、种类及置信度信息；④通过改进类别和置信度显示的DeepSORT跟踪算法，结合卡尔曼滤波与匈牙利算法实现红外弱光环境下铁路异物跟踪检测。实验结果表明，本文算法较比较算法，对红外弱光场景下铁路异物跟踪检测具有较好的性能。

# 1 本文算法

## 1.1 网络整体架构

本文算法的网络整体架构如图1所示。图中：X_Avgpool表示经过水平方向平均池化后的特征，Y_Avgpool表示经过垂直方向平均池化后的特征，Split_H表示经过特征分离后的垂直特征向量，Split_W表示经过特征分离后的水平特征向量。S_feature、M_feature及L_feature分别表示金字塔预测网络中不同尺度的特征。跟踪模型由以下模块组成：①改进多尺度级联的GhostNet特征提取网络；②空间定位与特征泛化增强模块；③金字塔预测与改进显示跟踪网络。模型工作时，首先，采用提出的改进多尺度级联GhostNet特征提取网络，通过卷积与线性计算实现特征变换，利用改进的多尺度级联实现红外特征提取，改善跟踪检测模型红外特征不足问题。然后，进行红外目标空间定位与特征泛化增强处理，结合红外目标坐标位置与特征形态信息，提升模型红外目标跟踪检测准确率。最后，通过金字塔预测网络及改进类别和置信度显示的DeepSORT网络，利用红外检测锚框、类别与置信度信息，实现红外弱光下铁路异物跟踪检测。

## 1.2 改进多尺度级联的GhostNet特征提取网络

在红外弱光视频序列图像中，存在成像对比度差与目标运动模糊造成异物细节特征不清晰，导致模型跟踪检测精度降低的问题[16]。针对该问题，本文提出多尺度级联的GhostNet网络进行特征提取，与CSP-Darknet53多尺度特征提取网络相比，本文算法结合Ghost模块与残差结构，组成G-bneck模块实现轻量化红外目标特征提取。通过多尺度级联结构与双线性上采样，综合不同尺度下红外特征及语义信息，保留红外图像中目标局部细节的渐变关系，提升输出红外目标特征的质量。本文所提红外多尺度级联特征提取网络结构如图2所示。

首先，采用尺寸为$c\times k\times k\times m$的卷积核$\boldsymbol{f}$对输入大小为$h\times w\times c$的红外特征$\boldsymbol{F}$进行卷积操作，生成维度大小为$h'\times w'\times m$的本征红外特征图$\boldsymbol{F}'$。其中，$c$为输入特征图的通道数，$m$为卷积操作后的输出特征图的通道数，$k$为卷积滤波器核大小，$h$和$w$分别为输入特征图的高度和宽度。卷积变换过程可表示为

$$\boldsymbol{F}'=\boldsymbol{F}*\boldsymbol{f} \tag{1}$$

式中：“$*$”表示卷积计算。

Ghost模块是一种模型压缩的方法[17]，通过线性变换输出与卷积变换相似的特征，可以用更少的参数生成更多的特征图。本文利用Ghost模块特征线性变换计算量、参数量均小于卷积变换的特点来提升模型的检测速度。对本征红外特征$\boldsymbol{F}'$中的第$i$特征图$\boldsymbol{F}'_i$进行线性变换$\phi_{i,j}$操作，得到第$j$特征子图$\boldsymbol{F}''_{i,j}$，特征子图集合为Ghost红外特征图$\boldsymbol{F}''$。其中，线性变换可表示为

$$\boldsymbol{F}''_{i,j}=\phi_{i,j}(\boldsymbol{F}'_i)\qquad i\in[1,m],j\in[1,s] \tag{2}$$

式中：$s$为通过线性变换从每个输入特征图中生成的特征子图个数。

通过式(2)线性变换可以得到$m\times s$个Ghost红外特征图。上述线性操作较普通卷积可以大幅减少特征提取的参数量。将恒等变换$\phi_{i,s}$得到的本征红外特征与Ghost特征子图集合进行叠加，最终得到输出大小为$h'\times w'\times(m\times s)$的红外特征$\boldsymbol{F}_{\text{Ghost}}$。

图2中，通过Ghost结构堆叠可以生成G-bneck模块，其中，G-bneck模块步幅为2时结构如图3所示，其主要作用是对红外特征进行2倍下采样操

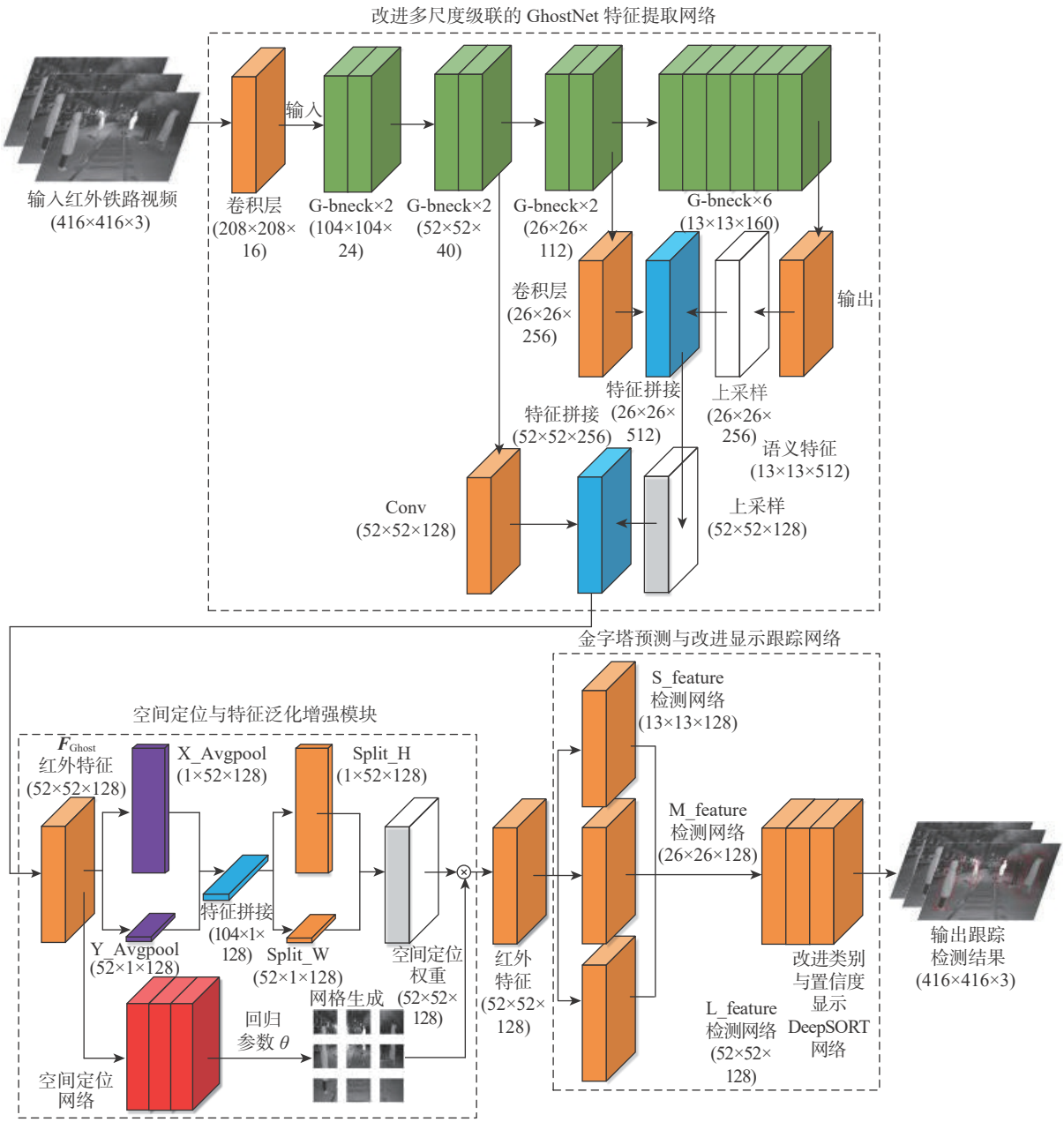



图 1　本文算法整体模型框架

Fig. 1　Model framework of the proposed algorithm

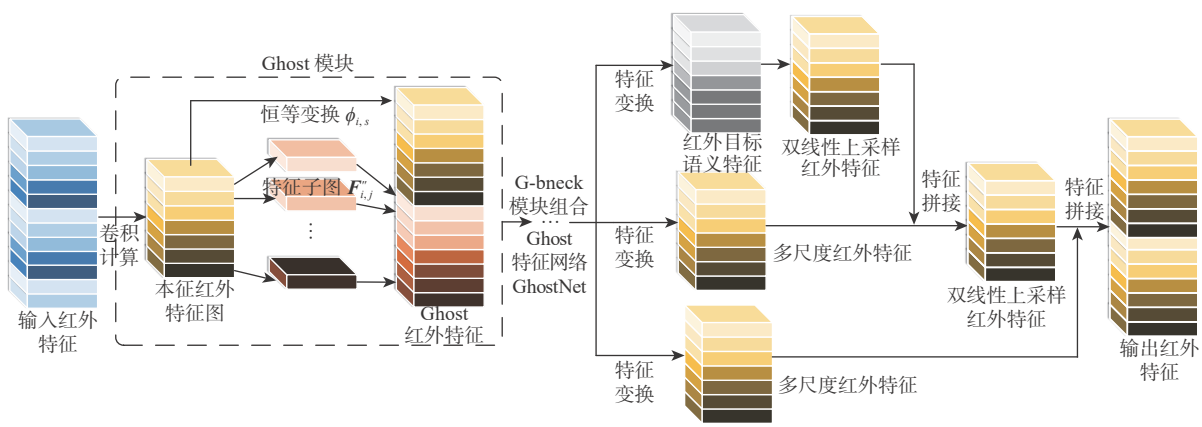



图 2　本文特征提取网络结构

Fig. 2　Structure of the proposed feature extraction network

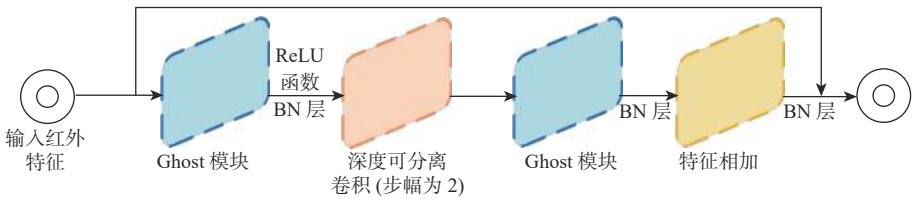
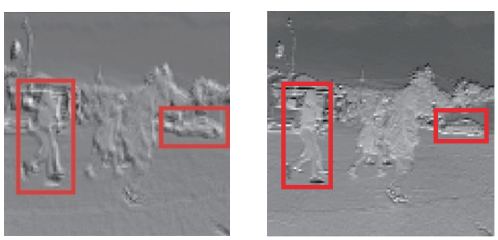



图 3 G-bneck 模块结构

Fig. 3 Structure of G-bneck module

作。将 G-bneck 模块通过组合生成 GhostNet 网络，从而实现红外目标特征的轻量提取。

本文提出的多尺度级联 GhostNet 特征提取网络，结合了浅层红外目标高分辨率细节特征与深层红外目标语义特征，并利用不同层次间的红外特征实现信息互补，来改善原始网络红外特征提取不充分的问题，而且可以减小计算开销，提高检测速度。为直观展示本文级联特征提取网络的有效性，采用特征可视化方法进行对比实验，比较结果如图 4 所示。图 4(a) 为原始 GhostNet 网络输出红外特征图，图 4(b) 为改进后输出红外特征图。可以看出，原始 GhostNet 特征提取后，存在边缘模糊的问题；通过级联多尺度特征与双线性上采样，改善了原始 GhostNet 网络特征边缘细节不清晰的问题。



(a) GhostNet 网络输出红外特征 (b) 本文网络输出红外特征

图 4 特征可视化比较

Fig. 4 Feature visualization comparison

在此基础上，为验证本文算法的特征提取效率，将所提网络与 Resnet50 残差网络、CSP-Darknet53 特征提取网络进行参数量、计算速度与网络尺寸对比实验，通过输入大小为 416×416×3 的红外图像，比较各算法的性能指标数据，实验结果如表 1 所示。可以看出，本文改进后 GhostNet 与 Resnet50 残差网络、CSP-Darknet53 特征提取网络相比，模型尺寸明显减小，仅为 42.36 MB，且特征计算速度为 0.78 s，均优于比较特征提取网络模型。本文算法通过轻量特征线性变换减少了参数量，在降低模型尺寸的同时，提高了模型整体的检测速度，实现了网络模型的高效参数计算。

**表 1 不同网络参数量与尺寸对比实验结果**

**Table 1 Results of parameter quantity and size comparison experiment under different networks**

| 网络 | 参数量/个 | 计算速度/s | 模型尺寸/MB |
|---|---|---|---|
| Resnet50 | 32 664 262 | 0.82 | 124.60 |
| CSP-Darknet53 | 64 040 001 | 0.94 | 244.29 |
| 改进后GhostNet(本文) | 11 105 445 | 0.78 | 42.36 |

### 1.3 空间定位与特征泛化增强模块

在红外目标跟踪检测的过程中，由于异物目标运动位置变化与轨迹形态角度发生偏移，导致红外模型跟踪检测时存在框选范围不准确与误检[18]。在完成 GhostNet 多尺度级联网络特征提取的基础上，本文进一步设计了空间定位与特征泛化 (spatial localization and feature generalization, SLFG) 增强模块，来增强对复杂场景下目标位置移动与跟踪轨迹变化的检测精度，结构如图 5 所示。

首先，对大小为 $h\times w\times c$ 的红外级联增强特征 $\boldsymbol{F}_{\text{Ghost}}$ 进行自适应平均池化处理，产生大小分别为 $w\times 1\times c$ 和 $h\times 1\times c$ 的水平和垂直方向的通道特征。

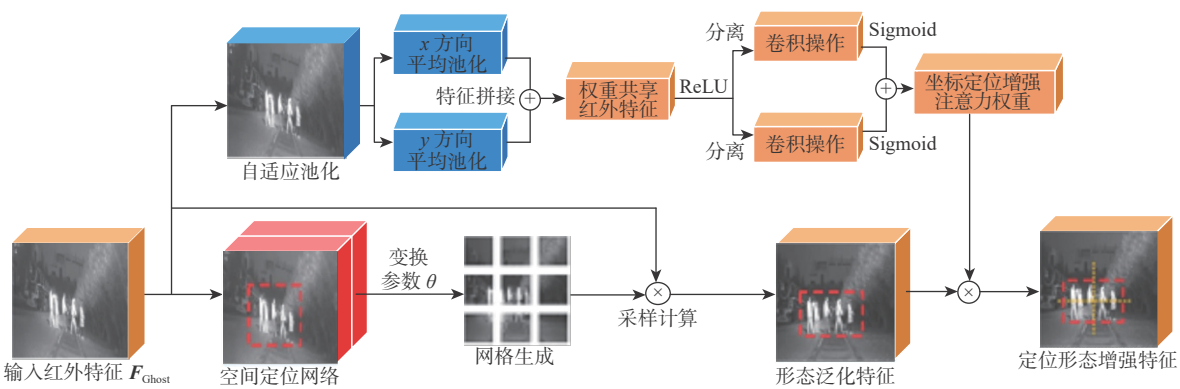



图 5 空间定位与特征泛化增强模块结构

Fig. 5 Structure of SLFG module

然后，通过特征拼接操作，结合权重共享的卷积与 ReLU 函数激活，得到大小为$(h+w)\times 1\times(c/r)$的权重共享红外特征，其中，$r$为特征通道下采样系数。对中间权重共享红外特征进行分离操作，得到大小分别为$(h+w)\times 1\times(c/r)$和$1\times(h+w)\times(c/r)$的水平和垂直方向的特征向量。最后，通过 Sigmoid 激活得到坐标定位增强注意力权重。

将大小为$h\times w\times c$的红外级联增强特征$\boldsymbol{F}_{\text{Ghost}}$输入空间定位网络[19]，通过卷积神经网络中定位函数$f_{\text{loc}}$得到回归参数$\theta=f_{\text{loc}}(\boldsymbol{F}_{\text{Ghost}})$，对红外特征$\boldsymbol{F}_{\text{Ghost}}$中采样点坐标$\left(x_{\text{pix}}^{\text{In}},y_{\text{pix}}^{\text{In}}\right)$进行仿射变换，输出红外像素坐标$\left(x_{\text{pix}}^{\text{Out}},y_{\text{pix}}^{\text{Out}}\right)$并定义至网格，结合采样器输出形态泛化增强的红外特征。其中，输入、输出红外坐标像素间变换关系如下：

$$\begin{bmatrix}x_{\text{pix}}^{\text{In}}\\ y_{\text{pix}}^{\text{In}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{A}_\theta\begin{bmatrix}x_{\text{pix}}^{\text{Out}}\\ y_{\text{pix}}^{\text{Out}}\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\theta_{11}&\theta_{12}&\theta_{13}\\ \theta_{21}&\theta_{22}&\theta_{23}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{\text{pix}}^{\text{Out}}\\ y_{\text{pix}}^{\text{Out}}\\ 1\end{bmatrix}\tag{3}$$

式中：下标pix表示红外特征中坐标像素数量；$\boldsymbol{A}_\theta$为包含仿射变换关系的映射矩阵；$\theta_{12}$、$\theta_{21}$为旋转参数，$\theta_{11}$、$\theta_{22}$为缩放参数，$\theta_{13}$、$\theta_{23}$为平移参数。

通过空间定位网络，不仅使模型输出具有空间不变性的红外特征，还可以利用无监督反向传播优化回归参数，泛化增强红外目标形态。最终将坐标定位增强注意力权重与红外泛化特征相乘，得到增强后的红外特征，变换前后对比如图 6 所示。可以看出，空间定位与特征泛化增强模块通过空间定位网络生成的红外目标泛化信息，实现了角度存在偏移红外目标的校正。结合坐标注意力计算得到空间位置权重，不仅实现了红外目标坐标的精确定位，而且提升了红外目标特征的空间不变性。利用红外目标空间定位与特征泛化增强模块处理后的特征信息，改善由于红外目标位置变化与形态角度偏移，导致模型跟踪检测精度低的问题，增强模型对移动目标的跟踪检测效果。

(a) 变换前　　(b) 变换后

图 6　空间定位与特征泛化增强变换比较

Fig. 6　Comparison of SLFG enhancement transform

### 1.4　改进类别与置信度的金字塔预测网络

在完成空间定位与特征泛化增强后，本文构建了金字塔与 DeepSORT 跟踪预测网络，通过预测网络对铁路交通场景中的近远景红外目标进行锚框范围、类别与置信度预测，通过增加跟踪器中的网络传递参数，改善跟踪算法无法有效判别红外铁路异物目标类别和检测鲁棒性差的问题[20]，综合提升模型对红外异物目标的跟踪效果。

红外目标跟踪检测网络利用金字塔预测网络输出红外目标锚框、类别与置信度信息，利用 DeepSORT 跟踪算法 8 维状态空间$(u,v,\gamma,t,\dot{x},\dot{y},\dot{\gamma},\dot{t})$描述红外目标在图像坐标系中的运动状态。其中，$(u,v)$表示红外目标锚框的中心坐标，$\gamma$和$t$分别为红外目标检测框的纵横比和高度，$(\dot{x},\dot{y},\dot{\gamma},\dot{t})$表示$(u,v,\gamma,t)$对应参数在红外图像坐标系中的相对速度。

采用跟踪器直接观测检测框参数$(u,v,\gamma,t)$作为红外目标状态值。其中，跟踪器采用匈牙利算法解决跟踪框与轨迹匹配问题。首先，通过马氏距离描述标准卡尔曼滤波器预测结果与检测器结果之间运动状态的关联程度，实现红外目标运动信息匹配，如下：

$$d^{(1)}(i,j)=(\boldsymbol{d}_j-\boldsymbol{y}_i)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_i^{-1}(\boldsymbol{d}_j-\boldsymbol{y}_i)\tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{d}_j$和$\boldsymbol{y}_i$分别为第$j$个红外目标检测框和第$i$个轨迹预测边界框；$d^{(1)}(i,j)$为$\boldsymbol{d}_j$和$\boldsymbol{y}_i$之间的马氏距离；$\boldsymbol{S}_i$为检测状态结果与平均追踪结果之间的协方差矩阵。通过计算马氏距离，可以排除关联性低的红外目标预测边界框。

因为红外视频序列中目标运动过程存在特征遮挡与镜头抖动，仅通过马氏距离关联红外目标跟踪鲁棒性较差，导致模型跟踪检测过程中存在断检、漏检，无法实现有效红外目标跟踪[21]。因此，结合最小余弦距离作为外观度量，对各检测框$\boldsymbol{d}_j$计算外观特征描述符$\boldsymbol{r}_j$，衡量不同红外目标间的外观差异，如下：

$$d^{(2)}(i,j)=\min\left\{1-\boldsymbol{r}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}^{(i)}\middle|\boldsymbol{r}^{(i)}\in R_i\right\}\tag{5}$$

式中：算法初始化$\|\boldsymbol{r}_j\|=1$，$\boldsymbol{r}^{(i)}$为第$i$个轨迹预测边界框对应的外观描述符；$R_i$为外观描述存储库。马氏距离$d^{(1)}(i,j)$为红外目标跟踪检测过程中提供有效的目标位置关联，最小余弦度量$d^{(2)}(i,j)$改善红外目标由于特征遮挡导致马氏距离失效的问题。

最终，DeepSORT 跟踪算法结合运动状态与外观信息，通过线性加权马氏距离$d^{(1)}(i,j)$与最小余弦度量$d^{(2)}(i,j)$，计算第$j$个红外目标检测框与第$i$个轨迹的关联程度$l_{i,j}$，通过超参数$\lambda$控制 2 种度量在轨迹跟踪中的影响[22]，有效改善红外目标断检、漏检导致跟踪失败的问题。计算如下：

$$l_{i,j}=\lambda d^{(1)}(i,j)+(1-\lambda)d^{(2)}(i,j)\tag{6}$$

为直观验证改进后 DeepSORT 跟踪算法的跟踪效果，进行输出结果可视化对比，如图 7 所示。

其中，图 7(a) 为原始 DeepSORT 跟踪算法在红外铁路场景中的跟踪检测结果，图 7(b) 为本文算法在红外铁路场景中的跟踪检测结果。可以看出，原始 DeepSORT 跟踪算法在跟踪检测红外目标过程中，仅显示跟踪 ID 号，缺少检测结果识别信息，无法判断跟踪过程是否存在误检，检测效果较差。而本文算法通过增加跟踪器中的传递参数，增强显示红外目标的检测类别与置信度，提升了模型对红外目标的跟踪检测效果。

(a) 改进前 (b) 改进后

图 7 增强显示的跟踪网络检测效果

Fig. 7 Enhance displayed tracking network detection effect

### 1.5 模型损失函数

本文红外目标跟踪网络模型损失 $L$ 由定位预测损失 $L_{\mathrm{loc}}$、置信度损失 $L_{\mathrm{conf}}$ 和类别损失 $L_{\mathrm{cls}}$ 组成：

$$L = L_{\mathrm{loc}} + L_{\mathrm{conf}} + L_{\mathrm{cls}} \tag{7}$$

预测网络通过目标框回归函数计算红外目标长宽比，对输入目标真实锚框区域的信息进行训练，实现红外目标锚框范围的准确预测。定位损失 $L_{\mathrm{loc}}$ 计算式如下：

$$L_{\mathrm{loc}} = \sum_{p=0}^{G^2}\sum_{q=0}^{B} I_{p,q}^{\mathrm{obj}} \left[ 1 - M_{\mathrm{IOU}} + \frac{\rho^2(b^{\mathrm{pre}}, b^{\mathrm{gt}})}{c_{\mathrm{diag}}^2} + \frac{\dfrac{16}{\pi^4}\left(\arctan\left(\dfrac{w^{\mathrm{gt}}}{h^{\mathrm{gt}}}\right) - \arctan\left(\dfrac{w^{\mathrm{pre}}}{h^{\mathrm{pre}}}\right)\right)^4}{1 - M_{\mathrm{IOU}} + \dfrac{4}{\pi^2}\left(\arctan\left(\dfrac{w^{\mathrm{gt}}}{h^{\mathrm{gt}}}\right) - \arctan\left(\dfrac{w^{\mathrm{pre}}}{h^{\mathrm{pre}}}\right)\right)^2} \right] \tag{8}$$

式中：$G^2$ 为网格数量；$B$ 为先验框数量；若第 $p$ 个网格中第 $q$ 个先验框中存在红外目标，则 $I_{p,q}^{\mathrm{obj}}$ 值为 1，没有为 0；$M_{\mathrm{IOU}}$ 为红外目标真实框与预测框的交并比；$b^{\mathrm{pre}}$ 和 $b^{\mathrm{gt}}$ 分别为预测框和真实框的中心点；$\rho^2(b^{\mathrm{pre}}, b^{\mathrm{gt}})$ 为 $b^{\mathrm{pre}}$ 和 $b^{\mathrm{gt}}$ 之间的欧氏距离；$c_{\mathrm{diag}}$ 为红外目标真实框与预测框交并矩形区间的对角线长度；$w^{\mathrm{gt}}$ 和 $h^{\mathrm{gt}}$、$w^{\mathrm{pre}}$ 和 $h^{\mathrm{pre}}$ 分别为真实框、预测框的宽和高。

另外，预测网络中置信度损失 $L_{\mathrm{conf}}$ 与类别损失 $L_{\mathrm{cls}}$ 计算式为

$$L_{\mathrm{conf}} = \sum_{p=0}^{G^2}\sum_{q=0}^{B} I_{p,q}^{\mathrm{obj}} \left[ -\hat{C}_p^q \ln C_p^q - \left(1 - \hat{C}_p^q\right) \ln\left(1 - C_p^q\right) \right] + \lambda_{\mathrm{noobj}} \sum_{p=0}^{G^2}\sum_{q=0}^{B} I_{p,q}^{\mathrm{noobj}} \left[ -\hat{C}_p^q \ln C_p^q - \left(1 - \hat{C}_p^q\right) \ln\left(1 - C_p^q\right) \right] \tag{9}$$

$$L_{\mathrm{cls}} = \sum_{p=0}^{G^2} I_{p,q}^{\mathrm{obj}} \sum_{c_{\mathrm{cls}} \in \mathrm{class}} \left[ -\hat{P}_p^q \ln P_p^q - (1 - \hat{P}_p^q) \ln(1 - P_p^q) \right] \tag{10}$$

式中：$C_p^q$ 和 $\hat{C}_p^q$ 分别为预测框和真实框的置信度；$\lambda_{\mathrm{noobj}}$ 为网格内无目标的权重系数[23]；若第 $p$ 个网格中第 $q$ 个先验框中不存在红外目标，则 $I_{p,q}^{\mathrm{noobj}}$ 值为 1，有则为 0；$P_p^q$ 和 $\hat{P}_p^q$ 分别为预测框和真实框中的红外目标属于对应训练目标类别的概率。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验数据与环境配置

由于目前缺少公开夜间红外铁路异物侵限的数据集，本文模型采用 FLIR 公司发布的红外交通数据集进行训练，并结合夜间铁路现场拍摄的复杂场景下红外铁路异物侵限视频，通过 LabelImg 工具实现数据集扩充，共计 25 000 张红外图像，其中，70% 为训练集，30% 为测试集。实验环境为 PyTorch 深度学习框架，显卡采用 NVIDIA GeForce GTX 1660，本文算法及对比算法均以相同环境进行实验。

### 2.2 红外铁路异物侵限跟踪检测实验

为验证本文算法在红外视频中对铁路异物目标的跟踪检测效果，进行真实铁路场景下的红外异物侵限检测，对出现在红外交通视频中的行人、机动车及铁轨区域目标进行跟踪，实验结果如图 8 所示。其中，图 8(a) 为原始红外视频序列图像。图 8(b) 为文献 [6] 算法检测结果，可以看出，文献 [6] 中卡尔曼滤波预测算法对于移动中的汽车目标存在漏检的问题，如图中箭头所指地方。图 8(c) 为文献 [11] 提出的级联增强 SSD 算法检测结果，可以看出，该算法无法有效检测出铁轨区域目标，并且对左侧行人异物目标存在锚框复选的问题。图 8(d) 为文献 [12] 单阶段 YOLO 算法检测结果，可以看出，该算法对异物轨迹发生变化时存在漏检。图 8(e) 为本文算法检测结果，可以看出，该算法能够稳定跟踪视频中红外行人与车辆目标，跟踪检测锚框范围准确。

为进一步进行检测结果细节比较，对图 8 检测结果进行局部放大分析。其中，图 9(a) 为文献 [6] 算法检测结果局部放大图，可以看出，该算法不仅重复框选红外行人目标，并且对位置发生变化的红外行人与汽车目标存在漏检，这是因为文献 [6] 算法仅采用卡尔曼滤波和匈牙利算法进行目标匹配与关联，对红外目标特征提取能力有限，导致跟踪检测鲁棒性差。图 9(b) 为文献 [11] 算法检测结果局部放大图，虽然该算法采用多级目标检测网络与交叉熵损失，一定程度上提升了模型对移动红外汽车目标的跟踪效果，但仍存在红外行人锚框复选与

(a) 原始铁路红外视频图像

(b) 文献[6]算法检测结果

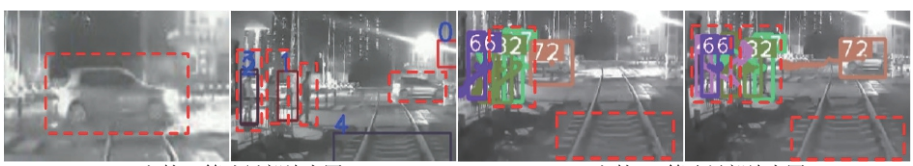
(c) 文献[11]算法检测结果

(d) 文献[12]算法检测结果

(e) 本文算法检测结果

图 8　红外铁路异物侵限跟踪检测实验结果

Fig. 8　Tracking detection experiment results of infrared railway foreign body intrusion



(a) 文献[6]算法局部放大图　　(b) 文献[11]算法局部放大图

(c) 文献[12]算法局部放大图

图 9　红外铁路异物侵限跟踪检测局部放大图

Fig. 9　Partial enlarged image of infrared railway foreign body intrusion tracking

铁轨区域漏检的问题。图 9(c) 为文献 [12] 算法检测结果局部放大图, 可以看出, YOLO 算法在跟踪检测过程中出现了行人目标的错检、漏检, 同时存在跟踪检测红外行人目标锚框漂移与车辆目标置信度偏低的问题。

### 2.3　遮挡异物侵限跟踪检测实验

在完成真实铁路场景下的红外异物侵限跟踪检测实验后, 进一步进行复杂红外弱光环境下异物遮挡侵限跟踪检测实验。检测红外视频图像中, 汽车目标受到行人的遮挡, 实验结果如图 10 所示。其中, 图 10(a) 为原始红外视频序列图像。图 10(b) 为文献 [6] 算法的检测结果, 可以看出, 该算法在检测过程中, 对位置、形态变动较大的红外目标存在检测效果不佳的问题。图 10 (c) 为文献 [11] 算法的检测结果, 可以看出, 该算法对特征遮挡的汽车目标存在漏检, 同时对红外行人目标存在锚框重复检测, 影响跟踪效果。图 10(d) 为文献 [12] 算法的检测结果, 该算法对多个红外行人与车辆目标均存在漏检, 不适合用于红外目标跟踪检测。图 10(e) 为本文算法的检测结果, 可以看出, 该算法不仅能够准确检测位置形态发生变化的红外行人, 也能够检测特征被遮挡的红外汽车目标, 检测置信度高于其他算法。

对图 10 进一步进行结果细化放大比较, 如图 11 所示。其中, 图 11(a) 为文献 [6] 算法检测结果局部放大图, 可以看出, 该算法无法有效跟踪运动状态

(a) 原始红外视频图像

(b) 文献[6]算法检测结果

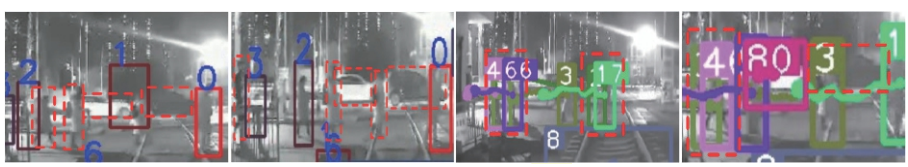
(c) 文献[11]算法检测结果

(d) 文献[12]算法检测结果

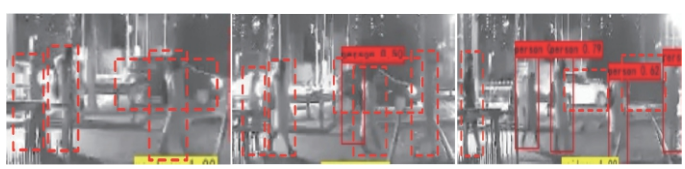
(e) 本文算法检测结果

图 10 遮挡异物侵限跟踪检测实验结果

Fig. 10 Tracking detection experiment results of occluded foreign objects intrusion



(a) 文献[6]算法局部放大图 (b) 文献[11]算法局部放大图



(c) 文献[12]算法局部放大图

图 11 遮挡异物侵限跟踪检测局部放大图

Fig. 11 Partial enlarged image of occluded foreign object intrusion tracking

中的红外行人与存在特征遮挡的红外车辆目标，检测鲁棒性差。图 11(b) 为文献 [11] 算法检测结果局部放大图，可以看出，该算法检测过程中存在复选密集红外行人与漏检特征遮挡红外车辆目标的问题，跟踪检测精度较低。图 11(c) 为文献 [12] 算法检测结果局部放大图，该算法针对运动状态中的红外行人与特征被遮挡的汽车目标存在漏检，并且存在跟踪检测行人目标置信度偏低的问题。

### 2.4 跟踪检测性能分析

为客观分析各种算法的综合检测性能，采用多目标检测准确度、多目标检测精确度与检测速度定量对比。评价数值越大，模型检测性能越好。各项实验数据如表 2 所示。

对表 2 数据进行分析，文献 [6] 算法虽然检测

表 2 不同异物跟踪检测算法性能对比

Table 2 Performance comparison of different foreign body tracking methods

| 算法 | 多目标检测准确度/% | 多目标检测精确度/% | 检测速度/(帧·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 文献[6] | 67.5 | 68.9 | 16.9 |
| 文献[11] | 78.4 | 81.5 | 8.8 |
| 文献[12] | 70.6 | 72.4 | 9.7 |
| 本文 | 80.9 | 83.3 | 11.3 |

速度最高，约为 17 帧/s，但易受红外目标移动、形态变化及环境噪声的影响，漏检问题严重，导致跟踪检测精度最低，仅为 68.9%。文献 [11] 算法结合级联卷积神经网络改进的单点多盒检测算法与 DeepSORT 跟踪算法实现复杂红外场景中的目标检测，一定程度上改善了红外目标的漏检，但该算法存在网络结构复杂导致的检测速率低的问题，检测速度为 8.8 帧/s，不利于实时铁路异物的跟踪检测。文献 [12] 算法采用单阶段 YOLO 方法进行异物跟踪检测，检测速度约为 9.7 帧/s，但存在红外目标特征提取不足导致检测多目标检测精度低的情况，其值为 72.4%。本文算法通过级联增强的特征提取网络及空间定位与特征泛化增强模块，增强了模型对红外目标坐标定位与形态学习能力，通过金字塔预测与改进显示的跟踪网络，实现红外弱光环境中的铁路异物目标跟踪，跟踪检测准确度为 80.9%，跟踪检测精确度为 83.3%，检测速度为 11.3 帧/s。通过分析上述实验指标，本文算法在复杂红外场景中保持了较高的跟踪精度与较高的检测速度，综合性能指标优于对比算法。

### 2.5　消融实验

为进一步直观反映本文算法中级联增强特征提取网络、空间定位与特征泛化增强模块、金字塔预测网络在红外铁路异物目标跟踪检测过程中的有效性，进行消融实验分析。通过在所提模型的基础上去除相关改进模块进行训练及测试，验证各改进模块对模型性能提升的作用，消融实验结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出，在所提红外异物跟踪检测模型进行级联特征提取网络增强后，通过结合特征变换与多尺度融合增强了红外目标的边缘与纹理特征，将网络模型的跟踪检测精度由 59.7% 提升到 67.1%，提升了 7.4%。在此基础上，加入红外目标位置空间定位与特征泛化增强模块，在前向训练的过程中增强模型对红外目标空间位置与形态特征的关注，将模型的跟踪检测精度由 67.1% 提升到 78.6%，提升了 11.5%。在预测过程中采用金字塔预测网络进行优化，本文算法的平均跟踪检测精度达到 83.3%。通过消融实验，直观体现各部分改进模块提升的跟踪检测精度值，验证算法跟踪检测的有效性。

**表 3　模型消融实验比较**

**Table 3　Comparison of ablation experiment**

| 基准 | 级联增强特征提取网络 | 空间定位与特征泛化增强 | 金字塔预测网络 | 所提 DeepSORT 网络 | 多目标检测精确度/% |
|---|---|---|---|---|---|
| √ | | | | √ | 59.7 |
| √ | √ | | | √ | 67.1 |
| √ | √ | √ | | √ | 78.6 |
| √ | √ | √ | √ | √ | 83.3 |

## 3　结　论

1）提出一种空间定位与特征泛化增强铁路异物跟踪检测算法，设计多尺度级联改进 GhostNet 特征提取网络，在提升检测速度的基础上，克服了铁路异物特征提取不充分的问题。

2）利用异物空间位置定位与泛化形态信息，提出了空间定位与特征泛化增强模块，克服了异物目标运动位置变化与轨迹形态角度发生偏移，造成红外模型跟踪检测存在框选范围不准确与误检的问题，提升了复杂场景下铁路异物的检测跟踪精度。

3）实验结果表明，与对比算法相比，本文算法跟踪检测精度较高，跟踪检测精确度达到 83.3%，平均检测速度为 11.3 帧/s，保持了较高的跟踪检测精度与速度。

综上，本文算法对于红外弱光场景下铁路异物跟踪检测具有较好的性能。

## 参考文献（References）


[1] LI C, XIE Z Y, QIN Y, et al. A multi-scale image and dynamic candidate region-based automatic detection of foreign targets intruding the railway perimeter[J]. Measurement, 2021, 185: 109853.

[2] LI Y D, LIU Y, DONG H, et al. Intrusion detection of railway clearance from infrared images using generative adversarial networks [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 40(3): 3931-3943.

[3] WANG Y, LI Y, HAN Q. Vehicle-mounted infrared pedestrian tracking based on scale adaptive kernel correlation filter[J]. IAENG International Journal of Computer Science, 2022, 49(2): 349-356.

[4] HU J W, LIU R X, CHEN Z H, et al. Octave convolution-based vehicle detection using frame-difference as network input[J]. The Visual Computer, 2023, 39(4): 1503-1515.

[5] 艾明晶, 单国志, 刘鹏高, 等. 基于朝向约束和重识别特征的目标轨迹关联方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(6): 957-967.
AI M J, SHAN G Z, LIU P G, et al. Target trajectory association method based on orientation constraint and re-identification feature[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(6): 957-967(in Chinese).

[6] LI S H, ZHAO L H. A low-cost and fast vehicle detection algorithm with a monocular camera for adaptive driving beam systems [J]. IEEE Access, 2021, 9: 26147-26155.

[7] YAO T T, HU J C, ZHANG B, et al. Scale and appearance variation enhanced Siamese network for thermal infrared target tracking[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 117: 103825.

[8] LIU F Y, LIU J, WANG L B. Deep learning and infrared thermography for asphalt pavement crack severity classification[J]. Automation in Construction, 2022, 140: 104383.

[9] XU Y, FAN Q. A lightweight convolutional network for infrared

object detection and tracking[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2234(1): 012004.

[10] LI G F, CHEN X, LI M J, et al. One-shot multi-object tracking using CNN-based networks with spatial-channel attention mechanism [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108267.

[11] YANG S D, CHEN Z H, MA X M, et al. Real-time high-precision pedestrian tracking: A detection-tracking-correction strategy based on improved SSD and Cascade R-CNN[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2022, 19(2): 287-302.

[12] LEE T Y, JEONG M H, PETER A. Object detection of road facilities using YOLOv3 for high-definition map updates[J]. Sensors and Materials, 2022, 34(1): 251.

[13] CUI F, NING M W, SHEN J W, et al. Automatic recognition and tracking of highway layer-interface using Faster R-CNN[J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 196: 104477.

[14] SOLIMAN N F, ALABDULKREEM E A, ALGARNI A D, et al. Efficient deep learning modalities for object detection from infrared images[J]. Computers, Materials & Continua, 2022, 72(2): 2545-2563.

[15] WU S J, ZHANG K, LI S Y, et al. Aircraft tracking in infrared imagery with adaptive learning and interference suppression[J]. Electronics Letters, 2021, 57(16): 636-638.

[16] ZHAO C H, WANG J P, SU N, et al. Low contrast infrared target detection method based on residual thermal backbone network and weighting loss function[J]. Remote Sensing, 2022, 14(1): 177.

[17] CHANG B R, TSAI H F, HSIEH C W, et al. Chip contour detection based on real-time image sensing and recognition[J]. Sensors and Materials, 2022, 34(3): 1077.

[18] YANG B, ZHANG Y. Localization and tracking of closely-spaced human targets based on infrared sensors[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 123: 104176.

[19] JADERBERG M, SIMONYAN K, ZISSERMAN A, et al. Spatial transformer networks[EB/OL]. (2016-02-04)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1506.02025.

[20] YANG F, LI W, LIANG B B, et al. Multi-stage attention network for video-based person re-identification[J]. IET Computer Vision, 2022, 16(5): 445-455.

[21] CUI Y M, JIANG L H, LIU S Y, et al. Fast and accurate obstacle detection of manipulator in complex human-machine interaction workspace[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(8): 085402.

[22] PAIK C, KIM H J. Improving object detection, multi-object tracking, and re-identification for disaster response drones[EB/OL]. (2022-01-05)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/2201.01494.

[23] KUSHNIR D. Methods and means for small dynamic objects recognition and tracking[J]. Computers, Materials & Continua, 2022, 73(2): 3649-3665.

# Railway foreign objects tracking detection based on spatial location and feature generalization enhancement

CHEN Yong[1, 2, *], WANG Zhen[1], ZHOU Fangchun[1]

(1. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Gansu Artificial Intelligence and Graphics and Image Processing Engineering Research Center, Lanzhou 730070, China)

**Abstract**: There are factors of complex environments, target occlusion, and others. These factors lead to the lack of detection and low detection accuracy of existing depth learning foreign object tracking algorithms.A railway foreign object tracking technique based on spatial location and feature generalization enhancement is proposed to address the issues with the current deep learning video tracking system. The multi-scale cascaded GhostNet network is used to improve the feature extraction ability of the model. The infrared features are enhanced by spatial location and feature generalization module. The module combined with infrared foreign object spatial location and generalization morphology.The detection accuracy of the network is enhanced. The detection anchor size, target kind, and confidence of infrared railway foreign materials are obtained by using the pyramid prediction network. The DeepSORT tracking algorithm which improved category and confidence combined with Kalman filtering and the Hungarian algorithm is used to track railway foreign objects in an infrared weak light environment. The experimental results show that the tracking precision of the proposed algorithm for infrared targets reaches 83.3%, and the average detection rate of the proposed method is 11.3 frames per second. Compared with the comparison method, the proposed algorithm has good performance for tracking railway foreign objects in infrared weak light scenes.

**Keywords**: machine vision; foreign object detection; infrared weak light; spatial location; feature generalization enhancement; target tracking

**Received**: 2022-12-07; **Accepted**: 2023-03-10; **Published Online**: 2023-03-29 09:50

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230328.1708.002

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (62462043,61963023); Key Research and Development Project of Lanzhou Jiaotong University (ZDYF2304)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0980

# 空间信息引导的双分支实时语义分割算法

侯志强[1,2,*]，戴楠[1,2]，程敏捷[1,2]，李富成[1,2]，马素刚[1,2]，范九伦[3]

(1. 西安邮电大学 计算机学院，西安 710121；2. 陕西省网络数据分析与智能处理重点实验室，西安 710121；
3. 西安邮电大学 通信与信息工程学院，西安 710121)

**摘　　要**：针对实时语义分割模型大量缩减参数造成特征空间信息损失，以及特征缺少上下文信息导致分割类别预测不准确的问题，提出一种基于空间信息引导的双分支实时语义分割算法。该算法采用双分支结构分别获取特征的空间信息和语义信息，为更好地保留空间信息，设计了一种空间引导模块(SGM)，同时捕获特征的局部信息和周围上下文信息，并通过通道加权给予重要信息更高的权重，有效弥补了图像高分辨率特征在降采样过程中的信息损失；为进一步强化特征的上下文信息表征能力，设计了池化特征增强模块(PFEM)，采用不同尺寸的池化核捕获多尺度特征信息，并采用条状池化核对特征之间的长距离依赖关系进行建模，更好地确定分割区域的类别。在Cityscapes和CamVid数据集上对所提算法进行验证，平均交并比分别达到77.4%和74.0%，检测速度分别达到49.1帧/s和124.5帧/s，在保证实时分割的情况下有效提升了精度，获得了良好的语义分割性能。

**关 键 词**：图像处理；实时语义分割；卷积神经网络；空洞卷积；上下文信息
**中图分类号**：TP391.4
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0019-11

图像语义分割[1]是计算机视觉的一项重要研究内容，旨在为图像中的每个像素分配所属的类别标签，在自动驾驶、场景解析、机器人感知等诸多领域具有广泛应用。在实际使用中，要求算法同时具备较高的分割精度和快速的运行速度。因此，设计轻量且高效的实时语义分割算法具有重要研究意义。

目前，已经出现了许多轻量级模型来平衡语义分割的准确性与实时性，通常采用高效的编码器-解码器结构。早期Badrinarayanan等[2]使用具有跳跃连接和转置卷积的编码器-解码器结构来恢复高分辨率的特征表示；Paszke等[3]采用非对称的编码器-解码器结构，对通道进行裁剪，去除冗余信息，降低了浮点运算量；Zhao等[4]将多尺度图像作为输入，使用级联网络结构逐步融合不同分辨率的特征，有效提高了模型运行速度；Li等[5]通过特征重用来增强特征的表征能力，将深层上下文信息合并到编码器中，极大提高了网络的运行速度；Wang等[6]采用带有空间金字塔池化(spatial pyramid pooling, SPP)的编码器-解码器结构，在每次进行跳跃连接前使用1×1的卷积减少特征维数，以缩减模型计算量。尽管这些方法在实时性上取得了进展，但模型大量参数的缩减会削弱网络结构提取特征信息的能力，造成特征空间信息的损失和分割精度的下降。

针对上述问题，之后的研究通过使用轻量级的模块来提高模型的分割性能，如在算法中引入深度可分离卷积[7]和转置残差块[8]。Mehta等[9]不仅将标准卷积进行分解，还采用了空间金字塔模块，在

收稿日期：2022-12-10；录用日期：2023-06-02；网络出版时间：2023-07-03 10:06
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230630.1810.012
基金项目：国家自然科学基金(62072370)
*通信作者. E-mail：hou-zhq@sohu.com

引用格式：侯志强，戴楠，程敏捷，等. 空间信息引导的双分支实时语义分割算法[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：19-29.
HOU Z Q，DAI N，CHENG M J，et al. Two-branch real-time semantic segmentation algorithm based on spatial information guidance[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：19-29 (in Chinese).

提高运行速度的情况下兼顾了模型精度；Wang 等[10]将空洞卷积与深度可分离卷积相结合，在保持参数量不变的同时产生较大的感受野，获得参数量小、精度高的实时分割结果；双边分割网络 (bilateral segmentation network, BiSeNet)[7] 选择轻量级骨干网络，并提出一路附加的下采样路径获取空间细节信息与主干网络融合，以弥补精度的下降；具有引导聚合的双边网络 BiSeNet V2[11] 进一步改进了 BiSeNet 的结构，减少了通道数量，并采用快速下采样策略，设计引导聚合层来融合 2 个分支的信息，但仅通过不同尺度的交互特征融合方法，导致特征表征能力较弱，缺少上下文信息，仍会出现分割精度降低问题。

对于实时语义分割任务来说，在有限的资源下实现更好的分割精度仍然有进一步的改进空间。为此，本文提出一种基于空间信息引导的双分支实时语义分割算法，主要工作如下：

1）算法采用双分支结构，有效缩减了模型计算量。为弥补特征在连续降采样过程中造成的空间信息损失，设计了一种空间引导模块 (spatial guided module, SGM)，有效扩大了模型提取特征的感受野，捕获了特征丰富的空间信息，并通过对通道加权给予重要信息更高的权重，增强了特征的信息表达。

2）为进一步提高特征的上下文信息表征能力，设计了一种池化特征增强模块 (pooling feature enhancement module, PFEM)，有效捕获了多尺度的特征信息，聚合了孤立区域间的长距离依赖关系，更好地确定了分割区域的类别。

3）在 Cityscapes 和 CamVid 数据集上对算法进行验证，平均交并比（mean intersection over union, MIoU）分别达到 77.4% 和 74.0%。在输入图像大小为 512×1 024 时，检测速度达到 49.1 帧/s；在输入图像大小为 720×960 时，检测速度达到 124.5 帧/s。与近几年提出的多个性能优越的算法进行比较，实验结果表明，本文算法在准确度和实时性之间取得了有效平衡。

## 1 本文算法

本文提出的空间信息引导的双分支实时语义分割算法由空间细节分支和语义上下文分支组成，并由特征融合模块 (feature fusion module, FFM) 合并，如图 1 所示。首先，经过 2 个并行分支提取特征，相较于传统的单分支结构，双分支结构可以有效缩减模型计算量，提高运行速度。空间细节分支主要用于提取高分辨率的浅层特征，具有目标更多的位置和细节信息。堆叠多个 3×3 的标准卷积层得到 $D_1$、$D_2$ 和 $D_3$ 这 3 层特征，大小分别为原始特征的 1/2、1/4 和 1/8，通道数分别为 64、64 和 128。为更好地保留空间信息，细化特征边缘，本文设计了 SGM，将其分别嵌入在 $D_1$、$D_2$ 和 $D_3$ 后，前一层特征的信息流经 SGM 处理后再作为下一层特征的输入，有效弥补了高分辨率特征在降采样过程中的信息损失。语义上下文分支主要用来提取低分辨率的深层特征，采用 3×3 的标准卷积层将浅层特征逐步映射到深层，得到 $S_1$～$S_6$ 这 6 层特征，大小分别为原始特征的 1/2、1/4、1/8、1/16、1/32 和 1/32，通道数分别为 16、16、32、64、128 和 128。在 FFM 中，将空间细节分支与语义上下文分支的信息进行

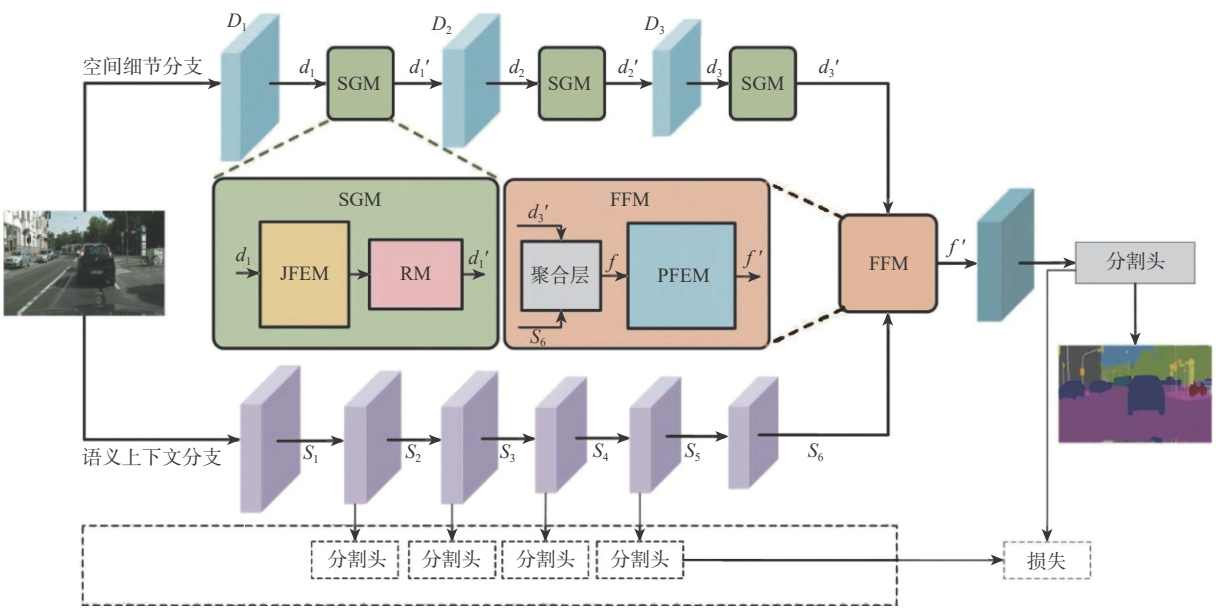



图 1 空间信息引导的双分支实时语义分割算法流程

Fig. 1 Flow chart of two-branch real-time semantic segmentation algorithm based on spatial information guidance

交互融合。在此处保留了 Baseline 的聚合层[4], 对双分支特征进行初步融合。为进一步强化特征的上下文信息表征能力, 在 FFM 中设计了 PFEM, 根据自适应平均池化和自适应最大池化操作的特性, 对融合特征进行不同方式的变换, 采用不同尺寸的池化核有效捕获了多尺度的特征信息, 并采用条状池化核对特征之间的长距离依赖关系进行建模, 获得了更精细的分割结果。

### 1.1　空间引导模块

目前, 很多实时语义分割算法为加快模型运行速度, 对特征进行简单降采样操作和大量缩减模型参数, 致使目标特征信息损失, 在上采样过程中较难恢复, 从而影响分割精度。为解决该问题, 本文设计了 SGM, 结构流程如图 2 所示, 主要由联合特征提取模块 (joint feature extraction module, JFEM) 和细化模块 (refinement module, RM) 组成, 结合不同空洞率的空洞卷积有效扩大了模型提取特征的感受野, 获取了特征丰富的空间信息, 并给予重要信息更高的权重, 进一步提升了模型解析语义信息的能力。

首先, 将 $d_1 \in \mathbf{R}^{H\times W\times C}$ (其中, $H$ 为高度, $W$ 为宽度, $C$ 为特征通道数) 作为该模块的输入, 在此处引入 1×1 的卷积操作, 将输入特征的通道数从 64 减少为 32, 以缩减后续操作的计算量, 提高模型运行速度。然后, 将特征输入 JFEM 中, 该模块主要由一个卷积核大小为 3×3 的标准卷积层 Conv 3×3 和与其并行的空洞卷积层 DConv 3×3 组成。标准卷积层用来捕获特征的局部信息, 记作 $x_1$; 空洞卷积具有相对较大的感受域, 可以捕获特征局部信息的周围上下文信息, 记作 $x_2$。最后, 将这 2 个并行分支的信息进行拼接融合, 得到联合特征 $x_c$。上述并行分支捕获了特征不同感受域的信息, 采用标准卷积关注小目标的分割, 采用空洞卷积增大感受野来分割大目标, 同时相较于下采样操作增大分辨率以精确定位目标。因此, 融合后的联合特征 $x_c$ 具有丰富的多尺度空间信息。上述过程表示如下:

$$x_1 = \mathrm{Conv}_{3\times3}(\mathrm{Conv}_{1\times1}(d_1)) \tag{1}$$

$$x_2 = \mathrm{DConv}_{3\times3}(\mathrm{Conv}_{1\times1}(d_1)) \tag{2}$$

$$x_c = x_1 \,\|\, x_2 \tag{3}$$

式中: $\mathrm{Conv}_{m\times n}$ 表示卷积核大小为 $m\times n$ 的卷积操作; $\mathrm{DConv}_{m\times n}$ 表示卷积核大小为 $m\times n$ 的空洞卷积操作; "‖" 表示特征拼接。

经过卷积操作提取到特征图后, 特征图的各通道表达不同的信息, 对于分割结果的影响存在差异。因此, 将 $x_c$ 送入 RM, 计算一个注意力向量来引导特征学习。获取特征图不同通道间的重要程度, 赋予每个通道相应的权重, 进一步细化提取到的联合特征。

首先, 使用一个卷积核大小为 3×3 的标准卷积层来提取 $x_c$ 的信息, 得到 $x_c'$。然后, 使用全局平均池化 (global average pooling, GAP) 和 1×1 卷积来计算通道维度上的注意力权值, 再采用批量归一化 BatchNorm 对数据进行归一化, 并使用 Sigmoid 函数激活。最后, 将计算得到的注意力权值分数与 $x_c'$ 相乘得到 $d_1'$。给予联合特征重要信息更高的注意力分数, 抑制无用信息, 增强特征表达, 达到细化特征的目的。

$$d_1' = x_c' \otimes \delta(F_{\mathrm{BN}}(\mathrm{Conv}_{1\times1}(F_{\mathrm{GAP}}(\mathrm{Conv}_{3\times3}(x_c))))) \tag{4}$$

式中: $F_{\mathrm{BN}}$ 表示 BatchNorm 操作; "⊗" 表示元素级相乘; $\delta$ 表示 Sigmoid 函数; $F_{\mathrm{GAP}}$ 表示全局平均池化操作。

$$\delta(x) = \frac{1}{1+\mathrm{e}^{-x}} \tag{5}$$

$$F_{\mathrm{GAP}} = \frac{1}{H\times W}\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W} x(i,j) \tag{6}$$

其中: $x$ 为特征图; $(i,j)$ 为特征的像素点。

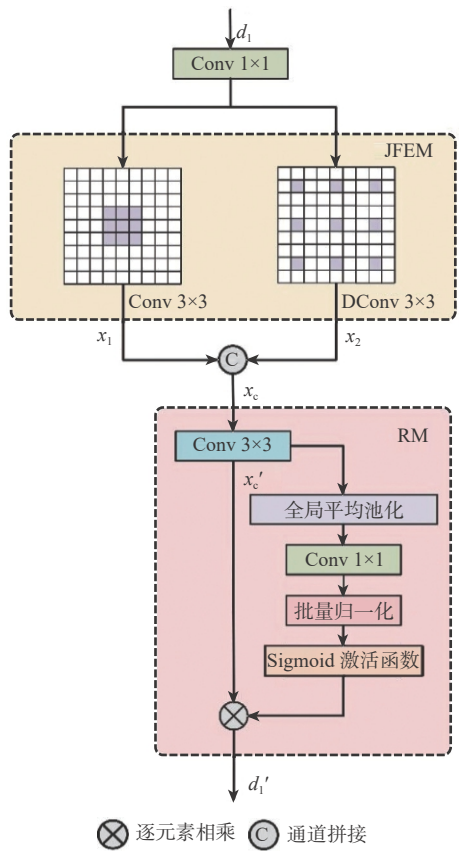



图 2　空间引导模块

Fig. 2　Spatial guided module

### 1.2　池化特征增强模块

由于空间细节分支和语义上下文分支的特征

信息具有互补性[12]，采用聚合层合并这2个分支的特征信息得到$f$。仅通过交互不同尺度特征信息的融合方法仍然存在分割精度降低的问题，导致特征的上下文信息减弱。为解决该问题，更好地确定分割区域的类别，本文提出了PFEM。该模块通过捕获多尺度特征信息和建模特征间的长距离依赖关系来提高特征的上下文信息表征能力，结构流程如图3所示。

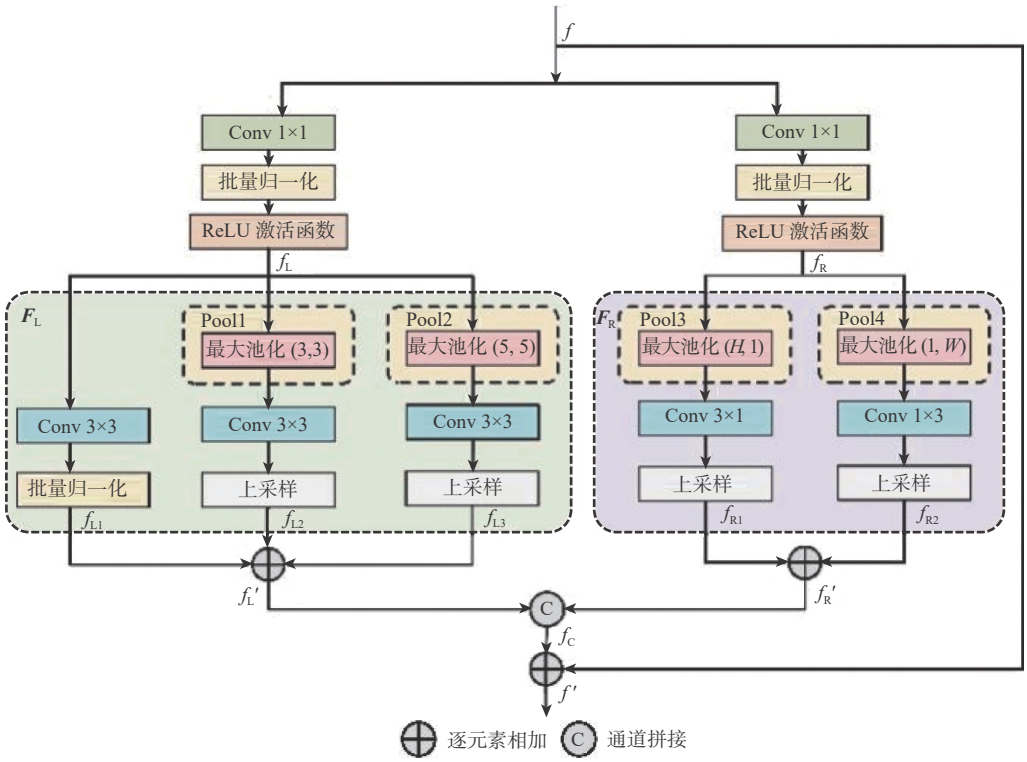



图3 池化特征增强模块

Fig. 3 Pooling feature enhancement module

对输入特征$f \in \mathbf{R}^{H\times W\times C}$分别进行2次卷积核大小为1×1的卷积操作，将初始通道数从128减少为32，以缩减后续操作计算量，再进行批量归一化和ReLU操作，得到$f_L$和$f_R$。如图3所示，将其分别输入到$F_L$和$F_R$中，表示如下：

$$f_L = \mathrm{ReLU}(\mathrm{BN}(\mathrm{Conv}_{1\times1}(f))) \tag{7}$$

$$f_R = \mathrm{ReLU}(\mathrm{BN}(\mathrm{Conv}_{1\times1}(f))) \tag{8}$$

在$F_L$中，主要捕获多尺度的特征信息，先通过一个卷积核大小为3×3的标准卷积层提取$f_L$的特征信息得到$f_{L1}$，表示如下：

$$f_{L1} = F_{\mathrm{BN}}(\mathrm{Conv}_{3\times3}(f_L)) \tag{9}$$

再采用2个大小分别为(3,3)和(5,5)的池化核对$f_L$进行池化操作，记作Pool1、Pool2。此处，由于要获得多尺度的特征信息，主要关注于特征的局部信息，采用自适应最大池化操作，滤波器提取对应区域的最大值，提高特征的平移不变性。通过池化操作得到2个不同分辨率的特征后，采用卷积核大小为3×3的卷积操作进一步提取信息，并分别进行上采样操作以匹配与$f_{L1}$相同的空间分辨率64×128，得到$f_{L2}$和$f_{L3}$，表示如下：

$$f_{L2} = F_{\mathrm{bilinear}}(\mathrm{Conv}_{3\times3}(\mathrm{MaxPool}_{3\times3}(f_L))) \tag{10}$$

$$f_{L3} = F_{\mathrm{bilinear}}(\mathrm{Conv}_{3\times3}(\mathrm{MaxPool}_{5\times5}(f_L))) \tag{11}$$

式中：$F_{\mathrm{bilinear}}$表示双线性上采样操作。

最后，将$f_{L1}$、$f_{L2}$和$f_{L3}$进行逐像素相加，融合得到具有多尺度特征信息的$f_L'$，表示如下：

$$f_L' = f_{L1} + f_{L2} + f_{L3} \tag{12}$$

在$F_R$中，采用大小为$(H,1)$和$(1,W)$的水平和垂直池化核分别对$f_R$进行池化操作，记作Pool3、Pool4。在以往的方法中，为提高卷积神经网络远程依赖关系的建模能力，大多采用自注意力机制[13]或non-local[14]模块，但它们会消耗大量内存，不利于语义分割模型的实时性。因此，本文在$F_R$中采用长而窄的池化核形状[15]，可以有效建立离散分布区域之间的长距离依赖关系。由于此处关注于特征的全局信息，采用自适应平均池化操作，滤波器提取对应区域的均值，考虑特征信息之间的相关依赖性。相应地，采用卷积核大小为3×1和1×3的非对称卷积操作来进一步提取池化后的特征信息，并对它们进行上采样得到相同分辨率64×128的特征图$f_{R1}$和$f_{R2}$，表示如下：

$$f_{R1} = F_{bilinear}\left(Conv_{3\times1}\left(AvgPool_{H\times1}(f_R)\right)\right) \quad (13)$$

$$f_{R2} = F_{bilinear}\left(Conv_{1\times3}\left(AvgPool_{1\times W}(f_R)\right)\right) \quad (14)$$

再进行逐像素相加融合得到$f'_R$，表示如下：

$$f'_R = f_{R1} + f_{R2} \quad (15)$$

将具有局部信息的$f'_L$与具有全局信息的$f'_R$进行拼接融合得到$f_C$，增加描述图像本身的特征数（通道数），实现深度特征的融合，表示如下：

$$f_C = f'_L \| f'_R \quad (16)$$

最后，通过残差连接将融合后的特征$f_C$与初始输入特征$f$进行特征图的叠加，得到输出特征$f'$，进一步增强空间信息与语义信息间的相关性，使特征表示更具鉴别性，表示如下：

$$f' = f_C + f \quad (17)$$

## 2　实验结果与分析

### 2.1　数据集

本文采用语义分割常用的 2 个街景数据集来验证模型的有效性，即 Cityscapes 和 CamVid 数据集。

Cityscapes 数据集是大型城市街道场景数据集，在语义分割领域广泛使用，标签包含 30 个类别，其中，19 个类别用于语义分割任务，共有 5 000 幅精细标注的图像和 20 000 幅粗略标注的图像。本文实验只使用精细标注的图像，包含 2 975 幅用于训练的精细注释图像、1 525 幅用于测试的图像和 500 幅用于验证的图像。

CamVid 数据集是从驾驶汽车的角度拍摄的街景数据集，标签包含 32 个语义类别，从中选择 11 个关注的类别，共有 701 幅图像，其中，367 幅用于训练，101 幅用于验证，233 幅用于测试。

### 2.2　实验训练细节

本文实验基于 PyTorch 1.7.1 深度学习框架和 Cuda11.0 库，由 Python3.7 编写，在 Linux 操作系统下使用一块 NVIDIA GeForce GTX 3090 进行模型训练，一块 NVIDIA GeForce GTX 1080Ti 用于模型验证。采用“kaiming normal”初始化方式从头开始训练，用批量随机梯度下降 (stochastic gradient descent, SGD) 算法进行优化，为更公平地对比不同算法的性能，采用多元学习策略。对于所有数据集，BatchSize=8，权重衰减系数为 0.000 5。其中，初始学习率在每次迭代后都乘以因子$(1-I/M_{iter})^P$以减小学习率，$I$为当前迭代次数，$M_{iter}$为总迭代次数，$P=0.9$。初始学习率为 0.005，动量系数为 0.9。分别对 Cityscapes 数据集、CamVid 数据集进行 150 000、10 000 的迭代训练。对于数据增强，本文采用随机水平翻转缩放，并随机将输入图像裁剪到固定大小进行训练。随机缩放量为{0.75、1、1.25、1.5、1.75、2.0}，裁剪后，Cityscapes 数据集的分辨率为 1 024×512，CamVid 数据集的分辨率为 960×720。损失函数采用交叉熵损失函数，记为$L$，计算式为

$$L = -\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left[wr_n \ln p_n + (1-r_n)\ln(1-p_n)\right] \quad (18)$$

式中：$w = \left(N - \sum_n p_n\right) \Big/ \sum_n p_n$，$p_n$为像素预测的类别；$r_n$为像素的原类别。

### 2.3　性能评估指标

平均交并比和检测速度是当前语义分割算法应用较多的度量标准，本文实验采用这 2 种评价指标。

平均交并比计算 2 个集合为真实值和预测值的交集与并集之比，用于评价算法精度，具体计算为

$$m = \frac{1}{k+1}\sum_{i=0}^{k}\frac{p_{ij}}{\sum_{j=0}^{k}p_{ij} + \sum_{j=0}^{k}p_{ji} - p_{ii}} \quad (19)$$

式中：$m$为平均交并比；$k$为前景对象的个数；$p_{ij}$为原本属于第$i$类却分类到第$j$类的像素的个数。

检测速度用每秒处理帧数来测量，具体计算为

$$T = N \Big/ \sum_{j=1}^{N} T_j \quad (20)$$

式中：$N$为图像序列的帧数；$T_j$为算法处理第$j$帧图像的时间。

### 2.4　消融实验

为验证本文模型的有效性，在 Cityscapes 数据集上进行了 3 组实验：SGM 的消融实验、PFEM 的消融实验及 2 个模块共同作用于该模型的消融实验。采用平均交并比、检测速度和参数量指标分别评估了相应模型，同步进行分析，验证各模块对提升算法整体性能的表现，并列出了与其他经典算法的对比实验。在 CamVid 数据集上进一步进行验证，证明了所提模块的有效性。

#### 2.4.1　空间引导模块消融实验分析

本文将 SGM 嵌入空间细节分支，主要用来弥补特征降采样时空间信息的损失，进一步细化目标边缘。空间细节分支共有 3 层特征，下采样率分别为 2、4、8 倍，通道数分别为 64、64、128，本文在每层都进行了实验，结果如表 1 所示，其中，Baseline 为 BiSeNet V2。

首先，在空间细节分支的第 1 层特征后加入一个 SGM，记作 SGM(1)，结合空洞卷积有效扩大特征感受野，并采用 RM 进行特征信息增强，相较于 Baseline，平均交并比提高了 0.5%；由于在 JFEM 之

表 1 空间引导模块的消融实验结果

Table 1 Comparision ablation experiment of SGM

| Baseline | SGM(1) | SGM(2) | SGM(3) | 平均交并比/% | 检测速度/(帧·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| √ | | | | 75.8 | 47.3 |
| √ | √ | | | 76.3 | 48.5 |
| √ | √ | √ | | 76.6 | 50.6 |
| √ | √ | √ | √ | 76.9 | 51.0 |

前引入 1×1 的卷积操作对通道数进行了调整，变为原来的 1/2，减少了计算量，并且 RM 为轻量级，通道的加权计算并未引入过多的参数，相较于 Baseline，检测速度提高了 1.2 帧/s。然后，在第 2 层和第 3 层后都加入 SGM，记作 SGM(2) 和 SGM(3)，可以看出，相较于 Baseline，平均交并比分别提高了 0.8% 和 1.1%，检测速度提高了 3.3 帧/s 和 3.7 帧/s。实验结果表明，不同阶段的 SGM 对算法整体性能的提升都有贡献，说明通过充分利用浅层特征的空间信息，可以弥补高分辨率特征在降采样时带来的信息损失，有效提高算法精度。

由于在 SGM 中引入了空洞卷积，探讨不同空洞率设置对网络整体性能的影响。空洞率设置过小，会使提取的特征上下文信息不足，从而无法很好地判别像素的所属类别；但空洞率过大，会导致空洞卷积稀疏的采样输入特征，使得远距离卷积得到的信息之间没有相关性，影响分割精度。本文受轻量上下文引导网络 (context guided network, CGNet)[16] 的启发，根据空间细节分支，每层的通道数设置了不同的空洞率，前 2 层通道数为 64，本文将空洞率设置为 2，最后 1 层通道数为 128，对应增大一倍空洞率，设置为 4。

### 2.4.2 池化特征增强模块消融实验分析

为进一步提高特征上下文信息的表征能力，本文在 Baseline 的基础上设计了 PFEM，实验结果如表 2 所示。

表 2 池化特征增强模块的消融实验结果

Table 2 Comparision ablation experiment of PFEM

| Baseline | PFEM | 平均交并比/% | 检测速度/(帧·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| √ | | 75.8 | 47.3 |
| √ | √ | 76.8 | 48.2 |

首先，通过尺寸大小为 (3,3) 和 (5,5) 的池化核，有效捕获了多尺度的特征信息，增强了特征表达，并采用 2 个尺寸为 ($H$,1) 和 (1,$W$) 的条状池化核从水平和垂直 2 个维度建模了特征的远程依赖关系，增强了特征的上下文信息表征能力，相较于 Baseline，平均交并比提高了 1%；由于在进行池化操作之前引入 1×1 的卷积操作对通道数进行了调整，变为原来的 1/4，减少了计算量，并且采用池化操作不会引入额外的参数，相较于 Baseline，检测速度提高了 0.9 帧/s。实验结果表明，增强特征的上下文信息表征能力对提高算法性能有积极的影响。

本文根据不同池化操作的特性，在提取多尺度特征信息和建模特征长距离依赖关系时采用了不同类型的池化操作，为证实本文所采取池化类型的合理性，在保持 PFEM 其他参数不变的前提下，对不同类型的池化操作组合进行了实验。将自适应平均池化操作记作 Avg，将自适应最大池化操作记作 Max，实验结果如表 3 所示，Pool$i$($i$=1,2,3,4) 在图 3 中均已标示。

表 3 不同池化操作的对比实验结果

Table 3 Comparision experiment of different pooling operations

| Pool1 | Pool2 | Pool3 | Pool4 | 平均交并比/% | 检测速度/(帧·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Avg | Avg | Avg | Avg | 76.77 | 47.3 |
| Max | Max | Max | Max | 76.43 | 49.5 |
| Avg | Avg | Max | Max | 76.54 | 49.1 |
| Max | Max | Avg | Avg | 76.84 | 48.2 |

从表 3 可以看出，采用 (Max, Max, Avg, Avg) 的池化组合方式在精度上达到最优。在 PFEM 的 $F_L$ 中，主要捕获多尺度的特征，关注于特征的局部信息，因此，采用自适应最大池化操作，滤波器提取对应区域的最大值，减少特征中的无用背景信息，提高特征的平移不变性；在 PFEM 的 $F_R$ 中，由于要建立特征之间的长距离依赖关系，关注于特征的全局信息，采用自适应平均池化操作，滤波器提取对应区域的均值，考虑了特征信息之间的相关依赖性。实验结果表明，本文分析选取的池化操作是合理的。为进一步印证该模块的泛化性，还在另一个双分支实时语义分割模型——深度双边融合网络 (deep dual-resolution networks, DDRNet)[17] 上进行了实验，结果表明，在不影响分割速度的情况下，平均交并比提升了 0.6%，证明了本文模块的有效性。

### 2.4.3 各模块对算法性能的影响

为直观显示各模块对提升算法总体性能所贡献的作用，表 4 列出了加入不同模块时算法的消融实验结果。

从表 4 可以看出，本文模块对算法整体分割性能的提升都有作用。在分割精度上，加入本文设计的 2 个模块后，平均交并比达到最高值 77.4%，与 Baseline 相比提高了 1.6%；在分割速度上，达到 49.1 帧/s，与 Baseline 相比提高了 1.8 帧/s；在实时性上，加入 SGM 后，参数量仅增加了 $0.03\times10^6$，加入 PFEM 后，由于引入池化操作，压缩了特征维度，参

表 4　不同模块的消融实验结果

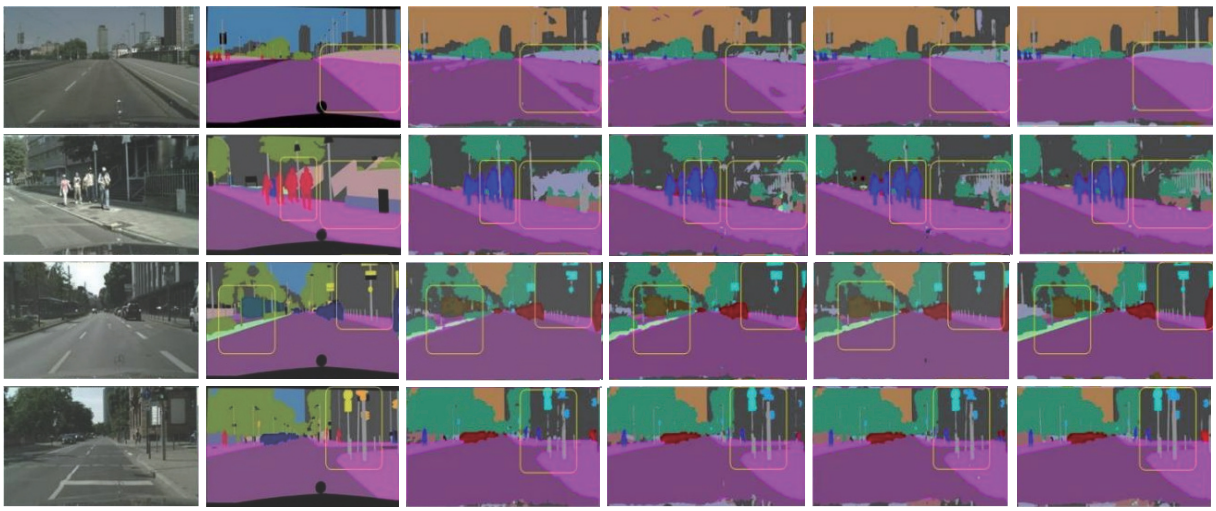
Table 4　Results of ablation experiments for different modules

| Baseline | SGM | PFEM | 平均交并比/% | 检测速度/(帧·s$^{-1}$) | 参数量 |
|---|---|---|---|---|---|
| √ | | | 75.8 | 47.3 | $3.40\times10^6$ |
| √ | √ | | 76.9 | 51.0 | $3.43\times10^6$ |
| √ | | √ | 76.8 | 48.2 | $3.21\times10^6$ |
| √ | √ | √ | 77.4 | 49.1 | $3.24\times10^6$ |

数量降低了 $0.19\times10^6$，总参数量达到 $3.24\times10^6$，相较于 Baseline，降低了 $0.16\times10^6$。因此，本文重新设计的结构具备轻量化的特点，推理过程中占用较小的存储空间。综上，本文模块在有限的资源下，保证了算法的实时性，有效提升了分割精度。

### 2.5　可视化结果

图 4 和图 5 分别给出了本文算法与 Baseline 在 Cityscapes 数据集和 Camvid 数据集上的可视化结果。



(a) 原始图像　(b) GroundTruth　(c) BiSeNet V2　(d) BiSeNet V2+SGM　(e) BiSeNet V2+FPEM　(f) BiSeNet V2+SGM+FPEM

图 4　不同算法在 Cityscapes 数据集上的可视化结果对比

Fig. 4　Comparison of visualization results of different algorithms on Cityscapes dataset

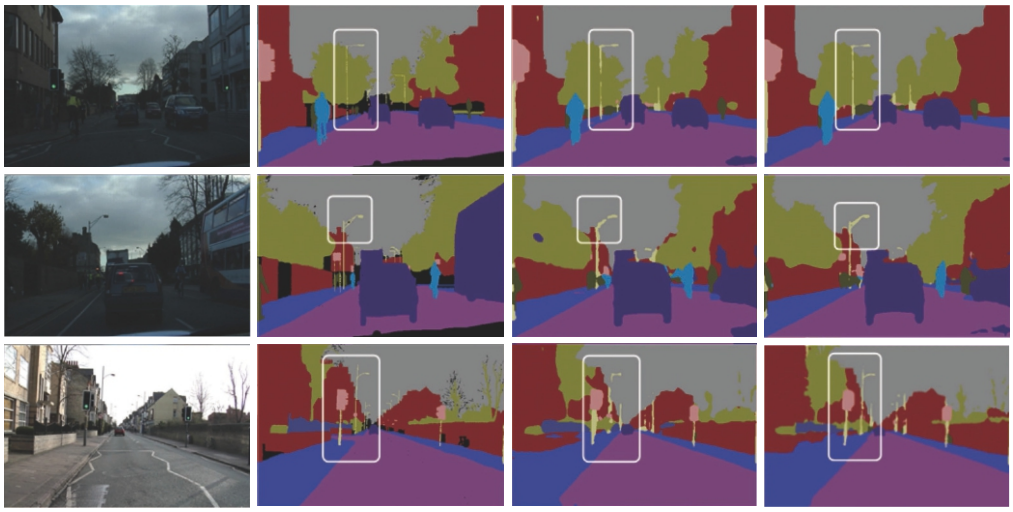
在 Cityscapes 数据集上，图 4(a)为输入原始图像，图 4(b)为 GroundTruth 图像，图 4(c)为 Baseline 的分割结果，图 4(d)～(f)为加入本文模块的分割结果，整体来看，各类别分割出来的轮廓都较为清晰。在第 1 行中，对于类别频率高、尺度较大的类别(如围栏和道路)，相较于 Baseline，本文算法可以很好地将路边的围栏分割出来，地面分割区域也变得完整，减少了语义信息丢失的情况，与标签对比几乎无差异；在第 2 行中，当目标人与标示牌发生连接时，本文模型能够将两者很好地区分开，并且轮廓边界清晰，当栏杆与背景的草垛发生重叠时，前景的栏杆能较为清晰地分割出来，线条分明可见，背景的草垛轮廓平滑，能够很好地将其与栏杆区分开来；在第 3、4 行中，对于尺度较小的目标，如标示牌和杆，Baseline 的分割结果边界较为模糊，杆的主体也有所缺失，加入本文模块后，目标轮廓变得完整，边界更加清晰流畅，同时改善了对于公交车的漏分割现象，减少了与背景信息混淆的情况。

在 CamVid 数据集上，图 5(a)为输入原始图像，图 5(b)为 GroundTruth 图像，图 5(c)为 Baseline 的分割结果，图 5(d)为加入本文模块的分割结果。整体来看，本文算法能够准确识别图像中目标的位置，对于尺度较大的目标，如道路和建筑物，分割区域完整，与标签对比几乎无差异；对于尺度较小的目标，如标示牌和杆，Baseline 的分割结果较为模糊，杆的主体也有所缺失，加入本文模块后，目标的形状明显更加清晰，边界也较为流畅，获得了更精细的分割结果。

实验结果表明，本文算法有效弥补了特征的空间信息损失，进一步细化了特征的边缘，并且提高了特征的上下文信息表征能力，获得了更精细的分割结果，具有良好的语义分割性能。

### 2.6　不同算法在 Cityscapes 数据集上的对比结果

为验证本文算法的性能，在 Cityscapes 数据集上与当前实时语义分割的经典算法进行了实验对比，包括深度神经网络架构 ENet[3]、图像级联网络(image cascade network，ICNet)[4]、深度特征聚合网络(deep feature aggregation network, DFANet)[5]、BiSeNet[7]、高效的膨胀空间金字塔卷积网络(efficient spatial pyramid of dilated convolutions network, ESPNet)[9]、BiSeNet V2[11]、快速双边对称网络(fast bilateral symmetrical network, FBSNet)[12]、高效残差



(a) 原始图像 (b) GroundTruth (c) BiSeNet V2 (d) BiSeNet V2+SGM+FPEM

图 5 不同算法在 CamVid 数据集上的可视化结果对比

Fig. 5 Comparison of visualization results of different algorithms on CamVid dataset

分解卷积网络 (efficient residual factorized ConvNet, ERFNet)[18]、快速语义分割网络 (fast semantic segmentation network, Fast-SCNN)[19]、深度非对称网络 (depth-wise asymmetric bottleneck network, DABNet)[20]、补丁超网络 (patch-wise hypernetwork, HyperSeg-M)[21]、剩余高效学习和注意力期望融合网络 (residual efficient learning and attention expected fusion network, RELAXNet)[22]、特征金字塔聚合网络 (feature pyramid aggregation network, FPANet C)[23] 和短期密集级联 (short-term dense catenate network, STDC) 网络[24] 等。从表 5 的实验结果可以看出，在分割精度上，本文算法的平均交并比达到最高值 77.4%，均高于其他算法，比 Baseline 算法 BiSeNet V2 提高了 1.6%；相较于 STDC2-Seg75，虽然在精度上略高，但 STDC2-Seg75 采用了分辨率大小为 768×1 536 的输入图像，理论上图像分辨率越大，预测结果的精度越高；相较于综合性能优越的 HyperSeg-M、RELAXNet 和 FPANet C，本文算法在平均交并比上分别提高了 1.2%、2.6% 和 1.5%，在精度上依然占据一定优势。在分割速度上，本文算法达到 49.1 帧/s，比 Baseline 提高了 1.8 帧/s，虽然比 ESPNet、Fast-SCNN、DFANet A′等轻量级算法低，但主要是由于轻量级模型在前期过滤了大量无关信息，缩减了模型参数，但本文算法在平均交并比上分别高了 17.1%、8.8% 和 6.1%，在精度上占明显优势。相较于 STDC1-Seg75 和 STDC2-Seg75，虽然本文算法速度低，主要是由于 STDC 模型引入了 TensorRT，加快了推理速度，本文主要采用常规的测速方法，造成了一定差异，但在平均交并比上分别高了 2.9% 和 0.4%；相较于综合性能优越的 HyperSeg-M 和 FPANet C，检测速度分别高了 12.2 帧/s 和 18.1 帧/s，可以看出，在速度上也占据一定优势。为直观展示分析结果，本文给出了算法在 Cityscapes 验证集上的准确性-速度参数比较的散点图，如图 6 所示。可以看出，虽然部分算法在速度上高于本文算法，但本文算法在精度上更具优势，且在准确性和实时性之间保持了良好的平衡。综上，本文算法能更精准地分割目标，且综合性能更加优越。

**表 5 不同算法在 Cityscapes 验证集中的对比**

**Table 5 Comparison of different algorithms on Cityscapes validation set**

| 算法 | Basenet | 分辨率 | 平均交并比/% | 检测速度/(帧·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| ENet[3] | | 512×1 024 | 58.3 | 76.9 |
| ESPNet[9] | ESPNet | 512×1 024 | 60.3 | 112.9 |
| ERFNet[18] | | 512×1 024 | 70.0 | 41.7 |
| ICNet[4] | PSPNet50 | 1 024×2 048 | 69.5 | 30.3 |
| BiSeNet[7] | ResNet18 | 768×1 536 | 74.8 | 65.05 |
| Fast-SCNN[19] | | 512×1 024 | 68.6 | 123.5 |
| DABNet[20] | | 1 024×2 048 | 70.1 | 27.7 |
| DFANet A′[5] | XceptionA | 1 024×2 048 | 71.3 | 100 |
| BiSeNet V2[11] | | 512×1 024 | 75.8 | 47.3 |
| STDC1-Seg75[24] | STDC1 | 768×1 536 | 74.5 | 126.7 |
| STDC2-Seg75[24] | STDC2 | 768×1 536 | 77.0 | 97.0 |
| FBSNet[12] | | 512×1 024 | 70.9 | 90 |
| HyperSeg-M[21] | EfficientNet-B1 | 512×1 024 | 76.2 | 36.9 |
| RELAXNet[22] | | 512×1 024 | 74.8 | 64 |
| FPANet C[23] | ResNet18 | 512×1 024 | 75.9 | 31 |
| 本文 | | 512×1 024 | 77.4 | 49.1 |

### 2.7 不同算法在 CamVid 数据集上的对比结果

为进一步验证本文算法的性能，在 CamVid 数据集上与当前实时语义分割的经典算法进行了实验对比，包括 ENet[3]、ICNet[4]、DFANet[5]、BiSeNet[7]、

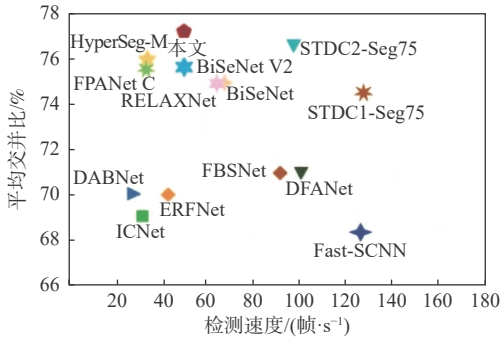



图 6　Cityscapes 数据集上的准确性-速度参数比较

Fig. 6　Comparison of accuracy-speed parameters on Cityscapes dataset

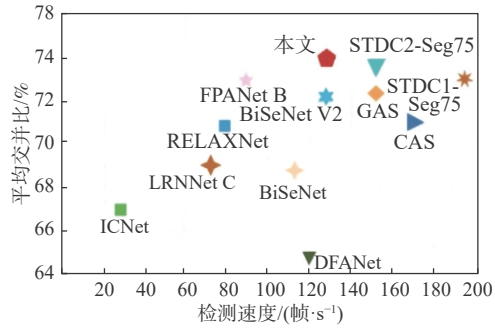



图 7　CamVid 数据集上的准确性-速度参数比较

Fig. 7　Comparison of accuracy-speed parameters on CamVid dataset

BiSeNet V2[11]、FBSNet[12]、RELAXNet[22]、FPANet[23]、STDC1-Seg75[24]、STDC2-Seg75[24]、定制架构搜索 (customizable architecture search, CAS)[25]、图形引导架构搜索 (graph-guided architecture search, GAS)[26] 和高效减少非本地操作的轻量级网络 ( light-weighted network with efficient reduced non-local operation, LRNNet C)[27] 等。如表 6 所示, 在分割精度上, 本文算法在平均交并比上达到最高值 74.0%, 均优于其他模型; 在分割速度上, 本文算法达到 124.5 帧/s, 虽然比 CAS、GAS、STDC1-Seg75 和 STDC2-Seg75 等算法低, 但在平均交并比上, 分别高了 2.8%、1.2%、1.0% 和 0.1%, 在准确度上占据一定优势。从实验结果可以看出, 相较于近年来的经典算法, 本文算法能更精准地分割目标, 且综合性能优越。为更加直观地展示定量分析结果, 本文给出了算法在 CamVid 验证集上的准确性-速度参数比较的散点图, 如图 7 所示。虽然部分算法在速度上高于本文算法, 但本文算法在精度上更具优势, 在准确度和实时性之间保持了良好的平衡。

**表 6　不同模型在 CamVid 测试集中的对比**

**Table 6　Comparison of different models on CamVid test set**

| 算法 | Basenet | 分辨率 | 平均交并比/% | 检测速度/(帧·s⁻¹) |
|---|---|---|---|---|
| ENet[3] | | 960×720 | 51.3 | 61.2 |
| ICNet[4] | PSPNet50 | 960×720 | 67.1 | 27.8 |
| BiSeNet[7] | ResNet18 | 960×720 | 68.7 | 116.3 |
| DFANet A'[5] | XceptionA | 960×720 | 64.7 | 120 |
| CAS[25] | | 960×720 | 71.2 | 169 |
| GAS[26] | | 960×720 | 72.8 | 153 |
| LRNNet C[27] | | 960×720 | 69.2 | 76.5 |
| BiSeNet V2[11] | | 960×720 | 72.4 | 124.5 |
| STDC1-Seg75[24] | | 960×720 | 73.0 | 197.6 |
| STDC2-Seg75[24] | | 960×720 | 73.9 | 152.2 |
| RELAXNet[22] | | 960×720 | 71.2 | 79 |
| FPANet B[23] | | 960×720 | 72.9 | 88 |
| 本文 | | 960×720 | 74.0 | 124.5 |

## 3　结　论

针对当前实时语义分割存在的问题, 保证在有限的资源下实现更好的分割精度, 为此本文提出了一种基于空间信息引导的双分支实时语义分割算法。

1) 设计实现 SGM, 采用标准卷积和空洞卷积并行的方式有效扩大了模型提取特征的感受野, 捕获了特征丰富的空间位置信息, 并通过细化模块计算注意力权重向量来引导特征学习, 对特征进行细化, 有效弥补了图像高分辨率特征在降采样过程中的空间信息损失。

2) 设计实现 PFEM, 采用不同尺寸、形状和种类的池化操作捕获了多尺度的上下文特征信息, 并建模了特征之间的长距离依赖关系, 更好地确定了分割区域的类别。

3) 使用双分支结构, 有效缩减模型计算量, 提高运行速度。空间细节分支主要用于提取高分辨率的浅层特征, 具有目标更多的位置和细节信息。语义上下文分支主要用来提取低分辨率的深层特征。

本文提出的基于空间信息引导的双分支实时语义分割算法扩大了模型提取特征的感受野, 捕获了丰富的空间信息, 对城市街景进行分割。与传统算法相比, 本文算法在速度与精度方面取得了良好的平衡。在接下来的研究中, 考虑将本文算法进行轻量化处理, 实现移动设备上的应用。

### 参考文献 ( References )

[1] 宝音图, 刘伟, 李润生, 等. 遥感图像语义分割的空间增强注意力 U 型网络[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(7): 1828-1837.
BAO Y T, LIU W, LI R S, et al. Spatial enhanced attention U-type network for semantic segmentation of remote sensing images[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(7): 1828-1837(in Chinese).

[2] 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.

[3] PASZKE A, CHAURASIA A, KIM S, et al. ENet: A deep neural network architecture for real-time semantic segmentation[EB/OL]. (2016-06-07)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1606.02147.

[4] ZHAO H S, QI X J, SHEN X Y, et al. ICNet for real-time semantic segmentation on high-resolution images[C]//Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2020: 418-434.

[5] LI H C, XIONG P F, FAN H Q, et al. DFANet: Deep feature aggregation for real-time semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 9514-9523.

[6] WANG H C, JIANG X L, REN H B, et al. SwiftNet: Real-time video object segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1296-1305.

[7] YU C Q, WANG J B, PENG C, et al. BiSeNet: Bilateral segmentation network for real-time semantic segmentation[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 334-349.

[8] 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.

[9] MEHTA S, RASTEGARI M, CASPI A, et al. ESPNet: Efficient spatial pyramid of dilated convolutions for semantic segmentation [C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 561-580.

[10] WANG Y, ZHOU Q, LIU J, et al. LedNet: A lightweight encoder-decoder network for real-time semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1860-1864.

[11] YU C Q, GAO C X, WANG J B, et al. BiSeNet V2: Bilateral network with guided aggregation for real-time semantic segmentation[J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129(11): 3051-3068.

[12] GAO G W, XU G A, LI J C, et al. FBSNet: A fast bilateral symmetrical network for real-time semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2022, 25: 3273-3283.

[13] HOU Q B, ZHOU D Q, FENG J S. Coordinate attention for efficient mobile network design[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 13708-13717.

[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] HOU Q B, ZHANG L, CHENG M M, et al. Strip pooling: Rethinking spatial pooling for scene parsing[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 4002-4011.

[16] WU T Y, TANG S, ZHANG R, et al. CGNet: A light-weight context guided network for semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 1169-1179.

[17] HONG Y D, PAN H H, SUN W C, et al. Deep dual-resolution networks for real-time and accurate semantic segmentation of road scenes[EB/OL]. (2021-09-01)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/2101.06085.

[18] ROMERA E, ÁLVAREZ J M, BERGASA L M, et al. ERFNet: Efficient residual factorized ConvNet for real-time semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(1): 263-272.

[19] POUDEL R P K, LIWICKI S, CIPOLLA R. Fast-SCNN: Fast semantic segmentation network[EB/OL]. (2019-02-12)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1902.04502.

[20] LI G, YUN I, KIM J, et al. DABNet: Depth-wise asymmetric bottleneck for real-time semantic segmentation[EB/OL]. (2019-10-01)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1907.11357.

[21] NIRKIN Y, WOLF L, HASSNER T. HyperSeg: Patch-wise hypernetwork for real-time semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 4060-4069.

[22] LIU J, XU X Q, SHI Y Q, et al. RELAXNet: Residual efficient learning and attention expected fusion network for real-time semantic segmentation[J]. Neurocomputing, 2022, 474: 115-127.

[23] WU Y, JIANG J Y, HUANG Z M, et al. FPANet: Feature pyramid aggregation network for real-time semantic segmentation[J]. Applied Intelligence, 2022, 52(3): 3319-3336.

[24] FAN M Y, LAI S Q, HUANG J S, et al. Rethinking BiSeNet for real-time semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 9711-9720.

[25] ZHANG Y H, QIU Z F, LIU J G, et al. Customizable architecture search for semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 11633-11642.

[26] LIN P W, SUN P, CHENG G L, et al. Graph-guided architecture search for real-time semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 4202-4211.

[27] JIANG W H, XIE Z Z, LI Y Y, et al. LRNNet: A light-weighted network with efficient reduced non-local operation for real-time semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.

# Two-branch real-time semantic segmentation algorithm based on spatial information guidance

HOU Zhiqiang[1, 2, *]，DAI Nan[1, 2]，CHENG Minjie[1, 2]，LI Fucheng[1, 2]，MA Sugang[1, 2]，FAN Jiulun[3]

(1. School of Computer Science and Technology，Xi'an University of Posts and Telecommunications，Xi'an 710121，China；
2. Shaanxi Key Laboratory of Network Data Analysis and Intelligent Processing，Xi'an 710121，China；
3. School of Communication and Information Engineering，Xi'an University of Posts and Telecommunications，Xi'an 710121，China)

**Abstract**：In view of feature spatial information loss caused by the reduction of a large number of parameters in the real-time semantic segmentation model and inaccurate segmentation category prediction caused by the lack of context information of features, a two-branch real-time semantic segmentation algorithm based on spatial information guidance was proposed. In order to better retain the spatial information, the algorithm used a two-branch structure to obtain the spatial and semantic information of features, respectively. A spatial guided module (SGM) was designed to capture the local information and the surrounding context information of the features and give higher weight to the important information through channel weighting, which effectively made up for the image information loss of high-resolution features in the process of downsampling. A pooling feature enhancement module (PFEM) was designed to further enhance the ability of context information characterization of features. Pooling cores of different sizes were used to capture multi-scale feature information, and the long-distance dependence relationship between the features was modeled by strip-shaped pooling cores.The category of the segmentation region was better determined. The proposed algorithm was verified on Cityscapes and CamVid datasets, and the mean intersection over union reached 77.4% and 74.0%, respectively. The detection speed reached 49.1 frames per second and 124.5 frames per second, respectively, which effectively improved the accuracy and achieved good semantic segmentation performance while ensuring real-time segmentation.

**Keywords**：imaging processing；real-time semantic segmentation；convolutional neural networks；dilated convolution；context information

**Received**：2022-12-10；**Accepted**：2023-06-02；**Published Online**：2023-07-03 10：06

**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230630.1810.012

**Foundation item**：National Natural Science Foundation of China (62072370)

*** Corresponding author**. E-mail：hou-zhq@sohu.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0990

# 基于 AAGC-GRU 的航班延误组合预测方法

刘晓琳[1]，郭梦娇[1]，李卓[2,*]

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津 300300；2. 中国农业大学 信息与电气工程学院，北京 100083)

**摘 要**：针对航班延误预测模型中延误数据的时空动态相关性难以提取的问题，提出一种基于自适应注意力图卷积门控循环单元 (AAGC-GRU) 的航班延误预测模型。以机场为节点构建机场网络拓扑图，结合空间注意力机制及自适应图卷积神经网络，弥补图卷积神经网络对先验知识过度依赖的缺陷，同时增强模型对机场网络空间动态相关性的自动挖掘能力；采用门控循环单元获取航班延误数据的时间相关性，并引入时间注意力机制来学习不同时间步数据的影响权重；采用全连接层获取航班延误预测结果。利用美国大型机场网络的航班离港准点率数据集进行实验，结果表明：所提 AAGC-GRU 模型的预测结果在平均绝对误差、均方根误差和平均绝对百分误差方面均优于梯度提升回归树、门控循环单元及时空图卷积神经网络等基线模型。

**关 键 词**：航班延误预测；深度学习；自适应图卷积；门控循环单元；注意力机制
**中图分类号**：V351
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0030-13

随着航空运输业的飞速发展，航班运输量的快速增长与有限的空域、机场资源之间的矛盾日益尖锐，导致愈发频繁地发生航班延误现象。该现象不仅极大地影响了航空系统的运行效率，给航空公司造成了巨大的经济损失[1]，而且由空中航班延误带来的额外燃油消耗与废气排放还加剧了环境污染[2-4]。通过对航班延误进行精准预测，能够为航空公司和空中交通管制部门提供决策依据，对提高旅客的满意度及机场网络的运行效率、减少经济损失及环境污染具有十分重要的意义。

航班延误预测是根据历史和当前的延误数据对未来一段时间的航班延误情况进行预测。针对该问题，国内外学者采用的研究方法主要分为建模仿真方法、传统机器学习方法和深度学习方法3类。建模仿真是最早流行的一类航班延误预测方法。Baspinar 和 Koyuncu[5] 基于 SIS 流行病传播模型构建了单航班和机场2个层次的航班延误传播模型，有效模拟了航班延误波及的内部系统动力学。王春政等[6] 构建了面向多个机场航班运行的 Agent 模型，实现了对大范围机场网络延误的精准预测。然而，建模仿真方法对复杂非线性特征的表征能力不足，预测误差较大。随着支持向量机回归[7]、随机森林[8] 和梯度提升决策树[9] 等传统机器学习方法被广泛应用于航班延误预测研究，预测精度得到较大提升。但是，由于该方法需要构建大量复杂的特征工程，对于航班延误数据时空特征提取的充分性未作考虑，在精度提升方面遇到了瓶颈。

近年来，深度学习研究领域的迅猛发展极大地推动了航班延误预测问题的研究。Yu 等[10] 综合考虑天气、上游航班延误时长等影响因素，将支持向量机嵌入到深度信念网络中，实现了对北京机场航班延误的高准确率预测。Gui 等[11] 结合天气和 ADS-B 数据，构建长短时记忆 (long short-term memory, LSTM) 网络模型，对单航班延误进行了时长预测和等级预

**收稿日期**：2022-12-13；**录用日期**：2023-01-14；**网络出版时间**：2023-02-28 14:28
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230227.2013.009
**基金项目**：天津市自然科学基金 (17JCYBJC18200)
*通信作者. E-mail：zhuo.li1@student.kuleuven.be

*引用格式：刘晓琳，郭梦娇，李卓. 基于 AAGC-GRU 的航班延误组合预测方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：30-42.*
*LIU X L，GUO M J，LI Z. Combined prediction method of flight delay based on attention-based adaptive graph convolution-gated recurrent unit [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：30-42（in Chinese）.*

测, 区别于仅侧重于时间依赖性的一般时间序列预测, 研究者关注到不同机场延误时间序列之间的空间相关性。Qu 等[12] 提出采用改进后的 SE-DenseNet 模型对天气、相关机场延误信息及航班飞行的融合数据进行卷积操作, 并自动提取特征, 从而实现航班延误等级预测。由于机场网络中机场分布不均且机场间影响程度各不相同, 难以处理成标准的网格数据, 然而卷积神经网络仅适用于图像等结构化数据, 许多研究学者开始将目光聚焦于可直接对图结构数据进行特征提取的图卷积神经网络 (graph convolutional network, GCN)[13], 运用 GCN 来处理机场网络拓扑图结构。姜雨等[14] 提出时空图卷积神经网络 (spatio-temporal graph convolutional network, STGCN) 模型, 分别利用一维因果卷积和 GCN 捕获航班延误数据的时间和空间相关性。Zeng 等[15] 提出深度图嵌入 LSTM 网络模型, 一方面利用扩散卷积学习复杂的机场网络拓扑结构来捕获空间相关性, 另一方面采用 LSTM 学习航班延误数据的动态变化来提取时间相关性。

尽管现有的深度学习方法兼顾了时间和空间的相关性, 但仍存在以下不足之处: ①历史时间序列数据对待预测时刻的航班延误特征影响程度不同, 现有方法不能充分捕获最相关的时间特征; ②机场网络的空间相关性随时间动态变化, GCN 存在对空间特征提取的固定化与对先验知识过度依赖的缺陷。

鉴于此, 本文提出了基于自适应注意力图卷积门控循环单元 (attention-based adaptive graph convolution-gated recurrent unit, AAGC-GRU) 的航班延误预测方法。首先, 采用自适应 GCN 从航班延误数据集中自动提取机场之间隐藏的结构信息, 并结合空间注意力机制为机场节点自动分配注意力权重, 增强模型对空间动态相关性的提取能力; 其次, 结合门控循环单元 (gated recurrent unit, GRU) 与时间注意力机制, 用于捕获航班延误数据的复杂非线性时间动态特征, 避免在长期预测时易发生梯度消失或梯度爆炸的问题; 然后, 构建全连接层获取航班延误预测结果; 最后, 在美国大型机场的航班离港准点率数据集上进行大量预测对比实验。结果表明, AAGC-GRU 模型的预测结果在平均绝对误差、均方根误差和平均绝对百分误差方面均显著优于基线模型, 有效提高了航班延误预测精度。

# 1　本文方法

作为航班运行的承载体, 机场网络是典型的复杂系统。机场之间的交互作用构成非线性聚合的空间动力学特征, 给航班延误预测带来了挑战。因此, 考虑时空动态影响, 本文提出了一种航班延误智能预测方法。首先, 对机场网络构建拓扑图, 通过学习机场节点之间的影响权重来表征非线性空间特征; 然后, 构建 AAGC-GRU 模型, 用于同时捕获航班延误数据的时空动态相关性, 并学习航班延误的未来变化趋势; 最后, 利用数据集不断迭代优化模型, 实现航班延误预测。

本文方法中, 模型的空间卷积模块可自动挖掘机场网络的全局结构信息, 用于增强模型全局特征的提取能力, 同时, 模型中还引入时空注意力机制, 用于突出重要时空特征和提升模型的预测精度。与传统的航班延误预测方法相比, 本文方法的主要创新点如下:

1) 采用 GRU 作为基础网络结构, 并在其基础上引入时间注意力机制, 不仅可以充分提取航班延误数据的时间相关性, 而且能够突出历史延误特征的不同关注权重, 有利于网络自适应地学习最相关的时间特征, 以有效捕获时间动态相关性。

2) 在 GCN 中引入自适应图生成矩阵, 并加入空间注意力机制, 从而实现空间相关性的动态捕获与全局提取。一方面, 采用随机梯度下降算法, 根据延误数据自动学习机场之间的空间动态依赖, 通过避免矩阵特征分解等复杂运算, 提高网络训练效率; 另一方面, 通过计算各机场的空间注意力来分配不同空间特征对应的关注权重, 充分捕获全局空间相关性, 实现高精度航班延误预测。

## 1.1　机场网络拓扑图构建

由于机场之间共享空域、航站楼等有限的资源配置, 充分考虑并捕获机场网络的动态空间特征是提高延误预测精度的关键。为充分研究机场之间航班延误的相互影响, 根据机场之间的空间拓扑关系, 将机场网络定义为不规则的拓扑图, 可表示为

$$G_t = \{V_t, E, \boldsymbol{A}\} \tag{1}$$

式中: $V_t$ 为网络中机场节点的集合, $V_t = \{v_i | i = 1, 2, \cdots, N\}$, $N$ 为机场的个数; $E$ 为由机场之间的通航航线所构成边的集合; $\boldsymbol{A}$ 为刻画机场之间关系的邻接矩阵, 且 $\boldsymbol{A} \in \mathbf{R}^{N \times N}$, $\boldsymbol{A}$ 中的元素 $a_{ij}$ 为节点 $v_i$ 与节点 $v_j$ 间航班延误特征的相互影响程度。

在第 $t$ 个时间步, 机场网络拓扑图上观测到的 $N$ 个机场的航班延误数据特征为

$$\boldsymbol{X}_{:,t} = [\boldsymbol{x}_{1,t}, \boldsymbol{x}_{2,t}, \cdots, \boldsymbol{x}_{N,t}] \in \mathbf{R}^{N \times d} \tag{2}$$

式中: $d$ 为表征机场航班延误的特征维数。

将过去 $T$ 个时间步的机场网络拓扑图 $G_t$ 按时间顺序排列获得图结构时间序列, 图结构时间序列预测的示意图如图 1 所示。航班延误预测问题可以表述为: 给定历史 $T$ 个时间步机场网络拓扑图中的

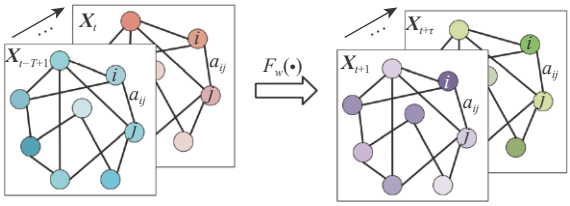


图1 图结构时间序列预测

Fig. 1 Graph sequence time series prediction

航班延误数据与机场网络拓扑图$G_t$，寻找最优的目标函数$F_w(\cdot)$，输出未来$\tau$个时间步的预测值。历史延误数据与预测值之间的映射关系表示为

$$\{\boldsymbol{X}_{:,t+1},\cdots,\boldsymbol{X}_{:,t+\tau}\}=F_w\{\boldsymbol{X}_{:,t-T+1},\cdots,\boldsymbol{X}_{:,t};G_t\} \tag{3}$$

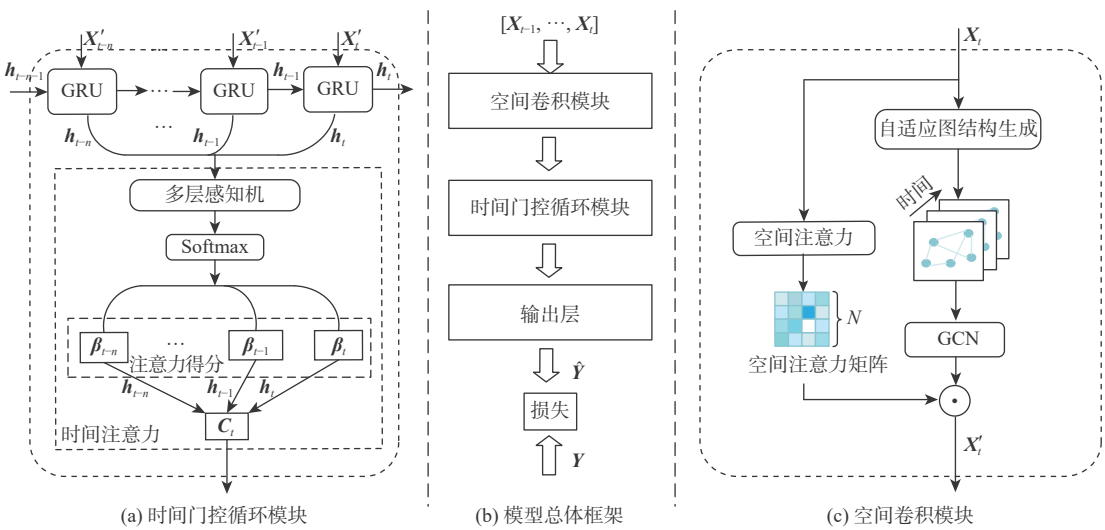
式中：$w$为网络模型中所有可学习的参数。

机场网络中的航班延误预测流程如下：首先，根据机场间的空间特征联系构建机场网络拓扑图；然后，将机场网络拓扑图及航班离港准点率[14]、平均延误时长[16]等航班延误数据输入到延误预测模型中，自动提取时空动态相关性；最后，通过模型的输出层对时空特征进行解码，并输出拓扑图中各机场节点的航班延误预测值。

### 1.2 AAGC-GRU模型构建

从机场网络的角度兼顾航班延误数据的时空依赖性，在结合采用GCN和GRU的基础上，引入自适应邻接矩阵和时空注意力机制以充分提取时空动态相关性，提出嵌入时空注意力的AAGC-GRU模型。

AAGC-GRU模型的结构如图2所示。由图2(b)可见，该模型主体由空间卷积模块、时间门控循环模块和输出层组成，图2(a)和图2(c)分别为时间门控循环模块和空间卷积模块的具体结构。在空间卷积模块中引入自适应GCN和空间注意力机制，不仅解决了GCN对先验知识过度依赖的缺陷，而且提高了模型对空间动态特征的提取能力；在时间门控循环模块中引入GRU与时间注意力机制，自动挖掘航班延误数据在时间维度上的动态相关性，提高航班延误预测的准确度。




(a) 时间门控循环模块 (b) 模型总体框架 (c) 空间卷积模块

图2 AAGC-GRU模型结构

Fig. 2 Architecture of AAGC-GRU model

### 1.3 空间动态特征建模

航班延误的空间动态特征表现在某时刻目标机场的航班延误受到邻近机场或同一航空器上下游机场的航班影响。为充分捕获机场网络中机场间航班延误数据的空间动态特征，本文设计了空间卷积模块，提出能自动学习机场间拓扑关系的自适应GCN与能自动区分不同空间特征重要性的空间注意力机制，将自适应GCN与空间注意力机制相结合，在空间维度上建模。

#### 1.3.1 自适应GCN

考虑到机场之间共享空域、航站楼等有限的资源配置，航班延误传播现象频发，提取复杂非线性空间特征是机场航班延误预测的关键。机场网络中的机场分布不均，机场之间的相互影响错综复杂。以机场为节点形成的图结构是不规则的拓扑图，而仅适用于欧几里得结构的标准卷积操作无法对拓扑图进行空间特征提取。GCN[17]将卷积操作拓展到拓扑图结构中，根据图谱理论原理，拓扑图的性质由其拉普拉斯矩阵及特征值反映。对图的拉普拉斯矩阵对称归一化为

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{I}_N-\boldsymbol{D}^{-\frac{1}{2}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{D}^{-\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{I}_N$为单位对角阵；$\boldsymbol{D}$为邻接矩阵$\boldsymbol{A}$的度矩阵，且有$D_{ii}=\sum_j A_{ij}$。

对半正定对称阵$\boldsymbol{L}$进行特征分解，可得

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

式中: $\boldsymbol{U}$为特征向量矩阵; $\boldsymbol{\Lambda}$为特征值对角阵。

频谱域的 GCN 运算为: 由空间域变换到傅里叶变换域后, 输入图信号$\boldsymbol{x}$与图形滤波器$\boldsymbol{g}_{\theta}$的乘积, 故图结构的频谱卷积操作表示为

$$\boldsymbol{g}_{\theta}*\boldsymbol{x}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{g}_{\theta}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \tag{6}$$

式中: $\boldsymbol{g}_{\theta}$为可学习的卷积核; "$*$" 表示图卷积操作运算符。

然而, 式 (6) 所定义的谱图卷积存在明显的缺陷: 拉普拉斯分解的计算复杂度过高, 不适于大图的运算。为降低计算复杂度, Defferrard 等[18] 提出用切比雪夫多项式对卷积核 $K$阶截断近似拟合。在此基础上, Kipf 等[19] 又提出一阶多项式近似, 简化后的图卷积操作为

$$\boldsymbol{g}_{\theta}*\boldsymbol{x}\approx\theta\left(\boldsymbol{I}_{N}+\boldsymbol{D}^{-\frac{1}{2}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{D}^{-\frac{1}{2}}\right)\boldsymbol{x} \tag{7}$$

式中: $\boldsymbol{\theta}$为网络可学习的权重参数矩阵。

在图卷积的过程中, 邻接矩阵$\boldsymbol{A}$的定义方式决定机场网络的图结构及图谱滤波器的拟合效果。现有研究主要采用机场间的球面距离、机场间来往的航班量定义邻接矩阵, 然而机场间的相互影响随时间变化, 固定的邻接矩阵难以反映完整的空间动态依赖性。此外, GCN 在邻接矩阵的构造中对先验知识的过度依赖也是明显的局限性之一。

为弥补上述缺陷, 更充分地提取机场节点间的空间动态依赖性, 提出能自动学习机场网络隐藏结构信息的自适应邻接矩阵。自适应邻接矩阵主要利用节点嵌入的思想, 自动从延误数据集中学习节点之间的空间联系。首先, 对所有节点的低维空间嵌入向量随机初始化, 得到由$N$个机场节点的嵌入向量构成的矩阵$\boldsymbol{E}_{A}$; 然后, 受启发于图节点相似度的定义方式, 计算出节点映射向量间的欧氏距离以提取机场间的空间依赖权重。自适应邻接矩阵的自动生成为

$$\boldsymbol{D}^{-\frac{1}{2}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{D}^{-\frac{1}{2}}=\mathrm{Softmax}(\mathrm{ReLU}(\boldsymbol{E}_{A}\boldsymbol{E}_{A}^{\mathrm{T}})) \tag{8}$$

如式 (8) 所示, 先采用ReLU激活函数剔除微弱连接, 再利用Softmax函数对自适应邻接矩阵进行归一化处理。在模型训练过程中, 节点向量矩阵$\boldsymbol{E}_{A}$将随梯度下降算法自动学习并不断更新, 利用嵌入空间的节点相似性挖掘机场间的动态空间联系, 自动生成自适应邻接矩阵。由此, 不仅避免了矩阵特征分解等大量数学运算, 而且降低了网络训练的复杂程度。引入自适应邻接矩阵后, 自适应图卷积操作定义为

$$\boldsymbol{z}=\boldsymbol{g}_{\theta}*\boldsymbol{x}\approx\boldsymbol{\theta}\left(\boldsymbol{I}_{N}+\mathrm{Softmax}\left(\mathrm{ReLU}\left(\boldsymbol{E}_{A}\boldsymbol{E}_{A}^{\mathrm{T}}\right)\right)\right)\boldsymbol{x} \tag{9}$$

式中: $\boldsymbol{z}$为自适应 GCN 的输出; $\boldsymbol{E}_{A}$、$\boldsymbol{\theta}$为待学习的参数矩阵, 且有$\boldsymbol{E}_{A}\in\mathbf{R}^{N\times r}$, $r$为节点嵌入向量的维度。通过构造自适应邻接矩阵, 改进后的自适应 GCN 能够在缺乏先验知识的情况下自动获取动态变化的机场网络空间依赖性。

#### 1.3.2　空间注意力

自适应 GCN 能够捕获机场网络拓扑图中相近节点间的隐藏依赖关系, 然而相距较远的机场间也可能存在较强的空间依赖关系。由于航班运行过程的连接性, 同一架航空器在一天内需要执行多个机场间的飞行任务, 上下游机场间的空间依赖性便因航班延误传播现象而加深。为更好地提取机场之间航班延误的全局空间相关性, 引入注意力机制以区分各机场节点之间不同的影响权重。

注意力机制借鉴了人类的选择性视觉注意力处理信息的思想, 目前广泛应用于图像分类、语音识别、情感分析等领域[20], 其本质是: 从大量信息中筛选出更关键的信息, 关注相关信息而忽略不相关信息, 从而提高模型对重要特征的提取能力。为合理分配注意力资源及计算资源, 自动学习机场网络中各节点最相关的空间依赖性, 在空间卷积模块中引入软性注意力[21], 并称为空间注意力机制。空间注意力机制的表达式为

$$\boldsymbol{e}=\sigma(\boldsymbol{o}\cdot(\boldsymbol{w}_{1}\boldsymbol{X}_{i-1}+\boldsymbol{b}_{1})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{w}_{2}\boldsymbol{X}_{i-1}+\boldsymbol{b}_{2})) \tag{10}$$

$$\alpha_{i,j}=\exp\left(e_{i,j}\Big/\sum_{j=1}^{N}e_{i,j}\right) \tag{11}$$

式中: $\boldsymbol{X}_{i-1}$为上一时刻模型的输入矩阵, 包含$N$个机场的航班延误特征; $\boldsymbol{w}_{1}$、$\boldsymbol{w}_{2}$、$\boldsymbol{b}_{1}$、$\boldsymbol{b}_{2}$、$\boldsymbol{o}\in\mathbf{R}^{N\times N}$为可学习的参数矩阵; $N$为机场拓扑图的节点个数; $\sigma$为 Sigmoid 激活函数; $\boldsymbol{e}$为用于表征节点间相互影响的中间变量, 通过 Softmax 函数对其归一化处理后即得节点$i$和节点$j$间的影响权重$\alpha_{i,j}$。

图 3 为空间注意力机制的示意图。采用多层感知机 (multi-layer perceptron, MLP) 为 score 函数, 自动计算出任意 2 个节点之间的空间相关度, 由此生成大小为$N\times N$的空间注意力矩阵, 从而提取出机场节点之间的空间关注权重。

为进一步捕获节点间的空间动态联系, 将空间注意力矩阵与自适应邻接矩阵相结合, 得到空间卷积模块的整体输出为

$$\boldsymbol{z}=(\boldsymbol{g}_{\theta}\odot\boldsymbol{\alpha})*\boldsymbol{x}\approx\boldsymbol{\theta}\odot\boldsymbol{\alpha}\cdot\left(\boldsymbol{I}_{N}+\mathrm{Softmax}\left(\mathrm{ReLU}\left(\boldsymbol{E}_{A}\boldsymbol{E}_{A}^{\mathrm{T}}\right)\right)\right)\boldsymbol{x} \tag{12}$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}\in\mathbf{R}^{N\times N}$为空间注意力矩阵; "$\odot$" 表示 Hadamard 乘积。

### 1.4　时间动态特征建模

航班延误预测本质上是时间序列预测问题, 其

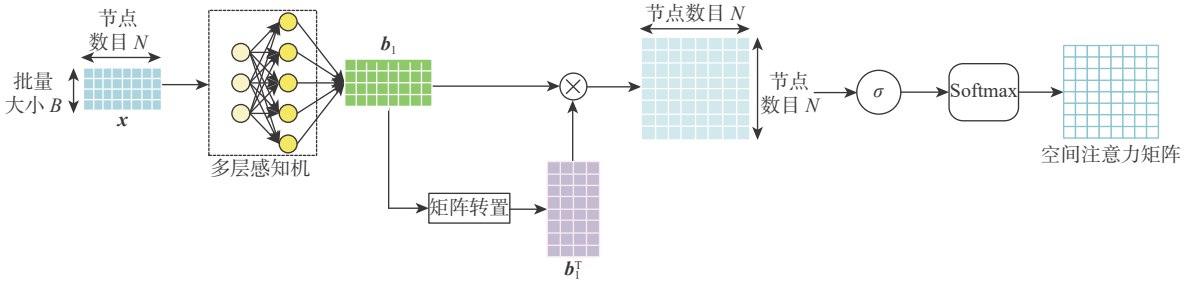



图 3 空间注意力机制

Fig. 3 Spatial attention mechanism

时间动态特征表现在某时刻某机场节点的航班延误受到历史时刻该节点航班延误数据的影响。为充分提取机场航班延误数据的时间动态相关性，本文设计了时间门控循环模块，将 GRU 与时间注意力机制相结合，在时间维度上建模。

### 1.4.1 门控循环单元

时间序列预测研究主要使用经典的循环神经网络模型。传统循环神经网络在被应用于长期时间序列预测研究时，暴露出易发生梯度消失或梯度爆炸的缺陷。鉴于此，研究学者提出了基于循环神经网络改进的 2 种变体，即 LSTM 网络和 GRU。二者均通过引入门结构决定需要被遗忘或被保留的信息，使得重要特征在长期预测中得以保留并传递下来，解决了传统循环神经网络长期预测能力不足的问题。然而，相较于 LSTM，GRU 不仅简化了网络结构，减少了迭代训练的参数，而且还能加快模型训练的收敛速度，降低模型过拟合的风险[22]。因此，选择采用 GRU 来提取航班延误数据的长期时间相关性，对时间序列进行建模。GRU 通过更新门 (update gate) 与重置门 (reset gate) 筛选出需要保留的航班延误重要特征，并将其存入记忆单元 $\boldsymbol{c}_t$ 中，其内部工作原理如图 4 所示。对每个时间步的隐藏状态进行迭代计算的表达式为

$$\boldsymbol{u}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_u\cdot[\boldsymbol{x}_t,\boldsymbol{h}_{t-1}]+\boldsymbol{b}_u) \tag{13}$$

$$\boldsymbol{r}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_r\cdot[\boldsymbol{x}_t,\boldsymbol{h}_{t-1}]+\boldsymbol{b}_r) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{c}_t=\tanh(\boldsymbol{W}_c\cdot[\boldsymbol{x}_t,(\boldsymbol{r}_t\odot\boldsymbol{h}_{t-1})]+\boldsymbol{b}_c) \tag{15}$$

$$\boldsymbol{h}_t=\boldsymbol{u}_t\odot\boldsymbol{h}_{t-1}+(1-\boldsymbol{u}_t)\odot\boldsymbol{c}_t \tag{16}$$

式中：$\boldsymbol{W}_u$、$\boldsymbol{W}_r$、$\boldsymbol{W}_c$ 分别为更新门、重置门、记忆储存单元的权重矩阵；$\boldsymbol{b}_u$、$\boldsymbol{b}_r$、$\boldsymbol{b}_c$ 为相应的偏置矩阵；$\boldsymbol{h}_{t-1}$ 为上一时刻的隐藏状态；$\boldsymbol{x}_t$ 为当前时刻的时间序列输入；$\boldsymbol{u}_t$ 和 $\boldsymbol{r}_t$ 分别为更新门和重置门，均利用 Sigmoid 激活函数调节航班延误信息被遗忘或保留的程度；$\boldsymbol{c}_t$ 为记忆储存单元，用于储藏当前时刻的信息，由重置门决定当前时刻 $\boldsymbol{c}_t$ 对上一时刻状态的遗忘程度；$\boldsymbol{h}_t$ 为当前时刻 GRU 的预测输出，由更新门控制其对历史状态信息的关注程度。

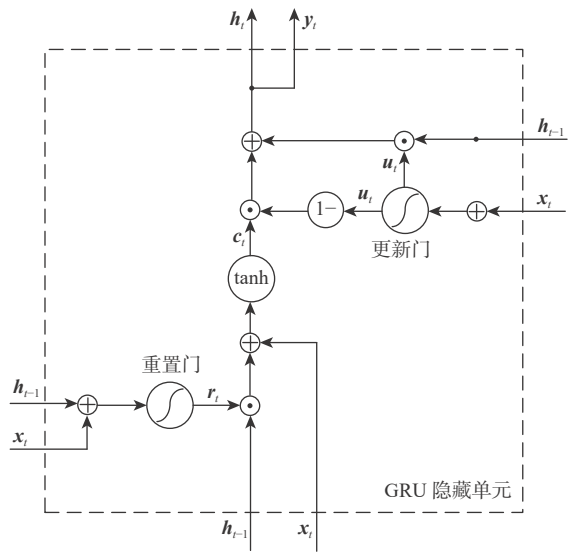



图 4 GRU 隐藏单元内部结构

Fig. 4 Architecture of GRU cell

门控机制的引入，不仅解决了传统循环神经网络易梯度消失的问题，还提高了 GRU 对航班延误数据时间特征的提取能力。

### 1.4.2 时间注意力

在以循环神经网络为基础的编码器-解码器模型中，对输入序列的每一部分都赋予相同的权重，导致模型的预测性能在输入序列较长时大大降低。鉴于此，Bahdanau 等[21]提出将注意力机制应用到编码解码器中，在解码过程中，对输入序列的各个时间步赋予不同的关注度，以提高模型的预测精度。受此启发，考虑到历史时序数据对待预测时刻的航班延误特征影响程度不同，在时间轴上引入时间注意力机制，为不同的时刻分配相应的关注权重，自适应地学习最相关的历史时序数据。首先，定义 score 函数为 MLP，用以计算各个时刻 GRU 隐藏状态的注意力概率分布值；然后，将各隐藏状态与对应的注意力分布值加权求和，提取出全局时间变化趋势，输出到后续的预测工作。与空间注意力类似，时间注意力机制的表达式为

$$\boldsymbol{l}=\boldsymbol{w}_4(\boldsymbol{w}_3\boldsymbol{h}_{i-1}+\boldsymbol{b}_3)+\boldsymbol{b}_4 \tag{17}$$

$$\beta_{ti}=\exp\left(l_i\Big/\sum_{k=1}^{Q}l_k\right) \tag{18}$$

式中: $Q$为输入序列的长度; $\boldsymbol{h}_{i-1}$为前一个时刻的GRU输出的隐藏状态; $\boldsymbol{w}_3$、$\boldsymbol{w}_4$、$\boldsymbol{b}_3$、$\boldsymbol{b}_4$均为网络中可学习的参数矩阵; $\boldsymbol{l}$为用于表征节点间相互影响的中间变量。

如此, 利用时间注意力机制计算得到各时刻隐藏状态$\boldsymbol{h}_i$的权重矩阵$\boldsymbol{\beta}_i$, 将各个时刻的关注权重加权求和, 得到航班延误特征未来全局变化趋势的概括矩阵$\boldsymbol{C}_t$为

$$\boldsymbol{C}_t=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{\beta}_i*\boldsymbol{h}_i \tag{19}$$

### 1.5　损失函数

模型的输出层由全连接层构成, 输出航班延误的预测值$\hat{\boldsymbol{Y}}_t$为

$$\hat{\boldsymbol{Y}}_t=\boldsymbol{C}_t\boldsymbol{W}+\boldsymbol{b} \tag{20}$$

式中: $\boldsymbol{W}$、$\boldsymbol{b}$为模型可学习的权重参数矩阵。

在 AAGC-GRU 模型的训练过程中, 不断迭代优化以求最小化机场预测值与真实值的误差。选择 $L_2$ 损失作为损失函数来评判航班延误预测值与真实值之间的拟合程度, 表示为

$$L=\sum_{i=t+1}^{t+\tau}\left\|\hat{\boldsymbol{Y}}_i-\boldsymbol{Y}_i\right\|^2 \tag{21}$$

式中: $L$为损失; $\hat{\boldsymbol{Y}}_i$为在第$i$时刻所有节点的航班延误预测值; $\boldsymbol{Y}_i$为第$i$时刻的真实值。

## 2　实例分析

为验证本文方法的性能优越性, 基于美国大型机场网络的航班离港准点率数据集分别开展了基线模型对比实验、不同机场预测实验、参数优化实验、模块消融实验及泛化性实验, 并对实验结果进行了分析。

### 2.1　数 据 集

用于航班延误预测实验的数据集源自美国运输统计局的官网。选用 2011—2018 年间共 2 922 d 的航班数据, 共计 48 696 140 条美国机场之间来往航班的数据记录。每条数据包含航班的飞行日期、出发机场和到达机场、计划离港和计划到港时间、离港和到港延误分钟数、起飞和降落机场的球面距离等信息。

为更好地考虑空间动态特征, 以机场为单元, 选取机场离港准点率为航班延误的表征量。考虑到美国许多机场每天的航班数不到一个, 为提高机场航班延误数据质量, 对各机场的航班运营数进行统计并排序, 由航班运营量排名前 51 的机场构建机场网络, 筛选出机场之间的来往航班数据记录。美国联邦航空管理局对准点航班的定义为: 在航班时刻表中公布的到达时间 15 min 内到达的航班。因此, 本文对机场离港准点率的定义为: 离港航班中起飞时刻在航班时刻表提供的出发时刻 15 min 内的航班所占的比例。

以机场为拓扑图的节点, 根据原数据集计算出各个机场的日离港准点率来表征各节点的航班延误情况, 并按照机场三字码的首字母对各个机场的离港准点率时间序列进行排序, 获得机场网络离港准点率时间序列。

### 2.2　实验环境与参数设置

实验所使用的计算机配置如下: 处理器为 AMD Ryzen R5-5600U, CPU 频率为 4.20 GHz; 机带内存为 16 GB, GPU 为 NVIDIA GeForce MX450; 操作系统为 Windows 10(64 位); 程序设计语言为 Python 3.6.13, 所采用的深度学习框架为 TensorFlow 1.14.0。

为保证训练过程的稳定, 原始数据集中的缺失值用均值填充, 在数据预处理阶段还对数据进行了标准的归一化处理。在模型训练过程中, 数据集按照 8∶2 的比例划分为训练集和测试集。机场航班的时刻表排布在宏观层面上是周期性的, 考虑航班延误数据的周期性有利于提高延误预测精度。航班的排班期是以周为周期, 故使用一周 ($T$=7 个时间步) 的历史航班离港准点率数据作为延误预测模型的输入, 分别预测未来 $P$($P$=1, 2, 3, 4, 5 个时间步) 天的航班离港准点率。模型的基本参数设置为: 最大迭代次数(epoch)为 300; 批处理量(batch size)为 32; 优化器采用 Adam Optimizer; 学习率为指数衰减式, 初始值为 0.01, 衰减率设为 0.7。

### 2.3　模型评价指标

为综合评价本文所提 AAGC-GRU 模型对机场网络范围内航班离港准点率的预测效果, 选取时序预测常用的 3 个度量标准, 即平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均绝对百分误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 来衡量预测模型的性能, 具体计算式为

$$E_1=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\hat{p}_i-p_i| \tag{22}$$

$$E_2=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{p}_i-p_i)^2} \tag{23}$$

$$E_3=\frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\hat{p}_i-p_i}{p_i}\right| \tag{24}$$

式中，$E_1$为平均绝对误差；$E_2$为均方根误差；$E_3$为平均绝对百分误差；$\hat{p}_i$为第$i$时刻的航班延误预测值；$p_i$为第$i$时刻的真实值；$n$为样本数量。

### 2.4 模型性能分析实验

基于美国大型机场网络的航班离港准点率数据集对本文模型的优异性和有效性进行验证，设置了以下2种性能分析实验：

1）通过将模型与经典的基线模型进行对比实验，验证本文模型的优异性。

2）根据对不同机场的航班延误预测效果分析并验证模型的有效性。

#### 2.4.1 与基线模型对比分析

为检验AAGC-GRU模型的预测效果，选择与以下5种在航班延误预测领域较具代表性的模型进行对比：

1）历史平均(history average, HA)模型的预测方法是直接将历史延误值取平均值作为未来的预测结果，不需要做任何假设，计算简单而快速，但由于不考虑任何时间特征，预测精度较低。

2）MLP是一种至少含有一个隐藏层的、由全连接层构成的前馈神经网络。

3）梯度提升回归树(gradient boosting regression tree, GBRT)[23]是一种集成学习器，通过集成多个弱学习器的预测结果来提高模型的鲁棒性与预测精度。

4）GRU是专用于时间序列预测的一种循环神经网络变体，解决了传统循环神经网络长期预测能力不足的问题。

5）STGCN[14]是结合了门控线性单元(gated linear unit, GLU)和GCN的一种经典时空预测模型。

基于机场网络离港准点率数据集，AAGC-GRU模型与上述基线模型分别预测未来1～5 d的机场日离港准点率，各模型的性能对比结果如图5所示。分析可知，基于GCN的方法在短期预测任务中均要优于经典的机器学习模型及只考虑时间依赖性的GRU模型，说明对机场网络空间特征的提取是非常有必要的，同时也证明GCN对航班延误预测的有效性与优越性；在时间尺度增大时，STGCN的预测性能大大降低，分析原因可能是GCN中由机场间通航数定义的邻接矩阵对机场节点间航班延误的空间相关性挖掘不充分；此外，本文提出的AAGC-GRU模型很好地兼顾了短期和长期预测，对每一个预测步长都取得了最好的预测效果；从整体来看，随着预测步长的增加，AAGC-GRU模型的预测效果有所下降，但预测误差的增长速度相对基线模型较缓。

任选某一天真实值与AAGC-GRU模型对51个机场离港航班准点率预测值的对比如图6所示。实验结果表明，AAGC-GRU模型对大部分机场的离港准点率都能很好的拟合。针对不同的预测步长，综合分析可知，对比模型中，GRU的预测效果最好。因此，给出GRU和AAGC-GRU模型分别对

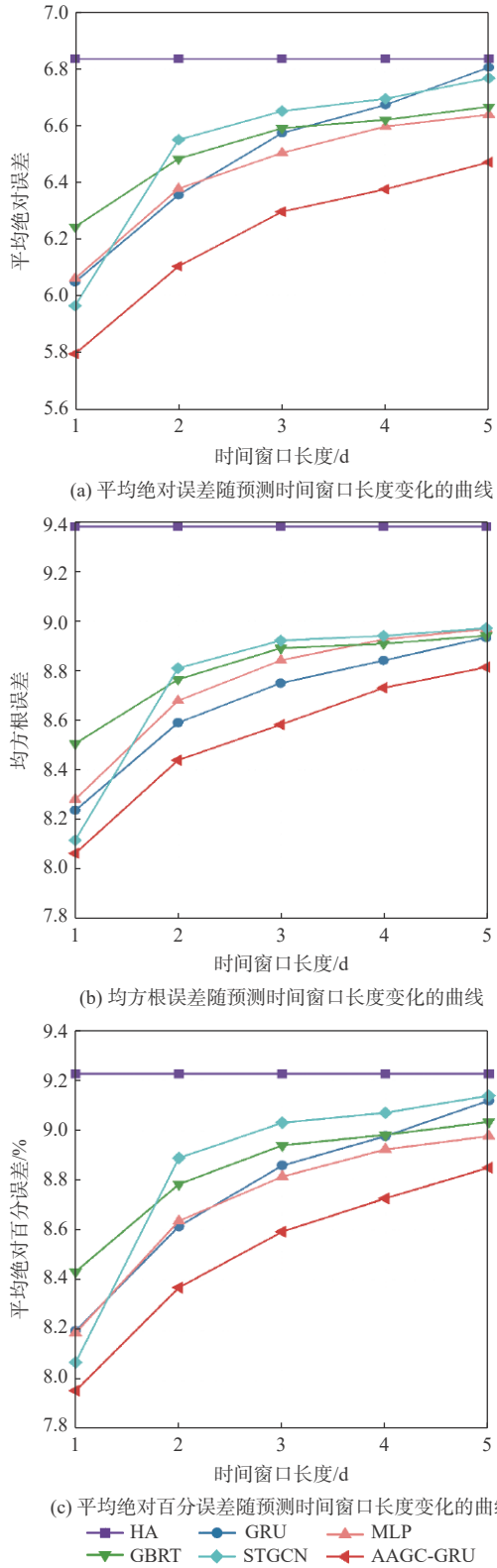



图5 不同模型预测结果的评价指标对比

Fig. 5 Comparison of evaluation indexes of prediction results by different models

未来一天航班离港准点率的预测效果比较, 实验结果如图 7 所示。为更好地展示各模型的预测性能, 从测试集中抽取了各模型对时间连续的 100 d 的预测结果以作可视化展示。分析可知, AAGC-GRU 模型的预测曲线更接近于真实值, 进一步说明本文方法的预测效果最好, 能够更精确地预测航班延误的未来变化趋势, 对复杂的航班延误数据动态时空相关性具有更优的建模能力。

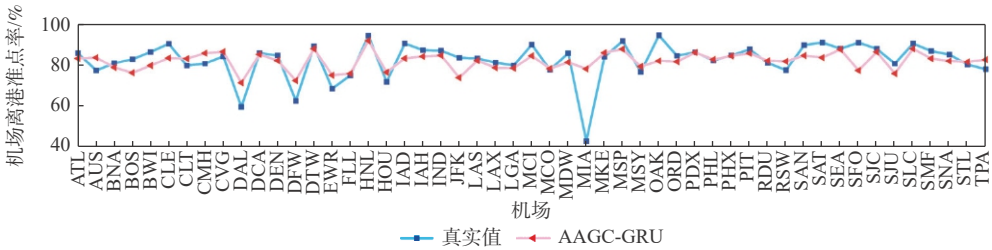



图 6　某天 AAGC-GRU 模型对机场网络的预测结果

Fig. 6　Prediction result of airport network by AAGC-GRU model on one day

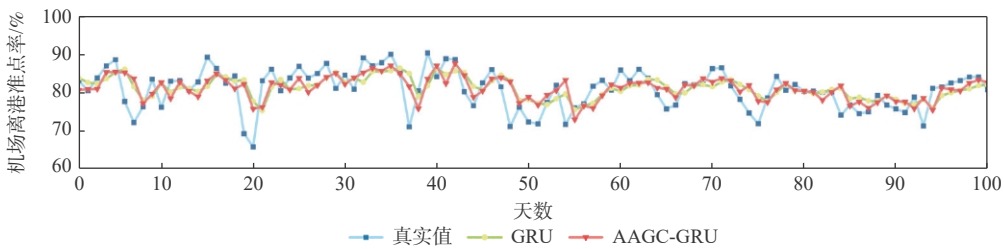



图 7　不同模型的预测结果可视化

Fig. 7　Visualization of prediction results by different models

2.4.2　对不同机场的预测效果对比分析

从机场网络中不同机场的角度分析 AAGC-GRU 模型的预测性能, 用过去 1 周的机场离港准点率预测未来 1 d 的机场准点表现, 对不同机场的预测结果进行对比分析。从数据集的机场网络中选取 3 个典型的机场, 并对模型的预测结果与真实值进行比较, 如图 8 所示。

选用单个机场的平均绝对误差预测指标来评价各自航班延误预测效果。其中, 平均绝对误差最低的是 MDW 机场, 表示对 MDW 机场的航班离港准点率变化趋势的预测效果是最好的; OAK 机场的平均绝对误差处于机场网络预测效果的中等水平; 模型对平均绝对误差最高的 RDU 机场的航班准点率曲线的拟合程度是最差的。结合 3 个机场的预测曲线及平均绝对误差指标, 分析得出以下结论: 对于航班准点率短期变化趋势相对平稳的机场, AAGC-GRU 模型的拟合效果较好; 对于波动密集且短期变化大的机场, 模型的预测精度有所降低, 对航班延误峰值的预测能力有限, 不过仍能较好地拟合准点率曲线峰谷之间的转换趋势。

进一步分析各机场的预测精度发现, 平均绝对误差相对较大的机场均为规模巨大且交通繁忙的枢纽机场, 每日的运营航班数量较大, 与机场网络中大多数机场的空间相关性错综复杂, 导致其航班延误数据的随机性难以预测。

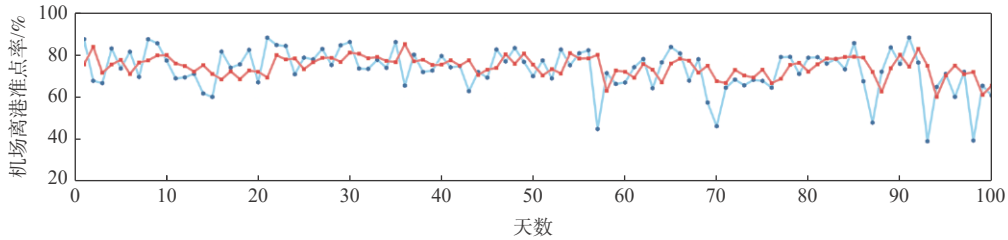
## 2.5　参数优化实验

本文模型包含空间卷积模块和时间门控循环模块, 模块中的节点嵌入维度与 GRU 个数影响着模型的预测性能, 故分别进行参数优化实验, 以求得模型的最优参数及最佳预测性能。

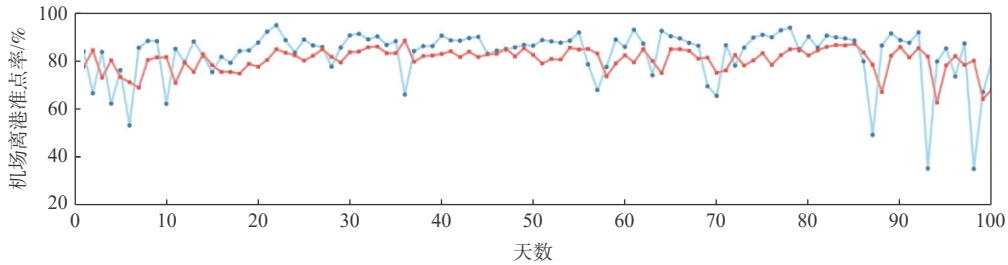
2.5.1　节点嵌入维数的最优化

AAGC-GRU 模型中的重要参数之一是自适应 GCN 中的节点嵌入维度, 其不仅会影响拓扑图邻接矩阵的生成效果, 而且还在一定程度上决定了模型的参数数量。使用枚举法手动对节点嵌入维度的大小进行调整, 实验中, 用历史 7 d 的机场离港准点率预测未来 3 d 的结果, 实验结果如图 9 所示。

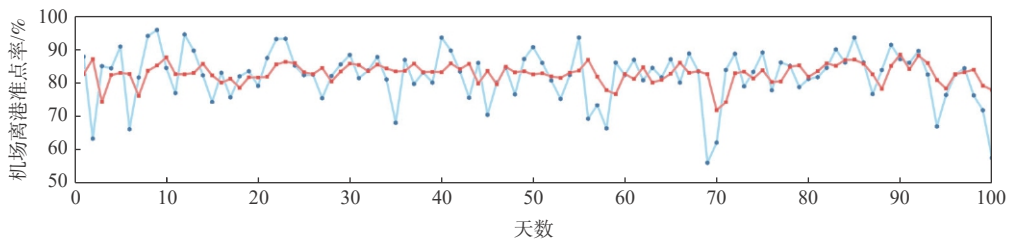
由图 9 分析可知, 针对本文构建的机场网络, 当自适应 GCN 的节点嵌入维度设置为 8 时, AAGC-GRU 模型的预测效果最佳。测试的节点嵌入维度过大或过小时, 模型的预测性能会大幅下降, 甚至低于部分基线模型的预测效果。一方面, 更大的节点嵌入维度有助于获取更多的信息, 从而提取更多的空间特征; 另一方面, 维度增大也会导致模型的参数增多, 不仅增大了整个模型的计算代价, 还会使得模型难以迭代到达模型的最优点, 容易出现过拟合现象。因此, 在 AAGC-GRU 模型的训练中寻




(a) MDW 机场离港准点率预测结果 (平均绝对误差为 3.837 1)




(b) OAK 机场离港准点率预测结果 (平均绝对误差为 7.425 6)




(c) RDU 机场离港准点率预测结果 (平均绝对误差为 14.213 2)

真实值 AAGC-GRU

图 8 不同机场的离港准点率预测结果

Fig. 8 Departure punctuality rate prediction results of different airports

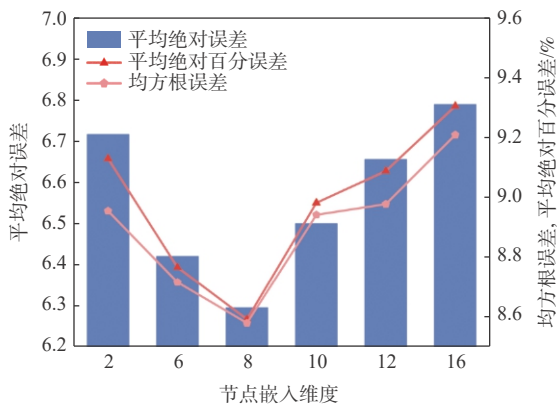



图 9 不同节点嵌入维度的预测结果比较

Fig. 9 Comparison of prediction results of different node embedding dimensions

找到一个合适的节点嵌入维度，平衡模型的预测精度与计算代价是非常重要的。

### 2.5.2 GRU 隐藏单元个数优化

GRU 隐藏单元的个数决定对历史时刻航班延误信息流的聚合度，对模型的预测精度影响较大，是影响 AAGC-GRU 模型时空序列预测性能的重要参数之一。为筛选出 GRU 隐藏单元数量的最优值，设置不同的隐藏单元数，从而比较分析不同数目神经元对模型评价指标的影响。实验中，统计了 GRU 隐藏单元个数为 16、32、64、100、128 时，模型在离港准点率数据集上的性能表现。GRU 隐藏单元个数的优化实验结果如图 10 所示。

可以看出，随着隐藏单元数量的增加，预测精度先升高后降低，当隐藏单元个数设置为 64 时，3 个误差评价指标均达到最小，即模型的预测精度达到最高。这主要是因为：当隐藏单元数目增大到某个门槛时，模型的参数爆炸，使得计算难度及复杂度大大增加，容易导致训练集数据过拟合，预测

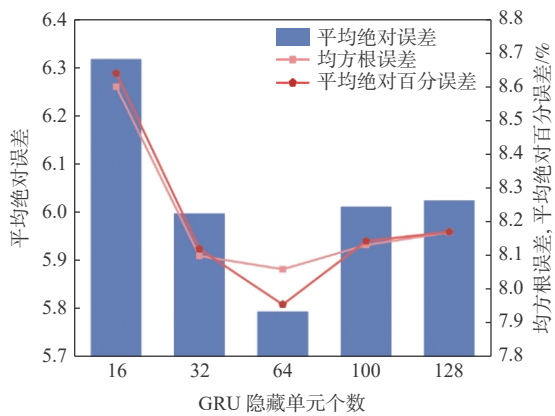



图 10 不同 GRU 隐藏单元个数的预测结果比较

Fig. 10 Comparison of prediction results of different GRU cell numbers

精度下降。因此, 为发挥出 AAGC-GRU 模型最佳的预测性能, 设置时间门控循环模块中合适的 GRU 隐藏单元数目是至关重要的。

### 2.6　模块消融实验

为验证模型各模块的有效性, 分别对自适应 GCN 模块、时间注意力机制模块和空间注意力机制模块进行针对性消融实验。

#### 2.6.1　自适应 GCN 评估

为综合评价自适应 GCN 模块的作用, 进行了针对性的消融实验, 构建了用普通 GCN 代替自适应 GCN 的 AttGC-GRU 模型, 用于与 AAGC-GRU 模型进行对比。参考文献 [13] 构建 GCN 的方法, 根据机场间的通航航班数预定义机场网络图结构中的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$, 矩阵 $\boldsymbol{A}$ 内部元素的计算式为

$$a_{ij}=\begin{cases}\dfrac{f_{ij}-f_{\min}}{f_{\max}-f_{\min}} & i\neq j\text{且}\dfrac{f_{ij}-f_{\min}}{f_{\max}-f_{\min}}\geqslant\varepsilon\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\tag{25}$$

式中: $f_{ij}$、$f_{\min}$、$f_{\max}$ 分别为机场 $i$ 和 $j$ 之间的通航航班数量、机场网络中 2 个机场之间最小、最大的通航数量; $\varepsilon$ 为用于控制邻接矩阵分布及稀疏程度的参数, 取 $\varepsilon=0.2$[13]。

将邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 代入式 (7) 进行一阶近似的图卷积运算, 代替 AAGC-GRU 模型中的自适应 GCN, 得到 AttGC-GRU 模型。自适应 GCN 模块的消融实验结果如图 11 所示。分析可知, AttGC-GRU 模型在采用普通 GCN 而非自适应 GCN 的情况下, 预测误差要远高于 AAGC-GRU 模型。由此说明, 利用节点嵌入的思想, 在模型训练过程中直接生成自适应邻接矩阵, 能够更好地挖掘机场网络的空间动态相关性, 证明了自适应 GCN 模块的有效性。

#### 2.6.2　时空注意力机制评估

为研究时间注意力机制和空间注意力机制在整个模型中起到的作用, 分别构建由 AAGC-GRU 去除时间注意力机制、空间注意力机制的 2 个模型。AAGC-GRU 及依次去除其中一个模块后模型的对比实验结果如表 1 所示。分析可知, 引入时间注意力机制或空间注意力机制都能大大提高模型的预测精度, 减小机场网络范围航班延误预测的误差。时间注意力模块的引入在预测未来的离港准点率时, 通过区分不同历史时间的影响程度, 能够将历史输入序列中每一步对输出的依赖性很好地捕获到, 同时也提高了模型对历史时间步的全局特征学习能力。此外, 空间注意力机制能够通过提高对机场节点之间空间依赖性的提取能力来降低模型的预测误差。

为进一步验证时空注意力机制模块的有效性, 从引入的浮点运算量和模型参数量的角度分析时间注意力机制和空间注意力机制所带来的模型复杂度。采用相同的数据集和实验设置进行对比评估, 实验结果如表 2 所示。分析可知, 3 个对比模型的浮点运算次数及模型参数量较为相近, 故引入时间注意力机制与空间注意力机制后, 时间复杂度和空间复杂度变化不大。上述实验结果验证了时间及空间注意力机制引入的有效性。

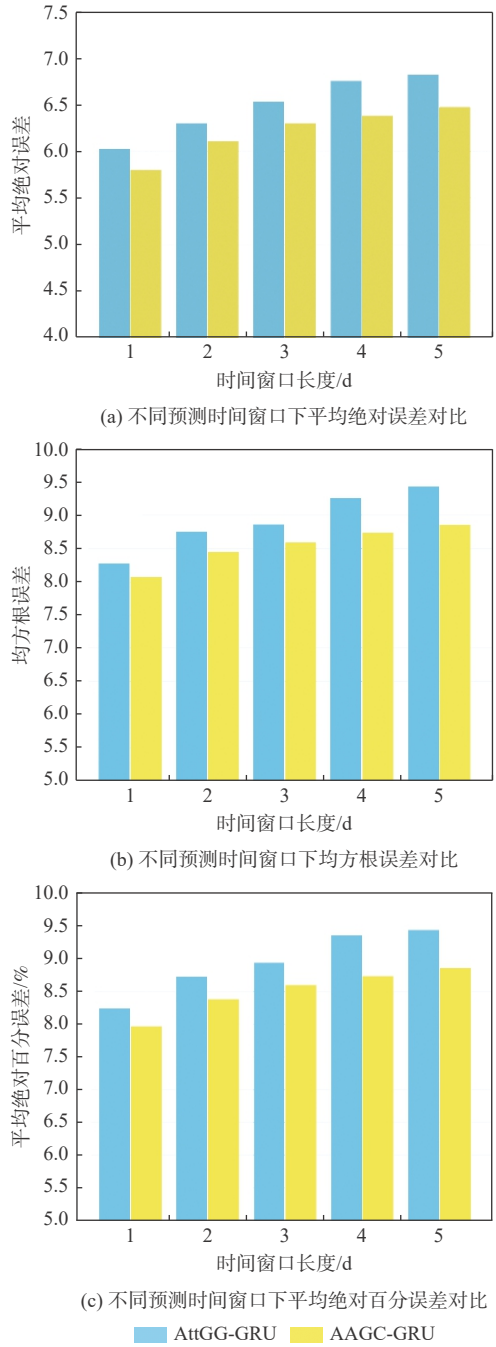



图 11　自适应 GCN 模块消融实验结果

Fig. 11　Results of ablation experiment of adaptive GCN module

### 2.7　泛化性实验

为进一步验证本文模型的泛化性, 对原 51 个机场数据集进行了机场数量上的扩充, 从美国运输统计局官网所得的原始数据集中筛选出航班运营

表1 时空注意力机制模块的有效性实验结果

Table 1 Effectiveness experiment result of spatial and temporal attention mechanism module

| 时间窗口/d | 模型 | 均方根误差 | 平均绝对误差 | 平均绝对百分误差/% |
|---|---|---|---|---|
| 1 | SAttGC-GRU | 8.121 7 | 5.941 3 | 8.092 7 |
| | TAttGC-GRU | 8.124 9 | 5.931 4 | 8.068 0 |
| | AAGC-GRU | 8.062 1 | 5.795 0 | 7.957 8 |
| 2 | SAttGC-GRU | 8.462 1 | 6.229 2 | 8.461 4 |
| | TAttGC-GRU | 8.487 1 | 6.197 3 | 8.479 3 |
| | AAGC-GRU | 8.437 3 | 6.103 6 | 8.369 7 |
| 3 | SAttGC-GRU | 8.660 4 | 6.356 4 | 8.684 2 |
| | TAttGC-GRU | 8.703 1 | 6.425 6 | 8.753 6 |
| | AAGC-GRU | 8.580 6 | 6.296 1 | 8.593 2 |
| 4 | SAttGC-GRU | 8.800 0 | 6.608 6 | 8.951 7 |
| | TAttGC-GRU | 8.747 6 | 6.473 6 | 8.817 5 |
| | AAGC-GRU | 8.729 0 | 6.374 6 | 8.726 4 |
| 5 | SAttGC-GRU | 8.862 4 | 6.683 3 | 9.034 5 |
| | TAttGC-GRU | 8.877 9 | 6.563 1 | 8.954 3 |
| | AAGC-GRU | 8.812 3 | 6.470 1 | 8.849 1 |

注：SAttGC-GRU为AAGC-GRU去除时间注意力机制模块后的模型，TAttGC-GRU为AAGC-GRU去除空间注意力机制模块后的模型。

表2 不同模型的时空复杂度对比分析

Table 2 Comparative analysis of spatial-temporal complexity of different models

| 模型 | 浮点运算量/FLOPs | 参数量 |
|---|---|---|
| SAttGC-GRU | 2 822 461 | 27 408 |
| TAttGC-GRU | 2 822 479 | 27 395 |
| AAGC-GRU | 2 822 591 | 27 411 |

数排名前76的中大型机场，构建更大的机场网络数据集，用以模型的泛化性实验。在数据预处理阶段，原数据集的缺失值用均值填充，并采用标准的归一化以保证训练的稳定性。在模型训练过程中，数据集按照8∶2的比例划分为训练集和测试集，其他模型超参数与前述实验设置一致。基于更大规模的新数据集对AAGC-GRU模型的泛化性进行实验验证。使用一周（$T$=7个时间步）的历史航班离港准点率数据作为预测模型的输入，用以预测未来$P$($P$=1个时间步)天的航班离港准点率。仍选取平均绝对误差、均方根误差、平均绝对百分误差3个度量标准来评估各模型的航班离港准点率预测性能，各模型的预测结果如表3所示。

由表3分析可知，AAGC-GRU模型的各项预测误差均为所有模型中最低，能够在规模更大的机场网络上也达到较高的预测精度。由此说明，该模型对不同规模的数据集具有一定的泛化能力。

表3 不同模型的预测结果

Table 3 Prediction results of different models

| 模型 | 平均绝对误差 | 均方根误差 | 平均绝对百分误差/% |
|---|---|---|---|
| HA | 6.412 9 | 8.680 3 | 8.493 5 |
| GRU | 6.087 0 | 8.208 8 | 8.091 1 |
| MLP | 6.127 1 | 8.259 1 | 8.093 8 |
| GBRT | 6.283 0 | 8.473 7 | 8.315 4 |
| STGCN | 5.970 4 | 8.083 1 | 7.940 3 |
| AAGC-GRU | 5.878 7 | 7.921 7 | 7.815 0 |

## 3 结 论

本文针对航班延误预测中延误数据的时空动态相关性提取不充分的问题，构建了AAGC-GRU模型，提升了航班延误预测的准确性和泛化性，主要结论如下：

1）采用自适应邻接矩阵改进GCN，直接从输入的数据集中自动学习拓扑图的结构关系，避免图结构的固定化，解决了空间动态相关性提取不充分的问题。

2）采用时空注意力机制对上一网络层输入的特征按照不同权重进行筛选，有利于充分挖掘最相关的数据特征，有效提高了航班延误预测精度。

3）构造2个不同机场网络规模的航班离港准点率数据集对本文方法进行实验，结果表明，基于不同数据集或是在不同的预测时间窗口内，AAGC-GRU模型均达到最优的预测性能。由此可见，该模型不仅对比其他基线模型具有一定优势，而且对不同规模的数据集也具有一定的泛化性。

由于当前数据集只包含航班的延误数据，实验中仅从历史延误数据这个单一维度对预测模型进行测试，模型对多维数据集预测的能力仍需在后续研究工作中进行验证。未来的工作集中于将机场的拥挤程度、气象等航班延误的主要影响因素纳入考虑范围，进而更好地捕获航班延误的不确定性。

## 参考文献（References）

[1] BRITTO R, DRESNER M, VOLTES A. The impact of flight delays on passenger demand and societal welfare[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(2): 460-469.

[2] PEJOVIC T, NOLAND R B, WILLIAMS V, et al. A tentative analysis of the impacts of an airport closure[J]. Journal of Air Transport Management, 2009, 15(5): 241-248.

[3] RYERSON M S, HANSEN M, BONN J. Time to burn: Flight delay, terminal efficiency, and fuel consumption in the National Airspace System[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2014, 69: 286-298.

[4] SIMIĆ T K, BABIĆ O. Airport traffic complexity and environ-

ment efficiency metrics for evaluation of ATM measures[J]. Journal of Air Transport Management, 2015, 42: 260-271.

[5] BASPINAR B, KOYUNCU E. A data-driven air transportation delay propagation model using epidemic process models[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2016, 2016: 4836260.

[6] 王春政, 胡明华, 杨磊, 等. 基于 Agent 模型的机场网络延误预测[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 452-465.
WANG C Z, HU M H, YANG L, et al. Airport network delay prediction based on Agent model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 452-465(in Chinese).

[7] 罗赟骞, 陈志杰, 汤锦辉, 等. 采用支持向量机回归的航班延误预测研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1): 143-149.
LUO Y Q, CHEN Z J, TANG J H, et al. Flight delay prediction using support vector machine regression[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1): 143-149(in Chinese).

[8] REBOLLO J J, BALAKRISHNAN H. Characterization and prediction of air traffic delays[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 44: 231-241.

[9] CHAKRABARTY N, KUNDU T, DANDAPAT S, et al. Flight arrival delay prediction using gradient boosting classifier[C]//Proceedings of the Emerging Technologies in Data Mining and Information Security . Berlin: Springer, 2018: 651-659.

[10] YU B, GUO Z, ASIAN S, et al. Flight delay prediction for commercial air transport: A deep learning approach[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 125: 203-221.

[11] GUI G, LIU F, SUN J L, et al. Flight delay prediction based on aviation big data and machine learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 140-150.

[12] QU J Y, ZHAO T, YE M, et al. Flight delay prediction using deep convolutional neural network based on fusion of meteorological data[J]. Neural Processing Letters, 2020, 52(2): 1461-1484.

[13] LI Z, YE L, ZHAO Y N, et al. A spatiotemporal directed graph convolution network for ultra-short-term wind power prediction[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(1): 39-54.

[14] 姜雨, 陈名扬, 袁琪, 等. 基于时空图卷积神经网络的离港航班延误预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(5): 1044-1052.
JIANG Y, CHEN M Y, YUAN Q, et al. Departure flight delay prediction based on spatio-temporal graph convolutional networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(5): 1044-1052(in Chinese).

[15] ZENG W L, LI J, QUAN Z B, et al. A deep graph-embedded LSTM neural network approach for airport delay prediction[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021: 6638130.

[16] BAO J, YANG Z, ZENG W L. Graph to sequence learning with attention mechanism for network-wide multi-step-ahead flight delay prediction[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 130: 103323.

[17] BRUNA J, ZAREMBA W, SZLAM A, et al. Spectral networks and locally connected networks on graphs[EB/OL]. (2014-05-21)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1312.6203.

[18] DEFFERRARD M, BRESSON X, VANDERGHEYNST P. Convolutional neural networks on graphs with fast localized spectral filtering[EB/OL]. (2017-02-05)[2022-12-01]. https://arxiv. org/abs/1606.09375v2.

[19] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks[EB/OL]. (2017-02-22)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1609.02907.

[20] 申翔翔, 侯新文, 尹传环. 深度强化学习中状态注意力机制的研究[J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 317-322.
SHEN X X, HOU X W, YIN C H. State attention in deep reinforcement learning[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(2): 317-322(in Chinese).

[21] BAHDANAU D, CHO K, BENGIO Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate[EB/OL]. (2016-05-19)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1409.0473v5.

[22] CHUNG J, GULCEHRE C, CHO K, et al. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling[EB/OL]. (2014-11-11)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1412.3555.

[23] XIA Y, CHEN J G. Traffic flow forecasting method based on gradient boosting decision tree[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology. Paris: Atlantis Press, 2017: 436-439.

# Combined prediction method of flight delay based on attention-based adaptive graph convolution-gated recurrent unit

LIU Xiaolin[1], GUO Mengjiao[1], LI Zhuo[2,*]

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. School of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract**: Aiming at the problem of the difficult extraction of spatio-temporal dynamic correlation of flight delay data in a flight delay prediction model, a type of flight delay prediction model based on an attention-based adaptive graph convolution-gated recurrent unit (AAGC-GRU) is proposed. Firstly, the airport network topology graph is constructed with the airport as the node. When combined with the spatial attention mechanism and adaptive graph convolution, it improves the model's autonomous mining of the spatial dynamic correlation of the airport network and compensates for the over-reliance of graph convolution on prior knowledge. Secondly, GRU was used to obtain the temporal dependence of historical flight delay data, and the time attention mechanism was introduced to automatically allocate the influence weight of data at different time steps, so as to fully capture the impact degree of data at different moments. Then, the fully connected layer is used to obtain the flight delay prediction results. Finally, the experiments are conducted on the on-time departure rate dataset of the American large airport network. In terms of mean absolute error, root mean square error, and mean absolute percentage error, the AAGC-GRU model outperforms the gradient boosting regression tree, gated recurrent unit model, spatio-temporal graph convolutional neural network, and other baseline models.

**Keywords**: flight delay prediction; deep learning; adaptive graph convolution; gated recurrent unit; attention mechanism

**Received**: 2022-12-13; **Accepted**: 2023-01-14; **Published Online**: 2023-02-28 14:28

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230227.2013.009

**Foundation item**: Natural Science Foundation of Tianjin, China (17JCYBJC18200)

* **Corresponding author**. E-mail: zhuo.li1@student.kuleuven.be

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0995

# 基于指令扩展的RISC-V可配置故障注入检测方法

刘强[1,2,*]，李一可[1,2]

(1. 天津大学 微电子学院，天津 300072；2. 天津市成像与感知微电子技术重点实验室，天津 300072)

**摘 要**：针对处理器运行时受到故障攻击出现的数据流错误，提出了一种面向RISC-V处理器微架构的模式可配置故障注入检测方法。该方法基于RISC-V指令集架构，利用其可扩展性添加带模式配置的自定义算术逻辑运算指令和控制与状态寄存器，以软硬件结合的方式同时实现算术逻辑运算和故障注入检测。在软件层面，通过写寄存器指令将配置信息写入自定义的控制与状态寄存器，配置自定义指令的故障注入检测模式，包括信息冗余和时间冗余2种故障注入检测模式及其参数；在硬件层面，实现了支持模式可配置故障注入检测方法的RISC-V处理器微架构。采用仿真器命令模拟故障注入，验证扩展后的RISC-V处理器的功能正确性与故障注入检测能力。实验结果表明：当信息冗余模式和时间冗余模式的应用频率相同时，模式可配置方法相较于单信息冗余方法，平均故障检测率提高13.34%，引入4.4%的平均资源开销；相较于单时间冗余方法，降低了8.24%的平均时间开销，故障检测率降低了13.33%。所提模式可配置方法可以实现故障检测率和时间开销的折中，适用于不同安全性和性能需求的应用场景。

**关 键 词**：硬件安全；故障注入攻击对策；故障注入检测；RISC-V处理器；指令扩展
**中图分类号**：TN407
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0043-10

故障注入攻击(fault injection attack, FIA)作为一种非侵入式主动攻击技术，通常使用时钟毛刺、电磁脉冲和激光等故障注入方法，使芯片输出异常，进而达到提取隐私信息[1-3]或绕过安全功能[4]的目的。由于攻击能力强、所需时间短，故障注入攻击逐渐成为集成电路攻击的有效手段。处理器作为信息系统的核心芯片，是承受故障注入攻击的脆弱节点。基于RISC-V指令集架构(instruction set architectures, ISA)的处理器目前已被广泛应用，范围覆盖了数据中心到物联网设备，并面临着针对处理器电路的潜在故障注入攻击威胁。当前，攻击者已能够通过时钟毛刺故障注入手段，干扰RISC-V处理器指令执行过程，绕过RISC-V处理器安全机制，严重威胁RISC-V处理器的安全[5]。

为确保芯片内部信息安全，在芯片设计过程中，需引入抗故障注入攻击技术，包括物理隔离、环境监测及故障注入检测。其中，故障注入检测技术包括基于数字传感器和基于冗余的故障注入检测方法。基于数字传感器的故障注入检测方法[6-8]将监控到的应力转换为易于测量的时间应力，适用于时钟毛刺或超频、电压毛刺或欠压和升温等全局故障注入攻击，但在无故障注入时，传感器存在误检测概率。基于冗余的故障注入检测技术[9-11]由于无需额外设备、成本较低而被广泛使用，包括空间冗余、时间冗余及信息冗余。与空间冗余和时间冗余相比，信息冗余所需资源和时间开销较低，但故障检测率也较低。一方面，不同应用场景对处理器的性能和安全性的需求不同；另一方面，单一的故障

收稿日期：2022-12-15；录用日期：2023-02-24；网络出版时间：2023-03-09 14:22
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230309.0928.001
基金项目：国家自然科学基金 (61974102)
*通信作者. E-mail：qiangliu@tju.edu.cn

*引用格式：刘强，李一可. 基于指令扩展的RISC-V可配置故障注入检测方法[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：43-52.*
*LIU Q，LI Y K. Configurable fault injection detection method for RISC-V based on instruction extension[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：43-52 (in Chinese).*

注入检测技术无法实现对高故障检测率和低时间开销的兼容。这给具备故障注入检测能力的高效处理器设计提出了挑战。

针对以上问题，本文从提高故障检测单元灵活性的角度出发，结合RISC-V指令集架构的可扩展特性，针对处理器执行算术逻辑运算指令时受到故障攻击导致的数据流错误，提出一种基于指令扩展的模式可配置故障注入检测方法，以软硬结合的方式实现了适应不同性能和安全性需求的RISC-V处理器。首先，确定自定义指令的操作类型和自定义控制与状态寄存器（control and status register, CSR）的功能，并修改编译器添加自定义指令和CSR；其次，扩展RISC-V处理器微架构，添加支持信息冗余和时间冗余故障注入检测及检测模式配置的硬件逻辑；最后，通过添加CSR访问指令，灵活配置处理器执行自定义指令时的故障注入检测模式。

# 1 RISC-V的可扩展性及故障注入检测方法

## 1.1 RISC-V可扩展性

RISC-V是一种基于精简指令集计算机（reduced instruction set computer, RISC）原理的开源指令集架构[12]。RISC-V指令集架构具有简洁、模块化、可扩展及开源的技术特性。通过有限指令集的组合和扩展，设计者能够构建适合不同领域的微处理器。

RISC-V指令的可扩展性源于其模块化设计，体现在预留的指令编码空间。RISC-V指令集架构预留充足指令编码空间用于自定义指令扩展。自定义指令扩展流程如图1所示。在软件层面，设计者通过修改RISC-V GNU工具链中的二进制工具（RISC-V Binutils），实现编译器对自定义指令的识别；在硬件层面，设计者通过扩展处理器微架构，添加指令译码逻辑和自定义硬件逻辑并整合数据、控制通路，实现自定义指令规定的操作。

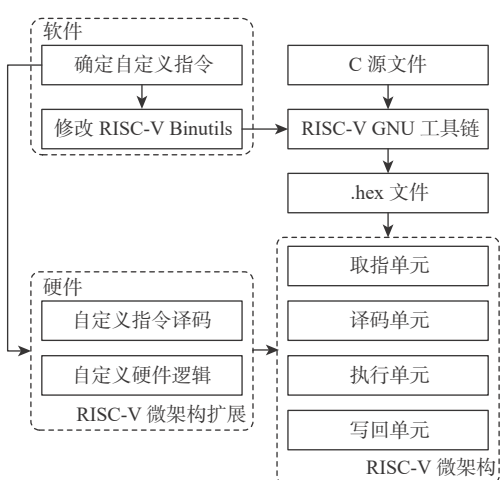



图1 RISC-V自定义指令扩展流程

Fig. 1 Customized instruction extension flow of RISC-V

此外，RISC-V可扩展性还体现为CSR可扩展。RISC-V特权架构定义了用于配置或记录处理器运行状态的CSR。CSR是处理器核内部的寄存器，使用独立的地址编码空间，其访问采用专用指令，包括CSR读操作、写操作、置位及清零指令。除架构规定的标准CSR外，设计者可通过添加特定CSR及其硬件支持，实现CSR扩展。CSR扩展方法为：软件上，使用自定义CSR地址编写指令，或修改RISC-V工具链，在编译器中集成CSR名称；硬件上，实现相应寄存器逻辑。

## 1.2 故障注入检测方法

基于冗余的故障注入检测方法由于无需额外设备、成本较低而被广泛使用，包括空间冗余、时间冗余及信息冗余。与空间冗余相比，时间冗余和信息冗余的资源开销较低。与时间冗余相比，信息冗余的时间开销较低，但故障检测率也有所降低。因此，综合故障检测率和开销的考虑，本文选择信息冗余方法和时间冗余方法。

信息冗余通过错误检测编码实现，在数据中增加冗余信息进行故障注入检测，基于信息冗余的故障注入检测方法如图2所示。根据操作数间的运算类型和选取的错误检测编码，操作数$A$、$B$经过校验位计算单元和校验位预测单元计算后，得到输出结果校验位的预测值。校验位计算单元对经原始电路运算得出的输出数据进行编码，得到输出结果校验位的实际值。比较电路将输出结果校验位的实际值与预测值进行比较，若二者不一致，则检测到故障注入。由于错误检测编码检错能力的限制，并非任意比特数的故障均可被检测到。例如，奇偶校验码存在无法检测偶数比特故障的缺陷，残差码和循环冗余码的故障注入检测能力分别与校验模数、生成多项式相关[13]。

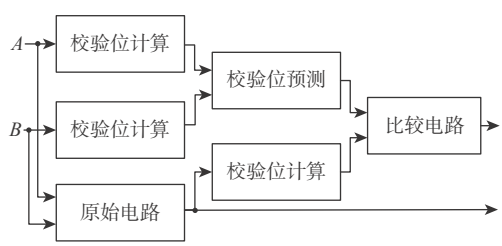



图2 基于信息冗余的故障注入检测方法

Fig. 2 Fault injection detection method based on information redundancy

时间冗余通过重复执行操作进行故障注入检测，基于时间冗余的故障注入检测方法如图3所示。在不同任务时刻$t_1$、$t_2$和$t_3$使用相同的输入操

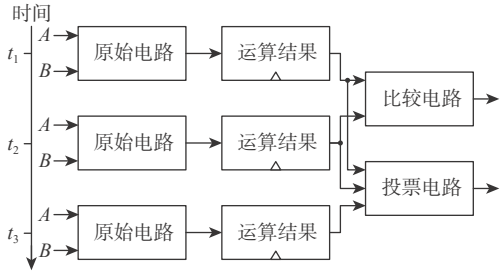



图 3　基于时间冗余的故障注入检测方法

Fig. 3　Fault injection detection method based on temporal redundancy

作数 $A$、$B$, 重复执行相同的运算并比较每个任务的结果。运算重复执行 2 次, 可通过比较电路检测故障, 重复执行 3 次, 可通过投票电路实现部分故障的纠错。在实际应用中, 可以根据需求从程序开始或从保存正确状态的检查点开始重复执行。时间冗余只需要增加比较电路和投票电路, 硬件开销小, 但运算的重复执行引入了较大的时间成本。

## 2　基于指令扩展的模式可配置故障注入检测方法

### 2.1　威胁模型

本文提出的故障注入检测方法针对的是处理器执行算术逻辑运算时受到故障注入攻击出现的数据流错误。假定处理器微架构中指令存储器及指令缓存单元、数据存储器存储的信息为可信的, 流水线寄存器(如指令寄存器(instruction register, IR)、程序计数器(program counter register))、通用寄存器组(general purpose registers, GPR)和算术逻辑单元(arithmetic logic unit, ALU)为故障注入攻击的目标单元。攻击者先通过侧信道信号测量确定注入故障的时间, 进而利用故障攻击手段干扰电路运算过程, 注入故障。故障表现为逻辑电路中的比特翻转、置位和重置类型的瞬态故障。其中, 指令寄存器存储的指令编码中关乎指令操作类型的编码区间出现故障会导致指令执行错误的运算类型, 寄存器寻址索引和立即数编码区间出现故障会导致指令以错误的操作数执行; 通用寄存器组作为执行时的源寄存器(source register), 其出现故障也会导致指令以错误的操作数执行; 算术逻辑单元作为处理器执行单元的关键逻辑, 在该组合逻辑中引入的故障一旦被传播至寄存器, 将导致错误的执行结果被写入目的寄存器(destination register)。

### 2.2　模式可配置故障注入检测方法

在基于冗余的故障注入检测方法中, 时间冗余和信息冗余在时间开销、故障注入检测能力和资源开销方面具有互补性。信息冗余适用于故障注入检测能力要求较低、时间开销要求较高的应用场景, 而时间冗余则用于故障注入检测能力要求较高、时间开销要求低的应用场景。因此, 将 2 种方法融合并动态切换, 可以满足不同应用场景的需求。同时, 为进一步提高故障注入检测方法的灵活性, 相较于直接将基于冗余的故障注入检测方法应用于目标指令, 本文实现了基于指令扩展的模式可配置故障注入检测方法, 如图 4 所示。该方法以 RISC-V 整数指令集架构(RV32I)中的算术逻辑运算指令为指令扩展对象, 并对 RISC-V 微架构进行扩展以实现相应的故障注入检测功能, 以软硬结合的方式实现了模式可配置故障注入检测。在模式可配置故障注入检测方法中, 配置参数在处理器运行时通过 CSR 访问指令写入自定义 CSR, 进而配置处理器执行自定义指令时的故障注入检测模式。在故障注入检测模式可配置的 RISC-V 处理器上, 自定义算术逻辑运算指令执行时不仅支持原有的算术逻辑运算, 还支持信息冗余或时间冗余 2 种不同的故障注入检测方法。

在软件层面, 本文通过修改工具链添加自定义算术逻辑运算指令和自定义 CSR MREPLY, 使得编译器能够识别自定义算术逻辑运算指令和 MREPLY 寄存器访问指令, 进而在源程序添加配置自定义指令的 MREPLY 访问指令, 以软件方式实现硬件电路功能的配置。添加的自定义算术逻辑运算指令以 RV32I 指令集为基础, 包括寄存器加法指令 ADDF、减法指令 SUBF、异或运算指令 XORF、或运算指令 ORF、与运算指令 ANDF、逻辑左移指令 SLLF、逻辑右移指令 SRLF 和算术右移指令 SRAF。

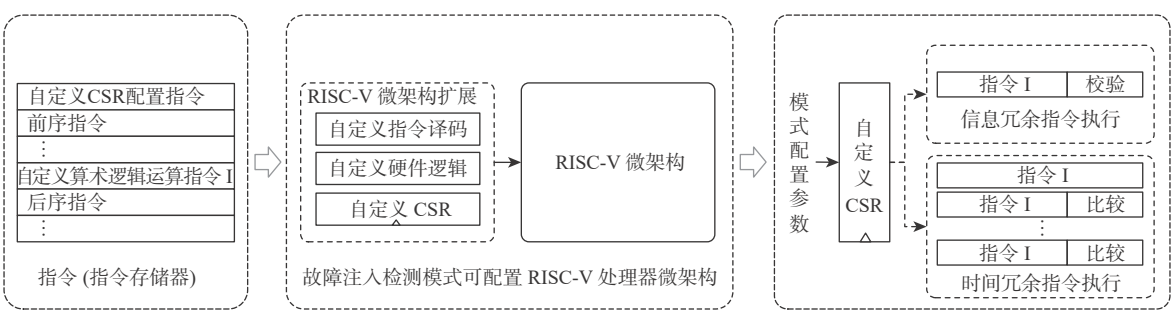



图 4　模式可配置故障注入检测方法示意图

Fig. 4　Mode configurable fault injection detection method

指令的编码格式如图 5 所示。此外，添加的自定义指令还包括立即数加法指令 ADDIF、异或运算指令 XORIF、或运算指令 ORIF、与运算指令 ANDIF、逻辑左移指令 SLLIF、逻辑右移指令 SRLIF 和算术右移指令 SRAIF。指令的编码格式如图 6 所示。其中，为减小自定义指令译码单元引入的额外资源开销，自定义算术逻辑运算指令的编码仅在操作码（opcode）区间和相应的 RV32I 指令不同。

| 31 25 | 24 20 | 19 15 | 14 12 | 11 7 | 6 0 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| funct7 | rs2 | rs1 | funct3 | rd | opcode | | |
| 0x00 | rs2 | rs1 | 0x0 | rd | 1110111 | ADDF | rd, rs1, rs2 |
| 0x20 | rs2 | rs1 | 0x0 | rd | 1110111 | SUBF | rd, rs1, rs2 |
| 0x00 | rs2 | rs1 | 0x4 | rd | 1110111 | XORF | rd, rs1, rs2 |
| 0x00 | rs2 | rs1 | 0x6 | rd | 1110111 | ORF | rd, rs1, rs2 |
| 0x00 | rs2 | rs1 | 0x7 | rd | 1110111 | ANDF | rd, rs1, rs2 |
| 0x00 | rs2 | rs1 | 0x1 | rd | 1110111 | SLLF | rd, rs1, rs2 |
| 0x00 | rs2 | rs1 | 0x5 | rd | 1110111 | SRLF | rd, rs1, rs2 |
| 0x20 | rs2 | rs1 | 0x5 | rd | 1110111 | SRAF | rd, rs1, rs2 |

图 5 自定义寄存器类型 32 位整数指令

Fig. 5 Customized register-type 32-bit integer instruction

| 31 20 | 19 15 | 14 12 | 11 7 | 6 0 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| imm | rs1 | funct3 | rd | opcode | | |
| imm | rs1 | 0x0 | rd | 1010011 | ADDIF | rd, imm, rs2 |
| imm | rs1 | 0x4 | rd | 1010011 | XORIF | rd, imm, rs2 |
| imm | rs1 | 0x6 | rd | 1010011 | ORIF | rd, imm, rs2 |
| imm | rs1 | 0x7 | rd | 1010011 | ANDIF | rd, imm, rs2 |
| 0x00 imm[4:0] | rs1 | 0x1 | rd | 1010011 | SLLIF | rd, imm[4:0], rs1 |
| 0x00 imm[4:0] | rs1 | 0x5 | rd | 1010011 | SRLIF | rd, imm[4:0], rs1 |
| 0x20 imm[4:0] | rs1 | 0x5 | rd | 1010011 | SRAIF | rd, imm[4:0], rs1 |

图 6 自定义立即数类型 32 位整数指令

Fig. 6 Customized immediate-type 32-bit integer instruction

MREPLY 寄存器用于配置自定义指令执行时电路启动的故障注入检测模式及参数，支持机器模式下的读写访问（machine read and write, MRW），其低 2 位为故障注入检测模式配置域。其中，‘00’为默认值，‘01’表示信息冗余模式，‘10’和‘11’表示时间冗余模式，数值表示指令执行的次数。MREPLY 寄存器是实现故障注入检测功能控制的关键单元，因此，保证其安全可靠至关重要。例如，当攻击者成功注入置位型或翻转型故障到 MREPLY 寄存器中时，MREPLY 寄存器内部信息位有可能被恶意篡改为默认值，将使得攻击者有可能绕过基于冗余措施的检错机制。为降低 MREPLY 寄存器面临的安全隐患，设计者可以增加输出与 MREPLY 寄存器互补的影子寄存器，通过同或运算比较二者输出以发现恶意篡改，进而提高该寄存器的可靠性[14]。

在硬件层面，本文通过扩展 RISC-V 处理器微架构，硬件实现自定义指令译码执行和 MREPLY 寄存器。自定义指令的译码信息和写入 MREPLY 寄存器的配置信息作为支持信息冗余和时间冗余 2 种模式的电路单元控制信号，进而使得自定义算术逻辑运算指令除支持原有的算术逻辑运算，还支持通过 MREPLY 寄存器进行故障注入检测模式配置。因此，通过添加 MREPLY 访问指令到原有程序，配置处理器执行自定义指令时支持的故障注入检测模式，本文以软硬件结合的方式实现了基于指令扩展的模式可配置故障注入检测方法。

## 3 模式可配置故障注入检测方法硬件实现

在硬件层面，将本文方法应用于开源 RISC-V 处理器核 zero-riscy。zero-riscy 是支持 RV32IMC 指令集的二级流水线、顺序单发射 RISC-V 处理器。其中，处理器流水线第 1 级为取指阶段，第 2 级为译码执行阶段，2 级流水线之间的寄存器包括指令寄存器等其他寄存器。支持模式可配置故障注入检测方法的处理器微架构如图 7 所示。基于原有的处理器微架构，添加了自定义指令译码单元、MREPLY 寄存器和故障注入检测硬件逻辑。其中，信息冗余模式的硬件实现包括编码电路、预

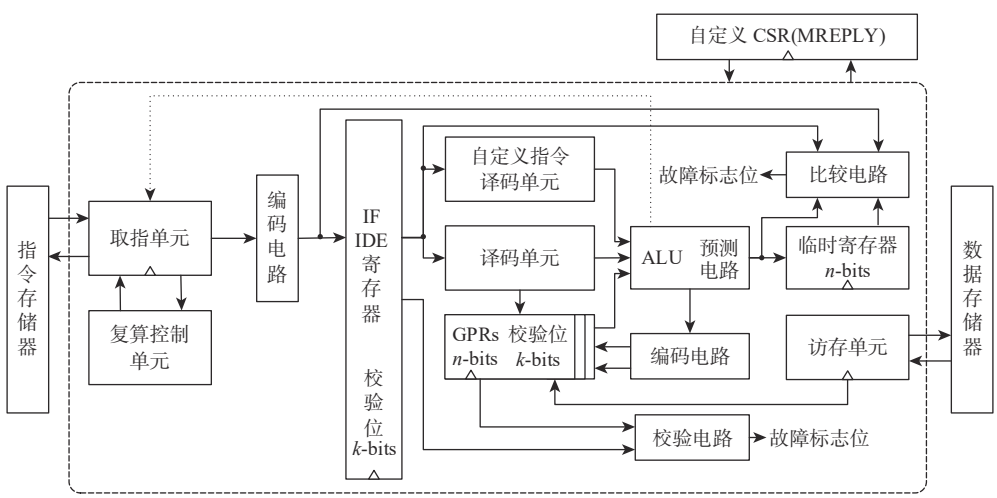



图 7 故障注入检测模式可配置 RISC-V 处理器微架构

Fig. 7 Microarchitecture of RISC-V processor with configurable fault injection detection mode

测电路和校验电路; 时间冗余模式的硬件实现包括复算控制单元、临时寄存器和比较电路。

### 3.1　信息冗余模式实现

信息冗余模式基于错误检测编码实现。在常用的错误检测编码中, 奇偶校验码由于原理简单、易于实现而被广泛使用[15]。本文以奇偶校验码作为实现信息冗余模式的错误检测编码, 针对 $n$-bits 信息位, 以 $g$ 作为奇偶校验的粒度, 即每 $g$-bits 数据设置一个奇偶位作为校验位, 其中, $g \bmod 2 = 0$且$0 < g \leqslant n$。随着 $g$ 值减小, 奇偶位数增加, 资源消耗增加, 故障检测率提高。本文中, 寄存器的信息位位宽 $n$ 均为 32。

信息冗余模式的硬件实现如图 8 所示。其中, 在处理器执行指令时, 编码电路对写入寄存器的数据进行编码, 因此, 指令寄存器、通用寄存器组在原有 $n$-bits 信息位($n = 32$)的基础上添加 $k$-bits 校验位($k = n/g$)。写入上述寄存器的数据包含 $n$-bits 数据位 $D$ 和 $k$-bits 校验位 $P$, 校验位 $P$ 的计算公式为

$$P_{i_k} = \mathop{\oplus}_{i_n=g(i_k+1)-1}^{gi_k} D_{i_n} \qquad i_k = 0,1,\cdots,k-1 \tag{1}$$

式中: $i_k$为校验位; $i_n$为数据位; $g$ 为奇偶校验的粒度。

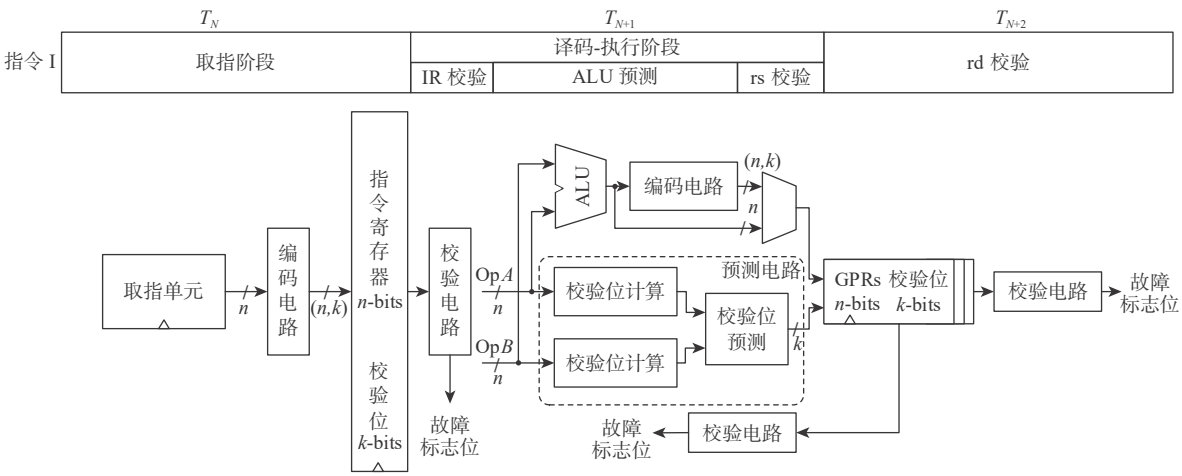



图 8　信息冗余模式实现

Fig. 8　Information redundancy mode implementation

如图 8 所示, 自定义指令 I 在信息冗余模式下执行时, 在指令执行阶段 $T_{N+1}$, 校验电路对通用寄存器组中的源寄存器(rs1 和 rs2)和指令寄存器的数据进行奇偶校验。其中, 校验电路先根据奇偶校验原理计算寄存器信息位对应的实际校验位, 再将其与寄存器校验位比较得出寄存器中的数据是否被注入故障。此外, 该模式还通过比较算术逻辑单元执行结果奇偶性的实际值和预测的理论值对算术逻辑单元进行故障注入检测。在指令执行阶段 $T_{N+1}$, $A$ 和 $B$ 为算术逻辑单元的 2 个 $n$-bits 操作数, 经由预测电路得出校验位理论值, 预测的 $k$-bits 校验位和实际计算的 $n$-bits 数据写入目的寄存器(rd)。在指令 I 执行完成后的下一时钟周期 $T_{N+2}$, 校验电路对寄存器信息位进行奇偶校验, 完成针对算术逻辑单元的故障注入检测。此外, 故障检测单元的正常工作依赖自定义指令的正确性, 因此, 对于指令寄存器存储的指令操作码(opcode), 编码区间持续进行奇偶校验。

校验位预测电路的实现与指令类型相关。针对自定义算术逻辑运算指令 I 的运算类型, 粒度为 $g$ 的校验位预测电路采取不同的硬件实现方式。在处理器微架构实现中, 为节约硬件开销, 加法指令和减法指令多采用同一加法器实现, 操作数加法运算结果的奇偶性通过异或 2 个加数的奇偶性及加法运算过程产生的所有进位得到。基于此, ADDF、SUBF 和 ADDIF 指令执行时奇偶校验位的预测方式为

$$P_{i_k}(A+B) = P_{i_k}(A) \oplus P_{i_k}(B) \oplus C_{\text{in}}(i_k-1) \oplus \left( \mathop{\oplus}_{i=g-2}^{0} C_{\text{out}}^{(i)}(i_k) \right) \tag{2}$$

式中: $i_n$为数据位; $i_k(i_k = 0,1,\cdots,k-1)$为校验位; $C_{\text{in}}(i_k)$为第 $i_k - 1(i_k > 0)$个 $g$-bits 数据运算的进位输出; $C_{\text{out}}^{(i)}(i_k)$为第 $i_k$个 $g$-bits 数据作加法运算过程中第 $i$ 位产生的进位。

如果用于计算预测值的进位链信号使用的是原始加法器内部产生的进位信号, 进位信号计算出现错误可能导致检错码无法检测到相应的故障。因此, 在处理器的加法器为行波进位加法器的前提下, 硬件电路实现加法器进位链的冗余, 提高电路的故障注入检测可靠性。

基于位操作逻辑运算规律，ANDF、ORF、XORF、ANDIF、ORIF和XORIF指令执行时奇偶校验位的预测方式为

$$P_{i_k}(A\oplus B)=P_{i_k}(A)\oplus P_{i_k}(B) \tag{3}$$

$$P_{i_k}(A|B)=P_{i_k}(A)\oplus P_{i_k}(B)\oplus P_{i_k}(A\&B) \tag{4}$$

$$P_{i_k}(A\&B)=P_{i_k}(A)\oplus P_{i_k}(B)\oplus P_{i_k}(A|B) \tag{5}$$

式中：$i_k(i_k=0,1,\cdots,k-1)$为校验位。

针对逻辑移位指令SLLF、SLLIF、SRLF、SRLIF指令，数据$A$经过逻辑移位$j$位后得到数据的奇偶性计算方式为

$$P_{i_k}(A<<j)=\begin{cases}0 & i_k=-1,\cdots,m-1\\ \mathop{\oplus}\limits_{i_n=g(i_k+1)-j-1}^{0}A_{i_n} & i_k=m\\ \mathop{\oplus}\limits_{i_n=g(i_k+1)-j-1}^{gi_k-j}A_{i_n} & i_k=m+1,\cdots,k\end{cases} \tag{6}$$

$$P_{i_k}(A>>j)=\begin{cases}\mathop{\oplus}\limits_{i_n=g(i_k+1)+j-1}^{gi_k+j}A_{i_n} & i_k=-1,\cdots,k-m-2\\ \mathop{\oplus}\limits_{i_n=n-1}^{gi_k+j}A_{i_n} & i_k=k-m-1\\ 0 & i_k=k-m,\cdots,k\end{cases} \tag{7}$$

式中：$m=(j-j \bmod g)/g$；$i_n$为数据位；$i_k$（取$i_k=0,1,\cdots,k-1$）为校验位。

对于算术右移运算，在移位的过程中会在高位补入符号位。因此，针对算术右移运算指令SRAF和SRAIF，当符号位为0时，其结果与式(7)中所示的逻辑右移方法相同，当符号位为1时，运算结果的奇偶性还需要和补入的1进行异或运算。

### 3.2 时间冗余模式实现

时间冗余模式实现方法如图9所示。覆盖2级流水线间指令寄存器的故障注入检测和自定义指令执行后写回目的寄存器结果值的故障注入检测，指令的执行次数为$r$，复算$r-1$次。假设指令I被配置为时间冗余故障注入检测模式。该指令在时钟周期$T_N$被取指，在时钟周期$T_{N+1}$被译码、执行和写回，即被第1次执行完成。在时钟周期$T_{N+1}$和$T_{N+2}$，该指令进行复算。同时，比较电路在时钟周期$T_{N+1}$比较指令寄存器中存储的指令和指令复算时取到的指令是否一致，进而实现了指令寄存器的故障注入检测；比较电路在时钟周期$T_{N+2}$将指令复算后的执行结果与上一周期存入临时寄存器中的数据相比较，发生不匹配时表示指令执行出现故障。

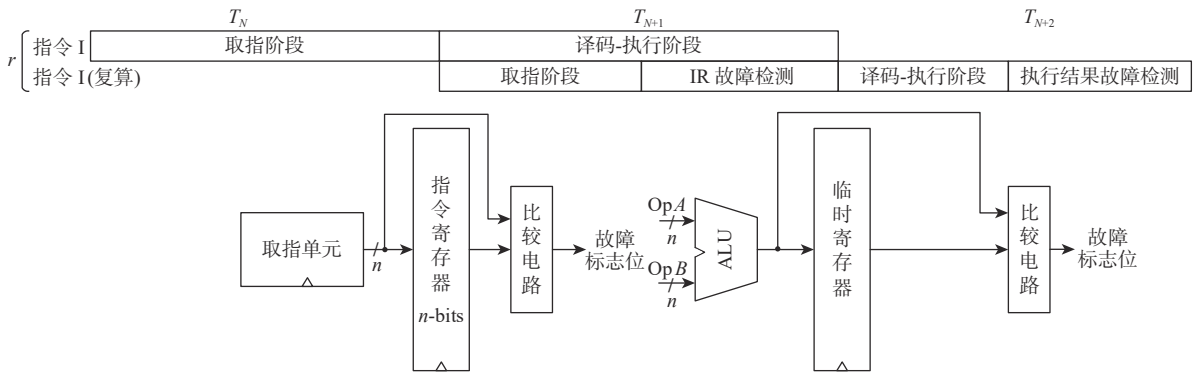



图9 时间冗余模式实现

Fig. 9 Temporal redundancy mode implementation

时间冗余模式的控制通过支持复算机制的取指单元实现。如图10所示，复算控制电路包括操作码译码器(opcode decoder)和重复取指状态机(re-fetch FSM)。译码电路对从指令存储器取出指令的操作码(opcode)区间译码后得到复算指令的标志信号。指令复算通过重复取指状态机控制，该状态机根据MREPLY寄存器中的复算配置参数、取指FIFO(fetch FIFO)空满标志和复算指令标志输出重复取指控制信号。根据重复取指信号，取指控制状态机(IF FSM)在相应的时钟周期生成地址偏移量为0的取指地址，实现指令的重复预取指。此外，复算控制电路中的状态机编码采用独热码，该编码方式不易受到故障攻击的影响[16]。

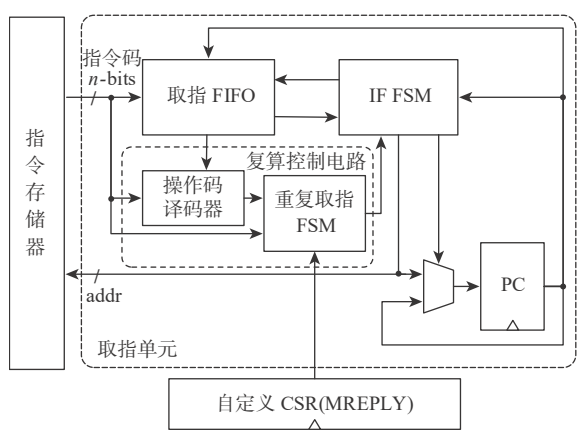



图10 添加复算控制的取指单元

Fig. 10 Instruction fetch unit with re-fetch control

## 4　实验结果与分析

### 4.1　实验环境

本文使用 riscv32-unknown-elf-gcc v11.1.0 交叉编译工具链对 C 源文件进行编译, 并利用 Xilinx Vivado 2022.2 工具对扩展后的 zero-riscy 处理器进行功能仿真, 进而实现故障注入检测能力分析及时间开销的评估。其中, 故障注入检测能力的分析采用基于 Vivado 仿真器命令的故障注入模拟方法。该方法基于仿真器交互命令和工具命令语言(tool command language, TCL)脚本, 针对处理器寄存器传输级(register transfer level, RTL)设计利用仿真器支持的 force 命令模拟故障注入攻击。仿真流程的控制通过将故障注入仿真命令整合到控制电路仿真的 TCL 脚本实现。TCL 脚本实现了故障注入的时刻、强度(故障比特数)、类型、位置及次数的控制。使用 Vivado 工具对上述处理器电路进行综合及实现, 对其部署在 xc7a100tcsg324-1 现场可编程阵列逻辑(field programmable gate array, FPGA)上的硬件资源开销进行评估。

在实验评估中, 本文以不同粒度为信息冗余模式的电路实现参数, 分别实现了粒度为 8 的字节奇偶校验、粒度为 16 的半字奇偶校验和粒度为 32 的字奇偶校验。

### 4.2　故障注入检测能力评估

本文分别在信息冗余和时间冗余 2 种故障注入检测模式配置下对 RISC-V 处理器微架构进行模拟故障注入攻击。模拟故障注入的测试程序为 PIN 码验证(VerifyPIN)程序[17], 该程序利用字节比较函数验证用户 PIN 码和实际 PIN 码是否一致。在添加了写 MREPLY 寄存器指令的测试程序中, 本文选取程序字节比较函数对应汇编中的一条立即数加法指令“addi $x_{10}$, $x_{15}$, 0”, 将其替换为对应的自定义算术逻辑运算指令“addif $x_{10}$, $x_{15}$, 0”作为故障注入目标指令, 如图 11 所示。

在每个时钟周期上升沿后, 针对目标指令涉及的通用寄存器组和 2 级流水线之间的指令寄存器进行随机故障注入, 故障持续时间为单个时钟周期, 如图 12 所示。当 MREPLY 寄存器写入“01”后, 电路配置为信息冗余模式, 此时故障注入点为含奇偶校验位指令寄存器、源寄存器 $x_{15}$ 和算术逻辑单元涉及的组合逻辑。其中, 针对组合逻辑的故障注入模拟时, 表现为在下一个周期注入故障到目的寄存器 $x_{10}$ 中, 表示模拟组合逻辑的故障传播到了下一级的时序逻辑。此外, 寄存器的信息位和校验位受到故障注入的概率相同。当 MREPLY 寄存器写入“10”后, 电路配置为单次复算的时间冗余模式, 此时故障注入点为不包含奇偶校验位的指令寄存器、源寄存器 $x_{15}$ 和算术逻辑单元涉及的组合逻辑。其中, 针对目的寄存器的故障注入, 在模拟时以临时寄存器为故障注入点。由于上述攻击场景下故障注入点均为寄存器单元, 模拟故障注入得到的实验结果也适用于其他自定义算术逻辑运算指令。此外, 考虑到实际的故障攻击场景, 程序执行每次只进行一次故障注入, 因此, 时间冗余模式配置为只进行单次复算。

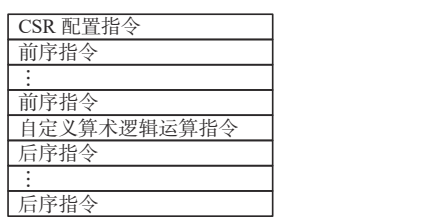



图 11　故障注入模拟测试程序示意图

Fig. 11　Fault injection simulation test procedure

故障注入的位置和强度为分别在相同的寄存器注入 1～8 bit 的位翻转故障, 执行故障注入 500 次。实验结果显示, 时间冗余模式下, 扩展的 RISC-V 处理器实现了 100% 的故障注入检测。信息冗余模式下, 随着校验粒度参数 $g$ 的降低, 分别达到了 50.75%、78.05% 和 91.20% 的平均故障检测率, 如图 13 所示。

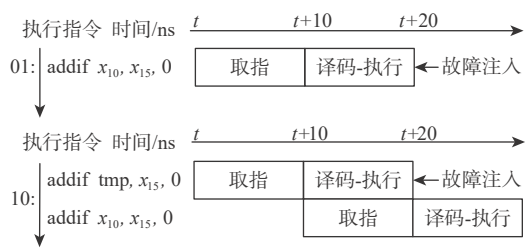



图 12　故障注入时序示意图

Fig. 12　Fault injection timing

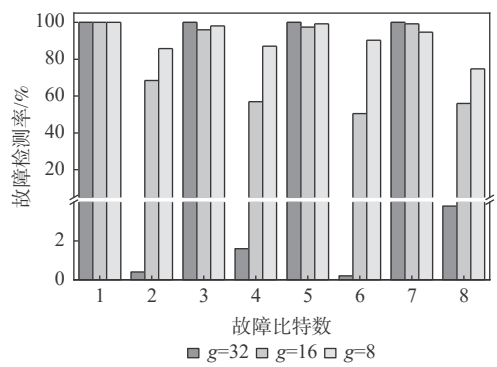



图 13　模拟故障注入实验结果

Fig. 13　Experimental results of simulated fault injection

本文将基于时间冗余和信息冗余的故障注入检测方法总故障检测率 $F$ 定义为

$$\begin{cases} F = \alpha_i d_i + (1-\alpha_i) d_t \\ d_i = \sum_{g \in s_g} d_g / \mathrm{card}(s_g) \end{cases} \tag{8}$$

式中：$\alpha_i$表示程序中自定义指令被配置为信息冗余模式的频率；$d_i$为信息冗余模式下的平均故障检测率；$d_t$为时间冗余模式下的平均故障检测率，由于时间冗余方法直接比较多次复算后的指令计算结果，其故障检测为100%；$d_g$表示粒度为$g$的信息冗余模式下的平均故障检测率；$s_g$为选取的奇偶校验粒度的集和；$\mathrm{card}(s_g)$为集合$s_g$中元素的个数。

在仅支持信息冗余故障注入检测方法的电路架构下，$\alpha_i$为1；在仅支持时间冗余故障注入检测方法的电路架构下，$\alpha_i$为0；相比于信息冗余模式，时间冗余模式的故障检测率更高。对于模式可配置故障注入检测方法，$\alpha_i$在从1减小到0的过程中，电路的故障注入检测能力整体上逐渐增强。因此，为评估模式可配置方法的平均故障注入检测能力，在支持该方法的电路架构下，取$\alpha_i$为0.5。综合字校验、半字校验和字节校验3种常用的奇偶校验粒度，根据图13所示的模拟故障注入实验结果，模式可配置方法的平均故障检测率为86.67%，相较于时间冗余方法的故障检测率损失为13.33%，信息冗余方法的平均故障检测率为73.33%，模式可配置方法与之相比提高了13.34%。

### 4.3 时间开销评估

针对PIN码验证程序（VerifyPIN）中的字节比较函数，本文将字节比较函数进行比较运算时对应的7条算术逻辑运算指令修改为支持故障注入检测的自定义算术逻辑运算指令，并在函数首行添加MREPLY寄存器配置指令。基于上述实验设置，本文分析了支持信息冗余故障注入检测方法、时间冗余故障注入检测方法和模式可配置故障注入检测方法的RISC-V处理器执行该函数中指令的时间开销。表1列出了采用不同的故障注入检测方法时，字节比较函数在4组与实际PIN码不一致的用户PIN码（User PIN）函数输入下的指令执行时钟周期数。

本文将基于时间冗余和信息冗余的故障注入检测方法总时间开销$T$定义为

$$\begin{cases} T = \alpha_i c_i + (1-\alpha_i) c_t \\ c_t = \dfrac{\sum_{r \in s_r} \sum_{p \in s_p} c_{rp}}{\mathrm{card}(s_r) \cdot \mathrm{card}(s_p)} \end{cases} \tag{9}$$

式中：$T$为时间开销，单位为时钟周期；$c_i$为信息冗余模式下的平均时间开销；$c_t$为时间冗余模式下的平均时间开销；$c_{rp}$表示复算次数为$r-1$、测试程序参数为$p$时的时间开销；$s_r$为选取的指令复算参数$r$的集和；$\mathrm{card}(s_r)$为集合元素个数；$s_p$为测试程序参数$p$的集合；$\mathrm{card}(s_p)$为集合元素个数。

**表1 不同故障注入检测方法时间开销**

**Table 1 Time overhead for different fault injection detection methods**

| 方法 | 时间开销/时钟周期数 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | User PIN 1 | User PIN 2 | User PIN 3 | User PIN 4 |
| 信息冗余 | 83 | 128 | 179 | 236 |
| 时间冗余（复算单次） | 82 | 142 | 199 | 247 |
| 时间冗余（复算双次） | 96 | 159 | 228 | 300 |
| 模式可配置（MREPLY = 01） | 78 | 135 | 186 | 235 |
| 模式可配置（MREPLY = 10） | 86 | 143 | 203 | 263 |
| 模式可配置（MREPLY = 11） | 82 | 145 | 211 | 277 |

由于信息冗余模式时间成本低于时间冗余模式，模式可配置故障注入检测方法中，$\alpha_i$取值越大，引入的时间开销就越低。与4.2节类似，将$\alpha_i$=0.5时的电路时间开销作为本文方法的平均时间开销进行评估。在写入MREPLY寄存器的指令复算参数$r \in \{10,11\}$及4组用户PIN码（User PIN）作为测试程序参数$p$的前提下，根据表1列出的实验结果，模式可配置方法的平均时间开销为167个时钟周期，时间冗余方法的平均时间开销为182个时钟周期，信息冗余方法的平均时间开销为157个时钟周期。相对时间冗余方法，模式可配置故障注入检测方法减少了8.24%的平均时间开销。

### 4.4 硬件资源开销评估

表2列出了RISC-V处理器微架构分别以信息冗余故障注入检测方法、分别支持单次及双次复算的时间冗余故障注入检测方法和模式可配置故障注入检测方法在FPGA上实现后得到的硬件电路资源开销，以及扩展前后的资源开销对比。

根据表2所示资源开销，在3种粒度参数的配

**表2 不同故障注入检测方法资源开销**

**Table 2 Resource overhead for different fault injection detection methods**

| 方法 | LUT | FF | 数字信号处理器 | 总可编程逻辑资源 |
|---|---|---|---|---|
| zero-riscy处理器 | 3 250 | 1930 | 1 | 5 180 |
| 信息冗余（$g$ = 32） | 4 004 | 2038 | 1 | 6 042 |
| 信息冗余（$g$ = 16） | 4 098 | 2 065 | 1 | 6 163 |
| 信息冗余（$g$ = 8） | 4 035 | 2 138 | 1 | 6 173 |
| 时间冗余（复算单次） | 3 598 | 2033 | 1 | 5 631 |
| 时间冗余（复算双次） | 3 530 | 2034 | 1 | 5 564 |
| 模式可配置（$g$ = 32） | 4 261 | 2 080 | 1 | 6 341 |
| 模式可配置（$g$ = 16） | 4 313 | 2 112 | 1 | 6 425 |
| 模式可配置（$g$ = 8） | 4 246 | 2 175 | 1 | 6 421 |

置下, 模式可配置故障注入检测方法相较于原 RISC-V 处理器核引入了 23.47% 的平均可编程逻辑资源(查找表(look up table, LUT)、触发器(flip-flop, FF))开销。此外, 模式可配置方法相较仅支持时间冗余故障注入检测方法的硬件架构引入了 14.26% 的平均资源开销, 相较于信息冗余检测方法仅引入了 4.4% 的平均资源开销。

综上可见, 模式可配置故障注入检测方法通过软硬结合的故障注入检测模式配置方法, 实现硬件架构对信息冗余和时间冗余 2 种故障注入检测模式的兼容, 充分提高故障检测单元的灵活性, 进而实现了检测率和时间开销的折中, 动态适用于不同的安全性和性能的需求。

## 5　结　论

1) 针对 PIN 码验证程序中的字节比较函数, 在故障注入目标指令为函数中单条加法指令的前提下, 相对于单一的信息冗余故障注入检测方法, 该方法在平均故障检测率提高 13.34% 的同时, 仅引入了 4.4% 的资源开销。

2) 针对 PIN 码验证程序中的字节比较函数, 相对于单一时间冗余故障注入检测方法, 该方法应用在字节比较函数对应的代码片段时, 减少了 8.24% 的平均时间开销。

3) 相对于只支持单一冗余措施的电路架构, 模式可配置故障注入检测方法扩展后的 RISC-V 处理器可以应用在安全性和性能需求不同的场景下。根据需求调整 $\alpha_i$ 可以实现安全性和时间开销间的权衡。

### 参考文献 (References)


[1] 王省欣, 胡伟, 谭静, 等. AES 相关故障注入攻击[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(4): 192-199.
WANG X X, HU W, TAN J, et al. Correlation fault attack on AES [J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(4): 192-199(in Chinese).

[2] TROUCHKINE T, BUKASA S K, ESCOUTELOUP M, et al. Electromagnetic fault injection against a complex CPU, toward new micro-architectural fault models[J]. Journal of Cryptographic Engineering, 2021, 11(4): 353-367.

[3] 姜会龙, 朱翔, 李悦, 等. 基于微控制器的 AES 激光注入攻击研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(5): 1357-1364.
JIANG H L, ZHU X, LI Y, et al. Research on laser injection attack for AES based on micro-controller unit[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(5): 1357-1364(in Chinese).

[4] VASSELLE A, THIEBEAULD H, MAOUHOUB Q, et al. Laser-induced fault injection on smartphone bypassing the secure boot [C]//Proceedings of the Workshop on Fault Diagnosis and Tolerance in Cryptography. Piscataway: IEEE Press, 2017: 41-48.

[5] NASHIMOTO S, SUZUKI D, UENO R, et al. Bypassing isolated execution on RISC-V using side-channel-assisted fault-injection and its countermeasure[J]. IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems, 2021, 2022(1): 28-68.

[6] YUCE B, GHALATY N F, DESHPANDE C, et al. FAME: Fault-attack aware microprocessor extensions for hardware fault detection and software fault response[C]//Proceedings of the Hardware and Architectural Support for Security and Privacy. New York: ACM, 2016: 1-8.

[7] BREIER J, BHASIN S, HE W. An electromagnetic fault injection sensor using Hogge phase-detector[C]//Proceedings of the 18th International Symposium on Quality Electronic Design. Piscataway: IEEE Press, 2017: 307-312.

[8] DESHPANDE C, YUCE B, GHALATY N F, et al. A configurable and lightweight timing monitor for fault attack detection[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Piscataway: IEEE Press, 2016: 461-466.

[9] 王沛晶, 刘强. 一种混合粒度奇偶校验故障注入检测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(4): 821-826.
WANG P J, LIU Q. Mixed-grain parity-code-based fault detection method against fault injection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(4): 821-826(in Chinese).

[10] MANSSOUR N A, LAPÔTRE V, GOGNIAT G, et al. Processor extensions for hardware instruction replay against fault injection attacks[C]//Proceedings of the 25th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2022: 26-31.

[11] 邓丁, 郭阳. 面向 RISC-V 内核的标记指令复算与纠错机制的设计[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(6): 90-97.
DENG D, GUO Y. Recomputation and correction mechanism design for tagged instructions of the RISC-V core[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(6): 90-97(in Chinese).

[12] WATERMAN A S. Design of the RISC-V instruction set architecture[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2016.

[13] PARHAMI B. Computer arithmetic: Algorithms and hardware designs[M]. New York: Oxford University Press, 2000.

[14] DESHPANDE C, YUCE B, NAZHANDALI L, et al. Employing dual-complementary flip-flops to detect EMFI attacks[C]//Proceedings of the Asian Hardware Oriented Security and Trust Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2017: 109-114.

[15] NICOLAIDIS M. Carry checking/parity prediction adders and ALUs [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2003, 11(1): 121-128.

[16] NAHIYAN A, FARAHMANDI F, MISHRA P, et al. Security-aware FSM design flow for identifying and mitigating vulnerabilities to fault attacks[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2019, 38(6): 1003-1016.

[17] DUREUIL L, PETIOT G, POTET M L, et al. FISSC: A fault injection and simulation secure collection[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security. Berlin: Springer, 2016: 3-11.

# Configurable fault injection detection method for RISC-V based on instruction extension

LIU Qiang[1, 2, *], LI Yike[1, 2]

(1. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronic Technology, Tianjin 300072, China)

Abstract: For data flow errors caused by fault attacks during processor operation, this paper designed a configurable fault injection detection method based on RISC-V processor microarchitecture. Based on the RISC-V instruction set architecture, this method took advantage of its expandability to add custom arithmetic logic instructions with mode configuration and control and state registers and realized the arithmetic logic operation and fault detection simultaneously by the combination of hardware and software. At the software level, configuration information was written to the customized control and state register by register access instructions to configure the fault detection modes of the customized instructions, including information and temporal redundancy modes and their parameters. At the hardware level, a RISC-V processor microarchitecture supporting configurable fault injection detection was implemented. Finally, the simulator command was used to simulate the fault injection, and the functional correctness and fault injection detection capability of the extended RISC-V processor were verified. The experimental results show that compared to the single information redundancy method, when the information redundancy mode and temporal redundancy mode are applied with the same frequency, the proposed configurable method improves the average fault detection rate by 13.34% with an average resource overhead of 4.4%. Compared to the single temporal redundancy method, it reduces the average time overhead by 8.24% with a 13.33% decrease in fault detection rate. The proposed configurable method can achieve a compromise between fault detection rate and time overhead and be applied in application scenarios with different security and performance requirements.

