



ISSN 1001-5965

CN 11-2625/V

北京航空航天大学 学报

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS



2023-01

Vol.49 No.1

目 次

车辆与二轮车预碰撞场景分析及其 AEB 优化 徐向阳, 胡文浩, 张友, 王书翰, 何霞, 曹毅 (1)

基于随机空间网络的无人机集群协同对抗模型 王尔申, 郭靖, 宏晨, 任虹帆, 陈艾东, 商新娜 (10)

锂离子电池热失控气体燃烧对热失控传播影响的量化方法 张青松, 刘添添, 赵子恒 (17)

基于脑电信号相位传递熵的谎言机制研究 韦思宏, 张家琦, 黎峰, 康倩若, 高军峰 (23)

锂离子动力电池系统多尺度热安全研究 张艳岗, 郭旭旭, 薛文阳, 张志文, 梁君飞, 王华 (31)

基于改进关键帧选择的 ORB-SLAM2 算法 张洪, 于源卓, 邱晓天 (45)

基于双注意力混洗的无人机航拍目标跟踪算法 金国栋, 薛远亮, 谭力宁, 许剑锐 (53)

基于点融合系统的多目标进场排序与调度 张军峰, 游录宝, 周铭, 杨春苇, 康博 (66)

基于学习行为的 MOOC 用户持续学习预测框架 陈辉, 白骏, 殷传涛, 荣文戈, 熊璋 (74)

增材制造技术在载人航天工程中的应用与展望 刘洋, 周建平, 张晓天 (83)

纳米酚醛气凝胶材料高温热物性参数辨识方法 张红军, 李海群, 康宏琳, 罗金玲 (92)

基于试飞分析的直升机动力系统边界保护控制方法 宋招桢, 赵敬超, 杨文凤 (100)

提高冲碾机跟踪规划路径精度的方法 宋二波, 姚仰平 (106)

航线联营下基于转运的飞机航线路径优化 闫妍, 马啸来 (115)

使用三天线的联合定姿和欺骗检测方法 陈佳佳, 袁洪, 徐颖, 于丰正 (128)

基于最小化新息协方差的修正 SRCKF 算法 杨永建, 甘轶, 李春辉, 邓有为, 肖冰松, 彭芳 (138)

基于 EEG 信号特征的脑力疲劳快速检测方法 张朋, 周前祥, 于洪强, 王川 (145)

小样本下基于孪生神经网络的柱塞泵故障诊断
..... 高浩寒, 潮群, 徐孜, 陶建峰, 刘明阳, 刘成良 (155)

基于 BEMD 与 DCT 的彩色图像多重水印鲁棒算法
..... 胡坤, 李聪, 胡建平, 王小超, 杜玲, 王红飞 (165)

低速冲击下碳/玻混杂复合材料红外辐射特征 赵志彬, 杨正伟, 李胤, 寇光杰, 陈金树, 张炜 (177)

新型聚乙烯醇/聚乙二醇水凝胶热沉性能研究
..... 殷健宝, 邢玉明, 郝兆龙, 王仕淞, 王子贤, 侯煦 (187)

无人机自主引导跟踪与避障的近端策略优化 胡多修, 董文瀚, 解武杰 (195)

点阵夹芯结构非接触式损伤成像研究 赵倩, 冯侃 (206)

卷积线性混合模型下的复非高斯信号盲源提取 李苗苗, 吕晓德, 王宁, 刘忠胜 (212)

基于 SRCKF 的多传感器融合自适应鲁棒算法 李春辉, 马健, 杨永建, 肖冰松, 邓有为 (220)

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

Vol. 49 No. 1 (Sum 359) January 2023

CONTENTS

Pre-crash scenarios and AEB optimization between vehicle and two-wheeler	XU Xiangyang, HU Wenhao, ZHANG You, WANG Shuhan, HE Xia, CAO Yi (1)
Cooperative confrontation model of UAV swarm with random spatial networks	WANG Ershen, GUO Jing, HONG Chen, REN Hongfan, CHEN Aidong, SHANG Xinna (10)
Quantitative method of influence of thermal runaway gas combustion on thermal runaway propagation of lithium-ion battery	ZHANG Qingsong, LIU Tiantian, ZHAO Ziheng (17)
Lie mechanism based on phase transfer entropy of EEG signals	WEI Sihong, ZHANG Jiaqi, LI Feng, KANG Qianruo, GAO Junfeng (23)
Research on multi-scale thermal safety of lithium-ion power battery system	ZHANG Yangang, GUO Xuxu, XUE Wenyang, ZHANG Zhiwen, LIANG Junfei, WANG Hua (31)
ORB-SLAM2 algorithm based on improved key frame selection	ZHANG Hong, YU Yuanzhuo, QIU Xiaotian (45)
Aerial object tracking algorithm for UAVs based on dual-attention shuffling	JIN Guodong, XUE Yuanliang, TAN Lining, XU Jiankun (53)
Multi-objective arrival sequencing and scheduling based on point merge system	ZHANG Junfeng, YOU Lubao, ZHOU Ming, YANG Chunwei, KANG Bo (66)
Behavior based MOOC user dropout predication framework	CHEN Hui, BAI Jun, YIN Chuantao, RONG Wenge, XIONG Zhang (74)
Application and prospect of additive manufacturing technology in manned space engineering	LIU Yang, ZHOU Jianping, ZHANG Xiaotian (83)
High temperature thermal conductivity estimation method of inorganic-organic hybrid phenolic composites	ZHANG Hongjun, LI Haiqun, KANG Honglin, LUO Jinling (92)
Boundary protection control method of helicopter power system based on flight test analysis	SONG Zhaorui, ZHAO Jingchao, YANG Wenfeng (100)
Method of improving tracking precision of planning path for impact rollers	SONG Erbo, YAO Yangping (106)
Air freight route planning based on transshipment under air alliance	YAN Yan, MA Xiaolai (115)
Joint attitude determination and spoofing detection method using three antennas	CHEN Jiajia, YUAN Hong, XU Ying, YU Fengzheng (128)
Amended SRCKF algorithm based on minimum variance of innovation	YANG Yongjian, GAN Yi, LI Chunhui, DENG Youwei, XIAO Bingsong, PENG Fang (138)
Fast detection method of mental fatigue based on EEG signal characteristics	ZHANG Peng, ZHOU Qianxiang, YU Hongqiang, WANG Chuan (145)
Piston pump fault diagnosis based on Siamese neural network with small samples	GAO Haohan, CHAO Qun, XU Zi, TAO Jianfeng, LIU Mingyang, LIU Chengliang (155)
Robust multiple watermarking algorithm for color image via BEMD and DCT	HU Kun, LI Cong, HU Jianping, WANG Xiaochao, DU Ling, WANG Hongfei (165)
Infrared radiation characteristics of carbon/glass hybrid composites under low-velocity impact	ZHAO Zhibin, YANG Zhengwei, LI Yin, KOU Guangjie, CHEN Jinshu, ZHANG Wei (177)
Performance of a novel polyvinyl alcohol/polyethylene glycol hydrogel for heat sink	YIN Jianbao, XING Yuming, HAO Zhaolong, WANG Shisong, WANG Zixian, HOU Xu (187)
Proximal policy optimization for UAV autonomous guidance, tracking and obstacle avoidance	HU Duoxiu, DONG Wenhan, XIE Wujie (195)
Noncontact damage imaging method in lattice sandwich structures	ZHAO Qian, FENG Kan (206)
Blind source extraction of complex non-Gaussian signals based on convolution linear mixture model	LI Miaomiao, LYU Xiaode, WANG Ning, LIU Zhongsheng (212)
Adaptively robust multi-sensor fusion algorithm based on square-root cubature Kalman filter	LI Chunhui, MA Jian, YANG Yongjian, XIAO Bingsong, DENG Youwei (220)

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0184

车辆与二轮车预碰撞场景分析及其 AEB 优化

徐向阳¹, 胡文浩¹, 张友², 王书翰^{1,*}, 何霞², 曹毅²

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 西华大学 汽车与交通学院, 成都 610039)

摘要: 车辆自动紧急制动 (AEB) 系统的应用存在大量误识别和不合理决策的挑战, 在典型场景下开展测试, 可以有效提高 AEB 的适用性。对国内外相关研究进行分析, 从 12 类车辆与二轮车预碰撞场景中提取 AEB 测试重点关注的 2 类涉及参与方转向的场景 (场景 S11 和 S12), 建立 2 类典型场景下的 Pre-scan 模型和量化描述二轮车相对于车辆运动轨迹的数学模型, 并对 AEB 的效用及改进方向进行定性和定量分析。结果表明: 场景 S11 和 S12 中, 二轮车在运动坐标系下的运动轨迹仅与车辆和二轮车速度比值相关; 场景 S11 中, 仅当车辆和二轮车速度比值取为 $(0.7888, +\infty)$ 时, 二轮车能够进入车辆 AEB 触发域, 将 AEB 视场角从 60° 增大到 90° , 可有效改善 AEB 触发效果, 速度比值范围从 $(0.7888, +\infty)$ 增加至 $(0.2033, +\infty)$; 场景 S12 中, 当二轮车和车辆速度比值取为 $(0, (\Delta v+2.46)/9.64)$ 时, 车辆 AEB 具有较好的触发效果, 将 AEB 触发宽度从 1.5 m 扩大至 2 m 时, 对 AEB 触发效果的改善幅度不大。研究成果可为 AEB 系统的改进优化提供技术支撑。

关键词: 车辆与二轮车冲突; 避撞安全; 自动紧急制动; 测试场景; 建模仿真

中图分类号: U461.91; U467.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0001-09

自动驾驶是实现交通“零伤亡、零事故”的必由之路, 先进驾驶辅助系统 (advanced driving assistance system, ADAS) 作为自动驾驶功能的重要组成部分已经大量投放市场, 其中, 自动紧急制动 (autonomous emergency braking, AEB) 系统在紧急工况下, 作为对车辆制动的主动干预手段备受关注。Fildes 等^[1]对典型低速场景下的 AEB 功能进行分析, 认为在 95% 的置信度下 AEB 系统能够避免 38% 的追尾事故。2017 年, 美国国家公路交通安全管理局 (NHTSA) 和美国公路安全保险协会联合发布报告称, 按照各汽车企业承诺的 AEB 装车率, 到 2025 年美国将避免 2.8 万起事故和 1.2 万人员受伤^[2]。然而, 在面对复杂、多样的交通冲突场景时, 其场景识别的准确度及决策算法的合理性面临着较大挑战, 严重制约着 AEB 系统的实际效用, 甚至会带来一定的安全隐患, 已有车辆因 AEB 系统对复杂道路交通场景的误识别与不合理决策问题构成的缺

陷实施了召回。

目前, 各国车辆测试评价体系中逐渐增加了对 AEB 功能的测试评价^[3-5], 初期主要针对车辆与车辆冲突的典型场景, 在发展过程中逐渐加入了车辆与行人冲突的典型场景。现阶段, 车辆与二轮车冲突的典型场景也在分阶段引入 AEB 功能的测试评价中。但是, 基于特定场地及场景的实车测试评价方法具有较强的局限性, 无法全面有效评测 AEB 系统安全性, 需要进一步基于实际数据挖掘典型场景, 扩大测试场景的覆盖度。

二轮车和行人在交通参与方中属于弱势道路使用者 (vulnerable road user, VRU), 然而相较于行人, 二轮车使用者具有移动速度快、行驶路线不确定性强等特征, 因此, 二轮车参与的事故更易导致人员伤亡。据世界卫生组织 2018 年统计报告显示, 全球自行车使用者和机动二、三轮车使用者占道路交通死亡比例高达 31%, 占 VRU 死亡比例达

收稿日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-07-04; 网络出版时间: 2021-07-20 09:27

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210719.1750.001.html

基金项目: 2020 年产业技术基础公共服务平台项目 (2020-0101-1-1); 中国标准化研究院项目

*通信作者. E-mail: wsh@buaa.edu.cn

引用格式: 徐向阳, 胡文浩, 张友, 等. 车辆与二轮车预碰撞场景分析及其 AEB 优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 1-9.

XU X Y, HU W H, ZHANG Y, et al. Pre-crash scenarios and AEB optimization between vehicle and two-wheeler [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 1-9 (in Chinese).

57%^[6]。中国二轮车保有量巨大,据统计,2017年中国道路交通事故死亡人数为63 772人,其中机动二轮车和自行车使用者死亡人数为29 459人,占道路交通事故死亡比例高达46.2%,占VRU死亡比例达63%^[7]。因此,在AEB测试中,也应重点关注二轮车参与的冲突场景。

本文研究了现有基于不同数据源、采用不同分析方法得到的典型汽车与二轮车冲突场景,分析提取法规和NCAP测试尚未涉及到的典型场景,并研究典型AEB系统在相关场景下面临的挑战及优化方向。

1 典型场景分析与提取

科研人员基于自然驾驶数据和事故深度调查数据等,采用数据统计、聚类分析等方法开展了典型汽车与二轮车冲突场景挖掘研究。

Liers^[8]基于德国事故深度研究(GIDAS)数据分析了机动二轮车(powerd two-wheelers, PTW)参与的事故特征,并综合事故发生的具体责任情况,得出10类最为频发的事故类型。李霖等^[9]基于上海道路采集的自然驾驶数据,对数据中涉及二轮车的典型危险工况,采用聚类分析方法获得7组典型危险场景特征,但相关场景特征元素不包括车辆相对运动方向,每一类均可以衍生多种场景组合。徐向阳等^[10]基于国家车辆事故深度调查体系(NAIS)事故数据,采用聚类分析方法挖掘出8类机动车路口事故场景。胡林等^[11]依托419例汽车与二轮车碰撞事故案例,采用聚类分析方法提取了11类典型逻辑场景。Nitsche等^[12]针对1 056例发生在路口


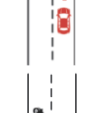
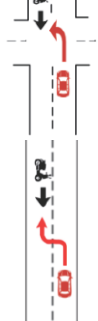
的交通事故案例,采用k-medoids聚类分析方法挖掘出15类典型丁字路口危险场景和6类十字路口逻辑场景。Sui等^[13]基于中国交通事故深入研究项目(CIDAS)事故深度调查数据,采用聚类分析方法分析了汽车与二轮车碰撞事故,得出4类典型二轮车与汽车冲突场景。Cao等^[14]基于中国NAIS事故深度调查数据,采用聚类分析方法分析了汽车与二轮车碰撞事故,得出4类典型汽车与二轮车冲突场景,由于数据源的不同,与Sui等^[13]的研究成果在场景特征方面存在一定差异。Hu等^[15]基于全球事故协调计划(IGLAD)数据,分析了以中国、欧洲、美国和印度为主要类别国家的事故特征,共得出7类典型汽车与二轮车冲突场景。

综上,提取汽车与二轮车运动和路段特征,共得出汽车与二轮车预碰撞场景12类,其中,汽车与二轮车相向运动的场景为3类,垂向运动的场景4类,同向运动的场景5类,如表1所示。





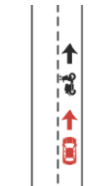
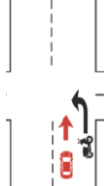


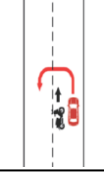
AEB系统对目标物的识别与决策过程仅限于碰撞发生前,即预碰撞阶段,由于场景S13与S31、S21与S23、S34与S35在预碰撞阶段车辆与二轮车相对位置基本相同,将相关场景进行合并。考虑到场景S24、S32、S33和S34中,二轮车未出现在车辆前部,与AEB关注的前向冲突场景不符,本文在后续分析中不予考虑。同时,文献[3-4]已将S21、S22和S31场景引入测试规程,不予进一步考虑。本文将重点关注交通参与双方路权冲突可能性较大的场景S11和S12,分析相关场景下AEB系统优化可能面临的挑战,相关场景均涉及参与方转弯,与文献[5]中规划的参与方转弯特征一致。

表1 汽车与二轮车预碰撞场景

Table 1 Pre-crash scenario between vehicle and two-wheeler

场景类型	序号	场景描述	场景图示
相向运动	S11	在十字路口,车辆直行与对向左转二轮车发生碰撞	
	S12	在十字路口,车辆左转与对向直行二轮车发生碰撞	
	S13	在直线路段,车辆向左变更车道与对向直行二轮车发生碰撞	

续表

场景类型	序号	场景描述	场景图示
垂向运动	S21	在十字路口, 车辆直行与从左侧出现直行二轮车发生碰撞	
	S22	在十字路口, 车辆直行与从右侧出现直行二轮车发生碰撞	
	S23	在十字路口, 车辆左转与从左侧出现直行二轮车发生碰撞	
	S24	在十字路口, 车辆左转与从右侧出现直行二轮车发生碰撞	
同向运动	S31	在直线路段, 车辆直行与前方直行二轮车发生追尾碰撞	
	S32	在十字路口, 车辆直行与同向左转二轮车发生碰撞	
	S33	在十字路口, 车辆左转与同向直行二轮车发生碰撞	
	S34	在十字路口, 车辆右转与同向直行二轮车发生碰撞。	
	S35	在十字路口, 车辆左转调头与同向直行二轮车发生碰撞	

2 场景 S11 下 AEB 触发及改进分析

2.1 AEB 模型构建

以车辆前部传感器为原点建立运动坐标系, 车辆正前方为 y 轴, 垂直行驶方向为 x 轴。典型 AEB 识别区域及触发模型如图 1 所示。当二轮车的运动轨迹进入触发区域内时, 会触发 AEB 系统采取全力制动。触发区域②由 3 个数据决定: 一是制动触发宽度 w ; 二是制动触发时间 (time to collision, TTC), 与触发距离 S 和相对运动速度 Δv 相关; 三是视场角 (field of view, FoV)。设定典型车辆 AEB 系统传感器及触发参数条件如表 2 所示。

在运动坐标系中, 标记不同场景下二轮车的运动轨迹, 随着时间的推移, 根据二轮车与车辆相对运动状态的不同, 二轮车呈现不同的运动轨迹, 不断接近乘用车。Cao 等^[14]对场景 S21 和 S22 的分析中提出, 二轮车相对乘用车的运动轨迹可拟合为直线 $y = ax$, 并在此基础上提出了 AEB 各关键参数之间的相互制约关系。

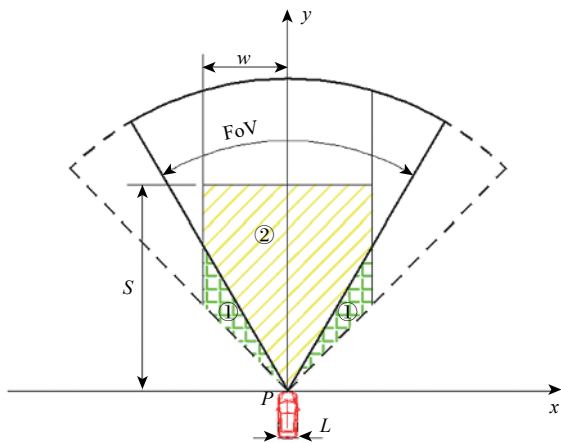


图 1 典型 AEB 触发模型

Fig. 1 Typical AEB trigger model

表 2 典型 AEB 参数条件

Table 2 Typical AEB parameter conditions

参数	FoV/(°)	触发宽度 w/m	探测距离 L/m	TTC _{max} /s
数值	60	1.5	40	1

2.2 场景 S11 构建及 AEB 触发情况分析

场景 S11 中, 在十字路口, 车辆直行与对向左转二轮车发生碰撞。由于二轮车存在直行和转弯 2 种运动状态, 重点考虑二轮车进入弯道之后的轨迹特征。设定二轮车转弯时刻的车辆位置为原点, 车辆运动方向为 y 轴, 垂直运动方向为 x 轴, 建立坐标系, 车辆与二轮车运动轨迹特征如图 2 所示。图中: d 为初始时刻二轮车相对于车辆的横向距离;

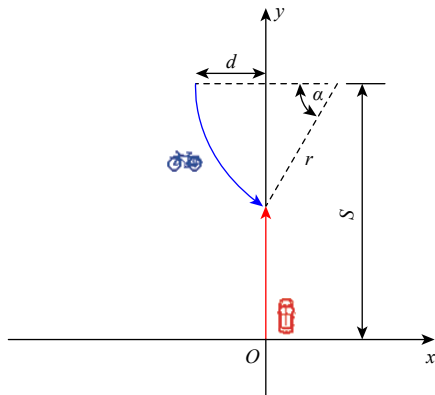


图 2 场景 S11 参与方运动轨迹特征

Fig. 2 Trajectory characteristics of participants in S11

S 为初始时刻二轮车相对于车辆的纵向距离; r 为二轮车转弯半径; α 为二轮车转弯角度。

根据中国道路交通安全法规的相关要求, 中国城市道路一般最高限速为 70 km/h, 其中在转弯工况下, 车辆受横向离心力作用, 最高速度为 30 km/h。因此, 在场景 S11 和 S12 中, 乘用车转弯工况下, 速度设置为 30 km/h, 直行工况下, 速度设置为 30 km/h、50 km/h 和 70 km/h; 二轮车转弯工况下, 速度设置为 20 km/h 和 30 km/h, 直行工况下, 速度设置为 20 km/h、30 km/h 和 50 km/h。

按照上述速度分布, 选取典型速度组合, 将场景 S11 中车辆和二轮车速度 (v_c, v_i) 分别设置为 (30, 20) km/h、(30, 30) km/h、(50, 30) km/h 和 (70, 20) km/h, 在 Pre-scan 中建模, 如图 3 所示, 导出二轮车相对汽车的位置信息, 并绘制相对运动轨迹, 如图 4 所示。

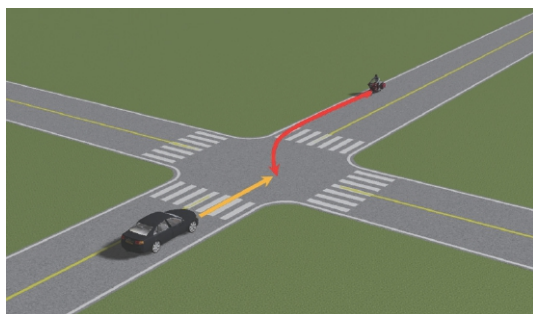


图 3 场景 S11 Pre-scan 模型

Fig. 3 Pre-scan model of scenario S11

二轮车沿图 4 所示轨迹靠近车辆, 若车辆 AEB 系统触发宽度 w 大于二轮车相对车辆的横向距离 d , AEB 避撞策略仅需考虑车辆和二轮车相对运动速度 Δv 即可。若 $w < d$ 时, AEB 避撞策略则需要分析二轮车靠近车辆的角度 β 与 FoV 之间的关系, 如图 4 可知, β 与 v_c 和 v_i 相关, 且在二轮车靠近车辆的过程中逐渐增大。

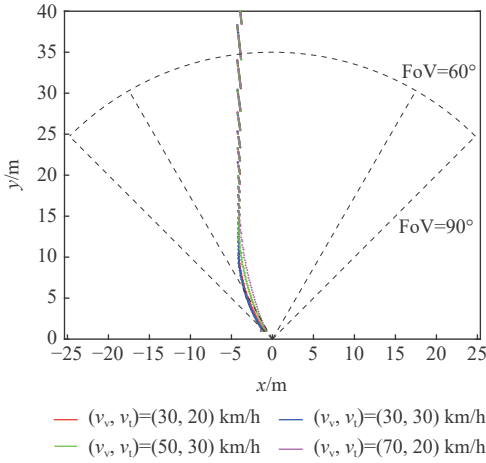


图 4 场景 S11 参与方相对运动轨迹

Fig. 4 Relative trajectories of participants in scenario S11

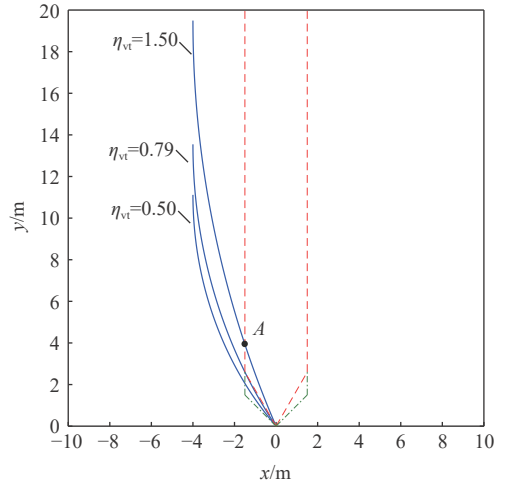


图 5 不同 η_{vl} 下场景 S11 参与方相对运动轨迹

Fig. 5 Relative participants trajectories of different η_{vl} in scenario S11

2.3 场景 S11 数学模型构建及 AEB 改进分析

为进一步量化分析 AEB 系统参数设置及改进方向,对场景 S11 中二轮车相对于车辆的运动轨迹进行建模分析。

二轮车在图 2 所示固定坐标系的轨迹表达如下:

$$\begin{cases} x_0 = f_0(t) = -r \cos(v_l t/r) + r - d \\ y_0 = g_0(t) = -r \sin(v_l t/r) + S \end{cases} \quad (1)$$

由于车辆为直线运动,运动坐标系的移动仅是平移,在运动坐标系下,二轮车的轨迹 (x, y) 与固定坐标系的轨迹 (x_0, y_0) 关系为

$$\begin{cases} x = x_0 - dx \\ y = y_0 - dy \end{cases} \quad (2)$$

式中: (dx, dy) 为动态坐标系相对固定坐标系的移动坐标。 $dx = 0, dy = v_v t$, 可得二轮车在运动坐标系下的轨迹表达式为

$$\begin{cases} x = f(t) = -r \cos(v_l t/r) + r - d \\ y = g(t) = -r \sin(v_l t/r) - v_v t + S \end{cases} \quad (3)$$

令 $t = t_0$ 时,车辆与二轮车发生碰撞,如图 2 所示,可得如下方程组:

$$\begin{cases} S = v_v t_0 + \sqrt{r^2 - (r - d)^2} \\ \alpha_0 = -\arccos(1 - d/r) \\ -r\alpha_0 = v_l t_0 \end{cases} \quad (4)$$

令二轮车转弯半径 $r = 8 \text{ m}$,二轮车与汽车横向距离 $d = 4 \text{ m}$,代入方程组 (4) 可得 $S = 6.93 + 8.38v_v/v_l$ 。进一步代入表达式 (3), 可得

$$\begin{cases} x = f(t) = -8 \cos(v_l t/8) + 4 \\ y = g(t) = -8 \sin(v_l t/8) - v_v t + 6.93 + 8.38v_v/v_l \end{cases} \quad (5)$$

消元分析可知,相对运动轨迹仅与 v_v/v_l 相关,令 $\eta_{vl} = v_v/v_l$, 绘制不同 η_{vl} 下二轮车相对于车辆的行驶轨迹,如图 5 所示。

进一步分析二轮车相对车辆的运动轨迹。若要二轮车进入车辆 AEB 触发域,则运动轨迹与 $x = -1.5 \text{ m}$ 的交点 A 应位于触发域边界上,即 $y > w \cdot \cot(\text{FoV}/2)$ 。令 $f(t_1) = -1.5$, 可得 $g(t_1) = 1.12 + 1.88 \eta_{vl}$ 。令 $g(t_1) > w \cdot \cot(\text{FoV}/2)$ ($\text{FoV} = 60^\circ$), 可得 $\eta_{vl} > 0.7888$, 即当 $\eta_{vl} > 0.7888$ 时,二轮车能够进入车辆 AEB 触发域。

若增加 FoV, 可增加车辆的探测范围,令 $\text{FoV} = 90^\circ$, 可得 $\eta_{vl} > 0.2023$, 即当 $v_v/v_l > 0.2023$ 时,二轮车能够进入车辆 AEB 触发域,车辆与二轮车速度比值范围得到大幅度提升。

与此同时,若要车辆 AEB 具有最佳的 AEB 触发效果,则需 $g(t_1) \geq \text{TTC} \cdot \Delta v$, 即 $\eta_{vl} > (\Delta v - 1.12)/1.88 > 0.7888$, 其中 Δv 为二轮车相对于车辆的纵向运动速度。若 Δv 较高时,需要进一步提高 v_v/v_l 值,方可使车辆 AEB 达到最佳触发效果。

可见,在现有 AEB 配置条件下,场景 S11 中 AEB 能否触发与二轮车速度和车辆速度的比值直接相关, η_{vl} 越大,车辆传感器越容易探测到二轮车。而通过增加 AEB 系统 FoV, 可大幅增大车辆的速度范围,有效增加车辆对类似场景的应对能力。与此同时,若要 AEB 达到最佳触发效果,需要综合考虑车辆和二轮车的纵向相对速度,随着纵向相对速度增大,需要 η_{vl} 值越大。

3 场景 S12 下 AEB 触发及改进分析

3.1 场景 S12 构建及 AEB 触发情况分析

场景 S12 中,在十字路口,车辆左转与对向直行二轮车发生碰撞。仅考虑车辆进入弯道之后的轨迹特征,设定车辆转弯时的车辆位置为原点,车辆运动方向为 y 轴,垂直运动方向为 x 轴,建立坐标系,车辆与二轮车运动轨迹如图 6 所示。

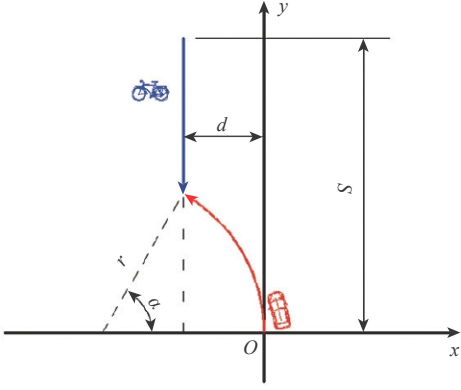


图6 场景 S12 参与方运动特征

Fig. 6 Trajectory characteristics of participants in S12

将场景 S12 中二轮车和车辆速度 (v_v, v_c) 分别设置为 (30, 20) km/h、(30, 30) km/h 和 (30, 50) km/h, 在 Pre-scan 中建模如图 7 所示, 导出二轮车相对汽车的位置信息, 并绘制相对运动轨迹, 如图 8 所示。

二轮车沿图 8 所示轨迹靠近车辆, 在设置典型速度下, 当 FoV=60° 时, 能够满足车辆对二轮车的探测要求。可见, 在场景 S12 下, 车辆转弯并没有对 FoV 提出更为严苛的探测要求。然而, 二轮车运动轨迹有超出 AEB 触发宽度 w 的情况, 可能会降低

AEB 制动效果。

3.2 场景 S12 数学模型构建及 AEB 改进分析

对二轮车相对车辆的运动轨迹建立数学模型, 二轮车在图 6 所示固定坐标系下的运动轨迹表达为

$$\begin{cases} x_0 = -d \\ y_0 = S - v_c t \end{cases} \quad (6)$$

运动坐标系随着车辆移动, 运动轨迹既有平移, 也有转动, 则在运动坐标系下二轮车的轨迹 (x, y) 与固定坐标系的轨迹 (x_0, y_0) 关系为

$$\begin{cases} x = x_0 \cos \alpha - y_0 \sin \alpha - dx \cos \alpha + dy \sin \alpha \\ y = x_0 \sin \alpha + y_0 \cos \alpha - dx \sin \alpha - dy \cos \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中: α 和 (dx, dy) 分别为动态坐标系随车辆相对固定坐标系的转角和移动坐标。 $\alpha = -v_c t / r$, $dx = -(r - r \cos \alpha)$, $dy = r \sin(-\alpha)$, 代入表达式 (7) 可得

$$\begin{cases} x = f(t) = d \cos(-v_c t / r) - (S - v_c t) \cdot \sin(-v_c t / r) - r(\cos(-v_c t / r) - 1) \\ y = g(t) = d \sin(-v_c t / r) + (S + r - v_c t) \sin(-v_c t / r) \end{cases} \quad (8)$$

令 $t = t_0$ 时, 车辆与二轮车在运动坐标系原点处发生碰撞, 如图 6 所示, 可得如下方程组:

$$\begin{cases} S = v_c t_0 + \sqrt{r^2 - (r - d)^2} \\ \alpha_0 = -\arccos(1 - d/r) \\ -r\alpha_0 = v_c t_0 \end{cases} \quad (9)$$

令二轮车转弯半径 $r = 8$ m, 二轮车与汽车横向距离 $d = 4$ m, 代入方程组 (9), 计算可得 $S = 6.93 + 8.38v_c/v_v$, 进一步代入表达式 (8) 可得

$$\begin{cases} x = f(t) = 4 \cos(v_c t / 8) - (6.93 + 8.38v_c/v_v - v_c t) \cdot \sin(-v_c t / 8) - 8 \\ y = g(t) = -4 \sin(v_c t / 8) + (6.93 + 8.38v_c/v_v - v_c t) \cdot \cos(-v_c t / 8) \end{cases} \quad (10)$$

对表达式 (10) 进行化简分析可知, 二轮车相对于车辆的轨迹方程 $h(x, y)$ 仅与 v_c/v_v 相关, 令 $v_c/v_v = \rho_w$, 进一步化简消元可得

$$\begin{aligned} h(x, y) = y + 4 \sin \left\{ \left[6.93 + 8.38\rho_w - \sqrt{(x+8)^2 + y^2 - 16} \right] / (8x) \right\} - \\ \sqrt{(x+8)^2 + y^2 - 16} \cos \left\{ \left[6.93 + 8.38\rho_w - \sqrt{(x+8)^2 + y^2 - 16} \right] / (8x) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

绘制不同 ρ_w 下二轮车相对于车辆的行驶轨迹, 如图 9 所示。

由于车辆触发宽度 $w = 1.5$ m, 令 $x = f(t_1) = 1.5$ m, 则 $g(t_1)$ 为二轮车轨迹与 $x = 1.5$ m 的交点。如图 9 所示, 若 $g(t_1)$ 不存在或为单值, 则二轮车轨迹从左侧或者前侧进入触发域后, 始终保持在触发域内, AEB 具有较好的制动效果; 若 $g(t_1)$ 为双值, 则表明二轮

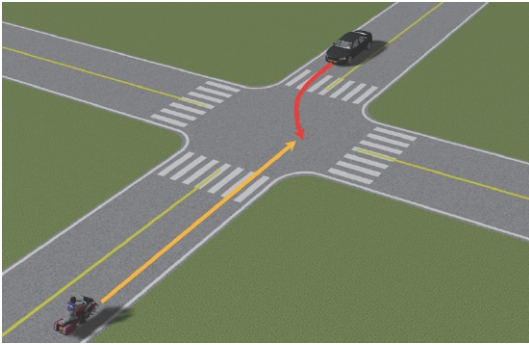


图7 场景 S12 Pre-scan 模型

Fig. 7 Pre-scan model of scenario S12

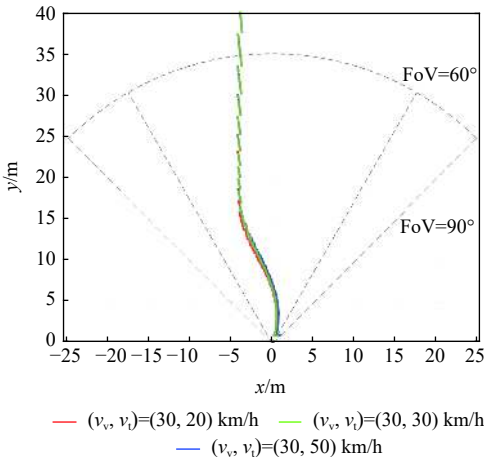


图8 场景 S12 参与方相对运动轨迹

Fig. 8 Relative trajectories of participants in scenario S12

车轨迹有从图示右侧进入触发域的情况。针对方程 (11), 令 $x = 1.5 \text{ m}$, 绘制 y 与 ρ_{tv} 的关系曲线, 如图 10 所示。

从图 10 中曲线趋势可知, $\rho_{tv} = 1.1$ 时, y 为单值, 即二轮车在运动坐标系下的轨迹与 $x = 1.5 \text{ m}$ 相切。随着 ρ_{tv} 增大, y 呈直线上升, 两者关系曲线近似为 $y = 9.64\rho_{tv} - 2.46$ 。由此可知, 当 $0 < \rho_{tv} \leq 1.1$ 时, 二轮车轨迹从触发域左侧或者前侧进入触发域, 并始终保持在触发域内, AEB 具有较好的制动效果。若 $\rho_{tv} > 1.1$, 二轮车运动轨迹与 $x = \pm 1.5 \text{ m}$ 有 3 个交点, 分别为 A、B 和 C, 如图 9 所示。若要车辆 AEB 具有较好的制动效果, 则需交点 A 位于触发域边界上, 即 $y < TTC \cdot \Delta v$, 进一步计算可知, 当 $1.1 < \rho_{tv} < (\Delta v + 2.46)/9.64$ 时, 车辆 AEB 具有较好的触发效果, 但由于二轮车进入 AEB 触发域后再次离开触发域, 存在误判的可能性。

由于触发宽度 w 是制约场景 S12 中 AEB 触发效果的关键参数, 将触发宽度 w 从 1.5 m 扩大至 2 m ,

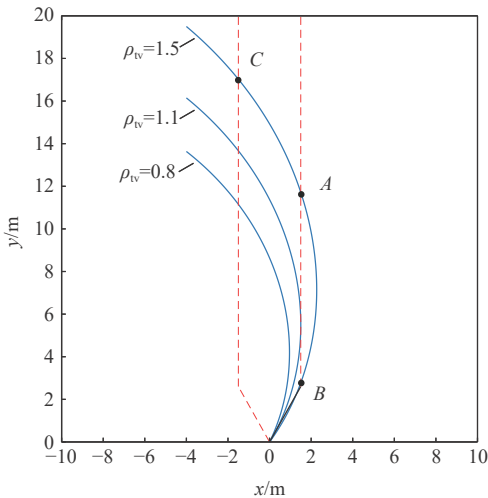


图 9 不同 ρ_{tv} 下场景 S12 参与方相对运动轨迹

Fig. 9 Relative participants trajectories of different ρ_{tv} in scenario S12

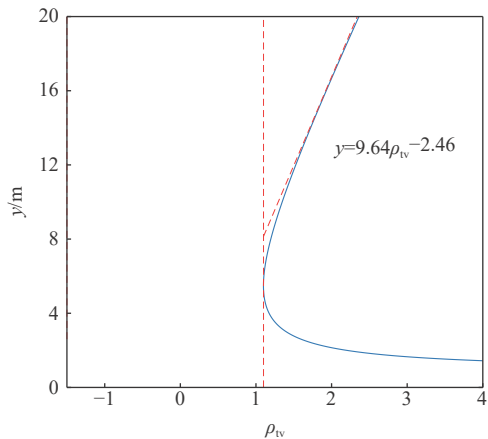


图 10 场景 S12 下 y 与 ρ_{tv} 的关系

Fig. 10 Relationship between y and ρ_{tv} in scenario S12

若要二轮车运动轨迹从左侧或者前侧进入触发域后, 始终保持在触发域内, ρ_{tv} 取值范围从 $(0, 1.1]$ 增加至 $(0, 1.36]$, 改善幅度不大, 且 w 增加会增加 AEB 的误动作, 因此不建议通过调整触发宽度来改善 AEB 触发域。

4 结 论

本文通过对国内外相关研究进行分析, 提取典型车辆与二轮车预碰撞场景, 通过建立 Pre-scan 模型和数学模型的方式对典型 AEB 系统在相关场景下的效用及改进方向进行定性和定量分析, 得出如下结论:

1) 分析国内外基于不同数据、采用不同方法研究的车辆与二轮车事故场景, 共得到汽车与二轮车预碰撞功能场景 12 类, 其中汽车与二轮车相向运动的场景为 3 类, 垂向运动的场景 4 类, 同向运动的场景 5 类。

2) 面向车辆典型 AEB 系统测试需求, 排除国内外标准法规已经纳入测试规程的场景, 共提取 2 类典型场景, 2 类场景均涉及参与方转弯, 与 Euro NCAP 2025 路线图中规划的参与方转弯特征一致。同时, 从目标物跟踪和预测的角度分析, 对车辆感知与决策算法可能有一定的挑战。

3) 通过建立数学模型的方式对场景 S11 和 S12 进行分析可知, 在车辆运动坐标系下, 二轮车的运动轨迹仅与车辆和二轮车速度比值相关。不同场景下, 二轮车运动轨迹特征差异性较大, 在相同场景下, 根据速度比值的不同, 运动轨迹存在一定差异。

4) 针对场景 S11, 在设定 AEB 触发模型和场景部分元素取值下, 仅当 $\eta_{vt} > 0.7888$ 时, 二轮车能够进入车辆 AEB 触发域。若将视场角 FoV 从 60° 增大到 90° , 可有效改善 AEB 触发效果, 二轮车进入触发域时对 η_{vt} 范围的要求从 $(0.7888, +\infty)$ 增加至 $(0.2033, +\infty)$ 。与此同时, 若要车辆 AEB 具有最佳的触发效果, 则需 $\eta_{vt} > (\Delta v - 1.12)/1.88 > 0.7888$, 随着相对运动速度 Δv 增大, η_{vt} 需要进一步提高。

5) 针对场景 S12, 在设定 AEB 触发模型和场景部分元素取值下, 当 $0 < \rho_{tv} \leq 1.1$ 时, 车辆 AEB 具有较好的触发效果。同时, 当 $1.1 < \rho_{tv} < (\Delta v + 2.46)/9.64$ 时, 仍能保持较好的触发效果, 由于二轮车进入 AEB 触发域后离开触发域, 存在一定误判的可能性。将触发宽度 w 从 1.5 m 扩大至 2 m , 若要二轮车运动轨迹从左侧或者前侧进入触发域后, 始终保持在触发域内, ρ_{tv} 取值范围从 $(0, 1.1]$ 增加至 $(0, 1.36]$, 增加触发宽度 w 对 AEB 触发效果的改善幅度不大, 且会增加 AEB 误触发的可能。

本文采用数据建模的方法对典型场景 S11 和 S12 下 AEB 的触发情况进行分析,为场景的定性分析和定量分析提供参考,同时为 AEB 系统的优化方向提供技术支撑。

致谢 感谢国家市场监督管理总局缺陷产品管理中心对本文研究工作的支持。

参考文献 (References)

- [1] FILDES B, KEALL M, BOS N, et al. Effectiveness of low speed autonomous emergency braking in real-world rear-end crashes[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2015, 81: 24-29.
- [2] NHTSA. Manufacturers make progress on voluntary commitment to include automatic emergency braking on all new vehicles[EB/OL]. (2017-12-21)[2021-04-10].<https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-iihs-announcement-aeb>.
- [3] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP管理规则(2021年版)[S]. 天津: 中国汽车技术研究中心有限公司, 2020. China Automotive Technology & Research Center Company Limited. C-NCAP management regulation(2021)[S]. Tianjin: China Automotive Technology & Research Center Company Limited, 2020(in Chinese).
- [4] Euro NCAP. Test protocol AEB VRU systems[S]. [S.l.]: Euro NCAP, 2018.
- [5] Euro NCAP. Euro NCAP 2025 roadmap[S]. [S.l.]: Euro NCAP, 2018.
- [6] World Health Organization. Global status report on road safety 2018[R]. Geneva: World Health Organization, 2018.
- [7] 中华人民共和国公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2017年度)[R]. 北京: 中华人民共和国公安部交通管理局, 2018. Traffic Administration Bureau of the Ministry of Public Security of the People's Republic of China. The People's Republic of China road traffic accident annual statistic report (2017) [R]. Beijing: Traffic Administration Bureau of the Ministry of Public Security of the People's Republic of China, 2018(in Chinese).
- [8] LIERS H. Analysis of the accident scenario of powered two-wheelers on the basis of real-world accidents[C]//Expert Symposium on Accident Research (ESAR), 2012: 101-115.
- [9] 李霖, 朱西产, 刘颖, 等. 涉及骑车人的典型交通危险场景[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 42(7): 1082-1087. LI L, ZHU X C, LIU Y, et al. Typical traffic risk scenarios relate to pedal cyclist[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 42(7): 1082-1087(in Chinese).
- [10] 徐向阳, 周兆辉, 胡文浩, 等. 基于事故数据挖掘的AEB路口测试场景[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46 (10): 1817-1825. XU X Y, ZHOU Z H, HU W H, et al. Intersection test scenarios for AEB based on accident data mining[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46 (10): 1817-1825(in Chinese).
- [11] 胡林, 易平, 黄晶, 等. 基于真实事故案例的自动紧急制动系统两轮车测试场景研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(12): 1435-1446. HU L, YI P, HUANG J, et al. A research on test scenes of two-wheeled vehicles for automatic emergency braking system based on real accident cases[J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(12): 1435-1446(in Chinese).
- [12] NITSCHKE P, THOMAS P, STUETZ R, et al. Pre-crash scenarios at road junctions: A clustering method for car crash data[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2017, 107: 137-151.
- [13] SUI B, LUBBE N, BARGMAN J, et al. A clustering approach to developing car-to-two-wheeler test scenarios for the assessment of automated emergency braking in China using in-depth Chinese crash data[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 132: 105242.
- [14] CAO Y, XIAO L Y, DONG H L, et al. Typical pre-crash scenarios reconstruction for two-wheelers and passenger vehicles and its application in parameter optimization of AEB system based on NAIS database[C]//Proceedings of the 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), 2019, 19: 0272.
- [15] HU W H, XU X Y, ZHOU Z H, et al. Mining and comparative analysis of typical pre-crash scenarios from IGLAD[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2020, 145: 105699.

