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



车控操作系统实时性/安全性保障技术

杨世春　崔海港　周思达　周新岸　范春鹏　曹耀光

7
2024
Vol.50

北京航空航天大学学报

第 50 卷　第 7 期　（总第 377 期）　2024 年 7 月

目　　次

车控操作系统实时性/安全性保障技术 …… 杨世春，崔海港，周思达，周新岸，范春鹏，曹耀光（2051）
基于麻雀搜索算法的 ARAIM 故障子集优化算法 …… 王尔申，王欢，雷虹，曾洪正，曲萍萍，庞涛（2066）
基于关键节点识别算法的重点人分析 …… 韩奕，孙百兵，王军国，杜彦辉（2074）
涉水锂离子电池的腐蚀与析氢风险研究 …… 张青松，李东琪，连晓雪（2083）
基于组合变换域的彩色图像大容量零水印算法 …… 韩绍程，刘欢（2093）
一种基于动态信息迭代的系统群组维修规划方法 …… 杨力，陈懿，高凯烨，马小兵，赵宇（2104）
高马赫数内埋武器分离特性数值模拟研究 …… 陈兵，罗磊，蒋安林，吴晓军，张培红，贾洪印（2113）
基于多分类字典学习的灵敏度编码重建算法 …… 段继忠，王成菊（2123）
基于 RCJAYA 算法的太阳电池参数辨识 …… 欧阳城添，黄祖威，刘裕嘉，张林，朱东林，周昌军（2133）
基于改进 Double-Head RCNN 的无人机航拍图像小目标检测算法 …… 王殿伟，胡里晨，房杰，许志杰（2141）
融合 CBAM 注意力机制与可变形卷积的车道线检测 …… 胡丹丹，张忠婷，牛国臣（2150）
轻量化特征融合的 CenterNet 输电线路绝缘子自爆缺陷检测 … 苟军年，杜愫愫，王世铎，张昕悦（2161）
CCF300/QY8911 层压板破孔损伤快速抢修后的拉伸性能 …… 侯日立，王春雨，周平（2172）
冰雪天气下基于 LSTM 的跑道温度数据-机理联合预测 …… 陈斌，刘悦，尹开浪，方珣（2184）
一种自动实时的物联网在野漏洞攻击检测方法 …… 何清林，王丽宏，陈艳姣，王星（2195）
舰载直升机主动甲板着舰气动载荷特性 …… 谭剑锋，邢肖兵，崔钊，武杰，张卫国（2206）
进港航班滑入时间预测 …… 唐小卫，丁叶，张生润，任思豫，吴佳琦（2218）
机场飞行区多层异质链序风险传播模型研究 …… 吴维，吴泽萱，王兴隆（2225）
基于软件机器人的工控靶场应用软件行为模拟 …… 刘志尧，张格，刘红日，张旭，陈翊璐，王佰玲（2237）
液体火箭发动机地面试验控制电路的设计与分析 …… 徐勇，郭红杰，超力德，黄俊杰，梁国柱（2245）
成分数据的变系数地理加权空间滞后模型 …… 黄婷婷（2256）
基于改进 OMP 算法的多目标高速机动检测方法 …… 王阳，张小宽，马前阔，郑舒予，宗彬锋，徐嘉华（2265）
高超目标强跟踪 CKF 自适应交互多模型跟踪算法 …… 罗亚伦，廖育荣，李兆铭，倪淑燕（2272）
基于检索增强的噪声标签细粒度图像分类方法 …… 暴恒，邓理睿，张良，陈训逊（2284）
一种基于图注意力机制的威胁情报归因方法 …… 王婷，严寒冰，郎波（2293）
基于自动化私有协议识别的挖矿流量检测 …… 童瑞谦，胡夏南，刘优然，秦研，张宁，王强（2304）
小倾角对 Ω 形弯曲热管传热特性的影响 …… 王卓，潘宇晖，赵锐，年永乐，程文龙（2314）
适应人体重心起伏的悬吊减重康复系统设计 …… 王创，陈文杰，陈伟海，孙先涛，林岩（2322）
具有领导-跟随双层编队的 UAV 集群跟踪控制 …… 张青川，王乐，席建祥，王成（2331）
考虑随机和认知混合不确定性的 CFD 模型修正方法 …… 李泽贤，马梦颖，武健辉，熊芬芬，王博民（2343）
基于深度强化学习的风场中浮空器驻留控制 …… 柏方超，杨希祥，邓小龙，侯中喜（2354）

期刊基本参数：CN 11-2625/V * 1956 * m * A4 * 316 * zh * P * ￥50.00 * 400 * 31 * 2024-07

（**编　辑**　张　嵘　孙　芳　卞欢欢　王　茜　李亚泰）

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

Vol. 50 No. 7 (Sum 377) July 2024

CONTENTS

Real-time performance/security guarantee technology of vehicle control operating system
…… YANG Shichun, CUI Haigang, ZHOU Sida, ZHOU Xin'an, FAN Chunpeng, CAO Yaoguang (2051)
ARAIM-related fault subset optimization algorithm based on sparrow search algorithm
…… WANG Ershen, WANG Huan, LEI Hong, ZENG Hongzheng, QU Pingping, PANG Tao (2066)
Target person analysis based on critical node recognition algorithm
…… HAN Yi, SUN Baibing, WANG Junguo, DU Yanhui (2074)
Study of corrosion and hydrogen evolution risk of waded lithium ion-battery
…… ZHANG Qingsong, LI Dongqi, LIAN Xiaoxue (2083)
A large-capacity zero-watermarking algorithm for color images based on combined transform domain
…… HAN Shaocheng, LIU Huan (2093)
A system group maintenance scheduling method based on iteratively dynamic information
…… YANG Li, CHEN Yi, GAO Kaiye, MA Xiaobing, ZHAO Yu (2104)
Numerical simulation of separation characteristics for internally buried weapon at high Mach number
…… CHEN Bing, LUO Lei, JIANG Anlin, WU Xiaojun, ZHANG Peihong, JIA Hongyin (2113)
Sensitivity encoding reconstruction algorithm based on multi-category dictionary learning
…… DUAN Jizhong, WANG Chengju (2123)
Parameter identification of solar cell model based on RCJAYA algorithm
…… OUYANG Chengtian, HUANG Zuwei, LIU Yujia, ZHANG Lin, ZHU Donglin, ZHOU Changjun (2133)
Small target detection algorithm based on improved Double-Head RCNN for UAV aerial images
…… WANG Dianwei, HU Lichen, FANG Jie, XU Zhijie (2141)
Lane line detection incorporating CBAM mechanism and deformable convolutional network
…… HU Dandan, ZHANG Zhongting, NIU Guochen (2150)
Insulator self-explosion detection in transmission line based on CenterNet fusing lightweight features
…… GOU Junnian, DU Susu, WANG Shiduo, ZHANG Xinyue (2161)
Tensile properties of rapid repaired CCF300/QY8911 laminates with broken hole damage
…… HOU Rili, WANG Chunyu, ZHOU Ping (2172)
Runway temperature data mechanism joint prediction based on LSTM under ice and snow
…… CHEN Bin, LIU Yue, YIN Kailang, FANG Xun (2184)
An automatic and real-time detection method of IoT in-the-wild vulnerability attack
…… HE Qinglin, WANG Lihong, CHEN Yanjiao, WANG Xing (2195)
Investigation on aerodynamics of a helicopter approaching an active control deck
…… TAN Jianfeng, XING Xiaobing, CUI Zhao, WU Jie, ZHANG Weiguo (2206)
Taxi-in time prediction of arrival flight
…… TANG Xiaowei, DING Ye, ZHANG Shengrun, REN Siyu, WU Jiaqi (2218)
Research on multi-layer heterogeneous chain sequence risk propagation model in airport movement area
…… WU Wei, WU Zexuan, WANG Xinglong (2225)
Software robot-based application behavior simulation for cyber security range in industrial control field
…… LIU Zhiyao, ZHANG Ge, LIU Hongri, ZHANG Xu, CHEN Yilu, WANG Bailing (2237)
Design and analysis of ground test control circuit on liquid rocket engine
…… XU Yong, GUO Hongjie, CHAO Lide, HUANG Junjie, LIANG Guozhu (2245)
A varying coefficient geographically weighted spatial lag model for compositional data
…… Huang Tingting (2256)
Multiple high-speed maneuvering target detection method based on improved orthogonal matching pursuit algorithm
…… WANG Yang, ZHANG Xiaokuan, MA Qiankuo, ZHENG Shuyu, ZONG Binfeng, XU Jiahua (2265)
Strong tracking CKF adaptive interactive multiple model tracking algorithm based on hypersonic target
…… LUO Yalun, LIAO Yurong, LI Zhaoming, NI Shuyan (2272)
Fine-grained image classification method with noisy labels based on retrieval augmentation
…… BAO Heng, DENG Lirui, ZHANG Liang, CHEN Xunxun (2284)
Threat intelligence attribution method based on graph attention mechanism
…… WANG Ting, YAN Hanbing, LANG Bo (2293)
Mining traffic detection based on automated private protocol identification
…… TONG Ruiqian, HU Xianan, LIU Youran, QIN Yan, ZHANG Ning, WANG Qiang (2304)
Effect of small inclination angle on heat transfer performance of Ω-shaped bending heat pipe
…… WANG Zhuo, PAN Yuhui, ZHAO Rui, NIAN Yongle, CHENG Wenlong (2314)
Design of suspension weight-support rehabilitation system adapted to fluctuation of human center of gravity
…… WANG Chuang, CHEN Wenjie, CHEN Weihai, SUN Xiantao, LIN Yan (2322)
Tracking control of unmanned aerial vehicle swarms with leader-following double formation
…… ZHANG Qingchuan, WANG Le, XI Jianxiang, WANG Cheng (2331)
Model correction method for CFD numerical simulation under mixed aleatory and epistemic uncertainty
…… LI Zexian, MA Mengying, WU Jianhui, XIONG Fenfen, WANG Bomin (2343)
Station keeping control for aerostat in wind fields based on deep reinforcement learning
…… BAI Fangchao, YANG Xixiang, DENG Xiaolong, HOU Zhongxi (2354)

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0594

车控操作系统实时性/安全性保障技术

杨世春[1]，崔海港[1]，周思达[1]，周新岸[1]，范春鹏[2]，曹耀光[3,*]

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院，北京 100191；2. 北京新能源汽车股份有限公司，北京 100176；
3. 北京航空航天大学 前沿技术研究院，北京 100191)

摘　　要：电子控制技术为智能网联汽车的高速发展持续赋能，车控操作系统是保障汽车电子控制软件安全、高效、实时运行的基石。随着智能网联汽车向集中式、端云融合式电子电气架构发展，车载硬件演化为多核异构处理器、弹性计算平台，车控软件向面向服务的软件架构转变，车控操作系统的架构、关键技术等也随之发展。综述了智能网联汽车用车控操作系统的发展历程与现状，对任务调度、实时性/安全性保障、形式化表征与验等基础理论和关键技术进行深入分析，阐述现有车控操作系统的技术挑战与发展趋势，为智能网联汽车的车控操作系统发展提供参考。

关 键 词：智能网联汽车；车控操作系统；任务调度；代码隔离；最坏执行时间分析
中图分类号：TP316.2
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2051-15

在软件定义汽车的新时代下，传统分布式电子电气架构难以为继，集中式、端云融合式电子电气架构快速发展，汽车电子与产业正在发生变革。自2015年《中国制造2025》[1]提及智能网联汽车后，国家相继出台了《国家综合立体交通网规划纲要》[2]《国家车联网产业标准体系建设指南》[3]等多款文件，2020年2月，工业和信息化部等十一部委联合发布了《智能汽车创新发展战略》[4]，将智能网联汽车的发展上升到国家战略高度。2021年4月，工业和信息化部发布了《智能网联汽车生产企业及产品准入管理指南(试行)》[5]，明确指出车控操作系统应满足功能安全、预期功能安全、信息安全等过程保障要求。

车控操作系统是保障汽车电子控制软件安全、高效、实时运行的基石，也是决定软件定义汽车时代产品竞争力的关键“卡脖子”技术。

国外车控操作系统研发较早，自20世纪90年代起，已研发了OSEK-OS、AUTOSAR-OS等多代操作系统，建立了车控操作系统相关标准体系，在操作系统内核、机制等方面建立了技术壁垒。然而，国内车控操作系统研究起步较晚，在操作系统任务调度机制、实时性/安全性保障等方面的理论及技术仍不完善，导致国产车控操作系统市场占有率低、国际竞争力差。

本文围绕智能网联汽车对车控操作系统发展及其关键技术进行研究，用汽车电子电气架构发展的观点归纳车控操作系统的发展脉络和技术特点，并针对任务调度机制、代码隔离、最坏执行时间分析等安全性、实时性保障技术进行重点阐述，最后，总结了车控操作系统的技术挑战及未来发展趋势，为相关从业人员、学者等提供参考。

1　车控操作系统

19世纪60年代末，集成电路元件应用于汽车领域后，汽车电子推动了汽车技术突破与产业发展。早期的汽车电控系统依靠车载嵌入式系统的

收稿日期：2022-07-07；录用日期：2022-09-02；网络出版时间：2022-12-14 10:51
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221213.1625.009
基金项目：国家重点研发计划 (2021YFB2501300)
*通信作者. E-mail：caoyaoguang@buaa.edu.cn

引用格式：杨世春，崔海港，周思达，等. 车控操作系统实时性/安全性保障技术 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2051-2065.
YANG S C，CUI H G，ZHOU S D，et al. Real-time performance/security guarantee technology of vehicle control operating system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2051-2065 （in Chinese）.

任务管理器实现程序的执行与调度，逻辑简单、功能性弱。随着车控软件代码量激增、软件功能日趋复杂，其需要操作系统满足高效、安全、实时等高指标要求，从而推动车控操作系统的发展。1993年，汽车控制器的开放式系统及其相应的接口体系OSEK发布，对车控操作系统进行了规范；汽车开放系统架构组织(AUTOSAR)在OSEK规范基础上进一步完善了车控操作系统技术要求[6]。如图1所示，随着电动化、智能化、网联化趋势的发展，此后汽车电子电气架构逐渐从分布式架构向集中式、端云融合方向发展，弹性计算平台、多核异构处理器在智能网联汽车上大规模推广应用，这对车控操作系统的实时性、安全性提出了更严苛的要求，推动了车控操作系统的技术突破[7]。

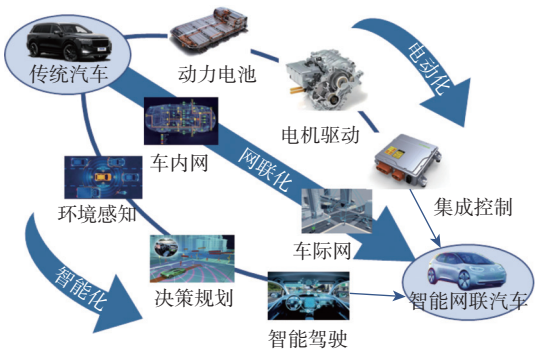


图1 汽车电子技术向电动化、智能化、网联化方向发展

Fig. 1 Development of automotive electronic technology towards electric, intelligent, and network-connected direction

1.1 车控操作系统的起源与发展

早期的车控操作系统起源于车载电子控制单元(electronic control unit, ECU)软件的实时性需求。汽车动力控制系统、底盘控制系统等要求任务具有毫秒级甚至微秒级响应[8]，车身控制系统也要求任务具有毫秒级响应，这使得车控软件需要操作系统的支撑[9]。随着汽车分布式电子电气架构的发展，车控软件软、硬件接口逐渐复杂，这就要求汽车软件接口标准化并建立专用的车控操作系统以保障车控软件的实时性与安全性[10]。此外，随着电控软件功能性增加、软件复杂度提高，传统任务执行方式(如状态机等)进行任务调度的难度显著增加，任务执行的优先级控制、代码隔离、执行时间控制等基础性能与实时性难以保证，亟须发展车控操作系统以提高汽车电控系统的运行效率与安全性。

1993年，德国汽车工业界提出一个用于汽车控制器的开放式系统及其相应的接口体系OSEK。与此同时，法国也推出了类似的汽车分布式运行系统VDX。1994年，二者合并成立了OSEK/VDX协会，随后发布了SEK/VDX规范，规范了汽车电子接口并提出车控实时操作系统(OSEK-OS)的技术要求[11-14]。德国3Soft公司开发了第1个商业化的OSEK操作系统ProOSEK，并应用于奥迪A8的仪表控制器中，推动了OSEK操作系统的应用与推广。早期的OSEK系统主要用于车载单核处理器的嵌入式系统中，用于管控分布式ECU并提供必要功能来支持事件驱动的控制系统[15-17]。OSEK操作系统还具备可配置性、可移植性、标准化接口、实时性及可靠性等特点，在功能性方面，OSEK规范要求操作系统应具备任务管理、资源管理、时钟管理、中断管理和错误处理等功能，同时对操作系统的执行开销、实时性等提出了要求[18-19]。对象静态化是OSEK操作系统的特点之一，其所有对象在应用程序启动之前就已经被创建且启动后不会被删除。然而，对象静态化也导致了OSEK操作系统进程管理能力相对有限，在进行汽车电子电气架构升级、车控软件功能性提升时性能不足。文献[20-23]围绕OSEK标准体系研发了车控操作系统SmartOSEK-OS，并在此基础上为适应汽车电子技术的发展推出了多代操作系统、集成开发环境等。宋君花等[24]建立了符合OSEK/VDX标准的车控操作系统，并应用于混合动力汽车的电控系统。郜文等[16]研究了OSEK/VDX嵌入式实时操作系统，并应用于汽车稳定性控制器中。杨林孟等[25]研发了基于UC/OS-Ⅱ操作系统的汽车底盘集成控制器。

随着汽车分布式电子电气架构的发展与集中式电子电气架构的探索，如图2所示，OSEK操作系统软件架构简单、硬件抽象程度低、基础软件模块少等问题逐渐暴露，车控操作系统技术亟须进一步突破。2003年，以宝马、博世、戴姆勒、通用等9家企业为代表的汽车开放系统架构组织成立(简称AUTOSAR组织)，通过独立于硬件的分层软件架构规范各类型车辆应用接口和集成标准，从而为车控软件开发提供方法论指导，减少车控软件开发复杂度并提高开发的灵活性和效率[26]。AUTOSAR组织参考OSEK/VDX发布了Classic AUTOSAR与Adaptive AUTOSAR这2个版本的规范，分别用于安全车控操作系统与面向智能驾驶的高性能操作系统。AUTOSAR操作系统在功能上参考了OSEK/VDX，额外增添了实时性能推理、基于优先级的调度策略、在运行时提供保护等额外功能。Classic AUTOSAR平台基于OSEK/VDX标准定义了安全车控操作系统的技术需求及规范，显著提高了开发效率并降低了开发成本，同时保障了汽车电控系统的安全性[27]。在AUTOSAR架构中，AUTOSAR OS，属于多任务的实时操作系统，可同时兼容OSEK OS并在此基础上增加了调度表、堆栈监测、OS-应用

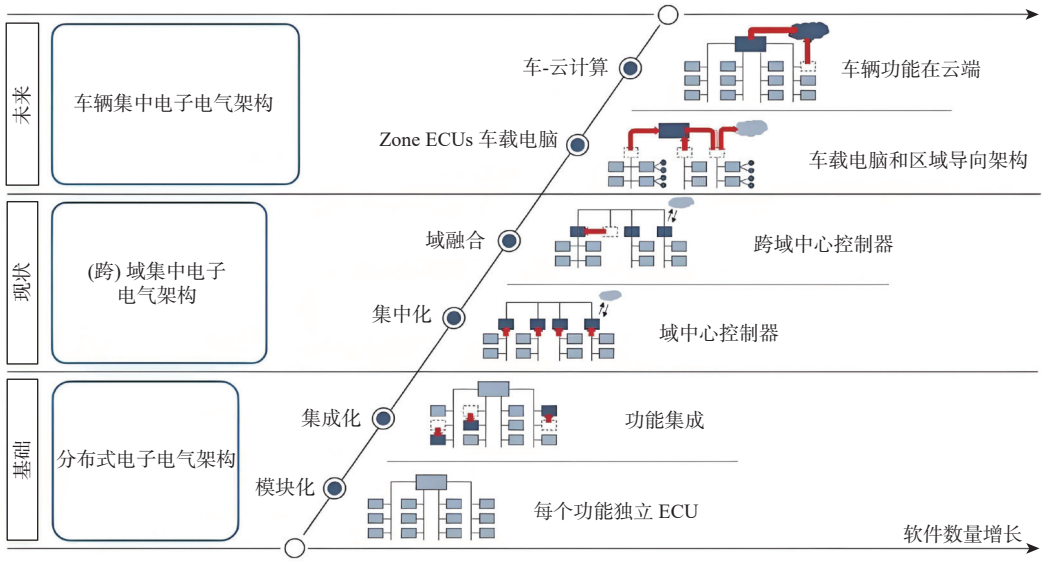


图 2　博世提出的汽车电子电气架构发展趋势

Fig. 2　Development trends of automotive electronic and electrical architecture presented by Bosch

及保护措施等功能[28]。满足 AUTOSAR 规范的车控操作系统具备以下特性: 能够对系统进行静态配置和剪裁、提供基于优先级的调度策略、在系统运行期间能够提供相应的保护功能、可在低端微控制器上运行[29-31]。

1.2　智能网联汽车用车控操作系统

随着智能网联汽车电子电气架构的发展, 集中式电子电气架构及端云融合电子电气架构逐渐成为智能网联汽车的主流电子电气架构[32], 传统汽车的车控操作系统难以满足智能化、网联化趋势下汽车电控的新需求[33-34]。智能网联汽车通过部署先进的智能传感器(高清摄像头、激光雷达、毫米波雷达等)和复杂的控制算法, 实现智能驾驶等先进功能。随着智能网联汽车的车控软件复杂化, 各任务优先级调度需实时管控, 车控操作系统的实时性与安全性问题也随之产生[35-36]。功能安全、预期功能安全及信息安全是汽车安全的重要支撑, 智能网联汽车的电子技术必须遵守 3 项安全相关标准体系。ISO 26262 规范了汽车电子的功能安全, 通过分析潜在的安全风险从而在系统设计时建立安全机制, 解决安全风险或减轻由安全风险引起的危害[37]。ISO 21448 阐述了智能网联汽车预期功能安全, 避免存在由功能不足, 或者可合理预见的人员误用所导致的危害和风险[38]。ISO/SAE 21434 规范了汽车信息安全相关内容, 更注重于在外界恶意的攻击情况下, 可以抵御外界攻击, 让系统正常运行, 解决或减轻外界攻击引起的危害[39]。如图 3 所示, 智能网联汽车的全场景安全主要由功能安全、预期功能安全及信息安全构成, 并随着对智能网联汽车安全的需求逐渐深入, 三大安全也存在相互融合的发展趋势, 如图 4 所示。

智能网联汽车的弹性计算平台、多核异构处理器广泛应用, 导致车控操作系统在满足强实时性要求的同时还需适配各类车载硬件。为满足智能驾驶技术与智能网联汽车技术的需求, AUTOSAR 组织在原有基础上提出 Adaptive AUTOSAR 架构, 其

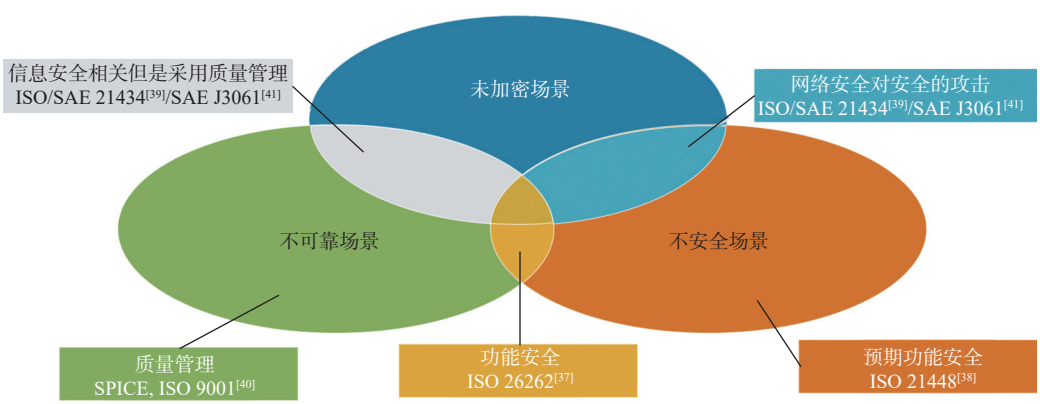


图 3　智能网联汽车电控系统全场景安全标准

Fig. 3　Safety standards for electronic control systems of intelligent connected vehicles in all scenarios

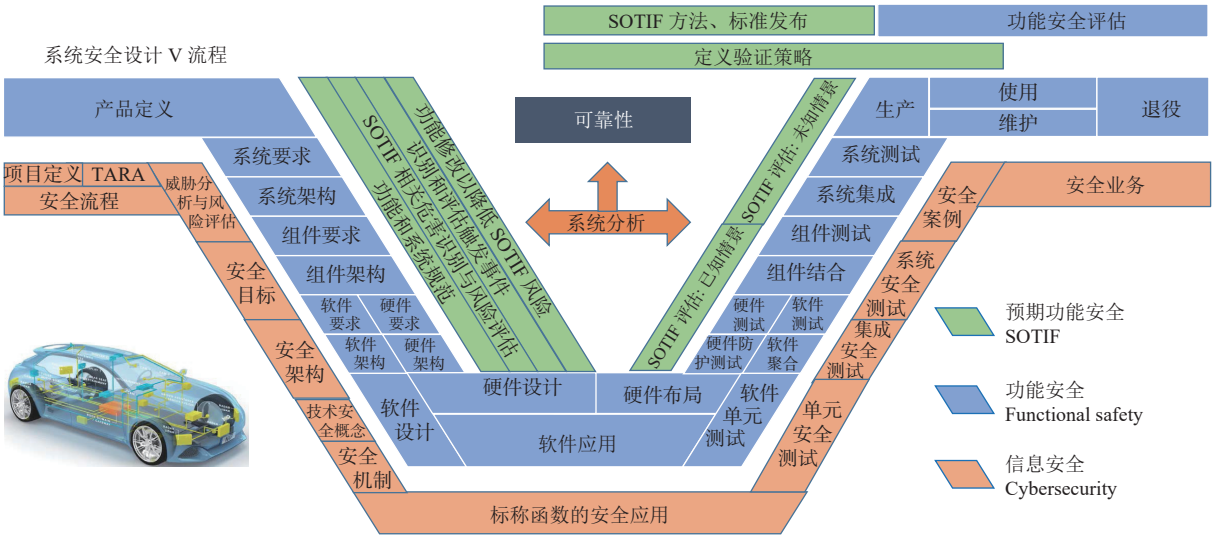


图 4 满足汽车全场景安全的电控单元研发流程

Fig. 4 Development process of electronic control unit to ensure safety of automobiles in all scenarios

核心特征是面向服务的架构，将服务根据需求动态加载、配置、更新，并更新了 AUTOSAR-OS 的技术要求，以满足强实时性、高兼容性、高安全性的智能网联汽车车控操作系统的需求[42-44]。在 Adaptive AUTOSAR 平台定义中，仍采用了基于 POSIX 标准的操作系统，可以为支持 POSIX 标准的操作系统及不同的应用需求提供标准化的平台接口和应用服务。此外，如图 5 所示，随着测试左移理论的提出，传统汽车电子遵循的 V 型开发流程逐渐向敏捷式发展，并实现 V 流程与敏捷迭代的融合，对车控操作系统研发及测试提出高效、快速、可靠的新要求。然而，目前 Adaptive AUTOSAR-OS 尚处于发展初期，如何开发满足 Adaptive AUTOSAR 标准的国产化车控操作系统仍缺乏理论与技术支持。

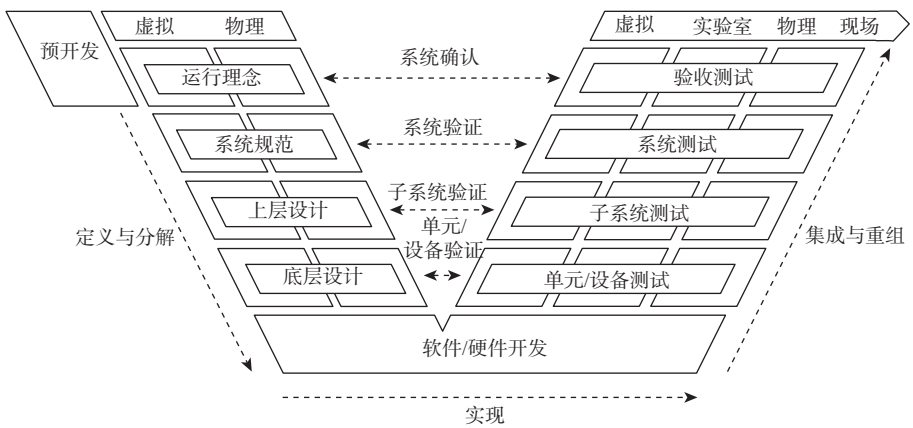


图 5 基于测试左移的汽车电子研发流程

Fig. 5 Electronic development process of automobiles based on left-shift test

1.3 国产车控操作系统

智能网联汽车电子电气架构的快速发展对车控操作系统提出了更高的要求，车控操作系统技术仍需进一步发展突破。2019 年 10 月，全国汽车标准化技术委员会发布了《车用操作系统标准体系》[45]，规范了车用操作系统定义，划分了车用操作系统边界，明确了车用操作系统分类，构建了车用操作系统标准体系。在该标准体系中，车控操作系统可分为安全车控操作系统和智能驾驶操作系统。安全车控操作系统主要面向车控的实时控制，用于动力系统、底盘系统、车身系统等 ECU 中，由于安全车控操作系统承担了汽车的实时响应动作与任务调度等功能，因此，其应具备强实时性与安全性。智能驾驶操作系统用于汽车智能驾驶功能，主要面向车载智能驾驶域控制器等，对系统安全性、可靠性及性能与运算能力均要求较高，仍处于研究发展过程中，尚未建立完备的生态环境及工具链、产业链[34]。因此，目前智能网联汽车的车控操作系统研究仍主要集中于安全车控操作系统，用于解决车载 ECU 实时响应与任务调度问题。2021 年

7 月, 汽标委智能网联汽车分标委发布了《车控操作系统总体技术要求研究报告》[46], 提出了车控操作系统的参考架构, 如图 6 所示, 要求车控操作系统具有以下技术特征: 任务调度的时钟周期要在毫秒级、高优先级的任务不能被低优先级任务所阻塞、具备高可靠性/高可访问性/高可服务性、智能驾驶车控操作系统内核需要向上层应用提供标准的 POSIX 接口。

目前, 中国主机厂及零配件供应商主要使用 AUTOSAR 架构进行软件开发, 并探索了 AUTOSAR-OS 的核心技术[47]。如图 7 所示, 国内的主流汽车电子产品供应商均已推出自研的车控操作系统, 如国汽智控于 2021 年推出 iVVB1.0, 实现了向国产主流芯片的向下兼容与自动驾驶操作系统的向上兼容; 华为推出鸿蒙自动驾驶操作系统及智能车控操作系统, 普华基础软件推出安全车控操作系统并在车身控制、新能源汽车控制等领域应用。现有的国产化操作系统大多为面向分布式架构或集中式架构的车控操作系统, 且与智能驾驶、智能座舱等操作系统联动性较差, 因此, 在面向端云融合式电子电气架构时, 仍需解决在有限车载硬件资源下的实时调度、安全保障等技术问题。此外, 浙江大学杨国青等发明了符合 OSEK 标准的嵌入式实时操作系统 SmartOSEK-OS[23], 一汽集团、长安集团等整车企业于 2009 年起逐渐利用 AUTOSAR 标准的工具进行 ECU 的设计、开发、验证。此外, 浙江大学与上汽、一汽、长安、奇瑞等国内高校及企业共同成立了中国汽车电子基础软件自主研发与产业化联

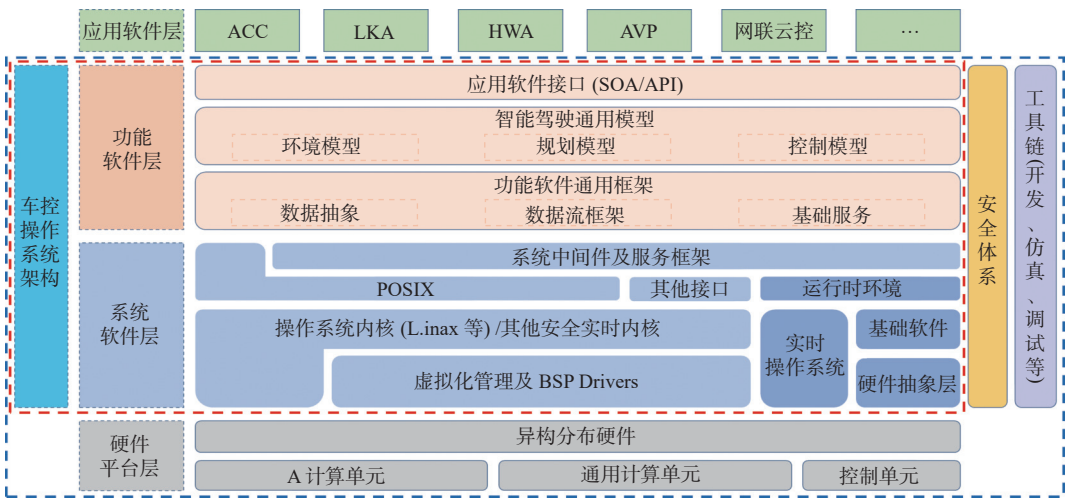


图 6　汽标委智能网联汽车分标委提出的车控操作系统参考架构[46]

Fig. 6　Reference architecture of vehicle control operating system proposed by Subcommittee on Intelligent and Connected Vehicle of National Technical Committee on Road Vehicles of Standardization Administration of China[46]

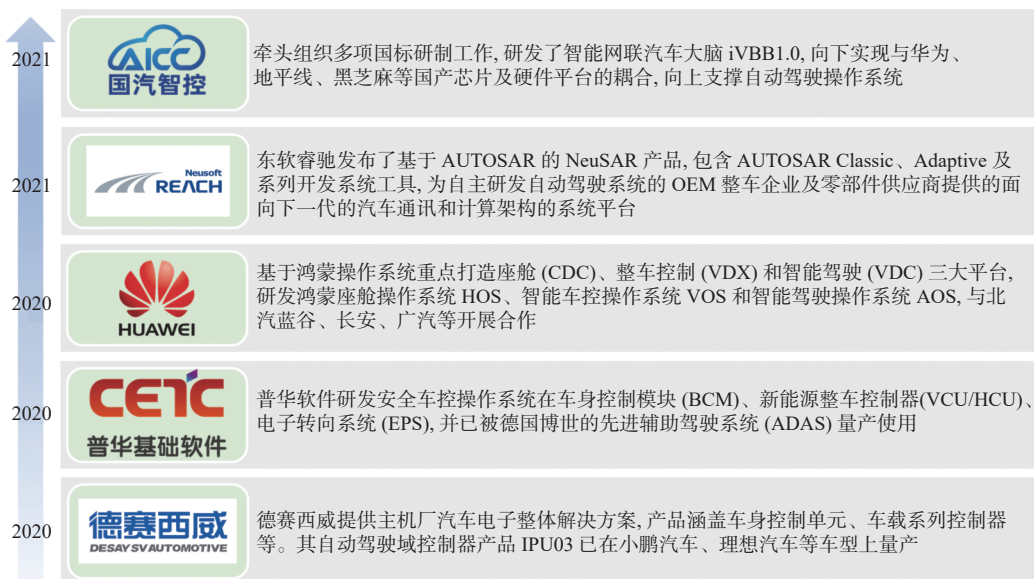


图 7　国内主流汽车电子产品供应商推出的自研车控操作系统

Fig. 7　Self-developed vehicle control operating system launched by mainstream electronic product suppliers of automobiles in China

盟(简称CASA联盟),旨在中国推广和发展AUTOSAR架构及国产化车控操作系统。国产化的自主车控操作系统仍处于发展初期,在面向智能网联汽车的新型电子电气架构下,仍面临强有限车载硬件资源的基础上实时性、高安全性的新需求挑战。

1.4 车控操作系统实时性、安全性保障技术新需求

智能网联汽车电子电气架构、软件功能需求的快速发展,对车控操作系统的实时性、安全性保障技术提出新的要求。

1)智能网联汽车的电子电气架构向集中式、端云融合式发展,使得智能网联汽车须采用高性能多核异构处理器及弹性实时计算平台以提高车端计算能力,需要车控操作系统对各类车载硬件计算平台进行虚拟化抽象并具备高互用性、强兼容性,此外,车控软件安全性保障及智能驾驶等功能在操作系统的集中度提高,需要融合车控安全操作系统与智能驾驶系统,因此,车控操作系统还需协同安全保障及智能驾驶的功能、合理分配硬件资源,并需采用虚拟化技术对代码进行系统级强时空隔离。现有操作系统基于分布式架构研发,对硬件资源为独占式使用,导致对智能网联汽车的新硬件、新架构兼容性差、复用性低。

2)车控软件架构向面向服务式架构(service-oriented architecture, SOA)发展,在车控操作系统中需要实现面向安全和面向智能驾驶等服务性功能,安全性服务与功能性服务存在竞争并实时变化,SOA下操作系统需要为服务运行及调度提供弹性强实时计算环境。因此,车控操作系统需要支持SOA并具备弹性实时调度机制,保障服务调度时系统的安全性和功能性。现有的车控操作系统为基于信号驱动架构下的软件,既不满足SOA下操作系统的扩展性要求,也不具备弹性实时调度机制保障服务调度及运行。

2 车控操作系统实时任务调度机制

智能网联汽车的车控操作系统承担了汽车实时控制响应等功能,因此,车控操作系统需根据任务优先级实时调度系统内各任务及中断操作,是典型的实时多任务运行环境[48]。图8为近年来车控操作系统中任务调度需求及典型算法的发展。基于智能网联汽车的车控操作系统调度策略、实时任务调度存在以下技术需求:①基于优先级的实时调度机制,避免恶意进程/线程绕过内核调度机制并长时间持续占用CPU资源,同时在调度中还应具备防止优先级反转的机制,防止因资源竞争可能导致的死锁;②操作系统服务的运行时间具有确定性,即系统服务的运行时间与系统负载(如活动进程、线程的数量)无关;③安全切换,在进程、线程、任务切换后安全处理残留信息,无关键数据信息及敏感信息残留,从而防止恶意软件对操作系统的数据进行攻击与截获。

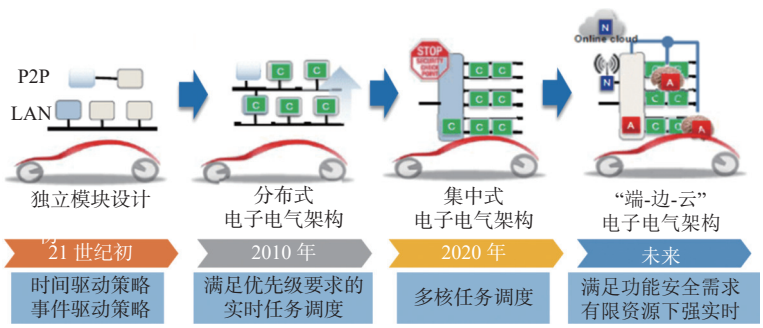


图8 车控操作系统任务调度机制发展历程

Fig. 8 Development of task scheduling mechanism in vehicle control operating system

车控操作系统任务调度策略主要包括时间驱动策略和事件驱动策略[49-50],如图9所示。时间驱动策略即将任务的启动时间预先设计好,由实时内核在特定时间启动任务。该方法有效保证了任务调度的实时性,同时调度机制简单、开发难度低。但该方法的灵活性差,不能满足在运行条件快速变化时的系统适应性。事件驱动策略即通过事件对任务进行激活,激活方式包括预先设计的任务或随机发生的中断等,再由实时内核负责根据特定的调度算法分配处理器资源[51]。在分布式电子电气架构中,电控单元多采用单核处理器,操作系统的任务调度机制主要为满足优先级要求的实时任务调度机制[52]。在该机制中,当优先级高的任务处于就绪状态时,其会立即抢占优先级低的任务的处理器资源。对传统的简单任务调度过程而言,由于任务量少、各任务优先级明确、任务调度频率低,因此,无须使用复杂的调度算法及机制进行管理。而智能网联汽车的车控操作系统实时性要求高(毫秒级

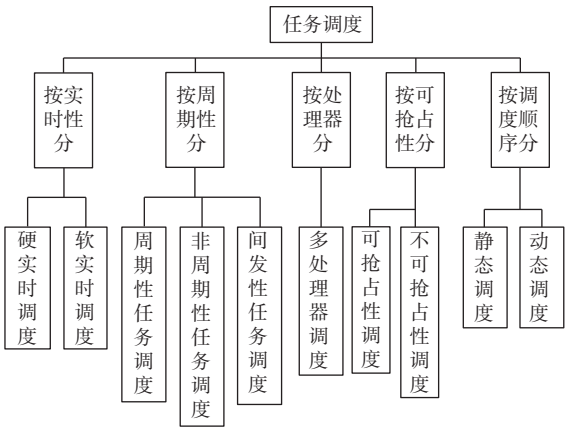


图 9　操作系统任务调度机制分类

Fig. 9　Classification of task scheduling mechanism in operating system

响应)、并发任务数量大, 且任务需在有限时间内完成, 因此, 需设计先进的任务调度算法以保障实时任务的调度性能。任务调度算法通过对处理器资源进行时间上的分配, 从而保障任务在特定的时间限制内完成, 由此可见, 合理的任务调度算法可以提高系统的实时性[53]。

对于不同优先级任务的调度, 基于优先级的实时任务调度方式主要包括不可抢占调度方式和可抢占调度方式[54]。在不可抢占调度方式中, 当优先级高的任务准备就绪时并不立即占用分配处理器资源, 而是在等待运行中的任务主动释放处理器资源后才会调度使用。不可抢占调度方式的优点在于正在运行的任务不会被抢占, 因此, 对共享数据的保护无须额外操作。然而, 不可抢占调度方式的执行时间较长, 且需等待正在进行的任务结束, 调度执行时间难以计算。在可抢占调度方式中, 只要优先级高的任务准备就绪就会立即抢占处理器运行资源, 响应迅速、实时性强。但由于任务运行过程中存在被抢占的可能性, 因此, 对各任务之间的互斥性要求较高。通常情况下, 车控操作系统中的任务调度机制将 2 种方式混合执行, 对于可抢占任务采用可抢占调度, 对于不可抢占任务则采用不可抢占的调度方式。对于优先级相同的任务调度, 常用的实时任务调度方式包括先来先服务、时间片轮转等。先来先服务采用堆栈的思想, 当多个优先级相同的任务准备就绪后, 时间上先进入就绪状态的任务先运行, 当其运行完毕后再运行同优先级后进入就绪状态的任务。而对于时间片轮转调度, 一个任务运行一段时间后切换给另一个相同优先级的就绪任务。以浙江大学开发的 SmartOSEK-OS 为例, 在面向分布式电子电气架构应用的 SmartOSEK-OS 的 1.0 和 2.0 版本中使用的是基于优先级的调度方式, 并支持全抢占式调度、非抢占式调度及混合调度[55], SmartOSEK-OS 3.0 版本集成了先进先出、时间片轮转等任务调度方式[56]。此外, 张激和包晟临[57]研究了 OSEK 操作系统的定时优化机制与调度优化方法。

随着集中式电子电气架构的发展、车载域控制器的推广应用, 多核异构处理器已成为车载电控系统的核心芯片, 弹性计算平台逐渐成为高性能车载计算平台的优选, 传统车控操作系统的实时任务调度机制难以适应多芯片、跨板卡、强算力、低时延和网联云控的车载硬件, 需要进一步发展及突破[58]。车载计算平台由原先的单核处理器演化为多核异构处理器, 因此, 操作系统也应对多核技术予以支持[59]。传统的面向单核处理器的操作系统能够对单核处理器的任务进行调度与管理, 把 CPU 计算时间按照进程优先级进行划分并将处理器计算资源分配至各任务调度, 从而形成多任务调度及运行[60], 而对于多核处理器中的多核协同、数据共享等则难以实现[61-62]。在多核处理器中, 在不同核上运行的任务进程及数据共享均可能不相同, 因此, 面向多核处理器的车控操作系统任务调度机制需综合分析各个核的负载以保障均衡性, 并结合各个核的性能特点进行优化以提高系统执行效率[63]。目前, 面向多核处理器的车控操作系统实时调度机制主要包括全局队列调度、局部队列调度和共生队列调度等[64-66]。全局队列调度机制通过车控操作系统维持一个全局的任务等待队列, 当某个内核空闲时就从等待队列中抽取出一个任务执行, 该方案有效提高了内核的利用率, 在现有的多核操作系统中是较为普遍的方法。局部队列调度机制通过多核操作系统维护每一个内核自身的任务等待队列, 当每一个内核发生空闲时便从其自身的任务等待队列中抽取任务执行, 在此机制中, 任务无须在各个内核之间切换, 但可能存在内核空闲的情况, 多核系统使用效率可能降低。共生队列调度机制通过多核操作系统的思想将使用共享资源多的任务和使用共享资源少的任务调度到同一时刻执行, 从而减少资源冲突的可能性。在面向多核处理器开发的 SmartOSEK-OS-M 中, 使用了参考共生队列的任务调度机制[67-68]。然而, 现有的车控操作系统的任务调度算法大多为面向多核同构处理器研发的, 忽略了在多核异构处理器下各个内核的性能差异、执行效率等, 从而导致操作系统在假设各个内核性能相同(即多核同构)的前提下, 对高性能内核分配工作量偏低、对低性能内核分配工作量偏高, 存在多核负载不均衡问题[69-70]。

在多核车控操作系统中，除了任务调度机制外，为保证系统实时性，还需任务调度算法以提高任务调度的效率[71]。经典的任务调度算法包括高性能内核优先算法、任务预分配算法、负载均衡算法等[72-73]。智能启发式算法具有求解全局最优化问题的能力，但全局最优化算法通常计算量大、内存消耗多，这便对操作系统任务调度的实时性提出了挑战[74]。随着数据驱动算法逐渐成熟、软件定义汽车趋势日趋明朗，以强化学习为代表的数据驱动算法等也逐渐成为任务调度算法的可行方向之一，根据变化的系统状态，通过学习算法获取优化后的任务调度策略。

随着智能网联汽车向集中式、端云融合式电子电气架构发展，其车控操作系统已经具备了安全性保障与智能驾驶等功能，并逐渐向安全车控操作系统与智能驾驶操作系统融合的方式发展[75]。车控操作系统需要针对其硬件资源进行虚拟化，并在安全性保障服务与智能驾驶功能性服务间进行合理分配、复用[76-77]。然而，现有的车控操作系统以分布式电子电气架构为基础，任务调度机制对车载硬件资源为独占式使用，围绕集中式、端云融合式电子电气架构下非独占式资源使用的实时任务调度机制的研究仍不充分[78-79]。此外，车控软件逐渐采用SOA进行设计，车控操作系统中存在面向安全和面向智能驾驶等服务性功能，安全性服务与功能性服务存在竞争与协同，导致车控操作系统需要支持SOA并实时调度各类服务以保障系统安全性和功能性，现有的车控操作系统为基于信号驱动架构下的软件，难以满足SOA和实时、安全的保障服务调度及运行[80]。此外，智能网联汽车中面向多核异构芯片的操作系统通常用于多芯片、跨板卡的硬件平台，仍需考虑系统执行效率、可靠性、安全性等问题[81]，现有的任务调度机制缺乏对系统稳定性、可靠性的分析。

智能网联汽车的车-云融合趋势已成为未来技术发展方向，车控操作系统的任务调度需要满足汽车全场景安全的需求。形式化验证方法通过数学模型保障了系统的准确性，可用于验证车控操作系统的应用效果，在保障操作系统功能安全性方面具有重要意义[82-83]。然而，现有的形式化验证方法为硬件、软件相互分离，且受限于系统复杂性，形式化验证方法主要应用于系统应用效果的验证，既缺乏对车控操作系统机制的形式化验证方法，也缺少对智能网联汽车软硬件一体化的形式化表征及验证方法。这对智能网联汽车的车控操作系统任务调度机制形式化验证提出了较大的理论与技术挑战。

3 特权层代码隔离技术

智能网联汽车的电控系统需满足严苛的功能安全、预期功能安全及信息安全要求，同时车控操作系统本身的安全也极为重要[84-85]。在操作系统中，由于第三方代码可能通过入侵的方式转换为核心代码或运行在核心代码的特权级上，从而可能通过特权级违规获得访问权限和实施破坏操作。操作系统可以通过在操作系统中引入强制访问控制机制从而对安全进行加固及增强，因此，对代码的特权级进行划分并将特权层代码隔离是重要且有效的安全保护方式[86]。只有保证了操作系统核心运行的安全，才能根本上保证在此基础上进行的访问控制等模式的安全加固，从而起到系统安全增强的作用[87]。

在分布式电子电气架构中，车控操作系统将实际运行空间划分为核心层和用户层，并将所有操作系统内核模块代码部署并运行在公共共享地址空间的核心层[88]。因此，在车控操作系统实现外设兼容和内核模块扩展特性的过程中，任何添加到操作系统内核中的外部第三方代码都存在威胁操作系统功能安全及信息安全的可能性。车控操作系统可以在操作系统内的运行空间赋予相适应的访问权限并对其访问进行控制，其安全性能的提高依赖于对特权层代码访问权限的细化。操作系统特权层代码的时空隔离主要包括运行空间的隔离保护、输入/输出隔离保护、内核模块间隔离保护。

运行空间的隔离保护是指依据计算机的程序存储结构，对存储地址空间及程序指令进行分层隔离。如在I386体系中，采用分段寻址的方法通过段描述符描述段内数据性质、访问权限、线性地址基址和段界限在内的地址空间段的情况，并引入段界限和段优先级的概念，规范、限制和保护对系统运行空间的访问。

内核模块间隔离保护指针对服务对象进程的数据共享传输由核心内核控制完成。在用户进程通过系统调用进入内核模块服务时，向核心内核传入数据段指针。在核心内核切换到内核模块运行过程中，此数据段暂时向提供服务的内核模块开放读写权限，此权限伴随着内核模块的关闭被核心内核收回。内核模块之间的隔离通过杜绝各个模块间的同特权级直接调用，防止因个别内核模块的不安全问题影响系统内核服务功能，因此，内核模块之间不提供调用接口，当正在运行的内核模块需要使用其他模块提供数据或调用其他模块时，其需要

返回核心以系统调用的方式请求需要的内核模块提供服务。此外, 内核模块的隔离空间内的任务属于不同的进程, 另有单独的内核模块运行体服务核心内核用于处理中断, 任务之间互不影响并具有不同的运行栈空间, 并分离不同进程对同一内核模块的服务请求。卢从娟[89]研究了汽车电子嵌入式操作系统的隔离保护机制, 并围绕有限的硬件、软件资源对隔离机制进行了评述。

随着智能网联汽车的车载硬件平台和软件架构的发展, 车控操作系统的特权层代码隔离也需融合智能驾驶操作系统和安全车控操作系统的需求。由于安全车控操作系统和智能驾驶操作系统的核心代码需满足的安全等级不同, 因此, 需要研究系统级代码的时空隔离方法以保障系统安全。虚拟化技术是智能网联汽车的特权层代码隔离的核心特征之一, 该技术通过对物理层硬件系统进行虚拟化抽象, 对运行在虚拟环境中的操作系统代码进行独立的时空隔离, 从而确保操作系统的核心代码相互独立并满足其特有的安全等级要求[90]。

4　最坏执行时间分析技术

实时性是智能网联汽车的车控操作系统核心性能指标之一, 但由于车控操作系统功能复杂、需求众多、任务调度与中断机制复杂, 因此, 导致对车控操作系统的实时性评价与测试存在难题[91]。最坏执行时间分析方法是指在考虑程序所有可能的输入、系统状态和软硬件间交互的前提下, 对软件和硬件进行数学建模来分析确定程序的最坏执行时间[92-93]。最坏执行时间分析方法是对系统实时性测试的重要指标之一, 常用的分析方法包括静态分析法、动态度量法及混合方法等[94-95]。

静态最坏执行时间分析法根据车控操作系统源程度的流信息, 结合拟部署的处理器性能大体估计程序的最坏执行时间, 在分析传统单核处理器的操作系统的最坏执行时间方面适用性强、准确度高[96]。此外, 静态分析方法无须运行程序即可得到最坏执行时间, 同时保证得到的结果是安全的, 方案简单、可靠性强[97]。静态最坏执行时间分析法是目前主流技术方案, 包括控制流分析、底层分析和计算方法分析等[98-99]。控制流分析从程序的源代码或目标代码出发, 通过分析程序的逻辑结构、语法、语义等信息来获取程序所有可能的执行路径。底层分析是对目标处理器的各种加速特性进行建模, 主要考虑缓存、流水线等处理器体系结构特性对程序执行时间的影响[100-101]。计算方法大致包括基于树的方法、基于路径的方法和隐藏路径枚举方法[102]。

但随着智能网联汽车的车载硬件系统向多核异构芯片、弹性计算平台的发展, 其处理器性能难以评价、物理层建模难度高, 导致静态分析法在处理多核操作系统的最坏执行时间分析时适用性差。多核实时嵌入式系统的任务执行过程必须遵循某种任务分配策略。当系统中有多个处理器可以执行同一个任务时, 该策略决定将任务分派给其中的一个处理器去执行。在动态调度算法的模型中, 为描述任务分配这一动态行为, 任务与处理器之间的映射关系必须能够动态地建立和调整, 而建立这种动态映射关系模型难度较高[103]。动态调度算法必须解决基于多核、多任务的调度问题, 即确定各个任务分别在哪个核上运行、何时开始运行。

动态度量法通过直接运行程序从而实时测量程序的真实执行时间, 该方法使用给定的输入条件用于验证程序的最终执行时间。由于难以预测全部可能的输入条件[104], 在分析时还需向动态系统输入任务所需的所有参数以保障程序可执行完所有可能的路径, 因此, 动态度量法在处理现代多核异构复杂处理器的程序分析时, 输入空间及计算开销可能较大, 从而难以保证运行所得到的结果的安全, 且存在低估系统最坏执行时间的可能[105]。

混合方法耦合了静态分析法与动态度量法[106], 先对程序进行静态分析, 随后开展有限条件下的输入测试[107]; 也可以先进行动态输入的度量, 而后计算静态程序的最坏执行时间。该方法综合了 2 类最坏执行时间分析方法, 虽能取得较好的分析结果, 但工作量大, 需要额外的计算开销[108]。

5　车控操作系统实时性/安全性保障技术

综上所述, 面向智能网联汽车的国产化操作系统研发在任务调度、实时性/安全性保障等方面仍存在理论难题与技术挑战, 主要包括:

1) 面向服务架构已成为智能网联汽车的主要软件架构。在面向服务架构中, 车控操作系统需要实时调度管理安全性保障、智能驾驶等各类服务, 由于服务随用户需求时变调整、各类服务需求资源动态更新, 车控操作系统需要为服务提供高弹性、强实时的调度机制。现有车控操作系统软件架构以信号驱动为主, 既无法满足面向服务架构需求, 也不具备弹性调度的功能。因此, 需要研究面向服务架构下的实时任务弹性调度理论, 为智能网联汽车提供弹性强实时计算环境, 保障服务调度时系统的安全性和功能性。

2）随着智能网联汽车自动驾驶技术的发展，车载硬件转化为多核异构处理器及弹性计算平台。然而，分布式架构下单核操作系统的最坏执行时间和中断延迟时间分析及保障技术无法用于多核异构处理器。多核处理器中任务访问共享资源时会受到其他内核上运行任务的干扰，现有的单核操作系统的最坏执行时间分析法缺乏对多核共享资源的考虑，难以预测多核操作系统任务的时间行为，造成面向多核异构处理器的操作系统最坏执行时间和中断延迟时间分析准确性差等问题，难以应用于集中式、端云融合式架构下的操作系统并应对强实时低延迟的车控软件需求，这对智能网联汽车的车控操作系统实时性评估及保障理论提出了挑战，需要开发基于多核异构处理器抽象模型的任务-内核动态行为映射方法，实现面向智能网联汽车多核异构处理器的高精度最坏执行时间和中断延迟时间分析。

3）智能网联汽车电子电气架构向集中式、端云融合式发展，对车控软件的安全性要求逐渐提升。当前智能网联汽车的车控软件开发需满足严苛的全场景安全要求，对操作系统的运行环境、代码隔离等技术提出了新要求。现有的车控操作系统缺乏对安全可信计算环境的研究与安全性保障理论，对车控操作系统的潜在攻击面、威胁分析不充分，操作系统可能存在的故障、入侵导致的破坏等难以量化和检测，这对车控操作系统的安全性保障技术提出了挑战，需要探索面向全场景安全的车控操作系统安全性保障理论，建立基于虚拟化技术的车控操作系统代码时空隔离机制与操作系统可信计算环境构建方法，保障操作系统的安全可靠运行。

4）车载硬件向高弹性强实时计算平台、多核异构处理器发展，车控软件的安全性保障及智能驾驶等功能在操作系统的集中度提高，要求车控操作系统兼容各类硬件平台、融合安全车控操作系统与智能驾驶操作系统，导致车控操作系统复杂度提升、安全验证难度高。因此，需要将操作系统接口标准化以提高开发效率，并采用形式化验证方法在理论上保障操作系统安全性。现有的形式化验证方法大多仅针对应用效果进行研究，而对车控操作系统的核心机制等的验证较少。需要探索软硬件一体化的形式化表征方法，建立面向车控操作系统核心机制的系统级形式化验证方法，提高车控操作系统的开发效率及安全性。

6 结束语

随着智能网联汽车技术和车载电子电气架构的快速发展，车控操作系统已成为汽车电子控制软件安全、高效、实时运行的基石，也是决定软件定义汽车时代产品竞争力的关键“卡脖子”技术。国外的车控操作系统起步较早，创立了OSEK OS和AUTOSAR OS等多代车控操作系统。2019年左右，国内智能网联汽车用车控操作系统才快速发展，如国汽智控、经纬恒润等企业均研制了国产化车控操作系统。

操作系统实时性/安全性保障技术主要包括任务调度、代码隔离、最坏执行时间分析等。任务调度机制从早期的任务队列逐渐发展为单核系统的任务调度、排序，并在多核芯片发展后进一步发展为跨核任务调度、资源共享等。代码隔离也从早期的内核代码物理隔离演化为虚拟化技术，即在虚拟环境中对代码进行时空隔离。多核操作系统的最坏执行时间分析方法目前仍进展较慢，主要采用静态分析和动态度量融合的混合方法对复杂操作系统最坏执行时间进行测试。

随着智能网联汽车集中式、端云融合式电子电气架构发展趋势下车控操作系统高弹性、强实时性、高安全性需求不断提升，传统的实时性/安全性保障技术已难以解决多核异构处理器的任务调度、最坏执行时间分析和高安全需求下的代码隔离等。因此，未来应重点发展智能网联汽车面向服务架构下的实时任务调度理论、面向多核异构处理器和全场景安全的车控操作系统实时性/安全性保障技术，从而在国产化智能网联汽车用车控操作系统关键技术、核心理论等方面取得进一步突破，以期推动产业化应用落地、保障行业快速健康发展。

参考文献（References）

[1] 国务院. 中国制造2025[R]. 北京: 国务院, 2015.
The State Council. Made in China 2025[R]. Beijing: The State Council, 2015(in Chinese).

[2] 中共中央, 国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[R]. 北京: 中共中央, 国务院, 2021.
The Central Committee of the Communist Party of China, The State Council. National comprehensive three dimensional transportation network planning outline[R]. Beijing: The Central Committee of the Communist Party of China, The State Council, 2021(in Chinese).

[3] 工业和信息化部, 国家标准委. 国家车联网产业标准体系建设指南[R]. 北京: 工业和信息化部, 国家标准委, 2023.
The Ministry of Industry and Information Technology, The National Standards Commission. Guidelines for the construction of national automotive internet industry standard system[R]. Beijing: The Ministry of Industry and Information Technology, The National Standards Commission, 2023(in Chinese).

[4] 国家发展改革委, 中央网信办, 科技部, 等. 智能汽车创新发展战略[R]. 北京: 国家发展改革委, 中央网信办, 科技部, 工业和信

息化部, 公安部, 财政部, 自然资源部, 住房城乡建设部, 交通运输部, 商务部, 市场监管总局, 2020.
National Development and Reform Commission, Cyberspace Administration of China, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, et al. Intelligent vehicle innovation and development strategy[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, Cyberspace Administration of China, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, The Ministry of Public Security of the People's Republic of China, Ministry of Finance of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Ministry of Transport of the People's Republic of China, Ministry of Commerce of the People's Republic of China, and State Administration for Market Regulation, 2020(in Chinese).

[5] 工业和信息化部. 智能网联汽车生产企业及产品准入管理指南(试行)[R]. 北京: 工业和信息化部, 2021.
The Ministry of Industry and Information Technology. Guidelines for intelligent connected vehicle production enterprises and product access management (Trial)[R]. Beijing: The Ministry of Industry and Information Technology, 2021(in Chinese).

[6] KHENFRI F, CHAABAN K, CHETTO M. Efficient mapping of runnables to tasks for embedded AUTOSAR applications[J]. Journal of Systems Architecture, 2020, 110: 101800.

[7] 张梅. 国内智能网联汽车操作系统发展现状与前景[J]. 时代汽车, 2021(9): 25-26.
ZHANG M. The development status and prospects of domestic intelligent networked automobile operating systems[J]. Auto Time, 2021(9): 25-26(in Chinese).

[8] 肖锋, 颜运昌, 陈卫国. 基于嵌入式实时操作系统的汽车转向器性能及寿命试验[J]. 机电产品开发与创新, 2006, 19(6): 136-137.
XIAO F, YAN Y C, CHEN W G. A design of vehicle steering gear performance and life test devices based on an embedded real-time operating system[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2006, 19(6): 136-137(in Chinese).

[9] 姜周. J1939 汽车通信平台的设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
JIANG Z. Design and implementation of J1939 automobile communication platform[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006(in Chinese).

[10] 李秀梅, 杨国青. OSEK/VDX 标准与车控电子产品开发[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2005, 5(4): 27-30.
LI X M, YANG G Q. OSEK/VDX standard and development of vehicle control electronic products[J]. Microcontroller & Embedded System, 2005, 5(4): 27-30(in Chinese).

[11] 毛亚茹. OSEK/VDX 标准研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
MAO Y R. Research and apply of OSEK/VDX standard[D]. Changchun: Jilin University, 2005(in Chinese).

[12] 龚黎明, 辜承林. 基于 OSEK/VDX 标准的嵌入式实时操作系统 PICOS18[J]. 电子技术, 2004, 33(5): 10-12.
GONG L M, GU C L. Embedded real-time operating system PICOS18 based on OSEK/VDX standard[J]. Electronic Technology, 2004, 33(5): 10-12(in Chinese).

[13] CHOI Y. A configurable V&V framework using formal behavioral patterns for OSEK/VDX operating systems[J]. Journal of Systems and Software, 2018, 137: 563-579.

[14] ZHANG M, AOKI T, HE Y Y. A spiral process of formalization and verification: A case study on verification of the scheduling mechanism of OSEK/VDX[J]. Journal of Information Security and Applications, 2016, 31: 41-53.

[15] 唐晓磊, 黄涛. 基于 OSEK/VDX 的汽车操作系统设计[J]. 北京汽车, 2007(1): 24-26.
TANG X L, HUANG T. Design of automobile operating system based on OSEK/VDX[J]. Beijing Automotive Engineering, 2007(1): 24-26(in Chinese).

[16] 郜文, 李继来, 梁华为. OSEK/VDX 嵌入式实时操作系统在汽车稳定性控制器中的应用[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(4): 148-151.
GAO W, LI J L, LIANG H W. Application of OSEK/VDX embedded real-time operating system to vehicle stability controller[J]. Computer Systems & Applications, 2010, 19(4): 148-151(in Chinese).

[17] 郑英治, 焦哲勇. 基于 OSEK 标准的嵌入式实时操作系统在汽车电子中的应用[J]. 现代电子技术, 2011, 34(3): 148-150.
ZHENG Y Z, JIAO Z Y. Application of embedded RTOS in automotive electronics based on OSEK[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(3): 148-150(in Chinese).

[18] 王瑞, 张东. 基于 OSEK/VDX 标准的操作系统设计与实现[J]. 航空计算技术, 2011, 41(2): 121-124.
WANG R, ZHANG D. Design and implementation of operating system based on OSEK/VDX specification[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(2): 121-124(in Chinese).

[19] 李静, 邢国成, 张家旭. 嵌入式 OSEK/VDX 操作系统的优化与应用[J]. 汽车工程, 2016, 38(4): 473-477.
LI J, XING G C, ZHANG J X. Optimizationand application of embedded OSEK/VDX operating system[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(4): 473-477(in Chinese).

[20] 古杨. SmartOSEK 集成开发环境研究和实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
GU Y. Research and implementation of SmartOSEK integrated development environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005(in Chinese).

[21] 胡博. 基于模型驱动的建模环境—SmartDesigner 3.5[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
HU B. A model-driven development environment SmartDesigner 3.5[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008(in Chinese).

[22] 岳龙. SmartIDE2.0: 支持 OSEK 标准的汽车电子集成开发环境[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
YUE L. SmartIDE2.0: Integrated development environment for automotive electronics supporting OSEK standard[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006(in Chinese).

[23] YANG G Q, ZHAO M D, LI H, et al. SmartOSEK based design and verification for in-vehicle network system: A Model-Based approach[C]//Proceedings of the International Conference on Control. Piscataway: IEEE Press, 2006.

[24] 宋君花, 王俊席, 冒晓建, 等. OSEK/VDX 的混合动力汽车实时操作系统[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 21-24.

SONG J H, WANG J X, MAO X J, et al. Design of real-time operating system for hybrid electric vehicle based on OSEK/VDX[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 21-24(in Chinese).

[25] 杨林孟, 吴光强, 邱绪云. 基于 UC/OS-Ⅱ操作系统的汽车底盘集成控制器设计[J]. 汽车科技, 2007(5): 41-44.
YANG L M, WU G Q, QIU X Y. The design based on operation system UC/OS-Ⅱ for integration controller of vehicle chassis[J]. Auto Mobile Science & Technology, 2007(5): 41-44(in Chinese).

[26] 张吕红. 参照 AUTOSAR 标准的 SmartOSEK OS 4.0 的设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
ZHANG L H. Design and implementation of SmartOSEK OS 4.0 consulting AUTOSAR[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010(in Chinese).

[27] 欧诗鑫. AUTOSAR OS 规范研究及其在 μC/OS-Ⅱ中实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
OU S X. Research on AUTOSAR OS specification and implementation in μC/OS-Ⅱ[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012(in Chinese).

[28] 武书逸, 杨弘跃, 董宗祥. 基于 AUTOSAR 操作系统的内核追踪方案研究[J]. 上海汽车, 2021(12): 25-28.
WU S Y, YANG H A, DONG Z X. Research on kernel tracing scheme based on AUTOSAR operating system[J]. Shanghai Auto, 2021(12): 25-28(in Chinese).

[29] 钟再敏, 张允. 基于 AUTOSAR 4.0 标准多核软件系统实现研究[J]. 机电一体化, 2016, 22(1): 12-17.
ZHONG Z M, ZHANG Y. Research of multicore software system implementation based on AUTOSAR 4.0 standard[J]. Mechatronics, 2016, 22(1): 12-17(in Chinese).

[30] 彭云辉. 基于 AUTOSAR 的汽车电子操作系统及其应用的建模与分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
PENG Y H. Modeling and analysis of AUTOSAROS and application[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014(in Chinese).

[31] 陈海兰. 基于 AUTOSAR 规范的嵌入式实时操作系统设计与实现[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
CHEN H L. Design and implementation of embedded real-time operating system based on AUTOSAR specification[D]. Shanghai: Fudan University, 2013(in Chinese).

[32] 严刚, 肖堃, 褚文博. 智能网联汽车计算平台虚拟化技术研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(1): 33-37.
YAN G, XIAO K, CHU W B. Research on virtualization technology for computing platform of intelligent connected vehicles[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 33-37(in Chinese).

[33] 赵世佳, 徐可, 宋娟, 等. 我国智能网联汽车操作系统发展的实施策略[J]. 科技管理研究, 2020, 40(9): 107-111.
ZHAO S J, XU K, SONG J, et al. Analysis of intelligent connected vehicle operating system and its implementation strategy[J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(9): 107-111(in Chinese).

[34] 赵黎. 打造智能汽车操作系统, 实现软件定义汽车[J]. 汽车纵横, 2021(11): 91-94.
ZHAO L. Create a smart car operating system and realize a software-defined car[J]. Auto Review, 2021(11): 91-94(in Chinese).

[35] 谭超鹏. 异构多核处理器的微内核操作系统实时任务调度的研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
TAN C P. Research on real-time task scheduling of micro-kernel operating system of heterogeneous multicore processor[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018(in Chinese).

[36] 黄一智, 李仁发. 从安全角度评述汽车操作系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(3): 4-8.
HUANG Y Z, LI R F. Review of vehicle operating system from perspective of safety[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2021, 21(3): 4-8(in Chinese).

[37] International Organization for Standardization. Road vehicles—Functional safety: ISO 26262[S]. Geneva: ISO, 2018.

[38] International Organization for Standardization. Road vehicles—Safety of the intended functionality: ISO 21448[S]. Geneva: ISO, 2022.

[39] International Organization for Standardization. Road vehicles—Cybersecurity engineering: ISO/SAE 21434[S]. Geneva: ISO, 2021.

[40] International Organization for Standardization. Quality management systems—Requirements: ISO 9001[S]. Geneva: ISO, 2015.

[41] SAE International. Cybersecurity guidebook for cyber-physical vehicle systems: SAE J3061[S]. New York: SAE, 2016.

[42] Roman Pallierer, BöRge Schmelz. 适用于高性能车载计算平台的自适应 AUTOSAR[J]. 汽车与配件, 2019(3): 43-45.
PALLIERER R, SCHMELZ B. Adaptive AUTOSAR for high-performance vehicular computing platforms[J]. Automobile & Parts, 2019(3): 43-45(in Chinese).

[43] 邱天时, 朱元, 吴志红, 等. 兼容 ROS 的自适应 AUTOSAR 面向服务通信研究[J]. 长江信息通信, 2021, 34(4): 1-5.
QIU T S, ZHU Y, WU Z H, et al. Research on service-oriented communication of adaptive AUTOSAR compatible with ROS[J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(4): 1-5(in Chinese).

[44] Roman Pallierer, BöRge Schmelz. 高性能车载计算平台的自适应 AUTOSAR 满足未来需求[J]. 汽车制造业, 2020(9): 10-13.
PALLIERER R, SCHMELZ B. AUTOSAR's capability of answering the future needs[J]. Automobil Industrie, 2020(9): 10-13(in Chinese).

[45] 全国汽车标准化技术委员会. 车用操作系统标准体系[S]. 北京: 全国汽车标准化技术委员会, 2019.
The National Technical Committee for Automobile Standardization. Vehicle operating system standard system[S]. Beijing: The National Technical Committee for Automobile Standardization, 2019(in Chinese).

[46] 全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分标委. 车控操作系统总体技术要求研究报告[R]. 北京: 全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分标委, 2021.
Intelligent Connected Vehicles Sub Committee of the National Technical Committee for Automobile Standardization. Research report on overall technical requirements for vehicle control operating system [R]. Beijing: Intelligent Connected Vehicles Sub Committee of the National Technical Committee for Automobile Standardization, 2021(in Chinese).

[47] 李鲁苗, 周玮. 全球车用操作系统发展现状[J]. 汽车纵横, 2022(1): 39-42.
LI L M, ZHOU W. Current situation of global automotive operating system development[J]. Auto Review, 2022(1): 39-42(in

Chinese).

[48] 管业雷. 异构多核处理器的微内核操作系统体系结构的研究与设计[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
GUAN Y L. Research and design of microkernel operating system architecture based on heterogeneous multicore processor[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018(in Chinese).

[49] ZHAO L, HAN X. Decomposition-based scheduling for parallel real-time tasks on multiprocessors[J]. Computers & Electrical Engineering, 2022, 97: 107644.

[50] HASANLOO M, KARGAHI M, JALILIAN S. Dynamic harvesting and energy-aware real-time task scheduling[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2020, 28: 100413.

[51] 周俊龙. 实时系统的可靠性驱动任务调度机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
ZHOU J L. Reliability-driven task scheduling in real-time systems[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017(in Chinese).

[52] 杨国青. 基于模型驱动的汽车电子软件开发方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
YANG G Q. Research on model-based design approaches for automotive electronics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006(in Chinese).

[53] HU M L, LUO J, WANG Y, et al. Holistic scheduling of real-time applications in time-triggered in-vehicle networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(3): 1817-1828.

[54] 陈剑利, 宋昕, 唐亚利, 等. 汽车软件中实时任务调度机制研究[J]. 湘潭师范学院学报 (自然科学版), 2008, 30(1): 27-30.
CHEN J L, SONG X, TANG Y L, et al. Research on real-time task scheduling mechanism in automotive software[J]. Journal of Xiangtan Normal University (Natural Science Edition), 2008, 30(1): 27-30(in Chinese).

[55] 陈威. SmartOSEK 操作系统设计和空间优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
CHEN W. SmartOSEK operating system design and space optimization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005(in Chinese).

[56] 郁利吉. SmartOSEK OS 3.0 的设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
YU L J. The design and implementation of SmartOSEK OS 3.0[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007(in Chinese).

[57] 张激, 包晟临. OSEK 操作系统定时机制优化设计[J]. 计算机工程, 2010, 36(17): 252-254.
ZHANG J, BAO S L. Optimization design of timer mechanism in OSEK operating system[J]. Computer Engineering, 2010, 36(17): 252-254(in Chinese).

[58] MOULIK S. RESET: A real-time scheduler for energy and temperature aware heterogeneous multi-core systems[J]. Integration, 2021, 77: 59-69.

[59] 朱怡安, 黄林林, 李联, 等. 多核平台下分区操作系统的安全关键任务调度方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(12): 38-44.
ZHU Y A, HUANG L L, LI L, et al. Safety-critical task scheduling method for partitioned operating system in multi-core platform[J]. Computer Engineering, 2017, 43(12): 38-44(in Chinese).

[60] BIONDI A, BUTTAZZO G. Modeling and analysis of engine control tasks under dynamic priority scheduling[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10): 4407-4416.

[61] 李彦冬, 雷航. 多核操作系统发展综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3215-3219.
LI Y D, LEI H. Survey of multi-core operating system[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(9): 3215-3219(in Chinese).

[62] 梁荣晓. 多核操作系统发展综述[J]. 信息安全与技术, 2013, 4(3): 10-12.
LIANG R X. Summary of multicore operating system development[J]. Information Security and Technology, 2013, 4(3): 10-12 (in Chinese).

[63] SHAHABI-SHAHMIRI R, ASIAN S, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, et al. A routing and scheduling problem for cross-docking networks with perishable products, heterogeneous vehicles and split delivery[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 157: 107299.

[64] 江斌. 一种车用同构多核嵌入式实时操作系统内核的设计与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
JIANG B. Design and implementation of an automotive embedded real-time operating system kernel supporting homogeneous multicore[D]. Changsha: Hunan University, 2012(in Chinese).

[65] 罗文. 异构多核任务迁移和调度算法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LUO W. Research on task migration and scheduling algorithm for heterogeneous multi-core processors[D]. Changsha: Hunan University, 2016(in Chinese).

[66] SALMAN S M, PAPADOPOULOS A V, MUBEEN S, et al. Multi-processor scheduling of elastic applications in compositional real-time systems[J]. Journal of Systems Architecture, 2022, 122: 102358.

[67] 卢朝洪, 金曦, 唐岳东, 等. 多核处理器下智能车载平台的设计与实现[J]. 电子产品世界, 2013, 20(7): 64-67.
LU C H, JIN X, TANG Y D, et al. Design and implementation of intelligent in-vehicle platform on multicore processor[J]. Electronic Engineering & Product World, 2013, 20(7): 64-67(in Chinese).

[68] 俞建德. 支持异构多核的嵌入式实时操作系统 SmartOSEK OS-M[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
YU J D. SmartOSEK OS-M: A real-time operating system supporting heterogeneous multi-cores[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008(in Chinese).

[69] YUAN C Z, HE H Y, ZHAN P P, et al. A framework for analysis of non-functional properties of AADL model based on PNML [C]//Proceedings of the International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems. Berlin: Springer, 2020: 2562-2570.

[70] ORR M, SINNEN O. Optimal task scheduling for partially heterogeneous systems[J]. Parallel Computing, 2021, 107: 102815.

[71] NIE P C, DUAN Z H. Efficient and scalable scheduling for performance heterogeneous multicore systems[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2012, 72(3): 353-361.

[72] 王嘉平. 多核系统中实时任务调度算法的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
WANG J P. The research on a scheduling algorithm for real-time tasks in multi-core systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012(in Chinese).

[73] 王世涛, 张激, 李健, 等. 嵌入式多核操作系统负载均衡研究[J]. 计算机工程, 2015, 41(7): 86-90.

WANG S T, ZHANG J, LI J, et al. Load balancing research on embedded multicore operating system[J]. Computer Engineering, 2015, 41(7): 86-90(in Chinese).

[74] YAĞMUR E, KESEN S E. Multi-trip heterogeneous vehicle routing problem coordinated with production scheduling: Memetic algorithm and simulated annealing approaches[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 161: 107649.

[75] WANG B, WANG C H, HUANG W W, et al. Security-aware task scheduling with deadline constraints on heterogeneous hybrid clouds[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2021, 153: 15-28.

[76] HUSSAIN M, WEI L F, LAKHAN A, et al. Energy and performance efficient task scheduling in heterogeneous virtualized cloud computing[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2021, 30: 100517.

[77] LI M S, GAO J, ZHAO L, et al. Adaptive computing scheduling for edge-assisted autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 5318-5331.

[78] SINGH H, TYAGI S, KUMAR P, et al. Metaheuristics for scheduling of heterogeneous tasks in cloud computing environments: Analysis, performance evaluation, and future directions[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2021, 111: 102353.

[79] LI J F, CAO X F, GUO D K, et al. Task scheduling with UAV-assisted vehicular cloud for road detection in highway scenario[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(8): 7702-7713.

[80] KIM E, LEE Y, HE L, et al. Power guarantee for electric systems using real-time scheduling[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020, 31(8): 1783-1798.

[81] HADIAN M, ALTUWAIYAN T, LIANG X H, et al. Privacy-preserving task scheduling for time-sharing services of autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5260-5270.

[82] 孙海泳. 嵌入式操作系统的形式化验证方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
SUN H Y. Research on formal verification method of embedded operating system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020(in Chinese).

[83] KNOOP J, KOVÁCS L, ZWIRCHMAYR J. Replacing conjectures by positive knowledge: Inferring proven precise worst-case execution time bounds using symbolic execution[J]. Journal of Symbolic Computation, 2017, 80: 101-124.

[84] 魏城炯. SmartOSEK OS 可靠性测试方案[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
WEI C J. Reliability testing scheme for SmartOSEK OS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010(in Chinese).

[85] 杨国青, 厉蒋. 基于 ISO 26262 功能安全标准的汽车电子系统测试方法 (上)[J]. 电子产品世界, 2013, 20(4): 31-34.
YANG G Q, LI J. Test method for automotive electronics system based on ISO 26262 (I)[J]. Electronic Engineering & Product World, 2013, 20(4): 31-34(in Chinese).

[86] 刁振军. 基于三层特权级的系统安全体系研究[J]. 电子技术与软件工程, 2014(18): 247.
DIAO Z J. Research on system security system based on three privilege levels[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2014(18): 247(in Chinese).

[87] YUAN C Z, WU K Z, PENG R, et al. A hierarchical fault detection method for aerospace embedded software[C]//Proceedings of the International Conference on Wireless and Satellite Systems. Berlin: Springer, 2021: 124-138.

[88] 陈丽蓉, 燕立明, 罗蕾. 汽车电子嵌入式操作系统的隔离保护机制[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(3): 450-456.
CHEN L R, YAN L M, LUO L. An isolation and protection mechanism of automotive electronic embedded operating system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(3): 450-456(in Chinese).

[89] 卢从娟. 探析汽车电子嵌入式操作系统的隔离保护机制[J]. 中国新通信, 2015, 17(15): 100.
LU C J. Analysis on the isolation and protection mechanism of automotive electronic embedded operating system[J]. China New Telecommunications, 2015, 17(15): 100(in Chinese).

[90] 迎九. 多核、虚拟化、多操作系统的软件趋势[J]. 电子产品世界, 2010, 17(S1): 58-60.
YING J. Software trends of multi-core, virtualization and multi-operating systems[J]. Electronic Engineering & Product World, 2010, 17(S1): 58-60(in Chinese).

[91] AGIRRE I, CAZORLA F J, ABELLA J, et al. Fitting software execution-time exceedance into a residual random fault in ISO-26262[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2018, 67(3): 1314-1327.

[92] 吕鸣松. 实时系统最坏情况执行时间分析技术的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
LYU M S. Research on worst-case execution time analysis techniques of real-time systems[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010(in Chinese).

[93] ZHANG T X, ZHENG W G, XIAO Y Y, et al. A dynamic instruction cache locking approach for minimizing worst case execution time of a single task[J]. IEEE Access, 2020, 8: 208003-208015.

[94] 殷锋社, 汤小明. 实时系统最坏执行时间分析及测试[J]. 电子测试, 2013(10): 95-96.
YIN F S, TANG X M. Analysis and test of worst-case execute time in real time system[J]. Electronic Test, 2013(10): 95-96(in Chinese).

[95] ERMEDAHL A, PUSCHNER P. Preface to the special issue on worst-case execution-time analysis[J]. Journal of Systems Architecture, 2011, 57(7): 675-676.

[96] 王颖洁, 周宽久, 李明楚. 实时嵌入式系统的 WCET 分析与预测研究综述[J]. 计算机科学, 2019, 46(S1): 16-22.
WANG Y J, ZHOU K J, LI M C. Review on WCET analysis and prediction of real-time embedded system[J]. Computer Science, 2019, 46(S1): 16-22(in Chinese).

[97] STAPPERT F, ALTENBERND P. Complete worst-case execution time analysis of straight-line hard real-time programs[J]. Journal of Systems Architecture, 2000, 46(4): 339-355.

[98] 刘育芳, 张立臣. 实时系统最坏执行时间分析[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(11): 8-10.
LIU Y F, ZHANG L C. Worst-case execution time analysis for real-time systems[J]. Application Research of Computers, 2005, 22(11): 8-10(in Chinese).

[99] METZLAFF S, UNGERER T. A comparison of instruction memories from the WCET perspective[J]. Journal of Systems Architecture, 2014, 60(5): 452-466.

[100] SEGARRA J, GRAN TEJERO R, VIÑALS V. A generic framework to integrate data caches in the WCET analysis of real-time systems[J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 120: 102304.

[101] SIEH V, BURLACU R, HÖNIG T, et al. Combining automated measurement-based cost modeling with static worst-case execution-time and energy-consumption analyses[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2019, 11(2): 38-41.

[102] HARMON T, SCHOEBERL M, KIRNER R, et al. Fast, interactive worst-case execution time analysis with back-annotation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(2): 366-377.

[103] BARTLETT M, BATE I, KAZAKOV D. Accurate determination of loop iterations for worst-case execution time analysis[J]. IEEE Transactions on Computers, 2010, 59(11): 1520-1532.

[104] BRANDNER F, JORDAN A. Refinement of worst-case execution time bounds by graph pruning[J]. Computer Languages, Systems & Structures, 2014, 40(3-4): 155-170.

[105] GIL S J, BATE I, LIMA G, et al. Open challenges for probabilistic measurement-based worst-case execution time[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2017, 9(3): 69-72.

[106] ERMEDAHL A, STAPPERT F, ENGBLOM J. Clustered worst-case execution-time calculation[J]. IEEE Transactions on Computers, 2005, 54(9): 1104-1122.

[107] CARMINATI A, STARKE R A, DE OLIVEIRA R S. Combining loop unrolling strategies and code predication to reduce the worst-case execution time of real-time software[J]. Applied Computing and Informatics, 2017, 13(2): 184-193.

[108] CHATTOPADHYAY S, TRESINA M J, NARAYAN S. Worst case execution time analysis of automotive software[J]. Procedia Engineering, 2012, 30: 983-988.

Real-time performance/security guarantee technology of vehicle control operating system

YANG Shichun[1]，CUI Haigang[1]，ZHOU Sida[1]，ZHOU Xin'an[1]，FAN Chunpeng[2]，CAO Yaoguang[3,*]

(1. School of Transportation Science and Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China；
2. Beijing New Energy Vehicle Co.，Ltd.，Beijing 100176，China；
3. Research Institute for Frontier Science，Beihang University，Beijing 100191，China)

Abstract：Electronic control technology continues to enable the rapid development of intelligent connected vehicles, and the vehicle control operating system is the fundament of ensuring the safe, efficient, and real-time operation of the electronic control software of automobiles. As intelligent connected vehicles develop towards centralized and end-cloud integrated electronic and electrical architecture, vehicle-mounted hardware evolves into multi-core heterogeneous processors and elastic computing platforms, and vehicle control software transforms into service-oriented software architecture. The architecture and key technologies of vehicle control operating systems also develop accordingly. In this article, the development and current situation of vehicle control operating systems for intelligent connected vehicles were reviewed, and the basic theories and key technologies of task scheduling, real-time performance/security guarantee, and formalized representation and verification were analyzed. The technical challenges and development trends of the existing vehicle control operating system were discussed, so as to provide a reference for the development of the vehicle control operating system of intelligent networked vehicles.

Keywords：intelligent connected vehicle；vehicle control operating system；task scheduling；code isolation；worst execution time analysis

Received：2022-07-07；**Accepted**：2022-09-02；**Published Online**：2022-12-14 10：51

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221213.1625.009

Foundation item：National Key Research and Development Program of China (2021YFB2501300)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0596

基于麻雀搜索算法的ARAIM故障子集优化算法

王尔申[1,2,*]，王欢[1]，雷虹[3]，曾洪正[2]，曲萍萍[1]，庞涛[1]

(1. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院，沈阳 110136；2. 中国民用航空飞行学院 飞行技术与飞行安全重点实验室，广汉 618307；3. 电磁环境效应航空科技重点实验室，沈阳 110035)

摘　　要：针对多假设解分离(MHSS)测试受卫星数目增加、潜在故障概率提高的影响，使得需要监测的子集数量增长而带来计算负担增加的问题，提出一种基于麻雀搜索算法(SSA)的高级接收机自主完好性监测(ARAIM)故障子集优化算法。结合SSA将可见卫星分配为发现者、跟随者和侦查预警者，通过剔除能量较低的个体降低计算冗余。在搜索过程中，引入自适应步长提升迭代速度，提高算法的执行效率。在双星座情况下，对完好性支持信息(ISM)参数进行3种假设，验证了所提算法的可用性，并与传统算法进行了对比分析。结果表明：通过所提算法得到的子集数量较传统算法减少了75%～90%，相同条件下，仿真用时降低了68%～88%，ARAIM可用性变化不超过2%。

关 键 词：高级接收机自主完好性监测；双星座；故障子集；麻雀搜索算法；完好性支持信息
中图分类号：V221^{+}.3; TB553
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2066-08

多星座组合导航系统的应用使得接收机可见卫星数增加，定位精度得到改善[1-2]，但这也会导致卫星/星座潜在故障概率的提高，进而影响定位结果的可靠性。完好性监测技术可以评估当前定位结果置信度，当定位结果不能满足导航性能需求时，及时向用户发出告警[3-5]。该技术主要分为3类：外部增强法、接收机自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)法和卫星自主完好性监测法[6]。其中，RAIM利用接收机内部观测信息和其他辅助方式，不需要大量的基础设施即可进行完好性监测。高级接收机自主完好性监测(advanced receiver autonomous integrity monitoring, ARAIM)技术作为RAIM的扩展，可利用双频信号和多个全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)星座消除电离层延迟，并改善用户的几何结构[7-8]。

ARAIM的多假设解分离(multiple hypothesis solution separation, MHSS)基准算法使用户能够探测、排除故障，进而满足完好性需求[9-10]。该算法提供了一种基于最大故障阶数的故障子集确定方法，但存在2方面问题：①在数据处理方面，故障子集数量过大会影响算法执行效率；②在完好性方面，检测过多的故障模式会降低可用性[11-12]。针对上述问题，学者们提出了不同解决方法。Walter等提出先将卫星按星座分组，再将故障星座移除的方法[13]；Ge等利用轨道参数信息，移除了存在故障模

收稿日期：2022-07-07；**录用日期**：2022-09-14；**网络出版时间**：2022-10-09 17:38
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221009.0906.002
基金项目：国家自然科学基金(62173237)；中国民航大学民航航班广域监视与安全管控技术重点实验室开放基金(202105)；嵩山实验室预研项目(YYJC062022017)；卫星导航系统与装备技术国家重点实验室开放基金(CEPNT2022B04,CEPNT2022A01)；省部共建动态测试技术国家重点实验室开放基金(2023-SYSJJ-04)；民航飞行技术与飞行安全重点实验室开放基金(FZ2021KF15,FZ2021ZZ06,FZ2020KF09)；辽宁省应用基础研究计划(2022020502-JH2/1013,2022JH2/101300150)；沈阳市科技计划(22-322-3-34)

*通信作者. E-mail：wanges_2016@126.com

引用格式：王尔申，王欢，雷虹，等. 基于麻雀搜索算法的ARAIM故障子集优化算法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2066-2073. WANG E S，WANG H，LEI H，et al. ARAIM-related fault subset optimization algorithm based on sparrow search algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2066-2073 (in Chinese).

式的卫星轨道[14]; Blanch 等研究了固定检测子集的方法[15]; Meng 等研究了一种基于概率累加反馈的 ARAIM 故障模式确定方法[16]; Luo 等研究了一种基于完好性支持信息(integrity supported message, ISM)参数的卫星选择新方法[17]; 刘金鑫等研究了使用一个子集代替多个子集的方法[18]。

上述方法可通过将类似故障模式联合或将观测到的卫星进行预处理的方式直接或间接地减少需要测试子集的数量。但在双星座组合条件下, 会因监测门限的降低造成连续性风险等问题。

本文研究了不同参数对故障子集数目的影响, 将麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)引入故障子集的处理过程, 提出一种基于 SSA 的 ARAIM 故障子集优化算法。通过实验验证本文算法的性能, 对比了优化前后故障子集减少情况和算法运行时间。基于理想状态、差异状态和保守状态对 ISM 参数进行了 3 类假设, 分析了本文算法对 ARAIM 全球可用性的影响。

1　故障探测与故障子集确定

故障探测通过加权最小二乘算法, 将伪距经过牛顿迭代后, 更新位置估计残差。在 ARAIM 算法中, 全部可见卫星和故障子集的位置估计残差分别表示为

$$\boldsymbol{x}_q^{(0)} = (\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}^{(0)}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}^{(0)}\Delta\boldsymbol{y} = \boldsymbol{S}_q^{(0)}\Delta\boldsymbol{y} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{x}_q^{(k)} = (\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}^{(k)}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}^{(k)}\Delta\boldsymbol{y} = \boldsymbol{S}_q^{(k)}\Delta\boldsymbol{y} \tag{2}$$

式中: $\Delta\boldsymbol{y}$为伪距残差; $\boldsymbol{H}$为接收机定位解算的观测矩阵; k为对应的故障子集; $q=1,2,3$表示东北天 3 个方向分量; $\boldsymbol{S}^{(0)}$为无故障条件下的位置估计矩阵; $\boldsymbol{S}^{(k)}$为第k个故障子集的位置估计矩阵; $\boldsymbol{W}$为用于评估完好性的权重矩阵, 表示为

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{C}_{\mathrm{int}}^{-1} \tag{3}$$

$$C_{\mathrm{int}}(i,i) = \sigma_{\mathrm{URA},i}^2 + \sigma_{\mathrm{tropo},i}^2 + \sigma_{\mathrm{user},i}^2 \tag{4}$$

$$C_{\mathrm{acc}}(i,i) = \sigma_{\mathrm{URE},i}^2 + \sigma_{\mathrm{tropo},i}^2 + \sigma_{\mathrm{user},i}^2 \tag{5}$$

其中: $\boldsymbol{C}_{\mathrm{int}}$为评估完好性的伪距协方差矩阵; $\boldsymbol{C}_{\mathrm{acc}}$为评估精度的伪距协方差矩阵; $\sigma_{\mathrm{URA},i}^2$和$\sigma_{\mathrm{URE},i}^2$分别为第$i$颗卫星的用户测距精度误差方差和用户测距误差方差; $\sigma_{\mathrm{tropo},i}^2$和$\sigma_{\mathrm{user},i}^2$分别为对流层延迟误差方差和用户接收机误差方差。

第k个故障子集的检验统计量为

$$D_{k,q} = \left|\boldsymbol{x}_q^{(k)} - \boldsymbol{x}_q^{(0)}\right| \leqslant T_{k,q} \tag{6}$$

式中: $\boldsymbol{x}_q^{(0)}$和$\boldsymbol{x}_q^{(k)}$分别为全部可见卫星和故障子集的位置估计残差; $T_{k,q}$为东北天某个方向上的检测阈值, 被定义为

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{fault}}} P\left(\left|D_{k,q}\right| > T_{k,q} \mid H_0\right) = P_{\mathrm{FA}} \\ D_k \sim N\left(0, \sigma_k^2\right) \end{cases} \tag{7}$$

其中: D_k为第k个故障子集的检验统计量; N_{fault}为故障子集的个数; H_0为无故障的情况; P_{FA}为连续性风险概率。

每个子集建立的检验统计量都要在 3 个方向上进行阈值检测。可采用不同的方法将风险分配给子集, 进而求出检测阈值。为降低计算冗余, 基准算法给出了一种基于最大故障阶数的故障子集计算方法, 由 ISM 给出的故障先验概率求出:

$$N_{\mathrm{fault,max}} = \min\left\{ s \left| \left(1 - \sum_{i=0}^{n} P_{\mathrm{fault},i} \leqslant P_{\mathrm{thres}}\right)\right.\right\} \tag{8}$$

式中: $N_{\mathrm{fault,max}}$为所求得的卫星/星座同时发生故障的最大数目; $s=1,2,\cdots,N$为可能发生的故障数目; P_{thres}为完好性风险阈值; $P_{\mathrm{fault},i}$为故障模式i的先验概率。

确定了同时发生故障的最大数目后, 要对全部可见卫星进行遍历, 列举出所有可能发生故障的情况, 即确定故障子集。

2　麻雀搜索算法

通过 MHSS 算法遍历故障子集, 在卫星数量增多或先验故障概率提高时, 会带来过大的计算冗余, 增加接收机处理的负担。因此, 需要在保证算法可用性的同时尽量降低计算冗余。SSA 是根据麻雀觅食和躲避危险的行为提出的群智能优化算法[19]。SSA 模拟了麻雀的觅食行为, 将种群内部分工为发现者、跟随者和侦察预警者, 既可以保证群体获取食物储备能量, 又可以警戒危险保证群体的安全。SSA 稳定性好且寻优精度高、收敛速度快, 较其他传统的群智能优化算法有明显优势[20-21]。

在 SSA 中, 一般选取一定数量性能较好的个体作为初始发现者, 再选取一定数量性能较差的个体作为初始侦察预警者。模拟麻雀搜寻食物的过程, 由n只麻雀所组成的种群表示为

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,d} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \cdots & x_{m,d} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中: d为优化问题中变量的维度; m为种群中麻雀的数量。

对应n只麻雀的适应度函数为

$$\boldsymbol{F}_n=\begin{bmatrix} f(x_{1,1},x_{1,2},\cdots,x_{1,d}) \\ f(x_{2,1},x_{2,2},\cdots,x_{2,d}) \\ \vdots \\ f(x_{n,1},x_{n,2},\cdots,x_{n,d}) \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：$f(\,)$表示适应度函数，结合具体情况而定。

3 本文算法

ARAIM算法将故障刻画为一个较大的偏差（见式(6)），在无故障条件下，该事件服从零均值正态分布[4]，在故障探测过程中，也是通过此事件来确定故障子集的数量，因此，选取该事件作为适应度函数。选星通过对观测卫星进行预处理间接降低ARAIM算法中需要监测子集的总数目[17]。SSA收敛速度快且寻优精度高，可作为一种数据处理手段优化算法的性能[19]。因此，为解决因子集数量剧增而带来的计算冗余问题，采用SSA将观测到的卫星数据进行处理。

设在某时刻t可见卫星为n颗，将卫星进行分组并检测故障卫星。在SSA故障子集优化算法中，每颗卫星被视为一个粒子，每个粒子在种群内部都有具体分工，令故障检测的检验统计量作为适应度函数。具体实施步骤如下：

步骤 1 获取数据。根据导航电文和观测文件计算可见卫星位置，记为$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2\cdots,x_n]$，结合卫星的状态信息剔除不可用卫星。

步骤 2 初始化种群。引入k-means算法进行分组。把卫星分配到离其最近的聚类中心点所在的种群中。输入样本集，即当前时刻可见卫星的位置，记为$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2\cdots,x_n]$。选取方位角较大的$j$颗卫星作为种群的初始聚类中心点，记为$\{\mu_1,\mu_2,\cdots,\mu_j\}$，$j$与可见星座个数相同。计算每颗卫星到种群中心的欧氏距离：

$$d(x_i,\mu_j)=\sqrt{\sum\left(x_i^{(q)}-\mu_j^{(q)}\right)^2} \tag{11}$$

式中：x_i为第i颗卫星；μ_j为第j个聚类中心。比较卫星到聚类中心的距离，将卫星分配到离其最近的聚类中心所在的种群中，直至达到设置的最大迭代次数，得到初始种群$S=\{S_1,S_2,\cdots,S_j\}$。

步骤 3 将每个种群内部的卫星按照低、中、高仰角区域划分，对不同仰角区域的卫星进行统计，发现者、跟随者、侦查预警者数量记为l、m、h。初始化$\boldsymbol{X}_h$为发现者，$\boldsymbol{X}_m$为跟随者，$\boldsymbol{X}_l$为侦察预警者。

步骤 4 计算适应度值。每个种群适应度函数的构建流程是相同的。假设在某一种群中有n_1颗卫星，将该种群内的卫星位置记为$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]$。在$q$维空间中，该种群中的卫星位置可表示为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & \cdots & x_1^{(q)} \\ x_2^{(1)} & x_2^{(2)} & \cdots & x_2^{(q)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n^{(1)} & x_n^{(2)} & \cdots & x_n^{(q)} \end{bmatrix} \tag{12}$$

优先遍历种群中的侦察预警者，根据式(6)构造适应度函数，故障子集k的适应度函数为

$$f_k=\left|x_{k,q}-x_{0,q}\right|\leqslant T_{k,q} \tag{13}$$

式中：$x_{k,q}$为第k个故障子集所对应的位置解；$x_{0,q}$为无故障条件下的位置解。

种群内所有故障子集所构造的适应度函数的集合表示为

$$\boldsymbol{F}_k=\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_k \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \left|x_{1,q}-x_{0,q}\right|\leqslant T_{1,q} \\ \left|x_{2,q}-x_{0,q}\right|\leqslant T_{2,q} \\ \vdots \\ \left|x_{k,q}-x_{0,q}\right|\leqslant T_{k,q} \end{bmatrix} \tag{14}$$

步骤 5 更新迭代。种群中卫星的身份不是固定不变的，为保证发现者具有较大搜索范围，其位置更新被描述为

$$\boldsymbol{X}_{h,q}^{t+1}=\begin{cases} \boldsymbol{X}_{h,q}^{t}\exp\left(-\dfrac{h}{\alpha i_{\text{ter_max}}}\right) & R_{\text{T}}<S_{\text{T}} \\ \boldsymbol{X}_{h,q}^{t}+V\boldsymbol{L} & R_{\text{T}}\geqslant S_{\text{T}} \end{cases} \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{h,q}^{t+1}$为$t+1$次迭代时发现者的位置，$t$为当前迭代次数；$i_{\text{ter_max}}$为设定的最大迭代次数；$\alpha\in(0,1]$为随机数；$R_{\text{T}}\in[0,1]$和$S_{\text{T}}\in[0.5,1]$分别为预警值和安全值；$V$为服从正态分布的随机数；$\boldsymbol{L}$为$1\times q$的矩阵，且矩阵内每个元素全部为1。当$R_{\text{T}}<S_{\text{T}}$时，种群内部没有故障卫星，重新执行步骤1，对下一个历元进行评估；当$R_{\text{T}}\geqslant S_{\text{T}}$时，则该种群中存在故障卫星，要及时向系统发出警报。

跟随者迭代更新。一旦跟随者察觉自身的能量大于当前的发现者，就会取而代之。位置更新描述如下：

$$\boldsymbol{X}_{m,q}^{t+1}=\begin{cases} Q\exp\left(\dfrac{\boldsymbol{X}_{\text{worst}}-\boldsymbol{X}_{m,q}^{t}}{m^2}\right) & m>n/2 \\ \boldsymbol{X}_{\text{p}}^{t+1}+\left|\boldsymbol{X}_{m,q}^{t}-\boldsymbol{X}_{\text{p}}^{t+1}\right|\boldsymbol{A}^{+}\boldsymbol{L} & \text{其他} \end{cases} \tag{16}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{m,q}^{t+1}$为$t+1$次迭代时跟随者的位置；$n$为种群中可见卫星数；$\boldsymbol{X}_{\text{p}}$为当前全局最优位置；$\boldsymbol{X}_{\text{worst}}$为当前全局最差的位置；$\boldsymbol{A}$为$1\times q$的矩阵，其中每个元素随机赋值为1或−1，$\boldsymbol{A}^{+}=\boldsymbol{A}^{\text{T}}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\text{T}})^{-1}$；$Q$为服从正态分布的随机数。

当察觉到有故障威胁时，种群会进行自我保护，更新侦察预警者，其数学表达式为

$$\boldsymbol{X}_{l,q}^{t+1}=\begin{cases}\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{t}+\beta\left|\boldsymbol{X}_{l,q}^{t}-\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{t}\right| & f_k>f_{\text{g}}\\ \boldsymbol{X}_{l,q}^{t}+K\dfrac{\left|\boldsymbol{X}_{l,q}^{t}-\boldsymbol{X}_{\text{worst}}^{t}\right|}{(f_k-f_{\text{w}})+\varepsilon} & f_k=f_{\text{g}}\end{cases}\tag{17}$$

式中: $\boldsymbol{X}_{l,q}^{t+1}$为第$t+1$次迭代时侦察预警者的第$q$维位置; $\boldsymbol{X}_{\text{best}}$为全局最优位置; $\beta\sim[0,1]$为控制全局最优位置的移动步长控制参数; $K\in[-1,1]$用于控制卫星的移动方向和步长; f_{g}和f_{w}分别为所有故障子集对应的适应度值中的最佳和最差的适应度值; 为避免分母为 0, 添加了一个最小常数ε。当$f_k>f_{\text{g}}$时, 表示故障子集k处于告警边缘, 故障子集中存在故障卫星的概率较大, 极易发生故障; 当$f_k=f_{\text{g}}$时, 表示故障子集k中存在故障卫星, 该故障子集所在的种群会受到故障卫星的影响, 导致种群产生较大偏差的故障卫星会被标记并不再参与解算, 种群中的侦察预警者也会随之更新, 从而达到剔除故障卫星的目的。

4　仿真验证与结果分析

4.1　仿真参数设置

采用北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 和全球定位系统 (global positioning system, GPS) 双星座组合进行仿真, 本文只考虑北斗三号系统的 24 颗中地球轨道 (middle Earth orbit, MEO) 卫星, 基于软件接收机的 ARAIM 算法平台使用北斗 (数据来源: http://www.csno-tarc.cn/datacenter/ephemeris) 和 GPS(数据来源: http://celestrak.com/GPS/almanac/Yuma/) 的历书进行仿真实验。考虑到不同系统在性能上的差异, 本文对 ISM 参数进行了 3 类假设: 理想状态、差异状态和保守状态[7,17-18], ISM 参数包括了卫星的故障先验概率P_{sat}、星座的故障先验概率P_{const}、用于完好性的最大标称偏差b_{nom}、用于完好性的用户测距精度σ_{URA}及用于精度和连续性的用户测距误差σ_{URE}, 具体设置如表 1 所示。理想状态和保守状态不考虑星座间的差异, 将 ISM 参数设置为最优和最保守的数值; 差异状态考虑了星座间的差异。时间步长设置为 300 s, 使用历书根据时间更新获取卫星的位置, 以 10°为间隔, 在全球范围内按照经纬度划分网格。ARAIM 的全球可用性覆盖率以仿真时间段内服务可用时间比率超过 99.5% 的用户占总用户的比率表示。

4.2　优化前后子集数量和仿真用时对比分析

根据里程碑报告给出的统计[22], 不同 ISM 参数和可见卫星颗数下对应的最大故障阶数 $N_{\max}$ 如表 2 所示。表中, P_{event}为故障事件的先验概率, N为卫星+星座的个数。针对上述 3 种状态, 记录同一台实验设备上优化前后子集数量和仿真用时, 如图 1 所示。

表 1　ISM 参数设置

Table 1　Setting of ISM parameters

假设状态	组号	星座	P_{sat}	P_{const}	b_{nom}	σ_{URA}	σ_{URE}
理想状态	1	GPS	10^{-5}	10^{-8}	0.75	1	0.66
		BDS	10^{-4}	10^{-8}	0.75	1	0.66
	2	GPS	10^{-4}	10^{-8}	0.75	1	0.66
		BDS	10^{-5}	10^{-8}	0.75	1	0.66
差异状态	3	GPS	10^{-5}	10^{-4}	0.75	1	0.66
		BDS	10^{-4}	10^{-5}	0.75	1	0.66
	4	GPS	10^{-4}	10^{-5}	0.75	1	0.66
		BDS	10^{-5}	10^{-4}	0.75	1	0.66
保守状态	5	GPS	10^{-4}	10^{-4}	0.75	2.4	1.6
		BDS	10^{-3}	10^{-4}	0.75	2.4	1.6
	6	GPS	10^{-3}	10^{-4}	0.75	2.4	1.6
		BDS	10^{-4}	10^{-4}	0.75	2.4	1.6

表 2　不同 ISM 参数下$N_{\max}$取值

Table 2　$N_{\max}$ under different ISM parameters

P_{event}	$N_{\max}$						
	N=10	N=15	N=20	N=20	N=30	N=35	N=40
10^{-5}	1	1	1	1	1	1	1
10^{-4}	2	2	2	2	2	2	2
5×10^{-4}	2	2	3	3	3	3	3
10^{-3}	3	3	3	3	3	3	4

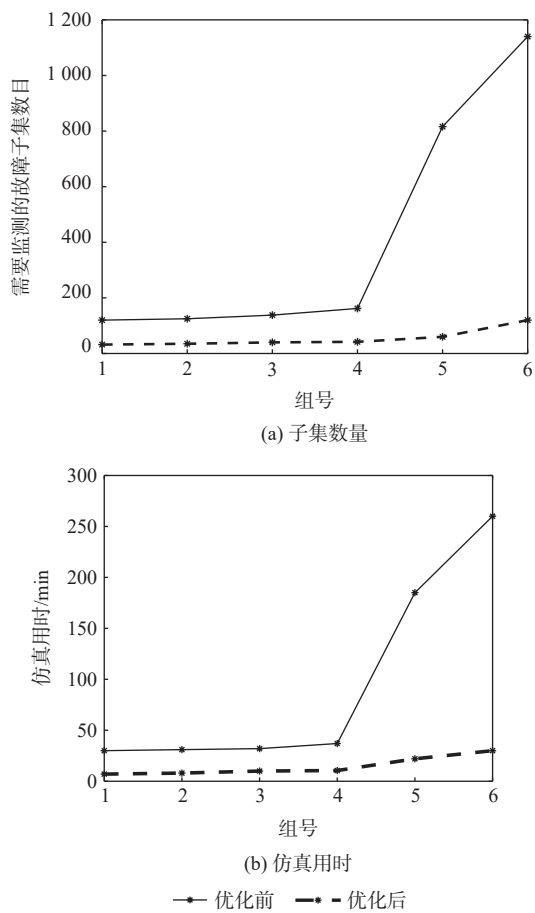


图 1　子集数量和仿真用时对比

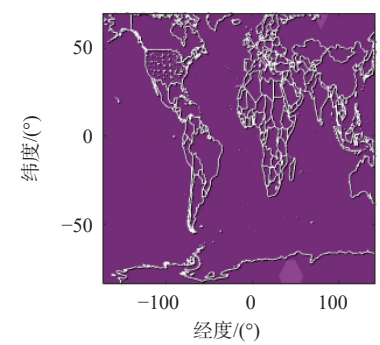
Fig. 1　Comparison of subset number and simulation time

图1(a)表示在3种不同假设状态下子集数量的变化趋势，通过统计在某一状态下同一时刻的子集数量的变化可以看出，ISM参数设置越保守，需要监测的故障子集数量越多。由图1(a)得出，基于传统算法的子集数量范围为(100, 1 200)，而本文算法经几轮迭代后累计需要计算的子集数量较优化前算法减少了75%～90%。图1(b)表示在3种不同假设状态的仿真用时对比，仿真用时与子集数量呈现相同的变化趋势，监测子集数量越多，仿真用时也就越长，由图1(b)可以看出，优化后的算法大大节约了时间成本，经统计分析，优化后较优化前的仿真用时减少了68%～88%。

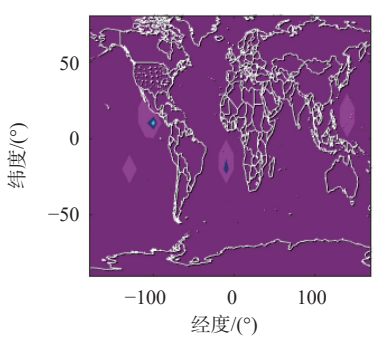
4.3 优化前后ARAIM可用性分析

采用表1中6组不同参数，将本文算法与传统算法进行对比，分析本文算法对ARAIM全球可用性的影响，结果如图2～图7所示。

由图2和图3可知，理想状态下潜在故障概率较小，ARAIM全球可用性占比较高。传统算法的可用性占比为99.91%，本文为99.53%，优化前后可用性占比的变化趋势相同，占比的波动范围为0.4%～1.7%，说明本文算法具有较高的可用性。由图4和图5可知，差异状态下传统算法的可用性占



(a) 传统算法，可用性占比为99.91%



(b) 本文算法，可用性占比为99.53%

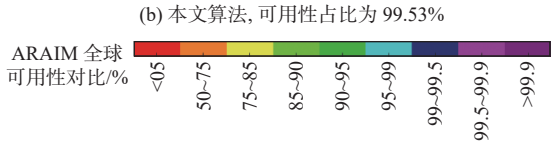
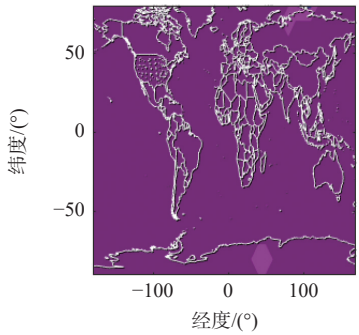
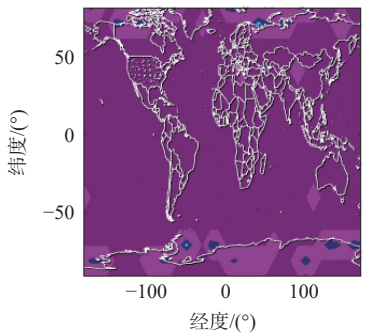


图2 第1组参数下ARAIM全球可用性对比

Fig. 2 Comparison of global availability of ARAIM with parameters of group 1



(a) 传统算法，可用性占比为99.91%



(b) 本文算法，可用性占比为98.20%

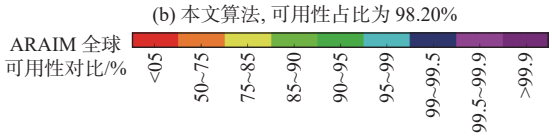
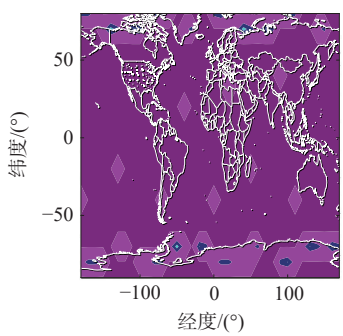
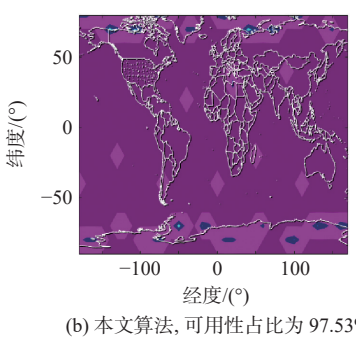


图3 第2组参数下ARAIM全球可用性对比

Fig. 3 Comparison of global availability of ARAIM with parameters of group 2



(a) 传统算法，可用性占比为97.82%



(b) 本文算法，可用性占比为97.53%

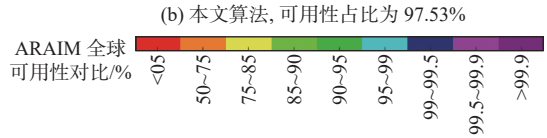


图4 第3组参数下ARAIM全球可用性对比

Fig. 4 Comparison of global availability of ARAIM with parameters of group 3

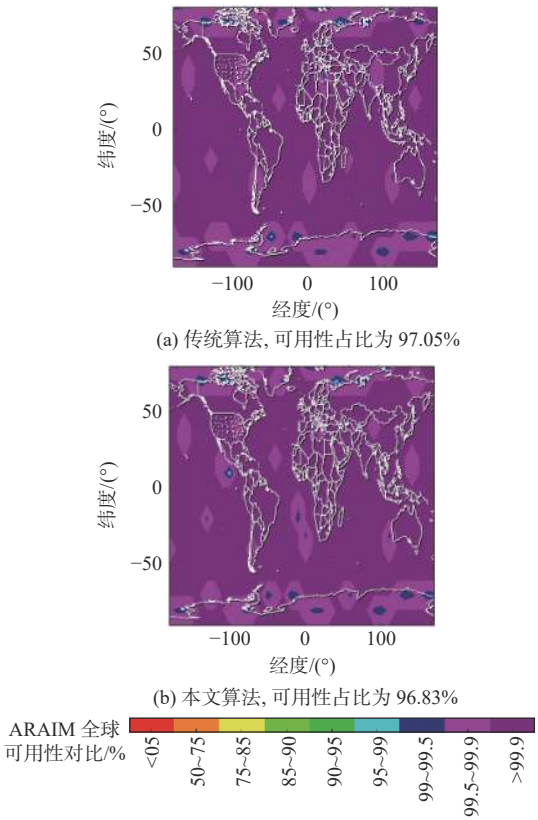


图 5　第 4 组参数下 ARAIM 全球可用性对比

Fig. 5　Comparison of global availability of ARAIM with parameters of group 4

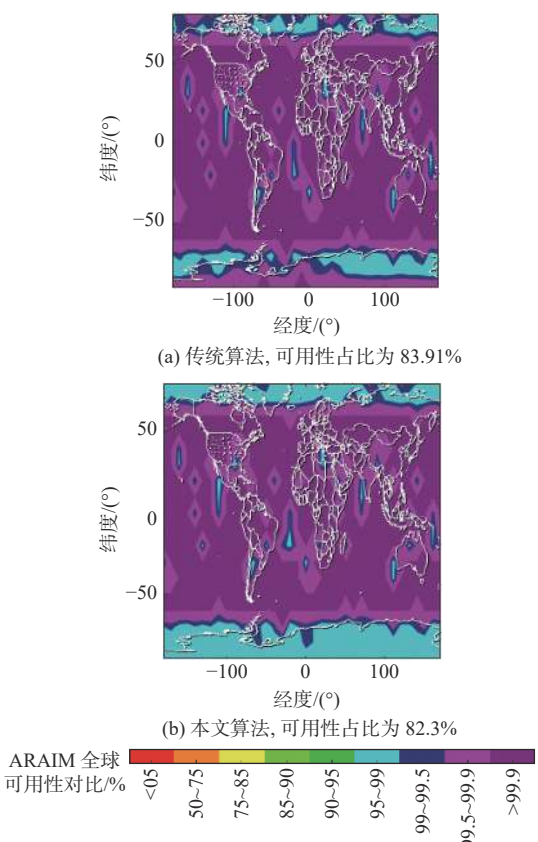


图 6　第 5 组参数下 ARAIM 全球可用性对比

Fig. 6　Comparison of global availability of ARAIM with parameters of group 5

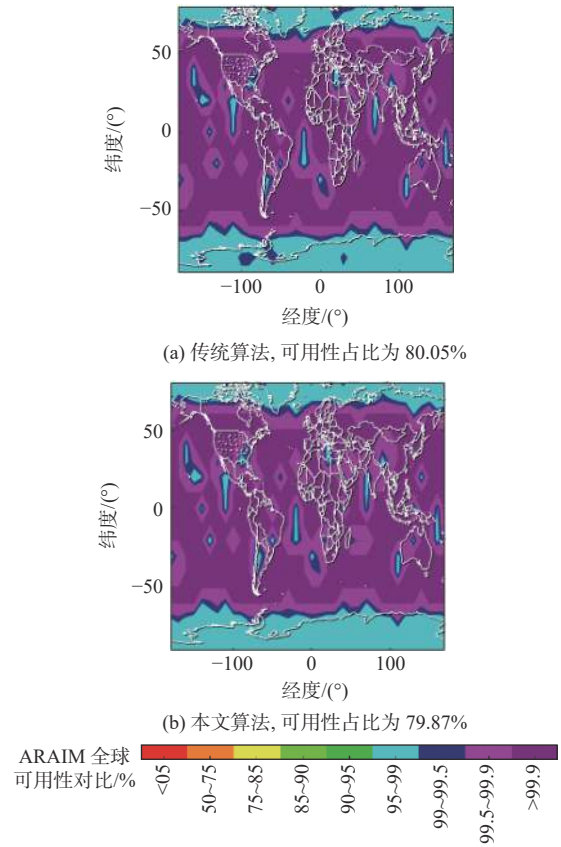


图 7　第 6 组参数下 ARAIM 全球可用性对比

Fig. 7　Comparison of global availability of ARAIM with parameters of group 6

比相较于理想情况下降了约 2%, 本文算法优化前后可用性占比的变化趋势依然相近, 波动范围为 0.2%～0.3%, ARAIM 全球可用性变化较小。由图 6 和图 7 可知, 在 ISM 参数设置保守状态下, 对 ARAIM 全球可用性的分析结果可以看出, 可用性较前几组有大幅下降, 为 10%～20%。本文算法能够减少子集数量, 并保证 ARAIM 的可用性。

5　结　论

本文将减少故障子集的数目和降低算法执行的时间成本作为优化目标, 选取故障探测的检验统计量作为适应度函数, 提出基于 SSA 的 ARAIM 故障子集优化算法。

1) 本文算法与传统算法相比, 可减少故障子集的数目, 提高算法的执行效率。

2) 相较于传统算法, 本文算法的可用性占比在不同状态下的变化均不超 2%, 表明其对可用性影响较小。

参考文献（References）

[1] 胡自全, 何秀凤. 组合 GNSS 系统可见卫星分析[J]. 全球定位系统, 2015, 40(3): 1-5.

HU Z Q, HE X F. Analysis the visible satellites of combined GNSS

system[J]. GNSS World of China, 2015, 40(3): 1-5(in Chinese).

[2] 王尔申, 孙彩苗, 黄煜峰, 等. 改进粒子群优化的卫星导航选星算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(1): 1-6.
WANG E S, SUN C M, HUANG Y F, et al. Satellite navigation satellite selection algorithm based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(1): 1-6(in Chinese).

[3] 崔瑞云, 倪育德, 王琳琳, 等. 北斗卫星导航系统完好性参数研究[J]. 现代导航, 2015, 6(1): 17-22.
CUI R Y, NI Y D, WANG L L, et al. Research on integrity parameters of BeiDou satellite navigation system[J]. Modern Navigation, 2015, 6(1): 17-22(in Chinese).

[4] CHANG J, ZHAN X Q, ZHAI Y W, et al. Analysis of BDS GEO satellite multipath effect for GNSS integrity monitoring in civil aviation[J]. Aerospace Systems, 2021, 4(2): 133-141.

[5] WANG S Z, ZHAI Y W, ZHAN X Q. Characterizing BDS signal-in-space performance from integrity perspective[J]. Navigation, 2021, 68(1): 157-183.

[6] 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).

[7] 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).

[8] CHANG J, ZHAN X Q, ZHAI Y W. Real-time integrity monitoring for civil aviation with improved navigation performance[C]//Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering. Berlin: Springer, 2020: 107-127.

[9] LIU B Y, GAO Y, GAO Y T, et al. HPL calculation improvement for Chi-squared residual-based ARAIM[J]. GPS Solutions, 2022, 26(2): 45.

[10] BLANCH J, WALKER T, ENGE P, et al. Baseline advanced RAIM user algorithm and possible improvements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(1): 713-732.

[11] ZHANG Y B, WANG L, FAN L, et al. MHSS ARAIM algorithm combined with gross error detection[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2020, 3(1): 38-46.

[12] GAO Y T, JIANG Y, GAO Y, et al. A linear Kalman filter-based integrity monitoring considering colored measurement noise[J]. GPS Solutions, 2021, 25(2): 59.

[13] WALTER T, BLANCH J, ENGE P. Reduced subset analysis for multi-constellation ARAIM[C]//Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Washington, D.C.: INST Navigation, 2014: 89-98.

[14] GE Y S, WANG Z P, ZHU Y B. Reduced ARAIM monitoring subset method based on satellites in different orbital planes[J]. GPS Solutions, 2017, 21(4): 1443-1456.

[15] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. Fixed subset selection to reduce advanced RAIM complexity[C]//Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Washington, D.C.: INST Navigation, 2018: 88-98.

[16] MENG Q, LIU J Y, ZENG Q H, et al. Improved ARAIM fault modes determination scheme based on feedback structure with probability accumulation[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 16.

[17] 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.

[18] 刘金鑫, 滕继涛, 李锐, 等. 基于子集包含减少 ARAIM 子集数量的方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(8): 1592-1600.
LIU J X, TENG J T, LI R, et al. Method for reducing number of ARAIM subsets based on subset inclusion[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(8): 1592-1600 (in Chinese).

[19] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.

[20] WANG Z, HU W, WANG E S, et al. Enhancement dataset for low altitude unmanned aerial vehicle detection[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(6): 914-926.

[21] 王尔申, 郭靖, 宏晨, 等. 改进目标收益函数的无人机集群空地对抗模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 888-897.
WANG E S, GUO J, HONG C, et al. UAV swarm air-ground engagement model with improved payoff[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 888-897(in Chinese).

[22] BLANCH J, WALKER 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. Washington, D.C.: INST Navigation, 2012: 2828-2849.

ARAIM-related fault subset optimization algorithm based on sparrow search algorithm

WANG Ershen[1, 2, *]，WANG Huan[1]，LEI Hong[3]，ZENG Hongzheng[2]，QU Pingping[1]，PANG Tao[1]

(1. College of Electronic and Information Engineering，Shenyang Aerospace University，Shenyang 110136，China；
2. Key Laboratory of Flight Techniques and Flight Safety，Civil Aviation Flight University of China，Guanghan 618307，China；
3. Key Laboratory of Aeronautical Science and Technology for Electromagnetic Environmental Effects，Shenyang 110035，China)

Abstract：The multiple hypothesis solution separation (MHSS) test is affected by the increase in the number of satellites and the potential fault probability. This results in a sharp increase in the number of subsets to be monitored and brings more computational burdens. In order to solve the above problems, an advanced receiver autonomous integrity monitoring (ARAIM)-related fault subset optimization algorithm based on the sparrow search algorithm (SSA) was proposed. According to the SSA, the satellites were divided into detectors, followers, and premonitors. Computational redundancy was reduced by eliminating individuals with lower energy. The adaptive step size was introduced during the search, so as to improve the iteration speed and the execution efficiency of the algorithm. In the dual constellation scenario, three hypotheses were made for the integrity supported message (ISM) parameters to verify the availability of the improved algorithm and compare it with traditional algorithms. The results show that the number of subsets obtained by the proposed algorithm is reduced by 75%–90% compared with traditional algorithms, and the computing time under the same condition is reduced by 68%–88%. In addition, the availability of ARAIM changes by no more than 2%.

Keywords：advanced receiver autonomous integrity monitoring；dual constellations；fault subset；sparrow search algorithm；integrity supported message

Received：2022-07-07；**Accepted**：2022-09-14；**Published Online**：2022-10-09 17：38

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221009.0906.002

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (62173237); Open Fund of Key Laboratory of Civil Aviation Flights Wide Area Surveillance and Safety Control Technology of Civil Aviation University of China (202105); Songshan Laboratory Pre-research Foundation (YYJC062022017); Open Fund of State Key Laboratory of Satelite Navigation System and Equipmet Technology (CEPNT2022B04,CEPNT2022A01); Open Fund of the National Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, Co-established by the Province and Ministry (2023-SYSJJ-04); Open Fund of Key Laboratory of Flight Techniques and Flight Safety CAAC (FZ2021KF15,FZ2021ZZ06,FZ2020KF09); Applied Basic Research Programs of Liaoning Province (2022020502-JH2/1013, 2022JH2/101300150); Shenyang Science and Technology Program (22-322-3-34)

*** Corresponding author**. E-mail：wanges_2016@126.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0588

基于关键节点识别算法的重点人分析

韩奕[1,2]，孙百兵[1]，王军国[1,3]，杜彦辉[1,*]

(1. 中国人民公安大学 信息网络安全学院，北京 100038；2. 公安部第一研究所，北京 100049；
3. 南京森林警察学院，南京 210023)

摘 要：关键节点识别算法是社交网络研究领域的重要分支，但现有研究成果大多对数据的多样性、完整性、可用性等依赖程度高，导致在公安机关重点人分析场景中适用性较低。因此，对静态网络拓扑结构进行量化表示，同时结合局部最优算法和全局最优算法重新定义关系度指标，再基于该指标构建特征矩阵，提出适用于公安部门重点人分析的特征向量中心性（REC）算法。依托公开数据集、2部影视剧人物关系网络、境外社交平台账号网络和国内某诈骗团伙5个数据集，从网络传播能力、抗打击弹性和重点人分析结果一致性3个维度证实所提算法的有效性，相较于其他传统挖掘算法能准确识别社交网络重要节点，具有较为广泛的应用场景。

关 键 词：关键节点；社交网络；关系度；特征矩阵；肯德尔
中图分类号：V221+.3; TB553
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2074-09

目前，中国仍然处于重要战略机遇期，社会发展不平衡、不充分的问题仍然突出，社会矛盾也日益凸显，群体性事件、聚众犯罪频发，给社会公共安全、危机管理带来了诸多问题，公安机关管控工作的难度也随之增加。多数情况下，犯罪团伙的人员结构并非分离的，而是按照相对严格的组织层级交织而成。因此，研究如何针对大规模人群缩小侦查范围的解决方法，能够帮助公安部门快速锁定核心成员、发现潜在的关系人或成长中的重点人，缓解因警力不足而无法快速全面布控的局面。

社交网络分析旨在利用社交网络中有价值的信息，研究其结构特性、行为方式和信息传播的规律[1]。公安机关可以根据目标嫌疑人所在社交网络的联系人进行扩线分析，发现网络中具有影响力的重要成员或核心头目。由此可见，社交网络分析技术在公安犯罪侦查方面具有广阔的发展空间。但是，随着海量的社交网络数据和日益增长的数据处理需求，传统数据挖掘和侦查方法耗时且效率低下，难以适用于社交网络大数据分析和挖掘场景。因此，如何高效、准确地研究重点人群分析方法，对公安部门打击违法犯罪有着重要意义。

近年来，学术界在社交网络关键节点分析方面已有大量的研究成果，特别是依托网络节点内容、节点间交互行为等数据进行关键节点挖掘。但此类方法由于对数据项的多样性、完整性、可用性依赖程度高，在公安机关警用犯罪分析场景中适用性较低。因此，本文从网络节点间拓扑结构出发，利用有限的数据维度分析重点人，综合考虑了目标所在社交网络的局部和全局拓扑特征，实现重要节点之间关系强度的量化表示，完成目标人群的重要性排序。

1 关键节点识别的度量指标

关键节点一般是整个网络中处于核心位置的

收稿日期：2022-07-05；**录用日期**：2022-09-16；**网络出版时间**：2022-12-15 15:29
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221214.1414.005
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金 (2021JKF105)；中央高校重大科研业务费专项资金 (2021FZB13)
* **通信作者**. E-mail：dyh6889@126.com

引用格式：韩奕，孙百兵，王军国，等. 基于关键节点识别算法的重点人分析 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2074-2082.
HAN Y，SUN B B，WANG J G，et al. Target person analysis based on critical node recognition algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2074-2082（in Chinese）.

节点, 对整体网络结构或功能具有较大的影响力[2-5]。在社交网络科学中, 设计有效的关键节点识别方法, 并提出合理的评价模型, 有很强的理论研究价值和实践意义。

1.1　基于网络局部属性的指标

基于网络局部属性衡量节点重要性的指标通常有度中心性、半局部中心性、子图中心性、结构洞等, 此类算法具有计算复杂度低、实用性强等特点, 适用于大规模社交网络[6]。Ugander 等发现, 在 Twitter 上的好友关系中, 影响节点重要性的并不是邻居节点的数量多少, 而是邻居节点所形成的连通子图起决定性作用[7]。这与顾亦然和朱梓嫣的研究结果有异曲同工之处, 即根据共同邻居节点相似度作为局部重要性的特征指标提出 SRank 算法, 并利用仿真实验验证该算法在有向网络和无向网络中的有效性[8]。此外, 节点重要性评估还可根据具体场景引入其他度量指标, 如科研网络中文献引用次数、微博网络回帖转发次数等, 从而提高算法在实际应用的准确率。

1.2　基于网络全局属性的指标

基于网络全局属性衡量节点重要性的指标通常有介数中心性、接近中心性等, 相关算法具有准确率和可靠性高等特点, 但由于计算复杂度较高使其难以适用于大规模网络计算[6]。介数中心性[9]是经过一个节点的最短路径占网络所有最短路径的比值, 通常以表达式 $g(v)=\sum_{s\neq v\neq t}\sigma_{st}(v)/\sigma_{st}$ 给出。其中, $\sigma_{st}(v)$ 为经过节点 v 到节点 s 到节点 t 的短路径条数, σ_{st} 为节点 s 到节点 t 的最短路径条数。直观上来说, 介数中心性反映了节点 v 作为“桥梁”的重要程度, 类似于复杂网络中的“要塞”节点, 具有较高介数中心性的节点对网络有更多的控制作用, 通常在城市道路规划、网络舆情管控等方面具有较好的理论指导意义。Yan 等[10]利用介数中心性重新定义了网络中心节点, 并将原中心节点的信息流量负载重新分配给其他非中心节点, 有效地优化路径, 提高网络信息流量处理能力, 较好地缓解拥塞。接近中心性[11]通过计算节点到网络其他所有节点的最短路径长度来刻画节点到网络中心的趋近程度, 通常以表达式 $c(i)=1\Big/\sum_{n=1}^{N}d_{isi}^{n}$ 给出。其中, N 为网络中节点的个数, $\sum_{n=1}^{N}d_{isi}^{n}$ 为节点 i 到节点 n 的最短距离。此类算法多用于旺铺门店选址, 可通过计算该项指标来衡量选址的合理性。

1.3　基于随机游走的度量算法

随机游走最典型算法是谷歌的 PageRank 算法, 最初被用于互联网搜索引擎检索结果的网页排序。其原理是根据不同网页的链接指向关系抽象成有向图, 模拟用户随机访问不同的网页节点, 按照相同的访问概率构造转移矩阵, 经多次迭代, 各节点被访问的概率会收敛到一个稳定值, 最后, 将拥有较多访问量的网页节点赋予更高的权重, 搜索引擎便依据这个结果进行网页排序。例如, 有 A、B、C、D 这 4 个网页链接指向关系, 如图 1 所示, 同时用户跳转到 B、C、D 页面具有相同的行为概率, 均为 1/3, 那么可以用转移矩阵 $\boldsymbol{M}$ 来表示整个有向图的情况。

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}0 & 1/2 & 0 & 1/2\\ 1/3 & 0 & 0 & 1/2\\ 1/3 & 1/2 & 0 & 0\\ 1/3 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: 第 1 行代表网页 A、B、C、D 跳转到网页 A 的概率。

令每个页面的初始值 rank 为 1/4, 由此构成向量 $\boldsymbol{v}$:

$$\boldsymbol{v}=\begin{bmatrix}1/4\\ 1/4\\ 1/4\\ 1/4\end{bmatrix} \tag{2}$$

进而:

$$\boldsymbol{Mv}=\begin{bmatrix}1/4\\ 5/24\\ 5/24\\ 1/3\end{bmatrix} \tag{3}$$

经多轮迭代计算, 各项值趋于稳定, 即收敛于 [1/4,1/4,1/5,1/4]。这一结果表明网页 C 比 A、B、D 更为重要。

综上, 无论是基于节点度的局部度量算法, 还是基于介数或距离的全局度量算法, 抑或是基于随机游走的邻接点聚合算法, 单一维度衡量节点影响力都存在一定局限性。但不论何种算法, 关键节点识别算法更应结合具体业务场景进行优化, 明确关键节点的切实意义才能发挥其理论价值。

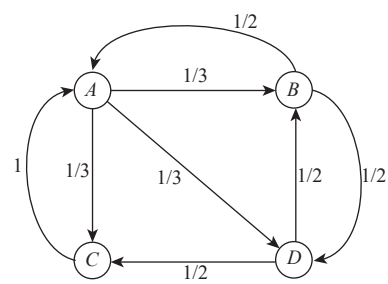


图 1　示例网络

Fig. 1　Network example

2　基于关系度的关键节点分析算法

在公安机关犯罪侦查过程中, 经常需要从复杂

的人物关系中梳理组织架构。事实上，对大部分社交网络而言，不同平台间网络账号特征属性差异较大，且真实性无从考量，而账号间的关联关系相对真实、公开且客观。据此，本节提出面向社交网络节点拓扑关系（即关系度）的节点度量方法。

2.1 关系度的定义

关系度（relationship degree，RD），用来衡量2个点之间连接的紧密程度，即边的权重。社交网络的拓扑结构图$G=(V,E,\boldsymbol{W})$表示，其中$V=\{v_i|i=1,2,\cdots,n\}$表示点集，$E=\{e_{ij}|i,j=1,2,\cdots,n\}$表示节点$i$和$j$的边（即连接）；$\boldsymbol{W}=[w_{ij}|i,j=1,2,\cdots,n]$为衡量2个邻近节点的关系度（由于是无向边，故$w_{ij}=w_{ji}$）；$\boldsymbol{A}_{n\times n}$表示图的邻接矩阵，其中$a_{ij}$取布尔值，当点$i$和$j$连接时为1，其他情况为0（$i\neq j$）。

在缺少互动数据的前提下，可以考虑迁移节点度与介数的原理加以量化。从局部视角而言，2个节点的邻居重叠程度越高，它们之间的关系越紧密，本文引入Jaccard相似度度量这种关系：

$$J_{ij}=\frac{|N_i\bigcap N_j|}{|N_i\bigcup N_j|} \tag{4}$$

式中：N_i表示节点v_i的邻居节点集合。

Jaccard相似度是从局部出发，计算2个节点的共同邻居节点在总邻居节点中的个数占比，也就间接度量了边e_{ij}。

从全局视角而言，类似于节点的介数中心度，本文引入边介数来度量边在全局网络下的重要程度。其核心思想是：处于网络中间位置的节点或路径相比周边节点、路径具有更大的人际关系影响力[12-13]：

$$e_{ij}=\frac{\sum_{s<t}|g_{st}^{ij}|}{C_n^2} \tag{5}$$

式中：$|g_{st}^{ij}|$表示节点s与节点t之间的最短路径同时经过节点i、节点j的边（即e_{ij}）的个数；C_n^2表示图G上任意2个节点的最短路径总个数。边介数是从全局角度度量边e_{ij}的重要程度。

因此，综合考虑边的2点邻居重合度和邻居之间连接的紧密程度，提出一种基于度中心性与介数中心性的边重要性的评估方法，兼顾网络的全局与局部最优，本文定义其为关系度w_{ij}：

$$w_{ij}=\frac{J_{ij}}{\sqrt{\sum_{i,j\in V}J_{ij}^2}}+\frac{e_{ij}}{\sqrt{\sum_{i,j\in V}e_{ij}^2}} \tag{6}$$

或基于参数ρ的修正：

$$w_{ij}=\rho\frac{J_{ij}}{\sqrt{\sum_{i,j\in V}J_{ij}^2}}+(1-\rho)\frac{e_{ij}}{\sqrt{\sum_{i,j\in V}e_{ij}^2}} \tag{7}$$

或基于欧氏距离的修正：

$$w_{ij}=\sqrt{\frac{J_{ij}^2}{\sum_{i,j\in V}J_{ij}^2}+\frac{e_{ij}^2}{\sum_{i,j\in V}e_{ij}^2}} \tag{8}$$

关系度$w(i,j)$本质是将局部特征与全局特征的二维关系映射到一维关系的转换过程中。其中，式(6)是将2类特征基于相同权重进行归一处理，从而计算一阶矩阵的距离值；类似地，式(7)是根据2类特征的重要程度分别调整权重再计算距离值，通常情况下，ρ的取值范围是[0,1]，当ρ为0.5时，即式(6)；式(8)则是基于相同权重计算二阶矩阵的距离值，转换过程信息损耗相对较小，即当其中一类指标数值特征较大时，式(8)会保留更多这类指标的信息，计算稳定性较好。因此，本文选择式(8)作为关系度的计算方法。

2.2 基于关系度的特征向量中心性

特征向量中心性（relationship eigenvector centrality, REC）是度量网络节点重要性的重要指标，其基本思想是：一个节点的中心性是相邻节点中心性的函数。这在原理上要比度中心性更加合理，因其考虑了邻居节点的重要程度[14]。具体定义为

$$C_e^{\boldsymbol{A}}(i)=\lambda^{-1}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}e_j \tag{9}$$

式中：λ为邻接矩阵$\boldsymbol{A}_{n\times n}$的最大特征值，$\boldsymbol{e}=[e_1,e_2,\cdots,e_n]$为邻接矩阵$\boldsymbol{A}_{n\times n}$所对应最大特征值的特征向量。REC正是从网络中节点的地位或声望角度考虑，将单个节点的声望看成所有其他节点声望的线性组合，从而得到一个线性方程组，这个方程组的最大特征值所对应的特征向量就代表各个节点的重要性。需要注意的是，邻接矩阵$\boldsymbol{A}_{n\times n}$的每个值仅仅可表示为是否连接（0或1），而并未带有所连接的边的紧密程度，这就在度量邻居节点的地位或声望时存在天然缺陷。基于此，将关系度w_{ij}代替a_{ij}引入邻接矩阵，得到带有连接程度的修正矩阵$\boldsymbol{W}$：

$$\boldsymbol{W}=[w_{ij}]_{n\times n} \tag{10}$$

因此，基于边关系度的REC指标可以进一步表示为

$$C_e^{\boldsymbol{W}}(i)=\lambda^{-1}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}e_j \tag{11}$$

2.3 REC算法在公安场景中的应用

利用网络拓扑关系挖掘群体重点人，其中，最为基础的工作是由目标节点逐层向外拓展并形成一定规模的网络，考虑到REC的计算复杂度，可以

根据嫌疑人的N层社交网络, 逐级搭建邻接矩阵并依次找到关键人物。即从目标源节点所在的社交网络$G=(V,E,\boldsymbol{W})$, 基于局部邻居亲密关系与全局信息传播效率, 挖掘得到一个结构精简、重点清晰的核心骨干关系架构。因此, 本节基于目标账号的好友层级定义多个子网络$G^s=(V^s,E^s,\boldsymbol{W}^s)$, $s=0,1,\cdots,m$(m为好友层级, 多取值为 3), 其中$G^s\in G$, $\boldsymbol{W}^s$中的w_{ij}为全局关系度, 而并非子网络下的关系度, 即将全网的关系引入局部评估上。

关系度的度量算法如下。

输入: 无向网络$G=(V,E)$

输出: 每条边e_{ij}系程度值w_{ij}

统计G中节点V其相连的边;

for v_i in V到N_i节点集合;

for e_{ij} in E:

根据式(4)计算局部亲密关系, Jaccard 相似度J_{ij};

根据式(5)计算全局重要程度, 边介数中心性e_{ij};

根据式(6)~式(8)计算综合的边关系度 w_{ij};

end for

return E 中每条边的 RD 值;

同时 return 基于 RD 的邻接矩阵$\boldsymbol{W}=[w_{ij}]_{n\times n}$

对于给定的G, 网络中节点个数为n, 边个数为m, 邻居节点集合N_i与 Jaccard 相似度J_{ij}的算法复杂度均为$O(N)$, 边介数中心性e_{ij}的算法要考虑任意 2 个节点间的关系, 所以复杂度为$O\left(N^2\right)$。整体而言, 计算复杂程度可控, 适用于大规模网络。

基于边关系度的 REC 算法如下。

输入: 无向网络$G=(V,E,\boldsymbol{W})$

输出: 原始网络中基于好友层级关系的节点重要性度量$C_e^{\boldsymbol{W}}(i)$统计 G 中的 G^s 情况, 得到各自基于 RD 的修正邻接矩阵 $\boldsymbol{W}^s$

for s in m:

针对修正邻接矩阵 $\boldsymbol{W}^s$ 做矩阵运算, 得到其最大特征值及其对应的特征向量;

end for

return 每个 G^s 中每个点的影响力数值;

同时基于$G^s\in G$ in G retum m层好友关系下的 Top 影响力节点结构图。

3　实验与分析

3.1　数据集的描述

本文选取 5 个社交网络数据, 分别为空手道俱乐部网络[15-16]、2 部影视剧人物网络、境外网站社交账号和国内某诈骗团伙。其中, 空手道俱乐部网络也称为 Zachary 网络, 该网络是 Zachary 在 20 世纪 70 年代用 2 年时间观察美国一所大学中的空手道俱乐部成员的相互社会关系而得到的, 该俱乐部主管与校长之间因是否提高俱乐部收费问题产生争执, 分裂成 2 个分别以校长和主管为核心的小俱乐部; 影视剧人物数据来自 *Harry Potter* 和《红楼梦》2 部影视作品, 本文根据剧情将不同人物角色进行关联匹配, 形成人物社交网络, 剧中人物数量多、情节复杂、角色定位清晰, 适合作为本文研究的重点人分析算法的数据集; Twitter 数据集来自 2020 年 5 月至 7 月香港国安法设立前后 Twitter 较为活跃且具有潜在组织关系的 48 个社交网络账号; 诈骗团伙数据来自公安刑侦部门侦办的一起诈骗案件, 本文根据案卷内容共梳理出 36 名团伙成员, 并根据上述成员的业务分工、角色定位、涉案行为等进行关联分析, 形成诈骗团伙的关系网络, 该案作为有组织犯罪的群体性案件, 内部人员层级分明、案件判决量刑清晰, 能够很好地验证本文算法分析效果。表 1 为 5 个真实网络的基本拓扑特性。其中, N和E分别为网络中节点数和边数, $\langle k\rangle$为网络的平均度值, $k_{\max}$为网络中节点的最大度值, k_{smax}为网络中节点的最大核值, $\langle d\rangle$为网络的平均最短路径。

3.2　评价指标

评价社交网络重要节点识别方法的效果有多种不同的角度, 本文算法的最终目的是挖掘具有影响力的组织重要成员或核心头目, 为判断算法得出的结果是否具有可解释性, 本文从传染病模型(susceptible infected, SI)传播验证、鲁棒性验证和肯德尔系数验证 3 个维度进行检验。

表 1　5 个真实网络的基本拓扑特性

Table 1　Basic topology features of five real networks

网络	N	E	$\langle k\rangle$	$k_{\max}$	k_{smax}	$\langle d\rangle$
Zachary[15-16]	34	78	4.588 2	17	4	2.270 6
Harry Potter	648	1 738	4.802	93	10	3.833 8
《红楼梦》	285	1 657	11.628	127	16	2.615
Twitter	81	960	21.63	65	15	1.762
诈骗团伙	36	82	4.556	17	7	3.209 5

1）SI传播验证。SI传播验证[17-19]是评价节点重要性排序的常用方法之一，目前大多数学者采用SI模型来检测信息和病毒的传播能力。在SI模型中，网络中的每个节点处于2种状态：易感染状态（susceptible，S）和感染状态（infected,I）。每个时间步中，处于I状态的节点以传播率β感染处于S状态的邻居节点，此刻这些节点又成为新的感染源，感染网络中的其他节点，直至网络中不再出现S状态节点，传播过程结束。

令$s(t)$和$i(t)$分别表示目标网络在t时刻处于S状态和I状态的节点密度（占节点总数的比例），λ为S状态节点被感染为I状态节点的概率，N为系统节点总个数，则每个感染节点会使$\lambda s(t)$个节点被感染，在该网络中已感染节点的个数为$Ni(t)$，则已感染节点密度随时间的变化率为

$$\frac{\mathrm{d}Ni(t)}{\mathrm{d}t}=Ni(t)\lambda s(t)\Rightarrow\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}=\lambda i(t)s(t) \tag{12}$$

系统中所有节点只有S和I这2种状态，故易感染节点随时间的变化率为

$$\frac{\mathrm{d}s(t)}{\mathrm{d}t}=-\lambda \tag{13}$$

于是在SI模型中，传播动力学行为可以用如下微分方程组描述：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}s(t)}{\mathrm{d}t}=-\lambda i(t)s(t)\\ \dfrac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}=\lambda i(t)s(t)\end{cases} \tag{14}$$

由于在该系统中所有的个体只有2种状态，即

$$s(t)+i(t)=1 \tag{15}$$

于是，求解可得

$$i(t)=\frac{1}{1+(1/i_0-1)\mathrm{e}^{-\lambda t}} \tag{16}$$

式中：i_0为初始时刻传染病患者人数。

由式（16）可知，当感染到达$i(t)$时刻，SI模型的最终状态是网络中所有节点都感染为I状态节点。因此，本文依托SI传播模型，衡量组织中扮演重要角色的成员向其他成员传递其影响力的传播能力，并根据传播结果进行评价，传播越快、感染数量越多，则说明感染源节点对于其所在的网络重要程度准确性越高，即算法得出的网络重要节点排序越准确。

2）鲁棒性验证。鲁棒性[20-22]是衡量某些节点在被移除后网络变化情况的指标，当目标网络移走某些节点后，网络分裂成不相连的碎片，其通常停止运行。因此，当算法识别出网络重要节点后，通过鲁棒性分析来验证目标群体抗打击的网络弹性，这在犯罪网络重点人分析的场景下是可取的。

$$C_{\mathrm{R}}(v_i)=\frac{N_i^{\mathrm{R}}}{N} \tag{17}$$

式中：N_i^{R}为节点v_i删除后最大连通分支中的节点数。则用删除节点v_i后网络的最大连通分量与原网络连通比值来度量删除节点v_i后网络的效能。比值越接近1，说明鲁棒性越强。如果$C_{\mathrm{R}}(v_i)$随着节点数i的增加而快速下降，则认为移除的节点会导致更高的网络碎片化程度，即节点越重要，算法效果越好。

3）肯德尔系数验证。肯德尔相关系数τ是一个用来测量2组序列相关性的统计值，在统计学领域多用于分布未知、数据类型离散的相关样本的比较，取值范围在−1～1之间，当τ为1时，表示2个随机变量拥有一致的等级相关性；当τ为−1时，表示2个随机变量拥有完全相反的等级相关性；当τ为0时，表示2个随机变量是相互独立的。由此可知，当算法得出的重要节点排序与实际重点人比较时，肯德尔系数越大，说明和谐的节点数越多、重点人一致性越高、算法效果越好。

$$\tau=\frac{2(n_{\mathrm{c}}-n_{\mathrm{d}})}{n(n-1)} \tag{18}$$

式中：n_{c}、n_{d}分别为和谐、不和谐的个数；n为网络节点总数。之所以用和谐与不和谐的个数差除以$n(n-1)/2$，是为了解决归一化问题。

此外，如果结合网络拓扑的实际意义，厘清港独群体、诈骗团伙等此类典型案事件背后的社交网络关系，更能直观地验证REC算法在重点人分析场景中的效能。因此，本文通过查阅相关事件报道、舆论信息、法院刑事判决书等，对实验数据中的实际重点人进行梳理，作为实验结果分析依据，如表2所示。

表2 诈骗团伙重点人判决文书（部分）[23-24]

Table 2 Sentencing documents of target persons in fraud gang (part)[23-24]

重点人	判决量刑
刘某	判处有期徒刑五年，并处罚金人民币五万元
谢某青	判处有期徒刑五年，并处罚金人民币五万元
谢某江	判处有期徒刑四年八个月，并处罚金人民币四万五千元
刘某桃	判处有期徒刑四年六个月，并处罚金人民币四万元
谢某	判处有期徒刑四年，并处罚金人民币三万元
戚某萍	判处有期徒刑三年八个月，并处罚金人民币二万五千元
刘某亮	判处有期徒刑三年八个月，并处罚金人民币二万五千元
陈某	判处有期徒刑三年，并处罚金人民币一万元
曾某	判处有期徒刑三年，缓刑四年，并处罚金人民币一万元

3.3 实验结果分析

本节依托5个真实网络，将REC算法与局部最优Jaccard算法、全局最优边介数（edge betweenness, EB）算法、特征矩阵算法等进行对比，分析不同算法的排序结果与真实样本差异，进一步验证本文算

法的有效性。

图 2 为 4 种算法在 5 个网络中的传播结果。本文根据不同网络规模大小, 调整感染源节点的初始数量, 并根据传播结果进行评价。

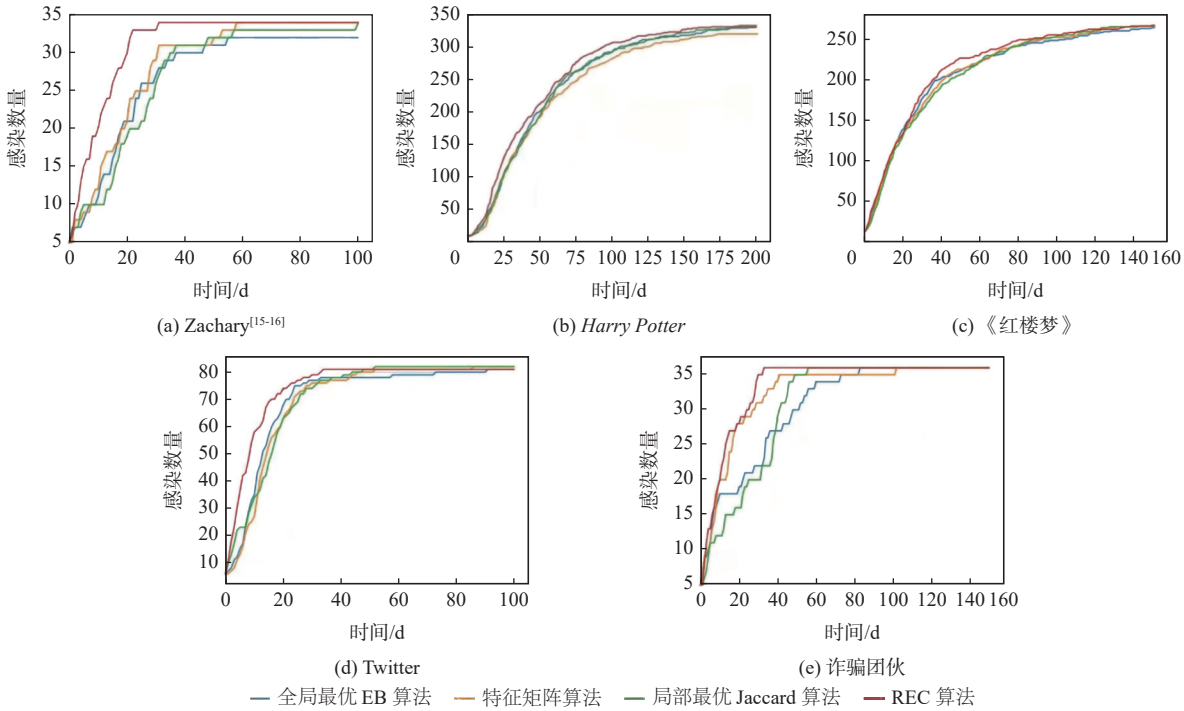


图 2　基于 SI 模型的网络传播实验结果

Fig. 2　Experimental results of network communication based on SI model

从实验结果分析, 如果将 REC 算法在上述网络中得出的重要节点作为源节点进行传播, 同等情况下, 5 个网络中均能先于其他算法完成全部节点扩散, 即 REC 算法所得的重要节点排序较准确、能效较优。其中, Zachary、Twitter 和诈骗团伙 3 个网络的群体规模为 30～80 人, 扩散对比较明显; *Harry Potter* 和《红楼梦》由于网络规模大、节点数量多, 图 2 中区分效果不显著, 但实际扩散速度 REC 算法确优于其他算法。

为进一步区分 REC 算法在 *Harry Potter* 和《红楼梦》这样大规模网络中的实验效果, 本文对上述 2 组实验数据进行调整, 即从原网络节点中随机选择 50 个节点进行重要性排序及SI传播实验。如图 3 所示, REC 算法的扩散速度优于其他算法, 即传播速度最快。

图 4 为对 4 种算法得出的节点排序进行鲁棒性测试的曲线。从曲线可以看出依次移除这些节点对网络的影响过程, 从而衡量节点重要性排序的效果。纵坐标为最大连通分量占比, 横坐标为移除节点占比。若曲线下降速度越快, 则认为网络在移除相应节点后网络抗打击弹性消解得越快, 同时也意味着该节点越重要; 此外, 曲线整体位置越低, 则认为该算法对重要节点的排序效果越好。

由图 4 可知, REC 算法在 5 个网络中的极大连

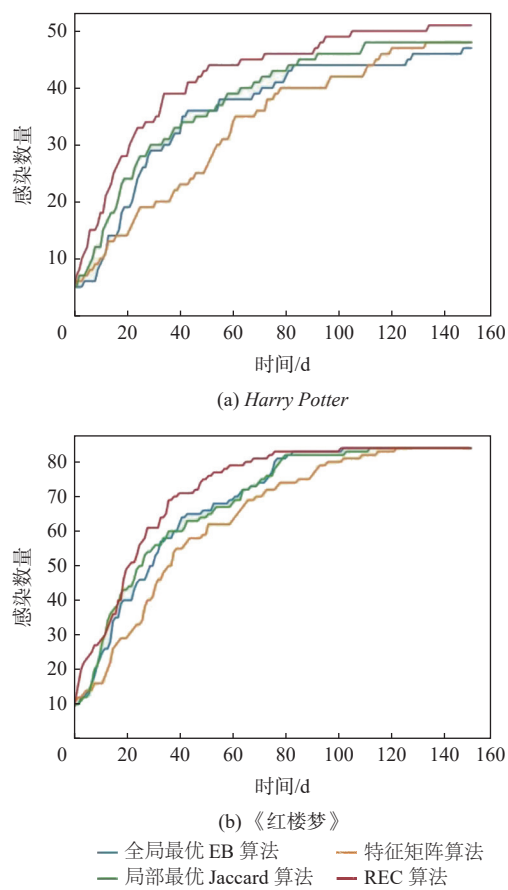


图 3　小范围扩散实验

Fig. 3　Small-scale diffusion experiments

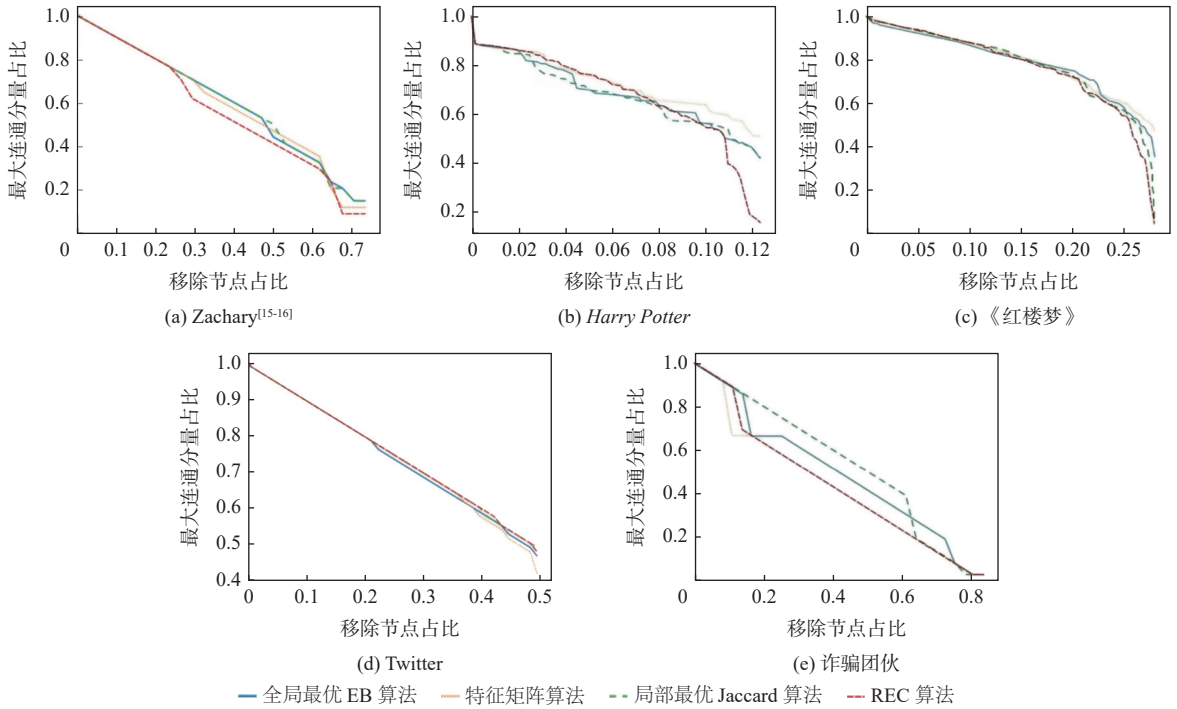


图 4 删除重要节点后网络抗打击弹性下降效果

Fig. 4 Anti-attack elasticity reduction of network after deleting critical nodes

通分量变小的总体趋势最为明显，且相对应的曲线基本处于图中最低位置，说明其在度量节点重要性方面发挥稳定。其中，从曲线前半部分的下降趋势来看，4 种算法得出的重要节点对 5 个网络的消解程度相对一致，后半部分 REC 算法的曲线斜率持续增大，说明 REC 算法对于次重点人的挖掘效果仍然较优，可以持续、快速地消解网络。出现这种结果是由于其他算法主要基于单一维度度量节点的重要性，很容易受网络规模、拓扑结构等特点影响，导致实验结果不稳定。而 REC 算法同时兼顾了节点局部特征和全局特征，具有较好的稳定性，能更加全面地评价节点重要程度，准确地度量社会网络中各节点重要程度。

本文算法得到的节点重要性排序，与其他算法有一些位次相同的节点，为进一步评测本文算法和其他算法排序结果的相似度，本文采用肯德尔系数对相关算法与法院判决文书的量刑结果进行一致性对比。结果如表 3 所示。

由表 3 可知，单纯依靠局部最优 Jaccard 算法、全局最优 EB 算法及特征矩阵算法的重点人排序，肯德尔系数相关性较低，而经 REC 算法改进后有不同幅度提升。此外，对于大规模社交网络的重点人分析，REC 算法优势较为突出。

表 3 肯德尔系数对比结果

Table 3 Kendall coefficient comparison results

算法	Zachary[15-16]	*Harry Potter*	《红楼梦》	Twitter	诈骗团伙
全局最优EB算法	0.327	0.067	0.211	0.289	0.356
特征矩阵算法	0.3	0.289	0.246	−0.067	0.422
局部最优Jaccard算法	0.341	−0.111	0.2	0.411	0.211
REC算法	0.404	0.344	0.321	0.467	0.477

4 结 论

1）本文提出 REC 算法，通过融合局部网络特征和全局网络特征的算法优势，重新定义了关系度指标，降低了单一算法对数据多样性、完整性的依赖程度。

2）通过 5 个社交网络的实验验证，证实本文算法在网络传播能力、抗打击弹性和重点人排序结果一致性 3 个方面均优于其他算法。

本文算法依赖的数据维度少、普适性高，除用于公安领域犯罪团伙重点人挖掘，还可用于运营商通连话单、银行资金流水转账、寄递物流、邪教组织线下集会等能抽象出具有此类网络拓扑特征的案件模型。在后续工作中，可根据网络中节点时序性或已经确定为绝对重要的已知节点进行数据预处理，进一步提高算法分析准确度、降低计算复杂度。此外，跨平台重要节点挖掘，即将不同平台的同源拓扑网络，根据业务场景调节节点密度、统一关联强度，研究构建跨平台的网络节点融合方法，也是后续工作的需要解决的问题之一。

参考文献（References）

[1] CAMACHO D, PANIZO-LLEDOT Á, BELLO-ORGAZ G, et al.

The four dimensions of social network analysis: An overview of research methods, applications, and software tools[J]. Information Fusion, 2020, 63: 88-120.

[2] LIAO H, MARIANI M S, MEDO M, et al. Ranking in evolving complex networks[J]. Physics Reports, 2017, 689: 1-54.

[3] LÜ L Y, CHEN D B, REN X L, et al. Vital nodes identification in complex networks[J]. Physics Reports, 2016, 650: 1-63.

[4] LIU J G, REN Z M, GUO Q, et al. Node importance ranking of complex networks[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 178901.

[5] 任晓龙, 吕琳媛. 网络重要节点排序方法综述[J]. 科学通报, 2014, 59(13): 1175-1197.
REN X L, LYU L Y. Review of ranking nodes in complex networks[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(13): 1175-1197(in Chinese).

[6] 许慧. 社会网络中节点重要性度量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
XU H. Research on nodes importance measurement in social networks[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020(in Chinese).

[7] UGANDER J, BACKSTROM L, MARLOW C, et al. Structural diversity in social contagion[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(16): 5962-5966.

[8] 顾亦然, 朱梓嫣. 基于 LeaderRank 和节点相似度的复杂网络重要节点排序算法[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(2): 441-448.
GU Y R, ZHU Z Y. Node ranking in complex networks based on LeaderRank and modes similarity[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(2): 441-448(in Chinese).

[9] LALOU M, TAHRAOUI M A, KHEDDOUCI H. The critical node detection problem in networks: A survey[J]. Computer Science Review, 2018, 28: 92-117.

[10] YAN G, ZHOU T, HU B, et al. Efficient routing on complex networks[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2006, 73(2): 046108.

[11] 郑文萍, 吴志康, 杨贵. 一种基于局部中心性的网络关键节点识别算法[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(9): 1872-1880.
ZHENG W P, WU Z K, YANG G. A novel algorithm for identifying critical nodes in networks based on local centrality[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(9): 1872-1880(in Chinese).

[12] FREEMAN L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. Social Networks, 1978, 1(3): 215-239.

[13] FREEMAN L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. Sociometry, 1977, 40(1): 35.

[14] STEPHENSON K, ZELEN M. Rethinking centrality: Methods and examples[J]. Social Networks, 1989, 11(1): 1-37.

[15] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
WANG X F, LI X, CHEN G R. Complex network theory and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006(in Chinese).

[16] ZACHARY W W. An information flow model for conflict and fission in small group[J]. Journal of Psycholog, 1975, 12: 328-383.

[17] 周涛, 韩筱璞, 闫小勇, 等. 人类行为时空特性的统计力学[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(4): 481-540.
ZHOU T, HAN X P, YAN X Y, et al. Statistical mechanics on temporal and spatial activities of human[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(4): 481-540(in Chinese).

[18] XU W B ,LI W T,RUAN S G. Spatial propagation in an epidemic model with nonlocal diffusion: The influences of initial data and dispersals[J]. Science China (Mathematics), 2020, 63(11): 2177-2206.

[19] BONACICH P. Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification[J]. The Journal of Mathematical Sociology, 1972, 2(1): 113-120.

[20] DEREICH S, MÖRTERS P. Random networks with sublinear preferential attachment: Degree evolutions[J]. Electronic Journal of Probability, 2009, 14: 1222-1267.

[21] VRAGOVIĆ I, LOUIS E, DÍAZ-GUILERA A. Efficiency of informational transfer in regular and complex networks[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2005, 71(3): 036122.

[22] LATORA V, MARCHIORI M. A measure of centrality based on network efficiency[J]. New Journal of Physics, 2007, 9(6): 188.

[23] 浙江省长兴县人民法院. 刘罗亮郑顺平刘发英等诈骗案: 浙江省长兴县人民法院刑事判决书 (2020) 浙 0522 刑初 15 号[EB/OL]. (2020-08-15) [2022-07-05]. https://wenshu.court.gov.cn/.
Zhejiang Changxing County People's Court. Liu Luoliang Zheng Shunping Liu Faying el al. Fraud case: Criminal judgment of the People's Court of Chanagxing County, Zhejiang Province (2020) Zhe 0522 Xingchu No. 15[EB/OL]. (2020-08-15) [2022-07-05]. https://wenshu.court.gov.cn/(in Chinese).

[24] 浙江省长兴县人民法院. 刘东谢传青谢思江等诈骗案: 浙江省长兴县人民法院刑事判决书 (2020) 浙 0522 刑初 16 号[EB/OL]. (2020-08-18) [2022-07-05] . https://wenshu.court.gov.cn/.
Zhejiang Changxing County People's Court. Liu Dong Xie Chuanqing Xie Sijiang el al. Fraud case: Criminal judgment of the People's Court of Chanagxing County, Zhejiang Province (2020) Zhe 0522 Xingchu No. 16[EB/OL]. (2020-08-18) [2022-07-05]. https://wenshu.court.gov.cn/(in Chinese).

Target person analysis based on critical node recognition algorithm

HAN Yi[1, 2], SUN Baibing[1], WANG Junguo[1, 3], DU Yanhui[1, *]

(1. College of Information and Network Security, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;
2. The First Research Institute of the Ministry of Public Security of PRC, Beijing 100049, China;
3. Nanjing Forest Police College, Nanjing 210023, China)

Abstract: The critical node recognition algorithm is an important branch in the field of social network research. However, most of the existing research results highly depend on the diversity, integrity, and availability of data. Therefore, they are less applied in the scene of target person analysis by public security organs. To address this issue, in this paper, a static network topology was first quantified, and a relationship degree index was redefined by the local and global optimization algorithms. Based on the index, a characteristic matrix was then constructed. Ultimately, a relationship eigenvector centrality (REC) algorithm suitable for target person analysis by public security organs was proposed. Based on five datasets such as the public dataset, the relationship network of characters in two TV series, the account network of overseas social platforms, and a Chinese fraud gang, the effectiveness of the proposed algorithm was verified from three dimensions of network communication ability, anti-attack elasticity, and the result consistency of target person analysis. Compared with other conventional data mining algorithms, the proposed one can identify the critical nodes in social networks accurately and can be widely applied.

Keywords: critical node; social network; relationship degree; characteristic matrix; Kendall

Received: 2022-07-05; **Accepted**: 2022-09-16; **Published Online**: 2022-12-15 15:29

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221214.1414.005

Foundation items: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2021JKF105); Major Program of the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2021FZB13)

* **Corresponding author**. E-mail: dyh6889@126.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0617

涉水锂离子电池的腐蚀与析氢风险研究

张青松[1,*]，李东琪[1]，连晓雪[2]

(1. 中国民航大学 民航热灾害防控与应急重点实验室，天津 300300；2. 中国民航大学 理学院，天津 300300)

摘 要：锂离子电池涉水事件频发，特别是沿海地区及海事应用方面常常遇到高盐度涉水事件。以18650型电池为样本，进行不同盐度条件下涉水锂离子电池的腐蚀与析氢风险实验研究。结果表明：锂离子电池涉水时首先发生电解和电化学腐蚀现象，盐度越高，这种现象越显著；腐蚀主要发生在阳极帽处，随着腐蚀进行，腐蚀孔向内部深入，直至电池彻底损坏；涉水中锂离子电池的质量损失速率与电压降呈正相关关系；腐蚀产物主要为氢氧化亚铁、氢氧化铁和氢氧化铝；涉水过程中阴极析出大量氢气，氢气产生速率与盐溶液浓度呈正相关关系；对于较封闭的应用环境极易达到氢气爆炸下限；轻度腐蚀后电池热失控过程的喷射程度较为剧烈，燃爆危险性较高；而过度腐蚀则会直接破坏电池结构，进而使电池完全失效。

关 键 词：锂离子电池；安全；涉水；电池性能；热失控；析氢

中图分类号：X951

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2083-10

锂离子电池具有储能比高、寿命长、质量轻等特点，广泛应用于交通运输和生活各方面。近年来，锂离子电池产业发展迅猛，据国家工业和信息化部数据显示，2021年中国锂离子电池产量324 GWh，同比增长106%，其中消费、动力、储能型锂电产量分别为72 GWh、220 GWh、32 GWh，同比分别增长18%、165%、146%，锂电全行业总产值突破6 000亿元[1]。2021年，中国动力电池装车154.5 GWh，同比增长142.8%[2]。据国际能源署首席经济师Laszlo Varro预计，到2030年，全球新能源汽车保有量将超过2.5亿辆。然而，受种种条件影响，锂离子电池潜藏着难以预测的风险性，已经引发诸多安全问题。锂离子电池的热失控最令人担忧，主要因素包括过度充放电[3]、非常规的物理作用(变形、针刺、碰撞[4]、老化[5])及热触发[6]。热失控的发生伴随着电池内部的各种材料相继发生化学与电化学反应，包括固体电解质界面(solid electrolyte interface, SEI)膜分解反应、阳极反应、阴极与电解液反应、电解液燃烧等[7]。热失控也导致电池内部结构变化，Finegan等[8]通过高速同步X光技术结合热成像设备发现，当电池外壳温度达到100℃时，电极层之间会产生气层，减小了电极层之间的接触面积。Ribiere等[9]对在3种(100%、50%和0%)不同荷电状态(state of charge, SOC)的$LiMn_2O_4$软包装锂离子电池进行实验，结果表明热失控产生SO_2、HCl、CO、NO和HF等有毒气体。锂离子电池热失控防护方面，Cho等通过向隔膜中加入无机材料SiO_2、CeO_2等，将聚烯烃隔膜与无机颗粒进行混合，以提高隔膜热稳定性[10]。Deng等在阳极材料中引入热敏聚合物微球(thermosensitive polymer microspheres, TSPMs)，利用其热敏特性，在滥用条件下膨胀，从而切断活性材料和集流体的电气连接，以提高锂离子电池在滥用条件下的安全性[11]。Wang等合成了基于磷酸乙酯聚乙二醇(EPCP)的聚合物作为电解液阻燃添加剂。当EPCP的质量分数为0.15时，电解液完全不可燃[12]。对于外部防护，Said等发现相

收稿日期：2022-07-13；**录用日期**：2022-09-16；**网络出版时间**：2022-11-11 09:24
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221110.1328.002
基金项目：国家自然科学基金民航联合基金(U1933109)；中国民航大学研究生科研创新资助项目(2022YJS009)
*通信作者. E-mail：nkzqsong@126.com

引用格式：张青松，李东琪，连晓雪. 涉水锂离子电池的腐蚀与析氢风险研究[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2083-2092.
ZHANG Q S，LI D Q，LIAN X X. Study of corrosion and hydrogen evolution risk of waded lithium ion-battery[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2083-2092 (in Chinese).

对于氮气环境，空气环境下热失控传播速度更快[13]，因此，可以通过改变外部环境气体成分来控制热失控程度，也可通过改进电池控制组件来达到优化电池使用安全的目的，如异常点检测算法[14]，并联晶体管均衡方法[15]，基于电压的均衡策略，基于SOC的均衡策略，基于容量的均衡策略，基于混合的均衡策略[16]。此外，通过增加模块内电池间距也会对热失控传播产生重大影响[17]。目前大部分关于锂离子电池安全的研究主要聚焦于锂离子电池的热失控，从起因、内部结构变化、产物及防护等多方面进行了深入讨论。但鲜有学者关注涉水及腐蚀锂离子电池安全性问题。

近年来受极端气候条件影响，洪涝灾害愈加频繁，其突发性、破坏性、极端性对人民的生命财产造成了巨大损失，尤其对于沿海地区，大面积的洪涝灾害伴随着海水倒灌，致使大量新能源汽车、民用电瓶车及生活电器中的锂离子电池遭受不同程度的水浸。2021年7月20日河南发生特大暴雨[18]，据河南银保监局公布数据显示，截至2021年8月3日，河南保险行业已接到理赔报案54.58万件，初步估损达112.21亿元，其中包含大量涉水电动汽车的理赔。2021年7月，第6号台风“烟花”登陆浙江[19]，受其影响，舟山、宁波多地被淹，出现大面积积水及海水倒灌，大量汽车涉水受灾。涉水后锂离子电池的二次使用安全性判别及涉水新能源汽车的定损问题等引起各界关注。同时，锂离子电池在海事设备及船舶上广泛使用[20]，甚至用于电动客船的主动力能源，在应用中可能长期遭受海水及盐雾侵蚀，导致电池性质发生改变或产生一些危害性气体，这些问题都对锂离子电池器件和人员安全埋下极大隐患。

GB/T 31485—2015电动汽车动力蓄电池安全要求及试验方法中要求[21]，电池充满后，完全浸入3.5%的NaCl溶液中2 h，观察现象。美国桑迪亚国家实验室电化学存储系统滥用测试程序手册[22]的浸没试验中规定，将充满电的电池浸没在海水盐度中至少2 h，直至出现任何可见的现象停止。这些测试浸泡时间均设置在2 h，并没有考虑2 h内的测试及超过2 h的测试，同时缺乏对于浓度改变的实验测试及涉水产物的危险性分析，因此，本文实验将开展对不同质量分数及不同时长的浸泡测试，此涉水安全研究无论在海事领域、军事领域，还是交通运输、日常生活及现有锂离子电池测试标准方面，均具有现实意义和理论参考价值。

本文对锂离子电池进行不同条件下的浸泡处理，观测其质量、电压、产氢、燃爆等性能指标的变化规律，分析讨论了锂离子电池阳极腐蚀和阴极析氢的机制，根据氢浓度与涉水时间的线性方程，推导出了普适性的涉水锂离子电池析氢速率与水溶液含盐度关系的动力学方程，在评估涉水锂离子电池性能及安全性方面具有重要的参考价值。

1 实 验

1.1 材料与设备

实验用锂离子电池为18650型电池，该类电池阳极和阴极的化学成分分别为石墨和锂镍钴锰氧化物（$LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O_2$, NCM）。电解液由六氟磷酸锂（$LiPF_6$）、甲基碳酸乙酯（EMC）、碳酸乙烯酯（EC）和碳酸二甲酯（DMC）组成。隔膜是厚度为16 μm的聚乙烯（PE）膜。电池的内阻约为38 mΩ。正极封装采用钢制正极帽及铝制安全阀，具体电池参数如表1所示。实验溶质采用佛山西陇化工有限公司的分析纯NaCl（≥99.5%），溶剂为去离子水。

表1 电池参数

Table 1 battery parameters

品牌	标称电压/V	截止电压/V	容量/(mA·h)	长度/mm	高度/mm
三星UNG	3.6	2.75	2 200	65.0	18.4

电池充放电测试设备为武汉市蓝电电子股份有限公司的CT3001C型充放电性能检测仪；气体探测设备采用北京艾利特科技有限公司生产的CGS-8型气体测试系统；数据采集设备为杭州联测自动化技术有限公司型号为SIN-R6000D的数据记录仪，记录热失控实验中电池的温度；深圳富凯特科技有限公司的FKT-MK-CO型氢气传感器（体积分数范围0～40 000×10^{-6}，精度为1×10^{-6}）。

1.2 涉水实验

将电池分别置于不同质量分数的NaCl溶液中，通过不同时间的浸泡，观察实验现象并得到相关参数，以及确定涉水过程中单体电池的危险性。2组实验分别标记为A组、B组。A组是将电池浸入相同质量分数的NaCl溶液中，浸泡不同时长；B组则是将电池浸入不同质量分数的NaCl溶液中，浸泡相同时长。收集2组实验中的气体和沉淀物，进行成分分析及危险性评估。

实验开始前，需将电池SOC充至100%。先对电池进行初始放电，以1 C恒流放电至电压2.75 V，静置10 min，再以1 C恒流充电至电压为4.1 V，静置10 min转恒流充电至电流小于50 mA，充电后静置2 h。实验在大型通风防爆柜中进行。涉水实验装置如图1所示，锂离子电池置于2 L的亚克力反应罐底部正中，罐体上部接氢气传感器，除去溶液体积罐中剩余受限空间体积为1.6 L。

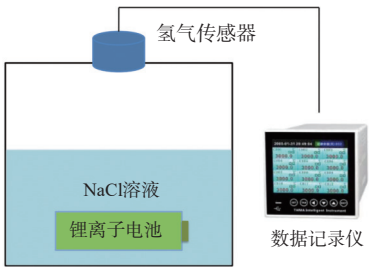


图 1　涉水实验装置

Fig. 1　Wading experiment device

A 组 NaCl 溶液质量分数为 0.035(海水含盐度), 浸泡时间设定为 10、20、30、60、120、180、240、360、480 min, 如表 2 所示; B 组 NaCl 溶液质量分数分别为 0、0.01、0.015、0.02、0.025、0.03、0.035, 浸泡 6 h, 如表 3 所示。实验过程中, 对产生的气体和沉淀物进行收集并观察涉水现象, 并实时监测和记录氢气浓度数据。浸泡后在阴凉通风处阴干电池并称重, 对沉淀物进行离心、干燥并做扫描电镜及 X 射线衍射分析, 通过测样结果评估产物危害程度。

表 2　A 组实验电池样品的电压和质量数据

Table 2　Voltage and weight data of battery samples in A group

编号	浸泡时长/min	初始质量/g	初始电压/V
A21	10	40.99	4.09
A22	20	41.02	4.09
A23	30	41.36	4.08
A24	60	41.14	4.09
A25	120	41.07	4.09
A26	180	40.97	4.08
A27	240	41.17	4.08
A28	360	41.11	4.08
A29	480	40.98	4.09

表 3　B 组实验电池样品的电压和质量数据

Table 3　Voltage and weight data of battery samples in B group

编号	质量分数	初始质量/g	初始电压/V
B11	0	41.01	4.09
B12	0.01	40.97	4.09
B13	0.015	41.03	4.09
B14	0.02	41.13	4.08
B15	0.025	40.89	4.09
B16	0.03	40.98	4.09
B17	0.035	41.04	4.08

1.3　燃爆实验

对涉水后的电池进行热失控处理, 通过燃爆参数分析并确定其热安全性和稳定性。实验基于自主搭建设备, 通过热诱发方式对涉水电池进行燃爆, 采集燃爆过程中的气敏数据、温度数据及质量体积变化数据。如图 2 所示, 燃爆装置包括实验舱、固定托架、自主设计的电池加热座、K 形热电偶、气敏设备、废气排气装置、温控设备。

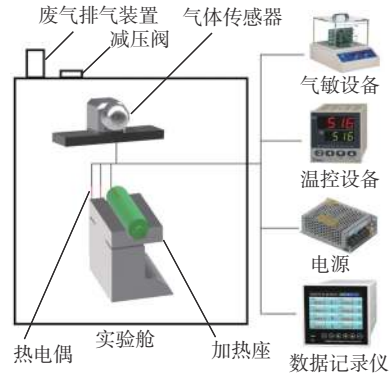


图 2　热失控试验装置

Fig. 2　Thermal runaway test device

实验舱采用铝制桶状结构, 顶部引出导气管和气泵, 其具备防爆、泄压、排气等功能。电池固定在加热座上, 放置于燃爆舱中央, 使用 3 个 K 形热电偶, 分别用于加热座的温控、加热座的温度及电池表面温度采集, 气体传感器固定于燃爆舱内壁上部, 使用隔热布进行包裹, 避免受燃爆烟尘影响。实验舱外接数据记录仪、气敏设备、废气排气装置、加热控制组件。通过外部加热的方式诱发涉水锂离子电池发生热失控, 观察现象, 记录燃爆过程中的各项参数, 对其燃爆危险程度进行评估。

2　结果与讨论

2.1　涉水实验现象

如图 3(a)～图 3(f)所示, 锂离子电池在不同质量分数的 NaCl 溶液浸泡下, 阴极析出大量氢气。NaCl 溶液质量分数为 0.01 时, 氢气气泡析出缓慢, 密度较小, 气泡较为细小, 整体表现为缓慢垂直上浮。随着 NaCl 溶液质量分数的增加(见图 3(a)～图 3(f)), 可以观察到, 气泡密度和气泡扩散范围逐渐增大, 扩散呈放射状, 产气速率明显加快。从图 3(f)中可以清晰地观察到, 高质量分数下, 有细小氢气泡快速聚集形成了一连串的较大气泡, 由于析氢速率高, 气泡几乎连成了较长的气体流束, 向四周喷射形成放射状的气流区。由此可知, 涉水过程中锂离子电池析氢速率与 NaCl 溶液质量分数呈正相关关系。

图 3(g)～图 3(l)为锂离子电池在质量分数为 0.035 的 NaCl 溶液下浸泡不同时长所表现出来的腐蚀状态。从图 3(g)～图 3(l)可知, 电池阳极结构逐渐被腐蚀。图 3(g)为未浸泡电池, 阳极帽结构完

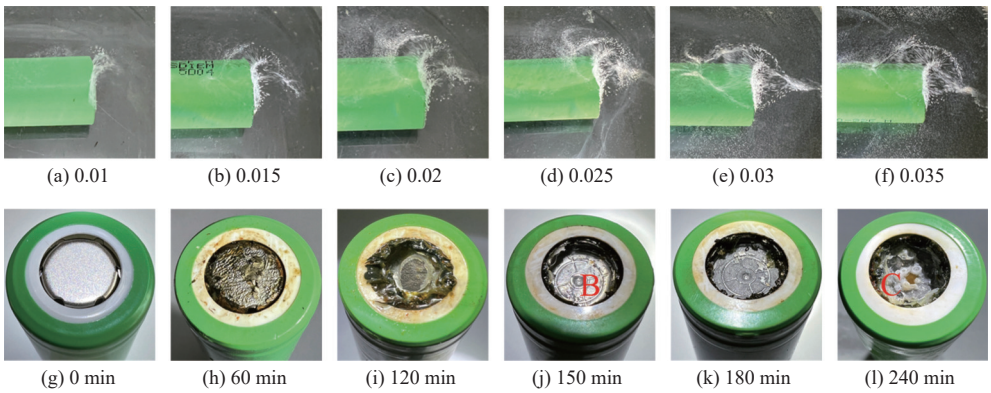


图3 锂离子电池涉水腐蚀过程

Fig. 3 Wading corrosion process of lithiumion battery in water

整，电池状态正常；图3(h)为浸泡60 min时的状态，阳极帽结构受损，表面呈粗糙的磨砂状，少量氧化层凸起、分层，粗糙化增加了电极与溶液的接触面积，一定程度上会降低阳极活化势垒，从而加剧腐蚀；浸泡达到120 min时，阳极帽已被完全腐蚀脱落，腐蚀开始向周边及内部扩散；150 min时，B处安全阀已暴露在外面(见图3(j))；180 min时安全阀结构受到可见的腐蚀(见图3(k))直至240 min时，阀体被完全破坏穿孔，C处电池的过流保护片部分裸露在外，此时电池已被完全腐蚀(见图3(l))。上述过程中，先在阳极表面析出大量漂浮物，之后凝聚成絮状沉淀物，随着腐蚀持续进行，安全阀被腐蚀产生的沉淀物逐渐浮出水面，如图4所示。图5(a)为腐蚀产物电镜照片，可以看出腐蚀产物粒度细小，粒径在50～100 nm，分布均匀，反映了腐蚀为匀速过程。X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)图谱分析表明，腐蚀产物的组成主要为立方型氢氧化铁和三水铝石(氢氧化铝)，如图5(b)所示。由此可推断腐蚀开始生成的漂浮物为氢氧化亚铁，在之后的电化学和水解过程中被氧化为氢氧化铁，安全阀在持续腐蚀过程中直接转化为三水铝石。整个浸泡过程中并未发生单体电池燃爆现象，未发现燃爆风险，但并不能排除电池组组件短路而造成燃爆的可能[23]。一个潜在的风险必须引起足够的重视，即涉水过程中产生的氢气如果没能及时疏散，被电气火花点燃并发生燃爆的风险很大。锂离子电池涉水时析氢与腐蚀是不可避免的，但是若能在电池组设计和运行空间预设防水、特殊情况下自动废气排气装置及在阳极帽、安全阀表面进行防腐涂层处理，则在一定程度上可以减少涉水锂离子电池安全风险。

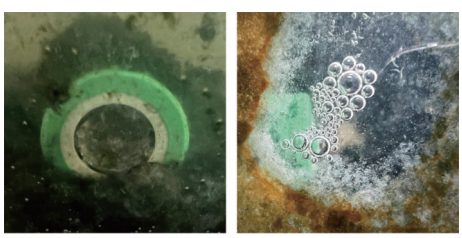


图4 腐蚀产物

Fig. 4 Corrosion products

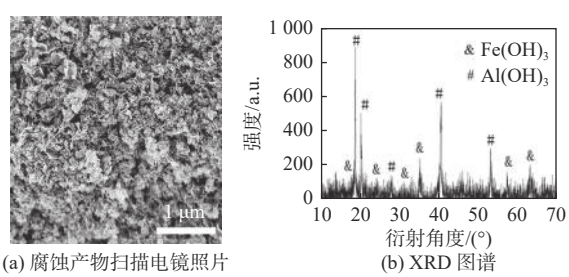


图5 腐蚀产物扫描电镜照片和XRD图谱

Fig. 5 SEM images and XRD patterns of corrosion products

2.2 腐蚀与析氢的热力学与动力学

标准大气压和标准温度环境中，涉水电池发生电解腐蚀所需要输入的最小电功等于反应吉布斯自由能变化 ΔG_0，与标准电极电势 E^{Θ} 的关系如下：

$$\Delta G_0 = -nFE^{\Theta} \tag{1}$$

式中：n 为电极反应转移电子数；F 为法拉第常数。在非标准大气压和温度下，电极电势 E_0 可以用能特斯方程来确定，如下所示：

$$E = E^{\Theta} + \frac{\Delta S}{nF}(T - T_0) + \frac{RT}{nF}\ln\prod_{\mathrm{B}} a_{\mathrm{B}}^{\nu_{\mathrm{B}}} \tag{2}$$

式中：E 为任一温度气压下的可逆电动势；E^{Θ} 为标准电动势；ΔS 为反应中的熵变；R 为通用气体常数；T 为任一温度；T_0 为标准温度；a_{B} 为B溶质离子活度；ν_{B} 为B溶质化学计量数。

理论电解水反应热力学电压 $E^{\Theta}(\mathrm{O_2,H^+}\mid \mathrm{H_2O})$= 1.23 V。实际电池涉水电解时，阳极通常会先发生极化电极电势较低的反应，阴极会先发生极化电极电势较高的反应，通过确定各电极反应的活度，来确定反应的极化电动势。如果按照标准气压和标准温度条件判断，$E^{\Theta}(\mathrm{H^+}\mid \mathrm{H_2})$= 0 V；$E^{\Theta}(\mathrm{Fe^{2+}}\mid \mathrm{Fe})$=

−0.447 V, 阳极帽 Fe 还原性较 OH^-强, 氧化反应活度较高, 可判断阳极优先发生 Fe 的腐蚀反应, 推测反应式如下:

$$Fe-2e^-=Fe^{2+} \quad (3)$$

$$12Fe^{2+}+3O_2+6H_2O=4Fe(OH)_3\downarrow+8Fe^{3+} \quad (4)$$

待阳极帽腐蚀破损后, 内部铝制安全阀也开始腐蚀, $E^{\ominus}(Al^{3+}|Al)=-1.662$ V, 其反应式如下:

$$Al-3e^-=Al^{3+} \quad (5)$$

$$Al^{3+}+3OH^-=Al(OH)_3\downarrow \quad (6)$$

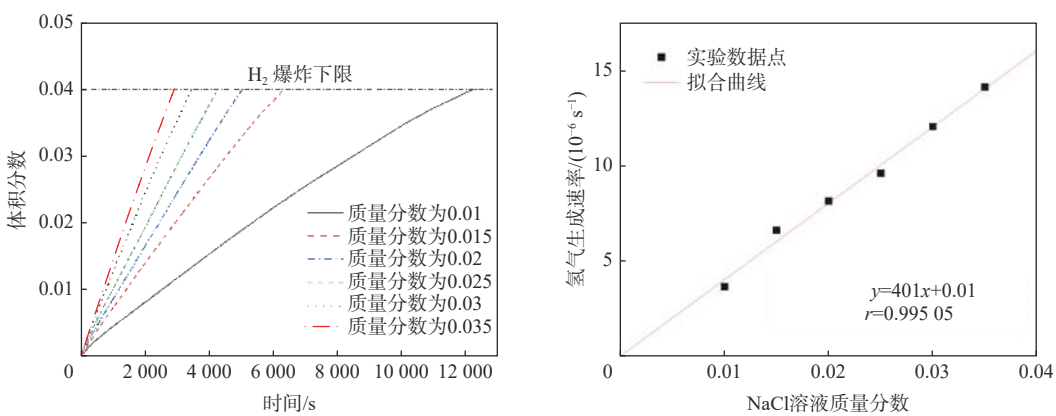
受反应阻力影响, 反应阈值电压 E_{op} 往往会大于 E_0, 大于 E_0 的部分为过电压 η, η 值的大小取决于克服浓差损耗 η_c、活化损耗 η_a、欧姆损耗 η_o, 影响过电压 η 的因素较多, 如环境温度、电解液浓度值、电极材料、电解液与电极接触面积等, 实际反应阈值电压用下式描述[24]:

$$E_{op}=E_0+\eta_c+\eta_a+\eta_o \quad (7)$$

在锂离子电池的常规应用中, 电池正常运行工作电压及终止电压远大于 E_{op}, 因此, 对于涉水中的电池, 很容易发生电解腐蚀, 恶劣的应用环境会降低 η 值, 使低电压状态下的锂离子电池也存在被腐蚀的风险。同时, 阴极析氢反应为

$$2H^++2e^-=H_2\uparrow \quad (8)$$

涉水实验中, 析氢现象非常显著, 这是涉水事件中锂离子电池最大的危险问题。因此, 本文系统研究了析氢的动力学问题。图 6 为 1.6 L 受限空间中, 不同质量分数 NaCl 溶液浸泡下锂离子电池生成氢气体积分数随时间变化的规律。随着时间延长加, 氢气浓度呈线性增大, NaCl 溶液质量分数越大, 其生成氢气的速率越快, 曲线斜率也越大。不同质量分数 NaCl 溶液下氢气体积分数随时间变化的拟合线性方程式如表 4 所示。当 NaCl 溶液质量分数为 0.035 时, 实验空间中氢气浓度达到气体爆炸下限 4% 仅需 48 min; 而当 NaCl 溶液质量分数为 0.01 时, 氢气体积分数达到爆炸下限也只需 200 min。在锂离子电池的应用中, 电池组往往集成多节单体电池, 为确保其防水性能及空间利用效率, 电池组内空间往往偏小, 同时在多场景应用中, 电池组一般位于空间狭小的电子舱或电池仓内部, 因此, 对于高盐度、高湿度及可能导致电池被长时间侵蚀的环境下, 应该高度警惕由于氢气聚集而可能导致的严重后果。



(a) 不同质量分数NaCl溶液下氢气体积变化　　(b) 氢气体积分数与NaCl溶液质量分数曲线

图 6　氢气体积分数与 NaCl 溶液质量分数的关系曲线

Fig. 6　Relationship curve between hydrogen volume fraction and solution salinity

表 4　氢气体积分数拟合方程

Table 4　Linear fitting equation of hydrogen concentration

NaCl质量分数	拟合曲线	相关系数r
0.01	$C_H=3.64t-374.66$	0.998 23
0.015	$C_H=6.36t+1\,053.76$	0.999 39
0.02	$C_H=7.95t+629.80$	0.999 92
0.025	$C_H=9.30t+800.29$	0.999 92
0.03	$C_H=11.58t+1\,049.58$	0.999 52
0.035	$C_H=13.77t+654.06$	0.999 75

注: C_H为氢气体积分数; t为反应时间, 单位s。

提取拟合氢气生成速率值与对应 NaCl 溶液质量分数值再次进行线性拟合, 可以发现氢气生成速率 v 与 NaCl 溶液质量分数 C_N 也呈线性正相关, 其方程式如下:

$$v=401C_N+0.01 \quad (9)$$

方程相关系数 r 为 0.995 05, 可以很好时模拟盐溶液质量分数与氢气生成速率间的关系。为进一步估算单位体积下氢气生成速率与盐溶液质量分数变化关系, 需要将体积分数转换为质量分数:

$$Y=\frac{M}{24.45}C_{\mathrm{H}} \tag{10}$$

式中：Y为气体质量浓度，mg/m^3；M为气体克分子量；C_{H}为氢气体积分数。

式中：24.45为气体常数，设氢气爆炸下限体积浓度为C_{L}=4×10^{-2}，则Y_{L}=3.271 98×10^{-3} mg/m^3，设1.6 L的受限空间中氢气质量为$m_{1.6}$，则$m_{1.6}$=Y_{L}×1.6×10^{-3}=5.235 168×10^{-6} mg，则每升受限空间中氢气体积分数为$C_1=(Y_1\times24.45)/2\approx6.4\times10^{-2}$，单位体积(1 L)氢气体积分数增长率$v_1$为

$$v_1=\frac{\mathrm{d}C_1}{\mathrm{d}t} \tag{11}$$

通过计算得出各质量分数NaCl溶液所对应的析氢速率，如表5所示，对计算值进行拟合，得到1 L受限空间中C_{N}与v之间的关系式：

$$v=561C_{\mathrm{N}}+1.06 \tag{12}$$

表5 1 L受限空间中的NaCl溶液质量分数与析氢速率

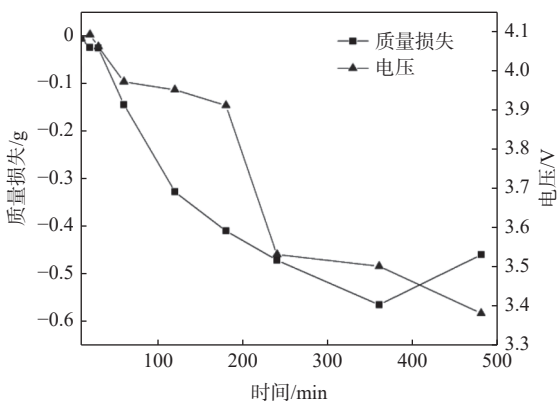
Table 5 Relationship between hydrogen generation rate and solution salinity in 1 L confined space

NaCl溶液质量分数	析氢速率/(10^{-6}·s^{-1})
0.01	5.82
0.015	10.18
0.02	12.72
0.025	14.88
0.03	18.53
0.035	20.03

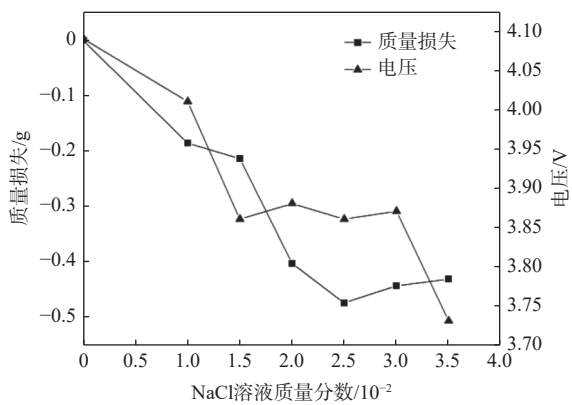
拟合相关系数为0.991 74。根据式(12)可推算出任意受限空间和各NaCl溶液质量分数水体中锂离子电池涉水时析氢的速率，并估算危险程度。

2.3 涉水过程中电池质量和电压的变化

本文锂离子电池涉水腐蚀损失质量为涉水后综合因素造成的质量变化，包括腐蚀损失、内部吸水、内部物质逸出等。测定时将电池从溶液中取出，用滤纸吸干其外部水分，并除去其表面腐蚀物，称量其质量。如图7(a)所示，锂离子电池被浸泡在质量分数为0.035的NaCl溶液中，随着浸泡时间延长，电池质量和电压发生了明显的变化。浸泡初期反应较为剧烈，质量下降较为显著。随着反应进行，阳极帽开始腐蚀，产生的絮状沉淀物附着于其表面，使腐蚀反应速率逐渐变慢，质量损失开始变缓。3 h后，结合图3(k)和图3(l)可以发现，这个阶段安全阀被侵蚀穿孔，致使少量水渗入电池内部，随着安全阀继续腐蚀，穿孔面积逐渐变大，渗入电池内部的水溶液开始变多，因此，8 h时的损失质量出现了小幅度回升。从电压变化曲线可以看出，在3 h之内，电池处于正常放电状态，而在3～4 h电压明显降低，可以断定安全阀穿孔导致电池电气性能急剧变化。如图7(b)所示，锂离子电池在不同NaCl溶液质量分数下浸泡相同时长，其电池质量和电压均降低。随着NaCl溶液质量分数的增加，电池损失质量也逐步增大，直到NaCl溶液质量分数为0.025质量分数左右时，质量损失基本一致，属于电池阳极帽彻底损失后的质量变化。电压在NaCl溶液质量分数为0.01～0.015时下降明显，此时电池处于初始放电期；在0.015～0.03之间电压保持一致，电池处于放电平台期，而0.03～0.035 NaCl质量分数下电压突降，此时电池安全阀出现穿孔。实验表明，在不同质量分数NaCl溶液中电池腐蚀速率不同，自由离子质量分数越高，电化学反应越密集，电池发生腐蚀过程越明显。



(a) 0.035NaCl溶液质量分数中浸泡不同时间



(b) 不同质量分数NaCl溶液中浸泡6 h

图7 锂离子电池涉水过程中质量损失与电压变化

Fig. 7 Mass loss and voltage change of lithiumion battery during water wading

2.4 涉水锂离子电池的热失控特性

锂离子电池热失控时，燃爆会喷射大量内部高温气体及物质，因此，热失控前后的质量变化在一定程度上能反映出热失控的喷射剧烈程度[25]。图8

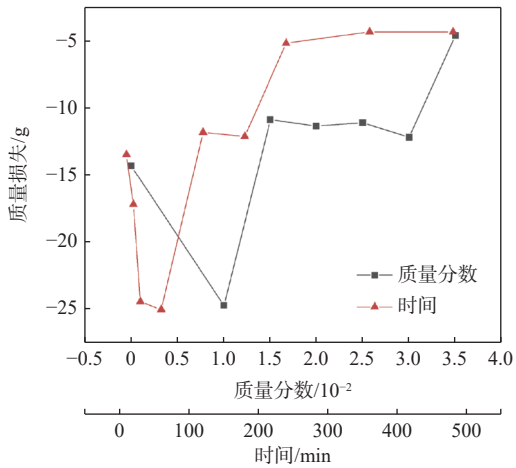


图 8　涉水锂离子电池热失控后质量损失

Fig. 8　Mass loss of wading lithiumion battery after thermal runaway

为不同涉水时间和不同质量分数 NaCl 溶液浸泡的锂离子电池样品燃爆质量损失曲线。可以看出, A 组实验中, 对于腐蚀时间分别为 10 min、20 min、30 min、60 min 的 4 个电池样品, 随着时间延长, 其热失控后质量损失逐渐变大, 其中, 浸泡 30 min 和 60 min 的样品质量损失达到 24.45 g 和 25.05 g。结合图 9 可知, 电池由于剧烈喷射, 阳极帽已被完全破坏, 同时带出大量内部物质, 中央芯轴及部分电极卷被喷出, 释压过程中带走大量热量, 导致电池表面温度较低。图 10 为锂离子电池热失控温度变化曲线, 相比浸泡 3 h 样品表面最高温度 783 ℃ 分别降低了 244 ℃ 和 280 ℃。随着腐蚀时间增加到 120～180 min, 电池安全阀被破坏, 因此, 热失控时

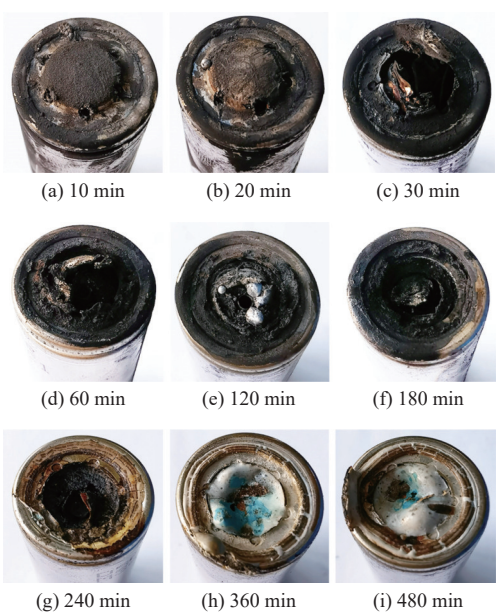


图 9　不同浸泡时长电池燃爆后的形貌照片

Fig. 9　Photo of lithium battery with different wading time after combustion and explosion

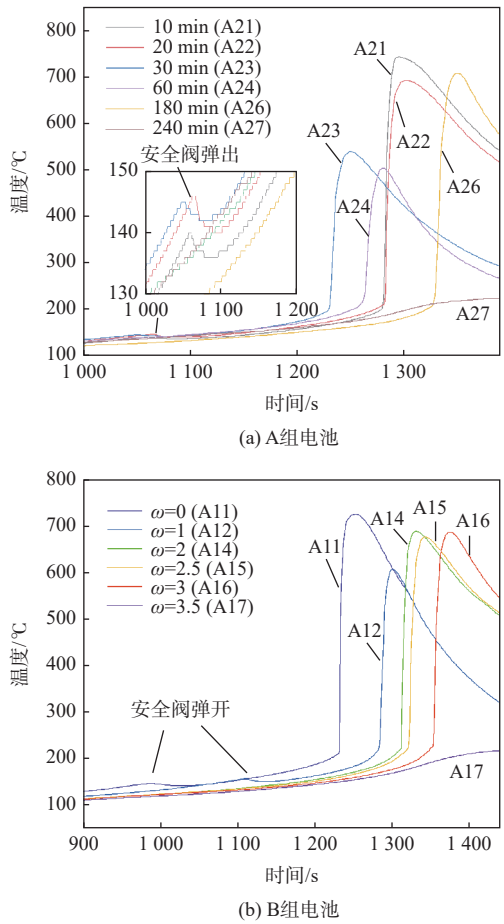


图 10　锂离子电池热失控温度变化曲线

Fig. 10　Temperature variation curve during thermal runaway of lithiumion battery

电池内部压力积累较少, 只有少量烟雾粉尘喷出, 燃爆后电池质量损失基本和浸泡 10 min 的样品保持一致。对于腐蚀时间达到 240 min 以上的电池, 其结构完全被破坏, 未发生燃爆现象, 质量损失较小。图 11 对比了浸泡 10 min、20 min、180 min 和 240 min 4 个电池样品燃爆的气敏特性曲线发现, 浸泡 10 min、20 min 的样品热失控阶段会产生 2 组峰

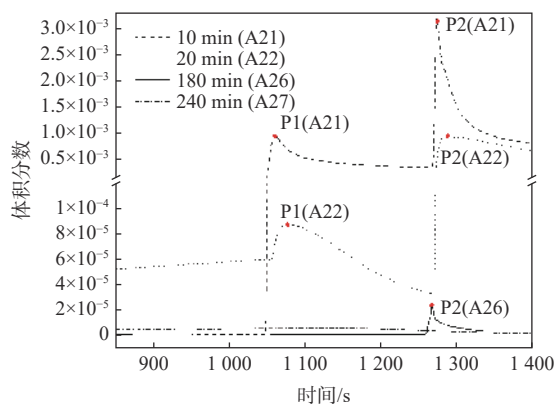


图 11　涉水锂离子电池热失控中释放 VOCs 气体曲线

Fig. 11　VOCs gas release curve during thermal runaway of water wading lithiumion battery

值：第1次峰值信号出现在初爆时，电池内部安全阀弹出，释放少部分气体，此时电池表面温度小幅降低；第2次峰值信号则是出现在不可逆的燃爆阶段，大量烟雾喷射而出，气体浓度峰值信号较为强烈，同时电池表面温度大幅上开。浸泡时间超过180 min后，初爆峰信号消失，电池表面温度并未发生下降，存在燃爆信号（P2(A26)），电池温度继续升高；浸泡时间达到240 min后，初爆、燃爆信号皆无法探测到，电池表面温度无明显增幅，此时电池结构破坏，性能丧失。

B组实验样品中，未经处理的电池与浸泡于质量分数为1.5%～3.0%NaCl溶液中的电池发生热失控质量损失相当，其中，未经处理的电池热失控发生速度最快，电池表面温度最高，随着浸泡溶液质量分数的增加，热失控触发时间逐渐变长。浸泡于质量分数为0.01的电池样品燃爆质量损失最大，其对应图10(b)中的电池表面温度为606 ℃，相比未经处理的电池表面温度降低了118 ℃，而浸泡于质量分数为0.035的样品由于腐蚀过度，结构破坏严重，电池封闭结构丧失，内部活性物质被水浸物钝化，并未发生热失控。

在对涉水电池的燃爆热安全性研究中总结发现，2组实验随着浸泡质量分数和浸泡时间的增加，电池的腐蚀程度不断加剧，不同的腐蚀阶段，其发生燃爆的风险程度不同，通过对比可将其分为4个阶段：第1阶段为阳极帽腐蚀初期，该阶段阳极帽强度变弱，可承受内部压力降低，但依旧可能抵消燃爆压力的冲击，燃爆触发较为迅速，有少量烟雾喷出，电池表面温度较高；第2阶段为阳极帽腐蚀后期，阳极帽强度不足以支撑燃爆压力，会造成大量内部物质喷出，喷射现象明显，电池表面温度较低；第3阶段为安全阀腐蚀阶段，此期间电池内部不会有大量的压力积累，没有较为剧烈的喷射现象，热失控现象主要表现为内部高温和少量物质喷出，与第1阶段表象较为接近，但总体热失控触发时间较为滞后；第4阶段安全阀腐蚀穿孔，电池性能丧失，此阶段电池无燃爆风险。

3 结 论

本文探究了较高质量分数NaCl溶液环境中涉水对锂离子电池性能的影响及其热失控安全性。得出以下结论：

1）涉水过程中锂电池会产生大量的氢气和沉淀物，析氢速率与NaCl的质量分数成正比。

2）单体锂电池涉水氢气产量较少，但在电池组受限空间应用场景中，其浓度能快速达到氢气爆炸下限，对于大规模的电池组应用，危险性不容忽视。

3）腐蚀沉淀物主要为氢氧化亚铁、氢氧化铁、氢氧化铝，未发现腐蚀性与毒害性的成分。

4）单体锂离子电池在涉水过程中不会发生燃爆，但会造成不同程度的电化学腐蚀现象。

5）涉水腐蚀从阳极开始，轻度的腐蚀会造成阳极帽的破坏，热失控时燃爆喷射现象更加剧烈。严重腐蚀会直接破坏电池结构，使其失去蓄电功能，不能二次使用。

参考文献（References）

[1] 何艺, 王兆龙, 鲍伟, 等. 2021年我国电池材料需求情况研究[J]. 电池工业, 2022, 26(4): 201-206.
HE Y, WANG Z L, BAO W, et al. Discussion on the demand of battery materials in China in 2021[J]. Chinese Battery Industry, 2022, 26(4): 201-206(in Chinese).