Keywords: hardware security; countermeasure for fault injection attacks; fault injection detection; RISC-V processor; instruction extension

**Received**: 2022-12-15; **Accepted**: 2023-02-24; **Published Online**: 2023-03-09 14:22

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230309.0928.001

**Foundation item**: National Natural Science Foundation of China (61974102)

* **Corresponding author**. E-mail: qiangliu@tju.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0954

# 飞机轮胎-湿滑道面相互作用SPH算法仿真分析

蔡靖，黄钰岱，李琪，李岳*，戴轩
(中国民航大学 交通科学与工程学院，天津 300300)

**摘 要**：针对飞机在湿滑道面上的滑水问题，采用光滑粒子流体动力学(SPH)算法建立了飞机轮胎-湿滑道面有限元模型，与流固耦合算法(CEL)模型进行对比，显示了SPH算法的优越性，进而分析了不同轮胎速度及水膜厚度对轮胎与湿滑道面相互作用的影响规律。结果表明，SPH模型得到的临界滑水速度与CEL模型结果相差不超过5%；舰首波、侧向羽流等流体特征更为明显立体；平均运算效率较CEL模型提高36.5%。利用SPH模型分析可得，道面支撑力随轮胎速度增加呈先平缓下降再急速下降的趋势，水膜厚度为3～13 mm时，急速下降段所在轮胎速度区间为170～260 km/h，基本处于A320飞机的着陆滑跑速度范围内，应增强对飞机滑水事故风险的防范；位移阻力随着轮胎速度增加呈先增大后减小的趋势，且在轮胎达到临界滑水速度时取得最大值，进而提出利用位移阻力最大值确定临界滑水速度的方法；侧向羽流最大溅水高度随轮胎速度增加呈先升高后降低的趋势，在接近临界滑水速度时达到最大值；舰首波最大溅水高度低于侧向羽流最大溅水高度，且随轮胎速度增加而降低，达到临界滑水速度时舰首波接近消失，2种溅水特征的最大溅水高度值均低于A320飞机发动机的最小离地高度0.680 m，不会对发动机产生影响。

**关 键 词**：交通运输工程；轮胎-道面相互作用；光滑粒子流体动力学算法；临界滑水速度；道面支撑力；位移阻力；溅水高度
**中图分类号**：U463.341
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0053-10

近年来，极端降雨天气频发，由此造成的道面污染严重威胁飞机运行安全。当飞机高速驶过积水区域时，作为唯一与道面接触的飞机轮胎在动水压力的作用下所受道面支撑力急剧下降，产生“漂”在水面的滑水现象，飞机的可操作性降低，极易发生冲偏出跑道的事故。另外，飞机高速驶过积水区域形成的溅水也会对发动机和机身产生影响。因此，有必要对轮胎与湿滑道面相互作用问题进行深入研究。

目前，国内外针对轮胎与湿滑道面相互作用的研究比较丰富。Cho等[1]基于流固耦合算法(coupled-Eulerian Lagrangian, CEL)算法建立了三维轮胎滑水模型，分析了不同速度下轮胎受到的动水压力和道面接触力，揭示了轮胎的滑水机理；朱林培[2]通过LS-DYNA软件建立了基于CEL算法的汽车轮胎滑水模型，分析了不同花纹形式对轮胎滑水性能的影响；Ding和Wang[3]通过ABAQUS软件中的CEL算法研究了不同卡车轮胎构型的滑水风险，分析了水膜厚度、胎压和行驶状态等因素对滑水速度的影响规律；Tang等[4]通过CT扫描获得道面表面纹理和内部多孔微观结构，建立了基于CEL算法的轮胎-水膜-道面有限元模型，真实模拟了轮胎与湿滑道面接触时水的流动及渗入过程，分析了降雨强度对透水沥青混凝土道面抗滑性能的影响；

**收稿日期**：2022-11-29；**录用日期**：2022-12-30；**网络出版时间**：2023-01-11 15:06
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230111.0932.001
**基金项目**：国家自然科学基金(51508559)；中央高校基本科研业务费专项资金(3122019103,3122022043)；天津市自然科学基金(21JCQNJC00850)
*通信作者. E-mail：leoliyue@163.com

*引用格式：蔡靖，黄钰岱，李琪，等. 飞机轮胎-湿滑道面相互作用SPH算法仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：53-62. CAI J，HUANG Y D，LI Q，et al. Simulation and analysis of SPH algorithm for interaction of aircraft tire-wet pavement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：53-62 (in Chinese).*

Zheng 等[5] 基于 CEL 算法研究了干燥和湿滑条件下轮胎与不同路面之间的附着特性，分析了滑移率、速度及路面平均纹理深度等因素对附着系数的影响规律；蔡靖等[6] 基于 CEL 算法建立了滚动轮胎冲击静流场模型，与动流场冲击原地转动轮胎模型的仿真结果进行对比，考虑实际道面积水状态对飞机临界滑水速度的影响；Liu 等[7-8] 基于 CEL 算法建立了轮胎滑水有限元模型，并结合摩擦能量耗散原理和车辆动力学分析了水膜厚度、胎面花纹复杂程度和胎压等因素对车辆制动性能的影响；Cho 等[9] 通过 CEL 算法预估了车辆在湿路面上的制动距离，对车辆轮胎在干、湿路面上制动能力进行了比较；Zhu 等[10-11] 基于不同路面真实纹理，利用 CEL 算法建立了轮胎-水膜-跑道有限元模型，研究了跑道纹理、飞机速度、滑移率及水膜厚度等对轮胎滑水行为的影响规律，并进一步分析了表面纹理劣化条件下道面抗滑性能的变化规律。

综上可知，近年来针对轮胎与湿滑道面相互作用问题仿真分析的主流算法以 CEL 算法为主，但由于 CEL 算法中水膜模型采用欧拉网格建立，存在计算效率低、对流体自由表面描述不精确、无法反映溅水高度等缺点，有必要探究新算法在轮胎-湿滑道面相互作用中的应用。光滑粒子流体动力学（smoothed particle hydrodynamics, SPH）算法是近年来兴起的一类无网格计算力学算法，相比于传统的网格算法，具有较强的自适应性，能够高效自然地处理大变形问题，并且可以精确地追踪流体自由表面的位置，目前已经广泛应用于流固耦合分析中。例如，Zhao 等[12] 基于 SPH-FEM 耦合算法分析了大型液化天然气储罐在不同液体深度下的动力响应，得到了较为准确的模拟结果，为地震区中大型液体储液罐分析提供了一种可行的方法；Zehetner 等[13] 通过 SPH 算法与 CEL 算法分别模拟了可变形的充水容器与刚性壁之间的碰撞，并对 2 种算法进行比较，结果表明，2 种算法在表现流体的位移场及压力场、容器的最大应力及接触应力的时间响应方面有较好的一致性，且 SPH 算法运算所用时间明显少于 CEL 算法；Keller 等[14] 基于 SPH 算法模拟了油束冲击旋转齿轮的过程，结果表明，SPH 算法可以较好地模拟油射流的撞击、分解及流动等特征行为，且与传统流体体积（volume of fluid, VOF）算法相比，其计算效率明显占优。

可见，SPH 算法在流固耦合问题研究上具有巨大的优势与潜力，而在飞机轮胎-湿滑道面相互作用方面相关应用和研究较少，且流体飞溅高度也是湿滑道面适航性评价的重要指标。因此，本文基于 SPH 算法建立了飞机轮胎-湿滑道面有限元模型，对二者进行相互作用分析，并与同时建立的 CEL 模型分析过程及结果进行对比，显示了 SPH 算法的优越性；同时，进一步应用 SPH 模型分析了不同轮胎速度及水膜厚度条件下，飞机轮胎与湿滑道面相互作用力及溅水高度变化规律，获得不同条件下的临界滑水速度及溅水高度值，为保证飞机在湿滑道面上安全运行提供参考依据。

## 1 SPH 算法基本原理

### 1.1 光滑核函数

SPH 算法是一种无网格化的纯拉格朗日流体力学算法，其本质是将流体计算域离散为一组携带物理力学属性的粒子。设定计算域中任一粒子 $i$ 只与以 $\kappa h$ 为半径的圆形影响区域内的其他粒子 $j$ 发生相互作用，相互作用大小与粒子间距离 $r_{ij}$ 成反比，如图 1 所示。确定该影响范围的函数为光滑核函数 $W_{ij}\left(\frac{r_i-r_j}{h},h\right)$，$\kappa$ 为光滑因子，是与光滑核函数有关的常数，$h$ 为核函数的光滑长度，$r_i$ 和 $r_j$ 分别为粒子 $i$ 与粒子 $j$ 的空间位置，$\frac{r_i-r_j}{h}$ 为粒子 $i$、粒子 $j$ 间的相对距离。

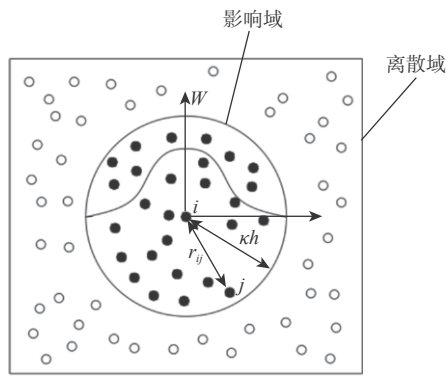



图 1 光滑核函数

Fig. 1 Smoothing kernel function

光滑核函数是 SPH 算法的关键参数，决定粒子影响域的范围，而且是粒子物理力学性质的最佳体现。在计算求解过程中，粒子间发生相互作用，粒子 $i$ 的物理力学参量表示为

$$A(r_i)=\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}A(r_j)W_{ij}\left(\frac{r_i-r_j}{h},h\right) \tag{1}$$

式中：$N$ 为粒子 $i$ 的影响区域内其他粒子 $j$ 的总数；$A(r_i)$ 和 $A(r_j)$ 分别为粒子 $i$ 和粒子 $j$ 的物理力学参数；$m_j$ 为粒子 $j$ 的质量；$\rho_j$ 为粒子 $j$ 的密度。

依据文献 [15] 并进行对比，选用三次样条型函数作为本文计算模型中的光滑核函数，表达式为

$$W_{ij}(x,h)=\alpha_{\mathrm{d}}\begin{cases}\dfrac{1}{2}x^3-x^2+\dfrac{2}{3} & 0\leqslant x\leqslant 1\\ \dfrac{1}{6}(2-x)^3 & 1<x\leqslant 2\\ 0 & x>2\end{cases}\tag{2}$$

式中: $x=|r_i-r_j|/h$为粒子间相对距离; $\alpha_{\mathrm{d}}$为光滑长度$h$的函数, 在不同维数下取值为

$$\alpha_{\mathrm{d}}=\begin{cases}\dfrac{1}{h} & \text{一维}\\ \dfrac{15}{7\pi h^2} & \text{二维}\\ \dfrac{3}{2\pi h^3} & \text{三维}\end{cases}\tag{3}$$

### 1.2　离散化光滑粒子流体动力学的运动方程

模型的流域计算中考虑流体的黏性与体力作用, 采用密度随时间变化的 Navier-Stokes 方程控制流体运动[16]:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=-\frac{\nabla\boldsymbol{P}}{\rho}+\mu\cdot\nabla^2\boldsymbol{v}+\boldsymbol{g}\tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}=-\rho\cdot\nabla\boldsymbol{v}\tag{5}$$

式中: $\boldsymbol{v}$为流体的速度场, m/s; $\rho$为流体的密度, kg/m$^3$; $\boldsymbol{P}$为静水压强, Pa; $\mu$为流体运动黏度系数, m$^2$/s; $\boldsymbol{g}$为重力加速度, m/s$^2$。

按照以上选用的光滑核函数和 SPH 算法的基本假设, 将方程(4)和方程(5)进行粒子化离散后, 形成的离散流域中离散粒子的流动控制方程为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_i}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{N}m_j\left(\frac{\boldsymbol{p}_i}{\rho_i^2}+\frac{\boldsymbol{p}_j}{\rho_j^2}\right)\cdot\nabla_i W_{ij}+\mu\cdot\nabla^2\boldsymbol{v}_i+\boldsymbol{g}\tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}\rho_i}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{N}m_j(\boldsymbol{v}_i-\boldsymbol{v}_j)\cdot\nabla_i W_{ij}\tag{7}$$

式中: $\boldsymbol{p}_i$和$\boldsymbol{p}_j$分别为作用在粒子$i$和粒子$j$上的流体压强; $\rho_i$和$\rho_j$分别为粒子$i$和粒子$j$的密度; $\nabla_i W_{ij}$表示粒子$i$位置处的核函数梯度; $\boldsymbol{v}_i-\boldsymbol{v}_j$为粒子$i$与粒子$j$的相对速度。

方程(6)和方程(7)为 SPH 算法的流体动量守恒和质量守恒方程。

## 2　基于 SPH 算法的轮胎-湿滑道面有限元模型

轮胎-湿滑道面有限元模型由轮胎、积水和道面 3 个子模型构成。模型中, 采用滚动前进的轮胎冲击静流场的方式实现飞机轮胎与湿滑道面之间的相互作用。

### 2.1　轮胎模型

轮胎是飞机发生滑水现象的主要部件, 为使结果更具有代表性, 选用目前主流机型空客 A320 的主起落架轮胎进行建模分析, 其型号为 46×17R20, 主要参数如表 1 所示。

根据轮胎的实际几何结构和材料参数, 将轮胎内帘线和轮胎内胎面等复杂的内部结构均等效为各向同性的橡胶材料, 并采用 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型[17]进行模拟, 轮毂部分则使用钢材料进行表征并与胎面刚性耦合, 轮胎模型整体使用 C3D8R 网格单元类型在径向和环向进行均匀划分。计算时, 对轮胎内胎面进行充气加压, 并在轮胎转动中心处施加等效竖向位移以模拟轮胎所受到的单轮轴载。同时, 为实现轮胎自由滚动状态, 约束轮胎侧向的位移和滚转, 在其转动中心处施加线速度和与之匹配的转动角速度, 控制滑移率小于 10%。

**表 1　轮胎物理参数**

**Table 1　Physical parameters of tire**

| 直径/cm | 内径/cm | 宽度/cm | 沟槽宽度/mm | 沟槽深度/mm | 胎压/kPa | 单轮轴载/kN |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 116.8 | 50.8 | 43.2 | 10.0 | 9.0 | 1 140.0 | 154.5 |

### 2.2　道面模型与积水模型

本文研究的道面结构为刚性道面, 由于道面内部结构对研究没有影响, 道面模型采用壳单元建立并定义为刚体, 同时, 为避免轮胎在滚动过程中沿长度方向脱离道面, 保证相互作用过程稳定, 多次试算后, 道面尺寸取值为 6.0 m×2.5 m。

根据《航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定》[18]中“当跑道表面的积水深度超过 13 mm 时禁止飞机起降”的要求, 积水模型的水膜厚度取值为 3～13 mm, 流域的平面尺寸经多次试算取值为 2.5 m×2.5 m。积水定义为不可压缩流体, 参数如表 2 所示[6]。表中, $\rho_{\mathrm{w}}$为水的密度, $c_0$为声音在水中的传播速度, $\eta$为水的动力黏度, $s$ 为表征水流质点速度的无量纲参数, $\Gamma_0$为表征水体压力的无量纲参数。

积水模型采用 SPH 算法建立。将流体应用 1.1 节和 1.2 节中的原理进行离散, 在运算中将网格单元(C3D8R)转换为 SPH 粒子(PC3D)。转化过程如图 2 所示。

**表 2　积水材料参数[6]**

**Table 2　Parameters of accumulated water[6]**

| $\rho_{\mathrm{w}}$/(kg·m$^{-3}$) | $c_0$/(m·s$^{-1}$) | $s$ | $\Gamma_0$ | $\eta$/(Pa·s) |
|---|---|---|---|---|
| 1 000 | 1 480 | 0 | 0 | $1.79\times10^{-3}$ |

### 2.3　边界条件及接触设定

由于 SPH 粒子本身并不包含为施加约束条件提供“支撑点”的节点或平面, 为保证水膜与轮胎的稳定接触, 同时避免流体与轮胎相互作用过程中溢出, 本文通过建立“边界水槽”的方式来对流体

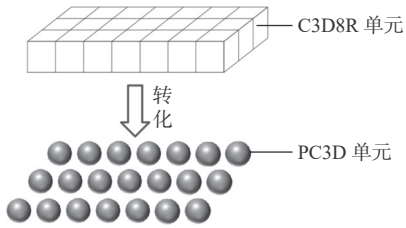



图 2 SPH 粒子转化示意图

Fig. 2 Conversion of SPH particles

进行约束。边界水槽由四面围挡和与道面尺寸大小相同的底面等 5 部分组成，均采用壳单元建立并定义为刚体。

另外，为避免边界水槽对轮胎运动的影响，对模型中的接触条件进行设定，其中，边界水槽被设定为只与水膜发生接触作用，可以保证轮胎在驶过水膜时，运动状态不受边界水槽干扰。进一步，为验证边界水槽的设置对流体特征不产生干扰，设置轮胎最大速度为 250 km/h，水膜厚度分别为 3,8,13 mm 时模型仿真所得轮胎与湿滑道面相互作用时流体的状态，如图 3 所示。可以看出，轮胎在最大速度下，不同水膜厚度时流域中流体边缘均在边界水槽范围内，其流动特征不受边界水槽的影响，说明边界水槽设置合理。因此，最终建立的轮胎-湿滑道面有限元模型如图 4 所示。

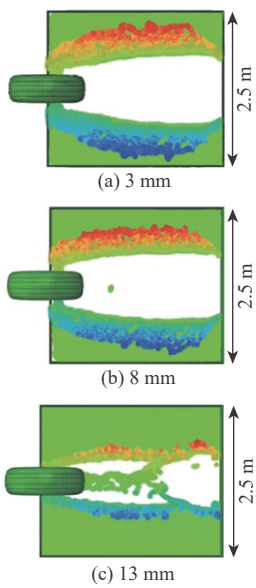



图 3 不同水膜厚度下流体特征

Fig. 3 Characteristics of liquid under different water film thicknesses

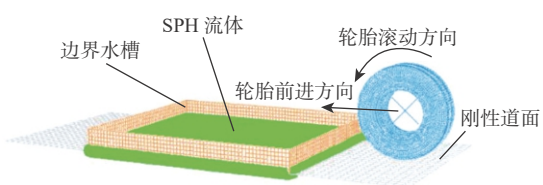



图 4 轮胎-湿滑道面有限元模型

Fig. 4 FEM of tire-wet pavement

## 3 模型可靠性验证及对比分析

为对比分析 SPH 模型与 CEL 模型，本文建立了同样分析工况的 CEL 模型，通过比较 2 种流固耦合模型在计算效率及接触特征等方面的特点，对 SPH 模型的优势进行分析。文献 [19] 中，基于动量定理求得飞机轮胎发生动力滑水时的临界滑水速度理论计算式，可用于对 SPH 算法模型计算结果的准确性进行验证，如下：

$$V_p = 3.6\sqrt{\frac{G}{\rho b\sqrt{2RH-H^2}}} \tag{8}$$

式中：$V_p$为临界滑水速度，km/h；$G$为轮胎所受起落架的荷载，N；$\rho$为水流密度，kg/m$^3$；$b$为轮胎胎面宽度，m；$R$为轮胎半径，m；$H$为水膜厚度，m。

### 3.1 模型可靠性验证

为验证基于 SPH 算法的飞机轮胎-湿滑道面相互作用模型的可靠性，选取 3,5,7.66,10,13 mm 这 5 种水膜厚度工况进行模拟，以轮胎在相应水膜厚度工况下的道面支撑力小于单轮轴载 10% 时的速度平均值作为临界滑水速度值，并与临界滑水速度理论公式的计算结果及 CEL 模型得到的数据进行对比，计算临界滑水速度理论值与 SPH 算法模拟值的相对误差，结果如表 3 所示[19]。

由表 3 可知，SPH 模型得到的临界滑水速度值与 CEL 模型较为接近，最大差值仅为 9.8 km/h。进一步比较 SPH 算法计算值与理论公式的计算结果，可以发现两者十分接近，最大误差不超过 7.0%，最小误差仅为 0.2%。因此，可以认为基于 SPH 算法建立的轮胎-湿滑道面有限元模型有足够的可靠性，其计算精度符合要求且可以与 CEL 算法媲美。

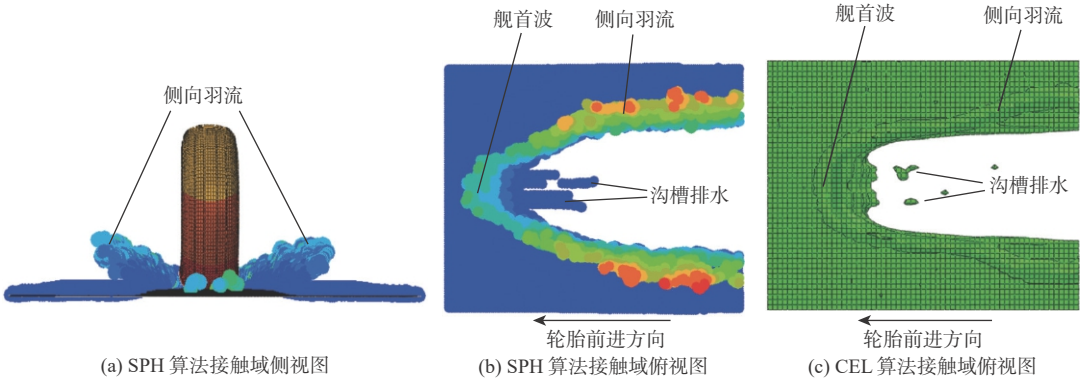
表 3 不同水膜厚度下临界滑水速度比较[19]

Table 3 Comparison of critical hydroplaning speeds under different water film thicknesses[19]

| 水膜厚度/mm | 临界滑水速度/(km·h$^{-1}$) | | | 理论值与SPH算法模拟值相对误差/% |
|---|---|---|---|---|
| | 理论值 | CEL算法 | SPH算法 | |
| 3 | 281.2 | 253.0 | 262.8 | 6.5 |
| 5 | 247.6 | 241.0 | 248.4 | 0.3 |
| 7.66 | 222.7 | 214.0 | 223.2 | 0.2 |
| 10 | 208.4 | 205.0 | 209.0 | 0.3 |
| 13 | 195.3 | 193.0 | 190.8 | 2.3 |

### 3.2 流体形态表达优势

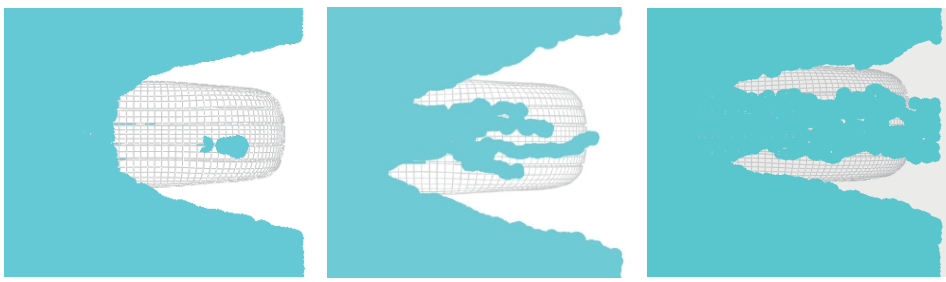
基于 SPH 算法和 CEL 算法的有限元模型，以 10 mm 水膜厚度工况为例，得到不同速度下轮胎与积水道面的接触特征，如图 5 和图 6 所示。由图 5(a) 可知，SPH 模型计算结果的流体形态表征更为全面




(a) SPH 算法接触域侧视图　(b) SPH 算法接触域俯视图　(c) CEL 算法接触域俯视图

图 5　有限元模型接触特征

Fig. 5　Contact feature of FEM



(a) 轮胎速度为 180 km/h　(b) 轮胎速度为 198 km/h　(c) 轮胎速度为 209 km/h

图 6　SPH 模型轮胎与积水道面接触特征

Fig. 6　Contact feature between tire and wet pavement of SPH model

和立体化, 水膜在轮胎的冲击下形成了两侧基本对称的侧向羽流; 图 5(b)中, 水膜被轮胎前端挤压形成了舰首波, 并且部分水流经轮胎沟槽排出, 与实际的接触特征相符; 而图 5(c)中, CEL 算法结果虽然也可以表现轮胎沟槽的排水过程, 但流体被限制在设定的空气层中, 无法体现其自由飞溅效果, 同时, 舰首波、侧向羽流等轮胎与积水道面接触过程中的具体特征也无法得到充分体现。图 6 从水膜底部向上观察, 更加直观地体现了随着轮胎速度的增大, 水膜逐渐侵入轮胎与道面的接触区域, 导致轮胎与道面的接触部分越来越小, 进而出现轮胎被水膜“抬起”的现象。

### 3.3　计算效率分析

对于一个合理的模型, 计算效率是重要指标, 较高的计算效率可以将模型的运算时间控制在合理范围内, 显著提高工作效率。

为比较 2 种建模算法的计算效率, 以 10 mm 水膜厚度工况为例, 2 类模型中部件尺寸大小、参数设置及网格划分密度均一致。分别提取 2 种模型在相同轮胎速度工况下的运算时间, 结果如表 4 所示。可知, 随着轮胎速度的增大, 2 种算法的运算时间都呈现减小的趋势。在相同轮胎速度的工况下, SPH 算法的运算时间均少于 CEL 算法, SPH 模型单工况运算效率提升率均在 32% 以上, 平均每种工况节省计算时间约为 107 min。

模型运算过程中涉及大量工况, 分别将每种水膜厚度下所要计算工况数量进行汇总并预计相应节省时间, 如表 5 所示。可知, 与 CEL 算法相比, SPH 算法整体预计节省时间超过 3 800 min, 近 3 d 时间, 极大提高了模型运算效率。因此, 在计算工况较多的情况下, 显然 SPH 算法更为高效。

**表 4　不同轮胎速度工况下 2 种算法运算时间比较**

**Table 4　Comparison between operation time under different tire speeds by two algorithms**

| 轮胎速度/(km·h$^{-1}$) | 运算时间/min | | 提升率/% |
|---|---|---|---|
| | CEL算法 | SPH算法 | |
| 144 | 373 | 245 | 34.3 |
| 162 | 332 | 223 | 32.8 |
| 180 | 293 | 182 | 37.9 |
| 198 | 251 | 153 | 39.0 |
| 209 | 236 | 145 | 38.6 |

**表 5　整体预计节省时间**

**Table 5　Expected time savings in all conditions**

| 水膜厚度/mm | 工况数量 | 预计节省时间/min |
|---|---|---|
| 3 | 10 | 1 070 |
| 5 | 7 | 749 |
| 7.66 | 8 | 856 |
| 10 | 6 | 642 |
| 13 | 5 | 535 |

# 4 基于SPH算法的轮胎与湿滑道面相互作用机理分析

## 4.1 轮胎所受道面支撑力

飞机实际运行过程中，机翼受到气流给予的向上的升力作用，将对机轮轴载产生影响，特别是在湿滑道面上，机轮轴载在扣除飞机升力后，主要由水膜抬升力（动水压力）、道面支撑力承担。参考文献[19]可求得机轮轴载在不同轮胎速度下的变化曲线，如图7所示。轮胎所受道面支撑力反映了轮胎的接地能力，其变化情况直接影响飞机制动性和方向控制性。为探究轮胎所受道面支撑力在升力与水膜厚度共同作用下随速度的变化趋势，在有限元模型中对轮胎施加如图7所示的轴载，分别提取3,5,7.66,10,13 mm这5种水膜厚度下轮胎以不同速度驶过积水区域且达到稳定状态时的道面支撑力，如图8所示。

由图8可知，轮胎所受的道面支撑力整体呈现平缓下降和急速下降段2个阶段。当轮胎速度在170 km/h以下时，道面支撑力的下降趋势较为平缓；水膜厚度变化对其影响较小。当轮胎速度达到

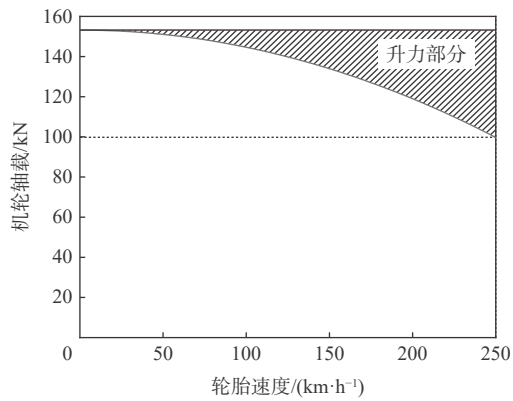



图7 不同轮胎速度下的机轮轴载

Fig. 7 Wheel axle load at different tire speeds

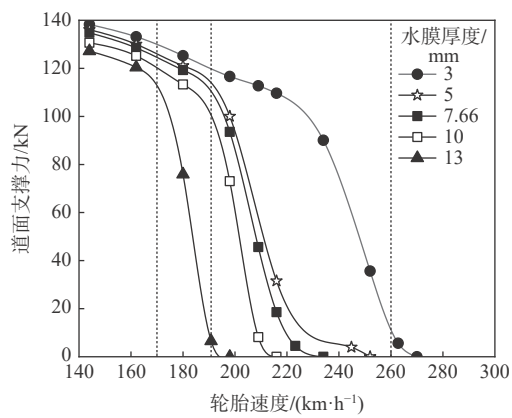



图8 道面支撑力曲线

Fig. 8 Curves of pavement supporting forces

170 km/h以上时，道面支撑力呈现急速下降趋势，受水膜厚度影响愈发显著。此时，飞机的操控难度会明显增加，要格外关注其所在速度区间。水膜厚度较小的工况下（如3 mm），道面支撑力在220～260 km/h的轮胎速度区间内下降较快，随着水膜厚度的增大，急速下降段所在的轮胎速度区间发生明显左移，当水膜厚度为13 mm时，其轮胎速度区间变为170～200 km/h。整体来看，湿滑道面上支撑力急速下降段所在轮胎速度区间基本位于A320飞机的着陆滑跑速度范围[20]（90～250 km/h）内，飞机滑水事故发生风险较大。速度为190 km/h时，3 mm水膜厚度下的道面支撑力约为120 kN，而13 mm水膜厚度下，道面支撑力已下降到6.5 kN，小于单轮轴载的10%[21]，此时轮胎已达到滑水状态。

## 4.2 轮胎所受位移阻力

位移阻力是航空器适航审定的指标之一，轮胎在积水道面上所受位移阻力会影响飞机的起降性能，进而干扰飞机的运行安全。因此，分别提取上述5种工况下轮胎以不同速度驶过积水区域且达到稳定状态时所受的位移阻力，如图9所示。

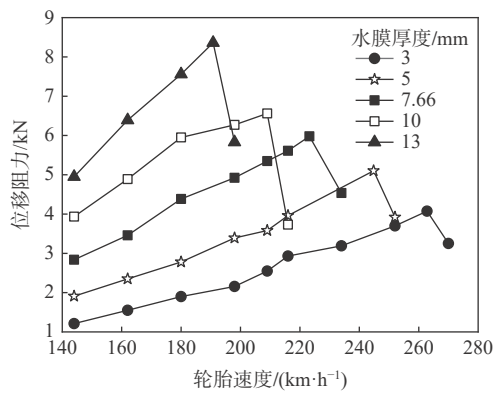



图9 位移阻力曲线

Fig. 9 Curves of displacement resistance

由图9可知，轮胎所受的位移阻力随着速度的增加总体呈现先增大后减小的趋势，在达到某一速度时，位移阻力取得最大值，最大位移阻力值取决于水膜厚度，当水膜厚度为3 mm时，轮胎的最大位移阻力值为4.1 kN，而随着水膜厚度增大，最大位移阻力值也逐渐增大，13 mm时最大位移阻力值达到8.4 kN，增加了1倍。结合图8得出，最大位移阻力对应的轮胎速度下道面支撑力已小于单轮轴载的10%，此时认为轮胎已达到滑水状态[21]，对应的轮胎速度可作为临界滑水速度。

因此，提出利用位移阻力最大值确定临界滑水速度的方法，弥补以往通过道面支撑力下降至单轮轴载10%以下的条件只能确定临界滑水速度范围的缺陷。不同水膜厚度的道面支撑力与位移阻力对比情况如图10所示。可知，位移阻力最大值对

应的临界滑水速度正好位于道面支撑力小于单轮轴载 10% 时对应的临界滑水速度范围内, 通过最大位移阻力值可以精确获得唯一的临界滑水速度, 各工况下临界滑水速度如表 6 所示。

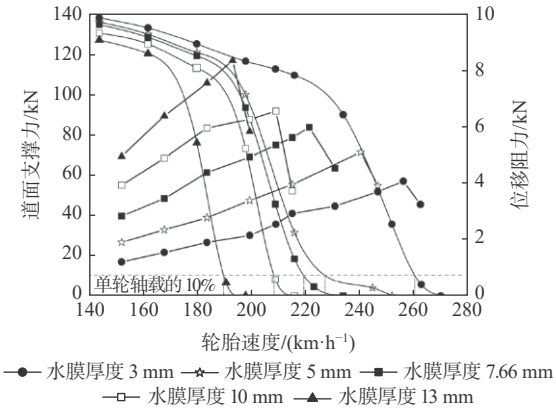



图 10　道面支撑力与位移阻力对比

Fig. 10　Comparison of pavement supporting force and displacement resistance

**表 6　各水膜厚度对应临界滑水速度**

**Table 6　Critical hydroplaning speed corresponding to each water film thickness**

| 水膜厚度/mm | 临界滑水速度/(km·h⁻¹) | |
|---|---|---|
| | 位移阻力法 | 道面支撑力法 |
| 3 | 262.8 | 257～270 |
| 5 | 244.8 | 225～252 |
| 7.66 | 223.2 | 218～234 |
| 10 | 209 | 206～216 |
| 13 | 190.8 | 188～198 |

### 4.3　轮胎溅水形态及溅水高度

不同于难以追踪水滴位置的 CEL 算法, SPH 算法本质上属于一种无网格的拉格朗日算法, 可以通过 SPH 粒子来确定流体自由表面位置, 实现对轮胎溅水形态及溅水高度的追踪。

为避免模型前后边界对轮胎溅水形态及高度的干扰, 选取轮胎轴心到达水域中间位置时的溅水高度作为每种工况下的溅水高度。以 13 mm 水膜厚度为例, 速度为 144 km/h 时轮胎的溅水特征及相应最大溅水高度如图 11 所示。

可以看到, 侧向羽流分布在轮胎两侧基本对称并与地面呈一定角度的放射状, 其最大溅水高度位于两侧羽流的中后部且数值十分接近; 舰首波分布在轮胎前缘部分, 同样呈射流状, 其最大溅水高度位于波最前端且数值上低于侧向羽流的最大溅水高度值, 符合以往研究的轮胎溅水特征[22-24]。

按照上述方法, 分别提取水膜厚度为 3,5,7.66, 10,13 mm 时轮胎的最大溅水高度, 其随速度的变化情况如图 12 和图 13 所示。

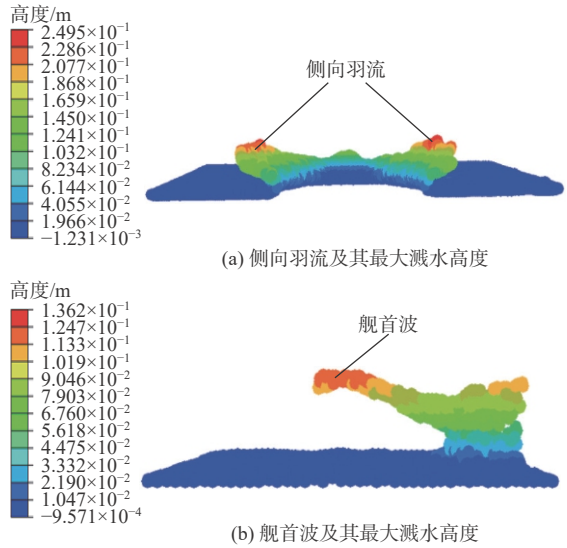



图 11　轮胎溅水特征及溅水高度

Fig. 11　Splashing characteristics and splashing height of tire

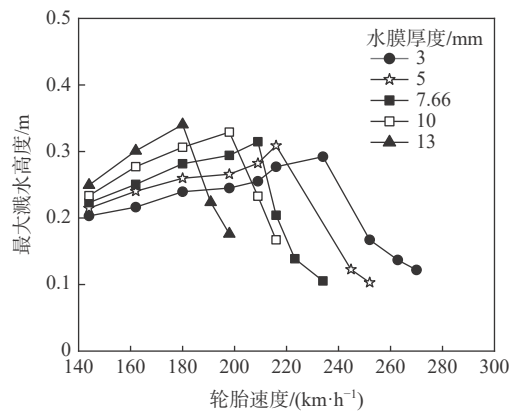



图 12　侧向羽流最大溅水高度

Fig. 12　Maximum splashing height of lateral plume

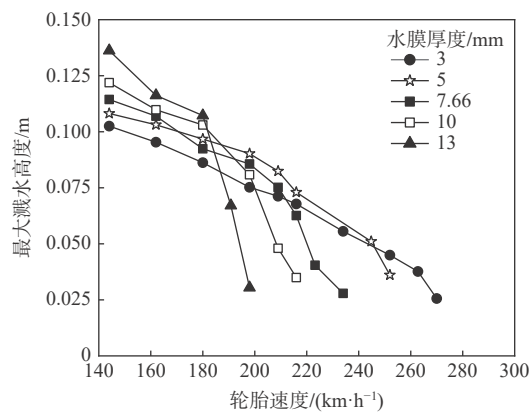



图 13　舰首波最大溅水高度

Fig. 13　Maximum splashing height of bow wave

由图 12 可以看到, 在水膜厚度不变的情况下, 侧向羽流最大溅水高度值均随轮胎速度增大呈现先升高后降低的趋势, 且在接近临界滑水速度时达到最大值, 符合文献 [25] 中提出的趋势变化规律。比较不同水膜厚度下的最大溅水高度值可以发现, 在溅水高度曲线上升段, 当轮胎速度保持不变时,

水膜越厚，最大溅水高度值越大。当水膜厚度为13 mm时，侧向羽流的最大溅水高度为0.340 m，小于A320飞机发动机的离地最小高度0.680 m[26]，此时飞机轮胎溅水不会影响发动机正常工作。

由图13可以看到，舰首波的最大溅水高度值为0.136 m，小于侧向溅水高度，且随着轮胎速度的增大而降低。这是由于轮胎速度的增大，轮胎的排水能力逐步下降，与轮胎接触的道面部分逐渐被水膜取代，当发生动力滑水产生轮胎“漂”在水上的现象时，舰首波已经接近消失。对比不同水膜厚度下的舰首波最大溅水高度值可以发现，水膜越厚，曲线后期的下降趋势就越明显。

## 5 结 论

1）相对于CEL模型，基于SPH算法建立的轮胎-湿滑道面有限元模型有与之相当的计算精度，最大差值不超过5%，且对流体形态特征描述更为全面和立体化。多工况条件下，SPH模型整体预计可节省计算时间近3 d，计算效率明显更高。

2）道面支撑力随着轮胎速度的增加总体呈现2个阶段的下降趋势：前期低速时的平缓下降段和后期高速时的急速下降段，且湿滑道面上支撑力急速下降段（170～260 km/h）基本位于A320飞机着陆速度区间内。在道面支撑力急速下降段内，飞机的操控难度大大增加，因此，必须提高防范飞机冲偏出跑道事故发生的风险意识。

3）当水膜厚度一定时，位移阻力随轮胎速度的增加呈现先升高后降低的趋势，且在轮胎达到临界滑水速度时取得最大值，从而提出利用最大位移阻力确定临界滑水速度的方法。

4）侧向羽流的最大溅水高度位于两侧羽流中后部，并随轮胎速度的增大呈现先升高后下降的趋势，且在13 mm水膜厚度下有最大溅水高度值0.340 m，低于发动机离地最小高度值0.680 m，此时发动机偏于安全；舰首波的最大溅水高度位于波的最前端，且随着轮胎速度的增大而减小，发生滑水时舰首波接近消失。

## 参考文献（References）


[1] CHO J R, LEE H W, SOHN J S, et al. Numerical investigation of hydroplaning characteristics of three-dimensional patterned tire[J]. European Journal of Mechanics-A, 2006, 25(6): 914-926.

[2] 朱林培. 基于Ls-dyna的轮胎滑水特性研究[J]. 中国制造业信息化, 2009, 38(11): 72-74.
ZHU L P. Simulation of tyre skiding based on Ls-dyna[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2009, 38(11): 72-74(in Chinese).

[3] DING Y M, WANG H. Computational investigation of hydroplaning risk of wide-base truck tyres on roadway[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(1): 122-133.

[4] TANG T C, ANUPAM K, KASBERGEN C, et al. A finite element study of rain intensity on skid resistance for permeable asphalt concrete mixes[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 464-475.

[5] ZHENG B S, HUANG X M, ZHANG W G, et al. Adhesion characteristics of tire-asphalt pavement interface based on a proposed tire hydroplaning model[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 5916180.

[6] 蔡靖, 李岳, 宗一鸣. 湿滑道面飞机轮胎临界滑水速度计算方法比较[J]. 航空学报, 2017, 38(7): 236-247.
CAI J, LI Y, ZONG Y M. Comparasion of prediction methods for critical hydroplaning speed of aircraft tire on wet pavement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(7): 236-247(in Chinese).

[7] LIU X Y, CAO Q Q, WANG H, et al. Evaluation of vehicle braking performance on wet pavement surface using an integrated tire-vehicle modeling approach[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(3): 295-307.

[8] LIU X Y, CAO Q Q, CHEN J Y. Simulation of vehicle braking behavior on wet asphalt pavement based on tire hydroplaning and frictional energy dissipation[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2018, 34(4): 500-507.

[9] CHO J R, LEE H W, YOO W S. A wet-road braking distance estimate utilizing the hydroplaning analysis of patterned tire[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(7): 1423-1445.

[10] ZHU X Y, PANG Y F, YANG J, et al. Numerical analysis of hydroplaning behaviour by using a tire-water-film-runway model[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(3): 784-800.

[11] ZHU X Y, YANG Y, ZHAO H D, et al. Effects of surface texture deterioration and wet surface conditions on asphalt runway skid resistance[J]. Tribology International, 2021, 153: 106589.

[12] ZHAO Y, LI H N, FU X, et al. Seismic analysis of a large LNG tank considering the effect of liquid volume[J]. Shock and Vibration, 2020, 10(6): 8889055.

[13] ZEHETNER C, SCHRGENHUMER M, HAMMELMÜLLER F, et al. Comparison of coupled Euler-Lagrange and smoothed particle hydrodynamics in fluid-structure interaction[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering. Barcelona: INT Center Numerical Methods Engineering, 2015: 1080-1088.

[14] KELLER M C, BRAUN S, WIETH L, et al. Smoothed particle hydrodynamics simulation of oil-jet gear interaction[J]. Journal of Tribology, 2019, 141(7): 071703.

[15] BUI H H, SAKO K, FUKAGAWA R. Numerical simulation of soil-water interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method[J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(5): 339-346.

[16] VIOLEAU D, ROGERS B D. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for free-surface flows: Past, present and future[J]. Journal of Hydraulic Research, 2016, 54(1): 1-26.

[17] FWA T F, ANUPAM K, ONG G P. Relative effectiveness of grooves in tire and pavement for reducing vehicle hydroplaning

risk[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2155(1): 73-81.

[18] 中国民用航空局. 航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定: AC-121-FS-33R1[S]. 北京: 中国民用航空局, 2021.
Civil Aviation Administration of China. Regulations on the operation management of wet runways and polluted runways for air carriers: AC-121-FS-33R1[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2021(in Chinese).

[19] 许诤. 考虑道面平整度的飞机轮胎滑水安全问题研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
XU Z. Study on water skiing safety of aircraft tires considering pavement smoothness[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019(in Chinese).

[20] 宗一鸣. 湿滑道面条件下轮胎力学行为与飞机着陆安全问题研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
ZONG Y M. Research on tire mechanical behavior and aircraft landing safety under wet road surface conditions[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017(in Chinese).

[21] 李岳, 蔡靖, 宗一鸣. 湿滑道面飞机轮胎临界滑水速度数值仿真[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 90-101.
LI Y, CAI J, ZONG Y M. Numerical simulation of critical hydroplaning speed of aircraft tire under wet pavement condition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 90-101(in Chinese).

[22] ZHAO K B, LIU P Q, QU Q L, et al. Numerical simulation of aircraft tire-generated spray and engine ingestion on flooded runways [J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(5): 1840-1848.

[23] ZHANG X P, XU F, REN X Q, et al. Consideration on aircraft tire spray when running on wet runways[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(2): 520-528.

[24] GUAN X S, XU F, HU M Q, et al. Numerical simulation of water spray generated by aircraft multi-wheels[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2021, 35(1-2): 93-105.

[25] 闫珅. 大型飞机污染跑道起降性能和飞行操作适航标准研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
YAN S. Study on take-off and landing performance and airworthiness standard of flight operation of large aircraft polluted runway [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019(in Chinese).

[26] 倪明. 大型客机污染跑道起降性能适航审定方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
NI M. Research on airworthiness certification method of take-off and landing performance of large passenger aircraft polluted runway[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018(in Chinese).

# Simulation and analysis of SPH algorithm for interaction of aircraft tire-wet pavement

CAI Jing，HUANG Yudai，LI Qi，LI Yue*，DAI Xuan

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

**Abstract**：In view of aircraft hydroplaning on wet and slippery pavement, a finite element model of aircraft tire-wet pavement was established by using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) algorithm and compared with the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) model, which highlighted the superiority of SPH algorithm. Then, the influence of different tire speeds and water film thickness on the interaction between tire and wet pavement was analyzed. The results show that the difference between the critical hydroplaning speeds obtained by the SPH algorithm model and the CEL model is less than 5%. The fluid characteristics such as bow wave and lateral plume are more obvious. The average computing efficiency of the SPH model is 36.5% higher than that of the CEL model. Then, the SPH model is used to analyze and get the following conclusions: the pavement supporting force decreases gently at first and then rapidly with the increase in speed. When the thickness of accumulated water is 3–13 mm, the speed range of the rapidly decreasing section is 170–260 km/h, which is basically within the landing and taxiing speed range of A320 aircraft, and the prevention of the risk of hydroplaning accidents should be strengthened. The displacement resistance increases at first and then decreases with the increase in speed, and the maximum value is obtained when the tire reaches the critical hydroplaning speed. Then, a method of determining the critical hydroplaning speed by using the maximum value of displacement resistance is put forward. The maximum splashing height of the lateral plume increases at first and then decreases with the increase in speed and reaches a maximum value when approaching the critical hydroplaning speed. The maximum splashing height of the bow wave is lower than that of the lateral plume and decreases with increasing speed. When the critical hydroplaning speed is reached, the bow wave almost disappears. The maximum splashing height values of both splashing characteristics are lower than the minimum ground height of 0.680 m for the A320 aircraft engine and will not affect the engine.

**Keywords**：transportation engineering; tire-pavement interaction; smoothed particle hydrodynamics algorithm; critical hydroplaning speed; pavement supporting force; displacement resistance; splashing height

**Received**：2022-11-29；**Accepted**：2022-12-30；**Published Online**：2023-01-11 15：06

**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230111.0932.001

**Foundation items**：National Natural Science Foundation of China (51508559); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122019103, 3122022043); Tianjin Municipal Natural Science Foundation (21JCQNJC00850)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0969

# 自调节图卷积UNet的三维人体姿态估计方法

马金林[1,2]，崔琦磊[1]，马自萍[3,*]，武江涛[1]，曹浩杰[1]

(1. 北方民族大学 计算机科学与工程学院，银川 750021；2. 图像图形智能信息处理国家民委重点实验室，银川 750021；
3. 北方民族大学 数学与信息科学学院，银川 750021)

**摘　　要**：基于图卷积网络的三维人体姿态估计方法无法提取关节点的多尺度特征和未充分利用相邻节点的拓扑关系问题，提出自调节图卷积UNet的三维人体姿态估计方法M-Joint-UNet。M-Joint-UNet方法由Joint-UNet、自调节图卷积和融合损失3部分组成：Joint-UNet通过关节点池化与去池化改变特征图大小，以提取关节点的不同尺度特征；自调节图卷积通过可学习矩阵自动调节相邻节点或人体骨架结构的关系；使用$L_1$和$L_2$融合的损失缓解梯度爆炸。对比实验表明：所提方法在参数量和估计性能方面均获得了最优的结果，以Human3.6M的二维真实关节点作为输入的参数量仅为$0.54\times10^6$，MPJPE和P-MPJPE值分别为37.81 mm和30.21 mm。

**关 键 词**：三维人体姿态估计；图卷积；Graph-UNet；关节点池化；权重矩阵
**中图分类号**：V19; TP391.41
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0063-12

三维人体姿态估计(3D human pose estimation, 3D HPE)是计算机视觉的重要研究领域，指从图像或视频中预测人体的关节点位置(坐标)的过程。三维人体姿势估计的应用领域非常广泛，如动作识别[1-4]、虚拟现实[5-6]和人机交互[7-9]等。

目前的三维人体姿态估计大部分基于深度神经网络[10]，因为其具有从数据中学习有效特征表示的强大能力。一些方法[11-15]通过卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)[16-17]直接从单目图像回归三维人体关节点坐标。近期工作将问题分解为2个子任务，即先执行二维关节点位置检测任务，再通过图卷积网络[18](graph convolution network, GCN)执行二维到三维人体姿态估计的回归任务。基于图卷积网络的三维人体姿态估计方法[19-21]在二维到三维人体姿态估计中取得了最先进的结果。

但是，基于图卷积网络的方法存在以下问题：①图卷积利用所有节点信息，将所有特征在“一个尺度”上处理；同时，多数方法使用顺序连接结构，很难提取多尺度的局部信息和全局信息，在一定程度上限制了图卷积的表示能力。②普通图卷积直接将关节点的原始特征输入网络，未利用相邻节点或人体骨架结构的拓扑关系。③普通图卷积的所有关节点使用共享权重矩阵，无法体现人体关节点之间的不同关系模式。

针对以上问题，本文提出了一种自调节图卷积UNet网络，主要贡献如下：

1）在Graph-UNet的基础上，根据人体骨架结构的先验知识提出更适合人体骨架结构的特征提取方法Joint-UNet。Joint-UNet可以提取多尺度、多层次的人体关节点特征，解决了顺序结构存在的问题。

2）使用自调节图卷积学习关节点特征的自调节向量，调节相邻节点或人体骨架结构的拓扑关系。对关节点和相邻关节点使用不同的权重矩阵，解决共享权重矩阵无法体现人体关节点之间不同

**收稿日期**：2022-12-06；**录用日期**：2023-04-21；**网络出版时间**：2023-05-25 11:00
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230524.1124.001
**基金项目**：国家自然科学基金(62462001)；宁夏自然科学基金(2024AAC03147,2023AAC03264)；中央高校基本科研业务费专项资金(2023ZRLG02)
*通信作者. E-mail：2006041@nmu.edu.cn

*引用格式：马金林，崔琦磊，马自萍，等. 自调节图卷积UNet的三维人体姿态估计方法[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：63-74. MA J L，CUI Q L，MA Z P，et al. Self-adjusting graph convolution UNet method for 3D human pose estimation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：63-74 (in Chinese).*

关系模式的问题。

3）使用 $L_1$ 和 $L_2$ 融合的损失函数，提高模型的鲁棒性和稳定性。

# 1 相关工作

## 1.1 Graph-UNet

U-Net[22] 等编码器-解码器架构已成功应用于许多图像像素预测任务，并取得了很好的性能。由于图结构不像图像一样具有网格状规则结构，图像中常见的上采样与下采样操作不能直接应用到图结构中。

为解决图结构缺乏类似操作这一问题，Gao 和 Ji[23] 提出了图池化 (graph pool, gPool) 操作和图去池化 (graph unpool, gUnpool) 操作，开发了基于图的编解码模型 Graph-UNet。图池化操作根据图结构数据在可训练投影向量上的标量值，自适应地选择节点形成较小的图。去池化操作是池化操作的逆操作，使用相应的池化操作中选择的节点位置信息将图结构恢复到原始结构。

## 1.2 图卷积网络

定义图 $G=\{V,E\}$，$V$ 为顶点的集合，$E$ 为边的集合。$E$ 可以通过邻接矩阵 $\boldsymbol{A}\in\{0,1\}^{N\times N}$ 表示，$G$ 的每个节点 $i$ 都有一个 $D$ 维的特征 $\boldsymbol{H}_i\in\mathbf{R}^D$。图 $G$ 中所有节点的特征可以表示为矩阵 $\boldsymbol{H}\in\mathbf{R}^{D\times N}$，即特征矩阵 $\boldsymbol{H}$。普通图卷积按照式 (1) 变换和聚合输入特征：

$$\boldsymbol{H}'=\sigma(\widetilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{W}) \tag{1}$$

式中：$\widetilde{\boldsymbol{A}}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I}$ 为 $\boldsymbol{A}$ 经过归一化和自连接后的矩阵；$\boldsymbol{W}\in\mathbf{R}^{D'\times D}$ 为可学习的权重矩阵，其将特征向量的维度由 $D$ 变为 $D'$；$\sigma(\cdot)$ 为激活函数；$\boldsymbol{H}'\in\mathbf{R}^{D'\times D}$ 为更新后的特征矩阵。

图卷积网络通过堆叠多个图卷积层，重复变换和聚合节点及其相邻节点的特征来获得增强的特征表示。增强的特征表示通过网络中的最后一层进行预测。

设矩阵 $\widetilde{\boldsymbol{A}}$ 中坐标 $(i,j)$ 的点为 $a_{ij}$，$N_i$ 表示包括自身节点 $i$ 的相邻节点集。当 $j\in N_i$ 且 $a_{ij}$ 非零时，式 (1) 可写为

$$\boldsymbol{h}_i'=\sigma\left(\sum_{j\in N_i}\boldsymbol{W}\boldsymbol{h}_j a_{ij}\right) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{h}_i'$ 为更新后的特征矩阵 $\boldsymbol{H}'$ 的第 $i$ 列，$i\in\{1,2,\cdots,N\}$。

普通图卷积的限制是：每个节点共享权重矩阵，从而阻止图卷积学习不同身体关节之间的关系模式。Liu 等[24] 通过在聚合相邻节点前，为每个节点 $j$ 使用一个不同的权重矩阵 $\boldsymbol{W}_j\in\mathbf{R}^{D'\times D}$ 来解决该问题，如下：

$$\boldsymbol{h}_i'=\sigma\left(\sum_{j\in N_i}\boldsymbol{W}_j\boldsymbol{h}_j a_{ij}\right) \tag{3}$$

虽然使用式 (3) 不共享权重可以提高模型性能，但会成倍增加模型大小，通常为 $N$。

# 2 自调节图卷积 UNet 三维人体姿态估计模型

## 2.1 M-Joint-UNet 的网络结构

本文提出自调节图卷积 UNet 三维人体姿态估计模型 M-Joint-Unet，该模型主要由 Joint-UNet、自调节图卷积和融合损失 3 部分组成。M-Joint-Unet 的网络结构如图 1 所示。模型的输入为由二维姿

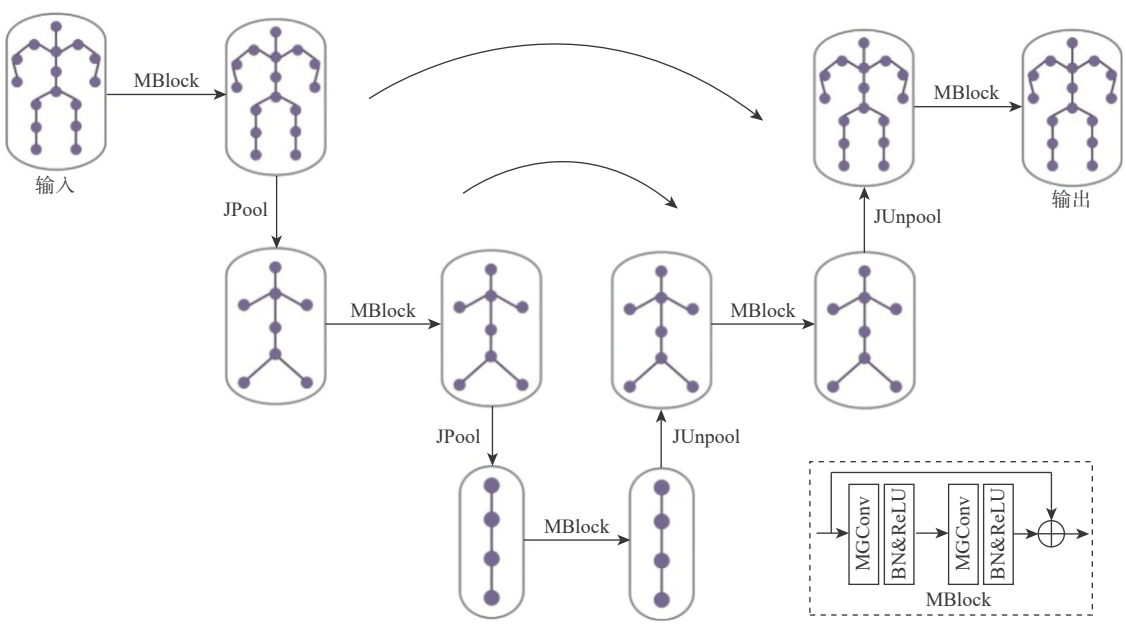



图 1 M-Joint-UNet 网络结构

Fig. 1 Network architecture of M-Joint-UNet

态检测器生成的 16 个关节点的真实姿态坐标, 模型的输出为预测的三维人体姿态的 16 个关节点坐标。在 M-Joint-UNet 中, 根据人体骨架结构先验知识定义了 3 种不同类型的骨架结构, 并按照该结构进行关节点池化和去池化操作。在特征的提取与传播过程中, 受 Martinez 等[25] 工作的启发, 本文使用具有残差连接的自调节图卷积 (MBlock) 作为构建块。所有图卷积层后都是批归一化 (BN)[26] 和 ReLU[27] 激活函数, 最后一个除外。三维人体姿态坐标由网络的最后一层生成。使用 $L_2$ 与 $L_1$ 融合的损失函数比较预测值和真实值, 通过实验将其权重确定为 0.9 和 0.1。

## 2.2　Joint-UNet

U-Net 编码-解码网络在像素级预测任务上取得了很好的性能, 因为它们可以在保持局部信息的同时, 对池化或去池化后的高级特征进行编码和解码。本文在三维人体姿态估计任务中也用类似结构的 Joint-UNet 进行关节点特征的编解码。Joint-UNet 主要由关节点池化 (joint pool, JPool)、关节点去池化 (joint unpool, JUnpool) 和跳跃连接 (skip connections) 组成。该网络利用人体骨架结构的先验知识简化特征图获取人体骨架结构高级特征的同时, 也通过跳跃连接将编码阶段的特征连接到解码阶段以获得更好的性能。

### 2.2.1　关节点池化

池化操作在类似网格数据的卷积神经网络中起着重要作用, 可以缩小特征图的尺寸, 扩大感受野, 获得更好的性能。本文根据人体骨架结构的先验知识作为正则化项, 提出关节点池化, 如图 2 所示, 如下:

$$\begin{cases} S_J = \{p_i\}_{i=1}^{J} \\ S'_N = \{p'_i\}_{i=1}^{N} \in S_J \\ \boldsymbol{H}' = (\mathrm{Linear}(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}))^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{4}$$

式中: $S_J$ 为未经池化、高尺度的骨架结构; $S'_N$ 为池化后、低尺度的骨架结构; $J$ 和 $N$ 分别为高尺度骨架结构和低尺度骨架结构的关节点个数; $p_i, p'_i \in \mathbf{R}^2$ 为第 $i$ 个关节点的二维坐标; $\boldsymbol{H} \in \mathbf{R}^{J\times D'}$ 为经过图卷积后的特征矩阵; $\boldsymbol{H}' \in \mathbf{R}^{N\times D'}$ 为经过线性变换, 尺寸重塑后的特征矩阵。

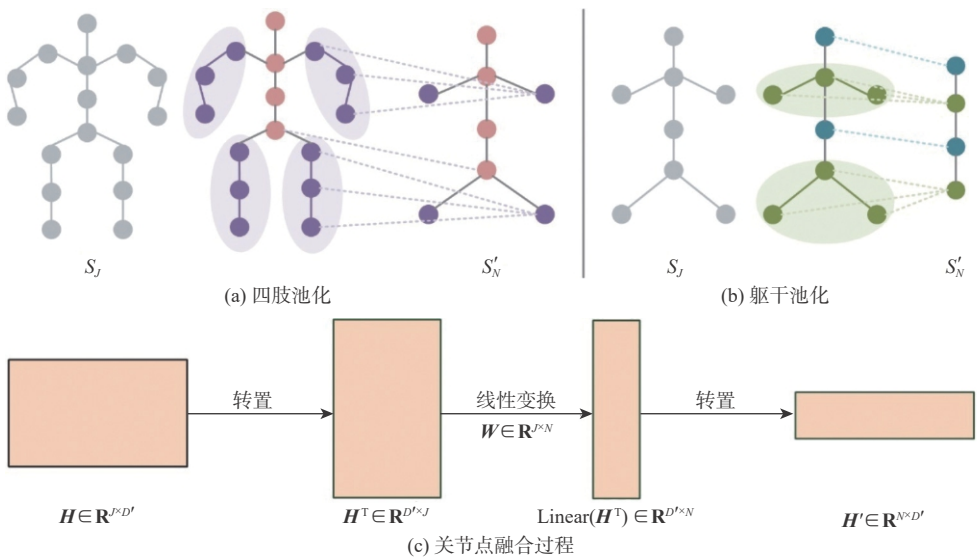



图 2　关节点池化示意图

Fig. 2　Illustration of joint pool

根据式 (4) 和图 2, 关节点池化是将高尺度人体骨架结构的关节点融合为低尺度骨架结构的关节点。具体操作为: ①根据人体骨架结构的特点将关节点分为四肢关节点与躯干关节点, 如图 2 所示。②将四肢的 3 个关节点融合为 1 个关节点, 如图 2 所示。③将融合后的关节点与相连接的躯干关节点融合, 如图 2 所示。经过如上操作, 通过对人体骨架结构关节点的 2 次融合, 可以得到分别包含 16、8 和 4 个关节点的 3 种不同尺度的骨架结构, 每种骨架结构对应相应尺度的邻接矩阵。

关节点融合过程的特征矩阵操作为: 首先, 将关节点的特征矩阵 $\boldsymbol{H} \in \mathbf{R}^{J\times D'}$ 转置; 其次, 对转置后的特征矩阵进行线性变换 $\mathrm{Linear}(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}})$, 变换矩阵为 $\boldsymbol{W} \in \mathbf{R}^{J\times N}$; 最后, 将线性变换后的特征转置, 得到池化后的特征矩阵 $\boldsymbol{H}' \in \mathbf{R}^{N\times D'}$。

关节点池化主要有以下特点: ①根据人体骨架结构的先验知识对人体关节点进行分组、融合来进行图池化操作, 而不是随机丢弃人体骨架结构中的关节点。②使用线性变换重塑人体关节点特征矩阵的尺寸。③人体骨架结构的特点决定了 M-Joint-UNet 的关节点池化操作的次数。

2.2.2 关节点去池化

上采样操作对编解码器网络非常重要。在解码器中,需要对特征图进行上采样以恢复其原始尺寸。为对人体骨架结构进行上采样操作,本文提出关节点去池化操作,如图3所示,如下:

$$\begin{cases} S_J \leftarrow S'_N \\ \boldsymbol{H}'' = \left(\text{Linear}\left(\boldsymbol{H}'^{\mathrm{T}}\right)\right)^{\mathrm{T}} \\ S_J \leftarrow S'_N \\ \boldsymbol{H}'' = \left(\text{Linear}\left(\boldsymbol{H}'^{\mathrm{T}}\right)\right)^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{5}$$

式中:$S_J$和$S'_N$分别为高尺度人体骨架结构和低尺度人体骨架结构,表示将低尺度人体骨架结构转换为高尺度人体骨架结构;$\boldsymbol{H}' \in \mathbf{R}^{N\times D'}$为经过图卷积变换后的特征矩阵;$\boldsymbol{H}'' \in \mathbf{R}^{J\times D'}$为经过线性变换、尺寸重塑后的特征矩阵。

根据式(5)和图3,关节点去池化是将低尺度人体骨架结构的关节点恢复为高尺度骨架结构的关节点,是关节点池化的反向操作。与关节点池化操作中对特征矩阵的处理方式类似,根据高尺度的人体骨架结构,使用线性变换来重塑特征矩阵的尺寸。

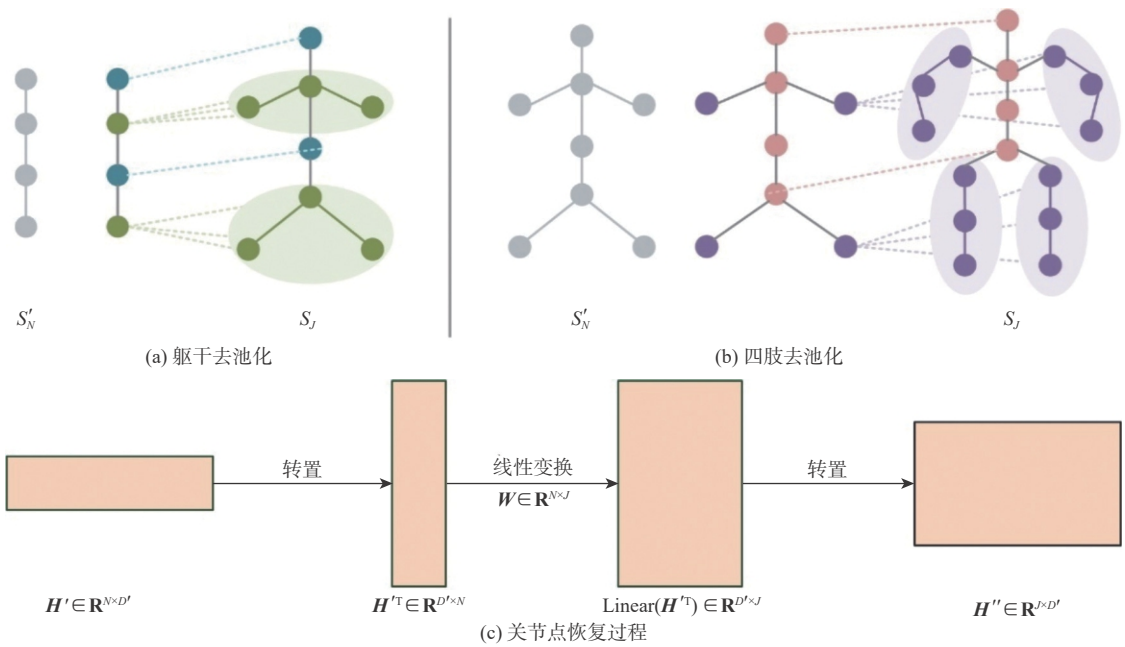



图3 关节点去池化示意图

Fig. 3 Illustration of joint unpool

## 2.3 自调节图卷积

图卷积网络通过反复变换和聚合相邻关节点特征获得更强大的特征表示,成功模拟了人体关节点之间的相关性。然而,图卷积(普通图卷积、权重不共享图卷积)在特征变换和信息聚合时存在以下缺点:①人体姿态往往超出关节之间的自然连接关系,如行走或跑步时手臂和腿之间配合的强相关性。直接对原始关节点特征进行提取,易忽略相邻关节点或人体骨架结构中的相互关系。②普通图卷积对所有关节点使用共享权重矩阵进行特征变换,阻碍了图卷积学习不同人体关节点的关系。③解决图卷积权重共享问题最直接的方法是对不同节点使用不同权重矩阵(即图卷积权重不共享),导致模型参数量呈线性增长,但并未带来理想的模型性能提高。

针对以上问题,本文提出自调节图卷积。自调节图卷积为每个关节点特征学习不同的自调节向量,并使用其来调节相邻节点的关系。具体操作如下:

$$\dot{\boldsymbol{h}}'_i = \sigma\left(\sum_{j\in N_i}\left(\left(\boldsymbol{m}_j \circ \boldsymbol{h}_j\right)a_{ij}\right)\boldsymbol{W}\right) \tag{6}$$

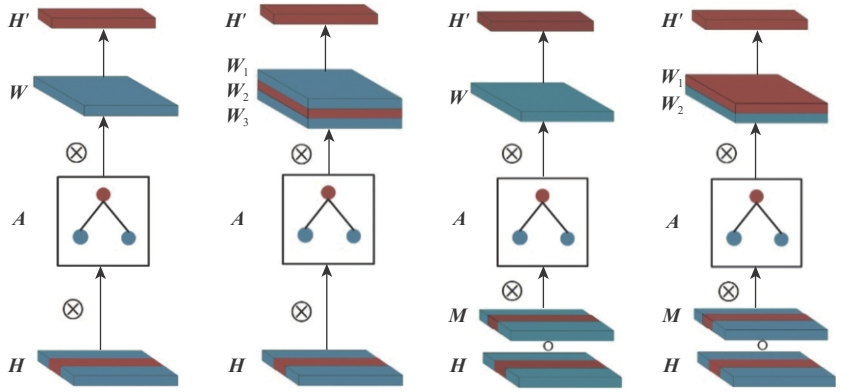
式中:$\boldsymbol{h}_j$为关节点的特征向量;$\boldsymbol{m}_j \in \mathbf{R}^{D'}$为关节点$a_{ij}$的可学习自调节向量;“∘”表示元素之间的乘法;$\boldsymbol{W} \in \mathbf{R}^{D'\times D}$为共享权重矩阵。

不同图卷积示意图如图4所示。由于需调节所有人体关节点的特征,如图4(c)所示,式(6)可以等效写成如下紧凑形式:

$$\boldsymbol{H}' = \sigma((\boldsymbol{M}\circ\boldsymbol{H})\widetilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{W}) \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{M} \in \mathbf{R}^{D'\times N}$为所有自调节向量的集合,称为自调节矩阵。

由于式(7)的所有关节点共享权重矩阵,阻碍了学习关节点间的不同关系模式。同时,使用权重不共享图卷积,在参数量暴涨的情况下,模型性能并不能达到理想效果。因此,本文在卷积过程中将关节点分为自身关节点和相邻关节点2类,并使用2个权重矩阵$\boldsymbol{W}_1$、$\boldsymbol{W}_2$对其进行变换,如图4(d)所




(a) 普通图卷积　(b) 权重不共享图卷积　(c) 权重共享的自调节图卷积　(d) 权重不共享的自调节图卷积

图 4　不同图卷积示意图

Fig. 4　Illustration of different graph convolution

示, 具体操作如下:

$$\boldsymbol{H}'=\sigma((\boldsymbol{M}\circ\boldsymbol{H})(\boldsymbol{E}\otimes\widetilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{W}_1+(\boldsymbol{O}-\boldsymbol{E})\otimes\widetilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{W}_2)) \tag{8}$$

式中: $\boldsymbol{E}$为单位阵; $\boldsymbol{E}\otimes\widetilde{\boldsymbol{A}}$和$(\boldsymbol{O}-\boldsymbol{E})\otimes\widetilde{\boldsymbol{A}}$分别表示自身关节点和相邻关节点; $\boldsymbol{O}$ 为全为 1 的矩阵。

式 (8) 为自调节图卷积的最终形式。从式 (8) 可以看出: ①自调节矩阵为不同关节点的特征学习不同的自调节向量, 从而达到调节相邻节点关系的目的; 且不同的变换位于同一个公共子空间, 因此, 加入自调节矩阵只会增加很少的参数量。②在图卷积过程中对关节点进行分类, 使用 2 个权重矩阵。自调节图卷积既具有权重不共享图卷积的优点, 又减少了权重不共享图卷积的参数量。③图卷积的参数量与可学习矩阵的尺寸和数量有关。具体而言, 对于$N$个关节点的尺寸为$D'\times D$的权重矩阵, 普通图卷积的参数量为$D'\times D$, 权重不共享图卷积的参数量为$D'\times D\times N$, 使用一个权重矩阵的自调节图卷积的参数量为$D'\times(D+N)$, 使用 2 个权重矩阵的自调节图卷积的参数量为$D'\times(D\times 2+N)$。

### 2.4　损失函数

三维人体姿态估计任务最常用的损失函数为 $L_2$ 损失。$L_2$ 损失也被称为最小平方误差, 即最小化真实值$y_i$与预测值$f(x_i)$的差值的平方和, 表示为

$$L_2=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|y_i-f(x_i)|^2 \tag{9}$$

虽然 $L_2$ 损失具有较快的收敛速度, 但在预测值与真实值差异较大时, 损失增加的是误差的平方, 其指导方向将会出现偏差, 同时梯度容易爆炸。为改善这一情况, 本文在 $L_2$ 损失的基础上引入了 $L_1$ 损失。$L_1$ 损失被称为最小化绝对误差, 即最小化真实值$y_i$与预测值$f(x_i)$的差值的绝对值和, 表示为

$$L_1=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|y_i-f(x_i)| \tag{10}$$

$L_1$ 损失稳健性强, 在面临较大误差时, 不易受到影响。因此, 融合 $L_1$ 损失和 $L_2$ 损失作为本文的损失函数, 将 $L_2$ 损失函数和 $L_1$ 损失函数同时作用于三维人体姿态估计模型, 设置超参数$\alpha$, 控制 $L_1$ 损失和 $L_2$ 损失的权重。本文的损失函数表示为

$$L=(1-\alpha)L_2+\alpha L_1 \tag{11}$$

## 3　实验设置

### 3.1　数 据 集

本文使用三维人体姿态估计任务的基准数据集 Human3.6M[28] 和 MPI-INF-3DHP[29] 对模型进行评估。

Human3.6M 是三维人体姿态估计中使用最广泛的基准数据集, 由 4 台同步摄像机在不同视角下拍摄的 360 万张图像组成, 11 名受试者(5 名女性和 6 名男性)在室内环境中拍摄了 15 项日常活动(步行、打电话、坐着和参与讨论等)。三维人体姿态表示为 16 个人体关节点的三维坐标。精确的三维人体关节点坐标由运动捕捉系统捕捉, 二维人体关节点坐标则通过使用已知的内部和外部相机参数进行投影获得。继 Martinez 等[25] 的工作, 使用标准归一化对二维和三维姿态进行预处理, 并将其输入本文模型。采用髋关节作为三维人体姿态的根关节, 实现零定心。

MPI-INF-3DHP 数据集是目前常用的三维人体姿态数据集, 由具有室内场景和复杂室外场景的运动捕捉系统构建。与 Human3.6M 数据集相比, MPI-INF-3DHP 数据集涵盖了更多的动作类, 从走路、坐着到挑战性的运动姿势和动态动作。为定量证明本文模型的泛化能力, 将在 Human3.6M 数据集上训练的模型直接应用于 MPI-INF-3DHP 测试集。

### 3.2　评估标准

Human3.6M 数据集有 prococal#1 和 prococal#2 这

2种常用的评估标准。2种评估标准均使用5名受试者(S1、S5、S6、S7、S8)进行训练,2名受试者(S9、S11)进行测试。其中,prococal#1是根关节(中心髋关节)对齐后预测的三维关节位置与真实关节位置之间的平均欧氏距离,以每关节位置平均误差(mean per joint position error, MPJPE)作为评估指标,计算公式为

$$E_{\mathrm{MPJPE}}=\frac{1}{N_S}\sum_{i=1}^{N_S}\left\|\boldsymbol{m}_{\mathrm{pre},S}(i)-\boldsymbol{m}_{\mathrm{gt},S}(i)\right\|_2 \tag{12}$$

式中:$E_{\mathrm{MPJPE}}$为误差值,mm;$S$为骨架结构,包括二维姿态检测器生成的16个关节点的骨架结构或级联金字塔网络生成的姿态17个关节点的骨架结构;$N_S$为对应骨架结构的关节点数;$\boldsymbol{m}_{\mathrm{pre},S}(i)$和$\boldsymbol{m}_{\mathrm{gt},S}(i)$分别为骨架结构$S$第$i$个关节的预测值和真实值。

prococal#2是经过刚性变换的MPJPE(Procrustes analysis MPJPE, P-MPJPE)。这2个评价指标都以mm为单位,值越低,表示性能越好。

MPI-INF-3DHP数据集采用正确关节点百分比(percentage of correct keypoints, PCK)和曲线下面积(area under curve, AUC)作为评估指标。其中,PCK是一种用于评估关节点定位准确性的指标,定义为在给定距离阈值(通常为150 mm)下,正确预测的关节点数量占总关节点数量的比例。AUC则是一种用于评估关节排序准确性的指标,其通过预测关节点的排序与真实关节点排序之间的ROC曲线下面积来评估算法的排序准确性。PCK和AUC的值越高,表示算法的性能越好。

### 3.3 参数设置

M-Joint-UNet由PyTorch框架实现,并通过Adam[30]进行优化,所有实验均在单块NVIDIA TITAN V GPU上进行,整个训练遵循端到端的方式。为与前人工作保持一致[25,31],本文设置如下:通道数为128,初始学习率为0.001,每100 000步的衰减因子为0.96,批次大小为64,dropout为0.25。使用$L_2$和$L_1$融合的损失函数。

## 4 实验结果与分析

为验证M-Joint-UNet的性能,本文进行如下实验:首先,考察Joint-UNet模型的性能和参数;其次,对比自调节图卷积及其层数对Joint-UNet的性能影响;然后,对比不同损失函数下的姿态估计性能;最后,对比M-Joint-UNet和最优人体姿态估计模型的性能,并进行定性展示。

### 4.1 Joint-UNet各组件对姿态估计性能的影响

Joint-UNet主要由关节点池化、关节点去池化和跳跃连接组成,为验证Joint-UNet各组件的有效性,实验以仅由普通图卷积组成的网络为基准三维人体姿态估计模型(PoseGCN),对比逐步加入关节点池化、关节点去池化和跳跃连接后的模型性能,实验结果如表1所示。

由表1可得,相比于基准模型,加入关节点池化和去池化的模型(PoseGCN w/JPool JUnpool)在MPJPE和P-MPJPE值上减少了21.89 mm和20.42 mm,性能提高了27.0%和29.8%,而参数量仅增加了0.001×$10^6$。说明:①由于关节点池化与去池化的特征变换矩阵$\boldsymbol{W}$与关节点数(16,8,4)相关,其参数量很小;②利用人体骨架结构的先验知识提出的关节点池化与去池化可以简化特征图,扩大感受野,获得人体骨架结构的高级特征。与加入关节点池化和去池化的模型相比,加入关节点池化与去池化和跳跃连接的模型(Joint-UNet)在MPJPE和P-MPJPE值上减少了4.83 mm和4.43 mm,性能提高了8.17%和9.2%,说明跳跃连接将编码阶段的特征连接到解码阶段可以获得更好的姿态估计性能。

**表1 Joint-UNet各组件对姿态估计性能的影响**

**Table 1 Influence of Joint-UNet components on pose estimation performance**

| 模型 | 通道数 | 参数量 | MPJPE/mm | P-MPJPE/mm |
|---|---|---|---|---|
| PoseGCN | 64 | 0.043×$10^6$ | 81.02 | 68.56 |
| PoseGCN w/JPool JUnpool | 64 | 0.044×$10^6$ | 59.13 | 48.14 |
| Joint-UNet | 64 | 0.056×$10^6$ | 54.30 | 43.71 |

### 4.2 图卷积通道数对Joint-UNet的性能影响

本文根据人体骨架结构先验知识对Graph-UNet中的池化与去池化操作进行改进,提出关节点池化与去池化操作。由于关节点池化与去池化操作已经确定了池化和去池化的层数和方式,设置不同的图卷积通道数(64、128、256)来观察其对实验结果的影响,实验结果如表2所示。

通过表2可以看出,当Joint-Unet的图卷积通道数为64时,虽然参数量仅有0.06×$10^6$,但模型的性能最差。当通道数为256时,模型性能虽然是最好的,但效果相对于其他2个提升不大,而参数量却是64通道的14.3倍、128通道的4倍。与64通道相比,128通道的参数量增大2.5倍,模型性能提

**表2 Joint-UNet中不同图卷积通道数的性能对比**

**Table 2 Performance comparison of graph convolution with different channel numbers in Joint-UNet**

| 通道数 | 参数量 | MPJPE/mm | P-MPJPE/mm |
|---|---|---|---|
| 64 | 0.06×$10^6$ | 54.30 | 43.71 |
| 128 | 0.21×$10^6$ | 51.15 | 40.93 |
| 256 | 0.86×$10^6$ | 49.78 | 40.27 |

高了 5.80% 和 6.36%; 但是, 256 通道的参数量增大了 13.3 倍, 模型性能仅提高了 8.32% 和 7.87%。因此, 为平衡参数量和模型性能, Joint-UNet 采用 128 维通道的图卷积。

### 4.3　不同图卷积对 Joint-UNet 的性能影响

如 4.2 节实验所述, 在使用普通图卷积的情况下, Joint-UNet 通过关节点池化与关节点去池化操作使模型的性能更好。然而, 在图结构中更重要的是图卷积是否能更好变换和聚合节点特征。因此, 实验将 Joint-UNet 中的普通图卷积换为自调节图卷积, 以观察不同图卷积构成的 Joint-UNet 对三维人体姿态估计性能的影响, 实验结果如表 3 所示。可得, 在使用一个权重矩阵, 即权重共享的情况下, Joint-UNet 仅使用引入自调节矩阵的自调节图卷积, 相比于使用普通图卷积在 MPJPE 和 P-MPJPE 值上分别减少了 4.33 mm 和 2.74 mm, 性能分别提高了 8.47% 和 6.69%, 而其附加参数仅提高了 $0.01\times10^6$。说明在关节点特征变换和聚合之前, 对关节点特征自调节可以充分利用相邻关节点之间的关系, 证明了自调节矩阵的有效性。

自调节图卷积采用不共享权重矩阵的方式, 使用不同的权重矩阵提取节点特征。下面对自调节图卷积中使用权重矩阵的个数进行讨论, 以此来探究权重是否共享和关节点分类对模型性能的影响。当 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 1 时, 为权重共享; 当 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 2 时, 将人体关节点分为自节点和相邻节点, 并分别为其使用不同的权重矩阵; 当 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 {16,8,4}时, 为每个关节点使用一个不同的权重矩阵, $\boldsymbol{W}$ 的个数与关节点数相同。实验结果如表 4 所示。

由表 4 可得, $\boldsymbol{W}$ 的个数为 2 时的自调节图卷积可以解决由不同关节点共享特征变换所带来的问题, 保持模型性能的同时具有较小的参数量。具体如下:

1) 权重不共享的模型性能。与 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 1 时的自调节图卷积相比, $\boldsymbol{W}$ 的个数为 2 时的自调节图卷积在 MPJPE 和 P-MPJPE 值上分别减少了 1.43 mm 和 0.56 mm, 性能分别提高了 3.05% 和 1.47%, 参数量增加了 $0.09\times10^6$。$\boldsymbol{W}$ 的个数为 16 时的自调节图卷积在 MPJPE 和 P-MPJPE 值上分别减少了 1.74 mm 和 0.8 mm, 性能分别提高了 3.72% 和 2.09%, 参数量增加了 $1.24\times10^6$。说明权重不共享能够很好地解决权重共享的局限性, 学习不同人体关节点之间的不同关系模式, 但其对应参数量也会增加。

2) 参数量与权重矩阵个数的关系。与 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 1 时的自调节图卷积相比, $\boldsymbol{W}$ 的个数为 2 时的自调节图卷积与 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 16 时的自调节图卷积在参数量上分别增加了 $0.09\times10^6$ 和 $1.24\times10^6$。由于 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 2 时的自调节图卷积比 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 1 时的自调节图卷积仅多使用了一个权重矩阵, 增加的 $0.09\times10^6$ 为增加一个权重矩阵所带来的参数量。因此, $\boldsymbol{W}$ 的个数为 16 时的自调节图卷积增加参数量是 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 2 时的自调节图卷积增加参数量的 13.8 倍。这与 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 16 时的自调节图卷积所用权重矩阵比 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 1 时的自调节图卷积多 15 个相吻合。说明图卷积的参数量与图卷积过程中的权重矩阵个数有关, 几乎呈线性增长趋势。

3) 权重矩阵个数对模型性能的影响。$\boldsymbol{W}$ 的个数为 16 时的自调节图卷积在参数量几乎线性增长的同时, 与 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 2 时的自调节图卷积相比, 其 MPJPE 和 P-MPJPE 值仅减少了 0.31 mm 和 0.24 mm, 性能分别提高了 0.68% 和 0.64%。说明模型的性能并不随着权重矩阵个数的增加而线性提高, 对其一味增加权重矩阵来提高模型性能是低效的。

因此, 本文在 Joint-UNet 中使用 $\boldsymbol{W}$ 的个数为 2 时的自调节图卷积对关节点特征进行变换, 称为 M-Joint-UNet。

**表 3　Joint-UNet 中使用不同图卷积的性能对比**

**Table 3　Performance comparison of different graph convolutions in Joint-UNet**

| 模型 | $\boldsymbol{W}$的个数 | 通道数 | 参数量 | MPJPE/mm | P-MPJPE/mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 普通图卷积 | 1 | 128 | $0.21\times10^6$ | 51.15 | 40.93 |
| 自调节图卷积 | 1 | 128 | $0.22\times10^6$ | 46.82 | 38.19 |

**表 4　自调节图卷积使用不同个数权重矩阵的性能对比**

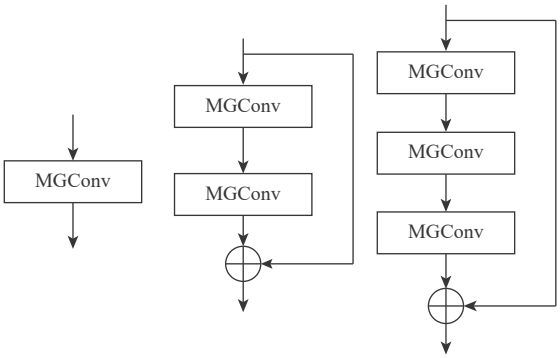
**Table 4　Performance comparison of self-adjusting graph convolution using different number of weight matrices**

| $\boldsymbol{W}$的个数 | 是否权重共享 | 是否关节点分类 | 通道数 | 参数量 | MPJPE/mm | P-MPJPE/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 是 | 否 | 128 | $0.22\times10^6$ | 46.82 | 38.19 |
| 2 | 否 | 是 | 128 | $0.31\times10^6$ | 45.39 | 37.63 |
| {16,8,4} | 否 | 是 | 128 | $1.46\times10^6$ | 45.08 | 37.39 |

### 4.4　自调节图卷积个数对 M-Joint-UNet 的性能影响

深度学习中, 网络的深度对模型的性能有较大影响, 实验考察自调节图卷积个数对 M-Joint-UNet 性能的影响。如图 5 所示, M-Joint-UNet 分别采用 1 个自调节图卷积、2 个残差自调节图卷积和 3 个残差自调节图卷积。实验结果如表 5 所示。

通过实验结果可以看出, 使用 2 个自调节图卷积和 3 个自调节图卷积的 M-Joint-UNet 模型的性能明显优于使用 1 个自调节图卷积的 M-Joint-UNet 模型, MPJPE 值分别减少了 6.63 mm 和 7.06 mm, 性能分别提高了 14.6% 和 15.6%。使用 2 个自调节图




(a) 1个自调节图卷积 (b) 2个自调节图卷积 (c) 3个自调节图卷积

图5 不同个数自调节图卷积示意图

Fig. 5 Illustration of self-adjusting graph convolution with different numbers

**表5 M-Joint-UNet使用不同个数自调节图卷积的性能对比**

**Table 5 Performance comparison of M-Join-UNet using different numbers of self-adjusting graph convolution**

| 自调节图卷积个数 | 通道数 | 参数量 | MPJPE/mm | P-MPJPE/mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 128 | $0.31\times10^6$ | 45.39 | 37.63 |
| 2 | 128 | $0.54\times10^6$ | 38.76 | 31.73 |
| 3 | 128 | $0.65\times10^6$ | 38.33 | 31.15 |

卷积的M-Joint-UNet模型的性能略低于使用3个自调节图卷积的M-Joint-UNet模型的性能，但参数量相对于使用3个自调节图卷积的M-Joint-UNet模型的参数量减少了16.9%。综合以上结果，选择2个自调节图卷积的M-Joint-UNet作为本文的最终模型。

### 4.5 损失函数的权重选择

$L_2$损失虽然有较快的收敛速度，但在预测值与真实值差异较大时，梯度容易爆炸。本文使用$L_1$和$L_2$融合的损失函数，即把2种损失函数都施加于真实值与预测值之间的误差上。为考察不同权重$\alpha$的$L_1$损失对模型性能的影响，实验对比没有使用$L_1$损失的模型，$L_1$损失权重$\alpha$为0.5、0.4、0.3、0.2、0.1的模型性能。实验结果如表6所示。

由表6可得，当$\alpha=0.1$时，模型效果达到最佳，因此，将$L_2$损失与$L_1$损失的权重分别设置为0.9和0.1。

**表6 损失函数权重$\alpha$的选择**

**Table 6 Choice of weight $\alpha$ of loss function**

| $\alpha$ | MPJPE/mm | P-MPJPE/mm |
|---|---|---|
| 0 | 38.76 | 31.73 |
| 0.1 | 37.81 | 30.21 |
| 0.2 | 39.70 | 32.07 |
| 0.3 | 38.82 | 31.49 |
| 0.4 | 40.69 | 33.28 |
| 0.5 | 39.43 | 32.33 |

### 4.6 消融实验

为验证Joint-UNet、自调节图卷积和融合损失函数的有效性，在通道数为128、图卷积个数为2、融合损失函数权重为0.1和0.9的情况下，进行消融实验。

实验由5个子实验组成：Method-A表示仅使用Joint-UNet的模型，Method-B表示仅使用自调节图卷积顺序堆叠的模型，Method-C表示使用Joint-UNet和$L_1$、$L_2$融合损失函数而未使用自调节图卷积的模型，Method-D表示使用自调节图卷积及$L_1$、$L_2$融合损失函数而未使用Joint-UNet的模型，Method-E表示使用Joint-UNet和自调节图卷积而未使用$L_1$、$L_2$融合损失函数的模型。需要说明的是，Method-B与Method-D未使用Joint-UNet结构，而使用了图1(a)所示的顺序结构，Method-A与Method-C未使用自调节图卷积，而使用了普通图卷积，Method-A、Method-B与Method-E未使用$L_1$、$L_2$融合损失函数，而是仅使用了$L_2$损失。实验结果如表7所示。

由表7可得，Method-C和Method-D相对于Method-A和Method-B的性能均有提升，MPJPE值分别减少了0.81 mm和1.04 mm，分别提高了1.81%和2.40%，证明了$L_1$、$L_2$融合损失函数的有效性。Method-E相对于Method-A和Method-B的MPJPE值分别减少了5.91 mm和4.65 mm，分别提高了13.23%和10.71%，证明了Joint-UNet和自调节图卷积的有效性。

### 4.7 与SOTA方法的性能对比

1）SemGCN[31]为每个关节点增加一个额外的

**表7 消融实验结果**

**Table 7 Ablation experiment results**

| 模型 | Joint-UNet | 自调节图卷积 | 融合损失 | 通道数 | 参数量 | MPJPE/mm | P-MPJPE/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Method-A | √ | | | 128 | $0.30\times10^6$ | 44.67 | 37.53 |
| Method-B | | √ | | 128 | $0.52\times10^6$ | 43.41 | 35.63 |
| Method-C | √ | | √ | 128 | $0.30\times10^6$ | 43.86 | 36.48 |
| Method-D | | √ | √ | 128 | $0.52\times10^6$ | 42.37 | 34.13 |
| Method-E | √ | √ | | 128 | $0.54\times10^6$ | 38.76 | 31.73 |
| M-Joint-UNet | √ | √ | √ | 128 | $0.54\times10^6$ | 37.81 | 30.21 |

可学习权重, 以学习骨架结构中隐含的局部语义关系。

2）SemGCN w/non-local[31] 引入非局部层来捕获关节点之间的全局语义关系。

3）High-order GCN[19] 通过对邻接矩阵的混合幂求和来增加图的连通性, 从而达到捕捉人体关节之间长距离依赖关系的目的。

4）HOIF-Net[21] 在高阶图卷积的基础上, 通过使用雅可比方法迭代求解图上的隐式光顺方程, 提出了具有初始残差连接的隐式光顺网络。

实验以二维真实关节点作为输入, 将 M-Joint-UNet 与人体姿态估计模型的 SOTA 方法[19,21,31] 进行对比, 以评估本文模型的性能。实验结果如表 8 所示。

由表 8 可得, 与 HOIF-Net 相比, 在 prococal#1 下, M-Joint-UNet 的 MPJPE 减少了 1.97 mm, 性能提高了4.95%。在prococal#2 下,M-Joint-UNet 的P-MPJPE 下降了 1.05 mm, 性能提高了 3.36%。由此可见, M-Joint-UNet 在 prococal#1 和 prococal#2 下都是最优的。

**表 8　M-Joint-UNet 与 SOTA 人体姿态估计模型的性能对比**

**Table 8　Performance comparison of M-Joint-UNet and SOTA human pose estimation models**

| 模型 | 通道数 | 参数量 | MPJPE/mm | P-MPJPE/mm |
|---|---|---|---|---|
| SemGCN[31] | 128 | $0.27\times10^6$ | 42.14 | 33.53 |
| SemGCN w/non-local[31] | 128 | $0.43\times10^6$ | 40.78 | 31.46 |
| High-order GCN[19] | 128 | $1.20\times10^6$ | 39.68 | 31.69 |
| HOIF-Net[21] | 64 | $0.54\times10^6$ | 39.78 | 31.26 |
| M-Joint-UNet | 128 | $0.54\times10^6$ | 37.81 | 30.21 |

为进一步评估本文模型, 使用经过级联金字塔网络 (cascaded pyramid network, CPN) 检测的二维姿态作为输入, 在 prococal#1 和 prococal#2 下, 比较 M-Joint-UNet 与最先进的三维人体姿态估计方法的性能。实验结果如表 9 和表 10 所示。表中, 第 1 列表示经典的三维人体姿态估计模型, 其余列表示 Human3.6M 数据集中的 15 组动作 (吸烟、遛狗、打

**表 9　prococal#1 下 M-Joint-UNet 与其他基线模型的性能对比**

**Table 9　Performance comparison between M-Joint UNet and other baseline models under proccal # 1**

| 模型 | MPJPE/mm | | | | | | | | | | | | | | | 平均 MPJPE/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Direct | Discuss | Eating | Greet | Phone | Photo | Pose | Purch | Sitting | SittingD. | Smoke | Wait | WalkD. | Walk | WalkT. | |
| 文献[25] | 51.8 | 56.2 | 58.1 | 59.0 | 69.5 | 78.4 | 55.2 | 58.1 | 74.0 | 94.6 | 62.3 | 59.1 | 65.1 | 49.5 | 52.4 | 62.9 |
| 文献[12] | 52.8 | 54.8 | 54.2 | 54.3 | 61.8 | 67.2 | 53.1 | 53.6 | 71.7 | 86.7 | 61.5 | 53.4 | 61.6 | 47.1 | 53.4 | 59.1 |
| 文献[14] | 51.5 | 58.9 | 50.4 | 57.0 | 62.1 | 65.4 | 49.8 | 52.7 | 69.2 | 85.2 | 57.4 | 58.4 | 43.6 | 60.1 | 47.7 | 58.0 |
| 文献[32] | 50.1 | 54.3 | 57.0 | 57.1 | 66.6 | 73.3 | 53.4 | 55.7 | 72.8 | 88.6 | 60.3 | 57.7 | 62.7 | 47.5 | 50.6 | 60.5 |
| 文献[33] | 48.5 | 54.4 | 54.4 | 52.0 | 59.4 | 65.3 | 49.9 | 52.9 | 65.8 | 71.1 | 56.6 | 52.9 | 60.9 | 44.7 | 47.8 | 55.8 |
| 文献[34] | 48.6 | 54.5 | 54.2 | 55.7 | 62.2 | 72.0 | 50.5 | 54.3 | 70.0 | 78.3 | 58.1 | 55.4 | 61.4 | 45.2 | 49.7 | 58.0 |
| 文献[31] | 47.3 | 60.7 | 51.4 | 60.5 | 61.1 | 49.9 | 47.3 | 68.1 | 86.2 | 55.0 | 67.8 | 61.0 | 42.1 | 60.6 | 45.3 | 57.6 |
| 文献[19] | 49.0 | 54.5 | 52.3 | 53.6 | 59.2 | 71.6 | 49.6 | 49.8 | 66.0 | 75.5 | 55.1 | 53.8 | 58.5 | 40.9 | 45.4 | 55.7 |
| 文献[35] | 47.1 | 52.8 | 54.2 | 54.9 | 63.8 | 72.5 | 51.7 | 54.3 | 70.9 | 85.0 | 58.7 | 54.9 | 59.7 | 43.8 | 47.1 | 58.1 |
| 文献[20] | 51.0 | 55.3 | 54.0 | 54.6 | 62.4 | 76.0 | 51.6 | 52.7 | 79.3 | 87.1 | 58.4 | 56.0 | 61.8 | 48.1 | 44.1 | 59.5 |
| 文献[21] | 47.0 | 53.7 | 50.9 | 52.4 | 57.8 | 71.3 | 50.2 | 49.1 | 63.5 | 76.3 | 54.1 | 51.6 | 56.5 | 41.7 | 45.3 | 54.8 |
| 本文 | 45.9 | 50.2 | 48.5 | 51.2 | 53.0 | 62.2 | 47.8 | 47.5 | 59.4 | 69.3 | 51.3 | 48.7 | 54.5 | 38.4 | 42.1 | 51.3 |

**表 10　prococal#2 下 M-Joint-UNet 与其他基线模型的性能对比**

**Table 10　Performance comparison between M-Joint-UNet and other baseline models under proccal # 2**

| 模型 | P-MPJPE/mm | | | | | | | | | | | | | | | 平均 P-MPJPE/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Direct | Discuss | Eating | Greet | Phone | Photo | Pose | Purch | Sitting | SittingD. | Smoke | Wait | WalkD. | Walk | WalkT. | |
| 文献[25] | 39.5 | 43.2 | 46.4 | 47.0 | 51.0 | 56.0 | 41.4 | 40.6 | 56.5 | 69.4 | 49.2 | 45.0 | 49.5 | 38.0 | 43.1 | 47.7 |
| 文献[12] | 42.1 | 44.3 | 45.0 | 45.4 | 51.5 | 53.0 | 43.2 | 41.3 | 59.3 | 73.3 | 51.0 | 44.0 | 48.0 | 38.3 | 44.8 | 48.3 |
| 文献[32] | 38.2 | 41.7 | 39.6 | 45.2 | 45.8 | 46.5 | 37.8 | 42.7 | 52.4 | 62.9 | 45.3 | 40.9 | 45.3 | 38.6 | 38.4 | 44.1 |
| 文献[33] | 47.5 | 50.5 | 48.3 | 49.3 | 50.7 | 55.2 | 46.1 | 48.0 | 61.1 | 78.1 | 51.1 | 48.3 | 52.9 | 41.5 | 46.4 | 51.7 |
| 文献[19] | 38.6 | 42.8 | 41.8 | 43.4 | 44.6 | 52.9 | 37.5 | 38.6 | 53.3 | 60.0 | 44.4 | 40.9 | 46.9 | 32.2 | 37.9 | 43.7 |
| 文献[35] | 36.7 | 39.5 | 41.5 | 42.6 | 46.9 | 53.5 | 38.2 | 36.5 | 52.1 | 61.5 | 45.0 | 42.7 | 45.2 | 35.3 | 40.2 | 43.8 |
| 文献[20] | 38.4 | 43.1 | 42.9 | 44.0 | 47.8 | 56.0 | 39.3 | 39.8 | 61.8 | 67.1 | 46.1 | 43.4 | 48.4 | 40.7 | 35.1 | 46.3 |
| 文献[21] | 36.9 | 42.1 | 40.3 | 42.1 | 43.7 | 52.7 | 37.9 | 37.7 | 51.5 | 60.3 | 43.9 | 39.4 | 45.4 | 31.9 | 37.8 | 42.9 |
| 本文 | 38.2 | 40.0 | 40.1 | 42.8 | 41.3 | 48.3 | 37.0 | 37.4 | 48.2 | 56.0 | 42.1 | 38.2 | 44.6 | 31.4 | 36.2 | 41.5 |

电话、问候等动作)的误差,最后一列为15组动作的平均误差,单位均为mm。

由表9和表10可看出,与经典的三维人体姿态估计模型相比,本文模型在绝大多数动作中表现最好。在prococal#1和prococal#2下,本文模型的性能最好,平均误差最低。与最先进的文献[21]模型相比,平均误差分别减少了3.5 mm和1.4 mm,性能分别提高了6.39%和3.26%。在prococal#1下,本文模型在大多数动作上的性能最优。

为评估本文方法的泛化能力,将在Human3.6M数据集上训练的模型应用于MPI-INF-3DHP的测试集,实验结果如表11所示。

由表11可得,本文方法在室内和室外场景下的性能均优于其他方法。值得注意的是,虽然本文方法是在Human3.6M数据集的室内场景下训练的,但在室外场景中仍取得了令人满意的识别效果,表明本文方法具有很强的泛化性能。

表11 在MPI-INF-3DHP测试集下M-Joint-UNet与其他基线模型的性能对比

Table 11 Performance comparison of M-Joint-UNet with other baseline models in MPI-INF-3DHP test set

| 模型 | 训练集 | PCK | AUC |
|---|---|---|---|
| 文献[25] | Human3.6M | 42.5 | 17.0 |
| 文献[29] | Human3.6M | 64.7 | 31.7 |
| 文献[15] | Human3.6M+MPI-INF-3DHP | 69.2 | 32.5 |
| 文献[32] | Human3.6M+MPI-INF-3DHP | 69.0 | 32.0 |
| 文献[36] | Human3.6M | 65.6 | 33.2 |
| 文献[33] | Human3.6M+MPI-INF-3DHP | 71.9 | 35.3 |
| 文献[37] | Human3.6M | 77.6 | 43.8 |
| 文献[21] | Human3.6M | 72.8 | 36.5 |
| 文献[38] | Human3.6M | 76.1 | 40.6 |
| 文献[39] | Human3.6M | 77.0 | |
| 文献[40] | Human3.6M | 73.4 | |
| 本文 | Human3.6M | 78.9 | 44.3 |

### 4.8 定性展示

图6清晰显示了M-Joint-UNet在Human3.6M数据集上的可视化结果,表明M-Joint-UNet可以准确预测执行各种动作的三维人体姿态,并且预测与真实姿态之间的差异可以忽略不计。从图6可以看到,某些输入的二维姿态并不完美,会产生遮挡,如图6(e)、(f)所示,但本文模型仍然可以产生合理的预测,这从侧面也说明了本文模型的有效性。

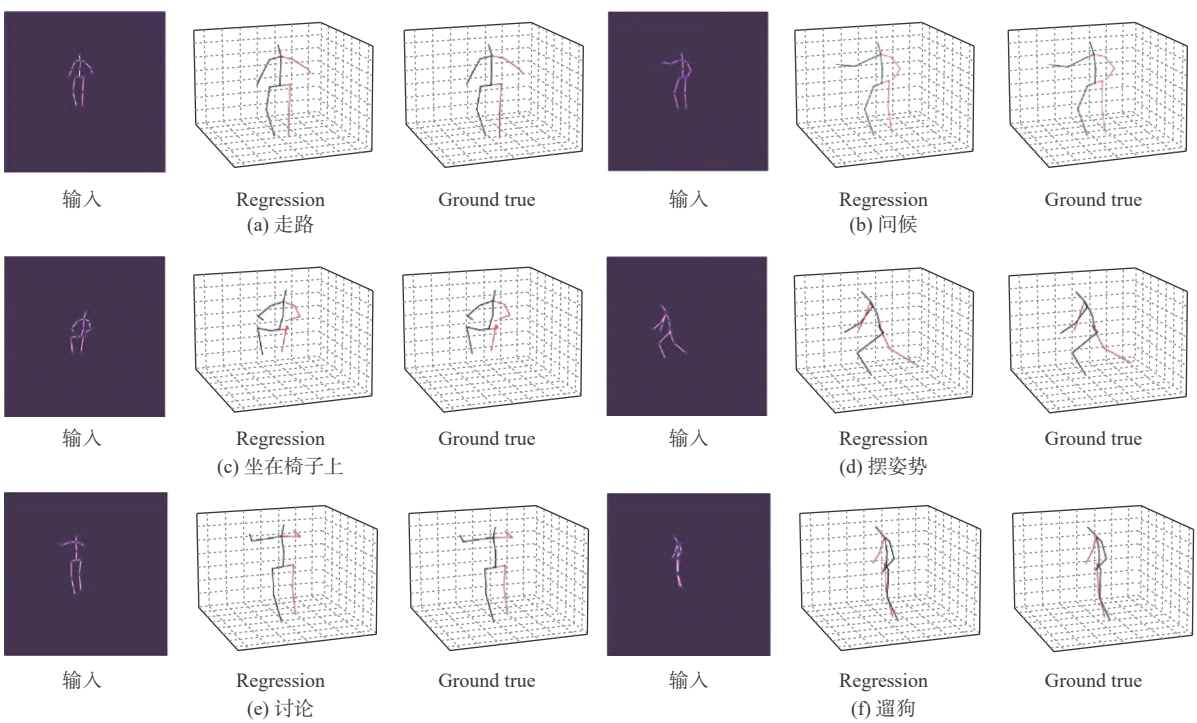



图6 M-Joint-UNet在Human3.6M数据集上的可视化展示

Fig. 6 Visualization of M-Joint-UNet on Human3.6M dataset

## 5 结 论

1)本文设计了Joint-UNet提取关节点的多尺度特征。

2)本文设计子调节图卷积自动调节相邻节点或人体骨架结构的关系。

3)本文设计L1和L2融合的损失函数缓解梯度爆炸。

4)M-Joint-UNet取得了优于对比方法的姿态估计效果。

## 参考文献（References）


[1] WENG J W, WENG C Q, YUAN J S. Spatio-temporal naive-Bayes nearest-neighbor (ST-NBNN) for skeleton-based action recognition [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 445-454.

[2] YAN S J, XIONG Y J, LIN D H. Spatial temporal graph convolutional networks for skeleton-based action recognition[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto: AAAI Press, 2018: 7444-7452.

[3] LI M S, CHEN S H, CHEN X, et al. Actional-structural graph convolutional networks for skeleton-based action recognition[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 3590-3598.

[4] JIANG S Y, SUN B, WANG L C, et al. Skeleton aware multi-modal sign language recognition[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 3408-3418.

[5] GAN J, WANG W Q. In-air handwritten English word recognition using attention recurrent translator[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(7): 3155-3172.

[6] LU D, LUO L. FMKit: An in-air-handwriting analysis library and data repository[C]//Proceedings of the CVPR Workshop on Computer Vision for Augmented and Virtual Reality. [S. l. ]: NSF PAR, 2020.

[7] HASSANIN M, KHAN S, TAHTALI M. Visual affordance and function understanding[J]. ACM Computing Surveys, 2022, 54(3): 1-35.

[8] GARCIA-SALGUERO M, GONZALEZ-JIMENEZ J, MORENO F A. Human 3D pose estimation with a tilting camera for social mobile robot interaction[J]. Sensors, 2019, 19(22): 4943.

[9] GUI L Y, ZHANG K, WANG Y X, et al. Teaching robots to predict human motion[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2018: 562-567.

[10] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.

[11] PAVLAKOS G, ZHOU X W, DERPANIS K G, et al. Coarse-to-fine volumetric prediction for single-image 3D human pose[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1263-1272.

[12] SUN X, SHANG J X, LIANG S, et al. Compositional human pose regression[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2621-2630.

[13] SUN X, XIAO B, WEI F, et al. Integral human pose regression [C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 536-553.

[14] YANG W, OUYANG W L, WANG X L, et al. 3D human pose estimation in the wild by adversarial learning[C]//Proceedings of the IEEE/CVFConference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 5255-5264.

[15] ZHOU X Y, HUANG Q X, SUN X, et al. Towards 3D human pose estimation in the wild: A weakly-supervised approach[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 398-407.

[16] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84-90.

[17] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(11): 2278-2324.

[18] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks[EB/OL]. (2017-02-22)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1609.02907.

[19] ZOU Z, LIU K, WANG L, et al. High-order graph convolutional networks for 3D human pose estimation[C]//Proceedings of the 31st British Machine Vision Conference. [S. l. ]: BMVC, 2020: 1-13.

[20] BANIK S, GARCÍA A M, KNOLL A. 3D human pose regression using graph convolutional network[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE Press, 2021: 924-928.

[21] QUAN J N, BEN HAMZA A. Higher-order implicit fairing networks for 3D human pose estimation[EB/OL]. (2021-11-01)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/2111.00950.

[22] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Berlin: Springer, 2015: 234-241.

[23] GAO H Y, JI S W. Graph U-Nets[C]//Proceedings of the International Conference on Machine Learning. San Diego: PMLR, 2019: 2083-2092.

[24] LIU K K, DING R Q, ZOU Z M, et al. A comprehensive study of weight sharing in graph networks for 3d human pose estimation [C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2020: 318-334.

[25] MARTINEZ J, HOSSAIN R, ROMERO J, et al. A simple yet effective baseline for 3d human pose estimation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2659-2668.

[26] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[C]//Proceedings of the International Conference on Machine Learning. San Diego: PMLR, 2015: 448-456.

[27] NAIR V, HINTON G E. Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning. New York: ACM, 2010: 807-814.

[28] IONESCU C, PAPAVA D, OLARU V, et al. Human3.6M: Large scale datasets and predictive methods for 3D human sensing in natural environments[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 36(7): 1325-1339.

[29] MEHTA D, RHODIN H, CASAS D, et al. Monocular 3D human pose estimation in the wild using improved CNN supervision[C]//Proceedings of the International Conference on 3D Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 506-516.

[30] KINGMA D, BA J. Adam: A method for stochastic optimization [C]//Proceedings of the International Conference on Learning Representations. Appleton: ICLR, 2015: 1-15.

[31] ZHAO L, PENG X, TIAN Y, et al. Semantic graph convolutional networks for 3D human pose regression[C]//Proceedings of the

IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 3420-3430.

[32] FANG H S, XU Y L, WANG W G, et al. Learning pose grammar to encode human body configuration for 3D pose estimation[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto: AAAI Press, 2018, 6821-6828.

[33] PAVLAKOS G, ZHOU X W, DANIILIDIS K. Ordinal depth supervision for 3D human pose estimation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 7307-7316.

[34] SHARMA S, VARIGONDA P T, BINDAL P, et al. Monocular 3D human pose estimation by generation and ordinal ranking[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 2325-2334.

[35] XU Y L, WANG W G, LIU T Y, et al. Monocular 3D pose estimation via pose grammar and data augmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(10): 6327-6344.

[36] LUO C X, CHU X, YUILLE A. OriNet: A fully convolutional network for 3D human pose estimation[EB/OL]. (2018-11-12)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/1811.04989.

[37] ZENG A L, SUN X, HUANG F Y, et al. SRNet: Improving generalization in 3D human pose estimation with a split-and-recombine approach[C]//Proceedings of the 16th European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2020: 507-523.

[38] WANG J, HUANG S L, WANG X C, et al. PONet: Robust 3D human pose estimation via learning orientations only[EB/OL]. (2021-12-21)[2022-12-01]. https://arxiv.org/abs/2112.11153.

[39] WANDT B, RUDOLPH M, ZELL P, et al. CanonPose: Self-supervised monocular 3D human pose estimation in the wild[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 13289-13299.

[40] ROY S K, CITRARO L, HONARI S, et al. On triangulation as a form of self-supervision for 3D human pose estimation[C]//Proceedings of the International Conference on 3D Vision. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-10.

# Self-adjusting graph convolution UNet method for 3D human pose estimation

MA Jinlin[1, 2], CUI Qilei[1], MA Ziping[3, *], WU Jiangtao[1], CAO Haojie[1]

(1. College of Computer Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China;
2. Key Laboratory of the National Ethnic Affairs Commission for Intelligent Processing of Image and Graphics, Yinchuan 750021, China;
3. College of Mathematics and Information Science, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract**: A few issues with the graph convolutional network-based 3D human pose estimation technique include the shared weight of all nodes, the incapacity to extract the multi-scale properties of the nodes, and the failure to take advantage of the topological relationships between neighboring nodes. In this paper, self-adjusting graph convolution UNet method for 3D human pose estimation (M-Joint-UNet) is proposed. M-Joint-UNet is composed of three parts: Joint-UNet, self-adjusting graph convolution, and fusion loss. Joint-UNet changes the size of the feature map through node pooling and unpooling to extract features of different scales of nodes. Self-adjusting graph convolution uses $L_1$ and $L_2$ fusion to mitigate gradient explosions and automatically modifies the relationship between neighboring nodes or the human skeletal structure using a learnable matrix. Comparative experiments show that the proposed method obtains optimal results in terms of the number of parameters and the estimation performance. With the 2D ground truth of Human3.6M as the input, the number of parameters is only $0.54\times10^6$, and the MPJPE and P-MPJPE values are 37.81 mm and 30.21 mm, respectively.

**Keywords**: 3D human pose estimation; graph convolution; Graph-UNet; joint pool; weight matrix

**Received**: 2022-12-06; **Accepted**: 2023-04-21; **Published Online**: 2023-05-25 11:00

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230524.1124.001

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (62462001); Natural Science Foundation of Ningxia (2024AAC03147, 2023AAC03264); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2023ZRLG02)

* **Corresponding author**. E-mail: 2006041@nmu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0975

# 用 Critic 赋权法加权邻域粗糙集的属性约简算法

吴尚智[1,*]，任艺璇[2]，葛舒悦[1]，王立泰[1]，王志宁[1]

(1. 西北师范大学 计算机科学与工程学院，兰州 730070；2. 国家税务总局武安市税务局，邯郸 056300)

**摘 要**：邻域粗糙集相比经典粗糙集能够处理非离散型数据和高维度数据，具有获得简化数据且不降低数据处理的能力。针对邻域粗糙集中每个属性具有相同权重，且每个属性对决策的影响程度不同的问题，提出用 Critic 赋权法加权邻域粗糙集的属性约简算法。使用 Critic 赋权法为条件属性赋权，引入加权距离函数计算邻域关系，得到加权邻域关系；构建加权邻域粗糙集，采用属性依赖度和重要度评估子集的重要性，使用等距搜索寻找最佳阈值，进行属性约简找到最优属性子集；采用 UCI 库中的 10 个数据集进行实验验证，与传统邻域粗糙集的属性约简算法的性能进行比较分析。实验结果表明：所提算法可得到最小属性约简集，并可保证约简后数据的分类准确率，具有有效性和实际应用价值。

**关 键 词**：Critic 赋权法；邻域粗糙集；属性约简；加权邻域关系；属性依赖度

**中图分类号**：TP301.6

**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0075-10

粗糙集理论[1]是 Pawlak 提出的一种处理知识中模糊性和不确定性问题的数学工具，属性约简是粗糙集理论研究的核心内容之一。经典粗糙集理论拥有严格的等价关系。非离散型数据需要离散化处理[2]，实际应用中，所处理数据往往为非离散型。许多学者扩展了粗糙集模型研究，如基于邻域关系的邻域粗糙集[3]、基于模糊对等关系的模糊粗糙集[4]等，这些扩展粗糙集模型已被广泛应用于图像处理[5]、数据挖掘[6]、人工智能[7]等诸多领域。

大数据时代，数据量大且数据维度很高，传统方法处理高维度数据时，很难达到较高的效率，因此，属性约简是十分必要的。属性约简是对经过信息粒化与近似逼近的原始数据集的条件属性进行约简，剔除冗余属性，得到更简洁的数据，且不降低数据处理的能力。

邻域粗糙集能更好地进行属性约简。文献 [8] 讨论了邻域算子和粗糙集近似算子的关系，提出了基于邻域系统的广义粗糙集近似算子。文献 [9] 指出，可以使用邻域模型为不同属性分配不同的阈值，进而减少数值和分类特征，并提出了基于邻域粗糙集来处理异构特征子集选择。文献 [10] 通过上下边界区域定义特征重要性，使用基于可辨别矩阵的特征选择方法，提出了基于邻域粗糙集的不平衡数据特征选择。文献 [11] 结合优势关系和邻域关系的优点，提出了基于优势邻域粗糙集中的并行属性约简。文献 [12] 结合邻域粗糙集和 F-粗糙集的优势，提出了 F-邻域粗糙集和 F-邻域并行约简。文献 [13] 结合 delta 邻域和 k 近邻的优点，提出了一种新的邻域粗糙集模型，称为 k-最近邻域粗糙集。但在邻域粗糙集研究上，研究者没有考虑属性的重要性，每种属性对结果的影响是不同的，如果提前考虑条件属性和决策之间的内部相关性，可以更容易地选择具有高相关性和依赖性的属性。因此，本文用赋权法对属性进行赋权，从而使不同属性具有

**收稿日期**：2022-12-15；**录用日期**：2023-05-05；**网络出版时间**：2023-05-15 09:48
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230512.1629.002
**基金项目**：国家自然科学基金 (12161082,61861039)
* **通信作者**. E-mail：wusz@nwnu.edu.cn

*引用格式：吴尚智，任艺璇，葛舒悦，等. 用 Critic 赋权法加权邻域粗糙集的属性约简算法 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：75-84. WU S Z，REN Y X，GE S Y，et al. An attribute reduction algorithm of weighting neighborhood rough sets with Critic method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：75-84（in Chinese）.*

不同的权重，进而更好地对数据做出更加高效准确的处理。

属性的权重是其重要性的体现。文献[14]利用决策树提出了一种多粒化区间值决策的粒化加权模型。文献[15]利用基于核函数的模糊粗糙集定义了加权Parzen函数，提出了一种新的基于加权Parzen函数的k近邻分类算法，以提高分类精度。文献[16]提出了一种新的基于有序加权平均的权重选择策略，以提高模糊粗糙集的抗噪声能力。赋权法主要有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法对属性的权重确定依赖于人的主观性，在使用时需要相关专家的介入；而客观赋权法通过对原始数据的计算便能得到权重值，被广泛使用。常用的客观赋权法有熵权法[17]、标准离差法[18]及Critic赋权法[19]。吴希[20]通过比较发现，Critic赋权法计算权重时，既考虑了关联性对指标的影响，又考虑了变异性对指标的影响，比其他2种方法更加全面。

为解决邻域粗糙集的属性约简未考虑到每个属性对决策影响不同的问题，本文提出了使用Critic赋权法加权邻域粗糙集的属性约简算法。首先，由于条件属性对决策的影响不同，用Critic赋权法计算属性的变异性评价和冲突性指数，为条件属性赋权。然后，确定加权邻域关系时，使用加权距离函数得到加权邻域关系及其他相关定义和性质，构建加权邻域粗糙集。最后，将依赖度[21]和属性重要度作为评价子集重要性的指标，进行属性约简。在UCI库中的10个数据集上进行实验验证，结果表明，用Critic赋权法加权邻域粗糙集的属性约简算法不仅能够降低维度，还能提高分类准确率。

## 1 相关理论

### 1.1 邻域粗糙集

给定一个信息系统$S=(U,C,D,f)$，该系统是由$m$个属性构成的数据对象集，其中，$U=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$为全部样本集合，$C=\{a_1,a_2,\cdots,a_m\}$为样本的条件属性集合，$D$为决策属性集合，$f(x_i,a_j)$为样本$x_i$在属性$a_j$上的取值。

**定义1** 对于信息系统$S$，在集合$U$中的任意$x_i\in U$，则$x_i$在$U$上的邻域$\delta(x_i)$定义为

$$\delta(x_i)=\{x_j\in U,\Delta(x_i,x_j)\leqslant\delta\} \tag{1}$$

式中：$\delta$为邻域半径；$x_j$为集合$U$中的元素；$\Delta$为$U$上的距离函数，且$(U,\Delta)$为度量空间，对于任意的$x_1,x_2,x_3\in U$，$\Delta$满足：

1）$\Delta(x_1,x_2)\geqslant 0$，当且仅当$x_1=x_2$时，$\Delta(x_1,x_2)=0$；

2）$\Delta(x_1,x_2)=\Delta(x_2,x_1)$；

3）$\Delta(x_1,x_3)\leqslant\Delta(x_1,x_2)+\Delta(x_2,x_3)$。

**定义2** 给定一个五元组为$\{U,A,V,f,\delta\}$，$A=C\cup D$且$C\cap D=\varnothing$。其中，$U$为对象集，$C$为条件属性集，$D$为决策属性集，$V$为属性值集合，$f$为信息函数。当$D$为非空有限集合时，该系统为邻域决策系统$[NDS]=\{U,C\cup D,V,f,\delta\}$。

**定义3** 给定一个邻域决策系统$[NDS]=\{U,C\cup D,V,f,\delta\}$，其中，$U=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$为有限样本集合，$B\subseteq C$，$\forall x_i\in U$，称$N_B$为属性子集$B$在$U$上的邻域关系，定义为

$$N_B=\{(x_i,x_j)\,|x_i,x_j\in U\text{且}x_j\in\delta_B(x_i),\delta\geqslant 0\} \tag{2}$$

式中：$\delta_B(x_i)=\{x_j\in U,\Delta(x_i,x_j)\leqslant\delta\}$表示$x_i$在属性子集$B$上的$\delta$-邻域，$\delta=0$时，邻域关系变为等价关系。

**定义4** 给定一个邻域决策系统$[NDS]=\{U,C\cup D,V,f,\delta\}$，集合$X_1,X_2,\cdots,X_N$为$U$在$D$上的划分，$B\subseteq C$生成$U$上的邻域关系$N_B$，$\delta_B(x_i)$表示$x_i$在$B$上的$\delta$-邻域，则$D$关于属性子集$B$的上近似、下近似集定义为

$$\overline{N_B}(D)=\bigcup_{i=1}^{N}\overline{N_B}(X_i) \tag{3}$$

$$\underline{N_B}(D)=\bigcup_{i=1}^{N}\underline{N_B}(X_i) \tag{4}$$

式中：

$$\overline{N_B}(X)=\{x_i|\delta_B(x_i)\cap X\neq\varnothing,x_i\in U\} \tag{5}$$

$$\underline{N_B}(X)=\{x_i|\delta_B(x_i)\subseteq X,x_i\in U\} \tag{6}$$

另外，$D$关于属性子集$B$的正域为$[pos]_B(D)=\underline{N_B}(D)$，负域为$[neg]_B(D)=U-\overline{N_B}(D)$，边界域为$[bnd]_B(D)=\overline{N_B}(D)-\underline{N_B}(D)$。

**定义5** 给定一个邻域决策系统$[NDS]=\{U,C\cup D,V,f,\delta\}$，子集$B$是属性集合$C$的子集，则$D$对于属性子集$B$的依赖度为

$$\gamma_B(D)=|[pos]_B(D)|/|U|\qquad 0\leqslant\gamma_B(D)\leqslant 1 \tag{7}$$

**定义6** 给定一个邻域决策系统$[NDS]=\{U,C\cup D,V,f,\delta\}$，$B\subseteq C$，若属性子集$B$满足：

1）$\gamma_B(D)=\gamma_C(D)$；

2）$\forall a\in B,\gamma_{B-\{a\}}(D)<\gamma_B(D)$。

则称属性子集$B$是属性集合$C$的一个属性约简。

### 1.2 Critic赋权法

Critic赋权法[22]是由Diakoulaki提出的一种处理多元准则的客观赋权法，其基本思想是：构造权重时，以对比强度和冲突性作为基础。其中，对比强度用标准差的形式体现，一般来说，标准差越大，各类别的差距越大。而冲突性则用各指标之间的相关系数体现，如果指标之间的负相关性较大，则冲突性较大。引入信息量，其数学计算公式为：$H_j=S_j\sum_{i=1}^{p}(1-r_{ij})$。其中，$p$为属性数量，$S_j$为标准差，$r_{ij}$为相关系数。

$H_j$ 越大, 第 $j$ 个属性对决策的影响作用越大, 应给其分配更多的权重。因此, 第 $j$ 个属性的客观权重表示为 $W_j = H_j \Big/ \sum_{j=1}^{p} H_j$。

## 2　属性约简算法

计算邻域关系前有必要挖掘属性和决策之间的内在相关性。如果属性与决策之间的内在相关性较高, 则属性的权重较大; 否则, 权重应更小。

### 2.1　Critic 赋权法计算属性权重

给定一个信息系统 $S=(U,C,D,f)$, 该信息系统是有 $m$ 个属性构成的数据对象集。

1) 无量纲化处理。不同的属性之间数量级不同, 会对结果有不同影响, 需要对数据进行无量纲化处理, 消除不同属性之间的数量级差异。

2) 计算属性变异性评价。

$$M(a_j)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f(x_i,a_j) \tag{8}$$

$$S_{\mathrm{td}}(a_j)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(f(x_i,a_j)-M(a_j)\right)^2}{n-1}} \tag{9}$$

式(8)表示属性 $a_j$ 的平均值, 式(9)表示属性 $a_j$ 的标准差。

在 Critic 赋权法中, 用标准差反映各属性的取值波动情况, 属性的数值之间差异越大, 则标准差越大, 越能反映更多的信息, 该属性对决策的影响强度也越强, 应赋予较大的权重。

3) 计算属性冲突性指数。

$$R(a_j)=\sum_{i=1}^{m}\left(1-r(a_i,a_j)\right) \tag{10}$$

式(10)表示属性 $a_j$ 的冲突性指数, $r(a_i,a_j)$ 表示属性 $a_i$ 与属性 $a_j$ 之间的相关系数, 由相似度函数求得。

属性冲突性由属性与属性之间的相关系数决定, 与其他属性的相关性越高, 则该属性的冲突性就越小, 反映的信息相同度越高, 对决策的影响强度也越小, 应赋予较小的权重。用 Critic 赋权法时, 当标准差一定时, 属性之间冲突性越小, 所赋权重也越小; 冲突性越大, 所赋权重也越大。

4) 计算信息量。

$$H(a_j)=S_{\mathrm{td}}(a_j)R(a_j) \tag{11}$$

5) 计算属性客观权重。

$$w(a_j)=H(a_j)\Big/\sum_{j=1}^{m}H(a_j) \tag{12}$$

**定义 7**　给定信息系统 $S=(U,C,D,f)$, 属性的权重集合 $w$ 定义为

$$w=\{w(a_1),w(a_2),\cdots,w(a_m)\} \tag{13}$$

### 2.2　构建加权邻域粗糙集

传统邻域粗糙集在确定邻域时未考虑属性对决策的影响不同, 却对评估子集重要性有着一定的影响, 因此, 用不同的权重计算不同属性的邻域相似关系。本文引入加权距离函数确定邻域关系, 构建加权邻域粗糙集。

给定一个信息系统 $S=(U,C,D,f,w)$, $U=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 表示全部样本集合, $C=\{a_1,a_2,\cdots,a_m\}$ 表示条件属性, $D$ 表示决策属性, $f(x_i,a_j)$ 表示样本 $x_i$ 在属性 $a_j$ 上的取值, $w=\{w(a_1),w(a_2),\cdots,w(a_m)\}$ 表示给定信息系统的属性权重集合。

**定义 8**　对于给定信息系统中, $U$ 为有限非空样本集合, $C$ 表示条件属性, $w(a_k)\in w$, $B\subset C$。假设 $\forall x_i,x_j\in U,\forall a_k\in B$, 则加权距离函数定义为

$$[wd]_B(x_i,x_j)=\sqrt{\sum_{k=1}^{m}\left[w(a_k)\left(f(x_i,a_k)-f(x_j,a_k)\right)\right]^2} \tag{14}$$

当 $x_1,x_2,x_3\in U$, 加权距离函数满足如下关系:

1) $[wd]_B(x_1,x_2)\geqslant 0$, 当且仅当 $x_1=x_2$ 时 $[wd]_B(x_1,x_2)=0$;

2) $[wd]_B(x_1,x_2)=[wd]_B(x_2,x_1)$;

3) $[wd]_B(x_1,x_3)\leqslant[wd]_B(x_1,x_2)+[wd]_B(x_2,x_3)$。

**性质 1**　对于 $B_1\subset B_2\subseteq C$, 任意 $x_i,x_j\in U$, 加权距离 $[wd]_B(x_i,x_j)$ 有: $[wd]_{B_1}(x_i,x_j)\leqslant[wd]_{B_2}(x_i,x_j)$。

**证明**　设 $B_1=\{a_1,a_2,\cdots,a_p\}$, $B_2=\{a_1,a_2,\cdots,a_m\}$, $p\leqslant m$, 则有

$$[wd]_{B_1}(x_i,x_j)=\sqrt{\sum_{k=1}^{p}\left[w(a_k)\left(f(x_i,a_k)-f(x_j,a_k)\right)\right]^2}$$

$$[wd]_{B_2}(x_i,x_j)=\sqrt{\sum_{k=1}^{m}\left[w(a_k)\left(f(x_i,a_k)-f(x_j,a_k)\right)\right]^2}$$

因为 $\left[w(a_k)\left(f(x_i,a_k)-f(x_j,a_k)\right)\right]^2$ 的值恒大于 0, 且 $p\leqslant m$, 所以, $[wd]_{B_1}(x_i,x_j)\leqslant[wd]_{B_2}(x_i,x_j)$。

**定义 9**　对于信息系统 $S$, $\forall x_i\in U$, $[wd]_B$ 为 $U$ 上的加权距离函数, $B$ 为属性集合 $C$ 的属性子集, $\delta$ 为正实数, 则 $x_i$ 在属性子集 $B$ 上的 $\delta$-加权邻域定义为

$$[w\delta]_B(x_i)=\{x_j\in U,[wd]_B(x_i,x_j)\leqslant\delta\} \tag{15}$$

$[w\delta]_B(x_i)$ 又称为 $x_i$ 在 $B$ 上的 $\delta$-加权邻域信息粒, 加权距离函数 $[wd]_B(x_i,x_j)$ 和邻域半径 $\delta$ 决定了 $x_i$ 的邻域大小。邻域半径 $\delta$ 的值越大, 邻域越大, 邻

域内点越多。邻域粒子簇$\{[w\delta]_B(x_i)|i=1,2,\cdots,n\}$构成了$U$的一个覆盖。

**性质 2** 给定任意一个正整数$\delta>0$, $B_1\subset B_2\subseteq C$, 对于$\forall x_i\in U$, 都有$[w\delta]_{B_2}(x_i)\subseteq[w\delta]_{B_1}(x_i)$。

**证明** 令$y\in[w\delta]_{B_2}(x_i)$, 则$[wd]_{B_2}(x_i,y)\leqslant\delta$, 根据性质 1 可知, $[wd]_{B_1}(x_i,y)\leqslant[wd]_{B_2}(x_i,y)\leqslant\delta$。因此, $y\in[w\delta]_{B_1}(x_i)$, 即$[w\delta]_{B_2}(x_i)\subseteq[w\delta]_{B_1}(x_i)$。

**定义 10** 对于信息系统$S$, $B$为属性集合$C$的子集, $\delta$为正实数, 则属性子集$B$导出的$x_i$在$U$上的加权邻域关系定义为

$$[WN]_B=\left\{\left(x_i,x_j\right)|x_i,x_j\in U且x_j\in[w\delta]_B(x_i),\delta\geqslant 0\right\} \tag{16}$$

式中: $[w\delta]_B(x_i)=\left\{x_j\in U,[wd]_B\left(x_i,x_j\right)\leqslant\delta\right\}$表示$x_i$在属性子集$B$上的加权$\delta$-邻域, 即给定$\forall x_i,x_j\in U$, $\forall a_k\in B$, 加权邻域关系表达式为

$$[WN]_B=\left\{\left(x_i,x_j\right)\left|\sqrt{\sum_{k=1}^{m}\left[w(a_k)\left(f(x_i,a_k)-f\left(x_j,a_k\right)\right)\right]^2}\leqslant\delta\right.\right\} \tag{17}$$

计算邻域关系时, 当$w(a_k)>1$时, 则表示属性$a_k$在计算时较为重要; 当$w(a_k)<1$时, 则表示该属性的重要程度下降; 当$w(a_k)=1$时, $[WN]_B$则与传统邻域关系相同。即加权邻域关系是传统邻域关系的扩展, 而传统的邻域关系是加权邻域关系的特例。

**性质 3** 给定信息系统$S$, $[WN]_B$是加权邻域关系, 对于$U$中的任意$x_i,x_j$, 满足自反性和对称性, 并且根据定义 8 中加权距离函数所满足的关系易证。

**性质 4** 给定信息系统$S$, $B_1\subset B_2\subseteq C$, 对于$\delta$为给定正整数, $\forall x_i,x_j\in U$, 都有$[WN]_{B_2}\subseteq[WN]_{B_1}$。

**证明** 若$(x_i,x_j)\in[WN]_{B_2}$, 则$x_j\in[w\delta]_{B_2}(x_i)$, 由性质 2 得, $[w\delta]_{B_2}(x_i)\subseteq[w\delta]_{B_1}(x_i)$, 因此, $x_j\in[w\delta]_{B_1}(x_i)$, 即$(x_i,x_j)\in[WN]_{B_1}$。故有$[WN]_{B_2}\subseteq[WN]_{B_1}$。

**性质 5** 给定 2 个正整数$\delta_1$和$\delta_2$, $\delta_1<\delta_2$, 对任意的$B\subseteq C$, 都有$[WN]_B^{\delta_1}\subseteq[WN]_B^{\delta_2}$。

**证明** 若$(x_i,x_j)\in[WN]_B^{\delta_1}$, 则$x_j\in[w\delta]_B^{\delta_1}(x_i)$, $[wd]_B(x_i,x_j)\leqslant\delta_1<\delta_2$。因此, $x_j\in[w\delta]_B^{\delta_2}(x_i)$, 即$(x_i,x_j)\in[WN]_B^{\delta_2}$。故有$[WN]_B^{\delta_1}\subseteq[WN]_B^{\delta_2}$。

**定义 11** 给定信息系统$S$, $X\subseteq U$, $B\subseteq C$, $[w\delta]_B(x_i)$为$x_i$在$B$上的$\delta$-加权邻域, 则$X$对于$B$的上、下近似表示为

$$\overline{[WN]_B}(X)=\{x_i|[w\delta]_B(x_i)\cap X\neq\varnothing,x_i\in U\} \tag{18}$$

$$\underline{[WN]_B}(X)=\{x_i|[w\delta]_B(x_i)\subseteq X,x_i\in U\} \tag{19}$$

当$\overline{[WN]_B}(X)=\underline{[WN]_B}(X)$时, 说明$X$可以用加权邻域关系来精确表示; 反之, 则不可以。$X$为$U$上的一个加权邻域粗糙集。

**定义 12** 给定信息系统$S$, $B$为条件属性$C$的子集, $B\subseteq C$, $U/D=\{X_1,X_2,\cdots,X_k\}$为$D$在$U$上的划分, 则$D$关于$B$的加权上、下近似表示为

$$\overline{[WN]_B}(D)=\bigcup_{i=1}^{k}\overline{[WN]_B}(X_i) \tag{20}$$

$$\underline{[WN]_B}(D)=\bigcup_{i=1}^{k}\underline{[WN]_B}(X_i) \tag{21}$$

另外, $D$关于$B$的正域、负域和边界域分别表示为: $[Wpos]_B(D)=\underline{[WN]_B}(D)$, $[Wneg]_B(D)=U-\overline{[WN]_B}(D)$, $[Wbnd]_B(D)=\overline{[WN]_B}(D)-\underline{[WN]_B}(D)$。当边界域等于零时, 即上下近似相同, 则$B$是精确的。当正域集合内的样本越多时, 则表示属性子集$B$和决策属性集$D$的相关性较高, $B$的近似能力和判定能力越强。

**定义 13** 给定信息系统$S$, $C$为条件属性, $D$为决策属性, $B$为条件属性子集, $B\subseteq C$, $[WN]_B$为$U$上的加权邻域相似关系, 则$D$对于$B$的加权依赖度表示为

$$[w\gamma]_B(D)=\left|[Wpos]_B(D)\right|/|U| \tag{22}$$

依赖度反映了条件属性子集和决策属性子集相关性, 依赖度的值越大, 则它们的相关性越大, 即属性子集$B$逼近于$D$的能力越强。

由性质 2 可知, 依赖度和属性子集的大小呈正相关, 当属性子集$B$中的属性增加时, $\delta$-加权邻域越小, $D$关于$B$的下近似集越大, 依赖度越大。同理, 由性质 5 可知, 与邻域半径的大小呈现负相关, $\delta$越大, 依赖度越小。

依赖度除了与属性子集大小及邻域半径相关外, 也与属性的权重有很大的关系。通过实例对比加权邻域粗糙集依赖度和传统邻域粗糙集的依赖度, 证明权重对属性子集的依赖度有影响。

实例如下: 表 1 给定一个信息系统, 其中, $U$为样本空间, $C=\{a_1,a_2,a_3,a_4\}$为条件属性集, $D=\{d\}$为决策属性集。样本可以被分为 2 类: $D_1=\{x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6\}$和$D_2=\{x_7,x_8,x_9,x_{10},x_{11},x_{12}\}$。

给定 2 个属性集合$B_1=\{a_1,a_2\}$, $B_2=\{a_3,a_4\}$, 邻域半径$\delta$为 0.01, 则属性子集$B_1$、$B_2$下的$\delta$-邻域如表 2 所示。可以看出, $D$关于属性子集$B_1$和$B_2$的正域均为$U$, 则$\gamma_1=\gamma_2=1$, 即$B_1$近似于$D$的能力与$B_2$近似于$D$的能力相同。

相同的信息系统中, 属性子集$B_1$、$B_2$下的加权邻域如表 3 所示。可以得到: $[Wpos]_{B_1}(D)=\{x_2,x_3,x_4,x_{10},x_{11},x_{12}\}$, $[Wpos]_{B_2}(D)=\{x_2,x_3,x_5,x_6,x_7,x_9,x_{11},x_{12}\}$, 此时$[w\gamma]_1=0.5$, $[w\gamma]_2=0.67$。通过加权邻域粗糙

集的依赖度可知, $B_2$ 近似于 $D$ 的能力优于 $B_1$ 近似于 $D$ 的能力。

**表 1　某信息系统统计信息**

**Table 1　Statistical information of an information system**

| $U$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $d$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | 0.06 | 0.91 | 0.11 | 0.08 | 1 |
| $x_2$ | 0.03 | 0.92 | 0.32 | 0.10 | 1 |
| $x_3$ | 0.03 | 0.43 | 0.31 | 0.14 | 1 |
| $x_4$ | 0.06 | 0.41 | 0.45 | 0.11 | 1 |
| $x_5$ | 0.05 | 0.68 | 0.67 | 0.13 | 1 |
| $x_6$ | 0.09 | 0.12 | 0.81 | 0.14 | 1 |
| $x_7$ | 0.08 | 0.69 | 0.23 | 0.03 | 2 |
| $x_8$ | 0.12 | 0.21 | 0.39 | 0.07 | 2 |
| $x_9$ | 0.10 | 0.89 | 0.61 | 0.03 | 2 |
| $x_{10}$ | 0.14 | 0.93 | 0.78 | 0.09 | 2 |
| $x_{11}$ | 0.13 | 0.41 | 0.74 | 0.07 | 2 |
| $x_{12}$ | 0.14 | 0.43 | 0.91 | 0.03 | 2 |

**表 2　$B_1$、$B_2$ 的邻域**

**Table 2　Neighborhood of $B_1$ and $B_2$**

| $U$ | $B_1$ | $B_2$ |
|---|---|---|
| $x_1$ | $\{x_1\}$ | $\{x_1\}$ |
| $x_2$ | $\{x_2\}$ | $\{x_2\}$ |
| $x_3$ | $\{x_3\}$ | $\{x_3\}$ |
| $x_4$ | $\{x_4\}$ | $\{x_4\}$ |
| $x_5$ | $\{x_5\}$ | $\{x_5\}$ |
| $x_6$ | $\{x_6\}$ | $\{x_6\}$ |
| $x_7$ | $\{x_7\}$ | $\{x_7\}$ |
| $x_8$ | $\{x_8\}$ | $\{x_8\}$ |
| $x_9$ | $\{x_9\}$ | $\{x_9\}$ |
| $x_{10}$ | $\{x_{10}\}$ | $\{x_{10}\}$ |
| $x_{11}$ | $\{x_{11}\}$ | $\{x_{11}\}$ |
| $x_{12}$ | $\{x_{12}\}$ | $\{x_{12}\}$ |

**表 3　$B_1$、$B_2$ 的加权邻域**

**Table 3　Weighted neighborhood of $B_1$ and $B_2$**

| $U$ | $B_1$ | $B_2$ |
|---|---|---|
| $x_1$ | $\{x_1, x_2, x_5, x_7, x_9\}$ | $\{x_1, x_2, x_8\}$ |
| $x_2$ | $\{x_1, x_2, x_5\}$ | $\{x_1, x_2, x_4\}$ |
| $x_3$ | $\{x_3, x_4, x_5\}$ | $\{x_3, x_5\}$ |
| $x_4$ | $\{x_3, x_4\}$ | $\{x_2, x_4, x_5, x_{10}\}$ |
| $x_5$ | $\{x_1, x_2, x_3, x_5, x_7\}$ | $\{x_3, x_4, x_5, x_6\}$ |
| $x_6$ | $\{x_6, x_8\}$ | $\{x_5, x_6\}$ |
| $x_7$ | $\{x_1, x_5, x_7\}$ | $\{x_7, x_9\}$ |
| $x_8$ | $\{x_6, x_8, x_{11}, x_{12}\}$ | $\{x_1, x_8, x_{10}, x_{11}\}$ |
| $x_9$ | $\{x_1, x_7, x_9, x_{10}\}$ | $\{x_7, x_9, x_{12}\}$ |
| $x_{10}$ | $\{x_9, x_{10}\}$ | $\{x_4, x_8, x_{10}, x_{11}\}$ |
| $x_{11}$ | $\{x_8, x_{11}, x_{12}\}$ | $\{x_8, x_{10}, x_{11}\}$ |
| $x_{12}$ | $\{x_8, x_{11}, x_{12}\}$ | $\{x_9, x_{12}\}$ |

使用邻域粗糙集时, $B_1$ 和 $B_2$ 近似于 $D$ 的能力是相同的, 通过实验得出结果如表 4 所示, 选择 $B_1$ 作为特征子集时的准确率没有选择 $B_2$ 作为特征子集时的准确率高。然而, 用加权邻域粗糙集对比加权依赖度, 可知 $B_2$ 近似于 $D$ 的能力优于 $B_1$ 近似于 $D$ 的能力。结果与实验结果相同。

**表 4　实验结果**

**Table 4　Experimental results**

| 属性子集 | 准确率/% | |
|---|---|---|
| | KNN | SVM |
| $\{a_1, a_2\}$ | 75 | 83.3 |
| $\{a_3, a_4\}$ | 83.3 | 91.7 |

### 2.3　算法描述

**定义 14**　给定一个信息系统 $S$, 任意一个属性子集 $B \subseteq C$, 属性 $a \in C - B$, 则属性 $a$ 对决策属性 $D$ 的加权属性重要度为

$$[Wsig](a, B, D) = [w\gamma]_{B+\{a\}}(D) - [w\gamma]_B(D) \tag{23}$$

属性 $a$ 对决策属性 $D$ 的加权属性重要度表示原条件属性集 $B$ 中没有属性 $a$, 则增加属性 $a$ 后, 决策属性 $D$ 对条件属性 $B$ 的加权依赖度增加的程度。

用 Critic 赋权法加权邻域粗糙集的属性约简算法描述如下:

**输入:** 数据集、邻域半径。

**输出:** 约简属性子集 Red。

**步骤 1**　对数据集进行标准归一化处理。

**步骤 2**　使用式(8)和式(9)计算每个属性的平均值和标准差。

**步骤 3**　使用式(10)计算属性之间的相关系数及每个属性的冲突性指数。

**步骤 4**　使用式(11)计算每个属性的信息量, 式(12)计算每个属性的权重, 构造属性的权重集合(式(13))。

**步骤 5**　初始化约简属性子集 Red 值为空。

**步骤 6**　用式(22)计算每个属性的加权依赖度。

**步骤 7**　使用式(23)计算属性的加权属性重要度, 选择加权属性重要度最大的属性。

**步骤 8**　当加权属性重要度不等于零时, 执行步骤 9, 否则跳转到步骤 11。

**步骤 9**　把属性重要度最大的属性加入到约简属性子集 Red 中。

**步骤 10**　遍历未选择属性集合的每个属性 $a_i$, 使用式(22)计算 $[w\gamma]_{\mathrm{Red}+\{a_i\}}(D)$, 返回步骤 7。

**步骤 11**　算法结束。

算法中, 先输入数据集、邻域半径, 经过计算得到约简后的属性子集。在步骤 1～步骤 4 中, 用 Critic

赋权法计算每个属性的权重值，步骤6和步骤8中用加权距离函数(式(14))计算每个样本的加权邻域类(式(15))，根据加权邻域类计算每个分类的加权下近似集(式(19))，再整理合并所有下近似集(式(21))，计算出加权依赖度(式(22))。

由邻域半径过大会导致无法得到有效特征属性集合，邻域半径过小会导致特征属性集合为空。为此，本文实验选择不同的数据集确定不同的邻域半径参数，提高准确率。

## 3 实验结果及分析

实验数据选用UCI数据库中10个数据集，数据集的基本信息如表5所示，即每个数据集的样本数和属性数各不相同。各数据集中的属性最少的数据集中有6个属性，属性最多的数据集中有54个属性，各数据集均无缺失数据。

为验证本文算法的有效性，用约简后的属性对数据构建分类进一步验证约简后数据的分类能力。

**表5 数据集信息**

**Table 5 Dataset information**

| 数据集 | 样本数 | 属性数 |
|---|---|---|
| wine | 178 | 13 |
| glass | 214 | 9 |
| wpbc | 198 | 33 |
| diab | 768 | 8 |
| bupa | 345 | 6 |
| horse | 366 | 27 |
| seeds | 210 | 7 |
| divorce | 169 | 54 |
| hcv | 1 385 | 14 |
| german | 1 000 | 20 |

### 3.1 邻域半径

在邻域粗糙集的邻域半径选择中，有些学者[23]使用标准差计算邻域半径，计算公式为

$$\delta = S_{\mathrm{td}}(a_i)/\lambda \tag{24}$$

式中：$S_{\mathrm{td}}(a_i)$为标准差函数，$a_i$为条件属性；$\lambda$为设定参数，调整邻域大小。

本文中，将样本数据根据十折交叉验证[24]随机划分为2部分，其中，90%作为训练集训练模型，10%作为测试集测试模型效果。分别选取$\lambda$为0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9进行实验，找到每个数据集的最优参数。对于本文中提出的属性约简算法，不同参数对应的属性约简率和分类准确率如图1～图10所示。

由图2、图5、图7可知，$\lambda$不为0时也会出现约简率为0的情况，说明此时无法得到有效特征属性集合。从图1～图10可知，不同的数据集分别在不同的$\lambda$值下得到最佳分类准确率。实验中，$\lambda$的取值为最佳准确率所对应的数值，进而得到最佳分类准确率。

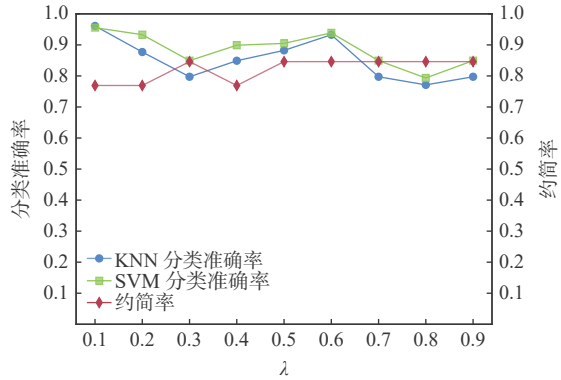



图1 不同$\lambda$值对应的属性约简率及分类准确率(wine)

Fig. 1 Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (wine)

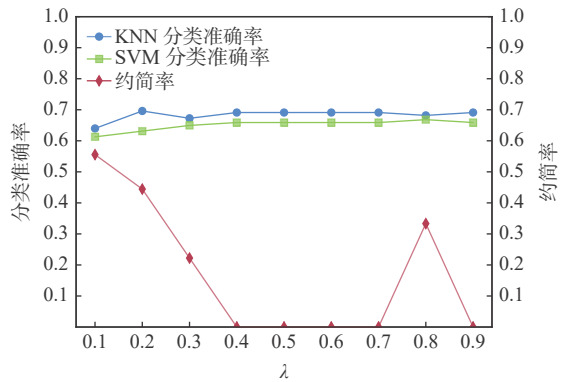



图2 不同$\lambda$值对应的属性约简率及分类准确率(glass)

Fig. 2 Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (glass)

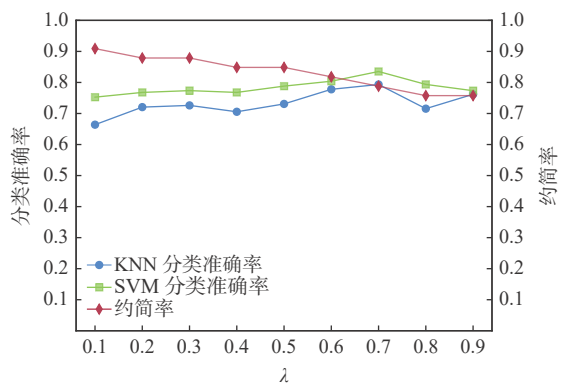



图3 不同$\lambda$值对应的属性约简率及分类准确率(wpbc)

Fig. 3 Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (wpbc)

### 3.2 结果分析

使用KNN[25]和SVM[26]分类算法，用基于邻域粗糙集(NRS)、基于信息熵[27](Entropy)的属性约简算法与本文提出的属性约简算法进行对比分析，且

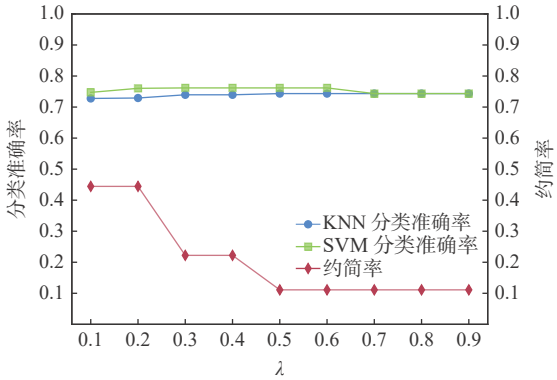



图 4　不同 $\lambda$ 值对应的属性约简率及分类准确率(diab)

Fig. 4　Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (diab)

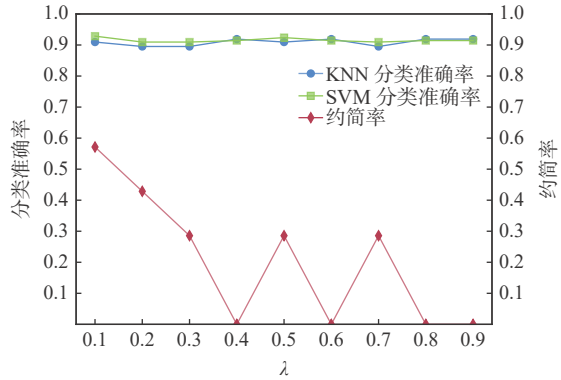



图 7　不同 $\lambda$ 值对应的属性约简率及分类准确率(seeds)

Fig. 7　Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (seeds)

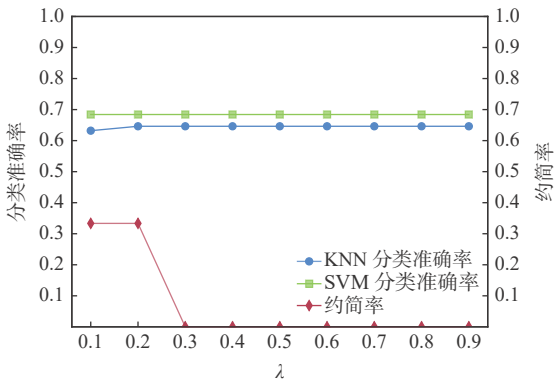



图 5　不同 $\lambda$ 值对应的属性约简率及分类准确率(bupa)

Fig. 5　Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (bupa)

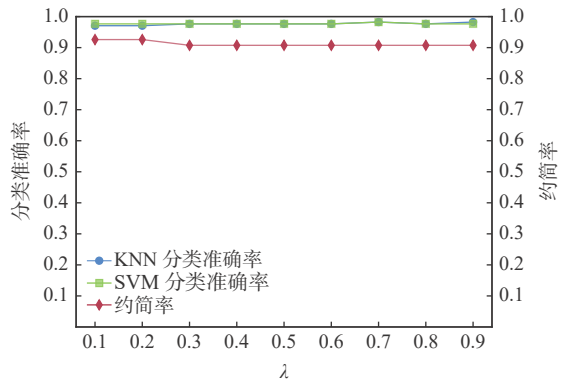



图 8　不同 $\lambda$ 值对应的属性约简率及分类准确率(divorce)

Fig. 8　Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values(divorce)

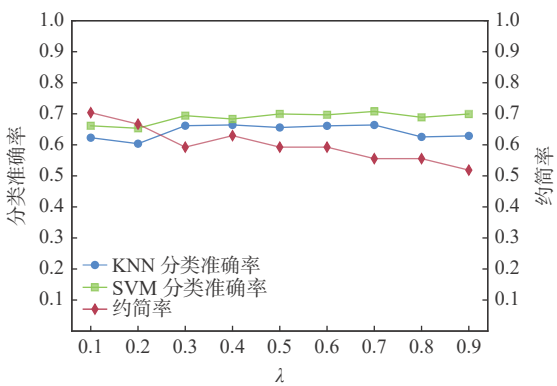



图 6　不同 $\lambda$ 值对应的属性约简率及分类准确率(horse)

Fig. 6　Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (horse)

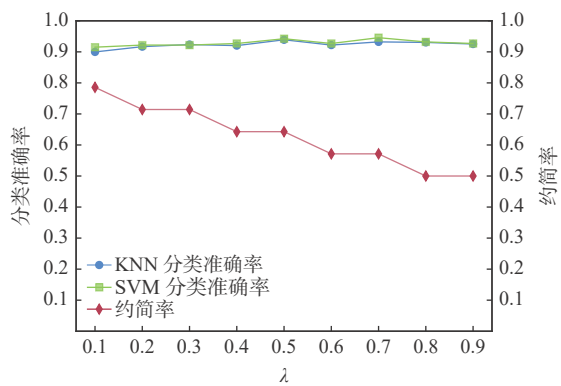



图 9　不同 $\lambda$ 值对应的属性约简率及分类准确率(hcv)

Fig. 9　Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (hcv)

将分类准确率和所选属性个数作为评价算法有效性指标。

表 6 为原始数据集和 3 种算法约简后数据集分别使用 2 种分类算法得到的分类准确率, 其中, 粗体突出不同约简算法中的最佳性能。表 6 的所有数据集(除 seeds 和 diab 数据集外)中, 属性约简后的数据集做分类预测实验时, 实验效果更好, 说明数据集中有冗余属性, 删除这些属性并不会削弱信息系统的分类性能。10 个数据集使用 KNN 算法和 SVM 算法进行实验, 其中, 原始数据集实验得到的平均分类准确率分别为 77.75% 和 79.45%, 用 3 种算法约简后数据集实验得到的平均分类准确率分别为 81.03%、80.70%、81.13% 和 81.83%、81.99%、82.94%。与原始数据得到的结果相比可发现, 使用 KNN 分类算法进行实验, 用 3 种约简算法后得到的分类准确率分别提高了 3.28%、2.95% 和 3.38%; 使

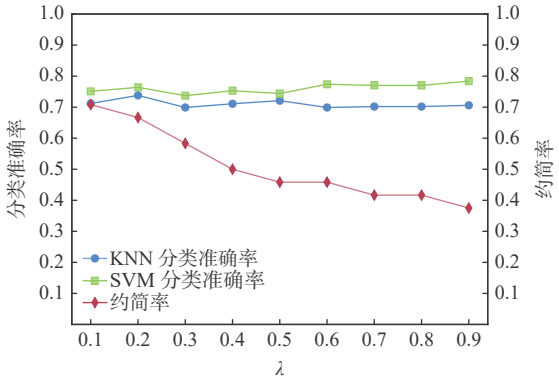



图 10 不同 $\lambda$ 值对应的属性约简率及分类准确率(german)

Fig.10Attribute reduction rate and classification accuracy corresponding to different $\lambda$ values (german)

**表 6 分类准确率实验结果**

**Table 6 Experimental results of classification accuracy %**

| 数据集 | 算法 | Original | NRS | Entropy | 本文算法 |
|---|---|---|---|---|---|
| wine | KNN | 94.92 | 97.22 | 96.11 | 95.52 |
| | SVM | 97.72 | 98.33 | 98.30 | 97.75 |
| glass | KNN | 66.15 | 71.95 | 70.06 | 69.61 |
| | SVM | 67.69 | 65.89 | 65.45 | 68.82 |
| wpbc | KNN | 70.63 | 76.89 | 76.79 | 79.34 |
| | SVM | 74.77 | 77.95 | 80.47 | 80.39 |
| diab | KNN | 74.35 | 74.74 | 74.34 | 74.94 |
| | SVM | 76.83 | 76.57 | 76.17 | 76.17 |
| bupa | KNN | 58.55 | 64.61 | 63.67 | 64.62 |
| | SVM | 57.68 | 66.41 | 67.41 | 68.41 |
| horse | KNN | 66.03 | 68.97 | 69.15 | 69.41 |
| | SVM | 70.27 | 72.15 | 71.57 | 73.77 |
| seeds | KNN | 93.65 | 91.90 | 91.90 | 91.90 |
| | SVM | 92.06 | 92.86 | 91.43 | 92.86 |
| divorce | KNN | 94.11 | 97.65 | 98.23 | 98.24 |
| | SVM | 94.11 | 98.14 | 98.23 | 98.24 |
| hcv | KNN | 88.70 | 93.55 | 93.79 | 93.89 |
| | SVM | 89.83 | 93.04 | 94.06 | 94.57 |
| german | KNN | 70.40 | 72.80 | 73.00 | 73.80 |
| | SVM | 73.50 | 77.00 | 76.80 | 78.40 |

用 SVM 分类算法进行实验,性能分别提高了 2.38%、2.54% 和 3.49%,其中,本文算法提高幅度最大。

表 6 中,50% 以上的数据集使用本文算法得到的结果最优,其中,divorce 数据集中,仅使用了原始数据集不到 1/10 的属性,分类准确率提高了 4%。有 4 个数据集使用传统邻域粗糙集时分类准确率最高,但与使用本文算法所得到的结果差距不是很大,甚至本文算法在得到属性个数最少的同时,分类效果更好。从分类准确率分析,本文算法在大多数情况下表现最好,且在 2 种分类器下,平均分类准确率均为最佳。

属性约简是找到一个信息量小的属性子集,所选属性子集的大小如表 7 所示。与其他约简算法相比,本文算法选择的属性子集最小。实验表明,本文算法可实现剔除冗余属性,得到更加精准的约简属性子集。

**表 7 约简后的属性个数**

**Table 7 Number of attributes after reduction**

| 数据集 | 算法 | Original | NRS | Entropy | 本文算法 |
|---|---|---|---|---|---|
| wine | KNN | 13 | 6 | 5 | 4 |
| | SVM | 13 | 6 | 6 | 6 |
| glass | KNN | 9 | 7 | 6 | 5 |
| | SVM | 9 | 8 | 8 | 6 |
| wpbc | KNN | 33 | 9 | 7 | 7 |
| | SVM | 33 | 8 | 7 | 6 |
| diab | KNN | 8 | 7 | 8 | 8 |
| | SVM | 8 | 4 | 4 | 7 |
| bupa | KNN | 6 | 6 | 6 | 4 |
| | SVM | 6 | 6 | 6 | 4 |
| horse | KNN | 27 | 10 | 12 | 10 |
| | SVM | 27 | 8 | 13 | 12 |
| seeds | KNN | 7 | 7 | 7 | 7 |
| | SVM | 7 | 5 | 7 | 3 |
| divorce | KNN | 54 | 3 | 5 | 5 |
| | SVM | 54 | 8 | 5 | 5 |
| hcv | KNN | 14 | 7 | 5 | 5 |
| | SVM | 14 | 4 | 5 | 6 |
| german | KNN | 20 | 9 | 10 | 8 |
| | SVM | 20 | 14 | 15 | 14 |

综上,用 Critic 赋权法加权邻域粗糙集属性约简算法对 diab 数据集的约简效果不太好,减少属性的同时降低了分类准确率,原因可能是因为 diab 数据属性较少,样本较多,经过属性约简后剔除了重要属性,导致分类准确率不理想。但该约简算法在大多数的数据集上有较好的效果,既降低数据维度,又保证约简后数据集的分类准确率,相对于经典邻域粗糙集模型有优势。

## 4 结 论

传统的基于邻域粗糙集的属性约简在计算邻域关系时没有考虑属性的权重问题,本文提出了一种基于 Critic 赋权法加权邻域粗糙集的属性约简算法。

1) 用 Critic 赋权法为条件属性分配不同的权重,使得构建的加权邻域粗糙集的粒度更细。

2) 可实现剔除冗余属性,得到更好的约简属性集,具有高效的处理能力。例如,在 divorce 数据集中,仅使用 5 个属性,分类准确率却得到 98% 以上。

3) 具有较高的约简率,在降维方面具有明显的优势。对于大维度且冗余的数据集,该算法可快速

选择划分能力较强的属性, 获得最精简的属性集, 进一步提高分类性能。

但本文算法还有些局限性, 在计算权重的时候进行累加操作, 增加了运行时间, 因此, 在后续研究中可以考虑并行计算等方法, 解决此类问题。

## 参考文献（References）


[1] PAWLAK Z. Rough sets[J]. International Journal of Computer & Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.

[2] 苑红星, 卓雪雪, 竺德, 等. 基于矩阵的混合型邻域决策粗糙集增量式更新算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1621-1631.
YUAN H X, ZHUO X X, ZHU D, et al. Rough set incremental update algorithm for mixed neighborhood decision based on matrix [J]. Control and Decision, 2022, 37(6): 1621-1631(in Chinese).

[3] YAO Y Y. Relational interpretations of neighborhood operators and rough set approximation operators[J]. Information Sciences, 1998, 111(1-4): 239-259.

[4] YUAN Z, CHEN H M, XIE P, et al. Attribute reduction methods in fuzzy rough set theory: An overview, comparative experiments, and new directions[J]. Applied Soft Computing, 2021, 107: 107353.

[5] 饶梦, 苗夺谦, 罗晟. 一种粗糙不确定的图像分割方法[J]. 计算机科学, 2020, 47(2): 72-75.
RAO M, MIAO D Q, LUO S. Rough uncertain image segmentation method[J]. Computer Science, 2020, 47(2): 72-75(in Chinese).

[6] WANG G Q, LI T R, ZHANG P F, et al. Double-local rough sets for efficient data mining[J]. Information Sciences, 2021, 571: 475-498.

[7] 冀俊忠, 龙腾, 杨翠翠. 基于邻域决策粗糙集的脑功能连接生物标记物识别[J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 1092-1100.
JI J Z, LONG T, YANG C C. Identifying brain functional connectivity biomarkers based on neighborhood decision rough set[J]. Control and Decision, 2023, 38(4): 1092-1100(in Chinese).

[8] KONDO M. On topologies defined by neighbourhood operators of approximation spaces[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2021, 137: 137-145.

[9] HU Q H, PEDRYCZ W, YU D R, et al. Selecting discrete and continuous features based on neighborhood decision error minimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2010, 40(1): 137-150.

[10] CHEN H M, LI T R, FAN X, et al. Feature selection for imbalanced data based on neighborhood rough sets[J]. Information Sciences, 2019, 483: 1-20.

[11] CHEN H M, LI T R, CAI Y, et al. Parallel attribute reduction in dominance-based neighborhood rough set[J]. Information Sciences, 2016, 373: 351-368.

[12] 邓志轩, 郑忠龙, 邓大勇. F-邻域粗糙集及其约简[J]. 自动化学报, 2021, 47(3): 695-705.
DENG Z X, ZHENG Z L, DENG D Y. F-neighborhood rough sets and its reduction[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(3): 695-705 (in Chinese).

[13] WANG C Z, SHI Y P, FAN X D, et al. Attribute reduction based on k-nearest neighborhood rough sets[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2019, 106: 18-31.

[14] GUO Y T, TSANG E C C, XU W H, et al. Adaptive weighted generalized multi-granulation interval-valued decision-theoretic rough sets[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 187: 104804.

[15] TSANG E C C, HU Q H, CHEN D G. Feature and instance reduction for PNN classifiers based on fuzzy rough sets[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2016, 7(1): 1-11.

[16] VLUYMANS S, MAC PARTHALÁIN N, CORNELIS C, et al. Weight selection strategies for ordered weighted average based fuzzy rough sets[J]. Information Sciences, 2019, 501: 155-171.

[17] KUMAR R, SINGH S, BILGA P S, et al. Revealing the benefits of entropy weights method for multi-objective optimization in machining operations: Acritical review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 1471-1492.

[18] YOU C S, YANG S Y. A simple and effective multi-focus image fusion method based on local standard deviations enhanced by the guided filter[J]. Displays, 2022, 72: 102146.

[19] 徐宇恒, 程嗣怡, 庞梦洋. 基于 CRITIC-TOPSIS 的动态辐射源威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(11): 2168-2175.
XU Y H, CHENG S Y, PANG M Y. Dynamic radiator threat assessment based on CRITIC-TOPSIS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(11): 2168-2175 (in Chinese).

[20] 吴希. 三种权重赋权法的比较分析[J]. 中国集体经济, 2016(34): 73-74.
WU X. Comparative analysis of three weight empowerment methods[J]. China's Collective Economy, 2016(34): 73-74(in Chinese).

[21] ZIELOSKO B, STAŃCZYK U. Condition attributes, properties of decision rules, and discretisation: Analysis of relations and dependencies[J]. Procedia Computer Science, 2021, 192: 3922-3931.

[22] BHADRA D, DHAR N R, SALAM M A. Sensitivity analysis of the integrated AHP-TOPSIS and CRITIC-TOPSIS method for selection of the natural fiber[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 2618-2629.

[23] 李冬. 基于邻域粗糙集的属性约简算法研究及应用[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2020.
LI D. Research and application of attribute reduction algorithm based on neighborhood rough set[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2020(in Chinese).

[24] 吴尚智, 王旭文, 王志宁, 等. 利用粗糙集和支持向量机的银行借贷风险预测模型[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2022, 49(2): 249-256.
WU S Z, WANG X W, WANG Z N, et al. Prediction model of bank lending risk using rough set and support vector machine[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(2): 249-256(in Chinese).

[25] XIONG L, YAO Y. Study on an adaptive thermal comfort model with K-nearest-neighbors (KNN) algorithm[J]. Building and Environment, 2021, 202: 108026.

[26] AKRAM-ALI-HAMMOURI Z, FERNÁNDEZ-DELGADO M, ALBTOUSH A, et al. Ideal kernel tuning: Fast and scalable selection of the radial basis kernel spread for support vector classification[J]. Neurocomputing, 2022, 489: 1-8.

[27] HUANG Y Y, GUO K J, YI X W, et al. Matrix representation of the conditional entropy for incremental feature selection on multi-source data[J]. Information Sciences, 2022, 591: 263-286.

# An attribute reduction algorithm of weighting neighborhood rough sets with Critic method

WU Shangzhi[1,*], REN Yixuan[2], GE Shuyue[1], WANG Litai[1], WANG Zhining[1]

(1. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;
2. Wu'an Tax Bureau, State Taxation Administration, Handan 056300, China)

**Abstract**: Compared with classical rough sets, neighborhood rough sets can process non-discrete and high-dimensional data, and get simplified data without reducing the ability of data processing. An attribute reduction approach of weighting neighborhood rough sets using the Critic method is proposed, aiming at the problem that every attribute in neighborhood rough sets has the same weight and every attribute has varied influence on decision making. Firstly, the Critic method is used to weigh the conditional attributes, the weighted distance function is introduced to calculate the neighborhood relationship, and then the weighted neighborhood relationship is obtained. Secondly, the weighted neighborhood rough sets are constructed, the attribute dependency and importance are used to evaluate the importance of the subset, the isometric search is used to find the best threshold, attribute reduction is carried out, and the optimal attribute subset is found.Finally, the experimental verification is carried out with 10 data sets in the UCI database, and the performance of the attribute reduction algorithm is compared with that of traditional neighborhood rough sets.The outcomes of the experiment demonstrate that the algorithm is able to guarantee the classification accuracy of the reduced data in addition to obtaining the minimum attribute reduction set.It has effectiveness and practical application value.

**Keywords**: Critic method; neighborhood rough set; attribute reduction; weighted neighborhood relationship; attribute dependence degree

**Received**: 2022-12-15; **Accepted**: 2023-05-05; **Published Online**: 2023-05-15 09:48

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230512.1629.002

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (12161082, 61861039)

* **Corresponding author**. E-mail: wusz@nwnu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1005

# 基于复数卷积和注意力机制的并行磁共振成像重建

段继忠*，肖琛
(昆明理工大学 信息工程与自动化学院，昆明 650500)

**摘　　要**：针对并行磁共振成像的重建，提出深度复数注意力网络(DCANet)模型。根据磁共振成像数据的复数性质，该模型使用复数卷积替换常规实数卷积；由于并行磁共振成像的数据中每个线圈获取到的数据有所不同，该模型还使用逐通道的注意力机制来重点关注有效特征较多的通道；该模型使用数据一致性层保留采样过程中的原始数据，最终形成级联网络。使用3个不同的采样模式对2个不同磁共振成像数据序列进行实验，实验结果表明：DCANet模型具有较好的重建效果，能够获得更高的峰值信噪比（PSNR）和结构相似性指数（SSIM），以及更低的高频误差范数（HFEN），其中，PSNR相比磁共振成像级联通道注意力网络（MICCAN）、Deepcomplex、双倍频网络（DONet）这3种模型平均分别提高了4.52 dB、2.30 dB和1.21 dB。

**关　键　词**：并行磁共振成像；图像重建；深度学习；复数卷积网络；注意力机制
**中图分类号**：TP391; R319
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0085-09

磁共振成像技术以丰富的对比度、无创地扫描患者体内结构等优点，被广泛应用于医学诊断和研究中，包括肌肉、骨骼、神经等组织肿瘤疾病的诊断，磁共振成像利用被扫描组织的水分子中氢原子核的“核磁共振”现象来进行成像，能够在早期诊断微小的组织病变[1]。由于磁共振扫描仪需要按时间顺序读取频域(k空间)中的数据，导致磁共振成像时间较长，并且在成像过程中，患者必须在具有强磁场的密闭空间中长时间保持固定姿势，这些特点往往会给患者带来不适，成像精度还容易受到患者呼吸等生理性运动的影响，从而产生伪影。因此，加快磁共振成像速度一直是磁共振成像技术的研究重点。

传统加速磁共振成像的方法主要分为2种：①基于压缩感知(compressed sensing, CS)的磁共振成像方法[2-3]，CS理论指出，在满足特定条件时，可以在不满足奈奎斯特采样定律的情况下准确重构出清晰图像，从而通过减少必要的数据采集量以加速成像，目前已经发展了多种CS-磁共振成像方法，例如小波变换[4]、总变分(total variation, TV)[5-6]等方法；②并行成像(parallel imaging, PI)，其使用多个具有不同空间灵敏度[7-8]的接收线圈同时采集数据，减少了每个线圈的数据采集量，从而缩短成像时间。典型的并行成像模型包括SENSE (sensitivity encoding)[9]，GRAPPA (generalized autocalibrating partially parallel acquisitions)[10]、SPIRiT (iterative self-consistent parallel imaging reconstruction)[11]和ESPIRiT (eigenvector-based SPIRiT)[12]等。

由于近年来算法、硬件和软件平台的发展与进步，深度学习[13]尤其是卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)在图像分割、超分辨率等传统图像处理领域中表现良好[14-15]。由于深度学习的快速发展，很多将深度学习应用于磁共振成像的方法开始出现[16]，Wang等[17]将CNN用于磁共振成像，训练获得欠采样图像与全采样图像之间的映射关系；Schlemper等[18]提出了级联的CNN模型，其

**收稿日期**：2022-12-19；**录用日期**：2023-03-10；**网络出版时间**：2023-03-22 08:30
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230320.1428.001
**基金项目**：国家自然科学基金地区科学基金项目(61861023)
*通信作者. E-mail：duanjz@kust.edu.cn

*引用格式：段继忠，肖琛. 基于复数卷积和注意力机制的并行磁共振成像重建[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：85-93.*
*DUAN J Z，XIAO C. Parallel MRI reconstruction by using complex convolution and attention mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：85-93 (in Chinese).*

包含了数据一致性 (data consistency, DC) 层，保留了欠采样过程中的原始数据；Sriram 等[19]将并行成像技术与深度学习结合，提出一个多线圈磁共振成像重建网络 GrappaNet；Lu 等[20]从稀疏迭代重建的角度设计网络结构，并用残差结构对网络进行优化，提出了 pFISTA-SENSE-ResNet，获得了不错的效果。

另外，还有研究表明，复数卷积在语音频谱预测与音乐转录中有不错的准确性[21]，在此基础上，Wang 等[22]使用复数卷积进行并行磁共振成像重建，Feng 等[23]提出的双倍频网络（dual-octave network，DONet）模型利用复数卷积对磁共振成像数据的实部和虚部进行处理以学习多尺度空间频率特征。另一方面，目前基于深度学习的磁共振成像重建方法通常是以相同的关注度对待每个通道，没有充分利用 CNN 良好的表达能力，而在超分辨率领域，使用注意力机制的 CNN 已经被证实能够得到令人满意的结果[24]，在磁共振成像重建领域，Huang 等[25]将注意力机制与 U-Net 结合构成磁共振成像级联通道注意力网络 (MRI cascaded channel-wise attention network，MICCAN ) 模型，用于磁共振图像重建。因此，本文将逐通道的注意力机制与深度复数 CNN 结合，并与数据一致性层组成级联网络对并行磁共振成像进行重建，提出深度复数注意力网络 (deep complex attention network, DCANet) 模型，该模型分别对实部和虚部进行实数卷积。实验结果表明，本文模型在不同采样模式下的并行磁共振成像重建时均有更好的重建质量。

## 1 基于 DCANet 模型的并行磁共振重建

### 1.1 问题表述

在并行磁共振成像中，多个接收线圈同时采集 k 空间数据，欠采样多线圈 k 空间数据可以表示为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{PFSx} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{y}\in\mathbf{C}^{MC}$ 表示欠采样多线圈 k 空间数据，第 $c$ 个线圈的欠采样 k 空间数据表示为 $\boldsymbol{y}_c\in\mathbf{C}^{M}$，$c=1,2,\cdots,C$，$C$ 为接收线圈的个数，$M$ 为单个线圈欠采样 k 空间数据的点数，$M\ll N$；$\boldsymbol{x}\in\mathbf{C}^{N}$ 为待重建的单线圈图像，$N=N_y\times N_x$ 为二维图像中所有的像素个数，$N_y$ 和 $N_x$ 分别为二维图像的高度和宽度；$\boldsymbol{S}\in\mathbf{C}^{NC\times N}$ 为多线圈灵敏度信息矩阵，第 $c$ 个线圈灵敏度信息 $\boldsymbol{S}_c\in\mathbf{C}^{N\times N}$。$\boldsymbol{P}\in\mathbf{R}^{MC\times NC}$ 为从整个多线圈 k 空间网格中选择需要获取的 k 空间数据的欠采样算子；$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{I}_C\otimes\boldsymbol{U}_x\otimes\boldsymbol{U}_y\in\mathbf{C}^{NC\times NC}$ 为逐线圈二维傅里叶变换算子，$\boldsymbol{I}_C$ 为 $C\times C$ 的单位矩阵，$\boldsymbol{U}_x\in\mathbf{C}^{N_x\times N_x}$ 和 $\boldsymbol{U}_y\in\mathbf{C}^{N_y\times N_y}$ 分别为 $N_x$ 点和 $N_y$ 点离散傅里叶变换矩阵，$\otimes$ 表示 Kronecker 乘积。

相比基于 CS 的并行磁共振成像重建方法，深度学习具有更快的重建速度。为避免灵敏度信息估计的困难，本文采用无需灵敏度信息的逐线圈重建方法[22-23]。令 $\boldsymbol{X}\in\mathbf{C}^{NC}$ 表示待重建多线圈磁共振图像，则基于深度学习的并行磁共振成像重建可以表述为

$$\boldsymbol{X}^t=\arg\min_{\boldsymbol{X}}\left\{\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{PFX}\|_2^2+\lambda\left\|\boldsymbol{X}-f(\boldsymbol{X}^{t-1}|\boldsymbol{\theta}^t)\right\|_2^2\right\} \tag{2}$$

式中：$\lambda$ 为正则化参数；$\boldsymbol{X}^{t-1}$ 为第 $t$ 个 DC 层的输出；$f(\cdot|\boldsymbol{\theta}^t)$ 表示用 DCANet 模型训练得到且由 $\boldsymbol{\theta}^t$ 参数化的映射，该映射可以把 $C$ 个线圈的欠采样数据作为输入，同时计算得到 $C$ 个线圈的重建图像。重建完成后，再使用平方和的平方根 (square root of sum of squares, SOS) 将全部线圈图像组合成单个幅度图像 $\boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^{N}$：

$$\boldsymbol{x}=\mathrm{SOS}(\boldsymbol{X})=\sqrt{\sum_{c=1}^{C}(\mathrm{mod}(\boldsymbol{X}_c))^2} \tag{3}$$

其中：SOS 为平方根函数；$\mathrm{mod}(\cdot)$ 表示复数的模；$\boldsymbol{X}_c\in\mathbf{C}^{N}$ 表示 $\boldsymbol{X}$ 的第 $c$ 个线圈图像。

### 1.2 DCANet 模型结构

图 1 为 DCANet 模型的结构，其中，CAB 表示逐通道的注意力模块，AGB 表示注意力组模块，IFFT 表示高斯傅里叶逆变换，$\hat{\boldsymbol{X}}^t=f(\boldsymbol{X}^{t-1}|\boldsymbol{\theta}^t)$，根据磁共振成像的 k 空间数据和图像均为复数这一特性，DCANet

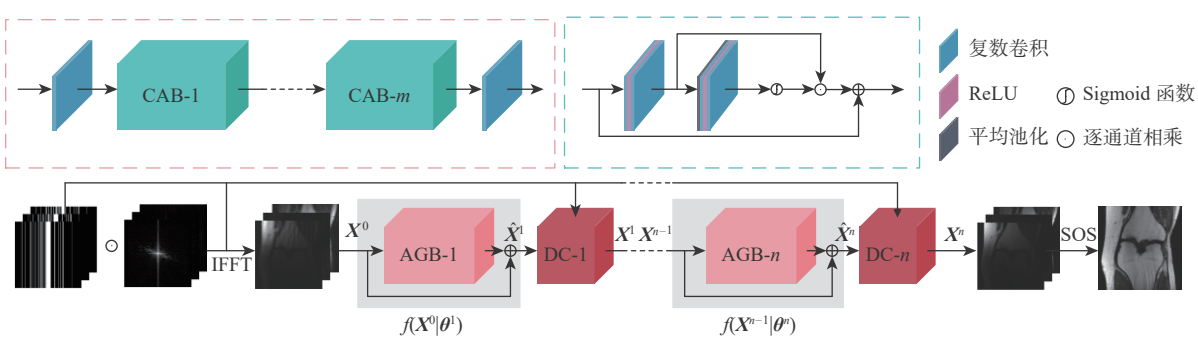



图 1 DCANet 模型结构

Fig. 1 Architecture of DCANet model

模型使用复数卷积直接对复数数据进行处理以获得更好的效果, 而通过引入注意力机制, DCANet 模型能够考虑通道间的差异使得 CNN 在每个通道上具有不同的注意力, 从而可以专注于拥有更多特征的通道, 进一步提高 CNN 的表达能力。

### 1.2.1　复数卷积

磁共振图像为复数数据, 将数据实部和虚部分别视为实数进行卷积的常规方法会丢失数据中实部和虚部之间的相关性, 这使得利用复数卷积对磁共振图像进行重建具有重要的现实意义。基于此, 本文在 DCANet 模型中使用复数卷积代替传统的卷积方法。

复数输入 $\boldsymbol{V}=\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}+\mathrm{j}\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}$ 和具有复数权重的卷积核 $\boldsymbol{K}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}+\mathrm{j}\boldsymbol{K}_{\mathrm{i}}$ 进行卷积的过程可以表示为

$$\boldsymbol{K}*\boldsymbol{V}=(\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}*\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}-\boldsymbol{K}_{\mathrm{i}}*\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}})+\mathrm{j}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}*\boldsymbol{V}_{i}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{i}}*\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}) \tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}$、$\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}$、$\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}$、$\boldsymbol{K}_{\mathrm{i}}$ 均为实数矩阵, "*" 表示卷积操作。另外, 在 CNN 中, 卷积核的初始化是一个重要的步骤, 特别是在没有使用批归一化 (batch normalization, BN) 的情况下, 正确的初始化可以抑制梯度消失或梯度爆炸。将卷积核写成极坐标形式:

$$\boldsymbol{K}=|\boldsymbol{K}|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}+\mathrm{j}\boldsymbol{K}_{\mathrm{i}} \tag{5}$$

Trabelsi 等[21] 使用瑞利分布对权重的幅度 $|\boldsymbol{K}|$ 进行初始化, 用分布区间为 $(-\pi,\pi)$ 的均匀分布来初始化相位 $\varphi$, 于是得到初始化的复数卷积核。

### 1.2.2　逐通道的注意力机制

在基于深度学习的并行磁共振成像重建中, CNN 的输入是多线圈欠采样数据, 而输入中每个通道的数据根据不同线圈的灵敏度信息将会产生差异, 此时再平等地对待每个通道则会忽略不同通道之间的差异, 使得具有重要特征信息的通道得不到更多关注, 在重建过程中表现为不能更好地利用重要信息。

如图 1 中逐通道的注意力模块所示, 在 DCANet 模型中引入逐通道的注意力机制来突出重点信息。首先, 使用 2 个卷积层来提取特征, 并在 2 个卷积层中间加入非线性的激活函数来提升表达能力; 接着, 根据提取到的特征来给每个通道分配不同的注意力; 最后, 与输入通过残差结构连接作为输出。

给每个通道分配不同的注意力由逐通道的注意力机制完成, 如图 2 所示, 其中, $r$ 为通道变化率, 令输入为 $\boldsymbol{A}=[\boldsymbol{a}_1,\boldsymbol{a}_2,\cdots,\boldsymbol{a}_d,\cdots,\boldsymbol{a}_D]$, 总共含有 $D$ 个 $H\times W$ 的特征图, 通过这些特征图可以得到每个通道的注意力权重, 第 $d$ 个通道的注意力权重 $\boldsymbol{G}_d$ 可以表示为 $\boldsymbol{G}_d=\mathrm{AvgPool}(\boldsymbol{a}_d)$, 其中, $\mathrm{AvgPool}(\cdot)$ 为平均池化下采样。同时使用输出通道数更少的卷积 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{Down}}$ 来学习各个通道间的非线性联系, 并用 ReLU 函数进行激活, 于是, 整个模块的输出可以表述为

$$\tilde{\boldsymbol{A}}=\mathrm{sigmoid}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{Up}}*\mathrm{ReLU}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{Down}}*\boldsymbol{G}))\odot\boldsymbol{A} \tag{6}$$

式中: $\boldsymbol{G}$ 为大小为 $1\times1\times D$ 的注意力权重矩阵; $\boldsymbol{K}_{\mathrm{Down}}$ 和 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{Up}}$ 分别为输出通道数减少和增加的卷积层; sigmoid(·) 和 ReLU(·) 分别为 sigmoid 函数和 ReLU 激活函数。

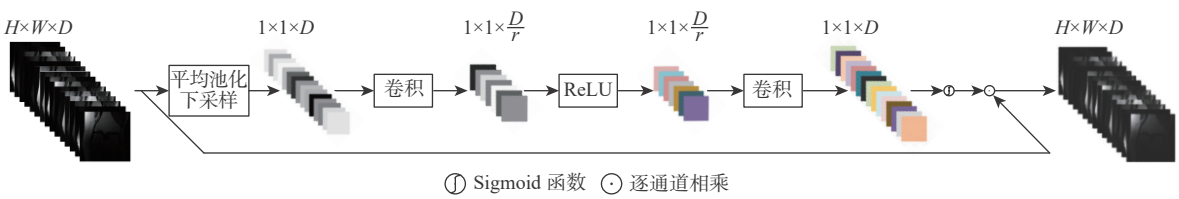



图 2　逐通道的注意力机制

Fig. 2　Channel attention mechanism

### 1.2.3　数据一致性层

如图 1 所示, 在每一个 AGB 之后连接数据一致性层。引入数据一致性层, 其实就是在 k 空间对 Attention Group 模块的输出数据进行数据保真处理。令式 (2) 中的目标函数对 $\boldsymbol{X}$ 的梯度为 0, 则可得数据一致性层的计算式为

$$\boldsymbol{X}^t=\boldsymbol{F}^{-1}\left[(\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\lambda\boldsymbol{I})^{-1}(\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}+\lambda\boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{X}}^t)\right] \tag{7}$$

式中: $\hat{\boldsymbol{X}}^t=f(\boldsymbol{X}^{t-1}|\boldsymbol{\theta}^t)$; $\boldsymbol{X}^t$ 为第 $t$ 个数据一致性层的输出; $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。式 (7) 的实质是将 $\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$ 与 $\lambda\boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{X}}^t$ 进行融合, 当 $\lambda\to0$ 时, 相当于用欠采样的 k 空间数据替换 $\boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{X}}^t$ 的相应位置, 使欠采样的 k 空间数据得以保留, 不会在经过 CNN 之后出现失真。

## 2　实验及结果分析

### 2.1　实验数据

实验中使用了公开数据集 NYULH Radiology-Reconstruction-Data[26] 对模型进行训练和测试。该数据集由 3T Siemens Magnetom Skyra 磁共振扫描仪使用标准临床膝关节协议对不同病理、性别、年龄和体重指数的病人进行膝盖部位的全采样, 数据集包含了 5 个不同对比度和不同解剖面的快速自旋回波 (turbo spin echo, TSE) 序列, 每个序列采集了 20 位不同病人的数据。实验选取了冠状面质子

密度加权序列和矢状面质子密度加权序列对模型效果进行验证，序列参数如下。

冠状面质子密度加权序列。重复时间为2 750 ms，回波时间为27 ms，回波序列长度为4，平面内分辨率为0.49×0.44 mm$^2$，切片厚度为3 mm，共35～42个切片，5个女性，15个男性，年龄为15～76岁，身体质量指数（body mass index, BMI）为20.46～32.94。

矢状面质子密度加权序列。重复时间为2 800 ms，回波时间为27 ms，回波序列长度为4，平面内分辨率为0.46×0.36 mm$^2$，切片厚度为3 mm，共31～38个切片，11个女性，9个男性，年龄为15～94岁，BMI为18.69～35.15。

实验时在每个序列中随机选取14位病人的数据作为训练集，3位病人的数据作为验证集，3位病人的数据作为测试集，同时为排除数据中噪声对实验结果的影响，选取了每位病人的中间部分切片并将图像裁剪为320像素×320像素进行实验，其中每个切片均为15个线圈，即最终的单个实验样本大小为320像素×320像素×15像素。

### 2.2 实验实施细节

实验采用3种不同欠采样模式进行欠采样，分别是一维均匀欠采样，一维笛卡尔随机欠采样和二维随机欠采样，每种欠采样模式分别使用了3倍和5倍加速欠采样（欠采样率分别为33.3%和20%）来评价模型的重建性能，即欠采样时的加速因子（acceleration factor, AF）为3和5。

DCANet模型参数如表1所示。由于硬件限制，实验中将Batch Size设置为1。模型使用$L_1$ Loss作为损失函数，使用Adam优化器训练模型，每训练20个epoch更新一次学习率。

**表1 DCANet模型参数**

**Table 1 DCANet model parameters**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| CAB数量 | 10 |
| AGB数量 | 10 |
| Batch Size | 1 |
| 卷积核大小 | 3×3 |
| $\boldsymbol{K}_{Up}$、$\boldsymbol{K}_{Down}$卷积核大小 | 1×1 |
| $\boldsymbol{K}_{Up}$、$\boldsymbol{K}_{Down}$通道变化率$r$ | 8 |
| 初始学习率 | 0.000 3 |
| 学习率衰减因子 | 0.7 |
| epoch | 300 |

在训练过程中，每次验证结束时计算验证Loss并与之前记录的最小验证Loss比较，当本次验证Loss小于最小验证Loss时，更新最小验证Loss并保存模型，保证训练完成时能够获得最佳模型。

为评估重建质量，使用峰值信噪比（peak signal-to-noise ratio, PSNR）、结构相似性指数（structural similarity, SSIM）和高频误差范数（high-frequency error norm, HFEN）作为评价指标，其中，PSNR和SSIM数值越高，或者HFEN数值越低，则表示重建质量越好。对于全采样参考图像$\hat{\boldsymbol{x}}$和重建图像$\boldsymbol{x}$，3种评价指标的计算方式如下。

实验过程中，需要对数据进行归一化处理，则PSNR定义为

$$V_{\mathrm{PSNR}} = 10\lg\left(\frac{1}{V_{\mathrm{MSE}}}\right) \tag{8}$$

式中：$V_{\mathrm{MSE}}$为$\boldsymbol{x}$与$\hat{\boldsymbol{x}}$之间的均方误差。

SSIM定义为

$$V_{\mathrm{SSIM}} = \frac{(2u_x u_{\hat{x}} + c_1)(2\sigma_{x\hat{x}} + c_2)}{(u_x^2 + u_{\hat{x}}^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_{\hat{x}}^2 + c_1)} \tag{9}$$

式中：$u_{\boldsymbol{x}}$和$u_{\hat{\boldsymbol{x}}}$分别为$\boldsymbol{x}$和$\hat{\boldsymbol{x}}$的均值；$\sigma_{\boldsymbol{x}}^2$和$\sigma_{\hat{\boldsymbol{x}}}^2$分别为$\boldsymbol{x}$和$\hat{\boldsymbol{x}}$的方差；$\sigma_{\boldsymbol{x}\hat{\boldsymbol{x}}}$为$\boldsymbol{x}$与$\hat{\boldsymbol{x}}$的协方差；$c_1$与$c_2$为常数，其中$c_1 = 0.02$，$c_2 = 0.02$。

HFEN定义为

$$V_{\mathrm{HFEN}} = \frac{\|\mathrm{filter}(\boldsymbol{x}) - \mathrm{filter}(\hat{\boldsymbol{x}})\|_2}{\|\mathrm{filter}(\hat{\boldsymbol{x}})\|_2} \tag{10}$$

式中：filter(·)为拉普拉斯高斯滤波器，用于获取图像边缘。

实验在配置为Intel Core i9-12900K@ 3.2 GHz CPU，64 GB内存，NVIDIA RTX 3090（24 G显存），64位Ubuntu 20.04操作系统的服务器上完成，所有代码均在PyTorch 1.11平台实现。

### 2.3 实验结果

表2和表3分别为2个序列在不同的欠采样模式及加速因子为3和5下重建图像的评价指标的结果，使用MICCAN模型[25]、Deepcomplex模型[22]和DONet模型[23]与DCANet模型进行比较，评价指标为测试过程中所有重建图片与对应全采样参考图像之间分别计算PSNR、SSIM和HFEN之后的平均值和标准差。表2和表3中的结果表明，相比MICCAN、Deepcomplex和DONet模型，DCANet模型在不同采样模式下2个序列的PSNR分别提高了4.52 dB、2.30 dB和1.21 dB，SSIM与HFEN也都表现良好，如表中加粗部分所示。

在图3中，使用小提琴图展示测试过程中DCANet模型在不同序列的不同采样模式下与对比模型的对应重建图像之间PSNR的相对差异。由于与MICCAN模型[25]相比，DCANet模型的重建效果提升较为明显，图中只分析DCANet模型与Deepcomplex模型[22]、DONet模型[23]之间的差异，同时，为更好地表现出不同采样模式下的重建效果，不再单独分析不同加速因子之间的区别。图3中的每一个小

表 2　冠状面质子密度加权序列重建效果

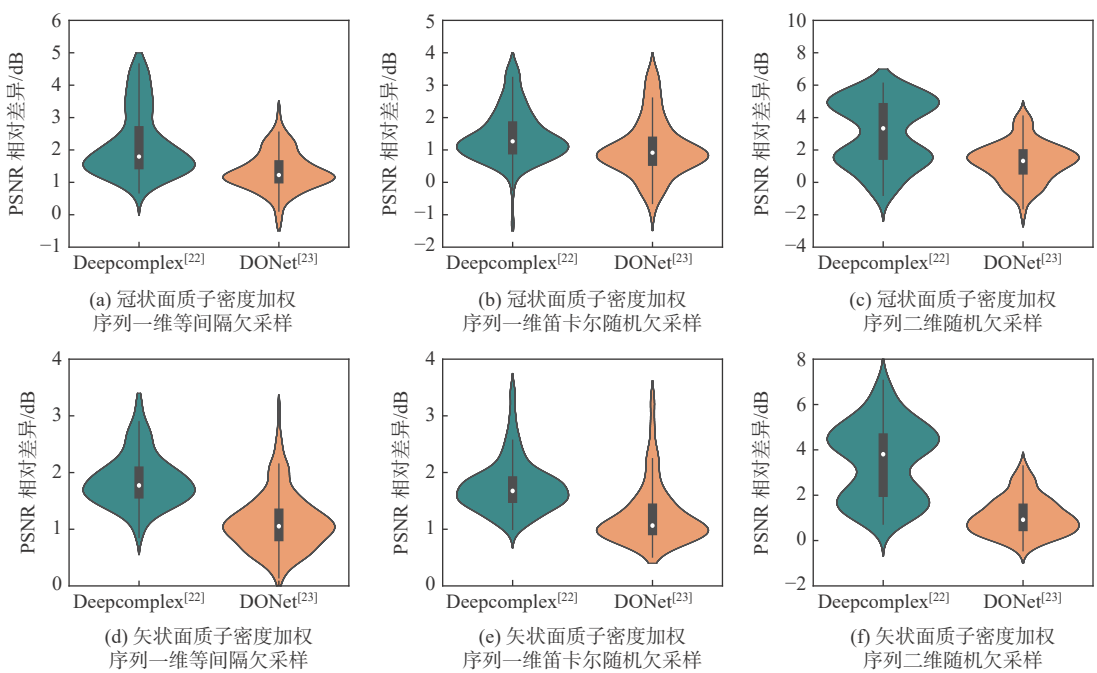
**Table 2　Reconstruction performance of coronal proton-density weighted sequence**

| 欠采样模式 | 模型 | PSNR/dB | | SSIM | | HFEN | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| 一维等间隔欠采样 | MICCAN[25] | 31.695±0.899 | 29.973±0.895 | 0.831±0.016 | 0.773±0.020 | 0.385±0.062 | 0.485±0.058 |
| | Deepcomplex[22] | 32.708±1.519 | 29.608±2.111 | 0.835±0.027 | 0.754±0.031 | 0.320±0.085 | 0.483±0.129 |
| | DONet[23] | 33.308±1.347 | 30.693±1.427 | 0.846±0.025 | 0.776±0.024 | 0.303±0.073 | 0.438±0.107 |
| | DCANet | **34.786±1.497** | **31.880±1.398** | **0.876±0.024** | **0.812±0.029** | **0.273±0.069** | **0.403±0.092** |
| 一维笛卡尔随机欠采样 | MICCAN[25] | 34.515±0.982 | 32.326±0.946 | 0.872±0.019 | 0.818±0.027 | 0.243±0.046 | 0.354±0.057 |
| | Deepcomplex[22] | 35.586±1.385 | 33.039±1.243 | 0.880±0.021 | 0.818±0.029 | 0.193±0.041 | 0.299±0.072 |
| | DONet[23] | 35.799±1.443 | 33.601±1.254 | 0.884±0.022 | 0.828±0.026 | 0.188±0.040 | 0.275±0.054 |
| | DCANet | **36.791±1.298** | **34.687±1.206** | **0.899±0.019** | **0.855±0.028** | **0.181±0.040** | **0.266±0.062** |
| 二维随机欠采样 | MICCAN[25] | 30.446±2.190 | 25.881±2.826 | 0.876±0.021 | 0.783±0.034 | 0.193±0.043 | 0.322±0.073 |
| | Deepcomplex[22] | 35.591±2.923 | 28.795±2.346 | 0.915±0.025 | 0.803±0.029 | 0.122±0.033 | 0.322±0.049 |
| | DONet[23] | 36.094±2.560 | 31.847±2.716 | 0.920±0.026 | 0.855±0.031 | 0.113±0.029 | 0.206±0.057 |
| | DCANet | **36.917±2.849** | **33.596±2.843** | **0.935±0.017** | **0.891±0.022** | **0.103±0.028** | **0.176±0.048** |

表 3　矢状面质子密度加权序列重建效果

**Table 3　Reconstruction performance of sagittal proton-density weighted sequence**

| 欠采样掩码 | 模型 | PSNR/dB | | SSIM | | HFEN | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| 一维等间隔欠采样 | MICCAN[25] | 33.710±2.097 | 29.559±1.726 | 0.854±0.033 | 0.731±0.045 | 0.353±0.051 | 0.595±0.069 |
| | Deepcomplex[22] | 35.220±1.868 | 30.766±1.772 | 0.870±0.024 | 0.755±0.037 | 0.282±0.031 | 0.502±0.053 |
| | DONet[23] | 35.744±1.758 | 31.707±1.603 | 0.876±0.023 | 0.773±0.030 | 0.263±0.028 | 0.463±0.053 |
| | DCANet | **37.046±2.069** | **32.668±1.713** | **0.900±0.025** | **0.809±0.034** | **0.241±0.025** | **0.426±0.047** |
| 一维笛卡尔随机欠采样 | MICCAN[25] | 34.513±1.862 | 32.496±1.772 | 0.864±0.027 | 0.808±0.035 | 0.294±0.035 | 0.404±0.049 |
| | Deepcomplex[22] | 36.889±1.590 | 34.342±1.632 | 0.893±0.019 | 0.833±0.027 | 0.194±0.020 | 0.288±0.029 |
| | DONet[23] | 37.308±1.541 | 34.931±1.578 | 0.896±0.018 | 0.840±0.026 | 0.184±0.019 | 0.267±0.029 |
| | DCANet | **38.660±1.730** | **36.073±1.849** | **0.916±0.020** | **0.871±0.030** | **0.168±0.019** | **0.252±0.031** |
| 二维随机欠采样 | MICCAN[25] | 27.841±3.032 | 26.252±0.051 | 0.819±0.057 | 0.735±0.061 | 0.267±0.051 | 0.405±0.067 |
| | Deepcomplex[22] | 36.025±2.099 | 29.177±2.295 | 0.920±0.018 | 0.802±0.042 | 0.151±0.018 | 0.366±0.036 |
| | DONet[23] | 37.149±1.901 | 32.905±2.804 | 0.933±0.014 | 0.877±0.027 | 0.130±0.015 | 0.217±0.031 |
| | DCANet | **38.166±2.076** | **34.007±2.209** | **0.941±0.013** | **0.894±0.022** | **0.111±0.013** | **0.194±0.024** |




(a) 冠状面质子密度加权序列一维等间隔欠采样　(b) 冠状面质子密度加权序列一维笛卡尔随机欠采样　(c) 冠状面质子密度加权序列二维随机欠采样

(d) 矢状面质子密度加权序列一维等间隔欠采样　(e) 矢状面质子密度加权序列一维笛卡尔随机欠采样　(f) 矢状面质子密度加权序列二维随机欠采样

图 3　DCANet 与 Deepcomplex[22], DONet[23] 模型在不同序列的不同欠采样模式下 PSNR 的相对差异

Fig. 3　Relative differences in PSNR between DCANet and Deepcomplex[22], DONet[23] models under different undersampling modes of different sequences

提琴中含有120个测试数据的结果，分别是60个3倍欠采样数据重建的结果和60个5倍欠采样数据重建的结果，从图中能直观地看出DCANet模型的重建性能有明显的提升。

如图4～图9所示，其中，第1列上方是真实图像，下方是欠采样掩码。第2～第5列上方是不同模型重建图像，下方是对应的重建误差图，分别选取2个序列中具有代表性的切片来进行重建的视觉效果比较，图中展示的是不同模型在不同采样模式下3倍和5倍欠采样的重建图像与重建误差图。结果表明，在2个序列中，由于DCANet模型中的注意力机制能够重点关注含有较多信息的线圈，另外在给信息较少的线圈赋予较小注意力权重的同时还抑制了该线圈中伪影对重建结果的影响，既抑制了伪影，又能够很好地利用有效信息，而复数卷积能通过利用数据的实部和虚部之间的联系来提高重建精度，所以DCANet模型的重建图像在视觉上相比MICCAN模型[25]、Deepcomplex模型[22]和DONet模型[23]都更接近全采样参考图像，能够更好地抑制伪影和还原细节。通过图4中的重建图像可以看出，在一维等间隔欠采样模式下，DCANet模型能更好地抑制由欠采样引起的竖状伪影，图6和图8中的误差图展示了在容易出现误差的地方，DCANet模型重建的误差更小。

由实验结果可知，无论是与只采用注意力机制的MICCAN模型[25]相比，还是与采用了复数卷积的Deepcomplex模型[22]和DONet模型[23]相比，在量化的指标和体现细节的视觉效果上，本文DCANet模型都能够获得更好的重建质量。

为保证实验结论没有被实验结果的偶然性影响，实验从冠状面质子密度加权序列中选取了3组训练集、验证集和训练集各不相同的数据，使用3倍一维笛卡尔欠采样对每个模型分别进行一次完整实验，并记录每个模型3个实验结果的平均值，

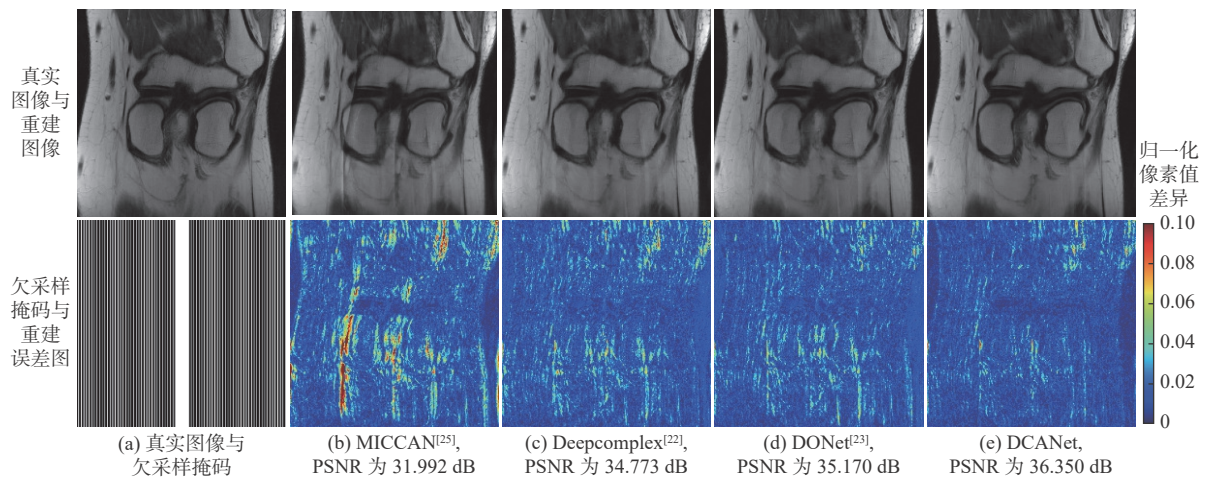



图4 冠状面质子密度加权序列3倍一维等间隔欠采样重建误差对比

Fig. 4 Comparison of reconstruction error maps of coronal plane proton density-weighted sequences with 3-fold 1D uniform undersampled reconstruction

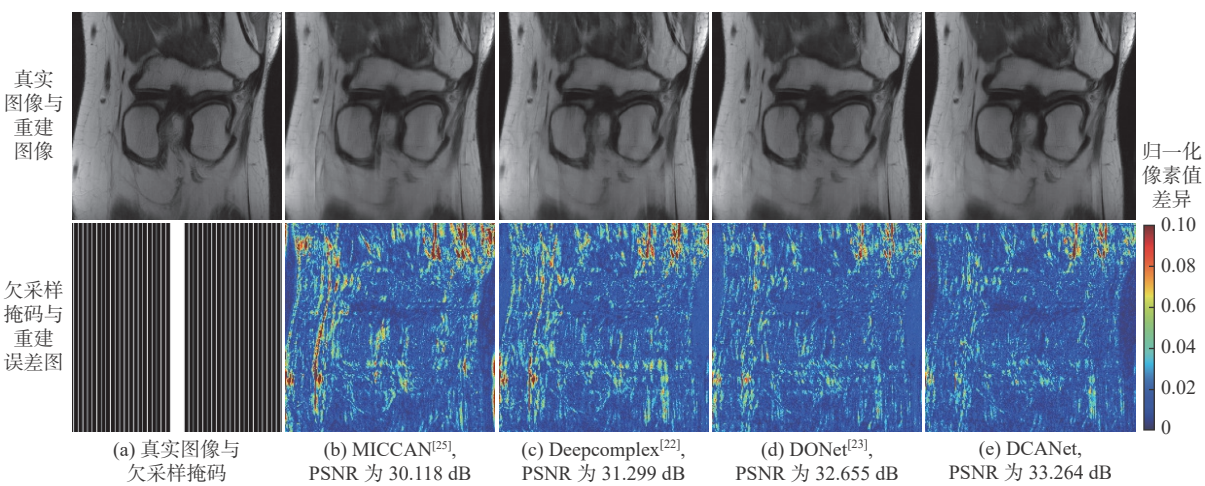



图5 冠状面质子密度加权序列5倍一维等间隔欠采样重建误差对比

Fig. 5 Comparison of reconstruction error maps of coronal plane proton density weighted sequences with 5-fold 1D uniform undersampled reconstruction

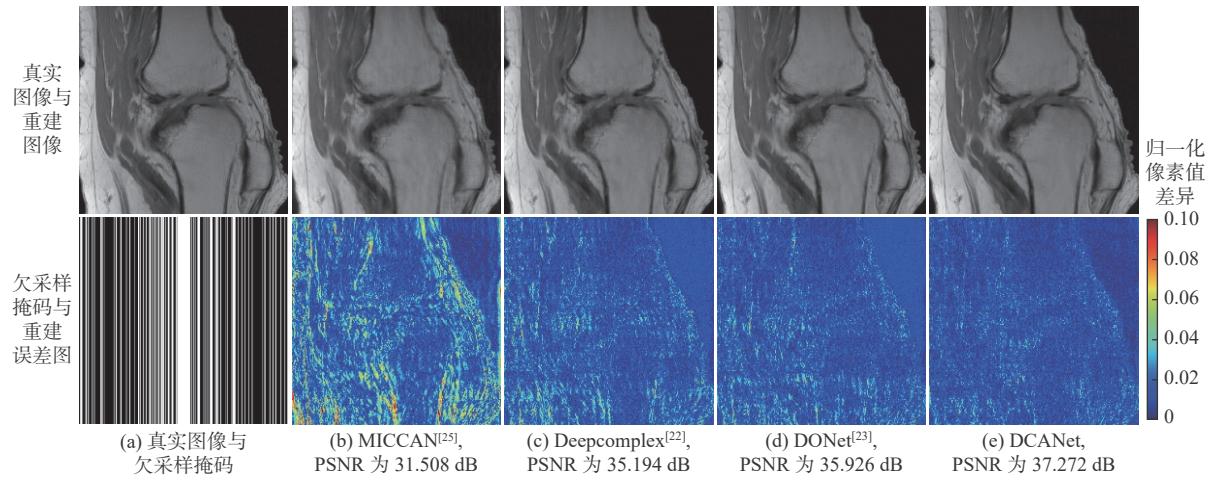



图 6　矢状面质子密度加权序列 3 倍一维笛卡尔随机欠采样重建误差对比

Fig. 6　Comparison of reconstruction error maps of sagittal plane proton density-weighted sequences with 3-fold 1D cartesian random undersampling

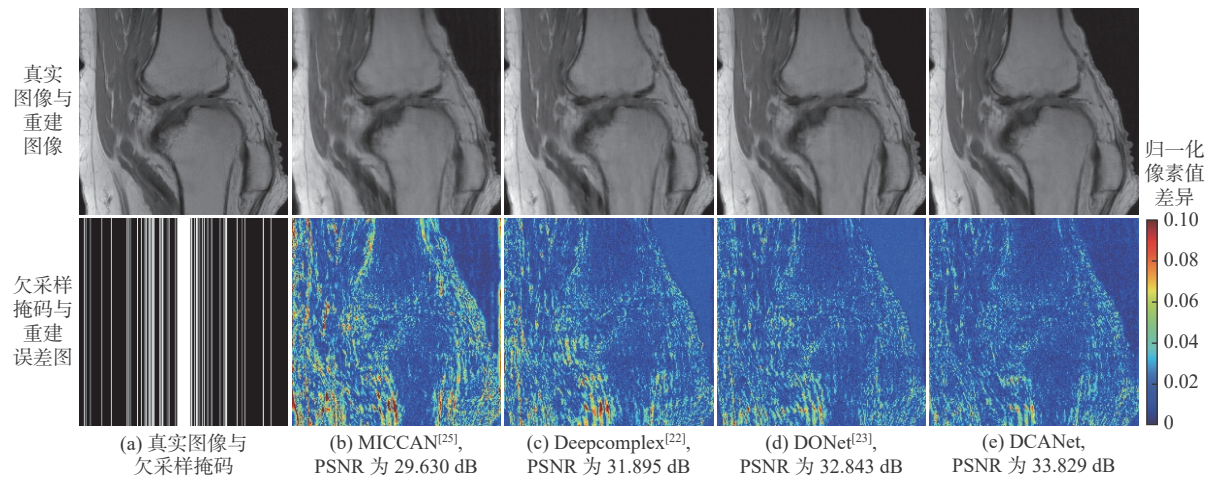



图 7　矢状面质子密度加权序列 5 倍一维笛卡尔随机欠采样重建误差对比

Fig. 7　Comparison of reconstruction error maps of sagittal plane proton density-weighted sequences with 5-fold 1D cartesian random undersampling

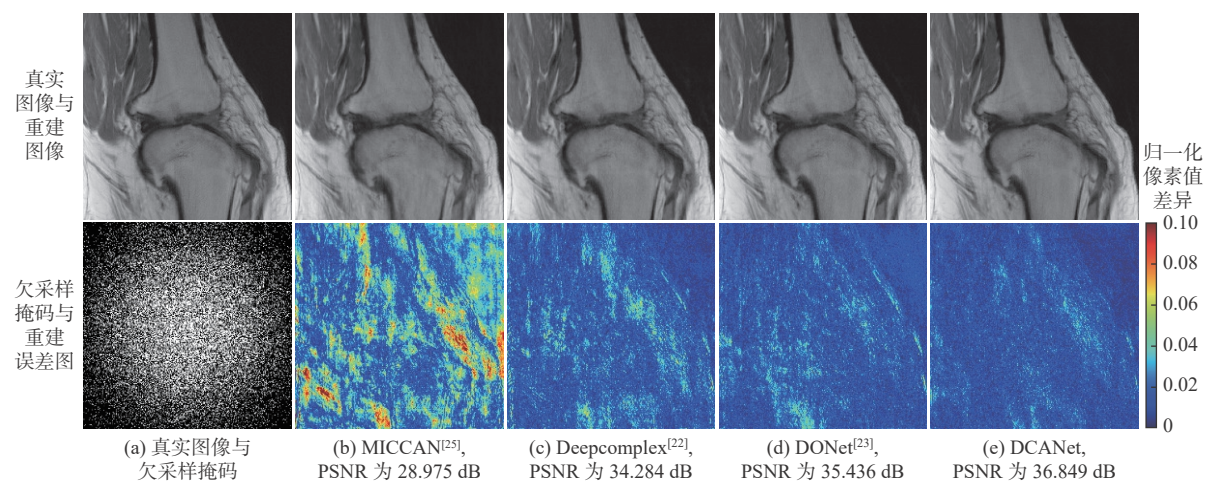



图 8　矢状面质子密度加权序列 3 倍二维随机欠采样重建误差对比

Fig. 8　Comparison of reconstruction error maps of sagittal plane proton density-weighted sequences with 3-fold 2D random undersampling

完成 3 折交叉验证实验, 结果如表 4 所示。表中结果表明 DCANet 模型的重建质量提升没有受到实验结果偶然性的影响。

为验证数据一致性层的有效性, 实验选取冠状

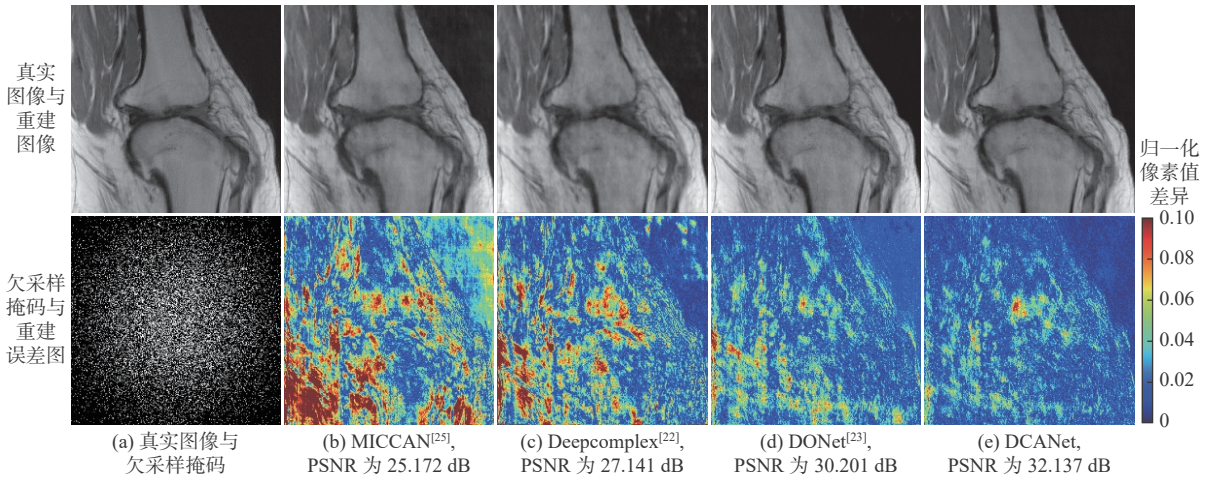



图 9 矢状面质子密度加权序列 5 倍二维随机欠采样重建误差对比

Fig. 9 Comparison of reconstruction error maps of sagittal plane proton density-weighted sequences with 5-fold 2D random undersampling

面质子密度加权序列在 3 倍一维笛卡尔欠采样方式下进行对比实验，结果如表 5 所示，表中 DCANet_NoDC 为没有数据一致性层的 DCANet 模型，结果表明数据一致性层是提高磁共振图像重建质量的有效手段。

**表 4 3 折交叉验证实验结果**

**Table 4 Results of 3-fold cross-validation experiment**

| 模型 | PSNR/dB | SSIM | HFEN |
|---|---|---|---|
| MICCAN[25] | 35.101±0.846 | 0.881±0.009 | 0.230±0.031 |
| Deepcomplex[22] | 36.238±0.879 | 0.888±0.014 | 0.177±0.025 |
| DONet[23] | 36.581±0.760 | 0.894±0.013 | 0.158±0.017 |
| DCANet | 37.567±0.618 | 0.908±0.008 | 0.156±0.018 |

**表 5 数据一致性层对比实验结果**

**Table 5 Results of data consistency layer contrast experiment**

| 模型 | PSNR/dB | SSIM | HFEN |
|---|---|---|---|
| DCANet_NoDC | 33.677±1.337 | 0.857±0.029 | 0.271±0.052 |
| DCANet | 36.791±1.298 | 0.899±0.019 | 0.181±0.040 |

## 3 结 论

1）本文提出一种用于并行磁共振成像重建的 DCANet 模型，该模型首先使用复数卷积来更好地处理复数数据，还使用了注意力机制使模型能够更加关注具有更多特征的通道，同时还在每个模块之后使用了数据一致性层来进行数据保真。

2）实验结果表明，本文 DCANet 模型对不同磁共振成像数据集的重建效果在主观的视觉感受和客观的定量指标上均优于 MICCAN、Deepcomplex 和 DONet 模型，能够还原更多细节，保证重建精度。

在之后的工作中，将继续改进模型，并尝试使用不同的损失函数来更好地优化模型。

## 参考文献（References）

[1] 赵喜平. 磁共振成像[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 64-87.
ZHAO X P. Magnetic resonance imaging[M]. Beijing: Science Press, 2004: 64-87(in Chinese).

[2] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.

[3] LUSTIG M, DONOHO D L, SANTOS J M, et al. Compressed sensing MRI[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 72-82.

[4] LAI Z Y, QU X B, LIU Y S, et al. Image reconstruction of compressed sensing MRI using graph-based redundant wavelet transform[J]. Medical Image Analysis, 2016, 27: 93-104.

[5] KNOLL F, BREDIES K, POCK T, et al. Second order total generalized variation (TGV) for MRI[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2011, 65(2): 480-491.

[6] YANG J F, ZHANG Y, YIN W T. A fast alternating direction method for TVL1-L2 signal reconstruction from partial Fourier data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 288-297.

[7] PRUESSMANN K P. Encoding and reconstruction in parallel MRI[J]. NMR in Biomedicine, 2006, 19(3): 288-299.

[8] PRUESSMANN K P, WEIGER M, BÖRNERT P, et al. Advances in sensitivity encoding with arbitrary k-space trajectories[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2001, 46(4): 638-651.

[9] PRUESSMANN K P, WEIGER M, SCHEIDEGGER M B, et al. SENSE: Sensitivity encoding for fast MRI[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 1999, 42(5): 952-962.

[10] GRISWOLD M A, JAKOB P M, HEIDEMANN R M, et al. Generalized autocalibrating partially parallel acquisitions (GRAPPA)[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2002, 47(6): 1202-1210.

[11] LUSTIG M, PAULY J M. SPIRiT: Iterative self-consistent parallel imaging reconstruction from arbitrary k-space[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2010, 64(2): 457-471.

[12] UECKER M, LAI P, MURPHY M J, et al. ESPIRiT: An eigen-

value approach to autocalibrating parallel MRI: Where SENSE meets GRAPPA[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2014, 71(3): 990-1001.

[13] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521: 436-444.

[14] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2015: 234-241.

[15] DONG C, LOY C C, HE K, et al. Learning a deep convolutional network for image super-resolution[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2014: 184-199.

[16] 施俊, 汪琳琳, 王珊珊, 等. 深度学习在医学影像中的应用综述[J]. 中国图象图形学报. 2020, 25(10): 1953-1981.
SHI J, WANG L L, WANG S S, et al. A review of the application of deep learning in medical imaging[J]. Journal of Image and Graphics. 2020, 25(10): 1953-1981(in Chinese).

[17] WANG S S, SU Z H, YING L, et al. Accelerating magnetic resonance imaging via deep learning[C]//Proceedings of the IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging. Piscataway: IEEE Press, 2016: 514-517.

[18] SCHLEMPER J, CABALLERO J, HAJNAL J V, et al. A deep cascade of convolutional neural networks for dynamic MR image reconstruction[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 37(2): 491-503.

[19] SRIRAM A, ZBONTAR J, MURRELL T, et al. GrappaNet: Combining parallel imaging with deep learning for multi-coil MRI reconstruction[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 14303-14310.

[20] LU T Y, ZHANG X L, HUANG Y H, et al. pFISTA-SENSE-ResNet for parallel MRI reconstruction[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2020, 318: 106790.

[21] TRABELSI C, BILANIUK O, ZHANG Y, et al. Deep complex networks[EB/OL].(2017-03-27)[2022-12-14].http://arxiv.org/abs/1705.09792.

[22] WANG S S, CHENG H T, YING L, et al. Deep complexMRI: Exploiting deep residual network for fast parallel MR imaging with complex convolution[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2020, 68: 136-147.

[23] FENG C M, YANG Z Y, FU H Z, et al. DONet: Dual-octave network for fast MR image reconstruction[C]//Proceedings of the IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-11.

[24] ZHANG Y L, LI K P, LI K, et al. Image super-resolution using very deep residual channel attention networks[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 294-310.

[25] HUANG Q Y, YANG D, WU P X, et al. MRI reconstruction via cascaded channel-wise attention network[C]//Proceedings of the IEEE 16th International Symposium on Biomedical Imaging. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1622-1626.

[26] HAMMERNIK K, KLATZER T, KOBLER E, et al. Learning a variational network for reconstruction of accelerated MRI data[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2018, 79(6): 3055-3071.

# Parallel MRI reconstruction by using complex convolution and attention mechanism

DUAN Jizhong*, XIAO Chen

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract**: for the reconstruction of parallel magnetic resonance imaging, a deep complex attention network (DCANet) model is proposed. A data consistency layer is used to maintain acquired k-space data unchanged, and a cascade network is formed. Additionally, since magnetic resonance images of multiple coils differ, the proposed model also uses a channel-wise attention mechanism to focus on channels with more effective features. All of these techniques are used to replace the conventional method of convolving real and imaginary parts separately in complex convolution. Experiments are conducted on two different magnetic resonance imaging datasets with three different undersampling patterns. According to the experimental findings, the DCANet model performs better during reconstruction and achieves lower high-frequency error norm (HFEN) and greater peak signal-to-noise ratio (PSNR) and structural similarity (SSIM). The DCANet model achieves average PSNR improvements of 4.52 dB, 2.30 dB and 1.21 dB over MRI cascaded channel-wise attention network (MICCAN), Deepcomplex and DONet models, respectively.

**Keywords**: parallel magnetic resonance imaging; image reconstruction; deep learning; complex convolutional networks; attention mechanism

**Received**: 2022-12-19; **Accepted**: 2023-03-10; **Published Online**: 2023-03-22 08:30

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230320.1428.001

**Foundation item**: National Natural Science Foundation of China Regional Science Foundation Project (61861023)

* **Corresponding author**. E-mail: duanjz@kust.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0991

# 复合材料厚板结构压缩稳定性和承载能力分析

王春寿[1]，张笑宇[2]，詹志新[3,*]，肖浩[1]

(1. 中国商飞上海飞机制造有限公司 复合材料中心，上海 200123；2. 南方科技大学 力学与航空航天工程系，深圳 518055；
3. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

**摘　　要**：针对复合材料厚板压缩稳定性分析问题进行了研究。对复合材料机身厚板结构进行压缩试验，试验中发现长桁底部蒙皮先发生屈曲，长桁未起到隔波作用；对该结构采用有限元线性和非线性分析方法进行分析，分析结果验证了该屈曲特征。根据试验和分析结果对稳定性分析方法进行了修正，采用修正的分析方法计算得到的屈曲载荷和承载能力精度更高，为复合材料厚板结构的屈曲分析和承载能力计算提供了一种新的方法。

**关 键 词**：复合材料；加筋板；厚板；稳定性；承载能力；横向剪切
**中图分类号**：V214.8
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0094-08

复合材料由于高比强度、高比刚度等特点，被广泛应用于飞机结构中。Kassapoglou[1]研究了复合材料加筋壁板结构，加筋壁板结构主要有筋条和蒙皮组成，传递面内载荷，稳定性失效是典型的失效模式。王菲菲等[2]研究了加筋壁板结构的失效模式，表明结构在失稳之后仍然有一定的承载能力，结构并不会马上失去承载能力。为充分利用加筋板结构的这一特点，需要研究结构的稳定性，文献[3-5]对结构进行了屈曲和后屈曲分析，充分利用结构的后屈曲性能，文献[6-7]对结构进行优化设计，通过铺层优化能提升结构的承载能力。加筋壁板结构的稳定性研究方法有很多种，Stamatelos和Bacciocchi[8-9]等采用工程分析方法，Dhurvey和Paik[10-11]等采用有限元分析方法，Takano[12]采用试验分析方法。工程分析方法由于假设的简化，能快速对结构进行尺寸设计，但工程分析方法往往针对于特定的结构，石经纬等[13]研究了T型长桁，万华亮等[14]研究了M型长桁，葛建彪[15]研究了I型长桁的加筋板结构，不同结构形式适用的工程分析方法往往不同，需要分别进行研究。试验分析方法方面，Stevens等[16]的试验结果表明，加筋板具有很高的后屈曲承载能力，Kong等[17]对均布压载作用下的复合材料加筋板进行试验研究，加筋板极限强度为屈曲载荷的4倍以上。Shi和Xiong[18]的试验研究表明剪切载荷作用下的复合材料薄壁加筋板结构具有较高的后屈曲承载能力。但由于试验成本较高，使用范围受到较大的限制。为得到更加准确的分析结果，目前越来越多采用有限元分析方法，Mishra等[19]采用有限元分析方法研究复合材料曲板的屈曲特性，有限元分析方法由于能模拟各种边界条件和加载方式，并且可以获得更详细的信息，目前得到了更加广泛的应用。有限元分析稳定性目前分为线性分析和非线性分析方法，工程中发现线性分析得到的屈曲载荷往往要高于试验值，因此，有必要采用非线性屈曲分析的方法，早期von Kármán和Tsien[20]根据非线性大挠度理论，提出了板壳后屈曲分析的一般方法及非线性屈曲理论。1968年，Stein[21]提出了非线性前屈曲一致理论，解释了经典线性理论与试验之间差异的原因。非线性屈曲分析考虑变形中载荷位移的非线性关系，计

收稿日期：2022-12-13；录用日期：2023-03-24；网络出版时间：2023-04-12 16:19
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230411.1929.004
*通信作者. E-mail：zzxupc@163.com

引用格式：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. Analysis of compression stability and load capacity of thick composite plate structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：94-101 (in Chinese).