Pre-crash scenarios and AEB optimization between vehicle and two-wheeler

XU Xiangyang¹, HU Wenhao¹, ZHANG You², WANG Shuhan^{1,*}, HE Xia², CAO Yi²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The application of autonomous emergency braking (AEB) is faced with challenges of misidentification and unreasonable decision. Testing under typical scenarios can effectively improve the applicability of AEB. Based on the analysis of relevant research literature, two typical scenarios (S11 and S12) involving participants turning that AEB test focuses on are extracted from 12 types of two-wheeler and vehicle pre-crash scenarios. Pre-scan model and mathematical model are established to conduct qualitative and quantitative analysis on the effectiveness and improvement direction of AEB under the typical scenarios. In scenario S11 and S12, the trajectory of the two-wheeler in the moving coordinate system is only related to the speed ratio between the vehicle and the two-wheeler. In scenario S11, only when the speed ratio of vehicle to two-wheeler is $(0.788\ 8, +\infty)$, the two-wheeler can enter the AEB triggering domain. By increasing the field of view from 60° to 90° , the AEB can be effectively improved, and the range of speed ratio increases from $(0.788\ 8, +\infty)$ to $(0.203\ 3, +\infty)$. In scenario S12, when the speed ratio of two-wheeler to vehicle is $(0, (\Delta v + 2.46)/9.64)$, the AEB has a good triggering effect. When the triggering width of AEB is expanded from 1.5 m to 2 m, the AEB triggering effect is not greatly improved. The research methods and conclusions can provide technical support for AEB optimization.

Keywords: vehicle and two-wheeler collision; collision avoidance safety; autonomous emergency braking; test scenario; modeling and simulation

Received: 2021-04-12; Accepted: 2021-07-04; Published Online: 2021-07-20 09:27

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210719.1750.001.html

Foundation items: Industrial Technology Basic Public Service Platform of 2020 (2020-0101-1-1); China National Institute of Standardization Foundation

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

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0206

基于随机空间网络的无人机集群协同对抗模型

王尔申^{1,2}, 郭靖¹, 宏晨^{3,4,*}, 任虹帆¹, 陈艾东^{3,4}, 商新娜^{3,4}

(1. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 沈阳 110136; 2. 沈阳航空航天大学 辽宁通用航空研究院, 沈阳 110136;
3. 北京联合大学 北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101; 4. 北京联合大学 机器人学院, 北京 100101)

摘 要: 无人机集群协同对抗是未来作战的发展方向, 为了突出集群强进攻、难防御、高灵活的优势, 对高维度、强动态、非线性无人机集群的协同对抗的复杂系统进行有效建模是一个重要的研究方向。应用复杂空间网络理论构建了对抗双方的协同网络、对抗网络及协同对抗网络, 模拟无人机集群的协同侦察场景, 分别在二维和三维空间中建立了无人机集群协同对抗模型; 分析了影响杀伤率的因素, 提出了杀伤率与空间距离的解析式; 通过网络级联效应分析了无人机集群协同网络的鲁棒性, 验证了所提无人机集群协同对抗模型的有效性, 为无人机集群协同对抗的建模提供了一种新思路。

关键词: 无人机集群; 协同对抗; 随机空间网络; 复杂网络; 级联效应

中图分类号: V279⁺.2; TN711.5; TP391.9

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0010-07

目前, 无人机在战场中发挥越来越重要的作用。无人机正在重新定义战争。无人机集群以难防御、强进攻、低成本、协同对抗、使用灵活等优势越来越受到重视^[1]。Grassé^[2]通过研究虫群的群体行为, 最早提出了“集群”的概念。无人机集群可以模仿生物集群行为, 通过无人机间的信息传递与协同, 能在各种复杂险恶的环境下完成多样性任务。无人机集群技术将成为一项足以改变战争模式和战争规则的颠覆性技术。

无人机集群技术已成为主要军事强国角逐的热点。在无人机集群协同方面, 文献[3]将博弈论应用于多智能体协同合作问题, 设计了一个分布式优化算法。文献[4]针对未知空域中的无人机路径规划问题研究了基于遗传算法的操作条件概率自动机 (genetic algorithm-operant conditioning probabilistic automaton, GA-OCPA) 学习系统。文献[5]通过

对无人机历史搜索信息、节点重要性和运动学约束等条件的综合分析完成无人机运动规划。文献[6]研究了一种无人机在线协同航迹规划方法, 可以快速生成符合协同时序要求的协同航迹。文献[7]研究了基于耦合度的启发式优先规划方法 (coupling-degree-based heuristic prioritized planning, CDH-PP), 提高了无人机集群协同路径生成的效率和鲁棒性。文献[8]针对已知地形下的无人机集群避撞问题, 研究了一种多目标最优路径分配算法。文献[9]研究了一种基于 Lyapunov 稳定性理论的无人机规避或跟踪目标运动导引方法。文献[10]针对无人机集群侦察任务研究基于离散粒子群优化 (discrete particle swarm optimization, DPSO) 的路径规划算法。文献[11]针对无人机集群网络协同通信的节点布局问题, 研究了多跳优先队列方法, 引入强化学习得到了基于深度 Q 学习 (deep Q-learning, DQN) 的无

收稿日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-06-04; 网络出版时间: 2021-09-01 16:22

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210901.1536.001.html

基金项目: 国家重点研发计划 (2018AAA0100804); 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); 辽宁省“兴辽英才计划” (XLYC1907022); 北京市教育委员会科技计划 (KM201811417005, KM201911417010); 辽宁省应用基础研究计划 (2022020502-JH2/1013); 沈阳市科技计划 (22-322-3-34)

* 通信作者. E-mail: hchchina@sina.com

引用格式: 王尔申, 郭靖, 宏晨, 等. 基于随机空间网络的无人机集群协同对抗模型 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 10-16.

WANG E S, GUO J, HONG C, et al. Cooperative confrontation model of UAV swarm with random spatial networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 10-16 (in Chinese).

人机网络链路优化模型。文献 [12] 针对无人机集群网络的协同通信问题,研究了自适应多集群 leader-follower 的协同优化模型。

在无人机集群对抗方面,文献 [13] 提出了基于博弈论的面向多无人机追逃的最优机动决策算法。文献 [14] 采用两步裁定法模拟无人机双方对战,并利用文化基因算法模拟目标匹配,实现了超视距无人机目标对抗。文献 [15] 在单无人机有限控制算法的基础上,提出了一种多无人机自主控制算法,以提高无人机集群在对抗中的成功率。文献 [16] 利用蜂群算法提出了一套完整的无人机集群协同对抗软件体系架构。文献 [17] 针对不同机动能力的无人机群体的攻防对抗,提出了基于强化学习的多无人机强化学习方法,无人机可通过自主学习提升协同对抗决策效能。

无人机集群协同对抗是一个高维度、强动态的非线性复杂系统。复杂网络是研究复杂系统的有力工具。复杂空间网络指节点位于具有度量的空间中,是受一定几何形状限制的嵌入到空间中的网络^[18]。空间网络中的节点具有空间位置属性,边具有空间距离属性。随机空间网络是指网络中节点被随机生成在一个空间坐标位置,节点间的空间距离也是随机生成的^[19]。

现有的无人机集群模型大多基于群体内部协同^[5-7],大规模无人机集群协同对抗的模型相对较少。使用随机空间网络模拟无人机集群对抗场景,可以充分利用现有的复杂网络理论,具有算法简单、空间布局灵活、战场初始态势随机、更接近于多无人机混战场景等优点。本文将随机空间网络引入到无人机集群协同对抗场景中,将对抗的无人机集群区分为红蓝双方,每架无人机为网络中的一个节点,无人机间的协同对抗关系抽象为网络中的边,边的长度代表无人机间的空间距离,构建无人机集群协同对抗网络 (cooperative confrontation networks of UAVs, CCN-UAVs), 基于网络级联效应分析无人机集群协同网络的鲁棒性,并通过仿真验证无人机集群协同对抗模型的有效性。

1 作战场景与网络模型

1.1 作战场景

蓝方无人机为察打一体型无人机,任务为协同侦察,主要探测敌方防御情况与侦察敌方地面部队,需要将侦察得到的大量信息带回基地。红方无人机为打击型无人机,任务为巡视是否有敌方潜入,并在发现敌军后进行攻击。红蓝无人机集群对抗场景如图 1 所示。

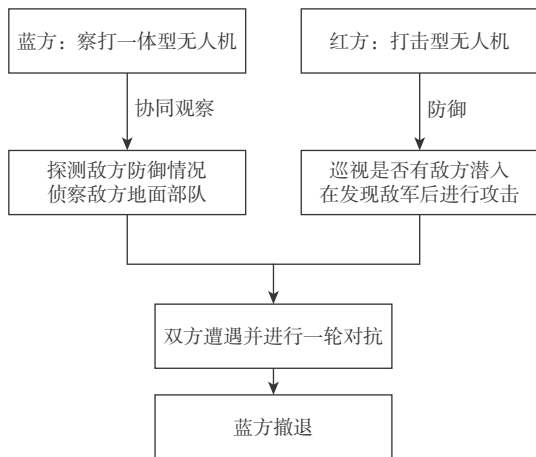


图 1 对抗场景示意图

Fig. 1 Diagram of confrontation scenario

1.2 协同对抗网络模型

随机空间网络具有 2 个重要参数:空间维度和空间中节点的距离阈值。初始时, n 个节点被随机生成在一个可设定维度的空间中,同时可根据需要设定节点的位置与分布方式。如果 $d(u,v) \leq R$,则节点 u 与节点 v 之间将存在连边。其中, d 为 2 个节点之间的欧氏距离, R 为节点间的距离阈值。

在二维空间与三维空间中,分别采用全连接方式构建红蓝双方的无人机集群协同对抗网络。网络中的每个节点视为无人机,一定空间距离内的无人机间存在连边表示其协同或对抗关系,互为友机间的连边为协同关系,互为敌机间的连边为对抗关系;设定网络总节点数为 n ,在空间中节点位置分布服从 $X \sim N(0,4)$ 高斯分布,各节点属性随机分配,红蓝双方节点数均为 $n/2$,得到红蓝双方无人机集群协同对抗网络 CCN-UAVs;将蓝方节点组成的网络单独提取出来并保存,此网络为蓝方无人机集群协同网络 (cooperative network of UAVs, CN-UAVs);将红蓝双方无人机集群协同对抗网络中所有互为友机间的连边 (即相同颜色节点之间的连边) 删除,构成红蓝双方无人机集群对抗网络。以 10 个节点为例展示了构建红蓝双方无人机集群网络的过程,如图 2 所示,蓝方节点用蓝色实心点表示,红方节点用红色空心点表示。

1.3 杀伤率的衰减

考虑双方的杀伤率受空间距离的影响,2 个对抗无人机的空间距离越大,杀伤率就越低。引入衰减因子 γ ,其表达式为

$$\gamma = \begin{cases} 1 & d_{rb} \leq d_{\min} \\ \frac{d_{\max} - d_{rb}}{d_{\max} - d_{\min}} & d_{\min} < d_{rb} < d_{\max} \\ 0 & d_{rb} \geq d_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_{\max} 为网络中对抗节点的空间距离阈值,超过

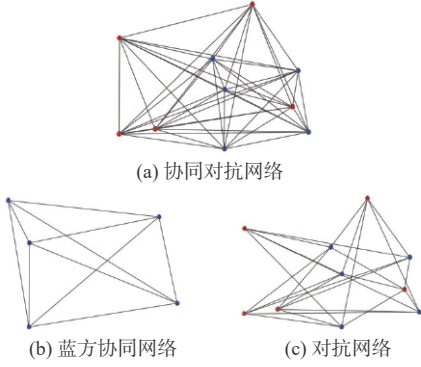


图2 网络结构

Fig. 2 Network structure

该距离将不再对抗; d_{tb} 为 2 个对抗无人机的实际空间距离; d_{min} 为无杀伤率衰减的最小空间距离。

双方对抗过程中的真实杀伤率 r_{real} 为

$$r_{real} = r\gamma \quad (2)$$

式中: r 为无衰减的初始杀伤率。

可以看出, $d_{tb} = d_{min}$ 时, $\gamma = 1$, 即不衰减。当 $d_{tb} = d_{max}$ 时, $\gamma = 0$, 2 个无人机将无法杀伤对方。

1.4 网络鲁棒性评价指标

鲁棒性^[20-21]是复杂网络的一项重要特征,指网络在受到外界攻击或内部结构由于某种原因发生变化时,还可以保持其功能的能力。如果网络中的部分节点(边)被移除后,该网络中的大部分节点(边)仍然可以保持正常功能,则称这个网络是鲁棒的。复杂网络的级联效应是指网络中一个或者少数几个节点或边的失效会通过节点之间的耦合关系引发其他节点也发生失效,进而产生连锁反应,导致网络中相当一部分节点甚至整个网络的崩溃^[22]。

为了分析蓝方 CN-UAVs 的鲁棒性,引入无人机数据携带量与数据容量上限参数,通过被击落无人机在坠毁前的数据分配过程来触发网络的级联效应。使用网络失效大小作为评价蓝方 CN-UAVs 鲁棒性的指标,其中网络失效大小 S 定义为

$$S = 1 - \frac{N'}{N} \quad (3)$$

式中: N' 为蓝方 CN-UAVs 中当前剩余节点数; N 为初始蓝方 CN-UAVs 总节点数。

仿真开始时,设置双方无人机各自的能力参数并分配任务杀伤率;对抗过程中,设置每架无人机选择单个敌机进行对抗,对抗结束后,蓝方无人机撤离,记录被击落的无人机;在对抗结束后,观察蓝方无人机集群对探测数据的分配及因被分配超出可容量(可容量指数数据容限减自身数据携带量)的数据而触发的级联效应。计算蓝方 CN-UAVs 失效大小 S 。

总体步骤如下:

步骤 1 基于随机空间网络构建红蓝双方的 CN-UAVs。

步骤 2 双方进行对抗,被击落的蓝方无人机在坠毁前分配探测数据。

步骤 3 在蓝方 CN-UAVs 中寻找是否有被分配数据量超出其可容量的无人机,若存在,则该部分无人机将因为满载而在网络中被视为失效,并将其被分配的超出可容量的数据平均分配给其他相邻友机。

步骤 4 重复步骤 3,直至蓝方 CN-UAVs 中不存在被分配超出可容量数据的无人机或全部无人机失效,计算蓝方 CN-UAVs 失效大小,整个过程结束。

2 仿真结果

在仿真实验中,设定整体空间足够大,总节点数设置为 100,其中 50 个节点为红方无人机,另外 50 个节点为蓝方无人机;蓝方每架无人机初始执行协同侦察任务探测到的数据量为 5;时间步从第 10 步开始,第 11 步为双方无人机对抗过程,第 12 步及之后为因数据容限所触发的级联效应过程。

2.1 二维空间下仿真结果

在二维空间中,不考虑杀伤率衰减,真实杀伤率为设定值,以蓝方 CN-UAVs 为主体,绘制红方无人机具备不同杀伤率的情况下,时间步 t 和蓝方网络失效大小 S 的关系,如图 3 所示。设置蓝方无人机数据容量上限为 7,红方无人机杀伤率分别为 0.2、0.4、0.6、0.8。图中结果为 200 次独立实验取得的平均值,误差棒表示标准差。

由图 3 可以明显看出,红方无人机的杀伤率越高,蓝方在第 11 时间步时被击落的无人机数量越多,且后续触发的级联效应越强,即成功带回基地

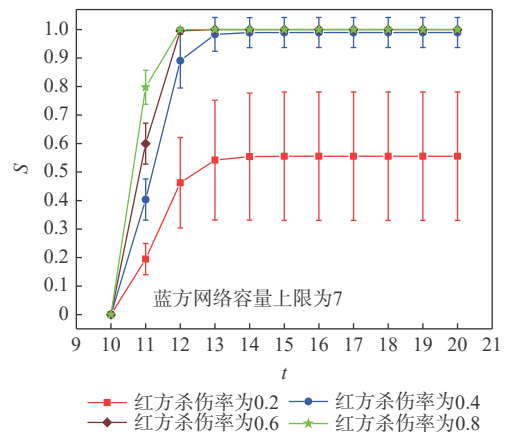


图3 二维空间中不同红方杀伤率下网络失效大小与时间步的关系

Fig. 3 Relationship between failed size and time step under different hit rates of red UAVs in 2D

的数据越少。因此, 针对红方 CN-UAVs 来说, 若要尽可能多得拦截敌方无人机, 阻止敌方将数据带回, 则应尽力提高攻击的杀伤率。

无人机具备的数据容量上限是触发级联效应的根源, 蓝方无人机为确保将更多数据带回基地, 其在坠毁前会将自身携带的全部数据平均分配给相邻友机, 正因为此过程, 一部分无人机可能会被分配到超出其可容量的数据, 这部分无人机将因满载而在网络中被视为失效。为了探寻无人机数量容量限对此过程的影响, 绘制了蓝方网络失效大小 S 和时间步 t 的关系, 如图 4 所示。设置红方无人机杀伤率为 0.5, 蓝方无人机数据容量上限分别为 6、8、10、12、16。仿真结果为 200 次独立实验取得的平均值, 误差棒表示标准差。

当容量上限达到一定值时 (图 4 中容量上限为 16, 为容量上限临界值, 即容量上限 16 的网络失效大小 S 基本不变), 对抗后的级联效应基本不会再使蓝方 CN-UAVs 失效大小 S 发生改变。因此, 针对蓝方 CN-UAVs 来说, 应尽力提高数据容量上限直至达到临界值, 这样既可以将更多的数据安全带回基地, 也可节约成本。

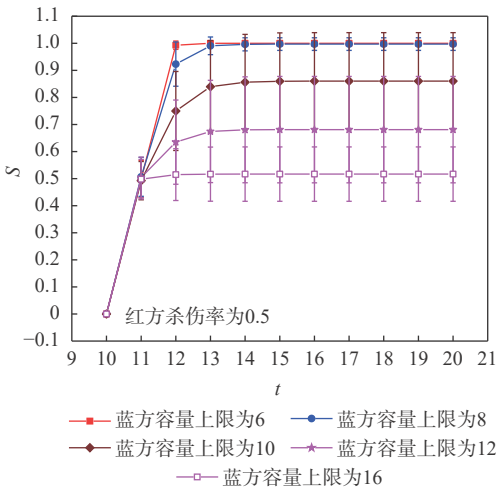


图 4 二维空间中不同蓝方容量上限下网络失效大小与时间步的关系

Fig. 4 Relationship between failed size and time step under different capacity-limitation of blue UAVs in 2D

2.2 三维空间下仿真结果

在三维空间中考虑杀伤率衰减, 设定空间距离阈值 $d_{\max} = 3$, 无杀伤率衰减的空间距离 $d_{\min} = 0.5$ 。以蓝方 CN-UAVs 为主体, 同样从红方杀伤率改变和蓝方容量上限改变 2 个方面进行研究。首先, 考虑红方杀伤率改变的情况, 通过比较二维和三维场景下的级联效应 (见表 1 和图 5), 2 种情况下蓝方无人机容量上限相同, 所得数据为 25 次独立实验的平均值。可以发现, 红方杀伤率相同的情况下,

三维场景在对抗过程中被击落的无人机架数明显减少, 并且后续触发的级联效应也相应减弱。

图 6 绘制了红方无人机具备不同杀伤率的情况下, 时间步 t 和蓝方网络失效大小 S 的关系。设置蓝方无人机数据容量上限为 7, 红方无人机杀伤率分别为 0.2、0.4、0.6、0.8, 图中结果为 100 次独立实验的平均值, 误差棒表示标准差。通过与图 3 对比, 结果显示, 二维场景与三维场景的级联效应变化规律基本一致, 即红方杀伤率越高, 蓝方在对抗

表 1 不同红方杀伤率下的级联效果

Table 1 Cascading effects under different hit rates of red UAVs

红方杀伤率	三维场景		二维场景	
	被击落无人机架数	网络最终S值	被击落无人机架数	网络最终S值
0.2	8.04	0.44	9.80	0.546
0.4	14.56	0.90	20.04	0.95
0.6	21.68	0.99	30.64	1.00
0.8	29.48	1.00	39.32	1.00

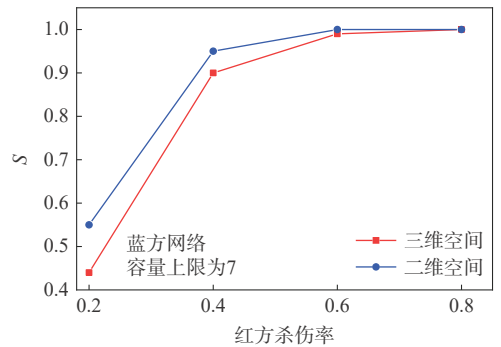


图 5 二维与三维空间中不同红方杀伤率下网络失效大小对比

Fig. 5 Comparison of failed size under different hit rates of red UAVs in 2D and 3D

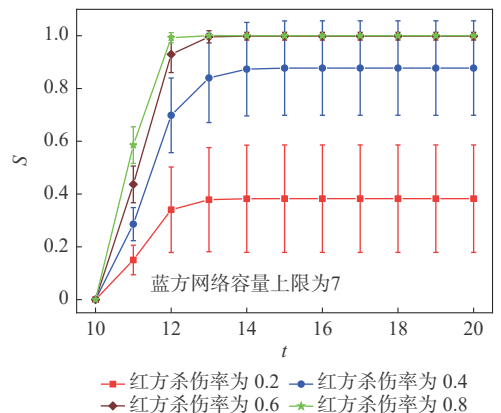


图 6 三维空间中不同红方杀伤率下网络失效大小与时间步的关系

Fig. 6 Relationship between failed size and time step under different hit rates of red UAVs in 3D

过程中被击落无人机数量越多,且后续触发的级联效应更强。但无论杀伤率为多少,蓝方被击落无人机架数都比同等条件下二维空间中少,且触发的级联效应相应减弱。

考虑蓝方容量上限改变的情况,图7绘制了蓝方无人机在具备不同容量上限的情况下,时间步 t 和蓝方网络失效大小 S 的关系。设置红方无人机杀伤率为0.5,蓝方无人机数据容量上限分别为6、8、10、12。实验结果为200次独立实验的平均值,误差棒表示标准差。图7中,蓝方无人机数据容量上限越大,所触发的级联效应越弱,数据容量上限临界值得到了降低,并且容量上限为12时级联效应趋于稳定。

同样对二维场景和三维场景的结果进行比较(见表2和图8),2种情况下红方无人机杀伤率相同,所得数据为25次独立实验取得的平均值。结果显示,蓝方容量上限相同时,三维场景比二维场景在被击落无人机数量、级联效应及容量上限临界值等数值上均有所降低。例如,二维场景下容量上限临界值为16(见图4),三维场景下容量上限临界值为12(见图7)。

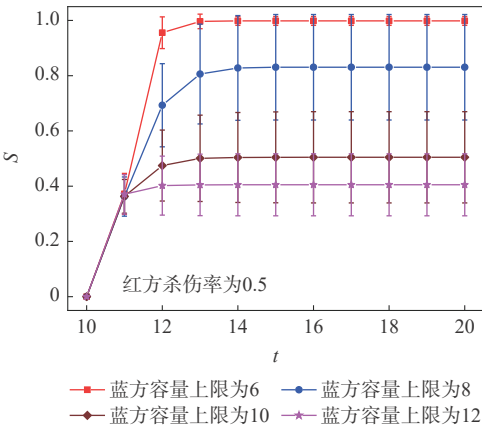


图7 三维空间中不同蓝方容量上限下网络失效大小与时间步的关系

Fig. 7 Relationship between failed size and time step under different capacity-limitation of blue UAVs in 3D

表2 不同蓝方容量上限下的级联效果

Table 2 Cascading effects under different capacity-limitation of blue UAVs

蓝方容量上限	三维场景		二维场景	
	被击落无人机架数	网络最终S值	被击落无人机架数	网络最终S值
6	19.68	1.00	25.04	1.00
8	18.20	0.83	26.68	1.00
10	18.60	0.54	24.56	0.86
12	19.48	0.42	25.16	0.64

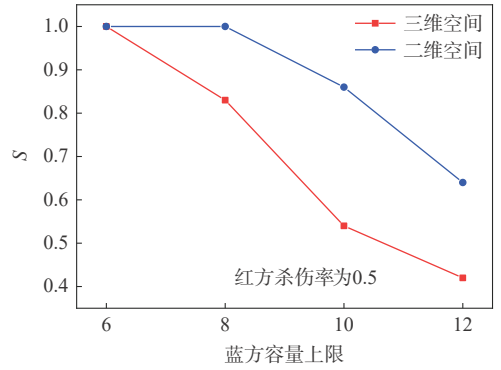


图8 二维与三维空间中不同蓝方容量上限下网络失效大小对比

Fig. 8 Comparison of failed size under different capacity-limitation of blue UAVs in 2D and 3D

3 结论

本文基于复杂网络理论,构建了红蓝对抗场景及无人机集群协同对抗网络模型,研究在二维、三维场景下的网络鲁棒性及级联效应的影响。二维与三维对抗场景的研究结果表明:

- 1) 蓝方容量上限值越大,级联效应越弱,网络鲁棒性越强。
- 2) 初始杀伤率相同时,三维场景中杀伤率的衰减使得蓝方网络产生的级联效应更弱,网络鲁棒性更强。

参考文献 (References)

[1] ALISTAIR D. Modeling robot swarms using agent-based simulation[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2002.

[2] GRASSÉ P P. Nest reconstruction and interindividual coordination in *bellicositermes natalensis* and *cubitermes* sp. the theory of stigmergy: An attempt to interpret the behaviour of builder termites[J]. *Insectes Sociaux*, 1956, 6: 41-80.

[3] LIN Z J, HONG-TAO L H. Consensus based on learning game theory with a UAV rendezvous application[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1): 191-199.

[4] 刘鑫, 杨霄鹏, 刘雨帆, 等. 基于GA-OCPA学习系统的无人机路径规划方法[J]. *航空学报*, 2017, 38(11): 287-297.

LIU X, YANG X P, LIU Y F, et al. UAV path planning method based on GA-OCPA learning system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(11): 287-297 (in Chinese).

[5] 朱黔, 许诺, 黄蓓, 等. 基于角色切换策略的多无人机协同区域搜索[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(5): 928-938.

ZHU Q, XU N, HUANG B, et al. Multi-UAV collaborative area search based on role-switching strategies[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(5): 928-938 (in Chinese).

[6] 曾佳, 申功璋, 杨凌宇. 无人机在线协同航迹规划时序问题[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(3): 334-338.

ZENG J, SHEN G Z, YANG L Y. Unmanned online collaborative flight path planning timing issues[J]. *Journal of Nanjing University*

- of *Aeronautics and Astronautics*, 2009, 41(3): 334-338(in Chinese).
- [7] LI H, LONG T, XU G T, et al. Coupling-degree-based heuristic prioritized planning method for UAV swarm path generation[C]// 2019 Chinese Automation Congress (CAC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 3636-3641.
- [8] 蒋进. 无人机集群动态避撞算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- JIANG J. UAV swarm dynamic collision avoidance algorithm research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019 (in Chinese).
- [9] 牛轶峰, 凌黎华. 无人机规避或跟踪空中目标的自适应运动引导方法[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(4): 116-124.
- NIU Y F, LIN L H. Adaptive motion guidance methods for UAV evasion or tracking of aerial targets[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(4): 116-124(in Chinese).
- [10] WANG Y, BAI P, LIANG X, et al. Reconnaissance mission conducted by UAV swarms based on distributed PSO path planning algorithms[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 105086-105099.
- [11] MANJUNATHA K A, HU F. Deep Q-learning-based node positioning for throughput-optimal communications in dynamic UAV swarm network[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(3): 554-566.
- [12] LAKAS A, BELKACEM A N, HASSANI S A. An adaptive multi-clustered scheme for autonomous UAV swarms[C]//2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 19855085.
- [13] 谢剑. 基于微分博弈论的多无人机追逃协同机动技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- XIE J. Differential game theory for multi-UAV pursuit maneuvers technology based on collaborative research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015(in Chinese).
- [14] 王晓光, 章卫国, 陈伟. 无人机编队超视距空战决策及作战仿真[J]. *控制与决策*, 2015, 30(2): 328-334.
- WANG X G, ZHANG W G, CHEN W. BVR air combat decision making and simulation for UAV formation[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(2): 328-334(in Chinese).
- [15] 周文卿, 朱纪洪, 匡敏驰. 一种基于群体智能的无人空战系统[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(3): 363-374.
- ZHOU W Q, ZHU J H, KUANG M C. An unmanned air combat system based on swarm intelligence[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2020, 50(3): 363-374(in Chinese).
- [16] 冉惟之. 基于群体智能的无人机集群协同对抗系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- RAN W Z. Design and implementation of cooperative adversarial system based on swarm intelligence for unmanned aerial vehicles [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020(in Chinese).
- [17] 陈灿, 莫雳, 郑多, 等. 非对称机动能力多无人机智能协同攻防对抗[J]. *航空学报*, 2020, 41(12): 342-354.
- CHEN C, MO L, ZHENG D, et al. Cooperative attack-defense game of multiple UAVs with asymmetric maneuverability[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 342-354(in Chinese).
- [18] CRUCITTI P, LATORA V, PORTA S. Centrality measures in spatial networks of urban streets[J]. *Physical Review E*, 2006, 73(3): 036125.
- [19] BARTHELEMY M. Morphogenesis of spatial network[M]. Berlin: Springer, 2018: 177-196.
- [20] CRUZ J B, SIMAAN M A, GACIC A, et al. Game-theoretic modeling and control of a military air operation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(4): 1393-1405.
- [21] COBB B J. Adaptive discrete event simulation for analysis of harpy swarm attack[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2011: 1-59.
- [22] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American power grid[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 025103.

Cooperative confrontation model of UAV swarm with random spatial networks

WANG Ershen^{1,2}, GUO Jing¹, HONG Chen^{3,4,*}, REN Hongfan¹, CHEN Aidong^{3,4}, SHANG Xinna^{3,4}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Liaoning General Aviation Academy, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

3. Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China;

4. College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract: UAV swarm cooperative confrontation is a development direction for future war. In order to highlight the advantages of the swarm such as strong attack, difficult defense and high flexibility, it is an important research direction to effectively model the complex system of high-dimensional, strong dynamic and nonlinear UAV cluster cooperative confrontation. In this paper, we apply the complex spatial network theory to construct a cooperative confrontation network, a cooperative network and a confrontation network between two UAV swarms. Meanwhile, we establish a UAV swarm cooperative confrontation model in 2D and 3D based on the cooperative reconnaissance scene of UAV swarm. Then, we analyze the impact of the spatial distance between opponent UAVs on the hit rate, and put forward the formula of hit rate with spatial distance. We analyze the robustness of the cooperative network of UAV swarm through cascading effects and verify the effectiveness and practicality of the UAV swarm cooperative confrontation model. Our work will provide new insight for the modeling of UAV swarm cooperative confrontation.

Keywords: UAV swarm; cooperative confrontation; random spatial network; complex network; cascading effects

Received: 2021-04-21; **Accepted:** 2021-06-04; **Published Online:** 2021-09-01 16:22

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210901.1536.001.html

Foundation items: National Key R & D Program of China (2018AAA0100804); Open Fund of Key Laboratory of Civil Aviation Flights Wide Area Surveillance and Safety Control Technology of Civil Aviation University of China (202105); Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC1907022); Beijing Education Commission Science and Technology Project (KM201811417005, KM201911417010); Applied Basic Research Programs of Liaoning Province (2022020502-JH2/1013); Shenyang Science and Technology Program (22-322-3-34)

* **Corresponding author.** E-mail: hchchina@sina.com

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0212

锂离子电池热失控气体燃烧对热失控传播影响的量化方法

张青松*, 刘添添, 赵子恒

(中国民航大学民航热灾害防控与应急重点实验室, 天津 300300)

摘要: 为量化锂离子电池热失控过程产生热失控气体对热失控传播的影响, 基于能量守恒方程和铜基电池量热法, 提出了一种计算热失控气体燃烧对热失控传播贡献占比的方法。选取商用 18650 型电池, 利用自主设计搭建的热失控气体释能测算实验平台获取计算所需参数。实验结果表明: 第 1 节电池热失控气体燃烧释放的能量在第 2 节电池热失控所需能量中占比达到 5.42%, 使第 2 节电池自产热增加了 42%, 热失控时间提前了 29%。研究结果有助于进一步探索热失控传播过程中的能量传递效率, 为单元层级和系统层级的电池安全设计提供理论支持。

关键词: 锂离子电池; 气体; 热失控传播; 燃烧; 能量传递

中图分类号: X949

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0017-06

锂离子电池因其工作电压高、循环寿命好等特性广泛应用于电动汽车及储能领域^[1]。但锂离子电池在面临一些滥用条件时(如热滥用^[2]、电气滥用^[3]、机械滥用^[4])可能会出现热失控(thermal runaway, TR)现象, 从而对周围的人员及财产造成伤害^[2]。锂离子电池的热失控实际上是由于电池温度升高而加速其内部反应的化学放热过程, 反应所释放的能量可以把电池加热到极高的温度, 从安全阀喷射出的可燃气体也会通过燃烧等方式将热量传递给周围物体。在飞机货舱 ULD、大型动力电源、储能电站等存在锂离子电池包裹、电池组, 或其他存有多节锂离子电池的环境中, 单节电池热失控可能会导致相邻电池发生热失控, 即锂离子电池热失控的多米诺效应, 且多米诺效应一旦发生很难控制, 其危害并不是单节电池热失控后果的累加, 而是短时间内多节电池所蕴含能量的剧烈释放, 最终可能造成中毒、火灾甚至爆炸等后果, 对航空安全构成严重威胁^[5]。为能有效延缓或切断能量在电池间的传递, 及时控

制电池的热失控多米诺效应, 对这一过程的能量和动力学研究是必不可少的。

国内外对锂离子电池热失控过程中热力学能量和反应动力学的研究已有先例, 相关商用测量技术也日趋成熟, 如绝热加速量热仪 ARC、差示扫描量热仪 DSC、VSP2 绝热量热仪等。清华大学欧阳明高团队^[6]基于 ARC 分析得到的电池热失控特征温度提出了基于单元层级的热失控风险控制措施, 分别从电池内部化学反应和外部烟、火现象着手, 以期全面提高电池热安全性; Doughty 等^[7]使用 DSC 测量了几种黏结剂和负极石墨的热反应, 比较了材料的反应热与高温下带电负极中发生的其他放热反应所产生的热; Jhu 等^[8-11]借助 VSP2 对 18650 型锂离子电池起始放热温度、自加热速率等热失控特征参数进行了测量, 计算了热失控反应的热力学参数, 评估了电池热失控潜能和爆炸危害。虽然对锂离子电池材料层级和单元层级的热力学实验研究不胜枚举, 但针对系统层级的电池热失控释能研

收稿日期: 2021-04-23; 录用日期: 2021-05-23; 网络出版时间: 2021-07-16 13:50

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210716.1056.001.html

基金项目: 国家自然科学基金-民航联合基金重点支持项目(U2033204)

*通信作者. E-mail: nkzqsong@126.com

引用格式: 张青松, 刘添添, 赵子恒. 锂离子电池热失控气体燃烧对热失控传播影响的量化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 17-22.
ZHANG Q S, LIU T T, ZHAO Z H. Quantitative method of influence of thermal runaway gas combustion on thermal runaway propagation of lithium-ion battery[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 17-22 (in Chinese).

究却少之又少,上述测量技术最初也并非是为研究锂离子电池的热危害性而设计的,无法准确区分发生在电池内部和外部的反应。Liu等^[12-13]为解决这一问题设计了铜基电池量热法(copper slug battery calorimetry, CSBC),可以实现对单节电池内部化学反应产生热量的精确测量。

近年来,有学者提出要重视锂离子电池组中热失控气体对热失控传播的影响。马里兰大学 Said等^[14]依托自主设计搭建的风洞试验平台,研究了锂离子电池组行间的热失控传播速度,并以此为基础研究了热失控的传播动力学,发现相对于氮气环境,空气环境下热失控传播速度更快,并将其归因于喷射物质燃烧产生热量的影响; Said等^[15]又延续这一思路,对比分析了不同阴极材料、不同气体环境下气流流速对热失控传播速度的影响差异,进一步支撑了喷射出的电池材料和气体的燃烧有助于热失控传播的假设,但依然缺乏对电池热失控传播过程中能量传递的相关研究。

本文基于燃烧三要素原理,通过改变气体环境(空气/氮气),结合能量守恒方程及CSBC法计算得到热失控电池传递至相邻电池的热量,提出了一种定量分析热失控气体燃烧对相邻电池影响的方法,进而为计算锂离子电池热失控多米诺效应中的能量传递提供技术支撑。

1 热失控气体燃烧释能计算方法

锂离子电池的热失控过程中,内部组分之间反应并不依赖氧气,电池内外压差也使得外界氧气难以进入电池内部,热失控气体燃烧释能过程需要在外界才能进行^[16],故可以将热失控过程中的反应划分至电池壳体内和电池外的大气环境。空气环境下,热失控触发电池产生的热失控气体在电池外燃烧,能量作用于自身温度的上升、环境温度的上升及第2节电池温度的上升;而惰性气体环境中无热失控气体燃烧释能,仅有热失控触发电池的內部反应释能作用于第2节电池的温度上升,因此2种不同气体环境下第2节电池温度上升所需能量扣除各自内部自产热量后的值即为热失控气体燃烧释能传递到第2节电池的能量。

将热失控触发电池称为1号电池,热失控传播目标电池称为2号电池。首先,将电池热失控起始温度定义为电池温升速率恰好超过10℃/s的温度,因为这一温度过后,电池热失控过程几乎不可逆^[16]。由于这一温度明显高于电池自产热温度,2号电池的自产热量也会作用于电池温度的上升,此处假设2号电池热失控产生能量全部作用于自身温度上升。因此,系统内各组成部分应遵循如下能量守恒方程:

$$P_{\text{heater}} + P_{B,1} + P_{B,2} = c_B m_{B,1}(t) \frac{dT_1}{dt} + c_B m_{B,2}(t) \frac{dT_2}{dt} + c_r m_r(t) \frac{dT_3}{dt} + P_{\text{loss}} \quad (1)$$

式中: P_{heater} 为加热装置功率,取值14.4W; $P_{B,1}$ 为1号电池内部化学或电化学反应及外部热失控气体燃烧释能的功率; $P_{B,2}$ 为2号电池内部化学或电化学反应释能的功率; c_B 为电池的比热容,取值 $1.10 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; c_r 为环境气体的比热容; $m_r(t)$ 、 $m_{B,1}(t)$ 、 $m_{B,2}(t)$ 分别为环境气体质量、1号电池质量、2号电池质量随时间的变化; T_1 、 T_2 和 T_3 分别为实验过程中1号电池、2号电池和环境气体的温度; P_{loss} 为实验过程中能量损失功率。

为求取2号电池自产热大小,采用铜柱作为虚拟电池替代的方法,将2号电池替换为铜柱,2号热电偶则转为监测记录铜柱表面的温度变化,系统内各组成部分即应遵循如下能量守恒方程:

$$P_{\text{heater}} + P_{B,1} + P_{B,2} = c_B m_{B,1}(t) \frac{dT_1}{dt} + c_{\text{copper}} m_{\text{copper}}(t) \frac{dT_2}{dt} + c_r m_r(t) \frac{dT_3}{dt} + P_{\text{loss}} \quad (2)$$

式中: T_1 、 T_2 、 T_3 分别为这一条件设置下实验过程中1号电池、铜柱和环境气体的温度; c_{copper} 为铜柱比热容,取值 $0.33 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; m_{copper} 为铜柱质量,取值139.7g。

因此,式(1)、式(2)在相同时间内积分的差值即为当前气体环境下2号电池在热失控前的自产热量;式(1)中 $c_B m_{B,2}(t) \frac{dT_2}{dt}$ 项在对应时间段的积分则为使2号电池升温所需热量;二者的差值即为2号电池升温所需外界热量值,而不同气体环境下该项的差值即为热解气体燃烧释能传递到第2节电池的能量。

2 热失控传播实验

2.1 实验设计及平台组成

实验装置各平台组成和结构示意图如图1所示。为保证实验装置的气密性,热电偶及加热装置均通过航空插座与实验装置外的八通道无纸记录仪及直流电源相连。实验平台在底部不锈钢板处通过管道阀门的形式与外界连通,导压口外通过卡套接头的方式连有压力传感器,对装置内部压力测量结果进行实时监测与记录。

将2节100% SOC的锂离子电池正极朝上放置于图1所示陶瓷纤维板中2个间距为1mm的预留凹槽内,分别标记为1、2号电池(空气环境下为A1、A2号电池;氮气环境下为B1、B2号电池)。1号电池作为热失控触发电池,在远离2号电池的一侧用绝热陶瓷纤维板固定有半环绕加热装置,在距加热片边缘5mm处固定有1号热电偶,2号热电偶布置于2号电池上,布置位置与1号热电偶一致,由于加热装置加热功率低,热电偶温度可以代

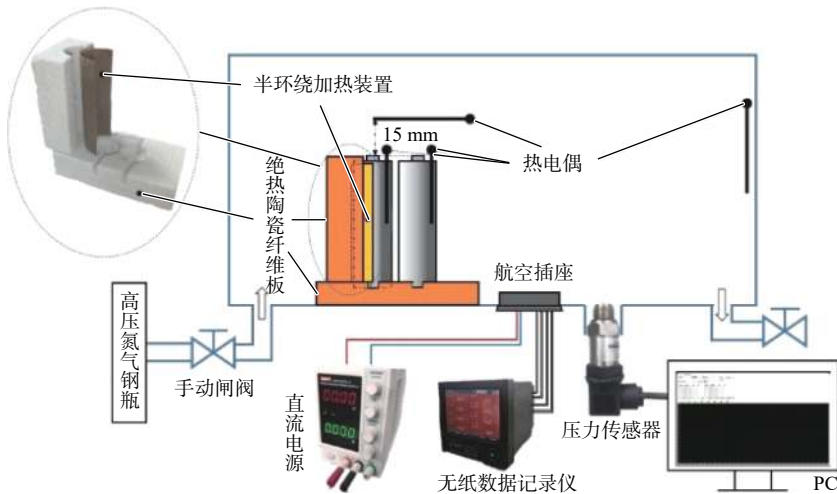


图 1 热失控气体释能测算实验平台结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of experimental platform for measuring energy release of thermal runaway gas

表整个电池的温度, 3、4 号热电偶分别悬挂固定于 1 号电池安全阀正上方 15 mm 处及实验装置内壁处, 用于测算实验装置内环境的温度; 取 3、4 号热电偶测量结果的均值为环境温度。实验结束后, 回收装置内粉末固体与电池并分别称重。电池选用正极材料为钴酸锂的 18650 型电池, 锂离子电池按照标准充电流程进行充电, 先以 1 C(2 200 mA) 的电流将电压充至 4.2 V, 再用 4.2 V 的电压对电池进行恒压充电直至电池达到截止电流 0.02 C(44 mA), 每节电池在充电后均放入 25 °C 恒温箱静置 24 h 以保持电池稳定性, 具体参数如表 1 所示。

表 1 锂离子电池参数

Table 1 Parameters of lithium-ion battery

参数	额定容量/mAh	电压/V	内阻/mΩ	荷电状态SOC/%	初始质量/g
数值	2 200	4.17±0.01	30±5	100	41±0.5

由于实验平台无法实现完全绝热, P_{loss} 项始终存在, 为修正结论误差, 采用 CSBC 法对该项进行拟合计算。在空气环境下, 将实验对象替换为与电池相同尺寸的实心黄铜柱, 使得电池释能项为 0, 故此能量方程可写为

$$P_{heater} = c_{copper} m_{copper} (t) \frac{dT_{copper}}{dt} + c_{air} m_{air} (t) \frac{dT_{air}}{dt} + P_{loss} \quad (3)$$

式中: c_{air} 为空气比热容, 取值 $0.72 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; m_{air} 为实验容器中空气质量, 取值 7.11 g。

依据式 (3), 在加热功率已知、铜柱和环境气体温度可测的条件下, 可得 P_{loss} 的瞬时变化曲线及铜柱和环境气体温升速率的变化曲线, 最终将电池温度 T_{LIB} 作为 P_{loss} 的变量。 P_{loss} 拟合方程如下:

$$P_{loss} = 7.135 73 + 0.045 56 T_{LIB}$$

2.2 热失控传播所需能量计算

空气环境下, 实验过程中平台内压力及各部分温度变化如图 2(a) 所示。图 2(a) 反映了 A1 号电池

热失控后对 A2 号电池的影响。A1 号电池热失控后经过 311 s, A2 号电池即发生热失控; 伴随着 A1 号电池发生热失控, 环境气体温度和 A2 号电池表面温度都出现了短暂的上升后回落现象, 这是 A1 号电池产生的热失控气体在电池外燃烧释能的影响导致的; 随后 A2 号电池温度快速上升直至热失控的主要致因是 A1 号电池高温壳体的热辐射, 在此期间 A2 号电池的热失控过程明显加快, 安全阀开启温度和热失控发生温度 ($138.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $170.4 \text{ } ^\circ\text{C}$) 与 A1 号电池 ($148.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $215 \text{ } ^\circ\text{C}$) 相比也显著降低, 这很可能与电池过快的温升速率有关。A2 号电池热失控时环境的最高温度明显不及 A1 号电池热失控时, 这与装置内氧气的消耗直接相关。A1 号电池热失控时热失控气体燃烧释能消耗了装置内的部分氧气, 产生的二氧化碳等非助燃气体及 A2 号电池安全阀开启后释放出的气体又使装置内氧气含量占比进一步降低, 最终导致 A2 号电池热失控时由于缺乏氧气而无法燃烧, 通过 A2 号电池热失控时装置内压力增加不及 A1 号电池热失控时这一现象表征也可以证明这一结论。图 2(b) 反映了在假设条件下电池与环境气体的质量变化趋势, 由于实验后所得固体粉末无法区分来源, 加之 2 节电池最终质量相差很小, 假设 2 节电池喷出的固体粉末质量相同。图中: 1 atm (标准大气压) = $1.013 25 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