[2] 宋文龙, 罗秋月, 何艺, 等. 2021年我国电池产销情况[J]. 电池工业, 2022, 26(2): 85-89.
SONG W L, LUO Q Y, HE Y, et al. Production and sales of batteries in China in 2021[J]. Chinese Battery Industry, 2022, 26(2): 85-89(in Chinese).

[3] 孙延先, 姜兆华. 锂离子电池模组过充热失控扩散仿真[J]. 电池, 2019, 49(6): 481-484.
SUN Y X, JIANG Z H. Simulation of thermal runaway diffusion in overcharging of Li-ion battery module[J]. Battery Bimonthly, 2019, 49(6): 481-484(in Chinese).

[4] 邢学彬, 袁德强, 王占国, 等. 不同触发条件下的钛酸锂电池热失控特性研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(6): 787-792.
XING X B, YUAN D Q, WANG Z G, et al. Research on the thermal runaway characteristics of lithium titanate batteries under different trigger conditions[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(6): 787-792(in Chinese).

[5] 毛亚, 白清友, 马尚德, 等. 循环老化对锂离子电池在绝热条件下的产热及热失控影响[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1120-1127.
MAO Y, BAI Q Y, MA S D, et al. Influence of cycling on the heat-release and thermal runaway of the lithium ion battery under adiabatic condition[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1120-1127(in Chinese).

[6] 陈现涛, 赵一帆, 张旭, 等. 不同外部热源及气压对软包装锂离子电池热失控影响[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(1): 15-20.
CHEN X T, ZHAO Y F, ZHANG X, et al. Influence of different external heat power and air pressure on thermal runaway of pouch lithium-ion batteries[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(1): 15-20(in Chinese).

[7] 陈天雨, 高尚, 冯旭宁, 等. 锂离子电池热失控蔓延研究进展[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1030-1039.
CHEN T Y, GAO S, FENG X N, et al. R Recent progress on thermal runaway propagation of lithium-ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1030-1039(in Chinese).

[8] FINEGAN D P, SCHEEL M, ROBINSON J B, et al. In-operando high-speed tomography of lithium-ion batteries during thermal runaway[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6924.

[9] RIBIÈRE P, GRUGEON S, MORCRETTE M, et al. Investigation

on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry[J]. Energy & Environmental Science, 2012, 5(1): 5271-5280.

[10] CHO J, JUNG Y C, LEE Y S, et al. High performance separator coated with amino-functionalized SiO_2 particles for safety enhanced lithium-ion batteries[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 535: 151-157.

[11] DENG Y M, WANG Z, MA Z, et al. Positive-temperature-coefficient graphite anode as a thermal runaway firewall to improve the safety of $LiCoO_2$/graphite batteries under abusive conditions[J]. Energy Technology, 2020, 8(3): 1901037.

[12] WANG Q F, LIU P P, LI S Z, et al. A flame retardant ionic conductor additive for safety-reinforced liquid electrolyte of lithium batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(7): A1559-A1563.

[13] SAID A O, LEE C, STOLIAROV S I, et al. Comprehensive analysis of dynamics and hazards associated with cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays[J]. Applied Energy, 2019, 248: 415-428.

[14] PIAO C H, WANG Z G, CAO J, et al. Lithium-ion battery cell-balancing algorithm for battery management system based on real-time outlier detection[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 168529.

[15] GALLARDO-LOZANO J, ROMERO-CADAVAL E, MILANES-MONTERO M I, et al. A novel active battery equalization control with on-line unhealthy cell detection and cell change decision[J]. Journal of Power Sources, 2015, 299: 356-370.

[16] XU J, CAO B G, LI S Y, et al. A hybrid criterion based balancing strategy for battery energy storage systems[J]. Energy Procedia, 2016, 103: 225-230.

[17] LOPEZ C F, JEEVARAJAN J A, MUKHERJEE P P. Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(9): A1905-A1915.

[18] 吴娟, 钱傲然, 林荷娟. 应对极端暴雨洪水与提升防洪安全韧性研究: 以太湖流域为例[J]. 中国水利, 2024(8): 25-32.
WU J, QIAN A R, LIN H J. Research on coping with extreme rainstorm flood and enhancing flood safety resilience—Taking the Taihu Basin as an example[J]. China Water Resources, 2024(8): 25-32(in Chinese).

[19] 贾燕, 杨明, 严睿恺. 台风“烟花”决策气象服务特色经验及技术探究[J]. 气象科技进展, 2023, 13(1): 56-60.
JIA Y, YANG M, YAN R K. Characteristic experiences and technologies of decision-making meteorological service for typhoon INFA[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2023, 13(1): 56-60(in Chinese).

[20] 方斯顿, 王鸿东, 张军军. 船舶大容量储能系统应用研究综述[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 22-35.
FANG S D, WANG H D, ZHANG J J. A review of shipboard large-scale energy storage systems[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(6): 22-35 (in Chinese).

[21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电动汽车用动力蓄电池安全要求及试验方法: GB/T 31485—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety requirements and test methods for traction battery of electric vehicle: GB/T 31485—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).

[22] DOUGHTY D, CRAFTS C. Abuse test manual for electric and Hybrid electric vehicle applications[J]. ECS Meeting Abstracts, 2006, 2(2): 77.

[23] 宗磊, 盛军. 锂离子动力电池系统的浸水试验及分析[J]. 北京汽车, 2020, 45(1): 22-26.
ZONG L, SHENG J. Submergence test of Li-ion power battery system[J]. Beijing Automotive Engineering, 2020, 45(1): 22-26(in Chinese).

[24] 张晨佳, 蔡军, 张玉魁, 等. 基于热力学平衡的高温固体氧化物电解水制氢模拟[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 210-217.
ZHANG C J, CAI J, ZHANG Y K, et al. Simulation of high temperature solid oxide water electrolysis for hydrogen production based on thermodynamic equilibrium[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(9): 210-217(in Chinese).

[25] 张青松, 赵子恒, 白伟. 过充条件下三元锂离子电池热安全性分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(5): 713-717.
ZHANG Q S, ZHAO Z H, BAI W. Thermal safety analysis on ternary lithium ion battery under overcharge conditions[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(5): 713-717(in Chinese).

Study of corrosion and hydrogen evolution risk of waded lithium ion-battery

ZHANG Qingsong[1,*], LI Dongqi[1], LIAN Xiaoxue[2]

(1. Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Hazards Prevention and Emergency Response, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Lithium-ion battery wading events occur frequently, especially, often suffering high salinity wading events in coastal areas and maritime operations. In this paper, 18650 model batteries were used as samples to carry out experiments on the risk of corrosion and hydrogen evolution of waded lithium-ion batteries under different salinity conditions. The findings indicate that soaking lithium-ion batteries in an aqueous sodium chloride solution triggers the onset of electrolytic and electrochemical corrosion. The higher the salinity of the solution, the more significant this phenomenon is. The corrosion mainly occurs at the anode cap. With corrosion developing, the corrosion hole goes deep into the interior until the battery is completely damaged. There is a positive correlation between the mass loss rate and voltage drop of lithium battery in the wading process. Aluminum hydroxide, ferrous hydroxide, and ferric hydroxide make up the majority of the corrosion products. In the process, a large amount of hydrogen emerges from the cathode, and the hydrogen generation rate has a positive linear relationship with the concentration of salt solution. For relatively narrow space, it is very easy to reach the lower limit of a hydrogen explosion. After mild corrosion, the injection degree of the thermal runaway process of the battery is more severe, and the risk of combustion and explosion is relatively high. Furthermore, extreme corrosion will directly damage the battery's construction, rendering it totally useless.

Keywords: lithium ion battery; safety; wading; battery performance; thermal runaway; hydrogen evolution

Received: 2022-07-13; **Accepted**: 2022-09-16; **Published Online**: 2022-11-11 09:24

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221110.1328.002

Foundation items: Civil Aviation Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (U1933109); Civil Aviation University of China Postgraduate Research Innovation Project (2022YJS009)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0009

基于组合变换域的彩色图像大容量零水印算法

韩绍程[1,*]，刘欢[2]

(1. 中国民航大学 工程技术训练中心，天津 300300；2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津 300300)

摘 要：针对现有大多数彩色图像零水印方案中水印嵌入容量小且抗几何攻击鲁棒性能不佳等问题，提出一种基于组合变换域和位平面分解的大容量鲁棒零水印算法。对彩色载体图像的R、G、B通道分别进行快速有限剪切波变换（FFST），并对变换后的各低频子带进行非重叠分块置乱，将置乱后的各子带的分块离散余弦变换（DCT）系数用于构造四元数离散余弦变换（QDCT）系数矩阵；在每个QDCT系数矩阵中选取两个低频系数，利用其各个实部和虚部的符号极性构造8个二值鲁棒特征矩阵；将经过正交拉丁方置乱加密后的灰度水印图像按位分解，把位分解后的8个二值位平面分别与以上二值鲁棒特征矩阵进行异或并重组得到灰度级认证零水印。此外，在水印检测前，采用ORB算法对待认证图像进行几何校正。实验结果表明，所提算法水印嵌入容量和安全性高，且对于常规非几何攻击和几何攻击均具有较强的鲁棒性。

关 键 词：零水印；彩色图像；灰度级水印；组合变换域；位平面分解

中图分类号：TP391

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2093-11

5G互联网时代的到来，使得数字媒体内容成为传输信息的主要载体，包括图像、音/视频等在内的数字资源在爆炸式增多的同时，也面临着包括未经授权的被下载、盗版、复制、篡改等多方面严峻的安全挑战[1]。数字水印作为一种能为多媒体数据安全提供有效保障的数字内容版权保护技术，受到信息安全领域中众多研究者的关注[2-3]。

数字零水印技术[4]的出现，可以有效地解决不可见性和鲁棒性之间的矛盾，一直吸引着众多研究者的密切关注[5-11]。现有大多数零水印方案以二值图像作为原始水印信息。文献[5]和文献[6]都是在空域下计算图像整体均值和分块均值，前者利用均值之间大小关系的稳定性构造特征矩阵；后者将其差值输入雅可比矩阵，用于生成零水印信息。以上空域零水印算法具有优越的时效性，但鲁棒性欠佳。相比空域水印算法，变换域水印算法由于出众的鲁棒性，受到研究者极大的青睐。赵彦霞等[7]将卷积神经网络与变换域结合，提出了一种彩色图像多功能零水印算法。该算法分别将彩色图像的Y、Cb、Cr三通道离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)后的系数矩阵进行奇异值分解，再输入深度卷积神经网络，从卷积神经网络输出层的输入矩阵中得到原始载体的信息矩阵，从而生成鲁棒零水印；同时，从Y通道DWT后的低频子带系数矩阵中获取原始载体的另一个信息矩阵，生成半脆弱零水印；该算法抵抗旋转攻击能力较弱。Jiang等[8]将载体图像的R、G、B及灰度化分量4幅图像进行适当组合，构造出2个三维张量，选择不同张量扩展后的数据分别进行奇异值分解和离散余弦变换，用二值化对角矩阵和变换后的低频系数来构造特征矩阵；该算法具有一定的创新性，但虚警率较高，鲁棒性欠佳。吴德阳等[9]在Curvelet变换和DWT

收稿日期：2023-01-04；**录用日期**：2023-04-22；**网络出版时间**：2023-05-18 00:00
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230517.1504.001
基金项目：国家自然科学基金(62172418)；天津市应用基础研究多元投入基金重点项目(21JCZDJC00830)
*通信作者. E-mail：schan_cauc2012@163.com

引用格式：韩绍程，刘欢. 基于组合变换域的彩色图像大容量零水印算法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2093-2103.
HAN S C，LIU H. A large-capacity zero-watermarking algorithm for color images based on combined transform domain[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2093-2103 (in Chinese).

组合变换域下提取载体图像特征矩阵，该算法由于在奇异值矩阵中引入了调控因子，解决了奇异值对几何攻击较敏感的问题，但无法抵抗较大强度的旋转攻击。张天骐等[10]先对彩色图像YCbCr空间下的亮度分量进行Tetrolet变换得到低频系数，对低频系数进行分块非负矩阵分解并通过计算频数质心构造特征矩阵；该算法中零水印特征矩阵的构造方法较为新颖，但在平移和剪切攻击下的鲁棒性欠佳。以上零水印算法抵抗几何攻击的性能均不太理想。针对此问题，Xia等[11]提出一种新的四元数极性复指数变换，并利用其构造二值特征矩阵，该零水印算法在抵抗旋转和缩放攻击方面表现出色，但仍不能抵抗较大程度的平移攻击，且计算复杂度相对较高。

二值图像水印包含的信息量较小，随着版权所有者对水印容量及视觉效果要求的提高，大量以灰度或彩色图像作为原始水印的算法涌现出来，其中绝大部分是非零水印算法[12-17]，但近年来也有少部分研究者提出了双彩色零水印算法[18-19]。胡森等[18]先对载体图像进行Contourlet变换，取变换后的低频系数进行分块，再对子块进行Schur分解，构造鲁棒特征矩阵，并基于加速鲁棒特征(speeded up robust features, SURF)实现受攻击图像的几何校正；该算法安全性高，但无法抵抗边缘信息丢失严重的旋转攻击。Wu等[19]通过对彩色医学图像的R、G、B 3个颜色分量进行DWT、二维经验模态分解、块操作和Schur分解提取特征信息，该算法没有考虑颜色通道之间的整体相关性，其在抵抗平移和剪切攻击方面性能不佳。

针对以上大部分零水印算法水印容量较小的问题，为了同时提高零水印算法抵抗常规攻击和几何攻击的能力，本文充分考虑彩色图像各通道之间的相关性，以四元数理论为基础，结合快速有限剪切波变换(fast finite shearlet transform, FFST)和四元数离散余弦变换(quaternion discrete cosine transform, QDCT)的优势，提出一种基于组合变换域和位平面分解的彩色图像大容量鲁棒零水印算法。对彩色载体图像的R、G、B三通道FFST变换后的低频子带进行分块置乱，利用置乱后相同位置的DCT系数子块构造QDCT系数矩阵，提取每个四元数子块QDCT系数的多符号特征构造多个二值鲁棒特征矩阵，实现高鲁棒、大容量、零水印的嵌入。同时，采用正交拉丁方矩阵置乱及加密原始灰度水印图像，提高了水印的安全性。此外，提取水印时引入ORB(oriented FAST and rotated BRIEF)图像几何校正机制[20]，使得水印算法具有一定的抗几何攻击能力。仿真实验表明，提出的算法可以有效地抵抗常见的图像处理操作和几何攻击，安全性更高。

1 相关工作

1.1 四元数离散余弦变换

四元数是复数的泛化，最早在1843年由数学家Hamilton提出[21]。其基本形式为：$E=a+b\mathrm{i}+c\mathrm{j}+d\mathrm{k}$，其中$a$、$b$、$c$、$d$为实数，i、j、k为虚部。当$a=0$时，$E$是纯四元数。彩色图像可以用纯四元数表示为

$$f(x,y)=f_{\mathrm{R}}(x,y)\mathrm{i}+f_{\mathrm{G}}(x,y)\mathrm{j}+f_{\mathrm{B}}(x,y)\mathrm{k} \tag{1}$$

式中：$f_{\mathrm{R}}(x,y)$、$f_{\mathrm{G}}(x,y)$、$f_{\mathrm{B}}(x,y)$分别为彩色图像在位置(x,y)处的R、G、B 3个颜色分量。显然，四元数将彩色图像的三个通道作为一个整体计算，充分考虑了通道之间的相关性和整体性。

Feng[22]首次在彩色模板匹配中提出QDCT。由于四元数不满足乘法交换律的特性，QDCT分为左边型和右边型。本文采用左边型，其正变换满足：

$$\begin{aligned}C(r,s)=&\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}e(r)\,e(s)\cdot\mu\cdot f(x,y)\cdot N(r,s,x,y)=\\&\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}e(r)\,e(s)\left[\alpha\mathrm{i}+\beta\mathrm{j}+\gamma\mathrm{k}\right]\cdot\left[f_{\mathrm{R}}(x,y)\,\mathrm{i}+\right.\\&\left.f_{\mathrm{G}}(x,y)\mathrm{j}+f_{\mathrm{B}}(x,y)\mathrm{k}\right]\cdot N(r,s,x,y)=\\&C_0(r,s)+C_1(r,s)\mathrm{i}+C_2(r,s)\mathrm{j}+C_3(r,s)\mathrm{k}\end{aligned} \tag{2}$$

其中：

$$N(r,s,x,y)=\cos\left[\frac{\pi(2x+1)r}{2M}\right]\cos\left[\frac{\pi(2y+1)s}{2N}\right] \tag{3}$$

$$\begin{cases}e(r)=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{1}{M}} & r=0\\ \sqrt{\dfrac{2}{M}} & r\neq 0\end{cases}\\ e(s)=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{1}{N}} & s=0\\ \sqrt{\dfrac{2}{N}} & s\neq 0\end{cases}\end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases}C_0(r,s)=-(\alpha\mathrm{DCT}(f_R)+\beta\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{G}})+\gamma\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{B}}))\\ C_1(r,s)=\beta\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{B}})-\gamma\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{G}})\\ C_2(r,s)=-\alpha\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{B}})+\gamma\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{R}})\\ C_3(r,s)=\alpha\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{G}})-\beta\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{R}})\end{cases} \tag{5}$$

式中：$\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{R}})$、$\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{G}})$和$\mathrm{DCT}(f_{\mathrm{B}})$分别为彩色图像的R、G、B颜色分量在点$(x,y)$处的DCT变换系数[23]。

1.2 快速有限剪切波变换

Hauser等[24]于2013年首次提出FFST。由于FFST不存在下采样的过程，与传统小波变换相比，具有平移不变性、定位特性及较高的定向灵敏度[25]。

图像经过FFST变换之后，所得到的低频子图

对噪声、滤波、压缩等常规图像攻击的敏感度较低, 且与原图像大小尺寸一样, 比鲁棒和大容量的水印特征构造具有明显优势。

2　算法描述

2.1　原始灰度水印图像预处理

原始灰度水印 $\boldsymbol{W}$ 的预处理加密步骤如下:

1) 基于 MD5 哈希函数, 利用外部密钥 Key1 生成长度为 $N_W/2$ 的十六进制字符串 $\boldsymbol{H}_1$; 将大小为 $N_W\times N_W$ 的原始灰度水印 $\boldsymbol{W}$ 的 MD5 哈希值定义为 Key2; 把 $\boldsymbol{H}_1$ 和 Key2 串联后的结果作为 SHA-256 哈希函数的输入, 输出长为 N_W 的十六进制字符串, 记作 $\boldsymbol{H}$。

2) 将 $\boldsymbol{H}$ 的每一个字符用 4 位二进制数表示, 并转置成 $4\times N_W$ 位的二进制行向量。将以上行向量以 4 位为一组, 转换成长度为 N_W 的十进制一维数组, 记作 $\boldsymbol{K}$。

3) 将 $\boldsymbol{K}$ 按顺序以 floor(N_W/5) 为一组, 进行按位异或得到中间控制变量 $K_i(i=1,2,3,4,5)$, 从而得到三维指数混沌映射[26](3D exponent chaotic map, 3D-ECM) 的初始值和控制参数, 即

$$\begin{cases} u_0 = \mod(K_1+K_2,256)/256 \\ v_0 = \mod(K_2+K_3,256)/256 \\ w_0 = \mod(K_3+K_4,256)/256 \\ \gamma = 18\times(K_5/256) \\ \lambda = \mathrm{round}(5+(K_4/256)) \end{cases} \tag{6}$$

3D-ECM 的表达式为

$$\begin{cases} u(i+1) = 2^{\lambda}\left(\gamma-u^2(i)+v^2(i)\right)\bmod 1 \\ v(i+1) = 3^{\lambda}\left(\gamma-v^2(i)+w^2(i)\right)\bmod 1 \\ w(i+1) = 5^{\lambda}\left(\gamma-w^2(i)+u^2(i+1)\right)\bmod 1 \end{cases} \tag{7}$$

式中: 系统初值 u_0、v_0、$w_0\in(0,1)$, 控制参数 $\gamma\in(0,18]$、$\lambda\in[5,29]$。3D-ECM 的迭代次数 L 为 $\boldsymbol{K}$ 剩余的 mod (N_W/5) 个十进制数字与 $2N_W$ 的和。

4) 将 3D-ECM 得到的 3 个序列按照 $\{u_i, v_i, w_i, u_{i+1}, v_{i+1}, w_{i+1}, \cdots\}(i=1,2,3,\cdots,L)$ 的顺序构造新的序列 $\boldsymbol{B}$, 并取最后 $2N_W$ 个元素分成等长的两组新序列 $\boldsymbol{B}_1$ 和 $\boldsymbol{B}_2$。表达式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{B}_1 = \boldsymbol{B}(e-N_W+1:e) \\ \boldsymbol{B}_2 = \boldsymbol{B}(e-2N_W+1:e-N_W) \end{cases} \tag{8}$$

式中: e 表示序列 $\boldsymbol{B}$ 的长度。

5)根据有限域构造拉丁方矩阵准则, 同时利用 $\boldsymbol{B}_1$、$\boldsymbol{B}_2$ 各自升序排列之后的索引 $\boldsymbol{Bx}_1$ 和 $\boldsymbol{Bx}_2$, 构造两个正交拉丁方矩阵 $\boldsymbol{L}_1$、$\boldsymbol{L}_2$。将 $\boldsymbol{L}_1$ 与原始水印图像 $\boldsymbol{W}$ 按位异或得到 $\boldsymbol{P}_1$, 结合 $\boldsymbol{L}_1$、$\boldsymbol{L}_2$ 对 $\boldsymbol{P}_1$ 进行拉丁方置乱得到 $\boldsymbol{P}_2$, 最后将 $\boldsymbol{P}_2$ 与 $\boldsymbol{L}_2$ 进行异或得到加密水印图像 $\boldsymbol{W}'$。

2.2　零水印生成算法

如图 1 所示, 零水印生成步骤:

1) 读取大小为 $N_I\times N_I$ 的原始彩色载体图像 $\boldsymbol{I}$, 并将其分解为 R、G、B 3 个通道, 对每一个通道分别进行 l 级 FFST 变换, 获得相应的低频子带 $\boldsymbol{Y}_R$、$\boldsymbol{Y}_G$、$\boldsymbol{Y}_B$。

2) 将获得的低频子带分别进行 8 像素×8 像素非重叠分块, 并使用 (2D logistic adjusted logistic map, 2D-LALM) 系统生成长度为 $N_W\times N_W$ 的随机序列 $\boldsymbol{D}$,

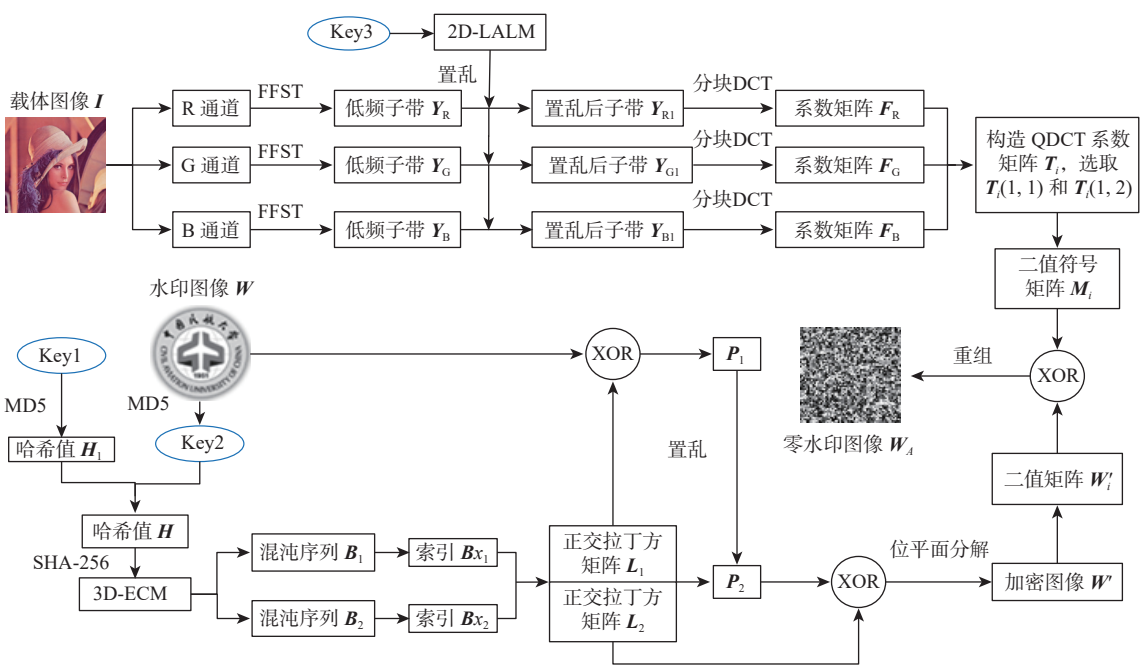


图 1　零水印生成过程

Fig. 1　Generation process of zero watermark

记录其按升序排列的位置向量 $\boldsymbol{I}_{\text{dex}}$。基于 $\boldsymbol{I}_{\text{dex}}$ 对低频子带进行子块随机置乱，得到置乱后的低频子带 $\boldsymbol{Y}_{\text{R1}}$、$\boldsymbol{Y}_{\text{G1}}$、$\boldsymbol{Y}_{\text{B1}}$。2D-LALM 系统表达式：

$$\begin{cases} \bar{x}_{i+1}=\delta(y_i+3)x_i(1-x_i) \\ x_{i+1}=4\bar{x}_{i+1}(1-\bar{x}_{i+1}) \\ \bar{y}_{i+1}=\delta(\bar{x}_{i+1}+3)y_i(1-y_i) \\ y_{i+1}=4\bar{y}_{i+1}(1-\bar{y}_{i+1}) \end{cases} \tag{9}$$

式中：控制参数 $\delta\in(0,1]$，初值 x_0、$y_0\in(0,1)$。把 δ、x_0、y_0 的取值定义为 Key3。

3）对 $\boldsymbol{Y}_{\text{R1}}$、$\boldsymbol{Y}_{\text{G1}}$、$\boldsymbol{Y}_{\text{B1}}$ 进行非重叠分块 DCT 变换，得到 DCT 系数矩阵 $\boldsymbol{F}_{\text{R}}$、$\boldsymbol{F}_{\text{G}}$、$\boldsymbol{F}_{\text{B}}$，根据式 (2) 和式 (5) 分块构造 QDCT 系数矩阵 $\boldsymbol{T}_i$，选取所有子块 $\boldsymbol{T}_i$，在 (1,1) 和 (1,2) 处的 2 个 QDCT 系数，利用其实部和虚部的符号构造成 8 个大小为 $N_{\text{W}}\times N_{\text{W}}$ 的二值符号矩阵 $\boldsymbol{M}_i(i=1,2,3,4,5,6,7,8)$。其中 $\boldsymbol{M}_1\sim\boldsymbol{M}_4$ 和 $\boldsymbol{M}_5\sim\boldsymbol{M}_8$ 分别是由 $\boldsymbol{T}_i(1,1)$ 和 $\boldsymbol{T}_i(1,2)$ 处的 1 个实部和 3 个虚部构造的符号矩阵。

4）将加密水印图像 $\boldsymbol{W}'$进行位平面分解，并将其从低到高分解排列为$\boldsymbol{W}_i'(i=1,2,3,4,5,6,7,8)$。与 $\boldsymbol{M}_i(i=1,2,3,4,5,6,7,8)$ 分别进行异或得到 $\boldsymbol{W}_{Ai}(i=1,2,3,4,5,6,7,8)$，然后将其由低到高进行位平面重组，最终生成认证的灰度零水印图像 $\boldsymbol{W}_A$。

5）将灰度零水印 $\boldsymbol{W}_A$ 保存到第三方的水印注册中心，同时保存密钥 Key1、Key2 和 Key3。这样，一个完整的零水印生成过程即完成。

2.3 零水印检测算法

对待认证图像 $\boldsymbol{I}'$进行认证时，需要进行零水印的检测操作，如图 2 所示，具体步骤：

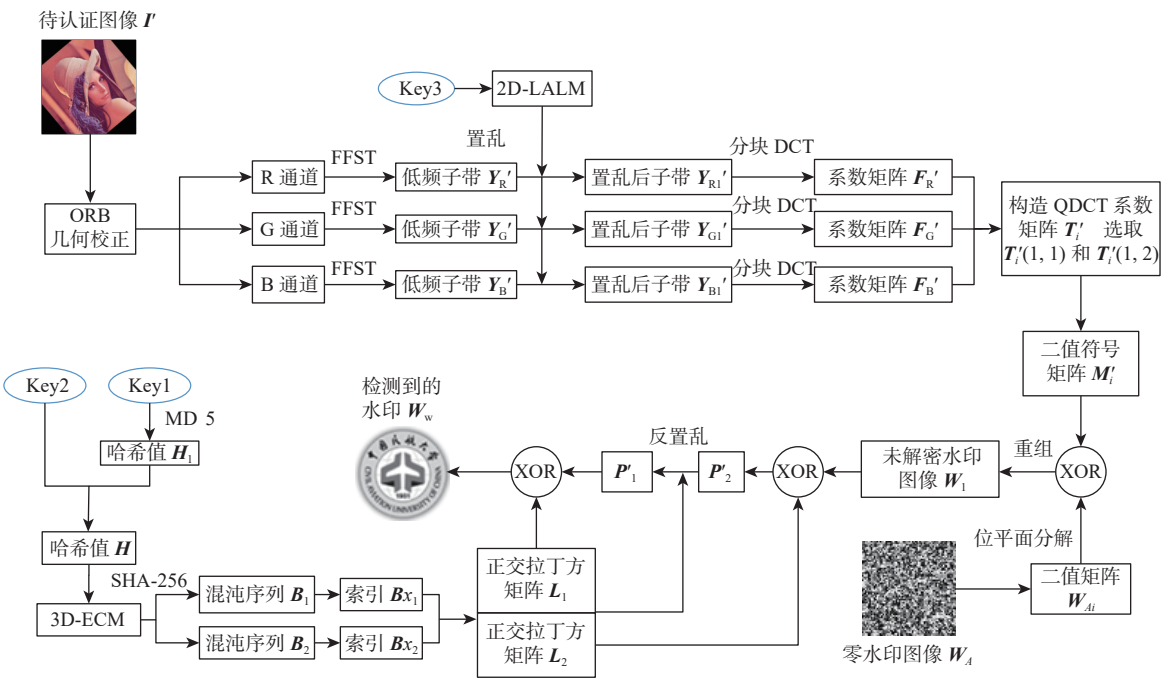


图 2 零水印检测过程

Fig. 2 Detection process of zero watermark

1）对待认证图像 $\boldsymbol{I}'$使用 ORB 算法进行图像几何失真校正，使用校正后的图像和零水印生成算法中的密钥 Key3，按照零水印生成算法中的步骤 1)～3)，得到 8 个二值特征矩阵 $\boldsymbol{M}_i'(i=1,2,3,4,5,6,7,8)$。

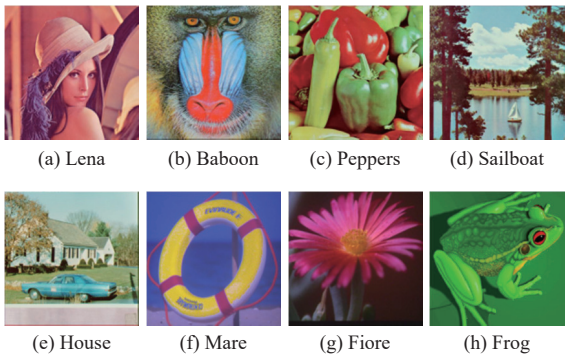
2）从水印注册中心取出之前存放的认证零水印图像 $\boldsymbol{W}_A$，将 $\boldsymbol{W}_A$ 的 8 个位平面 $\boldsymbol{W}_{Ai}$ 由低到高依次与 $\boldsymbol{M}_i'(i=1,2,3,4,5,6,7,8)$ 进行异或，最后通过位平面重组得到未解密的水印图像 $\boldsymbol{W}_1$。

3）参照水印预处理过程，利用密钥 Key1 和 Key2 获得两个正交拉丁方矩阵 $\boldsymbol{L}_1$ 和 $\boldsymbol{L}_2$，对 $\boldsymbol{W}_1$ 按照水印加密的逆过程进行解密，得到最终检测出的水印 $\boldsymbol{W}_{\text{w}}$。

3 仿真实验

实验仿真在 MATLAB2020b 环境下进行，测试彩色载体图像选自 CVG-UGR 数据库[27] 和 USC-SIPI 数据库[28] 中的 8 幅 24 位彩色图像，如图 3 所示，其大小都是 512 像素×512 像素。选取如图 4(a)、图 4(b) 所示的大小为 64 像素×64 像素的灰度图像作为原始水印；图 4(c) 和图 4(d) 是原始水印预处理之后的图像。

算法测试中，相关密钥参数分别设置为：64 位十六进制外部密钥 Key1=6b679b3c77826d30a79e612114a8c18df984c176f4e529f684748ad052241b17，原始灰度水印图像的 MD5 哈希值 Key2=1cb9720c04fe3



(a) Lena (b) Baboon (c) Peppers (d) Sailboat

(e) House (f) Mare (g) Fiore (h) Frog

图 3　彩色载体图像

Fig. 3　Color carrier images



(a) 校徽 (b) 摄影师

(c) 校徽预处理后 (d) 摄影师预处理后

图 4　原始水印和其预处理图像

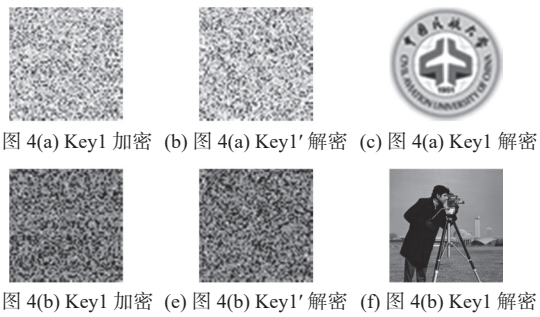
Fig. 4　Original watermarks and their preprocessed images

b99b18ec0417558e889, 2D-LALM 系统相关密钥 Key3=(δ, x_0, y_0)=(0.884 1,0.874 5,0.583 9)。采用归一化相关系数 (normalize correlation, NC) 来衡量算法的鲁棒性, 其取值范围是 [0,1], NC 值越接近 1, 表明算法的鲁棒性越强[28]。

3.1　安全性和唯一性测试

本文算法的安全性主要依赖于水印预处理过程中使用的外部密钥 Key1、由原始水印生成的密钥 Key2, 以及零水印生成算法中低频子带的随机子块置乱密钥 Key3。即使零水印生成算法完全公开, 攻击者若不具有正确的密钥 (假设仅有一个密钥中的 1 位是错误的), 其提取出的零水印图像也是错误的。本节仅测试外部密钥 Key1 对本文算法安全性能的影响。

根据水印预处理过程中外部密钥的特性, 可以随机改变 Key1 的任何 1 位作为错误密钥进行零水印检测。测试中选择将 Key1 的最后 1 位由 7 变为 1, 记作 Key1′。选取如图 4(a) 和图 4(b) 所示的两幅灰度水印图像使用 Key1 分别进行加密, 得到如图 5(a) 和图 5(d) 所示的加密图像。使用错误密钥 Key1′分别对加密图像进行解密, 得到解密图像如图 5(b) 和图 5(e) 所示。可以看出使用错误密钥不能正确解密, 而使用正确的原始密钥 Key1 可以得到无失真的解密图像, 如图 5(c) 和图 5(f) 所示。



(a) 图 4(a) Key1 加密 (b) 图 4(a) Key1′ 解密 (c) 图 4(a) Key1 解密

(d) 图 4(b) Key1 加密 (e) 图 4(b) Key1′ 解密 (f) 图 4(b) Key1 解密

图 5　加密和解密图像

Fig. 5　Encrypted and decrypted images

虽然错误密钥 Key1′与正确密钥 Key1 仅相差 1 位, 但其完全无法解密出正确的水印图像。值得注意的是, 以上分析仅是基于密钥 Key1 进行讨论的, 本文还使用了密钥 Key2 和 Key3, 这足以证明本算法的安全性极高。

零水印技术并没有把水印信息嵌入载体图像, 理论上不同载体图像构造的零水印之间应该具有明显差异, 即零水印应具有唯一性。由于本文算法中原始水印图像为灰度图像, 因此本文使用所构造的灰度级零水印图像对 8 个位平面各自 NC 值的平均值进行唯一性测试, 测试结果如表 1 所示。

从表 1 中的数据可以看出, 8 幅彩色图像构

表 1　唯一性测试 (NC 值)

Table 1　Uniqueness test (NC 值)

图像名称	Lena	Baboon	Peppers	Sailboat	House	Mare	Fiore	Frog
Lena	1.000 0	0.571 0	0.621 0	0.580 5	0.582 5	0.549 8	0.689 3	0.501 5
Baboon	0.571 0	1.000 0	0.601 1	0.571 2	0.614 8	0.517 3	0.544 4	0.592 8
Peppers	0.621 0	0.601 1	1.000 0	0.604 3	0.631 3	0.532 2	0.607 5	0.588 8
Sailboat	0.580 5	0.571 2	0.604 3	1.000 0	0.612 2	0.531 9	0.577 3	0.580 1
House	0.582 5	0.614 8	0.631 3	0.612 2	1.000 0	0.509 8	0.519 2	0.634 4
Mare	0.657 2	0.598 8	0.652 9	0.633 1	0.609 1	1.000 0	0.586 3	0.508 0
Fiore	0.689 3	0.544 4	0.607 5	0.577 3	0.519 2	0.586 3	1.000 0	0.452 5
Frog	0.501 5	0.592 8	0.588 8	0.580 1	0.634 4	0.508 0	0.452 5	1.000 0

造的灰度级零水印之间的相似度均小于0.689 3，平均值为0.571 8。因此，可以得出不同的彩色载体图像所构造的零水印之间相似度低，表明利用本文算法所构造的零水印具有良好的唯一性。

3.2 鲁棒性测试

算法的鲁棒性测试使用原始灰度水印图像和被检测到的灰度水印图像之间的NC值来衡量，这里选择图4(a)作为水印图像进行测试。

3.2.1 常规攻击

添加噪声、滤波处理，以及对图像进行不同形式的压缩等均是常规图像处理攻击的主要手段。为了测试本算法在以上类型攻击下的鲁棒性，下面分别对图3所示的8幅图像进行测试，具体攻击类型、强度和测试结果如表2所示。

表2 常规攻击测试结果

Table 2 Test results of conventional attacks

攻击类型及强度	NC值							
	Lena	Baboon	Peppers	Sailboat	House	Mare	Fiore	Frog
高斯噪声(0.1)	0.981 0	0.983 4	0.989 0	0.976 2	0.969 5	0.982 5	0.974 7	0.959 7
椒盐噪声(0.1)	0.991 9	0.989 7	0.995 3	0.984 0	0.969 1	0.990 7	0.983 9	0.965 7
中值滤波(5像素×5像素)	0.998 2	0.996 2	0.999 1	0.995 5	0.994 5	0.996 8	0.996 1	0.998 2
维纳滤波(5像素×5像素)	0.999 2	0.999 1	0.999 8	0.999 1	0.998 8	0.999 2	0.999 4	0.998 6
JPEG压缩(10)	0.980 2	0.982 5	0.992 7	0.976 1	0.965 9	0.984 6	0.972 1	0.973 3
JPEG2000压缩(90)	0.996 5	0.992 7	0.997 3	0.991 8	0.983 6	0.988 8	0.995 8	0.985 5

从表2看出，本文算法在面对高斯、椒盐两种噪声攻击时所提取水印的NC值均高于0.959 7，表明本算法有较强的抗噪声能力。本文算法在面对中值和维纳两种常见的滤波攻击时，提取水印的NC值均在0.99以上，表明本文算法能够有效地抵抗滤波攻击。同时，本文算法在两种不同方式的压缩攻击下，提取水印平均NC值为0.985 2，说明其在抵抗压缩攻击方面的鲁棒性具有一定优势。由于本文算法在零水印生成阶段是联合FFST和QDCT的低频特性构造认证零水印，彩色图像的以上低频信息对添加噪声、滤波和压缩等常规攻击具有较低的敏感性，故所提算法对以上常规攻击表现出较优越的抵抗性能。

3.2.2 几何攻击

针对旋转、缩放、平移及剪切4种典型几何攻击，本文算法分别对图3所示的8幅图像进行不同种类、不同强度的攻击测试，具体参数选择及测试结果如表3所示。

表3 几何攻击测试结果

Table 3 Test results of geometric attacks

攻击类型及强度	NC值							
	Lena	Baboon	Peppers	Sailboat	House	Mare	Fiore	Frog
旋转(10°)	0.959 4	0.987 7	0.971 1	0.974 6	0.972 4	0.976 3	0.977 2	0.956 6
旋转(90°)	0.997 5	0.999 2	0.998 1	0.997 5	0.999 1	0.999 5	0.997 9	0.994 3
缩小(0.5)	0.993 8	0.998 0	0.998 8	0.997 3	0.994 7	0.995 8	0.992 0	0.980 3
放大(2)	0.996 0	0.998 7	0.997 2	0.996 5	0.996 9	0.998 6	0.995 1	0.997 4
平移(向上10行)	0.998 4	0.996 7	0.995 8	0.993 5	0.995 5	0.996 6	0.994 7	0.988 2
平移(向左10列)	0.968 7	0.992 2	0.989 7	0.984 3	0.985 1	0.991 0	0.989 0	0.971 1
剪切(左上角1/16)	0.972 2	0.988 0	0.980 8	0.983 0	0.975 8	0.981 2	0.980 8	0.968 9
剪切(右上角1/16)	0.982 6	0.988 3	0.986 9	0.984 9	0.979 7	0.980 9	0.977 2	0.962 2
剪切(中心1/16)	0.979 2	0.984 6	0.980 8	0.981 0	0.983 6	0.990 5	0.966 8	0.972 8

从表3中的数据明显看出，本文算法在面对不同种类、不同强度的几何攻击时，提取水印NC值均高于0.95，说明其具有良好的鲁棒性。主要原因在于本文算法在零水印检测前，使用ORB算法对待认证图像进行了几何失真校正，使其在旋转、缩放和平移攻击测试下的鲁棒性较优越。特别地，当旋转角度为10°时，除Lena图像和Frog图像外，其余6幅彩色图像提取水印的NC值均大于0.97。缩放攻击下，8幅载体图像的NC值均接近于1，表现极佳。面对平移和剪切攻击时，提取水印的NC值也都大于0.96。由此可知，本文算法具有较强的抗几何攻击能力。

3.2.3　组合攻击

为了进一步测试本文算法的鲁棒性, 本文以图 3(b)(Lena) 和图 3(b)(Baboon) 作为测试图像, 同时选择图 4(a) 和图 4(b) 作为灰度水印图像, 进行了 6 种组合的攻击测试。组合攻击参数设置如表 4 所示, 组合攻击具体测试结果如表 5 所示。

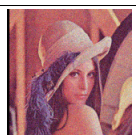
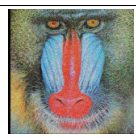
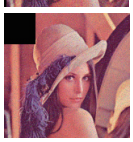
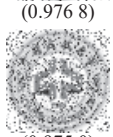
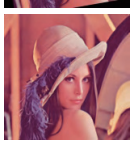
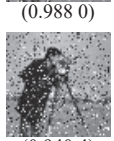
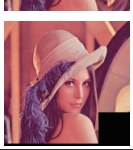
表 4　组合攻击类型及参数

Table 4　Types and parameters of combined attacks

序号	攻击类型(参数)
1	高斯噪声(方差0.05)+平移攻击(右移10列)
2	椒盐噪声(强度0.05)+剪切攻击(左上角1/16)
3	维纳滤波(5像素×5像素)+旋转攻击(逆时针10°)
4	中值滤波(7像素×7像素)+JPEG2000压缩(Q=90)
5	JPEG压缩(Q=10)+剪切攻击(中心1/16)
6	剪切攻击(右下角1/16)+平移(上移10行)

表 5　组合攻击测试结果

Table 5　Test results of combined attacks

序号	攻击后图像		检测到水印图像(NC值)	
1			 (0.975 8)	 (0.967 2)
2			 (0.976 8)	 (0.970 9)
3			 (0.975 0)	 (0.974 3)
4			 (0.995 7)	 (0.988 0)
5			 (0.967 0)	 (0.940 4)
6			 (0.980 3)	 (0.979 0)

从表 5 中数据可以看出, 两幅载体图像经历组合攻击后, 视觉质量均受到严重破坏, 但从中提取出的灰度水印仍基本清晰可见。例如, 当攻击序号为 5 时, 原始 Lena 和 Baboon 图像均已丢失中心区域主要信息, 此时提取水印的 NC 值依旧在 0.94 以上, 检测到的灰度水印信息基本清晰可见, 因此仍能有效地判断原始彩色载体图像的版权归属。

3.3　FFST 和 ORB 对算法鲁棒性的影响分析

3.3.1　FFST 对算法鲁棒性的影响

为了验证 FFST 对本文算法抵抗常规攻击的鲁棒性的影响, 分别对 8 幅测试图像进行不同攻击参数的高斯噪声 (方差: 0.1, 0.3, 0.5)、椒盐噪声 (强度: 0.1, 0.3, 0.5)、中值滤波 (窗口大小: 3 像素×3 像素, 5 像素×5 像素, 7 像素×7 像素)、维纳滤波 (窗口大小: 3 像素×3 像素, 5 像素×5 像素, 7 像素×7 像素) 和 JPEG 压缩 (压缩因子 Q: 10, 20, 50) 攻击测试, 具体测试结果如表 6 所示 (针对某一种攻击, 表中所列 NC 值为 8 幅图像测试结果的平均 NC 值)。

表 6　FFST 消融实验

Table 6　Ablation experiment of FFST

分解层数	平均NC值				
	高斯噪声	椒盐噪声	中值滤波	维纳滤波	JPEG压缩
	0.865 8	0.871 4	0.961 6	0.972 0	0.903 4
1	0.867 7	0.873 5	0.965 4	0.979 6	0.903 9
2	0.898 6	0.906 7	0.985 6	0.995 0	0.942 3
3	0.966 9	0.971 2	0.996 1	0.999 2	0.987 6

从表 6 可以看出, 随着分解层数的增加, 算法对于噪声、滤波和 JPEG 压缩的抵抗性有一定的提高, 说明 FFST 的选择及分解层数的设置对整体算法鲁棒性的提高至关重要。

3.3.2　ORB 对算法鲁棒性的影响

为了验证 ORB 对本文算法抵抗几何攻击的鲁棒性影响, 分别对 8 幅测试图像进行不同攻击参数的旋转 (角度: 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°)、缩放 (倍数: 0.25, 0.5, 2, 4) 和平移 (上、下移动行数: 10, 20, 30; 左、右移动列数: 10, 20, 30) 攻击测试, 具体测试结果如表 7 所示 (针对某一类攻击, 表中所列 NC 值为 8 幅图像测试结果的平均 NC 值)。

表 7　ORB 消融实验

Table 7　Ablation experiment of ORB

是否使用ORB	平均NC值		
	旋转	缩放	平移
否	0.851 2	0.997 9	0.921 2
是	0.963 3	0.998 5	0.985 5

从表 7 可以看出, 在水印提取前, 使用 ORB 算法对待认证图像进行几何校正后, 本文算法对于抵抗旋转和平移攻击的性能有显著提升, 说明了 ORB 几何校正环节的引入对整体算法性能改进的有效性。

3.4　鲁棒性对比测试

为了突出本文算法的整体优势, 本文选取不同

的算法进行对比测试。其中，文献[5,7,11,19,29-30]是以二值图像作为原始水印的零水印算法，包含基于多数投票模式和超混沌加密的零水印算法[29]和基于快速四元数的广义极性复指数变换的零水印算法[30]等；文献[17]则是以灰度级图像作为原始水印的“嵌入式”非盲水印算法。

实验中，对比测试包含24种不同参数的常规攻击和几何攻击，选择图4(a)作为水印图像进行测试。表8中的NC值为面对某一种攻击下，数据库中8幅彩色图像测试结果的平均NC值。由于文献[7]提出的算法使用了两幅二值图像作为原始水印，本文为了方便比较，将提取的两幅水印的平均NC值作为展示结果。本文算法与以上7种不同水印算法的对比测试结果如表8所示。

表8 本文算法与其他算法的鲁棒性对比测试结果

Table 8 Comparison of robustness between proposed algorithm and other algorithms

算法	NC值											
	高斯噪声(0.05)	高斯噪声(0.1)	椒盐噪声(0.05)	椒盐噪声(0.1)	中值滤波(3像素×3像素)	中值滤波(5像素×5像素)	维纳滤波(3像素×3像素)	维纳滤波(5像素×5像素)	JPEG压缩(10)	JPEG2000压缩(90)	旋转(10°)	旋转(20°)
文献[5]	0.969 7	0.953 3	0.983 3	0.973 6	0.997 3	0.994 6	0.998 6	0.996 7	0.994 5	0.987 8	0.764 3	0.705 9
文献[7]	0.893 9	0.873 5	0.916 8	0.908 5	0.972 9	0.958 0	0.965 8	0.961 4	0.891 8	0.941 3	0.815 0	0.799 2
文献[11]	0.986 7	0.970 7	0.997 4	0.981 3	0.997 4	0.997 4	1.000 0	0.997 4	0.992 1	0.992 1	1.000 0	1.000 0
文献[17]	0.839 2	0.803 8	0.894 4	0.859 0	0.998 0	0.983 4	0.998 5	0.981 8	0.908 5	0.927 9	0.816 5	0.779 4
文献[19]	0.978 4	0.997 8	0.951 5	0.996 4	0.995 7	0.997 0	0.999 3	0.998 9	0.989 0	0.992 6	0.689 2	0.752 0
文献[29]	0.973 9	0.957 4	0.980 2	0.972 8	0.998 1	0.994 9	0.998 6	0.996 4	0.974 3	0.991 1	0.860 6	0.761 6
文献[30]	0.989 6	0.992 9	1.000 0	0.995 8	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.996 3	0.998 8	0.999 6	0.999 6
本文算法	0.985 7	0.981 0	0.994 3	0.991 7	0.999 0	0.998 2	0.999 8	0.999 2	0.980 6	0.996 4	0.959 5	0.950 1

算法	NC值											平均NC值
	旋转(40°)	缩小(0.5)	放大(2)	平移(向上10行)	平移(向下10行)	平移(向左10列)	平移(向右10列)	剪切(左上角1/16)	剪切(右上角1/16)	剪切(左下角1/16)	剪切(右下角1/16)	剪切(中心1/16)	
文献[5]	0.685 5	0.998 3	0.999 5	0.927 7	0.919 6	0.866 7	0.884 5	0.952 1	0.947 6	0.955 4	0.948 0	0.938 0	0.930 9
文献[7]	0.784 6	0.973 8	0.979 5	0.865 8	0.867 6	0.863 1	0.859 6	0.967 7	0.957 6	0.955 8	0.964 0	0.956 0	0.912 1
文献[11]	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.898 3	0.915 3	0.886 5	0.860 4	0.968 7	0.970 7	0.976 0	0.976 1	0.962 5	0.972 3
文献[17]	0.768 9	0.993 5	0.996 6	0.845 0	0.845 4	0.846 5	0.792 4	0.593 4	0.791 7	0.860 6	0.758 7	0.956 7	0.871 1
文献[19]	0.791 2	0.998 0	0.999 2	0.996 9	0.986 5	0.969 2	0.910 5	0.846 2	0.833 8	0.805 1	0.763 2	0.872 3	0.922 8
文献[29]	0.596 2	0.998 9	0.999 7	0.927 3	0.924 2	0.867 7	0.872 4	0.952 3	0.946 9	0.954 1	0.946 5	0.935 3	0.932 5
文献[30]	0.999 2	1.000 0	1.000 0	0.936 0	0.968 5	0.891 3	0.947 0	0.891 5	0.936 2	0.947 1	0.925 1	0.833 5	0.969 4
本文算法	0.952 4	0.995 3	0.997 0	0.997 9	0.996 6	0.970 4	0.978 5	0.972 4	0.982 5	0.978 9	0.978 0	0.980 0	0.983 9

从表8中的测试结果可看出，在抵抗常规攻击时，本文算法明显优于对比文献[7,17]，略优于文献[30]。而相较于文献[5,11,19]，本文算法仅在个别攻击下的NC值略差，但整体上优于以上3篇对比文献。例如，文献[5]仅在JPEG压缩攻击下略优于本文算法；文献[11]在滤波和JPEG压缩攻击下略优于本文算法；文献[19]在高强度噪声和JPEG压缩攻击下略优于本文算法；文献[30]抵抗常规攻击性能稍优于本文算法，原因在于其使用了快速四元数的广义极性复指数变换构造二值特征矩阵，图像的极性复指数变换属于图像全局矩的一类，而图像的全局矩往往对常规图像处理攻击具有较强的稳健性。在旋转攻击下，本文算法明显优于除文献[11,30]之外的其余5篇对比文献。原因在于文献[11,30]都是利用四元数图像矩构造二值特征矩阵，该图像矩具有比较优越的旋转不变性，使其能抵抗不同程度的旋转抗击。在缩放攻击下，本文算法NC值除明显高于文献[7]之外，与其余6篇对比文献均相差较小，抵抗缩放攻击性能旗鼓相当。但针对不同强度的平移和剪切攻击，本文算法的鲁棒性测试结果要明显优于7篇对比文献，这也使得本文算法在24种不同攻击下的总体平均NC值要明显高于其余7篇对比文献。

综上分析表明，本文提出的灰度级零水印算法在鲁棒性能方面表现较好，相比其他7篇文献更具有整体优势。

3.5 水印容量对比测试

一个理想的零水印算法需要在保证一定鲁棒性的前提下尽量提高水印容量[13]。表9为本文算法与上述7篇文献水印容量的对比结果。

表 9　水印容量对比结果

Table 9　Comparison of watermark capacity

算法	水印图像/bits	载体图像/像素	水印容量/(bits·像素$^{-1}$)
文献[5]	64×64	512×512	0.015 6
文献[7]	36×36+64×64	512×512×3	0.006 9
文献[11]	32×32	256×256×3	0.005 2
文献[17]	96×96×8	1 024×1 024×3	0.023 4
文献[19]	32×32×8×3	512×512×3	0.031 3
文献[29]	64×64	512×512×3	0.005 2
文献[30]	64×64	512×512×3	0.005 2
本文算法	64×64×8	512×512×3	0.041 7

从表 9 中可以看出, 本文水印容量明显高于其余 7 篇对比文献。在彩色载体图像大小相同的情况下, 本文算法的水印容量要比文献 [7,29-30] 高出一个量级。即便文献 [19] 使用的是彩色水印, 其水印容量也低于本文算法的水印容量。文献 [17] 使用的载体和水印图像都比本文算法使用的图像尺寸大, 但文献 [17] 的水印容量仅为本文的 1/2 左右。综上所述, 本文算法综合考虑鲁棒性和水印容量之间的制约关系, 在提高鲁棒性的同时, 相较于以上所提文献, 能嵌入更大容量的水印信息, 更具有实际意义。

3.6　时效性对比测试

时效性也是衡量算法优劣的一个重要指标。表 10 为相同测试环境下, 本文算法与上述对比文献中的 6 篇零水印算法的运行时间比较结果。

表 10　时效性测试

Table 10　Timeliness test　　s

算法	水印生成时间	水印检测时间	总时间
文献[5]	0.202 0	0.096 0	0.298 0
文献[7]	59.075 0	0.272 0	59.347 0
文献[11]	15.267 0	14.906 0	30.173 0
文献[19]	2.911 0	1.837 0	4.748 0
文献[29]	1.846 0	0.201 0	2.047 0
文献[30]	9.196 0	8.998 0	18.194 0
本文算法	3.707 0	3.688 0	7.395 0

从表 10 中可看出, 本文算法在时效性上明显优于文献 [7,11,30], 但不及其余 3 篇文献, 原因在于: 文献 [11,30] 均是基于图像四元数矩构造零水印, 同文献 [7] 需要训练 DCNN 网络类似, 算法计算复杂度较高。文献 [5] 仅在空域下通过均值比较简单地完成 64 像素×64 像素大小的二值零水印的生成与检测, 时效性最佳。本文算法是在 FFST-QDCT 组合变换域下完成零水印的生成与检测, 算法中多级 FFST 变换的选用和分块 QDCT 系数的构造, 是本文算法时效性不及文献 [19,29] 的主要因素。但是, 本文正是以牺牲相对合理的运行时间, 来换取大容量零水印算法的整体安全性和鲁棒性的大幅度提高。综上所述, 本文算法在保障安全性、鲁棒性的同时, 较其余几篇对比文献具有合理的时效性。

4　结　论

1) 本文算法结合图像 FFST 低频子带的平移不变性和 QDCT 系数矩阵的超复数特性, 在组合变换域内利用四元数低频系数的多符号稳定性和图像位平面分解技术, 实现了原始灰度级大容量水印图像的可靠嵌入。

2) 本文算法在水印预处理时, 同时采用 MD5 和 SHA-256 哈希函数生成 3D-ECM 混沌系统的初值和控制参数, 进而获得构造正交拉丁方置乱及扩散矩阵 $\boldsymbol{L}_1$ 和 $\boldsymbol{L}_2$ 所需的混沌序列, 拓展了算法的密钥空间, 并保证了该算法的较高的安全性。

3) 本文算法可以有效抵抗添加噪声、滤波、图像压缩、剪切等常规图像处理的攻击。同时, 在零水印检测之前, 使用 ORB 算法校正待认证图像几何失真, 增强了算法抵抗旋转、缩放、平移等几何攻击的能力。

参考文献 (References)

[1] SHI H, LI Y N, HU B Y, et al. A robust and secure zero-watermarking copyright authentication scheme based on visual cryptography and block G-H feature[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(26): 38019-38051.

[2] HAI T, LI C M, MOHAMAD ZAIN J, et al. Robust image watermarking theories and techniques: a review[J]. Journal of Applied Research and Technology, 2014, 12(1): 122-138.

[3] NIU P P, WANG L, WANG F, et al. Fast quaternion log-polar radial harmonic Fourier moments for color image zero-watermarking[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2022, 64(5): 537-568.

[4] 温泉, 孙锬锋, 王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214-216.
WEN Q, SUN T F, WANG S X. Concept and application of zero-watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216(in Chinese).

[5] 熊祥光. 空域强鲁棒零水印方案[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 160-175.
XIONG X G. A zero watermarking scheme with strong robustness in spatial domain[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1): 160-175(in Chinese).

[6] GHADI M, LAOUAMER L, NANA L, et al. A novel zero-watermarking approach of medical images based on Jacobian matrix model[J]. Security and Communication Networks, 2016, 9(18): 5203-5218.

[7] 赵彦霞, 王熙照. 基于 SVD 和 DCNN 的彩色图像多功能零水印算法[J]. 山东大学学报 (工学版), 2018, 48(3): 25-33.

ZHAO Y X, WANG X Z. Multipurpose zero watermarking algorithm for color image based on SVD and DCNN[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2018, 48(3): 25-33(in Chinese).

[8] JIANG F F, GAO T G, LI D. A robust zero-watermarking algorithm for color image based on tensor mode expansion[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(11): 7599-7614.

[9] 吴德阳, 赵静, 汪国平, 等. 一种基于改进奇异值和子块映射的图像零水印技术[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2010002.
WU D Y, ZHAO J, WANG G P, et al. An image zero watermarking technology based on ameliorated singular value and subblock mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2010002(in Chinese).

[10] 张天骐, 叶绍鹏, 刘鉴兴, 等. 基于彩色图像 Tetrolet 变换的频数质心零水印算法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(1): 41-48.
ZHANG T Q, YE S P, LIU J X, et al. Frequency centroid zero watermarking algorithm based on Tetrolet transform of color image[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(1): 41-48(in Chinese).

[11] XIA Z Q, WANG X Y, WANG C P, et al. Novel quaternion polar complex exponential transform and its application in color image zero-watermarking[J]. Digital Signal Processing, 2021, 116: 103130.

[12] CHEN S Y, SU Q T, SUN Y H, et al. A blind color image watermarking algorithm using the energy concentration principle of Hadamard matrix[J]. Optik, 2022, 249: 168231.

[13] SU Q T, LIU D C, SUN Y H. A robust adaptive blind color image watermarking for resisting geometric attacks[J]. Information Sciences, 2022, 606: 194-212.

[14] 叶绍鹏, 张天骐, 柏浩钧, 等. 基于 Baker 映射与时空混沌相结合的 CT-QR 域双彩色鲁棒盲水印算法[J]. 信号处理, 2021, 37(5): 843-853.
YE S P, ZHANG T Q, BAI H J, et al. Dual-color robust blind watermarking algorithm in CT-QR domain based on baker map and spatio-temporal chaos[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(5): 843-853(in Chinese).

[15] 刘得成, 苏庆堂, 袁子涵, 等. 结合汉明码和图像矫正的彩色图像盲水印[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(5): 1138-1146.
LIU D C, SU Q T, YUAN Z H, et al. Blind color image watermarking method combining Hamming code with image correction[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(5): 1138-1146(in Chinese).

[16] WANG K S, GAO T G, YOU D T, et al. A secure dual-color image watermarking scheme based 2D DWT, SVD and Chaotic map[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(5): 6159-6190.

[17] ABDULRAHMAN A K, OZTURK S. A novel hybrid DCT and DWT based robust watermarking algorithm for color images[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(12): 17027-17049.

[18] 胡森, 吴德阳, 仲美玉, 等. 基于 SURF 和半色调映射加密的彩色零水印算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2010017.
HU S, WU D Y, ZHONG M Y, et al. Color zero-watermarking algorithm based on SURF and halftone mapping encryption[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2010017(in Chinese).

[19] WU D Y, WANG M M, ZHAO J, et al. Color zero-watermarking algorithm for medical images based on BEMD-schur decomposition and color visual cryptography[J]. Security and Communication Networks, 2021, 2021: 7081194.

[20] RUBLEE E, RABAUD V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]// 2011 International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2011: 2564-2571.

[21] HAMILTON W R, HAMILTON W E, EVERETT J D, et al. Elements of quaternions[M]. London: Longmans, Green, & co. , 1866.

[22] FENG W, HU B. Quaternion discrete cosine transform and its application in color template matching[C]// 2008 Congress on Image and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2008: 252-256.

[23] 崔滨. 融合四元数视觉特征的彩色图像水印算法研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2021: 9-11.
CUI B. Research on color image watermarking algorithm with quaternion visual features[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2021: 9-11(in Chinese).

[24] HÄUSER S, STEIDL G. Convex multiclass segmentation with shearlet regularization[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2013, 90(1): 62-81.

[25] TAN L, YU X. Medical image fusion based on fast finite shearlet transform and sparse representation[J]. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2019, 2019: 3503267.

[26] LIU H J, WANG X Y, KADIR A. Constructing chaos-based hash function via parallel impulse perturbation[J]. Soft Computing, 2021, 25(16): 11077-11086.

[27] University of Granada, Computer Vision Group (2002) CVG-UGR Image Database[EB/OL]. (2014-03-13)[2022-04-23] http://decsai.ugr.es/cvg/dbimagenes/c512.php.

[28] 胡坤, 李聪, 胡建平, 等. 基于 BEMD 与 DCT 的彩色图像多重水印鲁棒算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 165-176.
HU K, LI C, HU J P, et al. Robust multiple watermarking algorithm for color image via BEMD and DCT[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 165-176(in Chinese).

[29] KANG X B, LIN G F, CHEN Y J, et al. Robust and secure zero-watermarking algorithm for color images based on majority voting pattern and hyper-chaotic encryption[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(1): 1169-1202.

[30] YANG H Y, QI S R, NIU P P, et al. Color image zero-watermarking based on fast quaternion generic polar complex exponential transform[J]. Signal Processing: Image Communication, 2020, 82: 115747.

A large-capacity zero-watermarking algorithm for color images based on combined transform domain

HAN Shaocheng[1,*], LIU Huan[2]

(1. Engineering Technology Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In view of the small watermark embedding capacity and poor robustness against geometric attacks in most of the existing zero-watermarking schemes for color images, a robust zero-watermarking algorithm with a large capacity based on combined transform domain and bit-plane decomposition was proposed. Firstly, the R, G, and B channels of a color carrier image were respectively subjected to fast finite shearlet transform (FFST), and each low-frequency sub-band after FFST was processed by non-overlapping blocking and scrambling. The block discrete cosine transform (DCT) coefficients of each sub-band after the scrambling were used to construct the quaternion discrete cosine transform (QDCT) coefficient matrices, and then two low-frequency coefficients were selected from each QDCT coefficient matrix. Eight binary robust feature matrices were constructed according to the sign polarities of the real parts and the imaginary parts from the above two coefficients. Finally, the gray-level watermark image scrambled and encrypted by the orthogonal Latin squares matrices was decomposed by bits. The eight binary bit-planes after decomposition were used for XOR operation with the above binary robust feature matrices and recombined to obtain the final gray-level authentication zero-watermark. In addition, before the watermark detection, the image to be authenticated was geometrically corrected by the oriented FAST and rotated BRIEF (ORB) algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm has high watermark embedding capacity and security, and it is highly robust to both conventional geometric and non-geometric attacks.

Keywords: zero-watermarking; color image; gray-level watermark; combined transform domain; bit-plane decomposition

Received: 2023-01-04; **Accepted**: 2023-04-22; **Published Online**: 2023-05-18 00:00

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230517.1504.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62172418); Key Project of Tianjin Applied Basic Research Multi-investment Fund (21JCZDJC00830)

* **Corresponding author**. E-mail: schan_cauc2012@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0578

一种基于动态信息迭代的系统群组维修规划方法

杨力[1]，陈懿[1]，高凯烨[2]，马小兵[1,*]，赵宇[1]

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院，北京 100191；2. 北京信息科技大学 经济管理学院，北京 100096)

摘 要：可用度是衡量设备系统服役效能的重要指标，目前大部分面向系统可用度优化的群组维修方法均为静态框架，无法充分利用健康状态信息实时高效调整维修计划。基于此，提出了一种考虑动态信息迭代机制的智能群组维修规划方法。该方法充分兼容突发型和退化型等典型系统故障分布特点，设计耦合预防性计划维修和机会维修的两级群组维修方案，并根据每次成组时的各部件实时状态-年龄信息，迭代更新下一次成组时间和需维修部件序列。针对飞机群组部件的算例验证表明，所提方法相比于传统的静态群组维修，在减少停机次数、提升稳态可用度方面具有显著优势。

关 键 词：智能维护；可用度优化；群组维修；机会维修；动态规划
中图分类号：V267
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2104-09

以飞机、高铁列车、相控阵雷达为代表的大型设备系统，通常存在设备量多、服役周期长、故障模式复杂的特点，对系统级维修计划制定和备件保障资源配备的科学性提出了较高要求。而伴随其运维智能一体化进程，服役性能要求不断提高，服役状态信息维度和数量逐渐增加，进一步提升了对维修管理及时性和精准性的需求。传统的事后维修、定期维修通常依据单一维度的年龄或状态信息开展决策优化，缺乏对设备整体结构、故障规律和运行机制的综合把握，存在效率低、数据信息利用率差等问题，难以满足服役安全性和可用性的需求。

相比基于年龄的维修，基于服役状态退化过程的视情维修最大优势在于：可以根据设备实际的运行状态进行维修管理，避免由于先验信息误判或设备健康状态了解不全面造成的停机损失[1-3]。目前，国内外开展了大量针对视情维修决策的相关工作。文献 [4] 根据航空设备的可靠度进行维修决策；文献 [5-6] 分别利用测试和使用数据进行统计分析得到航空设备的可靠度评估，并安排维修活动；文献 [7] 研究了三阶段退化下的关键系统最优维修策略；文献 [8-9] 研究了不完全维修下的设备最优维修策略；文献 [10-13] 以维修成本为目标，对复杂系统的维修策略综合优化方法开展了研究；文献 [14] 以任务可靠度为评估指标对无人机的维修策略进行优化。

可用度是衡量设备系统保障效能的重要指标，其准备评估对后续维修策略的合理制定有重要的影响。文献 [15-16] 从不同资源约束下研究了系统的贮存可用度建模与计算方法；文献 [17-18] 以军用飞机为对象，研究了复杂系统的使用可用度计算方法；文献 [19] 归纳了使用可用度下的预防性维修方法。

复杂系统的不同部件之间通常存在空间或功能上的耦合，这些耦合是开展集群维修的重要理论基础。由于系统多个部件的维修活动共享某些维修资源或成本，可以将多个部件的维修活动组合，

收稿日期：2022-07-05；**录用日期**：2022-09-09；**网络出版时间**：2022-09-27 20:13
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220926.1933.001
基金项目：国家自然科学基金 (72101010,72001027)；中国博士后科学基金 (270514)
* **通信作者**. E-mail：maxiaobing@buaa.edu.cn

引用格式：杨力，陈懿，高凯烨，等. 一种基于动态信息迭代的系统群组维修规划方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2104-2112. YANG L，CHEN Y，GAO K Y，et al. A system group maintenance scheduling method based on iteratively dynamic information [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2104-2112 （in Chinese）.

达到减少系统停机的目的。文献 [20] 分别对故障相关动车组和风力机的成组预防性维修和机会性维修策略进行了研究, 其中, 机会维修窗口来源于其他部件的失效和非计划性的设备停机; 文献 [21] 考虑可用度和维修成本约束, 研究了预设时间窗口情况下开展的群组维修策略; 文献 [22] 以维修成本为目标函数, 研究了区域静态成组维修策略。

目前, 常见的群组维修策略以单个部件的退化或可靠度阈值为基准, 结合各类部件最小维修周期形成区域/全局静态策略。然而, 该策略在实际的维修工程中存在 2 个问题: ①无法充分利用设备的多源实时运行信息, 包括剩余寿命、退化程度和运行年龄等; ②不能为维修资源的准备调度提供充分的缓冲时间。针对以上问题, 本文以提升多部件设备系统的战备完好性和可用性为目标, 研究了基于动态信息自迭代机制的系统群组维修规划方法, 并提出了稳态可用度建模方法和维修决策优化方法。

相比传统的预设维护区间范围和区间内成组方案的静态群组维护策略, 本文提出的智能群组维修方法具有如下优势: ①能够充分结合各部件的健康状态信息, 提升对各类部件和系统整体可用度评估的精度; ②通过动态规划成组部件和维修时间, 能够有效避免过度维修和维修不及时的情况, 增强决策鲁棒性; ③能够通过统一框架有效兼容机会维修和计划维修, 降低系统停机时间和停机损失。

1　问题描述

1.1　失效描述

考虑n个关键部件串联构成的设备系统[12,23], 各部件的运行状态对系统整体的可靠性和使用可用度有显著影响。根据历史故障数据和运行维修记录, 系统关键故障类型通常划分为如下 2 类[24-25]: ①退化部件, 其退化数据可通过传感器数据收集获取, 并通过设置失效阈值评估剩余寿命, 如轴承、齿轮箱、液压设备等, 定义所有退化部件的集合为G_{D}; ②寿命部件, 其退化规律不显著或难以监测, 通常通过寿命分布描述其故障规律, 如电子元件、发动机控制件、高压点火导线等, 其可靠度仅与累计工作时间相关, 任一时刻部件是否发生故障均为随机事件, 定义所有寿命部件的集合为G_{T}。

1.2　动态群组维修策略

在设备服役使用过程中, 一旦发现关键部件失效, 需立即开展修复性维修。同时, 需对失效概率较大但暂时未发生失效的部件开展预防性维修, 维修效果均为修复如新。

由于部件之间可能存在空间耦合, 在维修时会产生 2 类停机时间[19-22]: ①耦合部件共享的固定时间t_{set}, 包含等待、入库、初步拆卸、人员与设备准备时间及维护结束后测试等; ②各部件单独的维修时间$t_{\mathrm{pr/cr}}$。

由于拆装、调试时间可以共享, 将多个部件成组同时进行维修可有效节约维修所需时间, 提高系统总体可用度, 这种维修策略称为群组(或成组)维修。因此, 在单个部件维修规划的基础上, 产生了多部件群组维修规划的需求。本文针对系统可用度提升的多部件群组维修策略采用如下两阶段[26]动态维修策略:

1) 部件级维修策略。以最大化可用度为目标, 对各部件独立开展维修间隔时间优化, 获得各部件最优维修间隔时间。

2) 系统级维修策略。如图 1 和图 2 所示, 根据各部件最优维修间隔时间和是否有部件发生失效进行维修分组, 并设置维修计划。

① 预防性维修分组。组内部件均未发生失效, 但失效概率偏高, 因此, 为防止发生部件故障及降低维修费用, 需要根据所有部件的健康状态信息提前进行预防性维修规划, 规划内容包含下一次进行成组计划维修的部件, 以及开始预防性维修的时间。

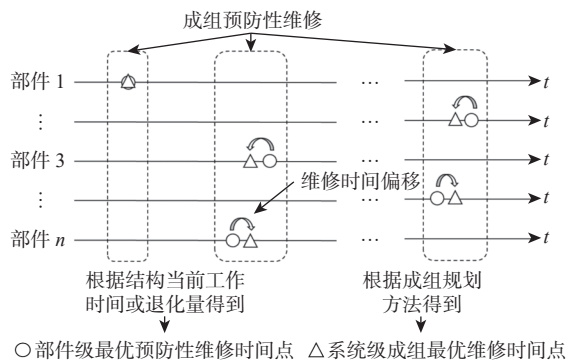


图 1　预防性维修分组示意图

Fig. 1　Schematic diagram of preventive maintenance group

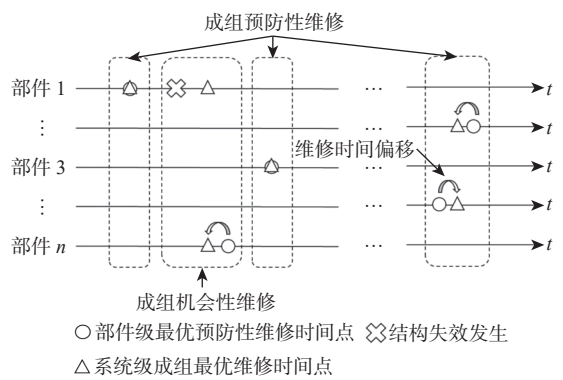


图 2　机会性维修分组示意图

Fig. 2　Schematic diagram of opportunistic maintenance group

② 机会性维修分组。组内有部件发生失效，需要进行修复性维修，该修复性维修为其他部件的预防性维修提供额外的机会，因此，在部件发生故障后，需要根据其他部件的健康状态信息进行机会性维修规划，规划内容包含本次进行成组机会性维修的部件，以及开始机会维修的时间。

该两阶段法的特点是可以在优化单个部件维修周期的基础上再进行系统群组维修优化，能显著降低维修停机时间和维修保障资源消耗，实际中，可实施性高，能适宜于高铁列车、相控阵雷达、飞机等大规模多部件系统。

需注意的是，该两阶段框架不同于传统群组维修框架之处在于：每次群组维修任务完成后，均需对各部件的服役年龄、性能退化程度和维修部件序列进行实时更新，并根据更新后的各部件最新情况（包含）安排下一个维修群组的执行日历时间和维修部件序列，据此不断进行维修成组的动态迭代更新。称该策略为基于动态信息自迭代机制的群组维修规划策略。

2 部件级静态维修模型

根据1.2节提出的群组维修策略，构建部件（单元）级静态维修模型，为后续系统级维护优化提供基础输入。假设第 i 个部件进行预防性维修所需时间为 $t_{\text{set}}+t_{i,\text{pr}}$，修复性维修所需时间为 $t_{\text{set}}+t_{i,\text{cr}}$。当上一次维修刚结束，准备进行下一次维修分组规划时，第 i 个部件工作时间为 τ_i（或退化量为 $X(\tau_i)$）。

如果在 $t(t\geqslant t_{\text{set}}+t_{i,\text{cr}}$ 或 $t\geqslant t_{\text{set}}+t_{i,\text{pr}})$ 时间后完成下一次维修，对于部件 i 而言，下一次完成维修时，根据其是否故障可以分为2种可能的情况：

1）下一次完成维修时部件曾发生故障。在此期间的任一时刻 x，部件 i 发生故障的概率密度为 $f(x|\tau_i)$。由于部件 i 发生故障后系统将进入不可用状态，且部件进行修复性维修需要的时间为 $t_{\text{set}}+t_{i,\text{cr}}$，直到下一次维修完成时，部件 i 共在不可用状态下经历了 $t-x$ 长度的停机时间。而在整个间隔期间的任一时刻，部件 i 均有可能发生失效。因此，这种情况累计发生的概率为

$$P_1=\int_0^{t-t_{\text{set}}-t_{i,\text{cr}}} f(x|\tau_i)\,\mathrm{d}x \tag{1}$$

在此基础上，部件的平均停机时间 $E_1(t_{\text{down}})$ 为

$$E_1(t_{\text{down}})=\int_0^{t-t_{\text{set}}-t_{i,\text{cr}}} f(x|\tau_i)(t-x)\,\mathrm{d}x \tag{2}$$

2）下一次完成维修时部件未曾发生故障。在 t 时间后，即下一次维修到来的时刻，部件 i 仍保持正常状态的概率为 $1-F(t|\tau_i)$。由于此时部件只需进行预防性维修，所需时间为 $t_{\text{set}}+t_{i,\text{pr}}$，且部件未经历停机时间，直到下一次维修完成时，部件 i 共在不可用状态下经历了 $t_{\text{set}}+t_{i,\text{pr}}$ 长度的停机时间。这种情况累计发生的概率为

$$P_2=1-F(t|\tau_i)=\int_{t-t_{\text{set}}-t_{i,\text{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\,\mathrm{d}x \tag{3}$$

在此基础上，部件的平均停机时间 $E_2(t_{\text{down}})$ 为

$$E_2(t_{\text{down}})=\int_{t-t_{\text{set}}-t_{i,\text{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\left(t_{\text{set}}+t_{i,\text{pr}}\right)\mathrm{d}x \tag{4}$$

综合以上2种情况，在 $[0,t]$ 周期内，部件 i 的稳态可用度为

$$A_i(t)=1-\left(\int_{t-t_{\text{set}}-t_{i,\text{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\left(t_{\text{set}}+t_{i,\text{pr}}\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t-\left(\int_0^{t-t_{\text{set}}-t_{i,\text{cr}}} f(x|\tau_i)(t-x)\,\mathrm{d}x\right)\Big/ t \tag{5}$$

通过最大化稳态可用度 $A_i(t)$ 可以得到对于当前的部件 i 而言，下一次维修完成的最优间隔 t_i^* 为

$$t_i^*=\arg\max A_i(t) \tag{6}$$

3 系统级动态群组维修模型

对于针对系统的群组维修而言，为降低共享的拆装、调试时间 t_{set}，需要协调维修分组内所有部件的维修间隔，因此，需根据成组情况对各部件级最优维修间隔时间进行偏移调整，以适应成组需求。

对于部件 i，假设偏移后的时间为 t_i，则因为偏移而导致的稳态可用度变化为

$$\Delta A_i(t_i)=A_i(t_i)-A_i\left(t_i^*\right) \tag{7}$$

将因为部件维修间隔时间偏移导致的可用度变化 $\Delta A_i(t_i)$ 称为部件 i 在成组维修下的可用度变化函数。因为成组维修完成时间 t_i 偏移了最优的单个部件维修完成时间 t_i^*，而 t_i^* 对应单个部件稳态可用度的最大值，所以，偏移后的稳态可用度 $A_i(t_i)$ 小于原稳态可用度 $A_i\left(t_i^*\right)$，可用度变化函数 $\Delta A_i(t_i)$ 均为负数。

3.1 延迟维修

如果偏移后的维修时间点 t_i 在 t_i^* 后，则定义为延迟维修，根据故障发生时间所在的区间分为3种情况，如图3所示。

1）故障发生于 $\left(0,t_i^*\right)$。由于故障在 t_i^* 前发生，而偏移后的维修时间点 t_i 在 t_i^* 后，维修类型未变，都是进行修复性维修，因此，维修所需的时间仍为 $t_{\text{set}}+t_{i,\text{cr}}$，故障停机时间增加了 $t_i-t_i^*$，对应的可用度变化函数为

$$\Delta A_{i,1}(t_i)=\left(\int_0^{t_i^*-t_{\text{set}}-t_{i,\text{cr}}} f(x|\tau_i)\left(t_i^*-x\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i^*-\left(\int_0^{t_i^*-t_{\text{set}}-t_{i,\text{cr}}} f(x|\tau_i)(t_i-x)\,\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i=\int_0^{t_i^*-t_{\text{set}}-t_{i,\text{cr}}} -xf(x|\tau_i)\left(\frac{1}{t_i^*}-\frac{1}{t_i}\right)\mathrm{d}x \tag{8}$$

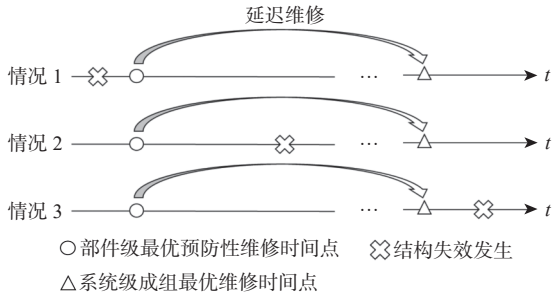


图 3　延迟维修示意图

Fig. 3　Schematic diagram of postponed maintenance

2) 故障发生于(t_i^*,t_i)。由于故障在t_i^*与t_i之间发生, 而偏移后的维修时间点t_i在t_i^*后, 维修类型发生了改变, 从预防性维修变为修复性维修。因此, 维修所需的时间增加了$t_{i,\mathrm{cr}}-t_{i,\mathrm{pr}}$, 故障停机时间增加了$t_i-x$, 对应的可用度变化函数为

$$\Delta A_{i,2}(t_i)=\left(\int_{t_i^*}^{t_i-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{pr}}} f(x|\tau_i)\left(t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i^*-\left(\int_{t_i^*}^{t_i-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{cr}}} f(x|\tau_i)(t_i-x)\,\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i \tag{9}$$

3) 故障发生于$(t_i,+\infty)$。由于故障在t_i后发生, 而偏移后的维修时间点t_i在t_i^*后, 维修类型未变, 都是进行预防性维修, 因此, 维修所需的时间仍为$t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}$, 无故障停机时间, 对应的可用度变化函数为

$$\Delta A_{i,3}(t_i)=\left(\int_{t_i-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\left(t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i^*-\left(\int_{t_i-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\left(t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i=\int_{t_i-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\left(t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}\right)\left(\frac{1}{t_i^*}-\frac{1}{t_i}\right)\mathrm{d}x \tag{10}$$

将以上 3 种可用度变化函数相加, 可以得到延迟维修的可用度变化为

$$\Delta A_{i,\mathrm{postpone}}(t_i)=\sum_{k=1}^{3}\Delta A_{i,k}(t_i) \tag{11}$$

3.2　提前维修

如果偏移后的维修时间点t_i在t_i^*前, 则定义为提前维修, 同样根据故障发生时间所在的区间分为 3 种情况, 如图 4 所示。

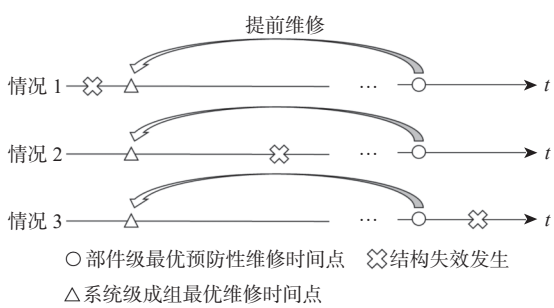


图 4　提前维修示意图

Fig. 4　Schematic diagram of advance maintenance

1) 故障发生于$(0,t_i)$。由于故障在t_i前发生, 而偏移后的维修时间点t_i在t_i^*前, 维修类型未变, 都是进行修复性维修, 因此, 维修所需的时间仍为$t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{cr}}$, 故障停机时间减少了$t_i^*-t_i$, 对应的可用度变化函数为

$$\Delta A_{i,4}(t_i)=\left(\int_0^{t_i-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{cr}}} f(x|\tau_i)\left(t_i^*-x\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i^*-\left(\int_0^{t_i-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{cr}}} f(x|\tau_i)(t_i-x)\,\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i=\int_0^{t_i-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{cr}}} -xf(x|\tau_i)\left(\frac{1}{t_i^*}-\frac{1}{t_i}\right)\mathrm{d}x \tag{12}$$

2) 故障发生于(t_i,t_i^*)。由于故障在t_i与t_i^*之间发生, 而偏移后的维修时间点t_i在t_i^*前, 维修类型发生改变, 从修复性维修变成了预防性维修, 因此, 维修所需的时间减少了$t_{i,\mathrm{cr}}-t_{i,\mathrm{pr}}$, 无故障停机时间, 对应的可用度变化函数为

$$\Delta A_{i,5}(t_i)=\left(\int_{t_i}^{t_i^*-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{cr}}} f(x|\tau_i)\left(t_i^*-x\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i^*-\left(\int_{t_i}^{t_i^*-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{pr}}} f(x|\tau_i)\left(t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i \tag{13}$$

3) 故障发生于$(t_i^*,+\infty)$。由于故障在t_i^*后发生, 而偏移后的维修时间点t_i在t_i^*前, 维修类型未变, 都是进行预防性维修, 因此, 维修所需的时间仍为$t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}$, 无故障停机时间, 对应的可用度变化函数为

$$\Delta A_{i,6}(t_i)=\left(\int_{t_i^*-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\left(t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i^*-\left(\int_{t_i^*-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\left(t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}\right)\mathrm{d}x\right)\Big/ t_i=\int_{t_i^*-t_{\mathrm{set}}-t_{i,\mathrm{pr}}}^{+\infty} f(x|\tau_i)\left(t_{\mathrm{set}}+t_{i,\mathrm{pr}}\right)\left(\frac{1}{t_i^*}-\frac{1}{t_i}\right)\mathrm{d}x \tag{14}$$

将以上 3 种可用度变化函数相加, 可以得到提前维修的可用度变化为

$$\Delta A_{i,\mathrm{advance}}(t_i)=\sum_{k=4}^{6}\Delta A_{i,k}(t_i) \tag{15}$$

3.3　预防性维修分组

假设在t^j时刻完成对部件集合G_i的第j次成组维修, 定义上一次成组维修的部件集合为G_k, 其中, 部件i在第j次成组维修中的维护时间点为t_i^j, 累计工作时间为τ_i^j, 则

1) 如果在第$j-1$次成组维修时, 对部件i进行过维修, 则第j次成组维修时部件i的最佳维修完成时间$t_i^j=t^{j-1}+t_i^*$。由于与维修间隔时间相比, 维修所需时间可以忽略不计, 部件i的年龄$\tau_i^j\approx t^j-t^{j-1}$。

2) 如果在第$j-1$次成组维修时部件i未进行过

维修，且初始条件$t_i^1 = t_i^*$，$t^0 = 0$，$\tau_i^0 = 0$，则第j次成组维修时部件i的最佳维修完成时间$t_i^j = t_i^{j-1}$，此时部件i的年龄$\tau_i^j \approx \tau_i^{j-1} + t^j - t^{j-1}$。

由于当部件规划成组维修时，以维修时间点的偏移导致的可用度变化函数为代价，共享并节约了拆卸、调试时间t_{set}，因此，当t^j完成对部件集合G_i的第j次成组维修时，组内部件的稳态可用度变化为

$$\Delta A_{G_i}(t^j) = \left(\prod_{i\in G_i}\left(A_i(t_i^*) + \begin{cases}\Delta A_{i,\text{advance}}(t^j), t^j < t_i^* \\ \Delta A_{i,\text{postpone}}(t^j), t^j > t_i^*\end{cases}\right) - \prod_{i\in G_i} A_i(t_i^*)\right)\prod_{k\notin G_i} A_k(t_k^*) + \frac{(|G_i|-1)t_{\text{set}}}{t^j} \tag{16}$$

式中：$|G_i|$为部件集合G_i中的部件数量。

通过最大化G_i组内部件的稳态可用度变化$\Delta A_{G_i}(t^j)$，可以得到完成第j次成组维修的最佳时间点t^{j^*}为

$$t^{j^*} = \arg\max \Delta A_{G_i}(t^j) \tag{17}$$

在确定完成成组维修的最佳时间点t^{j^*}的同时，还需要确定成组维修的最佳部件集合G_i^*，本文使用连续分组部件来进行优化[22,27]。该部件的优点是：可以使用动态规划的方法进行优化，进而降低优化的复杂度。

假设连续分组部件$G_S = \{G_1, G_2\}$是系统n个关键部件$G_T \cup G_D$的一种全划分，其中，$G_1 \cap G_2 = \varnothing$，$G_1 \cup G_2 = G_T \cup G_D$，并且每个部件按照累计工作时间进行了顺序编号$\{1,2,\cdots,n\}$，使得$\tau_1^j > \tau_2^j > \cdots > \tau_n^j$，并且$G_1 = \{1,2,\cdots,k\}$和$G_2 = \{k+1, k+2, \cdots, n\}$都是连续编号的部件分组。通过调整$G_S$内第1组$G_1$的部件组成来最大化部件稳态可用度变化$\Delta A_{G_1}(t^{j^*})$，可以得到第$j$次成组维修的最佳连续分组$G_i^*$为

$$G_i^* = \arg\max \Delta A_{G_1}(t^{j^*}) \tag{18}$$

每次维修都使用该方法进行规划。如果下一次成组维修到来前未发生部件故障，则按照预防性维修分组的规划内容进行维修；如果发生了部件故障，则需要使用机会性维修分组重新进行成组维修的规划。

3.4 机会性维修分组

如果在下一次成组预防性维修到来之前的t_F时刻有部件发生了故障，则立刻进行一次成组机会性维修。此时，如果在下一次预防性维修分组中存在最佳部件级维修完成时间t_i^*在t_F之前，但成组维修完成时间t_i在t_F之后的部件i，可以考虑将其纳入机会性维修分组G_{OM}中，假设这些部件的累计工作时间为$\tau_i, i \in G_{OM}$，则这些部件的稳态可用度变化为

$$\Delta A_{G_{OM}}(t_F) = \left(\prod_{i\in G_{OM}}\left(A_i(t_i^*) + \begin{cases}\Delta A_{i,\text{advance}}(t_F), t_F < t_i^* \\ \Delta A_{i,\text{postpone}}(t_F), t_F > t_i^*\end{cases}\right) - \prod_{i\in G_{OM}} A_i(t_i^*)\right)\prod_{k\notin G_{OM}} A_k(t_k^*) + \frac{(|G_{OM}|-1)t_{\text{set}}}{t_F} \tag{19}$$

按照3.3节方法得到最佳机会性维修分组G_{OM}^*为

$$G_{OM}^* = \arg\max \Delta A_{G_{OM}}(t_F) \tag{20}$$

在成组机会性维修完成后，更新这些部件的年龄，再进行下一次预防性维修分组，此时G_{OM}中的部件的累计工作年龄为$\tau_i^j \approx t^j - t_F$。

系统的成组维修根据如下维修策略进行：如果下一次规划的维修时间抵达时无部件发生故障，则按照预防性维修分组进行预防性维修；如果下一次规划的维修时间抵达时有部件发生了故障，则按照机会性维修分组，对故障部件进行修复性维修，对组内其他部件进行预防性维修，维修完成后更新部件工作年龄，再进行下一次预防性维修分组的规划。

4 算例验证

为验证本文提出的智能群组维修策略的有效性，针对飞机壁板结构和机载液压作动器这2类典型关键结构的群组维修效果开展性能测试。其中，液压作动器的性能退化服从Wiener随机过程[28-29]，而飞机壁板的失效时间服从Gamma分布[22]。对2类结构的结构件进行编号，其中，D1～D3表示退化部件机载液压作动器，T1～T5表示寿命部件飞机壁板，各部件的退化/失效参数信息如表1所示。

表1 各部件的退化/失效参数

Table 1 Degradation/failure parameters of components

部件编号	退化失效阈值X_F	漂移系数ν	扩散系数σ	形状参数α	尺度参数β
D1	25	0.481	0.407		
D2	20	0.473	0.412		
D3	15	0.432	0.428		
T1				1.021	0.012
T2				1.282	0.025
T3				1.252	0.028
T4				1.083	0.021
T5				1.102	0.010

假设飞机每次进行维修的等待、入库、初步拆卸、人员与设备准备时间、维护结束后测试等的时间$t_{\text{set}} = 3$ h，各部件维修所需时间$t_{\text{pr/cr}}$信息如表2所示。对于退化服从Wiener随机过程的液压作动器，

表 2　各部件的维修所需时间

Table 2　Maintenance durations of components

部件编号	预防性维修工时t_{pr}/h	修复性维修工时t_{cr}/h
D1	1	6
D2	1.5	12
D3	2	15
T1	1.5	12
T2	2	15
T3	1	9
T4	1.5	12
T5	2	15

其性能退化量$X(t)$可表示为[30-31]

$$X(t)=\nu t+\sigma B(t) \tag{21}$$

式中: ν为漂移系数; σ为扩散系数; $B(t)$为标准 Brownian 运动。

由于 Wiener 过程的增量服从正态分布, 在指定退化失效阈值X_F后, 部件发生故障的概率$F(t|\tau_i)$为

$$F(t|\tau_i)=P(X(t)-X(\tau_i)\geqslant X_F-X(\tau_i))=1-\Phi\left(\frac{X_F-X(\tau_i)-\nu(t-\tau_i)}{\sigma\sqrt{t-\tau_i}}\right) \tag{22}$$

式中: $\Phi(\cdot)$为标准正态分布的累积分布函数。

对应的概率密度$f(t|\tau_i)$为

$$f(t|\tau_i)=\frac{X_F-X(\tau_i)}{\sqrt{2\pi\sigma^2(t-\tau_i)^3}}\exp\left(-\frac{(X_F-X(\tau_i)-\nu(t-\tau_i))^2}{2\sigma^2(t-\tau_i)}\right) \tag{23}$$

而对于失效时间服从 Gamma 随机过程的寿命部件飞机壁板, 其发生故障的概率为

$$F(t|\tau_i)=P(T<t|T\geqslant\tau_i)=\frac{\int_{\tau_i}^{t}\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\beta x}\mathrm{d}x}{\int_{\tau_i}^{+\infty}\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\beta x}\mathrm{d}x} \tag{24}$$

式中: $\Gamma(\cdot)$为 Gamma 函数; α为形状参数; β为尺度参数。

对应的概率密度$f(t|\tau_i)$为

$$f(t|\tau_i)=\frac{\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}t^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\beta t}}{\int_{\tau_i}^{+\infty}\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\beta x}\mathrm{d}x} \tag{25}$$

根据表 1 和表 2 的数据, 结合第 2 节所提的部件级静态维修策略, 各关键飞机部件的稳态可用度随维修间隔的变化如图 5 所示, 其最优预防性维修时间间隔t_i^*、最大稳态可用度$A_i(t_i^*)$如表 3 所示, 对应的部件最优维修计划如图 6 所示。

从表 3 中可以看出, 对于退化部件 D1～D3, 由于使用的是线性 Wiener 过程进行退化建模, 其性能退化量随时间增加较为稳定, 相应地, 失效概率的

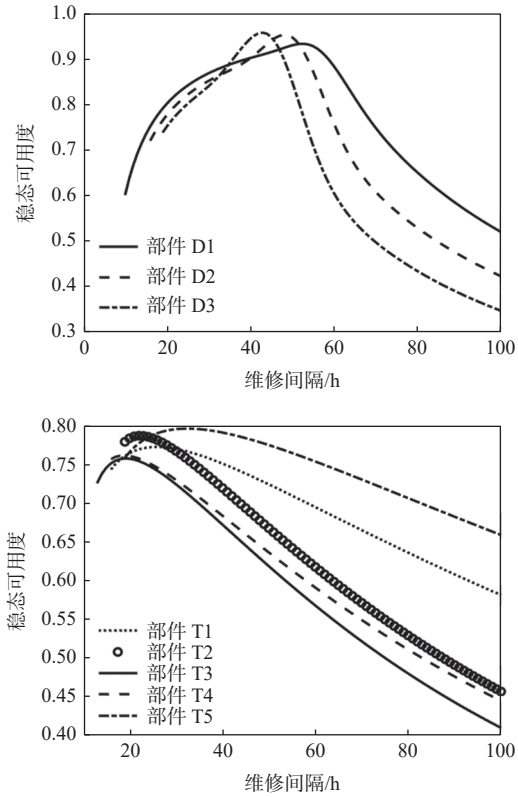


图 5　部件结构稳态可用度随维修间隔时间变化

Fig. 5　Change of structure stable availability of components with maintenance interval time

表 3　各部件最佳维修间隔及最大稳态可用度

Table 3　Optimal maintenance interval and maximum stable availability of components

部件编号	期望寿命/h	部件级最佳维修间隔/h	最大稳态可用度
D1	52	52	0.931
D2	42	48	0.951
D3	35	43	0.956
T1	85	26	0.772
T2	51	22	0.786
T3	45	19	0.757
T4	52	19	0.761
T5	110	32	0.796

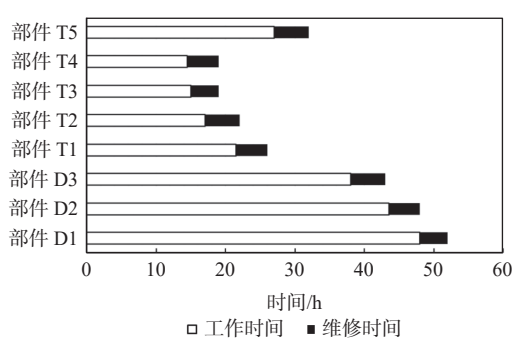


图 6　各结构的部件级最优维修计划

Fig. 6　Optimal maintenance plan for each structure component level

增加也较为稳定，因此，在进行部件级维修间隔优化时，通常可以充分利用其寿命，同时得到较高的部件稳态可用度；而对于寿命部件T1～T5，其寿命模型使用的是下凹式单调递增的Gamma分布，因此随着时间增加，其失效概率并非线性增加，而是下凹式递增，虽然其寿命期望较长，但维修间隔越长，其进行修复性维修所带来的稳态可用度损失越高，因此，从提高稳态可用度的角度来说，需要相对频繁地对其进行预防性维修。

根据3.3节和3.4节建立的维修优化模型，可以得到各部件在一定时间段内（此处设置为 T=100 h）的成组维修次数、每次进行成组维修的部件、成组维修的完成时间和成组维修带来的稳态可用度提升，如表4所示，对应的系统级最优维修计划如图7所示。可以看出，该动态成组维修策略可以合理地将多个飞机部件的维修活动进行结合，从而节省维修的等待、入库、初步拆卸、人员与设备准备时间、维护结束后测试等时间，同时通过并发执行多个部件的维修工作，进而提升结构总体的稳态可用度。

表4 T=100 h下的系统级最优维修计划

Table 4 Optimal system-level maintenance plan under T=100 hours

成组维修次数	最优维护组	成组维修完成时间/h	稳态可用度提升	提升比例/%
1	{T1,T2,T3,T4}	19	0.08	4.5
2	{D3,T2,T3,T4,T5}	38	0.12	4.1
3	{D1,D2,T1}	48	0.07	2.7
4	{T2,T3,T4}	57	0.07	2.7
5	{D3,T1,T2,T3,T4,T5}	74	0.10	3.9
6	{D1,D2,T1,T2,T3,T4}	93	0.14	4.9

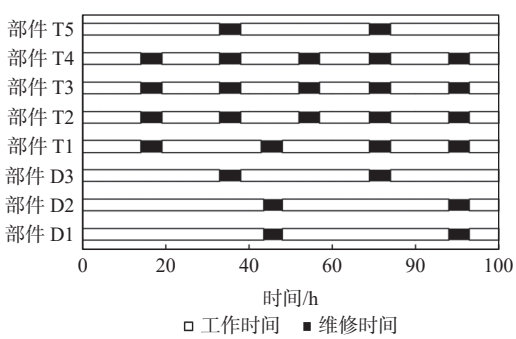


图7 T = 100 h下各部件的系统级最优维修计划

Fig. 7 Optimal maintenance plan at system-level for components under T = 100 hours

5 结 论

1）提出了结合部件服役年龄、性能退化程度等实时健康状态信息的系统可用度建模方法，提升系统可用度评估的实时性、精确性和鲁棒性。

2）构建了能够共享系统维修拆装、调试时间的群组维修决策框架，将多个部件的维修活动组合，降低系统停机次数、停机时间，提升系统稳态可用度。

3）形成了基于动态规划的系统群组计划和非计划维修优化方法，优化维修的执行日历时间和维修部件序列，降低维修规划优化的复杂度。

当前研究工作有2类可能的延伸方向：将贝叶斯驱动的预测性维修方法与群组维修决策模型相结合，进一步强化提升模型的智能预测与决策功能；考虑备件资源和人力资源短缺对于群组维修决策结果的影响。

参考文献（References）

[1] ZHANG Z H, YANG L. State-based opportunistic maintenance with multifunctional maintenance windows[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2021, 70(4): 1481-1494.

[2] ZHANG Z H, YANG L. Postponed maintenance scheduling integrating state variation and environmental impact[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 202: 107065.

[3] WANG J T, PENG R, QIU Q A, et al. An inspection-based replacement planning in consideration of state-driven imperfect inspections[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 232: 109064.

[4] REN H, CHEN X, CHEN Y. Reliability based aircraft maintenance optimization and applications[M]. London: Academic Press, 2017.

[5] 苏亨锔. 测试数据下的航空设备视情维修研究[J]. 设备管理与维修, 2018(21): 54-55.
SU H J. Research on condition-based maintenance of aviation equipment based on test data[J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(21): 54-55(in Chinese).

[6] 郑志霖, 叶晓东. 基于统计分析方法的飞机维修方案优化[J]. 航空维修与工程, 2020(11): 29-33.
ZHENG Z L, YE X D. Optimization of aircraft maintenance scheme based on statistical analysis method[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2020(11): 29-33(in Chinese).

[7] LIU J Q. Maintenance model of aircraft structure based on three-stage degradation process[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 157: 107335.

[8] ZHANG C X, LI Q, LIU Y K. Optimal replacement policy with minimal repair and preventive maintenance of an aircraft structure subjected to corrosion[J]. Soft Computing, 2020, 24(1): 375-384.

[9] 潘刚, 尚朝轩, 蔡金燕, 等. 基于Semi-Markov模型的多态系统不完全维修决策[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 320192.
PAN G, SHANG C X, CAI J Y, et al. Imperfect maintenance decision for multi-state system based on Semi-Markov model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 320192(in Chinese).

[10] WANG J J, YANG L, MA X B, et al. Joint optimization of multi-window maintenance and spare part provisioning policies for production systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 216: 108006.

[11] YANG L, CHEN Y, MA X B, et al. A prognosis-centered intelligent maintenance optimization framework under uncertain failure threshold[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2024, 73(1): 115-130.

[12] 李大伟, 张志华, 钟强晖, 等. 复杂退化系统的组合维修策略优化[J]. 航空学报, 2015, 36(3): 872-880.
LI D W, ZHANG Z H, ZHONG Q H, et al. Optimal combination maintenance strategy of deteriorating complex system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(3): 872-880(in Chinese).

[13] 林琳, 罗斌, 钟诗胜. 基于视情维修的机队维修决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 661-672.
LIN L, LUO B, ZHONG S S. Maintenance decision-making based on condition-based maintenance for fleet[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3): 661-672(in Chinese).

[14] YANG L, CHEN Y, QIU Q A, et al. Risk control of mission-critical systems: Abort decision-makings integrating health and age conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(10): 6887-6894.

[15] YANG L, WEI F P, QIU Q A. Mission risk control via joint optimization of sampling and abort decisions[J] Risk Analysis, 2024, 44(3): 666-685.

[16] DO P, VU C, BARROS A, et al. Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 142: 56-67.

[17] 王蕴, 王乃超, 马麟, 等. 考虑备件约束的多部件串联系统使用可用度计算方法[J]. 航空学报, 2015, 36(4): 1195-1201.
WANG Y, WANG N C, MA L, et al. Operational availability calculation methods of various series systems under the constraint of spare parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(4): 1195-1201(in Chinese).

[18] 李军亮, 滕克难, 夏菲. 一种复杂可修系统的可用度计算方法[J]. 航空学报, 2017, 38(12): 221169.
LI J L, TENG K N, XIA F. An availability calculation method for complex repairable systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(12): 221169(in Chinese).

[19] DINH D, DO P, IUNG B. Reliability modeling and opportunistic maintenance optimization for a multicomponent system with structural dependence[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 241: 109708.

[20] 王炳辉. 考虑故障相关性的动车组部件维护策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
WANG B H. Research on maintenance strategy of EMU components considering fault correlation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021(in Chinese).

[21] 王颖. 成组维修在通用飞机维修中的应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
WANG Y. Application research of group maintenance in general aircraft maintenance[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019(in Chinese).

[22] 罗斌. 基于结构疲劳寿命预测的机队维修决策方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
LUO B. Research on fleet maintenance decision-making based on structure fatigue life prediction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018(in Chinese).

[23] JIA H P, PENG R, YANG L, et al. Reliability evaluation of demand-based warm standby systems with capacity storage[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 218: 108132.

[24] CHEN Y, MA X B, WEI F P, et al. Dynamic scheduling of intelligent group maintenance planning under usage availability constraint[J]. Mathematics, 2022, 10(15): 2730.

[25] 孔祥芬, 蔡峻青, 张利寒, 等. CFM56-3 发动机高压点火导线可靠性分析[J]. 机械设计与制造, 2020(5): 289-292.
KONG X F, CAI J Q, ZHANG L H, et al. Reliability analysis of CFM56-3 engine high voltage ignition wire[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(5): 289-292(in Chinese).

[26] YANG L, YE Z S, LEE C G, et al. A two-phase preventive maintenance policy considering imperfect repair and postponed replacement[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 274(3): 966-977.

[27] WU T Y, WEI F P, YANG L, et al. Maintenance optimization of *k*-out-of-*n* load-sharing systems under continuous operation[J] IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(10): 6329-6341.

[28] 柏文峰, 洪黎, 张超, 等. 机载往复密封二元时变相关退化建模与可靠度评估[J]. 液压与气动, 2022, 46(2): 31-38.
BAI W F, HONG L, ZHANG C, et al. Dual time-varying correlation degradation modeling and reliability evaluation of airborne reciprocating seals[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(2): 31-38(in Chinese).

[29] 董青, 郑建飞, 胡昌华, 等. 考虑随机冲击影响的自适应 Wiener 过程剩余寿命预测方法[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 486-498.
DONG Q, ZHENG J F, HU C H, et al. Remaining useful life prediction for adaptive Wiener process method with random shock[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 486-498(in Chinese).

[30] YANG L, CHEN Y, MA X B. A state-age-dependent opportunistic intelligent maintenance framework for wind turbines under dynamic wind conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(10): 10434-10443.

[31] WANG J T, TANG L Y, MA X B, et al. Prognosis-driven reliability analysis and replacement policy optimization for two-phase continuous degradation[J] Reliability Engineering & System Safety, 2023, 230: 108909.

A system group maintenance scheduling method based on iteratively dynamic information

YANG Li[1]，CHEN Yi[1]，GAO Kaiye[2]，MA Xiaobing[1,*]，ZHAO Yu[1]

(1. School of Reliability and Systems Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China；
2. School of Economics and Management，Beijing Information Science & Technology University，Beijing 100096，China)

Abstract：Availability is an important index to measure the service efficiency of equipment system. At present, most of the group maintenance frameworks for system availability optimization are static, which cannot make full use of health status information to effectively adjust real-time maintenance plans. To address these problems, this paper proposes an intelligent group maintenance planning approach based on a dynamic information iterative mechanism. By creating a two-level group maintenance scheme that couples pre-planned maintenance with opportunistic maintenance, the suggested approach is entirely compatible with common fault distribution features like sudden failure type and degradation type. Based on the real-time age and condition information of components in each group, we iteratively update the next grouping time and the sequence of components to be repaired. The numerical experience result demonstrates that the suggested strategy works better at lowering downtime and enhancing the system's steady availability than conventional static group maintenance.

Keywords：intelligent maintenance；availability optimization；group maintenance；opportunistic maintenance；dynamic programming

Received：2022-07-05；**Accepted**：2022-09-09；**Published Online**：2022-09-27 20：13

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220926.1933.001

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (72101010,72001027); China Postdoctoral Science Foundation (270514)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0627

高马赫数内埋武器分离特性数值模拟研究

陈兵，罗磊，蒋安林，吴晓军，张培红*，贾洪印
(中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所，绵阳 621000)

摘 要：高马赫数（*Ma*>2）武器舱剪切层和激波更强，其流动特性与通常的亚、跨、超声速武器舱也有所不同，从而可能导致内埋武器的分离特性也不同。基于非结构混合网格流场解算器NNW-FlowStar，在前期针对高马赫数空腔流动模拟建立的改进HLLE++格式和自适应混合网格技术的基础上，采用数值模拟手段对比分析了*Ma*=4和*Ma*=2时的内埋武器分离特性，研究了环状板、横柱、锯齿和圆柱阵列等不同前缘流动控制措施对高马赫数（*Ma*=4）武器分离特性的影响，为高马赫数内埋武器的安全分离方案设计提供指导。研究表明：高马赫数（*Ma*=4）时，由于武器舱流动特性和武器舱前缘激波的激波角的不同，导致起始时刻内埋武器与武器舱之间的通道效应和分离过程的激波干扰不同，使得高马赫数（*Ma*=4）时内埋武器的姿态角和俯仰力矩与马赫数为2时差异较大；采取前缘扰流措施后，内埋武器的抬头趋势有所减弱，偏航角有所减小，有利于导弹的安全分离。

关 键 词：内埋武器；分离特性；非结构混合网格；数值模拟；流动控制
中图分类号：V221.3; TB553
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2113-10

随着对战斗机高速、隐身性能要求的提高，新一代战斗机要求具备隐身和超声速巡航能力，因此武器内埋成为必然选择[1]。由于内埋武器舱流动和内埋武器分离过程的复杂性，开展内埋武器舱流动特性及内埋武器分离特性的研究显得尤为重要。20世纪50年代以来，国外学者针对武器舱流动和内埋武器分离特性采用风洞试验和数值模拟手段进行了一系列研究。特别是美国学者，对内埋武器舱流动和内埋武器分离特性开展了系统深入的研究，并成功将内埋武器系统应用于F-111[2]、F/A-22[3]和F-35战斗机。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)和计算机技术的快速发展，为内埋武器分离特性的研究提供了新的手段。Atwood[4]采用RANS方法研究了不同流动控制措施对导弹分离轨迹的影响，发现采取流动控制措施，可以有效改善导弹的分离安全特性。Cavallo等[5]基于非结构网格，采用Roe格式和网格自适应方法，研究了超声速条件下子母弹的分离问题。Sickles等[6]基于非定常RANS方法和B-1轰炸机模型，研究了大型武器舱对小弹分离轨迹影响。Sahoo等[7]通过研究无射流控制措施和采用较小、较大不同射流控制措施对导弹分离特性的影响，表明无喷流和喷流较大时，导弹都无法安全分离。Johnson等[8]研究发现通过开槽吹流控制措施，可以抬升内埋武器舱的剪切层，使导弹在舱内下落一段距离后才受到剪切层的影响，并且弹体受到低头力矩作用，从而提高了分离安全性。Kim等[9]通过数值模拟研究发现，从而在相同发射条件下，受到武器舱非定常流动的影响，导弹分离轨迹受投放时刻的影响很大。Westmoreland[10]研究了不同弹射条件对分离轨迹的影响，结果表明通过施加适当的弹射力，可以显著提高武器分离的品质。

国内针对内埋武器分离问题的研究起步相对较晚，吴继飞[11]采用风洞试验手段，研究了内埋武器的分离特性和改进分离安全性的措施。薛飞等[12]通过改进内埋武器高速投放风洞试验技术，实现了

收稿日期：2022-07-22；**录用日期**：2022-08-26；**网络出版时间**：2023-07-18 15:27
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230718.1301.001
基金项目：国家数值风洞工程 (NNW) 项目
* **通信作者**. E-mail：zph2s@sina.com

引用格式：*陈兵，罗磊，蒋安林，等. 高马赫数内埋武器分离特性数值模拟研究 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2113-2122.*
CHEN B，LUO L，JIANG A L，et al. Numerical simulation of separation characteristics for internally buried weapon at high Mach number [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2113-2122（in Chinese）.

内埋武器弹射速度和角速度的独立调节。在数值模拟方面，杨俊等[13]通过RANS方法研究了有、无弹射措施对导弹分离轨迹的影响。朱收涛等[14]采用数值模拟研究了马赫数对导弹分离特性的影响，结果表明马赫数的增大，会导致导弹分离特性变差，影响分离安全。冯必鸣等[15]、雷娟棉等[16]通过数值模拟分析了安装角等对导弹分离特性的影响。李骞等[17]模拟研究了舱内重力投放、舱内弹射投放和舱外重力投放对武器分离特性的影响。郭亮[18]研究了扰流板、吹流等控制措施对内埋武器分离过程的影响。刘瑜[19]基于结构嵌套网格技术研究了开式弹舱舱门开启和导弹分离过程。张培红等[20]基于非结构重叠网格技术，研究了舱门开启过程非定常效应影响和内、外侧不同位置导弹分离安全特性。

受到第四代战斗机研制等工程应用背景的牵引，上述研究大多集中在马赫数($Ma\leqslant 2$)的内埋武器舱和内埋武器分离特性，对高马赫数($Ma>2$)的内埋武器分离特性研究较少。但随着飞行器越来越注重突防和高速作战能力，高马赫数($Ma>2$)内埋武器投放系统的工程应用需求越来越强。

相关研究表明，高马赫数($Ma>2$)内埋武器剪切层和激波更强，其非定常脉动特性及空腔振荡机制与较低马赫数时也有所不同，这就可能导致高马赫数时内埋武器的分离特性也存在很大不同，需要对此进一步开展研究。

本文基于非结构混合网格流场解算器NNW-FlowStar[21]，在项目组前期开发的适用于高马赫数空腔流动模拟的HLLE++格式[22]和自适应混合网格技术[23]的基础上，针对高马赫数内埋武器分离投放问题开展数值模拟研究。通过详细的流场结构对比，分析了高马赫数($Ma=4$)和较低马赫数($Ma=2$)时的内埋武器分离特性不同的原因。同时，研究了环状板、横柱、锯齿和圆柱阵列等不同前缘流动控制措施对高马赫数武器分离特性的影响，为高马赫数内埋武器的安全分离方案设计提供指导。

1 数值模拟方法

FlowStar软件是由中国空气动力研究与发展中心国家数值风洞(National Numerical Wind tunnel, NNW)工程项目团队自主研发的一款基于非结构混合网格的大型通用CFD软件，已面向全国免费发布[21]。软件基于非结构重叠网格技术，结合六自由度运动求解，可满足武器分离、舱门定轴转动等气动/运动协同仿真需求。

控制方程为非定常流场的控制方程：

$$\frac{\partial}{\partial\tau}\iiint_{\Omega}\boldsymbol{Q}\mathrm{d}V+\oint\!\!\oint_{\partial\Omega}\left(\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Q})\times\boldsymbol{n}-\boldsymbol{Q}\boldsymbol{v}_{g}.\boldsymbol{n}\right)\mathrm{d}S=\oint\!\!\oint_{\partial\Omega}\boldsymbol{H}_{\mathrm{v}}(\boldsymbol{Q})\times\boldsymbol{n}\mathrm{d}S \tag{1}$$

式中：Ω为控制体的体积；$\partial\Omega$为控制体封闭面的面积；V为体积变量；S为面积变量；$\boldsymbol{Q}$为守恒变量；$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Q})$为无黏通量；$\boldsymbol{H}_{\mathrm{v}}(\boldsymbol{Q})$为黏性通量；$\boldsymbol{v}_g$为网格单元面心运动速度。

无黏通量采用项目针对高马赫数空腔流动模拟发展的改进的HLLE++格式，针对非结构网格和高马赫数流动的特点，对原始HLLE++格式中激波探测的求解方式进行了改进，改进后的HLLE++格式中开关函数的各参数表达式为

$$\begin{cases}\varphi_p=\dfrac{k_{p,i,\mathrm{MAX}}}{\delta}\\ k_{p,i,\mathrm{MAX}}=\mathrm{MAX}(k_{p,j})\\ k_p=35\dfrac{|\boldsymbol{v}|}{c}\dfrac{\Delta p}{p}\Omega^{\frac{1}{3}}\end{cases} \tag{2}$$

式中：j为与单元i共点的所有单元；φ_p为求解接触间断速度的开关函数；$k_{p,i,\mathrm{MAX}}$为相邻单元节点的最大k_p；δ为输入参数，一般取0.1；c为声速；p为压力；$\boldsymbol{v}$为速度矢量；k_p为速度与压力梯度的点积。

内埋武器的运动通过求解六自由度运动方程，并采用非结构重叠网格技术来实现。重叠网格通过挖洞插值实现重叠区信息传递，插值过程采用项目组建立的基于超网格技术的重叠网格守恒插值方法。其思想是基于“超网格”和单元相交算法，通过在每个非定常时间步重新构造局部超网格，实现背景网格和目标网格的守恒插值，具体方法见文献[24]。

对于分离物体的质心运动方程，直接在初始状态的机体体轴系中求解即可，机体体轴系可以看作惯性系，具体形式为

$$\begin{cases}m\dfrac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}=mg_x+F_x=-mg\sin(p_{\mathrm{initial}})+F_x\\ m\dfrac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=mg_y+F_y=mg\sin(r_{\mathrm{initial}})\cos(p_{\mathrm{initial}})+F_y\\ m\dfrac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}=mg_z+F_z=mg\cos(r_{\mathrm{initial}})\cos(p_{\mathrm{initial}})+F_z\end{cases} \tag{3}$$

式中：$(\cdot)_{\mathrm{initial}}$为飞行器的初始状态空间姿态的欧拉角；$m$为飞行器质量；$F_x$、$F_y$、$F_z$分别为分离物体所受的气动力和其他外力(例如推力)之和在x、y、z坐标上的分量；g_x、g_y、F_z分别为重力加速在x、y、z坐标上的分量；p_{initial}为初始俯仰角；r_{initial}为初始滚转角。

对于分离物体的绕质心运动方程，则在分离物体的体轴系(非惯性系)中求解。同时，为了提高复杂流场模拟精度，分离投放模拟采用了项目组针对高马赫数空腔流动模拟发展的自适应混合网格技术，具体方法见文献[23]。湍流模型为Menter的k-ω SST两方程湍流模型。

2 计算方法验证

为验证数值方法模拟高马赫数内埋武器分离

特性的模拟能力, 对数值方法分别从空腔流动的能力和模拟分离投放特性的能力两个方面进行验证。对于空腔流动, 分别验证了文中方法对高马赫数空腔和跨声速空腔的模拟能力。

2.1　空腔标模验证

高马赫数空腔标模采用文献 [25] 中的空腔模型, 空腔长度 L=304.8 mm, 宽度 W=63.5 mm, 深度 D=12.7 mm, 长深比为 24。详细的计算参数如表 1 所示。

表 1　空腔模型计算参数

Table 1　Calculation parameters of cavity model

Ma	攻角α/(°)	侧滑角β/(°)	来流静压P/Pa	来流静温T/K
2.86	0	0	3 114.2	123.3

图 1 给出了空腔附近对称面网格。网格生成采用非结构混合网格策略, 在物面附近为了较好地模拟附面层流动, 采用三棱柱网格单元, 第一层网格间距$y^+ \leqslant 1$; 在空腔内为保证较好的正交性, 全部采用六面体(矩形)网格单元, 在空腔外采用混合网格单元, 在远离空腔的空间采用四面体网格单元, 网格量约为 4 200 万。

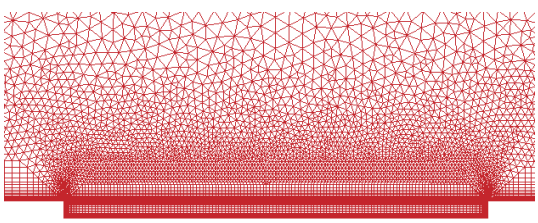


图 1　空腔附近对称面网格

Fig. 1　Grid of the cavity symmetry plane

图 2 给出了计算得到的空腔底部压力分布与试验结果比较。图中 C_p 为当地压强与来流压强的差值与来流动压之比。图 3 为空腔对称面上的流线和密度分布云图。由图 2、图 3 可知, 计算得到压力分布结果与试验结果吻合较好, 空腔压力分布和流场结构满足典型闭式空腔流动的特征。空腔前壁附近类似后台阶流动, 气流剪切层在空腔前缘处产生膨胀波, 并撞击空腔底部, 在撞击处和前壁之间的区域产生流动分离; 随后气流附着于空腔底部向后流动, 并在到达空腔后壁之前向外扩张, 形成溢出激波; 撞击激波与溢出激波在空腔外部形成一道激波; 空腔后壁附近流动类似前台阶流动, 在溢出激波和空腔后壁之间产生流动分离。典型压力分布在空腔前壁处的膨胀区域为低压, 激波撞击底部附近压力增大, 撞击激波和溢出激波之间的气流附着区域形成压力平台, 溢出激波处压力再次升高, 并在空腔后壁之前达到最大值。可以看出, 本文方法可以较好模拟空腔流动压力分布和流动结构, 验证了其模拟空腔流动的可靠性。

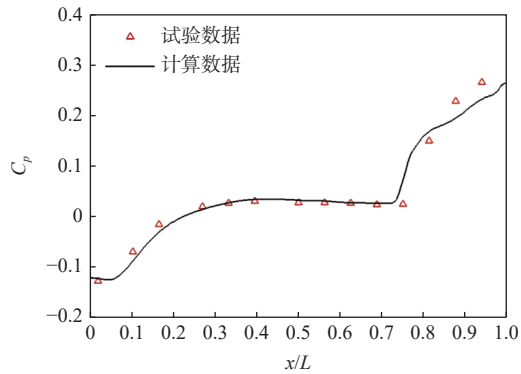


图 2　空腔底部压力分布比较(Ma=2.86)

Fig. 2　Comparison of pressure distribution of the bottom of cavity floor (Ma=2.86)

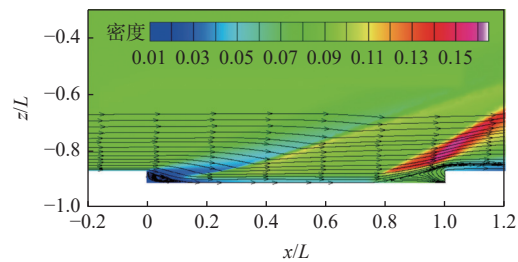


图 3　空腔对称面流线和密度分布

Fig. 3　Streamlines and density distributions on symmetry face

跨声速空腔标模, 模型尺寸: 空腔宽度 W = 63.5 mm, 空腔长度 L = 286.5 mm, 空腔长深比 L/D = 4.4; 计算条件: 来流马赫数 Ma = 0.9, 单位雷诺数 $Re = 9.84\times10^7$ m^{-1}, 来流总温 T_0 = 114 K。图 4 给出了计算得到的空腔底面中心线上压力分布与试验值比较, 空腔底部压力分布为典型的开式空腔流动压力分布。可以看出计算得到的平均压力分布与试验值均较好。

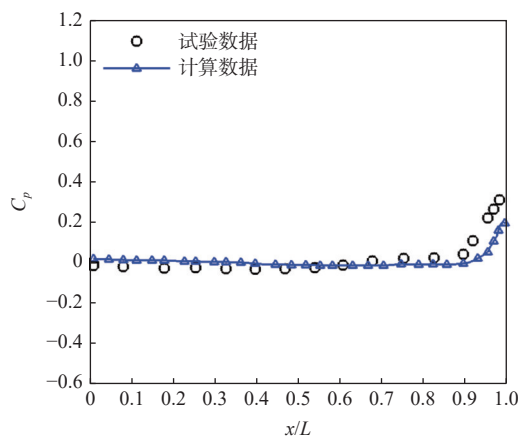


图 4　空腔底部压力分布比较(Ma=0.9)

Fig. 4　Comparison of pressure distribution of the bottom of cavity floor (Ma=0.9)

通过以上分析可知, 文中数值方法既可以很好地模拟高马赫数空腔流动, 又可以很好地模拟跨声速空腔流动。

2.2 分离投放标模验证

2.1节验证了文中方法对空腔流动的模拟能力，本节重点考察该方法求解分离投放问题的可靠性。由于尚未见到公开的高马赫数下分离投放标模，采用机翼/挂架/带舵外挂物模型[26](wing/pylon/finned/store, WPFS)对数值方法模拟分离投放特性的能力进行验证。WPFS模型是由美国第一次分离投放会议发布的，公认用来验证计算方法的试验模型，试验由阿诺德工程发展中心完成，外形如图5所示，模型具体几何尺寸和相关数据详见文献[26]。

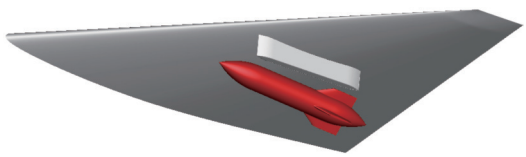
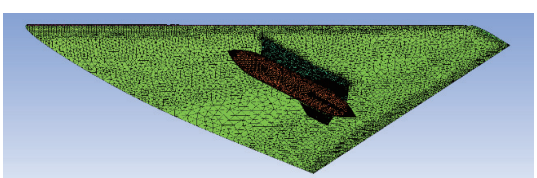


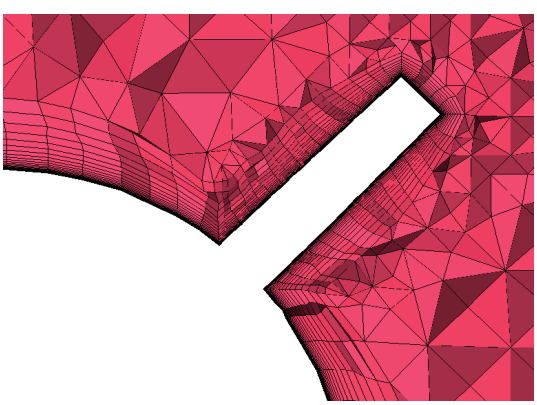
图5 WPFS模型外形

Fig. 5 Geometry of WPSF model

进行多体分离数值模拟时，采用非结构重叠网格技术，用于包裹机翼和挂架的背景网格约445万个网格单元，包裹外挂物的子网格约426万个网格单元，第一层网格间距$y^+ \approx 1$，图6给出了表面网格和舵面局部网格分布。计算条件：马赫数Ma=0.95，攻角α=0°，侧滑角β=0°，来流温度T=236.215 K，压力P=35 651 Pa；外挂物质量m=907.2 kg；重力加速度g=9.8 m/s^2。分离过程中使用了虚拟的弹力作用，弹射力1作用点距弹头部尖点为1.24 m，大小为F_1 = 10 679.4 N；弹射力2作用点距弹头部尖点为1.75 m，大小为F_2 = 42 717.5 N，分离距离大于给出的安全距离(0.1 m)后，虚拟弹力作用消失，作用时间约为0.05 s，总计算时间为0.3 s。



(a) 表面网格分布

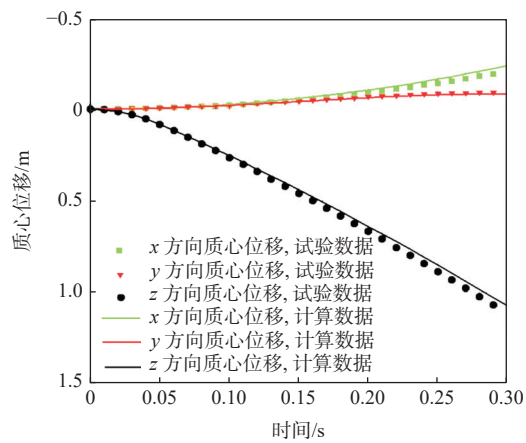


(b) 舵面局部网格分布

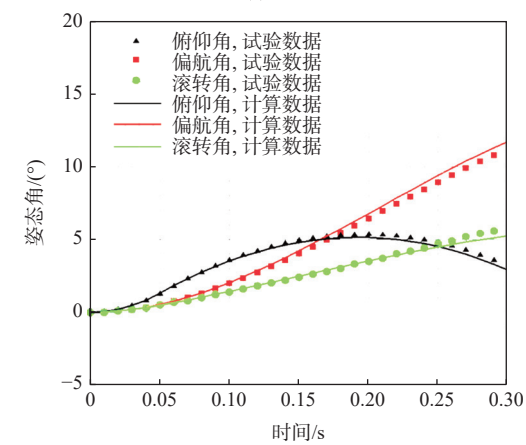
图6 表面网格和舵面局部网格分布

Fig. 6 Distribution of surface grid and local grid

图7给出了计算得到的外挂物质心位移、姿态角随时间变化与试验结果的比较。由图7可知，计算得到x、y、z 3个方向的位移和俯仰、偏航、滚转3个方向的姿态角与试验结果都吻合较好。在分离过程中x方向位移和y方向位移为小量，t=0.29 s时，z方向位移的计算值为1.029 m，试验值为1.068 m，误差约为3.65%。同时，偏航角的计算值为11.27°，试验值为10.77°，误差约为4.43%，俯仰角的计算值为3.25°，试验值为3.53°，误差约为7.93%，滚转角的计算值为5.12°，试验值为5.62°，误差约为8.89%。由此说明文中数值方法可以较好模拟武器分离投放过程的轨迹和姿态角，验证了该方法模拟分离投放特性的可靠性。文中虽然采用的是跨声速分离投放标模，但同样能够说明文中数值方法模拟分离投放问题时，求解六自由度方程的正确性，结合2.1节中数值方法模拟高马赫数空腔的能力验证，说明文中方法能够较好地模拟高马赫数内埋武器分离投放问题。



(a) 质心位移



(b) 姿态角

图7 外挂物质心位移、姿态角对比

Fig. 7 Attitude angle comparison of、heart displacement external hanging objects

3 高马赫数内埋武器分离特性研究

基于文中数值方法，本文针对某高马赫数内埋

武器的分离特性开展了研究, 内埋武器舱长深比约为 5.4, 内埋武器弹长度为 4.6 m, 弹径度为 0.5 m, 内埋武器质量特性见表 2。计算网格采用三棱柱+金字塔+四面体单元的混合网格, 物面上采用三角形的面网格单元, 第一层网格 $y^+ \leqslant 1$。载机背景网格 1 474 万个网格单元, 内埋武器子网格为 347 万网格单元。图 8 给出了内埋弹舱附近重叠网格。为实现高马赫数时对激波的精确捕捉, 提高内埋武器投放轨迹的预测精度, 采用了项目组发展的网格自适应技术。基于网格自适应技术的分离投放模拟过程见图 9, 首先采用重叠网格技术针对初始飞行器背景网格和导弹子网格的重叠区域进行自动挖洞, 建立重叠区域的插值边界; 其次对飞行器背景网格和导弹子网格进行流场求解, 在插值边界进行流场数据传递; 再次流场求解收敛后将流场特征信息数据传递到网格自适应模块, 对飞行器背景网格和导弹子网格进行自适应加密和稀疏处理; 从次网格自适应流场重新求解收敛后将作用在飞行器和导弹的气动力和力矩传递到刚体六自由度运动方程, 求解出下一时刻飞行器和弹体的姿态和位移; 最后将网格自适应后的飞行器网格和弹体网格移动到新的位置并旋转到新的姿态, 并在新的位置和姿态上进行重叠网格挖洞、建立插值边界和流场求解。重复以上过程, 直至完成内埋武器分离投放。

表 2　内埋武器质量特性

Table 2　Quality characteristics of internally buried weapon

质量/kg	I_x/(kg·m^2)	I_y/(kg·m^2)	I_z/(kg·m^2)
1 150.0	48	1 960	1 960

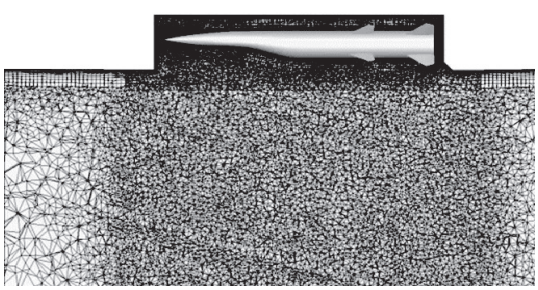


图 8　内埋弹舱附近重叠网格

Fig. 8　Overset grid near the weapon bay

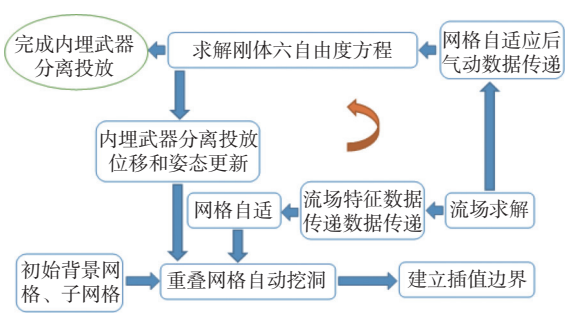
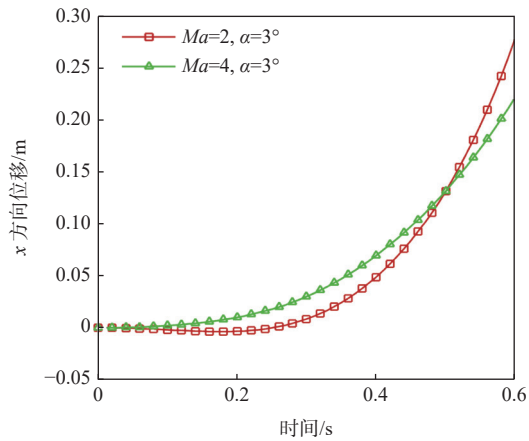


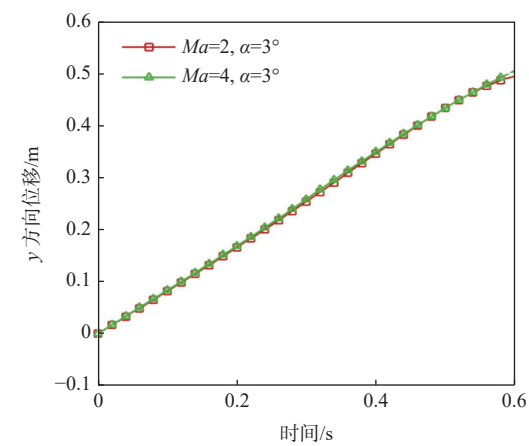
图 9　基于网格自适应技术的分离投放模拟过程

Fig. 9　Progress of weapon separation simulation based on the mesh adaptive technique

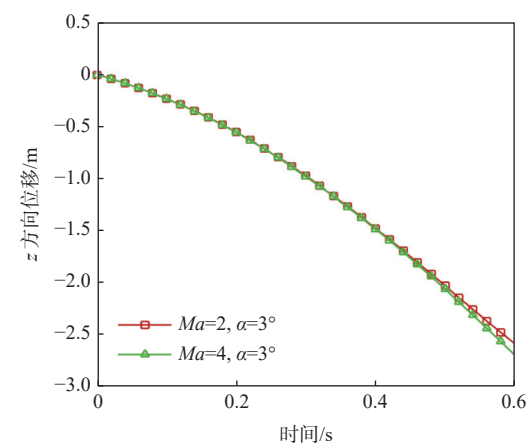
为对比分析马赫数对内埋导弹分离特性的影响, 采用等速压的计算条件: 马赫数(*Ma*=4), 对应分离高度 *H*=23 km; 马赫数(*Ma*=2), 对应分离高度 *H*=14.1 km。攻角均给定为 3°, 武器舱采用环状板(厚度 *h*=70 mm)前缘控制。其他分离条件保持一致: 内埋导弹的分离初始法向速度为 2 m/s(沿舱底法向向外), 初始滚转角为−20°。图 10、图 11、图 12 分别给出了相同初始分离条件下, *Ma*=2 和 *Ma*=4 时,



(a) 轴向位移对比



(b) 侧向位移对比



(c) 法向位移对比

图 10　*Ma*=2 和 *Ma*=4 时导弹位移对比

Fig. 10　Missile displacement comparison for *Ma*=2 and *Ma*=4

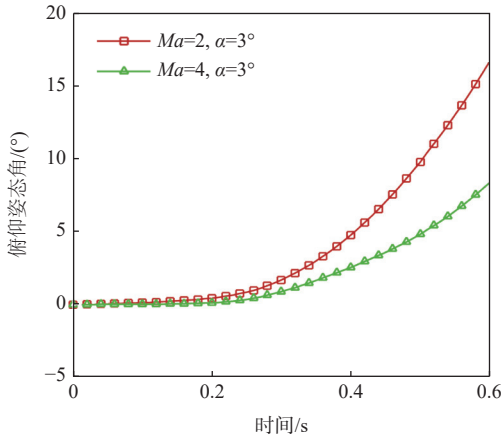


图 11 *Ma*=2 和 *Ma*=4 时俯仰姿态角对比

Fig. 11 Pitch angle comparison for *Ma*=2 and *Ma*=4

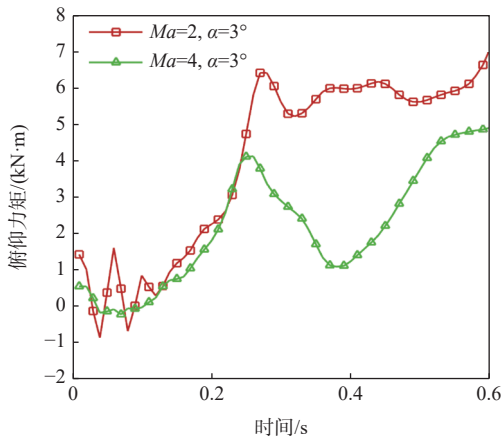


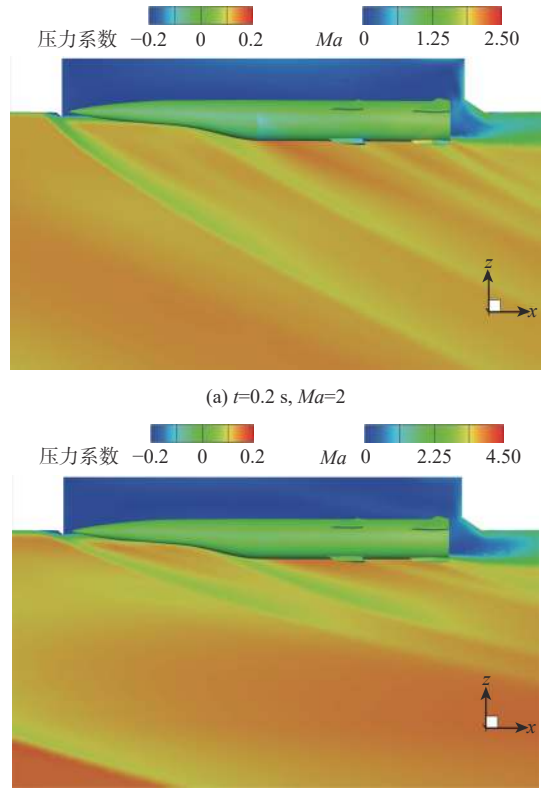
图 12 *Ma*=2 和 *Ma*=4 时俯仰力矩对比

Fig. 12 Pitching moment comparison for *Ma*=2 and *Ma*=4

内埋导弹的位移、俯仰姿态角和俯仰力矩对比曲线。图 13、图 14、图 15 分别给出了 *t*=0.2 s、*t*=0.26 s 和 *t*=0.38 s 时刻，马赫数 *Ma*=2 和 *Ma*=4 压力分布云图对比，导弹表面为压力云图，内埋弹舱截面为马赫数云图。

从图 10、图 11 可以看出，在当前条件下，马赫数对导弹位移影响不明显，对导弹姿态角影响较大。相比于 *Ma*=4 工况，*Ma*=2 时，导弹的轴向位移在 0.5 s 之前略小，在 0.5 s 之后略大；侧向位移和法向位移略小，但其值相差不大；在分离 0.2 s 后，弹体抬头更严重。由图 12 可知，*Ma*=2 工况的弹体在分离 0.25～0.3 s 所受的抬头俯仰力矩陡增，陡增后的抬头俯仰力矩远大于 *Ma*=4 工况弹体的俯仰力矩，造成 *Ma*=2 时导弹在分离 0.2 s 后抬头更严重。

由图 13 可知，在 *t*=0.2 s 时刻，导弹尚未出舱，弹体大部出于舱内的低速流动中，其气动力/力矩以及姿态角在不同马赫数下的差别很小。由图 14 可知，在 *t*=0.26 s 时刻，导弹已经出舱，导弹和内埋弹舱之间会产生通道效应：*Ma*=4 时，导弹尾部与弹舱之间流动马赫数约为 2，导弹尾部附近压力变化不明显；*Ma*=2 时导弹尾部与弹舱之间流动马赫数

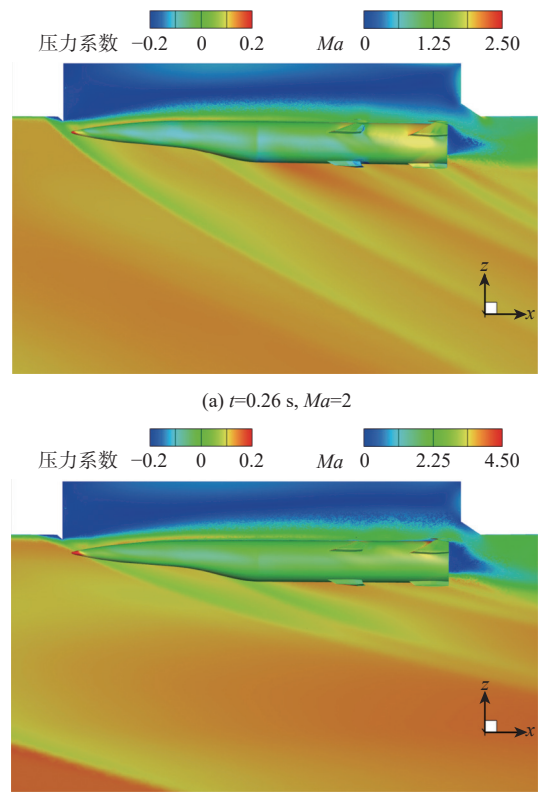


(a) *t*=0.2 s, *Ma*=2

(b) *t*=0.2 s, *Ma*=4

图 13 *t*=0.2 s, *Ma*=2 和 *Ma*=4 时马赫数压力云图对比

Fig. 13 Mach number and pressure comparison contour at *Ma*=2 and *Ma*=4 for *t*=0.2 s

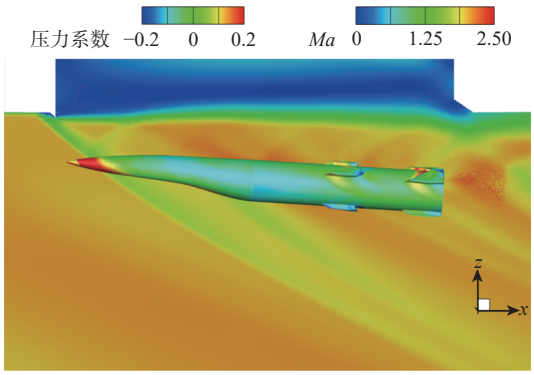


(a) *t*=0.26 s, *Ma*=2

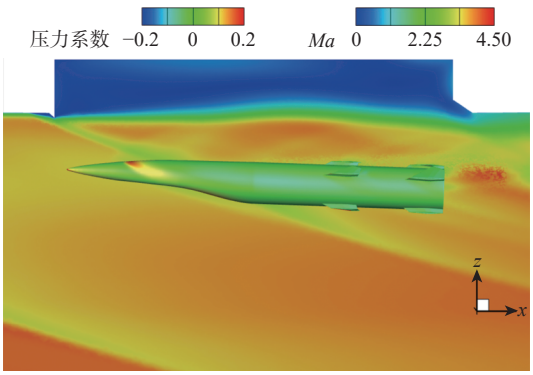
(b) *t*=0.26 s, *Ma*=4

图 14 *t*=0.26 s, *Ma*=2 和 *Ma*=4 时马赫数压力云图对比

Fig. 14 Mach number and pressure contour comparison at *Ma*=2 and *Ma*=4 for *t*=0.26 s



(a) t=0.38 s, Ma=2



(b) t=0.38 s, Ma=4

图 15　t=0.38 s, Ma=2 和 Ma=4 时马赫数压力云图对比

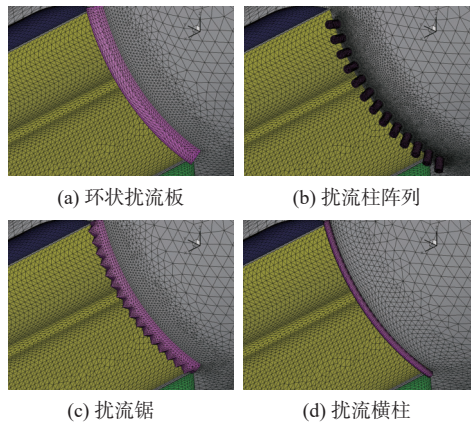
Fig. 15　Mach number and pressure contour comparison at Ma=2 and Ma=4 for t=0.38 s

约为 0.95, 形成壅塞流动, 导致导弹尾部附近压力增大, 产生抬头力矩, 造成导弹抬头力矩陡增, 与图 12 中导弹俯仰力矩曲线规律一致。导弹下落过程中, 内埋弹舱前缘产生的激波会撞击在导弹上, 其干扰会对导弹分离特性造成影响。Ma=4 时, 内埋弹舱前缘产生激波的激波角相比 Ma=2 时更小, 使得高马赫数下飞机形成的激波干扰区相比低马赫数要小, 而等速压投放条件下的弹体下落速率在不同马赫数下接近, 这意味着低马赫数时弹体受飞机绕流干扰的时间更长, 干扰效果也更明显。从图 15 显示的 t=0.38 s 时刻的流场看, 弹舱前缘激波撞击弹体的轴向位置在低马赫数时更为靠前, 说明低马赫数下导弹需要更长的时间才能脱离弹舱前缘激波的干扰范围。

4　不同控制措施对武器分离特性影响

为进一步研究常规弹舱前缘流动控制措施对高马赫数内埋武器分离特性的影响, 开展了对环状板(h=70 mm)、横柱(h=70 mm)、锯齿(h=70 mm)、圆柱列阵(h=80 mm)等 4 种前缘扰流措施的影响对比分析。计算条件与第 3 节中马赫数(Ma=4)时相同。图 16 为不同扰流措施局部网格。

图 17 给出了不同控制措施下, 内埋导弹质心

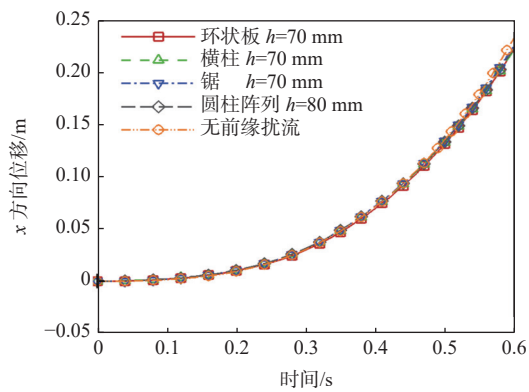


(a) 环状扰流板　(b) 扰流柱阵列

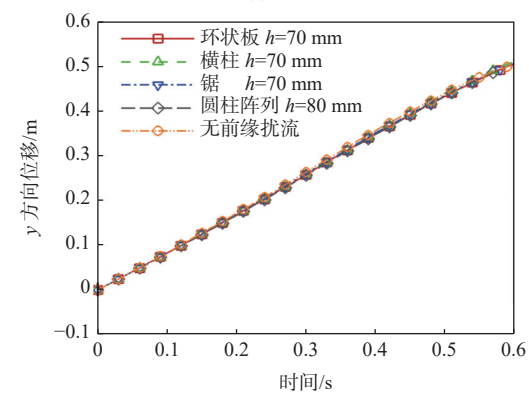
(c) 扰流锯　(d) 扰流横柱

图 16　不同流动控制措施表面网格

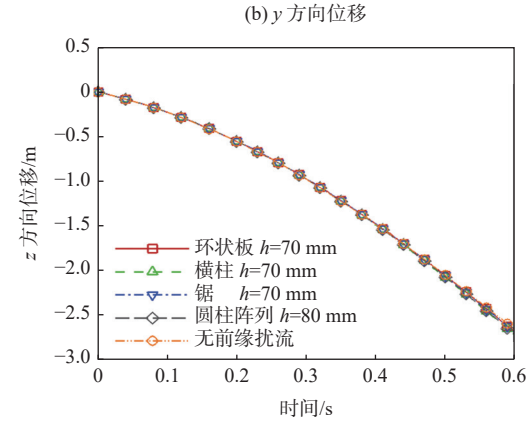
Fig. 16　Local grid of different flow control methods



(a) x 方向位移



(b) y 方向位移



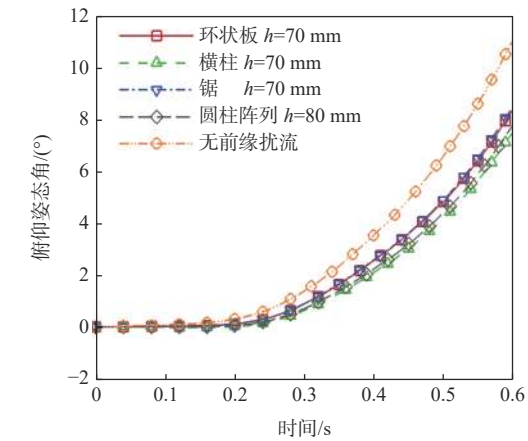
(c) z 方向位移

图 17　不同控制措施下导弹位移对比

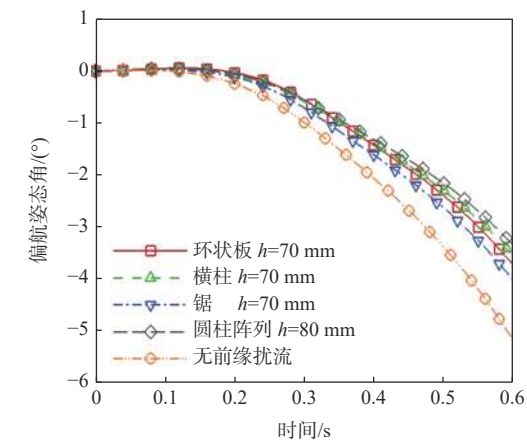
Fig. 17　Comparison of missile displacements under different control measures

位移随时间的变化情况。可以看出，在 t=0.6 s 内，内埋导弹的 x 方向质心位移(向后)、y 方向质心位移(向右)和 z 方向质心位移(向下)均随时间增加而单调增大。不同流动控制措施对 3 个方向质心位移量的影响较小。

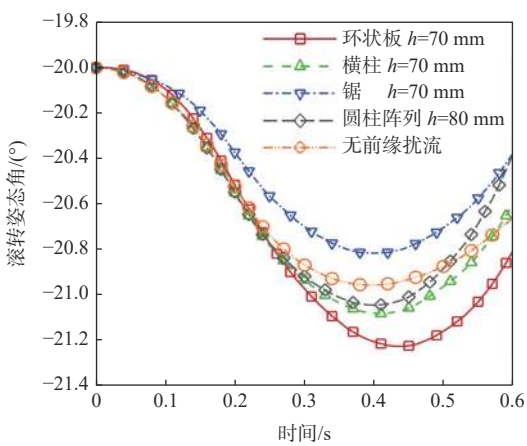
图 18 给出了不同控制措施下，内埋导弹姿态角随时间的变化情况。由图 18 可见，无论是否采用前缘流动控制措施，姿态角随时间的变化趋势一致。采用不同前缘流动控制措施后，导弹的俯仰角和偏航角变化范围均有所减小，有利于导弹的安全分离。同时从俯仰角和偏航角判断，对于文中计算状态，圆柱阵列和横柱两种前缘流动措施控制导弹姿态角变化范围最小，抬头趋势减弱，对于安全分离的效果最好。



(a) 俯仰姿态角



(b) 偏航姿态角



(c) 滚转姿态角

图 18 不同控制措施下姿态角对比

Fig. 18 Comparison of Attitude angle for different control methods

5 结 论

1) 由于起始时刻内埋武器与武器舱之间的通道效应和分离过程的激波干扰，导致内埋导 Ma=4 时的分离特性与 Ma=2 时差异较大。

2) 采用前缘扰流措施后，内埋武器的抬头趋势有所减弱，偏航角有所减小，有利于导弹的安全分离。

3) 在计算状态和研究前缘扰流措施中，圆柱阵列和横柱两种前缘流动控制措施对安全分离的效果相对略好。

参考文献（References）

[1] 常超, 丁海河. 内埋弹射武器机弹安全分离技术综述[J]. 现代防御技术, 2012, 40(5): 67-74.
CHANG C, DING H H. Review on missile store safety separation technology of embedded ejection weapons[J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(5): 67-74(in Chinese).

[2] CLARK R. Evaluation of F-111 weapon bay aero-acoustic and weapon separation improvement techniques[R]. AFFDL: Engineering Physics, 1979: 2-15.

[3] BAKER W, KEEN S, MORGRET C. Validation of weapon separation predictions using F/A-22 flight test results[C]// USAF Developmental Test and Evaluation Summit. Reston: AIAA, 2004: 6803.

[4] ATWOOD C A. Computation of a controlled store separation from a cavity[J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(4): 846-852.

[5] CAVALLO P, LEE R, HOSANGADI A, et al. Simulation of weapons bay store separation flowfields using unstructured grids[C]// 17th Applied Aerodynamics Conference. Reston: AIAA, 1999: 3188.

[6] SICKLES W, HAND T, MORGRET C, et al. High-fidelity, time-accurate CFD store separation simulations from a B-1B bay with comparisons to quasi-steady engineering methods[C]// 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2008: 186.

[7] SAHOO D, ANNASWAMY A, ALVI F. Microjets-based active control of store trajectory in a supersonic cavity using a low-order model[C]// 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Reston: AIAA, 2005: 3097.

[8] JOHNSON R, STANEK M, GROVE J. Store separation trajectory deviations due to unsteady weapons bay aerodynamics[C]// 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2008: 188.

[9] KIM D H, CHOI J H, KWON O J. Detached eddy simulation of weapons bay flows and store separation[J]. Computers & Fluids,

2015, 121: 1-10.

[10] WESTMORELAND W. Trajectory variation due to an unsteady flow-field[C]// Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston: AIAA, 2009: 550.

[11] 吴继飞. 内埋武器舱系统气动特性研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2012.
WU J F. Investigation on aerodynamic characteristics of internal weapons bay system[D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2012(in Chinese).

[12] 薛飞, 金鑫, 王誉超, 等. 内埋武器高速投放风洞试验技术[J]. 航空学报, 2017, 38(1): 120114.
XUE F, JIN X, WANG Y C, et al. Wind tunnel test technique on high speed weapon delivery from internal weapons bay[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(1): 120114(in Chinese).

[13] 杨俊, 李骞, 谢云恺, 等. 超声速内埋武器分离数值研究[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(4): 171-174.
YANG J, LI Q, XIE Y K, et al. Numerical studies on store separation from a weapon bay at supersonic speed[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015, 35(4): 171-174(in Chinese).

[14] 朱收涛, 曹林平, 封普文, 等. 平飞时内埋导弹弹射分离仿真与研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(9): 67-71,75.
ZHU S T, CAO L P, FENG P W, et al. Simulation of missile separation from internal weapon bay[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(9): 67-71,75(in Chinese).

[15] 冯必鸣, 聂万胜, 车学科, 等. 安装角度对内埋式导弹分离特性的影响[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(6): 672-675.
FENG B M, NIE W S, CHE X K, et al. Effect of fixing angle to separation characteristics of internal store[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(6): 672-675(in Chinese).

[16] 雷娟棉, 牛健平, 王锁柱, 等. 初始分离条件对航弹与载机分离安全性影响的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(2): 357-366.
LEI J M, NIU J P, WANG S Z, et al. Numerical simulation about the effect of initial separation condition on safety of aerial bomb separated from an aircraft[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(2): 357-366(in Chinese).

[17] 李骞, 杨俊, 谢云恺, 等. 超声速内埋武器不同分离方式分析[J]. 航空计算技术, 2014, 44(5): 69-72.
LI Q, YANG J, XIE Y K, et al. Simulation of different separation modes of internal weapon at supersonic speed[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(5): 69-72(in Chinese).

[18] 郭亮, 王纯, 叶斌, 等. 采用流动控制的超声速内埋物投放特性研究[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 1752-1761.
GUO L, WANG C, YE B, et al. Investigation on characteristics of store release from internal bay in supersonic flow under flow control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 1752-1761(in Chinese).

[19] 刘瑜. 内埋式弹舱武器发射分离过程研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
LIU Y. Fluid dynamics analysis on missile launching and separating from weapon bay[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010(in Chinese).

[20] 张培红, 王明, 邓有奇, 等. 武器分离及舱门开启过程数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(3): 277-281,293.
ZHANG P H, WANG M, DENG Y Q, et al. Numerical simulation of store separation and door operation[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(3): 277-281,293(in Chinese).

[21] 陈坚强, 吴晓军, 张健, 等. FlowStar: 国家数值风洞 (NNW) 工程非结构通用 CFD 软件[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 625739.
CHEN J Q, WU X J, ZHANG J, et al. FlowStar: general unstructured-grid CFD software for National Numerical Windtunnel (NNW) Project[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 625739(in Chinese).

[22] 张培红, 罗磊, 贾洪印, 等. HLLE++格式在高马赫数空腔流动模拟中的应用[J]. 计算力学学报, 2022, 39(6): 778-785.
ZHANG P H, LUO L, JIA H Y, et al. Application of HLLE++ scheme in the simulation of high Mach number cavity flow[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2022, 39(6): 778-785.

[23] 张培红, 唐银, 唐静, 等. 基于自适应混合网格的高马赫数空腔流动模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(6): 1311-1318.
ZHANG P H, TANG Y, TANG J, et al. Simulation of cavity flow at high Mach number based on adaptive unstructured hybrid mesh[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(6): 1311-1318(in Chinese).

[24] 崔鹏程, 唐静, 李彬, 等. 基于超网格的重叠网格守恒插值方法[J]. 航空学报, 2018, 39(3): 121569.
CUI P C, TANG J, LI B, et al. A conservative interpolation method for overset mesh via super mesh[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(3): 121569(in Chinese).

[25] STALLINGS R L, WILCOX F J. Experimental cavity pressure distributions at supersonic speeds: NASA-TP-2683[R]. Washington: NASA, 1987: 1-79.

[26] HEIM E R. CFD wing /pylon /finned store mutual inter-ference wind tunnel experiment[R]. Tennessee: Arnold Engineering Development Center, 1991.

Numerical simulation of separation characteristics for internally buried weapon at high Mach number

CHEN Bing，LUO Lei，JIANG Anlin，WU Xiaojun，ZHANG Peihong*，JIA Hongyin

(Computational Aerodynamic Institute of China Aerodynamic Research & Development Center，Mianyang 621000，China)

Abstract：The internal weapon may exhibit distinct separation characteristics due to the greater shear layer and shock wave of the high Mach number ($Ma > 2$) weapon bay, as well as distinct flow characteristics compared to the subsonic, transonic, and supersonic weapon bays. In this paper, using the unstructured hybrid mesh flow solver NNW-Flow Star, and based on the improved HLLE++ format and adaptive hybrid mesh technology established in the previous simulation for high Mach number cavity flow, the numerical simulations are used to compare and analyze the separation characteristics of the internal weapon at Ma=4 and Ma=2. The effects of different leading edge flow control measures such as annular plates, transverse columns, serrations and cylindrical arrays on the separation characteristics of high Mach number (Ma=4) weapons are investigated to provide guidance for the design of safe separation schemes for internal weapons at high Mach number. The findings show that at a high Mach number (Ma=4), the weapon bay's distinct flow characteristics and the shock wave's different shock angle at the leading edge of the weapon bay cause the internal weapon and weapon bay to have different channel effects at first and different shock interference during the separation process. As a result, the internal weapon's attitude angle and pitch moment at a high Mach number (Ma=4) differ from those at Ma=2. After the leading edge flow control measures are adopted, the rising trend of the positive pitching moment for internal weapons is weakened and the yaw angle is reduced, which is conducive to the safe separation of missiles.

Keywords：internal weapon；separation characteristics；unstructured hybrid mesh；numerical simulation；flow control

Received：2022-07-22；**Accepted**：2022-08-26；**Published Online**：2023-07-18 15：27

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230718.1301.001

Foundation item：National Numerical Windtunnel (NNW) Project

* **Corresponding author**. E-mail：zph2s@sina.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0571

基于多分类字典学习的灵敏度编码重建算法

段继忠*，王成菊
(昆明理工大学 信息工程与自动化学院，昆明 650504)

摘　　要：灵敏度编码 (SENSE) 方法利用多个线圈的灵敏度信息来减少扫描时间，利用SENSE模型重构的图像易存在伪影，不利于医学诊断。为减少重叠伪影，提高磁共振成像质量，将分类图像块的快速正交字典引入SENSE模型中，得到一种基于多分类字典学习的灵敏度编码重建算法。该算法通过对图像块分类，在每个类中训练字典，得到不同类别的多个字典，运用交替方向乘子法进行图像重构。在人体脑部和膝盖数据上进行实验，结果表明：相比于TV-SENSE、TV-LORAKS-SENSE和LpTV-SENSE算法，所提算法的平均信噪比分别提高了1.53 dB、1.22 dB和1.05 dB，重构图像与参考图像的一致性较高，图像细节部分和边缘轮廓信息保留完整。

关 键 词：图像处理；压缩感知；灵敏度编码；字典学习；交替方向乘子法
中图分类号：TP391
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2123-10

磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)具有软组织对比度高、无X射线电离辐射等诸多优点，是医生对患者进行疾病诊断时常用的一种技术。但是，MRI相对于计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 而言，成像速度较慢，图像质量易受到多种伪影的影响，这些问题阻碍了MRI的进一步发展。加速MRI的技术主要有压缩感知(compressed sensing, CS)和并行成像(parallel imaging, PI)两大类。

CS是从欠采样的数据中恢复出原始信号的一种技术，可以减少数据采样量，进而减少MRI的扫描时间，提高成像速度。2007年，Lustig等[1]将CS理论应用于MRI，详细描述了CS的非线性重建过程，得到了良好的图像重构效果。Song等[2]使用全变分 (total variation, TV) 和2个正交小波作为正则项，提出基于CS的MRI重建算法，提高了重构图像的准确性。自适应稀疏字典学习(dictionary learning, DL)也是一种增强图像稀疏性的方法[3-5]。Qu等[6]使用CS-MRI从图像中训练一个基于块的方向小波参数，指示每个块的几何方向，并结合到稀疏变换中，取得不错的重构效果。为使训练的字典更加稀疏，Zhan等[7]提出基于分类图像块的快速正交字典学习算法 (fast dictionary learning method on classified patches, FDLCP)，按图像块的几何方向对所有图像块集合分类，并从分类后的各个类中分别训练对应的自适应字典，重构图像误差较小。

PI使用具有不同灵敏度的多个射频线圈进行数据采集[8-9]。PI技术包括两大类：一类是已经确定灵敏度信息进行图像重构的方法，如灵敏度编码 (sensitivity encoding, SENSE)[10]等；另一类是基于K空间局部内核进行图像重构的方法，如通用自动校准部分并行采集 (generalized auto-calibrating partially parallel acquisitions, GRAPPA)[11]、迭代自洽并行成像重构 (iterative self-consistent parallel imaging reconstruction, SPIRiT)[12]等。在这些方法中，SENSE显式使用线圈灵敏度信息，可以进行任意轨迹的重

收稿日期：2022-06-30；**录用日期**：2022-08-15；**网络出版时间**：2022-09-28 15:21
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220927.1423.006
基金项目：国家自然科学基金 (61861023)
* **通信作者**. E-mail：duanjz@kust.edu.cn

引用格式：*段继忠，王成菊. 基于多分类字典学习的灵敏度编码重建算法 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2123-2132.*
DUAN J Z，WANG C J. Sensitivity encoding reconstruction algorithm based on multi-category dictionary learning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2123-2132 (in Chinese).

建。2014年，吴春俐等[13]将TV正则项与SENSE模型相结合，提出基于快速分裂Bregman迭代的TV正则化SENSE重建算法，可以保留丰富的图像细节信息。李建武等[14]将CS与SENSE结合，提出了一种新的MRI重建方法。TV-SENSE算法[15]将TV正则项与SENSE模型相结合，提升了图像重构质量。Kim等[16]将TV和基于局部K空间邻域的低秩建模(low-rank modeling of local K-space neighborhoods, LORAKS)作为正则项与SENSE模型相结合，提出TV-LORAKS-SENSE算法，能有效提高图像重构质量。鲍中文[17]利用CS理论，提出基于LpTV正则项的图像重建算法，即LpTV-SENSE算法，并利用算子分裂(operator splitting, OS)技术将目标函数分解为多个子问题迭代求解，在去除伪影方面表现出良好的性能。由此可见，将CS与PI的SENSE模型相结合，可以有效提升图像质量。

交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)[18-19]是一种将多变量耦合的优化问题解耦方法。由于优化问题难以求解，通过引入辅助变量，将优化问题转化为具有多个变量的约束优化问题，利用优化问题的可分离性，使用ADMM将约束优化问题拆解为多个子问题。优点是可以交替地根据某一个变量求最值，固定其他变量，将复杂问题简化，使原本难以求解的优化问题变得容易求解。

近年来提出的多分类字典学习能够增强MRI的稀疏性，进而改善重构图像的质量。为减少重叠伪影，提高MRI重构质量，本文将多分类字典学习方法FDLCP与SENSE模型相结合，得到FDLCP-SENSE模型，利用ADMM将稀疏优化问题拆分为若干个容易求解的子问题，迭代更新得到最优解。用人类大脑和膝关节数据进行测试，实验结果表明，本文提出的算法重构图像的细节和纹理信息保留完整，重构图像与参照图像一致性较高。

1 SENSE框架原理

SENSE属于PI方法中的一种，其重建模型可以表示为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{RFSx} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{x}\in\mathbf{C}^{N}$为待重构的单线圈图像；$\boldsymbol{y}\in\mathbf{C}^{ML}$为欠采样的多线圈K空间数据；$\boldsymbol{S}=[\boldsymbol{S}_1^{\mathrm{H}},\cdots,\boldsymbol{S}_l^{\mathrm{H}},\cdots,\boldsymbol{S}_L^{\mathrm{H}}]^{\mathrm{H}}\in\mathbf{C}^{NL\times N}$，$\boldsymbol{S}_l\in\mathbf{C}^{N\times N}$为对角矩阵，其对应第$l$个线圈的灵敏度，$1\leqslant l\leqslant L$，$L$为PI使用的接收线圈个数；$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{I}_L\otimes\boldsymbol{U}\in\mathbf{C}^{NL\times NL}$，$\boldsymbol{U}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{h}}\otimes\boldsymbol{U}_{\mathrm{v}}\in\mathbf{C}^{N\times N}$为逐线圈二维傅里叶变换，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{h}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{v}}$分别为$N_{\mathrm{h}}$、$N_{\mathrm{v}}$点的傅里叶变换矩阵，$\boldsymbol{I}_L\in\mathbf{R}^{L\times L}$为单位矩阵，“⊗”表示克罗内克积；$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{I}_L\otimes\boldsymbol{R}_1\in\mathbf{R}^{ML\times NL}$为K空间欠采样算子，$\boldsymbol{R}_1\in\mathbf{R}^{M\times N}$为单线圈K空间欠采样矩阵；$M$为单线圈欠采样数据的点数；$N=N_{\mathrm{v}}\times N_{\mathrm{h}}$为单线圈图像的像素点个数。

由于正则项在减少重建中的混叠伪影和噪声影响方面效果显著，能有效提升数据的稀疏性，则正则项与SENSE结合的重建算法表示为

$$\boldsymbol{x}=\arg\min_{\boldsymbol{x}}\left\{\frac{1}{2}\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{RFSx}\|_2^2+\Psi(\boldsymbol{x})\right\} \tag{2}$$

式中：$\Psi(\boldsymbol{x})$为正则项。常见的正则项有l_1正则项、TV正则项等。

2 问题描述

目前，TV-SENSE算法[15]、TV-LORAKS-SENSE算法[16]、LpTV-SENSE算法[17]虽然都能增强图像的稀疏性，有效保留图像的边缘轮廓信息，但仍存在一定的伪影。

为进一步提高MR重构图像的质量，将基于FDLCP的磁共振图像重构[7]与SENSE模型结合，优化问题表示为

$$\boldsymbol{x}=\arg\min_{\boldsymbol{x}}\left\{\frac{1}{2}\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{RFSx}\|_2^2+\lambda\sum_{j=1}^{J}\left\|\boldsymbol{D}_{\omega j}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{G}_j\boldsymbol{x}\right\|_0\right\} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{G}_j\in\mathbf{R}^{n^2\times N}$为从图像$\boldsymbol{x}$中提取第$j$个图像块的算子，$n$为图像块的像素点数；$\boldsymbol{D}_{\omega j}^{\mathrm{H}}$为第$j$个图像块的几何方向为$\omega$的自适应分析字典，$j=1,2,\cdots,J$，$J=N$，$\omega\in\{\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_Q\}$，$Q$为类别数；$\lambda$为正则化参数。

字典$\boldsymbol{D}_{\omega}^{\mathrm{H}}$可由FDLCP[7]算法估计得到，令

$$\boldsymbol{\Phi}=\frac{1}{n}\left[\boldsymbol{G}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\omega 1},\cdots,\boldsymbol{G}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\omega j},\cdots,\boldsymbol{G}_J^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\omega J}\right]^{\mathrm{H}} \tag{4}$$

由FDLCP算法推导可得

$$\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}=\boldsymbol{I} \tag{5}$$

利用式(5)，重建模型(3)，可改写为

$$\boldsymbol{x}=\arg\min_{\boldsymbol{x}}\left\{\frac{1}{2}\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{RFSx}\|_2^2+\lambda\|\boldsymbol{\Phi x}\|_0\right\} \tag{6}$$

求解式(6)的主要困难在于：等式右边第2项不连续非凸，不可以直接求导，难以求解，考虑使用ADMM进行求解。

引入辅助变量$\boldsymbol{z}=\boldsymbol{FSx}$，$\boldsymbol{\alpha}=\boldsymbol{\Phi x}$，以及相应的拉格朗日乘子$\boldsymbol{u}_z$和$\boldsymbol{u}_\alpha$，使用ADMM技术可将问题(6)转化成迭代求解如下子问题：

$$\boldsymbol{z}^{k+1}=\arg\min_{\boldsymbol{z}}\left\{\frac{1}{2}\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{Rz}\|_2^2+\frac{\mu_1}{2}\left\|\boldsymbol{z}-\boldsymbol{FSx}^k-\boldsymbol{u}_z^k\right\|_2^2\right\} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\alpha}^{k+1}=\arg\min_{\boldsymbol{\alpha}}\left\{\lambda\|\boldsymbol{\alpha}\|_0+\frac{\mu_2}{2}\left\|\boldsymbol{\alpha}-\boldsymbol{\Phi x}^k-\boldsymbol{u}_\alpha^k\right\|_2^2\right\} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{x}^{k+1}=\arg\min_{\boldsymbol{x}}\left\{\frac{\mu_1}{2}\left\|\boldsymbol{FSx}-\left(\boldsymbol{z}^{k+1}-\boldsymbol{u}_z^k\right)\right\|_2^2+\frac{\mu_2}{2}\left\|\boldsymbol{\Phi x}-\left(\boldsymbol{\alpha}^{k+1}-\boldsymbol{u}_\alpha^k\right)\right\|_2^2\right\} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{u}_z^{k+1}=\boldsymbol{u}_z^k+\delta\left(\boldsymbol{FSx}^{k+1}-\boldsymbol{z}^{k+1}\right) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{u}_\alpha^{k+1}=\boldsymbol{u}_\alpha^k+\delta\left(\boldsymbol{\Phi x}^{k+1}-\boldsymbol{\alpha}^{k+1}\right) \tag{11}$$

式中: $\mu_1>0$、$\mu_2>0$为罚因子; δ为步长。

子问题 (10) 和 (11) 是对$\boldsymbol{u}_z$和$\boldsymbol{u}_\alpha$的更新方法。

对子问题 (7) 的更新, 令其他变量保持不变, 并令问题 (7) 的目标函数对$\boldsymbol{z}$的导数为 0, 则可得关于$\boldsymbol{z}$的方程为

$$\left(\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}+\mu_1\boldsymbol{I}\right)\boldsymbol{z}=\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}+\mu_1\left(\boldsymbol{FSx}^k+\boldsymbol{u}_z^k\right) \tag{12}$$

由于$\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}$为对角矩阵, 其逆易得, 则可得问题 (7) 的解析解为

$$\boldsymbol{z}^{k+1}=\left(\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}+\mu_1\boldsymbol{I}\right)^{-1}\left[\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}+\mu_1\left(\boldsymbol{FSx}^k+\boldsymbol{u}_z^k\right)\right] \tag{13}$$

子问题 (8) 可用硬阈值法进行求解:

$$\boldsymbol{\alpha}^{k+1}=H(\boldsymbol{\Phi x}^k+\boldsymbol{u}_\alpha^k,\lambda/\mu_2) \tag{14}$$

式中: 硬阈值算子$H(\boldsymbol{\beta},\theta)$定义为

$$H(\boldsymbol{\beta},\theta)=\begin{cases}\boldsymbol{0} & |\boldsymbol{\beta}|<\theta\\ \boldsymbol{\beta} & |\boldsymbol{\beta}|\geqslant\theta\end{cases} \tag{15}$$

其中: $\boldsymbol{\beta}$为输入向量; θ为阈值。

对子问题 (9) 的更新, 控制其他变量不变, 对$\boldsymbol{x}$进行求导, 得

$$\left(\mu_1\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{F}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{FS}+\mu_2\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}\right)\boldsymbol{x}=\mu_1\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{F}^{\mathrm{H}}\left(\boldsymbol{z}^{k+1}-\boldsymbol{u}_z^k\right)+\mu_2\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}\left(\boldsymbol{\alpha}^{k+1}-\boldsymbol{u}_\alpha^k\right) \tag{16}$$

式中: $\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{F}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{FS}=\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}$为对角矩阵。

$\mu_1\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}+\mu_2\boldsymbol{I}$的逆易得, 故可得子问题 (9) 的解析解为

$$\boldsymbol{x}^{k+1}=\left(\mu_1\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}+\mu_2\boldsymbol{I}\right)^{-1}\cdot\left(\mu_1\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{F}^{\mathrm{H}}\left(\boldsymbol{z}^{k+1}-\boldsymbol{u}_z^k\right)+\mu_2\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}\left(\boldsymbol{\alpha}^{k+1}-\boldsymbol{u}_\alpha^k\right)\right) \tag{17}$$

相对误差的计算公式如下:

$$E_{\mathrm{R}}=\frac{\left\|\boldsymbol{x}^{k+1}-\boldsymbol{x}^k\right\|_2}{\left\|\boldsymbol{x}^k\right\|_2} \tag{18}$$

综上所述, 子问题 (7)～(11) 都可有效求解。

算法 1　FDLCP-SENSE 算法。

1. 设置$\boldsymbol{z}^0=\boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{\alpha}^0=\boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{u}_z^0=\boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{u}_\alpha^0=\boldsymbol{0}$, $k=0$。

2. 输入$\boldsymbol{y}$、$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{F}$、$\boldsymbol{S}$、$\boldsymbol{x}^0$、容差。

3. 用 FDLCP 算法[7]得到图像的分类块、多类字典$\{\boldsymbol{D}_{\omega j}^{\mathrm{H}}\}$和变换$\boldsymbol{\Phi}$。

4. Repeat

5. 使用式(13)计算得到$\boldsymbol{z}^{k+1}$。

6. 使用式(14), 通过硬阈值法得到$\boldsymbol{\alpha}^{k+1}$。

7. 使用式(17)计算得到$\boldsymbol{x}^{k+1}$。

8. 计算拉格朗日乘子$\boldsymbol{u}_z^{k+1}=\boldsymbol{u}_z^k+\delta\left(\boldsymbol{FSx}^{k+1}-\boldsymbol{z}^{k+1}\right)$。

9. 计算拉格朗日乘子$\boldsymbol{u}_\alpha^{k+1}=\boldsymbol{u}_\alpha^k+\delta\left(\boldsymbol{\Phi x}^{k+1}-\boldsymbol{\alpha}^{k+1}\right)$。

10. 迭代次数$k=k+1$。

11.使用式(18)计算相对误差。

12.直到相对误差小于设定值, 即容差, 或者k大于最大迭代次数K。

13.输出重构图像$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}^{k+1}$。

3　实验结果和分析

3.1　实验配置

为方便分析 FDLCP-SENSE 算法的重构性能, 分别与 TV-SENSE[15]、TV-LORAKS-SENSE[16]和 LpTV-SENSE[17]算法进行比较。所有算法均用 MATLAB 实现。所有实验均在配置有 i7 7500U@2.70 GHz 的 CPU、8 GB 内存和 Windows 10 操作系统的笔记本电脑上执行。

采用多组数据对算法的重构性能进行测试。第 1 组数据为使用 8 通道线圈采集的脑部切片数据[12], 由加利福尼亚大学和斯坦福大学提供, 尺寸为 200 像素×200 像素, 称为数据 1; 第 2 组数据为在临床 MR 扫描仪上使用 12 通道线圈采集得到的数据集 Calgary-Campinas dataset[20], 层面厚度为 1 mm, 重复时间为 6.3 ms, 回波时间为 2.6 ms, 反转时间为 650 ms, 尺寸为 218 像素×170 像素, 随机取 10 个数据, 并取第 95 个片层用于测试, 将这 10 个数据中的 1 个称为数据 2; 第 3 组数据来自 NYU fastMRI[21], 原始数据使用 15 通道线圈采集, 为方便实验, 利用线圈压缩技术将 15 通道的原始数据压缩到 8 通道, 并将尺寸剪切为 320 像素×320 像素, 取第 200 个片层, 称为数据 3; 第 4 组数据集通过在 GE 扫描仪上使用 8 通道的相控阵列线圈(层面厚度为 0.6 mm, 尺寸为 320 像素×320 像素, 取第 100 个片层)全采样得到[22], 在这组膝盖数据集中随机取 10 个数据进行测试, 并将其中 1 个称为数据 4。

通过实验, 对不同算法的重构图像及误差、评价指标等性能进行分析比较。信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR)[23]和峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)[24]是最普遍、最广泛使用的图像、视频的客观评价指标, 因此, 人们对于提高的 SNR/PSNR 数值(即 dB 数)和图像质量有一定的认识, SNR 常用来评价 MRI 重构图像的质量。然而, SNR 具有一定的局限性, 因此, 还引入结构相似性 (structural similarity, SSIM)[25]和高频误差范数 (high-frequency error norm, HFEN)[5] 2 个评价指标作为补充。SSIM 衡量图像之间结构相似度, SSIM 越大, 表明重构图像与参考图像越相似, 重构图像的失真程度越小。HFEN 用于衡量图像边缘部分重构好坏程度, 可用

来衡量高频误差，高频主要集中在图像的边缘部分，HFEN越小，表明图像的边缘部分重构质量越好。对于SSIM、HFEN这2个指标的改进，较难对应到质量提升的程度上。综合考虑，主要将SNR作为图像质量提升的主要衡量指标。

SNR定义如下：

$$V_{\mathrm{SNR}}=10\lg\left(\frac{V_{\mathrm{var}}}{V_{\mathrm{MSE}}}\right) \tag{19}$$

式中：V_{MSE}为重构图像$\boldsymbol{x}$与参考图像$\hat{\boldsymbol{x}}$的均方误差；V_{var}为$\hat{\boldsymbol{x}}$的方差。

SSIM定义如下：

$$V_{\mathrm{SSIM}}=\frac{(2u_xu_{\hat{x}}+c_1)(2\sigma_{x\hat{x}}+c_2)}{(u_x^2+u_{\hat{x}}^2+c_1)\left(\sigma_x^2+\sigma_{\hat{x}}^2+c_2\right)} \tag{20}$$

式中：u_x和σ_x^2分别为$\boldsymbol{x}$的均值和方差；$u_{\hat{x}}$和$\sigma_{\hat{x}}^2$分别为$\hat{\boldsymbol{x}}$的均值和方差；$\sigma_{x\hat{x}}$为$\boldsymbol{x}$和$\hat{\boldsymbol{x}}$的协方差；c_1和c_2为常数。

HFEN定义如下：

$$V_{\mathrm{HFEN}}=\sqrt{\frac{\|\mathrm{LoG}(\hat{\boldsymbol{x}})-\mathrm{LoG}(\boldsymbol{x})\|_F^2}{\|\mathrm{LoG}(\boldsymbol{x})\|_F^2}} \tag{21}$$

式中：LoG(·)为高斯拉普拉斯滤波器。

3.2 不同初始值下对算法的影响

由于FDLCP-SENSE算法的重构性能有限，考虑2种变体算法。①以零填充数据进行初始化的FDLCP-SENSE的重构结果为初始值再进行一轮FDLCP-SENSE重构，记为FDLCP-SENSE0；②以零填充数据进行初始化的LpTV-SENSE的重构结果作为初始值进行FDLCP-SENSE重构，记为FDLCP-SENSE1。比较2种算法的运行时间，结果如图1所示。ACS为自动校准信息，AF为加速因子。

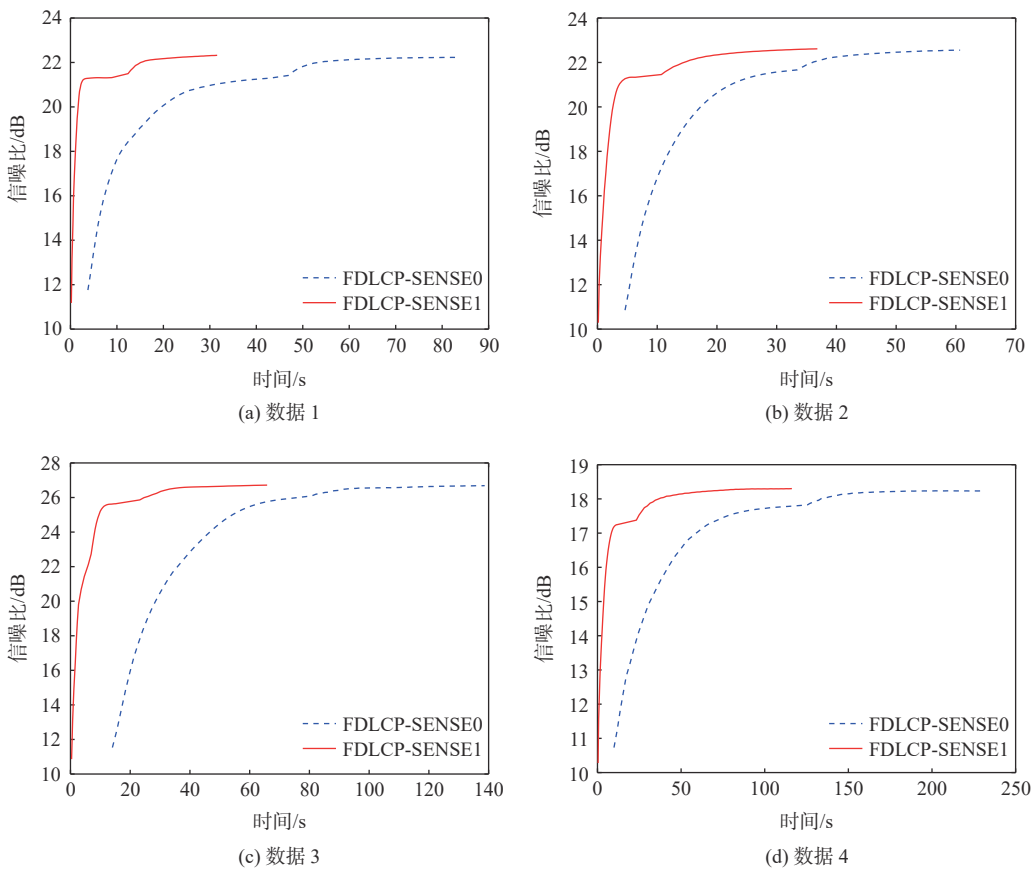


图1 AF=5、24像素×24像素ACS二维泊松圆盘欠采样时4个数据的信噪比随时间变化曲线

Fig. 1 SNR versus time curves for four data at two-dimensional Poisson discs undersampling when acceleration factor is 5 and 24 pixel×24 pixel ACS

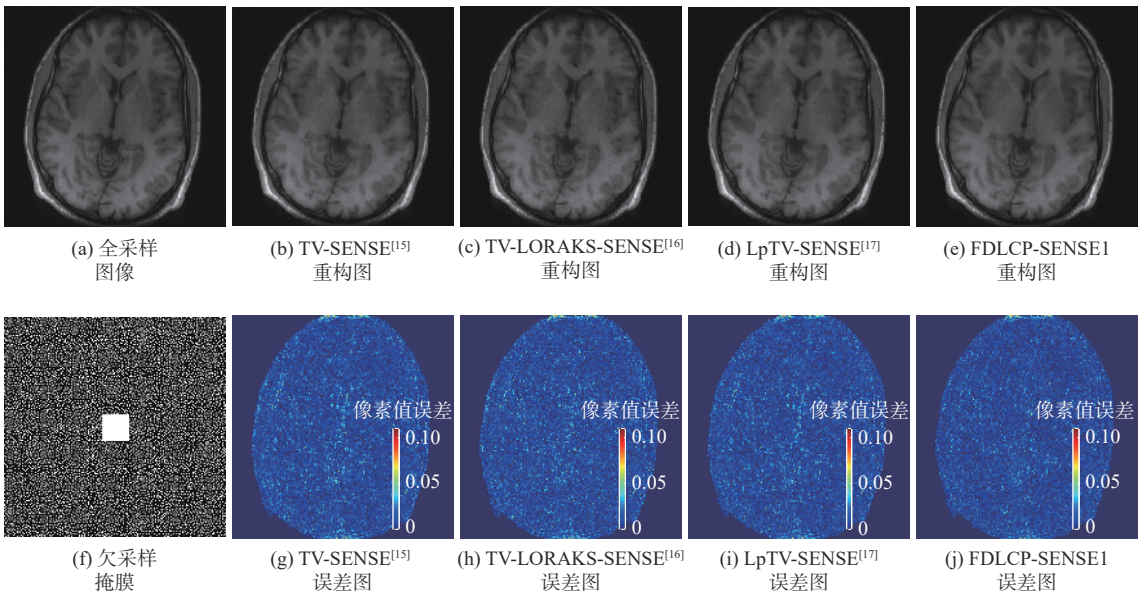
加速因子为5时，4个数据的重构图像SNR近似相等，但重构时间有所减少。具体地，FDLCP-SENSE1的重构速度比FDLCP-SENSE0分别快2.65倍、1.66倍、2.30倍和2.1倍。

与FDLCP-SENSE0相比，FDLCP-SENSE1在保证SNR基本不变的情况下，有效减少了图像重构时间。因此，本文均采用FDLCP-SENSE1进行实验。

3.3 相同加速因子下各算法的视觉比较

使用加速因子为4、24像素×24像素ACS的二维泊松圆盘欠采样掩膜，分别在4个数据上进行测试，重构图像及误差如图2～图5所示。

数据1的重构图像和误差如图2所示，可以看出，TV-SENSE[15]算法和TV-LORAKS-SENSE[16]

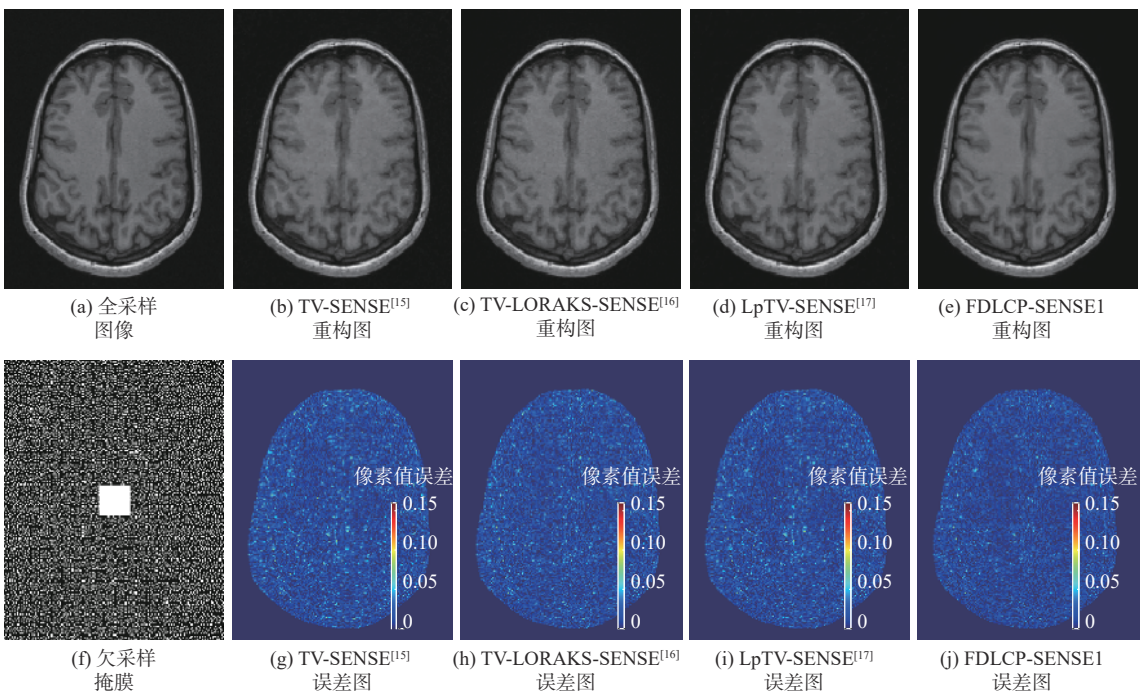


(a) 全采样图像　(b) TV-SENSE[15] 重构图　(c) TV-LORAKS-SENSE[16] 重构图　(d) LpTV-SENSE[17] 重构图　(e) FDLCP-SENSE1 重构图

(f) 欠采样掩膜　(g) TV-SENSE[15] 误差图　(h) TV-LORAKS-SENSE[16] 误差图　(i) LpTV-SENSE[17] 误差图　(j) FDLCP-SENSE1 误差图

图 2　AF=4 时 4 种算法在欠采样数据 1 上的重构图像和误差

Fig. 2　Reconstructed and error images for four algorithms on undersampled data 1 when acceleration factor is 4



(a) 全采样图像　(b) TV-SENSE[15] 重构图　(c) TV-LORAKS-SENSE[16] 重构图　(d) LpTV-SENSE[17] 重构图　(e) FDLCP-SENSE1 重构图

(f) 欠采样掩膜　(g) TV-SENSE[15] 误差图　(h) TV-LORAKS-SENSE[16] 误差图　(i) LpTV-SENSE[17] 误差图　(j) FDLCP-SENSE1 误差图

图 3　AF=4 时 4 种算法在欠采样数据 2 上的重构图像和误差

Fig. 3　Reconstructed and error images for four algorithms on undersampled data 2 when acceleration factor is 4

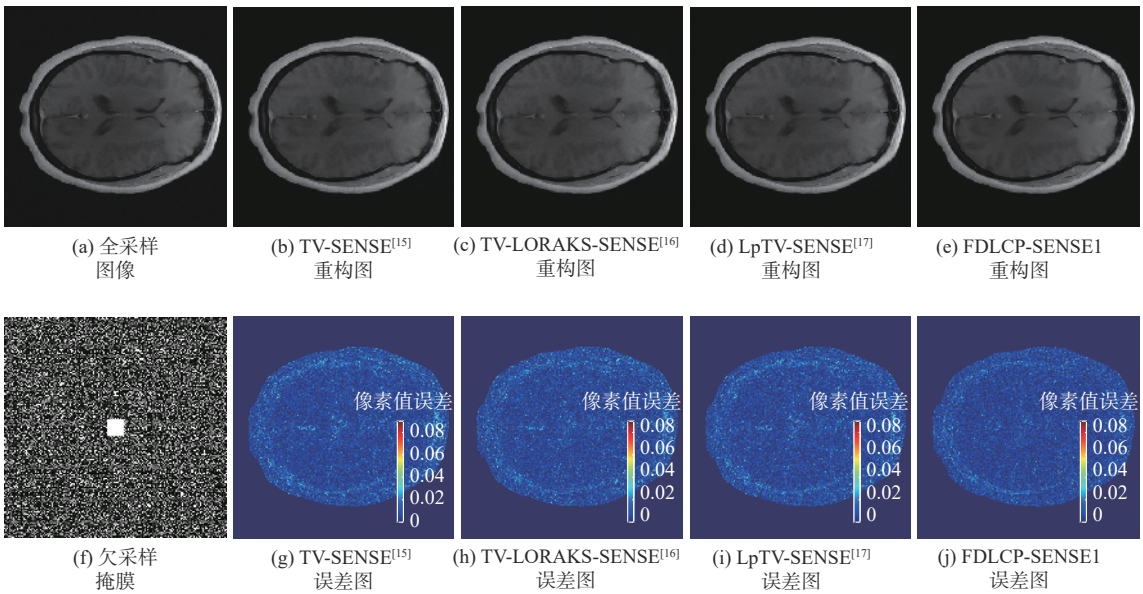
算法的误差存在大量较亮的点, 说明误差较大, LpTV-SENSE[17] 算法误差有所减少, 但边缘处的信息丢失较多, FDLCP-SENSE1 算法去模糊效果显著, 重构图像和原始图像最接近。

数据 2 的重构图像和误差如图 3 所示, 可以看出, TV-SENSE[15] 算法的误差存在大量模糊和阶梯伪影, TV-LORAKS-SENSE[16] 和 LpTV-SENSE[17] 算法在平滑处的伪影有所减少, 但图像边缘轮廓的信息丢失较多, FDLCP-SENSE1 算法进一步减少了重构中的伪影, 边缘轮廓信息保留更完整。

数据 3 的重构图像和误差如图 4 所示, 可以看出, FDLCP-SENSE1 与其他 3 种算法相比误差最小, 保留更多的细节信息, 重构图像质量较好, 与原图更加近似。

数据 4 的重构图像和误差如图 5 所示, 可以看出, TV-SENSE[15] 算法的误差存在大量颗粒状伪影, TV-LORAKS-SENSE[16] 和 LpTV-SENSE[17] 算法伪影有所减少, FDLCP-SENSE1 算法进一步减少了颗粒状伪影, 能保留更多的图像细节信息。

综上所述, FDLCP-SENSE1 能较好地消除伪影,

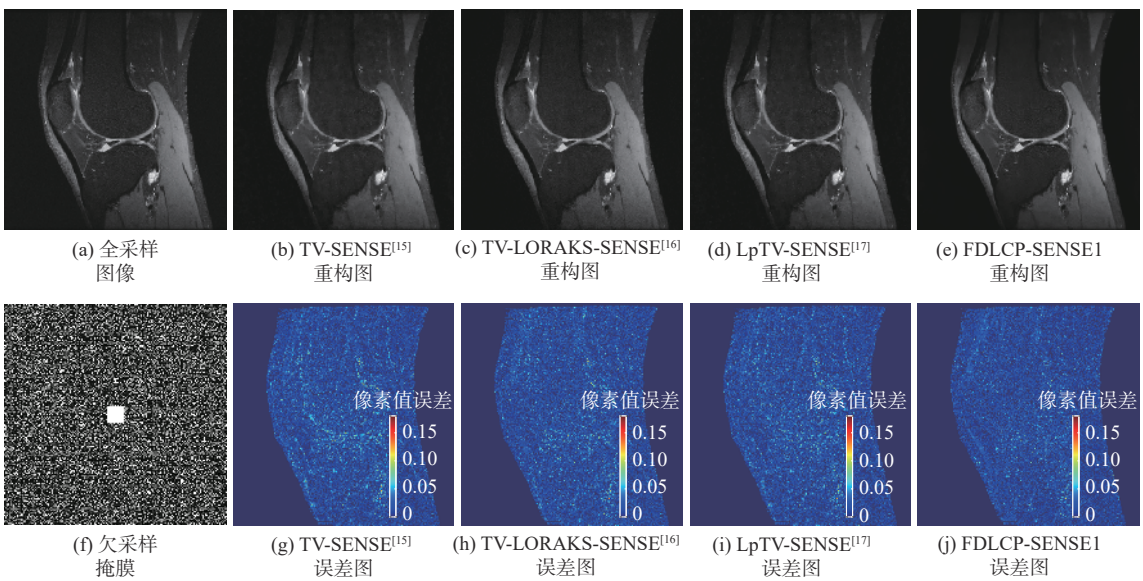


(a) 全采样图像 (b) TV-SENSE[15]重构图 (c) TV-LORAKS-SENSE[16]重构图 (d) LpTV-SENSE[17]重构图 (e) FDLCP-SENSE1重构图

(f) 欠采样掩膜 (g) TV-SENSE[15]误差图 (h) TV-LORAKS-SENSE[16]误差图 (i) LpTV-SENSE[17]误差图 (j) FDLCP-SENSE1误差图

图4 AF=4时4种算法在欠采样数据3上的重构图像和误差

Fig. 4 Reconstructed and error images for four algorithms on undersampled data 3 when acceleration factor is 4



(a) 全采样图像 (b) TV-SENSE[15]重构图 (c) TV-LORAKS-SENSE[16]重构图 (d) LpTV-SENSE[17]重构图 (e) FDLCP-SENSE1重构图

(f) 欠采样掩膜 (g) TV-SENSE[15]误差图 (h) TV-LORAKS-SENSE[16]误差图 (i) LpTV-SENSE[17]误差图 (j) FDLCP-SENSE1误差图

图5 AF=4时4种算法在欠采样数据4上的重构图像和误差

Fig. 5 Reconstructed and error images for four algorithms on undersampled data 4 when acceleration factor is 4

重构误差较小。

3.4 不同加速因子下各算法的重构性能比较

为更加客观地评价本文算法的重构性能，采用加速因子为3～7和24像素×24像素ACS的二维泊松圆盘欠采样掩膜，分别对4个数据进行测试，并使用TV-SENSE[15]、TV-LORAKS-SENSE[16]、LpTV-SENSE[17]、FDLCP-SENSE1进行重构。表1～表4中依次列出了对不同数据进行重构时SNR、SSIM和HFEN的数值。表5列出了22个数据在加速因子为3～7时，FDLCP-SENSE1与其他算法相比的平均SNR、平均SSIM和平均HFEN的差值。表6为针对不同算法的重构时间比较。

不同算法的重构效果如表1～表4所示。FDLCP-SENSE1与TV-SENSE[15]、TV-LORAKS-SENSE[16]、LpTV-SENSE[17]相比，3个指标均有所改善。对于数据1，SNR分别平均提升1.23 dB、1.19 dB、0.94 dB。对于数据2，SNR分别平均提升1.59 dB、1.16 dB、1.25 dB。对于数据3，SNR分别平均提升1.32 dB、1.11 dB、1.06 dB。对于数据4，SNR分别平均提升1.35 dB、1.06 dB、1.12 dB。总的来说，FDLCP-SENSE1与前3种算法相比，有着更高的SNR和SSIM，以及更低的HFEN，即3种评价指标都表明FDLCP-SENSE1重构出的图像质量更好。

如表5所示，FDLCP-SENSE1相对比较算法的平均SNR和平均SSIM有所增加，而平均HFEN有所减少，表明与其他3种算法相比，FDLCP-SENSE1

表 1　AF=3～7 时数据 1 在泊松圆盘欠采样下各算法的重构结果

Table 1　Reconstruction results of different algorithms for data 1 under Poisson disc undersampling when acceleration factor is 3−7

算法	SNR/dB					SSIM					HFEN				
	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7
TV-SENSE[15]	24.06	22.40	20.97	20.05	19.07	0.972 9	0.963 5	0.952 2	0.942 6	0.931 5	0.113 9	0.147 8	0.184 8	0.211 6	0.245 9
TV-LORAKS-SENSE[16]	23.80	22.32	21.10	20.24	19.28	0.970 0	0.960 8	0.951 0	0.942 6	0.932 2	0.108 6	0.139 4	0.171 6	0.196 3	0.230 0
LpTV-SENSE[17]	24.19	22.61	21.32	20.43	19.45	0.973 7	0.964 6	0.954 3	0.944 5	0.933 0	0.111 2	0.140 5	0.173 1	0.199 0	0.231 8
FDLCP-SENSE1	24.84	23.40	22.35	21.59	20.52	0.977 1	0.969 8	0.962 1	0.955 7	0.944 9	0.100 3	0.125 2	0.150 3	0.169 1	0.203 9

表 2　AF=3～7 时数据 2 在泊松圆盘欠采样下各算法的重构结果

Table 2　Reconstruction results of different algorithms for data 2 under Poisson disc undersampling when acceleration factor is 3−7

算法	SNR/dB					SSIM					HFEN				
	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7
TV-SENSE[15]	23.77	22.24	20.87	19.79	19.04	0.966 2	0.955 4	0.943 7	0.931 6	0.922 4	0.105 5	0.134 2	0.167 5	0.198 7	0.220 5
TV-LORAKS-SENSE[16]	23.97	22.57	21.40	20.31	19.62	0.967 1	0.957 1	0.947 7	0.937 1	0.928 8	0.092 9	0.115 7	0.142 5	0.170 9	0.190 8
LpTV-SENSE[17]	24.13	22.57	21.28	20.12	19.29	0.969 4	0.958 7	0.947 9	0.933 7	0.922 9	0.098 0	0.125 3	0.154 6	0.188 2	0.210 6
FDLCP-SENSE1	25.09	23.80	22.61	21.44	20.71	0.975 2	0.968 2	0.959 8	0.948 6	0.941 1	0.085 4	0.105 3	0.130 3	0.159 5	0.177 9

表 3　AF=3～7 时数据 3 在泊松圆盘欠采样下各算法的重构结果

Table 3　Reconstruction results of different algorithms for data 3 under Poisson disc undersampling when acceleration factor is 3−7

算法	SNR/dB					SSIM					HFEN				
	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7
TV-SENSE[15]	27.78	26.32	25.41	24.58	23.77	0.981 4	0.976 2	0.972 5	0.969 1	0.965 0	0.075 5	0.091 8	0.105 6	0.118 4	0.133 2
TV-LORAKS-SENSE[16]	27.76	26.44	25.64	24.89	24.18	0.980 5	0.975 3	0.971 8	0.968 7	0.965 2	0.070 9	0.085 2	0.097 5	0.109 8	0.122 9
LpTV-SENSE[17]	27.85	26.48	25.64	24.98	24.25	0.980 9	0.975 6	0.971 8	0.968 8	0.965 1	0.074 5	0.088 8	0.101 2	0.110 4	0.123 8
FDLCP-SENSE1	28.63	27.47	26.72	26.15	25.51	0.984 1	0.979 9	0.976 9	0.974 3	0.971 5	0.065 9	0.077 2	0.087 4	0.095 8	0.105 3

表 4　AF=3～7 时数据 4 在泊松圆盘欠采样下各算法的重构结果

Table 4　Reconstruction results of different algorithms for data 4 under Poisson disc undersampling when acceleration factor is 3−7

算法	SNR/dB					SSIM					HFEN				
	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7
TV-SENSE[15]	19.03	17.73	16.95	16.20	15.69	0.923 5	0.902 4	0.888 9	0.877 3	0.866 6	0.227 5	0.278 2	0.309 1	0.345 5	0.376 6
TV-LORAKS-SENSE[16]	19.15	17.95	17.25	16.59	16.08	0.924 2	0.903 6	0.891 1	0.880 8	0.870 9	0.201 9	0.250 2	0.276 9	0.309 5	0.341 1
LpTV-SENSE[17]	19.01	17.82	17.19	16.59	16.11	0.921 6	0.899 7	0.887 1	0.876 5	0.865 2	0.216 0	0.267 6	0.289 5	0.317 9	0.343 8
FDLCP-SENSE1	20.01	18.93	18.30	17.75	17.34	0.936 2	0.919 1	0.908 0	0.897 5	0.889 9	0.182 0	0.216 2	0.236 3	0.254 5	0.274 1

表 5　AF=3～7 时 22 个数据在泊松圆盘欠采样下平均 SNR、平均 SSIM、平均 HFEN 差值

Table 5　Difference of mean SNR, mean SSIM, and mean HFEN for 22 sets of data at Poisson disc undersampling when acceleration factor is 3−7

算法	平均SNR/dB					平均SSIM					平均HFEN				
	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7	AF=3	AF=4	AF=5	AF=6	AF=7
FDLCP-SENSE1 & TV-SENSE	1.23	1.44	1.61	1.68	1.71	0.055 6	0.072 1	0.082 3	0.090 6	0.097 2	−0.032 8	−0.045 4	−0.055 8	−0.063 9	−0.069 5
FDLCP-SENSE1 & TV-LORAKS-SENSE	0.85	1.06	1.26	1.43	1.51	0.007 1	0.009 8	0.012 3	0.014 0	0.015 3	−0.014 2	−0.026 5	−0.037 5	−0.049 4	−0.058 2
FDLCP-SENSE1 & LpTV-SENSE	0.86	1.01	1.10	1.13	1.14	0.029 6	0.038 2	0.043 2	0.047 5	0.050 6	−0.023 8	−0.031 4	−0.036 8	−0.041 5	−0.043 9

的重构图像质量更高，随着加速因子的增大，这一优势更加明显。

不同算法的重构时间如表6所示，对4个数据在加速因子为4时4种算法的重构时间进行比较，可以看出，LpTV-SENSE[17]算法的运行速度最快，FDLCP-SENSE1重构时间是LpTV-SENSE[17]的1.3～2.6倍，另外2种算法TV-SENSE[15]和TV-LORAKS-SENSE[16]则需要更长的重构时间。然而，考虑到FDLCP-SENSE1算法重构图像的平均SNR比其他算法高0.85 dB以上，将在后续研究中使用图形处理器(graphics processing unit, GPU)对算法进行并行优化，以减少FDLCP-SENSE1算法的重构时间。

表6 AF=4时不同算法在欠采样的4个数据上的重构时间

Table 6 Reconstruction time of different algorithms on four data at undersampling when acceleration factor is 4 s

数据	TV-SENSE	TV-LORAKS-SENSE	LpTV-SENSE	FDLCP-SENSE1
数据1	38	153	15	27
数据2	53	281	23	31
数据3	213	866	41	63
数据4	196	319	40	105

FDLCP-SENSE1与其他算法相比，SNR的相对差值如图6中的箱线图所示。引入分类图像块的快速字典训练FDLCP，能有效提高SENSE模型的重构性能，证明了本文算法的有效性。

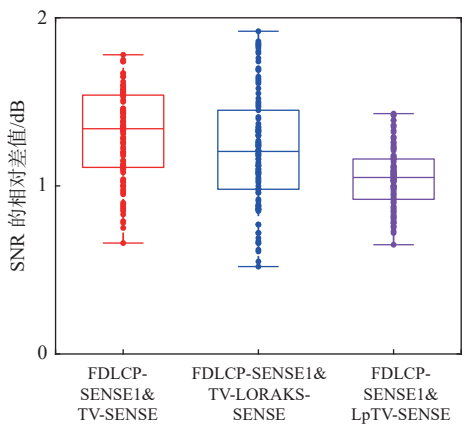


图6 22个数据在AF=3～7、24像素×24像素ACS泊松圆盘欠采样时FDLCP-SENSE1与其他算法SNR的差值

Fig. 6 SNR difference between FDLCP-SENSE1 and other algorithms for 22 data when acceleration factor is 3−7 and 24 pixel × 24 pixel ACS Poisson disc undersampling

3.5 收敛性分析

本节通过SNR、HFEN和相对误差3个指标随迭代次数的变化来讨论FDLCP-SENSE1算法的收敛性。

算法的收敛性分析如图7所示。SNR和HFEN在前35次迭代时数值变化较快，当迭代55次(即$E_R<8\times10^{-4}$)后，SNR和HFEN几乎不再变化，此时可以认为FDLCP-SENSE1算法近似收敛。

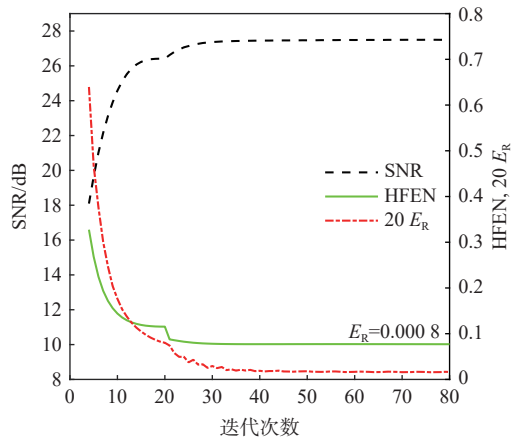


图7 AF=4时对欠采样数据3重构的收敛性分析

Fig. 7 Convergence analysis of reconstruction on data 3 when acceleration factor is 4 under undersampling

4 结 论

针对在PI中使用欠采样来提高磁共振扫描速度导致重构图像质量下降的问题，本文在SENSE模型的基础上作了改进，结论如下：

1) 提出一种FDLCP-SENSE算法，利用FDLCP从图像块分类后的集合中分别训练各类字典，图像的稀疏性得到增强。

2) 在人体脑部和膝盖数据上进行欠采样的图像重构实验，本文算法能有效重构图像，结果表明，相比TV-SENSE、TV-LORAKS-SENSE和LpTV-SENSE算法，FDLCP-SENSE算法重构图像的平均SNR分别提高了1.53 dB、1.22 dB和1.05 dB，平均SSIM相应有所提高，平均HFEN有所降低，图像重构效果较好。

3) 在加速因子相同的情况下，重构图像的质量有较大改善，但重构图像所需时间还有进一步提升的空间。

在保证重构图像质量的前提下，使用GPU对提出算法加速，可以减少重构时间，这在以后的工作中将继续探究。

参考文献（References）

[1] LUSTIG M, DONOHO D, PAULY J M. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2007, 58(6): 1182-1195.