算结果更符合实际情况。针对民用飞机的加筋壁板结构的稳定性分析, 李真等[22] 先进行有限元分析, 对工程分析方法进行修正, 进而再用试验来验证有限元分析方法, 这样可以得到较为准确的分析结果, 也是目前较适用的方法。文献 [23-25] 研究了薄板结构, 薄板结构往往是先发生局部失稳, 进而发生整体失稳直至结构失去承载能力发生破坏。

对于薄板结构, 可以忽略横向剪切效应, 采用平面应力假设使问题大大简化, 其精度工程上是可以接受的, 但对于厚板结构, 复合材料的横向剪切效应会降低结构的承载能力, 对结果影响显著, 无法忽略。本文以机身典型的厚板结构为研究对象, 对该结构进行轴压稳定性试验, 获得该结构的失稳载荷和破坏载荷, 基于 Abaqus 软件建立加筋壁板结构的有限元模型, 分别进行了线性和非线性稳定性分析, 并根据有限元分析和试验结果, 建立适用于厚板结构的分析方法, 为机身厚板结构的设计提供分析方法和依据。

## 1　厚板结构压缩稳定性试验

### 1.1　试验件结构

试验件为复合材料厚板结构, 由复合材料蒙皮、复合材料长桁和灌封端装配组成, 结构如图 1 所示, 长桁和蒙皮用高性能胶膜连接, 为方便加载, 在壁板两端建立了灌封端, 由金属灌封端框和填充树脂组成, 沿长桁方向宽度为 88 mm, 垂直于长桁方向高度为 90 mm。长桁间距为 212 mm, 长桁腹板高度为 30 mm, 长桁腹板厚度为 3.74 mm, 长桁底缘单侧宽度为 30 mm, 长桁底缘厚度为 2.43 mm, 长桁截面尺寸如图 2 所示, 试验件总长为 795 mm, 总宽度为 666 mm, 中间区域蒙皮厚度为 7.48 mm, 该部分区域为试验考核区域, 两端过渡段蒙皮厚度为 10.472 mm。

采用应变片检测加载过程中的应变历程。试验件应变片布置如图 3 所示, 以 *B-B* 截面为例, 应变片编号示意图如图 4 所示, 其中, 长桁间蒙皮应变片正反面均布置, *L* 为灌封盒之间蒙皮的长度。

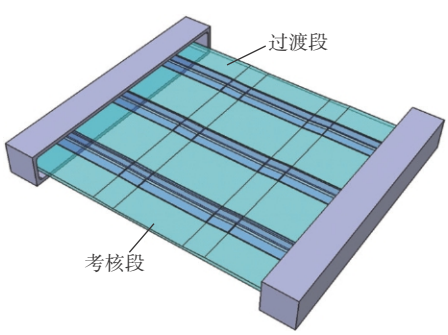



图 1　试验件结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of test specimen structure

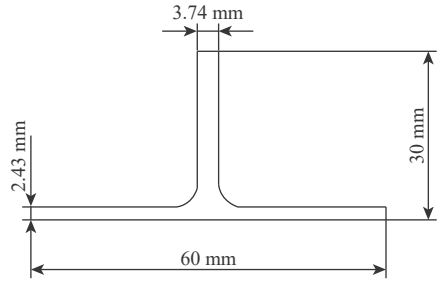



图 2　长桁截面尺寸示意图

Fig. 2　Schematic diagram of stringer section

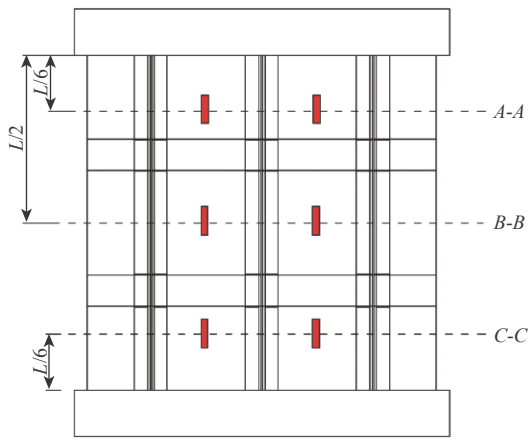



图 3　试验件截面应变片布置

Fig. 3　Strain gauge scheme of test specimen section

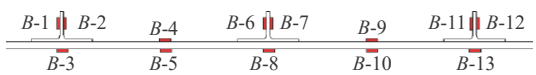



图 4　试验件截面应变片编号示意图

Fig. 4　Schematic diagram of section strain gauge numbering for test specimen

### 1.2　试验件材料和铺层

蒙皮和长桁采用 HEXCEL 公司制造的碳纤维复合材料单向带预浸料制造, 单层名义厚度为 0.187 mm, 材料属性如表 1 所示。灌封端框采用 7050-T7451 铝合金材料, 灌封材料为环氧树脂。蒙皮考核区铺层为 40 层, 过渡区铺层为 56 层, 长桁腹板铺层为 20 层, 长桁缘条铺层为 13 层。铺层顺序如表 2 所示, 其中, 0°方向沿着长桁轴向方向, s 表示对称。

材料属性如表 1 所示, 其中, $E_{11}$、$E_{22}$、$G_{12}$ 和 $\mu_{12}$ 分别为材料 0°方向(沿纤维方向)弹性模量、材料 90°方向(面内垂直纤维方向)弹性模量、面内切变模量和泊松比。

**表 1　材料属性**

**Table 1　Material properties**

| 材料 | $E_{11}$/MPa | $E_{22}$/MPa | $G_{12}$/MPa | $\mu_{12}$ |
|---|---|---|---|---|
| M21C/IMA | 148 000 | 9 650 | 4 600 | 0.31 |

表 2 壁板结构复材部分铺层信息

Table 2 Layups for composite parts of stiffened panel

| 部位 | 铺层顺序 |
|---|---|
| 蒙皮考核区 | [45,−45,0,45,−45,90,0,45,90,−45,45,−45,0,45,90,−45,45,90,−45,0]s |
| 蒙皮过渡段 | [45,−45,0,45,−45,90,−45,0,45,−45,90,45,−45,90,45,−45,0,45,90,−45,45,0,90,45,0,90,−45,0]s |
| 长桁腹板 | [45,0,0,90,0,−45,0,−45,0,45]s |
| 长桁缘条 | [45,0,0,90,0,−45,0,−45,0,45,−45,0,45] |

### 1.3 试验加载过程

在室温大气环境下开展试验，加载方式为力加载，试验件两侧采用刀口夹持，限制面外位移，试验件的截面形心需在试验机的中心线上，试验加载示意图如图 5 所示。试验前先进行调试，调试加载载荷为预估屈曲载荷的 40%，预估屈曲载荷用有限元线性分析方法分析得到。

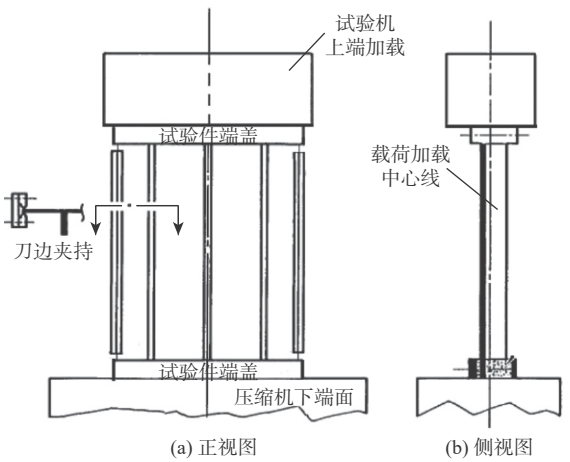



图 5 T 型长桁壁板压缩试验件加载示意图

Fig. 5 Schematic diagram of loading of T-shaped stiffened panel compression test specimen

开始正式试验时，先按照 5% 预估屈曲载荷为一等级逐渐加载载荷，载荷加载至 60%，检查应变、位移数据及试验件外观，如有异响，则载荷加载至 60% 后以 5% 理论载荷（为有限元预估的屈曲载荷）为一等级逐级卸载，再进行无损检测；若无异响，载荷加载至 60% 后以 2% 预估屈曲载荷为一等级，逐级加载至 80% 理论载荷，再以 1% 理论载荷为一等级，逐级加载至 100% 理论载荷，在此过程中逐级读取应变数据，若无破坏则继续以 1% 理论载荷为一等级加载至破坏，对应加载、卸载，逐级进行应变测量。

### 1.4 试验结果

考核区蒙皮部分正反两侧应变片的载荷应变曲线如图 6 所示。

蒙皮的屈曲载荷采用反向应变法[26]确定，取屈曲时的应变片应变极值处对应的载荷为屈曲载荷。

由图 6 可知，应变片 *B*-5 对应的拐点处的载荷为 1 324 kN，对应的应变为 2 587 με，应变片 *B*-10 对应的拐点处的载荷为 1 331 kN，对应的应变为 2 584 με，应变片 *B*-8 对应的拐点处的载荷为 1 264 kN，对应的应变为 2 188 με。

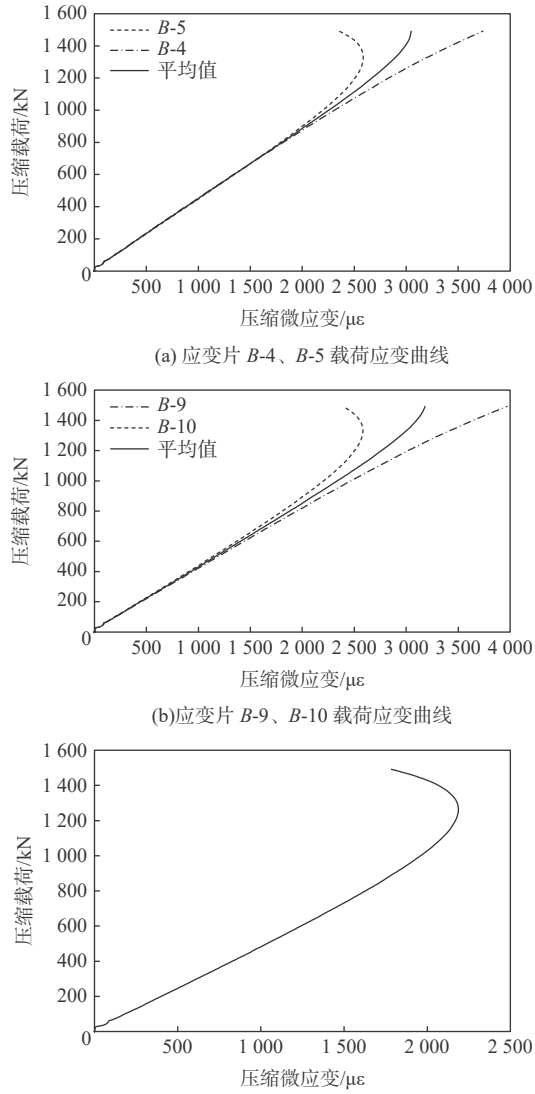



图 6 考核区蒙皮应变片载荷应变曲线

Fig. 6 Load-strain curves of skin strain gauges in the examination area

试验结果如表 3 所示。

表 3 试验结果分析

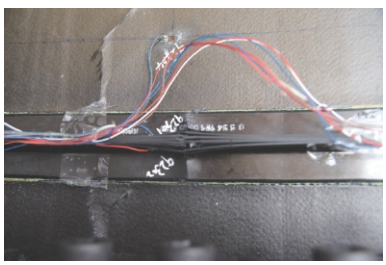
Table 3 Analysis of test results

| 应变片编号 | 拐点处应变/με | 拐点处载荷/kN |
|---|---|---|
| *B*-5 | 2 587 | 1 324 |
| *B*-10 | 2 584 | 1 331 |
| *B*-8 | 2 188 | 1 264 |

根据试验结果可知，载荷加载到 1 264 kN 时，长桁底部蒙皮发生屈曲，继续加载到 1 324 kN，蒙皮屈曲扩散到试样两侧，随着载荷继续增大，试验件出现最终破坏，对应的压缩破坏载荷为 1 492 kN，试验破坏载荷是初始屈曲载荷的 118%。试验失效

如图 7(a) 所示, 破坏区域沿着宽度方向贯穿整个试样。长桁截面局部破坏模式如图 7(b) 所示。

(a) 壁板试验件整体破坏



(b) 壁板试验件长桁局部破坏

图 7　壁板试验件破坏细节

Fig. 7　Collapse details of wall plate test specimen

## 2　有限元分析

### 2.1　有限元模型建模

本文采用 Abaqus 有限元软件进行有限元分析, 有限元模型如图 8 所示, 对于长桁和蒙皮单元, 使用 S4R 传统壳单元(见表 1)。铺层为各部分结构的真实铺层顺序(见表 2), 铺层 0°方向为长桁方向。蒙皮和长桁共胶结的部分, 长桁缘条上的节点和对应蒙皮上的节点一一对应, 用刚性连接单元

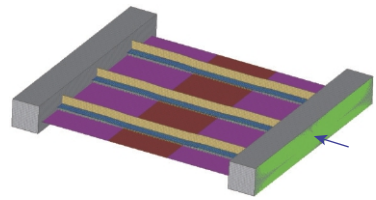


图 8　T 型长桁壁板压缩试验件有限元模型示意图

Fig. 8　Schematic diagram of finite element model of T-shaped stiffened compression test specimen

RBE2 连接 6 个自由度。试验件的一端固定, 另一端施加 2 000 kN 压缩载荷。

### 2.2　特征值屈曲分析

线性屈曲分析[27] 主要是求解特征方程:

$$(\boldsymbol{k}_n' - \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{k}_n'')\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

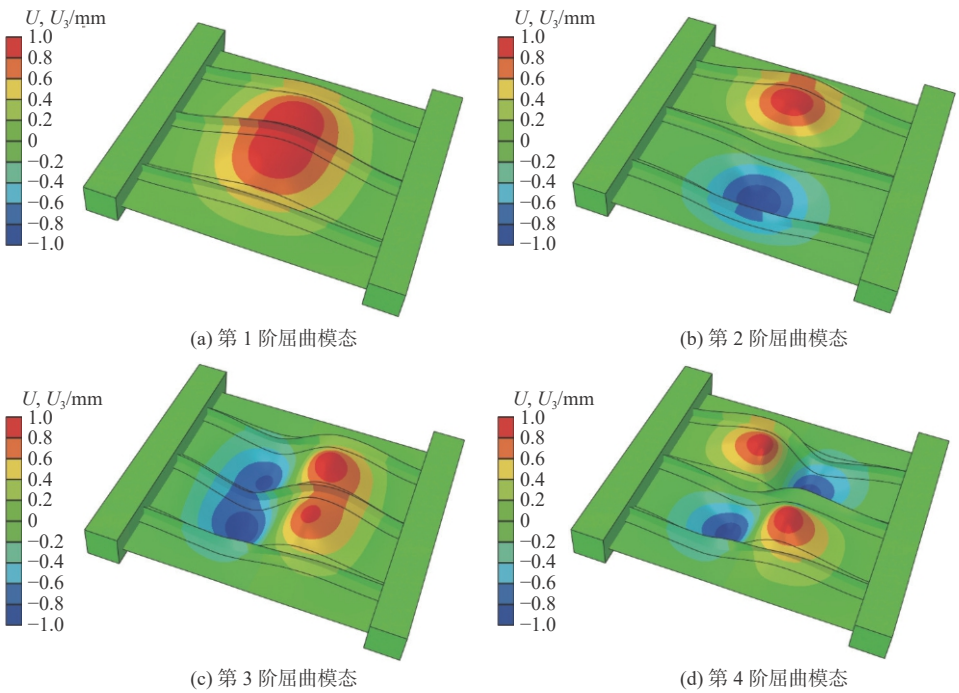
式中: $\boldsymbol{k}_n'$为刚度矩阵; $\boldsymbol{k}_n''$为中面载荷为单位载荷时对应的初应力刚度矩阵, 计入了中面薄膜力对弯曲刚度的影响。当施加载荷为单位载荷时, $\boldsymbol{\Lambda}$为该结构对应的屈曲临界载荷; $\boldsymbol{\delta}$为对应的屈曲模态; $n$ 为第 $n$ 阶模态。

分析得到结构的前 4 阶屈曲模态如图 9 所示, 其中, $U$ 为位移, $U_3$ 为法向位移, 对应的屈曲载荷分别为 1 370, 1 914, 2 065, 2 395 kN。

从第 1 阶屈曲模态中可以看出蒙皮的屈曲模态跨过了长桁, 长桁未起到隔波的作用。

### 2.3　非线性屈曲分析

非线性屈曲分析的目的是求解结构屈曲前后的变形过程, 如图 10 所示, 结构在基本载荷-位移平衡路径(路径 Ⅰ)的附近还存在另一分叉平衡路径




(a) 第 1 阶屈曲模态　　(b) 第 2 阶屈曲模态

(c) 第 3 阶屈曲模态　　(d) 第 4 阶屈曲模态

图 9　试验件屈曲模态

Fig. 9　Buckling modes of test specimen

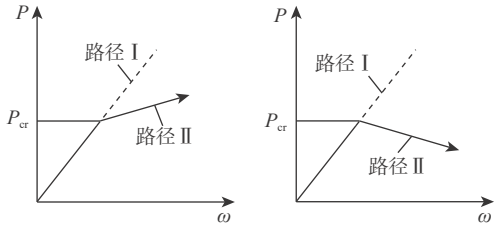



图 10 屈曲载荷临界点

Fig. 10 Critical point of buckling load

(路径Ⅱ),结构的载荷分叉临界点可以有2种表现形式:分叉临界点和极值临界点[27]。

分叉临界点。如图10(a)所示,当载荷达到临界值时,如果结构或载荷受到一微小扰动,载荷-位移曲线将沿分叉平衡路径发展,结构还能继续承载,有一定的后屈曲承载能力,一般常见于平板结构。

极值临界点。如图10(b)所示,当载荷达到临界值时,如果结构或载荷受到一微小扰动,载将分别发生位移的跳跃和载荷的快速下降,结构无法继续承载,一般常见于细长杆结构。图中,$P_{cr}$为屈曲临界载荷,$\omega$为屈曲挠度。

利用有限元软件进行结构的非线性屈曲分析,得到结构的载荷位移曲线,通过载荷拐点计算得到结构的屈曲载荷。

非线性分析得到的结构的变形云图如图11所示,提取失稳点的载荷和面外位移绘制曲线如图12所示,根据曲线拐点,得到的屈曲载荷为1 319 kN。

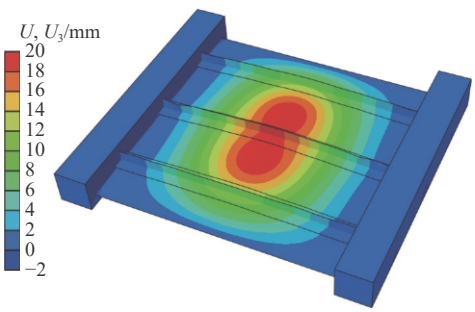



图 11 试验件非线性分析变形云图

Fig. 11 Deformation contour of nonlinear analysis

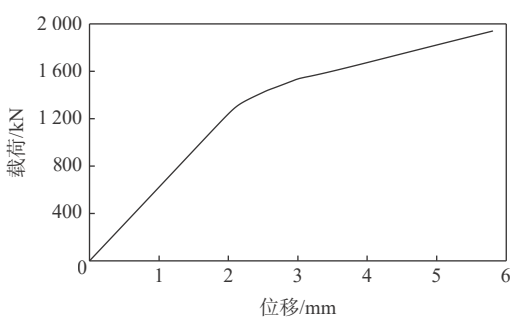



图 12 试验件载荷-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curve of test specimen

## 3 工程分析方法

### 3.1 蒙皮屈曲载荷计算

由于试验和有限元分析时间较长,而飞机中的结构设计需要反复迭代设计,为提高效率,需要建立一套快速且相对准确的分析方法,以便对机身中典型的结构进行迭代设计和优化。

结构横截面示意图如图13所示,$L_{str}$为长桁腹板高度,$b_{str}$为长桁间距,$W$为板宽,$t_{str}$为长桁底缘厚度,$t_{web}$为长桁腹板厚度,$t_{skin}$为蒙皮厚度。

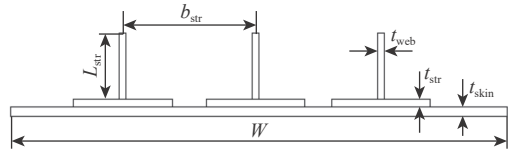



图 13 加筋壁板试件截面尺寸示意图

Fig. 13 Schematic diagram of cross-section dimensions of stiffened panel

对于加筋壁板结构,由于长桁是T型长桁,开口截面的扭转刚度可以忽略不计,在边界上无法限制蒙皮的扭转,因此,边界条件简化为简支,目前常用的分析方法认为筋条提供边界支持,将结构简化为四边简支结构的单向压缩平板,模型如图14所示,$a$为板长,$b$为板宽,$N_x$为压缩载荷线力。

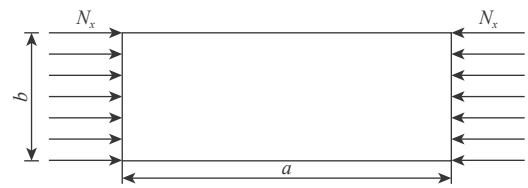



图 14 轴压作用下四边简支矩形平板

Fig. 14 Rectangular plate simply supported on four sides under axial compression

屈曲载荷线力的计算式为[28]

$$N_{x,\mathrm{cr}}=\frac{\pi^2 D_{22}}{b^2}\left[\frac{D_{11}}{D_{22}}\left(\frac{b}{a}\right)^2 m^2+2\frac{D_{12}+2D_{66}}{D_{22}}+\left(\frac{a}{b}\right)^2\frac{1}{m^2}\right] \tag{2}$$

式中:$m$为轴向屈曲半波数;$D_{11}$、$D_{22}$、$D_{12}$、$D_{66}$为复合材料平板的弯曲刚度矩阵$\boldsymbol{D}$的参数。

根据不同的$m$值,计算相应的一组$N_x$,取最小的$N_x$即为板的屈曲载荷。

长桁截面加筋比为长桁轴向刚度占整个截面的刚度比例,其表达式为

$$\eta=\frac{E_{\mathrm{str}}A_{\mathrm{str}}}{E_{\mathrm{str}}A_{\mathrm{str}}+E_{\mathrm{skin}}A_{\mathrm{skin}}} \tag{3}$$

式中:$E_{skin}$为蒙皮的轴向弹性模量;$A_{skin}$为蒙皮横截面积;$E_{str}$为长桁的轴向弹性模量;$A_{str}$为长桁横截

面积。

对于厚板结构, 由于蒙皮较厚, 长桁无法隔波, 为考虑长桁的弯曲刚度的影响, 将长桁的弯曲刚度折算到蒙皮的弯曲刚度上, 如下:

$$\begin{cases} D_{11,\mathrm{eq}} \approx D_{11,\mathrm{skin}} + \dfrac{E_{\mathrm{str}} I_{\mathrm{str}}}{2b_{\mathrm{st}}} \\ D_{12,\mathrm{eq}} \approx D_{12,\mathrm{skin}} \\ D_{22,\mathrm{eq}} \approx D_{22,\mathrm{skin}} \\ D_{66,\mathrm{eq}} \approx D_{66,\mathrm{skin}} + \dfrac{G_{\mathrm{str}} J_{\mathrm{str}}}{2b_{\mathrm{st}}} \end{cases} \tag{4}$$

式中: 下标 eq 表示等效; 下标 skin 表示蒙皮; 下标 str 表示长桁; $E$ 为弹性模量, $G$ 为剪切模量, $I$ 为惯性矩, $J$ 为扭转惯量。

由于 T 型长桁为开口截面, 忽略其扭转刚度 $G_{\mathrm{str}}J_{\mathrm{str}}$。

采用式(2)计算可得蒙皮的屈曲载荷 $N_x$= 1 884 N/mm

总屈曲载荷为

$$P_{\mathrm{buckling}} = N_x W \tag{5}$$

### 3.2　后屈曲承载能力计算

后屈曲阶段计算结构的承载能力需要考虑蒙皮的有效宽度 $W_{\mathrm{e}}$, 当蒙皮未失稳时其有效宽度等于长桁间距 $b_{\mathrm{str}}$, 而蒙皮失稳时应力重新分布, 长桁间的蒙皮应力不均匀, 蒙皮有效宽度 $W_{\mathrm{e}}$ 小于长桁间距 $b_{\mathrm{str}}$, 如图 15 所示, 其中, STR 表示长桁, 根据 von Kármán 等的计算式迭代计算有效蒙皮宽度[29]。

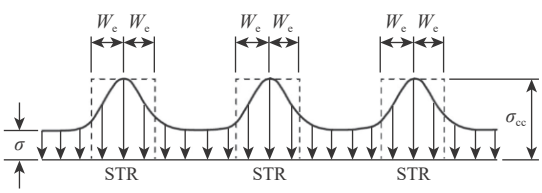



图 15　等效蒙皮宽度定义示意图

Fig. 15　Schematic diagram of definition of effective skin width of stiffened panel

根据结构的长细比分为短柱、中长柱和长柱, 如图 16 所示, 对于机身壁板结构, 一般都是典型的中长柱, 采用 Johnson 方程进行计算许用应力为[30]

$$\sigma_{\mathrm{c}} = \sigma_{\mathrm{cc}} - \frac{\sigma_{\mathrm{cc}}^2 (L'/\rho)^2}{4\pi^2 E_x} \tag{6}$$

式中: $\sigma_{\mathrm{cc}}$为柱剖面的压损许用应力; $L'/\rho$为长细比, $L' = L/\sqrt{C}$, $C$ 为端部支持系数; $\rho$ 为结构的回转半径, $\rho = \sqrt{I_{\mathrm{str}}/A}$, $A$ 为面积。

对于薄板结构, 横向剪切效应可以忽略, 采用平面应力假设使问题大大简化, 其精度工程上是可以接受的, 对于厚板结构, 由于横向剪切效应, 横截面在变形过程中, 不再垂直于中面, Kirchoff 假设不再适用, 越厚的板横向剪切效应越明显, 如果不考虑横向剪切效应, 分析得到的结果会不保守, 因此, 对于厚板结构需要考虑横向剪切效应修正, 修正的柱强度载荷为

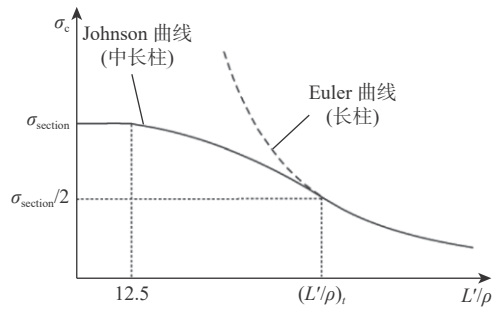



图 16　复材柱失稳类型与长细比关系

Fig. 16　Relationship between instability type and slenderness ratio of composite columns

$$\sigma_{\mathrm{cr}} = \frac{\sigma_{\mathrm{c}}}{1 + \sigma_{\mathrm{c}} A/(GA_{\mathrm{eff}})} \tag{7}$$

式中: $A_{\mathrm{eff}}$ 为柱剖面有效剪切面积。

## 4　结果分析与讨论

分析结果和试验结果对比如表 4 所示。

**表 4　分析结果与试验结果对比**

**Table 4　Compare calculation results with test results**

| 方法 | 类型 | 载荷/kN | 误差/% |
|---|---|---|---|
| 试验 | 屈曲载荷 | 1 264 | |
| | 破坏载荷 | 1 492 | |
| 工程 | 屈曲载荷(修正前) | 1 624 | 28.50 |
| | 屈曲载荷(修正后) | 1 255 | −0.70 |
| | 柱失稳载荷(不考虑横向剪切) | 2 384 | 59.80 |
| | 柱失稳载荷(考虑横向剪切) | 1 273 | −14.70 |
| 有限元分析 | 线性分析 | 1 370 | 8.40 |
| | 非线性分析 | 1 319 | 4.40 |

对于厚板结构, 长桁刚度相对蒙皮刚度较弱, 蒙皮屈曲模态跨过长桁, 对工程分析方法进行修正后, 误差从 28.5% 变为−0.70%, 方法更保守, 更适用于厚板结构。

对于厚板结构的柱失稳载荷, 横向剪切的影响较大, 误差从 59.80% 变为−14.70%, 对于厚板结构横向剪切效应不能忽略。

从有限元的计算分析可知, 线性有限元计算屈曲载荷误差为 8.40%, 非线性有限元计算屈曲载荷误差为 4.40%, 非线性分析结果精度更高, 因为非线性分析考虑到了屈曲前的变形, 对于预测结构屈曲载荷精度较高。

## 5　结　论

本文通过试验、有限元及工程分析方法, 对复

合材料加筋厚板结构的稳定性进行了研究，得到结论如下。

1）加筋壁板结构的屈曲模态受长桁加筋比的影响，当蒙皮为厚板时，长桁相对蒙皮较弱，长桁无法有效隔波，蒙皮失稳模态跨过长桁，结构继续承载直至发生破坏，试验破坏载荷是初始屈曲载荷的118%，结构屈曲之后较快发生破坏，说明厚板结构的后屈曲承载能力有限。

2）相比较于线性屈曲分析，采用非线性有限元分析方法计算加筋壁板结构的屈曲载荷精度更高，误差从8.40%提高到4.40%，能更为准确地计算得到结构的屈曲模态。

3）对于加筋壁板结构，当蒙皮为厚板，长桁无法有效隔波时，预测结构屈曲载荷时需要对工程分析方法进行修正，误差从28.50%提高到−0.70%，分析更为合理。

4）对于厚板结构，横向剪切的影响较大，考虑横向剪切修正后，柱强度载荷误差从59.80%提高到−14.70%，影响较大。

## 参考文献（References）


[1] KASSAPOGLOU C. Design and analysis of composite structures[M]. New York: Wiley, 2013: 237-273.

[2] 王菲菲, 崔德刚, 熊强, 等. 复合材料加筋板后屈曲承载能力工程分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(4): 494-497.
WANG F F, CUI D G, XIONG Q, et al. Engineering analysis of post-buckling loading capability for composite stiffened panels[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(4): 494-497(in Chinese).

[3] 李乐坤, 李曙林, 常飞, 等. 复合材料加筋壁板压缩屈曲与后屈曲分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(4): 563-568.
LI L K, LI S L, CHANG F, et al. Buckling and post-buckling of composite stiffened panel under compression[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(4): 563-568(in Chinese).

[4] 谭翔飞, 何宇廷, 冯宇, 等. 航空复合材料加筋板剪切稳定性及后屈曲承载性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2): 320-331.
TAN X F, HE Y T, FENG Y, et al. Stability and post-buckling carrying capacity of aeronautic composite stiffened panel under shear loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(2): 320-331(in Chinese).

[5] 高志刚, 冯宇, 马斌麟, 等. 航空复合材料加筋板压缩屈曲及后屈曲力学性能[J]. 航空材料学报, 2020, 40(1): 53-61.
GAO Z G, FENG Y, MA B L, et al. Compressive bucking and post-bucking mechanical properties of aeronautic composite stiffened panel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(1): 53-61(in Chinese).

[6] 王彬文, 张长兴, 郭文杰, 等. 考虑屈曲的复合材料加筋壁板铺层顺序优化[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12): 4123-4137.
WANG B W, ZHANG C X, GUO W J, et al. Stacking sequence optimization of composite stiffened panel considering buckling[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(12): 4123-4137(in Chinese).

[7] 王燕, 李书, 许秋怡, 等. 复合材料加筋板剪切后屈曲分析与优化设计[J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1512-1525.
WANG Y, LI S, XU Q Y, et al. Optimization design and analysis of stiffened composite panels in post-buckling under shear[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(5): 1512-1525(in Chinese).

[8] STAMATELOS D G, LABEAS G N, TSERPES K I. Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(3): 422-430.

[9] BACCIOCCHI M, TARANTINO A M. Analytical solutions for vibrations and buckling analysis of laminated composite nanoplates based on third-order theory and strain gradient approach[J]. Composite Structures, 2021, 272: 114083.

[10] DHURVEY P, MITTAL N D. Buckling behavior of an orthotropic composite laminate using finite element analysis[J]. International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2012, 1(4): 93-95.

[11] PAIK J K, SEO J K. Nonlinear finite element method models for ultimate strength analysis of steel stiffened-plate structures under combined biaxial compression and lateral pressure actions—Part II: Stiffened panels[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(8-9): 998-1007.

[12] TAKANO A. Buckling test of CFRP cylindrical shells under compression load[J]. Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2018, 66(4): 98-111.

[13] 石经纬, 赵娟, 刘传军, 等. 复合材料翼面壁板轴压稳定性[J]. 复合材料学报, 2020, 37(6): 1321-1333.
SHI J W, ZHAO J, LIU C J, et al. Stability of composite stiffened panels under compression[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(6): 1321-1333(in Chinese).

[14] 万华亮, 龚伟明, 覃俊娥. 复合材料帽型加筋壁板轴压稳定性研究[J]. 强度与环境, 2019, 46(1): 31-34.
WAN H L, GONG W M, QIN J E. Research on the buckling and post-buckling behavior of hat-stiffened composite panels under axial compressive load[J]. Structure & Environment Engineering, 2019, 46(1): 31-34(in Chinese).

[15] 葛建彪. 复合材料加筋壁板稳定性及承载能力分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
GE J B. Stability and bearing capacity analysis of composite stiffened panel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010(in Chinese).

[16] STEVENS K A, RICCI R, DAVIES G A O. Buckling and postbuckling of composite structures[J]. Composites, 1995, 26(3): 189-199.

[17] KONG C W, LEE I C, KIM C G, et al. Postbuckling and failure of stiffened composite panels under axial compression[J]. Composite Structures, 1998, 42(1): 13-21.

[18] SHI G, XIONG Y. Probabilistic buckling analysis of fiber metal laminates under shear loading condition[J]. Advances in Engineering Software, 2000, 31(8): 519-527.

[19] MISHRA B B, KUMAR A, SAMUI P, et al. Buckling of laminated composite skew plate using FEM and machine learning methods[J]. Engineering Computations, 2021, 38(1): 501-528.

[20] VON KÁRMÁN T, TSIEN H S. The buckling of thin cylindrical

shells under axial compression[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 165-181.

[21] STEIN M. Some recent advances in the investigation of shell buckling[J]. AIAA Journal, 1968, 6(12): 2339-2345.

[22] 李真, 王俊, 邓凡臣, 等. 复合材料机身壁板的强度分析与试验验证[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 118-130.
LI Z, WANG J, DENG F C, et al. Strength analysis and test verification of composite fuselage panels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 118-130(in Chinese).

[23] 陈庆远. 复合材料薄壁结构的屈曲和后屈曲分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
CHEN Q Y. Buckling and post-buckling analysis of composite thin-walled structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015(in Chinese).

[24] LI Z C, XIE Y G. Buckling mechanism of thin-walled arches with composite polyhedral shapes[J]. Composite Structures, 2021, 271: 114134.

[25] EINAFSHAR N, LEZGY-NAZARGAH M, BEHESHTI-AVAL S B. Buckling, post-buckling and geometrically nonlinear analysis of thin-walled beams using a hypothetical layered composite cross-sectional model[J]. Acta Mechanica, 2021, 232(7): 2733-2750.

[26] CHANG K, JENSEN J, MATTHEWS R, et al. Buckling strength of carbon/carbon panels[C]//Proceedings of the 31st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 1990.

[27] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 649-651.
WANG X C. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 649-651(in Chinese).

[28] 中国航空研究院. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 5-11.
China Aviation Research Institute. Guide to structural stability analysis of composite materials[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002: 5-11(in Chinese).

[29] VON KÁRMÁN T, SECHLER E E, DONNELL L H. The strength of thin plates in compression[J]. Journal of Fluids Engineering, 1932, 54(2): 53-56.

[30] 牛春匀. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 冯振宇, 程小全, 张纪奎, 译. 北京: 航空工业出版社, 2009: 394-395.
NIU C Y. Airframe stress analysis and sizing[M]. FENG Z Y, CHENG X Q, ZHANG J K , Translated. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 394-395(in Chinese).

# Analysis of compression stability and load capacity of thick composite plate structures

WANG Chunshou[1]，ZHANG Xiaoyu[2]，ZHAN Zhixin[3,*]，XIAO Hao[1]

(1. Composites Center，COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co.，Ltd.，Shanghai 200123，China；
2. Department of Mechanics and Aerospace Engineering，Southern University of Science and Technology，Shenzhen 518055，China；
3. School of Aeronautic Science and Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China)

**Abstract**: The compression stability of composite thick plates was studied. Firstly, the compression test was carried out on the thick plate structure of the composite fuselage. It was found that the bottom skin of the stringer was buckling first, and the stringer did not play the role of wave isolation. Secondly, the finite element linear and nonlinear analysis methods were carried out on the structure. The he buckling characteristics was verified. Finally, the stability analysis method was revised according to the test and analysis results. The buckling load and bearing capacity calculated by the modified analysis method were more accurate. A new method for buckling analysis and load-bearing capacity calculation of composite thick plate structures was established.

**Keywords**: composite; stiffened plates; thick plate; stability; load capacity; transverse shear

**Received**：2022-12-13；**Accepted**：2023-03-24；**Published Online**：2023-04-12 16：19
**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230411.1929.004

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0957

# 弹射救生过程飞行员胸腰椎高负荷损伤分析

裴卉宁[1]，陈允峰[1]，白仲航[1,2,*]，孙佳俐[1]，吴梦[1]，邵星辰[1]

(1. 河北工业大学 建筑与艺术设计学院，天津 300401；
2. 河北工业大学 国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心，天津 300401)

**摘 要**：针对战斗机飞行员在弹射过程中高负荷引起的胸腰段损伤率较高，且根据临床CT数据建立的有限元模型存在无法反映细微几何特征和骨骼非匀质属性，造成高负荷力学分析不准确等问题。采用非线性有限元方法建立表达特定对象皮质骨、松质骨厚度与密度的胸腰段（T12～L2）有限元模型，对弹射过程中战斗机飞行员胸腰段进行生物力学分析。基于胸腰段CT数据，将皮质骨测量（CBM）得到的皮质骨厚度和密度值纳入基于CT的胸腰段有限元建模过程中，并根据Hounsfield单位（HU）值计算各元素的弹性模量实现材质非均匀赋值，完成特定对象有限元模型的构建。通过添加边界条件和载荷对模型进行有效性验证，并模拟计算直立、前屈、后仰3种生理运动条件下弹射胸腰段脊柱的生物力学响应。结果表明：3种不同生理运动条件下弹射过程中椎骨对负荷的传递特性显著不同，直立生理运动条件下弹射，高负荷产生的椎骨直接急性损伤最小。

**关 键 词**：生物力学；有限元分析；高负荷损伤；胸腰段；弹射
**中图分类号**：TP391.9
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0102-11

脊柱是分配头部与躯干质量，传递信息与能量的人体重要结构。任何脊柱生物力学的改变都可能对脊柱结构产生影响并损害人体健康[1]。弹射负荷造成的脊柱生物力学改变作为脊柱损伤的一种特殊形式，由于其作用时间的瞬时性与过载性具有较高的致命性。如1990—2019年以色列空军1 710名飞行员的弹射数据表明，死亡率与主要伤害率分别为10.5%与29.8%[2]；法国空军2000—2008年间的弹射数据显示42%的飞行员存在脊柱骨折、椎间盘及韧带损伤[3]。其他研究表明，弹射过程中高负荷引起的胸腰段脊柱损伤率高达64.2%[4]。因此，研究弹射过程中的脊柱生物力学对分析脊柱损伤机理、预防脊柱损伤具有重要意义。

有限元方法能够量化具有复杂几何、多种材料和复杂载荷物体的内在参数，大大降低由于组织材料特性的高变异性造成研究结果的不确定性，在提供成本效益较好且强大的响应解决方案方面具有优势[5]。因此，有限元逐步成为临床研究的重要工具，广泛应用于脊柱生物力学、运动学预测等方面。国外学者对人体脊柱有限元模型的构建进行了深入的研究。例如，Rezaei等[6]针对单个椎体开发基于定量CT的有限元分析技术，用于预测三节段脊柱在不同加载速率下的骨折强度。国内学者的相关研究主要集中于脊柱负荷条件下生物力学分析。例如，Ke等[7]使用有限元分析和轮廓图可视化技术，建立了含有3个无核椎间盘（L2～L3，L3～L4，L4～L5）及与椎间盘相邻腰椎（L2～L5）的非线性有限元模型，研究椎体关节面和关节角度的变化对腰椎复杂生物力学的影响；秦计生等[8]构建全腰椎及骶椎的有限元模型用以分析L4～L5之间纤维

**收稿日期**：2022-11-30；**录用日期**：2023-01-14；**网络出版时间**：2023-01-30 15:13
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230130.1244.001
**基金项目**：国家自然科学基金(52242508)；河北省自然科学基金(G2021202008)
*通信作者. E-mail：baizhonghang@hebut.edu.cn

*引用格式：裴卉宁，陈允峰，白仲航，等. 弹射救生过程飞行员胸腰椎高负荷损伤分析[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：102-112.
PEI H N，CHEN Y F，BAI Z H，et al. Analysis of high load injury of thoracolumbar spine in pilots during ejection process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：102-112 (in Chinese).*

环破裂的病理因素; 包佳仪等[9]建立头部及颈椎(C1～T1)椎体有限元模型用以分析阻拦着舰过程中, 阻拦负荷对舰载机飞行员造成的颈部损伤。但是针对战斗机飞行员弹射过程中瞬时高负荷可能产生的损伤情况及脊柱的动态响应问题研究较为匮乏。

目前基于 CT 的有限元分析往往缺乏对皮质骨和松质骨属性的特异性表达。之前的研究通常采用偏移网格产生均匀的皮质骨厚度[10]; 或将皮质骨和松质骨假设为均质并赋予其统一的密度与弹性模量[10-11]。因此, 上述方法无法反映椎体的细微几何特征和表现材质的非均匀属性, 进而影响有限元模型的准确性。另一方面, 骨密度测量(bone mineral density, BMD)是实现特异性建模、改善有限元模型精度、降低仿真误差的关键。如 Treece 和 Gee[12]通过反卷积算法根据 CT 图像对皮质厚度和密度等参数进行估算, 完成皮质骨材质属性映射, 并通过 HRpQCT 验证。Schileo 等[13]通过皮质骨测量(cortical bone mapping, CBM)获得被试皮质骨厚度和密度, 完成股骨头有限元的特异性建模。但上述研究主要集中于股骨近端皮质骨临床治疗, 将其应用于脊柱有限元建模并进行生物力学分析的研究相对较少。

本文通过胸腰段 CT 数据, 将 CBM 产生的特定对象的皮质骨厚度和密度估值纳入基于 CT 的胸腰段(T12～L2)有限元模型, 从被试的计算机 CT 图像中提取出不同的材料特性, 实现非均质材料特性的赋值, 表达特定对象椎体几何特征和材质属性; 根据脊柱解剖学结构添加主要脊椎附着软组织, 脊柱生理形态更加贴近真实脊柱生物特性。添加边界条件和载荷验证本文模型的有效性, 并模拟不同生理运动条件下飞行员弹射过程, 分析预测高负荷引起的胸腰椎损伤情况及动态响应。研究结果可为战斗机弹射救生系统的优化设计和飞行员飞行训练指导提供理论依据, 降低飞行员弹射过程中高负荷造成的胸腰椎损伤。

## 1　材料和方法

### 1.1　T12～L2 有限元模型的建立

依据中国战斗机飞行员选拔标准, 选取一名 25 岁, 身高 170 cm, 体重 65 kg 的健康男性志愿者。首先, 通过 X 光检查排除脊柱畸形和病变, 采用日本东芝公司 320 排螺旋 CT 进行扫描(电压为 120 kV, 层厚为 0.5 mm)得到第 1 节胸椎(T1)～第 5 节腰椎(L5)及以上人体组织 CT 图像 1 181 张(分辨率 512 像素×512 像素)。其次, 将 CT 图像导入医学三维数据可视化软件 Stradview 6.2 中, 并选取胸腰段(T12～L2)作为研究对象, 使用阈值法半自动分割椎体获取骨膜初步估值并将其作为 CBM 输入; 使用 CBM V2 算法沿骨膜局部表面法线方向做剖面分析, 获得皮质骨厚度[12]; 完成 50 000～70 000 个表面点对单个椎体表面进行局部采样, 基于采样点皮质厚度测量值生成皮质骨内外表面; 最后, 将所得的皮质骨内外表面导入三维逆向工程软件 Geomagic Wrap 2021 中, 获得 B 样条曲线表示的初始图形交换规范(initial graphics exchange specification, IGES)模型, 并通过有限元前处理软件 HyperMesh 2021 使用网格大小为 1 mm 的 10 节点四面体进行非结构化网格划分, 有限元模型构建流程如图 1 所示。

### 1.2　模型单元非均匀赋值

采用三步法将骨密度转换为杨氏模量。首先, 通过无体模 CT 校准方法(详见 1.3 节), 从 Hounsfield 单位(Hounsfield units, HU)值获得放射密度$\rho_{QCT}$; 其次, 根据 Keyak 等[14]建立的$\rho_{QCT}$与灰密度$\rho_{ash}$关系

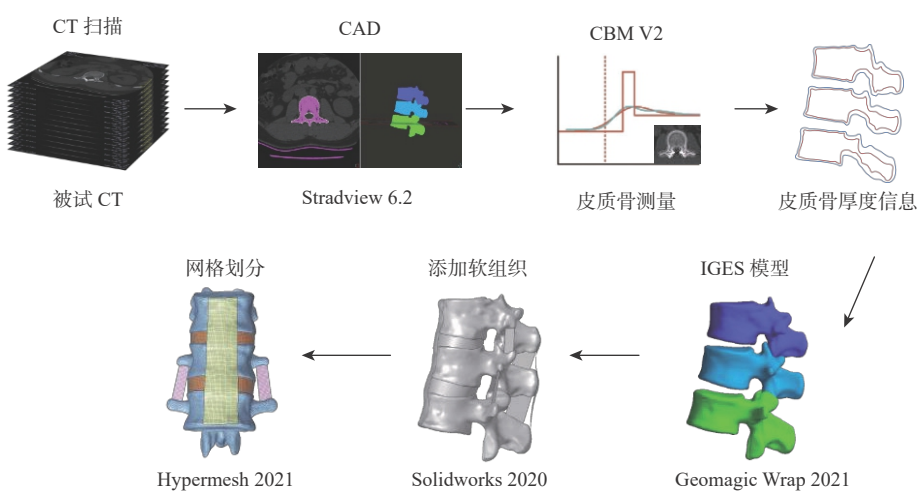



图 1　皮质骨厚度测量与有限元模型构建流程

Fig. 1　Flow of cortical bone mapping and finite element model construction

将$\rho_{QCT}$转化为$\rho_{ash}$，如式(1)所示；再次，基于Schileo等[15]建立的$\rho_{ash}$和表观密度$\rho_{app}$关系，将$\rho_{ash}$转换为$\rho_{app}$，如式(2)所示；最后，对于松质骨，选用Morgan等[16]提出的密度-刚度的关系，将$\rho_{app}$转换为杨氏模量$E$, MPa, 如式(3)所示；对于皮质骨，则选择Öhman等[17]建立的适合较大密度范围的密度-刚度关系的密度刚度转换公式，如式(4)所示，并将泊松比设置为0.3。

$$\rho_{ash} = 0.887\rho_{QCT} + 0.066\,3 \tag{1}$$

$$\rho_{app} = \rho_{ash}/0.6 \tag{2}$$

$$E = 6.85\rho_{app}^{1.49} \tag{3}$$

$$E = 12.9\rho_{app}^{2.0} \tag{4}$$

基于Bonemat（详见www.bonemat.org）算法将弹性属性从CT数值映射到每个四面体网格。定义4.5 GPa为皮质骨最小弹性模量和松质骨最大弹性模量，以排除映射过程中皮质骨和松质骨有可能产生的异常值。将获得的6个含有特异性材质的有限元模型及韧带软组织模型导入Abaqus中进行组合。

### 1.3 无体模CT校准

采用Eggermont等[18]建立的空气-脂肪-肌肉校准（air-fat-muscle calibration, AFMC）代替体模校准。如图2所示，从CT图像中选择9个能够容纳空气、脂肪和肌肉的兴趣区域（regions of interest, ROIs）；在ROIs内计算所有HU值的频数直方图，如图3所示，提取空气、脂肪和肌肉组织的峰值。从而得出空气、脂肪、肌肉的参考HU值分别为−924、−91和58。在空气、脂肪和肌肉区域的HU值和其放射密度$\rho_{QCT}$之间建立线性关系为

$$\rho_{QCT} = \beta_1 + \beta_2 H_u \tag{5}$$

式中：$H_u$为HU值；$\beta_1$和$\beta_2$为可变参数。

将从ROIs获得空气、脂肪、肌肉的特定扫描HU值与材料的等效BMD参考值进行线性回归[19]，

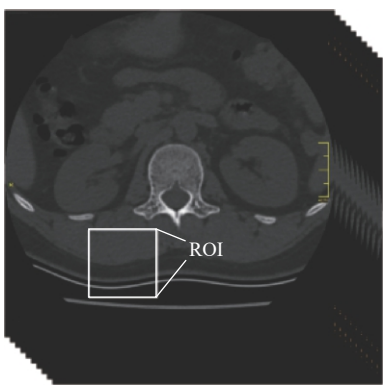



图2 空气、脂肪、肌肉ROIs区域

Fig. 2 ROIs contain air, fat, and muscle

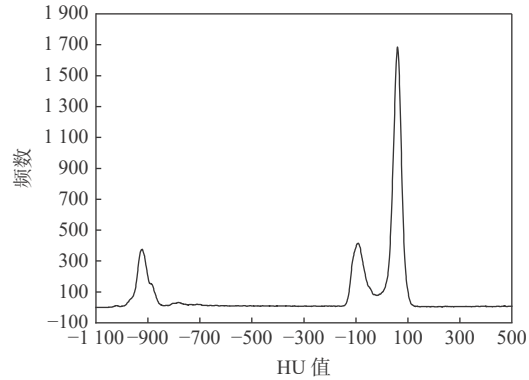



图3 空气、脂肪、肌肉ROIs区域HU值频数分布

Fig. 3 Frequency histogram of HU of air, fat and muscle within the ROIs

使用最小二乘法计算空气、脂肪和肌肉3个数据点，得出参数$\beta_1$和$\beta_2$。

### 1.4 软组织材料属性

对前纵韧带（anterior longitudinal ligaments, ALL）、后纵韧带（posterior longitudinal ligaments, PLL）、黄韧带（ligament menta flava, LF）、关节囊韧带（joint capsule ligaments, JCL）、横韧带（intertransverse ligaments, ITL）、棘间韧带（interspinous ligaments, ISL）与棘上韧带（supraspinal ligaments, SSL）进行软组织构建。依据韧带非线性的性质，使用应力-应变曲线描述脊柱韧带[20]，使用1 mm均匀厚壳单元将韧带进行网格化。椎间盘分为髓核和纤维环，其中，髓核体积约占44%，纤维环体积约占56%。纤维环分为纤维环基质和纤维环纤维，纤维环纤维的体积约为纤维基质的16%。髓核和纤维环基质用一阶Mooney-Rivlin超弹性材料法则建模，基于文献[21]实验数据校准，采用应变能密度方程表示，能量密度$W$和体积模量$K$分别为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + (J-1)/d \tag{6}$$

$$K = 6(C_{10} + C_{01})/3(1-2\nu) \tag{7}$$

式中：$C_{10}$、$C_{01}$为材料常数；$I_1$和$I_2$分别为第1、第2应变偏量不变量；$J$为体积比，$J = \nu/\nu_0$，$\nu$和$\nu_0$分别为变形前后体积；$d = 2/K$，表示材料不可压缩系数。考虑模型的弹射载荷与静态验证载荷对材料造成应变率的不同，$C_{10}$、$C_{01}$在不同的应变率下选用不同的材料参数，如表1所示。

纤维环胶原纤维由单向杆单元表示，其应力-应变行为基于Schmidt等[22]实验数据。纤维环纤维角度与上下终板从最内层±24 °到最外层±46 °，刚度从纤维环的中心层到外层增加110%，厚度从中心到外层增加150%[23]。因此，根据纤维环的刚度及厚度对不同的纤维环层强度进行加权，即第1层和第2层权重系数为1.0，第3层和第4层权重系数

表 1　椎间盘髓核、纤维环基质及关节软骨材料属性

Table 1　Nucleus pulposus, annulus fibrosus matrix and articular cartilage material properties of intervertebral discs

| 材质种类 | 应变率 | $C_{10}$/MPa | $C_{01}$/MPa | 密度/(g·cm$^{-3}$) | 泊松比 | 杨氏模量/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 髓核 | 高 | 31.8 | 8.0 | 1 | 0.495 | |
| | 低 | 0.12 | 0.03 | 1 | 0.495 | |
| 纤维环基质 | 高 | 11.8 | 2.9 | 1.2 | 0.45 | |
| | 低 | 0.18 | 0.045 | 1.2 | 0.45 | |
| 关节软骨 | | | | 1 | 0.4 | 10.4 |
| 肌肉等效体 | | 1 650 | 3 350 | 1.1 | 0.492 | |
| 下部骨骼等效体 | | | | 1.1 | 0.3 | 10 000 |

为 0.9, 第 5 层和第 6 层权重系数为 0.75, 第 7 层和第 8 层权重系数为 0.65。

关节有限元模型由关节囊韧带和关节软骨组成。定义关节突关节软骨层厚度为 0.2 mm, 关节突关节之间的间隙为 0.5 mm, 接触方向与关节面垂直。关节软骨元素类型被定义为具有线性各向同性弹性材料表示的实体单元, 软骨的材料属性[24] 如表 1 所示。接触区域和所有不呈现连续网格的结构相互作用设置为无摩擦接触, 摩擦系数设置为 0。整体有限元模型和椎间盘细节如图 4 所示。

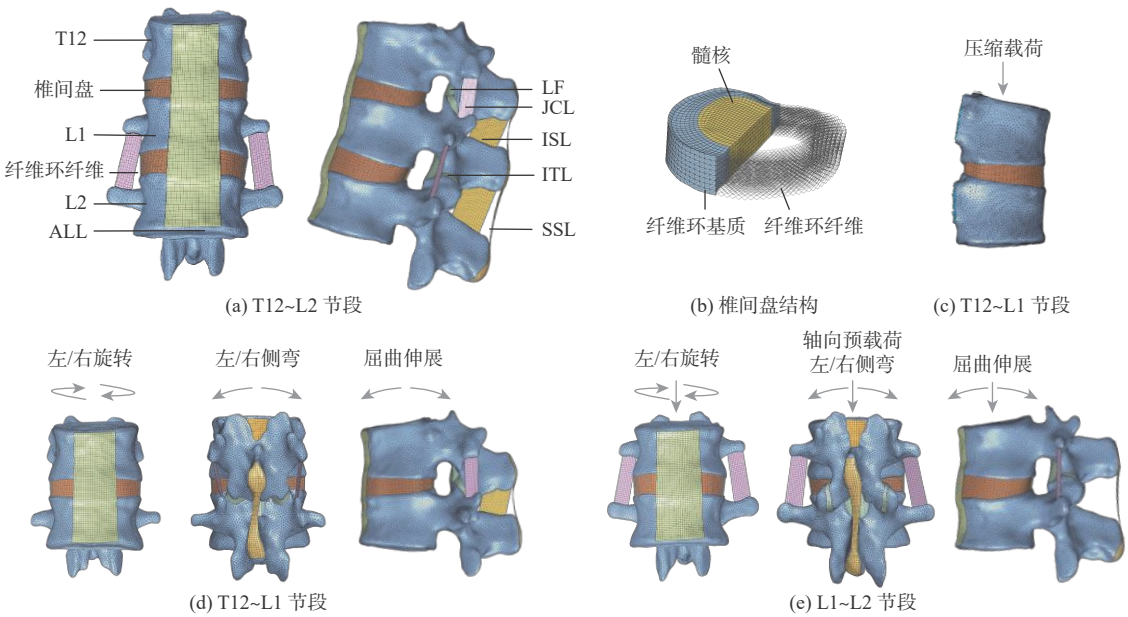



图 4　T12～L2 有限元模型和验证边界载荷条件

Fig. 4　T12～L2 finite element modeling and verification of boundary load conditions

## 2　有限元模型的验证

### 2.1　静态验证

为对模型进行更加充分的验证, 静态验证过程中对模型 T12～L1 节段与 L1～L2 节段分别进行验证。先对 T12～L1 进行双节段轴向压缩以验证椎间盘建模的有效性。根据文献 [25], 去除 T12～L1 节段椎体椎弓根后部结构, 固定下方椎体自由度, 在椎体上表面施加静态载荷 1.267 mm/s 的恒定速度在 T12 椎体的上终板施加轴向压缩载荷, 加载持续时间为 1.2 s(见图 4(c)), 并将得到的力-位移曲线与文献 [25] 的结果进行对比。

对于脊柱运动学部分验证, 针对 T12～L1 节段边界条件设定为固定 L1 椎体下终板表面所有节点自由度。在 T12 椎体终板上方建立参考点并与终板运动耦合, 在参考点施加大小为 7.5 N·m 的线性前屈、后仰、双侧轴向和双侧侧向弯曲力矩, 输出 T12 椎体表面参考点的活动角度。针对 L1～L2 节段运动学的验证, 采取与 T12～L1 节段同样边界条件, 在参考点处添加 100 N 轴向载荷及大小为 10 N·m 的线性前屈、后仰、双侧轴向和双侧侧向弯曲力矩, 输出 L1 椎体参考点的运动参数(见图 4(d)和图 4(e))。通过分别与 Panjabi[26] 和 Park[27] 等的胸腰椎体外实验进行对比, 验证本文模型运动学加载的生物力学特性。

### 2.2　静态验证结果

T12～L1 节段在轴向压力作用下的轴向位移如

图5所示，曲线显示胸腰椎脊柱节段受力-变形过程表现为非线性压缩行为，T12～L1节段压缩过程中模拟的椎间盘刚度稍大于实验结果，且随载荷的增大而增大，但与实验数据比较结果依然在合理范围内，可认为胸腰椎模拟结果和体外实验结果之间的相关性较好。

T12～L1和L1～L2节段模型的运动学验证结果如图6所示，与文献[28-30]体外实验数据相比，仿真计算得出的脊柱活动范围非线性响应在误差允许的范围内与体外实验高度吻合，变化趋势非常相近。可证明本文模型能够较好地模拟胸腰段脊柱受力时的运动情况，仿真结果可靠。

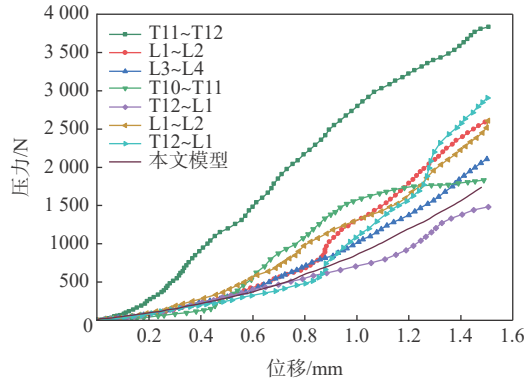
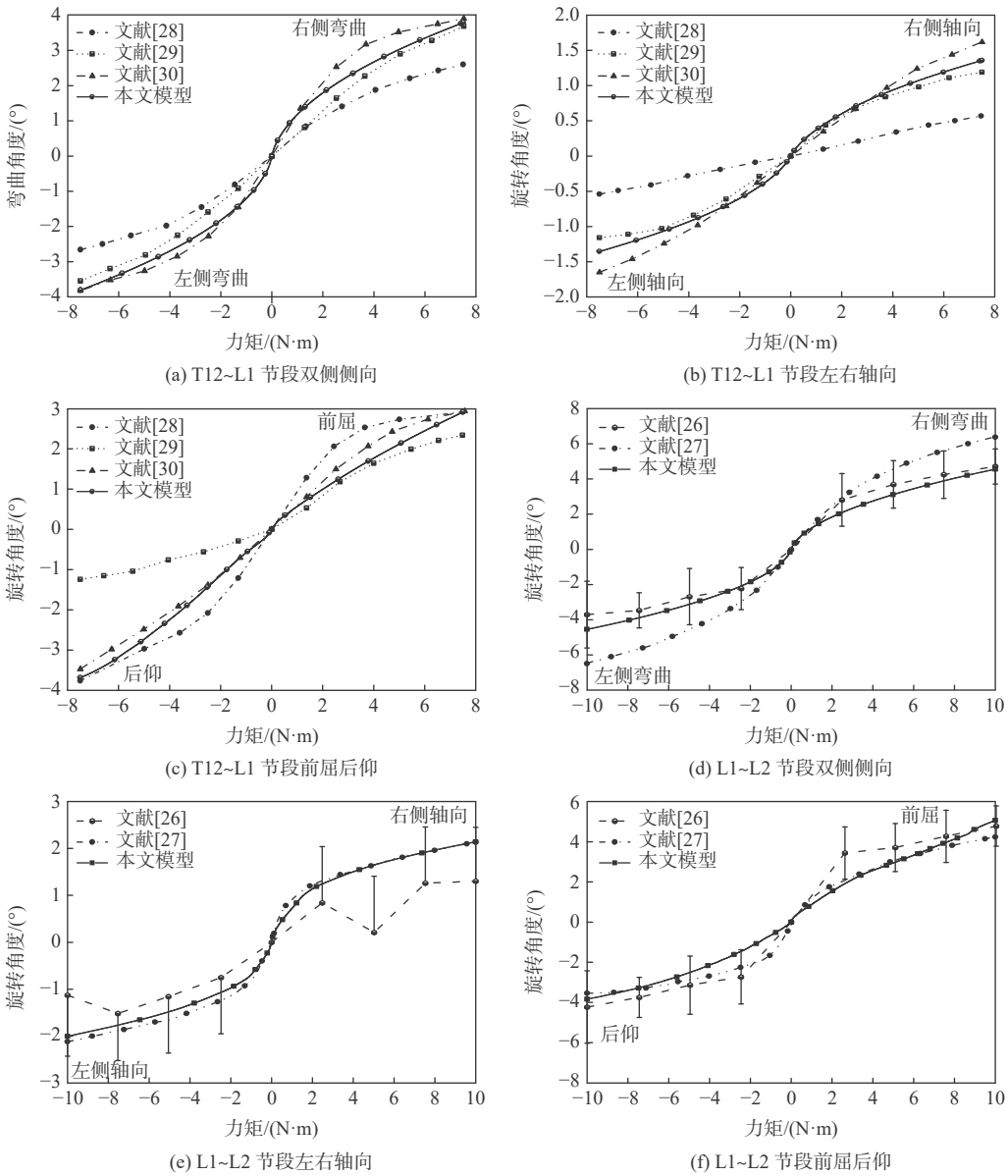



图5 T12～L1轴向压力-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement curves of T12～L1 segment




(a) T12~L1 节段双侧侧向

(b) T12~L1 节段左右轴向

(c) T12~L1 节段前屈后仰

(d) L1~L2 节段双侧侧向

(e) L1~L2 节段左右轴向

(f) L1~L2 节段前屈后仰

图6 本文模型关节活动范围验证结果

Fig. 6 The proposed model joint range of motion validation results

## 2.3 动态验证

通过Ivancic[31]的胸腰椎坠落体外实验数据，对本文模型进行动力学验证。动态验证过程保留胸腰段脊柱整体结构完整，以及模型$z$轴方向自由度，固定其他自由度，在T12、L2上下终板表面建立参考点并分别与之耦合，在参考点处分别添加轴

向力-时间动态载荷[31], 输出 L2 椎体轴向加速度, 并与体外实验数据计算得到参考曲线进行对比。

### 2.4　动态验证结果

文献 [31] 体外实验数据包含多次实验结果, 使用 Nusholtz 等[32] 开发的平均值对平均值(mean-to-mean, MTM)技术计算平均参考曲线及响应走廊的内外边界。加速度响应走廊与 L2 椎骨加速度响曲线如图 7 所示。结果显示, 本文模型的响应曲线位于响应走廊内, 响应曲线和平均参考曲线之间具有良好的相关性, 但本文模型最大加速度略高于体外实验平均参考曲线的最大值(体外实验为 179.7 m/s$^2$, 本文模型为 206.8 m/s$^2$)。

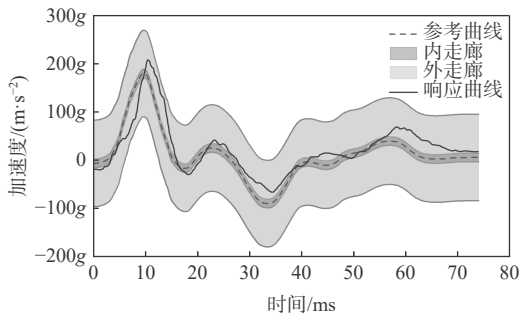



图 7　加速度响应走廊与响应曲线

Fig. 7　Acceleration response corridor and response curves

综上所述, 本文所建立的胸腰段(T12～L2)有限元模型具有优良的生物逼真度, 计算结果可信度较高, 可用于战斗机飞行员弹射过程中的动力学仿真分析。

## 3　弹射过程有限元仿真计算

### 3.1　人椅系统有限元模型的建立与模拟工况

通过有限元分析飞行员弹射过程中胸腰段脊柱生物力学响应, 不可忽略人体组织缓冲作用。由于还原包含有血液、骨骼、软组织、肌肉的人体组织生理结构及复杂的几何形状非常困难, 为实现人体模型的精确性和复杂性之间的平衡及节省计算资源提升计算速度, 在不影响模拟结果准确性的情况下, 对弹射座椅及胸腰段脊柱下部组织进行简化: 弹射座椅坐面、靠背、弹射筒抽象为几何结构, 保留人体臀部和大腿并考虑软组织及骨骼, 将腰椎(L3～L5)、盆骨和股骨简化并连接。皮肤、肌肉、肌腱及软组织结构等效为统一材料, 骨骼肌肉软组织等效材料分别使用各向同性弹性材料和 Mooney-Rivlin 材料法则模拟[33], 参数如表 1 所示。简化后的人椅系统如图 8 所示。

利用本文模型对弹射座椅弹射过程进行动力学仿真计算。首先, 建立如图 8 所示的坐标系, 整个模型处于 1$g$ 加速度的重力场中, 假设弹射座椅

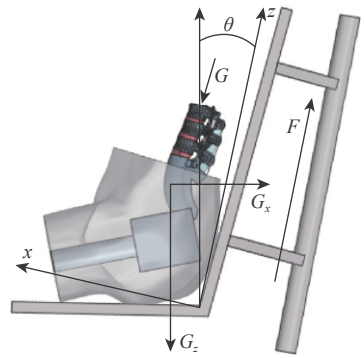



图 8　弹射座椅/人椅系统简化结构与受力分析

Fig. 8　Seat/occupant system simplified structure and force analysis

质量为 100 kg, 战斗机飞行员体重为 65 kg, 弹射时人-椅系统弹射轴线及胸腰段脊柱与重力方向分别成 22°。忽略座椅系统滑轮、导轨之间的摩擦阻力及弹射过程中的空气阻力, 基于建立的坐标系对人-椅系统进行受力分析。图中, $G$ 表示 T12 承受压力, $\theta$ 表示脊柱受力方向与坐标系的角度, $F$ 表示载荷。

根据受力分析将文献 [34] 试验测得的弹射座椅弹射筒力-时间曲线转化为加速度-时间曲线, 如图 9 所示, 并将其作为载荷工况施加于简化的人椅系统。同时固定下部人体和座椅冠状面、矢状面和水平面上的旋转自由度及 $x$、$y$ 轴方向自由度, 保留 $z$ 轴方向自由度, 人与座椅接触面之间设置为面面接触。坐姿条件下 T12 承担重量为人体体重的 47%, 在 T12 上终板表面位置建立质量为 30.55 kg 质量点并与之耦合, 以模拟飞行员坐姿条件下胸腰段脊柱承担的上身体重。

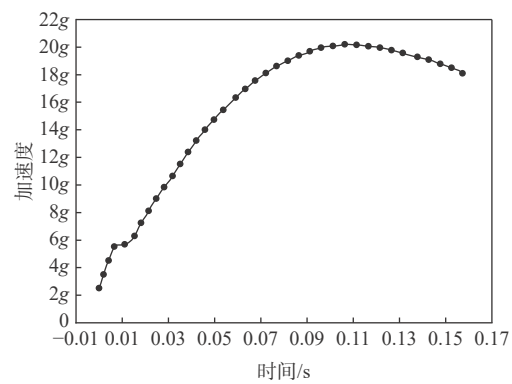



图 9　弹射筒加速度-时间曲线

Fig. 9　Ejection cartridge acceleration-time curve

本文模拟计算胸腰段脊柱直立、前屈、后仰 3 种生理运动条件下弹射过程。建模所使用姿势为直立姿势, 为模拟前屈、后仰生理运动, 弹射载荷前 0～0.05 s, 将 8°线性增加力矩[35] 施加于 T12 上终板表面以使脊椎产生前屈和后仰弯曲, 0.05 s 后保

持8°至仿真结束。弹射过程持续0.16 s，加速度最大值为20.19 m/s$^2$。

### 3.2 弹射仿真结果分析

通过仿真分析获得了直立、前屈、后仰3种生理运动下弹射胸腰段脊柱的生物力学响应，结果分析过程中取仿真计算得到的95%数值数据，以排除网格、接触等原因造成的极端值。如图10所示，3种不同生理运动条件下弹射，椎体对负荷的传递特性（应力）显著不同，直立、前屈、后仰3种生理运动下承受弹射负荷时的最大应力分别为121.83，135.62，129.74 MPa。其中，前屈产生了应力集中最大值，与另外2种生理运动下弹射相比，最小相对应力差为4.35%。

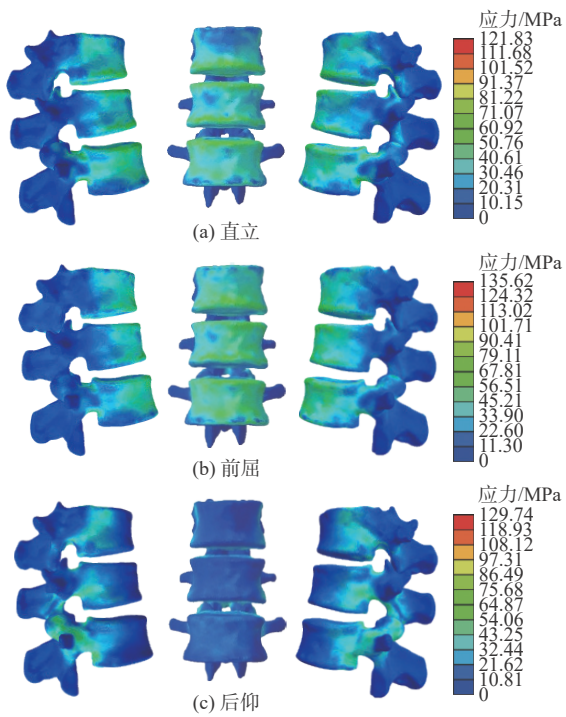



图10 皮质骨应力云图

Fig. 10 Stress nephogram of cortical bone

对于直立、前屈、后仰单独一种生理运动下弹射过程分析，发现直立与前屈生理运动下弹射最大应力集中分别发生在T12椎体下终板边缘和L1皮质骨前壁，应力最大值分别为121.83，135.62 MPa；3种生理运动弹射邻近髓核中心周围的上下终板区域均出现了高应力区域，其中，应力最大值为前屈生理运动的115.41 MPa。若终板发生破坏，髓核物质被挤压到椎体中，持续的压力会导致椎体爆裂性骨折。后仰生理运动下椎体承受冲击负荷时，L2后上壁出现了较大的应力集中，应力为129.74 MPa。后上壁是大多数实验和临床观察到骨折的部位，仿真结果与Panjabi等[36]的研究结果一致。后仰条件下次高应力出现在椎弓根基部，应力达118.36 MPa。椎体皮质骨强度为112.7 MPa[37]，3种情况的应力最大值均超过失效标准。

对松质骨部分的应力分析，如图11所示，前曲生理运动下，L1临近髓核的上终板附近松质骨出现应力最大值，应力达2.37 MPa，次高应力为直立生理运动下弹射的L1上终板附近的2.26 MPa，其次是L2上终板附近和L1的前柱小梁骨中的2.18 MPa和1.92 MPa，其余部位松质骨应力小于1.80 MPa。男性松质骨失效强度为2.40±0.81 MPa[38]，弹射过程中松质骨达到失效范围内，有较大可能引起损伤。

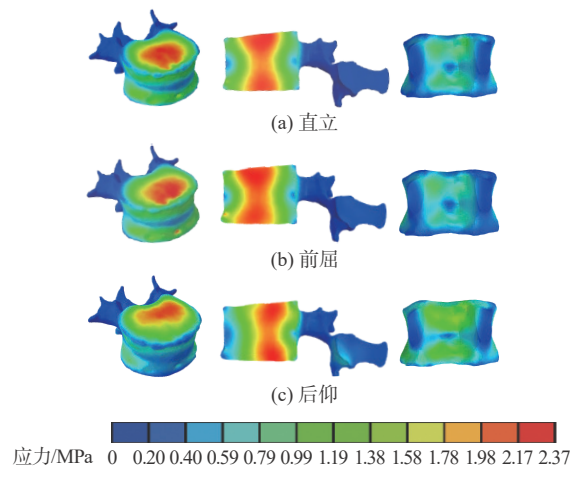



图11 L2松质骨应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of L2 cancellous bone

日常训练过程中飞行员需要反复承受加速度负荷，应力集中点因反复受力造成局部疲劳损伤，弹射造成的应力集中有较大可能与疲劳损伤点相重合引起更严重的椎体损伤。

仿真计算得到的椎间盘应力和椎间盘内压（intradiscal pressure, IDP）随加速度的增加而增加。应力和内压最大值出现在前屈生理运动条件下弹射，分别为62.31 MPa和25.17 MPa，如图12和图13所示。纤维环纤维应变与剪切应变随弹射加速度的增大而增大，但弹射过程中因较大加速度而导致的纤维应变大幅增加没有造成最大剪切应变产生。最大剪切应变发生在后仰生理运动下T12～L1椎间盘纤维环后侧位置最内侧的纤维环环层与下终板之间，位置始终没有改变。这与体外实验研究脊柱承担轴向冲击负荷时椎间盘结构容易破裂相对应。椎间盘内压与纤维环剪切应变造成了椎间盘和椎体终板之间的应力集中。对椎间盘内压位置分析表明前屈生理运动下弹射椎间盘主要最大内压位置为中心或前部区域，后仰生理运动下弹射为中心或后部区域。根据仿真结果中椎间盘的变形趋势，椎间盘承受轴向冲击负荷时会对后纵韧带产生压力，导致后纵韧带和椎间盘一起向侧后方或

正后方突出, 此时容易造成中央型或左右型的椎间盘膨出。

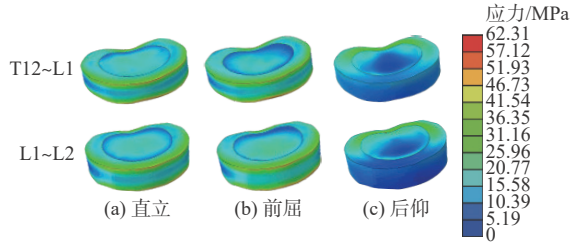



图 12　椎间盘应力云图

Fig. 12　Stress nephogram of intervertebral disc

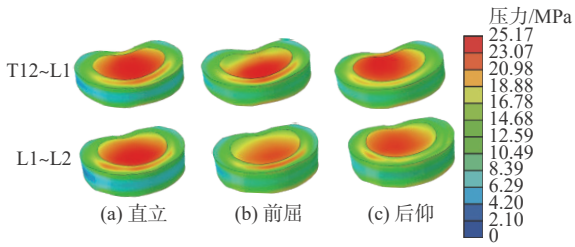



图 13　椎间盘内压云图

Fig. 13　Pressure nephogram of intervertebral disc

## 4　讨　论

本文模型具有较为真实的生物特征和精细网格的特点。本文模型不但对 3 种生理运动条件下弹射负荷造成的脊柱应力进行分析, 同时分析了椎间盘应力和压力。通过与体外实验数据的对比, 校准评估本文模型性能。本文模型能够较为真实预测失效发生和应力在骨骼上的传播情况, 对研究战斗机飞行员在弹射过程中受到弹射负荷引起的胸腰椎损伤具有理论借鉴意义。

通过本文模型对造成战斗机飞行员弹射过程中引起的胸腰椎损伤进行分析与预测, 直立生理运动下脊柱承担弹射负荷时, 靠近终板中央部分椎间盘髓核承受较高的压力, 且椎间盘髓核内压在动态轴向压缩过程中逐步增加。目前的研究表明, 持续增加的压力将导致终板向椎体松质骨内部隆起, 结果邻近髓核的终板中心部位经受较大的应力集中, 终板破坏很可能起源于该中心部分。一旦终板失效, 髓核物质进入椎体, 从而将椎体的脂肪和骨髓内容物挤出松质骨。当髓核物质进入椎体的速度比脂肪和骨髓排出的速度快时, 椎体内部将产生不同方向的剪切应力导致爆裂性骨折[29]。

前屈生理运动下脊柱承担弹射负荷时, 脊柱前柱有较大可能导致骨折, 其特征为前楔形压缩(前柱损伤)。前柱骨折原因可归因于椎体前壁上半部分位置的应力集中。当超过椎体失效标准时, 骨折从椎体前壁向椎体内部延伸至终板。后仰生理运动条件下脊柱承担弹射负荷时, 脊柱中柱和后部结构有较大可能失效。关节突面、终板和椎弓根是矢状面上脊柱节段快速移动时最薄弱的区域, 小关节处的剪切力通过椎弓根传递到椎体的后上半部分时, 有可能产生楔入效应导致骨碎片进入椎管。脊柱椎体后壁骨折(中柱损伤)可通过椎体后壁皮质骨的高应力来解释。本文模型预测的 3 种生理运动条件下椎骨应力传播分布情况和潜在骨折部位与其他研究一致[39], 从应力分布模式推导出的断裂模式与临床观察到的骨折模式也非常一致。

之前基于有限元的脊柱生物力学研究中, 把椎弓根引起的骨折模式归结于椎弓根基底附近的皮质骨的应力集中。然而, 后仰生理运动下椎弓根基部附近皮质层的最高应力预测值为 118.36 MPa, 相对低于终板和中柱后壁皮质区预测值 129.74 MPa。虽然高应力可能导致终板和皮质骨失效, 但骨折的产生实际取决于这些区域的破坏强度, 而破坏强度与骨材质属性和几何结构密切相关。现有的有限元分析采用均匀厚度的皮质骨模型, 对椎弓根皮质骨结构表达不足, 实际负荷传导过程中, 由于脊柱真实生理结构中椎弓根皮质骨突然变薄, 其对于椎弓根的底部和上部产生的高拉伸和压缩应力更加敏感, 造成椎弓根区更易于失效。此外, 由于脊柱承受的主要作用力为压缩作用力时, 韧带很少发生破坏[33], 研究过程中没有对韧带组织进行详细分析。

本文模型虽然能够较好地预测弹射过程中胸腰椎脊柱损伤情况, 但仍存在部分不足之处: ①飞行员弹射过程属于高负荷受力过程, 弹射过程中飞行员神经和肌肉的反应可对脊柱产生一定保护作用, 在模拟胸腰段承受弹射冲击负荷过程中, 本文模型无法将神经和肌肉反应纳入其中, 对弹射过程中脊柱分担负荷的预测产生一定影响; ②在弹射仿真实验过程中, 座椅弹射角度采用理想状态的标准角度, 真实的弹射过程中由于额外的侧向/轴向旋转、战斗机高速飞行受到的强气流吹袭造成的复合负荷情况, 复杂负荷会对人体造成较高受伤风险; ③使用超弹性材料对胸腰段椎间盘进行模拟, 未考虑模拟椎间盘和终板之间的液体流动, 当纤维环重复受力时, 椎间盘内部液体流动以降低应力对其造成的伤害。故仿真实验所得的椎间盘内压力可能高于真实弹射过程中椎间盘髓核内压。

## 5　结　论

1) 本文基于 CBM 算法将皮质骨厚度和密度信息引入有限元模型的构建过程中, 建立特定对象的胸腰段有限元模型。研究战斗机飞行员在弹射过

程中胸腰段脊柱应力传导与分布模式，计算各椎体及软组织在3种生理运动条件下弹射负荷对椎体造成的生物力学响应，对脊柱组织的损伤情况进行分析预测，为研究弹射损伤提供了一个新的思路和方法。

2）弹射过程中加速度过载造成飞行员脊柱损伤与椎体结构相关性较大，应力集中最有可能在终板、椎体前壁和椎弓处，且直立生理运动条件下，冲击负荷产生的椎骨直接急性损伤最小，飞行员应首选身体直立姿势。

## 参考文献（References）


[1] 原芳, 薛清华, 刘伟强. 有限元法在脊柱生物力学应用中的新进展[J]. 医用生物力学, 2013, 28(5): 585-590.
YUAN F, XUE Q H, LIU W Q. Recent advances about finite element applications in spine biomechanics[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2013, 28(5): 585-590(in Chinese).

[2] EPSTEIN D, MARKOVITZ E, NAKDIMON I, et al. Injuries associated with the use of ejection seats: A systematic review, meta-analysis and the experience of the israeli air force, 1990—2019[J]. Injury, 2020, 51(7): 1489-1496.

[3] MANEN O, CLÉMENT J, BISCONTE S, et al. Spine injuries related to high-performance aircraft ejections: A 9-year retrospective study[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2014, 85(1): 66-70.

[4] SRIDHAR M S, JOSHI V V, PUNYASHLOK BISWAL. Analysis of ejection injury of spine in aviators[J]. International Journal of Scientific Research, 2019, 8(1): 40-43.

[5] DREISCHARF M, ZANDER T, SHIRAZI-ADL A, et al. Comparison of eight published static finite element models of the intact lumbar spine: Predictive power of models improves when combined together[J]. Journal of Biomechanics, 2014, 47(8): 1757-1766.

[6] REZAEI A, TILTON M, LI Y, et al. Single-level subject-specific finite element model can predict fracture outcomes in three-level spine segments under different loading rates[J]. Computers in Biology and Medicine, 2021, 137: 104833.

[7] KE S, HE X W, YANG M, et al. The biomechanical influence of facet joint parameters on corresponding segment in the lumbar spine: A new visualization method[J]. The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society, 2021, 21(12): 2112-2121.

[8] 秦计生, 王昱, 彭雄奇, 等. 全腰椎三维有限元模型的建立及其有效性验证[J]. 医用生物力学, 2013, 28(3): 321-325.
QIN J S, WANG Y, PENG X Q, et al. Three-dimensional finite element modeling of whole lumbar spine and its biomechanical analysis[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2013, 28(3): 321-325(in Chinese).

[9] 包佳仪, 王兴伟, 周前祥, 等. 阻拦着舰过程中飞行员颈部的损伤分析与预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(3): 499-507.
BAO J Y, WANG X W, ZHOU Q X, et al. Analysis and prediction of neck injury of pilots during carrier aircraft arrest deck-landing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(3): 499-507(in Chinese).

[10] 陈吉清, 吴凯, 兰凤崇, 等. 中国成年男性全颈椎生物力学建模与验证[J]. 汽车工程, 2016, 38(11): 1305-1311.
CHEN J Q, WU K, LAN F C, et al. Biomechanics modeling and validation for all cervical vertebrae of Chinese adult male[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(11): 1305-1311(in Chinese).

[11] 唐亮, 郑佳佳, 李文熙, 等. 人体腰椎生物力学模型及损伤参数敏感性分析[J]. 华南理工大学学报, 2020, 48(9): 94-105.
TANG L, ZHENG J J, LI W X, et al. Biomechanical model of human lumbar spine and sensitivity analysis of injury parameters[J]. Journal of South China University of Technology, 2020, 48(9): 94-105(in Chinese).

[12] TREECE G M, GEE A H. Independent measurement of femoral cortical thickness and cortical bone density using clinical CT[J]. Medical Image Analysis, 2015, 20(1): 249-264.

[13] SCHILEO E, PITOCCHI J, FALCINELLI C, et al. Cortical bone mapping improves finite element strain prediction accuracy at the proximal femur[J]. Bone, 2020, 136: 115348.

[14] KEYAK J H, KANEKO T S, TEHRANZADEH J, et al. Predicting proximal femoral strength using structural engineering models[J]. Clinical Orthopaedics and Related Research, 2005(8): 219-228.

[15] SCHILEO E, DALL'ARA E, TADDEI F, et al. An accurate estimation of bone density improves the accuracy of subject-specific finite element models[J]. Journal of Biomechanics, 2008, 41(11): 2483-2491.

[16] MORGAN E F, BAYRAKTAR H H, KEAVENY T M. Trabecular bone modulus-density relationships depend on anatomic site[J]. Journal of Biomechanics, 2003, 36(7): 897-904.

[17] ÖHMAN C, BALEANI M, PANI C, et al. Compressive behaviour of child and adult cortical bone[J]. Bone, 2011, 49(4): 769-776.

[18] EGGERMONT F, VERDONSCHOT N, VAN DER LINDEN Y, et al. Calibration with or without phantom for fracture risk prediction in cancer patients with femoral bone metastases using CT-based finite element models[J]. PLoS One, 2019, 14(7): e0220564.

[19] LEE D C, HOFFMANN P F, KOPPERDAHL D L, et al. Phantomless calibration of CT scans for measurement of BMD and bone strength-Inter-operator reanalysis precision[J]. Bone, 2017, 103: 325-333.

[20] SHARMA M, LANGRANA N A, RODRIGUEZ J. Role of ligaments and facets in lumbar spinal stability[J]. Spine, 1995, 20(8): 887-900.

[21] WAGNAC E, ARNOUX P J, GARO A, et al. Calibration of hyperelastic material properties of the human lumbar intervertebral disc under fast dynamic compressive loads[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2011, 133(10): 101007.

[22] SCHMIDT H, HEUER F, SIMON U, et al. Application of a new calibration method for a three-dimensional finite element model of a human lumbar annulus fibrosus[J]. Clinical Biomechanics, 2006, 21(4): 337-344.

[23] CHEUNG J T M, ZHANG M, CHOW D H K. Biomechanical responses of the intervertebral joints to static and vibrational loading: A finite element study[J]. Clinical Biomechanics, 2003, 18(9): 790-799.

[24] MENGONI M. Biomechanical modelling of the facet joints: A review of methods and validation processes in finite element analysis[J]. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 2021, 20(2): 389-401.

[25] EL-RICH M, ARNOUX P J, WAGNAC E, et al. Finite element investigation of the loading rate effect on the spinal load-sharing changes under impact conditions[J]. Journal of Biomechanics, 2009, 42(9): 1252-1262.

[26] PANJABI M M, OXLAND T R, YAMAMOTO I, et al. Mechanical behavior of the human lumbar and lumbosacral spine as shown by three-dimensional load-displacement curves[J]. The Journal of Bone and Joint Surgery American Volume, 1994, 76(3): 413-424.

[27] PARK W M, KIM K, KIM Y H. Effects of degenerated intervertebral discs on intersegmental rotations, intradiscal pressures, and facet joint forces of the whole lumbar spine[J]. Computers in Biology and Medicine, 2013, 43(9): 1234-1240.

[28] MARKOLF K L. Deformation of the thoracolumbar intervertebral joints in response to external loads: A biomechanical study using autopsy material[J]. The Journal of Bone and Joint Surgery American Volume, 1972, 54(3): 511-533.

[29] QIU T X, TAN K W, LEE V S, et al. Investigation of thoracolumbar T12-L1 burst fracture mechanism using finite element method[J]. Medical Engineering & Physics, 2006, 28(7): 656-664.

[30] OXLAND T R, LIN R M, PANJABI M M. Three-Dimensional mechanical properties of the thoracolumbar junction[J]. Journal of Orthopaedic Research, 1992, 10(4): 573-580.

[31] IVANCIC P C. Biomechanics of thoracolumbar burst and chance-type fractures during fall from height[J]. Global Spine Journal, 2014, 4(3): 161-168.

[32] NUSHOLTZ G S, AOUN Z, DI DOMENICO L, et al. Statistical considerations for evaluating biofidelity, repeatability, and reproducibility of ATDs[J]. SAE International Journal of Transportation Safety, 2013, 1(1): 200-218.

[33] KUMAR V, MISHRA R K, KRISHNAPILLAI S. Study of pilot's comfortness in the cockpit seat of a flight simulator[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019, 71: 1-7.

[34] 王一丁, 童明波, 闫家益, 等. 某型飞机弹射座椅穿盖弹射试验与数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(3): 336-340.
WANG Y D, TONG M B, YAN J Y, et al. Test and numerical simulation of through canopy ejection for aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(3): 336-340(in Chinese).

[35] 李武杰, 郭立新. 不同姿势对脊椎胸腰节段爆裂骨折的影响[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2020, 41(4): 534-540.
LI W J, GUO L X. Effect of different postures on burst fracture of thoracolumbar segment[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(4): 534-540(in Chinese).

[36] PANJABI M M, KIFUNE M, WEN L, et al. Dynamic canal encroachment during thoracolumbar burst fractures[J]. Journal of Spinal Disorders, 1995, 8(1): 39-48.

[37] ZHAO J Z, NARWANI G. Biomechanical analysis of hard tissue responses and injuries with finite element full human body model[C]//Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Bethesda: National Library of Medicine, 2007: 343-366.

[38] ZHAO F D, POLLINTINE P, HOLE B D, et al. Vertebral fractures usually affect the cranial endplate because it is thinner and supported by less-dense trabecular bone[J]. Bone, 2009, 44(2): 372-379.

[39] MAGERL F, AEBI M, GERTZBEIN S D, et al. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries[J]. European Spine Journal, 1994, 3(4): 184-201.

# Analysis of high load injury of thoracolumbar spine in pilots during ejection process

PEI Huining[1], CHEN Yunfeng[1], BAI Zhonghang[1, 2, *], SUN Jiali[1], WU Meng[1], SHAO Xingchen[1]

(1. School of Architecture & Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. National Engineering Research Center for Technological Innovation Method and Tool, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In an attempt to accurately analyze high load, the finite element model established by clinical CT data was unable to capture the fine geometric features and heterogeneous properties of vertebrae, leading to an inaccurate analysis of the high rate of thoracolumbar spine injuries on fighter pilots during ejection. A finite element model of the thoracolumbar spine (T12-L2) was constructed based on nonlinear finite element, which represents the cortical thickness, cortical density, and cancellous bone density of specific-objects, to analyze the biomechanics of high load on the thoracolumbar spines of pilots during ejection. The object-specific finite element model was constructed based on the CT data of the thoracolumbar spine, and the cortical bone thickness and density values obtained from cortical bone mapping (CBM) were incorporated into the CT-based finite element modeling process of the thoracolumbar spine, and the elastic modulus of each element was calculated according to the Hounsfield units (HU) value to realize the heterogeneous assignment of material. By using the same loads and boundary conditions as those found in published in vitro studies, the model's correctness was confirmed. A Additionally, a simulation and computation were made of the biomechanical reaction of the thoracolumbar spine brought on by the ejection load in the upright, flexion, and extension physiological motion situations. The results showed that the vertebral load transfer characteristics were significantly different among the three different physiological motion conditions subjected to ejection loading, with the upright physiological motion conditions resulting in the least amount of direct acute injury to the vertebrae from the high load.

Keywords: biomechanics; finite element analysis; high load damage; thoracolumbar spine; ejection

**Received**: 2022-11-30; **Accepted**: 2023-01-14; **Published Online**: 2023-01-30 15:13

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230130.1244.001

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (52242508); Natural Science Foundation of Hebei Province (G2021202008)

* **Corresponding author**. E-mail: baizhonghang@hebut.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0985

# 地基光度数据判定GEO自旋稳定目标功能方法

王阳，胡敏*，杜小平，徐灿
(中国人民解放军战略支援部队航天工程大学，北京 101416)

**摘　　要**：地球静止轨道（GEO）自旋稳定目标的自旋周期和其地基光度数据周期及其自身的功能属性均具有较强关联性，以目标自旋周期为桥梁，可以基于地基光度数据实现GEO自旋稳定目标的功能判定。对截至2022年5月1日全球仍在轨运行的GEO自旋稳定目标进行目标自旋周期和功能关联分析，在综合考虑目标光度数据不同特点的基础上提出光度数据反演目标自旋周期的方法。结合目标自旋周期和其功能的关联性，进一步提出光度数据判定目标功能的方法，该方法可以有效提高地基光度数据的应用效益，有望为太空目标能力评估等空间应用提供新思路。

**关 键 词**：地球静止轨道目标；自旋稳定目标；光度数据；自旋周期；功能判定
**中图分类号**：O432.2
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0113-07

太空目标特征能够提供很多有价值的信息，如通过目标形状可以推断目标能力及意图，通过目标的材料成分可以推测其外部传感器组成，通过目标质量分布可以计算出其燃料使用的多少及推进器大小[1]。地球静止轨道(geosynchronous Earth orbit, GEO)目标等高轨目标由于距地较远，加之大气效应影响及光学系统分辨率限制，其在地基光学观测系统上仅能呈现几个像素亮度变化的光斑[2]。如何从不可分辨的光度数据中反演出目标的形状、尺寸、功能等特征，已成为目前太空态势感知领域极具挑战性，且亟待解决的问题。

近10年，国际上关于光度数据反演高轨太空目标特征的方法主要有基于光度数据特征的反演方法[3-6]和基于模型构建的反演方法[7-10]两大类。近几年，研究主要聚焦于机器学习在光度数据分析中的应用。国外，出现了以基于随机森林[11]、基于支持向量机[12]和基于人工神经网络[13]为代表的反演方法，近期正探索将机器学习用于光度数据的全天时分析[14]。国内，主要致力于对目标闪光特征的分析[15]、关键特征[16]及姿态[17]的反演。总的来看，当前研究主要停留在形状、姿态、材料等物理域特征反演，尚未实现目标功能、意图等认知域特征的判定。

本文基于光度数据反演了GEO自旋稳定目标的自旋周期，并以该周期为纽带，建立了光度数据与目标功能的联系，在此基础上提出一种基于光度数据判定目标功能的方法，能够有效提高地基光度数据的应用效益，为太空目标能力评估等空间应用提供新思路，在太空态势感知、太空目标功能判定、能力评估等领域有较好的应用前景。

## 1 目标自旋周期和功能关联分析

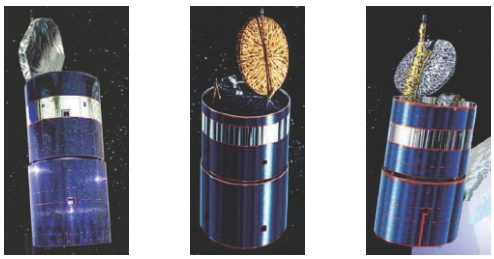
基于忧思科学家联盟(Union of Concerned Scientists, UCS)卫星数据库(详见 https://www.ucsusa.org/satellite-database)、冈特太空页面(Gunter's Space Page, GSP)卫星数据库(详见https://space.skyrocket.de/)等开源数据库进行分析，截至2022年5月1日，全球仍在轨工作的GEO目标共有565个。其中，GEO自旋稳定目标按照形状可以分为休斯卫星(Hughes satellite, HS)376型和非HS 376型两类。

收稿日期：2022-12-12；录用日期：2023-06-09；网络出版时间：2023-07-03 11:37
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230630.1750.010
*通信作者. E-mail：49205096@qq.com

*引用格式：王阳，胡敏，杜小平，等. 地基光度数据判定GEO自旋稳定目标功能方法[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：113-119.*
*WANG Y，HU M，DU X P，et al. Method for function determination of GEO spin stabilized objects by ground-based photometric data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：113-119 (in Chinese).*

### 1.1 HS 376 型自旋稳定目标

HS 376 型目标目前共有 4 个在轨运行，这些目标采用统一的卫星平台，具备较大的天线结构，呈细长型，其几何构型如图 1 所示。



(a) Astra (b) Brazilsat (c) Eutelsat

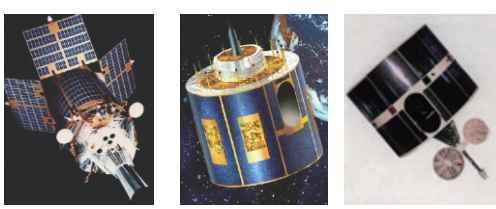
图 1 HS 376 型自旋稳定目标的几何构型

Fig. 1 Geometry of HS 376 spin stabilized objects

Astra 2D 用于向英国和爱尔兰提供数字电视直播服务，Astra 3A 用于向德国、奥地利和瑞士提供宽带服务，Brazilsat B4 为巴西提供通信服务，Eutelsat 33A 用于向斯堪的纳维亚、英国、西欧和东欧提供通信服务。这些目标均采用休斯空间通讯公司的 HS 376 型卫星平台，因此，具有相同的自旋周期，形状也较为相似。目标本体由自旋平台和消旋平台组成，自旋平台用于姿态控制，其自旋周期为 50 r/min；消旋平台上连有天线，天线有圆形和正八边形 2 种形状，天线的直径一般为 2 m。HS 376 型目标全部为通信卫星，用于提供语音、传真和电视信号等通信业务。

### 1.2 非 HS 376 型自旋稳定目标

非 HS 376 型目标目前共有 10 个在轨运行，其中，国家支援计划（defense support program, DSP）卫星 3 颗，Meteosat 卫星 4 颗及风云-2 卫星 3 颗，目标天线尺寸较小，没有统一的卫星平台，呈粗短型，其几何构型如图 2 所示。



(a) DSP (b) Meteosat (c) 风云-2

图 2 非 HS 376 型自旋稳定目标的几何构型

Fig. 2 Geometry of non-HS 376 spin stabilized objects

DSP 是美国导弹预警卫星，可以提供导弹和核爆炸的早期探测和预警，DSP 本体为直径为 6.74 m 的圆柱体，长为 10 m，自旋周期为 6 r/min。Meteosat 卫星直径为 2.1 m，高度为 3.195 m，其在轨道上绕主轴线以 100 r/min 的速度旋转。风云-2 系列卫星是中国自主研发的气象卫星，转速为 100 r/min，卫星柱体直径为 2.1 m，高度约为 4.5 m，卫星数据向国际用户开放，2018 年 6 月 5 日发射的风云-2H 卫星，是风云-2 系列的最后一颗卫星。

综上分析，全球在轨运行的 GEO 自旋稳定目标如表 1 所示，由表可知，GEO 自旋稳定目标的自旋周期和其功能具有极强的关联性，DSP 等预警卫星的转速均为 6 r/min，Astra、Brazilsat 等通信卫星的转速均为 50 r/min，Meteosat 等气象卫星的转速均为 100 r/min。

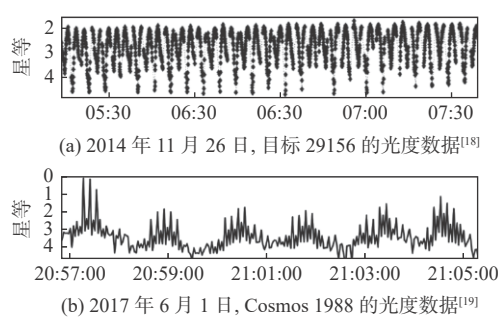
表 1 在轨运行 GEO 自旋稳定目标

Table 1 GEO spin stabilized objects in orbit

| 目标编号 | 目标名称 | 功能 | 转速/(r·min$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 2000-024A | DSP 20 | 预警 | 6 |
| 2001-033A | DSP 21 | 预警 | 6 |
| 2004-004A | DSP 22 | 预警 | 6 |
| 2000-081A | Astra 2D | 通信 | 50 |
| 2002-015B | Astra 3A | 通信 | 50 |
| 2000-046A | Brazilsat B4 | 通信 | 50 |
| 2003-043A | Eutelsat 33A | 通信 | 50 |
| 2002-040B | Meteosat 8 | 气象 | 100 |
| 2005-049B | Meteosat 9 | 气象 | 100 |
| 2012-035B | Meteosat 10 | 气象 | 100 |
| 2015-034B | Meteosat 11 | 气象 | 100 |
| 2012-002A | Fengyun 2F | 气象 | 100 |
| 2014-090A | Fengyun 2G | 气象 | 100 |
| 2018-050A | Fengyun 2H | 气象 | 100 |

## 2 光度数据反演目标自旋周期方法

2014 年 11 月，Hall 和 Kervin 利用位于毛伊岛的 Raven 望远镜对自旋目标 29156 进行了光度观测，光度数据如图 3(a) 所示[18]，其中，星等越小，表示目标越高，因此，纵轴值由大到小。2017 年 6 月 Schafer 基于西班牙卡拉尔山观测站望远镜对自旋目标 Cosmos 1988 进行了光度观测，光度数据如图 3(b) 所示[19]。由图 3 可知，自旋目标的光度数据具有一定的周期性，并且周期基本不随时间产生改变。并且自旋目标光度数据的周期与目标本身的形状无




(a) 2014 年 11 月 26 日，目标 29156 的光度数据[18]

(b) 2017 年 6 月 1 日，Cosmos 1988 的光度数据[19]

图 3 GEO 自旋目标的光度数据[18-19]

Fig. 3 Photometric data of GEO spin stabilized objects[18-19]

关, 只与目标的实际旋转周期有关, 目标的实际旋转周期一般等于目标的光度数据周期或光度数据周期的 2 倍[19]。因此, 可以通过计算目标的光度数据周期反演其自旋周期。

### 2.1　离散傅里叶变换

对于采样连续且采样率恒定的光度数据, 可以使用离散傅里叶变换将离散采样的时域光度数据转换为曲线的功率谱, 从而辨识出光度数据周期。设观测时刻数为$N$, $x(n)$为有限长序列, 即

$$x(n)=\begin{cases}x(n) & 0\leqslant n\leqslant N-1\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

则$x(n)$的离散傅里叶变换为

$$X(k)=\mathrm{DFT}(x(n))=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)W_N^{nk}\qquad 0\leqslant k\leqslant N-1 \tag{2}$$

式中: DFT 为离散傅里叶变换; $W_N$ 为单位周期复指数序列, 其表达式为

$$W_N=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}} \tag{3}$$

对图 3(b) 所示的光度数据进行离散傅里叶变换可得到如图 4 所示的结果。

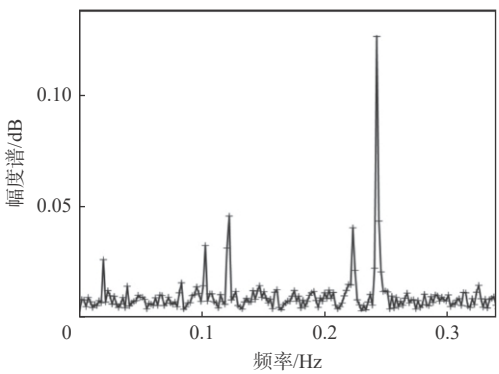



图 4　光度数据的离散傅里叶变换

Fig. 4　Discrete Fourier transform of photometric data

可以看出, 频率为 0.24 Hz 时峰值最大, 另外在 0.12 Hz 处也存在一峰值, 2 个频率恰好是 2 倍的关系。由于目标自旋周期等于目标光度数据周期或该周期的 2 倍, 因此, 可推断此时目标的实际旋转周期为 4.17 s 或 8.34 s, 转速为 14.4 r/min 或 7.2 r/min。具体转速需要通过 2.4 节介绍的相位折叠法进行判断。

### 2.2　最小二乘频谱分析

在光线曲线具有非恒定的采样率或间隙的情况下, 可以使用最小二乘频谱分析生成光度数据的功率谱。该方法类似于傅里叶分析, 是一种基于正弦曲线与数据样本的最小二乘拟合来估计频谱的方法, 可以辨识非等间隔采样数据中隐藏的周期信号频率。最小二乘频谱分析通过求 Lomb-Scargle 周期图实现[20], 假设时刻$t_j$对应的观测值为$h_j$, 则观测值均值和观测值方差分别为

$$\bar{h}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}h_j \tag{4}$$

$$\sigma^2=\frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N}(h_j-\bar{h})^2 \tag{5}$$

时间延迟$\tau$定义为

$$\tan(2\omega\tau)=\frac{\sum_{j=1}^{N}\sin(2\omega t_j)}{\sum_{j=1}^{N}\cos(2\omega t_j)} \tag{6}$$

式中: $\omega$为数字角频率。

Lomb-Scargle 周期图为

$$P_N(\omega)=\frac{1}{2\sigma^2}\cdot\frac{\left[\sum_{j=1}^{N}(h_j-\bar{h})\cos\left(\omega(t_j-\tau)\right)\right]^2}{\sum_{j=1}^{N}\cos^2\left(\omega(t_j-\tau)\right)}+\frac{1}{2\sigma^2}\cdot\frac{\left[\sum_{j=1}^{N}(h_j-\bar{h})\sin\left(\omega(t_j-\tau)\right)\right]^2}{\sum_{j=1}^{N}\sin^2\left(\omega(t_j-\tau)\right)} \tag{7}$$

对图 3(b) 所示的光度数据进行最小二乘频谱分析, 得到的结果如图 5 所示。由图可知, 该频谱与傅里叶变换的结果呈现出良好的一致性。由于此时光度数据的采样率并不是完全恒定的, 因此, 该结果比傅里叶变换得到的结果更为可信。此时, 可得到光度数据中最强的频率分量为 0.24 Hz, 次强的频率分量为 0.12 Hz, 同 2.1 节, 可反演出目标的转速约为 14.4 r/min 或 7.2 r/min。

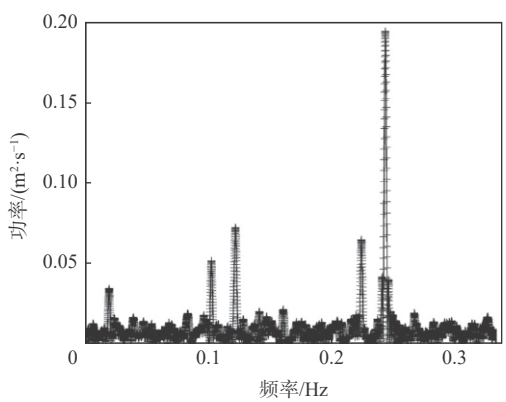



图 5　光度数据的最小二乘频谱分析

Fig. 5　Least-squares spectral analysis of photometric data

### 2.3　相位分散最小化

傅里叶变换和最小二乘频谱分析仅适用于具有正弦结构的光度数据, 对于两者不能很好处理的

具有非正弦结构的光度数据，可以使用相位分散最小化技术来确定曲线周期。该技术由 Stellingwerf 于 1978 年开发，并已广泛应用于天文学及其他领域的周期性数据分析，技术代码可开放获取（详见 http://www.stellingwerf.com/）。相位分散最小化对曲线中所有可能存在的周期进行检索。在检索过程中，将整个光度数据按照测试周期分成若干部分，并将这些部分彼此层叠。此后，层叠数据又被进一步细分为一系列的数据箱。计算这些数据箱中所有数据的方差，与数据集的总方差进行比较，生成一个介于 0 和 1 之间的数值。设第 $j$ 个观测时刻 $t_j$ 对应的观测值为 $h_j$，选取 $M$ 个不同光度采样数据子集，子集方差为 $s$，则整体方差为

$$s^2=\frac{\sum_{j=1}^{M}(n_j-1)s_j^2}{\sum_{j=1}^{M}n_j-M} \tag{8}$$

设 $\Pi$ 为测试周期，则相位向量 $\boldsymbol{\Phi}$ 的元素为

$$\phi_i=t_i/\Pi-\lfloor t_i/\Pi\rfloor \tag{9}$$

定义相位分散值 $\Theta$ 为

$$\Theta=s^2/\sigma^2 \tag{10}$$

其中，$\sigma^2$ 可由式 (5) 计算得到。若 $\Pi$ 不是实际周期，则 $\Theta\approx1$；若 $\Pi$ 为实际周期，则 $\Theta$ 为接近 0 的局部最小值。即：$\Theta$ 为 0，表示最为匹配；$\Theta$ 为 1，表示最不匹配。基于相位分散最小化对图 3(b) 所示的光度数据进行频谱分析，得到的结果如图 6 所示。

由图 6 可知，相位分散最小化与前 2 种方法（离散傅里叶变换、最小二乘频谱分析）产生的频谱并不相同，该方法计算的全局最小值为 8.33 s。考虑其他频率分量在分析结果中也相对较多，该方法并不适合分析目标 Cosmos 1988 的光度数据。

### 2.4 相位折叠

与离散傅里叶变换、最小二乘频谱分析的原理

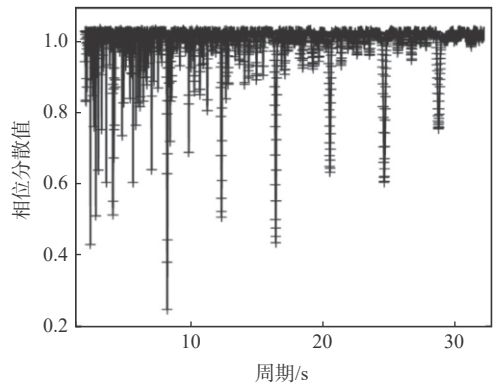



图 6 光度数据的相位分散最小化

Fig. 6 Phase dispersion minimization of photometric data

不同，相位分散最小化计算出的频率分量可能并不是光度数据中比重较大的频率分量。另外，即使确定了频谱中的最大频率分量，该分量也并一定等于目标的实际旋转频率。

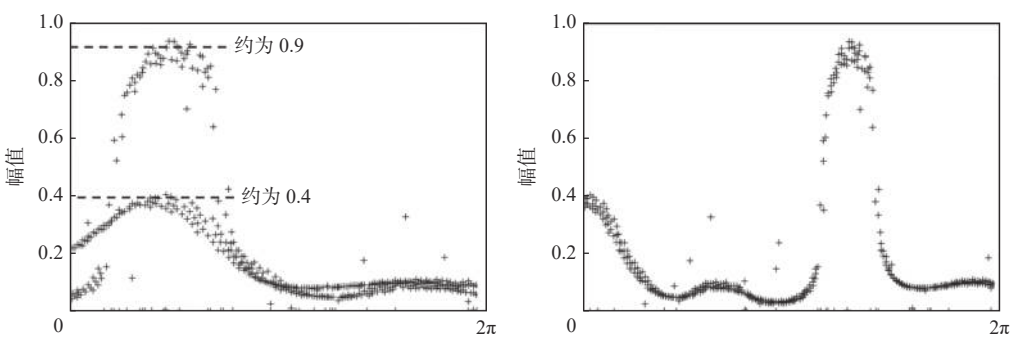
为确定目标的实际旋转频率，确保通过离散傅里叶变换、最小二乘频谱分析和相位分散最小化这 3 种方法获得的频率分量与光度数据特征相对应，借鉴相位色散最小化的思想，可通过相位折叠的方法对光度数据周期进行校验。假设该周期为 $T$，时刻 $t_i$ 对应的观测值为 $h_i$，对应的数据集为

$$X=\{t_i,h_i\}\qquad i=1,2,\cdots,N \tag{11}$$

经过相位折叠后，其对应的数据集为

$$Y=\{2\pi(t_i\mod T,h_i)/T\}\qquad i=1,2,\cdots,N \tag{12}$$

设目标的旋转频率为 0.24 Hz，对应的周期为 4.17 s，基于此周期对光度数据进行相位折叠并进行归一化，可得到 1 个周期内光度数据的折叠结果如图 7(a) 所示。从图中可以看出，折叠数据的波峰幅值有 2 个，分别约为 0.4 和 0.9，这说明 4.17 s 为目标实际周期的一半。假设目标的旋转周期为 8.34 s，基于此周期对光度数据进行相位折叠，得到的结果如图 7(b) 所示。由图可知，每部分的折叠数据基本




(a) 折叠周期为 4.17 s (b) 折叠周期为 8.34 s

图 7 光度数据的相位折叠

Fig. 7 Phase folding of photometric data

上在一个周期内都重合, 故 8.34 s 更加接近于目标的旋转周期, 因此, 目标的实际转速应为 7.2 r/min。

## 3　光度数据判定目标功能方法

若 GEO 目标的光度数据具有周期特征, 则可以根据离散傅里叶变换、最小二乘频谱分析、相位分散最小化和相位折叠反演目标的实际转速, 然后, 基于目标自旋周期和功能的关联性, 进一步判定目标功能。地基光度数据判定 GEO 自旋稳定目标功能方法流程如图 8 所示。具体可以分为以下 3 个步骤。

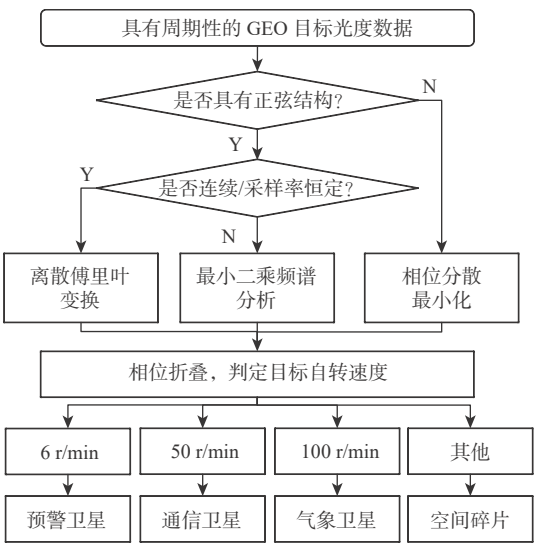



图 8　地基光度数据判定 GEO 自旋稳定目标功能方法

Fig. 8　Function determination of GEO spin stabilized object by ground-based photometric data

1) 自旋稳定 GEO 目标转速的初步反演。对于给定的具有周期性的 GEO 目标光度数据, 先根据数据波形定性判定其是否具有正弦结构; 对于具有正弦结构、采样连续且采样率恒定的光度数据, 使用离散傅里叶变换进行反演; 对于具有正弦结构、非恒定采样率或存在间隙的光线数据, 使用最小二乘频谱分析进行反演; 对于傅里叶变换和最小二乘频谱分析不能很好处理的具有非正弦结构的光度数据, 使用相位分散最小化技术进行反演。

2) 自旋稳定 GEO 目标转速的校验。使用相位折叠确定目标的实际自旋周期。与离散傅里叶变换、最小二乘频谱分析的原理不同, 相位分散最小化计算出的频率分量可能并不是光度数据中比重较大的频率分量。另外, 即使确定了频谱中的最大频率分量, 该分量也并一定等于目标的实际旋转频率。为确定目标的实际旋转频率, 确保通过离散傅里叶变换、最小二乘频谱分析和相位分散最小化获得的频率分量与光度数据特征相对应, 通过相位折叠的方法对光度数据周期进行校验。

3) 自旋稳定 GEO 目标的功能判定。在反演出目标转速的基础上, 基于目标自旋周期和目标功能的关联性, 进一步判定 GEO 目标的功能。若目标转速为 50 r/min, 则目标为通信卫星; 若目标转速为 100 r/min, 则目标为气象卫星; 若目标转速为 6 r/min, 则目标为预警卫星。另外, 若反演出其他转速, 则说明目标为空间碎片。

## 4　实例验证

为验证第 3 节判定方法的可行性, 本文基于已退役目标 Cosmos 2362 的光度数据进行了实验验证, 该目标的光度数据如图 9 所示。

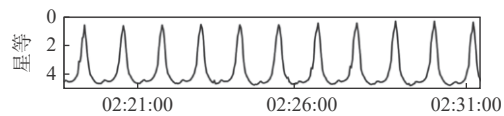



图 9　2017 年 7 月 19 日, 目标 Cosmos 2362 的光度数据

Fig. 9　Photometric data of Cosmos 2362 on July 19, 2017

1) Cosmos 2362 目标转速的初步反演。根据如图 9 所示的光度数据波形, 可判断该数据为具有正弦结构、采样率连续、非恒定的光度数据, 需要采用最小二乘频谱分析进行转速的反演, 结果如图 10 所示。可以看出, 转速为 0.85 r/min 时峰值最大, 初步判定目标自转速度为 0.85 r/min。

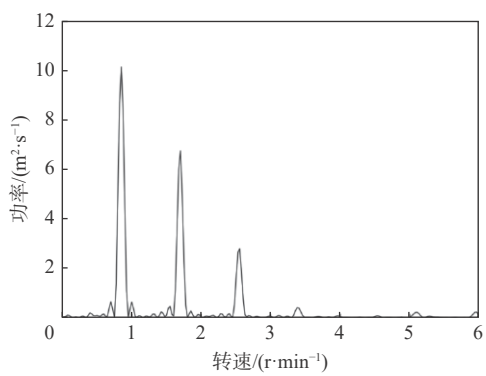



图 10　Cosmos 2362 光度数据的最小二乘频谱分析

Fig. 10　Least-squares spectrum analysis of Cosmos 2362 photometric data

2) 目标 Cosmos 2362 转速的校验。使用 0.85 r/min 的测试转速对图 9 所示光度数据进行相位折叠, 其结果如图 11 所示。由图可知, 光度数据的波峰、波谷及变化趋势基本一致, 可确定目标自转速度为 0.85 r/min。

3) 目标 Cosmos 2362 的功能判定。由图 8 可推断, 0.85 r/min 的转速对应的目标应为空间碎片。

综上, 基于本文光度数据判定目标功能的方法对目标 Cosmos 2362 的光度数据进行了分析, 最终

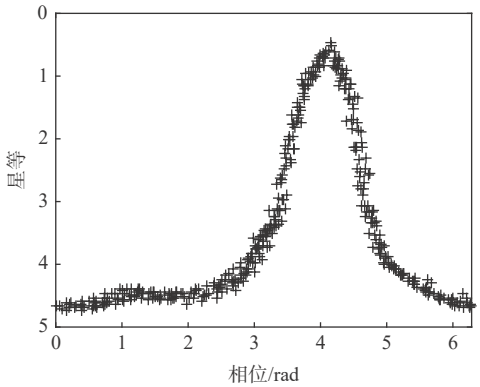



图 11 Cosmos 2362 光度数据的相位分散最小化

Fig. 11 Phase dispersion minimization of Cosmos 2362 photometric data

判定该目标为空间碎片。该结论与目标已退役的实时相符，说明了该方法的有效性和可行性。

## 5 结 论

1）GEO 自旋稳定目标的自旋周期和其地基光度数据周期及其功能属性均具有较强关联性，可以基于地基光度数据判定 GEO 自旋稳定目标功能。

2）对于采样连续且采样率恒定的光度数据，使用离散傅里叶变换进行反演。对于具有非恒定的采样率或存在间隙的光线曲线，使用最小二乘频谱分析进行反演；对于傅里叶变换和最小二乘频谱分析不能很好处理的具有非正弦结构的光度数据，使用相位分散最小化技术进行反演；最后，使用相位折叠确定目标的实际自旋周期。通过自旋周期，进一步反演出目标功能。

3）本文光度数据判定目标功能的方法有助于提高地基光度数据的应用效益。当前，虽然地基望远镜获取了海量的光度数据，但是大量具有时效性的数据没有被有效利用，数据并没有转换成有效信息。光度观测的目的是要识别目标，该方法可以打破自旋稳定 GEO 目标特征和光度数据之间的鸿沟，将光度数据转换成知识“金块”。

4）本文光度数据判定目标功能的方法有助于提升地基光学系统的观测能力。由于距离及大气的影响，地基光学观测系统对高轨空间目标识别难度较大，传统探测手段和方法将越来越不能满足需求，而设备改造或研制都是一个周期较长的过程，该方法可以在一定程度上提高地基光学观测系统的目标识别能力，进而提高其观测能力。

5）本文光度数据判定目标功能的方法可以为太空目标能力评估等空间应用提供新线索。目标功能是目标能力评估的重要线索，该方法能够基于地基光度数据判定 GEO 自旋稳定目标的功能，对于解决太空态势感知中的目标能力评估问题具有重要意义。

## 参考文献（References）

[1] LINARES R. Probabilistic identification and discrimination of deep space objects via astrometric and photometric data fusion[D]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2013: 2-3.

[2] 王阳, 杜小平, 范椿林. 地基光度曲线反演空间目标特征技术研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(15): 1578-1590.
WANG Y, DU X P, FAN C L. Progress of light curve inversion technology for resident space object characteristics[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(15): 1578-1590(in Chinese).

[3] PAYNE T, GREGORY S, LUU K. SSA analysis of GEOS photometric signature classifications and solar panel offsets[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: The Maui Economic Development Board, 2006.

[4] LINARES R, CRASSIDIS J L, JAH M K. Space object classification and characterization via multiple model adaptive estimation[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-7.

[5] HINKS J C, CRASSIDIS J L. Angular velocity bounds via light curve glint duration[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2016.

[6] VRBA F, HUTTER D, SHANKLAND P, et al. A survey of geosynchronous satellite glints[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: The Maui Economic Development Board, 2009.

[7] LINARES R, JAH M K, CRASSIDIS J L, et al. Astrometric and photometric data fusion for inactive space object mass and area estimation[J]. Acta Astronautica, 2014, 99: 1-15.

[8] LINARES R, CRASSIDIS J. Space object shape inversion via adaptive hamiltonian markov chain Monte Carlo[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics: A Publication of the American Institute of Aeronautics and Astronautics Devoted to the Technology of Dynamics and Control, 2020(11): 43-47.

[9] UR REHMAN M J, DASS S C, ASIRVADAM V S. Markov chain Monte Carlo (MCMC) method for parameter estimation of nonlinear dynamical systems[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications. Piscataway: IEEE Press, 2015: 7-10.

[10] DIANETTI A D, CRASSIDIS J L. Space object attitude determination from multispectral light curves[C]//Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020.

[11] PENG H, BAI X. Limits of Machine learning approach on improving orbit prediction accuracy using support vector machine[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: The Maui Economic Development Board, 2017.

[12] PENG H, BAI X L. Recovering area-to-mass ratio of resident space objects through data mining[J]. Acta Astronautica, 2018, 142: 75-86.

[13] NAUL B, BLOOM J S, PÉREZ F, et al. A recurrent neural network for classification of unevenly sampled variable stars[J]. Nature Astronomy, 2018, 2: 151-155.

[14] HARRISON K, ERIC C, ADAM B. Characterization of LEO satellites with all-sky photometric signatures[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: The Maui Economic Development Board, 2022.

[15] 杜俊举. 空间碎片光度数据的获取与分析[D]. 济南: 山东大学, 2022: 90-93.
DU J J. Acquisition and analysis of photometric data of space debris[D]. Jinan: Shandong University, 2022: 90-93(in Chinese).

[16] 马若. 基于地基光度信号的空间目标关键特征反演方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 22-33.
MA R. Research on key feature inversion method of space target based on ground photometric signal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 22-33(in Chinese).

[17] 苏金宇. 基于时谱分析的空间目标姿态反演方法及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 24-32.
SU J Y. Space target attitude inversion method and experimental study based on time spectrum analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 24-32(in Chinese) .

[18] HALL D, KERVIN P. Optical characterization of deep-space object rotation states[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: The Maui Economic Development Board, 2014.

[19] SCHAFER E. Stereoscopic light curve analysis of space debris objects[D]. Stuttgart: DLR Institute for Technical Physics, 2017.

[20] 刘通, 陈浩, 沈鸣, 等. 旋转卫星激光测距数据分析与处理[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0504001.
LIU T, CHEN H, SHEN M, et al. Spinning satellite laser ranging data analysis and processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0504001(in Chinese).

# Method for function determination of GEO spin stabilized objects by ground-based photometric data

WANG Yang，HU Min*，DU Xiaoping，XU Can

(Space Engineering University，Beijing 101416，China)

**Abstract**：The spin period of geosynchronous earth orbit (GEO) spin stabilized objects has a strong correlation with its ground-based photometric data period and functional attributes. With the spin period of the object as a bridge, the function determination of a GEO spin stabilized object can be realized by ground-based photometric data. The spin period and function correlation of the GEO spin stabilized objects that are still in orbit as of May 1, 2022 were analyzed. Based on different characteristics of their photometric data, the photometric data inversion method of the object's spin period was proposed. By combining the correlation between spin period and its function, the function determination of the object by photometric data was further proposed, which could effectively improve the application benefit of ground-based photometric data and provide new ideas for space applications such as space object capability evaluation.

**Keywords**：geosynchronous Earth orbit objects; spin stabilized objects; photometric data; spin period; function determination

**Received**：2022-12-12；**Accepted**：2023-06-09；**Published Online**：2023-07-03 11：37

**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230630.1750.010

* **Corresponding author**. E-mail：49205096@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1000

# 基于简短可验证环签名的区块链版权存证协议

王杰昌[1]，刘玉岭[2,*]，张平[3]，刘牧华[3]，王小伟[1]

(1. 郑州大学体育学院 体育大数据中心，郑州 450000；2. 中国科学院信息工程研究所，北京 100190；
3. 河南科技大学 数学与统计学院，洛阳 471023)

**摘　　要**：在现有区块链版权存证系统中，各种环签名占用过多存储空间，数据共识算法效率有待提高。针对此问题，使用动态累加器对环成员公钥进行累加，分别设计初始化、系统选取、密钥生成、签名生成、签名验证等算法，构造多私钥生成器（PKG）的身份基简短可验证环签名方案；为主节点选取设置信用阈值，降低允许参与共识的最大节点数，改进已有的联盟链共识算法；利用所构环签名方案及改进的共识算法，提出一种新的区块链版权存证协议。对所构签名方案的不可伪造性及匿名性进行形式化证明；对所构签名方案的计算效率及存储空间进行分析和仿真，对存证系统的共识算法和容错性进行实验评估。结果显示：所提协议节省了签名时间开销和存储空间，提高了共识效率和容错性。

**关 键 词**：多私钥生成器；身份基；简短可验证环签名；联盟链；版权存证；共识算法；容错性

**中图分类号**：TP309.2

**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0120-13

随着全球信息化和数字化的发展，人们在生活中所接触到的数字信息呈爆发式增长，数字作品所具有的传播快捷性与易复制性使针对其版权的侵权行为频频发生，严重影响中国数字出版产业的发展。区块链[1]技术具有开放性、去中心化、不可篡改性、可追溯性[2]等特点，将该技术应用于数字版权保护领域，为解决该问题提供了一种有效的新途径。环签名[3]是区块链系统的隐私保护利器之一[4]，其中，门限环签名[5]是环中部分成员只要达到规定门限值即可代表环中所有用户进行签名的方案，可验证环签名[6]是允许真实签名者通过出示一些证据来证明自己真实身份的签名方案，身份基环签名[7]是身份基密码体制与环签名相结合使得用户不再需要公钥证书的签名方案，但这些环签名方案占用空间多。共识机制是区块链的四大核心技术之一，区块链分为私有链、联盟链、公有链，目前大多数版权系统均是基于联盟链的，但现有联盟链版权共识算法效率亟待提高。

近年来已有不少学者将环签名应用于物联网、区块链及版权保护，以提升其隐私性。针对源推断攻击，Wang等[8]提出一种基于联邦学习和环签名的智能医疗保健框架，用于共享生理数据。Geng和Cui[9]提出一种基于可转化环签名的匿名买方-卖方数字水印协议，以实现版权保护和交易，但未基于区块链，一旦中心节点受攻击易致系统瘫痪。Li等[10]提出一种基于区块链的可信任投稿审稿系统，使用区块链和属性基加密来保护稿件版权，使用环签名技术实现匿名审稿。林梦晨等[11]利用身份基环签名，提出一种基于联盟链的电子医疗记录安全共享模型，其为单私钥生成器 (private key generator,

**收稿日期**：2022-12-17；**录用日期**：2023-05-26；**网络出版时间**：2023-07-03 10:04
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230630.1723.008
**基金项目**：国家重点研发计划 (2021YFF0307203)；基础加强计划技术领域基金 (2021-JCJQ-JJ-0908)；河南省科技攻关项目 (212102310264, 232102210138)；河南省高等学校重点科研项目 (23A520046,23A413005)
* **通信作者**. E-mail：liuyuling@iie.ac.cn

*引用格式*：*王杰昌，刘玉岭，张平，等. 基于简短可验证环签名的区块链版权存证协议 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：120-132.*
*WANG J C，LIU Y L，ZHANG P，et al. Blockchain copyright storage protocol based on short verifiable ring signature [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：120-132（in Chinese）.*

PKG) 模式, 容错性低。周艺华等[12] 利用基于身份的无可信中心门限环签名方案, 采用联盟链架构, 设计一套基于区块链技术的数据存证管理系统, 其同样为单 PKG 模式, 容错性低。翟社平等[13] 使用多 PKG 的身份基可验证环签名对版权进行隐私保护, 提出一种基于区块链的数字版权存证系统。陈思吉等[14] 利用多 PKG 提升系统的容错性, 并基于身份基可验证环签名, 提出一种区块链隐私保护算法。然而上述研究中环签名的大小均随环成员增多而增大, 占用较多存储空间。王玲玲等[15-16] 提出身份基简短环签名方案, 无论环成员数量如何变化, 其签名大小固定不变, 但是计算效率低, 且为单 PKG 模式。

共识机制是一种区块链中每个节点都必须遵守的规则, 在区块链网络中起到了协调全节点账目保持一致的作用, 目前在联盟链中的版权共识算法大多是对实用拜占庭容错 (practical Byzantine fault tolerance, PBFT) 算法的直接使用或改进。Luo 等[17] 提出基于同态加密和 PBFT 算法的安全数据融合方案, 同时提出基于粒子群优化算法和智能合约的电力自动调度方案。针对各类医疗信息系统之间的信息存储安全和信息共享问题, 结合加密及对等网络技术, Qu[18] 设计了一种基于 PBFT 算法的医疗区块链信息管理系统。针对车联网的高动态性和资源约束性, Zhang 等[19] 利用 PBFT 算法提出一种基于有向无环图格的并行共识机制。陈子豪等[20] 改进了 PBFT 算法, 并基于此提出一种联盟式音视频版权区块链系统。孙嘉豪等[21] 构造了一种区块链知识产权保护模型, 设计了知识产权登记和转让智能合约, 提出基于信用的改进 PBFT 算法共识机制。翟社平等[13] 也改进了 PBFT 算法, 提出新的版权数据共识算法, 并设计了版权智能合约。针对工作量证明 (proof of work, PoW)、权益证明 (proof of stake, PoS) 和 PBFT 算法等共识协议的效率、公平性和可扩展性问题, Kudva 等[22] 提出一种驱动证明 (proof of driving, PoD) 技术, 以随机选择诚实矿工为区块链车载自组网应用生成区块。针对物联网的安全问题, Feng 等[23] 结合边缘计算, 改进信用分级协议和环签名方案, 提出一种基于 PBFT 算法的信用身份环优化区块链算法 (credit identity ring optimization blockchain algorithm based on PBFT, CRBFT)。但是这些共识算法的效率都有提升的空间。

为解决上述问题, 本文根据身份基简短环签名[15-16] 的原理与设计, 并参考身份基可验证环签名[13-14], 利用动态累加器技术, 提出新的多 PKG 的身份基简短可验证环签名方案, 分别设计了初始化、系统选取、密钥生成、签名生成、签名验证等算法; 为主节点选取设置信用阈值, 降低允许参与共识的最大节点数, 改进了翟社平等[13] 的联盟链共识算法, 提高共识效率; 基于多 PKG 的身份基简短可验证环签名方案, 并利用改进的联盟链共识算法, 提出一种新的区块链版权存证协议。随着环成员的增多, 本文协议中的数据签名大小保持不变, 节省存储空间的同时也提升了签名效率和容错性, 确保签名者 (版权持有人) 的匿名性及版权签名的不可伪造性, 若出现版权纠纷时, 签名者可出示证据来证明自己的身份, 另外, 也提高了系统的共识效率。

# 1　相关理论基础

## 1.1　双线性对

假设 $G_1$ 和 $G_2$ 分别为 $p$ 阶的加法循环群和乘法循环群, $p$ 为大素数, $P$ 为 $G_1$ 的生成元。双线性映射 $e: G_1 \times G_1 \to G_2$ 具备如下性质。

双映射性。 $e(aP, bQ) = e(P, Q)^{ab}$, 对所有的 $P, Q \in G_1$ 及 $a, b \in \mathbf{Z}_p$ 成立。

非退化性。存在 $P, Q \in G_1$, 使得 $e(P, Q) \neq 1$。

可计算性。对于 $P, Q \in G_1$, 存在有效的算法计算出 $e(P, Q)$ 的值。

## 1.2　困难问题假设

$q$ 强迪菲赫尔曼 ($q$-strong Diffie-Hellman, $q$-SDH) 问题假设。如 1.1 节所述, 双线性映射 $e: G_1 \times G_1 \to G_2$, 已知 $(P, sP, \cdots, s^q P)$, 其中, $s \in_{\mathrm{R}} \mathbf{Z}_p^*$, 没有概率多项式时间 (probabilistic polynomial time, PPT) 算法能计算出 $\left(r, \frac{1}{s+r}P\right)$, 其中, $r \in \mathbf{Z}_p$。

## 1.3　动态累加器

双线性对动态累加器[24] $A_{\mathrm{D}} = (\{X_l\}_{l \in \mathbf{N}}, \{F_l\}_{l \in \mathbf{N}})$, 其中, $\{X_l\}_{l \in \mathbf{N}}$ 为累加器的定义域, $\{F_l\}_{l \in \mathbf{N}}$ 为一系列函数对族, 主要由下面几个算法组成。

1) 启动算法。输入安全参数 $l$, 输出公共参数 $p_{\text{public}} = \{t, t', (f, g), u\}$。其中, $t = (p, G_1, G_2, e, P)$, $t' = (P, sP, \cdots, s^q P)$, 辅助信息 $s \in_{\mathrm{R}} \mathbf{Z}_p^*$, $q$ 为累加器累加元素个数的上界; 累加元素的值域为 $\mathbf{Z}_p \backslash \{-s\}$, 从 $\mathbf{Z}_p^*$ 中随机选择 $u$, 从函数对族 $F_l$ 中选取函数对 $(f, g)$ 为 $f: \mathbf{Z}_p \times \mathbf{Z}_p \to \mathbf{Z}_p$ 及 $g: \mathbf{Z}_p \to G_1$, 具体形式为 $f: (u, x) \mapsto (x+s)u$, $g: u \mapsto uP$。

2) 累加值生成算法。输入公共参数 $p_{\text{public}}$, 以及集合 $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\} \subset \mathbf{Z}_p \backslash \{-s\}$, $n \leqslant q$, 不需知道 $s$ 的值而仅通过 $t' = (P, sP, \cdots, s^q P)$, 即可输出累加值 $V = g(f(u, X)) = \prod_{i=1}^{n} (x_i + s)uP$。

3) 成员隶属关系证据生成算法。输入公共参数 $p_{\text{public}}$ 及 $x_\pi \in X$, 生成 $x_\pi \in X$ 的证据 $W = g(f(u,$

$X\backslash\{x_\pi\})) = \prod_{i\neq\pi}(x_i+s)uP$。

4)成员隶属关系验证算法。输入公共参数$p_{\text{public}}$、集合$X$上的累加值$V$、元素$x_\pi$及证据$W$，验证$e(W,x_\pi P+sP)\stackrel{?}{=}e(V,P)$，其中，等式上方的问号表示判断等式是否成立。若等式成立，则$x_\pi\in X$，否则$x_\pi\notin X$。

同时，该累加器还具备准交换性、累加值及证据可更新性等性质。

**定理1** 在$q$-SDH问题假设下，动态累加器$A_{\text{D}}$具有抗碰撞性，$q$为累加器累加元素个数的上界。

## 2 系统模型

本文的区块链版权存证系统模型如图1所示，主要包含以下几个实体。

1)出版发行商(Publisher)。各出版发行商相互独立，共同组成联盟链，链上存证的版权数据由这些出版商共同维护。

2)私钥生成器(PKG)。其组成私钥生成器池(PKGP)或私钥生成器组(PKGG)，共同为参与环签名的用户生成密钥。

3)星际文件系统(interplanetary file system, IPFS)。其存储数字作品文件，并返回文件的哈希值。

4)数字作品作者(id)。其为数字版权的持有人(或用户)，在IPFS上存储数字作品，选取其他用户组成环对版权数据进行签名，将签名数据在联盟链上存证。

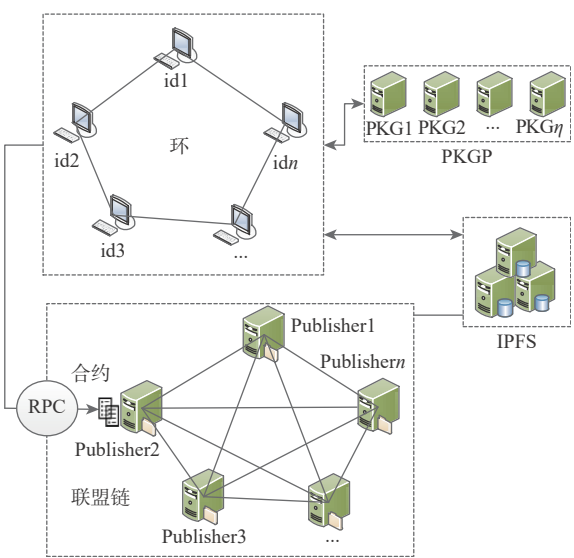



图1 区块链版权存证系统模型

Fig. 1 Model of blockchain copyright storage system

系统简单工作原理：首先，作者在区块链版权系统注册账户，将作品上传至IPFS并返回作品哈希值，作者再对其真实身份信息加密以构造数字版权数据；然后，利用PKG为其生成密钥，并选取其他用户组成环对版权数据进行环签名；最后，作者选择联盟链中的一个出版发行商节点，通过其对外提供的RPC(remote produce call)接口，将签名版权数据由已部署的智能合约发送至联盟链网络中进行存证，存证后可进行版权交易和版权监控(以处理版权纠纷)。存证过程中，智能合约将对请求进行验证，通过验证后将多条签名版权数据打包成区块，发送至联盟链网络中等待共识，达成共识的签名版权数据即可在区块链上存储。

## 3 区块链版权存证协议

本文的区块链版权存证协议主要包括版权数据构造、多PKG的身份基简短可验证环签名、版权数据共识。另外还有版权智能合约，其设计可参考翟社平等[13]及孙嘉豪等[21]的智能合约。

### 3.1 版权数据构造

数字作品作者先在版权存证系统中注册账户，再将其数字作品文件上传至IPFS，IPFS返回给作者一个文件的哈希值$h_{\text{W}}$，然后，作者构造作品版权数据，包含作者信息、作品信息、作品哈希值、作者真实身份信息等。用CR表示待存证的版权数据；CreInfo表示作者信息，其包含作者的昵称、所属地区等；用WorksInfo表示作品信息，其包含作品名称、发布时间、创作工具等；用$h_{\text{W}}$表示数字作品文件存储至IPFS返回的哈希值；id表示作者真实身份信息，包含身份证号码、真实姓名等。构造待存证版权数据为

$$\text{CR}=\{\text{CreInfo},\text{WorksInfo},h_{\text{W}},E(\text{id})\}$$

式中：$E(\text{id})$表示使用高级加密标准(advanced encryption standard, AES)算法对id加密。

### 3.2 多私钥生成器的身份基简短可验证环签名

本文提出的多PKG的身份基可验证环签名方案，包括初始化、系统选取、密钥生成、签名生成、验证签名等算法，具体过程如下。

1)初始化 Init

给定安全参数$l$，动态累加器$A_{\text{D}}$，选择双线性映射：$e:G_1\times G_1\to G_2$。存在$t'=(P,sP,\cdots,s^qP)$，$s\in{}_{\text{R}}\mathbf{Z}_p^*$，令$P_{\text{pub}}=sP$。$K,Q\in{}_{\text{R}}G_1^*$，$u\in{}_{\text{R}}\mathbf{Z}_p^*$，设哈希函数$H:\{0,1\}^*\to\{0,1\}^l$，$H_1:\{0,1\}^*\to\mathbf{Z}_p$，$H_2:\{0,1\}^*\to\mathbf{Z}_p$。

设$\text{PKGP}=\{\text{PKG}i|i=1,2,\cdots,\eta\}$是由$\eta$个私钥生成器PKG$i$组成的私钥生成器池，其中，每个PKG$i$均独立选择私钥$d_i\in{}_{\text{R}}\mathbf{Z}_p^*$，并计算其各自的公钥$Q_i=d_iQ$，如果计算的公钥重复，那么就重新选择计算。

2)系统选取 SysCho

PKGP从其池中随机选取$k(k\geqslant 2)$个PKG$i$组成私钥生成器组PKGG，为系统提供密钥生成服

务。为简化描述, 设 $k=2$, 私钥生成器组 PKGG = {PKG1,PKG2}; 则系统参数为 params = $\{l,e,P,t',f,g,K,Q,u,H,H_1,H_2,Q_1,Q_2\}$。

3)密钥生成 KeyGen

①真实签名者 id$a$随机选取包括自己在内的 $n$ 个用户组成环 $U=\{\mathrm{id}i|i=1,2,\cdots,n\}, a\in[1,n]$, $n\leqslant q$, PKG1和 PKG2为环 $U$ 中的所有成员 id$i$计算公钥 $h_i=H_1(\mathrm{id}i)$, 并生成集合 $X=\{h_i|i=1,2,\cdots,n\}$。

②PKG1和PKG2均参与安全两方计算, 将私钥 $d_1$、$d_2$输入, 计算:

$$R_i=\frac{1}{h_i+d_1+d_2}Q \tag{1}$$

PKG1和 PKG2均输出 $R_i$, 并通过安全信道将 $R_i$发送给用户 id$i$作为其私钥。

4)签名生成 Sign

①对于集合 $X=\{h_i|i=1,2,\cdots,n\}$, id$a$计算累加值为

$$V=g(f(u,X))=\prod_{i=1}^{n}(h_i+s)uP \tag{2}$$

②签名者 id$a$计算证据为

$$W=g(f(u,X'))=g(f(u,\{h_i\}_{i\neq a}))=\prod_{i\neq a}(h_i+s)uP \tag{3}$$

③签名者已构造部分加密的版权数据 CR, 使用哈希函数生成摘要 $m=H(\mathrm{CR})$, 利用 $(h_a,R_a,W)$对摘要 $m$ 进行签名, 执行如下操作:

计算 $Q_{\mathrm{pub}}=Q_1+Q_2=(d_1+d_2)Q$ (4)

选取 $r_1,r_2,r_3,r_4,k_1,k_2,k_3,k_4\in_{\mathrm{R}}\mathbf{Z}_p$, 计算:

$$U_1=r_1(h_aQ+Q_{\mathrm{pub}}) \tag{5}$$

$$U_2=r_1^{-1}R_a \tag{6}$$

$$U_3=r_2U_1+r_3K \tag{7}$$

$$S_1=r_1r_2(h_aP+P_{\mathrm{pub}}) \tag{8}$$

$$S_2=(r_1r_2)^{-1}W \tag{9}$$

$$T_1=k_1Q+k_2Q_{\mathrm{pub}}+k_3K \tag{10}$$

$$T_2=k_4U_1+k_3K \tag{11}$$

$$T_3=k_1P+k_2P_{\mathrm{pub}} \tag{12}$$

$$c=H_2(m\|V\|U_1\|U_2\|U_3\|S_1\|S_2\|T_1\|T_2\|T_3) \tag{13}$$

$$s_1=k_1+cr_1r_2h_a \tag{14}$$

$$s_2=k_2+cr_1r_2 \tag{15}$$

$$s_3=k_3+cr_3 \tag{16}$$

$$s_4=k_4+cr_2 \tag{17}$$

$$S_3=r_4Q_{\mathrm{pub}} \tag{18}$$

④输出简短可验证环签名为

$\sigma=(U_1,U_2,U_3,S_1,S_2,T_1,T_2,T_3,c,s_1,s_2,s_3,s_4,S_3,\mathrm{PKGG})$。

5)验证签名 Verify

①签名有效性验证

先通过式 (2) 计算出 $V$ 的值, 然后验证:

$$e(U_1,U_2)\stackrel{?}{=}e(Q,Q) \tag{19}$$

$$e(S_1,S_2)\stackrel{?}{=}e(P,V) \tag{20}$$

$$T_1\stackrel{?}{=}s_1Q+s_2Q_{\mathrm{pub}}+s_3K-cU_3 \tag{21}$$

$$T_2\stackrel{?}{=}s_4U_1+s_3K-cU_3 \tag{22}$$

$$T_3\stackrel{?}{=}s_1P+s_2P_{\mathrm{pub}}-cS_1 \tag{23}$$

若式(19)～式(23)均成立, 则验证者认为签名有效, 否则拒绝。

②签名者身份验证

若签名者 id$a$需证明自己的身份, 则向验证者透露秘密信息 $(Q_1,Q_2,r_4)$。验证者验证:

$$S_3\stackrel{?}{=}r_4(Q_1+Q_2) \tag{24}$$

若式(24)成立, 则验证者可确定签名者的真实身份为 id$a$; 否则, id$a$并不是真正的签名者。

### 3.3　版权数据共识算法

文献 [13] 的数据共识算法由 PBFT 算法改进而来, 建立基于行为的奖惩机制, 奖惩将通过系统中设置的信用值体现, 系统将参考节点的信用值, 利用加权随机算法来选取更可靠的主节点与共识节点提升算法效率。具体包含信用值计算、主节点选取、共识节点选取、结果广播与数据同步等算法。

本文改进的共识算法对其进行优化和改进, 包含信用值计算和加权随机算法、主节点选取、共识节点选取、结果广播与数据同步等。设置信用阈值, 仅选取超过信用阈值的节点担任主节点, 降低允许参与共识的最大节点数, 具体描述如下。

1) 信用值计算和加权随机算法

各节点的信用值初始化为 10, 该值在每轮共识后动态调整: 成功参与版权数据共识的节点增加信用值, 在共识过程中作恶或失效则扣除信用值; 系统采取奖励正常节点、允许节点偶发故障、对作恶节点进行严厉惩罚的方法。

在进行新一轮共识时, 主节点或共识节点的选取通过信用值的加权随机算法计算得出, 如式 (25) 所示, 节点担任主节点或共识节点的概率接近或等于其权重比, 进而提升系统效率。

$$p_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^{n} C_j} \tag{25}$$

式中：$C_i$为第$i$个节点的信用值，$C_i \geqslant 0$；$p_i$为第$i$个节点被选为主节点或共识节点的概率。

2）主节点选取

设置信用阈值$T_{\text{credit}} = 10$，执行算法时，系统将先按$p_i$选取一个节点，然后，判断该节点的信用值是否超过$T_{\text{credit}}$，若超过则选定该节点为主节点；否则，按本节步骤重新选择。

文献 [13] 的主节点选取算法也是通过同样的加权随机算法选取主节点，这样大概率能选到高信用值的主节点。但是本文又增加了节点是否超过$T_{\text{credit}}$的判断，进一步保证选定的主节点的可靠性；同时$T_{\text{credit}}$的值设定的并不是很高，因此，系统重新选择主节点的频次并不高。

3）共识节点选取

与文献 [13] 类似，使用加权随机算法选取部分信用值较高的节点参与共识，其余节点同步共识结果；但是，文献 [13] 设置允许实际参与共识的最大节点数为 35，本文降低系统允许实际参与共识的最大节点数，设置为 25，进一步提高共识效率。

另外，结果广播与数据同步算法与文献 [13] 相同，该算法目的是版权存证，需主节点向全网广播共识结果。

本文改进的共识算法运行流程如图 2 所示，文献 [13] 的共识算法在 Prepare 和 Commit 阶段是所有共识节点的广播，而本文简化了其广播方式，降低了广播量，节省了通信开销，具体过程描述如下。

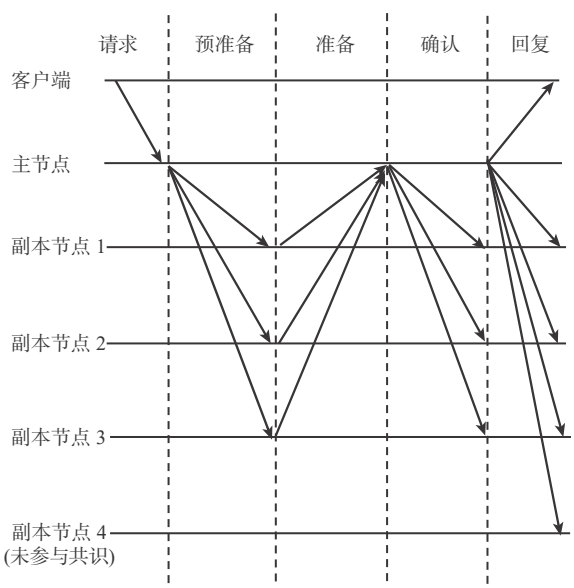



图 2 本文改进共识算法的运行流程

Fig. 2 Process of the proposed modified consensus algorithm

1）请求（Request）。客户端收到用户的版权存证请求后，验证签名，通过后发送请求消息至主节点。

2）预准备（Pre-Prepare）。主节点收到足够多的请求消息后，将这些请求打包成区块并构造预准备消息，将该消息广播至其他副本节点。

3）准备（Prepare）。副本节点收到预准备消息后验证消息合法性，通过后向主节点发送准备消息。

4）确认（Commit）。主节点收到 2$f$+1 个其他副本节点传来的准备消息后（$f$为拜占庭容错数量），若这些消息一致则认为共识达成，主节点将新区块链接至区块链上，并将确认消息广播至其他副本节点，其他副本节点将同步最新的区块链。

5）回复（Reply）。主节点向全网广播共识结果，已参与共识的节点对广播消息进行监督，其他节点则根据消息同步区块链最新状态。

## 4 安全性分析

### 4.1 正确性

签名的正确性如下：

$$e(U_1, U_2) = e(r_1(h_a Q + Q_{\text{pub}}), r_1^{-1} R_a) = e(h_a Q + Q_{\text{pub}}, R_a) = e\left((h_a + d_1 + d_2)Q, \frac{1}{h_a + d_1 + d_2} Q\right) = e(Q, Q) \tag{26}$$

$$e(S_1, S_2) = e(r_1 r_2 (h_a P + P_{\text{pub}}), (r_1 r_2)^{-1} W) = e(h_a P + P_{\text{pub}}, W) = e((h_a + s)P, (h_a + s)^{-1} V) = e(P, V) \tag{27}$$

$$s_1 Q + s_2 Q_{\text{pub}} + s_3 K - c U_3 = (k_1 + c r_1 r_2 h_a) Q + (k_2 + c r_1 r_2) Q_{\text{pub}} + (k_3 + c r_3) K - c[r_2 r_1 (h_a Q + Q_{\text{pub}}) + r_3 K] = k_1 Q + k_2 Q_{\text{pub}} + k_3 K = T_1 \tag{28}$$

$$s_4 U_1 + s_3 K - c U_3 = (k_4 + c r_2) U_1 + (k_3 + c r_3) K - c(r_2 U_1 + r_3 K) = k_4 U_1 + k_3 K = T_2 \tag{29}$$

$$s_1 P + s_2 P_{\text{pub}} - c S_1 = (k_1 + c r_1 r_2 h_a) P + (k_2 + c r_1 r_2) P_{\text{pub}} - c r_1 r_2 (h_a P + P_{\text{pub}}) = k_1 P + k_2 P_{\text{pub}} = T_3 \tag{30}$$

$$r_4 (Q_1 + Q_2) = r_4 Q_{\text{pub}} = S_3 \tag{31}$$

### 4.2 不可伪造性

**定理 2** 如果求解 $q$-SDH 问题是困难的，在随机谕言机模型下，本文的多 PKG 身份基简短可验证环签名是不可伪造的。

**证明** 具体来说，假设存在一个敌手$\mathcal{A}$至多进行$q_{H_1}$次 $H_1$ 询问、$q_R$次私钥询问、$q_{U_1}$次 $U_1$询问、$q_{S_1}$次$S_1$询问、$q_{H_2}$次 $H_2$ 询问、$q_S$次签名询问，以优势 $\varepsilon$ 打破简短可验证环签名机制，那么一定存在模拟器$\mathcal{B}$以不可忽略的优势解决一个 $q$-SDH 问题的实例。

为不失一般性, 给出 $q$-SDH 问题的实例 $(P,zP,\cdots,z^qP)$, $z\in_{\mathrm{R}}z_p^*$, $\mathcal{B}$计算 $\left(h^*,\dfrac{1}{z+h^*}P\right)$, $h^*\in\mathbf{Z}_p$。

敌手$\mathcal{A}$和模拟器$\mathcal{B}$进行如下游戏。

1) 系统建立。对安全参数 $l$, 模拟器$\mathcal{B}$运行 Init 及 SysCho 生成系统参数 params 发送至$\mathcal{A}$, 并秘密保存$d_1$和$d_2$。

2) 询问阶段。$\mathcal{A}$适应性地进行如下询问。

①$H_1$询问(至多进行$q_{H_1}$次)。模拟器$\mathcal{B}$维护一个列表$L_1$, 初始为空, $\mathcal{B}$随机选择 $j\in\mathbf{Z}_p(j<q_{H_1})$、id$^*$、$h^*$。当$\mathcal{A}$询问id$i$时, 模拟器先在列表$L_1$中查找id$i$, 若id$i$不在列表中, 则模拟器选择$h_i\in_{\mathrm{R}}\mathbf{Z}_p$应答, 并将(id$i$,$h_i$)存入列表中; 若id$i$在列表中, 则模拟器返回对应的结果; 对于第 $j$ 次询问, 若id$j$ = id$^*$, 则模拟器返回结果$h^*$。

②私钥询问(至多进行$q_R$次)。当$\mathcal{A}$询问id$i$时, 模拟器检查列表$L_2$, 若id$i$在列表中, 则模拟器返回对应的结果; 否则, 模拟器通过查询$L_1$找到对应的$h_i$, 若存在$h_i=h^*$, 则模拟器失败; 否则, 计算私钥 $R_i=\dfrac{1}{h_i+d_1+d_2}Q$, 并将(id$i$,$R_i$)加入列表$L_2$中, 并返回$R_i$的值。

③$U_1$询问(至多进行$q_{U_1}$次)。当$\mathcal{A}$以id$i$进行询问时, 模拟器检查列表$L_3$, 若id$i$在列表中, 则模拟器返回对应的结果; 否则, 通过查询$L_1$找到对应的$h_i$, 若存在$h_i=h^*$, 则模拟器失败; 否则, 随机选择 $r_1\in\mathbf{Z}_p$, 计算$U_1$的值, 将(id$i$,$r_1$,$U_1$)加入$L_3$中, 并返回$U_1$的值。

④$S_1$询问(至多进行$q_{S_1}$次)。当$\mathcal{A}$以id$i$进行询问时, 模拟器检查列表$L_4$, 若id$i$在列表中, 则模拟器返回对应的结果; 否则, 通过查询$L_1$找到对应的$h_i$, 若存在$h_i=h^*$, 则模拟器失败; 否则, 通过查询$L_3$找到对应的$r_1$, 随机选择 $r_2\in\mathbf{Z}_p$, 计算 $S_1$的值, 将(id$i$,$r_2$,$S_1$)加入$L_4$中, 并返回$S_1$的值。

⑤$H_2$询问(至多进行$q_{H_2}$次)。当$\mathcal{A}$以id$i\in U$及消息 $m$ 进行询问时, 模拟器检查列表 $L_5$, 若id$i\in U$及 $m$ 在列表中, 则模拟器返回对应的结果; 否则, 通过查询$H_1$谕言机返回$X$, 模拟器计算 $V$ 的值, 通过查询$L_2$找到对应的$R_i$, 通过查询$L_3$和$L_4$找到对应的$r_1,U_1,r_2,S_1$, 然后, 随机选择$r_3\in\mathbf{Z}_p$, 计算出$U_2,U_3,S_2,T_1,T_2,T_3$的值, 随机选择$c\in\mathbf{Z}_p$, 令$c=H_2(m\|V\|U_1\|U_2\|U_3\|S_1\|S_2\|T_1\|T_2\|T_3)$, 将 (id$i$, $m,V,r_1,r_2,r_3,U_1,U_2,U_3,S_1,S_2,T_1,T_2,T_3,c$)加入列表$L_5$中, 并返回 $c$ 的值。

⑥签名询问(至多进行$q_S$次)。$\mathcal{A}$在环$U=\{\mathrm{id}i|i=1,2,\cdots,n\}(n\leqslant q_S)$上询问id$i\in U$对消息 $m$ 的签名, $\mathcal{B}$通过$H_1$谕言机返回$X=\{h_i|i=1,2,\cdots,n\}$。若存在$h_i=h^*$, 则$\mathcal{B}$失败; 否则, $\mathcal{B}$通过动态累加器计算累加值$V$, 并通过查询列表$L_5$找到对应的$r_1,r_2,r_3,U_1,U_2,U_3,S_1,S_2,T_1,T_2,T_3,c$, 然后随机选择 $r_4,k_1,k_2,k_3,k_4\in\mathbf{Z}_p$, 计算出$s_1,s_2,s_3,s_4,S_3$的值, 最后, 返回对消息 $m$ 的签名$(U_1,U_2,U_3,S_1,S_2,T_1,T_2,T_3,c,s_1,s_2,s_3,s_4,S_3,\mathrm{PKGG})$。

3) 伪造。经过与模拟器的交互后, 敌手$\mathcal{A}$伪造出id$^*\in U^*$对消息$m^*$在环$U^*$上的一个签名$(U_1',U_2',U_3',S_1',S_2',T_1',T_2',T_3',c',s_1',s_2',s_3',s_4',S_3',\mathrm{PKGG})$。

根据分叉引理[25], 重放一个随机带, 选择不同的随机值作为$H_2$的值$c''$, $\mathcal{A}$可以伪造出id$^*\in U^*$对消息$m^*$的另一个签名$(U_1',U_2',U_3',S_1',S_2',T_1',T_2',T_3',c'',s_1'',s_2'',s_3'',s_4'',S_3',\mathrm{PKGG})$。模拟器$\mathcal{B}$可根据签名机制, 并利用这 2 个伪造的签名计算如下:

有$\begin{cases}s_2'=k_2'+c'r_1'r_2'\\ s_2''=k_2'+c''r_1'r_2'\end{cases}$, 上、下两式相减, 可得

$$r_1'r_2'=\frac{s_2'-s_2''}{c'-c''}\tag{32}$$

将式 (32) 代入式 (9), 可得

$$W^*=\frac{s_2'-s_2''}{c'-c''}S_2'\tag{33}$$

有$\begin{cases}s_1'=k_1'+c'r_1'r_2'h_a^*\\ s_1''=k_1'+c''r_1'r_2'h_a^*\end{cases}$, 上、下两式相减, 可得

$$h_a^*=\frac{s_1'-s_1''}{s_2'-s_2''}\tag{34}$$

有$\begin{cases}s_4'=k_4'+c'r_2'\\ s_4''=k_4'+c''r_2'\end{cases}$, 上、下两式相减, 可得

$$r_2'=\frac{s_4'-s_4''}{c'-c''}\tag{35}$$

将式 (29) 代入式 (32), 可得

$$r_1'=\frac{s_2'-s_2''}{s_4'-s_4''}\tag{36}$$

将式 (36) 代入式 (6), 可得

$$R_a^*=\frac{s_2'-s_2''}{s_4'-s_4''}U_2'\tag{37}$$

由此, 模拟器$\mathcal{B}$可得到一组新的$(h_a^*,R_a^*,W^*)$。对于环$U^*=\{\mathrm{id}i^*|i=1,2,\cdots,n\}$, $\mathcal{B}$可通过 $H_1$ 谕言机得到集合$X^*=\{h_i^*|i=1,2,\cdots,n\}$, $q_{H_1}\geqslant n$, 若$h_a^*\notin X^*$或$h_a^*\neq h^*$, 模拟器失败; 否则, $h_a^*\in X^*$且$h_a^*=h^*$, 根据动态累加器$A_{\mathrm{D}}$的性质, 有

$$(h^*+z)W^*=\prod_{i=1}^{n}(h_i^*+z)uP\tag{38}$$

令 $f(z)=\prod_{i=1}^{n}(h_i^*+z)$, 将其转换为 $f(z)=\sum_{i=0}^{n}\alpha_iz^i$, $\alpha_0\neq0$。由式 (38) 可得$(h^*+z)W^*=uf(z)P$, 即

$$\frac{1}{u}W^*=\frac{f(z)}{h^*+z}P\tag{39}$$

将 $f(z)$再表示为 $f(z)=b(z)(z+h^*)+\beta$，其中，$b(z)=\sum_{i=0}^{n-1}b_iz^i$，$\beta\in\mathbf{Z}_p^*$。则可得

$$\frac{f(z)}{h^*+z}=b(z)+\frac{\beta}{h^*+z} \tag{40}$$

将式(40)代入式(39)可得$\frac{1}{u}W^*=b(z)P+\frac{\beta}{h^*+z}P$，进而可得

$$\frac{1}{z+h^*}P=\frac{1}{u\beta}W^*-\frac{b(z)}{\beta}P \tag{41}$$

已知$(P,zP,\cdots,z^qP)$，则可求得$b(z)P$，代入式(41)可得到$q$-SDH问题的一个解$\left(h^*,\frac{1}{u\beta}W^*-\frac{b(z)}{\beta}P\right)$。模拟器$\mathcal{B}$能成功解决$q$-SDH问题由以下事件决定。

事件$E_1$。在私钥询问中，模拟器$\mathcal{B}$失败。

事件$E_2$。在$U_1$询问中，模拟器$\mathcal{B}$失败。

事件$E_3$。在$S_1$询问中，模拟器$\mathcal{B}$失败。

事件$E_4$。攻击游戏中，模拟器$\mathcal{B}$未成功提供签名服务。

事件$E_5$。游戏结束后，敌手$\mathcal{A}$伪造的签名未通过验证。

事件$E_6$。游戏结束后，模拟器$\mathcal{B}$利用$\mathcal{A}$伪造的签名所求得的$h_a\notin X$或$h_a\neq h^*$。

由于事件$\bar{E}_2$或$\bar{E}_3$的发生，与事件$\bar{E}_1$相互独立，其中，$\bar{E}$表示其对立事件或逆事件，则$\mathcal{B}$解决$q$-SDH问题的优势为

$$\begin{aligned}A_{\mathcal{B}}^{q\text{-SDH}}&=P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4\bar{E}_5\bar{E}_6)=\\&P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_6|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4\bar{E}_5)\cdot P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_5|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4)\cdot\\&P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_4|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3)\cdot P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3)=\\&P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_6|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4\bar{E}_5)\cdot P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_5|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4)\cdot\\&P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_4|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3)\cdot P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_3|\bar{E}_2)\cdot P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_2)\cdot P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_1)\end{aligned} \tag{42}$$

分析式(42)中的各个概率值如下：

$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_1)$。事件$\bar{E}_1$发生(即$\mathcal{B}$向$\mathcal{A}$提供$q_R$次私钥查询)的概率为

$$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_1)\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}}\right)\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-1}\right)\cdots\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_R+1}\right)\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_R+1}\right)^{q_R} \tag{43}$$

$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_2)$。事件$\bar{E}_2$发生(即$\mathcal{B}$向$\mathcal{A}$提供$q_{U_1}$次$U_1$查询)的概率为

$$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_2)\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}}\right)\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-1}\right)\cdots\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_{U_1}+1}\right)\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_{U_1}+1}\right)^{q_{U_1}} \tag{44}$$

$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_3|\bar{E}_2)$。事件$\bar{E}_2$发生的情况下，$\bar{E}_3$发生(即$\mathcal{B}$向$\mathcal{A}$提供$q_{S_1}$次$S_1$查询)的概率为

$$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_3|\bar{E}_2)\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}}\right)\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-1}\right)\cdots\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_{S_1}+1}\right)\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_{S_1}+1}\right)^{q_{S_1}} \tag{45}$$

$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_4|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3)$。在$\bar{E}_1$、$\bar{E}_2$、$\bar{E}_3$同时发生的情况下，事件$\bar{E}_4$发生(即$\mathcal{B}$向$\mathcal{A}$提供$q_S$次签名服务)的概率为

$$P_{\mathrm{r}}\left(\bar{E}_4|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\right)\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}}\right)\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-1}\right)\cdots\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_S+1}\right)\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_S+1}\right)^{q_S} \tag{46}$$

$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_5|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4)$。在$\bar{E}_1$、$\bar{E}_2$、$\bar{E}_3$、$\bar{E}_4$同时发生的情况下事件$\bar{E}_5$发生，即敌手$\mathcal{A}$伪造的签名均通过验证，根据分叉引理[25]及文献[26]的推导可知，若$\mathcal{A}$以优势$\varepsilon$输出一个有效的签名，则$\mathcal{A}$能以$(1-\mathrm{e}^{-1})\frac{\varepsilon}{q_{H_2}}$的概率再输出另一个有效的签名(即共输出2个有效的签名：$(U_1',U_2',U_3',S_1',S_2',T_1',T_2',T_3',c',s_1',s_2',s_3',s_4',S_3',\mathrm{PKGG})$和$(U_1',U_2',U_3',S_1',S_2',T_1',T_2',T_3',c'',s_1'',s_2'',s_3'',s_4'',S_3',\mathrm{PKGG})$)，则有

$$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_5|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4)\geqslant(1-\mathrm{e}^{-1})\frac{\varepsilon}{q_{H_2}} \tag{47}$$

$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_6|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4\bar{E}_5)$。即事件$\bar{E}_1$、$\bar{E}_2$、$\bar{E}_3$、$\bar{E}_4$、$\bar{E}_5$同时发生的情况下，敌手$\mathcal{A}$伪造的签名可被$\mathcal{B}$用于解决$q$-SDH问题。显然$h_a=h^*$的概率至少为$\frac{1}{q_{H_1}}$，$h_a\in X$的概率至少为$\frac{n}{q_{H_1}}$，则

$$P_{\mathrm{r}}(\bar{E}_6|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3\bar{E}_4\bar{E}_5)\geqslant\frac{n}{q_{H_1}^2} \tag{48}$$

将式(40)～式(42)代入式(36)，可得

$$A_{\mathcal{B}}^{q\text{-SDH}}\geqslant\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_R+1}\right)^{q_R}\cdot\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_{U_1}+1}\right)^{q_{U_1}}\cdot\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_{S_1}+1}\right)^{q_{S_1}}\cdot\left(1-\frac{1}{q_{H_1}-q_S+1}\right)^{q_S}\cdot\frac{n\varepsilon\left(1-\mathrm{e}^{-1}\right)}{q_{H_1}^2q_{H_2}}$$

**证毕**

### 4.3 匿名性

**定理3** 本文签名方案具备匿名性。

**证明** 敌手$\mathcal{A}$将与挑战者$\mathcal{B}$进行如下匿名性游戏。

1)系统建立。$\mathcal{B}$运行系统得到系统参数params，并将其发送给敌手$\mathcal{A}$。

2)询问阶段。敌手$\mathcal{A}$可以进行多项式有界次询问。

3)挑战阶段。敌手$\mathcal{A}$将消息$m$，以及环$U=\{\mathrm{id}_i|i=1,2,\cdots,n\}(n\leqslant q)$，发送给挑战者。挑战者随机挑选$\pi\in\{0,1,\cdots,n\}$计算签名$\sigma_\pi=(U_1,U_2,U_3,S_1,S_2,T_1,T_2,T_3,c,s_1,s_2,s_3,s_4,S_3,\mathrm{PKGG})$，然后，将$\sigma_\pi$发送给敌手$\mathcal{A}$。

4)猜测阶段。敌手$\mathcal{A}$输出猜测$\pi'\in\{0,1,\cdots,n\}$。

对于挑战者生成的合法签名$\sigma_\pi=(U_1,U_2,U_3,S_1,S_2,T_1,T_2,T_3,c,s_1,s_2,s_3,s_4,S_3,\mathrm{PKGG})$，首先，分析$U_1$、$U_2$、$U_3$、$S_1$、$S_2$、$T_1$、$T_2$、$T_3$的产生过程，由

于 $r_1$、$r_2$、$r_3$、$r_4$、$k_1$、$k_2$、$k_3$、$k_4$随机选取于$\mathbf{Z}_p$中, 所以$U_1$、$U_2$、$U_3$、$S_1$、$S_2$、$T_1$、$T_2$、$T_3$均随机分布于$G_1$中。又由于$c=H_2(m\|V\|U_1\|U_2\|U_3\|S_1\|S_2\|T_1\|T_2\|T_3)$, 所以 $c$ 随机分布于$\mathbf{Z}_p$中。

其次, 分析 $s_1$、$s_2$、$s_3$、$s_4$的生成过程, 由于 $r_1$、$r_2$、$r_3$、$r_4$、$k_1$、$k_2$、$k_3$、$k_4$、$c$的随机性, $s_1$、$s_2$、$s_3$、$s_4$均随机分布于$\mathbf{Z}_p$中。$S_3=r_4Q_{\text{pub}}$, 由 $r_4$的随机性可知, $S_3$也随机分布于$G_1$中。另外, PKGG 为从 PKGP 中随机选取的, 在每次签名中不变, 对所有环成员都是一样的。

综上分析可知, 签名$\sigma_\pi=(U_1,U_2,U_3,S_1,S_2,T_1,T_2,T_3,c,s_1,s_2,s_3,s_4,S_3,\text{PKGG})$中的参数均具有随机性, 对于敌手$\mathcal{A}$, 由签名信息猜测出$\pi'=\pi$的概率仅为$\frac{1}{n}$, $\mathcal{A}$赢得匿名性游戏的优势$A_{\mathcal{A}}^{\text{Ano}}=\left|P_{\text{r}}(\pi'=\pi)-\frac{1}{n}\right|$是可忽略的, 因此, 本文签名方案具备匿名性。

**证毕**

## 5　性能分析

文献 [8] 基于改进的身份基环签名, 文献 [12] 基于身份基门限环签名, 文献 [13] 和文献 [14] 均基于身份基可验证环签名, 而本文基于身份基简短可验证环签名, 因此, 对这 5 个方案就签名效率及签名大小进行对比分析。

为方便对比, 本文统一使用 $n$ 表示环成员的个数, 其他文献中的有关符号均统一使用本文中对应的符号表示; 使用 $T_{\text{M}}$ 表示群上的点乘运算时间, $T_{\text{A}}$ 表示群上的加法运算时间, $T_{\text{B}}$ 表示双线性对运算时间, $T_{\text{H}}$ 表示各类哈希运算的时间, $T_{\text{D}}$ 表示 AES 解密运算的时间。由于这些运算的时间开销较多, 本文主要用其来衡量签名的效率, 而忽略其他时间开销较少的运算。用$|\Omega|$表示群或集合$\Omega$中元素的比特长度, 各签名方案在签名生成阶段、签名验证阶段的时间开销及签名大小的对比如表 1 所示。

在表 1 中, $k(k\geqslant 2)$表示私钥生成器的个数, $t$ 表示门限值。在签名生成及签名验证阶段, 随着 $n$ 的增大, 文献 [8, 12-14] 的签名方案时间开销也随之增大, 而本文方案的时间开销保持不变, 因此, 本文方案的签名计算效率最高; 同时, 文献 [8, 12-14] 的签名方案的签名大小随 $n$ 的增大而增大, 而本文方案的签名大小保持不变, 因此, 本文方案的签名占用空间最少。综上可知, 本文的签名方案性能最优。

**表 1　各签名方案性能对比**

**Table 1　Performance comparison of each signature schemes**

| 方案 | 签名生成 | 签名验证 | 签名大小 |
|---|---|---|---|
| 文献[8] | $(3n-1)T_{\text{M}}+(4n-3)T_{\text{A}}+(3n-1)T_{\text{H}}$ | $(2n+2)T_{\text{M}}+(2n+1)T_{\text{A}}+2nT_{\text{H}}$ | $\|G_1\|+(n+1)\|\mathbf{Z}_p\|$ |
| 文献[12] | $(n+2t)T_{\text{M}}+(2n-1)T_{\text{A}}+T_{\text{H}}$ | $nT_{\text{M}}+2nT_{\text{A}}+2T_{\text{B}}+T_{\text{H}}$ | $n\|U\|+(n+2)\|G_1\|+\|\mathbf{Z}_p^*\|+\|\mathbf{Z}_p[x]\|$ |
| 文献[13] | $(2n+1)T_{\text{M}}+(2n+1)T_{\text{A}}+(n+1)T_{\text{H}}$ | $nT_{\text{M}}+(2n-1)T_{\text{A}}+2T_{\text{B}}+T_{\text{D}}$ | $(n+1)\|G_1\|+2\|\text{PKGP}\|$ |
| 文献[14] | $(2n+1)T_{\text{M}}+3(n-1)T_{\text{A}}+(n+1)T_{\text{H}}$ | $nT_{\text{M}}+(2n-1)T_{\text{A}}+3T_{\text{B}}+T_{\text{H}}$ | $(n+1)\|G_1\|+k\|\text{PKGP}\|$ |
| 本文方案 | $18T_{\text{M}}+8T_{\text{A}}+2T_{\text{H}}$ | $9T_{\text{M}}+8T_{\text{A}}+4T_{\text{B}}$ | $9\|G_1\|+5\|\mathbf{Z}_p\|+2\|\text{PKGP}\|$ |

## 6　实验评估

为测试本文协议的性能, 本文进行仿真实验, 分别对共识算法、系统容错性、签名方案进行评估分析, 具体实验环境搭建: 用一台笔记本(配置为: 2.8GHz 双核英特尔酷睿 i5 的 CPU、8 GB 的内存、win10 的操作系统)作为签名者进行环签名, 6 台虚拟机(配置均为: 2vCPU、8 GB 内存、512 GB 存储)组成 PKGP, 一台虚拟机(配置为: 2vCPU、8 GB 内存、4 TB 存储)充当 IPFS, 在一台虚拟机(配置为: 6vCPU, 16 GB 内存、1 TB 存储)上部署区块链, 按图 1 进行连接。所有实验在相同条件下均重复 10 次, 取其平均值作为最终实验结果。

### 6.1　共识算法

本文改进的共识算法、文献 [13] 算法及文献 [23] 算法均是对 PBFT 算法的改进, 为测试本文改进的共识算法的性能, 在 HyperLedger Fabric 源码基础上进行修改和调试, 与 PBFT 算法、文献 [13] 算法及文献 [23] 算法进行对比, 因共识时延、吞吐量、通信开销是衡量共识算法效率的重要指标, 所以仿真实验围绕着这 3 个指标展开对比分析。

共识时延是指从事务开始到事务结束所经历的时间, 其是共识算法运行速度的一个重要指标。图 3 为用 Python 画出的各共识算法时延对比。

由图 3 可知, PBFT 算法和文献 [23] 算法的共识时延随节点数的增大一直在增大, 但文献 [23] 算法的共识时延增幅较小, 逐渐少于 PBFT 算法。随着节点数从 5 增至 35, 文献 [13] 算法的共识时延随之增大, 之后维持在 72.9 ms 左右波动。随着节点数从 5 增至 25, 本文改进的共识算法的共识时延

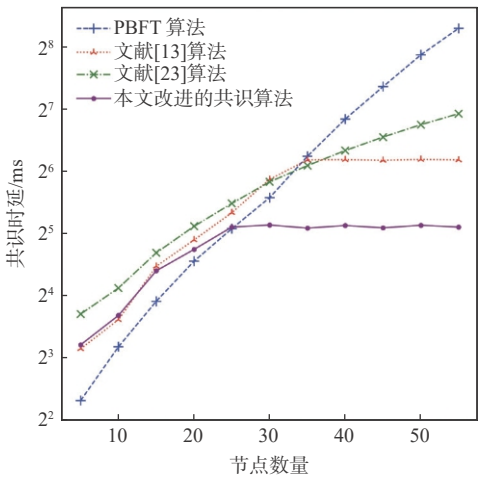



图 3 各算法共识时延对比

Fig. 3 Comparison of consensus delay of each algorithm

随之增大，之后维持在 34.5 ms 左右波动，因此，本文改进的共识算法性能最优。

在节点数目达到系统允许参与共识的最大节点数前，本文改进的共识算法和文献 [13] 算法的时延仍会随着节点数量的增多而增大，并大于 PBFT 算法，这是因为本文改进的共识算法和文献 [13] 算法中存在信用值计算与节点选取过程，会比 PBFT 算法多耗费一点时间。而文献 [23] 算法也采取了节点信用值分级协议，效果与本文的信用值计算和加权随机算法及主节点选取算法类似，所以在初始阶段文献 [23] 算法的共识时延同样也高于 PBFT 算法；相较于其他共识算法，文献 [23] 算法又增加了 ring-consensus 这一步骤，因此，在初始阶段，文献 [23] 算法比其他算法都耗时；但是随着节点的增多，本文改进的共识算法、文献 [13] 算法和文献 [23] 算法的共识逐步优化，时延增速小于 PBFT 算法。

本文改进的共识算法和文献 [13] 算法采取了类似的共识节点选取算法（即使用加权随机算法选取部分信用值较高的节点达成共识，其余节点同步共识结果，设定系统允许参与共识的最大节点数），但本文系统允许参与共识的最大节点数为 25，且本文采取了更优的主节点选取算法，而文献 [13] 算法允许参与共识的最大节点数为 35，当节点数目增至系统允许参与共识的最大节点数之后，本文的响应时间较早地维持在某个值附近上下波动。然而文献 [23] 算法没有设定允许参与共识的最大节点数，所以文献 [23] 算法的共识时延一直在增大。

吞吐量为系统在单位时间内处理的区块交易数量，其体现了系统能承受的负载或处理区块交易的能力。图 4 为各共识算法的吞吐量对比，在不同的节点数时各算法分别运行 50 min。

由图 4 可知，随着节点的增多，各算法的吞吐量均在降低，本文改进的共识算法、文献 [13] 算法和文献 [23] 算法的吞吐量均高于 PBFT 算法；而本文改进的共识算法的吞吐量又略高于文献 [13] 算法，文献 [13] 算法的吞吐量高于文献 [23] 算法的吞吐量；当节点数增至 25 后，本文改进的共识算法的吞吐量维持在 1 391 左右，当节点数增至 35 后，文献 [13] 算法的吞吐量维持在 1 045 左右。

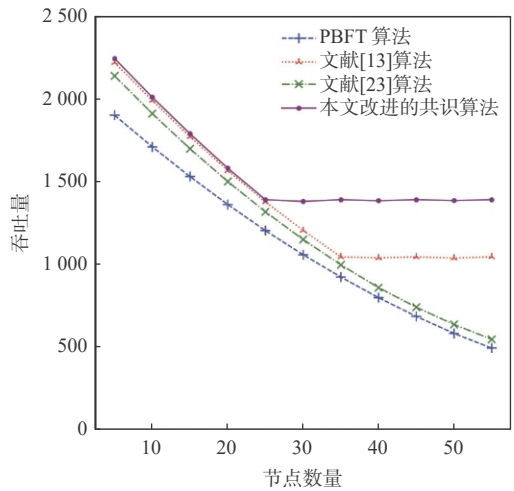



图 4 各算法吞吐量对比

Fig. 4 Comparison of TPS of each algorithm

本文改进的共识算法、文献 [13] 算法和文献 [23] 算法均是对 PBFT 算法的优化改进，主要优化改进在于信用值计算及节点选取，所以在运行一段时间内处理的区块交易数均高于 PBFT 算法。本文改进的共识算法的吞吐量又略高于文献 [13] 算法的吞吐量，是因为本文改进的共识算法优化了文献 [13] 算法的主节点选取算法，为主节点设定信用阈值，在系统共识过程中更稳定，更不易触发视图切换协议；文献 [13] 算法的吞吐量高于文献 [23] 算法的吞吐量，是因为文献 [23] 算法多了 ring-consensus 这一步骤，共识过程更耗时，在同样的时间内文献 [23] 算法处理的区块交易数要小于文献 [13] 算法。当节点数分别增至 25 及 35 后，本文改进的共识算法和文献 [13] 算法的吞吐量不再降低，维持不变，是因为本文改进的共识算法和文献 [13] 算法分别设定系统允许实际参与共识的最大节点数为 25 及 35，当实际参与共识的节点数不变时，同样时间内处理的区块交易数也是不变的。

通信开销也是衡量共识算法效率的一个重要指标，本节将对各算法的通信开销进行分析。因为各算法的 Request 阶段和 Reply 阶段的通信次数都一样，所以本节仅考虑除 Request 和 Reply 之外的其他阶段。PBFT 算法的总通信次数（除 Request 和 Reply 之外的其他阶段通信次数之和）为 $2N(N-1)$

($N$ 为网络中所有节点的个数), 其通信复杂度为 $O(n^2)$。文献 [23] 算法的总通信次数为 $3N-n_\alpha-f-2$, 其中, $n_\alpha$ 为参与共识的 $\alpha$ 类节点(即主节点候选节点)的个数, 其通信复杂度为 $O(n)$。文献 [13] 算法的总通信次数为 $2N_c(N_c-1)$, 其中, $N_c$ 为网络中实际参与共识的节点个数, $N>N_c>n_\alpha$, 文献 [13] 算法的通信复杂度 $O(n^2)$。本文改进的共识算法的总通信次数为 $3(N_c-1)$, 通信复杂度为 $O(n)$。从以上分析可以看出, 相对于其他共识算法, 本文改进的共识算法是比较节省通信开销的。

下面再对这 4 个共识算法的通信量进行仿真实验, 并采集数据, 图 5 为各算法的通信开销对比。

由图 5 可知, 随着节点数的增大, 各算法的共识通信次数都在增大, 本文改进的共识算法和文献 [23] 算法的通信次数较少, 但当节点数增大到 25 以后, 本文改进的共识算法的共识通信次数维持在 92 左右; PBFT 算法和文献 [13] 算法的共识通信次数较大, 但在节点数增大到 35 以后, 文献 [13] 算法的共识通信次数维持在 2 463 左右。具体原因见上段的分析, 另外还有一个主要原因是本文改进的共识算法和文献 [13] 算法分别设定系统允许实际参与共识的最大节点数为 25 及 35, 所以当本文改进的共识算法和文献 [13] 算法的节点数增大到系统允许实际参与共识的最大节点数后, 实际参与共识的节点数保持不变, 共识通信次数也保持不变。

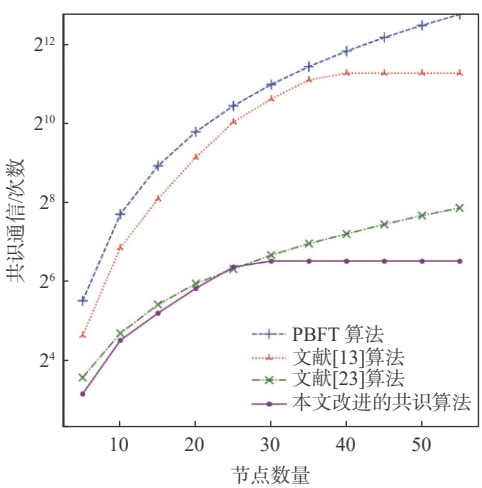



图 5　各算法通信开销对比

Fig. 5　Comparison of communication overhead of each algorithm

## 6.2　系统容错性

对系统的容错性进行测试, 模拟 PKG 节点意外断开网络的情况。私钥生成器池由 6 个独立的 PKG 组成, 每次随机选取 2 个 PKG 配合生成环签名, 向网络中发送总计 1 500 笔存证请求, 在 $Y$ 时刻(第 750 笔存证发送)随机断开网络中几个 PKG 节点的网络, 对最终成功存证数进行统计, 实验结果如图 6 所示, 图 6 为用 Python 画出的各系统容错性对比。

由图 6 可知, 文献 [23] 和文献 [12] 这类单 PKG 节点模式不适用于去信任化环境, 该模式中一旦 PKG 节点被攻破或意外失效, 整个系统就无法再正常运作; 而本文及文献 [13] 的多 PKG 模式, 即使有部分 PKG 节点失效, 只要剩余可用 PKG 数量大于等于系统选择数时, 就能保证服务的正常提供。因此, 本文系统和文献 [13] 系统具有良好的容错性。

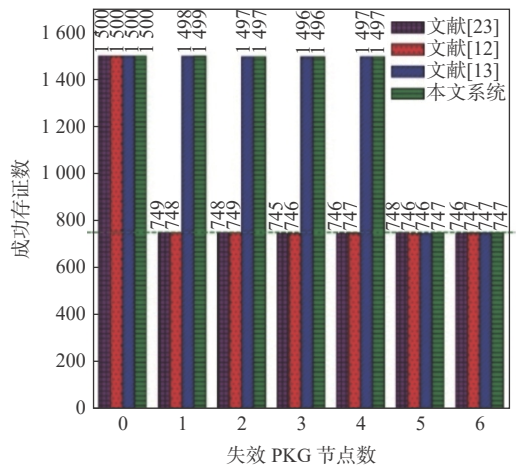



图 6　各系统容错性对比

Fig. 6　Comparison of fault tolerance of each system

## 6.3　签名方案

本节对签名方案进行仿真实验, 分别对签名生成时间、签名验证时间、签名大小进行统计对比。

图 7 为各方案的签名生成时间对比, 从图中可以看出, 随着环成员数从 10 增加到 50, 文献 [8, 12-14] 的签名方案的签名生成时间均在增大, 文献 [13-14] 签名方案的时间较为接近, 而本文签名方案生成时间最小且一直保持在 83.68 ms 左右。

图 8 为各方案的签名验证时间对比, 由图可

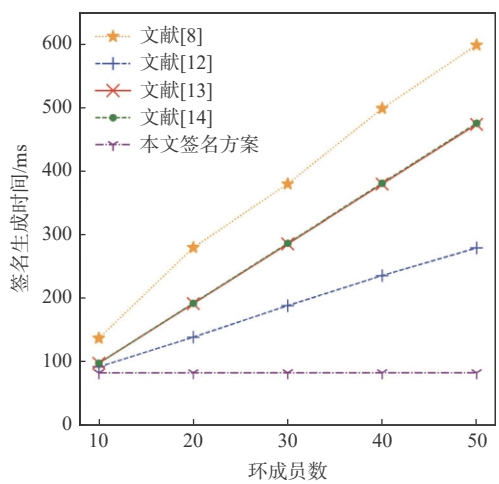



图 7　签名生成时间对比

Fig. 7　Comparison of signature generation time

知，随着环成员数从10增加到50，文献[8, 12-14]的签名验证时间均在增大，其中，文献[13-14]的时间非常接近(线条几乎重合)，文献[12]的时间稍低于文献[13-14]的时间且比较接近，而本文签名方案的签名生成时间最小且一直保持在53.59 ms左右。

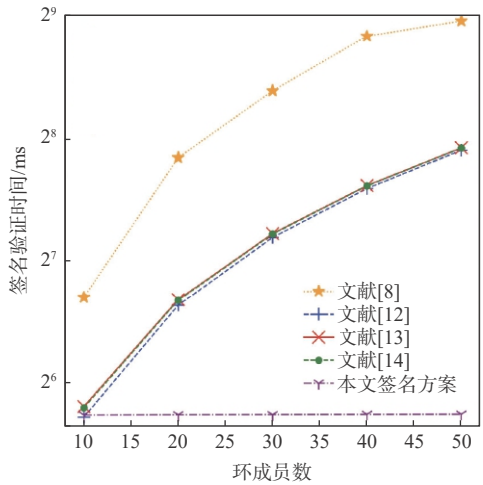



图8 签名验证时间对比

Fig. 8 Comparison of signature verification time

图9为各方案的签名大小对比，虽然文献[8]签名方案初始签名大小比较小，但随着环成员数从10增加到50，文献[8, 12-14]签名方案的签名大小均在增大，其中，文献[13]和文献[14]的签名方案的时间非常接近，文献[12]签名方案的签名大小比较大且增长较快；本文签名方案的签名大小虽然初始值不是最小的，但一直保持在738 Byte，随着环成员数增多到20以后，本文签名方案的签名最小，最节省空间。

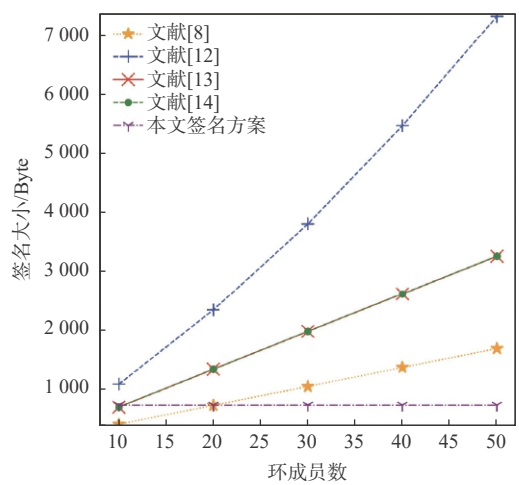



图9 签名大小对比

Fig. 9 Comparison of signature size

## 7 结 论

1）本文基于$q$-SDH问题假设，构造了多私钥生成器的身份基简短可验证环签名方案，该方案具备不可伪造性、匿名性、可验证性。

2）本文为主节点选取设置信用阈值，降低系统允许参与共识的最大节点数，改进了已有的联盟链共识算法。

3）本文辅以IPFS、AES、智能合约等技术，提出一种新的区块链版权存证协议。该协议节省了签名运行时间和存储空间，提高了共识效率和容错性，可更有效地解决数字版权纠纷，提高对数字版权的保护力度，推进区块链版权应用的商业化进程，推动中国数字产业的繁荣发展。

下一步将致力于研究后量子时代适用于区块链版权存证的密码算法，为数字经济的发展保驾护航。

## 参考文献（References）

[1] YANG D, LONG C N, XU H, et al. A review on scalability of blockchain[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Blockchain Technology. New York: ACM, 2020: 1-6.

[2] TANG F, PANG J J, CHENG K F, et al. Multiauthority traceable ring signature scheme for smart grid based on blockchain [J/OL]. Wireless Communications and Mobile Computing. (2021-04-10)[2022-11-28]. https://doi.org/10.1155/2021/ 5566430.

[3] RIVEST R L, SHAMIR A, TAUMAN Y. How to leak a secret [C]// Proceedings of the 7th International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security: Advances in Cryptology. Berlin: Springer, 2001: 552-565.

[4] 蔡晓晴, 邓尧, 张亮, 等. 区块链原理及其核心技术[J]. 计算机学报, 2021, 44(1): 84-131.
CAI X Q , DENG Y , ZHANG L , et al. The principle and core technology of blockchain [J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(1): 84-131(in Chinese).

[5] 任艳丽, 徐丹婷, 张新鹏, 等. 基于门限环签名的可删除区块链[J]. 通信学报, 2019, 40(4): 71-82.
REN Y L, XU D T, ZHANG X P, et al. Deletable blockchain based on threshold ring signature[J]. Journal on Communications, 2019, 40(4): 71-82(in Chinese).

[6] LV J Q, WANG X M. Verifiable ring signature[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Distributed Multimedia Systems. New York: Mathematics and Computer Science, 2003: 32-44.

[7] ZHANG F G, KIM K. ID-based blind signature and ring signature from pairings[C]//Proceedings of the Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2002: 533-547.

[8] WANG W S, LI X, QIU X Q, et al. A privacy preserving framework for federated learning in smart healthcare systems[J]. Information Processing & Management, 2023, 60(1): 103167.

[9] GENG H T, CUI X C. An anonymous buyer-seller watermarking protocol based on convertible ring signature[J]. Journal of Qufu Normal University, 2017, 43(2): 52-59.

[10] LI F Q, LIU K M, WU H Y, et al. MaSRChain: A trusted manuscript submission and review system based on blockchain[C]//Proceedings of the Lecture Notes in Computer Sci-

ence. Berlin: Springer, 2020: 18-26.

[11] 林孟晨, 冯勇, 付晓东. 一种基于联盟区块链的电子医疗记录安全共享模型[J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(10): 2161-2166.
LIN M C, FENG Y, FU X D. SMCB: A safe sharing model for electronic medical records based on consortium blockchain[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2021, 42(10): 2161-2166(in Chinese).

[12] 周艺华, 吕竹青, 杨宇光, 等. 基于区块链技术的数据存证管理系统[J]. 信息网络安全, 2019(8): 8-14.
ZHOU Y H, LYU Z Q, YANG Y G, et al. Data deposit management system based on blockchain technology[J]. Netinfo Security, 2019(8): 8-14(in Chinese).

[13] 翟社平, 陈思吉, 汪一景. 基于区块链的数字版权存证系统模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(19): 13-21.
ZHAI S P, CHEN S J, WANG Y J. Research on digital copyright storage system model based on blockchain[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(19): 13-21(in Chinese).

[14] 陈思吉, 翟社平, 汪一景. 一种基于环签名的区块链隐私保护算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(5): 86-93.
CHEN S J, ZHAI S P, WANG Y J. Blockchain privacy protection algorithm based on ring signature[J]. Journal of Xidian University, 2020, 47(5): 86-93(in Chinese).

[15] 王玲玲, 张国印, 马春光. 适用于电子现金协议的简短关联环签名方案[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(1): 102-106.
WANG L L, ZHANG G Y, MA C G. A short linkable ring signature scheme for E-cash protocol[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(1): 102-106(in Chinese).

[16] 王玲玲. 环签名及其应用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008: 31-43.
WANG L L. Research on ring signature and its application[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008: 31-43(in Chinese).

[17] LUO X Y, XUE K P, XU J, et al. Blockchain based secure data aggregation and distributed power dispatching for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5268-5279.

[18] QU J. Blockchain in medical informatics[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 25: 100258.

[19] ZHANG X D, LI R, ZHAO H. A parallel consensus mechanism using PBFT based on DAG-lattice structure in the Internet of vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(6): 5418-5433.

[20] 陈子豪, 李强, 甘俊, 等. VC Chain: 联盟式音视频版权区块链系统[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(11): 1939-1948.
CHEN Z H, LI Q, GAN J, et al. VC Chain: An alliance audio-video copyright blockchain system[J]. Computer Engineering & Science, 2019, 41(11): 1939-1948(in Chinese).

[21] 孙嘉豪, 孟翔斯, 张浩运, 等. 基于改进 PBFT 的区块链知识产权保护模型[J]. 计算机工程, 2020, 46(12): 134-141.
SUN J H, MENG X S, ZHANG H Y, et al. Intellectual property protection model using blockchain based on improved PBFT[J]. Computer Engineering, 2020, 46(12): 134-141(in Chinese).

[22] KUDVA S, BADSHA S, SENGUPTA S, et al. Towards secure and practical consensus for blockchain based VANET[J]. Information Sciences, 2021, 545: 170-187.

[23] FENG M Y, ZHENG J L, HE S Y, et al. CRBFT: An optimized blockchain algorithm for edge-based IoT system[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(23): 23200-23208.

[24] NGUYEN L. Accumulators from bilinear pairings and applications [C]//Proceedings of the Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2005: 275-292.

[25] POINTCHEVAL D, STERN J. Security arguments for digital signatures and blind signatures[J]. Journal of Cryptology, 2000, 13(3): 361-396.

[26] 杨波. 现代密码学[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2017: 273-274.
YANG B. Cyberspace security[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 273-274(in Chinese).

# Blockchain copyright storage protocol based on short verifiable ring signature

WANG Jiechang[1], LIU Yuling[2,*], ZHANG Ping[3], LIU Muhua[3], WANG Xiaowei[1]

(1. Sports Big Data Center, Physical Education College of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;
2. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. School of Mathematics and Statistics, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract**: In the existing blockchain copyright storage systems, various ring signatures occupied too much storage space, and the efficiency of the data consensus algorithm needed to be improved. The public keys of the ring members were accumulated using a dynamic accumulator in order to solve these issues. Various algorithms were then designed, including initialization, system selection, key generation, signature generation, and signature verification, to create an ID-based short verifiable ring signature scheme with multiple private key generators (PKG). The credit threshold was set for the primary node selection, the maximum number of nodes allowed to participate in the consensus was reduced, and the existing consortium blockchain consensus algorithm was improved. Using the new ring signature scheme constructed and the improved consensus algorithm, a new blockchain copyright storage protocol was proposed. Finally, the unforgeability and anonymity of the signature scheme were formally proved. The consensus algorithm and fault tolerance of the system were assessed experimentally, and the computational effectiveness and storage capacity of the signature scheme were examined and simulated. The results show that the proposed protocol saves the signature time and storage space, and improves the consensus efficiency and fault tolerance.

**Keywords**: multiple private key generators; ID-based; short verifiable ring signature; consortium blockchain; copyright storage; consensus algorithm; fault tolerance

**Received**: 2022-12-17; **Accepted**: 2023-05-26; **Published Online**: 2023-07-03 10:04

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230630.1723.008

**Foundation items**: National Key Research and Development Program of China(2021YFF0307203); Foundation Strengthening Program Technical Area Fund (2021-JCJQ-JJ-0908); Key Science and Technology Program of Henan Province (212102310264, 232102210138); Key Scientific Research Project of Higher Institutions in Henan Province (23A520046, 23A413005)

* **Corresponding author**. E-mail: liuyuling@iie.ac.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0953

# 涡扇发动机等效持久试车谱适航符合性设计与验证

汤鑫豪*，窦英睿
(中国航发商用航空发动机有限责任公司，上海 200241)

**摘 要**：为优化涡扇发动机的持久试车谱，减少试验过程中的三红线构型改装次数，对持久试车谱的等效设计与符合性验证方法进行研究。分析了持久原始试车谱及其不同阶段的损伤特征，以发动机零部件的等效损伤为原则，以减少三红线构型改装次数为目的，提出一种基于等效损伤原则的等效持久试车谱适航符合性设计与验证方法，并以某型发动机高压涡轮叶片为例提出模拟特征试验件设计方案。所提方法可作为整机持久适航取证试验试车谱优化工作的参考，所提方案可支撑模拟特征试验件的等效损伤试验。

**关 键 词**：适航；持久试验；试车谱；等效损伤；三红线
**中图分类号**：V231
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0133-08

持久试验是考核航空发动机最低操作性和耐久性的整机适航试验，发动机需在中国民用航空局的CCAR33.87条[1]规定条件下运行150 h，在试验过程中不得出现喘振、失速等对发动机造成不利影响，在试车后通过分解检查表明零部件的损伤在可用限制内。

涡轮发动机持久试验的适航要求最早产生于1952年的美国民用航空规章13部(CAR13[2])的CAR13.254条，规定了总时长150 h(30个阶段，每阶段5 h)的试验，包括65 min的最大起飞和5 min的起飞/慢车交替运转，30 min的91%最大起飞推力，90 min的最大连续推力(maximum continuous thrust, MCT)，60 min的90%MCT，30 min的75%MCT，30 min加减速，以及75次起动试验。CAR13[2]后续的数次修正案中，“90%起飞”和“90%、75%最大连续功率或推力”分别改为“起飞和慢车”和“递增的巡航功率或推力”，同时增加了在发动机额定运行时的最大燃气温度和滑油温度的要求[3]。除此之外，还有一些针对于旋翼类飞机的条款内容的增加和修改。美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)重新编排了适航规章架构，联邦航空规章33部(FAR33部)[4]替代了原CAR13[2]，而持久试验的条款被纳入FAR33部[4]的第33.87条。FAR33部[4]第33.87条中关于试车谱、最大推力、功率、扭矩、红线转速及发动机涡轮燃气温度等实质性要求没有改变。目前，有关持久试验的适航要求，CCAR-33R2[1]基本延续了FAR33部[4]的核心内容。

持久试验要求发动机在推力、燃气温度、转子转速同时达到限制值的三红线状态下完成规定25次6 h循环试车。大涵道比涡扇发动机在正常构型状态时无法同时达到推力、燃气温度、转子转速的红线值，因此，在开展涡扇发动机的持久试验时，需要改装发动机的构型，以达到适航规章要求的最大起飞状态(maximum take off, MTO)和额定MCT三红线状态。

根据CCAR33.87(b)[1]规定的试车谱，涡扇发动机在1次6 h试车过程中至少需实施2次三红线构型改装，150 h持久试验至少需改装发动机构型50次，多次构型改装将大大提升试车过程中的操作难度，延长试验周期。为缩短试验周期、降低操作

收稿日期：2022-11-29；录用日期：2023-03-10；网络出版时间：2023-03-17 09:40
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230314.1950.002
*通信作者. E-mail：txh0926@sina.com

*引用格式：汤鑫豪，窦英睿. 涡扇发动机等效持久试车谱适航符合性设计与验证[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：133-140.*
*TANG X H，DOU Y R. Design and verification of airworthiness compliance of equivalent endurance test cycle of turbofan engine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：133-140 (in Chinese).*

难度，优化试验的流程，通常需要对持久试车谱的次序进行调整，并表明调整后的试车谱不会降低对发动机的考核严苛度。

目前国内缺少针对涡扇发动机开展持久试车谱等效设计及验证的研究，本文分析了持久试验的原始试车谱各分段的损伤特征，基于等效损伤原则提出一种等效持久试车谱适航符合性设计与验证方法，并以某型发动机高压涡轮叶片为例提出模拟特征试验件设计方案。

## 1 持久试验要求分析

### 1.1 持久试验试车谱

根据CCAR 33.87条[1]要求，航空发动机需通过150 h的持久试验考核，其中，涡扇发动机的150 h持久试验由25个6 h持久试验试车谱组成，每个6 h持久试验试车谱由起飞/慢车交替运转、交换额定状态运转、长时额定状态运转、增量运转、加减速运转5部分组成。

起飞/慢车交替运转(分段A)。该阶段时长1 h，由6个5 min额定起飞推力及6个5 min地面慢车推力交替组成。

交换额定状态运转(分段B)。该阶段时长30 min，其中，25次6 h持久试验循环中的15次交换额定状态运转在MCT下运转(分段B1)，10次交换额定状态运转在额定MTO下运转(分段B2)。

长时额定状态运转(分段C)。该阶段时长1 h 30 min，发动机在MCT下运转。

增量运转(分段D)。该阶段时长2.5 h，从发动机最大连续转速开始，划分15个相等的转速间隔，每个间隔持续10 min，逐渐从最大连续转速减小到最小慢车转速。

加减速运转(分段E)。该阶段时长为30 min，包含6个加速和减速运转组合循环，每个循环由慢车推力或功率到起飞推力再到慢车推力构成。

根据CCAR33.87(a)(3)[1]的要求，试车过程中发动机在额定最大连续和最大起飞推力运转时，推力值、转子转速及燃气温度需保持在限制值，即MTO和MCT三红线状态。

### 1.2 持久试车零部件损伤特征

持久试验通过规定的试车谱加速发动机在运行中预期承受的载荷并基于试验后关键零部件损伤程度表明发动机具备初步的耐久性，试车过程中的零部件损伤主要包括因高温高载荷产生的蠕变损伤、因循环载荷产生的低循环疲劳损伤、以及蠕变-低循环疲劳共同作用下的交互损伤。

#### 1.2.1 持久试车蠕变损伤

在高温环境中的转动件和静子件主要失效模式是发生超过可用限制的蠕变[5]，如高压压气机末级的叶片/轮盘、高压涡轮叶片/轮盘、低压涡轮叶片/轮盘、热端机匣、喷管等。

蠕变损伤是一种在长时间高温和稳定载荷条件下产生的材料变形现象，蠕变应变是应力、温度、时间的函数：

$$\varepsilon_{\mathrm{cr}} = C_1\sigma^{C_2}t^{C_3+1}\mathrm{e}^{\frac{-C_4}{T}}/(C_3+1) \tag{1}$$

式中：$\varepsilon_{\mathrm{cr}}$为蠕变应变；$\sigma$为等效应力；$T$为绝对温度；$C_1$～$C_4$为材料常数；$t$为子步的结束时间。

典型的蠕变曲线可分为初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段、加速蠕变阶段3个阶段[6]，如图1所示。初始蠕变阶段的蠕变速率较高，但蠕变速率随时间的增大而减少；稳态蠕变阶段的蠕变速率最小，速率接近常数；加速蠕变阶段由于材料的横截面缩小或冶金变化(晶界分离、裂纹形成、孔洞等)，导致蠕变速率增加并最终发生蠕变断裂。

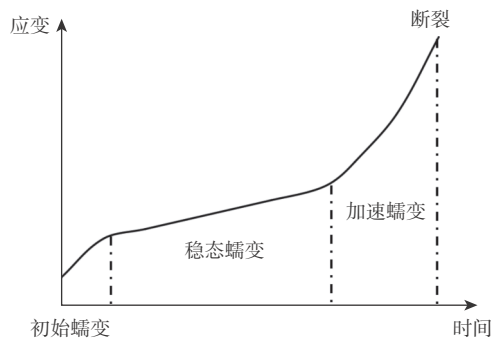



图1 典型蠕变曲线[6]

Fig. 1 Typical creep curve[6]

发动机的使用寿命中一般只允许发生初始蠕变和稳态蠕变，其中，稳态蠕变阶段时间最长，占据全蠕变过程的主要部分，因此，对蠕变的损伤分析和验证也主要针对稳态蠕变阶段开展。当发动机零部件处于稳态蠕变阶段时，塑性变形与恢复的机制达到动态平衡，此时零部件的蠕变速率为常数，相同条件下连续试验与分多次累积试验所产生的蠕变损伤是等效的。

根据150 h持久试验的试车谱，发动机需在三红线状态下累计运行63.75 h，其中，MTO三红线状态18.75 h，MCT三红线状态45 h。三红线状态下发动机转速及燃气温度需保持在红线值以上，零部件处于高温、高载荷工况，将持续积累蠕变损伤。试车谱各分段的三红线状态时间分布如表1所示。

根据表1的三红线状态运行时间分布统计，持久试验的分段A、B1、B2、C运转过程均包含长时间三红线状态，使得零部件出现显著蠕变损伤。

增量运转的燃气温度值低于红线起飞及最大连续状态，流道部件所处的温度场不足以产生显著

表 1　持久试验三红线状态运行时间

Table 1　Triple red-line operation time in endurance test

| 分段 | 三红线时间/min | 循环数 | MTO三红线总时间/min | MCT三红线总时间/min | 三红线总时间/min |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 30 | 25 | 750 | 0 | 750 |
| B1 | 30 | 15 | 0 | 450 | 450 |
| B2 | 30 | 10 | 300 | 0 | 300 |
| C | 90 | 25 | 0 | 2 250 | 2 250 |
| D | 0 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| E | 3 | 25 | 75 | 0 | 75 |

的蠕变损伤，该分段主要考核振动响应特性。

加减速运转阶段每个循环中有 30 s 处于三红线状态，该阶段达到红线温度的时间较短，不足以产生显著蠕变损伤，该阶段主要考核发动机的低循环疲劳损伤。

1.2.2　持久试车低循环疲劳损伤

疲劳损伤是指材料在循环应力作用下，在局部产生的永久性累积损伤，疲劳损伤可根据循环破坏次数划分为低循环疲劳损伤和高循环疲劳损伤，低循环疲劳损伤是指破坏循环在 $10^4$ 以下的疲劳损伤，其交变应力往往低于材料的屈服强度[7]。

用于低循环疲劳寿命计算的方程通常选用较保守的 Manson-Coffin 方法进行分析，在非对称循环应力作用下，经平均应力修正后的 Manson-Coffin 方程为

$$\frac{\Delta\varepsilon_1}{2}=\frac{\sigma_f-\sigma_m}{F}(2N_f)^b+\varepsilon_f'(2N_f)^c \tag{2}$$

式中：$\Delta\varepsilon_1$ 为总应变幅；$N_f$ 为失效循环数；$b$ 为疲劳延性指数；$c$ 为疲劳强度指数；$\varepsilon_f'$ 为疲劳弹性指数；$F$ 为弹性模量；$\sigma_f$、$\sigma_m$ 分别为 2 项非对称的循环应力。

疲劳对缺陷（如缺口、裂纹及组织缺陷）十分敏感，由于疲劳破坏是从局部开始的，所以其对缺陷具有高度的选择性[8]。疲劳失效过程可清楚地被观测划分为裂纹的萌生、缓慢扩展、快速扩展、断裂 4 个阶段，4 个阶段分别对应如图 2 所示[9] 的 I、II、III、IV 这 4 个区域。

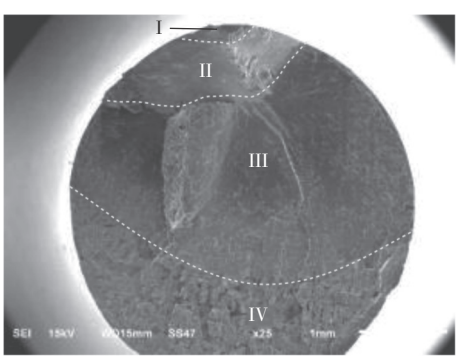



图 2　疲劳裂纹发展截面[9]

Fig. 2　Cross section of fatigue crack development[9]

在飞机的每次起飞-降落的工作循环中，航空发动机的零部件（如盘等）都将承受一次离心载荷、温度载荷、气动载荷作用的循环，这种起落循环往往使得零部件在 $10^4$ 次循环以内发生低周疲劳破坏。

持久试验中，加减速运转阶段由 6 组加减速主循环组成，每组加减速主循环都模拟了一次飞机的起落循环过程中发动机受到的循环载荷，并在此过程中累积低循环疲劳损伤。由于加减速运转阶段的每组加减速过程中发动机零部件仅有 30 s 处于三红线状态下，蠕变效应不显著，因而该阶段主要以单一的低循环疲劳损伤为主。

1.2.3　持久试车蠕变-低循环疲劳交互损伤

蠕变-疲劳交互损伤机理与单独的蠕变和疲劳作用有所差别[10]。材料局部萌生疲劳裂纹是疲劳损伤发展的结果，而材料内部晶界孔洞则是蠕变损伤的体现，疲劳裂纹和蠕变空洞会相互发展，相互影响，形成蠕变/疲劳交互作用。

蠕变-疲劳作用下材料寿命一般通过线性损伤累积方法评估[11]，将零部件的总损伤划分为与时间相关的蠕变损伤和与循环数相关的疲劳累积损伤，并按照线性进行叠加：

$$D=D_f+D_c \tag{3}$$

式中：$D_f$ 和 $D_c$ 分别为纯疲劳损伤和纯蠕变损伤；$D$ 为总损伤。

单次循环的疲劳损伤定义为疲劳寿命 $N_f$ 的倒数。蠕变疲劳下，疲劳损伤 $D_f$ 由每个循环的疲劳损伤累积得到，蠕变损伤定义为给定应力下累积交互损伤时间与该应力下持久强度的比值，即 $D_f=n/N_f$。

等幅载荷条件下：

$$D=\frac{n}{N_f}+\frac{n}{t_R} \tag{4}$$

式中：$N_f$ 为单次循环的疲劳损伤；$t_R$ 为单位时间的蠕变损伤；$n$ 为时间循环数。

变幅载荷条件下：

$$D=\sum_{i=1}^{n}\frac{n}{N_{fi}}+\sum_{j=1}^{n}\frac{n}{t_{Rj}} \tag{5}$$

式中：$N_{fi}$ 为单次循环的疲劳损伤；$t_{Rj}$ 为单位时间的蠕变损伤。

试验证明，式(4)和式(5)中的总损伤 $D$ 通常不为 1，说明蠕变和疲劳存在交互作用，因此，Langeberg 提出在式(4)和式(5)增加交互作用项来表示蠕变-疲劳的交互作用，即

$$\frac{n}{N_f}+B\left(\frac{n}{N_f}\cdot\frac{\sum\Delta t_i}{t_R}\right)^{0.5}+\frac{\sum\Delta t_i}{t_R}=1 \tag{6}$$

式中：$\Delta t_i$ 为单位时间步长。

线性累积损伤法形式简单，在蠕变占主导地位的情况下具有一定的优势，在蠕变/疲劳寿命研究中广泛应用。

蠕变-疲劳失效是发动机热端部件的主要失效模式之一，持久试验中，起飞/慢车交替运转（分段A）由6组加减速主循环组成，期间包含30 min的三红线状态，属于典型的蠕变-低循环疲劳交互损伤。

## 2 等效试车谱设计及验证

图3为FAR AC33.87-1A[12]推荐的持久试验原始试车谱。根据1.2节对持久试车各分阶段的损伤特性分析，其中，起飞/慢车交替过程（分段A）对发动机产生蠕变-疲劳交互损伤，交换额定状态及长时额定状态（分段B、分段C）对发动机热端部件产生蠕变损伤，增量运转过程（分段D）考核发动机的峰值振动特性，加减速运转阶段（分段E）对发动机主要产生低循环疲劳损伤。

为达到条款要求的发动机三红线状态，持久试车需改装试验发动机的进气道、尾喷管、可调静子叶片角度、发动机控制系统等软硬件构型，且发动机在MTO三红线状态下的构型往往与MCT三红线状态下的硬件构型存在差异。因此，根据图3所示的原始试车谱，每次6 h试车循环需进行至少2次硬件改装，且每次构型改装后，需要重新校准发动机的推力特性，确保发动机可稳定运行在要求的工作状态。为降低改装和校准的次数以提高试验可操作性、减少试验耗时，取证中的常用做法为调整分段A～分段E的次序以开展试验，将需要在MTO构型下完成的25个分段A和10个分段B尽可能合并，将需要在MCT构型下完成的15个分段B和25个分段C尽可能合并。重组后的试车谱应不能降低对发动机零部件耐久性考核的严苛性。因此，申请人需基于发动机零部件等效损伤原则，验证重组试车谱的损伤等效性。等效试车谱设计与验证流程如图4所示。

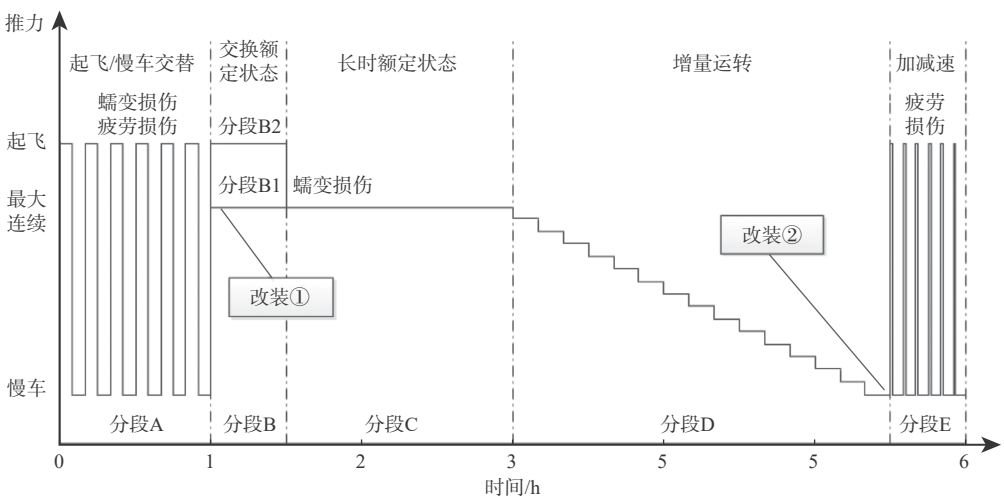



图3 持久试车标准循环[12]

Fig. 3 Standard endurance test cycle[12]

策划典型材料的模拟特征试验件损伤试验，研究低循环疲劳损伤、蠕变损伤、蠕变-疲劳交互损伤的不同加载次序对模拟特征试验件损伤程度的影响，模拟特征试验件损伤试验的结果作为等效试车谱设计的输入。若结果表明不同加载次序对损伤程度没有影响，则可以完全依据改装便捷性调整试车谱次序，形成一系列备选的重组试车谱。

模拟特征试验件损伤试验的思路可以概述为，根据发动机受到疲劳、蠕变、疲劳-交互损伤的关键零部件的典型失效位置和应力集中特征，设计模拟特征试验件作为试验对象。在典型的低循环疲劳、蠕变和疲劳-蠕变交互损伤循环的基础上，调整载荷加载次序形成损伤考核试车谱，以考核模拟特征试验件在不同考核试车谱下的损伤特征，分析并确定载荷加载次序对试验件损伤等效性的影响。基础损伤循环和损伤考核试验谱如图5～图8所示，其中，$\sigma_{\min}$ 和 $\sigma_{\max}$ 分别为最小和最大应力。

策划典型零件的模拟特征试验件等效损伤试验，使用初筛后的备选重组试车谱加载到典型零件的模拟特征试验件上，开展相应的试验及分析工作，以验证并筛选出符合等效损伤要求的一系列重组的等效损伤试车谱。此时筛选出的重组等效损伤试车谱可再次根据改装便捷性和试车操作性（33.87(a)(7)条[1]要求试验中至少有一次运转必须在滑油限制压力下进行；33.87(a)(4)条[1]要求至少有5次循环的运转应使用供发动机和飞机使用的

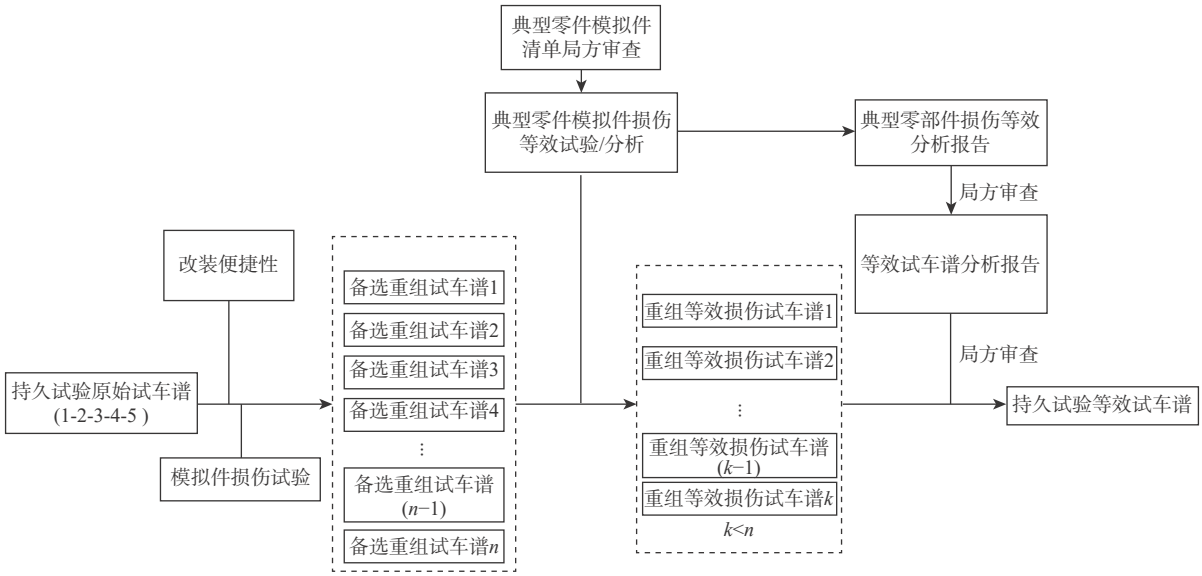



图 4　等效持久试车谱设计与验证流程

Fig. 4　Design and verification of equivalent endurance test cycle

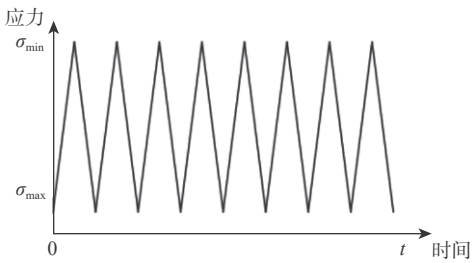



图 5　基础损伤循环-低循环疲劳

Fig. 5　Basic damage cycle-low cycle failure

图 6　基础损伤循环-蠕变

Fig. 6　Basic damage cycle-creep

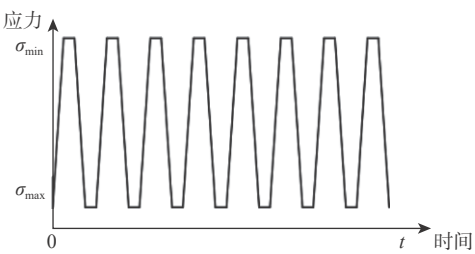



图 7　疲劳-蠕变交互循环

Fig. 7　Fatigue-creep interaction cycle

最大引气量)原则，最终挑选出一个目标试车谱，提交适航当局审查。

为降低试车谱等效损伤验证的风险，申请人应前期尽可能充分地识别持久试验考核的关键零部

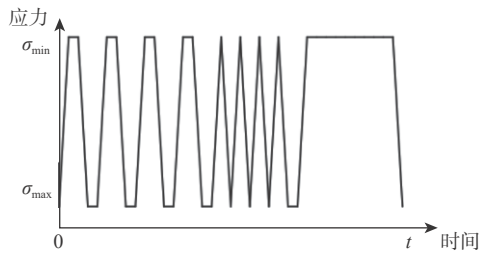



图 8　交互-疲劳-蠕变循环

Fig. 8　Interaction-fatigue-creep cycle

件，最终形成经局方确认的典型零部件清单，以作为后续策划典型零部件等效损伤试验的依据和试车谱等效损伤验证的对象。典型模拟特征试验件和模拟件损伤试验的设计思路应向局方确认，试验的实施和试验结果的分析等关键环节应让审查代表充分地介入，以确保备选重组试车谱设计环节的数据有效性。基于此，设计典型零件的模拟特征试验件，通过模拟特征试验件损伤等效试验及分析，完成典型零部件的等效损伤分析，并形成最终的等效试车谱分析报告，结果表明等效试车谱的适航符合性。

## 3　典型零件选择与模拟特征试验件设计

持久试验的考核实质是要求整机零件在长时间的蠕变和低周疲劳的载荷下仍满足规章要求的耐久性，本文旨在确保重组的试车谱没有弱化对零件蠕变、低周疲劳的考核，即确保零部件在调整次序后的低周疲劳和蠕变作用下，疲劳裂纹损伤和蠕变变形损伤没有弱于原始试车谱。低周疲劳由起飞-慢车循环的转子离心力引起，主要发生于压气

机、涡轮的转子部件；蠕变由高温环境与长时间的应力共同作用下引起，主要发生于燃烧室、涡轮、喷管等热端部件。选择开展重组试车谱等效验证的典型零件应选择低周疲劳和蠕变损伤显著发生的部位，即涡轮转子。

涡轮转子主要包含涡轮盘与涡轮叶片，其中，涡轮盘属于发动机的限寿件[13]，在其寿命周期内不允许产生可被检测的裂纹。若选取涡轮盘作为试车谱典型零部件，低周疲劳在涡轮盘上引发的裂纹损伤无法在150 h的试验时长内呈现，达不到试验观测的要求。高压涡轮动叶在运行时承受极高的温度及载荷[14]，并由于存在内部冷却流道、密排气膜孔等特征，导致叶片应力及温度分布情况复杂，是受低周和蠕变损伤最显著的零件，在发动机持久适航取证试验及发动机服役后的航线运行中，涡轮叶片也允许出现一定限制范围内的裂纹和变形[15-16]。结合发动机研发摸底试验故障分析及设计计算评估，高涡第1级动叶的设计裕度最低，也是最易发生故障的零件，产生的各项损伤最为显著。因此，以某型发动机的高压涡轮叶片为例设计其典型特征的模拟试验件。

在持久试验要求的起飞三红线工况下，某型发动机高压涡轮第1级动叶温度分布如图9所示，典型应力集中位置等效应力分布如图10所示。

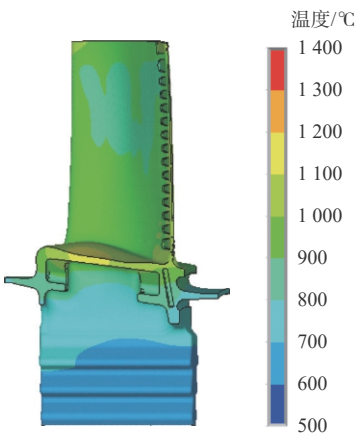



图9 三红线工况叶片温度分布

Fig. 9 Triple red-line blade temperature distribution

由图10可知，叶身尾缘及内腔圆孔附近区域有较明显应力集中，以上述位置为对象开展模拟特征试验件设计工作。为使试验结果能够尽可能表征涡轮叶片应力集中位置在持久试验工况下应力条件，模拟特征试验件设计应满足如下要求：

1）模拟特征试验件应力集中位置特征几何尺寸与叶片相近；

2）模拟特征试验件与叶片应力集中位置1 mm范围内应力梯度相近，误差不超过10%。

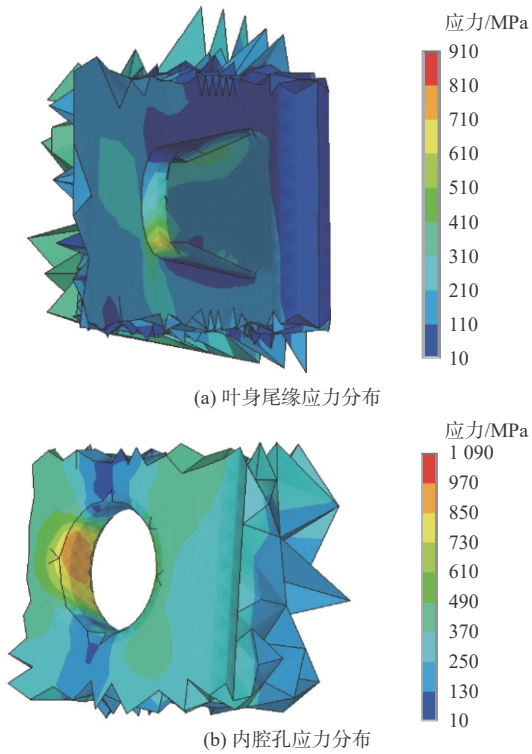



图10 应力集中位置等效应力分布

Fig. 10 Equivalent stress distribution at stress concentration locations

针对叶身尾缘特征，设计如图11所示缺口平板试验件，缺口根部半径及两侧张角与图10(a)所示叶片尾缘相同。

约束试验件一端位移并在另一端施加集中力载荷，试验件加载均温，温度值为叶片尾缘等效应力最大位置温度。缺口应力分布如图12所示，缺口根部应力梯度与叶身尾缘应力梯度对比如图13所示。

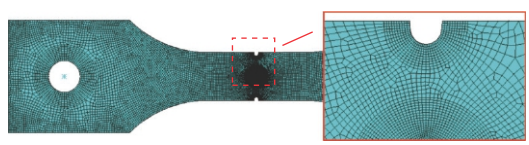


图11 缺口平板试验件

Fig. 11 Notched plate test piece

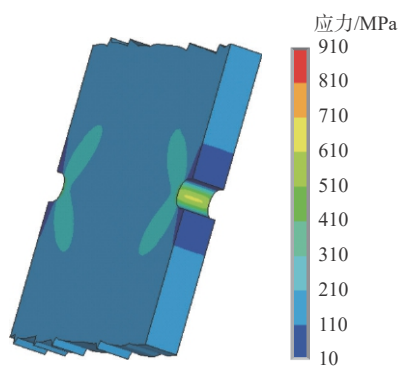



图12 缺口应力分布

Fig. 12 Notch stress distribution

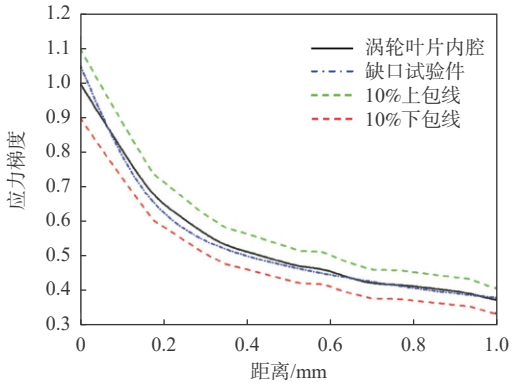



图 13　缺口模拟试验件应力梯度归一化对比

Fig. 13　Uniformization comparison of stress gradients of simulated notched test pieces

由图 13 可知，试验件及叶片缺口根部 1 mm 范围内等效应力梯度误差不大于 10%。

针对内腔圆孔特征，设计如图 14 所示中心孔平板试验件，中心孔为椭圆孔，其长轴与短轴长度与图 10(b)所示椭圆孔相同。

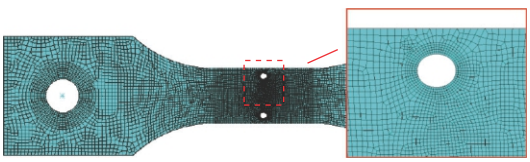


图 14　中心孔平板试验件

Fig. 14　Center hole plate test piece

约束试验件一端位移并在另一端施加集中力载荷，试验件加载均温，温度值为叶片内腔圆孔等效应力最大位置温度。中心孔应力分布如图 15 所示，中心孔边应力梯度与叶片内腔圆孔边应力梯度对比如图 16 所示。

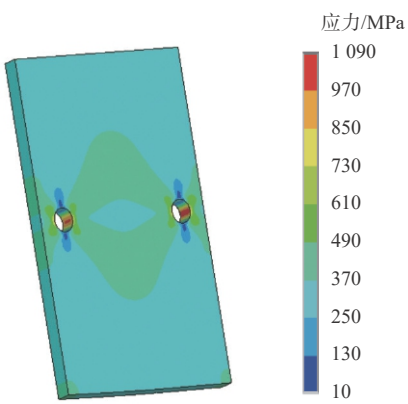



图 15　中心孔应力分布

Fig. 15　Center hole stress distribution

图 16 中实线为高涡一动内腔椭圆孔边等效应力梯度，点划线为试验件椭圆孔边等效应力梯度，两条虚线为黑色实线的±10% 包线。由图 16 可知，1 mm 范围内，试验件孔边应力梯度与涡轮叶片孔边应力梯度误差不大于 10%。

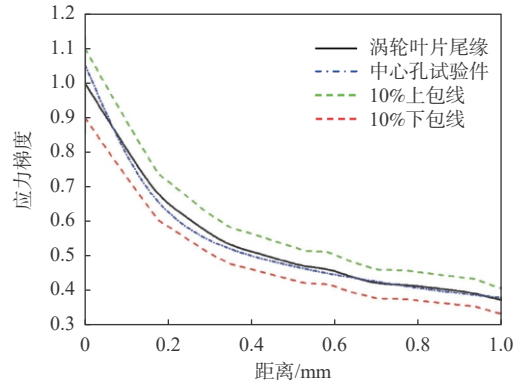



图 16　中心孔模拟试验件应力梯度归一化对比

Fig. 16　Uniformization comparison of stress gradients of simulated center hole test pieces

基于上述缺口及中心孔模拟试验件开展持久试验试车谱模拟试验，加载不同载荷谱，记录并对比试验件在不同载荷谱下经历的加载时间及循环数，可进一步确定满足等效原则的重组试验试车谱。

## 4　结　论

1）本文提出等效试车谱的符合性表明关键零件选取原则。持久试车谱对整机耐久性的考核具体体现为对各零部件的低周疲劳和蠕变变形的要求，试车谱次序调整可能导致 2 种载荷引发的交互损伤结果变化，可聚焦有损伤交互的零件，即高压涡轮动叶做分析与试验验证。

2）本文开展关键零件模拟特征试验件的设计。对高压涡轮第 1 级动叶作了特征试验件的设计，数值计算结果表明特征试验件可以较好地还原叶片气膜孔、尾缘等处特征结构产生的应力集中。

3）本文明确了等效持久试车谱适航符合性设计与验证流程。基于改装便捷性重组试车谱，确定受交互损伤潜在影响的典型零件并设计典型零件特征的模拟特征试验件，依据模拟特征试验件不同损伤加载次序的试验结果，设计并筛选出满足等效损伤要求的持久试车谱，开展典型零件模拟特征试验件的试车谱等效损伤试验及分析，最终表明等效试车谱的适航符合性。

### 参考文献（References）

[1] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定: CCAR-33R2[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Aircraft engine airworthiness regulations: CCAR-33R2 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011(in Chinese).