由图 3 可见, 在 A1 号电池热失控前, 电池-铜柱实验组各部分温度压力变化与电池-电池实验组相似, 而之后铜柱温度虽然也在热失控气体和 A1 号电池高温壳体影响下开始上升, 但由于铜柱本身没有自产热, 在达到 $140.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的最高温度峰值后开始缓慢降温, 实验结束后电池质量损失为 6.6 g。

A1 号电池热失控发生后, 经过电池-电池实验组中热失控传播所需时间, 即 311 s 后, 到达实验截

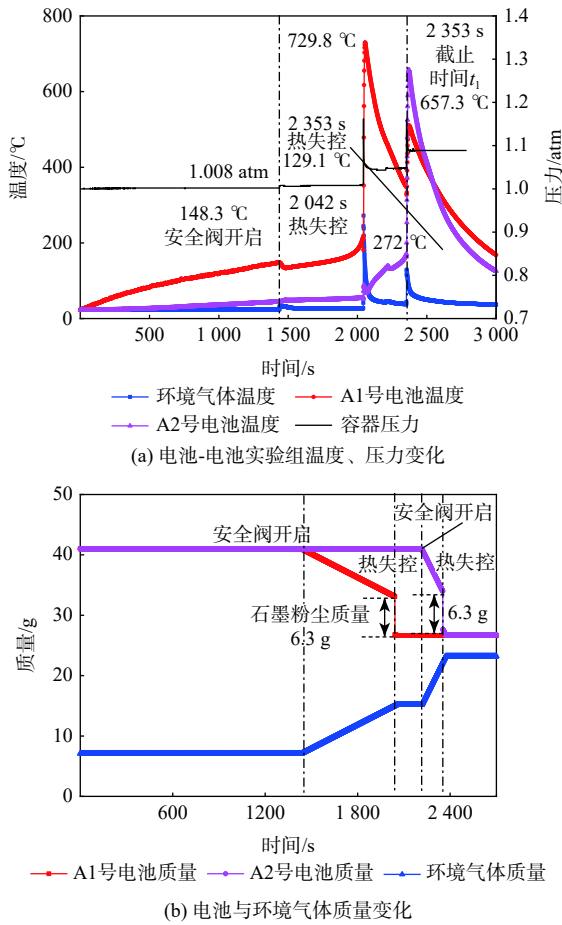


图2 空气环境下电池实验温度、压力、质量变化

Fig. 2 Temperature, pressure and mass change of battery experiments under air environment

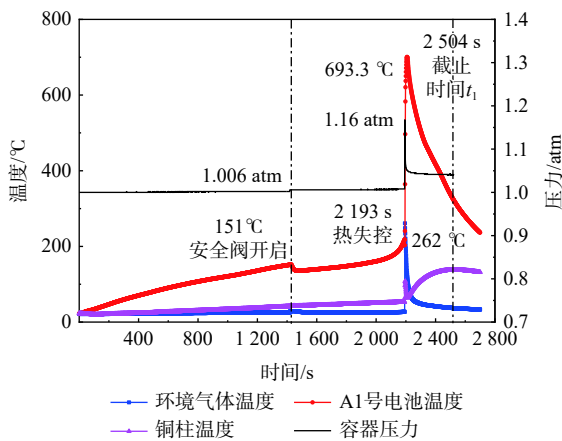


图3 空气环境下铜柱替代实验温度、压力变化

Fig. 3 Temperature and pressure change of copper column replacement experiment under air environment

止时间 t_1 , 根据式 (1)~式 (3) 所得计算结果如表 2 所示。

2.3 热失控气体燃烧传递能量计算

氮气环境下, 实验过程中平台内压力及各部分温度变化如图 4 所示。由于电池-电池实验组中 B2 号电池同样发生了热失控, 而电池-铜柱实验组中铜柱质量无变化, 装置内各部分质量变化规律与空气环境无异。

根据图 4(a), 氮气环境下 B2 号电池在 B1 号电池热失控发生时温度同样出现了短暂的上升又回落, 但变化幅度明显较小, 这无疑也是受到热失控气体释放引起的环境温度急剧上升的影响; 随后温度开始快速上升, 2640 s 左右也发生了热失控, 相比于空气环境下, 热失控传播所需时间有较为明显的延长 (311 s, 400 s), B2 号电池热失控温度也明显升高 (170.4 °C, 183.6 °C)。由于 2 节电池均发生了热失控, 装置内部压力和环境气体温度的变化趋势与空气环境下近似, 但压力与环境温度最大值各仅有 1.12 atm 和 148.5 °C, 明显低于空气环境实验组 (1.16 atm 和 272 °C)。此外, B1 号电池发生热失控后 1~2 s 内, 空气环境下安全阀上方及装置内环境气体温度高于电池表面温度近 150 °C, 说明电池内部物质和热失控气体喷出后在电池外发生了燃烧释能; 而氮气环境下环境温度甚至安全阀上方温度均低于电池表面温度, 说明热失控气体在电池外没有发生燃烧。氮气环境下依然设置为 B1 号电池热失控发生后, 经过电池-电池实验组中热失控传播所需时间, 即 311 s 后, 到达实验截止时间 t_1 。基于式 (1)~式 (3) 计算得到的关键参数及具体计算结果如表 3 所示。

由表 2、表 3 计算所得 2 号电池升温所需热量来源及热失控气体释能对其影响大小如表 4 所示。可知, 2 种气体环境下所求 2 号电池自产热量相差近 400 J, 说明热失控气体燃烧释能对 2 号电池内部自产热的加速促进作用十分明显。由于实验唯一变量为热失控气体燃烧, 空气环境下 A2 号电池热失控所需外界热量值与氮气环境下 B2 号电池到实验截止时间为止所吸收外界热量值的差值即为 1 号电池热失控气体燃烧释能传递到 2 号电池的能量 Q'_{gas} 。结合所求 2 号电池升温至热失控起始温度所需热量 $Q_{\text{TR, onset}}$, 便可得出热失控气体燃烧释

表 2 空气环境下传递能量测量和计算结果

Table 2 Measurement and calculation results of energy transfer in air environment

实验类型	t_1/s	$m_{B,1}(t_1)/g$	$m_{B,2}(t_1)/g$	$\int_{t_1}^{t_2} (P_{B,1} + P_{B,2}) dt/J$	$\int_{t_1}^{t_2} P_{B,1} dt/J$
电池-电池	2 353	26.629	26.740	19 134.6	
电池-铜柱	2 504	26.617			17 854.5

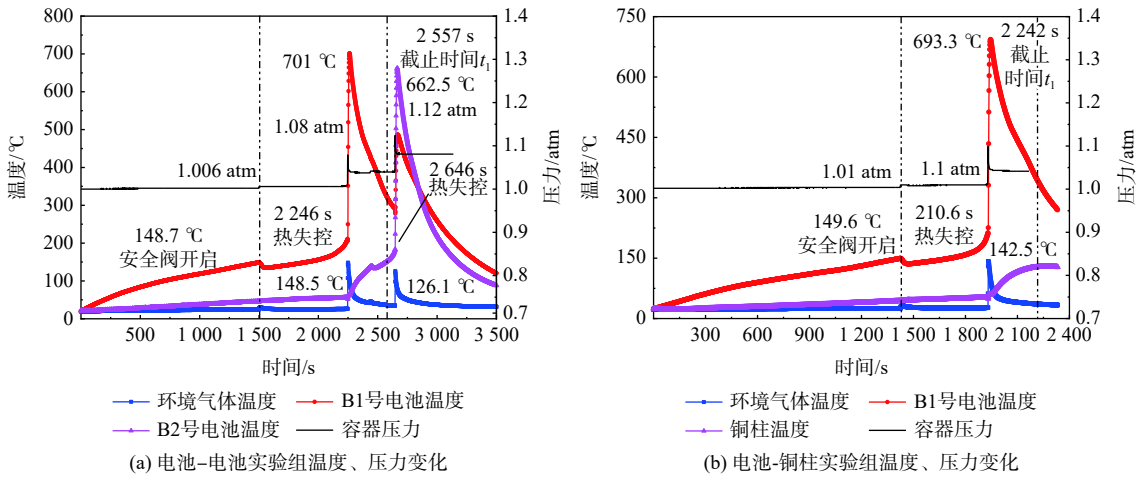


图 4 氮气环境下电池实验温度、压力变化

Fig. 4 Temperature and pressure change of battery experiment under nitrogen environment

表 3 氮气环境下传递能量测量和计算结果

Table 3 Measurement and calculation results of transfer energy in nitrogen environment

实验类型	t_1/s	$m_{B,1}(t_1)/g$	$m_{B,2}(t_1)/g$	$\int_{t_1}^{t_2} (P'_{B,1} + P'_{B,2}) dt/J$	$\int_{t_1}^{t_2} P'_{B,1} dt/J$
电池-电池	2 557	26.525	26.730	17 556.3	
电池-铜柱	2 242	26.502			16 657.2

表 4 2 号电池自产热及接收能量计算

Table 4 Calculation of self generated heat and received energy of No.2 battery

实验条件	2号电池自产热/J	2号电池升温所需热量/J	2号电池接收外界热量/J	传递到2号电池的热失控气体释能大小/J
空气环境	1 280.1	6 384.5	5 104.4	346.1
氮气环境	899.1	5 657.4	4 758.3	

能在热失控传播所需能量中的占比 ζ 为

$$\zeta = \frac{Q'_{gas}}{Q_{TRonset}} \times 100\% = 5.42\%$$

空气环境下 A1 号电池热失控 311 s 后 A2 号电池发生热失控, 而氮气环境下热失控传播所需时间延长至 400 s, 自产热也减少了 381 J。在本文实验条件下即使没有热失控气体燃烧释能, 2 号电池在 1 号电池高温壳体热辐射作用下同样会发生热失控, 但热失控气体燃烧释能占到了 2 号电池热失控所需能量的 5.42%, 且明显加速了 2 号电池内部自产热进程, 进一步加快了热失控在电池间的传播。

3 结论

1) 空气环境下, A2 号电池在 A1 号电池热失控 311 s 后发生了热失控, 热失控进程明显加快, 安全阀开启温度、热失控发生温度均显著下降, 压力增幅虽由于装置内氧含量降低出现下降, 但总体仍表现出较低的热安全性。

2) 氮气环境下, B2 号电池在 B1 号电池热失控 400 s 后发生了热失控, 热失控发生温度明显升

高, 热失控传播所需时间明显延长, 系统内环境温度最值及压力最值明显低于空气环境, 系统热安全性显著提高。

3) 基于计算热失控气体燃烧释能占热失控传播所需能量比率的方法, 1 号电池热失控气体燃烧释能共有 346.1 J 传递到 2 号电池, 占热失控传播所需能量的 5.42%, 使 2 号电池自产热增加了 42%, 热失控时间提前了 29%。

参考文献 (References)

[1] 芮新宇, 冯旭宁, 韩雪冰, 等. 锂离子电池热失控蔓延问题研究综述[J]. 电池工业, 2020, 24(4): 193-201.
RUI X Y, FENG X N, HAN X B, et al. Review on the thermal runaway propagation of lithium-ion batteries[J]. Chinese Battery Industry, 2020, 24(4): 193-201 (in Chinese).

[2] 张青松, 罗星娜, 程相静, 等. 基于锂离子电池温降指数的细水雾添加剂筛选方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1073-1079.
ZHANG Q S, LUO X N, CHENG X J, et al. Method for screening fine water mist additive based on temperature drop index of lithium-ion battery[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1073-1079 (in Chinese).

[3] 张磊, 张春颖, 黄昊, 等. 三元锂电池过充诱导燃烧特性的试验研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(2): 157-159.
ZHANG L, ZHANG C Y, HUANG H, et al. Experimental study on the combustion characteristics of ternary lithium battery by over-charge[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(2): 157-159 (in Chinese).

[4] 张磊, 黄昊, 张永丰, 等. 锂电池穿刺燃烧特性及其抑制技术研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(4): 526-528.
ZHANG L, HUANG H, ZHANG Y F, et al. Study on combustion characteristics and suppression technology of lithium batteries by

- puncture[J]. *Fire Science and Technology*, 2020, 39(4): 526-528(in Chinese).
- [5] 张青松, 曹文杰, 罗星娜, 等. 基于多米诺效应的锂离子电池热释放速率分析方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(5): 902-907.
ZHANG Q S, CAO W J, LUO X N, et al. Analysis method of heat release rate of lithium-ion battery based on Domino effect[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(5): 902-907(in Chinese).
- [6] FENG X N, REN D S, HE X M, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. *Joule*, 2020, 4(4): 743-770.
- [7] ROTH E P, DOUGHTY D H, FRANKLIN J, et al. DSC investigation of exothermic reactions occurring at elevated temperatures in lithium-ion anodes containing PVDF-based binders[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 134(2): 222-234.
- [8] JHU C Y, WANG Y W, SHU C M, et al. Thermal explosion hazards on 18650 lithium-ion batteries with a VSP2 adiabatic calorimeter[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(1): 99-107.
- [9] JHU C Y, WANG Y W, WEN C Y, et al. Self-reactive rating of thermal runaway hazards on 18650 lithium-ion batteries[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, 106(1): 159-163.
- [10] JHU C Y, WANG Y W, WEN C Y, et al. Thermal runaway potential of LiCoO₂ and Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂ batteries determined with adiabatic calorimetry methodology[J]. *Applied Energy*, 2012, 100: 127-131.
- [11] WEN C Y, JHU C Y, WANG Y W, et al. Thermal runaway features of 18650 lithium-ion batteries for LiFePO₄ cathode material by DSC and VSP2[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, 109(3): 1297-1302.
- [12] LIU X, STOLIAROV S I, DENLINGER M, et al. Comprehensive calorimetry of the thermally-induced failure of a lithium-ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 280: 516-525.
- [13] LIU X, WU Z, STOLIAROV S I, et al. Heat release during thermally-induced failure of a lithium-ion battery: Impact of cathode composition[J]. *Fire Safety Journal*, 2016, 85: 10-22.
- [14] 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.
- [15] SAID A O, LEE C, STOLIAROV S I, et al. Experimental investigation of cascading failure in 18650 lithium-ion cell arrays: Impact of cathode chemistry[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 446: 227347.
- [16] FENG X N, SUN J, OUYANG M G, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium-ion battery module[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 275: 261-273.

Quantitative method of influence of thermal runaway gas combustion on thermal runaway propagation of lithium-ion battery

ZHANG Qingsong*, LIU Tiantian, ZHAO Ziheng

(Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Hazards Prevention and Emergency Response, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to quantify the effect of thermal runaway gas produced in the thermal runaway process of lithium-ion battery on thermal runaway propagation, based on the energy conservation equation and the equivalent substitution method, this paper presents a method to calculate the contribution of thermal runaway gas combustion to thermal runaway propagation. The self-designed experimental platform of thermal runaway gas energy release calculation was used to pick the commercial 18650 battery and collect the parameters required for the calculation. According to the experiment results, the energy released during the combustion of the first cell's thermal runaway gas accounts for 5.42% of the energy needed by the second cell's thermal runaway, resulting in a 42% increase in the second cell's self-heat production and a 29% reduction in thermal runaway time. The research results are helpful to further explore the energy transfer efficiency in the process of runaway heat transfer, and provide theoretical support for cell level and system level battery safety design.

Keywords: lithium-ion batteries; gas; thermal runaway propagation; combustion; energy transfer

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0187

基于脑电信号相位传递熵的谎言机制研究

韦思宏, 张家琦, 黎峰, 康倩若, 高军峰*

(中南民族大学生物医学工程学院 认知科学国家民委重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 说谎是复杂的认知过程, 其执行控制功能需要不同脑区的共同参与, 相关研究证实了这些脑区之间存在相互作用。针对当前脑电信号特征提取方法有限及谎言机制尚不明确的问题, 利用相位传递熵构建了谎言实验过程中脑电信号的脑网络, 并分析了诚实组和说谎组不同脑区间的效应连接差异。采用标准的三刺激实验模式对 60 名受试者进行说谎检测实验, 同步采集所有受试者的脑电信号并进行预处理; 利用相位传递熵构建效应连接矩阵, 通过统计方法对矩阵中的每一条边进行 2 组间的熵值差异分析, 选取具有显著性差异的导联对上的熵值作为全连接神经网络的分类特征, 结果显示, 分类准确率为 96.75%, 说明相位传递熵指标可以有效区分说谎者和诚实者 2 类人群的脑电信号; 对 2 类人群大脑功能网络的分析结果显示, 与诚实者相比, 说谎类人群的额叶、顶叶和颞叶之间存在更强的信息流动, 表明说谎行为需要协调和使用更多的大脑资源。研究结果有助于揭示说谎状态下大脑的神经活动机制。

关键词: 脑电图; 测谎; 效应连接; 相位传递熵; 全连接神经网络; 脑网络

中图分类号: R338

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0023-08

说谎可以定义为故意掩盖真相以谋取个人利益和进步的行为, 是人类社会普遍存在的社会及心理现象。测谎的真实有效性虽存在争议, 但其对刑事调查、机场安全、反恐等领域具有重要的意义^[1]。早期的心理学专家主要通过观察受试者的言语和非言语行为来进行测谎研究^[2], 随后出现了通过检测受试者的血压、脉搏及皮肤电等生理指标的多道仪测谎技术^[3]。说谎的本质是一个复杂的认知过程, 涉及不同脑区之间神经元的信息传递, 单纯依靠言语、血压、脉搏等生理指标无法准确区分诚实组和说谎组之间的差异。脑电图 (electroencephalogram, EEG) 可以记录大脑神经细胞的电生理活动在头皮上的总体反映, 能够更加真实地显示大脑活动的整体信息。因此, 基于 EEG 的测谎研究将为人们在探索说谎的认知机制中提供更多的可能性^[4],

基于脑电的测谎技术在测谎领域的应用越来越多且取得了较为理想的结果^[5-6]。Wang 等^[7]基于 P300, 利用图论对欺骗条件下大脑的功能连接进行分析发现, 与诚实组相比, 说谎组有更高的网络密度, 脑网络的连接边更为复杂; Wang 等^[8]利用脑网络对欺骗任务进行研究, 分析发现, 欺骗状态下额叶与颞叶之间导联连接显著增强; Kohan 等^[9]利用有向定向函数对谎言信息进行功能连接分析, 结果显示, 导联的连接方向主要是由额叶连向顶叶和颞叶。因此, 说谎行为需要不同脑区的共同参与, 这些大脑区域的功能连接为神经元网络的复杂动力学提供了新的信息。进一步根据不同脑区之间的统计依赖关系对脑网络进行完整的描述是当前测谎领域的研究重点。

研究表明, 非线性分析方法更加适用于计算非

收稿日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-05-31; 网络出版时间: 2021-06-15 12:12

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210615.1130.001.html

基金项目: 国家自然科学基金 (61773408); 中央高校基本科研业务费专项资金 (CZZ19004,CZY20039)

*通信作者. E-mail: Junfengmst@163.com

引用格式: 韦思宏, 张家琦, 黎峰, 等. 基于脑电信号相位传递熵的谎言机制研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 23-30.

WEI S H, ZHANG J Q, LI F, et al. Lie mechanism based on phase transfer entropy of EEG signals [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 23-30 (in Chinese).

平稳信号的复杂度,而脑电信号具有典型的非平稳特性^[10],因此,利用非线性分析方法能够更好地分析脑电信号。近年来,样本熵、近似熵、相位传递熵(phase transfer entropy, PTE)等非线性分析方法成为研究脑认知加工过程的重要工具。2014年, Muriel等^[11]首次提出PTE的概念,并将其用于脑电信号的定向连接性分析。相较于仅可以计算信号复杂度的样本熵和近似熵, PTE可以基于相位关系检测不同脑区之间的效应连接,而且其对噪声具有较强的鲁棒性。PTE已在多项研究中发挥重要作用。2016年, Hillebrand等^[12]采用PTE研究发现静息态下大脑信息流的方向与频率有关;同年, Meenakshi等^[13]采用PTE研究发现路易体痴呆患者脑区之间的定向信息流被中断;2020年, Fatemeh等^[14]采用PTE研究发现重度抑郁症与大脑网络中脑区间的链接缺失有关。

以上研究表明, PTE可用于大脑信息流和功能脑网络的定向连接分析。本文通过PTE对说谎的神经活动机制进行研究,记录说谎组和诚实组的脑电信号,利用PTE提取特征,并选择具有统计性差异的特征送入全连接神经网络(fully connected neural network, FCNN)分类系统进行分类,根据分类结果构建脑网络,分析了诚实组和说谎组不同脑区之间的效应连接差异。

1 相位传递熵的基本原理及全连接神经网络

1.1 相位传递熵的基本原理

传递熵^[15](transfer entropy, TE)可以表示为在时间序列上信号 $X(t)$ 对信号 $Y(t)$ 不确定性大小的改变。传递熵可以衡量非线性系统变量之间的因果关系,因此,被广泛应用于神经信号的非线性分析。2014年, Muriel等^[11]对传递熵的算法进行改进,利用信号 $X(t)$ 和信号 $Y(t)$ 的瞬时相位时间序列来计算传递熵,并将改进的算法称为PTE。PTE是基于相位关系的信息流测量方法,具有鲁棒性强、计算效率高等优点,适用于人类大脑功能的定向连接估计。对于信号 $X(t)$,为了获得其瞬时相位 $\theta_x(t)$,将解析信号定义为

$$S(t) = X(t) + i\tilde{X}(t) = A(t)e^{i\theta_x(t)} \quad (1)$$

式中: $A(t)$ 为信号 $X(t)$ 的瞬时振幅;函数 $\tilde{X}(t)$ 为 $X(t)$ 的希尔伯特变换^[16],定义为

$$\tilde{X}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

对信号 $Y(t)$ 进行相同的操作获取其瞬时相位 $\theta_y(t)$ 。在获得信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的瞬时相位后,信号

$X(t)$ 到 $Y(t)$ 的PTE定义为

$$\begin{aligned} \text{PTE}_{xy} &= I(\theta_y(t), \theta_x(t') | \theta_y(t')) = \\ &= H(\theta_y(t), \theta_y(t')) + H(\theta_x(t'), \theta_x(t')) - \\ &= H(\theta_y(t')) - H(\theta_y(t), \theta_x(t'), \theta_x(t')) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\theta_x(t')$ 和 $\theta_y(t')$ 分别为 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 在过去 $t' = t - \delta_t$ 的瞬时相位时间序列, δ_t 表示分析时延; $I(\cdot)$ 表示互信息; $H(\cdot)$ 表示香浓熵。

对PTE进行标准化^[13]:

$$\text{dPTE}_{xy} = \frac{\text{PTE}_{xy}}{\text{PTE}_{xy} + \text{PTE}_{yx}} \quad (4)$$

式中: dPTE的取值范围为 $0 \sim 1$, $0.5 < \text{dPTE} < 1$ 表示信息流动的方向是信号 $X(t)$ 流向信号 $Y(t)$, $0 < \text{dPTE} < 0.5$ 表示信息流动的方向是信号 $Y(t)$ 流向信号 $X(t)$,在信号 $X(t)$ 和信号 $Y(t)$ 的信息流动平衡的情况下, $\text{dPTE} = 0.5$ 。将EEG的每个导联视为一个脑网络节点,利用式(4)计算每2个节点之间的dPTE。

1.2 全连接神经网络

与大多数深度神经网络结构相比, FCNN使用更少的网络层结构避免了复杂的数学运算,使模型更简单易懂。FCNN是一个有监督学习的网络,由输入层、隐藏层和输出层组成^[17]。从输入层开始,上一层神经元节点的计算结果经过激活函数归一化后作为下一层神经元节点的输入,直到输出最终结果 y_{predict} 。为使输出结果 y_{predict} 和真实值 y_{true} 之间的损失降至最小,在训练期间可利用梯度下降法对网络进行反向传播,反复调节节点之间的链接权重 \mathbf{W} 和偏置 \mathbf{b} 。本文所使用的激活函数为Softmax函数。Softmax函数可以对有限项离散概率分布的梯度对数归一化,将线性预测值转为类别概率,从而进行多分类。将 n 个输出 $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ 通过Softmax函数,使得输出满足概率分布要求,该函数可以定义为

$$y_j = \text{Softmax}(Z_j) = \frac{e^{Z_j}}{\sum_{i=1}^n e^{Z_i}} \quad (5)$$

式中: n 为隐藏层或输出层神经元的总个数; $\text{Softmax}(Z_j)$ 为 y_j 表示第 j 种情况 Z_j 出现的可能性大小, j 的取值范围为 $[1, n]$, y_j 的取值范围为 $[0, 1]$,且 $\sum_{y_j} p(Y = y_j) = 1$; \mathbf{Z} 为未经过激活函数的输出,其定义为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{X} + \mathbf{b} \quad (6)$$

其中: \mathbf{X} 为上一层神经元节点的输入向量,大小为 $N \times 1$; \mathbf{Z} 为大小为 $M \times 1$ 的输出向量。将大小为 $N \times M$ 的权重矩阵 \mathbf{W} 的转置乘以输入向量 \mathbf{X} 再加上偏置向量 \mathbf{b} ,就可以将输入样本向量转换为输出样本向量, \mathbf{b} 的大小为 $M \times 1$ 。

2 实验设计与数据预处理

2.1 测谎协议

本文实验招募了 60 名平均年龄 21 岁左右的健康在校大学生作为受试者, 所有受试者均签署了知情同意书。随机分为诚实组和说谎组, 每组各 30 名受试者。通过 Wilcoxon 秩和检验比较 2 组成员的性别和年龄, 性别 ($p=0.28$) 和年龄 ($p=0.32$) 的 p 值表示诚实组和说谎组之间没有显著性差异。

实验采用标准 Guilty Knowledge Test (GKT) 三刺激实验模式, GKT 是一种生理技术, 可用于检测受试者是否刻意隐瞒事实。在 GKT 中, 通常向受试者呈现 3 种刺激^[18]: ①探测刺激(P)。与隐藏信息有关, 只有说谎者认识。②靶刺激(T)。与隐藏信息无关, 所有受试者对此刺激熟悉。③无关刺激(I)。与隐藏信息无关, 所有受试者对此刺激不熟悉。

实验开始前, 准备 6 条不同的手链, 还有手链对应的图片和 1 个保险箱, 并随机选取 2 条手链放

入保险箱中。对说谎组, 实验要求受试者从保险箱中拿出手链, 认真观察这 2 条手链的尺寸、形状、颜色等外观信息后偷走其中的 1 条, 并将被偷走的手链作为探测刺激(P 刺激), 另外 1 条作为靶刺激(T 刺激), 其余 4 条手链作为无关刺激(I 刺激)。对诚实组, 受试者从保险箱中随机抽取 1 条手链, 认真观察后作为 T 刺激, 保险箱中的另外 1 条手链和其他 4 条手链分别作为 P 刺激和 I 刺激。每次实验过程中, 6 张不同手链的图片在电脑屏幕上共出现 30 次, 其中 P 刺激和 T 刺激分别出现 5 次, I 刺激出现 20 次。受试者需要尽可能准确地以点击鼠标的形式对出现的图片进行反应操作, 见过该手链点击鼠标左键, 未见过该手链点击鼠标右键。当电脑屏幕上出现 P 刺激和 I 刺激时, 受试者按下鼠标右键, 出现 T 刺激时按下鼠标左键, 即要求说谎者仅对 P 刺激做出说谎行为, 诚实者均做出诚实的行为。每位受试者进行 10 次实验。单个试次时长为 1.6 s, 每次实验间隔为 5 min(见图 1)。

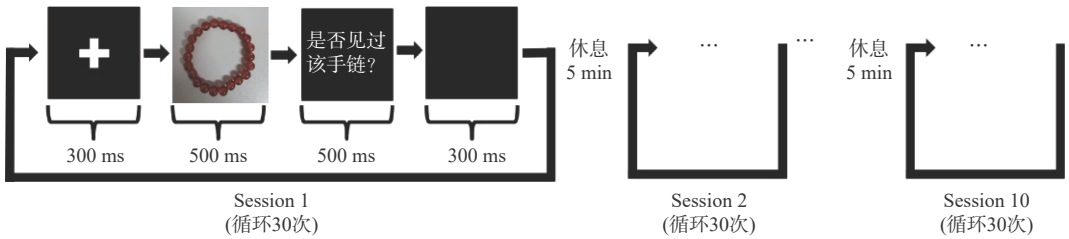


图 1 测谎实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polygraph experiment

2.2 EEG 数据采集及预处理

实验脑电数据采集设备为电极位置符合国际标准 10-20 的 32 导脑电帽和德国 BP 公司的脑电图仪, 采样频率为 500 Hz, 导联阻抗小于 5 k Ω 。在静止状态下, 记录受试者的 EEG 信号 5 min。实验过程中, 使用 E-Prime2 对受试者进行视觉刺激。实验采集了所有受试者的 EEG 数据。

本文采用 EEGLAB 工具箱对 EEG 数据进行预处理, 使用带通滤波器(0.05~35 Hz)对信号进行滤波去除伪影; 根据标记对 P 刺激前 300 ms 和刺激后 1 300 ms 的数据进行分割, 并将此作为一个 epoch; 为了更好地分析 P 刺激对受试者产生的影响, 选择 P 刺激前的 300 ms 作为基线对每个 epoch 进行基线校正; 对数据进行独立成分分析, 使用 Adjust 插件去除由眨眼、肌肉紧张等成分导致的伪影; 选择双侧乳突导联对数据进行电极重参考; 对每 5 个 epoch 进行一次叠加平均。最终获得诚实组和说谎组各 300 个 800 \times 30 的数据集。EEG 信号处理流程如图 2 所示。

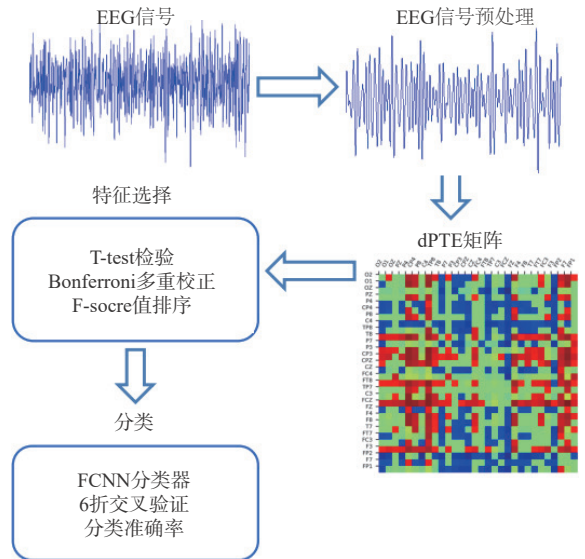


图 2 EEG 信号处理流程

Fig. 2 Flow chart of EEG signal processing

2.3 特征提取及分类

本文将不同导联之间的 dPTE 作为神经网络的分类特征。首先, 对受试者数据进行特征提取。分别计算预处理后 2 类人群的 dPTE, 获得 600 个 30 \times

30的dPTE有效连通网络矩阵。图3为说谎组和诚实组的总平均dPTE邻接矩阵对比。图中显示,说谎组和诚实组的平均dPTE邻接矩阵存在差异,尤其是电极P4和F7到其他电极的dPTE值,说谎组显然高于诚实组,直观显示说谎组不同导联之间信息流强度更大。注意的是,本文计算出来的说谎组和诚实组的平均dPTE邻接矩阵,除对角线元素为0外,其余元素均大于0.30且小于0.65,因此为了更好地从图3中显示说谎组和诚实组的差异性,图中的颜色刻度范围为[0.30,0.65]。矩阵的每一行和每一列都对应一个电极通道,每一个元素表示横坐标电极通道到纵坐标电极通道的链接权重。然后,对2组受试者的所有矩阵进行整合,去除对角线元素,其余元素(870)作为特征向量,最终获得2个300×870的特征矩阵。对特征矩阵中每个特征单独进行2组受试者间的独立样本T-test检验,使用Bonferroni多重校正方法检验特征的差异性,可以得到有差异的特征。对具有显著性差异($p < 0.05/870$)的特征进

行F-score值^[19]计算, F-score值越大,表征该特征在诚实和说谎2种状态下的差异越大。将所有特征根据F-score值进行降序排序,并将排序后的特征依次添加到特征集作为神经网络的分类特征。这可以减少神经网络训练参数数目,加速网络收敛,同时可以快速找出具有显著性差异的导联对。由于同一导联对的信息流流向由X流向Y和由Y流向X时dPTE值之和为1,则当信息流由X流向Y的dPTE值表现出较大的诚实-说谎差异性时,由Y流向X的信息流也必将表现出较大的诚实-说谎差异性,故各特征在差异性排序表中总是以导联对的形式成对出现。

将获得的特征集送入FCNN分类器,本文使用的FCNN分类器结构如图4所示,隐藏层神经元个数是5,输出层神经元的个数是2(说谎和诚实)。采用6折交叉验证^[20],将训练集送入FCNN进行训练。模型训练完成后进行测试,平均6个测试结果准确率(ACC)即为分类器平均测试准确率,该值代

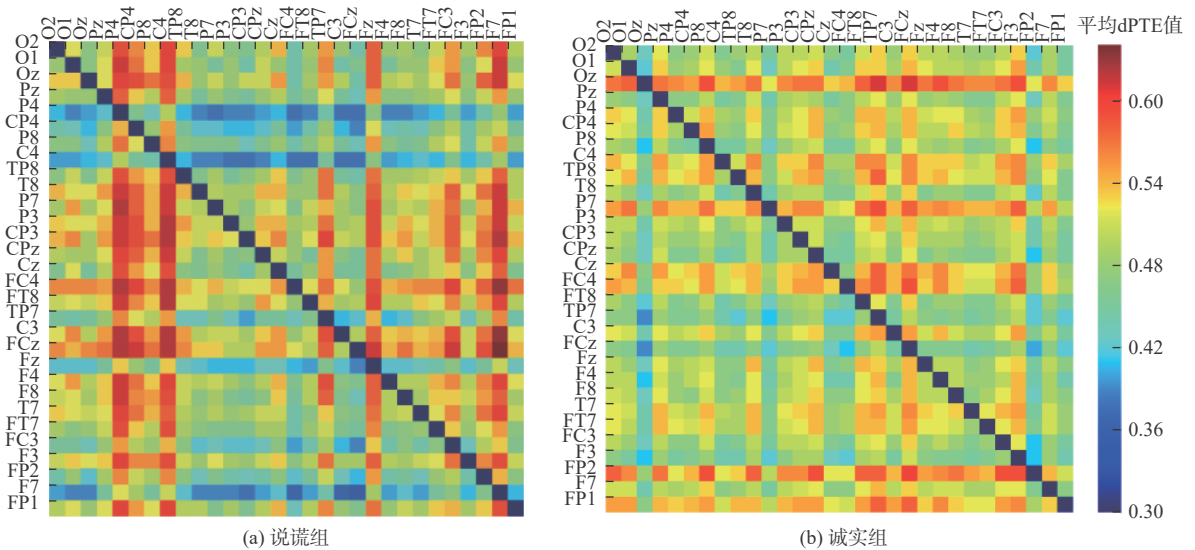


图3 组平均dPTE邻接矩阵对比

Fig. 3 Comparison of group average dPTE adjacency matrix

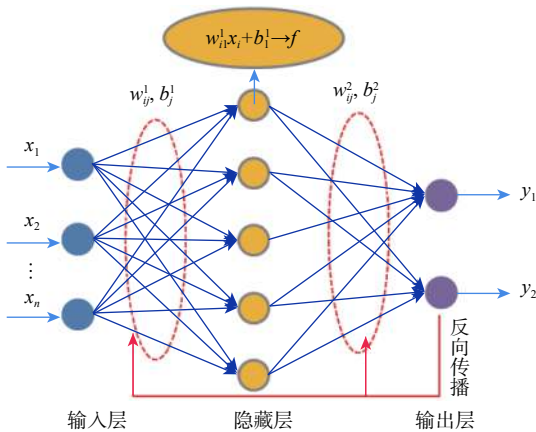


图4 FCNN结构示意图

Fig. 4 Structure schematic diagram of FCNN

表示了分类器的泛化能力。同时计算6个分类准确率的标准差(SD),直观反映准确率的离散程度。

3 实验结果

3.1 统计及分类

本文选取诚实-说谎差异性较大的dPTE值作为特征输入到神经网络中进行训练和分类。统计分析后的特征数据集输入到神经网络分类训练时发现,当输入12维特征,即对应诚实-说谎差异性最大的6个有向导联对(P4-T8, P4-Pz, FCz-F7, FP2-T8, P4-FT8, F7-FT8)时,平均分类准确率可以达到最大值96.75%(SD=±0.575)。本文同时通过传统的

SVM 分类器^[21]对上述特征集进行分类, 利用箱线图与 FCNN 分类结果进行对比, 结果如图 5 所示。可以看出, FCNN 比 SVM 分类准确率高, 且准确率波动程度比 SVM 小, 表明 FCNN 分类效果好且鲁棒性更强。因此, 最终选用 FCNN 用作本文的特征分类器。

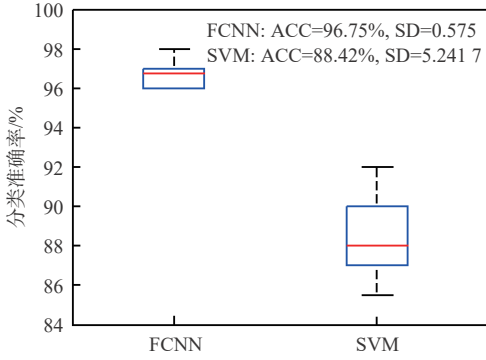


图 5 FCNN 与 SVM 分类准确率对比

Fig. 5 Comparison of classification accuracy between FCNN and SVM

3.2 效应连接分析

基于上述得到的 6 个具有显著性差异的有向导联对进行统计分析, 结果如表 1 所示, 这 6 个有向导联对共包括 7 个不同的电极 (P4、Pz、F7、FP2、FCz、T8、FT8)。表中电极对对应的 dPTE 分别是说谎组和诚实组的平均 dPTE 值。Koessler 等^[22]研究表明, Brodmann 分区与 10-20 电极放置系统具有相关性, 故本文将电极位置投影到大脑皮层, 如表 2 所示, 后续讨论将在电极对应的脑区中进行。

为了更加直观地突出说谎状态下大脑信息流的流向, 图 6 利用 BrainNet^[23]画出了大脑网络信息流图。图中: 蓝色节点表示所选的电极, 箭头方向表示信息流流向, 链路颜色表示链接权重。结合表 1 和表 2, 从图 6 可以看出, 相较于诚实组, 说谎状态下电极对之间信息流强度有所升高。说谎状

表 1 具有显著性差异的 6 个有向电极对平均 dPTE 值统计分析结果

Table 1 Statistical analysis results of average dPTE of 6 directed electrode pairs with significant differences

电极对		平均 dPTE 值	
x	y	说谎组	诚实组
P4	T8	0.611 5	0.467 0
P4	Pz	0.577 6	0.474 0
FCz	F7	0.360 4	0.533 1
FP2	T8	0.566 8	0.422 7
P4	FT8	0.606 1	0.462 0
F7	FT8	0.596 3	0.481 8

表 2 电极及其相应的投射皮层区域

Table 2 Electrodes and their corresponding projection cortical areas

电极		Brodman分区	脑区名称
P4	顶叶	R Inferior parietal Gyrus (R-IPG)	后顶回
Pz		M Superior parietal Lobe(M-SPL)	顶上小叶
F7		L Inferior frontal Gyrus (L-IFG)	额下回
FP2	额叶	R Superior frontal Gyrus (R-SFG)	额上回
FCz		M Superior frontal Gyrus (M-SFG)	额上回
T8	颞叶	R Middle temporal Gyrus (R-MTG)	颞中回
FT8		R Superior temporal Gyrus (R-STG)	颞上回

注: R表示右; L表示左; M表示中。

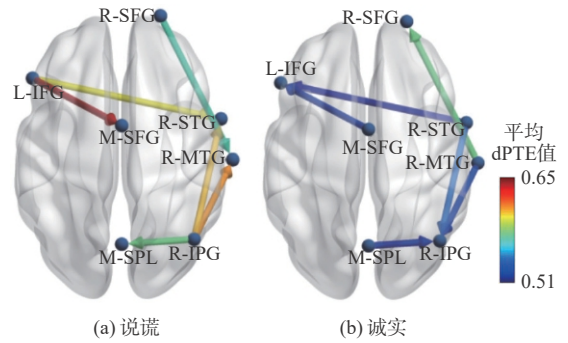


图 6 说谎与诚实受试者脑网络平均对比

Fig. 6 Average brain network comparison between lying and honest subjects

态下, 脑网络信息流主要由顶叶和额叶流向颞叶, 平均 dPTE 值维持在 0.6 左右; 诚实状态下, 相对于说谎状态刚好相反, 信息流主要由颞叶流向顶叶和额叶, 且平均 dPTE 值较为恒定, 维持在 0.53 左右。这进一步说明, 说谎状态下, 大脑的顶叶、额叶和颞叶被激活, 这些脑区之间的信息流动较强。

4 讨论

目前的主流测谎方法如 BAD、BCD 等, 仅专注于 EEG 信号的时频特性, 虽然可以在一定程度上揭露说谎状态下局部大脑的活动规律, 但无法探知整个大脑及各个脑区之间的功能模式。PTE 理论是一种基于相位关系的信息流量化方法, 可用于 EEG 各导联信号之间的定向连接估计。为了更好地揭示说谎过程中大脑的工作模式, 本文利用 PTE 理论量化大脑各节点之间信息流的方向与强度, 并将归一化后的 PTE 邻接矩阵构建加权有向网络, 对计算结果进行统计分析, 选取具有显著性差异的导联对作为神经网络的分类特征, 分类准确率为 96.75%, 说明 dPTE 可以准确探知到大脑在说谎状态与诚实状态下的差异信息。以上证据表明, 本

文方法可以有效探索人类说谎时大脑的认知机制,同时也是一种有效的测谎方法。

实验结果表明,在说谎状态下,部分脑区之间的信息流强度相较于诚实状态下更高,尤其是前额叶皮层、后顶叶皮层和颞叶皮层(见图6)。在说谎激活的相关脑区中,这些脑区之间的信息流动可以解释为需要协调和使用更多的大脑资源才能有效地执行欺骗行为。记忆编码、抑制控制、任务转换是实现欺骗行为最基本的神经活动^[24]。后顶回参与了视觉注意功能,并且在记忆更新中起关键作用^[25]。一些关于fMRI的欺骗研究表明,在欺骗过程中激活了后顶回^[26],并且Sun等^[27]发现后顶回在欺骗的后期过程中被激活,表明其通过操纵真实信息以达到欺骗的目的。本文将说谎组与诚实组进行比较后发现,2组的后顶回和顶上小叶(R-IPG→M-SPL)之间存在相反的信息流传递,不仅为后顶回参与欺骗过程提供了新的证据,而且揭露了后顶回在欺骗过程中的信息传递规律。另外有研究表明,颞叶在长期记忆中起重要作用^[28],本文结果发现,说谎类人群与诚实类人群在后顶回与颞叶(R-IPG→R-MTG, R-IPG→R-STG)之间存在相反的信息流传递,可能表示传入的视觉信息引发了情节性记忆的检索,然后进行了记忆更新。关于前额叶,本文发现,前额叶的额上回和额下回(L-IFG→M-SFG)之间有很强的信息交流,其与人的思维、决策、记忆等脑认知活动存在密切的联系。说谎行为需要抑制、判断、决策、记忆等多项认知功能的共同参与,前额叶在复杂而协调的认知活动中起着至关重要的作用^[29]。进一步,考虑到颞叶皮层反复参与长期记忆过程^[27],说谎状态下前额叶与颞叶(R-SFG→R-MTG, L-IFG→R-STG)之间的强信息流动表明,犯罪人员在看到与被盗物或犯罪现场相关的场景时会不可避免地回忆犯罪过程或细节等信息,并对这些信息进行了记忆检索和思维决策等认知处理。总的来说,以上研究结果表明,欺骗会导致大脑中的信息流向重新分配和增强,这可能与说谎者在反测谎过程中更为复杂的脑部活动有关。

虽然当前国内外不同学者对测谎进行了许多研究,但由于测谎协议、特征提取方式及数据处理方式的不同,会导致部分研究结果之间存在差异。本文利用dPTE对欺骗状态下脑网络的信息流进行研究,结果显示信息流主要由额叶和顶叶流向颞叶,这些结果部分支持了国内外其他研究结果^[7-9],同时也有新的研究发现。不同的测谎协议及特征提取算法之间的对比研究也是未来的研究内容之一。

5 结 论

1) 本文针对P刺激对受试者产生的影响进行脑电信号分析,使用归一化后的PTE来度量脑区之间的信息流模式。根据网络的信息流模式来探索一个大脑区域对另一个大脑区域的直接因果影响,探索欺骗和说真话的认知差异,为揭示欺骗状态下大脑的神经活动机制提供新的见解。

2) 根据脑网络分析结果,额顶叶和颞叶之间的信息交互增强,表明欺骗任务在某些皮质上引起了更强的激活,这在很大程度上与先前关于欺骗的许多研究发现是一致的。

3) 本文仅对头皮脑电信号进行了简单分析,未对大脑皮层的网络结构进行研究,将来会利用溯源的方法进一步分析皮层脑功能网络的定向连接,以对谎言机制进行更深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] TURRI A, TURRI J. The truth about lying[J]. *Cognition: International Journal of Cognitive Psychology*, 2015, 138: 161-168.
- [2] GÜNTHER K. Behavioral correlates of statement credibility: Theories, paradigms, and results[M]. Berlin: Springer, 1989: 281-282.
- [3] TOMASH J, REED P. The generalization of a conditioned response to deception across the public/private barrier[J]. *Learning and Motivation*, 2013, 44(3): 196-203.
- [4] GAO J F, YAN X G, SUN J C, et al. Denoised P300 and machine learning-based concealed information test method[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2011, 104(3): 410-417.
- [5] 彭丝雨, 周到, 张家琦, 等. 基于互信息的脑网络及测谎研究[J]. *电子学报*, 2019, 47(7): 1551-1556.
PENG S Y, ZHOU D, ZHANG J Q, et al. Research on mutual information-based brain network and lie detection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(7): 1551-1556(in Chinese).
- [6] BABLANI A, EDLA D R, TRIPATHI D, et al. An efficient concealed information test: EEG feature extraction and ensemble classification for lie identification[J]. *Machine Vision and Applications*, 2019, 30(5): 813-832.
- [7] WANG H, CHANG W, ZHANG C. Functional brain network and multichannel analysis for the P300-based brain computer interface system of lying detection[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 53: 117-128.
- [8] WANG Y, CHUN N W, SIONG N K, et al. An electroencephalography network and connectivity analysis for deception in instructed lying tasks[J]. *Plos One*, 2015, 10(2): e0116522.
- [9] KOHAN M D, NASRABADI A M, SHARIFI A, et al. Interview based connectivity analysis of EEG in order to detect deception[J]. *Medical Hypotheses*, 2020, 136: 109517.
- [10] LI M, LUO X Y, YANG J F, et al. Applying a locally linear embedding algorithm for feature extraction and visualization of MIEEG[J]. *Journal of Sensors*, 2016, 2016: 7481946.
- [11] MURIEL L A, FELIX S, SATU P, et al. Phase transfer entropy: A

- novel phase-based measure for directed connectivity in networks coupled by oscillatory interactions[J]. *Neuroimage*, 2014, 85: 853-872.
- [12] HILLEBRAND A, TEWARIE P, DELLEN E V, et al. Direction of information flow in large-scale resting-state networks is frequency-dependent[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(14): 3867-3872.
- [13] MEENAKSHI D, EDWIN V D, LOTTE B, et al. EEG-directed connectivity from posterior brain regions is decreased in dementia with Lewy bodies: A comparison with Alzheimer's disease and controls[J]. *Neurobiology of Aging*, 2016, 41: 122-129.
- [14] FATEMEH H, MARYAM M, REZA R. Graph theory analysis of directed functional brain networks in major depressive disorder based on EEG signal[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2020, 17(2): 026010.
- [15] VICENTE R, WIBRAL M, LINDNER M, et al. Transfer entropy—A model-free measure of effective connectivity for the neurosciences[J]. *Journal of Computational Neuroscience*, 2011, 30(1): 45-67.
- [16] EMARA H M, ELWEKEIL M, TAHA T E, et al. Hilbert transform and statistical analysis for channel selection and epileptic seizure prediction[J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 116(2): 3371-3395.
- [17] CHOWDHURY M S N, DUTTA A, ROBISON M K, et al. Deep neural network for visual stimulus-based reaction time estimation using the periodogram of single-trial EEG[J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 6090.
- [18] ARASTEH A, MORADI M H, JANGHORBANI A. A novel method based on empirical mode decomposition for P300-based detection of deception[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, 11(11): 2584-2593.
- [19] VDAS D, DATTA S, BHATTACHARJEE T, et al. Eliminating individual bias to improve stress detection from multimodal physiological data[C]//2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 5753-5758.
- [20] JAMES G, WITTEN D, HASTIE T, et al. An introduction to statistical learning: With applications in R[M]. Berlin: Springer, 2013: 176-177.
- [21] GAO J F, LANG L, YANG Y, et al. A novel concealed information test method based on independent component analysis and support vector machine[J]. *Clinical EEG and Neuroscience*, 2012, 43(1): 54-63.
- [22] KOESSLER L, MAILLARD L, BENHADID A, et al. Automated cortical projection of EEG sensors: Anatomical correlation via the international 10-10 system[J]. *Neuroimage*, 2009, 46(1): 64-72.
- [23] XIA M R, WANG J H, HE Y. BrainNet Viewer: A network visualization tool for human brain connectomics[J]. *Plos One*, 2013, 8(7): e68910.
- [24] GANIS G, ROSENFELD J P, MEIXNER J, et al. Lying in the scanner: Covert countermeasures disrupt deception detection by functional magnetic resonance imaging[J]. *Neuroimage*, 2011, 55(1): 312-319.
- [25] BORST J P, ANDERSON J R. Using model-based functional MRI to locate working memory updates and declarative memory retrievals in the fronto-parietal network[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(5): 1628-1633.
- [26] CHRIST S E, ESSEN D C V, WATSON J M, et al. The contributions of prefrontal cortex and executive control to deception: Evidence from activation likelihood estimate meta-analyses[J]. *Cerebral Cortex*, 2009, 19(7): 1557-1566.
- [27] CHAN C, CHETWYN C H, SUN D, et al. Unfolding the spatial and temporal neural processing of lying about face familiarity[J]. *Cerebral Cortex*, 2015, 25(4): 927-936.
- [28] HEBART M N, HESSELMANN G. What visual information is processed in the human dorsal stream?[J]. *Journal of Neuroscience the Official Journal of the Society for Neuroscience*, 2012, 32(24): 8107-8109.
- [29] KARTON I, BACHMANN T. Disrupting dorsolateral prefrontal cortex by rTMS reduces the P300 based marker of deception[J]. *Brain and Behavior*, 2017, 7(4): e00656.