[2] SONG L X, ZHANG J G, WANG Q. MRI reconstruction based on three regularizations: Total variation and two wavelets[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2016, 30: 64-69.

[3] WANG S S, XIA Y, LIU Q G, et al. Fenchel duality based dictionary learning for restoration of noisy images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 5214-5225.

[4] ELAD M, AHARON M. Image denoising via sparse and redundant representations over learned dictionaries[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(12): 3736-3745.

[5] RAVISHANKAR S, BRESLER Y. MR image reconstruction from highly undersampled k-space data by dictionary learning[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2011, 30(5): 1028-1041.

[6] QU X B, GUO D, NING B D, et al. Undersampled MRI reconstruction with patch-based directional wavelets[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2012, 30(7): 964-977.

[7] ZHAN Z F, CAI J F, GUO D, et al. Fast multiclass dictionaries learning with geometrical directions in MRI reconstruction[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2016, 63(9): 1850-1861.

[8] FRANCAVILLA M A, LEFKIMMIATIS S, VILLENA J F, et al. Maxwell parallel imaging[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2021, 86(3): 1573-1585.

[9] 蒋明峰, 朱礼涛, 汪亚明, 等. 结合非线性 GRAPPA 与 SENSE 的并行磁共振成像[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2014, 48(10): 1865-1870.
JIANG M F, ZHU L T, WANG Y M, et al. Parallel MRI based on combination of nonlinear GRAPPA and SENSE[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(10): 1865-1870 (in Chinese).

[10] 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.

[11] GRISWOLD M A, JAKOB P M, HEIDEMANN R M, et al. Generalized auto-calibrating partially parallel acquisitions (GRAPPA)[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2002, 47(6): 1202-1210.

[12] 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.

[13] 吴春俐, 朱学欢, 翟江南, 等. 基于快速分裂 Bregman 迭代的全变差正则化 SENSE 磁共振图像重建[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2014, 35(1): 24-28.
WU C L, ZHU X H, ZHAI J N, et al. Total variation regularized SENSE MRI reconstruction based on fast split Bregman iteration[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(1): 24-28(in Chinese).

[14] 李建武, 康杨, 周金鹏. PF-FICOTA-SENSE: 一种 MRI 快速重构方法[J]. 自动化学报, 2020, 46(5): 897-908.
LI J W, KANG Y, ZHOU J P. PF-FICOTA-SENSE: An MRI fast reconstruction method[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(5): 897-908(in Chinese).

[15] RAMANI S, FESSLER J A. Parallel MR image reconstruction using augmented Lagrangian methods[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2011, 30(3): 694-706.

[16] KIM T H, SETSOMPOP K, HALDAR J P. LORAKS makes better SENSE: Phase-constrained partial Fourier SENSE reconstruction without phase calibration[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2017, 77(3): 1021-1035.

[17] 鲍中文. 磁共振成像的稀疏重构算法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020: 1-70.
BAO Z W. Research on sparse reconstruction algorithm of magnetic resonance imaging[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020: 1-70(in Chinese) .

[18] 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.

[19] AFONSO M V, BIOUCAS-DIAS J M, FIGUEIREDO M A T. Fast image recovery using variable splitting and constrained optimization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(9): 2345-2356.

[20] SOUZA R, BENTO M, NOGOVITSYN N, et al. Dual-domain cascade of U-nets for multi-channel magnetic resonance image reconstruction[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2020, 71: 140-153.

[21] KNOLL F, ZBONTAR J, SRIRAM A, et al. FastMRI: A publicly available raw k-space and DICOM dataset of knee images for accelerated MR image reconstruction using machine learning[J]. Radiology Artificial Intelligence, 2020, 2(1): e190007.

[22] SAWYER A M, LUSTIG M, ALLEY M, et al. Creation of fully sampled MR data repository for compressed sensing of the knee [C]//Proceedings of the SMRT Conference. Salt Lake City: SMRT, 2013.

[23] HUANG J Z, ZHANG S T, METAXAS D. Efficient MR image reconstruction for compressed MR imaging[J]. Medical Image Analysis, 2011, 15(5): 670-679.

[24] CORRIVEAU P, WEBSTER A. VQEG evaluation of objective methods of video quality assessment[J]. SMPTE Journal, 1999, 108(9): 645-648.

[25] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

Sensitivity encoding reconstruction algorithm based on multi-category dictionary learning

DUAN Jizhong*, WANG Chengju

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: The sensitivity encoding (SENSE) method explicitly utilizes sensitivity information from multiple receiving coils to reduce scan time. The images reconstructed using the SENSE model have a portion of blurring artifacts that are not conducive to medical diagnosis. We propose a sensitivity coding reconstruction approach based on multi-classification dictionary learning to minimize overlap artifacts and enhance the quality of parallel magnetic resonance imaging by integrating fast dictionary learning on classed patches into the SENSE model. In order to obtain picture reconstructions using alternating direction method of multipliers, the algorithm first classifies the image blocks and then trains multiple dictionaries of various classes in each category. The results on the human brain and knee data show that the algorithm improves the average signal-to-noise ratio by 1.53 dB, 1.22 dB and 1.05 dB over the TV-SENSE, TV-LORAKS-SENSE and LpTV-SENSE algorithms, respectively. The reconstructed image is in high agreement with the reference image, and the image detail part and edge contour information are kept intact.

Keywords: image processing; compressed sensing; sensitivity encoding; dictionary learning; alternating direction method of multipliers

Received: 2022-06-30; **Accepted**: 2022-08-15; **Published Online**: 2022-09-28 15:21

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220927.1423.006

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61861023)

* **Corresponding author**. E-mail: duanjz@kust.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0576

基于RCJAYA算法的太阳电池参数辨识

欧阳城添[1]，黄祖威[1]，刘裕嘉[2]，张林[3,*]，朱东林[4]，周昌军[4]

(1. 江西理工大学 信息工程学院，赣州 341000；2. 江西应用科技学院 人工智能学院，南昌 330100；
3. 江西理工大学 软件工程学院，南昌 330000；4. 浙江师范大学 计算机科学与技术学院，金华 321004)

摘 要：为提升智能优化算法辨识太阳电池参数的精度和准确度，提出一种基于排序概率量化机制和混沌扰动JAYA算法(RCJAYA)的辨识方法。RCJAYA算法根据排序概率选择不同方式对个体进行更新，以平衡局部和全局搜索能力，保持种群多样性；对最优个体进行混沌扰动，发掘更优解替代最差解，提升种群质量；采用替换策略更新陷入停滞的个体，提升算法性能。通过RCJAYA算法辨识参数得到的太阳电池单、双二极管的电流均方根误差最优值分别为9.860 2×10^{-4} A、9.825 8×10^{-4} A，与JAYA等5种算法对比，结果表明，RCJAYA算法更具优势。根据辨识结果计算出模拟电流，与实测电流进行比对，在单、双二极管上的平均误差分别为0.000 84 A、0.000 82 A，表明RCJAYA算法辨识的参数值准确可靠。

关 键 词：太阳电池；参数辨识；JAYA算法；排序概率；混沌扰动
中图分类号：TP301.6
文献标志码：A **文章编号：**1001-5965(2024)07-2133-08

太阳能是目前较为普及的清洁能源，基于太阳电池的光伏发电系统已广泛应用，但太阳电池的工作环境会影响其使用寿命，进而影响光伏系统发电效率[1]。通过建立太阳电池电流-电压的关系模型，进行太阳电池参数辨识，对提升光伏系统发电效率具有重要意义。

太阳电池的参数辨识方法主要包括数学解析法和智能优化算法。数学解析法具有较快的求解速度，如最小二乘法[2]、Lambert W函数[3]等，但存在求解精度不高的问题[4]。智能优化算法是近年来应用于太阳电池参数辨识较多的方法，如遗传算法[5]、粒子群算法[6]、差分进化算法[7]等，虽已解决传统数学方法求解精度不高的问题，但仍存在参数过多，需耗时调参来提升辨识精度的问题，缺乏普适性[8]。

JAYA算法是Rao[9]提出的一种新型无参智能优化算法，只需设置种群大小和迭代次数，具有良好的优化能力，已被应用于太阳电池的参数辨识。曾一婕等[10]融合JAYA算法与蜻蜓算法，先由JAYA算法执行全局搜索，再由蜻蜓算法执行局部搜索，获得了准确的辨识参数。Zhang等[11]设计了3种学习策略来提高JAYA算法的种群多样性，个体根据概率执行其中一种，以提升参数辨识的效率。Jian和Weng[12]引入logistic映射提升JAYA算法种群多样性，并引入混沌变异平衡算法探索和开发能力，以提升算法参数辨识的性能。Yang和Gong[13]提出了一种改进进化算子来提升搜索效率，以及线性种群大小缩减策略来控制收敛速度，并引入广义反向学习来增强算法跳出局部最优的能力。上述改进虽有效提升了JAYA算法的性能，但过多的随机操作会破坏较优解，影响算法的收敛速度和精度。

为进一步提升JAYA算法在太阳电池参数辨

收稿日期：2022-07-05；**录用日期：**2022-12-03；**网络出版时间：**2023-01-09 15:42
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230106.1716.001
基金项目：国家自然科学基金(61561024,62002046,62006106)；浙江省自然科学基金(LQ21F02005)；浙江省基础公益研究计划(LGG18E050011)
*通信作者. E-mail：993291500@qq.com

引用格式：欧阳城添，黄祖威，刘裕嘉，等. 基于RCJAYA算法的太阳电池参数辨识[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2133-2140.
OUYANG C T，HUANG Z W，LIU Y J，et al. Parameter identification of solar cell model based on RCJAYA algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2133-2140 (in Chinese).

识上的性能，本文提出了一种基于排序概率量化机制和混沌扰动的JAYA算法(JAYA algorithm based on ranking probability quantization mechanism and chaotic perturbation, RCJAYA)。RCJAYA算法在种群位置更新时，根据排名计算选择概率，为个体选择合适的更新策略，有效提升种群多样性，平衡算法的全局与局部搜索能力；对最优个体进行混沌扰动，得到更优解取代最差解，提升解的质量并加速收敛。为防止算法陷入局部最优而停滞，引入替换策略，对超出最大停滞次数的个体进行替换。太阳电池参数辨识实验结果表明，RCJAYA算法具有良好的优化性能，可得到准确的参数值。

1 太阳电池模型

1.1 单二极管模型

太阳电池单二极管模型结构较为简单，且具有精确的计算结果，因而成为实际工程中的主流模型，其等效电路如图1所示[14]。图中：I_{L}为输出电流，V_{L}为输出电压，R_{S}为串联电阻，R_{sh}为并联的分流电阻，I_{sh}为并联电阻电流，I_{d}为二极管电流，I_{ph}为电池光生电流。

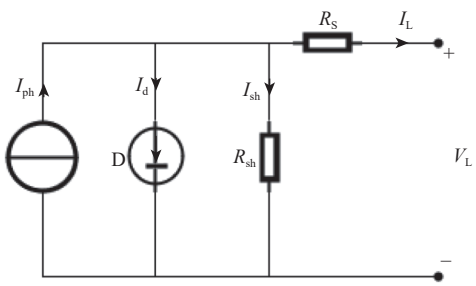


图1 单二极管模型等效电路[14]

Fig. 1 Equivalent circuit of single diode model[14]

单二极管等效电路的输出电流、输出电压和模型参数之间的关系可用如下数学模型表示[11]：

$$I_{\mathrm{L}}=I_{\mathrm{ph}}-I_{\mathrm{sd}}\left[\exp\left(\frac{q(V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}})}{nkT}\right)-1\right]-\frac{V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{sh}}} \tag{1}$$

式中：I_{sd}为二极管反向饱和电流；q为电子电荷量，$q=1.602\,176\,46\times10^{19}$ C；n为二极管理想因子；$k=1.380\,650\,3\times10^{23}$ J/K为玻尔兹曼常数；T为太阳电池工作状态下的绝对温度。单二极管模型中需辨识的未知参数为I_{ph}、I_{sd}、R_{S}、R_{sh}、n。

1.2 双二极管模型

太阳电池的双二极管模型的等效电路如图2所示，其考虑耗尽区复合电流的损耗，并联一个扩散二极管D1和复合二极管D2，得到更高精度的太阳电池模型[15]。

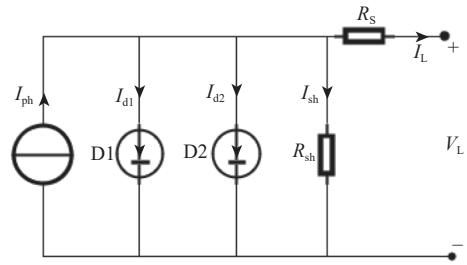


图2 双二极管模型等效电路[15]

Fig. 2 Equivalent circuit of double diode model[15]

双二极管等效电路的输出电流、输出电压和模型参数之间的关系可用如下数学模型表示[11]：

$$I_{\mathrm{L}}=I_{\mathrm{ph}}-I_{\mathrm{sd1}}\left[\exp\left(\frac{q(V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}})}{n_1kT}\right)-1\right]-I_{\mathrm{sd2}}\left[\exp\left(\frac{q(V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}})}{n_2kT}\right)-1\right]-\frac{V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{sh}}} \tag{2}$$

式中：I_{sd1}和I_{sd2}分别为扩散电流和饱和电流；n_1和n_2分别为扩散和复合二极管的理想因子。因此，双二极管模型中需辨识的未知参数为I_{ph}、I_{sd1}、I_{sd2}、R_{S}、R_{sh}、n_1、n_2。

1.3 目标函数

为辨识模型中的未知参数，需建立合理的目标函数，即最小化实测电流、电压数据和辨识计算的电流、电压数据之间的误差，从而转为优化问题，运用智能优化算法求解。式(3)和式(4)分别用于单、双二极管模型[11]：

$$f_k(V_{\mathrm{L}},I_{\mathrm{L}},\boldsymbol{X})=I_{\mathrm{ph}}-I_{\mathrm{sd}}\left[\exp\left(\frac{q(V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}})}{nkT}\right)-1\right]-\frac{V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{sh}}}-I_{\mathrm{L}} \tag{3}$$

$$f_k(V_{\mathrm{L}},I_{\mathrm{L}},\boldsymbol{X})=I_{\mathrm{ph}}-I_{\mathrm{sd1}}\left[\exp\left(\frac{q(V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}})}{n_1kT}\right)-1\right]-I_{\mathrm{sd2}}\left[\exp\left(\frac{q(V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}})}{n_2kT}\right)-1\right]-\frac{V_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{S}}I_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{sh}}}-I_{\mathrm{L}} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{X}$为需辨识参数构成的解向量。

定义均方根误差(root mean squared error, RMSE)作为评价指标，量化辨识计算值和实测值之间的总体差异，建立目标函数。通过最小化目标函数，得到对应的解向量，即为最佳辨识参数。RMSE的计算式如下[11]：

$$X_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}f_k(V_{\mathrm{L}},I_{\mathrm{L}},\boldsymbol{X})^2} \tag{5}$$

式中：N为实测数据的数量。

2 RCJAYA算法

2.1 JAYA算法

JAYA算法作为一种新型群智能优化算法，其

核心思想是向最优解靠拢, 同时规避最差解来进行优化。与多数智能优化算法不同的是, JAYA 算法无须调参, 且没有复杂的计算步骤, 却具有良好的优化性能, 这一特性使其具有潜在的普适性和优化效率。JAYA 算法的种群位置更新表达式如下[9]:

$$X'_{j,k,i}=X_{j,k,i}+r_{1,j,i}\left(X_{j,\text{best},i}-\left|X_{j,k,i}\right|\right)-r_{2,j,i}\left(X_{j,\text{worst},i}-\left|X_{j,k,i}\right|\right) \tag{6}$$

式中: $X_{j,k,i}$为第i次迭代中第k个个体的第j个变量; $X_{j,\text{best},i}$为第i次迭代最优个体的第j个变量; $X_{j,\text{worst},i}$为第i次迭代最差个体的第j个变量; $r_{1,j,i}$和$r_{2,j,i}$为[0,1]上均匀分布的随机数。

2.2　基于排序概率的位置更新

在智能优化算法中, 平衡全局探索和局部开发能力非常重要。本文提出一种基于排序概率的位置更新方式, 个体根据概率选择不同方式进行更新。排序概率的计算式如下:

$$R_i=X_{\text{NP}}-I_i+1 \tag{7}$$

$$P_i=\left(\frac{R_i}{X_{\text{NP}}}\right)^{\beta} \tag{8}$$

$$\beta=0.5+2(t-X_{\text{NP}})/M \tag{9}$$

式中: R_i为个体排名, 个体质量越高, 排名越高, 如最优个体排名X_{NP}, 最差个体排名 1; X_{NP}为种群大小; I_i为升序排序后个体顺序; P_i为选择概率; β为控制参数, 受当前迭代次数t和最大迭代次数M的影响。

排序概率反映个体适应度值的差异, 通过该差异选择不同的位置更新方式, 可有效保持种群多样性。较差个体专注于增强开发能力, 其位置更新表达式如下:

$$x'_{i,j}=x_{i,j}+r\left(x_{\text{best},j}-\left|x_{i,j}\right|\right)-wr\left(x_{\text{worst},j}-\left|x_{i,j}\right|\right) \tag{10}$$

$$w=\begin{cases}\left(\dfrac{f(\boldsymbol{X}_{\text{best}})}{f(\boldsymbol{X}_{\text{worst}})}\right)^2 & f(\boldsymbol{X}_{\text{worst}})\neq 0\\ 1 & \text{其他}\end{cases} \tag{11}$$

式中: $x_{i,j}$为种群第i个解向量的第j维分量; $x_{\text{best},j}$为种群最优解向量的第j维分量; $x_{\text{worst},j}$为种群最差解向量的第j维分量; $\boldsymbol{X}_{\text{best}}$为当前种群最优解向量; $\boldsymbol{X}_{\text{worst}}$为当前种群最差解向量; r为[0,1]之间均匀分布的随机数; w为自适应权重, 其随着最优和最差个体的适应度值而变化, 可在算法早期帮助较差个体更快找到潜在最优区域。

较优个体专注于增强探索能力, 按如下表达式进行位置更新:

$$x'_{i,j}=x_{i,j}+r_1\left(x_{m,j}^{P_m}-x_{n,j}^{\text{R}}\right) \tag{12}$$

式中: $x_m^{P_m}$为按式 (8) 所得P_m概率选择的较优个体; x_n^{R}为从种群随机选择的个体, 且$i\neq m\neq n$; r_1为[0,1]的随机数。

通过排序概率模型, 以及 2 种不同的位置更新方式, 可实现平衡全局搜索和局部搜索的目的。

2.3　混沌扰动

为有效提升种群质量, 加速算法收敛, 本文引入一种基于 logistic 映射的混沌扰动机制[16-18]。通过对最优个体进行扰动, 得到质量较好的个体, 从而替换最差个体; 也可对最优个体进行更新, 提升收敛精度。混沌扰动产生新个体的具体表达式为[17]

$$z_{k+1}=4z_k(1-z_k) \tag{13}$$

$$X_{\text{new},j}=\begin{cases}X_{\text{best},j}+r_2(2z_k-1) & r_2<1-t/M\\ X_{\text{best},j} & \text{其他}\end{cases} \tag{14}$$

式中: $\boldsymbol{X}_{\text{new}}$为经过混沌扰动后产生的新的解向量; z_k为第k次迭代的混沌值, 且z_0从[0,1]中随机选择; r_2为[0,1]的随机数。

从式 (14) 中可以看出, 算法前期会进行更多的扰动, 尽可能获得更多优质个体; 而后期扰动较少, 使个体平稳收敛到全局最优位置。

2.4　替换策略

算法后期, 由于最优和最差个体差异变小, 使位置更新变化不明显, 可能导致算法停滞, 影响搜索能力; 并且当算法陷入局部最优, 个体大量聚集, 更容易出现停滞现象, 算法性能更难发挥。为解决算法停滞带来的负面影响, 本文引入一种停滞替换策略[19]。设置一个外部存储矩阵$\boldsymbol{M}_{\text{EXM}}$, 并为每个个体设置停滞次数$N_{\text{count}}$; 如果$f(\boldsymbol{X}_{\text{new}})<f(\boldsymbol{X})$, $\boldsymbol{X}_{\text{new}}$加入种群, $\boldsymbol{X}$进入$\boldsymbol{M}_{\text{EXM}}$, 同时设$N_{\text{count}}=0$, 否则$N_{\text{count}}=N_{\text{count}}+1$; 当个体停滞次数大于$X_{\text{NP}}\times D$($D$为维度), 从$\boldsymbol{M}_{\text{EXM}}$中选择最优个体替换该个体。$\boldsymbol{M}_{\text{EXM}}$大小设为$X_{\text{NP}}$, 超过该大小, 则随机选择解删除。

2.5　RCJAYA 算法步骤

步骤 1　初始化参数(种群大小X_{NP}、最大迭代次数M)、种群及外部矩阵$\boldsymbol{M}_{\text{EXM}}$。

步骤 2　计算种群个体适应度值, 并升序排序, 得到最优、最差个体$\boldsymbol{X}_{\text{best}}$、$\boldsymbol{X}_{\text{worst}}$, 以及对应的适应度值$f_{\text{best}}$、$f_{\text{worst}}$。

步骤 3　得到排序后个体顺序I_i, 根据式 (7) 计算个体排名R_i; 根据式 (8) 和式 (9) 计算个体选择概率P_i。

步骤 4　生成一个[0,1]之间的随机概率P_{rand}, 当$P_{\text{rand}}>P_i$, 个体根据式 (10) 更新位置, 否则根据式 (12) 更新。

步骤 5　计算新个体适应度值, 取更优个体加入种群; 根据替换策略记录个体停滞次数N_{count}。

步骤 6 确定新种群最优、最差个体$\boldsymbol{X}_{\text{best}}$、$\boldsymbol{X}_{\text{worst}}$，根据式 (14) 对最优个体进行混沌扰动得到新个体，如果新个体更优，则替代最差个体，同时记录停滞次数N_{count}。

步骤 7 判断每个个体的N_{count}是否超出$X_{\text{NP}}\times D$，超出则从$\boldsymbol{M}_{\text{EXM}}$中选出适应度值最优的个体进行替换，否则转到步骤 8。

步骤 8 对种群排序，更新最优$\boldsymbol{X}_{\text{best}}$、最差个体$\boldsymbol{X}_{\text{worst}}$，判断是否满足终止条件，是则输出最优个体$\boldsymbol{X}_{\text{best}}$、最优适应度值$f_{\text{best}}$，否则跳转步骤 3 继续循环。

RCJAYA 算法的流程如图 3 所示。

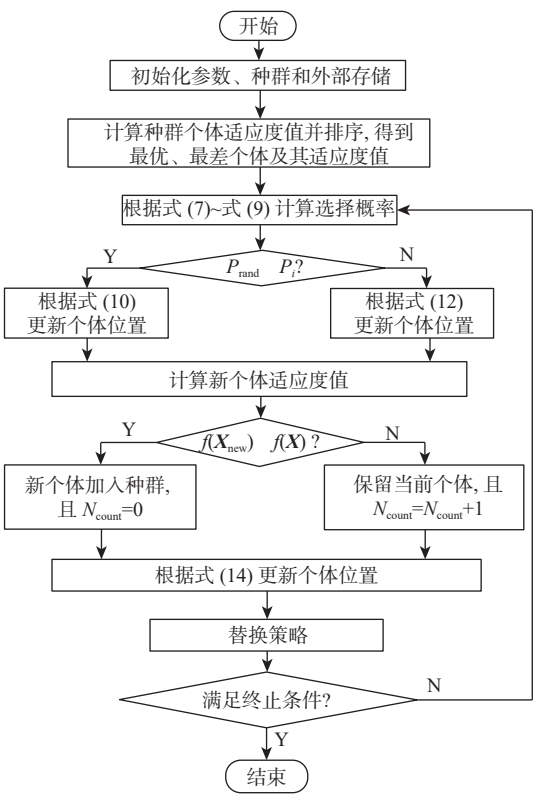


图 3 RCJAYA 算法流程

Fig. 3 RCJAYA algorithm flow

3 太阳电池参数辨识实验结果与分析

本文将 RCJAYA 算法应用于太阳电池参数辨识，根据实验结果验证 RCJAYA 算法在解决太阳电池参数辨识问题中的有效性。选择直径为 57 mm、型号为 RTC France 的商用硅太阳电池，其中，实测电流、电压数据来自文献 [20]，并且数据在温度 33 ℃、辐照度 1 000 W/m^2 的环境下测得。各待辨识参数的范围如表 1 所示。

为突出 RCJAYA 算法的优化性能，选择在太阳电池参数辨识问题上表现较为突出的 5 种算法进行对比，分别为标准 JAYA 算法[9]、改进 JAYA 算法 (improved JAYA optimization algorithm, IJAYA)[14]、以性能为导向的 JAYA 算法 (performance-guided JAYA algorithm,PGJAYA)[17]、简化的教与学优化算法 (simplified teaching-learning based optimization algorithm, STLBO)[16]、灰狼-布谷鸟融合算法 (hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and cuckoo search,GWOCS)[21]。为确保实验合理和公平性，算法采用的实测数据、参数范围均与本文一致；所有算法的最大评估次数设为 50 000，其他参数均按文献给出设置，每个算法独立运行 30 次。此外，本文算法在 CPU 为 AMD Ryzen 74800H、主频为 2.9 GHz、内存为 32 GB 的计算机上基于 MATLAB 2020a 实现。

表 1 单、双二极管模型待辨识参数范围

Table 1 Range of parameters to be identified for single and double diode models

参数	下界	上界
I_{ph}/A	0	1
I_{sd}, I_{sd1}, I_{sd2}/μA	0	1
R_{S}/Ω	0	0.5
R_{sh}/Ω	0	100
n, n_1, n_2	1	2

表 2、表 3 分别给出各算法对单、双二极管模型的参数辨识实验结果，记录各算法 RMSE 的最优、最差、平均值和标准差。从表 2 可以看出，RCJAYA 算法的 RMSE 最优值为 $9.860\,2\times10^{-4}$ A，与 PGJAYA[17]、STLBO[16] 算法所得一致，略优于其他 3 种算法；但从平均值和标准差上的数据来看，RCJAYA 算法优势更为明显，标准差 $1.059\,8\times10^{-13}$ A 与其他算法相比，反映出 RCJAYA 算法具有更高的寻优稳定性。从双二极管模型参数辨识结果来看，RCJAYA 算法的 RMSE 最优值为 $9.825\,8\times10^{-4}$ A，略逊于 STLBO[16] 算法，优于其他 4 种算法；平均值 $9.855\,7\times10^{-4}$ A 和标准差 $1.374\,3\times10^{-6}$ A 为 6 种算法中最佳。从这些数据来看，双二极管辨识参数增加后，各算法的寻优结果有明显波动，但相较于其他 5 种算法，RCJAYA 算法波动较小，展现出更好的鲁棒性。

表 4 和表 5 给出各算法 RMSE 最优值所对应的最佳辨识参数值。将 RCJAYA 算法所得参数值代入式 (1)、式 (2) 得到单、双二极管模型的模拟输出电流$I_{\text{sim-S}}$和$I_{\text{sim-D}}$，与实测电流I_{L}进行拟合，并计算模拟电流与实测电流的误差I_{IAE}，计算结果如表 6 和图 4 所示。从图 4 中可看出，单、双二极管模型模拟电流与实测电流误差大部分都在 0.001 5 A 以下；从表 6 也可看出，RCJAYA 算法得到的模拟电流与 26 组实测电流的差异非常小，在单二极

表 2　单二极管参数辨识电流 RMSE 值统计结果

Table 2　Statistical results of current RMSE values for single diode parameter identification　　A

算法	最优值	最差值	平均值	标准差
RCJAYA	$9.860\,2\times10^{-4}$	$9.860\,2\times10^{-4}$	$9.860\,2\times10^{-4}$	$1.059\,8\times10^{-13}$
JAYA[9]	$9.894\,6\times10^{-4}$	$1.478\,3\times10^{-3}$	$1.161\,7\times10^{-3}$	$1.879\,6\times10^{-4}$
IJAYA[14]	$9.860\,3\times10^{-4}$	$1.062\,2\times10^{-3}$	$9.920\,4\times10^{-4}$	$1.403\,3\times10^{-5}$
PGJAYA[17]	$9.860\,2\times10^{-4}$	$9.860\,3\times10^{-4}$	$9.860\,2\times10^{-4}$	$1.448\,5\times10^{-9}$
STLBO[16]	$9.860\,2\times10^{-4}$	$9.865\,5\times10^{-4}$	$9.860\,7\times10^{-4}$	$1.860\,2\times10^{-5}$
GWOCS[21]	$9.860\,7\times10^{-4}$	$9.909\,5\times10^{-4}$	$9.887\,4\times10^{-4}$	$2.469\,6\times10^{-6}$

表 3　双二极管参数辨识电流 RMSE 值统计结果

Table 3　Statistical results of current RMSE values for double diode parameter identification　　A

算法	最优值	最差值	平均值	标准差
RCJAYA	$9.825\,8\times10^{-4}$	$9.890\,9\times10^{-4}$	$9.855\,7\times10^{-4}$	$1.374\,3\times10^{-6}$
JAYA[9]	$9.893\,4\times10^{-4}$	$1.479\,3\times10^{-3}$	$1.176\,7\times10^{-3}$	$1.935\,6\times10^{-4}$
IJAYA[14]	$9.829\,3\times10^{-4}$	$1.405\,5\times10^{-3}$	$1.026\,9\times10^{-3}$	$9.832\,5\times10^{-5}$
PGJAYA[17]	$9.826\,3\times10^{-4}$	$9.949\,9\times10^{-4}$	$9.858\,2\times10^{-4}$	$2.537\,5\times10^{-6}$
STLBO[16]	$9.825\,2\times10^{-4}$	$2.448\,0\times10^{-3}$	$1.058\,5\times10^{-3}$	$2.897\,8\times10^{-4}$
GWOCS[21]	$9.833\,4\times10^{-4}$	$1.001\,7\times10^{-3}$	$9.941\,1\times10^{-4}$	$9.593\,7\times10^{-6}$

表 4　各算法单二极管模型最佳辨识参数

Table 4　Optimal identification parameters of single diode model for each algorithm

算法	I_{ph}/A	I_{sd}/μA	R_S/Ω	R_{sh}/Ω	n	X_{RMSE}/A
RCJAYA	0.760 8	0.323 0	0.036 4	53.718 8	1.481 2	$9.860\,2\times10^{-4}$
JAYA[9]	0.760 8	0.328 1	0.036 4	54.929 8	1.482 8	$9.894\,6\times10^{-4}$
IJAYA[14]	0.760 8	0.322 8	0.036 4	53.759 5	1.481 1	$9.860\,3\times10^{-4}$
PGJAYA[17]	0.760 8	0.323 0	0.036 4	53.718 5	1.481 2	$9.860\,2\times10^{-4}$
STLBO[16]	0.760 8	0.323 0	0.036 4	53.718 4	1.481 2	$9.860\,2\times10^{-4}$
GWOCS[21]	0.760 8	0.321 9	0.036 4	53.632 0	1.480 8	$9.860\,7\times10^{-4}$

表 5　各算法双二极管模型最佳辨识参数

Table 5　Optimal identification parameters of double diode model for each algorithm

算法	I_{ph}/A	I_{sd1}/μA	R_S/Ω	R_{sh}/Ω	n_1	I_{sd2}/μA	n_2	X_{RMSE}/A
RCJAYA	0.760 8	0.633 3	0.036 7	55.214 1	2.000 0	0.239 9	1.456 0	$9.825\,8\times10^{-4}$
JAYA[9]	0.760 7	0.006 1	0.036 4	52.657 5	1.843 6	0.315 1	1.478 8	$9.893\,4\times10^{-4}$
IJAYA[14]	0.706 1	0.005 1	0.037 6	77.851 9	1.218 6	0.750 9	1.624 7	$9.829\,3\times10^{-4}$
PGJAYA[17]	0.760 8	0.210 3	0.036 8	55.813 5	1.445 0	0.885 3	2.000 0	$9.826\,3\times10^{-4}$
STLBO[16]	0.760 8	0.233 6	0.036 7	55.338 2	1.453 8	0.684 9	2.000 0	$9.825\,2\times10^{-4}$
GWOCS[21]	0.760 8	0.537 7	0.036 7	54.733 1	2.000 0	0.248 6	1.458 8	$9.833\,4\times10^{-4}$

管模型中平均误差为 0.000 84 A, 双二极管模型为 0.000 82 A。为更加直观地展示模拟电流和实测电流的拟合结果, 根据表 6 所得数据绘制出电流-电压特性曲线, 如图 5 和图 6 所示。可见, RCJAYA 算法得到的模拟电流值与实测电流值非常吻合。实验结果表明, RCJAYA 算法在解决太阳电池参数辨识问题上取得了良好的成效, 可获得非常准确的参数值, 证明了 RCJAYA 算法的有效性和实用性。

表6 RCJAYA算法获得的单、双二极管模型的电压、电流和误差的计算值

Table 6 Calculated values of voltage, current and error obtained by RCJAYA for single and double diode model

编号	V_L/V	I_L/A	I_{sim-S}/A	I_{sim-D}/A	I_{IAE-S}/A	I_{IAE-D}/A
1	−0.205 7	0.764 0	0.764 111 83	0.763 998 68	0.000 111 83	0.000 001 32
2	−0.129 1	0.762 0	0.762 687 22	0.762 612 60	0.000 687 22	0.000 612 60
3	−0.058 8	0.760 5	0.761 379 45	0.761 340 02	0.000 879 45	0.000 840 02
4	0.005 7	0.760 5	0.760 178 14	0.760 170 52	0.000 321 86	0.000 329 48
5	0.064 6	0.760 0	0.759 079 36	0.759 099 55	0.000 920 64	0.000 900 45
6	0.118 5	0.759 0	0.758 066 50	0.758 109 36	0.000 933 50	0.000 890 64
7	0.167 8	0.757 0	0.757 115 80	0.757 173 99	0.000 115 80	0.000 173 99
8	0.213 2	0.757 0	0.756 165 49	0.756 228 40	0.000 834 51	0.000 771 60
9	0.254 5	0.755 5	0.755 110 92	0.755 164 22	0.000 389 08	0.000 335 78
10	0.292 4	0.754 0	0.753 687 73	0.753 714 56	0.000 312 27	0.000 285 44
11	0.326 9	0.750 5	0.751 414 38	0.751 399 46	0.000 914 38	0.000 899 46
12	0.358 5	0.746 5	0.747 376 39	0.747 311 36	0.000 876 39	0.000 811 36
13	0.387 3	0.738 5	0.740 138 17	0.740 028 86	0.001 638 17	0.001 528 86
14	0.413 7	0.728 0	0.727 400 44	0.727 268 98	0.000 599 56	0.000 731 02
15	0.437 3	0.706 5	0.706 986 99	0.706 869 16	0.000 486 99	0.000 369 16
16	0.459 0	0.675 5	0.675 289 50	0.675 219 75	0.000 210 50	0.000 280 25
17	0.478 4	0.632 0	0.630 762 74	0.630 757 53	0.001 237 26	0.001 242 47
18	0.496 0	0.573 0	0.571 930 24	0.571 981 08	0.001 069 76	0.001 018 92
19	0.511 9	0.499 0	0.499 611 77	0.499 687 89	0.000 611 77	0.000 687 89
20	0.526 5	0.413 0	0.413 665 00	0.413 719 20	0.000 665 00	0.000 719 20
21	0.539 8	0.316 5	0.317 549 74	0.317 541 37	0.001 049 74	0.001 041 37
22	0.552 1	0.212 0	0.212 232 58	0.212 130 72	0.000 232 58	0.000 130 72
23	0.563 3	0.103 5	0.102 382 39	0.102 180 79	0.001 117 61	0.001 319 21
24	0.573 6	−0.010 0	−0.008 516 37	−0.008 777 55	0.001 483 63	0.001 222 45
25	0.583 3	−0.123 0	−0.125 219 67	−0.125 537 66	0.002 219 67	0.002 537 66
26	0.590 0	−0.210 0	−0.208 109 80	−0.208 391 72	0.001 890 20	0.001 608 28

注: I_{IAE-S}平均误差为0.000 838 82 A, I_{IAE-D}平均误差为0.000 818 83 A。

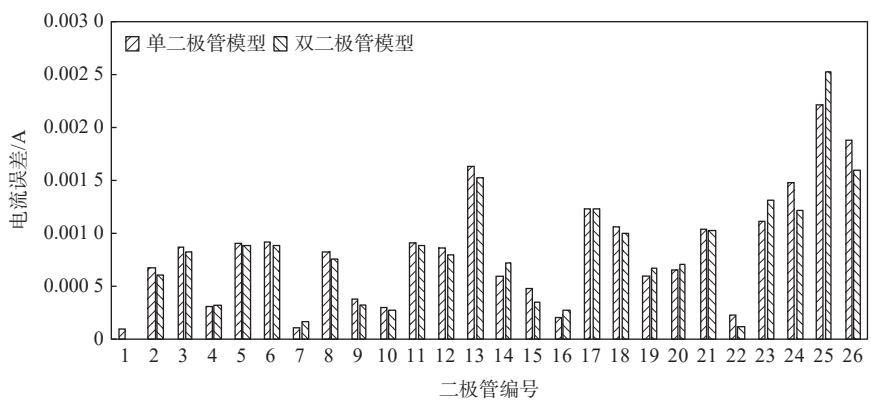


图4 RCJAYA算法单、双二极管模型电流误差值比较

Fig. 4 Comparison of current error value of RCJAYA algorithm single and double diode model

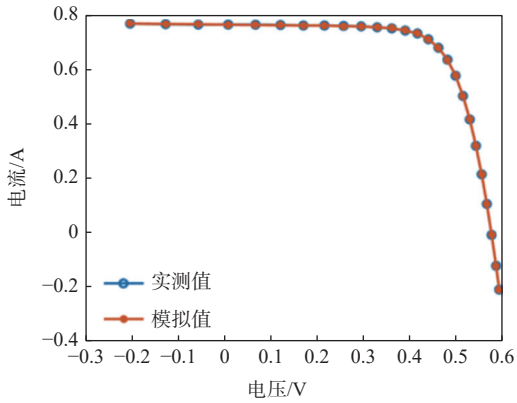


图 5　单二极管模型的 RCJAYA 模拟数据和实测数据比较

Fig. 5　Comparison of measured data and simulated data of RCJAYA for single diode model

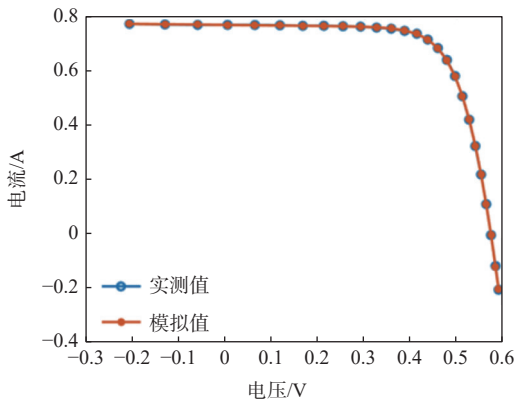


图 6　双二极管模型的 RCJAYA 模拟数据和实测数据比较

Fig. 6　Comparison of measured data and simulated data of RCJAYA for double diode model

4　结　论

1) RCJAYA 利用排序概率更新机制, 平衡了算法的全局探索和局部开发; 通过混沌扰动提高迭代过程中算法种群的质量; 引入替换策略改进了算法易陷入局部最优的缺点。

2) RCJAYA 性能出色, 在太阳电池参数辨识应用中, 相较于基准算法具有较大优势, 对比代表性改进 JAYA 算法也具有较强的竞争力。

3) RCJAYA 优化得到的单二极管和双二极管模型的模拟电流, 与实测电流之间的平均误差分别为 0.000 84 A 和 0.000 82 A, 证明了 RCJAYA 求解太阳电池参数辨识问题的可行性和实用性。

各项实验数据表明, RCJAYA 算法获取的太阳电池参数值准确可靠。未来太阳电池的结构愈加复杂, 待辨识参数更多, 问题维度更高, 将给算法带来更大挑战。下一步研究方向是针对高维问题改进算法, 适应未来更复杂的优化场景, 提高算法鲁棒性。

参考文献（References）

[1] ALSKAIF T, DEV S, VISSER L, et al. A systematic analysis of meteorological variables for PV output power estimation[J]. Renewable Energy, 2020, 153: 12-22.

[2] ELKHOLY A, ABOU EL-ELA A A. Optimal parameters estimation and modelling of photovoltaic modules using analytical method [J]. Heliyon, 2019, 5(7): e02137.

[3] 孙以泽, 彭乐乐, 孟婥, 等. 基于 Lambert W 函数的太阳电池组件参数提取及优化[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1429-1434.
SUN Y Z, PENG L L, MENG Z, et al. Parameters extraction and optimization for PV module based on Lambert W function[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(8): 1429-1434(in Chinese).

[4] 吴忠强, 于丹琦, 康晓华. 基于改进蚁狮优化算法的太阳电池模型参数辨识[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12): 3435-3443.
WU Z Q, YU D Q, KANG X H. Parameter identification of solar cell model based on improved ant lion algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(12): 3435-3443(in Chinese).

[5] KUMARI P A, GEETHANJALI P. Adaptive genetic algorithm based multi-objective optimization for photovoltaic cell design parameter extraction[J]. Energy Procedia, 2017, 117: 432-441.

[6] CHOPDE A, MAGARE D, PATIL M, et al. Parameter extraction for dynamic PV thermal model using particle swarm optimization[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 508-517.

[7] BISWAS P P, SUGANTHAN P N, WU G H, et al. Parameter estimation of solar cells using datasheet information with the application of an adaptive differential evolution algorithm[J]. Renewable Energy, 2019, 132: 425-438.

[8] 简献忠, 翁志远, 王如志. CIJAYA 算法在光伏组件参数辨识中的应用[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 19-26.
JIAN X Z, WENG Z Y, WANG R Z. CIJAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic module model[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(11): 19-26(in Chinese).

[9] RAO R. Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems[J]. International Journal of Industrial Engineering Computations, 2016, 7: 19-34.

[10] 曾一婕, 王龙, 黄超. 基于 Jaya-DA 算法的太阳电池模型参数辨识[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 198-202.
ZENG Y J, WANG L, HUANG C. Parameter identification of solar cell model based on Jaya-DA algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2): 198-202(in Chinese).

[11] ZHANG Y Y, MA M D, JIN Z G. Comprehensive learning Jaya algorithm for parameter extraction of photovoltaic models[J]. Energy, 2020, 211: 118644.

[12] JIAN X Z, WENG Z Y. A logistic chaotic JAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module models[J]. Optik, 2020, 203: 164041.

[13] YANG X, GONG W Y. Opposition-based JAYA with population reduction for parameter estimation of photovoltaic solar cells and modules[J]. Applied Soft Computing, 2021, 104: 107218.

[14] YU K J, LIANG J J, QU B Y, et al. Parameters identification of photovoltaic models using an improved JAYA optimization algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 150: 742-753.

[15] CHEN X, YU K J, DU W L, et al. Parameters identification of solar

cell models using generalized oppositional teaching learning based optimization[J]. Energy, 2016, 99: 170-180.

[16] NIU Q, ZHANG H Y, LI K. An improved TLBO with elite strategy for parameters identification of PEM fuel cell and solar cell models[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(8): 3837-3854.

[17] YU K J, QU B Y, YUE C T, et al. A performance-guided JAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module[J]. Applied Energy, 2019, 237: 241-257.

[18] YU K J, WANG X, WANG Z L. An improved teaching-learning-based optimization algorithm for numerical and engineering optimization problems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 27(4): 831-843.

[19] WEI J M, NIU H Y. A ranking-based adaptive cuckoo search algorithm for unconstrained optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 204: 117428.

[20] EASWARAKHANTHAN T, BOTTIN J, BOUHOUCH I, et al. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers[J]. International Journal of Solar Energy, 1986, 4(1): 1-12.

[21] LONG W, CAI S H, JIAO J J, et al. A new hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and cuckoo search for parameter extraction of solar photovoltaic models[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 112243.

Parameter identification of solar cell model based on RCJAYA algorithm

OUYANG Chengtian[1], HUANG Zuwei[1], LIU Yujia[2], ZHANG Lin[3,*], ZHU Donglin[4], ZHOU Changjun[4]

(1. School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2. School of Artificial Intelligence, Jiangxi Institute of Applied Science and Technology, Nanchang 330100, China;
3. School of Software Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330000, China;
4. School of Computer Science and Technology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: A JAYA algorithm based on the ranking probability quantization mechanism and chaotic perturbation (RCJAYA) is proposed as a discrimination approach to increase the precision and accuracy of the intelligent optimization algorithm to detect solar cell parameters.The RCJAYA algorithm selects different ways to update individuals according to the ranking probability to balance the local and global search ability and maintain the population diversity; chaotic perturbation is applied to the optimal individuals to discover a better solution. The replacement strategy is used to update the stagnant individuals and improve the performance of the algorithm. When compared to the five algorithms such as JAYA, the root mean square error of the current of the single and double diodes of solar cells achieved by the RCJAYA algorithm is $9.860\,2\times10^{-4}$ A and $9.825\,8\times10^{-4}$ A, respectively. The results show that the RCJAYA algorithm has more advantages. The simulated current is calculated according to the identification results compared with the measured current, and the average error is 0.000 84 A and 0.000 82 A for single and double diodes, respectively, which indicates that the parameter values identified by RCJAYA are accurate and reliable.

Keywords: solar cell; parameter identification; JAYA algorithm; ranking probability; chaotic perturbation

Received: 2022-07-05; **Accepted**: 2022-12-03; **Published Online**: 2023-01-09 15:42

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230106.1716.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61561024,62002046,62006106); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LQ21F02005); Basic Public Welfare Research Program of Zhejiang Province (LGG18E050011)

* **Corresponding author**. E-mail: 993291500@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0591

基于改进 Double-Head RCNN 的无人机航拍图像小目标检测算法

王殿伟[1,*]，胡里晨[1]，房杰[1]，许志杰[2]

(1. 西安邮电大学 通信与信息工程学院，西安 710121；2. 哈德斯菲尔德大学 计算机与工程学院，哈德斯菲尔德 HD13DH)

摘 要：为解决无人机航拍图像中小目标特征信息少且容易被噪声干扰导致现有算法漏检率和误检率高的问题，提出一种改进 Double-Head Region-卷积神经网络（RCNN）的无人机航拍图像小目标检测算法。在骨干网络 ResNet-50 上引入 Transformer 和可变形卷积（DCN）模块，更有效提取小目标特征信息和语义信息；提出一种基于内容感知特征重组（CARAFE）的特征金字塔网络（FPN）结构模块，解决特征融合过程中小目标被背景噪声干扰而丢失特征信息的问题；在区域建议网络中针对小目标尺度分布特点重新设置 Anchor 生成尺度，进一步提升小目标检测性能。在 VisDrone-DET2021 数据集上的实验结果表明：所提算法能提取更具有表征能力的小目标特征信息和语义信息，对比 Double-Head RCNN 算法，所提算法的参数量增加了 9.73×10^6，FPS 损失了 0.6，但是 AP、AP50 和 AP75 分别提升了 2.6%、6.2% 和 2.1%，APs 提升了 3.1%。

关 键 词：小目标检测；无人机航拍图像；Double-Head RCNN；Transformer；内容感知特征重组

中图分类号：V279; TP391.41

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2141-09

无人机目标检测作为无人机应用的一个重要环节，其相关算法的研究受到了广泛的关注。无人机航拍图像中通常存在大量的小目标，根据 COCO[1] 数据集的定义，目标所占像素小于 32×32 即为小目标；此外，根据 AI-TOD[2] 数据集的定义，目标所占像素小于 16×16 即为极小目标。由于无人机拍摄角度多变、目标被遮挡、成像天气和光照条件各异，导致小目标不易被定位，难以辨别。此外，由于小目标所占的像素信息少，缺乏区分自身与背景或相似类别的外观信息，在检测时容易出现漏检和误检的情况[3]。现有算法直接应用于无人机航拍图像小目标检测中常常效果不佳，因此，如何使算法有效地利用小目标的特征信息来提升其检测性能是无人机航拍图像小目标检测的一大难点。

基于深度学习的目标检测算法可分为 3 类：基于 Transformer 的目标检测算法、单阶段和双阶段目标检测算法。基于 Transformer 的目标检测算法包含 PVT v2（pyramid vision transformer）[4]、DETR（detection with transformers）[5]、Deformable DETR[6] 等算法，近年来已取得很好的检测成果，其中，DETR[5] 目标检测算法流程简单，不需要 Anchor 的设计及非极大值抑制 (non-maximum suppression, NMS) 后处理，以端到端的方式直接输出预测的集合，并利用匈牙利算法完成预测框与真实框的匹配，但该算法在小目标检测方面的效果并不理想。Deformable DETR[6] 算法则使用 Deformable attention 机制加快模型收敛速度，并增加多尺度特征来提高小目标检测的精度。单阶段目标检测算法包含 RetinaNet[7]、

收稿日期：2022-07-05；录用日期：2022-11-01；网络出版时间：2023-01-10 17:29
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230106.1717.002
基金项目：国家自然科学基金 (62201454)；西安邮电大学研究生创新基金 (CXJJLY2021058)
*通信作者. E-mail：wangdianwei@xupt.edu.cn

引用格式：王殿伟，胡里晨，房杰，等. 基于改进 Double-Head RCNN 的无人机航拍图像小目标检测算法 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2141-2149. WANG D W，HU L C，FANG J，et al. Small target detection algorithm based on improved Double-Head RCNN for UAV aerial images [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2141-2149（in Chinese）.

YOLOX[8]、YOLOv7[9]等算法，在检测速度和精度上也不断取得突破，已在无人机航拍图像目标检测方面广泛应用。双阶段目标检测算法相比单阶段目标检测算法速度较慢，但是对小目标检测精度更高，经典算法有Faster Region-卷积神经网络(region-convolutional neural networks, R-CNN)[10]、Libra R-CNN[11]、Cascade R-CNN[12]、Grid R-CNN[13]等。Faster R-CNN[10]在Fast R-CNN[14]上使用区域建议网络生成感兴趣区域(region of interest, ROI)以提高检测的效率，然而Faster R-CNN[10]仅使用最后一层特征进行预测，没有充分考虑其他层的特征，导致检测小目标时性能差。多层特征融合是提高小目标检测性能的常用手段，特征金字塔网络(feature pyramid networks, FPN)[15]在Faster R-CNN[10]上使用FPN结构，融合不同尺度的特征对小目标进行更好的预测；PANet[16]对FPN[15]中各层特征实现了额外的自底向上的路径增强，进一步提高模型对小目标的敏感程度，并提出了自适应特征池来聚集所有层次的特征，从而实现更好的预测；Tan等[17]在EfficientDet网络中提出BiFPN结构，该结构由加权双向FPN构成，增加了跨尺度连接来增强特征的表示能力，给每个输入添加相应的权重来更好地进行小目标检测任务。Cascade R-CNN[12]提出将Faster R-CNN[10]的第2阶段多次级联，并且分别使用不同的正负样本交并比(intersection over union, IOU)阈值，从而对小目标获得较高的检测精度。Double-Head RCNN[18]算法改变了传统检测头部使用全连接层来进行分类和边框回归的做法，在FPN[15]中设计出用于目标分类的全连接头和用于目标边框回归的卷积头，能够实现对小目标更精准的分类和定位，不足之处是该算法网络参数量大，难以满足实时检测的需求。

综上所述，本文采用对小目标检测精度较高的Double-Head RCNN[18]作为基础网络，针对无人机图像中小目标漏检率和误检率高的问题进行改进，以提高小目标检测精度。具体创新点如下：

1）为更好提取小目标特征，获取丰富的语义信息，在骨干网络中加入可变形卷积(deformable convolutional networks, DCN)[19]和Transformer[20]模块。

2）提出一种基于内容感知特征重组(content-aware reassembly of features, CARAFE)[21]的FPN结构模块(简称CARAFE-FPN)，解决特征融合过程中小目标被背景噪声干扰从而容易丢失特征信息的问题。

1 本文算法

针对无人机航拍图像中小目标漏检率和误检率高的问题，本文提出一种改进Double-Head RCNN算法的无人机航拍图像小目标检测算法。本文算法由改进的特征提取网络、CARAFE-FPN、区域建议网络和双头检测器组成，本文算法框架如图1所示。

本文算法首先由改进的特征提取网络提取更丰富的小目标特征信息；其次，利用CARAFE-FPN融合不同尺度的特征，减少与小目标特征相似的背景噪声干扰；接着，在区域选取网络(region proposal network, RPN)模块中使网络生成更容易匹配到小目标的Anchor；然后，由RoIAlign输出固定大小的特征；最后，通过双头检测器的全连接头和卷积(conv)头实现目标的精准分类和定位。

1.1 改进的特征提取网络

DCN[19]能根据不同输入特征进行不规则采样，因此，特征提取过程更加集中于有效信息区域，保证准确地提取有效信息。图2为残差网

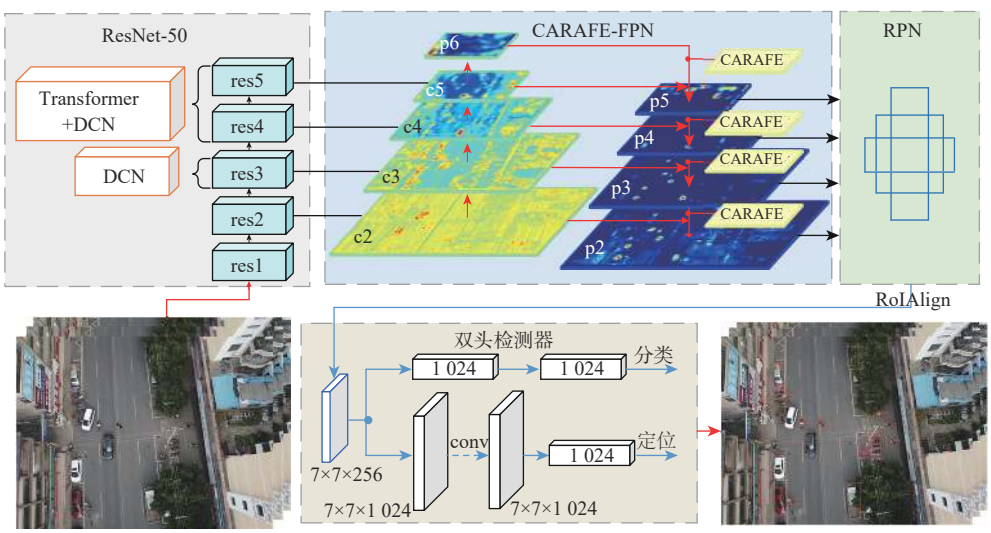
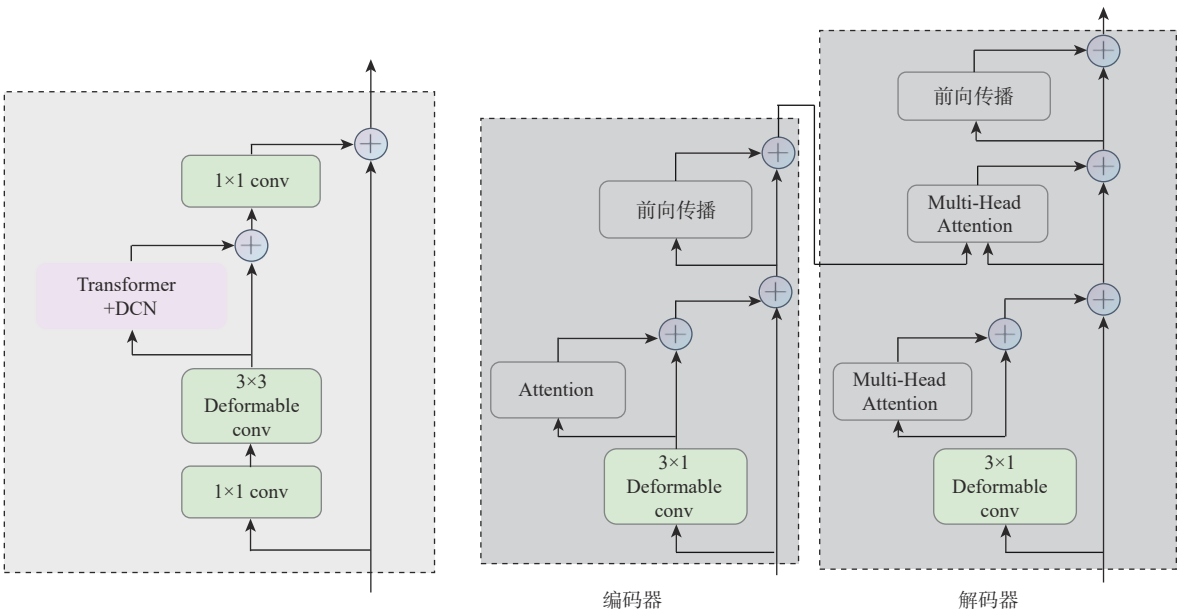


图1 本文算法框架

Fig. 1 Framework of the proposed algorithm

络结构, 本文首先在特征提取网络 ResNet-50 的第 3～第 5 阶段(res3～res5)使用 DCN[19], 然后, 在使用了 DCN[19] 的残差块中加入 Transformer+DCN[22] 模块, 组成如图 2(a) 所示的注意力残差网络结构, 该模块应用于 ResNet-50 的第 4 和第 5 阶段, 其中 Transformer+DCN[22] 网络结构如图 2(b) 所示, 考虑 Double-Head RCNN[18] 算法本身参数量较大, 本文算法中的 Transformer+DCN[22] 模块只查询 key 的内容特征, 捕获显著的关键元素, 这能使算法的参数量不会增加太多且获得不错的检测精度。为方便描述, 将本文算法中改进后的骨干网络结构称为 R50-Attention。



(a) 注意力残差网络结构　　(b) Transformer+DCN 网络结构

图 2　残差网络结构

Fig. 2　Structure of residual network

DCN[19] 能捕获自注意力, 使网络更多地关注输入的相关元素, 而多头注意力(Multi-head attention)相比自注意力能使模型联合注意到不同输入位置的不同子空间表示的信息, 通过不同的线性变化, 将输入特征映射到不同的子空间, 因此, 本文算法可以从不同角度理解输入的图像, 从而更有效地提取小目标语义信息。Multi-head attention 算法可表示为

$$\text{Multihead}(Q,K,V)=\text{Concat}(h_1,h_2,\cdots,h_I)\boldsymbol{W}^O \tag{1}$$

$$h_i=\text{Attention}(Q\boldsymbol{W}_i^Q,K\boldsymbol{W}_i^K,V\boldsymbol{W}_i^V) \tag{2}$$

本文算法中 Multi-head attention 由 8 个自注意力模块组成。每个模块都有自己的一组可学习的权重矩阵$\{\boldsymbol{W}_i^Q,\boldsymbol{W}_i^K,\boldsymbol{W}_i^V\}$, 其中$i=0,1,\cdots,I-1$, $\boldsymbol{W}_i^Q\in\mathbf{R}^{d_{\text{model}}\times d_k}$, $\boldsymbol{W}_i^K\in\mathbf{R}^{d_{\text{model}}\times d_k}$, $\boldsymbol{W}_i^V\in\mathbf{R}^{d_{\text{model}}\times d_k}$, $d_k=d_v=d_{\text{model}}/I=64$, $\boldsymbol{W}^O\in\mathbf{R}^{hd_v\times d_{\text{model}}}$。其中$I$表示所使用的 Multi-head attention 的个数。

1.2　CARAFE-FPN

在特征金字塔生成过程中, 传统的 FPN 主要使用双线性插值对高阶特征图进行上采样, 但是双线性插值只考虑相邻的亚像素空间, 感知范围较小, 无法获取充足的小目标语义信息, 而且在插值过程中引入的噪声在一定程度上会削弱小目标特征的表示能力。

CARAFE[21] 是一种基于输入内容的可学习的图像上采样算法, 能够消除双线性插值的弊端。因此, 本文提出 CARAFE-FPN 特征融合模块, 该模块使网络上采样时有更大的感受野, 同时保留更多小目标细节信息, 滤除与小目标无关的背景噪声, 增强小目标特征的表示能力。其中, CARAFE[21] 结构如图 3 所示。

CARAFE[20] 计算过程可分为以下 4 个部分。

1) 通道压缩。将输入的$H\times W\times C$维特征压缩到$H\times W\times C_{\text{m}}$维以减少后续操作的计算量。其中, H 和 W 分别为图像的高度和宽度, C 为通道数, C_{m} 为压缩通道数, 本文中C_{m}设为 64。

2) 内容编码与上采样核预测。对于压缩后的特征图, 利用一个卷积核为$k_{\text{encoder}}\times k_{\text{encoder}}$的卷积层来预测上采样核, 得到大小为$\sigma H\times\sigma W\times k_{\text{up}}^2$的上采样核。其中, σ为上采样率, k_{up}为预测所得上采样核的大小, 本文中k_{up}为 5, k_{encoder}为 3。

3) 上采样核归一化。对预测得到的上采样核进行 Softmax 归一化, 使卷积核权重和为 1。

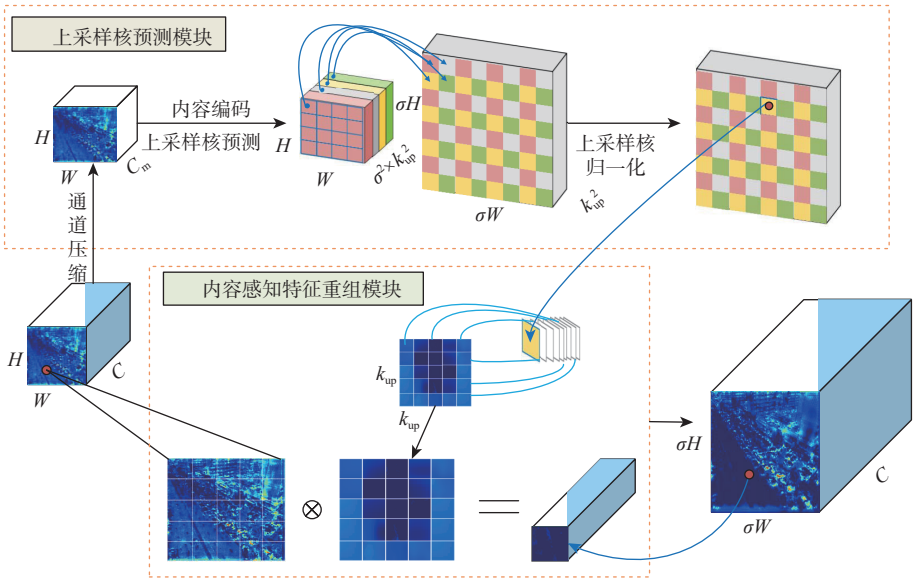


图 3 CARAFE[20] 结构

Fig. 3 Structure of CARAFE[20]

4) 内容感知特征重组。利用预测所得到的上采样核与输入的特征进行卷积运算，得到重组后的特征。

1.3 Anchor 生成策略

无人机航拍图像中通常包含很多的小目标，合理的设置 RPN 中 Anchor 的生成尺度能使网络更容易检测到小目标。本文统计了 VisDrone-DET2021[23] 训练集的标注框中目标尺寸的分布信息，如图 4 所示。

图 4(a) 为目标标注框的尺度分布信息，其中，目标尺寸小于 32 像素的小目标数量非常多(见图中红色矩形)。图 4(b) 为目标标注框的宽高比分布情况。根据 VisDrone-DET2021[23] 训练集的目标尺寸分布特点，本文算法重新设计了 RPN 中生成的 Anchor 尺度。本文在 VisDrone-DET2021[23] 数据集上进行了大量实验，最终设置了 5 种不同的基础边框大小(20, 40, 80, 140, 210 像素)和 3 种不同的高宽比例(0.65、1.2、2.4)来生成 15 种不同大小的 Anchor，使生成的 Anchor 更好地匹配无人机航拍图像中的小目标，获得最优的检测结果。

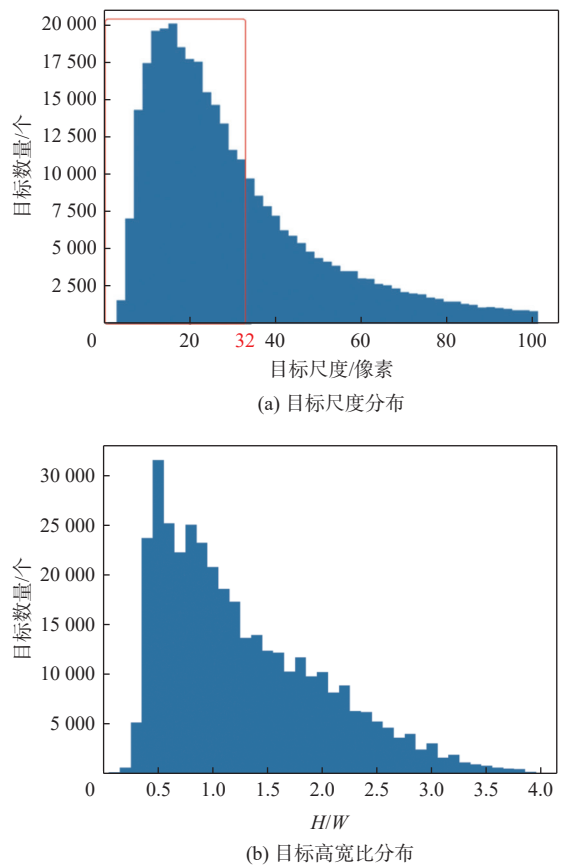
1.4 损失函数

本文使用双头检测器与 RPN 网络端到端联合训练，总损失计算如下：

$$L=\omega^{\mathrm{fc}}L^{\mathrm{fc}}+\omega^{\mathrm{conv}}L^{\mathrm{conv}}+L^{\mathrm{rpn}} \tag{3}$$

式中：ω^{fc} 和 ω^{conv} 分别为全连接头和卷积头的权重；L^{fc} 和 L^{conv} 分别为全连接头和卷积头损失；L^{rpn} 为 RPN 的损失。回归损失使用 L_{smooth} 函数，分类损失使用交叉熵损失函数，其中 L_{smooth} 定义如下：

$$L_{\mathrm{smooth}}(x)=\begin{cases}0.5x^2 & |x|<1\\ |x|-0.5 & \text{其他}\end{cases} \tag{4}$$



(a) 目标尺度分布

(b) 目标高宽比分布

图 4 VisDrone-DET2021[23] 数据集目标尺寸分布

Fig. 4 Target size distribution in VisDrone-DET2021[23] dataset

假设概率分布 p 为期望输出，概率分布 q 为实际输出，则交叉熵损失 $H(p,q)$ 可表示为

$$H(p,q)=-\sum\left(p(x)\log_2 q(x)+(1-p(x))\log_2(1-q(x))\right) \tag{5}$$

本文算法训练过程中损失函数曲线如图 5 所示。当网络训练超过 17 轮时，损失函数值变化趋

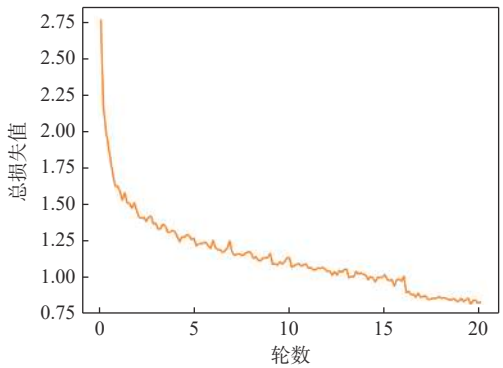


图 5　损失函数曲线

Fig. 5　Loss function curve

于平稳, 最终的损失值稳定在 0.84 左右。从损失函数收敛情况来看, 当训练超过 20 轮时, 网络的损失函数趋于收敛, 训练结果较为理想。

2　实验结果及分析

2.1　数据集和评价指标

本文使用的无人机数据集为天津大学于 2019 年发布的 VisDrone-DET2021[23] 目标检测数据集, 该数据集共包含 10 209 张图像(6 471 张训练集, 548 张验证集, 3 190 张测试集), 包含 10 类目标(pedestrian、person、bicycle、car、van、truck、tricycle、awning-tricycle、bus、motor), 目标标注框超过 2.6×10^6 个。该数据集是在不同场景、不同天气和照明条件下使用多种无人机摄像头收集, 取材于 14 个不同城市, 涉及城市和乡村、稀疏和密集等多种场景。本文使用 COCO[1] 数据集的评价指标(AP、AP50、AP75、APs、APm 和 APl)来客观地评价目标检测网络的性能, 其中, AP 为平均准确度(average precision), AP50 和 AP75 是 IoU 阈值分别为 0.5 和 0.75 时计算得到的平均精度, APs 为小目标(小于 32 像素×32 像素)检测的平均准确度, APm 为中等大小目标(在 32 像素×32 像素到 96 像素×96 像素之间)检测的平均准确度, APl 为大目标(大于 96 像素×96 像素)检测的平均准确度, 是分析本文算法对小目标检测性能的主要评价指标。

2.2　实验平台及参数设置

本文算法硬件平台为 CPU(Intel Xeon E5-2 620v4×2)和 GPU(Nvidia Titan XP×4), 在 Python 3.8 中使用 PyTorch 1.9.0 和 CUDA 10.2 版本实现。实验结果中每秒帧数(frames per second, FPS)为使用单个 GPU(Nvidia Titan XP)所测得。使用 COCO[1] 数据集上的 ResNet-50 预训练模型初始化网络, 输入的图像分辨率为 1 333 像素×800 像素, 批处理大小设为 1。使用随机梯度下降(stochastic gradient descent, SGD)优化器, 动量因子为 0.9, 初始学习率为 0.002 5, 权重衰减因子为 0.000 1, 总共训练 20 轮, 学习率在第 16～19 轮中下降 10 倍。

2.3　对比实验

为验证本文算法的有效性, 本文算法与几种先进的目标检测算法在 VisDrone-DET2021[23] 数据集上分别进行了训练和验证。检测结果如表 1 所示。结果表明, 本文算法的 AP、AP50、AP75、APs、APm 和 APl 分别达到了 26.4%、44.5%、26.9%、18.1%、36.1% 和 48.7%。与原始的 Double-Head RCNN[18] 算法相比, 本文算法的 AP、AP50、AP75、APs、APm 和 APl 分别提升了 2.6%、6.2%、2.1%、3.1%、1.0% 和 3.9%。

其中, FPN[15] 算法对大目标的平均检测精度最高, APl 达到 53.8%, 比本文算法高出 5.1%, 但 AP 和 APs 相比本文算法低了 3.5% 和 4.5%。相比基于 Transformer 的 Deform DETR[6] 和 RetinaNet+ PVT v2[4] 算法, 本文算法检测速度略低, 但是检测精度远超这 2 种算法, 其中, APs 分别高出 8.4% 和 7.7%。相比检测速度较快的单阶段网络 RetinaNet[7] 和

表 1　本文算法与先进算法比较

Table 1　Comparison between the proposed algorithm and advanced algorithms

算法	骨干网络	输入图像分辨率/像素	轮数	AP/%	AP50/%	AP75/%	APs/%	APm/%	APl/%	FPS
RetinaNet+PVT v2[4]	PVTv2-B1	1 333×800	20	20.6	34.1	21.4	10.4	34.5	48.9	10.9
Deform DETR[6]	ResNet-50	1 333×800	50	18.0	32.1	17.5	9.7	27.8	44.9	9.2
RetinaNet[7]	ResNet-50	1 333×800	20	18.5	30.1	19.3	8.2	31.7	48.0	16.6
YOLOX-S[8]	CSPDarkNet	640×640	300	19.9	34.6	19.6	10.8	30.9	42.6	53.1
Cascade R-CNN[12]	ResNet-50	1 333×800	20	24.5	39.3	25.9	15.4	36.9	45.2	9.0
Grid R-CNN[13]	ResNet-50	1 333×800	20	25.1	39.3	26.9	15.8	37.8	47.7	10.4
FPN[15]	ResNet-50	1 333×800	20	22.9	36.8	23.9	13.6	34.7	53.8	14.5
VFNet[24]	ResNet-50	1 333×800	20	22.5	37.4	23.5	13.1	34.5	45.4	13.7
Double-Head RCNN[18]	ResNet-50	1 333×800	20	23.8	38.3	24.8	15.0	35.1	44.8	6.5
本文算法	R50-Attention	1 333×800	20	26.4	44.5	26.9	18.1	36.1	48.7	5.9

YOLOX-S[8]算法，本文算法的APs分别高出9.9%和7.3%。相比对小目标检测精度较高的Cascade R-CNN[12]和Grid R-CNN[13]算法，本文算法的APs分别高出2.7%和2.3%。这也验证了本文算法对小目标检测的有效性。

为直观地感受本文算法对小目标的检测能力，本文展示了本文算法和其他算法的可视化检测结果，如图6所示。在图6(a)中，PVT v2-B1+RetinaNet[4]算法对于小目标的定位能力很强，能够捕获小目标的位置信息，但是该算法会产生冗余的预测框，误检率较高，因此其对于小目标的检测性能有待改善。在图6(b)中，Double-Head RCNN[18]算法通过使用双头检测器进一步改善了FPN[15]算法对于小目标的检测性能，但仍出现了小目标漏检和误检的现象。在图6(c)中，本文算法对于图像中近处目标的检测效果与其他算法基本相同，但对于较远处的人和车等小目标的定位和分类能力较强，捕获到了许多Double-Head RCNN[18]算法无法检测到的小目标，且没有产生冗余的预测框，对目标的分类也更加准确，进一步降低了算法的漏检率和误检率。从主观视觉效果和客观数据结果来看，本文算法对无人机航拍图像中的小目标有强大的检测能力。

2.4 消融实验

为分析本文算法中各模块的有效性，本文在Double-Head RCNN[18]算法中逐个添加所改进的模块，实验结果如表2所示。

本文在Double-Head RCNN[18]算法上单独使用Anchor生成策略后，算法整体检测性能得到提升，AP、AP50和AP75分别提升了1.1%、3.3%和0.7%。虽然APm和APl损失了0.8%和0.4%，但小目标检测性能有较大提升，APs提升了2.2%，且算法在参数量没有增加的情况下FPS增加了0.4。这表明本文针对小目标设计的Anchor生成策略拥有更好的边框回归能力，能更容易匹配到小目标。



(a) PVT v2-B1+RetinaNet[4] (b) Double-Head RCNN[18] (c) 本文算法

图6 不同算法检测结果

Fig. 6 Detection results of different algorithms

表2 消融实验结果

Table 2 Ablation experimental results

Double-Head RCNN[18]			AP/%	AP50/%	AP75/%	APs/%	APm/%	APl/%	参数量	FPS
R50-Attention	CARAFE-FPN	Anchor生成策略								
			23.8	38.3	24.8	15.0	35.1	44.8	46.76×10^6	6.5
		√	24.9	41.6	25.5	17.2	34.3	44.4	46.76×10^6	6.9
√			25.0	40.9	26.2	15.5	37.2	48.4	50.88×10^6	5.9
	√		24.6	39.6	26.0	15.6	36.5	47.6	52.36×10^6	6.4
	√	√	25.6	42.7	26.2	17.6	35.4	46.0	52.36×10^6	6.6
√	√	√	26.4	44.5	26.9	18.1	36.1	48.7	56.49×10^6	5.9

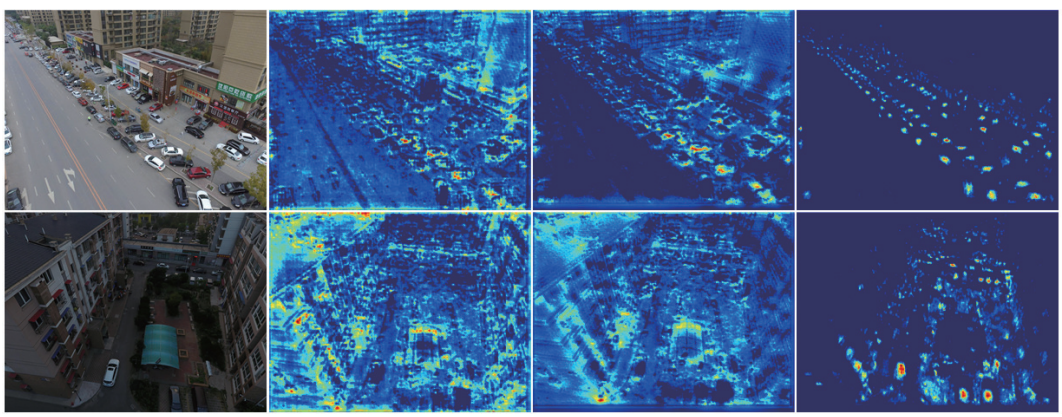
注：√表示添加一个方法。

在只添加了 R50-Attention 骨干网络后, 相比使用 ResNet-50 骨干网络, 算法参数量增加了 4.12×10^6, 且 FPS 下降了 0.6, 但是 AP 提升了 1.2%, APs 提升了 0.5%。由此可以看出该模块有效地提升了本文算法对小目标的检测能力。

在 Double-Head RCNN[18] 算法中只使用 CARAFE-FPN 模块时, 算法参数量增加了 5.6×10^6, FPS 只下降了 0.1, 但是 AP 提升了 0.8%, APs 提升了 0.6%。

最终, 在使用本文所有改进的模块后, 本文算法的 FPS 相比 Double-Head RCNN[18] 算法虽然损失了 0.6, 参数量增加了 9.73×10^6, 但整体检测性能有较大提升, AP 提升 2.6%, AP50 提升了 6.2%, AP75 提升了 2.1%, 且小目标的检测精度提升尤为明显, APs 提升 3.1%。

为进一步分析本文算法中 R50-Attention 骨干网络和 CARAFE-FPN 模块对小目标特征提取和融合的影响, 本文对使用这 2 个模块所提取到的特征图做可视化对比, 如图 7 所示。图 7(a) 为输入的待检测图像, 图 7(b)、图 7(c)、图 7(d) 分别为使用不同模块通过特征融合得到的 p2 层特征。图 7(b) 为 Double-Head RCNN[18] 算法通过 FPN 提取到的特征图, 图中存在大量与目标无关的特征信息。图 7(c) 为仅使用 CARAFE-FPN 模块后的提取到的特征图, 可观察到图中马路和楼房等与目标无关的特征信息变弱, 一定程度上降低了背景噪声的干扰, 这表明该模块能够增强小目标特征的表征能力。图 7(d) 为本文算法提取的特征图, 可观察到, 相比图 7(c), 其特征像素更加集中于小目标区域, 马路及楼房区域等与目标无关的背景噪声大量减少。这表明本文算法能更有效地强化所提取到的小目标特征, 滤除与小目标特征相似的背景信息, 保留有用的特征信息, 有效降低小目标的漏检率和误检率。这也进一步验证了本文算法对无人机航拍图像在小目标检测中的有效性。



(a) 原始图像　(b) Double-HeadRCNN[18]　(c) CARAFE-FPN　(d) 本文算法

图 7　特征图对比

Fig. 7　Comparison of feature maps

3　结　论

1) 本文算法使用 Transformer 和 DCN 模块更好地提取小目标的特征信息和语义信息, 提出 CARAFE-FPN 模块来增强小目标特征的表征能力, 提升本文算法对背景噪声的过滤能力和无人机航拍图像中小目标的检测精度。

2) 考虑到无人机图像中小目标的尺度分布特点, 重新设计了 Anchor 生成尺度, 进一步提高了小目标的检测精度。

3) 本文算法相比于 Double-Head RCNN 算法, 在 VisDrone-DET2021 数据集中 AP 提升了 2.6%, AP50 提升了 6.2%, 小目标检测平均精度 APs 提升了 3.1%。

由实验结果可知, 本文算法对于极小目标仍有少量误检和漏检现象, 进一步提高小目标检测精度, 以及优化模型参数使算法加速, 将是下一步改进的方向。

参考文献 (References)

[1] LIN T Y, MAIRE M, BELONGIE S, et al. Microsoft COCO: Common objects in context[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2014: 740-755.

[2] WANG J W, YANG W, GUO H W, et al. Tiny object detection in aerial images[C]//Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 3791-3798.

[3] 陈映雪, 丁文锐, 李红光, 等. 基于视频帧间运动估计的无人机图像车辆检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(3): 634-642.
CHEN Y X, DING W R, LI H G, et al. Vehicle detection in UAV image based on video interframe motion estimation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(3): 634-642(in Chinese).

[4] WANG W H, XIE E Z, LI X, et al. PVT v2: Improved baselines with pyramid vision transformer[J]. Computational Visual Media, 2022, 8(3): 415-424.

[5] CARION N, MASSA F, SYNNAEVE G, et al. End-to-end object detection with transformers[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2020: 213-229.

[6] ZHU X Z, SU W J, LU L W, et al. Deformable DETR: Deformable transformers for end-to-end object detection[EB/OL]. (2021-03-18)[2022-05-18]. http://arxiv.org/abs/2010.04159.

[7] 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.

[8] GE Z, LIU S T, WANG F, et al. YOLOX: Exceeding YOLO series in 2021[EB/OL]. (2021-08-06)[2022-05-20]. http://arxiv.org/abs/2107.08430.

[9] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[EB/OL]. (2022-07-01)[2022-07-03]. http://arxiv.org/abs/2207.02696.

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

[11] PANG J M, CHEN K, SHI J P, et al. Libra R-CNN: Towards balanced learning for object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 821-830.

[12] CAI Z W, VASCONCELOS N. Cascade R-CNN: Delving into high quality object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 6154-6162.

[13] LU X, LI B Y, YUE Y X, et al. Grid R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 7355-7364.

[14] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1440-1448.

[15] 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.

[16] 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.

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

[18] WU Y, CHEN Y P, YUAN L, et al. Rethinking classification and localization for object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 10183-10192.

[19] DAI J F, QI H Z, XIONG Y W, et al. Deformable convolutional networks[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 764-773.

[20] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]//Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2017: 6000-6010.

[21] WANG J Q, CHEN K, XU R, et al. CARAFE: Content-aware ReAssembly of FEatures[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 3007-3016.

[22] ZHU X Z, CHENG D Z, ZHANG Z, et al. An empirical study of spatial attention mechanisms in deep networks[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 6687-6696.

[23] CAO Y R, HE Z J, WANG L J, et al. VisDrone-DET2021: The vision meets drone object detection challenge results[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 2847-2854.

[24] ZHANG H Y, WANG Y, DAVOUB F, et al. VarifocalNet: An iou-aware dense object detector[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 8510-8519.

Small target detection algorithm based on improved Double-Head RCNN for UAV aerial images

WANG Dianwei[1,*], HU Lichen[1], FANG Jie[1], XU Zhijie[2]

(1. School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China;
2. School of Computing and Engineering, University of Huddersfield, Huddersfield HD13DH, UK)

Abstract: The feature information of small targets in unmanned aerial vehicle aerial images is small and easily interfered with by noise, which leads to the high missed detection and false detection rates of existing algorithms. To address these issues, a small target detection algorithm based on an improved Double-Head region-convolutional neural networks(RCNN)for unmanned aerial vehicle aerial images was proposed. Transformer and deformable convolution networks (DCN) modules were introduced on the backbone network ResNet-50 to extract small target feature information and semantic information more effectively. A feature pyramid network(FPN) structure based on content-aware reassembly of features (CARAFE) was proposed to solve the problem that the small target information is interfered with by the background noise, and the feature information is lost in the process of feature fusion. The generation scale of Anchor was reset according to the characteristics of small target scale distribution in the region proposal network to further improve the small target detection performance. The experimental results on the VisDrone-DET2021 dataset show that the proposed algorithm can extract feature and semantic information of small targets with representational capacity more effectively. Compared with the Double-Head RCNN algorithm, the parameter quantity of the proposed algorithm increases by 9.73×10^6, and the FPS loss is 0.6. However, AP, AP50, and AP75 increase by 2.6%, 6.2%, and 2.1% respectively, and APs increases by 3.1%.

Keywords: small target detection; unmanned aerial vehicle aerial images; Double-Head RCNN; Transformer; content-aware reassembly of features

Received: 2022-07-05; **Accepted**: 2022-11-01; **Published Online**: 2023-01-10 17:29

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230106.1717.002

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62201454); Postgraduate Innovation Foundation of Xi'an University of Posts and Telecommunications (CXJJLY2021058)

* **Corresponding author**. E-mail: wangdianwei@xupt.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0601

融合 CBAM 注意力机制与可变形卷积的车道线检测

胡丹丹[1]，张忠婷[1]，牛国臣[1, 2, *]

(1. 中国民航大学 机器人研究所，天津 300300；2. 中国民航大学 民航智慧机场理论与系统重点实验室，天津 300300)

摘 要：为满足自动驾驶及汽车高级驾驶辅助系统（ADAS）对车道线检测准确性和实时性的要求，提出一种融合卷积块注意力机制 (CBAM) 与可变形卷积网络 (DCN) 的车道线检测方法 CADCN。在特征提取模块中嵌入 CBAM 注意力机制，增强有用特征并抑制无用特征响应；引入可变形卷积替换常规卷积，用带偏移的采样学习车道线的几何形变，提高卷积核的建模能力；基于行锚分类思想，对行方向上的位置进行选择和分类分析，预测车道线的位置信息，提高车道线检测模型的实时性。在车道线公开数据集上对所提 CADCN 方法进行训练及验证，在满足实时性的情况下，CADCN 方法在 TuSimple 数据集上准确率达到 96.63%，在 CULane 数据集上综合评估指标 F_1 平均值达到 74.4%，验证了所提方法的有效性。

关 键 词：车道线检测；特征提取；注意力机制；可变形卷积网络；行锚分类
中图分类号：U471.11; TP391.4
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2150-11

车道线作为路面的主要交通标志，具有分隔道路区域、规定行驶方向和为行人提供引导信息的功能，是保证车辆安全行驶的重要信息。车道线检测技术是智能车领域的关键技术之一，被广泛应用于自动驾驶及车道保持、车道偏离预警、前向碰撞预警等汽车高级驾驶辅助系统 (advanced driver assistance system, ADAS)[1] 中。

实际路况中，车道线的形状、颜色具有多样性；行人、车辆等目标遮挡会影响车道线的连续性；在不同的驾驶场景中，车道线的表现形式不同，如栅栏、台阶等；还受到天气因素、光线变化、道路阴影和车道线破损等影响。此外，车道线检测任务还需具有较高的实时性以保障车辆响应速度及安全性。因此，车道线检测研究仍面临着严峻的挑战。

目前，基于计算机视觉的车道线检测研究主要包括传统方法和深度学习方法。传统方法主要通过手工提取不同环境中车道线的颜色、边缘或梯度变化等特征[2-3]，利用霍夫变换[4]、最小二乘法[5] 等后处理来拟合车道线形状。当实际环境中车道线较为清晰时，传统方法表现出良好的准确性和检测效率，但易受道路环境的干扰，在光线变化、路面积水、障碍物严重遮挡和阴影干扰等复杂场景下难以取得理想效果。

为解决传统车道线检测方法存在的检测精度低、对环境要求高、适应性差等问题，国内外学者开始研究基于深度学习的车道线检测方法。Kim 和 Lee[6] 提出一种基于卷积神经网络（convolutional neural network, CNN）的车道线检测算法。Li 等[7] 提出一种将 CNN 和递归神经网络（recurrent neutral network, RNN）相结合的车道线检测方法，利用 CNN 提取车道线每帧图像中的特征信息，输入 RNN 中进行特征学习和车道线预测。Pan 等[8] 提出空间 CNN（spatial CNN, SCNN）模型，用片连片卷

收稿日期：2022-07-09；**录用日期**：2022-11-19；**网络出版时间**：2022-12-15 17:33
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221214.1720.008
基金项目：天津市科技计划 (17ZXHLGX00120)；中央高校基本科研业务费专项资金 (3122022PY17,3122017003)
* **通信作者**. E-mail：niu_guochen@139.com

引用格式：胡丹丹，张忠婷，牛国臣. 融合 CBAM 注意力机制与可变形卷积的车道线检测 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2150-2160. HU D D，ZHANG Z T，NIU G C. Lane line detection incorporating CBAM mechanism and deformable convolutional network [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2150-2160（in Chinese）.

积取代传统层接层卷积的连接形式, 使信息可以跨行和跨列传递, 改善无视觉线索情况下的车道线检测问题。但是, 逐片卷积信息传递方式耗时较长, 难以进行实时的车道线检测。

为提高车道线检测速度, Hou 等[9] 提出一种采用自注意蒸馏 (self-attention distillation, SAD) 模块的轻量级网络模型, 推理时间较少, 但会丢失一些详细信息, 对车道线缺失或无视觉线索等复杂环境下的车道线检测效果欠佳。Neven 等[10] 提出 LaneNet 模型, 将车道线检测过程视为实例分割问题, LaneNet 模型由 2 个分支构成, 其中, 二值分割分支通过逐像素的语义分割区分车道线和背景, 像素嵌入分支将车道线像素分解为不同的车道线实例, 结合 2 个分支的结果得到实例分割的效果, 从而完成车道线提取。此外, Tabelini 等[11] 提出 PolyLaneNet 模型, 利用深度学习网络回归车道线的曲线方程, 为每条车道线输出一个多项式及置信度得分, 实时性较高, 但当车道线受到严重遮挡时, 检测性能会显著降低。

为解决实际应用中车道线检测准确性和实时性不平衡的问题, 本文提出一种融合卷积块注意力机制 (convolutional block attention module, CBAM) 与可变形卷积网络 (deformable convolutional networks, DCN) 的车道线检测方法 CADCN, 在满足车道线检测实时性的前提下提高检测精度。通过融合 CBAM 注意力机制[12] 和可变形卷积[13] 重构残差网络 (residual network, ResNet)[14], 端到端地学习全局特征并细化局部特征, 获取更丰富的特征表示, 提升模型的整体车道线识别能力。基于行锚分类思想, 网格化车道线位置代替像素级分类, 提高车道线模型检测的实时性。

1　车道线检测网络框架

本文提出一种融合 CBAM 注意力机制和可变形卷积的 CADCN 车道线检测方法, 其网络框架如图 1 所示, 主要由车道线特征提取模块和车道线预测模块 2 部分组成, 能够实现端到端、实时的车道线检测。

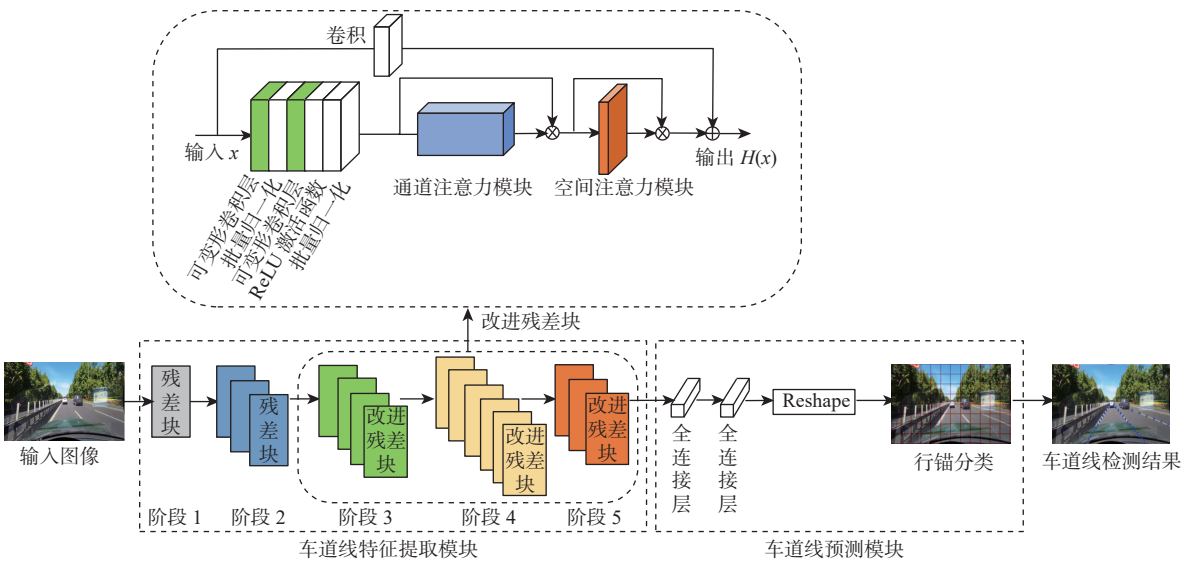


图 1　网络框架

Fig. 1　Network framework

车道线特征提取模块以 ResNet34 作为骨干网络, 其包含 5 个阶段, 即 5 种参数不同的卷积阶段, 经过多层的卷积层进行特征提取。利用 ResNet34 残差网络中特殊的跳连结构缓解因网络深度增加导致的梯度爆炸或梯度弥散等网络性能退化现象, 加快模型收敛, 提升模型训练效果。在阶段 3～阶段 5 的残差块中引入 CBAM 注意力机制和可变形卷积, 提高模型特征提取能力, 提取到更多关于车道线的细节信息, 尤其是低对比度区域的信息, 提升车道线模型检测准确性。

在车道线预测模块中, 使用全局的融合特征, 经过 2 个全连接层 FC 的分类, 解决感受野小的问题。利用上下文的环境信息将不连续但属于同一条车道线的各部分识别为一个整体, 无须复杂的信息传递机制就可以实现很好的车道线识别效果, 改善车道线被遮挡、磨损等复杂场景下的检测性能。为提高车道线检测速度, 改进传统语义分割方法, 借鉴行锚分类思想, 将像素点分类改为对像素块进行分类, 减少需分类的像素点的数量, 在不影响正常检测的前提下, 放大需检测的区域。方法复杂度缩减, 极大提高了车道线检测方法的实时性。通过预测预定义的行锚上所有位置的概率分布选择车

道线的位置，判断车道线是否存在，端到端地输出车道线的位置信息。

2 融合 CBAM 注意力机制与可变形卷积的特征提取模块

ResNet34 的阶段 1 由 1 个卷积层和 1 个最大池化层 MaxPool 组成，阶段 2～阶段 5 由残差块堆叠而成，见图 2。如图 2(a)所示，残差块的输入为 x，输出为 $H(x)$，输入和输出之间通过一个旁路卷积将浅层特征与深层抽象特征直接连接在一起，增加特征的重复利用率，在一定程度上能够避免信息传递时的特征丢失。

本文提出的 CADCN 车道线检测方法，在 ResNet34 的阶段 3～阶段 5 的每个残差块中串联加入 CBAM 注意力机制，分别考虑车道线图像不同通道上像素的重要性及同一通道不同空间位置上像素的重要性，强化有效特征信息，弱化无效特征信息。此外，为更好地提取输入特征，对不同位置对应的尺度或感受野进行自适应调整，将阶段 3～阶段 5 的残差块中的 3×3 卷积层调整为可变形卷积，其他阶段保留为标准卷积层，以减小引入可变形卷积带来的网络参数量的增加对网络负荷的影响。改进后的残差块如图 2(b)所示。

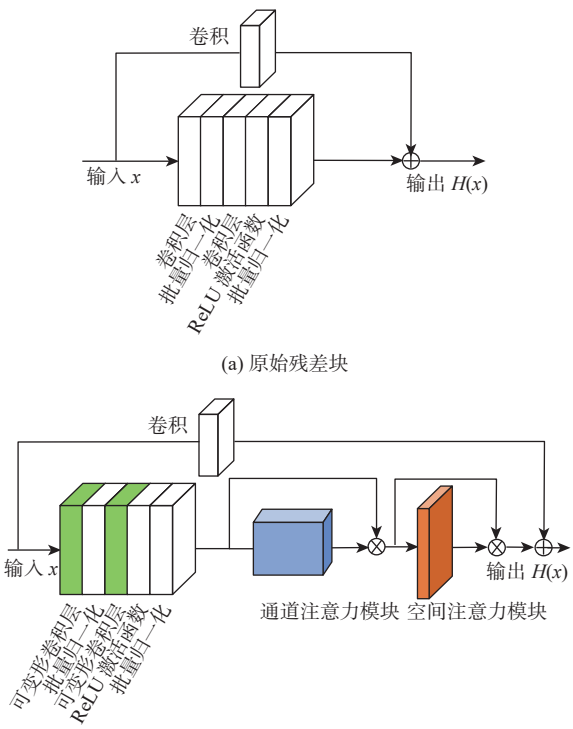


图 2 残差结构改进

Fig. 2 Improvement of residual structure

2.1 基于 CBAM 注意力机制的残差块重构

车道线通常只占图像的小部分区域，大部分内容是自然背景，为剔除与车道线无关的冗余特征信息，提升车道线检测模型的特征提取能力，在 ResNet34 中对残差块进行重构，设计并添加 CBAM 注意力机制，对提取到的车道线特征进行特征重标定，模仿人类视觉感知，自动过滤不重要的信息，把更多的注意资源用于需要重点关注的目标区域，提高视觉信息处理效率与准确性。

CBAM 注意力机制整体流程如图 3 所示。CBAM 由通道注意力机制与空间注意力机制组成，协同学习图像中的关键局部细节信息，为神经网络特征图中车道线区域分配较高的权重，背景分配较低的权重，提高神经网络对图像中车道线的关注度，进而提升网络的特征学习和表达能力。

2.1.1 通道注意力机制

在判断某一像素是否属于车道线时，特征图的各个通道往往具有不同的重要程度，平等地对各个通道的特征信息进行利用，会造成计算资源的浪费。引入通道注意力机制，建模特征图通道间的相互关系，有区别地对待不同通道的特征信息。

如图 3 所示，输入特征图记为 $F \in \mathbf{R}^{C\times H\times W}$，$H$ 和 W 分别为输入特征图的高和宽，C 为输入特征图的通道数。通过全局最大池化和全局平均池化 AvgPool 对特征图 F 的全局空间信息进行压缩，生成 2 个尺寸为 $1\times1\times C$ 的特征图 S_1、S_2。将每个通道特征图在整张图中的位置信息进行融合，可避免小尺寸卷

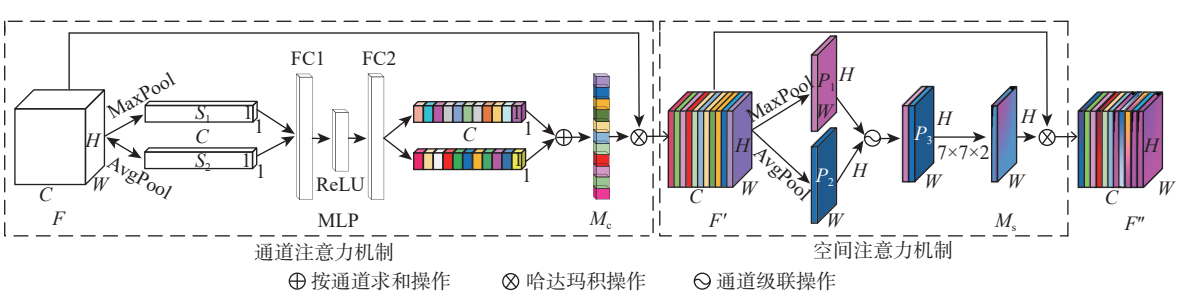


图 3 CBAM 结构

Fig. 3 CBAM structure

积核在提取特征时因感受野范围太小造成的网络评估偏差。

为充分利用压缩操作提取的特征信息, 通过评估操作获得通道间的相关性。S_1和S_2通过共享由全连接层FC1、FC2和ReLU非线性激活函数组成的多层感知机 (multi-layer perception, MLP) 得到2个一维特征图。对其按通道进行求和操作后使用Sigmoid函数进行归一化, 得到各通道的尺寸为$1\times1\times C$的权重统计值M_c, 该过程可表示为

$$M_c(F)=\sigma\left(\mathrm{MLP}\left(\mathrm{AvgPool}(F)\right)+\mathrm{MLP}\left(\mathrm{MaxPool}(F)\right)\right)=\sigma\left(\mathrm{MLP}\left(\frac{1}{H\times W}\sum_{i_0=1}^{H}\sum_{j_0=1}^{W}f_{x_0}(i_0,j_0)\right)+\mathrm{MLP}\left(\max_{i\in H,j\in W}f_{x_0}(i_0,j_0)\right)\right)\tag{1}$$

式中: σ为Sigmoid函数; $f_{x_0}(i_0,j_0)$表示输入特征图F的第x_0通道中坐标为(i_0,j_0)点的像素值。

2.1.2　空间注意力机制

空间注意力机制以通道特征重标定后得到的特征图F'作为输入, 在通道维度上分别做全局最大池化和平均池化操作, 得到特征图$P_1\in\mathbf{R}^{1\times H\times W}$、$P_2\in\mathbf{R}^{1\times H\times W}$。通过通道级联的方式得到特征描述$P_3\in\mathbf{R}^{2\times H\times W}$, 利用卷积层对$P_3$中不同位置的信息进行编码和融合, 得到空间加权信息M_s, 可用于区分图像不同空间位置的重要程度, 过程如下:

$$M_s(F)=\sigma\left(f^{7\times7}\left(\mathrm{AvgPool}(F');\mathrm{MaxPool}(F')\right)\right)\tag{2}$$

式中: $f^{7\times7}$表示卷积核为7×7大小的卷积层。

2.1.3　CBAM 注意力机制

将输入特征图F与各通道权重值M_c的2个矩阵的对应元素相乘, 对F进行特征重标定处理, 得到能够有效体现特征关键通道信息的特征映射F'。在通道加权的基础上, 利用串联的空间注意力机制对空间特征信息进行自适应加权, 将F'作为空间注意力模块的输入, 与空间权重系数M_s这2个矩阵的对应元素相乘, 得到包含通道位置信息、空间位置信息的显著特征图F'', 使网络能够更多关注车道线输入特征强的部分, 提升其空间特征选择能力, 其过程可表示为

$$\begin{cases}F'=M_c\otimes F\\F''=M_s\otimes F'\end{cases}\tag{3}$$

式中: "⊗"表示2个矩阵对应元素相乘。

2.2　可变形卷积替换常规卷积

常规卷积受限于固定的几何结构, 感受野难以感知目标的几何变形, 可提取的有效信息有限, 容易导致目标关键特征信息丢失严重, 网络整体性能下降。为提高CNN对几何变换的建模能力, 引入可变形卷积替换普通卷积, 构造可变形残差块。用带偏移的采样代替固定位置采样, 采样位置自动向目标区域位置偏移, 使卷积核形状自适应车道线形状, 重构ResNet34的卷积层, 以捕获各种形状和尺寸的车道线微小结构细节。

传统的二维卷积, 在局部采样位置p_0的输出特征映射y可定义为

$$y(p_0)=\sum_{p_n\in r}w(p_n)\cdot x(p_0+p_n)\tag{4}$$

式中: $w(p_n)$为采样位置的卷积核权重; $x(p_0+p_n)$为输入特征图的采样位置; p_n为感受野区域中的所有采样位置; r为感受野区域。

在可变形卷积中, 其输出特征映射y定义如下:

$$y(p_0)=\sum_{p_n\in r}w(p_n)\cdot x(p_0+p_n+\Delta p_n)\tag{5}$$

式中: $\{\Delta p_n|n=1,\cdots,N\}, N=|r|$表示在标准卷积的每个采样位置上增加的可学习的偏移量, 通常是一个小数。

因此, 偏移后采样位置的像素$x(p_0+p_n+\Delta p_n)$通常利用双线性插值方法来实现:

$$x(p)=\sum_{q}G(q,p)\cdot x(q)\tag{6}$$

式中: p为区域中的任意位置, $p=p_0+p_n+\Delta p_n$; q为输入特征映射中的所有空间位置, 即$p_0+p_n+\Delta p_n$周围的4个整数点; $x(q)$为特征图上所有整数点的取值; G为双线性插值核函数, 是1个二维核, 可以分解为2个一维核:

$$G(q,p)=\mathrm{g}(q_x,p_x)\mathrm{g}(q_y,p_y)\tag{7}$$

其中: $g(a,b)=\max\{0,1-|a-b|\}$。

引入调节因子[15]$\Delta m_n(0\leqslant\Delta m_n\leqslant1)$对采样范围加以约束, 减少特征学习过程中不相关内容的影响:

$$y(p_0)=\sum_{p_n\in r}w(p_n)\cdot x(p_0+p_n+\Delta p_n)\Delta m_n\tag{8}$$

可变形卷积过程如图4所示。卷积核在偏移量Δp_n的约束下, 车道线特征图的感受野变成一个多边形, 并且多边形的每个位置都受到调节因子Δm_n的影响, 使采样点可以提取车道线不规则的特征, 关注车道线的局部形态变换。偏移量和调节因子的大小通过卷积层进行学习确定。

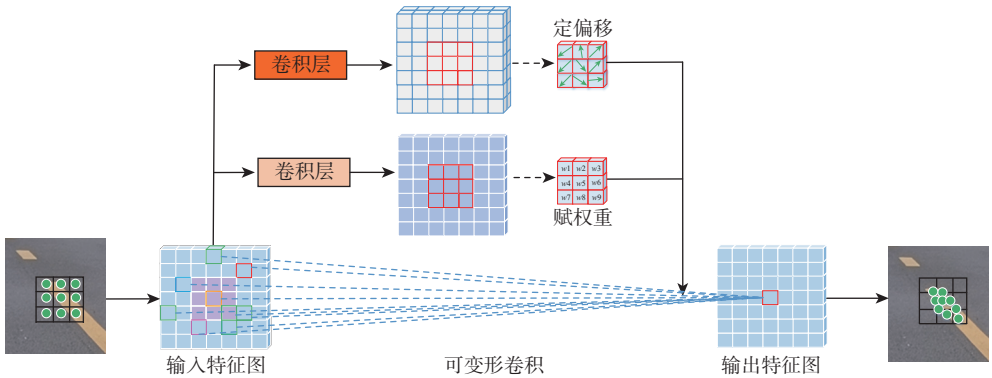


图4 可变形卷积过程

Fig. 4 Process of deformable convolutional network

3 基于行锚分类的车道线预测

考虑车道线长且窄的结构特征，其像素量远小于背景像素量，借鉴超快速结构感知深度车道检测(ultra fast structure-aware deep lane detection, UFLD)方法[16]提出的行锚分类思想，将车道线检测定义为在行方向上进行水平位置的选择和分类问题，由网络模型预测最可能包含车道标记的单元，用网格化车道线位置选取代替像素级分类，旨在复杂道路场景下对车道线进行快速、实时的检测。

将输入通道数为C_0的车道线图像缩放至$H_0\times W_0$大小，本文中H_0取288，W_0取800。车道线特征提取模块处理后的特征图经过全连接层后输出分类张量，利用行锚分类思想，将其重构为C'通道的特征图，每个通道的特征图被分为h行，这些预定义的行称为一个行锚，每一行在垂直方向上再进行切割，形成w个网格，即将$H_0\times W_0$大小的图像聚合成$h\times w$个单元进行处理。在特征图的最右侧增加一个网格单元(即第w+1个)来表示该行中没有车道的情况。利用行锚分类思想，在行方向上对w+1个网格单元进行选择与分类，选择含有车道线元素的网格单元。

以TuSimple数据集为例进行分析，先将输入RGB三通道的车道线图像缩放至288像素×800像素大小，在车道线特征提取模块经过一个卷积层后得到64像素×144像素×400像素的特征图，再经过最大池化将特征维度缩减为64像素×72像素×200像素。经过ResNet34堆叠的残差模块输出512像素×9像素×25像素的特征图，平均池化后得到8像素×9像素×25像素的压缩图，对其进行扁平化处理，展开成1×1 800的一维向量，经过2个全连接层后，其特征维度映射为22 624=(100+1)×56×4，用于最终的SoftMax分类，其中的101为w+1，56表示h，4为设定的图像最多可检测的车道线数量，即C'。SoftMax分类的输出为：$P_{\mathrm{rob}_{i,j,k}}(1\leqslant i\leqslant C', 1\leqslant j\leqslant h, 1\leqslant k\leqslant w+1)$，其中，$P_{\mathrm{rob}_{i,j,k+1}}$表示第$i$个车道出现在第$j$行、第$k$列的网格单元上的可能性，当$k=w+1$时，即$P_{\mathrm{rob}_{i,j,k+1}}$表示第$i$个车道不出现在第$j$行任一个网格单元的可能性。对行锚上的每个网格单元求期望，即可预测出车道线的位置信息。

以LaneNet为例的传统分割方法需处理$H_0\times W_0\times C_0$个分类问题，十分消耗计算资源，难以达到实时性的要求。本文提出的基于行锚分类的CADCN车道线检测方法只需处理$h\times(w+1)\times C'$个分类问题，其中，$h\ll H_0$，$w\ll W_0$，网络模型可以直接提供车道线标志的位置且计算参数量降低，车道线检测实时性提高。

4 实验结果与分析

4.1 数据集及评价标准

为验证CADCN车道线检测模型的性能，分别使用TuSimple数据集和CULane数据集对模型进行训练及评估。数据集的详细信息如表1所示。

4.1.1 TuSimple数据集及评价标准

TuSimple数据集的示例如图5所示。在TuSimple数据集中，使用准确率A对车道线的预测结果进行评估，表示预测正确的像素点在样本中所占的比例，通常$A=\sum_{\mathrm{clip}}C_{\mathrm{clip}}\Big/\sum_{\mathrm{clip}}S_{\mathrm{clip}}$越高表示检测效果

表1 车道线数据集的详细信息

Table 1 Details of lane line dataset

数据集	总帧数	训练集	验证集	测试集	分辨率/(像素×像素)	标注方式	多天气	多时段	多线型	道路类型	车道数	场景种类
TuSimple	6 408	3 268	358	2 782	1 280×720	点坐标	是	是	否	公路	≤5	1
CULane	133 235	88 880	9 675	34 680	1 640×590	点坐标	是	是	否	公路、城市、农村	≤4	9



图 5　TuSimple 数据集示例

Fig. 5　Example of TuSimple dataset

越好, 计算公式如下:

$$A=\sum_{\text{clip}}C_{\text{clip}}\Big/\sum_{\text{clip}}S_{\text{clip}} \tag{9}$$

式中: C_{clip}为预测正确的车道线点数; S_{clip}为标注的车道线真值点数。

4.1.2　CULane 数据集及评价标准

CULane 数据集的测试集分为 9 个类别, 分别为正常、拥挤、夜间、无车道线、阴影、箭头、亮光、弯道和十字路口, 9 种场景所占比例如表 2 所示, CULane 数据集示例如图 6 所示。

表 2　CULane 数据集场景分类及占比

Table 2　CULane dataset scene classification and proportion

场景	场景描述	占比/%
正常	驾驶员视野良好, 车道线标记清晰可见	27.74
拥挤	道路上大量车辆缓行, 车道线被车辆遮挡	23.39
夜间	晚上能见度低, 车道线模糊, 各类灯光干扰	20.27
无车道线	无车道线标记, 通常道路狭窄且路边停车较多	11.73
阴影	天桥或高架桥下光线较暗, 树荫或建筑阴影	2.68
箭头	车道线之间的直行、转弯、调头等标记	2.57
亮光	各类强光造成路边反光, 道路上车道线不清晰	1.40
弯道	前方车道线弯曲	1.22
十字路口	十字路口中斑马线标记干扰, 路口中间无车道线	9.00

在 CULane 数据集中, 使用F_1分数作为综合评估标准, 表示精确率P和召回率R的加权调和平均, F_1分数越高表明模型性能越好, 其计算过程如下:

$$F_1=2\frac{PR}{P+R} \tag{10}$$

$$\begin{cases}P=\dfrac{T_P}{T_P+F_P}\\[2ex] R=\dfrac{T_P}{T_P+F_N}\end{cases} \tag{11}$$



图 6　CULane 数据集示例

Fig. 6　Example of CULane dataset

其中: F_N为假阴性的数目; T_P、F_P分别为真阳性、假阳性的数目。

本文选用准确率A、F_1分数、帧率综合评价 CADCN 车道线检测模型, 验证其性能。

4.2　实验设置

实验使用的硬件环境为: 处理器为 Intel(R) Core (TM) i7-10750H CPU@2.60 GHz 2.59 GHz, GPU 为 GTX-1650Ti。软件环境为: Ubuntu18.04, CUDA-11.1, OpenCV-3.4, Pytorch-1.7.1, Python3.8。使用标准的随机梯度下降法训练模型, 学习动量为 0.9, 权重衰减为 10^{-4}, TuSimple 数据集和 CULane 数据集学习率分别为 2.5×10^{-2} 和 1.6×10^{-2}, 批处理量大小分别为 4 和 2。

4.3　实验对比分析

4.3.1　定量对比实验

基于上述公开车道线数据集进行训练获得车道线检测模型, 将 CADCN 模型分别与 Segnet-Res34[17]、PolyLaneNet[11]、FastDraw[18]、PINet[19]、SAD[9]、LaneNet[10]、EL-GAN[20]、SCNN[8] 等模型进行对比, 用于验证该模型的检测效果。在 TuSimple 数据集上的评估结果如表 3 所示, 在 CULane 数据集上的评估结果如表 4 所示。

从表 3 的实验结果可以看出, 与基于语义分割和聚类实例的 Segnet-Res34[17]、EL-GAN[20]、SCNN[8] 车道线模型相比, 由于 CADCN 模型采用行锚分类的方法对像素块进行分类, 降低了计算量, 在检测速度方面有明显的优势, 可达到 50 帧/s, 是 SCNN[8] 的 7 倍左右; 与 PolyLaneNet[11]、FastDraw[18] 模型相比, CBAM 注意力机制与可变形卷积的加入增强了网络的特征提取能力, 提取到的车道线特征细节信息更加丰富, 使 CADCN 模型在检测准确率方面优势较大; 与 PINet[11]、SAD[9]、LaneNet[10] 模型相比,

表3 TuSimple数据集上不同模型检测结果比较

Table 3 Comparison of detection results of different models on TuSimple dataset

方法	准确率/%	帧率/(帧·s^{-1})
Segnet-Res34[11]	92.84	19.5
PolyLaneNet	93.36	115
FastDraw[18]	95.20	90
PINet[19]	96.51	35
SAD	96.02	42
LaneNet	96.38	52.63
EL-GAN[20]	96.39	9.8
SCNN	96.53	7.5
CADCN	96.63	50

CADCN模型在保持高实时性的前提下，车道线检测准确率最高，可达96.63%，达到检测速度和精度的良好平衡，表现出优越的性能。

表4以F_1分数和帧率比较了CULane数据集中不同场景下的车道线检测效果。可以看出，相较于其他模型，CADCN模型在除亮光及十字路口场景外，F_1指标均表现较优，在夜间、阴影、无车道线等复杂驾驶场景下，表现出良好的抗扰能力。在检测速度方面，CADCN模型基于像素块在行方向上进行分类，其检测速度高于DeepLabV2和FastDraw[18]，可达92.4帧/s，比SCNN[6]提高了10倍以上，相较于LaneNet[10]、SAD[9]、PINet[19]提高了2～3倍，表现出明显的优势。

表4 CULane数据集上不同模型检测结果比较

Table 4 Comparison of detection results of different models on CULane dataset

方法	F_1/%								F_P(十字路口)	平均值/%	帧率/(帧·s^{-1})
	正常	拥挤	夜间	无车道线	阴影	箭头	亮光	弯道			
LaneNet[10]	82.9	61.1	53.4	37.7	56.2	72.2	54.5	59.3	5 928	61.8	44
DeepLabV2	87.4	64.1	60.6	38.1	60.7	79	54.1	59.8	2 505	66.7	77.31
FastDraw[18]	85.9	63.6	57.8	40.6	59.9	79.4	57.0	65.2	7 013	69.7	90.3
SAD[9]	89.8	68.1	64.2	42.5	67.5	83.9	59.8	65.5	1 995	70.5	39.53
SCNN[8]	90.6	69.7	66.1	43.4	66.9	84.1	58.5	64.4	1 990	71.6	7.5
PINet[19]	89.6	71.9	67.0	49.3	67.0	84.2	**65.2**	66.2	**1 505**	73.8	35
CADCN	**90.9**	**72.4**	**67.7**	**46.1**	**69.3**	**85.9**	62.3	**69.5**	2 016	**74.4**	**92.4**

注：加粗字体为每行最优结果。

综上所述，本文提出的融合CBAM注意力机制和可变形卷积的CADCN车道线检测方法能够在一定程度上使模型更加关注与车道线相关的特征信息，提升网络的检测性能，具有较强的鲁棒性和实时性。

4.3.2 消融实验

为验证CADCN模型采用模块的有效性，在设置相同实验参数的情况下做如下对比实验，实验结果如表5所示。可以看出，在可变形卷积替换普通卷积后，分别添加通道注意力机制和空间注意力机制均能提高车道线检测的准确率，但添加CBAM注意力机制后，车道线检测效果提升明显，说明CBAM注意力机制可以对图像中的车道线予以聚焦和关注，并且对干扰信息进行了有效抑制，提高了模型对目标通道和空间信息的聚焦能力。

表5 消融实验结果对比

Table 5 Comparison of ablation test results

组别	可变形卷积	通道注意力机制	空间注意力机制	CBAM注意力机制	准确率/%
1					95.87
2	√				96.07
3	√	√			96.23
4	√		√		96.30
5	√			√	96.63

4.3.3 实验可视化分析

运用本文提出的CADCN模型与LaneNet[10]模型在Tusimple数据集上进行实验验证，部分测试结果如图7所示，白色框标注的区域对比了2种模型对车道线的检测效果。

从图7可以看出，LaneNet[10]模型对车道线的拟合效果欠佳，在场景1(弯道)、场景2(车道线缺失)、场景3(车道线磨损)、场景4(道路阴影)中预测的车道线均出现了偏移，且在场景2和场景3中，因车道线缺失及磨损造成了车道线漏检。而CADCN模型通过输入图像的全局特征有效利用上下文信息，较好处理车道线细节部分，即使车道线



图 7　LaneNet 与 CADCN 检测结果对比

Fig. 7　Comparison of LaneNet and CADCN detection results

出现破损、阴影遮挡等情况, 也能够对其进行鲁棒检测, 且检测结果与真实标签有较高的交并比(intersection over union, IoU)。采用行锚分类预测车道线位置, 多个网格同时负责检测一条车道线, 能够有效避免漏检。然而, 对远端车道线的预测效果不及 LaneNet 模型。

将 CADCN 模型与 PINet[19] 模型在 CULane 数据集及校园环境下采集的图像进行对比, 部分检测效果如图 8 所示。

在场景 1 中, 车道线被车辆遮挡, CADCN 模型可以感受图像的全局信息, 依靠周围车流的走向对车道线进行定位, 借助 CBAM 注意力机制恢复被遮挡的车道线, 与 PINet[19] 模型相比, 减少了车道线漏检情况。

在无车道线视觉线索的场景 2 中, 模型在训练阶段经过多次重复的训练, 即使没有车道线信息, 也可根据道路边缘信息预测出合理的车道线位置。

在场景 3 中, 夜晚环境下道路光照较弱, 且路面有箭头等信息干扰, PINet[19] 模型出现了漏检现象, 由于 CBAM 注意力机制的加入, 使模型能够更加关注车道线的局部细节信息, 可变形卷积替换普通卷积后增强了特征提取能力, 使得提取的特征信息更加丰富。因此, CADCN 模型能够有效检测出车道线, 表现出优越的性能。

在场景 4 和场景 5 中, 车道线被道路两旁的树木阴影干扰, 图像阴影交界的明暗差异容易对模型预测车道线造成干扰。PINet[19] 模型在该情况下对车道线的特征捕捉不充分, 车道线识别不全, 融合 CBAM 注意力机制和可变形卷积的 CADCN 模型能够充分提取全局的空间语义信息, 将不连续但是属于同一条车道线的各个部分识别为一个整体。

场景 6 为实际校园环境下采集的图像, 车道线出现破损且路面存在积水, 车道线颜色与地面接近。从检测结果可以看出, PINet[19] 模型只检测到 2 条车道线, 而 CADCN 模型能够根据图像的全局特征及车道线局部细节特征, 准确定位 3 条车道线的位置, 具有良好的实际应用效果。

由上述测试对比结果可以看出, CADCN 模型在各种复杂场景下都能够较为准确地预测出车道线的位置信息, 显著提高了车道线检测的精度, 同

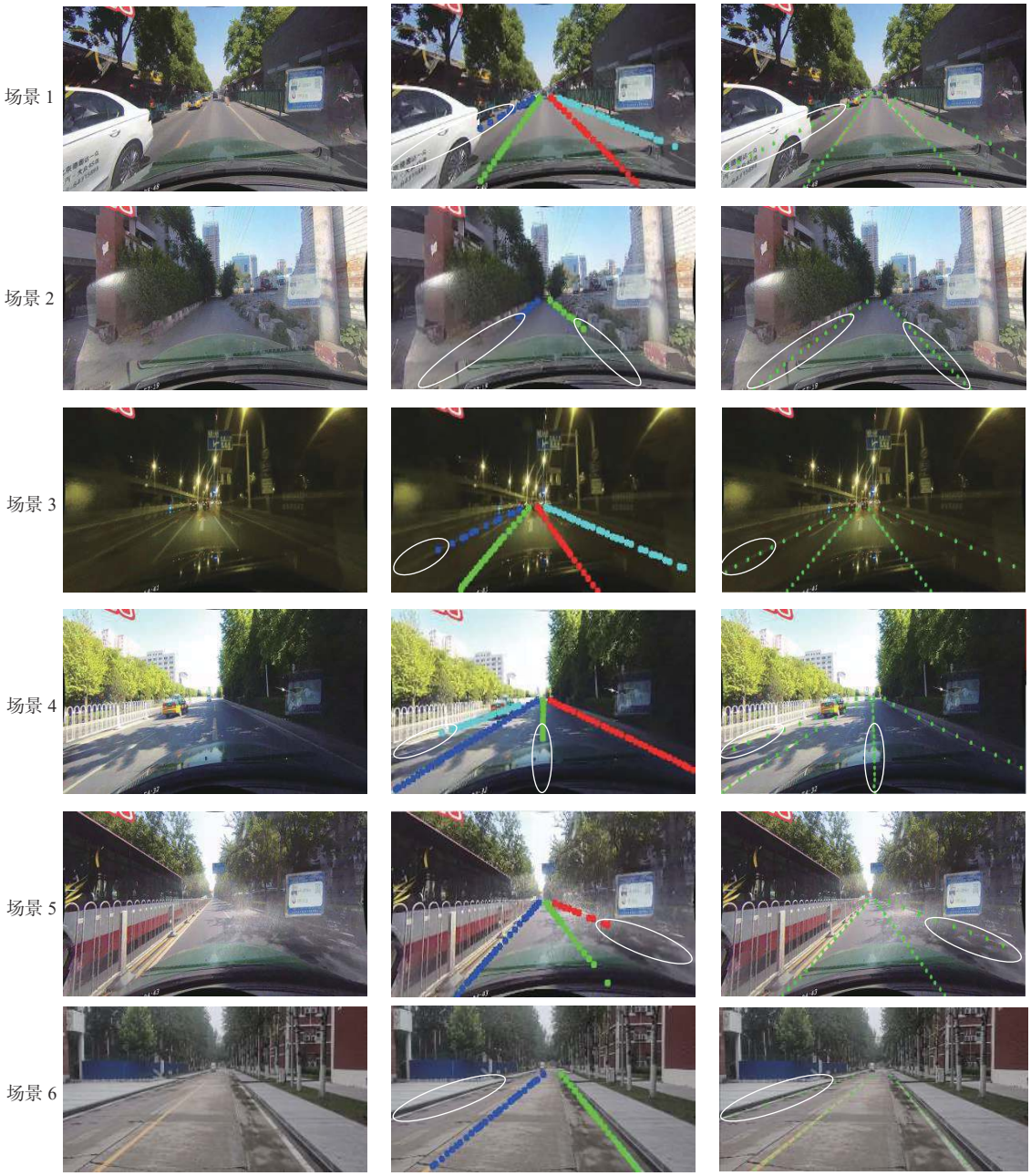


图 8 PINet 与 CADCN 检测结果对比

Fig. 8 Comparison of PINet and CADCN detection results

时具有很好的泛化能力和抗干扰能力。

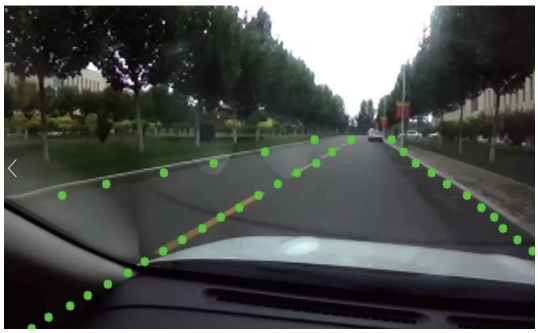
4.3.4 实际道路测试

为验证 CADCN 模型的有效性，在无人驾驶汽车平台上进行了实际道路的车道线检测。车辆的整体架构如图 9 所示，在长城欧拉黑猫 R1 新能源汽车的基础上，搭载了工控机、AGX 计算平台、ZED 2i 双目立体视觉相机和其他外设设备，如电源、鼠标、键盘和显示器等。车道线检测结果如图 10 所示。可以看出，CADCN 模型可以有效地对实际道路中的车道线进行检测，能够应对多种复杂场景，且实时性能够满足无人驾驶车辆对车道线检测算法的要求 (帧率>30 帧/s)，具有良好的实际应用效果。



图 9 无人驾驶汽车平台架构

Fig. 9 Driverless vehicle platform architecture



(a) 白天、马路边沿道路车道线检测



(b) 黑夜、积水道路车道线检测

图 10　实际道路车道线检测

Fig. 10　Lane line detection on actual road

5　结　论

针对复杂的道路驾驶环境, 为提升车道线检测方法性能, 提出 CADCN 车道线检测方法, 经实验验证可得到以下结论:

1) 在提高方法准确性方面, 采用 CBAM 注意力机制使模型能够专注于学习车道线特征, 提高了模型对车道线检测的灵敏度及辨别能力; 将部分 3×3 卷积层调整为可变形卷积, 提高了模型对车道线几何形变的建模能力和学习效率; 通过强化骨干网络的深层语义特征提取能力, 方法的鲁棒性及环境适应性均得到提高。在 TuSimple 数据集上准确率达到 96.63%, 在 CULane 数据集上其综合评估指标 F_1 平均值达 74.4%。

2) 在提高方法实时性方面, 基于行锚分类思想, 将车道线检测定义为在预定义的行锚上进行水平位置的选择和分类问题, 用网格化车道线位置选取代替像素级分类, 计算量减少。采用端到端的方法, 无后处理操作, 实时性较高, 能够满足无人驾驶车辆实时的道路分析检测需求。

本文方法虽然能快速、实时地对车道线进行检测, 但对远端车道线的检测效果欠佳, 下一步的研究工作是考虑对远端和近端车道线使用不同大小的网格分割以提高车道线检测准确率。

参考文献 (References)

[1] WAYKOLE S, SHIWAKOTI N, STASINOPOULOS P. Review on lane detection and tracking algorithms of advanced driver assistance system[J]. Sustainability, 2021, 13(20): 11417.

[2] 杜恩宇, 张宁, 李艳荻. 基于 Gabor 滤波器的车道线快速检测方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 314-321.
DU E Y, ZHANG N, LI Y D. Lane line quick detection method based on Gabor filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8): 314-321(in Chinese).

[3] ANDRADE D C, BUENO F, FRANCO F R, et al. A novel strategy for road lane detection and tracking based on a vehicle's forward monocular camera[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(4): 1497-1507.

[4] LUO S, ZHANG X Q, HU J, et al. Multiple lane detection via combining complementary structural constraints[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(12): 7597-7606.

[5] 蔡英凤, 张田田, 王海, 等. 基于实例分割和自适应透视变换算法的多车道线检测[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2020, 50(4): 775-781.
CAI Y F, ZHANG T T, WANG H, et al. Multi-lane detection based on instance segmentation and adaptive perspective transformation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(4): 775-781(in Chinese).

[6] KIM J, LEE M. Robust lane detection based on convolutional neural network and random sample consensus[C]//Proceeding of the International Conference on Neural Information Processing. Berlin: Springer, 2014: 454-461.

[7] LI J,MEI X,PROKHOROV D,et al. Deep neural network for structural prediction and lane detection in traffic scene[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 28(3): 690-703.

[8] PAN X G, SHI J P, LUO P, et al. Spatial as deep: Spatial CNN for traffic scene understanding[C]//Proceeding of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alco: AAAI, 2018: 7276-7283.

[9] HOU Y N, MA Z, LIU C X, et al. Learning lightweight lane detection CNNs by self attention distillation[C]//Proceeding of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1013-1021.

[10] NEVEN D, DE BRABANDERE B, GEORGOULIS S, et al. Towards end-to-end lane detection: An instance segmentation approach[C]//Proceeding of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Piscataway: IEEE Press, 2018: 286-291.

[11] TABELINI L, BERRIEL R, PAIXÃO T M, et al. PolyLaneNet: Lane estimation via deep polynomial regression[C]//Proceeding of the 25th International Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 6150-6156.

[12] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: Convolutional block attention module[C]//Proceeding of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 3-19.

[13] DAI J F, QI H Z, XIONG Y W, et al. Deformable convolutional networks[C]/Proceeding of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 764-773.

[14] 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.

[15] ZHU X Z, HU H, LIN S, et al. Deformable ConvNets V2: More deformable, better results[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 9300-9308.

[16] QIN Z Q, WANG H Y, LI X. Ultra fast structure-aware deep lane detection[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2020: 276-291.

[17] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(4): 834-848.

[18] PHILION J. FastDraw: Addressing the long tail of lane detection by adapting a sequential prediction network[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 11574-11583.

[19] KO Y, LEE Y, AZAM S, et al. Key points estimation and point instance segmentation approach for lane detection[C]//Proceedings of the IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Piscataway: IEEE Press, 2022: 8949-8958.

[20] GHAFOORIAN M, NUGTEREN C, BAKA N, et al. EL-GAN: Embedding loss driven generative adversarial networks for lane detection[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2019: 256-272.

Lane line detection incorporating CBAM mechanism and deformable convolutional network

HU Dandan[1], ZHANG Zhongting[1], NIU Guochen[1, 2, *]

(1. Robotics Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Key Laboratory of Smart Airport Theory and System, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to meet the accuracy and real-time requirements of autonomous driving and advanced driver assistance systems (ADAS) for lane line detection, a CADCN lane line detection method incorporating convolutional block attention module (CBAM) mechanism and deformable convolutional network (DCN) was proposed. Firstly, the CBAM mechanism was embedded in the feature extraction module to enhance the useful features and suppress the useless feature responses. Secondly, DCN was used to replace the conventional convolutional network, and the geometric deformation of lane lines was learned by sampling with offset to improve the modeling capability of the convolution kernel. Finally, based on the idea of row anchor classification, the location point along the row was selected and classified, so as to predict the lane line location information and thus improve the real-time performance of the lane line detection model. The CADCN model was trained and validated on the public lane line dataset. While ensuring real-time performance, the accuracy rate of the model on the TuSimple dataset reaches 96.63%, and the comprehensive evaluation index F_1 on the CULane dataset reaches 74.4%, which verifies the effectiveness of the algorithm.

Keywords: lane line detection; feature extraction; attention mechanism; deformable convolutional network; row anchor classification

Received: 2022-07-09; **Accepted**: 2022-11-19; **Published Online**: 2022-12-15 17:33

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221214.1720.008

Foundation items: Tianjin Science and Technology Plan (17ZXHLGX00120); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122022PY17,3122017003)

* **Corresponding author**. E-mail: niu_guochen@139.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0602

轻量化特征融合的 CenterNet 输电线路绝缘子自爆缺陷检测

苟军年*，杜愫愫，王世铎，张昕悦
(兰州交通大学 自动化与电气工程学院，兰州 730070)

摘 要：输电线路智能化巡检是新一代电力系统建设的必然要求。当前，基于深度学习的检测模型由于参数量过大，使得利用无人机（UAV）进行边缘部署较困难。为使无人机可搭载轻量级模型实现输电线路中具有自爆缺陷绝缘子的识别，提出了一种轻量级 CenterNet-GhostNet 的目标检测网络。对模型主干特征提取网络进行轻量化处理，利用计算成本较低的 GhostNet 提取自爆缺陷绝缘子的多层次特征，降低模型复杂度；引入增强感受野模块 (RFB) 增强特征表达能力，提升模型对小目标特征信息的注意力；构建特征融合模块，将低层特征信息和高层特征信息有效融合以输出更完整的特征图，提高缺陷识别精度。利用迁移学习参数共享，结合冻结与解冻训练相结合的模型训练策略，缓解网络因小样本数据集而产生的泛化能力不足问题。基于构建的输电线路自爆缺陷绝缘子数据集对所提方法进行验证，实验结果表明：相比原始 CenterNet，所提方法的 AP50、AP75 和 AP50:95 分别提升至 0.86、0.74 和 0.63，模型参数量由 124.61×10^6 减少至 64.2×10^6，可实现复杂环境下的自爆缺陷绝缘子检测，提高了基于无人机的输电线路巡检精度与速度。

关 键 词：深度学习；绝缘子自爆缺陷；轻量级网络；CenterNet；小目标检测
中图分类号：TM755; TP389.1
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2161-11

输电线路是电力系统重要的生命线路，线路中各个器件长期负荷运行，受外部环境及自身特性的影响，容易出现多种缺陷[1]。绝缘子具备电气绝缘和机械固定等功能，是输电线路中不可或缺的元件。由于制造过程中杂质颗粒的影响，绝缘子投入运行后发生膨胀，导致内部产生裂纹；另外，绝缘子经常暴露于风、雨、雪、电等自然环境中，表面积污无法得到及时处理，加之温差变化和电场作用，在实际运行中常出现绝缘子自爆缺陷，导致绝缘子串脱落，对其性能产生干扰，从而影响电力系统安全稳定运行。因此，对输电线路进行有效巡检，及时检测缺陷绝缘子是维护电力系统安全的重要保障。

随着新一代电力系统建设“智能化”的需求，利用无人机获取线路大数据，结合计算机视觉技术进行缺陷定位[2]已成为发展潜力最大的智能化巡检方式。目前，绝缘子缺陷自动化检测实现方式主要基于传统机器视觉方法或深度学习方法。传统机器视觉方法采用常规图像处理算法或人工设计特征方式[3]实现目标区域的分割与识别。刘洋等[4]选定多尺度形态学梯度算法完成红外图像中瓷绝缘子串边缘提取，确定最大连通区域，对解决红外图像边缘缺失导致的铁帽和伞盘误分割问题有一定指导意义。目标区域的准确分割是图像处理算法实现精准定位的前提，传统分割方法很大程度上依赖于图像预处理效果，具有一定局限性。赵振兵等[5]

收稿日期：2022-07-09；**录用日期**：2022-08-19；**网络出版时间**：2022-09-17 13:00
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220916.1343.001
基金项目：国家自然科学基金 (61863023)
* **通信作者**. E-mail：junnian@mail.lzjtu.cn

引用格式：苟军年，杜愫愫，王世铎，等. 轻量化特征融合的 CenterNet 输电线路绝缘子自爆缺陷检测 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2161-2171. GOU J N，DU S S，WANG S D，et al. Insulator self-explosion detection in transmission line based on CenterNet fusing lightweight features [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2161-2171（in Chinese）.

提出协同分割方法，对预处理后的图像进行Hough检测修复，缓解输电线与绝缘子黏连问题，进行超像素分割后实现C-V模型初始轮廓的选取，有效区分绝缘子与背景，去除伪目标干扰，但图像处理算法受图像质量影响较大，巡检图像光线多变、背景复杂，很难实现有效分割。姚晓通等[6]针对接触网绝缘子小幅度旋转这一特定场景，设计了Canny边缘特征和SURF点特征的绝缘子识别方法，检测结果较为准确，但特定场景设计的特征难以得到泛化能力较强的模型，且人员经验存在主观性与片面性，没有统一标准进行性能评价。以上方法虽然可以实现输电线路中绝缘子的识别，但均针对特定目标与特定场景，通用性不强，且对航拍所获图像中小尺度、高似然目标的快速定位与识别存在困难[7]，难以满足工业实际检测需求。

目前，基于深度学习的目标检测方法具有更强的特征提取能力和抗干扰能力，已成为计算机视觉领域重要的研究方向，按照方法实现可分为以Fast R-CNN、Faster R-CNN等为代表的双阶段模型和以YOLO、单次多边框检测（single shot multibox detector SSD）等为代表的单阶段模型。双阶段模型由特定算法生成一系列候选框，通过卷积神经网络（convolutional neural network, CNN）进行样本分类，回归得到目标框。顾超越等[8]针对无人机巡检所得输电线路销钉图像中目标尺寸小、背景复杂等特点，利用K-means算法调整Faster R-CNN所获初始锚框，并建立特征金字塔，有效融合多尺度特征，改进算法与常见目标检测模型相比，精确度与召回率均得到提升。李鑫等[9]提出基于改进Cascade R-CNN的输电线路多目标检测方法，引入Soft-NMS方法和Focal损失，降低了被遮挡目标的漏检率，缓解了样本不平衡的影响，结果表明，改进方法在复杂背景下对3种瓷质绝缘子及其缺陷、相间棒、防震锤及鸟窝均能实现较为准确的检测，为输电线路的智能巡检提供了一种新思路。考虑到实际工业生产中实时性要求，单阶段模型直接将目标定位问题转化为回归问题，牺牲部分检测精度，以提高速度。李瑞生等[10]提出基于残差网络和多级特征融合的改进SSD模型，对于输电线路销钉具有较高检测精度，实验表明，模型泛化能力较强，可用于线路小目标缺陷检测。郝帅等[11]针对目标多尺度性及输电线路常见目标遮挡问题，提出基于注意力机制与跨尺度特征融合的YOLOv5输电线路故障检测算法，结果表明，该算法对复杂环境中输电线路的多尺度故障目标可实现精确检测。

无论是单阶段模型还是双阶段模型，均为Anchor-Based算法，利用分布密集的锚框进行目标分类及边界框坐标回归，可有效提升网络目标召回能力，对小目标检测精度提高地非常明显。但大量锚框导致正负样本严重不平衡，即使后期引入非极大抑制（non-maximum suppression, NMS）模型，计算量与复杂度仍阻碍检测速度的提高。Anchor-Free算法直接利用关键点特征热力图进行目标检测，无须预先定义锚框，检测精度提升的同时加快了检测速度，适用于输电线路缺陷绝缘子的快速准确定位，维护电网安全运行。许延雷等[12]提出了基于自适应阈值的改进CenterNet航拍图像目标检测算法，为提高检测精度，在主干网络中引入基于注意力机制的卷积结构，结果表明，改进算法具有良好的检测精度，可满足实时性要求。

深度学习目标检测模型基于卷积神经网络设计，模型体积大、运算量高，为实现嵌入式平台的边缘部署，检测网络轻量化设计成为热点。唐玮等[13]为在星载平台实现模型部署，提出轻量级飞机目标深度学习检测方法，以SSD算法为基本框架，设计密集连接结构和双卷积通道构成计算效率较高的骨干网络，由残差结构进行特征融合，可实现复杂飞行场景下的高精度检测，且有效降低模型计算复杂度。符惠桐等[14]基于YOLOv4设计GS-YOLO模型，利用Ghostmodule重构目标识别网络，仅损失2.43%的精度，将模型预测速度提高为原算法的2.9倍，缓解了算力较低的移动平台部署压力。

以上方法均可实现输电线路部件及其缺陷检测，具有较好的检测性能，但对于绝缘子自爆缺陷检测还存在诸多挑战：①绝缘子自爆缺陷像素占比较少，缺陷检测可视作小目标检测，难以实现目标特征的有效提取；②无人机航拍所得巡检图像背景复杂，不同部件对绝缘子缺陷的检测造成干扰，难以实现多尺度特征有效融合；③深度网络参数量大，模型训练依赖高性能运算平台，难以实现移动边端的部署[15]。

针对复杂场景下小尺度绝缘子自爆缺陷检测，综合检测精度与速度，结合实际工业生产中移动设备部署问题及实时化要求，本文仅针对模型构建、训练及测试展开研究，提出多尺度特征融合的轻量级CenterNet输电线路绝缘子自爆缺陷检测方法。该方法采用轻量级GhostNet作为主干特征提取结构，引入感受野模块（receptive field block, RFB），改善不同尺度感受野的特征提取能力；设计轻量化特征融合模块，在保证参数量与运算量小幅度增长的前提下，有效利用多尺度特征间的关联性提高缺陷检测精度；在训练过程中使用迁移学习思想，提升

网络训练效果与收敛速度, 优化网络在复杂背景下对绝缘子自爆缺陷此类小目标的检测性能。

1　多尺度特征融合的轻量级网络实现

本文方法流程如图 1 所示, 包含数据集制作、轻量级自爆缺陷检测模型构建和模型训练 3 部分。首先, 采用翻转变换、亮度变换、滤波变换及加噪处理等方法增广输电线路绝缘子缺陷图像数据集, 减少因样本数据不足产生的过拟合现象, 并使用 LabelImg 对自爆缺陷区域进行标注。然后, 构建轻量级 CenterNet-GhostNet 主干特征提取网络, 减少模型参数, 由于绝缘子缺陷尺寸较小, 引入 RFB, 以此增强复杂背景下自爆缺陷处图像显著度; 特征提取网络输出不同尺度的特征层, 通过构建轻量级特征融合模块, 有效平衡低层特征与高层特征, 提高模型缺陷检测性能。

CenterNet 由特征提取和目标检测 2 部分构成, 目前常用的特征提取网络基于 Hourglass Network、DLANet 或 ResNet 设计, 虽然 3 种网络应用成熟, 但 Hourglass Network、DLANet 本身网络参数较多, 模型结构较为复杂, 而 ResNet50 训练时间较长, 网络性能优化过程费时。考虑最终模型部署及轻量化要求, 选用轻量化网络 GhostNet 作为主干网络。

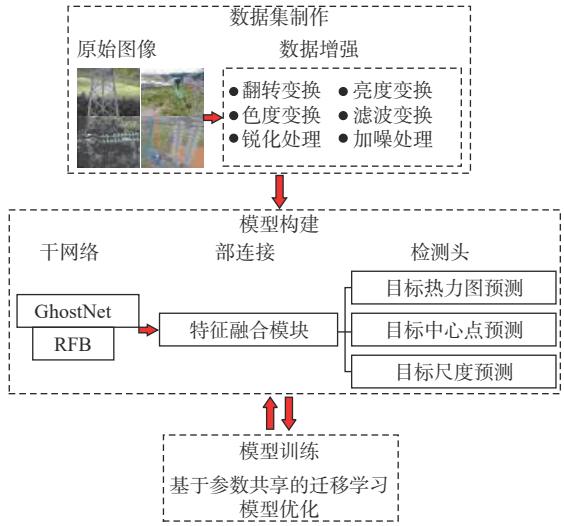


图 1　本文方法流程

Fig. 1　Flow of the proposed method

1.1　基于 GhostNet 的多尺度感受野特征提取网络

在保证模型检测精度前提下, 降低参数量, 合理利用硬件资源, 设计 GhostNet-RFB 轻量化特征提取网络, 其结构如图 2 所示。

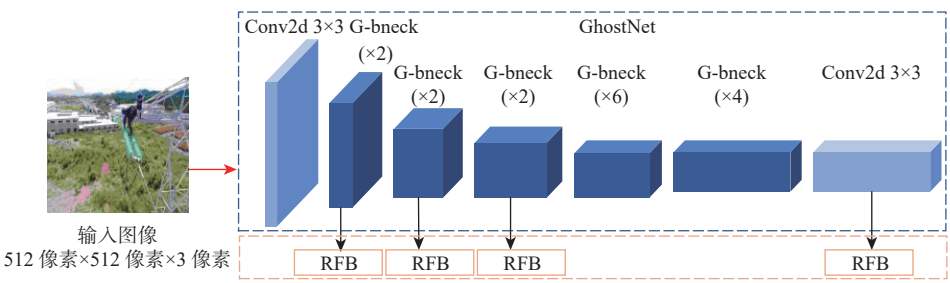


图 2　GhostNet-RFB 轻量化特征提取网络

Fig. 2　Lightweight feature extraction network of GhostNet-RFB

1.1.1　轻量级 GhostNet 主干特征提取网络

基于神经网络设计的主干构架获取的特征层之间有很多相似性, 但这些相似特征层中所蕴含的冗余或充足信息却是实现目标全面理解的基础, 这种具有庞大计算体系的模型使小型移动端难以负荷人工智能网络[16], 因此, 小型化、轻量级网络的构建成为研究热点。目前, 较为流行的轻量化网络结构有 SqueezeNet、ShuffleNet 及 MobileNet 等。SqueezeNet 构建压缩再扩展模块, 1×1 卷积用于实现输入通道数的压缩, 为确保网络可保留更多目标信息, 使用多尺度卷积进行特征提取的计算, 有效提高检测准确率, 但大量使用 1×1 卷积占用了较多计算资源。ShuffleNet 着重优化网络结构, 利用分组卷积结合通道混洗操作有效缓解资源占用现象, 但传统卷积操作在特征提取阶段仍具有较为繁琐的计算过程。MobileNet 设计了高效的深度可分离卷积方式, 通过逐通道卷积和逐点卷积操作, 极大减少了卷积过程的计算量, 更有效地实现了网络的轻量化要求。考虑到重复特征信息对模型检测精度的重要性, GhostNet 设计时并未简单去除冗余, 而是采用成本更低的计算方式获取[17], 即构建 Ghost module 替代普通卷积。从网络整体看, Ghost module 主要功能有 2 个方面: 利用 1×1 卷积获取输入特征的必要特征浓缩, 以利用深度可分离卷积获得特征浓缩的相似特征层。图 3 为 Ghost module 构建过程, 该模块是 GhostNet 实现精度提升与网络轻量化的关键, 利用逐层卷积的线性运算代替部分传统卷积以减少网络计算量, 直接拼接本征与冗余特征图以获取有效特征图, 提升网络的特征表达能力。

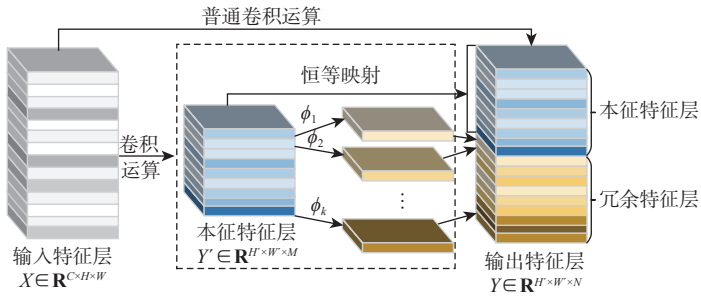


图 3 Ghost module 结构

Fig. 3 Ghost module structure

普通卷积运算过程直接由输入特征层 X 经过卷积核 f 运算处理得到输出特征层 Y，而 Ghost module 先通过卷积核 f' 进行普通卷积运算生成 M 个本征特征层 Y'，再利用线性变换 ϕ_{ij} 逐层处理，生成对应冗余特征层，将上述 2 类型特征层进行拼接，得到最终的输出特征层 Y。上述过程如下：

$$Y=X\times f+b \tag{1}$$

$$\begin{cases} Y'=X\times f' \\ Y_{ij}=\phi_{ij}(Y_i') \end{cases} \quad i\in[1,m],j\in[1,s] \tag{2}$$

式中：$f\in\mathbf{R}^{c\times k\times k\times n}$ 表示 n 个 $k\times k$ 大小的卷积核；b 为偏置；$f'\in\mathbf{R}^{c\times k\times k\times m}$ 表示 m 个 $k\times k$ 大小的卷积核；$X\in\mathbf{R}^{C\times H\times W}$ 表示输入通道数为 C、高度为 H、宽度为 W 的输入特征层；$Y\in\mathbf{R}^{H'\times W'\times N}$ 表示高度为 H'、宽度为 W' 的 N 个输出特征层；$Y'\in\mathbf{R}^{H'\times W'\times M}$ 为由输入特征层通过普通卷积运算得到的 M 个本征特征层；Y_{ij} 表示卷积核大小为 $d\times d$ 的逐层线性变换 ϕ_{ij} 所生成的第 j 个本征特征所对应的冗余特征，即 Ghost 特征图。

为衡量模型计算量与复杂度，常采用浮点运算次数 (floating point of operation, FLOP) 作为量化指标，对普通卷积运算与 Ghost module 进行运算量分析。

对于普通卷积运算，其计算量为

$$F_1=k\times k\times C\times H'\times W'\times N \tag{3}$$

对于 Ghost module 所进行的运算，其计算量为

$$F_2=k\times k\times C\times H'\times W'\times\frac{n}{s}+d\times d\times H'\times W'\times(s-1)\times\frac{n}{s} \tag{4}$$

由于 $M\leqslant N$，且模型构建时，设置 $k=d$，普通卷积运算与线性运算卷积核大小相同，则可得到 2 个计算量的比值为

$$\alpha=F_1/F_2=(k\times k\times C\times H'\times W'\times N)/\left[k\times k\times C\times H'\times W'\times\frac{n}{s}+d\times d\times H'\times W'\times(s-1)\times\frac{n}{s}\right]=(C\times k\times k)\left(\frac{1}{s}\times k\times k\times C+\frac{s-1}{s}\times d\times d\right)\approx s \tag{5}$$

由 Ghost module 处理过程可知，经模块处理拼接所得结果与输入特征层的数量一致，但经量化比较可知，卷积与线性运算结合后的特征提取过程可有效减少网络计算量。

利用 Ghost module 可进行轻量化网络 GhostNet 瓶颈结构的设计，根据网络操作结果的不同，瓶颈结构可设计为 2 种类型：步长为 1 的 G-bneck 和步长为 2 的 G-bneck，如图 4 所示。当需要对特征层的宽高进行压缩时，设置如图 4 (b) 中步长为 2 的结构，在主干部分的 2 个 Ghost module 中引入深度可分离卷积 (depthwise separable convolution, DWConv) 进行宽高压缩操作，以减少模型参数与计算量。

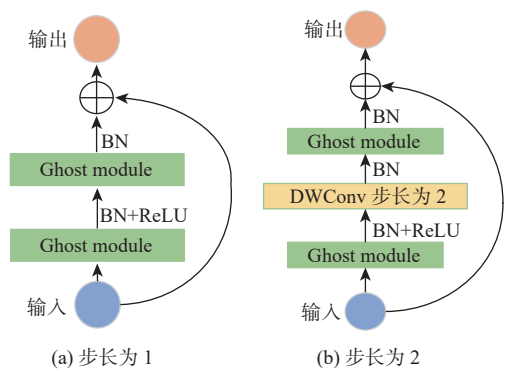


图 4 G-bneck 结构

Fig. 4 G-bneck structure

无人机所获巡检图像经过特征提取网络处理后，特征层尺度变化及网络参数如表 1 所示。

表 1 GhostNet 特征层输出尺度与网络参数结构

Table 1 Output scale and network parameter structure of GhostNet feature layer

输入尺度/(像素×像素×像素)	操作	步长
512×512×3	Conv2d 3×3	2
256×256×16	G-bneck(×2)	1,2
128×128×24	G-bneck(×2)	1,2
64×64×40	G-bneck(×2)	1,2
32×32×80	G-bneck(×4)	1,1,1,1
32×32×112	G-bneck(×2)	1,2
16×16×160	G-bneck(×4)	1,1,1,1
16×16×160	Conv2d 3×3	1

1.1.2　小尺度绝缘子自爆缺陷加强特征提取网络

对于航拍输电线路绝缘子成像特点, 其拍摄角度与自然光线的多变性影响模型训练的复杂度; 且绝缘子通常处于复杂环境中, 周围自然场景、架空线路器件对绝缘子造成遮挡或干扰; 同时, 航拍高度变化比例较大, 绝缘子自爆缺陷区域所占图像像素比例较少, 导致检测精度较低。因此, 整个自爆缺陷检测任务可视为小目标检测[18]。针对上述图像特点, 在保证模型大小符合边缘部署及实时目标检测要求的前提下, 增强航拍图像尺度多变时检测模型的鲁棒性, 引入 RFB 提升骨干网络对小目标的特征提取能力。

对小目标而言, 由于尺度限制, 可提取特征较少, 但靠近目标中心的特征点所具备的信息对检测结果的准确性来说至关重要, 且目标所处背景较复杂, 难以实现高精度辨识。借鉴人类视觉感受野模式, 需要利用小尺度卷积核进行中心特征提取, 而对于距离中心点较远的特征采样点, 所需的卷积核空洞率则相对较大[19], 在神经网络中, 感受野指卷积神经网络中每层输出特征图上的像素点在原始输入图像映射的区域大小[20], 由卷积核的尺寸大小决定。因此, 引入依据人类感受野模式设计的 RFB, 设置空洞率分别为 1、3、5 的空洞卷积, 利用不同大小卷积核提取多尺度特征信息; 再利用不同尺度加宽卷积层, 增强特征感受力; 通道拼接与 1×1 卷积实现特征融合, 整个模块在进行少量计算的前提下, 可有效利用不同感受野的特征信息, 提升对输电线路绝缘子自爆缺陷的检测性能。RFB 的特征提取过程如图 5 所示。

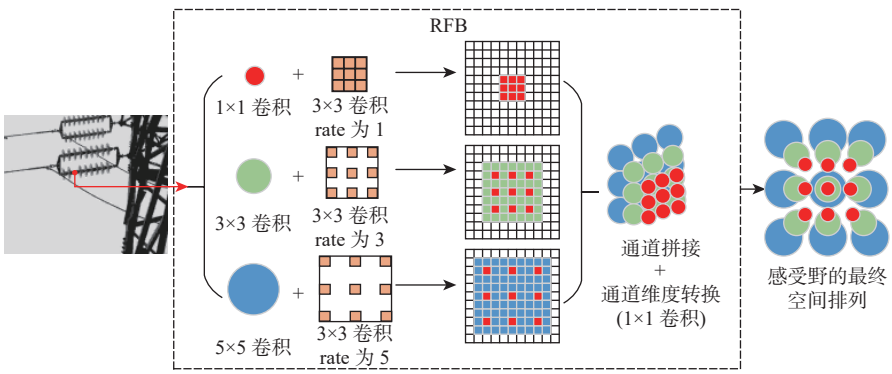


图 5　增强 RFB 的特征提取结构

Fig. 5　Feature extraction structure of enhanced RFB

该模块是一个类似于 Inception 结构的多分支卷积并联模块, 每条支路先利用 1×1 卷积对输入特征层进行跨通道信息融合, 以减少特征通道数; 其内部结构有 2 个重要组件: 具有不同尺度卷积核的多分支卷积层及随后不同大小的膨胀卷积层, 如图 5 中不同大小的圆代表不同尺度的卷积核, 随后紧跟操作是膨胀率不同的加宽卷积层, 可以有效平衡不同尺寸感受野之间的关系, 是提高模块对不同尺度特征感受力的关键。输入图像因经过不同膨胀率的卷积实现特征提取, 所得特征图尺度各异, 此时再通过拼接与 1×1 的卷积实现多尺度特征融合, 有效增强网络对小尺度绝缘子自爆部位的检测鲁棒性, 对复杂背景下缺陷部位的检测效果有所改善。

输入的巡检图像经主干网络 GhostNet 处理后可输出不同尺度的特征层。其中, 底层特征经过的卷积层较少, 具有较高的分辨率, 包含更多的位置信息及目标细节信息, 但其语义性比较低且存在更多噪声; 高层特征经过较多卷积层处理, 噪声影响减小, 具有较强的语义性, 但分辨率过低导致目标细节的感知能力较差。为保障轻量级网络提取目标特征的有效性与完整性, 在特征层进行融合之前, 选择主干网络中分辨率分别为 128 像素×128 像素×24 像素、64 像素×64 像素×40 像素、32 像素×32 像素×112 像素的特征层及 16 像素×16 像素×160 像素的网络输出特征层, 对应大尺度、中尺度及小尺度自爆缺陷特征, 将上述特征层输入 RFB, 进一步提升自爆缺陷小目标的特征提取能力, 得到类似于人类视觉感受野的输电线路绝缘子自爆缺陷区域图像空间通道特征。

1.2　轻量级特征融合网络

主干网络在生成多分辨率特征图的过程中, 无法避免部分特征信息的丢失, 并且原始 CenterNet 模型的定位结果仅通过操作一个具备语义信息的高层特征层所得, 对小目标而言, 丢失部分底层目标信息, 忽略尺度跨度较大的信息[21], 会对检测结果的准确性造成一定影响。

为提升模型对小目标的检测能力, 设计轻量级特征融合网络引入主干结构之后, 将底层特征和高

层特征有效融合起来，在完善目标全局情景信息的同时保留足够细节信息，减少噪声对检测造成的干扰。融合网络结构如图 6 所示。

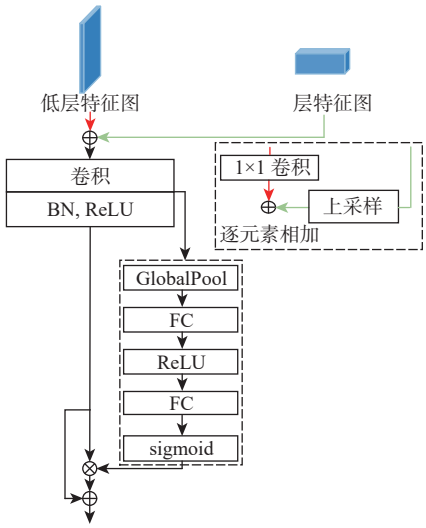


图 6 特征融合网络构建

Fig. 6 Construction of feature fusion network

融合网络对加强特征提取网络所得分辨率分别为 128 像素×128 像素、64 像素×64 像素、32 像素×32 像素及 16 像素×16 像素，对包含不同特征信息的 4 个特征层进行融合，得到最终有效特征层，用于后续的缺陷检测。低层特征图经过步长为 1 的 1×1 卷积运算，对维度进行修正，高层特征图利用 2 倍上采样操作变换尺度，将处理后的高、低层特征图逐像素相加，输出初步特征融合图；为保证融合网络可以自适应突出缺陷区域重要特征，减少背景及高似然物体等无用信息的干扰，设计了旁路分支结构，借鉴高效通道注意力 (efficient channel attention, ECA) 模块结构原理，对所得初步融合的特征图进行全局池化，在不进行降维操作的前提下，生成特征权重向量，将该权重作用于初步融合特征图上，学习与自爆缺陷更为相关的特征信息，输出有效融合特征图。该融合过程对模型复杂度的影响很小，且基于注意力所设计的旁路融合分支可实现有效的跨通道信息交互，得到表达能力更强的融合信息，进一步降低了融合后网络所产生的噪声影响，对于自爆缺陷的检测性能也有所提升。

根据上述模型各部分的构建过程，得到改进后轻量级 CenterNet 目标检测网络结构，如图 7 所示，包括：①特征提取模块，对自爆缺陷绝缘子图像进行特征提取，获取不同分辨率的特征层，主干结构为 GhostNet；②加强特征提取模块，对代表大尺度、中尺度及小尺度的特征层进行多属性特征提取，由 RFB 结构完成；③特征融合模块，对所获多层次特征图进行有效融合，保证目标特征信息的完整性；④目标检测模块，利用筛选出的关键点进行目标中心点的确定及边界框的绘制，实现输出预测。

1.3 模型的迁移学习优化过程

由于电力系统安全运行的要求，缺陷绝缘子更换须及时，获取大型输电线路自爆缺陷绝缘子数据集较为困难，利用小型数据集训练模型，却极易出

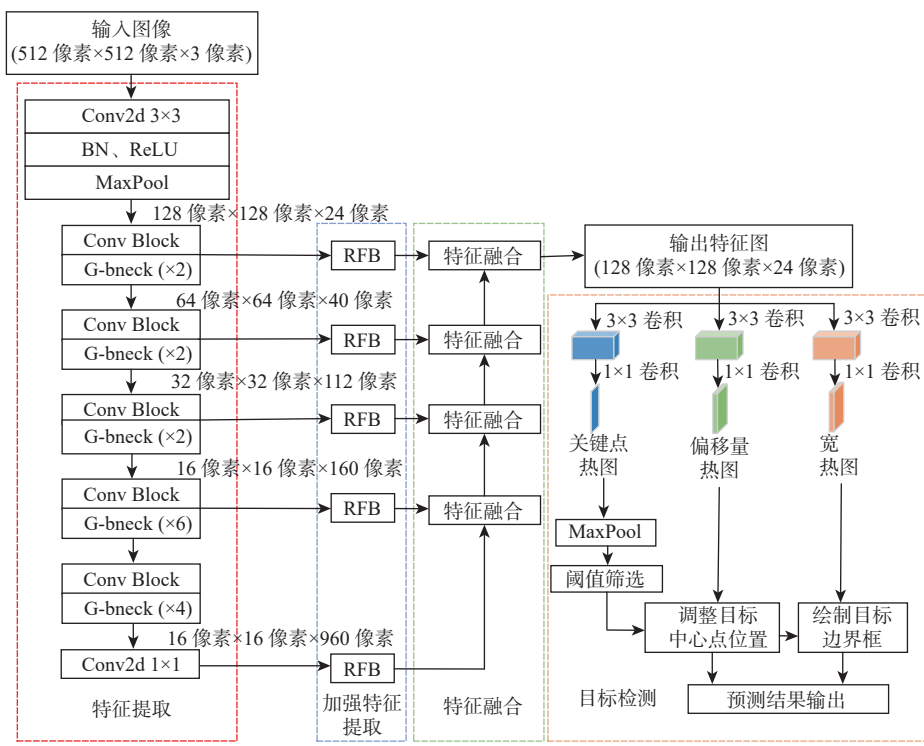


图 7 改进后轻量级 CenterNet 目标检测网络结构

Fig. 7 Structure of improved lightweight CenterNet target detection network

现网络过拟合现象, 导致模型泛化能力差。为解决上述问题, 在训练过程中借鉴迁移学习方法, 将源领域所学的特征知识迁移到目标领域, 使得目标领域能够取得更好的学习效果。本文利用 VOC 数据集对 CenterNet-GhostNet 模型进行预训练, 得到训练后模型权重, 在此基础上, 为节约硬件资源, 提高训练过程中模型的收敛率, 使用冻结与解冻相结合的训练策略, 采用自制输电线路自爆缺陷绝缘子数据集, 对构建模型重新训练, 并进行微调, 使模型快速适应具有自爆缺陷的绝缘子小样本数据集。

2　实验结果与分析

本文实验环境使用 PyTorch 深度学习框架, 脚本语言 Python3.7.6, 且均基于 Intel Core i5-9400 @ 2.90 GHzCPU 和6 GB 运行内存的NVIDIA RTX1660Ti 硬件配置完成。实验使用自制的输电线路自爆缺陷绝缘子数据集。其中, 原始数据集来源于国网某输电运检中心无人机作业班巡检作业对拍摄的巡检图像, 共 849 张。由于深度学习模型训练结果和检测效果的优劣与数据集质量息息相关, 而原始图像数量有限, 若直接用于网络训练, 容易出现网络过拟合现象, 导致最终模型的检测效果难以满足电力巡检精度的要求[22], 且绝缘子处于复杂的自然环境中, 这也给模型检测带来一定程度的干扰。为提高数据利用率, 本文利用图像变换技术(如加噪处理、滤波变换、翻转变换等)进行数据扩充, 利用亮度变换、色度变换、锐化处理模拟实际绝缘子所处的不同环境, 增强模型训练的鲁棒性。

2.1　轻量级 CenterNet-GhostNet 模型训练分析

模型训练迭代次数以 epoch 为计量单位, 设置为 300, 输入图像分辨率均为 512 像素×512 像素。为避免小样本训练造成的模型性能不足问题, 借助迁移学习思想, 利用大型开源 VOC 数据集进行模型预训练, 得到预训练权重, 将其作为初始化训练权重用于本文数据集的训练, 主干网络在大型数据集上所提取到的特征具有通用性, 在模型微调阶段, 采用冻结训练与解冻训练相结合的方式, 避免因初始化模型权重太过随机而造成模型特征提取能力不足的问题, 而这种网络微调策略也可节约硬件资源, 加快网络收敛速度。前 100 个 epoch 为冻结训练阶段, 此时网络主干特征提取网络被冻结, 不发生改变, 训练过程仅对模型其他部分进行微调, 占用显存较小; 后续训练均为解冻训练, 对主干特征提取网络参数进行调整, 此时网络训练占用显存较大, 网络所有参数均发生变化, 综合考虑实际巡检图像像素大小及最终网络边缘部署的要求, 设置冻结与解冻阶段的批大小均为 2。可视化轻量级 CenterNet-GhostNet 模型训练过程如图 8 所示。

由图 8 可知, 迁移学习方法可有效提高网络训练的收敛速度。无论是训练损失还是模型验证损失, 前 100 个 epoch 损失值骤降, 后续训练至第 160 个 epoch 时损失值平稳下降, 网络仍处于参数微调中, 当网络训练迭代超过 220 个 epoch 后, 损失值逐渐趋于平稳, 两者损失值分别稳定在 1.05 和 1.12。为直观验证迁移学习训练策略对本文方法 CenterNet-GhostNet 泛化能力的提升效果, 绘制使用迁移学习和未使用迁移学习进行模型训练的损失曲线, 如图 9 所示。对比网络整体收敛趋势来看, 使用迁移学习训练的模型损失值下降更快, 且收敛值更小, 整体收敛趋势平稳, 说明预测值与真实值之间误差更小, 训练所得模型识别能力强, 模型拟合及泛化能力更佳。综上所述, 轻量级 CenterNet-GhostNet 网络训练结果较理想, 且模型具备一定的泛化能力, 可用于输电线路自爆缺陷绝缘子检测。

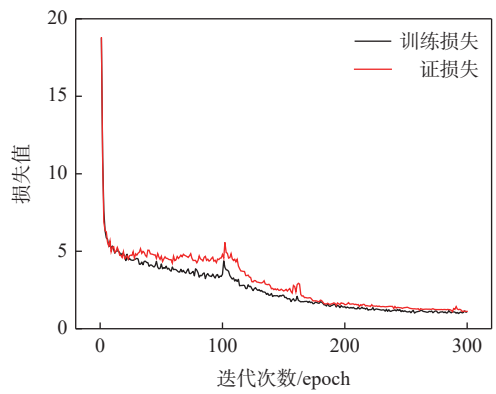


图 8　轻量级 CenterNet-GhostNet 训练损失函数曲线

Fig. 8　Training loss function curves of lightweight CenterNet-GhostNet

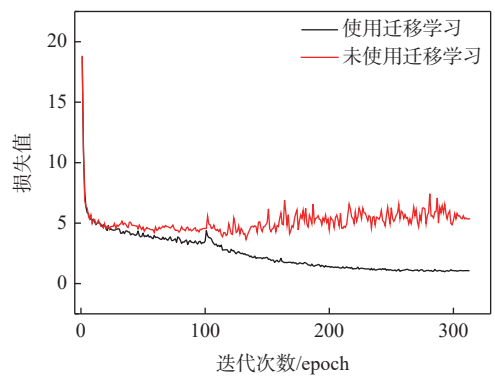


图 9　使用迁移学习和未使用迁移学习模型训练损失曲线

Fig. 9　Training loss curves with and without transfer learning model

2.2　轻量级 CenterNet-GhostNet 模型性能评估分析

2.2.1　主干网络选择实验

对比常见轻量化主干网络大小和参数量, 如表 2 所示, 可知, GhostNet 规模和参数量最小, 在保

证模型轻量化的前提下也不会简单去除目标相关特征。因此，选择 GhostNet 作为本文方法的主干特征提取网络。

表 2 主干网络对比指标

Table 2 Comparison indexes of backbone network

主干网络	参数量	模型大小
SqueezeNet	6.9×10^6	28.3×10^6
MobileNetV3	5.8×10^6	26.8×10^6
ShuffleNetV2	5.3×10^6	23.5×10^6
GhostNet	5.18×10^6	19.77×10^6

2.2.2 消融实验

为验证本文提出的轻量级 CenterNet-GhostNet 网络中主干特征提取模块和特征融合模块的有效性，进行消融实验评估不同改进在相同实验环境配置下对目标检测性能的影响。选择以 ResNet50 为主干网络的原始 CenterNet 模型作为基准模型，训练 300 个 epoch 后结果如表 3 所示。采用 AP50、AP75、AP50:95、参数量及 FLOP 作为模型性能的主要评价指标。AP50 和 AP75 分别表示 IoU 阈值为 0.5 和 0.75 时目标检测精度，一般来说，IoU 阈值越高，对应模型的回归能力要求越高，AP50 可反映模型对目标综合分类能力，而 AP75 更能表现模型对目标边界框的回归能力；AP50:95 表示以 0.05 为步长，IoU 阈值从 0.5～0.95 的 10 个阈值条件下模型检测精度的平均值；同时，为直观表现改进后网络的规模，利用参数量计量模型参数数量，FLOP，可衡量模型训练的计算复杂度。

表 3 消融实验评价指标

Table 3 Evaluation indexes of ablation experiment

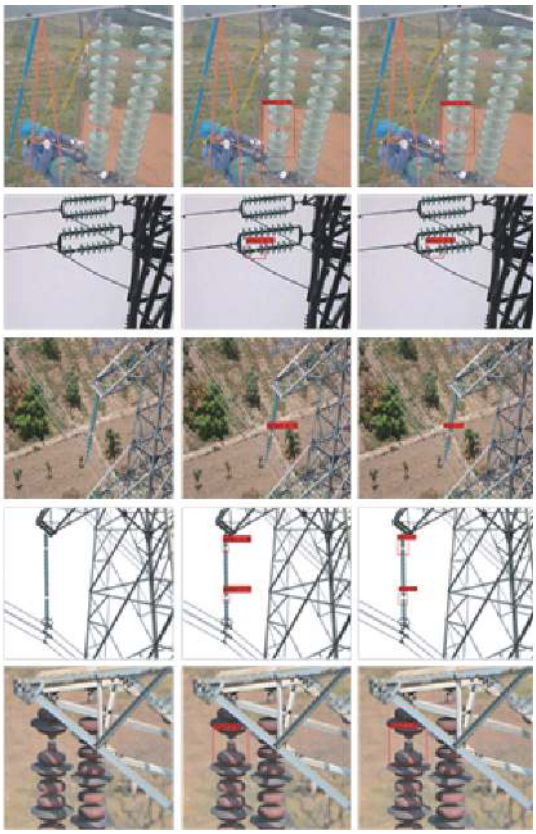
特征提取		特征融合	AP50	AP75	AP50:95	参数量	FLOP
GhostNet	RFB						
			0.68	0.62	0.59	124.61×10^6	19.1×10^6
√			0.71	0.64	0.62	47.5×10^6	15.7×10^6
	√		0.76	0.71	0.64	48.2×10^6	15.9×10^6
		√	0.81	0.69	0.67	52.4×10^6	17.3×10^6
√	√	√	0.86	0.74	0.63	64.2×10^6	18.8×10^6

消融实验的结果表明：①改进后的轻量级网络具有更高的检测精度，与原始 CenterNet 网络相比，AP50、AP75 和 AP50:95 分别提升至 0.86、0.74 和 0.63，且网络参数量减少了 60.41×10^6，FLOP 减少了 0.3×10^9。②将主干特征提取网络替换为轻量级网络 GhosterNet 后，与原始 CenterNet 网络相比，参数量减少了 77.11×10^6，FLOP 减少了 3.4×10^9，极大降低了检测模型的复杂度，并且替换主干网络后的模型检测精度比原始网络有所提高，说明将轻量级特征提取网络用于 CenterNet，其性能表现有所改善。③在轻量级主干网络中引入 RFB 完成加强特征提取，可以保证在增加少量计算量的前提下，有效提高模型检测精度。④特征融合模块可保证目标信息得到有效利用，由于构建过程中借鉴了轻量化注意力机制 ECA 结构，所以整体参数量仍呈现小幅增长趋势，在特征提取基础上进行融合，结果证明了该思路的有效性，与原始网络相比，检测精度有大幅提高。综上所述，本文方法在 CenterNet 基础上，既保证了检测实时性要求，模型检测精度也得到有效提高，证明了改进模块的有效性。为进一步验证本文方法在实际电力巡检中对自爆缺陷绝缘子的检测效果，进行改进前后方法检测结果的可视化比较，检测效果如图 10 所示。

由可视化对比结果分析可知，无论是单目标图像还是多目标图像，改进前后的模型均可有效识别绝缘子自爆缺陷区域，但本文方法的目标检测框置信度较原始方法更高，可实现小尺度目标的精确检测，并且在目标存在遮挡的场景中，本文方法所得置信度也较高。综合评价指标与可视化结果，本文方法既可满足巡检实时化要求，也克服了模型实际边缘部署的最大障碍，可实现输电线路的有效巡检。

2.2.3 对比实验

为验证本文方法相较于其他经典目标检测方法的优越性，进行对比实验，基于相同的硬件环境配置和输电线路自爆缺陷绝缘子数据集，分别进行模型检测准确度和速度的比较分析，结果如表 4 所示。选取经典双阶段目标检测方法 Faster R-CNN 和 Mask R-CNN、单阶段检测方法 YOLOX，轻量化检测方法 YOLOv4-Tiny 和 MobileNet-SSD 与本文方法进行对比，经分析可知，在一定检测速度的前提下，本文方法的检测精度优于其他方法，与双阶段检测方法 Faster R-CNN 和 Mask R-CNN 相比，AP50 分别提升了 11.6% 和 22.8%，说明本文方法对自爆缺陷绝缘子综合分类能力较强；AP75 提升了 19.3% 和 10.4%，表明本文方法对自爆缺陷绝缘子的目标



(a) 实际电力巡检图　(b) 原始 CenterNet 检测结果　(c) 改进 CenterNet 检测结果

图 10　改进前后 CenterNet 可视化检测结果

Fig. 10　Visual detection results of CenterNet before and after improvement

表 4　不同检测方法的对比实验评价指标

Table 4　Comparative experimental evaluation indexes of different detection algorithms

方法	骨干网络	AP50	AP75	帧率/(帧·s^{-1})
Faster R-CNN	VGG16	0.77	0.62	16.3
Mask R-CNN	ResNet50	0.70	0.67	13
YOLOX	Darknet53	0.76	0.75	32.3
YOLOv4-Tiny	CSPDarknet53	0.73	0.68	28.4
MobileNet-SSD	MobileNet	0.82	0.71	30.6
本文方法	GhostNet	0.86	0.74	38.2

回归能力更强。同样地, 与 YOLOX 方法相比, 本文方法也表现出一定的优越性, AP50 提升了 13.1%。与轻量化网络相比, 本文轻量化设计网络不仅检测准确度较高, 检测速度也有一定优势。以上说明, 本文方法引入 RFB 进行加强特征提取和设计特征融合模块, 改善了小目标特征提取困难的问题, 利用不同尺度的特征信息权重, 有效融合目标信息, 帮助模型处理航拍所得绝缘子自爆缺陷时可展现检测优越性。

3　结　论

针对基于深度学习的目标检测模型由于参数量过大导致移动边缘部署困难、输电线路自爆缺陷绝缘子所处场景复杂、高似然线路器件对检测结果的干扰问题, 本文提出一种轻量级 CenterNet-GhostNet 网络的小目标检测方法。具体结论如下:

1) 提出基于轻量级 GhostNet 的多感受野主干特征提取网络, 不仅可以有效节约硬件计算资源, 还可增强模型对绝缘子自爆缺陷区域的特征表达力, 实现复杂背景下小目标特征的有效提取。

2) 基于轻量化设计思想, 借助高效注意力机制 ECA 结构, 构建特征融合模块, 保证目标特征信息可实现跨尺度有效融合, 避免因特征信息缺失而造成小尺度目标漏检、误检。

本文方法能够对已有的输电线路自爆缺陷绝缘子进行高效识别, 具备高精度和高效率的特点, 并且轻量化设计可满足移动设备部署需求, 为利用小型移动设备进行输电线路智能化巡检时模型的构建提供了新的思路, 具有一定的应用价值。

参考文献 (References)

[1] 赵振兵. 电力视觉技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020: 84-90.
ZHAO Z B. Computer vision technology in electric power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020: 84-90(in Chinese).

[2] 赵振兵, 张薇, 翟永杰, 等. 电力视觉技术的概念、研究现状与展望[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(1): 1-8.
ZHAO Z B, ZHANG W, ZHAI Y J, et al. Concept, research status and prospect of electric power vision technology[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(1): 1-8(in Chinese).

[3] 陶显, 侯伟, 徐德. 基于深度学习的表面缺陷检测方法综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(5): 1017-1034.
TAO X, HOU W, XU D. A survey of surface defect detection methods based on deep learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(5): 1017-1034(in Chinese).

[4] 刘洋, 陆倚鹏, 高嵩, 等. 边缘检测在盘形悬式瓷绝缘子串红外图像上的应用[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 198-203.
LIU Y, LU Y P, GAO S, et al. Edge detection on infrared image of high voltage porcelain disc type suspension insulator strings[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 198-203(in Chinese).

[5] 赵振兵, 徐磊, 戚银城, 等. 基于 Hough 检测和 C-V 模型的航拍绝缘子自动协同分割方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 395-403.
ZHAO Z B, XU L, QI Y C, et al. Automatic co-segmentation method for aerial insulator based on Hough detection and C-V model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 395-403(in Chinese).