[2] Civil Aeronautics Board. Aircraft engine airworthiness: CAR13[S]. Washington, D. C. : Civil Aeronautics Board, 1952: 4.

[3] 王晓明, 綦蕾. 民用航空涡轮发动机持久试验条款发展历程[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 431-439.

WANG X M, QI L. Development history of civil turbine engine endurance test requirements[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 431-439(in Chinese).

[4] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards: Aircraft engines FAR Part 33 amendment 33-32[S]. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2012.

[5] MOSKOVIC R, LINGHAM I J, CROCKER A G, et al. An experimental and theoretical consideration of the effect of prior creep damage on the heat affected zone fracture toughness of CrMoV steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(4-6): 587-599.

[6] KAFTELEN H, BALDAN A. Comparative creep damage assessments using the various models[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(13): 4199-4210.

[7] CHATZIIOANNOU K, KARAMANOS S A, HUANG Y E. Coupled numerical simulation of low-cycle fatigue damage in metal components[J]. Engineering Structures, 2021, 229: 111536.

[8] JEONG I H, PARK Y M, BAE M K, et al. Low-cycle fatigue characteristics of SNCM 420H steel used to fabricate ships' engines[J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(14/15): 1940035.

[9] 许罗鹏, ZHOU M, 王清远. DZ125合金超高周疲劳微观裂纹萌生机制[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6): 245-250.
XU L P, ZHOU M, WANG Q Y. Micro-crack initiation mechanism of DZ125 Ni-based alloy during very high cycle fatigue[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(6): 245-250(in Chinese).

[10] MATSUZAKI T, SUGIURA R, NAGUMO Y, et al. Crack growth characteristic and damage evaluation under creep-fatigue interactive condition for W-added high-Cr steel[J]. Materials Transactions, 2013, 54(12): 2215-2224.

[11] XU L Y, ZHAO L, GAO Z F, et al. A novel creep–fatigue interaction damage model with the stress effect to simulate the creep–fatigue crack growth behavior[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 130: 143-153.

[12] Federal Aviation Administration. Engine over-torque test, calibration test, endurance test, and teardown inspection for turbine engine certification (33.84, 33.85, 33.87, 33.93): AC 33.87-1A [R]. Washington, D. C. : Federal Aviation Administration, 2015.

[13] 白国娟, 侯乃先, 杨坤, 等. 粉末高温合金涡轮盘初始缺陷概率模型研究[J]. 机械设计与制造, 2021, 360(2): 252-256.
BAI G J, HOU N X, YANG K, et al. Study on the initial defect probability model of powdered high temperature alloy turbine disc[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2021, 360(2): 252-256(in Chinese).

[14] 由于, 徐健, 燕群, 等. 涡轮叶片耦合疲劳寿命预测与试验验证[J]. 航空动力学报, 2022, 37(5): 946-953.
YOU Y, XU J, YAN Q, et al. Combined fatigue life prediction and experiment verification for turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(5): 946-953(in Chinese).

[15] 雷世英, 孙见忠, 刘赫. 涡轮叶片累积损伤指数模型及服役可靠性评估[J]. 航空学报, 2022, 43(3): 244-260.
LEI S Y, SUN J Z, LIU H. Cumulative damage index model and service reliability evaluation of turbine blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 244-260(in Chinese).

[16] 何庆富, 迟重然, 臧述升. 几何损伤导致涡轮静叶气动衰减的CNN预测[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(12): 3219-3224.
HE Q F, CHI C R, ZANG S S. CNN prediction of aerodynamic decay of turbine static blades due to geometric damage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(12): 3219-3224(in Chinese).

# Design and verification of airworthiness compliance of equivalent endurance test cycle of turbofan engine

TANG Xinhao*, DOU Yingrui

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

**Abstract**: In order to optimize the endurance test cycle of the turbofan engine and reduce the number of triple red-line configuration modifications during the test, the equivalent design and compliance verification method of the endurance test cycle were studied. The damage characteristics of the original endurance test cycle and endurance test cycle at different stages were analyzed, and a design and verification method for the airworthiness compliance of the equivalent endurance test cycle based on the principle of equivalent damage was proposed to reduce the number of triple red-line configuration modifications. A simulated characteristic test piece was designed by taking the high-pressure turbine blade of a certain engine as an example. The proposed design and verification method for the airworthiness compliance of the equivalent endurance test cycle of a turbofan engine can be used as a reference for the optimization of the test cycle of the endurance airworthiness certification test of the whole engine, and the proposed design scheme of the simulated characteristic test piece can support the equivalent damage test of the simulated characteristic test piece.

**Keywords**: airworthiness; endurance test; test cycle; equivalent damage; triple red-line

**Received**: 2022-11-29; **Accepted**: 2023-03-10; **Published Online**: 2023-03-17 09:40

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230314.1950.002

* **Corresponding author**. E-mail: txh0926@sina.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0968

# 挠性陀螺交叉耦合影响因素分析及控制

蔡曜*，司玉辉，王玉琢，杜鑫，尹路
(西安航天精密机电研究所，西安 710100)

**摘 要**：由于机械结构误差和电气干扰，实际生产的挠性陀螺存在交叉耦合。分析交叉耦合影响因素，确定其为差动式电感传感器铁芯柱垂直度和力矩器线圈周向偏移角度，由此建立传感器、力矩器的误差模型，定量分析了各影响因素对交叉耦合的影响程度。设计铁芯柱精密装配工装、线圈精密装配工装，并对力矩器进行可调设计，控制挠性陀螺交叉耦合。工程实践表明：各项控制方法均取得较好效果，交叉耦合稳定控制为不大于1%；各项控制方法提高了挠性陀螺对角速度的测量精度，进而提高了惯导系统的导航精度。

**关 键 词**：挠性陀螺；交叉耦合；影响因素；差动式电感传感器；力矩器；可调设计
**中图分类号**：V241.5+59
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0141-11

挠性陀螺可作制导、导航与定位等用途，被广泛应用于航空航天、兵器、船舶等领域。挠性陀螺利用挠性支撑悬挂陀螺转子，在陀螺转子高速旋转工作中，通过挠性支撑产生的动力效应来补偿其弹性刚度，是具有二自由度的陀螺仪[1-2]。挠性陀螺在工程应用中存在着交叉耦合的问题，交叉耦合直接影响挠性陀螺对角速度的测量精度，最终影响惯导系统的导航精度[3-4]，降低交叉耦合是挠性陀螺工程实践中需要解决的关键问题。

目前，解决该问题的主要方法为解耦控制器补偿法。文献[5]针对挠性陀螺的交叉耦合问题，设计专用补偿电路，可根据实测值为正耦合或负耦合2种情况，将伺服板上电路相应改造为加法运算电路或减法运算电路进行补偿，从而降低交叉耦合。文献[6]研究了挠性陀螺再平衡回路的数字化设计和实现方法，基于半实物仿真系统辨识出数字再平衡回路的开环离散传递函数矩阵；利用矩阵求逆法与经典控制器设计方法设计了数字解耦合校正环节，最终将陀螺交叉耦合控制在1%以内。上述补偿方法，均需要逐一对挠性陀螺进行测试，根据实测值在伺服回路中对多个元器件进行调整，涉及分步烙焊、防护、喷漆、固封等多个工序，工艺方法复杂，制约生产效率。

挠性陀螺因双敏感轴的特殊性存在交叉耦合问题，与之类比，导引头、捷联惯组、稳定平台等因安装多块陀螺，每块陀螺可敏感一个方向的位置信息，故具有双敏感轴或三敏感轴，同样存在交叉耦合的问题。文献[7]以两轴速率陀螺导引头为研究对象，综合考虑交叉耦合、质量不平衡、扰动力矩等因素，建立动力学模型。基于双万向节耦合系统框图，设计时滞补偿网络，提高了系统的开环增益和抗干扰能力。文献[8]以惯性测量单元为研究对象，提出一种陀螺位置补偿方法，包括分步进行、区分权重、分步标定等步骤，对同一惯性测量单元上的3个陀螺进行陀螺间的交叉解耦，最终将交叉耦合由最大2.09%降至0.16%。上述控制交叉耦合的方法，需要进行繁多的标定工序，调试耗时过长，同样不适用于大批量的型号任务生产。

本文针对挠性陀螺交叉耦合问题，将其按层级打开，研究问题形成机理，分析、确定影响因素及影

收稿日期：2022-12-06；录用日期：2023-03-10；网络出版时间：2023-03-28 09:01
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230327.1334.005
*通信作者. E-mail：615596667@qq.com

*引用格式：蔡曜，司玉辉，王玉琢，等. 挠性陀螺交叉耦合影响因素分析及控制[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：141-151.*
*CAI Y，SI Y H，WANG Y Z，et al. Analysis and control of influencing factors of cross coupling of flexible gyro[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：141-151 (in Chinese).*

响程度，从工艺方法控制和结构设计优化的角度提出可量化控制交叉耦合的可行性方法。与解耦控制器补偿法、标定解耦方法相比，本文方法可从挠性陀螺的元件层级对装配精度进行控制，无需多余调试工序，工艺方法更简单，生产效率更高，综合成本更低。在生产状态稳定后，具有理想的合格率和较高的可靠性，能够满足大批量型号任务的生产需求。挠性陀螺的交叉耦合得到有效控制后，可显著提高其对角速度的测量精度，进而对提高惯导系统的导航精度具有积极意义。

## 1 挠性陀螺与交叉耦合

### 1.1 挠性陀螺结构及原理

挠性陀螺由磁滞电机、陀螺转子（含挠性接头）、差动式电感传感器、力矩器、前置放大板、壳体等组成[9-10]，具体如图1所示。

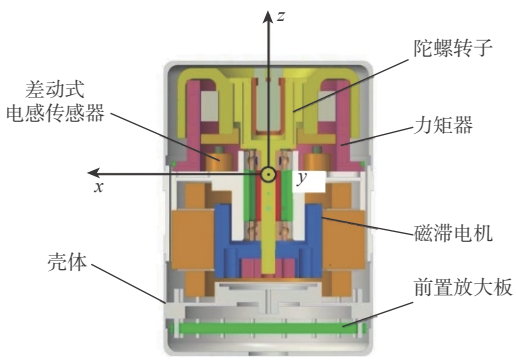



图1 挠性陀螺结构

Fig. 1 Structure of flexible gyro

挠性陀螺需与其配套的伺服回路板共同组成再平衡回路，使其工作于闭环状态，用于测量角速度或角加速度[11-12]。

当挠性陀螺 $z$ 轴向上水平放置，保持静止状态工作时，驱动电机带动挠性接头、陀螺转子高速转动，在动力调谐效应下，陀螺转子相对惯性空间具有很高的方位稳定性；此时，安装在陀螺转子上的导磁环与差动式电感传感器的铁芯之间的气隙保持稳定，则传感器输出电压微小且稳定；经伺服回路板变换为电流信号，通入力矩器；力矩器对陀螺转子施加微小力矩平衡干扰力矩，使其处于平衡状态。在静止平衡状态下，由力矩器采集的直流电压信号即为挠性陀螺的零位电压 $U_x^{\mathrm{DC}}$、$U_y^{\mathrm{DC}}$。

当挠性陀螺随同其载体运动时，将会绕其2个敏感轴 $x$、$y$ 输入角速率 $\omega_x$、$\omega_y$；在动力调谐效应下，陀螺转子相对壳体发生偏转；在 $x$、$y$ 方向上，导磁环与铁芯的气隙变化分别为 $\Delta\delta_x$、$\Delta\delta_y$，则传感器输出电压分别为 $\dot{U}_x^{\mathrm{AC}}$、$\dot{U}_y^{\mathrm{AC}}$；经伺服回路板变换为电流信号，通入力矩器；力矩器对陀螺转子施加与其偏转方向相反的力矩，迫使其绕敏感轴进动。当陀螺转子的进动角速率与输入角速率方向相同、大小相等时，达到平衡状态。该平衡状态为挠性陀螺的运动平衡状态，由力矩器采集的电压信号即为挠性陀螺的输出 $U_{x,\omega}^{\mathrm{DC}}$、$U_{y,\omega}^{\mathrm{DC}}$。由于 $|U_{x,\omega}^{\mathrm{DC}}-U_x^{\mathrm{DC}}|$ 与 $\omega_x$、$|U_{y,\omega}^{\mathrm{DC}}-U_y^{\mathrm{DC}}|$ 与 $\omega_y$ 具有比例关系，故挠性陀螺可以测量角速度或角加速度[13-14]。

### 1.2 交叉耦合

在理想状态下，使挠性陀螺仪绕 $x$ 轴以角速率 $\omega$ 旋转，则在 $x$、$y$ 方向上，导磁环与铁芯的气隙变化 $\Delta\delta_x=0$，$\Delta\delta_y\neq 0$，最终导致由力矩器采集的电压信号 $U_{x,\omega}^{\mathrm{DC}}=U_x^{\mathrm{DC}}$，$U_{y,\omega}^{\mathrm{DC}}\neq U_y^{\mathrm{DC}}$，且 $|U_{y,\omega}^{\mathrm{DC}}-U_y^{\mathrm{DC}}|$ 与 $\omega$ 具有比例关系。挠性陀螺绕 $y$ 轴以角速率 $\omega$ 旋转的情况类似。简言之，挠性陀螺仅沿其一个敏感轴转动时，敏感轴对应的一路力矩器输出增大，非敏感轴对应的一路力矩器输出不变。

在工程实践中，由于机械结构误差、电气干扰等因素，当挠性陀螺仅沿其一个敏感轴转动时，敏感轴与非敏感轴对应两路力矩器的输出均改变，非敏感轴对应力矩器输出与敏感轴对应力矩器输出的比值称为交叉耦合，表达式为

$$\begin{cases}\psi_x=|U_{x,+\omega}^{\mathrm{DC}}-U_{x,-\omega}^{\mathrm{DC}}|/|U_{y,+\omega}^{\mathrm{DC}}-U_{y,-\omega}^{\mathrm{DC}}|\\ \psi_y=|U_{y,+\omega}^{\mathrm{DC}}-U_{y,-\omega}^{\mathrm{DC}}|/|U_{x,+\omega}^{\mathrm{DC}}-U_{x,-\omega}^{\mathrm{DC}}|\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\psi_x$ 和 $\psi_y$ 分别为挠性陀螺绕 $x$ 轴和 $y$ 轴旋转时的交叉耦合；$U_{x,+\omega}^{\mathrm{DC}}$ 和 $U_{x,-\omega}^{\mathrm{DC}}$ 分别为挠性陀螺顺时针旋转和逆时针旋转时 $x$ 路力矩器的输出；$U_{y,+\omega}^{\mathrm{DC}}$ 和 $U_{y,-\omega}^{\mathrm{DC}}$ 分别为挠性陀螺顺时针旋转和逆时针旋转时 $y$ 路力矩器的输出。

## 2 交叉耦合影响因素分析

多项因素可造成挠性陀螺交叉耦合，机械结构误差为主要影响因素。针对传感器、力矩器的误差模型进行分析，确定关键影响因素。

### 2.1 传感器影响因素分析

挠性陀螺所用传感器为差动式电感传感器，按坐标轴可分为 $x$ 路传感器、$y$ 路传感器。每路传感器又由完全相同的2个电感信号器合用一个活动衔铁（导磁环）构成差动结构[15-16]。差动式电感传感器所含零件为底座、铁芯柱、线圈、导磁环。其中，导磁环装配于挠性陀螺的陀螺转子上，随其一同发生偏转，隐藏挠性陀螺的其他零件，其结构如图2所示。

差动式电感传感器造成挠性陀螺交叉耦合的主要原因为：铁芯柱相对于底座法兰下端面（基准面）的垂直度差，使得导磁环向一个轴上的传感器

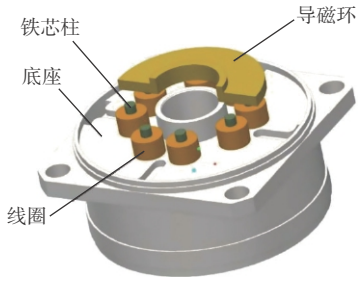



图 2　差动式电感传感器结构

Fig. 2　Structure of differential inductance sensor

发生偏转时，另一个轴上的 2 个电感信号器的气隙变得不相等，电桥的平衡被破坏，最终引起该轴对应力矩器所通电流增大。

分析传感器的差动结构特点，仅有铁芯柱的倾斜量在其所在轴的垂直方向上的分量会引起交叉耦合，倾斜量在其所在轴的平行方向上的分量对交叉耦合无影响。考虑到 1 根铁芯柱即可存在多种倾斜情况，8 根铁芯柱的倾斜情况经排列组合后问题将变得十分复杂，故只举例一种对交叉耦合影响程度最大的误差模型，作为指导生产的理论依据。

差动式电感传感器（不含导磁环）的俯视图如图 3 所示，编号为①～⑧的铁芯柱连同线圈安装在底座上。

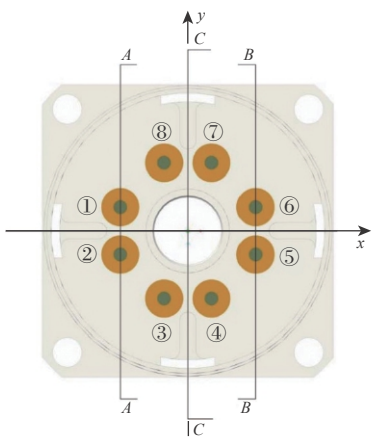



图 3　差动式电感传感器俯视图

Fig. 3　Top view of differential inductance sensor

假设铁芯柱完全垂直于底座基准面，在导磁环水平无偏转的情况下，剖面图 *A-A*、*B-B* 如图 4 (a) 所示。

由图 4 (a) 可知，*x* 路传感器的铁芯柱①、铁芯柱②、铁芯柱⑤、铁芯柱⑥与导磁环的气隙满足 $\delta_1=\delta_2=\delta_5=\delta_6$，电桥平衡。

当导磁环向+*y* 方向偏转，角度为 $\alpha$ 时，剖面图 *A-A*、*B-B* 如图 4( b)所示。

由图 4 (b)可知，*x* 路传感器的铁芯柱①、铁芯柱⑥与导磁环的气隙减小量、铁芯柱②、铁芯柱⑤与导磁环的气隙增大量均一致，为 $\Delta\delta$，电桥平衡，未引起交叉耦合。

假设铁芯柱①、铁芯柱②均向−*y* 方向倾斜，角度为 $\theta$，铁芯柱⑤、铁芯柱⑥均向+*y* 方向倾斜，角度为 $\theta$，在导磁环水平无偏转的情况下，剖面图 *A-A*、*B-B* 如图 4 (c)所示。

由图 4 (c)可知，*x* 路传感器的铁芯柱①、铁芯柱②、铁芯柱⑤、铁芯柱⑥与导磁环的气隙满足 $\delta_1'=\delta_2'=\delta_5'=\delta_6'$，电桥平衡。

当导磁环向+*y* 方向偏转，角度为 $\alpha$ 时，剖面图 *A-A*、*B-B* 如图 4 (d)所示。

由图 4( d)可知，铁芯柱①、铁芯柱②、铁芯柱⑤、铁芯柱⑥与导磁环的气隙分别为 $\delta_1''=\delta_1'-\Delta\delta_1'$、$\delta_2''=\delta_2'+\Delta\delta_2'$、$\delta_5''=\delta_5'+\Delta\delta_5'$、$\delta_6''=\delta_6'-\Delta\delta_6'$。

结合图 4( b) 可得

$$\delta_1'-\Delta\delta_1'>\delta_1-\Delta\delta>\delta_6'-\Delta\delta_6' \tag{2}$$

$$\delta_2'+\Delta\delta_2'>\delta_2+\Delta\delta>\delta_5'+\Delta\delta_5' \tag{3}$$

由式(2)和式(3)可得

$$\delta_1''+\delta_2''>\delta_5''+\delta_6'' \tag{4}$$

此时 *x* 路传感器的电桥平衡被破坏，最终引起其对应的力矩器所通电流增大，造成交叉耦合。

进一步定量分析铁芯柱相对底座基准面的垂直度对交叉耦合的影响程度，可将图 4(d)转化为几何图示，如图 5 所示。

图 5 中存在如下关系式（各符号含义在图中标注）：

$$L=\frac{\delta_1'}{\tan\alpha} \tag{5}$$

$$l_3=h\tan\theta \tag{6}$$

$$\delta_1''=(L-l_1+l_3)\tan\alpha=\delta_1-l_1\tan\alpha+h\tan\alpha\tan\theta \tag{7}$$

$$\delta_2''=(L+l_1+l_3)\tan\alpha=\delta_1+l_1\tan\alpha+h\tan\alpha\tan\theta \tag{8}$$

$$\delta_5''=(L+l_1-l_3)\tan\alpha=\delta_1+l_1\tan\alpha-h\tan\alpha\tan\theta \tag{9}$$

$$\delta_6''=(L-l_1-l_3)\tan\alpha=\delta_1-l_1\tan\alpha-h\tan\alpha\tan\theta \tag{10}$$

*x* 路传感器的气隙差值为

$$\Delta\delta_x=\delta_1''+\delta_2''-(\delta_5''+\delta_6'')=4h\tan\alpha\tan\theta \tag{11}$$

进一步假设，*y* 路传感器的铁芯柱③、铁芯柱④、铁芯柱⑦、铁芯柱⑧完全垂直于底座基准面，当导磁环向+*y* 方向偏转，角度为 $\alpha$ 时，剖面图 *C-C* 的几何图示如图 6 所示。

图 6 中存在如下关系式（各符号含义在图中标注）：

$$\delta_7''=\delta_8''=\delta_1-l_2\tan\alpha \tag{12}$$

$$\delta_3''=\delta_4''=\delta_1+l_2\tan\alpha \tag{13}$$

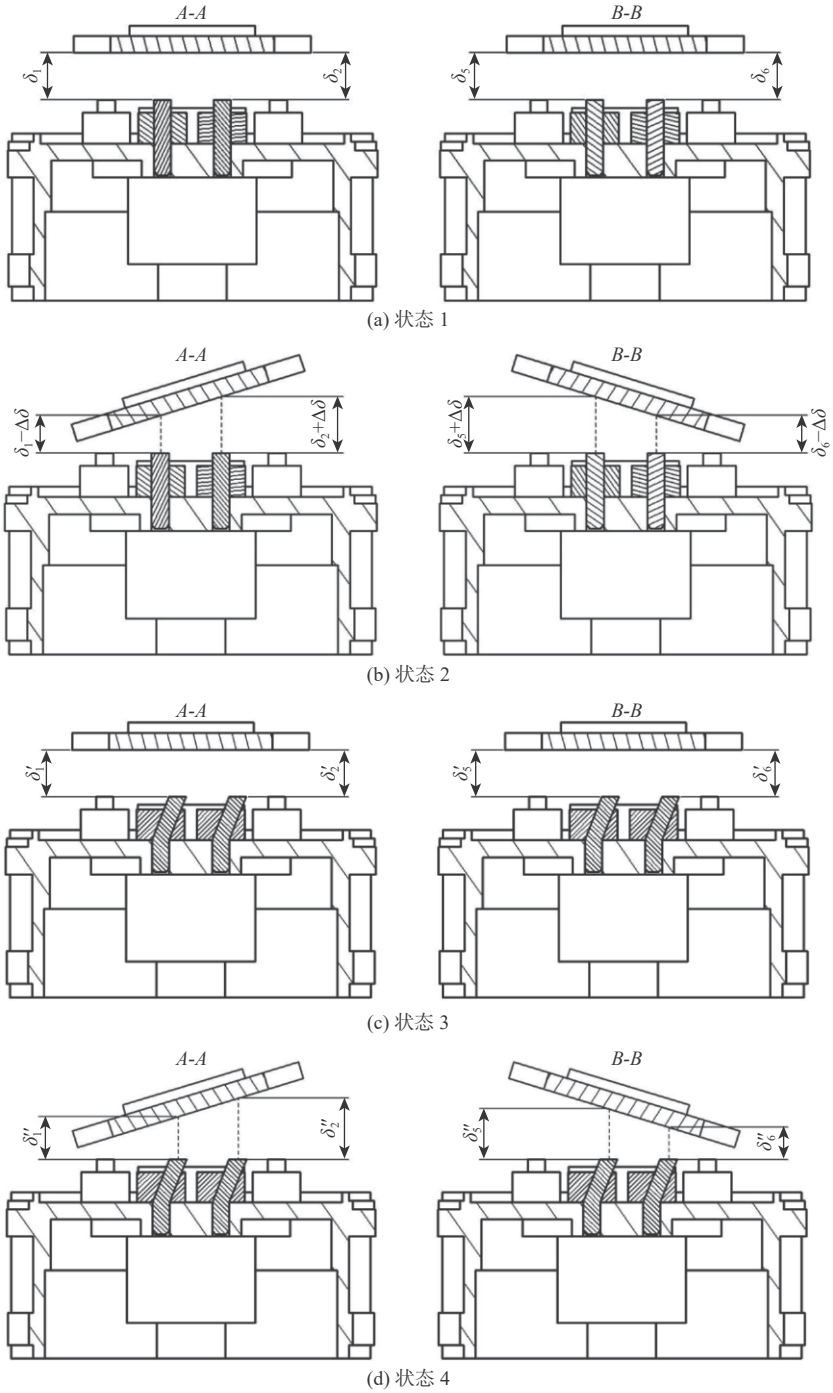



图 4 差动式电感传感器剖面图

Fig. 4 Profile map of differential inductance sensor

$y$ 路传感器的气隙差值为

$$\Delta\delta_y=\delta''_7+\delta''_8-(\delta''_3+\delta''_4)=4l_2\tan\alpha \tag{14}$$

由于$\Delta\delta_x$、$\Delta\delta_y$分别与其对应的力矩器 $x$、$y$ 中测得电压成比例，当比例系数相等时，交叉耦合$\psi_x$可描述为

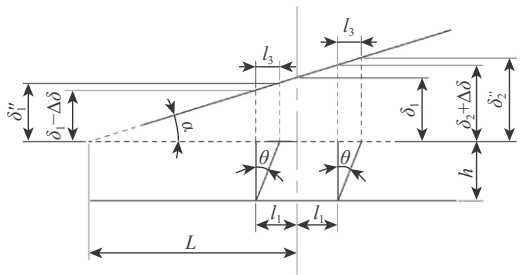
$$\psi_x=\frac{\Delta\delta_x}{\Delta\delta_y}=\frac{l_3}{l_2} \tag{15}$$

式(15)中的$l_3$实际描述的是铁芯柱①、铁芯柱②、铁芯柱⑤、铁芯柱⑥的倾斜程度在$+y$、$-y$ 方向的分量对交叉耦合$\psi_x$的影响。同理亦可推导出铁芯柱③、铁芯柱④、铁芯柱⑦、铁芯柱⑧的倾斜程度在$+x$、$-x$ 方向的分量对交叉耦合$\psi_y$的影响。

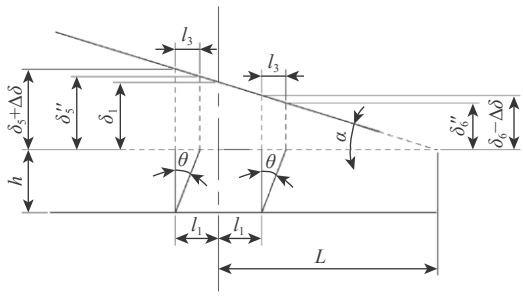
当技术指标要求$\psi_x$、$\psi_y$不大于 $\varepsilon$ 时，则在生产差动式电感传感器的过程中，仅需控制铁芯柱的垂直度不大于$\varepsilon l_2$，即可保证生产的传感器用于装配挠性陀螺，其交叉耦合满足指标要求。

### 2.2 力矩器影响因素分析

挠性陀螺中广泛使用的力矩器为动铁式双轴力矩器[17-18]，其所含零件为磁环组件、定圈支架、线圈、接线板、环氧树脂。其中，磁环组件装配于挠




(a) 图示 1




(b) 图示 2

图 5　状态 4 的几何图示

Fig. 5　Geometric structure of state 4

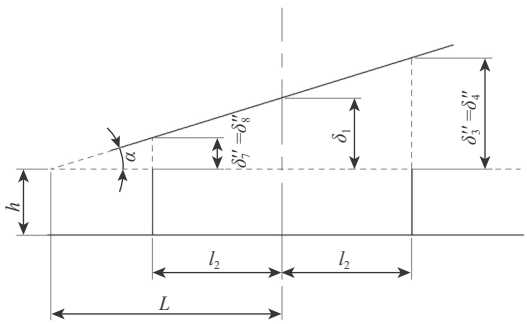



图 6　剖面图 *C-C* 的几何图示

Fig. 6　Geometric structure of profile *C-C*

性陀螺的陀螺转子上, 随其一同发生偏转。隐藏挠性陀螺的其他零件及环氧树脂胶层, 力矩器结构如图 7 所示。

力矩器造成挠性陀螺交叉耦合的主要原因为: 陀螺转子沿其敏感轴方向偏转时, 力矩器敏感轴方向线圈通电对装配在陀螺转子上的磁环组件施加电磁力矩, 对陀螺转子的偏转产生修正和补偿效应。由于线圈装配位置的精度存在不足, 导致施加

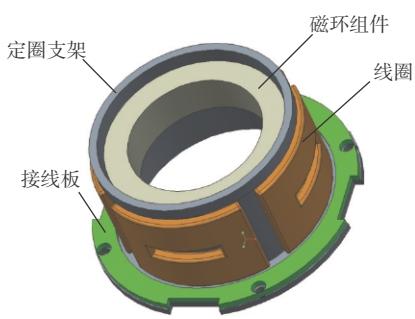



图 7　动铁式双轴力矩器结构

Fig. 7　Structure of moving-iron biaxial torquer

的电磁力矩等效合力的方向与陀螺转子的偏转方向存在夹角, 迫使陀螺转子的偏转方向发生改变, 在非敏感轴方向上存在分量。此时非敏感轴上差动式电感传感器的铁芯柱与导磁环的气隙发生改变, 在再平衡回路的控制下, 力矩器非敏感轴方向线圈通电工作, 对磁环组件施加电磁力矩, 修正和补偿陀螺转子在非敏感轴方向上的偏转。

力矩器上共装配 4 个“回型”线圈, 考虑 1 个线圈即可存在 2 个方向偏移的情况, 4 个线圈的偏移情况经排列组合后问题将变得十分复杂, 故只举例 2 种情况的误差模型, 作为指导生产的理论依据。

力矩器编号为①～④的线圈安装在定圈支架上, 由环氧树脂固封, 其不含胶层的俯视工程图如图 8 所示(线圈涂黑)。

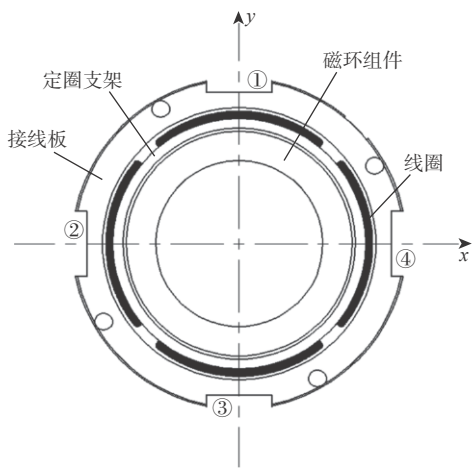



图 8　力矩器俯视图

Fig. 8　Top view of torquer

假设 4 个线圈装配的位置不存在误差, 在陀螺转子向+$y$ 方向偏转时, 线圈①、线圈③将通入电流, 其大小与偏转角度成正比。其中, 线圈①对磁环组件施加推力 $F_1$, 线圈③对磁环组件施加拉力 $F_3$, 即为作用在磁环组件上的电磁力矩, 其合力为 $F_y$, 方向为−$y$。$F_y$可修正和补偿陀螺转子的偏转, 力矩器的线圈②、线圈④未工作, 未引起挠性陀螺的交叉耦合。

假设线圈①～线圈④均沿逆时针方向偏移, 偏移角度为 $\beta$。则力矩器线圈的装配误差示意图如图 9 (a) 所示, 为方便观察, 图 9 (a) 中的 $F_{xx}$与 $F_{yx}$的矢量长度未按比例绘制。

当陀螺转子沿+$y$ 方向偏移, 线圈①、线圈③通电工作, 其对磁环组件作用的合力为 $F_y$, $F_y$沿−$y$ 方向的分量为 $F_{yy}$, 沿+$x$ 方向的分量为 $F_{yx}$, 其大小可表示为

$$F_{yy} = F_y \cos\beta \tag{16}$$

$$F_{yx}=F_y\sin\beta \tag{17}$$

$F_{yy}$将修正和补偿陀螺转子在+$y$方向的偏转，但$F_{yx}$将造成陀螺转子在+$x$方向发生偏转。这将改变$x$轴上差动式电感传感器的气隙，最终导致力矩器线圈②、线圈④通电工作。线圈②、线圈④对磁环组件作用的合力为$F_x$，$F_x$沿−$x$方向的分量为$F_{xx}$，沿−$y$方向的分量为$F_{xy}$，其大小可表示为

$$F_{xx}=F_{yx}=F_x\cos\beta \tag{18}$$

$$F_{xy}=F_x\sin\beta \tag{19}$$

$F_{xx}$将抵消陀螺转子沿+$x$方向的偏转，其大小与$F_{yx}$相等，方向相反。$F_{xy}$将辅助$F_{yy}$一同修正和补偿陀螺转子沿+$y$方向的偏转。

由于$F_x$、$F_y$与力矩器$x$路、$y$路的输出成正比，当两路的比例系数（即力矩器系数$K_L$）相等时，结合式(17)和式(18)，交叉耦合$\psi_x$可描述为

$$\psi_x=\frac{F_x}{F_y}=\frac{\sin\beta}{\cos\beta}=\tan\beta \tag{20}$$

假设线圈①、线圈③沿逆时针方向偏移，偏移角度为$\beta$；线圈②、线圈④沿顺时针方向偏移，偏移角度为$\beta$。则力矩器线圈的装配误差示意图如图9(b)所示，为方便观察，图9 (b)中的$F_{xx}$与$F_{yx}$的矢量长度未按比例绘制。

图9 (b)中，陀螺转子向+$y$方向偏转，因力矩器线圈装配误差，进而造成陀螺转子向+$x$方向偏转。$F_{yx}$为陀螺转子沿+$x$方向偏转的成因，$F_{xx}$将抵消陀螺转子沿+$x$方向的偏转，其大小与$F_{yx}$相等，方向相反。$F_{xy}$将加剧陀螺转子沿+$y$方向偏转，$F_{yy}$将修正和补偿陀螺转子沿+$y$方向的偏转。该误差模式下的交叉耦合$\psi_x$同样由式(20)描述。

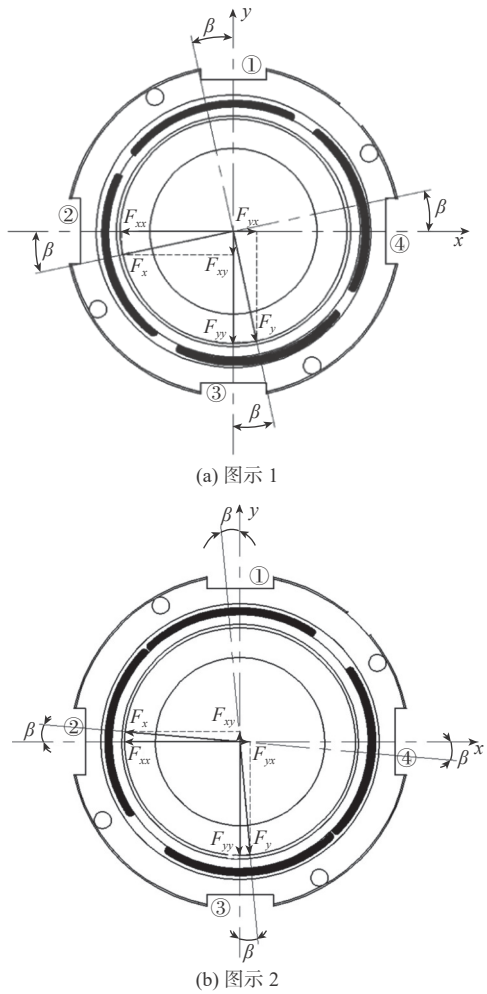
按照上述误差模型的分析过程，同理可推导出力矩器线圈①～线圈④的偏移程度对交叉耦合$\psi_y$的影响。

当技术指标要求$\psi_x$、$\psi_y$不大于$\varepsilon$时，则在生产力矩器的过程中，仅需控制线圈的偏移角度$\beta$不大于$\arctan\varepsilon$，即可保证生产的力矩器用于装配挠性陀螺，其交叉耦合满足指标要求。

### 2.3 影响因素叠加分析

通过对传感器影响因素、力矩器影响因素进行分析，分别建立了单影响因素误差模型。在实际生产过程中，2种影响因素同时存在，涉及2种影响因素叠加的情况。耦合结果比较复杂，既存在2种误差叠加，引起交叉耦合进一步增大，也存在2种误差相抵，使交叉耦合降低。为有效控制交叉耦合，重点考虑误差叠加的情况。

传感器铁芯柱的装配可以近似看作刚体间的固连，通过合理设计零件间的配合尺寸，精细控制零件、工装的加工精度，可以将铁芯柱的垂直度控制在极高水平。结合中小型挠性陀螺的实际体积，铁芯柱垂直度控制在0.02 mm可以实现，最大可引起交叉耦合为0.2%。




(a) 图示1

(b) 图示2

图9 力矩器装配误差示意图

Fig. 9 Schematic diagram of assembly error of torquer

相比而言，力矩器线圈为“软”状态，其装配的周向精度控制工艺难度更高。即使设计和使用高精度的线圈精密装配工装进行生产，线圈装配的角度偏移误差最大也可达0.5°左右，可引起交叉耦合为0.87%。

结合上述分析，需要综合考虑传感器影响因素与力矩器影响因素的权重分配，估算两者权重比为1∶4.35。根据铁芯柱垂直度、线圈周向分布偏移角度的计量结果对传感器、力矩器进行选配，可进一步控制交叉耦合。

## 3 交叉耦合控制

通过对差动式电感传感器、力矩器的误差模型进行分析，确定通过控制传感器铁芯柱和力矩器线圈的装配精度，以保证最终生产的挠性陀螺的交叉

耦合满足指标要求。

### 3.1　传感器相关控制方法

某型号挠性陀螺的差动式电感传感器的生产制造过程为: 齐套零件。将铁芯柱安装于底座上。通过激光焊接将铁芯柱与底座固连。通过机械加工保证铁芯柱垂直高度、上端面至基准面的平面度。将绕制、选配的线圈装配于铁芯柱上。焊接线圈并装配引出线, 测试传感器灵敏度等参数。检验合格并入库。

该型号挠性陀螺的技术指标要求交叉耦合$\psi_x$、$\psi_y$不大于 1%, 尺寸$l_2$为 10 mm, 则传感器铁芯柱相对于底座基准面的垂直度应不大于 0.1 mm。为此设计并生产铁芯柱精密装配工装, 以满足其形位精度要求, 工装实物如图 10 所示。

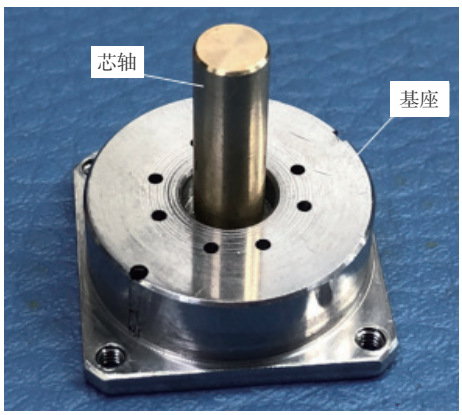



图 10　铁芯柱精密装配工装

Fig. 10　Precision assembly tool of iron core column

由于该型号挠性陀螺底座的力矩器安装面与法兰下端面(基准面)的平行度为 5 μm, 该工装将以底座的力矩器安装面为定位基准, 安装铁芯柱。工装由基座和芯轴组成, 基座用于保证铁芯柱的安装精度, 芯轴则方便最后的脱模操作。基座材料为 2Cr13; 圆形端面、方形端面的平行度不大于 5 μm; 端面上 8 个盲孔相对于圆形端面的垂直度不大于 5 μm; 盲孔与铁芯柱为间隙配合, 配合间隙为 5～10 μm。芯轴材料为 H62, 与基座为螺纹连接; 芯轴外径小于底座轴承室内径, 单边间隙不小于 1 mm。

铁芯柱精密装配工装的使用方法为: 清洗工装并晾干。将铁芯柱逐一安装于工装的 8 个盲孔中, 确保安装到底。将底座安装至工装上, 使工装上的 8 个铁芯柱穿入底座的铁芯柱安装孔、中心轴穿过底座轴承室, 底座的力矩器安装面与工装的圆形端面贴合紧密。将 4 枚螺钉穿过底座法兰安装孔, 紧固至工装四角的螺纹孔中, 边紧固边用深度尺测量工装方形端面四角的高度, 保证各点的高度极差不大于 0.01 mm。使用激光焊接将铁芯柱与底座固连。拆卸螺钉, 并使用支撑座和压床将工装从底座中脱模。

### 3.2　力矩器相关控制方法

通过力矩器控制挠性陀螺交叉耦合的方法有 2 种: 设计并生产线圈精密装配工装, 由力矩器装配阶段进行控制; 对力矩器增加可调设计, 由挠性陀螺调试阶段进行控制。

#### 3.2.1　线圈精密装配工装设计

某型号挠性陀螺的力矩器制造过程为: 齐套零件。将线圈装配于定圈支架上, 线圈与接线端子焊接。环氧树脂灌封。通过机械加工保证力矩器的尺寸及形位精度。黏接接线板。焊接引出线。检验合格并入库。

该型号挠性陀螺的技术指标要求交叉耦合$\psi_x$、$\psi_y$不大于 1%, 力矩器装配于底座上时, 由定位销约束其圆周位置, 则力矩器线圈相对于其定位孔角度的偏移应不大于 arctan(1%) = 0.57°。为此设计并生产线圈精密装配工装, 以满足其装配位置精度要求, 工装实物如图 11 所示。

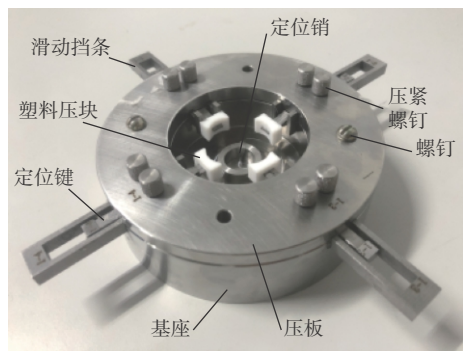



图 11　线圈精密装配工装

Fig. 11　Precision assembly tool of coil

工装由基座、压板、定位销、定位键、滑动挡条、塑料压块、压紧螺钉、螺钉组成。基座上定位键安装槽的加工精度较高, 其与定位销安装孔所成角度分别为 45°、135°、225°、315°, 公差为±0.25°, 其与定位键为滑动配合, 配合间隙为 10～20 μm。

线圈精密装配工装的使用方法为: 将定圈支架放置于基座中心孔上, 定位销穿过定圈支架的定位孔, 约束其周向位置。将 4 个线圈分别安装于定位键上, 依靠线圈的“回型”孔与定位键配合定位。在线圈黏接面上均匀涂抹黏接剂。推动定位键带动线圈至中心位置。推动滑动档条, 通过塑料压块将线圈压紧在定圈支架上。拧紧压紧螺钉, 确保线圈与定圈支架之间不会发生相对位移。按要求操作使黏接剂固化。放松压紧螺钉, 依次撤除滑动档条、塑料压块及定位键, 取出力矩器。

#### 3.2.2　力矩器可调设计

当力矩器线圈的安装误差符合图 9 (a)所示的

误差模型，即均沿逆时针或顺时针方向偏移一角度时，可通过对力矩器定圈进行可调设计，实现在挠性陀螺的调试阶段控制其交叉耦合。

具体设计方案为：力矩器的安装孔设计为圆周方向腰型孔，并取消力矩器定位销。可调设计示意图如图 12 所示，其中，环氧树脂胶层已隐藏。

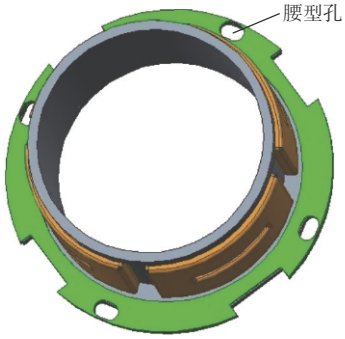



图 12 可调设计示意图

Fig. 12 Schematic diagram of adjustable design

在挠性陀螺调试阶段，先使用速率转台对其输入角速率，由式(1)计算当前挠性陀螺的交叉耦合 $\psi_x$、$\psi_y$。放松力矩器安装螺钉，小幅转动力矩器后重新拧紧力矩器安装螺钉，再次测试挠性陀螺的交叉耦合。在力矩器周向可调的较小范围内，交叉耦合的变化具有单调性，通过几次调整，即可调整交叉耦合至满足技术指标要求。

## 4 工程实践

### 4.1 传感器生产控制效果

某型号挠性陀螺的差动式电感传感器使用铁芯柱精密装配进行生产制造，随机选取生产车间某批次传感器 5 件，使用三坐标计量仪对传感器各铁芯柱相对于底座基准面的垂直度进行计量，计量结果如表 1 所示，其中，①～⑧为铁芯柱。

由表 1 可知，共计量 40 件铁芯柱相对于底座基准面的垂直度，最大值为 0.012 1 mm，均满足不大于 0.1 mm 的指标要求。说明使用铁芯柱精密装配工装生产传感器，可有效保证铁芯柱装配后的形位精度。

表 1 铁芯柱垂直度计量结果

Table 1 Measurement results of perpendicularity of iron core column

| 传感器编号 | 垂直度指标/mm | | | | | | | | 是否合格 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | |
| 1 | 0.009 6 | 0.008 7 | 0.001 0 | 0.003 2 | 0.005 9 | 0.005 2 | 0.002 0 | 0.011 6 | 是 |
| 2 | 0.001 2 | 0.006 6 | 0.008 5 | 0.008 0 | 0.004 7 | 0.011 9 | 0.004 3 | 0.012 1 | 是 |
| 3 | 0.007 7 | 0.011 7 | 0.001 3 | 0.006 1 | 0.011 7 | 0.011 0 | 0.005 4 | 0.001 0 | 是 |
| 4 | 0.002 9 | 0.008 1 | 0.009 2 | 0.010 0 | 0.003 8 | 0.006 1 | 0.011 3 | 0.002 1 | 是 |
| 5 | 0.008 8 | 0.001 6 | 0.003 7 | 0.006 8 | 0.002 7 | 0.009 2 | 0.006 0 | 0.003 0 | 是 |

对表 1 中数据进一步分析，其最小值为 0.001 0 mm，平均值为 0.006 39 mm，极差为 0.011 1 mm，标准偏差为 0.003 57 mm。垂直度在合格指标范围内具有一定的离散性，这是由于传感器底座、铁芯柱及铁芯柱精密装配工装在加工生产过程中，其实际尺寸、形位等因素综合影响的结果。若进一步控制垂直度的离散性，须在机械加工过程中更为精细地控制切削参数，合理设置稳定处理工序，以提高产品质量与一致性。

### 4.2 力矩器生产控制效果

力矩器线圈装配完成后，可通过计量、拟合的方式检测其装配位置精度。已装配线圈的定圈支架展开如图 13 所示。

图 13 中，刻线位置为力矩器定位孔中心位置。令该位置为 0°，依次计量 0°到第 1 点～第 8 点的角度 $\gamma_i$，其中，$i$=1, 2, ⋯, 8。则拟合所得 4 个线圈相对力矩器定位孔的角度可描述为

$$\Gamma_i = \frac{\gamma_i + \gamma_{i+1}}{2} \qquad i = 1,3,5,7 \tag{21}$$

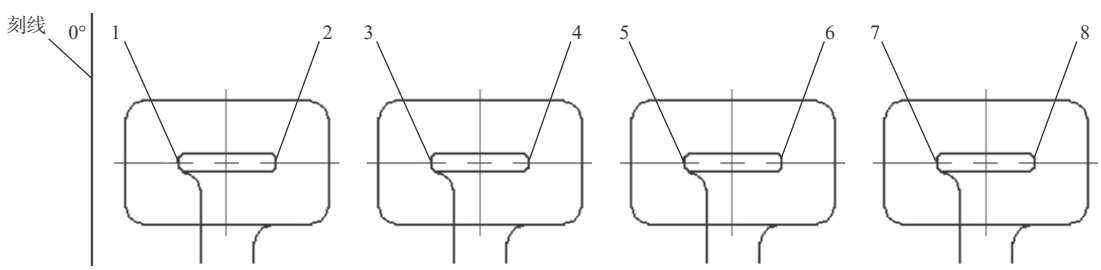



图 13 零件展开

Fig. 13 Part expansion

式中: $\Gamma_1$需满足(45±0.57)°, $\Gamma_3$需满足(135±0.57)°, $\Gamma_5$需满足(225±0.57)°, $\Gamma_7$需满足(315±0.57)°。

随机选取生产车间使用线圈精密装配工装生产的某批次力矩器 5 件, 使用三坐标计量仪对力矩器各线圈相对定位孔的角度进行计量, 并计算拟合结果, 如表 2 所示。

**表 2　线圈安装角度计量及拟合结果**

**Table 2　Measurement and fitting results of coil installation angle**

| 力矩器编号 | 各点实测值/(°) | | | | | | | | 各点拟合值/(°) | | | | 是否合格 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1、2 | 3、4 | 5、6 | 7、8 | |
| 1 | 25.00 | 64.30 | 115.10 | 153.80 | 204.60 | 244.40 | 294.90 | 336.20 | 44.65 | 134.45 | 224.50 | 315.55 | 是 |
| 2 | 24.70 | 65.20 | 115.20 | 154.70 | 204.30 | 244.60 | 294.20 | 335.90 | 44.95 | 134.95 | 224.45 | 315.05 | 是 |
| 3 | 25.00 | 65.20 | 115.00 | 154.80 | 204.30 | 245.10 | 294.80 | 334.20 | 45.10 | 134.90 | 224.70 | 314.50 | 是 |
| 4 | 25.10 | 65.00 | 115.10 | 154.50 | 204.70 | 244.50 | 295.70 | 335.00 | 45.05 | 134.80 | 224.60 | 315.35 | 是 |
| 5 | 25.30 | 65.50 | 116.00 | 154.50 | 204.20 | 245.00 | 294.30 | 334.80 | 45.40 | 135.25 | 224.60 | 314.55 | 是 |

由表 2 可知, 共计量 20 个线圈相对于力矩器定位孔的角度, 装配的角度偏移误差最大为 0.55°, 均满足指标要求。说明使用线圈精密黏接工装生产力矩器, 可有效保证线圈装配后的周向位置精度。

### 4.3　挠性陀螺交叉耦合控制效果

随机选取 5 块使用铁芯柱精密装配工装生产的差动式电感传感器、线圈精密装配工装生产的力矩器生产挠性陀螺, 并测试其交叉耦合, 分别绕 $x$ 轴、$y$ 轴±20(°)/s 旋转, 结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 共测试 5 块挠性陀螺的交叉耦合, 最大值为 0.90%, 均满足不大于 1% 的指标要求。说明通过使用铁芯柱精密装配工装、线圈精密装配工装保证差动式电感传感器、力矩器的装配精度, 可以有效控制所生产挠性陀螺的交叉耦合。

**表 3　挠性陀螺测试结果**

**Table 3　Test results of flexible gyro**

| 挠性陀螺编号 | 旋转轴及角度 | $U^{DC}_{x,+20}$/ mV | $U^{DC}_{x,-20}$/ mV | $U^{DC}_{y,+20}$/ mV | $U^{DC}_{y,-20}$/ mV | $\psi_x$/% | $\psi_y$/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 220036# | | −12.8 | 21.0 | 1 996.2 | −1 965.5 | 0.85 | |
| 220037# | | 18.9 | −8.7 | 1 981.8 | −2 022.3 | 0.69 | |
| 220041# | 绕$y$轴±20(°)/s旋转 | −6.6 | 20.4 | 1 974.2 | −2 022.0 | 0.68 | |
| 220044# | | 18.5 | −17.8 | 2 023.2 | −2 019.1 | 0.90 | |
| 220057# | | −6.8 | 17.0 | 2 009.4 | −2 010.5 | 0.59 | |
| 220036# | | 2 016.3 | −1 979.2 | 7.6 | 7.1 | | 0.01 |
| 220037# | | 2 053.6 | −2 093.4 | 0.9 | 7.5 | | 0.16 |
| 220041# | 绕$x$轴±20(°)/s旋转 | 2 022.0 | −2 037.9 | −9.9 | 4.7 | | 0.36 |
| 220044# | | 2 050.0 | −2 050.4 | 2.9 | −7.9 | | 0.26 |
| 220057# | | 1 994.2 | −1 983.5 | 5.1 | −3.8 | | 0.22 |

在实际工程应用中, 当安装陀螺的测试六面体形位精度稳定, 陀螺每次安装在六面体上时与定位台贴合紧密的情况下, 多次测试交叉耦合的结果具有较好的一致性, 变化量不超过 0.05%。因此, 将交叉耦合内控在 0.95% 以内, 可以满足不大于 1% 的技术指标要求, 具有较高的可靠性。

使用已落实可调设计方案的力矩器生产挠性陀螺, 并在挠性陀螺调试阶段调整其交叉耦合。220012#、220018#挠性陀螺的调试过程数据如表 4 所示。

**表 4　220012#、220018#调试过程数据**

**Table 4　Debugging process data of 220012# and 220018#**

| 挠性陀螺编号 | $\psi_x$/% | | | | $\psi_y$/% | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 初测 | 顺时针旋转 | 逆时针旋转 | 复测 | 初测 | 顺时针旋转 | 逆时针旋转 | 复测 |
| 220012# | 1.1 | 1.6 | 0.3 | 0.2 | 2.1 | 2.7 | 0.8 | 0.9 |
| 220018# | 2.1 | 2.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.8 | 0.8 |

由表 4 可知, 通过调整力矩器的周向位置, 220012#、220018#挠性陀螺的交叉耦合被有效控制在指标范围内。

调整合格后, 使用咪唑固定胶将力矩器与陀螺

底座胶接，并采用常温、高温相结合的固化方法。在随后的环境、力学试验中多次测试，其交叉耦合的变化量极小（一般不超过0.05%），处于稳定状态。因此，使用可调设计方案生产的挠性陀螺，按照内控指标不大于0.9%进行生产，即可满足最终不大于1%的技术指标要求，具有较高的可靠性。

综上，设计并使用铁芯柱精密装配工装、线圈精密装配工装生产挠性陀螺，对力矩器进行可调设计，均可有效控制挠性陀螺的交叉耦合，实测值满足指标要求。

## 5 结 论

1）建立的传感器、力矩器的几何、数学误差模型，能够准确定量分析2种元件的机械结构误差造成挠性陀螺交叉耦合的程度。

2）基于数学误差模型，可以根据某一型号挠性陀螺的技术指标准确换算成传感器、力矩器2种元件在生产制造过程中需要达到的技术指标。

3）工程实践表明，基于误差模型针对性设计的控制措施，可以有效控制传感器、力矩器2种元件的生产制造精度使其满足换算后的技术指标，并通过调整力矩器的周向安装位置实现挠性陀螺交叉耦合的调整。

4）研究成果可以有效指导挠性陀螺的生产制造，高效率、低成本的将交叉耦合控制在可接受范围内，满足大批量型号任务的生产需求。

随着研究的深入，挠性陀螺的陀螺转子（或其内部的挠性接头）对交叉耦合的影响机理被有效识别，若需进一步提高挠性陀螺对角速度的测量精度，更为严格地控制该指标，以减小其对惯导系统导航精度的影响，陀螺转子对交叉耦合的影响机理分析和控制方法研究将是后续工作的重点内容。

## 参考文献（References）


[1] 荣伟彬, 陈涛, 陈立国, 等. 挠性陀螺十字铰链模型的建立与分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 864-869.
RONG W B, CHEN T, CHEN L G, et al. Establishment and analysis of cross model of flexible gyro[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 864-869(in Chinese).

[2] 张锋. 陀螺转子动平衡校正系统与工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
ZHANG F. Research on dynamic balancing calibration system and process of gyro rotor[D]. Dalian: Dalian University of Technology , 2017(in Chinese).

[3] 熊伟, 丁海山, 付奎生. 陀螺敏感轴交叉耦合对稳定平台角速度的影响分析[J]. 计测技术, 2012, 32(5): 8-12.
XIONG W, DING H S, FU K S. Analysis of influence of the cross coupling of gyros sensitive axes on the angular rate of stabilized platform[J]. Metrology & Measurement Technology, 2012, 32(5): 8-12(in Chinese).

[4] 王俊璞, 田蔚风, 金志华, 等. 全姿态挠性陀螺寻北仪误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(z1): 56-57.
WANG J P, TIAN W F, JIN Z H, et al. Error analysis of all-attitude dynamically tuned gyro strapdown north-seeker[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(z1): 56-57(in Chinese).

[5] 陕西航天时代导航设备有限公司. 一种挠性陀螺交叉耦合补偿电路: CN 215639490 U[P]. 2022-01-25.
Shaanxi Aerospace Times Navigation Equipment Co. , Ltd. The invention relates to a flexible gyro cross-coupling compensation circuit: CN 215639490 U [P]. 2022-01-25(in Chinese).

[6] 张连超, 范世珣, 范大鹏, 等. 动力调谐陀螺再平衡回路数字化的研究与实现[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(12): 1974-1981.
ZHANG L C, FAN S X, FAN D P, et al. Research and implementation of digital control of dynamically tuned gyroscope rebalance loop[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(12): 1974-1981(in Chinese).

[7] LIU S X, LU T Y, SHANG T, et al. Dynamic modeling and coupling characteristic analysis of two-axis rate gyro seeker[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018, 2018: 8513684.

[8] 西安航天三沃机电设备有限责任公司. 一种惯性测量单元陀螺位置补偿方法: CN112683303B[P]. 2022-12-06.
Xi'an Aerospace Sanwo Electromechanical Equipment Co. , Ltd. An inertial measurement unit gyro position compensation method: CN112683303B[P]. 2022-12-06(in Chinese).

[9] 周百令, 胡永华, 王寿荣. ANSYS在挠性陀螺仪温度场分布分析中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(4): 89-92.
ZHOU B L, HU Y H, WANG S R. Application of ANSYS on the analysis of dynamically tuned gyro temperature field[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2000, 8(4): 89-92(in Chinese).

[10] 吴瑾颖, 刘光斌. 力学复合环境下挠性陀螺仪的动力学分析[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(5): 58-61.
WU J Y, LIU G B. Dynamics analysis for dynamically tuned gyro under overload-vibration[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(5): 58-61(in Chinese).

[11] 周政. 基于CompactRIO的动力调谐陀螺仪再平衡回路设计与远程控制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
ZHOU Z. Design and remote control method of dynamically tuned gyroscope rebalancing circuit based on CompactRIO[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017(in Chinese).

[12] 李郴荣, 戴兴安, 陈均瑞, 等. 无人机挠性陀螺传感器仿真模型研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 54-57.
LI C R, DAI X A, CHEN J R, et al. Research on simulation model for UAV flexible gyroscope sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(5): 54-57(in Chinese).

[13] 贾米娜. 挠性陀螺解耦及数字再平衡技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2006.
JIA M N. The study on decoupling and digital rebalance technique of flexibile gyroscope[D]. Taiyuan: North University of China, 2006(in Chinese).

[14] 王亚辉, 李醒飞, 纪越, 等. 改进极大似然法动力调谐陀螺仪闭环辨识[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(6): 499-506.
WANG Y H, LI X F, JI Y, et al. Dynamically tuned gyroscope closed-loop identification based on modified maximum likelihood

method[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(6): 499-506(in Chinese).

[15] 孙殿平, 郭超修, 柴志方, 等. 基于差动电容传感器的阻尼振动研究[J]. 大学物理, 2019, 38(7): 36-38.
SUN D P, GUO C X, CHAI Z F, et al. Research on damped vibration based on differential capacitance sensor[J]. College Physics, 2019, 38(7): 36-38(in Chinese).

[16] 赵焕玲. 一种双轴差动自感式传感器[J]. 贵州科学, 2020, 38(5): 71-74.
ZHAO H L. A dual-axis self-induction differential sensor[J]. Guizhou Science, 2020, 38(5): 71-74(in Chinese).

[17] 郑桂隆. 动力调谐陀螺仪力矩器定圈组件制造技术研究[J]. 导航与控制, 2005, 4(3): 69-72.
ZHENG G L. Research on manufacturing technology of dynamic tuning gyroscope torquer[J]. Navigation and Control, 2005, 4(3): 69-72(in Chinese).

[18] 杨林, 郑保国, 程玲莉, 等. 陀螺力矩器磁场仿真分析及磁路优化设计[J]. 磁性材料及器件, 2022, 53(1): 46-48.
YANG L, ZHENG B G, CHENG L L, et al. Magnetic field simulation analysis and magnetic circuit optimization design of gyro torque[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2022, 53(1): 46-48(in Chinese).

# Analysis and control of influencing factors of cross coupling of flexible gyro

CAI Yao*, SI Yuhui, WANG Yuzhuo, DU Xin, YIN Lu

(Xi'an Aerospace Precision Mechatronics Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract**: Due to mechanical structure error and electrical interference, the produced flexible gyro has cross coupling. The influencing factors of cross coupling were analyzed, which were positioned as the perpendicularity of the iron core column of the differential inductance sensor and the circumferential deviation angle of the torquer coil. The error models of the sensor and torquer were established, and the influencing degree of each influencing factor on cross coupling was quantitatively analyzed. Precision assembly tools of the iron core column and coil were designed, and an adjustable design of torquer was carried out to control the cross coupling of the flexible gyro. The engineering practice shows that all the control methods achieve good results, and the cross coupling stability control is less than 1%, which has a positive significance for improving the measurement accuracy of the diagonal velocity of the flexible gyro and the navigation accuracy of the inertial navigation system.

**Keywords**: flexible gyro; cross coupling; influencing factors; differential inductance sensor; torquer; adjustable design

**Received**: 2022-12-06; **Accepted**: 2023-03-10; **Published Online**: 2023-03-28 09:01
**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230327.1334.005

* **Corresponding author**. E-mail: 615596667@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1026

# 传感器结冰特性及其影响规律试验研究

丁亮，胡站伟，郭向东，石雅楠，易贤*
(中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室，绵阳 621000)

**摘 要**：结冰探测是飞机结冰防护系统运行的前提和依据，是结冰防护面临的首要问题。目前，针对探针结冰过程的研究缺乏实测数据，相关规律尚待验证。为更准确地模拟飞机遭遇的真实结冰环境，利用大型结冰风洞开展传感器结冰特性试验研究。采用探针阵列分布和冰形可重复性验证相结合的试验方法，通过在线实拍图像、实测结冰外形与结冰质量等数据，直观、定量地揭示探针表面水滴撞击的细节特征及变化规律。结果表明：探针圆柱表面的水收集系数沿轴向先增大后减小，存在极值点，且该点高度会随壁面边界层的发展逐步上升，变化量级处于2～30 mm之间；此外，各探针位置面对来流参数变化的敏感程度不同，结冰质量较大且对迎角变化敏感度较低的点，将具备更好的探测效果。实测数据与分析结果可为传感器探针的精确设计提供依据。

**关 键 词**：结冰探测；液滴撞击；结冰特性；冰风洞；边界层
**中图分类号**：V221+.3; TB553
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0152-09

飞行实践表明，当飞机穿过含过冷水滴的云层时，一些部件的迎风表面与气流裹挟下的过冷水滴发生碰撞，将会发生结冰现象[1-2]。在无结冰防护或防护不当时，结冰会使飞机升阻特性恶化、失速迎角及稳定性裕度减小、操纵性降低[3-5]，严重威胁飞行安全。结冰探测是飞机结冰防护系统运行的前提和依据，其有效性和精确程度极其关键。结冰传感器一般安装在飞机的易结冰部位，以判断飞机是否结冰，并给出结冰厚度、结冰速率、报警强度等信息[6]。高性能结冰传感器还能定量给出结冰的严重程度，配合机载防除冰装置，减小飞机在结冰气象条件下失事的可能性。

由于飞机结冰过程呈动态特征且冰层具有极其复杂的内部结构，目前的探测技术普遍存在实时探测可靠性较差、传感器位置不佳、对结冰强度(结冰速率)和厚度的实时定量辨识精度普遍较低等问题[7]。飞行员有时已然目测结冰发生，而结冰传感器却未曾报警。这种传感器低可靠性带来的问题使得飞机在结冰气象下飞行时具有较大的潜在风险[8]。改善结冰传感器的工作效果可通过2个方面来实现：①提高传感器内部系统的探测精度；②优化传感器探针的设计高度、安装位置等，提高其对飞机结冰的捕捉能力。在飞机机头表面，其不同区域的流场分布、水滴撞击情况差别较大，对于结冰的捕捉能力必然有所差异；同时，由于壁面边界层沿流向的逐步发展，不同位置探针的高度需求将发生变化。针对上述现象与问题，国内仅开展过部分数值仿真探索工作[9-10]，缺乏真实结冰环境下的实测数据，与水滴运动撞击、表面边界层效应相关的一些规律特征仍需验证[11-12]，国际上也罕见公开发表的相关试验数据。因此，本文依据空气动力学基础理论和结冰风洞试验方法，选取常用机头外形，在3 m×2 m大型结冰风洞中开展试验研究，通过实拍图像、实测结冰外形、结冰质量等数据，直观、定量地揭示机头表面探针结冰过程的细节特征及其影响规律。

由于大型结冰风洞单次的试验耗费巨大，因此，在实施过程中希望用最经济的条次覆盖尽可能

收稿日期：2023-01-02；录用日期：2023-04-10；网络出版时间：2023-04-18 09:50
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230417.1819.001
基金项目：国家自然科学基金(52106001)；中国博士后科学基金(2022M713865)
*通信作者. E-mail：yixian@cardc.cn

引用格式：丁亮，胡站伟，郭向东，等. 传感器结冰特性及其影响规律试验研究[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：152-160.
DING L，HU Z W，GUO X D，et al. Test research on icing characteristics of sensors and their influence laws[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：152-160 (in Chinese).

多的位置。据此, 采用传感器阵列排布和冰形可重复性验证相结合的试验方法, 从不同工况下机头表面整体和局部的结冰特点出发, 揭示探针上的覆冰规律从而指导探针设计, 并通过来流参数影响规律分析, 重点研究不同探针位置面对气流速度、飞行迎角(angle of attack, AOA)等参数改变时的敏感程度。本文针对机头探针结冰问题建立了较为完整的试验研究方法, 实测数据与分析结果可为传感器探针的精确设计提供依据, 支撑中国飞机结冰探测技术的进一步发展。

## 1　试验平台及研究对象

试验所用 3 m×2 m 结冰风洞是一座闭口回流式高亚音速风洞, 轮廓如图 1 所示[13-14], 主要由制冷系统、高度模拟系统和喷雾系统等组成。温度控制范围为−40℃～常温, 高度模拟范围为 0～20 000 m; 喷雾系统利用喷雾耙和喷嘴产生结冰云雾, 其模拟范围能够覆盖中国民用航空规章第 25 部附录 C 结冰气象条件包线[15]的大部分条件。2019 年, 3 m×2 m 结冰风洞主试验段开展了全面的流场校测(包括气动热流场和结冰云雾场), 流场校测结果表明, 其主试验段流场品质满足 SAE ARP5095 的指标要求[16]。此外, 采用 NACA0012 翼型(弦长 0.914 m, 展长 2 m)在 3 m×2 m 结冰风洞主试验段中开展了标模结冰试验, 对 2014 年和 2018 年 2 次试验结果进行了重复性验证并与 SAE ARP5666[17] 中的数据进行了对比, 冰形曲线与国外结冰风洞试验结果一致性良好, 如图 2 所示[18]。图中对比的流场条件为: 高度 $H$=457 m、速度 $V$=67.1 m/s、静温 $T$=7℃、水滴直径为 20 μm、液态水含量为 0.5 g/m$^3$、$t$=25 min 为结冰时间、飞行迎角为 3°; CIRA.1R、COX、BRAIT、IRT 和 GKN 分别为国外几座知名风洞的简称; CARDC 表示中国空气动力研究与发展中心。

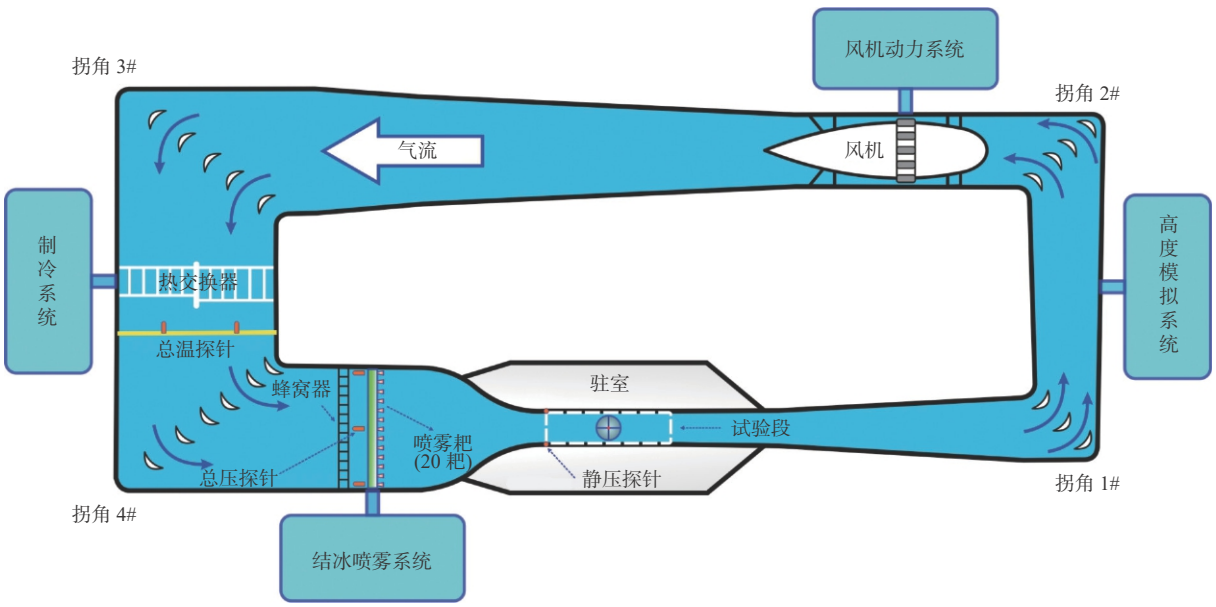



图 1　3 m×2 m 结冰风洞布局[13-14]

Fig. 1　Layout of 3 m×2 m icing wind tunnel[13-14]

选取某典型机头外形作为研究对象, 模型最大截面直径为 0.8 m, 最大截面积约 0.5 m$^2$, 相对于试验段的阻塞比为 8.3%。机头模型通过支架竖直安装于试验段上下转盘之间, 模型迎角变化由转盘转动实现, 设计的安装形式如图 3 所示。

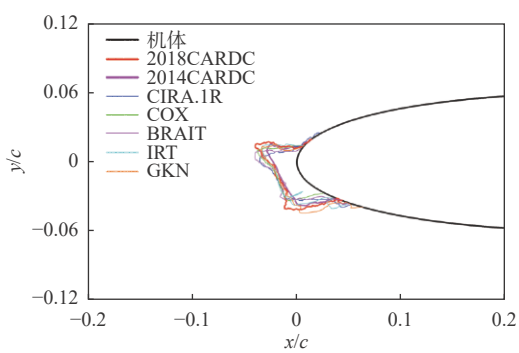



图 2　标模结冰试验结果对比[18]

Fig. 2　Comparison of icing test results of standard model[18]

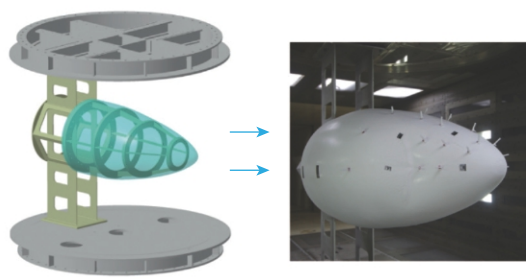


图 3　机头模型安装设计

Fig. 3　Nose model installation design

## 2 试验研究方法

### 2.1 传感器阵列排布

大型风洞中单次结冰试验的耗费较大、总条次有限，为全面研究机头表面不同位置的结冰特点，设计时预留了多个安装孔位，希望用最经济的条次覆盖尽可能多的结冰区域。根据机头轮廓和由其决定的气动特征，沿机头表面曲率过渡处设置了5个研究截面(见图4)，0号截面为传感器原始安装位置所在截面。由于机头左右对称，在每个截面右半部分均匀设置6个安装孔位，沿来流顺时针方向由上而下依次编号为1～6。传感器探针高度均为40 mm，直径为3 mm。

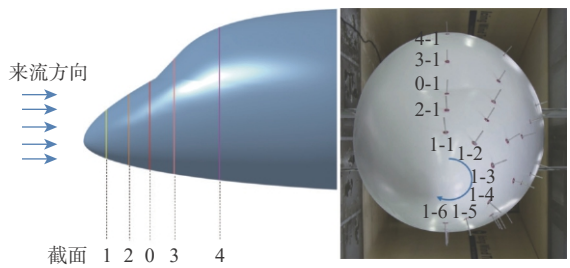



图4 截面及传感器位置定义

Fig. 4 Section and definition of sensor position

同时，为避免探针间的相互干扰，以环境温度为−25℃、速度为90 m/s来流条件为测试环境，进行连续5次的干扰程度测试，结冰时间均设置为300 s。第1次测试中所有孔位布满探针，后4个条次拆装相应位置探针，通过前后对比评估干扰程度。实测发现，截面0受截面2的遮挡影响较为明显；此外，由于与流线方向平行度高，模型最左侧和最右侧传感器位置连线区域相互干扰严重。针对这一现象，在后4次测试过程中对相应位置进行拆卸。以图5所示为例，去掉2-3位置后，其后方0-3位置冰形恢复正常；相反的，去掉1-4位置后，2-4位置冰形及质量几乎没有变化，因此，1-4位置可以保留。采用上述方法，通过气动分析并结合实测效果空置了部分区域，确定了如图6所示的传感器阵列形式。

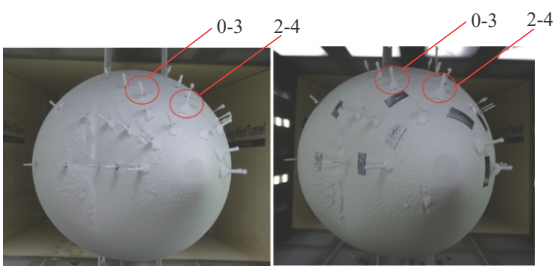



图5 干扰程度测试

Fig. 5 Interference degree test

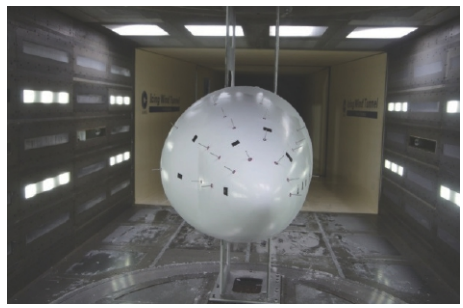


图6 传感器阵列形式

Fig. 6 Form of sensor array

### 2.2 冰形可重复性验证

在减少探针表面结冰相互干扰的基础上，风洞自身参数的稳定性是保证试验结果准确的另一重要因素。因此，以相同位置的结冰冰形和结冰质量为评估标准，开展了试验的可重复性验证。图7为1-1位置在相同模拟环境下的多次结冰冰形，其中静温 $T$=−25℃，速度 $V$=90 m/s，水滴直径为20 μm，液态水含量为1 g/m$^3$。图8为同一位置的结冰质量对比，可以看出，重复试验所得冰形相似度很高，均呈现出“靴子”状，其主干区域厚度均在20～25 mm的范围内，底部伸出尖角长度均在50 mm附近；同时，其结冰质量十分接近，变化区间为5.65～6.09 g，均方差仅为0.171。上述重复性试验的数据表明，风洞控制参数的稳定性和精确程度可以满足拟开展研究的需要。

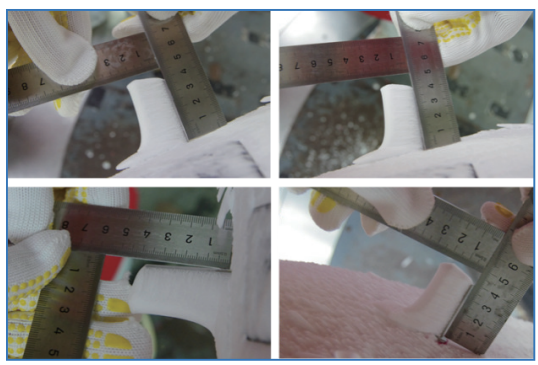


图7 可重复性测试结冰冰形

Fig. 7 Ice shapes for repeatability test

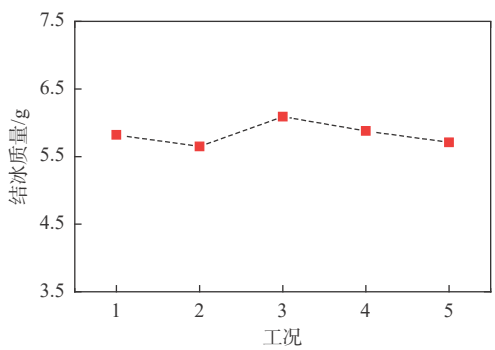



图8 可重复性测试结冰质量(1-1位置)

Fig. 8 Ice quality for repeatability test (1-1 position)

### 2.3　方案设置

试验前期准备完成后，旨在开展两方面的研究：①不同工况下飞机机头及传感器探针表面的结冰特性；②来流参数变化对不同位置探针结冰敏感度的影响规律。相应地，选取的环境模拟条件如表 1 所示，主要考虑环境静温、速度、迎角、水滴直径、结冰时间 5 个变量，液态水含量均为 1 g/m$^3$。其中，通过环境静温的变化希望得到不同类型的附着冰（明冰与霜冰）；速度、迎角和水滴直径对不同位置探针表面的水滴撞击分布影响显著；此外，本项试验研究的重点为霜冰状态下探针表面的局部结冰特征，而液态水含量作为撞击水的总量对于探针轴向的水收集分布影响较小，为降低试验成本和对比其他环境变量，将其固定为统一值。

表 1　环境模拟条件

Table 1　Environmental simulation conditions

| 工况 | 温度/℃ | 速度/(m·s$^{-1}$) | 迎角/(°) | 水滴直径/μm | 时间/s |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | −10 | 90 | 2 | 20 | 180 |
| 2 | −10 | 90 | 2 | 30 | 180 |
| 3 | −25 | 90 | 4 | 20 | 80 |
| 4 | −25 | 90 | 6 | 20 | 80 |
| 5 | −25 | 65 | 2 | 15 | 300 |
| 6 | −25 | 40 | 2 | 15 | 300 |
| 7 | −25 | 65 | 2 | 20 | 80 |
| 8 | −25 | 90 | 2 | 20 | 80 |
| 9 | −25 | 65 | 2 | 30 | 80 |
| 10 | −25 | 90 | 2 | 30 | 80 |
| 11 | −25 | 40 | 2 | 20 | 80 |

试验过程中，通过传感器探针结冰过程的录像与相关细节照片，能直观分析机头表面探针的整体结冰特点；各探针位置的结冰特性，可利用图片展示、厚度测量及质量测定等方式进行定量分析。具体的实施流程包括：调整转盘角度至目标迎角，设置风速、温度和模拟高度；等待气流参数稳定后，设置喷雾系统的水压、气压和喷雾时间至目标值，开始计时喷雾；达到结冰时间后停止吹风和喷雾，适当降低风洞总温以避免风洞回压后导致可能存在的残留冰融化；进洞采集数据时，拍摄探针位置的局部结冰情况，测量结冰厚度，并确定每一个安装探头表面的局部结冰质量。

## 3　传感器探针结冰特性分析

### 3.1　整体结冰分布

图 9 为试验段内机头表面的整体结冰情况，其中的一些特征是所有工况共有的。由图可见，机头表面风挡和前部尖端一定范围内均存在较大面积结冰，而底部区域较为光洁，这是机头几何轮廓的气动特点所决定的：风挡与机头前端区域在正对来流方向上的投影面积较大，受到水滴群的直接撞击；底部区域则与来流方向的平行度高，不易直接黏附水滴。

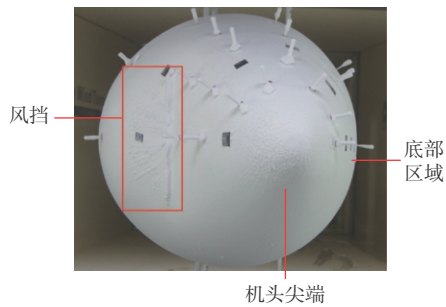



图 9　机头表面整体结冰特点

Fig. 9　Overall icing characteristics of nose surface

### 3.2　霜冰状态局部结冰特征

工况 3～11 的环境温度较低，为典型的霜冰工况。图 10 为霜冰工况下的局部结冰特点，可见，此时探头表面积冰的生长方向与来流方向平行，厚度也主要沿探头轴向变化。图 10 同时给出了试验中不同安装位置发展出的 5 种极具代表性的冰形轮廓，由左至右依次编号为①～⑤号冰形。可以看出，①～③号冰形中均出现迎着来流方向伸出的尖角状部分，但出现位置逐步从探针底部向上端移动，尖角两侧均发展为弧形轮廓区域；④号冰形也在探头顶端存在尖角状部分，但不完整，上半弧形区域缺失；⑤号冰形由下到上逐渐变厚，尚未达到最大厚度，未出现明显尖角。

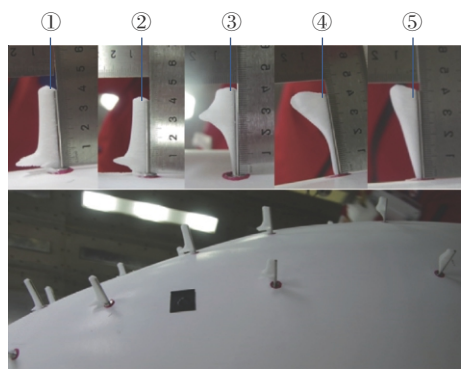



图 10　霜冰工况下的局部结冰特点

Fig. 10　Local icing characteristics under rime ice conditions

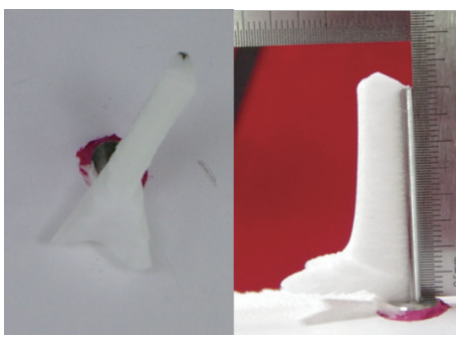
### 3.3　探针表面水收集特性分析

霜冰条件下，来流携带的过冷水滴撞击到探针圆柱表面马上冻结，冰形生长与液态水收集情况十分接近，因此，冰形轮廓可以直接反映水收集系数沿探针轴向的分布。通过图 10 进一步分析，由①～⑤号典型冰形的共同点可知，所有传感器探针表面的水收集系数均呈现先增大后减小的趋势，存

在极值点(即尖角区);同时,①~⑤号冰形尖角区轴向位置不同,说明探针安装位置不同时水收集极值点出现的轴向高度不同。受传感器探针自身高度的限制,④号冰形位置的水收集极值点出现在接近轴向末端的位置,因此,后续的水收集减小区缺失,而⑤号冰形位置的水收集极值点超出了探针的高度范围,其水收集一直处于增大区。

归纳以上分析可得,传感器探针表面自下而上存在3个水滴撞击特性不同的区域:水收集增大区、水收集极值点、水收集减小区。极值点的出现是水滴积聚效应的结果,其附近区域气流场的液态水含量明显高于两侧。当水滴积聚点周围的液态水含量进一步增大时,伴随积冰生长释放的潜热,水滴撞击已形成的冰层表面将不会马上冻结(即冻结系数小于1)。随后水滴积聚点的结冰特性将趋向于明冰,可能会出现具有三维特征的冰角形貌。图11为工况3条件下3-3位置与2-4位置探针表面的结冰情况,可见两者均发展出了明冰特征显著的三维冰角。因此,在机头上的某些安装位置,探针表面结冰既包含乳白色的霜冰(水收集增大和减小区),也包含半透明的明冰结构(水收集极值点附近),具体外观如图12所示。

(a) 3-3位置冰形



(b) 2-4位置冰形

图11 冰形尖点的三维特征(工况3)

Fig. 11 3D characteristics of ice tip (condition 3)

### 3.4 水收集极值点随表面位置的变化规律

进一步研究发现,探针表面的水收集特性与其安装位置密切相关。图13为工况8条件下截面0、截面3、截面4上部分探针的结冰情况,沿气流方向将其分为上下2组:0-3、3-3和4-3位置为一组,3-4和4-4位置为一组。可以看出,顺着气流方向,探针表面积冰的尖角位置,即水收集极值点逐步上移,这也反映了裹挟水滴的气流沿机头表面的流线分布特征:在下游区域的分离度高于上游区域。

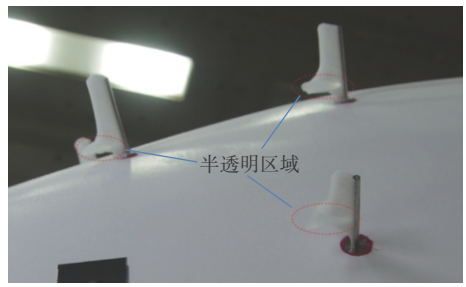



图12 乳白色与半透明区域混合的冰形外观

Fig. 12 Appearance with creamy white and translucent area

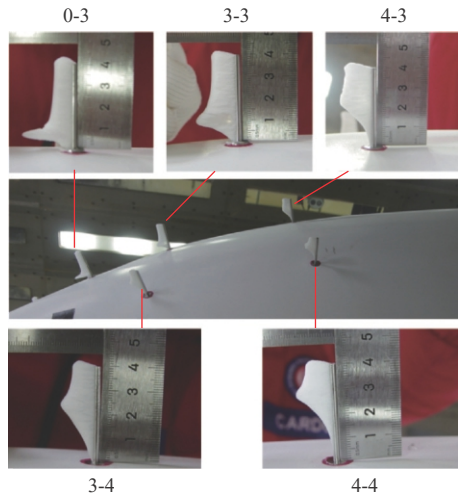



图13 探针表面水收集特性沿机头表面的变化(工况8)

Fig. 13 Change in water collection characteristics on probe surface along the nose surface (condition 8)

基于该发现,选取结冰时间相同的多个环境状态(工况3、工况4、工况7~工况11),重点分析水收集极值点沿3号纵向截面和4号纵向截面的定量变化。图14为3号纵向截面的位置定义与结冰情况。可知,3号纵向截面由各安装截面上的3号探针沿气流方向连线构成,4号纵向截面的位置定义同理;此外,图14右侧近距离展示了3号纵向截面中各探针表面的结冰情况,可以很直观地发现,探针表面的冰形尖点沿气流方向由前往后逐步向探针上端移动。

图15和图16定量给出了不同状态下,2个纵向截面中各探针表面水收集极值点沿气流方向的高度变化。其中,横坐标代表不同的探针位置,纵坐标为极值点在探针轴向上的高度,不同颜色的曲线代表不同工况。可以发现,环境参数不同时,相同位置的水收集极值点高度不同,这里的影响因素

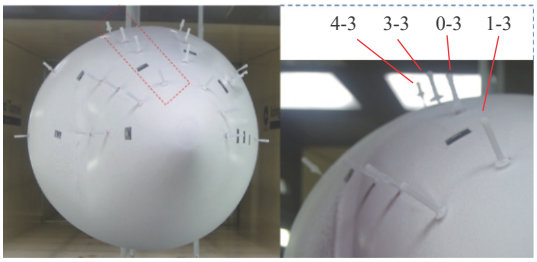



图 14　3 号纵向截面的位置定义与结冰情况

Fig. 14　Location definition and icing condition of No. 3 longitudinal area

主要是迎角和水滴直径; 但所有工况沿气流方向的变化趋势一致, 水收集极值点的位置逐渐升高, 变化范围在 2～30 mm 的区间内。具体而言, 由于位于机头的最前端, 壁面边界层的发展尚不充分, 截面 1 的 1-3、1-4 位置的水收集增大区(即液态水含量较低的区域)较小, 水收集极值点的轴向位置很低, 所有工况均处在 5 mm 以下。在往后的截面 2 和截面 0 位置, 即图示的 2-4、0-3 位置, 水收集极值点高度稍有变化, 上升到 5 mm 以上, 最大值约为 8 mm, 但整体变化幅度较小, 所有工况的极值点高度仍然处于 10 mm 以下。截面 3 和截面 4 位置靠后, 极值点高度相较前面两个截面有了明显的提升。如图 15 所示, 从截面 3 到截面 4, 所有工况的水收集极值点高度增量均超过 10 mm, 这是由于 2 个截面之间的壁面轮廓曲度变化较大, 经过了风挡到机头背部的过渡区域, 边界层流动的发展也有了较大变化。作为气流方向的最后一个探测截面, 截面 4 的水收集极值点高度均处于 20 mm 以上, 最大值达到了 29 mm。

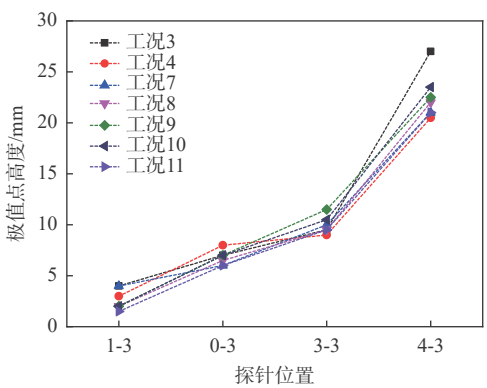



图 15　3 号纵向截面的极值点高度沿程变化

Fig. 15　Change in extreme point height along path for No. 3 longitudinal area

综上所述, 基于机头表面区域的流场特点, 壁面边界层沿流向逐步发展, 在探针高度相同时, 其安装位置越靠近气流下游, 水收集极值点越接近上端。因此, 从工程应用的角度而言, 若探针高度不够而安装位置靠后, 将可能出现无法捕捉最大结冰厚度点的情况, 这将影响结冰探测的敏感程度。

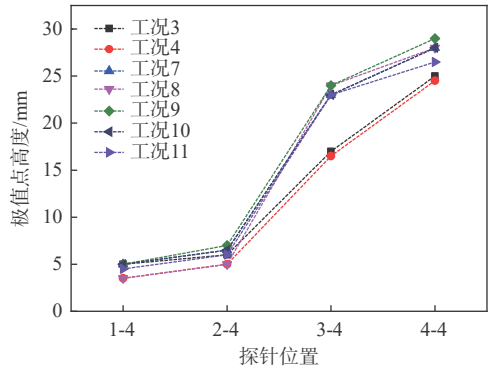



图 16　4 号纵向截面的极值点高度沿程变化

Fig. 16　Change in extreme point height along path for No. 4 longitudinal area

### 3.5　明冰状态局部结冰特征

工况 1 和 2 的环境静温为−10℃, 结合速度可得其总温达到−5.97℃, 为典型的明冰工况。图 17 为此时传感器探针上出现的 3 种冰形, 与霜冰状态不同, 其质地较为透明, 中间区域凹陷; 积冰以探针为轴具有较强的对称性, 且在与来流方向垂直的截面上生长为伸展幅度不同的扇形。

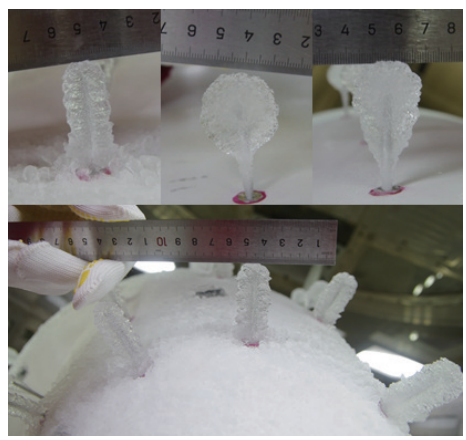


图 17　明冰工况下的整体结冰特点

Fig. 17　Overall icing characteristics under glaze ice conditions

与霜冰结冰特点不同, 明冰工况下, 气流中的水滴撞击到探针表面后不会马上冻结, 结冰速度较慢。因此, 探针表面附着的水滴受重力影响向下流动, 弥补了边界层效应的影响, 沿探针表面竖直方向的结冰量较为均匀, 其一般冰形如图 18 所示。然而, 受机头外形气动特征和来流的影响, 机头表面不同位置探针的局部滞止温度不同。在滞止温度相对更低的位置, 结冰速度较快, 探针表面水膜流动现象并不显著, 结冰过程的特点也更接近霜冰。此时, 探针表面结冰过程受轴向水滴撞击量分布的影响较大, 探针轴向上下结冰量显著不同, 呈现出自下而上逐步增加的趋势, 具体如图 19 所示。

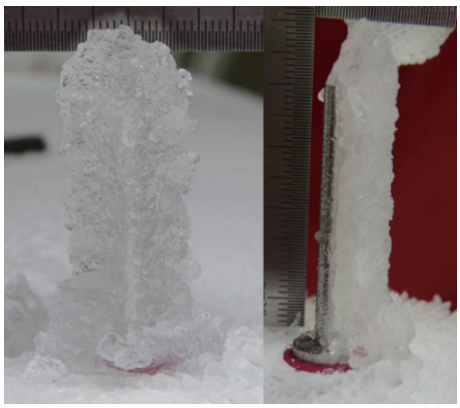


图 18 明冰工况下的一般冰形

Fig. 18 General ice shape under glaze ice conditions

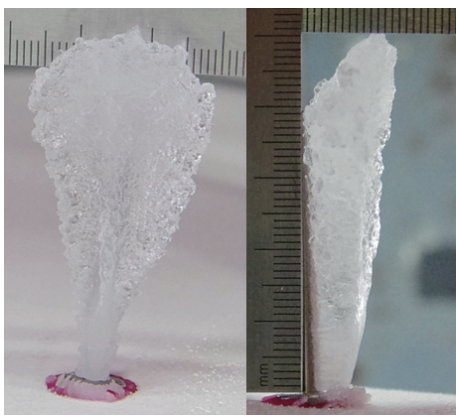


图 19 明冰工况下的特殊冰形

Fig. 19 Special ice shape under glaze ice conditions

## 4 来流参数影响规律分析

来流参数变化会对机头表面的结冰质量分布产生影响，其中以迎角和速度变化最为显著。以截面4上的6个探针位置为例，图20为工况7、工况8、工况11条件下，4-1～4-6位置的结冰质量分布，三者的速度分别为40 m/s、65 m/s和90 m/s，其他参数完全相同。可以看出，当气流速度逐渐增大时，各位置的结冰质量同时增加，改变幅度略有不同，增量最大的是4-2位置处的1.3 g，最小的是4-6位置处的0.55 g。整体而言，速度的改变使得各探针位置的结冰量明显增大，但并未影响表面的分布趋势，即未改变同截面相邻探头之间的大小关系。

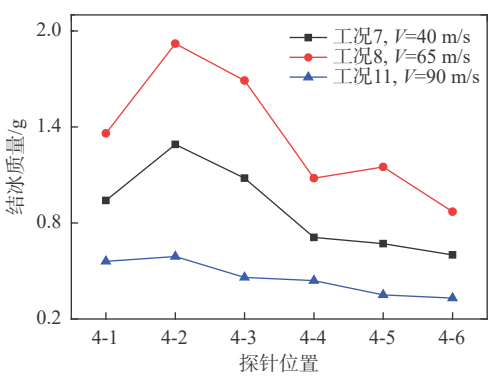



图 20 速度变化敏感度分析

Fig. 20 Velocity change sensitivity analysis

图21为工况3、工况4、工况8和工况9下，4-1～4-6位置的结冰质量分布。其中，工况8、工况3、工况4的飞行迎角分别为2°、4°和6°，其他参数完全相同，满足单一变量原则，工况9为对照组，其飞行迎角与工况8相同(2°)。当飞行迎角逐渐增大时，机头顶部区域的4-1和4-2位置结冰质量变化极小(不足0.1 g)，而位于机头侧面及底部区域的4-3、4-4、4-5、4-6位置结冰质量均有不同程度的变化：4-3、4-4、4-6位置质量逐渐增大，4-5位置质量则先增大后减小且波动幅度较大。整体来看，迎角的改变对表面结冰质量分布的影响显著，同截面相邻探头之间的大小关系产生较大变化；此外，4-2位置结冰对于攻角变化具有不敏感性，且结冰质量较大，探测效果较好。

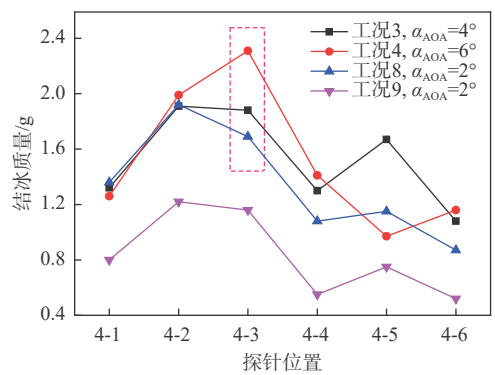



图 21 攻角变化敏感度分析

Fig. 21 Attack angle change sensitivity analysis

## 5 结 论

利用大型结冰风洞平台模拟真实结冰环境开展试验研究，通过实拍图像、实测的结冰外形和结冰质量等数据，直观、定量地揭示了飞机机头表面探针的结冰特性及其影响规律。

1) 霜冰条件下，探针圆柱表面的水收集系数由底部开始先增大后减小，存在极值点，安装位置不同时极值点出现的高度不同。

2) 由于壁面边界层沿流向逐步发展，探针安装位置越靠近气流下游，水收集极值点越接近上端，其变化区间为2～30 mm，设计不当会导致探针无法捕捉最大结冰厚度点，影响结冰探测的灵敏度。

3) 明冰条件下，结冰速度一般较慢，探针表面轴向的结冰量分布较为均匀；然而，在滞止温度相对较低的位置，探针表面水膜流动现象不显著，结冰过程特征也更接近霜冰，探针轴向结冰量自下而上逐步增加。

4) 气流速度变化显著影响整体结冰量, 而迎角变化主要影响机头表面的结冰分布。各探针位置面对来流参数变化的敏感程度不同, 结冰质量较大且对迎角变化敏感度较低的点将具备更好的探测效果。

## 参考文献（References）


[1] 裘燮纲, 韩凤华. 飞机防冰系统[M]. 北京: 航空专业教材编审组, 1985.
QIU X G, HAN F H. Aircraft anti-icing system[M]. Beijing: Aeronautic Specialty Textbook Read and Edit Group, 1985(in Chinese).

[2] 林贵平. 飞机结冰与防冰技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
LIN G P. Aircraft icing and anti-icing technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2016(in Chinese).

[3] 魏扬, 徐浩军, 薛源, 等. 机翼前缘积冰对大飞机操稳特性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(6): 1088-1095.
WEI Y, XU H J, XUE Y, et al. Influence of ice accretion on leading edge of wings on stability and controllability of large aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(6): 1088-1095(in Chinese).

[4] LYNCH F T, KHODADOUST A. Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(8): 669-767.

[5] THOMAS S K, CASSONI R P, MACARTHUR C D. Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling[J]. Journal of Aircraft, 1996, 33(5): 841-854.

[6] 张杰, 周磊, 张洪, 等. 飞机结冰探测技术[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1578-1586.
ZHANG J, ZHOU L, ZHANG H, et al. Aircraft icing detection technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1578-1586(in Chinese).

[7] 尹胜生, 叶林, 陈斌, 等. 可识别冰型的光纤结冰传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2012(5): 9-11.
YIN S S, YE L, CHEN B, et al. Fiber-optical icing sensor for detecting the icing type[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(5): 9-11(in Chinese).

[8] 桂业伟, 周志宏, 李颖晖, 等. 关于飞机结冰的多重安全边界问题[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 1-12.
GUI Y W, ZHOU Z H, LI Y H, et al. Multiple safety boundaries protection on aircraft icing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 1-12(in Chinese).

[9] 朱程香, 孙志国, 付斌, 等. 探头式结冰探测器安装位置分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2676-2683.
ZHU C X, SUN Z G, FU B, et al. Analysis on installation location of probe-style ice detectors[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2676-2683(in Chinese).

[10] 熊海霞, 袁冬莉, 张正明. 无人机结冰探测器仿真研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(5): 84-86.
XIONG H X, YUAN D L, ZHANG Z M. The research to real-time simulation of the icing probe of one UAV[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(5): 84-86(in Chinese).

[11] 郭琦, 申晓斌, 林贵平, 等. 飞机旋转表面结冰数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(11): 2259-2269.
GUO Q, SHEN X B, LIN G P, et al. Numerical simulation of icing on aircraft rotating surfaces[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(11): 2259-2269(in Chinese).

[12] 吴孟龙, 常士楠, 冷梦尧, 等. 基于欧拉法模拟旋转帽罩水滴撞击特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(9): 1263-1267.
WU M L, CHANG S N, LENG M Y, et al. Simulation of droplet impingement characteristics of spinner based on Eulerian method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(9): 1263-1267(in Chinese).

[13] 郭向东, 柳庆林, 赖庆仁, 等. 大型结冰风洞气流场适航符合性验证[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(2): 184-195.
GUO X D, LIU Q L, NAI Q R. Airworthiness compliance verification of air flow field in large icing wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 39(2): 184-195(in Chinese).

[14] 黄明其, 王亮权, 袁红刚, 等. 直升机前飞状态旋翼结冰风洞试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(6): 929-936.
HUANG M Q, WANG L Q, YUAN H G, et al. Wind tunnel test study on rotor icing in helicopter forward flight[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(6): 929-936(in Chinese).

[15] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.10.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness Standards for Transport Aircraft : CCAR25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011: 10(in Chinese).

[16] 郭向东, 张平涛, 赵照, 等. 大型结冰风洞云雾场适航应用符合性验证[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 200-214.
GUO X D, ZHANG P T, ZHAO Z, et al. Airworthiness application compliance verification of cloud flowfield in large icing wind tunnel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 200-214(in Chinese).

[17] SAE Aerospace. Icing wind tunnel interfacility comparison test: SAE ARP5666[S]. New York: SAE, 2012.

[18] 刘森云, 王乔, 易贤, 等. 3m×2m 结冰风洞试验技术新进展(2020 年-2022 年)[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(1): 57-65.
LIU S Y, WANG Q, YI X. New progress of 3m×2m icing wind tunnel test technology (2020-2022)[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2023, 41(1): 57-65(in Chinese).

# Test research on icing characteristics of sensors and their influence laws

DING Liang，HU Zhanwei，GUO Xiangdong，SHI Yanan，YI Xian*

(Key Laboratory of Icing and De-Icing，China Aerodynamic Research and Development Center，Mianyang 621000，China)

Abstract：Icing detection is the premise and basis for the operation of aircraft icing protection systems, and it is the primary problem faced by icing protection. At present, the research on the probe icing process lacks the measured data, and the relevant laws need to be verified. Therefore, in order to simulate the real icing environment encountered by the aircraft more accurately, the large-scale icing wind tunnel was used to carry out experimental research on the icing characteristics of the sensor. A test method combining probe array distribution and ice shape repeatability verification was used, and online images, measured ice shape, and ice quality were utilized to reveal the detailed characteristics and changing rules of water droplets impacting the probe surface visually and quantitatively. The results show that the water collection coefficient on the cylinder surface of the probe first increases and then decreases along the axial direction, and there is an extreme point. The height of this point will gradually increase with the development of the wall boundary layer, and the variety ranges from 2 mm to 30 mm. In addition, each probe position has different sensitivity to changes in incoming flow parameters, and the points with higher icing quality and lower sensitivity to changes in attack angle will have better detection effects. The measured data and analysis in this paper can provide a basis for the accurate design of the sensor probe.

Keywords：icing detection；droplet impact；icing characteristics；icing wind tunnel；boundary layer

**Received**：2023-01-02；**Accepted**：2023-04-10；**Published Online**：2023-04-18 09：50

**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230417.1819.001

**Foundation items**：National Natural Science Foundation of China (52106001); China Postdoctoral Science Foundation (2022M713865)

* **Corresponding author**. E-mail：yixian@cardc.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0955

# 基于分段自适应的机械臂力/位混合控制

殷文喆，练达芃，李凯悦，赵国伟*
(北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191)

**摘 要**：空间操作任务对空间机械臂的柔顺控制品质要求不断提高，采用单一控制方法易造成较大的末端接触力超调或动态偏差。结合自适应阻抗与自适应导纳控制方法的优点，提出一种基于分段自适应的力/位混合控制方法。所提方法按空间实现力、位分控，并基于子空间期望末端加速度叠加的方式，求取关节控制力矩。力空间控制中，采用自适应导纳控制实现初始位置到目标位置的快速过渡，在接近目标位置时，采用自适应阻抗控制实现末端的高精度稳定控制；由于位置空间控制中期望力和接触力均为0，直接采用PD控制即可获得与自适应控制方法相同的效果。仿真结果表明：相较于自适应阻抗或自适应导纳单一控制，采用所提方法时接触力超调量和动态偏差更小，全程控制品质更优。

**关 键 词**：机械臂；柔顺控制；力控制；分阶段；自适应算法
**中图分类号**：V448.21; TP241.3
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0161-06

空间机械臂是空间操作不可或缺的设备。末端接触的控制不当易造成操作任务的失败，柔顺控制是解决该问题的重要技术途径。

柔顺控制分为被动柔顺控制和主动柔顺控制[1]。由于被动柔顺控制环境适应能力低，使用范围、条件苛刻[2]，主动柔顺控制更受关注。

针对各方向控制目标的不同，Raibert和Craig[3]提出经典力/位混合控制，将空间分解为力、位2个互补子空间，基于PID方法分别实现了力和位置的控制。Hogan[4-6]将阻抗和导纳的概念引入机械系统，建立了经典阻抗和经典导纳控制器。经典阻抗控制通过获取机械臂位置信息，计算期望加速度以生成控制力矩；经典导纳控制获取机械臂力信息，计算期望位置以生成控制力矩[7]。

然而，经典阻抗、导纳控制对环境依赖性强，不能满足力跟踪精度。文献[8-9]基于力误差自适应地修正期望位置，使方法环境依赖性降低的同时计算效率高。文献[10-11]分别使用线性环境模型与卡尔曼滤波估计环境刚度，在未知环境中获得了较好的力跟踪精度。文献[12]基于径向基函数神经网络提出一种自适应阻抗控制，在不确定环境下获得了良好的跟踪精度。文献[13]通过BP神经网络补偿阻抗控制器误差，收敛速度更快。文献[14]结合粒子群优化算法与BP神经网络，将训练得到的阻抗参数用于控制，获得了良好的力跟踪精度。文献[15]基于逆强化学习，从专家演示中恢复阻抗参数和奖励函数，可在不同任务下生成不同阻抗参数，在仿真中成功跟踪了专家演示轨迹。

目前，对于主动柔顺控制的研究主要着眼于单一控制率的改进，而单一控制率难以同时兼顾快速性、超调量、稳态性能等品质要求。

本文在自适应导纳控制与自适应阻抗控制的基础上，结合两者的优点，提出并建立了一种新的主动柔顺控制方法——基于分段自适应的力/位混合控制方法。控制中，将操作空间分为力空间与位置空间，分别对力与位置进行控制，并采取先对2个子空间期望末端加速度集总叠加、后通过机械臂动力学方程求取关节控制力矩的方法。力空间中，在过渡阶段使用自适应导纳控制，以实现机械臂末端由初始位置到目标位置的快速过渡；在稳定段使用自适应阻抗控制，以实现

收稿日期：2022-11-30；录用日期：2023-03-29；网络出版时间：2023-04-07 10:52
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230407.1000.001
*通信作者. E-mail：zhaoguowei@buaa.edu.cn

引用格式：殷文喆，练达芃，李凯悦，等. 基于分段自适应的机械臂力/位混合控制[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：161-166.
YIN W Z，LIAN D P，LI K Y，et al. Manipulator force/position hybrid control based on staged adaptation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：161-166 (in Chinese).

末端的高精度稳定控制;使用滞回的切换条件,以提高方法的抗扰动能力。位置空间中,直接采用PD控制,获得与自适应控制方法相同的控制效果。

## 1 机械臂动力学模型

以六自由度全转动副机械臂为研究对象,建立动力学方程:

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})=\boldsymbol{\tau}-\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{e}} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{q}$为机械臂关节角;$\boldsymbol{D}$为惯性矩阵;$\boldsymbol{H}$为包含离心力与科氏力的向量;$\boldsymbol{\tau}$为关节控制力矩;$\boldsymbol{F}_{\mathrm{e}}$为机械臂末端的环境接触力;$\boldsymbol{J}$为机械臂的雅可比矩阵。雅可比矩阵表征了机械臂末端速度与关节角速度的关系及机械臂末端所受静力与维持静力所需关节力矩的关系,可通过机械臂正运动学模型求解得到,满足:

$$\dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{2}$$

式中:$\dot{\boldsymbol{q}}$为关节角速度;$\dot{\boldsymbol{X}}$为末端速度。

## 2 全空间控制

通常,对于只考虑末端力和末端位置的机械臂柔顺控制目标为:控制机械臂末端与环境接触时,在接触面法向达到期望的法向力,在切向达到期望的位置。将控制的全空间分为力和位置2个互为正交补集的子空间,如图1所示,接触面法向$O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{f}}$方向为力空间,由$O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{p1}}$、$O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{p2}}$扩展的接触点切平面为位置空间。

经典力/位混合控制[3]中,通过将子空间计算得到的关节控制力矩求和的方式计算全空间控制量。然而,力、位子空间求得的关节力矩存在耦合,从而导致控制品质下降。机械臂末端在2个子空间中的运动相互独立,因此,选择末端加速度作为控制量。在本文方法全空间控制中,通过期望末端加速度叠加的方式来获得全空间控制量,即由力、位空间控制分别获得末端加速度$a_{\mathrm{f}}$和$a_{\mathrm{p1}}$、$a_{\mathrm{p2}}$,集总获得全空间控制加速度为

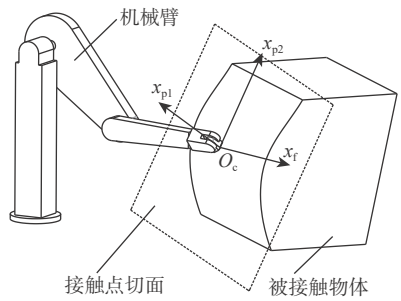



图1 控制空间示意

Fig. 1 Schematic of control space

$$\boldsymbol{a}=\begin{bmatrix}a_{\mathrm{f}} & a_{\mathrm{p1}} & a_{\mathrm{p2}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

对式(2)求导并移项可得

$$\ddot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{J}^{-1}\left(\ddot{\boldsymbol{X}}-\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}}\right) \tag{4}$$

将式(3)和式(4)代入式(1),可得控制力矩:

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{D}\boldsymbol{J}^{-1}\left(\boldsymbol{a}-\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}}\right)+\boldsymbol{H}+\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{e}} \tag{5}$$

在力空间控制中,考虑到机械臂末端从初始位置到目标位置的快速过渡和接近目标位置后的高精度稳定控制要求,采取分段控制的方式。其中,快速过渡段采用超调量小、快速性好的自适应导纳控制;稳定控制段采用收敛能力更强的自适应阻抗控制。由于位置空间控制中期望力和接触力均为0(忽略切向摩擦后),直接采用PD控制。系统控制流程如图2所示,其中,$\gamma$为接触力相对误差,$\gamma_{\mathrm{l}}$为

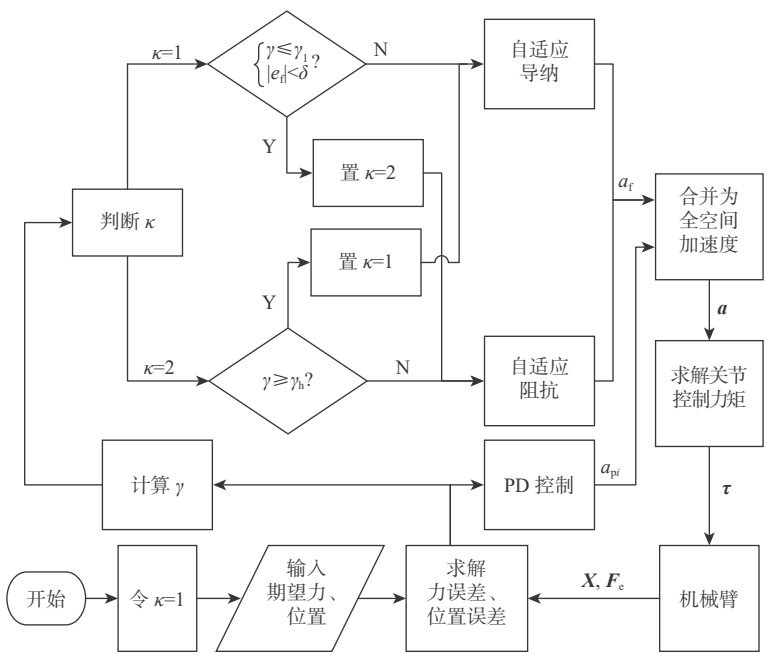



图2 分段自适应力/位混合控制流程

Fig. 2 Flow of staged adaptive force/position hybrid control

下界切换参数, $\gamma_h$ 为上界切换参数, $e_f$ 为力误差变化率, $\delta$ 为小量, $\kappa$ 为力空间方法的标志。

## 3　力空间控制

### 3.1　快速过渡段的自适应导纳控制

自适应导纳控制基于机械臂末端接触力测量值与期望值间的误差生成控制参考位置, 进而实现对机械臂的控制。力空间阻抗方程可写为[16]

$$m\ddot{e}_{cd}+b\dot{e}_{cd}+ke_{cd}=-e_f \tag{6}$$

式中: $m$、$b$ 和 $k$ 分别为阻抗控制器的惯性、阻尼和刚度参数; 力误差 $e_f=f_d-f_e$, $f_d$ 为期望接触力, $f_e$ 为机械臂末端与环境的接触力; 位置偏差 $e_{cd}=x_c-x_d$, $x_c$ 为控制器进行追踪的参考位置, $x_d$ 为机械臂末端的期望位置。

通过测量接触力 $f_e$ 可求得力误差 $e_f$, 应用式 (6), 可求解得位置偏差 $e_{cd}$。

由自适应控制率计算得到期望位置:

$$x_d=g(t)+k_p(t)e_f+k_d(t)\dot{e}_f \tag{7}$$

式中: $g(t)$、$k_p(t)$、$k_d(t)$ 为自适应函数, 满足[9]:

$$g(t)=g(0)+\mu_{g1}\int_0^t\lambda(t)\mathrm{d}t+\mu_{g2}\lambda(t) \tag{8}$$

$$k_p(t)=k_p(0)+\mu_{p1}\int_0^t\lambda(t)e_f\mathrm{d}t+\mu_{p2}\lambda(t)e_f \tag{9}$$

$$k_d(t)=k_d(0)+\mu_{d1}\int_0^t\lambda(t)\dot{e}_f\mathrm{d}t+\mu_{d2}\lambda(t)\dot{e}_f \tag{10}$$

$$\lambda(t)=\lambda_p e_f+\lambda_v\dot{e}_f \tag{11}$$

其中: $g(0)$、$k_p(0)$、$k_d(0)$ 为初始值; $\mu_{g1}$、$\mu_{p1}$、$\mu_{d1}$ 为积分环节增益; $\mu_{g2}$、$\mu_{p2}$、$\mu_{d2}$ 为比例环节增益; $\lambda_p$ 和 $\lambda_v$ 分别为位置环和速度环系数。

计算参考位置 $x_c$, 有

$$x_c=x_d+e_{cd} \tag{12}$$

为避免出现参考位置 $x_c$ 超出机械臂操作空间的情况, 在计算参考位置时, 通过对其变化率限幅以控制 $x_c$, 即

$$x_c=\begin{cases}x_c & |\dot{x}_c|\leqslant\dot{x}_{c,\max}\\ x_{c,h}+\mathrm{sgn}(\dot{x}_c)\dot{x}_{c,\max}h & |\dot{x}_c|>\dot{x}_{c,\max}\end{cases} \tag{13}$$

式中: $x_{c,h}$ 为上一控制周期 $x_c$ 取值; $h$ 为控制的时间间隔; 参考位置变化率 $\dot{x}_c=(x_c-x_{c,h})/h$; $\dot{x}_{c,\max}$ 为幅值参数; sgn() 为符号函数, 满足:

$$\mathrm{sgn}(x)=\begin{cases}1 & x>0\\ 0 & x=0\\ -1 & x<0\end{cases} \tag{14}$$

控制需要达到的末端加速度可表示为

$$a_f=-k_{v,f}\dot{x}+k_{p,f}(x-x_c) \tag{15}$$

式中: $k_{v,f}$ 和 $k_{p,f}$ 分别为速度环和位置环参数; $x$ 为机械臂末端位置; $\dot{x}$ 为机械臂末端速度。

### 3.2　稳定段的自适应阻抗控制

与自适应导纳控制相同, 自适应阻抗控制通过使机械臂末端追踪阻抗方程以达到柔顺的效果。阻抗方程可写为

$$m\ddot{e}+b\dot{e}+ke=f_e \tag{16}$$

式中: 力方向上的位置误差 $e=x_d-x$。

为使末端与环境的接触力 $f_e$ 追踪目标力 $f_d$, 应合理选择期望位置 $x_d$。力跟踪稳态误差为 0 时, 对应的期望位置为

$$x_d=x_e+f_d/k \tag{17}$$

式中: $x_e$ 为环境位置。

阻抗控制通过使机械臂的末端按照希望的加速度运动, 从而让机械臂满足阻抗方程。设 $\ddot{x}_d=\dot{x}_d=0$, 则式 (16) 可改写为

$$m\ddot{x}+b\dot{x}+kx=kx_d-f_e \tag{18}$$

由文献 [17], 在机械臂与环境接触后, 可设置刚度参数 $k=0$。将式 (17) 代入式 (18) 并加入速度环自适应控制率可得

$$m\ddot{\varepsilon}+b(\dot{\varepsilon}+\Omega)+f_d-f_e=0 \tag{19}$$

式中: $\varepsilon=x_e-x$; $\Omega$ 为自适应参数, 可以写为

$$\Omega(t)=\Omega(t-h)+\eta e_f(t-h)/b \tag{20}$$

其中: $\eta$ 为学习率, 为保证控制的稳定性, $\eta$ 应满足[17]:

$$0<\eta<bh/(bh+m) \tag{21}$$

将自适应控制率应用于阻抗控制, 可得控制需要施加的机械臂末端加速度:

$$a_f=\ddot{x}_e+\left[b(\dot{\varepsilon}+\Omega)+f_d-f_e\right] \tag{22}$$

### 3.3　力空间控制方法切换条件

力空间控制通过判断接触力相对误差 $\gamma$ 大小与力误差变化率 $\dot{e}_f$, 滞回地决定使用何种控制方法。$\kappa$ 表示使用何种力空间方法, $\kappa$=1 表示力空间使用自适应导纳控制, $\kappa$=2 表示使用自适应阻抗控制。由自适应导纳控制进入自适应阻抗控制 (即由 $\kappa$=1 切换为 $\kappa$=2) 的切换条件可设置为

$$\begin{cases}\gamma\leqslant\gamma_l\\ |\dot{e}_f|<\delta\end{cases} \tag{23}$$

式中: $\gamma=|e_f|/f_d$; $\gamma_l$ 为下界切换参数; $\delta$ 为小量。

式 (23) 使转换时刻的力误差变化率为接近 0 的小量, 从而当自适应阻抗控制接管时, 系统的状态更利于接触力误差快速收敛。

由自适应阻抗控制进入自适应导纳控制 (即由 $\kappa$=2 切换为 $\kappa$=1) 的切换条件可设置为

$$\gamma \geqslant \gamma_{\mathrm{h}} \tag{24}$$

式中：$\gamma_{\mathrm{h}}$为上界切换参数。

通常设置$\gamma_{\mathrm{h}}>\gamma_{\mathrm{l}}$，使切换条件滞回，从而使处于稳定段的系统避免了力偏差在临近切换条件时频繁切换，以获得更好的鲁棒性。

## 4 位置空间控制

位置空间控制中，忽略机械臂末端与环境间摩擦力，则$f_{\mathrm{e}}$=0、$f_{\mathrm{d}}$=0，此时自适应控制方法会退化为PD控制，采用PD控制即可得到与自适应控制方法相同的控制效果。各方向独立进行控制，则机械臂末端的位置误差应满足：

$$\ddot{e}_{\mathrm{p}i}+k_{\mathrm{v,p}}\dot{e}_{\mathrm{p}i}+k_{\mathrm{p,p}}e_{\mathrm{p}i}=0 \tag{25}$$

式中：$k_{\mathrm{v,p}}$、$k_{\mathrm{p,p}}$为控制参数；$i$=1和$i$=2分别指位置空间中的两正交方向；位置误差$e_{\mathrm{p}i}=x_{\mathrm{d}i}-x_{\mathrm{p}i}$，$x_{\mathrm{p}i}$和$x_{\mathrm{d}i}$分别为各方向末端位置和期望位置。

将式(25)移项展开后，可得位置空间各方向控制需要的机械臂末端加速度：

$$a_{\mathrm{p}i}=\ddot{x}_{\mathrm{d}i}+k_{\mathrm{v,p}}\left(\dot{x}_{\mathrm{d}i}-\dot{x}_{\mathrm{p}i}\right)+k_{\mathrm{p,p}}\left(x_{\mathrm{d}i}-x_{\mathrm{p}i}\right) \tag{26}$$

## 5 算例验证

通过算例仿真对比验证了所建立的分段自适应力/位混合控制方法与仅采用自适应阻抗或自适应导纳控制方法时的控制效果。

仿真中，控制了一部基座固定的全转动关节六自由度机械臂，其标准DH模型[18]参数如表1所示，动力学参数如表2所示。控制要求为：机械臂末端贴墙面移动至墙面上特定点，并按一定的力按压墙面。参考坐标系设置在机械臂基座处，$Ox$方向指向墙面，与$O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{f}}$对齐；$z$方向沿机械臂向上，与$O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{p2}}$对齐；$y$方向由右手定则确定，与$O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{p1}}$对齐，如图3所示。

墙面设置为移动墙面，墙面位置在$Ox$方向上正弦变化，满足$x_{\mathrm{e}}$=0.7+0.001sin(4π$t$) m，其刚度$k_{\mathrm{e}}$=4×10$^4$ N/m。

控制参数中，阻抗参数$m$=1，$b$=200，$k$=400；$\mu_{\mathrm{g1}}$=6×10$^{-2}$，$\mu_{\mathrm{p1}}$=8×10$^{-4}$，$\mu_{\mathrm{d1}}$=2×10$^{-8}$，$\mu_{\mathrm{g2}}$=6×10$^{-3}$，$\mu_{\mathrm{p2}}$=8×10$^{-5}$，$\mu_{\mathrm{d2}}$=2×10$^{-9}$，$\lambda_{\mathrm{p}}$=5，$\lambda_{\mathrm{v}}$=0.1；$\dot{x}_{\mathrm{c,max}}$=0.1 m/s；$k_{\mathrm{v,f}}$=100；$k_{\mathrm{p,f}}$=3 600；$\eta$=0.033 3；$k_{\mathrm{v,p}}$=100；$k_{\mathrm{p,p}}$=3 600；$\gamma_{\mathrm{l}}$=2%；$\gamma_{\mathrm{h}}$=5%；$h$=1 ms。

**表1 机械臂标准DH参数**

**Table 1 Standard DH parameters of manipulator**

| 连杆号 | $\alpha$/(°) | $l$/mm | $d$/mm |
|---|---|---|---|
| 1 | 90 | 0 | 660 |
| 2 | 180 | 432 | 149 |
| 3 | 90 | 0 | 60.0 |
| 4 | −90 | 0 | 433 |
| 5 | 90 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 56.3 |

注：$\alpha$为关节扭角；$l$为连杆长度；$d$为关节偏移。

**表2 机械臂惯性参数**

**Table 2 Inertia parameters of manipulator**

| 连杆号 | $\chi$/kg | $p_x$/mm | $p_y$/mm | $p_z$/mm | $I_{xx}$/(kg·mm$^2$) | $I_{yy}$/(kg·mm$^2$) | $I_{zz}$/(kg·mm$^2$) | $I_{xy}$/(kg·mm$^2$) | $I_{yz}$/(kg·mm$^2$) | $I_{zx}$/(kg·mm$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 75.0 | 0 | −323 | −0.235 | 1.08×10$^7$ | 1.77×10$^5$ | 1.07×10$^7$ | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 50.8 | −282 | 0 | 1.97 | 1.78×10$^5$ | 5.39×10$^6$ | 5.51×10$^6$ | 0 | −4.51×10$^4$ | 0 |
| 3 | 14.4 | 0 | −0.917 | 142 | 4.74×10$^5$ | 4.76×10$^5$ | 1.23×10$^4$ | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 2.66 | 0 | 38.9 | 0 | 7.64×10$^3$ | 1.73×10$^3$ | 7.55×10$^3$ | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0.484 | 0 | 0 | 14.4 | 282 | 294 | 102 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0.010 | 0 | 0 | −8.13 | 0.938 | 0.938 | 0.124 | 0 | 0 | 0 |

注：$\chi$为连杆质量；$p_x$、$p_y$、$p_z$为连杆质心在由DH参数建立的连杆坐标系下的位置分量；$I_{xx}$、$I_{yy}$、$I_{zz}$、$I_{xy}$、$I_{yz}$、$I_{zx}$为连杆在连杆坐标系的二阶惯量。

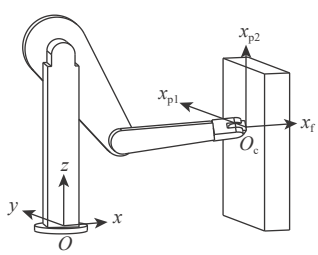



图3 仿真环境示意

Fig. 3 Schematic of simulation environment

机械臂末端初始位置为(0.7,0.1,0.3) m。控制的期望接触力$f_{\mathrm{d}}$=100 N；按压目标位置$y_{\mathrm{d}}$=0.12 m，$z_{\mathrm{d}}$=0.33 m，即控制机械臂末端以常值期望力按压沿墙面法线做正弦运动的平面墙，并使末端追踪墙面上的1个固定点。

不考虑测量与关节力矩施加误差，对比3种方法得到的末端位置，在控制时间内，仅采用自适应导纳控制在$y$方向末端位置相较于采用分段自适应力/位混合控制的最大偏差为22.4 nm，$z$方向末端位置最大为12.1 nm；仅采用自适应阻抗控制在$y$方向末端位置相较于采用分段自适应力/位混合控制的最大偏差为2.2 nm，$z$方向末端位置最大为2.7 nm。图4为分段自适应力/位混合控制下的机械臂末端

位置曲线。前述结果表明, 3 种控制方法均可控制机械臂末端到达墙面固定点, 且末端在位置空间运动关于时间的曲线一致。

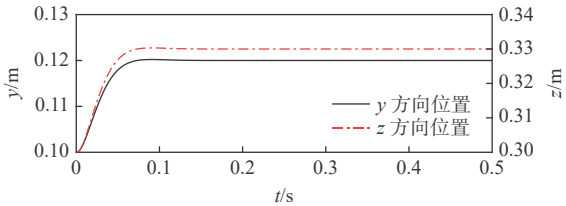



图 4　分段自适应力/位混合控制下机械臂末端位置曲线

Fig. 4　Curves of manipulator end position by staged adaptive force/position hybrid control

$\kappa$ 值通过监测控制方法切换, 可知采用分段自适应力/位混合控制方法, 在 $t$=0.172 s 时刻实现了从自适应导纳到自适应阻抗控制的切换。图 5 为 3 种控制方法下接触力误差曲线。可以看出, 在方法切换的 $t$=0.172 s 时刻, 接触力误差大小未出现跳变, 表明了切换的平稳。接触力动态响应如表 3 所示。分段自适应力/位混合控制的超调量为 3.92%, 与自适应导纳控制接近, 优于自适应阻抗控制的 51.5%, 动态偏差为 0.30%, 与自适应阻抗控制接近, 优于自适应导纳控制的 3.31%。上述结果表明, 分段自适应力/位混合控制在全过程综合性能更优。

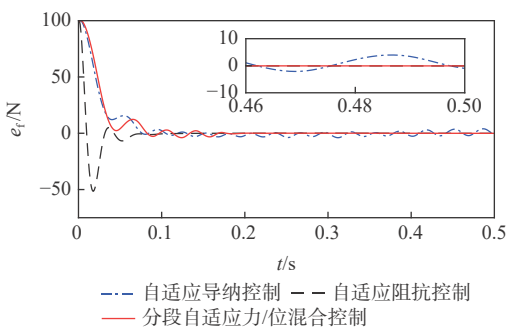



图 5　3 种控制方法力误差变化曲线

Fig. 5　Curves of force error by three control methods

**表 3　3 种控制方法下接触力动态响应**

**Table 3　Dynamic response of contact force by three control methods**

| 控制方法 | 超调量/% | 动态偏差/% |
|---|---|---|
| 自适应导纳控制 | 3.94 | 3.31 |
| 自适应阻抗控制 | 51.5 | 0.30 |
| 分段自适应力/位混合控制 | 3.92 | 0.30 |

图 6 为分段自适应力/位混合控制下 1～3 号连杆根部关节的控制力矩曲线, 其中, $\tau_i$ 为第 $i$ 根连杆(与表 1 对应)根部关节提供给此连杆的控制力矩。可以看出, 在力空间方法切换的 $t$=0.172 s 时刻, $\tau_1$、$\tau_2$、$\tau_3$ 平稳过渡。在仿真的 0.5 s 内, $\tau_4$、$\tau_5$、$\tau_6$ 的最大绝对值分别为 0.76, 1.9, $4.5\times10^{-5}$ N·m, 在方法切换的 $t$=0.172 s, $\tau_4$、$\tau_5$、$\tau_6$ 不会出现大范围变化。上述结果表明了分段自适应力/位混合控制可以保证方法切换时的平稳过渡。

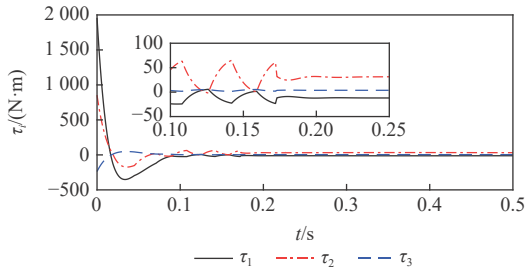



图 6　分段自适应力/位混合控制下关节控制力矩曲线

Fig. 6　Curves of joint control torques by staged adaptive force/position hybrid control

综上所述, 分段自适应力/位混合控制在全时域控制品质良好, 优于另 2 种单一控制方法。

## 6　结　论

1) 本文方法在全空间控制中采用期望末端加速度叠加, 统一了 2 个子空间的输出量; 力空间控制充分发挥了自适应阻抗和自适应导纳控制方法的优点, 与单一控制方法相比, 其超调量与动态偏差更小, 在全过程综合性能更优。

2) 本文方法滞回切换条件, 避免了力空间控制中力误差临近切换条件时的控制方法频繁切换, 增强了鲁棒性; 所采用的切换条件限制力误差变化率接近 0, 使自适应阻抗控制接管时, 系统状态更利于后续的快速稳定控制。

### 参考文献 (References)

[1] 王宪伦. 不确定环境下机器人柔顺控制及可视化仿真的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
WANG X L. Research on robot compliance control and visual simulation in uncertain environment[D]. Jinan: Shandong University, 2006(in Chinese).

[2] 殷跃红, 朱剑英, 尉忠信. 机器人力控制研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 1997, 29(2): 220-230.
YIN Y H, ZHU J Y, WEI Z X. Force control of robot: An overview[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1997, 29(2): 220-230(in Chinese).

[3] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1981, 103(2): 126-133.

[4] HOGAN N. Impedance control: An approach to manipulation: Part I—Theory[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1985, 107(1): 1-7.

[5] HOGAN N. Impedance control: An approach to manipulation: Part II—Implementation[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1985, 107(1): 8-16.

[6] HOGAN N. Impedance control: An approach to manipulation: Part III—Applications[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1985, 107(1): 17-24.

[7] 李志雄. 七自由度协作机械臂避障与柔顺控制方法研究及仿真分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 8.
LI Z X. Research and simulation analysis on obstacle avoidance and compliance control method of 7-DOF cooperative manipulator[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 8(in Chinese).

[8] SERAJI H. Adaptive admittance control: An approach to explicit force control in compliant motion[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 1994: 2705-2712.

[9] SERAJI H, COLBAUGH R. Adaptive force-based impedance control[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 1993: 1537-1544.

[10] JUNG S, HSIA T C, BONITZ R G. Force tracking impedance control for robot manipulators with an unknown environment: Theory, simulation, and experiment[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(9): 765-774.

[11] ROVEDA L, VICENTINI F, PEDROCCHI N, et al. Force-tracking impedance control for manipulators mounted on compliant bases [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2014: 760-765.

[12] WANG X B, ZHANG Y, LU C. Adaptive impedance control in uncertain environment for uncertain manipulator[C]//Proceedings of the 40th Chinese Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 3937-3942.

[13] 王邢波, 葛胜. 基于BP神经网络的腱驱动灵巧手的自适应阻抗控制[J]. 信息技术与网络安全, 2019, 38(4): 71-75.
WANG X B, GE S. Self-adaptive impedance control of tendon-driven dexterous hands based on BP neural network[J]. Information Technology and Network Security, 2019, 38(4): 71-75(in Chinese).

[14] 戚毅凡, 贾英宏, 赵宝山, 等. 基于改进神经网络的空间机械臂阻抗控制方法[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(2): 82-90.
QI Y F, JIA Y H, ZHAO B S, et al. Impedance control of space manipulator based on improved neural network[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(2): 82-90(in Chinese).

[15] ZHANG X, SUN L T, KUANG Z A, et al. Learning variable impedance control via inverse reinforcement learning for force-related tasks[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 2225-2232.

[16] 王小冬. 基于力/位控制的机械臂纤维铺放技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019: 25-27.
WANG X D. Research on fiber placement technology of manipulator based on force/position control[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019: 25-27(in Chinese).

[17] JUNG S, HSIA T C, BONITZ R G. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(3): 474-483.

[18] 彭光宇, 董洪波, 马斌. 两种DH模型的机器人运动学建模对比研究[J]. 机械研究与应用, 2019, 32(6): 62-65.
PENG G Y, DONG H B, MA B. Comparative study of robot kinematics modeling based on two DH models[J]. Mechanical Research & Application, 2019, 32(6): 62-65(in Chinese).

# Manipulator force/position hybrid control based on staged adaptation

YIN Wenzhe, LIAN Dapeng, LI Kaiyue, ZHAO Guowei*

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract**: The requirements for the compliant control quality of the space manipulator are continuously improved in space manipulation tasks. Using a single control method is likely to cause large end contact force overshoot or dynamic deviation. This study proposes and implements a force/position hybrid control approach based on staged adaptation, which combines the advantages of adaptive impedance and adaptive admittance control systems. The method realizes separate control of force and position according to space and calculates the joint control torque based on the superposition of expected terminal acceleration in subspace. Because the expected force and the contact force are both 0 in the position space control, the same result as the adaptive control method can be obtained by directly using PD control. Adaptive admittance control is used in the force space control to realize the rapid transition from the initial position to the target position, and adaptive impedance control is used to realize the high-precision and stable control of the end when approaching the target position. The simulation results show that compared with the single use of adaptive impedance or adaptive admittance control, the contact force overshoot and dynamic deviation are smaller when the staged adaptive force/position hybrid control method is adopted, and the whole process control quality is better.

**Keywords**: manipulators; compliance control; force control; stages; adaptive algorithms

**Received**: 2022-11-30; **Accepted**: 2023-03-29; **Published Online**: 2023-04-07 10:52

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230407.1000.001

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1018

# 高速电磁阀相移PWM电压驱动策略

陈晓明[1]，朱玉川[1,2,*]，李林飞[1]，王玉文[1]

(1. 南京航空航天大学 机电学院，南京 210016；2. 南京航空航天大学 无锡研究院，无锡 214000)

**摘 要**：高速电磁阀作为数字流量技术的核心控制元件，其动态响应及有效可控占空比区间严重影响系统流量控制精度。为进一步扩展有效可控占空比区间，提出一种包含基准脉冲宽度调制(PWM)、预激励PWM、激励PWM、高频PWM、预卸荷PWM、卸荷PWM在内的相移PWM电压驱动策略，给出相移PWM电压驱动策略的工作原理，并建立高速电磁阀动态特性理论模型，开展预激励PWM、预卸荷PWM可控占空比仿真分析与实验验证研究。结果表明：所提策略与复合PWM电压驱动策略相比，阀芯开启、关闭压力响应时间分别缩小了87%、37.9%，工作频率为100 Hz，阀芯正常启闭可控占空比为0.285～0.77，自扩展至0.085～0.81。

**关 键 词**：高速电磁阀；预激励；预卸荷；相移PWM电压驱动策略；可控占空比

**中图分类号**：TH137

**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0167-08

高速电磁阀作为数字流量技术的核心控制元件，在电磁激励下，阀芯仅工作在全开、全关状态，无结构死区、无泄漏、抗污染能力强[1]，现已成功应用于航空发动机燃油系统、刹车系统等关键技术领域[2]。然而，受制于运动部件机械惯性，其动态频响不足，可控占空比有限，高速电磁阀在精密数字流量技术领域仍未能取得较大突破。

为在驱动层面提升高速电磁阀动态特性，Lee[3]设计了一种三电压驱动策略，其三电压的逻辑切换及持续时间均在实施前指定。Messner和Scheidl[4]提出一种融合高频脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)的多电压驱动策略，其在阀芯最大开度维持阶段线圈电流可调，使高速电磁阀在1 ms内启闭。赵建辉等[5-7]发现，增加激励电压并减小维持电流，可显著降低阀芯开启时间，提高能量转化效率。孙晓等[8]提出一种双线圈高速电磁阀的导通续流控制策略，可将高速电磁阀线圈电流卸荷时间降至3 ms。钟麒等[9-10]通过数值仿真手段阐明了三电压与双电压驱动策略的优缺点，并提出一种基于电流反馈的三电压驱动策略，阀芯启闭时间分别降低了35.3%和25.0%，平均功耗降低了70.4%。高强等[11]提出一种复合PWM电压驱动策略，相较于传统PWM控制策略，开启延迟减小84.6%，载波频率为100 Hz的有效可控占空比扩展至12%～85%。上述驱动策略中，临界启闭时间取决于激励PWM、卸荷PWM可控占空比大小，在极端可控占空比大小时，阀芯难以正常启闭，可控占空比区间亟待进一步扩展。

李林飞等[12-13]提出一种由预加载电压、正脉冲电压、保持电压和负脉冲电压组成的混合电压驱动策略，以提升插装式高速电磁阀动态特性，该策略可将阀芯总开启时间缩短74.24%(从29.5 ms减少到7.60 ms)，总关闭时间缩短92.06%(从136 ms减少到10.8 ms)。钟麒等[14]提出一种高速电磁阀预设控制策略，并对该策略下的动态特性及功耗所致温升进行了讨论，发现该策略可减少阀芯开启时

**收稿日期**：2022-12-29；**录用日期**：2023-01-17；**网络出版时间**：2023-02-15 11:01
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230214.1700.003
**基金项目**：国家自然科学基金(51975275)；江苏省重点研发计划(BE2021034)
*通信作者. E-mail：meeyczhu@nuaa.edu.cn

*引用格式：陈晓明，朱玉川，李林飞，等. 高速电磁阀相移PWM电压驱动策略[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：167-174.*
*CHEN X M，ZHU Y C，LI L F，et al. Phase-shifted PWM voltage drive strategy of high-speed solenoid valve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：167-174 (in Chinese).*

间的 29.4%，关闭时间的 59.6%，提升效率为 7.9%。但上述驱动策略对预加载可控占空比大小预先给定，且与激励可控占空比分配关系尚未明确，对解决高可控占空比激励下不完全关闭所致有效可控占空比区间小，难以适应不同供油压力下的高动态驱动需求。

为解决高速电磁阀低可控占空比激励下阀芯不完全开启，高可控占空比激励下阀芯不完全关闭所导致的有效可控占空比范围小的问题，在高速电磁阀复合 PWM 电压驱动策略基础上，本文提出一种包含预激励与预卸荷 PWM 信号的相移 PWM 电压驱动策略，预激励 PWM 在基准 PWM 上一工作周期低电平时触发，预卸荷 PWM 在基准 PWM 当前周期临近低电平时触发。结果表明，本文策略可有效缩短阀芯临界启闭时间，扩展阀芯可控占空比区间，同时扩展高速电磁阀线性流量区，为高速电磁阀的工业应用奠定基础。

## 1 高速电磁阀工作原理

本文所述高速电磁阀相较于传统电磁阀，装配精度较高、初始气隙较小，对导磁元件材料性能要求较高，相同激励电流下的输出电磁力更大；结构一致性好、阀芯及运动部件质量较小，阀芯受力作用面积较小，相同电磁力下的阀芯频响更高；阀口最大通流面积较小、阀口油液泄漏量较少，相同工作频率下的阀口流量分辨率更高。本文所述常开式两位三通高速电磁阀结构示意如图 1 所示。

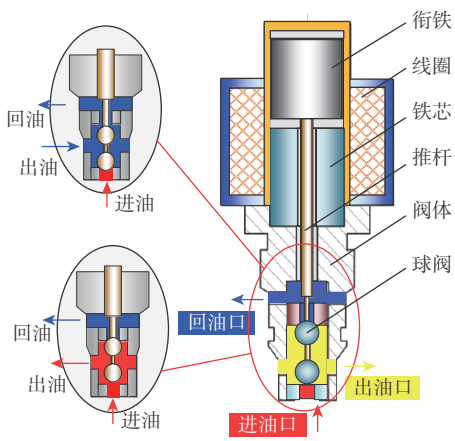



图 1 高速电磁阀结构示意图

Fig. 1 High-speed solenoid valve structure

由图 1 可知，无驱动电压时，电磁力为 0，衔铁、推杆无动作，球阀阀芯在压力油液静压作用下处于上止点，即进油侧阀口完全开启，回油侧阀口可靠关闭，进油口与出油口连通，出油口与回油口断开，压力油液经进油侧阀口流入系统；有驱动电压时，电磁力开始增加并大于静压作用力，衔铁、推杆与球阀阀芯在电磁力作用下一并向下动作，使球阀阀芯运动至下止点，进油侧阀口可靠关闭，回油侧阀口完全开启，进油口与出油口断开，出油口与回油口连通，系统压力油液经回油侧阀口流回油箱。

## 2 相移 PWM 工作原理与理论

### 2.1 相移 PWM 工作原理

本文相移 PWM 主要包括基准 PWM、预激励 PWM、激励 PWM、高频 PWM、预卸荷 PWM、卸荷 PWM，主要由基准可控占空比 $\tau_b$、预激励可控占空比 $\tau_p$、激励可控占空比 $\tau_e$、高频可控占空比 $\tau_w$、预卸荷可控占空比 $\tau_c$、卸荷可控占空比 $\tau_f$ 等控制线圈电流变化。特点在于：可通过预激励 PWM、激励 PWM、预卸荷 PWM、卸荷 PWM 可控占空比两两之间的滑移分配实现高、低可控占空比激励下阀芯正常启闭，结合线圈电流、阀后压力反馈量，实现高速电磁阀阀芯启闭动态过程的精确控制。本文相移 PWM 工作原理如图 2 所示。

由图 2 可知，相移 PWM 电压驱动信号由 6 种 PWM 信号通过一定的逻辑判定组合在一起，每种 PWM 信号均有不同的功能：①基准 PWM：该 PWM 信号为指令信号，其可控占空比 $\tau_b$ 决定了阀芯开启时间与关闭时间分配关系。②预激励 PWM：该 PWM 信号与指令信号不在同一控制周期内，预激励可控占空比 $\tau_p$ 用以在指令信号前一 PWM 控制周期结束时提升线圈电流初始电流。③激励 PWM：该 PWM 信号用以在预激励可控占空比基础上为线圈续流，提供足够大的电磁力驱动阀芯开启运动。④高频 PWM：可控占空比 $\tau_w$ 为基准可控占空比与激励可控占空比 $\tau_e$ 差值，在该可控占空比区间内，高频 PWM(1 000 Hz)用以降低线圈功耗。⑤预卸荷 PWM：可控占空比 $\tau_c$ 为基准可控占空比 $\tau_b$ 与高频可控占空比 $\tau_w$ 及激励可控占空比 $\tau_e$ 的差值，其值略小于基准 PWM，在基准 PWM 下降沿到来之前快速降低线圈电流至临界关闭电流附近。⑥卸荷 PWM：其可控占空比 $\tau_f$ 稍大于基准可控占空比 $\tau_b$，由指令信号下降沿触发，用于加快降低线圈电流至 0，确保阀芯完全关闭。

各激励、高频、卸荷 PWM 驱动信号的时序通过 MATLAB/Simulink 平台中“PWM generator”模块的逻辑判断功能予以实现。

### 2.2 高速电磁阀理论模型

为准确设计主要 PWM 可控占空比大小，需要结合高速电磁阀理论模型，为此，建立两位三通高速电磁阀球阀阀芯动力学平衡方程如下：

$$m_s\frac{\mathrm{d}^2x_s}{\mathrm{d}t^2}+b_s\frac{\mathrm{d}x_s}{\mathrm{d}t}=F_m-(p_sA_{ah}+p_dA_{al}) \tag{1}$$

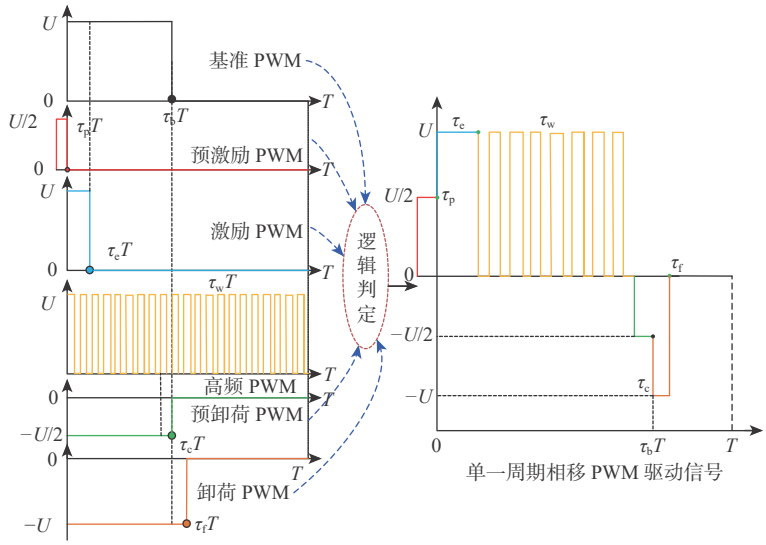



图 2　相移 PWM 工作原理

Fig. 2　Working principle of phase-shifted PWM

式中: $m_s$ 为球阀阀芯及运动部件质量; $b_s$ 为黏性阻尼系数; $x_s$ 为球阀阀芯运动位移; $F_m$ 为电磁力; $p_s$ 和 $p_d$ 分别为高速电磁阀阀前和阀后压力, 用以计算阀芯所受静压力, 这是因为阀芯撞击阀座时间很短, 与阀芯毫秒级运动时间相比仍可忽略不计, 且其引起的阀芯回弹效应对阀芯最大阀芯位移与阀芯关闭状态下的位移变化影响很小; $A_{ah}$、$A_{al}$ 分别为进、出油口球阀阀芯静压作用面积, 计算式分别为

$$A_{ah}=\frac{\pi d_v^2}{4\sqrt{\left[2(x_{smax}-x_{s2})/d_s+\sqrt{(d_v/d_s)^2-1}\right]^2+1}} \tag{2}$$

$$A_{al}=\frac{\pi d_v^2}{4\sqrt{\left[2x_s/d_s+\sqrt{(d_v/d_s)^2-1}\right]^2+1}} \tag{3}$$

其中: $x_{smax}$ 为球阀阀芯最大运动阀芯位移; $d_s$ 为球阀进、出油口直径; $d_v$ 为球阀阀芯直径。

电磁力 $F_m$ 的计算式为

$$F_m=\frac{\phi_c^2}{2\mu_0 S}=\frac{B^2 S}{2\mu_0 N_c} \tag{4}$$

式中: $\mu_0$ 为空气磁导率; $\phi_c$ 为磁通量; $N_c$ 为线圈总匝数; $S$ 为极化面积; $B$ 为磁感应强度。

通常情况下, 阀后压力是由流入阀腔的净流量大小决定。根据流体动压平衡方程, 求得阀后压力 $p_d$ 为

$$p_d=\frac{K_e}{V_d}\int\left(C_d A_{hs}\sqrt{\frac{2(p_s-p_d)}{\rho_f}}-C_d A_{ls}\sqrt{\frac{2p_d}{\rho_f}}\right)\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中: $V_d$ 为球阀阀后容积大小; $C_d$ 为阀口固定节流孔流量系数; $K_e$ 为油液有效体积弹性模量; $A_{hs}$ 为进油阀口通流面积; $A_{ls}$ 为出油阀口通流面积, 两者可表示为

$$A_{ls}=\pi x_s\sin 2\beta\left(\frac{d_v}{2}+\frac{1}{2}x_s\sin\beta\right) \tag{6}$$

$$A_{hs}=\pi(x_{smax}-x_s)\sin 2\beta\left(\frac{d_v}{2}+\frac{1}{2}(x_{smax}-x_s)\sin\beta\right) \tag{7}$$

其中: $\beta$ 为阀座半锥角。

油液有效体积弹性模量 $K_e$ 可表示为[15]

$$K_e=(1-\gamma_{a0})\left[1+m_0(p-p_{0a})/E_0\right]^{-\frac{1}{m_0}}\Bigg/\left\{(1-\gamma_{a0})\Bigg/\left\{E_0\left[1+\frac{m_0(p-p_{0a})}{E_0}\right]^{-\frac{m_0+1}{m_0}}\right\}+\frac{\gamma_{a0}}{\kappa_a p_{0a}}(p_{0a}/p)^{\frac{\kappa_a+1}{\kappa_a}}\right\} \tag{8}$$

式中: $p_{0a}$ 为初始压力; $\gamma_{a0}$ 为初始压力下油液中空气含量; $p$ 为绝对压力; $\kappa_a$ 为空气热比率常数; $E_0$ 为纯油体积弹性模量; $m_0$ 为与工作压力相关的常数项。

## 2.3　仿真分析

本节将结合高速电磁阀阀芯运动状态, 在提升动态响应速度的前提下, 确定相移 PWM 各主要可控占空比分配原则。

### 2.3.1　预激励可控占空比分析

预激励 PWM 信号是在基准 PWM 信号上升沿触发之前, 旨在提高线圈电流初始值, 其可控占空比 $\tau_p$ 过小, 对线圈初始电流影响很小, 其可控占空比 $\tau_p$ 过大, 造成阀芯先于基准 PWM 信号上升沿开启运动。现有文献表明, 临界开启电流大小与测得线圈电流大小及静压作用力具有确切关系[10], 可用以判定预激励 PWM 是否结束的计算依据。认为电磁力与静压作用力相等时, 则线圈电流 $i(t_p)$ 具有如下关系[10]:

$$i(t_p)\leqslant\frac{4i_{con}}{5}=\frac{4N_c}{5L_{con}}\sqrt{\frac{\mu_0 S\pi d_a^2(p_s-p_d)}{2}} \tag{9}$$

式中：$d_a$为球阀阀芯静压作用面积等效直径；$i_{con}$为临界开启电流值；$L_{con}$为临界开启阶段的线圈电感。

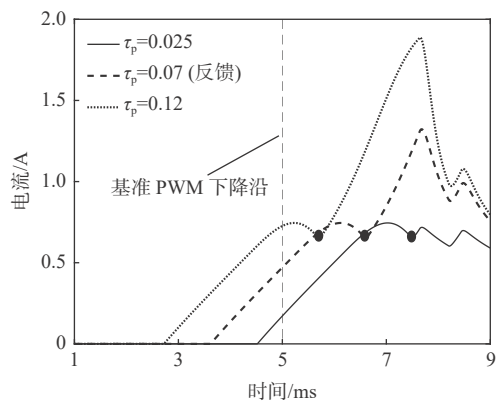
若式(9)等式部分成立，则$t_p$为预激励时间，线圈电流$i$约为临界开启电流$i_{con}$的4/5，即结束预激励PWM，可将预激励可控占空比$\tau_p$表示为

$$\tau_p \leqslant \frac{4t_{con}f_1}{5}=\frac{4L_{con}}{5R_c}\ln\left(\frac{V_e-i_{p0}R_c}{V_e-i_{con}R_c}\right)f_1 \tag{10}$$

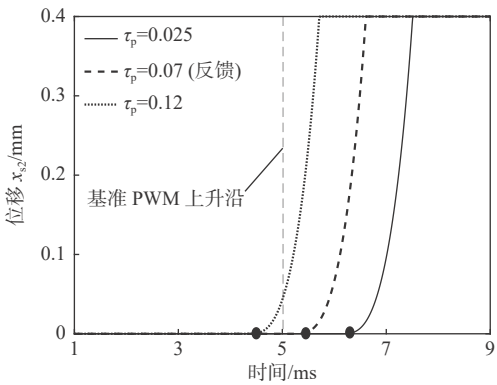
式中：$V_e$为激励电压；$t_{con}$为阀芯临界开启时间；$i_{p0}$为开启阶段线圈电流初始值；$R_c$为线圈电阻；$f_1$为工作频率。

式(10)表明，为使阀芯在基准PWM信号上升沿触发后开启运动，本文预激励PWM可控占空比$\tau_p$略小于临界开启时间所对应的可控占空比。结合式(9)和式(10)，基于高速电磁阀阀芯动态特性理论模型，可得不同预激励可控占空比$\tau_p$线圈电流与阀芯位移如图3所示。

由图3可知，当预激励可控占空比$\tau_p$=0.025、$\tau_p$=0.12时，线圈电流分别在4.52 ms、2.73 ms时开始上升，早于基准PWM上升沿对应时间5 ms，阀芯临界开启时间分别为1.15 ms、−0.65 ms；当预激励可控占空比$\tau_p$=0.07(由反馈变量决定)，线圈电流自3.62 ms开始上升，虽早于基准PWM上升沿时间




(a) 线圈电流




(b) 阀芯位移

图3 预激励可控占空比$\tau_p$仿真分析结果

Fig. 3 Simulation analysis results of pre-excitation controllable duty cycle $\tau_p$

1.38 ms，但阀芯临界开启时间为0.25 ms，相较于$\tau_p$=0.025，阀芯临界开启时间缩短78.3%，相较于$\tau_p$=0.12，避免了阀芯提早开启。这就说明，预激励可控占空比$\tau_p$应结合临界开启电流值合理设定，避免过大导致阀芯过早开启，亦不能过小，造成线圈初始电流变化较小，对阀芯临界开启时间缩短无益。

2.3.2 预卸荷PWM可控占空比分析

预卸荷PWM是为在基准PWM下降沿触发之前使线圈电流降至临界关闭电流附近，同时亦在延续高频PWM的功能，其可控占空比$\tau_c$可表示为

$$\tau_c=\tau_b-\tau_e-\tau_w \tag{11}$$

式(11)表明，当基准PWM可控占空比$\tau_b$、激励PWM可控占空比$\tau_e$及高频PWM可控占空比$\tau_w$确定后，即可确定预卸荷PWM可控占空比$\tau_c$。当阀口液动力恒定，在高频PWM可使线圈电流位于临界电流附近时，预卸荷可控占空比$\tau_c$=0。现有文献表明，临界关闭电流大小与测得线圈电流大小及最大阀芯位置时的液动力具有确切关系[10]，可用以判定预卸荷PWM何时开始的计算依据。若阀口液动力变化，在高频PWM临近结束之时线圈电流远远高于临界关闭电流，则可将预卸荷可控占空比$\tau_c$定义为

$$\tau_c \leqslant \frac{4t_{coff}f_1}{5}=\frac{4L_{coff}}{5R_c}\ln\left(\frac{-V_e-i_{c0}R_c}{-V_e-i_{coff}R_c}\right)f_1 \tag{12}$$

式中：$i_{c0}$为高频PWM结束时的线圈电流；$i_{coff}$为临界关闭线圈电流；$L_{coff}$为临界关闭阶段电感；$t_{coff}$为阀芯临界关闭时间。

结合式(11)和式(12)，基于高速电磁阀动态特性理论模型，可得不同预卸荷可控占空比$\tau_c$线圈电流与阀芯位移如图4所示。

由图4可知，当预卸荷可控占空比$\tau_c$=0.01时，线圈电流在14.82 ms时开始下降，并在15.2 ms时开始小于维持电流值0.4 A，与此同时，阀芯在15.65 ms开始关闭运动，并在16.85 ms关闭运动到位，临界关闭时间为0.65 ms；当预卸荷可控占空比$\tau_c$=0.1时，线圈电流在13.1 ms即开始下降，并在13.3 ms时开始小于维持电流值，与此同时，阀芯在14.1 ms时开始关闭运动，早于基准PWM下降沿开始关闭，说明线圈电流值低于维持电流并非使阀芯立即开始运动，这是因为反馈线圈维持电流值由阀口压差对应静压作用力求得，略小于供油压力作用下的阀芯流体力，造就了预卸荷可控占空比设计初衷；当预卸荷可控占空比$\tau_c$=0.05(由反馈变量决定)时，线圈电流在14 ms之后开始减小，14.5 ms时开始小于维持电流值，与此同时，阀芯在15.2 ms开始关闭运动，并在16.4 ms时关闭运动到位，临界关闭时间为

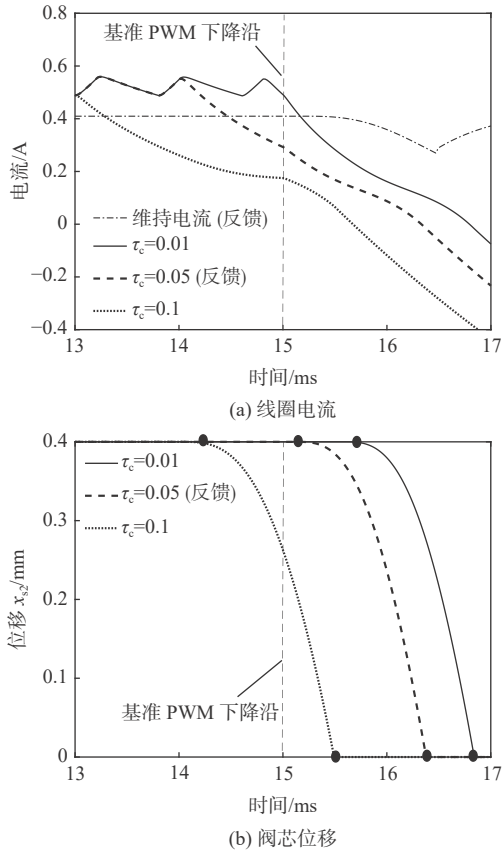



图 4　预卸荷可控占空比 $\tau_c$ 仿真分析结果

Fig. 4　Simulation analysis results of pre-unloading controllable duty cycle $\tau_c$

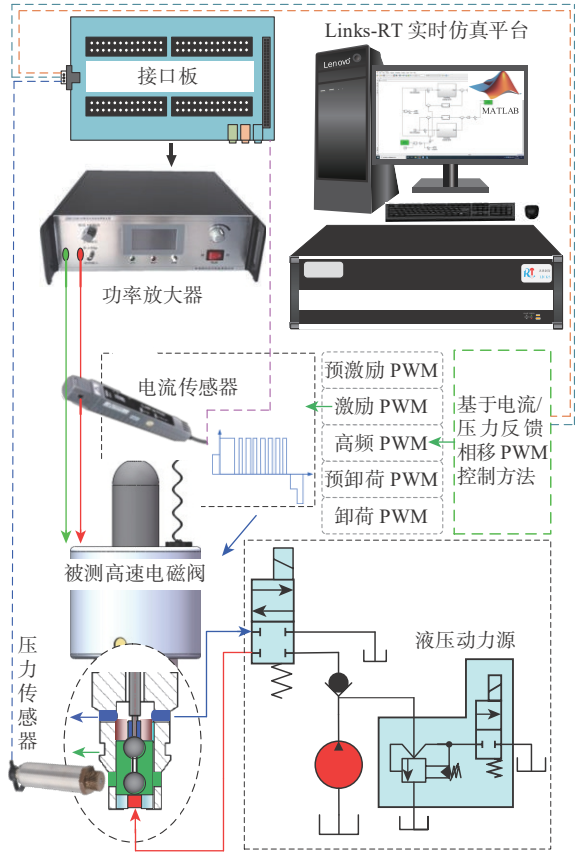



图 5　高速电磁阀动态特性测试平台

Fig. 5　Test platform for dynamic characteristics of high-speed solenoid valve

0.2 ms, 相较于预卸荷可控占空比 $\tau_c$=0.01, 临界关闭时间缩小 69.2%; 这就说明, 适宜大小的预卸荷可控占空比 $\tau_c$ 在基准 PWM 下降沿到来之前加快线圈电流卸荷, 进一步缩短阀芯临界关闭时间。

# 3　相移 PWM 电压驱动策略验证

## 3.1　测试平台

为验证相移 PWM 电压驱动策略对高速电磁阀动态特性的提升效果, 建立了高速电磁阀动态特性测试系统, 如图 5 所示, 其中, 实验装置包括电压功率放大器、Link-RT 实时仿真平台、高频电流传感器、高动态压力传感器、液压动力源、被测高速电磁阀、24 V 直流电源及部分液压附件。

实验过程中, 运用相移 PWM 电压信号控制高速电磁阀, 该信号在 MATLAB/Simulink 中生成并编译成 C++代码, 下载到 Links-RT 实时仿真平台中运行。测试系统中的控制器实时采集高速电磁阀阀后压力与线圈电流, 以此作为确定各主要 PWM 信号闭环控制的反馈参量, 最终按照逻辑控制时序形成相移 PWM 电压信号。仿真软件通过 PCI 6259 多功能采集卡输出相移 PWM 电压控制信号, 并经电压功率放大器放大为预激励电压 24 V、激励电压 24 V、高频电压 24 V、预卸荷电压−12 V、卸荷电压−24 V 的相移 PWM 电压信号。

## 3.2　测试结果分析

### 3.2.1　理论模型验证

为实现高速电磁阀相移 PWM 电压驱动策略的阀芯位置在线监测与闭环控制, 运用相移 PWM 电压驱动策略下的实测线圈电流与阀后压力结果, 验证高速电磁阀动态特性理论模型, 两者线圈电流与阀后压力对比结果如图 6 所示。

由图 6(a) 可知, 相移 PWM 电压驱动策略下的线圈电流快速上升, 理论预测电流与实验测得电流相比, 完全开启电流点略低; 理论模型所求线圈电流卸荷速度相比实测线圈电流稍慢, 整体上两者吻合度较高, 再次验证了所建理论模型的准确性; 由图 6(b) 可知, 理论模型所求阀后压力响应与实测压力响应吻合度极高, 仅在临界开启、关闭时间点存在较小偏差。

### 3.2.2　动态响应验证

为对比分析本文相移 PWM 与复合 PWM 电压驱动策略下的高速电磁阀阀芯动态特性差异, 以下给出相移 PWM(可控占空比 $\tau_p$=0.1, $\tau_e$=0.1, $\tau_h$=0.5,

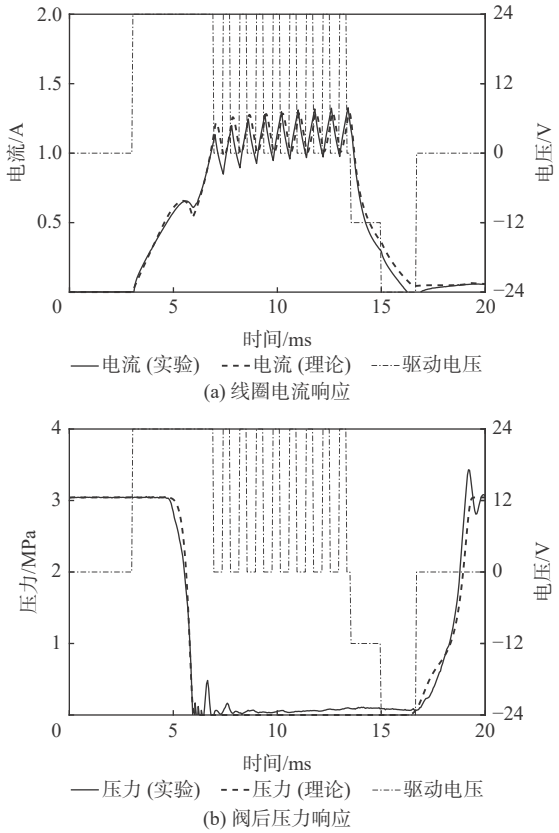



图 6 高速电磁阀线圈电流、阀后压力响应

Fig. 6 Coil current and downstream pressure response of high-speed solenoid valve

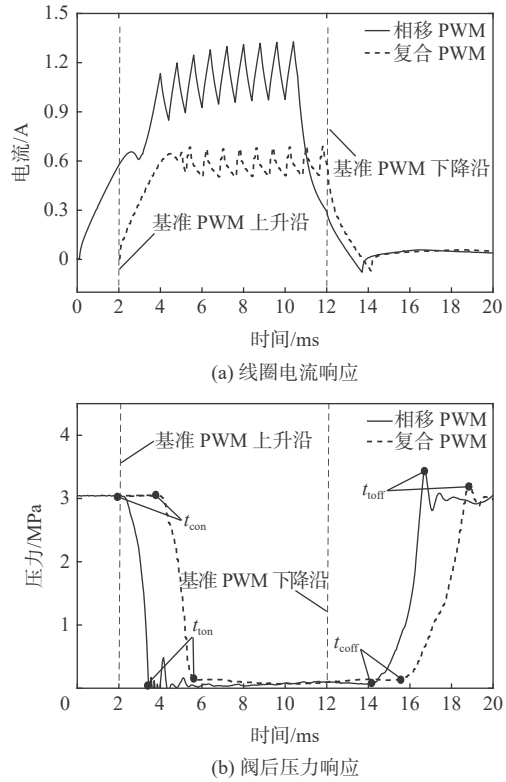



图 7 不同电压驱动策略下线圈电流、阀后压力响应对比

Fig. 7 Coil current and downstream pressure response of high-speed solenoid valve

$\tau_c$=0.075, $\tau_f$=0.075)与复合 PWM($\tau_p$=0, $\tau_e$=0.1, $\tau_h$=0.5, $\tau_c$=0, $\tau_f$=0.1)电压驱动策略下的线圈电流、压力响应对比如图 7 所示，图中，$t_{ton}$ 为完全开启时间，$t_{toff}$ 为完全关闭时间。

由图 7 可知，就相移 PWM 电压驱动策略而言，在预激励 PWM 作用下，线圈电流在 2.0 ms 内上升至 0.59 A，对应阀后压力在 2.2 ms 时开始下降，认为阀芯在 2.2 ms 时开始运动；在激励 PWM 作用下，线圈电流在 0.95 ms 内快速到达完全开启电流 0.61 A，阀后压力亦在 3.3 ms 时降为 0.06 MPa 附近；在高频 PWM 作用下，线圈电流维持在 1.1 A 左右；在预卸荷 PWM 作用下，线圈电流在 1.5 ms 内降至 0.29 A；在卸荷 PWM 作用下，线圈电流在 1.9 ms 内降至 0.01 A，造成阀后压力响应延迟 1.8 ms 后(对应电流为 0.075 A)，在 1.6 ms 内上升至供油压力。由此可知，基准 PWM 控制信号下完全开启、完全关闭电流响应时间分别为 0.95 ms、1.9 ms。以压力响应为准，阀芯临界开启、完全开启、临界关闭、完全关闭时间分别为 0.2 ms、1.3 ms、1.8 ms、3.4 ms。

就复合 PWM 驱动策略而言，在激励 PWM 作用下，线圈电流在 1.5 ms 内上升至 0.48 A，对应阀后压力在 1.55 ms 时开始下降(对应电流为 0.485 A)，在 2.85 ms 内线圈电流到达完全开启电流 0.61 A，阀后压力亦在 3.1 ms 内降至 0.13 MPa 附近；在高频 PWM 作用下，线圈电流维持在 0.57 A 左右；在卸荷 PWM 作用下，线圈电流在 2.3 ms 内降至 0.01 A，造成阀后压力延迟 2.9 ms 后(对应电流为 0.034 A)，在 3.5 ms 内上升至供油压力。由此可得，基准 PWM 控制信号下的完全开启、完全关闭电流时间分别为 2.85 ms、2.3 ms。以压力响应为准，阀芯临界开启、完全开启、临界关闭、完全关闭时间分别为 1.55 ms、3.1 ms、2.9 ms、6.4 ms。由此可知，相较于复合 PWM，相移 PWM 可使开启、关闭电流响应时间分别缩小 66.7%、17.4%；以压力响应为准，临界开启、完全开启时间分别缩小了 87%、58%；临界关闭、完全关闭时间分别缩小了 37.9%、46.9%。

### 3.2.3 可控占空比分析

为验证相移 PWM、复合 PWM 及单一 PWM 电压驱动策略对高速电磁阀阀芯正常启闭有效可控占空比区间的影响，本文给出工作频率 100 Hz 下 3 种电压驱动策略下的有效可控占空比区间(包括最大最小值)如图 8 所示。

结合图 7 实测结果可知，以完全开启电流为准，阀芯完全开启时间约为 2.85 ms，单一 PWM 与复合 PWM 电压驱动下正常开启的激励可控占空比 $\tau_e \geqslant 0.285$(最小基准 PWM 可控占空比 $\tau_b \geqslant \tau_e$)，相

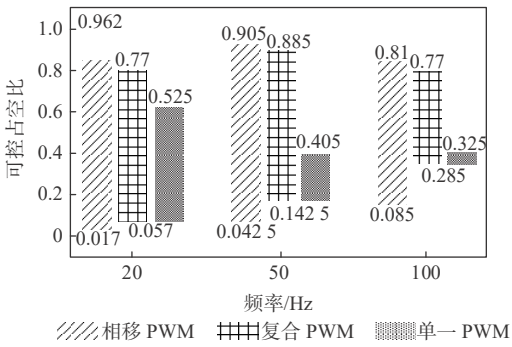



图 8　可控占空比对比结果

Fig. 8　Comparison results of controllable duty cycle

移 PWM 中 $\tau_e \geqslant 0.085$(激励时间 $t_e$=2.85～2.0 ms), 最小正常开启基准 PWM 可控占空比 $\tau_b$ 可扩展 70.2%, 随着工作频率降至 50 Hz、20 Hz, 最小基准 PWM 可控占空比 $\tau_b$ 分别扩展至 0.042 5、0.017; 以完全关闭电流为准, 阀芯完全关闭时间约为 2.3 ms(卸荷 PWM 可控占空比 $\tau_f$=0.1), 复合 PWM 电压驱动下正常关闭的最大基准 PWM 可控占空比 $\tau_b \leqslant 0.77$(最大基准 PWM 可控占空比 $1-\tau_b \geqslant 0.23$), 相移 PWM 电压中 $\tau_b \leqslant 0.81$(卸荷时间 $t_f$=10～1.9 ms), 最大正常关闭基准 PWM 可控占空比 $\tau_b$ 可扩展 5.2%, 随着工作频率降至 50 Hz、20 Hz, 最大基准 PWM 可控占空比分别扩展至 0.905、0.962。工作频率为 100 Hz, 单一 PWM、复合 PWM、相移 PWM 三者阀芯正常启闭可控占空比区间约为 [0.285～0.325]、[0.285～0.77]、[0.085～0.81]。此外, 工作频率为 50 Hz, 相移 PWM 电压驱动策略所求正常启闭可控占空比区间([0.042～0.905])与该型高速电磁阀实测所得阀口流量线性区间([0.1～0.87])吻合度较高, 相移 PWM 电压驱动策略的提出为高速电磁阀线性化流量控制奠定了基础。

为验证相移 PWM 电压驱动策略对线圈温升的影响, 以下给出 0.5 可控占空比、100 Hz 工作频率下单一 PWM、复合 PWM、相移 PWM 电压驱动策略下线圈温升如图 9 所示。

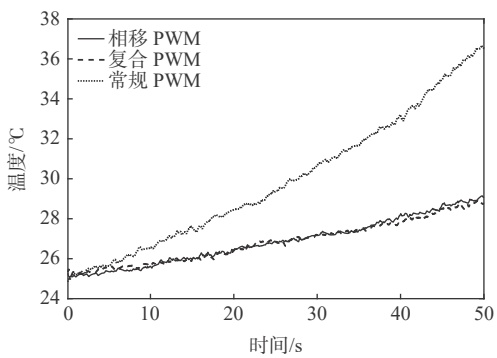



图 9　线圈温升对比结果

Fig. 9　Comparison results of coil temperature rise

由图 9 可知, 本文所提相移 PWM 与复合 PWM 电压驱动策略相比, 两者线圈温升变化规律基本一致, 相较于常规 PWM 电压控制可显著降低线圈温升, 持续工作 50 s, 温升减小 7.5 ℃。

## 4　结　论

针对高速电磁阀低可控占空比激励下阀芯不完全开启, 高可控占空比激励下不完全关闭所导致的有效可控占空比范围小的问题, 本文提出数字电压高动态激励驱动策略, 分别开展了 2 种驱动策略的设计、仿真与实验研究, 所得主要结论如下:

1) 本文策略相较于复合 PWM 电压驱动策略, 工作频率为 50 Hz, 阀后建压、卸荷过程耗时分别缩小了 37.9%、87%, 且线圈温升与复合 PWM 电压驱动策略相当。

2) 工作频率为 100 Hz, 压力响应对应阀芯正常启闭可控占空比从 0.285～0.77 提升至 0.085～0.81; 相移 PWM 电压控制实则是对线圈电流及电磁激励分段控制, 更易提升阀芯动态特性, 在较低可控占空比时易于实现阀芯正常开启, 较高可控占空比时确保阀芯正常关闭。

### 参考文献（References）

[1] DONKOV V H, ANDERSEN T, LINJAMA M, et al. Digital hydraulic technology for linear actuation: A state of the art review[J]. International Journal of Fluid Power, 2020, 21(2): 263-304.

[2] SHANG Y X, LI R J, WU S, et al. A research of high-precision pressure regulation algorithm based on ON/OFF valves for aircraft braking system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(8): 7797-7806.

[3] LEE I Y. Switching response improvement of a high speed on/off solenoid valve by using a 3 power source type valve driving circuit [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1823-1828.

[4] MESSNER F, SCHEIDL R. Development of a dual supply H-bridge amplifier for high speed actuation of digital hydraulic switching valves[J]. International Journal of Fluid Power, 2019, 20(1): 125-150.

[5] ZHAO J H, WANG M L, WANG Z J, et al. Different boost voltage effects on the dynamic response and energy losses of high-speed solenoid valves[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1494-1503.

[6] ZHAO J H, SHI Y, GREKHOV L, et al. Effects of structure parameters on the static electromagnetic characteristics of high speed solenoid valves[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 55(1): 45-60.

[7] ZHAO J H, YUE P F, GREKHOV L, et al. Hold current effects on the power losses of high-speed solenoid valve for common-rail injector[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 1579-1587.

[8] 孙晓, 栾盈盈, 孙柯, 等. 高速双线圈开关电磁阀控制策略研究[J]. 液压与气动, 2020(2): 175-182.

SUN X, LUAN Y Y, SUN K, et al. Control strategy of high-speed on/off solenoid valve with double windings[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(2): 175-182(in Chinese).

[9] 钟麒, 张斌, 洪昊岑, 等. 基于电流反馈的高速开关阀3电压激励控制策略[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2018, 52(1): 8-15.
ZHONG Q, ZHANG B, HONG H C, et al. Three power sources excitation control strategy of high speed on/off valve based on current feedback[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(1): 8-15(in Chinese).

[10] ZHONG Q, ZHANG B, YANG H Y, et al. Performance analysis of a high-speed on/off valve based on an intelligent pulse-width modulation control[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(11): 168781401773324.

[11] GAO Q, ZHU Y C, LUO Z, et al. Investigation on adaptive pulse width modulation control for high speed on/off valve[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(4): 1711-1722.

[12] YUE D L, LI L F, WEI L J, et al. Effects of pulse voltage duration on open-close dynamic characteristics of solenoid screw-in cartridge valves[J]. Processes, 2021, 9(10): 1722.

[13] LIU Z G, LI L F, YUE D L, et al. Dynamic performance improvement of solenoid screw-in cartridge valve using a new hybrid voltage control[J]. Machines, 2022, 10(2): 106.

[14] ZHONG Q, WANG X L, XIE G, et al. Analysis of dynamic characteristics and power losses of high speed on/off valve with pre-existing control algorithm[J]. Energies, 2021, 14(16): 4901.

[15] KIM S, MURRENHOFF H. Measurement of effective bulk modulus for hydraulic oil at low pressure[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(2): 021201.

# Phase-shifted PWM voltage drive strategy of high-speed solenoid valve

CHEN Xiaoming[1], ZHU Yuchuan[1, 2, *], LI Linfei[1], WANG Yuwen[1]

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Wuxi Research Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Wuxi 214000, China)

**Abstract**: High-speed solenoid valve is the core control element of digital flow technology, and its dynamic response and effective duty cycle range seriously affect the flow control accuracy of the system. To further expand the effective duty cycle range, a phase-shifted pulse width modulation (PWM) voltage drive strategy including reference PWM, pre-excitation PWM, excitation PWM, high-frequency PWM, pre-unloading PWM, and unloading PWM was proposed in this paper. Firstly, the working principle of the phase-shifted PWM voltage drive strategy was given, and the theoretical model of dynamic characteristics of high-speed solenoid valves was established. The simulation analysis and experimental verification of pre-excitation PWM and pre-unloading PWM duty cycle were carried out. The results show that compared with the composite PWM voltage drive strategy, the opening and closing pressure response time of the valve core are reduced by 87% and 37.9%, respectively. When the operating frequency is 100 Hz, the controllable duty cycle of the normal opening and closing of the valve core is extended from 28.5%–77% to 8.5%–81%.

**Keywords**: high-speed solenoid valve; pre-excitation; pre-unloading; phase-shifted PWM voltage drive strategy; controllable duty cycle

**Received**: 2022-12-29; **Accepted**: 2023-01-17; **Published Online**: 2023-02-15 11:01

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230214.1700.003

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (51975275); Primary Research and Development Plan of Jiangsu Province (BE2021034)

* **Corresponding author**. E-mail: meeyczhu@nuaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0956

# 低空时变风扰下无人机避障路径跟随方法

陶江[1]，曹云峰[2,*]

(1. 上海海洋大学 信息学院，上海 201306；2. 南京航空航天大学 航天学院，南京 211106)

**摘 要**：针对低空无人机避障路径跟随问题，设计了一种未知时变风扰下的无人机路径跟随方法。给出二维平面内的无人机运动学模型，完成避障路径跟随的数学建模；在未知时变风扰条件下采用矢量场方法设计了贝塞尔曲线期望路径的跟踪控制律，针对未知时变风扰下无人机地速无法测量的难点设计了地速估计器，分析了路径跟随的李雅普诺夫稳定性；在未知时变风扰条件下对贝塞尔曲线期望路径的跟踪进行了仿真验证。仿真实验证明：所设计的无人机路径跟随方法能够实现未知时变风扰条件下的路径稳定跟踪问题。

**关 键 词**：低空无人机；风切变；时变风扰；避障路径；跟踪控制律

**中图分类号**：V249; TP391

**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0175-08

在低空环境中，外界风扰对路径跟随的影响显得尤为强烈[1-2]。在距地面高度600 m以下时，龙卷风、雷暴、积雨云等气象条件的变化会引起强烈的下沉气流，气流下行的过程中会形成向四周扩散的阵风。在这个过程中，风速矢量的幅值和相位会不断地发生变化，这种低空环境中不断变化的风扰又被称为低空风切变。在低空风切变的扰动下，不断变化的垂直气流和水平气流都会使飞行器的姿态发生变化，从而偏离期望的路径[3]。由于低空风切变对飞行器姿态和路径的保持带来了较大的难度，极易引发飞行事故。1985年，美国达美航空191号航班在着陆过程中遭遇低空风切变，于达拉斯-沃斯堡国际机场坠毁，造成137人死亡。至此，低空风切变的探测、预警与影响消除开始在世界范围内作为一个科学问题进行研究。然而，低空风切变的短时间、高强度、小范围等特点使其探测与预警尤为困难，在此后的数十年间，由低空风切变所引发的飞行事故依然绵延不绝，2009年，联邦快递80号航班在日本成田国际机场遭遇低空风切变，最终飞机坠毁，2名驾驶员遇难。截至2019年，低空风切变仍然是威胁航空安全的一项重大隐患。对有人机而言，为在遭遇风切变的条件下仍精确地保持飞行器的期望路径，飞行员需要根据所遭遇的风切变特性对飞机采取一系列针对性的操纵，从而抵消风切变带来的影响，世界民航组织甚至为飞行员刊发了《低空风切变手册》这一标准的操纵准则[4]。对无人机而言，由于缺乏飞行员的操纵，在遭遇风切变时无人机需要依赖自身的路径跟随控制律完成路径的保持，因此，无人机的路径跟随控制律显得尤为重要。

当前无人机的路径跟随控制律设计方法主要分为两类：

1）基于虚拟目标点(virtual target point, VTP)的路径跟随。基于虚拟目标点的路径跟随假设无人机的期望路径上存在一个虚拟的运动目标点，通过设计无人机的飞行控制律驱动无人机始终跟踪该目标点。换言之，该方法的控制目标是使无人机在“指定的时间”到达“指定的目标点”。O'Connor

收稿日期：2022-11-30；录用日期：2023-01-13；网络出版时间：2023-03-27 08:50
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230324.1655.002
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金(NJ2020021)；南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ19-11)
*通信作者. E-mail：cyfac@nuaa.edu.cn

*引用格式：陶江，曹云峰. 低空时变风扰下无人机避障路径跟随方法[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：175-182.*
*TAO J，CAO Y F. UAV obstacle avoidance path-following method under time-varying wind disturbance at low altitudes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：175-182 (in Chinese).*

和 Kearney[5] 针对通过多个采样点布置风速计来计算低空风切变的传统方法，存在无法表征切变率是否为线性及无法确定 2 个采样点之间最大风切变位置的问题，探讨了将风胆集成到现有低空风切变警报系统中的可行性。理论证明了风胆的高采样速率可实现对低空风切变更精确的测量。Chen 和 Lu[6] 针对固定翼无人机路径跟随稳定性的问题，提出一种基于自适应制导距离的非线性制导律（nonlinear guidance law, NLGL），可以解决无人机离 VTP 较近时引起的跟随路径振荡问题，以及无人机离 VTP 较远时路径跟随误差较大问题，最后，通过实际飞行试验验证，横侧向路径跟随误差小于 1 m。Wang 等[7] 针对服从于非对称受控输入约束的非线性系统，提出一种近似最优的曲线路径跟踪控制算法。考虑模型部分未知的非线性，通过积分强化学习求解 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程。能够有效解决 NLGL 算法存在的当无人机距离 VTP 较近时，VTP 更新带来的严重的稳态误差问题。并通过硬件在环仿真系统验证了该算法相较于纯追踪算法和 NLGL 算法的优越性。

2）基于横侧向误差的路径跟随。与基于虚拟目标点的路径跟随不同，基于横侧向误差的路径跟随所考虑的跟踪误差是相对于整条期望路径的偏差，因此，这种控制策略在控制效果上是始终保持在期望路径上飞行，而非跟踪路径上的虚拟目标点。Silva 等[8] 针对空基风能发电系统中基于横侧向的路径跟随控制问题，提出一种改进的非线性制导逻辑控制器，极大增加了系统的吸引域。对八字形轨迹的跟随控制进行了仿真，并证明了系统的渐近稳定性。然而该方法只考虑了定常风速的情况，也未对系统的跟随误差进行分析。Back 等[9] 通过深度卷积神经网络实现无人机路径跟随中的航向指令生成及横侧向误差优化。Zhang 等[10] 通过深度强化学习方法来生成期望的航向指令，并通过设计回报函数实现路径跟随中的横侧向误差的最小优化。上述方法都通过仿真实验验证了有效性，然而控制器的稳定性没有得到证明。Yang 等[11] 针对固定翼无人机路径跟随问题，提出一种基于非线性优化控制方法，并设计了风扰滑模观测器。然而该观测器假定模型不存在参数不确定性，和实际飞行环境不符，在风扰下无人机无法保持恒定空速。此外，当风速或风向变化过快时，该滑模观测器也无法快速响应从而导致产生抖振现象。

在未知时变风扰条件下，第 1 类路径跟随控制律的设计方法存在较大的局限性，具体表现为：由于外界风扰的影响，虚拟目标点的运动速度需要随着风速的方向进行调整，当无人机顺风飞行时，虚拟目标点的运动速度需要相应地增加，当无人机逆风飞行时，虚拟目标点的运动速度需要相应地减小。由于未知时变风扰条件下，风速的幅值和相位都难以预测，难以对虚拟目标点的运动速度进行调整。相比之下，第 2 类路径跟随控制律以无人机相对于整条期望路径的偏差作为跟踪误差，在一定程度上消除了未知风速的影响，具有较大的优势。因此，本文基于横侧向的误差设计了低空未知时变风扰下的无人机避障路径跟随方法。

## 1 无人机避障路径跟随数学建模

采用二维平面内的无人机运动学模型表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = V_a\cos\psi + W\cos\psi_W = V_g\cos\chi \\ \dot{y} = V_a\sin\psi + W\sin\psi_W = V_g\sin\chi \\ \dot{\chi} = \alpha(\chi^c - \chi) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$V_a$为无人机的空速；$V_g$为无人机的地速；$W$为风速；$\psi$为无人机的空速与 $x$ 轴的夹角；$\psi_W$为风速与 $x$ 轴的夹角；$\chi$为地速与 $x$ 轴的夹角；$\alpha$为$\chi$的响应速率；$\chi^c$为方位角的控制量。$V_a$、$V_g$和 $W$ 之间的关联如图 1 所示。

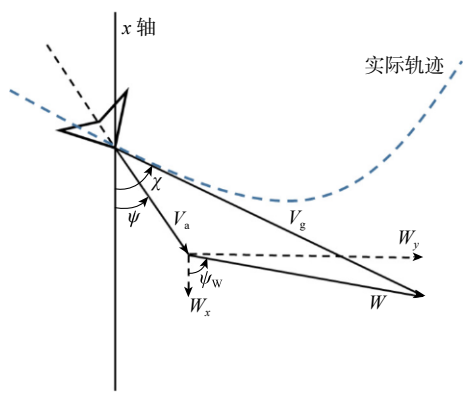



图 1 无人机$V_a$、$V_g$和 $W$ 之间的关联

Fig. 1 Relation among $V_a$, $V_g$ and $W$

对于本文的小型固定翼无人机，$W$的幅值一般为$V_a$大小的 20%～50%。

**注释 1** 相比于机体系下测得的$V_a$、$\psi$等，采用惯性系下的$V_g$、$\chi$进行数学建模可以忽略风扰的影响，因此，本文同样采用惯性系下测得的物理量进行数学建模。需要指出的是，由于时变风扰下无法通过惯性系测量$V_g$，因此，需要设计地速估计器，通过估计值设计控制律。

在上述模型中，路径跟随的数学模型可表示为：给定一条期望的避障路径，无人机的初始位置$(x,y)$，以及无人机方位角$\chi$。路径跟随的目的在于设计方位角的控制量$\chi^c$使无人机与期望路径之间的偏差收敛。

与大部分无人机路径跟随的研究相同, 本文对于路径跟随的研究服从以下 4 个基本假设。

**假设 1**　无人机的飞行高度和$V_a$均通过高度控制回路保持不变。

**假设 2**　无人机的方位角$\chi$是可测量的。

**假设 3**　无人机的状态均连续有界, 且满足如下约束条件:

$$\begin{cases} V_{\min} \leqslant V_g \leqslant V_{\max} \\ |W| \leqslant W_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

式中: $V_{\min}$和$V_{\max}$分别为空速的最大值和最小值; $W_{\max}$为风速的最大值。

**假设 4**　未知时变风扰下的$W$可分解为定常分量$W_c$和时变分量$W_v$, 其中, $W_c$的幅值$|W_c|$和相位$\psi_c$均为定值, $W_v$的幅值$|W_v|$和相位$\psi_v$均为时变的三角函数。

基于上述假设, 无人机避障路径控制律的设计可分为 2 个模块: 导引模块, 即根据无人机相对于期望路径的位置, 设计无人机在每个位置的期望方位角$\chi_d$; 控制模块, 即根据无人机的期望方位角, 计算方位角的控制量$\chi^c$。针对导引模块, 基于无人机相对于期望路径的横侧向误差构建矢量场, 通过矢量场获取无人机在不同位置的期望方位角。针对控制模块, 根据贝塞尔曲线等不同路径的特点设计控制律, 并验证本文方法的李雅普诺夫稳定性。

## 2　基于矢量场的无人机避障路径跟随控制律

### 2.1　基于矢量场的路径跟随导引律设计

矢量场是使用较为广泛的一种制导策略[12], 其主要技术思想是在期望路径周边构建矢量场, 驱动无人机在矢量场内运动并保证跟踪误差收敛为 0。区别于跟踪路径上的虚拟目标点, 矢量场给出的期望方位角指令用于驱动无人机始终保持在期望路径上飞行, 本节针对贝塞尔曲线[13]构建矢量场, 给出无人机相对于期望路径的导引律。

当无人机的期望路径为贝塞尔曲线$y = f(x)$(此处采用普通方程表示贝塞尔曲线[14]), 控制点分别为$P_0 = [-25, -5]$, $P_1 = [0, 20]$, $P_2 = [25, -25]$, $k = 0.15$矢量场的构建如图 2 所示。

假设$e = y - f(x)$为无人机与期望路径在竖直方向上的偏差, $\chi^p$为无人机所处位置对应的路径切线方位角。本文的导引律需满足:

1) 当$e \to \infty$时, 无人机以$\chi_d \to \chi^p + \chi^\infty + i\pi$的方位角沿垂直于贝塞尔曲线路径切线方向飞行;

2) 当$e \to 0$时, 无人机以$\chi_d \to \chi^p + i\pi$的方位角沿贝塞尔曲线切线方向飞行。

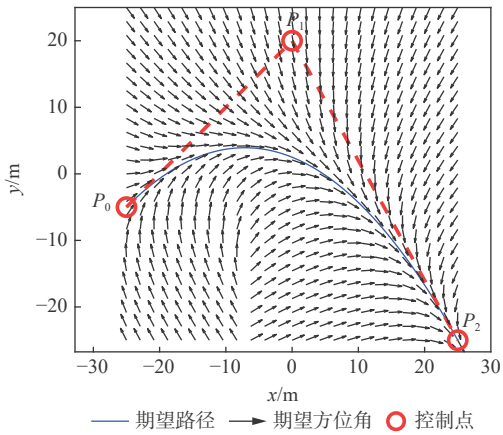



图 2　贝塞尔曲线路径的矢量场构建

Fig. 2　Vector field construction for Bessel curve paths

其中, 当$i = 0$时表示期望路径方向为$x$轴正方向, 当$i = 1$时表示期望路径方向为$x$轴负方向。因此, 贝塞尔曲线的矢量场导引律可表示为

$$\chi_d = \chi^p + \chi^\infty \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(ke) + i\pi \tag{3}$$

式中: $k$为控制期望方向角变化速率的衰减因子, 当$k$取值越大时, $\chi_d$随$e$变化越快, 反之则越慢。图 3 为不同$k$取值下贝塞尔曲线路径矢量场的示意图; 图 4 为不同方向的贝塞尔曲线路径矢量场示意图。

### 2.2　定常风扰下的路径跟随控制律

定常风扰下的路径跟随控制方案如图 5 所示, 在通过基于矢量场的导引律获取期望方位角后, 需要通过设定合适的方位角控制量$\chi_c$驱动无人机运动, 从而使无人机与期望路径之间的偏差收敛。在外界风扰定常的情况下, 一般认为无人机的地速$V_g$可测量[15], 因此, 可直接使用地速进行控制律设计。贝塞尔曲线路径跟随的垂直误差变化率可通过$y$轴方向上的相对运动表示:

$$\dot{e} = V_g \frac{\sin(\chi - \chi^p)}{\cos(\chi^p)} \tag{4}$$

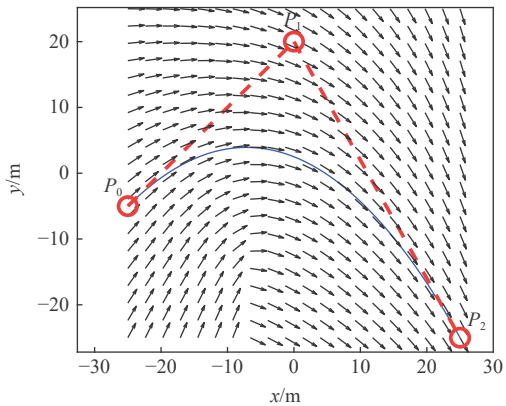
构造李雅普诺夫方程$W_1 = (1/2)e^2$验证当$\chi_d$的取值如式 (3) 所示时, $e \to 0$。考虑$W_1$的导数:

$$\dot{W}_1 = e\dot{e} = eV_g \frac{\sin(\chi^d - \chi^p)}{\cos\chi^p} = -eV_g \sin\left(\chi^\infty \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(ke) + \chi^p\right) \Big/ \cos(\chi^p) \tag{5}$$

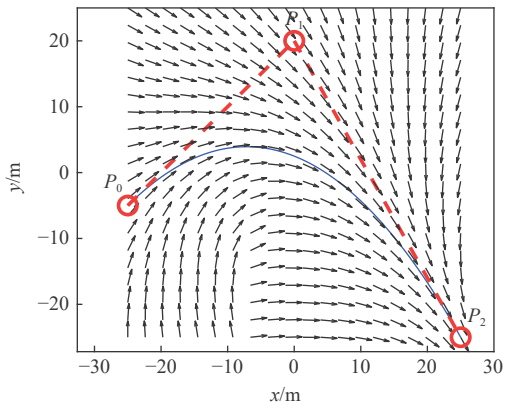
显然, $\dot{W}_1$小于 0, 因此, 满足当$\chi \to \chi_d$时$e \to 0$。

进一步定义无人机跟踪贝塞尔曲线路径的方位角误差$\tilde{\chi} = \chi - \chi_d$, 构建李雅普诺夫函数$W_2 = (1/2)\tilde{\chi}^2$, 考虑$W_2$的导数:

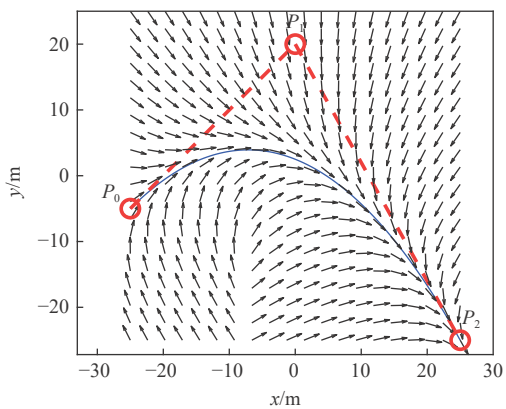
$$\dot{W}_2 = \tilde{\chi}\left(\alpha(\chi^c - \chi) - \dot{\chi}^p - \frac{k}{1 + (ke)^2} \cdot \frac{2\chi^\infty}{\pi} \cdot \frac{V_g \sin(\chi - \chi^p)}{\cos(\chi^p)}\right) \tag{6}$$




(a) $k$=0.015




(b) $k$=0.050

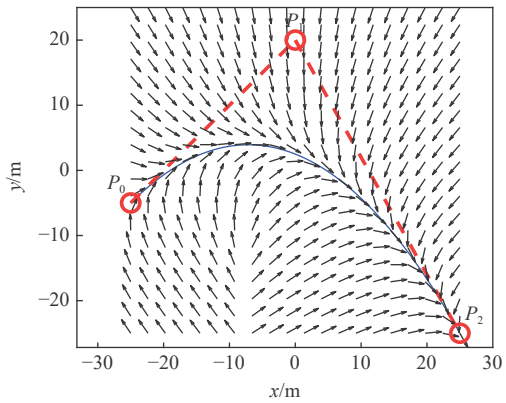



(c) $k$=0.150

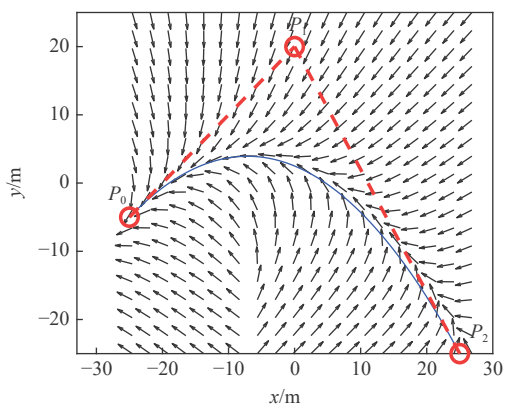
期望路径 期望方位角 控制点

图 3 不同 $k$ 值下的贝塞尔曲线路径矢量场对比

Fig. 3 Comparison of Bessel curve path vector fields for different values of $k$




(a) $i$=0 时的矢量场




(b) $i$=1 时的矢量场

期望路径 期望方位角 控制点

图 4 不同运动方向的贝塞尔曲线路径矢量场

Fig. 4 Comparison of Bessel curve path vector fields for different directions of motion

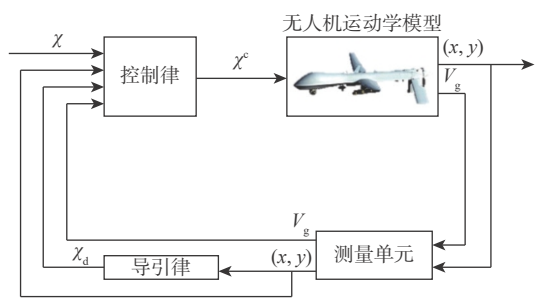



图 5 定常风扰下的路径跟随控制方案

Fig. 5 Path-following control scheme under constant wind disturbance

若选择控制量$\chi^c$为

$$\chi^c=\chi+\frac{\dot{\chi}^p}{\alpha}+\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{k}{1+(ke)^2}\cdot\frac{2\chi^\infty}{\pi}\cdot\frac{V_g\sin(\chi-\chi^p)}{\cos(\chi^p)}-\frac{\kappa}{\alpha}\mathrm{sign}\tilde{\chi} \tag{7}$$

式中：$\kappa>0$，则满足$\dot{W}_2\leqslant-\kappa|\tilde{\chi}|$，$\dot{W}_2=\begin{cases}-\dfrac{\kappa}{\varepsilon}\tilde{\chi}^2 & \left|\dfrac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right|<1\\ -\kappa|\tilde{\chi}| & \left|\dfrac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right|\geqslant 1\end{cases}$，由此可知，$\tilde{\chi}$在有限时间内收敛为 0。与直线和圆形路径跟随类似，采用 sat 函数替换 sign 函数重新选择控制量$\chi^c$为

$$\chi^c=\chi+\frac{\dot{\chi}^p}{\alpha}+\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{k}{1+(ke)^2}\cdot\frac{2\chi^\infty}{\pi}\cdot\frac{V_g\sin(\chi-\chi^p)}{\cos(\chi^p)}-\frac{\kappa}{\alpha}\mathrm{sat}\left(\frac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right) \tag{8}$$

其中：参数 $k$、$\kappa$、$\varepsilon$对于系统的影响与 2.2 节类似。$\dot{\chi}^p$的计算方法如下：

$$\dot{\chi}^p=\frac{\mathrm{d}\chi^p}{\mathrm{d}x}\cdot\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\tan^{-1}(f(x)')}{\mathrm{d}x}V_g\cos\chi=\frac{f(x)''}{1+(f(x)')^2}V_g\cos\chi \tag{9}$$

**定理 1** 定常风扰下路径跟随控制系统如式(10)所示，考虑式 (10) 所给出的非线性系统式 (11)：

$$\begin{cases}\dot{\tilde{\chi}}=\alpha(\chi^{\mathrm{c}}-\chi)-\dfrac{V_{\mathrm{g}}}{d}\sin(\chi-\gamma)+\dfrac{k}{1+(ke)^2}V_{\mathrm{g}}\cos(\chi-\gamma)\\ \dot{e}=-V_{\mathrm{g}}\sin\left(\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)\end{cases}\tag{10}$$

$$\begin{cases}\dot{\tilde{\chi}}=\alpha(\chi^{\mathrm{c}}-\chi)-\dot{\chi}^{\mathrm{p}}+\dfrac{k}{1+(ke)^2}\cdot\dfrac{2\chi^{\infty}}{\pi}\cdot\dfrac{V_{\mathrm{g}}\sin(\chi-\chi^{\mathrm{p}})}{\cos(\chi^{\mathrm{p}})}\\ \dot{e}=-V_{\mathrm{g}}\sin\left(\chi^{\infty}\dfrac{2}{\pi}\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)\end{cases}\tag{11}$$

控制量$\chi^{\mathrm{c}}$由式(12)给出, 该系统全局渐近稳定。

$$\chi^{\mathrm{c}}=\chi-\frac{1}{\alpha}\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}\cdot\frac{k}{1+(ke)^2}V_{\mathrm{g}}(\sin\chi-a\cos\chi)-\frac{\kappa}{\alpha}\mathrm{sat}\left(\frac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right)\tag{12}$$

其中,

$$\mathrm{sat}(x)=\begin{cases}x & |x|\leqslant 1\\ \mathrm{sign}(x) & |x|>1\end{cases}\tag{13}$$

**证明**　构造李雅普诺夫函数:

$$W=\frac{1}{2}e^2+\frac{1}{2}\rho\tilde{\chi}^2\tag{14}$$

式中: $\rho$为李雅普诺夫方程的量纲归一化指标, $\rho>0$。与 2.2 节类似, 当$|\tilde{\chi}|\geqslant\varepsilon$时, 系统满足全局渐近稳定的条件。当$|\tilde{\chi}|<\varepsilon$取李雅普诺夫导数:

$$\dot{W}=e\dot{e}+\rho\tilde{\chi}\dot{\tilde{\chi}}=-eV_{\mathrm{g}}\sin\left(\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)\Big/\cos(\chi^{\mathrm{p}})-\frac{\rho\kappa}{\varepsilon}\tilde{\chi}^2\leqslant 0\tag{15}$$

进一步考虑$\ddot{W}$:

$$\begin{aligned}\ddot{W}=&-\frac{\dot{e}V_{\mathrm{g}}}{\cos\chi^{\mathrm{p}}}\sin\left(\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)-\\ &\frac{eV_{\mathrm{g}}}{\cos\chi^{\mathrm{p}}}\cos\left(\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)\cdot\\ &\left[\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}\cdot\frac{ke\dot{e}}{1+(ke)^2}+\dot{\tilde{\chi}}\right]-2\rho\left(\frac{\kappa}{\varepsilon}\tilde{\chi}\right)^2=\\ &\left[V_{\mathrm{g}}\sin\left(\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)\right]^2\Big/\cos\chi^{\mathrm{p}}+\\ &eV_{\mathrm{g}}\cos\left(\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)\Big/\cos\chi^{\mathrm{p}}\cdot\\ &\left\{\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}keV_{\mathrm{g}}\sin\left(\chi^{\infty}\frac{2}{\pi}\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)\Big/\right.\\ &\left.\left[(1+(ke)^2)\cos\chi^{\mathrm{p}}\right]+\frac{\kappa}{\varepsilon}\tilde{\chi}\right\}-2\rho\left(\frac{\kappa}{\varepsilon}\tilde{\chi}\right)^2\end{aligned}\tag{16}$$

由于$\dot{W}$半负定, 表明系统状态$e$与$\tilde{\chi}$有界, 因此, $\ddot{W}$有界, 由此可知$\dot{W}$是一致连续的。由 Barbalat 引理可知, 系统状态$e$与$\tilde{\chi}$渐近收敛为 0。

**证毕**

### 2.3　未知时变风扰下的路径跟随控制律

如引言所述, 未知时变风扰下路径跟随最大的挑战在于$V_{\mathrm{g}}$是不可测量的, 在这种情况下需要先设计估计器来获得地速的估计值$\hat{V}_{\mathrm{g}}$, 利用估计值设计路径跟随控制律。因此, 未知时变风扰下的路径跟随控制方案如图 6 所示。

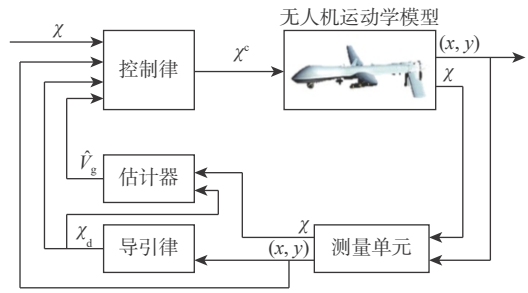



图 6　时变风扰下的路径跟随控制方案

Fig. 6　Path-following control scheme under time-varying wind disturbance

采用地速的估计值, 未知时变风扰下的贝塞尔曲线路径跟随控制律可写为

$$\begin{aligned}\chi^{\mathrm{c}}=&\chi+\frac{\dot{\chi}^{\mathrm{p}}}{\alpha}+\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{k}{1+(ke)^2}\cdot\frac{2\chi^{\infty}}{\pi}\cdot\\ &\frac{\hat{V}_{\mathrm{g}}\sin(\chi-\chi^{\mathrm{p}})}{\cos\chi^{\mathrm{p}}}-\frac{\kappa}{\alpha}\mathrm{sat}\left(\frac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right)\end{aligned}\tag{17}$$

**定理 2**　未知时变风扰下路径跟随控制系统如式(18)所示, 考虑式(18)所给出的非线性系统, 当控制信号由式(17)给出时, 该系统全局渐近稳定。

$$\begin{cases}\dot{\tilde{\chi}}=\dfrac{k}{1+(ke)^2}\cdot\dfrac{2\chi^{\infty}}{\pi}\cdot\dfrac{\sin(\chi-\chi^{\mathrm{p}})}{\cos\chi^{\mathrm{p}}}\Theta-\kappa\mathrm{sat}\left(\dfrac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right)\\ \dot{e}=-V_{\mathrm{g}}\sin\left(\chi^{\infty}\dfrac{2}{\pi}\tan^{-1}(ke)+\tilde{\chi}\right)\\ \dot{\Theta}=-\tau\rho\tilde{\chi}\dfrac{k}{1+(ke)^2}\cdot\dfrac{2\chi^{\infty}}{\pi}\cdot\dfrac{\sin(\chi-\chi^{\mathrm{p}})}{\cos\chi^{\mathrm{p}}}\end{cases}\tag{18}$$

式中: $\Theta=\hat{V}_{\mathrm{g}}-V_{\mathrm{g}}$为估计器的估计偏差; $\dot{\Theta}$为贝塞尔曲线轨迹跟踪的地速估计器; $\tau$为估计器的放大系数。

**证明**　构造李雅普诺夫函数:

$$W=\frac{1}{2}e^2+\frac{1}{2}\rho\tilde{\chi}^2+\frac{1}{2}\tau^{-1}\Theta^2\tag{19}$$

取李雅普诺夫导数:

$$\begin{aligned}\dot{W}=&e\dot{e}+\rho\tilde{\chi}\dot{\tilde{\chi}}+\tau^{-1}\Theta\dot{\Theta}=e\dot{e}+\\ &\rho\tilde{\chi}\left(\left(\frac{k}{1+(ke)^2}\cdot\frac{2\chi^{\infty}}{\pi}\cdot\frac{\sin(\chi-\chi^{\mathrm{p}})}{\cos\chi^{\mathrm{p}}}\right)(\hat{V}_{\mathrm{g}}-V_{\mathrm{g}})+\right.\\ &\left.\kappa\mathrm{sat}\left(\frac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right)\right)+\tau^{-1}(\hat{V}_{\mathrm{g}}-V_{\mathrm{g}})(\dot{\hat{V}}_{\mathrm{g}}-\dot{V}_{\mathrm{g}})=\\ &e\dot{e}-\rho\tilde{\chi}\kappa\mathrm{sat}\left(\frac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right)+\left[\tau^{-1}(\dot{\hat{V}}_{\mathrm{g}}-\dot{V}_{\mathrm{g}})+\right.\\ &\left.\rho\tilde{\chi}\left(\frac{k}{1+(ke)^2}\cdot\frac{2\chi^{\infty}}{\pi}\cdot\frac{\sin(\chi-\chi^{\mathrm{p}})}{\cos\chi^{\mathrm{p}}}\right)\right](\hat{V}_{\mathrm{g}}-V_{\mathrm{g}})\end{aligned}\tag{20}$$

由 2.2 节的证明可知$e\dot{e}$和$-\rho\tilde{\chi}\kappa\mathrm{sat}\left(\dfrac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right)$均为半负定, 当取$\dot{\hat{V}}_{\mathrm{g}}$为式(21)时, $\dot{W}$半负定。进一步由 2.2 节的证明可知$\ddot{W}$有界, 因此, 系统全局渐近稳定。

**证毕**

$\hat{V}_g$及地速$V_g$的导数计算式分别为

$$\dot{\hat{V}}_g = \dot{V}_g - \tau\rho\tilde{\chi}\frac{k}{1+(ke)^2}\cdot\frac{2\chi^\infty}{\pi}\cdot\frac{\sin(\chi-\chi^p)}{\cos\chi^p} \tag{21}$$

$$\dot{V}_g=\frac{\mathrm{d}V_g}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial V_g}{\partial\chi}\cdot\frac{\partial\chi}{\partial t}=\frac{\partial V_g}{\partial\chi}\left[\alpha(\chi^c-\chi)\right]=\frac{\partial V_g}{\partial\chi}\left[\alpha(\chi^c-\chi)\right]=\frac{\partial V_g}{\partial\chi}\left[-\chi^\infty\frac{2}{\pi}\cdot\frac{k}{1+(ke)^2}\hat{V}_g(\sin\chi-a\cos\chi)-\kappa\mathrm{sat}\left(\frac{\tilde{\chi}}{\varepsilon}\right)\right] \tag{22}$$

## 3 仿真实验验证

### 3.1 仿真实验设置

本文的实验参数设置为：导引律参数$\chi^\infty$为$\frac{\pi}{2}$，控制增益$k$为0.01，无人机空速$V_a$为13 m/s，方位角响应速度$\alpha$为1.65，控制律参数$\kappa$为$\frac{\pi}{2}$，$\varepsilon$为1，估计器参数$\tau$为80，定常风扰幅值$|W_c|$为6 m/s，相位为$\frac{2\pi}{3}$，时变风扰幅值$|W_v|$为$3\cos t$，时变风扰相位为$\pi\sin t$。本文的仿真平台为MATLAB 2019b，CPU主频为2.4 GHz。

### 3.2 仿真实验结果

对于给定的贝塞尔曲线，在时变未知风扰环境下的路径跟随结果如图7所示。图中的短箭头为定常风扰，用$W_c$表示；实线为无人机飞行路径；虚线为期望路径；长箭头为无人机在每个位置的期望方位角，用$\chi_d$表示。从图中可见，无人机受风扰的影响，在初始位置与预设轨迹有较大的偏离（10 m左右），随后逐渐收敛。地速估计结果如图8所示，虚线表示地速$V_g$，实线表示地速估计结果，图8(a)为地速估计初值和真实值初值相同的情况，从图中可以看出地速估计误差较小，均方根误差为2.7 m/s。图8(b)～图8(d)为地速估计初值和真实值初值分别相差2, 3, 4m/s的情况，从图中可以看出随着初值相差增大，地速估计误差也逐渐增大。具体误差数值如表1所示。从表中得到地速估计最大平均误差为7.5 m/s。仿真实验结果表明本文方法可以在时变未知风扰环境中估计真实地速，并完成曲线路径的跟随。

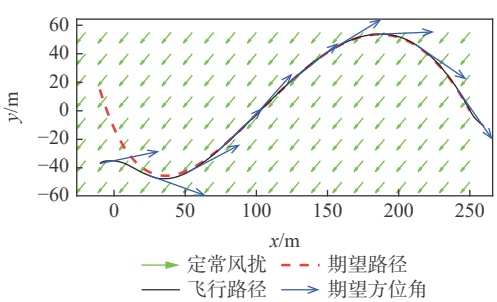
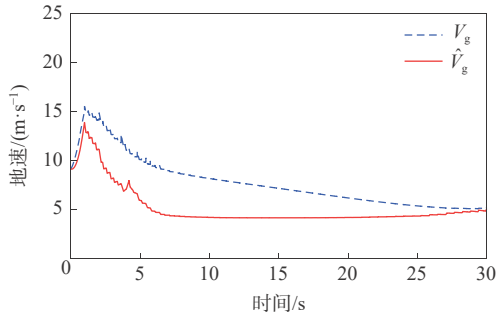
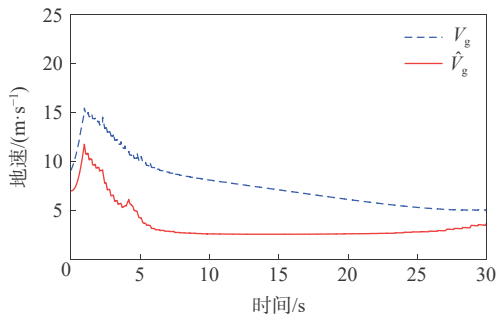



图7 时变未知风扰环境下的路径跟随结果

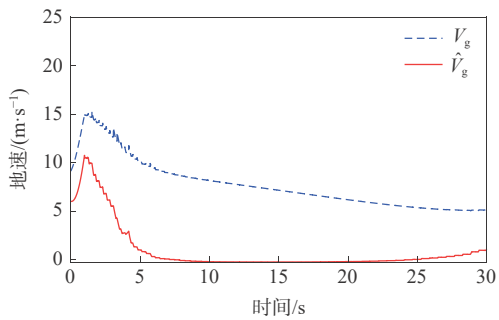
Fig. 7 Path-following result under unknown time-varying wind disturbance



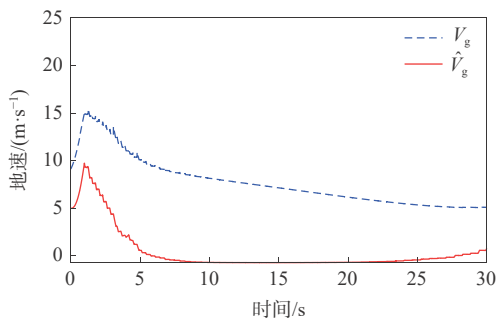

(a) 地速估计初值和真实值初值差值为0




(b) 地速估计初值和真实值初值差值为2 m/s




(c) 地速估计初值和真实值初值差值为3 m/s




(d) 地速估计初值和真实值初值差值为4 m/s

图8 地速估计结果

Fig. 8 Ground speed estimation result

表1 不同初值偏差条件下的地速估计误差

Table 1 Estimation error of ground speed under different deviations from initial values

| 初值偏差/(m·s⁻¹) | 平均误差/(m·s⁻¹) | 均方误差/(m·s⁻¹) |
|---|---|---|
| 0 | 3.0 | 2.7 |
| 2 | 4.5 | 4.3 |
| 3 | 6.9 | 7.1 |
| 4 | 7.5 | 7.6 |

进一步与未加地速估计器的传统矢量场路径跟随方法[13]进行对比, 路径跟随对比结果如图 9 所示, 虚线表示传统矢量场方法的路径跟随结果, 实线表示本文方法的路径跟随结果。由图 9 可知, 传统矢量场方法在路径跟随初期和末期都存在一定的振荡, 且收敛速度较慢, 而本文方法具有较快的收敛速度。纵向距离误差 $e$ 对比结果如图 10 所示。由图 10 可知, 在整个路径跟随过程中都存在振荡, 且从初始位置进行路径跟随一段时间后, 期间纵向距离误差最大可达 5 m。而本文方法在路径跟随期间纵向误差最大为 1 m, 随后快速稳定在 0.1 m 左右。方位角误差 $\chi$ 对比结果如图 11 所示。由图 11 可知, 在整个路径跟随过程中, 传统矢量场方法的方位角都存在较大误差, 最大误差为 1.6 rad。本文方法的方位角在路径跟随初期存在一定误差, 最大误差为 0.5 rad。随后方位角误差快速稳定在 0.1 rad 左右。上述结果表明, 本文方法具有更快的收敛速度, 且误差较小。

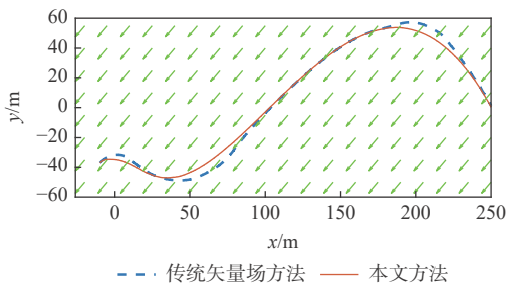



图 9　路径跟随结果对比

Fig. 9　Comparison of path-following results

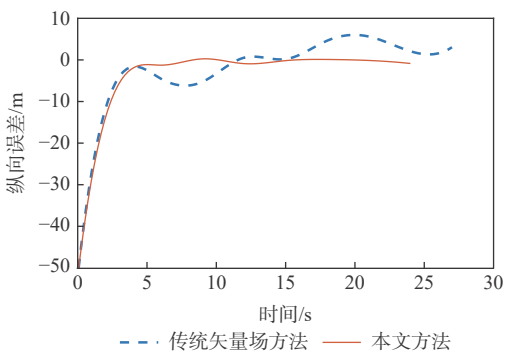



图 10　纵向误差对比

Fig. 10　Comparison of lateral errors

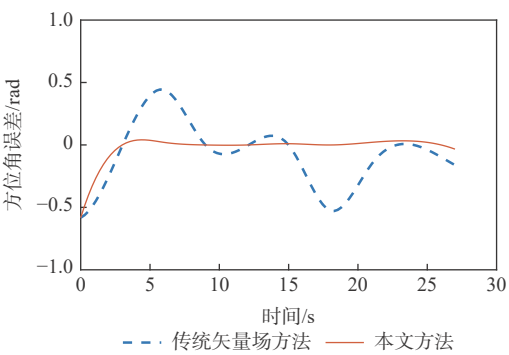



图 11　方位角误差对比

Fig. 11　Comparison of azimuth angle errors

## 4　结　论

1) 本文对路径跟随进行数学建模, 给出了二维平面内的无人机运动学模型; 依据低空未知时变风扰特性, 将无人机避障路径控制律的设计分为导引模块和控制模块。

2) 分别在定常风扰和时变未知风扰条件下采用矢量场方法设计曲线路径跟随控制律。针对时变未知风扰下无人机地速无法测量的难点设计了地速估计器, 分析了路径跟随的李雅普诺夫稳定性; 最终表明所设计的地速估计器是全局渐近稳定的。

3) 在时变未知风扰环境中对本文方法进行了仿真验证。仿真结果表明, 在时变和未知的风切变扰动环境中, 本文方法可以有效抵消风扰的影响, 满足路径跟随的要求。与未加地速估计器的传统矢量场路径跟随方法相比具有更快的收敛速度, 纵向距离偏差为 0.1 m, 方位角偏差 0.1 rad。

## 参考文献 (References)

[1] SUJIT P B, SARIPALLI S, SOUSA J B. Unmanned aerial vehicle path following: A survey and analysis of algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2014, 34(1): 42-59.