Lie mechanism based on phase transfer entropy of EEG signals

WEI Sihong, ZHANG Jiaqi, LI Feng, KANG Qianru, GAO Junfeng*

(Key Laboratory of Cognitive Science, State Ethnic Affairs Commission, School of Biomedical Engineering,
South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

Abstract: Lying is a complex cognitive process whose executive function requires the participation of different brain regions. And the interaction between these brain regions has been confirmed by related research. In view of the problems of limited current EEG signal feature extraction methods and the unclear psychological mechanism of lying, we constructed EEG signals-based brain networks by phase transfer entropy during the lie experiment, and we have analyzed the effective connectivity between different brain regions in the honest group and the lying group. First, the standard three-stimulus experiment was used to conduct a lying detection experiment on 60 subjects. The EEG signals of all subjects were collected simultaneously and preprocessed. Then, the phase transfer entropy was used to construct the effective connectivity matrix. Subsequently, the statistical method was used to analyze the entropy value difference between the two groups of each edge in the matrix, and the electrode pairs with significant differences in entropy value were selected as the classification features of the fully connected neural network. The result shows that the classification accuracy rate is 96.75%, indicating that it is effective to use phase transfer entropy index to distinguish the EEG signals of the liar and the honest. Finally, the brain function network of the two groups of people was analyzed. The results show that compared with honest people, there is a stronger flow of information between the frontal, parietal and temporal lobes of the liar, indicating that deception requires coordination and utilization of more brain resources. The above analysis results will help reveal the brain's neural activity mechanism in a lying state.

Keywords: EEG; lie detection; effective connectivity; phase transfer entropy; fully connected neural network; brain networks

Received: 2021-04-12; **Accepted:** 2021-05-31; **Published Online:** 2021-06-15 12:12

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210615.1130.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61773408); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (CZZ19004,CZY20039)

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

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0167

锂离子动力电池系统多尺度热安全研究

张艳岗¹, 郭旭旭¹, 薛文阳¹, 张志文¹, 梁君飞^{1,*}, 王华²

(1. 中北大学 能源与动力工程学院, 太原 030051; 2. 北京航空航天大学 化学学院, 北京 100191)

摘 要: 锂离子动力电池系统作为电动汽车最重要的核心部件, 其动力性能和安全可靠性的提升是中国电动汽车进一步规模化发展的重大需求。锂离子动力电池的热安全问题贯穿于电池系统的整个生命周期, 且在单体-模组-系统不同空间尺度下的表现形式不同。针对锂离子动力电池系统多空间尺度热安全问题, 分别从单体电池生热、模组温度均一性、电池系统安全可靠性的3个方面归纳总结了目前动力电池热安全设计的最新进展, 并对一些重要研究成果进行了着重介绍, 总结了锂离子动力电池系统热安全设计亟待解决的关键问题, 提出了可行的解决方案, 对今后的研究方向进行了展望, 旨在为电池系统动力性能和安全可靠性提升提供有益的借鉴和参考。

关键词: 锂离子动力电池系统; 生热模型; 温度均一性; 热管理系统; 可靠性

中图分类号: TM912; U469.72

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0031-14

发展电动汽车(electric vehicle)对于解决能源危机和促进汽车工业的可持续发展具有重要意义, 是当下世界各国重点支持的战略方向之一。而动力电池系统作为电动汽车最重要的核心部件, 其动力性能和安全可靠性的提升是发展电动汽车的关键所在, 也是电动汽车进一步规模化发展的重大需求。动力电池系统中, 由于锂离子电池具有能量密度高、比功率大、质量轻、自放电率低、可回收性好、循环寿命长等优点, 其被认为是目前电动汽车最适合的蓄电储能装置, 已成为各国科学界和工业界研究的重要方向。

动力电池系统性能的提升离不开单体电池性能的提升, 单体电池能量密度的提高对于电池系统动力性能和续航能力的提升具有重要意义, 而单体电池能量密度的提高会不可避免地造成电池充放电过程中生热量和生热速率急剧增加, 这会显著影响单体电池的工作性能, 甚至引发严重的安全性问题。另外, 为了提供充足动力, 电动汽车需要大量

单体电池成组工作, 电池组性能不一致性和温度不一致性的耦合作用会进一步恶化电池工作环境, 甚至引发热失控等安全问题。此外, 恶劣环境温度和高倍率充放电情况下的单体电池性能衰减, 单体不一致性引发的电池模组热失控及热蔓延, 以及不同车载工况下电池箱体的机械可靠性等问题, 使得电池系统多源可靠性评价异常困难。动力电池系统的热安全设计不仅贯穿于长时间尺度下的电池系统全生命周期, 同时在单体、模组、系统等不同空间尺度下的失效机理和热安全设计机制均不相同, 高性能长寿命的动力电池系统设计不再是单尺度、单物理场、单学科、单目标的设计优化问题, 而是长时间多空间尺度下从电池单体、模组到系统的跨尺度集成优化问题, 迫切需要从系统耦合与集成的角度研究动力电池系统的热安全设计理论与方法。

针对上述问题, 本文从单体电池生热、模组温度均一性、电池系统安全可靠性的3个方面总结了动力电池热安全设计的最新进展, 归纳了锂离子动力

收稿日期: 2021-04-02; 录用日期: 2021-08-27; 网络出版时间: 2021-09-14 09:40

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210913.1653.003.html

基金项目: 国家自然科学基金(51605447); 山西省基础研究计划(20210302123069, 201901D211208); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0605); 山西省研究生创新项目(2021Y662)

*通信作者. E-mail: jfliang@nuc.edu.cn

引用格式: 张艳岗, 郭旭旭, 薛文阳, 等. 锂离子动力电池系统多尺度热安全研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 31-44.

ZHANG YG, GUO XX, XUE WY, et al. Research on multi-scale thermal safety of lithium-ion power battery system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 31-44 (in Chinese).

电池系统热安全设计亟待解决的关键问题,并给出了可行的解决方案,力求为电池系统动力性能和安全可靠提升提供有益的借鉴和参考。

1 单体电池生热机理及模型

单体电池生热规律分析及温度在时间域和空间域上的表征,是单体电池热失控抑制、电池模组热管理系统设计及电池系统热失控抑制的关键基础。电池生热散热过程是一个典型的有时变内热源的非稳态导热过程,其生热特性由电化学反应和电热转换过程决定。如式(1)所示,锂离子电池生热主要来源有反应热 Q_r (由化学反应产生)、欧姆热 Q_n (带电粒子的焦耳热效应产生)、极化热 Q_p (因极化现象造成电位差而产生)和副反应热(充放电过程中电池材料分解产生)等。其中,副反应热是电池非正常工作状态下产生的,且数值很小,计算中常被忽略^[1]。

$$Q_z = Q_r + Q_n + Q_p = nmQI/(MF) + I^2 R_t \quad (1)$$

$$Q_n = I^2 R_t \quad (2)$$

$$Q_p = I^2 R_p \quad (3)$$

式中: 电池内阻 $R_t = R_n + R_p$, R_n 为欧姆内阻, R_p 为极化内阻; n 为电池数量; m 为电池电极的质量, g ; Q 为电池的电化学反应热, J ; I 为充放电电流, A ; $F = 96484.5 \text{ C/mol}$ 为法拉第常数; M 为摩尔质量, g/mol 。

Bernardi 等^[2] 提出的生热速率模型是目前应用最为广泛的计算模型,该模型的表达式为

$$q = \frac{1}{V_b} \left| E_{\text{voc}} - U - T \frac{dE}{dT} \right| = \frac{1}{V_b} \left| (R_{\text{ohm}} - R_p) - T \frac{dE}{dT} \right| \quad (4)$$

式中: I 为充放电电流,放电为正,充电为负; V_b 为电池体积; E_{voc} 和 U 分别为电池的开路电压和工作电压; T 为电池温度; dE/dT 表示可逆反应热; R_{ohm} 为欧姆内阻; q 为总生热量。由生热速率公式可知,电池产热主要与电流和电池内阻有关。

锂离子电池生热规律分析主要依赖于数值模拟和实验研究,辅助以实验手段的单体生热模型准确构建是锂离子电池生热特性分析及后续热管理系统设计的重要基础。目前,对锂离子电池热模型的研究按其建模原理可分为电-热耦合模型、热滥用模型和电化学-热耦合模型。

1.1 电-热耦合模型

电-热耦合模型主要基于等效电路原理,在分析电池内阻与电池工作状态的变化关系基础上研究电池的焦耳热,进一步对充放电过程中的电模型进行实时调整。Wang 等^[3] 分别采用混合脉冲动力特

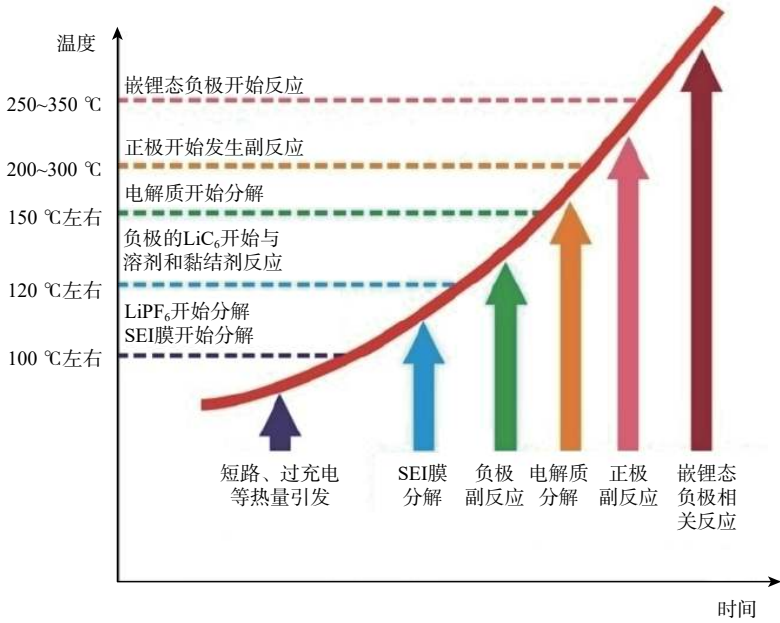
性和电化学阻抗谱 2 种方法对电池充放电产热行为进行了研究,指出不可逆欧姆热是电池主要生热来源;宋文吉等^[4] 进一步借助分层结构的电-热耦合模型,分析了锂离子电池温度分布和电-热变化规律,并基于该模型优化了电池极耳结构;姜水生等^[5] 通过建立电-热耦合模型,分析了电池单体电流密度及生热速率在电芯上的分布规律,并基于该模型优化了热管理系统;Barcellona 和 Piegari^[6] 提出一种集成了电池环境因素的电-热模型,来预测电池单体的热行为,为电-热耦合模型研究指明了新的方向;Pan 等^[7] 提出了一种伪三维多节点耦合的电-热耦合模型,可以实时预测电池内部和表面的温度场,在较宽的工作范围内具有良好的精度,对于电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS)设计具有很好的参考价值;Xie 等^[8] 通过建立锂离子电池的电-热耦合模型来预测不同放电电流和环境温度条件下的产热行为,可以准确预测电池温度分布状态。

综上所述,电-热耦合模型由于忽略了电池内部实际反应过程,集流体被考虑为随时间变化的电阻。因此,该模型常被用于电池外形的布置和优化等方面,以及电池组、电池箱结构和 BTMS 的设计。

1.2 热滥用模型

热滥用模型是在传统模型的基础上,考虑了异常工作状态下的生热副反应状态,如高温、短路、挤压和过充等工况。如图 1 所示^[9],锂离子电池生热副反应主要包括固体电解质界面(solid electrolyte interface, SEI)膜分解、负极副反应、电解质分解、正极副反应和嵌锂态负极相关反应。热滥用模型主要搭建副反应与温度间的联系,通过高温加热、短路、挤压和过充等方式诱发热失控,进而模拟电池在热滥用条件下的热特性规律。

Lai 等^[10] 针对内部短路引发的热失控问题,总结了目前热失控机理和演化过程研究的热滥用模型,并展望了内部短路引发的热失控研究的关键技术;Yuan 等^[11] 基于热滥用模型论证了在单体电池间隙填充石墨复合和铝挤压材料来实现热失控蔓延抑制的有效性;Feng 等^[12] 基于热滥用模型分析了粒子形态、掺杂比例、涂层策略、电池的格式和内部短路电流等因素对电池热稳定性的影响规律,指出了热失控抑制的关键特性表征方法;Li 等^[13] 研究了不同荷电状态下的大容量锂离子电池的热失控及蔓延行为,结果表明,较低的电池荷电状态可以显著减轻电池模块的燃烧和传播危害;Lai 等^[14] 基于热滥用模型,对加热、穿钉和过充 3 种触发状态下的锂离子电池模块快速热失控传播行为进行

图 1 锂离子电池热失控过程^[9]Fig. 1 Thermal runaway process of lithium-ion battery^[9]

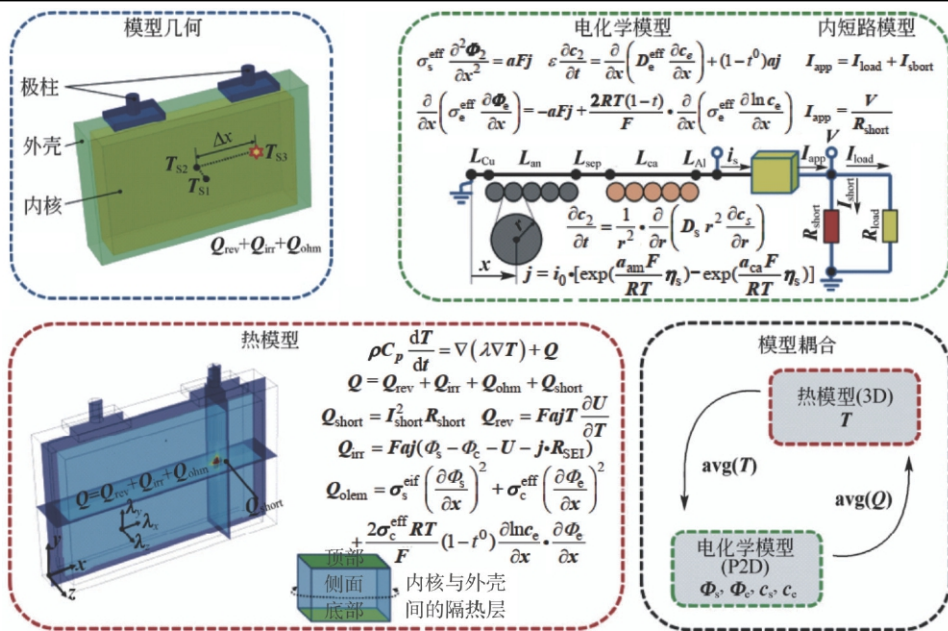
了研究和比较,提出了改善电池组结构来抑制或延迟热失控传播的电池热失控抑制策略;Ren等^[15]通过构建过充热滥用模型,研究表明不同过充电电流对电池热失控特性影响不大;Huang等^[16]针对三元镍钴锰锂电池($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$, NCM)和三元磷酸铁锂电池(LiFePO_4 , LFP)电池的热失控传播特性进行了分析,指出三元NCM电池的热失控持续时间和最高温度要高于三元LFP电池,传播更具有危险性,为电动汽车电池和储能电池/模块的安全设计提供了较高的借鉴价值。因此,热滥用模型较好地预测了电池热失控和热扩散,进而为电池单体、模组的热安全设计提供技术支持。但由于该模型未能综合考虑各种副反应与电池电化学参数之间的耦合关系,以及高温环境对电池实际物理结构的影响,导致热滥用模型对于电池结构改进及电化学性能优化的指导价值有限。

1.3 电化学-热耦合模型

电化学-热耦合模型主要基于锂离子电池工作时锂离子浓度、电流密度和电势分布结合能量守恒定律,来分析不同时域位置的各组分生热率,进而通过传热边界计算各组分温度场。该模型充分考虑了电池的实际运行机理,相比于电-热耦合更能精确表征电池的生热传热状态^[17]。Doyle和Newman^[18]提出的准二维电化学-热耦合模型(pseudo-two-dimensions, P2D)可以较准确表征锂离子电池电化学动力学行为,具有计算精度高的优点,但存在计算效率低的不足;庞辉^[19]针对上述不足,提出了简化准二维(simplified pseudo-two dimensions, SP2D)模

型,在保证计算精度的同时计算效率提高了90%,使得该模型得以广泛应用;Han等^[20]利用建立的电化学-热耦合数值模型,分析了环境温度对电池放电电压和放电深度的影响规律;Liu等^[21]基于所构建的电化学-热耦合模型,分析了电极结构参数、材料性能参数和动力学参数等参数对NCM811软包电池的电化学特性的影响规律;Lin等^[22]基于电化学-热耦合模型首次探讨了平均比热容和变比热容在计算NCM/石墨材料瞬时产热功率时的差异,研究表明,在低温范围($25\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$)使用平均比热容产生的误差较大;Chen等^[23]提出一种新的纽扣电池微量热法,基于三维电化学-热耦合模型对NCM111材料在不同电流速率下的产热状态进行了高精度的研究,指出电流和极化是造成高电流速率下产热率快速增加的主要因素;之后,Chen等^[24]又利用电化学-热耦合模型进一步从电极厚度、电流速率和温度3个方面研究了电极的电化学性能和热行为,指出充电过程比放电过程对电流速率的变化更敏感;清华大学欧阳明高院士团队^[25]采用等效短路内阻的方法,基于实验测试搭建了包含内短路的三维电化学-热耦合模型框架(见图2),为从数值模拟角度构建计及电池微观结构和热失控触发的三维电化学-热耦合模型奠定了重要基础。

综上所述,电化学-热耦合模型考虑了电芯内部反应物浓度和电流密度分布导致的生热空间性和时变性,可以较准确地模拟电池温度场,但目前的电化学模型通常以Newman和Doyle^[26]提出的P2D电化学模型为主,该模型由于忽略了电池密度分布

图2 含内短路的三维电化学-热耦合模型^[25]Fig. 2 3D electrochemical-thermal coupling model with internal short circuit^[25]

的差异性,导致大型电池热性能分析精度较差;同时,无论是电池单颗粒模型、P2D模型还是三维模型,均一化参数模型由于忽略了电池电极材料及微观结构与电池放热性能的相互影响,而未能指导电池材料及结构的具体设计。从电化学反应和电流分布出发的分布参数热模型,可以精确表征单体电池内部生热状态、外部温度场分布,进而指导单体电池的精益设计,同时对电池模组温度均一性分析及性能提升具有重要意义。

2 长时间尺度下电池单体热安全

动力电池系统的热安全设计贯穿于整个电池系统全生命周期,其在单体、模组、系统等不同空间尺度下的热失效机制均不相同。电池单体作为电池系统构成的基本单元,其热安全性设计是动力电池系统热安全设计的核心和基础。长时间尺度下电池单体热安全设计主要包括长时间尺度下电池材料改性等本征安全设计,以及长时间尺度下电池单体荷电状态和容量受环境压力、高温循环等因素影响的被动热安全设计。

2.1 长时间尺度下电池单体本征安全设计

热滥用是引发电池单体安全性问题的关键诱因之一,通过电极材料、电解液隔膜、电解液等电池单体性能改进方法可以有效提高电池材料在长时间尺度下的热稳定性,进而提升电池的热安全性。因此,长时间尺度下锂离子电池单体本征安全研究对于电池热安全设计具有非常重要的意义。邵丹等^[27]分别从正极材料、负极材料、电解液隔膜和电解液的角度总结了电池单体热安全性能提升

的方法,指出通过正极材料表面涂层可以防止正极高温分解,同时避免与电解液直接接触,电解液添加优化剂是提高SEI膜的稳定性从而解决锂枝晶析出问题的有效手段,采用高阻燃性能材料可以有效提高电池单体的热稳定性,进而提升电池单体在长时间尺度下的本征安全;Wu等^[28]进一步探索了电极、电解质和电解液隔膜等材料性能对电池热稳定性性能的影响规律,研究表明,选择不易分解材料的SEI膜、电解质中添加燃烧抑制剂、采用电极材料涂覆包裹等方法是提高长时间尺度下电池单体本征安全性能的有效途径,通过对正极材料的表面进行包覆涂层可以有效改善其热稳定性,对于负极材料热稳定性的改善,目前研究及应用较广泛的手段是采用原子层沉积法^[29]对负极进行包覆;Zhai等^[30]在总结归纳隔膜材料的研究进展及其应用现状的基础上,指出减小隔膜厚度、开发智能隔膜、研制高热稳定性的新型隔膜材料是未来从隔膜角度热安全设计的主要方向;Taniguchi等^[31]指出如钛酸锂等高热稳定性的新型负极材料可以有效提高电池的本征安全性,电解质热稳定性的改善主要依赖于在碳酸盐电解质中加入添加剂或者开发新的电解质盐,以及开发优化的新型电解质系统;Wu等^[32]探索了阴极-电解质界面(cathode electrolyte interphase, CEI)对阴极热稳定性性能的影响规律,为未来电池单体本征热安全设计提供了新的思想。

2.2 长时间尺度下电池被动热安全性设计

对于长时间处于工作状态下的电池,环境压力、高温循环等因素严重影响着电池单体的荷电状态、容量及寿命,而荷电状态、容量及寿命是决定

电池单体热安全性能的关键因素。因此,电池单体的热安全设计除了电池材料改性等本征安全设计外,长时间尺度下电池被动热安全性设计同样重要。Chen等^[33]基于实验分析了环境压力对不同阴极和不同荷电状态锂离子电池热失控和起火行为的影响,发现环境压力对热失控后的燃烧热有着显著影响;Song等^[34]等基于18650电池的充放电循环实验,研究了长时间状态下循环老化和环境压力对锂离子电池的热安全特性的影响规律,结果表明,低压循环老化电池更容易触发热失控,随着循环次数的增加或外界压力的降低,热失控的开始时间和温度均降低,气体释放到点火的间隔时间随着循环次数的增加而减少,而燃烧时间随着压力的降低而增加;汪宜秀等^[35]分析了工作区间对电池老化的影响及电池组性能一致性演变问题,提出了优化最差单体工作区间的寿命均衡策略,为电池组性能均衡研究提供了新的方向;Alastair等^[36]提出了利用散热系数的概念来表征电池单体散热效果,并研究了对于特定的电池单体的散热措施;任东生等^[37]研究指出负极析锂是影响电池单体热安全性能的重要因素,分析了长时间状态下循环老化和储存老化对电池安全性能的影响关系,指出储存老化后电池热滥用性能有一定提升,但储存老化过程中产生的气体一定程度上影响着电池安全;Xu等^[38]通过研究电池全生命周期中荷电状态、电池健康度(state of health, SOH)、温度一致性对动力电池系统安全性能的影响规律,提出了动力电池系统性能矩阵的概念,并通过对锂离子电池进行了1000次循环充放电实验来验证了基于状态空间的性能矩阵能够描述电池系统安全状态的动态变化,该研究可以为长时间尺度下电池被动热安全性设计提供方法参考。

综上所述,电池单体热安全设计是电池系统热安全设计的重要基础,不论是电池材料改性的本征安全设计,还是电池单体的被动安全设计,都必须重点关注长时间尺度下的电池单体性能、状态的动态演变过程,从而保证电池单体在长时间工作状态下的热安全性能,进而为电池模组和电池系统的热失控及热蔓延抑制奠定基础。

3 电池模组温度均一性分析

为了提供充足动力,电动汽车需要大量单体电池成组工作,成组后的电池性能受最差的单体性能限制,电池模组的温度不一致性是电池容量利用率降低的主要影响因素,同时极易降低电池系统的寿命和热安全性。高效BTMS设计是解决锂离子

电池模组温度不一致性问题的有效手段,尤其是对于高/低温等极限工况下电池模组的温度均一性、热失控及蔓延抑制等问题。为解决电池模组的热安全性难题,国内外学者对于热管理系统的研究主要集中在空气冷却、液体冷却、相变材料(phase change materials, PCM)冷却、热管冷却、微通道冷却等,以及上述热管理系统的组合系统设计。

3.1 空(风)冷热管理系统

空冷热管理系统主要是利用电池单体间隙中的空气流动带走电池的部分热量来降低电池的表面温度。为了提高散热效果,常常需要大量的空冷系统管道和整体尺寸较大的阀体结构,同时风机能耗偏高,这一特点严重限制了空冷热管理系统在更大容量、更大航程电动汽车中的应用^[39]。空冷系统可以分为自然对流和强制对流,自然对流属被动冷却,强制对流属主动冷却,为了提高电池模组温度均一性,更多关于空冷热管理系统的研究集中在优化气流通道和电池组布局方面。Fan等^[40]基于实验对比分析了空冷热管理系统的对齐、交错和交叉布局的散热效果,指出同等边界条件下交叉布局的散热效果更好;Chen等^[41]利用计算流体力学方法和实验设计优化了并联风冷BTMS中电池组的电池间距分布,进而提高了系统的冷却效率,该方法可以为空冷系统结构优化提供借鉴;Liu等^[42]提出了一种新的细水雾(water mist, WM)控制策略,利用WM液滴的蒸发潜热与空冷热管理系统相结合,实现电池模组散热效率的提升,但空冷系统复杂、冷却速度慢的不足依然没有解决;Chen等^[43]结合计算流体模拟方法和非支配排序遗传算法对风冷散热模型实现了多目标优化,使得空冷系统散热效率得到有效提高,将计算流体模拟方法与优化算法的优势结合起来进行空冷热管理系统的多目标优化是当前空冷热管理系统设计及性能优化的有效手段。

空冷热管理系统虽然具有结构简单、经济性好的优势,但存在导热系数低、冷却速度慢、温度均匀性差的缺点,很难满足锂离子电池高倍率充放电的需求。此外,空冷系统主要依靠空气流动来降低温度,而无法在寒冷的极端条件下为电池模组提供合适的工作平台。因此,空冷热管理系统与其他热管理系统的复合使用是BTMS发展的趋势之一。

3.2 液冷热管理系统

液冷热管理系统是一种导热系数高、冷却效率高的热管理系统,已经在部分电动汽车上得到广泛应用,但这类系统结构相对复杂,对于冷却剂的绝缘密封、无毒、化学稳定、阻燃等性能要求较高。

Karimi 和 Li^[44] 的研究指出硅油比空气有更好的冷却效果, 目前的研究多选用硅油和矿物油作为冷却剂^[45], 将电池组浸入冷却液中进行整个表面的冷却有助于提高电池组温度均匀性, 减少局部热效应, 但带来了冷却液阻燃性能要求提高和电池组质量、成本大幅增加的不足; 罗玉涛等^[46] 将变压器油作为冷却剂, 实验结果表明, 该方法可以对于 4 C 放电速率下的冷却效果较好, 但冷却过程中变压器油的温度无法控制; Wang 等^[47] 设计了一个基于导热硅片和水通道的冷却系统, 通过实验证明导热硅片可以有效增强液冷系统的散热性能, 为液冷热管理系统设计提供了新的思路。

对于液冷热管理系统而言, 除了冷却液性能优化外, 冷却通道的布局及结构优化设计是提高电池热管理性能的另一个重要研究方向, 主要出现了冷板型、翅片型、微通道型等通道设计及优化。Qian 等^[48] 利用数值模拟方法分析了通道数量、进口质量流量、通道流向和通道宽度对微通道液冷热管理系统性能的影响, 优化了上述结构参数; 苟飘等^[49] 针对高温环境下的锂离子电池性能退化、热失控等问题, 提出了一种锂离子电池模块化液体冷却系统, 论证了并联方式相比于串联方式在冷却效率方面的优势; Zhao 和 Jiang^[50] 研究了蛇形通道液冷系统中电池组内的温度均一性能, 指出缩短多蛇纹石通道的流道, 增加流动方向蛇纹石通道的接触面积, 可以有效提高模组的温度均一性; Deng 等^[51] 进一步探讨了通道数量、通道布置和冷却剂进口温度对蛇形通道液冷系统性能的影响, 得出了通道数超过 5 个冷却效率没有提高, 长度布置效果更好, 冷却剂进口温度影响不大的结论; Rao 等^[52] 将铝块与冷却通道相结合, 扩大了液冷系统与圆柱形电池之间的传热区域, 有效提高了电池组温度均一性能; Saw 等^[53] 通过实验和数值模拟研究了常规干空气冷却和薄雾冷却的热性能, 证明了喷雾冷却系统的优良冷却性能, 该系统可为锂离子电池液冷热管理系统提供一种替代方案。

相比于空冷系统, 液冷系统散热效率有了明显提升, 而且电池组温度分布更加均匀, 但液冷系统结构较为复杂, 且对电池包的密封性有着极高的要求, 将液冷系统的成熟应用技术与其他热管理系统有效结合起来是电动汽车规模发展的趋势之一。

3.3 热管冷却系统

热管冷却系统是一种无外部动力驱动的相变换热装置, 主要利用管内介质的相变过程来传递热量, 因而可以在温差较小的情况下传递大量的热量, 使得电池的温度维持在一个稳定范围内。由于

其导热性好的优势, 热管冷却系统已经在锂离子电池中逐步开始应用, 成为当前研究热点之一。Yao 等^[54] 提出了一种新型微热管阵列热管理系统, 探索了极端工况下新型微热管阵列热管理系统的应用效能, 实现了电池组更长的循环寿命和更强的动力性能, 有望进一步支持 BTMS 的发展; Ye 等^[55] 设计了 3 mm 微热管阵列热管理系统, 使电池在高/低温下的衰减得到了明显降低, 同时有效缓解了局部的热失控问题, 可为极端工况下电池模组的热安全性能提升提供有益借鉴; Zhang 等^[56] 对比分析了热管冷却系统、热管热电组合系统的散热性能, 分析表明, 组合系统的热管理性能更好; Ouyang 等^[57] 提出了一种利用热管作为热母线来高效散热的智能 BTMS, 获得了较好的温度跟踪性能和能源利用率, 为热管冷却系统设计应用提供了新的思路。由此可见, 相比于空冷、液冷系统, 热管冷却系统对于电池单体的散热性能, 尤其是模组温度均一性能的提升方面具有很大优势, 而且热管系统可以满足电池组高温散热和低温预热的双工况需求, 是 BTMS 重点研究方向之一, 但受布置和体积的限制, 目前未在电动汽车领域得到应用。将热管冷却系统的上述优势与其他热管理系统结合起来是 BTMS 的发展趋势之一。

3.4 基于相变材料的复合热管理系统

PCM 热管理系统是一种利用相变潜热的吸收和释放来对电池系统进行散热和预热的被动冷却系统, 其具有体积变化小、潜热大、相变热稳定性好等优点, 但由于热传导能力差、热管理系统力学性能不稳定等不足, 新型复合相变材料 (composite phase change materials, CPCPM) 的设计制备与基于 PCM 的复合热管理系统设计是 PCM 热管理系统研究的重点方向。Zou 等^[58] 设计制备了一种新型的防漏高导热 CPCPM, 使电池温度均匀性得到了明显改善, CPCPM 的设计逐步成为了研究热点; Zhang 等^[59] 研发了一种热管、泡沫铜和 PCM 相结合的新型分离型 PCM, 相比于自然对流、强制对流和基准 PCM 模式, 复合热管理系统使得模组的温度均一性得以进一步提升; Jilte 等^[60] 提出了一种双层纳米颗粒增强 PCM, 指出采用多层 PCM 跨径向布置的散热效果更好, 可为纳米 PCM 的设计优化提供方向性借鉴; Zhang 等^[61] 研制了一种以石蜡、膨胀石墨、聚磷酸铵、红磷和环氧树脂组成的新型电池模块阻燃复合材料 PCM, 并从宏观和微观 2 方面对其热物理性能和阻燃性能进行了研究, 在 18650 三元锂离子电池中得到成功应用; Chen 等^[62] 从电池热状态和循环寿命 2 方面评估了主动空冷和被动 PCM 冷却性能, 指出将 PCM 和主动空冷系统混合是提高锂

离子电池温度均一性和延长服役时间的有效途径之一。

由此可见, 基于 PCM 的 BTMS 通常具有相变潜热大、温度波动小且系统结构简单的优势, 但该系统为被动冷却, 需要及时将热量排出, 否则将导致冷却系统失效。因此, PCM 热管理系统研究中常常将 PCM 与泡沫金属、碳基材料进行复合, 或将 PCM 系统与其他冷却系统耦合形成复合热管理系统, 以提高其散热能力和力学性能。

3.5 混合热管理系统

由前述热管理系统研究现状可知, 单一热管理系统已经很难满足锂离子动力电池系统的需求。相比单一的热管理系统, 混合热管理系统使得模组温度均一性得到很大程度的提升, 但也带来了热管理系统庞大复杂的难题。Lyu 等^[63]设计了基于热电冷却、强制空冷和液冷的组合热管理系统, 实验结果表明, 混合系统的冷却效果良好, 然而系统复杂性带来了可靠性降低的风险; Tang 等^[64]为缓解传统电池系统固有的温度梯度问题, 将平板热管与液体冷却相结合, 提出了一种往复冷却策略, 结果表明, 往复冷却策略可以有效降低电池模块的温度差和温升; 王亮等^[65]设计了一种冷却、导热和蓄热相结合的混合热管理系统, 并利用优化算法实现了电池间距、导热结构、蓄热结构等系统参数的优化。将空气冷却、液体冷却、热电冷却等多个单一热管理系统集成的混合热管理系统具有冷却效率高的优势, 但系统庞大及复杂性加剧, 不能实现低温环境下的预热功能, 因此, 越来越多的混合热管理系统更多集成了 PCM 热管理系统, 取得了不错的效果。

Huang 等^[66]设计了一种新型的平板热管辅助 PCM 的 BTMS, 分析了该系统相比于纯 PCM、热管耦合空气热管理系统和热管耦合液体热管理系统的优势; Chen^[67]等将热管和 PCM 热管理进行耦合, 基于环境参数、热管参数和 PCM 参数对 BTMS 冷却性能进行了优化, 系统性能得到显著提高; Putra 等^[68]提出了一种 L 型翅片热管和 PCM 复合的电池模块被动冷却系统, 通过实验设计了 25~55 °C 温度范围内的最佳 PCM 材料; Kong 等^[69]提出了一种集成 PCM 和液体冷却的新型 BTMS, 利用 COMSOL 软件分别使用空气冷却、液体冷却、相变冷却和混合冷却, 结果表明, 混合冷却系统的散热性能较优; Yuan 等^[70]提出了一种具有散热和加热功能的微通道液冷、PCM、热管、导热胶混合热管理系统, 并实验和仿真验证了其有效性; Zhang 等^[71]提出了一种基于 PCM 和液体冷却的新型混合 BTMS, 该系统不仅可以实现电池极端工况的高效热管理, 而且解

决了传统 PCM 热管理在循环工况下吸热饱和而导致性能恶化的问题。

由于各类热管理系统集成过程中不可避免地涉及热流固等多物理场的耦合问题, 传统数值模拟方法在进行混合热管理系统的仿真分析时遇到了技术瓶颈, 更多学者着力于混合热管理系统仿真模型的构建研究。朱波等^[72]在某 CPCM 中嵌入了冷却管道, 利用冷却液流动过程中与 PCM 实现了热量交换, 通过 AMESIM 软件搭建了复合热管理系统模型, 进行了相变散热、辅热、高温散热 3 种情况的研究, 验证了这一复合模型的正确性; 黄伟男等^[73]提出一种用于温度-性能均一性耦合的电-热协同仿真方法, 利用 Modelica 语言和 CFD 软件构建了温度闭环的协同仿真模型, 通过零维电路模型与三维热路模型的耦合为电池性能与温度耦合仿真提供了新的思路; 王屹航等^[74]将孔隙网络模型的跨尺度多物理场耦合优势应用到电池组热管理系统优化中(见图 3), 取得了较好效果, 为电池系统单体-模组跨空间尺度分析提供了新的思路。

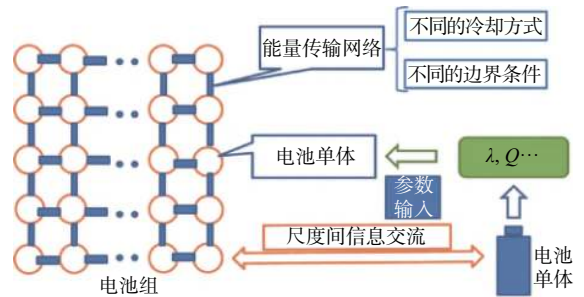


图 3 基于孔隙网络模型的跨尺度耦合热管理系统^[74]

Fig. 3 Cross-scale coupled thermal management system based on pore network model^[74]

综合上述研究现状, 针对电池模组温度不一致性难题, 空气冷却、液体冷却、相变冷却、热管冷却等单一热管理系统在不同领域得到了一定应用, 但依然存在冷却效率低、系统结构复杂等带来的可靠性难题, 尤其是未完全解决大功率动力电池组热安全问题。多类型热管理系统的混合设计与性能优化技术的有效结合是动力 BTMS 设计的发展趋势, 同时 BTMS 设计需要进一步考虑单体电池及模组的温度一致性动态演变问题, 如何建立单体与模组之间的热信息(热量、温度、热传导效率等)交互是高可靠性复合热管理系统研究及应用的关键问题之一。

4 电池系统安全可靠分析

动力电池系统作为电动汽车的关键部件, 其安全性设计不仅要防止系统内单体电池的热失控和

电池模组的热蔓延问题,同时还要承受由于路面载荷传递而来的各种激励引发的电池系统挤压、碰撞针刺等机械可靠性问题。因此,动力电池系统可靠性提升的核心是贯穿电池单体-模组-系统的跨空间尺度的安全性设计。

4.1 电池系统热失控及热蔓延抑制

动力电池安全本质是电池热失控及热蔓延抑制,有各种原因会导致电池安全事故发生,如热滥用原因、机械原因等。其中,热滥用是引发电池安全性问题的关键诱因之一,基于准确的电池热失控预测,可用于指导电池安全性设计,通过改善电池模组结构及热管理系统性能也可以大幅度提升电池的安全性,达到电池热失控及蔓延的抑制目标。

王莉等^[75]总结了锂离子动力电池系统安全问题的各种诱因,指出电池系统的安全性能提升可以从单体、模组和系统层面上采取措施,提出了多空间尺度热安全设计的思想;高菲等^[76]探索了高温循环和荷电状态对锂离子电池单体力学响应的影响规律,指出长时间高温环境会使得高荷电状态电池单体的最大模量和最大载荷应力显著降低;Zhang等^[77]以86 Ah商用LFP/石墨电池为对象,研究了加热器触发的热失控机理,得到了温度不均匀性对热失控的影响规律,该方法可以有效指导电池单体的热安全设计;Hu等^[78]基于COMSOL软件建立锂离子电池模型,分析了不同耗散温度下热失控抑制机理,通过多种副反应热模型,揭示了耗散温度对热失控的抑制机制,为锂离子电池热安全设计奠定了理论基础;Li等^[79]通过内部短路与热管冷却的VOF模型耦合,实现了电池与热管之间传热传质的数值模拟,研究表明,热管冷却系统不能控制电池单体的热失控,但可以抑制热失控到相邻电池的传播;Chombo和Laonual^[80]阐述了热失控的机理及其相关的连锁反应,分别从电池封装、模组热传递等角度提出了热保护隔板、安全装置、阻燃剂、被动冷却装置和灭火器等热失控抑制措施;Takahashi^[81]分析了膨胀型涂层材料和防火毯隔热等被动防火方法在电池热失控领域的应用,为电池系统热失控蔓延抑制的实施方法提供了新的思路;Coman等^[82]通过构建有限元热模型和电化学模型的耦合模型,跨尺度分析了电池单体生热及相邻电池单体之间的热传导过程,为电池模组热蔓延抑制奠定了理论基础。

从目前的研究现状看,动力电池系统的单体电池的热失控和电池模组的热蔓延抑制依然是动力电池系统热安全设计的难点,如何实现不同空间尺度之间热信息的有效交互,建立精确的单体-模组-系统的多空间尺度热安全模型,是动力电池系统热可靠性提升的关键。

4.2 动力电池系统机械可靠性

动力电池系统在配装汽车的服役过程中受到挤压、穿刺、跌落、撞击、振动等机械滥用问题是电池系统安全性问题的另一个重要诱因之一。从机械结构可靠性角度来分析电池箱体的结构强度及动力学特性是提高动力电池系统安全可靠性的关键问题。