[6] 姚晓通, 刘力, 李致远. 基于 Canny 边缘特征点的接触网绝缘子识别方法[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 142-148.
YAO X T, LIU L, LI Z Y. Identification method of catenary insulator based on Canny edge feature point[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 142-148(in Chinese).

[7] 崔昊杨, 张雨阁, 张驯, 等. 基于边端轻量级网络的电力仪表设备检测方法[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1186-1193.
CUI H Y, ZHANG Y G, ZHANG X, et al. Detection of power in-

struments equipment based on edge lightweight network[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1186-1193(in Chinese).

[8] 顾超越, 李喆, 史晋涛, 等. 基于改进 Faster-RCNN 的无人机巡检架空线路销钉缺陷检测[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3089-3096.
GU C Y, LI Z, SHI J T, et al. Detection for pin defects of overhead lines by UAV patrol image based on improved Faster-RCNN[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3089-3096(in Chinese).

[9] 李鑫, 刘帅男, 杨桢, 等. 基于改进 Cascade R-CNN 的输电线路多目标检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 24-32.
LI X, LIU S N, YANG Z, et al. Multi-target detection of transmission lines based on improved Cascade R-CNN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 24-32(in Chinese).

[10] 李瑞生, 张彦龙, 翟登辉, 等. 基于改进 SSD 的输电线路销钉缺陷检测[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 3795-3802.
LI R S, ZHANG Y L, ZHAI D H, et al. Pin defect detection of transmission line based on improved SSD[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3795-3802(in Chinese).

[11] 郝帅, 杨磊, 马旭, 等. 基于注意力机制与跨尺度特征融合的 YOLOv5 输电线路故障检测[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2319-2331.
HAO S, YANG L, MA X, et al. YOLOv5 transmission line fault detection based on attention mechanism and cross-scale feature fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2319-2331.

[12] 许延雷, 梁继然, 董国军, 等. 基于改进 CenterNet 的航拍图像目标检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2010013.
XU Y L, LIANG J R, DONG G J, et al. Aerial image target detection algorithm based on improved CenterNet[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2010013(in Chinese).

[13] 唐玮, 赵保军, 龙腾. 基于轻量化网络的光学遥感图像飞机目标检测[J]. 信号处理, 2019, 35(5): 768-774.
TANG W, ZHAO B J, LONG T. Aircraft detection in remote sensing image based on lightweight network[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(5): 768-774(in Chinese).

[14] 符惠桐, 王鹏, 李晓艳, 等. 面向移动目标识别的轻量化网络模型[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(7): 124-131.
FU H T, WANG P, LI X Y, et al. Lightweight network model for moving object recognition[J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2021, 55(7): 124-131(in Chinese).

[15] 汝承印, 张仕海, 张子淼, 等. 基于轻量级 MobileNet-SSD 和 MobileNetV2-DeeplabV3+ 的绝缘子故障识别方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3670-3679.
RU C Y, ZHANG S H, ZHANG Z M, et al. Fault identification method for high voltage power grid insulator based on lightweight MobileNet-SSD and MobileNetV2-DeeplabV3+ network[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3670-3679(in Chinese).

[16] 王盛洋. 基于迁移学习的轻量化网络目标检测算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021: 1-15.
WANG S Y. Research on lightweight network object detection algorithm based on transfer learning[D]. Xi'an: Xidian University, 2021: 1-15(in Chinese).

[17] HAN K, WANG Y H, TIAN Q, et al, GhostNet: More features from cheap operations[EB/OL].(2020-03-13)[2022-07-01] https://arxiv.org/abs/1911.11907.

[18] 奉志强, 谢志军, 包正伟, 等. 基于改进 YOLOv5 的无人机实时密集小目标检测算法[J]. 航空学报, 2023, 44(7): 327106.
FENG Z Q, XIE Z J, BAO Z W, et al. Real-time dense small object detection algorithm for UAV based on improved YOLOv5[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(7): 327106(in Chinese).

[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] 马富齐, 王波, 董旭柱, 等. 面向输电线路覆冰厚度辨识的多感受野视觉边缘智能识别方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2161-2169.
MA F Q, WANG B, DONG X Z, et al. Receptive field vision edge intelligent recognition for ice thickness identification of transmission line[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2161-2169(in Chinese).

[21] 史彩娟, 陈厚儒, 葛录录, 等. 注意力残差多尺度特征增强的显著性实例分割[J]. 图学学报, 2021, 42(6): 883-890.
SHI C J, CHEN H R, GE L L, et al. Salient instance segmentation via attention residual multi-scale feature enhancement[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(6): 883-890(in Chinese).

[22] 宋立业, 刘帅, 王凯, 等. 基于改进 EfficientDet 的电网元件及缺陷识别方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2241-2251.
SONG L Y, LIU S, WANG K, et al. Identification method of power grid components and defects based on improved EfficientDet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2241-2251(in Chinese).

Insulator self-explosion detection in transmission line based on CenterNet fusing lightweight features

GOU Junnian*, DU Susu, WANG Shiduo, ZHANG Xinyue

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Intelligent inspection of transmission lines is an inevitable requirement for the construction of a new generation of power systems. At present, the detection model based on deep learning has too many parameters, which makes it difficult to deploy unmanned aerial vehicles (UAVs) at the edge. In order to enable the UAV to carry a lightweight model to identify insulators with self-explosion defects in transmission lines, a lightweight CenterNet-GhostNet target detection network was proposed. Firstly, the backbone feature extraction network of the model received lightweight treatment, and the multi-level features of insulators with self-explosion defects were extracted by using GhostNet with low computational costs, so as to reduce the complexity of the model. Then, the enhanced receptive field block (RFB) was introduced to enhance the ability of feature expression and enhance the attention of the model to the feature information of small targets. Finally, a feature fusion module was constructed to effectively fuse the low-level feature information and high-level feature information, so as to output a more complete feature map and improve the accuracy of defect recognition. The model training strategy of sharing transfer learning parameters and combining freezing and thawing training was used, so as to avoid insufficient generalization ability of the network caused by a small sample dataset. Based on the constructed dataset of insulators with self-explosion defects in transmission lines, the proposed method was verified. The experimental results show that compared with the original CenterNet, AP50, AP75, and AP50:95 of the proposed method are increased to 0.86, 0.74, and 0.63, respectively, and the number of model parameters is reduced from 124.61 $\times 10^6$ to 64.2 $\times 10^6$. Therefore, the proposed method can detect insulators with self-explosion defects in complex environments and improve the inspection accuracy and speed of transmission lines based on UAVs.

Keywords: deep learning; self-explosion defects of insulator; lightweight network; CenterNet; small target detection

Received: 2022-07-09; **Accepted**: 2022-08-19; **Published Online**: 2022-09-17 13:00

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220916.1343.001

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61863023)

* **Corresponding author**. E-mail: junnian@mail.lzjtu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0485

CCF300/QY8911层压板破孔损伤快速抢修后的拉伸性能

侯日立*，王春雨，周平
(空军工程大学 航空机务士官学校，信阳 464000)

摘　　要：针对CCF300/QY8911复合材料层压板破孔损伤抢修后的拉伸强度影响规律和表征方法问题，通过对原始材料标准试件、含预制损伤试件及通过胶接、铆接和胶铆联合修理后试件的拉伸试验，得到了相应的强度、刚度、损伤模式和重点部位应变数据。结果表明，修理部位与原结构刚度不协调是影响修理强度的主要因素；胶接修理具有较高的连接刚度，其修理强度影响因素主要是铺层间结合强度；铆接修理连接刚度较低，且铆钉受单剪容易被拉脱是影响其修理强度的主要因素；胶铆联合修理综合了胶接修理刚度高和铆接修理能防止层间撕裂的双重优势；综合采用胶铆联合湿装配工艺、增加铆钉直径和在工件背面加装防拉脱垫片可显著提高修理效果，其抗拉强度分别为常规铆接修理和常规胶接修理的161.5%和135.9%。所提的基于线弹性断裂理论的强度恢复率评价方法能更好地从整体上表征修理后结构的真实承载能力。

关　键　词：层压板；铆接修理；胶接修理；胶铆修理；单轴拉伸；拉伸性能
中图分类号：V267+.4; TB330.1
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2172-12

纤维增强的树脂基复合材料具有比强度和比刚度高、耐腐蚀和抗疲劳性能强等优点，被广泛应用于现代飞机结构中，CCF300/QY8911是其中的典型代表。这些材料通常以层压板的形式被应用，战场环境下，当其被射弹或战斗部破片命中时，很容易产生穿透性破孔损伤。为迅速恢复战伤飞机的作战能力，通常要求采用简易方法进行快速抢修。目前，最典型的快速抢修方法是利用金属补片单面施工的铆接、胶接和胶铆联合修理[1-4]。

用金属补片铆接修理飞机复合材料层压板结构的战伤在国外已有应用，美军的F-16飞机战伤抢修手册中推荐了这种修理方法。国内的相关研究[5-9]主要停留在理论层面，尚未投入实际应用，相关成果主要集中在工艺参数的分析方面。文献[5]认为增加螺栓排数、采用钛合金双面补片和增大补片厚度等措施可以提高修理结构的强度恢复系数；文献[6]通过数值模拟研究了螺栓排布、补片材料和厚度等参数对结构强度、刚度和失效模式的影响；文献[7]采用单向拉伸实验，测试了含通孔损伤的复合材料壁板和螺接修理后的接头，结果显示，损伤位于原损伤孔边，修理后结构强度是完好结构强度的44.2%；文献[6]还通过数值模拟方法分析了不同修理参数对失效模式的影响，当破坏位置恰好位于层压板结构第一排螺栓孔截面处时，修理强度最佳。文献[7-9]提出了用壳元模拟层压板、梁元模拟紧固件、多点约束模拟紧固件与孔的接触的复合材料机械连接修理仿真分析方法。

胶接是飞机复合材料层压板结构损伤最经典的修理方法[10]，现有研究主要集中在2个方面：①利用数值模拟手段分析强度影响因素[11-13]；②改善材料表面特性，增强胶接结合力等[14-15]。

胶铆联合、胶螺联合是飞机复合材料结构损伤

收稿日期：2023-07-27；录用日期：2023-12-01；网络出版时间：2024-01-05 19:32
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240105.1142.001
*通信作者. E-mail：hrl6319@sina.com

引用格式：侯日立，王春雨，周平. CCF300/QY8911层压板破孔损伤快速抢修后的拉伸性能[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2172-2183. HOU R L，WANG C Y，ZHOU P. Tensile properties of rapid repaired CCF300/QY8911 laminates with broken hole damage[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2172-2183 (in Chinese).

修理较热门的研究方向[16-19]。文献 [16] 通过实验和数值模拟, 研究了利用钛合金补片的螺接和胶螺混合修理, 得到了原损伤截面拉伸破坏和第一排螺栓孔截面拉伸破坏 2 种破坏模式, 提出应合理选择修理参数使结构的破坏恰好位于第一排螺栓孔截面处; 文献 [17] 采用数值模拟方法分析了补片和胶膜厚度对胶接修理效果的影响, 得出胶铆混合修理能降低修理区胶层剪切应力水平; 文献 [18] 采用预固化复合材料补片开展了胶铆联合修理研究, 当损伤位置在最外侧铆钉孔处时, 修理强度较高; 文献 [19] 采用有限元数值模拟方法, 研究了胶铆联合修理中胶层的应力特性, 提出了修理中层合板铺层角度的优化设计方案。

综上, 目前对利用金属补片单面施工的铆接、胶接和胶铆联合等快速抢修方法的研究还不够完善: ①基于实验数据的修理强度影响机制分析较欠缺, 操作性强的改进措施不多; ②对修理后结构强度恢复率的评价几乎都简单地采用修理后试件强度除以完好试件强度。这种方法既未考虑抢修的局部性(即实际结构承载环境与试件承载环境的差别), 也未考虑初始损伤尺寸对结构承载能力的影响, 因此, 不能反映修理后结构的真实承载能力。基于此, 本文以飞机结构常用的 CCF300/QY8911 材料为例, 开展了材料拉伸性能和含预制损伤试件的剩余强度测试, 以获得基础数据; 利用高强度、高模量的钛合金和不锈钢作补片, 开展了常规的单面铆接修理, 并根据修理试件拉伸强度、损伤模式和重点部位应变分析了强度影响因素及其作用机制; 在此基础上, 通过增加铆钉直径、在背面加装金属垫片和在铆钉孔涂结构胶湿装配等措施, 改进了铆接修理工艺; 利用不锈钢补片, 开展了常规的胶接修理实验, 并分析了强度影响因素; 集成铆接和胶接修理的优点, 提出了一种改进后的胶铆联合修理方法, 达到了较理想的修理效果。同时, 提出了一种可以预估修理后结构整体承载能力的修理强度评价方法。

1　材料及方法

1.1　材　料

复合材料层压板采用 CCF300/QY8911 预浸料, 委托中航复合材料有限责任公司采用热压罐成型工艺进行制备, 铺层为 $[45/0/-45/90/0/45]_S$, 单层厚度为 0.125 mm, 总厚度约为 1.5 mm, 热压罐成型工艺曲线如图 1 所示。

钛合金补片为宝钛集团生产的 TC4 板, 退火态, 厚度为 2.0 mm; 不锈钢补片为 316L 板材, 厚度为 2.0 mm; 胶黏剂为黑龙江省科学院石油化学研究院的 J-349-1 双组分高性能室温固化糊状结构胶; 钛合金铆钉为 CHEERY 7774S-5-03(直径 4 mm)和 1S625-5-05(直径 5 mm); 垫片材料为 304 不锈钢, 内径为 5.0 mm, 外径为 20.0 mm, 厚度为 1.2 mm。

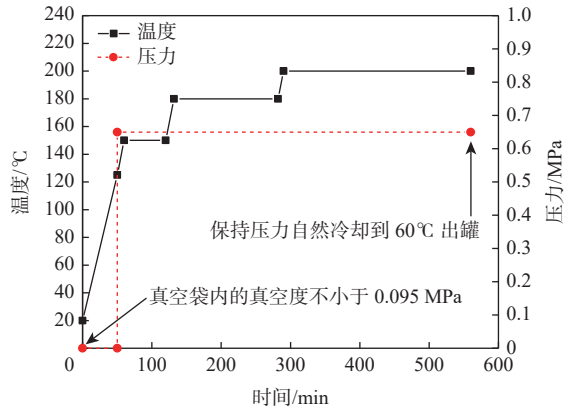


图 1　热压罐成型工艺曲线

Fig. 1　Autoclave process curves

1.2　试　件

1) 复合材料拉伸性能试件。利用层压板按 ASTM D3039—2017[20] 标准要求加工成 250 mm×25 mm×1.5 mm 的矩形试件。

2) 含预制损伤试件。先用机加方式将复合材料层压板裁成 450 mm×100 mm×1.5 mm 的矩形, 再在矩形板中心开设 20 mm×50 mm 的长椭圆孔, 圆弧半径为 10 mm。板的两端 120 mm 范围内, 两侧各粘贴一块复合材料层压板起加强作用, 如图 2 所示。

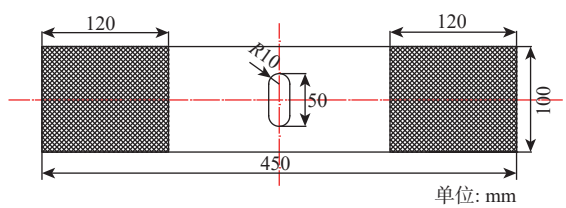


图 2　含预制损伤的试件

Fig. 2　Specimens with prefabricated damage

3) 常规铆接修理试件。制作了 2 类试件, 分别用钛合金和不锈钢作补片。盖板尺寸为 160.0 mm×100.0 mm×2.0 mm, 铆钉为 CHEERY 7774S-5-03。铆钉数量根据损伤件剩余强度测试结果确定。铆钉布置符合 HB 7709[21] 要求, 单侧两排各 8 颗对称排列, 如图 3 所示。其中, 盖板尺寸的确定方法为: 首先, 根据损伤造成的强度损失计算修理所需的铆钉数量; 然后, 根据飞机复合材料结构机械连接修理中规定的铆距、排距和边距布置铆钉; 最后, 根据铆钉的布局设计盖板。

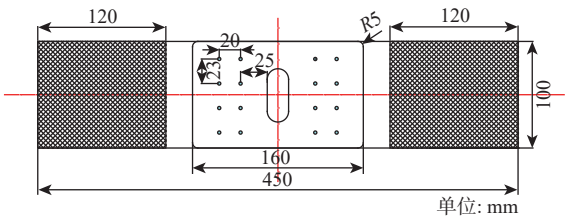


图3 常规铆接修理试件

Fig. 3 Specimens repaired by conventional riveting method

4) 常规胶接修理试件。补片材料为316L不锈钢板,其他参数与常规铆接修理试件完全一致。为便于比较,在不锈钢补片和复合材料基板上也钻孔。修理时,先按胶接修理要求清理试件表面,再涂胶,并在80℃环境下固化3 h,修理后的试件如图4所示。



图4 常规胶接修理试件

Fig. 4 Specimens repaired by conventional bonding method

5) 改进后的铆接修理试件。补片材料为316L不锈钢板,与常规铆接修理试件相比,有以下变化:①铆钉尺寸加大,采用了直径5.0 mm的大底角钛合金拉铆钉;②在铆钉及铆钉孔处涂胶、湿装配;③在复合材料层压板背面安装不锈钢垫片。如图5所示。



图5 改进后的铆接修理试件

Fig. 5 Specimens repaired by improved riveting method

6) 胶铆联合修理试件。首先,按胶接修理工艺要求清理试件表面,并涂胶和安装补片;然后,按改进后的铆接工艺安装铆钉和垫片;最后,按80℃/3 h工艺固化。胶铆联合修理后的试件如图6所示。

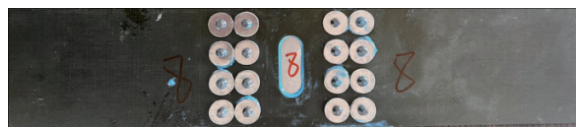


图6 胶铆联合修理试件

Fig. 6 Specimens repaired by adhesive-riveting joint method

1.3 拉伸实验

实验委托中国航发北京航空材料研究院和上海航空材料结构检测股份有限公司实施,采用的实验标准和主要设备如表1所示。

表1 实验标准及设备

Table 1 Experimental standard and equipment

试件类型	试件数量	实验标准	实验设备
标准拉伸试件	6	ASTM D3039—2017[20]	电子万能实验机INSTRON 5895 100 kN
含预制损伤的试件	5		
不锈钢补片	5	参考ASTM D3039—2017[20]	电子万能实验机MTS 311 1 000 kN
钛合金补片	5		

含预制损伤试件的剩余强度测试参考ASTM D3039—2017[20]标准,实验装置如图7所示。

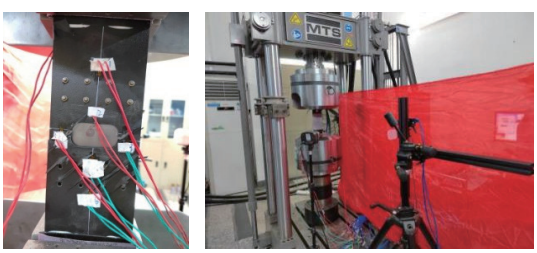


图7 拉伸实验装置

Fig. 7 Tension test equipment

2 结果与讨论

2.1 材料拉伸性能

实验获得的材料拉伸性能如表2所示,断口如图8所示。可以看出,拉伸强度均值为667.8 MPa,拉伸模量均值为64.5 GPa,破坏应变均值为10 231.3×10^{-6},实验数据分散性较小,断口形貌正常,说明材料成型质量良好。

2.2 含预制损伤试件拉伸性能

载荷-应变关系曲线如图9所示,载荷-位移曲线如图10所示,断口形状如图11所示。

从图9可以看出,复合材料原损伤孔长边处的应变远远大于短边处的应变,说明孔长边处有较大

表2 材料性能测试结果

Table 2 Experimental results of material properties

试件编号	宽度/mm	厚度/mm	载荷/kN	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	破坏应变
1	25.08	1.41	21.4	605	64.7	9 216×10^{-6}
2	25.06	1.40	25.3	721	63.8	11 036×10^{-6}
3	25.09	1.44	23.7	655	65.2	9 944×10^{-6}
4	25.07	1.42	23.4	656	63.6	10 333×10^{-6}
5	25.06	1.38	24.4	705	65.1	10 686×10^{-6}
6	25.04	1.41	23.5	665	64.4	10 173×10^{-6}

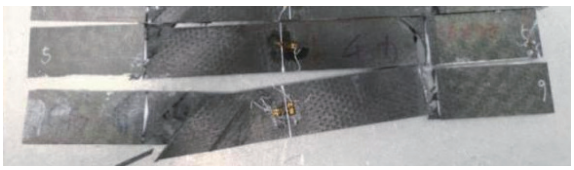


图 8　标准拉伸实验的断口

Fig. 8　Fracture surface of standard tensile test

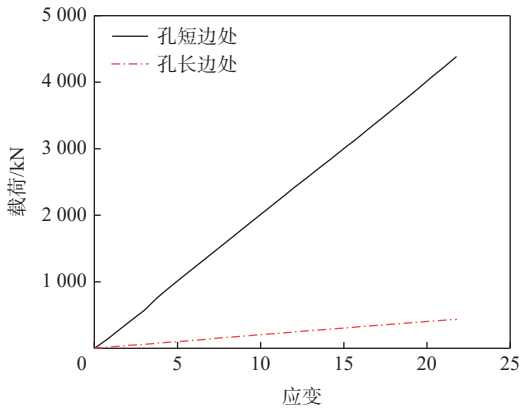


图 9　含预制损伤试件的载荷-应变曲线

Fig. 9　Load-strain curves of specimens with prefabricated damage

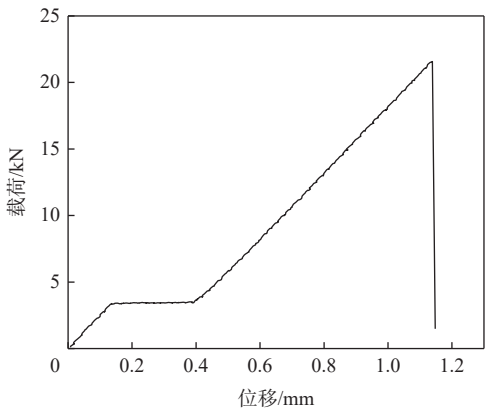


图 10　含预制损伤试件的载荷-位移曲线

Fig. 10　Load-displacement curve of specimens with prefabricated damage

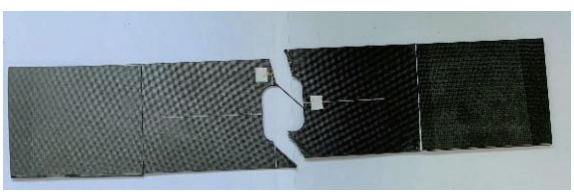


图 11　含预制损伤试件的断口

Fig. 11　Fracture surface of specimens with prefabricated damages

的应力集中, 因此, 损伤从该处发生, 如图 11 所示。另外, 从图 10 可以看出, 材料破坏前几乎没有屈服过程(起始阶段的平台是夹具间隙造成的), 属于典型的脆性破坏。但从图 11 可以看出, 其断口未如脆性金属材料一样与外载荷垂直, 而是呈近 45°方向。这主要是因为: 复合材料层压板中±45°铺层占比高(达 50%), 45°方向是其薄弱环节。

拉伸实验结果如表 3 所示。可以得到, 剩余强度均值为 141.6 MPa, 破坏应变均值为 4 138.6×10^{-6}。对比表 2 可以看出, 含损伤结构的剩余强度只有完好试件的 21.2%, 破坏应变只有完好试件的 40.5%。根据试件几何尺寸计算得到, 结构破坏时, 净截面上的平均破坏应力只有完好试件强度的 42.4%。

表 3　含预制损伤试件的拉伸性能测试结果

Table 3　Tensile properties results of specimens with prefabricated damage

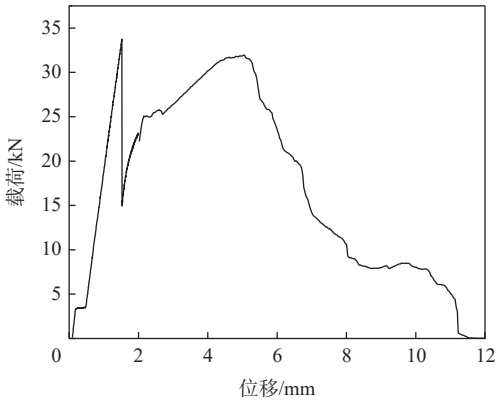
试样编号	宽度/mm	厚度/mm	载荷峰值/kN	拉伸强度/MPa	破坏应变(孔长轴侧)
1	97.66	1.50	21.6	147	4 378×10^{-6}
2	97.78	1.49	21.1	145	4 387×10^{-6}
3	98.18	1.48	20.1	138	3 815×10^{-6}
4	97.77	1.50	19.6	134	3 868×10^{-6}
5	97.83	1.50	21.1	144	4 245×10^{-6}

含预制损伤试件破坏时, 其净截面平均应力较低, 说明该试件在拉伸时存在严重的应力集中。即在平均应力不高的情况下, 孔边因应力集中先达到强度极限而开裂破坏; 破坏时, 孔边应变远低于完好试件的破坏应变, 主要是因为应变片的位置与孔边有一定距离, 测量结果近似为净截面的平均应变, 这也从另一个角度说明该构件拉伸时存在严重的应力集中现象。

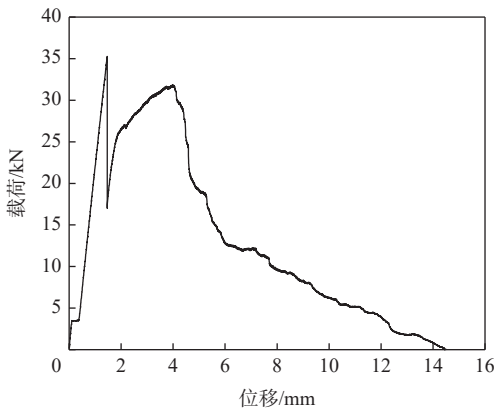
复合材料的上述特性给抢修工作带来 2 个启示: ①应力集中对复合材料结构的静强度影响显著, 抢修时务必彻底清除损伤以消除应力集中; ②对含损伤复合材料结构的剩余强度分析, 不可如塑性金属结构一样采用净截面屈服判据。文献 [22] 提出了一种等效的应力强度因子判据, 将损伤等效成裂纹, 采用线弹性断裂力学判据分析, 在工程应用中有较好的吻合度。

2.3　常规铆接修理结果

常规铆接修理试件拉伸时的载荷-位移曲线如图 12 所示, 有 2 个明显的载荷峰值, 对应 2 个极限强度, 且在 2 个峰值之间有明显的卸载过程。断口如图 13 和图 14 所示, 损伤均发生在原损伤孔的边缘处。测试结果如表 4 所示, 不锈钢补片的极限强度均值为 235.8 MPa, 钛合金补片的极限强度均值为 236.0 MPa, 两者几乎相等, 为完好试件强度的 35.3%、含预制损伤试件强度的 166.5% 左右。破坏时, 钛合金补片修理对应的补片应变为 269.8×10^{-6}, 复合



(a) 不锈钢补片



(b) 钛合金补片

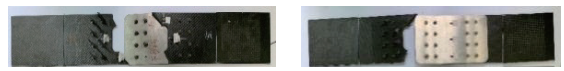
图 12 常规铆接修理试件的载荷-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of specimens repaired by simple riveting method

材料应变为 4 226.8 ×10^{-6}。不锈钢补片修理对应的补片应变为 105.8 ×10^{-6}, 复合材料应变为 4 298.4×10^{-6}。

损伤断口发生在原结构损伤的边缘处, 说明修理后补片未充分发挥承载作用, 致使原结构孔边依然应力集中明显, 仍是薄弱环节。

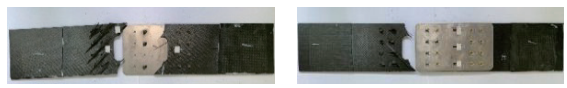
表 4 中的破坏应变指结构破坏时应变片所在部位的应变。由于复合材料层压板上的应变片粘贴位置与损伤发源处(孔边)有一定距离, 其测量值实际上更接近净截面的平均应变, 该值远低于完好试件的破坏应变, 从另一个角度说明该结构在拉伸时存在严重的应力集中。



(a) 复合材料侧 (b) 金属侧

图 13 不锈钢补片断口

Fig. 13 Fracture surface of specimens with stainless steel patch



(a) 复合材料侧 (b) 金属侧

图 14 钛合金补片断口

Fig. 14 Fracture surface of specimens with titanium alloy patch

载荷-位移曲线出现 2 个峰是由该类修复件的破坏模式决定的: 首先, 孔边复合材料破坏, 出现第 1 个载荷峰; 然后, 转由金属补片承载, 刚度降低, 出现明显卸载过程; 最后, 铆钉被拉脱, 出现第 2 个载荷峰。

结构破坏前, 金属补片的应变远低于孔边复合材料的应变, 说明修理部位, 即由“铆钉-补片-铆钉”组成的传力路径上, 其整体刚度远低于复合材料基材。

综上所述, 常规铆接修理后, 外载荷分配在修理补片上的量很小, 补片未发挥正常的承载作用, 孔边复合材料的应力集中依然严重, 损伤仍从原损伤孔边复合材料处开始, 修理后的整体强度较低。即修理部位的刚度低于原结构的刚度, 是制约铆接修理强度的主要因素。

在“铆钉-补片-铆钉”的传力路径上, 影响其整体刚度的因素主要有如下方面: ①铆钉接头的刚度; ②补片的刚度; ③补片受偏心力矩作用的受力

表 4 常规铆接修理试件的拉伸性能测试结果

Table 4 Tensile properties results of specimens repaired by simple riveting method

试件形式	试件编号	宽度/mm	厚度/mm	载荷峰值Ⅰ/kN	拉伸强度Ⅰ/MPa	载荷峰值Ⅱ/kN	拉伸强度Ⅱ/MPa	破坏应变(孔长轴侧)	破坏应变(金属侧)
不锈钢补片	1	98.08	1.48	33.7	232	31.9	220	4 326×10^{-6}	122×10^{-6}
	2	97.90	1.51	33.7	228	32.8	222	4 211×10^{-6}	68.3×10^{-6}
	3	98.08	1.44	32.4	229	29.2	207	4 256×10^{-6}	82.6×10^{-6}
	4	97.97	1.51	35.0	237	32.1	217	4 230×10^{-6}	135×10^{-6}
	5	98.26	1.45	36.1	253	30.2	212	4 469×10^{-6}	121×10^{-6}
钛合金补片	1	98.49	1.50	35.3	239	31.9	216	4 386×10^{-6}	259×10^{-6}
	2	98.28	1.49	33.0	225	30.7	210	4 190×10^{-6}	260×10^{-6}
	3	98.03	1.41	35.3	256	30.4	220	4 423×10^{-6}	331×10^{-6}
	4	98.39	1.48	33.6	231	32.5	224	3 995×10^{-6}	240×10^{-6}
	5	98.41	1.50	33.7	229	32.5	220	4 140×10^{-6}	259×10^{-6}

状态。

在铆接修理结构中, 铆钉承受剪切载荷作用, 其变形原理如图 15 所示。根据剪切应变的定义, 铆钉的剪切变形量 ΔL 可表示为

$$\Delta L = \frac{PL}{GA} \tag{1}$$

式中: P 为补片或复合材料作用在铆钉上的载荷; L 为补片与复合材料之间的间隙; G 为铆钉的剪切模量; A 为铆钉的横截面积。

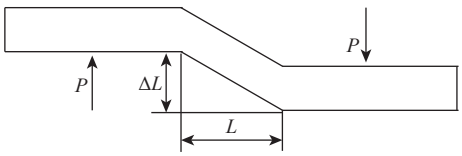


图 15　铆钉受剪变形示意图

Fig. 15　Shear deformation schematic of rivet

从式(1)可知, 影响铆接接头刚度的因素主要有: ①铆钉的剪切模量; ②铆钉的横截面积; ③两板之间的间隙。除此之外, 铆钉与钉孔之间的间隙也会影响接头的刚度。

本文修理实验中, 316L 不锈钢补片的弹性模量为 200 GPa, TC4 钛合金补片的弹性模量为 109 GPa, 厚度都为 2.0 mm。两者的刚度相差很大, 但修理效果几乎相同。说明补片刚度一旦超过了复合材料, 再增加其刚度, 对修理效果影响甚微。这也说明实验中补片的刚度不是造成修理部位整体刚度不足的原因。

补片受偏心力矩的作用可从补片的应变-载荷曲线(见图 16)看出, 在拉伸的初始阶段, 补片的应变为负值, 说明在该阶段补片被压缩, 这是由于补片遭受偏心力矩作用导致的。显然, 此时的补片无法参与拉伸载荷的传递, 自然也就削弱了传载路径的整体抗拉刚度。

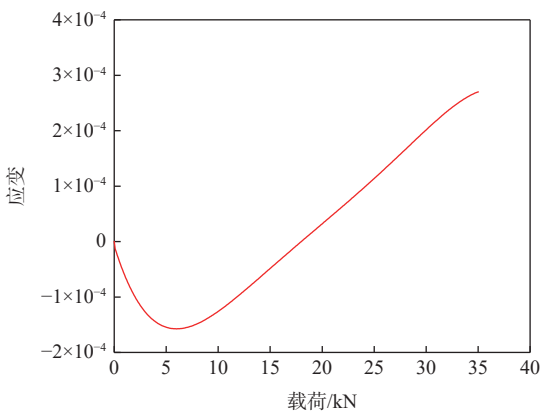


图 16　钛合金补片上应变随载荷的变化关系

Fig. 16　Relationship between strain and load of titanium alloy patch

单面铆接修理时, 补片受偏心力矩的作用几乎不可避免。因此, 要提高铆接修理部位的刚度, 应重点考虑提高铆接接头的刚度。为此, 本文从如下方面对修理方案进行了改进: ①增加铆钉直径, 获得更大的剪切刚度, 即将铆钉直径由 4 mm 变成 5 mm; ②在铆钉孔中涂胶并进行湿装配, 利用固化后的胶层减少装配间隙的影响; ③在复合材料背面安装垫片, 以增加锁紧力, 减少补片与复合材料之间的间隙, 并防止铆钉被拉脱。

2.4　改进后铆接修理结果

改进后铆接修理试件拉伸时的载荷-位移曲线如图 17 所示, 仍为典型的脆性破坏。断口如图 18 所示, 损伤位置转移到了第 1 排铆钉处。孔边复合材料和金属补片的应变如图 19 所示, 破坏前, 金属补片的最大应变为 510.0 ×10^{-6}, 远高于常规铆接修理时的情况, 复合材料层压板上的最大应变为 4 004.0×10^{-6}, 与常规铆接修理时的情况相当。试件极限强度测试结果如表 5 所示, 抗拉强度均值为 330.8 MPa, 是完好试件的 49.5%、含预制损伤试件的 233.6%、改进前铆接修理试件的 140.3%, 达到了较好的修理效果。

破坏前, 金属补片的应变比常规铆接修理明显增大, 即补片承担的载荷明显增多, 说明改进后的修理方案显著提高了“复合材料-铆钉-补片-铆钉-

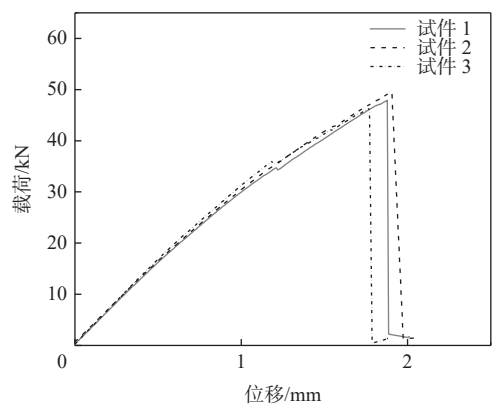


图 17　改进后铆接修理试件的载荷-位移曲线

Fig. 17　Load-displacement curves of specimens repaired by improved riveting method

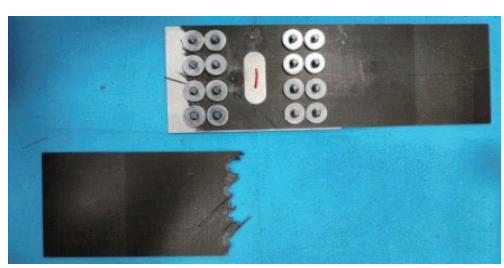


图 18　改进后铆接修理试件的断口

Fig. 18　Fracture surface of specimens repaired by improved riveting method

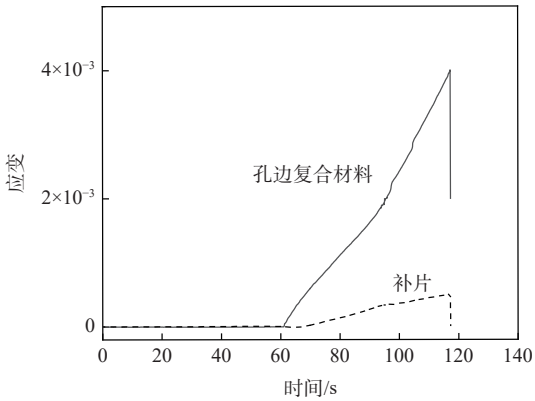


图 19 改进后铆接修理试件补片和孔边复合材料的应变

Fig. 19 Strain at patch and hole edge composite of specimens repaired by improved riveting method

表 5 改进后铆接修理试件的剩余强度测试结果

Table 5 Residual strength test results of specimens repaired by improved riveting method

试件编号	宽度/mm	厚度/mm	载荷/kN	剩余强度/MPa
1	98.60	1.50	47.90	323.8
2	98.54	1.48	47.53	325.9
3	98.70	1.48	49.62	339.7
4	98.70	1.44	46.44	326.7
5	98.64	1.44	47.99	337.9

复合材料”修理路径的刚度；原损伤孔边复合材料层压板的平均应变与常规铆接修理基本相当，但由于此时破坏位置转移到了第 1 排铆钉孔处(见图 18)，原损伤孔边已不再是危险截面，此时相对较小的应变是由于补片较好地承担了外载荷所致，说明该部位的受力环境得到了改善。

载荷-位移曲线不再出现 2 个过载峰，是因为该类修理试件的损伤模式发生了变化，结构中只有第 1 排铆钉孔处这一个危险部位，损伤都发生在该处。这也说明原损伤孔处得到了有效加强。

综上所述，改进后的方案有效提高了修理部位的刚度，达到了预期的效果。

2.5 胶接修理结果

胶接修理试件拉伸时的载荷-位移曲线如图 20 所示，3 个修理试件的载荷-位移曲线在后期均呈现典型的锯齿状。断口如图 21 所示，损伤仍发源于原结构损伤的孔边，金属补片上既有裸露的金属，又有残留的复合材料铺层。补片和孔边复合材料应变如图 22 所示，结构破坏前，金属补片上的最大应变为 452.0×10^{-6}，复合材料层压板的最大应变为 $1\,348.0\times10^{-6}$。极限强度测试结果如表 6 所示，其均值为 280.2 MPa，是含预制损伤试件的 197.9%、常规铆接修理试件的 118.8% 左右、改进后铆接修理试件的 84.7%。

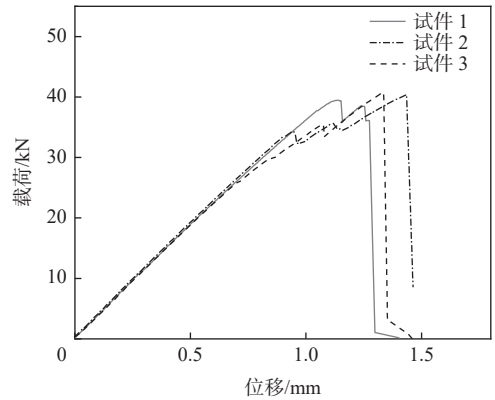


图 20 胶接修理试件的载荷-位移曲线

Fig. 20 Load-displacement curves of specimens repaired by bonding method



图 21 胶接修理试件的断口

Fig. 21 Fracture surface of specimens repaired by bonding method

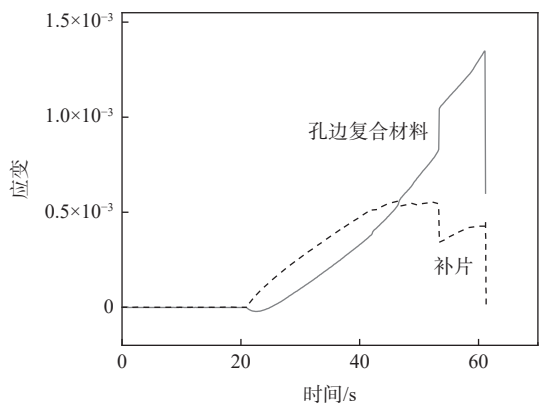


图 22 胶接修理试件补片和孔边复合材料的应变

Fig. 22 Strain at patch and hole edge composite of specimens repaired by bonding method

表 6 胶接修理试件的剩余强度测试结果

Table 6 Residual strength test results of specimens repaired by bonding method

试件编号	宽度/mm	厚度/mm	载荷/kN	剩余强度/MPa
1	98.84	1.5	39.47	266.2
2	98.4	1.48	40.41	277.5
3	98.2	1.4	40.82	296.9

载荷-位移曲线的锯齿是由胶接修理试件的破坏模式决定的。补片上既有裸露的金属，又有复合材料残留，说明修理部位的损伤既有胶层的界面破

坏, 又有复合材料铺层间的撕裂破坏。由于胶层界面和铺层之间应力分布的不均匀性, 上述 2 种损伤都是逐渐推进的。损伤每推进一步, 结构的刚度就变化一次, 对应地, 在载荷-位移曲线上就出现一个台阶。

结构破坏时, 金属补片的应变比常规铆接修理明显变大, 约为原孔边复合材料平均应变的 1/3。考虑到不锈钢补片的弹性模量近似为复合材料层压板的 3 倍, 此时, 金属补片上的应力已经非常接近复合材料层压板, 说明胶接修理很好地提高了修理部位的刚度, 使金属补片有效参与了承载。

孔边复合材料的应变比常规铆接明显变小, 原因是: ①金属补片有效分担了载荷; ②胶接修理结构中, 接头处的材料受剪切载荷作用, 胶接界面和复合材料铺层之间相对较低的剥离强度成为薄弱环节, 损伤位置由原结构孔边转移到接头和铺层界面处。

可见, 胶接修理的优点是修理部位的刚度较高, 有利于补片发挥承载作用; 缺点是接头和复合材料铺层界面的强度较低, 容易发生剥离破坏, 难以实现较高的整体修理强度。

2.6　胶铆联合修理结果

胶铆联合修理试件的载荷-位移曲线如图 23 所示, 仍有锯齿状特征, 但与胶接修理试件相比, 锯齿数量明显减少, 且其中一个试件甚至已经没有锯齿。断口如图 24 所示, 损伤位于第 1 排铆钉孔处, 有层间撕裂的痕迹。补片和孔边复合材料应变如图 25 所示, 结构破坏前, 金属补片上的最大应变为 717.0×10^{-6}, 复合材料层压板上的最大应变为 $2\,255.0\times10^{-6}$。极限强度测试结果如表 7 所示, 平均值为 380.9 MPa, 是胶接修理试件的 135.9%、改进后铆接修理试件的 115.1%、常规铆接修理试件的 161.5% 左右, 达到了很好的修理效果。

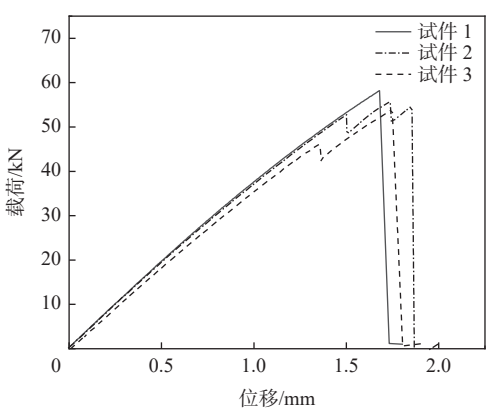


图 23　胶铆联合修理试件的载荷-位移曲线

Fig. 23　Load-displacement curves of specimens repaired by bonding-riveting joint method

载荷-位移曲线上锯齿特征减弱甚至消失, 是因为胶铆联合修理中, 铆钉的锁紧力有效阻止了接头及铺层界面的撕裂破坏。

破坏位置发生在第 1 排铆钉孔处, 而不是原结构孔边, 说明胶铆联合修理使原结构损伤处的强度得到了有效恢复, 孔边复合材料的受力环境得到了有效改善。

破坏前, 金属补片应变远大于常规铆接、胶接和改进后铆接修理, 说明胶铆联合修理进一步提高了修理部位的刚度, 金属补片更好地参与了载荷的传递。

综上所述, 胶铆联合修理既具有胶接修理可大幅提高修理部位刚度的优点, 又具有铆接修理可有效阻止复合材料层间撕裂的优点, 同时还具有改进后铆接修理的优点, 因此, 最终达到了比较理想的修理效果。

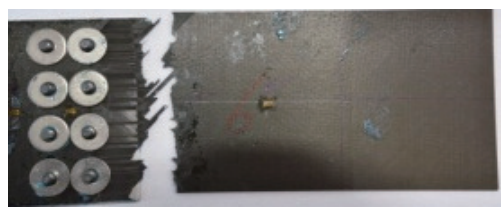


图 24　胶铆联合修理试件的断口

Fig. 24　Fracture surface of specimens repaired by bonding-riveting joint method

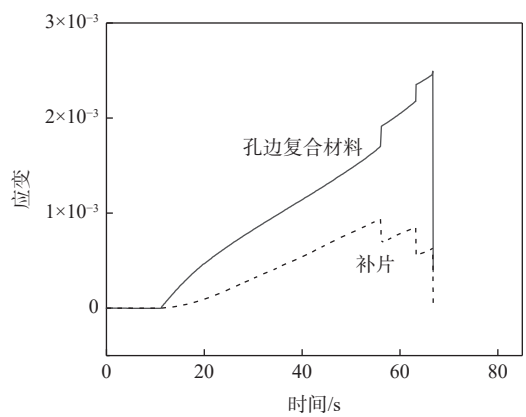


图 25　胶铆联合修理试件补片和孔边复合材料的应变

Fig. 25　Strain at patch and hole edge composite of specimens repaired by bonding-riveting joint method

表 7　胶铆联合修理试件的剩余强度测试结果

Table 7　Residual strength test results of specimens repaired by bonding-riveting joint method

试件编号	宽度/mm	厚度/mm	载荷/kN	剩余强度/MPa
1	99.20	1.48	58.20	396.40
2	98.64	1.46	54.75	380.20
3	98.12	1.50	53.88	366.10

2.7 综合分析

按照现有的修理强度评价方法，即便是修理效果最好的胶铆联合修理方法，其强度恢复率也只有57%左右，与文献[23]报道的飞机复合材料结构修理最低强度恢复率要求66.7%相差甚远，应用价值可能也不高。其实得出该结论是由于现有的表征强度恢复率的方法不准确造成的。

现有的修理强度恢复率分析中，直接用只具有简单构型的试件强度来等同具有复杂构型的真实结构的强度，显然不严谨。因为本文讨论的应急修理，通常是针对结构中的局部损伤，即在实际的修理结构中，修理部位和周边未损部位是共同参与承载的。分析本文得到的不同试件的载荷-位移曲线可以看出，现有的快速应急修理方法得到的试件，其刚度远低于完好复合材料试件的刚度。即在修理后的结构中，修理部位的刚度远小于原结构未损伤部位。根据载荷按刚度分配的原则，修理部位并不能如完好结构一样承受载荷。因此，用修理部位的局部强度代替修理后结构的整体强度不合理。

为从整体上评估修理后结构的实际承载能力，本文认为应参考飞机结构损伤容限设计中的分析方法。

GJB 3897—99[24]和MIL-DTL-87158D[25]中关于飞机结构战伤评估的安全性要求明确指出，当允许战伤飞机带伤使用时，其剩余强度应大于损伤容限设计规定的剩余强度要求值或使用限制条件下最大载荷的1.2倍。即对战伤飞机剩余强度的分析，需要采用损伤容限设计中的分析方法。

飞机损伤容限设计原理认为[26]，对于含有损伤的结构的剩余强度分析，可采用3种失效判据：基于线弹性断裂理论的应力强度因子判据、净截面屈服判据和弹塑性破坏判据。当剩余强度要求值大于或等于2/3的使用载荷时，应选用弹塑性和净截面屈服判据二者计算结果中的较小者；当剩余强度要求值小于2/3的使用载荷时，应选用线弹性判据和净截面屈服判据二者计算结果中的较小者。一般来说，当损伤尺寸很小时，需要采用弹塑性判据分析；当结构材料塑性很好时，需要使用净截面屈服判据分析；当结构材料为脆性时，需要使用线弹性断裂判据分析。

另外，虽然损伤容限设计中针对的损伤模式为裂纹，但对于实际的破孔型战伤，文献[22,27]认为，可将损伤作为等效的裂纹看待，用等效的应力强度因子判据分析。

此外，对于本文研究的飞机复合材料应急修理方法，不论是铆接、胶接，还是胶铆联合修理，都只对损伤区域进行了简单的降低应力集中的清理，采用机械连接或胶接等方法安装加强片，并不修理损伤本身。因此，修理补片的引入只改变了修理部位的局部构型，修理后的结构中损伤仍然存在。而且试验结果表明，很多情况下，在拉伸过程中，修理后结构的破坏仍然是从原损伤孔周边开始的。虽然改进后的铆接修理及胶铆联合修理试件的破坏位置可能从原损伤孔边缘转移到最外层铆钉孔处，但如文献[6,16]所述，理想的抢修工艺应使断裂位置正好处于由原结构损伤边缘向最外层铆钉孔过渡的临界状态。在该状态下，修理结构仍然可以看成一个等效的裂纹体，用损伤容限的方法来分析。

从本文的实验结果还可以看出，不论是完好的材料试件，还是修理后的小型结构试件，其拉伸曲线都无屈服平台，表现为典型的脆性断裂特征。从对未损伤部位的应变监控结果来看，修理后结构破坏时，未损伤净截面的平均应变远小于完好试件的破坏应变，说明在修理后的结构中，虽然采取了降低应力集中的清理措施，但孔边的应力集中仍然存在，用净截面平均应力去判断损伤显然不太合理。

基于以上原因，本文提出采用基于线弹性断裂理论的等效应力强度因子判据来分析修理后结构的剩余强度。按照线弹性断裂力学理论，损伤破坏的驱动力可以用应力强度因子来描述[28]：

$$K = CY\sigma\sqrt{\frac{\pi D}{n}} \tag{2}$$

式中：K为裂纹尖端的应力强度因子；C为内力再分配因子；Y为综合构型因子；n为考虑扩展的裂纹尖端数；D为裂纹长度；σ为工作应力。

为便于说明和理解，以简单的平板结构中含一处等效的中心穿透性裂纹为例进行分析。因为只考虑一处等效裂纹，由临近长裂纹引起的内力再分配因子C取1，考虑扩展的裂纹尖端数n为2。综合构型因子Y则可以看为有限板宽和修理补片2个因素的组合，参照文献[29]的分析方法，可写成如下形式：

$$Y = F_1F_2 \tag{3}$$

式中：F_1为与几何尺寸相关的构型因子，对于宽度W的有限宽板，$F_1 = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)}$，$a$为半裂纹长度；$F_2$为与修理补片相关的因子。

根据式(2)和式(3)，可以进一步推导出修理后结构件的剩余强度：

$$\sigma_c = \frac{K_c}{F_1F_2\sqrt{\pi a}} \tag{4}$$

式中：σ_c为结构件的剩余强度；K_c为材料的等效断裂韧度。

从式(4)可以看出, 修理后结构的强度除与修理方法有关外, 还与损伤尺寸和结构的宽度有关。

对于本文中的材料, K_c 和 F_1 可以用含预制破孔试件的剩余强度测试结果计算得到, F_1=1.189, $K_c = 47.2\ \mathrm{MN/m^{3/2}}$。利用 3 种修理试件的剩余强度值, 可以进一步计算得到各修理方法对应的修正因子 F_2。有了上述参数, 就可以根据损伤尺寸和构件构型尺寸计算修复后的强度。以前面的材料为例, 假设在 200 mm 宽的板状结构中有一处直径 30 mm 的弹孔, 采用不同的快速抢修方法可得到修正因子 F_2、修复强度及新旧评价方法下的强度恢复率, 如表 8 所示。

从表 8 可以看出, 按照本文提出的评价方法得到的强度恢复率与传统方法的强度恢复率有较大的区别。这里只是针对简单平板结构的分析例子, 对于实际的加筋壁板等比较复杂的结构, 两者的区别将更大。

表 8　评价方法改进前后的结构强度恢复率对比

Table 8　Comparison of strength recovery ratio by unimproved and improved evaluation methods

修理方法	修正因子F_2	修复强度/MPa	强度恢复率(旧)/%	强度恢复率(新)/%
常规铆接修理	0.601	361.9	35.3	54.2
胶接修理	0.505	430.7	41.9	64.5
改进后的铆接修理	0.428	508.1	49.5	76.1
胶铆联合修理	0.372	584.7	57.0	87.6

3　结　论

1) 飞机复合材料层压板的破坏具有典型的脆性材料特征, 因此, 对于含损伤结构的剩余强度及相应的修理分析, 不能采用传统的净截面屈服判据, 而应采用基于线弹性断裂理论的分析方法。

2) 对于飞机复合材料结构战伤的单面铆接修理, 其强度影响因素主要是“铆钉-补片-铆钉”传力路径上的刚度不足, 该刚度的大小除与补片的模量、厚度有关外, 还主要与铆钉的剪切刚度、装配间隙及补片承受偏心力矩作用的状态有关。

3) 增加铆钉直径、在铆钉孔处涂胶湿装配、在复合材料背面安装金属垫片, 可有效提高修理部位的刚度, 进而提高修理件的强度。但考虑到随着铆钉直径的增加, 铆钉孔也随之变大, 这会对修理后的结构强度带来一些负面的作用。因此, 通过增加铆钉直径来增加修理强度的方法, 建议仅限于在按修理原则计算出的铆钉直径的基础上加大一个规格。如果条件允许, 最好通过选择具有更高剪切模量的铆钉材料的办法来调整。

4) 胶接修理因为无装配间隙的影响, 其修理部位的刚度比明显高于常规铆接修理, 此时, 制约其强度的主要因素是接头及复合材料层间相对较低的撕裂强度。

5) 改进后的胶铆联合修理, 综合了胶接、铆接及改进后铆接修理的优点, 既有效提高了修理部位的刚度, 使之更好地参与承载, 又成功阻止了接头界面和复合材料铺层间撕裂破坏的发生, 提高了承载能力, 达到了比较理想的修理效果。

6) 用修理后试件的强度除以完好试件强度的方法评价修理后结构的强度恢复率, 因为其未考虑修理部位的实际受力状态和损伤尺寸对修理强度的影响, 不能反映结构的真实承载能力, 建议采用基于线弹性断裂理论的剩余强度评价方法。

参考文献（References）

[1] 魏士礼, 赵艳秦. 民用飞机复合材料翼盒蒙皮损伤外补修理[J]. 机械工程师, 2022(4): 82-84.
WEI S L, ZHAO Y Q. External patch repair for damage of composite wing box skin of civil aircraft[J]. Mechanical Engineer, 2022(4): 82-84(in Chinese).

[2] 刘岩松, 张子健, 宋晓晨, 等. 复合材料结构修理技术探究[J]. 航空维修与工程, 2018(11): 76-80.
LIU Y S, ZHANG Z J, SONG X C, et al. Research on repair technology of composite material structure[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2018(11): 76-80(in Chinese).

[3] 贺旺, 曹强, 孙涛. 飞机复合材料修理工艺研究的思路探讨[J]. 航空维修与工程, 2016(4): 57-59.
HE W, CAO Q, SUN T. Discussion on the process research of aircraft composite repair[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016(4): 57-59(in Chinese).

[4] 孔磊. 飞机复合材料修理技术研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(3): 140-144.
KONG L. Research on aircraft composite repair technology[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(3): 140-144(in Chinese).

[5] 聂恒昌, 谭日明, 郭霞, 等. 复合材料层合板机械连接修理拉伸性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(2): 318-327.
NIE H C, TAN R M, GUO X, et al. Tensile performances of mechanically fastened repairs of composite laminates[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(2): 318-327(in Chinese).

[6] 杨鹏飞, 樊俊铃, 宁宁, 等. 复合材料矩形开孔损伤螺接修理参数分析[J]. 航空维修与工程, 2021(5): 89-93.
YANG P F, FAN J L, NING N, et al. Analysis on repair parameters for damaged bolted joints with rectangular holes in composite materials[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(5): 89-93(in Chinese).

[7] 王航, 李想, 谢宗蕻, 等. 含通孔损伤复材壁板螺接修理接头拉伸性能试验研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(20): 56-62.
WANG H, LI X, XIE Z H, et al. Tests on tensile strength of bolted-repaired composite joints[J]. Aeronautical Manufacturing Techno-

logy, 2018, 61(20): 56-62(in Chinese).

[8] 张阿盈, 许洪明, 陈昊. 复合材料层压板铆接修补剩余强度评估[J]. 机械强度, 2016, 38(1): 105-109.
ZHANG A Y, XU H M, CHEN H. Residual strength evaluation of composite laminates repaired by riveted metal patch[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(1): 105-109(in Chinese).

[9] 张阿盈, 陈向明, 王力立. 含离散源损伤复合材料加筋板剩余强度及其修理技术研究[J]. 工程与试验, 2018, 58(2): 16-19.
ZHANG A Y, CHEN X M, WANG L L. Study on residual strength of composite stiffened panel with discrete source damage and repair technique[J]. Engineering & Test, 2018, 58(2): 16-19(in Chinese).

[10] 梁凤飞, 金迪, 何勇. 复合材料结构修理研究[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(5): 57-61.
LIANG F F, JIN D, HE Y. Research on the maintenance of composite material structure[J]. China Adhesives, 2019, 28(5): 57-61(in Chinese).

[11] 王锡然. 复合材料机翼结构胶接修理后强度评估模型研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
WANG X R. Strength evaluation model of composite wing structure after adhesive repair[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018(in Chinese).

[12] 田可可. 复合材料挖补结构性能分析和实验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
TIAN K K. Numerical and experimental study on scarf repairment properties of composite material[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021(in Chinese).

[13] 王宇灿. 复合材料胶铆混合修理力学特性实验研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
WANG Y C. Experimental study on mechanical properties of adhesive-rivet hybrid repair of composite materials[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019(in Chinese).

[14] 张昂. 碳纤维复合材料的激光清洗机理与表面改性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
ZHANG A. Research on laser cleaning mechanism and surface modification of carbon fiber reinforced polymer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019(in Chinese).

[15] 李俊磊. 基于激光表面处理的民机复合材料结构胶结修理研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2016.
LI J L. Civil aircraft composite structure based on laser surface treatment[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2016(in Chinese).

[16] 邹维杰. 复合材料层合板机械修理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZOU W J. Research on mechanical repair of composite laminates [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018(in Chinese).

[17] 王瑞峰. 复合材料胶铆混合连接与胶接修理的力学性能对比研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
WANG R F. A comparative study of mechanical property of bonded repair and adhesive-rivet hybrid repair of composite laminate[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016(in Chinese).

[18] 原志翔. 复合材料胶铆混合修理损伤特性实验研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
YUAN Z X. Experimental study on damage properties of adhesive-rivet hybrid repair of composite materials[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020(in Chinese).

[19] 徐航. 复合材料胶铆混合修理优化设计[D]. 天津: 中国民航大学, 2015.
XU H. Optimal design of composite material adhesive-rivet hybrid repair[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015(in Chinese).

[20] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039—2017[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

[21] 中国飞机强度研究所、中国航空综合技术研究所、中国航空工业第601研究所, 等. 飞机复合材料结构机械连接设计要求: HB 7709[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2003.
Aircraft Strength Research Institute of China, China Aero-poly Technology Establishment, AVIC Shenyang Aircraft Design & Research Institute, et al. Design requirements of mechanically fastened joint of composite structure for airplane: HB 7099[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2003(in Chinese).

[22] USHAKOV A, STEWART A, MISHULIN I. Probabilistic design of damage tolerant composite aircraft structures[R]. Washington, D. C. : US Department of Transportation, 2002.

[23] 王辰, 贺尔铭, 赵志彬, 等. 民机复合材料结构修理容限确定方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(4): 695-704.
WANG C, HE E M, ZHAO Z B, et al. Method for determining repair tolerance of civil aircraft composite structure[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(4): 695-704(in Chinese).

[24] 中国人民解放军空军第一研究所. 飞机战伤评估与修理技术手册编制要求: GJB 3897—99[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 1999.
Air Force First Research Institute of PLA. Requirements for developing technical manuals for aircraft battle damage assessment and repair: GJB 3897—99[S]. Beijing: PLA General Armament Department, 1999(in Chinese).

[25] FLCMC/HIAM Technical Data Section. Detail specification manuals, technical-aircraft battle damage assessment and repair: MIL-DTL-87158D[S]. Washington, D. C. : US Department of Defense, 2016.

[26] 中国航空研究院. 军用飞机疲劳·损伤容限·耐久性设计手册 第三册 损伤容限设计[M]. 北京: 中国航空研究院, 1994: 328-335.
Chinese Aeronautical Establishment. Fatigue, damage tolerant and durability design for military airplane. Volume Ⅲ. Damage tolerant design[M]. Beijing: Chinese Aeronautical Establishment, 1994: 328-335(in Chinese).

[27] JOHN G A. Design manual for impact damage tolerant aircraft structure: AGARD-AG-238[R]. Washington, D. C. : AGARD, 1981: 161-168.

[28] 中国航空研究院. 应力强度因子手册 (增订版)[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 3-9.
Chinese Aeronautical Establishment. Stress intensity factors handbook(revised and enlarged edition)[M]. Beijing: Science Press, 1993: 3-9(in Chinese).

[29] 航空航天工业部科学技术研究院. 飞机结构耐久性及损伤容限设计手册 第三册 飞机结构的损伤容限设计[M]. 北京: 航空航天工业部科学技术研究院, 1989.
Academy of Science and Technology Ministry of Aerospace Industry. Durability and damage tolerant design for airplane structure. Volume Ⅲ. Damage tolerant design for airplane structure[M]. Beijing: Academy of Science and Technology Ministry of Aerospace Industry, 1989(in Chinese).

Tensile properties of rapid repaired CCF300/QY8911 laminates with broken hole damage

HOU Rili*，WANG Chunyu，ZHOU Ping

(Aviation Maintenance NCO Academy，Air Force Engineering University，Xinyang 464000，China)

Abstract：The tensile strength of the CCF300/QY8911 composite laminate after hole damage repair was evaluated using a set of rules and characterization methods. To obtain the necessary data, tensile tests were conducted on standard specimens made from the original material, damaged specimens without repair, and specimens repaired using bonding, riveting, and bonding-riveting joint repair techniques. The corresponding data included strength, stiffness, damage mode, and key point strain. The following conclusions were drawn through comprehensive analysis: the incompatibility between the repair location and the original structure stiffness is the main factor affecting the repair strength; bonding repair has a high connection stiffness, and the main influencing factor of repair strength is the lamina bonding strength;on the other hand, riveting repair, which has a low connection stiffness, is mainly affected by the ease of pulling out the rivet in single shear; bonding-riveting joint repair combines the high stiffness of bonding repair and the dual advantage of riveting repair to prevent interlayer tearing; significantly improving the repair effect by adopting the combined wet assembly process of bonding-riveting, increasing the diameter of rivets, and installing anti-slip pads on the back of the workpiece can achieve a tensile strength of 161.5% and 135.9% higher than the conventional riveting repair and conventional bonding repair, respectively.The method described in this study, which is based on the linear elastic fracture theory, provides a more accurate representation of the real bearing capacity of the restored structure from a comprehensive standpoint.

Keywords：laminates；riveting repair；bonding repair；bonding-riveting joint repair；uniaxial tension；tensile properties

Received：2023-07-27；**Accepted**：2023-12-01；**Published Online**：2024-01-05 19：32
URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240105.1142.001

* **Corresponding author**. E-mail：hrl6319@sina.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0579

冰雪天气下基于LSTM的跑道温度数据-机理联合预测

陈斌[1,2,*]，刘悦[1,2]，尹开浪[1,2]，方珣[1,2]

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津 300300；2. 中国民航大学 航空地面特种设备研究基地，天津 300300)

摘 要：温度是跑道结冰的重要因素，针对跑道除冰运行的跑道热特性参数瞬态变化问题和温度周期序列缓慢变化特性，建立冰雪天气下基于长短时记忆(LSTM)的跑道温度数据-机理联合预测模型。通过最大信息系数法选择数据模型的输入特征变量，采用动态时间弯曲法进行跑道温度数据聚类划分，建立基于LSTM的数据预测模型；通过跑道热力学知识获取跑道温度预测机理模型，采用最小误差赋权法建立跑道温度数据-机理联合预测模型。仿真预测显示，预测时长为20 min、残差阈值为±0.5℃时，数据-机理联合预测模型优于单独的数据预测模型和机理模型，预测准确率可达99.34%；横向对比显示，在相同边界条件下，数据-机理联合预测模型优于BP神经网络、多元回归模型和支持向量机模型，平均准确率提高26.11%。研究表明，基于LSTM的跑道温度数据-机理联合预测模型契合冰雪天气下跑道除冰运行实际，可获得较好的跑道温度短时预测结果。

关 键 词：跑道温度；冰雪天气；预测；长短时记忆神经网络；动态时间弯曲

中图分类号：V219

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2184-11

冬季，中国北方大部分地区的机场常常面临暴雪、冻雨、雨夹雪等冰雪天气情况。跑道结冰会降低飞机机轮与跑道之间的摩擦力，带来飞行安全隐患。因此，精准掌握冰雪天气下跑道积冰情况是保障航班安全起降的重要环节。跑道温度是跑道结冰的重要影响因素，对跑道温度进行短期精准预测，将有助于及时准确确定跑道结冰临界温度点，为跑道积冰预警提供有效信息。多年来，国内外学者对与跑道结构相似的路面温度预测方法展开了大量研究，主要的研究思路分为机理预测和数据驱动预测。机理预测根据传热学基本原理，通过使用数值或解析法求解路面温度场导热微分方程，建立路面温度场预估模型[1]。数据驱动预测采用机器学习的方法，将大量的历史实测温度与气象数据作为训练样本，得到各因素与温度之间的映射关系，进而得到温度预测模型。

Nuijten等[2-3]建立了综合考虑机场跑道短波辐射通量、空气对流传导产生的热通量和飞机感热通量的热传导方程，利用有限差分法求解获得了不同深度的跑道内部结构温度及其温度场。Hermansson[4-5]基于路面温度、路面反射率等建立了路面一维温度场模型，通过现场实测数据比较显示，该模型可以较好地计算出夏季不同时间的路面温度。Ho和Romero[6]提出了太阳辐射计算公式，以太阳辐射为输入，将路面热渗透深度作为边界条件，采用二维有限元法预测了干冻地区沥青路面的温度变化。张丽娟等[7]由最小二乘法近似拟合了大气温度和太阳辐射强度，将此作为边界条件，使用拉普拉斯变换法获得了一维时变路面温度场的解析解，实验结果显示，该方法可以实现路面结构温度场分布的预测。陈斌等[8]为解决单一机理模型的预测误差累积问题，建立了基于核极限学习机

收稿日期：2022-07-05；录用日期：2022-09-25；网络出版时间：2022-10-09 15:26
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221009.0933.005
*通信作者. E-mail：chenbindavid@163.com

引用格式：陈斌，刘悦，尹开浪，等. 冰雪天气下基于LSTM的跑道温度数据-机理联合预测[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2184-2194.
CHEN B，LIU Y，YIN K L，et al. Runway temperature data mechanism joint prediction based on LSTM under ice and snow[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2184-2194 (in Chinese).

(kernel extreme learning machine, KELM)的跑道温度误差模型, 实现了跑道温度机理预测模型的误差补偿, 当残差阈值为±0.5℃ 时, 该模型的准确率达到 91.25%。总体来看, 路面温度机理预测模型能够从本质上反映气象因素、环境因素和路面结构材料对路面温度的影响机理, 模型普适性较强[9]。

早期的数据预测中, 线性回归法使用较为广泛。Nantasai 和 Nassiri[10] 根据 2015—2016 年冬季混凝土人行道的路面温度实测数据建立了多元线性回归模型, 预测透水性混凝土路面在 13 mm 深处的温度, 结果表明, 近地表温度对环境温度和太阳辐射的日变化比较敏感。统计回归预测起步较早, 模型结构简单, 易于理解和建立, 但缺乏自学习能力。随着 AI 技术的发展, 基于 AI 的机器学习方法也逐渐应用于路面温度预测。Liu 等[11] 提出了一种基于梯度极限学习机的路面温度预测模型, 克服了统计回归模型泛化性差和数据样本方差较大导致的预测误差增大问题, 结果显示, 残差阈值为 2℃ 时, 准确度可以提升到 87.4%。邱欣等[12] 采用关联规则挖掘算法确定了气温、气压、露点温度和大气湿度作为影响沥青路面温度变化的主要因素, 并建立了基于梯度提升树方法的路面温度预测模型, 结果显示, 该模型的预测均方误差更小, 控制在 1.5℃ 内。机器学习预测能够深度挖掘路面温度与气象因素之间的联系, 但建模过程中未考虑路面历史温度的动态时序特征, 会使路面温度预测过于依赖特征变量的选择, 影响预测准确性和普适性。

根据历史路面温度之间的相关性和时序性, 将路面温度样本看作时间序列数据, 采用时间序列建模是数据驱动路面温度预测的新方法。魏鑫[13] 利用大连机场 2010 年 12 月至 2011 年 4 月的数据建立了跑道温度的自回归移动平均(autoregressive moving average, ARMA)时间序列预测模型, 从预测结果可见, 当选取不同样本、预测时长和样本数量时, 平均误差控制在 1℃ 以内。汤筠筠和郭忠印[14] 基于沈阳东陵交通气象站冬季路面温度与气象数据, 建立了基于 ARIMA 的路面温度预测模型, 在残差阈值为 0.5℃ 和 1℃ 时, 该模型的平均预测准确率可以达到 81.25% 和 99.65%。上述时间序列模型更多应用于线性、单变量的预测, 实际场景的时间序列数据更多是非线性、多变量的。长短时记忆(long short term memory, LSTM) 神经网络在处理多维度、非线性、长时间稳态变化的时间序列时表现出良好的预测效果。Yu 等[15] 利用 LSTM 方法建立了局部地表温度预测模型, 结果表明, LSTM 方法可以通过历史温度数据集得出物联系统无法观察到的历史温度。Fang 等[16] 针对室内温度预测问题, 采用 LSTM 方法实现了多步超前预测, 其预测结果优于 Prophet 模型, 表明 LSTM 对短时间序列预测问题有更好的准确率与可靠性。采用 LSTM 对多元时间序列问题研究成为学界和业界的研究热点[17]。

机理模型能够从本质上反映气象、环境和路面结构材料对路面温度场的影响机理, 然而在实际运行中, 其存在有限差分求解与离散化, 以及预测时长增加导致误差累积问题。对于预测时长较大且跑道温度变化趋于平稳的问题, LSTM 可以取得较好的预测效果, 但起降飞机的尾流、道面污染物状况和除冰雪作业造成跑道热特征参数频繁跃变, LSTM 对非周期性瞬态变化的跑道多参数不能及时表征, 导致在跑道非平稳状态下预测误差较大。

综上, 冰雪天气下跑道温度短时预测面临机理模型误差累积和数据模型对跑道参数不能及时表征的问题。基于此, 本文利用 LSTM 神经网络建立跑道温度数据预测模型, 通过热力学知识建立跑道温度机理模型, 综合考虑跑道温度机理和数据驱动模型的优缺点, 提出了一种基于 LSTM 的跑道温度数据-机理联合预测方法。

1　跑道温度数据特征分析

1.1　相关性分析

1.1.1　相关性分析原理

冰雪天气下, 跑道温度的变化是气象条件、路面材料、不同地基温度和道面交通状况等多因素相互耦合的复杂过程, 深度挖掘跑道温度与其周围可量化监测的主要因素之间的相关性, 提取跑道温度主要影响因素, 能够减小输入空间维度, 降低模型复杂度。

最大信息系数 (maximal information coefficient, MIC) 起源于互信息, 用来评价 2 个变量之间线性或非线性相关程度, 计算表达式为

$$I(X;Y)=\int p(x,y)\log_2\left(\frac{p(x|y)}{p(x)}\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{1}$$

式中: $p(x,y)$为当前 X和 Y的联合概率密度函数; $p(x)$为 X的边缘概率分布函数; $p(x|y)$为条件概率。

MIC 采用离散化的方式对式 (1) 进行求解, 计算步骤为: 将变量 X和 Y中数据构造二维平面中的集合 D, 使 $D=\{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_n,y_n)\}$, 沿着二维平面 x轴、y轴将集合 D分别划分为 a、b段, 得到 $a\times b$个网格点, 记为 M。改变 a和 b的大小, 可得到不同分配方案下的网格点 M。选取不同网格分配方案中的最大互信息值:

$$I_1(D,x,y)=\max\left\{I(D|_M)\right\} \tag{2}$$

式中：$D|_M$为集合D在网格M上的分布。

将式(2)标准化处理，选取最大互信息值即为MIC值。

$$N(D)_{x,y}=\frac{I_1(D,x,y)}{\log_2\min(x,y)} \tag{3}$$

$$M(D)=\max_{xy\leqslant B(n)}\{N(D)_{x,y}\} \tag{4}$$

式中：$B(n)$为网格划分的最大数量，通常取$B(n)=n^{0.6}$[18]；$M(D)$为MIC值，其位于[0,1]区间内，当MIC值为1时，表示变量X与Y相关程度最大，当MIC值为0时，表示变量X与Y不相关。

1.1.2 跑道温度相关性分析结果

为充分考虑跑道温度与其周围多影响因素之间的相关性，按照1.1.1节方法，对跑道温度的影响因素进行相关性分析，其MIC值如表1所示。选取MIC值大于0.5的强相关因素作为数据模型的输入特征变量。本文选取基于传感器采集的大气温度、露点温度、大气湿度、风速、大气压强、跑道地基不同深度处温度和天气预报记录的大气温度、露点温度、大气湿度等因素作为跑道温度的主要特征参数，建立输入参数特征空间。

表1 输入变量最大信息系数值

Table 1 MIC value for input variables

序号	影响因素	MIC值
1	大气温度	0.682 0
2	露点温度	0.681 5
3	大气湿度	0.634 6
4	风速	0.536 2
5	大气压强	0.615 6
6	跑道下10 cm温度	0.687 0
7	跑道下20 cm温度	0.648 6
8	跑道下40 cm温度	0.523 0
9	大气温度(天气预报)	0.656 6
10	露点温度(天气预报)	0.628 3
11	大气湿度(天气预报)	0.602 1

1.2 跑道温度聚类分析

1.2.1 冰雪天气下跑道温度变化特征

图1为相同起止时间长度下的某2次降雪天气跑道温度变化曲线。可见：①冰雪天气下的跑道温度具有一定的长期趋势性。在每次降雪天气中，跑道温度总能保持持续平稳或持续降低的变化趋势。②不同降雪天气下，跑道温度具有一定的差异性。在降雪气温1下，跑道温度随大气温度的降低呈现下降的变化趋势，在降雪气温2中，跑道温度与大气温度变化趋势都趋于平稳。针对不同降雪天气下跑道变化趋势不同的特点，提出跑道温度聚类思想，将本文中的8组数据划分为4种类型，对每种类型进行建模预测。聚类后再建模的方式有助于将模型应用于新的降雪天气预测，具有实际应用性。

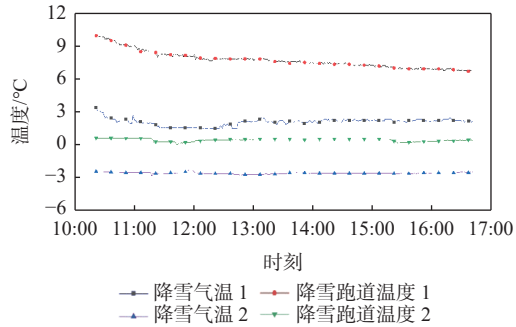


图1 跑道温度变化曲线

Fig. 1 Changing curves of runway temperature

1.2.2 跑道温度层次聚类方法

针对不同降雪天气下跑道温度的差异性，先对跑道温度进行聚类划分，再分别建立适合每个类别降雪天气下跑道温度的预测模型。在计算过程中，将每个样本看作单独的簇，基于簇间的相似度，按照自底向上的聚合策略，将不同组的样本划分形成树状图。聚类过程示意如图2所示。

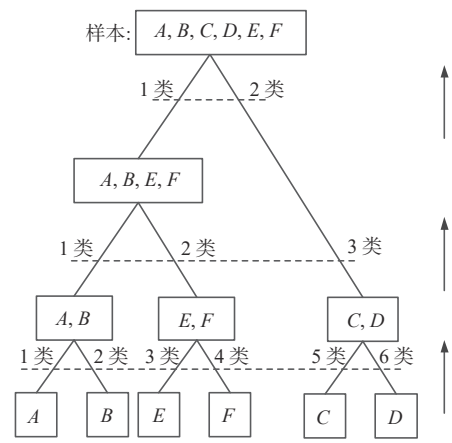


图2 聚类过程示意图

Fig. 2 Diagram of clustering process

层次聚类的计算步骤如下：

1）基于动态时间弯曲(dynamic time warping, DTW)相似距离计算。DTW方法能够对2个不等长时间序列以延伸、缩短的方式进行变形，实现2个时间序列的等长[19-20]。计算过程如下：在图3中，设2个跑道温度时间序列为R_1和R_2，序列长度分别为i和j，则由序列R_1中从1到i的每个点依次计算到序列R_2中从1到j的累加距离。由所有累加距离构成距离矩阵$\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}$，在$\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}$中可以确定一条从起点到终点、具有累加距离之和最小的移

动路线, 即为这 2 个时间序列的 DTW 距离。该路径可以表示为 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_k,\cdots,w_L),1<k<L$。累加距离计算表达式为

$$\begin{cases} G(m,n)=G_{\mathrm{Dist}}(m,n)+\min(G(m-1,n), \\ \quad G(m-1,n-1),G(m,n-1)) \\ G_{\mathrm{Dist}}(m,n)=|R_{1k}-R_{2k}|^2 \end{cases} \tag{5}$$

式中: $m=1,2,\cdots,i$; $n=1,2,\cdots,j$。

2) 最小距离计算。假设每组样本为一个单独的簇, 不同簇间按照最小距离的原则合并相似度较高的簇。最小距离计算表达式为

$$D_{\mathrm{dist}}=\min_{R_i\in N,R_j\in N}\mathrm{dist}(R_i,R_j) \tag{6}$$

式中: N为时间序列长度。

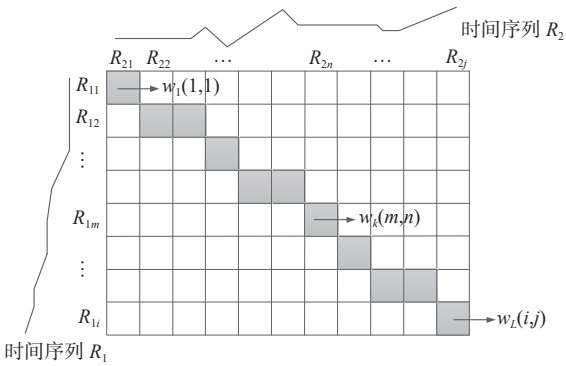


图 3　最优规划路径示意图

Fig. 3　Schematic diagram of optimal planning path

2　数据-机理联合预测

2.1　数据预测

2.1.1　LSTM 网络结构

利用 LSTM 神经网络建立跑道温度数据预测模型。LSTM 是由若干个神经元首尾相连组成的链式结构, 每个神经单元内部具有门控结构和细胞记忆单元, 使其能够用来预测具有长期依赖关系的时间序列数据。在 LSTM 单元内部, 门控结构主要包含遗忘门、输入门和输出门, 其相互协调配合, 共同控制信息的流入和流出[21]。LSTM 神经元结构如图 4 所示。

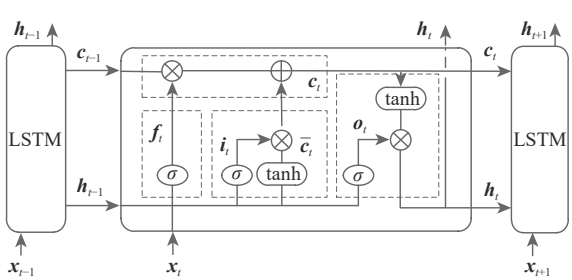


图 4　LSTM 单元结构

Fig. 4　LSTM cell structure

设 $\boldsymbol{h}_{t-1}$为上一时刻细胞记忆单元中的信息量, $\boldsymbol{x}_t$为当前时刻的输入, 则 LSTM 神经网络工作过程如下:

1) 遗忘门 $\boldsymbol{f}_t$负责决定上一时刻细胞记忆单元中信息的遗忘量。

$$\boldsymbol{f}_t=\sigma(\boldsymbol{w}_f(\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t)+\boldsymbol{b}_f) \tag{7}$$

式中: $\boldsymbol{w}_f$和$\boldsymbol{b}_f$分别为遗忘门对应的权值矩阵和偏置。

2) 输入门能够决定当前时刻更新到细胞记忆单元中的信息量, 其包括决定当前时刻细胞记忆程度的$\boldsymbol{i}_t$与控制流入细胞记忆单元的信息量$\tilde{\boldsymbol{c}}_t$。

$$\boldsymbol{i}_t=\sigma(\boldsymbol{w}_i(\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t)+\boldsymbol{b}_i) \tag{8}$$

$$\tilde{\boldsymbol{c}}_t=\tanh(\boldsymbol{w}_c(\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t)+\boldsymbol{b}_c) \tag{9}$$

式中: $\boldsymbol{w}_i$、$\boldsymbol{w}_c$和$\boldsymbol{b}_i$、$\boldsymbol{b}_c$分别为输入门对应的权值矩阵和偏置。

3) 细胞记忆单元$\boldsymbol{c}_t$能够实时更新当前时刻的细胞的信息量。

$$\boldsymbol{c}_t=\boldsymbol{f}_t\times\boldsymbol{c}_{t-1}+\boldsymbol{i}_t\times\tilde{\boldsymbol{c}}_t \tag{10}$$

式中: $\boldsymbol{c}_{t-1}$为前一个单元信息的输出值。

4) 输出门$\boldsymbol{h}_t$用于决定当前时刻流出的信息量。

$$\boldsymbol{o}_t=\sigma(\boldsymbol{w}_o(\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t)+\boldsymbol{b}_o) \tag{11}$$

$$\boldsymbol{h}_t=\boldsymbol{o}_t\odot\tanh(\boldsymbol{c}_t) \tag{12}$$

式中: $\boldsymbol{o}_t$为输出; $\boldsymbol{w}_o$和$\boldsymbol{b}_o$分别为输入门对应的权值矩阵和偏置; "⊙" 表示逐元乘法。

2.1.2　预测时长设计

为充分利用跑道温度输入变量的历史时序特征, 确定跑道温度预测时长, 本文在 LSTM 神经网络模型中设计滚动时间窗口, 如图 5 所示。在滚动时间窗口工作过程中, 若输入历史时间序列长度为M_1, 预测时长为L, 则时间窗口长度为M_1+L。设当前时间为t, t时刻的序列值为X_t, $X_t=\{x_{t,1},x_{t,2},\cdots,x_{t,n},y_t\}$。则当预测时长为$L$时, 跑道温度样本数据的输入输出依次为

$$\begin{cases} y_{t+L}=f(X_{t-M_1+1},\cdots,X_{t-1},X_t) \\ y_{t+L+1}=f(X_{t-M_1+2},\cdots,X_t,X_{t+1}) \\ y_{t+L+2}=f(X_{t-M_1+3},\cdots,X_{t+1},X_{t+2}) \end{cases} \tag{13}$$

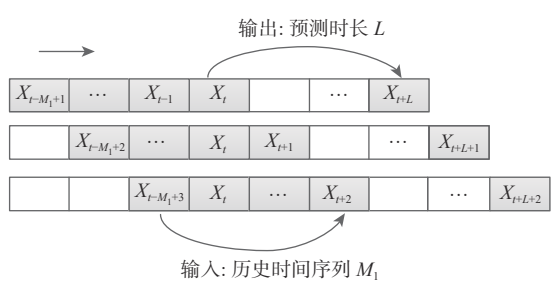


图 5　滚动时间窗口结构

Fig. 5　Structure of rolling time window

2.2 机理预测

跑道温度的变化往往与各影响因素在道面间的热流量流动形式相关。机理模型能够综合考虑跑道材料、地基因素、跑道周围气候因素的热通量，反映跑道热参数瞬时变化的特点，根据传热学原理预测跑道温度。跑道温度预测的本质是求解复杂边界条件下跑道温度导热微分方程。由于跑道为层状结构，跑道一维导热方程为

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}=\frac{\lambda}{\rho c}\cdot\frac{\partial T^2(x,t)}{\partial x^2} \tag{14}$$

式中：$T(x,t)$为跑道温度；x为空间坐标；λ为跑道的导热系数；ρ为跑道材料密度；c为跑道材料比热容。

基于能量守恒定律，确定跑道热通量平衡方程为

$$Q_0+Q_{l2}+H_f+L_f+Q_r+Q_w=Q_s+Q_{l1}+Q_d \tag{15}$$

式中：Q_0为跑道热通量；Q_s为太阳短波辐射通量；Q_{l1}为大气长波辐射通量；Q_{l2}为跑道长波辐射通量；H_f为感热通量；L_f为潜热通量；Q_r为降雨热通量；Q_w为积雪热通量；Q_d为飞机尾流与跑道之间热通量。热通量的计算过程参考文献[22]。

联立式(14)和式(15)，通过有限差分法网格划分，由差商近似表示微商，计算跑道温度机理模型为

$$T_0^{n+1}=\frac{2\tau\lambda}{\rho ch^2}T_1^n+\left(1-\frac{2\tau\lambda}{\rho ch^2}\right)T_0^n+\frac{2\tau}{\rho ch}Q_0^n \tag{16}$$

式中：n为当前时刻；$n+1$为下一时刻；T_0^{n+1}为下一时刻跑道表面温度预测值；T_0^n为当前时刻跑道表面温度值；T_1^n为跑道深度于h处的温度值；τ为网格划分时间步长。

2.3 联合预测

2.3.1 数据-机理联合预测原理

冰雪天气下，跑道污染物状况和除冰雪作业造成跑道热特征参数频繁跃变，LSTM对非周期性瞬态变化的跑道多参数不能及时响应，使得跑道积冰状况误报率高，严重情况下导致跑道状态评估报告误报[23]。跑道温度联合预测模型能够综合机理模型对外界环境变化瞬时波动性的灵敏性与LSTM预测长期稳定趋势特性。采用最小误差赋权的思想建立基于LSTM的跑道温度数据-机理联合预测模型，该联合模型的预测结构如图6所示。

如图6所示，将机理模型与数据预测模型以加权叠加的方式进行联合，获得联合预测模型输出值。融合过程中，权值系数的确定是整个联合预测模型建立的关键，本文采用最小误差赋权法确定子模型的权值系数，以联合预测模型误差平方最小为优化目标，获取机理模型和数据预测模型的权值系数。

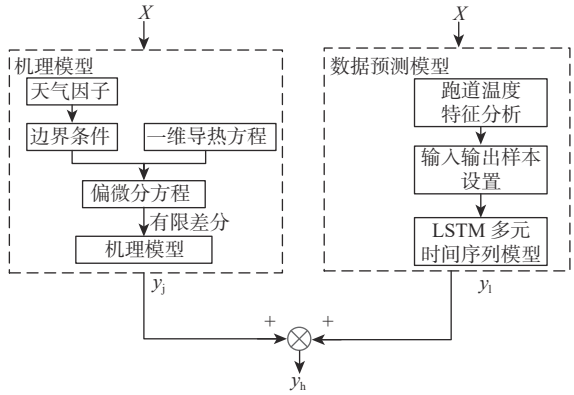


图6 联合预测原理结构框图

Fig. 6 Block diagram of joint prediction principle

2.3.2 最小误差赋权法

设w_j和w_l分别为机理模型和数据预测模型的权值，且$w_j+w_l=1$，则在第t时刻，该联合预测模型的预测误差可以表示为

$$\begin{aligned}e_h&=y_h-y_0=(w_jy_j+w_ly_l)-y_0=\\&(w_jy_j+w_ly_l)-(w_j+w_l)y_0=w_je_j+w_le_l\end{aligned} \tag{17}$$

式中：e_h、e_j和e_l分别为联合预测模型、机理模型和数据预测模型在第t时刻的预测残差；y_h、y_0、y_j和y_l分别为第t时刻的联合预测模型预测值、实际值、机理模型预测值和数据预测模型预测值。

目标函数计算表达式为

$$\begin{cases}\min\sum_{t=1}^{n}e_h^2\\ \text{s.t.}\quad \omega_j+w_l=1\end{cases} \tag{18}$$

式中：n为时间序列长度。

$$w_j=\frac{\sum_{t=1}^{n}\left(e_l^2-e_je_l\right)}{\sum_{t=1}^{n}\left(e_j-e_l\right)^2} \tag{19}$$

$$w_l=\frac{\sum_{t=1}^{n}\left(e_j^2-e_je_l\right)}{\sum_{t=1}^{n}\left(e_j-e_l\right)^2} \tag{20}$$

则联合预测模型预测值为

$$y_h=w_jy_j+w_ly_l \tag{21}$$

3 数据-机理联合预测建模

3.1 数据采集及预处理

3.1.1 数据采集

模拟跑道系统平台包括数据采集端和数据接收端，数据采集端包括水泥混凝土跑道与多个温度传感器。将ARS31Pro跑道温度传感器嵌入水泥跑

道表面测量跑道温度, 将 3 个 PT100 温度传感器分别嵌入跑道下方不同深度, 用于测量跑道下方 10 cm、20 cm、40 cm 深度处的温度。同时, 在跑道周围部署 Vaisala wxt520 气象传感器、路福德 Lufft WS300 气象传感器, 依次用于测量大气温度、风速、大气湿度、大气压强和露点温度。数据接收端负责实时接收跑道温度样本数据。实验数据根据数据采集的时间段, 划分为 1～8 组数据样本。为避免跑道温度与各影响因子之间由于单位和量纲的差别对模型预测准确性产生影响, 采用 mix-max 法对跑道温度相关数据进行归一化处理。

3.1.2　跑道温度聚类结果

对采集的 8 组样本进行层次聚类, 根据最小距离原则获得聚类结果, 如图 7 所示。

根据聚类结果, 将跑道温度划分为 4 类, 如表 2 所示。在每个类别中选取一组样本数据建立 LSTM 预测模型。选取与聚类样本相似的跑道温度作为模型的测试样本, 分析聚类模型对的实际运行特性。

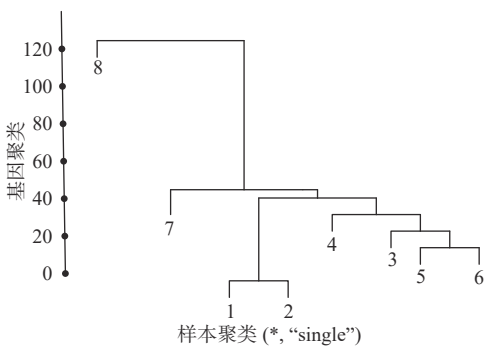


图 7　跑道温度聚类结果

Fig. 7　Clustering result of runway temperature

表 2　冰雪天气下跑道温度样本分类

Table 2　Runway temperature samples classification under ice and snow

类别	样本
Ⅰ	1、2
Ⅱ	3、4、5、6
Ⅲ	7
Ⅳ	8

3.2　数据预测建模

3.2.1　数据预测模型参数设置

LSTM 网络基础参数如表 3 所示。滚动时间窗中, 输入历史时间序列长度与 LSTM 预测模型的预测性能紧密联系[24], 采用实验测试方法选取输入历史时间序列长度。将输入历史时间序列长度分别设置为 1～12, 从图 8 中可见, 当历史时间序列为 6 时, 有最小的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均绝对误差 (mean absolute error, MAE), 因此, 将输入历史时间序列长度设置为 6。

表 3　LSTM 网络参数

Table 3　Parameters of LSTM network

参数	数值
输入层维数	10
隐藏层维数	2
输出层维数	1
每个隐藏层神经元数目	80
初始学习率	0.01
训练批次	64
迭代轮数	10

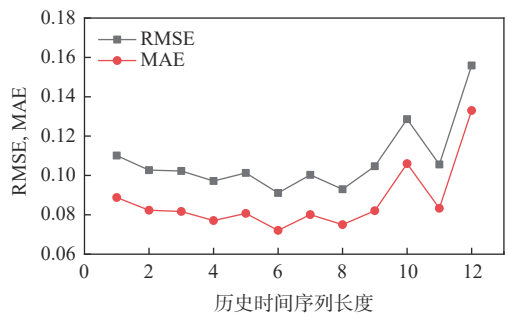


图 8　LSTM 预测模型预测性能结果

Fig. 8　Prediction performance results of LSTM prediction model

3.2.2　数据预测模型参数对比测试

采用样本 1、3、7、8 分别建立跑道温度 LSTM 预测模型和基于 KELM 的预测模型, 2 个模型进行对比测试。4 组样本的预测准确率如图 9 所示。当残差阈值分别为±0.5℃ 和±1℃ 时, LSTM 预测模型均高于 KELM 预测模型或与之持平。如图 9(a) 所示, 当预测时长为 30 min 时, LSTM 的预测准确率为 92.26%, KELM 的预测准确率为 61.77%。图 9(e) 中, 当残差阈值为±1℃ 时, 在 4 个预测时长下, LSTM 预测模型的准确率均高于 KELM 预测模型, 其模型预测准确性达到 99.62%。可见, LSTM 预测模型能充分利用跑道温度的动态时序特征, 不仅考虑主要输入特征变量对跑道温度的影响, 还能捕捉历史数据对当前时刻的数据关系, 使得跑道温度的预测更准确。

3.3　联合预测建模

步骤 1　数据采集。

步骤 2　数据预处理, 构建机理模型和数据预测模型输入样本集, 以及温度真实值样本。

步骤 3　构建数据预测模型, 以及数据预测模型的预测输出值。

步骤 4　构建机理模型, 以及机理模型的预测输出值。

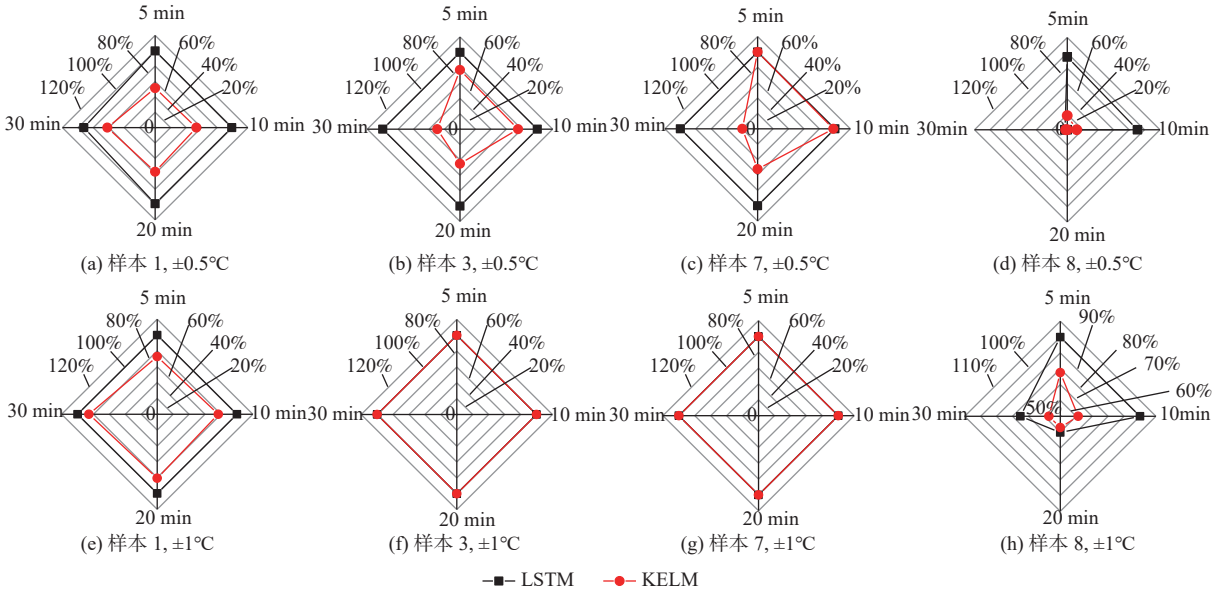


图 9 LSTM 预测模型的预测准确率

Fig. 9 Prediction accuracy of LSTM prediction model

步骤 5 利用最小误差法处理温度真实值、数据预测模型的预测输出值和机理模型的预测输出值，求出 2 种模型的权重数值。

步骤 6 通过权重值大小，构建基于数据-机理联合预测模型。

建模流程如图 10 所示。

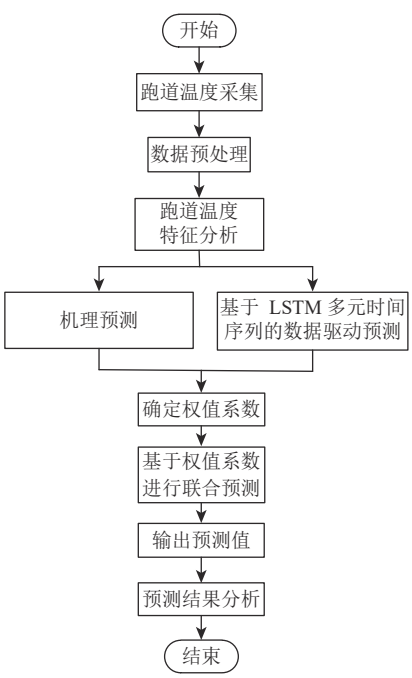


图 10 联合预测流程

Fig. 10 Joint prediction flow

4 仿真实验

4.1 数据预测模型仿真实验

选取类别Ⅰ中未参与训练的样本 2，以及类别Ⅱ中未参与训练与测试的样本 4、5、6，进行预测实验。4 组样本的预测结果如图 11 所示。可见，随着预测时长的增长，模型误差逐渐增加，并且针对跑道温度变化较为平稳的情况，LSTM 预测模型的预测效果较好。当预测时长为 30 min 时，4 组样本的平均误差均在 2.6℃ 内。

4.2 数据-机理联合预测模型仿真实验

由改进机理模型和 LSTM 预测模型分别获得跑道预测温度，根据跑道温度真实值和预测值误差平方和最小的原则，求出不同预测时长的权重值，如表 4 所示。预测时长分别选择 5 min、10 min、20 min 和 30 min，仿真结果如图 12 所示。

当预测时长为 20 min、残差阈值为±0.5℃ 时，联合预测模型的预测准确率为 99.56%；当预测时长为 30 min、残差阈值为±0.5℃ 时，联合预测模型的预测准确率为 99.5%。由仿真结果可以看出，3 种模型的误差随预测时长的增长而增加。其中，机理模型误差累积现象十分明显，如图 12(c)、(d) 所示。对短时温度预测，机理模型可以快速响应跑道温度的瞬态特征，如图 12(a)、(b) 所示。针对预测时长较长、温度变化趋于稳定的情况，LSTM 预测模型能取得较好的预测效果，如图 12(c)、(d) 所示，预测时长为 30 min 时，LSTM 预测模型的预测效果优于机理模型。

如表 5 所示，当预测时长为 20 min、残差阈值为±1℃ 时，联合预测模型的 RMSE 为 0.15，相比于其他 2 种模型，预测结果的 RMSE 减少了 64.8%；当预测时长为 30 min、残差阈值为±1℃ 时，联合预测模型的 RMSE 为 0.21，相比于其他 2 种模型，预测

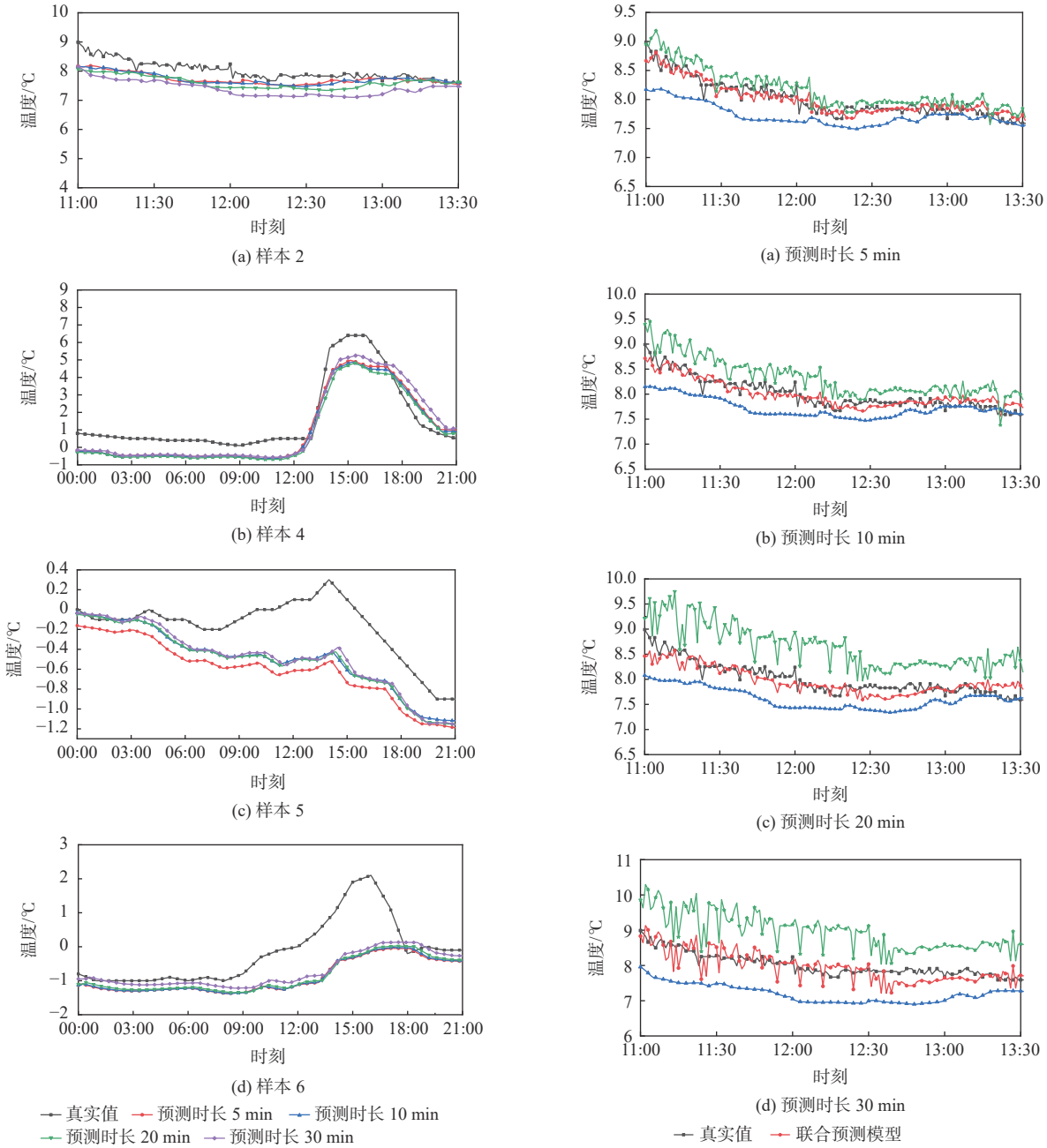


图 11　相似跑道温度预测结果

Fig. 11　Prediction results of similar runway temperature

图 12　联合预测模型预测结果

Fig. 12　Prediction results of joint prediction model

表 4　不同预测时长下的联合预测模型权重

Table 4　Weight of joint prediction model in different prediction time step

预测时长/min	机理模型权重	LSTM预测模型权重
5	0.63	0.37
10	0.55	0.45
20	0.34	0.66
30	0.33	0.67

结果的 RMSE 减少了 70.6%。结果表明, 联合预测模型综合了机理模型与 LSTM 预测模型的优点, 能够对跑道热特性参数瞬变和长期稳定时间序列实现折中, 获得较好的跑道温度短时预测效果。

4.3　对比仿真实验

为检验联合预测模型的实际效果, 与多元回归[10]、BP 神经网络及支持向量机模型进行对比研究。选取样本 2 建立多元回归模型, 选择大气温度、大气湿度、露点温度等气象因子作为多元回归模型、BP 神经网络及支持向量机模型的输入参数, 5 min、10 min、20 min 和 30 min 作为预测时长。4 种模型的预测情况如图 13 所示。

当预测时长为 20 min、残差阈值为±0.5℃ 时, 多元回归模型、BP 神经网络和支持向量机模型的

表5 不同模型预测值的RMSE

Table 5 RMSE of different model predictions

模型	预测时长/min	RMSE
机理模型	5	0.023
	10	0.32
	20	0.64
	30	1.02
LSTM预测模型	5	0.057
	10	0.064
	20	0.32
	30	0.55
联合预测模型	5	0.002
	10	0.037
	20	0.15
	30	0.21

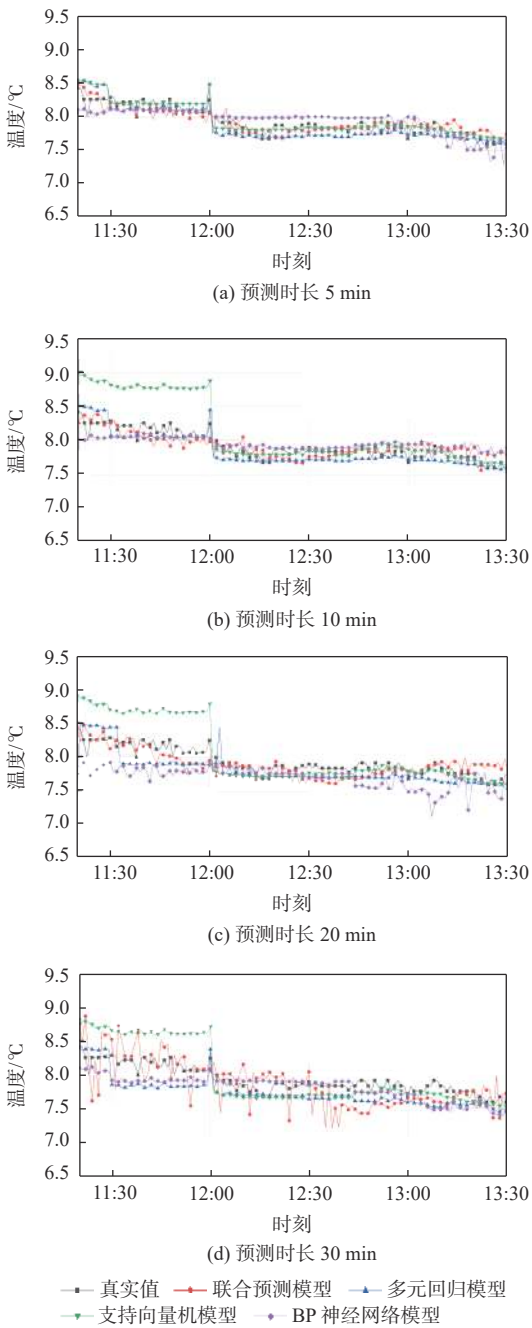


图13 多元回归模型预测结果

Fig. 13 Prediction results of multiple regression model

预测准确率分别为88.08%、88.08%和60.93%，均低于联合预测模型99.34%的准确率。预测时长增加时，4种模型预测指标都有所变化，但联合预测模型指标均优于其他3种模型，平均提高了26.11%。当残差阈值为±0.5℃时，4种模型横向对比的平方根误差与准确率如表6所示。

表6 多元模型预测值的RMSE

Table 6 RMSE of multivariate model predictions

模型	预测时长/min	RMSE	准确率/%
多元回归模型	5	0.044 7	86.75
	10	0.580 6	87.42
	20	0.980 7	88.08
	30	1.04	88.08
BP神经网络	5	0.069 9	88.08
	10	0.072 5	88.74
	20	0.130 3	88.08
	30	0.11	87.42
支持向量机模型	5	0.018	71.52
	10	0.224 3	60.93
	20	0.254 9	60.93
	30	0.387 2	60.26
联合预测模型	5	0.002	100
	10	0.037	100
	20	0.15	99.34
	30	0.21	99.34

5 结 论

1）采用MIC相关性分析法提取跑道温度的强相关因素作为预测模型输入特征变量，降低了输入空间维度。提出采用DTW方法将跑道温度实测数据聚类划分，分别建立针对不同聚类的跑道温度LSTM预测模型。预测结果显示，当预测时长为20 min、残差阈值为1℃时，LSTM预测模型的预测准确率可以达到99.62%。

2）针对跑道除冰作业引起的跑道热特性参数频繁跃变和跑道温度呈周期性缓慢变化的特性，利用最小误差赋权法的思想，提出基于LSTM的跑道温度数据-机理联合预测模型。当预测时长为20 min、残差阈值为±0.5℃时，联合预测模型的预测准确度为99.56%。相较于机理模型和LSTM预测模型，联合预测模型均方根误差值减少了70.6%。

3）横向对比仿真结果显示，当预测时长为20 min、残差阈值为±0.5℃时，联合预测模型的预测准确率为99.34%，优于多元回归模型、BP神经网络和支持向量机模型，平均准确率提高了26.11%。

参考文献（References）

[1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社,

2005: 51-95.
SUN L J. Theory of structural behavior of asphalt pavement[M]. Beijing: People's Traffic Publishing House, 2005: 51-95(in Chinese).

[2] NUIJTEN A D. Runway temperature prediction, a case study for Oslo Airport, Norway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 125: 72-84.

[3] NUIJTEN A D, HØYLAND K V. Modelling the thermal conductivity of a melting snow layer on a heated pavement[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 140: 20-29.

[4] HERMANSSON Å. Mathematical model for calculation of pavement temperatures: Comparison of calculated and measured temperatures[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1764(1): 180-188.

[5] HERMANSSON Å. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1699(1): 134-141.

[6] HO C H, ROMERO P. Low design temperatures of asphalt pavements in dry-freeze regions: Predicting by means of solar radiation, transient heat transfer, and finite element method[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2127(1): 60-71.

[7] 张丽娟, 黄建武, 许薛军. 基于拉普拉斯变换的路面一维时变温度场预测[J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2017, 45(11): 10-16.
ZHANG L J, HUANG J W, XU X J. Prediction of time-dependent one-dimension temperature field of pavement on the basis of Laplace transform[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(11): 10-16(in Chinese).

[8] 陈斌, 刘悦, 李庆真, 等. 冰雪天气下基于 MFOA-KELM 残差修正的跑道温度混合预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(11): 2153-2164.
CHEN B, LIU Y, LI Q Z, et al. Runway temperature hybrid prediction based on MFOA-KELM residual correction under ice and snow[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(11): 2153-2164(in Chinese).

[9] 孙立军, 秦健. 沥青路面温度场的预估模型[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2006, 34(4): 480-483.
SUN L J, QIN J. Prediction model on temperature field in asphalt pavement[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(4): 480-483(in Chinese).

[10] NANTASAI B, NASSIRI S. Winter temperature prediction for near-surface depth of pervious concrete pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(7): 820-829.

[11] LIU B, YAN S, YOU H L, et al. Road surface temperature prediction based on gradient extreme learning machine boosting[J]. Computers in Industry, 2018, 99: 294-302.

[12] 邱欣, 洪皓珏, 杨青, 等. 基于 APRIORI-GBDT 算法的沥青路面路表温度预测[J]. 公路交通科技, 2019, 36(5): 1-10.
QIU X, HONG H J, YANG Q, et al. Prediction of temperature of asphalt pavement surface based on APRIORI-GBDT algorithm[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(5): 1-10(in Chinese).

[13] 魏鑫. 基于时间序列机场跑道温度预测模型[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
WEI X. Temperature prediction model based on time series for airport runway[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012(in Chinese).

[14] 汤筠筠, 郭忠印. 基于自回归求和移动平均的冬季路温短临预测[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2017, 45(12): 1824-1829.
TANG J J, GUO Z Y. Pavement temperature short-impending prediction based on ARIMA in winter[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(12): 1824-1829(in Chinese).

[15] YU M, XU F, HU W, et al. Using long short-term memory (LSTM) and Internet of things (IoT) for localized surface temperature forecasting in an urban environment[J]. IEEE Access, 2021, 9: 137406-137418.

[16] FANG Z, CRIMIER N, SCANU L, et al. Multi-zone indoor temperature prediction with LSTM-based sequence to sequence model[J]. Energy and Buildings, 2021, 245: 111053.

[17] LIU J, ZHANG T, HAN G J, et al. TD-LSTM: Temporal dependence-based LSTM networks for marine temperature prediction[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3797.

[18] 颜弋凡, 安路达, 吕志民. 基于最大互信息系数属性选择的冷轧产品机械性能预测[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2020, 51(1): 68-75.
YAN Y F, AN L D, LÜ Z M. Prediction of mechanical properties of cold rolled products based on maximal information coefficient attribute selection[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(1): 68-75(in Chinese).

[19] 李正欣, 刘畅, 吴诗辉, 等. 特征点分段提取的时间序列模式匹配方法[J]. 北京航空航天大学学报 2023, 49(7): 1593-1599.
LI Z X, LIU C, W S H, et al. A time series matching method for feature point segmentation extraction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautic, 2023, 49(7): 1593-1599(in Chinese).

[20] ALAEE S, MERCER R, KAMGAR K, et al. Time series motifs discovery under DTW allows more robust discovery of conserved structure[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2021, 35(3): 863-910.

[21] 张慧. 深度学习中优化算法的研究与改进[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
ZHANG H. Research and improvement of optimization algorithms in deep learning [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018(in Chinese).

[22] 顾尔祚. 流体力学中的有限差分法基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988.
GU E Z. Fundamentals of finite difference method in fluid mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1988(in Chinese).

[23] 中国民用航空局. 运输机场跑道表面状况评估程序[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
Civil Aviation Administration of China. Runway surface condition of transport airport assessment procedure[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022(in Chinese).

[24] 王志刚, 王业光, 杨宁, 等. 基于 LSTM 的飞行数据挖掘模型构建方法[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 525800.
WANG Z G, WANG Y G, YANG N, et al. Construction method of flight data mining model based on LSTM[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 525800(in Chinese).

Runway temperature data mechanism joint prediction based on LSTM under ice and snow

CHEN Bin[1, 2, *], LIU Yue[1, 2], YIN Kailang[1, 2], FANG Xun[1, 2]

(1. School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Department of Aviation Ground Special Equipment, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Runway temperature is an important factor in runway icing. Fully considering the transient characteristics of the temperature mechanism model and the time sequence of temperature multivariate time series data, the paper has developed a joint model based on the long short term memory (LSTM) neural network and temperature mechanism model. Firstly, the influencing elements with a greater correlation with runway temperature were selected by the study using the maximum information coefficient approach to serve as the model's input. Secondly, the paper uses the dynamic time warping method to cluster temperature data under different snowfall conditions, and then develops an LSTM model adapted to different snowfall or icing situations. Finally, to solve the disadvantage of LSTM which can not be characterized by the runway parameters that change irregularly and frequently, the paper developed a joint model based on the LSTM neural network and temperature mechanism model by using the minimum error method. The joint model's degree of accuracy is 99.34%, which is superior than both the data model and the mechanism model, when the prediction time step is 20 minutes and the residual threshold is ±0.5°C, according to the simulation's result based on the ice and snowfall weather condition data. With the same condition, the joint model has better accuracy than the BP model, the regression model and the support vector machine model. Average accuracy increased by 26.11%. It proved the joint model based on the LSTM neural network and temperature mechanism model has better accuracy according to the transient characteristics of the mechanism model and the periodic time sequence of the multivariate time series of pavement temperature.

Keywords: runway temperature; snowy and icy weather; predict; long short term memory neural network; dynamic time warping

Received: 2022-07-05; **Accepted**: 2022-09-25; **Published Online**: 2022-10-09 15:26
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221009.0933.005
* **Corresponding author**. E-mail: chenbindavid@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0592

一种自动实时的物联网在野漏洞攻击检测方法

何清林[1,2]，王丽宏[2,*]，陈艳姣[3]，王星[4]

(1. 国家互联网应急中心，北京 102299；2. 北京航空航天大学 计算机学院，北京 100191；3. 浙江大学 电气工程学院，杭州 310007；4. 西北工业大学 网络空间安全学院，西安 710072)

摘 要：与互联网相连的海量物联网（IoT）设备容易被黑客攻击和利用，进而造成关键IoT应用的瘫痪。漏洞利用是一种常用的针对IoT设备的攻击方式，然而由于在野的漏洞利用形式多样、变异性和伪装性强，如何快速自动识别针对IoT设备的在野漏洞攻击极具挑战。为此，提出一种基于混合深度学习判别和开源情报关联的IoT漏洞攻击检测方法，所提检测方法可以实时判别网络流量中的IoT在野漏洞攻击行为，并且能够精准识别漏洞攻击行为的具体类别。实验结果表明：所提检测方法在大规模数据集上的判别准确率超过99.99%。所提检测方法在真实场景中应用效果显著，在不到1个月时间内发现了13种新的在野漏洞攻击。

关 键 词：物联网；在野漏洞利用；攻击检测；混合深度学习；开源情报

中图分类号：TP393.4; TP312

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2195-11

与传统设备相比，物联网(internet of things, IoT)设备更容易成为攻击的目标，主要有以下原因：①IoT设备如摄像头、小型网关路由器等，由于成本限制很少考虑安全防护功能，导致其设备存在大量漏洞，根据绿盟科技发布的《物联网2020年安全年报》[1]显示，网络空间中每天发现的针对各类IoT设备的漏洞攻击次数达数亿次之多；②互联网上存在大量IoT开源漏洞信息平台，如通用漏洞披露（common vulnerabilities and exposures, CVE）[2]、Exploits-DB[3]和Packet-Storm[4]等，这些信息很容易被黑客利用，迅速集成到攻击工具和恶意样本中，增加IoT设备遭受攻击的风险。

攻击者大量使用漏洞攻击方式，远程入侵IoT设备，进一步获取设备控制权限、植入木马或窃取敏感信息等。如何及时发现和精准识别各类IoT设备的漏洞攻击行为，成为IoT安全研究的一个迫切问题。传统的检测方法主要依靠专家知识，根据不同的漏洞攻击详细信息，人工提炼形成snort[5]或yara[6]等恶意行为检测规则，部署到各类流量入侵检测设备中。这种方法对已知漏洞的识别准确率高，但是无法应对快速变异的漏洞攻击方式，具有一定的滞后性。因此，急需一种不依赖专家人工经验的漏洞攻击检测方法，能够实时、自动识别网络流量中的漏洞攻击行为，并且能够精准定位漏洞攻击的具体类别。

为解决该问题，本文提出一种基于混合深度学习判别和开源情报关联的IoT漏洞攻击检测方法，该方法设计了一种新的基于混合深度学习的判定算法，并融合了开源情报提取关联技术，能够从实时的网络流量中自动识别和精准定位各种针对IoT设备的在野漏洞攻击行为。本文的主要贡献如下：

1）标注了一套面向IoT漏洞攻击检测的报文数据集。对常见的在野IoT漏洞网络攻击行为模式进行系统性梳理，通过人工标记形成通用的检测规则，基于该检测规则从真实的网络流量中萃取疑

收稿日期：2022-07-05；录用日期：2022-09-02；网络出版时间：2023-03-29 13:00
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230329.1041.004
*通信作者. E-mail：hql@cert.org.cn

引用格式：何清林，王丽宏，陈艳姣，等. 一种自动实时的物联网在野漏洞攻击检测方法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2195-2205. HE Q L，WANG L H，CHEN Y J，et al. An automatic and real-time detection method of IoT in-the-wild vulnerability attack[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2195-2205 (in Chinese).

似攻击报文，并通过专家经验验证将这些报文标记为正样本（真正的漏洞攻击报文）和负样本（正常非恶意报文）。该数据集包括 5×10^5 条攻击报文和 4×10^6 条正常报文。

2）针对漏洞攻击自动识别难题，提出了基于深度自注意力变换网络和卷积神经网络（convolutional neural networks, CNN）的混合深度学习模型。该模型将疑似攻击报文输入 Transformer 网络进行语义学习和表征，再将关键表征结果输入 CNN 模型进行分类。该模型在测试数据集上的 F_1 值达到了 99.98%，证明其可以有效自动判别实时输入的疑似攻击报文是否真正的漏洞攻击报文。

3）针对漏洞攻击精准定位难题，提出基于攻击向量回归的开源漏洞情报关联方法。对 Exploits-DB[3] 等 10 个主流开源漏洞情报平台的信息进行了实时提取和分析，并与贡献 2 中本文学习模型自动判别出来的漏洞进行自动关联，实现了对漏洞攻击类别的精准定位。

4）基于本文检测方法研发了一套 IoT 漏洞实时检测系统 IoT_Exploits_Founder，并在真实环境中进行了部署，系统运行效果显著。在一个月内，IoT_Exploits_Founder 系统从流量中实时检测和精准定位出了 13 类新的 IoT 在野漏洞攻击方式，识别出数万个漏洞攻击报文。整个检测过程不依赖于领域专家的人工参与，以自动实时的方式输出结果，为解决 IoT 漏洞入侵检测问题提供了新的有效手段和工具。

1 攻击检测相关工作

IoT 在野漏洞攻击检测本质上属于一种网络入侵检测，即从网络流量中检测出针对 IoT 的漏洞攻击流量，而针对网络入侵检测的研究历史可以追溯到 20 世纪 90 年代。1999 年知识发现与数据挖掘（knowledge discovery and data mining, KDD）会议发布了网络入侵检测领域的标准数据集 KDD99[7]，其覆盖了 Probe、DoS、R2L、U2R 和 Data5 大类 58 种典型的网络攻击方式，是目前引用率较高的入侵检测数据集。该数据集的发布开启了基于异常的网络入侵检测研究时代，与传统的基于已知规则的入侵检测技术相比，基于异常的入侵检测不需要人工规则，可实现自动的网络恶意入侵行为检测。

早期的基于异常的入侵检测研究[8-12] 主要集中在如何提取流量的关键特征，如统计行为特征和传输控制协议特征等，将特征进行向量化表征后采用传统机器学习方法，如层次聚类、支持向量机（support vector machine, SVM）和朴素贝叶斯等方法，进行入侵检测行为判定。Khan 等[11] 提出了将 SVM 和层次聚类相结合的网络流量入侵异常行为检测，采用动态生长的自组织树（dynamical growing self-organizing tree, DGSOT）算法实现更有效的聚类，这在处理大数据集时非常有效。

随着移动互联网和 IoT 技术的发展，网络流量变得更为丰富多样，网络入侵行为也变得更为复杂，文献 [13-14] 对基于异常的入侵检测方法的局限性进行了总结，指出了其中存在的数据集缺乏、不平衡分类、效果难以评估等问题。入侵检测研究开始由通用场景转向针对特定场景的异常行为检测研究，如恶意统一资源地址（uniform resource locator, URL）检测、恶意木马流量检测和恶意超文本传输协议（hypertext transfer protocol, HTTP）流量检测等[15-19]。在这些研究中，除了流量本身的特征外，还会利用更多外部关联的信息，如域名查询信息和网络地址信息等，在特征提取和表征方面，也用到了主动学习、深度学习和混合模型等方法。文献 [18] 使用 CNN 与多层感知机结合的混合结构深度神经网络，分别处理文本与统计信息，从而检测恶意 HTTP 流量，并标注了一套基于 HTTP 的流量数据集，包含 4.5×10^5 条以上恶意流量和 2×10^8 条以上非恶意流量。

近年来，针对 IoT 的入侵检测，开始成为一个研究热点。Thamilarasu 和 Chawla[20] 提出了一个实时处理 IoT 交通数据的集中系统，该系统首先用无监督方式训练深度置信网络（deep belief networks, DBN），然后，使用节点神经元构建标记数据，用来训练深度神经网络（deep neural networks, DNN），从而缩短模型的整体训练时间，该系统在包含 5 类攻击流量和正常流量的模拟合成数据集上的 F_1 得分为 99%。Al-Hawawreh[21] 等提出了一种基于自动编码器和前馈神经网络的工业 IoT 入侵检测模型，通过 TCP/IP 数据包进行可疑活动检测和分类，在标注数据集上该系统的准确率分别为 98.6% 和 92.4%。文献 [22] 针对 IoT 交通数据中存在的入侵检测问题，提出了一种分层半监督训练方法，该方法利用训练过程中的顺序特征，并在公开数据集中进行了实证评估。文献 [23] 对基于深度学习的 IoT 入侵检测方法进行了综述，指出 IoT 是技术和工程的下一个前沿领域，网络安全是 IoT 面临的主要挑战，而深度学习可能是解决该问题的最佳解决方案。

深度学习在各领域的快速发展和成功应用为解决 IoT 入侵检测问题指出了一个新的方向。但是该研究领域仍面临标准数据集缺乏、入侵场景复杂多变等问题，目前仅有 KDD99[7]、ISCX 2012[8] 和

CIDDS-001[9] 等少数可用验证检测方法有效性的标准数据集, 很多研究工作仍使用模拟数据进行验证, 已有网络入侵检测研究工作仅进行恶意行为和正常行为的二元判别, 不能对恶意行为的具体类别进行判定。针对这些问题, 本文从实际场景出发, 通过对真实 IoT 漏洞攻击进行人工标记的办法, 形成了一套面向 IoT 漏洞攻击检测的报文数据集, 为业界和学术界验证相关方法提供了标准数据集, 进一步基于本文开源漏洞情报关联方法, 实现了漏洞攻击类型的精准定位。

2　检测方法概述

2.1　物联网设备漏洞攻击现状分析

漏洞攻击是一种利用设备软硬件存在的缺陷发起的网络入侵行为, 其主要目标是获得设备控制权限、植入样本、窃取数据等。漏洞攻击已成为网络入侵的主要攻击手法。与传统网络设备相比, IoT 设备更容易成为漏洞攻击的目标, 其原因主要有 2 点。首先, IoT 设备大量采用各种开源组件和服务, 本身存在大量的漏洞; 其次, IoT 设备一般都是规模化部署, 具有同类型漏洞的设备在互联网上大量存在, 因而很容易成为各类黑产人员的目标。

例如, 针对 NetLink GPon 设备的漏洞, 2020 年 3 月 18 日在 Exploits-DB[3] 平台上披露, 2020 年 3 月 19 日已由黑客组织集成到 Gafgyt 僵尸网络工具中; 针对路由器组件的 CVE-2021-20 090 漏洞[24], 2021 年 8 月 3 日由 Tenable 公司安全研究员首次披露, 2021 年 8 月 14 日已由黑客组织集成到 Mirai 僵尸网络工具中, 如图 1 所示。从上述案例可以看出, 漏洞信息披露时间和漏洞被大规模利用时间之差越来越短。根据公开发布的报告显示, 有漏洞的设备一旦被部署到互联网上, 其平均被攻陷的时间已经从以天为单位缩短到以小时为单位。

随着网络攻击对抗的日趋激烈, 时效性和准确性成为 IoT 设备漏洞攻击检测方法的关键技术指标。而传统的依靠专家经验进行人工分析和总结提炼规则进行识别的检测方法已经无法满足实际防御场景的需求。

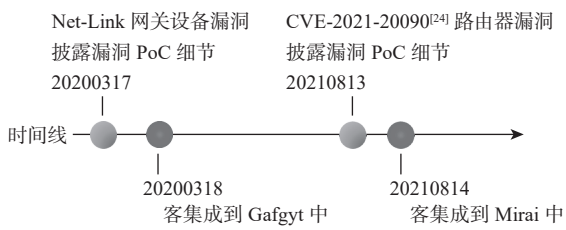


图 1　IoT 漏洞信息披露和在野利用发现

Fig. 1　IoT vulnerability information disclosure and inofficial exploits discovery

在漏洞攻击中, 攻击行为从发现到解决一般有 3 个关键的时间节点, 分别是: ①漏洞攻击行为第 1 次被人发现的时刻 T_0; ②漏洞攻击的细节被公开披露的时刻 T_1; ③漏洞被厂商修复的时刻 T_2。若漏洞攻击发生在 T_0 到 T_1 时刻之间, 则将该攻击行为称之为 0Day 漏洞攻击, 这个时候在网络上还没有任何关于此漏洞的公开信息; 若漏洞攻击发生在 T_1 和 T_2 时刻之间, 则称为 1Day 漏洞攻击; 若漏洞攻击发生在 T_2 时刻之后, 则称为 NDay 漏洞攻击。

本文主要解决如何从海量的网络流量中自动和实时识别各类 1Day 和 NDay 漏洞攻击问题。而 0Day 漏洞攻击则无法通过系统自动进行识别, 需要领域专家对漏洞进行人工验证和复现等一系列复杂的步骤。

2.2　本文检测方法框架

本文检测方法能够从大规模网络流量中检测并识别各类针对 IoT 设备的漏洞攻击行为。该方法融合了深度混合学习模型和开源情报提取关联技术, 在不依赖安全专家领域知识的条件下, 可以准确快速识别漏洞攻击。

本文检测方法主要由以下 3 个部分组成: 报文预处理、混合深度学习判定和开源情报关联, 如图 2 所示。

1) 报文预处理。根据某骨干网络真实流量测算, IoT 漏洞利用攻击报文在实际互联网流量中占比极低(小于 0.01%), 漏洞攻击检测是一个极端的不平衡分类学习问题。如果直接将原始未经处理的网络流量数据输入学习模型进行分类, 将会造成很高的漏报率。首先, 详细梳理 IoT 漏洞攻击常用范式并形成一套通用检测规则; 其次, 基于该检测规则从海量流量中萃取疑似漏洞攻击报文, 以疑似报文作为输入, 解决不平衡分类问题; 最后, 对疑似报文的格式与内容进行预处理, 以满足下一步学习任务和关联任务的需求。

2) 混合深度学习判定。传统基于一般特征提取和简单机器学习模型的检测方法, 无法准确提取漏洞攻击报文的关键特征, 无法有效学习攻击特征随时间不停变换的特性。因此, 本文提出了基于深度自注意力变换网络和 CNN 网络的混合深度学习模型, 该模型根据注意力机制提取报文的关键表征信息, 在此基础上实现快速自动的攻击报文识别。在本文模型训练阶段, 使用包含 4×10^6 个正常报文和 5×10^5 个 IoT 漏洞攻击报文的训练数据集进行训练; 在模型判定阶段, 将经过数据预处理后的疑似攻击报文输入该模型中, 来预测该报文是否是真正的漏洞攻击报文; 在模型更新阶段, 将后续正确识别出的新的漏洞攻击报文补充到训练数据集中, 使

用离线的方式来更新训练本文模型。

3)开源情报关联。经过前面判定后的疑似攻击报文,虽然能够明确是一种IoT漏洞攻击行为,但无法定位出具体的漏洞类型,因此,需要使用开源威胁情报辅助漏洞攻击的精准识别。本文跟踪了10个主流开源漏洞平台,这些平台基本覆盖了所有已公开的漏洞概念验证(proof of concept, PoC)信息,通过实时抓取这些平台上的漏洞PoC信息,对其进行范式处理后,与判定为正的攻击报文进行回归关联。若关联成功则确定为1Day或Nday漏洞攻击;否则可能是疑似0Day攻击,需要进一步的人工分析和确认。

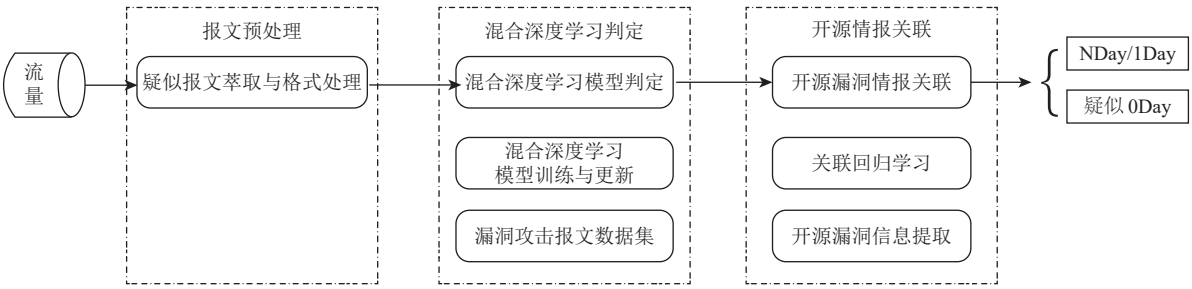


图2 本文检测方法框架

Fig. 2 Framework of the proposed detection method

综上,本文实现了一个端到端的IoT漏洞攻击识别方法,能够自动从背景流量中检测、识别和判定各种针对物联网的漏洞攻击行为,并能进一步精确地识别1Day/NDay漏洞攻击的具体类型,以及发现疑似0Day攻击行为。该方法同时加强了漏洞攻击识别的时效性和准确性,而且不依赖于人工专家经验的干预。最后,根据本文检测方法实现了一套IoT漏洞攻击识别系统IoT_Exploits_Founder,并且在真实环境中实际运转1个月,发现了13种新的在野漏洞攻击,识别效果显著。

3 数据预处理

3.1 攻击报文萃取

本文要从实时的网络流量中检测IoT漏洞攻击报文,然而在真实的网络流量中,真正的IoT漏洞攻击报文所占的比例极少。如果直接从流量中通过学习算法训练和判定哪些是真正的漏洞攻击报文,将是一个极端不平衡的学习分类问题,在实际场景中无法实现。因此,需要先进行数据预处理,将所有可疑的IoT漏洞攻击报文从流量萃取出来;然后,再利用学习算法训练和判定,将极端不平衡学习分类问题转换成一个普通的学习分类问题。经过数据预处理后,大量的正常报文将从流量中被剔除出去,留下的是疑似攻击报文。作为正例的漏洞攻击报文和作为负例的正常报文,其比例在预处理之前低于$1/10^5$,经过预处理后,变为1/10,这极大地缓解了数据集的不平衡问题。

首先,本文对大量已知IoT漏洞攻击报文的格式类型进行梳理,发现标准HTTP请求是目前已知IoT漏洞攻击类型的唯一格式,通过向IoT设备发起精心构造的HTTP请求报文,达到控制和利用设备的目的,对可疑攻击报文萃取时本文仅仅针对标准HTTP格式的报文进行萃取。其次,对各类IoT漏洞攻击报文的恶意行为分析后发现,针对不同IoT设备的漏洞攻击行为,一般都具有通用的恶意行为特征和范式:①大部分有远程命令执行、恶意样本植入、行为隐藏等恶意行为,而这些通用的恶意行为特征,都会在漏洞攻击的流量报文中出现;②这些具有漏洞的IoT设备操作系统,大部分基于linux kernal系统。因此,这些通用的恶意行为具有相同的范式,比如“wget xxx; ./xxx; rm xxx”就是一种典型的漏洞攻击行为,包括了样本植入下载、样本执行和痕迹删除等操作。最后,本文整理总结出整套通用的IoT漏洞利用行为特征规则,可以从大规模网络流量中萃取出所有可疑的IoT漏洞攻击报文,大大减少了漏洞攻击识别的范围。但预处理后的报文误报率仍然太高,且无法精准定位漏洞攻击的类别,因此,需要进行深度学习判定和开源情报关联。

3.2 报文预处理

经过萃取后的可疑漏洞攻击报文,还需要进行进一步的报文格式预处理。首先,对报文的字符集进行处理,将报文中出现的各种转义字符和计算机编码后的字符进行统一的转换处理,转换成标准可见字符集形式的文本信息;其次,对报文的格式进行处理,本文中的攻击报文仅限于标准的HTTP格式报文,一般具有如图3所示的格式。

请求行。在目前已知的漏洞攻击报文中,请求方法有HTTP GET和HTTP POST这2类。URL代表被攻击设备的访问路径,其标记了设备上的程序或组件的访问入口,是漏洞攻击中最关键的字段之

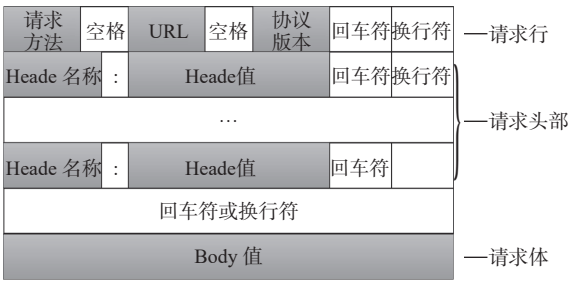


图 3　HTTP 请求报文典型格式

Fig. 3　Typical format of HTTP request messages

CVE_2021_20090
POST/images/../apply_abstract.cgi HTTP/1.1
Connection: keep-alive
User-Agent: Dark
action=start_ping&submit_button=ping.html&action_params=blink_time=5&ARC_ping_ipaddress=212.192.241.7%0AARC_SYS_TelnetdEnable=1&%0AARC_SYS_=cd+/tmp;wget xxxx;curl-O xxx;chmod+777+lolol.sh;sh + lolol.sh&ARC_ping_status=0&TMP_Ping_Type=4

CVE_2020_13872
GET/portal/_ajax_explorer.sgi?action=umnt&path=path&where=here&en=;cd+/tmp+rm +−rf+*;wget+1.1.1.1;chmod+777+fetch.sh;sh+fetch.sh;HTTP/1.1
Connection: keep-alive
Accept-Encoding: gzip, deflate
Accept:∧
User-Agent: Mozilla/5.0 (X11; Linux x86_64; rv:60.0) Gecko/20100101 Firefox/60.0

图 4　2 个 IoT 漏洞攻击的报文示例

Fig. 4　Request message examples of two IoT exploits

一。如果请求方法是 HTTP GET, 则 URL 中可以带参数, 因此, 很多漏洞攻击会选择 URL 里的参数入口, 如图 3 中的 CVE_2020_13872 漏洞攻击, 就利用了 URL 的参数调用植入了恶意命令; 如果请求方法是 HTTP POST, 则 URL 中一般不带参数。在对漏洞攻击报文进行预处理时, 先提取出 URL, 再对一些可变的参数值进行统一处理。

请求头部。正常的 HTTP 请求, 一般由浏览器发出, 其请求头部及属性值一般也是由浏览器自动填入; 而漏洞攻击报文, 则一般是由攻击者通过编写攻击程序构造并发送, 其攻击报文中的请求头部值也是由攻击者填写。常见的请求头部类别一般不超过 10 个, 而且大部分都与具体漏洞利用关联性很小。因此, 本文在做数据预处理时, 便将大部分的请求头部字段直接丢弃。值得注意的是, 有一些攻击者在填充请求头部信息时, 会加入一些特殊字符串, 如图 4 中的 CVE_2021_20090 漏洞攻击中, 攻击者在“User-Agent”填入了特殊的“Dark”字符信息, 这些信息可以用于追踪和定位攻击者信息。

请求体。该部分是 HTTP 报文的主要内容, 大部分漏洞攻击的命令都会在 Body 植入, 如图 4 所示: CVE_2021_20090 漏洞攻击的命令植入请求体中, 请求体的内容直接被提取出来, 没有其他的预处理步骤。

报文预处理这一步的主要任务是将报文中的请求方法、处理后的 URL 字段、部分请求头部字段及请求体字段分别提取出来, 直接进行拼接后, 得到可疑的攻击报文文本 X, 作为后续学习判定和关联识别的输入。

4　混合深度学习检测判定

4.1　漏洞攻击报文数据集介绍

本文中的 IoT 漏洞攻击数据集, 全部是从某互联网出入口捕获的真实报文, 报文的捕获时间为 2021 年 4 月～10 月, 均为标准的 HTTP 格式报文, 且都经过了第 3 节的数据预处理操作, 其中包含正例样本和负例样本。

正例样本。总数为 5×10^5 个不同的 HTTP 报文, 是通过专家编写的 yara 格式的漏洞攻击检测规则, 从网络流量中检测和标记的真实 IoT 漏洞攻击报文, 覆盖了 197 种 IoT 漏洞攻击行为, 表 1 列出了最近 3 年的部分在野利用 IoT 漏洞类别。这些漏洞均为远程命令注入、命令执行等能够控制设备的高

表 1　最近 3 年部分在野利用 IoT 漏洞示例

Table 1　Some inofficial IoT exploit examples in past three years

CVE编号	漏洞名称	针对设备
CVE_2021_33544	UDP_Technology_Geutebruck_IP_Cameras_Command_Injection	IP摄像头
CVE_2021_33514	HTTP_Router_NetgearGC108P	Netgear路由器
CVE_2021_31755	Tenda_AC11_Router_Stack_Buffer_Overflow_Vulnerability	腾达路由器
CVE_2021_28799on	QNAP_NAS_Hybrid_Backup_Sync_Command_Injecti	QNAP NAS设备
CVE_2021_20090	Arcadyan_Buffalo_Routers_Configuration_File_Injection	Buffalo组件的路由器
CVE_2021_1497	Cisco_HyperFlex_HX_Data_Platform_Command_Execution	Cisco管理平台
CVE_2020_9054_	Zyxel_NAS_RCE_Attempt_Inbound	Zyxel NAS设备
CVE_2020_8949	Gocloud_Router_Remote_Code_Execution	Gocloud路由器
CVE_2020_8515	DrayTek_Vigor_RCE	Vigor路由器
CVE_2020_35713	Linksys_RE6500_1_0_11_001_Remote_Code_Execution	Linksys路由器
CVE_2020_35576	TpLink_TLWR841N_Command_Injection	Tplink路由器
CVE_2020_17456	Seowon_Route	Seowon路由器
CVE_2020_13872	DLink_DIR_865L_Ax120B01_Command_Injection	Dlink路由器
CVE_2020_10987	Tenda_AC15_AC1900_goform_setUsbUnload_RCE	腾达路由器

危类型漏洞，漏洞覆盖的设备类型主要为各种路由器设备、摄像头设备，及相关设备的通用组件等，其中含有CVE编号的漏洞有117类，剩下的80类漏洞均在Exploits-DB[3]网站上有披露，其完整漏洞类别信息已经发布到GitHub网站[25]。

负例样本。总数为4×10^6个不同的HTTP报文，先通过流量萃取规则从网络流量中筛选出可疑漏洞攻击报文，再通过白名单机制将疑似攻击报文中的正常报文标记出来，作为数据集中的负例样本。

4.2 混合深度学习模型

文献[26]综合比较了目前各种分类任务中用到的分类学习模型，总结出表现最为优异的3个分类学习模型分别是CNN[27]、Transformer[28]和多层感知器(multilayer perceptron, MLP)模型，本文模型是一个Bert(bidirectional encoder representation from transformers)[29]和CNN[27]的混合深度学习模型，如图5所示，该模型用于对漏洞攻击报文的分类实验，其中，C为文本的上下文信息，T为文本的单个元素信息。

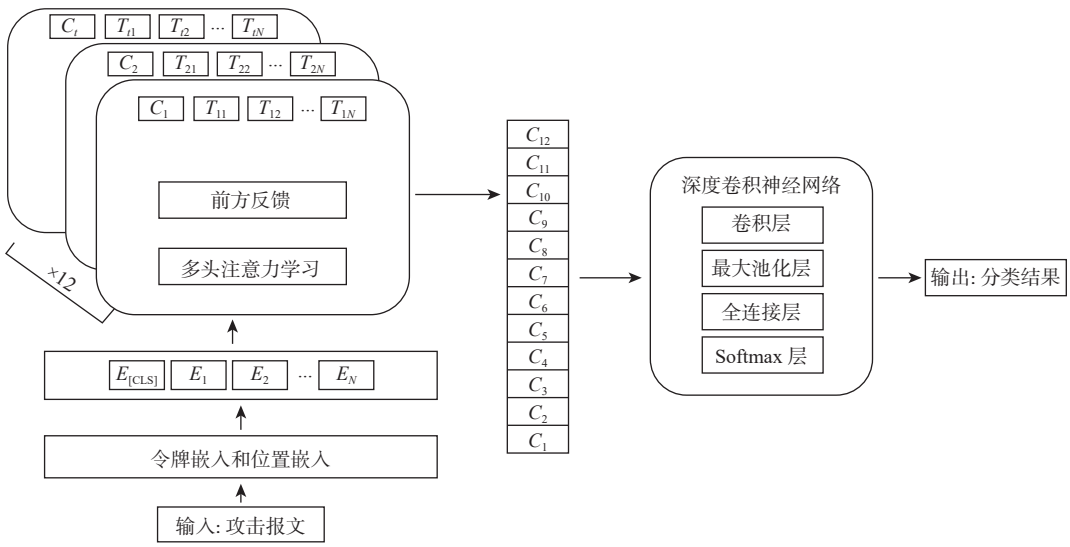


图5 本文模型结构

Fig. 5 Structure of the proposed model

Google团队于2017年提出了Transformer[28]模型，该模型与传统深度学习模型CNN[27]不同，其直接采用了注意力机制处理文本，避免了在文本摘要编码过程中按照一定顺序生成向量，因此，该模型有更强的并行计算能力。2018年，Google团队在Transformer[28]模型的基础上提出了Bert[29]模型，采用掩码语言模型(masked language model, MLM)对Transformer[28]模型进行预训练，生成了更深层次的双向表征，该模型在多项自然语言处理(neuro-linguistic programming, NLP)任务中均取得了优异的成绩。

在将文本信息向量输入Bert[29]模型时，会在首部加一个标志位，最后一层相应位置的向量可以用作整段文字的语意表示，用于分类任务。Bert[29]模型的self-attention部分会用文本中的其他词来增强目标词的语意表示，但是目标词本身的语意还是会占主要部分。但是额外增加的标志位本身没有语义，所以相比原有的字词，标志位可以更加公平地融合文本各个字词的语义信息，更好地表征语义。

1) CNN模型[27]。CNN起初主要用来处理图像任务，Kim[27]在2014年提出了TextCNN模型，即将CNN[27]模型应用到文本分类任务中。本文模型中使用CNN[27]模型结构，其具体结构如图5右侧所示，最大输入分别经过卷积层、最大池化层、全连接层、softmax层，最后输出分类结果。在CNN[27]模型的优化方面，激活函数选用Relu，优化器选用Adam，为更好地捕捉文本的局部相关性，提取文本的关键信息，卷积核大小分别选择了3、4、5这3种尺寸。

2) 损失函数。交叉熵主要用来判断实际输出和期望输出的接近程度，交叉熵越小说明实际输出与期望输出的差距越小。假设概率分布q为实际输出，概率分布p为期望输出，则交叉熵为

$$H(p,q)=-\sum p(x)\ln q(x) \tag{1}$$

3) 本文模型。考虑到漏洞攻击报文的文本属性特点，设计本文模型来判定可疑攻击报文是否漏洞攻击报文，本文模型结构如图5所示。首先，将每个预处理后的可疑漏洞报文的文本信息X作为

一个单独的句子, 进行 Token Embedding 和 Position Embedding 后输入 Bert[29] 模型; 其次, 将 12 个隐藏层的 [CLS] 向量拼接后, 作为 CNN[27] 模型的输入, 通过卷积层、最大池化层、全连接层 softmax 层; 最后, 输出分类结果。

4.3　评价指标

按照分类算法评价指标的惯例做法, 使用精确率 P、召回率 R、准确率 A_{CC} 和 F_1 值作为混合深度学习模型的分类效果的评价指标, 其表达式分别为

$$R = T_P/(T_P + F_N) \tag{2}$$

$$P = T_P/(T_P + F_P) \tag{3}$$

$$A_{cc} = (T_P + T_N)/(T_P + T_N + F_P + F_N) \tag{4}$$

$$F_1 = 2PR/(P + R) \tag{5}$$

式中: T_P 为被正确标记的正例样本; F_P 为被错误标记的正例样本; F_N 为被错误标记的负例样本; T_N 为被正确标记的负例样本。

4.4　分类实验结果及分析

经过报文预处理得到的可疑漏洞攻击报文文本 X, 将作为学习分类模型的输入, 以确定哪些是真正的 IoT 漏洞攻击报文。根据实际数据统计结果, 在可疑漏洞攻击报文中真正的漏洞攻击报文比例在 0.1～1 之间, 因此, 选择 1∶1、1∶2、1∶4、1∶8 这 4 种正负样本的比例, 来进行不同的分类实验。在分类实验同时对比使用本文模型和 Bert[29] 模型进行分类验证, 并将每组的训练集和测试集划分为 0.8 和 0.2。

根据不同的正负样本比例和不同模型的选择, 测试集上的分类结果分别如表 2 和图 6 所示。实验结果表明, 本文模型用于漏洞报文检测具有优越的检测性能。首先, 2 个模型的精确率接近 1, 在实际场景中, 精确率 P 是一个更有实用性的指标, 即被标记的漏洞攻击报文中有多少个是真正的攻击报文。因为本文检测方法分类仅仅是其中的一个步骤, 通过分类算法识别出的攻击报文会继续下一步流程, 进行关联和线索发现。如果精确率不高, 则会影响后续的流程; 其次, 2 种不同分类模型的准确率 A_{CC} 和 F_1 值均超过了 99.9%, 特别是在正负样本比例 1∶2 的场景下, 本文模型的准确率超过了 99.99%, 这意味着平均每检测 10^5 个可疑报文, 误报的报文数量仅为个位数, 具备较强的实用价值。最后, 由表 2 可知, 本文模型 F_1 比单个 Bert[29] 模型平均提高了 0.02%, 本文研究的问题是在大规模流量中检测漏洞攻击行为, 而在真实系统中每天发现的疑似攻击漏洞攻击报文数量超过 10^8 个。如果 F_1 值提升 0.01%, 即意味着有 10^5 个报文被正确识别, 反之则有 10^5 个报文被错误识别, 这对于后续发现 NDay 攻击和 0Day 漏洞攻击线索非常重要。所以 0.02% 的提升对实际工作的影响是显著的, 能大大减少误报量从而增强检测系统的实用性。

表 2　F_1 和 A_{CC} 实验结果

Table 2　Experimental results of F_1 and A_{CC}

正负样本比例	F_1/%		A_{CC}/%	
	Bert[29]模型	本文模型	Bert[29]模型	本文模型
1∶1(总数10^6)	99.93	99.94	99.95	99.96
1∶2(总数1.5×10^6)	99.97	99.97	99.99	99.99
1∶4(总数2.5×10^6)	99.93	99.96	99.98	99.98
1∶8(总数4.5×10^6)	99.96	99.97	99.96	99.97

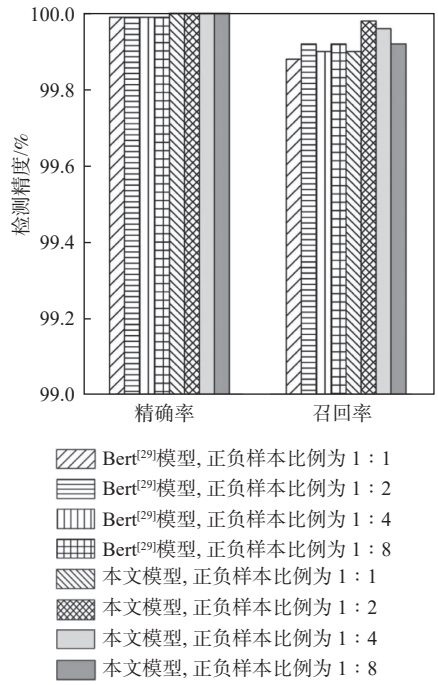


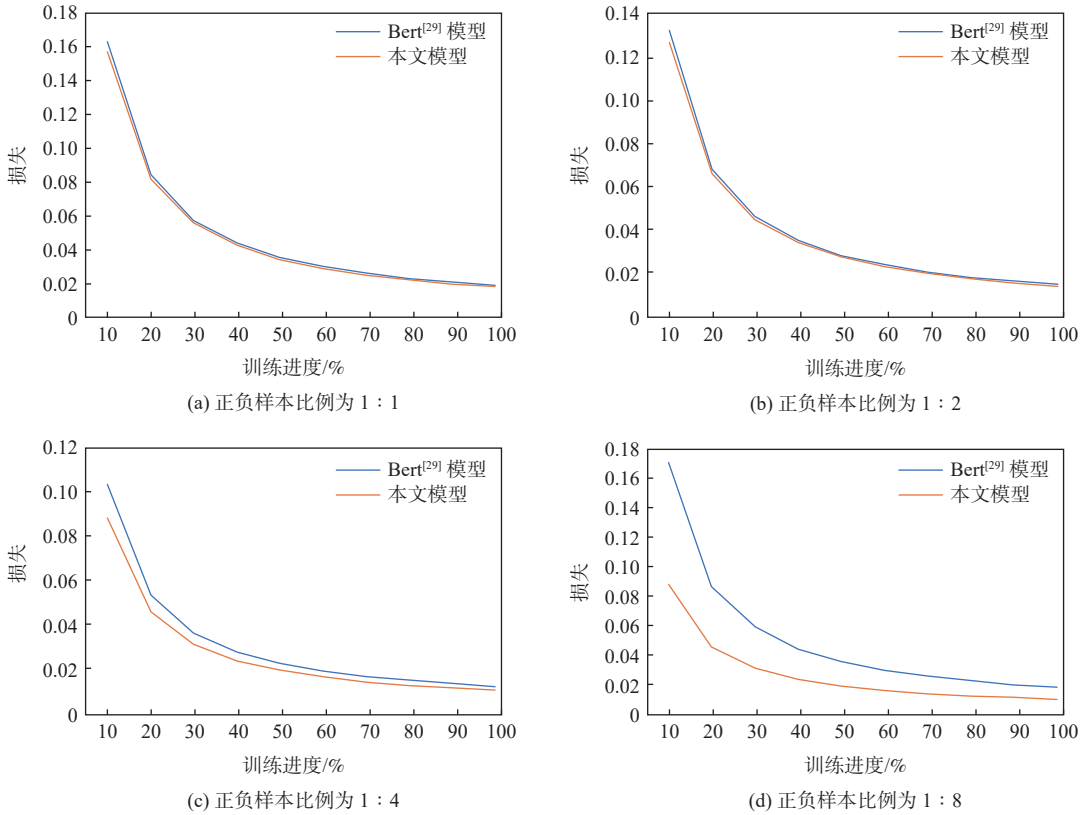
图 6　精准率和召回率实验结果

Fig. 6　Experimental results of precision and recall rate

另外, 由图 7 可知, 本文模型在训练时的损失值收敛效果比单个 Bert[29] 模型更快更好。在模型训练时硬件采用了 GPU 4 000 加速卡进行模型训练。

每一轮训练耗时对比如表 3 所示, 2 种模型的训练耗时都根据样本个数呈现线性变化, 耗时 60～150 min。

通过本文模型对可疑漏洞攻击报文进行分类判定后, 虽然能够确定某个可疑漏洞攻击报文是否真正的漏洞攻击报文, 但仍无法明确该漏洞攻击报文的攻击类型, 需要进一步使用后续的开源情报关联, 来进行漏洞的精确识别。



(a) 正负样本比例为 1∶1　(b) 正负样本比例为 1∶2

(c) 正负样本比例为 1∶4　(d) 正负样本比例为 1∶8

图 7　2 种模型损失值

Fig. 7　Loss of two models

表 3　模型每轮训练时间

Table 3　Model training time in each round

样本数量/10^6	训练时间/min	
	Bert[29]模型	本文模型
1	62	71
1.5	89	102
2.5	127	146
4.5	146	167

5　开源信息关联识别

5.1　开源漏洞信息提取

近年来基于开源威胁情报的网络狩猎研究成果[30]表明，开源威胁情报可应用于支撑威胁行为狩猎。本文关注的开源信息是漏洞利用信息 Exploit（EXP）是如何利用漏洞的详细说明或漏洞攻击代码，详细阐述了漏洞的机制及使用方法。在各类开源漏洞 EXP 信息平台中，Exploit-DB[3]的影响力最大，其是一个面向全世界黑客的漏洞提交平台，及时发布各种最新的漏洞 EXP 信息。除了 Exploit-DB[3]之外，还有 Packet-Storm[4]等知名开源漏洞情报平台，这些平台上也会及时披露各类漏洞 EXP 信息。而在针对各类 IoT 设备发起的漏洞攻击报文中，会具体利用到漏洞 EXP 信息中披露的方法，安全分析人员也需借助这些开源情报网站的漏洞 EXP 信息，来确定某个漏洞攻击报文是不是 1Day 或 NDay 漏洞攻击。

从这些开源网站上爬取的开源漏洞信息，本身是一种开源的威胁情报，但是与传统威胁情报不同的是其并没有标准的描述格式。除了与漏洞相关的描述信息，如发布时间和漏洞对象以外，最关键的信息是 EXP 内容，也就是具体的漏洞利用脚本，一般有 shell、python、php、java 等不同语言的脚本形式。本文对 10 个主流的漏洞 EXP 开源网站进行了实时跟踪，对在这些网站上发布的漏洞 EXP 信息及关联信息进行了实时抓取和存储。截止到 2021 年 10 月，从这 10 个开源情报网站上抓取的各类漏洞信息数量超过 2.5×10^5 条，覆盖了不同的漏洞类型。但是其中真正能用来发动网络攻击、进行命令注入、远程执行的漏洞，只有 1Day 或 NDay 漏洞（0Day 漏洞信息不会公布），均占比较低。

将第 4 节检测出的漏洞攻击报文与这些开源的漏洞信息进一步比对和关联，就能够确认漏洞攻击报文的类别。与以往依赖安全人员人工比对和关联不同，本文提出基于攻击向量回归的开源漏洞情报关联方法，从而对漏洞攻击报文精准识别。

5.2　基于攻击向量回归的漏洞关联识别

不管是从开源漏洞平台爬取的漏洞 EXP 信息，

还是网络流量中的漏洞攻击报文, 与自然语言短文本相比都存在较大差异, 已有的短文本处理工具, 如 NLTK、scikit-learn 主要处理英文及西欧语言, HanLP 则处理中文文本, 这些工具中的大部分函数不能直接应用于处理攻击报文或 EXP。因为攻击报文没有词库的概念, 某些标点符号、单个字符等也是代码执行的一部分, 不能直接根据空格及标点进行分词。因此, 本文设计和编写了专门的命名实体识别模块, 从攻击报文和 EXP 中分别提取关键词表。

对漏洞攻击报文进行信息抽取, 提取出报文中与漏洞利用有关的攻击向量字段, 形成如下结构: $[x_1:\text{attack_target};x_2:\text{attack_para};x_3:\text{attack_command}]$。其中, 攻击目标指漏洞攻击报文请求的具体地址, 即设备被漏洞攻击时触发的具体路径, 一般代表设备上某个组件或服务对外开放的服务接口, 展现设备可以被外部访问的位置; 攻击参数则代表漏洞攻击时触发具体使用的参数。表 4 列出了表 1 中提到的漏洞攻击报文的攻击目标和攻击参数。

表 4　IoT 漏洞攻击中的攻击目标及攻击参数

Table 4　Attack targets and parameters in IoT exploits

漏洞编号	攻击目标	攻击参数
CVE_2021_33544	/uapi-cgi/certmngr.cgi	action,createselfcert,local
CVE_2021_33514	cgi/setup.cgi	token
CVE_2021_31755	/goform/setmac	mac,wifien,wifissid
CVE_2021_28799	/cgi-bin/backup/hbs_mgnt.cgi	run_cmd,jisoosocoolhbsmgnt
CVE_2021_20090	/images/../apply_abstract.cgi	action,submit_button,action_params,arc_ping_ipaddress
CVE_2021_1497	/storfs-asup	action,token
CVE_2020_9054	/cgi-bin/weblogin.cgi	adv,username,password
CVE_2020_8949	/cgi-bin/webui/admin/tools/app_ping/diag_ping/	None
CVE_2020_8515	cgi-bin/mainfunction.cgi	action,keypath,loginPwd
CVE_2020_35713	/goform/setSysAdm	AuthTimeout, admpasshint
CVE_2020_35576	/cgi?	maxhopcount, numberoftries, host
CVE_2020_17456	/cgi-bin/system_log.cgi	Command, traceMode
CVE_2020_13872	/portal/__ajax_explorer.sgi	Action/path/where/en
CVE_2020_10987	/goform/setUsbUnload	setUsbUnload

攻击指令代表了具体的攻击行为, 如样本植入、隐藏痕迹、删除痕迹等, 根据对大量已知漏洞攻击的统计, IoT 漏洞攻击中常见的攻击指令如表 5 所示。

表 5　IoT 漏洞攻击中常见的攻击指令

Table 5　Common attack commands in IoT exploits

攻击指令类型	关键词
样本植入	wget,curl,tftp,fetch
反弹回连	bash-i, tmp/socat exec
探测	Nc,echo,dnslog
隐藏痕迹	Rm,mv,base64,decodeHex
命令执行	chmod, system,md5sum, busybox ,exec

使用攻击报文测试集中的已知漏洞攻击报文和对应的开源漏洞 EXP 信息进行回归计算, 得到关联系数w_1、w_2、w_3、α的值, 计算方式如下:

$$f(x,y)=w_1\text{sim}(x_1,y)+w_2\text{sim}(x_2,y)+w_3\text{sim}(x_3,y)+\alpha \tag{6}$$

$$f(x,y)=\begin{cases}>1 & x,y\text{对应}\\ <0 & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

式中: x为漏洞攻击报文文本; y为开源漏洞情报中的漏洞利用信息文本; x_1、x_2、x_3为 3 类攻击, 直接从攻击报文中提取; w_1、w_2、w_3、α为关联系数, 通过将攻击报文数据集和开源漏洞信息进行回归计算得到; sim()函数表示某类攻击在报文中和开源漏洞信息中的相似值, 取值范围为 (0～1)。计算方式如下: 攻击报文中的某一类攻击中的关键词列表在开源漏洞信息中出现的比例。以 CVE-2021-20090 所示的漏洞攻击报文为例, 其中攻击目标为: “/images/../apply_abstract.cgi”, 按照路径‘/’拆分成不同的字符串, 如果所有字符串在y中全部出现, 则$\text{sim}(x_1,y)$的值为 1, 如果所有字符串在y中均没有出现, 则$\text{sim}(x_1,y)$为 0。$\text{sim}(x_2,y)$和$\text{sim}(x_3,y)$的计算方法类似。

通过真实数据回归计算得到w_1、w_2、w_3、α, 即可获得攻击报文和开源漏洞信息的关联函数$f(x,y)$。在实际应用中, 当一个攻击报文x需要进行关联时, 其会与所有已知的开源漏洞信息进行关联。判断关联是否成功的依据如下: 首先, 选$f(x,y)$取值最大的那个漏洞类型y; 其次, 检查y对应

的$f(x,y)$是否超过某个阈值，如果超过，则将攻击报文成功关联到漏洞类型y。该阈值一般由专家根据实际场景调整。

6 结 论

1）本文通过深度学习和开源情报关联，进行IoT漏洞攻击检测判定和识别，在测试集上达到了99.99%的检测准确率。根据本文进一步开发出一套实际的在野漏洞攻击检测系统IoT_Exploits_Founder，该系统在真实环境中实际运转了1个月，新发现并识别了13类新的NDay漏洞攻击。

2）本文检测方法对IoT漏洞攻击检测是有效的，由于其针对各类IoT设备的攻击行为呈现出自动化和规模化的特征，整个攻击过程不需要人的参与，因此，可以使用数据驱动的学习和关联方法。

未来的工作将继续探索其他场景的漏洞攻击检测，并将自动学习关联和专家经验相结合，以精确识别各种攻击行为，特别是0Day漏洞攻击。

参考文献（References）

[1] 绿盟科技. 2020物联网安全年报[EB/OL]. (2021-01-08)[2022-05-28]. https://www.nsfocus.com.cn/html/2021/92_0118/147.html.
NSFOCUS. 2020 IoT Security annual report[EB/OL]. (2021-01-08)[2022-05-28]. https://www.nsfocus.com.cn/html/2021/92_0118/147.html(in Chinese).

[2] CVE-CVE [EB/OL]. (2022-05-28) [2022-05-29]. https://cve.mitre.org/.

[3] Exploit-DB - exploits for penetration testers[EB/OL]. (2022-05-28) [2022-05-29]. https://www.exploit-db.com/.

[4] Packet storm-exploits the possibilities[EB/OL]. (2022-05-29) [2022-05-30]. https://packetstormsecurity.com/.

[5] Snort - network intrusion detection & prevention system[EB/OL]. (2022-05-01) [2022-05-30]. https://www.snort.org/.

[6] Yara-the pattern matching swiss knife for malware researchers[EB/OL]. (2022-05-01) [2022-05-30]. https://virustotal.github.io/yara/.

[7] KDD cup 1999 data [EB/OL]. (2000-09-18) [2022-05-30]. http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html.

[8] SHIRAVI A, SHIRAVI H, TAVALLAEE M, et al. Toward developing a systematic approach to generate benchmark datasets for intrusion detection[J]. Computers and Security, 2012, 31(3): 357-374.

[9] RING M, WUNDERLICH S, GRUEDL D, et al. Technical report cidds-001 data set[EB/OL]. (2017-04-28) [2022-05-30]. https://www.hs-coburg.de/fileadmin/hscoburg/Forschung/WISENT_cidds_Technical_Report.pdf.

[10] LEE W K, STOLFO S J. Data mining approaches for intrusion detection[C]//Proceedings of the Conference on USENIX Security Symposium . New York: ACM, 1998: 6.

[11] KHAN L, AWAD M, THURAISINGHAM B. A new intrusion detection system using support vector machines and hierarchical clustering[J]. The VLDB Journal, 2007, 16(4): 507-521.

[12] NGUYEN TTT, ARMITAGE G. A survey of techniques for Internet traffic classification using machine learning[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(4): 56-76.

[13] SOMMER R, PAXSON V. Outside the closed world: On using machine learning for network intrusion detection[C]//Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy. Piscataway: IEEE Press, 2010: 305-316.

[14] SUTHAHARAN S. Big data classification[C]//Proceedings of the Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM, 2014, 41(4): 70-73.

[15] MA J, SAUL L K, SAVAGE S, et al. Identifying suspicious URLs: An application of large-scale online learning[C]//Proceedings of the Annual International Conference on Machine Learning. Montreal : ICML , 2009: 681-688.

[16] MA J, SAUL L K, SAVAGE S, et al. Byond blacklists: Learning to detect malicious web sites from suspicious URLs[C]//Proceedings of the Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. New York: ACM, 2009: 1245-1254.

[17] ZHAO P L, HOI S C H. Cost-sensitive online active learning with application to malicious URL detection[C]//Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2013: 919-927.

[18] 李佳, 云晓春, 李书豪, 等. 基于混合结构深度神经网络的HTTP恶意流量检测方法[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 24-33.
LI J, YUN X C, LI S H, et al. HTTP malicious traffic detection method based on hybrid structure deep neural network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 24-33(in Chinese).

[19] HODO E, BELLEKENS X, HAMILTON A, et al. Threat analysis of IoT networks using artificial neural network intrusion detection system[C]//Proceedings of the International Symposium on Networks, Computers and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

[20] THAMILARASU G, CHAWLA S. Towards deep-learning-driven intrusion detection for the Internet of Things[J]. Sensors, 2019, 19(9): 1977.

[21] AL-HAWAWREH M, MOUSTAFA N, SITNIKOVA E. Identification of malicious activities in industrial Internet of Things based on deep learning models[J]. Journal of Information Security and Applications, 2018, 41: 1-11.

[22] ABDEL-BASSET M, HAWASH H, CHAKRABORTTY R K, et al. Semi-supervised spatiotemporal deep learning for intrusions detection in IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12251-12265.

[23] TSIMENIDIS S, LAGKAS T, RANTOS K. Deep learning in IoT intrusion detection[J]. Journal of Network and Systems Management, 2021, 30(1): 8.

[24] CVE-2021-20090[EB/OL]. (2022-06-14) [2022-06-15]. https://medium.com/tenable-teblog/bypassing-authentication-on-arcad-an-routers-with-cve-2021-20090-and-rooting-some-buffalo-ea1dd30980c2.

[25] IoT_Exploits_Founder[EB/OL]. (2022-1-12) [2022-06-15]. https://github.com/bennyhee/IoT_Exploits_Founder.git.

[26] ZHAO Y C, WANG G T, TANG C X, et al. A battle of network structures: an empirical study of CNN, transformer, and MLP

[EB/OL]. (2021-08-30) [2022-06-17]. http://arxiv.org/abs/2108.13002.

[27] KIM Y. Convolutional neural networks for sentence classification[EB/OL]. (2014-08-25) [2022-06-15]. http://arxiv.org/abs/1408.5882.

[28] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[EB/OL]. (2017-06-12) [2022-06-15]. http://arxiv.org/abs/1706.03762.

[29] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[EB/OL]. (2018-10-11) [2022-06-15]. http://arxiv.org/abs/1810.04805.

[30] 崔琳, 杨黎斌, 何清林, 等. 基于开源信息平台的威胁情报挖掘综述[J]. 信息安全学报, 2022, 7(1): 1-26.
CUI L, YANG L B, HE Q L, et al. Survey of cyber threat intelligence mining based on open source information platform[J]. Journal of Cyber Security, 2022, 7(1): 1-26(in Chinese).

An automatic and real-time detection method of IoT in-the-wild vulnerability attack

HE Qinglin[1, 2], WANG Lihong[2, *], CHEN Yanjiao[3], WANG Xing[4]

(1. CNCERT/CC, Beijing 102299, China;
2. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China;
4. School of Cybersecurity, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The vast number of Internet-connected internet of things (IoT) devices are susceptible to hacking and exploitation, which can lead to the paralysis of critical IoT applications. Vulnerability exploitation is a common method of attack on IoT devices; however, due to the diverse, mutable, and highly disguised forms of in-the-wild vulnerability exploitations, it is extremely challenging to quickly and automatically identify ongoing vulnerability attacks targeting IoT devices. To address this, a detection method for IoT vulnerability attacks based on a hybrid deep learning discrimination and open-source intelligence correlation is proposed. This detection method can identify IoT in-the-wild vulnerability attack behaviors in network traffic in real-time and accurately identify the specific categories of vulnerability attack behaviors. Experimental results show that the proposed detection method achieves an accuracy rate of over 99.99% on large-scale datasets. The application of the proposed detection method in real-world scenarios has been significant, discovering 13 new in-the-wild vulnerability attacks within less than a month.

Keywords: internet of things; in-the-wild vulnerability exploitation; attack detection; hybrid deep learning; open-source intelligence

Received: 2022-07-05; **Accepted**: 2022-09-02; **Published Online**: 2023-03-29 13:00
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230329.1041.004

* **Corresponding author**. E-mail: hql@cert.org.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0615

舰载直升机主动甲板着舰气动载荷特性

谭剑锋[1,*]，邢肖兵[1]，崔钊[2]，武杰[3]，张卫国[3]

(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院，南京 211816；2. 中国飞行试验研究院 技术中心飞机所，西安 710089；
3. 中国空气动力研究与发展中心 旋翼空气动力学重点实验室，绵阳 621000)

摘　　要：被动与主动流动控制可减小舰艇艉流强度，但直升机着舰甲板处仍存在明显回流现象，由此导致直升机气动载荷变化显著。提出了自动升降的舰艇主动甲板，建立基于格子玻尔兹曼方法 (LBM) 的舰艇主动甲板流场分析方法，并结合单向耦合模型，嵌入旋翼黏性涡粒子法，研究直升机主动甲板着舰气动载荷特性。通过与 SFS2 舰艇流场试验、分离涡模拟（DES）方法、大涡模拟（LES）方法比较，验证了所建方法的准确性。随后研究主动甲板对舰艇流场和直升机着舰气动载荷的影响特性。结果表明：相比于标准 SFS2 舰艇，主动甲板有效抑制了直升机着舰甲板处回流，以及直升机旋翼拉力损失、滚转和俯仰力矩，最大降幅分别为 21.6%、55.1%、74.6%。

关 键 词：主动甲板；直升机旋翼；舰艇艉流；格子玻尔兹曼方法；黏性涡粒子
中图分类号：V221.52; TB553
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2206-12

受舰艇艉流和复杂流场的影响，直升机着舰仍是飞行员和自动控制系统最具挑战性的飞行任务，且舰载直升机面临危及飞行安全的因素是宇航员的 5 倍、轰炸机的 10 倍、民航的 54 倍。即使平稳海况下，直升机着舰甲板仍存在复杂的湍流[1-3]，且直升机与舰艇甲板流场干扰进一步增加了舰流场的复杂度。舰艇机库的剪切流、分离涡等结构引起直升机着舰甲板处流场速度时间与空间波动，诱发回流现象，并导致直升机气动载荷显著变化[4-5]。因此，降低着舰甲板处的回流强度可有效降低直升机着舰风险。

国内外已经开展基于被动和主动流动控制的舰艇艉流抑制方法研究。Shafer 和 Ghee[6] 通过风洞试验研究多孔表面、机库顶部导流板、网状泡沫导流板等被动流动控制方法对驱逐舰 DDG-81 艉流的抑制效果，结果表明网状泡沫导流板能较好减小甲板处的湍流强度。Findla 和 Ghee[7] 基于 1∶144 缩比驱逐舰 DDG-81 模型，测试机库顶部锯齿状导流板对流场和湍动能的抑制效果。此外，基于标准 SFS 舰艇模型，Greenwell 和 Barrett[8] 研究布置于机库边缘多孔导流板对甲板区域垂向速度梯度和湍流密度的影响。Bardera 和 Meseguer[9] 提出采用弯曲的机库顶部，以降低着舰流场脉动和直升机着舰风险，结果表明此方法可减小回流区，较好地保持舰艇表面附着流状态，且相比标准 SFS 舰艇模型，机库剪切流长度减小 42%，但曲面机库降低了舰艇的隐身性能。Forrest 等[10] 提出机库边缘导流板，以降低甲板的上洗流和气流分离，结果表明机库两侧边缘的导流板可减小剪切流长度和着舰区流场脉动量。Shi 等[11] 采用基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程的计算流体动力学（computational fluid dynamics, CFD）方法研究机库斜坡、切口、导流板对不同风向舰艇艉流的控制效果，结果表明机库斜坡和切口均能降低舰艇艉流湍流密度和旋翼气动载荷波动

收稿日期：2022-07-13；**录用日期**：2022-09-05；**网络出版时间**：2022-10-09 13:13
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221006.1316.001
基金项目：国家自然科学基金 (12172165)；江苏省自然科学基金 (BK20211259)；江苏省青蓝工程“优秀青年骨干教师”项目
*通信作者. E-mail：Jianfengtan@njtech.edu.cn

引用格式：谭剑锋，邢肖兵，崔钊，等. 舰载直升机主动甲板着舰气动载荷特性 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2206-2217.
TAN J F，XING X B，CUI Z，et al. Investigation on aerodynamics of a helicopter approaching an active control deck [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2206-2217（in Chinese）.