[2] YAMAGUCHI T, FEINGOLD G, KAZIL J. Aerosol cloud interactions in trade wind cumulus clouds and the role of vertical wind shear[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(22): 12244-12261.

[3] ZHOU B Y, SATYAVADA H, BALDI S. Adaptive path following for unmanned aerial vehicles in time-varying unknown wind environments[C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1127-1132.

[4] PALOMAKI R T, ROSE N T, VAN DEN BOSSCHE M, et al. Wind estimation in the lower atmosphere using multirotor aircraft[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2017, 34(5): 1183-1191.

[5] O'CONNOR A, KEARNEY D. Low level turbulence detection for airports[J]. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2019, 6(1): 3.

[6] CHEN Q Y, LU Y F. An improved nonlinear path following method with on-line transition trajectory generation for fixed-wing unmanned aerial vehicles[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2022, 19(3): 1-16.

[7] WANG Y J, WANG X K, SHEN L C. Approximate optimal curve path tracking control for nonlinear systems with asymmetric input constraints[J]. Drones, 2022, 6(11): 319.

[8] SILVA G B, PAIVA L T, FONTES F A C C. A path-following guidance method for airborne wind energy systems with large domain of attraction[C]//Proceedings of the American Control Confer-

ence. Piscataway: IEEE Press, 2019: 2771-2776.

[9] BACK S, CHO G, OH J, et al. Autonomous UAV trail navigation with obstacle avoidance using deep neural networks[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 100(3): 1195-1211.

[10] ZHANG Y T, ZHANG Y M, YU Z Q. Path following control for UAV using deep reinforcement learning approach[J]. Guidance, Navigation and Control, 2021, 1(1): 2150005.

[11] YANG J, LIU C J, COOMBES M, et al. Optimal path following for small fixed-wing UAVs under wind disturbances[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 29(3): 996-1008.

[12] WILHELM J P, CLEM G. Vector field UAV guidance for path following and obstacle avoidance with minimal deviation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2019, 42(8): 1848-1856.

[13] ZHANG Z, LIU X, FENG B. Research on obstacle avoidance path planning of UAV in complex environments based on improved Bézier curve[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 16453.

[14] CHOI J, CURRY R, ELKAIM G. Path planning based on bézier curve for autonomous ground vehicles[C]//Proceedings of the Advances in Electrical and Electronics Engineering-IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science. Piscataway: IEEE Press, 2008: 158-166.

[15] NELSON D R, BARBER D B, MCLAIN T W, et al. Vector field path following for miniature air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(3): 519-529.

# UAV obstacle avoidance path-following method under time-varying wind disturbance at low altitudes

TAO Jiang[1], CAO Yunfeng[2,*]

(1. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. School of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract**: An unmanned aerial vehicle path-following method under unknown time-varying wind disturbance was designed to solve the problem of unmanned aerial vehicle obstacle avoidance path-following at low altitudes. Firstly, a kinematic model of the unmanned aerial vehicle in the two-dimensional plane was given to complete the mathematical modeling of the obstacle avoidance path-following; secondly, a vector field method was used to design the tracking control law for the desired path of the Bessel curve under the unknown time-varying wind disturbance condition, and a ground speed estimator was designed for measuring the ground speed of the unmanned aerial vehicle under the unknown time-varying wind disturbance, and the Liapunov stability of the path-following was analyzed. Finally, a simulation was carried out to verify the Bessel curve's expected path-following under unknown time-varying wind disturbance. The simulation experiments demonstrate that the designed unmanned aerial vehicle path-following method can achieve stable path-following under the unknown time-varying wind disturbance.

**Keywords**: unmanned aerial vehicle at low altitude; wind shear; time-varying wind disturbance; obstacle avoidance path; tracking control law

**Received**: 2022-11-30; **Accepted**: 2023-01-13; **Published Online**: 2023-03-27 08:50

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230324.1655.002

**Foundation items**: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (NJ2020021); Funding for Outstanding Doctoral Dissertation in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (BCXJ19-11)

* **Corresponding author**. E-mail: cyfac@nuaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0965

# 高超声速飞行器再入滑翔段在线制导

魏昊[1]，蔡光斌[1,*]，凡永华[2]，徐慧[1]，王晶[3]，周卓成[1]

(1. 火箭军工程大学 导弹工程学院，西安 710025；2. 西北工业大学 航天学院，西安 710072；
3. 陆军步兵学院石家庄校区，石家庄 050000)

**摘　　要**：针对高超声速飞行器再入滑翔段制导问题，提出一种基于粒子群优化-鲸鱼算法的在线制导策略。考虑其约束模型与交班条件，建立了过程约束与终端约束模型。为缩短轨迹生成时间，减少算法计算量，设计了一种能自动满足终端高度、路径角、航程约束的高度-剩余航程飞行剖面。基于阻力系数为常值的前提下，推导了满足航程约束的速度数值解。利用上述模型，设计了一种三参数寻优模型，实现对终端条件的控制。为优化过程约束，提出结合鲸鱼算法和粒子群优化算法的改进鲸鱼算法，克服了粒子群算法易早熟收敛的缺点，提高了求解效率，满足了飞行过程中热流率最小的目标。而后通过将航迹分段的方法，提出一种基于中间点的在线制导方法，对纵向剖面进行在线更新，从而满足终端约束。仿真结果表明，所提方法能高效率的求解最优飞行轨迹。

**关　键　词**：高超声速飞行器；再入滑翔段；在线制导；改进的鲸鱼算法；轨迹优化
**中图分类号**：V448.235
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0183-10

现代防空反导系统在不断健全，已经具备全天域、多维度、平台化、体系化的特点。防御手段也从动能直接碰撞式杀伤发展为激光、高功率微波等杀伤。因此，传统的弹道导弹已经无法对具有强大防御能力的目标实施有效打击。高超声速滑翔飞行器 (hypersonic glide vehicles, HGV) 具有飞行速度快、突防能力强、飞行航程远等一系列特点，成为各军事大国的重点研究方向。美国通过开展 X-51A 等验证项目，在超燃冲压发动机等关键领域取得了重大进展。俄罗斯的“匕首”、“先锋”、“锆石”等高超声速导弹的研制成功，也使其技术取得重大突破[1-3]。

再入滑翔段是实现高超声速飞行器精确抵达目标的关键阶段。再入滑翔段可分为 3 段，分别为初始下降段、滑翔段及末端能量管理端(terminal area energy management phase, TAEM)段。而要使 HGV 精确抵达目标，必须要求 HGV 在滑翔段向末端能量管理段准确交班，满足 TAEM 段的各项状态约束[4]。为满足交班约束，需要优化飞行器再入轨迹。国内外学者对此理论已开展了大量研究。Elnagar[5] 和呼卫军[6] 等利用伪谱法将 HGV 再入段轨迹优化问题转化为最优控制的问题进行求解；王涛等[7] 用预测校正制导法加模糊控制的方法，实现了低负载的制导计算；刘欣等[8] 将高度与速度相关联，设计了基于高度-速度剖面的再入轨迹；伍元培等[9] 研究了高超声速飞行器避障问题，提出一种基于深度神经网络的实时轨迹优化方法；冯林爽等[10] 利用基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和序列二次规划的混合优化算法，在快速轨迹优化的同时提高最优轨迹的质量。

飞行器要安全进入 TAEM 段交接窗口，就必须能够应对各种突发态势，这就要求算法能实时生成滑翔段最优轨迹，使该轨迹能满足过程约束来保证飞行器的安全、满足终端约束保证顺利转换到

**收稿日期**：2022-12-03；**录用日期**：2023-04-04；**网络出版时间**：2023-05-06 10:44
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230505.1052.002
**基金项目**：国家自然科学基金 (61773387)
*通信作者. E-mail：cgb0712@163.com

*引用格式：魏昊，蔡光斌，凡永华，等. 高超声速飞行器再入滑翔段在线制导 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：183-192.*
*WEI H，CAI G B，FAN Y H，et al. Online guidance for hypersonic vehicles in glide-reentry segment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：183-192（in Chinese）.*

TAME段。这对算法的搜索效率、快速收敛性都提出很高的要求。在现代群体智能优化算法中，将动物种群的行为映射为粒子的动作，较传统算法有简单易实现、高效率的特点[11]，如PSO算法、鲸鱼优化算法[12-13](whale optimization algorithm, WOA)等，已经在轨迹优化、图像处理[14]、特征选择[15]等问题展现了其优越性。周宏宇等[16]对粒子群进化进行了3次修改，提高了算法的搜索能力，在再入轨迹生成的问题上实现了与伪谱法相当的优化效果；李振华等[17]提出一种新的随机梯度PSO算法，将梯度搜索的高效性和粒子群搜索的随机相结合，实现高超声速飞行器再入轨迹的快速优化，并且在优化速度、稳定性等方面均优于经典方法；徐慧等[18]设计了一种基于WOA的高超声速飞行器轨迹优化算法，实现了全程红外辐射最小的再入轨迹优化任务。

本文为解决上述滑翔段终端高度、航程、路径角航向角约束，设计了一种高度与剩余航程为多项式函数关系的纵向飞行剖面。为满足终端速度约束，本文推导出了速度与剩余航程的函数解析表达式，为修正航向偏差，本文通过控制倾侧角的变化实现横向轨迹优化。设计的倾侧角控制算法可以追踪航向角偏差，在满足过程约束的同时，简化控制器设计。而后，利用本文提出的纵向剖面，能够用3个参数控制轨迹形状，将本问题转化为参数寻优问题。最后，提出一种基于WOA与PSO算法的PSO-WOA，能够克服PSO算法与WOA的缺点，尤其是PSO算法易早熟收敛、陷入局部最优的缺点，提高了搜索效率，缩短轨迹优化时间。

# 1 高超声速飞行器再入段模型建立

## 1.1 飞行器动力学模型

将飞行器简化为质点，视地球为标准圆球并忽略地球自转，建立高超声速飞行器再入段动力学模型[19-21]：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=-D-g\sin\gamma\\ \dfrac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{V}\left[L\cos\sigma+\left(\dfrac{V^2}{r}-g\right)\cos\gamma\right]\\ \dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{V}\left(\dfrac{L\sin\sigma}{\cos\gamma}+\dfrac{V^2}{r}\cos\gamma\sin\psi\tan\phi\right)\\ \dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=V\sin\gamma\\ \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\dfrac{V\cos\gamma\sin\psi}{r\cos\phi}\\ \dfrac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=\dfrac{V\cos\gamma\cos\psi}{r}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$V$为速度；$\gamma$为路径角；$\psi$为航向角；$\sigma$为倾侧角；$r$为地心距；$\theta$为经度；$\phi$为纬度；$D$为阻力加速度；$L$为升力加速度；$g$为重力加速度。

$D$和$L$计算式如下：

$$\begin{cases}L=\dfrac{\rho V^2 S C_L(\alpha,Ma)}{2m}\\ D=\dfrac{\rho V^2 S C_D(\alpha,Ma)}{2m}\end{cases}\tag{2}$$

式中：$C_L$为升力系数；$C_D$为阻力系数；$S$为飞行器特征面积；$\alpha$为迎角；$Ma$为马赫数；$\rho$为大气密度，采用指数模型[22]进行计算，即$\rho=\rho_0\mathrm{e}^{-\beta h}$，$\rho_0$为海平面大气密度，$\beta$=1/$h_\mathrm{s}$，$h_\mathrm{s}$为标高。

气动系数模型采用与迎角和马赫数相关的双变量二次模型[23]：

$$\begin{cases}C_L=a_0+a_1Ma+a_2Ma^2+a_3\alpha+a_4\alpha^2\\ C_D=b_0+b_1Ma+b_2Ma^2+b_3\alpha+b_4\alpha^2\end{cases}\tag{3}$$

$$\begin{cases}[a_0,a_1,a_2,a_3,a_4]^\mathrm{T}=[0.111\,39,-0.019\,871,\\ \quad 0.000\,416\,1,2.299\,1,1.229\,2]^\mathrm{T}\\ [b_0,b_1,b_2,b_3,b_4]^\mathrm{T}=[0.236\,42,-0.024\,2\,1,\\ \quad 0.000\,708\,9,-0.174\,81,2.725\,1]^\mathrm{T}\end{cases}\tag{4}$$

## 1.2 约束条件

为使飞行器安全到达目标，避免任务失败，在飞行过程中加入热流率、动压、过载3种过程约束：

$$\begin{cases}\dot{Q}=k_Q\sqrt{\rho}V^{3.15}\leqslant\dot{Q}_{\max}\\ q=\dfrac{1}{2}\rho V^2\leqslant q_{\max}\\ n_\mathrm{L}=\sqrt{L^2+D^2}\leqslant n_{\mathrm{L}\max}\end{cases}\tag{5}$$

式中：$k_Q$为热流系数；$\dot{Q}_{\max}$为最大热流率；$q_{\max}$为最大动压；$n_{\max}$为最大法向过载。

为顺利向末端能量管理段交班，将终端约束设置为

$$\begin{cases}V_\mathrm{f}=V_\mathrm{e}\\ \gamma_\mathrm{f}=\gamma_\mathrm{e}\\ h_\mathrm{f}=h_\mathrm{e}\\ R_{\mathrm{L}\mathrm{f}}=R_{\mathrm{L}\mathrm{e}}\end{cases}\tag{6}$$

式中：下标f表示飞行器的实际终端状态；下标e表示期望状态。

# 2 飞行器弹道设计

## 2.1 纵向剖面设计

将飞行高度与剩余航程设计为高阶多项式函数关系：

$$h=b\ln f(R_\mathrm{L})=b\ln\sum_{i=1}^{n}(a_iR_\mathrm{L}^{i-1})\tag{7}$$

式中：$a_i$为相关系数；$b$为常数，本文取$b=-1/\beta$；$R_\mathrm{L}$为剩余航程，其定义为当前位置到目标点的地面投影距离。

由式 (7) 仅对$f(R_{\mathrm{L}})$求导可得

$$f'(R_{\mathrm{L}})=\sum_{i=2}^{n}(i-1)a_iR_{\mathrm{L}}^{i-2} \tag{8}$$

$$f''(R_{\mathrm{L}})=\sum_{i=3}^{n}(i-2)(i-1)a_iR_{\mathrm{L}}^{i-3} \tag{9}$$

由于$R_{\mathrm{L}}$定义为当前位置到目标点的地面投影距离, 故有

$$\frac{\mathrm{d}R_{\mathrm{L}}}{\mathrm{d}t}=-V\cos\gamma\cos\eta \tag{10}$$

式中: $\eta$为航向角偏差; $\psi_{\mathrm{c}}$为当前点指向目标点的期望航向角。$\psi_{\mathrm{c}}$和$\eta$表达式分别为

$$\begin{cases}\psi_{\mathrm{c}}=\arccos\left(\dfrac{\sin\phi_{\mathrm{c}}-\sin\phi\cos\nu}{\cos\phi\sin\nu}\right)\\ \nu=\arccos\left(\sin\phi_{\mathrm{c}}\sin\phi+\cos\phi\cos\phi_{\mathrm{c}}\cos(\theta_{\mathrm{c}}-\theta)\right)\end{cases} \tag{11}$$

$$\eta=\psi_{\mathrm{c}}-\psi \tag{12}$$

根据式 (1) 和式 (10) 可得

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}R_{\mathrm{L}}}=\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}R_{\mathrm{L}}}=-\frac{\tan\gamma}{\cos\eta} \tag{13}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2h}{\mathrm{d}R_{\mathrm{L}}^2}=\frac{\dot{\psi}_{R_{\mathrm{L}}}\sin\gamma\sin\eta}{\cos\gamma\cos^2\eta}-\frac{\dot{\gamma}_{R_{\mathrm{L}}}}{\cos\zeta\cos^2\gamma} \tag{14}$$

令$k=\mathrm{d}^2h/\mathrm{d}R_{\mathrm{L}}^2$, 由式 (1) 可求得$\dot{\psi}_{R_{\mathrm{L}}}$、$\dot{\gamma}_{R_{\mathrm{L}}}$, 将其代入式 (14) 中, 可得

$$L=f(k,V,\sigma,\gamma,\eta,h,\psi,\phi) \tag{15}$$

由式 (15) 可知, 升力可以由 $k$ 和飞行器当前状态量得出, 再由式 (2) 中升力加速度计算式, 即可用升力解析求得升力系数, 进而求得迎角。

因此, 为确定纵向飞行剖面, 需求出 $k$, 即式 (9) 中的$R_{\mathrm{L}}$和相关系数$a_i$。$R_{\mathrm{L}}$表达式为

$$R_{\mathrm{L}}=vR_{\mathrm{e}} \tag{16}$$

式中: $R_{\mathrm{e}}$为地球半径; $v$ 的值由式 (11) 得出。

本文取$n=6$, 则需要利用 6 个方程来求解$a_i$。由式 (7)、式 (8) 和式 (13), 代入初始条件与终端条件可得

$$\begin{cases}h_0/b=\ln f(R_{\mathrm{L0}})\\ -\dfrac{\tan\gamma_0}{b\cos\eta_0}=\dfrac{f'(R_{\mathrm{L0}})}{f(R_{\mathrm{L0}})}\end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases}h_{\mathrm{e}}/b=\ln f(R_{\mathrm{Le}})\\ -\dfrac{\tan\gamma_{\mathrm{e}}}{b\cos\eta_{\mathrm{e}}}=\dfrac{f'(R_{\mathrm{Le}})}{f(R_{\mathrm{Le}})}\end{cases} \tag{18}$$

结合式 (17) 和式 (18), 可以构建 4 个方程, 因此, 还需构建 2 个方程来求解$a_i$。由式 (7), 将总剩余航程等分为 3 部分, 其对应的高度为待定值, 即

$$R_{\mathrm{L}i}=R_{\mathrm{L0}}-(R_{\mathrm{L0}}-R_{\mathrm{Le}})i/3\qquad i=1,2 \tag{19}$$

$$\begin{cases}h_1=b\ln f(R_{\mathrm{L1}})\\ h_2=b\ln f(R_{\mathrm{L2}})\end{cases} \tag{20}$$

令$c_0=\dfrac{\tan\gamma_0}{b\cos\eta_0}$, $c_{\mathrm{e}}=\dfrac{\tan\gamma_{\mathrm{e}}}{b\cos\eta_{\mathrm{e}}}$, 整理式 (8)～式 (18) 可得

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}R_{\mathrm{L0}}^6 & R_{\mathrm{L0}}^5 & \cdots & 1\\ R_{\mathrm{L1}}^6 & R_{\mathrm{L1}}^5 & \cdots & 1\\ R_{\mathrm{L2}}^6 & R_{\mathrm{L2}}^5 & \cdots & 1\\ R_{\mathrm{Le}}^6 & R_{\mathrm{L0}}^5 & \cdots & 1\\ c_0R_E^6+6R_{\mathrm{L0}}^5 & c_0R_{\mathrm{L0}}^5+5R_{\mathrm{L0}}^4 & \cdots & c_0\\ c_{\mathrm{e}}R_{\mathrm{Le}}^6+6R_{\mathrm{Le}}^5 & c_{\mathrm{e}}R_{\mathrm{Le}}^5+5R_{\mathrm{Le}}^4 & \cdots & c_{\mathrm{e}}\end{bmatrix} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{B}=[\mathrm{e}^{h_0/b},\mathrm{e}^{h_1/b},\mathrm{e}^{h_2/b},\mathrm{e}^{h_{\mathrm{e}}/b},\ 0,\ 0]^{\mathrm{T}} \tag{22}$$

令$\boldsymbol{X}=[a_6,a_5,a_4,a_3,a_2,a_1]^{\mathrm{T}}$, 可得

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{C}^{-1}\boldsymbol{B} \tag{23}$$

对于每组$[h_1,h_2]$, 都对应着一种纵向飞行剖面。因此, 本文方法将轨迹优化问题转化为参数寻优问题。

### 2.2　横向剖面设计

为保证顺利到达目标点, 满足剩余航程约束, 同时修正航向角偏差, 本文设计了追踪航向角偏差$\eta$的倾侧角控制算法:

$$\sigma^i=\begin{cases}(1-\mathrm{e}^{-kt})(\sigma_{\max}\eta/\eta_{\max}) & |\sigma^{i-1}|\leqslant\sigma_{\max}\\ \sigma_{\max} & \sigma^{i-1}>\sigma_{\max}\\ -\sigma_{\max} & \sigma^{i-1}<-\sigma_{\max}\end{cases} \tag{24}$$

式中: $\sigma^i$为当前时刻倾侧角; $\sigma^{i-1}$为上一时刻倾侧角; $s=|\dot{\sigma}_{\mathrm{set}}/\sigma_{\max}|$为常数。其中, 倾侧角变化率设定值$\dot{\sigma}_{\mathrm{set}}>0$, 倾侧角最大值$\sigma_{\max}>0$。

由式 (24) 可得

$$|\dot{\sigma}_i|\leqslant s\frac{|\eta|\sigma_{\max}}{\eta_{\max}}\leqslant\dot{\sigma}_{\mathrm{set}} \tag{25}$$

由此, 本文方法通过控制$\dot{\sigma}_{\mathrm{set}}$来控制倾侧角变化率, 进而满足过程约束与终端航程约束, 避免在倾侧角变化率较大时, 使动压、热流、过载超出安全范围; 在倾侧角变化率过小时, 使飞行器转弯过慢而错过目标点。只要找到合适的$\dot{\sigma}_{\mathrm{set}}$, 就可以保证飞行器既能快速的转弯到期望方向, 满足剩余航程约束及过程约束。另外, 倾侧角可导也使控制系统的设计更为简便。

### 2.3　优化参数设计

根据 2.1 节和 2.2 节设计的纵向剖面与横向剖面, 本文的设计变量为

$$\boldsymbol{O}=[h_1,h_2,\dot{\sigma}_{\mathrm{set}}]^{\mathrm{T}} \tag{26}$$

将性能指标选取为

$$f_{\mathrm{obj}}=\frac{\min(\dot{Q})}{\dot{Q}_{\max}} \tag{27}$$

此性能指标意义为, 在设计变量所确定的轨迹中, 使热流率的最大值尽量小。该指标既能使热流率达到最小的目标, 也可使动压、过载、热流率的变化更加平缓, 有利于满足过程约束。

## 3 改进的鲸鱼优化算法

### 3.1 鲸鱼优化算法

WOA将每个粒子视作鲸鱼[24]，粒子的移动规律对应着鲸鱼的狩猎策略，分别为：包围猎物，螺旋更新位置，搜索猎物。

1）包围猎物。发现当前最优解，各粒子向当前最优解对应的粒子前进：

$$D = |CX^*(t) - X(t)| \tag{28}$$

$$X(t+1) = X^*(t) - AD \tag{29}$$

式中：$t$为迭代次数；$X^*(t)$为当前最优解；$X(t)$为当前粒子位置；$D$为步长；$A$和$C$计算如下：

$$\begin{cases} A = 2ar - a \\ C = 2r \end{cases} \tag{30}$$

其中：$a$为收敛因子；$r$为$[0,1]$中的随机变量。$a$表达式为

$$a = 2 - \frac{2t}{t_{\mathrm{MaxIter}}} \tag{31}$$

其中：$t$为当前迭代次数；$t_{\mathrm{MaxIter}}$为最大迭代次数。随着迭代次数的增加，$a$逐渐收敛到0，增强其局部挖掘能力。

2）螺旋更新位置。在$|A| \leqslant 1$时，鲸鱼找到猎物，部分会接近包围猎物，部分会绕猎物螺旋运动，将其轨迹抽象为粒子的位置更新，其数学模型为

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - AD & p < 0.5 \\ \mathrm{e}^{bl} D\cos(2\pi l) + X^*(t) & p \geqslant 0.5 \end{cases} \tag{32}$$

式中：$b$为常数；$p$为$[0,1]$之间的随机数；$l$为$[-1,1]$之间的随机数。

3）搜索猎物。在$|A| > 1$时，粒子将进行全局搜索，其模型如下：

$$X(t+1) = X_{\mathrm{rand}} - A|CX_{\mathrm{rand}} - X(t)| \tag{33}$$

式中：$X_{\mathrm{rand}}$为随机粒子位置变量，粒子在全局进行随机搜索。

综上，WOA先生成一组随机粒子，将其最优解对应的粒子设为目前最优解，而后根据$|A|$的大小来判断进行全局搜索或局部开发。

### 3.2 基于粒子群算法的改进鲸鱼优化算法

由WOA可知，粒子进行全局搜索还是局部开发取决于$|A|$值，而$|A|$值又由参数$a$决定，故首先对式(31)进行改进：

$$a = 2\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t}{t_{\mathrm{MaxIter}}}\right) \tag{34}$$

利用余弦函数来控制$a$的变化，在前期$a$的变化率小，有利于避免算法早熟，增强全局搜索能力，后期$a$的变化率大，增强局部开发能力。

WOA有粒子随机性强、收敛速度快、算法鲁棒性强等优点，但是仍有缺陷，如对全局搜索不够，对初始种群的依赖性高，最优解精度低等。而PSO算法具有全局搜索能力强，收敛精度高的特点。因此，本文将PSO算法与改进WOA融合，结合两者的优点，同时提高全局搜索和局部开发能力。

1）PSO算法。对于每个粒子，赋予其位置和速度，每个位置代表一个可能解，速度则决定下次粒子移动到的位置，设其种群数量为$N$，维度为$D$，粒子$i$的当前维度$d \in [1,D]$，PSO算法如下：

$$v_i^d(t+1) = \omega(t)v_i^d(t) + c_1 r_1\left(p_i^d(t) - x_i^e(t)\right) + c_2 r_2\left(g^d(t) - x_i^d(t)\right) \tag{35}$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \tag{36}$$

式中：$i = [1,2,\cdots,N]$，$d = [1,2,\cdots,D]$；$\omega(t)$为惯性权重；速率因子$c_1 = c_2 = 2$；$r_1$、$r_2$分别为$[0,1]$内的随机数。粒子$i$当前最佳位置为$p_i^d(t)$，种群目前全局最优位置为$g^d(t)$。$p_i^d(t)$和$g^d(t)$分别通过式(37)和式(38)得到：

$$p_i^d(t+1) = \begin{cases} p_i(t) & O_{\mathrm{bj}}(x_i(t+1)) \geqslant O_{\mathrm{bj}}(p_i(t)) \\ x_i(t+1) & O_{\mathrm{bj}}(x_i(t+1)) < O_{\mathrm{bj}}(p_i(t)) \end{cases} \tag{37}$$

$$g^d(t) = \min\left\{O_{\mathrm{bj}}(p_1(t)), O_{\mathrm{bj}}(p_2(t)), \cdots, O_{\mathrm{bj}}(p_N(t))\right\} \tag{38}$$

其中：$O_{\mathrm{bj}}$为计算粒子适应度的函数。

在本文中，惯性权重$\omega$设计为

$$\omega = \left(1 + 1.5\mathrm{e}^{-2.6s}\right)^{-1} \tag{39}$$

式中：

$$s = 1 - t/t_{\mathrm{MaxIter}} \tag{40}$$

$\omega$的初值为0.9，终值为0.4，通过惯性权重的动态改变，实现全局搜索和局部挖掘相协调，提高搜索能力。

2）PSO-WOA。修改WOA的结构，在粒子位置更新时，引入PSO算法，使粒子有相同的概率选择利用PSO算法或WOA来进行位置更新，提高搜索效率，其具体流程为：首先，生成随机种群，计算2种算法的各项参数；其次，计算每个粒子的适应度，得出目前最优解，其他粒子根据目前最优解的位置，通过概率$p$来选择根据WOA还是PSO来更新位置；再次，计算更新后各个粒子的适应度，更新本次迭代的最优解；最后，判断目前迭代次数是否达到最大值，如果是，则跳出循环，输出最优解，否则继续上述过程。其具体流程如图1所示。

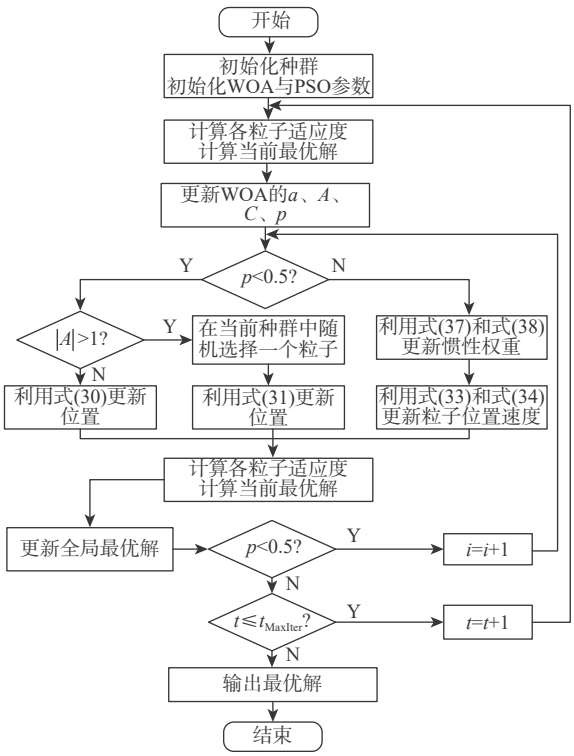



图 1　改进 WOA 流程

Fig. 1　Flow of improved WOA

## 4　飞行器在线制导方法

第 2 节所设计的飞行剖面, 能自动满足高度、路径角、剩余航程的末端约束, 但是对末速度没有相关设计。因此, 本节推导了速度关于剩余航程的解析解, 得到满足终端速度的剩余航程, 而后提出一种基于中间点的在线制导方法, 实现对剩余航程的控制, 进而控制终端速度。

### 4.1　解析推导剩余航程与速度的关系

在滑翔段有 $D \gg g\sin\gamma$, 由式 (1) 和式 (2) 可得

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}h}=\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}r}=\frac{-D-g\sin\gamma}{V\sin\gamma}=-V\frac{S\rho_0\mathrm{e}^{-\beta h}C_D}{2m\gamma} \tag{41}$$

$$\frac{\mathrm{d}V}{V}=-\frac{C_DS\rho_0}{2m}\cdot\frac{\mathrm{e}^{-\beta h}\mathrm{d}h}{\gamma} \tag{42}$$

在准平衡滑翔段中, 设定 $\gamma$ 和 $\eta$ 很小, $C_D$ 为常值, 由式 (1) 和式 (11) 可得

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}R_\mathrm{L}}=\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}R_\mathrm{L}}=\frac{V\sin\gamma}{-V\cos\gamma\cos\eta}=-\gamma \tag{43}$$

由式 (42) 和式 (7) 可得

$$\int\frac{\mathrm{d}V}{V}=\frac{C_DS\rho_0}{2m}\int\frac{\mathrm{e}^{-\beta h}\mathrm{d}h}{-\gamma}+q \tag{44}$$

将式 (11) 和式 (5) 代入式 (42) 可得

$$\ln V=\frac{C_DS\rho_0}{2m}\int f(R_\mathrm{L})\mathrm{d}R_\mathrm{L}+q \tag{45}$$

$q$ 为常数, 求得

$$q=\ln V_0-\frac{C_DS\rho_0}{2m}\sum_{i=1}^{6}\frac{a_i}{i}R_\mathrm{L}^i \tag{46}$$

由此, 可得速度与剩余航程关系如下:

$$V=V_0\exp\left\{\frac{C_DS\rho_0}{2m}\left[\sum_{i=1}^{6}\frac{a_i}{i}(R_\mathrm{L}^i-R_\mathrm{L0}^i)\right]\right\} \tag{47}$$

由式 (47) 可知, 速度仅与剩余航程相关, 因此, 可以通过控制剩余航程来控制末速度。

### 4.2　基于剩余航程的制导方法

航程由起点与目标点坐标决定, 若要控制剩余航程, 重点在于使飞行器进行横向机动。本文给出中间点的定义: 飞行器在飞向目标时必须先要经过的点。飞行器在向目标飞行过程中, 先向中间点飞行, 再向目标点飞行, 其总航程等于需要速度对应的剩余航程。

1) 中间点的选择。设起点为 $g_0$, 中间点为 $g_\mathrm{m}$, 终点为 $g_\mathrm{e}$, 令 $g_0$ 到 $g_\mathrm{m}$ 的航程为期望剩余航程 $R_\mathrm{Le}$ 的一半。由式 (11) 可知:

$$\begin{cases}\nu_{0\mathrm{m}}=\arccos\left(\sin\phi_\mathrm{m}\sin\phi_0+\cos\phi_0\cos\phi_\mathrm{m}\cos(\theta_\mathrm{m}-\theta_0)\right)\\ \psi_{0\mathrm{m}}=\arccos\left(\dfrac{\sin\phi_\mathrm{m}-\sin\phi_0\cos\nu_{0\mathrm{m}}}{\cos\phi_0\sin\nu_{0\mathrm{m}}}\right)\end{cases} \tag{48}$$

$\psi_{0\mathrm{m}}$ 为飞行器由起始点面向中间点的航向角, 由式 (47) 及球面三角定理可求得中间点坐标为

$$\begin{cases}\psi_{0\mathrm{m}}=\psi_{0\mathrm{e}}+\arccos\left(R_{0\mathrm{e}}/R_\mathrm{Le}\right)\\ \nu_{0\mathrm{m}}=R_\mathrm{Le}/2R_\mathrm{e}\\ \theta_\mathrm{m}=\arccos\left(\dfrac{-\sin\phi_0\sin\phi_\mathrm{m}+\cos\nu_{0\mathrm{m}}}{\cos\phi_0\cos\phi_\mathrm{m}}\right)+\theta_0\\ \phi_\mathrm{m}=\arcsin\left(\sin\phi_0\cos\nu_{0\mathrm{m}}+\cos\psi_{0\mathrm{m}}\sin\nu_{0\mathrm{m}}\cos\phi_0\right)\end{cases} \tag{49}$$

式中: $\theta_\mathrm{m}$ 表示中间点的经度; $\phi_\mathrm{m}$ 表示中间点的纬度。

2) 在线制导方法。首先, 进行误差分析, 在求解期望剩余航程中, 式 (47) 将气动参数 $C_D$ 视作常数, 会造成计算误差; 由于剩余航程初期较大, 所以根据式 (7)～式 (23) 得到的 $a_i$ 会很小, 会增大计算误差的影响, 给纵向飞行剖面带来误差; 另外, 在虚拟目标点的选择上, 该方法忽略了飞行器转弯所带来的航程增量, 从而造成实际航程大于期望航程, 造成终端速度偏小。

基于上述误差, 需对飞行轨迹进行在线更新, 减小误差, 保证终端速度达到要求。

对于期望剩余航程和纵向剖面误差, 本文通过每 10 s 解算一次相关参数 $a_i$ 与 $C_D$, 来更新飞行剖面、减小期望剩余航程误差。对于实际剩余航程误差, 本文通过式 (48) 和式 (49) 在线更新虚拟目标点, 使实际剩余航程不断逼近期望剩余航程来减小

终端速度误差。

在线制导算法的流程如图2所示。

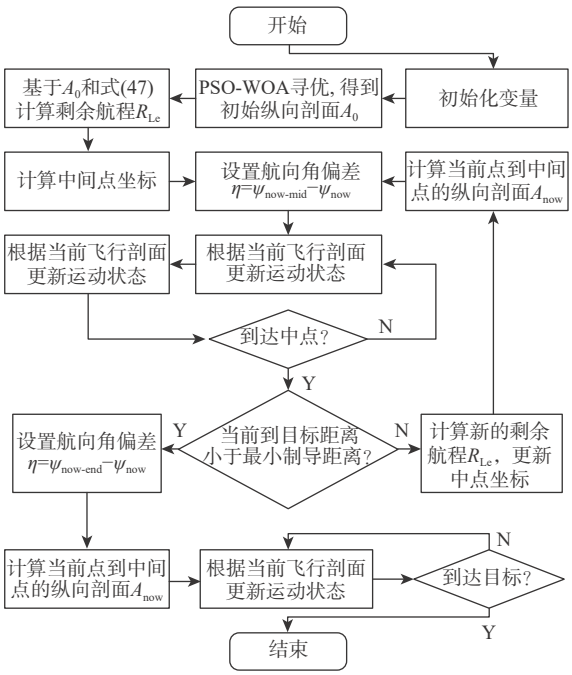



图2 在线制导算法的流程

Fig. 2 Flow of online guidance algorithm

在线制导算法伪代码如下。

初始化飞行器参数。

利用PSO-WOA计算初始纵向飞行剖面$A_0$。

利用式(47)计算$R_{Le}$。

计算中间点坐标

while $R_{now\text{-}end} > R_{set}$ do

  $\eta = \psi_{now\text{-}mid} - \psi_{now}$

  更新飞行状态

  if $R_{now\text{-}mid} < R_{set}$ then

    if $R_{now\text{-}end} < R_{set}$ then

      $\eta = \psi_{now\text{-}end} - \psi_{now}$

      更新当前飞行剖面$A_{now}$

    end

    计算剩余航程$R_{Le}$及中间点坐标

    利用$A_0$更新$A_{now}$

  end

end

while $R_{now\text{-}end} < R_{set}$ do

  更新飞行状态

  if $R_{now\text{-}end} < R_{min}$ then

    输出最优飞行轨迹

  end

end

在上述伪代码中，$R_{now\text{-}end}$和$R_{now\text{-}mid}$分别为当前位置到目标点$g_e$和中间点$g_m$的剩余航程，$\psi_{now\text{-}mid}$和$\psi_{now\text{-}end}$分别为当前位置指向中点和目标点的航向角，$A_{now}$为当前位置到中间点的飞行剖面，$R_{Le}$为期望剩余航程，$R_{set}$和$R_{min}$为剩余航程门限值，用来判断当前是否接近或到达目标点。

该方法通过引入中间点、在线更新纵向剖面的办法，在飞行轨迹最优的情况下，增加了飞行器的抗干扰能力，并能使得速度终端约束得以满足。

## 5 仿真分析

仿真初始参数如表1所示，其中，数值形式为“初始值|终端值”。设过程约束$\dot{Q}_{max} = 9\times10^5$ W/m$^2$，$q = 5\times10^4$ Pa，$n_L = 3.5$，$\sigma_{max} = 50°$。飞行器质量$m = 900$ kg，特征面积$S = 2.0$ m$^2$。终点设置为(E 115°, N 40°)。在PSO-WOA里，设种群数量$N = 50$，最大迭代次数$t_{MaxIter} = 20$。

表1 仿真初始条件

Table 1 Initial conditions of simulation

| 任务 | 初始位置/(°) | 高度/km | 速度/(m·s$^{-1}$) | 路径角/(°) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | (E 90, N 50) | 60\|30 | 5 500\|1 100 | −1\|−1 |
| 2 | (E 90, N 50) | 55\|30 | 5 250\|950 | 0\|−1 |
| 3 | (E 90, N 45) | 50\|30 | 5 000\|800 | −1\|0 |
| 4 | (E 90, N 45) | 45\|30 | 4 750\|650 | 0\|0 |

仿真结果如图3～图10所示。

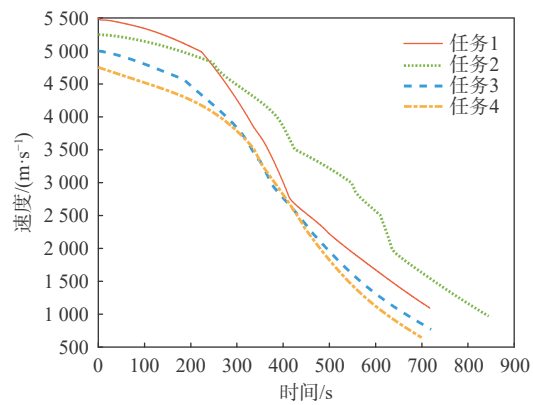



图3 速度-时间曲线

Fig. 3 Velocity-time curve

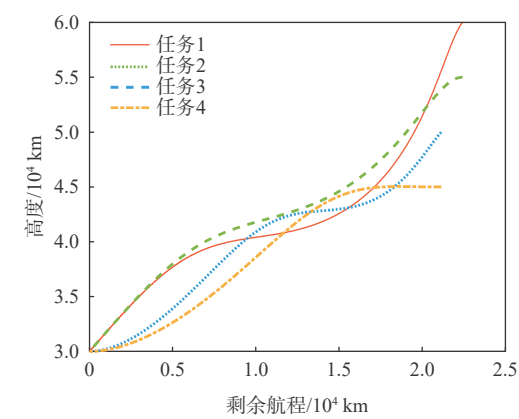



图4 高度-剩余航程曲线

Fig. 4 Height-remaining range curve

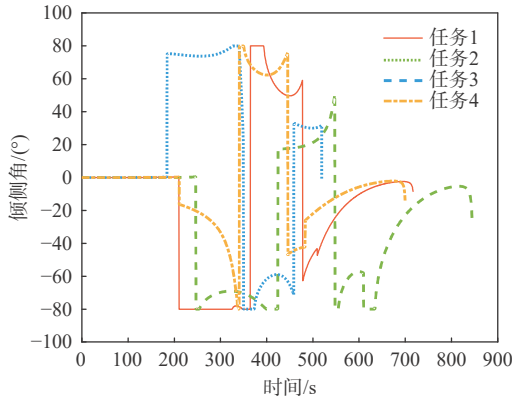



图 5　倾侧角-时间曲线

Fig. 5　Angle of heel-time curve

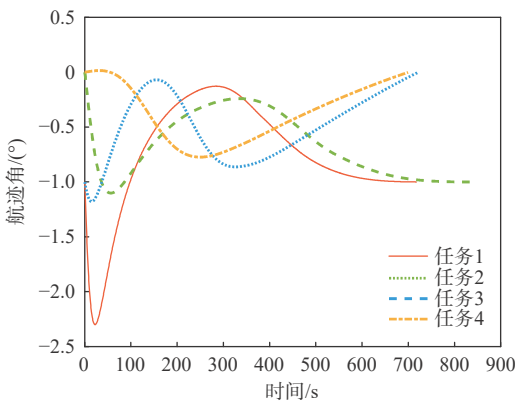



图 6　航迹角-时间曲线

Fig. 6　Path angle-time curve

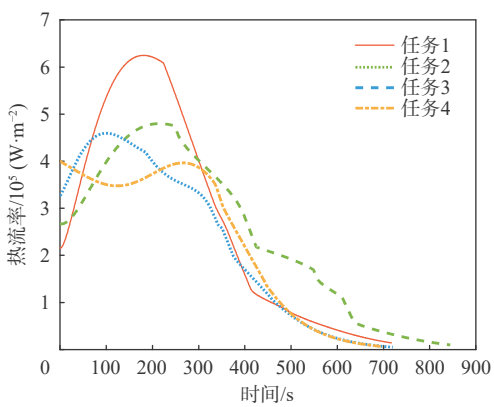



图 7　热流率-时间曲线

Fig. 7　Heat flow rate-time curve

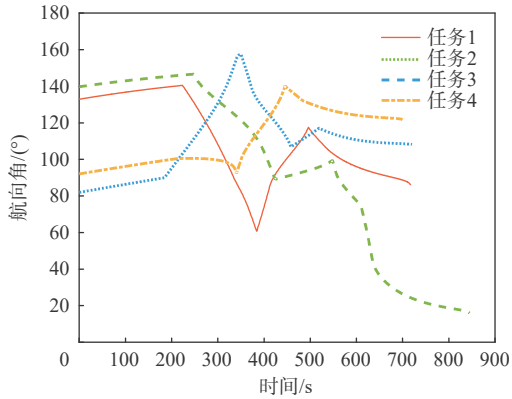



图 8　航向角-时间曲线

Fig. 8　Course angle-time curve

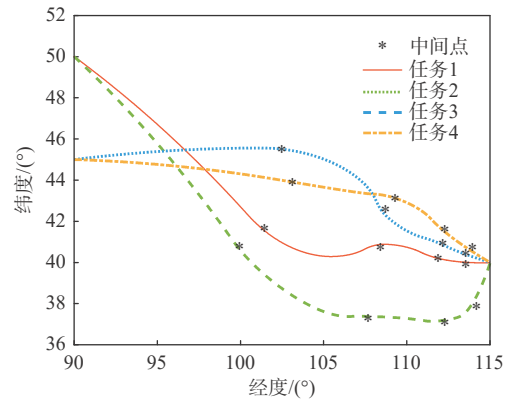



图 9　二维航迹图

Fig. 9　Two-dimensional trajectory map

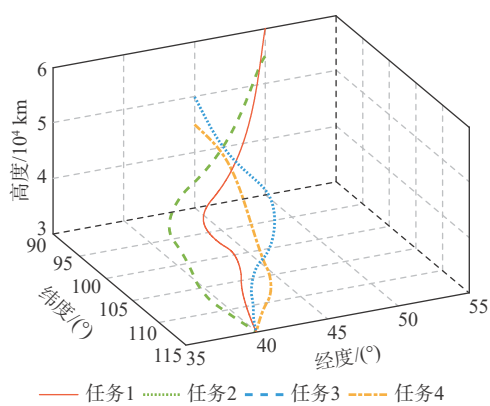



图 10　三维航迹图

Fig. 10　Three-dimensional trajectory map

仿真数据分析如表 2 和表 3 所示, 其中, $|\Delta V|$、$|\Delta\gamma|$、$|\Delta h|$、$|\Delta R_L|$分别为期望值与实际值之差的绝对值。

由仿真结果图 3～图 10 可知, 在 4 种情况下, 各项状态参数均能满足过程约束, 且终端值均在于期望值附近。由表 2 可知, 在不同的状态下, 终端路径角、高度、剩余航程约束均能得到满足, 验证了本文设计的纵向飞行剖面的有效性。由表 3 可知, 在 4 种情况下, 速度的相对误差平均值为 2.26%, 路径角的相对误差平均值为 0.003 3%, 高度的相对误差平均值为 0.078 3%, 待飞航程的相对误差平均

**表 2　仿真结果**

**Table 2　Simulation result**

| 任务 | $\lvert\Delta V\rvert$/(m·s$^{-1}$) | $\lvert\Delta\gamma\rvert$/(°) | $\lvert\Delta h\rvert$/km | $\lvert\Delta R_L\rvert$/km |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.17 | $3.62\times10^{-5}$ | $4.70\times10^{-2}$ | 2.69 |
| 2 | 21.92 | $2.07\times10^{-6}$ | $3.40\times10^{-2}$ | 1.94 |
| 3 | 29.64 | $6.58\times10^{-5}$ | $1.11\times10^{-2}$ | 1.39 |
| 4 | 17.20 | $2.64\times10^{-5}$ | $1.83\times10^{-3}$ | 0.89 |

表3 终端约束相对误差

Table 3 Relative error of terminal constraint

| 任务 | 相对误差/% | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $\Delta V$ | $\Delta\gamma$ | $\Delta h$ | $\Delta R_L$ |
| 1 | 0.38 | 0.003 6 | 0.16 | 0.120 |
| 2 | 2.31 | 0.000 21 | 0.11 | 0.086 |
| 3 | 3.71 | 0.006 6 | 0.037 | 0.066 |
| 4 | 2.64 | 0.002 6 | 0.006 1 | 0.042 |

值为0.078 5%，各状态量的相对误差很小，均在允许误差范围之内。

另外，为验证PSO-WOA的高效率与优越性，现将PSO算法、WOA、PSO-WOA的寻优效果和计算效率进行比较。

设3种寻优算法的初始状态为：种群数量$N=100$，迭代次数$t_{\text{MaxIter}}=5$，飞行器初始状态为任务1所对应状态，仿真结果如图11和表4所示。

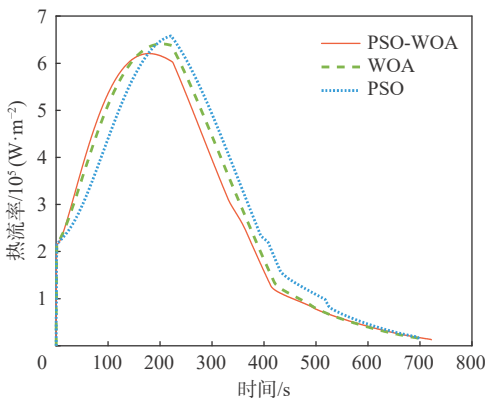



图11 3种智能算法的热流率时间曲线

Fig. 11 Heat flow rate-time curves of three intelligent algorithms

由图11和表4可知，在种群数量和迭代次数相同的情况下，采用PSO-WOA的热流率最大值小于其他2种优化算法；对于飞行器终端误差，除速度误差项外，PSO-WOA的其余终端误差均小于WOA和PSO算法，表明相较于PSO算法和WOA，PSO-WOA寻优效果更好，计算效率更高。

表4 3种智能算法的仿真结果

Table 4 Simulation results of three intelligent algorithms

| 算法 | $\lvert\Delta V\rvert$/(m·s$^{-1}$) | $\lvert\Delta\gamma\rvert$/(°) | $\lvert\Delta h\rvert$/km | $\lvert\Delta R_L\rvert$/km |
|---|---|---|---|---|
| PSO-WOA | 16.28 | $1.48\times10^{-6}$ | $1.21\times10^{-3}$ | 0.56 |
| WOA | 35.43 | $1.66\times10^{-6}$ | $2.36\times10^{-2}$ | 0.98 |
| PSO | 11.41 | $1.17\times10^{-5}$ | $2.15\times10^{-2}$ | 1.23 |

## 6 结 论

1）本文设计了一种新型纵向飞行剖面，使飞行器终端路径角、高度、剩余航程能够自然的满足期望值。

2）推导得出了满足剩余航程约束的速度解析解，提出基于中间点的在线制导方法，并利用其控制剩余航程，使得末速度能够满足终端约束。经过以上模型的建立与求解，所有终端约束能够做到自动满足。利用本文推导的纵向飞行剖面，将复杂的轨迹优化问题转化为三参数寻优问题。

3）设计了一种PSO-WOA算法进行寻优，通过引入选择因子$p$，使粒子随机选择PSO或WOA进行位置更新。对比结果表明，其寻优性能与效率均优于原始WOA与基本PSO算法。

从整个仿真结果来看，本文方法，在不同的场景下均能满足过程约束与终端约束，其精度足以满足由再入滑翔段向TAME段交班。

## 参考文献（References）

[1] 李帆, 张云飞, 李航宇, 等. 2021年世界防空反导综述及对我国发展的启示[J]. 战术导弹技术, 2022(3): 34-39.
LI F, ZHANG Y F, LI H Y, et al. Review of world air and missile defense in 2021 and the enlightenment to China's development[J]. Tactical Missile Technology, 2022(3): 34-39(in Chinese).

[2] 张灿, 王轶鹏, 叶蕾. 国外近十年高超声速飞行器技术发展综述[J]. 战术导弹技术, 2020(6): 81-86.
ZHANG C, WANG Y P, YE L. Summary of the technological development of overseas hypersonics in the past ten years[J]. Tactical Missile Technology, 2020(6): 81-86(in Chinese).

[3] 陈冰, 郑勇, 章后甜, 等. 临近空间高超声速飞行器导航技术发展综述[J]. 飞航导弹, 2021(12): 57-62.
CHEN B, ZHENG Y, ZHANG H T, et al. Overview of the development of navigation technology for hypersonic vehicles in near space[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(12): 57-62(in Chinese).

[4] 吴了泥. 可重复使用运载器亚轨道再入段制导与控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
WU L N. Research on guidance and control technology of sub-orbital reentry phase of reusable launch vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009(in Chinese).

[5] ELNAGAR G N, KAZEMI M A. Pseudospectral Chebyshev optimal control of constrained nonlinear dynamical systems[J]. Computational Optimization and Applications, 1998, 11(2): 195-217.

[6] 呼卫军, 周军, 常晶, 等. RLV应急再入轨迹规划问题的动态伪谱法求解[J]. 宇航学报, 2015, 36(11): 1255-1261.
HU W J, ZHOU J, CHANG J, et al. Emergency reentry trajectory planning for reusable launch vehicle based on dynamic Gauss pseudo-spectral[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(11): 1255-1261(in Chinese).

[7] WANG T, ZHANG H B, ZENG L, et al. A robust predictor-corrector entry guidance[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 66: 103-111.

[8] 刘欣, 李建林, 葛健全, 等. 滑翔式飞行器再入弹道设计[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(6): 161-164.
LIU X, LI J L, GE J Q, et al. Reentry trajectory design for glide-reentry vehicle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and

Guidance, 2011, 31(6): 161-164(in Chinese).

[9] 伍元培, 王阳, 赵爱红, 等. 基于深度学习网络的高超声速飞行器避障轨迹规划方法[J]. 战术导弹技术, 2022(1): 53-59.
WU Y P, WANG Y, ZHAO A H, et al. Obstacle avoidance trajectory planning of hypersonic vehicle based on deep learning network[J]. Tactical Missile Technology, 2022(1): 53-59(in Chinese).

[10] 冯林爽, 刘磊, 王永骥. 基于 PSO 和 SQP 混合优化算法的高超声速飞行器轨迹优化[C]//第 27 届中国控制与决策会议论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 1527-1531.
FENG L S, LIU L, WANG Y J. Hypersonic vehicle trajectory optimization based on PSO and SQP hybrid optimization algorithm [C]//Proceedings of the 27th China Control and Decision Making Conference. Beijing: Beihang University Press, 2015: 1527-1531(in Chinese).

[11] 高岳林, 杨钦文, 王晓峰, 等. 新型群体智能优化算法综述[J]. 郑州大学学报 (工学版), 2022(3): 21-30.
GAO Y L, YANG Q W, WANG X F, et al. Overview of new swarm intelligence optimization algorithms[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Edition), 2022(3): 21-30(in Chinese).

[12] 黄清宝, 李俊兴, 宋春宁, 等. 基于余弦控制因子和多项式变异的鲸鱼优化算法[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 559-568.
HUANG Q B, LI J X, SONG C N, et al. Whale optimization algorithm based on cosine control factor and polynomial mutation[J]. Control and Decision, 2020, 35(3): 559-568(in Chinese).

[13] SAAFAN M M, EL-GENDY E M. IWOSSA: An improved whale optimization salp swarm algorithm for solving optimization problems[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 176: 114901.

[14] ABD ELAZIZ M, LU S F, HE S B. A multi-leader whale optimization algorithm for global optimization and image segmentation[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 175: 114841.

[15] AGRAWAL R K, KAUR B, SHARMA S. Quantum based whale optimization algorithm for wrapper feature selection[J]. Applied Soft Computing, 2020, 89: 106092.

[16] ZHOU H Y, WANG X G, CUI N G. A novel reentry trajectory generation method using improved particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3212-3223.

[17] LI Z H, HU C, DING C B, et al. Stochastic gradient particle swarm optimization based entry trajectory rapid planning for hypersonic glide vehicles[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 176-186.

[18] 徐慧, 蔡光斌, 穆朝絮, 等. 高超声速滑翔飞行器全程总红外辐射最小的轨迹优化 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 3788.
XU H, CAI G B, MU Z X, et al. Trajectory optimization of hypersonic glide vehicle with minimum total infrared radiation (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 3788(in Chinese).

[19] 周宏宇, 王小刚, 赵亚丽, 等. 空天飞行器返回滑翔段在线制导方法[J]. 宇航学报, 2021, 42(2): 175-184.
ZHOU H Y, WANG X G, ZHAO Y L, et al. Online guidance for aerospace vehicle in return-gliding phase[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(2): 175-184(in Chinese).

[20] ZHANG W Q, CHEN W C, YU W B. Entry guidance for high-L/D hypersonic vehicle based on drag-vs-energy profile[J]. ISA Transactions, 2018, 83: 176-188.

[21] 周宏宇. 组合动力可重复使用运载器三维轨迹优化与在线制导方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
ZHOU H Y. Research on 3D trajectory optimization and online guidance method of combined power reusable launch vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019(in Chinese).

[22] HAMEED A S, BINDU G R. Single segment approach and landing guidance and control for an unpowered reusable launch vehicle[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 115: 106777.

[23] 徐慧, 蔡光斌, 张胜修. 高超声速滑翔飞行器再入气动系数改进拟合模型[J]. 宇航学报, 2021, 42(9): 1139-1149.
XU H, CAI G B, ZHANG S X. Modified aerodynamic coefficient fitting models of hypersonic gliding vehicle in reentry phase[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(9): 1139-1149(in Chinese).

[24] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.

# Online guidance for hypersonic vehicles in glide-reentry segment

WEI Hao[1], CAI Guangbin[1,*], FAN Yonghua[2], XU Hui[1], WANG Jing[3], ZHOU Zhuocheng[1]

(1. College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
2. Aviation College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. Shijiazhuang Campus, The Army Infantry College of PLA, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract**: In view of the guidance problem of the hypersonic vehicles in the glide-reentry segment, an online guidance strategy based on improved particle swarm optimization and whale algorithm was proposed. By considering its constraint model and shift conditions, a process constraint and terminal constraint model were established. To shorten the trajectory generation time and reduce the calculation amount of the algorithm, a height-range flight profile that could automatically meet the constraints of terminal height, path angle, and range was designed. Based on the premise that the drag coefficient is a constant value, a numerical solution of velocity that satisfied the range constraint was derived. Based on the above model, a three-parameter optimization model was designed to realize the control of the terminal conditions. To optimize the process constraints, an improved whale algorithm combining the whale algorithm and particle swarm optimization algorithm was proposed to overcome the shortcoming of precocious convergence of the particle swarm optimization algorithm, improve the solution efficiency, and minimize the heat flow rate during the flight. Then, through the method of segmenting the trajectory, an online guidance method based on the mid-point was proposed to update the longitudinal profile online to meet the terminal constraints. The simulation results show that the proposed method can efficiently solve the optimal flight trajectory.

**Keywords**: hypersonic vehicles; glide-reentry segment; online guidance; improved whale algorithm; trajectory optimization

**Received**: 2022-12-03; **Accepted**: 2023-04-04; **Published Online**: 2023-05-06 10:44
**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230505.1052.002
**Foundation item**: National Natural Science Foundation of China (61773387)
* **Corresponding author**. E-mail: cgb0712@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0997

# 基于离心泵数字孪生流场云图的叶轮故障诊断方法与应用

李亚洁[1, 2, 3]，刘强[1, 2, 3]，李炜[1, 2, 3, *]

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院，兰州 730050；2. 兰州理工大学 甘肃省工业过程先进控制重点实验室，兰州 730050；
3. 兰州理工大学 电气与控制工程国家级实验教学示范中心，兰州 730050)

**摘　　要**：随着工业技术的发展，离心泵的健康诊断与维护需求日益迫切，结合数字孪生和机器视觉技术，提出一种基于数字孪生流场云图的离心泵叶轮机械故障智能诊断方法。借助离心泵数字孪生模型来模拟叶轮叶片随机断裂故障的演化发展，生成具有不同故障特征的叶轮流场压力及速度云图；基于对Yolov5算法的学习训练，获得了压力和速度云图两类机器视觉模型，并结合统计分析实现了叶轮故障的初步诊断；进而考虑两类检测模型的优势互补特性，基于堆叠集成的思想将二者融合，以提升叶轮故障诊断的准确性。经实验验证，针对叶轮叶片的随机断裂故障，所提方法可达到0.99以上的诊断准确度，开发的离心泵叶轮机械故障智能诊断系统使所提方法得以落地应用。

**关 键 词**：离心泵；数字孪生；叶轮机械；机器视觉；智能诊断
**中图分类号**：TH165$^+$.3; TP181
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0193-09

离心泵主要用于输送液体或给液体增压，将叶轮的机械能转化为液体动能，其结构简单，种类繁多，广泛应用于航空、电力、石化、冶金、煤炭、建材、水利等诸多领域和场景中。离心泵已成为现代生产生活中不可或缺的设备，其健康状态也决定了整个生产生活链可否正常运转。而叶轮机械作为承受离心力、流体动力、振动、热应力及介质等综合作用的核心零件，对其进行状态监测与故障诊断则显得尤为重要。

纵览国内外用于离心泵机械装置的几类故障诊断方法[1-2]，由于叶片呈现翼型复杂结构，且发生纹裂或断裂故障的位置具有较高随机性，使得基于解析模型的故障诊断方法在实际应用中相对受限。基于信号处理的故障诊断方法作为当前的主流，关键在于对叶轮机械发生故障时振动信号的有效采集与分析。其中，以电阻应变测量为代表的接触式叶片故障在线测量方法[3]，具有很高的测量精度，但需要在每个叶片上粘贴应变片，布线繁琐且可靠性低。相比于接触式测量方法，基于声光等测量设备的非接触测量方法则具有良好的便捷性与可靠性[4-10]，但该方法对于测量仪器精度及可靠性的要求极高，在复杂工业环境下，存在测量仪器故障率远高于叶轮机械本身故障率的问题，且测量成本高昂。

随着人工智能技术的不断发展，神经网络、模糊推理及支持向量机等机器学习算法不断得到深入研究，基于知识学习的智能诊断方法，因既可规避建立精确解析模型所面临的困难，又可大幅减小附加测量设备所带来的额外成本[11]，得到了广泛的应用。其中，人工神经网络更是倍受关注，主要工作包括：基于人工神经网络实现离心泵故障特征的提取，进而结合遗传算法、支持向量机、卷积自编

收稿日期：2022-12-17；录用日期：2023-03-26；网络出版时间：2023-04-20 13:34
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230420.1027.001
基金项目：国家自然科学基金(62163022)；国家重点研发计划(2020YFB1713600)
*通信作者. E-mail：liwei@lut.edu.cn

*引用格式：李亚洁，刘强，李炜. 基于离心泵数字孪生流场云图的叶轮故障诊断方法与应用[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：193-201.
LI Y J，LIU Q，LI W. Impeller fault diagnosis method and application based on digital twin flow field contour of centrifugal pump[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：193-201 (in Chinese).*

码等其他机器学习算法实现离心泵故障的诊断分类[12-14]。除此以外，基于机器视觉的故障诊断方法作为神经网络的重要分支早在19世纪80年代就被提出，文献[15]采用改进的深度卷积神经网络，基于声学图像进行离心泵中机械缺陷故障的诊断。文献[16]结合信频到时频成像技术和自适应深度卷积神经网络模型，提出一种离心泵健康状态诊断框架。文献[17]在对导体断裂图像经灰度方差归一化处理后，基于灰度分布曲线的方波变换与图像投影算法，完成了导体断裂及其表面缺陷的检测与识别。近年来，尽管大多机器视觉算法与图像采集技术的迅速发展有效支撑了对高频、微幅运动图像采集的研究工作，但针对高频运动对象的故障诊断研究成果仍有限，尤其是离心泵叶轮这种高频旋转机械，一旦发生故障，其特征会波及全流场，加之故障位置、数量不确定等因素，使得大多数基于传统机器视觉的故障检测或诊断方法应用受限。因此，迫切需求一种能够满足对高频运动机械故障进行全场景、多点且多方位的图像测量检测方法，而近年来在机器视觉领域取得丰硕成果的Yolo算法，凭借其一图多识的多目标优良检测特性[18]，有望成为高频旋转特征的机械故障诊断算法的有力支撑。

随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术越来越多的应用于流体力学故障分析领域，基于虚拟仿真的叶轮机械故障诊断方法也随之应用而生，文献[19]基于CFD数值仿真模拟技术，提出离心泵压力脉动时频域对比分析方法，为离心泵的故障检测提供了重要参考依据。文献[20]通过对不同叶片故障状态下风机内部流场的湍流特性差异进行分析，实现了对风机叶片不同故障状态的检测。文献[21]基于不同工况下的CFD数值模拟结果，通过分析离心泵出口压力、流量、汽蚀位置及分布，为离心泵多余物故障检测提供了参考。上述方法尽管为叶轮机械的故障检测提供了新思路，然而，实际应用过程中对于最终的故障诊断结果，依然更多依赖专业知识与专家经验，存在对人员专业技能水平要求高、易受人为因素影响和诊断效率低等问题。因此，如何以机器取代人工实现故障的智能诊断，对于基于虚拟仿真模型的机械故障诊断研究，其必要性与可行性亦是显而易见的。

近年来，数字孪生作为一项集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真技术，由于能够映射物理设备全生命周期演化发展的数字孪生模型，为物理设备的故障诊断研究提供了新的思路[22-23]。文献[24]提出一种基于数字孪生技术的离心泵机组故障诊断方法，该方法描述了从构建离心泵数字孪生模型到处理孪生数据，再到结合深度学习等人工智能算法实现离心泵机组故障诊断的过程。基于对离心泵数字孪生的智能决策的研究[25]，文献[26]通过采用来自物理资产的连续测量数据构建设备的数字孪生模型，并使用来自数字孪生模型的条件数据来预训练用于故障诊断的深度迁移模型。受此启发，对于离心泵叶轮机械故障，可否借助其数字孪生体获取离心泵的故障数据，并驱动CFD生成相应的云图，基于深度机器视觉技术，使得泵体叶轮故障的准确诊断成为可能。

综上所述，离心泵高速旋转过程中，受叶片故障发生的随机性、多样性等因素影响，现存故障诊断方法仍难以取得期冀的应用效果，如何以借助于新技术，智能高效的实现高速旋转机械设备故障的准确诊断，不仅具有破解难题、拨棘问路的挑战性，也是极具现实意义的研究。鉴于此，结合数字孪生技术、CFD技术、机器学习、深度机器视觉等技术方法的优势，借助于离心泵的数字孪生模型输出的流场云图，本文探索性的提出一种基于Yolov5与集成学习相结合的叶轮机械故障智能诊断方法，并通过仿真实验和开发叶轮机械故障诊断系统来支撑本文方法的验证与应用。

## 1 离心泵叶轮机械故障智能诊断方案

离心泵数字孪生模型对其动态物理属性的变化具有良好的解释性，当离心泵叶轮叶片发生故障时，必然导致离心泵机组运行数据发生变化，进而使表征离心泵动态物理属性的流场压力与速度云图分布发生相应的变化。如何利用其数字孪生模型演化过程中的丰富信息，并以高效智能的方法实现对该变化的检测与识别，是实现叶轮叶片故障智能诊断的关键。因此，本文针对离心泵的叶轮机械故障，结合其数字孪生模型、CFD模拟、机器视觉以及信息融合等现代技术，针对叶轮机械故障提出如图1所示的故障智能诊断方案，具体共包括5个阶段。

**阶段1** 故障虚拟映射。在对叶轮机械故障机理进行分析的基础上，通过修改离心泵数字孪生模型中的相关参数，模拟离心泵正常与各类机械故障情形下的运行状态，实现数字孪生模型对离心泵物理实体的虚拟映射。

**阶段2** 故障数据生成。基于离心泵数字孪生模型，输出正常及各类虚拟故障情形下的叶轮流场压力云图与速度云图，以解决离心泵实际运行过程中故障监测数据储备匮乏及破坏性试验成本过高的问题。

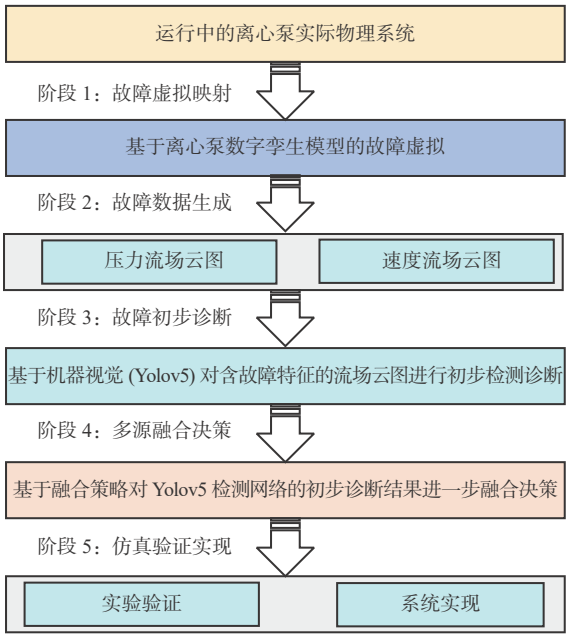



图 1　叶轮机械故障诊断方案

Fig. 1　Impeller fault diagnosis scheme

**阶段 3**　故障初步诊断。基于 Yolov5 目标检测网络的学习与训练，对叶片间的压力与速度流场云图变化分别进行检测，并通过叶轮叶片的检测结果统计计算，实现基于目标检测的叶轮故障的 2 种初步诊断。

**阶段 4**　多源融合决策。考虑基于叶轮压力场与速度场云图的单个目标检测网络，对不同故障诊断的准确度存在差异，进一步对 2 种初步诊断结果进行融合决策以扬长补短，提升叶轮机械故障诊断方法的准确率。

**阶段 5**　仿真验证实现。在对本文所提叶轮机械故障的智能诊断方法进行仿真验证的基础上，借助于相关技术开发出相应的故障检测系统，实现离心泵叶轮机械故障智能诊断方法的落地应用。

## 2　离心泵叶轮机械故障分析及故障云图生成

### 2.1　心泵叶轮机械故障分析

根据统计分析[27]，离心泵叶片故障占叶轮机械故障的 65% 以上，由此诱发的事故与损失也相当严重。造成叶片故障的原因主要包括 3 个方面：①离心泵工作过程中通常运行频率高且持续时间长，处于长期间歇性振动状态，容易造成叶轮紧固螺丝松动甚至掉落，导致叶轮偏离旋转轨迹，进而致使泵体内部发生机械结构摩擦与叶片断裂[28]；②离心泵运转时泵体内部受力情况极其复杂，受各种力的影响，叶片前后截面形成的压差会使叶片受到交变应力的作用，从而产生疲劳，导致叶片易发生故障[29]；③离心泵长期工作于室外环境，或内部机械结构难免产生锈蚀，或过滤装置的损坏，致使介质中存在固体杂质，加之定期检修过程中人员操作不当等原因，均会导致叶轮叶片发生断裂。因此，本文将聚焦于叶轮叶片发生的随机断裂型的故障，展开智能诊断方法的研究。

### 2.2　基于离心泵数字孪生模型的故障云图生成

叶轮机械结构发生故障时，其故障特征的生成是展开叶轮故障诊断的基础。考虑到离心泵历史故障监测数据匮乏且破坏性试验成本过高，因此，建立能够反映全生命周期演化规律的数字孪生模型，不失为一种生成故障数据源的有效方式。本文前期借助于 CFD 模拟、数据驱动补偿等技术建立了“离心泵数字孪生系统”，孪生体中的数字孪生属性模型与离心泵物理实体模型的一致性，已通过某石化公司航空煤油给油泵的实验验证。由于此离心泵数字孪生模型，能够很好的解释并展现叶轮流场变化与相应机械结构变化之间的物理规律，因此，根据叶片纹裂或断裂故障研究需求，通过修改孪生体叶轮的相关参数，即可模拟实际离心泵叶片的不同损伤程度、不同个数的机械故障，并可通过采集相应故障下离心泵数字孪生模型的运行数据，借助 ANSYS 数值分布图像生成工具，生成叶轮机械结构在正常及各类异常情形下流场的压力云图与速度云图。

## 3　基于 Yolov5 的叶轮机械故障诊断方法

### 3.1　明显云图边界特征的增强与标注

叶轮叶片发生故障时，考虑到基于有限元生成的压力与速度云图数值边界分布复杂密集，尤其是故障初期，故障图像的特征相较于正常图像差异不甚明显，首先，本文采用 Mosaic 数据增强方法，通过对输入图像进行随机缩放、裁剪、排布、再拼接，从而生成边界特征更清晰的新图像样本。这不仅可增加很多目标尺度更小、图像数值边界更细节的特殊场景，而且可丰富训练样本集。其次，考虑当故障反映到云图上时，其区域分布范围具有多点、多方位且位置随机等特点，通过采用自适应先验框机制，得到叶片重点检测区域的最佳先验框尺寸，以提高模型在特殊场景下的适应性与鲁棒性。最后，考虑基于深度学习目标检测模型需要大量的标注数据样本方能获得良好的性能，再利用 Labelme 工具对训练样本进行标注。

### 3.2　基于 Yolov5 的离心泵叶轮机械故障诊断

1）Yolov5 算法。在 Yolo 系列中，Yolov5 模型

相较于Yolov3、Yolov4具有更高的灵活性与检测速度，灵活的参数配置，使其能够得到不同负责度的模型，并且对于小目标物体的检测，其误检与漏检率明显降低，包含了Yolov5s、Yolov5m、Yolov5l、Yolov5x这4种不同大小的模型。考虑前述生成的压力与速度云图具有分辨率高但图像边界不明显的特征，本文选择采用Yolov5s模型。原因是该模型可在网络层数较浅的情况下，通过充足的侧向链接来保证对不同分辨率与复杂边界图像的检测[30-31]。Yolov5算法创造性地将目标检测当作回归问题来解决，直接从特征提取层获取检测框边界和类别概率，将候选区域和监测阶段合并，将输入划分成$s\times s$个窗格，每个格子会生成不同长宽比的$B$个边界框[32]。当目标框中心点落在某个窗格，则此目标的检测由该窗格负责，同时预测出边界框的位置信息，分类概率及置信度。

Yolov5网络结构主要由Input、Backbone、Neck和Prediction这4部分组成，其中，输入端包括Mosaic数据增强、自适应图片缩放、自适应锚框计算，Backbone包括Focus和CSP结构，Neck主要由特征金字塔和像素聚合网络结构组成，Prediction主要为损失计算结构。

2）损失函数。Yolov5的损失函数包括：分类损失、定位损失和置信度损失，通过对这3个损失进行加权相加得到总损失值，其中，分类损失和定位损失使用二元交叉熵（binary cross-entropy, BCE）损失函数计算，置信度损失使用通用交并比（generalized intersection over union, GIOU）损失函数计算。

二元交叉熵损失函数：

$$L_{\mathrm{BCE}}=-\sum_{x}(y\ln a+(1-y)\ln(1-a)) \tag{1}$$

式中：$x$表示样本；$y$表示样本$x$的正负样本标签（0或1）；$a$表示网络模型对样本$x$预测为正样本的概率，$a$通常由网络原始输出经Sigmoid处理后得到。

GIOU损失函数：

$$I_{\mathrm{OU}}=\frac{\boldsymbol{A}\cap\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{A}\cup\boldsymbol{B}} \tag{2}$$

$$L_{\mathrm{GIOU}}=1-I_{\mathrm{OU}}+\frac{|\boldsymbol{C}-\boldsymbol{A}\cup\boldsymbol{B}|}{|\boldsymbol{C}|} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{A}$表示预测框；$\boldsymbol{B}$表示真实框；$\boldsymbol{C}$为$\boldsymbol{A}$与$\boldsymbol{B}$的最小外接矩；$I_{\mathrm{OU}}$为真实框与预测框的交并比。

3）基于Yolov5的叶轮机械故障诊断方法。基于Yolov5的叶轮机械故障诊断方法主要包括：数据采集与预处理、叶片故障检测、叶轮故障初步诊断、融合决策的精确诊断4个环节。各环节具体实现方法如下。

数据采集与预处理环节：通过离心泵数字孪生模型参数的修改，输出离心泵叶轮叶片在正常和异常状态下的内部流场压力与速度数值分布的云图；基于Mosaic进行云图的数据增强，基于Labelme进行数据标注。

叶片故障检测环节：当含有故障特征的压力场与速度场云图数据被分别输入至对应的Yolov5检测网络时，将对离心泵进行叶片级健康状态的逐一检测，并标定相应叶片正常或异常的状态标签，进行留存。

叶轮故障初步诊断环节：先将故障检测环节中得到的叶轮检测结果，通过统计计算得到叶轮级叶片运行状态异常的标签数量；再对统计结果做进一步的数值标签化处理，初步得到叶轮的机械故障类型。

融合决策的精准诊断环节：采用Stacking融合方法，将基于压力与速度云图的两类Yolov5网络检测得到的初步诊断结果进行融合决策，进而精确判别出叶轮的具体机械故障类型。对于Stacking融合模型的确定，本文拟通过对比逻辑回归、K-近邻、随机森林、朴素贝叶斯、决策树及加权融合6种融合方式进行择优选择，其中，以基于目标检测模型对不同叶轮机械状态的检测准确度作为加权融合模型的权值分配依据。

4）基于Yolov5叶轮机械故障诊断方法的流程与步骤。综合上述故障诊断方法，基于Yolov5叶轮机械故障智能诊断方法的流程如图2所示，具体步骤如下。

**步骤1** 利用离心泵数字孪生模型虚拟叶轮随机机械故障，并采集相应故障状态下叶轮流场的压力与速度云图数据。

**步骤2** 对采集到的云图数据进行增强、标注及归一化等预处理。

**步骤3** 将预处理数据按自助法划分为训练集与测试集。

**步骤4** 初始化Yolov5网络及Stacking相关参数。

**步骤5** 利用训练集分别训练相应的Yolov5检测网络，对离心泵的每个叶片进行逐一检测，并根据检测结果标定每个叶片属于正常或异常状态的标签，进而实现对离心泵进行叶片级健康状态的逐一检测。

**步骤6** 计算检测网络的损失函数，并在测试集上采用3.3节中的评价指标对步骤5中训练得到的模型进行评价，如果达到设定损失标准则则结束此步骤，否则返回步骤2，检查数据或模型的相关参数，并重新训练对应的网络模型，更新模型权重。

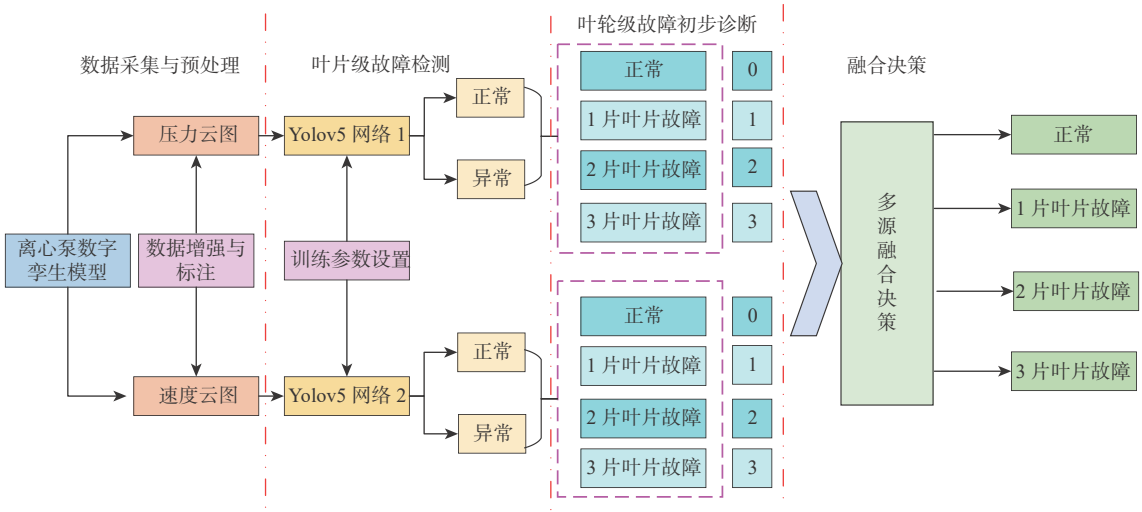



图 2　叶轮机械故障智能诊断方法

Fig. 2　Intelligent impeller fault diagnosis method

**步骤 7**　基于代数统计法对每个样本的检测异常标签数量进行统计，并对统计结果进行进一步的数值标签化，进而实现基于压力或速度云图检测的“叶轮”级故障的初步诊断。

**步骤 8**　使用基于步骤 7 得到的数值标签数据集进一步训练基于逻辑回归、K-近邻、随机森林、朴素贝叶斯及决策树的 5 种 Stacking 融合模型，并进行 K 折交叉验证。

**步骤 9**　记录以上训练过程中检测网络与各类 Stacking 融合模型的相关权重或参数。

**步骤 10**　利用基于步骤 7 得到的数值标签测试集对 Stacking 融合模型进行测试，判断融合准确度，如果达到预期，则结束此步骤，否则返回步骤 4 检查 Stacking 相关参数。

**步骤 11**　结束。

### 3.3　模型性能评价指标

为客观评价所建模型对叶轮机械常见故障诊断的有效性，本文采用目标检测领域常用的模型性能评价指标：准确度 $P_{\text{recision}}$，召回率 $R_{\text{ecall}}$，平均精度 $A_{\text{pre}}$，均值平均精度 $m_{\text{AP}}$，具体计算式为

$$P_{\text{recision}} = \frac{T_{\text{P}}}{T_{\text{P}} + F_{\text{P}}} \tag{4}$$

$$R_{\text{ecall}} = \frac{T_{\text{P}}}{T_{\text{P}} + F_{\text{N}}} \tag{5}$$

$$A_{\text{pre}} = \int_0^1 P_{\text{smooth}}(r)\mathrm{d}r \tag{6}$$

$$m_{\text{AP}} = \frac{\sum_{i=1}^{K} A_{\text{pre}i}}{K} \tag{7}$$

式中：$T_{\text{P}}$、$F_{\text{P}}$、$T_{\text{N}}$、$F_{\text{N}}$分别为预测样本为正样本且预测正确、预测为正样本但预测错误、预测为负样本且预测正确、预测为负样本但预测错误；$P_{\text{smooth}}(r)$为平滑的 *P-R*曲线；$K$表示样本个数；$A_{\text{pre}i}$表示第 $i$ 个样本的$A_{\text{pre}}$值。

## 4　仿真实验与分析

### 4.1　数据准备与 Yolov5 模型训练参数设置

为验证上述离心泵叶轮机械故障智能诊断方法的有效性，本文以某石化企业航空煤油输送管线中的离心泵作为实验对象。首先，采集 7 个工况点的运行数据，并依据 API610(第 12 版)中关于泵的性能验收标准要求[19]，验证了离心泵数字孪生模型的准确与可用性。其次，对孪生系统中的叶片几何参数进行随机修改，用以模拟离心泵叶片的随机断裂故障。最后，分别采集质量流量与转速数据构成数据集，利用此数据集来驱动不同叶轮机械类型下的离心泵数字孪生模型，进而采集模型运行状态下的叶轮流场压力云图与速度云图。

经过数据增强后，得到用于叶轮机械状态检测的压力与速度云图数据集，数据集中用于压力检测的压力云图样本量为 4 800 个，其中，每类 (包含正常、1 片叶片故障、2 片叶片故障、3 片叶片故障) 叶轮叶片机械状态样本为 1 200 个，用于故障检测的速度云图样本总量、分类数与之相同。在相应样本类型下，按照 5∶1 的比例随机抽取训练集与测试集。另外为保证模型检测性能达到标准，设定训练过程中模型的总损失为 0.1。

经过反复测试，将故障检测 Yolov5 模型的动量因子和学习率分别设置为 0.9 和 0.001；防止过拟合，设置权值衰减系数为 0.000 5，其他相关参数的设置如表 1 所示。

### 4.2　基于 Yolov5 的故障检测结果分析

1）当训练迭代次数达到 300 时，相关模型的各类损失及性能指标如表 2 和表 3 所示。

表1 Yolov5故障检测模型训练参数设置

Table 1 Setting of training parameters for Yolov5 fault detection model

| 网络参数 | 数值 |
|---|---|
| 迭代次数 | 300 |
| 批次大小 | 8 |
| 动量因子 | 0.9 |
| 学习速率 | 0.001 |
| 权重衰减系数 | 0.000 5 |
| 置信度阈值 | 0.5 |
| 非极大抑制阈值 | 0.3 |

表2 模型损失

Table 2 Model loss

| 检测模型 | 损失名称 | 训练集损失 | 测试集损失 |
|---|---|---|---|
| 压力云图检测模型 | 定位损失 | 0.051 3 | 0.043 5 |
| | 置信损失 | 0.022 5 | 0.015 6 |
| | 分类损失 | 0.003 1 | 0.001 4 |
| 速度云图检测模型 | 定位损失 | 0.051 4 | 0.044 2 |
| | 置信损失 | 0.020 5 | 0.015 1 |
| | 分类损失 | 0.003 2 | 0.001 5 |

表3 模型性能指标

Table 3 Model performance indicators

| 检测模型 | $P_{\text{recision}}$ | $R_{\text{ecall}}$ | $A_{\text{pre}}$ | $m_{\text{AP}}$@0.5 |
|---|---|---|---|---|
| 压力云图检测模型 | 0.940 | 0.939 | 0.949 | 0.948 |
| 速度云图检测模型 | 0.976 | 0.956 | 0.967 | 0.975 |

由表2可知，当迭代次数达到300时，压力与速度图像检测模型在训练集与测试集上的各类损失值已很接近，压力检测模型的总损失分别为0.076 9和0.060 5，速度检测模型的总损失分别为0.075 1和0.060 8，均低于设定的损失标准，表明本文用于训练故障检测模型的各个参数值取值较优。由表3可知，综合各项模型性能指标，速度检测模型的性能略高于压力检测模型。但无论哪种模型，其检测准确度、召回率、平均精度、均值精度(置信区间等于0.5)等指标均高于0.93，2种模型均表现出良好的故障检测性能。

为进一步凸显基于Yolov5目标检测进行叶轮机械故障诊断的优势，本文采用Resnet图像识别方法对研究问题进行了实验验证，结果如表4所示。

相较于Yolov5，基于Resnet图像识别的故障诊断过程虽无需代数统计环节，可直接基于压力或速度云图进行故障的识别分类，但由表4可知，Resnet网络的压力识别模型性能略高于速度识别模型，在测试集的识别分类准确度最高仅0.652 8，相较于Yolov5模型的检测性能低了近0.3，说明基于Yolov5的目标检测方法更适合叶片故障诊断。

表4 Resnet模型性能

Table 4 Resnet model performance

| 检测模型 | 训练集损失 | 训练集准确度 | 测试集损失 | 测试集准确度 |
|---|---|---|---|---|
| 压力云图识别模型 | 0.331 7 | 0.679 2 | 0.523 6 | 0.652 8 |
| 速度云图识别模型 | 0.739 6 | 0.508 8 | 0.770 1 | 0.500 1 |

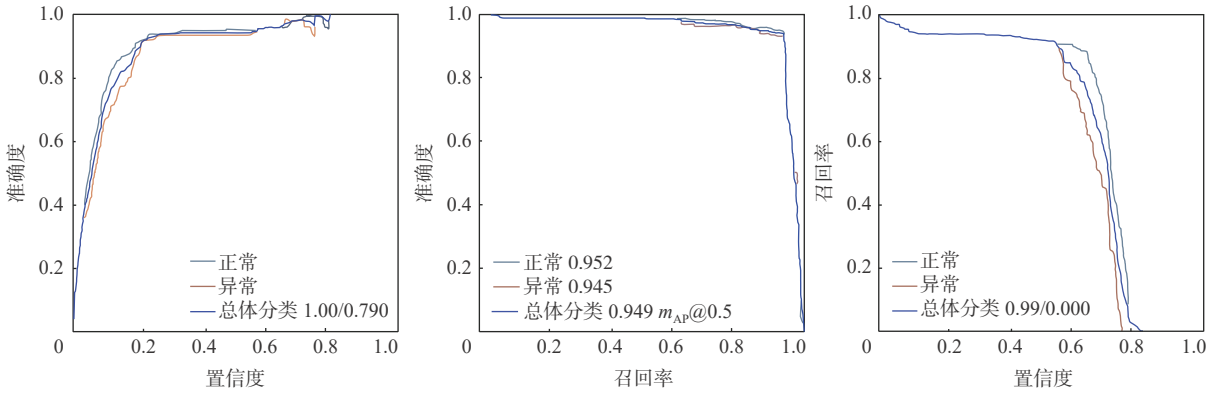
对于目标检测模型性能优劣的衡量，单一的准确度或召回率评价有一定局限性，需要在两者之间进行权衡，为进一步评价本文故障检测模型的性能，针对叶轮叶片正常和异常情形及叶轮整体机械状态检测性能，在不同置信阈值下，给出了如图3所示的不同交并比时模型检测准确度与召回率的变化趋势。

由图3(a)和图3(b)可知，当置信度取本文所设阈值0.5时，压力与速度检测模型对于叶轮正常或异常状态检测的准确率与召回率与总体检测的准确度与召回率基本相等，其中，压力云图检测模型对于正常状态的检测准确度整体趋势，高于对异常与总体的检测准确度趋势，而速度云图检测模型对于异常状态的检测准确度整体趋势，高于对正常与总体的检测准确度趋势。若以表3中置信度阈值取0.5时的总体检测准确度与召回率为参照，也显现出本文所建目标检测模型对于叶轮各类状态的高性能检测能力。同时也揭示出压力与速度云图检测网络存在的互补性，说明融合二者的诊断结果来进一步提高故障诊断准确度是必要的。

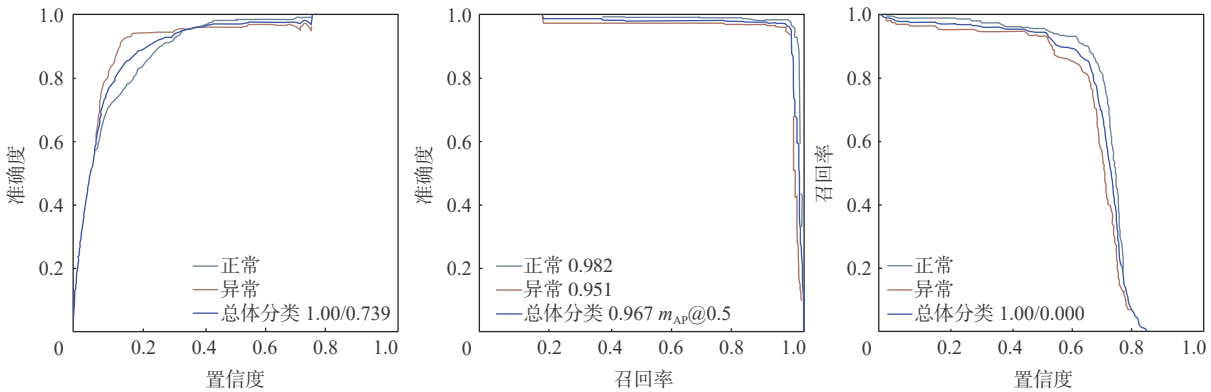
R-P曲线表示目标检测模型在准确度与召回率之间的权衡，其曲线包围的面积表示$A_{\text{pre}}$值。从图3(a)和图3(b)的R-P曲线可以看出，压力与速度检测模型对于正常状态检测的$A_{\text{pre}}$值均大于总体检测的$A_{\text{pre}}$值大于异常检测的$A_{\text{pre}}$值，但其整体趋势一致，且其数值大小进一步验证了本文所取置信度阈值的合理性。

2）基于Stacking融合的故障诊断结果分析。为选择性能较优的融合模型，本文分别对比了基于逻辑回归、K近邻、随机森林、朴素贝叶斯、决策树及加权等6种融合方式，融合后的故障诊断准确度比结果如表5所示。

由表5可知，对基于Yolov5的压力与速度云图初步诊断结果，通过进一步Stacking融合，6种融合策略下叶轮机械故障的诊断准确度均达到了0.99以上，均高于基于单一Yolov5检测网络的统计诊断结果，说明Stacking融合可有效提升故障诊断的准确度，这也验证了本文对基于单模型检测的两类诊断结果进行融合决策的必要性。表5中以决策树为Stacking模型的融合方式，故障诊断准确度




(a) 压力云图检测模型




(b) 速度云图检测模型

图 3　检测结果对比

Fig. 3　Comparison of detection results

**表 5　融合准确度对比**

**Table 5　Fusion accuracy comparison**

| 融合方式 | 准确度 |
|---|---|
| 加权融合 | 0.991 7 |
| K近邻 | 0.994 1 |
| 逻辑回归 | 0.990 1 |
| 随机森林 | 0.993 8 |
| 决策树 | 0.994 6 |
| 朴素贝叶斯 | 0.992 5 |

最高，达到了 0.994 6，故在实际应用时可优先选择此融合方式。

## 5　离心泵叶轮机械故障智能诊断系统的实现

在前述智能故障诊断方法研究与验证的基础之上，本文借助于山海鲸可视化工具，初步完成了航煤离心泵叶轮故障智能诊断系统的开发，其核心界面如图 4 所示。

系统功能包括：叶轮机械状态的实时检测，基于检测结果的故障诊断，故障报警提示。实时检测功能实现叶片和叶轮级离心泵运行状态的检测。故障诊断功能先完成初步诊断，进行叶片级的云图标注展示和叶轮级的故障检测结果，进而基于融合策略给出最终故障诊断结果。故障报警提示功能用于触发故障诊断报警功能，以红色警示灯展示。基于上述系统来实现离心泵叶轮机械故障的实时智能诊断，将在一定程度上减少专家咨询的次数、精简系统运维岗位的工作任务，为企业的提质增效运行做出有的力支撑。

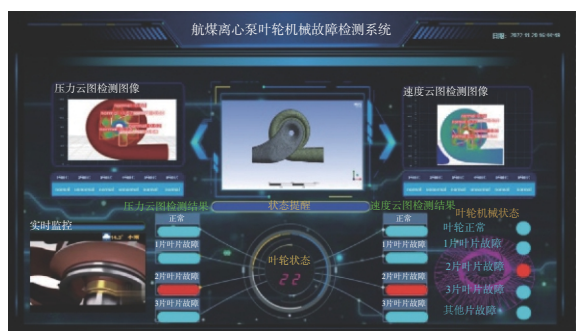



图 4　离心泵叶轮机械故障智能诊断系统的核心功能界面

Fig. 4　Core function interface of intelligent impeller fault diagnosis system for centrifugal pump

## 6　结　论

1）本文通过对离心泵数字孪生模型中相关参数进行修改，生成正常及各类虚拟故障情形下的叶轮流场压力云图与速度云图数据，规避了叶轮机械

故障数据难以获取的困境，为离心泵机械故障的智能化诊断提供了故障数据支撑。

2）借助Yolov5网络一图多识的优良特性，通过构建压力云图与速度云图2种Yolov5目标检测网络，实现了离心泵叶片级和叶轮级故障的高精度初步诊断；进而基于Stacking融合2种初诊结果，使故障诊断准确率进一步提升至0.99以上。

3）通过开发离心泵叶轮机械故障智能诊断系统，使得集数字孪生、机器视觉、集成学习为一体的综合故障诊断方法得以实施，探索了叶轮机械新型智能故障诊断方案落地应用的途径，有望助力企业提高设备运维水平。

## 参考文献（References）


[1] TONG Z M, XIN J G, TONG S G, et al. Internal flow structure, fault detection, and performance optimization of centrifugal pumps[J]. Journal of Zhejiang University Science A: Applied Physics & Engineering, 2020, 21(2): 85-117.

[2] 周耀. 离心泵故障诊断研究现状与发展趋势[J]. 设备管理与维修, 2019(20): 161-163.
ZHOU Y. Research status and development trend of centrifugal pump fault diagnosis[J]. Plant Maintenance Engineering, 2019(20): 161-163(in Chinese).

[3] 唐一科, 柯研, 谢志江. 叶轮机械叶片状态监测与故障诊断的现状与发展[J]. 噪声与振动控制, 2003, 23(6): 5-8.
TANG Y K, KE Y, XIE Z J. The actuality and development of turbo machine's status monitoring and fault diagnose[J]. Noise and Vibration Control, 2003, 23(6): 5-8(in Chinese).

[4] 唐亮, 吴桐, 杜鹏, 等. 基于激光条带追踪的桥梁振动非接触测量方法[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(6): 135-145.
TANG L, WU T, DU P, et al. Non-contact measurement method of bridge vibration based on laser strip tracing[J]. Engineering Science and Technology, 2022, 54(6): 135-145.

[5] STASZEWSKI W J, BIN JENAL R, KLEPKA A, et al. A review of laser Doppler vibrometry for structural health monitoring applications[J]. Key Engineering Materials, 2012, 518: 1-15.

[6] FROULA D H. Plasma scattering of electromagnetic radiation theory and measurement techniques[M]. Burlington: Academic Press/Elsevier, 2011.

[7] ANDRENELLI L, PAONE N, ROSSI G L. Large-bandwidth reflection fiber-optic sensors for turbomachinery rotor blade diagnostics[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1992, 32(1-3): 539-542.

[8] CAETANO E, SILVA S, BATEIRA J. A vision system for vibration monitoring of civil engineering structures[J]. Experimental Techniques, 2011, 35(4): 74-82.

[9] PFISTER T, GÜNTHER P, DREIER F, et al. Novel dynamic rotor and blade deformation and vibration monitoring technique[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(1): 1.

[10] WEISS A, GEISLER R, MULLER M M, et al. Dynamic-stall measurements using time-resolved pressure-sensitive paint on double-swept rotor blades[J]. Experiments in Fluids, 2021, 63(1): 15.

[11] 黄瑾珉. 面向机械故障智能诊断神经网络优化与识别方法研究[J]. 化学工程与装备, 2019(4): 220-224.
HUANG J M. Research on optimization and recognition method of neural network for intelligent diagnosis of mechanical faults[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2019(4): 220-224(in Chinese).

[12] ALI SAUD ALTOBI M, BEVAN G, WALLACE P, et al. Fault diagnosis of a centrifugal pump using MLP-GABP and SVM with CWT[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2019, 22(3): 854-861.

[13] PROSVIRIN A E, AHMAD Z, KIM J M. Global and local feature extraction using a convolutional autoencoder and neural networks for diagnosing centrifugal pump mechanical faults[J]. IEEE Access, 2021, 9: 65838-65854.

[14] CHEN Z H, CEN J, XIONG J B. Rolling bearing fault diagnosis using time-frequency analysis and deep transfer convolutional neural network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 150248-150261.

[15] KUMAR A, GANDHI C P, ZHOU Y Q, et al. Improved deep convolution neural network (CNN) for the identification of defects in the centrifugal pump using acoustic images[J]. Applied Acoustics, 2020, 167(10): 107399.

[16] HASAN M J, RAI A, AHMAD Z, et al. A fault diagnosis framework for centrifugal pumps by scalogram-based imaging and deep learning[J]. IEEE Access, 2021, 9: 58052-58066.

[17] ZHANG Y, HUANG X B, JIA J Y, et al. A recognition technology of transmission lines conductor break and surface damage based on aerial image[J]. IEEE Access, 2019, 7: 59022-59036.

[18] CHENG L B, LI J, DUAN P, et al. A small attentional YOLO model for landslide detection from satellite remote sensing images[J]. Landslides, 2021, 18(8): 2751-2765.

[19] American Petroleum Institute. Centrifugal pumps for the petroleum, petrochemical and natural gas industries, 12th edition: API 610[S]. United States: American Petroleum Institute, 2021: 68-80.

[20] 王燕, 马文文. 矿用通风机叶片裂纹诊断方法的研究[J]. 同煤科技, 2018(6): 24-26.
WANG Y, MA W W. Research on diagnosis method of fan blade crack in coal mine[J]. Datong Coal Science & Technology, 2018(6): 24-26(in Chinese).

[21] 陈雪巍, 汪轶俊, 何岗, 等. 基于CFD的某运载火箭发动机燃料泵故障诊断分析[J]. 上海航天, 2016, 33(2): 68-72.
CHEN X W, WANG Y J, HE G, et al. Faulty analysis of a centrifugal pump for some liquid rocket engine based on CFD[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2016, 33(2): 68-72(in Chinese).

[22] MADNI A M, MADNI C C, LUCERO S D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering[J]. Systems, 2019, 7(1): 7.

[23] XIE R, CHEN M Y, LIU W H, et al. Digital twin technologies for turbomachinery in a life cycle perspective: a review[J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2495.

[24] 张胜文, 杨凌翮, 程德俊. 数字孪生驱动的离心泵机组故障诊断方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2023(5): 1462-1470.
ZHANG S W, YANG L H, CHENG D J. Research on fault diagnosis method of centrifugal pump unit driven by digital twin[J].

Computer Integrated Manufacturing System, 2023(5): 1462-1470(in Chinese).

[25] YUSUPBEKOV N, ADILOV F, IVANYAN A. Development of digital twin for centrifugal rotating equipment assets[M]//Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer International Publishing, 2022: 446-455.

[26] LU Q C, PARLIKAD A K, WOODALL P, et al. Developing a digital twin at building and city levels: Case study of West Cambridge campus[J]. Journal of Management in Engineering, 2020, 36(3): 05020004.

[27] AENIS M, KNOPF E, NORDMANN R. Active magnetic bearings for the identification and fault diagnosis in turbomachinery[J]. Mechatronics, 2002, 12(8): 1011-1021.

[28] 冯黎刚. 相对定位法检测 GNSS 相位中心偏差的研究[J]. 陕西交通科教研究, 2021(2): 5-9.
FENG L G. Study on detection of GNSS phase center deviation by relative positioning method[J]. Shanxi Transportation Science and Education Research, 2021(2): 5-9(in Chinese).

[29] 胡振江. 单级单吸式离心泵叶片裂纹故障诊断技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 15-20.
HU Z J. Research on fault diagnosis technology of single-stage single-suction centrifugal pump vane crack[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 15-20(in Chinese).

[30] AHMAD Z, PROSVIRIN A E, KIM J M, et al. Multistage centrifugal pump fault diagnosis by selecting fault characteristic modes of vibration and using Pearson linear discriminant analysis[J]. IEEE Access, 2020, 8: 223030-223040.

[31] WANG D D, HE D J. Channel pruned YOLO V5s-based deep learning approach for rapid and accurate apple fruitlet detection before fruit thinning[J]. Biosystems Engineering, 2021, 210: 271-281.

[32] XU Z B, HUANG X P, HUANG Y, et al. A real-time zanthoxylum target detection method for an intelligent picking robot under a complex background, based on an improved YOLOv5s architecture[J]. Sensors, 2022, 22(2): 682.

# Impeller fault diagnosis method and application based on digital twin flow field contour of centrifugal pump

LI Yajie[1, 2, 3], LIU Qiang[1, 2, 3], LI Wei[1, 2, 3, *]

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
3. National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract**: With the development of industrial technology, the health diagnosis and maintenance of centrifugal pumps are increasingly urgent. Combining digital twin and machine vision technology, this paper proposed an intelligent impeller fault diagnosis method for centrifugal pumps based on a digital twin flow field cloud diagram. First of all, the digital twin model of the centrifugal pump was used to simulate the evolution of the random fracture for the impeller blades, and the pressure and velocity cloud diagrams of the impeller flow field with different fault characteristics were generated. Secondly, based on the learning and training of the Yolov5 algorithm, two kinds of machine vision models, namely pressure and velocity cloud diagrams, were obtained, and the preliminary diagnosis of impeller fault was realized by combining statistical analysis. Furthermore, the complementary advantages of the two types of detection models were considered, and the two types of detection models were combined based on the idea of stack integration to improve the accuracy of impeller fault diagnosis. The experimental verification shows that the intelligent fault diagnosis method for centrifugal pumps proposed in this paper has a diagnosis accuracy of more than 0.99 for the random fracture of impeller blades. The developed intelligent impeller fault diagnosis system for centrifugal pumps makes the method developed in this paper be applied to practical scenarios.

**Keywords**: centrifugal pump; digital twins; impeller; machine vision; intelligent diagnosis

**Received**: 2022-12-17; **Accepted**: 2023-03-26; **Published Online**: 2023-04-20 13:34

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230420.1027.001

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (62163022); National Key Research and Development Program of China (2020YFB1713600)

* **Corresponding author**. E-mail: liwei@lut.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1004

# 基于注意力引导和多样本决策的舰船检测方法

吕奕龙，苟瑶，李敏*，何玉杰，邢宇航
(火箭军工程大学 作战保障学院，西安 710025)

**摘　　要**：单阶段目标检测方法具有训练速度快、检测时间短的特点，然而其特征金字塔网络(FPN)难以抑制合成孔径雷达(SAR)舰船图像的背景和噪声信息，且检测头存在预测误差。针对该问题，提出一种基于注意力引导和多样本决策的检测方法，用于SAR舰船检测。提出一种注意力引导网络，将其添加至特征金字塔的最高层，使其抑制背景和噪声干扰，从而提升特征的表示能力。提出多样本决策网络，使其参与目标位置的预测。该网络通过增加回归分支中输出的样本数量，缓解预测误差对检测结果的影响。设计了一种新颖的最大似然损失函数。该损失函数利用多样本决策网络中输出的样本构造出最大似然函数，用于规范决策网络的训练，进一步提升目标定位的精度。以RetinaNet网络模型为基线方法，相较于基线方法及目前先进的目标检测方法，所提方法在舰船检测数据集SSDD上表现出最高的检测精度，AP达到52.8 %。相比基线方法，所提方法在AP评价指标上提升了3.4%～5.7%，且训练参数量仅增加$2.03\times10^6$，帧率仅降低0.5帧/s。

**关　键　词**：舰船检测；注意力引导；多样本决策；最大似然损失函数；单阶段检测；合成孔径雷达

**中图分类号**：TP37; TP753

**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0202-12

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种高分辨率的图像雷达。一方面，作为一种主动微波成像传感器，其微波成像对地面物体具有一定的穿透作用，且受环境的影响较小，因此，能够有效地探测各种隐蔽的目标；另一方面，其全天时全天候的优势，能够保证在各种极端的条件下完成探测任务。得益于这些特性，SAR图像广泛应用于海面舰船检测[1-6]。

近年来，随着深度学习和图形处理单元(graphics processing unit, GPU)计算能力的发展，基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNNs)的目标检测方法得到蓬勃发展。其中，得益于训练速度快、检测时间短的优势，单阶段目标检测被广泛应用在SAR舰船目标检测任务，如SSD[7]、RetinaNet[8]方法、FCOS[9]等。通常，单阶段目标检测方法由3个部分组成：① 骨干网络，用于提取图像的特征，典型代表有ResNet[10]、DenseNet[11]、Xception[12]和ResNeXt[13]；② 瓶颈网络，用于多尺度特征融合，典型代表有特征金字塔网络(feature pyramid network, FPN)[14]、PANet[15]和NAS-FPN[16]；③ 检测头，用于预测目标的种类和位置，典型代表有FCN[17]和Dynamic Head[18]。

由于单阶段目标检测的结构简单、速度快，所以其在SAR舰船检测任务中应用广泛。李晨瑄等[19]提出多尺度特征融合的轻量化舰船检测方法，利用轻量化的注意力机制改进了主干网络的结构，提升了检测精度。张晓玲等[20]提出一种轻量化的SAR舰船目标检测方法，利用深度分离卷积对检测模型进行轻量化，同时通过通道和空间注意力机制对特征融合进行强化，从而实现了检测模型的高速和高

**收稿日期**：2022-12-20；**录用日期**：2023-03-10；**网络出版时间**：2023-03-24 16:53
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230323.1351.005
**基金项目**：国家自然科学基金(62006240)
*通信作者. E-mail：limin301908@163.com

*引用格式：吕奕龙，苟瑶，李敏，等. 基于注意力引导和多样本决策的舰船检测方法[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：202-213.*
*LYU Y L，GOU Y，LI M，et al. Ship detection method based on attentional guidance and multi-sample decision[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：202-213 (in Chinese).*

精度。Jiao 等[21] 通过密集连接将不同分辨率的特征融合, 不同分辨率特征内富含不同尺度的特征信息, 因此, 通过对不同分辨率特征进行融合, 能够产生具有更多空间和多尺度语义特征信息。通过强化 SAR 舰船目标的表征能力, 提升了 SAR 舰船目标的检测性能; Zhang 等[22] 设计了一种平衡特征金字塔网络 (balance feature pyramid network, B-FPN), 通过依次对特征进行缩放、整合、提炼和强化后, 能够增强特征金字塔的特征表征能力, 从而提高 SAR 舰船目标检测精度; Chen 等[23] 利用注意力机制增强目标区域的特征表示, 并通过知识蒸馏技术, 提高了 SAR 舰船检测性能; Fu 等[24] 设计了一种无锚的特征优化与平衡方法, 该方法利用注意力机制对特征金字塔进行重新加权, 使其突出目标区域的特征, 从而实现了对目标特征的优化; 张冬冬等[25] 在光学遥感舰船检测任务中提出一种无锚框的检测算法, 该算法基于经典的全卷积一阶段 (fully convolutional one-stage, FCOS) 目标检测模型, 设计了全局上下文模块, 能够实现对船体的关键部位进行检测。以上方法对 FPN 内的每层特征都进行处理, 在一定程度上缓解了噪声和背景对特征融合的影响, 但是引入了大量训练参数, 增加了模型的计算负担。

单阶段目标检测方法虽然在一定程度上提升舰船目标的检测性能, 但仍然存在以下 2 个问题待完善改进: ①SAR 舰船图像中的复杂噪声和背景将影响特征融合后的效果, 导致检测结果的虚警率上升; ②典型的检测头在对目标进行定位时存在预测误差, 将影响舰船目标定位的精度, 并限制检测器在现实中的应用。

基于以上分析, 本文基于单阶段目标检测方法, 提出一种基于注意力引导和多样本决策的检测方法。首先, 为缓解噪声和背景对特征融合的干扰, 本文设计了注意力引导网络。该网络可以直接插入到现有的 FPN 中, 并且在没有额外监督的情况下进行端到端的训练。同时, 由于注意力引导网络具有简洁的网络结构, 并只对特征金字塔的最高特征层进行处理, 因此, 几乎不会增加训练负担。其次, 本文对典型的单阶段检测网络方法中回归分支的输出结果进行了统计和分析。经过分析后, 本文从简单起见将回归分支的输出分布建模为高斯模型, 并提出多样本决策网络用于缓解回归分支的输出误差对检测性能的影响。最后, 根据最大似然估计理论, 设计了一种最大似然估计损失函数用于规范多样本决策网络的训练, 使建立的高斯模型均值趋近于标签、方差趋近于 0。

# 1　单阶段检测方法原理

本文以简单和典型的单阶段检测方法 RetinaNet 为基线方法进行介绍。单阶段模型的各个组成部分实现不同的功能, 图像通过骨干网络进行特征提取, 特征金字塔将提取特征进行融合, 检测头网络基于融合特征进行回归和分类。

## 1.1　特征金字塔

经典特征金字塔的架构如图 1 所示, 其中 Conv 表示卷积操作, $F_i$ 表示输入特征, $P_i$ 表示输出特征。特征金字塔具有多尺度和多分辨率的特点, 通常由于分辨率较大的特征具有更小的细粒度, 因此, 包含更加丰富的小尺寸目标特征信息; 而分辨率较小的特征反之。因此, 通过进行多尺度融合, 能够强化特征表征能力, 从而提升对不同尺寸目标的检测性能。

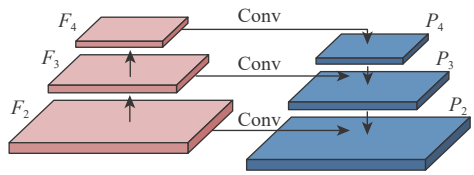



图 1　特征金字塔网络架构

Fig. 1　Structure of the feature pyramid network

然而, 经典 FPN 依然存在一些不足待完善改进。在网络组成上, 特征金字塔由全卷积神经网络构成, 不包含注意力机制、非局部神经网络等重加权结构, 同时图像中的全部特征将以相同权重在金字塔网络中进行传递。因此, SAR 舰船图像中包含的复杂的背景和噪声信息不会受到抑制和过滤。在特征融合过程中, 噪声信息将从特征金字塔网络的更深层特征中持续地流向浅层特征, 造成浅层特征被污染。为抑制噪声信息和提高目标特征的表达能力, 本文提出注意力引导金字塔网络, 该网络包含上下文提取模块和注意力模块。

## 1.2　检测头网络

RetinaNet 方法采用典型的平行检测头结构, 通过回归分支和分类分支分别对特征图上每个锚框 $(x,y,w,h)$ 的位置偏移量 $(t_x,t_y,t_w,t_h)$ 和 $C$ 个类别的概率进行预测。根据锚框的位置 $(x,y,w,h)$ 和位置偏移量 $(t_x,t_y,t_w,t_h)$ 可以表示出预测框的最终位置, 计算过程如下:

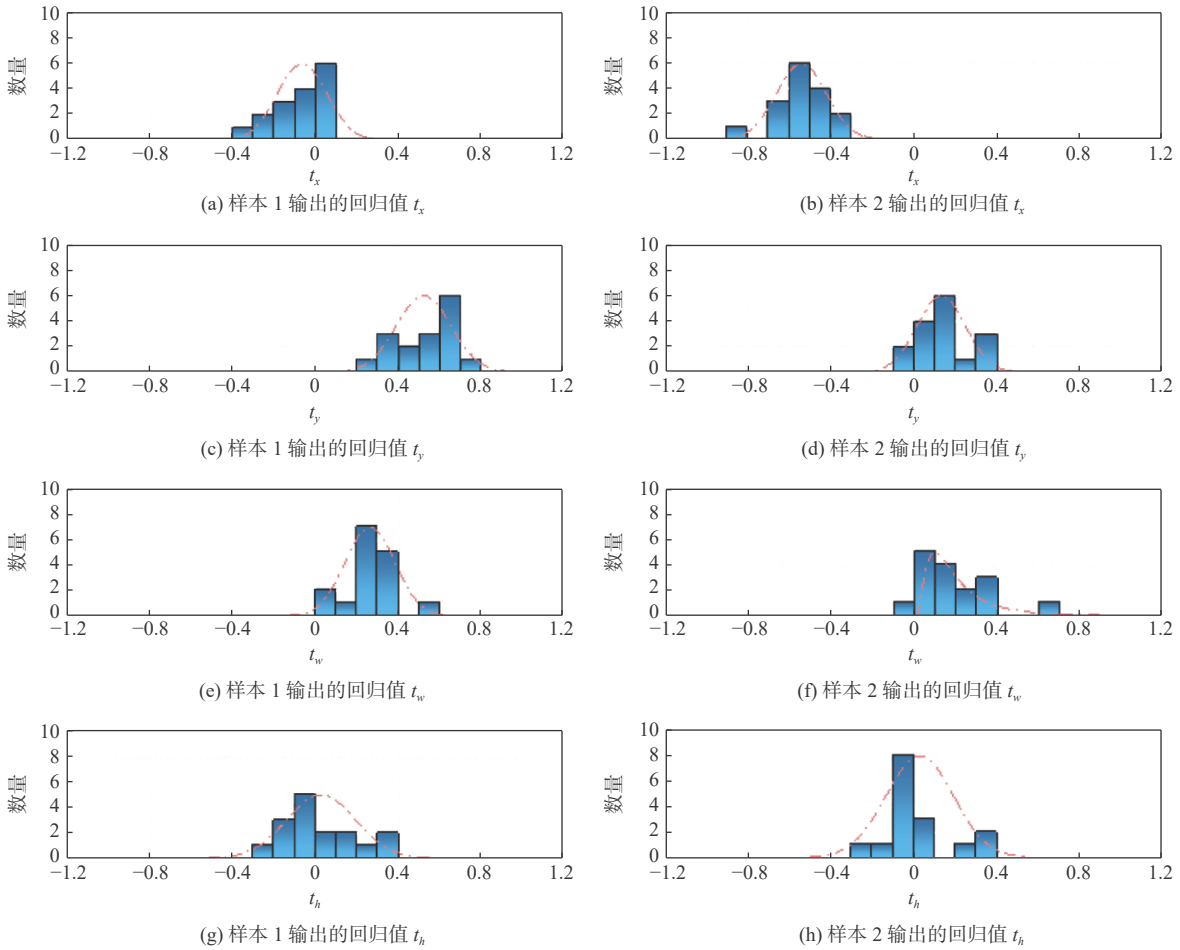
$$\begin{cases} x' = x + wt_x \\ y' = y + ht_y \\ w' = w\mathrm{e}^{t_w} \\ h' = h\mathrm{e}^{t_h} \end{cases} \tag{1}$$

式中: $(x',y',w',h')$ 表示输出的预测框位置。

RetinaNet 方法使用一组位置偏移量对锚框进

行校正，实现了对目标的检测。这种做法被广泛应用，典型的代表有PISA算法、FCOS算法、PAFPN算法等。通常，研究人员认为，预测位置$(x',y',w',h')$是关于真实位置$(x,y,w,h)$的狄拉克三角分布。然而，位置偏移量$(t_x,t_y,t_w,t_h)$事实上存在预测误差，这将导致预测的位置存在一定程度上的偏差，难以保证呈现狄拉克三角分布。

为证明位置偏移量存在预测误差，本文对RetinaNet方法的检测头网络部分重构后进行实验。在该部分，将单输出的回归分支增加到$n$个分支，并对$n$个分支分别进行独立训练，每个分支将分别输出4个回归值$(t_x,t_y,t_w,t_h)$。随机选择了2个正样本，并对同一正样本输出的$n$个回归值进行统计分析，本文在此处将$n$设置为16，结果如图2所示。




(a) 样本1输出的回归值 $t_x$　(b) 样本2输出的回归值 $t_x$

(c) 样本1输出的回归值 $t_y$　(d) 样本2输出的回归值 $t_y$

(e) 样本1输出的回归值 $t_w$　(f) 样本2输出的回归值 $t_w$

(g) 样本1输出的回归值 $t_h$　(h) 样本2输出的回归值 $t_h$

图2　回归分支上16个输出结果的统计图

Fig. 2　Statistical graph of 16 output results on the regression branch

由图2可知，16个位置输出值的统计分布不是理论上分布于真实标签附近的狄拉克三角分布，而是呈现一种混合高斯分布的形状，16个分支的输出值为该分布的16个随机样本。由此说明回归分支的输出值真实地存在预测误差。由于RetinaNet方法只有单一回归分支，因此，其产生的每个回归预测值只是混合高斯分布的一个样本，必然存在预测误差。为缓解回归分支上存在的预测误差，本文为简单起见，采用单变量高斯分布作为真实分布，并设计了多样本决策网络和最大似然损失函数用于减小误差，提升检测目标的定位精度。

## 2　本文方法与原理

以典型的单阶段方法RetinaNet为基线方法，本节将详细介绍本文方法及其原理，本文设计的网络结构如图3所示。注意力引导FPN，用于抑制噪声信息，并提升目标特征的表示能力；为提升回归分支的预测精度，本文设计了一种多样本决策网络，用于对原始网络结构进行改进，并提出最大似然损失函数。最后，提出本文方法的总损失函数。

### 2.1　注意力引导网络

注意力引导网络由上下文提取模块和注意力模块构成，网络结构如图4所示，其中，BN层为批量归一化层。

在不显著增加计算开销的情况下，上下文提取模块可以通过使用多分支的卷积层，从不同的特征空间捕获丰富的上下文信息。为综合多分支的上下文信息，本文将不同分支的特征进行拼接并通过一层卷积。

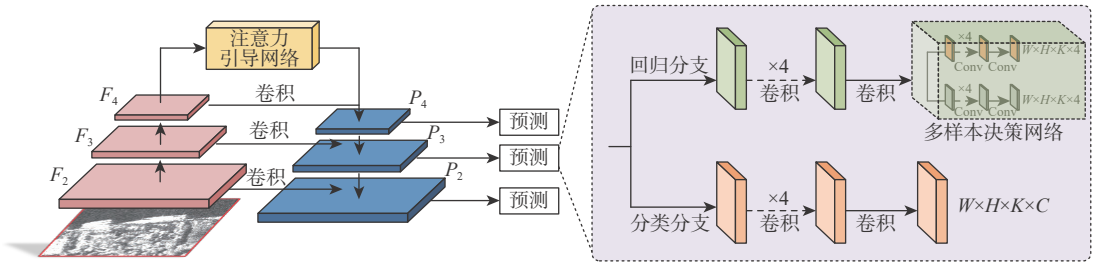



图 3　本文方法的结构

Fig. 3　Structure of the proposed method

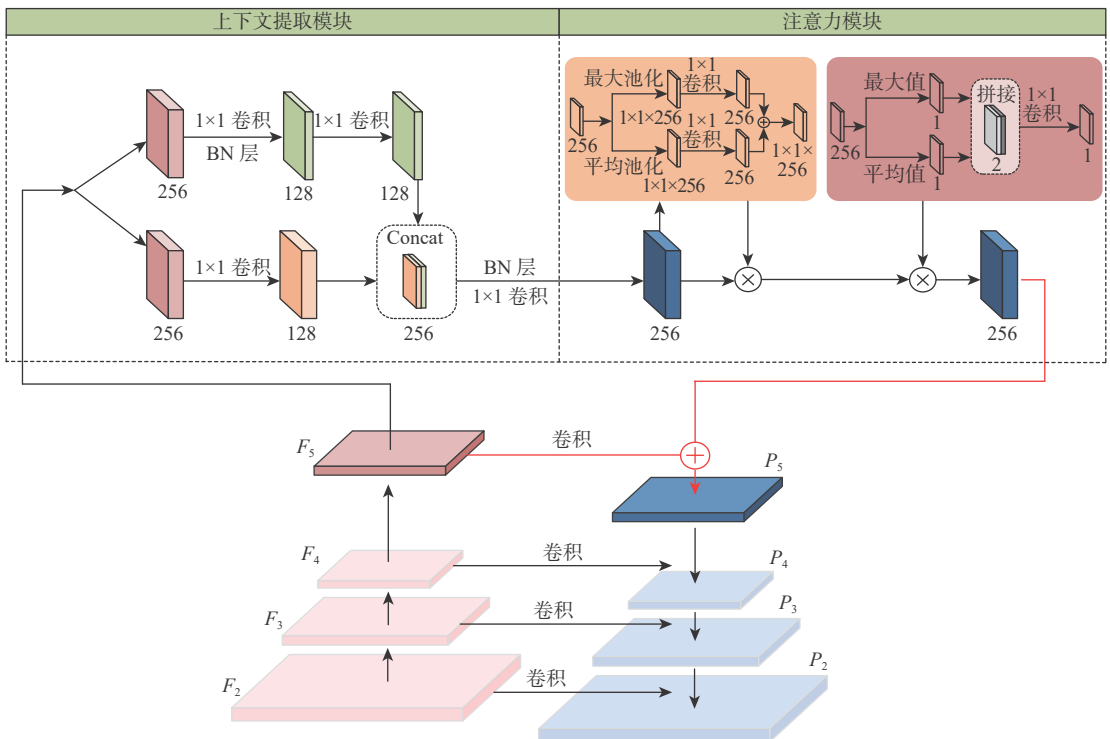



图 4　注意力引导网络结构

Fig. 4　Structure of attention-guided network

然而, 一些冗余的上下文关系可能会误导定位和识别。因此, 为减少冗余上下文的误导, 进一步提高特征的辨别能力, 本文设计了注意力模块, 该模块引入了一种自注意机制来捕获有效的上下文依赖关系。由空间注意力和通道注意力 2 个部分组成。

注意力引导网络由于具有简洁的网络结构, 并且只对特征金字塔的最高特征层进行处理, 几乎不会增加训练负担。具体处理流程如下。

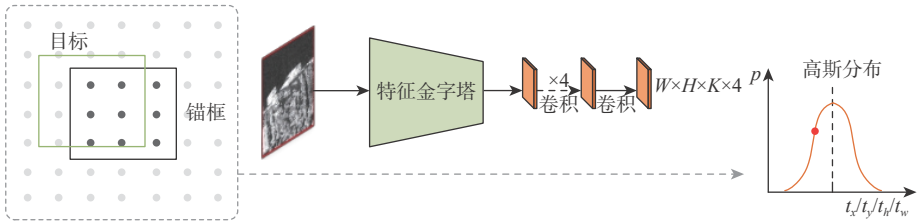
1) 在上下文提取模块中, 特征金字塔网络的最高层特征 $F_5$ 输入上下文提取模块: 特征层 $F_5$ 将被分别输入到 2 条分支。在上分支中, 经过一层 1×1 卷积和批标准化后, 再继续经过一层 1×1 卷积处理; 在下分支中, 特征层 $F_5$ 只经过一层 1×1 卷积, 最后, 将上下分支的特征进行拼接。上下文模块利用不同深度的卷积层, 从不同感受野中获取丰富的上下文信息。

2) 在注意力模块中, 上下文提取模块处理后的特征 $F_5'$ 将先后输入通道注意力和空间注意力进行重加权: ①特征 $F_5'$ 分别进行全局最大池化和全局平均池化, 继续经过一层 1×1 卷积, 再将 2 个卷积后的特征按元素求和后, 对特征 $F_5'$ 进行重加权得到 $F_5''$; ②特征 $F_5''$ 分别按通道求最大值和均值, 随后将 2 个特征进行拼接, 再经过一层 1×1 卷积后, 对特征 $F_5''$ 进行重加权 $F_5'''$。注意力模块利用通道注意力和空间注意力, 强化目标的特征表达能力, 抑制噪声信息。

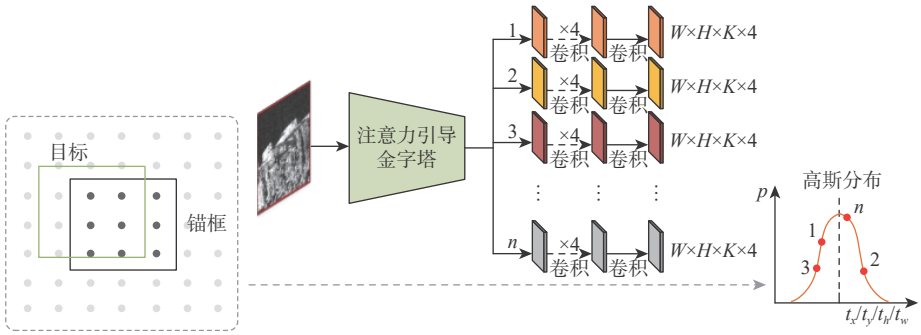
3) 特征 $F_5'''$ 与特征 $P_5$ 按元素求和, 得到处理后的特征图。

### 2.2　多样本决策网络

典型的检测头是单分支网络结构, 结构如图 5(a) 所示。其中, 回归分支的输出值服从类高斯分布, 而每次输出的回归结果为分布的一个样本值。根据大数定律, 只要不断地增加输出样本的数量, 那




(a) RetinaNet 网络的回归分支




(b) 多样本决策网络

图 5 本文方法与 RetinaNet 方法的结构

Fig. 5 Structure of the proposed method and RetinaNet method

么准确的回归值将是大量样本的期望。因此，通过增大回归输出值的样本量，能够提高回归输出的定位精度。

基于以上分析，本文设计了多样本决策网络，网络结构如图 5(b) 所示。首先，本文将原始的单分支回归输出改进为 $n$ 分支输出，以增加输出结果的样本数，从而提高回归输出的定位精度。其次，大数定律要求每个样本是独立同分布的，因此，多样本决策网络在增加输出样本量的同时，需要保证样本之间独立同分布性。结合以上 2 个特点，本文将多样本决策网络设计为独立多分支平行结构，即每个分支之间没有直接联系。此处，$n$ 取值为 16，本文将通过消融实验研究 $n$ 为其他取值时的检测结果，详细内容见 4.4 节。

### 2.3 最大似然损失函数

多样本决策网络增加了回归输出的样本数量，为了使多样本决策网络能够充分地训练，本文调整了模型训练的损失函数，以使得网络模型能够训练获得更准确的结果。

从形式上看，RetinaNet 方法预测的结果服从一种类高斯分布的概率分布。虽然其也存在服从其他复杂分布的可能，如多元高斯分布或混合高斯分布，但本文为了简单起见，假设位置偏移量 $(t_{x_i}, t_{y_i}, t_{w_i}, t_{h_i})$ 中每个偏移量是独立的，并使用单变量高斯分布分别描述 $(t_{x_i}, t_{y_i}, t_{w_i}, t_{h_i})$ 中的每个偏移量：

$$P(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\mathrm{e}^{\frac{(x-x_\mathrm{g})^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

式中：$x\in(t_x,t_y,t_w,t_h)$；$x_\mathrm{g}$ 为偏移量的目标值，偏移量的样本方差 $\sigma^2$ 是未知量，用于测量估计的不确定性。在训练过程中，回归分支输出 $n$ 个回归值，根据最大似然估计理论，该 $n$ 个回归值的似然函数是极大的，具体计算式为

$$\arg\max_{\sigma^2} l(x)=p(x_1,x_2,\cdots,x_n|\sigma^2)=\prod_{i=1}^{n}p(x_i|\sigma^2) \tag{3}$$

在单变量服从高斯分布的情况下，似然函数为

$$\begin{aligned}&\arg\max_{x_\mathrm{e},\sigma^2} l(x)=\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\right)^n \mathrm{e}^{\sum_{i=1}^{n}\frac{(x_i-x_\mathrm{g})^2}{2\sigma^2}}\\&\arg\max_{x_\mathrm{e},\sigma^2}\ln l(x)=-\frac{n}{2}\ln 2\pi-\frac{n}{2}\ln\sigma^2+\sum_{i=1}^{n}\frac{(x_i-x_\mathrm{g})^2}{2\sigma^2}\end{aligned} \tag{4}$$

为了让似然函数极大化，需要进一步对参数空间中 $\sigma^2$ 进行求导，令其导数为 0，计算结果为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\ln l(x)}{\mathrm{d}\sigma^2}=\dfrac{n}{2}\cdot\dfrac{1}{\sigma^2}+\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{(x_i-x_\mathrm{g})^2}{2(\sigma^2)^2}=0\\ \sigma^2=\dfrac{1}{n}\displaystyle\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_\mathrm{g})^2\end{cases} \tag{5}$$

通过 $n$ 个回归样本值能够计算样本方差 $\sigma^2$。为进一步提升回归分支对目标的预测精度，令样本方差 $\sigma^2$ 不断向 0 逼近以减小预测误差。当 $\sigma^2\approx 0$ 时，表示回归输出的预测精度达到最好。本文基于式 (5) 提出最大似然损失函数，具体表达式为

$$\sigma^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_\mathrm{g})^2\to 0 \tag{6}$$

本文模型的总损失函数由分类损失函数、回归损失函数、最大似然损失函数 3 部分组成，总损失函数为

$$\begin{aligned}L_\mathrm{total}=&\frac{1}{N_\mathrm{pos}}\sum_{x,y}L_\mathrm{cls}(p_{x,y},c^*_{x,y})+\frac{1}{N_\mathrm{pos}}\sum_{x,y}\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{x,y,i}-x_\mathrm{g}\right|+\\&\frac{1}{nN_\mathrm{pos}}\sum_{x,y}\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_\mathrm{g})^2\end{aligned} \tag{7}$$

其中，回归损失函数采用 $L_1$ 损失。分类损失函数

$L_{cls}$采用 Focal Loss:

$$\begin{cases} L_{cls}(p_{x,y}, c^*_{x,y}) = -\alpha(1-p)^{\gamma}\lg(p) \\ p = \begin{cases} p_{x,y} & c^*_{x,y}=1 \\ 1-p_{x,y} & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \tag{8}$$

式中: $\alpha$为平衡因子, 用于平衡正负样本的数量; $p_{x,y}$为图像上不同像素预测的分类分数; $c^*_{x,y}$为图像上不同像素对应的类别标签。

## 3　实验验证

### 3.1　实验数据集

为评估本文方法的有效性, 在 SSDD 数据集[26]上进行了大量实验。

SSDD 数据集为 2017 年建立的 SAR 舰船数据集[26]。自问世以来, 已被许多研究工作广泛使用, 并成为 SAR 舰船检测的基线数据集。该数据集共有 1 160 个图像, 训练数据集中的图像数量为 921, 测试数据集中的图像数量为 239。

SSDD 数据集[26]包含众多场景和船只, 同时涉及各种传感器、分辨率、极化模式和工作模式。此外, 此数据集的标签文件设置与主流 PASCAL VOC2007 数据集[27]相同, 因此, 能够直接用于训练算法模型。

### 3.2　性能指标

为评估本文方法的检测性能, 采用 MS COCO 数据集[28]中的评价指标为平均精度(average precision, AP), 评价指标包含 AP、AP50、AP75、APS、APM 和 APL。其中, AP 为超过交并比 (intersection over union, IoU)=0.50, 0.55, 0.60, …, 0.95(间隔为 0.05)的平均精度; AP50 为 IoU=0.5 的 AP; AP75 为 IoU=0.75 的 AP; APS、APM 和 APL 分别表示小目标、中目标和大目标的 AP; APS 为面积小于 $32^2$ 像素的小型船舶 AP; APM 为面积在 $32^2$～$96^2$ 像素之间的中型船舶 AP; APL 为面积大于 $96^2$ 像素的大型船舶 AP。通常, 模型的检测效果越好, AP 值就越高。AP 的计算式为

$$A_P = \int_0^1 P(R)\mathrm{d}R \tag{9}$$

式中: $P$ 为精度; $R$ 为召回率; $P$ 为以 $R$ 为参数的函数, $A_P$ 等于曲线下的面积。同时, 精度和召回率计算式为

$$P = \frac{T_P}{T_P + F_P} \times 100\% \tag{10}$$

$$R = \frac{T_P}{T_P + F_N} \times 100\% \tag{11}$$

式中: $F_N$ 为被抑制掉的预测结果中识别正确的数量; $T_P$ 为保留下的预测结果中识别正确的数量; $F_P$ 为保留下的预测结果中识别错误的数量。此外, 本文采用浮点运算次数和训练参数量评价计算性能和负担。浮点运算次数可以用来衡量模型的复杂性。与此同时, Params 用于评估模型的参数量。本文采用帧/s 评估目标检测的速度, 表示每秒处理的图像数量, 或处理一幅图像所需的时间, 时间越短, 速度越快。

### 3.3　实验设置

实验硬件环境设置如表 1 所示。

**表 1　实验硬件环境**

**Table 1　Experimental hardware environment**

| 类别 | 环境条件 |
|---|---|
| CPU | intel(R) xeon(R) silver 4110 |
| 显卡 | TITAN RTX (24 GB) |
| 操作系统 | Ubuntu 18.04 |
| 深度学习框架 | Pytorch 1.6.0 |
| CUDA版本 | CUDA 11.2 |
| cuDNN版本 | cuDNN 7.4.2 |
| 运行环境 | Pycharm 2021.01 |
| 脚本语言 | Python3.7 |

此外, 本文方法基于 MMDetection 框架[29]。其中, 训练策略 1×表示 12 次迭代训练, 2×表示 24 次迭代训练, 优化器采用随机梯度下降法, 学习率设置包括 0.01、0.005 和 0.001, 动量为 0.9, 权重衰减为 0.000 1。

### 3.4　样本量的影响

为讨论样本量对本文方法的影响, 本文分别设置了不同样本量进行实验, 并比较实验结果, 结果如表 2 所示。

**表 2　不同样本量的影响**

**Table 2　Effect of different sample size**

| $n$ | AP | 参数量 | 浮点运算次数 |
|---|---|---|---|
| 1 | 49.6 | $36.88\times10^6$ | $205.13\times10^9$ |
| 16 | 52.8 | $38.13\times10^6$ | $231.68\times10^9$ |
| 30 | 48 | $39.29\times10^6$ | $256.46\times10^9$ |
| 50 | 12.8 | $40.95\times10^6$ | $291.86\times10^9$ |
| 100 | — | $45.1\times10^6$ | $380.36\times10^9$ |

由表 2 可知, 随着样本量的增加, 实验结果不断提升, 当样本量 $n$ 设置为 16 时, 检测性能 AP 表现出最好的指标。但是, 当样本量 $n$ 为 50 时, 实验结果出现急剧的下降; 样本量 $n$ 增加到 100 时, 无法检测出目标。

实验结果说明, 随着样本量的提升, 检测性能并不随之增强。具体分析, 一方面, 随着样本量的提升, 分支的数量也将增多, 导致训练参数的增加和训练速度降低, 严重限制方法的应用前景; 另一

方面，当训练参数量增加到一定规模后，数据集将无法满足大规模的网络模型，因此，样本量的不断提升可能使当前存在的SAR目标检测数据集难以充分地训练模型，导致模型欠拟合。因此，本文在平衡检测效果、训练速度和训练参数量后，在本文其他实验中样本量 $n$ 设置为16。

### 3.5 消融实验

本节进行消融实验用于验证注意力引导网络、多样本决策网络、最大似然损失函数及模型关键参数对检测的影响，结果如表3所示。

表3 消融实验结果

Table 3 Results of ablation experiments

| 注意力引导网络 | 多样本决策网络 | 最大似然损失函数 | AP | 参数量 | 浮点运算次数 | 帧率/(帧·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| × | × | × | 48.8 | $36.1\times10^6$ | $204.36\times10^9$ | 16.2 |
| √ | × | × | 49.6 | $36.88\times10^6$ | $205.13\times10^9$ | 15.5 |
| × | √ | × | 50.2 | $37.35\times10^6$ | $230.91\times10^9$ | 15.6 |
| × | √ | √ | 51.3 | $37.35\times10^6$ | $230.91\times10^9$ | 15.7 |
| √ | √ | √ | 52.8 | $38.13\times10^6$ | $231.68\times10^9$ | 15.7 |

#### 3.5.1 注意力引导网络的影响

由表3可知，将注意力引导网络用于FPN后各项指标均获得提升。相比基线方法——RetinaNet方法，本文在仅加入注意力引导网络后，检测性能AP提升了0.8%。其参数量和浮点运算次数少量地增加了 $0.78\times10^6$ 和 $0.77\times10^9$，因此，本文的注意力引导网络只是少量地增加了训练参数和计算量。

图6为加入注意力引导网络前后，FPN在图像上关注点的变化情况。

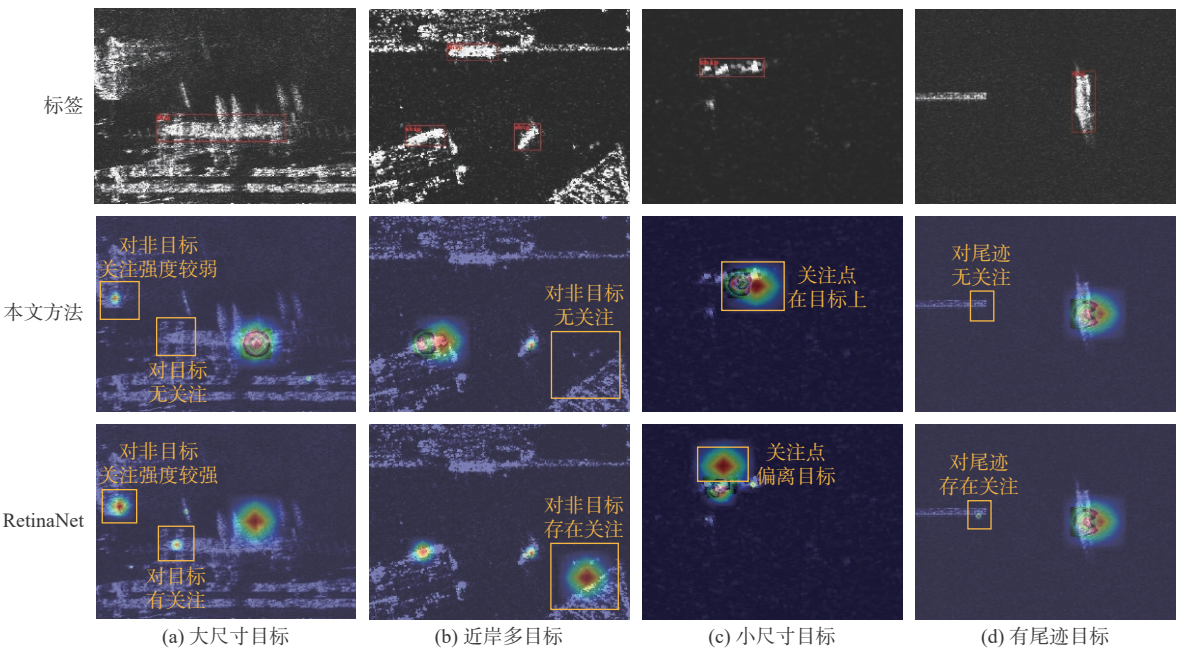



图6 本文方法与RetinaNet方法在图像上的关注点

Fig. 6 Attention of the proposed method and RetinaNet method on some images

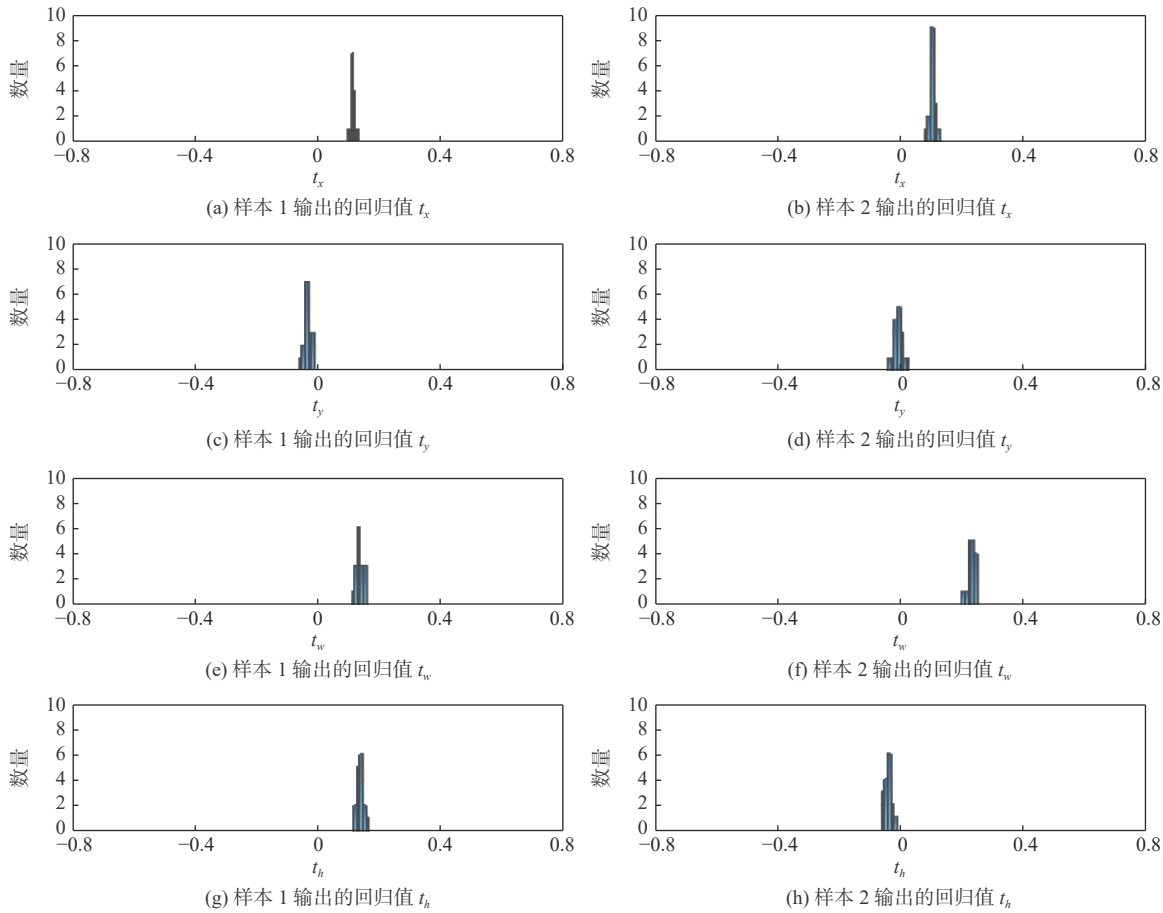
从图6可以看出，RetinaNet方法在不同场景下的关注点均存在偏差，而加入注意力引导网络后，偏差均得到改善。图6 (a)为大尺寸目标场景，加入注意力引导网络后，网络的关注点将更加集中于舰船中心，有助于提升网络对整个目标的感知；图6 (b)为近岸多目标场景，注意力引导网络抑制了网络对噪声的关注，从而提升了目标特征的表示能力；图6 (c)为小尺寸目标场景，RetinaNet方法的关注点在船体两侧，而改进后的关注点集中于船体本身；图6 (d)为尾迹目标场景，RetinaNet方法对图像中的尾迹干扰存在微弱的关注，而本文方法该关注被抑制。实验证明，本文方法能够有效地抑制噪声和背景的干扰。

#### 3.5.2 多样本决策网络和最大似然损失函数的影响

最大似然损失函数基于多样本决策网络结构，本节先讨论不采用最大似然损失函数，仅采用多样本决策网络对实验结果的影响。从表3的检测结果可以看出，将多样本决策网络用于回归分支后各项指标均获得了提升。相比RetinaNet方法，仅采用多样本决策网络提升了1.5%AP，证明了多样本决策网络的有效性。

当多样本决策网络和最大似然损失函数都被采用时，相比未采用最大似然损失函数提升了0.9%AP，证明最大似然损失函数能够优化多样本决策网络的训练，从而提升对舰船目标的检测性能。

为直观地理解多样本决策网络和最大似然损失函数带来的影响, 本文沿用图 2 中的实验方法和设置, 随机选择了 2 个正样本, 并对同一正样本输出的 16 个回归值进行统计分析。在同时使用本文多样本决策网络和最大似然损失函数后, 回归分支输出结果的统计图, 如图 7 所示。




(a) 样本 1 输出的回归值 $t_x$　(b) 样本 2 输出的回归值 $t_x$

(c) 样本 1 输出的回归值 $t_y$　(d) 样本 2 输出的回归值 $t_y$

(e) 样本 1 输出的回归值 $t_w$　(f) 样本 2 输出的回归值 $t_w$

(g) 样本 1 输出的回归值 $t_h$　(h) 样本 2 输出的回归值 $t_h$

图 7　多样本决策网络上 16 个输出结果的统计图

Fig. 7　Statistical graph of 16 output results on the multi-samples decision network

相较于图 2 中 RetinaNet 方法的分布状况, 由图 7 可以看出, 经过本文方法改进后, 模型的回归输出结果更加集中于真实标签, 证明本文方法能够有效地降低模型的预测误差, 从而提升定位的准确性。

### 3.5.3　特征金字塔输出特征通道数的影响

为进一步研究特征金字塔输出特征的通道数对检测性能的影响, 本文分别对不同通道数的输出特征进行实验, 并比较实验结果如表 4 所示。

**表 4　特征金字塔输出通道数对检测性能的影响**

**Table 4　Influence of the number of output channels of feature pyramid on the detection performance**

| 输出通道数 | AP | 参数量 | 浮点运算次数 |
|---|---|---|---|
| 64 | 52.2 | $30.02\times10^6$ | $196.71\times10^9$ |
| 128 | 48.3 | $32.17\times10^6$ | $206.55\times10^9$ |
| 256 | 52.8 | $37.35\times10^6$ | $230.91\times10^9$ |
| 512 | 52 | $51.24\times10^6$ | $298.26\times10^9$ |

通常, 在研究通用光学目标检测器时, 特征金字塔输出的通道数设置为 256, 但该设置在检测 SAR 成像下的舰船可能并不是最优的。因此, 本文将输出特征的通道数分别设置为 64、128、256、512, 并进行实验。由表 4 可知, 随着通道数的不断增加, 训练参数量、浮点运算次数不断增加, 表示训练效率下降, 检测精度 AP 并没有随之提高。同时, 当输出通道数为 256 时, 检测精度 AP 达到最高的 52.8。

注意到, 当通道数为 64 时, 检测精度 AP 为 52.2, 相比最高 AP(52.8)低 0.6, 但是训练参数量减少了 7.33 ×$10^6$、浮点运算次数减少了 34.2 ×$10^9$。综合而言, 通道数为 64 能够更好地平衡性能和负载。

### 3.5.4　检测头卷积层数的影响

典型的检测头在分类和回归分支上进行 4 层卷积, 为获得最佳的检测性能, 本文继续研究检测头中多层卷积对检测性能的影响。本文分别构造了不同数量卷积的检测头进行实验, 并比较实验结果, 如表 5 所示。

表5 检测头卷积层数对检测性能的影响

Table 5 Influence of convolution layer number of detection head on detection performance

| 检测头卷积层数 | AP | 参数量 | 浮点运算次数 |
|---|---|---|---|
| 1 | 53.7 | $33.81\times10^6$ | $155.36\times10^9$ |
| 2 | 53.6 | $34.99\times10^6$ | $180.54\times10^9$ |
| 3 | 52.6 | $36.17\times10^6$ | $205.73\times10^9$ |
| 4 | 52.8 | $37.35\times10^6$ | $230.91\times10^9$ |

由表5可知，卷积层数为1的检测精度AP最高，相比4层卷积的典型检测头结构提升了0.8AP，同时参数量减少$3.54\times10^6$、浮点运算次数减少$75.55\times10^9$。同时，还可以发现，卷积层数为1和2的检测精度AP明显高于卷积层数为3和4的。

### 3.6 与基线方法的比较

本节比较本文方法和RetinaNet方法的差异，在不同骨干网络、训练策略下，2种方法的实验结果如表6所示。

从表6的结果可以看出，在1×训练策略下，相较于RetinaNet+ResNet-50，本文方法+ResNet-50提升了4.0% AP，并且其他评价指标AP50、AP75、APS、APM、APL均得到显著的提升。在小舰船目标的检测上，APS显著提升了4.5%；在2×训练策略下，相较于RetinaNet方法，本文方法+ResNet-50在所有评价指标都出现显著的提升，其中AP、AP75和APS分别提升了3.4%、9.0%和3.9%。

表6 消融实验结果

Table 6 Results of ablation experiments

| 方法 | 骨干网络类型 | 训练策略 | AP | AP50 | AP75 | APS | APM | APL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RetinaNet | ResNet-50 | 1× | 48.8 | 86.7 | 49.5 | 46.2 | 56 | 31.2 |
| RetinaNet | ResNet-50 | 2× | 53.8 | 91.5 | 58.1 | 49.6 | 63 | 38.6 |
| RetinaNet | ResNet-101 | 1× | 48.9 | 88.3 | 48.7 | 45.7 | 56.3 | 33.3 |
| RetinaNet | ResNet-101 | 2× | 53.8 | 91.7 | 58.6 | 48.9 | 63.5 | 46.0 |
| 本文方法 | ResNet-50 | 1× | 52.8 | 89.4 | 57.2 | 50.7 | 58.9 | 41.1 |
| 本文方法 | ResNet-50 | 2× | 57.2 | 91.8 | 67.1 | 53.5 | 65.4 | 58.8 |
| 本文方法 | ResNet-101 | 1× | 54.6 | 89.5 | 61.8 | 51.3 | 62.0 | 49.9 |
| 本文方法 | ResNet-101 | 2× | 57.5 | 93.1 | 64.1 | 53.3 | 65.6 | 60.3 |

在1×训练策略下，相较于RetinaNet+ResNet-101，本文方法+ResNet-101提升了5.7% AP，并且其他评价指标也均得到显著的提升。同时在2×训练策略下，本文方法也超过了RetinaNet方法。实验证明，本文方法不仅能够较好地弥补RetinaNet方法的不足，还能大幅提升检测性能。

图8为以ResNet-50为骨干网络，RetinaNet方法和本文方法在SSDD数据集[26]上部分图像的检测结果。在图8(a)离岸小目标的场景下，RetinaNet方法未检测出图像中的小目标，而本文方法能够检测出来；在图8(b)离岸大目标的场景下，RetinaNet方法出现重复检测，而本文方法则能够正确检测；在图8(c)近岸密集目标的场景下，RetinaNet方法出现多种检测问题，如重复检测和错误检测，虽然本文方法也出现了误检，但避免了重复检测；在图8(e)模糊目标的场景下，RetinaNet方法出现重复检测，而本文方法正确检测。在不同场景下，相比RetinaNet方法，本文方法的检测效果最佳。

### 3.7 与其他先进方法的比较

为验证本文方法的先进性，本文在SSDD数据集[26]上将本文方法与先进的检测方法FoveaBox[28]、NAS-FCOS、ATSS[29]、GFL[30]、PISA[31]和PAA[32]进行性能比较，结果如表7所示。

从综合的检测性能来看，本文方法的AP达到了52.8%，帧率为15.7帧/s。PAA方法在待对比方法中表现出最好的检测性能，AP评价指标为52.7%，帧率为9.9帧/s。相比于PAA方法，本文方法领先0.1% AP，帧率快了5.8帧/s，所以在检测精度上两者之间几乎相同，但本文方法具有更快的检测速度；相较于ATSS方法，本文方法的AP领先了0.4%，而帧率仅慢了0.1帧/s，所以在检测速度上两者几乎相同，但本文方法具有更高的检测精度；相比于GFL方法，本文方法的帧率低了1.1帧/s，但AP提高了9.2%，虽然本文方法的检测速度落后，但检测精度显著领先；相较于其他先进方法，本文方法在综合检测性能上均具有明显的优势。因此，实验结果表明，本文方法在综合检测性能上具有先进性。

从个别的检测指标来看，相较于其他先进方法，本文方法虽然仅在APL上实现了最高的41.1%，但AP50、AP75、APS、APM的结果在所有方法中都均排名第2，性能表现良好。而部分先进算法只在个别指标上表现出较好的性能，如ATSS方法在AP75上表现为最高的58.5%，但在APM的结果排名第4；PAA方法在AP50上表现出最高的92.0%，但在AP75的结果排名第4。因此，综合所有评价指标可知，本文方法对多种尺寸目标的综合检测能力最优越。

从训练参数和计算量上来看，虽然本文方法在训练参数和计算量出现增加，但是结合检测性能的提升幅度来看，本文方法在检测性能和模型负担两方面上取得了不错的平衡。

由图8可知，在图8(a)离岸小目标的场景下，表5中仅次于本文方法的ATSS方法出现漏检，而本文方法正确检测出小目标；在图8(b)离岸大目标的场景下，GFL、PAA等方法均出现重复检测，而本文方法正确检测；在图8(c)近岸密集目标的场景

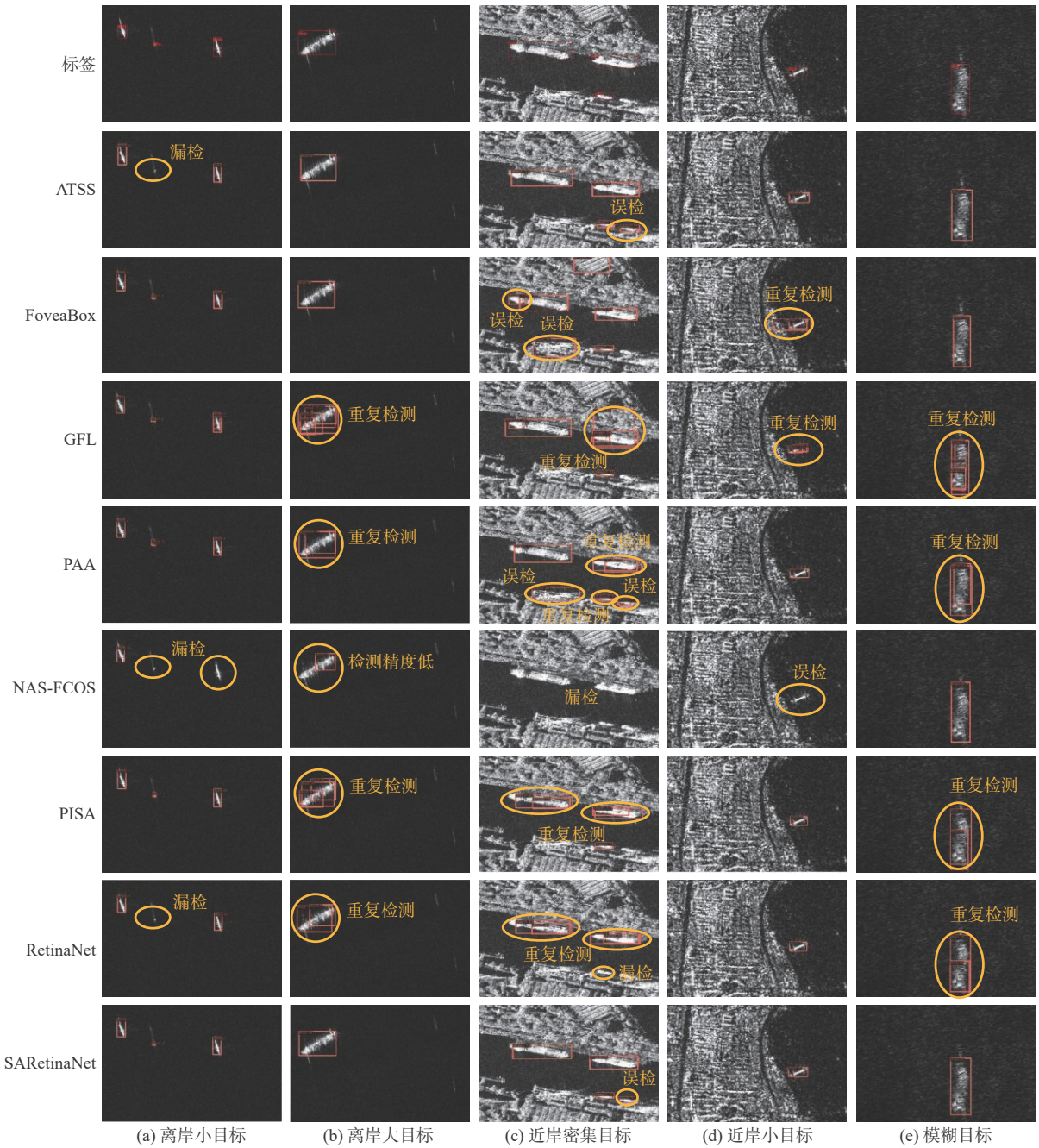



图 8　不同方法的检测结果

Fig. 8　Results of different methods

**表 7　不同检测方法的对比**

**Table 7　Comparison of different detection methods**

| 方法 | 骨干网络类型 | 训练策略 | AP | AP50 | AP75 | APS | APM | APL | 参数量 | 浮点运算次数 | 帧率/(帧·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FoveaBox | ResNet-50 | 1× | 50.0 | 88.0 | 52.9 | 49.0 | 54.3 | 33.5 | $36.01\times10^6$ | $202.39\times10^9$ | 11.4 |
| NAS-FCOS | ResNet-50 | 1× | 46.1 | 84.7 | 47.5 | 47 | 46.9 | 34.5 | $38.66\times10^6$ | $191.81\times10^9$ | 15.3 |
| ATSS | ResNet-50 | 1× | 52.4 | 89.3 | 58.5 | 52 | 56.6 | 36.8 | $31.89\times10^6$ | $201.33\times10^9$ | 15.6 |
| GFL | ResNet-50 | 1× | 43.6 | 80.1 | 44.3 | 45 | 43.2 | 34 | $32.03\times10^6$ | $204.42\times10^9$ | 16.8 |
| PISA | ResNet-50 | 1× | 50.6 | 88.3 | 56.0 | 47.8 | 57.2 | 29.8 | $36.1\times10^6$ | $204.36\times10^9$ | 16.1 |
| PAA | ResNet-50 | 1× | 52.7 | 92.0 | 55.0 | 49 | 61.4 | 37 | $31.89\times10^6$ | $201.33\times10^9$ | 9.9 |
| RetinaNet | ResNet-50 | 1× | 48.8 | 86.7 | 49.5 | 46.2 | 56 | 31.2 | $36.1\times10^6$ | $204.36\times10^9$ | 16.2 |
| 本文方法 | ResNet-50 | 1× | 52.8 | 89.4 | 57.2 | 50.7 | 58.9 | 41.1 | $38.13\times10^6$ | $231.68\times10^9$ | 15.7 |

下, 本文方法虽然将背景误检为小目标, 但是其他先进算法均表现出检测错误, 且错误更加明显; 在图 8(d) 近岸小目标的场景下, 多种方法也出现重复检测, 本文方法能够正确检测; 在图 8(e) 模糊目标

的场景下，模糊目标无法有效地确定边界，因此，多种方法出现重复检测，而本文方法正确检测，综合不同场景下的检测结果，本文方法的检测效果最佳。

## 4 结 论

针对SAR舰船检测问题，本文基于单阶段目标检测方法，提出一种基于注意力引导和多样本决策的检测方法，该方法的优势有：

1）对于注意力引导网络，本文通过消融实验证明了该网络能够有效地抑制噪声信息，强化目标特征信息，从而提高了图像特征的表达能力。

2）对于多分支决策网络，本文经过理论分析和广泛实验，并通过可视化回归输出结果统计图，验证了该网络降低了预测误差，能够提升检测模型的预测精度。

3）对于最大似然损失函数，实验证明该损失能够有效地优化多分支决策网络的训练，使多分支决策网络的功能得以实现。

4）在SSDD数据集上的检测结果表明，本文方法在仅增加少量训练参数的情况下，大幅提升了RetinaNet方法的检测性能。相比于其他先进方法，本文方法也具有更好的准确性。另外，本文方法在其他计算机视觉任务上的应用也是值得探索的。

在未来的研究中，将进一步研究本文方法在其他单阶段目标检测，以及在其他图像中的应用，希望能发挥更好的检测性能。

### 参考文献（References）


[1] DU L, DAI H, WANG Y, et al. Target discrimination based on weakly supervised learning for high-resolution SAR images in complex scenes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(1): 461-472.

[2] SHAHZAD M, MAURER M, FRAUNDORFER F, et al. Buildings detection in VHR SAR images using fully convolution neural networks[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(2): 1100-1116.

[3] HUANG L Q, LIU B, LI B Y, et al. OpenSARShip: A dataset dedicated to sentinel-1 ship interpretation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(1): 195-208.

[4] ZHANG Z M, WANG H P, XU F, et al. Complex-valued convolutional neural network and its application in polarimetric SAR image classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(12): 7177-7188.

[5] YANG G, LI H C, YANG W, et al. Unsupervised change detection of SAR images based on variational multivariate Gaussian mixture model and Shannon entropy[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(5): 826-830.

[6] GIERULL C H. Demystifying the capability of sublook correlation techniques for vessel detection in SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(4): 2031-2042.

[7] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot MultiBox detector[C]//European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2016: 21-37.

[8] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2999-3007.

[9] TIAN Z, SHEN C H, CHEN H, et al. FCOS: Fully convolutional one-stage object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 9626-9635.

[10] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 770-778.

[11] HUANG G, LIU Z, VAN DER MAATEN L, et al. Densely connected convolutional networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2261-2269.

[12] 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.

[13] XIE S N, GIRSHICK R, DOLLÁR P, et al. Aggregated residual transformations for deep neural networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 5987-5995.

[14] 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.

[15] 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.

[16] GHIASI G, LIN T Y, LE Q V. NAS-FPN: Learning scalable feature pyramid architecture for object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 7029-7038.

[17] SHELHAMER E, LONG J, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Piscataway: IEEE Press, 2017: 640-651.

[18] DAI X Y, CHEN Y P, XIAO B, et al. Dynamic head: Unifying object detection heads with attentions[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 7369-7378.

[19] 李晨瑄, 顾佼佼, 王磊, 等. 多尺度特征融合的Anchor-Free轻量化舰船要害部位检测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(10): 2006-2019.
LI C X, GU J J, WANG L, et al. Warship' s vital parts detection algorithm based on lightweight Anchor-Free network with multi-scale feature fusion[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(10): 2006-2019(in Chinese).

[20] 张晓玲, 张天文, 师君, 等. 基于深度分离卷积神经网络的高速高精度SAR舰船检测[J]. 雷达学报, 2019, 8(6): 841-851.

ZHANG X L, ZHANG T W, SHI J, et al. High-speed and high-accurate SAR ship detection based on a depthwise separable convolution neural network[J]. Journal of Radars, 2019, 8(6): 841-851 (in Chinese).

[21] JIAO J, ZHANG Y, SUN H, et al. A densely connected end-to-end neural network for multiscale and multiscene SAR ship detection[J]. IEEE Access, 2018, 6: 20881-20892.

[22] ZHANG T W, ZHANG X L, SHI J, et al. Balanced feature pyramid network for ship detection in synthetic aperture radar images[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.

[23] CHEN S Q, ZHAN R H, WANG W, et al. Learning slimming SAR ship object detector through network pruning and knowledge distillation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 14: 1267-1282.

[24] FU J M, SUN X, WANG Z R, et al. An anchor-free method based on feature balancing and refinement network for multiscale ship detection in SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(2): 1331-1344.

[25] 张冬冬, 王春平, 付强. 基于 Anchor-Free 的光学遥感舰船关重部位检测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(4): 1365-1374.
ZHANG D D, WANG C P, FU Q. Ship's critical part detection algorithm based on Anchor-Free in optical remote sensing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(4): 1365-1374(in Chinese).

[26] ZHANG T W, ZHANG X L, LI J W, et al. SAR ship detection dataset (SSDD): Official release and comprehensive data analysis[J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3690.

[27] LIN T Y, MAIRE M, BELONGIE S, et al. Microsoft COCO: Common objects in context[M]// Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2014: 740-755.

[28] KONG T, SUN F C, LIU H P, et al. FoveaBox: Beyound anchor-based object detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 7389-7398.

[29] ZHANG S F, CHI C, YAO Y Q, et al. Bridging the gap between anchor-based and anchor-free detection via adaptive training sample selection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 9756-9765.

[30] LI X, WANG W H, WU L J, et al. Generalized focal loss: Learning qualified and distributed bounding boxes for dense object detection[EB/OL]. (2020-06-08)[2022-12-10]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.04388.

[31] CAO Y H, CHEN K, LOY C C, et al. Prime sample attention in object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 11580-11588.

[32] KIM K, LEE H S. Probabilistic anchor assignment with IoU prediction for object detection[M]// Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2020: 355-371.

# Ship detection method based on attentional guidance and multi-sample decision

LYU Yilong，GOU Yao，LI Min*，HE Yujie，XING Yuhang

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

**Abstract**: The ones-stage object detection method has the characteristics of fast training speed and short inference time. However, its feature pyramid network (FPN) cannot suppress the background and noise information of the synthetic aperture radar (SAR) ship image, and the detection head has a prediction bias. This paper proposes a detection model based on attention guidance and multi-sample decisions for SAR ship detection. Firstly, in order to improve feature representation, this study suggests adding an attentional guidance network to the top of the feature pyramid in order to decrease noise and background interference. Secondly, Multi-sample decision networks are proposed to participate in predicting ship locations. By increasing the amount of output samples in regression branches, the network reduces the impact of prediction bias on detection outcomes. Finally, a novel maximum likelihood loss function is designed. The loss function constructs the maximum likelihood function from the output samples of multiple decision networks, which is used to standardize the training of decision networks and further improve the accuracy of target positioning. Compared with RetinaNet and current advanced object detection methods, the proposed method shows higher detection accuracy on the SSDD dataset, with AP up to 54%. Compared with the baseline method, the SARetinaNet method improved the AP evaluation index by 3.4%～5.7%, the number of training parameters Params only increased by 2.03M, and the FPS only increased by 0.5iter/s.

**Keywords**: ship detection; attentional guidance; multi-sample decision; maximum likelihood loss function; one-stage detection; synthetic aperture radar

**Received**：2022-12-20；**Accepted**：2023-03-10；**Published Online**：2023-03-24 16：53

**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230323.1351.005

**Foundation item**：National Natural Science Foundation of China (62006240)

* **Corresponding author**. E-mail：limin301908@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1014

# 基于信道互易的PA-MIMO雷达目标检测性能研究

齐铖[1]，谢军伟[1]，费太勇[2]，张浩为[1,*]，杨潇[1]

(1. 空军工程大学 防空反导学院，西安 710051；2. 空军预警学院 陆基预警装备系，武汉 430019)

**摘　　要**：针对如何高效运用雷达资源管理技术提高目标检测的准确性和可靠性，构建了一种混合分布式相控阵-多输入多输出（PA-MIMO）雷达系统模型，建立了基于奈曼—皮尔逊（NP）准则的目标检测模型，以及推导了同时考虑子阵收发共用导致的信道互易性和多脉冲相参积累条件的似然比（LRT）检测器，得到了给定虚警概率下的目标检测概率。通过与相控阵雷达、单输入多输出（SIMO）雷达、多输入单输出（MISO）雷达及最优阵元配置PA-MIMO雷达的性能对比，验证了混合分布式PA-MIMO雷达系统利用子阵内信号的相关性和子阵之间信号的独立性可以同时获取相干处理增益和波形分集增益，其最大检测概率达到0.987 4，高于其他4种体制雷达，有效提高了雷达系统的目标检测性能。通过仿真分析验证了信道互易性与脉冲积累对于雷达检测性能的提升作用。

**关 键 词**：混合分布式相控阵-多输入多输出；目标检测；信道互易性；分集增益；相参增益；脉冲积累

**中图分类号**：V221$^{+}$.3; TB553

**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0214-08

随着战场环境及对空作战任务的日益复杂多样化，预警探测系统在夺取战场信息优势、支援部队作战、提高作战效能等方面的需求愈加迫切[1-3]，传统的相控阵雷达体制已经难以满足当前军事斗争需求，学者们开始寻求新的雷达体制[4]。多输入多输出(multiple input and multiple output, MIMO)雷达作为一种新的雷达范式，已成为雷达领域的研究热点[5]。

MIMO雷达通过同时在发射端和接收端应用阵列信号处理技术，赋予了每个孔径独立灵活信号发射能力，具备优越的信号检测和参数识别功能，获得了良好的空间分集、结构分集、波形分集及极化分集增益[2-3,6-8]。但与相控阵雷达相比，MIMO雷达存在一些局限，例如，MIMO雷达所发射的正交信号不具备相控阵雷达的发射信号的相干增益，因而失去了对阵元噪声及雷达截面积衰落的鲁棒性，进而会产生波束形状和信噪比(signal noise ratio, SNR)损失。同时，若直接应用MIMO雷达，现有技术无法承受巨大的硬件成本与算法运算代价[9]。

混合分布式相控阵-多输入多输出(phased array-multiple input and multiple output, PA-MIMO)雷达结合分布式MIMO雷达系统与相控阵技术，被誉为相控阵与雷达技术的惊人突破之一[10]。混合分布式PA-MIMO雷达是指在分布式MIMO雷达系统架构下，MIMO雷达的每个子阵都是由多个阵元连贯组成的相控阵雷达。其作为MIMO雷达和相控阵雷达的折衷融合的新式结构，不仅具备相控阵雷达技术为各个子阵赋予的高灵活波束指向能力，同时子阵之间发射独立正交波束以产生空间分集增益。使得混合分布式PA-MIMO雷达既继承了分布式雷达在目标探测方面的突出优势，又可通过联合相参处理站对各雷达单元的有源发射、无源接收等工作

**收稿日期**：2022-12-27；**录用日期**：2023-03-10；**网络出版时间**：2023-03-21 15:18
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230320.1429.002
**基金项目**：国家自然科学基金 (62001506)
*通信作者. E-mail：zhw_xhzf@163.com

*引用格式：齐铖，谢军伟，费太勇，等. 基于信道互易的PA-MIMO雷达目标检测性能研究[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：214-221. QI C，XIE J W，FEI T Y，et al. Research on target detection performance of PA-MIMO radar based on channel reciprocity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：214-221 (in Chinese).*

模式进行灵活调整, 进一步发挥雷达组网的整体优势, 提高雷达的目标检测能力[11]。具体的, 混合分布式 PA-MIMO 雷达的主要优势如下。

1) 具备 MIMO 雷达的所有优点, 即: 能够提高角分辨率, 探测更多的目标, 提高参数可识别性, 并扩大阵列孔径[12]。

2) 可以直接在发射端和接收端使用现有波束形成技术, 克服了技术瓶颈[13]。

3) 具备高自由度的虚拟阵列总体波束图的设计方法。

4) 通过权衡角度分辨率和抗波束形状损失的鲁棒性, 优化系统性能。

5) 强化了混合分布式 PA-MIMO 雷达系统对抗强干扰的鲁棒性[14]。

由于混合分布式 PA-MIMO 雷达工作体制的优越特点, 许多学者对其在目标探测领域的相关理论与技术进行了深入研究。文献 [15] 同时对发射机和接收机进行子阵划分, 研究并分析了天线的部署带来的优良检测性能。文献 [16] 通过调节 MIMO 子阵信号之间的相关性水平来控制发射波束的高度和宽度, 使系统获得自适应波束调控和干扰抑制能力。文献 [17-18] 研究了混合分布式 PA-MIMO 雷达中相参增益与空间分集增益对于目标检测能力的提升作用, 通过阵元重组使得子阵内部产生相参增益, 并指出单独的 MIMO 雷达或相控阵雷达都不是最优的结构。文献 [19] 提出一种分布式 MIMO 数字阵列雷达阵元优化配置方法, 通过合理分配相参增益和空间分集增益在雷达系统中的比重, 最终有效提升了检测性能。文献 [11] 同时从收发两端研究混合分布式 MIMO 雷达的最优阵元配置方案, 提出的混合分布式 PA-MIMO 雷达系统配置在目标检测性能上较其他典型雷达系统有较大提升。

然而, 已有研究仅仅停留在阵元部署对相参增益和分集增益的均衡调配, 而忽略了雷达系统部署引起的波束增益改变。此时往往通过脉冲积累弥补增益的损失[18]。另一方面, 在预警探测系统形态层面, 收发一体的分布式预警探测系统是拦截对抗探测系统发展的重要方向[20]。因此, 本文考虑收发共用导致的信道互易性及多脉冲积累对于混合分布式 PA-MIMO 雷达检测性能的作用, 研究阵元部署策略对于其目标检测能力的影响, 分析雷达系统的结构特性。

## 1　混合分布式 PA-MIMO 雷达信号模型

混合分布式 PA-MIMO 雷达系统结构如图 1 所示, 混合分布式 PA-MIMO 雷达系统在 $xOy$ 平面内包含着 $Q=M\times N$ 个收发共用的相控阵雷达子阵, 并且其子阵间隔为半波长, 满足雷达系统空间分集条件。特别的, 雷达系统各个子阵内部的阵元发射相同的波形形成灵活的波束指向, 通过阵元之间的相参增益提高系统信噪比; 同时, 子阵之间则根据发射端相互独立的正交波形对接收目标回波信号进行分离, 利用由此产生的分集增益提升系统检测性能。

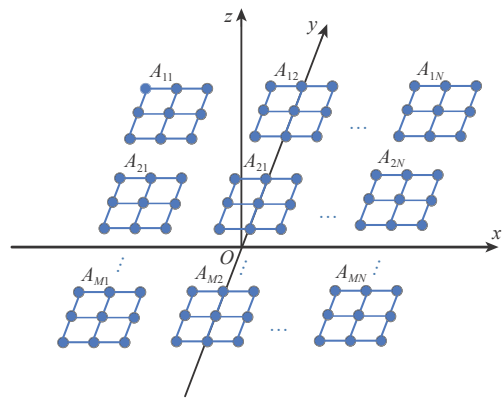



图 1　混合分布式 PA-MIMO 雷达系统结构

Fig. 1　Structure of hybrid distributed PA-MIMO radar system

假设在观测期间目标雷达截面积(radar cross section, RCS)服从 Swerling Ⅰ型起伏模型, 在雷达系统波束驻留期间, 目标匀速运动且不出现跨距离单元现象。其与雷达系统各子阵间满足远场条件且子阵之间的距离远小于目标距离 $R$, $Q$ 个子阵发射正交信号并接收来自目标的回波信号。根据雷达方程和 MIMO 雷达信号模型, 混合分布式 PA-MIMO 雷达信号由第 $m$ 个子阵发射经过目标散射后被第 $n$ 个子阵接收到的目标回波 $r_{mn}(t)$ 表示为[10]

$$r_{mn}(t)=\sqrt{\frac{P_tG_{mt}G_{tn}\lambda^2}{MN(4\pi)^3R_{mt}^2R_{tn}^2L}}\sigma_{mn}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_c(t-\tau_{nm})}\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{mn}(t-\tau_{nm})}s_m(t-\tau_{mn})+n_{mn}(t) \tag{1}$$

式中: $P_t$ 为雷达系统的总发射功率; $G_{mt}$ 为发射增益; $G_{tn}$ 为接收增益; $s_m(t)$ 为第 $m$ 个阵元发射的窄带信号, 满足 MIMO 雷达正交信号条件 $\int s_m(t)s_k^*(t)\mathrm{d}t=\delta_{ml}$, $\delta_{ml}$ 为 Kronecker Delta 函数, $\|s_m(t)\|^2=1$; $L$ 为雷达系统损耗; $f_{nm}$ 为多普勒频率; $\tau_{mn}=(R_m+R_n)/c$ 表示 $m$-$n$ 信道中第 $m$ 个阵元到目标距离 $R_m$ 与目标到第 $n$ 个接收阵元的距离 $R_n$ 引起的信号时延, 恒值 $c$ 为光速; $\lambda$ 为信号波长; $\sigma_{mn}$ 为信道对应的 Swerling Ⅰ型目标散射系数, 也即其均值为 0, 方差为 $\sigma^2$ 的复高斯分布变量; $n_{nm}$ 为加性高斯白噪声。阵元收发共用条件下有 $G_{mt}=G_{tn}=G$, $R_{mt}=R_{tn}=R$。在此基础上, 第 $n$ 个子阵接收到的信号 $r_n$ 可表示为

$$r_n=\sqrt{\frac{P_tG^2\lambda^2}{(4\pi)^3R^4LQ}}\sum_{m=1}^{Q}\sigma_{mn}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\psi_m+\varphi_n)}s_m(t-\tau_{mn})+n_n(t)$$
$$n=1,2,\cdots,N \tag{2}$$

式中：$\psi_m$和$\varphi_n$为雷达系统子阵空间位置引起的相位变化；$n_n(t)$为第$n$个子阵接收到的加性高斯白噪声。

## 2 混合分布式PA-MIMO雷达基于NP准则的似然比检测模型

混合分布式PA-MIMO雷达的系统检测模型如图2所示，$Q$为收发共用的子阵个数，在类似$m$-$n$信道和$n$-$m$信道对应的对称信道中，雷达信号工作在同一频率上，2个方向上的电磁波将会经历相同的散射、反射等物理扰动，此时认为对应信道具有相同的衰落特性，即$n$-$m$信道和$m$-$n$信道之间具有信道互易性，也就是说2个信道观察到的目标散射系数是相同的[21]。

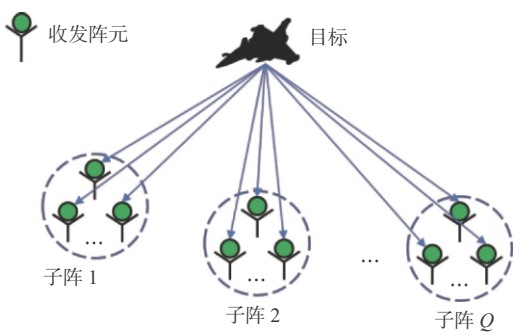



图2 混合分布式PA-MIMO雷达系统检测模型

Fig. 2 Hybrid distributed PA-MIMO radar system detection model

由于子阵的发射信号具备独立正交性质，雷达系统可接收到$Q^2$个目标回波脉冲串，$m$-$n$信道中的$K$个回波经过变频和匹配滤波之后在相应距离单元的采样值$\boldsymbol{r}_{mn}$可以近似表示为

$$\boldsymbol{r}_{mn}=\sqrt{P_t\tau/Q}\alpha_{mn}\boldsymbol{d}_{mn}+\boldsymbol{n}_{mn} \tag{3}$$

式中：$\tau$为发射脉冲宽度；$\alpha_{mn}=\sqrt{G^2\lambda^2/(4\pi)^3R^4L}\sigma_{mn}$，由中心极限定理可知系数$\alpha_{mn}$均值为0，方差为$\sigma_{\mathrm{T}}^2$的复高斯随机分布变量；$\boldsymbol{d}_{mn}=[1,\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{mn}T_{\mathrm{Pulse}}},\cdots,\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{mn}(K-1)T_{\mathrm{Pulse}}}]$，$T_{\mathrm{Pulse}}$为脉冲重复周期，$K$为一个脉冲中的回波数量；$\boldsymbol{n}_{mn}=[n_{mn}(1),n_{mn}(2),\cdots,n_{mn}(k),\cdots,n_{mn}(K)]$，$n_{mn}(k)$为方差为$\sigma_n^2$的高斯白噪声。

对于匹配滤波之后的目标回波，首先，将具有信道互易性的信道信号对应相加，再根据多普勒频移进行相参积累，对不具备互易特性的信道直接进行脉冲串的回波积累；在此基础上，将得到的$P=Q(Q+1)/2$个独立信道的目标回波信号进行非相参积累。最后，为消除各独立信道间的信号时延，对回波信号完成空间配准与包络对齐后进行似然比检测。图3为混合分布式PA-MIMO雷达的信号处理流程图。

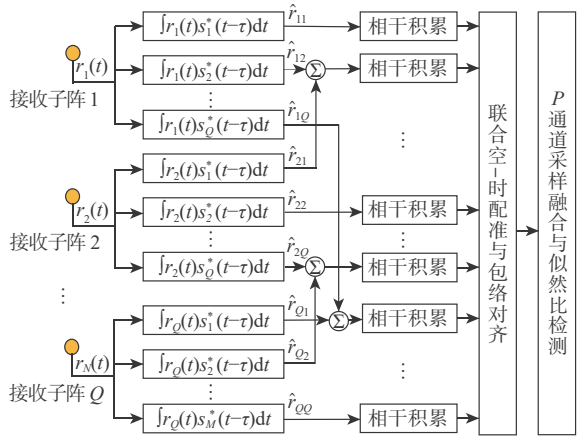



图3 信号处理流程图

Fig. 3 Signal processing flowchart

因此，根据混合分布式PA-MIMO雷达$P$个信道中存在的互易特性，首先，对$Q(Q-1)/2$个互易性信道求和后的$K$个回波进行相参积累，输出的信号可以表示为

$$X_i=\boldsymbol{r}_{mn}(\boldsymbol{d}_{mn})^{\mathrm{H}}+\boldsymbol{r}_{nm}(\boldsymbol{d}_{nm})^{\mathrm{H}}=2K\sqrt{P_t\tau/Q}\alpha_{mn}+2\boldsymbol{n}_{mn}(\boldsymbol{d}_{nm})^{\mathrm{H}}$$
$$(m>n,i=[(m-1)(m-2)/2]+n) \tag{4}$$

相应的$X_i$的信噪比为

$$\rho'=2KP_t\tau\sigma_{\mathrm{T}}^2/Q\sigma_n^2=2K\rho_0 \tag{5}$$

由此给出信道单脉冲基准信噪比$\rho_0=P_t\tau\sigma_{\mathrm{T}}^2/Q\sigma_n^2$的定义。

类似地，对不具有互易性信道1-1, 2-2, …, $Q$-$Q$等$Q$个独立信道的$K$个回波脉冲进行相参积累，其输出信号可以表示为

$$X_i=\boldsymbol{r}_{mn}(\boldsymbol{d}_{mn})^{\mathrm{H}}=K\sqrt{P_t\tau/Q}\alpha_{mn}+\boldsymbol{n}_{mn}\boldsymbol{d}_{mn}^{\mathrm{H}}\quad i=m+Q=n+Q \tag{6}$$

输出信号的信噪比为

$$\rho''=KP_t\tau\sigma_{\mathrm{T}}^2/Q\sigma_n^2=K\rho_0 \tag{7}$$

在此基础上，对相参积累后的$P$路独立回波信号进行平方律检波输出$\boldsymbol{Y}$表示为

$$\boldsymbol{Y}=[Y_1,Y_2,\cdots,Y_P] \tag{8}$$

式中：$Y_i=\left\|X_i^2\right\|^2$

由于$P$路回波信号为独立同分布复高斯随机变量，故构建假设检验，混合分布式PA-MIMO雷达的目标检测问题可以表示为：$H_0$，时延$\tau$内目标不存在；$H_1$，时延$\tau$内目标存在。

根据目标检测原理, 推导得到基于 NP 准则下的最优检测器——似然比检测器, 表达式为

$$\begin{cases} f(\boldsymbol{Y})=\prod\limits_{i=1}^{Q(Q-1)/2}\left[\dfrac{1}{2K\sigma_n^2}\exp\left(-\dfrac{Y_i}{2K\sigma_n^2}\right)\right]\cdot \\ \quad\prod\limits_{i=Q(Q-1)/2}^{P}\left[\dfrac{1}{K\sigma_n^2}\exp\left(-\dfrac{Y_i}{K\sigma_n^2}\right)\right] & H_0 \\ f(\boldsymbol{Y})=\prod\limits_{i=1}^{Q(Q-1)/2}\left[\dfrac{1}{2K\sigma_n^2(1+\rho')}\cdot\right. \\ \quad\left.\exp\left(-\dfrac{Y_i}{2K\sigma_n^2(1+\rho')}\right)\right]\cdot \\ \quad\prod\limits_{i=Q(Q-1)/2}^{P}\left[\dfrac{1}{K\sigma_n^2(1+\rho'')}\exp\left(-\dfrac{Y_i}{K\sigma_n^2(1+\rho'')}\right)\right] & H_1 \end{cases} \tag{9}$$

由此获得对数似然比函数:

$$\begin{aligned}\ln\left(\frac{f(\boldsymbol{Y}|H_1)}{f(\boldsymbol{Y}|H_0)}\right)=&\sum_{i=1}^{Q(Q-1)/2}\ln\left(\frac{1}{(1+\rho')}\right)+\\ &\sum_{i=1}^{Q(Q-1)/2}\ln\left(\frac{\rho' Y_i}{2K\sigma_n^2(1+\rho')}\right)+\sum_{i=Q(Q-1)/2}^{P}\ln\left(\frac{1}{(1+\rho'')}\right)+\\ &\sum_{i=Q(Q-1)/2}^{P}\ln\left(\frac{\rho'' Y_i}{K\sigma_n^2(1+\rho'')}\right)\end{aligned} \tag{10}$$

因此, 混合分布式 PA-MIMO 雷达的检验统计量 $T$ 为

$$\begin{aligned}T=\ln\left(\frac{f(\boldsymbol{Y}|H_1)}{f(\boldsymbol{Y}|H_0)}\right)=&\sum_{i=1}^{Q(Q-1)/2}\ln\left(\frac{\rho' Y_i}{2K\sigma_n^2(1+\rho')}\right)+\\ &\sum_{i=Q(Q-1)/2}^{P}\ln\left(\frac{\rho'' Y_i}{K\sigma_n^2(1+\rho'')}\right)\begin{cases}\geqslant\eta & H_1\\ <\eta & H_0\end{cases}\end{aligned} \tag{11}$$

式中: $\eta$为由检测门限决定的定值。为进一步分析检验统计量的数理分布特征, 通过剥离式 (12) 中的通道信噪比等定常参数与目标回波波动变量, 得到在备择假设$H_0$条件下具备信道互易性的$Q(Q-1)/2$个信号对应的检验统计量为

$$\begin{cases}\omega_i'=\rho'/[(1+\rho')]\,;R_i'=2Y_i/2K\sigma_n^2\\ i=1,2,\cdots,Q(Q-1)/2\\ \omega_i'=\rho''/2[(1+\rho'')]\,;R_i'=2Y_i/K\sigma_n^2\\ i=Q(Q-1)/2,\cdots,P\end{cases} \tag{12}$$

则雷达系统的检验统计量可表示为

$$T|H_0=\sum_{i=1}^{P}\omega_i' R_i' \tag{13}$$

式中: $R_i'$服从自由度为 2 的$\chi^2$分布, 也即指数分布。$T|H_0$作为独立同分布的指数分布随机变量的加权和, 其近似服从于伽马分布:

$$T|H_0\sim\Gamma(\alpha_0,\beta_0) \tag{14}$$

式中: $\alpha_0$为尺度参数; $\beta_0$为逆尺度参数, 可表示为

$$\begin{cases}\alpha_0=\left(\sum\limits_{i=1}^{P}\omega_i'\right)^2\Big/\sum\limits_{i=1}^{P}(\omega_i')^2\\ \beta_0=2\sum\limits_{i=1}^{P}(\omega_i')^2\Big/\sum\limits_{i=1}^{P}\omega_i'\end{cases} \tag{15}$$

另一方面, 在原假设$H_1$条件下:

$$\begin{cases}\omega_i''=\rho'/2\,;R_i''=2\rho'/[2K\sigma_n^2(1+\rho')]\\ i=1,2,\cdots,Q(Q-1)/2\\ \omega_i''=\rho''/2\,;R_i''=2\rho''/[K\sigma_n^2(1+\rho'')]\\ i=Q(Q-1)/2,\cdots,P\end{cases} \tag{16}$$

式中: $R_i''$为服从自由度为 2 的$\chi^2$分布, 则检验统计量可表示为

$$T|H_1=\sum_{i=1}^{P}\omega_i'' R_i''\sim\Gamma(\alpha_1,\beta_1) \tag{17}$$

其中:

$$\begin{cases}\alpha_1=\left(\sum\limits_{i=1}^{P}\omega_i'\right)^2\Big/\sum\limits_{i=1}^{P}(\omega_i')^2\\ \beta_1=2\sum\limits_{i=1}^{P}(\omega_i')^2\Big/\sum\limits_{i=1}^{P}\omega_i'\end{cases} \tag{18}$$

至此, 综合考虑式 (14)、式 (18), 得到混合分布式 PA-MIMO 雷达系统的似然比检测器:

$$T\sim\begin{cases}\Gamma(\alpha_0,\beta_0) & H_0\\ \Gamma(\alpha_1,\beta_1) & H_1\end{cases} \tag{19}$$

进一步可得混合分布式 PA-MIMO 雷达在给定虚警概率$P_{\mathrm{fa}}$下的目标检测概率为

$$P_{\mathrm{d}}=1-F_{\Gamma(\alpha_1,\beta_1)}(F^{-1}_{\Gamma(\alpha_0,\beta_0)}(1-P_{\mathrm{fa}})) \tag{20}$$

式中: $F^{-1}_{\Gamma(\cdot)}(\cdot)$为$\Gamma(\cdot)$的反积累函数。

根据雷达系统阵元配置方案与脉冲积累数量, 本文混合分布式 PA-MIMO 雷达系统可以退化为 4 种典型雷达系统:

1) 当每个单独阵元作为一个子阵并进行单脉冲检测时, 混合分布式 PA-MIMO 雷达退化为具有 $Q$ 个独立信道的单脉冲检测 MIMO 雷达系统($Q$ single pulse detection MIMO, QS-MIMO):

$$P_{\mathrm{d|QS\text{-}MIMO}}=1-F_{\chi^2_{(2Q^2)}}\left(\frac{1}{1+\rho_0}F^{-1}_{\chi^2_{(2Q^2)}}(1-P_{\mathrm{fa}})\right) \tag{21}$$

2) 当所有的阵元不进行划分配置成为一个单基地相控阵, 并进行单脉冲检测时, 混合分布式 PA-MIMO 雷达退化为单脉冲检测相控阵雷达系统($Q$ single pulse detection PA, QS-PA):

$$P_{\mathrm{d|QS\text{-}PA}}=1-F_{\chi^2_{(2)}}\left(\frac{1}{1+Q^3\rho_0}F^{-1}_{\chi^2_{(2)}}(1-P_{\mathrm{fa}})\right) \tag{22}$$

3) 当 QS-MIMO 考虑回波脉冲数为 $K$ 的脉冲积累时, 组成具有 $Q$ 个独立信道的 $K$ 脉冲检测 MIMO

雷达系统($Q$ $K$ pulses detection MIMO, QK-MIMO):

$$P_{\mathrm{d|QK\text{-}MIMO}}=1-F_{\chi^2_{(2Q^2)}}\left(\frac{1}{1+KQ\rho_0}F^{-1}_{\chi^2_{(2Q^2)}}(1-P_{\mathrm{fa}})\right) \quad (23)$$

4) 当QS-PA考虑回波脉冲数为$K$的脉冲积累时,组成$K$脉冲检测相控阵雷达系统($Q$ $K$ pulses detection PA, QK-PA):

$$P_{\mathrm{d|QS\text{-}PA}}=1-F_{\chi^2_{(2)}}\left(\frac{1}{1+KQ^3\rho_0}F^{-1}_{\chi^2_{(2)}}(1-P_{\mathrm{fa}})\right) \quad (24)$$

## 3 仿真结果及分析

为验证本文混合分布式PA-MIMO雷达系统架构的优越性能,本节分别从混合分布式PA-MIMO雷达最优检测概率及系统检测概率影响因素两方面进行对比验证,并进行相关的仿真实验和结果分析。

### 3.1 混合分布式PA-MIMO优越检测性能

本节在对比实验中分别构建相控阵雷达、多输入单输出(multiple input and single output, MISO)雷达、单输入多输出(single input and multiple output, SIMO)雷达、收发分置的PA-MIMO雷达系统,并将这4种典型雷达体制作为对照项目,比较雷达系统在检测概率上的性能表现。假定对照组中雷达系统的发射阵元数量与接收阵元数量均为100。相应地,本文混合分布式PA-MIMO雷达的收发一体阵元数量为200。首先,设定相控阵雷达对于1 000 km处RCS恒定为1 m$^2$目标的检测概率为0.80,虚警概率为$10^{-6}$,此时单个T/R通道的单脉冲基准信噪比$\hat{\rho}_0=6.091\,3\times10^7$。此外,令混合分布式PA-MIMO雷达在相同能量供给下相应的单脉冲基准信噪比$\rho_0=7.614\,2\times10^6$。

在此基础上,研究MISO雷达、SIMO雷达及混合分布式PA-MIMO雷达在不同子阵划分策略下的检测概率。表1计算并对比了典型体制雷达最大检测概率:相控阵雷达采用发射阵元数为100、接收阵元数为100的方案,其检测概率为0.80;PA-MIMO雷达按照文献[11,18]中的最优配置策略发射为100阵元的相控阵体制,接收端划分为13个子阵时检测概率最大可达0.981 2。而采用本文雷达配置方案检测性能得到了强化,在均匀划分为3个子阵时最大检测概率达到了0.987 4。

**表1 典型体制雷达最大检测概率**

**Table 1 Maximum detection probability of typical radar systems**

| 雷达 | 最优配置方案 | 检测概率 |
|---|---|---|
| 相控阵雷达 | (1,1) | 0.80 |
| MISO雷达 | (1,13) | 0.981 2 |
| SIMO雷达 | (1,1) | 0.80 |
| PA-MIMO[11,18] | (1,13) | 0.981 2 |
| 本文雷达 | 3 | 0.987 4 |

图4为MISO雷达、SIMO雷达及混合分布式PA-MIMO雷达不同阵元划分策略下的检测概率曲线。

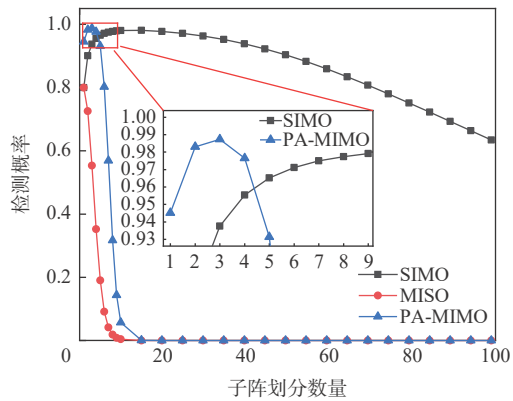



图4 典型体制雷达检测概率曲线

Fig. 4 Detection probability curves of typical radar systems

由图4仿真结果可以发现,子阵划分数量为1时构成相控阵雷达体制,此时雷达系统的检测概率为0.80。此外,MISO雷达的检测概率随着子阵划分数量的增多而衰减。相反,SIMO雷达与混合分布式PA-MIMO雷达的检测概率在划分数量较小的阶段随着子阵划分数量的增长而上升到最大值,然后,衰减至较低水平。此外,MISO雷达与混合分布式PA-MIMO雷达检测概率随分集数增长的衰减程度远大于SIMO雷达。

由此可以分析得到:①考虑MSIO曲线,发射阵元分置产生的分集增益难以弥补系统牺牲的相参增益;②考虑SIMO曲线,当接收阵元分置数不大于13时,系统分集增益与相参增益共同作用提高了检测性能;当接收阵元分置数大于13时,分置产生的分集增益难以弥补相参增益损失引起的检测性能衰减,因此,从整体上系统的检测性能呈衰减趋势。

当单信道拥有高信噪比条件时,空间分集增益对于雷达监测性能的贡献将大于相参增益,混合分布式PA-MIMO雷达与SIMO雷达的子阵划分会出现检测概率提升的情况。此时,混合PA-MIMO具备最优的检测性能,并超越其他4种典型体制雷达。

总而言之,子阵的划分本质上就是将分集增益引入相控阵体制雷达中,构建同时包含相参增益与分集增益的混合架构。虽然相参增益与分集增益均可以从不同角度提升系统的检测性能,然而科学调控2种增益协调配比,可以在不增加雷达器件数量或增加能耗的基础上一定程度上提升系统效能,

这也是雷达资源优化管理的现实落脚点。

### 3.2　混合分布式 PA-MIMO 检测性能影响因素

本节考虑信道互易和脉冲累积特性下不同子阵数量影响下的系统检测概率。按照定量分析的实验方法，分别对 QS-MIMO、QS-PA、QK-MIMO 及 QK-PA 在雷达系统不同规模和回波信号脉冲积累数量进行模拟仿真，通过对比实验分别研究雷达系统信道数和脉冲积累数对系统检测性能的影响。其中，仿真实验中的参数设置如表 2 所示。

**表 2　仿真参数设置**

**Table 2　Simulation parameter settings**

| 参数 | 仿真设定值 |
|---|---|
| 子阵数量$Q$ | 2,4,6,9 |
| 脉冲积累数$K$ | 1,10 |
| 噪声方差$\sigma_n^2$/dB | 1 |
| 虚警概率$P_{\mathrm{fa}}$ | $10^{-8}$ |

1）实验 1: 雷达系统信道影响。

实验 1 在单脉冲积累条件下混合分布式 PA-MIMO 雷达系统中的信道互易性对雷达系统目标检测能力的影响，分别设定阵元数量 $Q$ 为 2、4、6、9，分别对 5 种体制雷达进行仿真实验。

通过对比图 5 中检测概率关于基准信噪比的变化曲线，可知: 当雷达采用单脉冲检测时，MIMO 雷达与相控阵雷达相比在检测性能上的优势并不明显。分集增益对于检测性能的提升需要有一定水平的信噪比基础才可以弥补相参增益，只有当 $\rho_0$ 大于某一数值时，MIMO 雷达检测性能才能超过相控阵雷达。

另外纵向来看，阵元数越小，则信道互易性对检测概率的提升作用越明显。因此，在单脉冲积累的条件下，混合分布式 PA-MIMO 雷达具备的信道互易性可以有效提升检测性能，但 MIMO 雷达与相控阵雷达在检测概率上相比几乎不占优势。

2）实验 2: 雷达系统脉冲积累影响。

实验 2 研究多脉冲积累条件下的混合分布式 PA-MIMO 信道互易性对于雷达系统目标检测能力的影响，构建脉冲积累数 $K$ 为 10，信道数 $Q$ 分别为 2、4、6、9 的混合分布式 PA-MIMO 雷达检测模型并分析其检测性能。

通过对比图 6 中检测概率关于基准信噪比的曲线可以得到: 信道互易性进一步提高了雷达系统的检测性能。在子阵数较少和低基准信噪比的条件下，互易性信道数量较小，而脉冲积累所产生的相参增益大幅提升了雷达检测概率，因此，相控阵雷达检测概率占优。此外，随着阵元数量的增加，信道互易性对检测性能的提升作用开始显现，并且不同雷达系统检测性能差异与积累脉冲数并无关系。结合图 6 中曲线，比较不同信道数量下的仿真

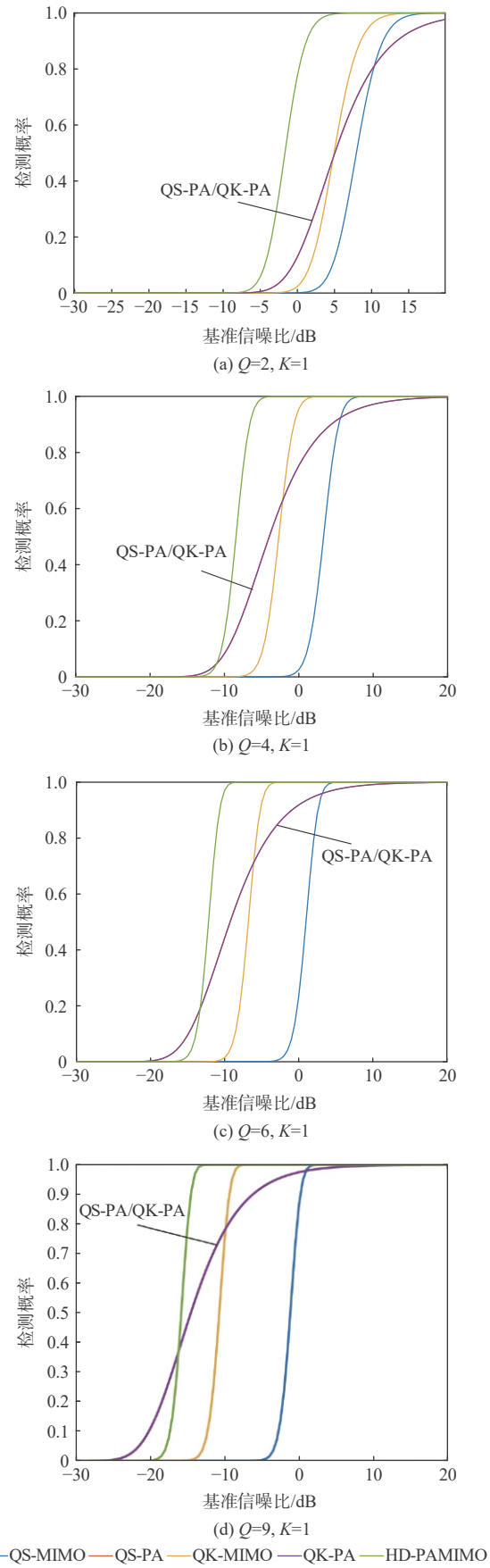



图 5　$K$=1 时，检测概率曲线

Fig. 5　Detection probability curves ($K$=1)

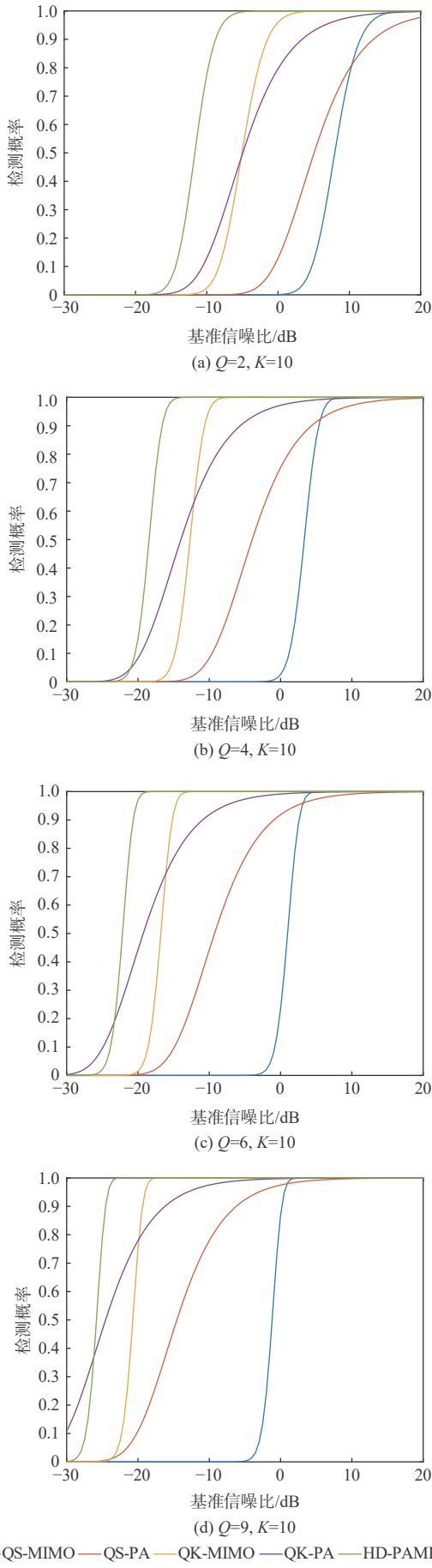



图 6 $K$=10 时，检测概率曲线

Fig. 6 Detection probability curves ($K$=10)

结果，不难得到：雷达检测性能随着信道数的增加而提升，尤其是具有信道互易性雷达系统的检测性能显著优于其他 4 种雷达系统。

综上，在独立信道数较多的情况下，空间分集增益对检测性能的贡献已经基本达到饱和，此时信道互易性恰好给系统提供了进一步利用相参增益的条件，且此时的相参增益对检测性能的贡献远大于空间分集增益对检测性能的贡献。

## 4 结 论

本文构建了一种相控阵雷达与 MIMO 雷达组合的新体制混合分布式 PA-MIMO 雷达系统，研究了具有信道互易性质与回波信号脉冲积累影响下的目标检测性能，并与 4 种典型体制雷达进行对比仿真实验。结果表明：

1）信道互易性和脉冲积累产生的相参增益及 MIMO 雷达分集增益均可以不同程度的提升检测性能。

2）单独的 MIMO 雷达分集增益需要一定的信噪比水平才可以发挥优质的检测性能。

3）而混合分布式 PA-MIMO 雷达同时占有信道互易性与脉冲积累，产生的相参积累进一步强化雷达的检测概率，使得整个检测区间的检测性能超越了相控阵雷达。

### 参考文献（References）

[1] YAN J K, JIAO H, PU W Q, et al. Radar sensor network resource allocation for fused target tracking: A brief review[J]. Information Fusion, 2022, 86: 104-115.

[2] SHI C G, WANG Y J, SALOUS S, et al. Joint transmit resource management and waveform selection strategy for target tracking in distributed phased array radar network[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2022, 58(4): 2762-2778.

[3] SHI C G, DING L T, WANG F, et al. Joint target assignment and resource optimization framework for multitarget tracking in phased array radar network[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(3): 4379-4390.

[4] BROOKNER E. Never ending Saga of phased array breakthroughs[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Piscataway: IEEE Press, 2010: 61-73.

[5] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. MIMO radar: An idea whose time has come[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Piscataway: IEEE Press, 2004, 71-78.

[6] LI J, STOICA P. MIMO radar with colocated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 106-114.

[7] HAIMOVICH A M, BLUM R S, CIMINI L J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 25(1): 116-129.

[8] ZHANG H W, LIU W J, ZHANG Z J, et al. Joint target assignment

and power allocation in multiple distributed MIMO radar networks [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(1): 694-704.

[9] HASSANIEN A, VOROBYOV S A. Why the phased-MIMO radar outperforms the phased-array and MIMO radars[C]//Proceedings of the 18th European Signal Processing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1234-1238.

[10] LIU R T, ZHANG W, YU X X, et al. Transmit-receive beamforming for distributed phased-MIMO radar system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(2): 1439-1453.

[11] 齐铖, 谢军伟, 张浩为, 等. 基于目标检测的混合分布式 PA-MIMO 雷达系统阵元优化部署 [J]. 雷达学报, 2023, (12)3: 576-589.
QI C, XIE J W, ZHANG H W, et al. Hybrid distributed PA-MIMO radar system model for improved target detection performance[J]. Journal of Radars, 2023, (12)3: 576-589(in Chinese).

[12] BERGIN J, MCNEIL S, FOMUNDAM L, et al. MIMO phased-array for SMTI radar[C]//Proceedings of the International Waveform Diversity and Design Conference. Piscataway: IEEE Press, 2009: 123.

[13] HASSANIEN A, VOROBYOV S A. Phased-MIMO radar: A tradeoff between phased-array and MIMO radars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3137-3151.

[14] EL-DIN ISMAIL N, MAHMOUD S H, HAFEZ A S, et al. A new phased MIMO radar partitioning schemes[C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-7.

[15] XU L Z, LI J. Iterative generalized-likelihood ratio test for MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(6): 2375-2385.

[16] FUHRMANN D R, BROWNING J P, RANGASWAMY M. Signaling strategies for the hybrid MIMO phased-array radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1): 66-78.

[17] XU J, DAI X Z, XIA X G, et al. Optimal transmitting diversity degree-of-freedom for statistical MIMO radar[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 437-440.

[18] XU J, DAI X Z, XIA X G, et al. Optimizations of multisite radar system with MIMO radars for target detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2329-2343.

[19] 费太勇, 谭贤四, 张堃, 等. 分布式 MIMO 数字阵列雷达阵元优化配置[J]. 现代雷达, 2017, 39(8): 22-27.
FEI T Y, TAN X S, ZHANG K, et al. Optimizations of elements configurations for distributed MIMO digital array radar[J]. Modern Radar, 2017, 39(8): 22-27(in Chinese).

[20] SHI C G, DING L T, WANG F, et al. Collaborative radar node selection and transmitter resource allocation algorithm for target tracking applications in multiple radar architectures[J]. Digital Signal Processing, 2022, 121: 103318.

[21] HE Q, BLUM R S, GODRICH H, et al. Target velocity estimation and antenna placement for MIMO radar with widely separated antennas[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1): 79-100.

# Research on target detection performance of PA-MIMO radar based on channel reciprocity

QI Cheng[1], XIE Junwei[1], FEI Taiyong[2], ZHANG Haowei[1,*], YANG Xiao[1]

(1. Air and Missile Defense College, Aire Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract**: On the issue of how to effectively utilize radar resources to improve the accuracy and reliability of target detection, proposed a hybrid distributed phased array-multiple input and multiple output (PA-MIMO) radar system model and established a target detection model based on the Neyman-Pearson (NP) criterion. The likelihood ratio (LRT) detector was derived under the condition of channel reciprocity caused by sub-array transceiver sharing and multi-pulse coherent accumulation, and the target detection probability under a given false alarm probability was obtained. On this basis, by comparing the performances of phased array radar, single input and multiple output (SIMO) radar, multiple input and single output (MISO) radar, and PA-MIMO radar with optimal array element configuration, it was verified that the hybrid distributed PA-MIMO radar system utilized the correlation of signals within sub-arrays and the independence of signals between sub-arrays to simultaneously obtain coherent processing gain and waveform diversity gain, and its maximum detection probability reached 0.987 4, which was higher than the other four radar systems, effectively improving the target detection performance of the radar system. Finally, the effect of channel reciprocity and pulse accumulation on the radar detection performance was verified by simulation analysis.