4.2.1 动力电池系统机械可靠性建模方法

动力电池系统机械可靠性模型是表征动力电池系统机械可靠性的有效手段,也是指导动力电池系统设计优化和提升动力电池系统安全可靠性的有效途径。Lin等^[83]基于电池加速退化试验和半参数化模型,构建了一个电池管理系统的可靠性相似度模型,并利用实际案例进行了有效性验证,该模型在电池管理系统的可靠性预测方面具有一定的优势;黄培鑫等^[84]通过构建电池系统的精细可靠性模型,评估了瞬态冲击和稳态随机振动状态下的电池系统结构损伤和电接触可靠性能,可为电池系统安全性设计提供方法借鉴;兰凤崇等^[85]提出一种基于单体等效力学参数的电池系统动力学建模方法,分析了系统内电接触点在随机振动下的响应问题,为动力电池系统机械可靠性分析奠定了基础;Wang等^[86]基于锂离子电池退化试验,利用相关函数定量描述了电池单体老化对模组整体老化的影响关系,并将这种定量影响关系与电池组可靠性模型相结合,形成新的可靠性模型,基于该模型提出了一种可行的电池组优化设计方法;Liu等^[87]针对大型电池储能系统的可靠性评估难题,提出了一种基于通用生成函数的电池模块可靠性评估方法,该方法通过单体电池健康状态的可靠性评估模型和直流/交流电力电子变换器的可靠性模型来进行多模块大型电池储能系统的可靠性评估,进一步研究了系统配置对电池系统可靠性的影响规律;西北工业大学的Li等^[88]利用COMSOL平台构建了机械-电-热-化学二维耦合模型(见图4),该模型通过电化学模型、力学模型、短路模型和热模型4个子模型的耦合,实现了机械压痕引起的短路和机-电-热耦合响应行为的预测,探索了多物理场耦合状态下多源可靠性问题;韩国建国大学的Lee和Kim^[89]进一步探索了机械非线性-电-热双向三维耦合模型(见图5),该模型可以分析由于机械变形和阴极阳极接触引发的可靠性问题,为动力电池系统多源可靠性耦合评价奠定了理论基础。由此可见,动力电池系统机械可靠性建模应进一步与电接触可靠性模型和热失控抑制模型相结合,构建热-机-电耦合的多源可靠性模型是动力电池系统可靠性评价的重点研究方向之一。

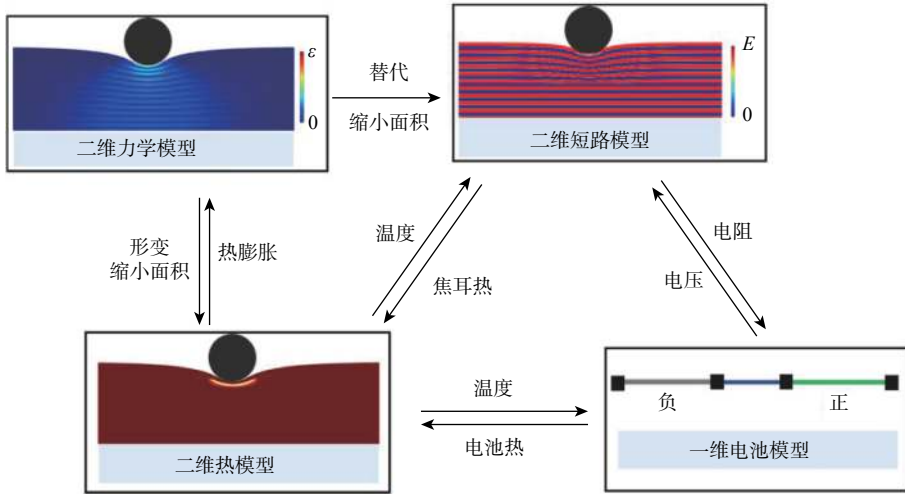


图 4 电池机械-电化学-热模型耦合策略^[88]

Fig. 4 Coupling strategy of mechanical-electrochemical-thermal model of cell^[88]

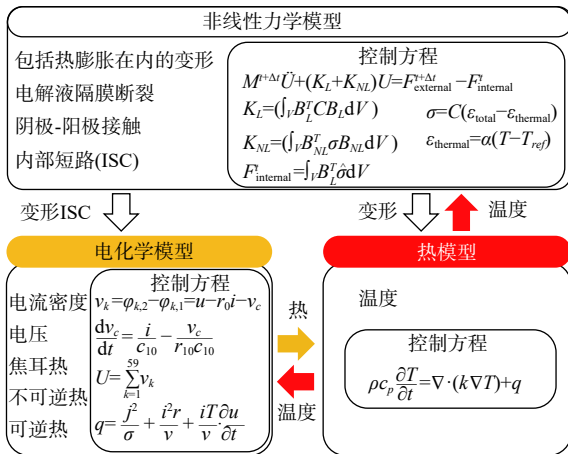


图 5 机械非线性-电化-热双向三维耦合模型^[89]

Fig. 5 3D nonlinear mechanical-electrochemical-thermal bidirectional coupling model^[89]

4.2.2 动力电池系统机械可靠性设计优化

提升动力电池系统机械可靠性是动力电池系统热安全设计的关键途径之一。动力电池系统由单体电池在有限空间内以不同串并联组合、布置方式构成,其安全可靠提升是保证动力电池系统在服役过程中受到挤压、穿刺、跌落、撞击、振动而避免热失控的关键。

Zhang 等^[90]通过对电池单体试样进行碰撞试验和电性能测试,提出了一种基于碰撞试验的电池单体损伤表征方法,并将碰撞力和加速度传感器信号特征及各自的损伤类别输入人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 模式分类器,发展成为一种基于传感器信号数据的电池碰撞损伤评估方法;葛文韬等^[91]提出了一种基于道路谱的电池包支架多体动力学-疲劳分析方法,电池包支架的动态性能研究对于电池系统机械可靠性设计具有重要参考价值;李潇^[92]通过建立包含电池模组和电气部件质量

点的电池包有限元模型,分别进行了约束模态分析、冲击载荷动力学分析和随机振动疲劳分析,以箱体结构疲劳强度作为可靠性约束实现了电池包箱体结构的轻量化设计,但缺乏电池箱体的振动特性与疲劳强度的多目标优化;Shui 等^[93]从刚度、固频和质量角度进行了电池包机械性能的多目标优化,实现了电池系统性能和质量的综合最优。上述研究对于提升电池系统可靠性和轻量化有较大的借鉴意义。兰凤崇等^[94]进一步提出了一种电池系统箱体多材料优化设计方法,利用遗传算法进行了箱体结构多目标优化设计,从材料结构一体化设计角度给出了电池系统箱体结构的精益设计方法;Li 等^[95]基于微小机械变形情况下 18650 电池的循环充放电实验分析了电池老化行为,结果表明,微小机械变形会影响 SOH,从而导致循环充放电情况下电池表面温度明显高于未存在微小机械变形的电池,进一步说明了机械可靠性对于电池热安全性能的重要影响;汕头大学的彭雄斌教授团队^[96]提出了一种电池单体-模组-系统的跨尺度电化-机械耦合性能的方法,基于该方法探索了初始应力和实时应力对电池容量的影响规律,指出初始应力与电池容量呈负相关关系,以强度、变形和固有频率作为优化目标,采用遗传算法实现了电池多目标优化设计,研究成果揭示了机械应力对电池性能的影响关系,可为电池设计提供理论指导;清华大学欧阳明高院士团队研究了电池组热失控蔓延建模关键参数的测取方法及模型建立方法^[97],并提出了基于模型的跨尺度(电池材料-单体-系统)电池系统热安全设计思路^[98],为动力电池系统安全可靠分析指明了方向。

由上述可知,目前的动力电池系统机械可靠性分析更多集中在电池箱体结构的静刚度、振动、疲劳等机械可靠性评价,部分学者从电池系统结构轻

量化角度探索了箱体结构的多材料和复合材料设计优化问题,对于电动汽车续航性能的提升起到了积极作用。然而上述研究中忽略了机械可靠性引发的电池容量衰减、热失控等电池系统的热安全问题。因此,贯穿于电池单体-模组-系统的跨空间尺度的安全性设计势在必行,从材料结构一体化角度提高电池单体力学性能和热传导性能,从不同热管理系统耦合与电池模组结构可靠性的协同优化角度提升电池模组的温度均一性,从系统集成优化角度均衡电池系统箱体结构的机械强度和散热能力是动力电池系统热安全问题抑制的关键途径,同时长时间尺度下电池箱体结构的热疲劳问题对于可靠性提升同样值得关注。多源激励下热-机-电耦合可靠性模型及评价体系的缺失,是动力电池系统安全可靠性能提升的关键难题,也是未来电动汽车进一步规模化发展的重大需求。

5 结论

综上所述,目前动力电池系统在单体-模组-系统不同空间尺度亟待解决的关键问题主要集中在以下方面:

1) 电池材料类型及微观结构与电池生热的构效关系、电化学能量转化过程的耦合模型和理论的缺失,导致目前的单体电池生热模型、电化学-热耦合模型均难以支撑动力电池均一性、可靠性及安全性的进一步提高。电池电化学-热耦合模型既涉及电场、热场和电化学场等多物理场之间的复杂耦合,又是微观(电极材料)-介观(电化学反应)-宏观(电池结构)跨尺度问题,如何构建高可信的跨尺度三维电化学-热耦合模型是制约单体电池热安全设计的瓶颈问题。

2) 电池模组内单体温度不一致性严重影响了电池模组的能量、寿命和安全性,当前研究忽视了长时间尺度下温度一致性动态演变引起的电池模组热安全问题,单体-模组跨尺度传热理论的缺失严重影响了电池模组的性能稳定性和安全性。如何揭示跨时间尺度下电池模组温度一致性动态演变机理,实现单体与模组之间跨尺度的热信息交互,是制约大功率动力电池组热安全性能提升的关键难题。

3) 动力电池系统由单体电池在有限空间内以不同串并联组合、布置方式构成,其安全可靠性能评价不仅取决于单体电池的寿命和容量估算、电池模组热失控、热蔓延抑制,还取决于极端工况下电池箱体的热机耦合可靠性分析,是典型的多源可靠性评价问题。然而,目前的研究主要集中在单源、单一物理场的可靠性分析,如单体电池容量及剩余寿

命预测、电池模组的热安全设计和热失控抑制、多工况下电池箱体的静动态特性分析与振动噪声抑制等方面。多源激励可靠性评价体系的缺失,导致动力电池系统安全性、可靠性和实用性等性能提升遭遇了瓶颈,严重制约了电动汽车产业的发展。因此探索极端条件下动力电池系统可靠度计算方法,构建多源激励下多物理场耦合的可靠性评价模型,实现电池箱体结构的多尺度构型和多功能需求的材料结构一体化设计,是动力电池系统安全性能提升的关键所在。

因此,动力电池系统多空间尺度热安全设计下一步的研究重点应该集中在以下3个方面:①揭示材料-结构-性能多学科跨尺度映射机理,研究高可信单体电池材料-结构-性能跨尺度三维电化学-热耦合模型构建方法,为动力电池系统热安全设计奠定理论基础;②探索长时间尺度下电池模组温度一致性动态演变机理,形成单体-模组热信息交互的复合热管理系统多目标优化设计理论与方法,从根本上解决大功率动力电池组热安全难题;③从系统耦合与集成的角度建立动力电池系统多源可靠性评价体系,尤其是极端条件下动力电池系统热安全评价体系,形成动力电池系统箱体多尺度构型和多功能需求的材料结构一体化设计方法,解决动力电池系统不同空间域、时间域的热安全难题。

参考文献 (References)

- [1] SATO N. Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 99(1-2): 70-77.
- [2] BERNARDI D, PAWLIKOWS K, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [3] WANG J, LIU S Q, LIN C J, et al. Experimental study on the internal resistance and heat generation characteristics of lithium-ion power battery with NCM/C material system[J]. *International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, 2018, 11(2): 131-138.
- [4] 宋文吉, 陈明彪, 白帆飞, 等. 基于电-热耦合模型的锂离子电池热特性与优化[J]. *电池*, 2018, 48(5): 309-312.
SONG W J, CHEN M B, BAI F F, et al. Thermal characteristics and optimization of lithium ion battery based on electric thermal coupling model[J]. *Battery*, 2018, 48(5): 309-312(in Chinese).
- [5] 姜水生, 何志坚, 文华. 基于电-热耦合模型的锂离子电池组热管理系统设计与优化[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(15): 1847-1853.
JIANG S S, HE Z J, WEN H. Design and optimization of thermal management system for lithium ion battery pack based on electrical thermal coupling model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(15): 1847-1853(in Chinese).
- [6] BARCELLONA S, PIEGARI L. Integrated electro-thermal model for pouch lithium-ion batteries[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2021, 183: 5-19.

- [7] PAN Y W, HUA Y, ZHOU S D, et al. A computational multi-node electro-thermal model for large prismatic lithium-ion batteries-Science Direct[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 459: 228070.
- [8] XIE Y, HE X, LI W, et al. A novel electro-thermal coupled model of lithium-ion pouch battery covering heat generation distribution and tab thermal behaviors[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(14): 11725-11741.
- [9] 崔灿. 锂离子动力电池安全性的研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2014: 39-42.
CUI C. Research and application on safety of lithium ion power battery[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 39-42(in Chinese).
- [10] LAI X, JIN C Y, YI W, et al. Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives[J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 35: 470-499.
- [11] YUAN C C, WANG Q S, WANG Y, et al. Inhibition effect of different interstitial materials on thermal runaway propagation in the cylindrical lithium-ion battery module[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 39-50.
- [12] FENG X N, ZHENG S Q, REN D S, et al. Key characteristics for thermal runaway of li-ion batteries[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 4684-4689.
- [13] LI H, DUAN Q L, ZHAO C P, et al. Experimental investigation on the thermal runaway and its propagation in the large format battery module with $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ as cathode[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 375: 241-254.
- [14] LAI X, WANG S N, WANG H B, et al. Investigation of thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion battery modules under different trigger modes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 171: 121080.
- [15] REN D S, FENG X N, LU L G, et al. Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 323-332.
- [16] HUANG Z, LI X, WANG Q, et al. Experimental investigation on thermal runaway propagation of large format lithium ion battery modules with two cathodes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 172: 121077.
- [17] 宋丽, 魏学哲, 戴海峰, 等. 锂离子电池单体热模型研究动态[J]. *汽车工程*, 2013, 35(3): 285-291.
SONG L, WEI X Z, DAI H F, et al. Research progress on thermal model of lithium-ion battery[J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(3): 285-291(in Chinese).
- [18] DOYLE M, NEWMAN J. The use of mathematical modeling in the design of lithium/polymer battery systems[J]. *Electrochimica Acta*, 1995, 40(13): 2191-2196.
- [19] 庞辉. 基于电化学模型的锂离子电池多尺度建模及其简化方法[J]. *物理学报*, 2017, 66(23): 312-322.
PANG H. Multi scale modeling and simplification of lithium ion battery based on electrochemical model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(23): 312-322(in Chinese).
- [20] HAN X F, HUANG Y X, LAI H X, et al. Electrochemical-thermal coupled investigation of lithium iron phosphate cell performances under air-cooled conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 908-916.
- [21] LIU Y, TANG S, LI L X, et al. Simulation and parameter identification based on electrochemical-thermal coupling model of power lithium-ion battery[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 844: 156003.
- [22] LIN C J, WEN H R, LIU L, et al. Heat generation quantification of high-specific-energy 21700 battery cell using average and variable specific heat capacities[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 184: 116215.
- [23] CHEN L, JIANG L H, YE S L, et al. Comprehensive analysis on dynamic heat generation of $\text{LiNi}_1/3\text{Co}_1/3\text{Mn}_1/3\text{O}_2$ coin cell under overcharge[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(14): A3369-A3376.
- [24] CHEN L, JIANG L H, WANG Q S, et al. Dynamic heat generation of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ half-cell under cycling based on an in situ micro-calorimetry[J]. *Fire Technology*, 2020, 56(6): 1-18.
- [25] 刘力硕, 张明轩, 卢兰光, 等. 锂离子电池内短路机理与检测研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(6): 1003-1015.
LIU L S, ZHANG M X, LU L G, et al. Recent progress on mechanism and detection of internal short circuit in lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(6): 1003-1015(in Chinese).
- [26] NEWMAN J, DOYLE M. Modeling of galvanic static charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1993, 140(6): 1526-1526.
- [27] 邵丹, 骆相宜, 钟灿鸣, 等. 动力锂离子电池安全性研究的进展[J]. *电池*, 2020, 50(1): 83-86.
SHAO D, LUO X Y, ZHONG C M, et al. Progress in safety research of power lithium ion battery[J]. *Battery*, 2020, 50(1): 83-86 (in Chinese).
- [28] WU X K, SONG K F, ZHANG X Y, et al. Safety issues in lithium ion batteries: Materials and cell design[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2019, 7: 65.
- [29] 劳力. 高比能锂离子动力电池系统充电策略及热失控安全研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 49-61.
LAO L. Research on charging strategy and thermal runaway safety of high specific energy li-ion power battery system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 49-61(in Chinese).
- [30] ZHAI P, LIU K S, WANG Z Y, et al. Multifunctional separators for high-performance lithium ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 499: 229973.
- [31] TANIGUCHI S, SHIRONITA S, KONAKAWA K, et al. Thermal characteristics of 80°C storage-degraded 18650-type lithium-ion secondary cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 416: 148-154.
- [32] WU Y, LIU X, WANG L, et al. Development of cathode electrolyte interphase for safer lithium batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 37: 77-86.
- [33] CHEN M Y, OUYANG D X, WENG J W, et al. Environmental pressure effects on thermal runaway and fire behaviors of lithium-ion battery with different cathodes and state of charge[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 130: 250-256.
- [34] SONG X, REN L, YANG X, et al. Influence of cycling aging and ambient pressure on the thermal safety features of lithium-ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 448: 227425.
- [35] 汪宜秀, 魏学哲, 房乔华, 等. 面向整组寿命最大化的电动汽车电池一致性变化规律及其均衡策[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(22):

- 176-183.
- WANG Y X, WEI X Z, FANG Q H, et al. Consistency change law and equilibrium strategy of electric vehicle battery for the whole group life maximization[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(22): 176-183(in Chinese).
- [36] ALASTAIR H, MOHAMED W M, LAURA B D, et al. The surface cell cooling coefficient: A standard to define heat rejection from lithium ion battery pouch cells[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2020, 167(2): 020524.
- [37] 任东生, 冯旭宁, 韩雪冰, 等. 锂离子电池全生命周期安全性演变研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(6): 957-966.
- REN D S, FENG X N, HAN X B, et al. Research progress on life cycle safety evolution of lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(6): 957-966(in Chinese).
- [38] XU Y, WU J, XU W, et al. Performance matrix analysis method of power battery system based on multi-parameters' model[J]. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 2021, 18(2): 020902.
- [39] AL-ZAREER M, DINCER I, ROSEN M A. A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems[J]. *Energy Convers Manage*, 2019, 187: 191-204.
- [40] FAN Y Q, YUN B, CHEN L, et al. Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 155: 96-109.
- [41] CHEN K, HOU J S, WU X L, et al. Design of flow pattern in air-cooled battery thermal management system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(6): 9541-9554.
- [42] LIU T, TAO C F, WANG X S. Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules[J]. *Applied Energy*, 2020, 267: 115087.
- [43] CHEN J H, ZHAO X B, WANG B, et al. Multiobjective optimization of air-cooled battery thermal management system based on heat dissipation model[J]. *Ionics*, 2021, 27(3): 1307-1322.
- [44] KARIMI G, LI X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles[J]. *International Journal of Energy Research*, 2013, 37(1): 13-24.
- [45] PESARAN A A. Battery thermal management in EVs and HEVs: Issues and solutions[C]//Advanced Automotive Battery Conference, 2001.
- [46] 罗玉涛, 罗卜尔思, 郎春艳. 锂离子动力电池组的直接接触液体冷却方法研究[J]. *汽车工程*, 2016, 38(7): 909-914.
- LUO Y T, LUO B E S, LANG C Y. A research on the direct contact liquid cooling method of Lithium-ion battery pack[J]. *Automotive Engineering* 2016, 38(7): 909-914(in Chinese).
- [47] WANG C, ZHANG G Q, LI X X, et al. Experimental examination of large capacity LiFePO₄ battery pack at high temperature and rapid discharge using novel liquid cooling strategy[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(3): 1172-1182.
- [48] QIAN Z, LI Y M, RAO Z H. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling[J]. *Energy Convers Manage*, 2016, 126: 622-631.
- [49] 苟飘, 徐俊, 刘晓艳, 等. 电动汽车锂电池模块化热管理系统的设计及实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(12): 104-110.
- GOU P, XU J, LIU X Y, et al. Design and experimental study of modular thermal management system for lithium battery of electric vehicle[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(12): 104-110(in Chinese).
- [50] ZHAO C R, JIANG F M. Minimization of thermal non-uniformity in lithium-ion battery pack cooled by channeled liquid flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 660-670.
- [51] DENG T, ZHANG G D, RAN Y. Study on thermal management of rectangular Li-ion battery with serpentine-channel cold plate[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 125: 143-152.
- [52] RAO Z H, QIAN Z, YONG G, et al. Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 1514-1522.
- [53] SAW L H, POON H M, THIAM H S, et al. Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs[J]. *Applied Energy*, 2018, 223: 146-158.
- [54] YAO C N, DAN D, ZHANG Y J, et al. Thermal performance of a micro heat pipe array for battery thermal management under special vehicle-operating conditions[J]. *Automotive Innovation*, 2020(4): 317-327.
- [55] YE X, ZHAO Y H, QUAN Z H, et al. Thermal management system of lithium-ion battery module based on micro heat pipe array[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(2): 648-655.
- [56] ZHANG C W, XIA Z, WANG B, et al. A Li-ion battery thermal management system combining a heat pipe and thermoelectric cooler[J]. *Energies*, 2020, 13(4): 841.
- [57] OUYANG D X, WENG J W, HU J Y, et al. Effect of high temperature circumstance on lithium-ion battery and the application of phase change material[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(4): A559-A567.
- [58] ZOU D Q, LIU X S, HE R J, et al. Preparation of a novel composite phase change material (PCM) and its locally enhanced heat transfer for power battery module[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180(1): 1196-1202.
- [59] ZHANG W C, QIU J Y, YIN X X, et al. A novel heat pipe assisted separation type battery thermal management system based on phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 165: 114571.
- [60] JILTE R, ALFZAL A, PANCHAL S. A novel battery thermal management system using nano-enhanced phase change materials[J]. *Energy*, 2021, 219: 119564.
- [61] ZHANG J Y, LI X X, ZHANG G Q, et al. Experimental investigation of the flame retardant and form-stable composite phase change materials for a power battery thermal management system[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 480: 229116.
- [62] CHEN F F, HUANG R, WANG C M, et al. Air and PCM cooling for battery thermal management considering battery cycle life[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173: 115154.
- [63] LYU Y, SIDDIQUE A R M, MAJID S H, et al. Electric vehicle battery thermal management system with thermo electric cooling[J]. *Energy Reports*, 2019, 5: 822-827.
- [64] TANG W, XU X M, DING H, et al. Sensitivity analysis of the battery thermal management system with a reciprocating cooling strategy combined with a flat heat pipe[J]. *ACS Omega*, 2020,

- 5(14): 8258-8267.
- [65] 王亮, 王荻楠, 王秀春. 冷却和蓄热结合的动力电池组热管理系统模型[J]. *电源技术*, 2019, 43(4): 662-665.
WANG L, WANG D N, WANG X C. Thermal management system model of power battery pack combined with cooling and heat storage[J]. *Power Technology*, 2019, 43(4): 662-665(in Chinese).
- [66] HUANG Q Q, LI X X, ZHANG G Q, et al. Experimental investigation of the thermal performance of heat pipe assisted phase change material for battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 1092-1100.
- [67] CHEN K, HOU J S, CHEN K, et al. Design of battery thermal management system based on phase change material and heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 188: 116665.
- [68] PUTRA N, SANDI A F, ARIANTARA B, et al. Performance of beeswax phase change material (PCM) and heat pipe as passive battery cooling system for electric vehicles[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 21: 100655.
- [69] KONG D P, PENG R Q, PING P, et al. A novel battery thermal management system coupling with PCM and optimized controllable liquid cooling for different ambient temperatures[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 204: 112280.
- [70] YUAN Q Q, XU X M, TONG G Y, et al. Effect of coupling phase change materials and heat pipe on performance enhancement of Li-ion battery thermal management system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(4): 5399-5411.
- [71] ZHANG W C, LIANG Z C, YIN X X, et al. Avoiding thermal runaway propagation of lithium-ion battery modules by using hybrid phase change material and liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 184: 116380.
- [72] 朱波, 杜如海, 姚明尧, 等. 基于相变材料的纯电动汽车电池热管理研究[J]. *电源技术*, 2020, 44(11): 1666-1670.
ZHU B, DU R H, YAO M Y, et al. Research on thermal management of pure electric vehicle battery based on phase change materials[J]. *Power Technology*, 2020, 44(11): 1666-1670(in Chinese).
- [73] 黄伟男, 宋永丰, 张维戈, 等. 基于温度修正的锂离子电池协同热仿真构架[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(12): 4013-4024.
HUANG W N, SONG Y F, ZHANG W G, et al. Collaborative thermal simulation framework for lithium ion battery based on temperature correction[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2020, 40(12): 4013-4024(in Chinese).
- [74] 王屹航, 杨元凯, 刘通, 等. 基于孔隙网络模型的电池热管理系统跨尺度分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(2): 170-176.
WANG Y H, LIU Y K, LIU T, et al. Cross scale analysis of battery thermal management system based on pore network model[J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2021, 61(2): 170-176(in Chinese).
- [75] 王莉, 谢乐琼, 田光宇, 等. 锂离子电池安全事故: 安全性问题, 还是可靠性问题[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(1): 1-6.
WANG L, XIE L Q, TIAN G Y, et al. Lithium ion battery safety accident: Safety or reliability[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(1): 1-6(in Chinese).
- [76] 高菲, 肖阳, 张文华, 等. 高温和荷电状态对锂离子电池单体力学响应的耦合影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(5): 1574-1583.
GAO F, XIAO Y, ZHANG W H, et al. Coupling effects of high temperature and state of charge on mechanical response of lithium ion battery[J]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*, 2020, 50(5): 1574-1583(in Chinese).
- [77] ZHANG Y, MEI W X, QIN P, et al. Numerical modeling on thermal runaway triggered by local overheating for lithium iron phosphate battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192: 116928.
- [78] HU T, XU X M, SUN X, et al. Numerical study on the inhibition control of lithium-ion battery thermal runaway[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(29): 18254-18261.
- [79] LI Y, QI F, GUO H, et al. Numerical investigation of thermal runaway propagation in a Li-ion battery module using the heat pipe cooling system[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2019, 75(3): 183-199.
- [80] CHOMBO P V, LAOONUAL Y. A review of safety strategies of a Li-ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 478: 228649.
- [81] TAKAHASHI F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance[J]. *MRS Bulletin*, 2021, 46(5): 429-434.
- [82] COMAN P T, DARCY E C, VEJE C T, et al. Numerical analysis of heat propagation in a battery pack using a novel technology for triggering thermal runaway[J]. *Applied Energy*, 2017, 203: 189-200.
- [83] LIN K S, CHEN Y X, LIU Y S, et al. Reliability prediction of battery management system for electric vehicles based on accelerated degradation test: A semi-parametric approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(11): 12694-12704.
- [84] 黄培鑫, 兰凤崇, 陈吉清. 随机振动与冲击条件下电动车电池包结构响应分析[J]. *汽车工程*, 2017, 39(9): 1087-1093.
HUANG P X, LAN F C, CHEN J Q. Structural response analysis of electric vehicle battery pack under random vibration and impact [J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(9): 1087-1093(in Chinese).
- [85] 兰凤崇, 黄培鑫, 陈吉清, 等. 车用电池包结构动力学建模及分析方法研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(8): 157-164.
LAN F C, HUANG P X, CHEN J Q, et al. Study on structural dynamic modeling and analysis method of vehicle battery pack[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(8): 157-164(in Chinese).
- [86] WANG L Z, SUN Y S, WANG X H, et al. Reliability modeling method for lithium-ion battery packs considering the dependency of cell degradations based on a regression model and copulas[J]. *Materials*, 2019, 12(7): 1054.
- [87] LIU M J, LI W Y, WANG C S, et al. Reliability evaluation of large scale battery energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 2733-2743.
- [88] LI H, LIU B H, ZHOU D, et al. Coupled mechanical-electrochemical-thermal study on the short-circuit mechanism of lithium-ion batteries under mechanical abuse[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2020, 167(12): 120501.
- [89] LEE D C, KIM C W. Two way nonlinear mechanical electrochemical thermal coupled analysis method to predict thermal runaway of lithium-ion battery cells caused by quasi-static indentation[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 475: 228678.
- [90] ZHANG J, LV D, SIMEONE A, et al. Artificial neural network-based multi sensor monitoring system for collision damage assessment of lithium-ion battery cells[J]. *Energy Technology*, 2020, 8(5): 2000031.

- [91] 葛文韬, 黄晖, 段龙杨, 等. 基于实测道路谱的纯电动轻卡电池包支架动态载荷仿真及疲劳分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(9): 267-273.
GE W T, HUANG H, DUAN L Y, et al. Dynamic load simulation and fatigue analysis of battery pack bracket for pure electric light truck based on measured road spectrum[J]. *Vibration and Impact*, 2020, 39(9): 267-273(in Chinese).
- [92] 李潇. 多物理场下动力电池包结构的可靠性设计优化[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020: 13-20.
LI X. Reliability design optimization of power battery pack structure under multi physical field[D]. Changsha: Central South University of Forestry Science and Technology, 2020: 13-20(in Chinese).
- [93] SHUI L, CHEN F Y, GARG A, et al. Design optimization of battery pack enclosure for electric vehicle[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, 58(1): 331-347.
- [94] 兰凤崇, 陈元, 周云郊, 等. 轻质多材料动力电池包箱体选材与优化[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(4): 1227-1234.
LAN F C, CHEN Y, ZHOU Y J, et al. Material selection and optimization of light multi material power battery case[J]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*, 2020, 50(4): 1227-1234(in Chinese).
- [95] LI L, CHEN X P, HU R F, et al. Aging mechanisms and thermal characteristics of commercial 18650 lithium-ion battery induced by minor mechanical deformation[J]. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 2021, 18(2): 021010.
- [96] NIU X D, GARG A, GOYAL A, et al. A coupled electrochemical-mechanical performance evaluation for safety design of lithium-ion batteries in electric vehicle: An integrated cell and system level approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222: 633-645.
- [97] 陈天雨. 大容量锂离子电池热失控蔓延建模与仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2019: 56-73.
CHEN T Y. Modeling and simulation of thermal runaway spread of large capacity lithium-ion batteries[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019: 56-73(in Chinese).
- [98] 陈天雨, 冯旭宁, 欧阳明高, 等. 基于模型的动力电池系统多尺度热安全设计[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(15): 1840-1846.
CHEN T Y, FENG X N, OUYANG M G, et al. Multi scale thermal safety design of power battery system based on model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(15): 1840-1846(in Chinese).

Research on multi-scale thermal safety of lithium-ion power battery system

ZHANG Yangang¹, GUO Xuxu¹, XUE Wenyang¹, ZHANG Zhiwen¹, LIANG Junfei^{1,*}, WANG Hua²

(1. School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Chemistry, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As the most important core component of electric vehicles, the lithium-ion power battery system requires improvement in power performance, safety, and reliability for further large-scale development of electric vehicles in China. Thermal safety issues of lithium-ion power batteries may occur throughout the whole life cycle of the battery system, and manifest differently in different spatial scales of monomers, modules, and systems. To address the multi-spatial scale thermal safety problems of the lithium-ion power battery system, the latest progress of thermal safety design of power batteries is reviewed from three aspects: heat generation of a single battery, temperature uniformity of a module, and safety and reliability of a battery system. Some important research results are introduced, and the key problems to be solved in the thermal safety design of a lithium-ion power battery system are summarized. Feasible solutions to the problems are put forward, and the future research direction is suggested, providing insight into increase in power performance, safety and reliability of battery systems.

Keywords: lithium-ion power battery system; heat generation model; temperature uniformity; thermal management system; reliability

Received: 2021-04-02; Accepted: 2021-08-27; Published Online: 2021-09-14 09:40

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210913.1653.003.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51605447); Applied Basic Research Programs of Shanxi Province in China (20210302123069,201901D211208); Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi (2019L0605); Graduate Student Innovation Program of Shanxi Province (2021Y662)

* Corresponding author. E-mail: jliliang@nuc.edu.cn

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0173

基于改进关键帧选择的 ORB-SLAM2 算法

张洪^{1,2,*}, 于源卓¹, 邱晓天¹

(1. 江南大学 机械工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 针对同时定位与建图 (SLAM) 算法精度不高且跟踪易失败的问题, 提出了一种改进关键帧选择的 ORB-SLAM2 算法。通过 ORB-SLAM2 算法计算帧间相对位姿; 在原有算法的基础上, 增加旋转与平移量作为判定依据, 决定是否创建新关键帧; 针对移动机器人所安装的相机与机器人产生相对运动引发误拍摄, 导致劣质关键帧生成的问题, 设计了劣质关键帧剔除算法; 基于 RGB-D 数据集与自主研发的移动机器人进行了实验验证。实验结果表明: 改进的关键帧选择算法能够准确及时地选择关键帧, 最优情况下定位误差约为原误差的 51.9%, 有效消除了相机与机器人之间相对运动产生的影响, 直线误差仅为原误差的 82.1%。改进算法能够有效提高定位精度, 减少跟踪失败。

关键词: 移动机器人; ORB-SLAM2; 关键帧选择; 劣质关键帧剔除; 定位精度

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0045-08

近年来, 移动机器人逐渐走进社会为人们的生活提供便利^[1-2]。在这种情况下, 机器人的控制与路径规划显得尤为重要^[3-4]。控制与路径规划需要定位与建图作为前提, 因此, 将机器视觉与同时定位与建图相结合 (V-SLAM)^[5-7] 成为了机器人领域研究的热点^[8]。相比于采用雷达的二维 SLAM, V-SLAM 通过机器视觉获取三维信息, 对物体空间的几何外形进行描述, 对于机器人在未知领域的导航有着重要意义^[9]。随着国内外学者的逐渐深入研究, V-SLAM 先后出现了 LSD-SLAM、RGB-D SLAM、ORB-SLAM 及语义 SLAM。

TUM^[10-11] 计算机视觉组采用了直接法的方式, 通过灰度图的强度对相邻的 2 帧进行匹配成功, 实现大规模环境下的定位与建图。Endres 等^[12] 使用深度相机获取视觉信息, 完成了 RGB-D SLAM 算法, 以提高建图鲁棒性。Mur-Artal 等^[13] 提出了经典的 ORB-SLAM 算法, 在跟踪、建图、重定位及闭环检测的过程中, 全程采用 ORB 特征完成, 使其具

有较好的实时性; 随后, 为解决 ORB-SLAM 所用相机单一且精度低的问题, 又提出了 ORB-SLAM2^[14], 该算法采用光速平差法进行优化使定位更加精确, 并提出了一种轻量级的定位模式, 使其能够更加有效地重用地图。Liu 等^[15] 对物体语义信息进行了总结, 语义 SLAM^[16-17] 也逐渐出现在人们的视野中, 借用物体的语义信息, 成功提高了 SLAM 的人机交互能力, 提高了算法精度。

相比于其他 SLAM 算法, ORB-SLAM2 算法具有高效的实时性、相机使用的多样性及良好的精度, 深受国内外研究学者的喜爱。关键帧作为决定 ORB-SLAM2 算法精度的重要因素, 广大学者针对其进行了大量创新优化, 以提升算法性能。Yang 等^[18] 提出基于地图元素和关键帧数据库的离线地图构建算法, 通过对关键帧与地图元素在线储存离线构图的方式提高建图精度。Xie 等^[19] 提出重复运动检测方法改进关键帧选择算法, 剔除冗余关键帧以提高整个系统的实时性能及定位精度。Cui 等^[20] 在

收稿日期: 2021-04-06; 录用日期: 2021-05-14; 网络出版时间: 2021-05-26 12:09

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210525.1308.002.html

* 通信作者. E-mail: zhanghong@jiangnan.edu.cn

引用格式: 张洪, 于源卓, 邱晓天. 基于改进关键帧选择的 ORB-SLAM2 算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 45-52.

ZHANG H, YU Y Z, QIU X T. ORB-SLAM2 algorithm based on improved key frame selection [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 45-52 (in Chinese).

ORB-SLAM2 算法的基础上使用图像强度而非特征点匹配关键帧,提出了 Direct-ORB-SLAM,该方法避免了计算冗余,使系统在效率与准确度上均有提高。综上所述,国内外针对 ORB-SLAM2 关键帧的研究已取得大量成果,但不难发现:①在跟踪定位的过程中,跟踪失败情况经常发生,严重影响定位效果;②虽然对算法进行了优化,但精度不高,误差较大的问题依然存在。

基于此,本文首先采用 ORB-SLAM2 算法对帧间相对位姿进行估计;其次在原有算法模型的基础上,增加旋转与平移量作为判定依据,决定是否插入新关键帧,解决了跟踪定位易失败的问题,并提高了定位精度;然后设计了劣质关键帧剔除算法,避免了因移动机器人所安装的相机与机器人机身产生相对运动而导致劣质关键帧生成的问题;最后通过 RGB-D 数据集与移动机器人开展了实验验证。

1 ORB-SLAM2 算法

经典的 V-SLAM 算法框架主要通过视觉传感器读取数据,完成前端视觉里程计,通过后端进行非线性优化,回环检测再次对整体地图进行优化更新,以完成地图的构建。而 ORB-SLAM2 算法将经典的 V-SLAM 算法划分为 3 个线程: Tracking、Local Mapping、Loop Closing,并通过 System 总线程完成对移动机器人的定位与建图。

Tracking 线程主要包含相机定位、关键帧选取与插入、ORB 特征点提取及相机位姿估计。ORB-SLAM2 算法采用了 ORB 特征点:由 FAST 角点与角点位置的 BRIEF 描述子组成,这种特征点有着较快的计算速率及较高的精度,其采用 opencv 库中的 BruteForceMatcher 结合汉明距离进行匹配,采用随机采样一致性算法(RANSAC)减少误匹配对,抑制噪声,剔除外点。

同时,ORB-SLAM2 之所以能够拥有较好的实时性,是因为在跟踪线程运行的过程中,不对相机传来的所有帧进行处理,而是如图 1 所示根据关键

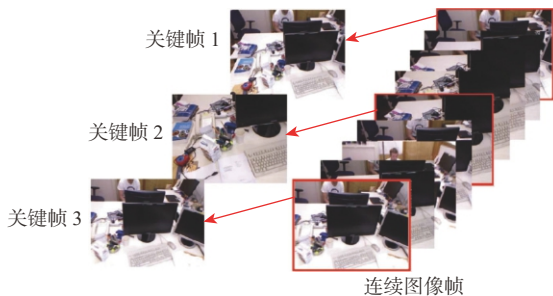


图 1 关键帧选取示意图

Fig. 1 Schematic of key frame selection

帧生成规则生成关键帧,仅对选取的关键帧进行处理,减少处理的帧数,节约运算资源,保证系统的实时性。

2 关键帧选择算法

2.1 常用关键帧选择算法

常用的关键帧选择算法首先要保证当前帧的内点数超过设定的最小阈值,并且重叠度不高,既保证关键帧跟踪的指令,同时又避免引入过多的信息冗余。上述条件符合时,线程开始对下述条件进行判定,当有一条判定成功时,插入关键帧。

1) 为避免通过帧数过多造成跟踪丢失,在距离上次关键帧插入过去 MAX 帧(预设的最大值)时,插入关键帧。

2) 为防止图像重叠度过高,在距离上次插入关键帧至少过去 MIN 帧(预设的最小值)且局部建图线程处于空闲状态时,插入关键帧。

3) 局部建图线程处理能力有限,在该线程中需要保持关键帧队列的关键帧不超过 3 个。

但是由于此关键帧筛选条件只与线程中通过帧的数量有关,当机器人在转弯或者移动速度过快的情况下,就会导致关键帧信息采集不足,漏掉重要信息,导致轨迹造成较大偏差,甚至跟踪中断。针对这一问题,本文新增帧间相对运动量作为关键帧选择条件,并设计劣质关键帧剔除算法,以提高跟踪定位精度。

2.2 改进关键帧选择算法

2.2.1 关键帧的选择

为提高定位精度,本文增加帧间相对运动量作为关键帧选择条件之一。帧间相对运动量表示帧与帧之间的相对运动程度,主要由 2 部分组成,分别是旋转和平移,其中将旋转作为主要变化量,平移作为次要变化量,计算方式如下:

通过视觉里程计得到相匹配的特征点,计算 2 组点的质心位置 \mathbf{p}' 和 \mathbf{p} , 计算每个点的去质心坐标:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{p} \\ \mathbf{q}'_i = \mathbf{p}'_i - \mathbf{p}' \end{cases} \quad (1)$$

通过优化方法计算旋转矩阵:

$$\mathbf{R}^* = \arg \min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{q}_i - \mathbf{R}\mathbf{q}'_i\|^2 \quad (2)$$

对 \mathbf{R} 的误差项进行展开:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{q}_i - \mathbf{R}\mathbf{q}'_i\|^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\mathbf{q}_i^T \mathbf{q}_i + \mathbf{q}'_i^T \mathbf{R}^T \mathbf{R} \mathbf{q}'_i - 2\mathbf{q}_i^T \mathbf{R} \mathbf{q}'_i) \quad (3)$$

对式(3)进行化简,去除与 \mathbf{R} 无关项,实际优化函数化简为

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i^T \mathbf{R} \mathbf{q}_i' = -\text{tr} \left(\mathbf{R} \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i' \mathbf{q}_i^T \right) \quad (4)$$

将式(4)中求和项定义为矩阵 \mathbf{W} , 对 \mathbf{W} 进行 SVD^[21] 最优性分解:

$$\mathbf{W} = \mathbf{U} \mathbf{E} \mathbf{V} \quad (5)$$

式中: \mathbf{E} 为奇异值组成的对角矩阵, 对角线元素从大到小排列; \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 为对角矩阵。

当 \mathbf{W} 为满秩时, 即可根据式(6)计算得出 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{V}^T \quad (6)$$

通过计算出的 \mathbf{R} 计算平移向量 \mathbf{t} :

$$\mathbf{t} = \mathbf{p} - \mathbf{R} \mathbf{p}' \quad (7)$$

式中: \mathbf{R} 表示当前帧与最新关键帧之间的帧间旋转矩阵; \mathbf{t} 表示二者之间的平移向量。

通过 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 求出 D , 并在 ORB-SLAM2 系统中为其设定阈值 D_k :

$$D = (1 - \alpha) \|\Delta \mathbf{t}\| + \alpha \min(2\pi - \|\mathbf{R}\|, \|\mathbf{R}\|) \quad (8)$$

式中: α 为位移与转角的平衡权值系数, 取值大小随转角增大呈指数形式增加。由于本文算法在原有以帧数为判定依据的关键帧选择算法基础上增加了转角作为主要变化量, 转角所采用的平衡权值系数, 在存在角度转变时远大于位置移动的平衡权值系数, 采用式(9)的计算公式进行计算, 设 $\omega = \min(2\pi - \|\mathbf{R}\|, \|\mathbf{R}\|)$, 取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ (当旋转角度大于 90° 时, 将彻底失去视角, 无法特征点匹配):

$$\alpha = \left(\frac{\tan \omega}{\tan \omega + 1} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

对计算所得相对运动量与其阈值进行比较: 当 $D \geq D_k$ 时, $\text{Frame}_{\text{key}} = \text{Frame}_{\text{cur}}$, $\text{Frame}_{\text{Ref}} = \text{Frame}_{\text{cur}}$; 当 $D < D_k$ 时, $\text{Frame}_{\text{key}} \neq \text{Frame}_{\text{cur}}$ 。其中, $\text{Frame}_{\text{key}}$ 为关键帧, $\text{Frame}_{\text{cur}}$ 为当前帧, $\text{Frame}_{\text{Ref}}$ 为参考关键帧。

当判定通过后, 将当前帧设为关键帧, 同时更新参考关键帧, 再次计算当前帧与新关键帧之间的相对运动量, 算法流程如图 2 所示。图中: Tracking 线程中存在成员变量指针 mCurrentFrame , 指向当前帧成员变量, 其中包括图像、深度信息、相对位姿等信息。

步骤 1 判断插入关键帧的前置条件是否满足: 系统不处于定位模式且不在全局闭环的条件下, 同时距离上一次重定位的距离较远, 内点数必须超过设定的最小阈值, 保证关键帧跟踪质量。

步骤 2 在原有关键帧筛选条件的基础上, 增加了帧间相对运动量作为筛选条件之一, System 主线程中将 Tracking 线程中的第 1 帧作为初始关键帧, 根据式(8)计算出当前帧与关键帧的帧间相对运动量 D 。

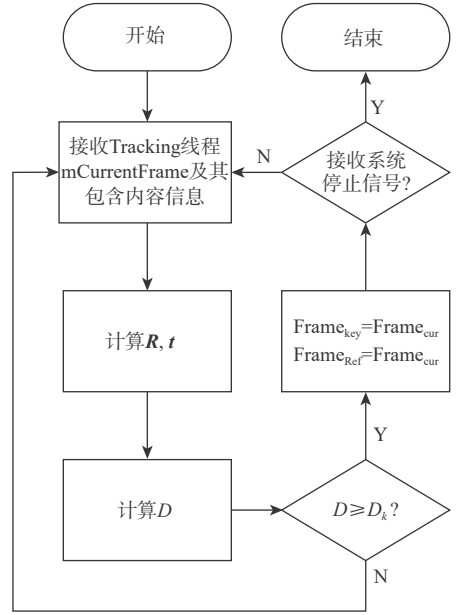


图 2 关键帧选择算法流程

Fig. 2 Flowchart of key frame selection algorithm

步骤 3 对帧间相对运动量进行比较。如果当前帧的相对运动大于或等于一定的阈值, 说明相机相对于之前跟踪定位的位置有了较大的相对运动, 相机的视角发生了较大改变, 此时不生成新的关键帧进行定位, 极有可能在跟踪定位时产生误差, 甚至因检测不到地图点造成跟踪中断。