量, 但导流板可能增加湍流密度和旋翼气动载荷。虽然上述被动流动控制方式能缓解舰艇非定常流场脉动, 抑制着舰区回流强度, 但仍难以实现对各状态的抑制。

因此, Shafer 和 Ghee[6] 提出机库表面多孔吹气装置以实现对舰艇艉流的主动流动控制, 结果表明此装置可较好地降低流场和舰艇艉流的脉动。文献 [12-14] 采用旋转圆柱、等离子射流、主动射流等主动流动控制方式减小甲板回流区, 结果表明合适的射流强度和频率可降低横向湍流密度和湍动能, 降低旋翼非定常气动载荷, 但过大强度和频率的射流引入附加涡结构, 导致舰艇艉流增强, 增加回流区。

虽然上述被动和主动流动控制在一定状态下可以实现对舰艇艉流和甲板回流的抑制, 但直升机着舰区回流仍然存在, 且直升机气动载荷变化仍然明显。因此, 本文提出舰艇主动甲板 (active control deck, ACD) 以抑制直升机着舰区回流, 减小直升机着舰气动载荷变化。随后建立基于格子玻尔兹曼方法 (lattice Boltzmann method, LBM) 的舰艇 ACD 流场分析方法, 并结合单项耦合模型, 嵌入旋翼黏性涡粒子法, 研究直升机着舰气动载荷特性。通过与 SFS2 舰艇流场试验、分离涡模拟(detached eddy simulation, DES)方法、大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 方法比较, 验证了本文方法的准确性, 并研究 ACD 对舰艇流场和直升机着舰气动载荷的影响特性。

1　计算方法

1.1　舰艇 ACD

基于联合技术项目开发的标准舰艇 SFS2, 在直升机着舰甲板处设置 ACD, 尺寸为 13.71 m×13.71 m, 甲板距离机库 6 m, 详细结构和尺寸如图 1 所示。基于标准的后侧着舰流程[15], 采用 ACD 后的直升机首先从舰艇后侧靠近 (图 2(a)), 同时, ACD 从甲板处自动抬升 (图 2(b)), 随后, 直升机在着舰点上方保持悬停姿态 (图 2(c)), 降落在 ACD 上 (图 2(d)), 并随 ACD 下降至舰艇甲板 (图 2(e)), 进入机库。因直升机着落在 ACD 上, 避免降落过程中穿过舰艇艉流区, 从而降低直升机气动载荷波动。ACD 配置自动增稳装置, 减少 ACD 平移, 提高着舰安全性, 同时 ACD 主要驱动机构放置于常规舰艇着舰点下方, 对整体舰艇结构影响较小。因 ACD 有利于减小回流区对直升机着舰载荷和安全的影响, 直升机着舰点前移, 缩短了舰甲板和舰艇整体长度, 且减小了舰艇甲板对着舰直升机型号的限制。

1.2　舰艇 ACD 流场模型

虽然基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程的 CFD 方法已应用于舰艇流场模拟, 但 CFD 计算网格庞大, 且数值耗散偏大, 舰艇艉流结构受湍流模型影响显著。基于介观的 LBM 可分析满足雷诺平均 Navier-Stokes 方程的宏观流场[16], 且能较好地处理涡量耗散问题, 具备高效并行格式, 因而较好地满足了舰艇艉流分析要求。为此, 基于 LBM 建立舰艇 ACD 流场分析模型。与 CFD 方法采用速度和压力作为宏观量不同, LBM 采用基于分布函数的微观动力学方程:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\boldsymbol{\xi}\nabla_x f+\boldsymbol{g}\nabla_{\xi} f=Q(f,f) \tag{1}$$

式中: f为分布函数; Q为碰撞函数; $\boldsymbol{g}$为外力场产生的加速度; $\boldsymbol{\xi}$为迁移速度矢量。

流场宏观量可通过积分分布函数得到, 如密度、速度、能量:

$$\rho(x,t)=m\int f\mathrm{d}\boldsymbol{\xi} \tag{2}$$

$$\rho\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x},t)=m\int \boldsymbol{\xi} f\mathrm{d}\boldsymbol{\xi} \tag{3}$$

$$\rho\varepsilon(\boldsymbol{x},t)=\frac{1}{2}m\int |\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{u}|^2 f\mathrm{d}\boldsymbol{\xi} \tag{4}$$

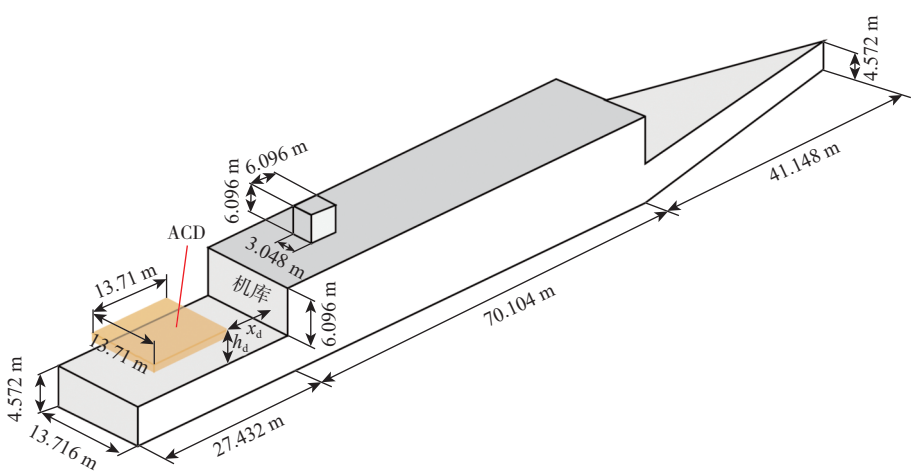


图 1　SFS2 舰艇 ACD

Fig. 1　SFS2 frigate with an ACD

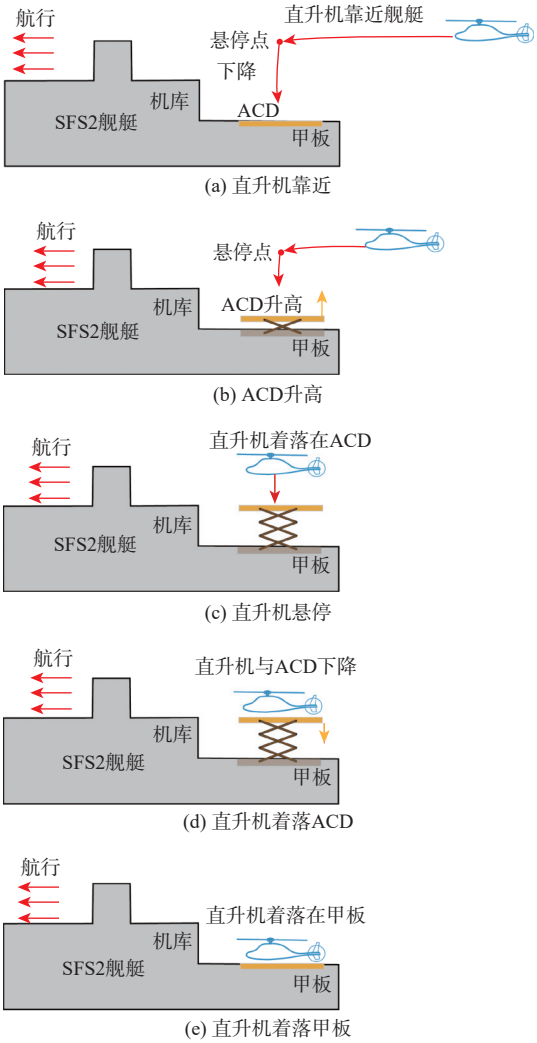


图2 直升机着舰过程

Fig. 2 Landing procedure with a helicopter

式中：m为气体粒子分子质量；ρ为密度；$\boldsymbol{u}$为速度；ε为能量；$\boldsymbol{x}$为位置；t为时间。

式(1)的碰撞约束可通过BGK(Bhatnagar-Gross-Krook)近似给出。通过假设碰撞过程的分布函数变化量正比于分布函数f与麦斯威尔平衡分布函数f^{eq}之差，实现碰撞积分线性化，得到BGK近似：

$$\Omega(f)_{\mathrm{BGK}}=-\frac{1}{\tau}(f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{x},t)-f^{\mathrm{eq}}(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{x},t)) \tag{5}$$

式中：Ω为BGK碰撞函数；τ为碰撞特征时间。

微观尺度上，碰撞特征时间τ影响碰撞过程，而宏观尺度上其影响流体传输效率。因此，采用BGK近似获得舰艇ACD流场控制方程：

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\boldsymbol{\xi}\nabla_x f+\boldsymbol{g}\nabla_{\xi} f=-\frac{1}{\tau}(f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{x},t)-f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{x},t)) \tag{6}$$

根据Chapman-Enskog展开，式(6)可通过动量积分转化为雷诺平均Navier-Stokes方程，也即LBM满足雷诺平均Navier-Stokes方程[17]，因而可用于舰艇艉流分析。根据式(6)可得到求解玻尔兹曼方程的数值格式。

1）碰撞。在时刻t、位置$\boldsymbol{x}$处发生碰撞，通过碰撞函数计算得到新的分布函数f_i^{c}：

$$f_i^{\mathrm{c}}(\boldsymbol{x},t)=f_i(\boldsymbol{x},t)-\frac{\Delta t}{\tau}\left[f_i(\boldsymbol{x},t)-f_i^{\mathrm{eq}}(\boldsymbol{x},t)\right] \tag{7}$$

2）迁移。碰撞后的分布函数f_i^{c}沿着与格子速度$\boldsymbol{\xi}_i$有关的特征线迁移：

$$f_i(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\xi}_i\Delta t,t+\Delta t)=f_i^{\mathrm{c}}(\boldsymbol{x},t) \tag{8}$$

上述LBM采用的动力学模型包括用于计算雷诺平均Navier-Stokes方程宏观平均量的宏观效应，因而可以采用覆盖流体计算域的规则格子分布，且分布函数表示每个格子点具有相应速度的概率。为求解可压缩和湍流，采用D3Q19格子分布模型，即三维19个格子点模型，如图3所示。

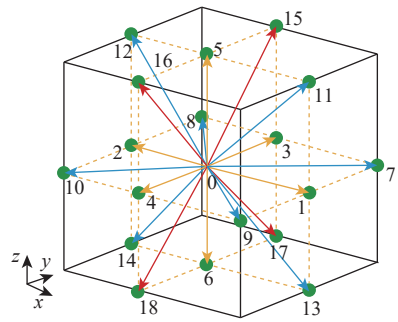


图3 速度空间离散的D3Q19格子模型

Fig. 3 D3Q19 lattice used for the velocity space discretization

通过对麦斯威尔平衡分布函数二阶多项式展开，得到D3Q19格子模型的平衡分布函数：

$$f_i^{\mathrm{eq}}=\rho w_i\left(1+\frac{\boldsymbol{\xi}_i\cdot\boldsymbol{u}}{c_{\mathrm{s}}^2}+\frac{(\boldsymbol{\xi}_i\cdot\boldsymbol{u})^2}{2c_{\mathrm{s}}^4}-\frac{\boldsymbol{u}^2}{2c_{\mathrm{s}}^2}\right) \tag{9}$$

式中：w_i为格子各方向系数；c_{s}为音速。

在LBM中，精确的边界条件是影响模拟稳定性和精度的重要因素。CFD方法通常采用基于宏观量设置边界条件，如无滑移边界条件、入口速度条件、压力出口条件等。但LBM主要变量为分布函数，且通过宏观边界条件难以反推分布函数，主要原因在于确定的宏观边界量反推得到的分布函数可能不唯一。因此，采用格子反弹边界条件模拟物理滑移和无滑移边界条件，即当格子分布函数遇到边界节点时，将格子分布函数反射至流场格子。此外，出口边界条件转化为边界法向速度梯度为0，入口边界条件可由基于初始速度的平衡分布函数得到，即

$$f_i=f_i^{\mathrm{eq}}(\boldsymbol{u}_0) \tag{10}$$

碰撞特征时间可由运动黏度υ计算可得

$$\tau=3\upsilon+0.5 \tag{11}$$

τ大于 0.5 时, LBM 稳定, 但当τ接近 0.5 时, LBM 存在不稳定现象。对于舰艇流场模拟, 由于运动黏度比较小, τ非常接近 0.5, 因而采用 LBM 模拟舰艇流场时存在不稳定现象。为此, 采用 Smagorinsky 亚格子模型[18] 提高 LBM 舰艇流场模拟稳定性。

非平衡应力张量Π可表示为

$$\Pi_{i,j}=\sum_{\alpha=0}^{18}e_{\alpha,i}e_{\alpha,j}(f_\alpha-f_\alpha^{\mathrm{eq}}) \tag{12}$$

式中: $e_{\alpha,i}$为格子移动速度单位量。

局部应力张量密度 S 可表示为

$$S=\frac{\sqrt{\upsilon^2+18C^2\sqrt{\Pi_{i,j}\Pi_{i,j}}}-\upsilon}{6C^2} \tag{13}$$

式中: C 为 Smagorinsky 常数。

根据局部应力张量密度 S 得到修正后的τ:

$$\tau_{\mathrm{smag}}=3(\upsilon+C^2S)+0.5 \tag{14}$$

由于局部应力张量密度 S 始终为正, 因此, 亚格子模型提高了 LBM 舰艇流场模拟稳定性。

由于 LBM 时间步长与空间步长耦合, 导致基于 LBM 的流场分析方法应用非均匀网格困难, 需通过均匀网格模拟复杂边界, 且 LBM 受格子和黏度影响, 需通过亚格子模型等提高 Re 流场模拟稳定性。

1.3　直升机旋翼气动模型

单向耦合模型是舰艇-直升机动态耦合建模中一种简单有效的方法, 且能分析舰艇流场波动对直升机操纵和控制的影响[19]。为此, 根据单向耦合模型策略, 将基于 LBM 的舰艇 ACD 流场模型嵌入基于非定常面元/黏性涡粒子法的直升机旋翼气动模型, 构建直升机着舰气动载荷分析方法, 从而分析 ACD 对直升机旋翼气动载荷的影响规律。基于旋翼非定常面元/黏性涡粒子法[20-21], 地面坐标系下的旋翼流场势函数 Φ 为

$$\phi(x,y,z,t)=\frac{1}{4\pi}\int_{S_{\mathrm{B}}}\mu\boldsymbol{n}\nabla\left(\frac{1}{\boldsymbol{r}_{\mathrm{t}}}\right)\mathrm{d}S-\frac{1}{4\pi}\int_{S_{\mathrm{B}}}\sigma\left(\frac{1}{\boldsymbol{r}_{\mathrm{t}}}\right)\mathrm{d}S+\frac{1}{4\pi}\int_{S_{\mathrm{w}}}\mu\boldsymbol{n}\nabla\left(\frac{1}{\boldsymbol{r}_{\mathrm{t}}}\right)\mathrm{d}S \tag{15}$$

式中: σ、μ、S_{B}、S_{W}、$\boldsymbol{n}$和$\boldsymbol{r}_{\mathrm{t}}$分别为直升机旋翼桨叶汇、偶极子、旋翼桨叶表面、桨叶尾迹涡面、桨叶法矢量和流场空间的位置矢量。

根据 Neumann 边界条件, 并考虑基于 LBM 的舰艇 ACD 流场, 旋翼桨叶表面分布为

$$-\sigma=\boldsymbol{n}\cdot(\boldsymbol{v}_{\mathrm{B}}+\boldsymbol{u}_{\mathrm{inf}}+\boldsymbol{u}_{\mathrm{v}}+\boldsymbol{u}_{\mathrm{LBM}}) \tag{16}$$

式中: $\boldsymbol{v}_{\mathrm{B}}$为旋翼桨叶运动速度矢量; $\boldsymbol{u}_{\mathrm{inf}}$为自由来流速度矢量; $\boldsymbol{u}_{\mathrm{v}}$为旋翼尾迹诱导速度矢量; $\boldsymbol{u}_{\mathrm{LBM}}$为舰艇流场速度矢量。由式 (3) 计算得到。

根据直升机旋翼桨叶边界条件、后缘 Kutta 边界条件, 并采用四边形网格离散桨叶表面, 最终计算得到旋翼桨叶偶极子分布。桨叶气动力可表示为

$$\Delta\boldsymbol{F}=-\frac{1}{2}\rho\boldsymbol{v}_{\mathrm{ref}}^2C_p\Delta S_{\mathrm{b}}\boldsymbol{n} \tag{17}$$

式中: $\Delta\boldsymbol{F}$为旋翼桨叶单元表面气动力; ΔS_{b}为桨叶单元面积; ρ为空气密度; C_p为桨叶表面压力系数; $\boldsymbol{v}_{\mathrm{ref}}$为桨叶合速度矢量。

直升机旋翼尾迹结构可通过三维 Navier-Stokes 方程计算得到, 基于黏性涡粒子法[19] 的直升机尾迹涡量分布为

$$\frac{\partial\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}}{\partial t}+\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}}\nabla\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}=\nabla\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}+\nu\nabla^2\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}} \tag{18}$$

式中: ν和$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}$分别为空气运动黏度和尾迹涡量; $\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}}$为速度场, 可由 Biot-Savart 定律和舰艇流场计算得到。

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}}=-\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\boldsymbol{\varepsilon}_v^3}K(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_i)\times\boldsymbol{\alpha}_i+\boldsymbol{u}+\boldsymbol{u}_{\mathrm{LBM}} \tag{19}$$

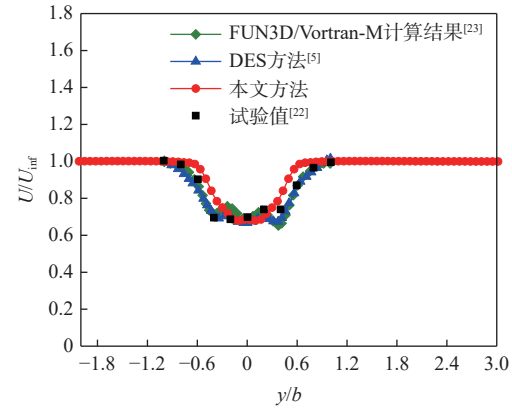
式中: K、$\boldsymbol{\alpha}_i$、$\boldsymbol{\varepsilon}_v$分别为 Biot-Savart 核函数、涡粒子涡矢量、涡核半径。

按四阶 Runge-Kutta 格式求解式 (18), 采用粒子强度交换法求解式 (18) 的$\nu\nabla^2\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}$, 并采用直接求解法求解式 (18) 的$\nabla\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}$, 嵌入快速多极子方法加速计算旋翼流场, 从而得到舰艇流场干扰下的直升机旋翼尾迹时变结构, 最终得到舰艇流场干扰下的旋翼气动载荷。

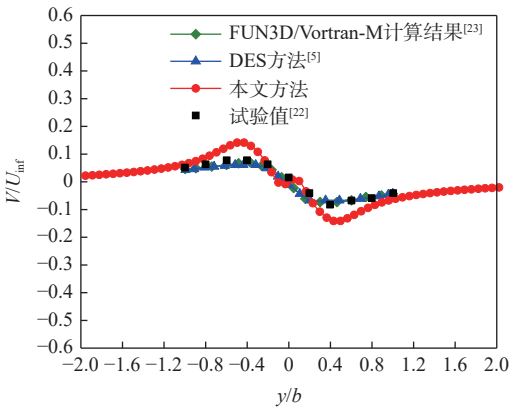
2　计算结果与分析

2.1　无 ACD 的舰艇流场

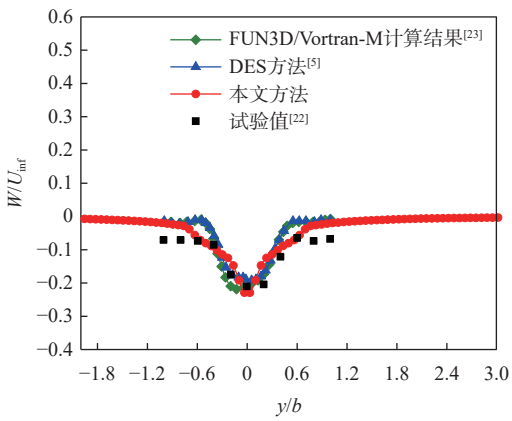
无 ACD 舰艇采用标准 SFS2 舰艇模型, 尺寸参数如图 1 所示。全尺寸舰艇流场计算域为 350 m×150 m×50 m, 结构网格数量为 4.1×10^7, 计算时间步长为 1.0×10^{-4} s, 航行速度 U_{inf} 为 20.6 m/s, Re 为 2.26×10^7, 空气运动黏度为 $1.248\ 9\times10^{-5}$ (N·s)/m^{-2}。计算得到舰艇甲板典型位置处 (甲板中间和机库高度) 的速度分布如图 4 所示。图中同时给出加拿大国家空气动力学研究委员会 2 m×3 m 风洞试验测量值[22]、FUN3D/Vortran-M 软件计算结果[23] 及分离涡模拟 DES 结果[5], 其中, FUN3D/Vortran-M 软件耦合了基于欧拉体系的涡量输运求解器 VorTran-M 和 NASA 兰利研究中开发的 FUN3D 软件, 以减小计算量并降低舰艇艉流数值耗散。DES 方法采用结构-非结构混合网格、SST k-ω 湍流模型、三阶 MUSCL 格式。



(a) 纵向速度U



(b) 横向速度V



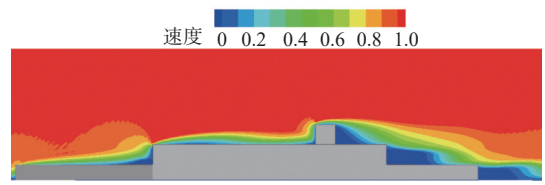
(c) 垂向速度W

图 4 舰艇典型位置处速度分布

Fig. 4 Velocity distribution at typical location of ship

计算得到 3 个方向速度随甲板宽度变化曲线与试验值[22]、FUN3D/Vortran-M[23] 和 DES 计算结果[5]基本吻合。从甲板左舷到右舷，甲板流场纵向速度 U 先减小后增加，且 U 小于 1，由此表明甲板处存在显著的低速区。甲板处纵向速度平均降低 28.8%，最大降低幅值为 30.25%，且计算得到的速度降低幅值与试验值[22] 和 DES 方法[5] 的结果吻合。与纵向速度不同，受甲板边缘气流分离涡的影响，从甲板左舷到右舷，横向速度 V 先增加后减小，最后增加，形成类正弦函数。横向速度最大值计算值略比试验值大，但变化趋势与试验值基本一致。垂向速度 W 变化规律与纵向速度 U 变形相似。FUN3D/Vortran-M 和 DES 计算得到的垂向速度与实验测量结果略有偏差，而本文方法计算结果与试验值吻合。此外，FUN3D/Vortran-M 使用 128 核 IBM 服务器计算 3.26×10^6 网格、1 000 次迭代耗时 16.7 h；DES 使用 32 核服务器计算 5.8×10^6 网格、6 000 次迭代耗时 200 h，而本文舰艇流场计算使用 8 核台式机计算 4.1×10^7 网格和 22 000 迭代仅耗时 26.3 h。因此，本文方法适用于舰艇流场分析。

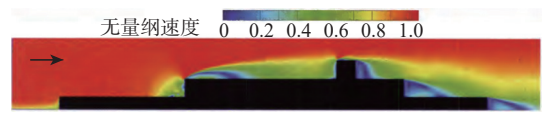
计算得到 SFS2 舰艇对称面流场如图 5 所示，图中同时给出 LES 结果[24] 和试验值[5]。舰艇机库上表面和甲板处均存在明显的回流现象，且计算结果与试验值[5] 和 LES 结果[24] 基本一致，由此表明本文方法能较好地模拟舰艇甲板流动特性。



(a) 本文方法



(b) LES方法[24]



(c) 试验值[5]

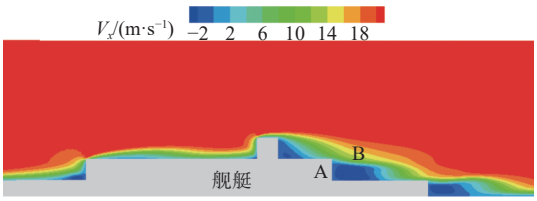
图 5 SFS2 舰艇对称面流场分布

Fig. 5 Flowfield of SFS2 at centerline

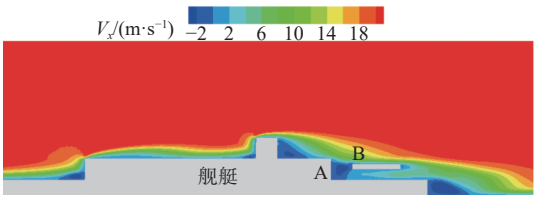
2.2 ACD 对舰艇流场的影响特性

无 ACD 和有 ACD 时舰艇对称面流场如图 6 所示 (航行速度为 20.6 m/s)。

无 ACD 状态下，舰艇机库上方剪切层向甲板方向移动，与甲板表面接触，并分成指向甲板流动(见图 7(a) 中 a 区)与指向舰艇尾部的流动(见图 7(a) 中 b 区)，a 区流动受机库、剪切流影响，形成明显回流。ACD 状态下，机库上方的剪切流受 ACD 的上、下两部分影响(见图 7(b) 中 c、d、e 区)，c 区与 ACD 上表面接触角较小，且沿着 ACD 上表面向下游流动，e 区沿着 ACD 与甲板缝隙向下游流动，d 区流向机库，但强度减弱，因而在机库与 ACD 缝隙处的回流减小。因此，相比于无 ACD 舰艇，增加 ACD 后舰艇机库与甲板之间 (a 区) 的反向流减小。虽然机库与 ACD 之间仍然存在较小的回流区(见图 6(b) 和图 7(b))，但相比于无 ACD 舰艇，回流区明显减小，由此表明 ACD 能有效抑制舰艇甲板处的回流



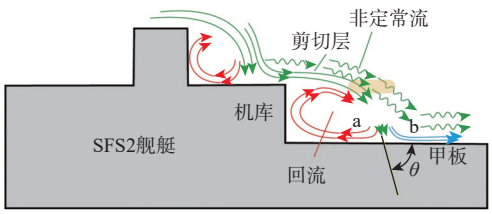
(a) 无ACD



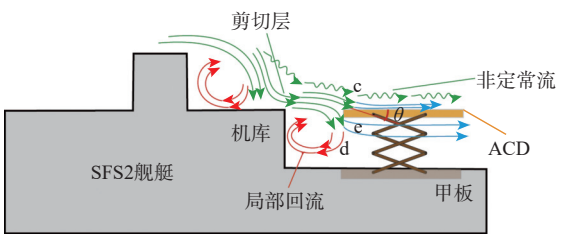
(b) 有ACD

图 6　ACD 对舰艇对称截面流场的影响

Fig. 6　Influence of the ACD on the flow field at centerline



(a) 无ACD



(b) 有ACD

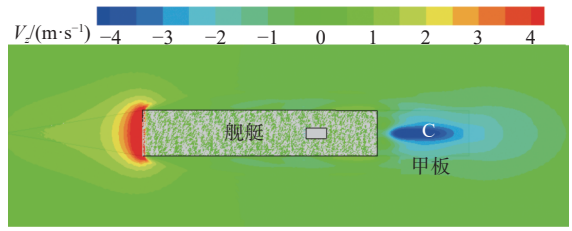
图 7　舰艇流场示意图

Fig. 7　Schematic of the ship flow

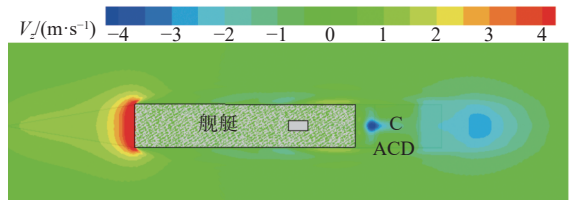
现象。无 ACD 时, 舰艇甲板上方存在明显的反向流, 而 ACD 上方为正向流。此外, 计算得到 ACD 状态下的舰艇机库上表面、甲板后部、机库表面均出现回流现象, 且 ACD 甲板上方的低速区反映了甲板黏性边界作用, 由此表明流场计算结果反映了 ACD 流场特征, 计算的流场合理。

无 ACD 和有 ACD 时舰艇机库高度垂向速度分布如图 8 所示。由于甲板处存在明显回流, 垂向速度变化对着舰直升机气动载荷影响较大。无 ACD 时, 舰艇甲板直升机着舰处 (C 点) 垂向速度为负值, 由此表明气流绕过机库顶部后快速向下流向甲板 (见图 8(a)), 从而减小直升机旋翼拉力, 产生拉力损失。然而, 有 ACD 时, C 点处的垂向速度接近 0(见图 8(b)), 仅机库与 ACD 之间较小区域的垂向速度为负值。由此表明 ACD 能明显抑制甲板上方的垂向流动。

各风向无 ACD 和有 ACD 时舰艇机库高度垂



(a) 无ACD



(b) 有ACD

图 8　ACD 对舰艇机库高度垂向速度的影响

Fig. 8　Influence of the ACD on the vertical velocity at top of the hangar door

向速度场如图 9 所示。

风向左舷 10°状态无 ACD 时, 由于机库与甲板左舷边缘产生明显分离 (见图 10(a)), 形成显著的尾流区, 从而导致直升机旋翼前行侧 (见图 9(a) 中 A 区) 垂向速度为负值, 而后行侧 (见图 9(a) 垂向速度中 B 区) 为正值, 因而导致前行侧气动力减小, 后行侧气动力增加, 诱发旋翼滚转力矩。然而, 有 ACD 时, 由于 ACD 与甲板之间增加了横向流动 (见图 10(b)), 减小了机库与甲板左舷边缘分离产生的尾流, 因而直升机旋翼前行侧 (见图 9(b) 中 A 区) 向下垂向速度和后行侧 (见图 9(b) 中 B 区) 向上垂向速度均明显减小, 从而减小了旋翼滚转力矩。风向左舷 30°和 60°状态无 ACD 时, 旋翼后行侧 (见图 9(c) 和图 9 (e) 中 B 区) 受甲板边缘影响存在明显的向上气流, 从而导致旋翼滚转力矩增加, 而 ACD 有效减小了因甲板边缘导致的向上气流 (见图 9(d) 和图 9(f) 中 B 区), 从而降低了旋翼滚转力矩。

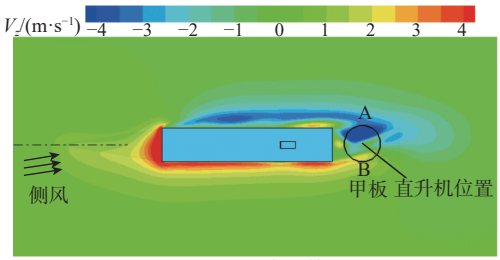
无 ACD 和有 ACD 时舰艇艉流如图 11 所示。

有 ACD 舰艇艉流与无 ACD 舰艇艉流基本相似, 但 ACD 减小了舰艇机库和甲板上方 (见图 11(b) 中 B 区) 的艉流强度, 甲板上方直升机着舰处涡量强度降低了 29.3%。此外, 相比于无 ACD, 有 ACD 机库艉流分离角 (见图 11(b) 中 B 区) 更小, 主要原因为 ACD 减小了甲板左舷分离涡强度和流动速度, 进而减小艉流向右弦移动速度, 减小分离角。

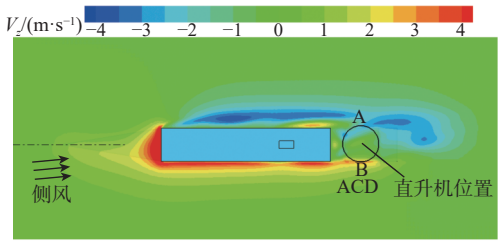
2.3　ACD 对着舰直升机气动载荷的影响特性

ACD 对 UH-60A 直升机着舰状态的尾流结构影响如图 12 所示。UH-60A 质量为 6 577 kg, 旋翼距离甲板高度为 6.1 m。

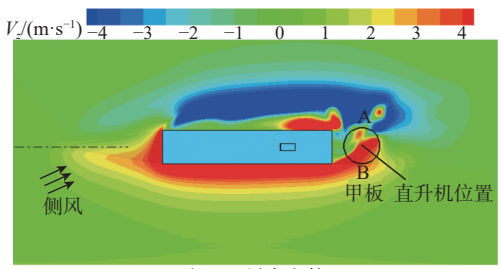
无舰艇干扰下, 旋翼桨叶脱出的桨尖涡向下游



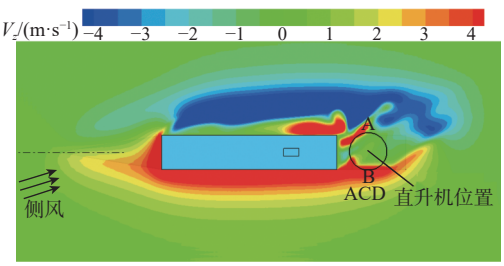
(a) 无ACD(风向左舷10°)



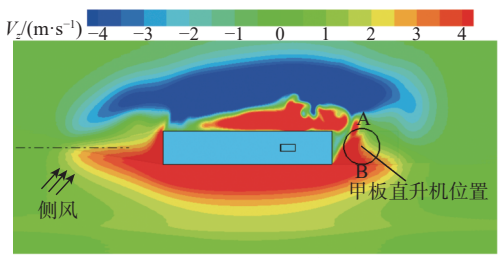
(b) 有ACD(风向左舷10°)



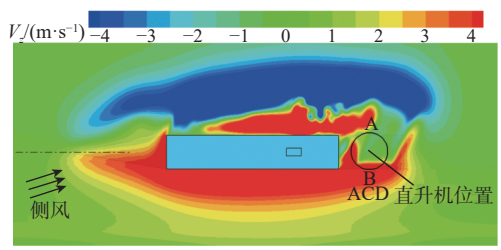
(c) 无ACD(风向左舷30°)



(d) 有ACD(风向左舷30°)



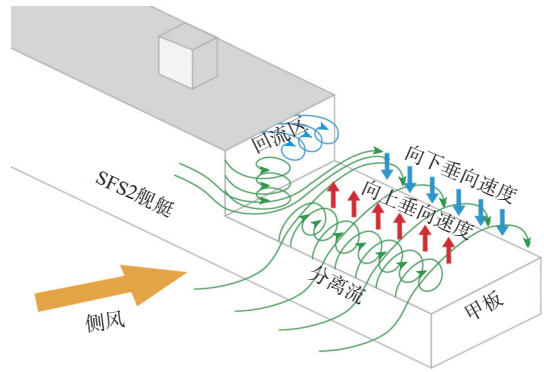
(e) 无ACD(风向左舷60°)



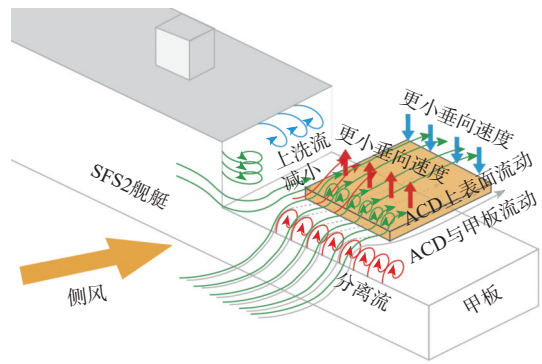
(f) 有ACD(风向左舷60°)

图 9 各风向 ACD 对舰艇机库高度垂向速度的影响

Fig. 9 Influence of the ACD on the vertical velocity at top of the hangar with different wind directions



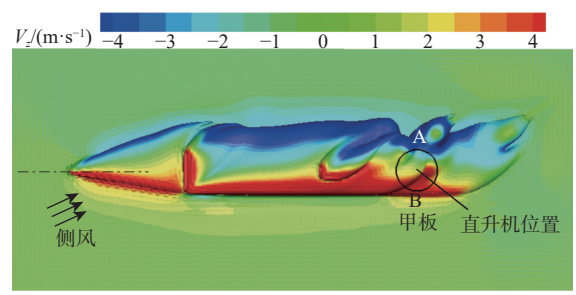
(a) 无ACD



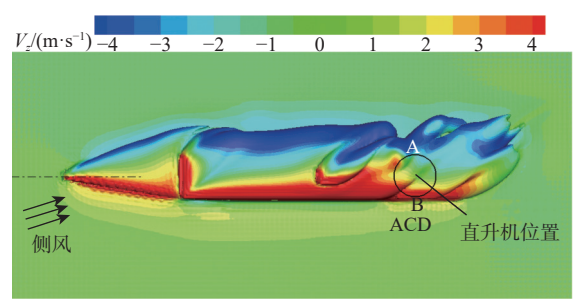
(b) 有ACD

图 10 侧风舰艇流场示意图

Fig. 10 Schematic of the ship flow at crosswind



(a) 无ACD

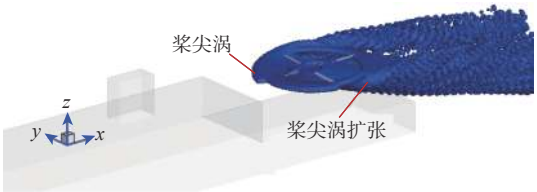


(b) 有ACD

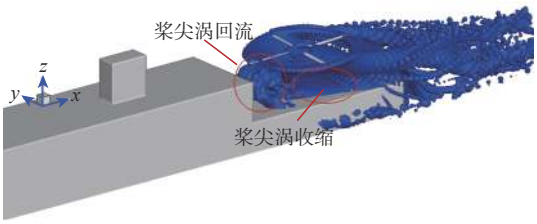
图 11 ACD 对舰艇艉流的影响 (风向左舷 30°)

Fig. 11 Influence of the ACD on the ship airwake at θ=−30°to port

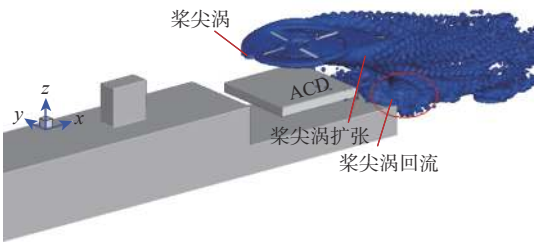
移动并向外扩张,形成卷起桨尖涡结构 (见图 12(a))。然而,在舰艇干扰下,旋翼桨尖涡向下游移动速度减小,并靠近舰艇甲板;受反流作用,桨尖涡向前移动,并在机库表面反弹后向上移动,再次进入旋



(a) 无舰艇



(b) 无ACD



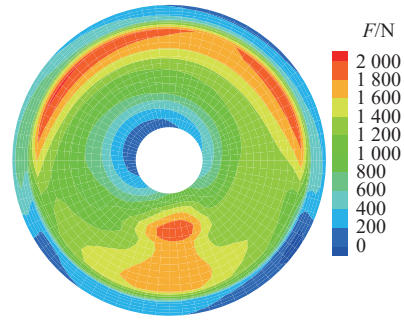
(c) 有ACD

图 12　ACD 对直升机着舰尾流的影响

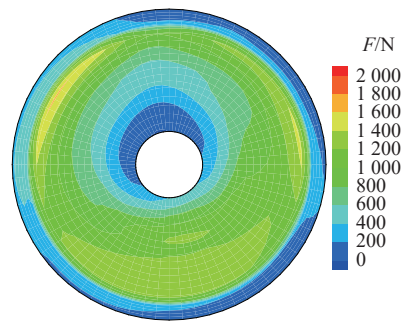
Fig. 12　Influence of the ACD on wake of shipborne helicopter

翼尾流, 形成显著的回流现象 (见图 12(b))。此外, 相比于无舰艇干扰, 受甲板边缘分离流影响, 舰艇干扰下的旋翼前行侧和后行侧桨尖涡向内收缩。相比于无 ACD, ACD 抑制了舰艇甲板反流 (见图 6(b) 中 B 区), 增加了甲板上方向后方流场速度, 并明显减小了旋翼位置向下速度 (见图 8(b) 中 C 区), 因而旋翼桨尖涡回流现象消失, 旋翼尾迹与 ACD 甲板干扰也消失。此外, 由于 ACD 降低了甲板边缘分离涡强度, 因而旋翼前行侧和后行侧桨尖涡收缩现象也消失, 且与孤立旋翼卷起桨尖涡结构相似。因此, ACD 显著抑制了旋翼桨尖涡的回流和收缩现象。由于 ACD 并未抑制舰艇尾部与海面的回流区 (见图 6(b)), 因而旋翼桨尖涡靠近海面后仍然受到舰艇尾部回流区的反流影响, 形成向前运动, 并形成回流现象。

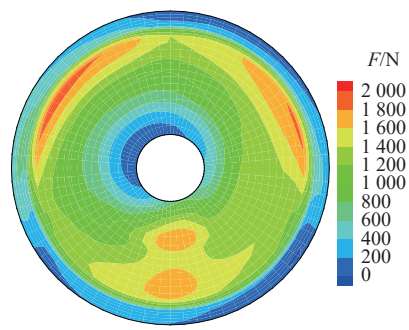
图 13 所示为 ACD 对旋翼桨盘载荷的影响。无舰艇干扰下, 旋翼拉力分布于前半部分和后半部分, 以满足配平要求。然而, 在舰艇干扰下, 受舰艇回流诱发的向下速度影响 (见图 8(a)), 旋翼前半部分和后半部分的拉力显著减小。相比于无 ACD, ACD 明显抑制舰艇甲板回流, 并减小向下速度 (见图 8(b)), 因而旋翼前半部分和后半部分拉力得到明显恢复, 且与孤立旋翼基本相似。因此, ACD 抑制了由舰艇回流产生的旋翼拉力损失。



(a) 无舰艇



(b) 无ACD



(c) 有ACD

图 13　ACD 对旋翼载荷的影响

Fig. 13　Influence of the ACD on the rotor airloads

旋翼桨叶特征剖面气动载荷系数变化特性如图 14 所示。相比于无舰艇, 舰艇干扰下的桨叶特征剖面气动载荷在方位角 ψ 为 90°～270°和 300°～390°时显著降低, 然而, ACD 明显提升了 90°～270°和 300°～390°处桨叶特征剖面气动载荷系数。

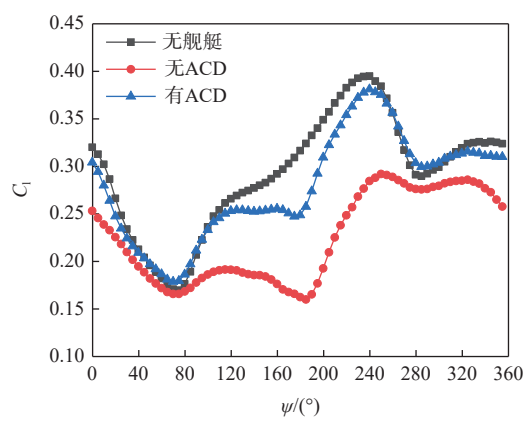
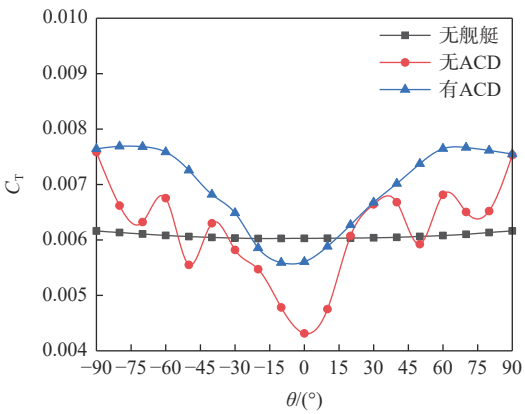


图 14　桨叶特征剖面气动载荷系数 (r/R=0.75)

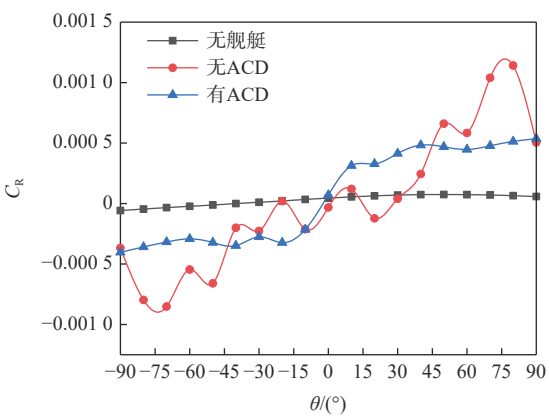
Fig. 14　Blade sectional thrust coefficient (r/R =0.75)

各风向ACD对着舰直升机旋翼气动载荷的影响如图15所示，其中，风向角θ定义如图16所示。无舰艇干扰的直升机旋翼操纵量由配平得到，而有/无ACD舰艇干扰下的旋翼操纵量与无舰艇干扰旋翼操纵量相同，以更清楚体现舰艇干扰对旋翼气动载荷的影响。

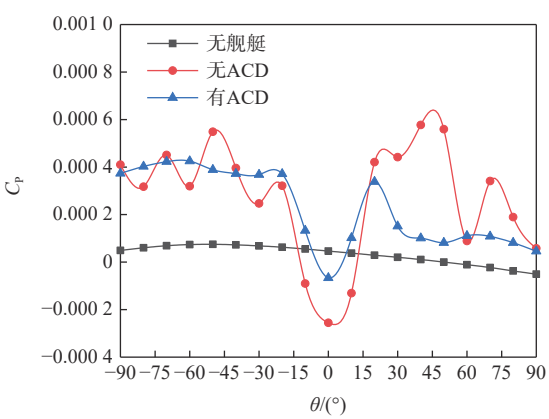
无舰艇干扰下，经配平后的旋翼拉力系数基本不变，滚转力矩和俯仰力矩系数基本为0。然而，受舰艇甲板回流的影响，无ACD状态下的旋翼拉力系数在风向角为−30°～15°时显著降低，最大降幅为28.7%，而ACD状态下的旋翼拉力系数得到明显提升，增加幅值为21.6%，拉力系数降低现象得到明显抑制。侧风状态下，无ACD舰艇甲板边缘分离诱导较大向上速度(见图10(a)和图11(a))，从而显著增加旋翼后行边气动力，并减小前形边气动力，增加旋翼整体拉力。ACD减小了舰艇甲板两侧气流分流强度(见图10(b)和图11(b))，因而，相比于无ACD，旋翼后行边气动力略减小，前形边气动力则增加，从而导致旋翼气动力增加。



(a) 旋翼拉力系数C_T



(b) 旋翼滚转力矩系数C_R



(c) 旋翼俯仰力矩系数C_P

图15 旋翼气动载荷随风向的变化

Fig. 15 Variations of rotor airloads at different wind directions

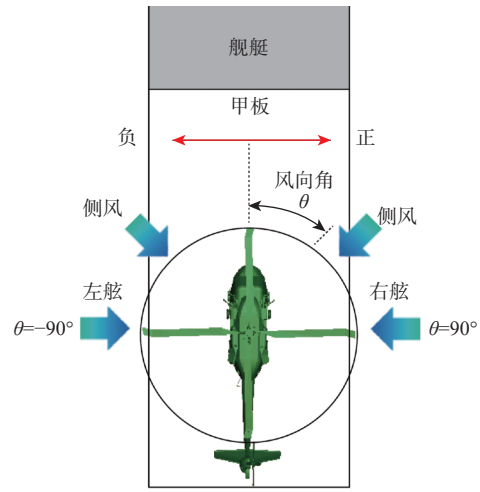
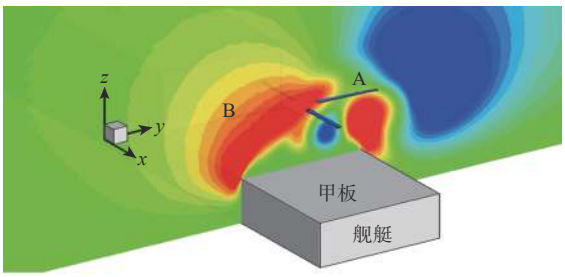


图16 风向角示意图

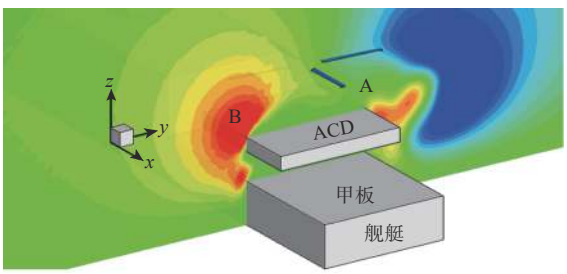
Fig. 16 Schematic of wind direction

图17为左舷30°风向的平板流场，图18为右舷30°风向的旋翼气动力。无ACD舰艇流场干扰下，左舷风向导致舰艇甲板左舷边缘分离，在旋翼后行侧产生较明显上洗流(见图17(a))，增加后行侧拉力，产生向左滚转力矩(滚转力矩为负)(见图18(a))。然而，ACD抑制甲板分离，减小左舷风向下的旋翼后行侧上洗流(见图17(b))，从而减小后行侧拉力，减小向左滚转力矩(见图18(b))，最大减小幅值为55.1%。右舷风向变化特性与此类似，因此，ACD降低相同状态的旋翼滚转力矩系数，有利于直升机着舰操纵。

无ACD舰艇流场干扰下，受舰艇甲板显著回流的影响，旋翼俯仰力矩在风向为−15°～15°时显著减小，诱发直升机低头。然而，ACD抑制舰艇甲板回流，因而明显降低风向−15°～15°旋翼俯仰力矩，减小幅值为74.6%，有利于直升机着舰。此外，相比于甲板左侧上洗流对旋翼后行侧拉力的影响，甲板右侧上洗流对旋翼前行侧拉力影响更为显著，因此，左侧风状态下ACD对旋翼俯仰力矩影响较小。然而，相比于无ACD，右侧风ACD下的旋翼俯仰力矩明显减小，最大降幅为85.9%，有利于直升机着舰操纵。



(a) 无ACD

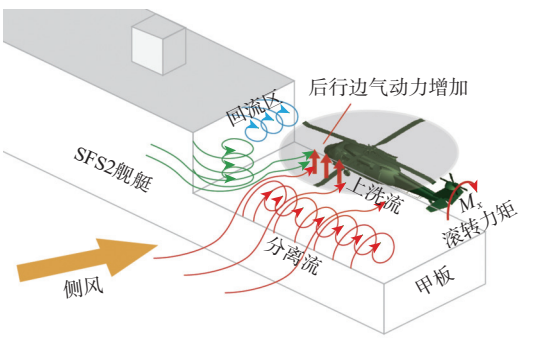


(b) 有ACD

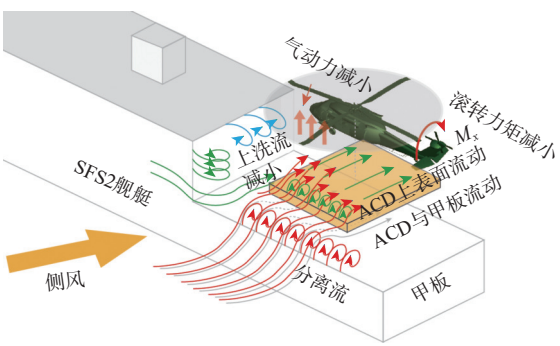


图 17　左舷 30°风向的甲板流场

Fig. 17　Flow field of deck at θ=−30° wind direction on port side



(a) 无ACD



(b) 有ACD

图 18　右舷 30°风向的旋翼气动力

Fig. 18　Aerodynamics of rotor at θ=−30°wind direction on port side

3　结　论

1）本文建立基于 LBM 的舰艇 ACD 流场分析方法，计算得到标准舰艇 SFS2 流场与实验测量值、FUN3D/Vortran-M、DES 结果吻合，且较好模拟舰艇甲板回流现象。

2）提出舰艇流场主动控制的 ACD 方法，且 ACD 有效抑制舰艇甲板回流现象。

3）ACD 有效抑制靠近舰艇甲板和机库的直升机旋翼桨尖涡回流现象，且抑制由甲板边缘气流分离导致旋翼桨尖涡压缩现象。

4）ACD 显著减小着舰直升机旋翼拉力损失，降幅为 21.6%，并减小舰艇甲板回流和两侧气流分离导致的旋翼滚转力矩和俯仰力矩，最大降幅幅值为 55.1% 和 74.6%。

参考文献（References）

[1] NEDA T, DANIELE Z, ALEX Z, et al. Experimental study of a helicopter model in shipboard operations[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 115: 106774.

[2] OWEN I, LEE R, WALL A, et al. The NATO generic destroyer–A shared geometry for collaborative research into modelling and simulation of shipboard helicopter launch and recovery[J]. Ocean Engineering, 2021, 228: 108428.

[3] 李旭, 祝小平, 周洲, 等. 动基座近舰面流场数值模拟[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 122131.
LI X, ZHU X P, ZHOU Z, et al. Numerical simulation of flow field during landing for carrier-based aircraft near a moving base[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 122131(in Chinese).

[4] CROZON C, STEIJL R, BARAKOS G N. Coupled flight dynamics and CFD–demonstration for helicopters in shipborne environment[J]. The Aeronautical Journal, 2018, 122(1247): 42-82.

[5] FORREST J S, OWEN I. An investigation of ship airwakes using detached-eddy simulation[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(4): 656-673.

[6] SHAFER D, GHEE T. Active and passive flow control over the flight deck of small naval vessels[C]//Proceedings of the 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2005: 5265.

[7] FINDLA D B, GHEE T. Experimental investigation of ship airwake flow control for a US navy flight II-A class destroyer (DDG)[C]//Proceedings of the 3rd AIAA Flow Control Conference. Reston: AIAA, 2006: 1-10.

[8] GREENWELL D, BARRETT R. Inclined screens for control of ship air wakes[C]// Proceedings of the 3rd AIAA Flow Control Conference. Reston: AIAA, 2006: 3502.

[9] BARDERA R, MESEGUER J. Flow in the near air wake of a modified frigate[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229(6): 1003-1012.

[10] FORREST J S, KAARIA C H, OWEN I. Determining the impact of hangar-edge modifications on ship-helicopter operations using offline and piloted helicopter flight simulation[C]//American Helicopter Society 66th Annual Forum. Montreal: AHS, 2010: 11-13.

[11] SHI Y J, HE X, XU Y, et al. Numerical study on flow control of

ship airwake and rotor airload during helicopter shipboard landing[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(2): 324-336.

[12] BARDERA-MORA R, CONESA A, LOZANO I. Simple frigate shape plasma flow control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(14): 2693-2699.

[13] SHI Y J, SU D C, XU G H. Numerical investigation of the influence of passive/active flow control on ship/helicopter dynamic interface[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106205.

[14] 李光印, 徐国华, 史勇杰, 等. 主动射流控制对直升机着舰飞行的影响分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(12): 68-79.
LI G Y, XU G H, SHI Y J, et al. Influence of active flow control on shipborne helicopter landing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(12): 68-79(in Chinese).

[15] BARDERA J, MATIAS J C. A comparison of helicopter recovery maneuvers on frigates by means of PIV measurements[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108393.

[16] KOELMAN J M V A. A simple lattice boltzmann scheme for navier-stokes fluid flow[J]. Europhysics Letters (EPL), 1991, 15(6): 603-607.

[17] RANDLES A P, KALE V, HAMMOND J, et al. Performance analysis of the lattice boltzmann model beyond navier-stokes[C]//Proceedings of the 2013 IEEE 27th International Symposium on Parallel and Distributed Processing. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1063-1074.

[18] LÉVÊQUE E, TOSCHI F, SHAO L, et al. Shear-improved Smagorinsky model for large-eddy simulation of wall-bounded turbulent flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 570: 491-502.

[19] DOOLEY G, EZEQUIEL MARTIN J, BUCHHOLZ J H J, et al. Ship airwakes in waves and motions and effects on helicopter operation[J]. Computers & Fluids, 2020, 208: 104627.

[20] 谭剑锋, 周天熠, 王畅, 等. 旋翼地面效应的气动建模与特性[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 122602.
TAN J F, ZHOU T Y, WANG C, et al. Aerodynamic model and characteristics of rotor in ground effect[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 122602(in Chinese).

[21] 谭剑锋, 何龙, 于领军, 等. 基于粘性涡粒子 VVPM/沙粒 DEM 的直升机沙盲建模研究[J]. 航空学报, 2022, 43(3): 125536.
TAN J F, HE L, YU L J, et al. Investigation on method of helicopter brownout based on viscous vortex particle and sand particle DEM[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 125536(in Chinese).

[22] CHENEY B, ZAN S. CFD code validation data and flow topology for the technical co-operation program AER-TP2 simple frigate shape NRCIAR-LTR-A-035[R]. Ottawa: National Research Council of Canada Technical Report NRCIAR-LTR-A-035, 1999.

[23] QUON E W, CROSS P A, SMITH M J. Investigation of ship airwakes using a hybrid computational methodology[C]//Proceedings of the AHS 70th Annual Forum. Montreal: AHS, 2014: 3001-3014.

[24] THEDIN R, KINZEL M P, SCHMITZ S. High-fidelity simulations of the interaction of atmospheric turbulence with ship airwakes [C]//Proceedings of the AHS International 73rd Annual Forum & Technology Display. Montreal: AHS, 2017: 1-14.

Investigation on aerodynamics of a helicopter approaching an active control deck

TAN Jianfeng[1,*], XING Xiaobing[1], CUI Zhao[2], WU Jie[3], ZHANG Weiguo[3]

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
2. Aircraft Institute of Technical Center, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China;
3. Rotor Aerodynamics Key Laboratory, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Passive and active flow controls were used to reduce the turbulence intensity of ship airwake, but there was a recirculation zone on the deck resulting in intensively unsteady airloads of a helicopter. Thus, a novel active control deck (ACD) which can be automatically lifted up and descended is firstly proposed to weaken the recirculation. Helicopter airloads are examined by combining a viscous vortex particle approach with the lattice Boltzmann approach (LBM) via a one-way coupling model. This establishes a flow field analysis method of the ship with ACD. The accuracy of the method is validated by comparing the present prediction with the SFS2 experiment, detached eddy simulation (DES), and large eddy simulation (LES) results. The influences of the ACD on the ship flow field and airloads of a helicopter approaching the ship are analyzed. It is demonstrated that the ACD clearly suppresses the recirculation bubble when compared to the baseline SFS2. Additionally, the reduction of the rotor thrust, rolling, and pitching moments is weakened, with the largest reductions being 21.6%, 55.1%, 74.6%.

Keywords: active control deck; helicopter rotor; ship airwake; lattice Boltzmann method; viscous vortex particle

Received: 2022-07-13; **Accepted**: 2022-09-05; **Published Online**: 2022-10-09 13:13

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221006.1316.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (12172165); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20211259); Outstanding Young Backbone Teacher Project of Jiangsu Qinglan Project

* **Corresponding author**. E-mail: Jianfengtan@njtech.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0625

进港航班滑入时间预测

唐小卫*，丁叶，张生润，任思豫，吴佳琦
(南京航空航天大学 民航学院，南京 211106)

摘　　要：准确预测进港航班滑入时间对合理调配航班保障资源和提高机场场面运行效率具有重要意义，可有效克服各大机场粗放式预测航班进港时刻的不足，为此提出一种基于机器学习模型的滑入时间预测方法。以首都机场为具体研究对象，分析进港航班滑入时间的影响因素并构建特征集；将线性回归、K-最近邻、支持向量机、决策树、随机森林和梯度提升回归树6种在滑出时间预测方面得到广泛应用的机器学习模型用于进港航班滑入时间预测。研究结果表明：在误差范围±3 min内6种机器学习模型的预测精度均超过90%，表明特征集的构建和模型的选择是有效的；综合预测性能与模型拟合评估结果，梯度提升回归树模型的预测效果最好；在梯度提升回归树模型上场面流量特征的贡献度最大，新引入的跨区特征对预测模型的贡献度超过了大部分传统特征。

关　键　词：航空运输；机场场面运行；滑行时间预测；机器学习；梯度提升回归树
中图分类号：V351
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2218-07

航班滑行时间包括进港滑入时间和离港滑出时间。滑入时间是指航班从落地至入位上轮挡的时间，滑出时间是指航班从机位撤轮挡推出至起飞离地的时间，二者都是表征机场场面运行效率的重要指标。航班离港滑出时间的研究受到更多的重视，这是因为离港航班在机位的目标推出时刻是由航班在跑道上的计算起飞时刻减去预测的滑出时间倒推得到的，所以滑出时间的精准预测在缓解场面拥堵、提高跑道的利用率等方面具有重要作用。相比之下，滑入时间的起点是航班在跑道落地，而降落航班的次序在落地之前由空中管制部门确定，所以对于机场几乎不存在优化空间。从作业操作来看，离港滑出时飞行员无法直接面对机坪场景，需使用牵引车将飞机从机位推出，滑出时间持续较长；而在滑入的整个过程中飞行员均直接面对运行场景且不需要牵引车，所以滑入时间持续较短，对其研究也相应很少。在实际保障过程中，各机场普遍以“航班实际落地时刻加上10 min”近似代替“航班进港时刻”，据此安排航班保障的人力与设备资源，但这种粗糙的管理方法既未考虑到不同机场之间的规模差异，也忽视了同一机场不同机位之间的位置差异，缺乏科学性与合理性。因此准确预测进港航班的滑入时间并计算出较为准确的航班进港时刻，对于机场保障资源的优化配置和航班过站的精细调度都具有重要的现实意义。

国内外对航班滑行时间预测的研究绝大多数集中在离港滑出时间预测上。早期的研究主要使用排队论模型[1-2]与统计学中的多元线性回归(linear regression, LR)模型[3-4]。随着适配开源软件的多种机器学习库的不断涌现，机器学习模型在滑出时间预测研究中逐渐得到广泛应用。Lee等[5]发现属于集成学习的随机森林(random forest, RF)模

收稿日期：2022-07-19；**录用日期**：2022-08-19；**网络出版时间**：2022-09-09 11:27
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220908.1849.004
基金项目：国家自然科学基金 (61603178,U2333204,U2233208)
* **通信作者**. E-mail：tangxiaowei@nuaa.edu.cn

引用格式：*唐小卫，丁叶，张生润，等. 进港航班滑入时间预测[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2218-2224.*
TANG X W，DING Y，ZHANG S R，et al. Taxi-in time prediction of arrival flight[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2218-2224 (in Chinese).

型的预测准确性大于支持向量机(support vector regression, SVR)、K-最近邻(K-nearest neighbor, KNN)等传统机器学习模型和深度学习分类下的神经网络模型; Herrema 等[6] 比较了神经网络、多层感知器、强化学习与决策树的滑出时间预测性能, 结果显示, 决策树(decision tree, DT)是其中预测效果最好的模型; 冯霞等[7] 基于 K-最近邻与支持向量机回归对滑出时间进行了两阶段预测, 得到了比直接预测更高的预测精度; Diana[8] 研究发现, 在不同年份的数据集上线性回归模型与集成学习中的梯度提升回归树(gradient boosting regression tree, GBRT)模型分别具有最佳的预测效果; Lian 等[9] 使用基于萤火虫算法改进的支持向量机回归模型进行了首都机场的滑出时间研究; 李楠等[10] 分别使用了 Lasso 线性回归模型与统计学线性回归模型进行滑出时间预测, 得出比前者具有更高的精度; Wang 等[11] 在研究中使用了多层感知器、线性回归、梯度提升回归树与随机森林等模型, 发现集成学习类模型的预测准确性更高。以上研究表明, 线性回归、K-最近邻、支持向量机回归、决策树、随机森林、梯度提升回归树等模型在滑出时间预测问题上得到了普遍的应用, 但在不同的机场及对应的数据集上有着不同的表现。整体上, 部分集成学习模型和树模型一般具有更好的预测效果。在特征构建方面, 离港滑出时间预测的特征库一般包括场面流量[3-4,12]、运行时段[8,13]、跑道配置[8,13]、机型类别[8,14]、航司属性[15]、滑行距离[8,16], 其中场面流量特征的重要度远超过其他方面的特征。

为解决航班进港时刻粗放式预测方法带来的问题, 提高机场保障资源的利用率与场面运行效率, 本文将重点研究进港航班滑入时间的预测问题。首先, 分析进港航班滑入时间的影响因素, 在此基础上构建特征集; 其次, 将在滑出时间预测研究中得到广泛应用的 6 种预测模型用于进港滑入时间的预测; 最后, 基于首都机场实际运行数据, 对比研究 6 种机器学习模型的预测精度, 评估不同模型的拟合效果和特征的重要度。

1　数据分析及特征集构建

1.1　首都机场运行环境与数据收集

选取北京首都国际机场(以下简称“首都机场”)为分析对象, 其场面布局如图 1 所示, 共有 3 条远距平行跑道, 两两之间均符合双跑道独立运行的间距要求。3 座航站楼与 16 个机坪分布于 3 条平行跑道之间, 构型复杂的滑行道系统连接所有跑道与机坪。机场整体的运行朝向决定了滑行道的运行流向, 图 1 展示了首都机场向北运行时主要滑行道的滑行流向, 黑色箭头指示单向滑行流向, 白色箭头指示双向滑行道的主要滑行流向。

为避免新冠疫情后航班量波动过大带来的非常态预测误差, 收集首都机场 2019-05-01—2019-12-31 的实际运行数据开展研究, 数据字段包括航班号、进港跑道、停机位、机型、航司、实际落地时刻(actual landing time, ALDT)、实际上轮挡时刻(actual in-block time, AIBT)、实际撤轮挡时刻(actual off-block time, AOBT)、实际起飞离地时刻(actual take-off time, ATOT)等。经过数据清洗得到的有效样本数据为 105 908 条。定义航班进港滑入时间 t 为航空器实际落地至实际上轮挡的这段时间, 计算式为

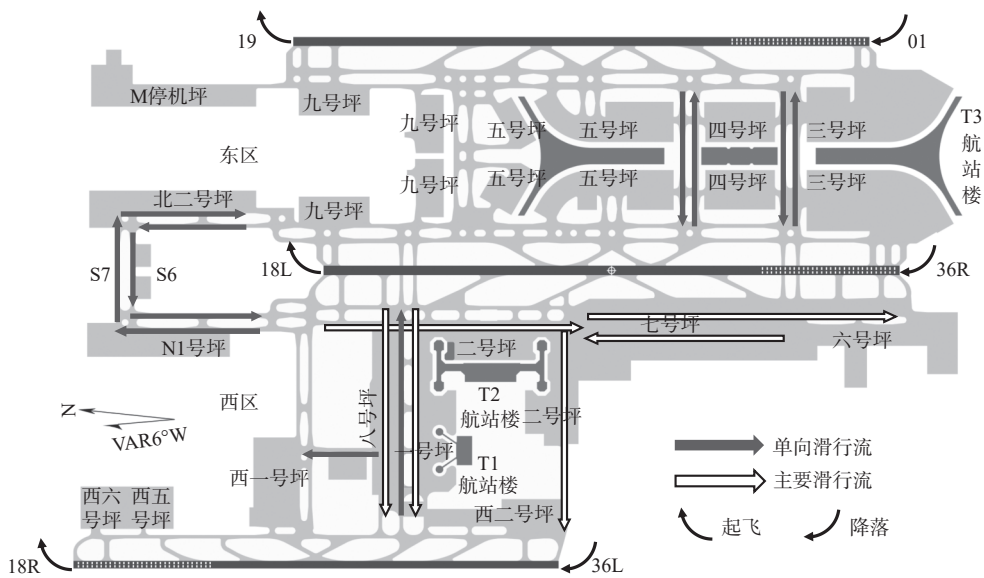


图 1　首都机场场面滑行流向(向北运行)

Fig. 1　Taxiing direction on the surface of Capital Airport field (running north)

$$t = t_{\mathrm{AIBT}} - t_{\mathrm{ALDT}} \tag{1}$$

式中：t_{AIBT}为航班实际上轮挡时刻；t_{ALDT}为航班实际落地时刻。

有效样本进港滑入时间的统计数据如表1所示。由表1可知，进港滑入时间集中在7～17 min，平均为12.35 min。

表1 进港滑入时间统计数据

Table 1 Statistical data of taxi-in time

统计指标	进港滑入时间/min	统计指标	进港滑入时间/min
最小值	3	最大值	59
25%位数	7	平均值	12.35
中位数	11	标准差	6.16
75%位数	17		

1.2 进港滑行时间预测的特征集构建

1.2.1 场面流量特征

场面流量对应了进港航班滑入过程中正在跑道、滑行道或停机坪上运动的航班数量，包括进港航班和离港航班，其数值直观反映了机场场面整体的拥堵情况。由首都机场跑滑系统构型和运行模式可知，进港航班滑行过程会受其他两条跑道上进离港航班的影响。为此，将第i个进港航班的滑行区间定义为$[t_{\mathrm{ALDT}}(i), t_{\mathrm{AIBT}}(i)]$，在此区间运行的其他进出港航班共有8类，进港航班分别为a1, a2, a3, a4类，出港航班分别为d1, d2, d3, d4类。将这8类航班对应的场面流量定义为8个特征变量，其编号和定义如图2和表2所示。对于任意进港航班j，如果其落地时间早于航班i、入位时间位于$[t_{\mathrm{ALDT}}(i), t_{\mathrm{AIBT}}(i)]$，则属于a1类进港航班，count$(j)$表示此类进港航班的数量，对应的场面流量特征标记为$A_1$, A_2, A_3, A_4，定义与之类似。对于任意离港航班k，如果其推出时间早于航班i、离地时间位于$[t_{\mathrm{ALDT}}(i), t_{\mathrm{AIBT}}(i)]$，则属于d1类离港航班，count$(k)$表示此类离港航班的数量，对应的场面流量特征标记为$D_1$, D_2, D_3, D_4，定义与之类似。

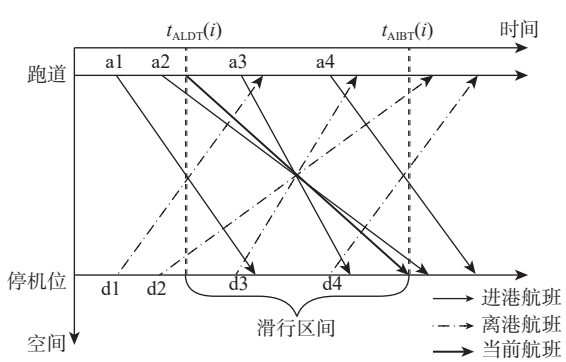


图2 场面运行航空器类别

Fig. 2 Category of aircraft operation aircrafts on the surface

表2 场面流量特征定义

Table 2 Definition of surface traffic flow features

特征变量	定义
A_1	$A_1(i)=\mathrm{count}(j), t_{\mathrm{ALDT}}(j)<t_{\mathrm{ALDT}}(i)\,\&$ $t_{\mathrm{ALDT}}(i)<t_{\mathrm{AIBT}}(j)<t_{\mathrm{AIBT}}(i)$
A_2	$A_2(i)=\mathrm{count}(j), t_{\mathrm{ALDT}}(j)<t_{\mathrm{ALDT}}(i)\,\&$ $t_{\mathrm{AIBT}}(j)>t_{\mathrm{AIBT}}(i)$
A_3	$A_3(i)=\mathrm{count}(j), t_{\mathrm{ALDT}}(j)>t_{\mathrm{ALDT}}(i)\,\&$ $t_{\mathrm{AIBT}}(j)<t_{\mathrm{AIBT}}(i)$
A_4	$A_4(i)=\mathrm{count}(j), t_{\mathrm{ALDT}}(i)<t_{\mathrm{ALDT}}(j)<t_{\mathrm{AIBT}}(i)\,\&$ $t_{\mathrm{AIBT}}(j)>t_{\mathrm{AIBT}}(i)$
D_1	$D_1(i)=\mathrm{count}(k), t_{\mathrm{AOBT}}(k)<t_{\mathrm{ALDT}}(i)\,\&$ $t_{\mathrm{ALDT}}(i)<t_{\mathrm{ATOT}}(k)<t_{\mathrm{AIBT}}(i)$
D_2	$D_2(i)=\mathrm{count}(k), t_{\mathrm{AOBT}}(k)<t_{\mathrm{ALDT}}(i)\,\&$ $t_{\mathrm{ATOT}}(k)>t_{\mathrm{AIBT}}(i)$
D_3	$D_3(i)=\mathrm{count}(k), t_{\mathrm{AOBT}}(k)>t_{\mathrm{ALDT}}(i)\,\&$ $t_{\mathrm{ATOT}}(k)<t_{\mathrm{AIBT}}(i)$
D_4	$D_4(i)=\mathrm{count}(k), t_{\mathrm{ALDT}}(i)<t_{\mathrm{AOBT}}(k)<t_{\mathrm{AIBT}}(i)\,\&$ $t_{\mathrm{ATOT}}(k)>t_{\mathrm{AIBT}}(i)$

注：t_{AOBT}为航班实际撤轮挡时刻，t_{ATOT}为航班实际起飞离地时刻。

分别计算上述8个场面流量特征与进港滑入时间的相关系数，如表3所示。由表3可知，在1%的显著性水平下，8个特征与滑入时间的相关性绝对值均超过0.45，说明本文建立的场面流量特征与进港滑入时间有较强的相关性。其中表示晚于航班i落地并早于航班i入位上轮挡的a3类航空器数量的场面流量特征A_3与滑入时间相关性最大。

表3 场面流量与滑入时间的相关性

Table 3 The correlation coefficient of surface traffic flow and taxi-in time

特征变量	相关系数	特征变量	相关系数
A_1	0.573^{***}	D_1	0.701^{***}
A_2	-0.564^{***}	D_2	-0.451^{***}
A_3	0.878^{***}	D_3	0.662^{***}
A_4	0.662^{***}	D_4	0.660^{***}

注：***表示1%的显著性水平。

上述场面流量特征的设计思路在其他多跑道机场同样适用，但需要根据目标机场的构型和跑道运行模式确定跑道之间的运行是否相互影响。如果进港航班滑行时仅受同跑道运行航班的影响，则只需要考虑同跑道场面流量特征。

1.2.2 跨区特征

首都机场的3条远距平行跑道将机场划分成东、西两区，位于01/19跑道与36R/18L跑道之间的是东区，位于36R/18L跑道与36L/18R跑道之间的是西区。由中跑道36R/18L进港的航班可以从不同的脱离道进入东区或西区，不存在跨区运行，但由外侧2条跑道进港时，根据停靠机位所属区域，将出现跨区或不跨区两种情况。当航班进行跨区运行时，根据中跑道运行状况，一部分航班采取绕

滑方式, 从东区进入西区的航空器需要从北面的 S6 滑行道绕行, 从西区进入东区的航空器则需要从 S7 绕行, 滑行距离较长; 另一部分航班采取直接穿越中跑道的方式, 但为了避免干扰中跑道的正常运行, 可能需要在穿越前等待一段时间。上述 2 种跨区方式都会对进港滑入时长造成明显的影响。统计首都机场实际运行数据发现, 近 30% 的进港航班需要跨区滑行, 跨区滑行的平均滑入时间是不跨区滑行的 2 倍以上, 如表 4 所示。

表 4　跨区与不跨区航班对应的平均滑入时间

Table 4　The average taxi-in time of cross-regional flights and non-cross-regional flights

是否跨区	样本量/%	平均滑行时长/min
不跨区	71	9.3
跨区	29	19.8

与首都机场不同, 国内上海浦东机场、广州白云机场、杭州萧山机场等均为航站楼居中、两侧各一组窄距平行跑道的构型, 此种情形下进港航班从一组窄距平行跑道的外侧跑道落地后需穿越内侧的起飞跑道, 此时可将跨区特征调整为跨跑道特征, 即进港航班在穿越起飞跑道时是否需要等待。此外, 侧向跑道由于能够减少强侧风的不利影响, 在我国大型机场的规划设计中不断出现, 例如北京大兴机场、成都天府机场等[17], 此时跨区特征或者跨跑道特征的构建还需进一步研究。

1.3　特征集构建

借鉴滑行时间预测的已有研究, 本文将运行时段、机型类别、航司属性、滑行距离和使用跑道等常见影响因素也纳入滑入时间预测模型的特征集, 最终的特征集如表 5 所示。

表 5　用于滑入时间预测的特征集构建

Table 5　Construction of feature set for taxi-in time prediction

特征名称	特征代号	特征描述
场面流量	A_1, A_2, A_3, A_4、D_1, D_2, D_3, D_4	见表2
跨区运行	K	跨区为1, 不跨区为0
滑行距离	d	跑道口至停机位的滑行距离
进港跑道	W	3条跑道共6端, 跑道号为19、01、18L、36R、18R、36L的跑道端分别对应1～6编号
运行时段	T	全天聚类为[0:00—0:59,10:00—23:59]、[1:00—1:59,9:00—9:59]、[2:00—8:59]共3个时段, 分别对应1～3编号
机型	M	机型共分为C、D、E、F四类, 分别对应1～4编号
航司属性	I	国内航司为1, 国外航司为0

2　预测结果分析与模型评估

2.1　模型预测结果分析

LR、KNN、SVR、DT、RF 和 GBRT 这 6 种机器学习模型在离港滑出时间预测方面得到了较为广泛的应用, 其在现有滑出时间预测研究中可达到的预测性能[11,13-14] 如表 6 所示。本文将这 6 种模型用于首都机场进港航班的滑入时间预测, 采用均方根误差 S_{RMSE}、平均绝对误差 S_{MAE}、决定系数 R^2 和预测精度作为评价指标, 其中 R^2 可在一定程度上表征模型的拟合程度。预测精度为预测模型输出的时间与实际滑入时间的 S_{MAE} 差值在某一设定范围内的数量与总预测样本数之比, 现有滑出时间预测研究主要关注±3 min、±5 min 范围的预测精度, 但在同一个机场平均滑入时间低于平均滑出时间, 故在±1 min、±2 min、±3 min 范围评估滑入时间预测精度。将处理好的数据集以 7∶3 的比例[11] 划分为训练集与测试集, 6 种模型的预测性能评估结果如表 7 所示。

表 6　滑出时间预测研究中 6 种模型的预测精度

Table 6　Prediction accuracy of six models in the research of taxi-out time prediction

模型	R^2	预测精度/%	
		±3 min	±5 min
LR[11]	0.81	73.74	88.40
SVR[13]	0.80	75.40	87.40
KNN[14]	0.79	59.69	81.46
DT[14]	0.81	63.07	85.10
RF[11]	0.84	77.79	90.53
GBRT[11]	0.83	77.36	90.19

表 7　6 种模型的滑入时间预测性能评估

Table 7　Evaluation of taxi-in time prediction performance by six models

模型	S_{RMSE}/min	S_{MAE}/min	R^2	预测精度/%		
				±1 min	±2 min	±3 min
LR[11]	2.01	1.39	0.89	49.6	78.3	90.3
SVR[13]	1.63	1.12	0.93	58.4	85.7	94.3
KNN[14]	1.85	1.26	0.91	56.4	82.3	92.3
DT[14]	1.73	1.22	0.92	54.5	82.5	93.0
RF[11]	1.50	1.07	0.94	59.6	86.5	95.0
GBRT[11]	1.40	1.01	0.95	61.4	88.4	96.0

由表 6 与表 7 可知, 6 种模型用于滑入时间预测时决定系数 R^2 较高, 且高于用于滑出时间预测时的表现, 表明这 6 种模型在测试集上的拟合优度较高, 借鉴现有滑出时间研究构建的特征集可以有效用于滑入时间预测。

对比6种模型的预测精度，对首都机场进港航班滑入时间的预测值与实际值在±2 min的准确性平均达到84%，±3 min的准确性平均达到93.48%，远高于用于离港滑出时间预测时在±3 min范围内的准确性，甚至超过了±5 min范围内的离港滑出时间预测精度。

综合模型误差、拟合优度和预测精度来看，GBRT的预测性能最好：S_{RMSE}=1.4 min和S_{MAE}=1.01 min均最低；R^2=0.95是6种模型中最高的；±1 min、±2 min、±3 min的预测精度也最高，分别为61.4%、88.4%、96%。

2.2 模型拟合评估

过拟合和欠拟合是使用机器学习进行模型训练时的常见问题。当模型过度学习了训练集的非一般性特征时即导致过拟合，此时在测试集上远远达不到在训练集上的拟合效果，导致模型泛化能力较低；相反，模型的学习能力不够即导致欠拟合，在训练集上也不能拥有较高的拟合优度，模型解释性较差。由表7可知，本文使用的6种模型都拥有较高的R^2值，可以判定其不存在欠拟合问题，为了确认预测模型在充分解释滑入时间的基础上是否也能具有较好的泛化能力，还需要进行过拟合检验。

以模型在训练集和测试集上的R^2作为得分指标，6种模型在不同规模样本下的学习曲线如图3所示。由图3(a)、3(b)、3(f)可知，LR、SVR和GBRT这3个模型的训练集与测试集得分趋势逐渐收敛，即不存在过拟合问题，说明模型的拟合情况较好。由图3(c)、3(d)、3(e)可知，KNN、DT和RF模型在训练样本足够多的情况下，测试集得分仍远不及训练集，即存在过拟合问题。6种模型中GBRT模型在训练集与测试集上的得分最高，在0.95左右，因此认为GBRT的拟合效果最好，同时也具有较高的解释能力与泛化性能。

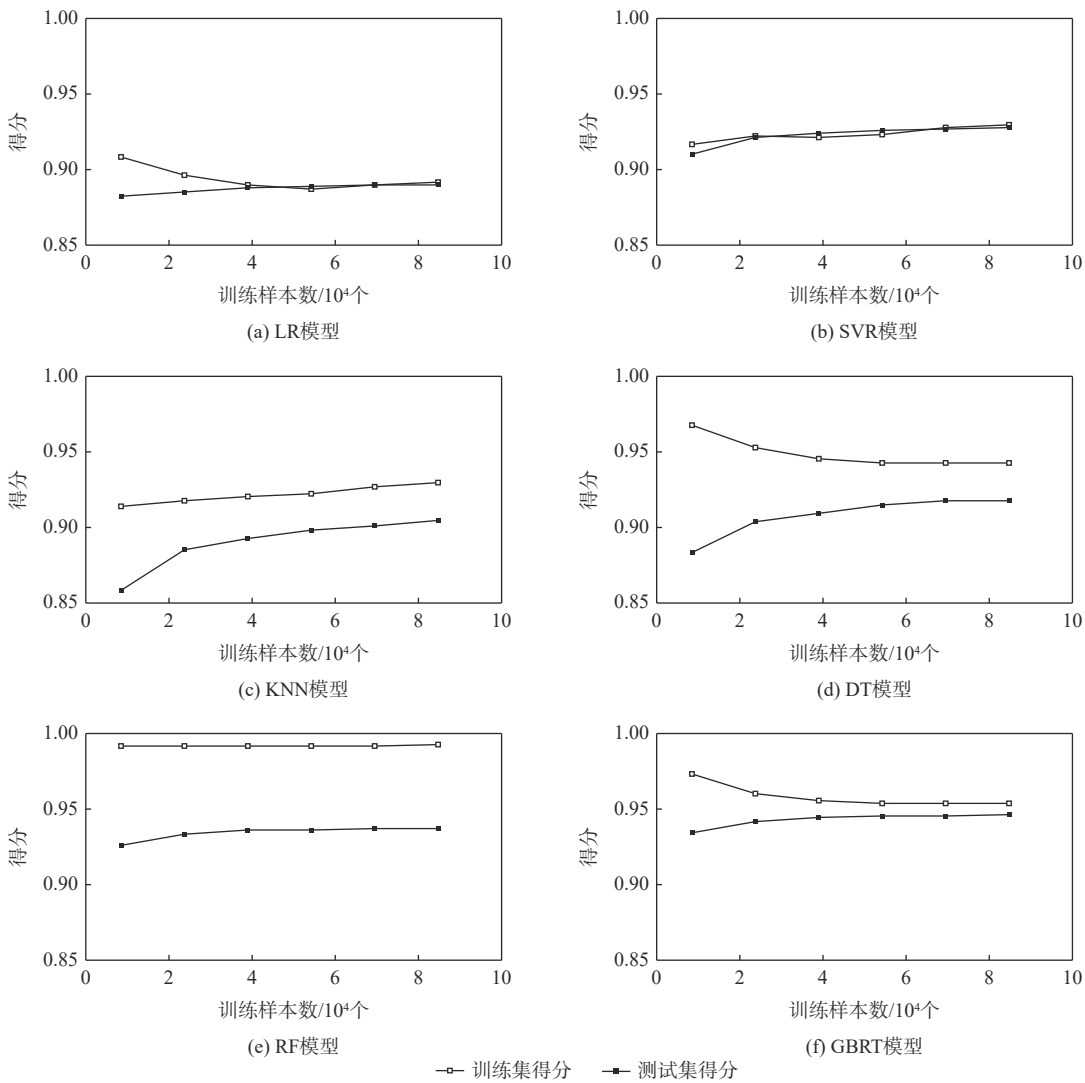


图3 6种模型的学习曲线

Fig. 3 Learning curves for six models

3　特征重要性分析

GBRT 模型拥有最好的预测和泛化性能, 故以 GBRT 模型为例进行进港滑入时间特征重要度的研究, 各特征变量对滑入时间预测的影响程度如表 8 所示。

表 8　GBRT 模型的特征重要度排序

Table 8　Feature importance order of GBRT model

排序	特征	特征重要度	排序	特征	特征重要度
1	A_3	0.636 5	8	D_4	0.013 6
2	d	0.121 0	9	D_2	0.008 1
3	K	0.055 0	10	T	0.003 6
4	D_3	0.050 9	11	W	0.003 3
5	A_4	0.048 6	12	A_1	0.001 4
6	D_1	0.040 3	13	M	0.000 6
7	A_2	0.017 0	14	I	0.000 1

由表 8 可知, 表征场面流量的特征变量对进港滑入时间预测的贡献较大, 第 1、4、5 位次均为场面流量特征, 其总贡献度达到 81.46%, 与文献 [11] 研究中滑出时间预测特征的重要度一致, 证明场面流量是影响滑行时间的最重要因素。首都机场三条跑道同时承担起降任务时, 根据管制运行规则, 进港航班比离港航班具有更高的优先级, 场面流量中的进港流量比离港流量更易对滑入时间产生影响, 因此反映进港流量的 4 个特征变量重要度远超离港流量特征, 总贡献度达到 70.35%。其中定义为 A_3 的进港流量特征对预测模型的贡献度达到 63.65%, 这是由于 a3 类航班落地比预测航班晚但入位更早, 对场面滑行系统资源占用的优先级更高, 例如, 当在滑行交叉点相遇时, 预测航班有可能因为让行 a_3 类航班而发生等待, 导致滑入时间增长, 因此 a_3 类航班的数量对滑入时间预测的影响最大。

本文首次提出的跨区特征对首都机场滑入时间预测的重要度排在第 3 位, 达到 5.5%, 超过了 A_3 以外的所有流量特征和大部分传统特征, 说明引入的新特征是有效的。

4　结　论

为克服各大机场进港航班地面滑行粗放管理的不足, 将机器学习用于进港航班滑入时间的预测, 得出有如下结论:

1) 离港滑出时间预测中得到广泛应用的 LR、SVR、KNN、DT、RF 和 GBRT 这 6 种模型在进港滑入时间预测方面取得了更好的预测精度, ±3 min 的预测精度均超过 90%。

2) 从综合模型预测结果性能与模型拟合评估结果看, GBRT 模型在首都机场进港滑入时间预测问题上具有最好的表现, 拟合优度达到 0.95 且不存在过拟合和欠拟合, ±3 min 的预测精度也最高, 达到 96%。

3) GBRT 模型中特征重要度的排序结果表明, 场面流量特征的贡献度最大, 这与离港滑出时间预测的研究结果一致。新引入的跨区特征对预测模型的贡献度达到 5.5%, 超过了大部分传统特征。

参考文献 (References)

[1] HEBERT J E, DIETZ D C. Modeling and analysis of an airport departure process[J]. Journal of Aircraft, 1997, 34(1): 43-47.

[2] IDRIS H, CLARKE J P, BHUVA R, et al. Queuing model for taxi-out time estimation[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2002, 10(1): 1-22.

[3] RAVIZZA S, ATKIN J A D, MAATHUIS M H, et al. A combined statistical approach and ground movement model for improving taxi time estimations at airports[J]. Journal of the Operational Research Society, 2013, 64(9): 1347-1360.

[4] JORDAN R, ISHUTKINA M A, REYNOLDS T G. A statistical learning approach to the modeling of aircraft taxi time[C]// 29th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010.

[5] LEE H, MALIK W, JUNG Y C. Taxi-out time prediction for departures at charlotte airport using machine learning techniques[C]// Proceedings of the 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2016.

[6] HERREMA F, CURRAN R, VISSER H, et al. Taxi-out time prediction model at Charles de Gaulle Airport[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2018, 15(3): 120-130.

[7] 冯霞, 孟金双. 基于 KNN 和 SVR 的航班滑出时间预测[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(5): 1008-1014.
FENG X, MENG J S. Flight taxi-out time prediction based on KNN and SVR[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(5): 1008-1014(in Chinese).

[8] DIANA T. Can machines learn how to forecast taxi-out time? A comparison of predictive models applied to the case of Seattle/Tacoma International Airport[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 119: 149-164.

[9] LIAN G, ZHANG Y P, XING Z W, et al. RETRACTED: a new dynamic pushback control method for reducing fuel-burn costs: using predicted taxi-out time[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(3): 660-673.

[10] 李楠, 焦庆宇, 张连东, 等. 离场航空器滑行时间预测研究[J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2021, 40(3): 1-6.
LI N, JIAO Q Y, ZHANG L D, et al. Taxi time prediction of departure aircraft[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(3): 1-6(in Chinese).

[11] WANG X W, BROWNLEE A E I, WOODWARD J R, et al. Aircraft taxi time prediction: feature importance and their implications[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 124: 102892.

[12] RAVIZZA S, CHEN J, ATKIN J A D, et al. Aircraft taxi time prediction: comparisons and insights[J]. Applied Soft Computing, 2014, 14: 397-406.

[13] LI N, JIAO Q Y, ZHU X H, et al. Prediction of departure aircraft taxi time based on deep learning[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(2): 232-241.

[14] 陈祯, 唐小卫, 林有超, 等. 基于决策树的航空器离港滑出时间预测方法和模型[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2021, 45(3): 448-453.
CHEN Z, TANG X W, LIN Y C, et al. Prediction method and model of aircraft taxi-out time based on decision tree[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2021, 45(3): 448-453(in Chinese).

[15] 赵征, 冯事成, 宋梅雯, 等. 基于 XGBoost 的航空器动态滑行时间预测方法研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 76-85.
ZHAO Z, FENG S C, SONG M W, et al. Prediction method of aircraft dynamic taxi time based on XGBoost[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 76-85(in Chinese).

[16] BROWNLEE A E I, WEISZER M, CHEN J, et al. A fuzzy approach to addressing uncertainty in Airport Ground Movement optimisation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 150-175.

[17] 沈志远, 胡莹莹. 考虑尾流影响的侧向双跑道机场的跑道容量研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 161-170.
SHEN Z Y, HU Y Y. Runway capacity of lateral double-runway airport considering wake effect[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 161-170(in Chinese).

Taxi-in time prediction of arrival flight

TANG Xiaowei*, DING Ye, ZHANG Shengrun, REN Siyu, WU Jiaqi

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Accurate prediction of flight taxi-in time has a significant meaning in allocating aircraft support resources reasonably and improving airport surface movement efficiency. Therefore, a method of taxi-in time prediction based on machine learning model is proposed. It can effectively overcome the deficiency of extensive aircraft arrival time prediction in major airports currently. Using Beijing Capital International Airport as the research object, we firstly analyzed the factors that influence the taxi-in time and created the feature set. Next, we applied various techniques that are commonly used to predict taxi-out times, such as linear regression, K-nearest neighbor, support vector regression, decision tree, random forest, and gradient boosting regression tree, to predict the taxi-in time. The results show that the prediction accuracy of the six machine learning models is over 90% within ±3 min, which means that the construction of the feature set and the selection of models are effective. The gradient boosting regression tree model has the best performance based on the prediction results and model fitting evaluation results. The prediction results of gradient boosting regression tree show that the surface traffic flow features contribute most to the prediction model, and the newly proposed cross-regional feature contributes more than most traditional features.

Keywords: air transportation; airport surface movement; taxi time prediction; machine learning; gradient boosting regression tree

Received: 2022-07-19; **Accepted**: 2022-08-19; **Published Online**: 2022-09-09 11:27

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220908.1849.004

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61603178,U2333204,U2233208)

* **Corresponding author**. E-mail: tangxiaowei@nuaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0203

机场飞行区多层异质链序风险传播模型研究

吴维[1, 2, *]，吴泽萱[1]，王兴隆[1]

(1. 中国民航大学 空中交通管理学院，天津 300300；2. 北京交通大学 交通运输学院，北京 100044)

摘 要：为探究机场飞行区风险发生机制及风险传播特性，增强机场飞行区安全管控能力，采用复杂网络理论，依据风险致因间的因果链序关系，构建多层异质网络风险传播模型。采用多层次因果图(AcciMap)理论分析机场飞行区运行风险传播的致因链；基于风险致因特征构建3层异质风险传播网络并根据网络特征设计概率-触发传播模型、容量-阻抗传播模型、容量-负荷传播模型；利用复杂网络理论设计风险传播评价指标，对风险网络传播特征进行分析。结果表明：多层风险网络中节点风险传播能力与节点度弱相关，节点风险灵敏指数可提升风险节点排序准确性；对风险灵敏度指数排序前15%的节点进行风险控制，可有效降低风险扩散近32%；网络风险传播结构存在高连通和松散状态，对风险扩散指数排序前15%的节点进行控制，可以有效降低网络结构鲁棒性指数使风险网络结构由高连通进入到松散状态；所建模型可有效识别风险扩散过程并进行精准控制，以提升机场飞行区风险控制水平。

关 键 词：航空运输；机场运行；复杂网络；风险传播；控制策略
中图分类号：U8; V355.2
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2225-12

随着机场航班量的不断增长和机场地面运行环境的日益复杂，机场飞行区不安全事件持续增加。由于机场飞行区航空器与机场保障车辆密度大、作用种类多，极易出现航空器滑行冲突、地面剐蹭、跑道侵入和滑行路线错误等不安全事件，造成飞行区运行性能急剧下降，航班正常性降低、运输量减少，给旅客、机场和航空公司都带来较大损失。为此，很多学者针对机场飞行区安全问题开展了相关研究。

风险评估方面的研究。Shyur[1]和Stamatelatos[2]利用贝叶斯网络研究飞行区设备出现故障的概率，通过故障树建模来进行概率风险评估；Tamasi和Demichela[3]考虑了飞行区事件的脆弱性构建危险分类，以定性和定量的方式对航空安全进行风险评估；孙殿阁等[4]将Bow-tie技术应用于民用机场进行安全风险评估；倪晓梅等[5]提出基于卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的民航风险评估模型以对文本格式的事件概要进行充分挖掘；陈芳等[6]提出基于毕达哥拉斯模糊、试验与评估实验室、贝叶斯网络和模糊损失率的管制单位动态风险评估模型。

多风险演变与耦合方面的研究。Saumell-Mendiola等[7]采用异质平均场方法研究了耦合网络中风险易感后的恢复问题；张仕杰等[8]基于复杂网络理论提出列车辅助驾驶系统危险致因传播模型；Parshani等[9]研究在完全依存型多层网络中随机攻击的情况下的网络结构风险变化趋势；肖琴等[10]构建了基于尖点突变理论的风险耦合模型，分析飞行签派员人因差错风险。

机场运行风险方面的研究。夏正洪等[11]分析了机场热点时空分布特征并研究了地面运行风险；武喜萍等[12]研究了空中交通网络抗毁性与延误传

收稿日期：2023-04-24；**录用日期**：2023-06-16；**网络出版时间**：2023-07-04 16:18
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230704.1137.001
基金项目：天津市应用基础多元投入基金面上项目(21JCYBJC00700)；中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122025098)
*通信作者. E-mail：wwu@cauc.edu.cn

引用格式：吴维，吴泽萱，王兴隆. 机场飞行区多层异质链序风险传播模型研究[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2225-2236.
WU W，WU Z X，WANG X L. Research on multi-layer heterogeneous chain sequence risk propagation model in airport movement area[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2225-2236 (in Chinese).

播特征；王兴隆等[13]建立了空中交通相依网络模型，分析其脆弱性表现规律；吴维等[14]建立跑道侵入风险事件风控网络模型，从多因素作用对跑道侵入风险控制脆弱性进行动态推演分析；Wu和Law[15]综合考虑多种因素利用贝叶斯网络模型构建了机场延误传播网络。

构建多层网络传播风险方面的研究。王岩韬和刘毓[16]利用传染病(susceptible, infected, and recovered, SIR)模型结合多层网络，对航班运行风险演变、风险扩散进行分析；冯芬玲等[17]针对多层复杂网络问题采用改进优劣解距离(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)方法识别风险关键节点；孙兴龙等[18]综合路径的权重和网络整体价值提出一种改进的融合算法，对多层网络进行评估；孙娟等[19]严格推导出三层、多层的单向耦合星形网络的特征值谱，得出了层数对多层网络同步能力至关重要的结论；Tang等[20]探讨了节点动力学参数的不断变化对不同耦合强度复杂动力网络拓扑识别的影响；冯慧琳等[21]分析了资源配置对机场航班延误及运行效率的影响。

综上所述，机场飞行区运行风险具有类型多样、致因多源、影响多态的特征，目前对网络风险的研究主要集中在多层单一风险传播方面，鲜有针对飞行区多层异质网络的风险耦合一体建模，未能全面刻画运行风险的异质传播规律。基于此，在上述研究基础上，结合机场飞行区运行风险致因多源、影响多态所带来的风险异质性传播问题，本文构建了多层异质网络风险传播模型。按照飞行区风险传播的致因链及不同致因要素的异质性，将机场飞行区运行风险传播模型分为3层，包括设备与环境层，设计以设备为主体的风险概率触发传播模型；指挥与决策层，设计以人为主导的容量-阻抗风险传播模型；运行与执行层，设计以航空器等为主体的容量-负荷传播模型，并结合复杂网络理论构建了3类指标对风险传播进行评价，为精准、精细刻画机场飞行区运行风险传播并实施控制提供支撑。

1 基于AcciMap识别风险事件致因

根据美国联邦航空局(Federal Aeronautics Administration, FAA)和中国民航局网站发布面板数据，选取236个机场飞行区运行不安全事件数据作为样本，对事件进行文本分析，同时参照《大型民用运输机场运行安全保障能力综合评价管理办法》[22]中的不安全事件指标样例，按照多层次因果图(accident analyse mapping, AcciMap)提取完整的事故致因链。AcciMap可以有效分析风险事件致因关系，从风险演变过程、人员活动、设备与环境等多维度探究风险形成的深层次原因。从数据统计看，机场飞行区不安全事件主要包括航空器剐蹭、航空器滑行冲突、滑行错误、保障车辆剐蹭、跑道侵入、冲出跑道、鸟击、外来物入侵等有后果事件，还包括航空器未按规定执行指令、停错机位、超速等无后果事件。

采用AcciMap方法的主要流程包括：① 根据风险致因之间属性类别与时间逻辑顺序建立层次结构图，将识别的致因要素记录其中；② 基于因果逻辑关系对每个致因要素进行回溯，建立致因关系表；③ 按照建立的致因关系所对应的因果链构建致因网络；④ 按照系统论理论对致因间关系的逻辑性、完整性进行完善，确定最终网络。

基于机场飞行区运行风险事件，利用AcciMap的结构模型并根据风险致因的主体、属性类别、风险传播特点和逻辑顺序，将风险事件致因分为4层。

管理与监督层A1。管理与监督层A1运行风险事件包含规章制度健全程度d1、监督检查落实程度d2和管理机制科学程度d3。

设备与环境层A2。设备与环境层A2运行风险事件包含维修不及时c1、电磁干扰c2、能源供给故障c3、监视设备故障c4、监视设备失效c5、通信设备不稳定c6、通信设备故障c7、通信延迟c8、自动化设备失效c9、无监视信息c10、关键监视信息缺失c11、通信质量下降c12、通信中断c13和自动化辅助功能失效c14。

指挥与决策层A3。指挥与决策层A3运行风险事件包含调配冲突指令不合理b1、排序指令不合理b2、工作流程指令不合理b3、信息通报指令不合理b4、纠正后的调配冲突指令b5、纠正后的排序指令b6、纠正后的工作流程指令b7、纠正后的信息通报指令b8、疲劳程度高b9、繁忙程度高b10、工作经验不足b11、双岗制人员工作年限b12、双岗制人员工作负荷b13、双岗制人员工作时长b14、双岗制工作状态b15、飞行员工作年限b16、飞行员工作负荷b17、飞行员工作时长b18和飞行员工作状态b19。

运行与执行层A4。运行与执行层A4运行风险事件包含地面上航空器间小于规定安全间隔a1、地面上航空器与障碍物小于规定安全间隔a2、地面车辆未按规定运行a3、跑道侵入a4、地面人员未及时执行指令a5、航空器机坪剐蹭a6，车辆、设备人员剐蹭a7、车辆与航空器运行冲突a8、航空器

间发生碰撞 a9、滑行冲突 a10、活动区存在障碍物 a11 和外来物损伤航空器 a12。

构建的机场飞行区风险事件 AcciMap 层次结构如图 1 所示, 图中节点表示可能导致风险事件的原因或致因, 边表示 2 个节点之间可能存在的因果关系或依赖关系, 如航空器间隔小于规定间隔可引起航空器间运行冲突, 航空器间运行冲突可导致机坪航空器间剐蹭等。通过分析事件与逻辑推理获取致因节点与连边, 并通过历史事件数据对网络进行完善。

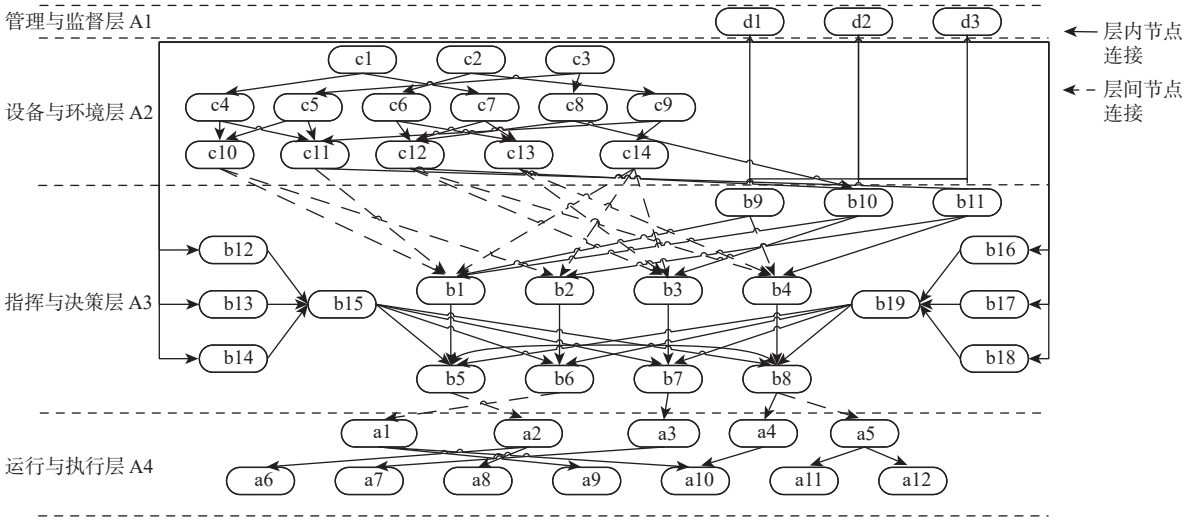


图 1　机场飞行区风险事件 AcciMap 结构模型

Fig. 1　AcciMap structural model for analyzing risk events in airport movement area

2　构建多层异质网络

由 AcciMap 方法构建风险网络在风险传递过程中存在明显的异质性和时序性, 为此, 根据构建 AcciMap 层次结构特征和风险转化过程, 将 4 层网络聚合组成 3 层相依网络。因果链第 1 层为设备与环境层, 该层由设备、环境和管理等因素构成, 风险传播的最大特征是随机性强具有明显概率性质, 体现为触发-发生的概率传播; 第 2 层为指挥与决策层, 该层在获取足够信息后, 由管制员、运行指挥员、巡查员等决策主体构成, 由于该层以人为主导在风险形成和传播过程中存在一定包容性且采取冗余设置方式, 因此其对前序节点风险传播具有一定阻抗作用, 体现为负荷-阻抗-超容-发生的传递模式; 第 3 层为运行与执行层, 主要由航空器、保障车辆、作业人员、预警装置等组成, 该层主要是执行指令并有一定容错能力, 风险传播体现为负荷-超容-发生的传递模式。基于此构建的机场飞行区具有异质、时序、多层的链式传播的风险传播网络, 如图 2 所示。

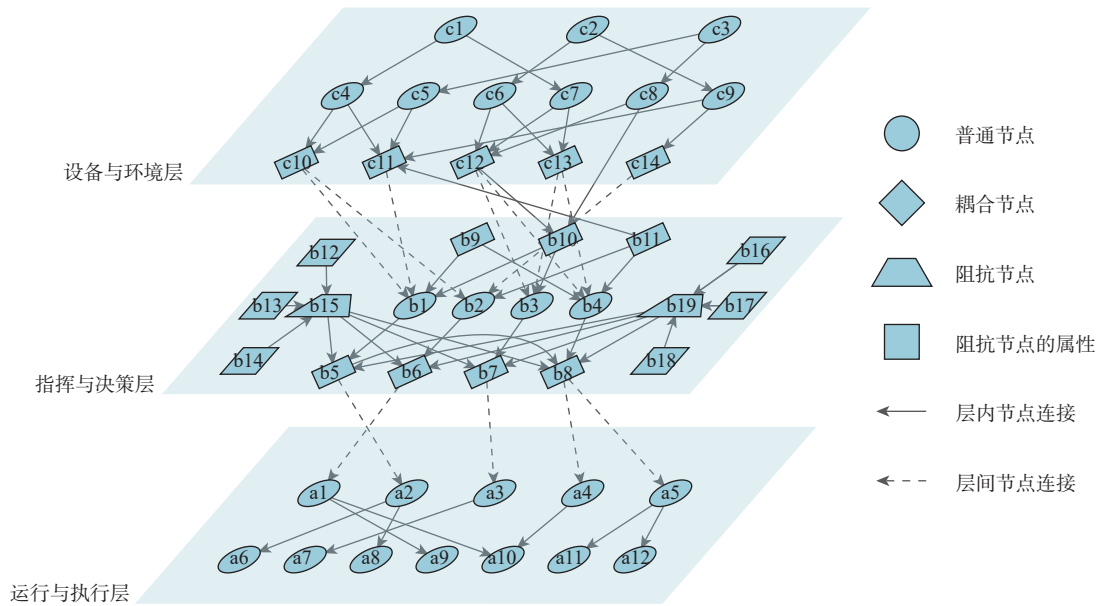


图 2　多层链序风险传播网络

Fig. 2　Multilayered network for cascade risk propagation

图2中的风险传播网络为$G=(V,\ E)$，该网络包括A、B、C这3层，其中A层为设备与环境层，B层为指挥与决策层，C层为运行与执行层，V为3层网络中所有的节点集合，E为3层网络中节点间有风险传播连边集合。由于风险传播过程具有强的因果性，因此，连边为有向边，根据节点间连边关系构建节点风险传播的邻接矩阵$\boldsymbol{M}$为

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{V}^{\mathrm{A}}_{m\times m} & \boldsymbol{V}^{\mathrm{AB}}_{m\times n} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{V}^{\mathrm{B}}_{n\times n} & \boldsymbol{V}^{\mathrm{BC}}_{n\times k}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{V}^{\mathrm{C}}_{k\times k}\end{bmatrix}=\left[a_{ij}\right]_{(m+n+k)\times(m+n+k)} \tag{1}$$

式中：m、n、k分别为A、B、C这3层网络中的节点数；$\boldsymbol{V}^{\mathrm{A}}_{m\times m}$、$\boldsymbol{V}^{\mathrm{B}}_{n\times n}$、$\boldsymbol{V}^{\mathrm{C}}_{k\times k}$分别为A、B、C这3层网络的邻接矩阵，$\boldsymbol{V}^{\mathrm{AB}}_{m\times n}$、$\boldsymbol{V}^{\mathrm{BC}}_{n\times k}$分别为AB层、BC层间耦合节点的邻接矩阵；$a_{ij}$表示节点$i$和节点$j$是否有风险传播关系，如果边$\boldsymbol{E}_{ij}$有风险传播关系则$a_{ij}$为1，否则为0。

3 基于网络特征的风险传播模型

由于A、B、C这3层网络在风险传播过程中具有迥异的传播特征，为有效描述风险在不同层间的传播过程，构建了以下3层网络的风险传播模型。

3.1 设备与环境层风险传播模型

该层主要风险源来自于设备运行情况，以及由设备产生的风险。设备运行质量、可靠性下降会造成相应功能的缺失产生潜在风险，但设备故障以及故障后风险传递具有一定的随机性，为此，该层风险传播为概率传播模型，即风险节点i以一定概率感染节点j，使得节点j状态发生改变。记$S^{\mathrm{A}}_i(t)$为A层节点i在t时刻风险状态为

$$S^{\mathrm{A}}_i(t)=\begin{cases}0\\1\end{cases} \tag{2}$$

式中：$S^{\mathrm{A}}_i(t)$值为0表示节点状态安全，$S^{\mathrm{A}}_i(t)$值为1表示节点状态危险；$i\in[1,m]$。

可知节点i的邻居节点j在$t+1$时刻风险状态由节点本身状态$S^{\mathrm{A}}_j(t)$和$S^{\mathrm{A}}_i(t)$决定。为此，要定义节点i向节点j风险传播概率。节点是否被传染成风险节点受节点自身的抗风险能力影响，为此，应根据飞行区运行对设备、人员、管理制度等方面的投入情况设置致因节点的抗风险能力，如采取冗余设置、增加培训等都会增强节点的抗风险能力，节点受邻居节点风险传播就由节点在所有邻居节点抗风险能力决定。A层内风险节点i向节点j风险传播概率P^{A}_{ij}为

$$P^{\mathrm{A}}_{ij}=\frac{\lambda^{\mathrm{A}}_j\left(1-\phi^{\mathrm{A}}_j\right)}{\sum\limits_{j\in\theta^{\mathrm{A}}_i}\phi^{\mathrm{A}}_j\lambda^{\mathrm{A}}_j}\qquad i,j\in[1,m] \tag{3}$$

式中：λ^{A}_j为节点j的防护水平；ϕ^{A}_j为j节点风险敏感度；θ^{A}_i为节点i在A层后续邻居节点的集合。

根据机场飞行区风险事件的因果时间链特征，飞行区中通信设备、监视设备和自动化设备在整个风险网络中作为主要的传感器，发挥感知作用。网络结构和风险传播过程中，机场管理部门会根据设备在后续工作中的作用（连边数量），增加设备维护和可靠性，使其具有较好的防护水平，节点的抗风险能力与其在网络结构中的重要程度有关，即节点度越大重视程度越高，防护水平为

$$\lambda^{\mathrm{A}}_i=\varpi\frac{D^{\mathrm{A}}_i}{\sum\limits_i D^{\mathrm{A}}_i} \tag{4}$$

式中：D^{A}_i为A层节点i的度；$\sum\limits_i D^{\mathrm{A}}_i$为A层所有节点度数之和；$\varpi$为网络规模修正系数。

在风险网络中，部分致因节点起到“承上启下”的作用，在风险形成过程中发挥关键作用，其风险变化对机场飞行区风险传播影响较大，为度量这种变化引入节点的介数中心性，其计算式为

$$\phi^{\mathrm{A}}_i=\frac{G^{\mathrm{A}}_i}{\sum\limits_i G^{\mathrm{A}}_i} \tag{5}$$

式中：G^{A}_i为节点i的介数中心性；$\sum\limits_i G^{\mathrm{A}}_i$为A层所有节点介数中心性之和。

由此可知，$t+1$时刻节点i传染节点j的概率$f^{\mathrm{A}}_{ij}(t+1)$为

$$f^{\mathrm{A}}_{ij}(t+1)=S^{\mathrm{A}}_i(t)P^{\mathrm{A}}_{ij}\qquad i,j\in[1,m] \tag{6}$$

节点j相连的致因节点都可能引起节点j风险变化，为此，需要求解与节点j相连所有风险节点的影响，可得节点j被传染概率$f^{\mathrm{A}}_j(t+1)$为

$$f^{\mathrm{A}}_j(t+1)=1-\prod_{i=1}^{m}\left(1-P^{\mathrm{A}}_{ij}f^{\mathrm{A}}_{ij}(t+1)\right) \tag{7}$$

节点的自身防护能力可在一定程度上降低风险的形成，因此，考虑节点的防护能力，节点j在$t+1$时刻成为风险节点的概率$P^{\mathrm{A}}_j(t+1)$为

$$P^{\mathrm{A}}_j(t+1)=f^{\mathrm{A}}_j(t+1)/\lambda^{\mathrm{A}}_j \tag{8}$$

3.2 指挥与决策层风险传播模型

该层主要是管制人员、监控人员和保障人员根据业务范畴进行的决策指挥，其主要风险是人员基于掌握信息和业务技能做出的决策风险。为提高机场飞行区运行安全性，管理部门在组织结构和运行环节上都采取冗余设置，如管制员与飞行员复诵、交叉检查、设备动态监控预警等手段，采取的冗余设置对风险传播具有明显的阻抗作用，因此，

本层风险传播类型为负荷-阻抗型。

3.2.1　指挥与决策层容量函数

节点容量指风险致因的已有抗风险水平, 即该节点成为风险节点需要满足的触发条件, 该条件的量化表征即容量。其中, 包括冗余配置、应急干预及地面车辆和航空器的安全防护配置等多种形式。该层节点分为具有纠错能力的阻抗型节点和非阻抗型节点。阻抗型节点可有效抑制风险的形成, 如双岗制工作状态、飞行员协作状态等节点具有抑制风险传播作用, 在风险网络中采用提高阻抗型风险节点的容量, 以表征其提高应对风险能力, 故B层节点综合考虑阻抗型节点和非阻抗节点, 容量计算式为

$$C_i^{\mathrm{B}} = \left(1+\lambda_i^{\mathrm{B}}\right) R_i^{\lambda_i^{\mathrm{B}}} + \sum_{y\in\varphi_i^{\mathrm{B}}} H_i^{\mathrm{B}} \left(1+\lambda_y^{\mathrm{B}}\right) R_y^{\lambda_y^{\mathrm{B}}} / \left|\varphi_i^{\mathrm{B}}\right| \quad i\in[m+1, m+n] \tag{9}$$

式中: C_i^{B}为节点 j的容量; λ_i^{B}为节点 j的防护水平; R_i为节点i的可达邻居节点数量, 当无可达邻居节点时为风险链终点, 容量为 0; R_y为节点y的可达邻居节点数量; φ_i^{B}为节点i前序邻居节点集合; H_i^{B}表示节点i是否为阻抗型节点, 取值为 0 或 1, 分别表示非阻抗节点或阻抗型节点; $|\varphi_i^{\mathrm{B}}|$为集合中的元素数量。

3.2.2　指挥与决策层节点初始负荷

节点初始负荷是指机场飞行区在正常运行时, 各个风险致因节点会存在一定的潜在风险程度, 其表征了某一时刻节点潜在的风险程度。负荷代表节点随着相邻节点及自身防护情况的变化, 在某一时刻相对于自身容量所处的风险程度。当节点负荷超过其容量时(过载), 就会出现设备故障、功能失效、人员差错等风险, 进而导致相邻的作业环节发生问题, 诱发风险的相继传播。阻抗型节点本身具有潜在风险负荷, 根据节点阻抗能力提高其容量的同时, 其潜在初始风险负荷也会有一定程度的增加, 如考虑到双岗制班组人员配合默契程度不同会有初始风险, 故B层节点初始负荷计算式为

$$L_i^{\mathrm{B}}(0) = C_i^{\mathrm{B}} \left(1+\sum_{y\in\varphi_i^{\mathrm{B}}} H_i^{\mathrm{B}} \lambda_y^{\mathrm{B}}\right) \Big/ \left(\lambda_i^{\mathrm{B}} + \sum_{y\in\varphi_i^{\mathrm{B}}} H_i^{\mathrm{B}} \lambda_y^{\mathrm{B}}\right) \tag{10}$$

3.2.3　指挥与决策层风险传播规则

当某个节点负荷超过容量时, 就会将风险传递给其邻居节点, 此时需要将风险按比例分配给邻居节点。按照复杂网络理论及风险传播过程, 不同邻居节点承接的风险与前序邻居节点和该节点因果强度有关。2 个节点因果关系就是网络中的连边, 按照复杂网络理论, 该强度与该边在整个网络中介数成正比, 即通过该边的因果链数量。节点 i 和节点 j 间因果强度μ_{ij}^{B}为

$$\mu_{ij}^{\mathrm{B}} = \begin{cases} V_i R_j & V_i > 0 \\ R_j & V_i = 0 \end{cases} \tag{11}$$

式中: V_i为节点i直接或者间接致因节点数; R_j为节点j的可达邻居节点数量; $i, j\in[m+1, m+n]$。

由此可得, 节点 i 和节点 j 间风险分配比例为

$$\Delta L_{ij}^{\mathrm{B}}(t) = L_i^{\mathrm{B}}(t) \frac{\mu_{ij}^{\mathrm{B}}}{\sum_{w\in\theta_i^{\mathrm{B}}} \mu_{iw}^{\mathrm{B}}} \tag{12}$$

式中: $\Delta L_{ij}^{\mathrm{B}}$为节点$i$向节点$j$传播的风险增量; $L_i^{\mathrm{B}}(t)$为t时刻节点i的负荷值; θ_i^{B}为节点i的在B层后续邻居节点集合。节点j在$t+1$时刻的负荷值为

$$L_j^{\mathrm{B}}(t+1) = L_j^{\mathrm{B}}(t) + \sum_{r\in\varphi_j^{\mathrm{B}}} \Delta L_{rj}^{\mathrm{B}}(t) \tag{13}$$

式中: φ_j^{B}为节点j在B层内的前序邻居节点集合。

3.2.4　指挥与决策层层间风险传播

设计A层与B层衔接的节点风险传播, 是由于 2 层间衔接节点具有阻抗能力。即在风险传播时, 该节点所承受的前序风险因其自身的阻抗性能力会抵消一部分, 因此, 针对AB层的衔接节点 j的风险传播规则为

$$L_j^{\mathrm{AB}}(t+1) = L_j^{\mathrm{AB}}(t) + \frac{\delta_{\mathrm{AB}} \sum_{r\in\varphi_j^{\mathrm{A}}} \Delta f_{rj}^{\mathrm{A}}(t+1) + \sum_{i=m+1}^{m+n} a_{ij}^{\mathrm{B}} \Delta L_{ij}^{\mathrm{B}}(t+1)}{\exp\left(H_j^{\mathrm{B}} \kappa_j \lambda_j^{\mathrm{B}}\right)} \tag{14}$$

式中: $L_j^{\mathrm{AB}}(t+1)$为节点 j 在$t+1$时刻A层与B层衔接节点的负荷值; $\sum_{r\in\phi_j^{\mathrm{A}}} \Delta f_{rj}^{\mathrm{A}}(t+1)$为节点 j 在A层网络中的邻节点传递的负荷增量; δ_{AB}为A层风险发生概率与B层负荷的转换当量; $\sum_{i=m+1}^{m+n} a_{ij}^{\mathrm{B}} \Delta L_{ij}^{\mathrm{B}}(t+1)$为节点 j在B层网络中的邻居节点传递的负荷增量; ϕ_j^{A}为节点j相连的A层中前序节点集合; a_{ij}^{B}为B层中连边的邻接矩阵对应元素; $\exp\left(H_j^{\mathrm{B}} \kappa_j \lambda_j^{\mathrm{B}}\right)$为节点 j对风险的阻抗能力, H_j^{B}为节点 j是否具有风险阻抗能力, 对应值为 1 或 0, 只有阻抗节点才能降低风险传播负荷; λ_j^{B}为节点 j的防护水平; κ_j为对节点阻抗能力的修正系数。

3.3　运行与执行层风险传播模型

该层主要是航空器、保障车辆、执行保障人员为主体, 由于上述主体需要有人参与执行, 人员在其中对风险有一定的包容性, 因此, 本层风险传播为容量-负荷型。

3.3.1　运行与执行层容量函数

该层节点是机场飞行区各项活动的执行主体,

其中包括驾驶人员、引导人员、车辆和保障设施，其风险容量与主体性质及其他节点业务联系有关，即由该节点所处的风险链数量(即可达邻居节点数量)及自身防护水平决定，计算式为

$$C_i^{\mathrm{C}} = \left(1+\lambda_i^{\mathrm{C}}\right) R_i^{\lambda_i^{\mathrm{C}}} \qquad i \in [m+n+1, m+n+k] \tag{15}$$

3.3.2 运行与执行层节点初始负荷

机场飞行区运行时，每个节点都有其自身潜在风险负荷$L_i^{\mathrm{B}}(t)$，该负荷与节点自身防护水平及该节点在风险网络中连接边数量有关，也即节点初始负荷是容量与防护水平的函数，即

$$L_i^{\mathrm{C}}(0) = C_i^{\mathrm{C}} / \lambda_i^{C} \qquad i \in [m+n+1, m+n+k] \tag{16}$$

3.3.3 运行与执行层风险传播规则

本层内风险传播规则与运行决策层相同，故不再赘述。

3.3.4 运行与执行层层间风险传播

C层与B层的衔接节点具有风险耦合特征，不仅有B层的层内部风险传播，也有C层的层间风险传播，因此，针对B、C层的耦合节点j设计风险传播规则为

$$L_j^{\mathrm{BC}}(t+1) = L_j^{\mathrm{BC}}(t) + \frac{\delta_{\mathrm{BC}} \sum_{r \in \varphi_j^{\mathrm{B}}} \Delta L_{rj}^{\mathrm{B}}(t+1) + \sum_{i=m+n+1}^{m+n+k} a_{ij}^{\mathrm{C}} \Delta L_{ij}^{\mathrm{C}}(t+1)}{\exp\left(H_j^{\mathrm{C}} \kappa_j \lambda_j^{\mathrm{C}}\right)} \tag{17}$$

4 风险传播模型应用与结果分析

4.1 风险传播分析指标

为有效评价风险在网络传播中的特征、影响程度和发展趋势，本文从节点、网络和结构3个维度构建了分析指标，包括节点风险灵敏指数、网络风险扩散指数和网络结构鲁棒性指数。上述3个指数的定义及计算式如下。

节点风险灵敏指数从节点风险传播视角提出，以分析网络中节点风险变化对整个网络风险变化的影响程度。该指标综合考虑网络拓扑结构和节点重要性，表征某一节点风险负荷变化对整个风险网络风险负荷的影响，计算式为

$$X_i = (\Delta L_i / L_i) \left(\sum_{j \neq i} \left| \Delta L_j \right| / L_j \right) \tag{18}$$

式中：X_i为节点i的风险灵敏指数；ΔL_i为节点i的风险负荷增量；L_i为节点i的风险负荷值。

网络风险扩散指数从网络风险传播视角提出，以分析网络中风险强度及潜在扩散程度，该指标考虑风险发生后网络中被触发风险节点负荷值及该节点在网络中风险传播能力。该传播能力强弱由被触发节点在网络中的介数大小决定，表征网络中某一周期整个网络风险继续扩散的程度，计算式为

$$I = \sum_i b_i L_i \left(1 + \frac{|L_i - C_i|}{L_i - C_i} \right) \tag{19}$$

式中：I为网络中风险指数；b_i为网络中节点i的介数。

网络结构鲁棒性指数从网络结构视角分析风险传播后网络中被触发的节点数及连通情况，反映致因节点失效后对风险网络整体结构影响。该指标考虑被触发节点数及其间的连通能力，反映网络的风险易感程度，计算式为

$$O = \frac{U}{N} \cdot \frac{T}{N-T} \tag{20}$$

式中：O为风险网络结构鲁棒性指数；U为最大连通子图节点数；T为网络中被触发节点总数；N为网络中节点总数。在结构鲁棒性指数中，包括连通性和被触发节点的影响，即最大连通子图大小并通过被触发节点数与未被触发节点比值进行修正，以更全面地反映网络中被触发风险节点的结构特征。

4.2 案例网络参数设置

风险传播模型阻抗节点与机场具体环境有关，选取西安咸阳国际机场、天津滨海国际机场和上海虹桥机场作为典型机场进行分析，对3座机场的人员、设备、风险事件进行统计并计算平均值，获取阻抗型节点的参数，如表1所示。

表1 阻抗节点参数

Table 1 Impedance node parameters

工作年限/a	κ_{j1}	工作负荷	κ_{j2}	工作时长/h	κ_{j3}
0~6	0.15	0~0.3	0.25	1~2	0.25
6~15	0.25	0.3~0.7	0	3~4	0
15~30	0.4	0.7~1	−0.2	5~6	−0.1

注：κ_{j1}、κ_{j2}、κ_{j3}为工作年限、工作负荷、工作时长的修正参数。

阻抗节点主要以人的决策为核心，根据机场飞行区人决策特征和文献[23]，考虑人的决策受工作年限、工作负荷和工作时长影响确定其对应的风险阻抗能力参数κ_j。

4.3 应用结果与分析

按照设计的评价指标对风险网络进行分析。

4.3.1 节点风险灵敏指数分析

对风险网络中的节点进行逐个分析，分析步骤如下。

步骤1 计算每个节点的初始风险负荷。

步骤2 选定一个评价节点，将该节点风险负荷增加其初始风险负荷的20%，获取网络风险负荷增加情况计算出此时节点风险灵敏指数。

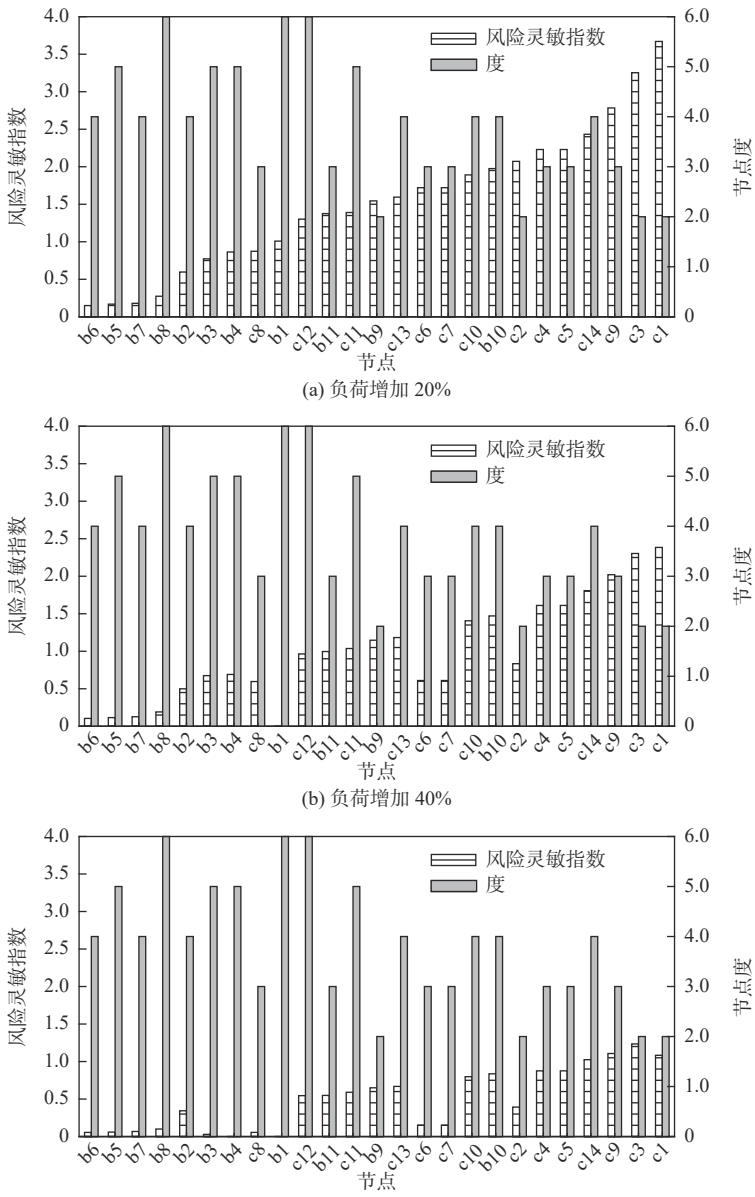
步骤 3　将所有节点风险恢复为初始风险节点, 将步骤 2 中选定节点风险负荷增加其初始风险负荷的 40%, 获取网络风险负荷增加情况计算出此时节点风险灵敏指数。

步骤 4　将所有节点风险恢复为初始风险节点, 将步骤 2 中选定节点风险负荷增加其初始风险负荷的 60%, 获取网络风险负荷增加情况计算出此时节点风险灵敏指数;

步骤 5　选取其他节点, 重复步骤 2 以后步骤。

图 3 为节点风险灵敏指数图, 由图可知, 节点风险灵敏指数排序受节点负荷增加程度较小, 节点 c1、c3 和 c9 对应的风险灵敏指数最大, 上述节点都属于设备与环境层, 是机场飞行区业务运行的基础, 传播链最长, 说明上述节点对网络风险波动贡献最大, 维修不及时又是其中影响程度最高的, 说明现有业务链中增强设备可靠性仍是需要重点解决的问题。图 3 也表明在节点增加负荷较低时, 节点风险灵敏指数区分度较低; 当节点负荷增加值超过 40% 时以上时, 节点风险灵敏指数对节点的区分程度更高, 更能有效识别节点对网络风险演变贡献量。通过对节点灵敏指数的分析, 可识别节点对风险贡献程度, 对其采取相应措施可快速控制风险传播。

由图 3 可知, 节点的风险灵敏指数与节点度存在弱相关性, 节点 b8、b1、c12 的度值最高, 但节点的风险灵敏指数排序较低; 节点 c1、c3、b9 的灵敏指数较高, 但节点的度值较低, 因此, 机场飞行区风险传播网络不能简单以复杂网络理论中节点的度



(a) 负荷增加 20%

(b) 负荷增加 40%

(c) 负荷增加 60%

图 3　节点风险灵敏指数

Fig. 3　Node risk sensitivity index

作为评估节点重要程度的依据，尤其是类似通信质量下降影响节点多，但对风险形成的贡献程度不高。

由图3可知，存在对负荷增加程度敏感的节点和迟钝节点，通过识别2类节点采用不同策略可防止节点的风险传播。如节点b1控制其风险负荷增加不超过40%使该节点不会对网络风险传播做贡献，节点b4、c8在控制其负荷增加不过20%时也不会对网络风险传播做贡献。通过分类识别此类节点特征有针对性地制定对应措施，可付出较小成本阻断该类型节点的风险传播。因此，可以看出调配冲突指令不合理存在重大隐患，但通过采取冗余方式、双岗制、管制员与飞行员协同等方式使得节点对负荷增加敏感性降低，具有明显阻抗飞行区风险传播能力。同时，通过优化业务内容，如调整信息通报流程和复诵环节上也能使节点对风险负荷增加具有一定抵抗能力。

4.3.2 网络风险扩散指数分析

分析网络风险扩散情况，即通过对网络中的节点逐个攻击，使其达到风险阈值进而引起风险传播并造成其他节点触发，进而形成网络级联传播效应，达到分析不同节点造成的网络扩散程度，步骤如下。

步骤1 计算每个节点的初始风险负荷。

步骤2 选定一个评价节点，增加该节点风险负荷达到其风险阈值触发风险传播。

步骤3 统计不同仿真时长下(由一个节点触发下一个节点记为单位时间)的被触发节点数量以及被触发节点的介数，直到仿真周期结束。

步骤3 选取其他节点，重复步骤1后的步骤，直到所有节点被攻击。

图4为网络风险扩散指数演变图，由图可知，网络风险扩散存在3种类型，即风险扩散指数大且扩散时间长、风险扩散指数较强且扩散时间短、风险扩散指数相对固定。其中，节点c3、c1、c9、c4风险扩散指数大且扩散时间长，该类型节点具有较长的致因链，在传播后期风险增长快，针对该类型风险应尽快切断其传播链(可对其本身或其邻居节点进行重点控制)，防止其带来的后期风险的快速增加；节点c10、c14、b9、b10、b5、b8风险扩散指数较强且扩散时间短，该类型节点虽然传播链短但是影响程度高，应对该类型节点本身采取有效的风险抑制措施；节点c2、c6、c8、b6、b7是风险扩散指数相对固定节点，该类型节点影响范围小且传播链短，相对影响程度低。

结合4.3.1节点风险灵敏指数发现存在“双高”节点，即风险灵敏度指数和风险扩散指数都比较高，如节点c3、c1、c9、c10需要采用“尽早尽快”的策略，防止此类节点造成风险在网络中快速蔓延。可以看出，在机场飞行区运行风险节点中自动化设备失效、监视设备故障等具有风险影响范围大且影响程度大的特点，针对该类型节点采取尽早预防性策略；疲劳程度高、繁忙程度高等节点具有传播范围小但影响程度高的特点，针对该类型节点须加强备份和冗余管理。

4.3.3 网络结构鲁棒性指数分析

分析节点被触发后对网络结构的影响，从网络结构角度分析不同节点风险变化带来的影响，分析步骤如下。

步骤1 计算每个节点的初始风险负荷。

步骤2 选定一个评价节点，增加该节点风险负荷达到其风险阈值触发风险传播。

步骤3 统计不同仿真时长下(由一个节点触发下一个节点记为单位时间)，被触发节点数量以及连通情况，直到仿真周期结束。

步骤4 选取其他节点，重复步骤1后的步骤，直到所有节点被攻击。

网络结构鲁棒性指数排名前10的节点如图5所示，从网络结构鲁棒性指数看，存在2种类型节点，一种是使得风险网络最终结构鲁棒性最强，另

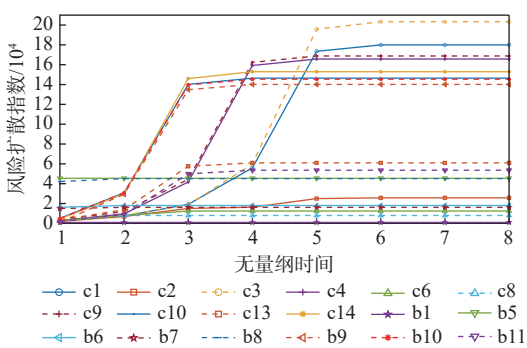


图4 网络风险扩散指数

Fig. 4 Network risk diffusion index

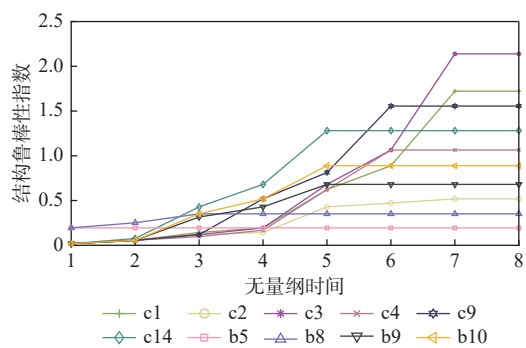


图5 网络结构鲁棒性指数

Fig. 5 Network structural robustness index

一种是使得网络结构鲁棒性指数增长最快。其中，节点 c1、c3 使得网络中风险触发的结构鲁棒性最强，对上述节点进行控制可以有效降低网络风险的链接关系；节点 c4、c14、c9、b9、b10 使得网络中结构鲁棒性增长最快，为有效控制网络中风险的快速蔓延、减少级联失效效应出现，对这类型节点应该提前控制。

由图 5 可知，通过结构鲁棒性指数可以分析设备与环境层、指挥与决策层等单个或多个节点致因的风险传播情况，如能源供给故障、疲劳程度高、繁忙程度高等单个或多致因耦合使得网络结构鲁棒性增加最快，整个网络风险易感性越强，风险传播范围越大。为此，可以通过分析网络结构鲁棒性指标研判单个或多个致因节点的影响范围和程度。

4.3.4　控制策略分析

针对所选指标和风险网络传播特征，本文采取 3 种不同控制策略，包括随机选取 15% 的节点进行控制（重复 1 000 次计算相应指标均值）、对度值排序前 15% 节点和灵敏指数前 15% 节点进行控制，且每种策略对节点风险控制程度相同，计算网络的风险扩散指数情况如图 6 所示。

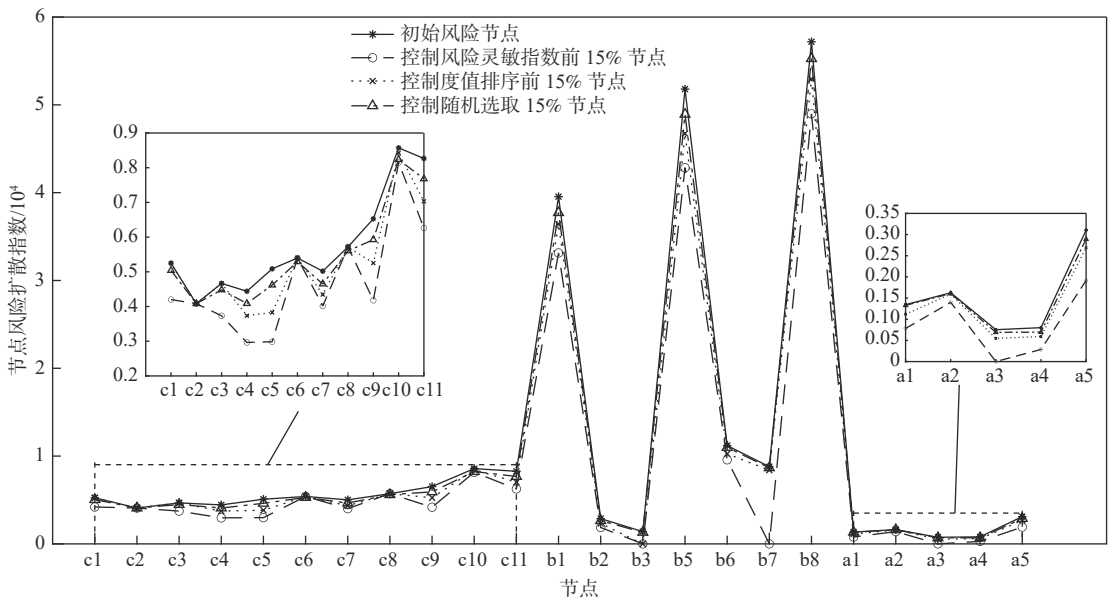


图 6　不同控制策略风险扩散指数

Fig. 6　Risk diffusion index under different control strategies

由图 6 可知，随机选取网络中 15% 的节点进行控制并重复 1 000 次获取的数值表明，该策略对控制网络风险传播能力有限，大部分节点风险扩散指数变动较小，部分节点如 c4、c11 可以降低 10%，总的风险扩散指数降低 5%；对度值排序前 15% 节点进行控制，大部分节点风险扩散指数都在降低，部分节点如 c5、b5 风险扩散指数可降低 20%，总风险扩散指数降低 11%；对风险灵敏指数排序前 15% 节点进行控制，风险扩散指数降低较为明显，如 c5、c9、b7、a3 风险扩散指数可降低 40%，总风险扩散指数降低 32%。因此，针对机场飞行区运行风险传播过程，对风险灵敏指数高的节点采取针对性的控制策略，即控制对网络贡献大的节点，可以在风险发生后有效降低风险的扩散程度，该控制策略明显优于随机控制策略，也优于基于度排序的控制策略。

为分析不同的控制策略对风险网络结构的影响，分别对扩散指数、度值排序前 15% 节点和随机选取的 15% 的节点（重复 1 000 次取均值）进行控制，计算风险网络结构鲁棒性指数，如图 7 所示。由图可知，3 种控制策略在时间上具有相同的趋势，都是在第 7 个仿真单元网络风险结构鲁棒性指数

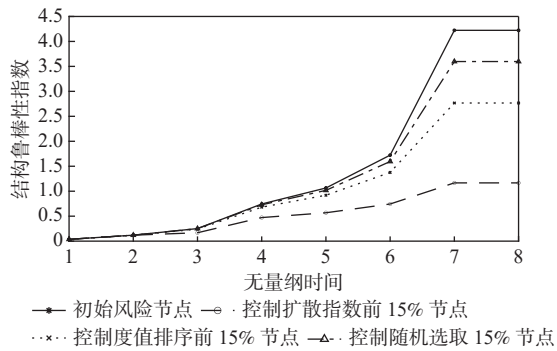


图 7　不同控制策略网络结构鲁棒性指数

Fig. 7　Network structure robustness index under different control strategies

达到最大值；但在程度上存在明显区别，控制扩散指数排序前15%节点的网络结构鲁棒性指数最低，网络中连通的风险节点数量最小，可使得结构鲁棒性指数降低48%，随机选取节点控制效果相对较差，对网络结构鲁棒性指数影响较小，网络中连通的风险节点数量依然较大。因此，针对疲劳程度高、双岗制工作状态、自动化设备失效、监视设备失效、等节点进行针对性控制可以有效缩小风险传播范围。

5 结 论

1）本文从机场飞行区风险形成过程出发，采用AcciMap方法融合机场飞行区风险数据识别飞行区的风险致因链，为构建机场飞行区异质链序风险网络提供基础。

2）基于异质多层风险网络，提出构建分层风险传播模型，建立基于分层特征的节点风险传播特征，更符合机场飞行区风险传播特点，提高针对致因多源、风险迥异多层网络风险传播建模的刻画精准。

3）针对多层风险网络传播的评价方面，综合网络结构和风险演化提出了3类指标，如针对节点重要性的评价不再单纯以复杂网络中的节点度为核心而是融合节点的风险贡献量进行评价，能够有效识别机场飞行区异质风险网络节点重要性，对精准控制风险传播发挥重要作用，如调配冲突指令不合理、通信质量下降等，虽节点度高但风险传播程度小。

4）基于风险传播案例表明，通过对机场飞行区风险节点按照风险灵敏指数强的节点进行优先、精准控制，其控制效益最高，可以降低风险扩散指数32%，降低风险网络中结构鲁棒性指数48%，为资源匮乏或短时资源短缺的机场实施优先致因调控提供依据。

参考文献（References）

[1] SHYUR H J. A quantitative model for aviation safety risk assessment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(1): 34-44.

[2] STAMATELATOS M. Probabilistic risk assessment procedures guide for managers and practitioners reliability[J]. Engineering System Safety, 2007, 11(1): 609-618.

[3] TAMASI G, DEMICHELA M. Risk assessment techniques for civil aviation security[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(8): 892-899.

[4] 孙殿阁, 孙佳, 王淼, 等. 基于Bow-Tie技术的民用机场安全风险分析应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(4): 85-89.
SUN D G, SUN J, WANG M, et al. Application of the improved Bow-tie risk analysis technology in civil airport safety[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(4): 85-89(in Chinese).

[5] 倪晓梅, 王华伟, 熊明兰, 等. 基于文本挖掘的民航事件风险评估[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49(6): 73-79.
NI X M, WANG H W, XIONG M L, et al. Civil aviation incident risk assessment based on text mining[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(6): 73-79(in Chinese).

[6] 陈芳, 向千秋, 陈茜. 基于模糊DEMATEL-BN的管制单位动态风险评估[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1): 35-43.
CHEN F, XIANG Q Q, CHEN X. Dynamic risk evaluation of air traffic control (ATC) based on fuzzy DEMATEL-BN[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(1): 35-43(in Chinese).

[7] SAUMELL-MENDIOLA A, ÁNGELES SERRANO M, BOGUÑÁ M. Epidemic spreading on interconnected networks[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2012, 86(2): 026106.

[8] 张仕杰, 唐涛, 刘金涛, 等. 基于复杂网络的列车辅助驾驶危险致因传播模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4): 129-136.
ZHANG S J, TANG T, LIU J T, et al. Propagation model for hazard causes of intelligent driving assistance system based on complex network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(4): 129-136(in Chinese).

[9] PARSHANI R, BULDYREV S V, HAVLIN S. Critical effect of dependency groups on the function of networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(3): 1007-1010.

[10] 肖琴, 罗帆, 朱本林. 基于突变理论的飞行签派员人因差错风险耦合演化研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 610-617.
XIAO Q, LUO F, ZHU B L. Identification and determination of the human error risk coupling evolution of the flight dispatcher based on the catastrophe theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(2): 610-617(in Chinese).

[11] 夏正洪, 万健, 朱新平. 机场热点时空分布特征及运行风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 93-98.
XIA Z H, WAN J, ZHU X P. Research on spatial and temporal distribution characteristics of airport hotspots and airport operational risk assessment[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(1): 93-98(in Chinese).

[12] 武喜萍, 杨红雨, 韩松臣. 基于复杂网络的空中交通特征与延误传播分析[J]. 航空学报, 2017, 38(S1): 721473.
WU X P, YANG H Y, HAN S C. Analysis of air traffic characteristics and delay propagation based on complex network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(S1): 721473(in Chinese).

[13] 王兴隆, 朱丽纳, 石宗北. 多层航线聚合网络建模及相关性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 1243-1249.
WANG X L, ZHU L N, SHI Z B. Multi-layer route aggregation network modeling and correlation analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(3): 1243-1249(in Chinese).

[14] 吴维, 罗欣然, 魏明. 基于SD模型的跑道侵入风控网络脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 41-48.
WU W, LUO X R, WEI M. Vulnerability assessment of runway intrusion risk control network based on SD model[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 41-48(in Chinese).

[15] WU C L, LAW K. Modelling the delay propagation effects of mul-

tiple resource connections in an airline network using a Bayesian network model[J]. Transportation Research, 2019, 122: 62-77.

[16] 王岩韬, 刘毓. 基于复杂网络的航班运行风险传播分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(1): 198-205.
WANG Y T, LIU Y. Flight operation risk propagation based on complex network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(1): 198-205(in Chinese).

[17] 冯芬玲, 蔡明旭, 贾俊杰. 基于多层复杂网络的中欧班列运输网络关键节点识别研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 191-200.
FENG F L, CAI M X, JIA J J. Key node identification of China railway express transportation network based on multi-layer complex network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 191-200(in Chinese).

[18] 孙兴龙, 李亚雄, 邱艳粉. 基于改进融合算法的交通网络节点重要性评估[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(4): 65-71.
SUN X L, LI Y X, QIU Y F. Evaluation of node importance in traffic network based on improved fusion algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(4): 65-71(in Chinese).

[19] 孙娟, 李晓霞, 张金浩, 等. 多层单向耦合星形网络的特征值谱及同步能力分析[J]. 物理学报, 2017, 66(18): 329-342.
SUN J, LI X X, ZHANG J H, et al. Synchronizability and eigenvalues of multilayer star networks through unidirectionally coupling[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(18): 329-342(in Chinese).

[20] TANG L K, LU J N, WU X Q, et al. Impact of node dynamics parameters on topology identification of complex dynamical networks[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(1): 1081-1097.

[21] 冯慧琳, 胡荣, 王德芸, 等. 航班时刻初级市场配置优化模型研究进展[J]. 交通运输工程与信息学报, 2022, 20(4): 42-58.
FENG H L, HU R, WANG D Y, et al. Research progress in optimization modeling of primary slot allocation[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2022, 20(4): 42-58(in Chinese).

[22] 中国民用航空局机场司. 大型民用运输机场运行安全保障能力综合评价管理办法: AP-140-CA-2018-01 [Z]. 2018-08-22.
AIRPORT Department of Civil Aviation Administration of China. Management measures for comprehensive evaluation of operational safety guarantee capability of large civil transport airports: AP-140-CA-2018-01 [Z]. 2018-08-22.

[23] 衡宇铭, 吴明功, 温祥西, 等. 基于复杂网络的管制员负荷评估[J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2022, 41(1): 52-58.
HENG Y M, WU M G, WEN X X, et al. Controller workload evaluation based on complex network[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2022, 41(1): 52-58(in Chinese).

Research on multi-layer heterogeneous chain sequence risk propagation model in airport movement area

WU Wei[1, 2, *], WU Zexuan[1], WANG Xinglong[1]

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A multi-layer heterogeneous network risk propagation model was built using complex network theory and the causal chain relationship between risk factors in order to better characterize the characteristics of operational risks' propagation in flight areas and improve the safety management capabilities of airport flight areas. The accident analysis mapping(AcciMap) theory was employed to analyze the causal chain of risk propagation. A three-layer heterogeneous risk propagation network was built. Evaluation indicators were designed using complex network theory to analyze the characteristics of risk network propagation. The results demonstrate that the node's risk propagation capability exhibits a weak correlation with the node degree, and the node's risk sensitivity index can enhance the accuracy of risk node ranking. Implementing risk control measures on the top 15% of nodes ranked by the risk sensitivity index can effectively reduce risk diffusion by approximately 32%. It is possible to reduce the robustness index of the network structure and move the risk network structure from a highly connected state to a loose state by controlling the top 15% of nodes ranked by the risk diffusion index. The built model enables the identification and precise control of risk diffusion processes, thereby enhancing the level of risk control in airport flight areas.

Keywords: air transportation; airport operations; complex network; risk propagation; control strategy

Received: 2023-04-24; **Accepted**: 2023-06-16; **Published Online**: 2023-07-04 16:18

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230704.1137.001

Foundation items: Natural Science Key project of Tianjin Municipal Education Commission (21JCYBJC00700); The Fundamental Research Funds for the Central Universities Civil Aviation University of China Special Project (3122025098)

* **Corresponding author**. E-mail: wwu@cauc.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0597

基于软件机器人的工控靶场应用软件行为模拟

刘志尧[1]，张格[1]，刘红日[2,3,4]，张旭[3,4]，陈翊璐[3,4]，王佰玲[2,3,4,*]

(1. 国家工业信息安全发展研究中心，北京 100040；2. 威海天之卫网络空间安全科技有限公司，威海 264209；
3. 哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院，威海 264209；4. 哈尔滨工业大学 网络空间安全学院，哈尔滨 150001)

摘 要：工控靶场为开展工业控制系统(ICS)安全研究提供重要支撑。面向工控靶场关键任务之一的应用软件行为模拟，提出一种软件机器人方法以实现工控靶场应用软件行为的逼真模拟。考虑软件图形界面及软件内在显隐式规则，提出基于尺度不变特征变换(SIFT)图像相似度的软件菜单采集算法及混合状态机模型对应用软件行为进行建模。针对软件机器人的智能化问题，使用深度Q网络(DQN)算法驱动软件机器人对应用软件行为进行自主学习，同时结合多重经验回访和多重目标网络对DQN算法进行优化。实验结果表明：基于DQN的软件机器人能够对工控软件进行有效学习，且优化后的DQN算法自主学习效果更佳。

关 键 词：工控靶场；应用软件行为模拟；软件机器人；混合状态机；深度Q网络
中图分类号：TP393.09
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2237-08

由于工业控制系统(industrial control system, ICS)对实时性和可靠性具有严格要求，安全研究无法在真实ICS中开展。工业控制领域的网络安全靶场(简称工控靶场)对所处ICS真实运行环境进行仿真与模拟，可用于技术验证、攻防演练等安全研究，在提高ICS安全性上发挥了重要作用[1-2]。其中，应用软件行为模拟指在网络靶场中模拟真实用户与应用软件的交互行为，是工控靶场的关键任务。

为逼真模拟应用软件行为，工控流程自动化机器人(简称软件机器人)可代替工控靶场中人这一角色，从而减少人的操作错误和操作误差，使模拟标准化。软件机器人和真实用户都需遵守软件操作要求，因此，应用软件行为描述是实现软件机器人模拟工控靶场应用软件行为的前提。

现有应用软件行为描述研究可分为应用软件行为语言描述和应用软件行为建模。应用软件行为语言描述[3-5]主要利用建模符号、特定语言等对应用软件行为进行语言描述，但缺少对软件内在显隐式规则的研究。应用软件行为建模通常使用有限状态机(finite state machine, FSM)及其改进后的模型来描述应用软件行为[6-7]，但基于FSM的方法缺乏对软件图形界面的描述和建模。

在软件机器人方面，传统方法基于真实用户操作数据的分析和统计[8-10]，借助鼠标键盘的脚本实现特定软件操作，该方法拓展性差，智能化程度低，且不同软件不同操作需要重新设计脚本。而基于智能算法的软件机器人虽具有较高水平的“大脑”[11]，但同样存在不足。例如，由神经网络驱动的软件机器人[12-15]的表现效果在一定程度上依赖于训练数据的数量及质量。

基于上述研究，本文提出一种基于软件机器人的工控靶场应用软件行为模拟方法，解决应用软件行为建模中软件图形界面和内在显隐式规则描述缺少及软件机器人的自主学习问题，实现工控靶场应用软件行为的逼真模拟。首先，针对应用软件行为建模，基于尺度不变特征变换(scale invariant

收稿日期：2022-07-09；录用日期：2022-10-07；网络出版时间：2022-12-14 14:43
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221213.1547.008
基金项目：国家重点研发计划 (2020YFB2009502)
*通信作者. E-mail：wbl@hit.edu.cn

引用格式：刘志尧，张格，刘红日，等. 基于软件机器人的工控靶场应用软件行为模拟[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2237-2244.
LIU Z Y，ZHANG G，LIU H R，et al. Software robot-based application behavior simulation for cyber security range in industrial control field[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2237-2244 (in Chinese).

feature transform, SIFT)图像相似度采集工控软件图形界面状态信息[16], 提出软件菜单混合状态机模型(hybrid hierarchical state machine model based on software menu, SM-HHSM)描述软件使用过程中的状态转移及显隐式规则。其次, 考虑软件机器人智能化问题, 使用基于网格的深度Q学习(deep Q network, DQN)算法驱动软件机器人求解状态转移问题, 从而实现应用软件行为的自主学习, 并结合多重经验回放和多重目标网络对网格DQN算法进行优化。最后, 通过实验验证本文方法的有效性。

1 软件机器人学习过程分析

软件机器人可通过模拟真实用户的软件使用过程实现对软件的学习。如图1所示, 真实用户在使用软件时, 眼睛从计算机屏幕上捕捉视觉信息并将其传递给大脑, 再由大脑处理视觉信息。用户用手操作鼠标和键盘与软件进行交互, 软件界面发生相应变化。用户循环整个过程直到达到目标效果。相应地, 软件机器人捕捉软件图像信息, 并利用学习算法进行处理, 通过系统API接口操纵鼠标和键盘来操作软件, 软件界面发生相应变化, 循环这一过程直至达到目标效果。

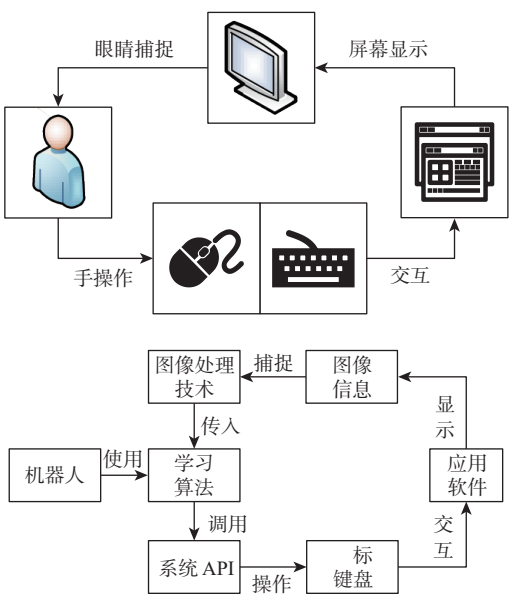


图1 用户和机器人使用软件过程的行为模型示意图

Fig. 1 Model of behavior users and robots in process of using software

本文以西门子的典型工控软件为例, 首先, 研究软件图形界面结构, 利用图像处理技术采集界面信息, 其次, 分析软件实际使用过程中的状态转换及显隐式规则, 构建应用软件行为模型, 最后, 根据模型建立软件机器人训练环境, 利用DQN算法驱动机器人进行自主学习。

2 应用软件行为模拟软件机器人技术

2.1 信息采集

西门子的典型工控软件的默认界面可分为软件窗体控制区、菜单按钮区及组件文本编辑区。真实用户在组件文本编辑区键入文字或放置组件, 点击菜单按钮区的按钮使文字或组件逐渐到达目标效果。用户在组件文本编辑区进行任务时, 通常避免点击到软件窗体控制区的按钮, 如最小化窗口按钮、关闭按钮。

针对菜单按钮区, 本文提出一种基于SIFT图像相似度的软件菜单采集算法, 如算法1所示, 算法主要思路为: 在菜单按钮区中横向或纵向移动鼠标点击菜单按钮并截图, 使用SIFT特征判断菜单按钮区截图前后是否相似, 若不相似, 表明出现新菜单, 则对新菜单进行记录。

算法1 基于SIFT图像相似度的软件菜单采集算法。

输入: 菜单按钮区4个顶点的位置坐标I, 其中, $I=\{(m_{1x},m_{1y}),(m_{2x},m_{2y}),(m_{3x},m_{3y}),(m_{4x},m_{4y})\}$, 鼠标横向扫描步进值集合$L_x$, 鼠标纵向扫描步进值集合$L_y$。

输出: 菜单集合R。

Begin

初始化鼠标位置坐标$(m_x,m_y)=(m_{1x},m_{1y})$

根据菜单按钮区的4个顶点坐标计算菜单按钮区长度L和宽度W

For 每一个在L_x集合中的值l_x

While m_x和L不相等

For 每一个在L_y集合中的值l_y

While m_y和W不相等

$m_y+=l_y$//鼠标纵向移动, 点击菜单按钮区并截图

使用SIFT特征计算新截图和已有截图的相似度

If 相似度大于指定阈值

将新菜单加入菜单集合R

Else

鼠标继续扫描点击

End if

End while

对菜单集合R去重

End for

$m_x+=l_x$//鼠标横向移动

$m_y=0$

End while

End for

返回菜单集合R

End

2.2　应用软件行为模型构建

菜单和按钮数量有限, 因此, 菜单按钮区的状态也有限; 而组件文本编辑区, 由于用户需求的多样性, 一定程度上其内容无法确定, 因此, 组件文本编辑区的状态无限。在软件使用过程中, 组件文本编辑区无限状态的转换通过菜单按钮区有限状态的转换来实现, 因此, 软件使用过程可看作有限状态和无限状态之间的转换。故工控靶场应用软件行为模拟可抽象为应用软件的状态转换问题。

若菜单呈现层次结构, 则存在多层菜单状态机。任意菜单可进入其所有子菜单, 任一子菜单仅可通过其上一级菜单进入, 并可返回至其上一级菜单; 同级菜单之间可相互进入, 菜单之间的转移不限次数。同时软件使用也遵循显隐式规则, 如鼠标在同一时刻只能点击一个按钮。

基于上述分析, 本文提出 SM-HHSM 模型, 以此描述软件使用过程和显隐式规则。菜单按钮区状态转移定义为$T_{\mathrm{M}} = S_{\mathrm{M}}E \to S_{\mathrm{M}}$, 表示某一菜单按钮区状态将通过事件转移至另一菜单按钮区状态; 混合状态机为$M = (S_{\mathrm{I}}, E, A, S_{\mathrm{M}}, s_0, H, T_{\mathrm{M}}, S_{\mathrm{W}}, T_{\mathrm{W}}, T_{\mathrm{I}})$。其中, E为状态事件集合, A为动作集合, S_{I}为组件文本编辑区无限状态集合, S_{M}为菜单按钮区有限状态集合, s_0为状态机初始状态, S_{W}为软件窗体控制区状态集合, H为菜单按钮区分层状态集合, T_{M}为菜单按钮区状态转移集合, T_{I}为组件文本编辑区状态转移集合, T_{W}为软件窗体控制区状态转移集合, M为混合状态机。

西门子典型工控软件的 SM-HHSM 如图 2 所示。软件初始状态指“选项”“插入”“视图”“项

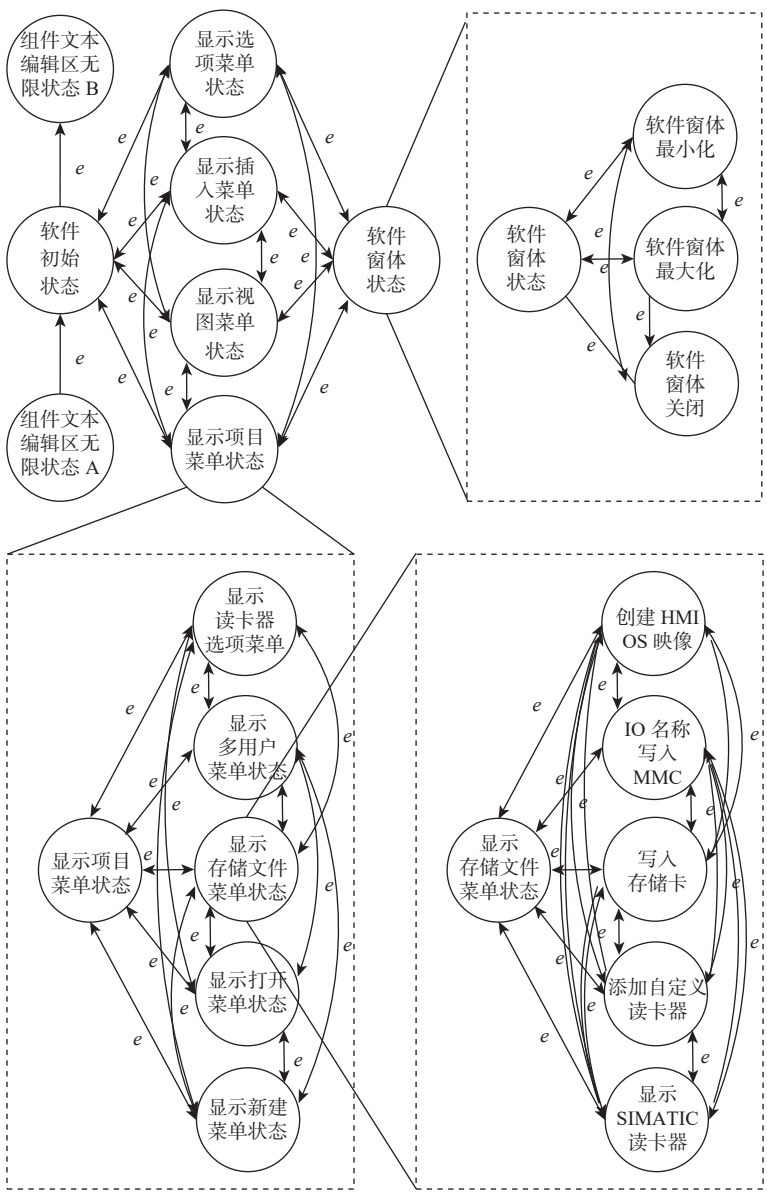


图 2　西门子典型工控软件的 SM-HHSM

Fig. 2　SM-HHSM of Siemens typical industrial control software

目”等菜单的初始显示状态，e为状态事件集合E中的事件。软件启动后，组件文本编辑区无限状态A经软件初始状态进入菜单按钮区分层FSM中，并通过一系列菜单按钮区状态转移实现目标效果，到达组件文本编辑区无限状态B。结合分层FSM建模过程及示意图，有以下应用软件行为规则。

规则1 无限状态必须通过软件初始状态进入分层FSM，也必须通过软件初始状态从FSM中转移出。

规则2 菜单按钮区分层FSM中的状态构成一个完整状态机，其中，最上层为父状态机，父状态机通过转移进入子状态机，子状态机也可以构成一个完整状态机。

规则3 单个菜单按钮区分层FSM中的父状态机状态通过多个独立的转移可到达多个子状态。

规则4 任意菜单按钮区分层FSM中的子状态机状态必须经其父状态机状态转移到达。

规则5 若能通过菜单按钮区分层FSM中的父状态机的任意状态转移进入其子状态机，子状态机的状态就可以通过转移回到父状态机中。

规则6 菜单按钮区分层FSM中的一个子状态机对应一个父状态机的状态转换，一个子状态机内部可以进行多次状态转换。

规则7 组件文本编辑区状态具有无限性，因此，状态转换没有次数限制。

2.3 软件机器人自主学习

2.3.1 网格学习环境构建

学习应用软件行为前，基于规则1～规则7构建软件机器人训练环境。以西门子的典型工控软件“项目”菜单及其部分子菜单为例，软件机器人训练环境如图3所示。每个二维平面对应SM-HHSM的一个菜单按钮区状态机，例如，“项目”菜单二维平面对应SM-HHSM中最上层状态机；二维平面的切换关系对应分层FSM之间的状态转移，“存储文件”菜单对应SM-HHSM中“显示项目菜单状态”通过转移之后进入的“显示存储文件菜单状态”的子FSM。

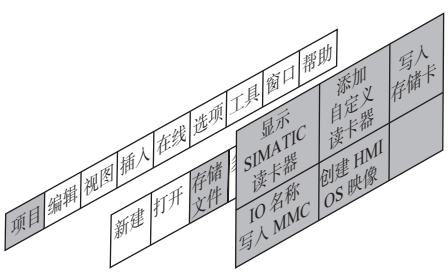


图3 软件机器人训练环境

Fig. 3 Software robot training environment

基于SM-HHSM的网格学习训练环境构建算法如算法2所示，其主要思想是：通过基于栈的深度优先搜索遍历SM-HHSM的菜单按钮区状态机。其中，创建网格训练环境指将读取到的状态机转换成神经网络能够处理的张量形式。

算法2 基于SM-HHSM的网格学习训练环境构建算法。

输入： SM-HHSM菜单按钮区状态机G及状态机中事件E。

输出： 软件机器人训练环境Env。

```
Begin
For 对G中每一个父状态机H_sp
  创建H_sp网格训练环境
    If H_sp有子状态机
      对H_sp其下的所有子状态机进行遍历并创建网格训练环境
    End if
End for
返回训练环境 Env
End
```

2.3.2 基于网格DQN的自主学习方法

DQN将神经网络和强化学习结合，包括Agent、环境、动作、状态、动作和奖励、策略、值函数等元素。软件机器人学习模型如图4所示。图中，软件机器人作为Agent，在t时刻观察学习环境，根据策略π采取动作A_t，此时环境状态由S_t变为S_{t+1}，同时返回新奖励R_{t+1}给软件机器人，软件机器人根据奖励R_{t+1}和状态S_{t+1}采取动作A_{t+1}。软件机器人通过这种循环机制对软件进行学习。

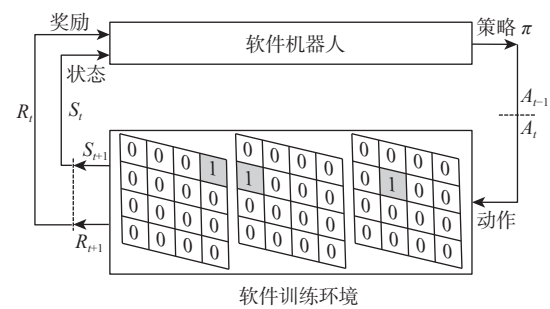


图4 软件机器人学习模型

Fig. 4 Learning model of software robot

软件机器人动作包括向上、向下、向左、向右4个方向的移动，每次移动都会获得相应奖励$r(s,a)$，其中，s为软件机器人所接收到的训练环境中的状态，a为软件机器人在训练环境中采取的动作。奖励函数$r(s,a)$定义为

$$r(s,a)=\begin{cases}10 & \text{达到目标}\\ 0 & \text{未达到目标}\\ -10 & \text{进行窗口控制}\end{cases} \quad (1)$$

软件机器人在状态 S_t 下通过动作 A_t 和策略 π 得到 Q 值, 用于指导软件机器人下一动作。Q 值更新为

$$Q_\pi(S_t,A_t)=Q_\pi(S_t,A_t)+\alpha(R_{t+1}+\gamma\max Q_\pi(S_{t+1},a)-Q_\pi(S_t,A_t)) \quad (2)$$

式中: $\alpha\in[0,1]$为学习率; $\gamma\in[0,1]$为折扣因子。

DQN 将 $Q_\pi(S_t,A_t)$作为状态-动作的值函数, 计算给定状态下所有动作的 Q 值, 并在神经网络的输出层中生成相应 Q 值。由于软件机器人存在 4 个移动方向, 故最终输出层有 4 层。

同时, 采用ε-greedy策略选择软件机器人的最终动作。参数ε表示以ε概率忽略预测的 Q 值而随机选择一个动作, 或以 $1-\varepsilon$概率选取预测的最高 Q 值动作。

软件机器人训练总体架构如图 5 所示。将软件菜单转换为训练环境, 输入深度强化学习神经网络中, 经神经网络向前和反向传播训练, 最终在输出层输出对应动作 Q 值。

由于网格 DQN 采取朴素 DQN 算法, 菜单的不断变化将引起网格动态变化, 导致软件机器人出现灾难性遗忘。针对该问题, 结合多重经验回放机制的 DQN 算法利用随机批学习可使目标达到平均水平, 但也会在一定程度上造成软件机器人学习不稳定。因此, 本文在多重经验回放的基础上增加多重目标网络机制, 以优化软件机器人的学习效果。多重目标网络机制将 Q-网络复制成多个常规 Q-网络和目标网络, 利用目标网络 Q 值训练 Q-网络, 可提高训练稳定性。

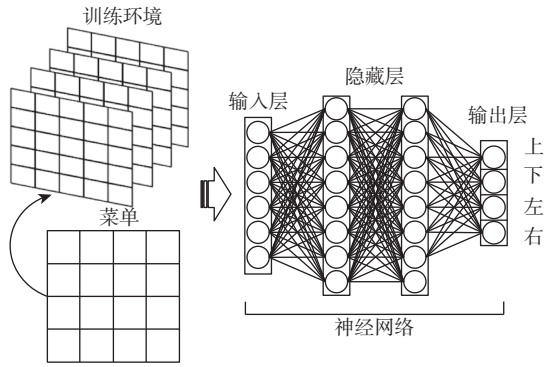


图 5　软件机器人训练总体架构

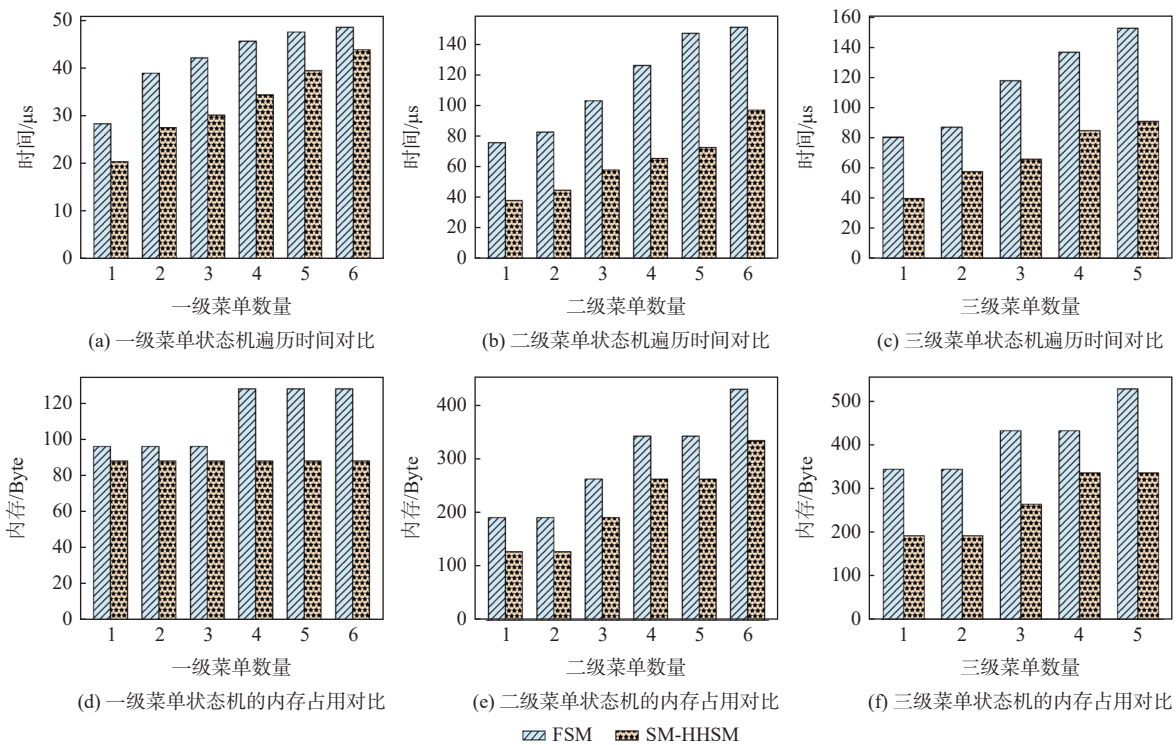
Fig. 5　Architecture of software robot training

3　实　验

3.1　SM-HHSM 性能实验

为测试本文 SM-HHSM 性能, 将其与 FSM 进行对比, 记录对不同菜单数量及不同菜单层次的菜单状态机进行状态遍历所用的时间和内存。首先, 对拥有不同菜单数量的一级菜单、二级菜单和三级菜单分别使用 FSM 模型和 SM-HHSM 模型实现状态机, 其次, 对菜单状态机进行状态遍历, 记录时间消耗和内存占用。

实验结果如图 6 所示。在不同菜单数量、不同



(a) 一级菜单状态机遍历时间对比　(b) 二级菜单状态机遍历时间对比　(c) 三级菜单状态机遍历时间对比

(d) 一级菜单状态机的内存占用对比　(e) 二级菜单状态机的内存占用对比　(f) 三级菜单状态机的内存占用对比

图 6　FSM 和 SM-HHSM 遍历时间和内存占用对比

Fig. 6　Comparison of traversal time and memory usage between FSM and SM-HHSM

菜单层级下的菜单状态机的状态遍历实验中，SM-HHSM的时间消耗和内存占用明显优于FSM。这是因为SM-HHSM的菜单按钮区状态机具有层次性和隔离性，在一定程度上对状态机的状态转移进行了规范，同时子状态之间不受外部状态转移的干扰，避免维护大量的冗余转移。

3.2 软件机器人自主学习参数设置

软件机器人采用DQN算法进行自主学习，并利用ε-greedy策略选择最终动作，其中，超参数折扣因子γ、学习率α及ε的取值在一定程度上决定机器人学习效果，故通过实验确定其最优值，为后续机器人自主学习实验提供基础。

考虑到训练时长及便捷性，实验使用规模固定的西门子典型工控软件的“工具”菜单。该菜单大小为4×4，网格如图7所示。软件机器人需从初始位置出发到达“下载到设备”按钮，若到达目标按钮则获得奖励10；若经过“关闭”按钮，则获得惩罚−10；经过其他按钮无惩罚和奖励。

		软件机器人	关闭
下载到设备	启动CPU		可访问设备
上传到设备	停止CPU		

图7 西门子“工具”菜单网格

Fig. 7 Grid of Siemens toolbar menu

由于ε-greedy策略依赖Q值选择软件机器人的最终动作，需先确定折扣因子γ和学习率α的最优取值。

在实验中，每次迭代都从0～1随机选择ε值，最终发现折扣因子γ为0.9、学习率α为0.03时学习效果最佳，此时训练损失曲线如图8所示。训练损失逐渐下降且收敛，说明软件机器人使用DQN算法对软件行为进行学习是可行的。考虑到实验时间消耗，将ε取值实验中的迭代训练次数设置为1 000。

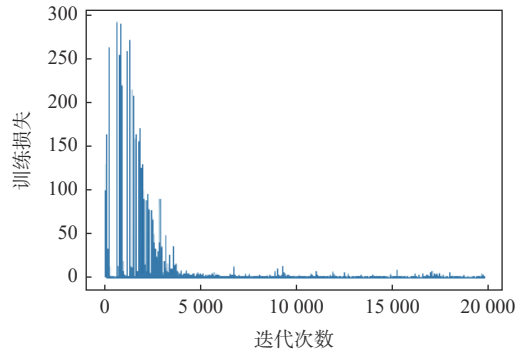


图8 $\gamma=0.9,\alpha=0.03$时软件机器人的训练损失曲线

Fig. 8 Training loss curve of software robot when $\gamma=0.9$ and $\alpha=0.03$

为确定ε最优范围，实验将ε初始值设置为1，对其进行线性递减：

$$\varepsilon=\varepsilon-1/I \tag{3}$$

式中：I为迭代训练次数。

迭代训练I次后，ε的最优范围为0.1～0.3。为确定最优值，将ε分别设置为0.1、0.2、0.3及线性减少，对比训练过程中的平均奖励、累积奖励和成功到达率。平均奖励反映随着迭代训练次数不断增加软件机器人所得奖励值的期望大小。累积奖励反映随着迭代次数不断增加软件机器人所得奖励的累积值。成功到达率μ表示在指定迭代训练次数I中软件机器人成功到达目标按钮的次数S所占比率，计算式为

$$\mu=S/I \tag{4}$$

在ε分别取0.1、0.2、0.3及线性减少4种情况下，平均奖励、累积奖励和成功到达率如图9所

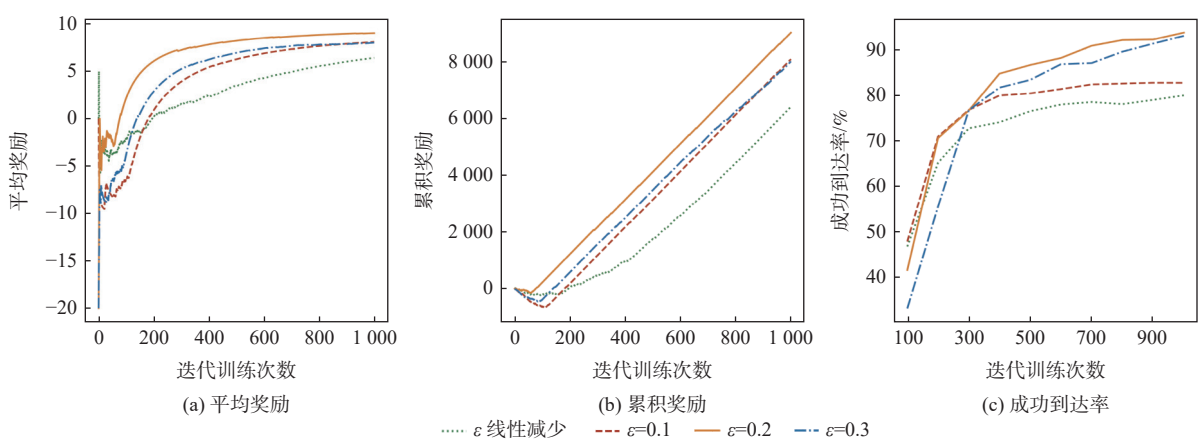


图9 ε不同取值下平均奖励、累积奖励情况和成功到达率对比

Fig. 9 Comparison of average and accumulative rewards and successful arrival rates with different ε values

示。结果显示, 在一定迭代训练次数下, ε取 0.2 时, 平均奖励、累积奖励和成功到达率均整体优于其他取值。因此, 将 0.2 设置为ε的最优取值。

3.3　软件机器人自主学习实验

为验证软件机器人自主学习效果, 分别对朴素 DQN 及其 2 种优化方案(带有多重经验回放的 DQN 和带有多重经验回放及多重目标网络的 DQN)进行实验, 对比 3 种算法的平均奖励、累积奖励及成功到达率。

实验采用西门子典型工控软件的“工具”菜单作为网格环境。软件机器人到达指定目标按钮视为成功, 到达关闭按钮视为失败。为避免机器人的学习进入死循环, 将学习最大移动次数设置为 50。3 种方法均使用ε-greedy策略, 参数设置如表 1 所示。

表 1　实验参数设置

Table 1　Parameter setting in experiment

软件行为模拟机器人位置	目标按钮位置	学习率α	迭代训练次数I	折扣因子γ	经验池大小	批大小	最大移动次数
(0,3)	(1,0)	0.03	5 000	0.9	1 000	200	50

DQN 及其 2 种优化方案的平均奖励、累积奖励和成功到达率情况如图 10 所示。

由图 10 可知, 3 种算法的平均奖励值虽在训练前期呈现波动, 但随着迭代训练次数的增加均逐渐趋于平稳, 同时三者的累积奖励值也逐渐增加。优化后的 DQN 具有较高的平均奖励、累积奖励和成功到达率, 其中, 带有多重经验回放和多重目标网络的网格 DQN 在一定迭代训练次数下, 具有最优结果。此外, 朴素 DQN 的波动较大, 而优化后的 DQN 波动较小, 表明优化算法的学习更稳定。

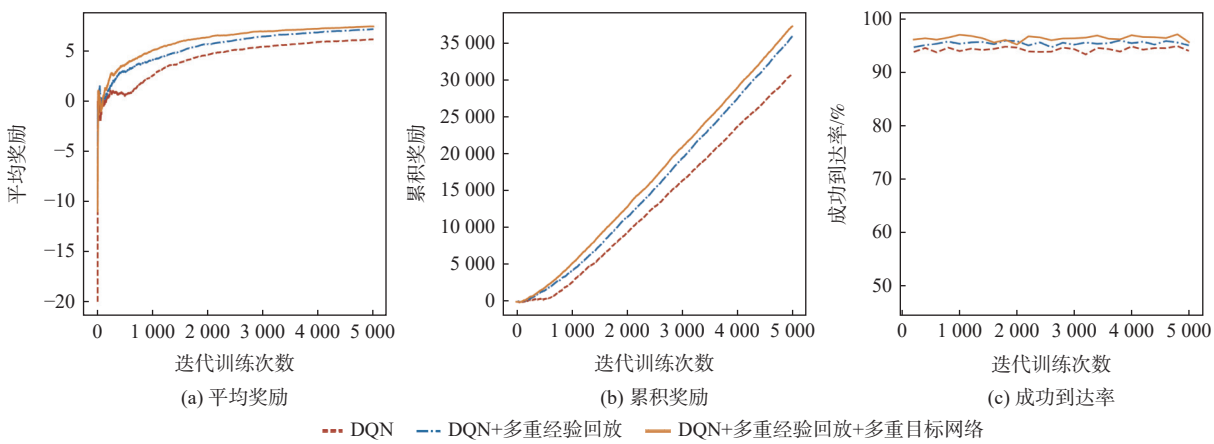


图 10　DQN 与其优化方案的平均奖励、累积奖励和成功到达率对比

Fig. 10　Comparison of average and accumulative rewards and successful arrival rates between DQN and its optimization schemes

综上, 本文所提软件机器人能够在基于 SM-HHSM 构建的训练环境中自主学习应用软件行为, 且优化后的 DQN 算法学习效果更佳。由于 SM-HHSM 描述了应用软件的图形界面及内在显隐式规则, DQN 算法驱动的软件机器人可逼真模拟真实用户的软件使用过程, 智能化程度较高。然而当应用软件改变时, 需重新构建 SM-HHSM 并训练软件机器人。

4　结　论

1) 本文使用基于 SIFT 图像相似度的软件菜单采集算法收集工控软件菜单信息, 达到模拟用户视觉信息采集的效果。

2) 本文提出 SM-HHSM 描述工控应用软件行为及显隐式规则。与 FSM 相比, SM-HHSM 在状态遍历中耗费更少的时间和内存。

3) 使用 DQN 算法的软件机器人可有效自主学习应用软件行为, 且使用多重经验回放和多重目标网络机制优化后的 DQN 算法学习效果更佳。

参考文献(References)

[1] 方滨兴, 贾焰, 李爱平, 等. 网络空间靶场技术研究[J]. 信息安全学报, 2016, 1(3): 1-9.
FANG B X, JIA Y, LI A P, et al. Cyber ranges: State-of-the-art and research challenges[J]. Journal of Cyber Security, 2016, 1(3): 1-9(in Chinese).

[2] 王佰玲, 刘红日, 张耀方, 等. 工业控制系统安全仿真关键技术研究综述[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1466-1488.
WANG B L, LIU H R, ZHANG Y F, et al. Review on key technologies of industrial control system security simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1466-1488(in Chinese).

[3] OZKAYA M. Analysing UML-based software modelling lan-

guages[J]. Journal of Aeronautics and Space Technologies, 2018, 11(2): 119-134.

[4] KOSE M A, OZKAYA M. Towards extending UML's activity diagram for the architectural modeling, analysis, and implementation[C]//Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. Piscataway: IEEE Press, 2020: 639-648.

[5] BOUTEKKOUK F. Architecture description languages taxonomies review: A special focus on self-adaptive distributed embedded systems[J]. International Journal of Technology Diffusion, 2021, 12(1): 53-74.

[6] SMOLYAKOV I Y, BELYAEV S A. Design of the software architecture for starcraft video game on the basis of finite state machines[C]//Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2019: 356-359.

[7] LEE E, KIM Y G, SEO Y D, et al. RINGA: Design and verification of finite state machine for self-adaptive software at runtime[J]. Information and Software Technology, 2018, 93: 200-222.

[8] MARTÍN A G, FERNÁNDEZ-ISABEL A, DE DIEGO I M, et al. A survey for user behavior analysis based on machine learning techniques: Current models and applications[J]. Applied Intelligence, 2021, 51(8): 6029-6055.

[9] LIAN J. Implementation of computer network user behavior forensic analysis system based on speech data system log[J]. International Journal of Speech Technology, 2020, 23(3): 559-567.

[10] ZHAO X, BHUIYAN M Z A, QI L Y, et al. TrCMP: A dependable app usage inference design for user behavior analysis through cyber-physical parameters[J]. Journal of Systems Architecture, 2020, 102: 101665.

[11] REN F J, BAO Y W. A review on human-computer interaction and intelligent robots[J]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2020, 19(1): 5-47.

[12] MU F R, LIU C Y. Design and research of intelligent logistics robot based on STM32[J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2021, 14(1): 44-51.

[13] BAI X J, DING X Y, WU M X. Intelligent classification robot based on image recognition[C]//Proceedings of the International Conference on Optoelectronic Materials and Devices. Bellinham: SPIE, 2021: 117671M.

[14] WANG T M, TAO Y, LIU H. Current researches and future development trend of intelligent robot: A review[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(5): 525-546.

[15] HE W, LI Z J, CHEN C L P. A survey of human-centered intelligent robots: Issues and challenges[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 602-609.

[16] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.

Software robot-based application behavior simulation for cyber security range in industrial control field

LIU Zhiyao[1], ZHANG Ge[1], LIU Hongri[2, 3, 4], ZHANG Xu[3, 4], CHEN Yilu[3, 4], WANG Bailing[2, 3, 4, *]

(1. China Industrial Control Systems Cyber Emergency Response Team, Beijing 100040, China;
2. Weihai Cyber Guard Technologies Co., Ltd., Weihai 264209, China;
3. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China;
4. School of Cyberspace Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The cyber security range in the industrial control field provides important support for studies on industrial control system (ICS) security. The application behavior simulation is a crucial task for the cyber security range in the industrial control field. Therefore, a software robot method was proposed to realistically simulate the application behavior for the cyber security range in the industrial control field. By considering software graphical interfaces and explicit and implicit software rules, a software menu acquisition algorithm based on scale invariant feature transform (SIFT) for image similarity, as well as a hybrid hierarchical state machine model was developed to model application behaviors. In view of the intelligent problem of the software robot, a deep Q network (DQN) algorithm was utilized to drive the software robot to autonomously learn the application behavior. At the same time, the DQN algorithm was optimized by combining multiple experience replays and multiple target networks. The experiment results show that the software robot based on DQN can effectively learn the industrial control software, and the optimized DQN algorithm has a better autonomous learning effect.

Keywords: cyber security range in industrial control field; application behavior simulation; software robot; hybrid state machine; deep Q network

Received: 2022-07-09; **Accepted**: 2022-10-07; **Published Online**: 2022-12-14 14:43

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221213.1547.008

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2020YFB2009502)

* **Corresponding author**. E-mail: wbl@hit.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0614

液体火箭发动机地面试验控制电路的设计与分析

徐勇，郭红杰*，超力德，黄俊杰，梁国柱
(北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191)

摘 要：针对液体火箭发动机地面试验控制系统须抑制控制电路输入端的脉冲噪声、输出端的反峰电压及控制电流测量精度低等问题，运用放大电路原理，采用电路仿真方法，设计了基于电路印制板型固态继电器的控制驱动和控制电流测量电路。控制驱动电路应用“二极管+稳压二极管”模块以实现降低反峰电压和缩短复位时间的效果，控制驱动电路中固态继电器输出端集成了光耦隔离模块用于反馈控制信号，控制电流测量电路主要由霍尔效应电流感应模块和运算放大器构成以达到较高精度测量控制电流的目的。通过电路仿真，分析了控制驱动电路的反峰电压抑制模块、控制电流测量电路的动静态特性。仿真和实测结果表明：控制电流测量电路的基本误差为6.66%±1.80%，电路上升时间小于0.3 ms，下降时间小于0.5 ms；控制驱动电路的接通时间小于2 μs，关断时间小于0.5 ms，“标准恢复二极管+齐纳二极管”方法能有效抑制反峰电压；控制驱动电路可应用于液体火箭发动机高精度的地面试验控制系统研制。

关 键 词：地面试验控制电路；固态继电器；电流测量；霍尔效应；液体火箭发动机
中图分类号：V442; TP211+.4
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2245-11

液体火箭发动机地面试验控制系统是确保液体火箭发动机试验正常有序进行的关键系统之一。控制系统的精度和可靠性主要由控制器、继电器和执行设备3个硬件决定。继电器、执行设备的启闭时间及稳定性是衡量控制系统性能的关键参数之一。继电器和执行设备的驱动电路输入端的噪声与输出端的反峰电压(主要由电磁阀类型的感性部件动作时产生)严重影响着控制系统的启闭时间与稳定性，因此需要应用相关方法抑制噪声和反峰电压。为定量分析不同方法抑制反峰电压的效果及评定控制系统的精度和可靠性，常通过测量控制电流或电压来实现。

控制驱动电路输入端常用的噪声抑制方法是电阻+电容[1-3]，抑制反峰电压的方法多种多样。余力凡和马红梅通过理论计算和仿真分析，认为“电阻+二极管+稳压二极管”方法优于“二极管+电阻”方法，但仿真中所测为泄放电阻两端电压不能较准确地表征反峰电压[2]。弭艳等通过仿真和试验发现“双向稳压二极管”方法优于“二极管+电阻”方法，然而试验数据显示采用“双向稳压二极管”方法的反峰电压高达43 V，并未有效抑制反峰电压[4]。沈福东通过理论设计分析认为，“二极管”方法适用于灵敏度要求不高的场合，“二极管+电阻”方法适用于灵敏度要求较高的场合[5]。卫强等通过理论计算和试验发现“电阻+电容+二极管”方法优于“电阻+二极管”方法[6]。

国外在抑制反峰电压(或称为反电动势/浪涌电压/电磁干扰等)方面的研究常见于高速开关控制电路[7-8]、电源转换器[9]等方向。日本欧姆龙公司的井户田修等发明了一种高速开关控制电路，该电路主

收稿日期：2022-07-13；录用日期：2022-09-02；网络出版时间：2022-09-23 11:34
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220922.1628.002
*通信作者. E-mail：guohongjie@buaa.edu.cn

引用格式：徐勇，郭红杰，超力德，等. 液体火箭发动机地面试验控制电路的设计与分析[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2245-2255. XU Y，GUO H J，CHAO L D，et al. Design and analysis of ground test control circuit on liquid rocket engine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2245-2255 (in Chinese).

要由电源电路、控制电路与继电器组成，控制电路与电源电路之间有整流电路，控制电路中的保护电路主要用于吸收浪涌电压。保护电路由电阻、电容和二极管组成，并联在继电器两端。实测结果表明，该高速开关控制电路可进一步提高电路关断速度[7]。日本魏尔比公司的安井敬晴等发明了一种控制电磁阀工作的电路，该电路采用二极管和电容分别与电磁阀并联的方式以抑制反峰电压[8]。韩国埃尔斯公司的崔在赫发明了一种吸收电路，该吸收电路主要由一级压敏电阻单元、抑制部和二级压敏电阻单元组成，可以有效抑制浪涌电压、噪声等电磁干扰[9]。

目前，常用的 2 种测量控制电流方法：①将低阻值、高精密采样电阻串联在控制驱动电路输出端回路中，采集电阻两端电压实现对控制电流的测量[1,10]；②运用霍尔电流感应模块测量控制电流[11-12]。方法①可真实反映阀门动作，但对采样电阻要求高（阻值选取既不能过小，也不能过大）、大电流检测难度大，测量回路需要设置放大，电气隔离、增益调节等功能才能实现准确测量电流的目的。方法②中，当测量小控制电流时，霍尔感应模块将控制电流转化为电压的数值过小，不利于数据采集。

本文针对适用于液体火箭发动机地面试验控制系统的抑制反峰电压方法，以及将小控制电流调节成适宜于数据采集的电压这 2 个关键问题展开有关设计与分析。设计了一种基于固态继电器、霍尔效应电流感应模块和运算放大器的控制驱动与控制电流测量集成化电路，以提高液体火箭发动机地面试验控制系统的精度、可靠性和通用性。

1 试验控制系统的硬件架构

液体火箭发动机地面试验控制系统[6,13-14]常见硬件架构是：可编程控制器（programmable logic controller, PLC）/面向仪器系统的 PCI 扩展（PCI extensions for instrumentation, PXI）控制器+控制驱动（反馈）调理电路+继电器+执行部件[14-15]。相比机械继电器，固态继电器无触点、电磁干扰小、误触发率低、开启关闭瞬间无抖动现象，十分适用于控制液体火箭发动机试验的执行部件[15-16]。

本文设计了常规推进剂（偏二甲肼/四氧化二氮、单推 3）液体姿轨控发动机地面试验控制系统中的控制电路，控制系统的硬件架构如图 1 所示。电磁阀和电磁气动阀的电磁阀部分的工作电压为（27±3）VDC，额定工作电流一般在 1 A 之内；电动阀由 220 VAC 或 380 VAC 驱动。

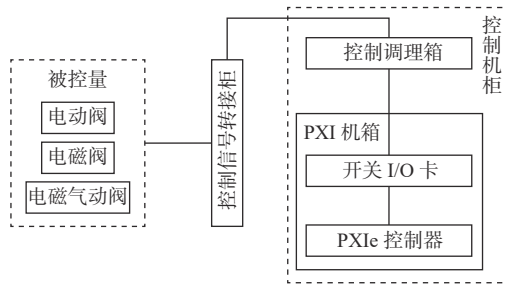


图 1 地面试验控制系统硬件架构

Fig. 1 Hardware architecture of ground test control system

2 试验控制电路的设计与分析

2.1 控制驱动电路的设计与分析

控制驱动电路和控制电流测量电路位于控制调理箱中，如图 1 所示。控制驱动电路应具有电气隔离功能（通道间隔离、通道输入端与输出端之间隔离）、供电功能（多个执行部件同时工作）及抗电磁干扰功能等。

根据上述要求，设计了一种控制驱动电路，原理如图 2 所示。

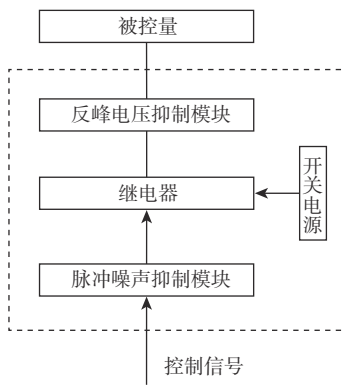


图 2 控制驱动电路原理

Fig. 2 Schematic of control drive circuit

2.1.1 脉冲噪声抑制模块的设计

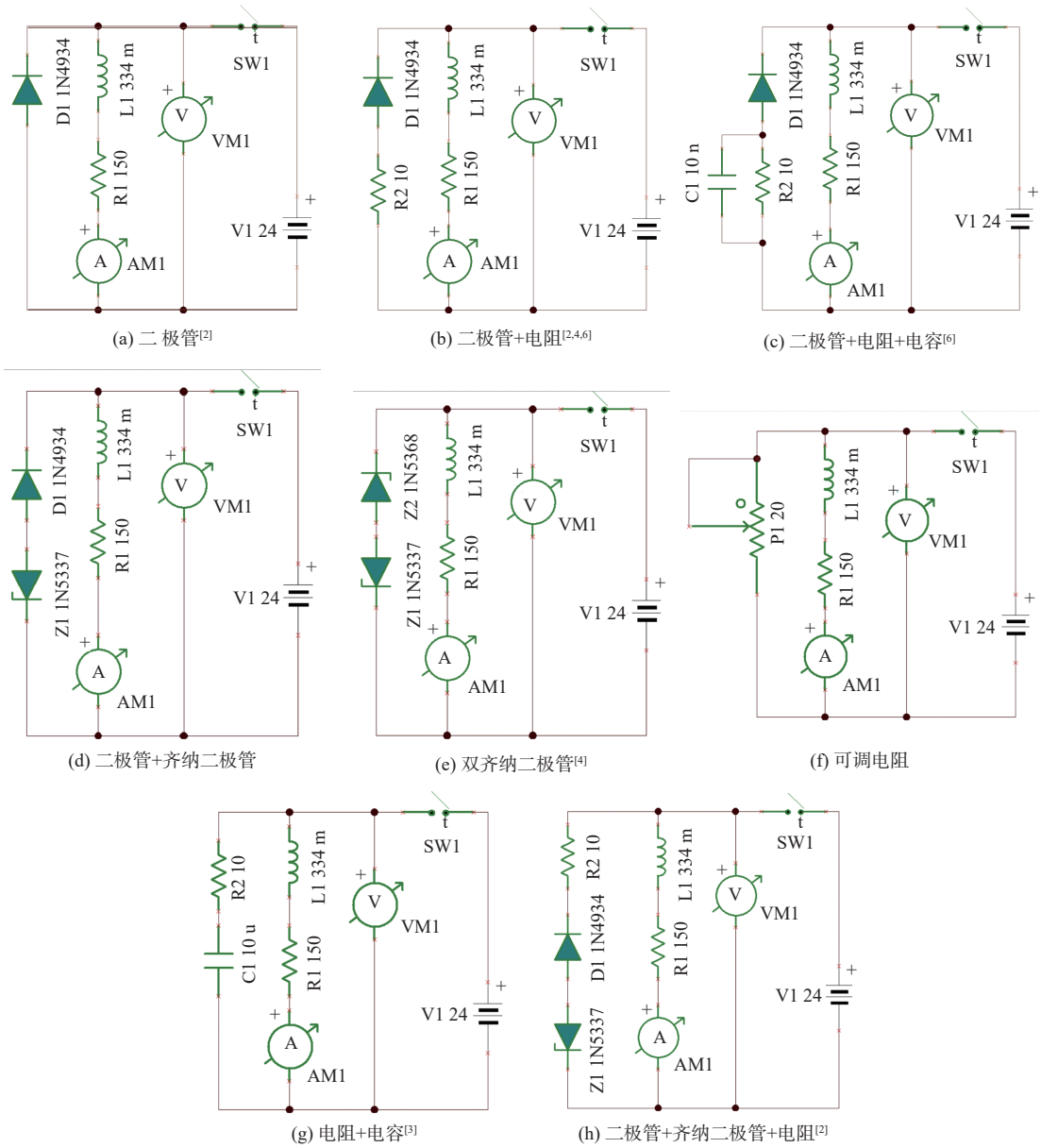
固态继电器动作时间短（1 ms 以下），动作功率极小（大约为 0.25 W），因此设计了脉冲噪声抑制模块用于抑制固态继电器输入端的噪声，以避免固态继电器误动作。

常用电阻、电容组合形成脉冲信号的噪声抑制模块[3]，电容的数值过大时固态继电器的复位时间将变长，电阻与电容的选取参考文献 [17]。

2.1.2 反峰电压抑制模块的设计与分析

感性执行设备（如电磁阀等）的电磁惯性很强，其电流变化滞后于电压变化。电路接通瞬间，电感器件会阻碍电流流动；电路断开瞬间，电感器件为保持电流原有方向和大小，会产生反向电动势。

常见反峰电压抑制方法共 8 种，如图 3 所示。通过仿真优选出抑制反峰电压的方案，为设计地面



(a) 二极管[2]　(b) 二极管+电阻[2,4,6]　(c) 二极管+电阻+电容[6]

(d) 二极管+齐纳二极管　(e) 双齐纳二极管[4]　(f) 可调电阻

(g) 电阻+电容[3]　(h) 二极管+齐纳二极管+电阻[2]

图 3　常见抑制反峰电压方法仿真电路原理

Fig. 3　Simulation circuit schematic of common inverse peak voltage suppression methods

试验控制系统中的控制电路提供支持。

以图 3(b)方法为例进行分析, 感性器件(电感为L)的反峰电压与加在其两端的电压方向相反, 即反峰电压为

$$V_{\mathrm{REV}}=-L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

由此得出, 断电后电流为

$$i=\frac{V_{\mathrm{REV}}}{r_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{D}}+R} \tag{2}$$

式中: r_{L}为电感器件内阻; R_{D}为二极管电阻; R为泄放电阻。

经过积分变换后, 电流可表示为

$$i=I_0\mathrm{e}^{-\frac{r_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{D}}+R}{L}t} \tag{3}$$

式中: I_0为电路正常工作电流。

瞬态电流衰减为稳定工作时电流的1/3所经历时间为

$$t_{1/3}=\frac{L}{r_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{D}}+R}\ln 3 \tag{4}$$

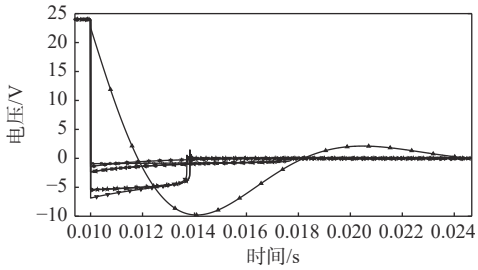
反峰电压可进一步表示为

$$V_{\mathrm{REV}}=i(R_{\mathrm{D}}+R)=\frac{E}{r_{\mathrm{L}}}(R_{\mathrm{D}}+R)\mathrm{e}^{-\frac{r_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{D}}+R}{L}t} \tag{5}$$

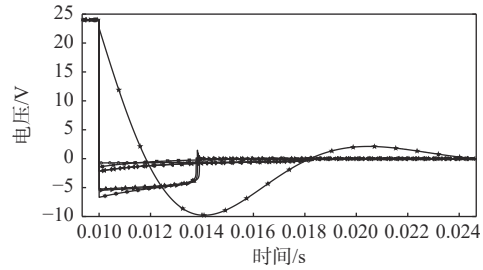
式中: E为电路正常工作电压。

由式(5)可知, 对固定的感性器件而言, 二极管电阻大小可忽略不计, 理论上泄放电阻增大可缩短复位时间, 但反峰电压峰值会增大。因此, 泄放电阻阻值须根据任务需求合理选定。工程上一般将反峰电压峰值控制在 10 V 以内[2]。

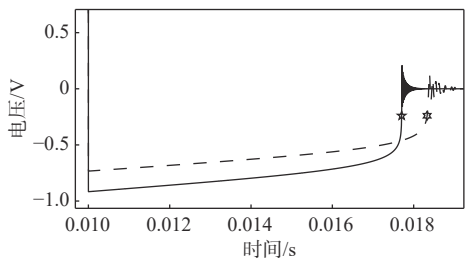
采用 Tina 软件, 对 8 种方法进行仿真分析, 仿真原理如图 3 所示, 仿真结果如图 4 所示。图 3(a)～



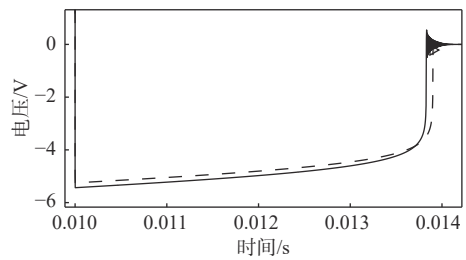
(a) 不同抑制反峰电压方法仿真结果 1



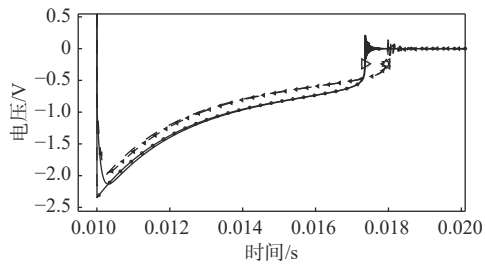
(b) 不同抑制反峰电压方法仿真结果 2



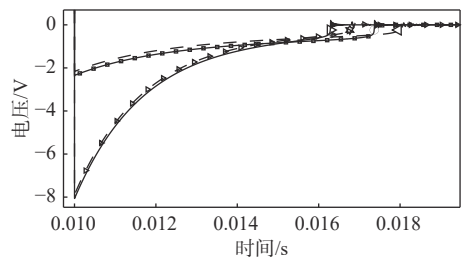
(c) D 方法



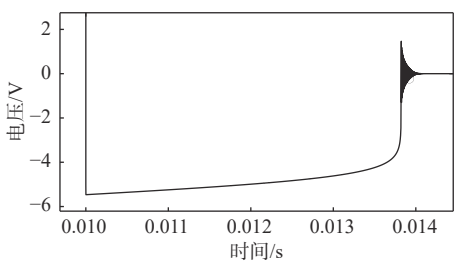
(d) DZ 方法



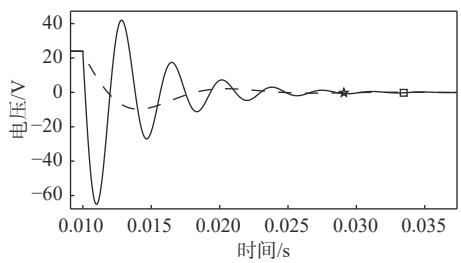
(e) DRC 方法



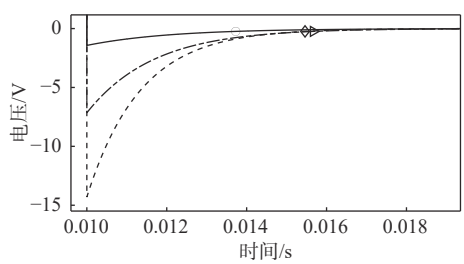
(f) DR 方法



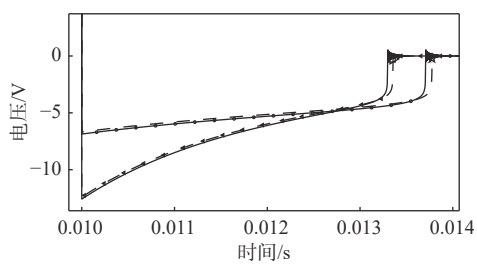
(g) ZZ 方法



(h) RC 方法



(i) Rad 方法



(j) DZR方法

图 4 不同抑制反峰电压方法的仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of simulation results for different methods to suppress peak inverse voltage

图 3(h)的 8 种方法依次简称为 D、DR、DRC、DZ、ZZ、Rad、RC 和 DZR 方法。

图 3 中，二极管(续流二极管)采用快速恢复二极管或肖特基二极管，仿真分析中 D1 二极管分别采用标准恢复整流二极管 1N5401 和快速恢复整流二极管 1N4934；Z1、Z2 齐纳二极管分别采用 1N5337(齐纳电压 4.7 V)、1N5368(齐纳电压 47 V)；泄放电阻 R_2 的阻值一般小于感性器件的阻值，仿真方法采用了 10 Ω、50 Ω这 2 种阻值的电阻；DRC 方法对 10 nF、10 uF 这 2 种电容值的 C_1 进行了仿真；RC 方法仿真了 C_1 为 10 uF 电容值。

图 4(a)和图 4(b)分别为快速恢复二极管 1N4934 和标准恢复二极管 1N5401 的仿真结果。图 4(c)～图 4(j)依次为 D、DZ、DRC、DR、ZZ、RC、Rad 和 DZR 方法的仿真结果。

从抑制反峰电压峰值和复位时间(正常工作电压开始下降时刻至反峰电压降为正常工作电压的 1% 以内的时间，本文为±0.24 V 以内)分析图 4 可得出如表 1 所示结果。

由图 4 和表 1 可知泄放电阻阻值增大，反峰电压峰值会变大；当 DR、DRC、Rad、DZR 方法的泄放电阻为 10 Ω、二极管为 1N4934 时抑制反峰电压峰值的效果由差及好的次序为：RC(9.78 V)<DZR(6.86 V)<ZZ(5.46 V)<DZ(5.43 V)<DRC(2.35 V)和 DR(2.35 V)<Rad(1.43 V)<D(0.92 V)；复位时间由长及短的次序为：RC(19.085 ms)>D(7.705 ms)>DR 和 DRC(7.365 ms)>ZZ(3.921 ms)>DZ(3.875 ms)>DZR(3.752 ms)>Rad(3.727 ms)。

表 1　不同抑制反峰电压方法仿真结果

Table 1　1Simulation results of different inverse peak voltage suppression methods

	方法	反峰电压峰值/V	复位时间/ms
D	1N4934	0.92	7.705
	1N5401	0.73	8.331
DR	1N4934+10 Ω	2.35	7.365
	1N4934+50 Ω	8.06	6.285
	1N5401+10 Ω	2.16	7.955
	1N5401+50 Ω	7.88	6.766
DZ	1N4934+1N5337	5.43	3.875
	1N5401+1N5337	5.25	3.902
ZZ	1N5368+1N5337	5.46	3.921
Rad	20 Ω×50%	1.43	3.727
	100 Ω×50%	7.15	5.669
	200 Ω×50%	14.31	5.461
RC	10 Ω+1 μF	65.12	23.458
	10 Ω+10 μF	9.78	19.085
DZR	1N4934+1N5337+10 Ω	6.86	3.752
	1N4934+1N5337+50 Ω	12.58	3.343
	1N5401+1N5337+10 Ω	6.68	3.775
	1N5401+1N5337+50 Ω	12.39	3.355

从抑制反峰电压变化过程分析图 4 可知，阻性元器件会使压降呈现单调下降趋势，压降过程逐渐趋于平缓、压降曲率单调减小并趋于 0，但是延迟时间会变长；半导体元器件大大缩短复位时间，但反峰电压压降曲线陡峭，压降呈反复振荡变化趋势；阻性元器件+容性元器件会导致反峰压降过程变长，器件参数不合理情形下反峰电压会过大。用于特定感性器件时，将可调电阻调整至合适阻值，反峰电压抑制效果较好，但是可调电阻会引入额外的功率消耗。

由图 4(c)～图 4(f)和表 1 可知，快速恢复二极管抑制反峰电压的复位时间比标准恢复二极管的复位时间短，前者的反峰电压峰值比后者略大。由图 4(d)可知，“快速恢复二极管+齐纳二极管”抑制反峰电压的效果比“标准恢复二极管+齐纳二极管”差，后者能有效抑制反峰电压的反复振荡。造成上述结果的原因是，快速恢复二极管适用于高频、小功率的电路，标准恢复二极管适用于低频、较大功率的电路。标准恢复二极管允许通过大电流，故抑制反峰电压效果优于快速恢复二极管。

依据前述仿真结果分析，对 8 种抑制反峰电压电路方法进行比对分析，给出了各电路方法适用性等级，具体如表 2 所示。

表 2　抑制反峰电压电路方法对比

Table 2　Comparison of methods to suppress peak inverse voltage

方法	对比项				适用性
	抑制PIV峰值效果	复位时间	额外功耗	选型难易	
D	最佳	偏长	很小	简单	优
DR	很好	偏长	很小	稍复杂	良
DRC	很好	偏长	很小	复杂	良
DZ	好	短	很小	稍复杂	优
ZZ	好	短	很小	稍复杂	优
Rad	很好	最短	大	复杂	中
RC	最差	最长	较小	复杂	差
DZR	较好	很短	很小	复杂	良

针对地面试验中常用执行部件，给出了最适合的 3 种电路方法及其次序，具体如表 3 所示。

液体火箭发动机地面试验控制系统要求反峰电压峰值不宜过大、复位时间尽可能短且开启关闭过程电流变化平缓。再结合前述仿真结果分析和适用性分析，“二极管+齐纳二极管”是最佳方法，控制电路的电流较大时，“标准恢复二极管+齐纳二极管”方法抑制反峰电压的效果优于“快速恢复二

表3 不同抑制反峰电压方法的适用情况举例

Table 3 Examples of application on different methods to suppress peak inverse voltage

执行部件	控制特性	适用电路方法及其次序
电磁阀	高频开关动作	DZ、D、ZZ
电动阀	低频开关动作	D、DZ、ZZ
电点火器	低频开关动作	D、DZ、ZZ
电磁气动阀	高频开关动作	DZ、D、ZZ
流量调节器	步进动作/高频开关动作	DZ、D、ZZ

极管+齐纳二极管”方法。

2.2 控制电流测量电路的设计与分析

2.2.1 控制电流测量电路的设计与计算

本文中测量控制电路电流采用的是基于霍尔效应模块+运算放大器核心元器件的方法。霍尔效应模块感应电流产生微小电压，运算放大器将微小电压放大到适合数据采集的范围。采用器件型号为：ACS712 和 LM321。

控制电流测量电路的已知设计条件与设计目标如表4所示。

表4 控制电流测量电路的设计条件和设计目标

Table 4 Design conditions and design objectives of control current measurement circuit

ACS712供电电压/V	ACS712输出电压/V	参考电压/V	正负隔离电源/V	LM321输出电压/V
5	1.575～3.425	2.5	±12	−10～10

当电流范围为−5～5 A、ACS712 供电电压为 5 V 时，霍尔效应电流感应模块输出信号为：1.575～3.425 V，通过 LM321 运算放大电路将信号放大为：−0～10 V。本文采用反相正基准电压同相放大原理[18]实现设计目标，电路原理如图5所示。

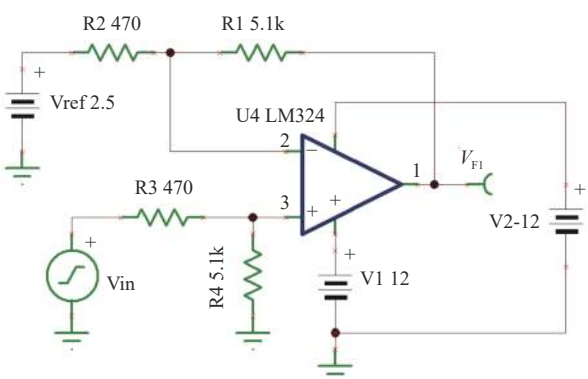


图5 反相正基准电压同相放大电路原理

Fig. 5 Non-inverting amplifier circuit schematic diagram with inverting positive reference voltage

运用叠加原理、分压原理计算每个输入电压产生的输出电压，将其相加可得到最终的输出电压。

输入电压V_{in}产生的输出信号如下：

$$V_+ = V_{in}\frac{R_4}{R_3+R_4} \tag{6}$$

$$V_{out1} = V_+(G_+) = V_{in}\frac{R_4}{R_3+R_4}\left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right) \tag{7}$$

反相输入级产生的输出为

$$V_{out2} = V_{ref}\left(-\frac{R_1}{R_2}\right) \tag{8}$$

式(7)和式(8)相加得到最终的输出为

$$V_{F1} = V_{in}\frac{R_4}{R_3+R_4}\left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right) - V_{ref}\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \tag{9}$$

选取合适的R_1和R_4，代入式(9)即可求解出R_2和R_3。本文选取的R_1和R_4均为 5.1 kΩ，求解得到R_2和R_3为 470 Ω。

$$V_{F1max} - V_{F1min} = (V_{in_max} - V_{in_min})\frac{R_4}{R_3+R_4}\left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right) \tag{10}$$

将式(10)中的输出信号差值除以输入信号差值，即可计算出最大输出摆幅的放大增益。本文的放大增益为 10.81。

2.2.2 控制电流测量电路的仿真分析

使用 Tina 软件对反相正基准电压同相放大电路进行直流仿真、瞬态仿真，仿真电路同图5一致，仿真数据通过 MATLAB 软件[19]处理分析，得到结果如图6所示。

由图6可知，瞬态仿真的输入信号、输出信号随时间变化的表达式，直流仿真的输入与输出关系式为

$$V_{in} = 0.925\sin(2\pi 100t) + 2.5 \tag{11}$$

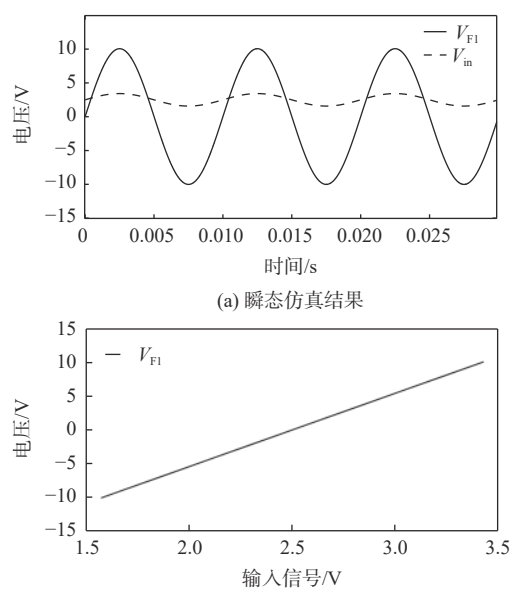


图6 反相正基准电压同相放大电路仿真结果

Fig. 6 Simulation results of non-inverting amplifier circuit with inverting positive reference voltage

$$V_{F1} = 10.036\,6\sin((2\pi 100)t - 0.001\,533 - 3) + 0.025\,3 \quad (12)$$

$$V_{F1} = 10.850\,4V_{in} - 27.100\,6 \quad (13)$$

图 6 中曲线拟合公式见式(11)～式(13), 由式(11)～式(13)中系数计算可得瞬态仿真和直流仿真的放大增益分别为 10.847 1、10.850 4; 瞬态仿真的输出信号时间延迟为 2.39 μs。由理论计算结果和仿真结果分析可知, 本文设计的反相正基准电压同相放大电路符合设计目标要求。

3　控制电路的设计与测试

3.1　控制电路的设计

控制电路主要由控制驱动电路和控制电流测量电路构成; 脉冲噪声抑制模块、固态继电器、反峰电压抑制模块构成控制驱动电路, 控制电流测量模块构成控制电流测量电路, 控制信号反馈模块、电源(开关电源、线性电源、隔离电源、基准电压源)模块接口、信号接口等共同组成控制电路, 组成与工作原理如图 7 所示。

控制电路具备主要功能的同时, 还需考虑其通用性、便携性、维护性及测试性等, 最终原理如图 8 所示。

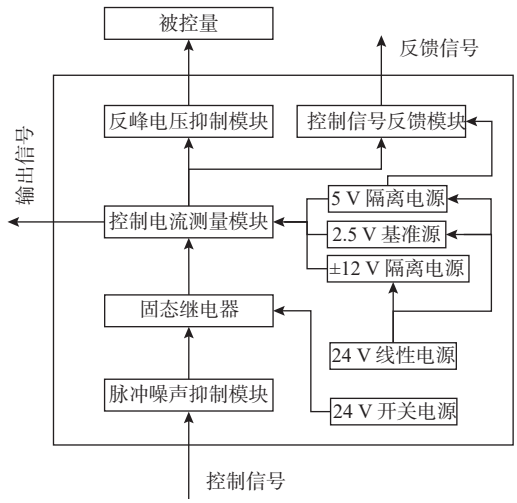


图 7　控制电路组成与工作原理

Fig. 7　Control circuit board composition and working principle

控制电路板实物如图 9 所示。

3.2　控制电路的测试与分析

3.2.1　控制驱动电路及电流测量电路的动态性能

完成表 5 所列测试项[20], 获取控制电路主要电气性能。

控制驱动电路输出端串联 2 个电阻(10 Ω+50.5 Ω)作为负载, 通过测量 10 Ω 电阻两端电压和

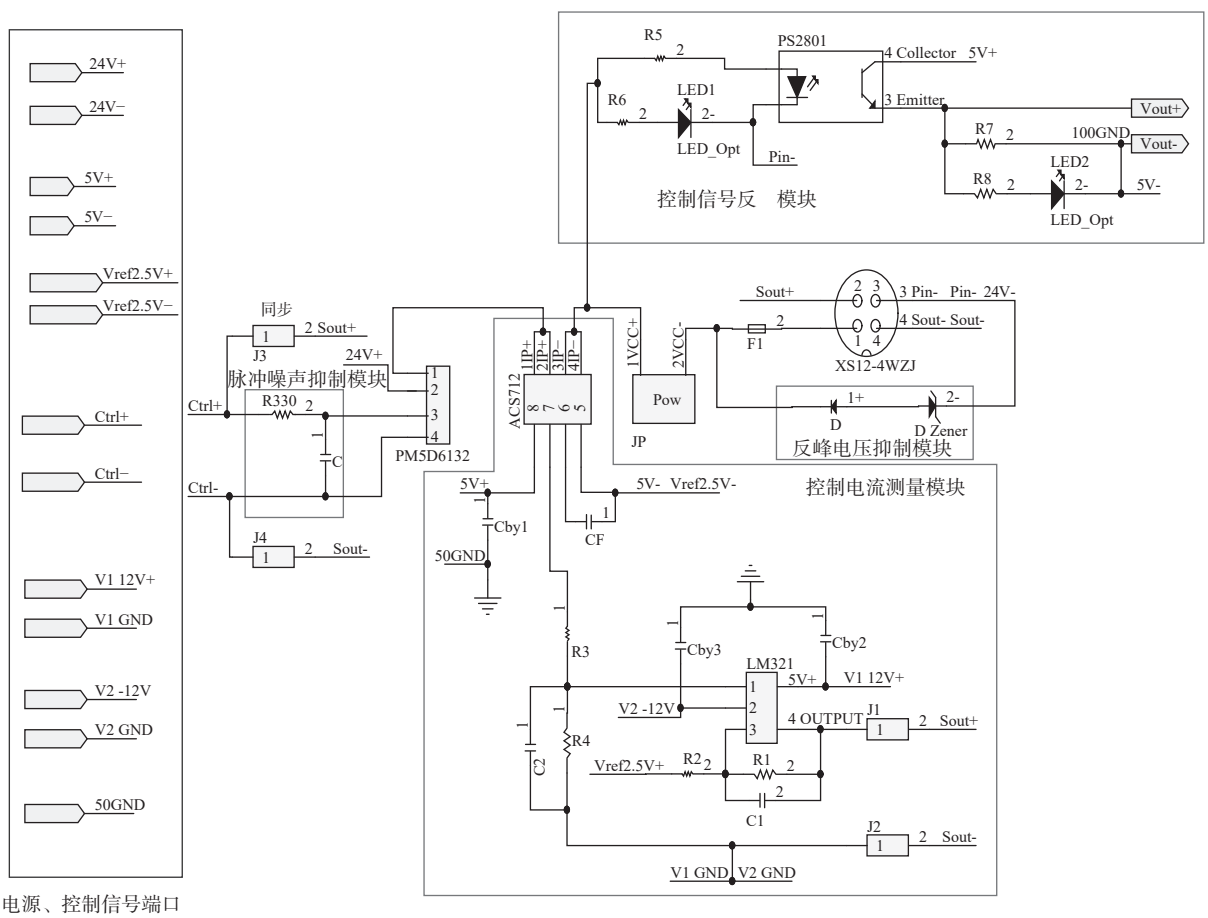


图 8　控制电路原理

Fig. 8　Control circuit principle

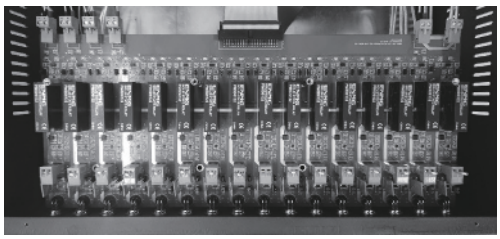


图 9 控制电路板

Fig. 9 Control circuit board

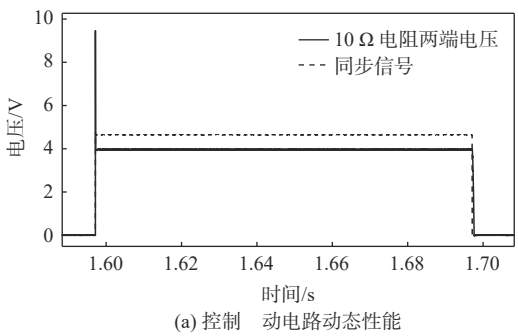
表 5 控制电路测试项

Table 5 Control circuit test items

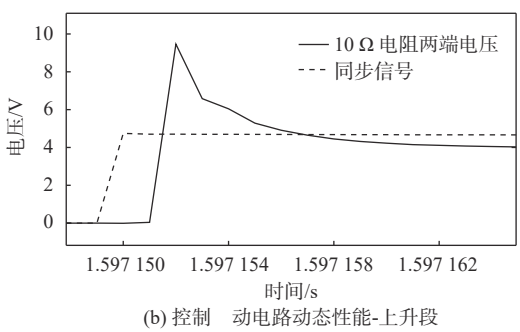
序号	测试项
1	控制驱动电路及电流测量电路的动态性能
2	电流测量电路的准确度
3	控制电路抑制反峰电压效果

控制电流测量模块输出端电压来获取控制驱动电路与控制电流测量电路的动态性能，测试结果分别如图 10 和图 11 所示。

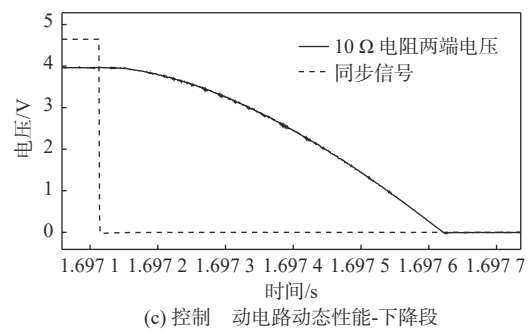
由图 10(b)可知，控制驱动电路通电时输出端



(a) 控制 动电路动态性能



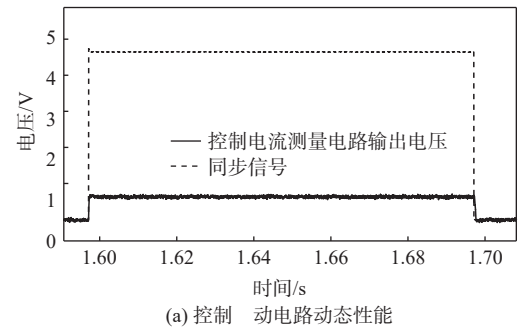
(b) 控制 动电路动态性能-上升段



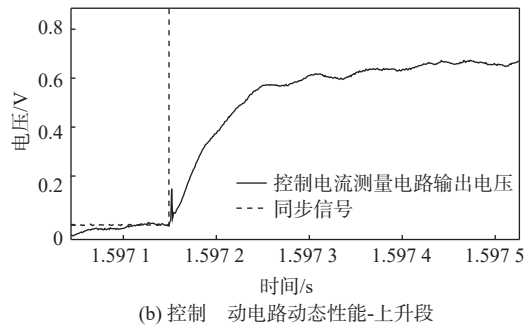
(c) 控制 动电路动态性能-下降段

图 10 控制驱动电路的动态性能测试结果

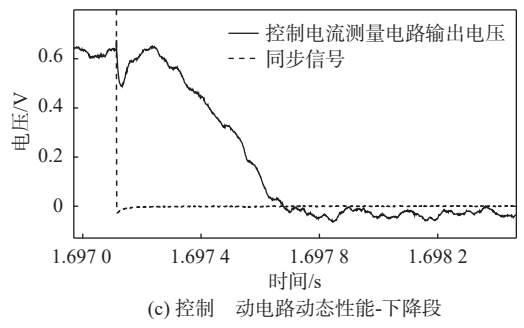
Fig. 10 Dynamic performance test results of control drive circuit



(a) 控制 动电路动态性能



(b) 控制 动电路动态性能-上升段



(c) 控制 动电路动态性能-下降段

图 11 控制电流测量电路的动态性能测试结果

Fig. 11 Dynamic performance test results of control current measurement circuit

信号相较于同步信号的延迟时间(同步信号触发时刻与输出信号开始变化时刻之间的时间)小于 3 μs，输出端信号上升时间(稳定工作时电压的 10% 上升至 90% 所用时间)小于 2 μs；由图 10(c)可知，控制驱动电路断电时输出端信号延迟时间小于 0.1 ms，输出端信号下降时间(稳定工作时电压的 90% 下降至 10% 所用时间)小于 0.5 ms。

由图 11(b)可知，控制驱动电路通电时控制电流测量电路输出信号相较于同步信号的延迟时间远远小于 0.05 ms，输出端信号上升时间小于 0.3 ms；由图 11(c)可知控制驱动电路断电时，控制电流测量电路输出信号延迟时间小于 0.2 ms，输出信号下降时间小于 0.5 ms。

3.2.2 电流测量电路的准确度

将开关电源对控制电路板的输入电流设定成阶梯型循环变化，测试控制电流测量电路的准确度。开关电源的输出电流变化情况如表 6 所示。

依照表 6 进行测试，准确度分析结果如表 7 所示，表中给出了电流标定点及其对应的电压值、线

表 6　开关电源输出阶梯型电流

Table 6　Switching power supply outputs stepped current

序号	升程电流/A	回程电流/A	持续时间/s
1	0	0	3
2	1.25	1.25	3
3	2.5	2.5	3
4	3.75	3.75	3
5	5	5	3

性度误差、回差、重复性误差、基本误差和零点输出误差等性能参数[6]。

表 7 对应的控制电流测量通道在 1.25 A、2.5 A、3.75 A 校准点的基本误差分别为 1.92%、3.07%、4.32%。

控制电路的所有控制电流测量通道(共 14 路)的基本误差的平均值为 6.66%, 基本误差的平均偏差为 0.56%, 最大偏差为 1.80%。

表 7　控制电流测量电路准确度分析结果

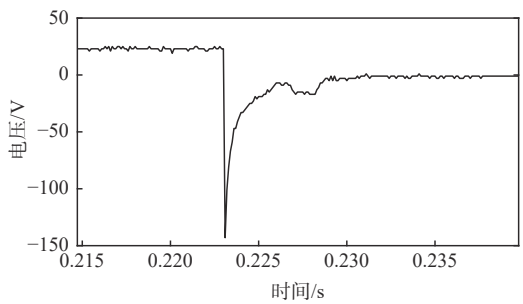
Table 7　Accuracy analysis results of control current measurement circuit

电流标准值/A	理论输出值/V	升程电压/V			回程电压/V		
		第1组	第2组	第3组	第1组	第2组	第3组
0	0	−0.139 53	−0.100 75	−0.068 05	−0.061 51	−0.079 36	−0.090 29
1.25	2.5	2.245 91	2.297 88	2.305 46	2.326 79	2.355 02	2.317 32
2.5	5	4.668 12	4.671 93	4.689 49	4.697 61	4.700 27	4.728 86
3.75	7.5	7.052 19	7.060 46	7.083 49	7.046 89	7.062 49	7.100 7
5	10	9.404 93	9.455 29	9.432 93	9.434 47	9.436 17	9.432 93

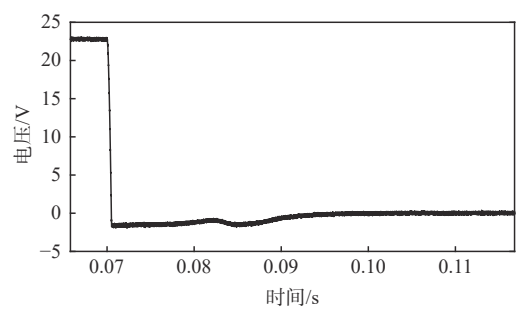
注: 准确度分析结果: 线性误差为0.002 15, 回差为0.004 99, 重复性误差为0.007 14, 基本误差(满量程)为0.056 78, 零点输出误差为0.008 99。

3.2.3　控制电路抑制反峰电压的效果

为准确评估控制电路抑制反峰电压的效果, 完成了 2 种情形下的测试工作。情形 1, 机械触点控制电磁阀开关, 示波器测量电磁阀两端(阀两端并联有 10 Ω 电阻, 避免反峰电压峰值过大烧坏示波器)反峰电压; 情形 2, 控制电路板控制电磁阀开关, 示波器测量电磁阀两端反峰电压。电磁阀主要性能参数是: 工作电压 24 VDC、额定功率 3.5 W、电感 334 mH 和内阻 150 Ω。测试结果如图 12 所示。



(a) 情形 1 的反峰电压



(b) 情形 2 的反峰电压

图 12　电磁阀关断瞬间的反峰电压

Fig. 12　Peak inverse voltage at the turn-off moment of solenoid valve

由图 12(a)可知, 反峰电压峰值接近−150 V, 电磁阀关断时间为 5～8 ms, 反峰电压会导致控制系统精度低、稳定性差, 特别是无法适应液体姿轨控发动机脉冲点火试验等高频工作场景。

情形 2 的测试结果如图 12(b)所示, 阀两端反峰电压峰值约为−1.6 V, 而未使用控制电路控制电磁阀工作时反峰电压峰值接近−150 V, 因此, 控制电路中的“标准恢复二极管+齐纳二极管”模块可以有效抑制反峰电压。

4　结　论

通过研究液体火箭发动机地面试验控制系统中的控制驱动电路及其控制电流测量电路, 得出如下结论:

1) 仿真模拟了多种抑制反峰电压方法的效果, 结果显示抑制反峰电压峰值效果最好的是“二极管”方法, 复位时间最短的是“电阻+二极管+齐纳二极管”方法。

2) 根据仿真分析结果, 结合液体火箭发动机地面试验控制系统应用背景, 抑制反峰电压的最佳方法是“二极管+齐纳二极管”; 当控制电路的电流较大时, “标准恢复二极管+齐纳二极管”方法抑制反峰电压的效果优于“快速恢复二极管+齐纳二极管”方法。经实测, “标准恢复二极管+齐纳二极管”方法可有效抑制电磁阀关断瞬间的反峰电压。

3) 采用反相正基准电压同相放大电路方法改进设计的控制电流测量电路, 解决了霍尔效应电流感应模块测量小功率电磁阀工作电流的输出电压

过小不利于较高精度数据采集的问题。

4）本文设计的控制电流测量电路可测量±5 A电流，其输出信号为±10 V，基本误差为6.66%±1.80%，电路上升时间小于0.3 ms，下降时间小于0.5 ms；控制驱动电路的接通时间小于2 μs，关断时间小于0.5 ms；控制驱动电路实现了精度高、稳定性强的控制目标，控制电流测量电路可满足液体火箭发动机试验控制电路大工作电流的较高精度测量需求，控制驱动电路可应用于液体火箭发动机高精度的地面试验控制系统。

参考文献（References）

[1] 凌思睿, 丁博深. 火箭发动机试验电磁阀电流隔离式测量电路[J]. 火箭推进, 2020, 46(5): 102-108.
LING S R, DING B S. Isolated solenoid valve current measurement circuit in rocket engine test[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(5): 102-108(in Chinese).