**Keywords**: PA-MIMO; target detection; channel reciprocity; diversity gain; coherent gain; pulse accumulation

**Received**: 2022-12-27; **Accepted**: 2023-03-10; **Published Online**: 2023-03-21 15:18

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230320.1429.002

**Foundation item**: National Natural Science Foundation of China (62001506)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1020

# 面向城市道路安全的ARAIM保护级优化方法

邓思瑜[1]，孙蕊[1,*]，张立东[2]，胡浩亮[2]

(1. 南京航空航天大学 民航学院，南京 211106；2. 中国航空无线电电子研究所 民航空管航空电子技术重点实验室，上海 200241)

**摘 要**：目前，以安全为导向的城市智能交通应用正不断扩展，此类应用不仅对全球卫星导航系统(GNSS)的精度有着一定的要求，同时对GNSS的完好性也提出了新的挑战。先进接收机自主完好性监测(ARAIM)技术作为一种低成本、自主性强的完好性监测算法，目前已经在空旷的航空领域受到广泛的关注，但是在城市环境的应用尚属空白，且面向航空应用空旷环境下的传统ARAIM算法对完好性风险和连续性风险分配较为简单、导致计算的保护级数值过于保守。针对上述问题，本文提出一种基于教与学(TLBO)算法的保护级优化方法，可以实现城市道路安全的完好性需求下完好性风险和连续性风险的合理分配，从而提高多星座ARAIM的可用性。车载实测数据表明，在全球定位系统(GPS)+伽利略卫星导航系统(GAL)双星座场景下，水平保护级(HPL)和垂直保护级(VPL)的平均优化率为50.58%和44.14%，10 m级告警门限(AL)对应的ARAIM可用性提高了51.29%；GPS+GAL+BDS多星座场景下，HPL和VPL的平均优化率为59.59%和56.33%，10 m级AL对应的ARAIM可用性提高了99.29%。

**关 键 词**：先进接收机自主完好性监测；垂直保护级；水平保护级；风险概率分配；教与学算法
**中图分类号**：V221+.3; TB553
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0222-13

全球卫星导航系统(global navitoin satellite sysytem, GNSS)导航服务性能分别是指完好性、连续性、精度和可用性(integrity, continuity, accuracy and availability, ICAA)[1]，ICAA最早源于航空应用中飞机精密着陆对所需导航性能的量化需求[2]。2011年4月15日美国发布的联邦无线导航计划[3]除了列举航空应用需求外，还详细规定了公路、货运、铁路等与“生命相关”行业的用户完好性等所需导航性能，GNSS完好性的概念也随着ICAA扩展到了其他行业。

GNSS完好性是对整个导航系统所提供信息正确性的置信度的测量，完好性包括系统在无法用于某些预定操作时向用户发出及时有效告警的能力，也就是对导航结果不信任时，系统能给导航用户提出警告的能力[3]。对GNSS的研究除了聚焦于导航精度的提高，对完好性的关注同样更是不可或缺。在生命安全相关领域，比精度不足更严重的是在导航结果不值得信任时未能在规定的短时间内通知用户，这直接导致用户相信了错误的导航结果而酿成安全事故的可能性。从这个意义上说，GNSS完好性监测比GNSS精度本身更加重要，更受业界关注，这也是在ICAA中将GNSS完好性作为第一个性能的原因。

随着GNSS不断发展与完善，GNSS在全球范围内的应用越来越广[4]，尤其在生命安全领域更加备受关注。长期以来，卫星定位和导航主要依靠美

**收稿日期**：2022-12-29；**录用日期**：2023-03-17；**网络出版时间**：2023-05-11 09:25
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230510.1331.003
**基金项目**：国家自然科学基金(41974033, 42174025, 42222401)；工信部民用飞机专项科研项目(MJ-2020-S-03)；欧盟地平线2020创新研究项目(875154 GreAT)；江苏省“六大人才高峰”项目(KTHY-014)；江苏省自然科学基金(BK20211569)；中央高校基本科研业务费专项资金(xcxjh20220722)
* **通信作者**. E-mail：rui.sun@nuaa.edu.cn

*引用格式：邓思瑜，孙蕊，张立东，等. 面向城市道路安全的ARAIM保护级优化方法[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：222-234. DENG S Y，SUN R，ZHANG L D，et al. Protection level optimization method of ARAIM algorithm for urban road safety[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：222-234 (in Chinese).*

国的全球定位系统 (globe positioning system, GPS) 实现。而近年来, 中国北斗三号全球卫星导航系统(即北斗三号)(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3) 也迅猛发展, 2020 年 7 月 31 日北斗三号正式开通, 为双频多星座的发展奠定了坚实的基础。在双频多星座的发展与完善下, 先进接收机自主完好性监测 (advanced receiver autonomous integrity monitoring, ARAIM) 技术被广泛研究与讨论。ARAIM 技术最早是在全球导航卫星系统进化结构研究小组 GEAS(GNSS evolutionary architecture study)[5] 的报告中被提出, 是对接收机自主完好性监测 (receiver autonomous integrity monitoring, RAIM) 技术的进一步发展, 现阶段的研究热点是将 ARAIM 技术应用于距地面 200 英尺以上垂直引导服务 (LPV-200) 中[6]。

在 ARAIM 技术中应用最多、也是 GEAS 推荐使用的多假设解分离 (multiple hypothesis solution separation, MHSS) 算法本质上是关于星座构型、风险模型、误差模型的函数。MHSS 算法通过给定的误差模型对卫星伪距进行加权, 按照假设的故障模式将所有观测到的卫星进行分组, 根据子集解与全集解的差值进行故障检测, 并在排除所有故障卫星后计算保护级别, 用以判定 ARAIM 的可用性。为了弥补单星座可用卫星数量不足导致 ARAIM 可用性较低的固有缺陷, 已有学者提出利用多星座融合来提高 ARAIM 的可用性[7-9]。文献 [10] 通过分析 ARAIM 在多星座组合下的全球可用性, 指出在现有的 GNSS 星座中, BDS 在 ARAIM 应用上具有明显的星座优势。与此同时, 基于连续性和完好性风险优化分配也是提高可用性的重要方法[11-14]。文献 [15] 通过分配完好性风险对垂直保护级 (vertical protection level, VPL) 进行优化, 提高了 ARAIM 的可用性。文献 [16] 提出了一种多项式系数优化算法, 利用高斯-牛顿法对简化的 VPL 模型进行解算, 提高了 ARAIM 的可用性。文献 [17] 通过优化分配连续性风险和完好性风险, 利用遗传算法实现了对 VPL 计算数值的优化。文献 [18] 通过 VPL 系数优化法来降低 VPL 的值, 提高 ARAIM 的可用性, 但其在风险优化分配时没有考虑到 VPL 公式中确定量的影响。文献 [19] 采用一种最大值最小化方法对完好性风险和连续性风险进行合理分配, 提高了单星座 ARAIM 的可用性。文献 [20] 基于粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法对完好性风险和连续性风险的分配策略进行优化, 有效降低了双星座 GNSS 的 VPL 值。这些改进在不同程度上优化了保护级, 但大多只利用仿真数据对全球范围内的 ARAIM 可用性进行优化研究, 降低后的保护级能否对实际定位过程中的真实定位误差进行有效包络尚需进一步研究验证; 且几乎所有上述改进都针对的是 LPV-200 的应用需求讨论 ARAIM 的可用性, 然而其他民用位置、速度、时间和姿态 (position, velocity, time and attitude, PVTA) 导航解使用用户也在期待着更高的完好性性能, 其他行业对完好性的需求及 ARAIM 在不同完好性需求下的可用性分析仍存在研究余地。因此, 目前尚未有针对城市环境下交通应用的卫星导航完好性需求分析及完好性监测算法的可用性研究。

针对上述问题, 本文面向城市道路安全的不同完好性需求, 针对传统 ARAIM 将完好性风险和连续性风险平均分配, 导致计算出的保护级数值过于保守的问题, 在理论层面对保护级方程进行推导, 提出一种基于教与学优化 (teaching-learning-based optimization, TLBO) 算法的保护级优化方法。并分别在 GPS+伽利略卫星导航系统 (Galileo satellite navigation system, GAL) 和 GPS+GAL+BDS 2 种星座场景下利用实测车载数据对所提方法进行验证分析。

## 1　ARAIM 介绍

ARAIM 架构由空间部分、地面部分和导航用户 3 部分组成[21]。相较于其他的完好性监测方式, ARAIM 对地面监测网的依赖程度更小。GEAS 在设计 ARAIM 架构时把主要的完好性监测任务分配给导航用户终端, 由接收机的故障处理算法来进行故障检测。地面监测网不需要承担实时的故障检测任务, 也无需在规定的告警时间内向用户提供告警信息, 其作用就只是保证提供给用户接收机端进行故障处理时所用的伪距精度和卫星、星座故障发生的先验概率等参数的假设是正确的、可靠的。因此, 机载接收机端的完好性监测算法设计就显得尤为重要。ARAIM 主要涉及故障处理和可用性判定 2 大部分, 故障处理的目的是从用户端检测出显著的故障卫星, 以免其影响定位的精度, 对于故障的正确探测率要求达到 99.9% 以上; 故障处理以后, 由于随机噪声等其他因素的存在, 还需进一步计算用户保护水平以直接判断定位误差是否超限。在给定的外部支持信息下面向具体的完好性需求时, 保护级的计算方法直接影响了 ARAIM 的可用性。

### 1.1　完好性支持信息

ARAIM 技术小组建议在 ARAIM 中使用完好性支持信息 (integrity support message, ISM)[22], 用户性能的好坏取决于接收机算法和 GNSS 星座部门

提供的参数性能保证。地面监测网负责播发的ISM是反映核心星座固有性能的参数,这些参数基于星座部门的承诺和星座运行的性能监测历史,用以表征卫星或星座在正常和故障状况下的伪距精度和概率。

ARAIM架构仍然处于设计之中,ISM参数的内容和播发方式也正处于讨论之中,但一般应包括表1中的参数[23]。在基准的ARAIM中,ISM中的元素都参与了故障检测的阈值确定和保护级计算的过程,因此ISM参数的数值确定直接影响了保护级的大小,从而间接影响了ARAIM最终的可用性。

**表1 ISM参数定义**

**Table 1 Definitions of ISM parameter**

| 参数 | 定义 |
|---|---|
| $P_{\mathrm{sat},i}$ | 一定时间内卫星$i$发生故障的先验概率 |
| $P_{\mathrm{const},j}$ | 一定时间内星座$j$发生故障的先验概率 |
| $\sigma_{\mathrm{URA},i}$ | 用户测距精度,用于评估完好性的高斯分布标准差 |
| $\sigma_{\mathrm{URE},i}$ | 用户测距误差,用于评估精度和连续性的高斯分布标准差 |
| $b_{\mathrm{nom},i}$ | 用于评估完好性的正常状态下最大伪距偏差 |

### 1.2 民用行业导航性能需求

随着GNSS应用领域的不断扩展,除了航空、搜救等生命安全领域,GNSS完好性问题也延伸至诸如陆地运输、海事、测绘等民用PVTA领域[24]。在分析ARAIM可用性之前,首先得了解用户对导航性能的需求。FRP2021对公路、货运、海事及测绘等民用行业应用都提出了包括完好性在内的导航服务性能要求[25]。

在GNSS用于民航应用时,由于航线已是预先设定,只是不同飞行阶段对导航的需求不同,导航性能要求是根据离散的导航阶段,即不同飞行阶段进行定义的。而根据导航阶段定义导航性能要求的方式不适用于陆地运输,这是因为陆地使用者在评估其位置时具有更大的灵活性。导航服务性能要求将根据用户使用意图、所使用运输系统的类型和用户的位置而有所不同[25]。

表2和表3分别为公路和货运用户能够满足需求的最低性能标准[25]。其中,告警限值(alert limit, AL)表征系统所允许的最大偏差限值范围,若解算结果的测距误差超过系统的告警限值则会向用户发出警报。判定ARAIM的可用性需要计算保护级(protection level, PL),若PL大于等于AL,则说明ARAIM不可用;反之,若PL小于AL,则说明ARAIM可用。可以将其分为水平方向和垂直方向两个部分,分别对应水平保护级(horizontal protection level, HPL)和垂直保护级(vertical protection level,VPL)。民航应用中在一般航路至非精密进近阶段下,只需要考虑水平方向的告警限制(horizontal alert limit, HAL),而在垂直引导和精密进近阶段还需要进一步考虑垂直方向的告警限制(vertical alert limit, VAL)。现阶段陆地运输更多是聚焦于水平方向的完好性要求。本质上,保护级别是为了告知用户卫星几何情况是否能够执行故障检测与排除功能。

**表2 公路用户的导航性能需求**

**Table 2 Navigation requirements of highway user**

| 需求 | 完好性/m | 连续性 | 精度/m | 可用性/% |
|---|---|---|---|---|
| 导航和路线引导 | 2～20 | | 1～20 | 95 |
| 自动车辆监控 | 0.2～30 | | 0.1～20 | 95 |
| 自动车辆识别 | 3 | | 1 | 99.7 |
| 公共安全 | 0.2～30 | 待定 | 0.1～30 | 95～99.7 |
| 资源管理 | 0.2～1 | | 0.005～30 | 99.7 |
| 避撞 | 0.2 | | 0.1 | 99.9 |
| 智能交通 | 0.2 | | 0.1 | 99.9 |

**表3 货运用户的导航性能需求**

**Table 3 Navigation requirements of rail user**

| 需求 | 完好性/m | 连续性 | 精度/m | 可用性/% |
|---|---|---|---|---|
| 停车场 | 50 | | 2～20 | 95 |
| 地理围栏 | 10 | | 10～20 | 99 |
| 危险品运输 | 10 | | 10～20 | 99 |
| 拖车跟踪 | 50 | 待定 | 20 | 95 |
| 沿海运输违规检查 | 10 | | 10～20 | 99 |
| 车队管理 | 50 | | 20 | 95 |
| 驾考 | 10 | | 5～20 | 99 |

表3所示的货运用户的导航性能需求基本是以货车停车场为代表的50 m和以地理围栏为代表的10 m级别[25]。因此,本文面向10 m级至50 m级的完好性告警门限,提出一种基于TLBO算法的保护级优化方法,分析星座组合和保护级优化对ARAIM可用性的影响。

## 2 基于TLBO算法的保护级优化方法

本文提出的基于TLBO算法的保护级优化方法流程图如图1所示。首先根据ISM参数和可见卫星数量确定最大故障数并构建故障子集,利用卫星的观测伪距构建各个子集的检验统计量并与对应的检验阈值进行比较。在一致性检验全部通过后,根据ARAIM保护级计算方程推导出保护级与风险分配之间的函数关系,构建优化模型。接着将TLBO算法引入到连续性风险和完好性风险的分配过程中,通过教学与学习2个阶段的相应寻优规则实现风险的优化分配,满足终止条件后输出最优保护级。

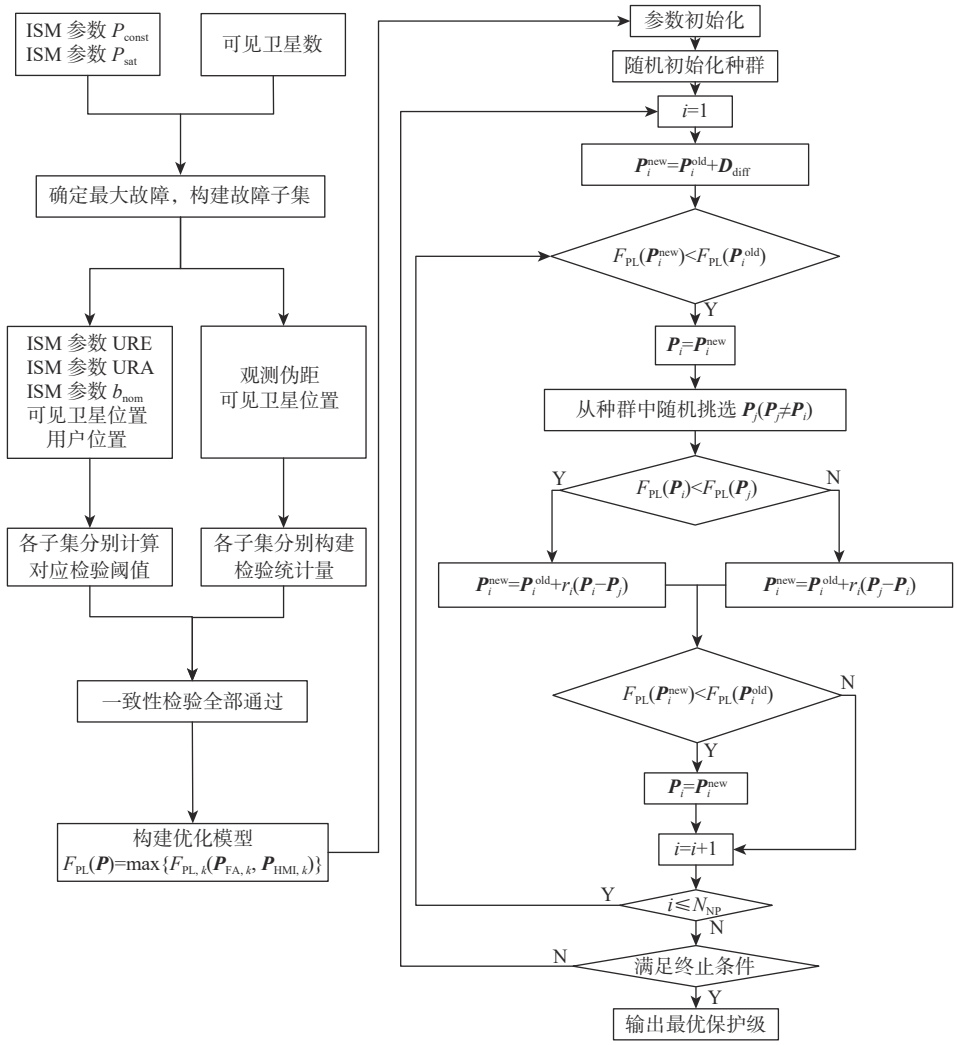



图 1　基于 TLBO 算法的保护级优化方法流程图

Fig. 1　Flow chart of TLBO algorithm-based protection level optimization method

### 2.1　ARAIM 的保护级方程

MHSS 被推荐作为 ARAIM 的基准用户算法，其核心思想是假定当前卫星中有一颗或多颗故障卫星，通过分配卫星子集使其在定位解中剔除。在所有的卫星子集中，至少存在一个具有相应完好性风险概率的无故障子集和一些具有相应完好性风险概率的容错子集，解算包括全集在内的所有子集的保护等级，取最大的子集保护等级作为用户最终的保护等级，该保护级即为定位误差的上限。

对于$N$颗 GNSS 系统可见卫星，线性化的无故障伪距观测方程为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{y}$为伪距残差；$\boldsymbol{G}$为观测矩阵；$\boldsymbol{x}$为待估参数矢量，由 3 个坐标参数和各个 GNSS 星座系统对应的接收机钟差参数组成；$\boldsymbol{\varepsilon}$为$N\times1$维伪距误差向量。

全集的加权最小二乘定位解为

$$\hat{\boldsymbol{x}}_0=\left(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}\boldsymbol{G}\right)^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}\boldsymbol{y}=\boldsymbol{S}_0\boldsymbol{y} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}$为评估完好性的矩阵；$\boldsymbol{S}_0$为无故障全集对应的位置估计矩阵。

第$k\left(k=1,2,\cdots,N_{\mathrm{fault_models}}\right)$个故障模式下容错子集的定位解为

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k=\left(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}\boldsymbol{G}\right)^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}\boldsymbol{y}=\boldsymbol{S}_k\boldsymbol{y} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{M}_i$为第$i(i=1,2,\cdots,N)$个元素为 0 的$N$维单位矩阵，用以移除第$i$颗卫星的伪距观测值；$\boldsymbol{S}_k$为第$k$个故障子集对应的位置估计矩阵。

定义第$k$个故障模式的检验统计量为

$$\Delta\hat{\boldsymbol{x}}_k=\hat{\boldsymbol{x}}_k-\hat{\boldsymbol{x}}_0=(\boldsymbol{S}_k-\boldsymbol{S}_0)\boldsymbol{y} \tag{4}$$

容错子集定位解的标准差为

$$\sigma_k^{(q)}=\sqrt{(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}\boldsymbol{G})_{q,q}^{-1}} \tag{5}$$

式中：$q=1,2,3$分别代表东、北、天 3 个方向。

无故障全集定位解的标准差为

$$\sigma_0^{(q)}=\sqrt{(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}\boldsymbol{G})_{q,q}^{-1}} \tag{6}$$

容错子集定位解与无故障全集定位解的差异，即解分离测试的标准差为

$$\sigma_{\mathrm{ss},k}^{(q)}=\sqrt{(\boldsymbol{S}_k-\boldsymbol{S}_0)\boldsymbol{C}_{\mathrm{acc}}(\boldsymbol{S}_k-\boldsymbol{S}_0)^{\mathrm{T}}} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{acc}}=\boldsymbol{W}_{\mathrm{URE}}^{-1} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{C}_{\mathrm{acc}}$为评估精度与连续性的协方差矩阵；$\boldsymbol{W}_{\mathrm{URE}}$为评估精度与连续性的矩阵。

每个故障模式都对应着东、北、天3个方向的解分离阈值统计量，故障模式$k$对应的检测门限定义为

$$T_k^{(1)}=T_k^{(2)}=K_{\mathrm{FA_HOR},k}\times\sigma_{\mathrm{ss},k}^{(1)} \tag{9}$$

$$T_k^{(3)}=K_{\mathrm{FA_VERT},k}\times\sigma_{\mathrm{ss},k}^{(3)} \tag{10}$$

式中：与连续性风险相关的$K$系数根据分配给水平方向和垂直方向2个不同方向的连续性风险预算计算。

基础的ARAIM将总的连续性风险平均分配给除无故障全集以外的各个故障子集，有

$$K_{\mathrm{FA_HOR},k}=-Q^{-1}\left(\frac{P_{\mathrm{FA_HOR}}}{4\times N_{\text{fault-models}}}\right) \tag{11}$$

$$K_{\mathrm{FA_VERT},k}=-Q^{-1}\left(\frac{P_{\mathrm{FA_VERT}}}{2\times N_{\text{fault-models}}}\right) \tag{12}$$

式中：$P_{\mathrm{FA_HOR}}$为水平方向上的连续性风险；$P_{\mathrm{FA_VERT}}$为垂直方向上的连续性风险；函数$Q^{-1}$为标准正态累积分布的逆函数。

无故障假设下，可用卫星全集对应的垂直保护级$V_{\mathrm{PL},0}$表示为

$$V_{\mathrm{PL},0}=K_{\mathrm{HMI_VERT},0}\times\sigma_0^{(3)}+\sum_{i=1}^{N}|\boldsymbol{S}_0(3,i)|\times b_{\mathrm{nom}} \tag{13}$$

式中：$b_{\mathrm{nom}}$为用于评估完好性的正常状态下最大伪距偏差，由ISM确定。

$V_{\mathrm{PL},k}$为排除了故障模式$k$对应的故障卫星后，剩余可见卫星对应的垂直保护级，表示为[19]

$$V_{\mathrm{PL},k}=T_k^{(3)}+K_{\mathrm{HMI_VERT},k}\times\sigma_k^{(3)}+\sum_{i=1}^{N}|\boldsymbol{S}_k(3,i)|\times b_{\mathrm{nom}} \tag{14}$$

式中：与完好性风险相关的$K$系数定义为

$$K_{\mathrm{HMI_VERT},0}=-Q^{-1}\left(\frac{P_{\mathrm{HMI_VERT},0}}{2}\right) \tag{15}$$

$$K_{\mathrm{HMI_VERT},k}=-Q^{-1}\left(\frac{P_{\mathrm{HMI_VERT},k}}{P_{\mathrm{prior},k}}\right) \tag{16}$$

式中：$P_{\mathrm{prior},k}$为故障模式$k$发生的先验概率。基础ARAIM将总的完好性风险平均分配给无故障模式和各个故障子集，有

$$P_{\mathrm{HMI_VERT},0}=P_{\mathrm{HMI_VERT},k}=\frac{P_{\mathrm{HMI_VERT}}}{N_{\text{fault-models}}+1} \tag{17}$$

最终取全部故障模式计算得到的最大$V_{\mathrm{PL}}$作为用户当前的垂直保护等级：

$$V_{\mathrm{PL}}=\max\left\{V_{\mathrm{PL},0},\max\left\{V_{\mathrm{PL},k}\right\}\right\} \tag{18}$$

水平保护级的计算方法与垂直保护级类似，有所区别的是水平保护水平需要先分别计算东向分量和北向分量：

$$H_{\mathrm{PL},0}^{(1)}=H_{\mathrm{PL},0}^{(2)}=K_{\mathrm{HMI_HOR},0}\times\sigma_0^{(1)}+\sum_{i=1}^{N}|\boldsymbol{S}_0(1,i)|\times b_{\mathrm{nom}} \tag{19}$$

$$H_{\mathrm{PL},k}^{(1)}=H_{\mathrm{PL},k}^{(2)}=T_k^{(1)}+K_{\mathrm{HMI_HOR},k}\times\sigma_0^{(1)}+\sum_{i=1}^{N}|\boldsymbol{S}_0(1,i)|\times b_{\mathrm{nom}} \tag{20}$$

式中：

$$K_{\mathrm{HMI_HOR},0}=-Q^{-1}\left(\frac{P_{\mathrm{HMI_HOR}}}{4\times(N_{\text{fault-models}}+1)}\right) \tag{21}$$

$$K_{\mathrm{HMI_HOR},k}=-Q^{-1}\left(\frac{P_{\mathrm{HMI_HOR}}}{2\times(N_{\text{fault-models}}+1)\times P_{\mathrm{prior},k}}\right) \tag{22}$$

东向分量和北向分量平方和的开方，即为水平保护级：

$$H_{\mathrm{PL},0}=\sqrt{\left(H_{\mathrm{PL},0}^{(1)}\right)^2+\left(H_{\mathrm{PL},0}^{(2)}\right)^2} \tag{23}$$

$$H_{\mathrm{PL},k}=\sqrt{\left(H_{\mathrm{PL},k}^{(1)}\right)^2+\left(H_{\mathrm{PL},k}^{(2)}\right)^2} \tag{24}$$

同样取全部故障模式计算得到的最大$H_{\mathrm{PL}}$作为用户当前的水平保护等级：

$$H_{\mathrm{PL}}=\max\left\{H_{\mathrm{PL},0},\max\left\{H_{\mathrm{PL},k}\right\}\right\} \tag{25}$$

由2.1节可以看出，在卫星几何构型（决定观测矩阵$\boldsymbol{G}$）和误差模型（决定加权矩阵$\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}$和$\boldsymbol{W}_{\mathrm{URE}}$）已知时，各个故障子集的保护级别为风险概率的函数，最终的保护级别由最大值函数求得。由完好性风险和连续性风险代替风险参数表示的保护级方程为

$$\begin{cases}V_{\mathrm{PL},0}=\left(-Q^{-1}\left(\dfrac{P_{\mathrm{HMI_VERT},0}}{2}\right)\right)\times\sigma_0^{(3)}+\\ \qquad\displaystyle\sum_{i=1}^{N}|\boldsymbol{S}_0(3,i)|\times b_{\mathrm{nom}}\\ V_{\mathrm{PL},k}=\left(-Q^{-1}\left(\dfrac{P_{\mathrm{FA_VERT},k}}{2}\right)\right)\times\sigma_{\mathrm{ss},k}^{(3)}+\\ \qquad\left(-Q^{-1}\left(\dfrac{P_{\mathrm{HMI_VERT},k}}{P_{\mathrm{prior},k}}\right)\right)\times\sigma_k^{(3)}+\displaystyle\sum_{i=1}^{N}|\boldsymbol{S}_k(3,i)|\times b_{\mathrm{nom}}\\ V_{\mathrm{PL}}=\max\left\{V_{\mathrm{PL},0},\max\left\{V_{\mathrm{PL},k}\right\}\right\}\end{cases} \tag{26}$$

$$\begin{cases} H_{\mathrm{PL},0} = \sqrt{2}\times\left(-Q^{-1}\left(\dfrac{P_{\mathrm{HMI_HOR},0}}{2}\right)\right)\times\sigma_0^{(1)}+ \\ \quad \sum\limits_{i=1}^{N}|\boldsymbol{S}_0(1,i)|\times b_{\mathrm{nom}} \\ H_{\mathrm{PL},k} = \sqrt{2}\times\left(-Q^{-1}\left(\dfrac{P_{\mathrm{FA_HOR},k}}{2}\right)\right)\times\sigma_{\mathrm{ss},k}^{(1)}+ \\ \quad \left(-Q^{-1}\left(\dfrac{P_{\mathrm{HMI_HOR},k}}{P_{\mathrm{prior},k}}\right)\right)\times\sigma_k^{(1)}+\sum\limits_{i=1}^{N}|\boldsymbol{S}_k(1,i)|\times b_{\mathrm{nom}} \\ H_{\mathrm{PL}} = \max\left\{H_{\mathrm{PL},0},\max\left\{H_{\mathrm{PL},k}\right\}\right\} \end{cases} \tag{27}$$

可以看出, 保护级是各个卫星子集相对应的连续风险性概率和完好性风险概率的函数, 从风险分配入手可以优化保护级的计算。选取$V_{\mathrm{PL}}$值作为优化目标, 各个故障子集分配的连续性风险和完好性风险作为优化参数, 建立优化函数为

$$\begin{cases} \min\ V_{\mathrm{PL}}\left(P_{\mathrm{FA_VERT},0},P_{\mathrm{FA_VERT},1},\cdots,P_{\mathrm{FA_VERT},N_{\text{fault-models}}},\right. \\ \quad \left.P_{\mathrm{HMI_VERT},0},P_{\mathrm{HMI_VERT},1},\cdots,P_{\mathrm{HMI_VERT},N_{\text{fault-models}}}\right) \\ \quad \text{s.t.}\begin{cases} \sum\limits_{k=0}^{N_{\text{fault-models}}}P_{\mathrm{FA_VERT},k}\leqslant P_{\mathrm{FA_VERT}} \\ \sum\limits_{k=0}^{N_{\text{fault-models}}}P_{\mathrm{HMI_VERT},k}\leqslant P_{\mathrm{HMI_VERT}} \end{cases} \end{cases} \tag{28}$$

同理, 建立$H_{\mathrm{PL}}$的优化函数为

$$\begin{cases} \min\ H_{\mathrm{PL}}\left(P_{\mathrm{FA_HOR},0},P_{\mathrm{FA_HOR},1},\cdots,P_{\mathrm{FA_HOR},N_{\text{fault-models}}},\right. \\ \quad \left.P_{\mathrm{HMI_HOR},0},P_{\mathrm{HMI_HOR},1},\cdots,P_{\mathrm{HMI_HOR},N_{\text{fault-models}}}\right) \\ \quad \text{s.t.}\begin{cases} \sum\limits_{k=0}^{N_{\text{fault-models}}}P_{\mathrm{FA_HOR},k}\leqslant P_{\mathrm{FA_HOR}} \\ \sum\limits_{k=0}^{N_{\text{fault-models}}}P_{\mathrm{HMI_HOR},k}\leqslant P_{\mathrm{HMI_HOR}} \end{cases} \end{cases} \tag{29}$$

值得说明的是, 由于连续性风险只分配给除无故障全集以外的各个故障子集, 所以$P_{\mathrm{FA_VERT},0}$和$P_{\mathrm{FA_HOR},0}$的值为 0。传统算法中将完好性风险和连续性风险平均分配给各个故障子集的方案假定各个卫星对定位误差的贡献度相同, 这种假设过于简单, 尤其是在复杂多变的城市环境, 不同卫星信号的传播误差迥异。此风险分配方式不可避免地导致保护级数值过于保守, 影响 ARAIM 的可用性。合理的风险分配策略可以减小卫星子集保护等级的最大值, 达到优化保护级的目的。因此, 需要进一步地对各个卫星子集的风险分配进行优化, 从而减少保护级数值, 提高 ARAIM 的可用性。

## 2.2　基于 TLBO 算法的优化解算

从风险分配入手的保护级优化问题, 实质上是在风险约束条件下的最优化问题。在风险非平均分配下的最优保护级计算转化成了优化解算, 本文选用 TLBO 算法进行优化解算, 主要基于以下 2 个方面考虑: 一是由于变量为概率值, 其取值可能趋近于无限小, 对无限接近于 0(数字 0)的决策变量进行求导会导致出现奇异解。选用智能优化算法能够对优化函数进行求解, 可以避免以上问题。二是相对于其他智能优化算法, TLBO 算法具有参数少、求解速度快、精度高且具有极强收敛能力的优势[26]。因此本文选用 TLBO 算法对优化方程进行求解, 适应度计算采用罚函数法。

TLBO 算法是一种通过模拟人类学习过程设计算法流程以获得全局最优解的群体智能优化算法[27]。对于优化问题$z=\min\limits_{X\in S}f(\boldsymbol{X})$, 搜索空间为$S=\left\{\boldsymbol{X}\middle|x_m^{\mathrm{L}}\leqslant x_m\leqslant x_m^{\mathrm{U}},m=1,2,\cdots,D\right\}$, 空间中任一搜索点为$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_D]$, $D$为设计变量的个数(空间的维数), $x_i^{\mathrm{L}}$和$x_i^{\mathrm{U}}$分别为每一维的上界和下界, $f(\boldsymbol{X})$为目标函数。算法中, 班级是搜索空间中所有点的集合; 学生是班级中的某一个点, $\boldsymbol{X}_i$表示第$i$个学生; 教师是班级中成绩最好的学生, 用$\boldsymbol{X}_{\mathrm{teacher}}$表示; $D$为学生学习科目数。算法分为教学和学习 2 个阶段, 教学阶段就是向教师学习, 学习阶段就是学生之间互相学习, 从而提高每个个体的学习水平。

在保护级优化问题中, 目标函数为$f(\boldsymbol{X})=F_{\mathrm{PL}}(\boldsymbol{P})$。其中, $\boldsymbol{P}=\left[P_{\mathrm{FA},0},P_{\mathrm{FA},1},\cdots,P_{\mathrm{FA},N_{\text{fault-models}}},P_{\mathrm{HMI},0},P_{\mathrm{HMI},1},\cdots,P_{\mathrm{HMI},N_{\text{fault-models}}}\right]$, 代表连续性风险和完好性风险的分配模式。变量数$D$为故障模式数目$N_{\text{fault-models}}$的 2 倍, 上下界为每种故障模式风险概率的上下限。对于随机初始化的风险分配模式, 计算每种风险分配模式得到的保护级, 对应最优保护级的风险分配模式定义为最优风险分配模式, 记为$\boldsymbol{P}_{\mathrm{teacher}}$, 即$\boldsymbol{P}_{\mathrm{teacher}}=\boldsymbol{P}_{F_{\mathrm{PL}}(\boldsymbol{P})=\min}$。

### 2.2.1　教学阶段

在教学阶段, 其余的每种风险分配模式向最优风险分配模式学习, 学习的依据是最优风险分配模式$\boldsymbol{P}_{\mathrm{teacher}}$和风险分配模式平均值$\boldsymbol{M}_{\mathrm{mean}}$之间的差异性, 教学过程为

$$\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{new}}=\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{old}}+\boldsymbol{D}_{\mathrm{diff}} \tag{30}$$

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{diff}}=r_i\times\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{teacher}}-t_{\mathrm{TF},i}\times\boldsymbol{M}_{\mathrm{mean}}\right) \tag{31}$$

式中: $\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{old}}$和$\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{new}}$分别为第$i$种风险分配模式学习前和学习后的值; $\boldsymbol{M}_{\mathrm{mean}}=(1/N_{\mathrm{NP}})\sum\limits_{i}^{N_{\mathrm{NP}}}\boldsymbol{P}_i$为所有风险分配模式的平均值; $N_{\mathrm{NP}}$为空间搜索点的个数, 即种群规模; $t_{\mathrm{TF},i}=\mathrm{round}\left[1+\mathrm{rand}(0,1)\right]$为教学因子; $r_i=\mathrm{rand}(0,1)$为随机因子, 表征学习速率。

### 2.2.2　学习阶段

在学习阶段, 第$i$种风险分配模式$\boldsymbol{P}_i(i=1,2,\cdots,N_{\mathrm{NP}})$随机选取另一种风险分配模式$\boldsymbol{P}_j(j=1,2,\cdots,N_{\mathrm{NP}},j\neq i)$,

$\boldsymbol{P}_i$通过分析和比较自己与$\boldsymbol{P}_j$之间的差异来进行学习，学习过程为

$$\boldsymbol{P}_i^{\text{new}}=\begin{cases}\boldsymbol{P}_i^{\text{old}}+r_i(\boldsymbol{P}_i-\boldsymbol{P}_j), F_{\text{PL}}(\boldsymbol{P}_i)<F_{\text{PL}}(\boldsymbol{P}_j)\\ \boldsymbol{P}_i^{\text{old}}+r_i(\boldsymbol{P}_j-\boldsymbol{P}_i), F_{\text{PL}}(\boldsymbol{P}_j)<F_{\text{PL}}(\boldsymbol{P}_i)\end{cases} \tag{32}$$

式中：$r_i=\text{rand}(0,1)$表示风险分配模式$\boldsymbol{P}_i$的随机因子。

2.2.3 算法优化步骤

根据2.1节中将各个故障子集分配的连续性风险和完好性风险作为优化参数建立的保护级优化函数，将TLBO引入到连续性风险和完好性风险的分配过程中，具体步骤如下。

**步骤1** 初始化班级：确定优化问题，设计目标函数$f(\boldsymbol{X})$。在保护级优化问题中，适应度函数为$f(\boldsymbol{X})=F_{\text{PL}}(\boldsymbol{P})$，$\boldsymbol{P}=[P_{\text{FA},0},P_{\text{FA},1},\cdots,P_{\text{FA},N_{\text{fault-models}}},P_{\text{HMI},0},P_{\text{HMI},1},\cdots,P_{\text{HMI},N_{\text{fault-models}}}]$，代表连续性风险和完好性风险的分配模式。

**步骤2** 初始化算法参数：即设计种群数目$N_{\text{NP}}$、确定变量数$D$、各变量的上下限。在此问题中，变量数$D$为故障模式数目$N_{\text{fault-models}}$的2倍。变量为概率值，因此每一维的上界$x_i^{\text{L}}$为1，下界$x_i^{\text{U}}$为0(数字0)。种群数目选取为50，最大迭代次数选取为1 000。

**步骤3** 教学阶段：计算每种风险分配模式的保护级数值，取数值最小对应的分配模式为最优风险分配模式，即$\boldsymbol{P}_{\text{teacher}}=\boldsymbol{P}_{F_{\text{PL}}(\boldsymbol{P})=\min}$。对于第$i$种风险分配模式$P_i=[P^i_{\text{FA},0},P^i_{\text{FA},1},\cdots,P^i_{\text{FA},N_{\text{fault-models}}},P^i_{\text{HMI},0},P^i_{\text{HMI},1},\cdots,P^i_{\text{HMI},N_{\text{fault-models}}}]$，根据式(30)计算$\boldsymbol{P}_i^{\text{new}}$。如果$\boldsymbol{P}_i^{\text{new}}$有更好的适应度值则接受，否则拒绝。

**步骤4** 学习阶段：随机选取第$i$种风险分配模式$\boldsymbol{P}_i$和第$j$种风险分配模式$\boldsymbol{P}_j=[P^j_{\text{FA},0},P^j_{\text{FA},1},\cdots,P^j_{\text{FA},N_{\text{fault-models}}},P^j_{\text{HMI},0},P^j_{\text{HMI},1},\cdots,P^j_{\text{HMI},N_{\text{fault-models}}}]$，根据式(32)完成相互学习，得到$\boldsymbol{P}_i^{\text{new}}$。如果$\boldsymbol{P}_i^{\text{new}}$有更好的适应度值则接受，否则拒绝。

**步骤5** 终止条件：满足终止条件则结束，否则重复步骤3。

## 3 实验验证与结果分析

### 3.1 实验设备及场景说明

为了对本文方法的性能进行验证，在江苏省南京市进行了跑车实验，实验路径如图2所示。实验所用的GNSS数据为HGuide n580 IMU/GNSS组合导航设备输出的GNSS多频数据，实验的参考轨迹由IMU/GNSS组合导航后解算得到，实验设备平台如图3所示。同时为了探讨BDS融入ARAIM应用的星座优势，本文设置了2组实验，以分析本文方法在GPS+GAL的双星座场景及GPS+GAL+BDS多星座场景下的保护级优化性能。

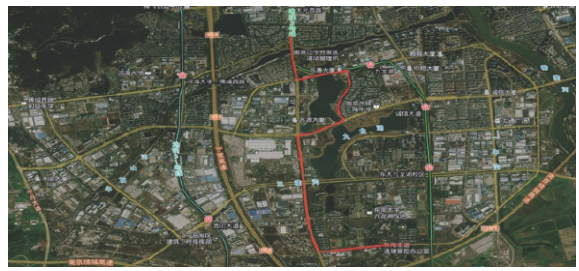


图2 实验路径图

Fig. 2 Experimental trajectory

(a) 车载设备硬件软件平台 (b) HGuide n580

图3 实验设备图

Fig. 3 Experimental equipment

根据最新的公开服务性能规范(open service performance standard, OS-PS)[28-30]，GPS、GAL、BDS官方均承诺在95%的置信度下，用户测距误差(user range error, URE)小于2.0 m，根据URE符合标准正态分布的假设，预先设定$\sigma_{\text{URE}}$值为1.0 m，推导过程为

$$\sigma_{\text{URE}}\leqslant\frac{2.0\text{ m}}{K_{95\%}}=\frac{2.0\text{ m}}{1.96}\approx 1.0\text{ m} \tag{33}$$

式中：$K_{95\%}$为正态分布的双侧95%分位数。

使用的$P_{\text{sat}}$和$P_{\text{const}}$等参数也参考了OS-PS中对$P_{\text{sat}}$和$P_{\text{const}}$的承诺值，全部ISM参数的预设值如表4所示[28-30]。完好性风险和连续性风险的要求参照民航的标准，但不同于民航更关注垂直方向的风险需求，面向城市道路安全的地表用户应当更注重水平方向的风险需求。因此水平方向和垂直方向的完好性风险取值为$P_{\text{HMI_HOR}}=9.8\times10^{-8}$和$P_{\text{HMI_VERT}}=2\times10^{-9}$；水平方向和垂直方向的连续性风险取值为$P_{\text{FA_HOR}}=3.9\times10^{-6}$和$P_{\text{FA_VERT}}=9\times10^{-7}$。

表4 ISM参数设置[28-30]

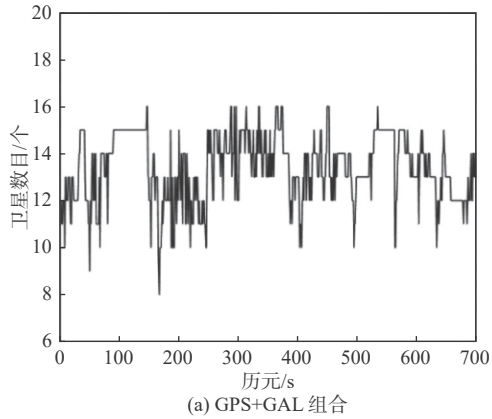
Table 4 ISM parameter setting[28-30]

| 星座 | $P_{\text{sat}}$ | $P_{\text{const}}$ | $\sigma_{\text{URE}}$ | $\sigma_{\text{URA}}$ | $b_{\text{nom}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| GPS | $1\times10^{-5}$ | $1\times10^{-8}$ | 1.0 | 1.5 | 0.75 |
| GAL | $3\times10^{-5}$ | $2\times10^{-4}$ | 1.0 | 1.5 | 0.75 |
| BDS | $1\times10^{-5}$ | $6\times10^{-5}$ | 1.0 | 1.5 | 0.75 |

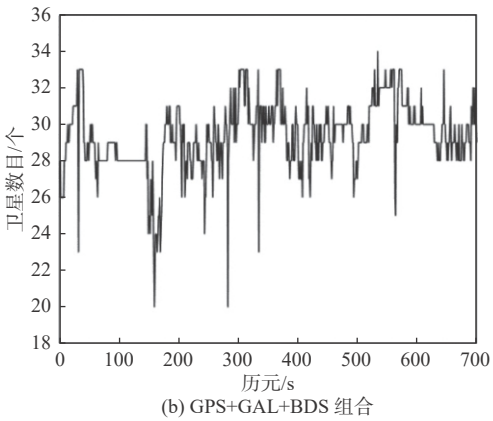
### 3.2 实验结果

实验过程共采集了700个历元的GNSS数据，图4为GPS+GAL组合和GPS+GAL+BDS组合2种星座组合模式的可见卫星数目，由于实验地点选取

了较为开阔的环境, 2 种星座组合模式在实验过程中都没有出现可用卫星不足的情况, 但 BDS 星座的加入还是能有效提高可用卫星的冗余量, 减少了由于可用卫星不足导致 ARAIM 不可用的风险。



(a) GPS+GAL 组合



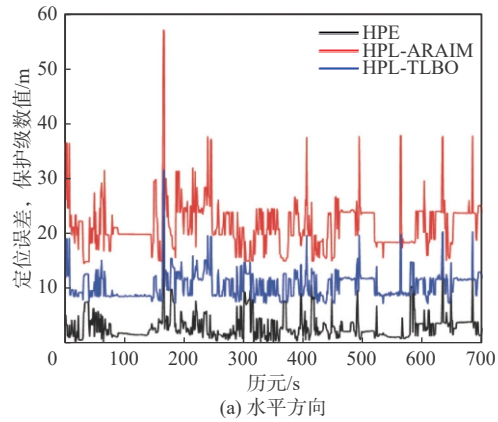
(b) GPS+GAL+BDS 组合

图 4　不同组合的可见卫星数目

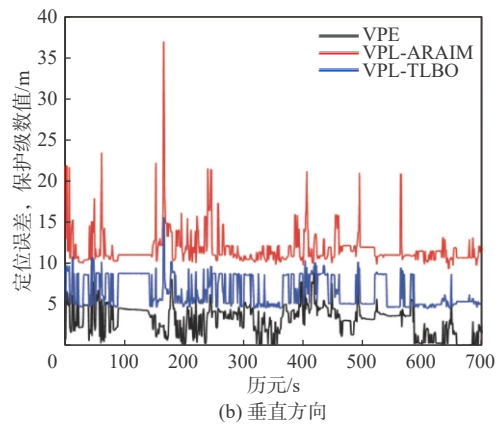
Fig. 4　Number of visible satellites for different constellation systems

图 5 为在 GPS+GAL 的星座组合模式下, 应用本文方法前后的水平和垂直方向上保护级数值及 GNSS 单点定位误差的分布情况, 其中, HPE 代表水平方向定位误差 (horizontal position error), VPE 代表垂直方向定位误差(vertical position error)。从图中可以看出, 本文方法降低了水平方向和垂直方向上的保护级数值, 并且优化后的保护级也能对定位误差进行完整包络。在 GPS+GAL 星座组合模式下, 优化前的水平保护级数值最差为 50 m 级, 优化后最差时也能达到 30 m 级。

图 6 为在 GPS+GAL+BDS 星座组合模式下, 应用本文方法前后的水平方向及垂直方向上保护级数值及 GNSS 单点定位误差的分布情况。同样地, 本文方法降低了保护级的数值, 并实现了对定位误差的完整包络。不同的是由于融合了 BDS 星座, 优化前的水平保护级数值最差就达到了 30 m 级, 优化后最差时能达到 10 m 级。可以看出由于 BDS 星座的融合增加了卫星的冗余度, 同样也能保护级



(a) 水平方向



(b) 垂直方向

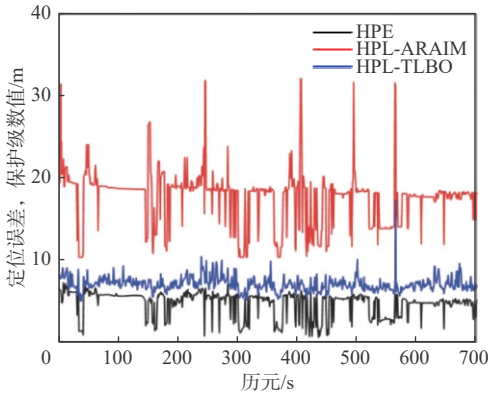
图 5　GPS+GAL 星座组合下水平和垂直方向上的定位误差及优化前后的保护级数值

Fig. 5　Positioning error and value of protection level before and after optimization in horizontal and vertical direction for GPS+GAL constellation systems

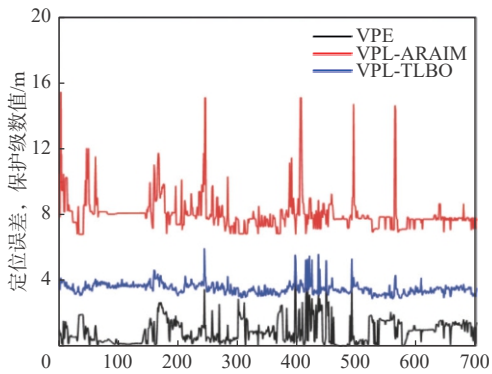
数值, 提高 ARAIM 的可用性。

表 5 将优化前后的保护级平均值进行了对比, 在 GPS+GAL 星座组合模式下, 水平保护级平均值的优化率达到了 50.58%、垂直保护级平均值的优化率为 44.14%; 在 GPS+GAL+BDS 星座组合模式下, 水平保护级平均值的优化率达到了 59.59%、垂直保护级平均值的优化率为 56.33%。

面向城市道路安全, 针对地表用户的不用应用需求, 表 6 给出了针对 10～50 m 级需求门限, 优化前后的 ARAIM 可用性对比。ARAIM 可用性以实验过程中水平保护级不超过门限值的历元数占总历元数的比率表示。从表 6 可以看出, 不管是双星座组合模式还是多星座组合模式, 本文方法都能实现 10 m 级需求门限的 ARAIM 可用性从零到有的突破, 在 GPS+GAL 星座组合模式下, 优化后的 ARAIM 可用性提高了 51.29%; 在 GPS+GAL+BDS 星座组合模式下, 优化后的 ARAIM 可用性提高了 99.29%。这是因为优化前的水平保护级数值大多为 10～20 m, 而优化后保护级数值降至 10 m 内, 因此可用性提升明显。其他需求门限下的 ARAIM




(a) 水平方向




(b) 垂直方向

图6 GPS+GAL+BDS星座组合下垂直方向上的定位误差及优化前后的保护级数值

Fig. 6 Positioning error and value of protection level before and after optimization in horizontal and vertical direction for GPS+GAL+BDS constellation systems

**表5 双星座和多星座组合下的平均保护级优化率**

**Table 5 Average protection level optimization ratios for dual and multi-constellation systems**

| 星座 | $\bar{H}_{PL}$ 优化前 | $\bar{H}_{PL}$ 优化后 | $\bar{H}_{PL}$ 优化率/% | $\bar{V}_{PL}$ 优化前 | $\bar{V}_{PL}$ 优化后 | $\bar{V}_{PL}$ 优化率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GPS+GAL | 21.49 | 10.62 | 50.58 | 11.78 | 6.58 | 44.14 |
| GPS+GAL+BDS | 17.67 | 7.14 | 59.59 | 8.06 | 3.52 | 56.33 |

可用性也都有相应提高。在GPS+GAL星座组合模式下，优化后40 m级需求门限的ARAIM能达到100%可用；在GPS+GAL+BDS星座组合模式下，优化后20 m级需求门限的ARAIM能达到100%可用。从优化机理上分析，由于本文方法在计算保护级时考虑了性能不同的卫星对于导航误差以及完好性风险的贡献比重，以计算的保护级数值最小为目标，在总的风险满足性能要求的前提下非平均分配完好性风险和连续性风险，因此能在满足所需监测风险的基础上减小保护级数值，提高ARAIM可用性。综上所述，本文方法可以降低保护级，有效提高ARAIM可用性。

同时面向基于GNSS导航服务的城市道路安全，选取一半为开阔地带一半有高大建筑物遮挡的转角道路(如图7所示)，对保护级优化结果及意义进行分析探讨。该部分的水平保护级优化结果如图8所示，平均保护级优化率如表7所示，优化率与整体水平相当，这是因为整段实验路线都选取城市里较为开阔的地区，此处也只是有明显建筑物遮挡，尚不属于严峻的城市峡谷环境。此外，不同于民航中用户的位置可以由航路预先估计，陆地运输中由用户位置导致的导航性能差异在此处用空间网格进行研究。将城市路网以六边形的蜂窝网格进行划分，不再严格区分路段、车道、方向等道路细节特征，网格大小可按照环境质量和应用需求更改[31]，这也符合陆地运输的灵活性特性。

**表6 不同应用需求门限下的ARAIM可用性提高率**

**Table 6 ARAIM availability improvement rates under different application requirements thresholds**

| 星座 | 需求门限/m | 优化前可用性/% | 优化后可用性/% | 提高率/% |
|---|---|---|---|---|
| GPS+GAL | 10 | 0.00 | 51.29 | 51.29 |
| | 20 | 47.86 | 99.14 | 51.29 |
| | 30 | 96.43 | 99.71 | 3.29 |
| | 40 | 99.57 | 100.00 | 0.43 |
| | 50 | 99.71 | 100.00 | 0.29 |
| GPS+GAL+BDS | 10 | 0.00 | 99.29 | 99.29 |
| | 20 | 88.71 | 100.00 | 11.29 |
| | 30 | 98.71 | 100.00 | 0.00 |
| | 40 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| | 50 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |

图7 实验道路转角部分

Fig. 7 Corner section of experimental road

图9和图10为优化前后城市网格中的保护级结果示意图，每个栅格中的保护级结果为落入该栅格的历元对应保护级的平均值。在建筑物遮挡部分，多星座组合可以增加可见星数目，有效增加可用于完好性监测的卫星冗余度，但与此同时局部地区可能由于建筑物遮挡和卫星位置等使可见星构型变差，总体优化效果不稳定。而本文方法由于重新合理分配了故障模式的风险概率，对较为开阔地带和遮挡地带的水平保护级优化效果都十分明显，并且对于遮挡地带的格网优化效果更好，这可能是因为TLBO算法对被建筑物反射导致多径误差较

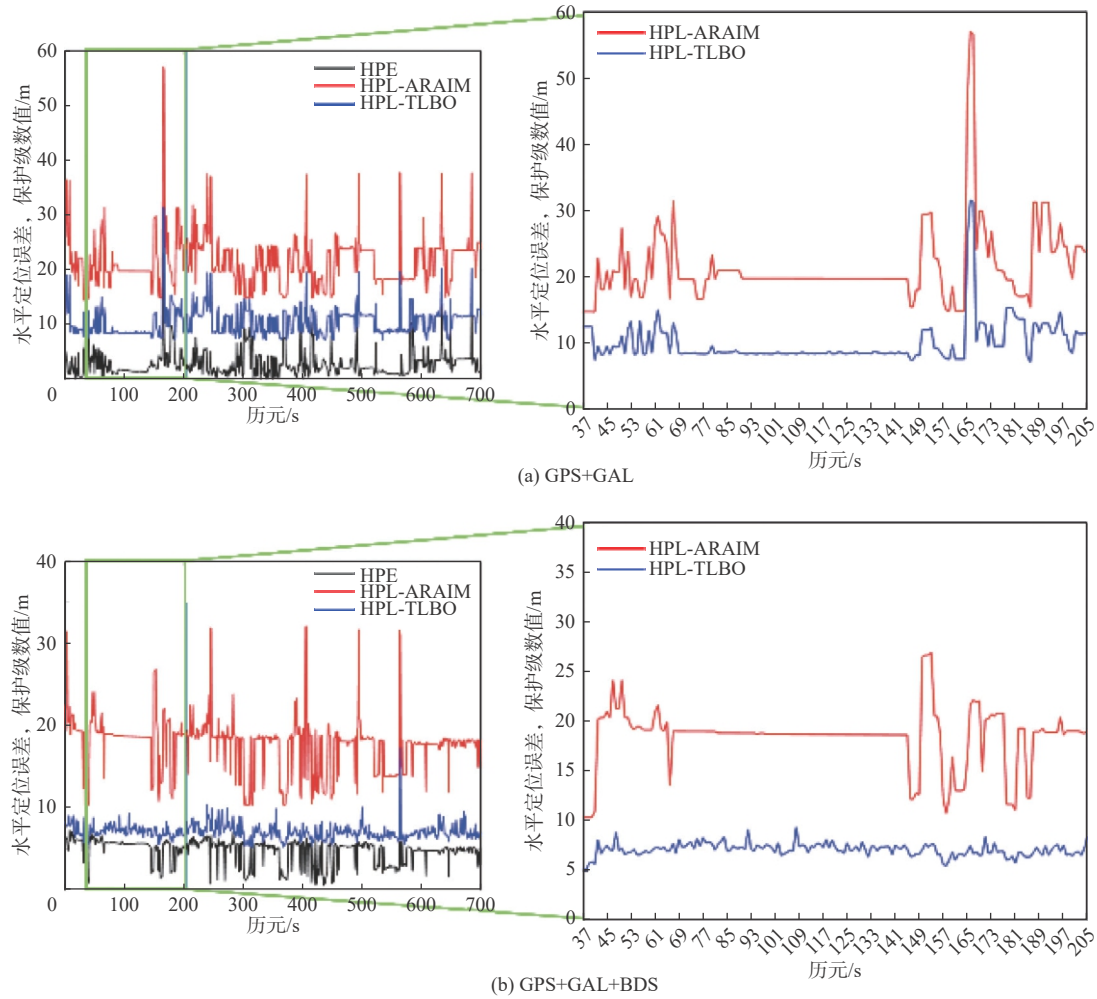



图 8　有遮挡场景下的不同星座组合水平方向上的定位误差及优化前后的保护级数值

Fig. 8　Positioning error and the value of protection level before and after optimization in horizontal direction for different constellation systems with obscured scenes

**表 7　有遮挡场景下双星座和多星座组合的平均保护级优化率**

**Table 7　Average protection level optimization ratios for dual and multi-constellation systems with obscured scenes**

| 星座 | $\bar{H}_{PL}$ | | 优化率/% |
|---|---|---|---|
| | 优化前 | 优化后 | |
| GPS+GAL | 21.48 | 9.76 | 54.56 |
| GPS+GAL+BDS | 18.45 | 7.16 | 61.19 |

大的卫星信号(但没有被识别为故障卫星)分配更大的监测概率, 对开阔方向来的多径误差较小的卫星信号分配更小的监测概率。而 ARAIM 对所有故障模式分配相应的风险概率, 当故障模式中包含多径误差较大的卫星信号时计算的保护级数值偏大, 而只包含多径误差较小卫星信号的故障模式得到的保护级数值又偏小, 不同故障模式得到的保护级

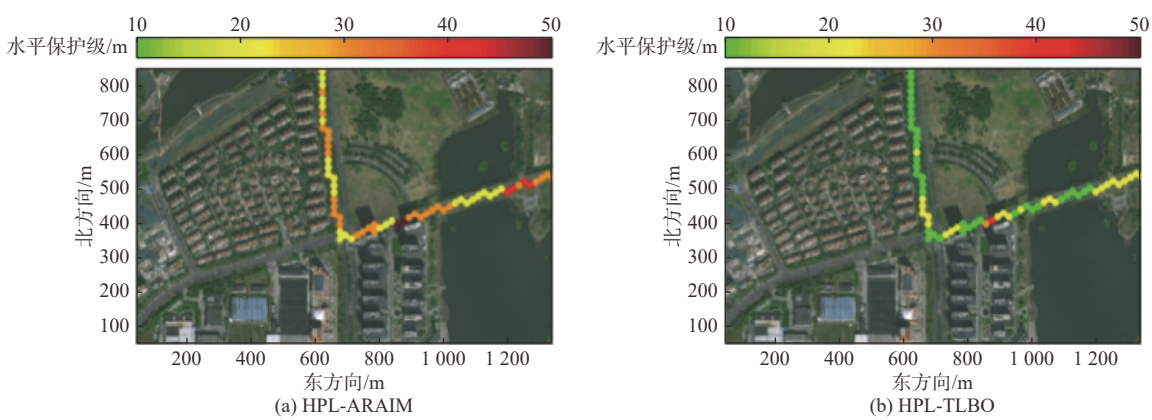



图 9　GPS+GAL 双星座场景下水平保护级优化前后结果图

Fig. 9　Horizontal protection level results before and after optimization in GPS+GAL dual-constellation scenario

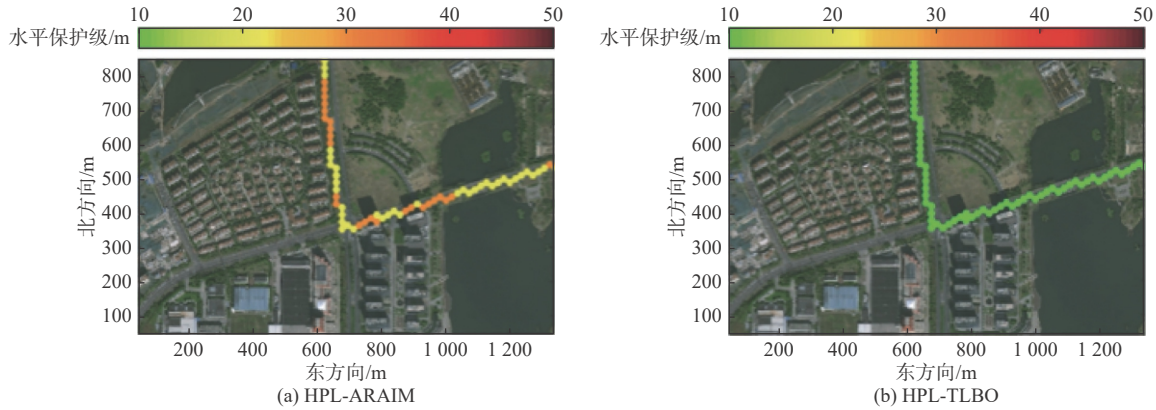



图 10 GPS+GAL+BDS 多星座场景下水平保护级优化前后结果图

Fig. 10 Horizontal protection level results before and after optimization in GPS+GAL+BDS multi-constellation scenario

数值很不均衡导致最终的保护级数值过于保守。

基于 TLBO 算法的多星座保护级优化后都能达到 10 m 级，能够满足驾考、地理围栏、危险品运输等应用的完好性需求，对城市道路安全和智能交通系统发展具有较大意义。同时还可利用网格模式根据卫星-城市环境的时空重复性继续对多径风险进行建模分析，从而进一步研究城市峡谷环境下的完好性应用。

## 4 结论

本文提出一种基于 TLBO 算法的保护级优化方法，通过构建优化模型，建立了基于 TLBO 算法的完好性风险和连续性风险优化分配过程，通过车载实测数据对所提算法进行了 GPS+GAL 双星座组合和 GPS+GAL+BDS 多星座组合的实验。

1）本文方法可以降低保护级水平。双星座组合场景下水平保护级平均优化率达到了 50.58%、垂直保护级平均优化率为 44.14%；多星座组合场景下，水平保护级平均优化率达到了 59.59%、垂直保护级平均优化率为 56.33%。

2）本文方法可以有效提高 ARAIM 可用性。双星座组合场景下，面向 10 m 级需求门限优化后的 ARAIM 可用性提高了 51.29%；优化后 40 m 级需求门限的 ARAIM 能达到 100% 可用。多星座组合场景下，面向 10 m 级需求门限优化后的 ARAIM 可用性提高了 99.29%；优化后 20 m 级需求门限的 ARAIM 能达到 100% 可用。

3）BDS 星座的融合也能有效提高 ARAIM 的可用性，BDS 作为全球卫星导航系统四大核心供应商之一，有必要也有需求与 ARAIM 技术互相推动发展。

### 参考文献（References）

[1] ILCEV D S. Development and characteristics of African Satellite Augmentation System (ASAS) network[J]. Telecommunication Systems, 2013, 52(1): 121-137.

[2] ENGE P, PARKINSON B, SPILKER J Jr, et al. Global positioning system: Theory and Applications, 2-Volume Set[M]. Reston: AIAA, 1996.

[3] GATES R M, LA H R NAPOLITANO J. 2010 federal radionavigation plan[R]. Massachusetts: Volpe National Transportation Systems Center (US), 2011: 71-91.

[4] 陈含智, 孙蕊, 邱明, 等. 基于自适应噪声方差的卫星定位故障检测法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(2): 406-421.
CHEN H Z, SUN R, QIU M, et al. An adaptive noise variance based fault detection algorithm for GNSS positioning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(2): 406-421(in Chinese).

[5] PANEL G. GNSS Evolutionary architecture study(GEAS)phase -II panel report[R]. Washington, D. C. : FAA, 2010: 10-12.

[6] 肖伟, 刘文祥, 徐博, 等. LPV-200 下中国区域内 ARAIM 可用性评估[J]. 全球定位系统, 2014, 39(5): 32-36.
XIAO W, LIU W X, XU B, et al. The current ARAIM availability in China according to LPV-200[J]. GNSS World of China, 2014, 39(5): 32-36(in Chinese).

[7] JOERGER M, PERVAN B. Multi-constellation ARAIM exploiting satellite motion[J]. Navigation, 2020, 67(2): 235-253.

[8] ZHAI Y W, ZHAN X Q, CHANG J, et al. ARAIM with more than two constellations[C]// Proceedings of the ION 2019 Pacific PNT Meeting. Manassas: ION, 2019: 925-941.

[9] LUO S L, WANG L, TU R, et al. Satellite selection methods for multi-constellation advanced RAIM[J]. Advances in Space Research, 2020, 65(5): 1503-1517.

[10] 王崇宇, 尹凯, 李锐, 等. ARAIM 算法在多星座中的全球可用性分析[J]. 导航定位学报, 2022, 10(3): 101-109.
WANG C Y, YIN K, LI R, et al. Global availability analysis of ARAIM algorithm in multiple constellations[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(3): 101-109(in Chinese).

[11] 王尔申, 杨迪, 宏晨, 等. ARAIM 技术研究进展[J]. 电信科学, 2019, 35(8): 128-138.
WANG E S, YANG D, HONG C, et al. Research progress of ARAIM technology[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(8): 128-138(in Chinese).

[12] BROWN R G, MCBURNEY P W. Self-contained GPS integrity check using maximum solution separation[J]. Navigation, 1988,

35(1): 41-53.

[13] BLANCH J, WALTER T, ENGE P, et al. Advanced RAIM user algorithm description: Integrity support message processing, fault detection, exclusion, and protection level calculation[C]//Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation. Manassas: ION, 2012: 2828-2849.

[14] JOERGER M, STEVANOVIC S, CHAN F C, et al. Integrity risk and continuity risk for fault detection and exclusion using solution separation araim[J]. Navigation, 2013, 60(1): 53-69.

[15] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. Optimal positioning for advanced raim[J]. Navigation, 2013, 60(4): 279-289.

[16] 宋恺. GNSS 自主完好性检测算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 51-64.
SONG K. Research on GNSS autonomous integrity detection algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 51-64(in Chinese).

[17] 郑学恩, 许承东, 范国超, 等. 应用遗传算法的多星座保护级别优化方法[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1046-1050.
ZHENG X E, XU C D, FAN G C, et al. Multi-constellation protection level optimization method using genetic algorithm[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1046-1050(in Chinese).

[18] 荆帅, 战兴群, 苏先礼. ARAIM 算法应用于 LPV-200 服务[J]. 测控技术, 2012, 31(11): 75-79.
JING S, ZHAN X Q, SU X L. Exploration of advanced RAIM to provide LPV-200 service[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(11): 75-79(in Chinese).

[19] 韩清清, 王利, 罗思龙, 等. ARAIM 算法的风险概率优化分配[J]. 测绘学报, 2021, 50(12): 1751-1761.
HAN Q Q, WANG L, LUO S L, et al. Optimal allocation of risk probability based on ARAIM algorithm[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(12): 1751-1761(in Chinese).

[20] 王尔申, 孙彩苗, 佟刚, 等. 基于 PSO 的多星座 GNSS 垂直保护级优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(11): 2175-2180.
WANG E S, SUN C M, TONG G, et al. Optimization method of multi-constellation GNSS vertical protection level based on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(11): 2175-2180(in Chinese).

[21] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. A framework for analyzing architectures that support ARAM[J]. Interconnectedness of Relationships Industrial Marketing Management, 2000, 29(4): 155-165.

[22] Working Group C, EU-U. S. ARAIM concept of operation[EB/OL]. [2022-11-15]. https://portal.icao.int/nsp/meetingdocuments/NSP4-10-20-October2017/NSP4_ip18_HARAIMCo-nOps_final.docx.

[23] 罗思龙. GNSS 用户级完好性监测算法理论、性能评估及优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2019: 26-28.
LUO S L. Research on the theory, performance evaluation and optimization of GNSS user-level integrity monitoring algorithm[D]. Xi'an: Changan University, 2019: 26-28(in Chinese).

[24] 战兴群, 苏先礼. GNSS 完好性监测及辅助性能增强技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 45-48.
ZHAN X Q, SU X L. GNSS integrity monitoring and assisted performance enhancement technology[M]. Beijing: Science Press, 2016: 45-48(in Chinese).

[25] AUSTIN III L J, BUTTIGIEG P, MAYORKAS A N. 2021 Federal Radionavigation Plan[R/OL]. Massachusetts: Volpe National Transportation Systems Center(US) [2022-11-15]. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/63024.

[26] RAO R V, SAVSANI V J, VAKHARIA D P. Teaching–Learning-Based Optimization: An optimization method for continuous non-linear large scale problems[J]. Information Sciences, 2012, 183(1): 1-15.

[27] 拓守恒, 雍龙泉, 邓方安. "教与学"优化算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(7): 1933-1938.
TUO S H, YONG L Q, DENG F A. Survey of teaching-learning-based optimization algorithms[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(7): 1933-1938(in Chinese).

[28] FAA. Global positioning system standard positioning service performance standard(5th edition)[EB/OL]. (2020-04)[2022-11-15]. https://www.gps.gov/technical/ps/.

[29] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范 (3.0 版)[EB/OL]. (2021-05-26)[2021-06-05]. http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system open service performance standard (Version 3.0)[EB/OL]. (2021-05-26)[2021-06-05]. http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/(in Chinese).

[30] European GNSS Service Centre.Galileo open service service definition document (OS SDD), issue 1.1[EB/OL]. (2019-05)[2021-06-05]. https://galileognss.eu/galileo-gnss-documents/.

[31] SUN R, FU L X, CHENG Q, et al. Resilient pseudorange error prediction and correction for GNSS positioning in urban areas[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(11): 9979-9988.

# Protection level optimization method of ARAIM algorithm for urban road safety

DENG Siyu[1], SUN Rui[1,*], ZHANG Lidong[2], HU Haoliang[2]

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Key Laboratory of ATM Avionics Technology, China Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China)

**Abstract**: Safety-critical intelligent transportation systems (ITS) applications are surging in recent years. These kinds of applications not only have the accuracy but also the integrity of global navigation satellite system (GNSS) positioning services. In the field of aviation with an open environment, advanced receiver autonomous integrity monitoring (ARAIM) has been widely concerned as a low-cost, highly autonomous integrity monitoring method. However, there are still gaps in the application of urban environments. Moreover, the probability of integrity risk and continuity risk of traditional ARAIM algorithm which is applied for aviation applications in the open environment has been equally allocated, resulting in the relatively conservative protection level. In order to solve the above problems, this paper proposes a protection-level optimization method based on Teaching-learning-based optimization (TLBO), which can realize the reasonable allocation of integrity risk and continuity risk under the integrity requirements of urban road safety, so as to improve the availability of multi-constellation ARAIM. The on-board measured data shows that under the global position system (GPS) + Galileo satellite navigation system (GAL) dual constellation scenario, the average optimization rates of horizontal protection level (HPL) and vertical protection level (VPL) are 50.58% and 44.14%, and the availability of ARAIM for the 10-meter alert limit (AL) is increased by 51.29%. In the GPS+GAL+BDS multi-constellation scenario, the average optimization rates of HPL and VPL are 59.59% and 56.33%, and the availability of ARAIM for the 10-meter AL is improved by 99.29%.

**Keywords**: ARAIM; VPL; HPL; risk probability allocation; TLBO

**Received**: 2022-12-29; **Accepted**: 2023-03-17; **Published Online**: 2023-05-11 09:25

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230510.1331.003

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (41974033, 42174025, 42222401); Civil Aircraft Special Research Project of Ministry of Industry and Information Technology (MJ-2020-S-03); European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme (875154 GreAT); Jiangsu Provincial Six Talent Peaks Project (KTHY-014); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20211569); Fundamental Research Funds for the Central Universities (xcxjh20220722)

* **Corresponding author**. E-mail: rui.sun@nuaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0891

# 多策略融合的改进黑猩猩优化算法

张福兴，高腾*，吴泓达
(大连工业大学 机械工程与自动化学院，大连 116034)

**摘 要**：针对黑猩猩优化算法存在迭代速度慢、精度不高及初始化分布不均匀等问题，提出一种融合多策略的改进黑猩猩优化算法。采用改进的Sine混沌映射初始化种群，解决种群边界聚集分布问题，引入考虑线性权重系数、自适应加速因子的粒子群思想，配合改进的非线性收敛因子平衡算法的全局搜索能力，加快算法收敛，提高收敛精度。引入自适应水波因子改进麻雀精英突变和Bernoulli混沌映射策略，提高个体跳出局部最优的能力。利用22个基准测试函数进行迭代分析求解和Wilcoxon秩和统计检验，得出所提算法迭代速度更快、精度更高、跳出局部最优能力更强。将所提算法应用到工程实例中，进一步验证算法处理现实优化问题的优越性。

**关 键 词**：改进的Sine混沌映射；非线性衰减因子；麻雀精英突变；Bernoulli混沌映射；Wilcoxon秩和检验
**中图分类号**：TM561.2
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0235-13

元启发式算法由于灵活性、实用性、鲁棒性被广泛应用。常见的元启发式算法有灰狼优化算法(grey wolf optimization algorithm, GWO)[1]、粒子群优化算法(particle swarm optimization algorithm, PSO)[2]、鸡群优化算法[3]、麻雀优化算法[4]等。元启发式算法广泛应用于路径规划[5]、船舶结构优化设计[6]、气味原定位[7]等领域。

不同的智能优化算法有不同的搜索方式，其本质都是在保证收敛精度和速度的同时，避免陷入局部搜索[8]。针对其基本原理，许多学者对元启发式算法进行改进。王子恺等[9]利用Piecewise map初始化麻雀个体的位置，保证初始化种群均匀分布；王万良等[10]根据粒子的角色划分指标，给不同性能的粒子赋予不同角色，提出多策略的学习参数调整方法和多策略的全局最优粒子选取方法，帮助种群执行各种搜索策略；张晶等[11]提出融合正余弦优化的距离定位算法，利用正余弦的波动性寻找最优解，平衡算法前期、后期的搜索能力；李爱莲等[12]借助折射反向学习机制改进麻雀搜索算法，增加物种多样性，扩大算法搜索空间；谭慧娟等[13]利用均匀分布混沌序列映射实现人工鱼群的混沌初始化，提高人工鱼的搜索范围；吕鑫等[14]提出一种混沌麻雀搜索算法，通过混沌序列增加扰动，提高跳出局部最优的能力；Sayed等[15]提出一种二进制克隆花授粉算法，通过将克隆选择算法和花授粉算法相结合，降低花粉克隆算法易陷入局部最优的概率。

为改进黑猩猩优化算法(chimpanzee optimization algorithm, ChoA)的优化性能，本文提出一种融合多策略的改进黑猩猩优化算法。利用改进的Sine混沌映射对种群进行初始化，解决种群边界聚集分布现象。其次为了平衡算法收敛能力引入线性权重

**收稿日期**：2022-11-04；**录用日期**：2022-12-30；**网络出版时间**：2024-07-17 10:20
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240715.1532.001
**基金项目**：辽宁省教育厅高校基本科研项目 (JYTZD2023023)
* **通信作者**. E-mail：gaoteng@dlpu.edu.cn

*引用格式*：*张福兴，高腾，吴泓达. 多策略融合的改进黑猩猩优化算法 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：235-247.*
*ZHANG F X，GAO T，WU H D. Improved chimpanzee search algorithm based on multi-strategy fusion and its application [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：235-247（in Chinese）.*

因子、自适应加速因子加持的粒子群算法，提高收敛精度，同时引入自适应变化水波因子改进的麻雀精英突变和 Bernoulli 混沌映射策略，提高个体跳出局部最优的能力。通过基准函数迭代分析求解得出改进算法的有效性。

## 1 黑猩猩优化算法

ChoA 是通过模拟黑猩猩群体捕食猎物行为提出的一种智能算法。根据黑猩猩狩猎过程中所展现的能力，对黑猩猩个体分为驱赶者、阻拦者、追捕者和攻击者。黑猩猩群体狩猎过程主要分为：①探索阶段，即驱赶、阻挡、追逐猎物；②开发阶段，攻击猎物。每种黑猩猩都有独立思考的能力，用自己的方式搜索猎物的位置。假设第 1 个驱赶者、阻拦者、追捕者和攻击者能够预测猎物的位置，其他黑猩猩根据距离猎物最近的黑猩猩更新位置。黑猩猩驱赶和追逐猎物的公式模型如下：

$$\boldsymbol{d}(t)=\boldsymbol{c}\boldsymbol{X}_{\mathrm{P}}(t)-\boldsymbol{m}\boldsymbol{X}_{\mathrm{E}}(t) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{E}}(t+1)=\boldsymbol{X}_{\mathrm{P}}(t)-\boldsymbol{a}\boldsymbol{d}(t) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{\mathrm{P}}$ 为猎物的位置；$\boldsymbol{X}_{\mathrm{E}}$ 为黑猩猩的位置；$\boldsymbol{m}$ 为混沌向量；$t$ 为迭代次数；$\boldsymbol{d}(t)$ 为黑猩猩与猎物的距离；$\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{c}$ 为系数向量，其计算公式如式(3)、式(4)所示。当 $|\boldsymbol{a}|<1$ 时，黑猩猩个体趋向猎物，当 $|\boldsymbol{a}|>1$ 时，表示黑猩猩已经偏离猎物位置，扩大搜索范围。

$$|\boldsymbol{a}|=2fr_1-f \tag{3}$$

$$|\boldsymbol{c}|=2r_2 \tag{4}$$

式中：$r_1$、$r_2$ 为取值 [0,1] 的随机数；$|\boldsymbol{a}|$为 $[-2f, 2f]$ 之间的随机变量；$f$为线性收敛因子，表示为

$$f=2-\frac{2t}{t_{\max}} \tag{5}$$

其中：$t_{\max}$ 为最大迭代次数。在迭代过程中，$f$从 2 线性衰减至 0。

种群中，黑猩猩的位置由驱赶者、阻拦者、追捕者和攻击者的位置共同确定。黑猩猩攻击猎物的数学模型为

$$\begin{cases}\boldsymbol{D}_{\mathrm{A}}=\boldsymbol{c}\boldsymbol{X}_{\mathrm{A}}-\boldsymbol{m}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{D}_{\mathrm{B}}=\boldsymbol{c}\boldsymbol{X}_{\mathrm{B}}-\boldsymbol{m}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{D}_{\mathrm{C}}=\boldsymbol{c}\boldsymbol{X}_{\mathrm{C}}-\boldsymbol{m}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{D}_{\mathrm{D}}=\boldsymbol{c}\boldsymbol{X}_{\mathrm{D}}-\boldsymbol{m}\boldsymbol{X}\end{cases} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{X}_{\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{X}_{\mathrm{C}}$ 和 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{D}}$ 为黑猩猩种群的驱赶者、阻拦者、追捕者和攻击者的初始位置；$\boldsymbol{D}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{D}_{\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{D}_{\mathrm{C}}$ 和 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{D}}$ 为更新后的位置。

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_1=\boldsymbol{X}_{\mathrm{A}}-\boldsymbol{a}\boldsymbol{X}_{\mathrm{A}}\\ \boldsymbol{X}_2=\boldsymbol{X}_{\mathrm{B}}-\boldsymbol{a}\boldsymbol{X}_{\mathrm{B}}\\ \boldsymbol{X}_3=\boldsymbol{X}_{\mathrm{C}}-\boldsymbol{a}\boldsymbol{X}_{\mathrm{C}}\\ \boldsymbol{X}_4=\boldsymbol{X}_{\mathrm{D}}-\boldsymbol{a}\boldsymbol{X}_{\mathrm{D}}\end{cases} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{X}(t+1)=\frac{1}{4}(\boldsymbol{X}_1+\boldsymbol{X}_2+\boldsymbol{X}_3+\boldsymbol{X}_4) \tag{8}$$

## 2 改进黑猩猩优化算法

ChoA 种群随机初始化的方法导致种群多样性、均匀性差，容易出现边界聚集现象。ChoA 不能有效平衡局部搜索和全局搜索能力，跳出局部最优的能力具有很大的不稳定性。针对 ChoA 存在的问题，引入相应的改进策略，具体如下。

### 2.1 改进的 Sine 混沌映射初始化种群

混沌映射可以有效改善上述问题。常见的混沌映射中，Sine 混沌映射稳定性好、覆盖性高，但仍存在分布不均匀、边界聚集现象。

Sine 混沌映射表达式为

$$\boldsymbol{X}(t)=\mu\sin(\pi\boldsymbol{X}(t-1)) \tag{9}$$

针对上述问题，引入 Chebyshev 映射将 Sine 混沌映射进行改进。同时建立高维混沌映射，使其在原有基础上更好地表现出混沌特性。

改进 Sine 混沌映射表达式为

$$\boldsymbol{P}(t)=\mu\sin(\pi\boldsymbol{X}(t-1))+\lambda\cos(t\arccos(\boldsymbol{X}(t-1))) \tag{10}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{W}(t)=\mu\sin(\pi\boldsymbol{W}(t-1))+\lambda\cos(t\arccos(\boldsymbol{W}(t-1))\\ \boldsymbol{O}(t)=\mu\sin(\pi\boldsymbol{O}(t-1))+\lambda\cos(t\arccos(\boldsymbol{O}(t-1))\\ \boldsymbol{E}(t)=\mu\sin(\pi\boldsymbol{E}(t-1))+\lambda\cos(t\arccos(\boldsymbol{E}(t-1))\\ \boldsymbol{H}(t)=\mu\sin(\pi\boldsymbol{H}(t-1))+\lambda\cos(t\arccos(\boldsymbol{H}(t-1))\\ \boldsymbol{X}(t)=\mathrm{mod}(\boldsymbol{W}(t)+\boldsymbol{O}(t)+\boldsymbol{E}(t)+\boldsymbol{H}(t),1)\end{cases} \tag{11}$$

式中：$\lambda$、$\mu$ 为 [0,1] 之间的随机数，且满足 $\lambda$、$\mu$ 之和为 1；$\boldsymbol{W}$、$\boldsymbol{O}$、$\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 表示驱赶者、阻拦者、追捕者和攻击者经过 Sine 初始化后的位置；$\boldsymbol{X}(t)$ 表示改进 Sin 映射初始化的位置。

改进前后两者初始解的维度分布图、维度分布直方图如图 1 所示。可以看出，改进后的 Sine 混沌映射值分布比较均匀，边界聚集问题得到有效解决。

### 2.2 粒子群思想和非线性收敛因子

#### 2.2.1 粒子群思想

为调节 ChoA 前期、后期的全局、局部搜索能力的平衡，引进粒子群思想改进 ChoA 个体位置迭代方式，实现黑猩猩个体与种群之间的信息交流[16]。位置更新为

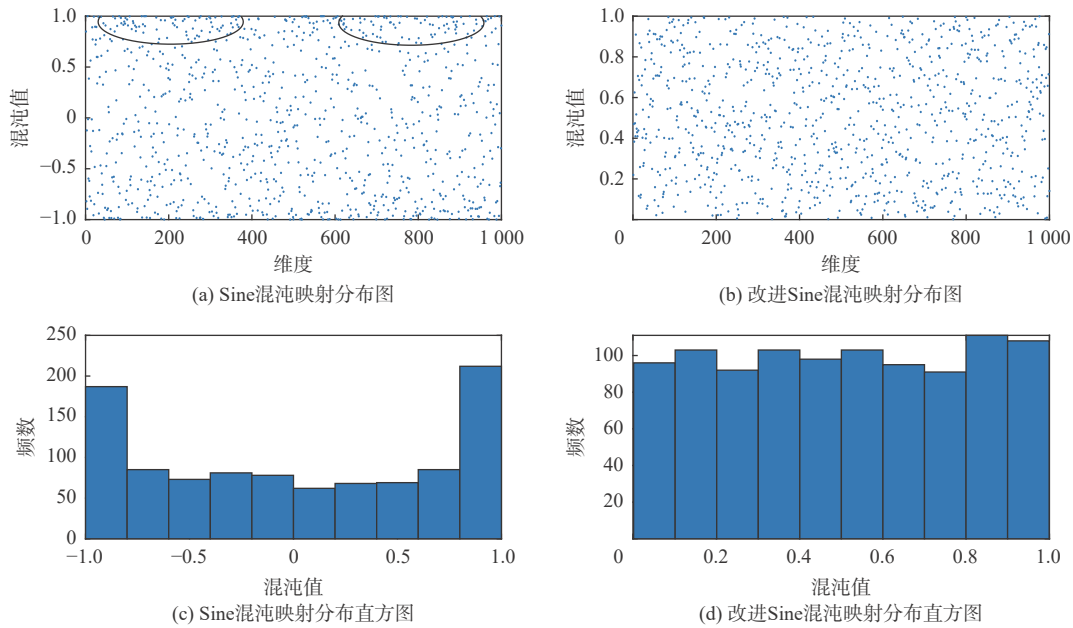



图 1　混沌映射分布图和分布直方图

Fig. 1　Distribution diagram and histogram of chaotic mapping

$$\boldsymbol{X}(t+1)=C\left[Rw(\boldsymbol{X}_1+\boldsymbol{X}_2+\boldsymbol{X}_3+\boldsymbol{X}_4)+R(\boldsymbol{X}_1-\boldsymbol{X}(t))\right] \tag{12}$$

式中: $w$ 为惯性权重系数; $C$ 为加速因子; $R$ 为 [0,1] 之间的随机数。惯性权重 $w$、加速因子 $C$ 取值关系到粒子过去的运动状态对现在运动状态的影响, 当 $w$、$C$ 变大时, 粒子的搜索空间会扩大, 当 $w$、$C$ 变小时, 粒子运动方向多变, 会导致算法陷入局部最优状态。通过调节 $w$、$C$ 的值来平衡算法局部搜索、全局搜索的能力, 提高算法的收敛速度[17]。

为提高算法前期的全局搜索能力, 同时强化粒子群后期的局部优化能力, 本文引入自适应线性加速因子。在算法迭代初期, 给予一个较大的 $C$ 值完成大范围搜索, 有利于算法全局搜索, 随着迭代次数增加, 算法逐渐收敛, 此时给予一个较小的 $C$ 值, 进行局部精细探索, 提高算法收敛精度。同时, 为防止在算法迭代过程中陷入局部最优, 引入余弦函数修正加速因子, 保持其在时刻波动。自适应加速因子数学模型如下:

$$C=g\frac{\mathrm{e}^{-0.1\sqrt{t}}}{t_{\max}}\cos(0.1t+24.5)+1.1 \tag{13}$$

式中: $g$ 为调整权衡系数。

$C$ 随迭代次数变化, 如图 2 所示。

为加快算法收敛, 提高收敛精度, 引进线性惯性权重模型。通过权重因子的线性变化, 调节算法在全局、局部的搜索能力, 提高算法的收敛精度。$w$ 随迭代次数变化, 如图 3 所示。线性惯性权重数学模型如下:

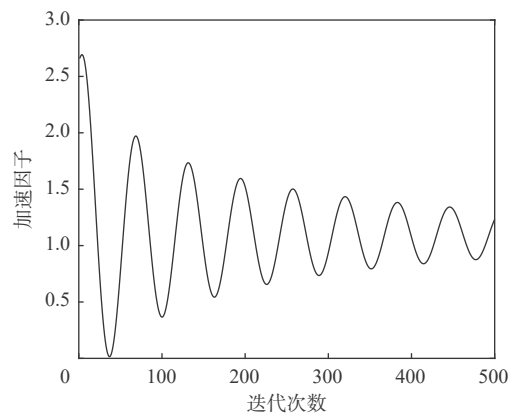



图 2　加速因子变化曲线

Fig. 2　Change curve of acceleration factor

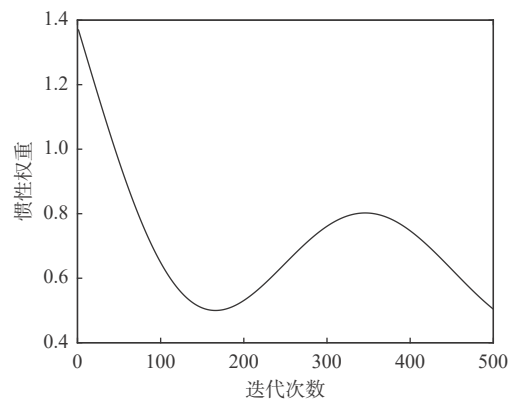



图 3　惯性权重变化曲线

Fig. 3　Curve of inertia weight change

$$w=0.5\left[w_{\max}-\frac{t(w_{\max}-w_{\min})}{t_{\max}}\cos^2(0.5t)\right] \tag{14}$$

式中：$w_{max}$ 和 $w_{min}$ 分别为最大权重系数和最小权重系数。

2.2.2 非线性收敛因子

能否平衡算法全局搜索能力和局部搜索能力是评价算法性能好坏的主要因素。由 ChoA 分析可知，当 $|\boldsymbol{a}|<1$ 时，黑猩猩个体趋向猎物，当 $|\boldsymbol{a}|>1$ 时，表示黑猩猩已经偏离猎物位置，扩大搜索范围。因此，收敛因子的变化决定了算法全局、局部搜索能力。基于此，本文引入一种非线性衰减变化模型，配合粒子群思想中的自适应加速因子共同平衡算法在迭代过程中全局搜索和局部搜索的占比。同时，引入控制因子 $\delta$ 控制衰减幅度。非线性衰减收敛因子数学模型描述如下：

$$q_g = f_g\left[1-\left(\frac{\mathrm{e}^{\frac{t}{t_{max}}}-1}{\mathrm{e}-1}\right)^{\delta}\right] \tag{15}$$

式中：$f_g$ 为初始收敛因子。$\delta\in[1,10]$，$\delta$ 越大，衰减速度越慢，如图 4 所示。

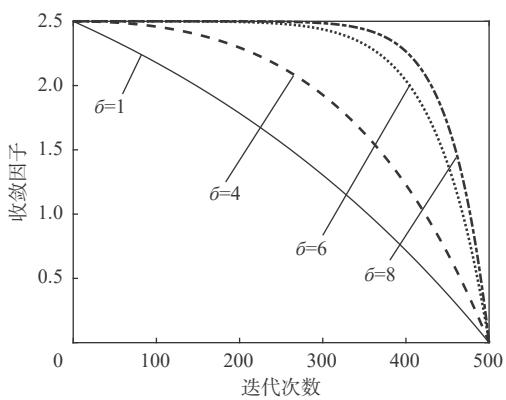



图 4 收敛因子对比

Fig. 4 Comparison of convergence factors

## 2.3 改进的麻雀精英突变和 Bernoulli 混沌映射

在 ChoA 中，个体更新会受到每次迭代中最后一个最优个体影响，因此，在迭代过程中，ChoA 容易收敛到局部最优。针对上述问题，本文提出自适应水波因子改进的麻雀精英突变和 Bernoulli 混沌映射相结合的优化策略。

2.3.1 改进的麻雀精英突变

麻雀优化算法是一种高效的群体智能优化算法，该算法将搜索群体分为探索者、跟随者和预警者 3 部分，其相互分工寻找最优值[18]。利用麻雀精英突变将具有较高搜索性能个体的能力赋予当前最优个体。在每次 ChoA 迭代时，对当前适应度值前 40% 的个体赋予较强的优化能力，同时在突变个体更新公式中加入自适应水波因子[19]，进一步提高突变个体的优化能力。

$$\boldsymbol{X}(t+1)_{0.4}=\begin{cases}\boldsymbol{X}(t)_{0.4}v\exp\left(-\dfrac{t}{\alpha t_{max}}\right) & R<S_T\\ \boldsymbol{X}(t)_{0.4}+v\boldsymbol{QLR} & \geqslant S_T\end{cases} \tag{16}$$

式中：$\boldsymbol{X}(t)_{0.4}$ 为当前适应度值前 40% 的个体；$\alpha$ 为突变系数；$Q$ 为服从 [0,1] 的正态分布的随机数；$\boldsymbol{L}$ 为所有元素为 1 的 $1\times d$ 矩阵；$S_T$ 为预警值，取 0.6；$v$ 为水波因子，随迭代次数自适应变化。

自适应水波因子的数学模型如下：

$$v=1-\sin\left(\frac{\pi t}{2t_{max}}+2\pi\right) \tag{17}$$

随着迭代次数增加，迭代过程中的不确定性和水波因子剧烈突变增强个体跳出局部最优的能力。自适应水波因子变化如图 5 所示。

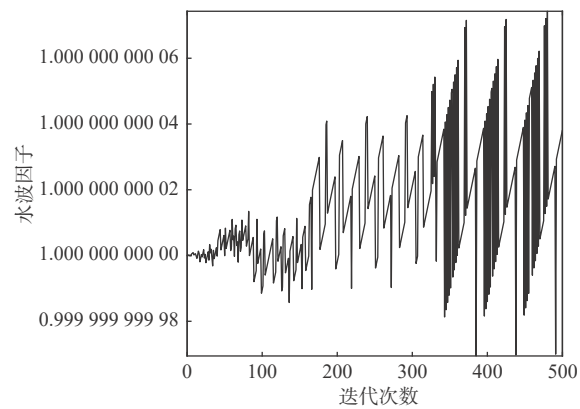



图 5 500 次迭代水波因子分布

Fig. 5 Adaptive water wave factor distribution with 500 iterations

2.3.2 Bernoulli 混沌映射

Bernoulli 混沌映射是混沌映射的经典代表，应用较为广泛[20]，其数学表达式为

$$Z_{t+1}=\begin{cases}Z_t/(1-G) & Z_t\in(0,1-G]\\ (Z_t-1+G)/G & Z_t\in(0,1-G]\end{cases} \tag{18}$$

式中：$\lambda$ 为调节系数，一般取 0.4。由此将产生新的混沌序列根映射到解的搜索空间内：

$$\boldsymbol{X}_{td}=\boldsymbol{X}_L+(\boldsymbol{X}_U-\boldsymbol{X}_L)Z_{td} \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{td}$ 为第 $t$ 个元素在 $d$ 维的位置；$\boldsymbol{X}_U$、$\boldsymbol{X}_L$ 为搜索空间的上、下限；$Z_{td}$ 为式(19)产生的混沌值。

## 2.4 本文算法流程

**步骤 1** 利用改进的 Sine 混沌映射初始化种群位置信息、维度 $d$、搜索上下边界 ub 和 lb、最大最小权重系数、调整权衡系数 $g$ 等，并设置相关参数。

**步骤 2** 更新加速因子、惯性权重、收敛因子、水波因子。

**步骤 3**　计算各个黑猩猩的位置。

**步骤 4**　更新驱赶者、阻拦者、追捕者、攻击者的位置。

**步骤 5**　计算适应度值及适应度平均值, 找到全局最优值、个体最优值。

**步骤 6**　比较个体适应度值 $F$ 与平均适应度值 $f_{avg}$。若 $F<f_{avg}$, 进行 Bernoulli 扰动, 判断扰动后个体是否优于原个体, 优于则进行更新, 否则保持原个体不变; 若 $F>f_{avg}$, 进行麻雀精英变异, 优于原个体进行替换, 否则保持。

**步骤 7**　更新种群全局最优值、个体最优值。

**步骤 8**　判断是否满足条件, 满足输出结果, 否则回到步骤 2 执行。

流程如图 6 所示。

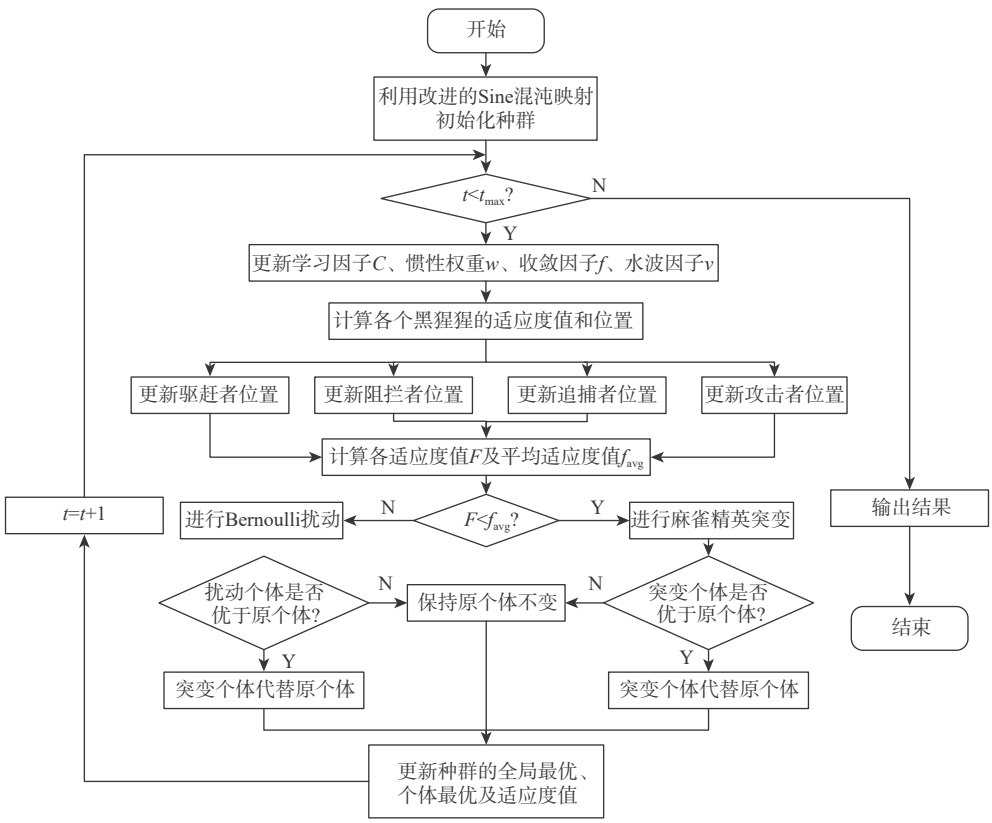



图 6　本文算法优化流程

Fig. 6　Flow chart of the proposed algrithm optimization

### 2.5　时间复杂度分析

时间复杂度是反映算法性能的重要指标[4]。假设黑猩猩种群规模为 $N$, 搜索空间维度为 $n$, 初始化时间为 $t_1$, 更新黑猩猩个体位置时间为 $t_2$, 求解目标适应度函数值的时间为 $F(n)$, 则算法时间复杂度为

$$T_1(n)=O(t_1+N(nt_2+F(n)))=O(n+F(n)) \quad (20)$$

在本文算法中, 采用改进 Sine 混沌映射初始化种群所用时间为 $t_3$, 在循环阶段, 引入粒子群思想, 假设非线性收敛因子、改进的麻雀精英突变和 Logistic 混沌映射所需的时间分别为 $t_4$、$t_5$、$t_6$。则本文算法的时间复杂度为

$$T_2(n)=O(t_1+t_3+N(nt_2+t_4+t_5+nt_6+F(n)))=O(n+F(n)) \quad (21)$$

由式(20)、式(21)得出本文算法与 ChoA 的时间复杂度一致。

综上所述, 本文算法策略没有增加时间复杂度, 是合理的。

## 3　算法性能测试

### 3.1　实验参数设置

本文选取 PSO、GWO、ChoA、本文算法与飞蛾扑火优化算法(moth-flame optimization algorithm, MFO)进行模拟迭代对比。为保证一致性, 参数统一进行设置。种群规模为 30, 最大迭代次数 $t_{max}$=500。

### 3.2　基准测试函数

为验证本文算法的有效性, 实验选取文献 [21] 所采用的 22 种基准测试函数用于寻优测试, 如表 1 所示。其中, $F_1$～$F_7$ 为连续单模态测试函数, $F_8$～$F_{13}$ 为连续多模态测试函数, $F_{14}$～$F_{22}$ 为固定多模态测试函数。

表1 基准测试函数

Table 1 Benchmark functions

| 编号 | 函数名 | 定义域 | 维度 | 最优值 | 绝对精度误差 |
|---|---|---|---|---|---|
| $F_1$ | Sphere | [−100, 100] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-3}$ |
| $F_2$ | Schwefel' problem 2.22 | [−10, 10] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-3}$ |
| $F_3$ | Schwefel' problem 1.2 | [−100, 100] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-3}$ |
| $F_4$ | Schwefel' problem 2.21 | [−100, 100] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-3}$ |
| $F_5$ | Generalized Rosenbrock's Function | [−30, 30] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_6$ | Step Function | [−100, 100] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_7$ | Quartic Function | [−1.28, 1.28] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_8$ | Generalized Schwefel's problem | [−500, 500] | 30 | −12 569.5 | $1.00\times10^{+02}$ |
| $F_9$ | Generalized Rastrigin's Function | [−5.12, 5.12] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{10}$ | Ackley's Function | [−32, 32] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{11}$ | Ceneralized Criewank Function | [−600, 600] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{12}$ | Ceneralized Penalized Function | [−50, 50] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{13}$ | Ceneralized Penalized Function | [−50, 50] | 30 | 0 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{14}$ | Shekell's Foxholes Function | [−65, 65] | 2 | 1 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{15}$ | Kowalik's Function | [−5, 5] | 4 | 0.000 3 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{16}$ | Six-Hump Camel-Back Function | [−5, 5] | 2 | −1.03 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{17}$ | Branin Function | [−5, 5] | 2 | 0.398 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{18}$ | Goldstein-Price Function | [−2, 2] | 2 | 3 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{19}$ | Hatman's Function1 | [0, 1] | 3 | −3.86 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{20}$ | Hatman's Function2 | [0, 1] | 6 | −3.32 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{21}$ | Shekel's Family 1 | [0, 10] | 4 | −10 | $1.00\times10^{-2}$ |
| $F_{22}$ | Shekel's Family 2 | [0, 10] | 4 | −10 | $1.00\times10^{-2}$ |

### 3.3 本文算法与其他算法对比

选用22种基本测试函数对3.1节提到的算法进行寻优测试，迭代曲线如图7～图9所示。图7中，$F_1$～$F_7$为连续单模态测试函数，只有一个全局最优值，不存在局部最优值，用来测试算法的全局搜索能力和收敛速度。从图7(a)～图7(f)中可以看出，本文算法收敛速度快，全局搜索能力强，能够快速找到函数的最优值。图8中，$F_8$～$F_{13}$为带有多个局部最优值的连续多模态测试函数，用于测试算法的收敛速度和跳出局部最优的能力。在计算$F_8$、$F_9$函数时，本文算法有陷入局部最优的情况，但是很快跳出并寻得最优值，由此证明本文算法拥有较强的跳出局部最优的能力，相比于ChoA，跳出局部最优能力得到了进一步的提高，同时收敛速度快，能够快速准确地完成寻优。图9中，$F_{14}$～$F_{22}$为固定多模态测试函数，用于测试系统的平衡发展能力和稳定性。从图9可以看出，本文算法能够很好地平衡算法的迭代能力，快速完成寻优测试，算法在收敛精度、稳定性方面有了明显提升，进一步验证了其在全局探索和跳出局部最优解上的优势。

为降低实验的偶然性，提高实验的说服力，选取13种基本测试函数，各算法在13种基本测试函数上独立运行50次，求得函数最优值、平均值、标准差，如表2所示。其中，最优值、平均值、标准差分别反映算法的收敛精度、收敛速度、寻优稳定性。相比较于其他算法，本文算法 在每个函数中均能寻优到固定最优值，除$F_6$、$F_{12}$函数的寻优

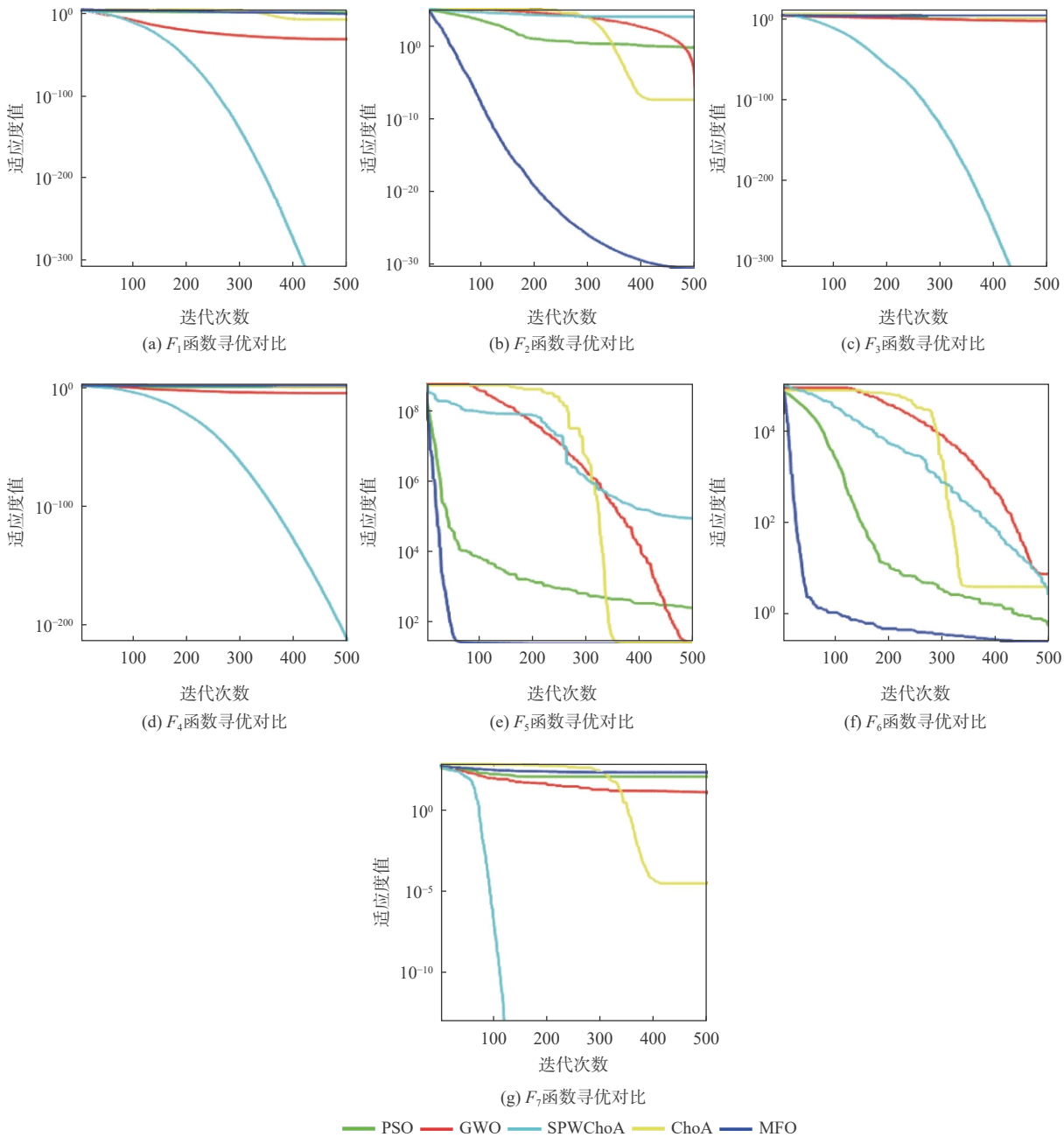



图 7　连续单模态测试函数收敛曲线

Fig. 7　Convergence curves for continuous single-modal test functions

速度略差于 GWO, 其他函数的计算性能方面均优于 GWO。相较于 PSO, 除了函数 $F_{18}$ 函数的寻优速度略差于 PSO, 本文算法在其他函数的计算性能方面均优于 PSO。相比于 ChoA, 本文算法在各个方面均优于 ChoA, 同时本文算法有着优于其他算法的寻优稳定性。由此证明, 本文算法在收敛精度、收敛速度和寻优稳定性上均存在突出优势。

### 3.4　Wilcoxon 秩和检测

为验证改进离子运动算法的有效性, 文献 [22] 提出, 对于改进算法性能的评估, 应进行统计检验, 通过统计检验结果证明改进算法的有效性。本文采用 Wilcoxon 秩和检测在 0.005 的显著水平上进行判断本文算法的每次迭代结果是否与 PSO、GWO、ChoA、MFO 存在明显差异。选取 8 个测试函数的运行结果与 PSO、GWO、ChoA、MFO 算法运行结果进行 Wilcoxon 秩和检验并计算 $P$ 值, 当 $P$<0.005 时, 可被认为是拒绝零假设的有力验证[23]。Wilcoxon 秩和检验结果如表 3 所示。由表 3 结果可知, 本文算法的 Wilcoxon 秩和检验结果 $P$ 值基本上都小于 0.005, 说明从统计学上来说, 本文算法对于基本测试函数的寻优性能优势是明显的, 进一步验证本文算法的鲁棒性。

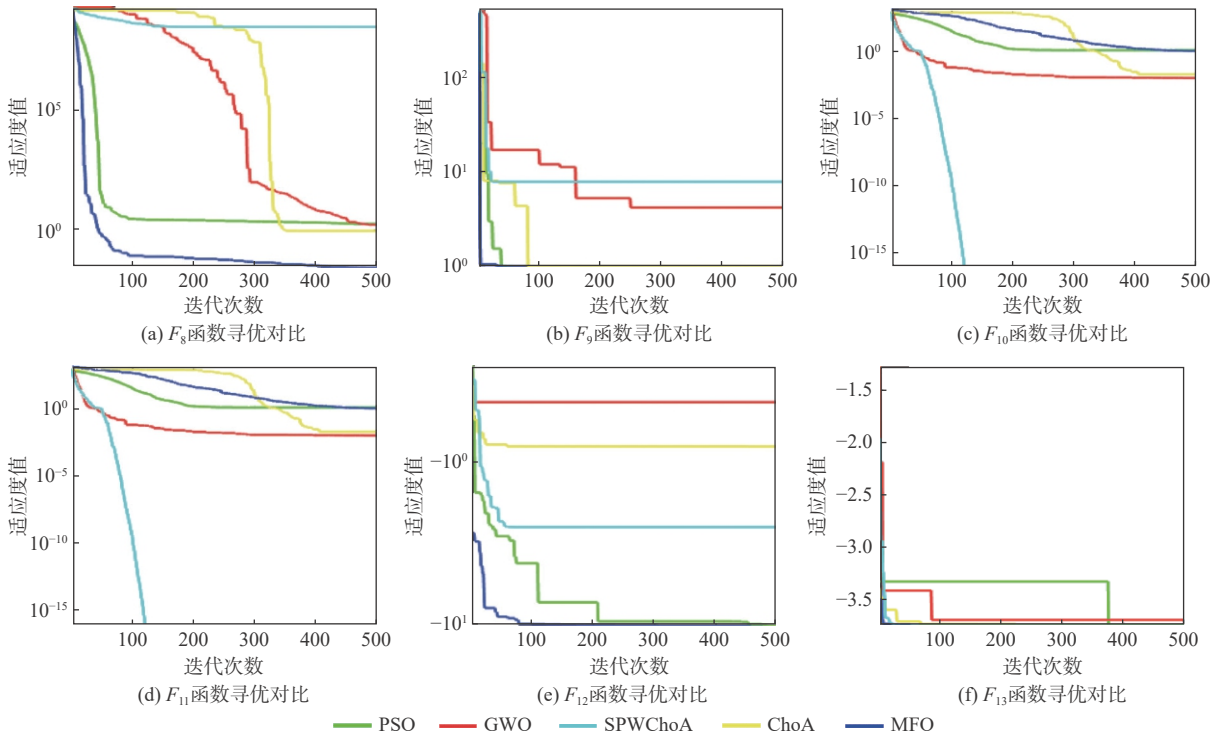



图 8 连续多模态测试函数收敛曲线

Fig. 8 Convergence curves of continuous multi-modal test functions

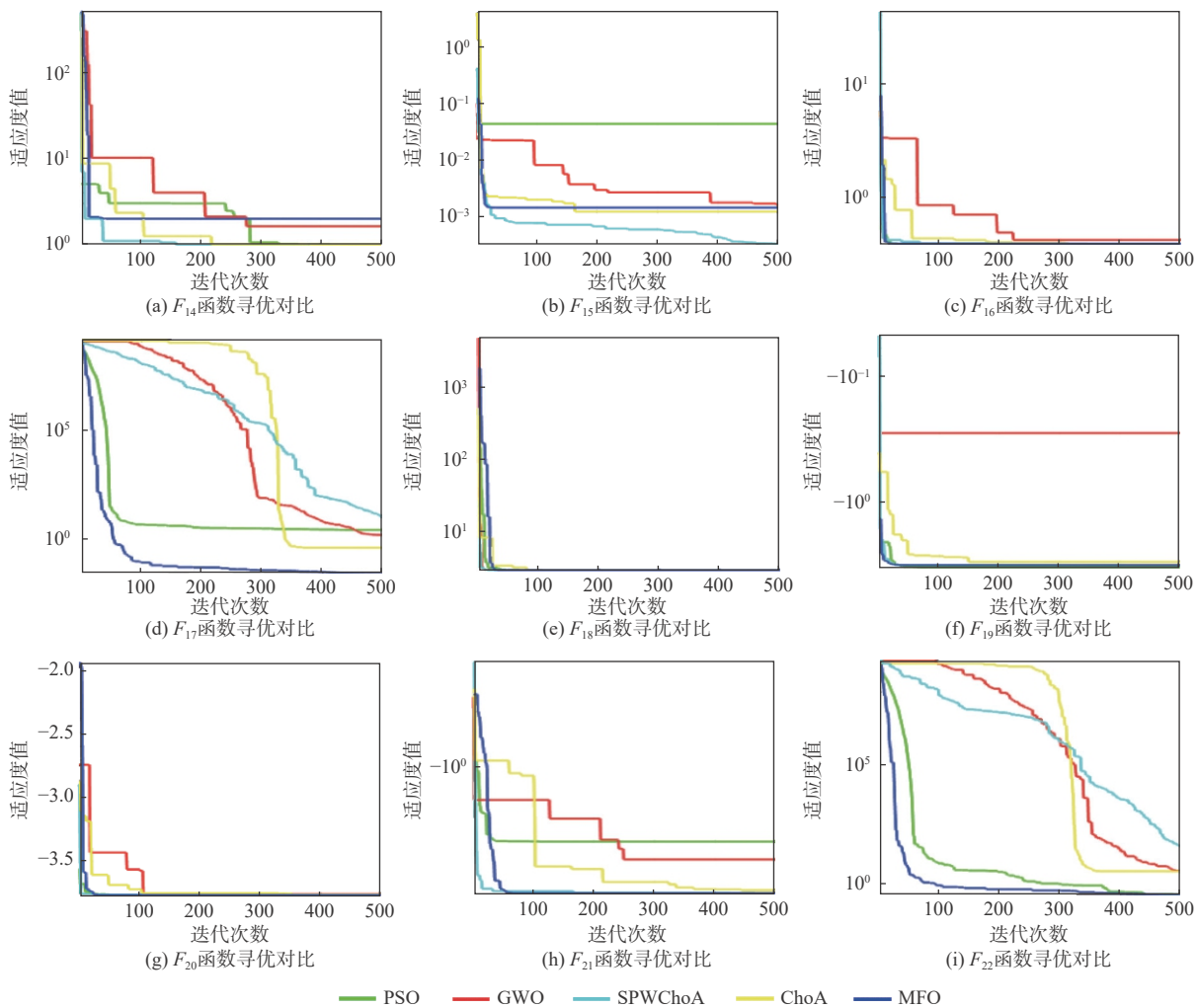



图 9 固定多模态测试函数收敛曲线

Fig. 9 Convergence curves for fixed multi-modal test functions

**表 2　函数测试实验结果（30 维度）**

**Table 2　Experimental results of function test (30 dimensions)**

| 函数 | 算法 | 最优值 | 平均值 | 标准差 |
|---|---|---|---|---|
| $F_1$ | PSO | $1.278\,1\times10^{2}$ | $1.531\,1\times10^{3}$ | $4.343\,1\times10^{3}$ |
| | GWO | $2.058\,4\times10^{-31}$ | $8.888\,1\times10^{2}$ | $6.915\,7\times10^{3}$ |
| | 本文算法 | 0 | $8.041\,7\times10^{2}$ | $6.399\,5\times10^{3}$ |
| | ChoA | $3.155\,5\times10^{-7}$ | $5.273\,1\times10^{4}$ | $4.813\,2\times10^{4}$ |
| | MFO | $1.696\,1\times10^{0}$ | $1.590\,2\times10^{4}$ | $2.703\,0\times10^{4}$ |
| $F_2$ | PSO | $1.272\,0\times10^{2}$ | $1.256\,1\times10^{8}$ | $1.984\,1\times10^{10}$ |
| | GWO | $3.201\,3\times10^{-18}$ | $3.116\,8\times10^{17}$ | $6.915\,7\times10^{14}$ |
| | 本文算法 | 0 | $1.860\,1\times10^{3}$ | $4.286\,1\times10^{8}$ |
| | ChoA | $3.082\,8\times10^{-6}$ | $3.503\,3\times10^{11}$ | $4.813\,2\times10^{14}$ |
| | MFO | $2.109\,1\times10^{1}$ | $3.072\,6\times10^{4}$ | $2.650\,3\times10^{12}$ |
| $F_4$ | PSO | $1.162\,7\times10^{-1}$ | $1.325\,8\times10^{1}$ | $7.721\,0\times10^{0}$ |
| | GWO | $3.285\,0\times10^{-5}$ | $9.580\,6\times10^{0}$ | $2.510\,7\times10^{1}$ |
| | 本文算法 | $7.296\,1\times10^{-214}$ | $2.032\,6\times10^{0}$ | $9.454\,2\times10^{0}$ |
| | ChoA | $3.579\,4\times10^{-0}$ | $6.415\,4\times10^{1}$ | $3.918\,9\times10^{1}$ |
| | MFO | $7.276\,1\times10^{-1}$ | $7.729\,4\times10^{1}$ | $6.275\,7\times10^{1}$ |
| $F_6$ | PSO | $4.054\,7\times10^{1}$ | $1.106\,6\times10^{3}$ | $6.844\,5\times10^{3}$ |
| | GWO | $2.401\,2\times10^{0}$ | $5.347\,1\times10^{2}$ | $6.031\,8\times10^{3}$ |
| | 本文算法 | $2.500\times10^{-1}$ | $6.287\,8\times10^{2}$ | $5.359\,7\times10^{3}$ |
| | ChoA | $4.042\,9\times10^{0}$ | $4.972\,6\times10^{4}$ | $4.798\,5\times10^{4}$ |
| | MFO | $1.483\,7\times10^{3}$ | $2.544\,1\times10^{4}$ | $2.518\,3\times10^{4}$ |
| $F_9$ | PSO | $2.586\,2\times10^{0}$ | $6.651\,1\times10^{0}$ | $1.678\,4\times10^{1}$ |
| | GWO | $1.483\,0\times10^{-3}$ | $1.859\,5\times10^{0}$ | $2.153\,1\times10^{1}$ |
| | 本文算法 | $1.731\,2\times10^{-4}$ | $1.098\,9\times10^{0}$ | $1.308\,3\times10^{1}$ |
| | ChoA | $3.027\,6\times10^{-4}$ | $6.760\,8\times10^{1}$ | $6.468\,4\times10^{1}$ |
| | MFO | $2.824\,9\times10^{-1}$ | $2.510\,9\times10^{1}$ | $5.400\,9\times10^{1}$ |
| $F_{10}$ | PSO | $1.090\,8\times10^{0}$ | $2.582\,0\times10^{1}$ | $8.954\,3\times10^{1}$ |
| | GWO | 0 | $8.128\,0\times10^{1}$ | $6.869\,6\times10^{1}$ |
| | 本文算法 | 0 | $9.999\,3\times10^{1}$ | $6.740\,6\times10^{1}$ |
| | ChoA | $4.896\,1\times10^{-9}$ | $4.646\,3\times10^{2}$ | $4.569\,3\times10^{2}$ |
| | MFO | $9.626\,3\times10^{1}$ | $1.415\,3\times10^{2}$ | $2.302\,1\times10^{2}$ |
| $F_{11}$ | PSO | $1.187\,9\times10^{0}$ | $5.203\,9\times10^{1}$ | $1.244\,3\times10^{2}$ |
| | GWO | $9.818\,9\times10^{-3}$ | $9.194\,5\times10^{0}$ | $6.875\,6\times10^{1}$ |
| | 本文算法 | 0 | $4.685\,5\times10^{1}$ | $4.537\,0\times10^{1}$ |
| | ChoA | $1.916\,6\times10^{-2}$ | $3.654\,8\times10^{2}$ | $3.402\,5\times10^{2}$ |
| | MFO | $1.020\,2\times10^{0}$ | $1.796\,7\times10^{2}$ | $2.949\,0\times10^{2}$ |
| $F_{12}$ | PSO | $1.413\,6\times10^{1}$ | $1.341\,8\times10^{6}$ | $1.923\,4\times10^{7}$ |
| | GWO | $1.331\,2\times10^{-1}$ | $1.137\,1\times10^{4}$ | $9.931\,7\times10^{7}$ |
| | 本文算法 | $6.577\,8\times10^{-3}$ | $7.536\,7\times10^{5}$ | $7.699\,2\times10^{6}$ |
| | ChoA | $8.762\,1\times10^{-1}$ | $4.388\,5\times10^{8}$ | $4.203\,7\times10^{7}$ |
| | MFO | $1.117\,8\times10^{1}$ | $2.687\,2\times10^{7}$ | $9.298\,6\times10^{7}$ |
| $F_{18}$ | PSO | $3.001\,0\times10^{0}$ | $4.523\,8\times10^{0}$ | $1.416\,9\times10^{1}$ |
| | GWO | $3.010\,1\times10^{0}$ | $1.218\,3\times10^{0}$ | $1.218\,3\times10^{1}$ |
| | 本文算法 | $3.000\,0\times10^{0}$ | $3.116\times10^{0}$ | $3.116\,0\times10^{0}$ |
| | ChoA | $3.100\,3\times10^{0}$ | $4.399\,3\times10^{0}$ | $4.399\,3\times10^{0}$ |
| | MFO | $3.050\,3\times10^{0}$ | $2.244\,3\times10^{1}$ | $1.765\,6\times10^{1}$ |
| $F_{19}$ | PSO | $-3.862\,8\times10^{0}$ | $-3.857\,9\times10^{-0}$ | $2.388\,3\times10^{-2}$ |
| | GWO | $-3.852\,7\times10^{0}$ | $-3.685\,6\times10^{0}$ | $6.664\,4\times10^{1}$ |
| | 本文算法 | $-3.985\,7\times10^{0}$ | $-3.985\,6\times10^{0}$ | $2.614\,0\times10^{-3}$ |
| | ChoA | $-3.854\,2\times10^{0}$ | $-3.794\,1\times10^{0}$ | $1.672\,3\times10^{-1}$ |
| | MFO | $-3.862\,8\times10^{0}$ | $-3.834\,8\times10^{0}$ | $2.074\,1\times10^{-1}$ |
| $F_{20}$ | PSO | $-3.322\,0\times10^{0}$ | $-3.266\,9\times10^{0}$ | $2.323\,3\times10^{-1}$ |
| | GWO | $-3.200\,6\times10^{0}$ | $-3.158\,6\times10^{0}$ | $2.094\,6\times10^{-1}$ |
| | 本文算法 | $-3.851\,8\times10^{0}$ | $-3.851\,6\times10^{0}$ | $2.051\,8\times10^{-4}$ |
| | ChoA | $-3.013\,7\times10^{0}$ | $-2.796\,6\times10^{0}$ | $5.078\,9\times10^{-1}$ |
| | MFO | $-3.203\,1\times10^{0}$ | $-3.180\,5\times10^{0}$ | $1.543\,6\times10^{-1}$ |
| $F_{21}$ | PSO | $-2.630\,5\times10^{0}$ | $-2.594\,3\times10^{-0}$ | $2.147\,7\times10^{-1}$ |
| | GWO | $-4.254\,7\times10^{-1}$ | $-4.254\,4\times10^{-1}$ | $3.264\,9\times10^{0}$ |
| | 本文算法 | $-1.015\,3\times10^{1}$ | $-6.654\,9\times10^{0}$ | $7.389\,2\times10^{-4}$ |
| | ChoA | $-4.972\,8\times10^{-1}$ | $-4.922\,2\times10^{-1}$ | $2.351\,0\times10^{-2}$ |
| | MFO | $-5.055\,2\times10^{0}$ | $-4.814\,7\times10^{0}$ | $9.376\,4\times10^{-1}$ |
| $F_{22}$ | PSO | $-6.321\,6\times10^{-1}$ | $-6.321\,2\times10^{-1}$ | $5.556\,7\times10^{-16}$ |
| | GWO | $-3.730\,8\times10^{-1}$ | $-3.730\,8\times10^{-1}$ | $3.637\,3\times10^{-1}$ |
| | 本文算法 | $-5.087\,7\times10^{0}$ | $-4.942\,0\times10^{-1}$ | $2.672\times10^{-16}$ |
| | ChoA | $-4.973\,3\times10^{0}$ | $-2.187\,2\times10^{-1}$ | $1.943\,1\times10^{0}$ |
| | MFO | $-5.087\,7\times10^{0}$ | $-4.818\,6\times10^{-1}$ | $9.606\,7\times10^{-1}$ |

表3 Wilcoxon秩和检验结果

Table 3 Wilcoxon rank-sum test results

| 函数 | PSO | GWO | ChoA | MFO |
|---|---|---|---|---|
| $F_1$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ |
| $F_2$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ |
| $F_3$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ |
| $F_4$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ | $3.01\times10^{-20}$ |
| $F_5$ | $1.28\times10^{-17}$ | $2.66\times10^{-17}$ | $2.29\times10^{-10}$ | $1.04\times10^{-10}$ |
| $F_6$ | $7.21\times10^{-18}$ | $7.07\times10^{-18}$ | $1.36\times10^{-17}$ | $1.38\times10^{-10}$ |
| $F_7$ | $3.41\times10^{-20}$ | $3.31\times10^{-20}$ | $1.21\times10^{-19}$ | NaN |
| $F_8$ | $3.41\times10^{-20}$ | $3.31\times10^{-20}$ | $2.96\times10^{-20}$ | $2.39\times10^{-16}$ |

注：NaN表示无限大。

## 4 本文算法工程算例应用分析

### 4.1 压力容器设计案例分析

压力容器设计是工程设计中的常见问题。在保证满足压力的条件下，生产压力计的成本最小，压力容器设计如图10所示。$L$为管的长度，$M$为筒体部分的内壁直径，$T_s$为压力容器筒体部分的壁厚，$T_h$为压力容器封头的壁厚。压力计容器设计问题的目标函数为

$$\boldsymbol{x}=[x_1,x_2,x_3,x_4]=[T_s,T_h,R,L] \tag{22}$$

$$f(x)=0.622\,4x_1x_3x_4+1.778\,1x_2x_3^2+3.166\,1x_1^2x_4+19.84x_1^2x_3 \tag{23}$$

约束条件为

$$\begin{cases} g_1(x)=-x_1+0.019\,3x_3\leqslant 0\\ g_2(x)=-x_2+0.095\,4x_3\leqslant 0\\ g_3(x)=-\pi x_3^3/3+1\,296\,000\leqslant 0\\ g_4(x)=x_4-240\leqslant 0 \end{cases} \tag{24}$$

式中：$0\leqslant x_1\leqslant 99, 0\leqslant x_2\leqslant 99, 10\leqslant x_3\leqslant 100, 10\leqslant x_4\leqslant 100$。

将PSO、GWO、本文算法、ChoA、MFO进行实验比较，其中，对比算法的数据来自文献[15,24]。

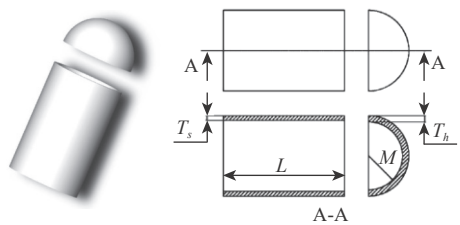



图10 压力容器设计问题模型

Fig. 10 Pressure vessel design problem model

每个算法独立运行100次取平均值，优化结果如表4所示。

如表4所示，本文算法获取函数最优解为$[x_1,x_2,x_3,x_4]$=[1.245 4,0.425 1,65.178 9,54.325 4]。本文算法对于压力容器设计问题有着很好的优化效果，能够在满足设计要求的前提下，降低压力容器的体积、高度、壁厚等，从而降低设计的费用。压力容器设计问题优化结果如表4所示。与其他算法相比，本文算法的适应度值最低，其次是GWO算法和ChoA算法。表4的结果表明，本文算法在实际工程应用中具有较好的性能。

表4 压力容器设计问题中各算法的最优解

Table 4 Optimal solutions of each algorithm in pressure vessel design problem

| 算法 | $T_s$ | $T_h$ | $M$ | $L$ | 适应度值 |
|---|---|---|---|---|---|
| PSO | 1.984 1 | 0.845 2 | 69.147 6 | 84.152 3 | 14 321.152 2 |
| GWO | 2.142 5 | 0.785 4 | 78.146 3 | 63.178 9 | 9 542.189 6 |
| 本文算法 | 1.245 4 | 0.425 1 | 65.178 9 | 54.325 4 | 7 854.254 7 |
| ChoA | 1.574 8 | 0.874 5 | 78.124 5 | 66.138 5 | 9 854.124 5 |
| MFO | 1.825 4 | 0.562 3 | 49.127 8 | 78.356 9 | 12 412.124 7 |

### 4.2 全自动活塞压力计控制系统的优化实验

压力计控制系统优化的最终目标是：检定活塞快速稳定地达到平衡位置，实现压力测量。工程上，一般采用群体智能算法优化的PID控制器进行调节，实现快、稳、准的控制。PID控制表达式如下所示：

$$u(k)=K_{\mathrm{p}}e(k)+k_{\mathrm{i}}\sum_{n=0}^{k}e(k)+K_{\mathrm{d}}[e(k)-e(k-1)] \tag{25}$$

式中：$K_{\mathrm{p}}$为比例系数；$K_{\mathrm{i}}$为积分系数；$K_{\mathrm{d}}$为微分系数；$e(k)$表示期望值和实际值的误差。

压力计控制系统结构如图11所示。实验采用500 MPa全自动活塞压力计，如图12所示。该设备

采用 STM32F429IGT6 为控制核心，搭载一系列控制电路。通过控制气动电磁阀从而控制砝码配置，伺服电机进行加压使活塞在平衡位置保持稳定，完成压力检定。检定活塞运动范围为−2～2 mm，0 mm 为平衡位置。

分别采用 PSO、GWO、本文算法、ChoA、MFO 对 PID 控制器参数进行整定，并对压力计运行结果进行比较。各算法初始条件一致，每个算法独立运行 50 次取平均值，得到 PID 参数整定结果，如表 5 所示，检定活塞运动位移曲线如图 13 所示。

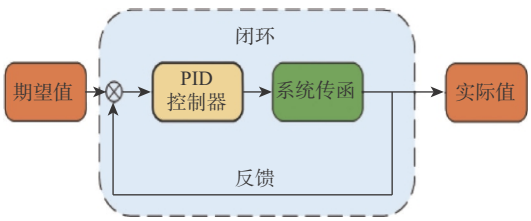



图 11　PID 控制系统结构

Fig. 11　Structure of PID control system

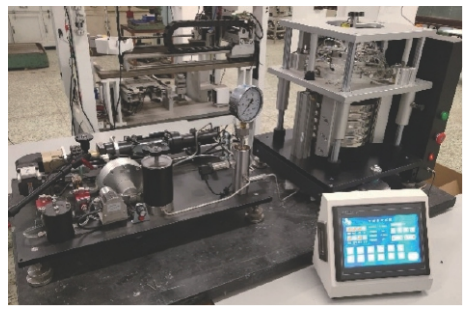


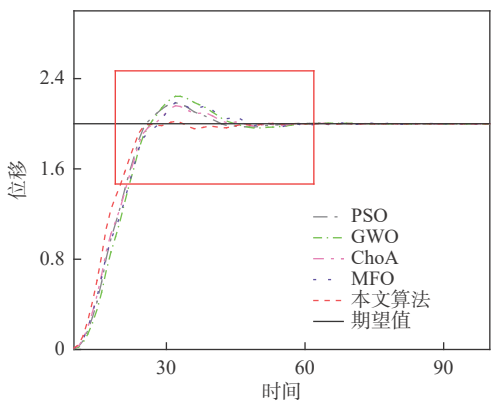
图 12　500 MPa 全自动活塞压力计

Fig. 12　500 MPa automatic piston manometer

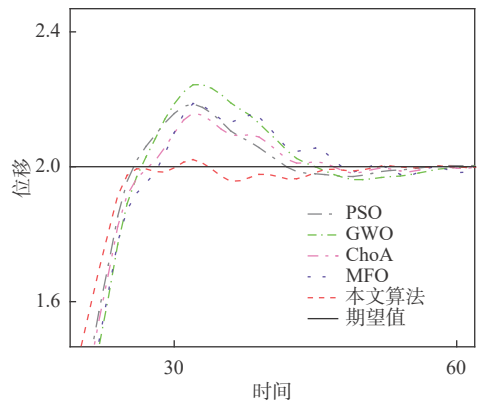
**表 5　不同算法优化 PID 控制器得出的整定参数**

**Table 5　Tuning parameters derived from PID controller optimized by different algorithms**

| 算法 | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$ | 适应度值 |
|---|---|---|---|---|
| PSO | 0.665 3 | 0.732 4 | 0.661 4 | 65.457 5 |
| GWO | 0.785 4 | 0.587 5 | 0.222 1 | 78.124 5 |
| SPWChoA | 0.287 7 | 0.047 8 | 0.857 4 | 33.457 8 |
| ChoA | 0.784 1 | 0.785 4 | 0.754 1 | 63.145 1 |
| MFO | 0.753 3 | 0.375 1 | 0.531 5 | 77.554 1 |




(a) 检定活塞的位移曲线




(b) 检定活塞的位移曲线局部放大图

图 13　检定活塞位移曲线

Fig. 13　Calibrate the piston displacement curve

如图 13 所示，本文算法优化后的 PID 控制器，对压力计系统控制效果最好，检定活塞能够快速稳定地达到平衡位置，完成压力检测，进一步证明了本文算法在实际工程应用中的可行性。

## 5　结　论

1）经过对 ChoA 缺点的系统分析，本文引进多种改进策略，从迭代速度、寻优精度和跳出局部最优能力等方面对算法进行优化。

2）从连续单模态测试函数、连续多模态测试函数、固定多模态测试函数的测试中可以看出，针对复杂程度不同、维度不同的问题，本文算法无论在迭代速度、寻优精度、跳出局部最优的能力均优于 PSO、ChoA、GWO、MFO 等算法。

3）将本文算法应用于工程实例压力计容量设计和全自动活塞压力计的控制问题，结果均表明优于原始算法，由此进一步验证了算法的有效性和鲁棒性。

## 参考文献（References）

[1] 卢纯义, 于津, 余忠东, 等. 基于改进灰狼算法优化 SVR 的混凝土中钢筋直径检测方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(11): 228-233.
LU C Y, YU J, YU Z D, et al. Detection method of rebar in concrete diameter based on improved grey wolf optimizer-based SVR [J]. Computer Science, 2022, 49(11): 228-233(in Chinese).

[2] 于振华, 刘争气, 刘颖, 等. 基于自适应混合粒子群优化的软件缺陷预测特征选择方法[J]. 计算机应用, 2023, 43(4): 1206-1213.
YU Z H, LIU Z Q, LIU Y, et al. Feature selection method based on self-adaptive hybrid particle swarm optimization for software defect prediction[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(4): 1206-1213(in Chinese).

[3] 张可为, 赵晓林, 何利, 等. 一种改进 X-best 引导个体和动态等级

更新机制的鸡群算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(12): 2579-2593.
ZHANG K W, ZHAO X L, HE L, et al. A chicken swarm optimization algorithm based on improved X-best guided individual and dynamic hierarchy update mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(12): 2579-2593 (in Chinese).

[4] 郑旸, 龙英文, 吉明明, 等. 融合螺旋黏菌算法的混沌麻雀搜索算法与应用[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(14): 124-133.
ZHENG Y, LONG Y W, JI M M, et al. Chaotic sparrow search algorithm and application based on spiral slime mould algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(14): 124-133(in Chinese).

[5] THARWAT A, ELHOSENY M, HASSANIEN A E, et al. Intelligent Bézier curve-based path planning model using chaotic particle swarm optimization algorithm[J]. Cluster Computing, 2019, 22(2): 4745-4766.

[6] 王一镜, 罗广恩, 王陈阳, 等. 基于自适应变异粒子群算法的船舶结构优化方法[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(2): 156-164.
WANG Y J, LUO G E, WANG C Y, et al. Ship structural optimization method based on daptive mutation particle swarm algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(2): 156-164(in Chinese).

[7] 缪燕子, 王玥, 李元龙, 等. 融合学习策略与导向果蝇机制的气味源主动定位方法研究[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(5): 913-922.
MIAO Y Z, WANG Y, LI Y L, et al. Study on active odor source localization method based on learning strategy and guided fruit fly mechanism[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(5): 913-922 (in Chinese).

[8] LU C, GAO L, YI J. Grey wolf optimizer with cellular topological structure[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 107: 89-114.

[9] 王子恺, 黄学雨, 朱东林, 等. 融合边界处理机制的学习型麻雀搜索算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 286-298.
WANG Z K, HUANG X Y, ZHU D L, et al. Learning sparrow search algorithm of hybrids boundary processing mechanisms[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 286-298(in Chinese).

[10] 王万良, 金雅文, 陈嘉诚, 等. 多角色多策略多目标粒子群优化算法[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56(3): 531-541.
WANG W L, JIN Y W, CHEN J C, et al. Multi role multi strategy multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(3): 531-541(in Chinese).

[11] 张晶, 贺媛媛. 融合正余弦优化与跳距优化的 DV-Hop 定位算法[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(4): 645-653.
ZHANG J, HE Y Y. A DV-Hop positioning algorithm combining sine and cosine optimization and hop distance optimization[J]. Computer Engineering & Science, 2022, 44(4): 645-653(in Chinese).

[12] 李爱莲, 全凌翔, 崔桂梅, 等. 融合正余弦和柯西变异的麻雀搜索算法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(3): 91-99.
LI A L, QUAN L X, CUI G M, et al. Sparrow search algorithm combining sine-cosine and Cauchy mutation[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(3): 91-99(in Chinese).

[13] 谭慧娟, 李世明, 郭文鑫, 等. 基于混沌自适应人工鱼群算法的含家庭储能配电网快速重构方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 468-477.
TAN H J, LI S M, GUO W X, et al. Fast reconfiguration method of distribution network with household energy storage based on chaotic adaptive artificial fish swarm algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 468-477(in Chinese).

[14] 吕鑫, 慕晓冬, 张钧, 等. 混沌麻雀搜索优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1712-1720.
LU X, MU X D, ZHANG J, et al. Chaos sparrow search optimization algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(8): 1712-1720(in Chinese).

[15] SAYED S A F, NABIL E, BADR A. A binary clonal flower pollination algorithm for feature selection[J]. Pattern Recognition Letters, 2016, 77: 21-27.

[16] 刘成汉, 何庆. 融合多策略的黄金正弦黑猩猩优化算法[J]. 自动化学报, 2023, 49(11): 2360-2373.
LIU C H, HE Q. Golden sine chimp optimization algorithm integrating multiple strategies[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(11): 2360-2373(in Chinese).

[17] 滕志军, 吕金玲, 郭力文, 等. 一种基于 Tent 映射的混合灰狼优化的改进算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(11): 40-49.
TENG Z J, LV J L, GUO L W, et al. An improved hybrid grey wolf optimization algorithm based on Tent mapping[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(11): 40-49(in Chinese).

[18] 王鹏飞, 杜忠华, 牛坤, 等. 基于改进粒子群算法的倒立摆 LQR 优化控制[J]. 计算机仿真, 2021, 38(2): 220-224.
WANG P F, DU Z H, NIU K, et al. LQR optimal control of inverted pendulum based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Simulation, 2021, 38(2): 220-224(in Chinese).

[19] 唐延强, 李成海, 宋亚飞, 等. 自适应变异麻雀搜索优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(3): 681-692.
TANG Y Q, LI C H, SONG Y F, et al. Adaptive mutation sparrow search optimization algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(3): 681-692(in Chinese).

[20] 何庆, 罗仕杭. 混合改进策略的黑猩猩优化算法及其机械应用[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 354-364.
HE Q, LUO S H. Hybrid improved chimpanzee optimization algorithm and its mechanical application[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 354-364(in Chinese).

[21] 刘景森, 袁蒙蒙, 左方. 面向全局搜索的自适应领导者樽海鞘群算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2152-2160.
LIU J S, YUAN M M, ZUO F. Global search-oriented adaptive leader salp swarm algorithm[J]. Control and Decision, 2021, 36(9): 2152-2160(in Chinese).

[22] 汪超, 王丙柱, 岑豫皖, 等. 基于多样性全局最优引导和反向学习的离子运动算法[J]. 控制与决策, 2020, 35(7): 1584-1596.
WANG C, WANG B Z, CEN Y W, et al. Ions motion optimization algorithm based on diversity optimal guidance and opposition-based learning[J]. Control and Decision, 2020, 35(7): 1584-1596(in Chinese).

[23] DERRAC J, GARCÍA S, MOLINA D, et al. A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2011, 1(1): 3-18.

[24] 张新明, 王霞, 康强. 改进的灰狼优化算法及其高维函数和

FCM 优化[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2073-2084.
ZHANG X M, WANG X, KANG Q. Improved grey wolf optimizer and its application to high dimension function and FCM optimization[J]. Control and Decision, 2019, 34(10): 2073-2084(in Chinese).

# Improved chimpanzee search algorithm based on multi-strategy fusion and its application

ZHANG Fuxing，GAO Teng*，WU Hongda

(School of Mechanical Engineering and Automation，Dalian Polytechnic University，Dalian 116034，China)

**Abstract**: In order to solve the problems of initial population boundary clustering distribution, slow convergence speed, low accuracy and easy falling into local optimum in chimpanzee search algorithm, an improved chimpanzee optimization algorithm with multi-strategy fusion (SPWChoA) was proposed. Firstly, the modified Sine chaotic map is used to initialize the population to solve the aggregation and distribution problem of population boundaries. Secondly, the concept of linear weight factor and adaptive acceleration factor for particle swarm optimization is presented. This is coupled with the enhanced nonlinear convergence factor balancing algorithm's global search capability to quicken the algorithm's convergence and raise its convergence accuracy. Finally, sparrow elite mutation and Bernoulli chaotic mapping strategies improved by adaptive water wave factors are introduced to improve the ability of individuals to jump out of local optima. By comparing the optimization results of 23 benchmark functions and Wilcoxon rank sum statistical test, it can be seen that the SPWChoA optimization algorithm has stronger robustness and applicability. Lastly, to further demonstrate the SPWChoA optimization algorithm's superiority in handling actual optimization issues, the technique is applied to an engineering case.

**Keywords**: modified Sine chaotic mapping; nonlinear attenuation factor; sparrow elite mutation; Bernoulli chaotic mapping; Wilcoxon rank-sum test

**Received**：2022-11-04；**Accepted**：2022-12-30；**Published Online**：2024-07-17 10：20
**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240715.1532.001
**Foundation item**：Basic Scientific Research Project of Higher Education Institutions in Liaoning Province (JYTZD2023023)
* **Corresponding author**. E-mail：gaoteng@dlpu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0952

# 考虑舵面效能柔性飞机阵风减缓控制系统

刘易斯[1]，杨佑绪[1,*]，刘燚[2]，成志勇[1]，余灵富[1]

(1. 南昌航空大学 飞行器工程学院，南昌 330063；2. 北京机电工程研究所，北京 100083)

**摘 要**：舵面效能损耗会直接影响柔性飞机阵风减缓效果，考虑舵面效能损耗是主动阵风减缓控制系统设计的关键。针对柔性飞机遭遇阵风干扰问题，以某大展弦比柔性飞机模型为对象，建立包含刚体运动和弹性模态的柔性飞机结构动力学模型，考虑舵面作动器存在舵面效能损耗的情况，设计一种自适应观测器实时在线估计舵面作动器效能因子，重构和求解自适应主动容错 $H_\infty$ 控制器，实现柔性飞机阵风载荷减缓。离散和连续阵风激励下的柔性飞机开/闭环时域响应仿真表明：在舵面无效能损耗情况下，$H_\infty$ 控制与比例-积分-微分 (PID) 控制均能达到较好的减缓效果，$H_\infty$ 控制相较于 PID 控制响应时间更快；在舵面存在效能损耗情况下，自适应观测器在 4 s 内能够完成效能因子评估，基于该效能因子设计的 $H_\infty$ 控制器能够达到与理想情况相当的阵风减缓效果。

**关 键 词**：气动伺服弹性；阵风响应；阵风减缓控制系统；自适应观测器；主动容错控制系统

**中图分类号**：V215.3

**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0248-09

飞机在飞行过程中遭遇阵风，阵风将影响升力面的有效攻角，升力的突然改变将产生涉及弹性变形的飞机动力学响应，导致飞机结构产生不期望的内载荷，进而影响飞行安全，引起旅客和机组人员不适[1-3]。

国内外学者使用了比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制[4-5]、线性二次型高斯控制[6-7](linear quadratic Gaussian, LQG)、$H_\infty$ 控制[8-9]、模型预测控制 (model predictive control, MPC) 等[10-11]方法进行阵风主动减缓研究。通过舵面联合偏转，产生与阵风扰动大小相等、方向相反的力，抵消阵风的不利影响[12-13]。在该过程中，研究者往往假设舵面作动器处于理想工作状态，不考虑作动器舵面效能损耗。然而，由于飞机的弹性变形、破损等实际因素的存在，作动器的控制效能损耗是不可避免的[14]。因此，理想条件下设计的阵风减缓控制律在实际飞行中将达不到预期的减缓效果，甚至会使气动弹性伺服系统发生不稳定。

对于舵面作动器问题，杨阳等[15]研究了舵机动态特性对阵风减缓控制系统产生的不利影响，并使用 Smith 预估控制补偿了舵机大部分的幅值衰减和相位滞后效应。Fan 等[16]通过对颤振前和颤振后速度下 3 种不同故障场景进行分析后表明，不同舵面的故障将通过刚体模态或弹性模态影响柔性飞机系统，并最终通过 2 种模态之间的相互作用影响整个动力学。Haghighat 等[17]研究表明，舵面故障会对传统 MPC 和线性二次型调节 (linear quadratic regulator, LQR) 控制器的闭环性能造成不利影响，导致刚体跟踪性能退化及翼尖和翼根处应力的高频振荡响应。由于舵面故障可能导致机翼结构产生不期望的气动弹性响应，用于恢复或保持飞机刚体运动的常规容错飞行控制器[18-20]对于柔性飞机不再有效。因此，设计柔性飞机阵风减缓控制器时，需要考虑飞机的弹性变形、破损等因素的影响。

Yu 等[21]将自适应控制应用于具有未知舵面故障的飞机，研究了自适应控制器对飞行动力学不确

**收稿日期**：2022-11-29；**录用日期**：2023-03-08；**网络出版时间**：2023-03-27 13:30
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230327.0931.001
**基金项目**：基础加强项目基金 (2022-JCJQ-JJ-1135)；江西省“双千计划”人才项目 (CK202006470)
* **通信作者**. E-mail：zgdy_1@163.com

*引用格式：刘易斯，杨佑绪，刘燚，等. 考虑舵面效能柔性飞机阵风减缓控制系统 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：248-256.*
*LIU Y S，YANG Y X，LIU Y，et al. Gust alleviation control system of flexible aircraft considering rudder efficiency[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：248-256（in Chinese）.*

定性系统的鲁棒性, 表明集中式控制器架构可以补偿一定范围的故障参数, 但未研究作动器饱和的问题。Fan 等[22] 使用线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 方法对阵风减缓容错控制器进行了研究, 但在实际应用中, 由于很多矩阵假设不成立, 不可观不可控的状态变量数量很大, 以至于难以实现。Pusch 等[23] 针对作动器冗余带来的极限和故障等问题, 提出了一种动态分配的阵风载荷减缓控制方案, 通过实时重新分配控制输入来处理作动器的饱和或故障等限制, 但未考虑作动器的效能损耗问题。目前, 在阵风减缓主动控制方面, 作动器效能和故障问题研究较少。

针对舵面作动器效能损耗问题, 本文设计一种主动容错阵风减缓控制系统, 旨在实时估计舵面作动器效能因子并重构阵风减缓控制器, 使其能够逼近实际效能因子, 并在保持刚体运动稳定性的同时实现阵风载荷减缓的目的。以某大展弦比柔性飞机为控制对象, 通过离散和连续阵风来验证所提控制方法的有效性。

## 1　阵风模型

离散阵风模型表现为确定性的风速变化[24], 本文使用 “1-cos” 型离散阵风模型, 数学表达式为

$$w_{\mathrm{g}}=\frac{\bar{w}_{\mathrm{g}}}{2}\left(1-\cos\left(\frac{2\pi x_{\mathrm{g}}}{L_{\mathrm{g}}}\right)\right) \tag{1}$$

式中: $w_{\mathrm{g}}$为阵风速度; $\bar{w}_{\mathrm{g}}$为阵风速度幅值; $L_{\mathrm{g}}$为阵风尺度, $0\leqslant x_{\mathrm{g}}\leqslant L_{\mathrm{g}}$为飞机位置。

连续阵风模型一般指大气紊流, 是通过对大气紊流现象进行理论和试验研究得到的功率谱模型[25]。本文使用 Dryden 型连续阵风模型, 功率谱密度函数为

$$\Phi_{\mathrm{dw}}(\omega)=\sigma^2\frac{L_{\mathrm{g}}}{\pi V}\left[\frac{1+3\dfrac{L_{\mathrm{g}}^2\omega^2}{V^2}}{\left(1+\dfrac{L_{\mathrm{g}}^2\omega^2}{V^2}\right)^2}\right] \tag{2}$$

式中: $\omega$为角频率; $\sigma$为连续阵风强度; $V$为飞行速度。

可采用 Simulink 模块将白噪声信号通过功率密度函数的成形滤波器得到时域内的阵风速度 $w_{\mathrm{g}}$。滤波器的传递函数为

$$H_{\mathrm{dw}}(s)=\sigma\sqrt{\frac{L_{\mathrm{g}}}{\pi V}}\frac{1+\dfrac{\sqrt{3}L_{\mathrm{g}}}{V}s}{\left(1+\dfrac{L_{\mathrm{g}}}{V}s\right)^2} \tag{3}$$

## 2　阵风减缓研究对象

### 2.1　气动弹性系统建模

气动弹性系统的状态空间方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{ae}}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{ae}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{ae}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{ae}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{ae}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{aw}}w_{\mathrm{g}} \tag{4}$$

状态向量、控制输入及阵风输入为

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{\mathrm{ae}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\zeta}\\ \dot{\boldsymbol{\zeta}}\\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{a}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{u}_{\mathrm{ae}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{u}\\ \dot{\boldsymbol{u}}\\ \ddot{\boldsymbol{u}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}=\begin{bmatrix}w_{\mathrm{g}}\\ \dot{w}_{\mathrm{g}}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{5}$$

式中: $\boldsymbol{A}_{\mathrm{ae}}$为状态矩阵; $\boldsymbol{B}_{\mathrm{ae}}$为输入矩阵; $\boldsymbol{B}_{\mathrm{aw}}$为阵风输入矩阵; $\boldsymbol{\zeta}$为飞机模态位移; $\boldsymbol{u}$为舵面偏转角; $\boldsymbol{x}_{\mathrm{a}}$为气动增广状态向量; $\boldsymbol{u}_{\mathrm{ae}}$为舵面位移输入; $\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}$为阵风干扰。

### 2.2　作动器动力学与效能损耗建模

假设作动器动力学模型为传递函数

$$\frac{u_i}{u_{ic}}=\frac{a_0}{s+a_0} \tag{6}$$

式中: $a_0>0$为作动器传递函数系数; $i=1,\cdots,m$为舵面编号, $m$为舵面数量; $u_i$和$u_{ic}$分别为第$i$个舵面的实际偏转量和期望偏转指令。

由于飞机的弹性变形、破损等实际因素的存在, 导致作动器达不到预期的舵角, 引入效能因子表征这种损耗影响。作动器效能损耗建模为

$$\frac{u_i}{u_{ic}}=\frac{\rho_i a_0}{s+a_0} \tag{7}$$

式中: $\rho_i\in[\varepsilon_i,1]$为第$i$个舵面作动器的效能因子, $\varepsilon_i>0$为效能因子的下确界。

定义$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{\rho})=\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{\rho}$, 其状态空间为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}\\ \boldsymbol{u}_0=\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{c}}\end{cases} \tag{8}$$

式中: $\boldsymbol{C}$为输出矩阵。

各系数矩阵分别为

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_{\mathrm{c}}=\begin{bmatrix}-a_0 & & \\ & \ddots & \\ & & -a_0\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{c}}=\begin{bmatrix}-a_0\rho_1\\ \vdots\\ -a_0\rho_i\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}=\begin{bmatrix}1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{\rho}=\begin{bmatrix}\rho_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \rho_i\end{bmatrix}\end{cases} \tag{9}$$

状态向量、控制输入及控制输出分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{\mathrm{c}} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{u}_{\mathrm{c}} = \begin{bmatrix} u_{1\mathrm{c}} \\ \vdots \\ u_{i\mathrm{c}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \end{bmatrix} \end{cases} \tag{10}$$

### 2.3 状态空间表达式

假设作动器动力学响应比飞机快得多，可近似为$\dot{u}_i=0$、$\ddot{u}_i=0$、$\dddot{u}_i=0$，故$u_i=\rho_i u_{i\mathrm{c}}$。将含有舵面效能损耗的作动器与气动弹性系统连接，飞机开环气动伺服弹性模型为

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_{w_{\mathrm{G}}}\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}+\boldsymbol{B}(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}\zeta_i & \dot{\zeta}_i & x_{\mathrm{a}} & \delta & \dot{\delta} & \ddot{\delta}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}$为舵面偏转角输入指令。

## 3 主动容错阵风减缓控制系统设计

考虑飞机舵面作动器效能损耗，基于主动容错控制 (active fault-tolerant control, AFTC) 方法设计可重构$H_\infty$控制系统。

### 3.1 主动容错控制系统

主动容错控制有别于被动容错控制，处理作动器故障更加有效，能够更大限度地提高控制系统的性能[18]。考虑作动器故障的飞机主动容错控制系统如图 1 所示，其中，$r$为参考输入。

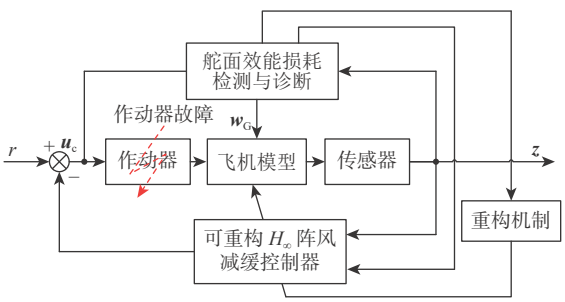



图 1 主动容错控制系统框架

Fig. 1 Active fault-tolerant control system framework

由气动伺服弹性模型 (11) 可得到实际作动器效能的飞机模型$\Sigma_0$和估计作动器效能的飞机模型$\Sigma_1$，气动弹性系统的状态空间分别为

$$\Sigma_0:\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_w\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}+\boldsymbol{B}(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}\\ \boldsymbol{z}=\boldsymbol{C}_1\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}_1\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}_2\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}_2\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}\end{cases} \tag{12}$$

$$\Sigma_1:\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{B}_w\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}+\boldsymbol{B}(\hat{\boldsymbol{\rho}})\hat{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{c}}\\ \hat{\boldsymbol{z}}=\boldsymbol{C}_1\hat{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{D}_1\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}\\ \hat{\boldsymbol{y}}=\boldsymbol{C}_2\hat{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{D}_2\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}\end{cases} \tag{13}$$

式中：$\hat{\boldsymbol{\rho}}$为$\boldsymbol{\rho}$的估计；$\boldsymbol{D}$为前馈矩阵；$\boldsymbol{y}$为测量输出；$\boldsymbol{z}$为控制输出；$\hat{\boldsymbol{y}}$和$\hat{\boldsymbol{z}}$分别为$\boldsymbol{y}$和$\boldsymbol{z}$的估计值。

为抵御舵面作动器效能损耗对飞机阵风减缓系统的影响，将基于主动容错控制系统构建如图 2 所示的虚拟增广控制系统，其中，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{ref}}$为舵面偏转角的参考输入，$\hat{\boldsymbol{u}}$为估计舵面偏转角。

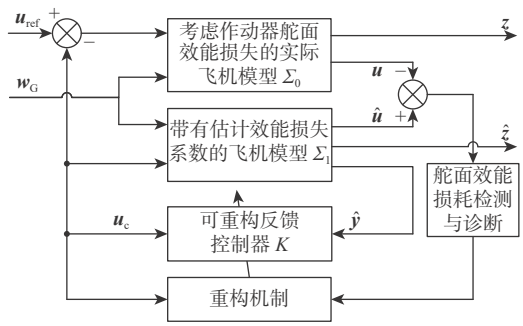



图 2 自适应容错$H_\infty$控制系统框架

Fig. 2 Adaptive fault-tolerant $H_\infty$ control system framework

舵面效能损耗检测与诊断模块用于快速检测作动器的舵面效能，实时在线估计作动器效能因子$\hat{\boldsymbol{\rho}}$、舵面的偏转角$\boldsymbol{u}$和估计作动器效能的飞机模型$\Sigma_1$；重构机制模块在保证系统稳定性、期望的动态和稳态性能的前提下，通过估计的效能因子以自适应的方式求解和重构$H_\infty$阵风减缓控制器。

### 3.2 $H_\infty$控制问题

一般$H_\infty$控制问题通过设计控制器使得如图 3 所示的广义控制系统内部稳定[26]，并且从干扰输入$\boldsymbol{w}_G$到控制输出的闭环传递矩阵$\boldsymbol{H}_{zw}$的$H_\infty$范数小于给定正数$\gamma$，控制器求解采用 Riccati 解法[8]。

选用双向滤波函数作为控制加权函数来约束舵面偏转角，使其符合实际要求，具有加权函数的广义控制系统如图 4 所示。

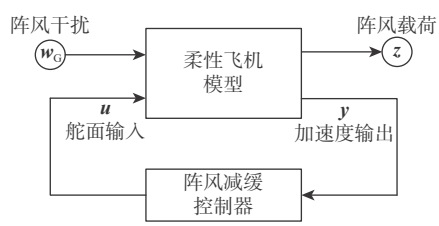



图 3 广义控制系统

Fig. 3 Generalized control system

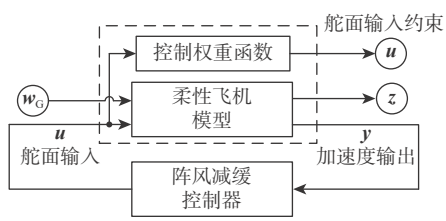



图 4 具有加权函数的广义控制系统

Fig. 4 Generalized control systems with weighting functions

### 3.3　舵面效能损耗检测与诊断

为各个舵面设计自适应状态观测器[27], 用于观测估计作动器式 (8) 的状态向量和效能因子。

第$i$个观测器的状态空间表达式为

$$\dot{\hat{x}}_{ci}=A_{ci}\hat{x}_{ci}+B_{ci}\hat{\rho}_i u_{ci}+G_i(u_i-C_{ci}\hat{x}_{ci}) \tag{14}$$

$$\dot{\hat{\rho}}_i=\begin{cases}0 & \hat{\rho}_i=1,\tilde{u}_i u_{ci}\leqslant 0\text{或}\hat{\rho}_i=0,\tilde{u}_i u_{ci}\geqslant 0\\ -k_i a_0\tilde{u}_i u_{ci} & \text{其他}\end{cases} \tag{15}$$

式中: $\hat{x}_{ci}$为$x_{ci}$的估计值; $\hat{\rho}_i$为$\rho_i$的估计值; $G_i$为状态观测器的输出误差反馈矩阵系数; $k_i>0$为可调节增益。

根据式 (14) 和式 (8) 可得

$$\dot{\tilde{x}}_{ci}=(A_{ci}-G_iC_{ci})\tilde{x}_{ci}+B_{ci}\tilde{\rho}_i u_{ci} \tag{16}$$

式中: $\tilde{x}_i=\hat{x}_i-x_i$为状态误差; $\tilde{\rho}_i=\hat{\rho}_i-\rho_i$为舵面效能因子误差。

将式 (10) 引入式 (16), 可得

$$\dot{\tilde{u}}_i=-(a_0+G_i)\tilde{u}_i+a_0\tilde{\rho}_i u_{ci} \tag{17}$$

定义李雅普诺夫函数:

$$V_i=\frac{1}{2}\tilde{u}_i^2+\frac{1}{2k_i}\tilde{\rho}_i^2 \tag{18}$$

对式 (18) 求导, 可得

$$\dot{V}_i=\tilde{u}_i\dot{\tilde{u}}_i+\frac{1}{k_i}\tilde{\rho}_i\dot{\tilde{\rho}}_i-(a_0+G_i)\tilde{u}_i^2+\tilde{\rho}_i\left(a_0u_{ci}\tilde{u}_i+\frac{1}{k_i}\dot{\tilde{\rho}}_i\right) \tag{19}$$

当满足自适应控制律 (15):

$$\dot{V}_i\leqslant-(a_0+G_i)\tilde{u}_i^2\leqslant 0 \tag{20}$$

根据李雅普诺夫稳定性理论[28], 所设计自适应状态观测器渐近稳定。

### 3.4　自适应控制器重构流程

作动器估计效能因子初值$\hat{\boldsymbol{\rho}}_0=\boldsymbol{I}^m$, 调节容差为$\boldsymbol{l}=\text{diag}\{10^{-6},\cdots,10^{-6}\}\in\mathbf{R}^m$。

**步骤 1**　采用$j(j=0,1,\cdots,n,\ n$为重构次数$)$时刻作动器效能因子估计值的飞机模型$\Sigma_1$设计阵风减缓$H_\infty$控制系统, 并获取当前时刻作动器偏转角输入指令$\boldsymbol{u}_c$及作动器偏转角估计值$\hat{\boldsymbol{u}}$。

**步骤 2**　将作动器偏转角指令$\boldsymbol{u}_c$输入实际作动器效能的飞机模型$\Sigma_0$, 通过传感器测量舵面实际偏转角$\boldsymbol{u}$, 通过自适应控制律 (15) 获取$j$时刻效能因子估计值的变化率$\dot{\hat{\boldsymbol{\rho}}}$及$j+1$时刻估计效能因子$\hat{\boldsymbol{\rho}}$。

**步骤 3**　比较作动器估计偏转角$\hat{\boldsymbol{u}}$与实际偏转角$\boldsymbol{u}$的大小, 若满足$\hat{\boldsymbol{u}}-\boldsymbol{u}\leqslant\boldsymbol{l}$, 则进入步骤 4, 否则返回步骤 1 继续执行。

**步骤 4**　以当前时刻设计的$H_\infty$控制器为稳定阵风减缓控制器, 直到下一次舵面效能因子改变或偏转角差值超出容差范围, 即可进行新一轮的重构和调节。

重构流程如图 5 所示, 引入常规黎卡提方程。

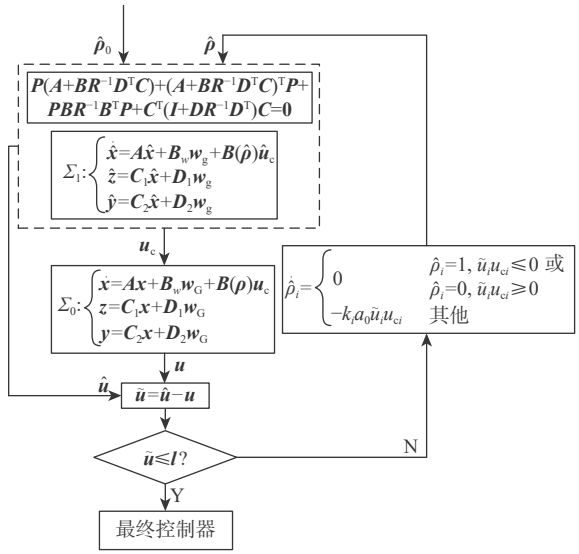



图 5　控制器重构步骤流程

Fig. 5　Steps and flows of controller reconfiguration

## 4　仿真结果及分析

某大展弦比柔性飞机的舵面布置如图 6 所示。飞机有一对大展弦比机翼, 每侧有 3 个后缘舵面、1 个 V 型尾翼和 1 对升降舵, 选用 1 号舵面和 2 号舵面作为阵风减缓舵面, 偏转角角度分别用$\delta_1$和$\delta_2$表示, 主要结构参数如表 1 所示。

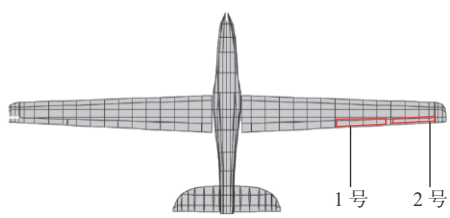



图 6　大展弦比柔性飞机舵面布置

Fig. 6　Rudder surface arrangement of flexible aircraft with large aspect ratio

**表 1　某大展弦比柔性飞机主要结构参数**

**Table 1　Main structural parameters of flexible aircraft with large aspect ratio**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 翼展/m | 4.5 |
| 平均气动弦长/m | 0.29 |
| 展弦比 | 15.52 |
| 机身长/m | 2.2 |
| 尾翼展长/m | 0.8 |
| V尾夹角/(°) | 110 |

利用 NASTRAN 软件对结构有限元模型进行动力学仿真, 包含沉浮和俯仰两阶刚体模态及机翼对称一弯、内副翼对称旋转和外副翼对称旋转等弹性模态, 并利用 ZAERO 计算速度 35 m/s、空气密度 1.225 kg/m$^3$情况下的非定常气动力, 分析该飞行

状态下的阵风响应。

### 4.1 作动器理想工作情况下的阵风减缓

假设飞机所有舵面作动器均无效能损耗能够正常工作，即$\rho_1 = \cdots = \rho_m = 1$。

以“1-cos”离散阵风为外部干扰，开环控制、PID控制、主动容错控制器下的额外翼根弯矩如图7所示，主动容错控制器和PID控制器的舵面偏转角如图8所示。

由图7可知，开环情况下机翼翼根弯矩最大响应幅值接近197 N·m，打开PID阵风减缓控制系统后，机翼翼根弯矩最大响应幅值为62.12 N·m，减缓率接近68.5%；打开主动容错阵风减缓控制系统后，机翼翼根弯矩最大响应幅值为51.39 N·m，减缓率接近73.9%，且过渡时间更短，振荡次数更少。由图8可知，舵面偏转角在容许范围内。

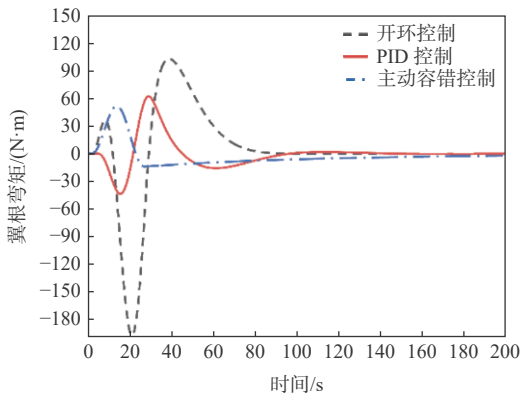



图7 “1-cos”阵风激励理想情况下的翼根弯矩

Fig. 7 Wing-root bending moment under nominal “1-cos” gust excitation

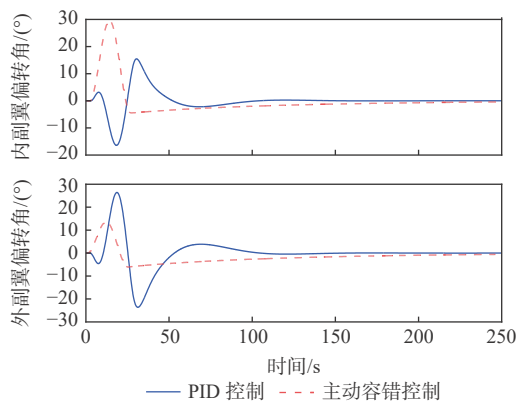



图8 “1-cos”阵风激励理想情况下的舵面偏转角

Fig. 8 Rudder surface deflection angle under nominal “1-cos” gust excitation

以作用时间为12.5 s的Dryden连续阵风为外部干扰，开环控制、PID控制、主动容错控制器下的额外翼根弯矩如图9所示。主动容错控制器及PID控制器舵面偏转角如图10所示。

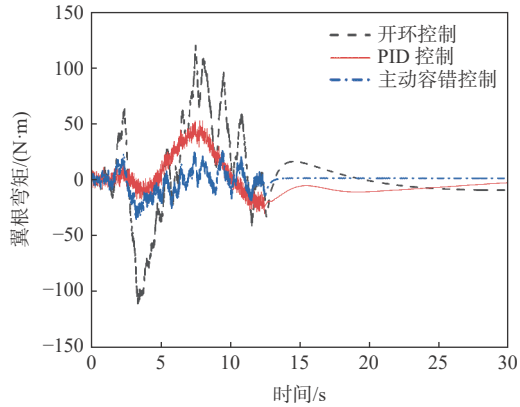



图9 Dryden阵风激励理想情况下的翼根弯矩

Fig. 9 Wing-root bending moment under nominal of Dryden gust excitation

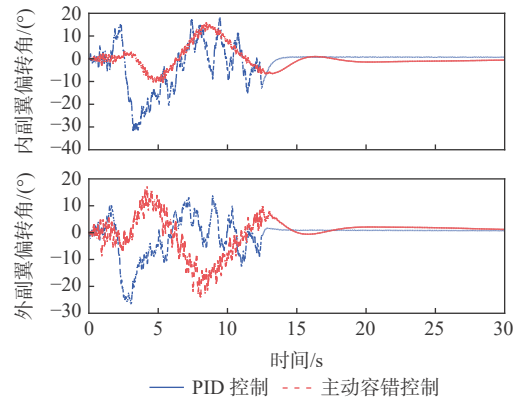



图10 Dryden阵风激励理想情况下的舵面偏转角

Fig. 10 Rudder surface deflection angle under nominal Dryden gust excitation

由图9可知，开环情况下，机翼翼根弯矩最大响应幅值接近119.47 N·m，打开PID阵风减缓控制系统后，机翼翼根弯矩最大响应幅值为52.29 N·m，减缓率接近56.2%；打开主动容错阵风减缓控制系统后，机翼翼根弯矩最大响应幅值为35.94 N·m，减缓率接近69.9%。

对于2种阵风扰动，主动容错阵风减缓控制器均能在理想情况下有效减缓阵风引起的额外翼根弯矩。

### 4.2 作动器效能损耗情况下的阵风减缓

在飞机存在作动器效能损耗的情况下，验证主动容错控制器的阵风减缓控制效果。

假设内副翼和外副翼作动器正常工作或舵面效能损失，升降舵和襟翼正常工作。描述为：$\varepsilon_1 \leqslant \rho_1 \leqslant 1$，$\varepsilon_2 \leqslant \rho_2 \leqslant 1$，其中，$\varepsilon_1$和$\varepsilon_2$设置为0.3。

将以下故障注入系统：

$$\rho_1(t) = \rho_2(t) = 0.5 \quad t > 0 \tag{21}$$

在“1-cos”阵风激励下，舵面效能因子的估计值及其变化率如图11和图12所示，阵风响应及舵

面实际偏转角如图 13 和图 14 所示。

由图 11 可知, 本文所述的舵面效能估计方案能够及时准确地估计出效能因子$\boldsymbol{\rho}$, 图 12 为效能因子估计值的变化率$\dot{\hat{\boldsymbol{\rho}}}$, 能够反映其估计过程; 0～3.4 s 属于调节阶段, 估计效能因子从初值 1 调节至实际效能因子 0.5。根据图 13 可知, 机翼翼根弯矩在该时间段内有微小可接受振荡, 其幅值约为 25 N·m, 3.4 s 后舵面效能因子处于容差允许范围内, 此时阵风减缓控制器已迭代至稳定, 翼根弯矩有明显减缓效果, 与图 7 的理想情况下阵风响应后半段相似。

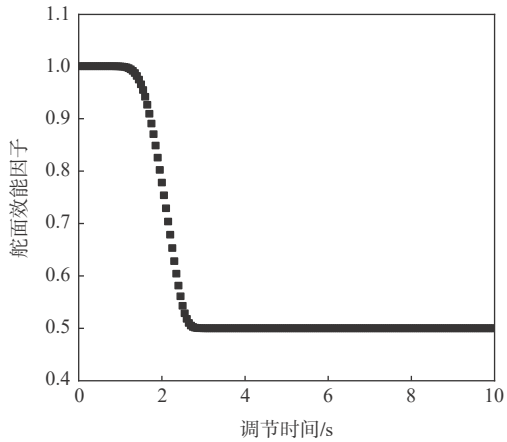



图 11　考虑效能损失“1-cos”阵风激励下估计效能因子

Fig. 11　Estimation of efficiency factor under “1-cos” gust excitation considering efficiency loss

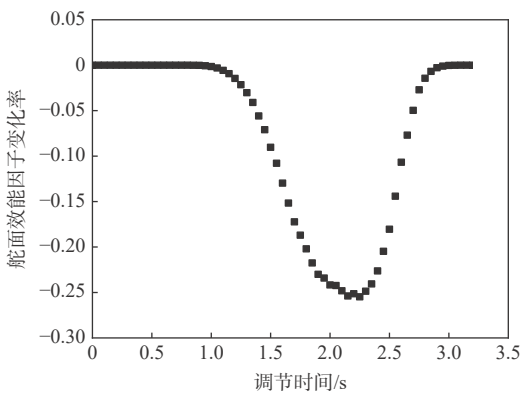



图 12　考虑效能损失“1-cos”阵风激励下估计效能因子变化率

Fig. 12　Estimated efficiency factor change rate under “1-cos” gust excitation considering efficiency loss

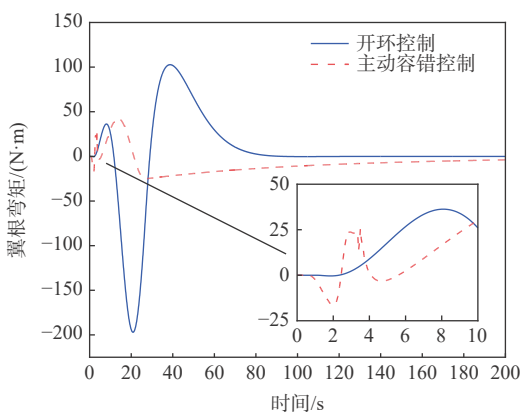



图 13　考虑效能损失“1-cos”阵风激励下翼根弯矩

Fig. 13　Wing-root bending moment under “1-cos” gust excitation considering efficiency loss

在 Dryden 阵风激励下, 效能因子的估计值及其变化率如图 15 和图 16 所示, 阵风响应及舵面偏转角如图 17 和图 18 所示。

与“1-cos”离散阵风激励下情况类似, 所设计

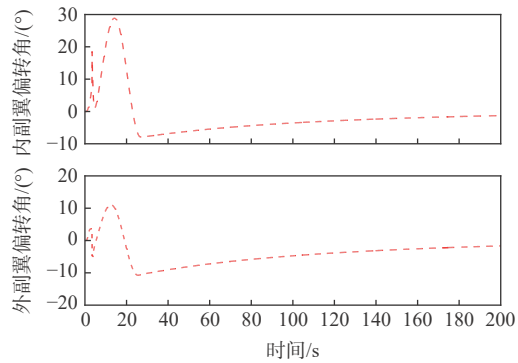



图 14　考虑效能损失“1-cos”阵风激励下舵面偏转角

Fig. 14　Rudder surface deflection angle under “1-cos” gust excitation considering efficiency loss

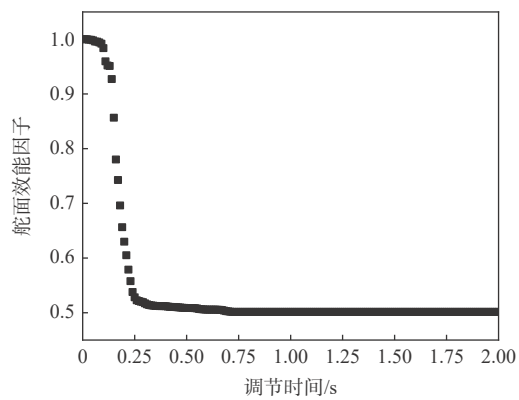



图 15　考虑效能损失 Dryden 阵风激励下估计效能因子

Fig. 15　Estimation of efficiency factor under Dryden gust excitation considering efficiency loss

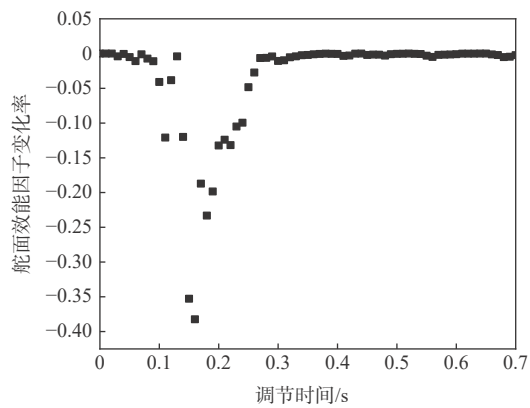



图 16　考虑效能损失 Dryden 阵风激励下估计效能因子变化率

Fig. 16　Estimated efficiency factor change rate under Dryden gust excitation considering efficiency loss

的效能因子估计方案能够及时准确地估计出舵面效能因子。由图 15 和图 16 可知，0～0.7 s 属于调节阶段，由图 17 和图 18 可知，控制器正常工作后，翼根弯矩有明显减缓效果，与图 9 所示理想情况下相似。

根据 2 种不同阵风激励的仿真情况可知，连续阵风下所设计的主动容错阵风减缓控制器能更快地估计出实际效能因子，同时也会引起较大的振荡幅值。

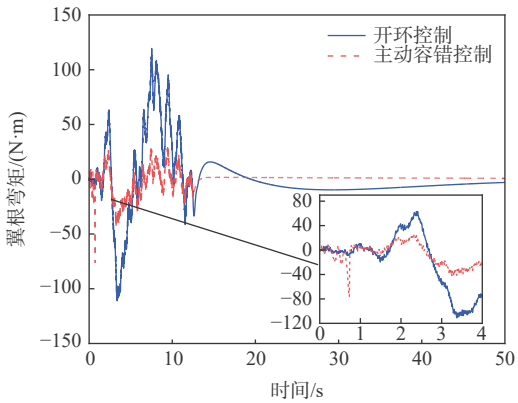



图 17 考虑效能损失 Dryden 阵风激励下翼根弯矩

Fig. 17 Wing-root bending moment under Dryden gust excitation considering efficiency loss

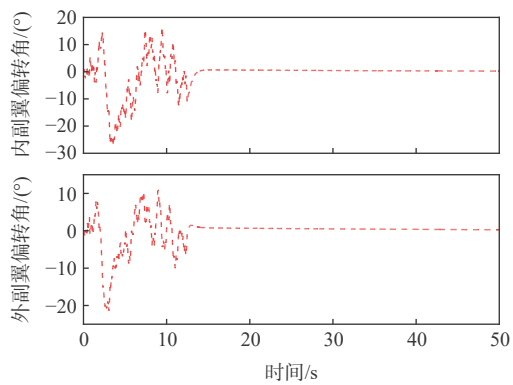



图 18 考虑效能损失 Dryden 阵风激励下舵面偏转角

Fig. 18 Rudder surface deflection angle under Dryden gust excitation considering efficiency loss

### 4.3 本文控制方案性能分析

针对“1-cos”阵风激励下的舵面效能损失情况，对可调节增益$k_i$的选取进行研究与分析，部分增益选取和调节结果如表 2 所示，效能因子及阵风响应如图 19 和图 20 所示。

由图 19 和图 20 可知，当调节增益过小时，作动器效能因子的估计值下降梯度较大，且是正相关的；当调节增益过大时，下降梯度较小。研究表明，过小的调节增益不仅会带来较大的调节时间，而且还会产生不合理的作动器控制输入；过大的调节增益会对自适应控制律及减缓系统的稳定性带来不利影响。

表 2 调节增益分析

Table 2 Adjustment gain analysis

| 调节增益 | 调节次数 | 调节时间/s | 调节幅值/(N·m) |
|---|---|---|---|
| 100 | | | |
| 150 | 80 | 4.00 | 28.115 8 |
| 190 | 69 | 3.45 | 24.224 0 |
| 200 | 68 | 3.40 | 23.793 4 |
| 220 | 65 | 3.25 | 23.204 4 |
| 230 | 64 | 3.20 | 22.843 6 |
| 240 | 63 | 3.15 | 22.590 5 |
| 250 | 62 | 3.10 | 22.225 8 |

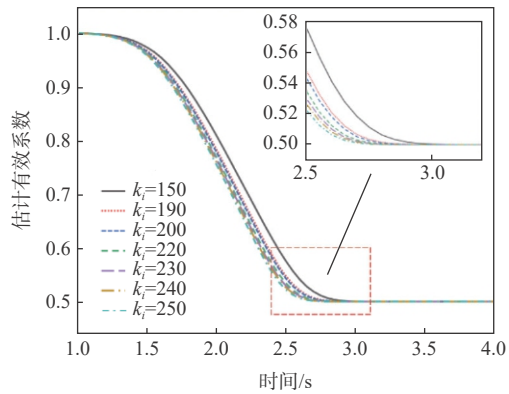



图 19 调节增益-效能因子分析

Fig. 19 Adjustment gain-efficiency factor analysis

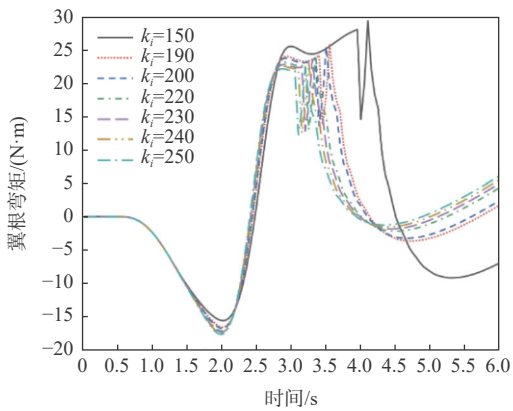



图 20 调节增益-翼根弯矩分析

Fig. 20 Adjustment gain-wing-root bending moment analysis

## 5 结 论

考虑舵面效能提出了一种自适应重构设计方案，以某大展弦比柔性飞机为受控对象，设计阵风减缓主动容错控制器，以减小阵风载荷，结果表明：

1）无舵面效能损耗情况下，主动容错控制器相较于 PID 控制和开环控制情况下，能够取得较好的减缓效果。

2）对于存在未知舵面效能损耗情况下，主动容错控制器能够快速准确评估舵面效能因子，以初

始阶段小幅度振荡为代价整体上达到阵风减缓的效果。

3) 较大的调节增益会使系统调节时间较短, 且调节幅值较小, 当调节增益上升至某一上限时, 会给系统的稳定性带来不利影响, 经过分析, 这种不利影响可能是由于较大的效能因子变化率导致系统产生过大的偏转角及低于实际效能因子较多的效能因子估计值。

## 参考文献（References）


[1] 杨超, 黄超, 吴志刚, 等. 气动伺服弹性研究的进展与挑战[J]. 航空学报, 2015, 36(4): 1011-1033.
YANG C, HUANG C, WU Z G, et al. Progress and challenges for aeroservoelasticity research[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(4): 1011-1033(in Chinese).

[2] 杨超, 邱祈生, 周宜涛, 等. 飞机阵风响应减缓技术综述[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 208-248.
YANG C, QIU Q S, ZHOU Y T, et al. Review of aircraft gust alleviation technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 208-248(in Chinese).

[3] 金长江, 肖业伦. 大气扰动中的飞行原理[M]. 北京: 国防工业出社, 1992.
JIN C J, XIAO Y L. Flight principle with atmosphere turbulence [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1992(in Chinese).

[4] WU Z G, CHEN L, YANG C. Study on gust alleviation control and wind tunnel test[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(3): 527350.

[5] 杨澜, 安朝, 谢长川, 等. 基于状态空间涡格法的阵风减缓分析研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(7): 1200-1209.
YANG L, AN C, XIE C C, et al. Gust load alleviation analysis based on vortex lattice method in state-space form[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(7): 1200-1209(in Chinese).

[6] GANGSAAS D, LY U, NORMAN D. Practical gust load alleviation and flutter suppression control laws based on a LQG methodology[C]//Proceedings of the 19th Aerospace Sciences Meeting. Reston: AIAA, 1981: 21.

[7] 吴志刚, 杨超. 主动气动弹性机翼的颤振主动抑制与阵风减缓研究[J]. 机械强度, 2003, 25(1): 32-35.
WU Z G, YANG C. Investigation on active flutter suppression and gust alleviation for an active aeroelastic wing[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(1): 32-35(in Chinese).

[8] AOUF N, BOULET B, BOTEZ R M. Robust gust load alleviation for a flexible aircraft[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 2000, 46(3): 131-139.

[9] WILDSCHEK A, MAIER R, HROMČÍK M, et al. Hybrid controller for gust load alleviation and ride comfort improvement using direct lift control flaps[C]//Proceedings of the 3rd European Conference for Aerospace Sciences. Paris: EUCASS, 2009: 21.

[10] WANG Y N, WYNN A, PALACIOS R. Model-predictive control of flexible aircraft dynamics using nonlinear reduced-order models[C]//Proceedings of the 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston: AIAA, 2016: 0711.

[11] BARZGARAN B, QUENZER J D, MESBAHI M, et al. Real-time model predictive control for gust load alleviation on an aeroelastic wind tunnel test article[C]//Proceedings of the AIAA Scitech 2021 Forum. Reston: AIAA, 2021: 1-18.

[12] ETKIN B. Turbulent wind and its effect on flight[J]. Journal of Aircraft, 1981, 18(5): 327-345.

[13] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 392-419.
WU S T, FEI Y H. Flight control[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005: 392-419(in Chinese).

[14] YANG Y X, WU Z G, YANG C. Control surface efficiency analysis and utilization of an elastic airplane for maneuver loads alleviation [C]//Proceedings of the 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston: AIAA, 2013: 1487.

[15] 杨阳, 杨超, 吴志刚. 基于舵机动态特性测试的阵风减缓控制系统设计[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 106-112.
YANG Y, YANG C, WU Z G. A design of gust alleviation control system based on test of actuator's dynamic characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock. 2020, 39(4): 106-112(in Chinese).

[16] FAN W, LIU H H, KWONG R. The influence of control surface faults on flexible aircraft[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2016: 0082.

[17] HAGHIGHAT S, LIU H H T, MARTINS J R R A. Model-predictive gust load alleviation controller for a highly flexible aircraft[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(6): 1751-1766.

[18] ZHANG Y M, JIANG J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32: 229-252.

[19] EDWARDS C, LOMBAERTS T, SMAILI H. Fault tolerant flight control: A benchmark challenge[M]. Berlin: Springer, 2010.

[20] STEINBERG M. Historical overview of research in reconfigurable flight control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2005, 219(4): 263-275.

[21] YU M J, RAHMAN Y, ATKINS E M, et al. Minimal modeling adaptive control of the NASA generic transport model with unknown control-surface faults[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2013: 4693.

[22] FAN W, LIU H H, KWONG R. Gust load alleviation control for a flexible aircraft with loss of control effectiveness[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2017: 1721.

[23] PUSCH M, KIER T M, TANG M, et al. Advanced gust load alleviation using dynamic control allocation[C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum. Reston: AIAA, 2022: 0439.

[24] HOUBOLT J C. Design manual for vertical gusts based on power spectral techniques[Z]. Princeton: Aeronautical Research Associates of Princeton Inc NJ, 1970.

[25] MOORHOUSE D J, WOODCOCK R J. US military specification: Flying qualities of piloted airplanes: MIL-F-8785C[Z]. Washington, D.C.: US Department of Defense, 1980.

[26] ZHOU K, DOYLE J C. Essentials of robust control[M]. Upper

Saddle River: Prentice Hall, 1998.

[27] WANG H, DALEY S. Actuator fault diagnosis: An adaptive observer-based technique[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 41(7): 1073-1078.

[28] GOLDHIRSCH I, SULEM P L, ORSZAG S A. Stability and Lyapunov stability of dynamical systems: A differential approach and a numerical method[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1987, 27(3): 311-337.

# Gust alleviation control system of flexible aircraft considering rudder efficiency

LIU Yisi[1], YANG Youxu[1,*], LIU Yi[2], CHENG Zhiyong[1], YU Lingfu[1]

(1. School of Flight Vehicle and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Beijing Research Institute of Mechanical and Electric Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract**: The rudder surface effectiveness loss directly affects the gust alleviation effect of flexible aircraft, considering the rudder surface effectiveness loss is the key to the design of an active gust alleviation control system. In order to tackle the issue of gust interference in flexible aircraft, a high aspect ratio flexible aircraft model is utilized to create a structural dynamics model of the flexible aircraft that takes into account elastic modes and rigid body motion. Additionally, the rudder effectiveness loss of the rudder surface actuator is taken into consideration. An adaptive observer is designed to estimate the efficiency factor of the rudder surface actuator online in real-time, reconstruct and solve the adaptive active fault-tolerant $H_\infty$ controller, and achieve aircraft gust load alleviation. Under discrete and continuous gust excitation, simulation of the aircraft's open/closed loop time domain response demonstrates that both $H_\infty$ control and proportional-integral-derivative (PID) control can achieve better alleviation effects under the rudder surface ineffective energy loss, and that $H_\infty$ control's response time is faster than PID control's. Under the rudder efficiency loss, the adaptive observer can complete the efficiency factor evaluation in less than 4 seconds, and the $H_\infty$ controller, which is designed based on this efficiency factor, can achieve gust alleviation that is comparable to the ideal scenario.

**Keywords**: aeroservoelastic; gust response; gust alleviation control system; adaptive observer; active fault-tolerant control systems

**Received**: 2022-11-29; **Accepted**: 2023-03-08; **Published Online**: 2023-03-27 13:30

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230327.0931.001

**Foundation items**: 173 Plan (2022-JCJQ-JJ-1135); Jiangxi Province "Double Thousand Plan" Talent Project (CK202006470)

* **Corresponding author**. E-mail: zgdy_1@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0959

# 基于多尺度注意力机制的RAW图像重建

张科[1]，刘昱[1,*]，胡凯[1,2]

(1. 天津大学 微电子学院，天津 300072；2. 天津大学 浙江国际创新设计与智造研究院，绍兴 312000)

**摘 要**：针对传统图像信号处理(ISP)算法繁琐的问题，基于可取代ISP算法的PyNET网络模型，提出一种端到端的RAW图像重建方法Py-CBAM。通过引入高效的注意力机制，并利用该机制对原有网络的多层级多尺度结构进行重设计，实现不同尺度特征的自适应加权，以较大程度提升图像重建的性能。实验结果表明，所提方法在公开的ZRR数据集上获得的峰值信噪比(PSNR)与PyNET方法相比提升了0.37 dB，结构相似度(SSIM)提升了0.001 8。将ZRR数据集和新构建的NRR数据集联合对Py-CBAM重新训练后，PSNR和SSIM分别达到25.73 dB和0.965 4。视觉效果上，所提方法解决了RAW图像重建时的噪声高与色彩失真、畸变等问题，增强模型在多场景不同光照环境条件下的重建能力；重建结果较为真实，视觉质量最优，在图像过曝和过暗区域视觉提升效果较为明显。

**关 键 词**：图像信号处理；图像重建；增强网络；注意力机制；深度学习
**中图分类号**：TN911.73
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0257-08

手机摄影是目前大众主要的拍照方式，如何利用手机拍摄出更高质量的图像，俨然成为了各大手机厂商的主要竞争点。伴随着智能手机的更新换代，手机拍摄出的图像质量与专业设备之间的差距也在不断缩小，这得益于智能手机的图像信号处理(image signal processing, ISP)算法。传统的ISP算法具有较为繁琐的流程，其中，相机的CMOS元件捕捉到环境的光信号后，得到RAW图像文件，但该文件的可视化还要经过黑电平矫正、白平衡、去马赛克、降噪、颜色校正和伽马增强等过程才能生成预期的彩色图像。

目前，市场上的绝大多数厂商都把摄像头的升级作为手机的一大卖点。由于传统的ISP算法中负责不同子任务的硬件部分通常都是单独设计的，各子任务之间的相关性不强，同时这种设计方式会导致相机部分占用过多的硬件面积，进而压缩相机升级的空间。卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)在过去几年中被大量应用在图像重建上，并取得了显著性成果。基于此，Schwartz等[1]使用三星S7手机拍摄得到了110张低光照的RAW图像，采用CNN对这些图像实施降噪处理，再结合手工ISP获得彩色的RGB图像。CameraNet[1-2]根据ISP各任务之间的弱相关性，同时构建了一个恢复网络和一个增强网络。上述模型的提出填补了这一方向的空白，然而由于这些方法都采取多阶段式的网络结构，使得训练的过程较为复杂，且容易在图像重建过程中由于误差累积而导致重建效果不佳。

针对图像重建任务，最突出的问题就是需要同时考虑到图像的全局亮度、色彩等特征及局部的细节纹理信息。基于此，Ignatov等[3]提出了PyNET深度学习模型，该模型采用“金字塔”式结构，使得网络提取的高层级在训练过程中也能融入低层级的信息特征，为解决这一问题提供了新的方案且性能最优。然而，针对夜间场景的RAW图像文件，

**收稿日期**：2022-12-03；**录用日期**：2023-02-03；**网络出版时间**：2023-05-05 15:16
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230505.1049.001
**基金项目**：国家自然科学基金(61771338)；天津市科技计划重点项目(18ZXRHSY00190)
*通信作者. E-mail：liuyu@tju.edu.cn

*引用格式：张科，刘昱，胡凯. 基于多尺度注意力机制的RAW图像重建[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：257-264.*
*ZHANG K，LIU Y，HU K. RAW image reconstruction based on multi-scale attention mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：257-264 (in Chinese).*

PyNET模型重建后的图像存在较为明显的高噪声、颜色畸变等问题、严重影响输出图像的质量和使用性。同时，目前缺少针对夜间场景的RAW文件图像重建的数据集。

为解决以上问题，本文基于PyNET方法，设计了一个全新的可代替ISP流程的端到端深度学习模型Py-CBAM。该方法引入注意力机制的思想，设计了多卷积块注意力模块（multi-convolution block attention module, MCBAM），并将其与PyNET方法的多层级及多尺度结构充分融合，对提取的图像特征实现自适应加权。同时，针对夜间场景数据短缺的问题，采集并构建了4 500个夜间场景的RAW-RGB图像对，并命名为NRR（night of RAW-RGB）数据集。

主要贡献如下：

1）提出一种全新的可代替ISP流程的端到端深度学习模型Py-CBAM。该模型有助于解决图像重构任务在夜间场景下存在的严重噪声和颜色畸变等问题，提高并改善对RAW图像重建的性能。

2）引入CBAM注意力机制[4]，并将其与PyNET方法的多层级及多尺度结构充分融合，对提取的图像特征实现自适应加权。

3）构建了一个基于夜间场景的RAW-RGB图像对NRR数据集，该数据集可实现针对夜晚场景图像重建模型的训练与测试。

## 1 相关工作

在传统ISP设计中，需要为每个ISP的子任务开发特定的算法。该方法将复杂的ISP设计问题分化成若干个简单的子问题，在一定程度上简化了ISP流程，但会造成整个算法流的积累误差，导致图像重建无法达到预期效果[5]。同时，传统ISP算法无法在一些特定的场景中生成高质量图像，如夜晚场景。

近年来，许多学者在图像恢复与重建[6]工作方面做了大量研究，在处理ISP子任务时，也有很多经典方案，如去马赛克[7]、降噪[8]、颜色校正[9]、白平衡[10]等，但是这些方法用CNN很难实现。随着深度学习被大量应用在图像重建问题上，CNN模型逐渐成为有效的解决方案，如最简单的CNN模型[11]、深度残差模型[12]、金字塔模型[13]等。

图像由RAW文件向RGB空间映射需要考虑全局特征与局部细节特征的结合。在解决图像重建中的全局特征问题时，文献[14]为图像的全局调色提供了一种基于深度学习的解决方案；文献[15]提出了一种自动全局亮度和伽马矫正的解决方案。在局部细节方面，去模糊[16]和降噪[17]是具有一定相关性的过程，目的是消除图像的噪点，增加图像的清晰度。

随着神经网络的发展，学者们尝试训练可以将相机捕捉到的RAW文件映射到RGB空间形成彩色图像的端到端的深度学习模型。CameraNet[2]根据ISP子任务之间的弱相关性，构建了一个恢复网络和一个增强网络。DeepISP[1]采用两阶段的结构方式，解决了全局特征与局部特征的问题。W-Net[18]则采用另一种两阶段方式，将2个U-Net堆叠，更好地解决了ZRR数据集中手机照片与专业的单反照片像素点对齐的问题。文献[19]提出了一种图像像素点对齐和RGB图像重建联合学习方法，用来解决RAW与RGB图像对数据不匹配的问题。GenISP[20]用于处理低光照下的RAW文件，提升了低光条件下图像目标检测性能。CSANet[21]在轻量级卷积层中引入注意力机制，提高了处理速度，并取得不错的视觉效果。AWNet[22]引入小波变换及注意力机制来代替ISP，小波变换可以获得更大的感受野，提高计算效率。PyNET采用了“倒金字塔”结构，原理类似于U-Net，多层结构使其可以同时考虑图像的全局特征与局部特征，提供了一种基于CNN端到端的解决方案，并在测试实验中[3]优于众多经典的深度学习模型，体现了极强的性能，重建效果如图1所示。

图1 可视化RAW文件与重建图像

Fig. 1 Visualized RAW data and reconstructed image

## 2　本文方法

### 2.1　多卷积块注意力模块

根据人类的视觉神经系统分析, 注意力在视觉感官上极为重要。例如, 对双眼捕捉到的整个场景, 无法提取所有细节信息, 只能将“注意力”有选择性地放在人类更感兴趣的部分。同理, 文献[23]将注意力原理与 CNN 相结合, 使模型在提取图像特征时将“注意力”放在更突出图像特性的细节特征中, 以此提升整个模型的性能。基于此, 本文方法引入了 CBAM 注意力机制。其中, CBAM 为一个轻量级的注意力模块, 其主要融合通道注意力(channel attention, CA)机制与空间注意力(spatial attention, SA)机制来提取输入图像的特征, 结构如图 2 所示。首先, 输入特征图, 经过通道注意力模块, 处理后得到中间特征图; 然后, 将其输入空间注意力模块, 与通道注意力模块不同, 空间注意力模块是前者的补充, 其倾向于“哪里”是有效的信息区域; 最后, 输出空间注意力特征图。CBAM 的使用更加有效地突出了图像中期望的有效信息。

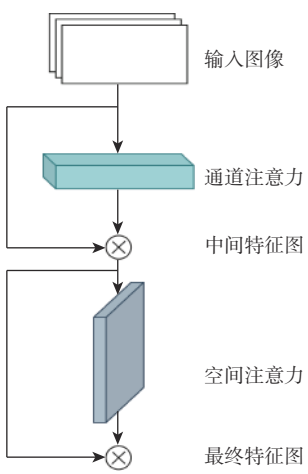



图 2　卷积块注意力模块

Fig. 2　Convolutional block attention module

多卷积块(multi-convolution block, MCB)为 PyNET 模型中的基本模块, 由 2 个相同卷积核的卷积层构成, 大小分别为 3×3、5×5、7×7、9×9。为能将 CBAM 注意力机制与 PyNET 模型中的多层级及多尺度结构充分融合, 本文构建了 MCBAM。其主要将 MCB 融合后的多尺度特征图采用 CBAM 注意力机制进行自适应加权, 实现图像感兴趣区域在通道和空间上的突出, 该结构如图 3 所示。由于 MCB 采用多种尺度的卷积核, 根据采用的卷积核大小可将 MCBAM 分为 4 种, 即 MCBAM3、MCBAM5、MCBAM7、MCBAM9。这些基本模块依靠从 3×3 到 9×9 大小的卷积滤波器对特征图进行并行处理,

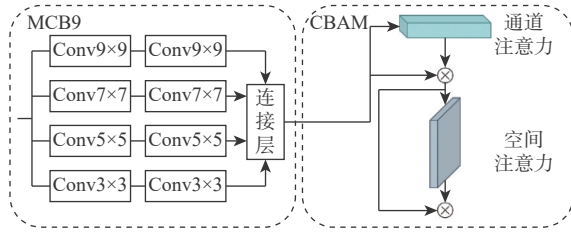



图 3　多卷积块注意力模块

Fig. 3　Multi-convolution block attention module

例如, MCBAM3 只有 3×3 的卷积核, 而 MCBAM5 中并联了 3×3、5×5 的卷积核, MCBAM7 并联了 3×3、5×5、7×7 的卷积核, MCBAM9 同理。

### 2.2　本文模型结构

深受 PyNET 方法对 RAW 图像高质量重建的影响, 本文方法在此基础上引入了注意力机制, 设计的 Py-CBAM 网络模型如图 4 所示, 主要采用倒金字塔式结构。该模型共含有 5 个网络层, 每个网络层主要由多个含跳跃连接的 MCB 和 MCBAM 级联构成, 其中, 每层采用的 MCB 和 MCBAM 由浅层到深层随着特征图尺寸的减小而逐渐减少, 这种模型结构可同时兼顾到图像的全局与局部特征。同时, 针对注意力机制的引入, Py-CBAM 模型主要从网络层的第 4 层开始, 自下而上, 位于前一个上采样卷积层的输出之间, 并非针对每个网络层或每个基本模块都嵌入 CBAM。该注意力机制的引入策略可以增加网络对图像多尺度高频信息的感知能力及有效特征信息的聚合能力。

本文方法的详细设计原理为: 输入 448×448×1 的 RAW 图像文件 $\boldsymbol{I}_{\text{raw}}$, 使用拜尔提取函数 $f_{\text{Bayer}}$, 分别对拜尔阵列中的 $R$、$G_r$、$G_b$、$B$ 这 4 个分量进行像素信息提取, 该过程可表示为

$$\boldsymbol{F}_{rggb}^{224\times224\times4}=f_{\text{Bayer}}(\boldsymbol{I}_{\text{raw}}^{448\times448\times1}) \tag{1}$$

可得到 224×224×4 的 RGGB 图像 $\boldsymbol{F}_{rggb}$, 将其输入网络的第 1 层。其中, 输入的图像每次向低层级传入都会进行 2×2 的最大池化(MaxPool)降采样, 该过程持续循环到第 5 个卷积层。采用 MCB3 模块多次卷积, 并将其上采样输出的特征图和前一层经过 MCB3 模块卷积后输出的特征图采用卷积层连接, 连接后的输出作为该层网络的输入, 可表示为

$$\boldsymbol{F}_I^1=\text{MCBAM3}(\boldsymbol{F}_{rggb}) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{F}_I^{i+1}=\text{MCBAM3}(\text{MaxPool}(\boldsymbol{F}_I^i)) \qquad i\in\{1,2,3,4\} \tag{3}$$

输入特征图经过每层的 MCB3 或 MCBAM 卷积块多次卷积后输出图像 $\boldsymbol{F}_O^i$, 可表示为

$$\boldsymbol{F}_O^5=\boldsymbol{G}^5(\boldsymbol{F}_I^5) \tag{4}$$

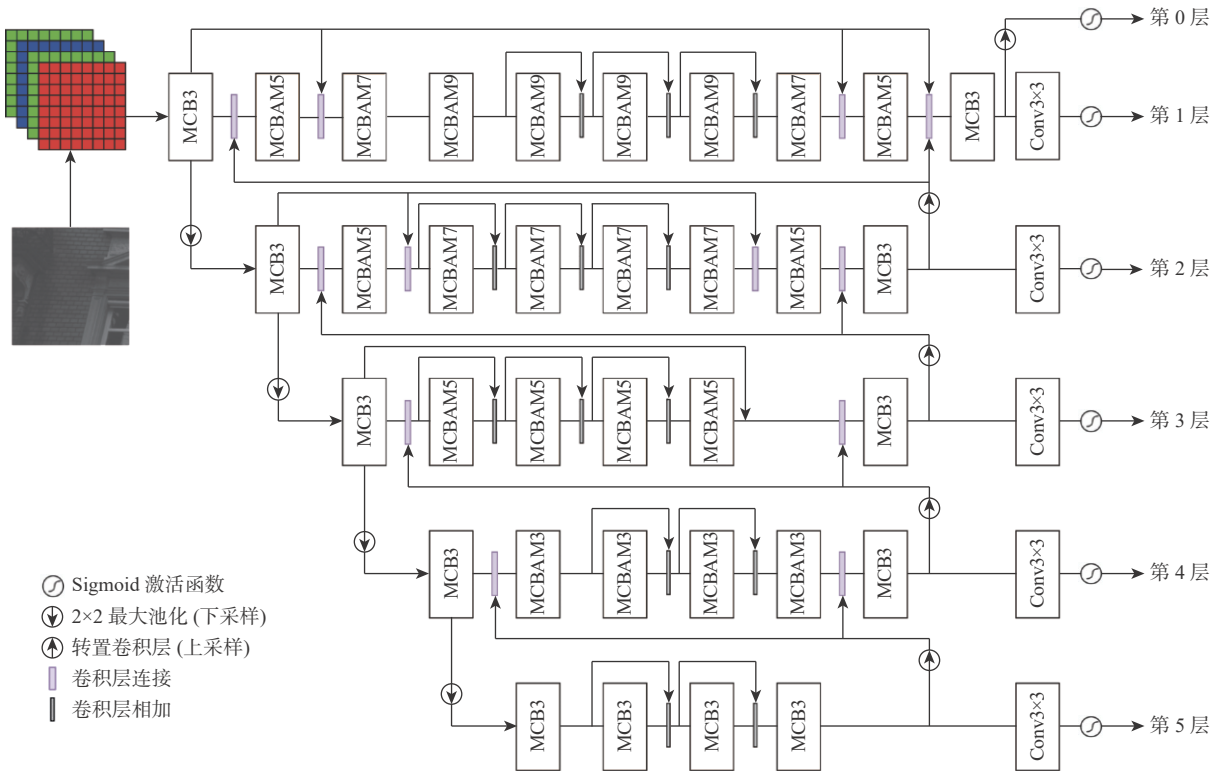



图 4 本文所提的 Py-CBAM 模型结构

Fig. 4 Py-CBAM model structure mentioned in this article

$$\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{O}}^{i}=\boldsymbol{G}^{i}(\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{I}}^{i},\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{I}}^{i+1}) \qquad i\in\{1,2,3,4\} \tag{5}$$

式中：$i$ 为当前网络层；$\boldsymbol{G}^{i}$ 为训练层在Conv3(·)之前的所有卷积操作。

通过 3×3 的卷积层与 tanh 激活函数，最终输出该层的特征图：

$$\boldsymbol{F}_{rgb}^{i}=\tanh(\mathrm{Conv3}(\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{O}}^{i})) \qquad i\in\{1,2,3,4,5\} \tag{6}$$

式中：Conv3(·)表示经过卷积核大小为 3 的卷积层；tanh(·)表示采用 tanh 非线性激活函数。

将第 1 层输出的 224×224×3 的 RGB 图像经过转置卷积层Transpose(·)和 tanh 激活函数tanh(·)：

$$\boldsymbol{F}_{rgb}=\tanh(\mathrm{Transpose}(\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{O}}^{1})) \tag{7}$$

输出得到与初始输入长宽尺寸相同的 448×448×3 的 RGB 图像。

### 2.3 损失函数

针对 Py-CBAM 模型的训练，本文采用均方差(mean squared error, MSE) 损失$L_{\mathrm{MSE}}$、VGG 网络 relu5_4 的感知损失 $L_{\mathrm{VGG}}$和多尺度结构的相似性系数度量损失 (multi-scale structural similarity index measure, MS-SSIM) $L_{\mathrm{MS\text{-}SSIM}}$用于联合优化，可表示为

$$L=\alpha L_{\mathrm{MSE}}+\beta L_{\mathrm{VGG}}+\gamma L_{\mathrm{MS\text{-}SSIM}} \tag{8}$$

式中：$\alpha$、$\beta$和$\gamma$为超参数，在网络的不同层，其设置的具体数值有所差异。

由于本文模型采取从低层级向高层级逐层向上训练，在对网络的第 4 层和第 5 层进行训练时，主要对原图像采取 8 倍与 16 倍下采样操作后缩小的图像进行处理。该过程主要用于解决全局图像的色彩与亮度问题，此时$\alpha$设置为 1，$\beta$和$\gamma$设置为 0；当训练网络的第 2 层和第 3 层时，该过程是对下采样操作后缩小了 2 倍和 4 倍的图像进行处理，$\alpha$设置为 1，$\beta$设置为 0.01，$\gamma$设置为 0；当训练网络的第 1 层及最高层级的 Transpose 层时，仅将$\gamma$设置为 0.2，其余参数与网络第 2 层和第 3 层的训练设置相同，这样的设置有助于增加照片重建的动态范围，减小颜色偏差。

## 3 实 验

### 3.1 训练细节

#### 3.1.1 数据集

ZRR 数据集[3]为本文方法用于训练模型所采用的数据集，该数据集是在不同的地点、不同的光照强度及不同的天气状况下收集得到。数据内容主要为：约 48 000 个 448×448 的 RAW-RGB 图像对(RAW 文件的通道数为 1，RGB 图像的通道数为 3)，其中，RAW 图像文件由华为 P20 手机拍摄得到，RGB 图像由佳能 5D Mark IV 单反相机所采集，并使用 RANSAC 算法[24]对每个 RAW-RGB 图像对进行像素点严格对齐。关于训练集、验证集和测试集的划分，将其中的 40 000 个 RAW-RGB 图像对用于模型的训练与验证，剩余的 8 000 个图像对用于

模型的测试。

NRR 数据集是针对夜晚场景在不同的地点和不同的天气条件下拍摄并制作而成。拍摄所采用的电子设备为实验室工程机, 其中, RAW 图像文件和彩色 RGB 图像分别由工程机提供的 RAW 图像输出流程及该设备所采用的 ISP 算法所获取得到。数据集约含有 4 500 个大小为 448×448 的 RAW-RGB 图像对, 其中, 1 500 个图像对用于测试不同方法在夜晚场景下的图像重建性能, 3 000 个图像对作为训练集。

#### 3.1.2　实施细节和评价指标

本文方法模型采用逐级的方式分别对不同的网络层进行训练。首先, 针对模型的第 5 层网络开始训练, 输入 Py-CBAM 网络模型尺寸大小为 224×224 的图像, 经过 4 次下采样, 到达第 5 层网络时, 其尺寸大小为 14×14。然后, 在第 4 层网络的训练过程中, 将第 5 层的输出经上采样处理成尺寸大小为 28×28 的图像, 与第 4 层的输入图像尺寸一致, 并进行卷积层连接操作, 因此, 第 4 层网络包含第 5 层网络的信息特征。以此由深层向浅层类推, 每层网络的训练都需要包含之前所有已经参与训练的网络层。

训练过程需要持续 5 次, 直到第 0 层网络训练完毕, 最终输出尺寸大小为 448×448×3 的 RGB 图像。基于该训练策略, 可以将网络低层次提取的全局特征与高层次提取的局部特征充分结合, 并增强网络深层与浅层特征之间的相关性。

在硬件方面, 本文实验所使用的显卡为单张 Nvidia Tesla V100, 整个网络模型的训练需要约 4 天时间, 其中, 浅层网络训练的时间占绝大部分。基于 TensorFlow 的深度学习架构, 采用的学习率为 0.000 05, 训练的 batchsize 由网络的深层向浅层依次设置为 50, 40, 30, 20, 10, 6。

在评价指标上, 为验证本文方法性能的优异性, 主要采用了 2 个常规的度量指标: 峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)与结构相似度(structural similarity index measure, SSIM)。

### 3.2　消融实验

为验证本文端到端图像重建模型的性能, 以及引入 CBAM 的必要性, 分别对如下变量因子进行对比实验: 通道注意力、空间注意力和两者融合后的 CBAM 注意力机制。其中, 针对通道注意力和空间注意力, 用其代替 CBAM 注意力机制在 Py-CBAM 模型中的位置, 构建成新的模型, 即 Py-CA 模型与 Py-SA 模型, 并开展训练和测试。针对变量因子的消融实验, 本文采用 ZRR 数据集对上述模型的性能进行测试评估。

定量对比结果如表 1 所示。可以看出, 与基线模型 PyNET 相比, Py-CBAM 模型引入注意力机制后, 在各项性能指标上均有提高。当引入含有完整通道注意力和空间注意力机制 CBAM 后, 无论是在 PSNR 还是 SSIM 指标的数值上, 其提升幅度都是最大的。

**表 1　消融实验结果对比**

**Table 1　Comparison of ablation experiment results**

| 模型 | 通道注意力 | 空间注意力 | PSNR/dB | SSIM |
|---|---|---|---|---|
| PyNET | | | 20.77 | 0.860 1 |
| Py-CA | √ | | 20.89 | 0.859 7 |
| Py-SA | | √ | 20.97 | 0.861 0 |
| Py-CBAM | √ | √ | 21.14 | 0.861 9 |

可视化结果如图 5 所示, 其中, 真值(ground truth, GT)为佳能 5D Mark IV 单反相机处理得出的彩色图像。可以看到, 图 5(a)的 PyNET 模型重建图与图 5(e)的 GT 相比色差最为明显。然而, 基于基线模型 PyNET 引入注意力机制后, 会在视觉感官上带来较为明显的提升。针对注意力变量因子, 对比图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)这 3 组图像, 可得出 Py-SA 将“注意力”集中在重建图像中亮度较低的像素点, 导致其局部色调偏暗, 而 Py-CA 与其相反, 整体偏亮。

为验证引入注意力机制对重建图像色彩的平滑性和局部区域亮度的效果, 随机选取 1 000 张 ZRR 测试数据集中的 RAW 图像并使用上述模型重建, 引入图像亮度方差:

$$V_n=\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}\left(x_{ij}-y_{ij}\right)^2 \tag{9}$$

$$V=\frac{1}{1\,000}\sum_{n=1}^{1\,000}V_n \tag{10}$$

首先, 计算第$n$张重构图像与 GT 的方差, 其中, $x_{ij}$为图像第$i$行第$j$列的像素值, $y_{ij}$为 GT 的第$i$行第$j$列的像素值, $H$和$W$分别为图像的高和宽; 然后, 再将每张图像的方差相加, 得到 1 000 张图像的均方差。

不同方法与 GT 的亮度方差对比结果如表 2 所示。本文的 Py-CBAM 方法, 由于基于目前性能最优的 PyNET 模型, 并且引入注意力机制进行结构上多层级及多尺度的重设计, 得到的图像亮度差异方差在 4 个方法中最低, 为 994.3。因此, 使用该方法重建的图像亮度在全局的分布上更为均匀, 视觉效果上也最接近 GT, 解决了图像偏亮、偏暗的同

(a) PyNET (b) Py-SA (c) Py-CA (d) Py-CBAM (e) GT

图5 消融实验视觉效果对比

Fig. 5 Visual effect comparison of ablation experiment

表2 亮度方差对比实验结果

Table 2 Comparison experiments result of brightness variance

| 模型 | 方差 |
|---|---|
| PyNET | 1 108.6 |
| Py-CA | 1 042.0 |
| Py-SA | 1 022.2 |
| Py-CBAM | 994.3 |

时，也不会造成图像畸变。综上可知，Py-CBAM无论在数据指标上还是视觉效果上，都呈现出了最优的性能。

### 3.3 扩展实验

为验证本文方法在不同传感器、多场景、不同光照环境条件下性能的泛化性，采用本文制作的NRR数据集对Py-CBAM模型与PyNET模型进行定量定性对比实验。为能更好地验证不同方法在不同光照环境下对图像重建的性能，将NRR训练集和ZRR训练集联合对Py-CBAM模型与PyNET模型进行训练，并对得到的新模型分别采用NRR测试集进行性能测试。

测试结果如表3所示。在没有使用NRR训练集和ZRR训练集联合训练的情况下，PyNET模型对夜景图像重建后得到的PSNR和SSIM分别只有13.67 dB和0.553 7，数值最小，性能最差。与PyNET模型相比，Py-CBAM模型对夜景图像重建后的PSNR数值和SSIM数值分别提升了约7 dB和0.16，图像的重建质量远高于PyNET，具有较强的泛化能力。同时，在使用NRR训练集和ZRR训练集联合训练后，得到的PyNET(夜晚)模型的PSNR和SSIM指标比PyNET模型分别提高了6.5 dB和0.15；Py-CBAM(夜晚)模型的PSNR和SSIM指标比Py-CBAM模型分别提高了5 dB和0.25。

表3 NRR数据集测试结果对比

Table 3 Comparison of test results on NRR dataset

| 模型 | PSNR/dB | SSIM |
|---|---|---|
| PyNET | 13.67 | 0.553 7 |
| PyNET(夜晚) | 20.22 | 0.705 9 |
| Py-CBAM | 20.54 | 0.715 8 |
| Py-CBAM(夜晚) | 25.73 | 0.965 4 |

可视化结果如图6所示。可看出，图6(a)的PyNET基线模型在图像重建过程中，对于白色光亮部分分配RGB颜色空间时，对$R$分量的权重较大，导致图像整体色调偏红，图片全域有很高的噪声。对于图6(c)的Py-CBAM模型，CBAM的引入使得RGB权重配比更为合理，能够更好地还原真实场景，且图像噪声问题得到了极大改善，但在重建图像中亮度高的区域时存在“光晕”。针对夜景训练集的使用，使得模型在对不同光照图像的重建过程起到了承上启下的作用，由于NRR数据集引入训练，图6(b)和图6(d)的重建图像相比没有引入NRR数据集大大降低了“光晕”现象，PSNR和SSIM等性能指标证明图6(d)的重建图像的噪点更低且更接近于GT。由整体结果可知，本文模型引入CBAM机制后，极大程度解决了重建图像的噪声、色彩失真和畸变等问题，并提升了模型的泛化性，尤其对图像较暗和较亮区域的改善效果较为突出。

(a) PyNET　(b) PyNET (夜晚)　(c) Py-CBAM　(d) Py-CBAM (夜晚)　(e) GT

图 6　夜晚环境下的实验结果对比

Fig. 6　Comparison of experimental results in night environment

## 4　结　论

本文提出一种全新可替代 ISP 流程的端到端深度学习模型，该模型主要通过引入 CBAM 注意力机制对目前最优的 PyNET 网络进行多层级多尺度结构的重设计来增强 RAW 图像重建的性能，并改善图像重建后的视觉感官质量。针对本文模型的性能验证，主要采用 ZRR 数据集，以及本文构建的 NRR 夜间场景数据集，实验结果总结如下：

1）本文方法可实现对 RAW 图像文件的高性能重建，并在 PSNR、SSIM 度量指标上优于 Py-SA、Py-CA、PyNET 等模型，在 PSNR 指标上超过 0.17～0.37 dB，在 SSIM 指标上超过 0.000 9～0.002 2。

2）在视觉效果上，本文方法模型与 Py-SA、Py-CA、PyNET 等模型重建的彩色图像结果相比，视觉感观质量最优，更接近于 GT，并解决了 PyNET 模型色差大、色调过亮或过暗等问题，充分验证了本文方法性能的先进性。

3）本文引入 NRR 数据集后，验证了 Py-CBAM 模型针对夜晚场景具有较强的泛化性。同时，将 NRR 与 ZRR 数据集联合对 Py-CBAM 重新训练，本文方法与改进前的模型相比提升幅度较大，其中 PSNR 达到了 25.73 dB，SSIM 达到了 0.965 4。解决了以往模型在夜晚场景下 RAW 图像重建工作遇到的高噪声及色彩畸变等问题。

4）本文方法针对不同传感器捕获的多场景不同光照环境条件下的 RAW 文件进行重建时，与传统 ISP 算法相比最大的优点就是不需要进行参数调整，而是通过使用相关传感器捕获的 RAW-RGB 图像对模型进行针对性训练的方法来提升模型的图像重建效果。

### 参考文献（References）


[1] SCHWARTZ E, GIRYES R, BRONSTEIN A M. DeepISP: Toward learning an end-to-end image processing pipeline[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(2): 912-923.

[2] LIANG Z T, CAI J R, CAO Z S, et al. CameraNet: A two-stage framework for effective camera ISP learning[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 2248-2262.

[3] IGNATOV A, VAN GOOL L, TIMOFTE R. Replacing mobile camera ISP with a single deep learning model[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 2275-2285.

[4] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: Convolutional block attention module[EB/OL]. (2018-07-17)[2022-11-25]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.06521.

[5] HEIDE F, STEINBERGER M, TSAI Y T, et al. FlexISP: A flexible camera image processing framework[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(6): 231.

[6] ZAMIR S W, ARORA A, KHAN S, et al. Restormer: Efficient transformer for high-resolution image restoration[C]//Proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 5718-5729.

[7] LI X, GUNTURK B, ZHANG L. Image demosaicing: A systematic survey[C]//Proceedings of the Visual Communications and Image Processing. San Diego: SPIE, 2008: 6822-6837.

[8] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2005: 60-65.

[9] KWOK N M, SHI H Y, HA Q P, et al. Simultaneous image color correction and enhancement using particle swarm optimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(10): 2356-2371.

[10] GIJSENIJ A, GEVERS T, VAN DE WEIJER J. Improving color constancy by photometric edge weighting[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(5): 918-929.

[11] SHI W Z, CABALLERO J, HUSZÁR F, et al. Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1874-1883.

[12] LIM B, SON S, KIM H, et al. Enhanced deep residual networks for single image super-resolution[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1132-1140.

[13] LAI W S, HUANG J B, AHUJA N, et al. Deep Laplacian pyramid networks for fast and accurate super-resolution[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 5835-5843.

[14] LEE J Y, SUNKAVALLI K, LIN Z, et al. Automatic content-aware color and tone stylization[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Con-

ference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 2470-2478.

[15] FU X Y, ZENG D L, HUANG Y, et al. A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images[J]. Signal Processing, 2016, 129: 82-96.

[16] GUO C L, YAN Q X, ANWAR S, et al. Image dehazing Transformer with transmission-aware 3D position embedding[C]//Proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 5802-5810.

[17] ZAMIR S W, ARORA A, KHAN S, et al. CycleISP: Real image restoration via improved data synthesis[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 2693-2702.

[18] UHM K H, KIM S W, JI S W, et al. W-Net: Two-stage U-Net with misaligned data for raw-to-RGB mapping[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2019: 3636-3642.

[19] ZHANG Z L, WANG H L, LIU M, et al. Learning RAW-to-sRGB mappings with inaccurately aligned supervision[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2021: 4328-4338.

[20] MORAWSKI I, CHEN Y, LIN Y S, et al. GenISP: Neural ISP for low-light machine cognition[C]//Proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2022: 629-638.

[21] HSYU M C, LIU C W, CHEN C H, et al. CSANet: High speed channel spatial attention network for mobile ISP[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 2486-2493.

[22] DAI L H, LIU X H, LI C Q, et al. AWNet: Attentive wavelet network for image ISP[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2020: 185-201.

[23] WANG F, JIANG M Q, QIAN C, et al. Residual attention network for image classification[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 6450-6458.

[24] VEDALDI A, FULKERSON B. VLFeat: An open and portable library of computer vision algorithms[C]//Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia. New York: ACM, 2010: 1469-1472.

# RAW image reconstruction based on multi-scale attention mechanism

ZHANG Ke[1], LIU Yu[1,*], HU Kai[1,2]

(1. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. International Institute for Innovative Design and Intelligent Manufacturing of Zhejiang, Tianjin University, Shaoxing 312000, China)

**Abstract**: Traditional image signal processing (ISP) algorithms are cumbersome. Therefore, based on the PyNET model that can replace ISP algorithms, an end-to-end RAW image reconstruction method was proposed, called Py-CBAM. This method introduced an efficient attention mechanism and used it to redesign the multi-level and multi-scale structure of the PyNET network to achieve adaptive weighting of features at different scales, so as to improve the image reconstruction performance to a large extent. The experimental results show that the peak signal-to-noise ratio (PSNR) and structural similarity index measure (SSIM) obtained by the proposed method on the publicly available ZRR dataset improve by 0.37 dB and 0.001 8 compared with those by the PyNET method. After retraining the Py-CBAM on the ZRR dataset and the newly constructed NRR dataset, the PSNR and SSIM reach 25.73 dB and 0.965 4, respectively. Visually, the proposed method solves the problems of high noise and chromatic aberration and distortion in RAW image reconstruction. It can also enhance the reconstruction ability of the model under different lighting environment conditions in multiple scenes. The reconstruction results are more realistic and have better visual quality, especially in the overexposed and dark areas of the image.