因此, 当相对运动较大时, 添加关键帧可以有效改善这种情况。当关键帧生成后, 用新产生的关键帧作为参考关键帧继续计算下一帧的相对位姿, 直到整个系统循环结束。

2.2.2 劣质关键帧剔除

本文自主设计研发的移动机器人, 在运行过程中与机械臂共用相机, 因此地面轮胎的打滑及机器人移动过程中的震动, 会导致相机与机器人本身发生相对运动从而改变相机的视角, 产生误拍摄, 此时所得关键帧会对跟踪定位产生误导, 从而使定位精度降低, 本文将此定义为劣质关键帧。针对这一问题, 本文设计了劣质关键帧剔除算法, 剔除由于误拍摄造成的劣质关键帧, 提高跟踪定位精度。

在 ORB-SLAM2 跟踪定位线程中, 存在冗余关键帧剔除模块, 该模块只对冗余关键帧进行剔除, 并不对精度产生影响, 其目的是为了节约资源, 减轻工作线程负担。本文基于冗余关键帧剔除模块, 设计了劣质关键帧剔除算法, 剔除过程如下:

步骤 1 在关键帧生成时, 临时存储彩色图像及时间戳。

步骤 2 选取相邻 3 关键帧进行 ORB 特征匹配, 分别保存了 2 次相邻关键帧特征点匹配数量 NUM_{Adj1} 、 NUM_{Adj2} 及一次相隔关键帧匹配数 NUM_{Sep} 。

步骤3 若相邻2帧的特征点匹配数量小于相隔2帧,说明3帧中的中间帧大概率是由于误拍摄而产生的关键帧。

步骤4 激活关键帧剔除函数对劣质关键帧进行剔除,继续线程的运行,直到整个线程结束,释放内存。

伪代码如下:

If(没有关键帧插入)and(关键帧库内超过3个关键帧)Then

If(NUM_{Adj1}<NUM_{Sep})Then

If(NUM_{Adj2}<NUM_{Sep})Then

剔除关键帧

EndIf

EndIf

EndIf

这种方法区别于传统SLAM算法中只对相邻2帧的关键帧进行比较,而是采用了比较相邻3帧的方法。由于本文所设计的移动机器人平台不存在视角突变,算法运行过程中,如果第1帧和第3帧差异较小,而第2帧与两者之间图像差异较大,说明第2帧在拍摄的过程中,因震动或其他原因导致相机本身与移动机器人之间发生了相对运动,从而使视角发生了改变,产生了劣质关键帧。

3 实验

3.1 公开数据集实验

在Ubuntu 16.04环境下进行了公开数据集实验,计算机所用的CPU为2.0 GHz i7,运行内存为4 GB。实验采用TUM RGB-D Benchmark数据集,选取fr1中的desk、xyz和room进行。依次对比了常用关键帧选择算法、改进关键帧选择算法(包含劣质关键帧)、改进关键帧选择算法(剔除劣质关键帧)的实验效果。

3.1.1 ORB-SLAM2 实时性分析

SLAM的实时性是评价其优劣程度重要的性能指标,表1对各个数据集平均跟踪时间进行了记录。

从表1可知,由于对关键帧选择算法进行了改

表1 平均跟踪时间对比结果

Table 1 Comparison of mean tracking time

数据集	平均跟踪时间/ms		
	常用关键帧选择算法	包含劣质关键帧的改进算法	剔除劣质关键帧的改进算法
desk	39	45	51
xyz	46	51	57
room	30	31	36

进,增加了关键帧选择的计算量,导致运行时间稍有增加,但由于相对整个系统而言计算并不复杂,增加时间极少,对系统的实时性并没有造成影响。

3.1.2 ORB-SLAM2 跟踪定位精度分析

TUM计算机视觉组数据集中包含利用运动视觉捕捉系统记录的摄像头在该场景下真实且连续的轨迹数据,图3(a)~图3(c)分别为3种算法得到的估计轨迹与真实轨迹的对比轨迹曲线。可以明显看出:①在图3(a)的轨迹交叉处有较大视角突变,原有关键帧选择算法未能检测到此信息,导致跟踪失败,采用线段直接相连的方式进行轨迹估计;而改进后的算法如图3(b)、图3(c)所示,跟踪失败并未发生,说明改进算法可以将转弯信息较好地采集,并用于关键帧选择,有效解决了跟踪失败的问题。②图3(a)中轨迹最右侧转弯后估计轨迹明显偏离真实值,是由于原有关键帧选择算法检测转弯信息出现了滞后,造成较大偏差;改进后的算法增加了相对变化量,缩减了该处的定位误差。③由于劣质关键帧仅在移动机器人实验中产生,图3(b)与图3(c)相差不大。

对于定位精度,采用绝对轨迹误差(absolute trajectory error, ATE)进行比较。ATE越小,精度越高。第*i*帧的ATE定义如下:

$$F_i := \mathbf{Q}_i^{-1} \mathbf{S} \mathbf{P}_i \quad (10)$$

使用RMSE统计ATE为

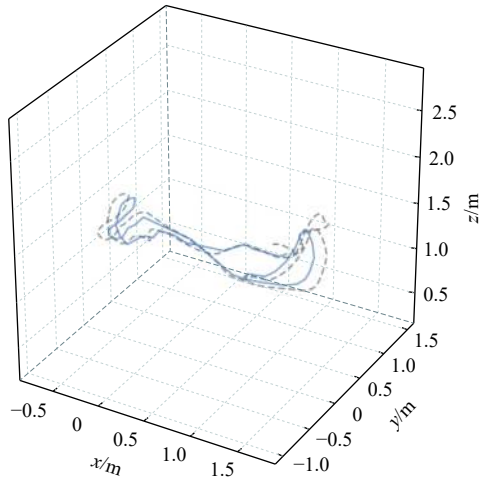
$$\text{RMSE}(F_{1:m}, \Delta) := \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|\text{trans}(F_i)\|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中: Δ 为真实位置与估计位置之间的误差; F_i 为第*i*帧的ATE; \mathbf{Q}_i 为真实位姿; \mathbf{P}_i 为算法估计位姿; \mathbf{S} 为从估计位姿到真实位姿的相似旋转矩阵。

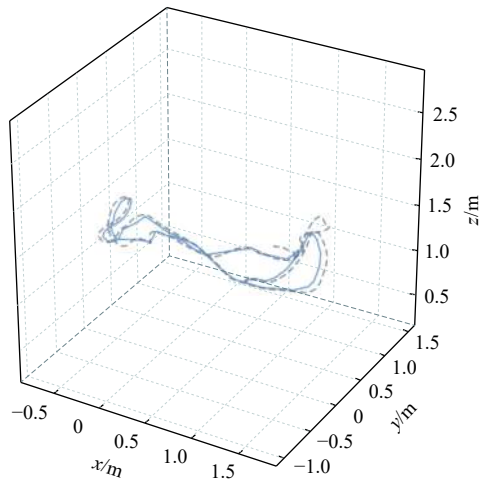
将估计轨迹与真实轨迹进行对比,绘制出绝对轨迹误差曲线,如图4所示。图4(a)为常用关键帧选择算法所得到的估计轨迹与真实曲线的误差,图4(b)为2种改进关键帧选择算法后所得到估计轨迹与真实轨迹的误差,是否添加劣质关键帧剔除算法对误差结果并没有太大影响,说明劣质关键帧剔除算法对数据集的定位精度并没有太大影响。由图4可以看出,相较于常用关键帧选择算法,改进后的算法有明显提高。

选取最大绝对轨迹误差作为评判标准,表2为3种算法下的最大绝对轨迹误差。

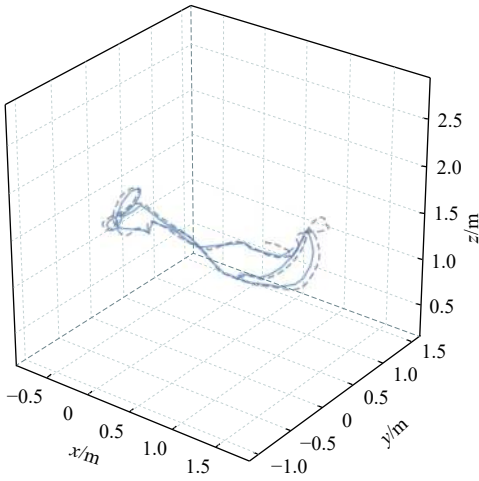
由表2可知:①改进关键帧选择算法相比于常用关键帧选择算法,在3个数据集中误差均明显降低,最优结果改进后的算法误差仅为改进前误差的



(a) 常用关键帧选择算法



(b) 改进关键帧选择算法(包含劣质关键帧)

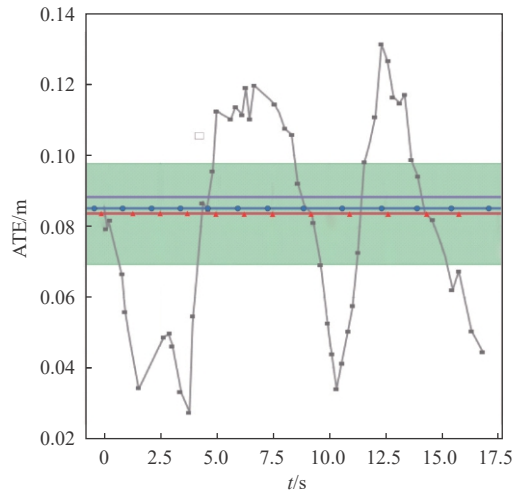


(c) 改进关键帧选择算法(剔除劣质关键帧)

--- 真实轨迹 — 估计定位轨迹

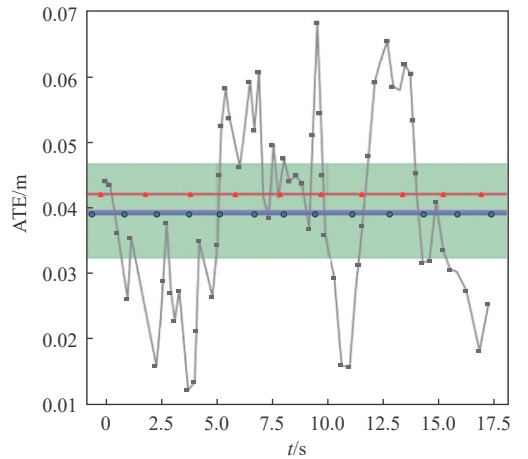
图 3 三种关键帧选择算法运动轨迹对比

Fig. 3 Comparison of motion trajectories of three key frame selection algorithms



— ATE — 中位数 — 均值 — 均方差 — 标准差

(a) 常用关键帧选择算法



— ATE — 中位数 — 均方差 — 均值 — 标准差

(b) 改进关键帧选择算法

图 4 定位轨迹误差曲线

Fig. 4 Curve of track positioning error

表 2 最大绝对轨迹误差对比

Table 2 Maximum absolute trajectory error

数据集	最大绝对轨迹误差/m		
	常用关键帧选择算法	包含劣质关键帧的改进算法	剔除劣质关键帧的改进算法
desk	0.131	0.064	0.062
xyz	0.124	0.097	0.097
room	0.202	0.125	0.130

综上,改进后的关键帧选择算法在保证实时性的情况下,能够有效地提高算法估计轨迹精度,同时还能有效避免跟踪失败的情况发生。

3.1.3 ORB-SLAM2 关键帧数量分析

图 5 比较了不同数据集下 3 种关键帧选择算法计算的关键帧数量。显然,改进后的关键帧选择算法的关键帧数量明显大于改进前,说明改进后的算法选择了更多的关键帧以提升估计定位精度。

51.9%; ②剔除了劣质关键帧的改进算法与包含劣质关键帧的选择算法轨迹误差相差较小,仅存在合理波动,这是由于以数据集作为实验对象时,数据集内部并不包含劣质关键帧。

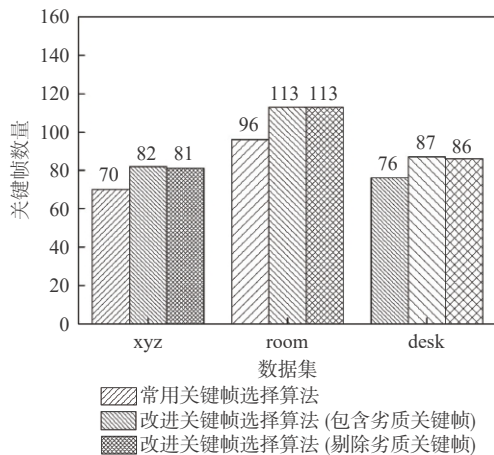


图5 数据集实验关键帧数量比较

Fig. 5 Comparison of key frame numbers in dataset experiments

3.2 移动机器人实验

本文自主设计的移动机器人如图6所示,采用大唐工控机新创云 i7mini 主机作为平台的嵌入式主控机,搭配一款 15.6 寸触控屏作为人机交互硬件,并选用奥比中光深度相机作为视觉传感器为机器人传送视觉信息数据。实验比较了 3 种算法在实时运行过程中的定位精度。



图6 移动机器人

Fig. 6 Mobile robot

实验内容主要包括机器人直线运动、转弯运动及回环运动 3 种运动方式。对机器人设计搭建、相机标定等操作后,通过对 3 种运动的实际轨迹和 ORB-SLAM2 跟踪估计的定位轨迹进行测量,分别进行了 6 次实验,并取误差平均值进行比较。图7为 3 种关键帧选择算法对应的回环运动轨迹对比。由于数据为机器人实时输出,真实轨迹存在差异,并不能在同一坐标系内进行绘制。

由图7可知:①图7(b)相比于图7(a)有一部分路程未能检出,发生了跟踪失败的情况,在转弯处,明显因检测信息滞后而导致估计转角过小增大误差;②由图7(c)、(d)轨迹曲线可知,算法未发生大规模跟踪失败,且转角处定位精度明显提高;

③图7(e)、(f)为剔除了劣质关键帧的改进算法,由于剔除了劣质关键帧,图7(f)的轨迹更接近真实轨迹曲线,抖动明显减少,在一定程度上提高了定位精度。

表3为不同关键帧选择算法所得到的轨迹与真实轨迹平均位置误差。可知:①包含劣质关键帧的改进算法相较于改进前算法,成功提高了定位精度,由于算法改进主要针对转向,直线时误差减小并不明显,但转弯与回环运动时定位精度显著提高,误差仅为原误差的 58.1%;②剔除劣质关键帧的

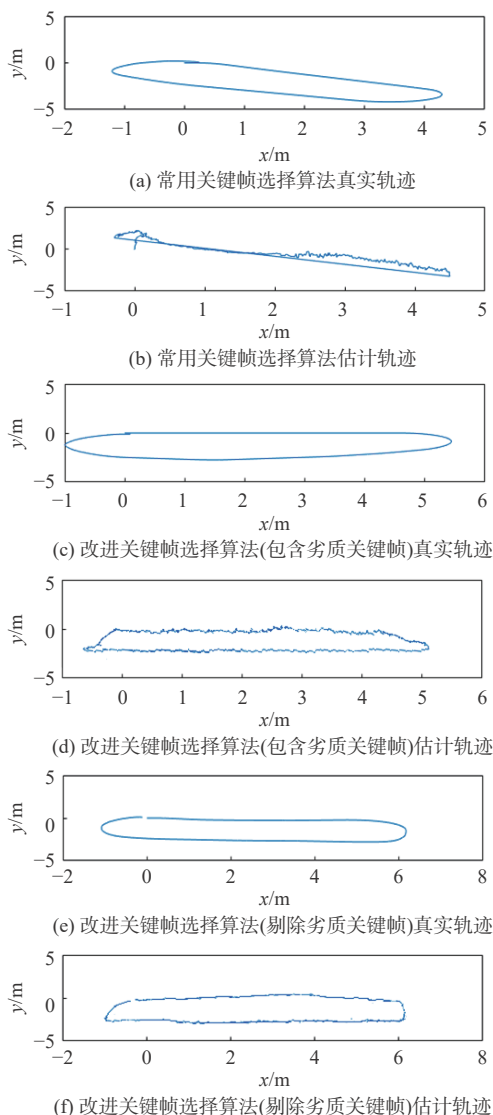


图7 回环运动轨迹对比

Fig. 7 Comparison of loop trajectories

表3 平均位置误差

Table 3 Average position error

运动方式	平均位置误差/m		
	常用关键帧选择算法	包含劣质关键帧的改进算法	剔除劣质关键帧的改进算法
直线	0.209	0.202	0.164
转弯	0.964	0.565	0.543
回环	1.236	0.732	0.721

改进算法轨迹精度与未剔除相比明显提高,尤其在直行时,误差为包含劣质关键帧算法误差的82.1%。

图8比较了机器人不同运行方式下的3种关键帧选择算法计算的关键帧数量。显然,机器人实时运行的过程中,改进后的算法除直线外同样选择更多的关键帧以保证算法精度,而直线过程未发生角度转变,因此关键帧数量在误差范围内合理波动;剔除劣质关键帧后,关键帧数量相对减少,在直线过程中最为明显,所剔除的劣质关键帧数量约达到关键帧总数的25%;回环运动的直线行驶路程为直线运动的2倍,但多次实验所剔除的劣质关键帧数量均未达到直线运动的2倍。造成这种现象的原因有3点:①角度的转变会对劣质关键帧的判断造成干扰;②劣质关键帧是否生成与机器人所处环境的优劣特别是路面的平滑度有着极大的关联;③实时运行的过程不能严格保证机器人运行轨迹完全相同。

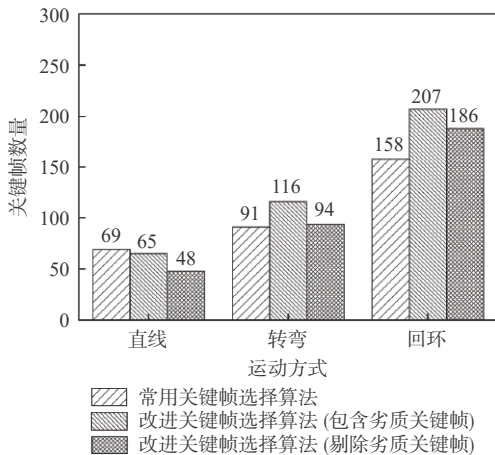


图8 移动机器人实验关键帧数量比较

Fig. 8 Comparison of key frame numbers in mobile robot experiments

3.3 实验参数分析

实验过程中应对某些参数进行调整,参数调整不当会造成定位错误,系统运行资源浪费,甚至使系统崩溃。对于不同的数据集,通过计算及多次实验调整的方式确定算法所用参数。

最大帧间相对位移量 D_k 是通过计算并进行多次实验后,依据算法最小绝对估计误差确定。 D_k 越大,表明选取关键帧时通过的相对位移越大,可能导致重要关键帧被忽略而导致精度降低; D_k 越小,表明选取时通过的相对位移越小,选取的关键帧就会随之增多,产生冗余,导致系统实时性降低,对后续的建图工作产生较大影响。本文中 D_k 取转角为 45° 、位移为 0 时计算值,并通过实验进行微调。此转角下相邻 2 关键帧在匹配到足够特征点进行计算的同时,有效防止过多关键帧的产生浪费系统内存。在不同的实验条件下,相机的采样频率、机器

人的运行速度及环境的规模大小均对 D_k 的最佳值产生影响。一般情况, D_k 取 30~50 为最佳。

4 结论

1) 提出了一种改变关键帧选择判定条件的 ORB-SLAM2 算法,在原有算法的基础增加了相对运动量作为选择依据,有效避免了跟踪失败,提高了定位精度。

2) 提出了一种劣质关键帧剔除算法,解决了相机与移动机器人机身之间的相对运动产生的劣质关键帧问题。

3) 通过数据集与移动机器人实验验证了算法的优异性。实验结果表明,数据集估计定位误差的最优结果约为改进前算法的 51.9%;移动机器人实验约为改进前的 62.9%。剔除劣质关键帧后,直线误差仅为原来的 82.1%。

参考文献 (References)

- [1] JIANG W, YE G C, ZHOU D H. Dynamic model based energy consumption optimal motion planning for high-voltage transmission line mobile robot manipulator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K:Journal of Multi-body Dynamics, 2021, 253(1): 93-105.
- [2] 罗欣,丁晓军.地面移动作业机器人运动规划与控制研究综述[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(1):1-15.
LUO X, DING X J. Research and prospective on motion planning and control of ground mobile manipulators[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(1): 1-15 (in Chinese).
- [3] 魏彤,龙琛.基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J].北京航空航天大学学报,2020,46(4):703-711.
WEI T, LONG C. Path planning for mobile robot based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(4): 703-711 (in Chinese).
- [4] 翟敬梅,刘坤,徐晓.室内移动机器人自主导航系统设计与方法[J].计算机集成制造系统,2020,26(4):890-899.
ZHAI J M, LIU K, XU X. Autonomous indoor navigation system of mobile robot[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(4): 890-899 (in Chinese).
- [5] FUNENTES P, RUIZ A, RENDON M. Visual simultaneous localization and mapping: A survey[J]. Artificial Intelligence Review, 2012, 43(1): 55-81.
- [6] LI J Q, PEI L, ZHOU D P, et al. Attention-SLAM: A visual monocular SLAM learning from human gaze[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 6408-6420.
- [7] 王晨捷,罗斌,李成源,等.无人机视觉SLAM协同建图与导航[J].测绘学报,2020,49(6):767-776.
WANG C J, LUO B, LI C Y, et al. UAV visual SLAM collaborative mapping and navigation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(6): 767-776 (in Chinese).
- [8] GARCIA-FIDALGO E, ORTIZ A. Vision-based topological mapping and localization methods: A survey[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 64: 1-20.

- [9] TANG Y C, WANG C, LUO L, et al. Recognition and localization methods for vision-based fruit picking robots: A review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 510-526.
- [10] ENGEL J, SCHOPS T, CREMERS D, et al. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM[C]//European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2014, 8690: 834-849.
- [11] SAKAI T, YOSHIOKA M, INOUE K. Camera tracking improvement for LSD-SLAM system with 360-degree camera[J]. *IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems*, 2020, 140(7): 800-809.
- [12] ENDRES F, HESS J, STURM J, et al. 3D mapping with an RGB-D camera[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(1): 177-187.
- [13] MUR-ARTAL R, MOTIEL J M, TARDOS J D. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [14] MUR-ARTAL R, MOTIEL J M, TARDOS J D. ORB-SLAM2: An open-source slam system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [15] LIU J, SHAHROUDY A, PEREZ M, et al. NTU RGB-D: A large-scale benchmark for 3D human activity understanding[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, 42(10): 2684-2701.
- [16] 张括嘉, 张云洲, 吕光浩, 等. 基于局部语义拓扑图的视觉SLAM闭环检测[J]. *机器人*, 2019, 41(5): 649-659.
- ZHANG K J, ZHANG Y Z, LV G H, et al. Loop closure detection based on local semantic topology for visual slam system[J]. *Robot*, 2019, 41(5): 649-659(in Chinese).
- [17] GARDENFORS P. Using event representations to generate robot semantics[J]. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*, 2019, 8(4): 1-21.
- [18] YANG G, CHEN Z, LI Y, et al. Rapid relocation method for mobile robot based on improved ORB-SLAM2 algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(2): 149.
- [19] XIE P, SU W, LI B, et al. Modified keyframe selection algorithm and map visualization based on ORB-SLAM2[C]//2020 4th International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 142-147.
- [20] CUI L, MA C, WEN F. Direct-ORB-SLAM: Direct monocular ORB-SLAM[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1345(3): 032016.
- [21] POMERLEAU F, COLAS F, SIEGWART R. A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics[J]. *Foundations and Trends in Robotics*, 2015, 4(1): 1-104.

ORB-SLAM2 algorithm based on improved key frame selection

ZHANG Hong^{1,2,*}, YU Yuanzhuo¹, QIU Xiaotian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: To address the difficulties caused by the low accuracy and poor robustness of simultaneous localization and mapping (SLAM), an ORB-SLAM2 algorithm is proposed based on key frame selection. First, the relative pose between frames is calculated based on ORB-SLAM2. Second, to determine whether a new key frame should be created, rotation and translation values are added to the original algorithm, functioning as the judgement basis. Then, an inferior key frame removal algorithm is designed to solve the problem of inferior key frame generation which results from incorrect shooting caused by the relative movement between the robot and the camera installed in the self-developed mobile robot. Finally, experiments are carried out based on the RGB-D dataset and the developed mobile robot, verifying the outstanding performance of the proposed algorithm. The results show that the improved key frame selection algorithm can accurately and timely choose the key frame, and reduce tracking failures. In the most optimal case, the positioning error is about 51.9% of that of the original, while the linear error is about 82.1% of that of the original, which effectively eliminates the influence caused by relative motion between the camera and the robot. This research shows that the improved algorithm could effectively promote positioning accuracy and reduce tracking failures.

Keywords: moving robot; ORB-SLAM2; key frame selection; inferior key frame removal; positioning accuracy

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0177

基于双注意力混洗的无人机航拍目标跟踪算法

金国栋*, 薛远亮, 谭力宁, 许剑钡

(火箭军工程大学 核工程学院, 西安 710025)

摘要: 针对无人机 (UAV) 跟踪过程中目标经常出现尺寸小、尺度变化大和相似物干扰等问题, 提出了一种基于双注意力混洗的多尺度无人机实时跟踪算法。考虑到无人机视角下目标像素点少, 构建了双采样融合的深层网络, 既提供了语义信息丰富的深度特征, 又保留了目标的细节信息; 设计了双注意力混洗模块, 通道注意力和空间注意力同时分组筛选提取到的特征信息, 混洗不同通道间的信息, 加强信息交流, 提高了算法辨别能力; 为利用不同层的特征信息, 加入多个区域建议网络完成目标的分类和回归, 并针对无人机的目标特点, 将结果进行加权融合。实验结果表明: 所提算法在数据集上的成功率和准确率分别为 60.3% 和 79.3%, 速度为 37.5 帧/s。所提算法的辨别能力和多尺度适应能力明显增强, 能有效应对无人机跟踪中常见的挑战。

关键词: 无人机; 目标跟踪; 注意力模块; 混洗; 区域建议网络

中图分类号: V279; TP391

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0053-13

无人机因其操作简单、体积小和成本低等优势, 在各个领域有着广泛的应用。作为无人机应用的关键技术之一, 目标跟踪逐渐成为计算机视觉领域的研究热点, 在给定目标第一帧后, 对后续帧中出现的该目标进行持续不断的定位跟踪。随着无人机的飞速发展, 研究稳健准确且高效的跟踪技术对于无人机的应用有着十分重要的意义。

相较于地面平台, 无人机视角下目标尺寸相对较小, 目标包含的像素点较少, 并且无人机飞行过程中容易出现相机抖动和飞行速度变化, 造成目标模糊和形变等问题, 都对跟踪算法提取特征的能力有着更高的要求。目前的目标跟踪算法主要分为 2 类, 即相关滤波方法和深度学习方法。其中, 相关滤波方法大多使用传统特征提取算法, 对目标的表征能力不够^[1], 不能有效应对无人机对目标的跟踪任务。而卷积神经网络 (convolutional neural networks, CNN) 提取的特征能有效表征目标, 在目标跟踪领

域发挥着重要作用。Bertinetto 等^[2] 提出了一种基于全卷积孪生神经网络 (fully-convolutional Siamese networks, SiamFC) 的跟踪算法, 将目标跟踪任务看作为目标模板与搜索图像之间相似度学习的问题, 尽管网络层数不深, 但算法的准确率和速度分别为 53.35% 和 86 帧/s (frames per second, FPS)。后续研究大多都在孪生神经网络的基础上进行, Huang 等^[3] 发现浅层特征足以完成简单场景下的跟踪, 因此在孪生神经网络每一层连接一个判别器, 当该层的特征图的得分大于阈值时停止神经网络的后续计算, 有效降低了运算成本。SiamRPN^[4] 在 SiamFC 上引入区域建议网络^[5] (region proposal network, RPN), 将在线跟踪过程看作局部的目标检测任务, 实现了精度和速度的提升, 在多个数据集上表现优异且速度高达 160 FPS, 有效证明了基于深度学习的目标跟踪算法在精度和速度上的良好平衡。SiamRPN++^[6] 打破了特征提取能力更强的深层神经网络不能应

收稿日期: 2021-04-07; 录用日期: 2021-05-28; 网络出版时间: 2021-06-16 17:54

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210616.1533.001.html

基金项目: 国家自然科学基金 (61673017, 61403398)

*通信作者. E-mail: 641797825@qq.com

引用格式: 金国栋, 薛远亮, 谭力宁, 等. 基于双注意力混洗的无人机航拍目标跟踪算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 53-65.
JIN G D, XUE Y L, TAN L N, et al. Aerial object tracking algorithm for UAVs based on dual-attention shuffling [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 53-65 (in Chinese).

用在目标跟踪领域的限制,在多个数据集上排名第一。针对无人机的跟踪算法主要有: Fu等^[7]提出一种融合了语义特征的无锚框(anchor-free)跟踪算法,跟踪器的速度和跟踪效果都有所上升,但跟踪框的回归成为难题;刘芳等^[8]提出一种基于残差学习的自适应无人机目标跟踪算法,在深度网络上引入残差连接和空洞卷积强化特征提取能力,使用分块策略应对无人机跟踪过程中的尺度变化,但是受到网络层数限制,特征提取能力有所不足;又提出自适应 Siamese 网络^[9],结合高斯混合模型更新目标模板,有效解决了目标遮挡、形变等问题,但跟踪速度达不到实时要求。

注意力机制也渐渐应用在孪生神经网络上。SA-Siam^[10]在 SiamFC 上加入语义分支,并受到 SE-Net^[11]的启发,引入通道注意力,利用外观特征和语义特征的互补,取得了不错的跟踪效果。钟莎和黄玉清^[12]提出了一个基于孪生区域候选的注意力机制网络算法,在改进过的 ResNet-50^[13]网络上引入通道注意力排除干扰,并融合 2 个 RPN 网络实现了分类与边界框回归。

综上所述,针对无人机视角下跟踪目标尺寸小、相似物干扰和尺度变化等问题,本文提出了一种基于双注意力混洗的多尺度无人机目标跟踪算法。首先,对 ResNet-50 网络中的残差连接进行改进,融合了软采样和硬采样的方法,有助于目标分类和定位。然后,为了更好地利用特征,将特征图一分为二,分别使用空间注意力和通道注意力,二者输出由混洗(shuffle)操作^[14]有效结合起来。最后,跟踪框生成阶段将不同深度卷积层的 RPN 输出进行融合并分配不同权值,有效解决尺度变化问题。实验表明,本文算法能更有效地应对尺度变化、小目标、运动模糊和部分遮挡等问题,提升了算法的跟踪效果,并且速度达到 37.5 FPS,满足实时性要求。

1 相关工作

1.1 残差模块

He 等^[13]发现随着网络层数的加深,信息传递的难度加大,网络因学习到的有效信息变少而出现退化现象。而 ResNet 网络层数可以达到很深,是因为残差模块中的捷径连接相当于在网络层的输入和输出之间构建了一种映射关系,确保信息能有效传递,避免网络出现退化现象。图 1 为 2 种残差模块的示意图。图中:第 l 层残差模块的输入为 $\mathbf{x}^{[l]}$ 、输出为 $\mathbf{x}^{[l+1]}$; conv 1×1 、conv 3×3 分别代表大小为 1、3 的卷积; ReLU 为修正线性单元激活函数; BN

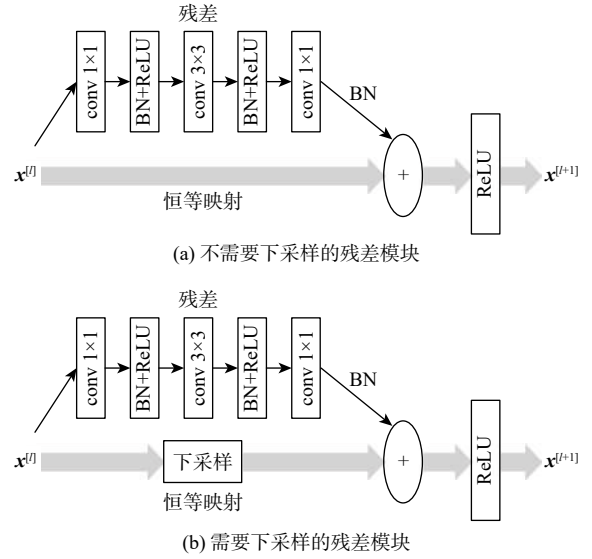


图 1 残差模块

Fig. 1 ResBlock

(batch normalization) 为批量归一化操作。

ResNet 残差网络由数个残差模块堆叠而成,残差模块的定义表达式如下:

$$\mathbf{x}^{[l+1]} = \begin{cases} \sigma(\mathbf{x}^{[l]} + F(\mathbf{x}^{[l]})) & S(\mathbf{x}^{[l]}) = S(\mathbf{x}^{[l+1]}) \\ \sigma(F_p(\mathbf{x}^{[l]}) + F(\mathbf{x}^{[l]})) & S(\mathbf{x}^{[l]}) \neq S(\mathbf{x}^{[l+1]}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F(\mathbf{x}^{[l]}) = F_3(\sigma(F_2(\sigma(F_1(\mathbf{x}^{[l]}))))$, F_1 、 F_2 、 F_3 分别表示 conv 1×1 、conv 3×3 、conv 1×1 , σ 为 ReLU 激活函数; F_p 为投影映射; $S(\mathbf{x}^{[l]})$ 、 $S(\mathbf{x}^{[l+1]})$ 分别代表特征图 $\mathbf{x}^{[l]}$ 、 $\mathbf{x}^{[l+1]}$ 的尺寸。

$\mathbf{x}^{[l+1]}$ 由映射和残差 $F(\mathbf{x}^{[l]})$ 两部分组成。映射分为恒等映射和投影映射: 当 $\mathbf{x}^{[l]}$ 和 $\mathbf{x}^{[l+1]}$ 尺寸一致时, 恒等映射为 $\mathbf{x}^{[l]}$, 残差 $F(\mathbf{x}^{[l]}) = \mathbf{x}^{[l+1]} - \mathbf{x}^{[l]}$; 当 $\mathbf{x}^{[l]}$ 和 $\mathbf{x}^{[l+1]}$ 尺寸不一致时, 进行下采样操作, 得到投影映射 $F_p(\mathbf{x}^{[l]})$, 残差 $F(\mathbf{x}^{[l]}) = \mathbf{x}^{[l+1]} - F_p(\mathbf{x}^{[l]})$ 。

残差模块将训练过程中学习 $\mathbf{x}^{[l]}$ 到 $\mathbf{x}^{[l+1]}$ 映射的任务, 转化为学习残差 $F(\mathbf{x}^{[l]})$ 。相对学习整个映射而言, 网络更加容易学习残差, 有效提升网络性能。

1.2 注意力机制

注意力在人类的知觉中起着重要的作用^[15]。人类视觉系统的一个重要特性是人类不会试图一次处理整个场景。相反, 为了更好地捕捉视觉内容, 人类会利用一系列局部的观察, 并有选择地聚焦于想要关注的内容^[16]。计算机视觉中的注意力机制同样可以帮助神经网络着重地关注输入中的重要信息, 排除不重要信息的干扰。主要分为通道注意力和空间注意力, 分别旨在捕捉通道间和像素间的依赖关系^[17]。

文献 [18] 提出一种空间转换器, 将空间信息进

行变换, 提取其中关键信息。SE-Net^[11] 分别使用全局平均池化 (global average pooling, GAP) 和 2 个全连接层达到对通道的压缩、激励, 使模型更加关注信息量更大的通道特征。

ECA-Net^[19] 用一维的卷积构建高效的通道注意力模块, 避免了通道降维, 且有效捕获了跨通道交互的信息。之后的 CBAM^[20]、DANet^[21] 在前面研究基础上将通道注意力和空间注意力结合起来, 证明了 2 种注意力结合的效果比单个注意力的效果更好。

2 基于双注意力混洗的孪生跟踪算法

基于孪生神经网络的跟踪算法将跟踪任务看作为目标模板与搜索图像之间的相似度度量问题。孪生神经网络主要分为特征提取部分和相似度度量部分。特征提取部分根据目标模板 z 和搜索

图像 x , 分别使用权值共享的神经网络 $\phi(\cdot)$ 提取特征, 本文提取的特征相当于一种更为抽象、更为泛化的描述子。如式 (2) 所示, 相似度度量部分根据输入的描述子, 使用度量函数 $f(z, x)$ 计算描述子之间的相似度, 得到响应图。响应的分数越高, 则二者相似度越高。

$$f(z, x) = f(\phi(z), \phi(x)) = \phi(z) * \phi(x) + b \cdot I \quad (2)$$

式中: “*” 代表互相关运算; $b \cdot I$ 为响应图每个位置的偏差值。

本文算法的网络结构如图 2 所示, 主要分为 3 个部分: 双采样融合的 ResNet-50 (double sample integration ResNet-50, DSI-ResNet)、双注意力混洗模块 (dual attention shuffle, DAS) 和多区域建议网络加权融合, 因此算法命名为 SiamDAS。

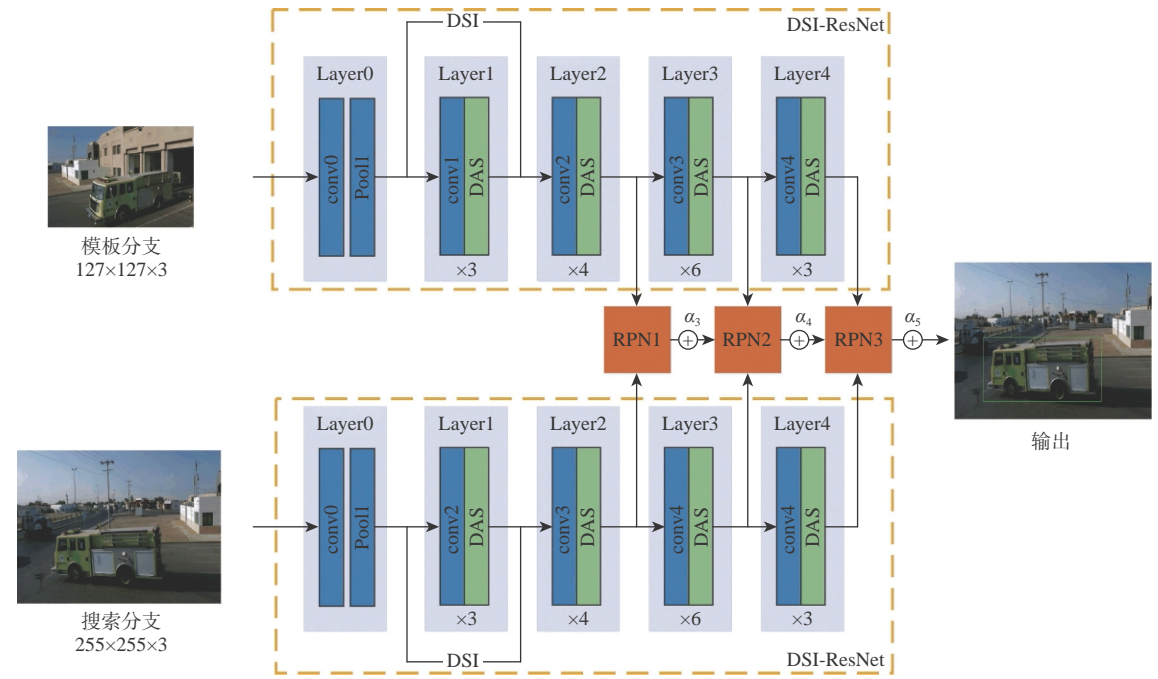


图 2 本文算法网络结构

Fig. 2 Structure of the proposed algorithm network

2.1 双采样融合的 ResNet-50 和 DSI-ResNet

经典孪生跟踪算法 MDNet^[22]、SiamFC^[2] 和 Siam-RPN^[4] 使用网络层数较少的 VGG^[23] 和 AlexNet^[24] 作为特征提取的主干网络, 导致提取到的浅层特征缺少语义信息。当无人机跟踪过程中目标发生外观变化和运动模糊时, 浅层特征描述物体能力不够, 容易出现跟踪失败的情况。因此, 更好地利用丰富的语义信息建立鲁棒的目标模型才是无人机跟踪算法的关键。ResNet-50 因其特征提取能力更强而被广泛使用在计算机视觉其他领域。本文主干网络 DSI-ResNet 也是在其基础上根据无人机跟踪任务而进行改进。

ResNet-50^[13] 残差模块中的映射是传递信息的主要路径。每次映射都会增加特征图的通道数, 当输入和输出的特征图尺寸不一致时, 还需要对特征图进行下采样。图 3(a) 为 ResNet 中的下采样, 使用一个步长 Stride 为 2、大小为 1 的卷积核对特征图进行逐步长的卷积运算, 一次性完成了通道升维和空间下采样。如图 4 所示 (蓝色为使用到的像素, 黄色为卷积核), 步长为 2 导致下采样过程中忽略了 75% 的特征信息, 不适合无人机视角下目标尺寸小和运动模糊等情况, 本文提出的 DSI-ResNet 改进原有的采样方式, 将 2 种各有优点、相互互补的“软下采样”和“硬下采样”进行融合, 保留更多的

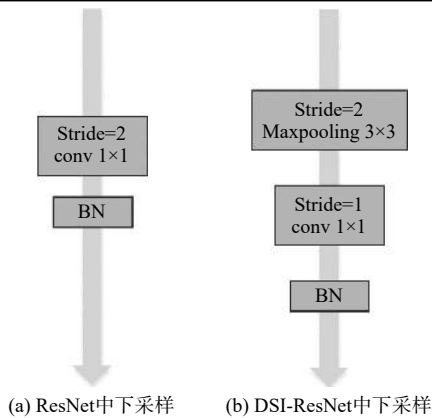


图3 投影映射的下采样

Fig. 3 Down-sampling of projection mapping

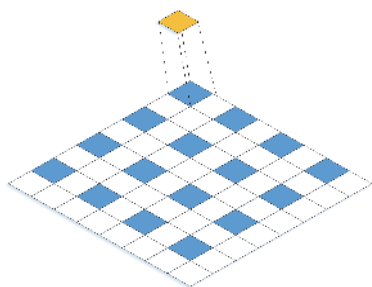


图4 步长为2、大小为1的卷积过程

Fig. 4 Convolution process with a step of 2 and size of 1

细节信息和背景信息。

下采样中常用的最大池化操作,即“硬下采样”,从模板中选择激活度最高的元素作为输出,有利于目标分类。而图1(b)中残差部分使用的下采样是步长为2、大小为3的卷积,相比于最大池化,输入输出之间的计算更平滑,因此称为“软下采样”。卷积运算会考虑特征图上的全部信息包括背景信息,有助于网络更好地定位。

如图3(b)所示,“硬下采样”由一个步长为2、大小为3的最大池化和一个步长为1、大小为1的卷积来实现。空间下采样与通道升维分为2步进行:第1步,最大池化会全面考虑空间信息并从中选择最大激活值,作为卷积的输入;第2步,利用步

长为1、大小为1的卷积实现跨通道的信息融合。将投影映射中“硬下采样”的输出和残差部分中“软下采样”的输出相加,有效结合2种下采样方法,使其更适合无人机下目标像素点少、运动模糊的跟踪任务,还不会增加运算成本。

2.2 双注意力混洗

基于孪生神经网络的跟踪算法为了提升运算速度,采用的是在大型数据集上离线训练跟踪模型,在线跟踪过程中不会更新目标模板,需要网络有很强的泛化能力和辨别能力。网络仅根据给定的第1帧初始图像,既要提取到目标的语义信息,又要捕获目标特有的细节信息。语义信息保证网络在各个场景下跟踪目标的泛化能力,细节信息则是排除同类物体干扰、提高网络辨别能力的关键。

根据上述分析,能提取到丰富语义信息的DSI-ResNet,辨别能力仍有不足,主要体现在:①通过卷积生成特征图的过程中,对输入的特征图的每个位置有着一样的关注,而这特征图上不仅有要跟踪目标的信息,也有干扰信息。如果能在特征提取阶段就将干扰信息排除,就可以有效提高跟踪算法的准确度。②互相关运算中,各个通道上的特征图对于计算相似度的贡献都是一样的,而往往不同通道代表着不同类别的物体,对于只跟踪特定目标的跟踪任务来说,对所有类别都给予相同的权重不适用于跟踪任务。

单独的通道注意力或空间注意力不能解决上述问题,而这两者的效果是互补的,同时使用就能解决上述问题。文献[20]提出的CBAM级联空间注意力和通道注意力模块,相比于单一注意力,能帮助网络更好地关注目标,实验表明,双注意力融合起来效果更好。但是CBAM的设计不够轻量化,不适合无人机跟踪任务。为了提高网络的辨别能力,在DSI-ResNet上引入了一种轻量化的双注意力混洗模块,如图5所示。首先,将特征图按通道进行分组,生成子特征图;然后,子特征图上按通道一分