[2] 余力凡, 马红梅. 运载火箭控制系统电磁继电器消反峰电路分析与MULTISIM仿真[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(11): 55-57.
YU L F, MA H M. Analysis and MULTISIM simulation of electromagnetic relay anti-PIV circuit in launch vehicle control system[J]. Computer Measurement& Control, 2017, 25(11): 55-57(in Chinese).

[3] 方蜀州, 尹治武. 固体姿轨控发动机燃气电磁阀快速驱动电路研究[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(3): 232-234.
FANG S Z, YIN Z W. The fast driving circuit for gas solenoid valve of solid rocket divert and attitude control motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2005, 28(3): 232-234(in Chinese).

[4] 弭艳, 张红霞, 马兵兵, 等. 基于双向TVS的电磁阀加速释放电路研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(8): 182-187.
MI Y, ZHANG H X, MA B B, et al. Accelerated release circuit of solenoid valve based on bidirectional TVS[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(8): 182-187(in Chinese).

[5] 沈福东. 浅谈直流感性负载消除反电动势电路设计[J]. 科技创新导报, 2012, 9(15): 55.
SHEN F D. Discussion on circuit design of DC inductive load eliminating back EMF[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012, 9(15): 55(in Chinese).

[6] 卫强, 郭红杰, 刘洌, 等. 基于PXI的液体姿轨控火箭发动机试验测控系统设计与实现[J]. 航空动力学报, 2016, 31(12): 2979-2987.
WEI Q, GUO H J, LIU L, et al. Design and implementation of PXI based test measurement and control system for attitude and orbit control liquid rocket engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(12): 2979-2987(in Chinese).

[7] ITODA S, NISHIDA T, MATSUO S. Control circuit for switch apparatus, has rectifier circuit or element for surge absorption that is connected between power supply and control circuit: Japan, WO2018159041-A1[P]. 2018-07-09.

[8] DOI M, YASUI T.Electromagnetic valve-control circuit for controlling opening/closing of solenoid valve for physics and chemistry fields to measure flow volume of fluid, has voltage absorption unit and capacitor for becoming parallel with respect to valve: Japan, JP2014206240-A[P]. 2014-10-30.

[9] CHOI J H. Surge absorption circuit for protection equipment, particularly for absorbing transient voltage and noise flowed in instrument, comprises suppression assembly and varistor units for absorbing transient voltages and induced noise components: Korea, KR2015083300-A[P]. 2015-07-17.

[10] NICOLAE P M, STĂNESCU D G, NICOLAE M S, et al. Considerations on signals conditioning circuits[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-6.

[11] 王明迪, 李建勋. 霍尔电流传感器在阀门电流测试中的应用[J]. 微型电脑应用, 2009, 25(11): 17-19.
WANG M D, LI J X. Application of hall current sensor in valve current measurement[J]. Microcomputer Applications, 2009, 25(11): 17-19(in Chinese).

[12] 武旭, 王林森, 居鹏, 等. 基于闭环霍尔电流传感器驱动电路的设计[J]. 控制工程, 2020, 27(7): 1210-1215.
WU X, WANG L S, JU P, et al. Design of drive circuit based on closed-loop hall current sensor[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(7): 1210-1215(in Chinese).

[13] 沈传兵, 苏杭, 朱子勇. 基于PLC和WinCC的火箭发动机热真空试验控制系统[J]. 火箭推进, 2015, 41(3): 93-97.
SHEN C B, SU H, ZHU Z Y. Control system for liquid rocket engine heat-vacuum test based on PLC and WinCC[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(3): 93-97(in Chinese).

[14] 张卫东, 李力, 张茂森, 等. 基于虚拟仪器和PXI总线的电磁阀控制系统研制[J]. 火箭推进, 2015, 41(1): 112-116.
ZHANG W D, LI L, ZHANG M S, et al. Development of solenoid valve control system based on virtual instrument and PXI bus[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(1): 112-116(in Chinese).

[15] 翟国富, 崔行磊, 杨文英. 电磁继电器产品及研究技术发展综述[J]. 电器与能效管理技术, 2016, 2016(2): 1-8.
ZHAI G F, CUI X L, YANG W Y. Overview for development of research and technologies of electromagnetic relays[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016, 2016(2): 1-8(in Chinese).

[16] 航天部第一研究院技术部标准化处. 气动电磁阀通用技术要求: QJ1141-87[S]. 北京: 中华人民共和国航天工业部, 1987: 1-8.
Department of Standardization, Department of Technology, First Research Institute of Aerospace Ministry. Pneumatic solenoid valve general technical requirements: QJ1141-87[S]. Beijing: Ministry of Aerospace Industry of the People's Republic of China, 1987: 1-8(in Chinese).

[17] OMRON. Solid state relays common precautions[R]. Kyoto: OMRON, 1-9.

[18] CARTER B. 运算放大器权威指南[M]. 4版. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 227.
CARTER B. OP AMPs for everyone[M]. 4th ed. Beijng: Posts and Telecom Press, 2014: 227(in Chinese).

[19] BALNDFORD D, PARR J. 数字信号处理及MATLAB仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 500.
BALNDFORD D, PARR J. Introduction to digital signal processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 500(in Chinese).

[20] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 霍尔电流传感器: JB/T 7490—2007[S]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 15.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Hall effect current sensor: JB/T 7490—2007[S]. Beijing: China Machine Press, 2007: 15(in Chinese).

Design and analysis of ground test control circuit on liquid rocket engine

XU Yong，GUO Hongjie*，CHAO Lide，HUANG Junjie，LIANG Guozhu

(School of Astronautics，Beihang University，Beijing 100191，China)

Abstract：Aiming at the problems that the liquid rocket engine ground test control system must suppress the pulse noise at the input end of the control circuit, the peak inverse voltage at the output end and the low measurement accuracy of the control current, a control drive and control current measurement circuit based on printed board solid state relay is designed through the application of circuit simulation and amplification circuit methods. The control drive circuit applied the "diode + zener diode" module to reduce the peak reverse voltage and speed up the reset time. An optocoupler isolation module is integrated at the output of solid state relay (SSR) of the control drive circuit to feed back the control signal. The Hall effect current sensing module and operational amplifier make up the majority of the control current measurement circuit, which is designed to provide high-precision control current measurement. The dynamic and static characteristics of the peak inverse voltage suppression module of the control drive circuit and the control current measurement circuit are simulated and analyzed. The simulation and measurement results show that the intrinsic error of the control current measurement circuit is 6.66%±1.80%, with a circuit rise time less than 0.3 ms and a fall time less than 0.5 ms. Control drive circuit can be used to construct high precision ground test control system of liquid rocket engine, with turn-on and turn-off time less than 2 μs and 0.5 ms, respectively. The control drive circuit can efficiently suppress peak inverse voltage with the help of a "standard recovery diode + zener diode" module.

Keywords：ground test control circuit; solid state relay; current measurement; Hall effect; liquid rocket engine

Received：2022-07-13；**Accepted**：2022-09-02；**Published Online**：2022-09-23 11：34

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220922.1628.002

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

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0347

成分数据的变系数地理加权空间滞后模型

黄婷婷*
(首都经济贸易大学 统计学院，北京 100070)

摘 要：针对已有模型无法刻画面类型空间依赖下成分数据的空间异质性，提出模型参数可变的成分数据空间自回归模型。通过假定空间滞后参数、成分型系数、数值型系数为位置坐标的函数，允许空间效应和变量关系在全局空间上非均匀分布。基于等距对数比(ilr)变换、工具变量法和局部线性地理加权法，对模型参数进行估计。数值模拟实验表明：所提出模型的表现优于已有的成分数据空间自回归模型，并且参数估计量是有效的。基于一组实际数据，说明所提模型的实用性。

关 键 词：成分数据；面数据；空间异质性；等距对数比变换；地理加权模型
中图分类号：F222
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2256-09

在生产生活中，有一类特殊的数据，其关注的是部分在总体中的占比。如某一城市实现高质量发展，其面临的可能是三产占比的结构调整，而不是第1、第2、第3产业增加值的变化；再如，某地区宗教信仰的演变，更多关注的是不同宗教信仰人群的比例。对这类关注占比信息的数据展开研究，Ferrers[1]在19世纪提出了成分数据的概念。成分数据表达了数据的结构信息，其各成分取值都是非负的、加和为1。目前，成分数据广泛地应用在地质学、经济学、医学等领域[2-6]。

对成分数据进行统计建模，回归模型作为一种最常用的分析工具，受到越来越多的关注。特别地，有许多学者对成分型协变量、数值型因变量的回归模型展开了研究。如针对二分类因变量，龙文和王惠文[7]与李玉莹和张景肖[8]分别于2006年和2019年研究了成分数据的Logistic回归；针对高维问题，Lin等[9]于2014年考虑了成分型协变量的变量选择，Wang等[10]于2021年研究了成分数据的切片逆回归模型；针对异常值或离群点，Ma和Zhang[11]于2023年研究了成分数据的分位回归，Mishra和Müller[5]于2022年研究了成分数据的稳健回归模型；针对非线性关系，Huang等[12]于2023年研究了成分数据的非参回归。更多关于成分数据的进展可参考Alenazi[13]于2023年的综述论文。

我们注意到，已有模型大多假设观测对象是相互独立的，而对于空间中的个体，如连续数据、面数据[14]，则需考虑其空间相关性。Clarotto等[15]于2022年研究了连续类型空间依赖下的成分数据的克里金方法。本文聚焦于面类型的空间依赖。文献[16-17]分别于2019与2021年和曾梅[18]于2021年研究了成分型协变量对数值型因变量的空间线性模型。但文献[16-18]未考虑面类型空间依赖下的成分数据中普遍存在的空间异质性。

当研究对象仅涉及数值型数据时，Páez等[19]于2002年和Brunsdon等[20]于1998年提出了变系数地理加权空间滞后模型。通过引入空间滞后项，该模型可处理数据中的空间相关性；通过允许空间滞后参数和模型系数随空间位置发生变化，该模型可处理空间异质性。因此，在处理实际数据时，变系数地理加权空间滞后模型具有良好的适应性[21]。对该模型进行参数估计，Páez等[22]于2002年研究了极大似然估计法；林光平和龙志和[21]于

收稿日期：2023-06-12；录用日期：2023-12-29；网络出版时间：2024-02-01 20:24
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240201.1152.004
基金项目：北京市自然科学基金（9224032）
*通信作者. E-mail：tingth@cueb.edu.cn

引用格式：黄婷婷. 成分数据的变系数地理加权空间滞后模型[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2256-2264.
Huang T T. A varying coefficient geographically weighted spatial lag model for compositional data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2256-2264 (in Chinese).

2014 年研究了两阶段最小二乘估计法; 魏传华等[23]于 2022 年基于工具变量和局部地理加权法构建了参数估计方法。

因此, 本文针对协变量为成分型的面数据, 提出模型参数可变的成分数据空间自回归模型。根据本文模型的特点, 使用等距对数比(isometric log-ratio, ilr)变换、工具变量法、局部线性近似法对模型参数进行估计。本文模型灵活性更高, 可同时刻画空间依赖和变量关系的异质性, 具有较大的应用潜力。

1　成分数据的预备知识

本节主要介绍成分数据的内积运算和 ilr 变换。将成分数据所在的单形空间S^D定义为

$$S^{\mathrm{D}}=\left\{\boldsymbol{x}^D=\left[x_1^D,x_2^D,\cdots,x_d^D\right]^{\mathrm{T}},\ x_j^D\geqslant 0,\ i=1,2,\cdots,d;\ \sum_{i=1}^{d}x_j^D=1\right\}$$

式中: $\boldsymbol{x}^D=\left[x_1^D,x_2^D,\cdots,x_d^D\right]^{\mathrm{T}}$表示成分数据$\boldsymbol{x}^D$有$D$个成分; $x_j^D\geqslant 0$表示每个成分占比都大于等于 0; $\sum_{i=1}^{d}x_j^D=1$表示各成分占比之和为 1。在S^D中定义加法、数乘、内积运算, 可以得到成分数据的艾奇逊(Aitchison)几何空间。特别地, 给定任意 2 个成分数据$\boldsymbol{x}^D=\left[x_1^D,x_2^D,\cdots,x_d^D\right]^{\mathrm{T}}\in S^D$, $\boldsymbol{y}^D=\left[y_1^D,y_2^D,\cdots,y_d^D\right]^{\mathrm{T}}\in S^D$, 其内积运算定义为

$$\begin{cases}\left\langle\boldsymbol{x}^D,\boldsymbol{y}^D\right\rangle_{\mathrm{a}}=\sum_{j=1}^{d}\ln\dfrac{x_j^D}{g_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{x}^D)}\ln\dfrac{y_j^D}{g_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{y}^D)}\\ g_{\mathrm{m}}\left(\boldsymbol{x}^D\right)=\left(\prod_{i=1}^{d}x_j^D\right)^{1/d}\\ g_{\mathrm{m}}\left(\boldsymbol{y}^D\right)=\left(\prod_{i=1}^{d}y_j^D\right)^{1/d}\end{cases}$$

式中: 内积运算$\langle\cdot\rangle_{\mathrm{a}}$的下标a表示该运算在艾奇逊空间中。

由于约束$\sum_{i=1}^{d}x_j^D=1$的存在, 直接将成分数据的各成分作为协变量进行回归会得到误导性的结果。解决这一问题的已有方法主要是基于 ilr 变换的方法。该变换将艾奇逊空间中的d维成分数据映射到欧几里得空间中的$d-1$维向量, 消除了成分数据各成分间的共线性。ilr 变换还是保内积的变换, 即有

$$\begin{cases}\left\langle\boldsymbol{x}^D,\boldsymbol{y}^D\right\rangle_a=\left\langle\mathrm{ilr}\left(\boldsymbol{x}^D\right),\mathrm{ilr}\left(\boldsymbol{y}^D\right)\right\rangle\\ \mathrm{ilr}\left(\boldsymbol{x}^D\right)=\left[x_1^*,x_2^*,\cdots,x_{d-1}^*\right]^{\mathrm{T}}\\ \mathrm{ilr}\left(\boldsymbol{y}^D\right)=\left[y_1^*,y_2^*,\cdots,y_{d-1}^*\right]^{\mathrm{T}}\end{cases}$$

式中: 上标*用来表示 ilr 变换后得到的新变量; $\langle\cdot\rangle$为欧几里得空间中的向量内积。目前主要有 2 种 ilr 变换基, 分别由 Egozcue 等[24]于 2003 年和 Hron 等[25]于 2012 年提出。由于 Hron[25]等的方法具有更好的可解释性, 故本文采用该方法, 该变换方法的计算式为

$$\begin{cases}x_1^*=\sqrt{\dfrac{d-1}{d}}\ln\left(x_j^D\Big/\sqrt[d-1]{\prod_{k=2}^{d}x_k^D}\right)\\ x_j^*=\sqrt{\dfrac{d-j}{d-j+1}}\ln\left(x_j^D\Big/\sqrt[d-j]{\prod_{k=j+1}^{d}x_k^D}\right)\quad j=2,3,\cdots,d-1\end{cases}$$

在后面的参数估计中, 将用这一变换方法将成分型协变量和成分型系数转化成数值型协变量和数值型系数。

2　本文模型

2.1　本文模型构建

假设空间上有n个个体, 每个个体的位置坐标为$(u_i,v_i),i=1,2,\cdots,n$。从个体i上观测到数据$\left\{y_i,\boldsymbol{x}_i^D,x_i\right\}$, 其中, y_i为数值型因变量, $\boldsymbol{x}_i^D=\left[x_{i1}^D,x_{i2}^D,\cdots,x_{id}^D\right]^{\mathrm{T}}$为成分型协变量, x_i为数值型协变量。研究y_i与$\boldsymbol{x}_i^D,x_i$的关系, 建立如下模型:

$$y_i=\rho(u_i,v_i)\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}+\left\langle\boldsymbol{x}_i^D,\boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)\right\rangle_{\mathrm{a}}+x_i\beta(u_i,v_i)+\varepsilon(u_i,v_i)\tag{1}$$

式中: $w_{ii'}$为个体i和个体i'之间的空间权重, 根据i和i'的相对位置提前给定; $\rho(u_i,v_i)$为空间滞后参数; $\boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)$为成分型系数矩阵$\left[\beta_1^D(u_i,v_i),\beta_2^D(u_i,v_i),\cdots,\beta_d^D(u_i,v_i)\right]^{\mathrm{T}}$; $\beta(u_i,v_i)$为数值型变量的系数; $\varepsilon(u_i,v_i)$为残差。需注意, $w_{ii'}$除了表示空间位置关系, 还能刻画贸易关系等。

相比已有的成分数据空间自回归模型[11](见式(2))。首先, 本文模型具有类似于地理加权回归模型的优点, 即$\boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)$和$\beta(u_i,v_i)$为位置坐标$(u_i,v_i)$的函数, 能刻画成分型协变量和数值型协变量对因变量的影响在空间中的非均匀分布。这比式(2)使用不变参数$\boldsymbol{\beta}^D=\left[\beta_1^D,\beta_2^D,\cdots,\beta_d^D\right]^{\mathrm{T}}$和$\beta$具有更强的灵活性。注意到, 对任一固定的坐标$(u_0,v_0)$, 有$\sum_{j=1}^{d}\beta_j^D(u_0,v_0)=1$。其次, 本文模型的空间参数$\rho(u_i,v_i)$也是变系数的, 允许个体间的空间自相关程度随地理位置发生变化, 这比式(2)中的ρ更能反映实际空间数据中常见的空间影响异质性。基于以上 2 个特点, 空间滞后指模型中含有空间滞后项$\rho(u_i,v_i)\cdot\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}$。

$$y_i=\rho\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}+\left\langle \boldsymbol{x}_i^D,\boldsymbol{\beta}^D\right\rangle_{\mathrm{a}}+x_i\beta+\varepsilon_i \tag{2}$$

总的来说,本文模型不仅通过空间滞后项考虑了观测对象间的空间相关性,还通过可变参数考虑了空间影响和变量关系的异质性,因此,在实际数据分析中有更好的建模效果。

2.2 模型参数的估计方法

为估计模型式(1)中的$\rho(u_i,v_i)$,$\boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)$和$\beta(u_i,v_i)$,首先,使用ilr变换处理成分型变量;其次,利用工具变量法处理空间滞后项;最后,使用局部地理加权估计法对变系数进行估计。

利用第1节中介绍的ilr变换方法,可将$\boldsymbol{x}_i^D$转换为$\mathrm{ilr}\left(\boldsymbol{x}_i^D\right)=\boldsymbol{x}_i^*=\left[x_{i1}^*,x_{i2}^*,\cdots,x_{i(d-1)}^*\right]^{\mathrm{T}}$,类似的有$\mathrm{ilr}\left(\boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)\right)=\boldsymbol{\beta}^*(u_i,v_i)=\left[(\beta_1^*(u_i,v_i),\beta_2^*(u_i,v_i),\cdots,\beta_{d-1}^*(u_i,v_i)\right]^{\mathrm{T}}$,根据ilr变换的保内积性质,模型式(1)可等价写为

$$y_i=\rho(u_i,v_i)\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}+\left\langle \boldsymbol{x}_i^*,\boldsymbol{\beta}^*(u_i,v_i)\right\rangle+x_i\beta(u_i,v_i)+\varepsilon(u_i,v_i) \tag{3}$$

观察式(3),可发现变量$\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}$具有内生性。构造自回归模型中常用的工具变量,$\boldsymbol{Z}_{n\times 3d}=\left(\boldsymbol{z}^*,\boldsymbol{W}\boldsymbol{z}^*,\boldsymbol{W}^2\boldsymbol{z}^*\right)$,$\boldsymbol{z}^*=\left[\boldsymbol{z}_1^*,\boldsymbol{z}_2^*,\cdots,\boldsymbol{z}_n^*\right]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{z}_i^*=\left[x_{i1}^*,x_{i2}^*,\cdots,x_{i(d-1)}^*,x_i\right]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{W}=[w_{ii'}]_{n\times n}$;然后用$\boldsymbol{Z}_{n\times 3d}$的第$i$行$\boldsymbol{Z}_{i\cdot}$来拟合$\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}$,有

$$\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}=\langle \boldsymbol{Z}_{i\cdot},\boldsymbol{\delta}(u_i,v_i)\rangle+\epsilon(u_i,v_i) \tag{4}$$

由于$\boldsymbol{\delta}(u_i,v_i)$是由与位置有关的$3d\times 1$维系数组成的向量,故使用局部地理加权估计法进行估计。先将$\boldsymbol{\delta}(u_i,v_i)$在$(u_0,v_0)$处做一阶泰勒展开,得到

$$\boldsymbol{\delta}(u_i,v_i)\approx\boldsymbol{\delta}(u_0,v_0)+\frac{\partial\boldsymbol{\delta}(u_0,v_0)}{\partial u_i}(u_i-u_0)+\frac{\partial\boldsymbol{\delta}(u_0,v_0)}{\partial v_i}(v_i-v_0) \tag{5}$$

然后,求解目标函数

$$\underset{\boldsymbol{\delta}(u_0,v_0)}{\arg\min}\left\{\sum_{i=1}^{n}\left[\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}-\boldsymbol{Z}_{i\cdot}\times\left[\boldsymbol{\delta}(u_0,v_0)+\frac{\partial\boldsymbol{\delta}(u_0,v_0)}{\partial u_i}\cdot(u_i-u_0)+\frac{\partial\boldsymbol{\delta}(u_0,v_0)}{\partial v_i}(v_i-v_0)\right]\right]^2k_h(d_{i0})\right\} \tag{6}$$

式中:$k_h(d_{i0})$为窗宽等于h的核函数,记为

$$\begin{cases}\boldsymbol{Z}_{i\cdot}(u_0,v_0)=[\boldsymbol{Z}_{i\cdot},\boldsymbol{Z}_{i\cdot}(u_i-u_0),\boldsymbol{Z}_{i\cdot}(v_i-v_0)]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{Z}(u_0,v_0)=[\boldsymbol{Z}_{1\cdot}(u_0,v_0),\boldsymbol{Z}_{2\cdot}(u_0,v_0),\cdots,\boldsymbol{Z}_{n\cdot}(u_0,v_0)]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{K}_h(u_0,v_0)=\mathrm{diag}\left(k_h(d_{10}),k_h(d_{20}),\cdots,k_h(d_{n0})\right)\\ \boldsymbol{y}=\left[y_1,y_2,\cdots,y_n\right]^{\mathrm{T}}\end{cases}$$

可该式的解为

$$\widehat{\boldsymbol{\delta}}(u_0,v_0)=(\boldsymbol{I}_{3d},\boldsymbol{0}_{3d},\boldsymbol{0}_{3d})\left[\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}(u_0,v_0)\boldsymbol{K}_h(u_0,v_0)\boldsymbol{Z}(u_0,v_0)\right]^{-1}\cdot\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}(u_0,v_0)\boldsymbol{K}_h(u_0,v_0)\boldsymbol{W}_{\mathrm{y}} \tag{7}$$

由于(u_0,v_0)是任意给定的,要得到$\widehat{\boldsymbol{\delta}}(u_{\mathrm{i}},v_{\mathrm{i}}),i=1,2,\cdots,n$,将式(7)中的$(u_0,v_0)$替换成$(u_i,v_i)$即可。因此,$\boldsymbol{W}_{\mathrm{y}}$的拟合值为

$$\widehat{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{y}}=\left[\boldsymbol{Z}_{1\cdot}\widehat{\boldsymbol{\delta}}(u_1,v_1),\boldsymbol{Z}_{2\cdot}\widehat{\boldsymbol{\delta}}(u_2,v_2),\cdots,\boldsymbol{Z}_{n\cdot}\widehat{\boldsymbol{\delta}}(u_n,v_n)\right]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

使用$\widehat{\boldsymbol{W}}_{\mathrm{y}}$的第$i$行$\boldsymbol{Z}_{i\cdot}\widehat{\boldsymbol{\delta}}(u_i,v_i)$替代式(3)中的内生变量$\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}$,然后利用局部地理加权估计法,即可得到$\rho(u_i,v_i)$,$\boldsymbol{\beta}^*(u_i,v_i)$和$\beta(u_i,v_i)$的估计量。式(3)替换后的表达式为

$$y_i=\rho(u_i,v_i)\boldsymbol{Z}_{i\cdot}\widehat{\boldsymbol{\delta}}(u_i,v_i)+\left\langle \boldsymbol{x}_i^*,\boldsymbol{\beta}^*(u_i,v_i)\right\rangle+x_i\beta(u_i,v_i)+\epsilon(u_i,v_i) \tag{9}$$

记$\boldsymbol{\lambda}(u_i,v_i)=\left[\rho(u_i,v_i),\boldsymbol{\beta}^*(u_i,v_i),\beta(u_i,v_i)\right]^{\mathrm{T}}$,将$\boldsymbol{\lambda}(u_i,v_i)$在$(u_0,v_0)$处做一阶泰勒展开,得到

$$\boldsymbol{\lambda}(u_i,v_i)\approx\boldsymbol{\lambda}(u_0,v_0)+\frac{\partial\boldsymbol{\lambda}(u_0,v_0)}{\partial u_i}(u_i-u_0)+\frac{\partial\boldsymbol{\lambda}(u_0,v_0)}{\partial v_i}(v_i-v_0) \tag{10}$$

记$\boldsymbol{A}_{i\cdot}=\left[\boldsymbol{Z}_{i\cdot}\widehat{\boldsymbol{\delta}}(u_i,v_i),\boldsymbol{x}_i^*,\boldsymbol{x}_i\right]$,可通过求解以下目标函数得到参数估计量:

$$\underset{\boldsymbol{\lambda}(u_0,v_0)}{\arg\min}\left\{\sum_{i=1}^{n}\left[y_i-\boldsymbol{A}_{i\cdot}\times\left(\boldsymbol{\lambda}(u_0,v_0)+\frac{\partial\boldsymbol{\lambda}(u_0,v_0)}{\partial u_i}\cdot(u_i-u_0)+\frac{\partial\boldsymbol{\delta}(u_0,v_0)}{\partial v_i}(v_i-v_0)\right)\right]^2k_h(d_{i0})\right\} \tag{11}$$

记$\boldsymbol{A}_{i\cdot}(u_0,v_0)=[\boldsymbol{A}_{i\cdot},\boldsymbol{A}_{i\cdot}(u_i-u_0),\boldsymbol{A}_{i\cdot}(v_i-v_0)]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{A}(u_0,v_0)=[\boldsymbol{A}_{1\cdot}(u_0,v_0),\boldsymbol{A}_{2\cdot}(u_0,v_0),\cdots,\boldsymbol{A}_{n\cdot}(u_0,v_0)]^{\mathrm{T}}$,可知该式的解为

$$\widehat{\boldsymbol{\lambda}}(u_0,v_0)=(\boldsymbol{I}_{3d},\boldsymbol{0}_{3d},\boldsymbol{0}_{3d})\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(u_0,v_0)\boldsymbol{K}_h(u_0,v_0)\boldsymbol{A}(u_0,v_0)\right)^{-1}\cdot\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(u_0,v_0)\boldsymbol{K}_h(u_0,v_0)\boldsymbol{y} \tag{12}$$

将(12)中的(u_0,v_0)替换成(u_i,v_i),即可得到$\widehat{\rho}(u_i,v_i)$,$\widehat{\beta}(u_i,v_i)$和$\widehat{\boldsymbol{\beta}}^*(u_i,v_i)$。$\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u_i,v_i)$可由下式得到:

$$\begin{cases}\beta_1^D(u_i,v_i)=\exp\left(\sqrt{\dfrac{d-1}{d}}\beta_1^*(u_i,v_i)\right)\\ \beta_j^D(u_i,v_i)=\exp\left(-\displaystyle\sum_{k=1}^{j-1}\frac{1}{\sqrt{(d-k+1)(d-k)}}\beta_k^*(u_i,v_i)+\frac{\sqrt{(d-j)}}{\sqrt{(d-j+1)}}\beta_j^*(u_i,v_i)\right)\quad j=2,3,\cdots,d-1\\ \beta_d^D(u_i,v_i)=\exp\left(-\displaystyle\sum_{k=1}^{d-1}\frac{1}{\sqrt{(d-k+1)(d-k)}}\beta_k^*(u_i,v_i)\right)\end{cases} \tag{13}$$

3　数值模拟

为评估本文模型的表现及估计量的统计性质，本节设计了几组数值模拟实验。所有的计算在 R 软件上完成，用到的包有 compositions, spdep, robCompositions。

特别地，假设空间上的个体均匀地分布在一个 R 行 T 列的棋盘格子上，每个个体占据一个格子点。基于最常用的“车”相邻，棋盘格子中间的个体有 4 个邻居，边上的个体最多有 3 个邻居，角上的个体有 2 个邻居。除此之外，设置同一行上相邻 2 个个体的距离为 $\frac{1}{T-1}$，同一列上相邻 2 个个体的距离为 $\frac{1}{R-1}$。可知，依据从左至右、从下至上的顺序，第 l 行第 m 列上的个体 $(l-1)T+m$ 的坐标为 $[(l-1)/(R-1),(m-1)/(T-1)]$。实验中令样本容量 $n=\{49,144,441\}$，相应的 $R\times T=\{7\times 7,12\times 12,21\times 21\}$。

空间背景设置后，因变量 $\boldsymbol{y}$ 为

$$\boldsymbol{y}=\left[\boldsymbol{I}_n-\boldsymbol{\rho}(u,v)\boldsymbol{W}\right]^{-1}\left[\boldsymbol{X}^D\odot\boldsymbol{\beta}^D(u,v)+\boldsymbol{x}\beta(u,v)+\boldsymbol{\varepsilon}\right]$$

式中：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}^D\odot\boldsymbol{\beta}^D(u,v)=\begin{bmatrix}\left\langle\boldsymbol{x}_1^D,\boldsymbol{\beta}^D(u_1,v_1)\right\rangle_{\mathrm{a}}\\ \vdots\\ \left\langle\boldsymbol{x}_{n-1}^D,\boldsymbol{\beta}^D(u_{n-1},v_{n-1})\right\rangle_{\mathrm{a}}\\ \left\langle\boldsymbol{x}_n^D,\boldsymbol{\beta}^D(u_n,v_n)\right\rangle_{\mathrm{a}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)=\left[\beta_1^D(u_i,v_i),\beta_2^D(u_i,v_i),\beta_3^D(u_i,v_i)\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\varepsilon}=[\varepsilon_1,\varepsilon_2,\cdots,\varepsilon_n]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\rho}=\mathrm{diag}\left(\rho(u_1,v_1),\rho(u_2,v_2),\cdots,\rho(u_n,v_n)\right)\end{cases}$$

其中，$\boldsymbol{x}_i^D\sim N_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\Sigma})$，$\boldsymbol{\mu}=[0.287,0.4]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\Sigma}=\begin{bmatrix}2 & -1\\ -1.5 & 3\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{x}_i\sim N(0,1)$，$\varepsilon_i\sim N(0,0.25^2)$。

式中；$N_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\Sigma})$ 表示成分数据 ilr 变换后服从均值为 $\boldsymbol{\mu}$，方差为 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的正态分布。关于参数，考虑以下 2 种情形。

1）空间异质性不存在，即

$$\begin{cases}\rho(u_i,v_i)=0.8\\ \beta(u_i,v_i)=0.4\\ \mathrm{ilr}\left(\boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)\right)=[0.5,-0.5]^{\mathrm{T}}\end{cases}$$

2）协变量对因变量的影响及空间自相关均存在异质性，即

$$\begin{cases}\rho(u_i,v_i)=0.8\sin(v_i\pi)\\ \rho(u_i,v_i)=0.4u_i\\ \mathrm{ilr}\left(\boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)\right)=[u_i,-\cos(v_i\pi)]^{\mathrm{T}}\end{cases}$$

模拟数据生成后，分别使用本文模型式(1)和成分数据空间的自回归模型式(2)进行拟合。其中，式(1)使用第 3 节介绍的方法进行参数估计；式(2)的估计方法参考文献 [11]。特别地，核函数 $k_h(d_{i0})$ 采用常见的高斯核，由于空间位置是二维的，涉及 2 个变量 u_i 和 v_i，因此，令 $k_h(d_{i0})=\frac{1}{h_1h_2}K\cdot\left[\frac{(u_i-u_0)}{h_1}\right]K\left[\frac{(v_i-v_0)}{h_2}\right]$，其中 $K(w)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{w^2}{2}\right)$；窗宽 $h_1=s_{\mathrm{d}}(u)n^{-1/6}$，式中 $s_{\mathrm{d}}(u)$ 为变量 u 的标准差。窗宽 h_2 采用相同方式设置。针对每一种情形，均重复实验 300 次。参数 $\rho(u,v)$ 和 $\beta(u,v)$ 的估计效果用均方根误差（root mean squared error, RMSE）和平均标准差（standard deviation, SD）来衡量，其表达式分别为

$$\begin{cases}e_{\mathrm{RMSE}}\left(\widehat{\rho}(u,v)\right)=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{\rho}(u_i,v_i)-\rho(u_i,v_i)\right)^2}\\ e_{\mathrm{sd}}\left(\widehat{\rho}(u,v)\right)=\sqrt{\frac{1}{300n}\sum_{i=1}^{n}\sum_{l=1}^{300}\left(\widehat{\rho}_l(u_i,v_i)-\overline{\rho}(u_i,v_i)\right)^2}\end{cases}$$

式中：

$$\overline{\rho}(u_i,v_i)=\frac{1}{300}\sum_{l=1}^{300}\widehat{\rho}_l(u_i,v_i)\tag{14}$$

$\boldsymbol{\beta}^D(u,v)$ 的估计效果用成分数据的平均单形标准差（simplicial standard deviation, SSD）和各成分的 RMSE 和来衡量。先计算出 $\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u_i,v_i)$ 的均值为

$$\begin{aligned}c_{\mathrm{en}}\left(\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u_i,v_i)\right)&=\overline{\boldsymbol{g}}(u_i,v_i)=\\ &\left[\overline{g}_1(u_i,v_i),\overline{g}_2(u_i,v_i),\overline{g}_3(u_i,v_i)\right]=\\ &C\left(\widehat{g}_1(u_i,v_i),\widehat{g}_2(u_i,v_i),\widehat{g}_3(u_i,v_i)\right)\end{aligned}\tag{15}$$

式中：

$$\widehat{g}_j(u_i,v_i)=\left(\prod_{l=1}^{300}\widehat{\beta}_{lj}^D(u_i,v_i)\right)^{\frac{1}{300}}\qquad j=1,2,3\tag{16}$$

$C(\cdot)$ 为闭合运算，则 $\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u,v)$ 第 j 个成分的 e_{RMSE} 为

$$e_{\mathrm{RMSE}}\left(\beta_j^D(u,v)\right)=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{g}_j(u_i,v_i)-\beta_j^D(u_i,v_i)\right)^2}$$

$\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u,v)$ 的 SSD 为

$$\begin{cases}e_{\mathrm{SSD}}\left(\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u,v)\right)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}t_{\mathrm{var}}\left(\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u_i,v_i)\right)}{n(d-1)}}\\ t_{\mathrm{var}}\left(\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u_i,v_i)\right)=\frac{1}{6}\sum_{j,k=1}^{3}\widehat{t}_{jk}(u_i,v_i)\\ \widehat{t}_{jk}(u_i,v_i)=\frac{1}{300}\sum_{l=1}^{300}\left(\ln\frac{\widehat{\beta}_{lj}^D(u_i,v_i)}{\widehat{\beta}_{lk}^D(u_i,v_i)}-\ln\frac{\widehat{g}_j(u_i,v_i)}{\widehat{g}_k(u_i,v_i)}\right)^2\end{cases}$$

将空间参数$\rho(u_i,v_i)$和数值型系数$\beta(u_i,v_i)$的估计误差总结在表1中，将成分型系数$\beta_1^D(u_i,v_i)$、$\beta_2^D(u_i,v_i)$、$\beta_3^D(u_i,v_i)$的估计误差总结在表2中，可以发现：

表1 空间参数和数值型系数的RMSE和SSD

Table 1 RMSE and SSD for the spatial lag parameter and numerical coefficient

情形	n	RMSE				SSD			
		本文模型		已有模型[11]		本文模型		已有模型[11]	
		$\rho(u_i,v_i)$	$\beta(u_i,v_i)$	$\rho(u_i,v_i)$	$\beta(u_i,v_i)$	$\rho(u_i,v_i)$	$\beta(u_i,v_i)$	$\rho(u_i,v_i)$	$\beta(u_i,v_i)$
情形1	49	0.010	0.010	−0.005	0.001	0.16	0.22	0.03	0.04
	144	0.008	0.006	−0.003	0.000	0.08	0.10	0.01	0.02
	441	0.009)	0.004	−0.001	0.000	0.05	0.06	0.01	0.01
情形2	49	0.083	0.008	0.312	0.134	0.26	0.27	0.20	0.23
	144	0.023	0.006	0.280	0.126	0.11	0.11	0.11	0.13
	441	0.014	0.003	0.266	0.121	0.07	0.06	0.06	0.07

表2 成分系数各成分的RMSE和整个成分系数的SSD

Table 2 RMSE for each component and mean SSD for the entire compositional coefficient

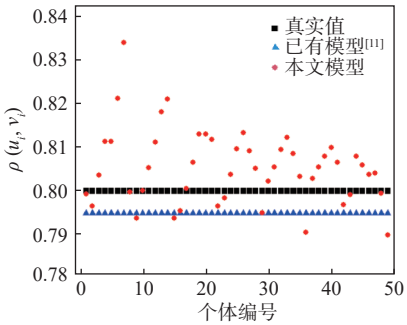
情形	n	RMSE						SSD	
		本文模型			已有模型[11]			本文模型	已有模型[11]
		$\beta_1^D(u_i,v_i)$	$\beta_2^D(u_i,v_i)$	$\beta_3^D(u_i,v_i)$	$\beta_1^D(u_i,v_i)$	$\beta_2^D(u_i,v_i)$	$\beta_3^D(u_i,v_i)$	$\beta_2^D(u_i,v_i)$	$\beta_2^D(u_i,v_i)$
情形1	49	0.003	0.003	0.001	0.001	0.000	−0.001	0.050	0.009
	144	0.002	0.001	0.001	−0.001	0.000	0.000	0.024	0.005
	441	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.014	0.003
情形2	49	0.007	0.012	0.018	0.092	0.148	0.191	0.056	0.057
	144	0.004	0.007	0.011	0.088	0.144	0.187	0.023	0.032
	441	0.002	0.004	0.007	0.086	0.142	0.184	0.012	0.018

1）当空间异质性不存在时（以下简称情形1），本文模型和已有模型[11]的表现差不多。由表1和表2可知，本文模型的均方根误差均较小，且接近真模型的误差。

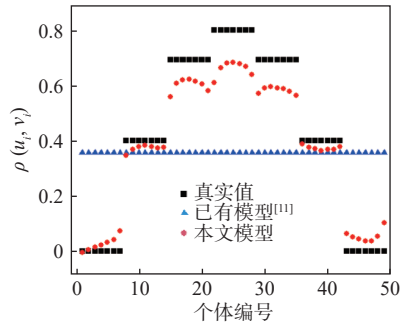
2）当空间异质性存在时（以下简称情形2），本文模型的表现优于已有模型[11]。可以看到，已有模型[11]各参数估计值的误差远大于本文模型参数估计值的误差。

3）随着样本量的增加，本文模型各参数的RMSE和标准差（包括SD和SSD）都逐渐减小。

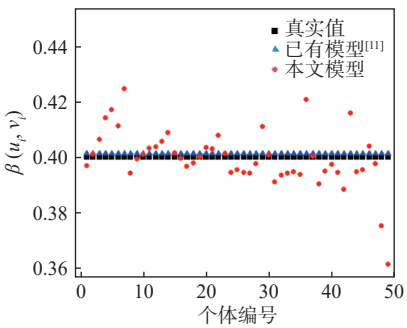
为更加直观地展示模型参数的估计效果，图1为将300次重复实验参数估计值的平均值与真实值的对比，其中$\widehat{\rho}(u_i,v_i)$和$\widehat{\beta}(u_i,v_i)$均值的计算式见式(14)，$\widehat{\boldsymbol{\beta}}^D(u_i,v_i)$均值的计算式见式(15)。我们注意到，参数$\rho(u_i,v_i)$、$\beta(u_i,v_i)$、$\beta_1^D(u_i,v_i)$、$\beta_2^D(u_i,v_i)$、$\beta_3^D(u_i,v_i)$均为坐标$(u_i,v_i)$的函数，这导致每个空间个体的参数估计值都不相同。为清晰展现出所有个体的参数估计情况，将图1所有散点图的横坐标设定为个体编号，该数字是依据从左至右、从上至下的顺序对棋盘格子上的个体进行编号得到的。散点图的纵坐标为各模型参数的大小取值。考虑到图片展示的简洁性，选取样本容量较小的情形（$n=49$）展示模型参数估计结果。由图1可知，情形1（见图1(a)、图1(c)、图1(e)、图1(g)和图1(i)）时，本文模型参数估计值的均值（圆形点）虽有误差，但围绕真实值（矩形点）在一个较小范围内波动；情形2（见图1(b)、图1(d)、图1(f)、图1(h)和图1(j)）时，本文模型参数估计值的均值（圆形点）非常贴近真实值（矩形点），而已有模型[11]参数估计值的均值（三角形点）为一个恒定值，大部分远离真实值。因此，综合来看，本文模型的表现整体优于已有模型[11]，得到与表1和表2一致的结论。



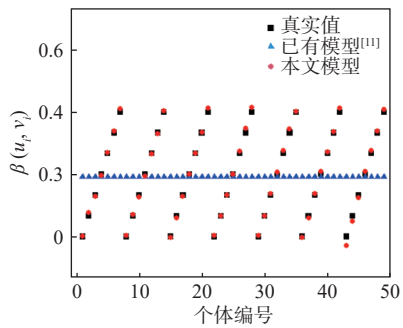
(a) 情形 1 时, $\rho(u_i, v_i)$ 的估计均值



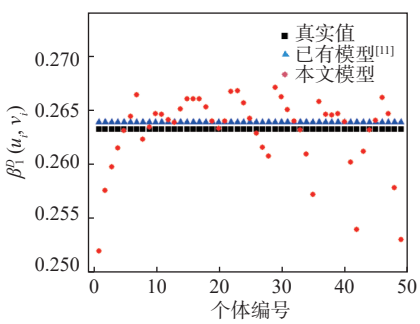
(b) 情形 2 时, $\rho(u_i, v_i)$ 的估计均值



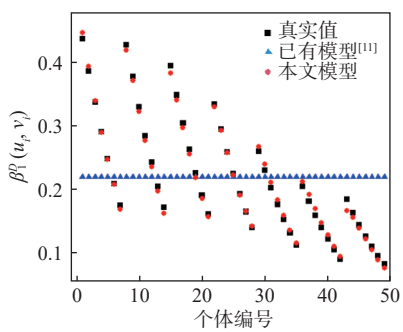
(c) 情形 1 时, $\beta(u_i, v_i)$ 的估计均值



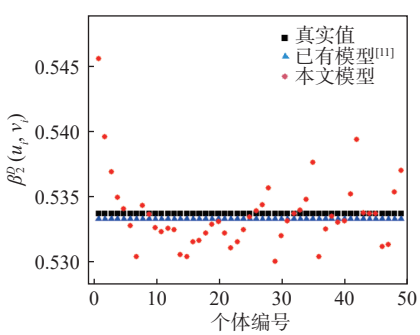
(d) 情形 2 时, $\beta(u_i, v_i)$ 的估计均值



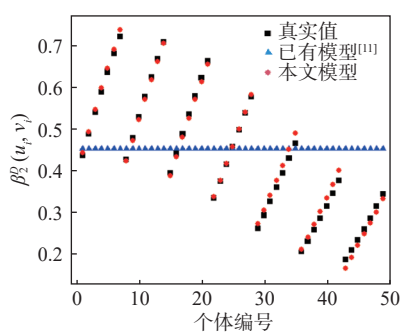
(e) 情形 1 时, $\beta_1^0(u_i, v_i)$ 的估计均值



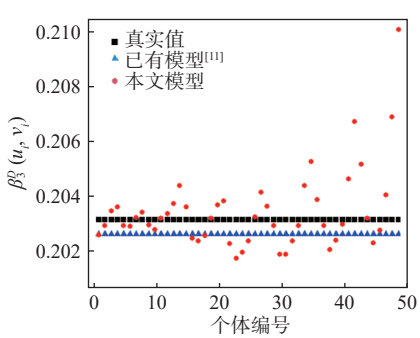
(f) 情形 2 时, $\beta_1^0(u_i, v_i)$ 的估计均值



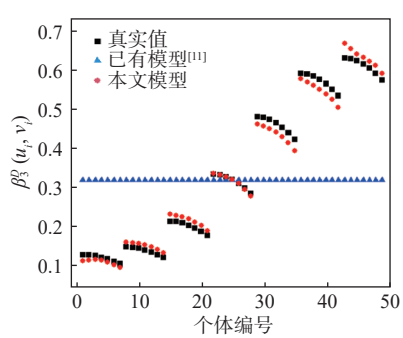
(g) 情形 1 时, $\beta_2^0(u_i, v_i)$ 的估计均值



(h) 情形 2 时, $\beta_2^0(u_i, v_i)$ 的估计均值



(i) 情形 1 时, $\beta_3^0(u_i, v_i)$ 的估计均值



(j) 情形 2 时, $\beta_3^0(u_i, v_i)$ 的估计均值

图 1　参数真实值与估计值的均值对比

Fig. 1　Comparison of true values with means of estimated values

4 实际数据分析

本节利用本文模型研究产业结构和人均国内生产总值(gross domestic product, GDP)如何影响PM2.5浓度。从各省及直辖市的统计年鉴、生态环境状况公报中获得2019年的PM2.5浓度和经济数据。由于呼伦贝尔离其他城市较远,故从数据集中删去该条记录。建立如下回归模型:

$$y_i=\rho(u_i,v_i)\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}+\left\langle \boldsymbol{x}_i^D,\boldsymbol{\beta}^D(u_i,v_i)\right\rangle_{\mathrm{a}}+ x_i\beta(u_i,v_i)+\varepsilon(u_i,v_i)$$

式中:在本节的实际数据中,y_i为第i个城市的年平均PM2.5浓度,$\boldsymbol{x}_i^D$为该城市第1、第2、第3产业产值的占比,x_i为该城市的人均GDP取对数。$\boldsymbol{W}=[w_{ii'}]_{n\times n}$为邻接矩阵,当城市$i$和城市$i'$相邻时,$w_{ii'}$为1,否则为0。$u_i$和$v_i$分别表示各城市的经度和纬度。同时考虑如下成分数据的空间自回归模型:

$$y_i=\rho\sum_{i'\neq i}w_{ii'}y_{i'}+\left\langle \boldsymbol{x}_i^D,\boldsymbol{\beta}^D\right\rangle_{\mathrm{a}}+x_i\beta+\varepsilon_i$$

将其回归结果与本文模型进行对比。

首先,比较拟合度,已有模型[11]和本文模型的R方分别为0.62和0.94,可见本文模型对真值的拟合度更好;其次,查看参数的估计值。采用Hron等[20]的ilr变换方法,以查看$\boldsymbol{x}_i^D$各成分占比的增加对因变量产生的影响(注意此时得到的系数之和不等于1)。得到已有模型空间参数、成分系数、数值型系数的结果分别为$0.06,[-0.68,0.67,0.20]^{\mathrm{T}},-0.25$,本文模型的估计结果展现在表3中。可以发现:①已有模型[11]的空间影响为0.06,接近于0;而本文模型的空间影响有正有负,如巴彦淖尔及附近城市(包头、阿拉善盟)呈现高-高聚集,临汾及附近城市(运城、晋城、长治、吕梁)呈现低-低聚集。②从已有模型[11]的结果看,第1产业占比增加会降低PM2.5污染(系数为−0.68);但从本文模型的结果看,兴安盟、锡林郭勒、巴彦淖尔等部分草原地区增大第1产业占比会增加PM2.5污染(系数分别为1.09,1.30,0.84)。③从已有模型[11]结果看,第2、第3产业占比增加会加重PM2.5污染(系数分别为0.67, 0.2);但本文模型结果显示,对通辽而言,第2、第3产业比例增加会极大程度减小PM2.5污染(系数分别为−1.31, −4.04)。④已有模型[11]说明,经济越发达地区PM2.5污染越轻(系数为−0.25);本文模型结果显示,对山西部分地区如朔州、忻州、太原、吕梁而言,经济水平越高PM2.5污染越严重(系数分别为0.25,0.26, 0.22,0.22)。可以看出,相比已有模型[11],本文模型能分析空间效应和变量影响的局部差异,具备更强的解释能力。实际上,影响PM2.5浓度的因素还有很多,如地形、是否靠海等。此处分析这一组数据,在于说明本文模型如何应用到实际中。对PM2.5浓度的影响因素展开系统研究,需考虑更多的变量。

表3 本文模型的回归结果

Table 3 Regression results for the proposed model

城市	ρ	β_1^D	β_2^D	β_3^D	β
兴安盟	−0.10	1.09	−0.16	−3.42	3.61
通辽	−0.31	0.85	−1.31	−4.04	2.58
锡林郭勒	0.22	1.30	1.37	4.85	0.63
赤峰	−0.09	0.66	0.85	−1.26	0.38
张家口	0.12	0.32	−0.44	0.41	0.20
包头	0.13	−0.04	2.25	3.86	−0.21
呼和浩特	0.00	0.24	1.56	2.35	0.00
乌兰察布	0.05	0.16	1.05	2.50	0.04
鄂尔多斯	−0.09	0.09	1.63	3.21	−0.10
巴彦淖尔	0.75	0.84	0.61	6.50	−1.10
乌海	0.53	−0.73	0.61	3.83	−1.13
阿拉善盟	0.24	−0.70	1.36	2.51	−1.41
承德	−0.12	0.31	0.28	−2.49	0.13
北京	−0.03	0.06	−0.76	−1.09	0.01
天津	−0.14	−0.20	−0.56	−1.69	−0.20
唐山	−0.20	−0.18	0.26	−2.38	−0.12
秦皇岛	−0.34	−0.29	1.46	−3.03	−0.02
廊坊	−0.07	−0.05	−0.75	−1.32	−0.08
保定	−0.05	−0.10	−1.38	−0.20	−0.03
沧州	−0.17	−0.36	−0.90	−1.72	−0.34
衡水	−0.12	−0.38	−1.52	−0.91	−0.27
邢台	−0.11	−0.43	−1.52	−0.35	−0.25
邯郸	−0.19	−0.56	−1.27	−0.89	−0.42
长治	−0.24	−0.58	−0.07	−0.71	−0.33
晋城	−0.40	−0.75	1.29	−0.50	−0.66
运城	−0.67	−0.77	4.20	2.09	−0.63
临汾	−0.32	−0.56	1.18	0.43	−0.12
吕梁	−0.09	−0.17	−0.29	1.86	0.22
晋中	0.01	−0.14	−1.17	1.57	0.18
太原	0.02	−0.09	−1.09	1.81	0.22
阳泉	0.01	−0.15	−1.47	1.19	0.10
忻州	0.02	0.02	−0.98	2.00	0.26
石家庄	−0.03	−0.19	−1.62	0.51	0.00
朔州	−0.04	0.19	−0.10	2.06	0.25
大同	0.05	0.23	−0.06	1.53	0.20

5 结 论

1)本文模型参数是地理位置的函数,不仅能刻画空间自相关程度的空间异质性,还能处理成分型

协变量和数值型协变量对因变量影响的局部差异性。因此, 本文模型广泛适用于带有空间结构的占比数据分析。

2) 本文的估计量具有良好的统计性质, 随着样本量的增大, 各参数的均方根误差和标准差都在减小。

需注意的是, 当成分型协变量的某个成分取值为 0 时, 本文估计方法不再适用。鉴于这一问题较为复杂, 将在未来继续对其展开研究。

参考文献（References）

[1] FERRERS N M. An elementary treatise on trilinear co-ordinates: The method of reciprocal polars, and the theory of projections[M]. New York: Macmillan and Company, 1876.

[2] VAN DEN BOOGAART K G, FILZMOSER P, HRON K, et al. Classical and robust regression analysis with compositional data[J]. Mathematical Geosciences, 2021, 53(5): 823-858.

[3] ARBORETTI GIANCRISTOFARO R, GASTALDI M, MARTINELLO L, et al. Regression analysis with compositional data using orthogonal log-ratio coordinates[J]. Communications in Statistics - Simulation and Computation, 2022, 51(4): 1932-1945.

[4] 龚日朝, 姚嘉倩, 刘香伶. 产业结构数据的等距 logratio 变换与应用[J]. 统计与决策, 2023, 39(19): 53-59.
GONG R Z, YAO J Q, LIU X L. Isometric logratio transformation of industrial structure data and its application[J]. Statistics & Decision, 2023, 39(19): 53-59 (in Chinese).

[5] MISHRA A, MÜLLER C L. Robust regression with compositional covariates[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2022, 165: 107315.

[6] YOO J, SUN Z Q, GREENACRE M, et al. A guideline for the statistical analysis of compositional data in immunology[J]. Communications for Statistical Applications and Methods, 2022, 29(4): 453-469.

[7] 龙文, 王惠文. 成分数据偏最小二乘 Logistic 回归模型及其应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2006, 23(9): 156-161.
LONG W, WANG H W. PLS logistic regression on compositional data and its application[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2006, 23(9): 156-161 (in Chinese).

[8] 李玉莹, 张景肖. 成分数据的 logistic 回归模型研究[J]. 数理统计与管理, 2019, 38(3): 442-449.
LI Y Y, ZHANG J X. Logistic regression model for compositional data[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2019, 38(3): 442-449 (in Chinese).

[9] LIN W, SHI P X, FENG R, et al. Variable selection in regression with compositional covariates[J]. Biometrika, 2014, 101(4): 785-797.

[10] WANG H W, WANG Z C, WANG S S. Sliced inverse regression method for multivariate compositional data modeling[J]. Statistical Papers, 2021, 62(1): 361-393.

[11] MA X J, ZHANG P. Quantile regression for compositional covariates[J]. Communications in Statistics - Simulation and Computation, 2023, 52(3): 658-668.

[12] HUANG S M, AILER E, KILBERTUS N, et al. Supervised learning and model analysis with compositional data[J]. PLoS Computational Biology, 2023, 19(6): e1011240.

[13] ALENAZI A. A review of compositional data analysis and recent advances[J]. Communications in Statistics - Theory and Methods, 2023, 52(16): 5535-5567.

[14] CRESSIE N A C. Statistics for spatial data[M]. Hoboken: Wiley, 1993.

[15] CLAROTTO L, ALLARD D, MENAFOGLIO A. A new class of α-transformations for the spatial analysis of compositional data[J]. Spatial Statistics, 2022, 47: 100570.

[16] 黄婷婷, 王惠文, GILBERT S. 成分数据的空间自回归模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 93-98.
HUANG T T, WANG H W, GILBERT S. Spatial autoregressive model for compositional data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 93-98 (in Chinese).

[17] HUANG T T, SAPORTA G, WANG H W. A spatial durbin model for compositional data[C]//Proceedings of the Advances in Contemporary Statistics and Econometrics. Beilin: Springer, 2021: 471-488.

[18] 曾梅. 带有缺失数据的混合空间自回归模型的统计分析[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
ZENG M. Analysis of mixed spatial autoregressive model with missing data[D]. Kunming: Yunnan University, 2021 (in Chinese).

[19] PÁEZ A, UCHIDA T, MIYAMOTO K. A general framework for estimation and inference of geographically weighted regression models: 1. Location-specific kernel bandwidths and a test for locational heterogeneity[J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 2002, 34(4): 733-754.

[20] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M. Spatial nonstationarity and autoregressive models[J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 1998, 30(6): 957-973.

[21] 林光平, 龙志和. 空间经济计量: 理论与实证[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LIN G P, LONG Z H. Spatial econometrics[M]. Beijing: Science Press, 2014 (in Chinese).

[22] PÁEZ A, UCHIDA T, MIYAMOTO K. A general framework for estimation and inference of geographically weighted regression models: 2. Spatial association and model specification tests[J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 2002, 34(5): 883-904.

[23] 魏传华, 王韶郡, 苏宇楠. 空间变系数地理加权自回归模型的局部 GMM 估计[J]. 统计与信息论坛, 2022, 37(11): 3-13.
WEI C H, WANG S J, SU Y N. Local GMM estimation in spatial varying coefficient geographically weighted autoregressive model[J]. Journal of Statistics and Information, 2022, 37(11): 3-13 (in Chinese).

[24] EGOZCUE J J, PAWLOWSKY-GLAHN V, MATEU-FIGUERAS G, et al. Isometric logratio transformations for compositional data analysis[J]. Mathematical Geology, 2003, 35(3): 279-300.

[25] HRON K, FILZMOSER P, THOMPSON K. Linear regression with compositional explanatory variables[J]. Journal of Applied Statistics, 2012, 39(5): 1115-1128.

A varying coefficient geographically weighted spatial lag model for compositional data

Huang Tingting*

(School of Statistics，Capital University of Economics and Business，Beijing 100070，China)

Abstract：When it comes to area data with compositional factors, existing regression models seldom ever take spatial heterogeneity into account. To solve the problem, a compositional spatial autoregressive model with varying coefficients is proposed. By assuming that the spatial lag parameter, the compositional coefficient, and the numerical coefficient are functions of the location coordinates, the new model permits spatial effects and linear interactions between covariates and response to change in space. Based on isometric log-ratio (ILR) transformation, instrumental variables and local linear geographically weighted method, the parameters are estimated. The simulation study shows that the proposed model is superior to the existing spatial autoregressive model for compositional data, and the parameters estimation are effective. The utility of the proposed model is demonstrated by a real data set.

Keywords：compositional data；areal data；spatial heterogeneity；isometric log-ratio transformation；geographically weighted regression

Received：2023-06-12；**Accepted**：2023-12-29；**Published Online**：2024-02-01 20：24

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240201.1152.004

Foundation item：Beijing Municipal Natural Science Foundation (9224032)

* **Corresponding author**. E-mail：tingth@cueb.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0580

基于改进OMP算法的多目标高速机动检测方法

王阳[1]，张小宽[2,*]，马前阔[1]，郑舒予[3]，宗彬锋[2]，徐嘉华[1]

(1. 空军工程大学 研究生院，西安 710051；2. 空军工程大学 防空反导学院，西安 710051；
3. 国防科技大学 ATR国防科技重点实验室，长沙 410073)

摘 要：针对多目标高速机动检测问题，提出了一种基于改进正交匹配追踪(OMP)算法的多目标检测方法。根据高速机动目标运动特性建立信号模型；利用改进OMP算法对脉冲压缩后的回波信号进行运动参数估计；构建相位补偿函数对距离徙动和多普勒徙动进行校正；通过快速傅里叶变换(FFT)完成相参积累，实现对多目标的检测。改进算法适用于多目标高速机动检测场景，可有效避免盲速旁瓣现象及信号交叉项的影响，且具有参数估计精度高和抗噪声能力强等优点。仿真实验验证了改进算法的有效性与可靠性。

关 键 词：高速机动目标；改进正交匹配追踪算法；距离徙动；多普勒徙动；相参积累
中图分类号：V221+.3; TB553
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2265-07

高速机动目标的出现给传统雷达检测技术带来了严峻的挑战。通常，长时间相参积累[1-4]技术可以提高目标回波的信噪比(signal to noise ratio, SNR)，从而提升雷达的检测性能。但是，在相参积累的过程中，高速机动目标导致的距离徙动和多普勒徙动[5-8]会严重影响回波的积累效果。因此，如何解决高速机动目标带来的距离徙动和多普勒徙动问题，实现回波能量的有效积累，是提升雷达对高速机动目标检测能力的关键。

为实现能量的有效积累，典型的检测方法有基于参数搜索的Radon-Fourier变换(Radon-Fourier transform, RFT)算法[9-10]、Keystone变换(Keystone transform, KT)算法[11]、基于坐标轴旋转的动目标检测(axis rotation-moving target detection, AR-MTD)算法[12-13]。这些算法只能校正由目标匀速运动造成的一阶距离徙动，不适用于高速机动目标的检测。针对高速机动目标，学者们在RFT算法的基础上提出了广义RFT(generalized RFT, GRFT)算法[14-16]，此类算法通过对目标运动参数的搜索完成了对目标信号的参数估计和积累，积累增益高，能够对多目标进行有效检测，但由于要进行参数的多维搜索，运算量巨大，且会产生盲速旁瓣效应；在KT算法的基础上，文献[17-19]分别提出了KT-Lv分布(KT-Lv's distribution, KT-LVD)、KT-广义去调频处理(KT-generalized dechirp-process, KT-GDP)和二阶KT(second-order KT, SKT)算法，此类算法通过对慢时间进行变换实现频率和慢时间的解耦，进而完成对多目标的补偿和积累，但存在速度模糊问题，需要确定折叠因子，运算量大。针对以上问题，李小龙等[20]提出了迭代相邻互相关函数(adjacent cross correlation function, ACCF)算法，无须进行参数搜索，仅通过目标回波间的互相关操作处理就能有效校正距离徙动，同时对多普勒徙动降阶，进而完成目标的能量积累，但该算法属于非线性运算，在低信噪比条件下检测性能较差，且针对多目标检测时，存在信号交叉项的影响，还易将多目标能量压缩到同一距离单元，检测能力较差。

为解决上述问题，本文提出了一种基于改进正

收稿日期：2022-07-05；录用日期：2022-09-02；网络出版时间：2022-09-30 10:52
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220927.1152.004
*通信作者. E-mail：ezxk@sina.com

引用格式：王阳，张小宽，马前阔，等. 基于改进OMP算法的多目标高速机动检测方法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2265-2271. WANG Y，ZHANG X K，MA Q K，et al. Multiple high-speed maneuvering target detection method based on improved orthogonal matching pursuit algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2265-2271 (in Chinese).

交匹配追踪 (orthogonal matching pursuit, OMP) 算法的多目标高速机动检测方法。首先,利用过完备字典的广义正交性,直接估计出目标的运动参数,然后,构建补偿函数,对距离徙动和多普勒徙动进行校正,最后,通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)进行相参积累,实现了对多目标高速机动回波信号的有效检测。仿真实验验证了本文方法的有效性与可靠性。

1 信号模型

假设雷达发射信号为线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信号,信号的表达形式为

$$S_t\left(\hat{t},t_{\mathrm{m}}\right)=\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_{\mathrm{P}}}\right)\exp\left(\mathrm{j}\pi k\hat{t}^2\right)\exp(\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{c}}t) \tag{1}$$

式中:$\hat{t}$为快时间;$t_{\mathrm{m}}=mT_{\mathrm{r}}(m=0,1,\cdots,N-1)$为慢时间,$T_{\mathrm{r}}$为脉冲重复时间,$N$为脉冲个数;rect(·)为门函数;$T_{\mathrm{P}}$为脉冲宽度;$k$为调频率;$f_{\mathrm{c}}$为载频;$t=\hat{t}+t_{\mathrm{m}}$为全时间。

假设雷达探测I个目标,雷达接收到的目标基带回波信号为

$$\begin{aligned}S\left(\hat{t},t_{\mathrm{m}}\right)=&\sum_{i=1}^{I}\sigma_i\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}-2R_i(t_{\mathrm{m}})/c}{T_{\mathrm{P}}}\right)\cdot\\&\exp\left(\mathrm{j}\pi k\left(\hat{t}-2R_i(t_{\mathrm{m}})/c\right)^2\right)\exp\left(-\mathrm{j}4\pi f_{\mathrm{c}}R_i(t_{\mathrm{m}})/c\right)\end{aligned} \tag{2}$$

式中:σ_i为第i个目标的散射强度;c为电磁波传播速度;$R_i(t_{\mathrm{m}})$为第i个目标与雷达间在t_{m}时刻的距离,可简化表示为

$$R_i(t_{\mathrm{m}})=R_i-v_it_{\mathrm{m}}-\frac{1}{2}a_it_{\mathrm{m}}^2 \tag{3}$$

其中:R_i为第i个目标与雷达的初始距离;v_i为第i个目标的径向速度;a_i为第i个目标的径向加速度。

对回波信号进行脉冲压缩,可得

$$\begin{aligned}S\left(\hat{t},t_{\mathrm{m}}\right)=&\sum_{i=1}^{I}A_{1i}\mathrm{sinc}\left(\exp\left(-\mathrm{j}4\pi f_{\mathrm{c}}R_i(t_{\mathrm{m}})/c\right)\cdot\right.\\&\left.\left(\hat{t}-\frac{2}{c}\left(R_i-v_it_{\mathrm{m}}-\frac{1}{2}a_it_{\mathrm{m}}^2\right)\right)\right)\exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi R_i}{\lambda}\right)\cdot\\&\exp\left(\mathrm{j}\frac{4\pi v_it_{\mathrm{m}}}{\lambda}\right)\exp\left(\mathrm{j}\frac{2\pi a_it_{\mathrm{m}}^2}{\lambda}\right)\end{aligned} \tag{4}$$

式中:$A_{1i}=\sigma_i\sqrt{T_{\mathrm{P}}\exp\left(-\mathrm{j}4\pi f_{\mathrm{c}}R_i(t_{\mathrm{m}})/c\right)}$为第$i$个目标脉冲压缩后的回波幅度;$\lambda$为波长。

从式 (4) 中可以看出,慢时间的变化会影响回波的包络位置,当变化程度超过距离分辨率时,会导致距离徙动的产生,使回波能量发散到不同距离单元。

从式 (4) 可以得到,第i个目标的瞬时多普勒频率为

$$f_{\mathrm{d}}(t_{\mathrm{m}})=f_{\mathrm{d}}+\frac{2a_i}{\lambda}t_{\mathrm{m}} \tag{5}$$

式中:$f_{\mathrm{d}}=2v_i/\lambda$为多普勒频率。

从式 (5) 中可以看出,多普勒频率也随着慢时间时变。多普勒分辨率$\rho_{\mathrm{d}}=1/T$,T为脉冲积累时间,当多普勒频率变化程度超过多普勒分辨率时,会导致多普勒徙动的产生。距离徙动和多普勒徙动的产生,导致能量无法集中在同一距离单元,影响相参积累及后续的目标检测。

2 基于改进 OMP 算法的多目标检测

2.1 基于稀疏信号分析的运动参数提取

雷达回波信号中只存在有限个目标,具有稀疏性。因此,可通过稀疏方法解决高速机动目标运动参数提取问题。

对式 (4) 沿$\hat{t}$方向进行傅里叶变换,可得

$$\begin{aligned}S(f,t_{\mathrm{m}})=&\sum_{i=1}^{I}A_{2i}\mathrm{rect}\left(\frac{f}{\exp\left(-\mathrm{j}4\pi f_{\mathrm{c}}R_i(t_{\mathrm{m}})/c\right)}\right)\cdot\\&\exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi R_i}{c}(f+f_{\mathrm{c}})\right)\exp\left(\mathrm{j}\frac{4\pi v_it_{\mathrm{m}}}{c}(f+f_{\mathrm{c}})\right)\cdot\\&\exp\left(\mathrm{j}\frac{2\pi a_it_{\mathrm{m}}^2}{c}(f+f_{\mathrm{c}})\right)\end{aligned} \tag{6}$$

式中:A_{2i}为第i个目标 FFT 后的回波幅度;f为频率。

从式 (6) 可以看出,只有第 2 个指数项和第 3 个指数项会造成目标回波的徙动。因此,可以构造一个包含目标速度和加速度信息的运动参数字典$\boldsymbol{\psi}$。

$$\varphi_i=\exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi v_it_{\mathrm{m}}}{c}(f+f_{\mathrm{c}})\right)\exp\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi a_it_{\mathrm{m}}^2}{c}(f+f_{\mathrm{c}})\right) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\psi}=\left[\varphi_1,\cdots,\varphi_M\right] \tag{8}$$

由此可得,目标回波信号的压缩感知形式为

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{\psi\theta} \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{S}$为目标回波信号;$\boldsymbol{\theta}$为稀疏系数向量。

由此,高速机动目标运动参数的求解可等价为l_0范数最小化问题:

$$\begin{cases}\bar{\boldsymbol{\theta}}=\arg\min\|\boldsymbol{\theta}\|_0\\ \quad\text{s.t. }\|\boldsymbol{S}-\boldsymbol{\psi\theta}\|\leqslant\varepsilon\end{cases} \tag{10}$$

式中:$\bar{\boldsymbol{\theta}}$为估计的稀疏向量;$\|\cdot\|_k$为$l_k$阶范数;$\varepsilon$为误差范围。

l_0范数最小化问题是 NP-hard 问题,即多项式复杂程度的非确定性问题,一般可通过 OMP 算法对该问题进行求解。但 OMP 算法运算时间集中在搜索其输出矩阵的精确解,而目标运动参数提取仅

需几个特定的数据, 造成了运算资源的浪费; 另外, 更新残差过程中涉及求逆, 运算时间长。针对以上问题, 本文对 OMP 算法加以改进。

在对式 (9) 的求解中, 过完备字典$\boldsymbol{\psi}$的内积小于10^{-2}, 可近似为正交矩阵, 即过完备字典具有广义正交性。基于该性质, 可将原问题抽象为: 已知字典$\boldsymbol{\psi}$、信号$\boldsymbol{S}$和终止误差ε, 其满足$(\boldsymbol{\psi}^*)'\boldsymbol{\psi}\approx\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{\psi X}=\boldsymbol{S}$。其中, $\boldsymbol{E}$为单位矩阵, $\boldsymbol{X}$为要求解的向量, "$*$" 表示取共轭。

此时, 可通过改进后的 OMP 算法对该问题进行求解, 改进算法步骤如下:

步骤 1　字典$\boldsymbol{\psi}$、信号$\boldsymbol{S}$和终止误差ε。

步骤 2　正交匹配。由$(\boldsymbol{\psi}^*)'\boldsymbol{\psi}\approx\boldsymbol{E}$可得, $(\boldsymbol{\psi}^*)'\boldsymbol{\psi X}=(\boldsymbol{\psi}^*)'\boldsymbol{S}$, 即$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{\psi}^*)'\boldsymbol{S}$。由此, 令$\boldsymbol{\theta}_t=(\boldsymbol{\psi}^*)'\boldsymbol{S}$。

步骤 3　计算输出的稀疏矩阵$\hat{\boldsymbol{X}}$, $\hat{\boldsymbol{X}}=\text{find}(|\boldsymbol{\theta}_t|>\varepsilon)$。

步骤 4　输出稀疏矩阵$\hat{\boldsymbol{X}}$。

至此, 通过输出的$\hat{\boldsymbol{X}}$可以估计出多个目标的速度参数和加速度参数, 实现运动参数估计。

2.2　补偿函数构建

为表述方便, 以第i个目标为例, 在得到第i个目标估计出的速度$\hat{v}$和加速度$\hat{a}$后, 可以构建如下补偿函数:

$$H_1=\exp\left(-\text{j}\frac{4\pi\hat{v}t_{\text{m}}}{c}(f+f_{\text{c}})\right) \tag{11}$$

$$H_2=\exp\left(-\text{j}\frac{2\pi\hat{a}t_{\text{m}}^2}{c}(f+f_{\text{c}})\right) \tag{12}$$

将式 (11)、式 (12) 与式 (6) 相乘, 可得

$$\begin{aligned}S(f,t_{\text{m}})=&\sum_{i=1}^{I}A_{2i}\text{rect}\left(\frac{f}{\exp\left(-\text{j}4\pi f_{\text{c}}R_i(t_{\text{m}})/c\right)}\right)\cdot\\&\exp\left(-\text{j}\frac{4\pi R_i}{c}(f+f_{\text{c}})\right)\exp\left(\text{j}\frac{4\pi(v_i-\hat{v})t_{\text{m}}}{c}(f+f_{\text{c}})\right)\cdot\\&\exp\left(\text{j}\frac{2\pi(a_i-\hat{a})t_{\text{m}}^2}{c}(f+f_{\text{c}})\right)\end{aligned} \tag{13}$$

对式 (13) 沿$\hat{t}$方向做 IFFT, 可得

$$\begin{aligned}S(\hat{t},t_{\text{m}})=&\sum_{i=1}^{I}A_{3i}\text{sinc}\left(\exp\left(-\text{j}4\pi f_{\text{c}}R_i(t_{\text{m}})/c\right)\cdot\right.\\&\left.\left(\hat{t}-\frac{2}{c}\left(R_i-(v_i-\hat{v})t_{\text{m}}-\frac{1}{2}(a_i-\hat{a})t_{\text{m}}^2\right)\right)\right)\cdot\\&\exp\left(-\text{j}\frac{4\pi R_i}{\lambda}\right)\exp\left(\text{j}\frac{4\pi(v_i-\hat{v})t_{\text{m}}}{\lambda}\right)\cdot\\&\exp\left(\text{j}\frac{2\pi(a_i-\hat{a})t_{\text{m}}^2}{\lambda}\right)\end{aligned} \tag{14}$$

式中: A_{3i}为第i个目标 IFFT 后的回波幅度。

当估计出的速度$\hat{v}$、加速度$\hat{a}$与目标真实速度、加速度相等时, 目标运动参数引起的徙动可被校正。

2.3　相参积累实现

对式 (14) 沿t_{m}方向做 FFT, 可得

$$\begin{aligned}S(f_{t_{\text{m}}},\hat{t})=&\sum_{i=1}^{I}A_{4i}\text{sinc}\left(\exp\left(-\text{j}4\pi f_{\text{c}}R_i(t_{\text{m}})/c\right)\cdot\right.\\&\left.\left(\hat{t}-\frac{2R_i}{c}\right)\right)\text{sinc}\left(NT_{\text{r}}f_{t_{\text{m}}}\right)\end{aligned} \tag{15}$$

式中: A_{4i}为第i个目标 FFT 后的回波幅度。

从式 (14) 可以看出, 通过沿t_{m}方向做 FFT 可将目标回波能量有效积累成一个尖峰, 并且根据峰值位置, 可以获得对第i个目标的径向距离估计值$\hat{R}_0$。在实现相参积累后, 对其进行恒虚警检测, 完成对多目标高速机动的检测。

本文提出的基于改进 OMP 算法的多目标检测方法流程如图 1 所示。

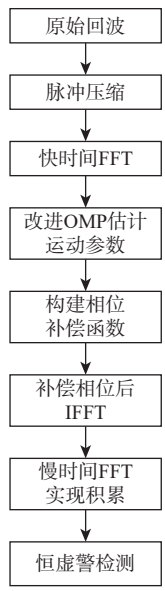


图 1　基于改进 OMP 算法的多目标检测流程

Fig. 1　Multi target detection flow based on improved OMP algorithm

3　仿真实验

3.1　算法仿真分析

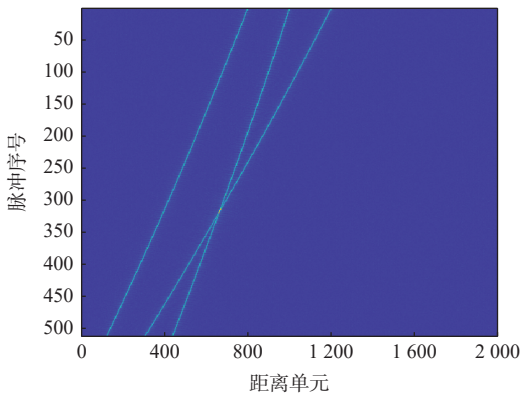
设置仿真实验验证改进算法的多目标检测性能。雷达参数设置如下: 信号载频为 1 GHz, 带宽为 15 MHz, 采样率为 60 MHz, 脉冲宽度为 20 μs, 脉冲重复频率为 200 Hz, 积累脉冲数为 512, 信噪比为 5 dB。目标运动参数设置如表 1 所示。

仿真结果如图 2 所示。其中, 图 2(a) 为信号回波脉冲压缩后的结果, 可以看出, 3 个目标都发生了徙动, 能量发散到了不同的距离单元。图 2(b) 为对脉冲压缩后的信号在慢时间维进行 FFT 得到的结果, 可以看出, 由于徙动的存在, 常规的检测方法已不适用于高速机动目标的检测。

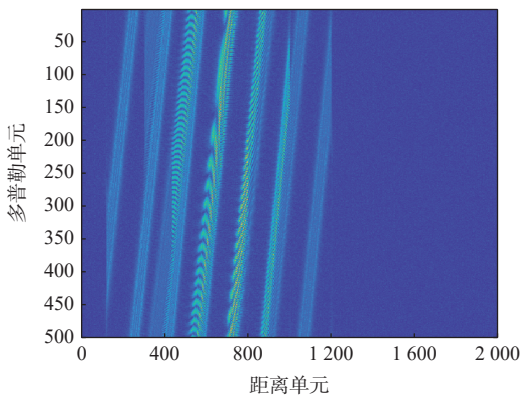
表 1 目标的运动参数

Table 1 Motion parameters of target

目标	初始径向距离/km	径向速度/(m·s^{-1})	径向加速度/(m·s^{-2})
A	149.5	600	50
B	150	500	40
C	150.5	800	80



(a) 回波脉冲压缩结果

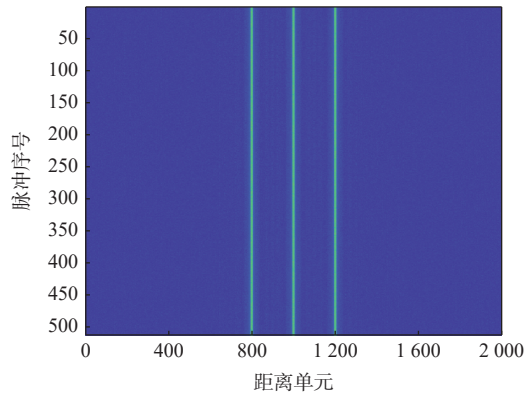


(b) 慢时间FFT结果

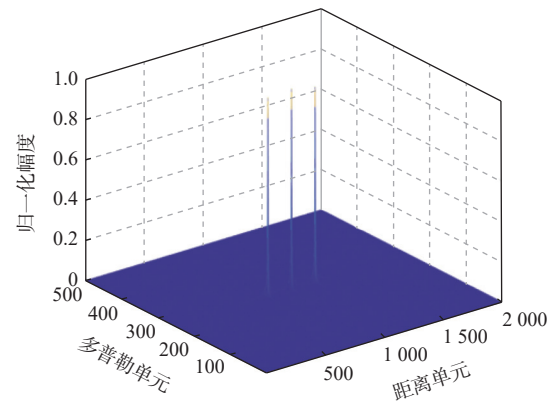
图 2 回波直接相参积累结果

Fig. 2 Results of echo direct coherent accumulation

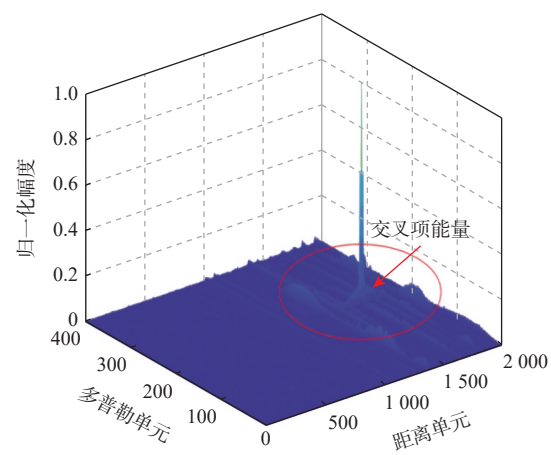
通过仿真实验分析本文改进算法、迭代 ACCF 算法和 GRFT 算法的多目标检测能力，得到的仿真结果如图 3 所示。其中，图 3(a) 为本文算法补偿回波信号的结果，可以看出，通过构建补偿函数，目标的距离徙动和多普勒徙动均可被有效补偿。图 3(b) 为本文算法相参积累结果，可以看出，3 个目标都能够被有效检测，在距离-多普勒域形成了 3 个不同的峰值，能量得到了有效积累。图 3(c) 为迭代 ACCF 算法相参积累结果，可以看出，3 个目标的能量被积累在同一个距离单元难以分辨，且存在交叉项能量残留，不适用于多目标场景。图 3(d) 为 GRFT 算法相参积累结果，可以看出，3 个目标能够被检测出来，但是产生了盲速旁瓣，会造成严重的虚警。因此，相较于迭代 ACCF 算法和 GRFT 算法，本文改进算法更适用于多目标检测。



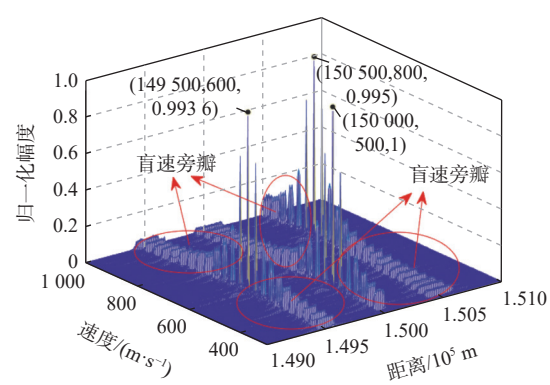
(a) 本文改进算法对回波补偿后结果



(b) 本文改进算法相参积累结果



(c) 迭代ACCF算法相参积累结果



(d) GRFT算法相参积累结果

图 3 不同算法检测多目标结果

Fig. 3 Results of detecting multi-target using different algorithms

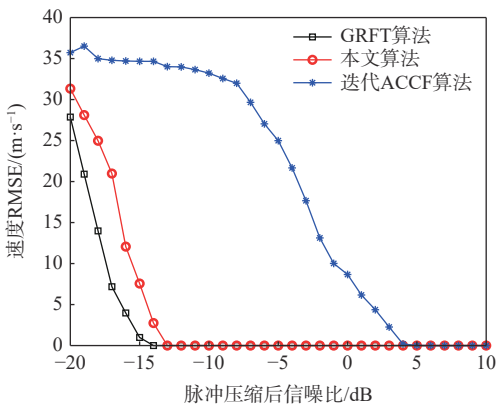
3.2　运动参数均方根误差比较

为比较本文改进算法、迭代 ACCF 算法及 GRFT 算法在不同信噪比条件下的运动参数估计性能, 设置信噪比的变化范围为−20～10 dB, 蒙特卡罗仿真次数为 200。利用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 比较不同算法的参数估计精度, 其定义为

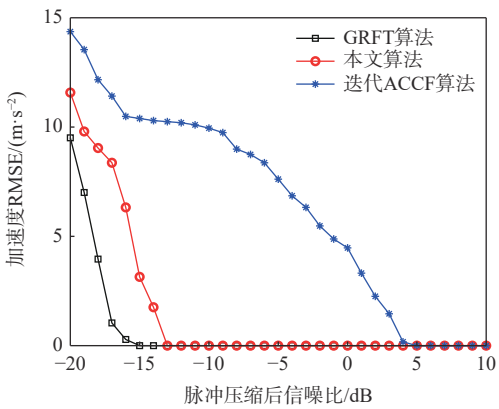
$$e_{\mathrm{RMSE}}(y)=\sqrt{\left[\sum_{n=1}^{M}(y_n-\hat{y}_n)^2\right]\Big/M} \tag{16}$$

式中: y_n为第n次实验设定的目标运动参数; $\hat{y}_n$为第n次实验估计出的目标运动参数; M为蒙特卡罗实验次数。

得到的仿真结果如图 4 所示。可以看出, 3 种算法都能够在信噪比较高时准确估计目标运动参数, 且 RMSE 随信噪比升高而降低, 但在信噪比较低时, 本文算法和 GRFT 算法目标运动参数估计性能要明显优于迭代 ACCF 算法。



(a) 速度RMSE比较



(b) 加速度RMSE比较

图 4　运动参数 RMSE 比较

Fig. 4　RMSE comparison of motion parameter

3.3　计算复杂度分析

本节分析算法运动参数估计过程中的计算复杂度, 不考虑其他操作造成的影响。令N、N_d、N_v和N_a分别表示脉冲个数、距离单元数、速度搜索数和加速度搜索数。本文改进算法构建了一个包含目标速度信息和加速度信息的二维字典, 因此, 算法的计算复杂度为$O(NN_vN_a)$。GRFT 算法由于要对目标运动参数进行三维搜索, 其计算复杂度为$O(NN_dN_vN_a)$。迭代 ACCF 算法由于无须进行参数搜索, 其计算复杂度为$O\left(N\log_2N_d\right)$。

为便于比较, 令$N=N_d=N_v=N_a$, 表 2 比较了不同算法的计算复杂度, 图 5 显示了脉冲个数和计算复杂度的关系。从图 5 可以看出, 由于 GRFT 算法需要进行三维搜索, 其计算复杂度最高; 迭代 ACCF 算法无须进行参数搜索, 因此其计算复杂度最低; 本文改进算法计算复杂度介于两者之间, 但检测性能要明显强于迭代 ACCF 算法, 其在计算复杂度和检测性能之间达到了平衡。

表 2　不同算法的计算复杂度比较

Table 2　Computational complexity comparisons between different algorithms

算法	计算复杂度	搜索维度
GRFT算法	$O(NN_dN_vN_a)$	三维搜索
本文算法	$O(NN_vN_a)$	二维搜索
迭代ACCF算法	$O(N\log_2N_d)$	无须搜索

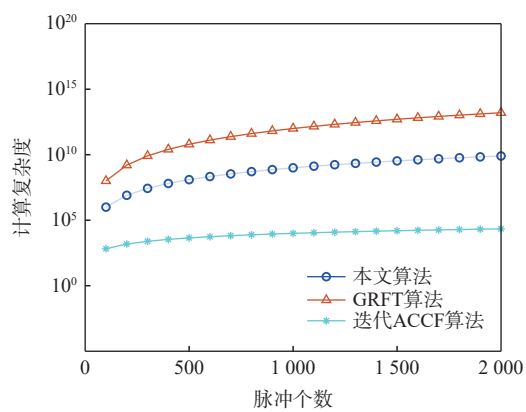


图 5　计算复杂度比较

Fig. 5　Comparison of computational complexity

3.4　检测性能比较

本节通过 200 次蒙特卡罗实验仿真对比了 GRFT 算法、时间翻转变换-SKT-LVD(time reversing transform-SKT-LVD, TRT-SKT-LVD)、KT-GDP、迭代 ACCF 算法、MTD 和本文改进算法的检测性能。设置恒虚警概率为 10^{-6}, 信噪比的变化范围为−20～15 dB, 得到的仿真结果如图 6 所示。可以看出, 由于 GRFT 算法通过多维参数搜索获得目标运动参数, 在高斯白噪声背景下可被视为最优滤波器, 其检测性能最优。MTD 算法无法校正距离徙动和多普勒徙动, 其检测性能最差。迭代 ACCF 算法和 TRT-SKT-LVD 算法由于是非线性运算, 会造

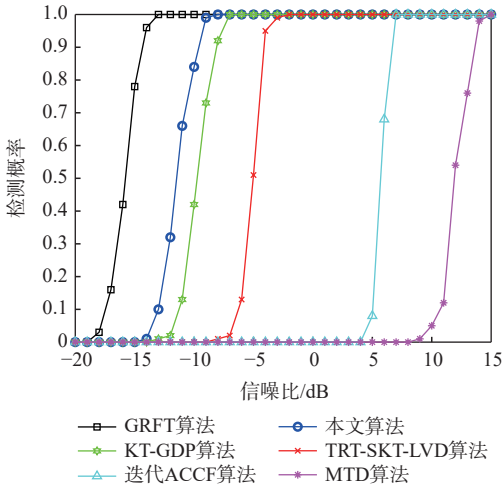


图6 不同算法检测性能比较

Fig. 6 Comparison of detection performance of different algorithms

成信噪比的损失，在低信噪比下检测性能较差。而本文改进算法和KT-GDP算法不涉及非线性运算，检测性能优于迭代ACCF算法、TRT-SKT-LVD算法。因为本文改进后的OMP算法抗噪声性能更优，所以在低信噪比下检测性能要更优于KT-GDP算法。

4 结 论

针对多高速机动目标检测，本文提出了一种基于改进OMP算法的多高速机动目标检测方法。仿真结果表明，所提算法能够准确估计多目标运动参数，有效校正距离徙动和多普勒徙动，实现对多目标的检测。并具有以下优点：

1）能够避免盲速旁瓣，不存在信号交叉项影响。

2）参数估计精度高并且在低SNR下有较强鲁棒性。

3）计算复杂度较低。

参考文献（References）

[1] ZHAO L X, TAO H, CHEN W J, et al. Maneuvering target detection based on subspace subaperture joint coherent integration[J]. Remote Sensing, 2021, 13(10): 1948.

[2] YANG J, LIU X X, YANG B, et al. Detection and speed estimation of moving target based on phase compensation and coherent accumulation using fractional Fourier transform[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1410.

[3] YU W C, SU W M, GU H, et al. Weak maneuvering target detection in random pulse repetition interval radar[J]. Signal Processing, 2020, 171: 107520.

[4] LIN L J, SUN G H, CHENG Z Y, et al. Long-time coherent integration for maneuvering target detection based on ITRT-MRFT[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7): 3718-3731.

[5] ZUO L, WANG J, WANG J P, et al. UAV detection via long-time coherent integration for passive bistaticradar[J]. Digital Signal Processing, 2021, 112: 102997.

[6] JIN K, LAI T, WANG Y B, et al. Radar coherent detection for Doppler-ambiguous maneuvering target based on product scaled periodic Lv's distribution[J]. Signal Processing, 2020, 174: 107617.

[7] SUN Z, LI X L, CUI G L, et al. Coherent detection method for maneuvering target with complex motions[J]. Journal of Engineering, 2019, 2019(21): 8032-8036.

[8] LI X L, CUI G L, YI W, et al. Sequence-reversing transform-based coherent integration for high-speed target detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(3): 1573-1580.

[9] XU J, YU J, PENG Y N, et al. Radon-Fourier transform for radar target detection. I: Generalized Doppler filter bank[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 1186-1202.

[10] XU J, YU J, PENG Y N, et al. Space-time Radon-Fourier transform and applications in radar target detection[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 6(9): 846-857.

[11] ZHANG S S, ZENG T, LONG T, et al. Dim target detection based on keystone transform[C]//Proceedings of the IEEE International Radar Conference. Piscataway: IEEE Press, 2005: 889-894.

[12] RAO X, TAO H H, SU J, et al. Axis rotation MTD algorithm for weak target detection[J]. Digital Signal Processing, 2014, 26: 81-86.

[13] RAO X, ZHONG T T, TAO H H, et al. Improved axis rotation MTD algorithm and its analysis[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2019, 30(2): 885-902.

[14] XU J, XIA X G, PENG S B, et al. Radar maneuvering target motion estimation based on generalized Radon-Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(12): 6190-6201.

[15] XIA W J, ZHOU Y, JIN X, et al. A fast algorithm of generalized Radon-Fourier transform for weak maneuvering target detection[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2016, 2016: 4315616.

[16] MA B, ZHANG S S, JIA W K, et al. Fast implementation of generalized Radon-Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(6): 3758-3767.

[17] LI X L, CUI G L, YI W, et al. Manoeuvring target detection based on keystone transform and Lv's distribution[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(7): 1234-1242.

[18] ZHENG J B, ZHU K L, NIU Z Y, et al. Generalized dechirp-keystone transform for radar high-speed maneuvering target detection and localization[J]. Remote Sensing, 2021, 13(17): 3367.

[19] WAN J, TAN X H, CHEN Z Y, et al. Refocusing of ground moving targets with Doppler ambiguity using keystone transform and modified second-order keystone transform for synthetic aperture radar[J]. Remote Sensing, 2021, 13(2): 177.

[20] LI X L, CUI G L, KONG L J, et al. Fast non-searching method for maneuvering target detection and motion parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(9): 2232-2244.

Multiple high-speed maneuvering target detection method based on improved orthogonal matching pursuit algorithm

WANG Yang[1]，ZHANG Xiaokuan[2,*]，MA Qiankuo[1]，ZHENG Shuyu[3]，ZONG Binfeng[2]，XU Jiahua[1]

(1. Graduate School，Air Force Engineering University，Xi'an 710051，China；
2. Air and Missile Defense College，Air Force Engineering University，Xi'an 710051，China；
3. National Key Laboratory of Science and Technology on ATR，National University of Defense Technology，Changsha 410073，China)

Abstract：An improved orthogonal matching pursuit (OMP) algorithm is proposed for the detection of multiple high-speed maneuvering targets. Based on the maneuvering characteristics of a high-speed target, a signal model is established at first. Then, an improved OMP algorithm is used to estimate motion parameters. In addition, a phase compensation function is constructed to correct for the range migration and Doppler migration. Finally, coherent integration can be achieved by the fast Fourier transform (FFT). The suggested technique may successfully avoid the effects of the signal cross term and blind speed side lobe in multi-target high-speed maneuver identification settings.Meanwhile, it has the advantages of high accuracy of parameter estimation and strong anti-noise robustness. The suggested algorithm's efficacy and dependability are confirmed by the simulation results.

Keywords：high-speed maneuvering target; improved orthogonal matching pursuit algorithm; range migration; Doppler migration; coherent integration

Received：2022-07-05；**Accepted**：2022-09-02；**Published Online**：2022-09-30 10：52
URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220927.1152.004

* **Corresponding author**. E-mail：ezxk@sina.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0587

高超目标强跟踪CKF自适应交互多模型跟踪算法

罗亚伦[1]，廖育荣[2,*]，李兆铭[2]，倪淑燕[2]

(1. 航天工程大学 研究生院，北京 101416；2. 航天工程大学 电子与光学工程系，北京 101416)

摘 要：高超目标运动状态复杂且具有高机动性，传统的交互多模型(IMM)跟踪精度低、收敛速度慢，基于此，提出了一种基于多重渐消因子的强跟踪容积卡尔曼滤波(CKF)自适应交互多模型(AIMM)跟踪算法。以IMM-CKF算法为基础，通过对CKF算法的结构进行分析，在时间更新和量测更新的协方差矩阵中引入强跟踪算法的渐消因子，在线实时调整滤波增益，减小模型不匹配导致的滤波精度下降；在IMM的模型集中选择Singer模型、“当前”统计模型和Jerk模型，并针对模型扩维导致CKF算法中无法Cholesky分解的问题引入奇异值分解(SVD)算法；对IMM算法中马尔可夫矩阵提出自适应算法，通过模型似然函数值对转移概率进行自适应修正，增强匹配模型所占比例。仿真结果表明：所提算法跟踪收敛速度提高了约37.5%，跟踪精度提高了16.51%。

关 键 词：高超目标；容积卡尔曼滤波；强跟踪滤波；渐消因子；自适应交互多模型

中图分类号：V249.4

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2272-12

高超声速滑翔目标(hypersonic glide target, HGT)的飞行马赫数大于5，具有飞行速度快、突防能力强、机动性强、精度高的特点，其采用大升阻比气动外形，轨迹复杂且多变，难以达到有效的防御。因此，对高超声速助推滑翔飞行器进行跟踪定位一直是目标跟踪研究领域的难点和热点问题。

随着对机动目标特性的研究不断深入，国内外专家学者提出了多种单模型拟合机动目标。目前，常用的模型有常速度(constant velocity, CV)模型和常加速度(constant acceleration, CA)模型[1]；Singer模型也称为时间相关模型，最早由Singer于1970年提出[2]；中国的周宏仁教授在20世纪80年代提出了“当前”统计(“current” statistical, CS)模型[3]；1997年，印度学者Mehrotra和Mahapatra借鉴Singer模型提出了Jerk模型[4]，对传统加速度进行扩维，提出了加加速度的概念。还有一些专家学者只对模型进行了改进，但由于高超目标等具有强机动性，单一模型难以匹配其运动状态，当运动状态差距较大时，会导致滤波发散，跟踪失败[5]。

针对上述问题，1965年，Magill提出了多模型(multiple model, MM)[6]算法来改进单模型的局限性。在多模型算法的基础上，Bar-shalom和Blom等利用伪贝叶斯算法提出了交互多模型(interactive multiple model, IMM)算法，利用马尔可夫转换矩阵来克服模型固定导致的滤波发散问题[7]，其跟踪匀速运动过程，噪声显著降低，跟踪精度高，收敛速度快[8]。IMM算法自提出以来，学者们将其应用到目标跟踪领域，并进行了大量研究。文献[9]针对高超声速滑翔目标的跟踪问题，提出了一种Singer模型机动频率自适应算法，利用滤波信息计算调节Singer模型中的机动频率，对比IMM-Singer算法跟踪精度高，计算量小。由于高超目标雷达量测模型为非线性，文献[10]提出了利用强跟踪无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)与IMM算法结

收稿日期：2022-07-05；**录用日期**：2022-09-02；**网络出版时间**：2022-09-28 10:45
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220927.1128.002
基金项目：国家自然科学基金(61805283)
*通信作者. E-mail：1151943632@qq.com

引用格式：罗亚伦，廖育荣，李兆铭，等. 高超目标强跟踪CKF自适应交互多模型跟踪算法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2272-2283. LUO Y L，LIAO Y R，LI Z M，et al. Strong tracking CKF adaptive interactive multiple model tracking algorithm based on hypersonic target[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2272-2283 (in Chinese).

合, 实现对高超目标的跟踪滤波。针对模型交互问题, 文献 [11] 提出了一种改进的马尔可夫参数自适应交互多模型(adaptive interactive multiple model, AIMM)算法, 其跟踪精度有所提高, 但仅适用于有先验信息的慢机动目标。在此基础上, 文献 [12] 提出了一种自适应变结构交互多模型(adaptive variable structure interactive multiple model, AVSIMM), 提高了对高超目标的跟踪精度。

综上, 对于高超目标等强机动目标 IMM 跟踪算法, 主要存在 3 个问题: ①模型选择问题, 常规 CV、CA、CS 模型机动性弱, 无法匹配高超目标运动状态; ②滤波算法, 高超目标测量大多为非线性测量方程, 不适用于 IMM 模型中的线性卡尔曼滤波, 同时需要提高滤波算法精度; ③模型交互问题, 常规 IMM 算法马尔可夫矩阵固定, 模型概率交互自适应性弱, 匹配精度较低。

在以上算法研究的基础上, 本文分析了容积卡尔曼滤波(cubature Kalman filter, CKF)结构, 提出引入多重渐消因子的强跟踪 CKF 算法, 提高滤波精度; 针对 CKF 算法中由于模型维数不同导致 Cholesky 分解失败的问题, 提出改进的基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)[13] 的强跟踪 CKF 算法; 对标准马尔可夫矩阵进行改进, 提出 AIMM 算法, 提高算法自适应性。仿真结果表明, 相比于单模型算法和标准 IMM 算法, 本文算法能够明显提高高超目标跟踪精度和收敛速度。

1　高超目标运动特性建模

1.1　高超目标运动方程

如图 1 所示, 在建立高超目标运动方程的过程中, 需要考虑以下坐标系:

1) 地心地固(Earth centered Earth fixed, ECEF)坐标系 O-XYZ。原点 O 位于地心, X 在赤道平面内指向零度经线, Z 轴指向北极, Y 轴在赤道平面内与 X、Z 轴垂直。O-XYZ 三轴上的单位矢量分别表示为 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$。

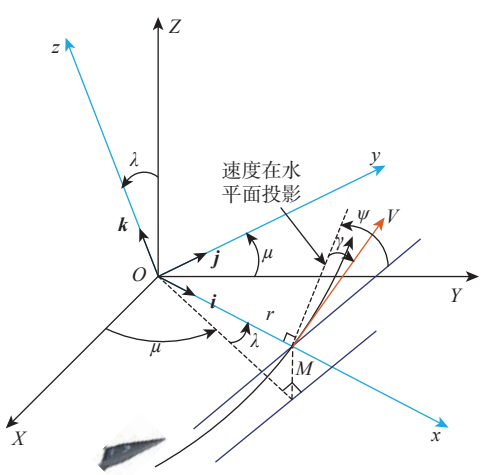


图 1　坐标系关系

Fig. 1　Coordinate system relationship

2) 经纬高(longitude latitude altitude, LLA)坐标系。给出目标所处位置的经度 μ、纬度 λ 和高度 h 即可知道目标在地球中的位置。

3) 飞行器位置坐标系 O-xyz。原点 O 位于地心, x 轴为地心到高超目标连接线, 向上为正, y 轴与 x 轴垂直, 并在赤道平面内, 以正东方向为正, z 轴由其他两轴和右手法则确定。O-xyz 坐标系可由 O-XYZ 坐标系结合高超目标位置所在经度、纬度得到。

4) 东北天(east north up, ENU)坐标系。即雷达坐标系, 以雷达所在位置 R 为坐标系原点, E、N 和 U 分别指向相互垂直的东向、北向和天向, 可用于表示高超目标的方位角 α 和俯仰角 β。

将高超目标所受飞行气动力、重力等通过飞行航向角、气动角、姿态角等重要角度转换到同一坐标系中, 得到高超目标六自由度运动方程, 由于方程结构复杂, 在针对场景进行分析时简化, 得到如下目标弹道模型:

$$\begin{cases} \dot{r} = V\sin\gamma \\ \dot{\mu} = \dfrac{V\cos\gamma\cos\xi}{r\cos\lambda} \\ \dot{\lambda} = \dfrac{V\cos\gamma\sin\xi}{r} \\ \dot{V} = -\dfrac{D}{m} - g\sin\gamma + w_e^2 r\cos\lambda(\sin\gamma\cos\lambda - \\ \qquad \cos\gamma\sin\lambda\sin\xi) \\ \dot{\gamma} = \dfrac{L\cos\sigma}{mV} + \left(\dfrac{V}{r} - \dfrac{g}{V}\right)\cos\gamma + 2w_e\cos\lambda\cos\xi + \\ \qquad \dfrac{w_e^2 r}{V}\cos\lambda(\cos\gamma\cos\lambda + \sin\gamma\sin\lambda\sin\xi) \\ \dot{\xi} = \dfrac{L\sin\sigma}{mV\cos\gamma} - \dfrac{V}{r}\cos\gamma\cos\xi\tan\lambda + \\ \qquad 2w_e(\tan\gamma\cos\lambda\sin\xi - \sin\lambda) - \\ \qquad \dfrac{w_e^2 r}{V\cos\gamma}\sin\lambda\cos\lambda\cos\xi \end{cases} \tag{1}$$

式中: m 为目标飞行器的质量; r 为目标飞行器质心与地心间距离, μ 为地心经度, λ 为地心纬度, 这 3 个参数描述了目标所在位置; V 为目标速率, γ 为弹道倾角, ξ 为弹道偏角, 这 3 个参数描述了目标的速度; D 和 L 分别为气动阻力和气动升力; σ 为倾斜角; w_e 为地球自转角速度, $w_e = 7.292\,115\,0\times10^{-5}$ rad/s; g 为当地重力加速度。

在高超目标主要运动过程中, 复杂空气动力是考虑的主要因素, 常见的飞行气动升力和阻力 L、D 表示如下:

$$\begin{cases} L = C_L qS \\ D = C_D qS \\ q = 0.5\rho V^2 \end{cases} \tag{2}$$

式中：C_L、C_D分别为升力系数、阻力系数，这2个系数通常与目标的飞行马赫数和迎角有关；q为目标的飞行动压；S为高超目标气动参考面积；ρ为飞行高度处的空气密度，采用大气指数模型描述为

$$\rho = \rho_0 \mathrm{e}^{-\frac{h}{\rho_\beta}} \tag{3}$$

其中：$\rho_0 = 1.225\ \mathrm{kg/m^3}$为标准海平面大气密度；$\rho_\beta = 6\,700\ \mathrm{m}$[14]。

本文以HTV-2为研究对象，其气动参数与CAV-H相似，因此，引用CAV-H的气动参数[15]，采用最小二乘法进行模型参数辨识：

$$\begin{cases} C_D = C_{D0} + C_{D1}\alpha^2 + C_{D2}\exp(C_{D3}Ma) \\ C_L = C_{L0} + C_{L1}\alpha + C_{L2}\exp(C_{L3}Ma) \end{cases} \tag{4}$$

式中：Ma为飞行马赫数，为目标飞行速度与声速的比值；其他系数取值为

$$\begin{cases} C_{D0} = 0.024 \\ C_{D1} = 7.24\times10^{-4} \\ C_{D2} = 0.406 \\ C_{D3} = -0.323 \\ C_{L0} = -0.231\,7 \\ C_{L1} = 0.051\,3 \\ C_{L2} = 0.294\,5 \\ C_{L3} = -0.102\,8 \end{cases} \tag{5}$$

1.2 测量模型

单站雷达测量包括方位角α、俯仰角β和相对距离r_R。根据图2所示几何关系，建立如下系统观测方程：

$$\boldsymbol{Z}_k = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ r_\mathrm{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\dfrac{y}{x}\right) \\ \arctan\left(\dfrac{z}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \\ \sqrt{x^2+y^2+z^2} \end{bmatrix} + \boldsymbol{v}_k \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{v}_k$为量测噪声，$\boldsymbol{v}_k \sim N(0, \boldsymbol{R}_k)$，$\boldsymbol{R}_k$为噪声协方差矩阵。

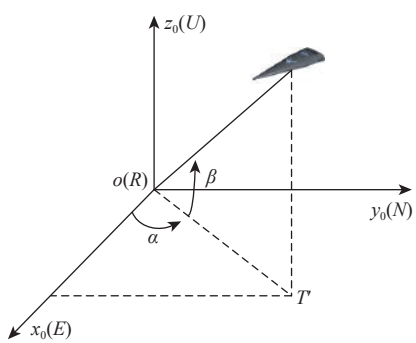


图2 ENU坐标系下的目标量测

Fig. 2 Target measurement in ENU coordinate system

雷达测量方程建立在ENU坐标系下，而HTV-2弹道参考坐标系为LLA坐标系，因此，需要对高超目标状态信息进行坐标变换，如图3所示。

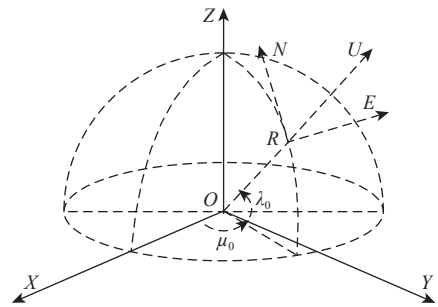


图3 ECEF坐标系与ENU坐标系

Fig. 3 ECEF coordinate system and ENU coordinate system

假设高超目标在LLA坐标系下坐标为(μ,λ,h)，在ECEF坐标系下坐标为(X,Y,Z)，转换关系如下：

$$\begin{cases} X = (N+h)\cos\mu\cos\lambda \\ Y = (N+h)\cos\mu\sin\lambda \\ Z = \left[N\left(1-e^2\right)+h\right]\sin\mu \end{cases} \tag{7}$$

式中：N为基准椭球半径；e为椭球偏心率。

$$\begin{cases} e^2 = \dfrac{a^2-b^2}{a^2} \\ N = \dfrac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\mu}} \end{cases} \tag{8}$$

式中：a为地球长半轴；b为地球短半轴。

同理，可以通过式(6)和式(7)将雷达LLA坐标$(\mu_\mathrm{R},\lambda_\mathrm{R},h_\mathrm{R})$转换为ECEF坐标$(X_\mathrm{R},Y_\mathrm{R},Z_\mathrm{R})$。因此，可得到高超目标在ENU坐标系中的位置信息为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_{\mathrm{ECEF}}^{\mathrm{ENU}} \begin{bmatrix} X-X_\mathrm{R} \\ Y-Y_\mathrm{R} \\ Z-Z_\mathrm{R} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{ECEF}}^{\mathrm{ENU}} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_\mathrm{R} & \cos\lambda_\mathrm{R} & 0 \\ -\sin\mu_\mathrm{R}\cos\lambda_\mathrm{R} & -\sin\mu_\mathrm{R}\sin\lambda_\mathrm{R} & \sin\mu_\mathrm{R} \\ \cos\mu_\mathrm{R}\cos\lambda_\mathrm{R} & \cos\mu_\mathrm{R}\sin\lambda_\mathrm{R} & \sin\mu_\mathrm{R} \end{bmatrix} \tag{10}$$

2 基于多重渐消因子的强跟踪CKF算法

2.1 传统CKF算法

以高超目标运动模型为状态方程，以单站雷达观测模型为量测方程，构成如下非线性系统模型：

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{k-1}) + \boldsymbol{w}_{k-1} \\ \boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{v}_k \end{cases} \tag{11}$$

式中：

$$\boldsymbol{x}_k = \begin{bmatrix} x & \dot{x} & \ddot{x} & \dddot{x} & y & \dot{y} & \ddot{y} & \dddot{y} & z & \dot{z} & \ddot{z} & \dddot{z} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^n \tag{12}$$

$\boldsymbol{x}_k$为高超目标在k时刻的飞行状态，包括目标

的位置、速度、加速度等n维状态信息; $\boldsymbol{z}_k=[\beta,\alpha,r_{\mathrm{R}}]^{\mathrm{T}}$为雷达系统在$k$时刻的观测向量, 代表雷达测元; $\boldsymbol{f}(\cdot)$和$\boldsymbol{h}(\cdot)$分别为非线性跟踪系统的过程函数和量测函数; $\boldsymbol{w}_k$和$\boldsymbol{v}_k$为不相关的零均值高斯白噪声, 对应的协方差矩阵分别为$\boldsymbol{Q}_k$和$\boldsymbol{R}_k$。

CKF 为一种非线性高斯滤波算法, 其核心在于通过球面-径向容积准则进行采样点的选取。计算流程如下[16]:

步骤 1　状态初始化。

$$\hat{\boldsymbol{x}}_0=E(\boldsymbol{x}_0) \tag{13}$$

$$\boldsymbol{P}_0=E\left((\boldsymbol{x}_0-\hat{\boldsymbol{x}}_0)(\boldsymbol{x}_0-\hat{\boldsymbol{x}}_0)^{\mathrm{T}}\right) \tag{14}$$

步骤 2　时间更新。

1) 根据$k-1$时刻的状态值$\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}$和协方差矩阵$\boldsymbol{P}_{k-1}$计算状态一步预测值。

$$\boldsymbol{S}_{k-1}=\mathrm{chol}(\boldsymbol{P}_{k-1}) \tag{15}$$

$$\boldsymbol{X}_{i,k-1}=\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}+\boldsymbol{S}_{k-1}\boldsymbol{\xi}_i\qquad i=1,2,\cdots,m \tag{16}$$

式中: $\boldsymbol{S}_{k-1}$为协方差矩阵$\boldsymbol{P}_{k-1}$的 Cholesky 分解取下三角阵, 即$\boldsymbol{P}_{k-1}=\boldsymbol{S}_{k-1}\boldsymbol{S}_{k-1}^{\mathrm{T}}$; $\boldsymbol{\xi}_i=\sqrt{n}[1]_i$, $\boldsymbol{\xi}_i$为一个数组, $m=2n$。

2) 非线性状态函数传播容积点。

$$\boldsymbol{\chi}_{i,k}^{-}=\boldsymbol{f}\left(\boldsymbol{X}_{i,k-1}\right)\qquad i=0,1,\cdots,m \tag{17}$$

3) 容积点加权平均, 计算状态预测值$\hat{\boldsymbol{x}}_k^-$和协方差矩阵预测值$\boldsymbol{P}_k^-$。

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k^-=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{\chi}_{i,k}^{-} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{P}_k^-=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\boldsymbol{\chi}_{i,k}^{-}-\hat{\boldsymbol{x}}_k^-\right)\left(\boldsymbol{\chi}_{i,k}^{-}-\hat{\boldsymbol{x}}_k^-\right)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}_{k-1} \tag{19}$$

步骤 3　测量更新。

1) 计算量测容积点。

$$\boldsymbol{S}_k^-=\mathrm{chol}\left(\boldsymbol{P}_k^-\right) \tag{20}$$

$$\boldsymbol{X}_{i,k}^-=\hat{\boldsymbol{x}}_k^-+\boldsymbol{S}_k^-\boldsymbol{\xi}_i \tag{21}$$

2) 非线性量测函数传播容积点。

$$\boldsymbol{Z}_{i,k}^-=\boldsymbol{h}\left(\boldsymbol{X}_{i,k}^-\right)\qquad i=0,1,\cdots,m \tag{22}$$

3) 计算得到量测预测均值$\hat{\boldsymbol{z}}_k^-$、新息协方差矩阵$\boldsymbol{P}_z$、互协方差矩阵$\boldsymbol{P}_{xz}$和卡尔曼增益$\boldsymbol{K}_k$。

$$\hat{\boldsymbol{z}}_k^-=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{Z}_{i,k}^- \tag{23}$$

$$\boldsymbol{P}_z=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\boldsymbol{Z}_{i,k}^-\left(\boldsymbol{Z}_{i,k}^-\right)^{\mathrm{T}}-\hat{\boldsymbol{z}}_k^-\left(\hat{\boldsymbol{z}}_k^-\right)^{\mathrm{T}}\right)+\boldsymbol{R}_k \tag{24}$$

$$\boldsymbol{P}_{xz}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\boldsymbol{X}_{i,k}^-\left(\boldsymbol{Z}_{i,k}^-\right)^{\mathrm{T}}-\hat{\boldsymbol{x}}_k^-\left(\hat{\boldsymbol{z}}_k^-\right)^{\mathrm{T}}\right) \tag{25}$$

$$\boldsymbol{K}_k=\boldsymbol{P}_{xz}\boldsymbol{P}_z^{-1} \tag{26}$$

4) 计算k时刻状态值$\hat{\boldsymbol{x}}_k$和协方差矩阵$\boldsymbol{P}_k$。

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k=\hat{\boldsymbol{x}}_k^-+\boldsymbol{K}_k\left(\boldsymbol{z}_k-\hat{\boldsymbol{z}}_k^-\right) \tag{27}$$

$$\boldsymbol{P}_k=\boldsymbol{P}_k^--\boldsymbol{K}_k\boldsymbol{P}_z\boldsymbol{K}_k^{\mathrm{T}} \tag{28}$$

2.2　引入多重渐消因子

强跟踪滤波(strong-tracking filter, STF)指通过引入变化的渐消因子λ_k, 实时调整状态预测协方差矩阵$\boldsymbol{P}_k^-$, 为方便公式表示, 下文替换为$\boldsymbol{P}_{k|k-1}$, 使滤波残差矩阵保持正交, 从而应对目标运动状态突变的问题, 提高鲁棒性。核心思想为: 在线调整增益矩阵$\boldsymbol{K}_k$, 以满足以下 2 个条件: $E((\boldsymbol{x}_k-\hat{\boldsymbol{x}}_k)(\boldsymbol{x}_k-\hat{\boldsymbol{x}}_k)^{\mathrm{T}})$最小; $E\left(\boldsymbol{e}_{k+j}\boldsymbol{e}_k^{\mathrm{T}}\right)=0,k=0,1,\cdots,j=1,2,\cdots$,其中, $\boldsymbol{e}_k=\boldsymbol{z}_k-\hat{\boldsymbol{z}}_{k|k-1}$为$k+1$时刻残差, 即要求在所有时间残差序列都保持相互正交。

传统 STF 算法基于扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法建立, 本文将 STF 算法与 CKF 算法结合, 建立非线性系统下的 STF 算法, 其算法原理核心结构在于残差的计算:

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k=\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}+\boldsymbol{K}_k\boldsymbol{e}_k \tag{29}$$

$$\boldsymbol{e}_k=\boldsymbol{z}_k-\boldsymbol{h}\left(\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}\right) \tag{30}$$

渐消因子λ_{k+1}计算方法如下:

$$\lambda_k=\max\left(1,\frac{\mathrm{tr}(\boldsymbol{N}_k)}{\mathrm{tr}(\boldsymbol{M}_k)}\right) \tag{31}$$

$$\boldsymbol{N}_k=\boldsymbol{V}_{0,k}-\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{Q}_{k-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}-\theta\boldsymbol{R}_k \tag{32}$$

$$\boldsymbol{M}_k=\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{\boldsymbol{x}}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} \tag{33}$$

$$\boldsymbol{H}_k=\left(\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{\boldsymbol{xz},l}\right)\left(\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{l}\right)^{-1} \tag{34}$$

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{\boldsymbol{xz},l}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\boldsymbol{x}_{k|k-1}^{i,l}\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{x}_{k|k-1}^{i,l}\right)-\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}\left(\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}\right)\right) \tag{35}$$

$$\boldsymbol{V}_{0,k}=\begin{cases}\boldsymbol{e}_1\boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}} & k=0\\ \dfrac{\varepsilon\boldsymbol{V}_{0,k}+\boldsymbol{e}_k\boldsymbol{e}_k^{\mathrm{T}}}{1+\varepsilon} & k>0\end{cases} \tag{36}$$

式中: $\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{\boldsymbol{x}}$为不引入渐消因子和不考虑系统噪声方差阵时的状态预测误差协方差矩阵; $\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{l}$为考虑系统噪声方差阵的状态预测误差协方差矩阵; $\theta\geqslant 1$为弱化因子; ε为遗忘因子, 通常取值为$0.95\leqslant\varepsilon\leqslant 0.995$。

高超目标非线性系统变量多维且复杂, 难以确定最优的渐消因子, 单个渐消因子精度提高有限。因此, 引入基于多重渐消因子的强跟踪容积卡尔曼滤波(strong tracking cubature Kalman filter, STCKF)算法。

1) 时间更新过程。在状态预测误差协方差矩阵$\boldsymbol{P}_{k+1|k}$中引入对称的渐消因子, 将式(19)改为

$$\boldsymbol{P}_k^- = \lambda_{k+1}\left[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\boldsymbol{\chi}_{i,k}^- - \hat{\boldsymbol{x}}_k^-\right)\left(\boldsymbol{\chi}_{i,k}^- - \hat{\boldsymbol{x}}_k^-\right)^{\mathrm{T}}\right]\lambda_{k+1} + \boldsymbol{Q}_{k-1} \tag{37}$$

2）量测更新过程。在新息协方差矩阵和量测自协方差矩阵中分别引入一个渐消因子，即在式(24)和式(25)的基础上得到：

$$\boldsymbol{P}_z = \lambda_{k+1}\left[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\boldsymbol{Z}_{i,k}^-\left(\boldsymbol{Z}_{i,k}^-\right)^{\mathrm{T}} - \hat{\boldsymbol{z}}_k^-\left(\hat{\boldsymbol{z}}_k^-\right)^{\mathrm{T}}\right)\right] + \boldsymbol{R}_k \tag{38}$$

$$\boldsymbol{P}_{xz} = \lambda_{k+1}\left[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\boldsymbol{X}_{i,k}^-\left(\boldsymbol{Z}_{i,k}^-\right)^{\mathrm{T}} - \hat{\boldsymbol{x}}_k^-\left(\hat{\boldsymbol{z}}_k^-\right)^{\mathrm{T}}\right)\right] \tag{39}$$

3 AIMM 算法

3.1 IMM 算法

IMM 算法主要由一个交互作用器、多个滤波器、一个状态估计融合器和一个模型概率估计器组成，主要过程如图 4 所示。

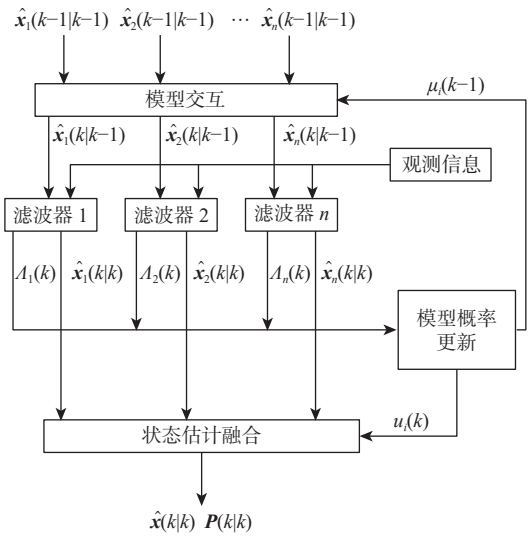


图 4 IMM 算法计算步骤

Fig. 4 Computational steps of IMM algorithm

IMM 算法计算步骤如下：

步骤 1 交互输入。将上一时刻中各模型的输出值基于马尔可夫矩阵交互来得到新的滤波状态值和协方差值。为方便表示，自适应算法公式中的时刻备注在括号内。

$$\mu_{ij}(k-1|k-1) = p_{ij}u_i(k-1)\Big/\sum_{i=1}^{n}p_{ij}u_i(k-1) \quad \forall i,j \in M \tag{40}$$

式中：$\mu_{ij}(k-1|k-1)$为模型i转移到模型j的转移后验概率；i、j为模型编号；p_{ij}为从模型i转移到模型j的转移概率；$u_i(k-1)$为目标在$k-1$时刻模型i的概率。

通过交互计算，初始值如下：

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{0j}(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^{n}\hat{\boldsymbol{x}}_i(k-1|k-1)\mu_{ij}(k-1|k-1) \tag{41}$$

$$\begin{aligned} p_{0j}(k-1|k-1) = {} & \sum_{i=1}^{n}\mu_{ij}(k-1|k-1)\cdot \\ & \Big[p_i(k-1|k-1) + \left(\boldsymbol{x}_i(k-1|k-1) - \hat{\boldsymbol{x}}_{0j}(k-1|k-1)\right)\cdot \\ & \left(\boldsymbol{x}_i(k-1|k-1) - \hat{\boldsymbol{x}}_{0j}(k-1|k-1)\right)^{\mathrm{T}}\Big] \end{aligned} \tag{42}$$

同时，可以得到预测的k时刻的模型概率：

$$\bar{c}_j = \sum_{i=1}^{n}p_{ij}u_i(k-1) \tag{43}$$

步骤 2 模型概率更新。将状态初值进行滤波计算，得到残差$\boldsymbol{e}_j(k)$和残差协方差$\boldsymbol{M}_j(k)$。

$$\begin{cases} \boldsymbol{e}_j(k) = \boldsymbol{Z}(k) - \boldsymbol{H}(k)^j\hat{\boldsymbol{X}}^j(k|k-1) \\ \boldsymbol{M}_j(k) = \boldsymbol{H}(k)^j\boldsymbol{P}^j(k|k-1)\boldsymbol{H}^j(k)^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}(k) \end{cases} \tag{44}$$

$$\Lambda_j(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\left|\boldsymbol{S}_j(k)\right|}}\exp\left(-0.5\boldsymbol{e}_j^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{M}_j^{-1}(k)\boldsymbol{e}_j(k)\right) \tag{45}$$

式(45)计算了k时刻模型j的最大似然函数$\Lambda_j(k)$，是本文自适应算法提出的基础，假定其服从正态分布，可得到模型j的后验概率$\mu_j(k)$为

$$\mu_j(k) = \Lambda_j(k)\sum_{i=1}^{n}p_{ij}u_i(k-1)/c \tag{46}$$

式中：c为归一化常数，表示为

$$c = \sum_{j=1}^{n}\Lambda_j(k)\bar{c}_j \tag{47}$$

步骤 3 状态估计融合。基于模型概率融合各模型滤波预测值，得到k时刻的最终结果为

$$\hat{\boldsymbol{x}}(k|k) = \sum_{i=1}^{n}\hat{\boldsymbol{x}}_i(k|k)u_i(k) \tag{48}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{P}(k|k) = {} & \sum_{i=1}^{n}u_i(k|k)\big[\hat{\boldsymbol{P}}_i(k|k) + \\ & \left(\hat{\boldsymbol{x}}_i(k|k) - \hat{\boldsymbol{x}}(k|k)\right)\left(\hat{\boldsymbol{x}}_i(k|k) - \hat{\boldsymbol{x}}(k|k)\right)^{\mathrm{T}}\big] \end{aligned} \tag{49}$$

3.2 自适应修正马尔可夫矩阵

IMM 算法中，模型切换是一个马尔可夫过程，因此，十分依赖模型转换的马尔可夫矩阵。标准 IMM 算法中，马尔可夫矩阵是预先给定的，由于目标的机动性等先验信息的不确定性，对于高超目标等强机动目标来说，固定的马尔可夫矩阵不能很好地反映目标真实运动状态和模型之间的切换过程，因此，考虑利用后验信息对马尔可夫矩阵进行自适

应修正。

模型似然函数$\Lambda_j(k)$包含了k时刻预测状态与真实状态的残差和残差协方差矩阵, 因此, 可以很好地反映模型j与当前运动状态的匹配程度。参考式(42), 模型匹配程度与似然函数值大小成正比。因此, 本文基于模型的似然函数, 提出转移概率矩阵自适应修正算法。计算过程如下:

$$\varphi_{ij}(k)=\left(\frac{\Lambda_j(k)}{\Lambda_i(k)}\right)^{\omega} \tag{50}$$

$$p_{ij}(k)=p'_{ij}(k)\Big/\sum_{j=1}^{u}p'_{ij}(k) \tag{51}$$

$$p'_{ij}(k)=\varphi_{ij}(k)\,p_{ij}(k-1) \tag{52}$$

式中: $\varphi_{ij}(k)$为模型似然函数的比值, 作为调节因子调整模型转换率; ω为修正速率, $0\leqslant\omega\leqslant1$, 用以控制修正的快慢, 本文中修正速率$\omega=0.8$。

从式(50)可以看出, 在k时刻, 当似然函数$\Lambda_j(k)$大于$\Lambda_i(k)$, 模型j比模型i与真实运动匹配度更高, 通过修正后由模型j到模型i的概率增大。因此, 在下一时刻似然函数值大的模型所占比重更大; 相反, 似然函数值小的模型, 在下一时刻所占比重减小。可以得出, 该方法通过利用量测信息对转移概率矩阵进行自适应修正, 增强了匹配模型所占比例。

但是通过代入计算发现, 式(51)存在缺陷, 当迭代计算时, 可能会导致主对角线某些元素越来越大, 模型之间的转移概率降低, 模型状态切换效率降低。因此, 对主对角线元素和非主对角线元素分别设定阈值M和B, 做出如下改进。

若主对角线元素过大, 即$p_{ii}(k)>M$, 则令$p'_{ii}(k)=M$, 对其所在行的非主对角线元素按照原来比例重新分配:

$$p''_{ij}(k)=p_{ij}(k)\left[1-\frac{M-p_{ii}(k)}{\sum_{j=1}^{m}\left(p_{ii}(k)-p''_{ii}(k)\right)}\right] \tag{53}$$

同理, 若非对角线元素过小, 即$p_{ij}(k)<B(i\neq j)$, 则令$p'_{ij}(k)=B(i\neq j)$, 对其所在行的其他元素按照原来比例重新分配, 参考式(53)。

通过式(53)对元素的修正, 仍然满足$\sum_{j=1}^{m}p_{ij}(k)=1$且$0\leqslant p_{ij}(k)\leqslant1$, 可以增强模型转换的稳定性和自适应性, 本文中设置对角线上限阈值$M=0.7$, 非对角线下限阈值$B=0.2$。

3.3　SVD 算法

IMM 模型集的选取需要满足任意时刻均有模型与运动状态匹配度最高。已有模型包括 CV 模型、CA 模型、匀转弯 (constant turn, CT) 模型、Singer 模型、CS 模型和 Jerk 模型等, 均适用于不同场景。其中, CV、CA 模型适用于目标非机动或弱机动运动状态, CT 模型适用于目标转弯运动, Singer、CS 模型可描述常规运动, Jerk 模型作为阶数最高的模型可描述目标加加速度, 主要用于跟踪强机动目标。高超目标机动性较强, 因此, 本文选取 3 个机动性较强的模型, 即 Singer 模型、CS 模型和 Jerk 模型构建 IMM 模型集。

目标运动模型状态方程可表示为

$$\boldsymbol{x}_k=\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{k-1}+\boldsymbol{w}_{k-1} \tag{54}$$

式中: $\boldsymbol{x}_{k-1}$为上一时刻目标的运动状态; $\boldsymbol{x}_k$为当前目标的运动状态; $\boldsymbol{F}$为状态转移矩阵。

1) Singer 模型。状态转移矩阵和状态噪声协方差矩阵在一维的情况如下:

$$\boldsymbol{F}_1=\begin{bmatrix}1 & T & \left(\alpha_{\mathrm{m}}T-1+\mathrm{e}^{-\alpha_{\mathrm{m}}T}\right)/\alpha_{\mathrm{m}}{}^2\\ 0 & 1 & \left(1-\mathrm{e}^{-\alpha_{\mathrm{m}}T}\right)/\alpha_{\mathrm{m}}\\ 0 & 0 & \mathrm{e}^{-\alpha_{\mathrm{m}}T}\end{bmatrix} \tag{55}$$

式中: T为采样间隔; α_{m}为机动频率, 通常根据经验选取, 一般根据目标机动性强弱取值 1、1/20、1/60。状态噪声协方差矩阵可参考文献 [17]。

2) CS 模型。状态转移矩阵和状态噪声协方差矩阵与 Singer 模型相同, CS 模型相比于 Singer 模型有控制输入矩阵, 其离散状态方程可表示为

$$\boldsymbol{x}_k=\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{k-1}+\boldsymbol{I}_k\bar{\boldsymbol{a}}+\boldsymbol{w}_{k-1} \tag{56}$$

式中: $\boldsymbol{I}_k$为输入控制矩阵; $\bar{\boldsymbol{a}}$为加速度均值。

以x轴为例, 可将加速度状态的一步预测作为当前加速度均值, 即$\bar{a}_x=\bar{x}_k^-$, 根据“当前”加速度均值可得到当前加速度方差为

$$\sigma_{a_x}^2=\begin{cases}[(4-\pi)/\pi](a_{\max}-\bar{a}_x)^2 & \bar{a}_x>0\\ [(4-\pi)/\pi](\bar{a}_x-a_{\min})^2 & \bar{a}_x<0\end{cases} \tag{57}$$

式中: $a_{\max}$、$a_{\min}$分别为每个轴设置的最大、最小加速度, 一般根据先验情况设定。

3) Jerk 模型。在 Singer 模型基础上引入一个零均值的有色噪声表示加加速度。离散后的状态转移矩阵和状态噪声协方差矩阵如下:

$$\boldsymbol{F}_2=\begin{bmatrix}1 & T & T^2/2 & J_1\\ 0 & 1 & T & J_2\\ 0 & 0 & 1 & J_3\\ 0 & 0 & 0 & J_4\end{bmatrix} \tag{58}$$

式中: J_1、J_2、J_3、J_4为构成状态噪声协方差矩阵的元素, 具体赋值可参考文献 [18]。

Jerk 模型为 4 阶, Singer、CS 模型为 3 阶, 因此, 需要对其状态转移矩阵和状态噪声协方差矩阵进

行扩维。传统扩维方法将出现全零行，导致CKF算法中Cholesky因矩阵失去正定性而无法分解，因此，为增强计算的稳定性，本文用SVD分解代替Cholesky分解，具体过程如下。

将时间更新过程中的协方差矩阵Cholesky分解改写为SVD分解：

$$\boldsymbol{P}_{k-1}=\boldsymbol{U}_{k-1}\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{k-1} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\boldsymbol{U}_{k-1}^{\mathrm{T}} \tag{59}$$

式中：$\boldsymbol{S}_{k-1}$为对角阵，$\boldsymbol{S}_{k-1}=\mathrm{diag}[s_1,s_2,\cdots,s_n]$，$s_i$为矩阵奇异值。

则容积点可表示为

$$\boldsymbol{X}_{i,k-1}=\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}+\boldsymbol{U}_{k-1}\sqrt{\boldsymbol{S}_{k-1}}\boldsymbol{\xi}_i \qquad i=1,2,\cdots,m \tag{60}$$

式中：$\boldsymbol{\xi}_i=\sqrt{m/2}[1]_i$。

量测更新与时间更新类似：

$$\boldsymbol{P}_{k-1}^{-}=\boldsymbol{U}_{k-1}^{-}\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{k-1}^{-} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}(\boldsymbol{U}_{k-1}^{-})^{\mathrm{T}} \tag{61}$$

$$\boldsymbol{X}_{i,k-1}=\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}+\boldsymbol{U}_{k-1}^{-}\sqrt{\boldsymbol{S}_{k-1}^{-}}\boldsymbol{\xi}_i \qquad i=1,2,\cdots,m \tag{62}$$

该算法兼顾了IMM模型集中Jerk模型的表示和CKF算法中协方差矩阵的合理分解，增强了算法的稳定性。

4 仿真与分析

4.1 仿真环境设置

1）HTV-2弹道真实轨迹构建。采用美国给出的HTV-2特征数据，该飞行器质量为907 kg，气动参考面积$S=0.483\,7\ \mathrm{m}^2$，重力加速度g取值$9.8\ \mathrm{m/s}^2$。为得到高超目标的运动状态，设置目标初始状态为：地心距6 426 km，经纬度0°，目标初始速率17*Ma*，目标弹道倾角0.25 rad，弹道偏角−0.42 rad。参考文献[19]中迎角设置：

$$\alpha_{\mathrm{a}}=\begin{cases}\alpha_{\max} & V_1<V\leqslant V_{\mathrm{e}}\\ \alpha_{\mathrm{mid}}+\alpha_{\mathrm{bal}}\sin\left(\dfrac{(V-V_{\mathrm{mid}})\pi}{V_1-V_2}\right) & V_2\leqslant V\leqslant V_1\\ \alpha_{\max(K)} & V_{\mathrm{f}}\leqslant V<V_2\end{cases} \tag{63}$$

$$\begin{cases}\alpha_{\mathrm{mid}}=\left(\alpha_{\max}+\alpha_{\max(K)}\right)/2\\ \alpha_{\mathrm{bal}}=\left(\alpha_{\max}-\alpha_{\max(K)}\right)/2\\ V_{\mathrm{mid}}=(V_1+V_2)/2\end{cases} \tag{64}$$

式中：V_1、V_2为迎角曲线的分段参数；α_{mid}为迎角分段中值；α_{bal}为迎角分段差值；V_{mid}为速度中值；设置最大迎角$\alpha_{\max}$为20°，最大升阻比时迎角$\alpha_{\max(K)}$为11°。

通过4阶龙格库塔法仿真得到目标运动轨迹，如图5所示。

2）雷达仿真条件设置。设置雷达LLA坐标系中坐标为(37.45°, −15°, 0 m)，单站雷达探测距离为400 km，测角和测距标准差分别为0.5°和500 m，雷达采样周期为1 s，跟踪时段为710～1 060 s，跟踪轨迹如图5中红色轨迹部分所示。

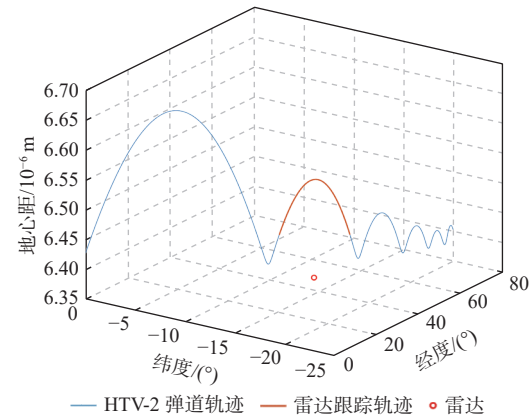


图5 HTV-2弹道轨迹

Fig. 5 HTV-2 ballistic trajectory

4.2 仿真结果

4.2.1 多重渐消因子强跟踪CKF算法对比仿真

本文非线性系统多维且变量复杂，CKF算法估计精度及跟踪性能因不同变量而异，难以确定最优的渐消因子，且仅靠单个渐消因子并不能带来最佳滤波效果，因此，采用多重渐消因子，并与单一渐消因子进行对比仿真实验，结果如图6和图7所示。

从实验仿真结果中可以看出，单一渐消因子CKF算法的跟踪精度低于多重渐消因子CKF算法，且均方误差方差较大。因此，本文选择利用多重渐消因子的强跟踪CKF算法跟踪滤波。

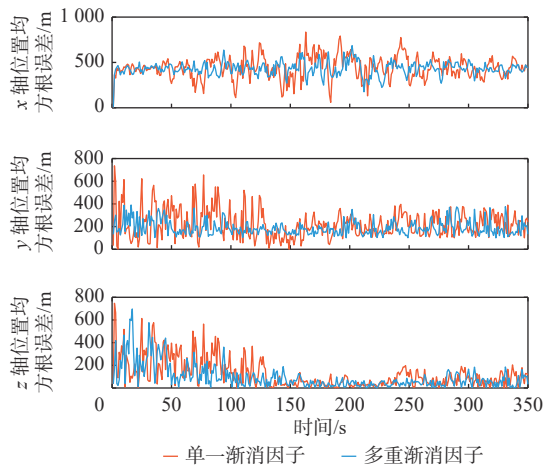


图6 3轴方向位置均方根误差

Fig. 6 Root mean square error of position in three-axis direction

4.2.2 本文算法仿真

高超目标的初始值设置为$\boldsymbol{x}_0$=[−719 000 m, 4 270 m/s, 1 m/s^2, 0.2 m/s^3, 233 000 m, −1 530 m/s, −0.6 m/s^2, 0.3 m/s^3, 199 000 m, 1 030 m/s, −5.9 m/s^2, 0.5 m/s^3]，目标机动频率设置为$\alpha_{\mathrm{m}}=1/20$ s，在CS模型中，x、y、z轴最大、最小加速度分别为±700 m/s^2、±500 m/s^2、±200 m/s^2。

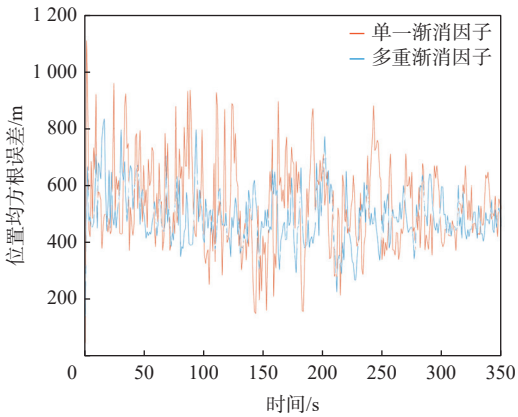


图 7　渐消因子算法位置均方根误差

Fig. 7　Root mean square error of position of fading factor algorithm

仿真初始参数设置如表 1 所示。跟踪轨迹仿真结果如图 8～图 11 所示。目标的跟踪轨迹如图 8 所示, 可知, 3 种算法都可实现对高超目标的有效跟踪。如图 9～图 11 所示, 黄色曲线相比于其他 2 条曲线最接近于目标真实轨迹, 因此, 本文算法跟踪精度较高; 目标起始状态的跟踪误差较大,

表 1　仿真初始参数设置

Table 1　Simulation initial parameter settings

参数	数值
仿真步长/s	1
弱化因子	1
遗忘因子	0.95
采样时长/s	350
初始模型概率	$\boldsymbol{u}=[1/3 \quad 1/3 \quad 1/3]$
马尔可夫转移矩阵	$\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}=\begin{bmatrix}0.9 & 0.05 & 0.05\\ 0.05 & 0.9 & 0.05\\ 0.05 & 0.05 & 0.9\end{bmatrix}$
状态误差协方差矩阵	$\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}\left(100^2,100^2,100^2\right)$
观测噪声协方差矩阵	$\boldsymbol{R}=\mathrm{diag}\left(0.5^2,0.5^2,500^2\right)$
初始误差协方差矩阵	$\boldsymbol{P}=\mathrm{diag}\left(5\,000^2,3\,000^2,100^2,5\,000^2,3\,000^2,100^2,5\,000^2,3\,000^2,100^2\right)$

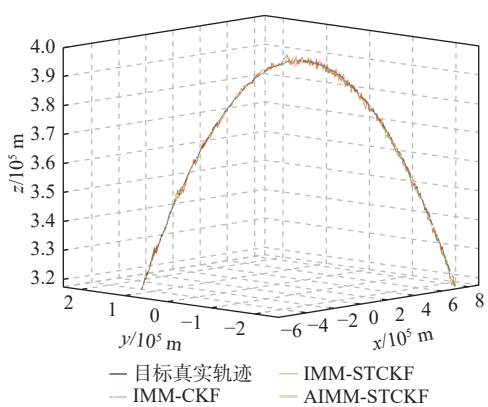


图 8　高超目标轨迹跟踪

Fig. 8　Hypersonic target trajectory tracking

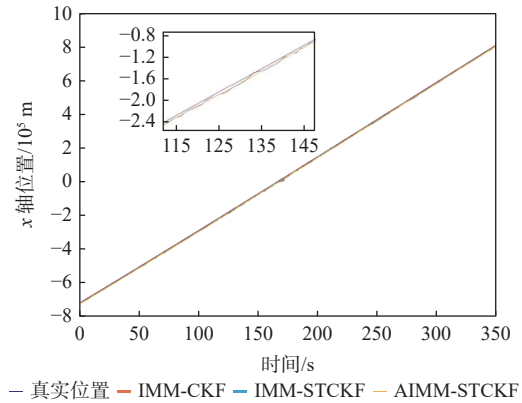


图 9　高超目标 x 轴轨迹跟踪

Fig. 9　Hypersonic target x-axis trajectory tracking

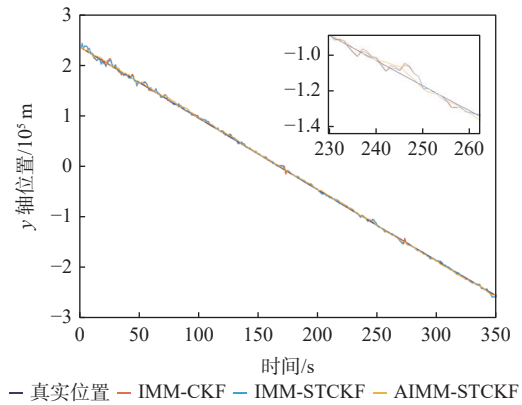


图 10　高超目标 y 轴轨迹跟踪

Fig. 10　Hypersonic target y-axis trajectory tracking

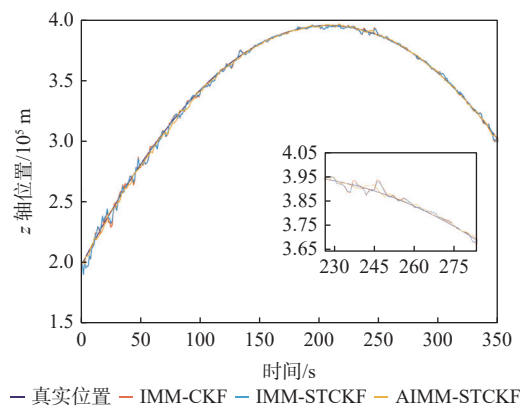


图 11　高超目标 z 轴轨迹跟踪

Fig. 11　Hypersonic target z-axis trajectory tracking

随着滤波的进行, 跟踪误差变小。为更直观地看出算法跟踪过程, 对过程量进行仿真分析。

以 Jerk 模型为例, 由图 12 中位置增益矩阵 $\boldsymbol{K}_k$ 迹值的变化趋势可以看出, 在 t = 166~173 s时刻, 位置增益矩阵迹值发生了突变, 模型状态发生改变; IMM-STCKF 算法较 IMM-CKF 算法增益矩阵迹值变化较小, 因此, 模型匹配度适应性增强。

图 13 给出了后验误差协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_{kk}$ 迹的变化

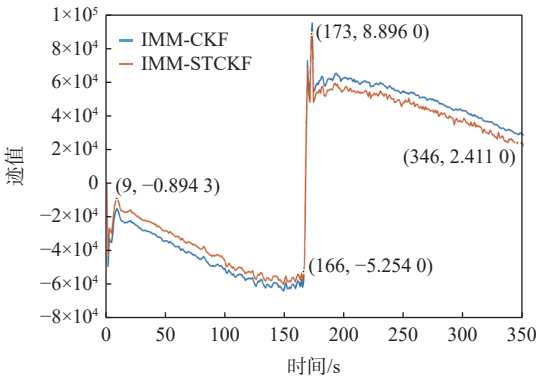


图12 Jerk模型位置增益矩阵迹值变化

Fig. 12 Change of trace value of position gain matrix of Jerk model

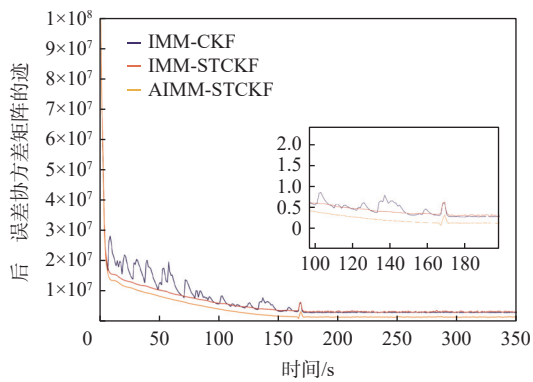


图13 后验误差协方差矩阵的迹

Fig. 13 Trace of posterior error covariance matrix

趋势。可以看出，随着滤波的进行，后验误差协方差矩阵迹值逐渐减小趋于稳定，误差也随之减小收敛；本文提出的AIMM-STCKF算法收敛后迹值最小，因此，跟踪精度最高。

对3种算法进行100次蒙特卡罗仿真，可用目标均方根误差及其均值来衡量算法性能。

$$\Delta^i_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{N}\left(X^i-\hat{X}^i\right)^2+\left(Y^i-\hat{Y}^i\right)^2+\left(Z^i-\hat{Z}^i\right)^2} \tag{65}$$

式中：n为蒙特卡罗仿真次数；X^i、Y^i、Z^i为第i次仿真各轴真实状态；$\hat{X}^i$、$\hat{Y}^i$、$\hat{Z}^i$为各轴滤波估计值。

仿真结果如图14～图21所示。为对比3种算法的跟踪精度，对各轴的位置、速度均方根误差进行仿真，如图14～图21所示。通过计算得到3种算法均方根误差均值对比，如表2所示。IMM-CKF模型转移概率如图22所示，本文算法模型转移概率如图23所示。

结合图14～图21和表2，分析x、y、z轴位置、速度均方根误差可发现：

1）由于x轴位置、速度初始值设置误差较小，

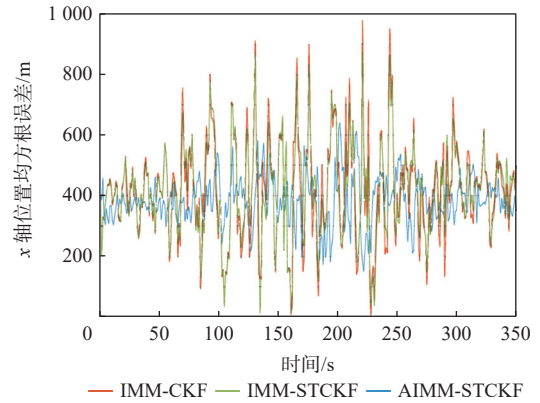


图14 x轴方向位置均方根误差

Fig. 14 Root mean square error of position in x-axis direction

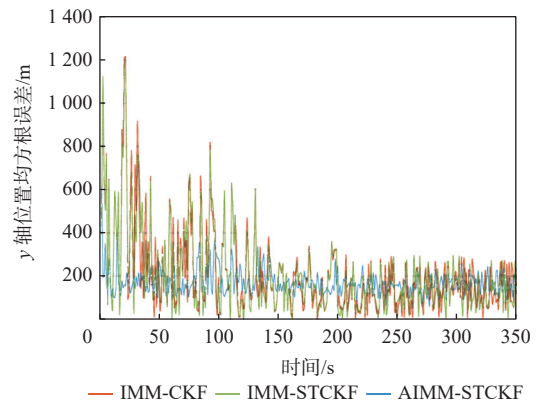


图15 y轴方向位置均方根误差

Fig. 15 Root mean square error of position in y-axis direction

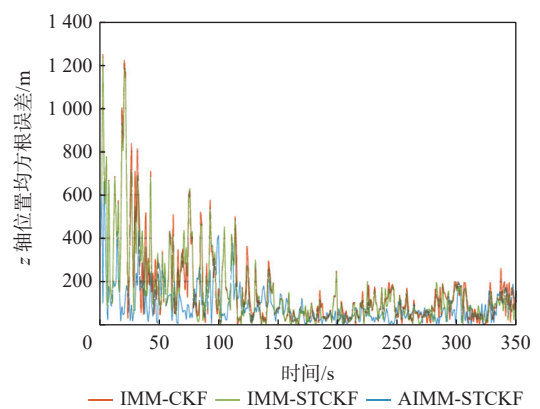


图16 z轴方向位置均方根误差

Fig. 16 Root mean square error of position in z-axis direction

IMM-CKF和IMM-STCKF算法收敛速度较快；而y、z轴的位置和速度由于初始值误差较大，2种算法收敛时间大约在40 s。相比之下，AIMM-STCKF算法由于具有模型自适应性，收敛时间明显加快，整体看约在25 s，收敛速度提升了约37.5%。

2）本文提出的AIMM-STCKF算法在加入马尔可夫自适应矩阵后显著提高了算法精度，在3种算法中，速度、位置均方根误差最小，跟踪精度最高且

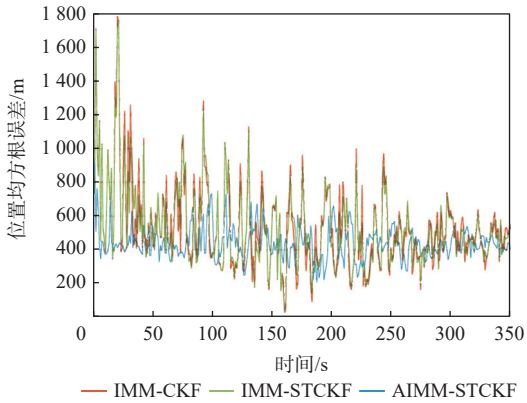


图 17　改进算法位置均方根误差

Fig. 17　Root mean square error of position of improred algorithm

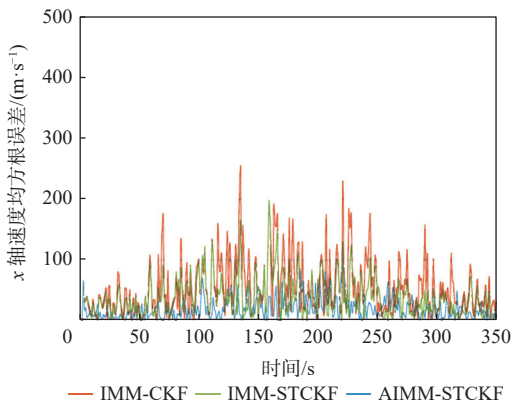


图 18　x轴方向速度均方根误差

Fig. 18　Root mean square error of velocity in x-axis direction

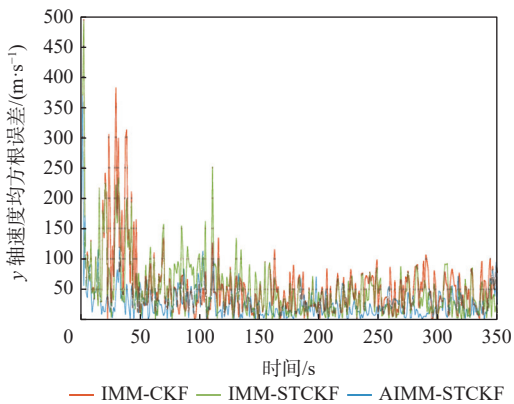


图 19　y轴方向速度均方根误差

Fig. 19　Root mean square error of velocity in y-axis direction

方差较小, 整体来看, 位置跟踪精度较 IMM-CKF 算法提高了约 16.51%, 速度跟踪精度提高了约 35.73%。

3) 由于本文高超目标状态不具有明显突变, 强跟踪算法所提高的精度较低; 相比之下, 基于自适应模型交互的强跟踪算法可以加快模型的转变和加强自适应匹配能力, 因此, 收敛速度和跟踪精度

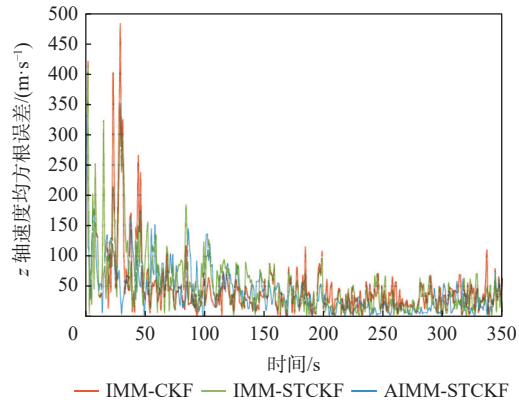


图 20　z 轴方向速度均方根误差

Fig. 20　Root mean square error of velocity in z-axis direction

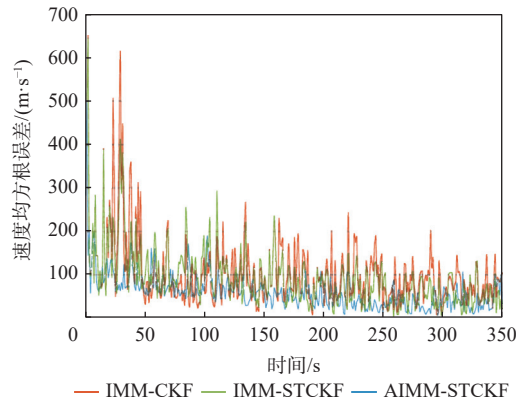


图 21　改进算法速度均方根误差

Fig. 21　Root mean square error of velocity of improved algorithms

表 2　3 种算法均方根误差均值对比

Table 2　Comparison of mean values of root mean square error of three algorithms

算法	位置均方根误差均值/m				速度均方根误差均值/(m·s⁻¹)			
	x轴	y轴	z轴	整体	x轴	y轴	z轴	整体
IMM-CKF	449.2	213.7	164	537.3	52.7	56.2	51.9	104.1
IMM-STCKF	447.9	207	158.2	530.2	37.9	56.3	49.5	92.7
AIMM-STCKF	381.9	171.3	97.1	448.6	19.4	27.7	41.4	66.9

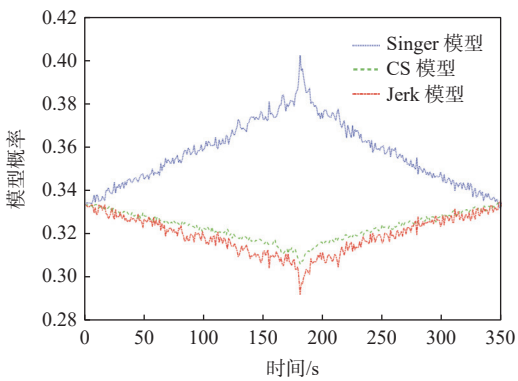


图 22　IMM-CKF 模型概率

Fig. 22　IMM-CKF model probability

更优。

对比图 23 模型概率转移图和图 24 模型似然函数比值图可发现：

1）随着高超目标机动性减弱，机动性较弱的 Singer 模型概率逐渐增加；随着高超目标机动性增强，机动性较强的 Jerk 模型概率逐渐增加。

2）对比可以发现，本文自适应算法增大了 IMM 算法中匹配模型所占的比例，且模型似然函数值大的模型所占比重更大，减小了模型概率方差，模型转换鲁棒性更强。

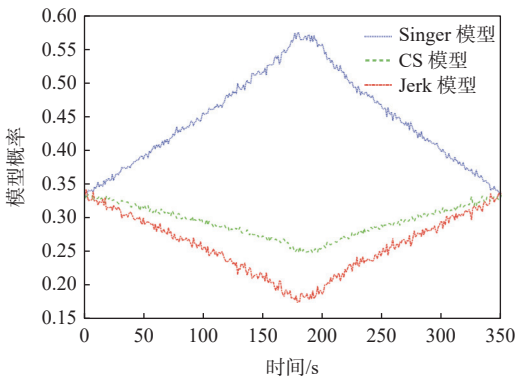


图 23 AIMM-STCKF 模型概率

Fig. 23 AIMM-STCKF model probability

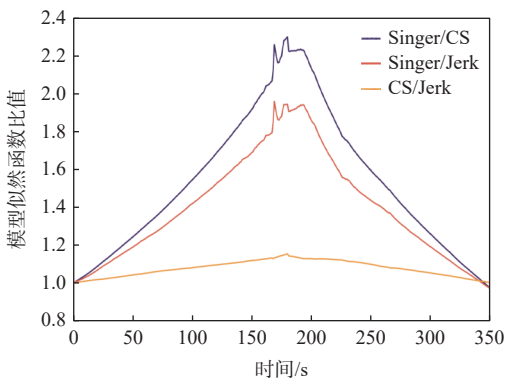


图 24 模型似然函数比值

Fig. 24 Model likelihood function ratio

5 结 论

本文针对高超目标高机动性的特点下传统 IMM 算法跟踪精度低甚至失败的问题，提出了一种基于 CKF 的强跟踪自适应 IMM 算法。

1）针对 HTV-2 动力学建立六自由度方程，通过 4 阶龙格库塔法离散方程并结合迎角模型得到 HTV-2 跳跃-滑翔弹道，并根据坐标轴转换关系建立雷达量测模型。

2）分析 CKF 结构，通过加入多重渐消因子来实时调整增益矩阵，将强跟踪滤波与 CKF 结合，提高模型失准时的滤波精度。

3）针对 IMM 算法中模型维数扩维而导致 CKF 算法中无法进行 Cholesky 分解的问题提出利用 SVD 分解代替 Cholesky 分解。

4）针对 IMM 算法估计马尔可夫矩阵的不足，提出了自适应转移概率 IMM 算法，通过后验信息对转移概率进行自适应修正，增强匹配模型所占比例。

5）仿真结果表明，本文算法增强了 IMM 算法中匹配模型所占比例，跟踪精度提高了 16.51%，收敛速度提高了约 37.5%，具有工程应用价值。

参考文献（References）

[1] 周宏仁, 敬忠良, 王培德, 等. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 1-35.
ZHOU H R, JING Z L, WANG P D, et al. Maneuvering target tracking[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991: 1-35 (in Chinese).

[2] SINGER R A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970, AES-6(4): 473-483.

[3] 周宏仁. 机动目标“当前”统计模型与自适应跟踪算法[J]. 航空学报, 1983, 4(1): 73-86.
ZHOU H R. A “current” statistical model and adaptive tracking algorithm for maneuvering targets[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1983, 4(1): 73-86(in Chinese).

[4] MEHROTRA K, MAHAPATRA P R. A Jerk model for tracking highly maneuvering targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(4): 1094-1105.

[5] 王磊, 程向红, 李双喜, 等. 自适应交互式多模型 AUV 组合导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(4): 511-516.
WANG L, CHENG X H, LI S X, et al. Adaptive interacting multiple model filter for AUV integrated navigation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(4): 511-516(in Chinese).

[6] MAGILL D. Optimal adaptive estimation of sampled stochastic processes[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1965, 10(4): 434-439.

[7] BLOM H A P. An efficient filter for abruptly changing systems[C]// Proceedings of the 23rd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 1984: 656-658.

[8] LI X R, BAR-SHALOM Y. Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1993, 1(3): 186-194.

[9] 黄景帅, 李永远, 汤国建, 等. 高超声速滑翔目标自适应跟踪方法[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 323786.
HUANG J S, LI Y Y, TANG G J, et al. Adaptive tracking method for hypersonic glide target[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 323786(in Chinese).

[10] 戴洪德, 方君, 唐亮, 等. 高超声速机动目标的强跟踪 UKF 自适应交互多模型算法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(3): 338-345.
DAI H D, FANG J, TANG L, et al. Strong tracking UKF adaptive interacting multiple-model algorithm based on maneuvering hypersonic-target tracking[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(3): 338-345(in Chinese).

[11] 戴定成, 姚敏立, 蔡宗平, 等. 改进的马尔可夫参数自适应 IMM 算法[J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1198-1205.
DAI D C, YAO M L, CAI Z P, et al. Improved adaptive Markov IMM algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(5): 1198-1205 (in Chinese).

[12] 肖楚晗, 李炯, 雷虎民, 等. 基于 AVSIMM 算法的高超声速再入滑翔目标跟踪[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(2): 413-421.
XIAO C H, LI J, LEI H M, et al. Hypersonic reentry gliding target tracking based on AVSIMM algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(2): 413-421(in Chinese).

[13] 王姚宇, 陈仁文, 张祥. 改进的基于奇异值分解的抗差容积卡尔曼滤波算法在全球定位导航中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2356-2362.
WANG Y Y, CHEN R W, ZHANG X. Application of improved robust singular value decomposition-cubature Kalman filter algorithm in global positioning system navigation[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2356-2362(in Chinese).

[14] 贾晓娟. 高超声速飞行器再入轨迹估计与跟踪[D]. 西安: 西北工业大学, 2015: 18-22.
JIA X J. Reentry trajectory estimating and tracking for hypersonic vehicle[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015: 18-22(in Chinese) .

[15] 缪天宇. 助推滑翔式高超声速飞行器雷达探测与跟踪预报算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 11-13.
MIAO T Y. Research on radar detection, tracking and prediction algorithm for the boost-glide hypersonic vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 11-13(in Chinese) .

[16] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6): 1254-1269.

[17] 秦雷, 李君龙, 周荻. 临近空间非弹道式目标 HTV-2 跟踪滤波与预报问题[J]. 航天控制, 2015, 33(2): 56-61.
QIN L, LI J L, ZHOU D. The problems of tracking filter and prediction for non-ballistic target HTV-2 in the near space[J]. Aerospace Control, 2015, 33(2): 56-61(in Chinese).

[18] MENG Q H, HOU B W, LI D, et al. Performance analysis and comparison for high maneuver target track based on different Jerk models[J]. Journal of Control Science and Engineering, 2018, 2018: 6432485.

[19] 李广华. 高超声速滑翔飞行器运动特性分析及弹道跟踪预报方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016: 19-20.
LI G H. Motion characteristics analysis and trajectory prediction for hypersonic glide vehicles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016: 19-20(in Chinese) .

Strong tracking CKF adaptive interactive multiple model tracking algorithm based on hypersonic target

LUO Yalun[1], LIAO Yurong[2,*], LI Zhaoming[2], NI Shuyan[2]

(1. Department of Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;
2. Department of Electronics and Optics, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Hypersonic targets have complex motion states and high maneuverability. The conventional interactive multiple model (IMM) technique converges slowly and tracks poorly. Based on numerous fading variables, an adaptive interactive multiple model (AIMM) algorithm with strong tracking for cubature Kalman filter (CKF) is proposed. The structure of CKF is examined based on IMM-CKF, and the fading factor of the strong tracking algorithm is added to the covariance matrix of time updating and measurement updating. This allows for the online and real-time adjustment of the filter gain, which can lessen the decrease in filter accuracy brought on by model mismatch. Choose the Singer, 'current' and Jerk models from the IMM model collection. These models introduce singular value decomposition (SVD) decomposition as a solution to the issue that the model dimension expansion prevents Cholesky decomposition in CKF. An adaptive algorithm for Markov matrix in IMM algorithm is proposed. The transition probability is adaptively modified by the value of the model likelihood function to enhance the proportion of the matching model. Simulation results show that the proposed algorithm improves tracking convergence speed by 37.5% and tracking accuracy by 16.51%.

Keywords: hypersonic target; cubature Kalman filter; strong tracking filtering; fading factor; adaptive interactive multiple model

Received: 2022-07-05; **Accepted**: 2022-09-02; **Published Online**: 2022-09-28 10:45
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220927.1128.002
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61805283)
* **Corresponding author**. E-mail: 1151943632@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0589

基于检索增强的噪声标签细粒度图像分类方法

暴恒[1]，邓理睿[2]，张良[3,*]，陈训逊[3]

(1. 中国科学院大学 网络空间安全学院，北京 100049；2. 清华大学 计算机科学与技术系，北京 100084；
3. 国家计算机网络应急技术处理协调中心，北京 100029)

摘 要：在互联网音视频内容分析的应用中，快速建立低标注代价的图像细粒度分类方法具有重要意义。由于类别间具有相似的外观特征，并且存在光照、视角、背景遮挡等干扰因素，细粒度图像分类面临类别数量多、类间差异性小，以及标注代价高、标签信噪比低等挑战。为改善在带有噪声标签的数据环境下海量图像细粒度分类的效果，提出一种基于检索增强的图像细粒度分类方法，在迭代清洗噪声标签的基础上，利用检索范式通过简单类别标注获取更具表达性的特征，提升分类器的识别能力，并在包含1 500个细粒度的食物类别和超过50万张图像的数据集上取得良好的效果。

关 键 词：细粒度图像分类；网络安全；图像检索；数据清洗；噪声标签
中图分类号：TP18; TP389.1
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2284-09

近年来，随着互联网产业和多媒体技术的快速发展与应用，网络在人类的生活中发挥着越来越重要的作用，其是用来获取、交换信息的重要媒介，因此，互联网已成为主流媒体信息传播的重要渠道[1-2]。随着网络技术的发展和信息采集设备的普及，图像信息的种类和数量激增，而大量质量参差不齐的图像和视频信息也给网络安全带来了巨大挑战。因此，中国网络空间内容安全形势依然十分严峻，对网络内容进行有效的识别和审查至关重要。各种社交媒体平台上存在的大量的视觉内容，图像、视频、音频、文本等数据每天都以惊人的速度增长，丰富的视觉内容创建和分享带来了新挑战，对于这些包含丰富视觉信息的图像，如何在海量的图像库中快速且准确地查询或鉴别敏感的目标图像已成为网络空间安全领域的研究热点。因此，图像分类技术发挥着越来越重要的作用。

细粒度图像分类是指在区分图像物体基本类别的基础上，进行更精细的子类划分，如区分车辆、徽标的具体款式或动物花草的具体品种等。传统的物体图像分类研究考虑的对象往往具有区别明确且差异较大的视觉表现，如猫、狗等不同动物或衣帽、汽车等不同物体类别。同类标签的视觉内容具有大致固定的轮廓，且不同类别图像之间结构性上的差异显著。随着技术的进步与需求的提高，在实际应用中，往往需要区分来自某一传统类别下较细粒度级别的不同子类别。这些类别之间几乎没有结构化的布局差异，不同类别间的差异较小。这使得细粒度图像分类相比传统的图像分类更具挑战性。细粒度图像分类问题已经得到研究者们的广泛关注[3-6]，并且在实际工程应用中扮演着重要的角色。

细粒度图像分类问题相较于传统图像分类研究的不同，主要可以概括为以下几个特点：①类别数量多。细粒度分类问题在一定程度上可以看作图像分类在子类别上的纵向扩展，每一个常见分类通常分为不同层次的众多子分类，因此，需要识别

收稿日期：2022-07-05；录用日期：2022-12-02；网络出版时间：2022-12-15 10:31
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221212.1832.005
*通信作者. E-mail：zl@isc.org.cn

引用格式：暴恒，邓理睿，张良，等. 基于检索增强的噪声标签细粒度图像分类方法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2284-2292.
BAO H，DENG L R，ZHANG L，et al. Fine-grained image classification method with noisy labels based on retrieval augmentation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2284-2292 (in Chinese).

的种类往往繁多且层次结构不平衡。②类内方差大, 类间方差小。相同类别的物体图像形态相差较大, 而不同类别的物体图像形态比较接近。如鸟类的细粒度分类, 除对鸟类通用特征的捕捉外, 还需要结合体态、羽色、喙型对不同鸟类的科、属或种群进一步区分。③标注代价高且难度大, 带噪声标签的可能性更高。现有的细粒度图像分类数据集如 CUB200-2011、FGVC-Aircraft[7] 等都需要大量的人工标注, 因此, 标注情况往往会受到主观因素的影响, 导致数据集中含有一定比例的噪声标注。这些噪声标注会在训练过程中对网络的性能带来干扰, 从而影响分类的结果[8]。

细粒度分类方法通常依赖于分类器的选择, 各种因素也限制了提取特征的情况。同时, 针对大规模的图像数据集, 使用分类方法也很容易出现过拟合的情况, 尤其在未经训练的数据集上的准确率会大幅下降。且细粒度图像分类方法想要达到好的效果往往需要精准的注释, 甚至包括对象的部分区域与边界框。而在实际情况中这样的注释是昂贵且需要花费大量的人工成本的。为解决这一难题, 部分研究人员尝试仅使用图像标签解决细粒度分类问题[9-10]。研究表明, 基于图像检索的方法实现细粒度分类可以获得良好的效果[3], 因此, 也越来越受到关注。

本文方法具体创新点包括:

1) 针对海量图片的细粒度图像分类问题中存在的噪声标注问题, 给出一种基于迭代的标签清洗策略。实验表明标签经清洗后, 有效提升了模型准确率。

2) 提出一种基于检索增强的海量图像数据细粒度分类方法。首先, 提取匹配图像与检索库中图像的特征; 其次, 使用余弦相似度计算图像的相似度; 再次, 对相似度进行重排序; 最后, 输出相似度 top-k 的图像。结果表明, 本文方法比图像分类方法有很大的提升。

3) 以食品图像细粒度分类数据集为例, 对本文方法进行验证, 取得了良好的效果。

1　图像细粒度分类研究背景

1.1　图像分类与检索

图像分类是指通过特征学习方法等对图像进行描述, 然后, 使用分类器判定物体类定并返回图像分类的标签。常用的图像分类方法是通过提取图像特征, 然后设计分类器来对图像进行分类。如 Matsuda 等[11] 提出的一种方法, 将整个图像划分为不同的候选区域, 通过分析每个候选区域, 可以同时识别多个物体。Bossard 等[12] 提出使用随机森林进行图像分类的方法, 并证明该方法优于其他分类方法。Bolanos 和 Radeva[13] 提出一种算法, 其核心是分析输入图像的特征图, 通过寻找最相似的图像特征来预测输入物体的种类。上述方法实现了在只有几个边界框的情况下获得高精度和合理的召回水平。但分类器的选择会影响分类方法的效果, 同时针对大规模的图像集, 使用传统的分类方法也可能会出现过拟合现象。因此, 基于图像检索技术进行图像分类的方法逐渐受到关注[14]。

早期的图像检索技术大多是基于文本的图像检索 (text-based image retrieval, TBIR) 方法[15]。但由于是根据图像的名称、尺寸、作者、日期及图像注释等来标注图像, 通常是以关键词的形式来进行查询, 而没有真正对图像本身的内容进行分析, 所以得到的检索结果未必符合用户的检索期望。因此, 基于内容的图像检索 (content-based image retrieval, CBIR) 应运而生。CBIR 在 1992 年由 Hirata 和 Kato[16] 首次提出, 是一种对图像的匹配技术, 通过提取图像的底层视觉特征 (如颜色、纹理、形状等) 来表征图像的内容[17]。首先, 从图像数据库中提取特征并存储; 其次, 计算与查询图像相关的特征; 最后, 检索出最相似的图像, 即通过比较查询图像特征和图像库中的图像特征之间的距离来度量图像之间的相似程度。

由于图像的内容信息比文本信息更丰富, 所以随着技术的提高, TBIR 方法已不能准确地表达图像信息, 无法满足需求。因此, CBIR 方法应运而生, 其检索的速度和效率更高。而图像检索的性能会受到所提取的图像特征状况的影响。伴随着深度学习的引入, 逐渐产生了基于图像内容的深度学习图像检索技术。其主要是将深度学习方法应用在图像检索中的特征提取模块, 利用卷积神经网络提取图片特征, 从而提高图像检索准确率。Babenko 等[18] 证明了为实现分类目的, 卷积神经网络可用于提取描述图像特征的神经代码, 展示了神经代码作为图像检索的视觉描述符的前景。然而该方法的问题是需要标记数据从而训练神经网络, 而图像标记任务可能很昂贵且需要大量的人工成本。Huang 等[19] 提出一种基于深度卷积神经网络的图像检索集合模型。通过 2 种网络获取图像特征并计算加权平均特征向量进行图像检索。结果表明, 在解决图像分类问题时, 与单个神经网络相比, 聚合集成结构有效地提高了学习精度。

1.2　细粒度的图像分类

传统的图像分类[20] 是针对如鸟、狗、花等传统

意义上的物体类别进行区分，这种情况下的不同类别图像之间差异较大，同类别图像之间的差异较小。而在实际应用中，往往需要识别来自某一传统类别下较细粒度级别的不同子类别，因此，细粒度的图像分类受到广泛关注。细粒度图像分类旨在区分一般类别下的子类别的对象，如鸟的种类、狗的品种等。传统图像分类与细粒度级别图像分类的对比如图1所示。

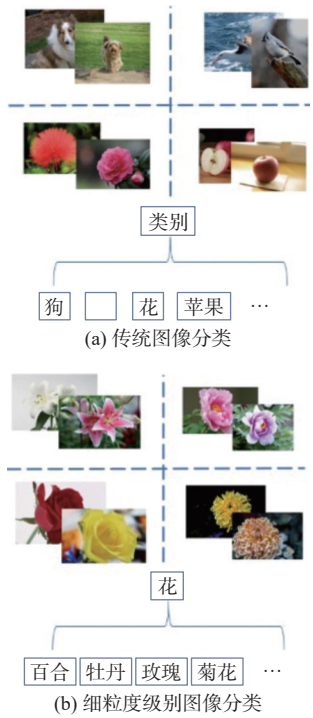


图1 传统图像分类与细粒度级别图像分类对比

Fig. 1 Comparison of traditional image classification and fine-grained image classification

近年来，研究者在基于深度学习的细粒度图像分类领域开展了大量研究。为获取更好的图像特征及提高分类准确率，除探索不同深度学习的骨干网络结构外，在损失函数设计、学习方式调整、采样策略优化等诸多领域都提出了新的方案。Branson等[21]提出一种姿态归一化网络，通过对物体姿态的计算与估计，提取图像局部特征，并且将其用于图像细粒度分类。Zhuang等[22]提出一种用于细粒度分类的注意力成对交互网络，其可以从一对图像中发现对比线索，通过成对交互来区分。为避免出现网络对背景的过拟合问题，白瑜颖等[23]提出一种基于注意力机制的混合裁剪数据增强方法。Zhu等[24]提出交叉注意力机制的方法，可以更好地学习识别细粒度对象的特征嵌入，从而更准确地识别细粒度对象。Ding等[25]提出选择性稀疏采样方法，以捕获各种各样的细粒度细节，从而提取到更好的图像特征。Chang等[26]提出一种新的损失函数，从而提升分类模型的精确度。

上述方法主要是通过改进端到端深度学习策略流水线中的某个环节，以期获取更好的视觉线索或学习到相同类别样本的显著视觉分类模式，提高细粒度分类的准确性。在总体样本量大、单个类别样本量有限且带有噪声的细粒度图像分类问题中更容易导致过拟合或引起模式崩塌。相比之下，基于检索的分类在同类样本的模式表达不明显的条件下更有可能获得更准确的结果。即使没有在某些样本稀疏的类别中寻找到典型特征，依然可以通过与同类样本的距离排序获得良好的分类效果。

1.3 图像重排序算法

随着用户要求的日益提高，仅依靠距离计算的检索模型已不能满足精度的需求，图像检索中的重排序算法成为提升图像检索性能的一大热点问题[27]。

图像重排序算法的性能对图像检索技术起着至关重要的作用。目前大多数的重排序算法主要是基于图像之间的相似度来进行的，即将与查询图像最相似的图像呈现在结果列表的最前面，如Visual Rank[28]算法。但是这样的重排序方式并没有考虑到检索结果的多样性，所以基于结果多样性的重排序算法随之提出，如Multiclass Visual Rank[29]算法。另外，许多研究利用k-最近邻来探索相似关系来解决重排序问题[30]。Shen等[31]利用初始排名列表的k-最近邻作为新查询来生成新的排名列表，每个图像的新分数根据其在该排名列表中的位置进行计算。上述算法都利用了初始排名列表中排名靠前的图像之间的相似关系。因此，可能存在错误匹配图片也包含在待查询图片的top-k中，而正确匹配图片的排序却很靠后的问题。因此，直接使用排名前k的图像可能会在重排序系统中影响最终结果。k-相互最近邻算法[32]是一种针对上述问题的有效解决算法。即当2幅图像被称为k-相互最近邻时，其相互都排在对方的top-k排序中。在此基础上，Zhong等[33]提出k-相互最近邻重排序算法。如果2张图片相似，那么其应该互为前k个最近邻。此算法不需要任何人机交互或任何标记数据，因此，也适用于大规模数据集。

2 本文方法

2.1 基于内容的图像检索

图像检索的目的是让同一类别图片的相似程度尽可能高，不同类别图片的相似程度尽可能低。由于图像本身的内容信息相比纯粹的文本信息更丰富，所以CBIR方法在检索的速度和效率上要求更高。而提取的图像特征的情况会对图像检索的

性能产生影响。因此,伴随着深度学习的引入，产生了基于深度学习的图像检索技术。其主要是将深度学习方法应用在图像检索中的特征提取模块，利用卷积神经网络提取图片特征，从而提高图像检索准确率。CBIR 实现流程如图 2 所示，其主要步骤如下。

步骤 1　对数据进行预处理（包括旋转、增强、切分等）。

步骤 2　特征提取。从图像数据库中提取特征，构建特征向量并存储。

步骤 3　计算与查询图像相关的特征。

步骤 4　检索出具有最相似特征的图像，即通过比较查询图像特征和图像库中的图像特征之间的距离来度量图像之间的相似程度。

步骤 5　返回相似性较高的结果。

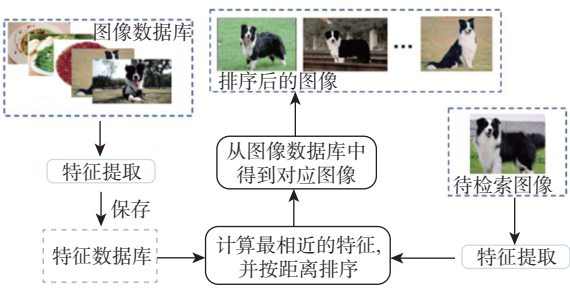


图 2　CBIR 流程

Fig. 2　CBIR process

2.2　基于检索增强的细粒度分类

细粒度的图像分类是一项具有挑战性的任务，相较于传统的图像分类，其难度更大，因为来自从属类别的对象可能具有肉眼难以识别的视觉差异。此外，由于光照强度、背景遮挡或拍摄视角等因素，同一从属类别内的对象也可能会出现较大的外观变化。图 3 以食物和动物为例，对比了细粒度图像的特点，图 3(a) 为香菇油菜和北极鸥的特征，可以发现同类别之间的物体特征差异可能较大；图 3(b) 为不同类别之间特征差异较小，菠菜和油麦菜，北极鸥和环嘴鸥，虽然都属于不同类别，但它们



(a) 同类别之间的特征差异较大

(b) 不同类别之间的特征差异较小

图 3　细粒度食物图像的特点

Fig. 3　Features of fine-grained food images

之间的特征表现却很相似。

为解决这些问题，本文提出一种基于检索增强的噪声标签细粒度图像分类方法，其目的是能够对不同类别但形态相似的物体进行有效的分类，提升在带有噪声标签的数据环境下海量图像细粒度分类的效果。

本文实验流程框架如图 4 所示，实验主要包括特征提取阶段与后处理阶段，其中特征提取阶段包括数据清洗、数据预处理及特征提取，后处理阶段包括特征处理、距离度量及重排序方法。

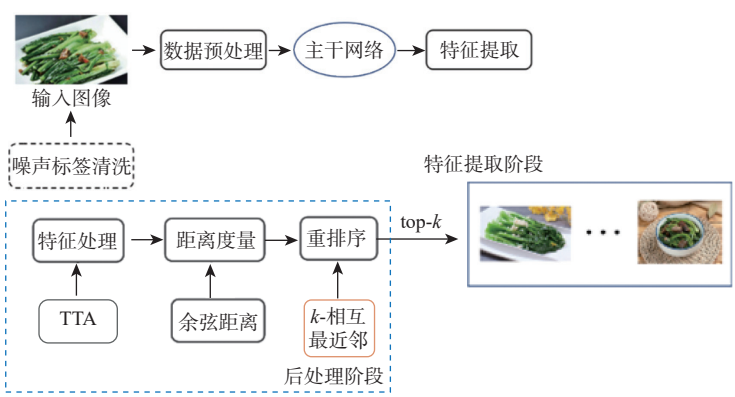
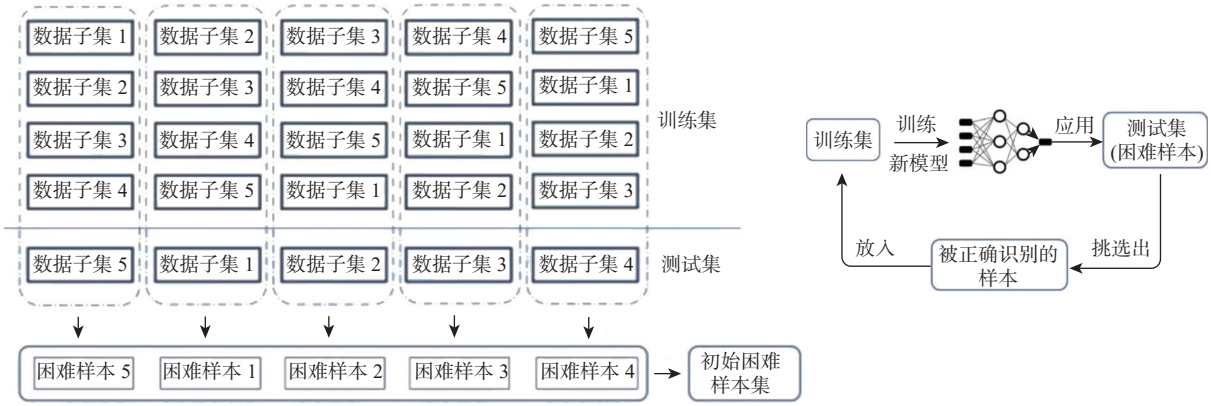


图 4　实验流程框架

Fig. 4　Experimental process framework

2.3 数据清洗

本文实验将数据集划分为训练集和测试集，为使类别之间的区别更加明显，提高模型的泛化性和鲁棒性以提高分类精度，以及针对数据集中存在的噪声标注问题，本文采用一种基于迭代的标签清洗策略。数据清洗的过程如图5所示。



(a) 交叉 证获取初始困难样本集　　(b)迭代清洗困难样本测试集

图5 数据清洗过程

Fig. 5 Data cleaning process

实验中数据清洗的具体步骤如下。

步骤1 模仿交叉验证的形式获取初始困难样本集。将数据集随机划分成5份(数据子集1~数据子集5)进行 k-fold 训练，形成5组训练设置。将每组实验集合中 top-1 分类错误的样本作为训练集，其他样本作为测试集。

步骤2 迭代清洗困难样本测试集。在步骤1形成的训练集与测试集基础上，迭代训练分类模型，并将新模型应用于当前的测试集(即困难样本)，将此时 top-1 分类正确的样本取出加入训练集中，形成新一轮次的训练集与验证集。反复迭代清洗直到结果趋于稳定。

其中，分类模型是以 Resnet50 为主干网络的图像多分类模型，不断对数据集中的图片进行多分类训练，从而筛选出噪声标注图片，达到清洗的效果。在训练过程中使用随机梯度下降优化器 (stochastic gradient descent, SGD) 优化神经网络。

2.4 特征提取

本文使用 EfficientNet[34]、SwinTransformer[35] 及 ConvNeXt[36] 作为主干网络进行特征提取。输入图像大小为224像素×224像素，将经过平均池化层后的输出作为特征。在特征提取时，得到更好的特征提取器是图像检索模型最为重要的部分，因此，需要更好的损失函数来完成扩大类间距的任务。本文使用 Cosface 作为损失函数。Cosface[37] 在 softmax loss 的基础上进行改造，引入 cosine margin 进一步最大化超球面特征空间中的决策裕度。即以归一化的特征为输入，以最大化类间余弦 margin 来学习判别性特征。其中 Cosface 损失函数的表达式为

$$L_{\mathrm{lmc}}=\frac{1}{N}\sum_{i}-\lg\frac{\mathrm{e}^{s(\cos(\theta_{y_i},i)-m)}}{\mathrm{e}^{s(\cos(\theta_{y_i},i)-m)}+\sum\limits_{j\neq y_i}\mathrm{e}^{s(\cos(\theta_j,i))}}\cdot$$

$$\cos\left(\theta_j,j\right)=\boldsymbol{W}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i\qquad m=0.35,s=30\tag{1}$$

对 $\boldsymbol{W}$ 和 $\boldsymbol{x}_i$ 做单位化处理，即

$$\begin{cases}\boldsymbol{W}=\dfrac{\boldsymbol{W}^*}{\|\boldsymbol{W}^*\|}\\ \boldsymbol{x}_i=\dfrac{\boldsymbol{x}_i^*}{\|\boldsymbol{x}_i^*\|}\end{cases}\tag{2}$$

式中：N 为训练样本数；$\boldsymbol{x}_i$ 为对应类别 y_i 的第 i 个特征向量；$\boldsymbol{W}_j$ 为第 j 个类的权重向量；θ_j 为 $\boldsymbol{W}_j$ 和 $\boldsymbol{x}_i$ 之间的角度。

2.5 后处理阶段

2.5.1 测试时间增强

由于食物会因角度及颜色的不同而导致结果有很大的差别，所以本文对测试数据集进行数据扩展。即对5幅裁剪图像的预测结果进行整合：在原图片的4个角和中心处各截取一幅大小相同的图片，最后，选取这些图片结果的平均值进行预测。实验结果表明此数据扩展整合方法有一定的效果。

2.5.2 图像重排序算法

提取特征后在度量2张图片相似度阶段，如果单纯使用余弦距离来计算最终结果，仅是返回数据库中查询图片相似度最高的 N 张图片，可能出现与查询图片对应的正确类别图片包含在前 N 张图片中，但并不一定得分最高，这样就会导致检索结果不准确。本文使用 k-相互最近邻方法对检索结果进行重排序。通过比较2幅图像的相互最近邻，使用 Jaccard 距离计算其间的新距离，再结合使用余弦距离计算出的原始距离，可以得到更为精确的结

果。即通过余弦距离计算查询图像 q 和图像数据集 gallery 中图像的相似度, 由高到低排序, 选择距离前 k 的图像为 k 近邻。计算每对查询图像和 gallery 的原始距离 d 和 Jaccard 距离 d_{Jac}。最终距离 d^*作为 d 和d_{Jac}的组合计算, 表达式为

$$\begin{cases} d^*(q,g_i)=(1-\lambda)d_{\mathrm{Jac}}(q,g_i)+\lambda d(q,g_i) \\ d_{\mathrm{Jac}}=\dfrac{|R(q,k)\cap R(g_i,k)|}{|R(q,k)\cup R(g_i,k)|} \end{cases} \tag{3}$$

式中: g_i为 gallery 图像数据集中的图像; $d(q,g_i)$为原始距离; R 为符合 k-相互最近邻的图片集合。本文 $\lambda=0.3$, $k=6$。

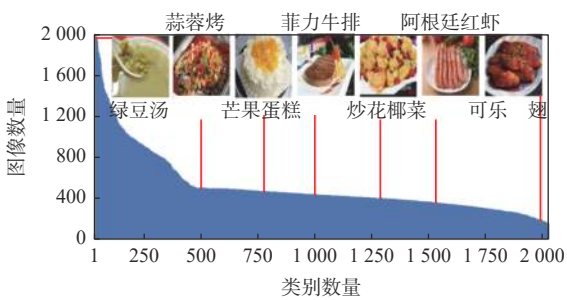
3　实验分析

3.1　数据集描述

本文以食物类别为例, 使用 Food2k[38] 数据集来进行验证。该数据集由美团制作而成, 其中的食物图片由不同个人使用不同设备, 在不同场景下拍摄获取, 包含 1 500 个细粒度的食物类别, 超过 50 万张图像。相比其他主流食物图像识别数据集, Food2k 完全由人工标注且类别划分更细。以比萨为例, Food101[12] 等主流数据集中仅有比萨类, 而 Food2k 将其进一步划分为香肠比萨、榴莲比萨等。因此, Food2k[38] 数据集有类别多、类别不平衡等特点。其基本情况如图 6 所示。



(a) 数据集的部分图像



(b) 数据分布

图 6　Food2k[38] 数据集的基本情况

Fig. 6　Basic situation of Food2k[38] dataset

实验中将数据集划分为训练集和测试集。其中, 训练集由 1 000 个类别的 317 277 张食物图像组成。测试集包括其他 500 个类别中的 209 562 张图片, 并随机划分为 gallery 与 query, query 是待进行查询的图片, 共 10 000 张; gallery 是图像数据库中的图片, 共 199 562 张。

3.2　评价指标

本文使用前 100 张图片的平均精度和 top-1 及 top-5 分类结果作为评价指标。平均精度 M 的计算式为

$$M=\frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\frac{1}{\min\left(m_q,100\right)}\sum_{k=1}^{\min\left(n_q,100\right)}P_q(k)R_q(k)\cdot$$
$$P_q(k)=T_p/P_{\mathrm{a}} \tag{4}$$

式中: Q 为待查询图像的数量; m_q为包含与查询图像 q 相同标签的索引图像的数量 (m_q>0); n_q为系统对查询图像 q 的预测数量; $P_q(k)$为第 q 个查询在 top-k 处的精准率, 即预测正确的图片个数占总的正类预测个数的比例; T_p为被预测为正确的测试样本中真正正确的测试样本数目; P_{a}为所有被预测为正类的测试样本数目; $R_q(k)$为预测 k 与第 q 个查询的相关性, 第 k 个预测正确则为 1, 否则为 0。

搜索结果中置信度最高的 k 张图有正确结果的概率 $t_{\text{top-}k}$, 计算式为

$$\begin{cases} t_{\text{top}-k}=\dfrac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}I\left(l_q,l_i^k\right) \\ I(l_q,l_i)=\begin{cases}0 & l_q\neq l_i\\ 1 & l_q=l_i\end{cases} \end{cases} \tag{5}$$

式中: $I(l_q,l_i)$为查询图像 q 与第 i 张图像是否具有相同标签, 是则为 1, 否则为 0。

3.3　实验结果

通过图像分类方法得到的结果如表 1 所示。本文方法如表 2 所示。实验结果表明使用本文方法的效果要好于直接使用图像分类方法。检索模型的 BaseLine 是使用主干网络进行特征提取, 然后使用余弦相似度计算查询图像与图像库中图片的特征, 并按距离排序取得的结果。

实验结果表明, 在不同的网络下, 对检索结果进行重排序对精度都有很大的提升, 迭代的标签清洗方法及对测试集的数据扩充方法也很有效。本文方法在 ConvNeXt 主干网络下可以使前 100 张图

表 1　图像分类方法结果

Table 1　Results of image classification methods

主干网络	$t_{\text{top-1}}$/%
ResNet	38.57
EfficientNet-b1	42.30
EfficientNet-b5	47.52
Swin Transformer	52.41
ConvNeXt	54.88

表2 本文方法实验结果

Table 2 Experimental results of proposedmethod

主干网络	方法	$t_{top\text{-}1}$/%	$t_{top\text{-}5}$/%	平均精度/%
ResNet	BaseLine	56.73	88.30	53.89
	重排序	79.92	94.80	66.05
	本文方法	86.58	94.77	71.64
EfficientNet-b1	BaseLine	60.61	91.30	61.77
	重排序	90.3	94.80	69.69
	本文方法	94.20	97.40	77.75
EfficientNet-b5	BaseLine	66.50	93.27	66.90
	重排序	94.42	97.30	74.73
	本文方法	95.49	98.00	75.80
Swin Transformer	BaseLine	87.76	95.91	80.33
	重排序	95.13	98.48	84.75
	本文方法	97.05	99.13	88.06
ConvNeXt	BaseLine	94.60	99.50	81.62
	重排序	97.85	99.61	88.66
	本文方法	98.02	99.70	90.56

片的平均精度达到90.56%，$t_{top\text{-}1}$精度达到98.02%，$t_{top\text{-}5}$精度达到99.70%，因此，使用ConvNeXt作为主干网络可以在平均精度上取得最好的效果。

4 结 论

1）本文方法在ConvNeXt主干网络下可以使前100张图片的平均精度达到90.56%，$t_{top\text{-}1}$精度达到98.02%，$t_{top\text{-}5}$精度达到99.70%。

2）本文提出的数据清洗和重排序等方法都对结果有一定的改善，是针对大规模细粒度图像分类问题十分有效的方法。

3）本文方法具有广泛的应用场景和实际的应用价值，其也可以用于解决其他类别的分类问题，如动物、植物等。

为使本文方法能处理更多类别的图片，仍需要继续优化过程中的各项参数。

参考文献（References）

[1] 李赫. 人工智能中的图像识别技术分析[J]. 无线互联科技, 2021, 18(17): 93-94.
LI H. Analysis of image recognition technology in artificial intelligence[J]. Wireless Internet Technology, 2021, 18(17): 93-94(in Chinese).