**Keywords**: image signal processing; image reconstruction; augmentation network; attention mechanism; deep learning

**Received**: 2022-12-03; **Accepted**: 2023-02-03; **Published Online**: 2023-05-05 15:16

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230505.1049.001

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (61771338); Key Project of Tianjin Science and Technology item (18ZXRHSY00190)

* **Corresponding author**. E-mail: liuyu@tju.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0961

# 基于共形几何代数的七杆巴氏桁架位置分析

黄昔光[1,*]，吴一帆[2]，刘东裕[2]

(1. 北京邮电大学 智能工程与自动化学院，北京 100876；2. 北方工业大学 机械与材料工程学院，北京 100144)

**摘 要**：机构位置分析是机构运动学和动力学研究的基础。针对传统机构位置分析理论旋转坐标变换矩阵运算繁琐、多元高次非线性方程组求解困难等问题，提出了一种七杆巴氏桁架的位置分析共形几何代数(CGA)方法。利用CGA中的平移、旋转算子和几何积，建立各个运动点的位置坐标表达式；根据CGA中内积几何性质，直接获得该机构的一元16次位置输入-输出方程及其所有解析解；将该高次方程求解出的所有解进行回代，获得机构所有运动点的位置坐标，并通过数字实例验证所提方法的有效性。结果表明：所提方法的几何直观性显著优于传统的复向量法、D-H矩阵法，不仅可以避免矩阵运算和消元运算，且求解无增根也无漏根。

**关 键 词**：几何代数；运动学分析；七杆巴氏桁架；几何直观性；解析解

**中图分类号**：TG112

**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0265-07

1844年，德国数学家Grassmann引入外积的概念成功解决了向量与复数之间的数值运算[1]。1878年，Clifford结合Hamilton四元数和Grassmann代数理论结构创立了Clifford代数[2]。随后，Hestenes提出了几何代数理论，并被广泛应用于物理研究[3]。20世纪末，李洪波在Hestenes提出的几何代数的基础上提出了共形几何代数(conformal geometric algebra, CGA)[4-5]，成为国际几何代数研究的主流，广泛应用于计算机图形学、计算机辅助设计、计算机视觉、动画等高技术领域，以及数学、宇宙学等基础研究领域[6-7]。

近年来，共形几何代数逐步应用于机构学与机器人学研究。Zamora等运用共形几何代数研究了串联机构的运动学逆解问题[8]。Wang等提出了一种采用串联机构进行逆运动学共形几何代数求解的方法[9]。张立先将运动学逆解方法应用在SCARA串联机械臂中[10]。Kim等运用共形几何代数完成了一种空间3-SPS/S冗余驱动机构的逆运动学求解，同时分析了机构奇异性[11]。黄昔光和黄旭提出了一种空间3-RPS并联机构位置正解共形几何代数方法[12]。马朝阳基于共形几何代数完成了几种空间并联机构正运动学分析[13]。黄昔光等基于共形几何代数对空间3-PPS并联机构进行位置分析，推导出符号形式的一元8次运动学输入-输出方程，获得机构的所有8组实数解析解及其相应的装配构型[14]。研究表明，将共形几何代数引入机构学中，可降低研究问题的复杂程度，能够更加清晰地展示求解的几何过程。

20世纪初，俄国数学家阿苏尔提出了阿苏尔杆组[15]。阿苏尔杆组以杆件连接得到的构建称为巴氏桁架。研究巴氏桁架可以极大减少平面机构构型数量，减轻研究工作量，从而引起了机构学和机器人学者的广泛关注与研究。Innocenti运用代数法对一种七杆巴氏桁架的从动件进行位置分析[16-18]。王品等采用吴方法完成并获得了一种七杆巴氏桁架位置的所有18组解[19]；随后，使用Sylvester消元法、Dixon与Sylvester消元法等方法完成了几种九杆巴氏桁架的位置分析[20-21]。从数学方法上看，上

**收稿日期**：2022-12-03；**录用日期**：2023-03-06；**网络出版时间**：2023-05-11 10:42
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230510.1644.007
**基金项目**：国家自然科学基金(51105003)；北京市自然科学基金(3172010)
*通信作者. E-mail：marchbupt@126.com

*引用格式：黄昔光，吴一帆，刘东裕. 基于共形几何代数的七杆巴氏桁架位置分析[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：265-271.*
*HUANG X G，WU Y F，LIU D Y. Position analysis of seven-link Barranov truss based on conformal geometric algebra[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：265-271 (in Chinese).*

述文献的数学建模过程中，都需要设定多个未知量变量，通过封闭矢量闭环，建立位置分析非线性方程组，进而使用吴方法、结式等传统代数消元法消元，最终得到一元高次输入-输出方程。然而，传统的旋转矩阵变换和多元高次非线性方程组消元存在建模繁琐、求解困难等问题。对此，Federico基于距离行列式方法对3种巴氏桁架位置分析进行建模和求解，不需要消元和姿态角半角正切转换，使得数值求解更加简单、稳定[15]，但其输入-输出方程只是推导获得最终方程中的一个因式，数学推导过程不满足充分必要条件，包含大量的增根。

本文将共形几何代数引入巴氏桁架位置分析中，提出了一种无需进行复杂旋转变换矩阵转换及非线性方程组消元的新方法，直接推导出该问题的一元16次输入-输出方程，并获得全部16组解析解，求解过程简洁高效，具有较强的几何直观性，无增根且无漏根。

## 1 共形几何代数

共形几何代数是五维共形空间中的几何代数形式，可将几何元素（如点、线、面、圆、球等）以矢量的形式表达出来，并且可以通过螺旋理论来描述刚体的旋转和运动，从而使得几何关系的表达和计算变得更加简单易懂。在五维共形空间中，共形几何代数包含一组单位向量$\{\boldsymbol{e}_1,\boldsymbol{e}_2,\boldsymbol{e}_3,\boldsymbol{e}_+,\boldsymbol{e}_-\}$。基础向量$\boldsymbol{e}_0$和$\boldsymbol{e}_\infty$分别表示三维原点和无穷远的点，可以用以下关系来定义：

$$\begin{cases}\boldsymbol{e}_0=\dfrac{1}{2}(\boldsymbol{e}_--\boldsymbol{e}_+)\\ \boldsymbol{e}_\infty=\boldsymbol{e}_-+\boldsymbol{e}_+\end{cases}\tag{1}$$

共形几何代数的单位伪标量$\boldsymbol{I}$的表达式为

$$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{e}_1\boldsymbol{e}_2\boldsymbol{e}_3\boldsymbol{e}_0\boldsymbol{e}_\infty\tag{2}$$

### 1.1 几何代数中的基本运算

内积、外积和几何积是在几何代数中常用的3种基本运算。向量间的内积运算结果为数值，向量$\boldsymbol{a}$和$\boldsymbol{b}$的内积可以定义为

$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}=|\boldsymbol{a}||\boldsymbol{b}|\cos\theta'\tag{3}$$

式中：$\theta'$为向量之间的角度。

向量$\boldsymbol{a}$和$\boldsymbol{b}$的外积表示矢量$\boldsymbol{a}$沿矢量$\boldsymbol{b}$的方向扫过的平行四边形，如图1所示，可表示为$\boldsymbol{a}\wedge\boldsymbol{b}$。

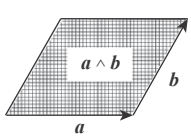



图1 $\boldsymbol{a}\wedge\boldsymbol{b}$的几何表示

Fig. 1 Geometric representation of $\boldsymbol{a}\wedge\boldsymbol{b}$

几何积是外积和内积的集合。例如，对于向量$\boldsymbol{u}$和$\boldsymbol{v}$，几何积$\boldsymbol{uv}$可以定义为

$$\boldsymbol{uv}=\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{v}+\boldsymbol{u}\wedge\boldsymbol{v}\tag{4}$$

### 1.2 几何元素的表达

所有几何元素都可以使用共形几何代数统一表示，如表1所示。这些实体有2种代数表示法：内积空间（inner product null space, IPNS）和外积空间（outer product null space, OPNS）。2种表示法彼此对偶。

表1 共形几何代数中几何元素的表达

Table 1 Expression of geometric elements in CGA

| 实体 | 内积空间表达式 | 外积空间表达式 |
|---|---|---|
| 点 | $\boldsymbol{P}=\boldsymbol{x}+\frac{1}{2}\boldsymbol{x}^2\boldsymbol{e}_\infty+\boldsymbol{e}_0$ | |
| 球 | $\boldsymbol{S}=\boldsymbol{P}-\frac{1}{2}r^2\boldsymbol{e}_\infty$ | $\boldsymbol{S}^*=\boldsymbol{P}_1\wedge\boldsymbol{P}_2\wedge\boldsymbol{P}_3\wedge\boldsymbol{P}_4$ |
| 面 | $\boldsymbol{\pi}=\boldsymbol{n}+d\boldsymbol{e}_\infty$ | $\boldsymbol{\pi}^*=\boldsymbol{P}_1\wedge\boldsymbol{P}_2\wedge\boldsymbol{P}_3\wedge\boldsymbol{e}_\infty$ |
| 圆 | $\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{S}_1\wedge\boldsymbol{S}_2$ | $\boldsymbol{Z}^*=\boldsymbol{P}_1\wedge\boldsymbol{P}_2\wedge\boldsymbol{P}_3$ |
| 线 | $\boldsymbol{l}=\boldsymbol{\pi}_1\wedge\boldsymbol{\pi}_2$ | $\boldsymbol{l}^*=\boldsymbol{P}_1\wedge\boldsymbol{P}_2\wedge\boldsymbol{e}_\infty$ |
| 点对 | $\boldsymbol{P}_P=\boldsymbol{S}_1\wedge\boldsymbol{S}_2\wedge\boldsymbol{S}_3$ | $\boldsymbol{P}_P^*=\boldsymbol{P}_1\wedge\boldsymbol{P}_2$ |

表1中，$\boldsymbol{x}$和$\boldsymbol{n}$表示由三维基向量的线性组合得到的三维实体：

$$\boldsymbol{x}=x_1\boldsymbol{e}_1+x_2\boldsymbol{e}_2+x_3\boldsymbol{e}_3\tag{5}$$

式中：$x_1$、$x_2$和$x_3$为实数。

表1中点对$\boldsymbol{P}_P$的表达式可以通过式(6)表示出点的几何表达[12]：

$$\boldsymbol{P}_\pm=-\frac{\pm\sqrt{\boldsymbol{P}_P^*\boldsymbol{P}_P^*}+\boldsymbol{P}_P^*}{\boldsymbol{e}_\infty\boldsymbol{P}_P^*}\tag{6}$$

### 1.3 距离和角度

在共形几何代数中，内积通常被用来构建机构运动学输入-输出方程，几何体之间的距离和角度都可以通过内积运算得到。

若$\boldsymbol{P}$和$\boldsymbol{Q}$表示在三维空间中任意2点，在共形几何空间，2点之间的距离可通过内积表示：

$$\boldsymbol{PQ}=-\frac{1}{2}d^2\tag{7}$$

式中：$d$为两点间的距离。

几何实体的角度余弦表达式可表示为

$$\cos\theta=\frac{\boldsymbol{O}_1^*\boldsymbol{O}_2^*}{|\boldsymbol{O}_1^*|\cdot|\boldsymbol{O}_2^*|}\tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{O}_i^*$代表一条直线或者一个平面。

## 2 刚体运动的表达

刚体的运动通常可以分解为2个运动：平移和旋转。在共形几何代数中，为表示刚体的运动，引入平移算子$\boldsymbol{T}$和旋转算子$\boldsymbol{R}$来进行说明。

平移算子 $\boldsymbol{T}$ 可以表示为

$$\boldsymbol{T}=1-\frac{1}{2}t\boldsymbol{e}_{\infty} \tag{9}$$

式中:

$$\boldsymbol{t}=t_1\boldsymbol{e}_1+t_2\boldsymbol{e}_2+t_3\boldsymbol{e}_3 \tag{10}$$

旋转算子 $\boldsymbol{R}$ 可以表示为

$$\boldsymbol{R}=\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)-\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\boldsymbol{L} \tag{11}$$

式中: $\boldsymbol{L}$ 为旋转轴归一化的双向量表示; $\theta$ 为围绕该轴的旋转角度。

因此, 在共形几何代数下, 空间中刚体 $\boldsymbol{O}$ 的所有运动都可以表示为

$$\boldsymbol{O}_{\text{transformed}}=\boldsymbol{MO}\widetilde{\boldsymbol{M}} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{RT} \tag{13}$$

式中: $\boldsymbol{M}$ 为运动算子; $\widetilde{\boldsymbol{M}}$表示 $\boldsymbol{M}$ 的共轭。

## 3　七杆巴氏桁架位置分析

七杆巴氏桁架如图 2 所示, 中心三角形 $\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_4\boldsymbol{P}_5$ 被假定固定在基座上, 坐标原点与点 $\boldsymbol{P}_2$ 重合, 整个机构所在的平面垂直于 $z$ 轴。位置分析问题就是通过给定的结构参数, 包括每个环节的长度 $s_{ij}(i,j=1\sim9)$和点 $\boldsymbol{P}_2$、点$\boldsymbol{P}_4$、点$\boldsymbol{P}_5$的位置来求解其他运动点 $\boldsymbol{P}_1$、$\boldsymbol{P}_3$、$\boldsymbol{P}_i(i=6\sim9)$的位置。

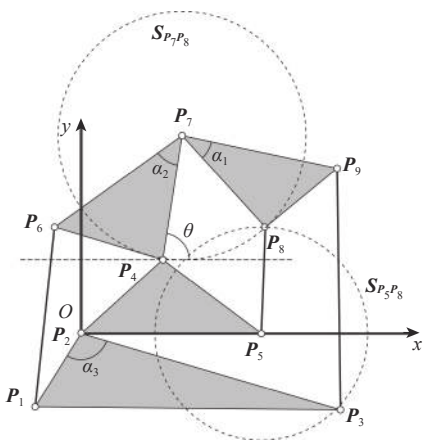



图 2　七杆巴氏桁架机构

Fig. 2　Seven-link Barranov truss mechanism

### 3.1　点 $\boldsymbol{P}_7$ 的坐标

点 $\boldsymbol{P}_7$ 的位置可通过旋转算子和平移算子计算出来, 引入变量 $\theta$。如图 2 所示, 通过使用运动算子 $\boldsymbol{M}_{47}$, 可以计算出点 $\boldsymbol{P}_7$ 的位置坐标。首先, 沿当前坐标系的 $x$ 轴方向平移 $\boldsymbol{P}_{4x}$, 然后, 沿 $y$ 轴方向平移 $\boldsymbol{P}_{4y}$, $\boldsymbol{P}_{4x}$和 $\boldsymbol{P}_{4y}$分别表示点 $\boldsymbol{P}_4$在 $x$ 轴和 $y$ 轴方向上的坐标值, 最后, 围绕 $z$ 轴旋转角度 $\theta$, 获取点的位置信息。由式(9)、式(11)和式(13), 可以得到运动算子 $\boldsymbol{M}_{47}$ 如下:

$$\boldsymbol{M}_{47}=\boldsymbol{T}_{24}\boldsymbol{R}_{47}\boldsymbol{T}_{47} \tag{14}$$

式中:

$$\boldsymbol{T}_{24}=1-\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{P}_{4x}\boldsymbol{e}_1+\boldsymbol{P}_{4y}\boldsymbol{e}_2\right)\boldsymbol{e}_{\infty} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{R}_{47}=\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)-\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\boldsymbol{e}_{12} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{T}_{47}=1-\frac{1}{2}s_{47}\boldsymbol{e}_1\boldsymbol{e}_{\infty} \tag{17}$$

由式(12)可得点 $\boldsymbol{P}_7$ 的坐标为

$$\boldsymbol{P}_7=\boldsymbol{M}_{47}\boldsymbol{e}_0\widetilde{\boldsymbol{M}}_{47} \tag{18}$$

### 3.2　点 $\boldsymbol{P}_8$ 的坐标

由图 2 可知, 点 $\boldsymbol{P}_8$ 的位置可以通过几何体相交来计算。点 $\boldsymbol{P}_8$ 位于以 $\boldsymbol{P}_7$ 为球心、$s_{78}$ 为半径的球面 $\boldsymbol{S}_{P_7P_8}$ 上, 同时也位于以 $\boldsymbol{P}_5$ 为球心、$s_{58}$ 为半径的球面 $\boldsymbol{S}_{P_5P_8}$ 上, 也位于以 $\boldsymbol{e}_3$ 为法向量且经过原点的平面上。这个交点的位置将是一个点对 $\boldsymbol{P}_{P_8}$。因此, 根据表 1 的 2 个球面 $\boldsymbol{S}_{P_7P_8}$、$\boldsymbol{S}_{P_5P_8}$和平面 $\boldsymbol{\pi}$可以在共形几何代数中表示为

$$\boldsymbol{S}_{P_7P_8}=\boldsymbol{P}_7-\frac{1}{2}s_{78}^2\boldsymbol{e}_{\infty} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{S}_{P_5P_8}=\boldsymbol{P}_5-\frac{1}{2}s_{58}^2\boldsymbol{e}_{\infty} \tag{20}$$

因此, 可以由点对 $\boldsymbol{P}_{P_8}$ 得到点 $\boldsymbol{P}_8$:

$$\boldsymbol{P}_{P_8}=\boldsymbol{S}_{P_7P_8}\wedge\boldsymbol{S}_{P_5P_8}\wedge\boldsymbol{\pi} \tag{21}$$

由式(6)可计算出点 $\boldsymbol{P}_8$ 的坐标位置:

$$\boldsymbol{P}_8=-\frac{t_8+\boldsymbol{P}_{P_8}^*}{\boldsymbol{e}_{\infty}\boldsymbol{P}_{P_8}^*} \tag{22}$$

式中:

$$t_8^2=\boldsymbol{P}_{P_8}^*\boldsymbol{P}_{P_8}^* \tag{23}$$

### 3.3　点 $\boldsymbol{P}_9$ 的坐标

根据三角形 $\boldsymbol{P}_7\boldsymbol{P}_8\boldsymbol{P}_9$ 的稳定性, 点 $\boldsymbol{P}_9$ 的坐标可以通过点 $\boldsymbol{P}_8$ 的表达式得到, 通过矢量关系可以计算出点 $\boldsymbol{P}_{91}$:

$$\boldsymbol{P}_{91}=\frac{s_{79}}{s_{78}}(\boldsymbol{P}_8-\boldsymbol{P}_7)+\boldsymbol{P}_7 \tag{24}$$

式中: $s_{79}$表示点 $\boldsymbol{P}_7$到点 $\boldsymbol{P}_9$之间的距离; $s_{78}$表示点 $\boldsymbol{P}_7$到点 $\boldsymbol{P}_8$之间的距离。

旋转轴 $z_7$ 可以通过 $\boldsymbol{e}_{12}$ 被 $\boldsymbol{T}_{P_7}$ 转换的过程计算出:

$$z_7=\boldsymbol{T}_{P_7}\boldsymbol{e}_{12}\widetilde{\boldsymbol{T}}_{P_7} \tag{25}$$

式中: $\boldsymbol{T}_{P_7}=1-\frac{1}{2}(\boldsymbol{P}_{7x}\boldsymbol{e}_1+\boldsymbol{P}_{7y}\boldsymbol{e}_2)\boldsymbol{e}_{\infty}$, 点 $\boldsymbol{P}_7$ 是在三维空间中的表示。

由式(11)和式(12), 可以得到 $\boldsymbol{P}_9$ 的位置坐标:

$$\boldsymbol{P}_9=\boldsymbol{R}_{79}\boldsymbol{P}_{91}\widetilde{\boldsymbol{R}}_{79} \tag{26}$$

式中: $\boldsymbol{R}_{79}=\cos\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)-\sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)z_7$, $\alpha_1$ 为向量 $\overrightarrow{\boldsymbol{P}_7\boldsymbol{P}_9}$和 $\overrightarrow{\boldsymbol{P}_7\boldsymbol{P}_8}$的夹角。

### 3.4 点$P_6$的坐标

根据三角形$P_4P_6P_7$中3个点的相对位置固定，点$P_6$的坐标可以通过点$P_7$的表达式得到，计算方法与点$P_9$相同。

通过使用矢量关系可以计算出点$P_{61}$：

$$P_{61}=\frac{s_{67}}{s_{47}}(P_4-P_7)+P_7 \tag{27}$$

式中：$s_{67}$表示点$P_6$到点$P_7$之间的距离；$s_{47}$表示点$P_4$到点$P_7$之间的距离。

根据式(11)和式(12)，可以得到$P_6$的位置坐标：

$$P_6=R_{76}P_{61}\widetilde{R}_{76} \tag{28}$$

式中：$R_{76}=\cos\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)+\sin\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)z_7$，$\alpha_2$为向量$\overrightarrow{P_4P_7}$和$\overrightarrow{P_6P_7}$的夹角。

### 3.5 点$P_1$的坐标

由图3可以看出，点$P_1$位于以下3个几何实体的交点上，分别为以点$P_2$为中心、半径为$s_{12}$的球面$S_{P_2P_1}$，以点$P_6$为中心、半径为$s_{16}$的球面$S_{P_6P_1}$上，以及法向量为$e_3$的平面$\pi$。

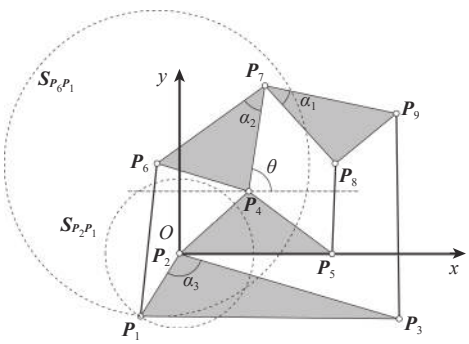



图3 平面$\pi$上点$P_1$的位置

Fig. 3 Location of point $P_1$ on plane $\pi$

根据表1，可得

$$S_{P_2P_1}=P_2-\frac{1}{2}s_{12}^2e_\infty \tag{29}$$

$$S_{P_6P_1}=P_6-\frac{1}{2}s_{16}^2e_\infty \tag{30}$$

因此，可以从点对$P_{P_1}$得到点$P_1$：

$$P_{P_1}=S_{P_6P_1}\wedge S_{P_2P_1}\wedge\pi \tag{31}$$

由式(6)可计算出点$P_1$的坐标位置：

$$P_1=-\frac{t_1+P_{P_1}^*}{e_\infty P_{P_1}^*} \tag{32}$$

式中：

$$t_1^2=P_{P_1}^*P_{P_1}^* \tag{33}$$

### 3.6 点$P_3$的坐标

根据三角形$P_1P_3P_2$的稳定性，点$P_3$的坐标可以通过$P_1$的表达式得到，其计算方法与点$P_6$相同。通过矢量关系可以计算出点$P_{31}$：

$$P_{31}=\frac{s_{23}}{s_{12}}(P_1-P_2)+P_2 \tag{34}$$

式中：$s_{23}$表示点$P_2$到点$P_3$之间的距离；$s_{12}$表示点$P_1$到点$P_2$之间的距离。

根据式(11)和式(12)，可以得到$P_3$的位置坐标：

$$P_3=R_{23}P_{31}\widetilde{R}_{23} \tag{35}$$

式中：$R_{23}=\cos\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)-\sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)e_{12}$，$\alpha_3$为向量$\overrightarrow{P_2P_1}$和$\overrightarrow{P_2P_3}$的夹角。

### 3.7 建立输入-输出方程

根据式(26)和式(35)，可以得到以下结果：

$$-2(P_3P_9)=s_{39}^2 \tag{36}$$

式中：$s_{39}$表示点$P_3$到点$P_9$之间的距离。

展开式(36)，未知量包括$t_1$、$t_8$和$\theta$，其中，$t_1$和$t_8$可以由$\theta_u$表示。为去除中间变量，将式(23)代入已经展开的方程中，并将$t_8$视为未知量，可得

$$w_1t_8+w_0=0 \tag{37}$$

式中：$w_1$和$w_0$为带有$\theta$和$t_1$的系数。

由式(37)可得

$$w_1^2t_8^2-w_0^2=0 \tag{38}$$

将式(23)代入式(38)中，可以消去未知量$t_8$。将$t_1$视为未知量，方程可以表示为

$$u_1t_1+u_0=0 \tag{39}$$

式中：$u_1$和$u_0$为带有$\theta$的系数。

通过相同的方法整理式(39)，可得

$$u_1^2t_1^2-u_0^2=0 \tag{40}$$

根据式(33)，可以得到仅包含未知量的正余弦表达的方程。为便于计算，令$t=\tan(\theta/2)$，根据万能公式：$\sin\theta=\frac{2t}{1+t^2}$，$\cos\theta=\frac{1-t^2}{1+t^2}$，可以将式(40)转换为关于单变量$t$的一元16次方程，进一步化简，可得

$$\sum_{i=0}^{16}a_it^i=0 \tag{41}$$

式中：$a_i(i=0,1,\cdots,16)$且$t=\tan(\theta/2)$。

### 3.8 回代计算

通过求解式(41)，可以得到$t$的全部16个解。将$t$的每个解直接代入式(18)、式(22)、式(26)、式(28)、式(32)和式(35)中得到各关节$P_i$的对应坐标。因此，动平台的姿态可以由其上各关节点的位置确定。由于定平台上的3个球副$P_2$、$P_4$、$P_5$的位置是可以确定的，动平台上的关节点相对于定平台的位置均可以得到。

## 4 数字实例

为验证第3节推导过程的正确性，提供一组巴氏桁架的输入参数：$s_{12}=5$，$s_{13}=10$，$s_{16}=\sqrt{97}$，$s_{23}=$

$\sqrt{45}$, $s_{24}=\sqrt{13}$, $s_{25}=6$, $s_{39}=\sqrt{97}$, $s_{45}=5$, $s_{46}=\sqrt{13}$, $s_{47}=\sqrt{20}$, $s_{58}=4$, $s_{67}=\sqrt{17}$, $s_{78}=\sqrt{13}$,, $s_{79}=\sqrt{37}$, $s_{89}=\sqrt{20}$, $\boldsymbol{P}_2=(0,0)$, $\boldsymbol{P}_4=(2,3)$, $\boldsymbol{P}_5=(6,0)$。

基于计算机代数系统 Maple-16 编程, 将上述参数代入式(41), 获得关于 $t$ 的一元 16 次方程, 并获得关于变量 $t$ 的 16 组解, 其中, 实数解为 10 组。通过回代所得解, 可获得运动点 $\boldsymbol{P}_1$、点 $\boldsymbol{P}_3$、点 $\boldsymbol{P}_i(i=6\sim9)$ 在绝对坐标系的 16 组解, 既无增根也无漏根。

根据变量 $t$ 的 10 组实数解: 0.618 034, 0.011 682, 0.482 881, −0.334 540, −0.341 171, −0.420 279, −0.423 537, −0.907 169, −0.935 014 和−1.025 82, 通过回代, 可以获得各可获得运动点 $\boldsymbol{P}_1$、点 $\boldsymbol{P}_3$、点 $\boldsymbol{P}_i(i=6\sim9)$关节点的位置坐标, 如表 2 所示。

由表 2 可获得数字实例 10 组实数解对应的机构构型, 如图 4 所示。整个计算过程使用计算科学编程数学软件 Maple 编程完成。

**表 2　位置正解 10 组实数解**

**Table 2　10 sets of real number solutions for forward position kinematics**

| 各点位置坐标 | $\boldsymbol{P}_1$ | $\boldsymbol{P}_3$ | $\boldsymbol{P}_6$ | $\boldsymbol{P}_7$ | $\boldsymbol{P}_8$ | $\boldsymbol{P}_9$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_1$=0.618 034 | (−4.000 00,−3.000 00) | (6.000 00,−3.000 00) | (0,6.000 00) | (4.000 00,7.000 00) | (6.000 00,4.000 00) | (10.000 0,6.000 00) |
| $t_2$=0.011 682 | (3.393 40,−3.672 17) | (2.370 56,6.275 38) | (3.715 24,6.171 43) | (6.470 92,3.104 47) | (9.704 36,1.509 21) | (12.165 2,5.243 41) |
| $t_3$=0.482 881 | (4.081 52,−2.888 11) | (1.016 82,6.630 69 | (0.660 712,6.347 58) | (4.780 91,6.502 36) | (7.189 27,3.819 11) | (10.862 2,6.370 44) |
| $t_4$=−0.334 540 | (1.651 67,−4.719 32) | (4.672 19,4.813 59) | (5.312 48,4.423 89) | (5.571 88,0.308 959) | (2.006 49,−0.227 689) | (2.118 45,−4.698 42) |
| $t_5$=−0.341 171 | (−4.335 79,2.490 16) | (−0.386 7 15,−6.697 05) | (5.329 19,4.384 37) | (5.539 59,0.266 632) | (4.605 84,3.749 18) | (0.175 979,3.135 72) |
| $t_6$=−0.420 279 | (1.062 47,−4.885 81) | (5.225 49,4.206 46) | (5.488 12,3.912 69) | (5.129 44,−0.194 782) | (4.663 44,−3.770 09) | (8.992 13,−4.893 68) |
| $t_7$=−0.423 537 | (−4.270 52,2.600 52) | (−0.558 314,−6.684 93) | (5.493 12,3.893 39) | (5.111 72,−0.212 041) | (4.748 82,−3.799 28) | (9.108 06,−4.797 81) |
| $t_8$=−0.907 169 | (−4.543 26,2.087 77) | (0.220 628,−6.704 57) | (5.289 43,1.523 63) | (2.434 33,−1.451 00) | (2.626 58,2.149 43) | (−1.775 13,2.939 95) |
| $t_9$=−0.935 014 | (−4.589 53,1.983 98) | (0.372 944,−6.697 83) | (5.243 46,1.425 21) | (2.300 05,−1.462 06) | (4.984 59,−3.868 97) | (8.359 95,−0.935 213) |
| $t_{10}$=−1.025 82 | (−3.653 12,−3.413 89) | (6.288 55,−2.335 41) | (5.083 89,1.131 94) | (1.886 02,−1.470 68) | (2.576 18,2.068 19) | (−1.673 19,3.462 06) |

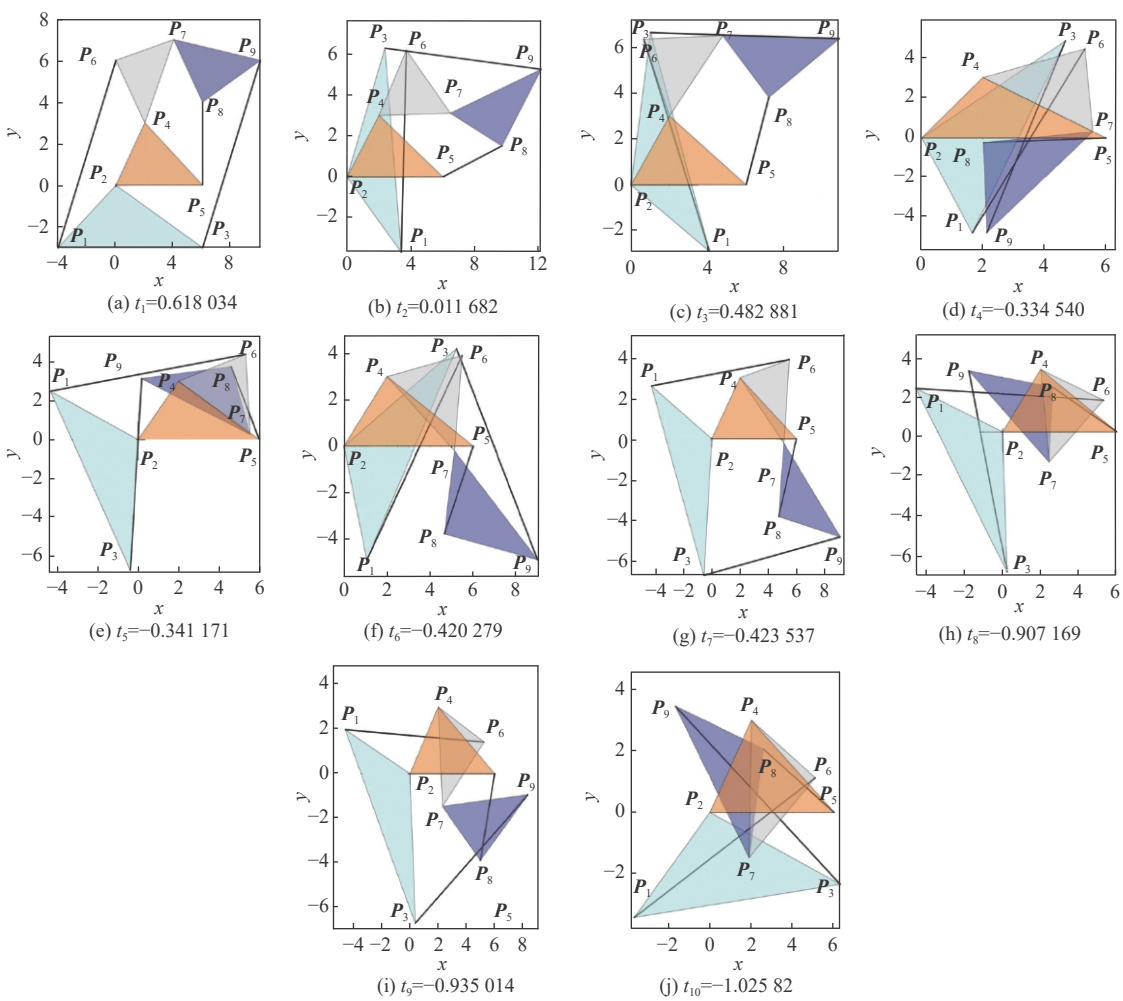



图 4　数字实例 10 组实数解的对应构型

Fig. 4　Corresponding configurations of 10 sets of real number solutions of digital examples

## 5 结 论

1）提出了基于共形几何代数的平面七杆巴氏桁架的位置分析方法，能直接推导出该问题既无增根也无漏根的一元16次输入-输出方程，获得全部16组解析解，实现了该问题的数学机械化自动求解。

2）相比传统的机构学和机器人学理论，本文方法无需复杂的旋转矩阵变换和困难的非线性方程组消元求解，更加简洁有效，求解过程具有传统的复向量法、D-H矩阵方法尚未实现的几何直观性，对于其他巴氏桁架的位置分析求解具有借鉴与参考价值。

3）运用共形几何代数求解平面七杆巴氏桁架的位置分析时，由于构造点、线、面、球等几何元素方式不当，容易产生成倍的增根，需要人为剔除增根，导致求解效率大大降低，不能反映共形几何代数理论的内在优点。需要巧妙地构造几何元素，确保推导全过程满足充分必要条件，才能获得既无增根也无漏根的解析解，从而提高计算效率。

## 参考文献（References）


[1] GRASSMANN H. Die lineale ausdehnungslehre ein neuer zweig der mathematik paperback[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.

[2] CLIFFORD W K. On the space-theory of matter[M]//CAPEK M. The concepts of space and time. Berlin: Springer, 1976: 295-296.

[3] HESTENES D. Grassmann's legacy[M]//PETSCHE H J, LEWIS A, LIESEN J, et al. From past to future: GraBmann's work in context. Berlin: Springer, 2011: 243-260.

[4] HESTENES D. Old wine in new bottles: A new algebraic framework for computational geometry[M]//CORROCHAND E B, SOBCZYK G. Geometric Algebra with Applications in Science and Engineering. Berlin: Springer, 2001: 3-17.

[5] LI H B. Invariant algebras and geometric reasoning[M]. Singarore: World Scientific, 2008.

[6] CLIFFORD P. Applications of Grassmann's extensive algebra[J]. American Journal of Mathematics, 1878, 1(4): 350.

[7] LI H B. Ordering in mechanical geometry theorem proving[J]. Science in China Series A: Mathematics, 1997, 40(3): 225-233.

[8] HILDENBRAND D, ZAMORA J, BAYRO-CORROCHANO E. Inverse kinematics computation in computer graphics and robotics using conformal geometric algebra[J]. Advances in Applied Clifford Algebras, 2008, 18(3): 699-713.

[9] WANG C Q, WU H T, MIAO Q H. Inverse kinematics computation in robotics using conformal geometric algebra[C]//Proceedings of the International Technology and Innovation Conference. London: IET, 2009: 1-5.

[10] 张立先. 基于几何代数的机构运动学及特性分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2008.
ZHANG L X. Kinematics and characteristic analysis of mechanism based on geometric algebra[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2008(in Chinese).

[11] KIM J S, JEONG J H, PARK J H. Inverse kinematics and geometric singularity analysis of a 3-SPS/S redundant motion mechanism using conformal geometric algebra[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 90: 23-36.

[12] 黄昔光, 黄旭. 基于共形几何代数的空间并联机构位置正解[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(12): 2377-2381.
HUANG X G, HUANG X. Direct kinematics of a spatial parallel mechanism based on conformal geometric algebra[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(12): 2377-2381(in Chinese).

[13] 马朝阳. 基于共形几何代数的并联机器人运动学研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2019.
MA C Y. Research on kinematics of parallel robot based on conformal geometric algebra[D]. Beijing: North China University of Technology, 2019(in Chinese).

[14] HUANG X G, MA C Y, SU H J. A geometric algebra algorithm for the closed-form forward displacement analysis of 3-PPS parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 137: 280-296.

[15] ROJAS N, THOMAS F. Distance-based position analysis of the three seven-link Assur kinematic chains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(2): 112-126.

[16] INNOCENTI C. Position analysis in analytical form of the 7-link Assur kinematic chain featuring one ternary link connected to ternary links only[J]. Mechanism and Machine Theory, 1997, 32(4): 501-509.

[17] INNOCENTI C. Analytical-form position analysis of the 7-link Assur kinematic chain with four serially-connected ternary links[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(2): 622-628.

[18] INNOCENTI C. Polynomial solution to the position analysis of the 7-link Assur kinematic chain with one quaternary link[J]. Mechanism and Machine Theory, 1995, 30(8): 1295-1303.

[19] 王品, 廖启征, 魏世民. 基于吴方法的一种7杆巴氏桁架位移分析研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(6): 748-752.
WANG P, LIAO Q Z, WEI S M. Forward didplacement analysis of a seven-link Barravo truss based on Wu method[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(6): 748-752(in Chinese).

[20] 王品, 廖启征, 庄育锋, 等. 9杆巴氏桁架的位移分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 11-15.
WANG P, LIAO Q Z, ZHUANG Y F, et al. Displacement analysis of nine-link Barranov truss[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 11-15(in Chinese).

[21] WANG P, LIAO Q Z, ZHUANG Y F, et al. A method for position analysis of a kind of nine-link Barranov truss[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(10): 1280-1288.

# Position analysis of seven-link Barranov truss based on conformal geometric algebra

HUANG Xiguang[1,*], WU Yifan[2], LIU Dongyu[2]

(1. School of Intelligent Engineering and Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract**: The position analysis of mechanism is the basis of kinematics and dynamics research of mechanism.A conformal geometric algebraic (CGA) method for position analysis of seven-link Barranov truss is proposed to solve the problems of the traditional mechanism position analysis theory, such as the complicated operation of rotating coordinate transformation matrix and the difficulty of solving multivariate nonlinear equations of higher order. The expression of position coordinates of each moving point is established by means of translation, rotation operator and geometric formula expression in CGA. According to the properties of inner product geometry in CGA, the 16-degree position input-output equation of the mechanism and all its solutions are obtained directly. After all the solutions of the higher order equation are substituted back, the position coordinates of all moving points can be obtained. Finally, the effectiveness of the new method is verified by numerical examples.The results show that the geometric intuitionicity of the proposed algorithm is significantly superior to the traditional complex vector method and D-H matrix method. The proposed algorithm can not only avoid matrix operations and elimination operations, but also solve without adding or missing roots.

**Keywords**: geometric algebra; kinematic analysis; seven-link Barranov truss; geometric intuition; closed-form analysis

**Received**: 2022-12-03; **Accepted**: 2023-03-06; **Published Online**: 2023-05-11 10:42

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230510.1644.007

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (51105003); Beijing Natural Science Foundation (3172010)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0963

# 飞轮壳体黏弹性阻尼环的仿真分析与试验研究

金富蕴[1]，王永锋[2,*]，王虹[3]，刘珊珊[4]，马艳红[1]

(1. 北京航空航天大学 航空发动机研究院，北京 100191；2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院，北京 100191；
3. 北京控制工程研究所 精密转动和传动机构长寿命技术北京市重点实验室，北京 100094；
4. 西安飞行自动控制研究所 导航系统部，西安 710076)

**摘 要**：随着航天器平台性能指标要求的提高，飞轮微振动对航天器平台的影响越加突出，需要对其进行振动抑制。根据飞轮上壳体的模态特性，提出一种圆环形黏弹性阻尼环结构的设计方法，并针对黏弹性阻尼环的敷设位置、厚度、宽度对其减振效果影响规律进行数值仿真与试验验证，验证圆环形黏弹性阻尼环的有效性。结果表明：圆环形黏弹性阻尼环结构对宽频振动具有良好的减振效果，黏弹性阻尼环的敷设位置对飞轮系统的各阶固有频率变化和减振效果起决定性作用，在飞轮外径的60%处敷设圆环形黏弹性阻尼环减振效果较好，宽度设计为飞轮外径的6%以内、厚度设计为壳体厚度的4倍以内时，随着宽度、厚度的增加，减振效果提高。

**关 键 词**：飞轮系统；黏弹性阻尼环；薄壳结构；多参数分析；振动抑制；宽频减振
**中图分类号**：V474
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0272-09

飞轮是控制卫星姿态和保持精度的关键机械部件，其工作原理是：通过自身储存的角动量与航天器进行角动量交换，来实现稳定飞行。随着中国对卫星等航天器平台的指向精度要求达到0.01°甚至角秒级，姿态稳定度达到$10^{-3}$～$10^{-4}$ (°)/s，甚至更高的$5\times10^{-5}$～$1\times10^{-4}$ (°)/s量级等不断提升的性能指标要求[1]，飞轮机械系统的微振动对卫星平台高性能指标的影响愈发凸显，成为中国高精度、高性能卫星发展的瓶颈问题[2-3]。现阶段，各国学者对卫星在轨微振动控制进行了大量的研究，对于飞轮本体振动抑制，多采用弹性片干摩擦阻尼结构[4]；对于载荷隔离技术，已经成熟发展了附加隔振器等手段，但这样在牺牲了飞轮系统的体积和质量的基础上，同时缺乏通用性，没有从根本上解决本体振动的问题。

由于航天产品轻质化的要求，飞轮承力结构壳体多以板壳件为主[5]，振动以能量的形式在壳体中传递，针对该结构特征，本文提出一种圆环形黏弹性阻尼环结构，其具有形式简单、不需要改动飞轮本体结构、质量轻、粘贴方便、阻尼性能优越的优点[6-7]，使用较少的材料就能达到较大的减振效果。

敷设在设备表面的圆环形黏弹性阻尼环既作为一种自由阻尼环减振耗能，也作为一种非连续隔振结构进行振动隔离。理论研究表明，当传递路径非连续，发生截面几何突变等情况时，振动能量会在隔振结构处存在突降，原因在于应力波和功率流在非连续结构处存在大量反射和耗散，因而具有显著的振动隔离效果[8-9]。

国内外学者对非连续隔振结构及黏弹性阻尼环开展了大量研究工作。Cremer等[10]在研究结构声传播时发现截面突变处有结构声损失，随后深入研究了在半无限长板中设置矩形质量对结构声传播的影响。Liu等[11]采用行波分析方法和空间薄板振动中的截面功率流指标，研究了有限长度的连接

收稿日期：2022-12-03；录用日期：2023-03-04；网络出版时间：2023-03-13 16:48
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230310.2238.005
基金项目：国家自然科学基金(52075018,52175072)；精密转动和传动机构长寿命技术北京市重点实验室开放基金(BZ0388202102)
*通信作者. E-mail：wangyongfeng@buaa.edu.cn

*引用格式：金富蕴，王永锋，王虹，等. 飞轮壳体黏弹性阻尼环的仿真分析与试验研究[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：272-280.
JIN F Y，WANG Y F，WANG H，et al. Simulation analysis and experimental study of viscoelastic damping ring of flywheel housing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：272-280 (in Chinese).*

板结构中振动能量传递及主动控制问题。Mei[12]使用波动方法分析了两自由度弹簧质量系统及Timoshenko 梁/框架的自由振动和强迫振动的横向振动，其中，振动被描述为沿均匀结构传播的振动波和在结构不连续处反射、透射。Gupta 等[13]运用有限元分析方法研究分析了阻尼加筋板在不同边界条件下的振动特性，得出阻尼材料的阻尼特性随着约束条件改变的变化规律，并得到最小阻尼特性的约束条件。王献忠等[14]依据混合方法的基本原理计算了含阻振质量基座的圆柱壳隔振特性，数值计算和模型试验结果表明，阻振质量基座对双层圆柱壳结构具有明显的隔振特性，采用含阻振质量的基座结构能有效阻隔结构中振动波的传递。纪琳和黄震宇[15]以板-筋-板组合系统为研究对象，将加强筋视为板件结构的中间连接件，通过仿真分析计算，研究了加筋板的参数不确定性对筋板组合系统的功率流传递特性的影响。

1965 年，Ditaranto[16]研究了具有弹性和黏弹性层的有限长度梁结构的振动特性、固有频率和相关复合阻尼系数；1991 年，Mead 和 Yaman[17]研究了带有黏弹性芯的夹层矩形板结构的谐响应分析问题；1993 年，Rikards[18]对具有黏弹性中间层的夹层梁和板进行了广泛的材料和几何参数的振动和阻尼分析；1988 年，Lall 等[19]用这种方法研究了部分敷设阻尼对基于简化方法和精确阻尼分析方法而开发的部分覆盖夹层梁的共振频率与阻尼因子的影响；Parthasarthy 等[20-21]对中空的自由阻尼环矩形板和局部敷设自由阻尼环板进行了分析；陈前和朱德懋[22]在时间域和拉氏域内建立了由单一黏弹材料构成的黏弹结构的动力学方程，分析在模态向量空间内的动响应，给出了传递函数和脉冲响应，揭示了黏弹结构的动力学特性；曾海泉等[23]阐明了性能单一的黏弹性阻尼材料通过简单的物理组合可以变成满足各种性能要求的黏弹性阻尼结构；王劲凯等[24]提出了一种将阻尼硬涂层涂覆在次镜支撑薄壁梁上进行减振的方法，分析了涂覆厚度和弹性模量对减振效果的影响；王鹏等[25]利用在桁架管壁和箱体面板上敷设黏弹性约束阻尼环的方法对整体结构进行减振，并对黏弹性约束阻尼环的厚度进行了优化和对比分析；李晖等[26]研究了约束环阻尼参数的改变对薄壳固有频率、振型和阻尼参数的影响程度，发现约束层阻尼会降低结构的固有频率，但可以有效提升壳体结构的阻尼特性。

以上非连续隔振结构及黏弹性阻尼环的研究主要针对能量在板壳中的传播规律，没有实际工程应用；阻尼环的研究主要针对阻尼涂层和压电阻尼，但这 2 种形式的结构在工程上的实用性仍有待提升。本文以飞轮壳体为研究对象，通过数值仿真与试验研究探讨了圆环形黏弹性阻尼环对飞轮系统的宽频减振效果，并进一步对黏弹性阻尼环的敷设位置、宽度、厚度等参数对飞轮振动响应的影响规律进行研究，为工程中解决飞轮微振动对航天器平台影响问题提供支撑。

## 1　黏弹性阻尼环减振原理

飞轮的机械扰振源包括轴承构件的摩擦、接触和碰撞等，转子系统的静、动不平衡量、转子系统支承挠性、壳体、轮体等结构挠性等。振动传递路径如图 1 所示，包括轴承支杆结构、轮体结构、壳体结构等部件。图中：箭头表示振动传递路径。

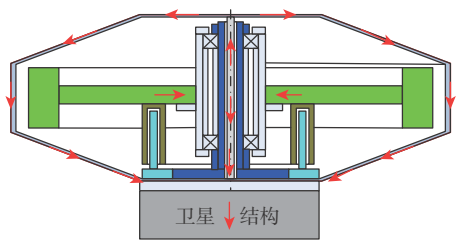



图 1　飞轮振动传递路径

Fig. 1　Flywheel vibration transfer path

由于振动是从与转子相连的螺纹孔处传到壳体上，在上壳面表面沿母线方向传至圆柱壳，当上壳体共振时，会在传递路径上形成能量涡，根据此振动传递路径，设计一种圆环形黏弹性阻尼环结构。振动传递路径及圆环形黏弹性阻尼环形式如图 2 所示。图中：箭头表示振动能量传递路径。

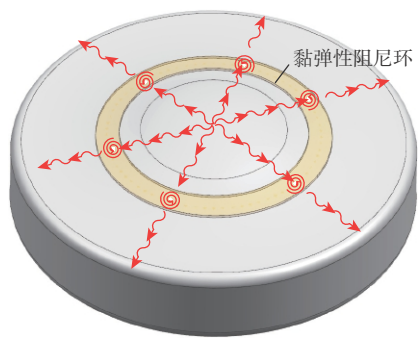



图 2　振动传递路径及黏弹性阻尼环

Fig. 2　Vibration transfer path and viscoelastic damping ring

黏弹性阻尼环的阻尼方向与振动传递方向垂直，并且对于壳面上的波动路线而言，会在阻尼环处形成截面突变，从而带来能量的反射和折射。图 3 为飞轮上壳体能量波传播示意图。在非连续截面处，由于波的反射和透射，导致该处能量密度不连续。研究表明，变截面结构对于杆内的纵波功率流具有明显的隔振效果，变截面位置的能量发生突变，不连续，表现了良好的隔振效果[27]。

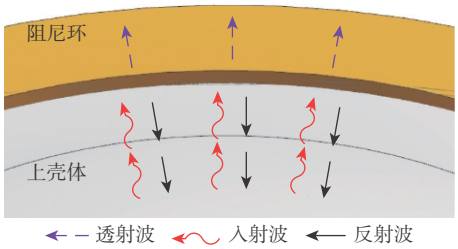



图3 非连续平板波传播示意图

Fig. 3 Discontinuous flat wave propagation

黏弹性阻尼环作为一种自由阻尼结构粘贴于飞轮壳体表面上，当结构层产生弯曲振动时，阻尼环随结构层一起振动，在阻尼环内部产生拉压、剪切变形而耗能，从而起到减振的作用[28]。

## 2 黏弹性阻尼环减振特性及参数影响

分析飞轮上壳体固有特性，其多阶振型在上壳体外径相对值为60%的位置处有较大的应变能集中，因此，采用Workbench有限元分析软件，预先在飞轮上壳体外径60%(200 mm)处敷设宽度、厚度分别为10 mm、4 mm的黏弹性阻尼环进行振动响应分析，在Workbench中基于模态叠加法对飞轮的轴向进行谐响应分析，阻尼控制模块选择来自模态的等效阻尼比率，并生成频率响应曲线，分析黏弹性阻尼环的减振效果及对固有频率的影响规律，最终通过调整圆环形黏弹性阻尼环结构的几何参数探究各参数对减振效果的影响。

### 2.1 黏弹性阻尼环结构建模方法

飞轮壳体及圆环形黏弹性阻尼环系统仿真计算模型如图4所示，其采用的实体结构为飞轮外壳体及圆环形黏弹性阻尼环，有限元模型如图4所示，采用实体单元网格划分。飞轮壳体材料为2A14，密度为2 710 kg/m$^3$，弹性模量为$7\times10^{10}$ Pa，结构阻尼为0.002，泊松比为0.31；黏弹性阻尼环结构材料为硅橡胶，密度为1 500 kg/m$^3$，弹性模量为$2\times10^7$ Pa，材料阻尼为0.1，泊松比为0.3。黏弹性阻尼环的敷设位置、宽度、厚度分别为上壳体外径的60%处(阻尼环外径200 mm)、10 mm、4 mm。黏弹性阻尼环与飞轮上壳体设置为绑定接触。边界条件如图4所示，将飞轮底面安装边固定约束。

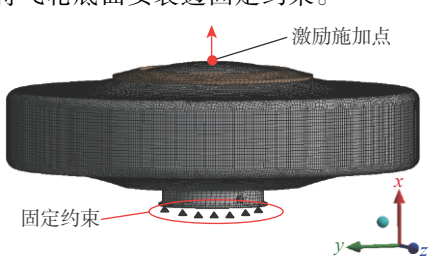



图4 飞轮有限元模型及载荷、边界条件

Fig. 4 Flywheel finite element model with loads and boundary conditions

### 2.2 黏弹性阻尼环振动响应仿真分析

#### 2.2.1 黏弹性阻尼环减振效果分析

通过简谐激励可以初步验证阻尼环的减振效果，如图4所示，载荷条件为：在螺纹杆和上壳面相交的节点处施加大小为10 N的节点简谐力$F$。为确定黏弹性阻尼环对上壳体的减振效果，加速度响应拾振点$t_1$设置为上壳体外缘处，如图5所示，此处不位于振型节线，有利于验证黏弹性阻尼环的减振效果。

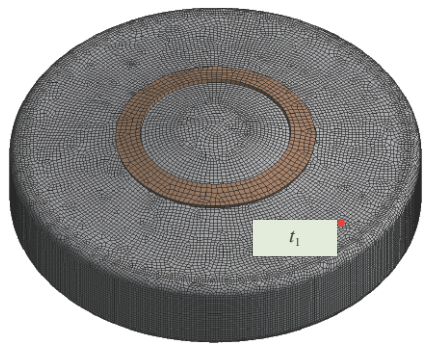



图5 拾振点位置

Fig. 5 Vibration response points

为方便进行振动响应的分析，与试验结果相对应，计算得到频响函数$t_1/F$，原壳体结构和敷设黏弹性阻尼环结构的频响函数如图6所示。通过分析可知，1 000 Hz以内无敷设黏弹性阻尼环的飞轮壳体系统有6阶较为明显的峰值，分别对应模态振型中的上下壳面同向一节径、上壳面一节圆、上壳体二节径、上壳面一节径、上壳体三节径、上壳面二节圆。系统在上壳体二节圆频率有较大振动响应。敷设黏弹性阻尼环后，系统的刚度和质量均会增大，分析可知，第1阶振型对附加刚度的灵敏性较大，固有频率增大，第2阶固有频率没有变化，其余4阶振型均对附加质量较为敏感，固有频率均下降，且敷设黏弹性阻尼环结构后，上壳体二节径固有频率小于上壳体一节圆频率，与无阻尼环系统相比，两者固有频率相对大小发生变化。

提取有无敷设黏弹性阻尼环的飞轮壳体$t_1/F$频响函数中的各阶响应峰值，如表1所示。分析可知，1阶频响函数峰值减振效果为77.8%，2阶频响函数峰值减振效果为92.8%，3阶频响函数峰值减振效果为97.9%，4阶频响函数峰值减振效果为55.8%，5阶频响函数峰值减振效果为52.3%，6阶频响函数峰值减振效果为87.3%，黏弹性阻尼环对各阶振动响应均有较好的抑制效果，减振效果均大于52.3%。

#### 2.2.2 变参分析

为提高黏弹性阻尼环结构效率，完全阻尼材料

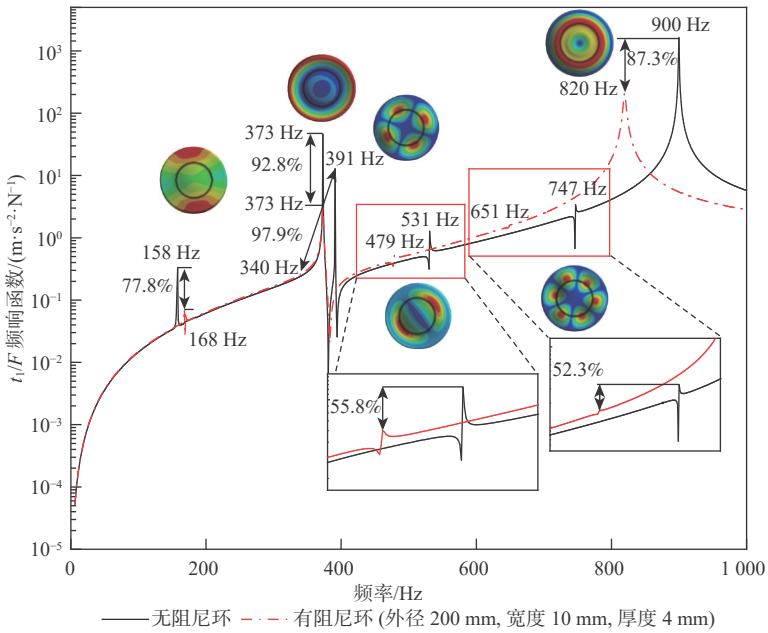



图 6　$t_1$ 测点振动响应频响函数

Fig. 6　Frequency response function of $t_1$ measurement point vibration

**表 1　飞轮壳体系统 1 000 Hz 内前 6 阶频响函数峰值提取**

**Table 1　Peak extraction of the first six frequency response functions within 1 000 Hz of flywheel housing system**

| 频响函数阶数 | 响应峰值/(m·s$^{-2}$·N$^{-1}$) | |
|---|---|---|
| | 无阻尼 | 有阻尼 |
| 1阶 | 0.324 | 0.072 |
| 2阶 | 46.273 | 3.346 |
| 3阶 | 12.808 | 0.268 |
| 4阶 | 1.277 | 0.565 |
| 5阶 | 3.405 | 1.623 |
| 6阶 | 1 625.3 | 206.92 |

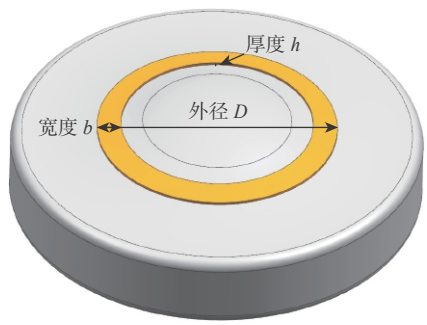



图 7　几何参数

Fig. 7　Geometric parameters

处理不是一种有效的方法，因为与有效的部分阻尼处理相比，阻尼效果没有显著提高[29]。因此，对圆环形黏弹性阻尼环的几何参数进行变参分析，以确定最佳黏弹性阻尼环结构参数。飞轮上壳体外径为 330 mm，壳体壁厚为 1 mm，为分析阻尼环敷设位置对减振效果的影响，分别在上壳体外径的 30%、60%、90% 处设计圆环形黏弹性阻尼环，分别对应圆环形黏弹性阻尼环的外径 $D$ 为 100 mm，200 mm，300 mm，在此外径基础上设计宽度参数 $b$，宽度选择 10 mm、20 mm，分别为上壳体外径的 3%、6%，宽度 $b$ 向轴线延伸，组成阻尼分布带，分析阻尼环厚度 $h$ 的影响，厚度选择为上壳体壁厚的 2、4 倍，即 2 mm、4 mm。几何参数如图 7 所示。

为方便分析敷设位置对振动响应的影响，黏弹性阻尼环宽度 $b$ 设为 10 mm，厚度 $h$ 设为 4 mm。图 8 为黏弹性阻尼环改变外径时 $t_1/F$ 的频响曲线。分析可知，敷设位置对飞轮系统固有频率及各阶频响峰值影响较大。各阶振型对圆环形黏弹性阻尼环附加质量和刚度敏感度不同，对于第 1 阶上下壳体同向一节径振型，敷设黏弹性阻尼环会增加约束刚度，导致飞轮系统对附加刚度的敏感性大于附加质量，固有频率随着外径的增加而降低，但大于无阻尼环对应的固有频率；对于第 2 阶上壳体一节圆振型、第 3 阶上壳体二节径而言，敷设外径 100 mm 和 200 mm 黏弹性阻尼环，对其固有频率无影响，而敷设外径 300 mm 黏弹性阻尼环时，固有频率降低；对于第 4 阶上壳体一节径振型、第 5 阶上壳体三节径振型、第 6 阶上壳体二节圆而言，其节点均位于飞轮上壳体中心和边缘，飞轮系统对附加刚度的敏感性小于附加质量，固有频率降低。

对各阶频响峰值而言，敷设黏弹性阻尼环后，均具有减振效果，除第 2 阶振型对应的频响峰值，敷设外径 200 mm 的黏弹性阻尼环的频响峰值减振效果最优，均高于 44.1%，300 mm 黏弹性阻尼环敷设位置位于第 2 阶振型相对位移较大处，减振效果最优，为 94.4%。

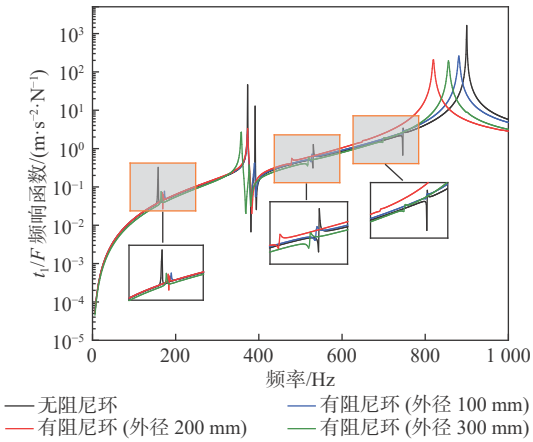



图 8 黏弹性阻尼环改变外径时的 $t_1/F$ 频响函数

Fig. 8 $t_1/F$ frequency response function when viscoelastic damping ring changes outer diameter

基于外径 200 mm 黏弹性阻尼环进行厚度和宽度参数，分析图 9 所示的改变厚度或宽度时 $t_1/F$ 频响函数曲线。厚度和宽度的增加会加剧敷设黏弹性阻尼环后各阶固有频率的变化趋势，且宽度变化的影响大于厚度变化的影响；对于各阶振动响应的减振效果而言，当厚度小于或等于壳体厚度的 4 倍，宽度小于或等于飞轮上壳体外径的 6% 时，随着宽度或厚度的增加，黏弹性阻尼环振动过程中消耗的机械振动能量增加，减振效果提高，且宽度增加带来的减振效果大于厚度带来的减振效果。

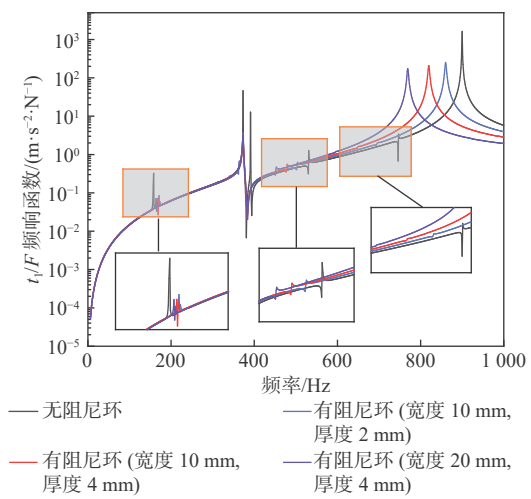



图 9 黏弹性阻尼环改变厚度或宽度时的 $t_1/F$ 频响函数

Fig. 9 $t_1/F$ frequency response function when viscoelastic damping ring changes thickness or width

### 2.2.3 全频域仿真减振效果

均方根值(root mean square, RMS)作为全频域减振评价指标，均方根值越小，说明减振效果越好。计算不同结构参数的 $t_1/F$ 频响函数的 RMS 值如表 2 所示。分析可知，在相同宽度和厚度下，敷设位置位于 200 mm 处时减振效果最好，在此基础上增加厚度和宽度，可进一步提高减振效果。

表 2 1 000 Hz 内不同几何参数黏弹性阻尼环 RMS 值减振效果

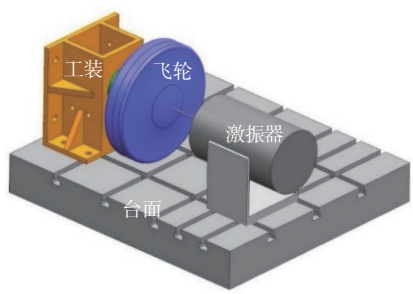
Table 2 Vibration damping effect within 1 000 Hz for different geometric parameters of viscoelastic damping ring with RMS value

| 外径/mm | 宽度/mm | 厚度/mm | RMS/(m·s$^{-2}$·N$^{-1}$) | 减振效果/% |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 10 | 4 | 19.69 | 67.2 |
| 200 | 10 | 2 | 18.68 | 68.9 |
| 200 | 10 | 4 | 15.95 | 73.4 |
| 200 | 20 | 4 | 12.90 | 78.5 |
| 300 | 10 | 4 | 14.85 | 75.3 |

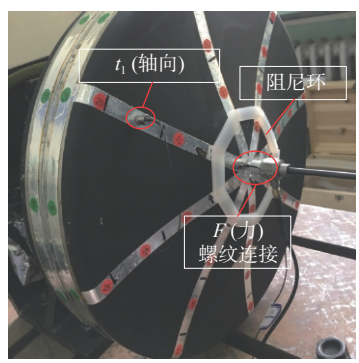
## 3 黏弹性阻尼环壳体减振设计的试验验证

### 3.1 试验测试方案

如图 10 所示，采用激振器激励(激振力的幅值控制在 10 N 以内，壳体测点上响应基本在 1 g 以内，最大不超过 8 g)来模拟振动条件，进行 1 000 Hz 以内的扫频激励，加速度传感器设置位置与仿真一致。试验激振器无激振力反馈控制功能，无法在扫频过程中激振力保持一致，为方便分析振动响应结果，计算得到频响函数 $t_1/F$，进而分析其振动响应。为验证仿真结果中结构参数对减振效果的影响规律，采用与仿真一致的结构参数进行激振试验。黏弹性阻尼环材料为硅橡胶。




(a) 激振器激振




(b) 激振力及传感器安装位置

图 10 试验装置原理和实物图

Fig. 10 Principle and physical drawings of test device

### 3.2 飞轮壳体振动响应分析

#### 3.2.1 外径的影响

黏弹性阻尼环宽度为 10 mm，厚度为 4 mm，改

变外径时，$t_1/F$ 的频响函数如图 11 所示。因激振器与飞轮上壳体采用螺纹连接，对上壳体中心位置提供局部约束，且试验中黏弹性阻尼环与飞轮上壳体采用强力胶粘贴，接触刚度与仿真有差异，故与仿真相比，上壳体一节圆振型对应的响应无明显峰值，而对于其他振型对应的固有频率，数值上有 2～15 Hz 的误差，但敷设不同外径黏弹性阻尼环对飞轮系统各阶固有频率影响规律一致。

分析各阶振动响应可知，敷设位置对各阶振动响应的影响规律与仿真一致，敷设位置为 200 mm 的黏弹性阻尼环减振效果最优。

### 3.2.2　厚度和宽度的影响

黏弹性阻尼环外径为 200 mm，改变厚度或宽度时，$t_1/F$ 的频响函数如图 12 所示。分析可知，厚度或宽度对飞轮系统固有频率影响规律与仿真一致；分析各阶振动响应可知，第 3 阶振动响应峰值因黏弹性阻尼环与飞轮采用强力胶粘贴，接触刚度与仿真有差异，阻尼下降，敷设有外径 200 mm、宽度 20 mm、厚度 4 mm 的黏弹性阻尼环减振效果略低于敷设有外径 200 mm、宽度为 10 mm、厚度 4 mm 的黏弹性阻尼环，但对于其余阶次振动响应峰值，试验规律与仿真一致。为分析试验与仿真在

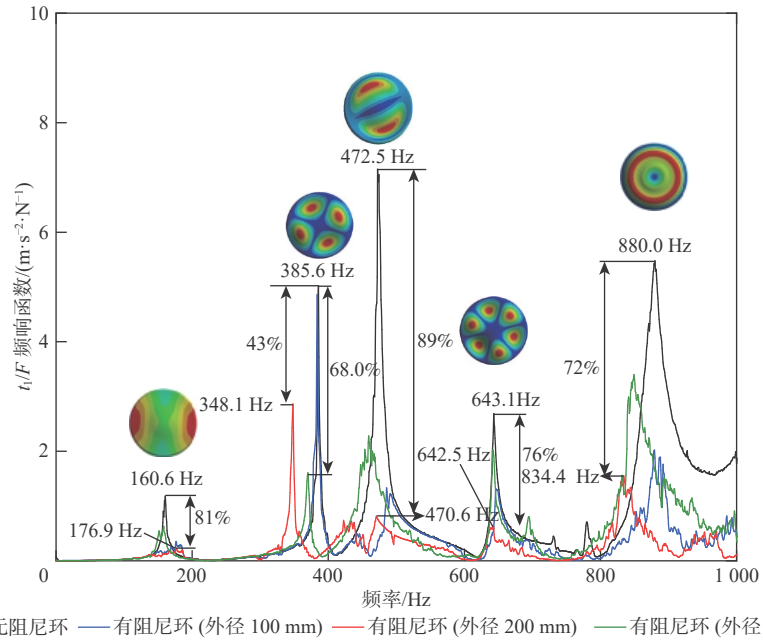



图 11　黏弹性阻尼环改变外径时的 $t_1/F$ 频响函数的试验结果

Fig. 11　Experimental results of $t_1/F$ frequency response function when viscoelastic damping ring changes outer diameter

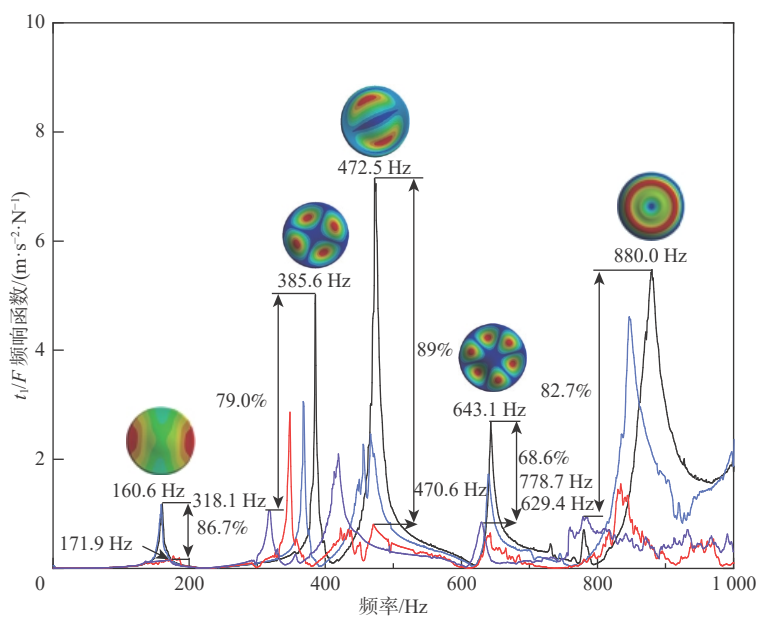



图 12　黏弹性阻尼环改变厚度或宽度时的 $t_1/F$ 频响函数的试验结果

Fig. 12　Experimental results of $t_1/F$ frequency response function when viscoelastic damping ring changes thickness or width

减振效果上的差异，选取敷设有外径 200 mm、宽度 20 mm、厚度 4 mm 的黏弹性阻尼环进行对比分析，其减振效果最优，表 3 为该黏弹性阻尼环试验与仿真减振效果对比。分析可知，除第 2 阶外，其余各阶误差不超过 9%，验证了仿真方法的准确性。

**表 3 敷设黏弹性阻尼环的减振效果对比**

**Table 3 Comparison of vibration damping effects with viscoelastic damping rings**

| 阶次 | 仿真减振效果/% | 试验减振效果/% | 绝对误差/% |
|---|---|---|---|
| 第1阶 | 78.0 | 86.7 | 8.7 |
| 第2阶 | 98.5 | 79.0 | 19.5 |
| 第3阶 | 63.1 | 70.6 | 7.5 |
| 第4阶 | 61.8 | 68.6 | 6.8 |
| 第5阶 | 89.3 | 82.7 | 6.5 |

### 3.2.3 全频域试验减振效果

计算不同结构参数黏弹性阻尼环在试验状态下的 $t_1/F$ 频响函数的 RMS，并与仿真结果进行对比，表 4 为不同参数的黏弹性阻尼环全频域内的仿真与试验减振效果对比。

**表 4 不同几何参数黏弹性阻尼环 RMS 值减振效果对比**

**Table 4 Comparison of vibration damping effects of different geometrical parameters of viscoelastic damping rings with RMS values**

| 外径/mm | 宽度/mm | 厚度/mm | RMS/$(\mathrm{m\cdot s^{-2}\cdot N^{-1}})$ | 试验减振效果/% | 仿真减振效果/% | 绝对误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 10 | 4 | 0.341 | 78 | 67.2 | 10.8 |
| 200 | 10 | 2 | 0.296 | 81 | 68.9 | 12.1 |
| 200 | 10 | 4 | 0.068 | 96 | 73.4 | 22.6 |
| 200 | 20 | 4 | 0.052 | 97 | 78.5 | 18.5 |
| 300 | 10 | 4 | 0.813 | 48 | 75.3 | 27.3 |

通过对表 4 分析可知，对 RMS 值而言，仿真与试验结果误差不超过 30%，且规律基本一致，证明了仿真结果得到的不同参数对 RMS 值的影响规律。

## 4 结 论

针对飞轮机械系统的振动对卫星平台高性能指标的影响，提出一种质量小且减振效果好的圆环形黏弹性阻尼环结构，分析其仿真与试验结果，得到以下结论：

1）敷设圆环形黏弹性阻尼环的飞轮壳体结构的试验和仿真结果基本一致，误差不超过 30%，验证了黏弹性阻尼环设计方法的可行性。

2）对于频率特性而言，各阶振型对黏弹性阻尼环附加的质量和刚度灵敏度不同，除上壳体同向一节径振型外，敷设黏弹性阻尼环均会使飞轮系统固有频率下降，且厚度或宽度的增加会加剧固有频率的变化趋势。

3）对于减振效果而言，黏弹性阻尼环敷设位置对减振效果具有决定性作用，应敷设在壳体各振型下应变能集中处；当宽度小于或等于壳体外径的 6%、厚度小于或等于壳体厚度的 4 倍时，增加宽度和厚度有利于提高减振效果。

## 参考文献（References）


[1] 郭子熙. 高精度高稳定度航天器的动力学与振动姿态一体化控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018: 1-7.
GUO Z X. Research on integrated control of dynamics and vibration attitude of spacecraft with high precision and stability[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018: 1-7(in Chinese).

[2] 马艳红, 刘珊珊, 王虹, 等. 动量轮微振动机理及仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(7): 1273-1282.
MA Y H, LIU S S, WANG H, et al. Micro-vibration mechanism and simulation of momentum wheel[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(7): 1273-1282(in Chinese).

[3] BHANSALI G, KUMAR S R, SINGH G. Novel viscoelastic vibration isolating methods in space technology: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 60: 2001-2003.

[4] 贺晓东, 黄修长, 华宏星. 用于飞轮微振动抑制的黏弹性-干摩擦阻尼环设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(23): 98-106.
HE X D, HUANG X C, HUA H X. Design of viscoelastic-dry friction damping ring for micro-vibration suppression of a flywheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(23): 98-106(in Chinese).

[5] TENG J G, SONG C Y. Numerical models for nonlinear analysis of elastic shells with eigenmode-affine imperfections[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(18): 3263-3280.

[6] 王墨斋. 粘弹橡胶阻尼材料在航天设备中的应用[J]. 宇航材料工艺, 1990, 20(4): 69-71.
WANG M Z. Application of viscoelastic rubber damping material in space equipment[J]. Aerospace Materials & Technology, 1990, 20(4): 69-71(in Chinese).

[7] 刘畅. 复合材料桁架的振动特性及减振研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 6-8.
LIU C. Study on vibration characteristics and vibration reduction of composite truss[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 6-8(in Chinese).

[8] CHO D S, CHOI T M, KIM J H, et al. Dominant components of vibrational energy flow in stiffened panels analysed by the structural intensity technique[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2018, 10(5): 583-595.

[9] 张新新. 卫星典型连接结构振动传递特性分析与隔振研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 4-7.
ZHANG X X. Analysis of vibration transmission characteristics and research on vibration isolation of typical satellite connection structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 4-7(in Chinese).

[10] CREMER L, HECKL M, PETERSSON B, et al. Structure-borne sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies (3rd Edition)[J]. The Journal of the ACoustical Society of America, 2005, 118(5): 2754.

[11] LIU C C, LI F M, FANG B, et al. Active control of power flow transmission in finite connected plate[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(20): 4124-4135.

[12] MEI C. Free and forced wave vibration analysis of a Timoshenko beam/frame carrying a two degrees-of-freedom spring-mass system [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2021, 143(6): 061008.

[13] GUPTA B V R, GANESAN N, NARAYANAN S. Finite element free vibration analysis of damped stiffened panels[J]. Computers & Structures, 1986, 24(3): 485-489.

[14] 王献忠, 孙龙泉, 姚熊亮. 含阻振质量基座的圆柱壳隔振特性[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40(5): 50-53.
WANG X Z, SUN L Q, YAO X L. Isolation characteristics of cylindrical shell with blocking mass bass[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(5): 50-53(in Chinese).

[15] 纪琳, 黄震宇. 连接界面不定性对于加筋板结构振动能量传递特性的影响分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(21): 184-187.
JI L, HUANG Z Y. Effects of ribs' parameter uncertainty on vibration energy transmission of rib-stiffened plate structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(21): 184-187(in Chinese).

[16] DITARANTO R A. Theory of vibratory bending for elastic and viscoelastic layered finite-length beams[J]. Journal of Applied Mechanics, 1965, 32(4): 881-886.

[17] MEAD D J, YAMAN Y. The harmonic response of rectangular sandwich plates with multiple stiffening: A flexural wave analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(3): 409-428.

[18] RIKARDS R. Finite element analysis of vibration and damping of laminated composites[J]. Composite Structures, 1993, 24(3): 193-204.

[19] LALL A K, ASNANI N T, NAKRA B C. Damping analysis of partially covered sandwich beams[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 123(2): 247-259.

[20] PARTHASARATHY G, REDDY C V R, GANESAN N. Partial coverage of rectangular plates by unconstrained layer damping treatments[J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 102(2): 203-216.

[21] PARTHASARTHY G, GANESAN N, REDDY C V R. Study of unconstrained layer damping treatments applied to rectangular plates having central cutouts[J]. Computers & Structures, 1986, 23(3): 433-443.

[22] 陈前, 朱德懋. 粘弹结构动力学分析[J]. 振动工程学报, 1989, 2(3): 42-52.
CHEN Q, ZHU D M. Dynamic analysis of viscoelastic structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 1989, 2(3): 42-52(in Chinese).

[23] 曾海泉, 罗跃纲, 闻邦椿. 复合阻尼结构及其阻尼性能[J]. 振动与冲击, 2001, 20(3): 13-15.
ZENG H Q, LUO Y G, WEN B C. Composite damping structures and their damping properties[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(3): 13-15(in Chinese).

[24] 王劲凯, 孟立新, 张立中, 等. 次镜支撑结构硬涂层阻尼减振设计与仿真[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12): 330-338.
WANG J K, MENG L X, ZHANG L Z, et al. Design and simulation of hard coating damping vibration for secondary mirror support structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(12): 330-338(in Chinese).

[25] 王鹏, 张振伟, 骆海涛, 等. 空间桁架复合结构的阻尼减振分析与试验研究[J]. 机械设计与制造, 2020(6): 121-124.
WANG P, ZHANG Z W, LUO H T, et al. Simulation analysis of the application of viscoelastic damping in truss and space load[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(6): 121-124(in Chinese).

[26] 李晖, 张林林, 常永乐, 等. 约束层阻尼对薄壁圆柱壳模态参数的影响研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(7): 1337-1344.
LI H, ZHANG L L, CHANG Y L, et al. The influence of constrained layer damping on modal parameters of thin cylindrical shell[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(7): 1337-1344(in Chinese).

[27] 游进, 孟光, 李鸿光. L 型耦合板相关激励下高频随机能量流分析[J]. 振动工程学报, 2010, 23(1): 60-63.
YOU J, MENG G, LI H G. High frequency random energy flow analysis of L-shaped coupled plates under coherent excitations[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(1): 60-63(in Chinese).

[28] 王鹏. 黏弹性阻尼在空间桁架和航天载荷上的减振分析和试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017: 9-12.
WANG P.Vibration analysis and experimental research of viscoelastic dampers on space truss and aerospace load[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017: 9-12(in Chinese).

[29] KIM S Y, MECHEFSKE C K, KIM I Y. Optimal damping layout in a shell structure using topology optimization[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(12): 2873-2883.

# Simulation analysis and experimental study of viscoelastic damping ring of flywheel housing

JIN Fuyun[1]，WANG Yongfeng[2,*]，WANG Hong[3]，LIU Shanshan[4]，MA Yanhong[1]

(1. Research Institute of Aero-Engine，Beihang University，Beijing 100191，China；
2. School of Energy and Power Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China；
3. Beijing Key Laboratory of Long-Life Technology of Precision Rotation and Transmission Mechanism，
Beijing Institute of Control Engineering，Beijing 100094，China；
4. Department of Navigation System，Xi'an Flight Automatic Control Research Institute，Xi'an 710076，China)

**Abstract**：As the requirements for performance indicators of spacecraft platforms increase, the influence of micro-vibrations generated by flywheels on spacecraft platforms is becoming increasingly prominent and needs to be suppressed. Based on the modal characteristics of the upper housing of the flywheel, a design method of circular viscoelastic damping ring structure was proposed, and numerical simulations and experiments were carried out to verify the damping effects of the viscoelastic damping ring in terms of the position, thickness, and width and verify the validity of circular viscoelastic damping ring. The results show that the circular viscoelastic damping ring structure has a good damping effect on broadband vibration, and the position of the viscoelastic damping ring plays a decisive role in the change of the inherent frequency of the flywheel system and the damping effect. The damping effect is better when a circular viscoelastic damping ring is applied at 60% of the outer diameter of the flywheel. When the width is designed to be within 6% of the outer diameter of the flywheel, and the thickness is designed to be within 4 times the thickness of the housing, the damping effect increases with the increase in width and thickness.

**Keywords**：flywheel system；viscoelastic damping layer；thin-housing structure；multi-parameter analysis；vibration suppression；broadband vibration damping

**Received**：2022-12-03；**Accepted**：2023-03-04；**Published Online**：2023-03-13 16：48

**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230310.2238.005

**Foundation items**：National Natural Science Foundation of China (52075018,52175072);Open fund of Beijing Key Laboratory of Long-Life Technology of Precision Rotation and Transmission Mechanism (BZ0388202102)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0964

# 基于迎风格式伴随方程的飞行器边界特性设计方法

邓俊[1]，高正红[1]，黄江涛[2,*]，赵轲[1]，夏露[1,3]

(1. 西北工业大学 航空学院，西安 710072；2. 中国空气动力研究与发展中心 空天技术研究所，绵阳 621000；
3. 西北工业大学 翼型、叶栅空气动力学国家级重点实验室，西安 710072)

**摘　　要**：飞行器的边界特性决定了其安全性和飞行性能，是飞行器设计的难点和重点。引入迎风格式伴随方程和不同的通量限制器处理形式，提高复杂流动问题的伴随方程求解精度、效率和鲁棒性，拓展伴随优化方法在飞行器边界特性设计的应用范围。介绍了离散伴随求解梯度的基本原理，在此基础上推导了伴随方程的无黏项及其边界条件的变分形式，根据通量限制器的处理方式，形成一阶精度、二阶精度和混合精度的伴随方程。对伴随方程的边界处理措施进行了研究。通过ONERA M6机翼梯度精度和鲁棒性验证算例，对比迎风格式和中心格式的伴随方程求解性能，分析限制器和边界处理措施对伴随方程的收敛性和梯度精度的影响。通过CRM翼身组合体巡航气动优化设计和边界特性优化设计算例，验证了求解器对飞行器巡航性能设计和边界特性设计的有效性。计算和设计结果表明，建立的迎风格式伴随方程求解方法鲁棒和梯度精度高，能够适用于飞行器边界特性设计难题的求解。

**关　键　词**：迎风格式；通量限制器；离散伴随方程；梯度计算；边界特性；气动优化
**中图分类号**：V211.3
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0281-12

数值优化设计技术以高效性和可靠性广泛应用于飞行器设计中，根据寻优算法的不同主要分为基于进化类算法的全局优化设计[1-3]和基于梯度算法的局部优化设计[4-5]。基于进化类算法的设计系统搭建简单，无需额外的求解器开发，针对新学科或者新算法能快速建立设计系统，同时具有收敛到全局最优的能力，但这类设计系统随着设计变量维度的增加，对目标评估的需求指数增加，难以应用于高维设计问题，而飞机设计特别是精细化设计主要是高维设计问题，基于梯度算法的优化设计系统处理这类问题具有很高的效率，即使采用有限差分求解梯度时，目标评估的需求仅线性增加，特别是基于伴随方法求解梯度的计算量几乎与设计变量的数量无关，仅需通过一次控制方程求解、一次伴随方程求解和多次扰动求解即可快速获得目标函数关于设计变量的梯度，因此备受研究人员关注，在气动[4-5]、结构[6]、声爆[5]、电磁[7-8]等领域得到了大量的应用。

为了提升离散伴随设计系统的设计效率和对工程复杂气动设计问题的适应性，国内外学者和研究机构均开展了离散伴随设计系统的开发和研究，如NASA开发了基于非结构化网格求解器FUN3D的离散伴随优化系统[9]；DLR基于结构化网格求解器Flower和非结构化网格求解器TAU开发了离散伴随优化系统[10]；ONERA开发了基于elsA的离散伴随优化系统[11]；密歇根大学Martins教授团队开发了ADflow离散伴随设计系统[12]。西北工业大学的Zuo等[13]建立了基于N-S方程的离散伴随优化设计系统；Li等[14]基于非结构化网格求解器建立离散伴随系统优化设计系统；黄江涛等[4]在具有自主

**收稿日期**：2022-12-03；**录用日期**：2023-06-08；**网络出版时间**：2023-07-03 09:53
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230630.1731.009
**基金项目**：重点实验室项目 (614220121020128)
* **通信作者**. E-mail：hjtcyf@163.com

*引用格式：邓俊，高正红，黄江涛，等. 基于迎风格式伴随方程的飞行器边界特性设计方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：281-292. DENG J，GAO Z H，HUANG J T，et al. Optimization design method of aircraft boundary characteristics based on upwind scheme adjoint equation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：281-292（in Chinese）.*

知识产权的大规模并行化结构化网格RANS求解器PMB3D的基础上，建立了结构化网格的离散型伴随优化系统；伊卫林等[15]基于非结构化网格的叶轮机定常流场求解程序Turbo Sim，以及叶轮机离散型伴随场计算程序Turbo Adj D，构建了叶轮机非结构化网格的离散型伴随优化系统。

为了进一步提高飞行器的综合性能，无论对民用飞行器的低速起降性能和高速抖振特性，还是对军用飞行器的机动性和边界特性，均提出了更高更严苛的要求。飞行器设计越来越需考虑到边界特性要求，然而飞行器边界附近的飞行状态和特征相较于巡航飞行要复杂得多，往往伴随着低速大分离流动、强激波诱导边界层分离流动等这类非线性和非定常难题。这类问题具有强非线性的特征，对CFD数值模拟和气动优化设计是一个极大的挑战，如NASA在CFD 2030愿景[16]中提到，飞机的边界特性设计是未来飞行器设计的重点、难点。

对气动伴随问题，残差项变分推导包括无黏项和黏性项的变分推导，由于无黏项采用中心格式时形式简单，变分推导涉及模板单元少，并且人工黏性的变分也有成熟的简化处理措施，因此国内外的离散伴随系统如SU2、TAU和elsA等在无黏项多采用中心格式[4,10-11]降低设计系统开发难度。然而，离散伴随系统中，伴随方程的精度和鲁棒性主要受无黏项处理形式的影响。在处理强激波和流动分离这类边界特性问题时，采用中心格式进行流场求解时存在难以收敛、精度不高的问题，同时格式也难以进一步处理降低为一阶精度的形式提高伴随方程的鲁棒性。由于伴随方程求解是对流场的微分，相比流场变量，伴随变量更加敏感，因此复杂流动条件下的伴随方程更难收敛，导致边界特性的伴随方程难以求解，这也是当前离散伴随系统在气动设计领域面临的一大难题。

本文针对中心格式伴随方程在求解边界特性问题中存在的迭代求解发散问题，引入基于迎风格式的伴随方程，解决伴随方程求解的稳定性问题，拓展基于离散伴随的优化设计方法的应用范围。通过ONERA M6机翼[17]算例，研究迎风格式伴随方程的处理措施对伴随方程的精度和稳定性的影响；通过CRM翼身组合体[18]巡航特性和边界特性优化算例验证本文提出的迎风格式伴随方程。

## 1 气动伴随方法

气动优化设计问题的目标可写为如下形式：

$$\begin{cases}\min I(\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{D}),\boldsymbol{D})\\ \boldsymbol{R}(\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{D}),\boldsymbol{D})=0\end{cases} \tag{1}$$

式中：$I$为设计目标函数；$\boldsymbol{Q}$为流场守恒变量；$\boldsymbol{D}$为设计变量；$\boldsymbol{R}$为由N-S方程求解获得流场求解的残差。采用拉格朗日乘子求解：

$$L=I+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R} \tag{2}$$

对式(2)求导，可得

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\boldsymbol{D}}&=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\boldsymbol{D}}[I(\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{D}),\boldsymbol{D})+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}R(\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{D}),\boldsymbol{D})]=\\ &\left(\frac{\partial I}{\partial\boldsymbol{Q}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{Q}}{\mathrm{d}\boldsymbol{D}}+\frac{\partial I}{\partial\boldsymbol{D}}\right)+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\left(\frac{\partial\boldsymbol{R}}{\partial\boldsymbol{Q}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{Q}}{\mathrm{d}\boldsymbol{D}}+\frac{\partial\boldsymbol{R}}{\partial\boldsymbol{D}}\right)=\\ &\left(\frac{\partial I}{\partial\boldsymbol{Q}}+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{R}}{\partial\boldsymbol{Q}}\right)\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{Q}}{\mathrm{d}\boldsymbol{D}}+\left(\frac{\partial I}{\partial\boldsymbol{D}}+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{R}}{\partial\boldsymbol{D}}\right)\end{aligned} \tag{3}$$

注意到方程右侧第一项带有流场变量对设计变量的导数，有限差分方法求解目标梯度时需要完整求解物理场，因此带来了巨大的计算量。伴随方法使右侧第一项为0，从而减少梯度求解过程对场的计算需求，使基于伴随方法的梯度求解计算量几乎与设计变量数量无关。伴随方程和目标梯度求解式分别为

$$\frac{\partial I}{\partial\boldsymbol{Q}}+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{R}}{\partial\boldsymbol{Q}}=0 \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\boldsymbol{D}}=\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}\boldsymbol{D}}=\frac{\partial I}{\partial\boldsymbol{D}}+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{R}}{\partial\boldsymbol{D}} \tag{5}$$

求解得到伴随变量即拉格朗日乘子$\boldsymbol{\lambda}$后，可采用中心差分计算目标梯度为

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\boldsymbol{D}}\approx&[I(\boldsymbol{D}+\Delta\boldsymbol{D},\boldsymbol{Q})+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{D}+\Delta\boldsymbol{D},\boldsymbol{Q})]-\\ &\frac{[I(\boldsymbol{D}-\Delta\boldsymbol{D},\boldsymbol{Q})+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{D}-\Delta\boldsymbol{D},\boldsymbol{Q})]}{2\Delta\boldsymbol{D}}\end{aligned} \tag{6}$$

## 2 离散伴随方程构造

离散伴随方程的构造主要工作是对流动控制方程数值迭代求解右端残差项进行变分处理。采用迎风格式时，$\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\partial\boldsymbol{R}/\partial\boldsymbol{Q}$可写为如下形式：

$$\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{R}}{\partial\boldsymbol{Q}}=\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{R}_{\mathrm{c}}}{\partial\boldsymbol{Q}}-\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{R}_{\mathrm{v}}}{\partial\boldsymbol{Q}} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{R}_{\mathrm{c}}$无黏项残差；$\boldsymbol{R}_{\mathrm{v}}$为黏性项残差。伴随方程中黏性项可采用流场求解中的薄层近似方程和中心格式推导得到[4]。

对式(7)进行变分为

$$\delta L=\delta I+\sum\boldsymbol{\lambda}_{i,j,k}^{\mathrm{T}}\delta\boldsymbol{R}(i,j,k) \tag{8}$$

式中：$i,j,k$为结构网格下三个计算网格的索引。

### 2.1 无黏项变分推导

迎风格式可分为通量矢量分裂(flux-vector splitting, FVS)和通量差分分裂(flux-difference splitting, FDS)。Van Leer格式[19]属于通量矢量分裂，该格式形式简单，便于变分推导，因此本文选取该格式进行迎风

格式伴随方程的构造研究。

由于无黏项在曲线坐标系下($\xi$, $\eta$, $\zeta$)方向的运算独立,因此仅对$\xi$方向进行推导,其余方向仅需改变索引即可,有利于进行模块化处理。令($i$, $j$, $k$)分别为($\xi$, $\eta$, $\zeta$)的索引方向,对$\xi$方向的无黏项进行变分为

$$\delta \boldsymbol{R}_{c,i}=\delta \boldsymbol{F}_{i+1/2}-\delta \boldsymbol{F}_{i-1/2}=\left(\delta \boldsymbol{F}_{i+1/2}^{+}+\delta \boldsymbol{F}_{i+1/2}^{-}\right)-\left(\delta \boldsymbol{F}_{i-1/2}^{+}+\delta \boldsymbol{F}_{i-1/2}^{-}\right) \tag{9}$$

式中: $\delta \boldsymbol{F}_{i+1/2}$、$\delta \boldsymbol{F}_{i-1/2}$分别为有限体积单元之两侧沿($\xi$, $\eta$, $\zeta$)正向通量变分。

$$\delta \boldsymbol{F}_{i+1/2}^{+}(\boldsymbol{q}_L)=\delta \boldsymbol{F}_{i+1/2}^{+}(\boldsymbol{q}_L(\boldsymbol{Q}_{i-1},\boldsymbol{Q}_i,\boldsymbol{Q}_{i+1})) \tag{10}$$

将式 (10) 代入式 (9), 乘以伴随变量并求和为

$$\begin{aligned}\sum \boldsymbol{\lambda}_{i,j,k}^{\mathrm{T}}\delta \boldsymbol{R}(i,j,k)=&\cdots+\boldsymbol{\lambda}_{i-2,j,k}^{\mathrm{T}}\delta \boldsymbol{R}(i,j,k)+\\&\boldsymbol{\lambda}_{i-1,j,k}^{\mathrm{T}}\delta \boldsymbol{R}(i,j,k)+\boldsymbol{\lambda}_{i,j,k}^{\mathrm{T}}\delta \boldsymbol{R}(i,j,k)+\\&\boldsymbol{\lambda}_{i+1,j,k}^{\mathrm{T}}\delta \boldsymbol{R}(i,j,k)+\boldsymbol{\lambda}_{i+2,j,k}^{\mathrm{T}}\delta \boldsymbol{R}(i,j,k)+\cdots\end{aligned} \tag{11}$$

合并含$\delta \boldsymbol{Q}_i$项, 可得

$$\begin{aligned}\boldsymbol{R}_c(\boldsymbol{\lambda})=&\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i-3/2}^{-}}{\partial \boldsymbol{q}_{i-3/2}^{\mathrm{R}}}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i-3/2}^{\mathrm{R}}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}\right)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}_{i-2}-\boldsymbol{\lambda}_{i-1})+\\&\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i-1/2}^{+}}{\partial \boldsymbol{q}_{i-1/2}^{\mathrm{L}}}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i-1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}+\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i-1/2}^{-}}{\partial \boldsymbol{q}_{i-1/2}^{\mathrm{R}}}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i-1/2}^{\mathrm{R}}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}\right)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}_{i-1}-\boldsymbol{\lambda}_i)+\\&\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i+1/2}^{+}}{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}+\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i+1/2}^{-}}{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{R}}}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{R}}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}\right)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}_i-\boldsymbol{\lambda}_{i+1})+\\&\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i+3/2}^{+}}{\partial \boldsymbol{q}_{i+3/2}^{\mathrm{L}}}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i+3/2}^{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}\right)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}_{i+1}-\boldsymbol{\lambda}_{i+2})\end{aligned} \tag{12}$$

式中: $\boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}$、$\boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}$ 分别为右行(向左侧)、左行(向右侧)原始变量。

式(12)即为伴随方程中无黏项在$\xi$方向的通项,为简化界面原始变量对流场守恒变量的求导难度,本文通量雅可比矩阵求解采用式 (13) 右端的形式,为了减小篇幅,通量雅可比矩阵采用式 (13) 左端的形式表示。

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i+1/2}^{+}}{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}=\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i+1/2}^{+}}{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{q}_i}\frac{\partial \boldsymbol{q}_i}{\partial \boldsymbol{Q}_i} \tag{13}$$

式(13)右端三项分别为通量雅可比矩阵,限制器变分矩阵和原始变量到守恒变量的转换矩阵。其中通量雅可比在较多文献中已经给出,且其篇幅较大,此处不再重复。

### 2.2　通量限制器变分推导

流场求解中,采用变量重构技术 MUSCL[20] 对界面原始变量$\boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}$和$\boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}$进行插值,本文采用的通量限制器形式如下,以$\boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}$为例,对压力和密度:

$$\begin{cases}\rho_{i+1/2}^{\mathrm{L}}=\rho_i+\dfrac{1}{2}\rho_i(\delta_{\mathrm{L}}\rho)_i\\ p_{i+1/2}^{\mathrm{L}}=p_i+\dfrac{1}{2}p_i(\delta_{\mathrm{L}}p)_i\end{cases} \tag{14}$$

对速度:

$$\begin{cases}u_{i+1/2}^{\mathrm{L}}=u_i+\dfrac{1}{2}(\delta_{\mathrm{L}}u)_i\\ v_{i+1/2}^{\mathrm{L}}=v_i+\dfrac{1}{2}(\delta_{\mathrm{L}}v)_i\\ w_{i+1/2}^{\mathrm{L}}=w_i+\dfrac{1}{2}(\delta_{\mathrm{L}}w)_i\end{cases} \tag{15}$$

式中: $\rho$ 为密度; $p$ 为压力; $u$、$v$、$w$ 分别为 $x$、$y$、$z$ 方向速度。

其中各向异性限制器形式如下:

$$(\delta q)=I(x,y)=\frac{x\left(y^2+2\varepsilon\right)+y\left(2x^2+\varepsilon\right)}{2x^2-xy+2y^2+3\varepsilon} \tag{16}$$

式中: $I(x,y)$为限制器, $x$、$y$由流场的非守恒量的梯度构造。

式 (16) 的处理有如下 4 种形式:

$$\begin{cases}\delta I(x,y)=0\\ \delta I(x,y)=(\delta x)I_y(x,y)+(\delta y)I_x(x,y)\end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases}\delta I(x,y)=x\delta I_y(x,y)+y\delta I_x(x,y)\\ \delta I(x,y)=x\delta I_y(x,y)+y\delta I_x(x,y)+\\ \qquad(\delta x)I_y(x,y)+(\delta y)I_x(x,y)\end{cases} \tag{18}$$

在流场变化缓和位置$\delta x$趋于 0, 而在流场变化剧烈位置$(\delta x)I_y(x,y)$相较于$x\delta I_y(x,y)$是一个小量, 可得式 (17) 为一阶精度的格式, 式 (18) 为二阶精度的格式。记式 (17) 的第一项为固定限制器(fix limiter, FL), 由于第二项包含在式 (18) 中, 此处不再特别处理; 记式 (18) 的第一项为限制器部分变分(fix part of limiter, FPL), 第二项为限制器全变分(limiter variation, LV)。

根据上述分析, 采用式 (19) 形式可得到从一阶精度到二阶精度的伴随方程, 压力、密度和速度的限制器采用不同的系数可得到更多形式的混合精度伴随方程。

$$\frac{\partial \rho_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial \rho_i}=1+[L_{\mathrm{V}}\times c_{\mathrm{m}}+L_{\mathrm{F}}\times(1-c_{\mathrm{m}})] \tag{19}$$

式中: $L_{\mathrm{V}}$为限制器全变分; $L_{\mathrm{F}}$为固定限制器, $c_{\mathrm{m}}$为混合的系数。

最终整理得到对角矩阵形式的限制器变分矩阵为

$$\begin{aligned}\frac{\partial \boldsymbol{q}_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{q}_i}=\mathrm{diag}\Bigg(&\frac{\partial \rho_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial \rho_i},\frac{\partial u_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial u_i},\ \frac{\partial v_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial v_i},\\&\frac{\partial w_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial w_i},\ \frac{\partial p_{i+1/2}^{\mathrm{L}}}{\partial p_i}\Bigg)\end{aligned} \tag{20}$$

### 2.3　边界条件处理

由于单个方向上 Van Leer 格式的模板单元共计 5 个, 在基于结构网格的求解器中, 外推的两层虚网格根据边界条件的不同与边界单元和紧邻边界单元的内部单元存在关系, 因此在边界处理中需

要考虑4种单元的处理情况；流场内部由于采用对接信息交换的技术，无需特殊处理。通量边界模板如图1所示，本文网格单元起始边界和结束边界单元分别为ST_IN1(2)、ST_IN2(3)、ED_IN1(jmax)、ED_IN2(jmax-1)，针对这4种的处理需要从式(11)出发重新推导。

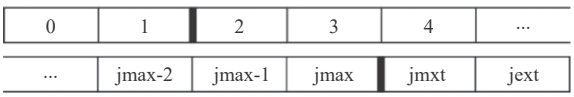



图1 通量边界模板

Fig. 1 Template of flux at boundary

对IN1边界，无黏通量模板减少2个；对IN2边界，无黏通量模板减少1个。本文给出单元ST_IN1表达式为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{R}_{\mathrm{c}}(\lambda)=&\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}^{+}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i-1/2}}\left(\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i-2}}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_{i-2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}+\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i-1}}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_{i-1}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}+\right.\right.\\&\left.\left.\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}\right)+\frac{\partial \boldsymbol{F}^{-}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}_{i-1/2}}\left(\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i-1}}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_{i-1}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}+\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}\right)\right]^{\mathrm{T}}\cdot\\&(-\boldsymbol{\lambda}_i)+\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}^{+}_{i+1/2}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i+1/2}}\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i+1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}+\frac{\partial \boldsymbol{F}^{-}_{i+1/2}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}_{i+1/2}}\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}_{i+1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}\right)^{\mathrm{T}}\cdot\\&(\boldsymbol{\lambda}_i-\boldsymbol{\lambda}_{i+1})+\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}^{+}_{i+3/2}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i+3/2}}\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i+3/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}\right)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}_{i+1}-\boldsymbol{\lambda}_{i+2})\end{aligned}\tag{21}$$

式中：$i=2$。ST_IN2、ED_IN1和ED_IN2表达式类似。

此外，式(21)中$\partial \boldsymbol{Q}_{i-2}/\partial \boldsymbol{Q}_i$即为边界条件矩阵，实现过程中令$\dfrac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i-2}}\dfrac{\partial \boldsymbol{Q}_{i-2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}=\dfrac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{q}_{i-2}}\dfrac{\partial \boldsymbol{q}_{i-2}}{\partial \boldsymbol{q}_{i}}\dfrac{\partial \boldsymbol{q}_{i}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i}}$，采用上述推导的形式有利于进行模块化处理。$\partial \boldsymbol{q}_{i-2}/\partial \boldsymbol{q}_i$的处理根据边界条件而定，文献[4]给出了几种典型的边界条件原始变量求导的矩阵。

### 2.4 壁面通量修正

采用MUSCL变量重构技术，可得到界面通量在物面边界处能较好地满足通量仅由压力贡献的条件。在流场求解中，为了满足其他格式对界面通量仅由压力贡献的要求，一般采取壁面通量修正的措施强制壁面通量满足仅由压力贡献的条件，表达式为

$$\boldsymbol{F}=[0\quad \xi_x p\quad \xi_y p\quad \xi_z p\quad -\xi_t p]^{\mathrm{T}}\tag{22}$$

本文给出一个壁面通量修正的变分形式：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{R}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{\lambda})=&\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i-1/2}}{\partial \boldsymbol{q}_i}\frac{\partial \boldsymbol{q}_i}{\partial \boldsymbol{Q}_i}(-\boldsymbol{\lambda}_i)+\\&\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}^{+}_{i+1/2}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i+1/2}}\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i+1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}+\frac{\partial \boldsymbol{F}^{-}_{i+1/2}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}_{i+1/2}}\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{R}}_{i+1/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}\right)(\boldsymbol{\lambda}_i-\boldsymbol{\lambda}_{i+1})+\\&\frac{\partial \boldsymbol{F}^{+}_{i+3/2}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i+3/2}}\frac{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{L}}_{i+3/2}}{\partial \boldsymbol{Q}_i}(\boldsymbol{\lambda}_{i+1}-\boldsymbol{\lambda}_{i+2})\end{aligned}\tag{23}$$

式中：$i=2$。由于迎风格式在壁面处较好满足壁面通量仅由压力贡献的条件，因此本文对比了壁面通量修正对伴随方程的收敛性和梯度精度影响。

### 2.5 模块化处理

基于结构化网格的流场和伴随方程求解器的开发中，模块化处理工作是重要的一环。模块化处理能有效复用代码，方便在($i$, $j$, $k$)索引方向进行循环，减小代码体积和工作量；在缺乏代码检查的语言中，能尽可能减小疏漏造成的错误，缩短验证时间。此外模块化的处理使代码结构清晰，有利于后续开发工作。本文的模块化处理工作主要包括流场内部残差变分、4种边界条件变分和索引方向循环的模块化处理，这三部分可进一步分解为子程序的组合。

1）流场内部残差变分模块化处理

单个索引方向上流场内部残差变分如式(12)包括6项，根据传播方向的不同可分为2组，分别记为L和R，每项分别由通量雅可比、限制器变分和转换矩阵组成。同组每项之间仅有流场变量不同，共用一个子程序模块。

2）边界条件变分模块化处理

边界条件处理中，残差的变分在ST_IN2和ED_IN2等单元多出一项，仍然按照流场内部单元的处理方法进行。此外在边界上还相应多出了边界条件矩阵，按顺序求解得到相应的矩阵边界条件矩阵，最终得到残差变分。边界条件矩阵同时存在于黏性项的变分处理中，共用子程序模块。

3）索引方向循环模块化处理

($i$, $j$, $k$)索引方向循环过程中，仅存在索引的不同，索引方向循环模块化处理即将通量残差变分处理为子程序模板的形式，索引和面法向等变量直接输入子程序模板。子程序模板中索引为(loop_im2, loop_jm2, loop_km2)形式，在$i$和$j$方向循环中，$k$方向取loop_km2 = $k-2$至loop_kp2 = $k+2$，$i$和$j$方向取loop_im2 = $\cdots$ = loop_ip2 = $i$, loop_jm2 = $\cdots$ = loop_jp2 = $j$的形式。

## 3 伴随方程处理方式影响研究与算例验证

介绍基于离散伴随的梯度求解流程与优化设计框架。通过ONERA M6机翼算例在巡航状态和边界状态下的算例，系统性验证了限制器全变分、限制器部分变分和固定限制器，以及壁面通量修正变分对伴随方程收敛性和梯度精度的影响。通过CRM翼身组合体外形在巡航状态和激波大分离状态的算例，验证了迎风格式伴随方程求解器的有效性。

本文的算例验证均采用512 GB内存的AMD EPYC 7763 64×2工作站。

### 3.1　梯度求解流程与优化设计框架

基于离散伴随的梯度求解流程与优化设计框架如图 2 所示。在梯度求解过程中, 求解流动控制方程, 本文为 RANS 方程, 并输出升力、阻力等气动特性参数和流场; 伴随方程求解采用式 (4) 进行, 输入所需的流场、气动力等参数, 求解伴随方程, 并输出伴随变量; 梯度求解时输入的流场和伴随变量, 采用式 (6) 求解。优化设计流程采用 SLSQP 驱动, 在求解得到气动特性数据和梯度后进行线搜索, 满足线搜索条件后进行下一轮搜索直到优化设计流程收敛。

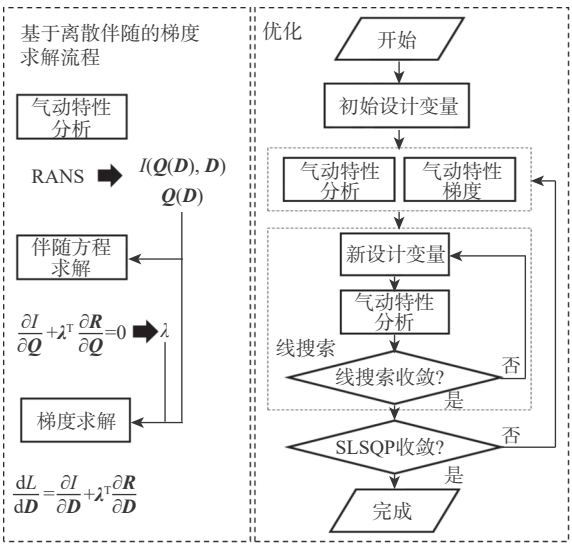



图 2　基于离散伴随方法的梯度求解流程与优化设计框架

Fig. 2　Gradient solving process based on discrete concomitant methods and a framework for optimization design

### 3.2　迎风格式与中心格式伴随方程求解器对比

通过 ONERA M6 机翼算例开展迎风格式伴随方程求解器的性能研究, 并与中心格式伴随方程求解器进行了对比, 分析两者在巡航状态和边界状态的性能。巡航状态和边界状态的参数如表 1 所示, $Ma$为马赫数, $Re$为雷诺数, $C_{\mathrm{L}}$为升力系数。

**表 1　求解器性能验证计算状态**

**Table 1　Solver performance validate status**

| 计算状态 | $Ma$ | $Re$ | $C_{\mathrm{L}}$ |
|---|---|---|---|
| 巡航状态 | 0.84 | $6.8\times10^6$ | 0.245 0 |
| 边界状态 | 0.84 | $6.8\times10^6$ | 0.400 0 |

采用基于 NURBS 基函数的 FFD 参数化方法[21]进行机翼参数化, ONERA M6 机翼的控制体和设计变量如图 3 所示。设计变量共 70 个, 沿展向布置 5 个截面, 流向每个截面上下表面各布置 7 个设计变量, 梯度验证时采用的设计变量为根部截面设计变量。

巡航状态迎风格式与中心格式伴随方程的收敛性和梯度精度对比如图 4 所示, 其中伴随$\rho$、$\rho\cdot u$、$\rho\cdot v$、$\rho\cdot w$、$\rho\cdot e$为与 N-S 方程对应的 5 个伴随方程

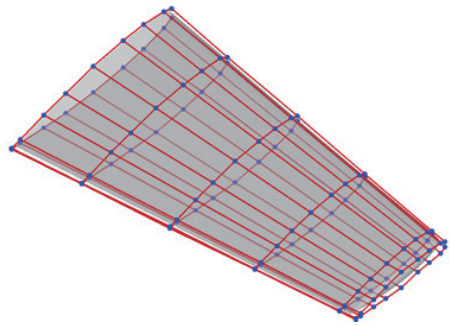


图 3　FFD 控制体与设计变量

Fig. 3　FFD lattice and design variables

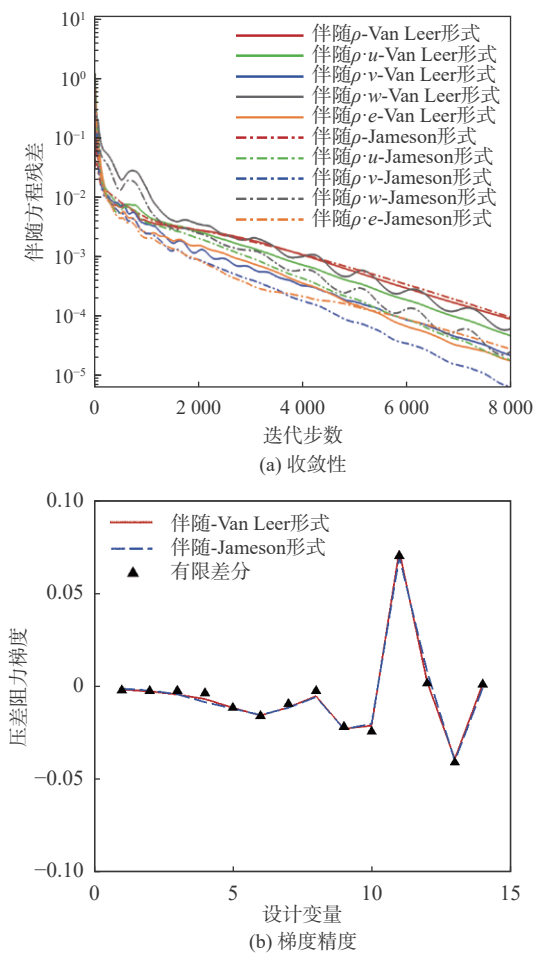



图 4　巡航状态下迎风格式与中心格式伴随方程收敛性和梯度精度对比

Fig. 4　Convergence and gradient accuracy comparison of upwind scheme and central scheme adjoint equation in cruise state

的守恒量, $e$ 为总能量, 伴随方程迭代求解步数设置为 8 000 步。由图 4 可知, 2 种伴随方程的收敛性和梯度精度相当。

边界状态下迎风格式与中心格式伴随方程的收敛性对比如图 5 所示。由图 5 可知, 中心格式的伴随方程发散, 迎风格式的伴随方程收敛, 这表明迎风格式伴随方程在处理强激波等边界问题时更加鲁棒, 这也正是本文开发迎风格式伴随方程求解

器的主要原因。迭代至2 000步时，中心格式的伴随方程已经发散，迎风格式伴随方程已经下降3个量级，因此其余验证中伴随方程迭代采用2 000步进行。迎风格式与有限差分的梯度精度对比如图6所示。由图6可知，伴随方程计算得到的梯度精度表现良好。

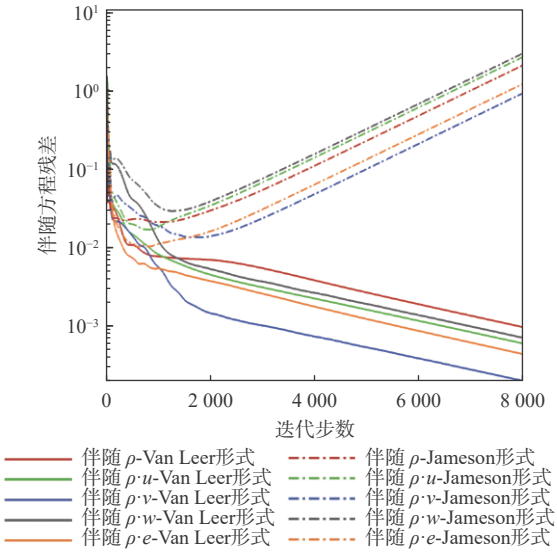



图5 边界状态下迎风格式与中心格式伴随方程收敛性对比

Fig. 5 Convergence comparison of upwind scheme and central scheme adjoint equation in boundary state

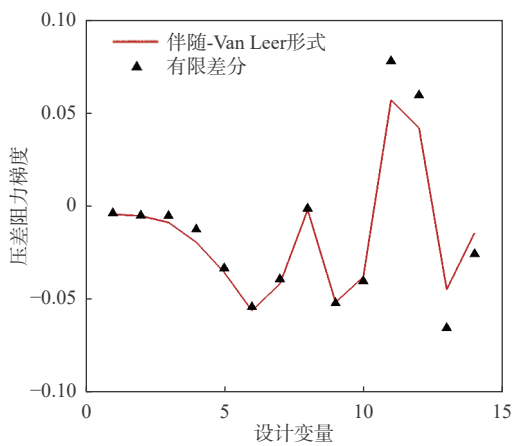



图6 边界状态下迎风格式与有限差分梯度精度对比

Fig. 6 Gradient accuracy comparison of upwind scheme and central scheme adjoint equation in boundary state

以上算例的分析表明，本文开发的迎风格式伴随方程求解器在巡航状态计算分析时，精度和收敛性与中心格式相同，而在进行边界特性计算时，克服了中心格式发散的难题，计算精度与差分结果吻合良好。

### 3.3 伴随方程处理方式影响研究

为进一步研究通量限制器、壁面通量修正变分和混合精度几种处理方式对伴随方程求解的影响计算状态采用表1所示巡航状态。限制器处理方式对伴随方程收敛性和梯度精度的影响如图7所示。由图7(a)可知，限制器全变分和限制器部分变分收敛性区别较小，固定限制器收敛性最好。由图7(b)可知，限制器全变分和限制器部分变分与有限差分梯度吻合良好，2种处理方式对梯度精度无显著影响，流场中局部的混合精度处理对梯度精度无显著影响；固定限制器与有限差分梯度存在一定误差，但能在一定程度上反映优化的趋势。

壁面通量修正变分对伴随方程收敛性和梯度精度的影响如图8～图10所示。由图8～图10可知，限制器全变分、限制器部分变分和固定限制器条件下壁面通量修正变分对伴随方程收敛性均无明显影响，对梯度精度影响较小。

混合精度伴随方程对收敛性和梯度精度的影响如图11所示。由图11可知，混合精度伴随方程的收敛性和求解得到的梯度介于限制器全变分和固定限制器之间，速度项采用混合精度，压力项和密度项采用二阶精度的方式，梯度精度进一步提高。由于二阶精度的限制器全变分处理形式精度高、鲁棒性稍差，一阶精度固定限制器处理形式鲁

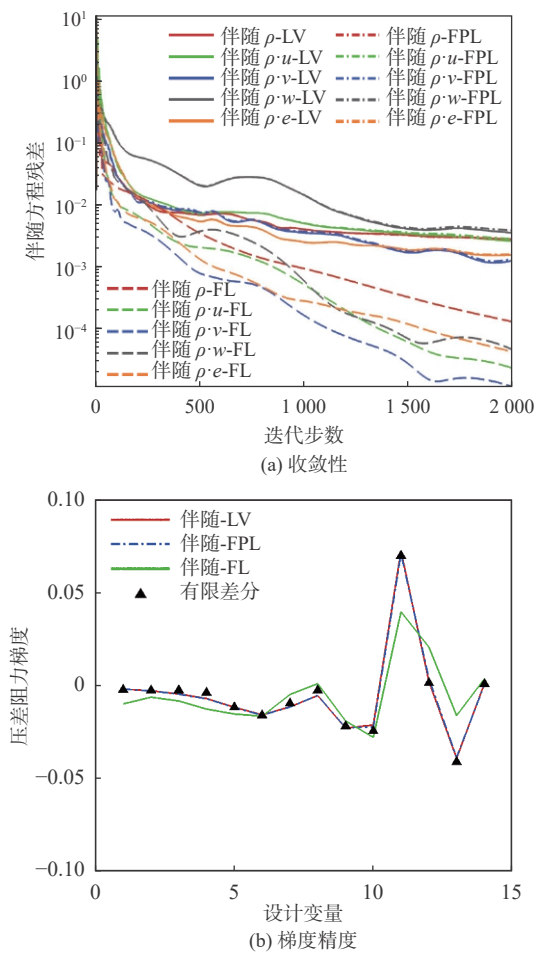



图7 限制器处理方式对收敛性和梯度精度的影响

Fig. 7 Influence of limiter treatment on convergence and gradient accuracy

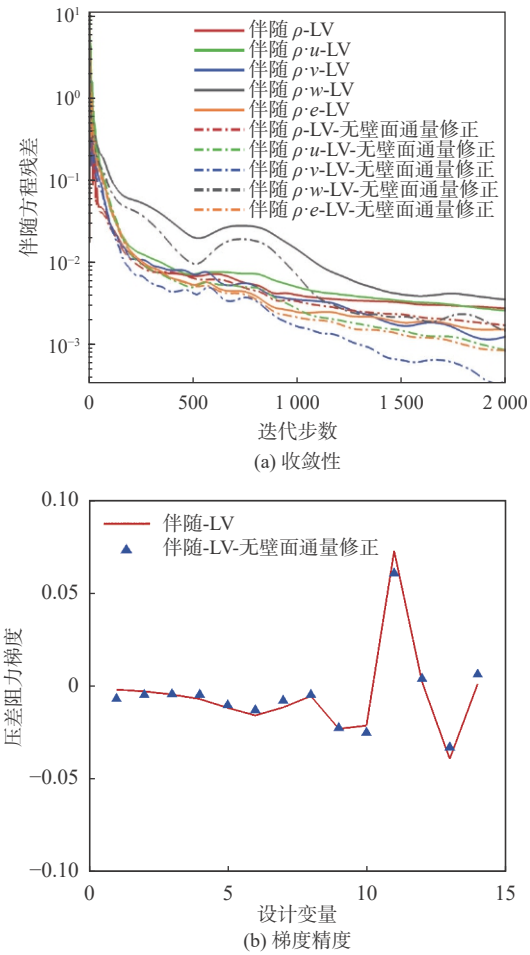



图 8　限制器全变分时壁面通量修正变分对伴随方程收敛性和梯度精度的影响

Fig. 8　Influence of wall modify on convergence and gradient accuracy in limiter variation

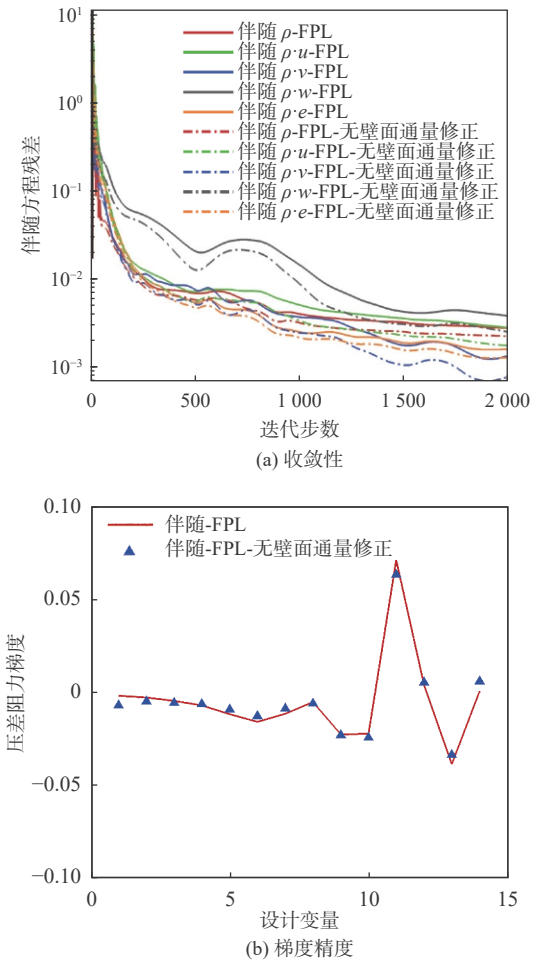



图 9　限制器部分变分时壁面通量修正变分对伴随方程收敛性和梯度精度的影响

Fig. 9　Influence of wall modify on convergence and gradient accuracy in fix part of limiter

棒性高、精度稍差, 采用混合精度伴随方程能在复杂流动中保证较好的梯度精度。

通过以上算例分析表明, 本文建立的一阶精度伴随方程求解得到梯度精度稍差, 但鲁棒性好, 收敛快, 可以处理更复杂的问题; 二阶精度伴随方程求解得到梯度精度高, 鲁棒性与中心格式一致; 混合精度伴随方程梯度精度和鲁棒性介于两者之间。

### 3.4　CRM 翼身组合体巡航状态气动优化

CRM 翼身组合体外形网格拓扑如图 12 所示。采用基于 NURBS 基函数的 FFD 参数化方法进行参数化, 动网格采用 RBF-TFI 方法, 设计变量布置如图 13 所示。设计变量共 126 个, 沿展向布置了 9 个截面, 流向每个截面上下表面各布置 7 个设计变量。

优化设计目标为压差阻力, 设计状态 $Ma=0.85$, $Re=5\times10^6$, $C_L=0.5$, 约束每个截面为 10%～90% 站位, 以 10% 为步长的 9 个站位处厚度不小于初始厚度。优化设计模型为

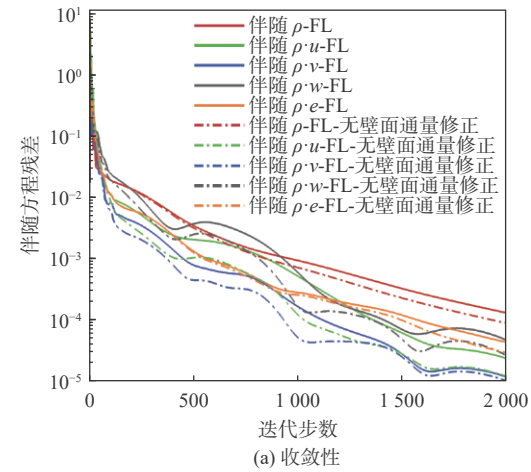
$$\begin{cases} \min F = C_{Dp}(\boldsymbol{x}_i) \\ \quad \text{s.t. } C_L(\boldsymbol{x}_i) = 0.5 \\ \quad t_{m,n}(\boldsymbol{x}_i) \geqslant t_{m,n}(\boldsymbol{x}_0) \qquad m,n = 1,2,\cdots,9 \end{cases} \tag{24}$$

式中: $C_{Dp}$ 为压差阻力系数; $\boldsymbol{x}_0$ 为初始设计变量; $\boldsymbol{x}_i$ 为第 $i$ 步设计变量; $t_{m,n}$ 为第 $m$ 个截面第 $n$ 个站位的厚度。

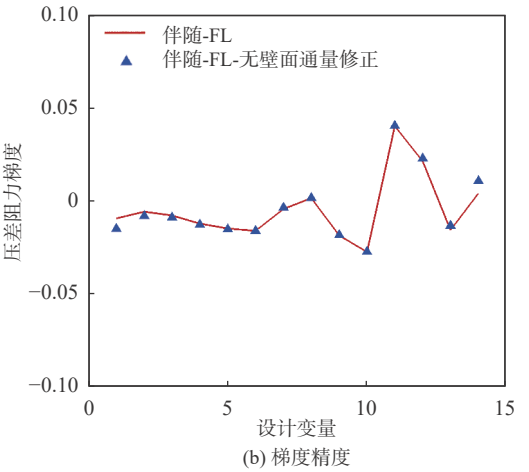
巡航状态气动优化设计采用了二阶精度和混合精度伴随方程 2 种方式, 其中混合精度伴随方程系数选取参考 3.5 节的系数以比较混合精度伴随方程对设计结果的影响, 压力项和密度项采用二阶精度混合系数 1.0; 速度项采用混合精度, 二阶精度混合系数取 0.8。

2 种方式的优化收敛历程如图 14 所示。由图 14 可知, 二阶精度伴随方程优化迭代至第 62 步满足收敛要求; 混合精度伴随方程优化迭代至第 44 步满足收敛要求。初始状态 $C_{Dp}(\boldsymbol{x}_0)=159.9\times10^{-4}$, 二阶精度伴随方程优化设计结束 $C_{Dp}(\boldsymbol{x}_{62})=148.5\times10^{-4}$, 降低了 $11.4\times10^{-4}$; 混合精度伴随方程优化设计结束 $C_{Dp}(\boldsymbol{x}_{44})=151.8\times10^{-4}$, 降低了 $8.1\times10^{-4}$, 混合精度的伴随方程设计中损失 $3.3\times10^{-4}$。

二阶精度伴随方程优化设计前后表面压力分布对比如图 15 所示, 展向各站位压力分布对比如图 16 所示。由图 16 可知, 由于截面不同站位的约



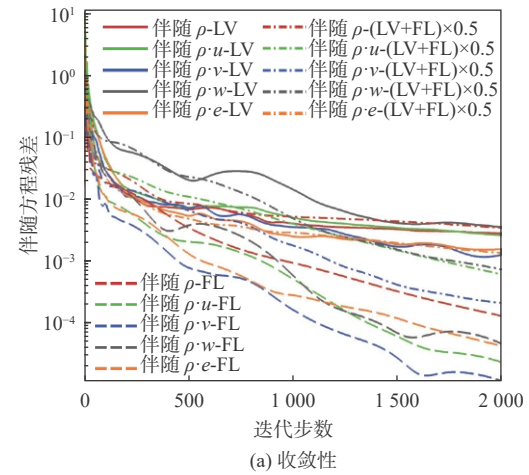

(a) 收敛性



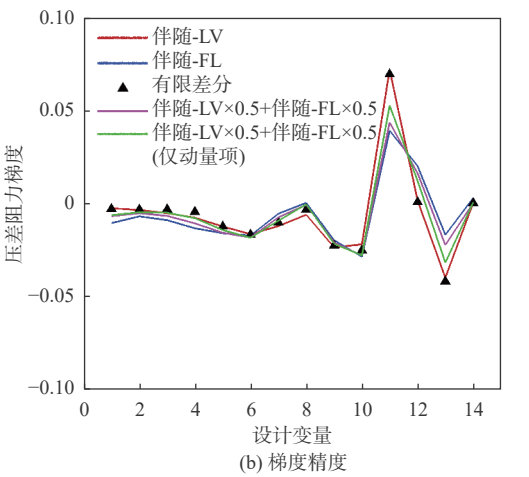

(b) 梯度精度

图 10 限制器固定时壁面通量修正变分对伴随方程收敛性和梯度精度影响

Fig. 10 Influence of wall modify on convergence and gradient accuracy in fix limiter




(a) 收敛性




(b) 梯度精度

图 11 混合精度伴随方程对收敛性和梯度精度的影响

Fig. 11 Influence of mixed adjoint equation on convergence and gradient accuracy

束极强，变量变化范围有限，因此翼型表面不够光顺，流动加速、减速频繁，翼型表面较强的激波减弱为多道弱激波。

混合精度伴随方程优化设计前后表面压力分布对比如图 17 所示，展向各站位压力分布对比如图 18 所示。由图 18 可知，表面较强的激波减弱为两道弱激波，翼根站位压力分布变化较小，主要变化为外翼段激波推迟。

对比二阶精度和混合精度优化结果可见，二阶精度优化的减阻效果更好，但是优化压力分布不够光滑，而混合精度压力分布更加光滑，但是减阻效果不足。因此在实际应用中建议采用两者搭配的策略，从而实现优化效率和效果的统一。

### 3.5 CRM 翼身组合体抖振边界特性优化

为了验证本文研发的迎风格式伴随方程在飞行器抖振边界状态气动设计的适用性，进一步开展了 CRM 翼身组合体抖振边界特性气动优化设计研究，参数化和网格等均与 3.4 节相同。优化设计目标为压差阻力，设计状态 $Ma=0.85$，$Re=5\times10^6$，

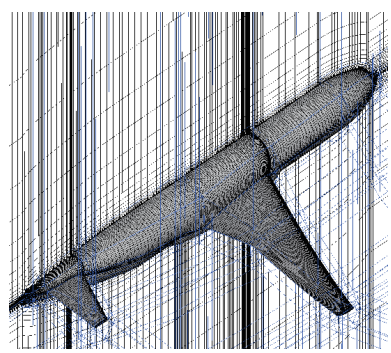


图 12 网格拓扑

Fig. 12 Grid topology

$C_L=0.7=1.4C_{L,cruse}$ 为典型的抖振边界状态，其中 $C_{L,cruse}$ 为巡航状态升力系数，约束每个截面为 10%～90% 站位，以 10% 为步长的 9 个站位处厚度不小于初始厚度。优化设计模型为

$$\begin{cases}\min F=C_{Dp}(\boldsymbol{x}_i)\\ \text{s.t. } C_L(\boldsymbol{x}_i)=0.7\\ t_{m,n}(\boldsymbol{x}_i)\geqslant t_{m,n}(\boldsymbol{x}_0)\qquad m,n=1,2,\cdots,9\end{cases}\tag{25}$$

抖振边界状态气动优化设计采用了混合精度伴随方程，由于不同复杂流动对伴随方程稳定性的

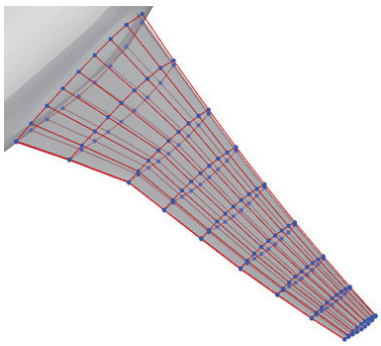


图 13　设计变量

Fig. 13　Design variables

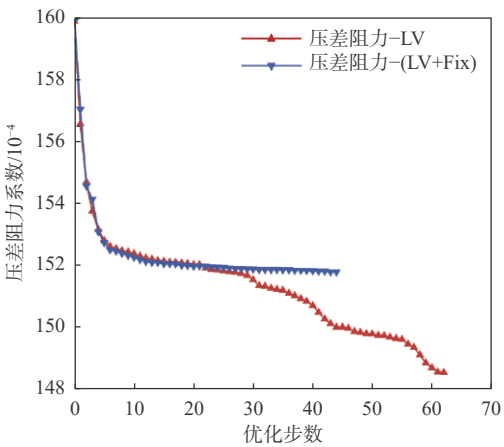



图 14　优化收敛历程

Fig. 14　Convergence histories of optimization

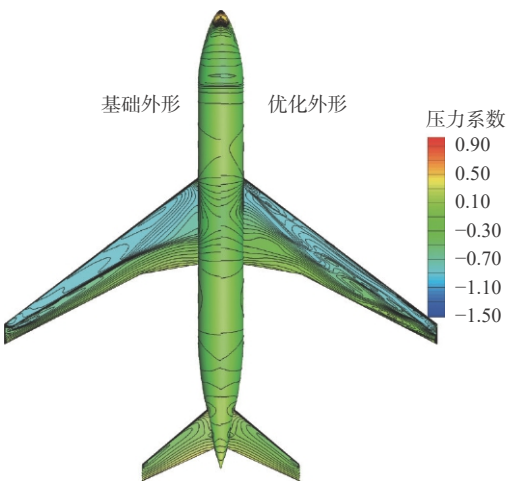



图 15　基础外形(左)与优化外形(右)表面压力分布

Fig. 15　Pressure distribution of baseline model (left) and opt model (right)

影响不同, 因此实际求解过程中, 采用试凑方法确定在设定的迭代步数下满足伴随方程收敛要求的混合系数, 本算例的压力项和密度项采用二阶精度混合系数 1.0; 速度项采用混合精度, 二阶精度混合系数取 0.8。初始状态混合精度的伴随方程和中心格式的伴随方程收敛曲线对比如图 19 所示。由图 19 可知, 混合精度的伴随方程残差已经降低 2 个量级

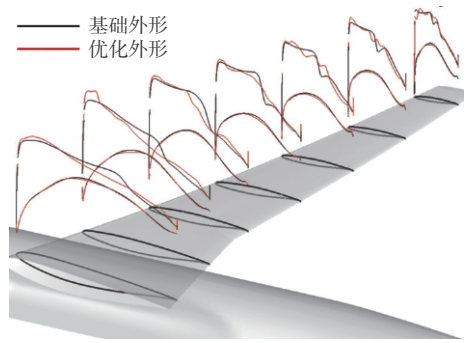



图 16　基础外形与优化外形各站位压力分布

Fig. 16　Distributions at different sections of baseline model and opt model

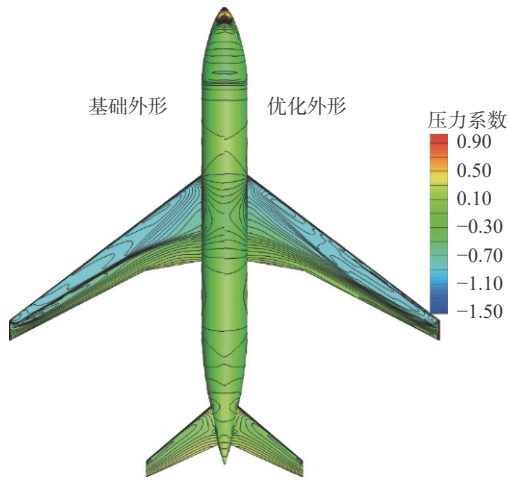



图 17　基础外形 (左) 与优化外形 (右) 表面压力分布

Fig. 17　Pressure distribution of baseline model (left) and opt model (right)

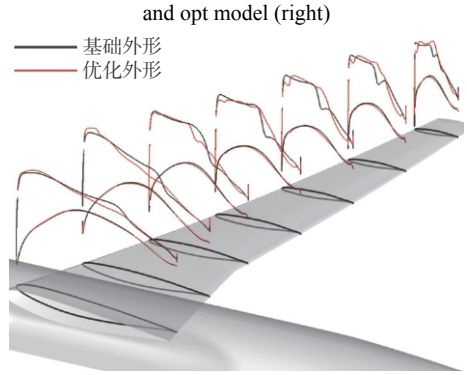



图 18　基础外形与优化外形各站位压力分布

Fig. 18　Distributions at different sections of baseline model and opt model

以上, 伴随方程收敛; 中心格式的伴随方程发散。第一伴随变量分布如图 20 所示。由图 20 可知, 外翼段为机翼最敏感的区域, 而这里也是分离最强的区域。

优化收敛历程如图 21 所示。由图 21 可知, 混合精度伴随方程优化迭代至第 40 步满足收敛要求。初始状态 $C_{\mathrm{Dp}}(\boldsymbol{x}_0)=436.6\times10^{-4}$, 混合精度伴随方程优化设计结束 $C_{\mathrm{Dp}}(\boldsymbol{x}_{80})=279.9\times10^{-4}$, 降低了 $156.7\times10^{-4}$。可见对于抖振边界状态的优化问题, 本文的混合精度迎风格式可以有效地求解。

混合精度伴随方程优化设计前后表面压力云图对比如图 22 所示，展向各站位压力分布对比如图 23 所示。由图 23 可知，优化后外形表面的强激波明显减弱，激波位置大幅推后，激波强度大幅下降。明显地提高飞机的边界特性性能。

混合精度伴随方程优化设计前后表面极限流线对比如图 24 所示。由图 24 可知，基础外形的激

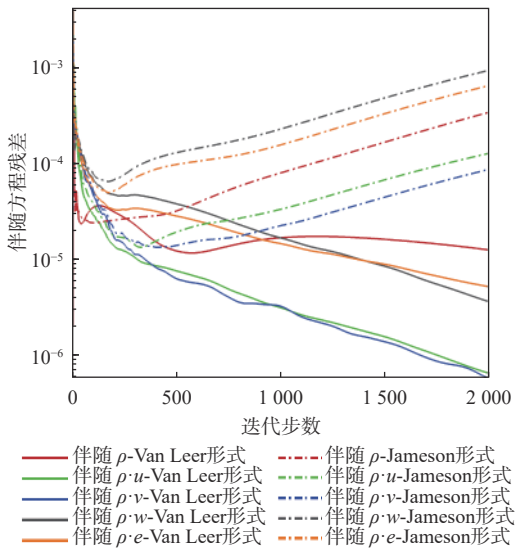



图 19 抖振边界状态下混合精度伴随方程与中心格式伴随方程收敛性对比

Fig. 19 Convergence comparison of mixed adjoint equation and central scheme adjoint equation in buffeting boundary state

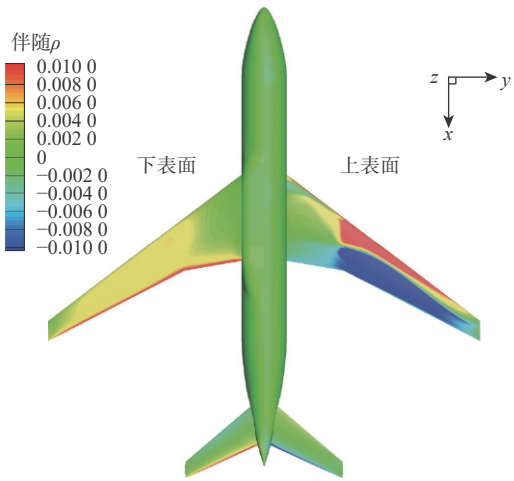



图 20 混合精度伴随方程第一伴随变量分布

Fig. 20 Adjoint $\rho$ distribution of mixed adjoint equation

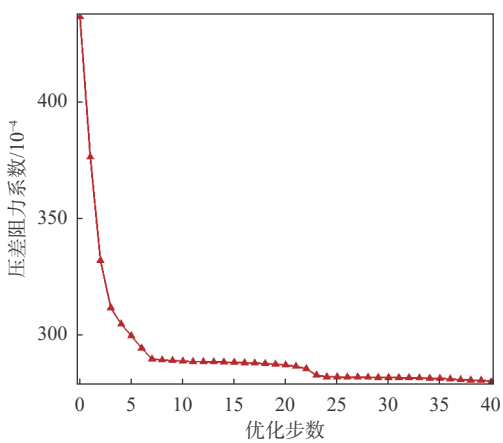



图 21 优化收敛历程

Fig. 21 Convergence histories of optimization

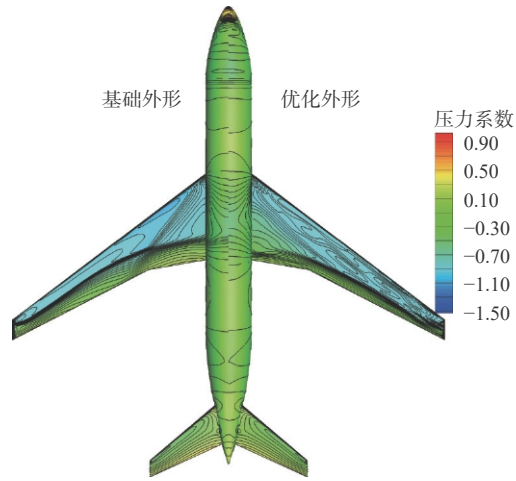



图 22 基础外形 (左) 与优化外形 (右) 表面压力分布

Fig. 22 Pressure distribution of baseline model (left) and opt model (right)

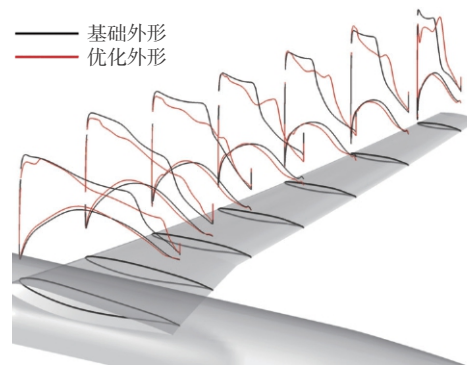



图 23 基础外形(左)与优化外形(右)各站位压力分布

Fig. 23 Distributions at different sections of baseline model (left) and opt model (right)

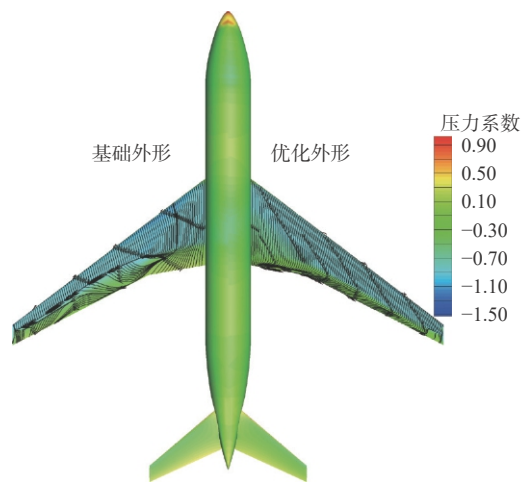



图 24 基础外形(左)与优化外形(右)表面极限流线

Fig. 24 Limiting streamline of surface of baseline model (left) and opt model (right)

波边界层干扰诱导机翼上表面中外翼出现大面积分离, 分离区扩大到机翼的一半面积, 会导致机翼出现抖振, 影响飞行安全, 设计之后激波后移变弱, 同时分离区大幅减小, 仅在后缘附近存在小分离, 气动特性大幅改善, 表明本文建立的混合精度伴随方程方法能有效用于飞行器的边界特性优化。

## 4　结　论

本文针对飞机设计中边界特性设计问题, 研究了 Van Leer 格式的伴随方程一阶、二阶和混合精度方程的构造问题, 采用 ONERA M6 算例和 CRM 翼身组合体外形算例验证了方法的有效性, 可得主要结论如下:

1) 本文建立了基于迎风格式的伴随方程方法, 与中心格式相比, 该方法梯度精度高, 有效克服了中心格式在计算求解边界问题的发散性问题。

2) 壁面通量修正对梯度精度影响不大; 限制器全变分时, 壁面通量修正对伴随方程的收敛性影响较大; 限制器部分变分和固定限制器时, 对伴随方程的收敛性影响不大; 一阶精度伴随方程求解得到梯度精度稍差, 但伴随方程计算量低、鲁棒性好, 且能有效反映优化的趋势; 二阶精度伴随方程求解得到梯度精度高, 方程鲁棒性稍差, 能有效应用于高精度气动优化设计问题; 混合精度的伴随方程兼顾了梯度精度和鲁棒性。

3) 迎风格式伴随方程能有效应用于飞行器的巡航特性优化, 混合精度收敛更快, 但是优化效果略差, 而二阶精度求解收敛较差, 优化效果更好, 因此在实际应用中建议将两者搭配使用。

4) 混合精度迎风格式伴随方程以其强的鲁棒性和较高的伴随求解精度, 能有效应用于求解飞行器边界特性优化设计问题。

### 参考文献 (References)


[1] 夏露. 导弹外形气动与隐身一体化优化设计研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
XIA L. Research on aerodynamics/stealth integrated optimization for missile[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001 (in Chinese).

[2] 张彬乾, 罗烈, 陈真利, 等. 飞翼布局隐身翼型优化设计[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 957-967.
ZHANG B Q, LUO L, CHEN Z L, et al. On stealth airfoil optimization design for flying wing configuration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4): 957-967(in Chinese).

[3] 张伟, 高正红, 周琳, 等. 基于代理模型全局优化的自适应参数化方法[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 160-171.
ZHANG W, GAO Z H, ZHOU L, et al. Adaptive parameterization method for surrogate-based global optimization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 160-171(in Chinese).

[4] 黄江涛, 刘刚, 周铸, 等. 基于离散伴随方程求解梯度信息的若干问题研究[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(4): 554-562.
HUANG J T, LIU G, ZHOU Z, et al. Investigation of gradient computation based on discrete adjoint method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2017, 35(4): 554-562(in Chinese).

[5] 黄江涛, 周铸, 余婧, 等. 考虑飞行器动力系统进排气效应的 设计参数灵敏度分析研究[J]. 推进技术, 2019, 40(2): 250-258.
HUANG J T, ZHOU Z, YU J, et al. Sensitivity analysis of design variables considering intake and exhaust effects[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(2): 250-258(in Chinese).

[6] 黄江涛, 周铸, 刘刚, 等. 飞行器气动/结构多学科延迟耦合伴随系统数值研究[J]. 航空学报, 2018, 39(5): 96-107.
HUANG J T, ZHOU Z, LIU G, et al. Numerical study of aero-structural multidisciplinary lagged coupled adjoint system for aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(5): 96-107(in Chinese).

[7] 周琳, 黄江涛, 高正红. 基于离散伴随方程的三维雷达散射截面几何敏感度计算[J]. 航空学报, 2020, 41(5): 128-138.
ZHOU L, HUANG J T, GAO Z H. Three dimensional radar cross section geometric sensitivity calculation based on discrete adjoint equation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(5): 128-138(in Chinese).

[8] ZHOU L, HUANG J T, GAO Z H, et al. Three-dimensional aerodynamic/stealth optimization based on adjoint sensitivity analysis for scattering problem[J]. AIAA Journal, 2020, 58(6): 2702-2715.

[9] NIELSEN E J, ANDERSON W K. Recent improvements in aerodynamic design optimization on unstructured meshes[J]. AIAA Journal, 2002, 40(6): 1155-1163.

[10] DWIGHT R, BREZILLON J. Effect of various approximations of the discrete adjoint on gradient-based optimization[C]//Proceedings of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virigina: AIAA, 2006: AIAA2006-690.

[11] CARRIER G, DESTARAC D, DUMONT A, et al. Gradient-based aerodynamic optimization with the elsA software[C]//52nd Aerospace Sciences Meeting. Reston: AIAA, 2014: 0568.

[12] MADER C A, KENWAY G K W, YILDIRIM A, et al. ADflow: an open-source computational fluid dynamics solver for aerodynamic and multidisciplinary optimization[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2020, 17(9): 508-527.

[13] ZUO Y T, GAO Z H, ZHAN H. Aerodynamic design method based on N-S equations and discrete adjoint approach[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 27(1): 67-72.

[14] LI B, DENG Y Q, TANG J, et al. Discrete adjoint optimization method for 3D unstructured grid[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 674-686.

[15] 伊卫林, 余佳, 宋红超, 等. 连续/离散型伴随优化方法在发动机内流优化设计中的应用探索[C]//中国航天第三专业信息网第三十八届技术交流会暨第二届空天动力联合会议论文集—发动机内流气动技术. 北京: 中国航天第三专业信息网, 2017: 314-327.
YI W L, YU J, SONG H C, et al. Exploration of continuous/discrete adjoint optimization method in engine internal flow optimization design [C]// Proceedings of the 2nd JCAP and the 38th APITS Technical Conference - Engine Internal Flow Aerodynamics Technology. Beijing: APITS, 2017: 314-327(in Chinese).

[16] SLOTNICK J, KHODADOUST A, ALONSO J, et al. CFD vision

2030 study: a path to revolutionary computational aerosciences: NASA/CR–2014-218178[R/OL]. (2014-03-01)[2022-12-03]. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140003093/downloads/20140003093.pdf.

[17] HOLLANDERS H, LERAT A, PEYRET R. Three-dimensional calculation of transonic viscous flows by an implicit method[J]. AIAA Journal, 1985, 23(11): 1670-1678.

[18] LYU Z J, KENWAY G K W, MARTINS J R R A. Aerodynamic shape optimization investigations of the common research model wing benchmark[J]. AIAA Journal, 2014, 53(4): 968-985.

[19] VAN LEER B. Flux-vector splitting for the Euler equation[M]// Upwind and High-Resolution Schemes. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997: 80-89.

[20] VAN LEER B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to godunov's method[J]. Journal of Computational Physics, 1979, 32(1): 101-136.

[21] KENWAY G, KENNEDY G, MARTINS J R R A. A CAD-free approach to high-fidelity aerostructural optimization[C]//13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2010: 9231.

# Optimization design method of aircraft boundary characteristics based on upwind scheme adjoint equation

DENG Jun[1], GAO Zhenghong[1], HUANG Jiangtao[2,*], ZHAO Ke[1], XIA Lu[1,3]

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Aerospace Technology, Institute of China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, China;
3. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamics Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract**: A challenging and crucial aspect of aircraft design is defining the boundary characteristics of the aircraft, which dictate their safety and flying performance. In order to increase the precision, effectiveness, and resilience of complex flow problems, we suggested in this study that adjoint optimization methods be extended to the design of aircraft boundary features. We did this by developing an upwind scheme adjoint equation and various flux limiter treatments. Firstly, the basic principle of discrete adjoint gradient solution was introduced. This served as the foundation for deriving the adjoint equation's inviscid term and its variational form of boundary conditions. According to the processing method of the flux limiter, adjoint equations with first-order accuracy, second-order accuracy, and mixed accuracy were formed. Subsequently, the boundary treatments for the adjoint equation were studied. By using the ONERA M6 wing for gradient accuracy and robustness validation examples, the performance of solving adjoint equations using upwind and central schemes was compared, and the effects of limiter and boundary treatments on the convergence and gradient accuracy of the adjoint equations were analyzed. The effectiveness of the solver in designing aircraft cruise performance and boundary characteristics was verified through examples of CRM wing body at cruise and boundary characteristics optimization design. The computation and design outcomes demonstrated the robustness and high gradient accuracy of the upwind approach developed in the article, suggesting its potential for resolving design issues pertaining to aircraft boundary characteristics.

**Keywords**: upwind scheme; flux limiter; discrete adjoint equation; gradient calculation; boundary characteristics; aerodynamic optimization

**Received**: 2022-12-03; **Accepted**: 2023-06-08; **Published Online**: 2023-07-03 09:53

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230630.1731.009

**Foundation item**: Key Laboratory Projects (614220121020128)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0978

# 基于最优探测航线椭圆拟合的战斗巡逻规划方法

李乐言，杨任农，王瑛*，李寰宇，吴傲，岳龙飞
(空军工程大学 空管领航学院，西安 710051)

**摘　　要**：针对远海弱情报支援背景下的空中编队战斗巡逻规划问题，提出了一种新的基于最优探测航线椭圆拟合的巡逻空域规划方法。以协同概率探测面积作为遗传算法的适应度函数，求解最优飞机协同探测航线，根据初始航路点列的统计学特征，提出了基于几何距离的双点移除椭圆拟合方法，求解航空兵实际可用的椭圆航线及对应巡逻空域。仿真结果表明，编队按照规划的矩形巡逻空域和椭圆航线进行战斗巡逻，可保持对总任务区域82.16%的协同探测，与最优雷达探测航线的平均实时探测范围相比仅下降1.93%，且探测盲区时间空窗小。规划结果能显著降低飞行员的认知载荷，具有较好的实用价值和现实意义。

**关 键 词**：战斗巡逻；协同概率探测；椭圆拟合；巡逻空域；椭圆航线
**中图分类号**：V323.1
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0293-10

战斗巡逻是歼击航空兵的常用作战方式，通过歼击机编队预先在巡逻空域的盘旋探测达成对一定区域或指定目标的警戒巡逻效果，其目的是监控空情态势，并及时为我方高价值目标提供支援掩护。在远海弱情报支援背景下，由于地面雷达、预警机探测能力受限，为维持大范围空域长时间的态势监控，需要歼击机编队前执行战斗巡逻任务以获取态势情报优势。而依靠人力规划巡逻空域和航线，实时性与合理性难以得到保证，因此，必须合理抽象战斗巡逻问题，智能规划战斗巡逻方案，以保证在提升巡逻探测效能的同时降低编队作战风险。

为充分发挥编队战斗巡逻中的机载雷达优势，维持大范围区域的协同探测能力，有两种规划解决思路，一种是使用A*算法[1]、遗传算法[2]、神经网络[3]、动态决策[4-5]等智能算法直接求解编队巡逻航线，另一种思路是通过凸多边形区域分割[6-7]、Voronoi图[8-10]等方法将大范围搜索区域划分成小的巡逻空域，进而在巡逻空域中规划巡逻航线。诸多学者对此进行了深入研究并取得了丰硕成果。使用智能算法直接求解巡逻航线方面，文献[1]使用改进ABC算法的无人机群轨迹与辐射功率联合优化过程来求解无人机编队的协同探测航线；文献[2]使用遗传算法解决了多无人机合作探测的航线规划问题；文献[3]采用了局部连接Hopfield神经网络解决无人机安全路径规划问题。划分巡逻空域进而实现编队协同巡逻待战规划方面，文献[6]通过凸多边形分割的方法解决了三维的动态空域分区问题；文献[8]将机场、航路点作为Voronoi图关键点，通过构建加权图的方式解决了空域动态配置问题。

综合研究发现，现有规划方法虽然具备了较好的协同探测效果，但存在以下几点不足：

1）第1种规划思路使用智能优化算法求解的巡逻航线较为复杂，飞行员操纵困难，难以在实战中使用。

**收稿日期**：2022-12-08；**录用日期**：2023-02-20；**网络出版时间**：2023-02-28 00:00
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230227.1553.004
**基金项目**：国家社会科学基金(2022-SKJJ-A-002)
*通信作者. E-mail：yingwangkgd@163.com

*引用格式：李乐言，杨任农，王瑛，等. 基于最优探测航线椭圆拟合的战斗巡逻规划方法[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：293-302. LI L Y，YANG R N，WANG Y，et al. CAP planning method based on elliptic fitting of optimal detection routes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：293-302 (in Chinese).*

2）第2种规划思路使用的各种区域划分方法普遍面向规则任务区域，而实际作战任务区域具备不规则性和随机性，所以该规划思路通用性不强。

3）普遍将机载雷达探测范围简化成半径为最大探测距离的圆形，忽略了雷达探测的实际情况和多机协同探测问题。

针对上述问题，面向有人机战斗巡逻规划应用，充分考虑飞行员实际认知载荷与能力载荷，结合两种巡逻规划思路，提出了一种基于最优探测航线的椭圆拟合优化方法，以兼顾航线的探测效能优势和空域巡逻的实用价值，该方法极大提升了规划结果的通用性和科学性，贴近远海大规模防御性制空作战需要。

# 1 战斗巡逻问题建模

## 1.1 飞机转弯角度限制模型

编队飞机在执行巡逻待战任务时，主要由机身倾斜时升力的水平分量来提供转弯所需的向心力，如图1所示。此时飞机受力满足式(1)：

$$\begin{cases} mg = L\cos\gamma \\ F_{\mathrm{c}} = \dfrac{mv^2}{R} = L\sin\gamma \end{cases} \tag{1}$$

其中：$m$为飞机质量；$g$为重力加速度；$L$为飞机升力；$\gamma$为飞机滚转角；$F_{\mathrm{c}}$为飞机转弯向心力；$v$为飞机飞行速度；$R$为飞机转弯半径。

由上式可推得

$$R = \frac{v^2}{g\tan\gamma} \tag{2}$$

式(2)中，$\tan\gamma$为过载，过载随滚转角增大而增大，飞机转弯半径随滚转角增大而减小，飞机在最大滚转角时取得最小转弯半径，即飞机的转弯极限。如图2所示，仅考虑水平面的机动，飞机在时间间隔$\Delta t$内沿$EF$方向飞行的空间可达集为弧$GH$，$\Delta t$较小时，弧$GH$可近似为圆弧，所以飞机可到达的范围就是以$R_{\min}$为半径，$\pm\alpha$为范围的圆弧，可以证明：

$$\theta = 2\alpha = \frac{v\Delta t}{R_{\min}} \tag{3}$$

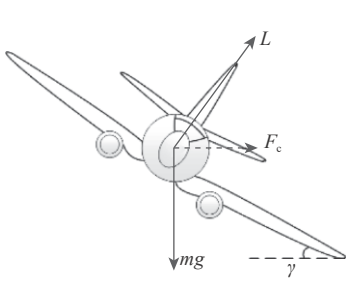



图1 飞机受力分析

Fig. 1 Aircraft stress analysis

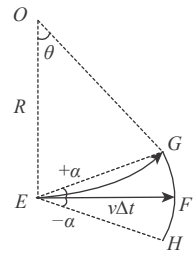



图2 飞机$\Delta t$时间的可达集

Fig. 2 Flight's reachable range within $\Delta t$

## 1.2 雷达网协同探测概率模型

雷达网通常由地面各功能波段雷达、预警机配备的预警探测雷达以及飞行任务编队机载雷达组成，雷达网内信息会相互融合以获得区域的整体态势。雷达网对目标的协同探测概率可由网内各部雷达对目标单独的探测概率求得

$$P_{\mathrm{s}} = 1 - \prod_{i=1}^{n_1}(1-P_{\mathrm{d}i})\prod_{j=1}^{n_2}(1-P_{\mathrm{y}j})\prod_{k=1}^{n_3}(1-P_{\mathrm{f}k}) \tag{4}$$

其中：$P_{\mathrm{s}}$为雷达网对某一目标的协同探测概率；$P_{\mathrm{d}i}$为第$i$部地面雷达对目标的探测概率；$P_{\mathrm{y}j}$为第$j$架预警机对目标的探测概率；$P_{\mathrm{f}k}$为第$k$架编队飞机对目标的探测概率。

文献[11]给出了$P_{\mathrm{d}i}$、$P_{\mathrm{y}j}$、$P_{\mathrm{f}k}$的计算公式为

$$P = \mathrm{e}^{\frac{\ln(P_{\mathrm{a}})R^4}{K\cdot\sigma_{\mathrm{RCS}}}} \tag{5}$$

其中：$P_{\mathrm{a}}$为雷达的虚警概率；$\sigma_{\mathrm{RCS}}$为目标的雷达散射截面积；$K$为由雷达方程求得的雷达性能参数的规整因子，求解公式为

$$K = \frac{P_{\mathrm{t}}G_{\mathrm{t}}G_{\mathrm{r}}\lambda^2 Dn^{1/2}}{(4\pi)^3 kT_0B_{\mathrm{n}}F_{\mathrm{n}}L_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{a}}} \tag{6}$$

其中：$P_{\mathrm{t}}$为雷达峰值发射功率；$R$为雷达到目标的探测距离；$G_{\mathrm{t}}$为天线发射增益；$G_{\mathrm{r}}$为天线接收增益；$\lambda$为发射信号波长；$D$为脉压比；$n$为脉冲累积个数；$k$为玻尔兹曼常数；$T_0$为绝对环境温度；$B_{\mathrm{n}}$为接收机带宽；$F_{\mathrm{n}}$为接收机噪声系数；$L_{\mathrm{s}}$为系统损耗；$L_{\mathrm{a}}$为大气损耗。

这样3种不同类别雷达对目标的独立探测概率可由式(5)分别计算，再将计算得到的结果代入式(4)，即得到了雷达网对该目标的协同探测概率。

## 1.3 任务区栅格化概率探测面积模型

根据实际作战任务的不同，指挥员对不同作战空域的情报需求也会有所差异，所以要对作战空域进行切分并确定每一部分的属性，并且由于雷达、机场、目标、地形等战场要素复杂，实际作战空域和任务区通常不是规则的矩形，为使方法具有普适性，现建立作战空域栅格化模型。

如图3所示，将空域中涵盖全体任务区的大矩

形区域按照一定比例进行切分可以得到$x\times y$的栅格矩形[12]，将每个矩形栅格抽象成空域矩阵：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{A}}=\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1y} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{x1} & \cdots & a_{xy} \end{pmatrix}_{x\times y} \tag{7}$$

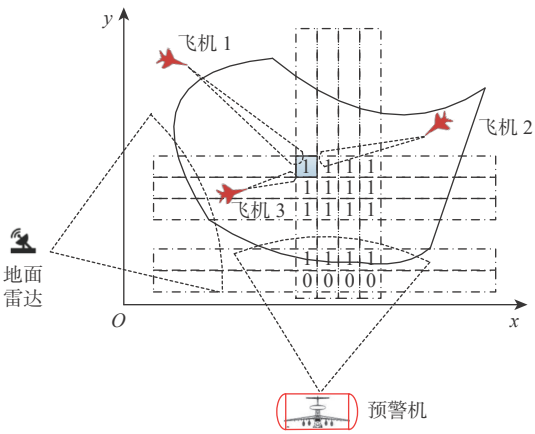



图 3　任务区栅格化示意图

Fig. 3　Rasterized diagram of mission area

进一步定义空域中每个栅格$\alpha_{ij}$状态，设$\omega$为任务区：

$$a_{ij}=\begin{cases}1, & a_{ij}\in\omega\\ 0, & a_{ij}\notin\omega\end{cases} \tag{8}$$

这样就将不规则的总体搜索空间，离散化为区分(0,1)两种状态的栅格点，并可根据指挥员意图，通过改变$a_{ij}$的值实时调整栅格的任务属性，实现对战斗巡逻任务的敏捷在线规划。在进行任务区协同探测面积计算时，遍历大矩形区域，将各探测源对$a_{ij}=1$的矩形栅格区域中心点的协同探测概率与栅格面积的乘积作为该区域的协同概率探测面积：

$$A_{ij}=\begin{cases}P_{sij}\times A, & a_{ij}=1\\ 0, & a_{ij}=0\end{cases} \tag{9}$$

其中：$A_{ij}$为各探测源对$a_{ij}$栅格的协同概率探测面积；$P_{sij}$为由式 (4) 求得的协同探测概率；$A$为小矩形栅格的面积。则整个任务区域的协同概率探测面积可由各小矩形区域概率探测面积求和得到。

上述概率探测面积计算方法是建立在雷达能够同时进行全向探测的基础上的，忽略了雷达视场的探测角度约束。该模型的简化是基于巡逻空域划设的实际运用提出的，在实际作战中飞行员在巡逻空域执行探测任务时具备一定的自由度，因此难以严格按照给定的时间点进行巡逻探测，而飞行编队协同探测范围受到雷达安装角及性能影响与时间严格相关，因此在巡逻空域划设阶段不考虑雷达探测视角约束。

### 1.4　巡逻空域及椭圆航线基本模型

航空兵常用的巡逻航线类型包括椭圆航线、跑马航线、三角航线等，其中椭圆航线具有雷达探测强效区大、活动空域小、径向速度盲区小等优点[13]。从实战角度出发对规划出的航线进行优化，牺牲少许的协同探测效率使规划结果转化为更加符合实际需要的巡逻待战空域和椭圆航线。

由于高空气流复杂及飞行员操纵误差影响，飞机难以严格按照预定航线飞行，因此要在航线周围设置一定的安全余度，为飞行员留出机动的空间[14]。如图 4 所示巡逻空域通常为矩形，且满足：

$$\begin{cases}L_{\mathrm{c}}=2a+2d_{\mathrm{y}}\\ L_{\mathrm{d}}=2b+2d_{\mathrm{y}}\end{cases} \tag{10}$$

其中：$L_{\mathrm{c}}$为巡逻空域长边；$L_{\mathrm{d}}$为巡逻空域短边；$v$为飞机飞行速度；$d_{\mathrm{y}}$为安全余度，通常取 5 km；$R$为转弯半径，由式 (2) 可知：

$$b\geqslant\frac{v^2}{g\tan\gamma_{\max}} \tag{11}$$

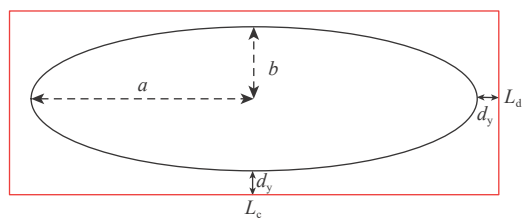



图 4　巡逻空域及椭圆航线示意图

Fig. 4　Patrol airspace and elliptical route

## 2　基于遗传算法的最优雷达探测航线规划

### 2.1　初始矩阵及个体适应度函数

编队飞机进入任务空域时有初始进入点和进入方向，在飞行速度一定的情况下，只需计算每个决策时刻的角度改变量，即可迭代生成飞行航线，其中每一时刻的角度改变量应不大于式 (3) 中的$\pm\alpha$。使用遗传算法对每一时刻的角度改变量进行寻优[15]。

设定飞机编队包含$L$架飞机，遗传算法中初始矩阵$G$的设置如下：

$$G=\begin{pmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1L} \\ \vdots & & \vdots \\ \theta_{N1} & \cdots & \theta_{NL} \end{pmatrix} \tag{12}$$

其中：每一行为种群的一个个体，即飞机编队中每架飞机的角度改变量，共有$N$个个体为遗传提供基因；每一列为种群的一个染色体，即一架飞机的多组角度改变量，共有$L$架飞机的角度改变量需要求解。

为了获得最优的雷达协同探测效果，将1.3节中编队飞机的协同概率探测面积作为个体的适应度函数。首先由矩阵 $G$ 中每行的角度改变量可以计算下一时刻编队飞机的位置，将位置坐标作为适应度函数的输入可以得到种群中每个个体的适应度值，求解公式如下：

$$f_{\mathrm{v}}=\sum_{i=1}^{i=x}\sum_{j=1}^{j=y}P_{sij}\times A\times a_{ij} \tag{13}$$

为了加快种群迭代的速度，增加优秀个体的遗传概率，在计算个体适应度值后加入变换式修正适应度值：

$$f_{\mathrm{v}}'=f_{\mathrm{v}}-f_{\mathrm{vmin}}/n_{\mathrm{r}} \tag{14}$$

其中：$f_{\mathrm{v}}'$为修正后的适应度值；$f_{\mathrm{v}}$为直接计算得到的适应度值；$f_{\mathrm{vmin}}$为种群中适应度值的最小值；$n_{\mathrm{r}}$为修正因子，$n_{\mathrm{r}}\geqslant 1$。

修正因子$n_{\mathrm{r}}$会影响劣等基因的保存可能性，$n_{\mathrm{r}}=1$时会导致劣等个体直接被淘汰，致使所有个体趋同，但实际上劣等个体可能有某些基因是优秀的，所以$n_{\mathrm{r}}$要取适当值才可以在加快种群进化的同时保存优秀基因。

## 2.2 种群交叉及变异方式

用轮盘赌的方式决定交叉过程的父体，使适应度值高的个体具有更高的遗传可能性，个体$\overline{\boldsymbol{I}}$被遗传的概率为

$$p_i=\frac{f_{\mathrm{v}i}'}{\sum_{j=1}^{N}f_{\mathrm{v}j}'} \tag{15}$$

选择父体时，首先生成[0,1]区间内的随机数，然后判断该随机数落入某个个体的概率范围即选择该个体作为父体，母体的选择用随机的方式产生。选择父体和母体之后，按照交叉概率$p_{\mathrm{c}}$判断是否进行交叉操作，由于种群矩阵使用的是十进制编码，所以在仿真过程中对每个基因进行交叉判断，进行交叉时父体相应位置的基因会被母体基因替换，完成循环后即得到了执行交叉操作后的新种群。

进行交叉操作后，为加入可能更优的角度改变量，按变异概率$p_{\mathrm{m}}$使种群基因变异。对种群中每个基因进行判断，生成[0,1]区间的随机数与$p_{\mathrm{m}}$比较，小于$p_{\mathrm{m}}$时该基因发生变异，被替代为$[-\infty,+\infty]$内的随机角度，通常情况下$p_{\mathrm{m}}$取值较小。遗传算法中新一代种群产生方式如图5所示。

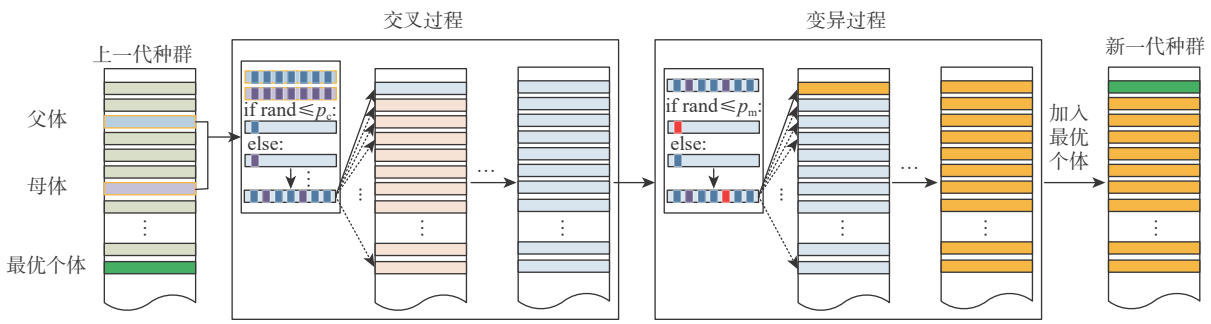



图5 仿真步长对末端收敛特性的影响

Fig. 5 Effect of simulation step size on terminal convergence characteristics

为了保证种群不会退化，将每一代中的最优个体直接加入新一代种群，这样就生成了新的种群矩阵。

## 2.3 雷达探测航线的末端收敛特性

使用遗传算法进行最优雷达探测航线求解时，若未设定约束，都会显示出一定的末端收敛特性，时间步长不同显示出的末端收敛特性强度不同，如图6所示，时间步长越长其末端收敛特性越明显，实际上A*算法、深度学习以及遗传算法进行航线求解时都会有近似的特性。

这种末端的绕圈收敛特性是飞机编队对于任务区协同探测最优位置的反映，提取末端航路点列的统计学特征，即可获得最优空中战斗巡逻规划结果。

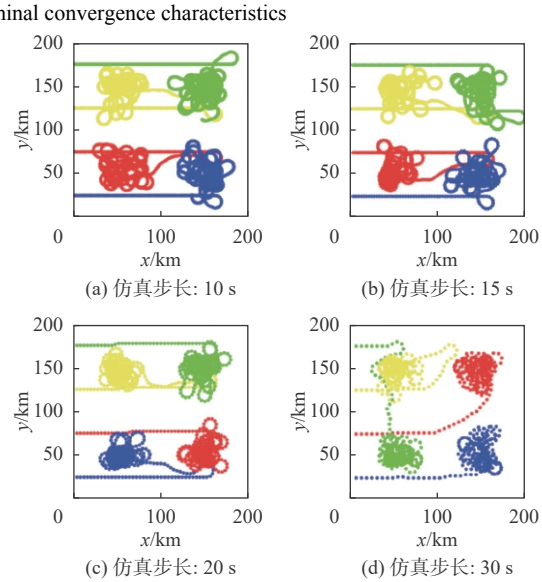



图6 交叉及变异过程

Fig. 6 Crossover and mutation process

## 3　基于最优探测航线椭圆拟合的战斗巡逻规划方法

### 3.1　经典椭圆拟合方法

使用优化算法求解的航线往往对于飞行员有很高的操作要求, 难以满足作战需要。在实际作战计划制定时, 通常会划设矩形巡逻空域, 然后在巡逻空域中规划巡逻航线, 但巡逻空域及椭圆航线位置和形状难以确定。由于椭圆航线由中心点、长轴、短轴以及偏转角度唯一确定, 所以借用统计学中椭圆拟合的方法对问题进行求解。

为叙述完整, 本节简单介绍经典椭圆拟合方法, 该方法以二次曲线方程作为拟合模型, 并通过约束条件确保二次曲线是椭圆。

带约束条件的椭圆代数方程为

$$\begin{cases} Ax^2+Bxy+Cy^2+Dx+By+F=0 \\ B^2-4AC<0 \end{cases} \tag{16}$$

式 (16) 中的不等式为确保曲线为椭圆的约束条件, 由于对二次曲线方程, 即式 (16) 中的等式等号左右两边同时乘不为 0 的常数曲线不发生改变, 所以椭圆约束条件可以等价为

$$4AC-B^2=1 \tag{17}$$

给定待拟合点集, 即第 2 节中求得的航路点列集合$\{(x_i,y_i),i=1,2,\cdots,N\}$, 基于代数距离的椭圆拟合就是求解最小化问题:

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{O}^*=\arg\min_{O}\sum_{i=1}^{N}d_{\mathrm{a}}^2(x_i,y_i;\boldsymbol{O}) \\ &\text{s.t. } \boldsymbol{O}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{O}=1 \end{aligned} \tag{18}$$

其中:

$$d_{\mathrm{a}}(x_i,y_i;O)=Ax_i^{\,2}+Bx_iy_i+Cy_i^{\,2}+Dx_i+Ey_i+F$$

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix} \boldsymbol{\Gamma}_{3\times3} & \boldsymbol{0}_{3\times3} \\ \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{0}_{3\times3} \end{pmatrix},\quad \boldsymbol{\Gamma}=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{O}=(A,B,C,D,E,F)^{\mathrm{T}}$$

椭圆曲线参数$O^*$可通过求解广义特征值得到:

$$\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z}\boldsymbol{O}=\lambda\boldsymbol{S}\boldsymbol{O} \tag{19}$$

其中:

$$\boldsymbol{Z}=\begin{pmatrix} x_1^{\,2} & x_1y_1 & y_1^{\,2} & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^{\,2} & x_ny_n & y_n^{\,2} & x_n & y_n & 1 \end{pmatrix}$$

可求解拟合椭圆的中心点坐标、长轴、短轴以及偏转角度:

$$\begin{cases} (x,y)=\left(\dfrac{2CD-BE}{4J},\dfrac{2AE-BD}{4J}\right) \\ a=\sqrt{\dfrac{-\xi}{(A+C)-\delta}} \\ b=\sqrt{\dfrac{-\xi}{(A+C)+\delta}} \\ \theta=\dfrac{1}{2}\arctan\dfrac{B}{A-C}-\dfrac{\pi}{2} \end{cases} \tag{20}$$

其中:

$$J=\frac{1}{4}B^2-AC$$

$$\xi=\frac{1}{2J}\left(AE^2+CD^2-BDE+4RJ\right)$$

$$\delta=\sqrt{(A-C)^2+B^2}$$

### 3.2　基于几何距离的双点移除椭圆拟合优化

经典椭圆拟合方法对点集中的离群点敏感, 为充分体现航线规划结果中的转圈收敛特性, 降低初始段航线对最终求解结果的影响, 需要从点集中去除部分离群点才能突出智能算法的航线规划优势。

文献 [16] 提出了一种基于代数距离的双点移除椭圆拟合算法, 该算法指出点集中每个点与经典椭圆拟合方法拟合的椭圆曲线间有包含正负值的代数距离$d_{\mathrm{a}}(x_i,y_i;O)$, 通过若干次经典椭圆拟合, 每次将代数距离最大和最小一对点从点集中去除, 直至点集中的点少于原有点集的一定比例, 最后由剩余点拟合出的椭圆即为所求。然而代数距离$d_{\mathrm{a}}(x_i,y_i;O)$与几何距离存在巨大差距, 在与实际问题结合时显示出不好的拟合效果, 所以将$d_{\mathrm{a}}(x_i,y_i;O)$修正为几何距离[17], 即可实现椭圆拟合的优化改进。

基于几何距离的双点移除椭圆拟合优化算法伪代码如下:

**算法**: 基于几何距离的双点移除椭圆拟合优化算法

**输入**: 包含全部航路点$(x,y)$坐标的点集

**输出**: 拟合椭圆的参数向量$O^*$

1. while 点集中点的数量大于等于航路点数量的一定比例 do;
2. 使用经典椭圆拟合方法求解点集的参数向量$O$;
3. for 现有点集中的全部点;
4. 计算每个点到参数为$O$的椭圆的几何距离;
5. end for
6. 去掉几何距离最大的点;
7. 去掉几何距离最小的点;
8. 更新点集;
9. end while

10. 输出最后拟合的椭圆参数向量 $O^*$;

### 3.3 基于最优探测航线椭圆拟合的战斗巡逻规划方法流程

由探测航线解得拟合椭圆参数后，将解得的椭圆参数作为椭圆航线的性质参数，依据式 (10) 即可得到巡逻待战空域及对应的航线计划。整体流程如图 7 所示。

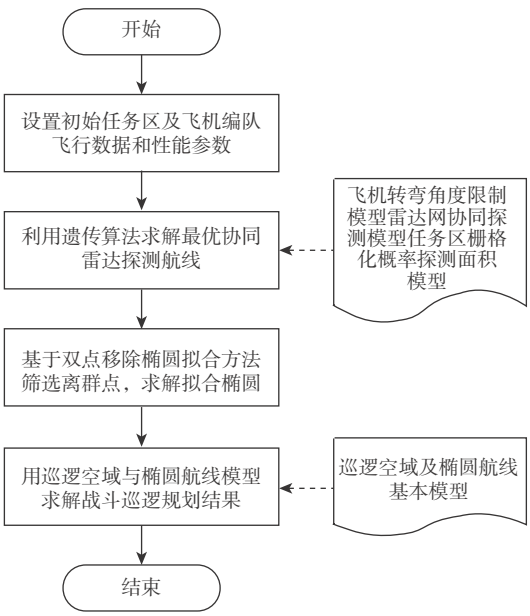



图 7 基于最优探测航线椭圆拟合的战斗巡逻规划方法流程

Fig. 7 CAP planning method flow based on elliptic fitting of optimal detection route

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真设置

想定任务环境如图 8 所示，一架简化模型的预警机位于 (0,300) 固定位置，可对飞机编队进行情报支援和指挥控制。雷达参数设置如表 1。编队飞机性能参数设置如表 2。

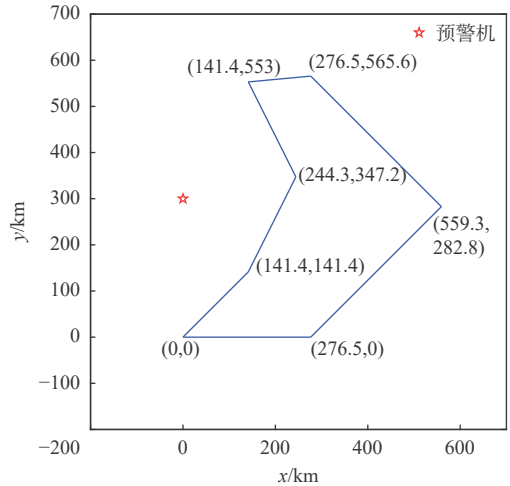



图 8 任务区示意图

Fig. 8 Mission area

### 4.2 基于遗传算法的航线规划仿真

雷达虚警概率为 $10^{-6}$ 时，单雷达对雷达散射截面积为 5 $m^2$ 的目标的探测概率随距离变化情况如图 9 所示。

遗传算法中各参数见表 3。

选择 4 种不同飞机数量的编队类型对任务区域进行探测，飞机进入任务区域的初始位置和角度信息见表 4。

航线规划仿真结果如图 10 所示，编队中不同飞机数量的平均协同概率探测面积如图，飞机数量增多编队平均协同探测面积增大。

### 4.3 基于最优探测航线的巡逻空域及椭圆航线求解

如图 11 所示，经典椭圆拟合方法的拟合结果对点集中的离群点敏感，受到初始进入段航线的影响大；基于代数距离的椭圆拟合方法能够排除部分离群点，但由于代数距离与通常的空间认知不同结果不理想；基于几何距离的椭圆拟合结果能够挖掘出航线的绕圈收敛特性，拟合效果理想。

表 1 雷达参数

Table 1 Radar parameters

| 机型 | 发射功率/W | 发射增益/dB | 接收机带宽/Hz | 接收增益/dB | 信号波长/m | 脉压比 | 脉冲累积数 | 环境温度/K | 噪声系数/dB | 损耗/dB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 预警机 | $2.0\times10^2$ | 40 | $5.0\times10^6$ | 40 | 0.3 | 1 | 30 | 293 | 2 | 6 |
| 歼击机 | $1.0\times10^2$ | 35 | $5.0\times10^6$ | 35 | 0.03 | 1 | 30 | 293 | 3 | 8 |

表 2 飞机性能参数

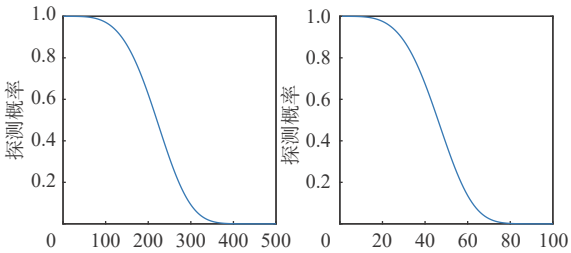
Table 2 Aircraft performance parameters

| 速度/(km·s$^{-1}$) | 最大滚转角/rad | 最小转弯半径/m | 10 s最大偏航角/rad |
|---|---|---|---|
| 0.2 | $\pi/6$ | 7 070 | 0.141 5 |

4 种飞机数量的编队航线基于几何距离的椭圆拟合结果如图 12 所示，从拟合效果看，对于双机编队，该任务区域过大，拟合椭圆长轴过长，会导致飞机巡逻周期较长，巡逻探测平均覆盖率不高；对于六机编队，出现了两个拟合椭圆重叠的情况，说明一部分编队协同探测能力被浪费，且为保障飞行安全，航线实际使用时需要调配空域；从图 10 可知，五机编队比四机编队的平均协同概率探测面积大，对于该想定任务，应使用五机编队对任务区域实施战斗巡逻。

五机编队对任务区域协同战斗巡逻的巡逻空域及椭圆航线规划结果如图 13 所示，空域及航线详细信息如表 5 所示。

图 14 显示了按照规划的战斗巡逻空域和椭圆航线遂行巡逻任务，编队飞机协同探测范围随




(a) 预警机预警雷达探测概率曲线　(b) 编队飞机机载雷达探测概率曲线

图 9　雷达探测能力曲线

Fig. 9　Radar detection capability curve

**表 3　遗传算法参数**

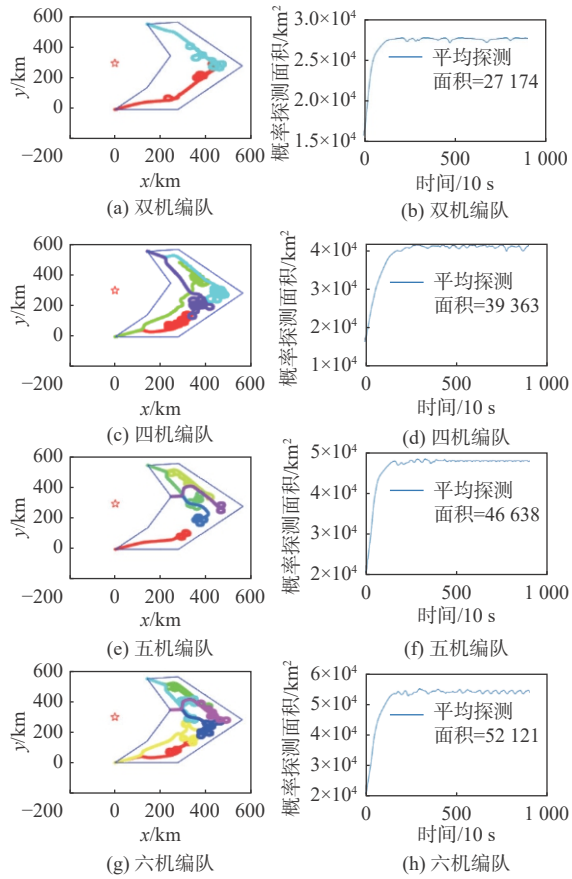
**Table 3　Genetic algorithm parameters**

| $N$ | $L$ | $p_c$ | $p_m$ | $g$ | $n_r$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 30 | [2,4,5,6] | 0.9 | 0.01 | 30 | 2 |

**表 4　飞机初始位置和角度信息**

**Table 4　Initial aircraft position and angle information**

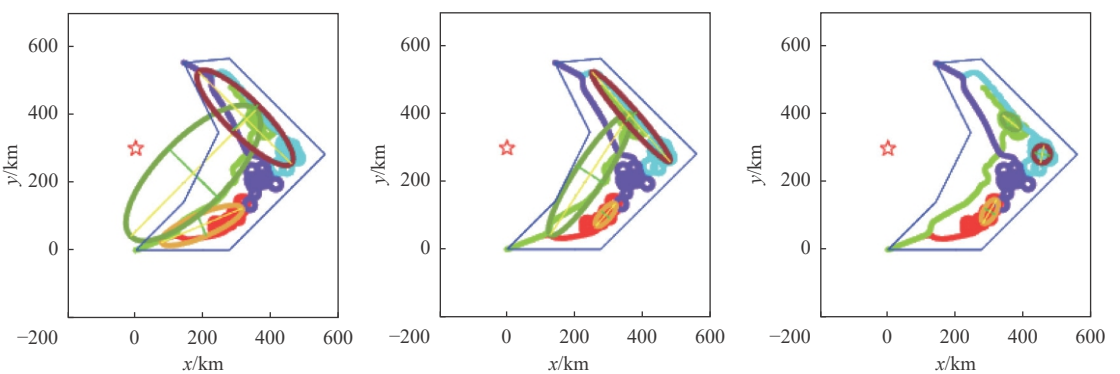
| 数量 | 初始位置/km | 初始角度/rad |
|---|---|---|
| 2 | [0,0;141.4,553] | [0;0] |
| 4 | [0,0;0,0;141.4,553;141.4,553] | [0;0;0;0] |
| 5 | [0,0;141.4,553;141.4,553;244.3,347.2;244.3,347.2] | [0;0;0;0;0] |
| 6 | [0,0;0,0;141.4,553;141.4,553;244.3,347.2;244.3,347.2] | [0;0;0;0;0;0] |




(a) 双机编队　(b) 双机编队
(c) 四机编队　(d) 四机编队
(e) 五机编队　(f) 五机编队
(g) 六机编队　(h) 六机编队

图 10　航线规划仿真结果

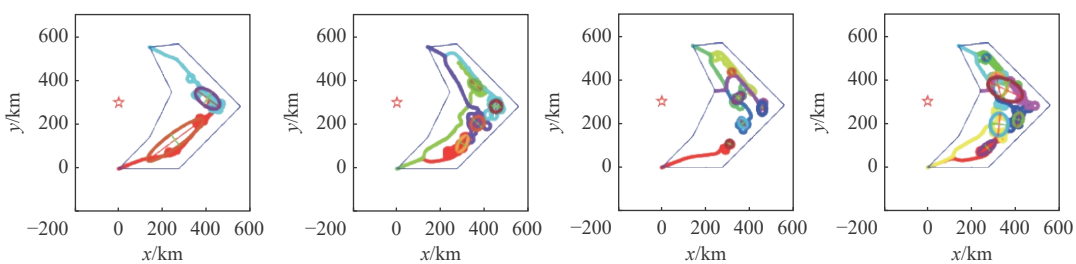
Fig. 10　Route planning simulation results




(a) 经典椭圆拟合方法　(b) 基于代数距离的双点移除椭圆拟合　(c) 基于几何距离的双点移除椭圆拟合

图 11　3 种椭圆拟合方法效果对比

Fig. 11　Effect comparison of three elliptic fitting methods




(a) 双机编队　(b) 四机编队　(c) 五机编队　(d) 六机编队

图 12　4 种编队航线的椭圆拟合结果

Fig. 12　Elliptic fitting results of four formation routes

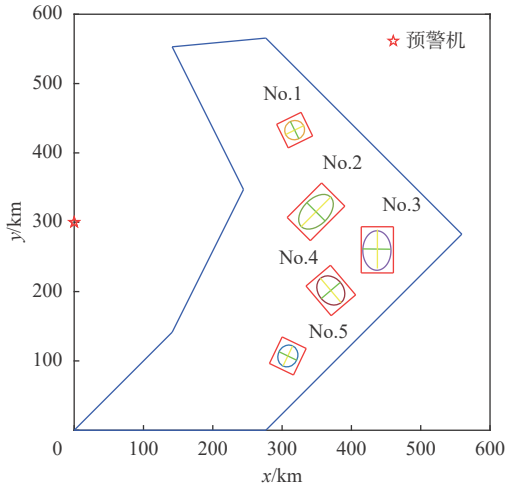



图 13 战斗巡逻空域及椭圆航线规划结果

Fig. 13 CAP airspace and elliptical route planning results

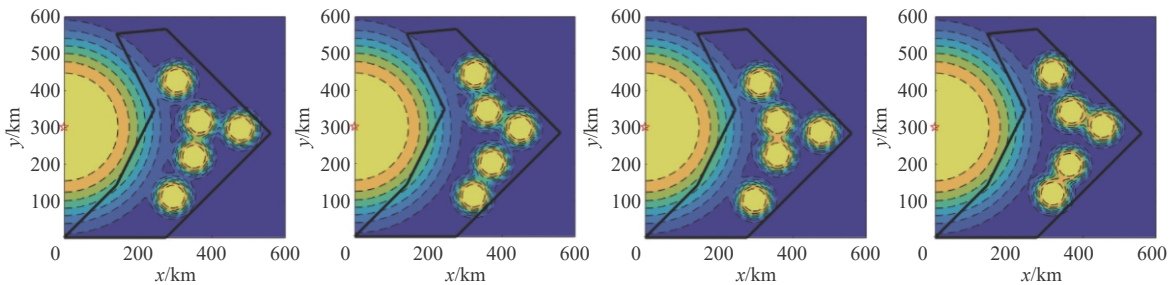
时间的变化情况。可见，不同时刻编队的协同探测覆盖范围不同，但协同探测周期短，探测盲区的时间窗口小，有利于维持对空战场的监控。

任务过程中五机编队对区域每个位置的最小和最大探测能力如图 15 所示，不同的颜色对应的协同探测概率不同，黄色到蓝色探测概率依次降低，紫色表示未被覆盖的区域。通过最大协同探测能力图可以看出，编队可维持对118 706 km²任务区域的协同探测，占总任务区域的82.16%；平均协同概率探测面积为47 049 km²，可覆盖总任务区域的32.56%。

表 5 巡逻空域及椭圆航线详细信息

Table 5 Patrol airspace and elliptical route details

| 编号 | 空域顶点坐标/km | 航线中心点/km | 长轴长/km | 短轴长/km | 偏转角/rad |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | (344.0,424.5)<br>(308.8,407.2)<br>(292.1,441.3)<br>(327.4,458.5) | (318.1,432.9) | 14.6 | 13.9 | 0.46 |
| 2 | (390.5,323.2)<br>(340.8,273.4)<br>(307.3,306.9)<br>(357.0,356.7) | (348.9,315.1) | 30.2 | 18.7 | 0.79 |
| 3 | (460.6,293.5)<br>(460.6,226.9)<br>(414.2,226.9)<br>(414.2,293.5) | (437.4,260.2) | 28.3 | 18.2 | 1.57 |
| 4 | (369.8,238.0)<br>(406.1,195.2)<br>(370.8,165.2)<br>(334.5,208.0) | (370.3,201.6) | 23.1 | 18.1 | 2.27 |
| 5 | (334.7,118.0)<br>(316.4,79.7)<br>(281.7,96.3)<br>(300.1,134.6) | (308.2,107.1) | 16.2 | 14.6 | 1.12 |

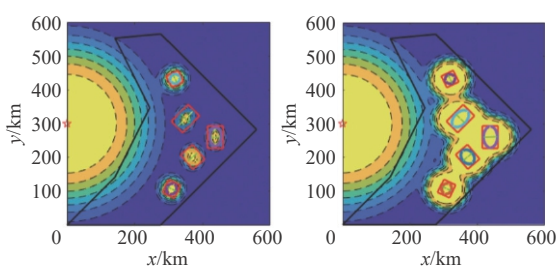



(a) $t$=6 600 s (b) $t$=6 800 s (c) $t$=7 000 s (d) $t$=7 200 s

图 14 不同时刻编队协同探测范围变化示意图

Fig. 14 Cooperative detection range variation of formation at different time

图 16 中五机编队 5 000～9 000 s稳定段的最优雷达探测航线平均探测面积为47 976 km²，47 049 km²椭圆航线的平均探测面积相比于最优雷




(a) 最小协同探测能力 (b) 平均概率协同探测面积：47 049 km²最大协同探测能力

图 15 编队协同探测能力示意图

Fig. 15 Formation cooperative detection capability

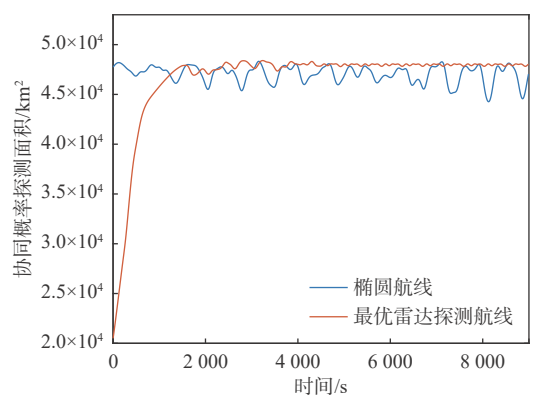



图 16 五机编队椭圆航线与最优雷达探测航线概率探测面积对比

Fig. 16 Comparison of probability detection areas between elliptical route and optimal radar detection route of five aircraft formation

达探测航线仅下降 1.93%, 但椭圆航线可以极大降低飞行员的认知载荷, 更有利于战斗力生成。

## 5　结　论

针对远海弱情报支援背景下的空中战斗巡逻规划问题, 提出了一种基于最优探测航线椭圆拟合的战斗巡逻空域规划方法。

1) 建立了任务区栅格化概率探测面积模型, 以编队飞机的协同概率探测面积作为航线规划中遗传算法的适应度函数, 提高了巡逻探测问题模型的真实性。

2) 提取巡逻航路点列的统计学特征, 以几何距离作为双点移除椭圆拟合的依据, 求解的巡逻空域和椭圆航线协同探测性能优异, 编队按照规划方案进行战斗巡逻, 可维持对总任务区域82.16%的协同探测, 平均实时协同探测范围占任务区域的32.56%。

3)通过调整航线求解算法和约束条件, 本文提出的基于最优探测航线椭圆拟合的规划思想可以拓展到多种空域规划问题, 算法适应度高、通用性强。

## 参考文献（References）


[1] YANG W D, WU M G, WEN X X, et al. A joint optimization method for cooperative detection resources based on channel capacity[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2022: 8418426.

[2] CAO Y, WEI W Y, BAI Y, et al. Multi-base multi-UAV cooperative reconnaissance path planning with genetic algorithm[J]. Cluster Computing, 2019, 22(3): 5175-5184.

[3] 樊长虹, 陈卫东, 席裕庚. 未知环境下移动机器人安全路径规划的一种神经网络方法[J]. 自动化学报, 2004, 30(6): 816-823.
FAN C H, CHEN W D, XI Y G. A neural networks-based approach to safe path planning of mobile robot in unknown environment[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(6): 816-823 (in Chinese).

[4] 侯岳奇, 梁晓龙, 何吕龙, 等. 未知环境下无人机集群协同区域搜索算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(2): 347-356.
HOU Y Q, LIANG X L, HE L L, et al. Cooperative area search algorithm for UAV swarm in unknown environment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(2): 347-356 (in Chinese).

[5] 吴傲, 杨任农, 梁晓龙, 等. 基于信息素决策的无人机集群协同搜索算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(4): 814-827.
WU A, YANG R N, LIANG X L, et al. Cooperative search algorithm based on pheromone decision for UAV swarm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(4): 814-827(in Chinese).

[6] TANG J J, ALAM S, LOKAN C, et al. A multi-objective approach for Dynamic Airspace Sectorization using agent based and geometric models[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 21(1): 89-121.

[7] 于驷男, 周锐, 夏洁, 等. 多无人机协同搜索区域分割与覆盖[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 167-173.
YU S N, ZHOU R, XIA J, et al. Decomposition and coverage of multi-UAV cooperative search area[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 167-173 (in Chinese).

[8] CHEN Y Z, ZHANG D F. Dynamic airspace configuration method based on a weighted graph model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(4): 903-912.

[9] PEHLIVANOGLU Y V. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 16(1): 47-55.

[10] GURUPRASAD K R, GHOSE D. Automated multi-agent search using centroidal voronoi configuration[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2011, 8(2): 420-423.

[11] 方学立, 杨永祥. 雷达与雷达网的目标检测威力模型[J]. 现代雷达, 2008, 30(7): 18-20.
FANG X L, YANG Y X. Radar target detection range model based on detection probability[J]. Modern Radar, 2008, 30(7): 18-20 (in Chinese).

[12] 王宁, 李哲, 梁晓龙, 等. 基于搜索意图交互的无人机集群协同搜索算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(3): 454-463.
WANG N, LI Z, LIANG X L, et al. Cooperative search algorithm for UAV swarm based on search intention interaction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(3): 454-463 (in Chinese).

[13] 单博楠, 傅宇龙, 叶海军, 等. 预警机典型巡逻航线下探测性能分析及评估[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(6): 625-633.
SHAN B N, FU Y L, YE H Q, et al. Analysis and modeling for typical patral routes of early warning aircraft[J]. Journal of CAEIT, 2019, 14(6): 625-633(in Chinese).

[14] 徐鑫宇, 万路军, 陈平, 等. 防御性制空截击中警戒巡逻空域规划建模[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(5): 1589-1599.
XU X Y, WAN L J, CHEN P, et al. Modeling of alert patrol airspace planning in defensive counterair interception operation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(5): 1589-1599 (in Chinese).

[15] 李艳庆. 基于遗传算法和深度强化学习的多无人机协同区域监视的航路规划[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
LI Y Q. Route planning of multi-UAV cooperative area surveillance based on genetic algorithm and deep reinforcement learning[D]. Xi'an: Xidian University, 2018 (in Chinese).

[16] 郭斯羽, 吴延冬. 去除离群点的改进椭圆拟合算法[J]. 计算机科学, 2022, 49(4): 188-194.
GUO S Y, WU Y D. Improved ellipse fitting algorithm with outlier removal[J]. Computer Science, 2022, 49(4): 188-194 (in Chinese).

[17] AHN S J, RAUH W, WARNECKE H J. Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola, and parabola[J]. Pattern Recognition, 2001, 34(12): 2283-2303.

# CAP planning method based on elliptic fitting of optimal detection routes

LI Leyan，YANG Rennong，WANG Ying*，LI Huanyu，WU Ao，YUE Longfei

(Air Traffic Control and Navigation School，Air Force Engineering University，Xi'an 710051，China)

**Abstract**：In view of the combat air patrol (CAP) planning problem in air formation under the background of weak intelligence support in the far sea, a new patrol airspace planning method based on the elliptic fitting of the optimal detection route was proposed. First, the cooperative probability detection area was used as the fitness function of the genetic algorithm to solve the optimal cooperative detection route of the aircraft. Then, according to the statistical characteristics of the initial route points, a two-point removal elliptic fitting method based on geometric distance was used to solve the actual available elliptical route and the corresponding patrol airspace for pilots. The simulation results show that the formation can maintain 82.16% cooperative detection of the total mission area in CAP according to the planned rectangular patrol airspace and elliptical route, and the average real-time detection range only decreases by 1.93% compared with the optimal radar detection route. The time window in the detection blind area is small. The planning results greatly reduce the cognitive load of pilots and have practical value.