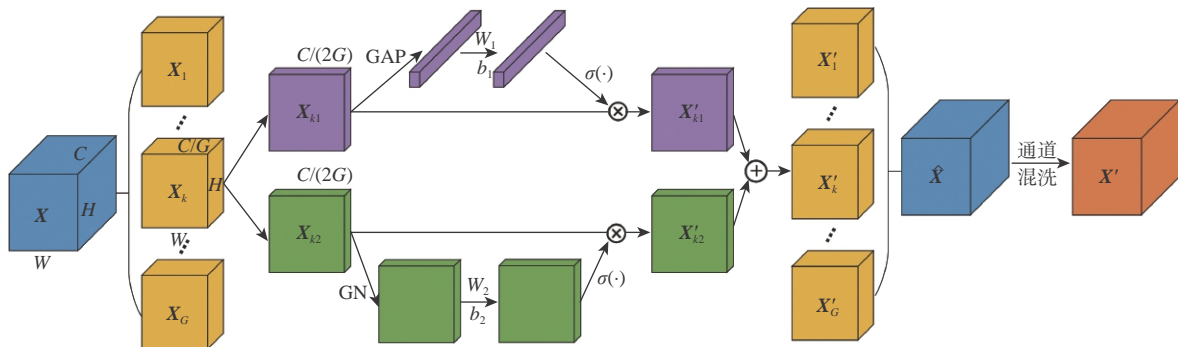


图5 双注意力混洗

Fig. 5 Dual-attention shuffling

为二,分别使用空间注意力和通道注意力,2个注意力模块的输出相加得到新的子特征图;最后,所有子特征图组合生成新的特征图,混洗子特征图上的信息,加强不同通道间信息交流。

2.2.1 特征图分组

给定输入的特征图为 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{C \times H \times W}$,其中, C 、 H 和 W 分别为特征图的通道数、高度和宽度。为了降低计算成本,将 \mathbf{X} 在通道维度上分为 G 组子特征图, $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_k, \dots, \mathbf{X}_G], \mathbf{X}_k \in \mathbf{R}^{C/G \times H \times W}$,因为子特征图是按通道划分的,所以在训练过程中每个子特征图都能捕获到特定的语义信息。子特征图 \mathbf{X}_k 一分为二,得到 $\mathbf{X}_{k1}, \mathbf{X}_{k2} \in \mathbf{R}^{C/(2G) \times H \times W}$,一个使用通道注意力捕获通道间的相互关系,另一个则使用空间注意力寻找特征之间的空间关系。因此,通过注意力模块的权重分配,网络更好地知道关注什么和关注哪里才是有意义的^[17]。

2.2.2 通道注意力

深层网络的特征图上,不同通道代表着不同的语义信息^[25]。通道注意力分配权重的过程可以看作是为不同的通道选择语义属性的过程^[11]。本文选用的是SE-Net^[11]中的全局平均池化GAP压缩 \mathbf{X}_{k1} 通道上的特征层,得到结果 \mathbf{s} :

$$\mathbf{s} = \text{GAP}(\mathbf{X}_{k1}) = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \mathbf{X}_{k1}(i, j) \quad (3)$$

为了学习到通道之间的非线性关系, \mathbf{s} 通过sigmoid非线性激活函数 $\delta(\cdot)$ 得到权重系数,自适应地引导网络选择合适的特征图。通道注意力响应 \mathbf{X}'_{k1} 由式(4)得到

$$\mathbf{X}'_{k1} = \delta(W_1 \mathbf{s} + b_1) \cdot \mathbf{X}_{k1} \quad (4)$$

式中: $W_1, b_1 \in \mathbf{R}^{C/(2G) \times 1 \times 1}$ 对 \mathbf{s} 进行放缩和偏移操作。

将特征图按照不同的语义信息进行权重分配,目标所在通道的权重最大。在互相关运算时,其他通道上的响应受到抑制,明确网络应该关注什么类别(what)的目标。

2.2.3 空间注意力

无人机跟踪过程中经常有与跟踪目标相似的物体存在,导致特征图上存在跟踪目标的特征信息,也存在同类物体的特征信息。空间注意力则是增强对相似物体的辨别能力,对目标所在的位置给予更大的关注度。本文使用文献[26]提出的组归一化(group norm, GN)完成对 \mathbf{X}_{k2} 上的空间信息统计 $\bar{\mathbf{X}}_{k2}$,最终空间注意力响应 \mathbf{X}'_{k2} 由式(5)可得

$$\mathbf{X}'_{k2} = \delta(W_2 \cdot \text{GN}(\mathbf{X}_{k2}) + b_2) \cdot \mathbf{X}_{k2} \quad (5)$$

式中: $W_2, b_2 \in \mathbf{R}^{C/(2G) \times 1 \times 1}$ 和 $\delta(\cdot)$ 用于加强 $\bar{\mathbf{X}}_{k2}$ 的表示能力。

空间注意力响应对特征图各个位置的权重设计有效抑制了相似物的干扰,明确网络应该关注图像上什么位置的目标。

2.2.4 混洗

在混洗前,注意力响应 \mathbf{X}'_{k1} 和 \mathbf{X}'_{k2} 连接得到新的子特征图 $\mathbf{X}'_k \in \mathbf{R}^{C/G \times H \times W}$,所有新的子特征图按通道进行叠加,组合形成特征图 $\hat{\mathbf{X}} \in \mathbf{R}^{C \times H \times W}$ 。使用类似于ShuffleNet V2^[14]中的通道混洗操作处理 $\hat{\mathbf{X}}$,如图6所示。首先,将 $\hat{\mathbf{X}}$ 展开为 $g \times C' \times H \times W$ 四个维度的矩阵,矩阵的 H 、 W 维度不变,对 g 、 C' 维度进行转置;然后,压缩矩阵维度,得到输出特征图 $\mathbf{X}' \in \mathbf{R}^{C \times H \times W}$ 。混洗操作能有效整合各个通道上的特征信息,加强通道间信息交流^[14]。

$$\mathbf{X}' = \text{channel_shuffle}(\hat{\mathbf{X}}) \quad (6)$$

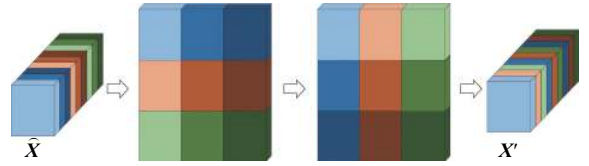


图6 通道混洗

Fig. 6 Channel shuffle

2.2.5 可视化

为了直观展现双注意力混洗模块的作用,使用Grad-CAM^[27]对加入双注意力混洗的ResNet-50分类网络最后一层卷积层(见图2中Layer4的第2层卷积)生成类激活热力图。图7为预测狗类别的类激活热力图。温度代表网络对图像中目标类别的认识,网络认为该区域越接近目标类别,则类激活值就越高,因此图中温度越高。可以看出,加入双注意力混洗后,网络对感兴趣目标(狗)的辨别能力得到提升,抑制干扰目标(猫)的影响,有效证明了双注意力混洗模块对特定目标的辨别能力。因此,当双注意力混洗模块用于提取跟踪任务中目标特征时,也能很好地将网络注意力限制在跟踪目标上。



(a) 无DAS

(b) 有DAS

图7 Grad-CAM热力图

Fig. 7 Heatmap of Grad-CAM

2.3 多区域建议网络融合

2.3.1 区域建议网络

SiamRPN^[4]引入RPN模块代替传统金字塔式的尺度估计方法,预先定义尺度、大小不同的 k 个锚框完成对目标的多尺度估计,主要包括上通道互相关运算(UP-channel Xcorr)、边界框回归分支 $B_{W \times H \times 4k}$ 和分类分支 $S_{W \times H \times 2k}$ 。上通道互相关运算是整合模板分支与搜索分支特征信息的关键运算,其核心思想是把模板分支的特征图 $\phi(z)$ 当作卷积核,与搜索分支的特征图 $\phi(x)$ 进行卷积运算,得到响应图。回归分支与分类分支根据响应图,分别得到目标的预测位置与分类得分,其中得分最高的目标及其预测位置作为输出。

$$\begin{cases} S_{W \times H \times 2k} = \phi(z)_{\text{cls}} * \phi(x)_{\text{cls}} \\ B_{W \times H \times 4k} = \phi(z)_{\text{reg}} * \phi(x)_{\text{reg}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:“*”代表上通道互相关运算; $\phi(\cdot)$ 为特征提取网络; W 、 H 和 $2k$ 、 $4k$ 分别为特征图的宽度、高度和通道数。

SiamRPN++^[6]发现SiamRPN中的上通道互相关运算需要对特征图进行通道升维,导致RPN模块与特征提取模块的参数严重不平衡(RPN的参数为 20×10^6 ,而特征提取部分参数只有 4×10^6),容易出现训练困难。因此,提出一种轻量化的深度互相关运算,实现了更高效的信息整合,参数减少了10倍。得到的多通道响应图还具有正交特性,同类物体在特定通道上的响应最大,其他通道上受到抑制。

图8为本文使用的SiamRPN++中的RPN模块。其中,深度互相关运算得到的多通道响应图具有正交特性,结合双注意力混洗模块能更好地提高跟踪准确度。

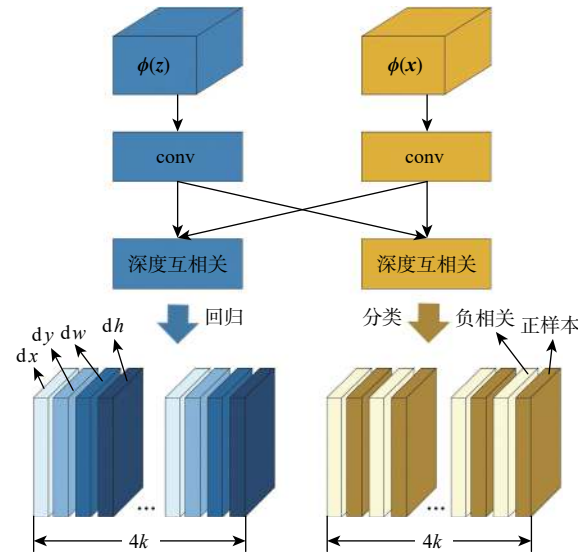


图8 RPN模块

Fig. 8 Region proposal network module

2.3.2 加权融合多区域建议网络

浅层特征有助于物体跟踪的精确定位^[28],浅层特征主要描述物体的外观,包括颜色、大小等细节信息,这对于物体的定位是不可缺少的;深层特征主要描述物体的语义信息,对物体的描述更抽象,也更具有泛化能力,能有效应对跟踪目标发生外观变化和运动模糊等情况。因此,对于无人机目标跟踪来说,充分利用神经网络提取出来的细节信息和语义信息是至关重要的。

SiamRPN只利用最后一层语义信息,在辨别背景和目标时判别力不够^[29]。由于不知道跟踪目标的先验信息,跟踪过程中预先定义的anchor想要一次性、准确地估计目标的大小和位置是比较困难的。为了利用多层特征信息和目标的精确定位,采用多个RPN融合的方式输出跟踪结果(见图2)。与SiamRPN++平均加权融合相比,重新设计了各层融合的权重。

$$\begin{cases} S = \alpha_3 S_3 + \alpha_4 S_4 + \alpha_5 S_5 \\ B = \beta_3 B_3 + \beta_4 B_4 + \beta_5 B_5 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)为加权融合结果的计算过程, S_i 和 B_i 分别为第 i 层RPN的分类输出和回归输出。考虑到无人机视角下的目标特征信息少、尺寸小和更容易出现运动模糊的情况,给浅层特征更多的关注,即 $\alpha_3 > \alpha_4 = \alpha_5, \beta_3 > \beta_4 = \beta_5$,保证网络能更多地利用细节信息完成无人机视角下的目标跟踪。

2.4 算法实现步骤

跟踪算法的流程如图9所示。具体实现步骤如下:

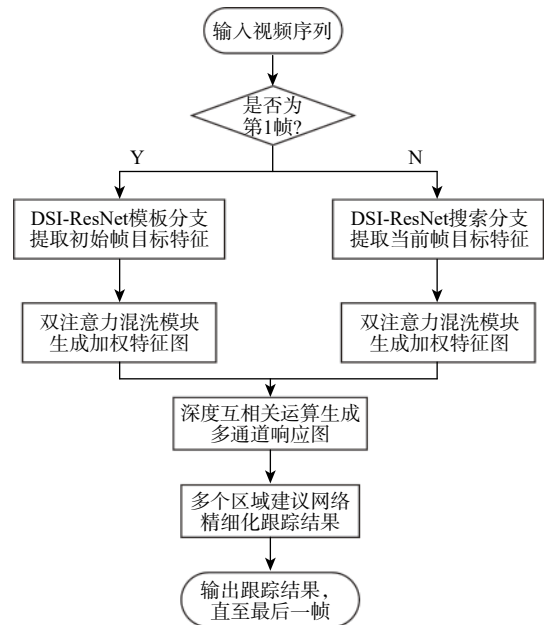


图9 算法实现步骤

Fig. 9 Algorithm flowchart

步骤 1 输入视频序列。

步骤 2 利用模板分支提取视频序列的第 1 帧目标图像, 作为模板特征。

步骤 3 利用搜索分支提取后续帧中搜索区域的图像特征作为搜索特征。

步骤 4 双注意力混洗模块对模板特征与搜索特征根据进行权重分配, 生成各自的加权特征图。

步骤 5 深度互相关运算完成对 2 个分支的加权特征图的信息整合, 生成多通道响应图, 其中最大响应位置为目标粗略位置。

步骤 6 多个区域建议网络逐步完成对目标位置、边界框大小的精确评估。

步骤 7 输出预测的目标位置。

步骤 8 重复步骤 3~步骤 7, 直至视频结束。

3 实验与分析

3.1 实验平台及参数设置

1) 实验平台: ①操作系统为 Ubuntu18.04; ②CPU 为 Intel Core i7-9700 @3.6 GHz; ③GPU: NVIDIA GeForce RTX 2080Ti, 内存 12 GB。

2) 训练数据集: 包含 38 万个视频片段, 560 万个人工标注的边界框, 跟踪 23 个类别的日常物体的 YouTube-BoundingBoxes^[30]; 有 30 个基本级别的类别, 200 个子集的 ImageNet VID^[31] 和 ImageNet DET^[31]; 包含 91 个对象类型, 328 000 张图像, 共有 250 万个标注的 COCO^[32]。以图像对的方式训练网络, 模板分支图像的大小为 127×127, 搜索分支图像大小为 255×255。

3) 参数设置: 特征图分组数量 $G = 64$; 多个 RPN 融合权重为 $\alpha_3 = \beta_3 = 0.5, \alpha_4 = \alpha_5 = \beta_4 = \beta_5 = 0.25$; 与 SiamRPN++ 一样, 使用随机梯度下降法 (SGD) 训练网络, epoch=20, 其中每个 epoch 训练图像数量为 600 000 对, batch size=28, 即每批次处理图像 14 对。前 5 个 epoch 训练 RPN, 学习率为 0.001; 后 15 个 epoch 对整个网络进行端对端训练, 学习率从 0.005 指数衰减到 0.000 5, 衰减权重为 0.000 5, 动量为 0.9。损失函数是分类损失和回归的标准平滑 L1 损失的总和。需要注意的是, SiamRPN++ 只对 ResNet-50 的 Layer2、Layer3、Layer4 进行训练, 而本文因为有双注意力混洗模块的加入, 还加入了 Layer1 参与训练以保证效果。

3.2 实验结果与分析

本文的测试数据集为 UAV123^[33] 数据集, 包含 123 个无人机拍摄的高分辨率视频序列, 视频平均帧数为 915, 主要分为 3 个子集: 子集 1 使用一架专业级无人机 (DJI S1000), 在 5~25 m 的高度跟踪不同的目标, 所有序列以 720 p 和 30 FPS 的速度提

供, 用垂直边框标注; 子集 2 具有较低的质量和分辨率, 并包含合理数量的噪声; 子集 3 是无人机模拟器捕获的 8 个合成序列。

UAV123 数据集包含城市景观、道路、建筑、田野、海滩、港口和码头等场景, 以及汽车、卡车、船只、人员、团体和空中交通工具等目标。目标的活动模式有步行、骑自行车、滑水、驾驶、游泳和飞行等。包含常见的视觉跟踪挑战: 小目标、完全和部分遮挡、尺度变化、光照变化、视角变化、背景干扰、摄像机动作等。因其包含场景多、目标广泛、运动模式复杂多元, 能整体评估跟踪算法, 已经成为无人机跟踪算法评测的基准。

3.2.1 定性分析

本文算法 (SiamDAS) 与 7 种主流的跟踪算法 DSST^[34]、Struck^[35]、MEEM^[36]、SAMF^[37]、SRDCF^[38]、SiamFC^[2]、SiamRPN^[4] 在 UAV123 数据集上进行实验对比。DSST、Struck、MEEM、SAMF、SRDCF 是基于相关滤波的跟踪算法, 其中, SAMF、DSST 和 SRDCF 算法使用传统金字塔式尺度估计的方法来应对目标的尺度变化。而 SiamFC 和 SiamRPN 是基于孪生神经网络的跟踪算法, 其中, SiamRPN 是使用预定义多个 anchor 完成对跟踪目标的尺度估计。为保证评估的公平性, 所有跟踪结果来自数据集官网和作者提供的跟踪结果。算法在数据集上的部分跟踪结果如图 10 所示。

1) car16_1 序列。跟踪目标为一个快速运动的汽车, 且无人机视角在变化。加入尺度估计的 DSST、SAMF、SRDCF 算法, 因目标运动过快而不能及时估计目标尺度变化, 导致 DSST、SAMF 和 SRDCF 算法的跟踪框过小, 丢失了大部分的正样本信息, 在第 358 帧已经跟踪失败; 当视角发生变化后, SRDCF 算法的跟踪框变大, 存在过多的干扰信息, 影响后续跟踪。本文算法和 SiamRPN 都能灵活适应跟踪目标的尺寸变化, 由于有多个 RPN 加权融合, 本文算法的跟踪框更加贴近目标实际大小。

2) truck1 序列。跟踪目标有着尺度变化, 且随着目标的行驶, 背景出现较多的相似干扰物体。第 63 帧时, 孪生跟踪算法 SiamFC、SiamRPN 和 SiamDAS 得益于提取到的深度特征, 能准确定位目标, 而相关滤波类的算法已经出现跟踪漂移情况。第 305 帧时, 只有 SiamFC 和 SiamDAS 能从干扰物中辨认出跟踪目标, 其余算法出现跟错目标或找不到目标的情况。本文算法因为有双注意力混洗模块, 提高了算法的辨认能力, 有效降低了相似干扰物的影响。

3) wakeboard1 序列。随着目标的运动, 目标的尺度逐渐变小, 且伴随着背景的干扰。Struck 和



图 10 部分跟踪结果

Fig. 10 Some tracking results

MEEM 算法因为没有尺度估计,跟踪框大小始终不变,当目标变小时,过多的背景信息干扰了正样本信息,导致出现跟踪错误目标的情况。本文算法相较于其他尺度估计的算法,跟踪结果更加准确,有良好的尺度自适应性。

4) truck2 序列。跟踪目标在视野中很小,所含特征信息少,对算法有着很高的要求。因为辨认能力不足,受到背景信息的干扰,所以绝大多数算法出现跟踪失败的情况。本文算法因为有 DSI-ResNet 深层网络提取的深层特征,保留了小目标更多的细节信息,能持续有效地跟踪。

5) person16 序列。不仅目标尺寸小,还存在遮挡情况和相似目标干扰。出现遮挡前,全部算法均能准确跟踪目标。当遮挡情况出现时,并且遮挡物和目标有着相似的外观信息,诱导了大多数算法,将遮挡物误认为目标。只有 SiamRPN 和本文算法在目标重新出现时,准确迅速地完成了再跟踪,证明了本文算法较好的辨认能力。

6) person7_1 序列。目标在跟踪过程中有快速运动和突然变换方向的特点,大部分算法都很难跟上目标的快速运动,导致跟踪失败。但目标突然变化方向时,只有本文算法实现了目标的及时跟踪,有着较强的适应能力,足以应对突发情况。

3.2.2 定量分析

为了进一步验证算法的能力,采用一次通过评估模式(one-pass-evaluation, OPE)、通过成功率和准确率对算法进行评估^[38]。成功率是指成功率曲线与坐标轴围成的面积(area under curve, AUC),其中成功率曲线是计算重叠率(intersection over union,

IOU) 大于某个阈值的跟踪结果与真实值的数量百分比;准确率即中心定位误差(center location error, CLE)。计算被跟踪目标中心位置与真实中心位置之间的平均欧氏距离,当距离小于阈值(一般为 20 个像素)时,被视为跟踪成功。准确率由成功跟踪的图像数量和视频序列数量的百分比得到。

1) 8 种算法在 UAV123 数据集上的整体评估结果如图 11 所示。本文算法(SiamDAS)的成功率和准确率分别为 60.3% 和 79.3%,相较于 SiamRPN 提升了 4.6% 和 2.5%。当成功率的阈值变高,准确率误差阈值变低(小于 20 像素),本文算法的成功率和准确率都高于其他算法,说明在更高要求的跟踪任务中,本文算法的效果更好,也证明了 DSI-ResNet、双注意力混洗模块和多层 RPN 加权融合的方法能够提升网络的整体性能。同时,速度达到 37.5 FPS,满足实时性要求。

2) UAV123 数据集对每个视频序列都标注了类别属性,用于分析跟踪算法在各个属性上的表现。图 12 为 8 种算法在不同属性上的评估结果。UAV123 数据集中最多的 2 种属性为目标尺度变化和边界框的长宽比变化,分别为 89% 和 55%,这也是所有无人机目标跟踪算法都要解决的问题。相比于其他算法,本文算法在尺度变化和长宽比变化属性上的成功率和准确率有着较大幅度的上升,是适合无人机目标跟踪任务的。在处理无人机跟踪过程中经常出现的相似物体、视角变化、部分遮挡、快速运动和出视野等情况时,都取得了较好的效果。

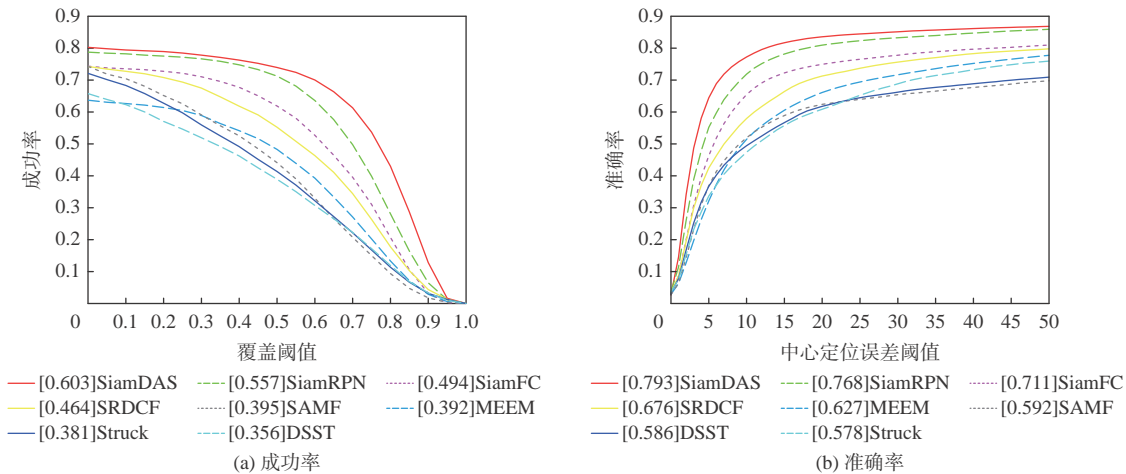
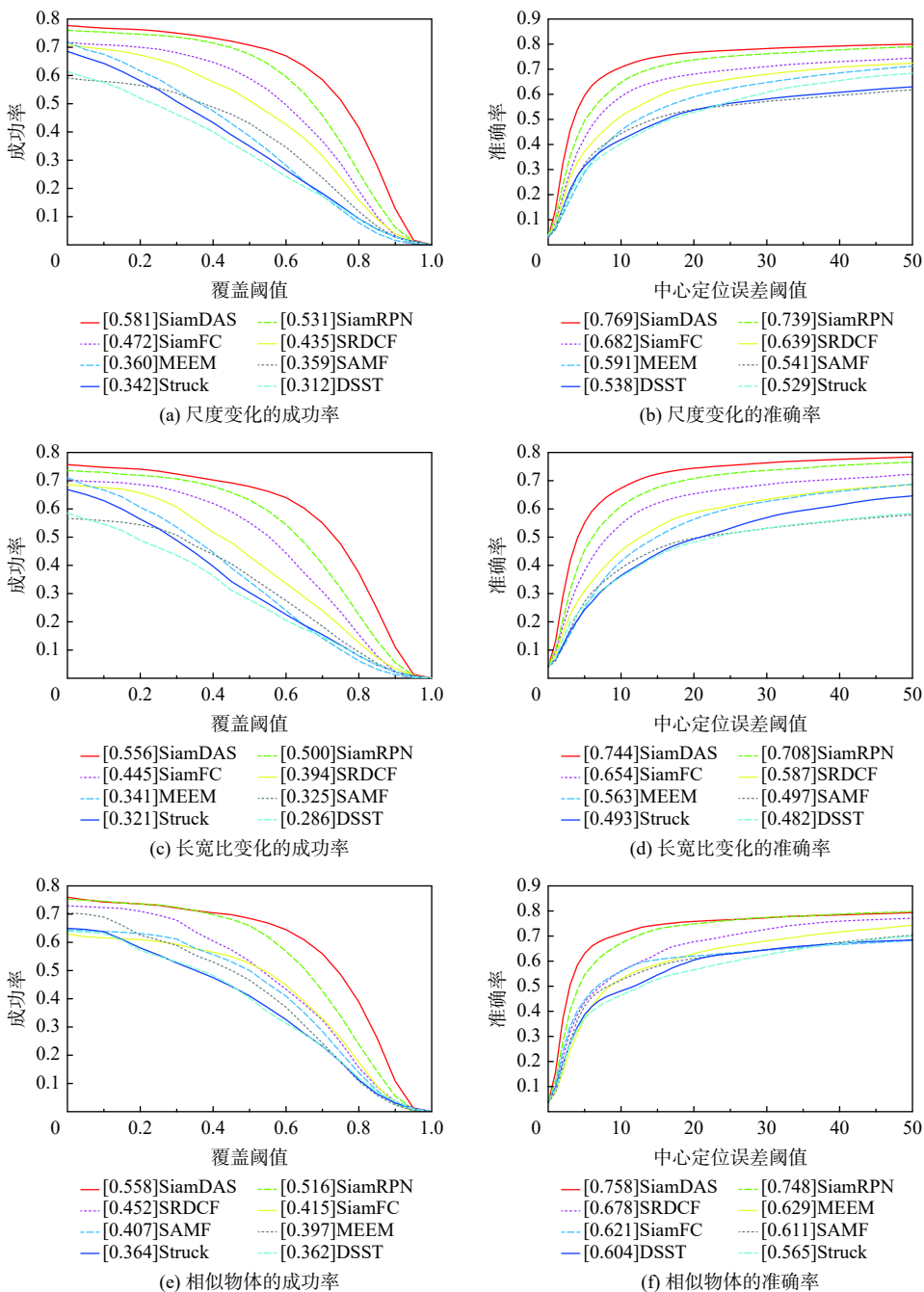


图 11 不同算法在 UAV123 数据集上的整体评估结果

Fig. 11 Overall evaluation results of different algorithms on UAV123 dataset



(e) 相似物体的成功率

(f) 相似物体的准确率

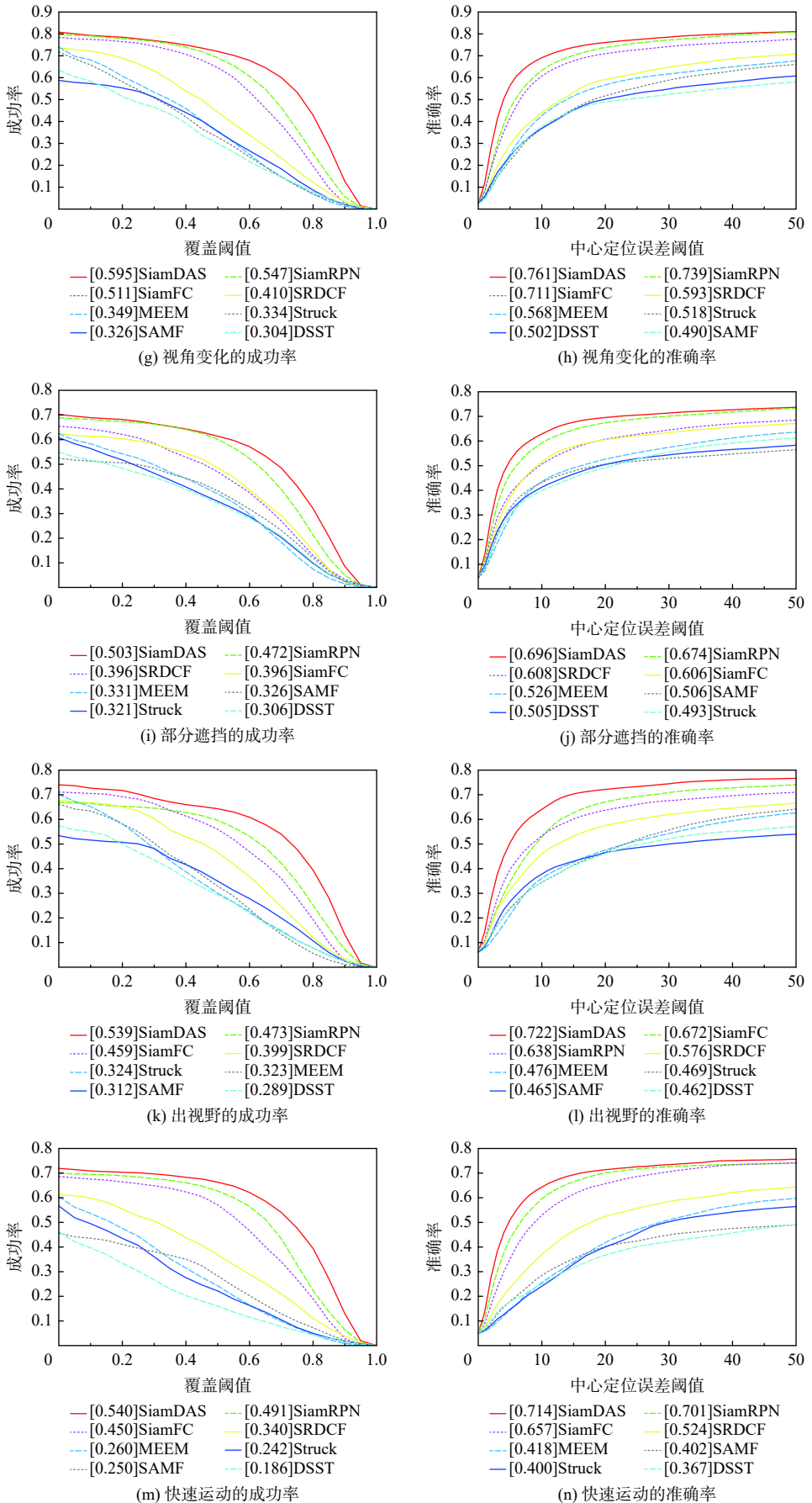


图 12 不同算法在 UAV123 数据集上各属性的评估结果

Fig. 12 Evaluation results of different algorithms in terms of different attributes of UAV123 dataset

3.3 在无人机航拍视频上测试

为验证算法在实际应用中的跟踪效果,将本文算法应用在无人机航拍视频中进行测试。按照COCO数据集^[32]中目标面积小于或等于 32×32 像

素的目标为小目标,无人机拍摄的视频序列中目标都为小目标且包含尺度变化部分遮挡、快速运动等多种挑战,能够检验跟踪算法的工程应用能力。图13为本文算法的部分跟踪结果。



图13 无人机拍摄视频跟踪结果

Fig. 13 Tracking results of UAV shooting video

1) 序列1。第97帧中,跟踪目标出现部分遮挡情况,本文算法仍能识别出被遮挡的目标,准确跟踪。第140帧中,跟踪目标与相似目标的相遇并未影响本文算法对跟踪目标的跟踪效果,可见本文算法在实际应用中也有着较好的辨认能力和抗干扰能力。

2) 序列2。跟踪目标尺寸小且随着目标运动,外观和光照都在变化,DSI-ResNet提供目标的细节信息和深度特征信息,保证本文算法能够准确跟踪小尺寸目标。

3) 序列3。快速运动的跟踪目标,其尺度变化大且迅速,对算法的尺度适应能力要求高。包含深度互相关运算的多RPN加权融合模块,使得本文算法能够灵活快速地感知目标的尺度变化,有着较好的尺度自适应能力。

4 结论

1) 融合2种下采样方式,设计了DSI-ResNet深层特征提取网络,这些特征既保留了目标的背景信息,有助于定位,又利用最大池化寻找最大激活值,有助于目标分类。

2) 为了从深层特征中筛选跟踪目标的特征,设计双通道注意力混洗模块,提升了算法的辨别能

力,有效解决无人机跟踪过程中出现的相似物干扰、快速运动和部分遮挡等情况。

3) 在不同特征层上使用多层RPN,深层语义信息和浅层细节信息的结合使用,有助于目标分类和定位。RPN模块代替传统尺度估计方法,更准确地定位目标,并针对无人机跟踪目标特点,重新分配融合权重。对于尺度和长宽比变化情况,有很好的适应能力。

参考文献 (References)

- [1] 孟磊,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).
- [2] BERTINETTO L, VALMADRE J, HENRIQUES J F, et al. Fully-convolutional siamese networks for object tracking[C]//Proceedings of the 2016 European Conference on Computer Vision (ECCV). Berlin: Springer, 2016, 9914: 850-865.
- [3] HUANG C, LUCEY S, RAMANAN D. Learning policies for adaptive tracking with deep feature cascades[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE Press, 2017: 105-114.
- [4] LI B, YAN J, WU W, et al. High performance visual tracking with Siamese region proposal network[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recogni-

- tion. Piscataway: IEEE Press, 2018: 8971-8980.
- [5] REN S, HE K, 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.
- [6] LI B, WU W, WANG Q, et al. SiamRPN++: Evolution of Siamese visual tracking with very deep networks[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 4277-4286.
- [7] FU C, CAO Z, LI Y, et al. Siamese anchor proposal network for high-speed aerial tracking[EB/OL]. (2021-03-26)[2021-04-05]. <https://arxiv.org/abs/2012.10706>.
- [8] 刘芳, 孙亚楠, 王洪娟, 等. 基于残差学习的自适应无人机目标跟踪算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(10): 1874-1882.
LIU F, SUN Y N, WANG H J, et al. Adaptive UAV target tracking algorithm based on residual learning[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(10): 1874-1882 (in Chinese).
- [9] 刘芳, 杨安喆, 吴志威. 基于自适应Siamese网络的无人机目标跟踪算法[J]. *航空学报*, 2020, 41(1): 243-255.
LIU F, YANG A Z, WU Z W. Adaptive Siamese network based UAV target tracking algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(1): 243-255 (in Chinese).
- [10] HE A, LUO C, TIAN X, et al. A twofold Siamese network for real-time object tracking[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 4834-4843.
- [11] HU J, SHEN L, ALBANIE S, et al. Squeeze-and-excitation networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, 42(8): 2011-2023.
- [12] 钟莎, 黄玉清. 基于孪生区域候选网络的无人机指定目标跟踪[J]. *计算机应用*, 2021, 41(2): 523-529.
ZHONG S, HUANG Y Q. Tracking of specified target of unmanned aerial vehicle based on Siamese region proposal network[J]. *Journal of Computer Applications*, 2021, 41(2): 523-529 (in Chinese).
- [13] HE K M, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 770-778.
- [14] MA N, ZHANG X, ZHENG H T, et al. ShuffleNet V2: Practical guidelines for efficient CNN architecture design[C]//Proceedings of the 2018 European Conference on Computer Vision(ECCV). Berlin: Springer, 2018, 11218: 122-138.
- [15] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [16] LAROCHELLE H, HINTON G E. Learning to combine foveal glimpses with a third-order Boltzmann machine[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: Curran Associates Inc, 2010, 1: 1243-1251.
- [17] ZHANG Q L, YANG Y B. SA-Net: Shuffle attention for deep convolutional neural networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 2235-2239.
- [18] MAX J, KAREN S, ANDREW Z, et al. Spatial transformer networks[C]//Proceedings of the 2015 Advances in Neural Information Processing Systems(NIPS). New York: Curran Associates Inc, 2015, 28: 2017-2025.
- [19] WANG Q, WU B, ZHU P, et al. ECA-Net: Efficient channel attention for deep convolutional neural networks[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2020: 11531-11539.
- [20] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: Convolutional block attention module[C]//Proceedings of the 2018 European Conference on Computer Vision(ECCV). Berlin: Springer, 2018, 11211: 3-19.
- [21] FU J, LIU J, TIAN H, et al. Dual attention network for scene segmentation[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 3141-3149.
- [22] NAM H, HAN B. Learning multi-domain convolutional neural networks for visual tracking[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 4293-4302.
- [23] KAREN S, ANDREW Z. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[EB/OL]. (2015-04-10)[2021-04-05]. <https://arxiv.org/abs/1409.1556>.
- [24] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. *Communications of the ACM*, 2017, 60(6): 84-90.
- [25] WANG Q, TENG Z, XING J, et al. Learning attentions: Residual attentional Siamese network for high performance online visual tracking[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 4854-4863.
- [26] WU Y, HE K. Group normalization[C]//Proceedings of the 2018 European Conference on Computer Vision(ECCV). Berlin: Springer, 2018: 3-19.
- [27] RAMPRASAATH R S, MICHAEL C, ABHISHEK D, et al. Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision(ICCV). Piscataway: IEEE Press, 2017: 618-626.
- [28] ROMAN P. An in-depth analysis of visual tracking with Siamese neural networks[EB/OL]. (2018-08-02)[2021-04-05]. <https://arxiv.org/abs/1707.00569>.
- [29] FAN H, LING H. Siamese cascaded region proposal networks for real-time visual tracking[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 7944-7953.
- [30] ESTEBAN R, JONATHON S, STEFANO M, et al. YouTube-BoundingBoxes: A large high-precision human-annotated data set for object detection in video[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 7464-7473.
- [31] OLGA R, JIA D, HAO S, et al. ImageNet large scale visual recognition challenge[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2015, 115(3): 211-252.
- [32] LIN T Y, MAIRE M, BELONGIE S, et al. Microsoft COCO: Common objects in context[C]//Proceedings of the 2014 European

- Conference on Computer Vision(ECCV). Berlin: Springer, 2014: 740-755.
- [33] MATTHIAS M, NEIL S, BERNARD G. A benchmark and simulator for UAV tracking[C]//Proceedings of the 2016 European Conference on Computer Vision(ECCV). Berlin: Springer, 2016: 445-461.
- [34] MARTIN D, GUSTAV H, FAHAD S K. Accurate scale estimation for robust visual tracking[C]//Proceedings of the 2014 British Machine Vision Conference(BMVC). Berlin: Springer, 2014: 1-11.
- [35] HARE S, GOLODETZ S, SAFFARI A, et al. Struck: Structured output tracking with kernels[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(10): 2096-2109.
- [36] ZHANG J, MA S, SCLAROFF S. MEEM: Robust tracking via multiple experts using entropy minimization[C]//Proceedings of the 2014 European Conference on Computer Vision(ECCV). Berlin: Springer, 2014: 188-203.
- [37] LI Y, ZHU J. A scale adaptive kernel correlation filter tracker with feature integration[C]//Proceedings of the 2014 European Conference on Computer Vision(ECCV). Berlin: Springer, 2015: 254-265.
- [38] MARTIN D, GUSTAV H, FAHAD S K, et al. Learning spatially regularized correlation filters for visual tracking[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE Press, 2015: 4310-4318.

Aerial object tracking algorithm for UAVs based on dual-attention shuffling

JIN Guodong*, XUE Yuanliang, TAN Lining, XU Jiankun

(School of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: A multi-scale real-time tracking algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) based on dual-attention shuffling is proposed to solve the problems of small size, large scale variation and similar object interference which often occur during UAV object tracking. First, considering the small number of target pixels in the UAV view, a deep network with double sampling integration is constructed, which provides semantic information-rich depth features and preserves the target's detailed information. Next, a dual-attention shuffling module is designed. Channel attention and spatial attention are simultaneously grouped to filter the extracted feature information, and then the information between different channels is shuffled to enhance information exchange and improve the discriminative ability of the algorithm. Finally, to utilize the feature information of different layers, multiple region proposal networks are added to complete the target classification and regression, and the results are weighted and fused for the UAV target characteristics. Results show that the success and precision rates of the algorithm are 60.3% and 79.3% on the dataset, respectively, with 37.5 frame/s. The algorithm discrimination ability and multi-scale adaptation are significantly enhanced, which can effectively deal with the common challenges in UAV tracking.

Keywords: unmanned aerial vehicle; object tracking; attention module; shuffle; region proposal network

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0199

基于点融合系统的多目标进场排序与调度

张军峰^{1,*}, 游录宝¹, 周铭¹, 杨春菁¹, 康博²

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 210016; 2. 中国民用航空中南地区空中交通管理局, 广州 510403)

摘要: 持续增长的交通需求和日趋饱和的空域资源对飞行安全和管制效率要求更高, 鉴于此, 研究基于点融合系统 (PMS) 的多目标进场排序与调度问题。分析四维航迹预测模型与方法, 实现四维航迹预测功能。针对 PMS 的运行模式和多个利益相关方的需求, 构建 PMS 多目标排序与调度模型, 提出基于多目标帝国竞争算法 (ICA)。利用长沙黄花国际机场实际运行数据与蒙特卡罗模拟数据对优化模型与算法进行验证。结果表明: 所提算法有良好的实际应用效果, 能为管制员提供决策支持; 在应用基于 PMS 的多目标进场排序与调度, 即使在相对保守的安全间隔下, 相对于实际运行优化后的总延误时间、总飞行时间、最大飞行时间分别有 70.8%、13.2%、11.8% 的缩减。

关键词: 空中交通管理; 排序与调度; 帝国竞争算法; 点融合系统; 多目标优化

中图分类号: V335

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0066-08

终端空域资源受限, 且进离场交通交织, 随着终端空域进离场交通需求的激增, 导致终端空域交通流量增长, 从而造成管制工作负荷增加。为提高进场运行效率、缓解管制工作负荷, 点融合系统 (point merge system, PMS)^[1] 应运而生。该系统是一种新型仪表进场程序结构, 通过融合到达交通流的新方法, 相对于传统的雷达引导, 能够标准化进场管制运行、增强飞行员情境意识。从实际运行来看, PMS 主要解决管制指挥标准化的问题, 而进场运行效率提升的根本依旧需要借助进场排序与调度领域的研究及进场管理系统的应用。

Liang 等^[2-3] 研究了基于 PMS 的进场调度问题, 利用滑动时间窗机制、采用模拟退火算法动态优化进场运行。Hong 等^[4] 将 PMS 引入进场调度, 同时采用混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 建模, 通过最小化 PMS 中所有航空器的总运行时间来优化着陆时间。在后续研究中, Hong 等^[5] 考虑了连续下降期间的不确定性, 并依据不确定性

规划^[6] 提出了带有鲁棒特性的解决方案。You 等^[7] 考虑了 PMS 并联形式, 并通过带精英策略的遗传算法实现并联 PMS 的进场排序与调度优化。

空中交通领域中空管、航司、机场和民众等各利益相关方往往秉持不同的诉求, 于是, 进场排序与调度也需要综合考虑安全、效率、容量、准点运行、环境等多个方面目标, 因此, 多目标进场排序与调度近年来逐渐引起重视。Hong 等^[8] 在 PMS 运行情况下, 以运行时间和序列改变次数为目标进行进场排序优化。Zhang 等^[9-10] 通过等效进场调度问题与机器调度问题, 利用已有研究成果, 梳理并精简了进场排序与调度问题的优化目标, 以总延误时间、总飞行时间和最大飞行时间构建多目标进场排序与调度模型。

因此, 本文面向多目标进场排序与调度问题, 构建基于 PMS 的多目标优化模型, 设计多目标优化算法, 借助蒙特卡罗模拟^[11] 验证算法可行性。为了实现管制决策支持, 引入四维航迹预测^[12] 协助解

收稿日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-07-04; 网络出版时间: 2021-07-26 09:24

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210723.1417.003.html

基金项目: 国家自然科学基金 (U1933117)

* 通信作者. E-mail: zhangjunfeng@nuaa.edu.cn

引用格式: 张军峰, 游录宝, 周铭, 等. 基于点融合系统的多目标进场排序与调度 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 66-73.

ZHANG J F, YOU L B, ZHOU M, et al. Multi-objective arrival sequencing and scheduling based on point merge system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 66-73 (in Chinese).