[2] 任继明, 呼晓璐. 图像识别技术在公共安全领域的运用[J]. 计算机产品与流通, 2019(5): 108.
REN J M, HU X L. Application of image recognition technology in the field of public safety[J]. Computer Products and Distribution, 2019(5): 108(in Chinese).

[3] WEI X S, LUO J H, WU J X, et al. Selective convolutional descriptor aggregation for fine-grained image retrieval[J]. IEEE Transactions on Image Processing:A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2017, 26(6): 2868-2881.

[4] JI X, VEDALDI A, HENRIQUES J. Invariant information clustering for unsupervised image classification and segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 9864-9873.

[5] LIN T Y, ROYCHOWDHURY A, MAJI S. Bilinear CNN models for fine-grained visual recognition[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1449-1457.

[6] 罗建豪, 吴建鑫. 基于深度卷积特征的细粒度图像分类研究综述[J]. 自动化学报, 2017, 43(8): 1306-1318.
LUO J H, WU J X. A survey on fine-grained image categorization using deep convolutional features[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(8): 1306-1318(in Chinese).

[7] MAJI S, RAHTU E, KANNALA J, et al. Fine-grained visual classification of aircraft[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-6.

[8] HAN B, YAO Q, YU X, et al. Co-teaching: Robust training of deep neural networks with extremely noisy labels[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2018, 3: 8527-8537.

[9] ZHANG Y, WEI X S, WU J X, et al. Weakly supervised fine-grained categorization with part-based image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing:A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2016, 25(4): 1713-1725.

[10] SIMON M, RODNER E. Neural activation constellations: Unsupervised part model discovery with convolutional networks[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1143-1151.

[11] MATSUDA Y, HOASHI H, YANAI K. Recognition of multiple-food images by detecting candidate regions[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway: IEEE Press, 2012: 25-30.

[12] BOSSARD L, GUILLAUMIN M, VAN GOOL L. Food-101–mining discriminative components with random forests[C]//Proceedings of the Computer Vision – ECCV. Berlin: Springer, 2014: 446-461.

[13] BOLANOS M, RADEVA P. Simultaneous food localization and recognition[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 3140-3145.

[14] GORDO A, ALMAZÁN J, REVAUD J, et al. End-to-end learning of deep visual representations for image retrieval[J]. International Journal of Computer Vision, 2017, 124(2): 237-254.

[15] LI W, DUAN L, XU D. Text-based image retrieval using progressive multi-instance learning[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2011:2049-2055.

[16] HIRATA K, KATO T. Query by visual example - content based image retrieval[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Extending Database Technology: Advances in Database Technology. Berlin: Springer, 1992: 56-71.

[17] LEE S H, CHOI J Y, RO Y M, et al. Local color vector binary patterns from multichannel face images for face recognition[J]. IEEE Transactions on Image Processing:A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2012, 21(4): 2347-2353.

[18] BABENKO A, SLESAREV A, CHIGORIN A, et al. Neural codes for image retrieval[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2014: 584-599.

[19] HUANG H K, CHIU C F, KUO C H, et al. Mixture of deep CNN-based ensemble model for image retrieval[C]//Proceedings of the IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-2.

[20] 魏秀参. 深度学习下细粒度级别图像的视觉分析研究[M]. 南京: 南京大学, 2018: 18-24.
WEI X S. Visual analysis of fine-grained images under deep learning [M]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 18-24(in Chinese).

[21] BRANSON S, VAN HORN G, BELONGIE S, et al. Bird species categorization using pose normalized deep convolutional nets[EB/OL]. (2014-06-11)[2022-04-05]. http://arxiv.org/abs/1406.2952.

[22] ZHUANG P Q, WANG Y L, QIAO Y. Learning attentive pairwise interaction for fine-grained classification[J]. AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(7): 13130-13137.

[23] 白瑜颖, 刘宁钟, 姜晓通. 结合注意力混合裁剪的细粒度分类网络[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(10): 38-42.
BAI Y Y, LIU N Z, JIANG X T. Fine grained image classification network combined with attention CutMix[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(10): 38-42(in Chinese).

[24] ZHU H W, KE W J, LI D, et al. Dual cross-attention learning for fine-grained visual categorization and object re-identification[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 4682-4692.

[25] DING Y, ZHOU Y Z, ZHU Y, et al. Selective sparse sampling for fine-grained image recognition[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019: 6598-6607.

[26] CHANG D L, DING Y F, XIE J Y, et al. The devil is in the channels: Mutual-channel loss for fine-grained image classification[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2020: 4683-4695.

[27] 李海飞. 图像检索中的重排序算法研究[M]. 郑州: 河南大学, 2015: 7-17.
LI H F. Research on reordering algorithms in image retrieval[M]. Zhengzhou: Henan University, 2015: 7-17(in Chinese).

[28] JING Y S, BALUJA S. VisualRank: Applying PageRank to large-scale image search[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(11): 1877-1890.

[29] AMBAI M, YOSHIDA Y. Multiclass VisualRank: Image ranking method in clustered subsets based on visual features[C]//Proceedings of the 32nd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. New York: ACM, 2009: 732-733.

[30] CHUM O, PHILBIN J, SIVIC J, et al. Total recall: Automatic query expansion with a generative feature model for object retrieval[C]//Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-8.

[31] SHEN X H, LIN Z, BRANDT J, et al. Object retrieval and localization with spatially-constrained similarity measure and k-NN re-ranking[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2012: 3013-3020.

[32] QIN D F, GAMMETER S, BOSSARD L, et al. Hello neighbor: Accurate object retrieval with k-reciprocal nearest neighbors[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2011: 777-784.

[33] ZHONG Z, ZHENG L, CAO D L, et al. Re-ranking person re-identification with k-reciprocal encoding[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 3652-3661.

[34] TAN M X, LE Q V. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks[EB/OL]. (2020-09-11)[2022-04-05]. http://arxiv.org/abs/1905.11946.

[35] LIU Z, LIN Y T, CAO Y, et al. Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2021: 9992-10002.

[36] LIU Z, MAO H Z, WU C Y, et al. A ConvNet for the 2020s[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 11966-11976.

[37] WANG H, WANG Y T, ZHOU Z, et al. CosFace: Large margin cosine loss for deep face recognition[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 5265-5274.

[38] MIN W Q, WANG Z L, LIU Y X, et al. Large scale visual food recognition [C]//Proceedings of the IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Piscataway: IEEE Press, 2023: 9932-9949.

Fine-grained image classification method with noisy labels based on retrieval augmentation

BAO Heng[1]，DENG Lirui[2]，ZHANG Liang[3,*]，CHEN Xunxun[3]

(1. School of Cyber Security，University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China；
2. Department of Computer Science and Technology，Tsinghua University，Beijing 100084，China；
3. National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China，Beijing 100029，China)

Abstract：In the application of Internet audio and video content analysis, it is of great significance to establish a fast fine-grained image classification method with lowlabeling costs. Due to the more similar appearance features between categories and the existence of interference factors such as illumination, viewing angle, and background occlusion, fine-grained image classification faces challenges such as large number of categories, small differences between categories, high labeling cost, and low label signal-to-noise ratio. In order to improve the effect of fine-grained classification of massive images in a data environment with noisy labels, a fine-grained image classification method based on retrieval augmentation was proposed. Based on iterative cleaning of noisylabels, the retrieval paradigm was used to obtain more expressive features through simple category labeling, so as to improve the recognition ability of the classifier. In addition, favorableresults wereachieved on the dataset containing 1 500 fine-grained food categories and more than 500 000 images.

Keywords：fine-grained image classification; network security; image retrieval; data cleaning; noisy labels

Received：2022-07-05；**Accepted**：2022-12-02；**Published Online**：2022-12-15 10：31
URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221212.1832.005

* **Corresponding author**. E-mail：zl@isc.org.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0590

一种基于图注意力机制的威胁情报归因方法

王婷[1,2]，严寒冰[2,*]，郎波[1]

(1. 北京航空航天大学 计算机学院，北京 100191；2. 国家计算机网络应急技术处理协调中心，北京 100029)

摘　　要：威胁情报关联分析已成为网络攻击溯源的有效方式。从公开威胁情报源爬取了不同高级持续性威胁（APT）组织的威胁情报分析报告，并提出一种基于图注意力机制的威胁情报报告归类的方法，目的是检测新产生的威胁情报分析报告类别是否为已知的攻击组织，从而有助于进一步的专家分析。通过设计威胁情报知识图谱，提取战术和技术情报，对恶意样本、IP和域名进行属性挖掘，构建复杂网络，使用图注意力神经网络进行威胁情报报告节点分类。评估表明：所提方法在考虑类别分布不均衡的情况下，可以达到78%的准确率，达到对威胁情报报告所属组织进行有效判定的目的。

关 键 词：威胁情报；高级持续性威胁组织；知识图谱；图注意力机制；攻击溯源

中图分类号：TP391

文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2293-11

如今，高级持续性威胁(advanced persistent threat, APT)新型攻击越来越复杂、持续、有组织，网络空间安全形势日趋严峻[1]。传统的APT组织识别依赖恶意样本的特征，而被广泛使用的样本和攻击无疑给APT组织归因溯源提出难题[2]。威胁情报具有数据内容丰富、准确性高、可自动化处理等特点，将其用于网络安全分析中可以有效提高安全防御能力[3-7]。

随着威胁情报研究技术的不断发展，涌现出大量APT组织分析报告，不同安全厂商对APT组织给出不同命名，导致同一APT攻击组织在不同分析报告中的命名方式不同，为攻击溯源带来了巨大挑战。

为应对这些挑战，本文提出并设计一种基于图注意力机制的威胁情报报告归类的方法。根据真实情报数据，进行APT攻击组织建模，严格分析并提出威胁情报要素及其关系，构建网络安全知识图谱，并基于此复杂图网络进行威胁情报报告节点分类，旨在将不断产生的威胁情报报告分类到已知攻击组织类别中，形成可用于追踪溯源定性的重要依据，缩短溯源周期。随着图神经网络研究的发展，将网络表示学习方法运用到安全领域成为研究的热点。本文使用图注意力网络(graph attention network, GAT)模型[8]对构建的数据集进行分类，实验表明本文方法可以有效地进行威胁情报报告分类。

本文的创新点如下：

1）先从不同渠道搜集公开威胁情报，威胁情报生产链中包含了各式各样的情报生产厂商，对不同的威胁情报源进行报告爬取及收集，最终得到关于22个攻击组织的1 171篇威胁情报分析报告和恶意代码分析报告。

2）对网络威胁情报报告进行关联分析。通过半自动化的方式对威胁情报要素进行抽取，针对不同的威胁情报要素进行属性分析及特征扩线。其中，恶意代码样本作为APT组织的攻击武器库，对溯源分析起着至关重要的作用。通过多种方式对

收稿日期：2022-07-05；**录用日期**：2022-09-09；**网络出版时间**：2022-12-28 15:35
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221227.1603.004
基金项目：国家重点研发计划 (2019QY1400)
* **通信作者**. E-mail：yhb@cert.org.cn

引用格式：王婷，严寒冰，郎波. 一种基于图注意力机制的威胁情报归因方法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2293-2303.
WANG T，YAN H B，LANG B. Threat intelligence attribution method based on graph attention mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2293-2303 (in Chinese).

恶意代码样本特征进行分析和提取，并建立富属性的攻击组织知识图谱，之后基于同构网络图注意力机制对报告节点进行组织归类。

3）通过对实验结果的分析和评估，表明本文方法可以有效地对不同APT组织的分析报告进行分类。

1 相关工作

1.1 溯源分析手段

网络攻击溯源被定义为“确定攻击者（或攻击者使用设备）的身份或位置的过程”[9]，通常需要经验丰富的安全专家参与。溯源分析的方法主要有基于恶意样本分析、域名/IP溯源、全流量分析、入侵日志等方法，这些方法仍然停留在对威胁行为和恶意样本的人工分析阶段[10]。自动化攻击归因尝试对从恶意样本的代码和行为中提取的特征，应用各种机器学习技术，识别恶意代码所属的恶意家族。然而相同的恶意软件可以被多个参与者重复使用，使用恶意软件执行攻击的参与者可能与恶意软件的作者不同，因此，仅靠恶意软件信息难以准确溯源攻击者的身份[11-12]。为实现已知攻击者或攻击组织的溯源，典型的方法是通过融合威胁情报和网络攻击事件线索数据，构建网络安全威胁情报知识图谱，这已经成为一个趋势[13-18]。

威胁情报是关于威胁的信息，利用公开的资源，用于发现威胁并指导企业行动以改善安全状况。英国的国家网络安全中心（The National Cyber Security Centre, NCSC）将威胁情报分为4种：战略情报、可操作情报、战术情报和技术情报。战略情报通常为行业总揽、攻击趋势等比较宏观的报告；可操作性情报是针对特定组织即将发生的攻击情报；战术情报指战术、技术、程序 (tactics techniques and procedures, TTP) 用来描述攻击者的方法、工具和策略，是对攻击者行为、战略战术层次的描述，通常以自然语言描述的形式出现在非结构化文本中；技术情报又称攻击陷落指标（indicator of compromise, IOC），是用于机读的可以自动化检测、分析的信息。

威胁情报分析报告是对复杂APT组织进行持续追踪和全面分析的重要信息来源。为高效利用威胁情报分析报告，不同学者提出了不同的分析框架，其中，广泛的研究是利用主题模型将威胁情报报告划分为不同主题。Lu等[19]提出了DTD-FETC（domain-oriented topic discovery based on features extraction and topic clustering）系统，其利用词频-逆文档频率（term frequency-inverse document frequency, TF-IDF）方法、潜在狄利克雷分配（latent Dirichlet allocation, LDA）方法和命名实体识别模型对威胁情报报告进行关键词提取并生成向量，进而结合层次聚类将威胁情报报告划分为不同主题。Hossen等[20]较早利用多分类器对威胁情报分析报告进行主题分类，再通过主题建模对不同类型的威胁情报分析报告进行主题词挖掘。然而对威胁情报分析报告进行主题归类无法作为APT攻击组织溯源的直接依据，仍需要大量的后续分析。因此，本文旨在设计模型将威胁情报分析报告映射到其所属攻击组织，据笔者所知，这是第1项将威胁情报分析报告进行攻击组织分类的工作。

1.2 图表示学习技术

图表示学习又称图嵌入，其目的是将网络中的节点表示为低维、稠密的实值向量，且需要满足在原始网络中相似的2个节点在向量空间中也要尽可能地相近。好的网络表示需充分利用网络中隐含的丰富信息，如节点的属性特征、边的属性特征及网络的拓扑结构等信息[21]。近年来，深度学习在自然语言处理领域的长足发展，为网络表示学习领域带来了一系列新的研究方向和技术方法。2014年，DeepWalk较早在网络表示学习领域引入了深度学习技术，其先使用随机游走算法在网络中采样生成节点序列，然后用Skip-Gram模型对序列的滑动窗口中的节点对进行概率建模，通过最大化上下文的共现概率，最终训练得到每个节点的向量表示[22]。之后涌现了大量此种基于随机游走结合Skip-Gram的网络表示学习。近几年来，图神经网络也展示了其在这个领域的卓越性能。2013年，Bruna等[23]较早提出基于谱域和基于空域的图卷积神经网络，相比谱域的图卷积神经网络，更多工作主要针对基于空域的方法进行改进，GraphSAGE（graph sample and aggregate）对每个节点的邻域进行采样，得到固定大小的邻居节点集合，再通过聚合邻居特征得到中心节点的向量表示。受注意力机制的启发，GAT提出用不同的注意力系数对节点邻居信息进行聚合[23-28]。

2 本文方法

2.1 本文方法的模型

本文提出一种基于图注意力机制的威胁情报报告分类方法，该方法将APT攻击归因建模为多文本分类问题，可以有效地利用已有标记的报告对新的威胁情报分析报告进行组织归类。

本文方法的工作流程如图1所示，包括以下主要步骤：①APT组织威胁情报报告收集；②威胁情报要素提取；③利用知名厂商Virustotal的分析引

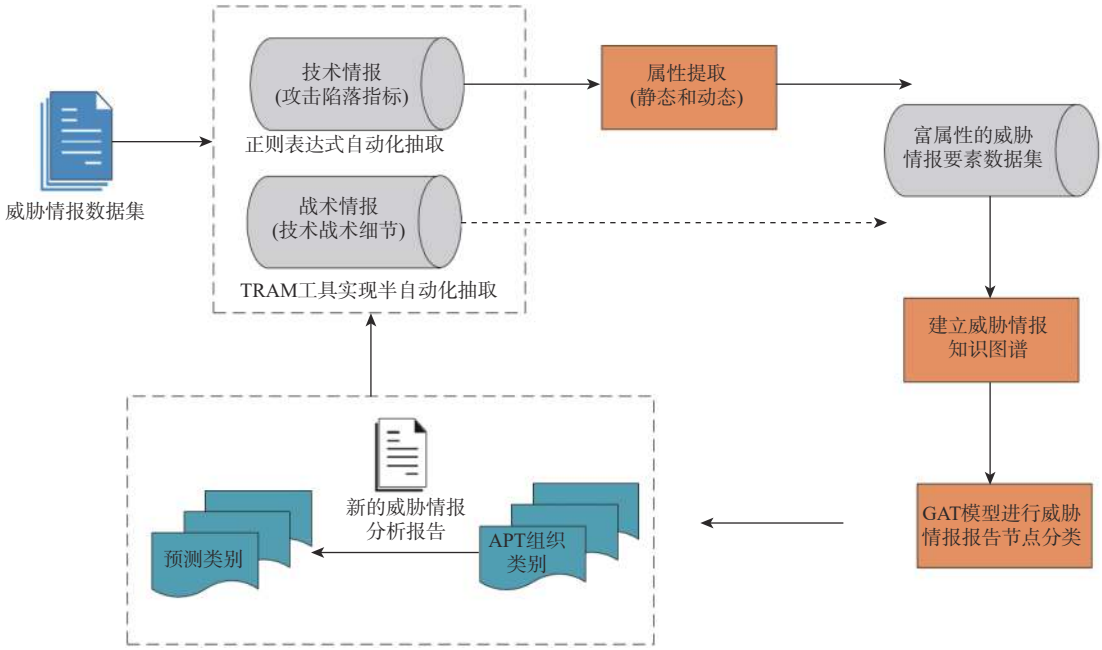


图 1　本文方法工作流程

Fig. 1　Workflow of the proposed method

擎对威胁要素进行特征扩线; ④对得到的数据集建立威胁情报知识图谱, 并使用节点分类模型对 APT 组织分析报告进行组织归类。首先, 从各大公开威胁情报源收集或爬取 APT 组织分析报告; 其次, 对 APT 组织进行建模, 设计威胁要素, 并通过半自动化的方法提取技术情报和战术情报; 再次, 进行威胁要素特征扩线, 从静态特征和动态特征 2 方面对其进行属性补充; 最后, 使用同构图注意力机制对已标记的 APT 组织样本进行分类。通过对已有的知识库进行训练, 建立模型, 当产生新的 APT 事件分析报告时, 判断其是否为已知类别的 APT 组织, 给专家判断做出一定的指导, 从而缩短攻击溯源周期。

2.2　威胁情报知识图谱构建

本文参考国内外各大威胁情报平台设计(如 VirusTotal、绿盟等), 对战术情报和技术情报进行抽取, 以建立一种面向已知威胁情报来判断未知威胁情报类别的模型。

2.2.1　网络威胁情报实体

1) 威胁情报报告实体。其多以非结构化的数据形式出现, 是其他威胁要素的综合。

2) 恶意样本实体。其是 APT 组织使用的武器库, 具有唯一的哈希值。恶意代码样本具有多种静态属性, 包括所属恶意家族信息、恶意样本描述信息、原始文件名称、恶意样本编写语言、恶意样本产生的威胁行为, 以及 ImpHash 值和 pe-resource 等。其中, ImpHash 值是恶意样本导入表的唯一标识。pe-resource 是恶意样本使用的资源列表。

3) IP 实体。其属性包括 IP 的地理位置、IP 所属自治系统(autonomous system, AS)。

4) 域名实体。其属性包括域名注册信息和 Sophos Category, 其中 Sophos Category 是 Sophos 公司对域名所做的恶意域名标识, 如 Commad and Contral。

5) Techiniques 实体。其属性包括技术名称和对技术的详细描述。

6) Tactics 实体。其属性包括战术名称和对战术的详细描述。

7) URL、FilePath、Register 和漏洞实体, 其中, 漏洞实体主要指公开披露的网络安全漏洞(common vulnerabilities and exposures, CVE), 这些实体的属性包括名称。

2.2.2　威胁情报实体关系

1) IP-Malware 关系。样本与特定 IP 地址通信, 样本中包含某 IP 地址, 样本是从某 IP 地址下载的。

2) IP-Domain 关系。域名可以正向解析到 IP 地址或 IP 地址逆向解析到域名。

3) Domain-Malware 关系。样本与特定域名通信, 样本中包含某域名, 样本是从某域名地址下载的。

4) Malware-Malware 关系。不同样本间的同源关系。

5) 威胁情报报告-其他威胁要素关系。威胁情报报告包含威胁要素。

威胁情报知识图谱结构如图 2 所示, 其中, URL 为统一资源定位符(uniform resource locator)。

2.3　威胁情报实体关系提取

根据 2.2 节威胁情报知识图谱, 本文对 22 个

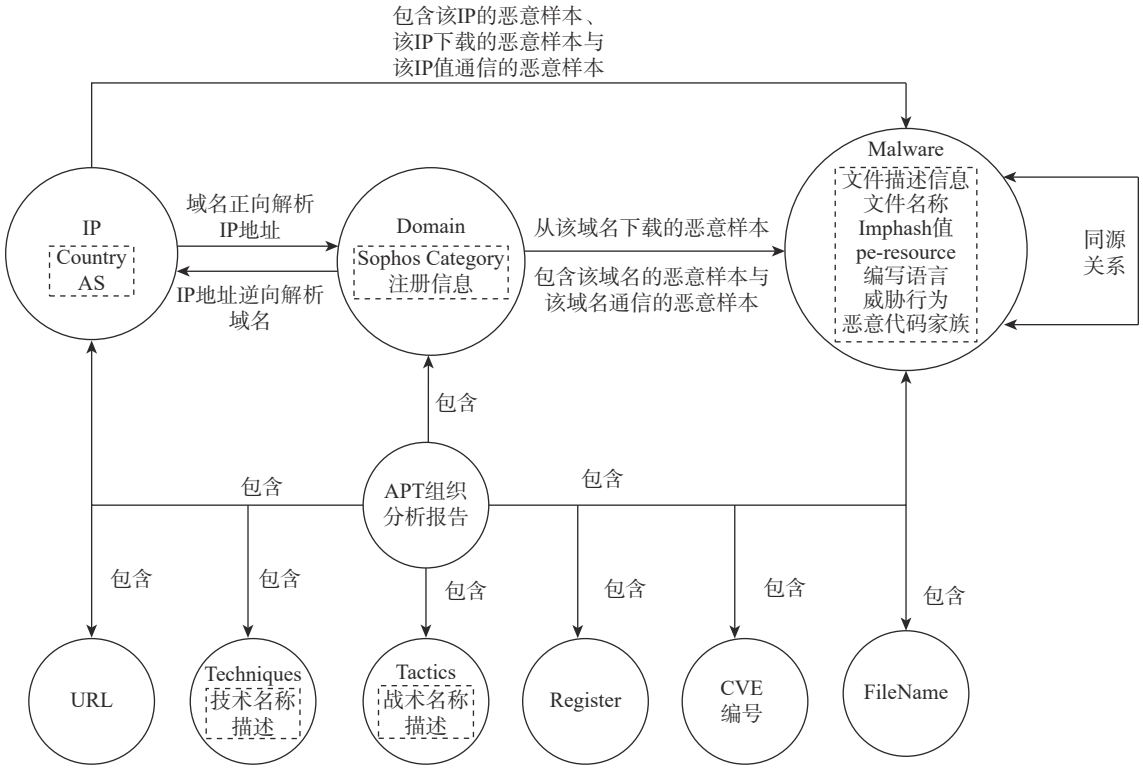


图2 威胁情报知识图谱结构

Fig. 2 Threat intelligence knowledge graph structure

APT攻击组织的1 171篇公开的中英文APT组织分析报告和恶意代码分析报告(统称威胁情报报告)进行实体关系提取。先进行实体抽取,其中,技术情报为7类IOC实体,构建正则表达式对其抽取,部分表达式展示如表1所示。其中,a-z表示匹配从a到z的所有小写英文字母,A-Z表示匹配从A到Z的所有大写英文字母。

表1 部分IOC正则表达式

Table 1 Some examples of IOC regular expressions

实体类型	正则表达式
MD5	[a-f 0-9]{32}|[A-F 0-9]{32}
SHA1	[a-f 0-9]{40}|[A-F 0-9]{40}
SHA256	[a-f0-9]{64}|[A-F0-9]{64}
CVE	CVE-[0-9]{4}-[0-9]{4,6}
IP	((25[0-5]|2[0-4]\d|((1\d{2})|([1-9]?\d))\).){3}(25[0-5]|2[0-4]\d|((1\d{2})|([1-9]?\d)))
Domain	[a-zA-Z0-9][-a-zA-Z0-9]{0,62}\.+?)([a-zA-Z][-a-zA-Z]{0,62}

提取战术情报需要利用复杂的自然语言处理技术和大量语料库。受限于网络安全语料库不足,以及手工标注需耗费大量人力,本文暂不考虑通过自然语言处理技术进行TTP的提取。本文利用MITRE公司于2019年12月开源的TRAM工具将威胁情报分析报告映射到其发布的“对手战术、技术和通用知识”(adversarial tactics, techniques, and common knowledge, ATT&CK)模型来自动提取TTPs。利用TRAM工具,用户手动上传威胁情报报告,TRAM将报告按句划分,将句子映射到ATT&CK中的TTPs项,并给出置信度,如图3所示。由专家手动确认其映射是否正确,并生成TTPs报告。再进行关系抽取,已知威胁报告和其他9类威胁实体存在包含关系,分别对恶意样本、域名和IP这3类重要技术情报进行属性分析并建立关联关系,最终得到威胁情报异构网络。

1)恶意样本属性和关系提取

爬取国外知名厂商VirusTotal分析引擎结果,分析得到恶意样本描述信息、原始文件名称、恶意样本编写语言、恶意样本产生的威胁行为,以及ImpHash值和pe-resource。其中,如果2个文件具有相同的ImpHash值,则其具有相同的导入函数出现顺序(import address table, IAT),这意味着这些文件是用相同的源代码编译的,并且编码方式相同,可以建立样本之间重要的同源关系。

利用AVClass2.0对得到的恶意代码样本集进行恶意家族判别,如果2个样本属于同一恶意代码家族,则建立同源关系。

利用反汇编技术,抽取不同维度的代码特征,包括数字证书、字符串、pdb信息、描述信息和基于应用程序编程接口(application programming interface, API)的代码切片特征,综合计算相似值,相似值大于0.6则判定为同源样本,建立同源关系。由于本文主要研究内容为威胁情报关联分析,故对此部分内容不做详细描述。

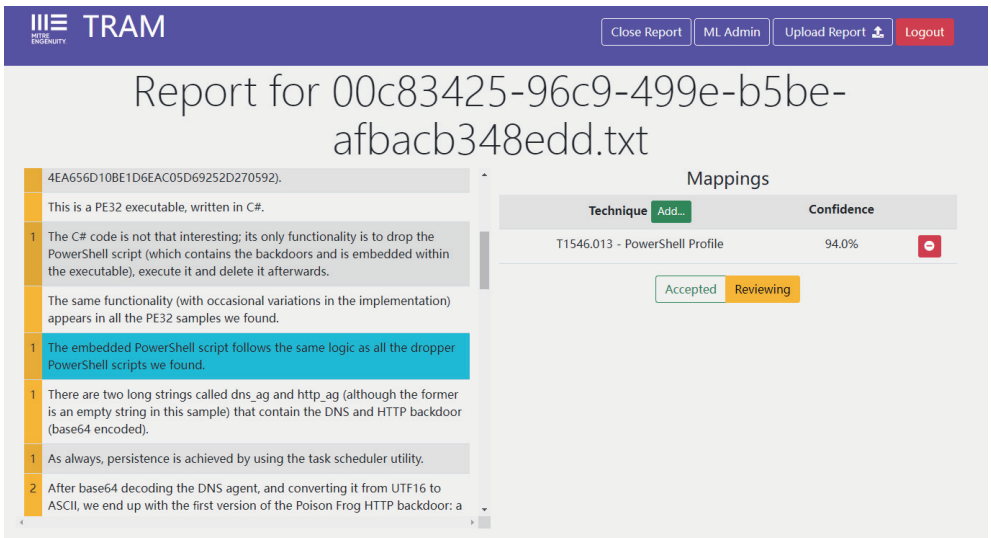


图 3　TRAM 工具使用样例

Fig. 3　Application example of TRAM tool

2) IP 属性和关系提取

通过爬取国外知名厂商 VirusTotal 分析引擎结果, 可以分析得到: ①静态特征, IP 的地理位置、IP 所属 AS; ②动态特征, 与样本的通信、下载和包含关系。

3) 域名属性和关系提取

通过爬取国外知名厂商 VirusTotal 分析引擎结果, 可以分析得到: ①静态特征, 域名的 whois 信息, 包括域名的注册信息、域名的恶意标识; ②动态特征, 与样本的通信、下载和包含关系。

3　基于图注意力机制的节点分类

本文旨在通过图注意力机制, 对建立的威胁情报异构网络进行浅层表示学习, 从而实现对威胁情报报告节点进行组织类别分类。近年来, 异构图神经网络蓬勃发展, 2021 年 Lyu 等[29] 系统再现了最新的 12 个异构神经网络模型, 令人惊讶的是, 由于各个模型的数据处理和评估设置不同, 使得同构网络的许多经典方法如图卷积神经网络(graph convolutional network, GCN)、GAT 等很大程度上被低估了。在大多数情况下, 即使是普通的 GAT 模型也可以在输入数据合理的情况下超越很多异构网络模型, 因此, 本文将沿用同构图注意力机制模型, 并将其应用于富属性的威胁情报网络。

3.1　异构网络映射为同构网络

在建立威胁情报知识图谱后, 得到包含 9 类实体的异构信息网络 $G=(V,\ E)$, 其中, E表示边, V表示节点, $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_9\}$,威胁情报报告节点 v_i是本文进行分类的目标节点。v_i之间通过其他各类威胁要素间接相连, 如果 2 个v_i节点直接或间接链接到了相同的威胁要素, 则 2 个v_i节点之间建立边。如图 4 所示, 左边为威胁情报异构图, 蓝色节点表示待分类的威胁情报报告节点, 其他颜色表示其他各类威胁要素, 最终映射为只包含威胁情报报告节点的同构信息网络。

3.2　节点向量化表示

在得到关于威胁情报报告的同构网络之后, 继而对威胁情报报告节点进行初始化向量表示, 其计算过程如下:

$$\boldsymbol{D}_{\text{emb}}=\sum_{i=2}^{9}\sum_{j=1}^{m}\boldsymbol{V}_{ij} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{V}_{ij}$为与该威胁情报报告节点存在包含关系的其他类别的实体的向量表示, i为相邻实体类别, j为该类别第j个实体。

在威胁情报知识图谱中, 实体节点往往不具有

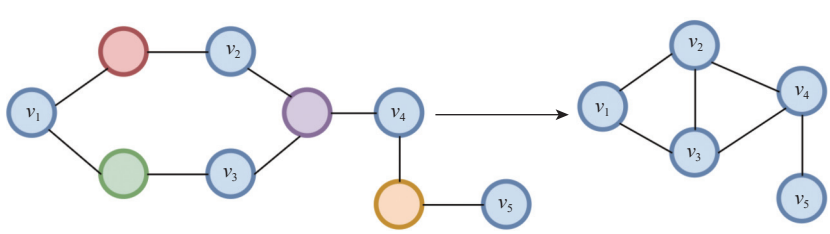


图 4　威胁情报异构网络映射为同构网络

Fig. 4　Heterogeneous threat intelligence networks mapped to homogeneous networks

实际含义，如10.0.0.1为数字和标点的组合，这些实体的向量初始化往往为随机初始化，这极大降低了其表示能力。本文对恶意样本、IP和域名的属性进行了挖掘，因此，这3类实体具有更加丰富的含义，如域名fsportal.net，恶意标识为spyware and malware，则其初始化向量包含“间谍软件和恶意软件”的含义。此外，根据MITRE公司提供的ATT&CK模型，可以找到对应战术和技术项的自然语言描述，利用word2vec模型对其进行向量化，可以表示其具体的恶意操作信息。在对威胁情报报告表示的时候，这5类实体的向量作为重要信息聚合进去，会在一定程度上提高节点的表示能力。

3.3 同构图注意力机制进行节点分类

图神经网络的核心是消息传递机制，通过聚合邻居特征信息来学习目标节点特征向量。本文考虑到不同邻居节点的属性信息不同，对学习目标节点的嵌入表示应该有不同的贡献。图注意力模型通过注意力机制获得邻居节点的注意力权重，并按权重聚合邻居节点的特征，从而可以更准确地学习目标节点的嵌入表示。如图5所示，红色节点表示目标节点，蓝色节点表示邻居节点。

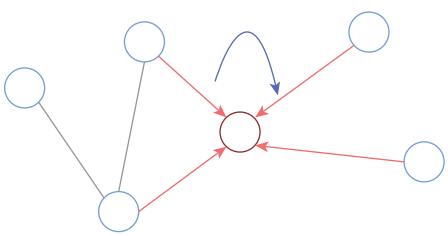


图5 图注意力机制消息聚合示意图

Fig. 5 Schematic diagram of message aggregation of graph attention mechanism

GAT先通过线性变化$\boldsymbol{W}$将输入特征向量$\boldsymbol{h}=[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_n]$，$\boldsymbol{h}_l\in\mathbf{R}^F$转换为高级特征。不同邻居节点的重要性不同，对目标节点特征表示的贡献也不同。GAT通过计算注意力权重来区分邻居节点的重要程度，并聚合按不同注意力权重缩放后的邻居节点特征表示，得到更新后的目标节点特征表示为

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

式中：σ为非线性激活函数；α_{ij}为节点j对节点i的重要程度，可表示为

$$\alpha_{ij}=\mathrm{soft\,max}(e_{ij})=\frac{e_{ij}}{\exp\left(\sum_{k\in N(l)}e_{ik}\right)} \tag{3}$$

$$e_{ij}=\mathrm{LearkyReLU}(\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{W}\boldsymbol{h}_i,\boldsymbol{W}\boldsymbol{h}_j]) \tag{4}$$

其中，LearkyReLU为采用的非线性激活函数。注意力网络有很多的设计方式，本文选择对节点i和j的表示进行拼接，再映射为一个标量。因此，$e_{ij}\neq e_{ji}$，即注意力值是非对称的。此外，在聚合邻居信息时，需要对每个节点的所有邻居注意力值进行归一化。归一化之后的注意力权重α_{ij}才为真正的聚合系数。

同时，GAT可以使用多头注意力机制从不同方面学习节点特征表示，从而获得目标节点的多个不同的特征表示，最终采用均值的方式对多头注意力机制进行输出，如下：

$$\boldsymbol{h}_i'=\sigma\left(\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\sum_{j\in N(i)}\alpha_{ij}{}^k\boldsymbol{W}^k\boldsymbol{h}_j\right) \tag{5}$$

图6为同构图注意力机制模型，模型的输入为$\boldsymbol{X}$，$\boldsymbol{H}$为节点向量，经过一次注意力机制网络层训练提取特征后，输出为节点最终的向量表示$\boldsymbol{Z}$和预测类别。

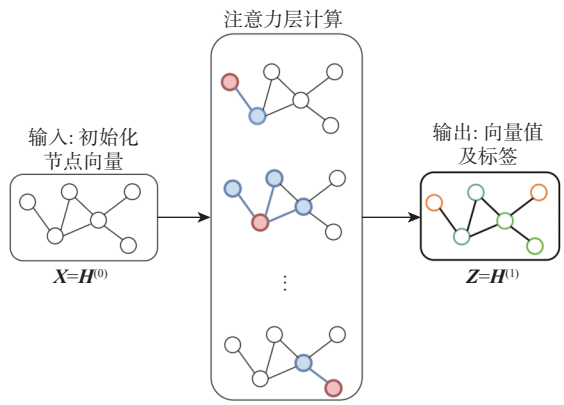


图6 同构图注意力机制模型

Fig. 6 Homogeneous graph attention mechanism model

4 实验与结果

在本节中，将介绍数据集、实验环境，并对实验进行评估。

4.1 数据集

本文主要针对22个具有国家背景的APT组织，收集非结构化威胁情报分析报告，并在一定程度上保证数据的及时和有效，因此，本文主要关注2015年以后产生的威胁情报分析报告。

由于不同的安全公司会以不同的方式命名同一个攻击组织，这将为采集数据带来挑战。因此，本文参考MITRE公司对APT攻击组织的命名方式，并结合国内安全厂商对APT组织的中文命名方式，整理了22个APT攻击组织的别名列表，部分展示如表2所示。

据此，本文爬取了国内外不同安全厂商（见

表 2　APT 部分组织别名

Table 2　APT part organization aliases

APT组织	别名
Sofacy	APT28, PawnStorm, PawnStorm, FancyBear,Sednit, SNAKEMACKEREL, TsarTeam, TsarTeam, TG-4 127, Group-4 127, STRONTIUM, TAG_0700, Swallowtail,IRONTWILIGHT, Group74, SIG40, GrizzlySteppe, apt_sofacy
BITTER	T-APT-17, APT-C-08, 蔓灵花
APT32	海莲花、OceanLotusGroup, OceanLotus, CobaltKitty, APT-C-00, SeaLotus, SeaLotus, APT-32, OceanBuffalo, PONDLOACH, TINWOODLAWN
Confucius	孔夫子
SideWinder	响尾蛇

表 3　本文使用的威胁情报源

Table 3　Threat intelligence sources used in this paper

威胁情报源	厂商名称
国内安全厂商	绿盟, 奇安信, 360, 微步在线, 安天
国外安全厂商	MITRE ATT&CK, CheckPoint, CrowdStrike, Microsoft, Trend Micro,Symantec, FireEye, Kaspersky, Welivesecurity, Malwarebytes, Mandiant,Ahnlab, VirusTotal
Github开源项目	APTnotes

表 3)公开发布的威胁报告, 并利用 APTnotes(一个开源的包含自 2008 年以来的网络威胁报告的威胁情报存储库)收集了共计 1 171 篇公开的中英文 APT 组织分析报告和恶意代码分析报告(统称威胁情报报告), 其中, APTnotes 详见 https://github.com/aptnotes/data。这些报告均被专家进行过过滤, 具有明确唯一的组织归属, 且包含丰富的 IOC 信息。图 7 为来自 FireEye 的威胁情报对 APT32 的攻击活动描述, 可以观察到威胁情报报告以自然语言的形式描述攻击组织真实攻击活动情况, 包括使用的基础设施信息和攻击手段信息。

由于不同组织活动频率不同, 收集到的不同组织的威胁情报报告数量也有差异, 如图 8 所示。

对威胁情报报告进行进一步实体关系抽取, 从 1 171 篇威胁情报分析报告中提取到 12 310 个威胁情报实体, 具体统计如图 9 所示, 16 887 条实体关系, 具体统计如图 10 所示。考虑到威胁情报受时间影响较大, 本文将数据按照发布时间的先后排序, 然后将数据集按照 6:4 划分为训练集和测试集, 并将其内部顺序打乱。

4.2　实验环境

在 Python 中使用 PyTorch 实现了本文方法的模型, 模型超参数设置如表 4 所示, 其参数含义具体如下:

seed 表示种子数, weight_decay 表示权重衰减参数, nb_head 表示注意力机制头数, α 表示正则化超参数, l_r 表示学习率, hidden 表述隐藏层维数, dropout 表示随机失活率, patience 表示训练停止的轮数。

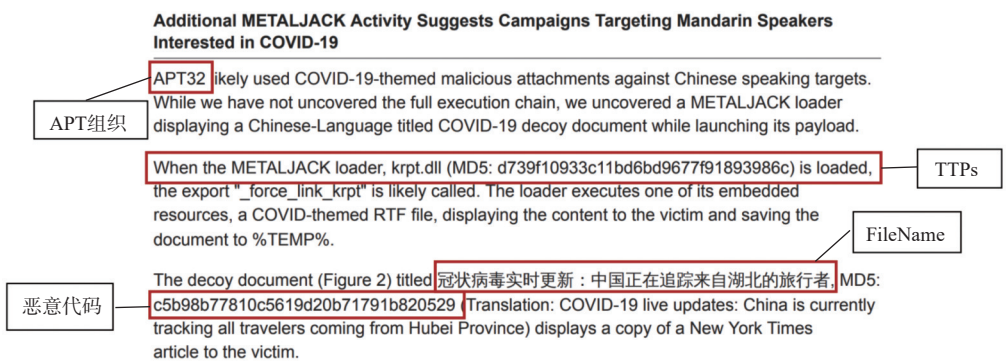


图 7　FireEye 发布的与 APT32 相关的威胁情报报告示例

Fig. 7　Example of threat intelligence report related to APT32 released by FireEye

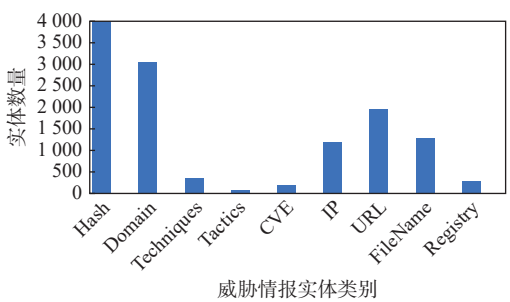


图 8　威胁情报实体数量

Fig. 8　Statistics of threat intelligence entities

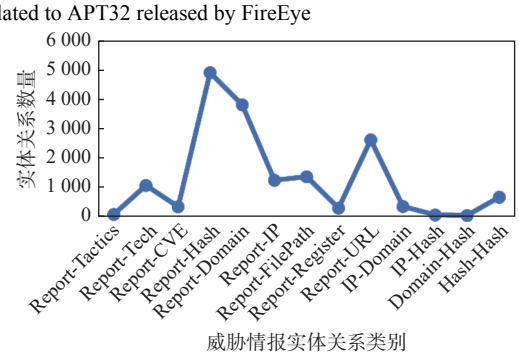


图 9　威胁情报关系数量

Fig. 9　Statistics of threat intelligence relations

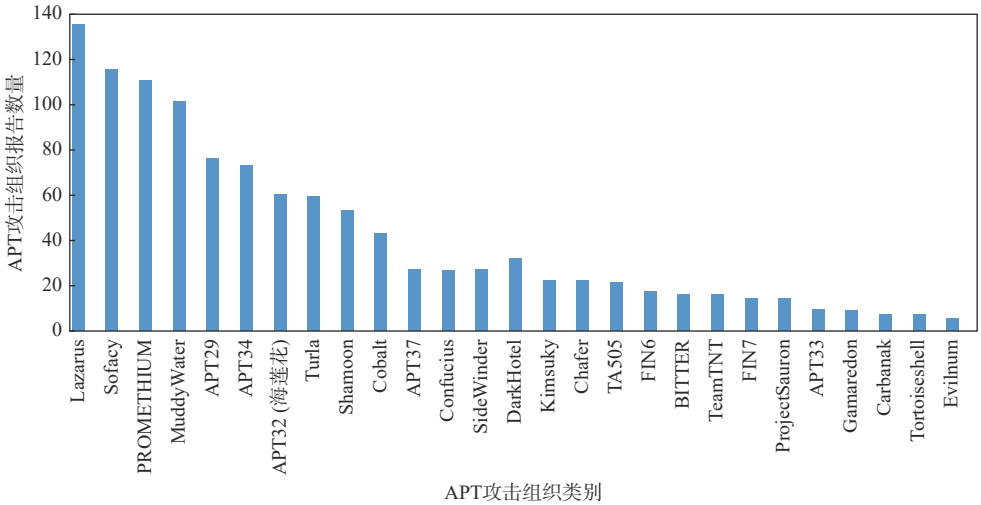


图 10 APT 攻击组织分析报告统计

Fig. 10 Statistics of APT organization analysis report

表 4 模型超参数设置

Table 4 Super parameter settings of model

参数	数值
seed	72
weight_decay	5×10^{4}
nb_head	32
α	0.2
l_r	0.005
hidden	8
dropout	0.3
patience	200

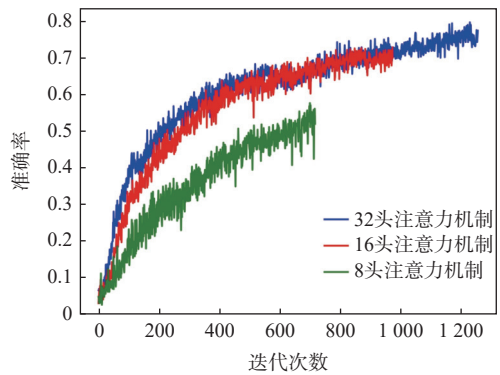


图 11 多头注意力机制准确率

Fig. 11 Accuracy of multi-head attention mechanisms

4.3 本文方法的模型分析

在本节中，从以下 3 个方面评估本文方法：恶意代码静态属性的提取对模型最终结果的影响，图注意力机制中多头注意力机制个数对模型效果的影响，以及模型在威胁情报报告分类中的有效性。

4.3.1 恶意代码属性提取的必要性

本文使用多种方式对恶意样本的属性进行提取，并通过恶意代码反汇编后的代码段的相似程度来判断 2 个样本是否同源，以此来建立样本同源关系。本文在去掉属性挖掘建立的关系之后，进行实验，准确率降低 4%。由此证明，恶意样本作为攻击组织使用的重要攻击工具，可以建立稳定的关联关系。

4.3.2 多头注意力机制个数的影响

在实验过程中，为验证多头注意力机制对模型的影响，分别选取 8、16、32 个多头注意力机制进行实验，结果表明，选取 32 头机制时，实验效果最好，如图 11 所示。

4.3.3 模型有效性分析

为度量本文方法的分类性能，本文选取了 3 个度量指标来进行模型评估，分别为分类精确率 P、分类查全率 R 和 F_1 值，通过调和 P 和 R 这 2 方面因素，来衡量模型分类的能力。如表 5 所示，本文在测试集预测得到每个类别的 3 个指标。

经过分析得知，有 15 个攻击组织的识别准确率可以达到 0.7 以上，这说明本文方法可以识别 70% 以上的正例。3 个攻击组织的判别精确率低于 0.3，分别是 Kimsuky、DarkHotel 和 APT33。其中，DarkHotel 和 APT33 的样本数量太少，经过检查，这些报告无法与其他报告建立联系，为孤立节点，因此，无法被正确识别。Kimsuky 有 7 个报告判别错误，分别被误判为 Lazarus 和 Turla 这 2 个组织，对这 7 个报告进行分析得 Kimsuky 与 Lazarus 和 Turla 在攻击技术和攻击工具库上具有一定的联系，因此，没有被正确归类。

由于 APT 组织的活跃程度不同，可以收集到的不同攻击组织的报告数量有很大差别，因此，本文的数据集不可避免具有类别不平衡的问题。

micro-F_1 为 F_1 值的微平均，考虑了每个类别的数量，所以适用于数据分布不平衡的情况，在 3 类

表 5　性能评估指标

Table 5　Performance evaluation indicators

组织	P	R	F_1	报告数量
APT29	0.70	0.89	0.78	18
APT32	0.80	0.67	0.73	24
APT33	0.20	0.25	0.22	4
APT34	0.90	0.76	0.83	25
APT37	0.75	0.60	0.67	5
BITTER	0.57	0.50	0.53	8
Cobalt	1.00	0.33	0.50	6
Confucius	0.90	0.82	0.86	11
DarkHotel	0.15	0.67	0.25	3
FIN6	0.60	0.75	0.67	4
FIN7	0.57	0.50	0.53	16
Kimsuky	0.29	0.20	0.24	10
Lazarus	0.77	0.90	0.83	106
MuddyWater	0.88	0.84	0.86	45
ProjectSauron	0.80	0.80	0.80	10
Shammon	1.00	0.75	0.86	8
SideWinder	0.67	0.50	0.57	8
Sofacy	0.84	0.90	0.87	41
StrongPity	1.00	0.85	0.92	46
TeamTNT	1.00	0.14	0.25	7
PROMETHIUM	0.83	1.00	0.91	5
TA505	0.79	0.82	0.81	33
Accuracy			0.78	443
Macro avg	0.73	0.66	0.66	443
Micro avg	0.78	0.78	0.78	443
Weighted avg	0.80	0.78	0.78	443

指标下本文方法的模型微平均值均为 0.78, 说明本文方法的模型可以在类别不均衡的情况下实现较好的分类效果。

4.3.4　不同模型对比验证

为验证图注意力机制在本文构造的知识图谱上的有效性, 使用基于频域的 GCN 和基于谱域的 GraphSage 这 2 个经典同构图模型进行对比实验。实验结果如表 6 所示, 可知在 3 种指标下, 基于图注意力机制的 GAT 模型都得到了最佳性能。

4.3.5　本文方法适用性分析

网络环境本身具有典型的图结构, 网络安全知识、信息、数据依照知识图谱的形式组织起来, 能够充分发挥图结构优势。

表 6　方法对比

Table 6　Methods comparison

方法	P	R	F_1
GCN	0.744	0.744	0.744
GraphSage	0.752	0.748	0.749
GAT	0.780	0.780	0.780

本文根据真实威胁情报数据, 选取 9 类威胁要素全方位刻画了 APT 攻击组织, 并通过多种方式丰富实体属性, 自底向上构建威胁情报知识图谱。基于此知识图谱, 不同威胁情报报告通过共同关联的威胁要素建立邻居关系。本文认为通过不同威胁要素产生的邻居关系, 重要程度不同。例如, 比起通过相同的漏洞编号建立的联系, 通过使用相同的攻击手段建立的邻居关系更为重要。图注意力机制进行节点分类, 可以有效衡量不同邻居节点的重要程度, 并且不依赖于事先了解整个图结构, 其可以在图中所有节点上并行计算, 是高效和有用的。有别于异构图神经算法, 使用 GAT 没有考虑元路径的选取带来的影响, 但另一个优点是不需要定制元路径, GAT 适用于任何安全领域图结构。探索异构图神经在本文构造的数据集上的分类效果将是下一步的工作。

5　结　论

1) 本文通过对 APT 组织攻击特征的分析, 成功构建了基于实际数据的威胁情报知识图谱。进而将威胁情报报告节点分类问题, 建模为基于图嵌入进行节点多分类的问题, 从而能有效地挖掘不同 APT 组织之间的联系。

2) 经评估证实, 本文方法能够有效实现对 APT 分析报告的攻击组织分类。

然而, 由于威胁情报报告的编写风格存在较大差异, 以及可供分析的语料库数量有限, 对于攻击行业、地点、目的等其他关键威胁情报要素, 需要大量手工标注工作才能实现自动化提取, 本文未将其纳入考量范围, 但这并不意味着这些要素的重要性被忽视。未来研究将致力于解决上述问题, 并计划引入更先进的图表示学习算法, 以期进一步提高模型的准确率和分析效能。

参考文献 (References)

[1] 尹彦, 张红斌, 刘滨, 等. 网络安全态势感知中的威胁情报技术[J]. 河北科技大学学报, 2021, 42(2): 195-204.
YIN Y, ZHANG H B, LIU B, et al. Threat intelligence technology in network security situation awareness[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2021, 42(2): 195-204(in Chinese).

[2] 王淮, 杨天长. 网络威胁情报关联分析技术[J]. 信息技术, 2021, 45(2): 26-32.
WANG H, YANG T C. Network threat intelligence correlation analysis technology[J]. Information Technology, 2021, 45(2): 26-32(in Chinese).

[3] 赵宁, 李蕾, 刘青春, 等. 基于网络开源情报的威胁情报分析与管理[J]. 情报杂志, 2021, 40(11): 16-22.
ZHAO N, LI L, LIU Q C, et al. Analysis and management of threat intelligence based on OSINT[J]. Journal of Intelligence, 2021, 40(11): 16-22(in Chinese).

[4] 党超辉, 马志伟, 邵国飞, 等. 基于大数据与威胁情报的防御体系研究[J]. 计算机与网络, 2021, 47(15): 46-47.
DANG C H, MA Z W, SHAO G F, et al. Research on defense system based on big data and threat intelligence[J]. Computer & Network, 2021, 47(15): 46-47(in Chinese).

[5] 何志鹏, 刘鹏, 王鹤. 网络威胁情报标准化建设分析[J]. 信息安全研究, 2021, 7(6): 503-511.
HE Z P, LIU P, WANG H. Analysis on standardization construction of cyber threat intelligence[J]. Journal of Information Security Research, 2021, 7(6): 503-511(in Chinese).

[6] 张红斌, 尹彦, 赵冬梅, 等. 基于威胁情报的网络安全态势感知模型[J]. 通信学报, 2021, 42(6): 182-194.
ZHANG H B, YIN Y, ZHAO D M, et al. Network security situational awareness model based on threat intelligence[J]. Journal on Communications, 2021, 42(6): 182-194(in Chinese).

[7] 赵阳. 绿盟威胁情报解决方案[J]. 信息安全与通信保密, 2020, 18(S1): 23-28.
ZHAO Y. Green alliance threat intelligence solution[J]. Information Security and Communications Privacy, 2020, 18(S1): 23-28(in Chinese).

[8] VELIČKOVIĆ P, CUCURULL G, CASANOVA A, et al. Graph attention networks[EB/OL]. (2017-10-30)[2022-07-12]. http://arxiv.org/abs/1710.10903.

[9] 黄克振, 连一峰, 冯登国, 等. 一种基于图模型的网络攻击溯源方法[J]. 软件学报, 2022, 33(2): 683-698.
HUANG K Z, LIAN Y F, FENG D G, et al. Method of cyber attack attribution based on graph model[J]. Journal of Software, 2022, 33(2): 683-698(in Chinese).

[10] 蔡扬. 基于网络行为分析的单机木马检测技术的研究与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
CAI Y. Research and implementation of Trojan detection technology base on network behavior analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016(in Chinese).

[11] PERRY L, SHAPIRA B, PUZIS R. NO-DOUBT: Attack attribution based on threat intelligence reports[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics. Piscataway: IEEE Press, 2019: 80-85.

[12] NAVEEN S, PUZIS R, ANGAPPAN K. Deep learning for threat actor attribution from threat reports[C]//Proceedings of the International Conference on Computer, Communication and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.

[13] 丁兆云, 刘凯, 刘斌, 等. 网络安全知识图谱研究综述[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49(7): 79-91.
DING Z Y, LIU K, LIU B, et al. Survey of cyber security knowledge graph[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 79-91(in Chinese).

[14] 杨沛安, 刘宝旭, 杜翔宇. 面向攻击识别的威胁情报画像分析[J]. 计算机工程, 2020, 46(1): 136-143.
YANG P A, LIU B X, DU X Y. Portrait analysis of threat intelligence for attack recognition[J]. Computer Engineering, 2020, 46(1): 136-143(in Chinese).

[15] 李序, 连一峰, 张海霞, 等. 网络安全知识图谱关键技术[J]. 数据与计算发展前沿, 2021, 3(3): 9-18.
LI X, LIAN Y F, ZHANG H X, et al. Key technologies of cyber security knowledge graph[J]. Frontiers of Data & Computing, 2021, 3(3): 9-18(in Chinese).

[16] 刘强, 祝鹏程. 基于联合学习的端到端威胁情报知识图谱构建方法[J]. 现代计算机, 2021(16): 16-21.
LIU Q, ZHU P C. End-to-end threat intelligence knowledge graph construction method based on joint learning[J]. Modern Computer, 2021(16): 16-21(in Chinese).

[17] 李涛. 威胁情报知识图谱构建与应用关键技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2020: 21-74.
LI T. Research on key technologies for construction and application of threat intelligence knowledge graph[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2020: 21-74(in Chinese).

[18] 王一琁. 基于知识图谱的网络安全态势感知技术研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 18-68.
WANG Y Q. Research and implementation of NSSA technology based on knowledge graph[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 18-68(in Chinese).

[19] LU X F, ZHOU X, WANG W T, et al. Domain-oriented topic discovery based on features extraction and topic clustering[J]. IEEE Access, 2020, 8: 93648-93662.

[20] HOSSEN M I, ISLAM A, ANOWAR F, et al. Generating cyber threat intelligence to discover potential security threats using classification and topic modeling[EB/OL]. (2021-08-16)[2022-07-14]. http://arxiv.org/abs/2108.06862.

[21] 陈斌. 基于注意力机制的网络表示学习算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 13-32.
CHEN B. Network representation learning algorithm research based on attention mechanism[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 13-32(in Chinese).

[22] PEROZZI B, AL-RFOU R, SKIENA S. DeepWalk: Online learning of social representations[C]//Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2014: 701-710.

[23] BRUNA J, ZAREMBA W, SZLAM A, et al. Spectral networks and locally connected networks on graphs[EB/OL]. (2013-12-21)[2022-07-14]. https://arxiv.org/abs/1312.6203.

[24] TANG J, QU M, WANG M Z, et al. LINE: Large-scale information network embedding[C]//Proceedings of the International Conference on World Wide Web. New York: ACM, 2015: 1067-1077.

[25] WANG D X, CUI P, ZHU W W. Structural deep network embedding[C]//Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2016: 1225-1234.

[26] DONG Y X, CHAWLA N V, SWAMI A. Metapath2vec: Scalable representation learning for heterogeneous networks[C]//Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2017: 135-144.

[27] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks[EB/OL]. (2016-09-09)[2022-07-20]. http://arxiv.org/abs/1609.02907.

[28] HAMILTON W L, YING R, LESKOVEC J. Inductive representa-

tion learning on large graphs[C]//Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2017: 1025–1035.

[29] LYU Q S, DING M, LIU Q, et al. Are we really making much progress? Revisiting, benchmarking and refining heterogeneous graph neural networks[C]//Proceedings of the ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. New York: ACM, 2021: 1150-1160.

Threat intelligence attribution method based on graph attention mechanism

WANG Ting[1, 2], YAN Hanbing[2, *], LANG Bo[1]

(1. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China, Beijing 100029, China)

Abstract: Threat intelligence correlation analysis has become an effective way to trace the source of cyber attacks. The threat intelligence analysis reports of different advanced persistent threat (APT) organizations were crawled from the public threat intelligence sources, and a threat intelligence report classification method based on graph attention mechanism was proposed, which was to detect whether the newly generated threat intelligence analysis report categories were known attack organizations, so as to facilitate further expert analysis. By designing a threat intelligence knowledge graph, extracting tactical and technical intelligence, mining the attributes of malicious samples, IPs and domain names, constructing a complex network, and using the graph attention neural network to classify the threat intelligence reporting nodes. Evaluation indicates that the method can achieve an accuracy rate of 78% while considering the uneven distribution of categories, which can effectively achieve the purpose of judging the organization to which the threat intelligence report belongs.

Keywords: threat intelligence; advanced persistent threat organization; knowledge graph; graph attention mechanism; attack source tracing

Received: 2022-07-05; **Accepted**: 2022-09-09; **Published Online**: 2022-12-28 15:35

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221227.1603.004

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2019QY1400)

* **Corresponding author**. E-mail: yhb@cert.org.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0598

基于自动化私有协议识别的挖矿流量检测

童瑞谦[1]，胡夏南[1]，刘优然[1]，秦研[1]，张宁[1,*]，王强[2,3]

(1. 西安电子科技大学 网络与信息安全学院，西安 710071；2. 中国科学院大学 网络空间安全学院，北京 100049；
3. 中国科学院 信息工程研究所，北京 100093)

摘 要：面向虚拟货币挖矿过程中私有协议流量检测识别需求，提出面向未知挖矿行为通信协议流量的自动化识别方法。改进N-gram报文格式分割算法和字典树正则表达式生成算法，实现私有协议特征签名自动化生成，对明文通信的挖矿流量进行精确匹配；基于经典加密流量分类模型，改进基于流交互特征的流量分析方法，实现轻量级的挖矿行为识别模型，对加密通信的挖矿流量进行实时检测。测试结果表明：所提方法生成的挖矿通信协议特征签名可覆盖当前3种主流明文挖矿流量，在实网验证过程中可达到0.996的识别精确率和0.985的召回率。

关 键 词：虚拟货币；挖矿流量；私有协议；自动化；正则签名；加密流量识别
中图分类号：TP393.08
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2304-10

近年来，虚拟货币违法挖矿产业在缺乏监管和约束的环境下野蛮发展。文献[1]指出，如果缺乏合理管控措施,大量的虚拟货币挖矿产业将破坏政府在节能减排方面做出的努力。例如，门罗币(Monero, XMR)为代表的基于自身密码学设计进行保护的虚拟币种，在区块链交易中天生具有隐蔽性，是暗网交易中的主流使用币种，又因其挖掘设备门槛低等特性，逐渐成为针对内外网服务器、个人浏览器设备、物联网终端设备等脆弱目标恶意网络入侵的主要获利手段。

由于采用未公开的协议格式、协议语法和协议交互实例的私有协议，对监管方而言难以识别，使得其在挖矿业务通信、恶意挖矿木马植入、远程命令控制等场景中得到广泛应用，给网络安全监管带来巨大挑战。传统的基于特征签名、机器学习的恶意流量识别方案，往往依赖于专家知识、筛选特征、多轮调参等工作，使得挖矿流量分析和识别存在较强主观依赖和效率瓶颈。基于深度神经网络的流量识别模型需要较大的系统开销，难以满足大规模实时流量数据的检测需求。当前亟需一种轻量泛用的私有挖矿协议流量识别方法用于虚拟货币挖矿流量识别和非法挖矿治理。

本文利用聚类算法将报文自动化分流，并结合上述算法优势，加入反馈优化机制以提高明文报文分析的自动化程度；密文流量分类方面，基于深度学习的流量分类算法在数据集上取得较好的精确率和召回率的性能表现，但训练和运行性能表现不佳；而基于一般机器学习的加密流量检测方法具有更好的实时性能且存在若干新颖算法，但大多并未成熟落地，在特征工程方面仍然较为依赖人工。本文在此基础上提出一种自动化提取和筛选流量特征并进行模型训练的流程方法，并结合上述明文分析流程，综合提出一种面向私有协议流量的自动化识别方法以解决虚拟货币挖矿检测问题。

1 相关工作

虚拟货币使用基于分布式账本的区块链技术[2]创建存储庞大交易区块的点对点网络系统，并

收稿日期：2022-07-09；录用日期：2022-09-16；网络出版时间：2023-03-29 14:59
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230329.1041.003
基金项目：信息系统安全技术重点实验室基金 (CNKLSTISS-6142111190501)
*通信作者. E-mail：zhang_n@mail.xidian.edu.cn

引用格式：童瑞谦，胡夏南，刘优然，等. 基于自动化私有协议识别的挖矿流量检测[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2304-2313.
TONG R Q，HU X N，LIU Y R，et al. Mining traffic detection based on automated private protocol identification[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2304-2313 (in Chinese).

使用密码技术将共识确认的区块按顺序追加形成分布式账本, 区块链中每一个区块都包含了前一个区块的加密散列、相应时间戳及交易资料的散列值表示, 这样的设计使区块内容具有难以被篡改的特性。区块链在虚拟货币中的作用可视为一本公共账簿, 其保存了该虚拟货币自创建以来的全部交易记录。

基于威胁情报(indicator of compromise, IOC)的检测需要大量挖矿行为相关特征库积累, 且部署分发成本高, 人为主动绕过的操作门槛低, 较难实现有效监管。挖矿行为侧针对虚拟货币挖矿开展检测治理的方法, 可分为终端检测与流量检测 2 类[3]。终端侧主要通过部署基于磁盘文件和进程内存的监控程序实现挖矿行为的检测。文献 [4] 通过监控对外访问的网络外连行为数据, 并判断网络外连行为数据中是否存在所述钱包地址集中的钱包地址进行挖矿行为识别。文献 [5] 通过监测图形处理器(graphics processing unit, GPU)链接库的加载进程以检测挖矿行为, 具有更强的普适性。而基于流量的检测, 完全通过被动监听实现, 不影响正常业务进行, 且方案部署成本低, 是较为理想的检测方式。现有基于挖矿行为流量侧的监管手段有矿池域名封禁、明文流量字段匹配、域名系统(domain name system, DNS)解析检测等, 通过利用已有安全设备, 如防火墙、高性能探针、态势感知等硬件设备, 人工配置 DNS 服务器和接入区防火墙策略规则, 进行单点清理处置, 如文献 [6] 根据提取的协议流量, 识别出存在挖矿通信协议封装的网络传输数据包, 进而定位出源主机 IP。文献 [7] 提出一种基于时间序列追踪的挖矿流量检测方法, 通过计算加密货币区块创建时间与本地流量时间序列相似度的方式生成检测结果。上述方法对此类隐患的响应具有一定滞后性, 且对于通过安全套接字层(secure sockets layer, SSL)或隧道代理的加密挖矿流量缺乏有效的应对能力, 存在手工配置耗时、操作复杂度过高、自动化程度低等问题。

针对挖矿流量的检测本质上是对通信报文中的协议特征进行识别, 由于其通信过程采用非公开的私有协议, 分析识别过程往往较困难。挖矿通信过程中的矿池协议是指工作在 TCP/IP 的 4 层模型中应用层用于矿池和矿工之间通信的网络协议, 如 Stratum 协议、Getwork 协议等。矿池通信协议通常会承担矿机登记、任务下发、账号登录、结果提交和难度调整等任务, 包含矿工账号、矿工算力等重要信息。挖矿过程中具有 2 种长时行为, 分别为运算任务下发和客户端挖矿任务 Hash 值结果提交, 在本地算力稳定情况下, 其报文传输时间间隔相对固定, TCP 连接流的时序特征较为明显。例如, Stratum 挖矿协议报文数据中包含分配任务号、区块 Hash、交易 ID 列表、区块版本号、当前时间、通知方法等信息字段, 成功打包区块后采用“mining.submit”方法向矿池提交任务, 矿池回应的“result”字段为“true”则表示提交成功, 否则回应“error”字段并给出报错原因。其中, 矿机在服务器登记的 login 过程中会向矿池提交钱包地址、挖矿程序版本、操作系统和挖矿开始时间等特征信息, 可作为取证分析的重要切入点。因此, 针对明文的私有协议流量, 可通过私有协议识别技术逆向分析网络流量, 提取出私有协议的特征签名, 用于高效匹配报文中的特征字段[8], 达到私有协议流量检测目的。

文献 [9] 提出协议信息学 (protocol informatics, PI) 方法,采用 Smith-Waterman 算法计算协议报文间的相似性矩阵,并结合非加权组平均法 (unweighted pair-group method with arithmetic means, UPGMA) 与 Needleman-Wunsch 算法得到完整的协议公共报文序列, 启发式地给出了协议逆向的可行方案。

根据文献 [10], 现有报文格式推断方法可归纳为序列对比、概率统计、深度学习 3 类。文献 [11] 提出基于语义信息的协议格式推断与协议关键词关系挖掘算法, 加入先验的语义信息以改进 UPGMA 算法和 Needleman-Wunsch 序列比对算法, 得到具有语义标识的协议格式。文献 [12] 将隐半马尔可夫模型(hidden semi-Markov models, HsMM)引入协议逆向分析, 通过求解 HsMM 模型最大似然概率的隐状态序列得到报文分段。基于深度学习的协议格式推断方案主要通过训练已知类型的报文关键词分类器, 从而获得未知报文内容载荷的协议关键词, 并重构协议格式, 该领域的研究为报文协议推断拓展了新的思路方法。

此外, 基于明文报文的私有协议逆向方法无法满足加密流量的检测。而大多私有协议流量均采用加密传输, 针对加密流量的检测同样是不可忽视的一环。目前, 针对加密流量的检测方法有基于密文解密匹配[13]、传输层安全(transport layer security, TLS)握手指纹[14] 和机器学习模型分类[15] 等。

通过对加密流量进行解密还原得到明文内容, 从而实现加密流量的检测, 该方法的检测精确度和效率接近明文匹配, 但由于破坏了安全通信过程, 应用中存在极大的用户隐私泄露风险。

由于网络流量加密仅混淆报文内容, 对报文长度、方向、时间间隔等统计特征影响较小, 基于机器学习的检测方法可通过提取上述流量特征训练

分类模型，以较高精确率预测识别加密流量。文献[16]对加密流量的分析与分类方法进行了综述。文献[17]通过提取流量的时间流特征识别加密流量，验证了时序等相关特征对加密流量识别的可行性。文献[18]进一步提取构建了863维的特征向量，利用机器学习结合多特征维度完成加密流量的检测，在保持分类准确性的同时提高了鲁棒性。文献[19]提出一种基于深度学习的加密流量分类方法，利用堆叠降噪自动编码器(stacked denoising auto-encoder, SDAE)和卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)实现对网络流量的分类，规避了机器学习耗时的高成本专家提取特征过程，且取得较机器学习方法更优的分类结果。

基于上述相关工作，目前私有协议识别领域仍处于蓬勃发展的初期阶段，较为成熟的工具化方案Netzob需要人工参与语义信息的收集，且较为依赖先验知识。应用基于分隔词的序列比对算法处理字符类型报文具有更好效果，而对二进制协议报文格式并不适用，且二进制报文分段较难人工分析，对此方向的研究能较大提高协议分析的自动化程度，N-gram分割算法[20]是较为理想的选择，但仍存在参数选择优化等问题。

2 本文方法概述与实现

挖矿流量是矿工与矿池之间信息同步和交换的载体，是以特定私有协议传递挖矿任务与结果数据所产生的流量，其可通过流量加密等手段进行隐藏混淆。本文通过提取其协议流量的报文特征(报文字段特征、报文指纹特征、报文序列集合的时序和统计特征等)实现分类检测，流程如图1所示。

2.1 基于改进N-gram分割算法的特征语料库构建

本文提出一种基于N-gram分割算法实现私有协议报文分割的方法，自动化提取字符类型和二进制类型的明文报文特征字段，用以构建协议正则表达式的生成语料库。

N-gram是一种基于马尔可夫链的概率语言模型[15]，用于对语句的结构进行推断。假定存在一条长度为m个单词的句子$S=w_1w_2w_3\cdots w_m$，根据链式法则，句子出现的概率$p(w_1w_2\cdots w_m)$为

$$p(w_1w_2\cdots w_m)=p(w_1)p(w_2\mid w_1)\cdots p(w_n\mid w_1w_2\cdots w_{m-1}) \tag{1}$$

根据N-gram模型，考虑一个$N-1$阶马尔可夫链，每个单词w_i出现的概率仅与前面n个单词有关，可以约简得到

$$p(w_1w_2\cdots w_m)=\prod_{i=1}^{m}p(w_i\mid w_{i-n+1}w_{i-n+2}\cdots w_{i-1}) \tag{2}$$

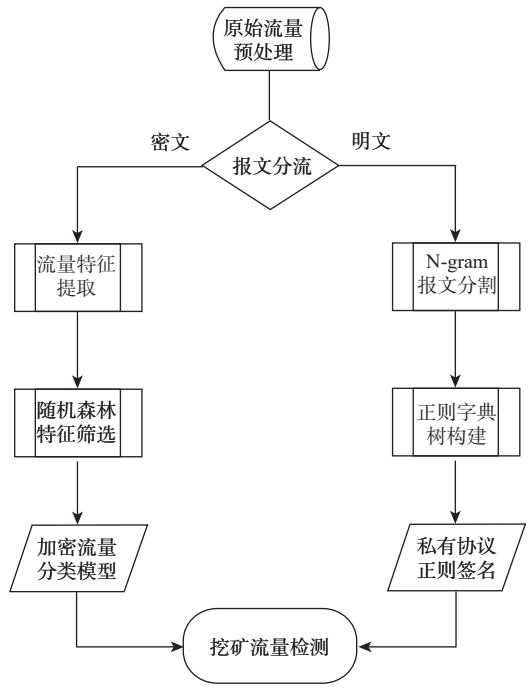


图1 挖矿流量检测方法流程

Fig. 1 Flowchart of mining traffic detection method

改进的N-gram分割算法如下。

输入： 流量数据集D，窗口大小N。

输出： 数据集中分词-位置对应字典。

$D_{\text{gram}}\leftarrow\{\}$;
for $f_{\text{data}}\in D$ do
  for i from 0 to len $(f_{\text{data}})-N$ do
    $w_{\text{gram}}\leftarrow f_{\text{data}}[i:i+N]$;
    $L_g\leftarrow 1$;
    while $L_g<N$ do
    for j from 0 to len $(w_{\text{gram}})-L_g$ do
    $w_{\text{gram},j}\leftarrow w_{\text{gram}}\left[j:j+L_g\right]$;
    if $w_{\text{gram},j}\in D_{\text{gram}}$ then
     $D_{\text{gram}}\left[w_{\text{gram},j}\right]$.append$(i+j)$;
     else
     $D_{\text{gram}}\left[w_{\text{gram},j}\right]=[i+j]$;
     end if
     end for
     end while
     if $w_{\text{gram}}\in D_{\text{gram}}$ then
       $D_{\text{gram}}\left[w_{\text{gram}}\right]$.append$(i)$;
     else
       $D_{\text{gram}}\left[w_{\text{gram}}\right]=[i]$;
     end if
  end for
end for

上述改进的分割算法除了能够提取主要的特征字符串外，还可提取出大量的冗余字符串，如某

些字符串的前缀和在数据包中不固定的载荷信息, 如图 2 所示。



图 2　提取出的冗余字符串

Fig. 2　Extracted redundant strings

这些不固定的载荷信息被视作额外增加的噪声, 本文采用经过修改的 Jaccard 相似度对这些载荷进行过滤。将 N-gram 分割算法视作对数据集的采样, 并将数据集随机划分为 2 个子集, 这 2 个子集通过 N-gram 分割算法采样得到的结果应服从同一个概率分布, 然而由于数据集中存在的不固定载荷信息, 实际通过 N-gram 分割算法采样得到的结果分布并不相同, 应仅截取在数据集中高频出现的载荷, 即设置确定的阈值, 仅选择出现次数高于 M_{thres} 的字符串, 阈值 M_{thres} 应满足使得随机划分的 2 个数据集经过 N-gram 分割算法后得到的集合相似度最高。为判断集合的相似性, 本文选择了经过修改的 Jaccard 相似度指标, 将 2 个数据集 D_A、D_B 经过 N-gram 分割算法处理后得到 2 个不同的分词集合 D'_A、D'_B, 统计这 2 个集合的词频信息, 得到降序的词频表 A、B:

$$\begin{cases} A=\{w_{\text{gram},A1}:\theta_{A1},w_{\text{gram},A2}:\theta_{A2},\cdots,w_{\text{gram},An}:\theta_{An}\} \\ B=\{w_{\text{gram},B1}:\theta_{B1},w_{\text{gram},B2}:\theta_{B2},\cdots,w_{\text{gram},Bn}:\theta_{Bn}\} \end{cases} \tag{3}$$

式中: $w_{\text{gram},si}$ 为数据集 D_s 中出现的某个单词; θ_{gi} 为其对应的出现次数, 统计表中的词语按照出现次数降序排列, 即 $i>j,\theta_{si}>\theta_{sj}$。

在式(3)基础上, 定义指标系数(简称 Jaccard 系数)如下:

$$P_{\text{Jaccard}}(A,B)=\frac{\sum_{i=1}^{n}\theta_{ai}\theta_{bi}}{\sum_{i=1}^{n}\theta_{ai}^2+\sum_{i=1}^{n}\theta_{bi}^2-\sum_{i=1}^{n}\theta_{ai}\theta_{bi}} \tag{4}$$

Jaccard 系数为[0,1]之间的值, 2 张词频表的分布越相似, 其 Jaccard 系数越接近于 1。基于该性质, 本文采用类蒙特卡罗方法[21] 筛选合适的 T_{thres} 取值, 如图 3 所示。

2.2　基于优化字典树的特征签名生成

提取报文特征字段后, 本文方法利用基于字典树的正则表达树生成算法生成特征字段正则树, 并通过优化算法, 进一步合并剪枝, 自动化生成私有协议报文正则签名。

字典树或前缀树是一种用来表示关联数组的有序树, 通过节点在树中的位置来表示相应的元素。字典树是一种高效且节约空间的算法, 常被用于搜索引擎、词频统计等领域。

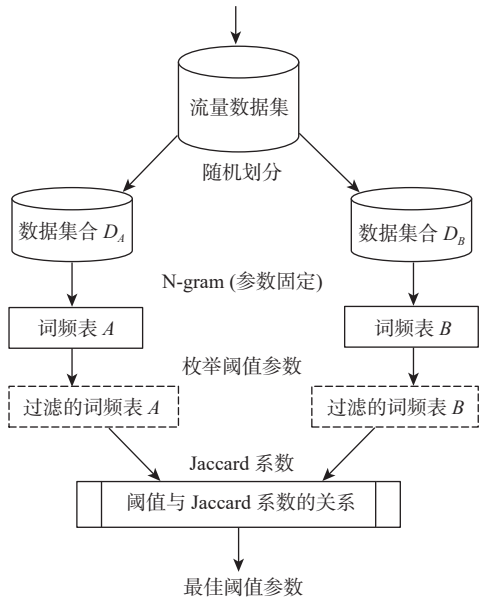


图 3　基于 N-gram 分割算法报文分段流程

Fig. 3　N-gram segmentation algorithm-based message segmentation flow

对于一棵字典树 T_{t}, 将一个非根节点 N 的父节点记作 $n_{\text{pre}}(N)$, 其子节点集合记作 $n_{\text{suc}}(N)$。

定义从根节点 n_{root} 到任一节点 N 的路径为有顺序的节点序列: $\Gamma(N)=(n_{\text{root}},N_1,N_2,\cdots,N_m,N),N_i\in T$, $1\leqslant N\leqslant m$。其中, $n_{\text{root}}=n_{\text{pre}}(N_1)$, $N_m=n_{\text{pre}}(N)$, $N_{i-1}=n_{\text{pre}}(N_i),1\leqslant i\leqslant m$。根据树的数据结构性质, 路径必然存在且唯一。字典树 T_{t} 上的任意一个节点 N 存储了数据 $V_{\text{node}}(N)$, 对于根节点, 定义 $V_{\text{node}}=n_{\text{ull}}$。存储在字典树 T_{t} 中的任一个数据 d_N 对应了从根节点到某一节点 N 的路径: $\Gamma(D_N)=\Gamma(N)=(n_{\text{root}},N_1,N_2,\cdots,N_m,N)$ 上所有节点存储数据的拼接, 即 $D_N=\sum_{n\in\Gamma(N)}v_n$, 如图 3 所示。

根据数据集建立字典树算法如下。

输入: 数据集 $D=\{d_1,d_2,\cdots,d_i\}$, 其中, $d_i=\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$, c_j 为组成 d_i 的词语。

输出: 字典树 T_{t}。

1. function AddChildNode (n,V) //向节点 n 添加值为 V 的子节点
2. $n_{\text{new}}\leftarrow$ new(TreeNode);
3. $n_{\text{new,pre}}\leftarrow n$;
4. $n_{\text{new,suc}}\leftarrow\varnothing$;
5. n_{suc}.append(n_{new});
6. $V_{n_{\text{new}}}\leftarrow V$
7. end function
8. $T_{\text{t}}\leftarrow n_{\text{root}}$ //初始化字典树
9. for $d\in D$ do //插入节点

10. $p \leftarrow T_t$; //从根节点开始遍历
11. for $c \in d$ do
12. is_exist ← false; //is_exist用于判断是否需要新建节点
13. for $n \in p_{suc}$ do
14. if $V_n = c$ then
15. is_exist ← true //存在对应的节点，指针切换到该节点
16. $p \leftarrow n$;
17. berak;
18. end if
19. end for
20. if is_exist ≠ true then //需要新建节点
21. $p \leftarrow$ AddChildNode (p, c)
22. end if
23. end for
24. end if

在实际的算法实现中，为标识数据的结束，数据集中的每个词语结尾都会额外增加一个终止符c_{null}加以标注。建立字典树算法后便获得了一个用于多模式匹配的自动机，可以生成对应的正则表达式，但由于获得的字典树实际上是对数据集的编码，本身并不具备可靠的性能和泛化能力，需要对字典树进行一定的优化以生成性能更好的正则表达式，本文提出以下算法用于正则表达式生成的性能优化。

1）噪声与重复模式优化。由于大部分的私有协议的特征流量载荷间都应当具有近似的格式，即数据会集中在字典树的主干部分，而数据集中存在的部分干扰数据会在字典树上生成偏差较大的旁枝，影响正则表达式的生成。为消除这些旁支，需要采用剪枝的方式进行处理。在生成字典树时，为所有节点之间的连接增加一个权重w，对于父节点N_f和子节点N_c，定义：

$$\begin{cases} w_{N_f,N_c} = \sum\limits_{d \in D} f(d, N_f, N_c) \\ f(d, N_f, N_c) = \begin{cases} 1 & N_f \in \Gamma(d) \text{且} N_c \in \Gamma(d) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \tag{5}$$

即父节点和子节点之间的权重w_{N_f,N_c}为经过这2个节点的数据的数量。如果字典树中一个分支出现的数量远少于其他数量，可以认为这是一个噪声产生的旁支，可以删去这条分支。本文设置剪枝阈值M_{cut}，即

$$\begin{cases} \dfrac{w_{N_f,N_c}}{E(N_f)} < M_{cut} \\ E(N_f) = \dfrac{\sum\limits_{n \in N_{f,suc}} w_{N_f,n}}{\left|N_{f,suc}\right|} \end{cases} \tag{6}$$

除部分噪声引起的旁支，需要处理的数据中还会出现一定的重复模式，极大地增加了生成的正则字符串的复杂程度。解决该问题需要对重复模式进行合并操作，如图4所示。

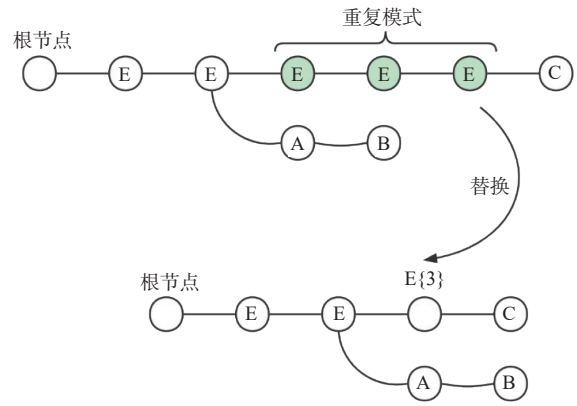


图4 重复模式替换与合并

Fig. 4 Repeated pattern replacement and merging

正则表达式提供了对重复字符的表示，即(char){repeat times}可以用来表示字符char出现了若干次。在遍历字典树时，当检测到一段连续、无分支的节点时，会对这些节点进行合并。下面给出本文对重复节点的合并算法。

输入：字典树T_t。

输出：经过优化的字典树T_t。

1. function MERGE(n, n_c) //用来进行重复节点的合并
2. if requirements not satisfied then
3. ABORT! //错误的合并不满足要求的节点
4. end if
5. $V_n \leftarrow V_n + 1$; //对应的节点重复次数加一
6. $n_{suc} \leftarrow n_{c,suc}$;
7. for $n_c \in n_{suc}$ do
8. $n_{c,pre} \leftarrow n$;
9. end for
10. Remove (n_c); //移除子节点
11. end function
12. for $n \in T$ do
13. for $n_c \in n_{suc}$ do
14. if $V_n = V_{n_c}$ and $|n_{suc}| = 1$ and $|n_{c,suc}| = 1$ then
15. Merge (n, n_c); //满足条件则合并2个节点
16. end if
17. end for
18. end for

2）公共子分支通配合并。正则表达式支持一系列的通配符，而不同的通配符有着不同的层次结构，通配符[A-Z]可以匹配所有的大写字母，而通配

符 \d 可以匹配所有的数字; 在这 2 种通配符之上, \w 可以匹配所有的字母、数字和下划线; 而在其之上的通配符则可以匹配 \r\n 之外的所有字符。运用这些规则可以极大地增强正则表达式的泛化能力。

如图 5 所示, 字典树中一个节点拥有较多的子节点, 一般代表该节点后面的数据变化较大。本文采用基于公共词位置的合并算法。在一个节点出现了较多的分支时, 判断各个分支下文是否存在公共词汇。如果存在, 则截取在公共词汇出现之前的段落, 通过选择更高层次的通配符构造通配。

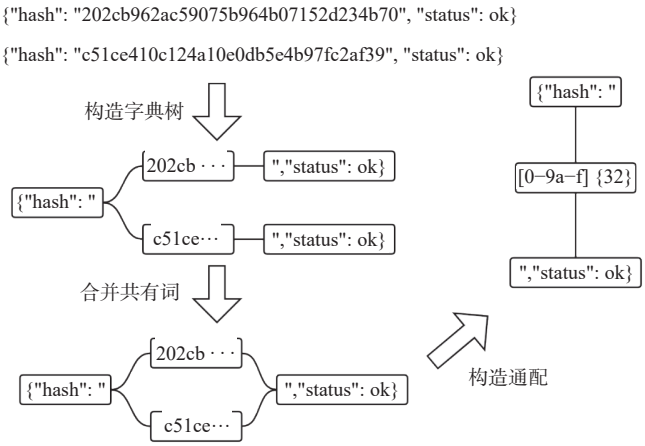


图 5　公共词位置的合并算法流程

Fig. 5　Flowchart of merging algorithm for common word position

为了提取更多的公共模式, 截取公共词汇出现之前的段落时, 本文考虑采取一种最大匹配的方式, 在提取了需要替换为通配符的节点区域后, 采用递归的方式遍历该区域并替换区域中的节点, 以生成满足条件的通配符。具体算法表述如下。

输入: 字典树 T_t, 起始节点 n, 关键词列表 $S_{\text{delimiter}}$。

输出: n 的一系列后继节点的集合 S_e。

从 n 的后继节点到 mathcalS_r的前驱节点这部分节点需要替换

1. function FINDDELIMITER (n, $S_{\text{delimiter}}$) //得到 delimiter – List[node]格式的 dict
2. if n_{suc} = then //叶节点, 可以理解为终止符为””
3. Return {”” : n};
4. end if
5. $d \leftarrow \{\}$; //暂时保存数据
6. for $n_c \in n_{\text{suc}}$ do //对于不是叶节点的情况
7. if $V_{n_c} \in S_{\text{delimiter}}$ then
8. d+ = $\{V_{n_c} : n_c\}$;
9. else
10. d+ = FindDelimiter($n_{\text{suc}}, S_{\text{delimiter}}$)
11. end if
12. end for
13. Return d
14. end function
15. $d_{\text{delim}} \leftarrow$ FindDelimiter (n, $S_{\text{delimiter}}$);
16. $S_e \leftarrow \{\}$
17. for $d_{\text{key}} \in d_{\text{delim}}$ do
18. while $\forall n_i, n_j \in d_{\text{delim}}[d_{\text{key}}], V_{n_i} = V_{n_j} \wedge n_{i,\text{pre}} \neq n$ do
19. $\forall n_i \in d_{\text{delim}}[d_{\text{key}}], n_i \leftarrow n_{i,\text{pre}}$;
20. end while
21. S_e.add($n_i \in d_{\text{delim}}$)
22. end for
23. Return S_e

3) 生成正则表达式。经过以上算法优化, 得到简化的字典树, 通过该字典树构造对应私有协议的高性能正则表达式签名, 构造算法表述如下。

输入: 字典树 T_t。

输出: 正则表达式 R_{reg}。

1. function DFS (n)
2. $R_{\text{sub}} \leftarrow V_n$; //在子程序中的正则表达式
3. if $\|n_{\text{suc}}\| > 1$ then
4. $R_{\text{sub}} \leftarrow R_{\text{sub}} +$ (
5. end if //如果子节点多于一个, 则需要并联
6. for $n_c \in n_{\text{suc}}$ do
7. $R_{\text{sub}} \leftarrow R_{\text{sub}} +$ DFS(n_c); //遍历子节点
8. end for
9. if $\|n_c\| > 1$ then
10. $R_{\text{sub}} \leftarrow R_{\text{sub}} +$)
11. end if //补全括号
12. end function
13. $R_{\text{reg}} \leftarrow$ DFS(T_t);

2.3　基于随机森林的加密流量分类模型

流量分类模型的构建目标是通过输入流量离

散或连续的特征向量对其进行二分类预测，由于加密流量的原始数据包含大量冗余信息，在流量分类时需要对原始数据进行数据清洗和预处理，本文选用NFStream作为分流和特征提取工具，对输入的原始流量按照五元组分流生成NFlow对象，并开启构造方法中的statistical_analysis选项对每个流进行特征提取，获得包括流持续时间，流内分组数量和字节长度，分组大小与时间间隔的最值、均值和标准差，传输层控制位计数，以及通过NFPlugin接口自定义特征在内的综合流量特征，并转化为pandas库的DataFrame对象用于后续训练和检测。对获得的特征以0.036作为阈值进行特征重要性筛选，得到7个筛后特征，分别为目的端到源端的流持续时间，分组时间间隔的最大值、平均值和标准差，流内最大包长，以及自定义特征中PSH位为1的占比和单位时间内传输的分组数。对筛后特征进行分析，由于挖矿行为的持续性，长时间进行挖矿作业时会保持TCP连接，流持续时间将显著高于正常业务中密集的短时流，使得流持续时间具有高重要性。另外，由于挖矿行为的工作量证明机制，目的端到源端的分组受到多次哈希影响，导致分组时间间隔和单位时间内的分组数具有高重要性。同时，挖矿协议结构相对固定且哈希值具有固定长度，导致流内最大包长具有高重要性。挖矿协议基于处理效率考虑，会将数据报文段中所有PSH位都置为1，而ACK报文段PSH位为0，因此，PSH位的比例较为稳定，使得PSH位为1的分组数具有高重要性指标。

本文使用CART决策树作为基分类器的随机森林构建加密流量分类模型。将上述流量特征向量输入模型后，训练过程可抽象为：将数据的n维特征有放回地随机抽取m维($m<n$)，并从m维特征中以信息增益的方式筛选分类效果最好的一维特征，将其阈值设为临界值，小于临界值的样本划分为左节点，其余划分为右节点，重复训练所有的样本数据，最终得到n棵决策树和预测结果。随机森林模型具有较好的泛化性能和精确度，可并行高效训练，快速完成轻量级的模型构建。同时，为进一步降低流量分类任务中的特征维度，从而降低系统复杂度，优化高流量负载应用场景中的系统性能，本文采用基于随机森林的特征重要性评估方法对输入特征的重要性进行计算，舍弃重要性在选择阈值以下的特征达到降维的目的。随机森林中的每棵决策树都为二叉树，其特征重要性由节点的基尼不纯度的平均减少量(mean decrease impurity, MDI)决定。其计算过程如下。

对于随机森林中的每棵树，由节点的基尼不纯度计算每个节点的重要性参数，计算过程为

$$n_j = w_j C_j - w_{j_l} C_{j_l} - w_{j_r} C_{j_r} \tag{7}$$

式中：j_l和j_r分别为j的左侧和右侧的子节点；n_j为节点j的节点重要性；w为经过节点的加权样本数；C为节点的基尼不纯度。

在本文的二分类模式下，基尼不纯度C计算式为

$$C = 1 - \sum_{i=1}^{2} p_i^2 \tag{8}$$

式中：p_i为节点上取分类为i的数据的概率。

由于随机森林中的每个节点由一个特定的特征所分裂，根据每个节点的重要性n_j可以计算特征i的重要性f_i，计算式为

$$f_i = \sum_j n i_j \Big/ \sum_k n i_k \tag{9}$$

式中：j为根据特征i分裂的节点；k为所有节点。

经过标准化得到所有特征的重要性指标：

$$n_{f_i} = f_i \Big/ \sum_{j \in f_{\text{all}}} f_j \tag{10}$$

式中：f_{all}为所有特征的集合。

最终将所有树的标准化特征取平均，得到随机森林的特征重要性：

$$R = \frac{\sum n_{f_i}}{T} \tag{11}$$

式中：T为随机森林中的决策树个数。

将计算出的特征重要性进行排序，舍弃重要性在特征选择阈值以下的特征项，实现基于随机森林特征重要性的特征选择算法。此外，本文采用类别权重法和分层K折交叉验证法进行参数选取和模型训练，以确保数据不平衡时模型的性能。在类别权重法中，对数据集中的类别按照比例分配权重，以提高少数类别数据的错误成本，从而改善模型性能；在分层K折交叉验证法中，每次按照数据间的比例关系将每类数据分成K份，其中，K−1份用于训练，1份用于测试，进行K次交叉验证，从而保证模型的可信度和性能。

3 实验验证

3.1 实验数据集

由于实验设备的局限性和国家法律法规方面的限制，本文以抗ASIC的XMR挖矿流量为主要分析检测对象，该数据集均为笔者自行部署捕获，利用tcpdump、wireshark等流量抓取工具，监听服务器或个人PC设备的网卡，捕获以源IP地址、源端

口、目的 IP 地址、目的端口和传输层协议为五元组划分的数据流, 经过自动化清洗提纯, 将数据流以指定长度或大小切分, 形成 pcap 数据包, 数据集共包含 13 种矿池, 覆盖亚洲、欧洲、加拿大、美国等地理位置, 并通过切换运行端口、发包速率(50～1 000 KB/s)、硬件算力(100～5 000 H/s)、控制捕获时长, 选择 TLS 加密、启用代理等多个维度进一步扩展, 以保证其多样性, 并标记标签为阳性, 作为后续机器学习训练中的黑样本数据集。共包含纯净 XMR 挖矿明文流量数据包 95 160 个, 纯净 XMR 密文流量数据包 57 456 个, 共计 39.1 MB, 另行捕获良性流量 34.1 MB。同时, 为保证真实网络流量环境的不平衡性, 本文测试实验中同时混合使用包含多种正常业务流量的公开数据集 USTC-TFC2016、VPN-nonVPN traffic dataset (ISCXVPN2016) 流量数据共计 4.61 GB。

3.2　自动化私有协议分析算法测试

测试环境如表 1 所示。

表 1　测试环境

Table 1　Test environment

配置	操作系统	内核版本	核心处理器	图形处理器	内存大小
性能测试主机	Arch Linux	x86_64 Linux 5.18.3-arch1-1	Intel Core i7-9750H @ 12x 2.60 GHz	NVIDIA GeForce RTX 2 060	15.5 GB
数据集捕获主机	Ubuntu 20.04 focal	x86_64 Linux 5.4.0-110-generic	Intel Core i5-9300H @ 8x 4.1 GHz	NVIDIA GeForce GTX 1 050	15 789 MB
服务端采集	Ubuntu 20.04 focal	x86_64 Linux 5.4.0-94-generic	Intel Xeon Platinum 8269CY @ 2x 2.5 GHz	Cirrus Logic GD 5 446	1 879 MB

私有协议流量正则签名生成测试: 私有协议流量正则签名生成程序需要设置剪枝阈值参数、重复节点合并阈值参数等。其中, 剪枝阈值参数会对生成的正则表达式的长度和匹配精确率产生较大的影响。使用较低的剪枝阈值参数可以生成更短的正则表达式以得到更高的性能, 但也会牺牲一定的对数据拟合的能力, 影响预测的准确性。本文对这些参数进行枚举, 得到的结果如图 6 所示。通过综合考虑生成的正则匹配精确率、正则包含的有效信息及正则表达长度等因素, 本文采用 0.2 作为剪枝阈值。

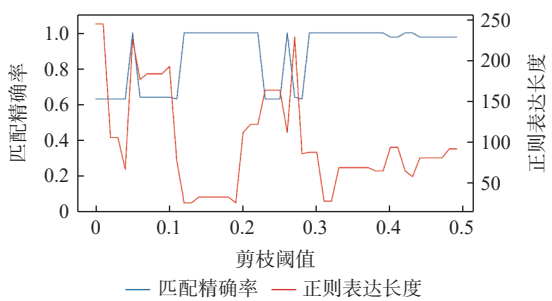


图 6　正则匹配算法阈值与性能关系

Fig. 6　Relationship between threshold and performance of regular matching algorithm

在挖矿流量数据集上, 自动化私有协议分析算法生成如下形式的正则表达式: “{"id":(.*).{4}\d{2}"}}|\w[a-z]\d{2}.\d{4}.[a-z]{2}\d{2}.[a-z]\d[a-z]{2}\d{6}[a-z]\d","job_id":"\w(.*)|\d”。表达式中 id、job_id 等字段为挖矿流量数据中广泛包含的特征字段, \d{2}等字段目的是命中流量中数字形式的载荷, \w[a-z] 通配符则用于命中协议中的字段标识。该方法提取出的特征保留了目标协议中的关键结构信息, 也能够用于自动匹配目标协议。相较于人工进行的特征工程分析, 该方法自动化程度更高, 且生成的特征更加精准和简短。

3.3　加密流量分类模型测试

为测试不同筛选阈值下生成模型的性能表现, 以 0.001 为步长, 遍历 [0, 0.1] 区间内的特征重要性阈值, 测试结果如图 7 所示。结果显示, 特征筛选阈值在 [0, 0.036] 区间取值时, 各项评测指标在小范围内波动, 阈值达到 0.02 以上时, 由于特征选择去除了低重要性的干扰特征, 精确率和 F_1 指标有小幅上升, 阈值在 [0.036, 0.1] 区间取值时各项指标呈下降趋势。综合以上分析, 特征筛选阈值在 [0.02, 0.036] 区间取值时, 模型性能稳定且良好。

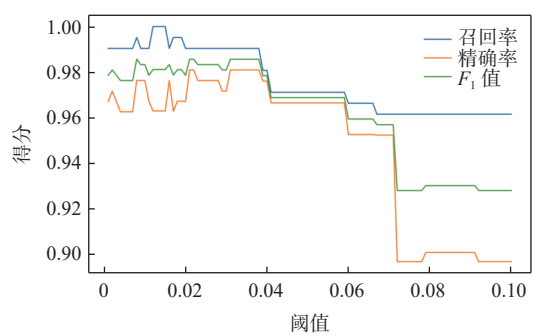


图 7　特征权重阈值筛选测试结果

Fig. 7　Test results of feature weight threshold screening

以上述阈值进行特征筛选后的随机森林模型与其他传统预测模型的对比测试结果如图 8 所示。

从召回率、精确率和 F_1 值 3 个维度评估的结果来看, 经过特征筛选的随机森林预测模型在测试集上的召回率达到 0.985, 且在精确率和 F_1 值的表现上均较其他模型存在一定优势。测试证明, 在大

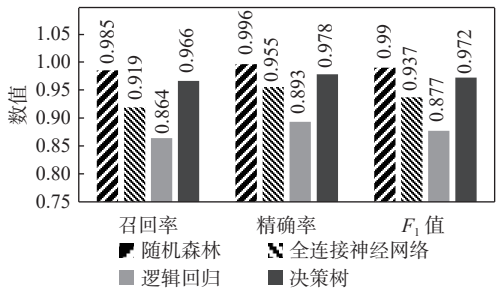


图 8 模型对比测试

Fig. 8 Model comparison test

规模流量分类场景中，经本文方法构建的机器学习模型是更为理想的模型选择。

在模型性能测试中，使用实时捕获的 1 222 条的 pcap 数据包（201 MB）对所生成的随机森林模型进行性能测试。重复测试 1 000 次，得到对单条数据进行预测分类的时间开销的频数如，图 9 所示。由图 9 可知，模型平均每条数据的处理时间仅为 10.334 ns，每 1 MB 流量平均处理时间为 62.8 ns，即 1 s 内可处理约 16 GB 流量数据，满足在较大规模流量负载的应用场景中对虚拟货币挖矿流量的实时检测需求。

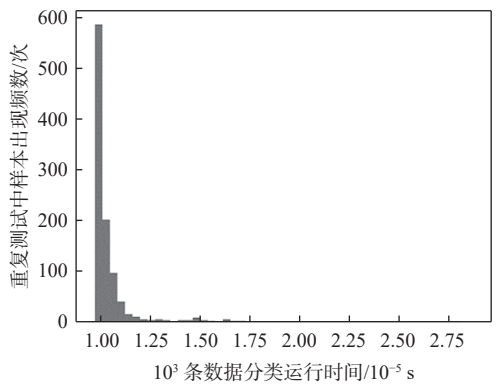


图 9 随机森林模型性能测试

Fig. 9 Performance test of random forest models

4 结 论

本文针对挖矿现状和问题，提出并实现了一种基于私有挖矿协议的通信指纹自动化择优生成方法，基于挖矿流量自动化提取其私有协议的正则匹配签名，同时构建轻量化加密挖矿流量识别模型，很大程度上缩短了私有协议分析识别任务周期。

1）本文方法生成的挖矿通信协议特征签名可覆盖当前 3 种主流明文挖矿通信流量，在实网验证过程中可达到 0.996 的识别精确率和 0.985 的召回率，方法性能也能满足大规模流量负载场景中的实时检测需求。

2）本文方法的解决流程具有针对挖矿通信流量的普适性，未来可尝试应用于大量未知安全协议流量的分析场景，在恶意攻击流量分析识别领域具有一定应用前景与发展潜力。

参考文献（References）

[1] JIANG S R, LI Y Z, LU Q Y, et al. Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China[J]. Nature Communications, 2021, 12: 1938.

[2] SQUAREPANTS S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system [J]. SSRN Electronic Journal, 2008: 21260.

[3] RUSSO M, ŠRNDIĆ N, LASKOV P. Detection of illicit cryptomining using network metadata[J]. EURASIP Journal on Information Security, 2021, 2021: 11.

[4] 郑云超, 范渊, 黄进. 一种恶意挖矿行为识别方法、装置、设备及存储介质: CN113177791A[P]. 2021-07-27.
ZHENG Y C, FAN Y, HUANG J. Malicious mining behavior identification method and device, equipment and storage medium: CN113177791A[P]. 2021-07-27(in Chinese).

[5] 邢宝玉, 白淳升. 基于 GPU 恶意挖矿行为的检测方法与装置: CN202010578925. XA[P]. 2020-06-23.
XING B Y, BAI C S. Method and apparatus for detecting GPU malicious mining behavior based on extracted redundant strings: CN202010578925. XA[P]. 2020-06-23(in Chinese).

[6] 余文珣, 余斯聪, 钟英南, 等. 一种基于流量特征识别挖矿程序的方法和系统: CN202010123819.2[P]. 2020-10-12.
YU W X, YU S C, ZHONG Y N, et al. A method and system for identifying mining programs based on traffic characteristics: CN202010123819.2[P]. 2020-10-12(in Chinese).

[7] 杨家海, 张世泽, 王之梁, 等. 基于时间序列追踪的挖矿流量检测方法和装置 CN202110203327.9[P] . 2021-10-20.
YANG J H, ZHANG S Z, WANG Z L, et al. Mining traffic detection method and device based on time series tracking CN202110203327.9[P]. 2021-10-20(in Chinese).

[8] PERDISCI R, LEE W K, FEAMSTER N. Behavioral clustering of HTTP-based malware and signature generation using malicious network traces[C]//Proceedings of the 7th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. New York: ACM, 2010: 26.

[9] BEDDOE M A. Network protocol analysis using bioinformatics algorithms[EB/OL]. (2004-06-01)[2021-10-12]. http://phreakocious.net/PI/PI.pdf.

[10] 李峻辰, 程光, 杨刚芹. 基于网络流量的私有协议逆向技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(1): 167-190.
LI J C, CHENG G, YANG G Q. Review of private protocol reverse technology based on network traffic[J]. Computer Research and Development, 2023, 60(1): 167-190(in Chinese).

[11] BOSSERT G, GUIHERY F, HIET G. Towards automated protocol reverse engineering using semantic information[C]//Proceedings of the 9th ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security. New York: ACM, 2014: 51-62.

[12] 黎敏, 余顺争. 抗噪的未知应用层协议报文格式最佳分段方法[J]. 软件学报, 2013, 24(3): 604-617.
LI M, YU S Z. Noise-tolerant and optimal segmentation of message formats for unknown application-layer protocols[J]. Journal of Software, 2013, 24(3): 604-617(in Chinese).

[13] DE CARLI L, TORRES R, MODELO-HOWARD G, et al. Botnet protocol inference in the presence of encrypted traffic[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-9.

[14] BERNAILLE L, TEIXEIRA R. Early recognition of encrypted applications[C]//Proceedings of the Passive and Active Network Measurement. Berlin: Springer, 2007: 165-175.

[15] DAINOTTI A, PESCAPE A, CLAFFY K C. Issues and future directions in traffic classification[J]. IEEE Network, 2012, 26(1): 35-40.

[16] VELAN P, ČERMÁK M, ČELEDA P, et al. A survey of methods for encrypted traffic classification and analysis[J]. Networks, 2015, 25(5): 355-374.

[17] DRAPER-GIL G, LASHKARI A H, MAMUN M S I, et al. Characterization of encrypted and VPN traffic using time-related features[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Information Systems Security and Privacy. Setúbal: SciTePress, 2016: 407-414.

[18] 李慧慧, 张士庚, 宋虹, 等. 结合多特征识别的恶意加密流量检测方法[J]. 信息安全学报, 2021, 6(2): 129-142.
LI H H, ZHANG S G, SONG H, et al. Robust malicious encrypted traffic detection based with multiple features[J]. Journal of Cyber Security, 2021, 6(2): 129-142(in Chinese).

[19] LOTFOLLAHI M, SIAVOSHANI M J, ZADE R S H, et al. Deep packet: A novel approach for encrypted traffic classification using deep learning[J]. Soft Computing, 2020, 24(3): 1999-2012.

[20] KONDRAK G. N-gram similarity and distance[C]//Proceedings of the String Processing and Information Retrieval. Berlin: Springer, 2005: 115-126.

[21] BENOV D M. The Manhattan project, the first electronic computer and the Monte Carlo method[J]. Monte Carlo Methods and Applications, 2016, 22(1): 73-79.

Mining traffic detection based on automated private protocol identification

TONG Ruiqian[1], HU Xianan[1], LIU Youran[1], QIN Yan[1], ZHANG Ning[1,*], WANG Qiang[2,3]

(1. School of Cyber Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. School of Cyber Security, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: To meet the demand for private protocol traffic detection and identification during cryptocurrency mining, an automated communication protocol traffic identification method for unknown mining behaviors was proposed. The N-gram message format segmentation algorithm and regular expression generation algorithm of the dictionary tree were improved, so as to automatically generate private protocol signatures and accurately match mining traffic during plaintext communications. Based on the classical encrypted traffic classification model, the traffic analysis method based on flow interaction features was improved, so as to achieve a lightweight mining behavior identification model and detect mining traffic during encrypted communications in real time. The test results show that the mining communication protocol signatures generated by the proposed method effectively cover the current three kinds of mainstream mining traffic during plaintext communications. The proposed method can achieve 0.996 identification accuracy and 0.985 recall rate in the real network verification process.

Keywords: cryptocurrency; mining traffic; private protocol; automation; regular signatures; encrypted traffic identification

Received: 2022-07-09; **Accepted**: 2022-09-16; **Published Online**: 2023-03-29 14:59
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230329.1041.003
Foundation item: Funding of Key Laboratory of Information System Security (CNKLSTISS-6142111190501)
* **Corresponding author**. E-mail: zhang_n@mail.xidian.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0603

小倾角对Ω形弯曲热管传热特性的影响

王卓，潘宇晖，赵锐，年永乐，程文龙*

(中国科学技术大学 工程科学学院，合肥 230027)

摘 要：为研究小倾角对Ω形槽道弯曲热管传热特性的影响，搭建了热管传热性能实验台，基于实验对不同小倾角下热管的温度分布、总热阻、当量导热系数和最大输入功率进行分析。结果表明：在相同输入功率下，倾角为0°和倾角为负的热管壁温均匀性优于倾角为正的热管；倾角为正的热管总热阻最大，倾角为0°和倾角为负的热管总热阻相近；热管倾角为0°时的最大输入功率最高。热管安装和应用中易出现重力倾角偏差，研究结果表明，较小倾角会对Ω形槽道弯曲热管的传热性能造成影响。

关 键 词：热管；传热；小倾角；热阻；当量导热系数；最大输入功率

中图分类号：TK172.4

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2314-08

热管是一种利用气液相变潜热将热量进行远距离快速输运的热控装置，具有很高的传热系数和传热能力，在太阳能[1-3]、核反应堆[4-5]、航天器[6-7]、电子芯片[8-9]、余热回收[10-11]等存在热控需求的领域中有广泛的应用。

槽道热管是一类制造工艺简单、成本低廉、运行稳定可靠、用途广泛的热管[12]，常见的槽道横截面形状有三角形、矩形、梯形、Ω形等。国内外诸多学者对不同槽道形状的热管进行研究[13-15]，发现Ω形槽道热管在毛细力较小时便可满足热管运行需求，相比其他槽道热管，Ω形槽道由于具有圆形的液体通道和矩形窄缝的毛细结构，具有更小的液体流阻、更大的毛细压头，其传热能力更好。韩娜丽等[16]对Ω形槽道热管的各部分温差进行实验研究，发现热管温差随热负荷的增加而增加。Pis'mennyi等[17]对Ω形槽道进行不同工质的蒸发沸腾可视化实验，建立了Ω形铝热管蒸发区热力和水力过程的物理模型。

热管在倾斜时传热特性会发生变化[18]。乔家广等[19]对弯曲3次的Ω形槽道热管进行实验，结果表明，热管在更大的倾斜角度下热阻更低。张畅等[20]通过实验得到了Ω形槽道热管在正放、侧放及反放时，热阻和最大输入功率随热沉温度变化的曲线。Yu等[21]进行槽道热管可视化实验，研究热管在小倾角下的工质蒸发，并提出通过*Bo*和*We*对该热管内的蒸发状态进行判断。Zhang等[22]实验研究了水平和倾斜时梯形槽热管的换热行为，发现热管渐进启动和超调启动的原因是倾斜热管内蒸发模式的改变。

重力场中小倾角(±1.5°，热管弯曲段高于直管段时记倾角为正)对Ω形槽道弯曲热管传热特性影响的研究较为缺乏，在实际安装和应用过程中，由于设备的安装误差和使用时的姿态调整，要求水平安装的热管易出现安装误差。本文定义这种安装误差造成的热管倾角为小倾角。因此，本文搭建可调节热管放置倾角的实验台，在小倾角范围为−1.5°～1.5°的工况下对Ω形槽道铝-氨热管进行实验，分析热管的轴向温度分布、总热阻、当量导热

收稿日期：2022-07-09；**录用日期**：2022-08-26；**网络出版时间**：2022-09-14 10:49
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220913.1405.002
基金项目：国家自然科学基金(51876198)；安徽省重点研发计划(202004a07020053)
* **通信作者**. E-mail：wlcheng515@163.com

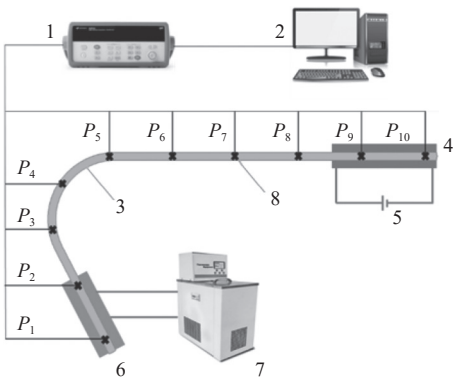
引用格式：王卓，潘宇晖，赵锐，等. 小倾角对Ω形弯曲热管传热特性的影响[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2314-2321.
WANG Z，PAN Y H，ZHAO R，et al. Effect of small inclination angle on heat transfer performance of Ω-shaped bending heat pipe[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2314-2321 (in Chinese).

系数和最大输入功率参数。本文的研究结果为槽道弯曲热管的设计、安装和研究提供了参考。

1　实验系统

1.1　实验装置

实验测试装置如图 1 所示。加热系统由直流稳压电源和 20 mm×100 mm 陶瓷加热片组成, 通过调节直流稳压电源的电压来改变热管的输入功率。冷却系统由低温恒温槽和 20 mm×80 mm 水冷板组成。本文选用的双孔 Ω 形热管横截面为长方形, 在横截面长的两边分别安装加热片和冷凝板, 为减少热管和加热片、水冷板之间的接触热阻, 在接触面上涂抹适量的导热硅脂, 并用固定器夹紧元件。实验在热管横截面短的一边布置了热电阻, 通过 10 个等轴向间距布置的热电阻测量热管外壳壁面温度, 热电阻为 1.5 mm×10 mm 的柱状 Pt100, 其固定在热管较窄侧的壁面上, 并涂抹适量导热硅脂以减小界面热阻。从热管冷凝段端部到蒸发段端部, 各测温点依次编号为 P_1、P_2, ⋯, P_{10}。数据采集仪每 5 s 记录一次温度数据。采用隔热棉对热管进行保温处理, 以抑制热管与外界环境之间的换热。

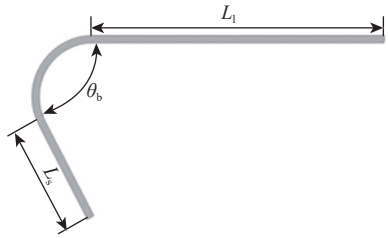


1. 数据采集仪; 2. 计算机; 3. 实验热管; 4. 陶瓷加热片; 5. 直流稳压电源; 6. 水冷板; 7. 低温恒温槽; 8. 热电偶。

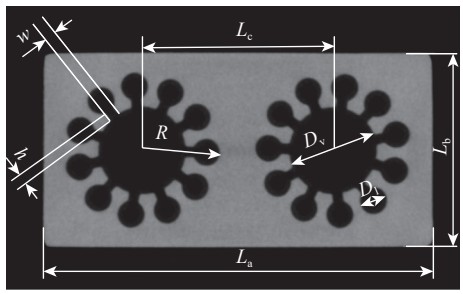
图 1　实验测试装置

Fig. 1　Experimental setup

本文用于实验研究的热管为 Ω 形轴向微槽道铝-氨热管。热管的轴向结构如图 2(a) 所示, 其中, 热管长直段 L_l 和短直段 L_s 的长度分别为 345 mm 和 110 mm, 弯曲段长度为 190 mm, 其夹角 θ_b 为 60°。热管的管壳截面形状如图 2(b) 所示, 各几何参数如



(a) 热管轴向结构



(b) 管壳截面形状

图 2　热管结构

Fig. 2　Structure of heat pipe

表 1 所示。热管工质充装量约为 12.1 g, 充液率为 101%(液体体积/毛细结构孔隙体积)。

如图 3 所示, 将热管放置于可调节倾角的实验台上, 以长直段和短直段的端点连线为轴线, 热管所处的平面绕该轴线旋转。取槽道热管弯曲段上的任意一点, 在热管所处的平面内过该点作轴线的垂直线, 旋转后的热管与水平放置的热管 2 条垂直线之间的夹角即为热管倾角 θ(下文提及的倾角均指该倾角 θ), 通过水平仪调节热管, 使其处于水平位置, 此时倾角 θ 为 0°; 当弯曲段高于倾角为 0°的位置时, 倾角 θ 为正, 反之为负。

1.2　实验工况设置及数据处理

本文分别对倾角 θ 为−1.5°、−1°、−0.5°、0°、0.5°、1°、1.5°的 7 种工况进行实验。先对热管施加 20 W 输入功率, 冷端水冷板的温度为 20℃; 待热管壁面各测点温度稳定后, 调节直流电源使热源功率增加 10 W; 待各测点温度再次稳定后, 重复上述操作增加输入功率, 直至热管失效。

槽道热管在常温工况下常见的最大输入功率为毛细最大输入功率, 毛细最大输入功率的理论公式为[23]

$$Q_{c,max}L_{eff}=\frac{\dfrac{2\sigma}{r_c}-\rho_l g' D_v\cos\varphi+\rho_l g l\sin\varphi}{F_v+F_l} \tag{1}$$

表 1　热管截面参数

Table 1　Cross-section parameters of heat pipe

横截面宽度 L_a/mm	横截面高度 L_b/mm	蒸汽腔直径 D_v/mm	吸液芯直径 D_l/mm	两孔圆心间距 L_c/mm	孔半径 R/mm	狭缝宽度 w/mm	狭缝高度 h/mm	单孔吸液芯通道数目
18.00	9.00	4.00	1.24	9.00	3.60	0.48	0.36	11

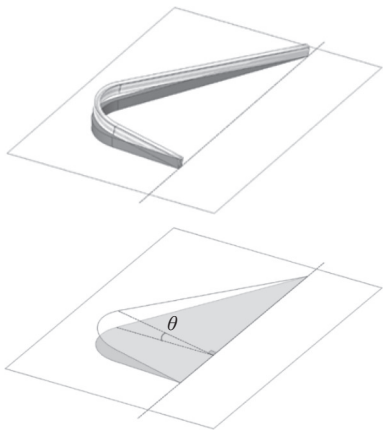


图3 热管倾角

Fig. 3 Inclination angle of heat pipe

式中：$Q_{c,max}$为最大输入功率；L_{eff}为有效长度；σ为表面张力系数；r_c为有效毛细半径；ρ_l为液体密度；g'为液态密度；D_v为蒸汽腔直径；l为热管长度；F_v和F_l分别为蒸汽腔和吸液芯的摩擦因子；φ为热管相对于水平面的角度。

热阻和当量导热系数是评价Ω形槽道弯曲热管传热性能的重要指标，计算式为

$$R_t = \frac{\Delta T}{Q} \tag{2}$$

$$K_{eff} = \frac{L_{eff}}{R_t A} \tag{3}$$

式中：R_t为热管热阻，K/W；$\Delta T = \overline{T}_{w,e} - \overline{T}_{w,c}$，$\overline{T}_{w,e}$、$\overline{T}_{w,c}$分别为热管蒸发段、冷凝段的壁面平均温度，K；$Q$为热管的输入功率，W；$K_{eff}$为热管当量导热系数，W/(m·K)；$L_{eff} = L_i + (L_e + L_{co})/2$，$L_i$、$L_e$和$L_{co}$分别为热管的绝热段长度、蒸发段长度和冷凝段长度，m；A为热管横截面积，m²。

热管壁温的测量误差为±0.15℃，电流和电压的测量误差分别为±0.001 A和±0.1 V，长度的测量误差为±0.5 mm。热阻和当量导热系数的相对误差如式(4)和式(5)所示，计算得出二者最大相对误差分别为3.4%和3.6%。

$$\frac{\Delta R_t}{R_t} = \sqrt{\left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2} \tag{4}$$

$$\frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L_{eff}}{L_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_t}{R_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2} \tag{5}$$

2 实验结果与分析

2.1 热管瞬态热响应

Ω形槽道弯曲热管在不同小倾角(0°、−0.5°和0.5°)下的瞬态热响应实验结果如图4所示。可以看出，倾角不同的热管在运行和失效时具有不同的

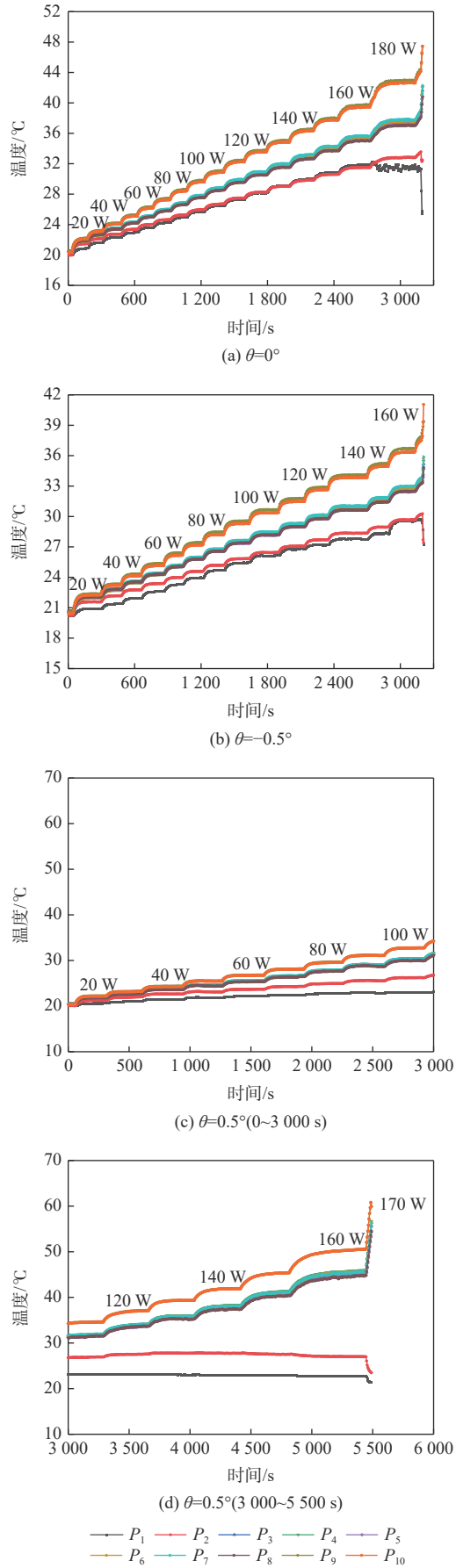


图4 热管瞬态热响应的轴向温度变化

Fig. 4 Axial temperature variation of transient thermal response for heat pipe

壁温变化趋势。

由图 4(a) 可知, 实验初始输入功率为 20 W, 在施加热负荷后约 50 s, 壁温趋于稳定, 此时蒸发段温度约为 22.1℃。待壁温稳定后, 输入功率增加 10 W, 约 60 s 后热管壁温再次稳定。当输入功率增加至 170 W 时, 靠近冷凝段端部的 P_1 测温点出现温度波动。当输入功率增加至 180 W 时, 蒸发段壁温急剧上升, 冷凝段端部壁温急剧下降。此时, 蒸发段工质蒸干, 输运循环中断, 热量不能正常传递, 即热管失效。

由图 4(b) 可知, 初始输入功率仍为 20 W, 在施加热负荷后约 55 s, 壁温趋于稳定, 此时蒸发段温度约为 22.3℃。随后输入功率每次增加 10 W 至壁温重新稳定。当输入功率加至 160 W 时, 蒸发段与冷凝段的温差急剧变大, 即热管失效。

由图 4(c) 可知, 施加 20 W 的初始输入功率后约 75 s, 壁温稳定, 此时蒸发段温度约为 22.4℃。在不同热负荷下, 冷凝段端部 P_1 测点壁温基本不变; 在输入功率低于 120 W 时, P_2 测温点壁温随输入功率的增加而增加, 当输入功率高于 120 W 时, P_2 测温点壁温开始下降。此外, 随着输入功率的增加, 壁温达到稳定所需的时间增加。输入功率增至 170 W 后, 热管壁温缓升, 在接近稳定时, 出现蒸发段与冷凝段的温差急剧升高的现象, 此时热管失效。

通过对比图 4(a) ～图 4 (d), 发现倾角为 0.5°的热管趋于稳定所需的时间比倾角为 0°和−0.5°的热管长。因为在倾角为正的热管中, 弯曲段比蒸发段和冷凝段高, 液态工质会在蒸发段和冷凝段端部积聚, 使得工质在蒸发段的蒸发面积减小。当各倾角热管蒸发段处的输入功率相同时, 即单位时间内液态工质的蒸发量相同时, 倾角为正的热管由于在蒸发段处的蒸发面积小, 需要在蒸发段处具有更高的蒸发温度, 以满足传递相同热负荷所需的蒸发量, 从而导致其壁温更高。此外, 在倾角为正的热管中, 气液相界面到管壳的距离增加使得热量从热管外侧面传递至气液相界面处的导热热阻增大, 同样增加了相同热负荷下的热管壁温。从瞬态响应的角度来看, 对 3 种不同倾角的热管施加相同的热负荷后, 由于倾角为正的热管稳定时达到的壁温更高, 因此其所需的时间更长。

此外, 随输入功率的提高, 倾角为 0°、−0.5°热管的各测温点壁温均有所提高, 而倾角为 0.5°热管的 P_1 与 P_2 处壁温变化较为平缓。这是因为热管的冷凝段端部在倾角为正时, 始终存在液态工质积聚, 气态工质无法在冷凝段端部冷凝放热所造成的。

2.2　热管稳态轴向温度分布

倾角为 0°、−0.5°和 0.5°的 Ω 形槽道弯曲热管在不同热负荷下达到稳态时的轴向温度分布情况如图 5 所示。同一倾角的热管在不同输入功率下呈现相似的稳态轴向温度分布, 且热管绝热段均具有良好的等温性, 但倾角不同的热管轴向温度分布存在一定差异。

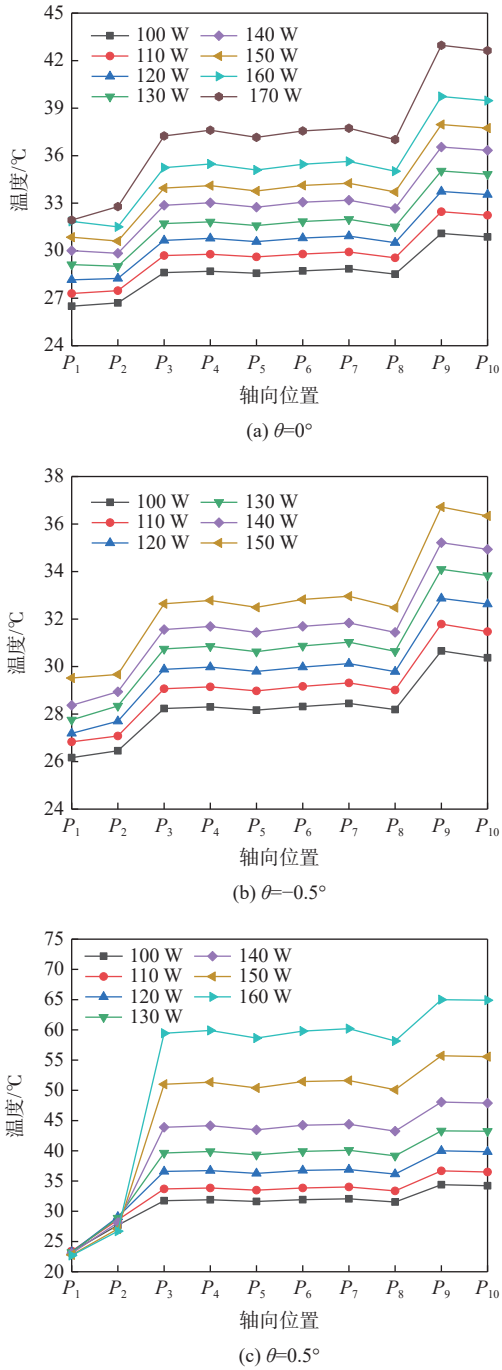


图 5　热管稳态时的轴向温度分布

Fig. 5　Axial temperature distribution of heat pipe in steady state

由图 5(a) 可知, 随着输入功率的增加, 热管各处的壁面温度整体升高。热管冷凝段与绝热段的温差在 100 W 输入功率时为 4.4℃, 当输入功率为 170 W 时, 温差变为 10.7℃, 热管整体温差随输入功

率的增加而增加。由图 5(b)可知，在不同热负荷下，该工况热管的轴向温度分布特征与水平放置热管的轴向温度分布特征相似。由图 5(c)可知，冷凝段端部 P_1 壁温与输入功率无关，均保持在 23℃ 左右，该现象与倾角为 0°和−0.5°的热管现象不同。这是因为倾角为正的热管在运行过程中，冷凝段端部始终存在液态工质积聚，输运至冷凝段的气态工质无法在端部(P_1)处冷凝放热，只能在冷凝段靠近绝热段的部分(P_2 附近)冷凝放热。因此，在水冷板的导热作用下，冷凝段端部 P_1 壁温始终接近于冷源温度 20℃。

图 6 为 3 种不同倾角热管在输入功率为 120 W 时的轴向温度分布。在施加相同热负荷时，倾角为 0°和−0.5°热管的壁温分布特征相似，倾角为 0.5°热管与倾角为 0°、−0.5°热管在蒸发段和绝热段的轴向壁温分布特征相似，而与冷凝段壁温分布特征不同。倾角为 0.5°热管的绝热段平均温度最高，倾角为 0°热管轴向温度稍高于倾角为−0.5°热管，二者的绝热段平均温度差约为 0.8℃，而倾角为 0.5°热管绝热段的温度比倾角为 0°热管绝热段温度高约 5.9℃。

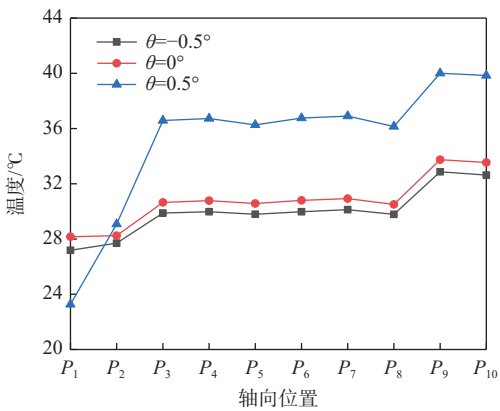


图 6　120 W 输入功率下不同倾角热管的轴向温度分布

Fig. 6　Axial temperature distribution of heat pipe with different inclination angles under 120 W heating power

2.3　热管热阻和当量导热系数

热阻和当量导热系数是分析槽道热管传热特性的重要参数，可通过式(2)与式(3)计算得到。倾角为 0°、−0.5°和 0.5°热管的热阻随输入功率的变化如图 7 所示，倾角为 0.5°热管的热阻最高，倾角为 0°和 0.5°热管的热阻相差不大。随着输入功率的增加，倾角为−0.5°热管的热阻基本不变，约为 0.045 K/W。在低输入功率时，倾角为 0°热管热阻基本不变，当接近热管最大输入功率时，热阻有明显升高。随着输入功率的增加，倾角为 0.5°热管的热阻值增大，且热管热阻上升的幅度也增大，当输入功率从 100 W 升至 110 W 时，热阻上升幅度为

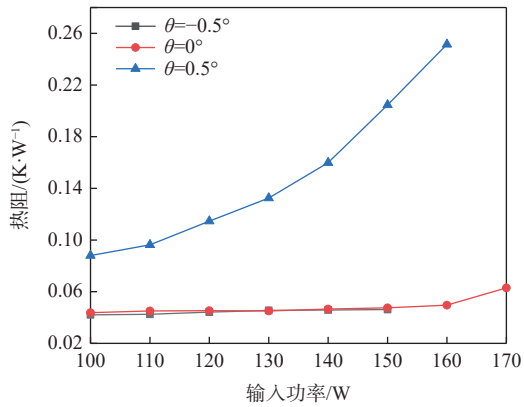


图 7　不同倾角热管的热阻

Fig. 7　Thermal resistance of heat pipe with different inclination angles

9.5%，当输入功率从 150 W 升至 160 W 时，热阻上升幅度为 22.9%。根据 2.1 节的分析已知，在倾角为正的热管中，冷凝段存在积液。随着输入功率的提高，冷凝段工质的冷凝速率增高，积液量增加，液柱高度增加，冷凝段的热阻增大。此外，冷凝段积液造成了气体的冷凝面积减小，为传递相应的热量，蒸汽腔内气体需要更高的温度实现足够的冷凝量，因此，绝热段和加热段的温度也会大幅上升。上述 2 个因素造成倾角为正热管的热阻偏大，且随着输入功率的增加而增大。在倾角为 0°、−0.5°的热管中，并没有出现冷凝段积液的情况，热阻较小，且随着输入功率增加基本不变。

3 种不同倾角 Ω 形槽道弯曲热管的当量导热系数随输入功率的变化如图 8 所示。倾角为 0.5°热管的当量导热系数最低，倾角为−0.5°热管的当量导热系数稍高于倾角为 0°热管。输入功率增加时，热管当量导热系数均有下降趋势，倾角为 0.5°热管的当量导热系数降低幅度更大，倾角为 0°热管在施加接近最大输入功率 170 W 时当量导热系数大幅下降。

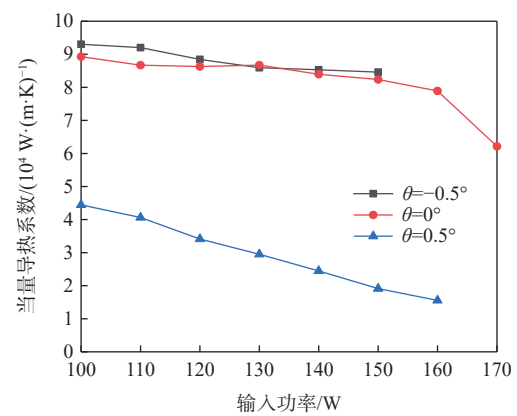


图 8　不同倾角热管的当量导热系数

Fig. 8　Thermal conductivity of heat pipe with different inclination angles

2.4　最大输入功率

为研究重力场中小倾角对 Ω 形槽道弯曲热管最大输入功率的影响, 分别对倾角为−1.5°、−1°、−0.5°、0°、0.5°、1°、1.5°的 Ω 形槽道弯曲热管进行最大输入功率的实验。图 9 为不同倾角热管在冷源温度为 15℃、20℃、25℃ 时的最大输入功率结果。

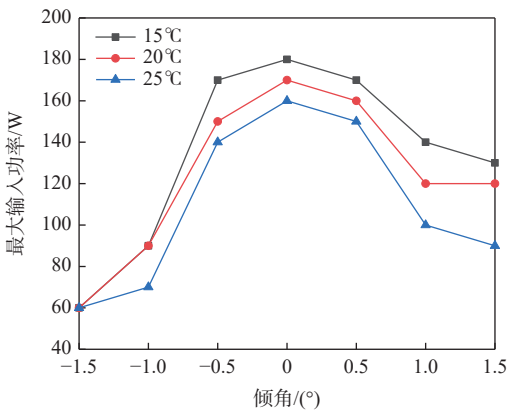


图 9　不同冷源温度下各倾角热管的最大输入功率

Fig. 9　Maximum heat transfer power of heat pipe with different inclination angles at different cold source temperatures

在本文工况下, 倾角为 0°热管可以在更大的输入功率下运行, 且随着热管倾角绝对值的增大(无论正负), 热管的最大输入功率均存在不同程度的减小。随着倾角绝对值的增大, 倾角为负的热管最大输入功率下降的幅度大于倾角为正的热管。冷源温度为 20℃ 时, 倾角为−1.5°热管的最大输入功率约降低 65%, 倾角为 1.5°热管的最大输入功率仅降低约 30%, 且不同冷源温度下的传热极限随倾角变化的趋势相似。

出现上述最大输入功率变化的原因是热管在不同放置角度下的液态工质积聚位置不同。在热管未运行时, 不同倾角热管的液体工质积聚情况如图 10 所示, g 为重力加速度, 箭头方向为重力方向, 灰色部分为积聚于热管各段的液体工质。图中 A 热管的倾角为正, B 热管的倾角为负。倾角为正时, 热管内的液态工质在重力作用下会在蒸发段和冷凝段端部积聚, 当热管运行后, 加热端液体会不断蒸发, 积液会减小直至消失, 冷凝段积液则会增加。倾角为负时, 热管内的液态工质会在弯曲段积聚。而水平放置时, 弯曲热管内的液态工质在各吸液芯内均匀分布, 不发生积聚。

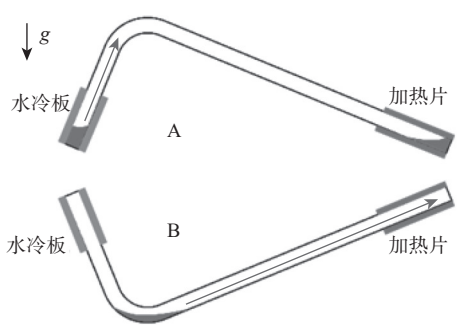


图 10　不同倾角热管的液体工质积聚

Fig. 10　Working fluid accumulation in heat pipe with different inclination angles

根据式(1)对不同倾角热管进行毛细最大输入功率分析, 其中, 蒸发段、弯曲段与冷凝段相对于水平面的角度 φ 和长度 l 均不相同。当吸液芯内的液态工质顺重力方向回流时, 该段热管的 φ 为正, 反之为负。当热管倾角 θ 不为 0°时, 热管长直段、短直段相对于水平面的角度 φ 绝对值不同且符号相反。

1) 倾角为正时, 弯曲段最高处的毛细压头需要克服液态工质的流动阻力和重力的不利影响, 才能使液态工质从冷凝段(短直段)顺利输运至弯曲段最高处(见图 10 中 A 热管箭头), 随后液态工质在顺重力的情况下从弯曲段最高处输运至蒸发段。当弯曲段最高处的毛细压力无法在逆重力情况下将冷凝段(短直段)的液体工质输运过热管最高处时, 工质输运循环中断, 达到热管最大输入功率。

2) 倾角为负时, 液态工质在顺重力的情况下从冷凝段输运至弯曲段最低处积聚, 随后蒸发段端部的毛细压力需要克服液态工质的流动阻力和重力, 才能将液态工质从弯曲段最低处输运至蒸发段端部(见图 10 中 B 热管箭头)。当蒸发段(长直段)最高处的毛细压力无法在逆重力情况下将弯曲段积聚的液体工质输运到蒸发段时, 工质输运循环中断, 达到热管最大输入功率。

综上所述, 倾角为正的热管输运循环需要满足的条件是: 弯曲段最高处的毛细压头大于或等于液态工质从冷凝段输运至弯曲段最高处过程中的流动压损和重力压差。倾角为负的热管输运循环需要满足的条件是: 蒸发段端部的毛细压头大于或等于液态工质从弯曲段最低处输运至蒸发段端部过程中的流动压损和重力压差。这 2 种工况虽然需要克服的重力压差相同, 但是热管在弯曲段低时需要克服的液态工质流经长直段的流动压损大于热管在弯曲段高时所需克服的液态工质流经短直段的流动压损。因此, 倾角为负的热管的最大输入功率小于倾角绝对值相同但倾角为正的热管的最大输入功率。

3　结　论

1) 在施加相同的输入功率后, 相对于倾角为 0°、−0.5°热管, 倾角为 0.5°热管的壁温达到稳定所需的时间更长, 这是因为倾角为正的热管在蒸发段处有液态工质积聚, 其蒸发面积更小、热阻更大。

2）随着输入功率的增加，不同倾角热管蒸发段与冷凝段温差均增加。在不同输入功率下，倾角为0°、−0.5°和0.5°热管在蒸发段和绝热段具有相似的轴向温度分布特征，但在冷凝段的温度分布存在差异。倾角为0°和−0.5°热管的冷凝段端部壁温随输入功率的增加而增加，倾角为0.5°热管的冷凝段壁温始终接近于冷源温度，这是因为倾角为正的热管在冷凝段处有液态工质积聚。

3）倾角为0.5°热管的总热阻大于倾角为0°和−0.5°热管，且其热阻随着输入功率的增加而增加，当量导热系数的变化趋势与热阻相反。此外，倾角为−0.5°热管在不同输入功率下的热阻约为0.045 K/W。倾角为0°热管的输入功率在接近最大输入功率时，热阻和当量导热系数会出现显著变化。

4）重力场中小倾角对Ω形槽道弯曲热管的最大输入功率有较大影响。倾角为0°热管的最大输入功率大于倾角不为0°的热管，倾角为负的热管的最大输入功率小于倾角绝对值相同但倾角为正的热管。此外，随着倾角绝对值的增大，热管最大输入功率减小，且倾角为负的热管最大输入功率下降的幅度大于倾角为正的热管。这是因为在不同倾角下，热管内的液态工质积聚位置不同。

参考文献（References）

[1] ABO-ELFADL S, HASSAN H, EL-DOSOKY M F. Energy and exergy assessment of integrating reflectors on thermal energy storage of evacuated tube solar collector-heat pipe system[J]. Solar Energy, 2020, 209: 470-484.

[2] 赵佳腾, 王增鹏, 戴宇成, 等. 两亲性纳米流体太阳能重力热管传热性能研究[J]. 化工学报, 2020, 71(12): 5461-5469.
ZHAO J T, WANG Z P, DAI Y C, et al. Research on heat transfer performance of amphiphilic nanofluid solar gravity heat pipe[J]. CIESC Journal, 2020, 71(12): 5461-5469(in Chinese).

[3] CIMEN M, COLAKOGLU M, GÜNGÖR A. Overheating limitation of thermosiphon solar collectors by controlling heat pipe fluid in all glass evacuated tubes[J]. Solar Energy, 2021, 230: 515-527.

[4] LIU X, ZHANG R, LIANG Y, et al. Core thermal-hydraulic evaluation of a heat pipe cooled nuclear reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 142: 107412.

[5] ZHANG Y, GUO K L, WANG C L, et al. Numerical analysis of segmented thermoelectric generators applied in the heat pipe cooled nuclear reactor[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 204: 117949.

[6] LEE J, KIM D, MUN J, et al. Heat-transfer characteristics of a cryogenic loop heat pipe for space applications[J]. Energyies, 2020, 13(7): 1616.

[7] 杨涛, 赵石磊, 高腾, 等. 航天分散热源控温用环路热管设计及飞行应用[J]. 宇航学报, 2021, 42(6): 798-806.
YANG T, ZHAO S L, GAO T, et al. Design and In-orbit application of temperature controlled loop heat pipe for aerospace distributed heat sources[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(6): 798-806 (in Chinese).

[8] SIRICHAROENPANICH A, WIRIYASART S, SRICHAT A, et al. Thermal management system of CPU cooling with a novel short heat pipe cooling system[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019, 15: 100545.

[9] BEHI H, GHANBARPOUR M, BEHI M. Investigation of PCM-assisted heat pipe for electronic cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1132-1142.

[10] DELPECH B, AXCELL B, JOUHARA H. Experimental investigation of a radiative heat pipe for waste heat recovery in a ceramics kiln[J]. Energy, 2019, 170: 636-651.

[11] WANG Y J, CHEN Y, WANG K, et al. Performance evaluation and thermal analysis of heat pipe flue gas waste heat utilization system[J]. Energy Reports, 2022, 8: 210-217.

[12] ANAND A R. Effect of various parameters on heat transport capability of axially grooved heat pipes[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 24: 100890.

[13] 朱明汉, 白鹏飞, 胡艳鑫, 等. 烧结多孔槽道吸液芯超薄平板热管的传热性能[J]. 化工学报, 2019, 70(4): 1349-1357.
ZHU M H, BAI P F, HU Y X, et al. Heat transfer performance of ultra-thin plate heat pipe with sintered porous channels structures wick[J]. CIESC Journal, 2019, 70(4): 1349-1357(in Chinese).

[14] NAGAYAMA G, GYOTOKU S, TSURUTA T. Thermal performance of flat micro heat pipe with converging microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 375-382.

[15] LI Z S. Design and preliminary experiments of a novel heat pipe using a spiral coil as capillary wick[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 1240-1251.

[16] 韩娜丽, 徐红艳, 陈跃勇, 等. “Ω”形轴向槽道热管传热系统传热能力试验研究[J]. 低温工程, 2016(2): 38-44.
HAN N L, XU H Y, CHEN Y Y, et al. Experimental investigation of heat transfer capability of “Ω” shape axial grooved heat pipe heat transfer system[J]. Cryogenics, 2016(2): 38-44(in Chinese).

[17] PIS’MENNYI E N, KHAYRNASOV S M, RASSAMAKIN B M. Heat transfer in the evaporation zone of aluminum grooved heat pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 80-88.

[18] LEDARI B H, SABZPOOSHANI M. A comparative empirical investigation on the thermal performance of gravity-assisted double-bent, double-ended cooling, and single-bent, single-ended cooling heat pipes[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 112: 104505.

[19] 乔家广, 陶乐仁, 谢荣建, 等. 特殊型槽道热管启动和运行特性研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(3): 84-88.
QIAO J G, TAO L R, XIE R J, et al. Research on starting and operation characteristics of special grooved heat pipe[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(3): 84-88(in Chinese).

[20] 张畅, 谢荣建, 孙琦, 等. 液氮温区Ω形轴向槽道热管的启动特性与传热性能[J]. 化工进展, 2019, 38(6): 2610-2617.
ZHANG C, XIE R J, SUN Q, et al. Start-up and heat transfer performance of a nitrogen cryogenic axial Ω shape grooved heat pipe[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(6): 2610-2617(in Chinese).

[21] YU F W, YU C, CAO J G, et al. Experimental analysis of the eva-

poration regimes of an axially grooved heat pipe at small tilt angles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 334-341.

[22] ZHANG X, JIANG D Y, WANG H, et al. Experimental analysis on the evaporator startup behaviors in a trapezoidally grooved heat pipe[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 199: 117558.

[23] CHI S W. 热管理论与实用[M]. 蒋章焰, 译. 北京: 科学出版社, 1981: 60-62.
CHI S W. Heat pipe theory and practice[M]. JIANG Z Y, translated. Beijing: Science Press, 1981: 60-62(in Chinese).

Effect of small inclination angle on heat transfer performance of Ω-shaped bending heat pipe

WANG Zhuo，PAN Yuhui，ZHAO Rui，NIAN Yongle，CHENG Wenlong*

(School of Engineering Science，University of Science and Technology of China，Hefei 230027，China)

Abstract: An experimental platform for studying the heat transfer performance of heat pipes was set up to investigate the effect of a small inclination angle on the heat transfer performance of Ω-shaped bending heat pipes. The temperature distribution, total thermal resistance, thermal conductivity, and maximum heat transfer power of heat pipes with different small inclination angles were analyzed in the experiment. The results show that the wall temperature uniformity of heat pipes with zero and negative inclination angles is better than that of heat pipes with positive inclination angles at the same heating power. The heat pipe with a positive inclination angle has the largest total thermal resistance. The total thermal resistance of heat pipes with zero and negative inclination angles is similar. The maximum heat transfer power of heat pipes with zero inclination angle is the highest. In installation and application, the heat pipe will inevitably face gravity inclination angle deviation. The research results indicate that the small inclination angle can affect the heat transfer performance of Ω-shaped bending heat pipes.

Keywords: heat pipes; heat transfer; small inclination angle; thermal resistance; thermal conductivity; maximum heat transfer power

Received：2022-07-09；**Accepted**：2022-08-26；**Published Online**：2022-09-14 10：49

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220913.1405.002

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (51876198); Key Research and Development Program of Anhui Province (202004a07020053)

* **Corresponding author**. E-mail：wlcheng515@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0605

适应人体重心起伏的悬吊减重康复系统设计

王创[1]，陈文杰[1,2,*]，陈伟海[3]，孙先涛[1,2]，林岩[3]

(1. 安徽大学 电气工程与自动化学院，合肥 230601；2. 安徽大学 安徽省人机共融系统与智能装备工程实验室，合肥 230601；
3. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘 要：减重系统对下肢疾病患者的行走康复训练有重要影响。现有的下肢康复外骨骼减重装置大多只考虑如何减去患者体重的百分比，而忽略了患者身体重心的起伏。由于外骨骼的骨盆支架在竖直方向运动轨迹固定，患者步态的微小变化就会导致重心高度与骨盆支架运动轨迹不符，这一差异会作用到患者的骨盆位置，影响下肢关节的活动，并产生额外的风险。针对这一问题，提出通过采集足底压力来预测重心位置变化，并利用获得的重心轨迹解算出应施加的减重力方法，为患者训练提供安全有效的减重系统。所提方法的可行性已获仿真证实，并在研发的外骨骼减重系统上获得实际验证，模糊控制器跟踪重心轨迹的误差相比 PID 控制减少了 21.2%，稳态误差维持在 ±1 mm 范围内，髋膝关节的活动范围相比常规减重分别增加了 14.36% 和 13.77%。

关 键 词：下肢外骨骼；康复训练；悬吊减重；重心起伏；PID 控制
中图分类号：TP242
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2322-09

减重系统是下肢康复机器人的一个重要组成部分，可以解决患者下肢肌肉力量不足、双腿难以支撑正常行走的问题。传统的减重系统是通过增加人体重量的百分比的形式进行减重，如日本东北大学开发的一款体重支撑助行器，配合足底压力采集模块，可以为试验者提供不同的体重支持，最高可达 15%[1]；Koyama 和 Kai[2] 设计了一种被动式步行支撑系统，该系统用恒力弹簧和电磁制动器，让患者在跑步机上进行步态训练，为患者提供体重支撑并且维持平衡，但减重调整困难；Lu 等[3] 使用加速度反馈方法主动补偿所需的重力和惯性力，仿真表明该方法能够实现部分或全部体重支持；于宁波等[4] 设计了一款单绳悬吊主动减重系统，利用滑模控制方法，分别控制吊绳偏角和吊绳拉力，实现主动减重效果；Glauser 等[5] 将减重系统分为患者模型和电机模型，通过运动学建模将 2 个模型的参数分开确定，这样在更换受试者时，电机模型可以保持不变，只需要调整患者模型的参数即可。

上述下肢康复外骨骼减重系统虽然从主动和被动两方面设计减重方案，通过不同的措施为患者减去体重百分比，但这种减重方式没有考虑到人体重心的起伏变化。患者步态稍微变化其重心轨迹就会与外骨骼的骨盆支架运动轨迹不符，从而容易对患者的骨盆运动造成限制。这样虽然能保证力传感器采集到的减重力恒定，但达不到康复训练的效果，严重的甚至会造成二次伤害[6]。

针对这一问题，一些研究人员将重心变化因素加入减重系统设计中。如上海理工大学康复工程研究所设计出一款跟随人体重心高度的骨盆支撑减重系统，他们使用安装在髋膝关节的惯性传感器和动作捕捉系统来判断人体重心位移，通过驱动电机来实时调节骨盆高度[7]。由于惯性测量单元 IMU

收稿日期：2022-07-09；**录用日期**：2022-11-18；**网络出版时间**：2022-11-29 17:07
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221129.1348.002
基金项目：国家自然科学基金面上项目 (51975002)
* **通信作者**. E-mail：wjchen@ahu.edu.cn

引用格式：王创，陈文杰，陈伟海，等. 适应人体重心起伏的悬吊减重康复系统设计 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（7）：2322-2330.
WANG C，CHEN W J，CHEN W H，et al. Design of suspension weight-support rehabilitation system adapted to fluctuation of human center of gravity [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（7）：2322-2330（in Chinese）.

在运动过程中受位置偏差及传感器温漂的影响, 精确追踪人体重心变化比较困难[8]。Song 等[9] 提出一种具有系列弹性驱动器的体重支撑系统, 该系统具有使骨盆平稳运动的支撑机构, 能够提供所需的卸载力, 但在卸载不同比例的质量时, PID 参数需要重新调整。

针对现有的减重系统只考虑减重而忽略患者重心起伏的问题提出一种解决方法, 即使用足底压力传感器采集人体正常行走时的压力, 利用足部压力中心的变化来预测重心位置的变化, 并将采集到的重心轨迹作为标准轨迹, 输入控制系统来指导康复训练。

1　设计方案

减重系统的整体设计框架如图 1 所示, 主要包括减重系统、骨盆支撑系统、外骨骼助行腿、康复跑步机。训练流程如下: ①为患者穿戴防护服; ②将减重系统调至速度模式; ③将患者吊起, 并根据患者病情状态设置所需的减重力; ④打开跑步机将转速调至合适位置, 将患者缓缓下放至脚尖刚好接触跑步机; ⑤开启外骨骼助行腿, 进行训练。在整个训练期间减重电机依据人体重心变化提供给受试者恒定的减重力。

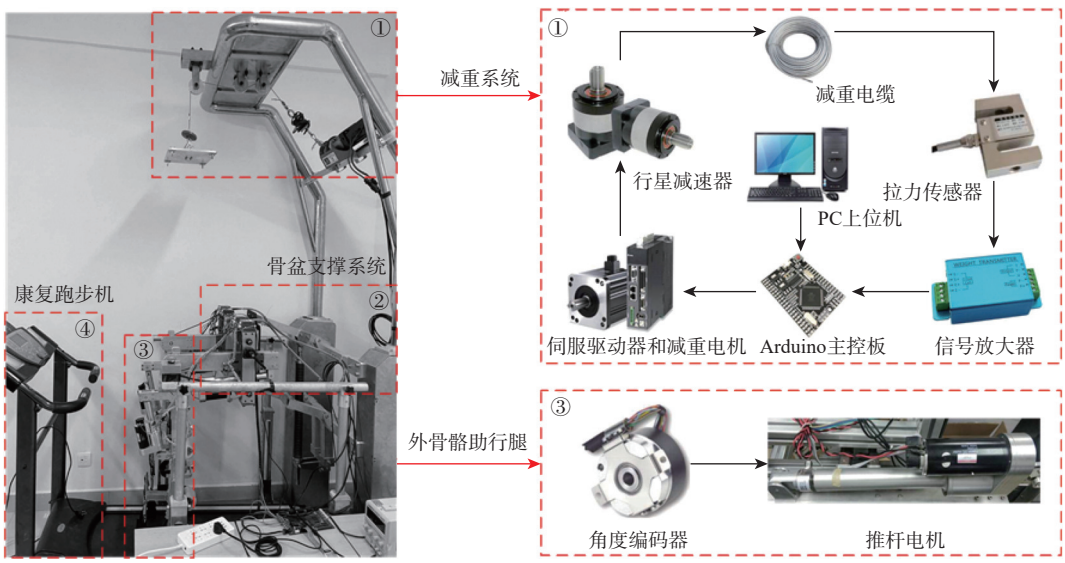


图 1　下肢康复外骨骼总体构成

Fig. 1　Overall composition of lower limb rehabilitation exoskeleton

1.1　减重系统

驱动单元选择台达公司生产的 ASDA-A2 220 V 系列伺服电机作为减重电机, 额定功率为 1.5 kW, 额定转速为 2 000 r/min, 输出力矩为 7.16 Nm, 配合高机能通讯型伺服驱动器进行驱动。考虑到钢丝绳索缠绕形成的钢圈旋转半径较小, 配备了上海寅通减速机有限公司生产的 PLF120-20-P2-S2 专用行星减速机, 二级减速比为 20, 最大输出力矩为 143.2 Nm, 可以满足最大 100 kg 的减重。传感器采用 DAYSENSOR 高精度 S 型拉力传感器, 量程为 100 kg, 精度为 0.03%, 输出电压信号为 0～10 mV, 配合电压放大电路可将拉力传感器输出信号传给主控板。主控板采用 Arduino Mega 2560, 通过 ModBUS 协议和驱动器进行通信。

1.2　外骨骼助行腿

台架式外骨骼机器人的 4 个关节使用 maxson 生产的直流有刷推杆电机, 该电机将普通电机的旋转运动通过丝杠等机构转换成推杆的直线运动。依据人体下肢关节进行建模, 能够实现基本的轨迹跟踪控制。测量单元选择 Hengstler 公司的 AD35 编码器作为位置反馈传感器, 可以记录实际的下肢关节角度变化, 并设计了 FPGA+DSP 的双芯片集成化电路来完成信息采集和运动控制。其中, DSP 芯片作为主控制器, 负责完成上下位机的交互和机器人的闭环控制, FPGA 芯片作为协调处理器负责采集传感器信息并作简单的滤波处理。在安全性能方面, 设计了机械限位结构, 并在末端添加限位开关, 在扶手处设置急停开关, 防止程序异常或断电时外骨骼出现大幅度变动。

图 2 为外骨骼助行腿简化结构。由三角形余弦定理及角度间的关系可得髋、膝关节电机长度和关节角度间的关系:

$$\dot{L}_1=\frac{d_1d_2\sin(\pi/2+\theta_1-\sigma_1-\sigma_2)}{\sqrt{d_1^2+d_2^2-2d_1d_2\cos(\pi/2+\theta_1-\sigma_1-\sigma_2)}}\dot{\theta}_1 \quad (1)$$

$$\dot{L}_2=\frac{d_3d_4\sin(\pi/2+\theta_2-\sigma_3)}{\sqrt{d_3^2+d_4^2-2d_3d_4\cos(\pi/2+\theta_2-\sigma_3)}}\dot{\theta}_2 \quad (2)$$

式中：θ_1为外骨骼大腿与竖直方向夹角；θ_2为外骨骼大腿与小腿之间的夹角；L_1和L_2分别为大腿和小腿电机长度。

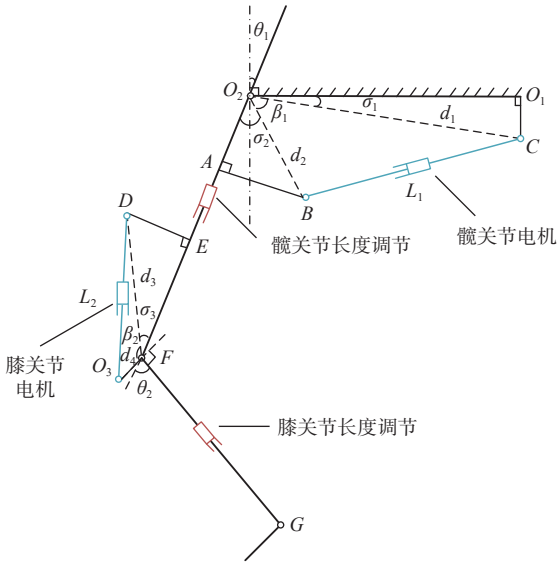


图2 外骨骼助行腿简化结构

Fig. 2 Simplified structure of exoskeleton walking legs

2 减重系统动力学建模

2.1 惯性力与重心位移的关系

在康复训练过程中，由于患者双腿和外骨骼助行腿固定在一起，因此，患者的横向位移可以忽略，即在动力学分析过程中只考虑竖直方向。将悬吊板和患者视为一体，用质量、弹簧和阻尼模型来模拟人体自身质量和柔度[5]，对人体进行受力分析。如图3所示，其中，$\boldsymbol{f}_{ss}$为传感器的受力，$\boldsymbol{d}(t)$为脚掌和跑步机的相互作用。在考虑传感器单元的显示时，将上身和下身视为一个整体：

$$m\ddot{\boldsymbol{x}} = -c_{ps}\dot{\boldsymbol{x}} - k_{ps}\boldsymbol{x} \tag{3}$$

式中：m为人体质量；$\boldsymbol{x}$为患者向上提升的竖直位移，可看作重心的变化；$\dot{\boldsymbol{x}}$为竖直速度；k_{ps}为防护服对人体的等效弹簧；c_{ps}为等效阻尼；k_l为双腿和地面的等效作用力。

将式(3)转换成标准形式：

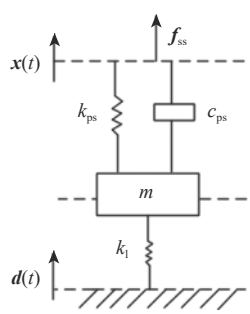


图3 人体等效质量模型

Fig. 3 Human equivalent mass model

$$\ddot{\boldsymbol{x}} + 2n\dot{\boldsymbol{x}} + p^2\boldsymbol{x} = \boldsymbol{0} \tag{4}$$

式中：令$p^2 = \dfrac{k_{ps}}{m}$，$2n = \dfrac{c_{ps}}{m}$，则其为有阻尼自由振荡微分方程，取其解$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{e}^{sx}$，$s$为待定系数，代入式(3)中，可得

$$(s^2 + 2ns + p^2 + 1)\boldsymbol{e}^{sx} = 0 \tag{5}$$

若式(5)成立，则$s^2 + 2ns + p^2 + 1 = 0$，那么特征方程的解为$s_{1,2} = -n \pm \sqrt{\Delta}$，若取$\Delta = n^2 - p^2 - 1$，则只要控制$n$和$p$的值，就可以控制系统的稳定性。

对传感器进行受力分析：

$$\boldsymbol{f}_{ss} = \boldsymbol{f}_s + \boldsymbol{f}_a \tag{6}$$

$$\frac{\boldsymbol{T}}{r_{sm}} = \boldsymbol{f}_{ss} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{f}_a$为患者轴向加速度产生的力；$\boldsymbol{f}_s$为设置的减重力，大小为人体质量的百分比；$\boldsymbol{T}$为伺服电机的输出扭矩；r_{sm}为伺服电机轴半径。根据式(4)～式(7)可知电机输出力矩和重心位移之间的关系。

2.2 重心位移的估算方法

如图4所示，采用力感科技的16区足底压力传感器采集人体正常行走时的压力变化。其中每个采集模块可等效为1个压敏电阻，每个电阻单独对应1个输出端口，8个电阻共用1个公共端口，行走时不同部位压力的变化可通过压敏电阻两端电压的变化获取。

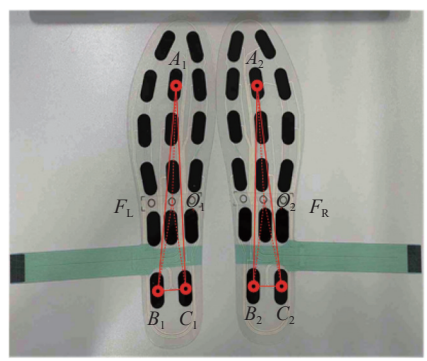


图4 足底压力传感器

Fig. 4 Plantar pressure sensor

选取最能反映足部压力特征的3点进行研究，记为A、B、C，点O为足部压力中心，压力为$\boldsymbol{F}$。

人体静止时，重心向地面的垂直投影与足部压力中心一致，参照Shimba[10]利用牛顿力学模型推导出平地上物体运动方程的方法，得出人体重心估计位置与足部压力中心受力的关系：

$$\boldsymbol{r}_G = \boldsymbol{r}_{G0} + \boldsymbol{v}_{G0}t + \boldsymbol{S}(t) \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{r}_G$为人体重心的位置矢量；$\boldsymbol{r}_{G0}$为初始重心位置；$\boldsymbol{v}_{G0}$为初始重心速度；$\boldsymbol{S}(t)$为成比例的水平地面反作用力。$\boldsymbol{r}_G$可写为双时间积分的形式：

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{G}}=\boldsymbol{r}_{\mathrm{G0}}+\boldsymbol{v}_{\mathrm{G0}}t+\iint\frac{\boldsymbol{F}_x(t)}{m} \tag{9}$$

式中: $\boldsymbol{F}_x$为水平地面作用力的合力。

由于人体在原地行走过程中, 其重心轨迹基本只在竖直方向变化, 并且具有明显的正余弦特性, 只有幅值大小随受试者高度的不同而变化[11-12], 因此, 根据式 (8) 和式 (9) 中对重心位置的测算方法及参考文献 [12-13] 的结论, 利用 MATLAB/Simulink 工具进行拟合, 经傅里叶函数处理后得到的人体重心(center of gravity, COG)轨迹曲线如图 5 所示。

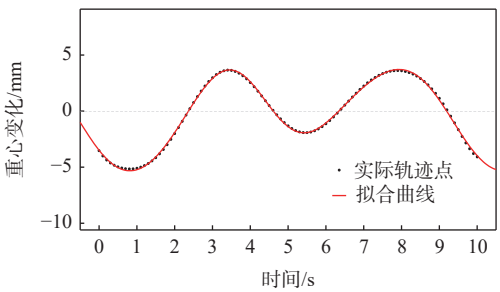


图 5　竖直方向 COG 轨迹拟合曲线

Fig. 5　Vertical COG trajectory fitting curve

3　控制系统设计与仿真

3.1　PID 控制器设计

本文设计的减重控制系统如图 6 所示, 内环为人体模型, 外环为电机模型。输入 COG 轨迹曲线, 通过公式解算出电机应输出的力矩变化, 然后经 PID 控制器将电压命令传入直流电机, 直流电机发生动作, 并跟随人体运动。同时采用力传感器对行走过程中减重绳上的拉力进行测量, 与电机施加的卸载力进行比较, 其差值经补偿控制器反馈给 PID 控制, 形成控制闭环。

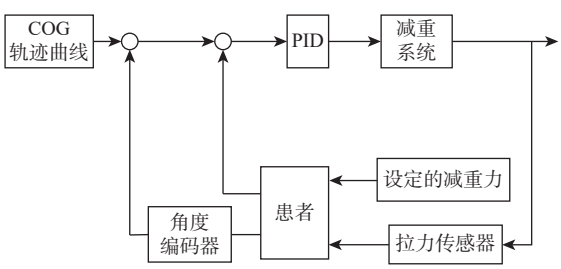


图 6　PID 控制的减重系统

Fig. 6　PID controlled weight support system

对于 PID 控制器, 先定量计算系统产生超调的范围中间值, 然后从左右两边各取该中间值的 3 倍, 观察这 3 个波形系统的误差和响应速度, 缩小范围择优选择, 再依次调整积分和微分环节, 最终的 PID 控制器参数设置为$k_{\mathrm{P}}=53$, $k_{\mathrm{I}}=60$, $k_{\mathrm{D}}=3$; 对于人体模型, 取m=60 kg, k_{ps}=23.0 kN/m, c_{ps}=481 (N·s)/m, 减重 20% 和 40% 时人体重心轨迹如图 7 所示。

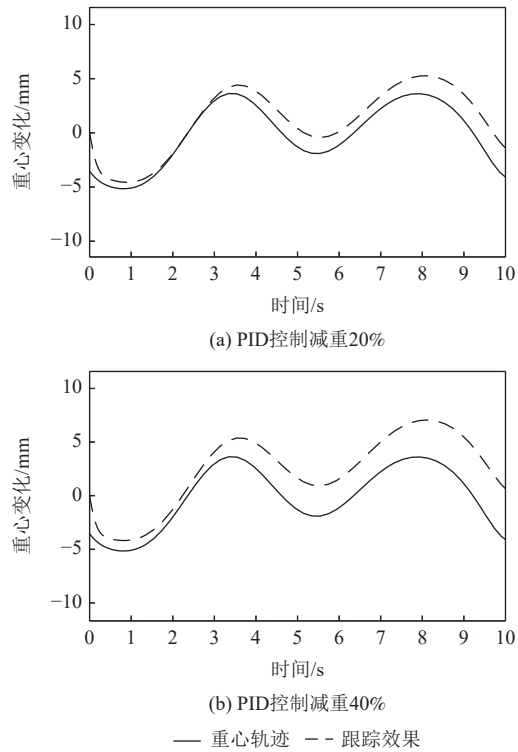


图 7　PID 控制 20% 和 40% 卸载力时重心变化

Fig. 7　PID controls gravity center change at 20% and 40% unloading force

从图 7 可以看出, 使用 PID 控制器进行轨迹跟踪, 具有一定的滞后效果, 并且随着卸载力的不断增大, 跟踪误差也在不断变大。当为重症患者卸载较大体重时, PID 控制器已经不能很好地起到控制效果, 需要重新设置 PID 参数。由于设计的需求是康复外骨骼要面向市场, 因此, 在更换不同的受试者及为受试者卸载不同的体重时应该普遍适用。由此, 设计出了模糊 PID 控制器, 利用模糊规则在线调节 PID 参数, 省去每次调节 PID 控制器所用的大量时间[14]。

3.2　模糊 PID 控制器设计

模糊控制器的设计包括以下 4 部分: 输入模糊化、建立模糊规则、模糊推理、解模糊化。模糊 PID 控制器包括一维、二维和三维, 本文构造为最常用的二维模糊 PID 控制器, 以误差e和误差变化率e_{c}作为输入[15–17], 利用模糊控制规则在线整定 PID 参数, 以满足不同时刻的e和e_{c}对 PID 参数的自整定要求。模糊控制器的控制结构如图 8 所示。

由式 (4) 可知, 系统动力学方程为: $\ddot{\boldsymbol{x}}+2n\dot{\boldsymbol{x}}+p^2\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$, 对模糊系统的输入$e$和$e_{\mathrm{c}}$分别设计 7 个模糊集, 即取$n=2$, $i=2$, $p_1=p_2=7$, 根据模糊系统的万能逼近定理:

$$\|g-f\|_{\infty}\leqslant\left\|\frac{\partial g}{\partial x_1}\right\|_{\infty}h_1+\left\|\frac{\partial g}{\partial x_2}\right\|_{\infty}h_2 \tag{10}$$

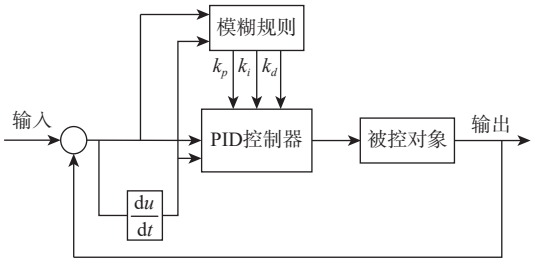


图 8 模糊 PID 控制器

Fig. 8 Fuzzy PID controller

$$h_i = \max_{1\leqslant j\leqslant N_i-1}\left|e_i^{j+1}-e_i^j\right| \qquad i=1,2 \tag{11}$$

式中：$f(x)$为二维模糊系统；$g(x)$为未知函数，并且在$U=[\alpha_1,\beta_1]\times[\alpha_2,\beta_2]$上是连续可微的，函数上界为无穷维范数$\|\cdot\|_\infty$，即$\|\boldsymbol{d}(\boldsymbol{x})\|_\infty=\sup\limits_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{U}}|\boldsymbol{d}(\boldsymbol{x})|$，以$\hat{f}(x|\theta)$来逼近模糊系统。对于2个变量$e$和$e_c$，采用$\prod_{i=1}^{n}p_i=49$条模糊规则来构造模糊系统，第$j$条模糊规则可以被表示为

$$R^{(j)}:\text{IF } x_1 \text{ is } A_1^{l_1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_1^{l_2} \text{ THEN } \hat{f} \text{ is } B^{l_1l_2} \tag{12}$$

式中：l_i=1, 2, …, 7；j=1, 2, …, 49；$B^{l_1l_2}$为结论的模糊集。

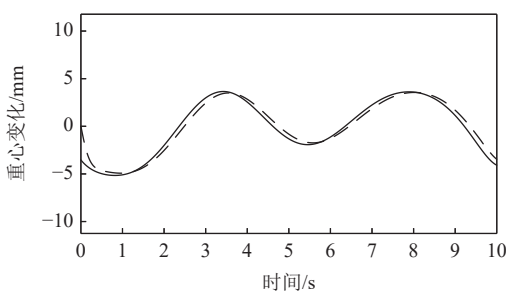
据此，建立了PID模糊规则，如表1所示，其中，NB为负大；NM为负中；NS为负小；ZO为0；PS为正小；PM为正中；PB为正大。分别是输入和输出的7个等级。

表 1 PID 模糊规则

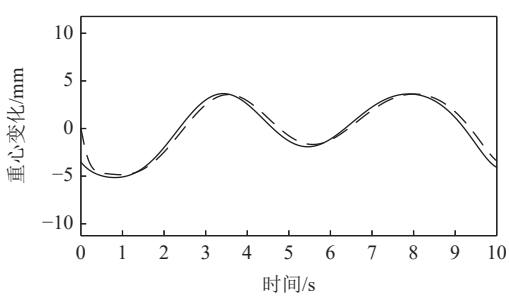
Table 1 PID fuzzy rule

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB\NB\PS	PB\NB\NS	PM\NM\NB	PM\NM\NB	PS\NS\NB	ZO\ZO\NM	ZO\ZO\PS
NM	PB\NB\PS	PB\NB\NS	PM\NM\NB	PS\NS\NM	PS\NS\NM	ZO\ZO\NS	NS\ZO\ZO
NS	PM\NB\ZO	PM\NM\NS	PM\NS\NM	PS\NS\NM	ZO\ZO\NS	NS\PS\NS	NS\PS\ZO
ZO	PM\NM\ZO	PM\NM\NS	PS\NS\NS	ZO\ZO\ZO	NS\PS\NS	NM\PM\NS	NM\PM\ZO
PS	PS\NM\ZO	PS\NS\ZO	ZO\ZO\ZO	NS\PS\ZO	NS\PS\ZO	NM\PM\ZO	NM\PB\ZO
PM	PS\ZO\PB	ZO\ZO\NS	NS\PS\PS	NM\PS\PS	NM\PM\PS	NM\PB\PS	NB\PB\PB
PB	ZO\ZO\PB	ZO\ZO\PM	NM\PS\PM	NM\PM\PS	NM\PM\PS	NB\PB\PS	NB\PB\PB

将模糊规则输入模糊控制器，再进行反模糊化处理，利用模糊规则实时调整PID参数，经MATLAB/simulink仿真后结果如图9所示，跟踪误差如图10所示。



(a) 模糊PID控制减重20%



(b) 模糊PID控制减重40%

—— 重心轨迹 – – 跟踪效果

图 9 模糊 PID 控制 20% 和 40% 卸载力时重心变化

Fig. 9 Fuzzy PID control of gravity center change at 20% and 40% unloading force

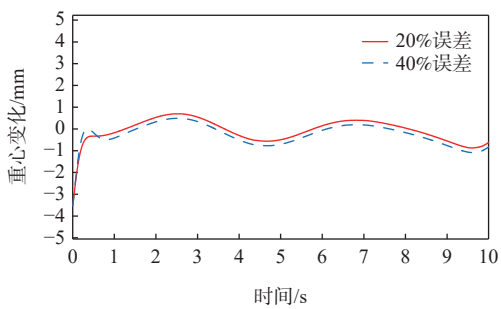


图 10 20% 和 40% 减重效果下跟踪误差

Fig. 10 Tracking error for 20% and 40% weight support effect

从图7和图9可以看出，在相同减重效果下设计的模糊PID控制器相较于普通PID控制器跟踪效果大大提升，动态响应快、稳态误差小，省去了每次调节PID参数的时间。由图10可知，不同减重效果下跟踪误差是衰减振荡的，在0～1 s起步状态时模糊控制器快速跟踪，并且2 s之后逐步趋于一个稳定的变化状态，稳态误差维持在±1 mm范围内。

4 人机实验

4.1 实验过程

根据3.2节设计的模糊PID控制器，进行实际

的人机实验来验证仿真结果。本次实验选取了3名健康成年人进行数据采集与测试, 所有受试者均无步态障碍、下肢损伤和神经系统等疾病, 其身体特征如表 2 所示。首先, 用减重系统速度模式将志愿者匀速吊起, 使其双脚脱离地面, 其次, 为其双腿穿戴外骨骼, 最后, 将受试者缓缓下放至脚尖刚好接触跑步机, 准备进入康复模式。本文共进行2组实验, 第 1 组实验志愿者按照 0.6 m/s 的步速行走, 第 2 组实验志愿者按照 1 m/s 的步速行走。每组步速下分别使用不同控制方式为受试者进行减重, 每次行走时间为 60 s, 不同控制方式之间间隔为 10 min, 不同组别之间间隔为 30 min, 并通过位置编码器记录髋膝关节的活动变化。

表 2　受试者身体指标

Table 2　Subject physical indicators

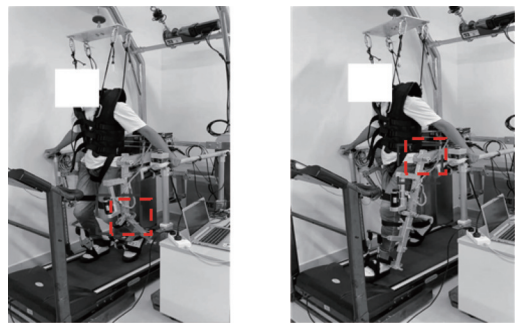
性别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	腿长/cm
男	25	175	62	95
女	24	165	53	88
男	27	183	72	97

通讯过程为, PC 上位机发出控制指令, 通过USB-TTL 将命令发送给下位机 Arduino, 下位机接收上位机的信息和传感器的反馈数据, 通过算法处理后将命令传到伺服驱动器, 驱动器驱动减重电机输出力矩变化, 跟随患者的重心轨迹。其中, 下位机和伺服驱动器通过 Modbus 通讯协议使用 RTU 进行通信, 每隔 2 ms 更新一次数据。

实验使用常规的体重百分比减重策略, 让受试者穿戴外骨骼助行腿在跑步机上行走, 采集正常行走下的髋膝关节角度信息作为对照。对每位志愿者在每组步速间进行了 2 次测试, 第 1 次使用 PID 控制策略, 假设受试者体重为 60 kg, 减重 40% 可计算得到钢丝绳索的拉力为 240 N, 经测算得到钢丝绳索缠绕的钢圈半径为 8 cm, 由式 (7) 可得电机的输出力矩为 19.2 Nm, 经减速器减速后输出力矩为 0.96 Nm。第 2 次使用模糊 PID 控制策略, 设置同样的减重比, 实验过程如图 11 所示。

4.2　实验结果

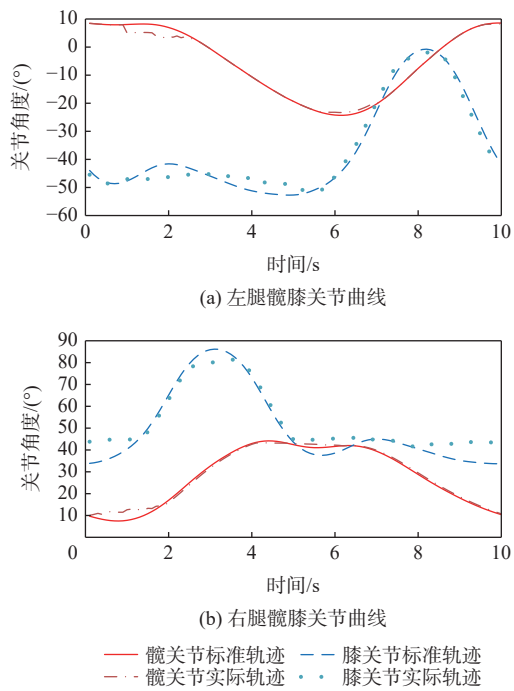
按照 4.1 节过程进行实验, 在使用常规减重措施的情况下采集到的受试者髋膝关节运动轨迹如图 12 所示, 可以看出由于受试者穿戴外骨骼, 在减重系统无法进行重心跟随时, 虽然对髋关节影响不大, 但其膝关节活动范围严重受限。膝关节是人体最大的一个屈戌关节, 在人体站立和行走时承载着人体大部分重量, 如果不能保护得当不但起不到康复训练的效果, 甚至很容易对患者造成二次伤害[18-19], 因此, 对康复患者进行体重支撑十分必要。



(a) 膝关节编码器　　(b) 髋关节编码器

图 11　步态减重实验过程

Fig. 11　Gait weight support experiment process



(a) 左腿髋膝关节曲线

(b) 右腿髋膝关节曲线

图 12　常规减重时受试者双腿髋膝关节变化

Fig. 12　Subjects' legs, hips and knees changed during routine weight support

从图 12 可以看出, 由于双腿关节具有对称性, 并且在正常行走状态下双腿相位相差半个周期, 因此, 在实验结果中只选取右腿髋膝关节的数据进行分析。

图 13 为第 1 位受试者分别在 2 种行走步速下右腿关节的运动轨迹。从图 13(a)可以看出, 在 0.6 m/s 步速下, PID 控制器的跟踪效果在 2 个关节的轨迹中相较于常规减重都有明显改善, 在摆动相跟踪效果比较理想, 但对于膝关节的支撑相仍有较大误差。原因是 PID 控制器没有及时把重心变化产生的数据反馈给下位机, 并且固定的 PID 参数影响了跟踪的准确性, 这与仿真结论是一致的。在模糊规则控制下, 模糊 PID 控制器的跟踪效果大为提升, 膝关节曲线逐渐变得平滑, 并且在支撑相较普通 PID 控制器跟踪效果有所提升, 下肢髋膝关节运

动曲线更加接近标准步态轨迹。大约30 min后，进行第2组测试，如图13(b)所示，设置步速为1 m/s，在减重40%状态下记录右腿髋膝关节角度变化。可以看出，在步速发生变化时2种控制方式都产生了延迟。对于PID控制方式，在膝关节支撑相期间已失去跟踪效果，而模糊控制器虽然较0.6 m/s步速时效果变差，但仍能跟踪2个关节的轨迹。

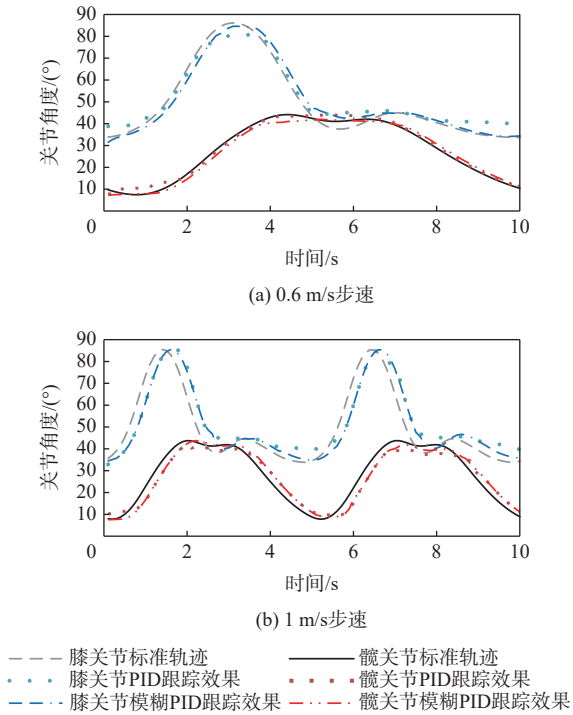


图13 受试者1在2种步速下实验结果

Fig. 13 Experimental results of subject 1 at two sets of walking speeds

按照与第1位受试者相同的方式，对其他2位受试者进行相同的实验，结果分别如图14和图15所示。从图14可以看出，受试者2在慢速行走时，2种控制方式均能准确提供跟踪效果，而在快速行走时，PID控制器在膝关节支撑相与髋关节摆动相效果较差。图15中，受试者3在刚开始慢速行走时，2种控制方式均产生振荡，但模糊控制器能快速调节跟踪效果，而在快速行走时，2种控制方式在支撑相与摆动相均出现振荡，但经过调整，模糊控制器仍能跟踪预定轨迹，并且误差控制在5°内。由于在康复训练期间，病人大多达不到1 m/s的行走速度，因此，设计的体重支撑系统是可以使用的。

为准确评价2种控制方法的性能，又引入均方根误差：

$$E_{\mathrm{r}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m}(y_i-\hat{y}_i)^2} \tag{13}$$

式中：y_i为下肢标准步态轨迹；$\hat{y}_i$为第i次测量的下肢轨迹。3位受试者双关节不同步速下的误差对比

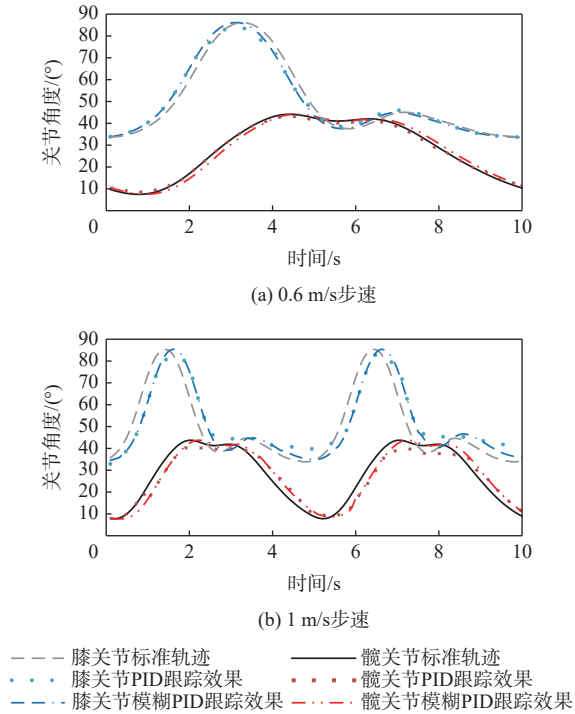


图14 受试者2在2种步速下实验结果

Fig. 14 Experimental results of subject 2 at two sets of walking speeds

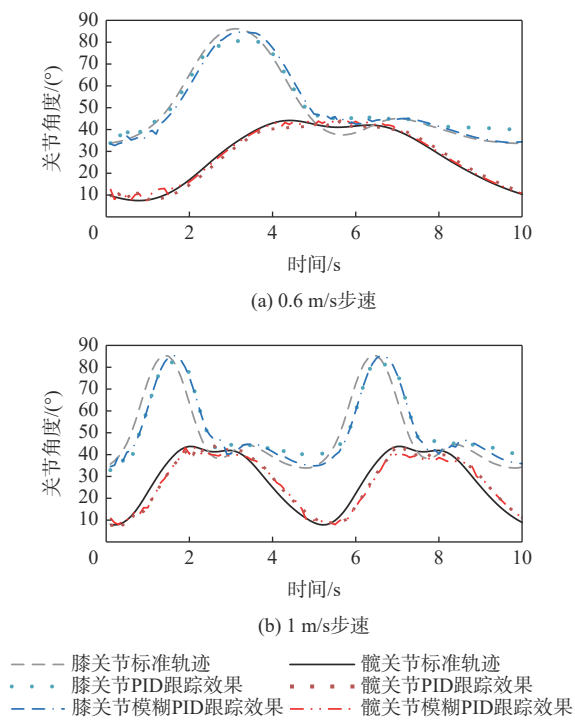


图15 受试者3在2种步速下实验结果

Fig. 15 Experimental results of subject 3 at two sets of walking speeds

结果如表3和表4所示。

由表3和表4可知，在12次行走实验中，有10组数据能体现出本文设计的模糊控制器的优异之处。即在模糊控制器作用下，有10次数据的均方根误差要小于PID控制，并且受试者在由慢速转

表 3　0.6 m/s 步速下 2 种控制方式误差对比
Table 3　Error comparison of two control modes at 0.6 m/s　(°)

受试者	PID控制		模糊控制	
	髋关节	膝关节	髋关节	膝关节
1	1.410 5	3.783 4	1.739 5	3.109 3
2	1.515 4	2.694 2	0.809 5	0.907 0
3	1.422 6	3.784 7	1.814 2	3.230 1

表 4　1.0 m/s 步速下 2 种控制方式误差对比
Table 4　Error comparison of two control modes at 1.0 m/s　(°)

受试者	PID控制		模糊控制	
	髋关节	膝关节	髋关节	膝关节
1	3.602 0	7.025 6	3.391 9	6.475 0
2	3.604 2	6.987 7	3.399 5	6.424 5
3	3.554 4	7.072 1	3.366 7	6.527 3

为快速行走时, 模糊控制器能快速调整、准确跟踪, E_r增幅较小。综合图 13～图 15 及表 3 和表 4 中 3 位受试者的行走数据可以看出, 控制器受受试者身高体型及行走速度的多因素影响, 其中受试者 1 和受试者 2 的各项关节指标比较稳定, 本文模糊控制器均能使志愿者的下肢运动轨迹与理想轨迹一致, 膝关节的误差 E_r维持在 0.907 0°～3.109 3°。而对于受试者 3, 由于减重量较大, 在运动前期及关节摆动相期间虽然控制器出现振荡, 但经过模糊规则的调整, 控制器仍具有跟踪效果。

5　结　论

1) 本文设计的模糊 PID 控制器相比普通 PID 控制器, 在 0.6 m/s 步速的一个步态周期减重 40% 时, 跟踪误差减少 21.2%, 稳态误差维持在±1 mm。

2) 本文设计的减重系统可迎合受试者重心变化, 在模糊 PID 控制下, 相比常规减重, 髋膝关节活动范围分别增加了 14.36% 和 13.77%, 并为受试者提供恒定的减重力。

3) 3 位受试者参与的 2 种不同步速的人机实验验证了模糊控制器的可行性, 模糊控制器能快速调整、准确跟踪, E_r增幅较小, 髋膝关节角度都保持在合理范围内。

为使设计的康复外骨骼减重系统具有普适性, 仍需要设计更大范围的健康人群试验, 并在此基础上增加患者实验。此外, 还可以根据实验结果考虑从结构和控制两方面对减重系统继续优化。如减重系统在更换受试者时, 由于体型和步态的影响重心轨迹也会有一定差距, 以及由于单独的足底压力传感器在运动期间存在数据传输不方便等问题, 因此, 下阶段可以考虑把足底压力传感器集成在康复跑步机上, 形成一个可以助行的测力平台, 这样通过采集受试者行走时的实时压力, 可以更加准确地估计其重心轨迹变化。人体自身具有柔度与阻尼, 在构建模型时把人体单纯地简化为弹簧阻尼系统, 可能会产生建模误差。在计算过程中忽略了减重电机和钢丝绳之间的摩擦及未知非线性因素的影响, 其所产生的误差可能会累积, 因此, 还需要逐步优化人体模型, 确保建立的系统更加准确。

参考文献（References）

[1] DONG Z H, LUCES J V S, HIRATA Y. Control and evaluation of body weight support walker for overground gait training[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(3): 4632-4639.

[2] KOYAMA T, KAI Y. Development of a walking support system controlled by servo brakes[C]//Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.

[3] LU Q, LIANG J X, QIAO B, et al. A new active body weight support system capable of virtually offloading partial body mass[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 11-20.

[4] 于宁波, 杨卓, 孙玉波, 等. 一种面向步态和平衡康复训练的单绳悬吊主动减重系统设计与控制方法研究[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1819-1831.
YU N B, YANG Z, SUN Y B, et al. Design and control of an active gravity offloading system for rehabilitation training of gait and balance[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(12): 1819-1831(in Chinese).

[5] GLAUSER M, LIN Z L, ALLAIRE P E. Modeling and control of a partial body weight support system: an output regulation approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2): 480-490.

[6] PENNYCOTT A, WYSS D, VALLERY H, et al. Effects of added inertia and body weight support on lateral balance control during walking[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.

[7] 何秉泽, 石萍, 李新伟, 等. 一种跟随人体重心高度的骨盆支撑减重康复系统[J]. 生物医学工程学杂志, 2022, 39(1): 175-184.
HE B Z, SHI P, LI X W, et al. A pelvic support weight rehabilitation system tracing the human center of mass height[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2022, 39(1): 175-184(in Chinese).

[8] LING Y, XUE Y, XING J G, et al. Experimental studies on static postural balance using the body center of gravity test system[C]//Proceedings of the First International Symposium on Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous HealthCare. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.

[9] SONG Z D, CHEN W, WANG W B, et al. Dynamic modeling and simulation of a body weight support system[J]. Journal of Healthcare Engineering, 2020, 2020: 2802574.

[10] SHIMBA T. An estimation of center of gravity from force platform data[J]. Journal of Biomechanics, 1984, 17(1): 53-60.

[11] 杨辉, 章亚男, 沈林勇, 等. 下肢康复机器人减重支撑系统的研究[J]. 机电工程, 2009, 26(7): 28-31.

YANG H, ZHANG Y N, SHEN L Y, et al. Research of the BWS system for lower extremity rehabilitation robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(7): 28-31(in Chinese).

[12] QIN T, ZHANG L X. Coordinated control strategy for robotic-assisted gait training with partial body weight support[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(8): 2954-2962.

[13] BENDA B J, RILEY P O, KREBS D E. Biomechanical relationship between center of gravity and center of pressure during standing[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 1994, 2(1): 3-10.

[14] 梁旭, 王卫群, 苏婷婷, 等. 下肢康复机器人的主动柔顺自适应交互控制[J]. 机器人, 2021, 43(5): 547-556.
LIANG X, WANG W Q, SU T T, et al. Active compliant and adaptive interaction control for a lower limb rehabilitation robot[J]. Robot, 2021, 43(5): 547-556(in Chinese).

[15] SHARMA K, PALWALIA D K. A modified PID control with adaptive fuzzy controller applied to DC motor[C]//Proceedings of the International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control. Piscataway: IEEE Press, 2017, 1: 1-6.

[16] KRISHNAN P H, ARJUN M. Control of BLDC motor based on adaptive fuzzy logic PID controller[C]//Proceedings of the International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.

[17] LIU B, YAO G, XIAO X B, et al. The research on self-adaptive fuzzy PID controller[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(373): 1462-1465.

[18] ZHANG X, LI J H, OVUR S E, et al. Novel design and adaptive fuzzy control of a lower-limb elderly rehabilitation[J]. Electronics, 2020, 9(2): 1-17.

[19] 陈豫生, 张琴, 熊蔡华. 截瘫助行外骨骼研究综述: 从拟人设计依据到外骨骼研究现状[J]. 机器人, 2021, 43(5): 585-605.
CHEN Y S, ZHANG Q, XIONG C H. From anthropomorphic design basis to exoskeleton research status: A review on walking assist exoskeletons for paraplegics[J]. Robot, 2021, 43(5): 585-605(in Chinese).