**Keywords**：combat air patrol; collaborative probability detection; elliptic fitting; patrol airspace; elliptical route

**Received**：2022-12-08；**Accepted**：2023-02-20；**Published Online**：2023-02-28 00：00

**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230227.1553.004

**Foundation item**：National Social Science Fund of China (2022-SKJJ-A-002 )

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0984

# 基于GPSSA算法的复杂地形多无人机航迹规划

闫少强，杨萍*，刘卫东，李新其，雷剑，赵超跃
(火箭军工程大学 基础部，西安 710025)

**摘 要**：针对多无人机协同航迹规划求解时间要求高、收敛难等问题，提出了一种基于博弈夺食机制和自毁机制的改进麻雀搜索算法(GPSSA)的多无人机协同航迹规划方法。利用分层规划思想分别建立单无人机航迹规划模型和多无人机协同航迹规划模型，将其转化为优化问题。提出博弈夺食机制和自毁机制用以改进麻雀算法，防止其快速丢失种群多样性，增强原算法逃脱局部极值吸引的能力，使得算法搜索方式更加灵活。利用改进麻雀算法对模型进行求解，仿真结果表明，GPSSA算法能够快速完成满足约束的航迹规划，且具有更好的收敛速度、寻优精度和算法鲁棒性。

**关 键 词**：多无人机协同航迹规划；麻雀搜索算法；博弈夺食机制；自毁机制
**中图分类号**：TP301.6
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0303-11

航迹规划是无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)在连续空间中进行路径寻优，已有的典型规划方法分为基于路标图形的航迹规划和基于栅格的航迹规划[1]。其中常用的算法可分为两类，一类是传统的优化算法，包括Voronoi图、快速扩展随机数[2]、A*算法[3]、Dijkstra算法[4]和人工势场法[5-7]等。另一类是基于智能算法，包括遗传算法[8]、灰狼优化算法[9]、蚁群算法[10]、粒子群算法[11]等，该类算法具有自适应性，对初始条件要求低，能够适应复杂的优化问题。

随着现代战争的快速发展，作战任务更加复杂，多无人机协同作战已成为必然的发展趋势。协同航迹规划是在多架无人机规划路径的基础上进一步考虑协同约束，使得路径最短。同时也带来了新的问题，比如求解维度增加难以快速收敛，航迹难以高精度时间协同以及复杂的空间冲突消解。因此此类更复杂的优化问题的求解对算法的性能提出了更高的要求，文献[12]概述了在无人机群中使用人工智能算法解决路径规划问题的趋势，并指出人工智能技术可以根据其技术分为四大类：强化学习技术[13-14]、进化计算技术[15-16]、群体智能技术[17]和图形神经网络[18]。

其中群体智能技术是指利用群体智能算法对该问题进行优化，文献[12]提出一种并行遗传算法，通过遗传算法并行计算来获得稳定的协同规划路径；文献[19]提出了一种基于社会等级的鸽群改进算法，利用社会阶层策略加速路径规划的收敛；文献[20]提出了一种改进步长的改进麻雀搜索算法(logarithmic spiral strategy and adaptive step strategy of the SSA, LASSA)，提高了协同路径规划的寻优质量；文献[11]针对无人机在复杂环境中受到多种威胁时的路径规划问题，提出了一种基于球面矢量的粒子群优化算法，结果表明，该算法生成的路径对于实际无人机操作具有有效性；文献[21]提出了一种改进的灰狼优化算法来解决考虑无人机动力学的无人机三维路径规划问题，并定义了一个称为“对齐系数”的可变权重来处理航路点散射问题；文献[16]针对异构无人机的覆盖路径规划问题，提出了一种基于蚁群算法的无人机覆盖路径规划算

**收稿日期**：2022-12-12；**录用日期**：2023-03-24；**网络出版时间**：2023-04-12 10:59
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230411.1751.003
**基金项目**：国家自然科学基金(61703411)
*通信作者. E-mail：yyp_ing@163.com

*引用格式：闫少强，杨萍，刘卫东，等. 基于GPSSA算法的复杂地形多无人机航迹规划[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：303-313.
YAN S Q，YANG P，LIU W D，et al. Multi-UAV trajectory planning for complex terrain based on GPSSA algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：303-313 (in Chinese).*

法，以获得更好的路径，有效地覆盖所有区域；文献[22]提出了一种新的混合粒子群算法，有效地均衡了搜索和开发能力，并采用时间戳分割模型简化无人机协调成本的处理，实验结果表明提出的算法在受限任务环境中能够为每架无人机生成可行有效的路径。

麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)[23]是2020年由我国学者薛建凯等提出的一种新型群体智能优化算法，主要依据麻雀种群的3种个体行为，即觅食行为、夺食行为和反捕食行为。该算法具有快速收敛、稳定性强、寻优精度高的优点[24-25]，能够适应复杂的工程问题。虽然该算法收敛速度快但易陷入局部最优，原有机制容易快速丢失种群多样性，且跳出局部最优能力差。

为此本文提出了一种基于博弈夺食机制和自毁机制的改进麻雀算法(game predatory sparrow search algorithm, GPSSA)，并将其应用于多无人机协同航迹规划问题求解。首先针对生物种群的觅食特性，提出博弈夺食机制改变其原有算法中种群个体仅向当前最优解靠近的机制，使其根据食物多少向次优解靠近，扩大搜索范围的同时更不易丢失优质解；而后根据麻雀独有的“被囚禁后自尽”的特性，提出一种自毁机制，帮助种群个体逃脱局部极值的吸引，进一步增加种群多样性。GPSSA算法具有原始算法收敛速度快优点的同时，更加符合麻雀种群的生物特性，并且具有更强的寻优能力和更灵活的搜索方式。最后将粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)[26]、差分进化算法(differential evolution, DE)[27]、灰狼算法(gray wolf optimization, GWO)[28]、SSA和GPSSA等算法在单无人机航迹规划中进行了仿真实验，并将GPSSA算法应用到多无人机协同航迹规划中，并与SSA和LASSA[20]进行了对比论证分析，实验结果验证了GPSSA算法优越的寻优性能和基于该算法的多无人机协同航迹规划方法的可行性。

# 1 UAV航迹规划建模

## 1.1 单UAV航迹规划模型

求解无人机静态航迹规划模型需要建立合适的适应度函数，并建立符合UAV动力学性能和影响航迹质量的各类约束。

### 1.1.1 飞行航迹代价

UAV飞行过程中自身能携带的能源(燃油或电池)是有限的，航迹长度与能源消耗呈正相关，$L_i$是第$i$段航迹长度，$N$为航迹点数量，则$N$+1为航迹段数量。即UAV飞行油耗代价$f_{\text{path}}$可用航迹长度表示为

$$f_{\text{path}}=\sum_{i=1}^{N+1}L_i \tag{1}$$

### 1.1.2 飞行高度变化代价

在飞行过程中，UAV需借助升高或降低飞行高度来防止与山体地形发生碰撞，但反复升降会影响UAV飞行过程中的稳定性[11]，该指标可以借助航迹高度变化的方差进行体现，则飞行高度变化代价$f_{\text{height}}$设置如下：

$$f_{\text{height}}=\sum_{i=1}^{N}\left(z_i-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}z_i\right)^2\Big/N \tag{2}$$

其中，$z_i$为第$i$个航迹点的海拔。

### 1.1.3 平滑代价

在飞行过程中偏转角越大，无人机的飞行状态就越不稳定，飞行航迹就越不平滑。因此本文加入了平滑代价来增加无人机航迹的稳定性和平滑性，用偏转角$\delta$的变化程度来表示平滑代价$f_{\text{smooth}}$，函数设置如下：

$$f_{\text{smooth}}=\sum_{i=2}^{N}|\delta_i-\delta_{i-1}| \tag{3}$$

### 1.1.4 综合威胁约束

UAV在穿越战场时会遭遇敌方防空设施或气候条件的威胁，如果进入其作用范围会对无人机造成损害，导致无人机损坏。现将其统称为综合威胁，并借助其作用范围构建圆柱体障碍模型。$M$表示综合威胁，设共有$n_M$个威胁，$k_M$表示第$k$个威胁，$R_{k_M}$表示威胁的半径。将当前航迹段$L_i$均分为5段，$d_{k,i}$表示当前威胁点分别到5个均分航段的距离，$C_i$表示第$i$个约束函数，原理如图1所示，设置该威胁约束函数为

$$C_1=\sum_{i=1}^{5N}\sum_{k_M=1}^{n_M}\max\left(R_{k_M}-d_{k_M,i},0\right) \tag{4}$$

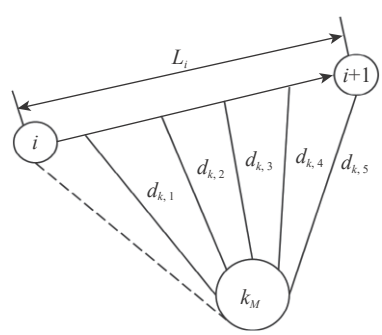



图1 综合威胁约束

Fig. 1 Comprehensive threat constraint

### 1.1.5 最大爬升角、水平转弯角约束

由于UAV自身动力学性能的约束，要求在飞

行时相邻航迹段间转弯角$\varphi$不能超过最大转弯角$\varphi_{\max}$, 爬升角$\theta$不能超过最大爬升$\theta_{\max}$, 如果 UAV 飞行过程中超过上述规定的角度, 会造成 UAV 状态的不稳定, 影响整体性能。设$d_{i-1}$, $d_i$, $d_{i+1}$为无人机的飞行轨迹点, 记$d'_{i-1}$, $d'_i$, $d'_{i+1}$分别是$d_{i-1}$, $d_i$, $d_{i+1}$的水平投影点。其中偏转角$\delta$、水平转弯角$\varphi$、爬升角$\theta$关系如图 2 所示。其约束条件表达式满足:

$$\begin{cases} \varphi_i = \arccos\left(\dfrac{\overrightarrow{d'_{i-1}d'_i}\cdot\overrightarrow{d'_id'_{i+1}}}{\left|\overrightarrow{d'_{i-1}d'_i}\right|\cdot\left|\overrightarrow{d'_id'_{i+1}}\right|}\right) \\ \theta_i = \arccos\left(\dfrac{\left|\overrightarrow{d'_id'_{i+1}}\right|}{\left|\overrightarrow{d_id_{i+1}}\right|}\right) \\ |\varphi_i|-\varphi_{\max}\leqslant 0 \qquad |\theta_i|-\theta_{\max}\leqslant 0 \end{cases} \tag{5}$$

则设置约束函数为

$$C_2=\sum_{i=1}^{N}\max\left(|\varphi_i|-\varphi_{\max},0\right) \tag{6}$$

$$C_3=\sum_{i=1}^{N}\max\left(|\theta_i|-\theta_{\max},0\right) \tag{7}$$

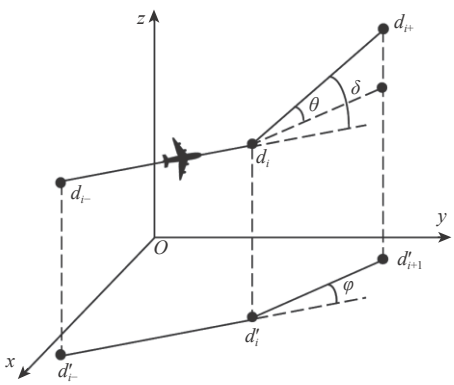



图 2　转弯角、爬升角、偏转角

Fig. 2　Turning angle, climbing angle and deflection angle

1.1.6　最大、最小航迹约束

假定 UAV 所携带的能源(燃油或电池)能飞行的最大航程为$L_{\max}$, 若规划的航程超出最大航程则无法完成任务, 则最大飞行航迹约束为

$$\sum_{i=1}^{N+1}L_i-L_{\max}\leqslant 0 \tag{8}$$

UAV 在飞行时的姿态必然会发生改变, 为保证 UAV 的稳定性, 因此需要有一个稳定的转变过程, 这一段航迹称为最小直线航迹距离$L_{\min}$, 航迹中的任意航迹段满足如下条件:

$$L_{\min}-L_i\leqslant 0 \tag{9}$$

则设置最大、最小航迹约束函数如下:

$$C_4=\max\left(\sum_{i=1}^{N+1}L_i-L_{\max},0\right) \tag{10}$$

$$C_5=\sum_{i=1}^{N+1}\left(\max\left(L_{\min}-L_i,0\right)\right) \tag{11}$$

1.1.7　最高、最低飞行高度约束

UAV 在飞行过程中, 依靠紧贴地面来躲避雷达探测, 但越靠近地面越容易与地面发生碰撞, 需要设定一个最低飞行高度$H_{\min}$, 此时 UAV 的最低飞行高度为$H_{\min}(i)=H_{\min}+H(x_i+y_i)$, $H(x_i+y_i)$为第 $i$ 个航迹点横纵坐标对应的地图的高度。

同时 UAV 在飞行过程时, 距离地面的高度越高则越容易被雷达发现, 应当设定一个最高飞行高度$H_{\max}$来减少被发现的风险, 此时 UAV 的最高飞行高度为$H_{\max}(i)=H_{\max}+H(x_i+y_i)$, 那么 UAV 的每段飞行航迹高度$H_i$应满足如下约束:

$$z_i-H_{\max}(i)\leqslant 0 \tag{12}$$

$$H_{\min}(i)-z_i\leqslant 0 \tag{13}$$

则设置最高、最低航迹高度约束函数如下:

$$C_6=\sum_{i=1}^{N}\max\left(z_i-H_{\max}(i),0\right) \tag{14}$$

$$C_7=\sum_{i=1}^{N}\max\left(H_{\min}(i)-z_i,0\right) \tag{15}$$

设$\eta$为惩罚函数, 当$\eta$足够大时, 可以忽略约束无法完全被满足, 即约束函数值为极小值的情况。设$\omega_1$、$\omega_2$、$\omega_3$为权重。构建的数学模型可适用于一般的航迹规划问题, 且本文的单 UAV 航迹规划目标函数为

$$\min(f)=\omega_1\cdot f_{\text{path}}+\omega_2\cdot f_{\text{height}}+\omega_3\cdot f_{\text{smooth}}+\eta\cdot\sum_{i=1}^{7}C_i \tag{16}$$

## 1.2　多 UAV 协同规划模型

在对多 UAV 进行协同航迹规划时, 需要额外建立时空协同约束关系, 即时间协同约束和空间协同约束。

1.2.1　空间协同约束

空间协同约束是指防止多架 UAV 之间发生碰撞。在 UAV 飞行过程中, 规定同一时刻的每架 UAV 的距离要大于安全距离 $D$, 以避免出现 UAV 间相互碰撞造成的毁伤。假设在某时刻的第 $i$ 架 UAV 和第 $j$ 架 UAV 的欧氏距离为 $D_{i,j}$,其中 $i,j\in[1,n]$, $n$ 为无人机数量, 则此时多 UAV 应满足的空间约束条件如下:

对于$\forall i,j\in[1,n]$, 都有$D-D_{i,j}\leqslant 0$。设置空间协同约束函数如式(12)所示。

$$C_{\text{space}}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\max\left(D-D_{i,j},0\right) \tag{17}$$

1.2.2 时间协同约束

时间协同约束主要是指在规划过程中，各UAV能够在一段可被接受的时间范围内到达目标位置，此时要求所有UAV到达目标位置的时间区间存在交集。当交集为空时，表明所有UAV无法同时到达目标位置；相反若不为空，则表明存在一段时间区间使得UAV能够通过调节自身的飞行速度，来达到同时到达目标位置的要求。

设共有 $n$ 架UAV，每架UAV拥有 $m$ 条备选航迹。第 $i$ 架UAV的第 $j$ 条飞行轨迹为 $L_{i,j}$，每架UAV的速度 $v_i \in [v_{\min}, v_{\max}]$，则第 $i$ 架UAV的第 $j$ 条飞行航迹到达目标区域的飞行时间范围为 $T_{i,j} = \left[L_{i,j}/v_{\max}, L_{i,j}/v_{\min}\right] = \left[T_{i,j}^{\min}, T_{i,j}^{\max}\right]$，$T_{i,j}^{\min}$ 和 $T_{i,j}^{\max}$ 分别表示第 $i$ 架UAV的第 $j$ 条航迹到达目标区域的最短和最长时间，那么第 $i$ 架UAV时间范围则为 $T_i = T_{i,1} \bigcup T_{i,2} \bigcup \cdots \bigcup T_{i,m}$，那么要求：$T = \bigcap_{i=1}^{N} T_i \neq \varnothing$，则说明当前UAV的航迹备选组中存在可行解。

设 $T_i^{\min}$ 和 $T_i^{\max}$ 分别为从第 $i$ 架UAV的候选航迹组中选出的一条航迹到达目标区域的最短和最长时间，当所有UAV到达目标区域的时间区间的交集不为空时，表明存在可行解方案，此时UAV时间协同约束条件为

$$\max(T_1^{\min}, T_2^{\min}, \cdots, T_m^{\min}) \leqslant \min(T_1^{\max}, T_2^{\max}, \cdots, T_m^{\max})$$

则设置时间协同约束函数为

$$C_{\text{time}} = \max(\max(T_1^{\min}, T_2^{\min}, \cdots, T_m^{\min}) - \min(T_1^{\max}, T_2^{\max}, \cdots, T_m^{\max}), 0) \tag{18}$$

图3为3架UAV的时间协同约束原理图，其中设每架UAV有3条备选航迹。图中仅以每架UAV的同一次序航迹进行解释说明，可以看出蓝色和紫色线路是存在时间交集的，即满足协同时间约束，而红色线路却不满足时间协同约束。

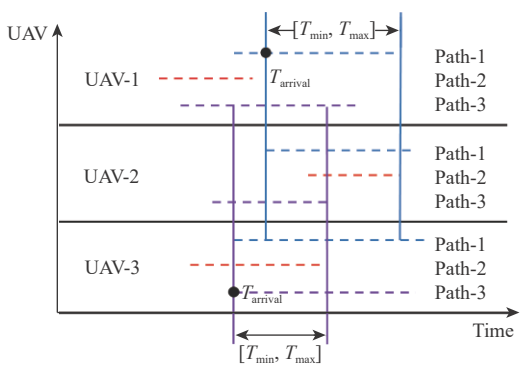



图3 时间协同约束

Fig. 3 Time collaboration constraint

1.2.3 协同目标函数

协同目标函数由3部分组成，第1部分是指各架UAV所选航迹的单机航迹目标函数代价总和 $\sum_{i=1}^{n} f_i$，其中 $f_i$ 为第 $i$ 架飞机选出的航迹目标函数代价；第2部分是指规划出的协同时间代价 $T_{\text{arrival}}$，该值越小则表示规划的时间越短，其取值为协同时间交集中的最小值，如图3所示位置。第3部分是时空协同约束函数，因此协同目标函数 $F$ 为

$$\min(f) = \sum_{i=1}^{n} f_i + T_{\text{arrival}} + \eta \cdot \left(C_{\text{space}} + C_{\text{time}}\right) \tag{19}$$

## 2 博弈夺食麻雀搜索算法

### 2.1 麻雀搜索算法

麻雀的种群个体分为发现者、加入者和警戒者。发现者负责发现食物并带领种群搜索方向，加入者则跟随发现者夺取食物，警戒者警惕周围环境威胁并及时发出危险信号，提醒麻雀种群向安全区域转移。

发现者负责引导种群觅食或者引导种群前往安全区域的位置，一般占20%，位置更新描述如下：

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t \cdot \exp\left(\dfrac{-i}{\alpha \cdot M}\right) & \text{if } R_2 < S \\ X_i^t + Q \cdot L & \text{if } R_2 \geqslant S \end{cases} \tag{20}$$

$t$ 为当前的迭代次数，$M$ 为最大的迭代次数，$X_i^t$ 表示第 $t$ 次迭代的第 $i$ 个麻雀个体的位置。$\alpha$ 是一个属于 (0,1] 的随机数。$R_2$ 代表预警值，属于 [0,1]。$S$ 代表当前环境的安全阈值，属于 [0.5,1]。$Q$ 负责控制步长，是一个服从正态分布的随机数。$L$ 是一个 $1 \times D$ 的矩阵，且元素全为1，$D$ 代表维度。

除了发现者，剩下的麻雀均为加入者。加入者为了获取优质食物，紧随发现者之后进行夺食或者独自觅食，故追随者的位置更新描述如下：

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\dfrac{X_{\text{worst}}^t - X_i^t}{i^2}\right) & \text{if } i > N/2 \\ X_P^{t+1} + \text{abs}\left(X_i^t - X_P^{t+1}\right) \cdot A^+ \cdot L & \text{otherwise} \end{cases} \tag{21}$$

$X_{\text{worst}}$ 表示当前的最坏位置，$X_P$ 是发现者当前所占据的最优位置。其中，运算符“abs”表示将矩阵中的元素取绝对值。$A$ 为一个元素仅是1或−1的 $1 \times D$ 的矩阵，其中 $A^+ = A^{\mathrm{T}}(AA^{\mathrm{T}})^{-1}$。值得注意的是，$A^+$ 为 $A$ 的伪逆矩阵，本文并不对 $A^+$ 进行展开化简，因为展开后算法的运算速度会降低。

随机分配20%的个体作为警戒者，当警戒者意识到危险时，警戒者会做出反捕食行为，其数学表达式如下：

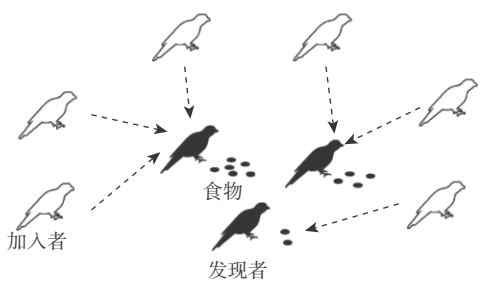
$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta \cdot \left|X_i^t - X_{\text{best}}^t\right| & \text{if } f_i \neq f_{\text{g}} \\ X_i^t + K \cdot \left(\dfrac{\left|X_i^t - X_{\text{worst}}^t\right|}{(f_i - f_{\text{w}}) + \varepsilon}\right) & \text{if } f_i = f_{\text{g}} \end{cases} \tag{22}$$

$X_{best}$ 表示当前种群的最优位置。$\beta$ 负责控制步长, 是一个服从标准正态分布的随机数。$K$ 是一个属于 [−1,1] 的随机数, 负责控制个体移动方向同时也可以控制移动步长。$f_i$、$f_g$ 和 $f_w$ 分别表示第 $i$ 个个体的适应度值、当前种群的最优和最差适应度值。为了避免分母为 0, 将 $\varepsilon$ 设置为一个极小的实数。

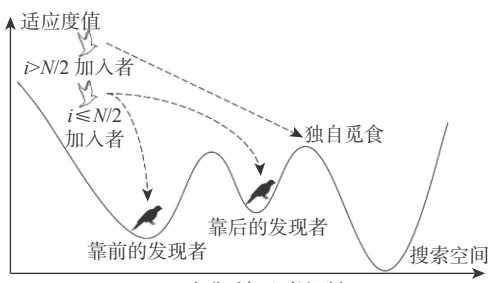
### 2.2　博弈夺食机制

麻雀算法中的加入者具有夺食机制, 即加入者直接跳跃到发现者当前最优位置的附近与其争夺食物。但是发现者当前最优位置的食物并不是无穷无尽的, 不可能满足大量加入者食物的需求, 这也是不符合自然定律的。

为此本文在博弈理论的基础上提出了一种博弈夺食机制, 即把加入者与发现者的夺食看作一种博弈过程: 当 $i \leqslant N/2$ 时, 规定每名发现者发现的食物仅能满足有限加入者的需求, 且发现食物的多少由其适应度值决定; 排名在前的加入者会优先选择发现食物较多的发现者进行夺食; 而排名较后的加入者为了能获得食物, 避免饥饿则会选择发现食物较少的发现者进行夺食, 如图 4(a)。值得注意的是, 这里保留了 $i>N/2$ 时, 加入者无法获得食物而独自觅食的机制, 如图 4(b)。




(a) 加入者跟随发现者




(b) 改进后加入者机制

图 4　博弈夺食机制原理

Fig. 4　Principle of game predatory mechanism

#### 2.2.1　夺食机制

由式(21)发现, 当 $i \leqslant N/2$ 时, 此时的加入者会紧随发现者之后进行夺食。因此设有 $R$ 个加入者直接跳跃到发现食物最多的发现者附近与其夺食, 其中 $R = N/2 - P \cdot N$, $P$ 为发现者比例。

#### 2.2.2　博弈夺食机制原理

假设每个发现者发现的食物是有限的, 发现者当前最优位置的食物不可能满足大量加入者食物的需求, 参与夺食机制的加入者会因为食物的短缺向不同的发现者进行夺食。且此时是个博弈过程, 加入者会选择对自己最有利的发现者进行夺食。博弈夺食机制共有两个步骤, 一是统计发现者食物量, 二是进行博弈选择, 选取对自己最有利的发现者。

1) 发现者食物量统计

适应度较低的个体被认为是更好的选择。发现者位置的适应度越低代表发现的食物更多, 其中发现者数量为 $P \cdot N$。则第 $z$ 个发现者发现食物的数量 $G$ 可以表示为

$$G_z = \frac{1}{f(D_z)},\ z = 1,2,\cdots,P \cdot N \tag{23}$$

2) 博弈选择

当已有 $J_z$ 个加入者跟第 $z$ 个发现者争夺食物时, 后面的加入者会因为博弈机制选择跟第 $z$+1 个发现者争夺食物, 以此类推。$D_z$ 表示第 $z$ 个发现者, $F_j$ 表示第 $j$ 个加入者。其中 $J_z$ 由第 $z$ 个发现者发现食物的数量 $G_z$ 占总数量的比值 $p_z$ 决定, 具体原理如下:

$$p_z = G_z \Big/ \sum_{z=1}^{P \cdot N} G_z \tag{24}$$

$$J_z = \mathrm{round}(p_z \cdot R) \tag{25}$$

此时每个参与博弈夺食机制的加入者与其被夺食的发现者的关系如下:

$$\underbrace{F_1, F_2, \cdots, F_{J_1}}_{D_1},\ \underbrace{F_{J_1+1}, F_{J_1+2}, \cdots, F_{J_1+J_2}}_{D_2},\ \cdots,\ \underbrace{F_{J_1+J_2+\cdots+J_{P \cdot N-1}+1}, F_{J_1+J_2+\cdots+J_{P \cdot N-1}+2}, \cdots, F_{J_1+J_2+\cdots+J_{P \cdot N}}}_{D_{P \cdot N}} \tag{26}$$

所以改进后加入者位置更新如下:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\dfrac{X_{\mathrm{worst}}^t - X_i^t}{i^2}\right) & \text{if } i > N/2 \\ D_z^{t+1} + \mathrm{abs}\left(X_i^t - D_z^{t+1}\right) \cdot A^+ \cdot L & \text{otherwise} \end{cases} \tag{27}$$

相较于 SSA 中种群个体仅向当前最优解靠近的原始机制, 博弈夺食机制充分利用了种群内的较优个体, 使种群个体依据食物数量(适应度值)向优质解靠近, 减少了搜索过程中由于搜索方向单一, 导致种群多样性大量流失、收敛速度过快进而陷入局部最优的可能, 保证搜索方式更加灵活的同时更不易遗漏优质解。

### 2.3　自毁机制

麻雀多活动在有人类居住的地方, 性格胆大活

泼，警惕性却非常高。麻雀是非常烈性的鸟，它依靠人生活但却不愿意被人圈养，如果没有自由，宁可活活饿死[21]。为此，本文在麻雀搜索算法的原始机制上加入了自毁机制，即把麻雀个体长时间不更新位置时，认为该麻雀被囚禁，此时麻雀会因为失去自由而自毁，具体原理如下。

$t_i$表示该个体位置不更新的迭代次数，当种群中的个体超过危险迭代次数$T$不更新位置时，认为该麻雀个体为被囚禁状态，麻雀个体会绝食而自毁。此时摒弃该麻雀个体，并且在该位置附近生成新的麻雀个体，有助于算法跳出局部最优。该过程可用中国一句古话表述，即“置之死地而后生”，randn() 表示一个服从正态分布的随机数，其麻雀位置更新如下：

$$X_i^{t+1}=\begin{cases}X_i^t+X_i^t\cdot\text{randn}() & \text{if } t_i\geqslant T\\ X_i^t & \text{otherwise}\end{cases} \tag{28}$$

自毁机制的引入从宏观方面来看，使得 SSA 中的个体行为更加符合真实麻雀种群的个体行为，其生物特性得到进一步完善；从微观方面来看，麻雀个体陷入“囚禁状态”后，则视为该个体进行了“自毁”，此时摒弃该个体并随机生成一个新的个体，若该“自毁”个体并非理论最优值，则有助于算法增加种群多样性并跳出局部最优，若该“自毁”个体为理论最优值，则有助于检验其真实性。

### 2.4 航迹规划方法框架

单 UAV 航迹规划层的具体操作为：获取地形、威胁、起点、终点等战场环境信息，构建相应代价函数和约束函数，得到目标函数，利用算法对种群个体编码并对目标函数求解，得到航迹点后进行平滑处理，组成航迹备选组。

多 UAV 协同航迹规划层的具体操作为：选取单 UAV 航迹规划层生成的某一 UAV 的航迹备选组，利用最大、最小飞行速度和航迹长度，计算该 UAV 到达目标位置的时间范围，类比得到所有的 UAV 到达目标位置的时间范围，进而计算不同 UAV 之间的时间交集，得到协同时间区间，选择满足时空协同约束且航迹代价和协同时间代价最小，即协同目标函数代价最优时所对应的各 UAV 的飞行航迹，最终得到最优协同航迹规划方案。

综上所述，结合第 1 节中的模型，基于博弈夺食机制和自毁机制的多 UAV 协同航迹规划方法框架，如图 5 所示。

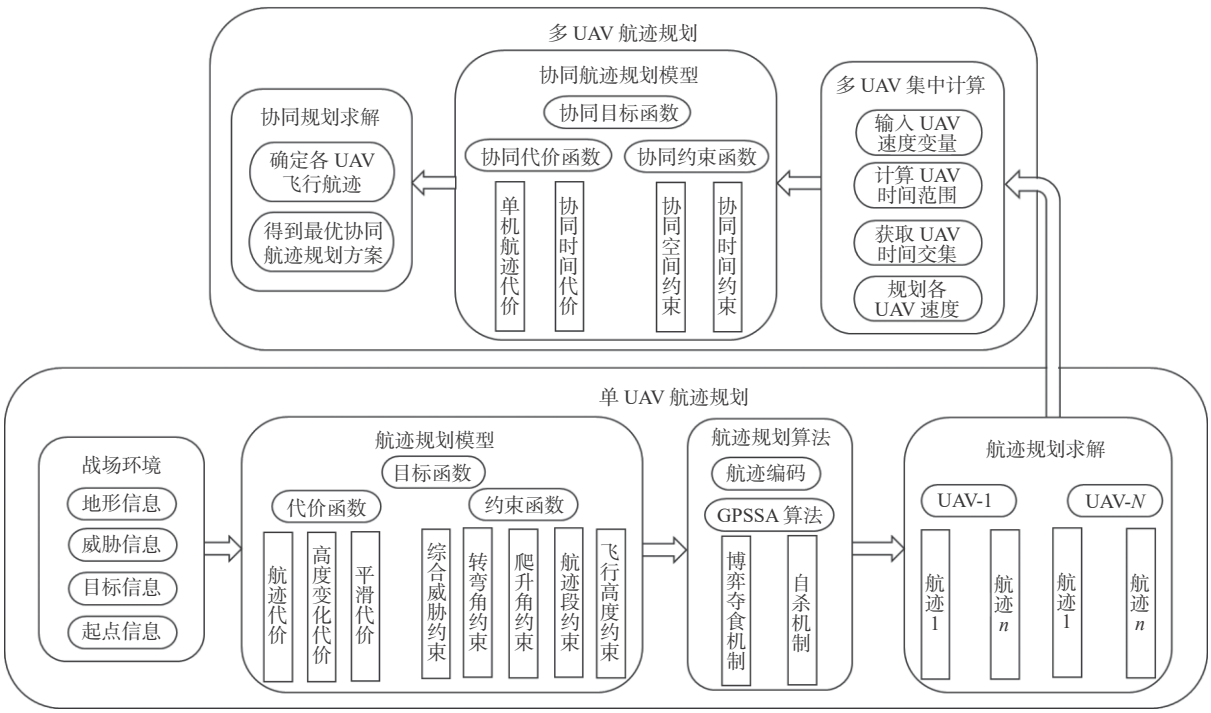



图 5 多 UAV 协同航迹规划框架

Fig. 5 Multi-UAV cooperative track planning framework

## 3 仿真实验与分析

### 3.1 航迹编码

定义种群中的某一个个体$S_i$为一条由多个航迹点连接而成的路径，即个体$S_i$可表示为$S_i=[s_{x1},s_{y1},s_{z1},s_{x2},\cdots s_{xN},s_{yN},s_{zN}]$，其中每 3 个构成一个航迹点的三维坐标，共有 $N$个航迹点，则每个个体的维度为 $3\times N$。同时，设起点坐标 $S$为$(x_S,y_S,z_S)$，终点坐标 $E$为$(x_E,y_E,z_E)$，则航迹点$d_i$的三维坐标$(x_{d_i},y_{d_i},z_{d_i})$为

$$x_{d_i} = x_S + s_{xi} \cdot (x_S - x_E) \tag{29}$$

$$y_{d_i} = y_S + s_{yi} \cdot (y_S - y_E) \tag{30}$$

$$z_{d_i} = z^*_{d_i} + s_{zi} \cdot (z_{\max} - z^*_{d_i}) \tag{31}$$

其中: $z^*_{d_i}$可根据$x_{d_i}$和$y_{d_i}$在高程地图中得到, $z_{\max}$是指高程地图中关于坐标 $z$ 的上界。

### 3.2　三次 B 样条曲线

B 样条曲线具有均匀的变化曲率, 适用于无人机航迹连续变化的特性。三维空间中的 $k$ 次 B 样条函数可表示为

$$p(u) = \sum_{i=0}^{n} d_i N_{i,k}(u) \tag{32}$$

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, u_i \leqslant u \leqslant u_{i+1} \\ 0, \text{other} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \dfrac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \dfrac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i,k-1}(u) \end{cases} \tag{33}$$

其中: $d_i$表示第 $i$ 个航迹点; $N_{i,k}(u)$表示 $k$ 次 B 样条的基函数。

本文通过使用三次 B 样条曲线的方法帮助无人机飞行航迹更加平滑稳定, 效果图如图 6 所示。

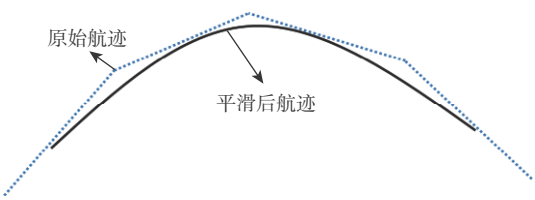



图 6　三次 B 样条曲线平滑处理

Fig. 6　Cubic B-spline curve smoothing

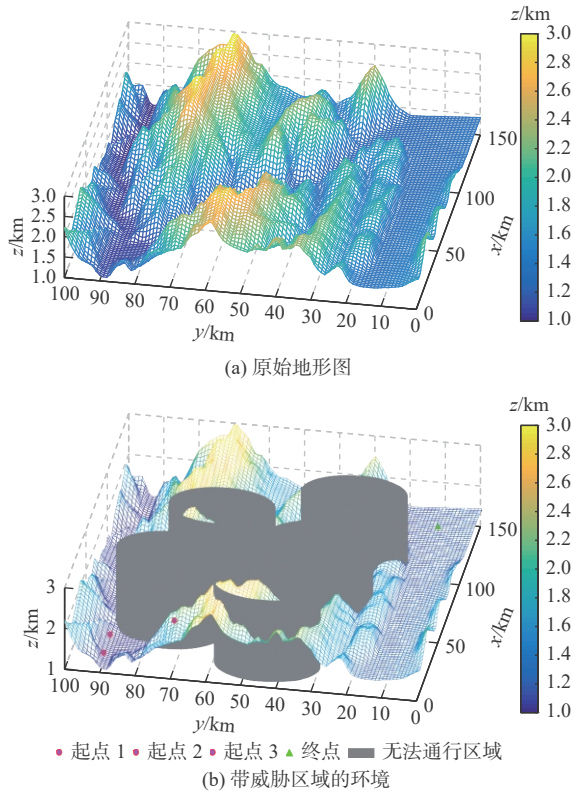
### 3.3　地形环境构建

本文使用数字高程地图建立三维山地地形, 基本符合实际环境, 其描述如下:

$$F = \{(x,y,z) | 0 \leqslant x \leqslant x_{\max}, 0 \leqslant y \leqslant y_{\max}, 0 \leqslant z \leqslant z_{\max}\} \tag{34}$$

其中: $x$, $y$, $z$ 分别为构建环境中的任意一点的三维坐标。$x_{\max}$, $y_{\max}$, $z_{\max}$分别为地形环境的边界值。本文在山地地形上建立三维环境模型, 其中由两座主要山峰以及大部分山谷所组成, 坡度变化明显, 规划难度较大, 具有一定的代表性, 如图 7 所示。

设置起点 1, 2, 3 和终点坐标为(10,90,1.1), (10,70,2.2), (10,90,1.2), (130,10,1.1)。共设有 5 处综合威胁不可飞行区域, 中心点坐标分别为: (20,45), (40,75), (60,30), (80,65), (100,30), 半径都为 15 km, 其分布在起点到终点直线路径的两侧, UAV 需绕开威胁区域, 具有一定的规划难度, 具体见图 7。




(a) 原始地形图

(b) 带威胁区域的环境

图 7　三维地形环境

Fig. 7　3D terrain environment

设置 $\varphi_{\max}$、$\theta_{\max}$=60°, $L_{\max}$=200 km, $L_{\min}$=10 km, $H_{\max}$=0.5 km, $H_{\min}$=0.1 km, $V_{\max}$=1 km/s, $V_{\min}$=0.5 km/s, $\eta$=$10^7$, $\omega_1$=0.5, $\omega_2$=0.3, $\omega_3$=0.2。

### 3.4　仿真实验条件和算法参数

本文实验环境均为 AMD Ryzen 7 4800U with Radeon Graphics @1.80 GHz, 内存 16 GB, 装有 Matlab 2020a 的 Windows 10 系统。且引言中文献所提到的算法的参数设置如表 1。

**表 1　算法参数**

**Table 1　Algorithm parameters**

| 算法 | 参数 |
|---|---|
| PSO | $c_1$=2 |
| | $c_2$=2 |
| | $W_{\min}$=0.2 |
| | $W_{\max}$=0.9 |
| DE | $C$=0.2 |
| | $F_{\min}$=0.2 |
| | $F_{\max}$=0.8 |
| GWO | $a$=(2→0) |
| SSA | $S$=0.8 |
| | $P$=0.2 |
| GPSSA | $S$=0.8 |
| | $P$=0.2 |
| | $T$=$M$/20 |

### 3.5　单 UAV 航迹规划仿真实验

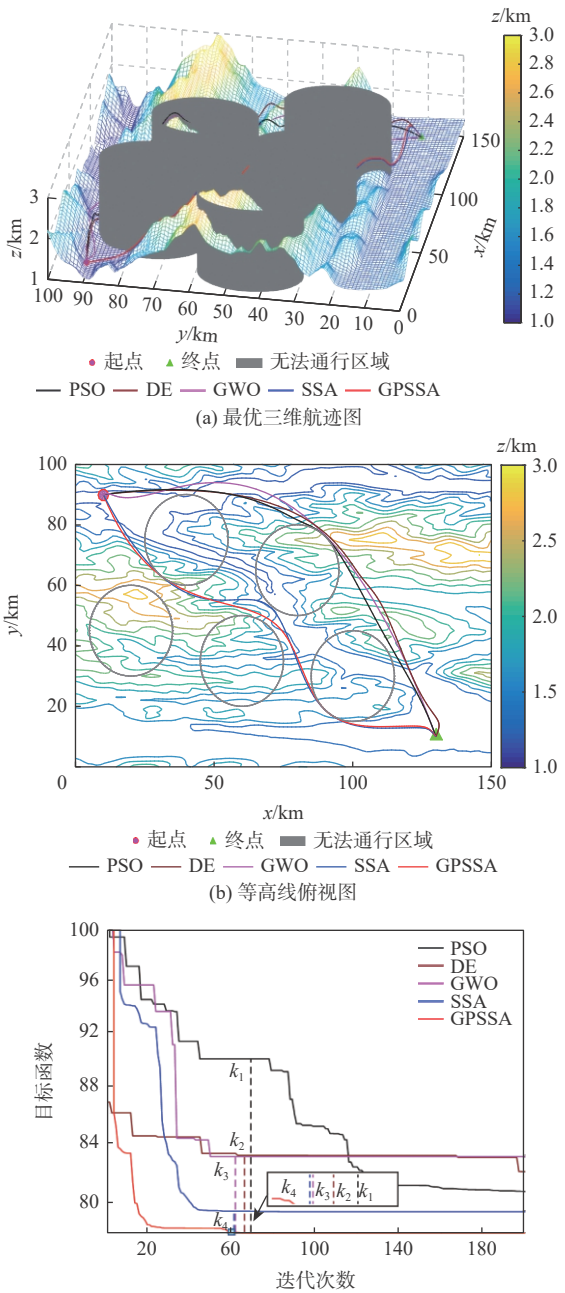
选取起点 1 为单 UAV 航迹规划的起点, 航迹

节点数为10，维度为30，最大迭代次数为200，种群个数为200，分别独立运行20次，仿真实验后目标函数结果如表2所示。图8(a)为各算法的最优三维航迹图，图8(b)为等高线俯视图，图8(c)为目标函数收敛图。

**表2 单UAV航迹规划仿真结果**

**Table 2 Simulation results of single UAV track planning**

| 算法 | 算法平均耗时/s | 最优值 | 最差值 | 平均值 | 标准差 |
|---|---|---|---|---|---|
| PSO | **35.635 4** | 80.824 0 | 105.188 7 | 88.608 0 | 9.129 1 |
| DE | 37.275 9 | 80.620 3 | 104.277 9 | 87.412 7 | 8.164 2 |
| GWO | 38.883 7 | 80.812 4 | 105.188 7 | 86.425 2 | 7.908 0 |
| SSA | 39.302 1 | 79.625 2 | 107.175 7 | 92.532 5 | 9.319 7 |
| GPSSA | 40.165 2 | **76.098 8** | **89.349 8** | **82.408 4** | **3.687 2** |




(a) 最优三维航迹图

(b) 等高线俯视图

(c) 目标函数收敛图

图8 单UAV航迹规划仿真结果

Fig. 8 Simulation results of single UAV track planning

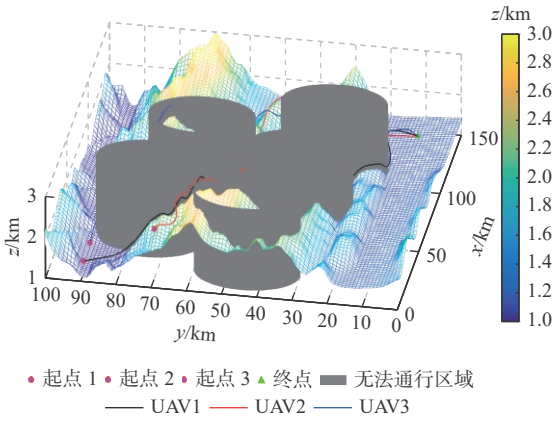
从图8可以看出，GPSSA能够完美地避开威胁区域，快速摆脱约束条件的约束，并且规划出的路线更加平滑。DE、GWO和SSA在经过一定迭代次数后陷入局部最优无法跳出，PSO尽管没有陷入局部最优但是收敛速度很慢，时效性较差，而GPSSA收敛速度极快且找到了相较于其他算法更优的解。图8(c)中虚线$k_1$, $k_2$, $k_3$, $k_4$与横坐标轴的交点为GPSSA迭代60次所耗费的时间内，根据各算法与GPSSA平均耗时的比值，得到的各算法的迭代次数；其与收敛曲线的交点表示相同时间(这里表示取GPSSA迭代60次耗费时间)内，其他对比算法的目标函数值，可见相同时间内，GPSSA仍然表现出较好的寻优性能，能够寻找到较其他算法更优的解。

表2为上述5种算法分别独立进行单UAV航迹规划20次后目标函数的结果。从表2的结果来看，GPSSA的4项指标都是优于PSO、DE、GWO和SSA的，表明其具有很强的寻优能力和稳定性，且相较于SSA算法性能有较大提升。尽管PSO是每一次迭代平均耗时最短的，而GPSSA耗时是最长的，GPSSA增加了时间消耗但换取了大幅算法性能的提升。综上所述，GPSSA能够在较少迭代次数内快速避开威胁区域的约束完成航迹的规划，且规划线路较其他对比算法更短，同时收敛速度、寻优精度和算法鲁棒性比其他算法更优。

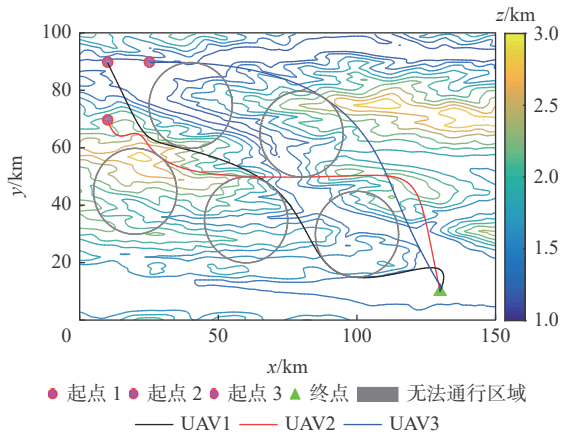
### 3.6 多UAV航迹规划仿真实验

本文选取三架UAV进行仿真实验，每架UAV的备选航迹组为20条。图9(a)为协同航迹规划三维路线图，图9(b)为等高线俯视图，图9(c)为三架UAV的目标函数收敛图。本文将航迹均分为100段，并记录每一段其飞行高度与所在地形的高度差，如图9(d)所示。最后本文记录了偏转角的变化情况，同上也是划分为100段，如图9(e)所示。表3分别为SSA、LASSA[20]和GPSSA的单UAV航迹规划层UAV目标函数的结果。表4分别为SSA、LASSA和GPSSA的多UAV协同航迹规划层协同目标函数的结果。

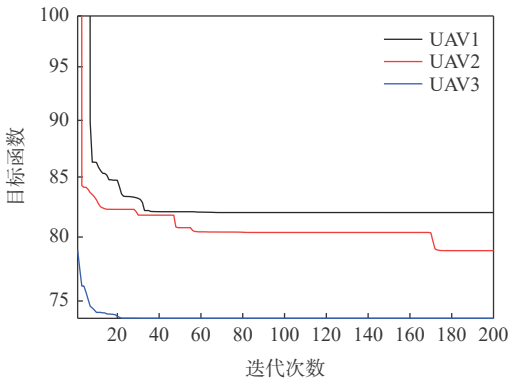
从图9(a)和图9(b)可见，GPSSA在多UAV协同规划的情况下依然可以避开威胁区域，摆脱约束以相对于地形较低的高度平滑飞行。但可见由于协同空间和时间的约束，各UAV的航迹并不都是最优的。从图9(c)可见GPSSA的收敛速度依然很快，且能不断跳出局部最优向更优解收敛。从图9(d)和图9(e)可见，偏转角和与地形的高度差的变化幅度较小，易知同一航迹点下偏转角大于水平转弯角和爬升角，而偏转角远的变化远小于设置的最大水



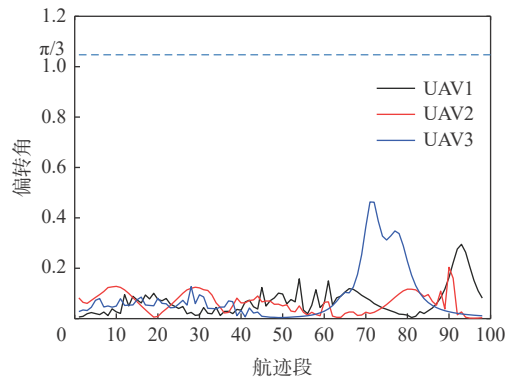

(a) 协同航迹规划三维路线图



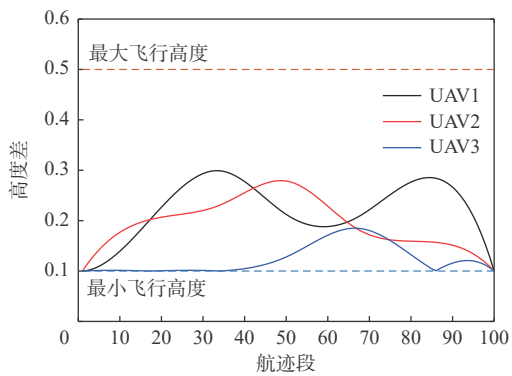

(b) 等高线俯视图




(c) 目标函数收敛图




(d) 偏转角变化情况




(e) 高度差变化情况

图 9　多 UAV 协同航迹规划仿真结果

Fig. 9　Simulation results of multi-UAV cooperative track planning

平转弯角和爬升角 60° 表明所规划的航迹具有较好的平滑性。

**表 3　单 UAV 航迹规划层结果**

**Table 3　Results of single UAV track planning layer**

| 算法 | UAV | 最优值 | 最差值 | 平均值 | 标准差 |
|---|---|---|---|---|---|
| SSA | UAV-1 | 112.675 0 | 118.649 5 | 115.701 5 | 2.439 7 |
| | UAV-2 | 71.428 5 | 78.462 5 | **74.902 2** | 2.872 3 |
| | UAV-3 | 75.642 5 | 82.067 3 | 79.826 8 | 2.961 2 |
| LASSA | UAV-1 | 83.123 9 | 110.111 0 | 96.617 5 | 11.017 0 |
| | UAV-2 | 75.792 2 | 84.845 5 | 80.318 9 | 3.696 0 |
| | UAV-3 | 78.402 9 | 88.544 8 | 83.473 9 | 4.140 4 |
| GPSSA | UAV-1 | 82.193 5 | 92.160 2 | **87.557 0** | 4.104 2 |
| | UAV-2 | 79.716 3 | 83.056 2 | 81.801 5 | 1.484 6 |
| | UAV-3 | 71.292 6 | 87.313 1 | **76.845 8** | 7.406 1 |

由表 3 可以看出, 3 种算法都能够在不同的起点下较为稳定地为各 UAV 规划出满足约束的备选航迹组, 且 GPSSA 在 UAV-1、UAV-3 中都得到了较 SSA 和 LASSA 更优的备选航迹组。表 4 是在表 3 的基础上得到的多 UAV 协同规划方案, 相较于 SSA 和 LASSA, GPSSA 表现优越, 其协同代价为 399.90, 且各 UAV 可以在 [163.78 s, 284.04 s] 的时间范围内到达终点。

可以看出每架 UAV 选取的航迹并不是备选航迹组中最优的, 表明协同航迹规划方案并不一定是由各 UAV 的备选航迹组中最优航迹组成, 而是选择满足协同要求的相对较优的航迹执行任务。综

表4 多UAV协同航迹规划层结果

Table 4 Results of multi-UAV cooperative track planning layer

| 算法 | UAV | 航迹代价 | 航迹长度/km | 到达时间/s | 协同到达时间/s | 协同代价 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SSA | UAV-1 | 115.78 | 215.32 | [215.32,430.64] | [215.32,297.18] | 487.98 |
| | UAV-2 | 74.82 | 148.59 | [148.59,297.18] | | |
| | UAV-3 | 82.07 | 160.35 | [160.35,320.71] | | |
| LASSA | UAV-1 | 83.12 | 163.57 | [163.57,327.14] | [163.57,300.34] | 411.03 |
| | UAV-2 | 75.79 | 150.17 | [150.17,300.34] | | |
| | UAV-3 | 88.54 | 157.12 | [157.12,314.24] | | |
| GPSSA | UAV-1 | 82.19 | 163.78 | [163.78,327.56] | [163.78,284.04] | **399.90** |
| | UAV-2 | 82.63 | 162.86 | [162.86,325.73] | | |
| | UAV-3 | 71.29 | 142.02 | [142.02,284.04] | | |

上，在复杂的计算环境下，GPSSA表现较好，其性能优于SSA和LASSA算法，能快速规划出较优且稳定平滑的航迹，验证了GPSSA良好的算法性能，为解决无人机航迹规划问题提供了一个新的方法。

## 4 结 论

为克服麻雀搜索算法收敛速度快但易陷入局部最优，原有机制快速丢失种群多样性，且跳出局部最优能力差的缺陷。本文根据麻雀生物特性，在保留原算法快速收敛的优点的同时提出博弈夺食机制使得搜索更加灵活，增强算法的种群多样性；利用麻雀“自毁”的特性，提出自毁机制，帮助算法跳出局部最优。

针对多UAV协同航迹规划复杂问题对时间的高要求性，引入GPSSA算法，并利用分层规划思想建立相关模型。单UAV航迹规划结果表明GPSSA算法能够快速收敛的同时能够稳定寻找到相较于SSA、PSO、GWO、DE更优的解。多UAV协同航迹规划结果表明GPSSA能够适应更复杂的优化问题，表现优于SSA和LASSA，有助于UAV航迹静态规划具有更短的时间、更优的规划路径以及更好的稳定性。

## 参考文献（References）


[1] 贾高伟, 王建峰. 无人机集群任务规划方法研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 99-111.
JIA G W, WANG J F. Research review of UAV swarm mission planning method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 99-111(in Chinese).

[2] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Randomized kinodynamic planning[J]. International Journal of Robotics Research, 2001, 20(5): 378-400.

[3] ZHONG X Y, TIAN J, HU H S, et al. Hybrid path planning based on safe A* algorithm and adaptive window approach for mobile robot in large-scale dynamic environment[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 99(1): 65-77.

[4] ALMURIB H A F, NATHAN P T, KUMAR T N. Control and path planning of quadrotor aerial vehicles for search and rescue[C]// SICE Annual Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 700-705.

[5] 王伟, 王华. 基于约束人工势场法的弹载飞行器实时避障航迹规划[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1738-1743.
WANG W, WANG H. Real-time obstacle avoidance trajectory planning for missile borne air vehicle based on constrained artificial potential field method[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(7): 1738-1743(in Chinese).

[6] CHEN Y B, LUO G C, MEI Y S, et al. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(6): 1407-1420.

[7] SUN J Y, TANG J, LAO S Y. Collision avoidance for cooperative UAVs with optimized artificial potential field algorithm[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18382-18390.

[8] GALVEZ R L, DADIOS E P, BANDALA A A. Path planning for quadrotor UAV using genetic algorithm[C]// 2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-6.

[9] WANG X F, ZHAO H, HAN T, et al. A grey wolf optimizer using Gaussian estimation of distribution and its application in the multi-UAV multi-target urban tracking problem[J]. Applied Soft Computing, 2019, 78: 240-260.

[10] ZHANG C, ZHEN Z Y, WANG D B, et al. UAV path planning method based on ant colony optimization[C]// 2010 Chinese Control and Decision Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 3790-3792.

[11] PHUNG M D, HA Q P. Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization[J]. Applied Soft Computing, 2021, 107: 107376.

[12] PUENTE-CASTRO A, RIVERO D, PAZOS A, et al. A review of artificial intelligence applied to path planning in UAV swarms[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(1): 153-170.

[13] BAYERLEIN H, THEILE M, CACCAMO M, et al. Multi-UAV path planning for wireless data harvesting with deep reinforcement learning[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, 2: 1171-1187.

[14] NGUYEN K K, DUONG T Q, DO-DUY T, et al. 3D UAV trajectory and data collection optimisation via deep reinforcement learn-

ing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(4): 2358-2371.

[15] SHORAKAEI H, VAHDANI M, IMANI B, et al. Optimal cooperative path planning of unmanned aerial vehicles by a parallel genetic algorithm[J]. Robotica, 2016, 34(4): 823-836.

[16] PEHLIVANOGLU Y V, PEHLIVANOGLU P. An enhanced genetic algorithm for path planning of autonomous UAV in target coverage problems[J]. Applied Soft Computing, 2021, 112: 107796.

[17] SAEED R A, OMRI M, ABDEL-KHALEK S, et al. Optimal path planning for drones based on swarm intelligence algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(12): 10133-10155.

[18] CHOI Y J, RAHIM T, RAMATRYANA I N A, et al. Improved CNN-based path planning for stairs climbing in autonomous UAV with LiDAR sensor[C]// 2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.

[19] ZHANG D F, DUAN H B. Social-class pigeon-inspired optimization and time stamp segmentation for multi-UAV cooperative path planning[J]. Neurocomputing, 2018, 313: 229-246.

[20] 韩统, 汤安迪, 周欢, 等. 基于 LASSA 算法的多无人机协同航迹规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(1): 233-241.
HAN T, TANG A D, ZHOU H, et al. Multi UAV cooperative path planning method based on Lassa algorithm[J] Systems Engineering and Electronic Technology, 2022, 44 (1): 233-241(in Chinese).

[21] JAMSHIDI V, NEKOUKAR V, REFAN M H. Real time UAV path planning by parallel grey wolf optimization with align coefficient on CAN bus[J]. Cluster Computing, 2021, 24(3): 2495-2509.

[22] HE W J, QI X G, LIU L F. A novel hybrid particle swarm optimization for multi-UAV cooperate path planning[J]. Applied Intelligence, 2021, 51(10): 7350-7364.

[23] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.

[24] 闫少强, 杨萍, 朱东林, 等. 基于佳点集的改进麻雀搜索算法[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-13 [2022-03-14]. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0730.
YAN S Q, YANG P, ZHU D L, et al. Improved sparrow search algorithm based on good point set[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: 1-13 [2022-03-14]. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0730(in Chinese).

[25] YAN S Q, YANG P, ZHU D L, et al. Improved sparrow search algorithm based on iterative local search[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021: 6860503.

[26] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Press, 1995: 1942-1948.

[27] PRICE K V. Differential evolution[M]// Intelligent Systems Reference Library. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 187-214.

[28] EMARY E, ZAWBAA H M, HASSANIEN A E. Binary grey wolf optimization approaches for feature selection[J]. Neurocomputing, 2016, 172: 371-381.

# Multi-UAV trajectory planning for complex terrain based on GPSSA algorithm

YAN Shaoqiang，YANG Ping*，LIU Weidong，LI Xinqi，LEI Jian，ZHAO Chaoyue

(School of Combat Support，Rocket Military Engineering University，Xi'an 710025，China)

**Abstract**：A multi-UAV cooperative path planning approach based on the self-destruction mechanism and game predatory sparrow search algorithm (GPSSA) is suggested to address the issues of high time requirement and problematic convergence. Firstly, a single UAV path planning model and a multi-UAV cooperative path planning model are established respectively by using the hierarchical planning idea, which is transformed into optimization problems. Then, the game predatory mechanism and self-destruction mechanism is proposed to improve the sparrow algorithm, prevent it from rapidly losing the diversity of the population, enhance the ability of the original algorithm to escape the attraction of local optimum, and make the search mode of the algorithm more flexible. Finally, the improved sparrow algorithm is used to solve the model. The outcomes of the simulation demonstrate how fast and accurately the GPSSA method can plan a path that satisfies the requirements, while also having superior algorithm robustness, convergence speed, and optimization accuracy.

**Keywords**：multi-UAV cooperative path planning; sparrow search algorithm; game predatory mechanism; self destruction mechanism

**Received**：2022-12-12；**Accepted**：2023-03-24；**Published Online**：2023-04-12 10：59

**URL**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230411.1751.003

**Foundation item**：National Natural Science Foundation of China (61703411)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
**DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0993

# 基于高次时频谱特征的LPI雷达信号识别

李世通[1]，金小萍[1,*]，孙杰[2]，汪晓锋[1]

(1. 中国计量大学 信息工程学院 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室，杭州 310000；
2. 浙江省计量科学研究院，杭州 310000)

**摘 要**：针对传统LPI雷达信号识别算法在低信噪比下识别率较低的问题，提出了一种基于高次时频特征的雷达信号识别算法。利用时频变换得到雷达信号的时频分布，时频谱做幂次化计算得到信号的高次时频图像，提取时频图像的灰度梯度共生矩阵和伪Zernike特征并组成联合特征向量，通过支持向量机实现雷达信号的分类识别。实验结果表明：在信噪比为−6 dB时，所提算法对8种典型雷达信号的整体识别准确率能达到95%以上。

**关 键 词**：雷达信号识别；时频变换；高次时频；特征提取；支持向量机
**中图分类号**：TN791
**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0314-07

雷达信号识别是电子战的关键组成部分，随着现代战场电磁环境日益复杂化，新型体制雷达信号得到了大规模应用，其中低截获概率(low probability of intercept, LPI)雷达信号由于其被截获的概率较低而受到更多关注[1-2]。如何快速有效地识别出LPI雷达信号具有重要的现实意义，雷达信号的时频图像中包含许多信号脉内特征，可以用来扩展信号识别的参数空间[3-4]，因此对时频图像的研究成为LPI雷达信号精准识别的重要方向。

许多研究者利用数字图像处理技术将雷达信号识别问题转移成为对信号时频图像的识别上，并取得了一定的成果。文献[5]提出了基于CWD图像的雷达信号识别算法，把信号识别转化为图像识别问题，通过提取二值图像中心距和伪Zernike矩作为识别特征，在信噪比为−3 dB时整体识别率能达到92%，但是低信噪比环境下整体识别率较低。文献[6]提出了一种利用改进的局部二值模式算子(local binary pattern variance, LBPV)提取Choi-Williams分布(Choi-Williams distribution, CWD)时频图像纹理特征的雷达信号识别算法，在信噪比为−2 dB时信号整体识别率为95%，但是低信噪比下随着CWD时频图像噪声成分增多会导致LBPV算子提取特征的有效性降低。文献[7]以平滑伪Wigner-Ville分布(smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD)时频图像为基础，提出了基于SPWVD时频图像特征融合的雷达信号识别算法，在信噪比为5 dB时，整体识别率可以达到100%，但是随着信噪比降低，信号整体识别率下降较快。文献[8]提出了基于多重同步压缩变换(multi synchro squeezing transform, MSST)的雷达信号识别算法，即在信号短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)的基础上对频率进行多次压缩，达到增强信号时频聚集性的目的，在信噪比为−2 dB时整体识别率大于96.5%，但是多次压缩会增加算法复杂度。文献[9]定义了信号$k$次方谱即信号$k$次方后的频谱。文献[10]提出了基于信号$k$次方频谱对称Holder系数作为脉内特征的算法，但是低信噪比下信号的频谱受噪声干扰明显，整体识别率较低。随着人工智能的发展，许多端到端的深度学习模型也相继被提出，例如卷积神经网络、栈式自编码器、深度置信网络

**收稿日期**：2022-12-13；**录用日期**：2023-03-17；**网络出版时间**：2023-04-03 14:14
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230403.1314.002
**基金项目**：浙江省自然科学基金(LQ20F020021)；浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室开放式项目(2019KF0003)
* **通信作者**. E-mail：jxp1023@cjlu.edu.cn

*引用格式：李世通，金小萍，孙杰，等. 基于高次时频谱特征的LPI雷达信号识别[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：314-320.*
*LI S T，JIN X P，SUN J，et al. LPI radar signal recognition based on high-order time-frequency spectrum features[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：314-320 (in Chinese).*

等; 这些方法通常比基于特征学习的机器学习方法具有更好的识别性能[11], 但是由于深度学习的“黑盒子”属性, 其学习的特征难以理解且往往具有较高的复杂度。

本文针对低信噪比下传统雷达信号识别方法准确率较低的问题, 提出了一种基于幂次化时频谱的识别算法。首先, 对雷达信号做 CWD 时频变换并幂次化处理, 得到高次时频图像; 然后, 对时频图像预处理抑制噪声干扰; 最后提取高次时频图像特征, 并利用支持向量机(support vector machine, SVM)实现对特征向量的分类识别。

## 1　调制信号特征提取

雷达探测信号通常为非平稳信号, 本文选择了 8 种典型雷达信号作为研究对象, 分别是 LFM、NLFM、BPSK、COSTAS、Frank、LFM/BPSK、LFM/FSK 和 FSK/BPSK 信号。针对非平稳雷达信号, 时频分析法通过构建时间和频率的联合分布函数, 将雷达信号从一维时域映射到二维的时频面, 从而揭示雷达辐射源信号的脉内特征信息。

### 1.1　雷达信号时频变换

#### 1.1.1　CWD 时频变换

CWD 是由 Choi 和 Williams 将指数型核函数($\phi(\tau,\nu)=\mathrm{e}^{-(\tau^2\nu^2/\sigma)}$)引入到 Cohen 类中的, 其具有较高的时频分辨率且能够有效抑制交叉项的影响。设雷达信号为$s(t)$, 则 CWD 的数学表达式为

$$\mathrm{CWD}_s(t,\omega)=\iint\sqrt{\frac{\sigma}{4\pi\tau^2}}\mathrm{e}^{-\frac{\sigma(t-u)^2}{4\tau^2}}s\left(u+\frac{\tau}{2}\right)\cdot s^*\left(u-\frac{\tau}{2}\right)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\tau}\mathrm{d}u\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

式中: $\omega$为角频率变量; $\tau$为时间延迟; $u$为时间变量; $\sigma$为衰减因子且为正值, 与交叉项的幅值呈比例关系, $\sigma$值较大时, CWD 时频分辨率越好但交叉项也最严重。选择合适的$\sigma$值可以平衡时频分辨率和交叉项干扰, 通常$\sigma$取 0.1 到 10 之间, 本文选择$\sigma=1$。图 1 为信噪比−6 dB 时 8 类信号的 CWD 时频分布。可见, 不同调制方式的雷达信号时频图像存在良好的分类属性。

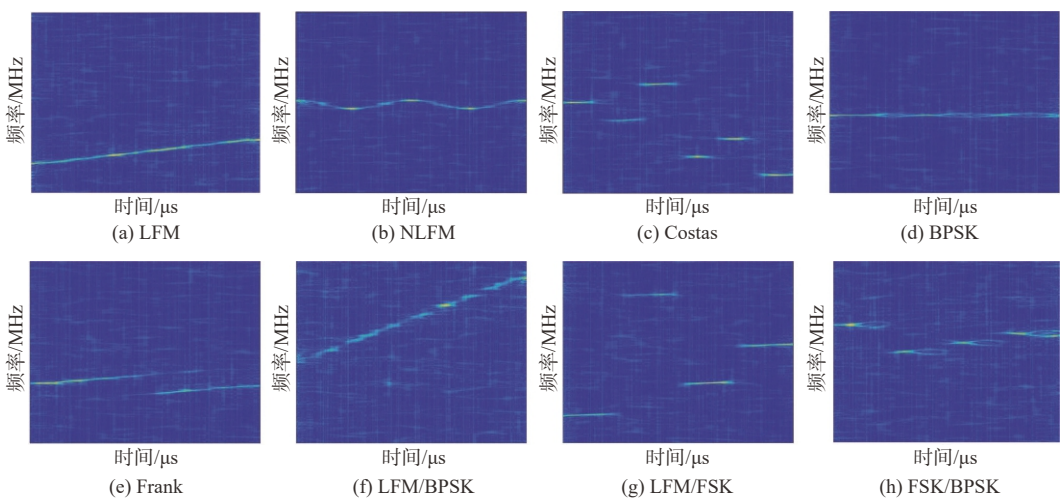



图 1　−6 dB 下 8 种雷达信号 CWD 时频图像

Fig. 1　CWD time-frequency images of eight radar signals with SNR of −6 dB

#### 1.1.2　高次时频变换

在信噪比条件较低时, 大量存在的噪声会加剧从时频图像中提取有效特征的难度。为了抑制噪声的影响, 对 CWD 的时频谱做 $k$ 次幂处理可以提高信号在时频图像中的比重, 达到信号增强的作用。离散时间序列的 CWD 离散形式为

$$\mathrm{CWD}[n,m]_s=\sum_{l=-\infty}^{+\infty}\sum_{u=-\infty}^{+\infty}\sqrt{\frac{\sigma}{4\pi l^2}}\mathrm{e}^{\left[-\frac{\sigma(n-u)}{4l^2}\right]}\cdot s(n+l)s^*(n-l)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}lm} \tag{2}$$

CWD 的谱图的计算公式为

$$\mathrm{SCWD}[n,m]=|\mathrm{CWD}[n,m]|_s^2 \tag{3}$$

再对 CWD 的谱图做$k$次幂计算, 则得到了对应幂次的 CWD 时频变换, 公式为

$$\mathrm{SPCWD}[n,m]=\mathrm{SCWD}[n,m]_s^k \tag{4}$$

在式(4)中, 以$k=2$为例, 此时即为信号的幂次方 CWD 分布(power Choi-Williams distribution, PCWD)。图 2 给出了信噪比为−6 dB 时上述 8 类信号的 PCWD 时频图像。可以看出, 时频图像中的背景变得很清晰, 原因是当前信噪比下信号的时频分量矩阵中信号有效信息成分占比要大于噪声成分, 在对矩阵中的数据幂次方化后, 两者数据的差异更加明显, 以此达到增强图像质量的目的。

### 1.2　高次时频图像预处理

雷达辐射源信号的时频图像, 图像尺寸较大特

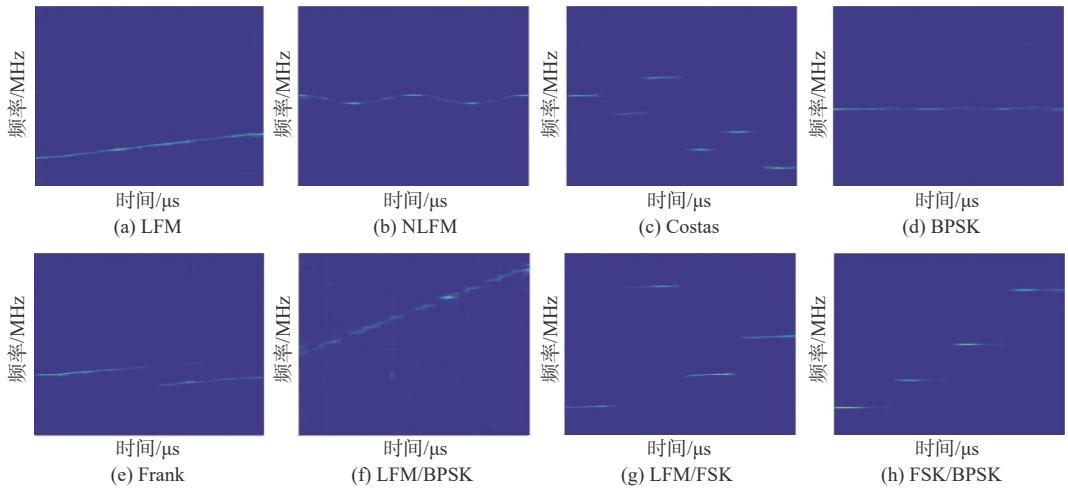



图2 −6 dB下8种雷达信号PCWD时频图像

Fig. 2 PCWD time-frequency images of eight radar signals with SNR of −6 dB

征参数较多，若直接进行训练会导致网络输入的维度过大，影响识别的结果，因此需要对时频图像进行预处理。以−4 dB环境下LFM信号的PCWD时频图像为例，预处理流程如图3所示。将3通道的时频图像灰度化，对图像二值化进一步抑制噪声和降低计算量，最后，通过双三次插值将时频图像调整为224×224。

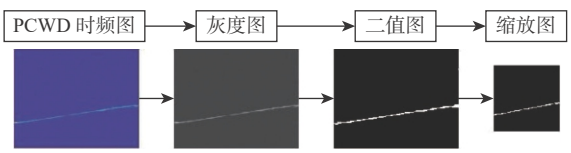



图3 时频图像预处理流程

Fig. 3 Time-frequency image preprocessing

### 1.3 纹理特征提取

灰度梯度共生矩阵(gray level-gradient co-occurrence matrix, GLGCM)中灰度信息反映了图像上的明暗程度，梯度信息反映了图像边缘轮廓，因此GLGCM可以更好地反映图像纹理的微观特征和变化[12]。

GLGCM的元素数$H(i,j)$定义为在归一化的灰度图像$F(x,y)$和归一化的梯度图像$G(x,y)$中共同具有灰度为$i$和梯度为$j$的总像素数[13]。设一幅大小为$X\times Y$的图像灰度矩阵表示为$f(x,y)$，梯度矩阵表示为$g(x,y)$，归一化的灰度图像和梯度归一化图像分别为[14]

$$F(x,y)=\mathrm{INT}\left[f(x,y)\cdot N_f/f_{\max}\right] \tag{5}$$

$$G(x,y)=\mathrm{INT}\left[g(x,y)\cdot N_g/g_{\max}\right] \tag{6}$$

式中：$N_f$和$N_g$分别为规定的最大灰度级和最大梯度级；$f_{\max}$和$g_{\max}$分别为灰度矩阵和梯度矩阵的最大值。

在正规化后的灰度和梯度图像中，计算同时使得$F(x,y)=i,G(x,y)=j$的像素点数，即得到灰度梯度共生矩阵$H(i,j)$的第$(i,j)$个元素值。

$$\widehat{H}=H(i,j)\Big/\left[\sum_{i=1}^{N_f}\sum_{j=1}^{N_g}H(i,j)\right] \tag{7}$$

本文选取了GLGCM的15个统计特征，包括能量($T_1$)、平均灰度值($T_2$)、平均梯度值($T_3$)、相关性($T_4$)、小梯度优势($T_5$)、大梯度优势($T_6$)、灰度分布不均匀性($T_7$)、梯度分布不均匀性($T_8$)、灰度标准差($T_9$)、梯度标准差($T_{10}$)、灰度熵($T_{11}$)、梯度熵($T_{12}$)、混合熵($T_{13}$)、差分矩阵($T_{14}$)和逆差分矩($T_{15}$)。高次时频图像的纹理特征向量由15个GLGCM统计特征组成。

$$\begin{aligned}T1=[&T_1,T_2,T_3,T_4,T_5,T_6,T_7,T_8,\\&T_9,T_{10},T_{11},T_{12},T_{13},T_{14},T_{15}]\end{aligned} \tag{8}$$

### 1.4 形状特征提取

Zernike矩是一种积分算子，通过多阶表达式描述目标的形状特征，具有很强的旋转不变性和噪声鲁棒性[15]，在雷达信号识别领域应用非常广泛。

一幅连续图像$f(x,y)$的$n$阶$m$次Zernike矩定义为

$$Z_{n,m}=\frac{(n+1)}{\pi}\iint\limits_{x^2+y^2\leqslant 1}f(x,y)W_{n,m}^{*}(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{9}$$

式中：$n$为正整数或零，$m$为整数，并且$|n|\leqslant m$。另外$W_{n,m}^{*}(x,y)$用极坐标表示为

$$W_{n,m}(\rho\cos\theta,\rho\sin\theta)=S_{n,m}(\rho)\exp(im\theta) \tag{10}$$

其中：

$$S_{n,m}(\rho)=\sum_{s=0}^{n-|m|}\frac{(-1)^s(2n+1-s)!\rho^{n-s}}{s!(n-|m|-s)!(n+|m|+1-s)!} \tag{11}$$

为了获得旋转不变性并减少Zernike矩的动态范围，令$\widehat{Z}=\ln|Z_{n,m}|$。本文选取$\widehat{Z}_{20},\widehat{Z}_{30},\widehat{Z}_{22},\widehat{Z}_{31},\widehat{Z}_{32},\widehat{Z}_{33},\widehat{Z}_{43}$构成一组7维的雷达信号形状特征向量。

## 2　分类器

SVM 是机器学习领域常用的方法, 其以监督学习的方式对数据进行分类, 旨在通过寻找超平面将无法区分的低维数据映射到高维空间进行分割[16-17]。在处理多分类问题时, 本文选择分类效果较好的一对一(one-against-one, OAO)法, 即在所有 $N$ 类之间的任意两个类中构造二分类器, 对于本文的 8 种雷达信号, 共有 28 个二分类器 SVM。

核函数选取具有计算简单、训练速度快和较好收敛性的径向基核函数(高斯核函数)。另外使用交叉验证的方法选取最优的 SVM 参数。设定惩罚因子 $C$ 和核函数参数 $g$ 的取值范围为 $[2^{-5},2^{5}]$, 步长为 0.2; 在误差阈值为 0.01 时终止训练; 为避免过拟合, 交叉验证数值为 5; 将每一组 $(C, g)$ 代入训练数据和测试数据中进行拟合验证, 选取结果最优的一组参数。

## 3　算法识别流程

本文构建的基于高次时频图像纹理特征和形状特征联合的雷达辐射源信号识别算法, 流程如图 4 所示。具体步骤如下:

1) 雷达辐射源信号做时频变换, 对信号的 CWD 时频谱幂次化处理, 得到对应的高次时频图像。

2) 对高次时频图像做预处理, 抑制噪声干扰并降低特征参数量。

3) 提取图像的纹理特征和形状特征, 组成 22 维的联合特征向量。

4) 利用支持向量机实现对雷达信号的自动识别。

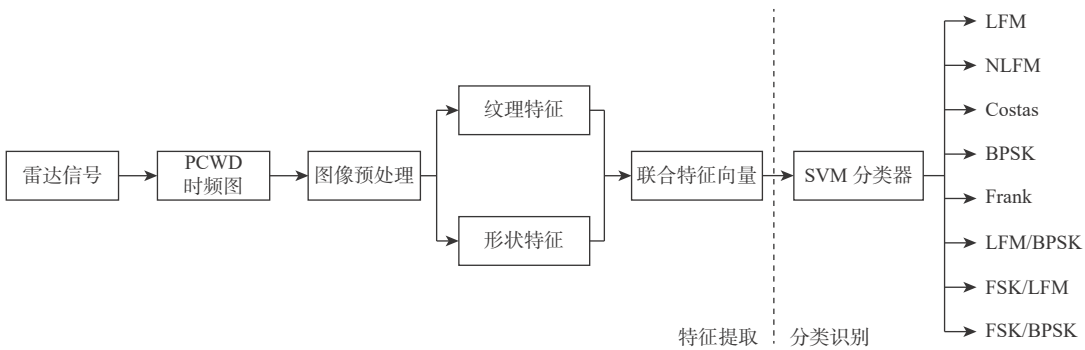



图 4　算法流程

Fig. 4　Flow chart of algorithm

## 4　仿真结果与分析

为验证本文算法的有效性, 选取了涉及调频、调相和复合调制中 LFM、NLFM、Costas、BPSK、Frank、LFM/BPSK、LFM/FSK 和 FSK/BPSK 共 8 种雷达调制信号进行实验。对于不同调制类型雷达信号, 仿真参数也不同, 详细参数设置如表 1 所示。参数采用基于采样频率 $f_s$ 的均匀分布 $U(\cdot)$ 进行表示, 其中 $U(1/16,1/8)$ 表示参数范围在 $[f_s/16, f_s/8]$ 的随机数; 统一取信号脉宽 $T = 6\ \mu s$, 采样频率 $f_s = 200$ MHz。本次实验是在 MATLAB R2019a 平台下完成。

### 4.1　识别准确率验证

在信噪比−12～8 dB 的区间内, 步进选取 2 dB。在每个信噪比取值下, 每种调制信号生成 250 个样本, 其中 200 个作为训练样本, 其余 50 个作为测试集。图 5 和图 6 分别给出了 8 种信号的总体识别率和每种调制信号的单一识别率。

从图 5 中可以看出, 在信噪比为−6 dB 时 8 种雷达信号整体识别高于 95%, 在信噪比为−8 dB 时准确率可以达到 87%。即使信噪比低至−10 dB 依然有接近 70% 的总体识别率。

**表 1　仿真信号参数设置**

**Table 1　Simulation signal parameter setting**

| 雷达信号 | 仿真参数 | 取值范围 |
|---|---|---|
| LFM, NLFM | 起始频率/Hz | $U(1/16,1/8)$ |
| | 带宽/Hz | $U(1/16,1/8)$ |
| BPSK | 巴克码长度/个 | {5,7,11,13} |
| | 载波频率/Hz | $U(1/8,1/4)$ |
| Frank | 步进频率/Hz | {4,8} |
| | 载波频率/Hz | $U(1/8,1/4)$ |
| Costas | 调频序列/Hz | [3,5] |
| | 基准频率/Hz | $U(1/24,1/20)$ |
| LFM/BPSK | 基准频率/Hz | $U(1/24,1/20)$ |
| | 带宽/Hz | $U(1/16,1/8)$ |
| LFM/FSK | 巴克码长度/个 | {5,7,11,13} |
| | 基准频率/Hz | $U(1/24,1/20)$ |
| | 子码带宽/Hz | $U(1/20,1/10)$ |
| FSK/BPSK | 巴克码长度/个 | {5,7,11,13} |
| | 基准频率/Hz | $U(1/24,1/20)$ |

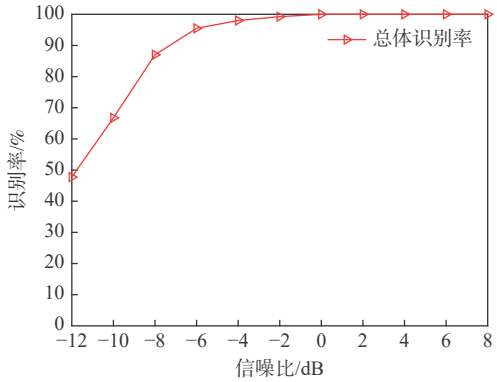



图 5 总体识别率曲线

Fig. 5 Overall recognition rate curve

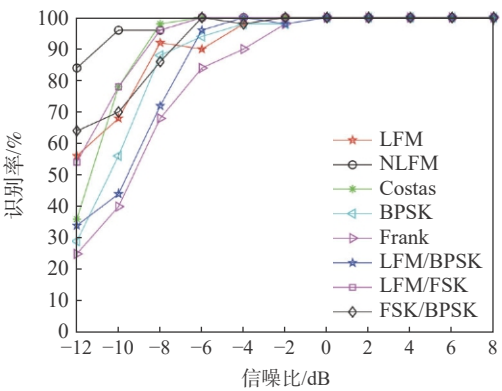



图 6 8 种雷达信号识别率曲线

Fig. 6 Recognition rate curve of eight radar signals

由图 6 可以看出在−8 dB 下，LFM、Costas 和 LFM/FSK 信号的识别率基本不受信噪比影响，能够保持在 90% 以上的识别率，表明了此类信号具有良好的抗造性能。在−12 dB 的环境下，多数信号的识别率低于 70%，这是由于信噪比过低，信号有效信息被淹没在噪声中。

### 4.2 抗混淆性能验证

选定信噪比范围为−12～8 dB，步进 2 dB。在每个信噪比取值下，每种调制信号生成 30 个样本，其中 20 个作为训练样本，其余 10 个作为测试。测试结果的混淆矩阵如图 7 所示。

在图 7 中，可以看到 8 种信号的单一识别率均高于 80%，其中有 4 种的识别率高于 90%，且信号整体平均识别率达到 89.38%。实验结果表明该算法在复杂信噪比下具有良好的抗混淆性能。

### 4.3 对比实验

为进一步验证利用 PCWD 时频图像的识别性能，在同等条件下与 CWD 时频图、SPWVD 时频图进行对比，同时与 LBPV 法[6]、MSST[8] 和 Holder 系数法[10] 进行对比实验，实验结果如图 8 所示。

图 8 的实验结果表明，在低信噪比环境下基于 PCWD 的时频图像要比使用传统 CWD 时频图像进

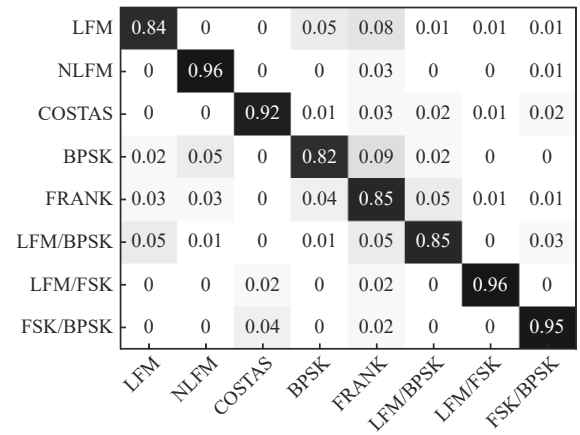



图 7 分类结果的混淆矩阵

Fig. 7 Confusion matrix for classification results

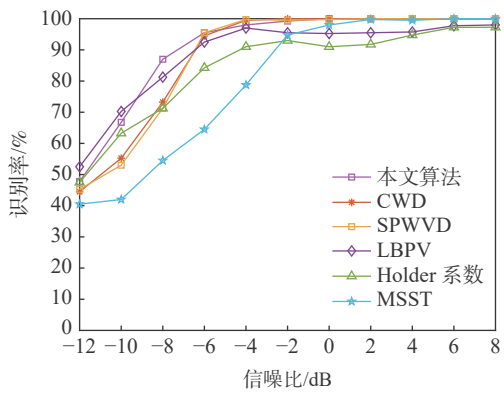



图 8 不同识别算法对比

Fig. 8 Comparison of different recognition algorithms

行雷达信号识别具有更好的识别效果，这是因为在低信噪比下对时频谱幂次方化能够比较好地抑制噪声。且本文使用的联合特征向量在一定的信噪比环境下识别率上也要优于单一的 LBPV 算子，说明了双通道的特征提取可以更加有效地表征信号的脉内信息；Holder 系数法虽然也能提取雷达信号的特征，但是由于高次频谱易受到噪声的影响，所以总体识别率不是很高。

## 5 结 论

针对低信噪比下 LPI 雷达信号识别准确率较低的问题，提出了一种基于高次时频谱特征的雷达信号识别方法。该方法首先为了加强信号的时频特征表征能力，对 CWD 时频谱进行了增强处理，然后分别提取高次时频图像的纹理特征和形状特征，最后构建了联合特征向量，并通过 SVM 实现对雷达信号的有效识别。仿真实验结果表明，本方法在低信噪比下对典型的 LPI 雷达信号具有较高的识别率，同时具备良好的抗混淆性。

本文在抑制噪声的同时会丢失信号部分信息，因此如何更加有效地对时频图像进行增强将是下

一步的研究重点。

## 参考文献（References）


[1] 孙艺聪, 田润澜, 董会旭, 等. 基于 SAMME+ResNet 的多相码信号识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(10): 2239-2245.
SUN Y C, TIAN R L, DONG H X, et al. Polyphase code signal recognition method based on SAMME+ResNet[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(10): 2239-2245(in Chinese).

[2] 徐卓君, 杨雯婷, 杨承志, 等. 雷达脉内调制识别的改进残差神经网络算法[J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021, 51(4): 1454-1460.
XU Z J, YANG W T, YANG C Z, et al. Improved residual neural network algorithm for radar intrapulse modulation classification[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(4): 1454-1460(in Chinese).

[3] 徐帅, 刘鲁涛. P-Net 框架下的小样本雷达信号识别算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(5): 739-744.
XU S, LIU L T. Small sample radar signal recognition algorithm under the P-Net framework[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(5): 739-744(in Chinese).

[4] 万海东, 蔡伟, 刘则林. 基于图像化特征的雷达信号个体识别与工作模式识别方法[J]. 空天预警研究学报, 2022, 36(2): 79-84.
WAN H D, CAI W, LIU Z L. Method of individual recognition and operating mode recognition of radar signal based on image features[J]. Journal of Air & Space Early Warning Research, 2022, 36(2): 79-84(in Chinese).

[5] 白航, 赵拥军, 胡德秀, 等. 基于 Choi-Williams 时频图像特征的雷达辐射源识别[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(4): 480-485.
BAI H, ZHAO Y J, HU D X, et al. Radar emitter recognition based on image feature of Choi-Williams time-frequency distribution[J]. Data Acquisition and Processing, 2012, 27(4): 480-485(in Chinese).

[6] 孟凡杰, 唐宏, 王义哲, 等. 基于时频图像纹理特征的雷达辐射源信号识别[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(3): 152-156.
MENG F J, TANG H, WANG Y Z, et al. Radar emitter signal recognition based on texture feature of time-frequency image[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 37(3): 152-156(in Chinese).

[7] 刘歌, 张国毅, 汪洪艳. 基于特征融合的雷达信号脉内调制类型识别[J]. 航天电子对抗, 2016, 32(3): 36-41.
LIU G, ZHANG G Y, WANG H Y. Intra-pulse modulation recognition of radar signal based on features fusion[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2016, 32(3): 36-41(in Chinese).

[8] 王功明, 陈世文, 黄洁, 等. 基于多重同步压缩变换的雷达辐射源分选识别[J]. 现代雷达, 2020, 42(3): 49-56.
WANG G M, CHEN S W, HUANG J, et al. Radar emitter sorting and recognition based on multi-synchrosqueezing transform[J]. Modern Radar, 2020, 42(3): 49-56(in Chinese).

[9] 关欣, 朱杭平, 张玉虎. 基于 FRFT 的雷达辐射源信号特征分析及提取[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(2): 71-76.
GUAN X, ZHU H P, ZHANG Y H. Analysis and extraction of radar emitter signal feature based on fractional Fourier transform[J]. Journal of Detection and control, 2018, 40(2): 71-76(in Chinese).

[10] 苑军见, 陈世文, 刘智鑫, 等. 基于高次频谱对称 Holder 系数的雷达信号分选方法[J]. 信号处理, 2020, 36(10): 1775-1783.
YUAN J J, CHEN S W, LIU Z X, et al. Radar signal sorting method based on the symmetric holder coefficients of high-order spectrum[J]. Signal Processing, 2020, 36(10): 1775-1783(in Chinese).

[11] 肖易寒, 王亮, 郭玉霞. 基于去噪卷积神经网络的雷达信号调制类型识别[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(8): 2300-2307.
XIAO Y H, WANG L, GUO Y X. Radar signal modulation type recognition based on denoising convolutional neural network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(8): 2300-2307(in Chinese).

[12] 简川霞, 林子嘉, 杜美剑, 等. 基于特征融合与降维的印刷套准识别方法[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 242-249.
JIAN C X, LIN Z J, DU M J, et al. Printing registration recognition method based on feature fusion and dimension reduction[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 242-249(in Chinese).

[13] 林龙, 王贤浪. 基于杂草算法优化的轴承时频谱图聚类识别研究[J]. 内燃机与配件, 2021(2): 117-120.
LIN L, WANG X L. A time-frequency image recognition method based on IWO-KFCM algorithm[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(2): 117-120(in Chinese).

[14] 陈后金, 许文达, 郝晓莉. 基于灰度-梯度共生矩阵的钢轨表面缺陷检测方法[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(2): 7-12.
CHEN H J, XU W D, HAO X L. Detection of rail track surface defects based on gray level-gradient co-occurrence matrix[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(2): 7-12(in Chinese).

[15] 杨棉绒, 牛丽平. 基于 LGBM 的 Zernike 特征选取及红外图像目标识别方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 415-420.
YANG M R, NIU L P. Zernike's feature selection based on LGBM and identification methods of infrared image target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 415-420(in Chinese).

[16] NAILA S, JJ Y, YANG N, et al. A rapid recognition method for rice false smut based on HOG features and SVM classification [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1576(1): 012018.

[17] NIU Y T, SHANG Y, TIAN Y J. Multi-view SVM classification with feature selection[J]. Procedia Computer Science, 2019, 162: 405-412.

# LPI radar signal recognition based on high-order time-frequency spectrum features

LI Shitong[1], JIN Xiaoping[1,*], SUN Jie[2], WANG Xiaofeng[1]

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China;
2. Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310000, China)

**Abstract**: In view of the low recognition rate of traditional low probability of intercept (LPI) radar signal recognition algorithms under low signal-to-noise ratios, a radar signal recognition algorithm based on high-order time-frequency features was proposed. The proposed algorithm firstly obtained the time-frequency distribution of radar signals by time-frequency transform, and then the power calculation of the time-frequency spectrum was done to obtain the high-order time-frequency image of the signal. The gray gradient co-generation matrix and pseudo-Zernike features of the time-frequency image were extracted and formed into a joint feature vector, and finally, the classification recognition of the radar signal was realized by the support vector machine (SVM). The experimental results show that the overall recognition accuracy of the proposed algorithm can reach more than 95% for eight typical radar signals when the signal-to-noise ratio is −6 dB.

**Keywords**: radar signal recognition; time-frequency transform; high-order time-frequency; feature extraction; support vector machine

**Received**: 2022-12-13; **Accepted**: 2023-03-17; **Published Online**: 2023-04-03 14:14

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230403.1314.002

**Foundation items**: Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LQ20F020021); Open Project Funding of the Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province (2019KF0003)

* **Corresponding author**. E-mail: jxp1023@cjlu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1003

# 基于卷积神经网络的双阶段水下图像增强方法

路斯棋[1]，管凤旭[1,*]，赖海涛[1]，杜雪[1,2]

(1. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院，哈尔滨 150001；
2. 哈尔滨工程大学 教育部极端海洋环境波动场前沿科学中心，哈尔滨 150001)

**摘　　要**：由于水体对光线不同粒子的吸收能力具有一定差异，水下采集到的图像往往存在严重的退化现象，严重影响水下机器人对环境的感知。传统的图像处理方法和基于退化模型的图像恢复算法受到水下环境的复杂性和物理参数不确定性的影响往往表现出较差的泛化能力。为提高水下图像的视觉效果，利用深度学习模型强大的学习能力，提出一种基于卷积神经网络的双阶段水下图像增强方法，通过图像损坏和图像恢复两个阶段的处理将退化的水下图像增强为视觉效果优秀的近空气图像。在 Challenge60、U45、EUVP 和 RUIE 数据集上的测试结果表明，提出的方法相比于已有水下图像复原、增强算法具有更好的增强效果，水下图像质量指标（UIQM）提升了 5.18%，水下彩色图像质量评价 (UCIQE) 指标提升了 6.64%。

**关 键 词**：卷积神经网络；深度学习；双阶段；水下图像增强；水下图像复原
**中图分类号**：TB18
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0321-12

近年来，自主式水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV)、无人水下航行器 (unmanned underwater vehicle, UUV) 以及各类水下机器人的迅速发展使人类对深海资源的探索成为可能。由于水下资源丰富，世界各国对水下资源的开发与保护越来越重视，已经成为国际战略发展的中心。对于水下机器人，水下视觉是其感知自身所处环境的一个重要方式，同时也是人类能否对水下环境以及机器人状态观测的关键。然而，由于水下环境复杂，同时光线的衰减以及散射现象严重，水下成像系统所采集到的图像往往质量较差、退化严重，存在严重的色彩失真、曝光度不足、图像模糊等问题[1-2]。一方面，模糊的水下图像严重影响水面操控者对水下环境的观察效果；另一方面，这些模糊的图像也会干扰水下机器人自身对环境的感知，进而影响自身的工作能力。因此，对水下图像增强方法的研究成为相关学者普遍关注的问题。

为了提高水下图像质量，相关学者利用传统的图像处理算法（图像增强算法）以及数学方法（图像恢复算法）来处理相关图像。一方面，在没有水下物理参数的图像增强方法中，人们更侧重调整图像的像素值来产生效果较好的增强图像。Li 等[3] 设计了一个分段线性函数进行直方图变换，自适应于整个 RGB 值。通过该方法处理过的图像在 RGB 三通道上拥有更多细节。CLAHE 颜色模型[4] 在 RGB 模型和 HSV 模型中应用混合对比度自适应直方图均衡化方法，有效地提高了水下图像质量、增强了对比度且降低了噪声。但在使用时，一些图像会出现过增强或欠增强的现象。Tang 等[5] 提出一种新的基于自适应反馈和 Retinex 算法的水下图像增强算法。该算法通过自适应反馈调节、引导滤波和像素融合等一系列操作提高了水下图像的色彩饱和

**收稿日期**：2022-12-19；**录用日期**：2023-05-26；**网络出版时间**：2023-06-09 11:54
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230608.1311.003
**基金项目**：国家自然科学基金 (52171297)；中央高校基本科研业务费专项资金 (3072022FSC0401)
* **通信作者**. E-mail：guanfengxu@hrbeu.edu.cn

*引用格式*：*路斯棋，管凤旭，赖海涛，等. 基于卷积神经网络的双阶段水下图像增强方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：321-332.*
*LU S Q，GUAN F X，LAI H T，et al. Two-stage underwater image enhancement method based on convolutional neural networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：321-332（in Chinese）.*

度、色彩丰富性、局部对比度和清晰度。但使用该方法增强的图像存在一定的雾化效果。Li等[6]提出一种基于最小信息损失原则的水下图像去模糊算法和一种基于直方图分布先验的对比度增强算法,在对水下退化图像增强后从中提取到了更多的特征信息。但该方法增强后的图像具有一定量的噪声,视觉效果仍有可提升空间。Zhang等[7]提出了基于扩展多尺度Retinex的水下图像增强算法。它能根据每个通道的特点,通过在CIELAB颜色空间对图像的3个通道进行双边滤波和三边滤波的组合得到视觉效果更加优秀的增强图像。尽管这些方法在一定程度上能够增强水下图像,但是在某些特定图像的处理上会出现过增强或欠增强,鲁棒性较差。另一方面,一些图像恢复技术需要考虑水下退化模型,并逆向计算未退化图像。Carlevaris-Bianco等[8]提出了一种简单而有效的先验知识,利用水中3个图像颜色通道之间的衰减差异来估计场景的深度并以此来进行图像去雾操作。Yang等[9]使用中值滤波来估计图像的深度图、采用颜色校正方法来增强水下图像的对比度,提出一种基于暗通道先验的低复杂度水下图像恢复方法并取得了较好的效果。Wang等[10]将水下光传播模型简化成传输模型,并在此基础上提出最大衰减识别方法提取水下图像的深度图用于水下图像的恢复。Drews等[11]提出了一种基于观察大量水下图像中R通道的吸收率,以恢复高质量图像的暗通道先验(underwater dark channel prior, UDCP)。然而,水下场景的变化使UDCP并不稳定,而且该方法需要许多物理参数和水下光学特性,所以通常难以实现。

由于水下环境复杂,传统的水下图像增强与恢复算法泛化能力较差,而且由于环境的特殊性加之水下图像数据集不足,往往建模困难。深度卷积网络拥有强大的学习与泛化能力,常被应用于各种视觉任务并取得了巨大的成功。基于深度学习的水下图像增强模型也成为近年来的主流研究方向。Shin等[12]基于通用的卷积神经网络,利用多尺度特征融合等手段提出了一种有效环境光和传播图估计方法,并通过有效环境光和传播图对水下退化图像进行增强处理。为提高水下图像增强模型的泛化能力,Wang等[13]提出了一个基于CNN的UIE-NET框架。UIE-NET可以同时学习去雾和颜色校正两个任务,并且通过像素中断策略提高了模型的收敛速度和模型精度。Anwar等[14]受基于神经网络的低级视觉任务启发,提出了一种端到端的水下图像增强策略,通过优化MSE和SSIM损失函数的组合在多个合成水下图像风格的数据集上训练均取得了较好的结果。Hu等[15]基于CNN训练了两个神经网络,分别用来学习水下场景与其对应的蓝色通道传播深度图和全局环境光之间的关系,利用水下光学成像模型恢复和增强水下图像。随着GANs及其衍生模型的不断发展[16-20],它在水下图像增强领域也取得了巨大的成功。对于水下图像增强而言,Cycle-GAN[21]做出了巨大的贡献。尽管Cycle-GAN在用于水下图像增强上性能不是十分优秀,但是它的网络结构以及循环损失等新颖的思想为相关学者提供了一种新的思路。Li等[22]受到Cycle-GAN的循环一致损失的启发,设计了一个多项损失函数,提出一种弱监督颜色转移方法来校正颜色并取得了SOTA的性能,成功解决了由于大多数算法和模型忽略了波长对衰减的依赖性或者假设特定的光谱轮廓造成模型的泛化能力变弱的影响。UGAN[23]将Cycle-GAN作为一个图像退化过程来训练生成配对的数据集,并基于Pix2Pix模型来改善水下图像质量。UWGAN[2]利用UGAN生成的配对数据集,在生成器模型中增加了多尺度特征提取模块,优化增强图像的质量。Li等[24]提出的Water-GAN与物理模型相结合,使用带有相应深度信息的空气中图像来合成特定水下场景图像,在一定程度上解决了水下成对图像数据集短缺导致训练困难的问题。Islam等提出的FUnIE-GAN[25]在水下图像的颜色重建方面非常出色,与当时的SOTA模型相比,具有更快的处理速度。Liu等提出的MLFcGAN[26]使用全局特征来增强每个尺度上的局部特征,以进行颜色校正和图像细节保存。尽管FUnIE-GAN与MLFcGAN对合成的水下图像具有一定的增强效果,但是二者在对退化严重的图像进行处理时,增强效果却受到了限制。Naik等[27]提出了一个名为Shallow-UWNet的光线模型来增强水下图像,该模型仅在较少参数的条件下便取得与当时SOTA模型相当的增强性能。

尽管现有模型在水下图像增强任务上具有一定的效果,但许多模型在对不同风格的图像进行处理时表现出的增强效果却有所不同。为了提高水下图像增强模型对不同风格图像增强的稳定性,同时平衡网络的训练成本、提高模型的处理速度,提出了一种基于卷积神经网络的双阶段水下图像增强的新方法。通过图像损坏和图像恢复两个阶段,对退化的水下图像进行处理,丰富水下图像的语义以及边缘信息,增强视觉效果,使其更接近空气图像。在Challenge60、U45、EUVP和RUIE数据集上测试后发现,相比于主流增强方法,该方法不仅在视觉效果以及测试指标上均有明显提升,而且有效

地平衡了处理速度与增强质量之间的关系。

## 1　双阶段图像增强网络

退化图像中存在的严重色彩偏差淡化了图像中的特征信息。一方面, 一些结构简单的特征提取网络难以从这些图像中提取到丰富的语义信息, 严重影响了图像的增强效果; 另一方面, 复杂的特征提取网络存在庞大的参数量, 尽管有效地提高了增强图像质量, 但同时也降低了模型的处理速度。本文提出的方法有效地平衡了图像质量与处理速度的问题, 在保证增强图像视觉效果的同时, 大大提高了模型的增强速度。图 1 展示了本文方法的完整结构。

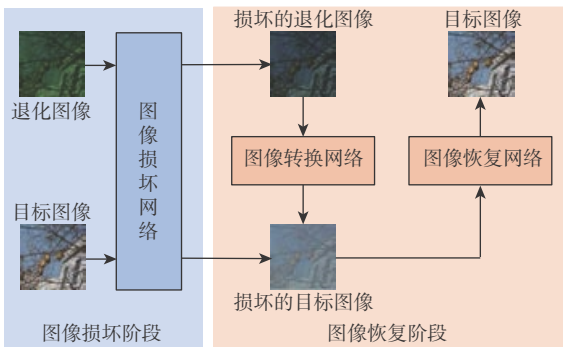



图 1　双阶段增强网络结构框图

Fig. 1　Two-stage enhancement network structure

双阶段增强网络分为图像损坏和图像恢复两个阶段。网络训练过程, 退化图像与目标图像首先经过图像损坏网络的处理, 输出对应的色彩失真的损坏图像; 图像转换网络尽可能地将损坏的退化图像拟合成损坏的目标图像; 最后, 图像恢复网络将损坏的目标图像拟合到原始的目标图像上。进行推理时, 仅输入退化的水下图像, 并将其进行损坏、转换与复原, 最终输出增强图像。

### 1.1　图像损坏阶段

图 2 为图像损坏网络的模型结构。为保证输出图像与输入图像维度一致, 确保图像的空间一致性, 采用 3 次步长为 1、3×3 大小的卷积层。在中间层使用 Leaky-ReLU(LR)函数来提高模型的非线性, 在输出层使用 Tanh 激活函数, 将输出图像的像素范围限制在—1 与 1 之间, 便于损失的计算, 保证网络整体训练的稳定性。在训练过程中, 图像损坏网络的目标函数等均服从完整模型的设置。不同的是, 图像损坏网络只在第一个批次进行训练, 以保证其对特征的不完全提取, 改变原有的图像数据分布, 达到损坏图像的目的。训练阶段, 网络输入退化图像和目标图像, 输出对应图像的损坏图像。推理阶段, 仅输入退化的水下图像。

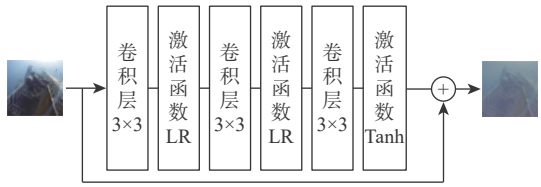



图 2　图像损坏网络结构图

Fig. 2　Structure of image corruption network

在图像损坏网络中卷积和非线性函数的作用下, 输入图像淡化了自身的整体风格。此时, 在纹理和其他高级语义信息相同的情况下, 转换网络和恢复网络更加注重对低级语义信息(如颜色)的学习。总的来说, 相比于使用单一网络进行图像增强而言, 采用双阶段图像增强策略可以使增强图像具有更好的视觉效果。

### 1.2　图像恢复阶段

图像恢复阶段的两个主要任务是: 拟合两个损坏图像和完成对损坏图像的恢复。

由于图像转换网络和图像恢复网络的输入和输出维度相同, 借鉴现有的图像增强网络结构, 两个网络均采用以 U-Net 为基础的具有相同结构的编码-解码器 (encoder-decoder) 结构, 如图 3 所示。图像转换网络用于拟合损坏的退化图像和损坏的目标图像, 而图像恢复网络用于将受损的目标图像还原。图像恢复网络处于完整模型的末端, 输出增强图像, 同样起着至关重要的作用。改进的 U-Net, 在跳跃连接和特征处理层(编码器和解码器中间的部分, 如图 3)分别引入注意力机制[28] 使网络能够更加关注输入图像中的有效信息。为得到全局特征向量, 本文将编码器的最后一层进行全局池化操作[29], 池化层后的向量能够在一定程度上代表输入图像的全局特征(称为全局特征向量), 为解码器提供有效指导。将全局特征向量复制若干次后, 与特征处理层的输出特征进行通道拼接, 使网络提高把控全局信息的能力, 提高模型对图像亮度等全局特征的整体增强能力。细节上, 使用最邻近插值加卷积的组合来替代反卷积层, 用以解决增强图像存在的棋盘效应问题。

### 1.3　损失函数

为了从色彩度、对比度等不同层面提高增强图像的质量, 本文采用具有不同效果的多函数加权融合的损失函数。用 $x$ 表示目标图像, $y$ 表示与 $x$ 对应的退化图像, $z$ 表示网络增强后的图像。总的损失函数可以表示为

$$\mathcal{L}_{\text{total}} = \lambda_{\text{L}} \times \mathcal{L}_{\text{L1}} + \lambda_{\text{S}} \times \mathcal{L}_{\text{S}} + \lambda_{\text{V}} \times \mathcal{L}_{\text{V}} + \lambda_{\text{C}} \times \mathcal{L}_{\text{C}} + \lambda_{\text{G}} \times \mathcal{L}_{\text{G}} \tag{1}$$

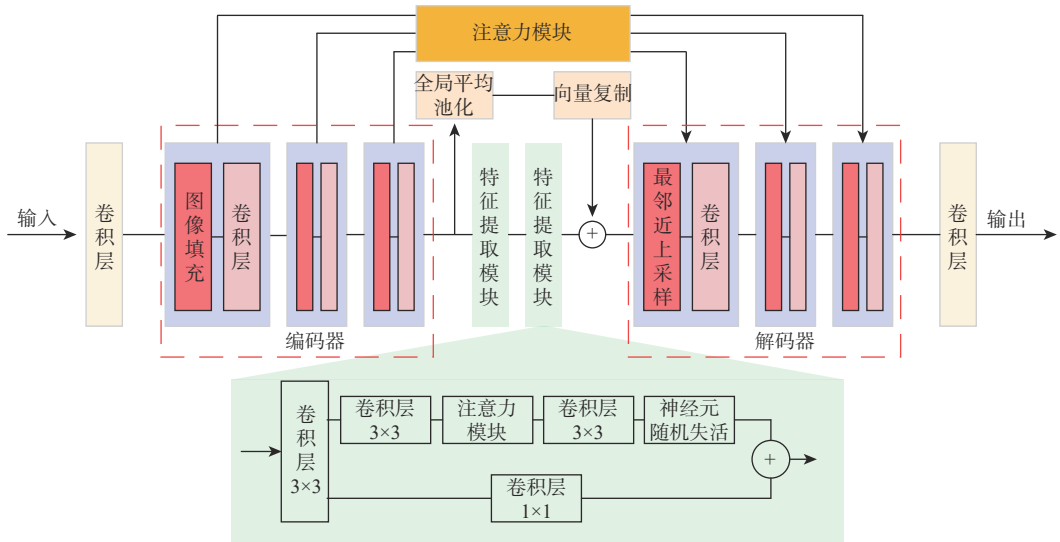



图 3 改进的 U-Net 网络结构

Fig. 3 Improved U-Net network structure

L1 损失用来减小两幅图像之间像素数值之间的距离。本文在图像转换网络和图像恢复网络中均用到了 L1 损失。其中，图像转换网络中的 L1 损失可以更有效地使两幅受损图像更加接近，图像恢复网络中可以使网络输出的增强图像更接近目标图像。其中 L1 损失可以用式(2)表示。

$$\mathcal{L}_{\mathrm{L1}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|x_i-z_i| \tag{2}$$

此外，使用 SSIM 损失[30]提升增强图像的亮度和对比度。SSIM 损失可以用式(3)来表示。

$$\mathcal{L}_{\mathrm{S}}=1-\mathrm{SSIM}(x,z)=1-\frac{(2\mu_x\mu_z+C_1)(2\sigma_{xz}+C_2)}{(\mu_x^2+\mu_z^2+C_1)(\sigma_x^2+\sigma_z^2+C_2)} \tag{3}$$

其中，$\mu_x$和$\mu_z$表示图像像素的均值，$\sigma_x$和$\sigma_z$是图像标准偏差的无偏估计值，$\sigma_{xz}$代表两幅图像的相关系数，$C_1$和$C_2$为常数，保证分母不为 0。

由于 L1 损失只是在数值上对两幅图的像素点进行限制，没有考虑到相位之间的距离，因此通常会导致增强图像颜色失真现象的出现[31]。本文使用颜色损失来弥补这一缺陷。近年来，相关学者提出了许多应用于图像增强任务中的色彩损失函数，其中 Andrey Ignatov[32]提出的颜色损失在本实验中取得了良好的效果。这种方法使用高斯模糊法来淡化图像的纹理和边缘信息，留下颜色信息用于两幅图像的比较。

颜色损失可以表示为

$$\mathcal{L}_{\mathrm{C}}=\|Z_{\mathrm{b}}-X_{\mathrm{b}}\|_2^2 \tag{4}$$

其中，$Z_{\mathrm{b}}$和$X_{\mathrm{b}}$是$z$和$x$经过高斯模糊处理后的模糊图像。

受感知损失在图像风格迁移任务中应用效果很好的启发，本文使用感知损失[33]来改善增强图像的颜色和纹理特征。感知损失可以表示为

$$\mathcal{L}_{\mathrm{V}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\mathrm{VGG}(x_i)-\mathrm{VGG}(z_i))^2 \tag{5}$$

其中，VGG(·)表示预训练的 VGG16 模型的第 4-3 层输出结果。

最后，本文使用梯度损失来提高图像的边缘信息，其损失函数可以用式(6)来表示。

$$\mathcal{L}_{\mathrm{G}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|\nabla z_i-\nabla x_i| \tag{6}$$

## 2 实 验

为了证明本文方法的有效性，从多个角度进行实验和效果演示，并与水下图像增强模型和算法进行了比较。相比之下，双阶段增强方法不仅取得了优秀的视觉效果，而且评价指标也有所提升。

### 2.1 数据集和评估指标

本文使用 UIEB 和部分 SUID 数据集来进行训练。UIEB 是由 Li 等[34]在 2019 年开源的水下图像数据集，它包含 890 幅不同退化程度的真实水下图像，并且根据不同增强算法择优选出相应的增强图像与原始图像组成图像对。SUID 数据集[35]共采集了 30 幅陆地图像，并通过算法模拟出包括雾化、蓝绿等不同程度的退化图像。测试集采用 Challenge60 数据集、U45 数据集、EUVP 数据集和 RUIE 数据集。Challenge60 数据集是 UIEB 数据集中用于测试的 60 幅真实水下图像。U45 数据集[36]是 Li 等收集的多种风格的退化严重的水下图像的测试数据集，被广泛应用于水下图像增强模型的测试中。EUVP

数据集[25] 是 Islam 等提出的用于水下图像颜色重建的数据集, 也是应用较为广泛的开源图像数据集。RUIE 数据集[37] 是 Liu 等于 2020 年提出的首个专门为多角度算法评估而设置的大型水下真实图像数据库。RUIE 数据集在靠近黄海的獐子岛处进行采样, 在天然的海洋生态系统下拍摄超过 250 h 的视频, 涵盖了各种照明、景深、色偏。

在评价指标方面, 水下图像质量指标 (underwater image quality measure, UIQM)[38] 和水下彩色图像质量评价 (underwater color image quality evaluation, UCIQE) 指标[39] 被用来评价增强后的图像。UCIQE 使用色度、饱和度和对比度的线性组合来评估增强的图像, 以量化不均匀的偏色、模糊和低对比度。UIQM 由水下图像颜色度量 (underwater image colorfulness measure, UICM)、水下图像清晰度度量 (underwater image sharpness measure, UISM) 和水下图像对比度度量 (underwater image contrast measure, UIConM) 的加权求和得到。

### 2.2　训练过程

本实验在 TensorFlow 框架下使用完整的 UIEB 和部分 SUID 数据集共 1 200 组图像对进行了 10 万次迭代训练, 设置 batch 大小为 8, 学习率为 0.000 1, 使用 Adam 优化器。所有图像被设置为 256×256 大小进行输入。训练结束后, 择优选取最佳网络权重, 通过选中的最优模型对测试集进行图像增强, 并计算对应的评价指标。

### 2.3　损失函数可行性验证与参数标定

本文使用具有不同效果的多函数加权融合的损失函数来训练双阶段图像增强网络。因此, 本节介绍损失函数中各损失项对模型性能的影响以及不同损失项权重的设定方式。

使用具有不同组合方式的损失函数训练网络时, 输出图像与参考图像间 SSIM 指标的变化情况如图 4 所示。训练过程中, 每迭代训练 100 次, 记录相同测试图像的 SSIM 指标, 绘制指标曲线。由图 4 可见, 随着损失项数量的累加, SSIM 指标曲线上限提高, 模型的训练偏差、方差逐渐降低。在使用本文完整的损失函数训练时, 模型取得了相同情况下的最优性能。

使用不同损失函数训练时, 模型的增强结果如图 5 所示。当加入对应的损失函数项后, 增强图像的质量明显提升(如加入颜色损失后, 图像的色彩度得到了提升, 如图中的红色方框所示)。因此, 使用具有不同效果的多函数加权融合的损失函数来训练双阶段图像增强网络, 可以有效地提升模型的性能, 相比于单一的损失函数, 增强图像的质量得到了明显的提升。

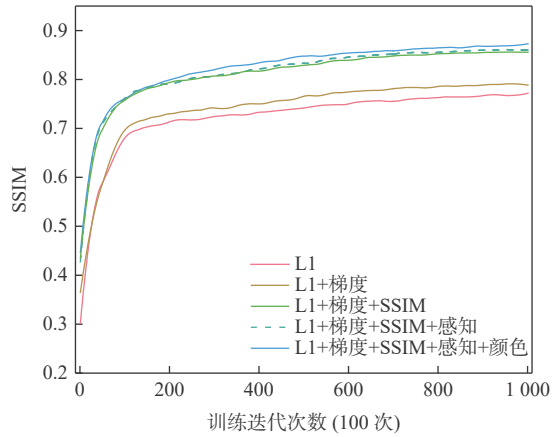



图 4　不同损失函数组合下 SSIM 指标的对比结果

Fig. 4　Comparison results of SSIM metrics with different combinations of loss functions

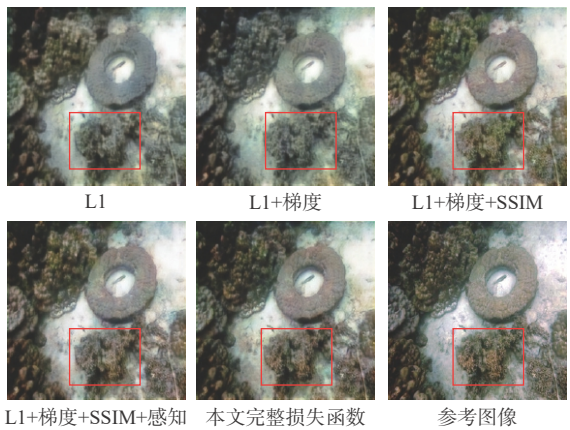



图 5　不同损失函数组合下的视觉效果对比

Fig. 5　Comparison of visual effects under different combinations of loss functions

损失函数中损失项的权重系数, 是平衡模型从不同角度增强图像的关键设定, 严重影响模型的训练时间和增强图像的质量。在进行权重设定时, 使用单一的损失函数进行迭代训练, 观察对应情况下损失值的大小和梯度下降的情况; 对于不同的损失项, 选择的权重应尽可能平衡损失值和梯度, 不同损失项的损失值和梯度处于同一量级; 最后, 根据具体的任务要求微调权重。具体, 由于 L1 损失、梯度损失和 SSIM 损失是水下图像增强任务中常用的损失函数, 参考现有工作对这 3 个损失函数的权重设置的比例确定本文的权重。使用感知损失的目的是解决“在仅使用 L1 损失、梯度损失和 SSIM 损失的情况下, 图像出现严重色彩偏差”的问题。因此, 适当增大感知损失项的权重, 可以让模型更加关注颜色和纹理特征。最后加入颜色损失项, 进一步提高模型的色彩丰富度, 其权重根据已选权重进行折中选取。经过多次实验测试, 本文令 $\lambda_L = 4$、

$\lambda_G = 10$、$\lambda_S = 5$、$\lambda_V = 10$、$\lambda_C = 5$。

## 2.4 实验结果

为了证明本文所提出方法的有效性，将双阶段水下图像增强方法与近年来应用广泛的水下图像增强模型以及算法进行比较。这些方法分别为：RCP(2015)[40]、FUnIEGAN(2020)[25]、MLFcGAN(2020)[26]、ShallowUWNet(2021)[27]、NU^2NET(2022)[41]和PUIE-NET(2022)[42]。

### 2.4.1 真实水下图像增强效果分析

为了证明本文提出的模型在真实的水下图像增强任务中具有明显的优势，从Challenge60和U45数据集中选取了9幅不同风格的真实水下图像用于测试并且与应用广泛的水下图像增强模型进行比较。表1和表2为这些图像在不同模型上评估指标的对比情况，图6为不同模型的增强效果对比。

**表1 不同方法在对应图像上的UIQM指标**

**Table 1 UIQM metrics of different methods on the corresponding images**

| 图像编号 | 图像处理方案 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | RCP | FUnIE-GAN | MLFcGAN | Shallow-UWNet | NU^2Net | PUIE-NET | Ours |
| 图6(a) | 4.633 9 | 4.853 3 | (5.053 6) | 4.948 9 | 4.666 4 | 4.730 5 | **5.140 2** |
| 图6(b) | 1.321 9 | (3.353 4) | 2.826 0 | 3.168 7 | 2.599 2 | 3.276 7 | **3.382 9** |
| 图6(c) | **6.109 0** | 5.409 3 | 5.562 0 | 5.127 4 | 5.719 4 | 5.504 4 | (6.106 7) |
| 图6(d) | (5.101 8) | 5.076 1 | 4.631 1 | 4.835 4 | 4.615 3 | 4.244 7 | **5.341 0** |
| 图6(e) | 4.219 8 | 4.250 9 | 4.226 3 | 4.111 4 | (4.273 3) | 3.975 3 | **4.295 9** |
| 图6(f) | 3.390 0 | 3.467 1 | (3.899 2) | 3.466 2 | 3.496 4 | 3.535 1 | **4.096 7** |
| 图6(g) | 5.030 5 | 5.294 6 | 5.428 8 | (5.449 9) | 5.439 7 | 5.225 4 | **5.458 0** |
| 图6(h) | 5.205 8 | (5.351 5) | 4.620 7 | 4.287 3 | 5.243 8 | 4.704 8 | **5.802 8** |
| 图6(i) | **6.010 9** | (5.369 2) | 5.588 7 | 5.222 4 | 5.588 6 | 5.143 7 | (5.600 2) |

注：表中各列的平均值分别为4.558 2, 4.713 9, 4.648 5, 4.513 1, 4.626 9, 4.482 2, 5.024 9；表中粗体表示每行最优结果，()表示每行次优结果。

**表2 不同方法在对应图像上的UCIQE指标**

**Table 2 UCIQE metrics of different methods on the corresponding images**

| 图像编号 | 图像处理方案 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | RCP | FUnIE-GAN | MLFcGAN | Shallow-UWNet | NU^2Net | PUIE-NET | Ours |
| 图6(a) | **0.468 5** | 0.416 7 | 0.439 9 | 0.424 7 | 0.442 5 | 0.441 8 | (0.445 0) |
| 图6(b) | **0.453 8** | 0.378 0 | 0.375 0 | 0.348 8 | (0.413 4) | 0.372 3 | 0.352 7 |
| 图6(c) | (0.515 0) | 0.315 5 | (0.408 0) | 0.292 9 | 0.409 5 | 0.384 4 | **0.515 2** |
| 图6(d) | **0.475 0** | 0.436 2 | 0.318 2 | 0.293 6 | 0.391 7 | 0.340 5 | (0.442 6) |
| 图6(e) | **0.486 1** | 0.351 1 | 0.378 8 | 0.335 6 | 0.375 0 | 0.342 9 | (0.401 4) |
| 图6(f) | 0.180 3 | 0.171 1 | 0.267 1 | 0.160 7 | **0.316 0** | 0.294 4 | (0.297 5) |
| 图6(g) | 0.429 9 | 0.415 4 | **0.511 6** | (0.507 7) | 0.425 9 | 0.394 6 | 0.445 1 |
| 图6(h) | (0.441 3) | 0.326 7 | 0.422 0 | 0.421 7 | 0.380 0 | 0.329 7 | **0.537 6** |
| 图6(i) | 0.438 0 | 0.346 7 | 0.409 7 | 0.341 8 | (0.442 3) | 0.408 6 | **0.460 6** |

注：表中各列的平均值分别为0.432 0, 0.350 8, 0.392 3, 0.347 5, 0.399 5, 0.367 6, 0.433 1；表中粗体表示每行最优结果，()表示每行次优结果。

从图6可以看出，RCP方法在处理蓝色色调图像时表现出来的效果不尽如人意，但是在处理雾化图像时，增强图像的色彩相比于其他方法更加饱满；FUnIEGAN、MLFcGAN和Shallow-UWNet虽然对大部分图像增强效果较好，但是在处理低照度图像时增强效果不是特别明显。MLFcGAN和Shallow-UWNet在处理雾化图像时，增强图像呈现粉色色调，存在颜色偏差。作为最新的水下图像增强方法，NU^2NET和PUIE-NET取得了明显的效果，但是在处理特定风格的图像时仍出现欠佳的效果，NU^2NET出现了颜色失真(图6(d))、PUIE-NET出现了一定程度上的雾化情况(图6(i))。相比于其他的方法，本文提出的方法能够更好地处理这些图像，增强后的图像具有更好的视觉效果。从表1可以看出，本文提出的方法在对绝大多数图像进行增强时，可以取得几种方法内最高的UIQM值。在UCIQE指标上，尽管本模型仅在3幅图上取得了最优效果，但在其余绝大多数的图像增强上取得了次优效果，且综合9幅图像的测试平均值，本文提出的方法取得了对比方法中的最优效果。综合UIQM

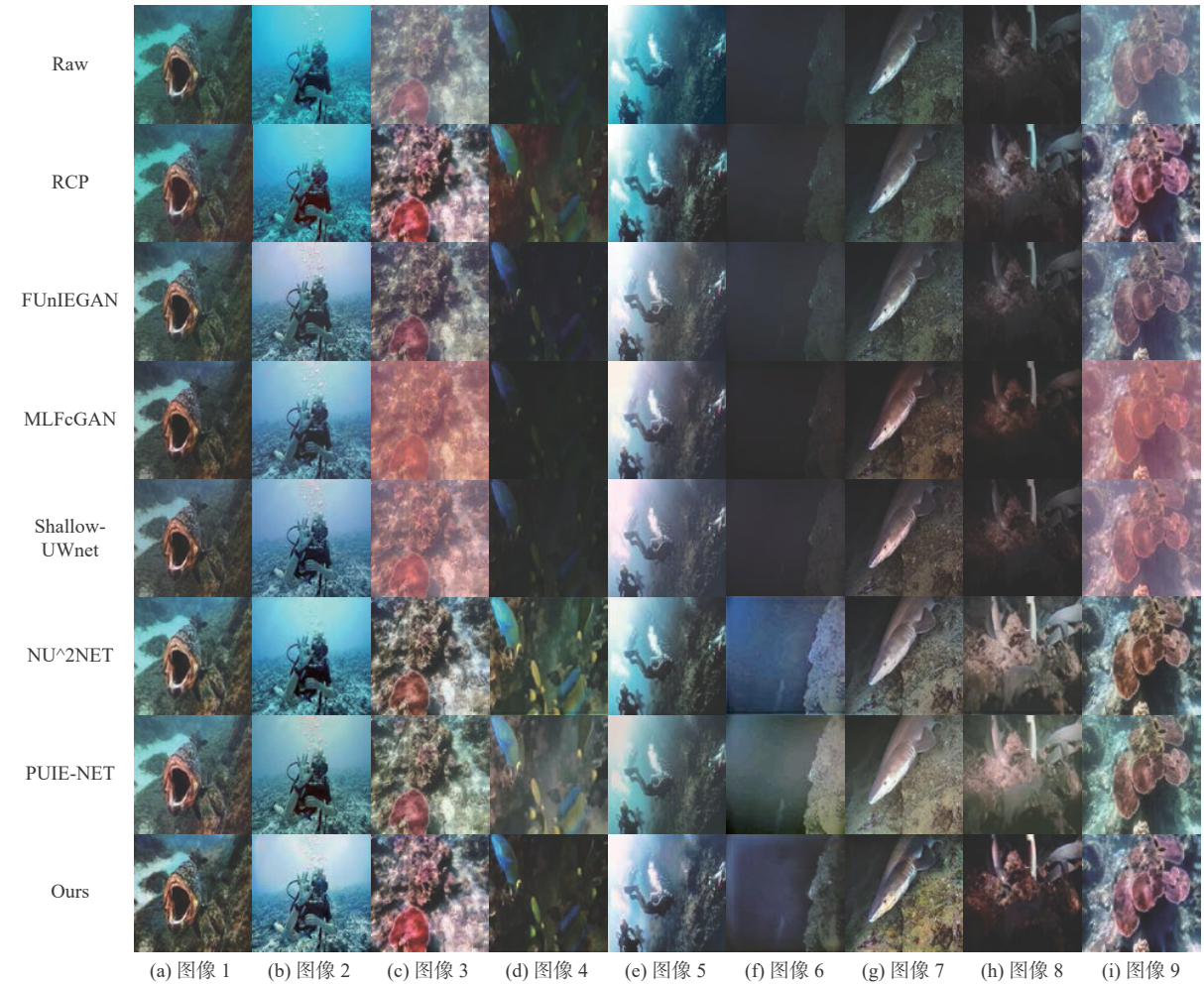



图 6　不同方法在 Challenge60 和 U45 测试集上的增强效果对比图

Fig. 6　Results of enhancement effects of different methods on Challenge60 and U45 test datasets

和 UCIQE 指标, 本文提出的方法取得了较好的评价指标值, 不亚于甚至优于存在的主流方法。

为进一步说明本文方法的有效性, 从 RUIE 和 EUVP 数据集上采样 7 幅具有代表性的图像进行展示, 如图 7 所示。

图 7 中前两幅图像采样自 EUVP 数据集, 退化程度较低; 后面的 5 幅图像采样自 RUIE 数据集, 这些图像退化程度较高, 且不同图像之间的退化程度存在一定差异。从图中可以看出, 这些对比方法对于退化程度较低的图像增强效果较好, 拥有更加优秀的视觉效果, 在一定程度上提高了图像的质量。然而, 对于退化程度较高的图像 (RUIE 数据集上采样的 5 幅图像), 这些方法的增强效果欠佳: RCP 方法出现了欠增强现象, 增强后的图像仅淡化了退化程度, 仍存在明显的颜色偏差; FUnIE-GAN、MLFc-GAN 和 Shallow-UWNet 方法处理后的图像出现了颜色偏差, 图像风格变成了黄色(如图 7(e)～图 7(f))。NU^2NET 和 PUIE-NET 在对绿色图像进行处理时, 结果仍存在一定的绿色偏差(图 7(e)～图 7(f))。相比而言, 本文提出的方法解决了上述问题, 增强后的图像颜色更加真实、对比度更高, 具有更加优秀的视觉效果。另外, 表 3 和表 4 为这些图像的客观评价指标对比。

表 3 和表 4 展示了不同方法在 EVUP 数据集和 RUIE 数据集上的测试结果。与在 Challenge60 和 U45 数据集上的测试结果类似, 本文提出的双阶段增强方法在绝大多数的测试图像上取得了最优的测试结果, 在少数的图像上取得了次优的效果。综合 7 幅图像的测试平均值, 本文提出的方法取得了对比方法中的最优效果。

### 2.4.2　消融实验

为证明本文提出的双阶段水下图像增强方法有效提升了水下图像质量, 本实验将其与单阶段水下图像增强方法在相同的实验条件下进行对比, 即本文模型去除图像损坏与分布转换网络, 使用单一的网络完成对水下图像的增强。值得注意的是, 单阶段增强方法仍使用以图 3 为基础的 U-Net 网络, 通过增加特征提取模块的数量来保证模型参数量与双阶段模型的参数量相近, 避免参数量导致的增强性能下降问题。训练的损失函数等

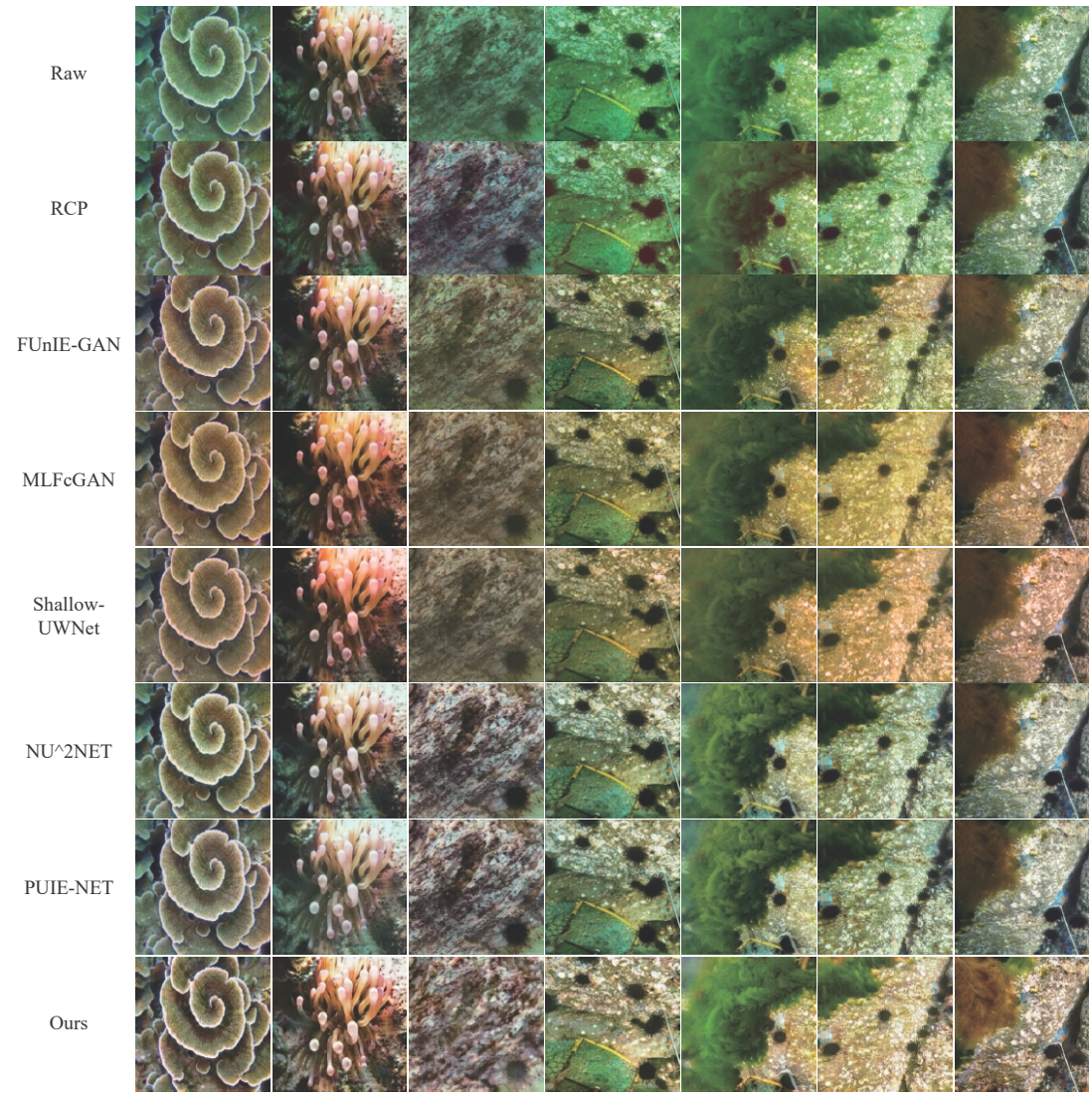



图 7 不同方法在 EUVP 和 RUIE 测试集上的增强效果对比图

Fig. 7 Results of enhancement effects of different methods on EUVP and RUIE test datasets

**表 3 不同方法在对应图像上的 UIQM 指标**

**Table 3 UIQM metrics of different methods on the corresponding images**

| 图像编号 | 图像处理方案 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | RCP | FUnIE-GAN | MLFcGAN | Shallow-UWNet | NU^2NET | PUIE-NET | Ours |
| 图7(a) | 5.108 2 | (5.818 9) | 5.802 1 | 5.621 2 | 5.386 5 | 5.351 9 | **5.822 7** |
| 图7(b) | 5.612 6 | 5.674 8 | 5.606 5 | (5.785 0) | 5.478 9 | 5.134 9 | **5.917 4** |
| 图7(c) | 5.686 1 | 5.707 6 | 5.670 7 | 5.599 5 | (5.972 9) | 5.608 4 | **6.071 0** |
| 图7(d) | 4.122 1 | 5.382 3 | 5.384 3 | 5.457 0 | 5.243 7 | (5.604 7) | **5.664 0** |
| 图7(e) | 4.169 7 | **4.759 3** | 4.497 5 | 4.020 5 | 4.451 6 | 4.417 9 | (4.581 2) |
| 图7(f) | 4.483 3 | 5.681 1 | 5.591 8 | (5.864 9) | 5.322 2 | 5.505 1 | **5.873 7** |
| 图7(g) | 5.102 4 | 5.548 5 | (5.998 2) | 5.677 2 | 5.552 8 | 5.367 5 | **6.171 6** |

注: 表中各列的平均值分别为4.897 7, 5.510 3, 5.507 3, 5.432 1, 5.344 0, 5.284 3, 5.728 8; 表中粗体表示每行最优结果, ()表示每行次优结果。

设置均与本文 1.3 节和 2.2 节相同。图 8 为二者在相同输入图像上的增强效果对比图, 表 5 为图 8 中不同输入图像在两个网络上的评价指标测试值。

从图 8 中可以看出, 双阶段水下图像增强模型相比于单阶段处理模型具有更加丰富的色彩信息(框选部分为举例说明), 这正与本文应用图像损坏网络的目的一致。表 5 展示了单阶段增强与双阶段增强在客观评价指标上的结果对比, 通过对比可知, 无论在 UIQM 还是 UCIQE 指标上, 双阶段增强模型取得的指标均高于单阶段水下图像增强模

表 4　不同方法在对应图像上的 UCIQE 指标

Table 4　UCIQE metrics of different methods on the corresponding images

| 图像编号 | 图像处理方案 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | RCP | FUnIE-GAN | MLFcGAN | Shallow-UWNet | NU^2NET | PUIE-NET | Ours |
| 图7(a) | 0.409 8 | 0.450 7 | (0.451 4) | 0.430 0 | 0.416 9 | 0.417 5 | **0.456 7** |
| 图7(b) | 0.476 1 | 0.478 7 | **0.481 8** | (0.476 5) | 0.451 1 | 0.401 8 | 0.457 1 |
| 图7(c) | 0.356 9 | 0.293 7 | 0.288 3 | 0.260 0 | **0.405 0** | 0.347 2 | (0.382 5) |
| 图7(d) | 0.403 8 | 0.413 3 | 0.410 7 | 0.423 2 | 0.398 8 | (0.425 4) | **0.435 3** |
| 图7(e) | 0.449 0 | (0.469 4) | 0.459 4 | **0.479 8** | 0.421 7 | 0.389 9 | 0.466 4 |
| 图7(f) | 0.406 3 | 0.406 2 | (0.412 3) | 0.404 2 | 0.390 2 | 0.386 2 | **0.438 7** |
| 图7(g) | 0.441 2 | 0.419 3 | 0.442 0 | **0.451 1** | 0.435 7 | 0.406 6 | (0.444 0) |

注: 表中各列的平均值分别为0.420 4, 0.418 7, 0.420 8, 0.417 8, 0.417 0, 0.396 3, 0.440 1; 表中粗体表示每行最优结果, ()表示每行次优结果。

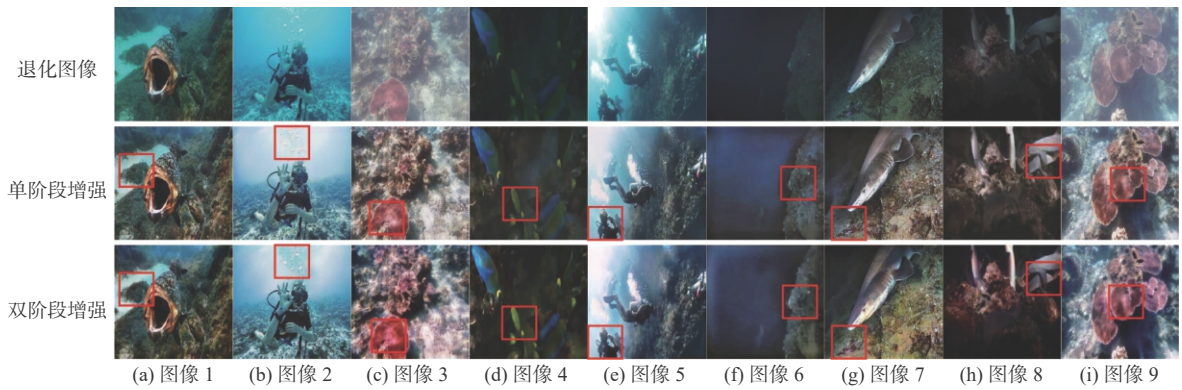



图 8　单阶段增强与双阶段增强效果对比图

Fig. 8　Comparison of the effects of single-stage enhancement and two-stage enhancement

表 5　单阶段增强与双阶段增强指标对比

Table 5　Comparison of single-stage enhancement and two-stage enhancement metrics

| 图像编号 | 单阶段增强 | | 双阶段增强 | |
|---|---|---|---|---|
| | UIQM | UCIQE | UIQM | UCIQE |
| 图8(a) | 5.089 3 | 0.431 1 | **5.140 2** | **0.445 0** |
| 图8(b) | 3.281 4 | **0.374 0** | **3.382 9** | 0.352 7 |
| 图8(c) | 5.995 7 | 0.429 3 | **6.106 7** | **0.515 2** |
| 图8(d) | 4.630 6 | 0.305 5 | **5.341 0** | **0.442 6** |
| 图8(e) | 4.224 3 | 0.364 6 | **4.295 9** | **0.401 4** |
| 图8(f) | 3.768 5 | 0.269 1 | **4.096 7** | **0.297 5** |
| 图8(g) | **5.469 0** | 0.436 0 | 5.458 0 | **0.445 1** |
| 图8(h) | 5.388 6 | 0.394 4 | **5.802 8** | **0.537 6** |
| 图8(i) | **5.605 2** | 0.434 5 | 5.600 2 | **0.460 6** |

注: 表中各列的平均值分别为4.828 1, 0.382 1, 5.024 9, 0.433 1; 表中粗体表示对应指标每行最优结果。

型。综上, 相比于单阶段的增强, 双阶段水下图像增强模型在一定程度上提高了水下图像增强的能力。

2.4.3　应用性分析

在工程应用中, 水下图像增强通常被用作高级视觉任务(如目标检测)的预处理步骤。从图像中提取到的特征点的数量决定了这些高级视觉任务的性能。在本实验中, 使用 SIFT 操作对增强前后的水下图像进行特征点匹配以说明图像增强效果。由于篇幅有限, 仅选择 3 幅不同风格的水下图像用于展示, 增强图像和退化图像的特征匹配结果如图 9 所示, 增强前后 SIFT 匹配点数量对比如表 6 所示。

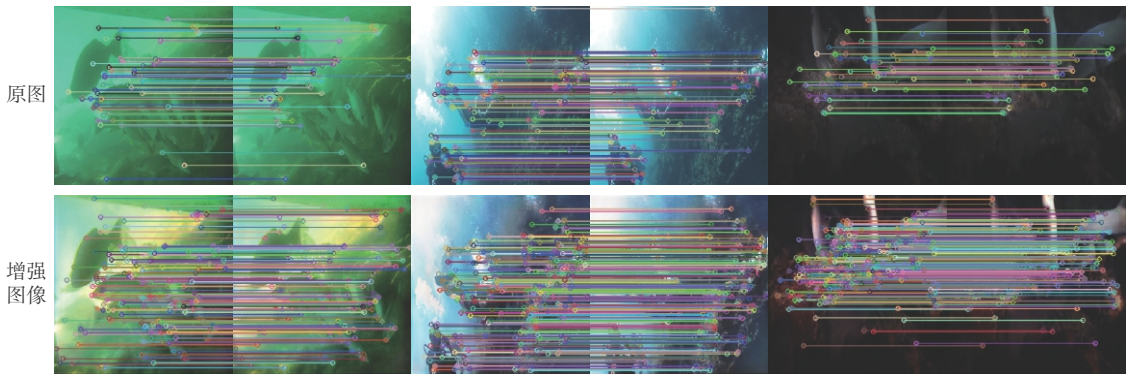
此外, 为了验证双阶段增强方法有效地丰富了图像的边缘信息, 在增强前后的图像上依次使用 Canny 算子进行边缘特征提取, 图 10 为边缘提取的结果对比图。

从两幅对比图中可以看出, 双阶段水下图像增强方法可以有效地丰富特征点和边缘信息, 在工程应用中具有十分重要的意义。

2.4.4　模型参数、增强速度与增强质量对比

为平衡增强质量和模型的训练成本、增强速度, 本文提出一种基于卷积神经网络的双阶段的水下图像增强方法, 该方法在保证增强质量的同时拥有较少的训练参数, 且模型的实时性较高。为证明双阶段增强方法具有较快的处理速度, 在相同的实验条件下进行了增强速度对比试验。实验的对比结果如表 7 所示。

在相同的实验环境下, 使用不同方法在 Challenge60 数据集上进行增强实验, 记录各个方法对 $256^2$




(a) 图像 1 (b) 图像 2 (c) 图像 3

图 9 输入图像与增强图像的 SIFT 效果图

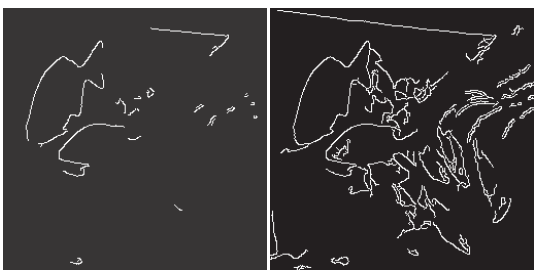
Fig. 9 SIFT effect of input image and enhanced image

**表 6 增强前后 SIFT 匹配点数目对比**

**Table 6 Comparison of the number of SIFT matching points before and after enhancement**

| 图像编号 | 原图 | 增强图像 | 提升数量 |
|---|---|---|---|
| 图9(a) | 140 | 330 | 190 |
| 图9(b) | 64 | 288 | 224 |
| 图9(c) | 69 | 179 | 110 |

注: 表中各列的平均值分别为91, 266, 175。



(a) 原图 (b) 增强图像

图 10 输入与增强图像的边缘提取效果图

Fig. 10 Edge extraction effect of input and enhanced images

**表 7 不同方法参数量、处理速度及性能对比**

**Table 7 Comparison of the parameters, processing speed and performance of different methods**

| 方法 | 速度/s | 参数量/MB | UIQM | UCIQE |
|---|---|---|---|---|
| FUnIE-GAN | 0.046 | 4.02 | 5.112 1 | 0.384 8 |
| MLFcGAN | 0.227 | 45.80 | 5.077 9 | 0.406 6 |
| Shallow-UWNet | 0.032 | 0.21 | 4.972 6 | 0.382 7 |
| NU^2NET | 0.013 | 3.00 | 4.985 4 | 0.409 4 |
| PUIE-NET | 0.010 | 5.12 | 4.883 2 | 0.383 6 |
| Ours | 0.048 | 4.67 | 5.376 9 | 0.436 6 |

尺寸图像的平均增强时间; UIQM 和 UICQE 指标是 4 个测试集上采样图像的平均值, 如表 7 所示。对比的方法除 MLFcGAN 外均为近年来应用广泛的实时增强模型。

在所有的对比模型中, 尽管 Shallow-UWNet 拥有最少的模型参数, 但是它的增强质量受参数量影响严重, 取得了 4 种方法中最低的增强质量; 相比而言, FUnIE-GAN 更好地平衡了速度与质量之间的关系, 但是增强质量仍有待提升。本文提出的双阶段增强方法, 单幅图像的平均处理速度仅比最快的 PUIE-NET 慢 0.038 s, 而 UIQM 指标和 UCIQE 指标分别提升了 10.11% 和 13.82%。从增强质量角度, 双阶段增强网络相比于次优的指标, 在 UIQM 上提高了 5.18%、在 UCIQE 指标上提升了 6.64%, 但单幅图像处理时间仅提高 0.002 s (FUnIE-GAN) 和 0.035 s(NU^2NET)。综上, 本文的双阶段增强网络有效地平衡了处理速度、训练成本和增强质量之间的关系。

## 3 结 论

1) 为了改善水下图像色彩失真、清晰度较差等问题, 提出一种基于卷积神经网络的双阶段水下图像增强方法。

2) 通过图像损坏阶段以及图像恢复阶段两个阶段的处理, 模型有效地提高了真实水下图像的视觉效果。通过使用通道注意力机制, 模型可以更好地关注图像中的有用信息, 提高增强效果。同时通过引入全局向量使模型能够把握图像的全局信息, 更好地提高增强图像的亮度以及对比度。

3) 在 Challenge60、U45、EUVP 和 RUIE 数据集上进行测试, 相比于已有的几种主流水下图像增强模型, 基于卷积神经网络的双阶段水下图像增强方法能够取得更好的视觉效果以及评价指标。相比于比较方法中的次优方法, 双阶段水下图像增强模型在 UIQM 上提升了 5.18%, UCIQE 测试指标上提升了 6.64%。另外, 在保证增强质量的同时, 双阶段增强模型拥有较快的处理速度, 达到了实时增强的效果。

## 参考文献（References）


[1] KOCAK D M, DALGLEISH F R, CAIMI F M, et al. A focus on recent developments and trends in underwater imaging[J]. Marine Technology Society Journal, 2008, 42(1): 52-67.

[2] GUO Y C, LI H Y, ZHUANG P X. Underwater image enhancement using a multiscale dense generative adversarial network[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, 45(3): 862-870.

[3] LI C L, TANG S Q, KWAN H K, et al. Color correction based on CFA and enhancement based on retinex with dense pixels for underwater images[J]. IEEE Access, 2020, 8: 155732-155741.

[4] HITAM M S, AWALLUDIN E A, JAWAHIR HJ WAN YUSSOF W N, et al. Mixture contrast limited adaptive histogram equalization for underwater image enhancement[C]// 2013 International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT). Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.

[5] TANG Z J, JIANG L Z, LUO Z H. A new underwater image enhancement algorithm based on adaptive feedback and Retinex algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(18): 28487-28499.

[6] LI C Y, GUO J C, CONG R M, et al. Underwater image enhancement by dehazing with minimum information loss and histogram distribution prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(12): 5664-5677.

[7] ZHANG S, WANG T, DONG J Y, et al. Underwater image enhancement via extended multi-scale Retinex[J]. Neurocomputing, 2017, 245: 1-9.

[8] CARLEVARIS-BIANCO N, MOHAN A, EUSTICE R M. Initial results in underwater single image dehazing[C]// OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-8.

[9] YANG H Y, CHEN P Y, HUANG C C, et al. Low complexity underwater image enhancement based on dark channel prior[C]// 2011 Second International Conference on Innovations in Bio-inspired Computing and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 17-20.

[10] WANG N, ZHENG H Y, ZHENG B. Underwater image restoration via maximum attenuation identification[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18941-18952.

[11] DREWS P L J Jr, NASCIMENTO E R, BOTELHO S S C, et al. Underwater depth estimation and image restoration based on single images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2016, 36(2): 24-35.

[12] SHIN Y S, CHO Y, PANDEY G, et al. Estimation of ambient light and transmission map with common convolutional architecture[C]// OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.

[13] WANG Y, ZHANG J, CAO Y, et al. A deep CNN method for underwater image enhancement[C]// 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1382-1386.

[14] ANWAR S, LI C Y, PORIKLI F. Deep underwater image enhancement[C]// 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-12.

[15] HU Y, WANG K, ZHAO X, et al. Underwater image restoration based on convolutional neural network[J]. Proceedings of Machine Learning Research, 2018, 95(11): 296-311.

[16] GOODFELLOW I J, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets[C]// Proceedings of the 2014 Conference on Advances in Neural Information Processing Systems. Montreal: Curran Associates Inc. , 2014: 2672−2680.

[17] KONG J H, SHEN H B, HUANG K J. DualPathGAN: facial reenacted emotion synthesis[J]. IET Computer Vision, 2021, 15(7): 501-513.

[18] RUAN C C, YUAN L C, HU H F, et al. Image translation with dual-directional generative adversarial networks[J]. IET Computer Vision, 2021, 15(1): 73-83.

[19] CHAVDAROVA T, FLEURET F. SGAN: an alternative training of generative adversarial networks[C]// 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 9407-9415.

[20] 尹诗, 侯国莲, 胡晓东, 等. 基于 AC-GAN 数据重构的风电机组主轴承温度监测方法[J]. 智能系统学报, 2021, 16(6): 1106-1116.
YIN S, HOU G L, HU X D, et al. Temperature monitoring method of the main bearing of wind turbine based on AC-GAN data reconstruction[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2021, 16(6): 1106-1116(in Chinese).

[21] ZHU J Y, PARK T, ISOLA P, et al. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks[C]// 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE Press, 2017: 2242-2251.

[22] LI C Y, GUO J C, GUO C L. Emerging from water: underwater image color correction based on weakly supervised color transfer[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(3): 323-327.

[23] FABBRI C, ISLAM M J, SATTAR J. Enhancing underwater imagery using generative adversarial networks[C]// 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 7159-7165.

[24] LI J, SKINNER K A, EUSTICE R M, et al. WaterGAN: unsupervised generative network to enable real-time color correction of monocular underwater images[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(1): 387-394.

[25] ISLAM M J, XIA Y Y, SATTAR J. Fast underwater image enhancement for improved visual perception[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 3227-3234.

[26] LIU X D, GAO Z, CHEN B M. MLFcGAN: multilevel feature fusion-based conditional GAN for underwater image color correction[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(9): 1488-1492.

[27] NAIK A, SWARNAKAR A, MITTAL K. Shallow-UWnet: compressed model for underwater image enhancement[EB/OL]. (2021-01-06)[2022-12-09]. http://arxiv.org/abs/2101.02073.

[28] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]// 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 7132-7141.

[29] HUANG J, ZHU P F, GENG M R, et al. Range scaling global U-net for perceptual image enhancement on mobile devices[C]// Computer Vision-ECCV 2018 Workshops. Berlin: Springer, 2018: 230-242.

[30] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transac-

tions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2004, 13(4): 600-612.

[31] WANG R X, ZHANG Q, FU C W, et al. Underexposed photo enhancement using deep illumination estimation[C]// 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2019: 6842-6850.

[32] IGNATOV A, KOBYSHEV N, TIMOFTE R, et al. DSLR-quality photos on mobile devices with deep convolutional networks[C]// 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE Press, 2017: 3297-3305.

[33] JOHNSON J, ALAHI A, LI F F. Perceptual losses for real-time style transfer and super-resolution[C]// European Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2016: 694-711.

[34] LI C, GUO C, REN W, et al. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond[J/OL]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 4376-4389[2022-12-01]. https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2955241.

[35] HOU G J, ZHAO X, PAN Z K, et al. Benchmarking underwater image enhancement and restoration, and beyond[J]. IEEE Access, 2020, 8: 122078-122091.

[36] LI H Y, LI J J, WANG W. A fusion adversarial underwater image enhancement network with a public test dataset[J/OL]. Image and Video Processing, 2019: 1-8 [2022-12-01]. http://arxiv.org/abs/1906.06819.

[37] LIU R S, FAN X, ZHU M, et al. Real-world underwater enhancement: challenges, benchmarks, and solutions under natural light[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 30(12): 4861-4875.

[38] MANDAL D, PANETTA K, AGAIAN S. Human visual system inspired object detection and recognition[C]// 2012 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA). Piscataway: IEEE Press, 2012: 145-150.

[39] YANG M, SOWMYA A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2015, 24(12): 6062-6071.

[40] GALDRAN A, PARDO D, PICÓN A, et al. Automatic Red-Channel underwater image restoration[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2015, 26: 132-145.

[41] GUO C L, WU R Q, JIN X, et al. Underwater ranker: learn which is better and how to be better[EB/OL]. (2022-11-26)[2022-12-01]. http://arxiv.org/abs/2208.06857.

[42] FU Z Q, WANG W, HUANG Y, et al. Uncertainty inspired underwater image enhancement[M]// Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 465-482.

# Two-stage underwater image enhancement method based on convolutional neural networks

LU Siqi[1], GUAN Fengxu[1,*], LAI Haitao[1], DU Xue[1,2]

(1. School of Intelligent Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Frontiers Science Center for Wave Field of Extreme Ocean Environment, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract**: Images taken underwater frequently suffer from substantial degradation due to the varied capabilities of water particles to absorb light, which has a significant impact on how underwater robots perceive their surroundings. The intricacy of underwater environments and uncertainties in physical factors usually result in poor generalization for traditional image processing techniques and degradation model-based picture restoration systems. A two-stage underwater image enhancement technique based on convolutional neural networks (CNNs) is suggested to improve the quality of underwater images. This method improves degraded underwater images into visually superior near-air images through damage and restoration phases. Testing results on Challenge60, U45, EUVP, and RUIE datasets show that the proposed method achieves better enhancement compared to existing underwater image restoration and enhancement algorithms, with improvements of 5.18% and 6.64% respectively for UIQM and UCIQE scores.

**Keywords**: convolutional neural networks; deep learning; two-stage; underwater image enhancement; underwater image restoration

**Received**: 2022-12-19; **Accepted**: 2023-05-26; **Published Online**: 2023-06-09 11:54

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230608.1311.003

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (52171297); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3072022FSC0401)

* **Corresponding author**. E-mail: guanfengxu@hrbeu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1025

# 高动态协同拓扑在线优化与分布式制导方法

庞博文[1]，朱建文[1,*]，包为民[1,2]，李小平[1]

(1. 西安电子科技大学 空间科学与技术学院，西安 710126；2. 中国航天科技集团有限公司，北京 100048)

**摘 要**：针对高速飞行器集群飞行过程中的分布式协同制导问题，提出了基于最小生成树的自适应拓扑优化与制导方法。构建了飞行器集群通信链路的拓扑图，根据通信代价将距离量化为权值，通过最小生成树中 Kruskal 算法思想实时生成最优通信拓扑图；采用分布式双层协同制导构架与多中心分布式拓扑优化决策方法，在一致性协同控制律中对协调变量进行补偿计算；实现了飞行器集群协同飞行中的拓扑自适应优化调控。仿真验证结果表明了所提方法的有效性与优异性能。

**关 键 词**：协同制导；拓扑优化；最小生成树；多中心；分布式设计

**中图分类号**：V243.1; TJ765.3

**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2025)01-0333-07

在现代化作战环境下，集群飞行器在面对复杂环境与丰富任务下具有特有的优势，而通信拓扑是保证多飞行器实现协同控制的基础。在现代优化理论与智能算法不断发展下，飞行器集群规模逐渐扩大，飞行速度逐渐加快，需求背景逐渐严苛。为了适应这些变化带来的计算复杂度，面对有限的通信带宽，优化其通信拓扑，平衡其协同强度、通信性能与隐蔽性是协同作战中的重中之重。

针对集群网络的拓扑优化问题，众多学者从收敛速率[1]、编队构型[2]、平衡通信能量与控制能量[3]等方面开展研究。文献 [4] 提出在领从结构下编队通信网络拓扑为一颗有向生成树。文献 [5] 采用 Dijkstra 最短路径算法得到领从结构下最优通信拓扑。对于分层优化方法，文献 [6] 针对队形保持下的大规模无人机编队通过最小树形图分级分布式生成信息拓扑；文献 [7] 对于飞行器编队优化考虑敌方机群编队，建立协同任务分配模型，分层得到最优队形。对于最优持久编队，文献 [8] 提出了针对智能体连通度数目的有向化操作方法，层层缩减最小刚性图范围以生成最优持久图；文献 [9-10] 考虑领从结构中的领航者约束提出了基于最小树形图与最短路径算法的改进算法，适用于二维、三维编队；文献 [11] 考虑了智能体间的通信能耗均衡，通过估计剩余能量更新链路权重来实现能耗均衡的三维最优持久拓扑生成；文献 [12] 考虑攻防对抗态势与最小信息流要求提出了基于 Q 学习的网络连通性控制方法；文献 [13] 综合考虑网络连通度、收益、成本以及通信质量，提出一种基于改进粒子群优化的网络拓扑优化控制算法；文献 [14] 研究了网络的分布式优化问题，提出了一种加速分布式 Nesterov 梯度法，收敛速度快，满足网络高动态需求。

本文研究在复杂信息态势下，飞行器集群协同飞行过程中自适应拓扑优化问题。协同方法采用分布式双层协同制导框架，制导控制律与协同控制律分开，通过协调变量一致性控制算法实现协同[15]。针对拓扑优化设计了基于最小生成树算法的自适应调节算法，以距离为标准建立飞行器集群全连接的通信拓扑模型，中心飞行器根据优化算法实时得到集群的最优通信拓扑并发送至各飞行器。各飞行器再根据最优拓扑在一致性控制律中补偿互相通信的飞行器协调变量差值，实现拓扑自

**收稿日期**：2022-12-31；**录用日期**：2023-03-04；**网络出版时间**：2023-04-06 13:52
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230406.1213.001
**基金项目**：国家自然科学基金 (62173336)
* **通信作者**. E-mail：zhujianwen1117@163.com

*引用格式*：庞博文，朱建文，包为民，等. 高动态协同拓扑在线优化与分布式制导方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（1）：333-339.
PANG B W，ZHU J W，BAO W M，et al. High dynamic cooperative topology online optimization and distributed guidance method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51（1）：333-339（in Chinese）.

适应调节的协同飞行。整个飞行过程为集中式拓扑优化，分布式协同制导控制，对其过程进行仿真，验证本文方法可行性并对其进行性能分析，本文的主要创新点如下：

1）并非针对飞行器编队的拓扑生成以及编队保持问题进行研究，而是对于飞行器协同制导过程中的实时的拓扑优化问题进行研究。

2）针对协同飞行的拓扑优化问题，提出了一种基于最小生成树的优化方法。首先建立以距离为标准的通信拓扑模型，利用Kruskal算法得到最小代价连通图，通过补偿通信飞行器间的剩余飞行时间误差对剩余飞行时间进行积分迭代来保持协同飞行。

## 1 协同制导问题描述

在协同飞行中采用的分布式双层协同制导架构，底层为飞行器本体的纵向高度控制律，终端方位角可控的侧向最优制导律以及满足终端时间约束的推力控制律。上层为时间协同控制律，选取剩余飞行时间为协调变量，各飞行器之间需要通过它们之间的通信链路进行信息交互以获取协调变量，通过一致性控制算法，使各自的剩余飞行时间趋于一致，进而实现同时到达，其流程结构如图1所示，攻击时间与角度控制制导（impact time and angle control guidance, ITACG）。

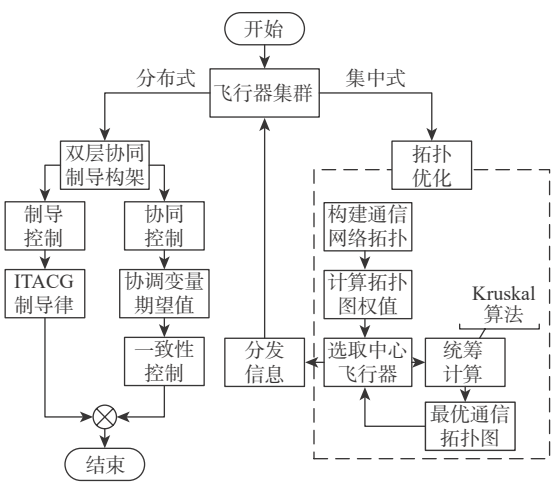



图1 协同飞行自适应拓扑优化结构流程

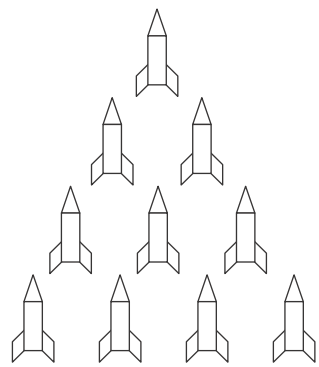
Fig. 1 Flow chart of adaptive topology optimization structure for cooperative flight

通信链路由于不同的通信代价要消耗不同的能量，在飞行过程中各飞行器能量有限，因此需要对于协同飞行中描述通信链路的拓扑图进行优化。移除掉冗余的通信链路，在保持每个飞行器都有链接的情况下，得到通信拓扑最小代价联通图。在拓扑优化中采用集中式决策与信息分配，需要构建飞行器集群的通信拓扑模型，选取中心飞行器，计算优化并将优化后的拓扑信息发送至各飞行器。

## 2 基于最小生成树的自适应信息拓扑优化

### 2.1 最小生成树算法

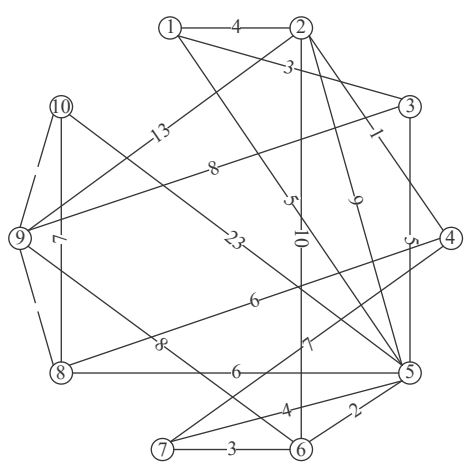
飞行器集群的通信网络可用一个图来表示[16]，图的顶点为各飞行器成员，图的边为他们之间的通信链路，他们之间的通信是双向的，因此用无向图表示。一个由10个飞行器组成的集群通信链路拓扑结构示意图如图2所示，示意图权值为随机值，邻接矩阵如图2(b)所示。



(a) 飞行器集群示意图

$$A=\begin{bmatrix}
0 & 4 & 3 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
4 & 0 & 0 & 1 & 9 & 10 & 0 & 0 & 13 & 0\\
3 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0\\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 6 & 0 & 0\\
5 & 9 & 5 & 0 & 0 & 2 & 4 & 6 & 0 & 23\\
0 & 10 & 0 & 0 & 2 & 0 & 3 & 0 & 8 & 0\\
0 & 0 & 0 & 7 & 4 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 6 & 6 & 0 & 0 & 0 & 7 & 7\\
0 & 13 & 8 & 0 & 0 & 8 & 0 & 7 & 0 & 9\\
0 & 0 & 0 & 0 & 23 & 0 & 0 & 7 & 9 & 0
\end{bmatrix}$$

(b) 通信链路加权邻接矩阵




(c) 通信链路拓扑示意图

图2 通信链路拓扑构建示意图

Fig. 2 Schematic diagram of communication link topology construction

协同飞行中飞行器之间的通信拓扑优化目的是以最小的代价保证所有飞行器处于通信网络中，正符合最小生成树算法的适用场景。最小生成树

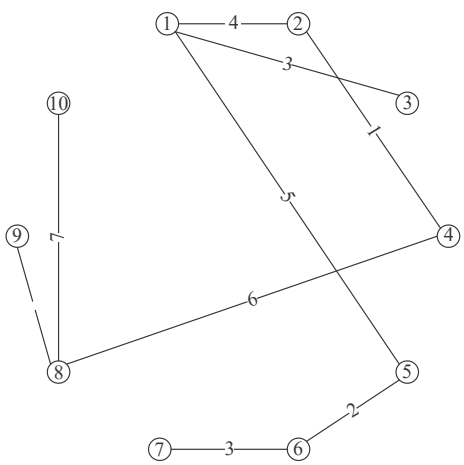
即最少的边来连接拓扑图中的所有顶点, 且不形成回路的树状结构。对于无向图, 使得 $n$ 个点联通最少需要 $n$−1 条边, 由 $n$−1 条边组成的子图为原图的生成树。对于带权图, 最小生成树即为权值和最小的一棵生成树。图 2(c) 所示拓扑图的最小生成树如图 3 所示, 10 个顶点的最小生成树为 9 条边。

针对飞行器集群的自适应拓扑优化对时间性能有所需求, 可以采用 Kruskal 算法思想, 效率较高, 对稀疏图效果好, 其时间复杂度为$O\left(n\log\left(n-1\right)\right)$。Kruskal 算法是将图中所有边按照权值由小到大排列, 然后从小到大枚举, 最终生成一棵生成树, 其过程如下:

| 边权值 | 节点 1 | 节点 2 |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 4 |
| 2 | 5 | 6 |
| 3 | 1 | 3 |
| 3 | 6 | 7 |
| 4 | 1 | 2 |
| 4 | 5 | 7 |
| 5 | 1 | 5 |
| 5 | 3 | 5 |
| 6 | 4 | 8 |
| 6 | 5 | 8 |

| 边权值 | 节点 1 | 节点 2 |
|---|---|---|
| 7 | 4 | 7 |
| 7 | 8 | 9 |
| 7 | 8 | 10 |
| 8 | 3 | 9 |
| 8 | 6 | 9 |
| 9 | 2 | 5 |
| 9 | 9 | 10 |
| 10 | 2 | 6 |
| 13 | 2 | 9 |
| 23 | 5 | 10 |

(a) 初始拓扑连边




(b) 最小生成树

图 3　最小生成树示意图

Fig. 3　Schematic diagram of minimum spanning tree

1) 设需要构造的生成树为 $T$。初始时, $T$ 中没有边, 所有点看成是一个单独的集合。

2) 设当前枚举的边为 $e(u,v)$, 如果 $u$ 与 $v$ 不在同一个集合中, 则将 $e$ 加入到 $T$ 中, 并且将 $u$ 和 $v$ 合并到一个集合中, 否则, 忽略 $e$。

3) 判断是否枚举完最后一条边, 否则重复第 2 步。如果 $T$ 中含有 $n$−1 条边, 则说明找到原图的最小生成树, 否则说明原图没有最小生成树。

结合最小生成树的性质, 对于判断枚举的边的 2 个终点是否在一个集合中, 可以将该边加入 $T$ 集合中, 然后判断集合中是否产生环路, 如果产生则删除该条边, 否则枚举下一条边。如图 3 所示, 左侧表格将图 2 中初始拓扑连边按权值从小到大枚举, 深色行即加入到 $T$ 集合中的边, 其中跳过了节点 1 和节点 2 都在 $T$ 中的边, 直至 $T$ 中存在 9 条边。

## 2.2　多中心拓扑结构优化

对于最小生成树算法进行拓扑优化需要通过一个计算中心得到来统筹分发优化的拓扑信息, 但是单个中心一旦被破坏容易造成整个协同系统的破坏, 优化算法将失效。因此, 选取多个计算中心能够增加整个系统的鲁棒性, 对于基于最小生成树的拓扑优化算法进行增强鲁棒性的优化是必要的。

通过飞行器之间距离的矩阵 $\boldsymbol{R}$, 与选取单个中心方法相同, 选取 $\boldsymbol{R}$ 矩阵和最小的 3 行来确定 3 个中心飞行器。对于 3 个中心的拓扑应保持它们之间的两两连接, 在生成最小生成树时, 排序并枚举其余边, 判断 $T$ 集合是否存在除中心环路外的其他环路, 有则删除该边, 否则枚举下一条边, 直至集合中有 $n$ 条边。优化后的拓扑为中心一个三角环路, 四周向各飞行器延伸的拓扑结构。协同飞行拓扑优化算法示意图如图 4 所示。

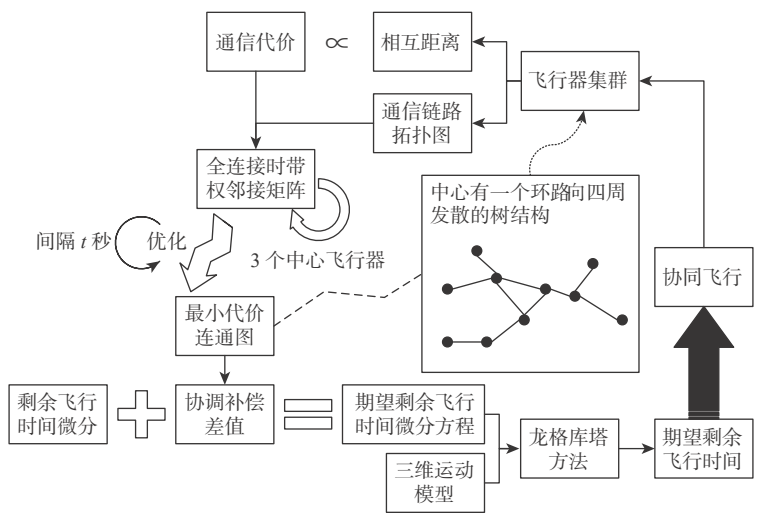



图 4　协同飞行拓扑优化算法示意图

Fig. 4　Schematic diagram of cooperative flight topology optimization algorithm

当其中1个或2个中心飞行器被迫离队，无法通信时，剩余的中心飞行器仍可承担拓扑优化的计算与信息分发任务，同时由于中心飞行器在集群中的位置处于中间位置，其剩余飞行时间也处于中间水平，因此离队导致的协同飞行偏差较小。

## 3 拓扑在线切变的分布式协同制导

### 3.1 最小通信分布式拓扑设计

通信代价通常与通信距离的平方成正比，计算各飞行器间的距离，以此值的平方为权值构建带权无向通信拓扑图。由带权值的全连通图找到权值和最小的连通图即为最小生成树问题，因此采用Kruskal算法每隔一定时间对拓扑进行重构，以得到的最小生成树为通信拓扑进行飞行。

在协同飞行过程中，此优化方法通过2步实现，在初始时拓扑为全连接的，即邻接矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0&1&\cdots&1\\1&0&\cdots&1\\\vdots&\vdots&&\vdots\\1&1&\cdots&0\end{bmatrix} \tag{1}$$

此时生成各飞行器之间距离的矩阵，即全连接时带权矩阵为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0&r_{12}&\cdots&r_{1n}\\r_{21}&0&\cdots&r_{2n}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\r_{n1}&r_{n2}&\cdots&0\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$r_{ij}$为第$i$个飞行器与第$j$个飞行器之间的距离。计算得到$\boldsymbol{R}$矩阵和最小的行为第$i$行，则选取第$i$个飞行器为中心飞行器。优化过程是以$\boldsymbol{R}$矩阵为权值，即最小通信，寻找权值和最小的连通图得到优化后的邻接矩阵$\boldsymbol{A}_k$，将优化后的拓扑信息发送给所有飞行器。每隔一段时间循环此过程，实现飞行过程不断优化更新，拓扑自主调控的协同制导。

### 3.2 制导律设计

对于制导律的设计，一方面协调层需要协调变量剩余飞行时间完成协同，因此要增添时间约束；另一方面目标点需要期望的角度命中来增加毁伤效果，因此要增添角度约束。

由于拓扑优化的适用场景多为巡航阶段，因此纵向制导需满足速度倾角为零的约束，使飞行器从$h_0$到$h_\mathrm{f}$进行平飞。设置高度与速度倾角控制的纵向制导律，纵向过载指令为

$$n_y=\frac{v}{g}\left(\dot{\theta}^*+\frac{g\cos\theta}{v}-\frac{v\cos\theta}{r}+k_\theta(\theta^*-\theta)\right)+k_h(h_\mathrm{f}-h) \tag{3}$$

式中：$v$为速度；$\theta$为速度倾角；$g$为引力加速度；$r$为距离；$k_\theta$、$k_h$为趋于期望值的反馈系数；$\theta^*$为期望速度倾角。

侧向制导要使视线方位角$\sigma_\mathrm{LOS}$与速度方位角$\sigma$之差趋于零，添加终端角度$\sigma_\mathrm{f}$的与约束，其最优制导律为[17]

$$\dot{\sigma}=4\dot{\sigma}_\mathrm{LOS}+2\frac{\sigma_\mathrm{LOS}+\sigma_\mathrm{f}}{T_\mathrm{go}} \tag{4}$$

式中：$T_\mathrm{go}$为剩余飞行时间。侧向过载指令为

$$n_z=v\dot{\sigma}/g \tag{5}$$

对于时间约束，需要满足剩余时间控制的推力调节，由速度来控制飞行时间。$x$方向推力为

$$P_{xh}=m\frac{(v^*-v)}{t_\mathrm{IS}}+C_Dq S_\mathrm{M}+mg\sin\theta \tag{6}$$

式中：$m$为质量；$t_\mathrm{IS}$为积分步长；$C_D$为阻力系数；$q=\rho v^2/2$为动压，$\rho$为空气密度；$S_\mathrm{M}$为飞行器最大横截面积；$v^*$为期望速度，可通过剩余飞行距离$R_\mathrm{go}$与期望剩余飞行时间$T_\mathrm{go}$估算：

$$v^*=\frac{R_\mathrm{go}}{T_\mathrm{go}^*} \tag{7}$$

$y$方向推力可通过攻角$\alpha$计算：

$$P_{yh}=P_{xh}\tan\alpha \tag{8}$$

### 3.3 基于一致性的协调变量计算

飞行器运动模型为各飞行状态的微分方程，针对其飞行过程的解算是通过龙格库塔方法求解积分值得到运动状态，那么针对协调变量的期望值同样可以通过这种方式得到。如果将剩余飞行时间作为飞行状态量之一，那么不难得到其微分方程为

$$\dot{T}_{\mathrm{go}i}=-\dot{R}_{\mathrm{go}i}/v_\mathrm{LOS} \tag{9}$$

式中：$\dot{R}_{\mathrm{go}i}$为点$(\varphi,\lambda)$到点$(\varphi+\dot{\varphi},\lambda+\dot{\lambda})$的距离，$\varphi$为纬度角，$\lambda$为经度角，代入球面上两点的距离公式得到

$$\dot{R}_{\mathrm{go}i}=R_\mathrm{E}\arccos[\cos(\varphi+\dot{\varphi})\cos\varphi\cos\dot{\lambda}+\sin(\varphi+\dot{\varphi})\sin\varphi] \tag{10}$$

其中：$v_\mathrm{LOS}$为视线方向速度，由速度倾角$\theta$与航向误差$\Delta\sigma$得到

$$v_\mathrm{LOS}=v\cos\theta\cos\Delta\sigma \tag{11}$$

而期望的剩余飞行时间微分方程应当叠加使飞行器之间剩余飞行时间趋于一致的修正量，即当前飞行器与互相通信的飞行器的剩余飞行时间差值，那么协调变量期望值的微分方程为

$$\dot{T}_{\mathrm{go}i}^*=-\dot{T}_{\mathrm{go}i}-\Delta t \tag{12}$$

式中：$\Delta t$为相互通信的飞行器之间求得的修正量，通过式(12)可得到

$$\Delta t=k_t\boldsymbol{a}_i\begin{bmatrix}T_{\mathrm{go}i}-T_{\mathrm{go}1}\\T_{\mathrm{go}i}-T_{\mathrm{go}2}\\\vdots\\T_{\mathrm{go}i}-T_{\mathrm{go}n}\end{bmatrix} \tag{13}$$

式中：$k_t$为调控协调变量趋于其他飞行器的反馈系

数; $\boldsymbol{a}_i$为重构后通信拓扑的邻接矩阵$\boldsymbol{A}_k$的行向量。由式(9)～式(13)可得到期望剩余飞行时间的微分方程为

$$\dot{T}_{\mathrm{goi}}^{*}=-\frac{R_{\mathrm{E}}\arccos[\cos(\varphi+\dot{\varphi})\cos\varphi\cos\dot{\lambda}+\sin(\varphi+\dot{\varphi})\sin\varphi]}{v\cos\theta\cos\Delta\sigma}-k_t\boldsymbol{a}_i\begin{bmatrix}T_{\mathrm{goi}}-T_{\mathrm{go1}}\\T_{\mathrm{goi}}-T_{\mathrm{go2}}\\\vdots\\T_{\mathrm{goi}}-T_{\mathrm{gon}}\end{bmatrix}\tag{14}$$

式中: $R_{\mathrm{E}}$为地球半径。

将式(14)放入飞行器运动模型微分方程中一同解算与迭代即可得到协调变量期望值, 通过一致性算法使得自身协调变量向其逼近即可实现协同飞行:

$$T_{\mathrm{goi}}^{*}=\int\dot{T}_{\mathrm{goi}}^{*}\mathrm{d}t\tag{15}$$

对于分布式双层协同制导, 由于协调变量期望值是一直变化的, 因此逼近的过程是一直持续的。而采用积分迭代加补偿得到协调变量保证协调变量一直处于收敛状态, 在进行拓扑优化的过程中, 即使通信对象, 即期望值的补偿对象发生改变也不会对协同飞行造成影响。

## 4　仿真验证

对上述飞行器集群在临近空间中进行长距离高速度飞行中的自适应拓扑优化与协同飞行方法进行仿真验证, 设置 10 个飞行器协同飞往目标, 采用积分算法对剩余飞行时间期望值进行计算。为了增加随机性, 对于总射程 $L$, 在 0.6$L$ 到 0.85$L$ 区间对 10 个飞行器分别增加余弦机动。各飞行器的初始经纬度、终端方位角约束以及机动幅值设置如表 1 所示, 其他初始条件皆一致, 初始速度为 2 100 m/s, 初始速度倾角与攻角为 0°, 初始高度为 25 km, 初始质量为 1 500 kg, 推进剂质量为 750 kg, 终端经度为 120°, 纬度为 30°, 终端高度为 25 km。制导律部分反馈系数$k_\theta$、$k_h$、$k_t$分别为 1、0.2、0.015。自适应的周期在 0.7$L$ 范围内设置为 10 s, 在最后的 0.7$L$～$L$ 范围设置为 5 s。

协同飞行的主要参数曲线如图 5 所示。可以

**表 1　仿真条件设置**

**Table 1　Simulation condition setting**

| 飞行器 | 初始纬度/(°) | 初始经度/(°) | 终端方位角/(°) | 机动幅值 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 10.01 | 99.98 | −95 | 0.1 |
| 2 | 10.00 | 99.98 | −94 | 0.2 |
| 3 | 9.99 | 99.98 | −93 | 0.3 |
| 4 | 10.01 | 99.99 | −92 | 0.4 |
| 5 | 10.00 | 99.99 | −91 | 0.5 |
| 6 | 9.99 | 99.99 | −90 | 0.1 |
| 7 | 10.01 | 100.00 | −89 | 0.2 |
| 8 | 10.00 | 100.00 | −88 | 0.3 |
| 9 | 9.99 | 100.00 | −87 | 0.4 |
| 10 | 10.00 | 100.01 | −86 | 0.5 |

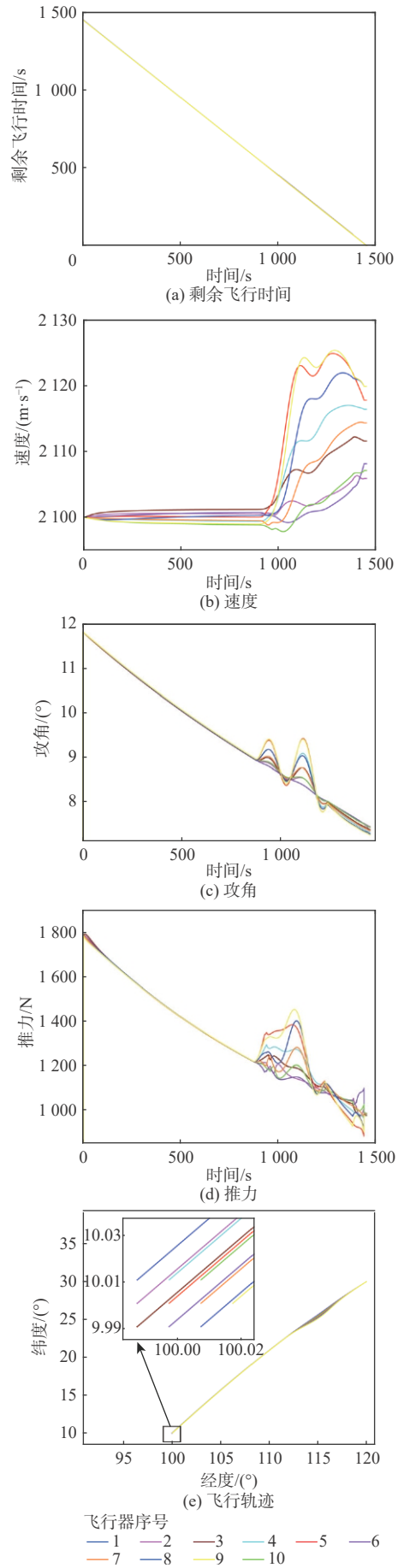


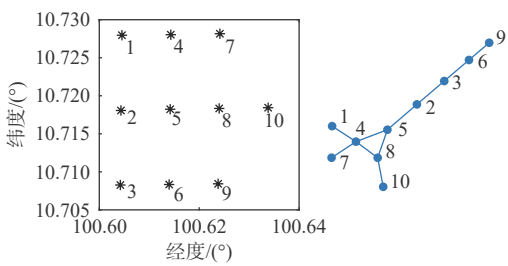

图 5　协同飞行状态信息

Fig. 5　Cooperative flight status information

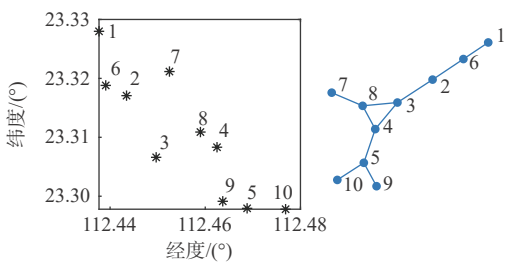
看到剩余飞行时间曲线的偏差很小，机动带来的波动没有导致估算剩余飞行时间发生变化。由于剩余飞行时间没有大幅增长，速度也没有出现衰减，稳定在2 100～2 125 m/s，攻角也没有出现激增，而是小幅波动后趋于稳定，推力同样波动幅度较小。飞行轨迹平滑，顺利抵达目标，后半段有小范围机动。

对于拓扑优化的自适应过程中的算法解算时间进行监控，由于集群数量较少，其优化算法的时间平均只有不到0.000 5 s，要远远低于自适应的周期，因此其自适应过程能正确的实现。

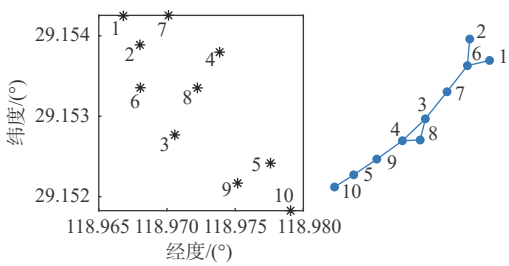
图6为选用3个中心的协同飞行的拓扑结构变化过程。可以看到在协同飞行过程中，随着飞行过程中飞行器之间的相对位置变化，它们之间的通信链路也一直发生改变，拓扑结构根据最小生成树的算法在飞行中不断解算，实现自适应的拓扑优化与调控。另外，通信拓扑图中中心的3个飞行器一直保持两两连接，其他飞行器如树状连接在中心飞行器周围。在飞行过程中，随着目标距离越近，剩余飞行时间减少，由于所有飞行器的目标一致，因此各飞行器之间的距离也逐渐变小，拓扑变换更加频繁，拓扑结构逐渐趋于一列。而当拓扑结构发生变化时，意味着飞行器对于剩余飞行时间的期望值估算的补偿对象发生了变化，但集群之间剩余飞行时间差值和时间补偿反馈系数较小，因此剩余飞行时间、速度等没有明显变化，如图5所示，因此无论飞行过程还是协同状态在拓扑变换过程中都十分平稳。




(a) 50 s 时刻集群位置及拓扑结构




(b) 950 s 时刻集群位置及拓扑结构




(c) 1 388 s 时刻集群位置及拓扑结构

图6 3个中心协同飞行过程拓扑结构变化

Fig. 6 Topological structure changes during cooperative flight of three center

## 5 结 论

本文研究了飞行器集群在协同飞行过程中的自适应拓扑优化问题，采用了分布式协同制导，集中式拓扑优化决策的思路。对于一致性协同控制律的协调变量提出了微分补偿的处理方法，对于集中式拓扑优化单个中心不稳定，提出了采用3个中心的优化方法。结果表明：

1）通过通信代价量化为权值从而构建通信链路拓扑图，采用Kruskal算法的思想能够快速生成最小联通图，满足协同飞行的自适应拓扑优化需求。

2）采用积分迭代加补偿的协调变量处理方法相比于传统的平均值求解方法能够显著减少机动等对协同时间的影响，从而保证飞行的稳定。

3）针对单个中心拓扑结构容易被集中破坏的缺陷，提出3个中心的优化拓扑结构，其性能并无损失且鲁棒性更强。

在后续研究中，应考虑更多因素来构建通信链路拓扑图的权值，实现更为真实全面的优化。面对数量更为庞大的飞行器集群，可利用深度学习来提高算法计算速度，更好地实现自适应的实时性。

### 参考文献（References）

[1] 陈新庄, 郭志伟, 李江荣. 一阶一致性收敛速率的拓扑优化方法综述[J]. 延安大学学报 (自然科学版), 2022, 41(2): 42-51.
CHEN X Z, GUO Z W, LI J R. An overview of topology optimization for improving the convergence rate of first-order consensus protocols[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2022, 41(2): 42-51(in Chinese).

[2] 杨彦祥. 无人机集群拓扑构型关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
YANG Y X. Research on key technologies of UAV cluster topology configuration[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022(in Chinese).

[3] 马丹, 张宝峰, 王璐瑶. 多智能体系统一致性问题的控制器与拓扑协同优化设计[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(5): 720-727.
MA D, ZHANG B F, WANG L Y. Controller and topology co-optimization for consensus of multi-agent systems[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(5): 720-727(in Chinese).

[4] REN W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations[J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(2): 505-512.

[5] GIULIETTI F, POLLINI L, INNOCENTI M. Autonomous formation flight[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2000, 20(6): 34-44.

[6] 董文奇, 何锋. 大规模 UAV 编队信息交互拓扑的分级分布式生成[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 452-462.
DONG W Q, HE F. Hierarchical and distributed generation of information interaction topology for large scale UAV formation[J]. Acta Aeronautica et AstronauticaSinica, 2021, 42(6): 452-462(in Chinese).

[7] 冉华明, 熊蓉玲. 空战中机群编队分层优化算法[J]. 航空学报, 2020, 41(S2): 44-52.
RAN H M, XIONG R L. Hierarchical optimization algorithm for air fleet formation in air-combat[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S2): 44-52(in Chinese).

[8] 罗小元, 杨帆, 李绍宝, 等. 多智能体系统的最优持久编队生成策略[J]. 自动化学报, 2014, 40(7): 1311-1319.
LUO X Y, YANG F, LI S B, et al. Generation of optimally persistent formation for multi-agent systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(7): 1311-1319(in Chinese).

[9] WANG G Q, LUO H, HU X X. Generation of optimal persistent formations for heterogeneous multi-agent systems with a leader constraint[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(2): 028901.

[10] WANG G Q, LUO H, HU X X, et al. Communication topology optimization for three-dimensional persistent formation with leader constraint[J]. Optimization Letters, 2021, 15(2): 513-535.

[11] 罗贺, 李晓多, 王国强. 能耗均衡的三维最优持久编队通信拓扑生成[J]. 航空学报, 2022, 43(1): 514-531.
LUO H, LI X D, WANG G Q. Energy-balanced communication topology generation of three-dimensional optimally persistent formation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 514-531(in Chinese).

[12] 徐星光, 王晓峰, 姚璐, 等. 固定翼无人机编队构型与通信拓扑优化[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(9): 2936-2946.
XU X G, WANG X F, YAO L, et al. Formation configuration and communication topology optimization for fixed-wing UAVs[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(9): 2936-2946(in Chinese).

[13] 崔亚妮, 任佳, 杜文才, 等. 多无人船通信网络拓扑优化控制算法[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(12): 1639-1649.
CUI Y N, REN J, DU W C, et al. Network topology optimization control algorithm for multiple unmanned surface vehicle[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(12): 1639-1649(in Chinese).

[14] QU G N, LI N. Accelerated distributed nesterov gradient descent[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(6): 2566-2581.

[15] 庞博文, 朱建文, 包为民, 等. 通信长时间中断的分布式自主协同制导策略[J]. 战术导弹技术, 2022(4): 69-77.
PANG B W, ZHU J W, BAO W M, et al. Distributed autonomous cooperative guidance strategy for long time communication interruption[J]. Tactical Missile Technology, 2022(4): 69-77(in Chinese).

[16] BONDY J A, MURTY U S R. Graph theory[M]. London: Springer London, 2008.

[17] ZHU J W, LIU L H, TANG G J, et al. Optimal guidance with multi-targets for hypersonic vehicle in dive phase[C]// 2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Piscataway: IEEE Press, 2013: 341-346.

# High dynamic cooperative topology online optimization and distributed guidance method

PANG Bowen[1], ZHU Jianwen[1,*], BAO Weimin[1,2], LI Xiaoping[1]

(1. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China;
2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

**Abstract**: In order to solve the distributed cooperative guidance problem in the flight process of a high-velocity aircraft swarm, this paper proposed an adaptive topology optimization and guidance algorithm based on a minimum spanning tree. The algorithm constructed the topology graph of the communication link of the aircraft swarm, quantified the distance as the weight according to the communication cost, and generated the optimal communication topology graph in real time through the idea of the Kruskal algorithm in the minimum spanning tree. This paper adopted the distributed two-layer cooperative guidance framework and multi-center distributed topology optimization decision-making method and compensated for the consistent variables in the consensus cooperative control law, so as to realize the topology adaptive optimization and control in the cooperative flight of aircraft swarm. Simulation results verify the effectiveness and excellent performance of the proposed algorithm.

**Keywords**: cooperative guidance; topology optimization; minimum spanning tree; multiple centers; distributed design

**Received**: 2022-12-31; **Accepted**: 2023-03-04; **Published Online**: 2023-04-06 13:52
**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230406.1213.001
**Foundation item**: National Natural Science Foundation of China (62173336)
* **Corresponding author**. E-mail: zhujianwen1117@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1022

# 基于改进 SuperPoint 与线性转换器的可见光红外匹配算法

伍薇[1]，鲜勇[1]，苏娟[2]，张大巧[1]，李少朋[1,3,*]，李冰[1]

(1. 火箭军工程大学 作战保障学院，西安 710025；2. 火箭军工程大学 核工程学院，西安 710025；
3. 清华大学 自动化系，北京 100084)

**摘　　要**：针对可见光和红外图像的异源图像匹配难度大、误匹配率高的问题，提出一种基于改进 SuperPoint 与线性转换器的深度学习匹配算法。首先在 SuperPoint 网络结构的基础上，引入特征金字塔的思想构建特征描述分支，基于铰链损失函数进行训练，从而较好地学习可见光与红外图像多尺度深层次特征，增大图像同名点对描述子的相似度；在特征匹配模块，利用线性转换器对 SuperGlue 匹配算法进行改进，聚合特征以提高匹配性能。在多个数据集上对所提算法进行实验验证，结果表明，与现有的算法相比，所提算法获得了更好的匹配效果，提高了匹配准确率。

**关 键 词**：红外图像；可见光图像；异源图像匹配；特征金字塔；线性转换器
**中图分类号**：TP183
**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)01-0340-09

图像匹配是在2幅有重叠区域的图像之间寻找同名点对，建立对应关系的过程，是图像领域的一个基础课题。随着遥感技术的发展和进步，异源遥感图像的数量和质量均有较大幅度提高，异源图像的应用更加广泛多样化，异源图像匹配是各类下游任务如图像融合的基本工作。红外和可见光作为2类常见的遥感图像，红外图像的热辐射特性和可见光图像的高分辨率特性可有效进行信息互补，可见光和红外图像的匹配工作有利于图像的进一步分析和实际应用。尽管图像匹配工作已经历长期研究和实验，但是异源图像匹配仍是具有挑战的难题和有意义的工作，本文针对可见光和红外的异源图像匹配开展研究[1-2]。

传统的图像匹配算法以尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)[3]算法为代表，提取图像中的特征点并进行特征的描述，使用搜索最近邻的方法寻找同名点对。将此类点特征算法直接用于红外与可见光这一类异源图像匹配时，因两者之间灰度差异大，容易出现误匹配点多或者无法匹配的情况。为提高异源图像匹配性能，针对结构特征可以较好体现异源图像间的共有属性，文献[4]使用边缘特征图通过高斯正则场进行可见光和红外图像配准；文献[5]提出了一种基于相位一致性方位直方图的特征描述方法进行可见光和红外图像的匹配方法；文献[6]基于 Zernike 矩描述的区域特征和边缘特征实现可见光和红外图像的匹配；文献[7]提出一种用相位一致性检测特征点，用 log-Gabor 构建最大索引映射图进行特征描述，实现可见光和红外图像的匹配。传统算法大部分通过提取可见光和红外图像间的共同特征进行匹配，已取得了一定成果，但传统算法大多需要一定的先验信息设计手工提取的特征，对特征提取要求较高，且每一种算法适用范围有限。

随着计算机硬件的发展，基于深度学习的图像

**收稿日期**：2022-12-29；**录用日期**：2023-05-29；**网络出版时间**：2023-09-08 16:06
**网络出版地址**：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230907.0928.001
**基金项目**：国家自然科学基金(62103432)；中国博士后科学基金(2022M721841)
*通信作者. E-mail：sp-li16@mails.tsinghua.edu.cn

*引用格式：伍薇，鲜勇，苏娟，等. 基于改进 SuperPoint 与线性转换器的可见光红外匹配算法 [J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(1)：340-348. WU W，XIAN Y，SU J，et al. A matching method based on improved SuperPoint and linear Transformer for optical and infrared images [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(1)：340-348 (in Chinese).*

匹配已经成为图像匹配的另一分支，卷积神经网络在图像匹配领域得到广泛应用。对于深度学习的异源图像匹配算法，文献 [8] 提出了一种基于生成对抗模型将异源图像转换成同源图像进而进行匹配的思路，将可见光和红外图像的匹配转化成红外与红外图像的匹配，此算法在固定场景，形变较小的情况可取得较好的匹配效果，但其泛化性较差，且生成的图像质量不好；文献 [9] 通过学习先将可见光和红外图像转化成共享信息的同一模态再进行匹配，但此算法提供的特征仅对旋转和平移有不变性。已有的深度学习异源匹配算法为异源图像匹配提供了新的匹配思路，但其应用范围较窄，难以处理场景复杂的可见光和红外图像匹配。基于特征的同源图像匹配可以分为 2 个部分：特征提取与描述和特征匹配算法。在特征提取和描述上，文献 [10] 构建了将特征检测、方向估计和特征描述统一成端到端可微的网络；文献 [11] 提出了一种用自监督的方式训练感兴趣点检测和描述的网络 SuperPoint；文献 [12] 介绍了一种弱监督进行局部特征学习的方法。在特征匹配方面；文献 [13] 构建了一种基于注意力图神经网络对特征进行聚合得到图像匹配关系的网络 SuperGlue；文献 [14] 融入聚类的思想对 SuperGlue 进行改进。以 SuperPoint 和 SuperGlue 的组合为代表的匹配算法在同源图像上取得了较好的匹配效果，可处理多种场景下的图像匹配，但将其直接应用于异源图像的匹配任务上仍有较大的提升空间。

针对可见光与红外图像间匹配存在的问题，结合深度学习图像匹配算法，本文提出了一种基于改进 SuperPoint 和线性转换器的深度学习匹配算法，并对算法的匹配性能进行了实验验证。

## 1　方　法

本文算法的结构框架如图 1 所示，由基于改进 SuperPoint 的特征点检测和描述以及基于线性转换器的特征匹配 2 部分组成。

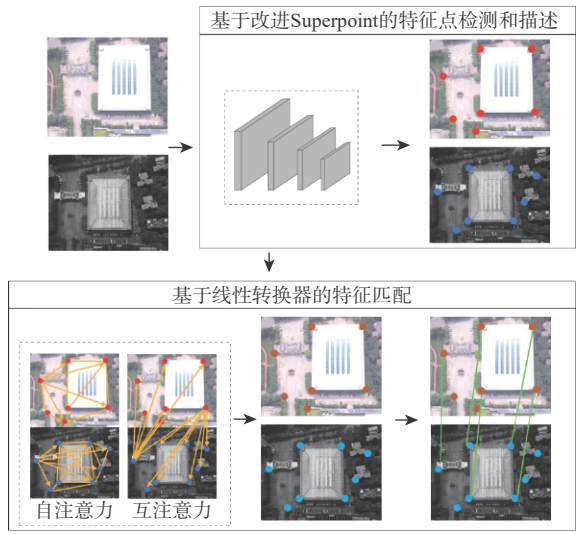



图 1　本文算法框架图

Fig. 1　Framework of proposed algorithm

### 1.1　基于改进 SuperPoint 的特征点检测和描述

改进 SuperPoint 的特征点检测和描述由特征点检测和特征描述 2 个分支组成，其中特征点检测分支沿用 SuperPoint[11] 的特征检测分支；为更好地对特征进行描述，特征描述分支借鉴特征金字塔 (feature pyramid network, FPN)[15] 和残差的思想对特征描述分支进行改进。改进 SuperPoint 网络（SuperPoint-FPN）结构如图 2 所示，其 $W_c$ 和 $H_c$ 表示图像长和宽。

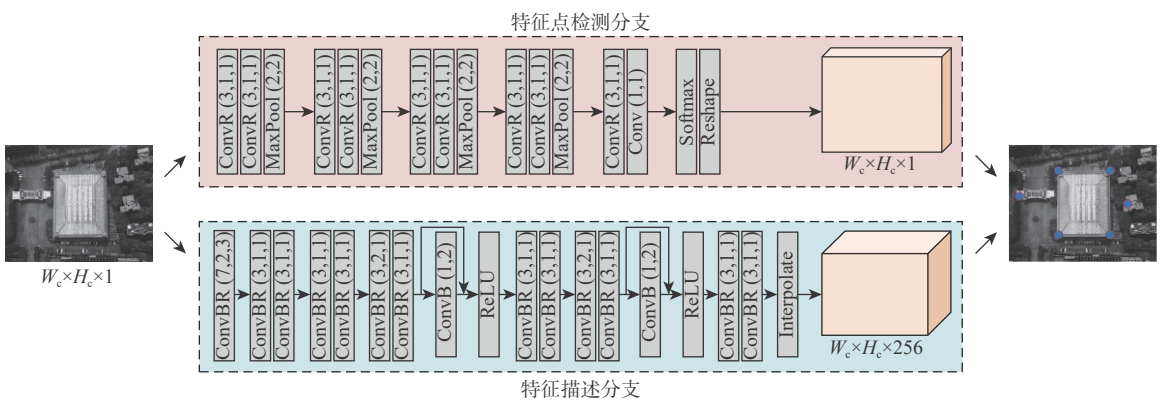
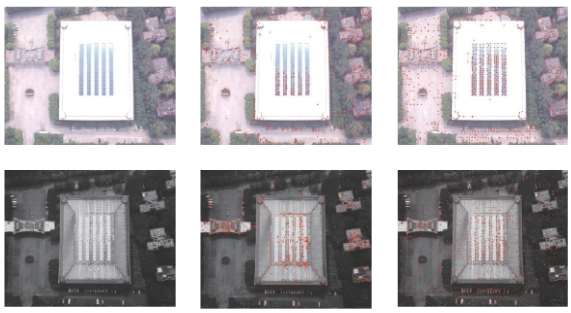



图 2　改进 SuperPoint 网络结构图

Fig. 2　Network structure of improved SuperPoint

为对比传统的 SIFT[3] 点特征提取和 SuperPoint 点特征提取，图 3 给出 2 对可见光红外图像对的点特征提取示例，经比较可知，SIFT 点特征分布不均匀，在对比度较高的区域检测的特征点较集中，一定程度上造成了特征点提取的冗余，不利于匹配工作；而 SuperPoint 提取的特征点整体分布更加均匀稀疏。

为使得网络更好地适应可见光和红外图像，提



(a) 原图 (b) SIFT特征点 (c) SuperPoint特征点

图3 SIFT与SuperPoint特征点检测对比

Fig. 3 Comparison of point feature detection between SIFT and SuperPoint

取可见光和红外图像共同的特征进行特征描述，增大同名点对特征描述子的相似度，设计带正负边缘的铰链损失函数$L_{\text{loss,d}}$为

$$L_{\text{loss,d}}=\frac{1}{(H_{\text{c}}W_{\text{c}})^2}\sum_{h=1,w=1}^{H_{\text{c}},W_{\text{c}}}\sum_{h'=1,w'=1}^{H_{\text{c}},W_{\text{c}}} l_{\text{d}}(\boldsymbol{d}_{hw},\boldsymbol{d}'_{h'w'},s_{hwh'w'}) \tag{1}$$

$$l_{\text{d}}(\boldsymbol{d},\boldsymbol{d}',s)=\lambda_{\text{d}}s\max(0,m_{\text{p}}-\boldsymbol{d}^{\text{T}}\boldsymbol{d}')+(1-s)\max(0,\boldsymbol{d}^{\text{T}}\boldsymbol{d}'-m_n) \tag{2}$$

$$s_{hwh'w'}=\begin{cases}1, & \left\|\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{hw}-\boldsymbol{P}'_{h'w'}\right\|\leqslant 8\\ 0, & \left\|\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{hw}-\boldsymbol{P}'_{h'w'}\right\|>8\end{cases} \tag{3}$$

式中：$\lambda_{\text{d}}$为平衡正负样本所设的参数；$m_{\text{p}}$、$m_{\text{n}}$分别为给定的正边缘参数和负边缘参数；$\boldsymbol{H}$为已知的图像变换关系矩阵；$\boldsymbol{d}_{hw}$、$\boldsymbol{d}'_{h'w'}$分别为可见光图像$(h,w)$位置处和红外图像$(h',w')$位置处的描述子；$\boldsymbol{P}_{hw}$、$\boldsymbol{P}'_{h'w'}$分别为可见光图像$(h,w)$位置处和红外图像$(h',w')$位置处的坐标表示；$H_{\text{c}}$、$W_{\text{c}}$分别为图像的长和宽。

## 1.2 基于线性转换器的特征匹配

特征匹配模块使用L-SuperGlue结构，框架流程图如图4所示，$N_{\text{A}}$为线性转换器中注意力层的层数。L-SuperGlue首先对检测的感兴趣特征点$(\boldsymbol{d}^i,\boldsymbol{P}^i)$，$i\in\{\text{A},\text{B}\}$中位置信息$\boldsymbol{P}^i$进行位置编码，与特征描述信息相加$\boldsymbol{d}^i$得融合特征$\boldsymbol{f}^i$；然后采用基于线性转换器的自注意力层和互注意力层对包含位置信息和描述子信息的特征$\boldsymbol{f}^i$进行聚合，更新特征描述子$\tilde{\boldsymbol{f}}^i$；基于更新后的特征点集合进行互相关计算得到相关分数$\boldsymbol{S}$，对$\boldsymbol{S}$的行和列分别扩增一行和一列得到$\bar{\boldsymbol{S}}$，使用Sinkhorn算法[16]对$\bar{\boldsymbol{S}}$沿着行和列进行$T$次迭代计算，得到最终的匹配概率预测值$\bar{\boldsymbol{P}}$，选取其中每行每列均为最大值且高于阈值$T_{\text{th}}$的特征点对为最后的同名点对。

位置编码的作用是将位置信息融入特征描述信息；L-SuperGlue中的特征聚合采用线性转换器编码层进行特征聚合，线性转换器编码层中使用线性注意力层(Linear Attention)[17]替代SuperGlue中点乘注意力层进行计算。本文中所用线性转换器编码层结构如图5所示，图中：$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{V}$分别为查询向量、键向量、值向量；$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{Q}}$、$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{K}}$、$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{V}}$为权重矩阵；$\boldsymbol{f}^i$和$\boldsymbol{f}^j$为图像$i$和图像$j$对应的特征描述子，$\tilde{\boldsymbol{f}}^i$为更新后的特征描述子；$E_{\text{elu}}(x)=\begin{cases}x, & x\geqslant 0\\ \text{e}^x, & x<0\end{cases}$，$h$为多头注意力的头数。

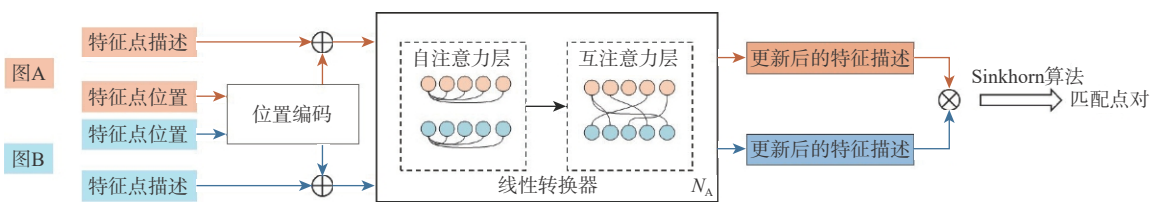



图4 L-SuperGlue结构图

Fig. 4 Structure of L-SuperGlue

为充分获取上下文信息，采用自注意力和互注意力迭代的方式进行特征聚合。对于自注意力层，输入的特征$\boldsymbol{f}^i$和$\boldsymbol{f}^j$为同一张图像的特征，即为$\boldsymbol{f}^{\text{A}}$或者$\boldsymbol{f}^{\text{B}}$；对于互注意力层，输入的特征$\boldsymbol{f}^i$和$\boldsymbol{f}^j$来自不同的图像，即为$\boldsymbol{f}^{\text{A}}$和$\boldsymbol{f}^{\text{B}}$或者$\boldsymbol{f}^{\text{B}}$和$\boldsymbol{f}^{\text{A}}$；自注意力层可建立同一张图像中的特征点的联系，互注意力层可建立不同图像特征点之间的联系。图6为图像的自注意力与互注意力的可视化示例图。

L-SuperGlue算法的伪代码如下：

**输入：** $\boldsymbol{d}^{\text{A}}$, $\boldsymbol{P}^{\text{A}}$; $\boldsymbol{d}^{\text{B}}$, $\boldsymbol{P}^{\text{B}}$

1. $\boldsymbol{f}^{\text{A}}_{\text{des}}=\boldsymbol{d}^{\text{A}}+F_{\text{MLP,PE}}(\boldsymbol{P}^{\text{A}})$; $\boldsymbol{f}^{\text{B}}_{\text{des}}=\boldsymbol{d}^{\text{B}}+F_{\text{MLP,PE}}(\boldsymbol{P}^{\text{B}})$

2. while $k\leqslant N_{\text{A}}$:

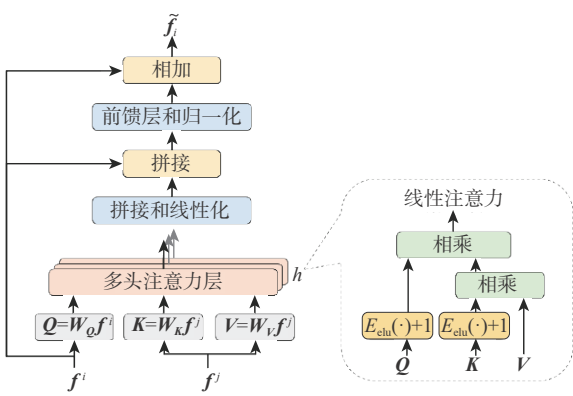
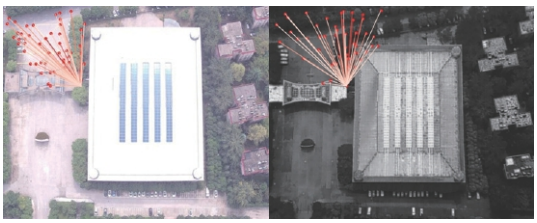
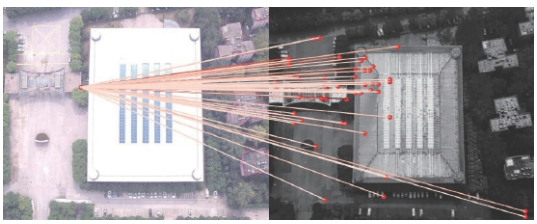



图5 线性转换器编码层结构图

Fig. 5 Structure of linear transformer encoder layer



(a) 自注意力



(b) 互注意力

图 6　自注意力与互注意力可视化

Fig. 6　Visualization of self-attention and cross-attention

if $k=1$, then ${}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}=\boldsymbol{f}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}$, ${}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}=\boldsymbol{f}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}$

Self-attention:

$${}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}\rightarrow\boldsymbol{Q}^{\mathrm{A}},\boldsymbol{K}^{\mathrm{A}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{A}};\ {}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}\rightarrow\boldsymbol{Q}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{K}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{B}}$$

$$\boldsymbol{m}^{\mathrm{AA}}=\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q}^{\mathrm{A}},\boldsymbol{K}^{\mathrm{A}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{A}});$$

$$\boldsymbol{m}^{\mathrm{BB}}=\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{K}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{B}})$$

$${}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}={}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}+F_{\mathrm{MLP,FFN}}(\mathrm{concat}({}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}},\boldsymbol{m}^{\mathrm{AA}}))$$

$${}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}={}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}+F_{\mathrm{MLP,FFN}}(\mathrm{concat}({}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{m}^{\mathrm{BB}}))$$

Cross-attention:

$${}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}\rightarrow\boldsymbol{Q}^{\mathrm{A}},K^{\mathrm{A}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{A}};\ {}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}\rightarrow\boldsymbol{Q}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{K}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{B}}$$

$$\boldsymbol{m}^{\mathrm{AB}}=\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q}^{\mathrm{A}},\boldsymbol{K}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{B}});$$

$$\boldsymbol{m}^{\mathrm{BA}}=\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{K}^{\mathrm{A}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{A}})$$

$${}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}={}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}+F_{\mathrm{MLP,FFN}}(\mathrm{concat}({}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}},\boldsymbol{m}^{\mathrm{AB}}))$$

$${}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}={}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}+F_{\mathrm{MLP,FFN}}(\mathrm{concat}({}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{m}^{\mathrm{BA}}))$$

if $k=N_{\mathrm{A}}$ then $\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}={}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}$, $\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}={}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}$

else ${}^{(k+1)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}={}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}$, ${}^{(k+1)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}={}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}$

3. $\boldsymbol{S}=\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{A}}*\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{des}}^{\mathrm{B}}$, $\boldsymbol{S}\rightarrow\bar{\boldsymbol{S}}$

4. Sinkhorn: $\bar{\boldsymbol{S}}\rightarrow\bar{\boldsymbol{P}}$

5. 按规则选择匹配点对$(c_{\mathrm{A}},c_{\mathrm{B}})$输出。

匹配模块中损失函数设计为

$$L_{\mathrm{loss,m}}=-\sum_{(i,j)\in G}\log\bar{\boldsymbol{P}}_{i,j}-\sum_{i\in I}\log\bar{\boldsymbol{P}}_{i,M+1}-\sum_{j\in J}\log\bar{\boldsymbol{P}}_{N+1,j}\tag{4}$$

式中: $G$为给定的同名点对标签; $I$为图A中没有匹配点对的特征点标签; $J$为图B中没有匹配点对的特征点标签; $N$、$M$分别为图A和图B特征点数量。

## 2　实验结果与分析

为对本文算法的性能进行分析和验证, 将本文算法在多个数据集上进行实验, 并与传统的 SIFT 算法[3]和基于深度学习的 SuperPoint-SuperGlue 算法[13]、D2-Net 算法[18]进行对比实验, 从匹配精度、匹配误差和匹配时间进行对比分析。

### 2.1　数据集准备

1) 彩色近红外数据集 (colour and near-infrared dataset, RGB-NIR) [19]包含严格配准好的可见光和近红外图像 477 对, 其中包含乡村、森林、室内、山川、古建筑、街道、郊区和水体等多类场景, 图像大小涵盖 508×384、823×384 和 1 024×384 等。

2) 车辆检测遥感数据集 (vehicle detection in aerial imagery, VEDAI) [20]包含配准好的可见光和近红外图像 1 268 对, 为 2012 年美国犹他州的春季卫星图像, 其中包含机场、建筑物、道路、水体、村庄等多类遥感影像, 图像大小均为 1 024×1 024。

3) 可见光红外数据集 (visible and infrared image dataset, VIS-IR) 包含无人机平台拍摄的可见光和红外图像 100 对, 无人机搭载平台为大疆经纬 M200 V2 无人机, 拍摄传感器为 DJI Zenmuse XT2 热成像云台相机同轴搭载的红外成像仪和可见光相机, 图像场景包含校区、工厂、交通枢纽、水体等多类, 图像大小涵盖 640×512、1 024×780 和 1 352×1 052 等。尽管图像为同轴、相同时间拍摄, 但可见光和红外图像间存在一定形变差异。

为对本文算法进行训练和测试, 将 RGB-NIR 数据集和 VEDAI 数据集按照 7∶3 的比例分为训练集和测试集。RGB 的原始图像对为严格配准的图像数据, 为生成带标签的训练数据, 受文献 [21] 生成训练数据的启发, 人为产生形变生成存在形变的图像对和其形变关系用于训练。为对数据进行增广, 同一对图像在每一次训练时都在线随机生成形变作为标签。因 VIS-IR 数据集未配准且无标签, 仅用于对算法性能进行测试。

### 2.2　实验设置

本文在 Ubuntu18.04 系统上, 以 PyTorch 作为网络开发框架进行训练和测试。训练的批尺寸为 2, 初始学习率为 0.000 1, 学习率衰减权重为 0.01, 训练代数为 150, 使用 Adam 方法更新参数。特征提取与描述模块中损失函数参数$\lambda_{\mathrm{d}}$=250, 正负边缘参数$m_{\mathrm{p}}$=1、$m_{\mathrm{n}}$=0.2; 匹配模块中线性转换器中注意力层的层数$N_{\mathrm{A}}$=9; 多头注意力层的头数$h$=4; Sinkhorn 迭代次数 $T$=10; 阈值 $T_{\mathrm{th}}$=0.02。

### 2.3　评价指标

本文使用的指标为准确率、匹配误差和匹配耗时。平均准确率为正确匹配点对占所有预测的匹

配点对的比例的平均值；平均匹配误差为正确匹配点对的预测值与真值的欧氏距离；匹配耗时为完成一对图像匹配的平均耗费时间。

### 2.4 算法性能分析

为更好地对本文算法进行评估分析，本文同时实现SIFT算法[3]、SuperPoint+SuperGlue算法[13]、D2-Net算法[18]，在RGB-NIR、VEDAI和VIS-IR数据集上进行实验与本文算法进行对比。

图7和图8选取数据集中部分图像对进行匹配结果可视化。图7为RGB-NIR数据集3组匹配结果对比图，图8为VEDAI数据集的3组匹配结果对比图；对RGB-NIR和VEDAI数据集，变换关系已知，匹配点对与真值的欧氏距离在3个像素以内的视为匹配正确。图9中图像来自VIS-IR数据集，因变换关系未知，对所有的匹配点对使用随机样本一致算法[22]进行计算获取变换关系，设定5个像素以内为内点，其他为外点；其中内点标为绿线，外点标为红线。

表1为实验结果对比，由表1、图7～图9可知，本文算法在匹配准确率和匹配误差的指标上优于其他2种算法，但本文算法的耗时介于其他2种算法之间。由实验可知，基于深度学习的算法优于传统算法，一方面是基于深度学习算法的特征点检测更加均匀，卷积网络提取的特征用于特征描述更

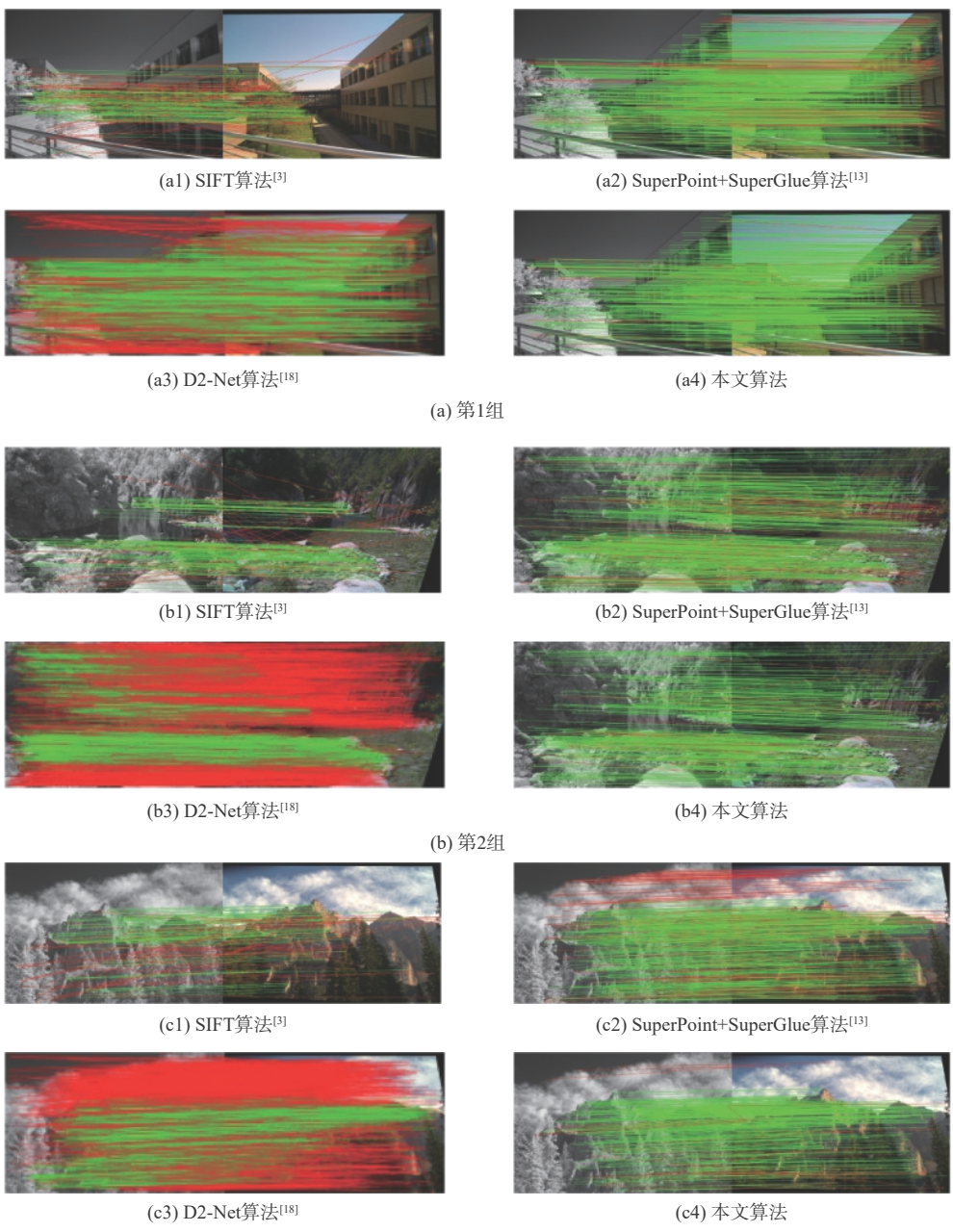
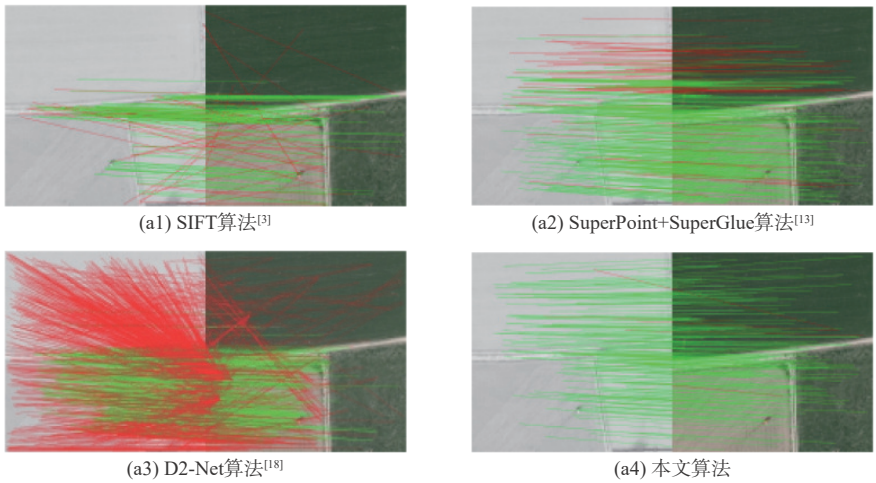



图7 RGB-NIR数据集匹配结果对比

Fig. 7 Comparison of matching results from RGB-NIR dataset

加准确; 另一方面, 注意力机制可有效聚合特征更新特征描述, 利于寻找匹配点对。

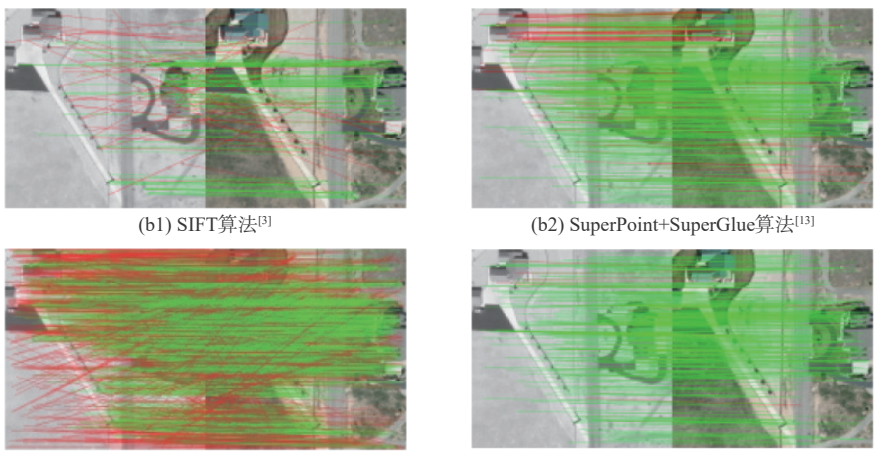
为进一步验证本文算法中各模块的作用, 在 RGB-NIR 和 VEDAI 数据集上进行消融实验。实验设置: 网络结构为 A, B, C, D; 特征提取为 SuperPoint, SuperPoint -FPN, SuperPoint, SuperPoint -FPN, 特征匹配为 SuperGlue, SuperGlue, L- SuperGlue, L- SuperGlue, 实验结果如表 2～表 3 所示。由表 2 可知, 本文算法的特征提取模块使用参数量更多的 SuperPoint-FPN 网络, 既保持了 SuperPoint 检测特征点的



(a1) SIFT算法[3]　(a2) SuperPoint+SuperGlue算法[13]

(a3) D2-Net算法[18]　(a4) 本文算法

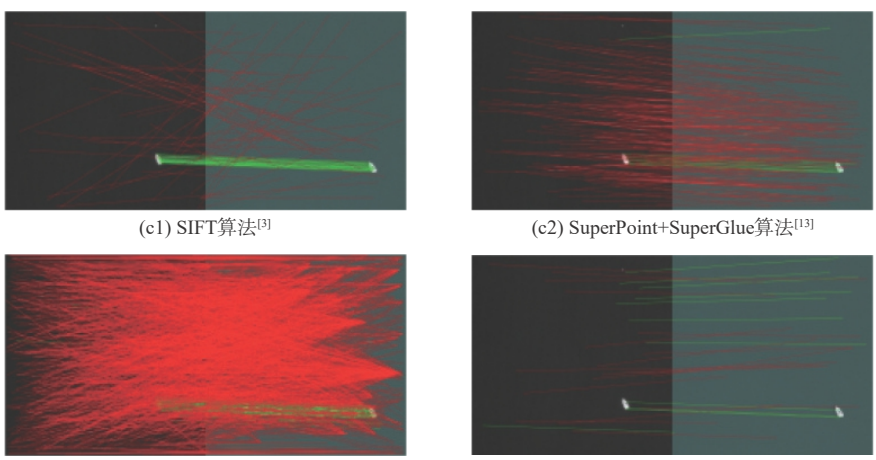
(a) 第1组



(b1) SIFT算法[3]　(b2) SuperPoint+SuperGlue算法[13]

(b3) D2-Net算法[18]　(b4) 本文算法

(b) 第2组



(c1) SIFT算法[3]　(c2) SuperPoint+SuperGlue算法[13]

(c3) D2-Net算法[18]　(c4) 本文算法

(c) 第3组

匹配正确的匹配点对线　匹配错误的匹配点对线

图 8　VEDAI 数据集匹配结果对比

Fig. 8　Comparison of matching results from VEDAI dataset

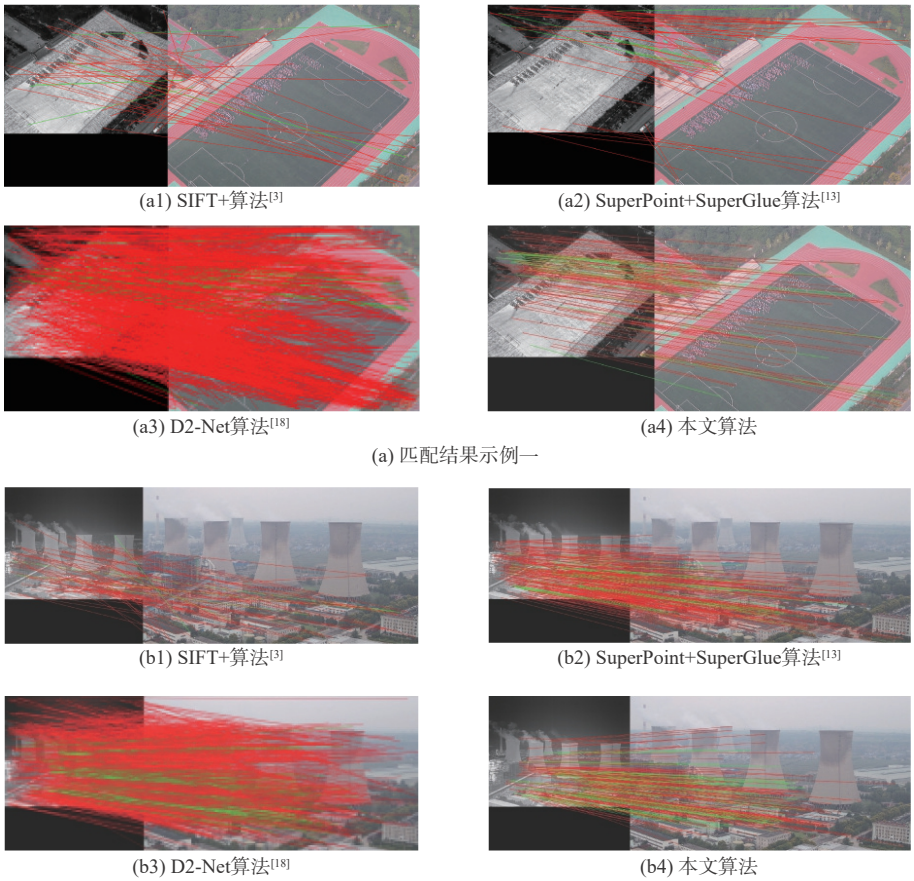



图 9 VIS-IR 数据集匹配结果对比

Fig. 9 Comparison of matching results fromVIS-IR dataset

能力，又提高了 SuperPoint 获取多尺度深层次共同特征的能力，利于后续的特征匹配；在特征匹配模块，L-SuperGlue 进一步提高了匹配点对中正确点对的占比。

**表 1 不同算法的实验结果对比**

**Table 1 Comparison experiment results of different algorithms**

| 算法 | 准确率/% | | 匹配误差/pixel | | 匹配耗时/s | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | RGB-NIR数据集 | VEDAI数据集 | RGB-NIR数据集 | VEDAI数据集 | RGB-NIR数据集 | VEDAI数据集 |
| SIFT[3] | 58.09 | 80.26 | 1.7734 | 1.5176 | 0.469 | 0.518 |
| SuperPoint+SuperGlue[13] | 73.72 | 85.76 | 1.3818 | 1.3538 | 0.071 | 0.104 |
| D2-Net[18] | 54.01 | 52.23 | 1.4028 | 1.3529 | 0.625 | 0.649 |
| 本文算法 | 83.56 | 97.65 | 1.0745 | 0.9742 | 0.314 | 0.365 |

**表 2 消融实验结果对比**

**Table 2 Comparison of ablation experiment results**

| 网络结构 | 准确率/% | | 匹配误差/pixel | | 匹配耗时/s | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | RGB-NIR数据集 | VEDAI数据集 | RGB-NIR数据集 | VEDAI数据集 | RGB-NIR数据集 | VEDAI数据集 |
| A | 73.72 | 85.76 | 1.3818 | 1.3538 | 0.071 | 0.104 |
| B | 82.37 | 95.37 | 1.0767 | 0.9785 | 0.306 | 0.339 |
| C | 81.46 | 94.80 | 1.0867 | 0.9778 | 0.075 | 0.110 |
| D | 83.56 | 97.65 | 1.0745 | 0.9742 | 0.314 | 0.365 |

**表 3 网络参数量对比**

**Table 3 Comparison of network parameters**

| 特征提取与描述 | | 特征匹配 | |
|---|---|---|---|
| SuperPoint | SuperPoint -FPN | SuperGlue | L- SuperGlue |
| 960 000 | 4 920 000 | 11 460 000 | 11 460 000 |

## 3 结　论

针对可见光和红外图像作为异源图像进行匹配存在的问题，提出了一种基于改进 SuperPoint 进行特征提取描述和基于线性转换器的深度学习匹配算法。

1）在特征提取和描述网络中，借鉴特征金字塔的思想，对 SuperPoint 特征描述分支进行改进，使得提取的特征融合多尺度多层次特征，兼顾深层信息和底层信息，特征描述更加准确丰富；同时使用铰链损失函数对特征描述网络进行训练以提取可见光和红外图像的共同特征，增大同名点对特征描述子的相似度。

2）在特征匹配模块中，引入线性转换器使用自注意力和互注意力机制对特征进行聚合，降低误匹配概率，提高匹配性能。

3）实验结果表明，与传统的图像匹配和当前的深度学习匹配算法相比，本文算法提高了匹配精度，降低了匹配误差，可较好地实现可见光和红外图像间的匹配。

### 参考文献（References）


[1] MA J Y, JIANG X Y, FAN A X, et al. Image matching from handcrafted to deep features: A survey[J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129(1): 23-79.

[2] ZITOVÁ B, FLUSSER J. Image registration methods: A survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.

[3] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.

[4] MA J Y, ZHAO J, MA Y, et al. Non-rigid visible and infrared face registration via regularized Gaussian fields criterion[J]. Pattern Recognition, 2015, 48(3): 772-784.

[5] YE Y X, SHAN J, BRUZZONE L, et al. Robust registration of multimodal remote sensing images based on structural similarity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5): 2941-2958.

[6] CHEN Y J, ZHANG X W, ZHANG Y N, et al. Visible and infrared image registration based on region features and edginess[J]. Machine Vision and Applications, 2018, 29(1): 113-123.

[7] LI J Y, HU Q W, AI M Y. RIFT: Multi-modal image matching based on radiation-variation insensitive feature transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2019, 29: 3296-3310.

[8] ARAR M, GINGER Y, DANON D, et al. Unsupervised multi-modal image registration via geometry preserving image-to-image translation[C]// 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2020: 13407-13416.

[9] PIELAWSKI N, WETZER E, ÖFVERSTEDT J, et al. CoMIR: Contrastive multimodal image representation for registration[C]// Proceedings of Annual Conference on Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2020: 1-21.

[10] YI K M, TRULLS E, LEPETIT V, et al. LIFT: Learned invariant feature transform[M]// Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2016: 467-483.

[11] DETONE D, MALISIEWICZ T, RABINOVICH A. SuperPoint: Self-supervised interest point detection and description[C]// 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Piscataway: IEEE Press, 2018: 337-33712.

[12] LI K H, WANG L G, LIU L, et al. Decoupling makes weakly supervised local feature better[C]// 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2022: 15817-15827.

[13] SARLIN P E, DETONE D, MALISIEWICZ T, et al. SuperGlue: Learning feature matching with graph neural networks[C]// 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2020: 4937-4946.

[14] SHI Y, CAI J X, SHAVIT Y, et al. ClusterGNN: Cluster-based coarse-to-fine graph neural network for efficient feature matching[C]// 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2022: 12507-12516.

[15] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]// 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2017: 936-944.

[16] CUTURI M. Sinkhorn distance: Lightspeed computation of optimal transport[C]// Proceedings of Annual Conference on Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2013: 1-9.

[17] KATHAROPOULOS A, VYAS A, PAPPAS N, et al. Transformers are RNNs: Fast autoregressive transformers with linear attention [C]//Proceedings of 2020 International Conference on Machine Learing (ICML). New York: ACM Press, 2020: 1-10.

[18] DUSMANU M, ROCCO I, PAJDLA T, et al. D2-net: a trainable CNN for joint description and detection of local features[C]// 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2019: 8084-8093.

[19] QUAN D, WANG S, NING H Y, et al. Element-wise feature relation learning network for cross-spectral image patch matching[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 33(8): 3372-3386.

[20] RAZAKARIVONY S, JURIE F. Vehicle detection in aerial imagery: A small target detection benchmark[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 34: 187-203.

[21] ROCCO I, ARANDJELOVIC R, SIVIC J. Convolutional neural network architecture for geometric matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019, 41(11): 2553-2567.

[22] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision[M]. New York: Cambridge University Press, 2004: 117-123.

# A matching method based on improved SuperPoint and linear Transformer for optical and infrared images

WU Wei[1], XIAN Yong[1], SU Juan[2], ZHANG Daqiao[1], LI Shaopeng[1, 3, *], LI Bing[1]

(1. College of War Support, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
2. College of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract**: A deep learning matching algorithm based on improved SuperPoint and linear transformer was proposed to solve the problem of difficult matching and high mismatching rates between visible and infrared heterologous images. Firstly, based on the SuperPoint network structure, the algorithm introduced the idea of a feature pyramid to build a feature description branch and trained it based on the hinge loss function, so as to better learn the multi-scale deep features of visible and infrared images and increase the similarity of the image with correspondence points to the descriptor. In the feature matching module, SuperGlue was improved by adopting a linear transformer for aggregating features to obtain better matching results. Experiments conducted on multiple datasets demonstrate that the proposed method improves the matching precision and provides better matching performance in comparison with existing matching methods.

**Keywords**: infrared image; visible light image; heterologous image matching; feature pyramid network; linear transformer

**Received**: 2022-12-29; **Accepted**: 2023-05-29; **Published Online**: 2023-09-08 16:06

**URL**: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230907.0928.001

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (62103432); China Postdoctoral Science Foundation (2022M721841)

* **Corresponding author**. E-mail: sp-li16@mails.tsinghua.edu.cn

# 《北京航空航天大学学报》征稿简则

《北京航空航天大学学报》是北京航空航天大学主办的以航空航天科学技术为特色的综合性自然科学学术期刊(月刊)。本刊以反映航空航天领域研究成果与动态、促进学术交流、培养科技人才和推动科技成果向社会生产力转化为办刊宗旨。本刊为中国自然科学技术核心期刊,并被 Ei Compendex 等国内外权威文献检索系统收录。本刊向国内外公开发行,为进一步提高办刊质量和所刊出文章的学术水平,特制定本简则。

## 1 论文作者及内容

**1.1** 本刊面向海内外所有学者。

**1.2** 主要刊载与航空航天科学技术有关的材料科学及工程、飞行器设计与制造、宇航科学与工程、信息与电子技术、控制技术和自动化工程、流体力学和动力工程、计算机科学及应用技术、可靠性工程与失效分析等领域的研究文章。航空航天科学技术民用方面以及具有航空航天工程背景的应用数学、应用物理、应用力学和工程管理等方面的文章也在本刊优先考虑之列。

## 2 来稿要求

**2.1** 论文应具有创新性、科学性、学术性和可读性。

**2.2** 论文为原创作品,尚未公开发表过,并且不涉及泄密问题。若发生侵权或泄密问题,一切责任由作者承担。

**2.3** 主题明确,数据可靠,图表清晰,逻辑严谨,文字精练,公式符号标准规范,标点符号正确。

**2.4** 文稿撰写顺序:中文题名(一般不超过 20 个汉字),作者中文姓名、单位、所在城市、邮政编码(作者顺序始终不得更改),中文摘要(包括目的、方法、结果及结论),中文关键词(5 ~ 8 个),中图分类号,引言,正文,参考文献,英文题名,作者英文姓名、单位、所在城市、邮政编码、国别,英文摘要,英文关键词。首、末页下角注明基金项目名称及编号,作者信息。

**2.5** 作者请登录本刊网页进行在线投稿。

## 3 稿件的审核、录用与版权

**3.1** 来稿须经专家两审和主编、编委讨论后决定刊用与否。

**3.2** 若来稿经审查后认定不宜在本刊发表,将及时告知作者。如果在投稿满 3 个月后仍未收到本刊任何通知,作者有权改投其他刊。在此之前,请勿一稿多投,否则一切后果自负。

**3.3** 来稿一经作者签字并在本刊刊出,即表明所有作者都已经认可其版权转至本刊编辑部。本刊在与国内外文献数据库或检索系统进行交流及合作时,不再征询作者意见。

**邮寄地址**:100191 北京市海淀区学院路 37 号 《北京航空航天大学学报》编辑部

**办公地点**:北京航空航天大学办公楼 405,407 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

# 《北京航空航天大学学报》
# 第五届编辑委员会

**主　任（主　编）**：赵沁平

（以下按姓氏笔画为序）

**副主任（副主编）**：丁希仑　王少萍　孙志梅　李秋实　李焕喜　杨嘉陵
苗俊刚　相　艳　徐立军　钱德沛　曹晋滨

**编　委**：马殿富　王　琪　王　聪　邓小燕　王青云　王荣明　刘　宇
刘　红　江　洁　刘　强　闫　鹏　朱天乐　刘铁钢　齐铂金
陈万春　邹正平　苏东林　杨世春　沈成平　邱志平　宋知人
杨树斌　张晓林　杨晓奕　杨继萍　李惠峰　吴新开　张瑞丰
杨照华　宋凝芳　周　锐　林宇震　林贵平　战　强　姚仰平
胡庆雷　赵秋红　段海滨　赵巍胜　席　平　郭　宏　徐　洁
徐世杰　郭洪波　康　锐　翟　锦　熊华钢



# 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51卷 第1期　2025年1月

**主管单位**　中华人民共和国工业和信息化部
**主办单位**　北京航空航天大学
**主　　编**　赵沁平
**编辑出版**　《北京航空航天大学学报》编辑部
**邮　　编**　100191
**地　　址**　北京市海淀区学院路37号
**印　　刷**　北京科信印刷有限公司
**发　　行**　《北京航空航天大学学报》编辑部
**发行范围**　国内外发行
**联系电话**　(010) 82316698 82316981
82315499 82317448
**电子信箱**　jbuaa@ buaa.edu.cn

# JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS (JBUAA)

(Monthly, Started in 1956)

Vol.51 No.1　January 2025

**Administrated by**　Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China
**Sponsored by**　Beijing University of Aeronautics and Astronautics (BUAA)
(Beijing 100191, P. R. China)
**Chief Editor**　ZHAO Qinping
**Edited and Published by**　Editorial Board of JBUAA
**Printed by**　Beijing Kexin Printing Co., Ltd.
**Distributed by**　Editorial Board of JBUAA
**Telephone**　(010) 82316698 82316981
82315499 82317448
**E-mail**　jbuaa@buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn

中国标准连续出版物号：ISSN 1001-5965 / CN 11-2625/V

ISSN 1001-5965

国内定价：50.00元／期



微信公众号　超星电子书　QQ群