Design of suspension weight-support rehabilitation system adapted to fluctuation of human center of gravity

WANG Chuang[1], CHEN Wenjie[1, 2, *], CHEN Weihai[3], SUN Xiantao[1, 2], LIN Yan[3]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Engineering Laboratory of Human-Robot Collaboration System and Intelligent Equipment, Anhui University, Hefei 230601, China;
3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The training that patients undergoing lower limb rehabilitation receive in walking is significantly impacted by the body weight support system. Most of the existing lower limb rehabilitation exoskeleton weight support devices only consider how to reduce the percentage of the patient's body weight and ignore the heaving of the patient's center of gravity. Since the pelvic brace of the exoskeleton has a fixed motion trajectory in the vertical direction, small changes in the patient's gait may result in a mismatch between the height of the center of gravity and the motion trajectory of the pelvic brace. This difference can be imposed on the patient's pelvic position, affecting the movement of the lower limb joints and creating additional risks. To solve this problem, plantar pressure was collected to predict the change of center of gravity position, and the obtained center of gravity trajectory was used to calculate the support force that should be applied, so as to provide safe and effective weight reduction for patient training. The feasibility of this method has been verified by simulation and practical verification of the developed exoskeleton support system. When using conventional body weight support, the fuzzy controller's error in tracking the trajectory of the center of gravity is reduced by 21.2% compared to PID control, the steady-state error is maintained within a 1 mm range, and the range of motion of the hip and knee is increased by 14.36% and 13.77%, respectively.

Keywords: lower limb exoskeleton; rehabilitation training; suspension weight support; fluctuation of center of gravity; PID control

Received: 2022-07-09; **Accepted**: 2022-11-18; **Published Online**: 2022-11-29 17:07
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221129.1348.002
Foundation item: The General Program of National Natural Science Foundation of China (51975002)
* **Corresponding author**. E-mail: wjchen@ahu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0607

具有领导-跟随双层编队的UAV集群跟踪控制

张青川，王乐，席建祥*，王成
(火箭军工程大学 导弹工程学院，西安 710025)

摘　　要：针对具有多个领导者的四旋翼无人机集群，提出领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制分析与设计方法。利用无人机局部邻域信息，构造时变编队跟踪控制协议；基于领导-跟随双层编队通信拓扑结构，给出编队中心的显式表达式和编队跟踪的充分条件；通过构造并求解代数Riccati方程，提出一种领导-跟随双层结构编队跟踪控制协议的设计方法；利用四旋翼无人机集群飞行平台开展领导-跟随双层结构编队跟踪飞行实验。结果表明：所设计的领导-跟随双层结构编队跟踪控制协议可以驱使具有多个领导者的四旋翼无人机集群系统形成期望的领导-跟随双层编队结构，验证了所提方法的有效性。

关　键　词：领导-跟随双层编队结构；时变编队控制；编队跟踪；四旋翼无人机；分布式
中图分类号：V221$^+$.3; TB553
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2331-12

四旋翼无人机(quadrotor unmanned aerial vehicle, QUAV)具有灵活性好、可垂直起降和机动性强等特点[1]，在测绘、表演等民用领域和监视、打击等军事领域有着广泛的应用[2-5]。但是，单架QUAV容错率较低且负载有限，难以完成多样化、复杂化的任务，与之相比，多QUAV编队的容错性更强、负载更多且感知范围更大[6-7]。QUAV编队可以分为领导-跟随结构和无领导结构。相比无领导结构，领导-跟随结构有明确的领导者，跟随者需跟踪领导者的状态，并保持一定的编队向量，因此，具有领导-跟随结构的QUAV编队控制问题通常可以归结为编队跟踪控制问题。QUAV编队跟踪控制主要利用QUAV之间的信息交互、位置与速度的协同，设计恰当的控制协议，使得编队中的跟随者可跟踪到领导者，并保持期望的编队队形，该编队队形由预设的编队向量决定[8-9]。

根据编队中领导者的数量，可将编队跟踪问题划分为单领导者和多领导者2类。近年来，单领导者编队跟踪问题得到广泛而深入的研究[10-11]。文献[12]提出了自抗扰时变编队跟踪控制协议，给出了一种基于跟踪微分器的编队指令生成方法，多跟随者可跟踪到由单目标构成的领导者。文献[13]研究了具有单个领导者的二阶多智能体系统时变编队跟踪问题，提出了实现时变编队跟踪的充要条件，多跟随者可跟踪到单领导者的状态。文献[14]提出了一种具有预设性能的时变编队跟踪策略，引入了跟踪微分器以降低虚拟控制变量导数计算的复杂性。上述有关单领导者编队跟踪问题的研究中，多跟随者形成了期望的编队队形，并跟踪到领导者的状态，但单领导者组成的集群抗干扰能力弱，且难以适应复杂多变的环境。相比单领导者，多领导者编队跟踪控制问题更为复杂且更富有挑战性。

针对多领导者编队跟踪控制问题，文献[15]研究了具有多个领导者的二阶多智能体系统平均编队跟踪问题，提出了实现平均编队跟踪的充要条

收稿日期：2022-07-09；**录用日期**：2022-08-15；**网络出版时间**：2022-10-09 15:25
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221009.0932.004
基金项目：国家自然科学基金(62176263,62103434,62003363)；中国博士后科学基金(271004)；陕西省杰出青年科学基金(2021JC-35)；陕西省青年科学基金(2021JQ-375)
* **通信作者**. E-mail：xijx07@mails.tsinghua.edu.cn

引用格式：*张青川，王乐，席建祥，等. 具有领导-跟随双层编队的UAV集群跟踪控制[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2331-2342. ZHANG Q C，WANG L，XI J X，et al. Tracking control of unmanned aerial vehicle swarms with leader-following double formation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2331-2342 (in Chinese).*

件，跟随者可跟踪到所有领导者的平均状态。文献[16]针对具有多个领导者的多智能体系统，提出了实现时变编队跟踪的充要条件，给出了编队跟踪的可行性约束条件，要求存在一个可与所有领导者通信的强知情跟随者。文献[17]针对具有多个领导者的多智能体系统，提出了一种完全分布式的时变分簇编队跟踪控制协议，给出了控制器设计算法。上述有关多领导者编队跟踪问题的研究中，多跟随者形成了期望的编队队形，但多领导之间无信息交互，且无法形成期望的时变编队队形。在实际应用中，领导者和跟随者同时形成时变编队的系统具备更强的任务执行能力，如QUAV集群在执行侦察打击任务时，领导者和跟随者需分别携带探测感知、干扰打击等不同载荷单元，对目标进行侦察和打击，此时需要领导者和跟随者分别形成各自期望的时变编队队形，以发挥集群综合效能优势。文献[15-17]研究了具有多个领导者的编队跟踪控制问题，但未考虑到领导者之间协同形成期望的时变编队队形。有关多领导者和多跟随者可同时形成各自期望的时变编队队形的问题还未得到深入的研究，以下3个问题仍然具有重要研究意义：①如何设计领导者编队控制项，使得多领导者可形成期望的时变编队队形；②如何设计跟随者编队跟踪项，使得跟随者形成编队的同时可跟踪到多领导者编队；③如何确定由所有领导者决定的编队中心，并求取编队中心函数的显式表达式，以描述整个运动轨迹。

本文研究具有领导-跟随双层编队结构的QUAV集群系统时变编队跟踪问题。首先，利用QUAV集群的局部邻域信息，构造分布式时变编队跟踪控制协议，其中，领导者和跟随者的编队是时变的。其次，基于领导-跟随双层编队通信拓扑结构，提出具有领导-跟随双层结构时变编队跟踪的充分条件，求取编队中心的显式表达式。通过构造并求解代数Riccati方程，提出一种时变编队跟踪控制协议的设计方法，实现领导者和跟随者可形成各自期望的时变编队队形，跟随者可跟踪由所有领导者共同决定的编队中心。最后，将理论成果应用到由2架领导者无人机和3架跟随者无人机组成的QUAV集群飞行实验中。

与现有编队跟踪控制的研究成果相比，本文主要贡献有：①提出了一种领导-跟随双层结构编队跟踪控制协议，该协议具有领导者编队控制项，可驱使多领导者形成期望的时变编队队形。然而，文献[15-17]未考虑到多领导者形成期望的时变编队队形的情况。②求取了由所有领导者决定的编队中心显式表达式，以反映整个编队的运动趋势。文献[15-17]未确定编队中心函数。③将领导-跟随双层结构编队跟踪控制协议应用于QUAV集群系统中，实现了领导-跟随双层结构编队跟踪飞行。

1 预备知识与问题描述

1.1 图论知识

令$G=(V,E,\boldsymbol{W})$表示有$M+N$个节点的有向图。$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_{M+N}\}$表示图的节点集，其中，$M$个节点构成跟随层，$N$个节点构成领导层，领导层和跟随层之间仅存在由领导层指向跟随层的单向连接，领导层的节点称为领导节点，跟随层的节点称为跟随节点；$E\subseteq\{(v_i,v_j),i\neq j;v_i,v_j\in V\}$表示边集，其中，$(v_i,v_j)$为节点$v_i$到节点$v_j$的一条边，记作$e_{ji}$；$\boldsymbol{W}=[w_{ij}]\in\mathbf{R}^{(M+N)\times(M+N)}$表示邻接矩阵，其中，$w_{ij}$为边$e_{ji}$的权重，当$e_{ji}\in E$时，$w_{ij}>0$，否则$w_{ij}=0$。从节点$v_i$到节点$v_j$的有向路径是一个有限有序的边序列$\{(v_i,v_m),(v_m,v_n),\cdots,(v_l,v_j)\}$。令节点$v_i$的邻居集合为$N_i=\{v_j\in V:(v_j,v_i)\in E\}$。定义$\boldsymbol{D}=\mathrm{diag}\{\deg(v_1),\deg(v_2),\cdots,\deg(v_{M+N})\}$为有向图$G$的入度矩阵，其中，$\deg(v_i)=\sum_{j=1}^{N}w_{ij}$为节点$v_i$的入度。定义$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{D}-\boldsymbol{W}$为有向图$G$的拉普拉斯矩阵。在一个有向图$G$中，如果一个节点至少存在一条有向路径到其他所有节点，则称有向图G包含生成树。

领导层节点和跟随层节点有如下特性：领导节点之间和跟随节点之间的连接是单向或双向的；领导节点和跟随节点之间的连接是单向的，且只能从领导节点指向跟随节点。节点关系如图1所示。

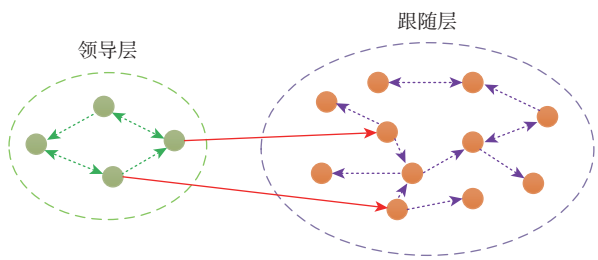


图1 领导层和跟随层的节点关系

Fig. 1 The nodes relationship schematic between the leadership layer and the following layer

假设1 领导节点之间的作用拓扑包含生成树；对于每个跟随节点，至少存在一条从领导节点指向其的有向路径。

根据领导节点和跟随节点的交互关系，有向图G的拉普拉斯矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{L}_1 & \boldsymbol{L}_2\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{L}_3\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{L}_1 \in \mathbf{R}^{M\times M}$; $\boldsymbol{L}_2 \in \mathbf{R}^{M\times N}$; $\boldsymbol{L}_3 \in \mathbf{R}^{N\times N}$; $\mathbf{R}^{S_1\times S_2}$表示$S_1\times S_2$维矩阵的集合。

引理 1[18]　令$\boldsymbol{L}\in\mathbf{R}^{(M+N)\times(M+N)}$为有向图$G$的拉普拉斯矩阵。如果有向图$G$包含生成树, 那么 0 是$\boldsymbol{L}$的单一特征值, 且对应的特征向量为$\mathbf{1}_{(M+N)}$表示元素均为 1 的$M+N$维列向量。矩阵$\boldsymbol{L}$其余$M+N-1$个特征值均具有正实部。

引理 2[19]　如果假设 1 成立, 则式 (1) 中矩阵$\boldsymbol{L}_1$的所有特征值均具有正实部, 矩阵$-\boldsymbol{L}_1^{-1}\boldsymbol{L}_2$的所有元素非负且每一行的和为 1。

1.2　问题描述

考虑一个由$M+N$架无人机组成的 QUAV 集群系统, 其中, M架无人机为跟随者, N架无人机为领导者, 无人机之间的通信关系可以用一个有向图G来描述, 节点v_i表示第i架无人机, 其中, 跟随节点为跟随者, 领导节点为领导者, 边e_{ij}表示第i架无人机和第j架无人机的相互作用, 权重w_{ij}表示第j架无人机到第i架无人机相互作用的强度。本文考虑 QUAV 集群系统中的领导者和跟随者具有如下特性: 领导者的邻居仅可以是领导者, 且领导者之间存在信息交互; 跟随者的邻居可以是领导者也可以是跟随者。

QUAV 的动力学模型可以分为姿态动力学模型和轨迹动力学模型, 其中, 轨迹动力学的时间常数远大于姿态动力学的时间常数[20]。因此, QUAV 集群系统的领导-跟随双层结构编队跟踪控制可解耦为内环控制和外环控制, 内环控制驱动无人机姿态变化, 并为外环控制提供期望加速度, 外环控制驱动无人机位置变化。本文主要考虑通过无人机集群系统位置和速度的协同控制实现编队跟踪, 属于外环控制。假设姿态控制的精度满足要求, 并为外环控制提供期望的控制输入, 便可以将第i架无人机的动力学模型描述为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_i(t)=\boldsymbol{v}_i(t)\\ \dot{\boldsymbol{v}}_i(t)=\boldsymbol{u}_i(t)\end{cases}\tag{2}$$

式中: $i=1,2,\cdots,M+N$为无人机编号; $\boldsymbol{x}_i(t)\in\mathbf{R}^n$、$\boldsymbol{v}_i(t)\in\mathbf{R}^n$、$\boldsymbol{u}_i(t)\in\mathbf{R}^n$分别为第$i$架无人机的位置向量、速度向量、控制输入向量, $\mathbf{R}^n$为n维列向量, n为无人机状态的维度。为简化后续分析推导过程中向量的表达形式, 在没有特别强调的情况下, 令$n=1$。$n=1$情况下推导出的结论可通过 Kronecker 积运算扩展至n维空间。

令$\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)=\left[\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}(t)\right]^{\mathrm{T}}$为第$i$架无人机的状态向量, $\boldsymbol{B}_1=[1,0]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{B}_2=[0,1]^{\mathrm{T}}$, 则 QUAV 集群系统式 (2) 可以表示为

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i(t)=\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}_i(t)\tag{3}$$

式中: $i=1,2,\cdots,M+N$。令跟随者编号为$1,2,\cdots,M$, 下标集合为$F=\{1,2,\cdots,M\}$; 领导者编号为$M+1$, $M+2,\cdots,M+N$, 下标集合为$E=\{M+1,M+2,\cdots,M+N\}$。

QUAV 集群系统式 (3) 的期望编队队形由跟随者和领导者的时变编队向量共同决定, 令跟随者和领导者的时变编队向量为$\boldsymbol{h}_F(t)=\left[\boldsymbol{h}_1^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{h}_2^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\boldsymbol{h}_M^{\mathrm{T}}(t)\right]^{\mathrm{T}}\in\mathbf{R}^{2nM}$和　$\boldsymbol{h}_E(t)=\left[\boldsymbol{h}_{M+1}^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{h}_{M+2}^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\boldsymbol{h}_{M+n}^{\mathrm{T}}(t)\right]^{\mathrm{T}}\in\mathbf{R}^{2nN}$, $\boldsymbol{h}_i(t)=\left[\boldsymbol{h}_{ix}^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{h}_{iv}^{\mathrm{T}}(t)\right]^{\mathrm{T}}(i=1,2,\cdots,M+N)$。下面给出领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制的相关定义。

定义 1　对于任意有界初始状态, 如果存在一个函数$r(t)\in\mathbf{R}^{2n}$, 使得 QUAV 集群系统式 (3) 满足:

$$\lim_{t\to\infty}(\boldsymbol{\varepsilon}_l(t)-\boldsymbol{h}_l(t)-\boldsymbol{r}(t))=0\tag{4}$$

则称 QUAV 集群系统式 (3) 中领导者可实现时变编队控制。式(4)中: $l\in E$; $r(t)$为编队中心参考函数; $\boldsymbol{h}_l(t)$为领导者的时变编队向量。

定义 2　对于任意有界初始状态, 如果存在一个正常数$\sigma_{jl}(j\in F,\ l\in E)$, 且$\sum_{l=M+1}^{M+N}\sigma_{jl}=1$, 使得 QUAV 集群系统式 (3) 满足:

$$\lim_{t\to\infty}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)-\sum_{l=M+1}^{M+N}\sigma_{jl}(\boldsymbol{\varepsilon}_l(t)-\boldsymbol{h}_l(t))\right)=0\tag{5}$$

则称 QUAV 集群系统式 (3) 中跟随者可实现时变编队跟踪控制。式(5)中: $\boldsymbol{h}_l(t)$和$\boldsymbol{h}_j(t)$分别为领导者和跟随者的时变编队向量。

定义 3　对于任意有界初始状态, 如果存在一个函数$r(t)\in\mathbf{R}^{2n}$和一个正常数$\sigma_{jl}(j\in F,l\in E)$, 且$\sum_{l=M+1}^{M+N}\sigma_{jl}=1$, 使得式 (4) 和式 (5) 同时成立, 则称 QUAV 集群系统式 (3) 可实现领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制。

从定义 1～定义 3 可以看出, 领导者和跟随者的状态在形成各自期望的时变编队的同时, 跟随者的状态可以跟踪到一个编队中心$r(t)$, 该编队中心由所有领导者共同决定。当$N=0$时, QUAV 集群系统式 (3) 转换为无领导编队结构, 定义 1 可描述所有无人机如何实现编队控制, 此时多领导者编队跟踪问题成为文献 [21-22] 中讨论的无领导者编队问题。当$N=1$时, QUAV 集群系统式 (3) 中仅有一个领导者, 则定义 2 转换为$\lim_{t\to\infty}(\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)-\boldsymbol{\varepsilon}_1(t))=0$, 其中, $\boldsymbol{\varepsilon}_1(t)$为领导者状态, 此时多领导者编队跟踪问题成为文献 [12-14] 中讨论的单领导者编队跟踪问题。因此, 上述关于 QUAV 集群系统的无领导者编队问题和单领导者编队跟踪问题可以看作本文

领导-跟随双层结构时变编队跟踪问题的特殊情况。

针对具有领导-跟随双层编队结构的QUAV集群，设计如下领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制协议：

$$\begin{cases} u_{iE}(t)=\boldsymbol{K}_1\sum\limits_{j=M+1}^{M+N}(w_{ij}(\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)-\boldsymbol{h}_i(t))-\\ \qquad(\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)))+\boldsymbol{K}_0\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) \qquad i\in E\\ u_{iF}(t)=\boldsymbol{K}_2\sum\limits_{j=1}^{M+N}(w_{ij}(\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)-\boldsymbol{h}_i(t))-\\ \qquad(\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)))+\boldsymbol{K}_0\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) \qquad i\in F \end{cases} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{K}_k=[k_{k1},k_{k2}]\ (k=0,1,2)$为增益矩阵。

注1 控制协议式(6)不仅包括了跟随层编队跟踪控制协议$u_{iF}(t),\ i\in F$，还包括了领导层编队控制协议$u_{iE}(t),\ i\in E$。其中，领导层编队控制协议利用领导者之间的信息交互，驱使领导者根据编队向量形成期望的编队队形；跟随层编队跟踪控制协议利用跟随者之间和领导者与跟随者之间的信息交互，驱使跟随者形成期望的编队队形的同时，跟踪到由多领导者所形成的编队。在控制协议式(6)中，增益矩阵$\boldsymbol{K}_0$可形成自反馈而使无人机可控，$\boldsymbol{K}_1$用于驱动领导者形成期望的时变编队队形，$\boldsymbol{K}_2$可以驱动跟随者跟踪由所有领导者共同决定的编队中心，并形成期望的时变编队队形。与文献[15-17]的控制协议相比，本文协议不仅要求领导层无人机形成期望的时变编队队形，而且要求跟随层无人机在形成期望的时变编队队形的同时，可跟踪到由所有领导者共同决定的编队中心。

本文的研究目的包括：①给出多领导者实现时变编队控制的充分必要条件，并求出编队中心的显式表达式；②提出QUAV集群系统实现领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制的充分条件，进而给出控制协议的设计方法；③将理论成果应用到QUAV集群飞行实验中。

2 领导层时变编队分析

本节提出了在控制协议式(6)作用下多领导者实现时变编队控制的充分必要条件，进而求出编队中心函数$r(t)$的显式表达式。

引理3[23] 已知系统$\dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{X}$，当系统中的矩阵$\boldsymbol{\kappa}$为2×2矩阵时，可以得到此矩阵的特征多项式$f(s)=s^2+b_1s+b_2$，当且仅当$\mathrm{Re}(b_1)>0$且$-\mathrm{Im}(b_2)^2+\mathrm{Re}(b_1)(\mathrm{Re}(b_1)\mathrm{Re}(b_2)+\mathrm{Im}(b_1)\mathrm{Im}(b_2))>0$时，系统是渐趋稳定的。

令$\boldsymbol{\varepsilon}_F(t)=\left[\boldsymbol{\varepsilon}_1^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{\varepsilon}_2^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\boldsymbol{\varepsilon}_M^{\mathrm{T}}(t)\right]^{\mathrm{T}}$和$\boldsymbol{\varepsilon}_E(t)=\left[\boldsymbol{\varepsilon}_{M+1}^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{\varepsilon}_{M+2}^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\boldsymbol{\varepsilon}_{M+N}^{\mathrm{T}}(t)\right]^{\mathrm{T}}$，并定义$\boldsymbol{I}_N$为维度为$N$的单位矩阵，在控制协议式(6)的作用下，QUAV集群系统式(3)的动力学模型可以表述为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)=\left(\boldsymbol{I}_N\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{L}_3\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1\right)\boldsymbol{\varepsilon}_E(t)-\\ \qquad(\boldsymbol{L}_3\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1)\boldsymbol{h}_E(t)\\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_F(t)=\left(\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2\right)\boldsymbol{\varepsilon}_F(t)+\\ \qquad(\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2)\boldsymbol{\varepsilon}_E(t)-(\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2)\boldsymbol{h}_F(t)-\\ \qquad(\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2)\boldsymbol{h}_E(t) \end{cases} \tag{7}$$

式中：“⊗”表示克罗内克积。对于矩阵$\boldsymbol{L}_3$，令$\mathrm{Re}(\lambda_{M+1})<\mathrm{Re}(\lambda_{M+2})\leqslant\cdots\leqslant\mathrm{Re}(\lambda_{M+N})$，其中，$\lambda_i(i\in E)$为矩阵$\boldsymbol{L}_3$的特征值。由假设1和引理1可得，$\lambda_{M+1}=0$对应的特征向量为$\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}=\boldsymbol{1}$。存在非奇异矩阵$\boldsymbol{U}_E=\left[\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}^{\mathrm{H}},\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+2}^{\mathrm{H}},\cdots,\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+N}^{\mathrm{H}}\right]^{\mathrm{H}}$和$\boldsymbol{U}_E^{-1}=\left[\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}^{\mathrm{H}},\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+2}^{\mathrm{H}},\cdots,\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+N}^{\mathrm{H}}\right]^{\mathrm{H}}$，使得$\boldsymbol{U}_E^{-1}\boldsymbol{L}_3\boldsymbol{U}_E=\boldsymbol{J}_E$，$\boldsymbol{J}_E$为矩阵$\boldsymbol{L}_3$的约当标准型。由引理1可得，$\boldsymbol{J}_E=\mathrm{diag}\{0,\lambda_{M+2},\lambda_{M+3},\cdots,\lambda_{M+N}\}$。令$\tilde{\boldsymbol{U}}_E=\left[\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+2}^{\mathrm{H}},\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+3}^{\mathrm{H}},\cdots,\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+N}^{\mathrm{H}}\right]^{\mathrm{H}}$。对于矩阵$\boldsymbol{L}_1$，令$\mathrm{Re}(\lambda_1)<\mathrm{Re}(\lambda_2)<\cdots<\mathrm{Re}(\lambda_M)$，其中，$\lambda_i(i\in F)$为矩阵$\boldsymbol{L}_1$的特征值。定义非奇异矩阵$\boldsymbol{U}_F\in\mathbf{C}^{M\times M}$，使$\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{U}_F=\boldsymbol{J}_F$，$\boldsymbol{J}_F$为矩阵$\boldsymbol{L}_1$的约当标准型，$\lambda_i(i=1,2,\cdots,M)$为$\boldsymbol{J}_F$对应的特征值。

令$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i(t)=\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)-\boldsymbol{h}_i(t)(i=1,2,\cdots,M+N)$，则QUAV集群系统式(7)可以表述为

$$\begin{cases} \dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}_E(t)=\left(\boldsymbol{I}_N\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{L}_3\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1\right)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)-\\ \qquad(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{I}_2)\dot{\boldsymbol{h}}_E(t)+\left(\boldsymbol{I}_N\otimes(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0)\right)\boldsymbol{h}_E(t)\\ \dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}_F(t)=\left(\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2\right)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_F(t)+\\ \qquad(\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)-(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{I}_2)\dot{\boldsymbol{h}}_F(t)+\\ \qquad\left(\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_F(t) \end{cases} \tag{8}$$

令$\boldsymbol{\chi}_E(t)=(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes\boldsymbol{I}_2)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)$和$\boldsymbol{\zeta}_E(t)=\left(\tilde{\boldsymbol{U}}_E\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)$，可得

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}_E(t)=\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\boldsymbol{\chi}_E(t)-(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes\boldsymbol{I}_2)\dot{\boldsymbol{h}}_E(t)+\left(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0)\right)\boldsymbol{h}_E(t) \tag{9}$$

$$\dot{\boldsymbol{\zeta}}_E(t)=\left(\boldsymbol{I}_{N-1}\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{J}_E\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1\right)\boldsymbol{\zeta}_E(t)+\left(\tilde{\boldsymbol{U}}_E\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_E(t)-\left(\tilde{\boldsymbol{U}}_E\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_E(t) \tag{10}$$

定理1 当且仅当$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{\zeta}_E(t)=0$成立时，QUAV集群系统式(3)在控制协议式(6)的作用下可实现多领导者时变编队控制。

证明 定义：

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{EC}(t)=\boldsymbol{1}\otimes\boldsymbol{\chi}_E(t) \tag{11}$$

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{E\bar{C}}(t)=\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)-\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{EC}(t) \tag{12}$$

令$\boldsymbol{e}_1\in\mathbf{R}^N$表示第1个元素为1、其他元素为0的列向量，$\left[\boldsymbol{\chi}_E^{\mathrm{H}}(t),\boldsymbol{0}\right]^{\mathrm{H}}=\boldsymbol{e}_1\otimes\boldsymbol{\chi}_E(t)$，$\boldsymbol{U}_E\boldsymbol{e}_1=\boldsymbol{1}$，可得

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{EC}(t)=(\boldsymbol{U}_E\otimes\boldsymbol{I})\left[\boldsymbol{\chi}_E^{\mathrm{H}}(t),\boldsymbol{0}\right]^{\mathrm{H}} \tag{13}$$

由式 (11) 和式 (12), 可得

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{E\bar{C}}(t)=(\boldsymbol{U}_E\otimes\boldsymbol{I})\left[\boldsymbol{0},\boldsymbol{\zeta}_E^{\mathrm{H}}(t)\right]^{\mathrm{H}} \tag{14}$$

因为 $\boldsymbol{U}_E\otimes\boldsymbol{I}$是非奇异的, 由式 (13) 和式 (14) 可以得到 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{EC}(t)$和 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{E\bar{C}}(t)$是线性无关的, 即 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)=\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{E\bar{C}}(t)+\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{EC}(t)$。当且仅当 $\lim\limits_{t\to\infty}\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{E\bar{C}}(t)=0$时, 由式 (11) 和式 (12) 可得

$$\lim_{x\to\infty}\left(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)-\boldsymbol{1}\otimes\boldsymbol{\chi}_E(t)\right)=0 \tag{15}$$

$$\lim_{t\to\infty}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)-\boldsymbol{h}_i(t)-\boldsymbol{\chi}_E(t)\right)=0 \tag{16}$$

式中: $i=M+1,M+2,\cdots,M+N$。

注 2　定理 1 给出了多领导者实现时变编队控制的充要条件。QUAV 集群系统中, 多领导者的运动包括: ①多领导编队整体的绝对运动, 用于描述多领导者整个编队的运动趋势; ②各个领导者之间的相对运动。由子系统式 (9) 和式 (10) 可知, 多领导者 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)$可降阶为 2 个线性无关的子系统 $\boldsymbol{\chi}_E(t)$和 $\boldsymbol{\zeta}_E(t)$, 当且仅当子系统 $\boldsymbol{\zeta}_E(t)$渐趋稳定时, 多领导者可形成期望的时变编队队形, 即将多领导者编队形成问题转化成子系统 $\boldsymbol{\zeta}_E(t)$的渐趋稳定问题。下面给出描述多领导者整个编队运动趋势的编队中心的显式表达式。

定理 2　当 QUAV 集群系统实现多领导者时变编队控制时, 编队中心的显式表达式为 $\lim\limits_{t\to\infty}\left(\boldsymbol{\chi}_E(t)-\boldsymbol{\chi}_0(t)-\boldsymbol{\chi}_h(t)\right)=0$, 其中, $\boldsymbol{\chi}_0(t)=\mathrm{e}^{\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)t}\cdot\sum\limits_{i=M+1}^{M+N}\boldsymbol{\varepsilon}_i(0)$, $\boldsymbol{\chi}_h(t)=\sum\limits_{i=M+1}^{M+N}\boldsymbol{h}_i(t)$。

证明　由定义 1 和式 (13) 可得

$$\boldsymbol{\chi}_E(0)=\left(\boldsymbol{1}_N^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{I}_N\right)\sum_{i=M+1}^{M+N}\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i(0) \tag{17}$$

且有 $\boldsymbol{\chi}_E(0)=(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes\boldsymbol{I}_N)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(0)$, 则可得

$$\begin{aligned}&\int_0^t\mathrm{e}^{\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)(t-\tau)}(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes\boldsymbol{I}_N)\dot{\boldsymbol{h}}(\tau)\mathrm{d}(\tau)=\\&(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes\boldsymbol{I}_N)\boldsymbol{h}(t)-\mathrm{e}^{\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)t}(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes\boldsymbol{I}_N)\boldsymbol{h}(0)+\\&\int_0^t\mathrm{e}^{\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)(t-\tau)}\left(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}\right)\right)\boldsymbol{h}(\tau)\mathrm{d}(\tau)=\\&\sum_{i=M+1}^{M+N}\boldsymbol{h}_i(t)-\mathrm{e}^{\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)t}\sum_{i=M+1}^{M+N}\boldsymbol{h}_i(0)+\\&\int_0^t\mathrm{e}^{\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)(t-\tau)}\left(\tilde{\boldsymbol{u}}_{M+1}\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}\right)\right)\boldsymbol{h}(\tau)\mathrm{d}(\tau)\end{aligned} \tag{18}$$

由式 (9)、式 (17) 和式 (18), 可以得到定理 2。

注 3　定理 2 给出了多领导者实现编队控制的编队中心的显式表达式, 描述了多领导者整个编队的运动趋势, 揭示了编队中心函数 $\boldsymbol{\chi}_E(t)$与 $\boldsymbol{\chi}_0(t)$和 $\boldsymbol{\chi}_h(t)$有关。编队中心函数由所有领导者共同决定, 与控制增益 $\boldsymbol{K}_0$、所有领导者的初始状态和编队向量有关。可通过调整控制增益 $\boldsymbol{K}_0$、领导者的初始状态和编队向量, 进而调整编队中心函数。文献 [15-17] 中未确定编队中心函数, 文献 [21-22] 中给出了多智能体系统的编队中心显式表达式, 其仅考虑了无领导编队结构的情况。

3　双层结构时变编队跟踪分析与控制器设计

在领导层时变编队分析的基础上, 本节提出了在控制协议式 (6) 作用下的 QUAV 集群系统式 (3) 实现领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制的充分条件, 给出了控制协议式 (6) 的设计方法。

定理 3　当满足以下条件时, QUAV 集群系统式 (3) 在控制协议式 (6) 的作用下可实现领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制。

对第 i 架无人机, 期望编队轨迹满足以下编队可行条件:

$$\lim_{t\to\infty}\left(\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\boldsymbol{h}_i(t)-\dot{\boldsymbol{h}}_i(t)\right)=0 \tag{19}$$

式中: $i=1,2,\cdots,M+N$。

对第 i 架领导者:

$$\begin{cases}k_{02}+\mathrm{Re}(\lambda_i)k_{12}<0\\(k_{02}+\mathrm{Re}(\lambda_i)k_{12})\psi_i+\mathrm{Im}(\lambda_i)^2k_{11}^2<0\end{cases} \tag{20}$$

式中: $i=M+1,M+2,\cdots,M+N$; $\psi_i=k_{02}k_{01}+\mathrm{Re}(\lambda_i)\cdot(k_{02}k_{11}+k_{01}k_{12})+(\mathrm{Re}(\lambda_i)^2+\mathrm{Im}(\lambda_i)^2)k_{11}k_{12}$。

对第 j 架跟随者:

$$\begin{cases}k_{02}+\mathrm{Re}(\lambda_j)k_{22}<0\\(k_{02}+\mathrm{Re}(\lambda_j)k_{22})\psi_j+\mathrm{Im}(\lambda_j)^2k_{21}^2<0\end{cases} \tag{21}$$

式中: $j=1,2,\cdots,M$; $\psi_j=k_{02}k_{01}+\mathrm{Re}(\lambda_j)(k_{02}k_{21}+k_{01}k_{22})+(\mathrm{Re}(\lambda_j)^2+\mathrm{Im}(\lambda_j)^2)k_{21}k_{22}$。

证明　当式 (19) 成立时, 可得

$$\lim_{t\to\infty}\left(\boldsymbol{I}_N\otimes(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0)\boldsymbol{h}_E(t)-\dot{\boldsymbol{h}}_E(t)\right)=0 \tag{22}$$

式 (22) 两边同时乘以 $\tilde{\boldsymbol{U}}_E\otimes\boldsymbol{I}_2$, 可得

$$\lim_{t\to\infty}\left(\left(\tilde{\boldsymbol{U}}_E\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_E(t)-\left(\tilde{\boldsymbol{U}}_E\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_E(t)\right)=0 \tag{23}$$

考虑如下子系统:

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\zeta}}}_i(t)=\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0+\lambda_i\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1\right)\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i(t) \tag{24}$$

式中: $i=M+2,M+3,\cdots,M+N$。

式 (24) 的特征多项式为 $P(s)=s^2-(k_{02}+\lambda_ik_{12})s-(k_{01}+\lambda_ik_{11})$, 当式 (20) 成立时, 由引理 3 可得式 (24) 是渐近稳定的, 由式 (24) 和 $\bar{\boldsymbol{J}}_E$的结构, 可得

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\zeta}}}_E(t)=\left(\boldsymbol{I}_{N-1}\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\bar{\boldsymbol{J}}_E\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1\right)\bar{\boldsymbol{\zeta}}_E(t) \tag{25}$$

显然,式(25)也是渐趋稳定的。由式(10)、式(23)和式(25)可得

$$\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{\zeta}_E=0 \tag{26}$$

令 $\boldsymbol{\varsigma}_i(t)=\sum_{j=1}^{M}w_{ij}\left(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i(t)-\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_j(t)\right)+\sum_{l=M+1}^{M+N}w_{il}\left(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i(t)-\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_l(t)\right)$ $(i\in F)$和$\boldsymbol{\varsigma}_F(t)=\left[\boldsymbol{\varsigma}_1^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{\varsigma}_2^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\boldsymbol{\varsigma}_M^{\mathrm{T}}(t)\right]^{\mathrm{T}}$,可得

$$\boldsymbol{\varsigma}_F(t)=(\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{I}_2)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_F(t)+(\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_2)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t) \tag{27}$$

当$\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{\varsigma}_F(t)=0$时,可得

$$\lim_{t\to\infty}\left(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_F(t)-\left(-\boldsymbol{L}_1^{-1}\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)\right)=0 \tag{28}$$

由$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_j(t)=\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)\,(j\in F)$和引理2,可得

$$\lim_{t\to\infty}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)-\sum_{l=M+1}^{M+N}\sigma_{jl}(\boldsymbol{\varepsilon}_l(t)-\boldsymbol{h}_l(t))\right)=0 \tag{29}$$

因此,当$\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{\varsigma}_F(t)=0$时,具有领导-跟随双层编队结构的QUAV集群系统式(3)在控制协议式(6)的作用下可实现时变编队跟踪控制。

由式(24)可得

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_F(t)=\left(\boldsymbol{L}_1^{-1}\otimes\boldsymbol{I}_n\right)\boldsymbol{\varsigma}_F(t)-\left(\boldsymbol{L}_1^{-1}\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_n\right)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)s \tag{30}$$

对式(27)左右求取时间导数,并将式(15)和式(30)代入,可得

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\varsigma}}_F(t)=&\left(\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2\right)\boldsymbol{\varsigma}_F(t)+\\&\left(\boldsymbol{L}_1\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_F(t)+\\&\left(\boldsymbol{L}_2\boldsymbol{L}_3\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1\right)\left(\boldsymbol{1}\otimes\boldsymbol{\chi}_E(t)\right)+\\&\left(\boldsymbol{L}_2\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_E(t)-\\&\left(\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_E(t)-\left(\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_F(t)\end{aligned} \tag{31}$$

矩阵$\boldsymbol{L}_3$的特征值$\lambda_{M+1}=0$对应的特征向量为$\bar{\boldsymbol{u}}_{M+1}=\boldsymbol{1}$,即$\boldsymbol{L}_3\boldsymbol{1}=0$,将此代入式(31),可得

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\varsigma}}_F(t)=&\left(\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2\right)\boldsymbol{\varsigma}_F(t)+\\&\left(\boldsymbol{L}_1\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_F(t)+\\&\left(\boldsymbol{L}_2\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_E(t)-\\&\left(\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_E(t)-\left(\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_F(t)\end{aligned} \tag{32}$$

令$\bar{\boldsymbol{\varsigma}}_F(t)=(\boldsymbol{U}_F^{-1}\otimes\boldsymbol{I}_M)\boldsymbol{\varsigma}_F(t)$,可得

$$\begin{aligned}\dot{\bar{\boldsymbol{\varsigma}}}_F(t)=&\left(\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{J}_F\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2\right)\bar{\boldsymbol{\varsigma}}_F(t)+\\&\left(\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_1\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_F(t)-\\&\left(\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_F(t)-\left(\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_E(t)+\\&\left(\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_2\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_E(t)\end{aligned} \tag{33}$$

当式(19)成立时,可得

$$\begin{aligned}\lim_{t\to\infty}\Big(&\left(\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_1\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_F(t)-\\&\left(\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_1\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_F(t)-\left(\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\dot{\boldsymbol{h}}_E(t)+\\&\left(\boldsymbol{U}_F^{-1}\boldsymbol{L}_2\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)\right)\boldsymbol{h}_E(t)\Big)=0\end{aligned} \tag{34}$$

当矩阵$\left(\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{J}_F\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2\right)$是Hurwitz的,且式(34)成立时,可得

$$\lim_{t\to\infty}\bar{\boldsymbol{\varsigma}}_F(t)=0 \tag{35}$$

由$\boldsymbol{J}_F$的结构可得,当矩阵$\left(\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{J}_F\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2\right)$是Hurwitz的,则$\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0+\lambda_j\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2$是Hurwitz的,则有

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\zeta}}}_j(t)=\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0+\lambda_j\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2\right)\bar{\boldsymbol{\zeta}}_j(t) \tag{36}$$

式中:$j=1,2,\cdots,M$。

式(36)的特征多项式为$P(s)=s^2-\left(k_{02}+\lambda_jk_{22}\right)s-\left(k_{01}+\lambda_jk_{21}\right)$,当式(21)成立时,由引理3可知式(36)是渐近稳定的,即$\lim_{t\to\infty}\bar{\boldsymbol{\zeta}}_F(t)=0$和$\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{\varsigma}_F(t)=0$成立,由此可得

$$\lim_{t\to\infty}\left(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_F(t)-\left(-\boldsymbol{L}_1^{-1}\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_2\right)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_E(t)\right)=0 \tag{37}$$

由$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_j(t)=\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)$和引理2,可得

$$\lim_{t\to\infty}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)-\sum_{l=M+1}^{M+N}\sigma_{jl}(\boldsymbol{\varepsilon}_l(t)-\boldsymbol{h}_l(t))\right)=0 \tag{38}$$

式中:$j=1,2,\cdots,M$。

注4 定理3构建了一个同时适用于多领导者和多跟随者的编队可行条件,证明了多领导者和多跟随者可分别形成各自期望的时变编队队形,分析了在控制协议式(6)作用下系统式(8)的稳定性。跟随者形成期望的时变编队队形的同时,还要跟踪到由所有领导者共同决定的编队中心,因此,在分析过程中引入编队向量$\boldsymbol{h}_i(t)$以实现领导-跟随双层编队结构。编队可行条件描述了期望编队队形$\boldsymbol{h}_i(t)$及其导数$\dot{\boldsymbol{h}}_i(t)$之间的关系,依赖于实际动力学系统的内在机制,可以看出,通过调节控制增益$\boldsymbol{K}_0$,可以同时扩大领导者和跟随者可行编队的范围。文献[15-17]仅给出了跟随者编队可行条件。

注5 在定理3中,构建式(27)以建立起领导层无人机和跟随层无人机的联系,实现了跟随层无人机在形成期望时变编队的同时,可跟踪到领导层无人机期望的时变编队队形。由定理1~定理3可知,QUAV集群系统式(3)形成了领导-跟随双层编队结构,在文献[15-17]中,多领导者之间无信息交互,且领导者和跟随者未同时形成期望的时变编队队形。由式(16)和式(38)可以得到,$\lim_{t\to\infty}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_j(t)-\boldsymbol{h}_j(t)-\boldsymbol{\chi}_E(t)\right)=0\,(j\in F)$,即跟随者可形成期望的时变编队队形,并且可跟踪到一个编队中心$\boldsymbol{\chi}_E(t)$,此编队中心由所有领导者共同决定。在文献[15-17]中,跟随者可跟踪到多领导者的平均状态,并且需要一个跟随者与所有领导者进行通信。

根据定理3中的编队可行条件,确定增益矩阵

$\boldsymbol{K}_0$, 并可通过下面的定理设计增益矩阵$\boldsymbol{K}_1$和$\boldsymbol{K}_2$。

定理 4　通过设计控制器增益矩阵$\boldsymbol{K}_1=-\alpha(\mathrm{Re}(\lambda_{M+2}))^{-1}\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{K}_2=-\beta(\mathrm{Re}(\lambda_1))^{-1}\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$, 可使 QUAV 集群系统式 (3) 在控制协议式 (6) 的作用下实现领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制。其中, $\alpha>0.5,\beta>0.5$, $\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{P}>\boldsymbol{0}$, 矩阵$\boldsymbol{P}$由式(39)可得

$$\boldsymbol{P}\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{I}=\boldsymbol{0} \tag{39}$$

证明　针对子系统$\boldsymbol{\zeta}_E(t)$, 考虑如下 Lyapunov 候选函数:

$$\boldsymbol{V}_i(t)=\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i^{\mathrm{H}}(t)\boldsymbol{P}\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i(t) \tag{40}$$

式中: $i=M+2,M+3,\cdots,M+N$。

对式 (40) 左右求取时间导数, 可得

$$\dot{\boldsymbol{V}}_i(t)=\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i^{\mathrm{H}}(t)\left(\boldsymbol{P}\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\lambda_i^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\lambda_i\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1+\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\right)\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i(t) \tag{41}$$

取 $\boldsymbol{K}_1=-\alpha(\mathrm{Re}(\lambda_{M+2}))^{-1}\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{B}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{I}$, 代入式 (41) 可得

$$\dot{\boldsymbol{V}}_i(t)=-\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i^{\mathrm{H}}(t)\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i(t)+\left(1-2\alpha(\mathrm{Re}(\lambda_{M+2}))^{-1}\mathrm{Re}(\lambda_i)\right)\cdot\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i^{\mathrm{H}}(t)(\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P})\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i(t) \tag{42}$$

由$1-2\alpha(\mathrm{Re}(\lambda_{M+2}))^{-1}\mathrm{Re}(\lambda_i)<0$其次可得, $\dot{\boldsymbol{V}}_i(t)<\boldsymbol{0}$, 则有$\lim\limits_{t\to\infty}\bar{\boldsymbol{\zeta}}_i(t)=0$, 即$\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0+\lambda_i\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1(i\in E)$是 Hurwitz 的, 且$\boldsymbol{I}_{N-1}\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\tilde{\boldsymbol{J}}_E\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_1$是 Hurwitz 的。取 $\boldsymbol{K}_2=-\beta(\mathrm{Re}(\lambda_1))^{-1}\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$, 同理可得$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{\varsigma}_j(t)=0$, 即$\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0+\lambda_j\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2(j\in F)$是 Hurwitz 的, $\boldsymbol{I}_M\otimes\left(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_0\right)+\boldsymbol{J}_F\otimes\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}_2$是 Hurwitz 的。

注 6　定理 4 给出了一种通过求解代数 Riccati 方程确定增益矩阵$\boldsymbol{K}_1$和$\boldsymbol{K}_2$的方法。需要指出的是, 利用 Riccati 方程求解得到的矩阵$\boldsymbol{P}$是唯一的, 即不存在调节系数α和β时, 可通过求解矩阵$\boldsymbol{P}$得出唯一的$\boldsymbol{K}_1$和$\boldsymbol{K}_2$; 引入调节系数α和β后, 增益矩阵$\boldsymbol{K}_1$和$\boldsymbol{K}_2$便是可调的。由$1-2\alpha(\mathrm{Re}(\lambda_{M+2}))^{-1}\mathrm{Re}(\lambda_i)<0$和$1-2\beta(\mathrm{Re}(\lambda_1))^{-1}\mathrm{Re}(\lambda_j)<0$可知, $\alpha>0.5$, $\beta>0.5$。可以看出, 通过调整获得系数α和β的适当取值, 能够得到合适的增益矩阵$\boldsymbol{K}_1$和$\boldsymbol{K}_2$, 即可在控制增益设计过程中提升编队控制性能, 对实际工程应用具有重要意义。

定理 3 是分析判据, 通过给定控制增益, 分析在该控制增益作用下, QUAV 集群系统能否实现领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制。定理 4 是设计判据, 通过求解代数 Riccati 方程设计增益矩阵$\boldsymbol{K}_1$和$\boldsymbol{K}_2$, 使得 QUAV 集群系统可实现领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制。

4　实验验证

为验证本文所提控制协议的有效性, 本节将本文理论成果应用到一个由 2 架领导者无人机和 3 架跟随者无人机组成的 QUAV 集群系统中。首先, 通过 MATLAB 仿真验证理论的正确性; 其次, 利用基于光学动作捕捉的室内定位系统和 MATLAB/Simulink+ROS 平台进行实验。QUAV 由 Px4 飞控、动力系统、UDP 通信模块和 Z250 机架组成。基于光学动作捕捉的室内定位系统通过捕捉 QUAV 上固定的 4 个特殊标记点, 实时精确地构建出 QUAV 的三维空间位置信息, 从而实现对 QUAV 的实时定位。实验平台通过 ROS 系统获取 QUAV 的实时位置信息, 利用 MATLAB/Simulink 发布任务开始和停止指令, 实验平台如图 2 所示。

考虑一个由 2 架领导者无人机和 3 架跟随者无人机组成的领导-跟随双层编队结构的 QUAV 集群系统, 领导者编号为 1 和 2, 跟随者编号为 3～5, 通信拓扑如图 3 所示。在北东地坐标系中, 考虑无人机在二维平面上飞行, 取$n=2$。实验过程中, 需注

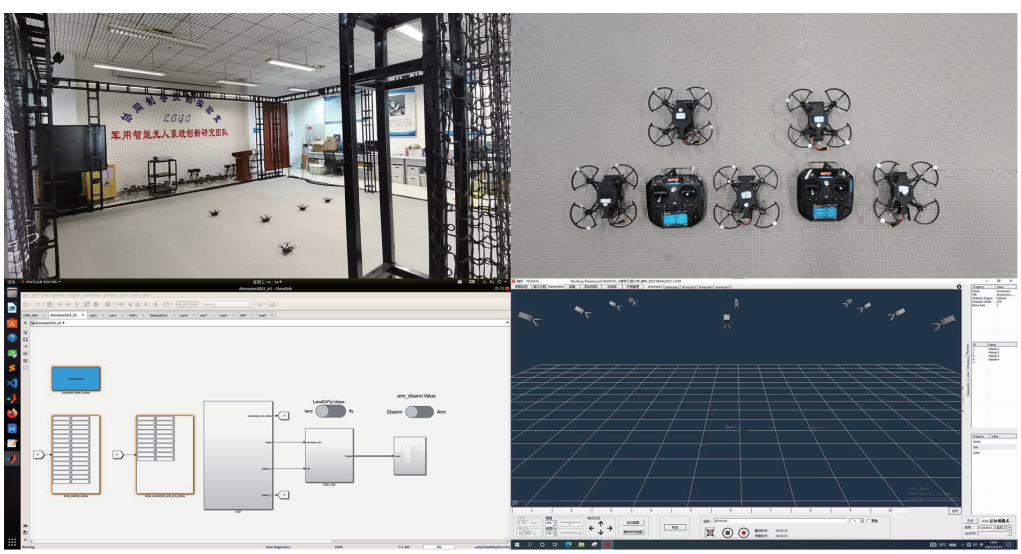


图 2　实验平台

Fig. 2　Experimental platform

意以下可能存在的干扰：单机不稳定，数据处理和传输中存在误差，实验过程中存在的其他干扰。

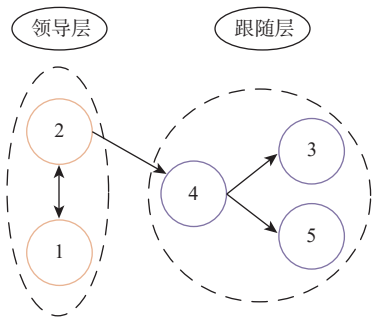


图3 QUAV系统的通信拓扑

Fig. 3 Communication topology of QUAV system

假设每架无人机的状态为$\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)=[\boldsymbol{x}_{iX}(t),\boldsymbol{x}_{iY}(t),\boldsymbol{v}_{iX}(t),\boldsymbol{v}_{iY}(t)]^{\mathrm{T}}\ (i=1,2,\cdots,5)$，控制输入为$\boldsymbol{u}_i(t)=[\boldsymbol{u}_{iX}(t),\boldsymbol{u}_{iY}(t)]^{\mathrm{T}}\ (i=1,2,\cdots,5)$，时变编队向量为$\boldsymbol{h}_i(t)=[\boldsymbol{h}_{ix}X(t),\boldsymbol{h}_{ix}Y(t),\boldsymbol{h}_{iv}X(t),\boldsymbol{h}_{iv}Y(t)]^{\mathrm{T}}\ (i=1,2,\cdots,5)$。根据定理1与定理3，令编队误差为$\boldsymbol{e}_E(t)=\boldsymbol{\varepsilon}_E(t)-\boldsymbol{h}_E(t)-\boldsymbol{1}\otimes\boldsymbol{\chi}_E(t)$，编队跟踪误差为$\boldsymbol{e}_F(t)=\boldsymbol{\varepsilon}_F(t)-\boldsymbol{h}_F(t)-\left(-\boldsymbol{L}_1^{-1}\boldsymbol{L}_2\otimes\boldsymbol{I}_2\right)(\boldsymbol{\varepsilon}_E(t)-\boldsymbol{h}_E(t))$。令$\|\boldsymbol{e}_E(t)\|=\sqrt{\boldsymbol{e}_E^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{e}_E(t)}$，$\|\boldsymbol{e}_F(t)\|=\sqrt{\boldsymbol{e}_F^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{e}_F(t)}$，利用定理3和定理4可求出，$\boldsymbol{K}_0=\boldsymbol{I}_2\otimes[-0.14,0]$，$\boldsymbol{K}_1=\boldsymbol{I}_2\otimes[-0.66,-1.27]$，$\boldsymbol{K}_2=\boldsymbol{I}_2\otimes[-1.05,-2.00]$，$\alpha=1.54$，$\beta=1.21$。

无人机的初始状态为

$$\begin{cases}\boldsymbol{\varepsilon}_1(0)=[0.02,0.67,0.12,0.02]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\varepsilon}_2(0)=[-0.02,-0.67,-0.12,0.02]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\varepsilon}_3(0)=[-1.03,-0.78,0.02,-0.03]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\varepsilon}_4(0)=[1.4,-0.85,0.04,0.08]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\varepsilon}_5(0)=[-0.06,1.23,-0.09,0]^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{43}$$

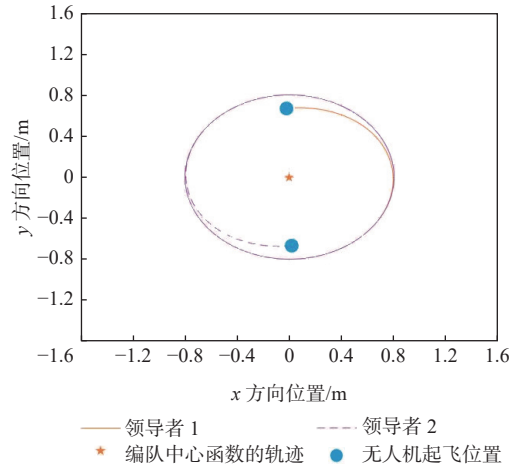
领导者时变编队向量函数为

$$\boldsymbol{h}_i(t)=\begin{bmatrix}-0.8\sin(0.375t+\pi i)\\-0.8\cos(0.375t+\pi i)\\-0.3\cos(0.375t+\pi i)\\0.3\sin(0.375t+\pi i)\end{bmatrix}\quad i=1,2\tag{44}$$

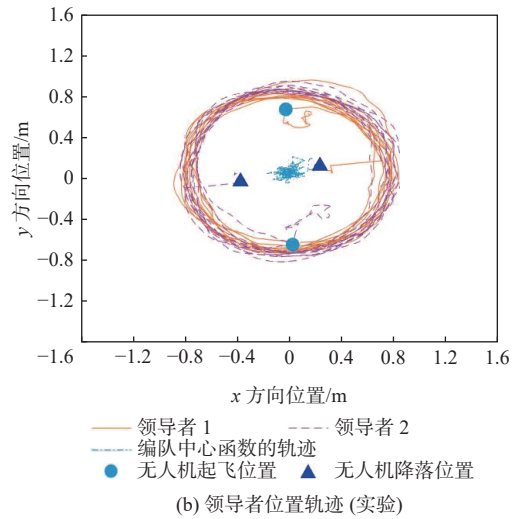
跟随者时变编队向量函数为

$$\boldsymbol{h}_i(t)=\begin{bmatrix}-1.6\sin(0.375t+2\pi i/3)\\-1.6\cos(0.375t+2\pi i/3)\\-0.6\cos(0.375t+2\pi i/3)\\0.6\sin(0.375t+2\pi i/3)\end{bmatrix}\quad i=3,4,5\tag{45}$$

图4(a)和图5(a)为仿真时领导者和跟随者的轨迹，图4(b)和图5(b)为领导者和跟随者无人机实飞轨迹。从位置轨迹可以看出，多领导者形成半径为0.8 m的圆形队形，跟随者可跟踪到由2架领导者共同决定的编队中心，并形成半径为1.6 m的圆形队形。仿真中，编队中心处于原点位置，实验中，编队中心的轨迹存在一定的偏移，但基本处于原点位置，与仿真轨迹基本相符。



(a) 领导者位置轨迹(仿真)



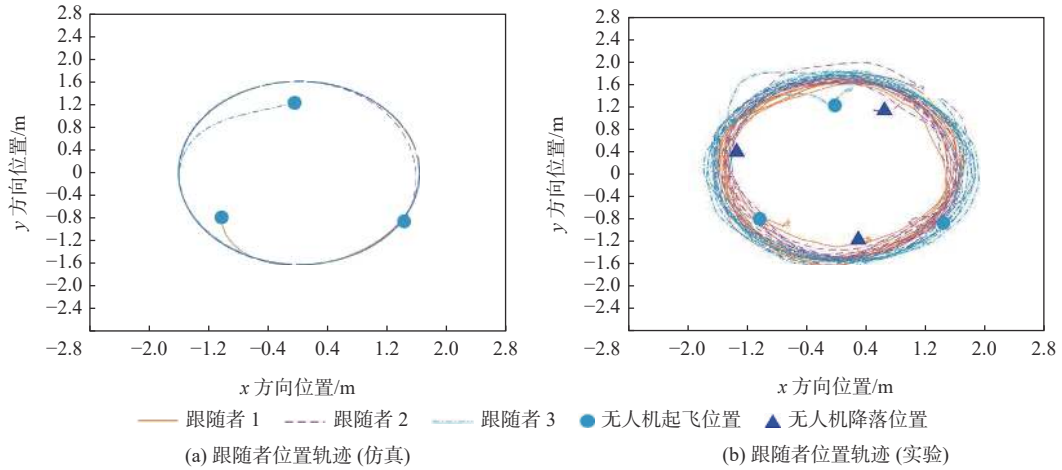
(b) 领导者位置轨迹(实验)

图4 领导者无人机轨迹

Fig. 4 Trajectories of leader QUAVs

图6(a)、图7(a)为仿真时领导者和跟随者在x、y方向上的速度，图6(b)、图7(b)为实验情况下领导者和跟随者在x、y方向上的速度。由此能够看出，无人机可以跟踪到期望速度。

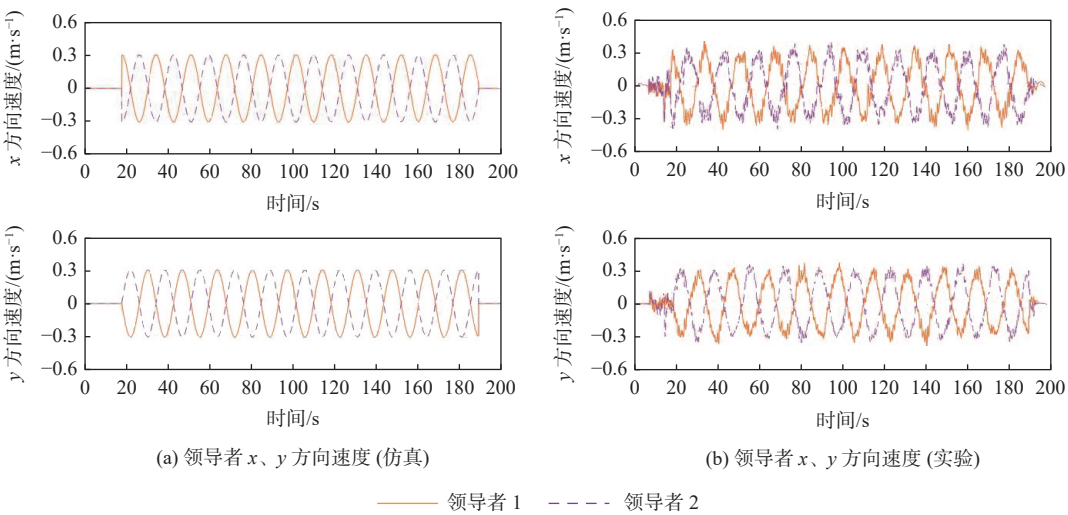
图8(a)和图9(a)为仿真时领导者的编队误差和跟随者的编队跟踪误差。图8(b)和图9(b)为实验时领导者的编队误差和跟随者的编队跟踪误差，0～17.46 s时，无人机处于起飞后的悬停状态，实验平台收到无人机的实时位置信息，但未开始执行任务，此时误差较大；17.46 s时，无人机开始执行任务，误差逐渐减小，领导者的编队误差收敛到0.2 m左右，跟随者的编队跟踪误差收敛到0.5 m左右；189 s时，无人机开始降落，此时误差开始变大；200 s时，无人机锁定，系统不再接收无人机位置信息。实验产生误差的主要原因有：①无人机尺寸较小，陀螺仪、磁罗盘和惯性测量单元(IMU)等传感器精度较低，经过滤波处理后仍存在误差，导致无人机飞行不够平稳；②无人机的姿态控制仍存在误差，影响到编队控制的效果。后续将更换高精度无人



(a) 跟随者位置轨迹 (仿真)　　(b) 跟随者位置轨迹 (实验)

图 5　跟随者无人机轨迹

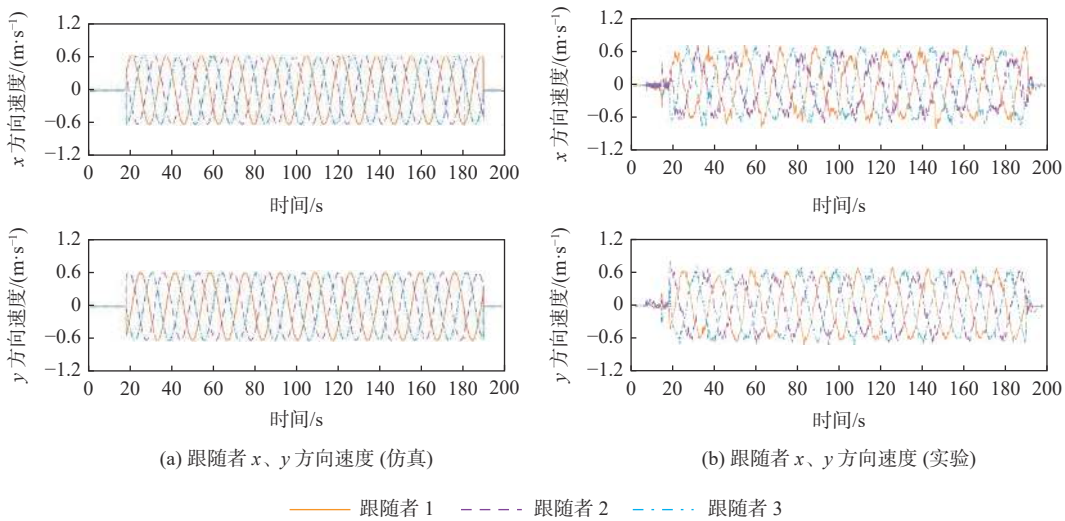
Fig. 5　Trajectories of follower QUAVs



(a) 领导者 x、y 方向速度 (仿真)　　(b) 领导者 x、y 方向速度 (实验)

图 6　领导者无人机的速度

Fig. 6　Velocity of leader QUAVs



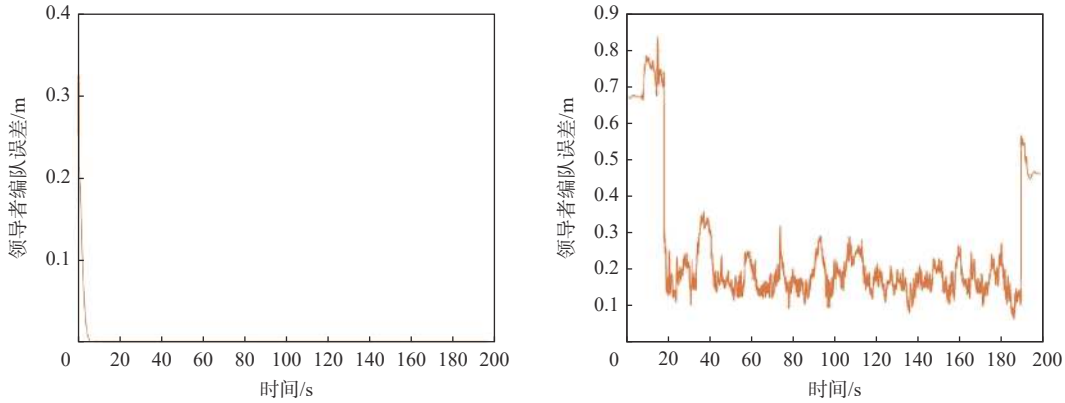
(a) 跟随者 x、y 方向速度 (仿真)　　(b) 跟随者 x、y 方向速度 (实验)

图 7　跟随者无人机的速度

Fig. 7　Velocity of follower QUAVs

机传感器、优化无人机姿态控制算法和滤波算法以减小上述误差。

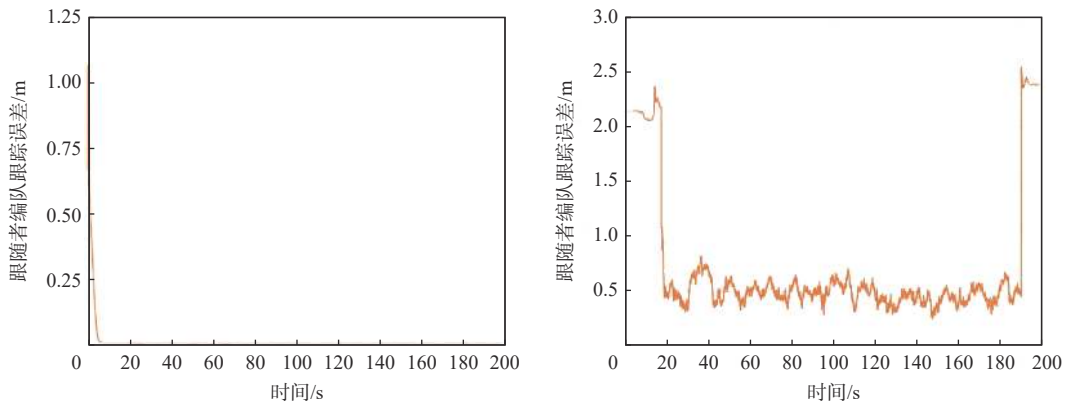
从图 4～图 9 可以看出, 本文设计的控制协议可实现领导-跟随双层结构时变编队跟踪控制, 领



(a) 领导者编队误差 (仿真) (b) 领导者编队误差 (实验)

图 8 领导者无人机编队误差

Fig. 8 Formation error of leader QUAVs



(a) 跟随者编队跟踪误差 (仿真) (b) 跟随者编队跟踪误差 (实验)

图 9 跟随者无人机编队跟踪误差

Fig. 9 Formation tracking error of follower QUAVs

导者和跟随者可分别形成各自期望的时变编队队形，并且跟随者可跟踪到由所有领导者决定的编队中心。飞行实验视频可参见 https://v.youku.com/v_show/id_XNTgzNjI3MjgxMg==.html，视频截图如图 10 所示。



图 10 实飞实验

Fig. 10 Flight experiment

5 结 论

1）求出了编队中心的显式表达式，用于描述整个编队的运动趋势。

2）给出了 QUAV 集群系统实现领导-跟随双层结构编队跟踪控制的充分条件。

3）证明了如果 QUAV 集群满足编队可行条件，领导者和跟随者可分别形成各自期望的时变编队队形，并且跟随者可跟踪到由所有领导者共同决定的编队中心。

4）提出了确定时变编队跟踪控制协议中增益矩阵的设计方法，用于求取增益矩阵。

5）将理论成果应用到一个由 2 架领导者无人机和 3 架跟随者无人机组成的 QUAV 集群系统中，并进行了飞行实验，验证了理论成果的有效性。

在后续理论研究中，需要进一步考虑时变时延、切换拓扑等通信问题和性能、能量约束等优化问题，使研究成果更好地应用于实际。

参考文献（References）

[1] ZHANG D D, TANG Y, ZHANG W B, et al. Hierarchical design for position-based formation control of rotorcraft-like aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 7(4): 1789-1800.

[2] HUANG Y, MENG Z Y. Bearing-based distributed formation control of multiple vertical take-off and landing UAVs[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2021, 8(3): 1281-1292.

[3] 张世勇, 张雪波, 苑晶, 等. 旋翼无人机环境覆盖与探索规划方法综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 513-529.
ZHANG S Y, ZHANG X B, YUAN J, et al. A survey on coverage and exploration path planning with multi-rotor micro aerial vehicles[J]. Control and Decision, 2022, 37(3): 513-529(in Chinese).

[4] DUCARD G J J, ALLENSPACH M. Review of designs and flight control techniques of hybrid and convertible VTOL UAVs[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 118: 107035.

[5] 石嘉, 裴忠才, 唐志勇, 等. 改进型自抗扰四旋翼无人机控制系统设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(9): 1823-1831.
SHI J, PEI Z C, TANG Z Y, et al. Design and realization of an improved active disturbance rejection quadrotor UAV control system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1823-1831(in Chinese).

[6] XU Y, ZHEN Z. Multivariable adaptive distributed leader-follower flight control for multiple UAVs formation[J]. The Aeronautical Journal, 2017, 121(1241): 877-900.

[7] YU Z Q, ZHANG Y M, JIANG B, et al. A review on fault-tolerant cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 1-18.

[8] LI W X, CHEN Z Q, LIU Z X. Leader-following formation control for second-order multiagent systems with time-varying delay and nonlinear dynamics[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 72(4): 803-812.

[9] 孟琅, 杨旭. 目标跟踪算法综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1244-1260.
MENG L, YANG X. A survey of object tracking algorithms[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(7): 1244-1260(in Chinese).

[10] XIE D M, CHENG Y L. Consensus tracking control of multi-agent systems with an active virtual leader: time delay case[J]. IET Control Theory & Applications, 2014, 8(17): 1815-1823.

[11] XIONG T Y, PU Z Q, YI J Q, et al. Fixed-time observer based adaptive neural network time-varying formation tracking control for multi-agent systems via minimal learning parameter approach[J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(9): 1147-1157.

[12] 姚辉, 席建祥, 王成, 等. 二阶多智能体系统自抗扰编队跟踪与避撞控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(5): 960-977.
YAO H, XI J X, WANG C, et al. Active disturbance rejection based formation tracking and collision avoidance control for second-order multi-agent system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(5): 960-977(in Chinese).

[13] DONG X W, ZHOU Y, REN Z, et al. Time-varying formation tracking for second-order multi-agent systems subjected to switching topologies with application to quadrotor formation flying[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 5014-5024.

[14] YANG Y, SI X F, YUE D, et al. Time-varying formation tracking with prescribed performance for uncertain nonaffine nonlinear multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 18(4): 1778-1789.

[15] DONG X W, TAN Q K, LI Q D, et al. Necessary and sufficient conditions for average formation tracking of second-order multiagent systems with multiple leaders[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(2): 611-626.

[16] DONG X W, HU G Q. Time-varying formation tracking for linear multiagent systems with multiple leaders[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(7): 3658-3664.

[17] HU J Y, BHOWMICK P, LANZON A. Distributed adaptive time-varying group formation tracking for multiagent systems with multiple leaders on directed graphs[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 7(1): 140-150.

[18] REN W, BEARD R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.

[19] MENG Z Y, REN W, YOU Z. Distributed finite-time attitude containment control for multiple rigid bodies[J]. Automatica, 2010, 46(12): 2092-2099.

[20] BAYEZIT İ, FIDAN B. Distributed cohesive motion control of flight vehicle formations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5763-5772.

[21] WANG L, XI J X, HE M, et al. Robust time-varying formation design for multiagent systems with disturbances: extended-state-observer method[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(7): 2796-2808.

[22] XI J X, WANG L, ZHENG J F, et al. Energy-constraint formation for multiagent systems with switching interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(7): 2442-2454.

[23] ZAHREDDINE Z, ELSHEHAWEY E F. On the stability of a system of differential equations with complex coefficients[J]. Indian Journal of Pure & Applied Mathematics, 1988, 19(10): 963-972.

Tracking control of unmanned aerial vehicle swarms with leader-following double formation

ZHANG Qingchuan，WANG Le，XI Jianxiang*，WANG Cheng

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

Abstract：In this paper, for a quadrotor unmanned aerial vehicle swarm with multiple leaders, a time-varying formation tracking control analysis and design method is proposed to realize the leader-following double formation structure. First, time-varying formation tracking protocols are constructed based on the neighboring information of UAVs. Next, using the leader-following double communication topology structure as a foundation, an explicit explanation of the formation center function and necessary requirements of formation tracking are suggested. Besides, a method to design the leader-following double structures formation tracking protocol is presented by solving an algebraic Riccati equation. Finally, the flight experiment of the leader-following double structure formation tracking was carried out by using the quadrotor UAV swarm flight platform. The experimental results validate the theoretical conclusions by demonstrating that the quadrotor UAV swarms system can be driven by the leader-following double structures formation tracking control protocol to build the necessary leader-following double formation structures.

Keywords：leader-following double formation structure；time-varying formation control；formation tracking；quadrotor unmanned aerial vehicle；distributed

Received：2022-07-09；**Accepted**：2022-08-15；**Published Online**：2022-10-09 15：25

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221009.0932.004

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (62176263,62103434,62003363); China Postdoctoral Science Foundation (271004); Science Foundation for Distinguished Youth of Shaanxi Province (2021JC-35); Youth Science Foundation of Shaanxi Province (2021JQ-375)

* **Corresponding author**. E-mail：xijx07@mails.tsinghua.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0624

考虑随机和认知混合不确定性的CFD模型修正方法

李泽贤[1]，马梦颖[2]，武健辉[2]，熊芬芬[1,*]，王博民[1]

(1. 北京理工大学 宇航学院，北京 100081；2. 中国运载火箭技术研究院 研发中心，北京 100076)

摘 要：针对随机和认知混合不确定性下的CFD模型修正问题，提出了一种融合混合不确定性量化、全局灵敏度分析、参数修正的模型修正架构，建立了基于证据理论的混合不确定性量化方法，在此基础上构建了基于概率包络面积变化率的混合不确定性灵敏度分析指标，提出了基于似然样本策略的参数修正方法。针对三维机翼ONERA M6的CFD数值模拟，在考虑湍流模型封闭系数认知不确定性和来流条件随机不确定性的情况下，通过混合不确定性量化得到升力系数的概率分布包络，并开展全局灵敏度分析发掘影响较大的封闭系数，降低模型修正的复杂度和计算量，并根据似然样本策略对关键系数加以修正。经过参数迭代修正，修正后的CFD仿真结果与试验数据高度吻合，证明了提出的CFD模型修正方法的有效性。

关 键 词：混合不确定性；模型修正；证据理论；灵敏度分析；湍流模型
中图分类号：V221；O35
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)07-2343-11

随着高性能计算机技术的迅速发展，计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)由于具有成本低、周期短、可模拟各种工况等众多优势，在工程产品设计和性能评估中已经成为不可或缺的重要手段[1-2]。然而，随着模拟的流动物理过程日益复杂，一次性建立精确的仿真模型变得不太现实，为解决数值模拟结果与试验测量结果存在偏差的问题，模型修正(model updating, MU)技术得到广泛的研究与关注，即以试验数据为基准来修正数值模拟的仿真模型，从而保证其预测结果的准确性。其中，参数型修正直接将模型参数作为修正对象，物理意义明确，是模型修正研究的主流方向[3]。现有研究表明，商业或开源CFD软件中的模型参数默认值或文献中给出的推荐值并不一定能使一般流动条件下的模型预测效果达到最优[4]。因此，针对不同的流动场景对CFD模型参数进行适当调整，使修正后模型的预测结果与系统真实响应尽可能接近，具有重要意义。

传统模型修正方法通常不考虑源于模型、参数或试验的不确定性，直接以仿真预测数据与试验数据之间的偏差最小化为目标，将模型修正的逆向问题转化为优化问题，通过寻优获得最佳的模型参数，使得修正后的仿真结果与试验结果吻合[5]。王纪森等[6]针对油液流动的CFD数值模拟，采用参数遍历法对Realizable k-ε两方程湍流模型中的参数c_2进行修正，使得压力损失的仿真结果与试验结果接近。张亦知[7]针对NACA0012翼型CFD仿真，以翼型表面压力系数为响应量，采用最速下降法修正Spalart-Allmaras(SA)湍流模型的生成项系数，使得基于SA湍流模型的预测结果与高精度大涡模拟结果吻合，提高了SA湍流模型对流场的模拟能力。

然而，在实际的CFD数值模拟中，存在如来流

收稿日期：2022-07-19；**录用日期**：2022-09-16；**网络出版时间**：2022-10-09 16:04
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221008.1548.007
基金项目：国家自然科学基金(52175214)
*通信作者. E-mail：fenfenx@bit.edu.cn

引用格式：李泽贤，马梦颖，武健辉，等. 考虑随机和认知混合不确定性的CFD模型修正方法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2343-2353. LI Z X，MA M Y，WU J H，et al. Model correction method for CFD numerical simulation under mixed aleatory and epistemic uncertainty[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2343-2353 (in Chinese).

和边界条件、几何尺寸等客观存在的随机不确定性以及湍流模型系数、经验常数、网格等由于知识缺乏或数据不足导致的认知不确定性[8]，这使得CFD仿真的输出响应也存在不可忽视的不确定性。在确定性情况下确认好的CFD仿真模型以及基于确定性模拟结果得出的结论有可能导致真实系统达不到预期的性能要求，引出潜在风险。因此，迫切需要考虑不确定性对CFD响应的影响，开展不确定性条件下的模型修正。目前该修正方法大都只考虑修正参数存在的随机不确定性，即随机模型修正，其基本思想为对数值模拟结果进行不确定性量化，基于此反演出随机不确定性参数的概率分布[9]。然而，对于CFD数值模拟，很多模型参数的不确定性源于测量数据缺乏或主观认知不足(如湍流模型的封闭系数)，属于认知不确定性，而且是其中最大的误差源，非常有必要面向CFD数值模拟开展随机和认知混合不确定性下的模型修正研究。

针对CFD数值模拟已经产生了大量随机和认知混合不确定性量化和灵敏度分析的研究工作[10-11]，为开展CFD模型修正提供了必要基础。Shah等[12]提出了一种结合证据理论和混沌多项式展开的混合不确定性传播方法，研究了攻角、马赫数、SA湍流模型系数的不确定性对跨音速翼型RAE 2822气动特性的影响。屈小章等[13]基于概率理论和区间分析理论对混合不确定性系统进行了可靠性分析，完成了叶片设计参数和叶轮转速对风机气动性能的影响评估。Guo等[14]在证据理论框架下定义了基于KS距离的非概率灵敏度指标，对曲柄滑块和凸轮系统中各认知不确定性参数的重要性进行了排序。Ferson等[15]和胡政文等[16]基于概率盒理论定义了概率盒面积度量的非概率灵敏度指标，研究了概率盒表征下的以不确定性缩减法为工具的混合不确定性灵敏度分析，并将其应用在NASA多学科不确定性量化挑战上。刘宇等[17]也提出了采用概率盒面积来分别度量输入随机、认知对输出认知影响程度的交互式灵敏度指标。在众多相关研究中，证据理论能够将随机和认知两种不同类型的不确定性整合到一个框架中，由区间分析、概率盒、模糊集等数学方法描述的认知不确定性，以及由概率理论描述的随机不确定性，都可转化为证据理论表征，在随机和认知混合不确定性量化方面优势显著[18]。证据理论下面积度量的非概率灵敏度指标容易理解、工程实现简单，也得到了较多的认可与应用。因此，充分利用证据理论适用范围广的优势，建立混合不确定性下基于证据理论的CFD数值模拟模型修正方法，具有重要意义。

尽管产生了众多关于混合不确定性量化和灵敏度分析的研究成果，但如何基于其量化的结果进行模型参数修正，形成CFD数值模拟模型确认的闭环架构，鲜有报道。目前在结构动力学领域出现了相关研究的初探，许泽伟[19]针对随机不确定性变量的概率分布参数同时具有认知不确定性的问题(分布类型已知但分布参数在一定范围波动)，基于概率盒理论提出将混合不确定性模型修正转化为两次随机模型修正，在输出响应概率盒上下界处修正刚桁架结构的弹性模量和密度的均值、标准差，减小了结构各阶频率响应的预测误差。该研究为随机和认知不确定性存在于同一参数的模型修正问题提供了有效解决思路，但并不适用于随机和认知不确定性分别独立存在于不同参数中的混合不确定性模型修正问题。在随机和认知混合不确定性的综合影响下，基于不确定性传播的结果进行模型参数快速有效的修正，比仅考虑随机不确定性的情况更为复杂。因此，本文针对随机和认知混合不确定性下的CFD模型修正，提出一种融合混合不确定性量化、全局灵敏度分析、参数修正策略的模型修正架构，构建基于证据理论的概率包络面积变化率灵敏度分析指标，有效评估随机和认知不确定性的影响大小，提出基于似然样本策略的参数修正方法。将所提出的模型修正方法应用于数学算例和考虑湍流模型系数认知不确定性和来流随机不确定性的三维ONERA M6机翼CFD模型修正，验证了其有效性。

1 提出的模型修正方法

为了在CFD模型修正中考虑随机和认知混合不确定性的影响，本文提出一种基于证据理论的CFD模型修正方法，流程如图1所示。

1）基于证据理论对CFD数值模拟中的认知不确定性(如湍流模型封闭系数)和来流随机不确定性(如来流马赫数和攻角)进行统一表征。

2）在证据理论框架下完成混合不确定性的综合传播和系统响应的不确定度量化。

3）建立基于距离准则的模型确认度量指标，判断CFD数值模拟的预测结果和试验结果在不确定性影响下的吻合度，以决定是否需要对模型参数展开修正。

4）若CFD预测精度不满足要求，则开展混合不确定性下的全局灵敏度分析，发掘出随机不确定性综合影响下对CFD响应影响较大的认知不确定性参数，并基于似然样本策略对该参数进行修正。

5）上述混合不确定性传播、模型确认、灵敏度

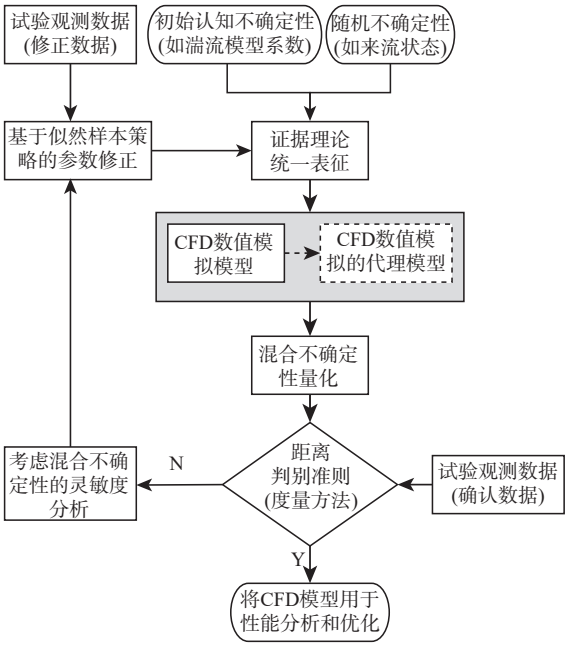


图 1　本文 CFD 模型修正方法流程

Fig. 1　Flow chart of proposed CFD model correction method

分析、参数修正的闭环流程将反复迭代, 直至模型符合要求。

1.1　基于证据理论的混合不确定性量化

不确定性量化是在给定系统输入的不确定性信息下估算系统输出响应的不确定性的过程, 是所提出的模型修正流程中的重要环节。本文沿用文献 [12,20] 中的方法实现基于证据理论的混合不确定性量化, 获得系统输出响应累积分布函数的上下界, 即累积信任函数 CBF 和累积似然函数 CPF。

证据理论通过识别框架、基本可信度分配 (basic probability assignment, BPA)、信任函数 Bel 和似然函数 Pl 3 个基本概念构成了不确定性建模的基本架构。其中, 识别框架被定义为包含一个不确定性问题所有可能结果的集合, 通常记为 Θ, 其所有子集构成的集合称为幂集, 记为 2^{Θ}; 基本可信度分配类似于概率理论中的概率密度函数, 是证据理论中对输入不确定性的基本度量, 定义为从幂集 2^{Θ} 到概率区间 $[0,1]$ 上的映射, 记为 $m(\cdot)$; 信任函数 Bel 和似然函数 Pl 是证据理论中用来描述系统响应不确定性的概率区间, Bel、Pl、不确定性三者之间的关系如图 2 所示。

对于实际工程问题, 识别框架往往表现为不确定性变量在名义值附近的微小波动 (即区间描述),

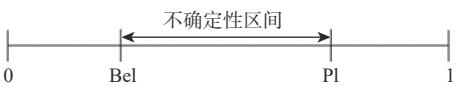


图 2　证据理论下的不确定性区间

Fig. 2　Uncertainty interval under evidence theory

识别框架内的若干子区间称为焦元, BPA 则可以理解为对每个子区间分配的概率。如, 由于缺乏足够的试验数据, 根据专家信息或工程经验已知不确定性变量 x 的取值落在区间 $[1,3]$ 上, 但落在 $[1,2]$ 和 $[2,3]$ 上的概率又有所不同, 由此可以得出该变量的识别框架及其幂集分别为 $\Theta=\{[1,2,2,3]\}$、$2^{\Theta}=\{\varnothing,[1,2,2,3,1,3]\}$。

设系统响应函数为 $y=g(\boldsymbol{x}^{\mathrm{e}},\boldsymbol{x}^{\mathrm{a}})$, 其中 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{e}}$ 为 m 维认知不确定性向量, $\boldsymbol{x}^{\mathrm{e}}=[x_1^{\mathrm{e}},\cdots,x_i^{\mathrm{e}},\cdots,x_m^{\mathrm{e}}]$, $1\leqslant i\leqslant m$; $\boldsymbol{x}^{\mathrm{a}}$ 为 n 维随机不确定性向量, $\boldsymbol{x}^{\mathrm{a}}=[x_1^{\mathrm{a}},\cdots,x_j^{\mathrm{a}},\cdots,x_n^{\mathrm{a}}]$, $1\leqslant j\leqslant n$。基于证据理论的随机和认知混合不确定性量化的流程如图 3 所示, 具体步骤如下:

1) 收集认知不确定性变量信息, 构建识别框架 $\Theta(x_i^{\mathrm{e}})$, 根据工程经验或专家预测确定基本可信度分配 $m(A_{ik}^{\mathrm{e}})$, 须满足以下条件:

$$\begin{cases} m(A_{ik}^{\mathrm{e}})\geqslant 0, A_{ik}^{\mathrm{e}}\in\Theta(x_i^{\mathrm{e}}) \\ m(\varnothing)=0 \\ \sum m(A_{ik}^{\mathrm{e}})=1, A_{ik}^{\mathrm{e}}\in\Theta(x_i^{\mathrm{e}}) \end{cases} \tag{1}$$

式中: A_{ik}^{e} 为第 i 个认知不确定性变量 x_i^{e} 的第 k 个焦元。

2) 收集随机不确定性变量信息, 并通过概率分布转化为证据理论表示。对于有界分布, 将变量全部取值 $[a,b]$ 等分为 N 个子区间 $[a_k,b_k]$, $1\leqslant k\leqslant N$, 用概率密度函数计算各个子区间的 BPA; 对于无界分布, 将变量取值截断后按照有界分布做同样处理, 考虑到截断后的 BPA 会产生边缘损失, 因此在式 (3) 的基础上将各个子区间的 BPA 均作归一化处理, 见式 (4)。

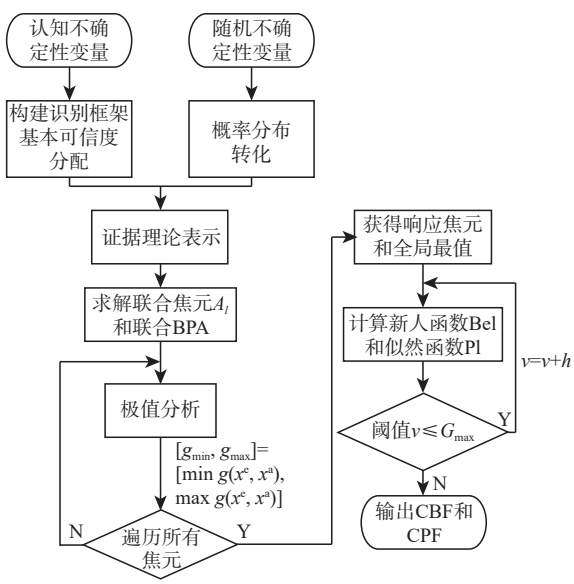


图 3　基于证据理论的随机和认知混合不确定性量化流程

Fig. 3　Flow chart of mixed aleatory and epistemic uncertainty quantification based on evidence theory

$$A_{jk}^{\mathrm{a}}=[a_k,b_k] \tag{2}$$

$$m(A_{jk}^{\mathrm{a}})=\int_{x^{\mathrm{a}}\in A_{jk}^{\mathrm{a}}} f(x^{\mathrm{a}})\mathrm{d}x^{\mathrm{a}} \tag{3}$$

$$m(A_{jk}^{\mathrm{a}})=\frac{m(A_{jk}^{\mathrm{a}})}{\sum_{k=1}^{N} m(A_{jk}^{\mathrm{a}})} \tag{4}$$

式中：A_{jk}^{a}为第j个随机不确定性变量x_j^{a}的第k个焦元；$m(A_{jk}^{\mathrm{a}})$为焦元A_{jk}^{a}的基本可信度分配；$f(x^{\mathrm{a}})$为随机变量x^{a}的概率密度函数(probability density function, PDF)。

3）假设各维变量均相互独立，通过单个证据变量(由证据理论统一表示的随机或认知不确定性变量)的焦元和BPA确定联合焦元A_l和联合BPA。

$$A_l=[\boldsymbol{x}_l^{\mathrm{low}},\boldsymbol{x}_l^{\mathrm{up}}] \tag{5}$$

$$m(A_l)=\prod_{i=1}^{m} m(x_i^{\mathrm{e}})\cdot\prod_{j=1}^{n} m(x_j^{\mathrm{a}}) \tag{6}$$

$$N_{\mathrm{total}}=\prod_{i=1}^{m} N(x_i^{\mathrm{e}})\cdot\prod_{j=1}^{n} N(x_j^{\mathrm{a}}) \tag{7}$$

式中：$m(A_l)$为焦元A_l的基本可信度分配；N_{total}为联合焦元的总数；$\boldsymbol{x}_l^{\mathrm{low}}$、$\boldsymbol{x}_l^{\mathrm{up}}$分别为$m+n$维证据变量第$l$组焦元的下界、上界向量，$1\leqslant l\leqslant N_{\mathrm{total}}$；$N\left(x_i^{\mathrm{e}}\right)$、$N\left(x_j^{\mathrm{a}}\right)$分别为认知和随机不确定性变量的焦元个数。

4）在每个联合焦元A_l上进行极值分析，获得在联合焦元A_l上输出响应的最大值和最小值，即响应焦元Y_l。进一步确定在所有认知和随机不确定性变量变化范围内的y的全局最大值和最小值$[G_{\min},G_{\max}]$。

$$Y_l=[g_{\min},g_{\max}]_l=\left[\min_{\boldsymbol{x}\in A_l} g(\boldsymbol{x}^{\mathrm{e}},\boldsymbol{x}^{\mathrm{a}}),\max_{\boldsymbol{x}\in A_l} g(\boldsymbol{x}^{\mathrm{e}},\boldsymbol{x}^{\mathrm{a}})\right] \tag{8}$$

$$[G_{\min},G_{\max}]=\left[\min_{1\leqslant l\leqslant N_{\mathrm{total}}} g_{\min}^{l},\max_{1\leqslant l\leqslant N_{\mathrm{total}}} g_{\max}^{l}\right] \tag{9}$$

5）取阈值为v，满足$G_{\min}\leqslant v\leqslant G_{\max}$。令阈值区间$G_v=[G_{\min},v]$，判断响应焦元$Y_l$和阈值区间$G_v$两集合间的包含关系，如表1所示，根据式(10)和式(11)计算出信任函数Bel和似然函数Pl，分别对应系统响应不确定性度量的下界和上界。

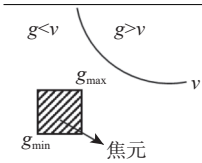
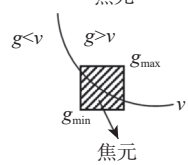
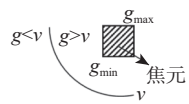
$$\mathrm{Bel}(G_v)=\sum_{Y_l\subseteq G_v} m(A_l) \tag{10}$$

$$\mathrm{Pl}(G_v)=\sum_{Y_l\cap G_v\neq\varnothing} m(A_l) \tag{11}$$

6）设阈值v递增的步长为h，令$v=v+h$，重复执行Step5，在v从$G_{\min}$递增至$G_{\max}$的过程中，得到一系列分析结果$[v,\mathrm{Bel}(G_v)]$和$[v,\mathrm{Pl}(G_v)]$，由此获得输出响应y的累积信任函数CBF和累积似然函数CPF。

表1 响应焦元与阈值区间3种可能的位置关系

Table 1 Three possible positional relationships between response focal element and threshold interval

图示	不等关系	包含关系	Bel	Pl
	$v\geqslant g_{\max}$	$Y_l\subseteq G_v$	√	√
	$g_{\min}\leqslant v\leqslant g_{\max}$	$Y_l\cap G_v\neq\varnothing$	×	√
	$v\leqslant g_{\min}$	$Y_l\cap G_v=\varnothing$	×	×

注：√表示BPA计入Bel或Pl，×表示不计入。

1.2 混合不确定性下的全局灵敏度分析

当系统中同时存在认知不确定性和随机不确定性时，基于证据理论进行混合不确定性传播后，可得到系统输出响应的概率分布的上下界(CBF、CPF函数曲线)，这两条曲线之间存在一定的包络面积，将其定义为概率包络面积。

为了量化系统响应对某不确定性变量的敏感程度，对仅考虑随机不确定性基于方差的灵敏度分析方法进行扩展，计算引入该不确定性变量前后系统输出响应的概率包络面积的变化率。对于响应函数$y=g(\boldsymbol{x}^{\mathrm{e}},\boldsymbol{x}^{\mathrm{a}})$，概率包络面积变化率指标为[15-17]

$$s_k=\left(\frac{S^{\mathrm{T}}-S_k^{\mathrm{T}}}{S^{\mathrm{T}}}\right)\times 100\% \tag{12}$$

式中：s_k为第$k(1\leqslant k\leqslant m+n)$个不确定性变量的灵敏度系数；$S^{\mathrm{T}}$为在考虑所有不确定性输入变量的情况下，对系统输出响应进行不确定性量化后所得的总概率包络面积；S_k^{T}为剔除(或裁剪)输入变量x_k的不确定性后，再次对系统输出响应进行混合不确定性量化所得的新概率包络面积。

概率包络面积示意如图4所示，其中CBFT、CPFT为考虑所有不确定性输入变量的情况下，对系统输出响应进行不确定性量化后所得的概率分布下界、上界，CBFT(k)、CPFT(k)为剔除(或裁剪)输入变量x_k的不确定性后再次对系统输出响应进行混合不确定性量化所得的概率分布下界、上界。由图4可知，当x_k的不确定性被剔除(或裁剪)后，概率包络面积会有所减小，图中阴影部分即为减少的面积。本文提出的基于概率包络面积变化率指标的灵敏度分析方法流程如图5所示。

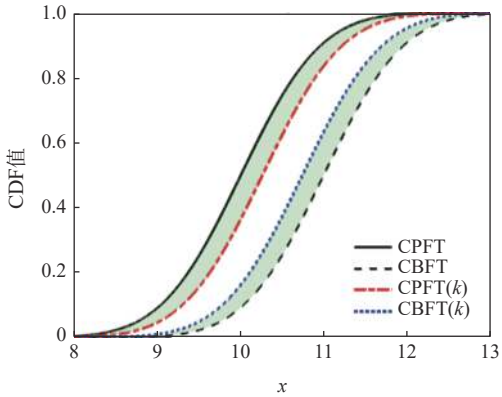


图 4　概率包络面积示意图

Fig. 4　Diagram of probability envelope area

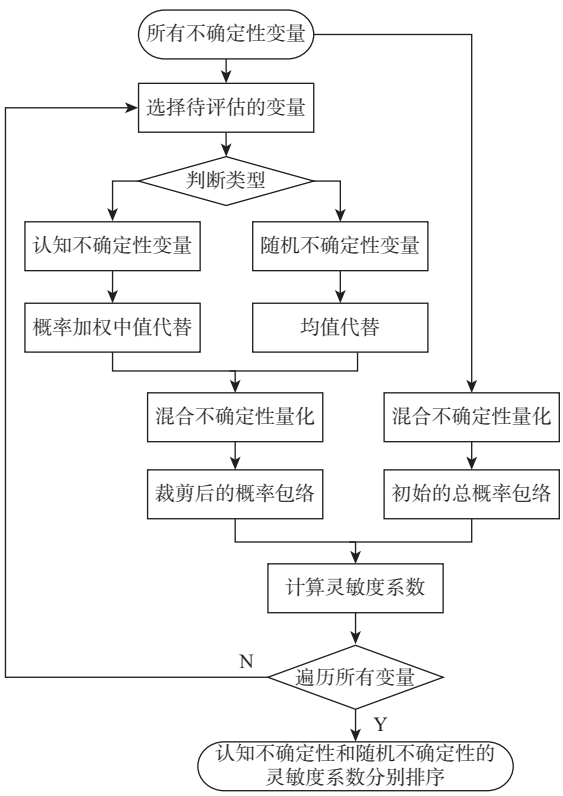


图 5　基于概率包络面积变化率的灵敏度分析流程

Fig. 5　Flow chart of sensitivity analysis based on change rate of probability envelope area

由图 5 可知, 将各输入不确定性变量依次剔除, 分别比较随机不确定性变量和认知不确定性变量的灵敏度系数的大小, 得到两类不确定性变量的重要度排序。关于不确定性变量的剔除 (或裁剪) 方法, 其中随机不确定性变量用其均值代替; 对于证据理论下由识别框架和基本可信度分配表征的认知不确定性变量, 本文提出采用概率加权中值 $\bar{x}_k$ 代替, $\bar{x}_k$ 计算式为

$$\bar{x}_k = \sum_{i=1}^{N(x_k)} \frac{\left(x_{ik}^{\mathrm{low}} + x_{ik}^{\mathrm{up}}\right)}{2} \cdot m(A_{ik}) \tag{13}$$

式中: $N(x_k)$ 为认知不确定性变量的焦元个数; $m(A_{ik})$、x_{ik}^{low}、x_{ik}^{up} 分别为该变量第 i 个焦元的概率质量、下界、上界。

1.3　基于似然样本策略的模型参数修正方法

为了在模型参数修正过程中避免复杂的逆向不确定性传播, 同时能有效考虑随机和认知混合不确定性对 CFD 输出响应的综合影响, 本文提出一种基于似然样本策略的参数修正方法, 其流程如图 6 所示。具体步骤如下:

1) 基于蒙特卡罗仿真 (Monte Carlo simulation, MCS) 对随机不确定性参数按其概率分布随机抽样, 对认知不确定性参数按其基本可信度分配进行重要性抽样, 基本可信度分配高的子区间会生成更多的样本。

2) 令迭代次数 $j = 1$, 将 1)中产生的样本数量为 n_{s} 的所有输入样本一一代入 CFD 数值模拟, 计算其响应预测数据 $\boldsymbol{y}^{\mathrm{p}}$。

3) 考虑到实际工程中由于成本和时间的限制, 往往无法进行完整的确认试验, 试验数据较为稀缺, 无法充分考虑试验误差等, 因此建立如式 (14) 所示的 CFD 数值模拟结果和试验结果间相对误差的距离指标, 来量化二者之间的差异, 从而对 CFD 数值模拟进行简单确认。

$$R_i = \left| \frac{y_i^{\mathrm{p}} - E(\boldsymbol{y}^{\mathrm{e}})}{E(\boldsymbol{y}^{\mathrm{e}})} \right| \qquad 1 \leqslant i \leqslant n_{\mathrm{s}} \tag{14}$$

式中: R_i 为相对误差; $\boldsymbol{y}^{\mathrm{e}}$ 为试验数据; $E(\boldsymbol{y}^{\mathrm{e}})$ 为多个试验数据的均值。

4) 将所有 CFD 预测数据点的相对误差从小到大排列, 若相对误差满足式 (15), 说明该预测数据与试验数据吻合较好, 则根据 CFD 预测值反推其对应的输入样本作为似然样本, 并予以保留。

$$\mathrm{rank}(\boldsymbol{E}_{\mathrm{RE}}) \leqslant \lambda n_{\mathrm{s}} \tag{15}$$

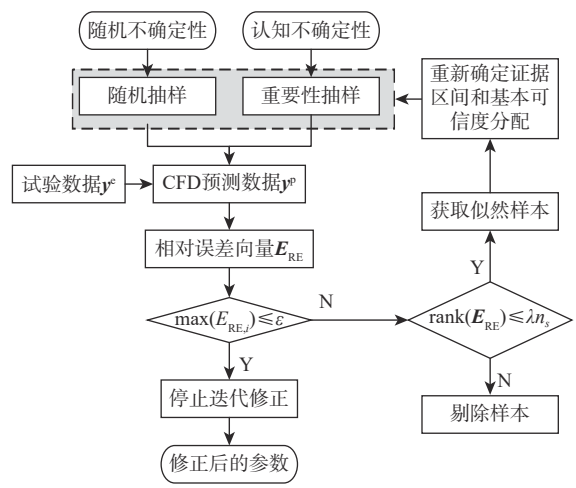


图 6　基于似然样本策略的模型参数修正流程

Fig. 6　Flow chart of model parameter correction process based on likelihood samples strategy

式中：rank为排序函数；λ为截断比例，决定了似然样本的总数λn_s。

5）根据上一步的似然样本，确定待修正的每个认知不确定性变量x_k的上、下边界，以此作为其新的证据区间，相应的BPA与初始各焦元概率质量保持一致。对于无须修正的认知不确定性参数以及随机不确定参数，其不确定性表征模型均保持不变，以进行下一轮的模型修正迭代。

6）当最大的相对误差小于ε，认为模型精度满足要求；同时考虑到迭代修正的收敛性，当待修正认知不确定性参数的证据区间上下界不再发生明显变化时，则认为修正结果收敛。

$$\begin{cases} \max\limits_{1\leqslant i\leqslant n_s}(E_{\mathrm{RE},i}) \leqslant \varepsilon \\ \left|A_{\mathrm{low}}^{j+1}-A_{\mathrm{low}}^{j}\right| \leqslant \delta \\ \left|A_{\mathrm{up}}^{j+1}-A_{\mathrm{up}}^{j}\right| \leqslant \delta \end{cases} \tag{16}$$

式中：A_{low}、A_{up}分别为待修正参数x_k证据区间的下界、上界。

提出的基于似然样本的参数修正原理示意如图7所示，似然样本策略通过对认知不确定性参数进行修正，减小系统响应预测的认知不确定性，使得在考虑随机不确定性的情况下CFD仿真预测数据能够逐渐接近试验数据，提高CFD仿真模型的预测能力。

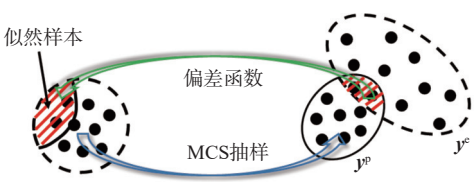


图7 基于似然样本的参数修正示意图

Fig. 7 Diagram of parameter correction based on likelihood samples

2 数值算例测试

考虑到数学算例简单、可容许大量函数调用，且待修正的认知不确定性参数真值可知，给出一个数学算例验证提出方法的有效性，然后将其应用于三维机翼ONERA M6的CFD湍流模型封闭系数的修正问题，证明了本文所提出的方法的工程适用性。

2.1 数学算例

考虑如下的非线性系统响应函数

$$y=3(c_1+1)^2\mathrm{e}^{-\left(x^2+c_1^2\right)}+c_2\sin(0.25c_2) \tag{17}$$

式中：x为正态随机变量，且$x\sim N(0,0.05^2)$；c_1、c_2分别为认知不确定性的参数，其真值为$[c_1,c_2]$=[0.618 0, 8.115 0]。

假设参数c_1和c_2分别在区间[0.5,1.5]和[7,9]内波动，其值落在各自取值区间的子区间内的概率不尽相同，相应的识别框架及基本可信度分配如表2所示。

表2 c_1、c_2的识别框架及基本可信度分配

Table 2 Evidence structure assignments and identification frameworks of c_1 and c_2

参数	焦元	BPA
c_1	[0.5, 0.8]	0.4
	[0.8, 1.2]	0.3
	[1.2, 1.5]	0.3
c_2	[7.0, 7.5]	0.2
	[7.5, 8.5]	0.5
	[8.5, 9.0]	0.3

在认知不确定性参数的真值处，即$[c_1,c_2]$=[0.618 0, 8.115 0]，考虑x的随机不确定性，调用响应函数20次（即对应同一试验条件下的20次测量）得到y的20组数据，将其看作试验数据，此时$E(\boldsymbol{y}^{\mathrm{e}})$=12.632 9。若修正后的$c_1$、$c_2$分别位于0.618 0、8.115 0附近，则可证明提出的模型修正方法的有效性。

在随机不确定性和初始认知不确定性影响下，基于式(14)得到最大误差为29.82%，模型预测精度较差。利用提出的全局灵敏度分析方法对各个不确定性变量进行混合不确定性下的灵敏度分析，根据式(13)得到c_1、c_2的裁剪值分别为0.965 0、8.075 0，计算相应的灵敏度指标分别为s_1=74.86%、s_2=19.45%。可见，两个认知不确定性参数对系统响应y的影响均不可忽略，因此对其同时展开修正，设$\lambda=1\%$、$\varepsilon=1\%$、$\delta=0.001$。参数修正迭代结果如表3所示。

表3 c_1、c_2的修正迭代结果

Table 3 Results of modified iteration for c_1 and c_2

修正迭代次数	c_1	c_2	$E_{\mathrm{RE,max}}$/%
0	[0.5, 1.5]	[7, 9]	29.82
1	[0.591 1, 0.645 8]	[7.979 2, 8.251 8]	0.94
7	[0.598 6, 0.642 3]	[7.995 3, 8.231 0]	0.65

注：c_1、c_2的证据区间的真值分别为0.618 0和8.115 0。

由表3可知，提出的方法可使最大相对误差迅速下降，参数区间范围迅速缩小，修正迭代仅需1次精度便能满足要求，迭代7次后修正的区间收敛，修正后c_1和c_2的证据区间分别包含了其真值(0.618 0和8.115 0)，且区间范围非常小。修正前后y的概率分布上、下界的变化情况如图8所示。由图8可知，经过1次修正迭代，相比初始情况，输出响应的不确定性范围已大幅缩小，对于工程问题，在满足精度要求的前提下可适当放宽收敛准则，减小修

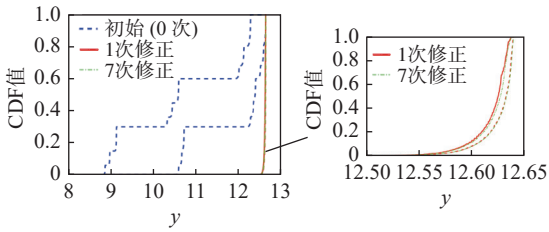


图 8　修正前后的 y 的概率分布上下界

Fig. 8　Upper and lower bounds of probability distribution of y before and after correction

正迭代次数。这些结果验证了提出方法的有效性。

2.2　M6 机翼 CFD 湍流模型修正

2.2.1　问题描述

将提出 CFD 模型参数修正架构应用于跨音速三维机翼 ONERA M6 的 CFD 气动特性预测问题。对于 CFD 数值模拟, 湍流模型的认知不确定性是其最大的误差源[21], 湍流模型中封闭系数的取值往往依赖于使用者的经验。对于很多流动问题, CFD 计算软件中给出的湍流模型封闭系数推荐值未必总能得到好的预测结果, 且封闭系数的略微调整可能会导致输出响应的剧烈变化。另外, 流场客观存在着不可消除的来流条件随机不确定性, 使得攻角和马赫数存在随机波动。

已建立了多种湍流模型来进行 CFD 数值模拟, 如 SA、k-ε和k-ω湍流模型、雷诺应力模型等。其中 SA 方程湍流模型具有计算收敛性好、计算精度和可靠性高、简单实用等优点, 且存在基于大量试验数据进行标定的推荐值, 是航空航天领域 CFD 数值模拟中应用最广的湍流模型[22]。本文考虑到 SA 湍流模型中 6 个封闭系数C_{b1}、C_{b2}、C_{v1}、C_{w2}、C_{w3}、σ具有认知不确定性, 来流条件中马赫数Ma和攻角α具有随机不确定性, 需综合分析混合不确定性对机翼升力系数C_L的影响。

关于 SA 湍流模型中的封闭系数, 在实际的工程问题中可以通过权威专家以及工程经验来确定其证据结构。考虑到 Spalart 等[23] 提出该湍流模型时便给出了其中参数的取值以及相应的物理约束, 文献 [21,24] 在研究 SA 湍流模型系数的认知不确定性时, 也给出了推荐的取值范围。因此, 综合考量现有文献中给出的各系数的默认值、物理约束以及推荐范围, 本文设定其证据结构如表 4 所示。为了方便与 ONERA M6 机翼已有的试验数据进行对比, 选择工况 Ma=0.839 5、α = 3.06°和雷诺数Re = 11.72×10^6, 假设马赫数Ma和攻角α服从均匀分布, 波动区间分别为名义值处±0.02和±0.05°。

2.2.2　CFD 代理模型构建

根据 NASA 官网公布的数据[25], 对 M6 机翼进行几何建模并绘制网格。CFD 流场计算使用 Fluent19.2, 求解器采用稳态密度求解器, 求解方法为 Roe-FDS。利用基于证据理论的混合不确定性量化方法对机翼升力系数C_L进行不确定性量化, 其中需要调用大量 CFD 仿真模型, 非常耗时, 因此构建以 6 个封闭系数、马赫数、攻角为输入, 升力系数作为输出的 kriging 代理模型[26], 取代真实 CFD 仿真, 从而降低计算量。

表 4　各认知不确定性变量的证据结构

Table 4　Evidence structure for each cognitive uncertainty variables

变量	默认值	焦元	BPA
C_{b1}	0.135 5	[0.129, 0.133]	0.05
		[0.133, 0.137]	0.95
C_{b2}	0.622	[0.61, 0.65]	0.80
		[0.65, 0.69]	0.20
C_{v1}	7.1	[6.9, 7.1]	0.50
		[7.1, 7.3]	0.50
C_{w2}	0.3	[0.055, 0.204]	0.30
		[0.204, 0.353]	0.70
C_{w3}	2	[1.75, 2.25]	0.85
		[2.25, 2.50]	0.15
σ	0.667	[0.6, 0.8]	0.90
		[0.8, 1.0]	0.10

利用拉丁超立方抽样在表 5 给出的抽样区间内抽取 100 个样本, 代入 CFD 数值模拟计算 M6 机翼的升力系数, 生成输入输出样本。根据输入输出样本构建 kriging 代理模型, 然后在抽样区间内随机抽取 20 个样本进行代理模型精度检验, 计算均方根误差 E_{RMSE}, 计算式为

$$E_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\boldsymbol{y}_i^{\mathrm{p}}-\boldsymbol{y}_i^{\mathrm{t}}\right)^2} \tag{18}$$

式中: n为精度检验样本数目; $\boldsymbol{y}^{\mathrm{p}}$、$\boldsymbol{y}^{\mathrm{t}}$分别为代理模型预测数据、真实数据 (即 CFD 仿真数据)。由计算可得 E_{RMSE}=0.43%, 符合精度要求。

表 5　各参数的抽样区间

Table 5　Sampling interval of each parameters

变量	抽样区间	变量	抽样区间
C_{b1}	[0.12, 0.14]	C_{w3}	[1.7, 2.5]
C_{b2}	[0.6, 0.7]	σ	[0.6, 1.0]
C_{v1}	[6.9, 7.3]	Ma	[0.819 5, 0.839 5]
C_{w2}	[0.05, 0.40]	α	[3.01°, 3.11°]

2.2.3　测试 1

考虑到 M6 机翼问题公布的升力系数试验值仅有工况 (Ma=0.839 5 和α = 3.06°) 下的一个值, 无法考虑来流随机不确定性对试验结果的影响, 难以全面验证提出的方法在处理混合不确定性时的有效

性。因此，首先设计测试 1，同时考虑湍流模型认知不确定性和来流随机不确定性，取 SA 湍流模型系数为 Fluent 软件默认值如表 3 所示，考虑到马赫数 Ma 和攻角 α 的随机不确定性，随机生成 10 个样本，代入 CFD 数值模拟计算 M6 机翼的升力系数，将其作为本次模型修正的试验数据。考虑表 3 所示的封闭系数认知不确定性和上述给定的来流随机不确定性，利用本文构建的 CFD 模型参数修正架构对 CFD 仿真模型进行参数修正。理论上，最终参数修正的结果应该非常接近表 4 中的默认值。

在初始的不确定性影响下，CFD 仿真相对试验值的最大误差为 5.06%，CFD 预测精度较差。利用提出的全局灵敏度分析方法对各个不确定性变量进行混合不确定性下的灵敏度分析，计算相应的灵敏度指标结果如表 6 所示。由表 6 可知，C_{b1} 和 C_{w3} 对升力系数的影响相比其他 4 个封闭系数明显要大，因此仅对这两个参数进行修正，其他参数固定于其默认值。

表 6　灵敏度分析结果 (测试 1)

Table 6　Results of sensitivity analysis (Case1)

类型	变量	裁剪值	S_k^{T}	s_k/%	排序
认知	C_{b1}	0.135	3.871×10^{-3}	58.57	1
	C_{b2}	0.638	9.165×10^{-3}	1.94	6
	C_{v1}	7.100	8.933×10^{-3}	4.42	5
	C_{w2}	0.234	8.827×10^{-3}	5.56	3
	C_{w3}	2.056	7.764×10^{-3}	16.93	2
	σ	0.720	8.845×10^{-3}	5.37	4
随机	Ma	0.840	9.093×10^{-3}	2.71	2
	α	3.060	8.926×10^{-3}	4.50	1

认知不确定性中灵敏度指标较大 (C_{b1}、C_{w3}) 和最小 (C_{b2}) 的 3 个参数概率包络的变化情况如图 9 所示。由图 9 可知，C_{b1} 的概率包络面积变化非常明显，而 C_{b2} 几乎不变。

利用提出的基于似然样本的参数修正方法对 C_{b1} 和 C_{w3} 进行修正，令修正指标 $\lambda=1\%$、$\varepsilon=1\%$ 和 δ=0.000 5，模型参数修正的迭代结果如表 7 所示，其中 n_{iter} 为修正迭代次数。由表 7 可知，随着参数修正的迭代，两个系数的认知不确定性明显减小，CFD 预测的最大相对误差快速下降，迭代 4 次后，$E_{\mathrm{RE,max}}$ 降为 0.98%，升力系数预测的波动范围显著缩小。同时，C_{b1} 和 C_{w3} 修正后的区间中值分别 0.135 7、2.026 0，与表 4 中的默认值非常接近，这与预期结果完全吻合，证明了所提出的模型修正方法的有效性。

2.2.4　测试 2

在测试 1 的基础之上，为了进一步测试提出的方法处理实际工程问题的有效性，开展测试 2。将文献 [27] 给出的升力系数 0.26 作为参数修正的试验数据，此时无法考虑随机不确定性，仅考虑 SA 湍流模型系数的认知不确定性。SA 湍流模型系数的认知不确定性与测试 1 设置相同，来流条件为确定值 (Ma=0.839 5, α = 3.06°)。

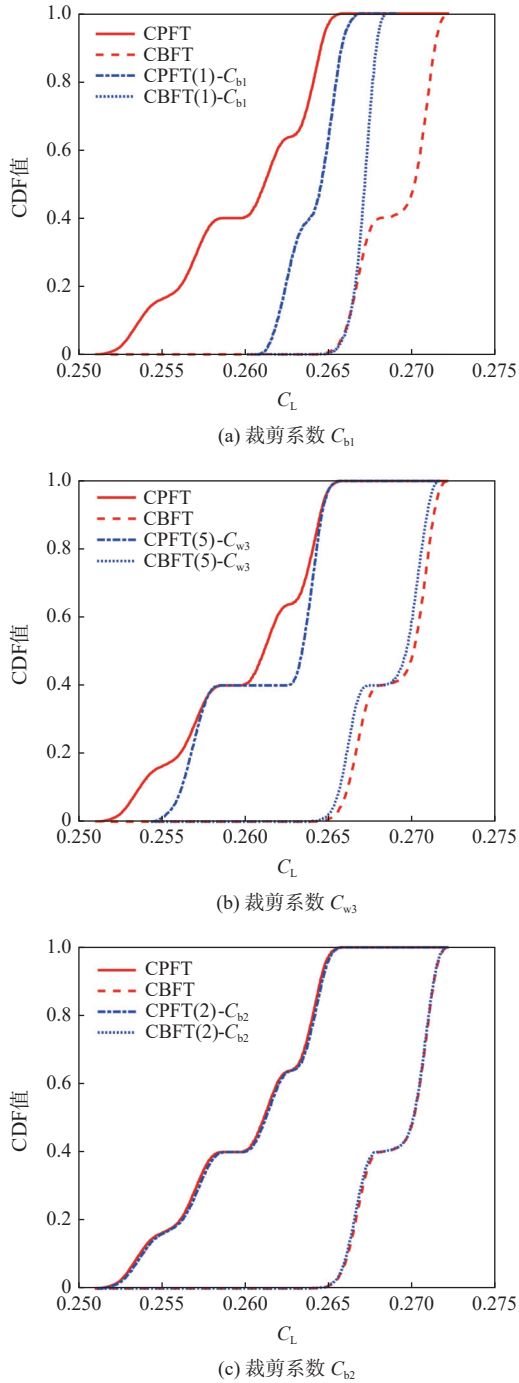


图 9　裁剪 C_{b1}、C_{w3}、C_{b2} 后的概率包络变化情况

Fig. 9　Change in probability envelope after cutting C_{b1}, C_{w3} and C_{b2}

在初始的不确定性影响下，CFD 仿真相对试验值的最大误差为 4.92%。对 6 个不确定性系数开展灵敏度分析，结果如表 8 所示。由表 8 可知，初始概率包络总面积 S^{T} = 0.008 67。与测试 1 相似，C_{b1}、C_{w3} 对升力系数的影响较大，因此仅对其进行修正。

表 7　模型参数修正的迭代结果 (测试 1)

Table 7　Results of model parameter corrections (Case1)

修正取值/区间	C_{b1}	C_{w3}	n_{iter}	$E_{RE,max}$/%	C_L
默认值	0.135 5	2.000 0			0.268 9
修正前	[0.129 0,0.137 0]	[1.75,2.50]	0	5.06	[0.255 3,0.273 6]
精度达标后	[0.132 6,0.136 9]	[1.913 7,2.108 1]	4	0.98	[0.266 3,0.271 4]
区间收敛后	[0.134 9,0.136 5]	[1.996 4,2.055 6]	17	0.55	[0.267 4,0.270 2]

表 8　灵敏度分析结果 (测试 2)

Table 8　Results of sensitivity analysis (Case2)

变量	裁剪值	S_k^T	s_k/%	排序
C_{b1}	0.135	3.202×10^{-3}	63.07	1
C_{b2}	0.638	8.485×10^{-3}	2.14	6
C_{v1}	7.100	8.249×10^{-3}	4.86	5
C_{w2}	0.234	8.120×10^{-3}	6.35	3
C_{w3}	2.056	7.083×10^{-3}	18.31	2
σ	0.720	8.212×10^{-3}	5.28	4

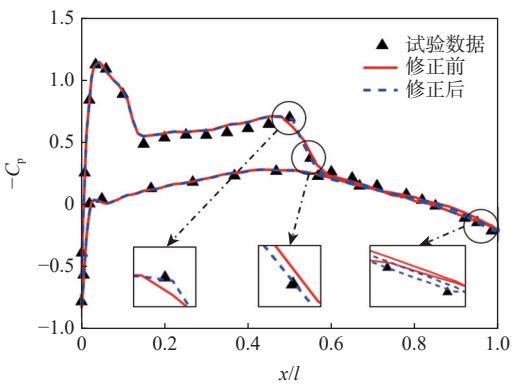
λ、ε、δ的设置与测试 1 相同, 参数修正的迭代结果如表 9 所示。由表 9 可知, 修正区间收敛后 (n_{iter}=12), 最大相对误差 $E_{RE,max}$ = 0.19%, 升力系数预测区间为 [0.259 5, 0.260 3], 区间的范围非常小, 且试验数据 0.26 位于该区间内。同时可以发现, 两个修正参数的 Fluent 软件默认值均不在修正后的区间中, 存在偏离。在该工况 (Ma=0.839 5, α = 3.06°) 下, 取 SA 湍流模型封闭系数分别为软件默认值和修正后所得区间的中值, CFD 数值模拟预测的升力系数分别为 0.268 0 和 0.259 6。显然, 参数修正后预测精度更高。

表 9　模型参数修正的迭代结果 (测试 2)

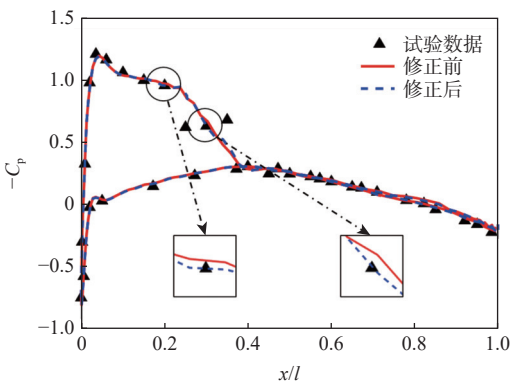
Table 9　Results of model parameter updating (Case2)

修正取值/区间	C_{b1}	C_{w3}	n_{iter}	$E_{RE,max}$/%	C_L
默认值	0.135 5	2.000 0			0.26
修正前	[0.129 0, 0.137 0]	[1.75, 2.50]	0	4.92	[0.256 6, 0.272 8]
精度达标后	[0.131 2, 0.134 8]	[1.754 5, 1.936 8]	3	0.81	[0.259 5, 0.262 1]
区间收敛后	[0.133 1, 0.134 0]	[1.754 7, 1.758 1]	12	0.19	[0.259 5, 0.260 3]

修正前后机翼从翼根开始沿翼展的 y/b=44% 和 y/b=80% 位置处截面的压力系数 C_p 如图 10 所示。由图 10 可知, 与 NASA 官网公布的 M6 机翼的压力系数的试验数据[25] 相比, 修正后的压力分布与试验数据的吻合度更高, 因此在升力系数预测上也更为精准。以上这些结果均表明, 商业软件中给出的湍流模型系数默认值并非总能使 CFD 模型预测精度达到最优, 体现了本文所提出的修正方法的工程价值。



(a) y/b=44%



(b) y/b=80%

图 10　修正前后的压力分布

Fig. 10　Pressure distribution before and after correction

3　结　论

针对 CFD 数值模拟的模型修正难以同时处理随机和认知不确定性的难题, 提出了一种融合混合不确定性量化、全局灵敏度分析、参数修正的模型修正闭环流程, 建立了基于证据理论的随机和认知混合不确定性的量化方法, 在此基础上构建了混合不确定性下基于概率包络面积变化率的灵敏度分析指标, 提出了基于似然样本策略的参数修正方法。得出以下结论:

1) 提出的模型修正闭环流程可有效处理随机和认知混合不确定性, 避免出现直接对认知不确定性参数进行分布假设导致的误差。

2) 能够快速减小待修正系数的认知不确定性, 提高 CFD 数值模拟的预测精度, 为后期将 CFD 数值模拟用于性能分析和优化设计奠定了基础。

参考文献 (References)

[1] 罗磊, 高振勋, 蒋崇文. CFD 技术发展及其在航空领域中的应用

进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(20): 77-81.
LUO L, GAO Z X, JIANG C W. CFD development and application in aviation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(20): 77-81(in Chinese).

[2] 阎超, 屈峰, 赵雅甜, 等. 航空航天CFD物理模型和计算方法的述评与挑战[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(5): 829-857.
YAN C, QU F, ZHAO Y T, et al. Review of development and challenges for physical modeling and numerical scheme of CFD in aeronautics and astronautics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(5): 829-857(in Chinese).

[3] XU H C, QIN D T, LIU C Z, et al. An improved dynamic model updating method for multistage gearbox based on surrogate model and sensitivity analysis[J]. IEEE Access, 2021, 9: 18527-18537.

[4] MARGHERI L, MELDI M, SALVETTI M V, et al. Epistemic uncertainties in RANS model free coefficients[J]. Computers & Fluids, 2014, 102: 315-335.

[5] 张皓, 李东升, 李宏男. 有限元模型修正研究进展: 从线性到非线性[J]. 力学进展, 2019, 49: 542-575.
ZHANG H, LI D S, LI H N. Recent progress on finite element model updating: from linearity to nonlinearity[J]. Advances in Mechanics, 2019, 49: 542-575(in Chinese).

[6] 王纪森, 贾倩, 陈晨, 等. 液压管路油液流动的湍流模型参数修正研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1665-1671.
WANG J S, JIA Q, CHEN C, et al. Research of turbulence model parameters correction for oil flow of pipeline[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1665-1671(in Chinese).

[7] 张亦知. 基于数据驱动的湍流模型修正方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
ZHANG Y Z. Data-augmented correction of turbulence modeling[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020(in Chinese).

[8] SCHAEFER J, ROMERO V, SHAFER S, et al. Approaches for quantifying uncertainties in computational modeling for aerospace applications[C]// AIAA Scitech 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020.

[9] MARES C, MOTTERSHEAD J E, FRISWELL M I. Stochastic model updating: part 1—theory and simulated example[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(7): 1674-1695.

[10] 陈鑫, 王刚, 叶正寅, 等. CFD不确定度量化方法研究综述[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(4): 1-13.
CHEN X, WANG G, YE Z Y, et al. A review of uncertainty quantification methods for Computational Fluid Dynamics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(4): 1-13(in Chinese).

[11] 郭惠昕, 锁斌. 随机和认知混合不确定系统的全局灵敏度分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(7): 1888-1896.
GUO H X, SUO B. Approach to global sensitivity analysis of hybrid uncertain system with aleatory and epistemic uncertainties[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(7): 1888-1896(in Chinese).

[12] SHAH H R, HOSDER S, WINTER T. A mixed uncertainty quantification approach with evidence theory and stochastic expansions[C]// Proceedings of the 16th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference. Reston: AIAA, 2014: AIAA2014-0298.

[13] 屈小章, 余江鸿, 姚齐水, 等. 基于随机-区间混合不确定性的风机性能可靠性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(3): 299-311.
QU X Z, YU J H, YAO Q S, et al. Random-interval hybrid reliability analysis for fan performance in the presence of epistemic uncertainty[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, 50(3): 299-311(in Chinese).

[14] GUO J, DU X P. Sensitivity analysis with mixture of epistemic and aleatory uncertainties[J]. AIAA Journal, 2007, 45(9): 2337-2349.

[15] FERSON S, TROY TUCKER W. Sensitivity analysis using probability bounding[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(10/11): 1435-1442.

[16] 胡政文, 张保强, 邓振鸿. 概率盒全局灵敏度和活跃子空间跨层降维[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 224582.
HU Z W, ZHANG B Q, DENG Z H. Cross-layer dimension reduction based on probability box global sensitivity analysis and active subspace method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 224582(in Chinese).

[17] 刘宇, 吴沐宸, 陈江涛, 等. 一种混合不确定性下的灵敏度分析方法: CN113051851B[P]. 2022-09-09.
LIU Y, WU M C, CHEN J T, et al. Sensitivity analysis method under hybrid uncertainty: CN113051851B[P]. 2022-09-09(in Chinese).

[18] FLOREA M C, JOUSSELME A L. Fusion of imperfect information in the unified framework of random sets theory: application to target identification[R]. Ottawa: Defence R&D Canada-Valcartier, 2007.

[19] 许泽伟. 基于多项式混沌展开的不确定性模型修正方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
XU Z W. Uncertainty finite element model updating method based on polynomial chaotic expansion[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021(in Chinese).

[20] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.

[21] DA RONCH A, PANZERI M, DROFELNIK J, et al. Sensitivity and calibration of turbulence model in the presence of epistemic uncertainties[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2020, 11(1): 33-47.

[22] HE X, ZHAO F Z, VAHDATI M. Uncertainty quantification of Spalart-Allmaras turbulence model coefficients for simplified compressor flow features[J]. Journal of Fluids Engineering, 2020, 142(9): 091501.

[23] SPALART P, ALLMARAS S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[C]// Proceedings of the 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 1992: AIAA1992-439.

[24] SCHAEFER J, HOSDER S, WEST T, et al. Uncertainty quantification of turbulence model closure coefficients for transonic wall-bounded flows[J]. AIAA Journal, 2017, 55(1): 195-213.

[25] NASA. ONERA M6 wing[EB/OL]. (2022-07-19)[2021-02-10]. https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/m6wing/m6wing.html.

[26] 韩忠华. Kriging模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225.
HAN Z H. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197-3225(in Chinese).

[27] ARAYA G. Turbulence model assessment in compressible flows around complex geometries with unstructured grids[J]. Fluids, 2019, 4(2): 81-95.

Model correction method for CFD numerical simulation under mixed aleatory and epistemic uncertainty

LI Zexian[1]，MA Mengying[2]，WU Jianhui[2]，XIONG Fenfen[1,*]，WANG Bomin[1]

(1. School of Aerospace Engineering，Beijing Institute of Technology，Beijing 100081，China；
2. Research Development Center，China Academy of Launch Vehicle Technology，Beijing 100076，China)

Abstract：A type of model updating framework is proposed, aiming at the challenge of CFD model updating under mixed aleatory and epistemic uncertainty. The framework integrates mixed uncertainty quantification, global sensitivity analysis and parameter updating strategy. The method of mixed uncertainty quantification is established based on evidence theory, and sensitivity analysis index——change rate of probability envelope area for mixed uncertainty is constructed based on evidence theory. A parameter updating method based on the likelihood samples strategy is proposed. For the CFD numerical simulation of the three-dimensional wing ONERA M6, the probability envelope representation of the lift coefficient is obtained by quantifying mixed uncertainty, considering epistemic uncertainty of the turbulence model coefficients and aleatory uncertainty of the incoming flow conditions. Based on this, the global sensitivity analysis is carried out to explore the key turbulence model coefficients that have a great impact on the output, so as to reduce the complexity and calculation of the model updating. The key coefficients are updated according to the likelihood samples strategy. The updated CFD simulation results following parameter iterative updating show a strong degree of consistency with the experimental data, demonstrating the efficacy of the suggested CFD model updating technique.

Keywords：mixed uncertainty；model updating；evidence theory；sensitivity analysis；turbulence model

Received：2022-07-19；**Accepted**：2022-09-16；**Published Online**：2022-10-09 16：04
URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221008.1548.007
Foundation items：National Natural Science Foundation of China (52175214)
* **Corresponding author**. E-mail：fenfenx@bit.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0629

基于深度强化学习的风场中浮空器驻留控制

柏方超，杨希祥*，邓小龙，侯中喜
(国防科技大学 空天科学学院，长沙 410073)

摘　　要：建立了平流层浮空器区域驻留模型，在有动力和无动力推进的情况下，基于马尔可夫决策过程，将具有优先经验回放的双深度Q学习应用于平流层浮空器区域驻留控制。通过平均区域驻留半径、区域驻留有效时间比等参数来评价区域驻留控制方法的效果。典型风场中仿真分析结果指出：在区域驻留半径为50 km、区域驻留时间为3天的任务下，无动力推进的平流层浮空器的平均区域驻留半径为28.16 km，区域驻留有效时间比为83%；有动力推进平流层浮空器的平均区域驻留半径可达8.84 km，可实现区域驻留半径为20 km的飞行控制，区域驻留有效时间比为100%。

关 键 词：平流层浮空器；动态风场；区域驻留控制；深度强化学习；动力推进
中图分类号：V274
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2024)07-2354-13

平流层浮空器是指依靠浮力升空，可在20 km高度附近持久驻空的浮空类飞行器，主要包括平流层飞艇和高空气球[1]。通过搭载任务载荷，平流层浮空器可开展对地观测、预警探测、通信中继、防灾减害、环境监测等应用，具有广阔的军民应用前景，受到了广泛的重视[1-9]。

研究表明，平流层底部存在东西方向切变风场，同时南北方向风速分量亦很小的准零风层[10]。平流层浮空器可以通过改变高度，利用相应的风层，实现飞行器的区域驻留或路径规划[11-15]。近年来，这种基于环境风场利用的新型浮空器得到了广泛关注[16]。

为了控制浮空器的飞行轨迹，Yoder等[17]分析了基于气动帆控制的浮空器的系统性能，基于PID控制器实现其在不同风场环境下的轨迹控制。Ramesh等[18]对比分析了双气球与气球-气动帆系统对浮空器区域驻留的影响，仿真结果表明，2种系统均在半径几百公里的区域内保持轨迹。谷歌的Loon项目[19]采用带空气囊的浮空器，可以通过打开排气阀门释放空气使得平流层浮空器上升，同时也可以通过充气风机增加系统重量用于下降，实现浮空器小范围内的高度控制与区域驻留控制。文献[20-21]在稳定风场的假设下，采用定点悬停策略，研究了带高度控制系统的浮空器的区域驻留能力，结果表明浮空器可以保持在期望的驻留区域内。王益平等[22]采用边界控制策略，研究了南北方向增加动力推进后的平流层浮空器的区域驻留性能，指出了由于南北方向风场的无规律性，在南北方向增加动力推进是必要的。文献[11,23]提出带副气囊和螺旋桨推进系统的平流层浮空器，设计了3种区域驻留策略，针对不同的策略进行了飞行仿真，结果表明，为更好地达到区域驻留的目标，需要启动推进系统。翟嘉琪等[12]基于马尔可夫决策过程提出一种浮空器在不确定风场作用下的二维全局路径规划方法，研究了不同推进能力对浮空器区域可达性的影响。以上研究表明，平流层浮空器可

收稿日期：2022-07-19；**录用日期**：2022-12-09；**网络出版时间**：2022-12-26 00:00
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221222.1751.001
基金项目：国家自然科学基金(61903369,52272445)；湖南省自然科学基金(2023JJ10056)
* **通信作者**. E-mail：nkyangxixiang@163.com

引用格式：*柏方超，杨希祥，邓小龙，等. 基于深度强化学习的风场中浮空器驻留控制[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(7)：2354-2366.*
BAI F C，YANG X X，DENG X L，et al. Station keeping control for aerostat in wind fields based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(7)：2354-2366 (in Chinese).

以通过将阀门和空气囊结合调整高度[24], 利用不同风层环境, 在水平方向上增加推进系统实现抗风飞行等方式来实现对飞行轨迹的控制[10,21,25]。然而, 以上大多采用边界控制策略等方法来进行区域驻留控制, 并未能充分考虑动态风场不确定性等因素对区域驻留的影响[20,25]。

深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)可以解决连续动作的决策优化问题, 无须标记数据。随着人工智能和计算机性能的提高, DRL 方法被应用于各种工程领域[19,26-27]。在不同的地方和季节收集平流层浮空器飞行数据很困难, DRL 可用于处理大气环境状态与风场环境状态等到浮空器动作选择的映射, 通过神经网络识别风场环境信息, 通过 DRL 方法训练的控制器可以根据环境状态引导动作, 以应对飞行期间可能的变化[28]。Xu 等[28]利用强化学习方法设计了平流层浮空器区域驻留控制器, 在不确定风场条件下, 研究了平流层浮空器初始点以及风场的不确定性对区域驻留能力的影响, 结果表明, 不同的初始位置对区域驻留能力影响较大, 控制器的性能随着风场不确定性的增加而降低, 但是研究并未考虑风场时序性的影响。美国谷歌的 Loon 利用强化学习方法在太平洋上空实现了一个为期 39 天的气球控制实验。在试验过程中, 控制策略可以最大限度地利用不同高度的风来实现对位置的控制[19]。

本文针对超压球为主体的平流层浮空器, 建立了平流层浮空器动力学模型, 针对无动力和有动力的情况, 基于强化学习方法设计了平流层浮空器区域驻留控制器, 并在实际风场环境中进行了飞行仿真分析, 指出了动力对其区域驻留特性的影响。

1　数学模型

1.1　系统构成与工作原理

平流层浮空器主要由球体、高度控制系统、推进分系统、能源分系统、回收分系统、管理分系统以及吊舱组成。其中, 球体采用超压球结构; 高度控制系统包括风机和阀门, 用于系统的高度调控; 推进分系统采用电机-螺旋桨技术方案, 用于提供系统轨迹控制能力; 能源分系统提供系统运行所需要的能源, 管理分系统用于确保各系统正常运行, 实现与地面的数据传输等; 回收分系统用于回收有效载荷; 吊舱主要搭载有效载荷和各分系统。平流层浮空器系统如图 1 所示。

平流层浮空器空气囊可以通过风机压入空气, 也可由阀门放气, 与外界大气进行质量交换, 调节空气囊中空气的质量, 空气质量的变化会影响系统总质量, 从而使平流层浮空器上升或者下降。空气囊吸气, 平流层浮空器下降; 空气囊放气, 平流层浮空器上升。吊舱装有动力推进系统, 通过此系统可以实现对平流层浮空器的弱动力控制, 增加其水平方向的轨迹控制与区域驻留能力。

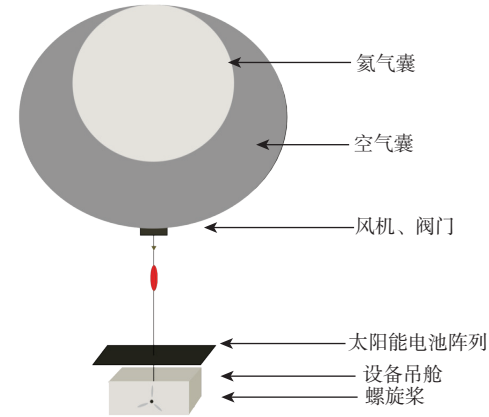


图 1　平流层浮空器系统

Fig. 1　Stratospheric aerostat system

1.2　动力学模型

平流层浮空器动力学假设条件:

1) 假设浮空器在飞行过程中受姿态影响较小, 忽略系统的姿态变化, 将整个系统视为质点。

2) 假设忽略系统的热力学变化过程。

3) 假设地球为均质球体。

4) 假设浮空器系统能源充足, 能够提供推进系统变化所需能源。

1.2.1　纵向动力学模型

平流层浮空器纵向受到的力包括浮力、重力、气动阻力。垂直方向的动力学方程可表示为(以高度垂直向上为正)

$$\begin{cases}(m_{\text{tot}}+m_{\text{add}})\dfrac{\mathrm{d}v_h}{\mathrm{d}t}+\dot{m}_{\text{tot}}v_h=B-m_{\text{tot}}g-D_h\\ \dfrac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}=v_h\end{cases}\tag{1}$$

式中: m_{tot}、m_{add}分别为平流层浮空器的总质量、附加质量; B为总浮力; D_h为平流层浮空器在高度方向上的气动阻力; h为高度; v_h为垂直方向速度。

平流层浮空器的总质量为

$$m_{\text{tot}}=m_{\text{He}}+m_{\text{f}}+m_{\text{st}}+m_{\text{p}}+m_{\text{air}}\tag{2}$$

式中: m_{He}为氦气质量; m_{st}为包括桁架、吊舱、电源、推进系统、飞控、压控等在内的系统干重; m_{f}为蒙皮质量; m_{p}为有效载荷质量; m_{air}为空气囊中空气的质量。

平流层浮空器的附加质量为

$$m_{\text{add}}=C_{\text{V}}\rho_{\text{air}}V_{\text{total}}\tag{3}$$

式中: C_{V}为附加质量系数; ρ_{air}为大气密度, 可根据

标准大气模型计算[29]；V_{total}为浮空器的总体积，采用的平流层浮空器结构为超压球，由压差和温度引起的囊体膨胀张力忽略不计。

平流层浮空器所受浮力和气动阻力为

$$\begin{cases} B=\rho_{\text{air}}V_{\text{total}}g \\ D_h=\dfrac{1}{2}\rho_{\text{air}}v_h|v_h|C_{\text{d}}S \end{cases} \tag{4}$$

式中：C_{d}为阻力系数；S为浮空器参考面积。

平流层浮空器的高度调节主要依靠阀门和风机的调节来实现。当平流层浮空器处于上升过程中，空气阀门打开，副气囊空气排出，空气的质量变化为

$$\frac{\text{d}m_{\text{air}}}{\text{d}t}=-nA_{\text{valve}}C\sqrt{2\Delta P_{\text{valve}}\rho_{\text{air}}} \tag{5}$$

式中：n为阀门数量；A_{valve}为单个阀门横截面积；C为排气系数，考虑理论流动和实际流动的差异得到；ΔP_{valve}为阀门内外压差。

当浮空器处于下降过程中，风机做功，将外界空气压入空气囊中，质量流量可写成

$$\frac{\text{d}m_{\text{air}}}{\text{d}t}=\rho_{\text{air}}V_{\text{in}}(h) \tag{6}$$

式中：V_{in}为单位时间进气量。

1.2.2 横侧向动力学

平流层浮空器横侧向的动力学方程可表示为

$$\begin{cases} (m_{\text{tot}}+m_{\text{add}})\dfrac{\text{d}v_x}{\text{d}t}=\dfrac{1}{2}\rho_{\text{air}}(v_x+u)^2C_{\text{d}}S+F_{\text{ps}} \\ \dfrac{\text{d}x}{\text{d}t}=v_x \\ (m_{\text{tot}}+m_{\text{add}})\dfrac{\text{d}v_y}{\text{d}t}=\dfrac{1}{2}\rho_{\text{air}}(v_y+v)^2C_{\text{d}}S+F_{\text{ps}} \\ \dfrac{\text{d}y}{\text{d}t}=v_y \end{cases} \tag{7}$$

式中：v_x、v_y分别为浮空器东西方向速度、南北方向速度；x、y分别为浮空器东西方向位移、南北方向位移；u、v分别为东西方向风速、南北方向风速；F_{ps}为推进系统推力。

平流层浮空器通过推进系统产生推力，推力表示为

$$F_{\text{ps}}=P_{\text{ps}}\eta_{\text{ps}}/v_{\text{r}} \tag{8}$$

式中：P_{ps}为推进系统功率；η_{ps}为螺旋桨-电机推进系统的综合效率；v_{r}为浮空器空速。

2 区域驻留飞行控制

2.1 基于定点悬停的区域驻留策略

2.1.1 区域驻留控制模型

高度控制系统通过调节平流层浮空器的总质量来改变其飞行高度，进而利用有利的风场环境，将浮空器保持在指定区域内。图2为控制浮空器水平方向转移策略原理图。在半径为R_1的指定区域中，平流层浮空器的位置随时间变化，为了将浮空器保持在该区域内，一个合理的策略是在浮空器漂浮出该区域之前，将高度调整到预期高度，该高度上风向与目前高度相反[20]。考虑到气球将在上升或下降到预期的风层之前离开该地区，高度控制系统应在浮空器位置到达该区域边界之前开始工作，定义开始工作的半径为R_0。

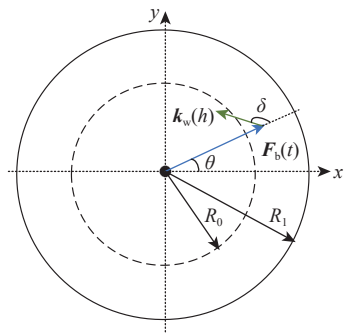


图2 平流层浮空器水平方向转移策略原理

Fig. 2 Schematic diagram of the horizontal transfer strategy of the stratospheric aerostat

图2中，$\boldsymbol{F}_{\text{b}}(t)$为$t$时刻浮空器的位置方向。$\boldsymbol{k}_{\text{w}}(h)$为预期高度$h_{\text{ex}}$处，当前时刻浮空器所在位置的风向。$x$和$y$为当前时刻浮空器的坐标位置。$\delta$为风向与当前位置方向的夹角。$\theta$为区域驻留中心指向浮空器当前位置的矢量与东向($x$轴)的夹角。

预期高度h_{ex}定义为当前时间高度下，使δ达到最大值的高度，满足以下公式：

$$\begin{cases} \delta_{\max}=\delta_{\max}(t,h_{\text{ex}})=\arccos\left(\dfrac{\boldsymbol{F}_{\text{b}}(t)\cdot\boldsymbol{k}_{\text{w}}(h_{\text{ex}})}{|\boldsymbol{F}_{\text{b}}(t)|\cdot|\boldsymbol{k}_{\text{w}}(h_{\text{ex}})|}\right) \\ \quad\text{s.t.}\quad x^2(t)+y^2(t)\geqslant R_0^2 \\ \quad h_{\min}\leqslant h_{\text{ex}}\leqslant h_{\max} \end{cases} \tag{9}$$

式中：$h_{\min}$、$h_{\max}$分别为高度调节范围下限、上限。

2.1.2 区域驻留控制流程

在区域驻留半径R_0内，浮空器定高飞行，当总位移超过R_0，计算期望高度h_{ex}，根据当前高度和期望高度选择动作，调节到合适的高度。图3为基于定点悬停的控制策略流程图。

2.2 基于DDQN的区域驻留控制器设计

结合环境模型的强化学习可用于研究不同控制策略下平流层浮空器的运动轨迹，但由于浮空器是在连续空间中移动，难以使用表格描述其连续运动状态空间。深度强化学习使用神经网络来估计Q函数的值，可以有效地解决“维度灾难”。基于值函数的深度强化学习方法，主要包括深度Q学习(deep Q learning, DQN)、双深度Q学习(double deep Q-learning, DDQN)等，在处理低维离散动作问

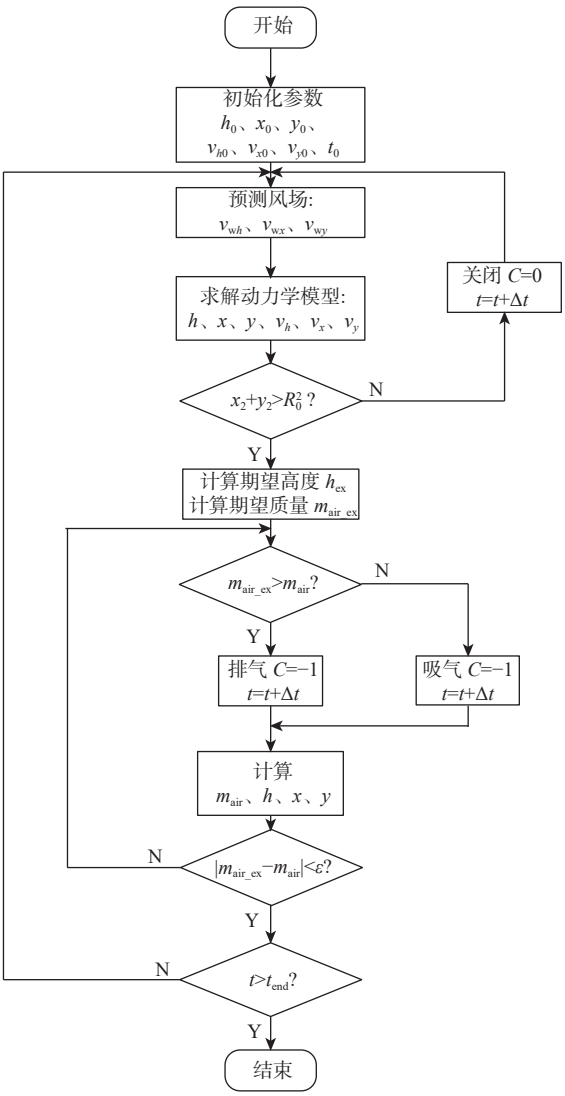


图 3　基于定点悬停的控制策略流程图

Fig. 3　Control strategy flow chart based on fixed-point hovering

题时, 执行效率高[30-31]。相较于 DQN 算法, DDQN 可以有效减小 DQN 算法的估计误差, 增大收敛速度[32]。综合考虑, 将采用 DDQN 强化学习方法解决浮空器的区域驻留控制问题。

根据控制高度调控模式与推进系统工程应用特点来定义动作空间, 在高度方向通过风机和阀门进行开关控制, 并将其作为离散动作处理; 在水平方向上, 通过螺旋桨对浮空器进行控制, 结合工程应用特点, 螺旋桨仅有开启与关停两种状态, 同时具有方向矢量控制能力, 为了采用基于奖励值函数的深度强化学习方法, 对螺旋桨方向进行了离散化处理。因此, 本文采用执行机构的离散动作作为控制器的控制量。

2.2.1　马尔可夫决策模型

强化学习算法框架中, 智能体根据环境状态决定最佳行动问题可以表述为马尔可夫决策过程(Markov decision process, MDP)。基于 MDP 的 Q 学习方法可以使用 5 个元素 $\left(s_t,a_t,R_{t+1},P_{ss'}^{a},q_\pi(s_t,a_t)\right)$ 进行描述[32]。环境状态 s_t 和状态转移概率 $P_{ss'}^{a}$ 由仿真环境决定, 而执行动作 a_t 与当前动作选择策略 π 有关, 动作奖励值 R 是由当前动作 a 在环境状态 s 转移到下一环境状态 s' 过程的实时奖励, 动作奖励值 R 通常以函数形式表示。强化学习的目标确保智能体更快、更优地学习最优策略, 利用最优策略 π^* 使折扣奖励值函数的期望最大化。

$$q_\pi(s,a)=E_\pi\left(R_{t+1}+\gamma R_{t+2}+\cdots|S_t=s,A_t=a\right)=E_\pi\left(R_{t+1}+\gamma q_\pi(S_{t+1},A_{t+1})\,|\,S_t=s,A_t=a\right)\quad(10)$$

式中: $\gamma(0\leqslant\gamma\leqslant1)$为衰减因子, 随着 γ 增加, 未来奖励的重要性增加; S_t 为 t 时刻的状态; A_t 为 t 时刻采取的动作; E_π 为采取策略 π 获得的期望; $q_\pi(s, a)$ 为在状态 s 执行动作 a 获得的期望回报。

基于连续状态、离散动作空间建立平流层浮空器区域驻留 MDP 模型, 具体元素设置为:

1) 环境状态空间 S

在飞行过程中, 平流层浮空器状态由位置坐标、大气环境和风场环境组成, 浮空器位置坐标 (x,y,h)保证区域驻留的实现, 大气环境 T,p,ρ 和副气囊空气质量 m 决定浮空器飞行过程中浮重平衡和高度控制能力。环境状态空间参数如表 1 所示。

表 1　环境状态空间参数设置

Table 1　Environmental state space parameter setting

参数	取值范围
高度h/km	18～22
东向位置x/km	−50～50
北向位置y/km	−50～50
副气囊空气质量m_{air}/kg	0～158
风速S_w/(m·s^{-1})	–
风向与位置角度δ	0～π

注: 东向、北向位置限制条件为 $\sqrt{x^2+y^2}\leqslant50$, 风速$S_w$根据真实风场确定, 风向与位置角度$\delta$根据真实风场与当前位置确定。

2) 动作空间 A

根据高度控制系统与推进系统设计, 智能体的执行动作空间有 27 个, 由风机阀门开闭和螺旋桨倾角指向位置组成, 表 2 为无推进系统作用下平流层浮空器动作空间, 表 3 为东西方向单通道推进系统作用下平流层浮空器动作空间, 表 4 为南北方向单通道推进系统作用下平流层浮空器动作空间, 表 5 为双通道推进系统作用下平流层浮空器动作空间。

3) 状态转移概率 $P_{ss'}^{a}$

在确定了风场环境和平流层浮空器总体设计后, 当智能体执行一个动作, 下一状态也随之确定,

表2 无推进系统作用下平流层浮空器动作空间

Table 2 Action space of stratospheric aerostat without propulsion system

动作空间	动作
a_1	阀门排气
a_2	阀门关
a_3	风机吸气

表3 东西方向单通道推进系统作用下平流层浮空器动作空间

Table 3 Action space of stratospheric aerostat under the action of single-channel propulsion system in east-west direction

动作空间	动作
a_1	阀门排气, 螺旋桨向东推进
a_2	阀门排气, 螺旋桨向西推进
a_3	阀门排气, 螺旋桨关闭
a_4	阀门关, 螺旋桨向东推进
a_5	阀门关, 螺旋桨向西推进
a_6	阀门关, 螺旋桨关闭
a_7	风机吸气, 螺旋桨向东推进
a_8	风机吸气, 螺旋桨向西推进
a_9	风机吸气, 螺旋桨关闭

表4 南北方向单通道推进系统作用下平流层浮空器动作空间

Table 4 Action space of stratospheric aerostat under the action of single-channel propulsion system in north-south direction

动作空间	动作
a_1	阀门排气, 螺旋桨向北推进
a_2	阀门排气, 螺旋桨向南推进
a_3	阀门排气, 螺旋桨关闭
a_4	阀门关, 螺旋桨向北推进
a_5	阀门关, 螺旋桨向南推进
a_6	阀门关, 螺旋桨关闭
a_7	风机吸气, 螺旋桨向北推进
a_8	风机吸气, 螺旋桨向南推进
a_9	风机吸气, 螺旋桨关闭

因此对每一个状态和动作来说, 状态转移概率 $P^{a}_{ss'}=1$。状态转移过程如图4所示。

4) 奖励值函数 R

奖励值函数是深度强化学习的重要组成部分, 通过奖励值函数可以反映智能体最终的控制目的,

表5 双通道推进系统作用下平流层浮空器动作空间

Table 5 The action space of the stratospheric aerostat under the action of the dual-channel propulsion system

动作空间	动作
a_1	阀门排气, 螺旋桨向北
a_2	阀门排气, 螺旋桨向东
a_3	阀门排气, 螺旋桨向南
a_4	阀门排气, 螺旋桨向北
a_5	阀门排气, 螺旋桨向东北
a_6	阀门排气, 螺旋桨向东南
a_7	阀门排气, 螺旋桨向西南
a_8	阀门排气, 螺旋桨向西北
a_9	阀门排气, 螺旋桨关闭
a_{10}	阀门关, 螺旋桨向北
a_{11}	阀门关, 螺旋桨向东
a_{12}	阀门关, 螺旋桨向南
a_{13}	阀门关, 螺旋桨向西
a_{14}	阀门关, 螺旋桨向东北
a_{15}	阀门关, 螺旋桨向东南
a_{16}	阀门关, 螺旋桨向西南
a_{17}	阀门关, 螺旋桨向西北
a_{18}	阀门关, 螺旋桨关闭
a_{19}	风机吸气, 螺旋桨向北
a_{20}	风机吸气, 螺旋桨向东
a_{21}	风机吸气, 螺旋桨向南
a_{22}	风机吸气, 螺旋桨向西
a_{23}	风机吸气, 螺旋桨向东北
a_{24}	风机吸气, 螺旋桨向东南
a_{25}	风机吸气, 螺旋桨向西南
a_{26}	风机吸气, 螺旋桨向西北
a_{27}	风机吸气, 螺旋桨关闭

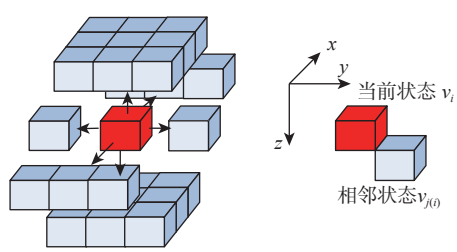


图4 智能体状态转移过程

Fig. 4 Agent state transition process in an intelligent body

本文提出的奖励值函数分为3个部分, 如式(11)所示。

$$R(s_t)=\max(N(w_{\text{wind}}\delta+w_{\text{dis}}(R_1-L_{\text{dis}}))+b) \tag{11}$$

式中: N为总权重的倒数, 保证w_{wind}与w_{dis}奖励占比不变; w_{wind}为奖励中风向所占权重; w_{dis}为当前位置距区域驻留中心距离所占权重; R_1为区域驻留半径; L_{dis}为浮空器当前位置距区域驻留中心的距离; b为偏差常数项, 以区分充气/放气与关闭动作。

5) 动作价值函数$Q(s_t,a_t|\theta)$

DDQN 算法是基于状态-动作空间中选择最大动作值函数$Q(s_t,a_t|\theta)$的行为策略, 而不是随机搜索动作, 参数θ为神经网络参数, 智能体将根据神经网络输出层的最大值选择动作。智能体对未知环境下智能体进行采样并保存数据, 保存当前的状态s_t、动作a_t和即时奖励R_t, 下一步状态s_{t+1}为样本空间$[s_t,a_t,R_t,s_{t+1}]$。为了解决最大化动作值函数$Q(s_t,a_t|\theta)$问题, 采用时序差分算法(temporal-difference, TD)寻找最优值。基于 TD 算法, 通过梯度下降计算当前神经网络$Q(s_t,a_t|\theta)$与目标神经网络$Q(s_{t+1},a_{t+1}|\theta^-)$参数。通过神经网络与梯度下降算法相结合, 递归方程如下:

$$y_t=\begin{cases}R_t & s_{t+1}\ \text{最终状态}\\ R_t+\gamma Q(s_{t+1},a_{t+1}|\theta^-) & s_{t+1}\ \text{非最终状态}\end{cases} \tag{12}$$

$$a_{t+1}=\arg\max_{a_{t+1}}Q(s_{t+1},a_{t+1}|\theta) \tag{13}$$

$$L(\theta^-)=\left((y_t-Q(s_t,a_t|\theta))^2\right) \tag{14}$$

式中: $L(\theta^{-1})$为优化函数。

2.2.2　基于 DDQN 区域驻留控制

图 5 为基于 DDQN 算法的平流层浮空器区域驻留控制流程图。

本文利用随机梯度下降算法来训练神经网络, 将$L(\theta^-)$作为损失函数, 通过最小化损失函数更新神经网络参数。使用优先经验回放机制算法, 对存储数据进行优先级排序, 神经网络迭代能够更频繁地采样重要数据[33]。经验缓存区的优先顺序是通过更高频的采样高期望经验来实现的, 期望值通过 TD 算法的误差大小来衡量, 在训练过程中将覆盖经验缓存区中的原始样本。

在训练过程中, 考虑到训练初期需要采集更多的样本空间, 训练后期需要将随机策略转为确定性策略。贪婪策略超参数ε设置应该逐渐减小, 设置满足以下方程:

$$\varepsilon_{t+1}=\varepsilon_t(1-\varepsilon_{\text{dec}}T) \tag{15}$$

式中: ε_{dec}为贪婪算法下降函数; T为归一化时间。

经过测试, 神经网络采用全连接神经网络性能最好, 神经网络包含 1 个输入层, 6 个隐藏层, 1 个输出层。输入层神经元与输出层神经元数目根据输入状态与控制动作数目确定, 激活函数选择 relu 函数。相关参数设置如表 6 所示。

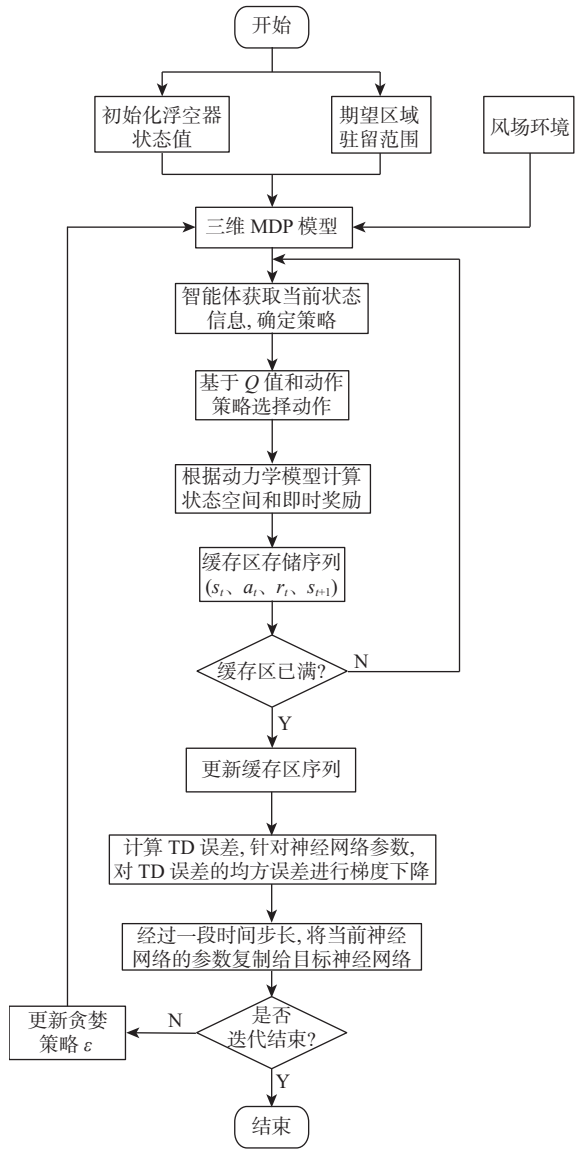


图 5　基于 DDQN 的区域驻留控制流程

Fig. 5　The area residency control flow diagram based on DDQN

本文的主要目的是设计基于风场环境综合利用的平流层浮空器区域驻留控制器, 其区域驻留控制能力与风场环境密切相关。区域驻留控制能力

表 6　DDQN 算法参数设置

Table 6　DDQN algorithm parameter settings

训练参数	数值
批学习数N_{b}	512
最大训练回合数$N_{\max}$	2×10^4
记忆回放单元大小M	2×10^6
学习率	0.001
奖励偏差	−0.1
ε-贪婪算法下降参数ε_{dec}	0.01
ε初值	0.98

的大小可以使用平均区域驻留半径d_{agv}(空间评价指标)与区域驻留有效时间比t_{eff}(时间评价指标)表示。

平均区域驻留半径d_{agv}表示所有时间节点浮空器位置距区域驻留中心的平均值,计算式为

$$d_{agv}=\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(x_i^2+y_i^2)}/n \tag{16}$$

式中:n为浮空器水平位置数据数量。

区域驻留有效时间比t_{eff}表示浮空器在50 km半径范围内驻留的时间占比,计算式为

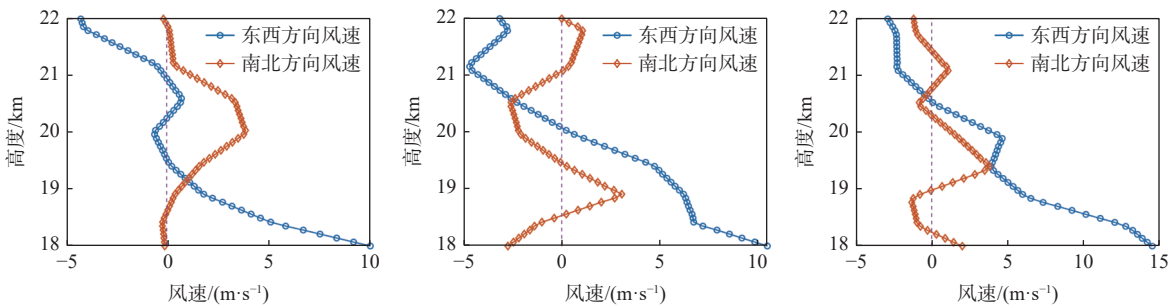
$$t_{eff}=\frac{T_{all}-T_{50}}{T_{all}}\times 100\% \tag{17}$$

式中:T_{all}为飞行总时长;T_{50}为驻留范围外的飞行时长。

3 仿真结果与分析

3.1 高空风场

本文选取长沙地区3天的真实风场数据。图6为风场的剖面图。不同高度间的风速大小采用三次样条插值求解。为了便于展示分析,将其分为东西方向和南北方向风速分量。由图6可知,20 km高度附近的风速带内风速趋近于0,此风速带为准零风层,准零风层上下存在着东西方向切变的纬向风,南北方向风速随高度变化并无明显变化规律,但是总体风速较小。图中仅展示了3个时间点的环境风场,仿真分析中使用的风场变化频率为每小时1次。



(a) 第1天中午12:00风场 (b) 第2天中午12:00风场 (c) 第3天中午12:00风场

图6 风场示意图

Fig. 6 Schematic of wind fields

3.2 无推进系统下的浮空器区域驻留

3.2.1 基于定点悬停策略区域驻留控制

平流层浮空器参数如表7,平流层浮空器初始状态如表8所示。基于定点悬停策略的平流层浮空器区域驻留控制72 h仿真结果如图7所示。平流层浮空器驻留范围为半径50 km,开始工作半径为22 km。动作执行机构工作模式:通过副气囊将空气吸入、排出,调整平流层浮空器驻空高度,利用不同高度的差异化风场实现水平方向的轨迹控制。执行机构的动作周期为3 min,周期内采用龙格库塔求解器进行仿真。

图7为飞行仿真结果,在区域驻留开始阶段,平流层浮空器可以实现区域驻留,但是随着风场环境的改变,浮空器在第2日就已经不能实现区域驻留的目标,第3日完全飘出区域驻留范围。从图7(a)与图7(b)中可以看出,最大驻留半径为d_{max}=145.69 km,平均区域驻留半径为d_{agv}=70.67 km,区域驻留有效时间比为t_{eff}=51%。从图7(c)与图7(d)中可以发现,东西方向和南北方向上皆不能实现50 km范围内的区域驻留控制。从图7(e)与图7(f)中可以发现,浮空器在开始工作范围内部,阀门无动作;在开始工作范围半径外,阀门动作频繁。

3.2.2 基于强化学习的区域驻留控制

在相同的平流层浮空器、风场环境与区域驻留

表7 平流层浮空器参数

Table 7 Stratospheric aerostat parameters

参数	数值
囊体半径/m	8.7
囊体体积/m³	2 780
囊体总质量/kg	48
系统总质量/kg	177.2
阀门数量	1
阀门半径/m	0.04
工作高度/km	18~22

表8 平流层浮空器初始状态

Table 8 Initial state of stratospheric aerostat

状态量	状态值
高度h_0/km	20
x方向x_0/km	0
y方向y_0/km	0
初始空气质量/kg	67.58
初始时间	2021-08-03T0
结束时间	2021-08-06T0

控制模型下, 根据高度控制系统设计, 浮空器的动作空间为 (−1,0,1), 分别表示为空气囊吸气、关闭和排气, 对应着平流层浮空器的下降、高度保持以及上升, 动作持续时间 3 min, 动作与环境交互使用龙格库塔仿真。从图 8(a)、图 8(b) 与图 7(a)、图 7(b) 对比可以看出, 通过深度强化学习所设计的区域驻

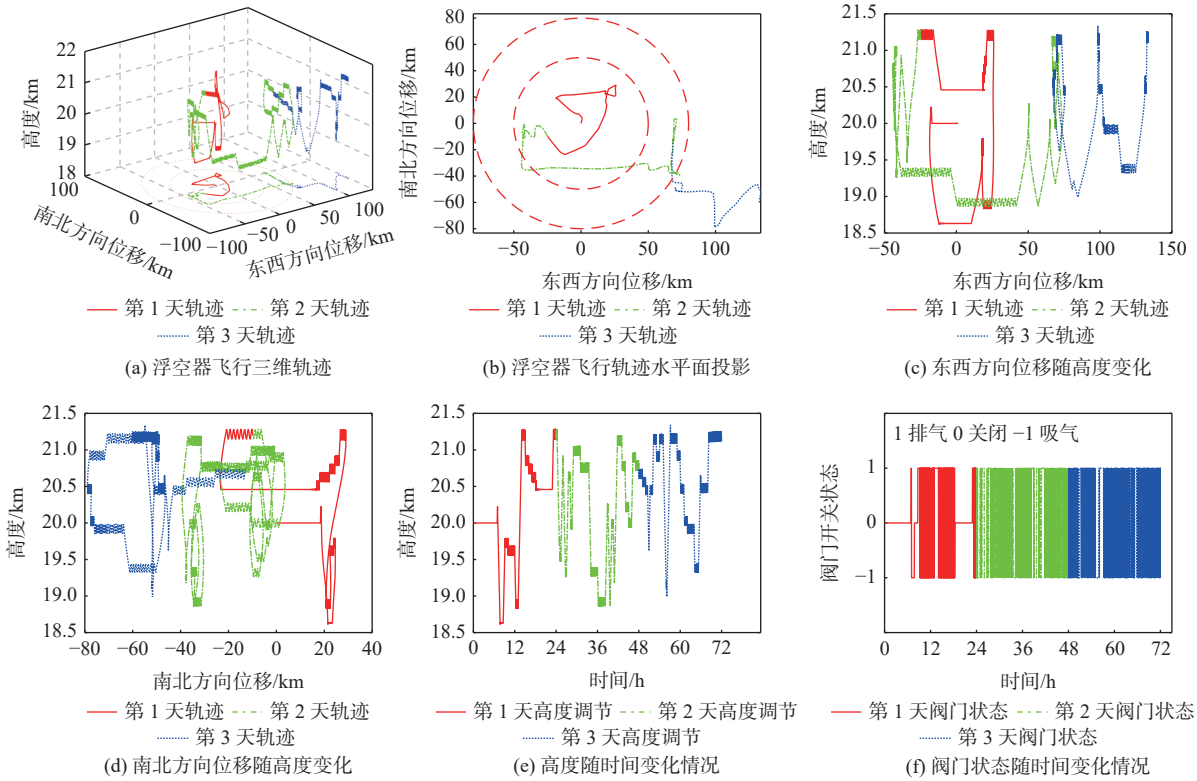


图 7　定点悬停下的飞行仿真结果

Fig. 7　The flight simulation result of the fixed point hovering

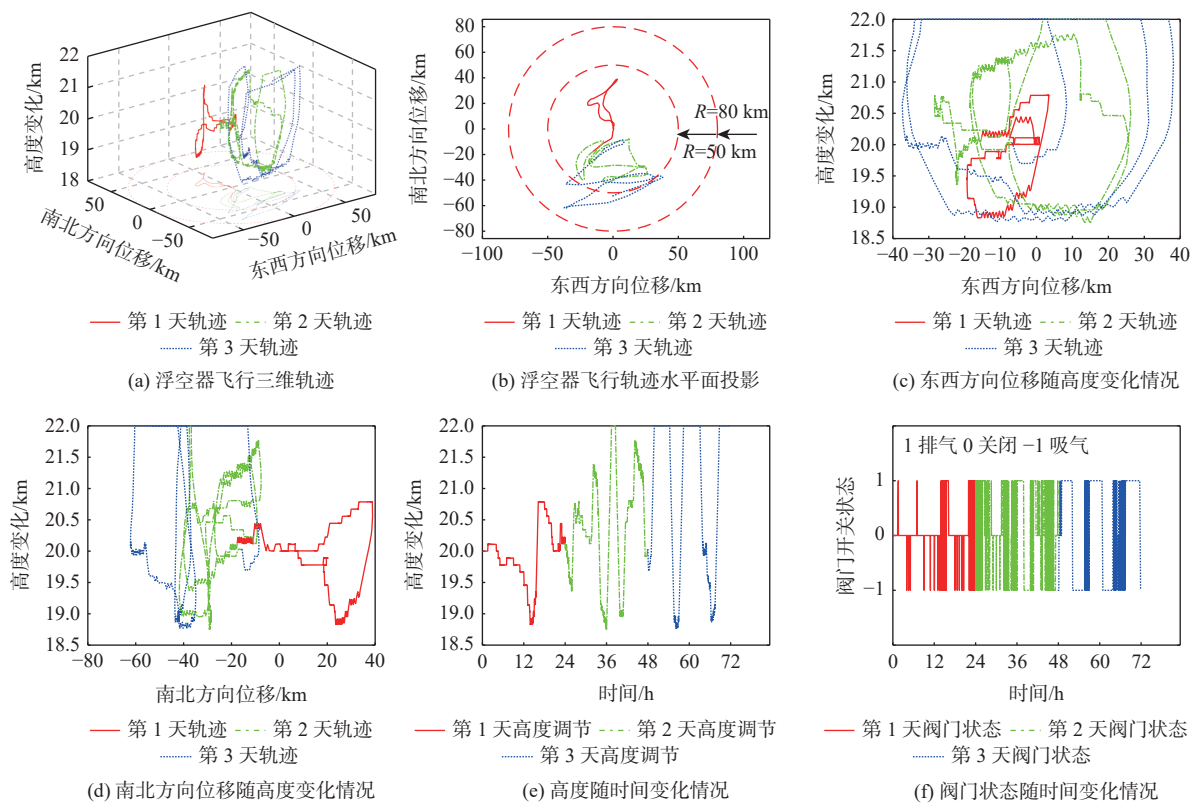


图 8　强化学习控制下的飞行仿真结果

Fig. 8　Flight simulation results under reinforcement learning control

留控制器，在控制效果上优于基于定点悬停策略的控制方案，通过强化学习设计的区域驻留控制器能明显缩短浮空器的区域驻留半径，最大区域驻留半径为 72.38 km，平均区域驻留半径为 d_{agv} = 28.16 km，区域驻留有效时间比为 t_{eff} = 83%，浮空器绝大部分时间位于驻留区域内部，全部驻留在半径为 80 km 的驻留区域内，在调节过程中，较定点悬停策略能够根据预测风场提前调节高度，使得浮空器提前作出决策。但是总体上未能达到 50 km 区域驻留的控制目标。

从图 8(b) 与图 8(c) 中可以看出，随着驻留时间的增加，高度调节范围增加，东西方向上跨度逐渐增加，能实现 50 km 范围内的区域驻留目标。从图 8(b) 和图 8(d) 中可以看出，南北方向上不能实现区域驻留 50 km 范围的目标。图 8(e) 与图 8(f) 表示高度调节随时间的变化以及阀门的动态变化。

图 9 为在风场扰动情况下，区域驻留控制器的控制结果。在东西方向和南北方向上，叠加方差为 1 的高斯分布的风速扰动。可以发现，在扰动的情况下，控制器还能保持良好的区域驻留控制效果。最大区域驻留半径为 70 km，平均区域驻留半径为 33.3 km，区域驻留有效时间比为 83%，接近无风场扰动下的指标。

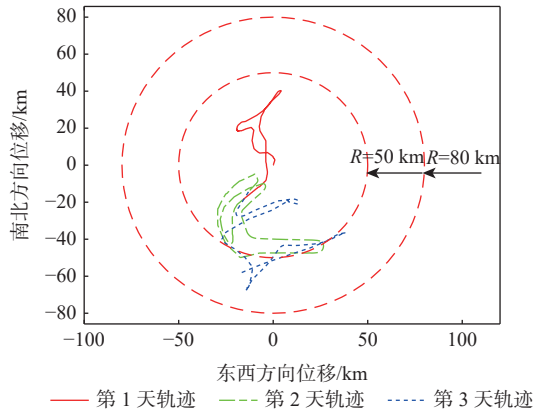


图 9 风场扰动下飞行仿真结果

Fig. 9 Flight simulation results under wind disturbance

3.3 东西方向单通道控制区域驻留仿真

通过以上分析可知，仅通过高度调节的方式不能完全实现半径为 50 km 的区域驻留目标。对此，分别探究了在东西方向上或南北方向上存在推进系统的情况下的区域驻留能力，抗风速度为 3 m/s。当仅在东西方向上进行动力推进时，仿真结果如图 10 所示。

从图 10(a) 与图 10(b) 可以看出，总体控制效果上，最大驻留半径为 d_{max} = 62.90 km，平均区域驻留半径为 d_{agv} = 21.38 km，区域驻留有效时间比为 t_{eff} = 93%。

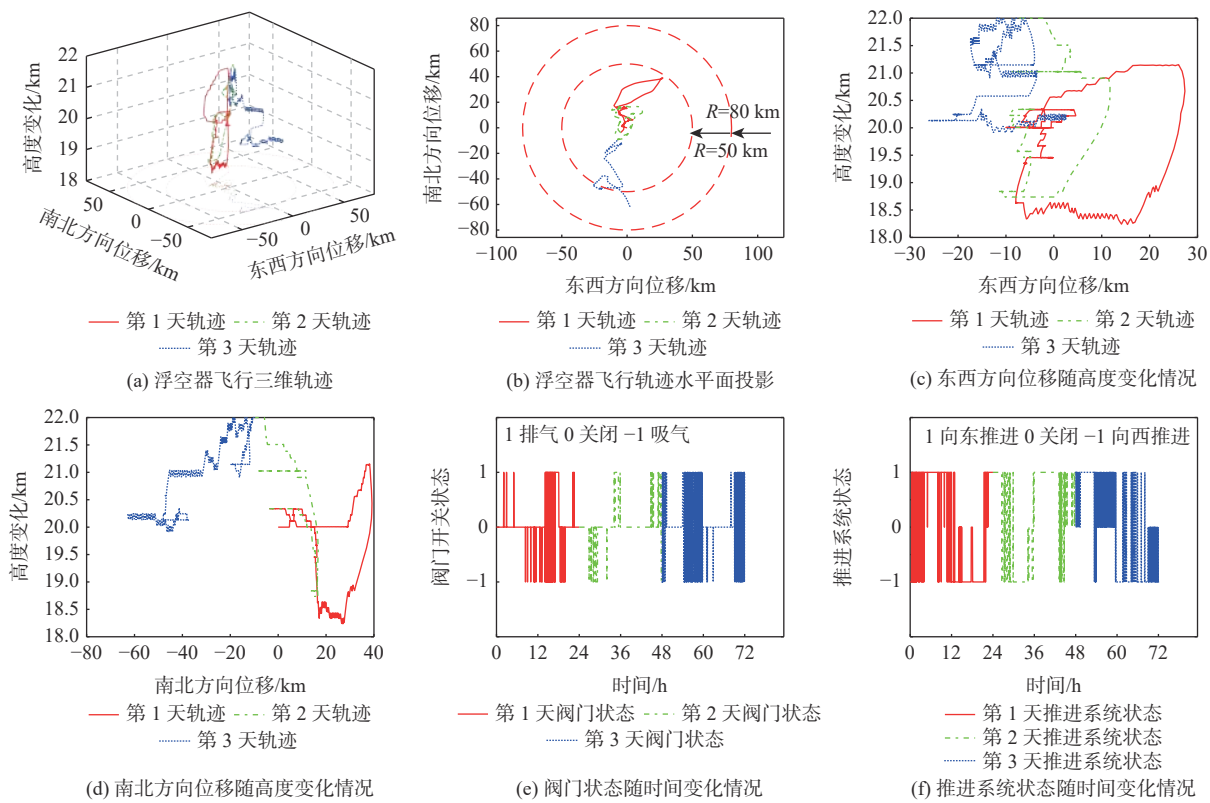


图 10 东西单通道控制飞行仿真结果

Fig. 10 Single-channel control flight simulation results in the east-west direction

由 3.2 节可知, 由于东西方向上的切变风比较明显, 在只通过高度调节的方式实现区域驻留的情况下, 通过强化学习设计的控制器, 经过数次高度调节, 已经能够实现东西方向上 50 km 范围内的区域驻留目标。从图 10(c), 图 10(d) 可知, 在东西方向上增加推进系统, 能够减小东西方向位移, 但是南北方向位移还是在 [−60 km,40 km] 的范围, 主要控制短板是在南北方向上缺少动力控制, 故在此方向上增加动力控制是必要的。对比图 8(f) 与图 9(e) 可以发现, 增加东西方向的控制后, 阀门开关频率明显减小。

3.4　南北方向单通道控制区域驻留仿真

当仅在南北方向上进行动力推进时, 仿真结果如图 11 所示。

由图 11(a) 与图 11(b) 可知, 总体控制效果上, 最大驻留半径为 d_{max} = 30.22 km, 平均区域驻留半径为 d_{agv} = 16.2 km, 区域驻留有效时间比为 t_{eff} = 100%。与无推进系统控制、东西方向单通道控制相比, 区域驻留能力明显增加。由图 11(c) 与图 11(d) 可知, 通过在南北方向上增推进系统, 在东西方向上和南北方向上均可以实现 50 km 范围内的区域驻留目标。

现通过高度控制系统加南北方向上的推进系统作用即可实现在半径 50 km 范围内区域驻留控制的目标。东西方向上的区域驻留主要是通过高度调节实现的, 南北方向上的区域驻留是高度调节与推进系统的双重效果。

3.5　双通道控制区域驻留仿真

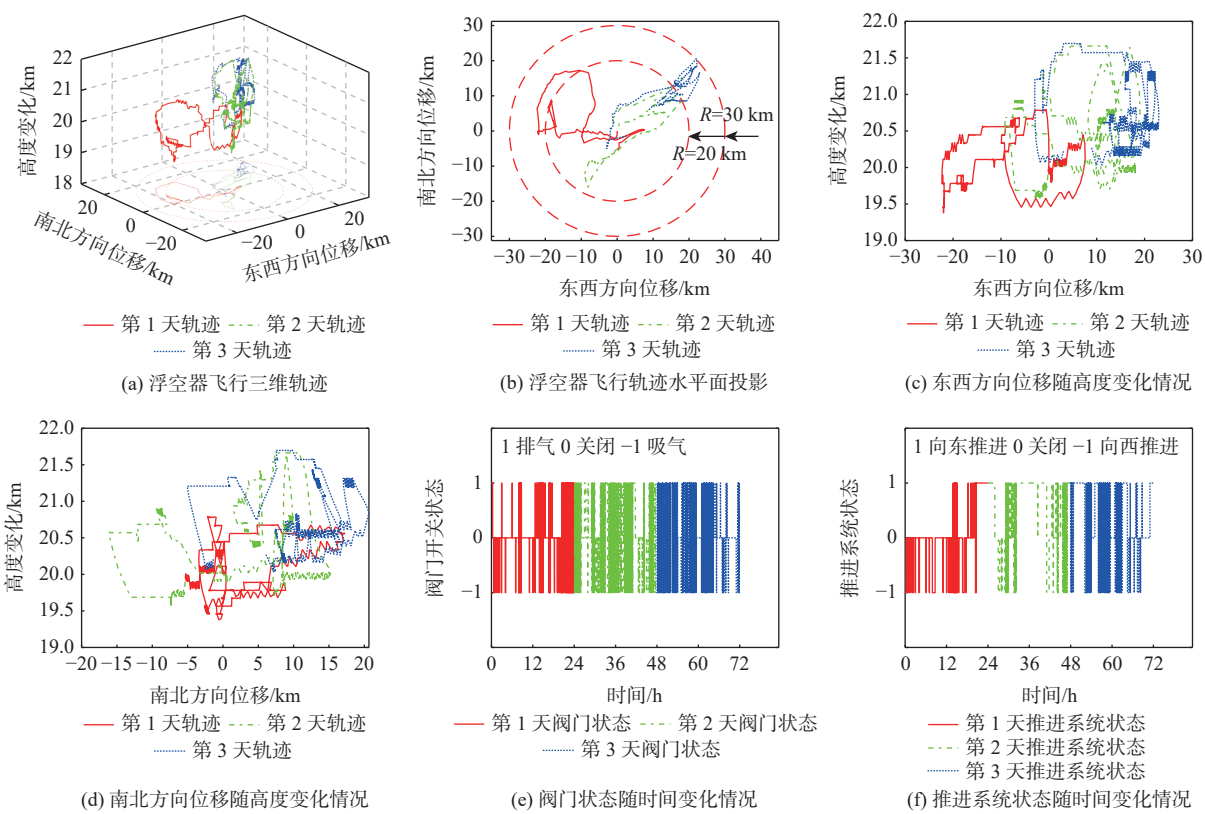
在东西方向与南北方向上皆增加推进系统控制, 仿真结果如图 12。

从图 12(a) 与图 12(b) 中发现, 总体控制效果为最大驻留半径 d_{max} = 17.63 km, 平均区域驻留半径 d_{agv} = 8.84 km, 区域驻留有效时间比 t_{eff} = 100%。

在东西方向和南北方向的耦合控制下, 能够显著减小东西方向和南北方向的区域驻留范围。虽然双通道控制下, 能够有效缩短区域驻留半径, 但是并未考虑动力推进系统的能源消耗, 需要在能源约束的情况下, 对浮空器的区域驻留控制故进一步研究。

3.6　控制器训练收敛结果

该训练使用的是 i7-9750 H、2.59 GHz 的处理器, 训练总时长在 3 h 左右。图 13 展示的是各控制器训练过程中的收敛情况, 在 200 回合左右能达到稳定状态。选择动作在 5 ms 以内, 在任务中, 浮空器每三分钟执行一次动作, 算法运行时间满足要求。



(a) 浮空器飞行三维轨迹　(b) 浮空器飞行轨迹水平面投影　(c) 东西方向位移随高度变化情况

(d) 南北方向位移随高度变化情况　(e) 阀门状态随时间变化情况　(f) 推进系统状态随时间变化情况

图 11　南北单通道控制飞行仿真结果

Fig. 11　Single-channel control flight simulation results in the north-south direction

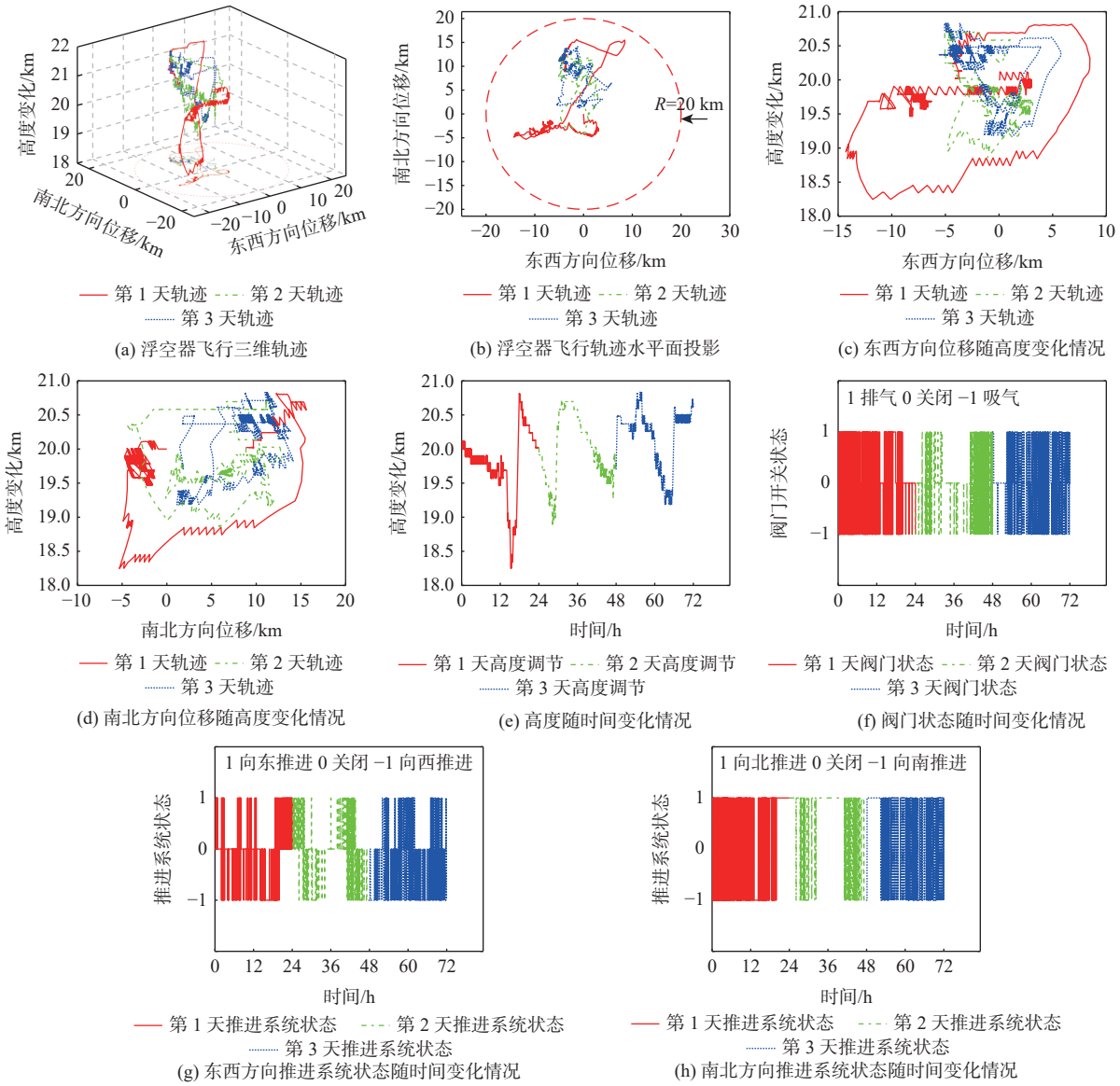


图 12 双通道控制飞行仿真结果

Fig. 12 Dual-channel control flight simulation results

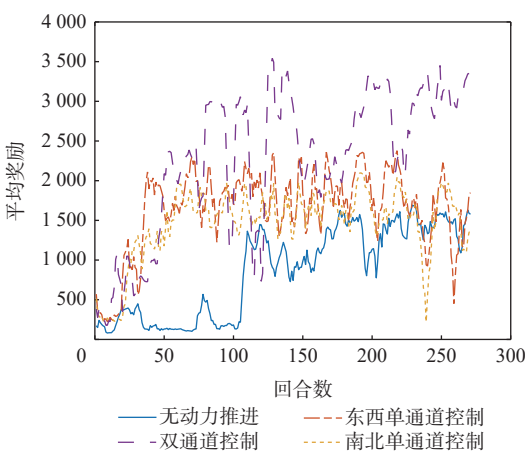


图 13 平均奖励值

Fig. 13 Average rewards during training process

4 结 论

本文提出一种基于强化学习的环境风场利用的新型平流层浮空器区域驻留控制器设计方法。在有动力和无动力的情况下，对平流层浮空器进行了 3 天内的区域驻留仿真。

1）在无动力的情况下，仅依靠高度调节利用风场，利用强化学习设计的区域驻留控制器不能实现区域驻留半径为 50 km 以内的目标，但是相较于定点悬停策略，其能够明显提高浮空器的区域驻留能力。在扰动的情况下，控制器还能保持良好的区域驻留控制效果，该控制器具有较强的鲁棒性。

2）只在东西方向单通道增加推进系统控制的情况下，并不能完全实现半径 50 km 的控制目标，但是显著提高了区域驻留范围内的停留时间，缩短了平均区域驻留半径。

3）在南北方向单通道或双通道都增加推进系统控制时，能明显提高区域驻留范围内停留时间，缩短平均区域驻留半径，完全实现区域驻留目标。

参考文献（References）

[1] 侯中喜, 杨希祥, 乔凯, 等. 平流层飞艇技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
HOU Z X, YANG X X, QIAO K, et al. Stratospheric airship technology [M]. Beijing: Science Press, 2019.

[2] 李智斌, 黄宛宁, 张钊, 等. 2020 年临近空间科技热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 54-68.
LI Z B, HUANG W N, ZHANG Z, et al. Summary of the hot spots of near space science and technology in 2020[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(1): 54-68(in Chinese).

[3] NOCK K T, HEUN M K, AARON K M. Global stratospheric balloon constellations[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(5): 1233-1238.

[4] 赵达, 刘东旭, 孙康文, 等. 平流层飞艇研制现状、技术难点及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 45-56.
ZHAO D, LIU D X, SUN K W, et al. Research status, technical difficulties and development trend of stratospheric airship[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 45-56(in Chinese).

[5] CATHEY H M, TUTTLE J W, FAIRBROTHER D A, et al. Qualification of the NASA super pressure balloon[C]// AIAA Balloon Systems Conference. Reston: AIAA, 2015: 2909.

[6] 刘东旭, 樊彦斌, 马云鹏, 等. 氦气渗透对高空长航时浮空器驻空能力影响[J]. 宇航学报, 2010, 31(11): 2477-2482.
LIU D X, FAN Y B, MA Y P, et al. Effect of helium permeability on working endurance high altitude long duration LTA vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2477-2482(in Chinese).

[7] 杨燕初, 张航悦, 赵荣. 零压式高空气球球形设计与参数敏感性分析[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 58-64.
YANG Y C, ZHANG H Y, ZHAO R. Shape design of zero pressure high altitude balloon and sensitivity analysis of key parameters[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(1): 58-64(in Chinese).

[8] 杨跃能. 平流层飞艇动力学建模与控制方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
YANG Y N. Dynamics modeling and flight control for a stratospheric airship[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013(in Chinese).

[9] 杨希祥, 朱炳杰, 邓小龙, 等. Stratobus 平流层飞艇项目研究进展与仿真分析[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 224579.
YANG X X, ZHU B J, DENG X L, et al. Development status and simulation analysis of stratospheric airship Stratobus[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 224579(in Chinese).

[10] RONEY J A. Statistical wind analysis for near-space applications[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2007, 69(13): 1485-1501.

[11] 邓小龙, 丛伟轩, 李魁, 等. 风场综合利用的新型平流层浮空器轨迹设计[J]. 宇航学报, 2019, 40(7): 748-757.
DENG X L, CONG W X, LI K, et al. Trajectory design of a novel stratospheric aerostat based on comprehensive utilization of wind fields[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(7): 748-757(in Chinese).

[12] 翟嘉琪, 杨希祥, 邓小龙, 等. 不确定风场下平流层浮空器全局路径规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(5): 1116-1126.
ZHAI J Q, YANG X X, DENG X L, et al. Global path planning of stratospheric aerostat in uncertain wind field[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(5): 1116-1126(in Chinese).

[13] SMITH M S. Demonstration of fine altitude control on stratospheric balloons to achieve a desired ground track[C]// AIAA Balloon Systems Conference. Reston: AIAA, 2017: 3287.

[14] 李魁, 邓小龙, 杨希祥, 等. 基于平流层风场预测的浮空器轨迹控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(5): 1008-1018.
LI K, DENG X L, YANG X X, et al. Trajectory control of aerostat based on prediction of stratospheric wind field[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(5): 1008-1018(in Chinese).

[15] TRAN N K, HE X, ZLOTNIK D E, et al. Attitude sensing and control of a stratospheric ballon platform[C]// AIAA Balloon Systems (BAL) Conference. Reston: AIAA, 2013: 1373.

[16] DU H F, SUN T F, LV M Y, et al. Dynamic coverage performance of wind-assisted balloons mesh based on Voronoi partition and energy constraint[J]. Advances in Space Research, 2022, 70(2): 470-484.

[17] YODER C D, GEMMER T R, MAZZOLENI A P. Modelling and performance analysis of a tether and sail-based trajectory control system for extra-terrestrial scientific balloon missions[J]. Acta Astronautica, 2019, 160: 527-537.

[18] RAMESH S S, MA J L, LIM K M, et al. Numerical evaluation of station-keeping strategies for stratospheric balloons[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 80: 288-300.

[19] BELLEMARE M G, CANDIDO S, CASTRO P S, et al. Autonomous navigation of stratospheric balloons using reinforcement learning[J]. Nature, 2020, 588(7836): 77-82.

[20] DU H F, LV M Y, LI J, et al. Station-keeping performance analysis for high altitude balloon with altitude control system[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 92: 644-652.

[21] DU H F, LV M Y, ZHANG L C, et al. Energy management strategy design and station-keeping strategy optimization for high altitude balloon with altitude control system[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 93: 105342.

[22] 王益平, 周飞, 徐明. 临近空间浮空器区域驻留控制策略研究[J]. 中国空间科学技术, 2018, 38(1): 63-69.
WANG Y P, ZHOU F, XU M. Research on control strategy of territory-hovering aerostat in near space[J]. Chinese Space Science and Technology, 2018, 38(1): 63-69(in Chinese).

[23] 邓小龙, 杨希祥, 麻震宇, 等. 基于风场环境利用的平流层浮空器区域驻留关键问题研究进展[J]. 航空学报, 2019, 40(8): 022941.
DENG X L, YANG X X, MA Z Y, et al. Review of key technologies for station-keeping of stratospheric aerostats based on wind field utilization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(8): 022941(in Chinese).

[24] JIANG Y, LV M Y, ZHU W Y, et al. A method of 3-D region controlling for scientific balloon long-endurance flight in the real wind[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 97: 105618.

[25] JIANG Y, LV M Y, LI J. Station-keeping control design of double balloon system based on horizontal region constraints[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 100: 105792.

[26] 杨思明, 单征, 丁煜, 等. 深度强化学习研究综述[J]. 计算机工程, 2021, 47(12): 19-29.

YANG S M, SHAN Z, DING Y, et al. Survey of research on deep reinforcement learning[J]. Computer Engineering, 2021, 47(12): 19-29(in Chinese).

[27] 张悦. 多智能体深度强化学习方法及应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
ZHANG Y. Research on multi-agent deep reinforcement learning methods and applications[D]. Xi'an: Xidian University, 2018(in Chinese).

[28] XU Z Y, LIU Y, DU H F, et al. Station-keeping for high-altitude balloon with reinforcement learning[J]. Advances in Space Research, 2022, 70(3): 733-751.

[29] 张小达, 张鹏, 李小龙.《标准大气与参考大气模型应用指南》介绍[J]. 航天标准化, 2010(3): 8-11.
ZHANG X D, ZHANG P, LI X L. Introduction of "*application guide of standard atmosphere and reference atmosphere model*" [J]. Aerospace Standardization, 2010(3): 8-11(in Chinese).

[30] 张顶立. 基于深度强化学习的城市场景无人机避撞决策研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
ZHANG D L. Research on autonomous collision avoidance decisionmaking of UAV in urban airspace based on deep reinforcement learning[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2022(in Chinese).

[31] LI J X, CHEN Y T, ZHAO X N, et al. An improved DQN path planning algorithm[J]. The Journal of Supercomputing, 2022, 78(1): 616-639.

[32] SUTTON R S, BARTO A G. Reinforcement learning: an introduction[M]. 2nd ed. London: MIT, 2018.

[33] SCHAUL T, QUAN J, ANTONOGLOU I, et al. Prioritized experience replay[EB/OL]. (2016-02-25)[2022-06-19]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.05952.

Station keeping control for aerostat in wind fields based on deep reinforcement learning

BAI Fangchao，YANG Xixiang*，DENG Xiaolong，HOU Zhongxi

(College of Aerospace Science and Engineering，National University of Defense Technology，Changsha 410073，China)

Abstract：In this paper, a stratospheric aerostat station keeping model is established. Based on Markov decision process, Double Deep Q-learning with prioritized experience replay is applied to stratospheric aerostat station keeping control under dynamic and non-dynamic conditions. Ultimately, metrics like the average station keeping radius and the station keeping effective time ratio are used to assess the effectiveness of the station keeping control approach. The simulation analysis results show that: under the mission the station keeping radius is 50 km and the station keeping time is three days, in the case of no power propulsion, the average station keeping radius of the stratospheric aerostat is 28.16 km, the station keeping effective time ratio is 83%. In the case of powered propulsion, the average station keeping radius of the stratospheric aerostat is significantly increased. The powered stratospheric aerostat can achieve flight control with a station keeping radius of 20 km, an average station keeping radius of 8.84 km, and a station keeping effective time ratio of 100%.

Keywords：stratospheric aerostat；dynamic wind field；station keeping control；reinforcement learning；power propulsion

Received：2022-07-19；**Accepted**：2022-12-09；**Published Online**：2022-12-26 00：00

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221222.1751.001

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (61903369、52272445); Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ10056)

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

《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50卷 第7期　2024年7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.50 No.7　July 2024

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