决进场调度问题。最后以长沙黄花国际机场的 PMS 运行为场景, 考察融合四维航迹预测和 PMS 的多目标进场排序与调度效果。

1 点融合系统与四维航迹预测

1.1 点融合系统

PMS 的结构示意图如图 1 所示。航空器进入系统后在排序支路上匀速平飞, 直到管制员发布转

弯指令, 然后从排序支路到合并点执行连续下降进近。

内外排序支路平行但不等高, 用来实现必要延误。为使内外支路上的航空器不发生冲突, 支路的水平和垂直方向都配备间隔。航空器在排序支路上匀速平飞时, 可以在任意点经由管制员引导转向融合点。航空器进入 PMS 之前, 为确保与同一定序航段中的前序航空器安全分开, 可以通过等待程序或速度调整加以实现。

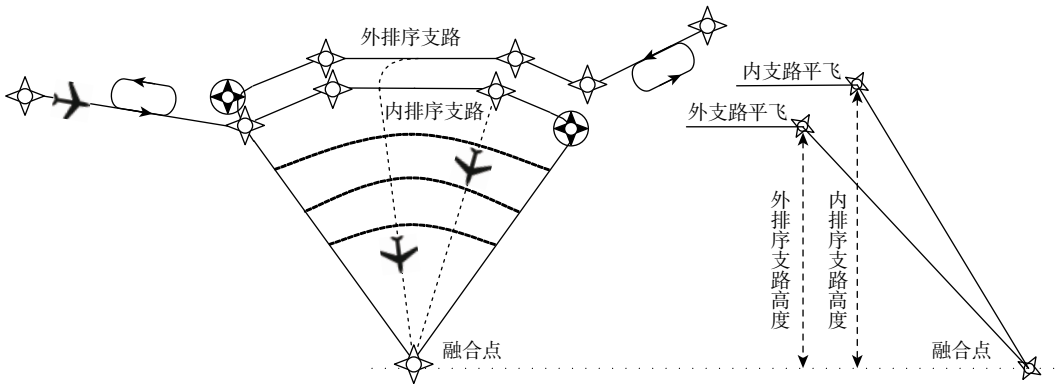


图 1 PMS 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PMS

在 PMS 中, 除了必要转向指令, 不再使用开环雷达引导, 从而有助于节约燃油消耗、减少污染排放、降低噪音影响。因此, PMS 一方面可以确保飞行管理系统充分使用水平导航模式, 发挥基于性能导航的优势; 另一方面能够帮助飞行管理系统优化垂直剖面, 实现连续下降进近。

1.2 四维航迹预测

引入 PMS 后的进场排序与调度, 进场航空器的四维航迹预测是前提和基础。一方面, 通过四维航迹预测获得预计到达时间; 另一方面, 经过排序与调度获得优化到达时间的同时, 也可通过四维航迹预测反推航空器在排序支路上的飞行时间, 给出航空器在排序支路上转弯的决策建议。如图 2 所示各部分之间的逻辑关系。

航空器四维航迹预测是指根据当前航空器的位置、环境状态和航空器性能参数, 基于航空器动力学与运动学模型, (见式(1)), 以及航空器意图, 预测航空器未来四维航迹的过程^[12]。

$$\begin{cases} \frac{d\zeta}{dt} = V_{TAS} \cos \psi \cos \gamma + w_1 \\ \frac{d\eta}{dt} = V_{TAS} \sin \psi \cos \gamma + w_2 \\ \frac{dh}{dt} = V_{TAS} \sin \gamma \\ \frac{dV_{TAS}}{dt} = (T - D)/m - g \sin \gamma \\ \frac{d\psi}{dt} = g \tan \phi / V_{TAS} \\ \frac{dm}{dt} = -\lambda T \end{cases} \quad (1)$$

式中: (ζ, η, h) 为空间位置; V_{TAS} 为真空速; γ 、 ψ 和 ϕ 分别为航径角、航向角和转弯坡度; mg 、 T 和 D 分别为航空器飞行时受到的重力、推力和阻力; w_1 和 w_2 分别为飞行时受到风的正东向分量和正北向分量。本文中各种机型性能参数均来自航空器基础性资料数据库 (base of aircraft data, BADA), 计算过程详见文献 [12]。

在 PMS 中, 航空器在排序支路平飞, 管制员发布转弯指令后, 航空器向融合点执行连续下降运行

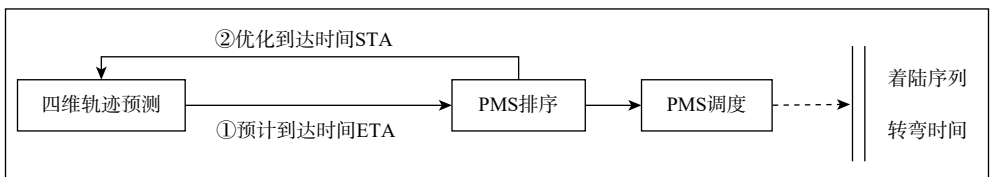


图 2 航迹预测与排序调度的关系

Fig. 2 Relation between trajectory prediction and arrival sequencing

指令。因此,整个过程中航空器意图明确,能够保障四维航迹预测的准确性。

2 多目标进场排序与调度模型

2.1 多目标选择

在航空器进场着陆的过程中,有诸如机场、航司、管制、民众等利益相关方,通过对其诉求进行类比,得出表1中5个具有代表性的目标。

表1 排序目标汇总

Table 1 Multi-objective arrival sequencing and scheduling

关注点	目标	关注方
跑道容量最大化	最小化最大着陆时间	机场
对航空公司的公平调度	最小化最大飞行时间	航司
管制工作负荷;运行效益	最小化总飞行时间	管制;航司
空管效率;准点出行	最小化延误时间和	管制;民众
对航空器的公平调度	最小化最大延误时间	航司;民众

文献[9, 13]研究结果表明,表1中的5个目标可以用3个目标函数涵盖,分别为:最小化总延误、最小化总飞行时间、最小化最大飞行时间;对于PMS来说,航空器在排序支路上的飞行时间即代表其延误时间。故当连续下降时间接近时,最小化总延误与最小化总飞行时间可缩减为一个目标,即本文的多目标为最小化总飞行时间和最小化最大飞行时间为

$$\text{obj} = \min \begin{cases} \sum_{i=1}^{|I|} \sum_{r=1}^{|R|} (T_{irM} - T_{irA} - t_{CDA}) \\ \max(T_{irM} - T_{irA}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I 为所有航班集合; R 为所有排序支路集合; T_{irM} 为航班*i*由支路*r*到达融合点*M*的时间; T_{irA} 为航班*i*到达进入点*A*的时间; t_{CDA} 为连续下降进近(continuous descent approach, CDA)的飞行时间。

2.2 约束条件

1) 进入点时间窗。航空器在进入点的时间窗约束:

$$T_{irA} - T_{irA}^E \geq 0 \quad \forall i \in I, r \in R \quad (3)$$

$$T_{irA} - T_{irA}^L \leq 0 \quad \forall i \in I, r \in R \quad (4)$$

式中: T_{irA}^E 和 T_{irA}^L 分别为航班*i*在进入点*A*的最早和最晚到达时间。 T_{irA}^{ETA} 为进入点的预计到达时间,则航空器在进入点的最早时间和最晚时间分别定义为 $0.8T_{irA}^{\text{ETA}}$ 和 $1.2T_{irA}^{\text{ETA}}$ 。可以通过改变航空器的标称速度来修正到达时间^[5]。

2) 飞行时间约束。

$$T_{irM} - T_{irA} - t_{CDA} \geq 0 \quad \forall i \in I, r \in R \quad (5)$$

$$T_{irM} - T_{irA} - t_{CDA} \leq t_{\text{ALL}} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (6)$$

式中: t_{ALL} 为航班的最长排序支路飞行时间。

规定了排序支路上航空器的飞行时间约束,也限制了到达融合点时航空器的飞行时间范围。

3) 安全间隔。

$$S_{ijr'A} \leq T_{jr'A} - T_{irA} + M(1 - Q_{ijr'A}) \\ \forall i, j \in I, r, r' \in R, \forall i \neq j, r = r' \quad (7)$$

$$S_{ijr'rM} \leq T_{jr'M} - T_{irM} + M(1 - Q_{ijr'rM}) \\ \forall i, j \in I, r, r' \in R, \forall i \neq j, r, r' \quad (8)$$

式中: $Q_{ijr'rX}$ 为二进制变量,表示航班*i*与*j*在某点*X*处的先后次序; $S_{ijr'rX}$ 为航班*i*与*j*在某点*X*处的安全间隔。在进入点只需要考虑当前支路前后机的安全间隔,而在融合点2条支路都需要考虑。

4) 顺序约束。

$$Q_{ijr'rA} + Q_{ijr'rA} = 1 \\ \forall i, j \in I, r, r' \in R, \forall i \neq j, r = r' \quad (9)$$

$$Q_{ijr'rM} + Q_{ijr'rM} = 1 \\ \forall i, j \in I, r, r' \in R, \forall i \neq j, r, r' \quad (10)$$

不管在进入点还是融合点,在保证安全距离间隔的情况下一次只允许一架航空器通过。

5) 位置转换约束。

$$\max(\text{CPS}_i) \leq z \quad \forall i \in I \quad (11)$$

式中: CPS_i 为航班*i*在优化后的位置转换位数; z 为所允许位置转换最大值。

位置转换约束通过限定航空器在先到先服务序列的基础上移动位置不超过*z*位次,从而确保了公平,以及限制了管制工作负荷。

6) 专机约束。

$$T_{irM} = T_{irM}^{\text{ETA}} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (12)$$

当航空器为专机时,要保证航空器要在预定的时间内落地,即着陆时间限定为预计到达时间。

3 多目标进场排序与调度算法

3.1 帝国竞争算法

作为一种新型的社会仿生进化算法,帝国竞争算法(imperialist competitive algorithm, ICA)^[14]包含帝国(Emp.)、殖民国家(Imp.)和殖民地(Col.)等元素,是将初始解分组成若干个帝国,每个帝国中包含一个殖民国家(帝国内最优解)和多个殖民地,通过对帝国内殖民地和殖民国家不断更新迭代达到产生最优解的目的。该算法的优点在于:通过帝国内竞争和帝国间竞争,加强深度搜索和广度搜索,从而提升邻域搜索和全局优化的能力^[13]。

3.2 多目标帝国竞争算法

在PMS进场排序与调度中,设计多目标帝国竞争算法,其特点在于引入非支配排序。多目标帝

国竞争算法流程如图 3 所示。图 3 中算法的参数 i_{\max} 为最大迭代次数。

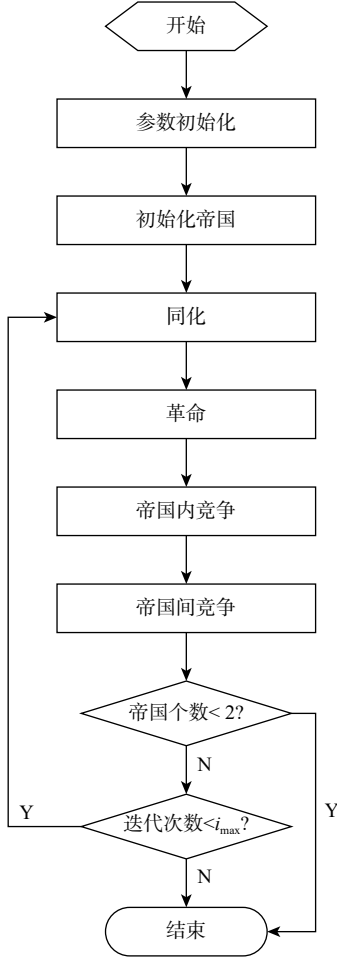


图 3 多目标帝国竞争算法流程

Fig. 3 Flowchart of multi-objective ICA

步骤 1 初始化帝国。对于本文多目标优化问题, 航空器在融合点处的到达时间构成初始解, 即国家。生成初始解集时, 需满足时间窗约束 $(T_{irA} + t_{CDA}, T_{irA} + t_{CDA} + t_{ALL})$, 本文采用线性插值初始化解集:

$$T_{irM} = \xi(T_{irA} + t_{CDA} + t_{ALL}) + (1 - \xi)(T_{irA} + t_{CDA}) \quad i \in I \quad (13)$$

式中: $\xi \in [0, 1]$ 。

本文采用非支配排序实现成本函数构建, 以此分配帝国内殖民国家和殖民地。过程如下:

1) 根据目标函数求解初始解集, 并进行快速非支配排序。

2) 基于非支配排序中的层级关系 R_k^{rank} 与拥挤距离 D_k^{crowd} 构建成本函数。

$$\text{Cost}_k = \frac{R_k^{\text{rank}} + D_k^{\text{crowd}}}{\sum_{l \in H} D_l^{\text{crowd}}} \quad k \in n_{\text{pop}} \quad (14)$$

式中: H 为层级关系值与 R_k^{rank} 相等的解集合, 对于边

界解, 其拥挤距离为 $\sum_{l \in H} D_l^{\text{crowd}} + a, a \geq 1$ 。

3) 初始化殖民国家, 优先从 Pareto 前沿中构建殖民国家。

4) 初始化殖民地, 采用轮盘赌的方式将殖民地分配给殖民国家。

$$P_k = \frac{\exp\{-\alpha[\text{Cost}_k / \max_{k \in n_{\text{pop}}}(\text{Cost}_k)]\}}{\sum_{k \in n_{\text{pop}}} \exp\{-\alpha[\text{Cost}_k / \max_{k \in n_{\text{pop}}}(\text{Cost}_k)]\}} \quad (15)$$

式中: α 为选择系数; n_{pop} 为种群数量。

步骤 2 同化。本文采用差分进化的方式, 如式 (16) 所示, 实现帝国内同化。

$$\text{Col.} \leftarrow \text{Col.} + \beta \cdot \text{rand} \cdot (\text{Imp.} - \text{Col.}) \quad (16)$$

式中: β 为差分进化系数; Imp. 为帝国内殖民国家; Col. 为殖民地; rand 为随机数。

步骤 3 革命。为防止陷入局部最优, 本文主要采用子段逆序、单点变异和 2 点交换 3 种算子进行革命。子段逆序: 随机选择部分连续航空器进行逆序操作, 获得相反序列。单点变异: 随机选择某架航空器, 分配新的优化时间; 2 点交换: 满足最大位置转换约束限制下, 随机交换 2 航空器优化时间; 为确保新解均为可行解, 需要考虑连续落地航空器之间的尾流间隔。

步骤 4 帝国内竞争。更新帝国内殖民国家与殖民地的成本值, 成本值最小成为新殖民国家。

步骤 5 帝国间竞争。帝国间竞争实现了帝国间殖民地的再分配, 势力强大的帝国逐步吞并势力弱小的帝国。帝国势力值计算过程如下:

$$\text{Emp}_j.\text{Cost} = \text{Imp}_j.\text{Cost} + \mu \frac{\sum_{k \in \text{Emp}_j} \text{Col}_k.\text{Cost}}{|\text{Emp}_j|} \quad (17)$$

$$\text{Emp}_j.\text{Cost} \leftarrow \lambda \max_{j=1, \dots, n_{\text{imp}}} (\text{Emp}_j.\text{Cost}) - \text{Emp}_j.\text{Cost} \quad (18)$$

$$P_{\text{Emp}_j} = \text{Emp}_j.\text{Cost} / \sum_{j=1}^{n_{\text{imp}}} (\text{Emp}_j.\text{Cost}) \quad (19)$$

式中: n_{imp} 为殖民国家数量。

帝国总势力值根据式 (17) 计算, 其中, μ 为殖民地势力值系数, $|\text{Emp}_j|$ 为帝国中殖民地数目; 并按式 (18) 和式 (19) 统一量纲, 本文 λ 取值为 1.2。

4 案例仿真与验证

4.1 四维航迹预测验证

为验证四维航迹预测模型与方法, 将预测航迹与真实数据作对比。选用某航班的快速存取数据 (quick access recorder, QAR), 该航班机型为 B737, 与

预测数据对比得出结果如图4和图5所示,其中图4为三维航迹对比,图5中表示的是过点时间对比,其中,横坐标为航路点。

由图4和图5发现,预测航迹与真实航迹在水平轨迹与高度剖面高度吻合,且在过点时间上精度也较高,证明了四维航迹预测模型与方法的可用性。

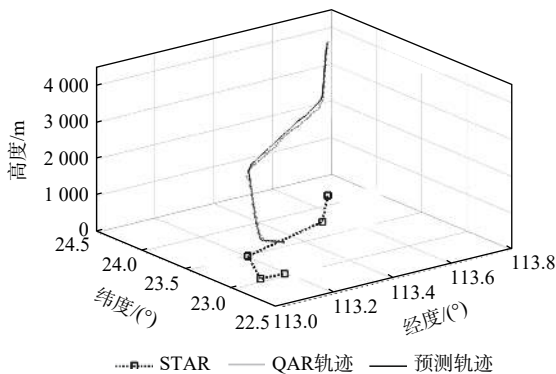


图4 预测轨迹与实际三维轨迹对比

Fig. 4 Comparison between three dimensional predicted and actual trajectory

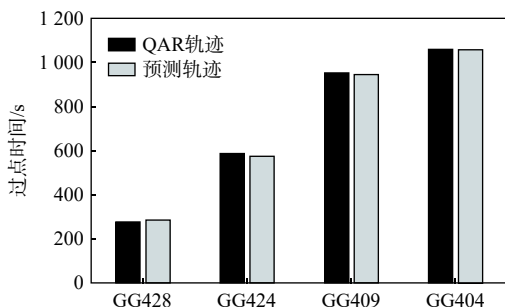


图5 预测轨迹与实际轨迹过点时间对比

Fig. 5 Comparison of flight time at each fix between predicted and actual trajectory

4.2 参数值确定

为研究序列改变对多个目标造成的影响, Hong等^[5]采用序列偏差(order deviation, OD), Jung等^[15]使用斯皮尔曼秩, 评价进场排序与调度模型和算法的优化结果。本文拟用序列变化来量化常规的先到先服务(first come first service, FCFS)序列和优化序列之间的差异。若航空器改变其与相邻航空器的位置, 则序列变化的数量增加1。例如, 如果FCFS序列和优化序列分别为1-2-3和3-2-1, 那么序列差异为3。

1-2-3 → 1-3-2 → 3-1-2 → 3-2-1

考虑10架进场航空器, PMS期间的连续下降飞行时间设定为290 s, 整个排序支路可供水平飞行时间为310 s(上述数值的确定考虑了实际运行的历史数据分析)。

可以预期, 所提算法的性能与交通密度存在较大关系。因此, 考虑高、中、低3种不同的交通密度。记2架航空器之间的标准尾流间隔为 S_{ijrrA} 。

在高交通密度下, 2个航班之间的初始相对距离在 S_{ijrrA} 和1.5倍的 S_{ijrrA} 之间随机产生。对于中和低交通密度, 范围在1.5倍 S_{ijrrA} 和2倍 S_{ijrrA} 及2倍 S_{ijrrA} 和2.5倍 S_{ijrrA} 之间。对于每种交通密度采用蒙特卡罗模拟各生成500个初始位置序列, 分配的每个航班初始位置用到达PMS的初始点的时间来表示。

通过MATLAB2014b编程实现模型及算法, 如图6所示交通密度情况下, Pareto解位置转换趋势, 图6中每个点为500次模拟的平均结果。通过重复增加序列改变次数的上限, 随之优化总延误、最大飞行时间的目标。

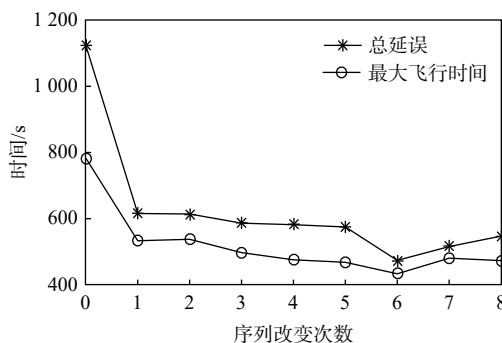


图6 目标随序列改变趋势

Fig. 6 Trend of objectives with different sequences

如图6所示, 横坐标为0时表示FCFS的序列, 当序列次数从0变化到1时, 2个目标都可以观察到最大的斜率。说明序列的改变相对于FCFS来说各个目标都有优势。从大趋势来看, 各个目标(纵坐标)随着序列改变次数的增加而减少, 在序列改变次数为6时, 最大飞行时间和总延误达到最优。序列的最终决定权取决于空中交通管制员, 其根据目前的态势及整体情况从获得的Pareto最优解中选择最合适的解来做决定。

尽管空中交通管制员通常根据FCFS顺序做出决定, 但由分析表明, 与FCFS序列之间略有偏差, 可以实现总延误与最大飞行时间的显著减少。因此, 经多目标算法优化的解决方案更适用于空中交通管制员。

4.3 排序与调度优化算法验证

本节采用真实数据对PMS的排序与调度优化算法进行验证。以长沙黄花国际机场进场运行为例, 图7显示了一天的进场航空器的综合航迹, 机场共有5个进港口: DAPRO、OVTAN、LIG、LLC、BEMTA。

利用Qt平台构建长沙黄花国际机场的PMS进场排序与调度仿真系统, 通过处理实际雷达航迹数据得到如表2(部分数据)所示的飞行计划。将处理好的飞行计划输入到PMS进场排序与调度仿真系统中进行仿真, 仿真场景如图8所示。

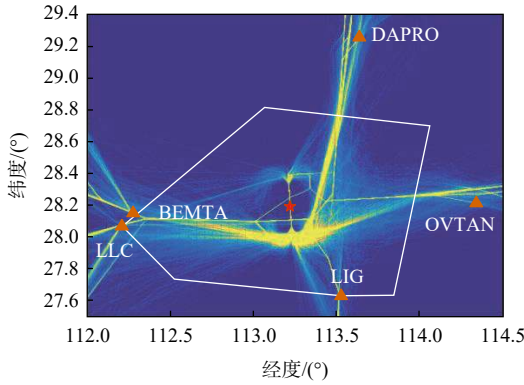


图 7 长沙终端航班进场轨迹

Fig. 7 Arrival trajectories within Changsha terminal area

表 2 基于实际进场数据的飞行计划 (部分)

Table 2 Flight plan based on actual operation (part)

序号	机型	进港时间/s	路径	序号	机型	进港时间/s	路径
1	B737	83 873	DPR_36R	11	A320	84 614	DPR_36R
2	A320	84 521	LIG_36R	12	A320	84 784	DPR_36R
3	A320	84 418	LLC_36R	13	A321	85 278	DPR_36R
4	A321	84 731	LIG_36R	14	B738	85 588	BEM_36R
5	A321	84 304	OVT_36R	15	A320	85 456	OVT_36R
6	B738	84 310	DPR_36R	16	A321	85 512	DPR_36R
7	A321	84 631	BEM_36R	17	A319	86 105	BEM_36R
8	A320	84 525	OVT_36R	18	A321	86 008	OVT_36R
9	B738	85 080	LIG_36R	19	B738	86 211	LLC_36R
10	A320	84 867	LLC_36R	20	B738	86 397	LLC_36R

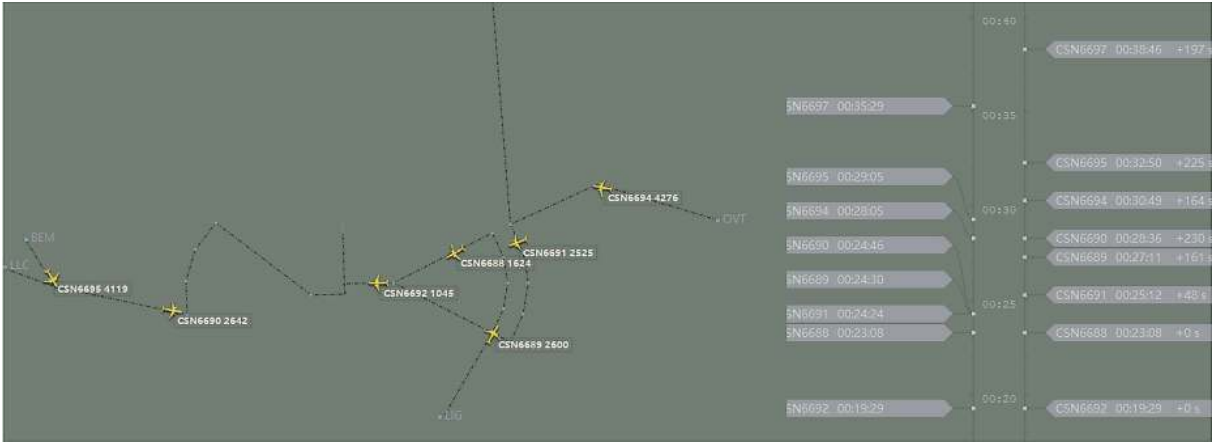


图 8 系统仿真界面示意图

Fig. 8 Interface of simulation system

选取繁忙时段 20 架航空器进行优化, 由于航空器从不同进港点到 PMS 进入点的飞行时间不同, 因此需同时考虑总飞行时间和总延误时间。尾流间隔分别取标准间隔的 1.2 倍和 1.5 倍, 仿真优化结果如表 3 所示。

表 3 仿真结果

Table 3 Simulation results

尾流间隔	总延误时间/s	总飞行时间/s	最大飞行时间/s
实际	7 628	28 295	1 936
1.2倍间隔	2 224	24 559	1 707
1.5倍间隔	5 838	28 186	1 921

由表 3 可知, 利用 PMS 结合多目标优化算法的方法可以有效提升航空器进场的运行效率和效益。初步引进新技术时, 往往需要优先保证安全第一, 因此容易采取更为保守的安全间隔, 所以本文适当扩大尾流间隔限制。

1.2 倍标准尾流间隔时, 多个目标的效益都有较大幅度提升, 其中总延误时间减少了 70.8%, 总飞行时间减少了 13.2%, 最大飞行时间减少了 11.8%。1.5 倍标准尾流间隔时, 在不增加其他指标的同时, 总延误仍能缩短 23.4%, 说明 PMS 确实能提升效率和效益。

图 9 以时序图的形式展示了实际着陆次序与 1.2 倍标准间隔下优化着陆序列的对比。图 10 是实际和优化序列的航迹对比。表 4 提供了基于 PMS 的进场排序与调度的航空器在排序支路上总的飞行时间。图 9 中蓝色菱形表示通过 PMS 优化的着陆时间, 红色方框表示实际着陆时间, 绿色三角表示航空器预计着陆时间。从图 9 可知, 经 PMS 的航班序列与预计到达序列较相似, 说明优化算法在保证优化目标的前提下优先考虑公平性。反观实际运行到达序列, 与预计到达序列有较大的差距, 究其原因, 在于常规进场管制员对于航班的引导没有既定路线, 航班密度较大情况下可能有较多的盘旋等待、侧向偏离等调配策略, 如图 10 真实轨迹所示, 容易造成既定序列的改变, 也会影响运行的效率和效益。

图 10 中在标准尾流间隔 1.2 倍的情况下, PMS 仍然不需要通过等待进行航班延误。在长沙 PMS 进场程序中, 最短的一条排序支路是西向进港(LLC/BEM)的部分, 航班在支路上最长可飞行 290 s, 而由表 4 可以看出, 20 架航空器在排序支路上等待的最长时间为 275 s, 还未达到溢出的状态, 说明 PMS

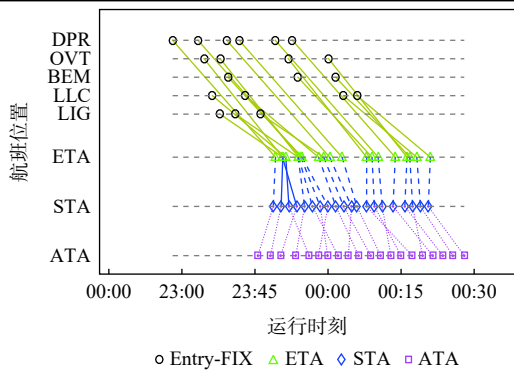


图9 PMS与实际数据时序对比

Fig. 9 Comparison of scheduling results between PMS and actual operation

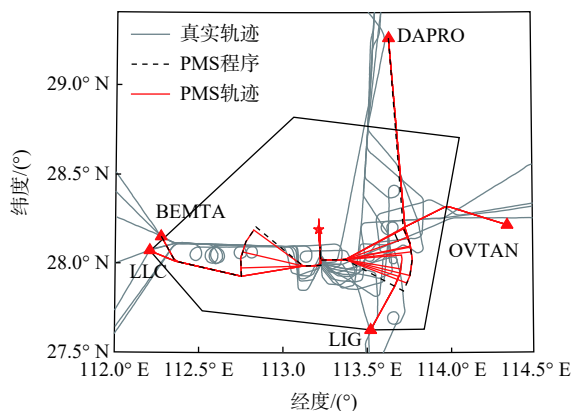


图10 PMS 仿真轨迹与实际轨迹对比

Fig. 10 Comparison of trajectories between PMS simulation and actual operation

表4 仿真案例航空器在排序支路飞行时间

Table 4 Aircraft flight time on sequencing leg of simulation case

航班	支路飞行时间/s	航班	支路飞行时间/s
1	0	11	275
2	0	12	225
3	48	13	62
4	164	14	33
5	197	15	14
6	243	16	28
7	233	17	39
8	160	18	0
9	234	19	34
10	230	20	0

不仅能在延误及飞行时间等方面有效能的提升,还在容量方面有相应的利用价值。而常规情况下管制员引导航空器主要依赖经验,兼之飞行员具体操控航空器时对管制员指令的依从度无法预知,最终导致无法充分利用终端空域及跑道的容量。

综合4.3节可以得出,将PMS与进场排序与调度结合有诸多优点:①排序与调度的结果可达性,

根据优化结果直接在PMS程序上以转弯时机的形式表现,为管制员提供决策建议;②结合优化算法,从空管、航司、机场、民众等多方面进行了效能提升;③PMS的特殊固定路线,增强了管制员与飞行员的态势感知;④飞行轨迹更为规整有序,有效降低了终端空域进场运行的复杂性。

5 结论

本文研究了PMS的运行,从实际运行角度出发,基于四维航迹预测,结合以非支配排序的多目标帝国竞争算法,对航空器进场排序与调度做出优化。

1) 基于非支配排序的多目标帝国竞争算法可行性较好,解决方案能为空中交通管制员提供决策支持。

2) 结合四维航迹预测的多目标优化算法在模拟实验中有良好的反馈,在较为保守的安全间隔限制下仍能获得比实际运行更好的效果。

3) PMS在航空器进场过程中发挥了显著的优势,从管制的角度来说降低了相关工作人员的工作负荷;从机场的角度PMS合理利用了空域,对提升有限终端区内的进场容量有很大的发展潜力。

本文主要解决了单跑道航空器进场排序与调度问题,结合PMS的优势,未来在多跑道机场跑道分配和进离场协同运行等方面值得后续深入研究。

参考文献 (References)

- [1] WILDE J D. Implementing point merge system based arrival management [D]. Delft: Delft University of Technology, 2018: 23-30.
 - [2] LIANG M, DELAHAYE D, MARECHAL P. Conflict-free arrival and departure trajectory planning for parallel runway with advanced point-merge system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 207-227.
 - [3] LIANG M, DELAHAYE D, MARÉCHAL P. Integrated sequencing and merging aircraft to parallel runways with automated conflict resolution and advanced avionics capabilities[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 85: 268-291.
 - [4] HONG Y, LEE S, LEE K, et al. Optimal scheduling algorithm for air traffic point merge system using MILP[C]//*Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control*. Berlin: Springer, 2017: 407-420.
 - [5] HONG Y, CHOI B, LEE K, et al. Dynamic robust sequencing and scheduling under uncertainty for the point merge system in terminal airspace[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(9): 2933-2943.
 - [6] 元尧, 王瑛, 梁颖, 等. 不确定容量下时隙分配问题两阶段规划模型[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(9): 1747-1756.
- QI X, WANG Y, LIANG Y, et al. Two-stage programming model for time slot allocation problem under uncertain capacity[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019,

- 45(9): 1747-1756(in Chinese).
- [7] YOU L B, ZHANG J F, YANG C W, et al. Heuristic algorithm for aircraft arrival scheduling based on a point merge system[C]//The 20th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston: American Society of Civil Engineers, 2020: 125-138.
- [8] HONG Y, CHO N, KIM Y. Multi-objective optimization for aircraft arrival sequencing and scheduling[J]. *Journal of Air Transportation*, 2017, 25(4): 115-121.
- [9] ZHANG J F, ZHAO P L, ZHANG Y, et al. Criteria selection and multi-objective optimization of aircraft landing problem[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 82: 101734.
- [10] ZHANG J F, ZHAO P L, YANG C W, et al. A new meta-heuristic approach for aircraft landing problem[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 37(2): 197-208.
- [11] 李琦, 甘旭升, 孙静娟, 等. 军航无人机与民航航班侧向碰撞风险评估研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(4): 724-730.
- LI Q, GAN X S, SUN J J, et al. Study on lateral collision risk assessment between military uav and civil aviation flight [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(4): 724-730(in Chinese).
- [12] ZHANG J F, LIU J, HU R, et al. Online four dimensional trajectory prediction method based on aircraft intent updating[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 77: 774-787.
- [13] 张军峰, 游灵宝, 杨春苇, 等. 基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度[J]. *航空学报*, 2021, 42(2): 324439.
- ZHANG J F, YOU L B, YANG C W, et al. Arrival sequencing and scheduling based on multi-objective imperialist competitive algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(2): 324439 (in Chinese).
- [14] HOSSEINIA S, KHALED A. A survey on the imperialist competitive algorithm metaheuristic: Implementation in engineering domain and directions for future research[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 24: 1078-1094.
- [15] JUNG S, HONG S, LEE K. A data-driven air traffic sequencing model based on pairwise preference learning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(3): 803-816.

Multi-objective arrival sequencing and scheduling based on point merge system

ZHANG Junfeng^{1,*}, YOU Lubao¹, ZHOU Ming¹, YANG Chunwei¹, KANG Bo²

- (1. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Central and Southern Regional Air Traffic Management Bureau of the CAAC, Guangzhou 510403, China)

Abstract: Increasing traffic demand and the saturated terminal airspace call for safer flight performance and more efficient control performance. Therefore, this paper focuses on the multi-objective arrival sequencing and scheduling based on point merge system (PMS). Firstly, the four-dimensional trajectory prediction model was developed to predict future trajectories since trajectory prediction played a critical role in arrival sequencing and scheduling. Secondly, the PMS-based multi-objective arrival sequencing model was put forward while taking both the PMS operation modes and different stakeholders appeals into account. Moreover, the multi-objective imperialist competition algorithm (ICA) was proposed based on a non-dominated sorting strategy for solving such a problem. Finally, the data from the Monte Carlo simulation and actual operating of Changsha Huanghua International Airport were used for validation. The results indicated that the proposed method was effective and efficient. On the one hand, the proposed multi-objective ICA did well in practical application, making decision support for controllers. On the other hand, the proposed method could reduce the total delay time, total flight time, and maximum flight time by 70.8%, 13.2%, and 11.8%, compared with the actual operation, with relatively conservative safety separations.

Keywords: air traffic management; sequencing and scheduling; imperialist competitive algorithm; point merge system; multi-objective optimization

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0188

基于学习行为的 MOOC 用户持续学习预测框架

陈辉^{1,*}, 白骏¹, 殷传涛², 荣文戈¹, 熊璋¹

(1. 北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学 中法工程师学院, 北京 100191)

摘 要: 大型开放式网络课程 (MOOC) 的出现虽然极大地改变了人们的学习方式, 但用户在 MOOC 平台开展学习的学习情况及完成率预测仍是目前一个重要的技术挑战。针对预测的需求, 从用户的学习行为中对用户和课程进行分析, 采用长短时记忆机对学习者的学习活动进行建模, 采用多头注意力机制对用户和课程之间的交互活动情况进行分析, 提出一个基于门控单元的特征融合框架, 用于学习情况预测。在公开数据集上的结果表明: 所提框架能够提升预测精度, 使得 MOOC 平台能够尽可能早地对用户活动进行干预, 从而提升整体的 MOOC 平台使用体验。

关键词: 大型开放式网络课程; 预测框架; 用户; 课程内容; 学习行为

中图分类号: TP399; G434

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0074-09

大型开放式网络课程 (massive open online courses, MOOC) 作为目前一种最重要的在线学习机制之一, 极大地改变了学习者的学习行为, 使得不同的学习者能够不受时间和空间的限制, 随意进行感兴趣知识的学习, 因此, MOOC 在当今网络学习大潮中扮演越来越重要的角色, 受到越来越多的欢迎^[1]。然而, 作为一种新的学习机制, MOOC 的发展遇到了一系列的挑战, 其中一个最重要的问题是, 有相当多的学习者无法完成 MOOC 平台上的课程学习, Lykourantzou 等^[2]通过研究显示, 只有不到 10% 的注册用户可以在 MOOC 平台上完成特定的课程学习。

对于任何一个新的信息化系统, 其成功的要素一般可以从用户使用过程中的愉悦度、参与度、接受度、留存率及任务完成度等角度来研究, 该 HEART 度量框架是一个广泛适用的评价体系^[3]。因此对于 MOOC 平台, 如何吸引学习者能够留在 MOOC 平台中不断学习, 去完成一些特定课程, 提高留存率和任务完成度, 是一个非常重要的任务, 尽管简

单地使用退课率来评估 MOOC 平台对于学习者的学习效果可能并不一定准确, 但其确实反映了一些具有挑战性的问题且值得进一步研究。

学习者的学习习惯对于学习的效果会有直接的关联, 不同的课程内容对于学习的效果也有不同的作用。因此, 更好地了解学习者对于不同课程的学习特征对于 MOOC 平台的退课预测研究有着重要的价值。对于学习者来说, 有很多因素可能会影响注册用户在 MOOC 平台上学习课程的持久性, 如年龄、性别、以往的学习经历、受教育程度等^[2], 此外, 学习者在 MOOC 平台上的一些学习习惯, 也可能对其在平台上的学习效果产生重要的影响, 比如在学习过程中尝试提交作业或其他测试的行为^[4], 对论坛帖子的浏览和关注^[5], 课程视频的点击^[6]等。同样的, 不同类型的课程, 如课程内容上的差异^[7]等, 也可能会有不同的退课表现。因此, 本文在研究 MOOC 平台退课率时, 不仅要研究学习者学习习惯带来的影响, 也要研究课程本身带来的影响。基于这样的思考, 本文提出了一个基于用户和课程

收稿日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-04-21; 网络出版时间: 2021-04-23 16:29

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210423.1555.002.html

基金项目: 国家自然科学基金 (61977003)

*通信作者. E-mail: chenhui@buaa.edu.cn

引用格式: 陈辉, 白骏, 殷传涛, 等. 基于学习行为的 MOOC 用户持续学习预测框架 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 74-82.

CHEN H, BAI J, YIN C T, et al. Behavior based MOOC user dropout predication framework [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 74-82 (in Chinese).

感知增强的活动学习框架。在该框架中,首先提出了一种语义感知编码机制来分别对用户和课程的活动进行编码,然后使用注意机制分别从用户和课程的角度提取学习活动的相关性,最后设计了一个基于门控机制的上下文提取机制,将用户和课程的特征整合在一起,以实现最终的退课行为预测。为了评价所提框架,本文在 XuetangX 数据集上^[8]进行了实验研究,实验结果验证了本文提出的退课预测框架的可行性。

1 MOOC 退课率预测现状

近年来,MOOC 平台为全世界各地的数百万用户提供了众多的免费在线课程^[9],一些 MOOC 平台,例如 Coursera、udacity、edx、XuetangX 等已经成为开放式和远程教育最重要的在线学习平台^[1]。尽管 MOOC 的优势已经得到充分证明,但值得注意的是较高的退课率已成为 MOOC 实际应用中最重要的一個挑战^[10],有研究表明,超过 90% 的用户都不能顺利地在 MOOC 平台上完成课程^[11]。因此,预测学习者放弃课程的可能性就变得非常重要^[12],从而使得 MOOC 平台能够及时提供支持性干预措施,通过各种不同的激励方法来鼓励学习者继续完成课程的学习^[13]。

通过分析用户在 MOOC 平台上学习课程方面的特点,预测其潜在的退课可能性是在在线教育领域一个非常重要的课题^[14],2015 年 KDD 大会还特地为此类退课率预测挑战举办了数据挖掘的竞赛。为了降低退课率,需要给学习者提供一个满意的 MOOC 平台学习体验,而好的学习体验与很多因素相关^[15],例如:学习者本身背景、课程内容、平台的质量、学校的特点等。有学习者通过研究指出,MOOC 平台上学习者退课率高的主要因素和学习者的学习行为与 MOOC 平台属性相关,其中与学习者相关的属性包括学习的动机、学习时间、背景知识和技能等因素,而与 MOOC 平台相关的属性包括课程设计和课程互动性等因素^[7]。类似的,Goopio 和 Cheung^[16]的研究表明,MOOC 平台上的退课率主要与学习体验、互动性、课程设计、技术、语言、时间和情境七大因素有关。

为了降低 MOOC 平台学习者的退课率,一个可行的解决办法是尽早预测退课行为,从而使得平台能够提前部署一些干预手段,帮助和鼓励学习者来完成课程^[17]。不同学习者的不同学习行为、学习习惯和学习时间都会影响学习者的退课行为,这其中学习者的学习行为对于退课的预测有着非常重要的作用^[14]。在 MOOC 平台上,通过研究分析学习者

的学习行为来预测退课的可能性一直是退课率预测领域的重要挑战。例如,文献 [18-19] 对学生参与 MOOC 课程的情况进行了调查,开发了一种潜在动态因子图(LadFG)来建模和预测学习行为,同时,进一步提出融合特征提取、特征选择和学习者分类的预测模型,并利用 MOOC 平台提供的一些学习行为特征进行预测。

在研究 MOOC 平台的学习者学习行为特征的工作中,最常用的一种学习行为特征是注册用户 MOOC 中学习模式的点击流。点击流是网络课程研究中一个重要的学习者行为的时间序列指标^[20],通过使用点击流数据可以构建一个不断变化的学习者学习状态表示,利用这个学习状态表示,就能对学习者的学习行为进行跟踪,从而预测其可能出现的退课行为。点击流是一种重要的行为模式,并且是评估 MOOC 学习成果的一种重要数据来源^[21-22],因为不同的学生通常有不同的学习方式,这意味着对于同一门课程,不同类型的学习者可能会有不同的活动和学习结果^[23]。为了更好地了解点击流,需要更好地对点击流进行建模,较早的尝试提取用户操作方面的特征,如不同点击类型的计数^[24],虽然这种方法显示出一定的效果并且易于实现,但无法研究点击流所包含的一些复杂属性,比如点击之间的顺序^[25]。目前随着深度学习技术的发展,出现了许多基于神经网络的方法来对点击流进行建模。

为了充分利用点击流中的顺序信息,一些研究人员建议使用序列感知学习技术来研究学习者学习模式,进而预测学习者的退课行为。例如,Wang 等^[26]提出一种基于递归神经网络(recurrent neural network, RNN)的深度模型用于退课预测。类似的,Tang 等^[27]提出一种基于 RNN 具有短期记忆单元的方法。Xiong 等^[28]则进一步开发了基于长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络的方法来预测学习状态。同样,Fei 和 Yeung^[25]提出一个 LSTM 单元的神经网络模型进行退课预测^[29]。这种针对学习者学习行为序列的建模方法在预测退课行为时显示出了巨大的潜力,因为点击流确实具有顺序属性。但是,点击流活动序列内不同活动之间的内在联系也值得充分研究。例如,与其他活动相比,“加载视频”与“观看视频”的相关性更高。因此,有学者指出,除了点击流内部活动之间的时序特性,部分点击流内部活动之间的依赖性应该也有助于提高总体退学预测任务的准确性。

在研究点击流内部活动关系方面,Wang 等^[26]提出了一种结合了卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和 RNN 方法的 ConRec 网络,从原始 MOOC 数据中自动提取特征。类似的,为了利

用学习行为之间的相关性, Wen 等^[23]设计了一个基于时间序列的二维矩阵作为 CNN 模型的输入, 将时间信息与学习者的行为特征相结合, 利用时间序列解决行为特征的局部相关性问题。除了研究活动之间的相关性以外, 还需要指出不同用户和不同课程可能具有不同的活动模式, 这意味着活动相关性也应分别从用户和课程的角度进行研究。实际上, 一些研究人员指出, 从用户和课程不同的角度去研究活动相关性也将影响 MOOC 课程的退课率预测^[30], 因为不同的课程可能与活动具有不同的相关模式, 在学习行为的研究中, 不同类型的课程对学生的行为可能有不同的影响^[15]。Feng 等^[8]针对这个问题进行了研究, 提出了一种上下文感知功能交互网络(context-aware feature interaction network, CFIN)来预测辍学概率, 并在更大的数据集上取得了最好的结果。

2 退课预测框架

2.1 问题定义

令 $u \in U$ 和 $c \in C$ 为用户和课程, 其中 U 和 C 分别为用户集合和课程集合, 从用户 u 学习周期为 D_u 的 c 课程学习日志中提取用户的学习行为 $X(u, c)$, 其中每个元素 $x_i(u, c)$ 表示特定的行为, v_i 是 $x_i(u, c)$ 的归一化统计值, 其相应的行为名称为 $s_i = \{w_{ij}\}_{j=1}^{l_{s_i}}$ (如“加载视频”), 其中 w_{ij} 表示行为 $x_i(u, c)$ 名称中的第 j 个

单词, l_{s_i} 为该名称的长度。学习行为的上下文信息包含用户信息 $Z(u)$ 和课程信息 $Z(c)$, 其中用户信息元素 $z_i(u)$ 包含学习者的个人基本信息(如年龄、性别、受教育程度、注册课程数量等), 课程信息元素 $z_i(c)$ 则包含课程基本信息(如课程种类及注册课程的用户数)。

退课预测任务可根据上述变量形式化定义为: 给定过去时间段内发生的学习行为 $X(u, c)$ 及相关上下文信息 $Z(u)$ 和 $Z(c)$, 预测用户 u 是否会在预测周期 D_p 内放弃课程 c 的学习, 用于是否退课的结果是一个二分类的值 $y_{(u,c)}$, 用 1 表示用户在预测周期内没有放弃学习任务, 否则为 0, 因此本文目的是学习一个预测函数, 使得其预测结果 $\hat{y}_{(u,c)}$ 尽可能地逼近真实结果 $y_{(u,c)}$ 。

2.2 框架结构

针对 MOOC 平台学习者的学习行为, 本文首先提取学习行为的语义信息, 并捕捉学习行为之间的交互关系。在此基础上, 进一步从用户和课程的角度分别对行为进行分析, 获得从用户和课程角度观察到的行为信息, 最后, 通过一个门控机制将用户、课程信息及与用户、课程相关的行为交互特征进行融合, 并最终用于用户退课的预测, 因此, 本文提出一个基于用户和课程信息感知增强的行为学习框架, 如图 1 所示。

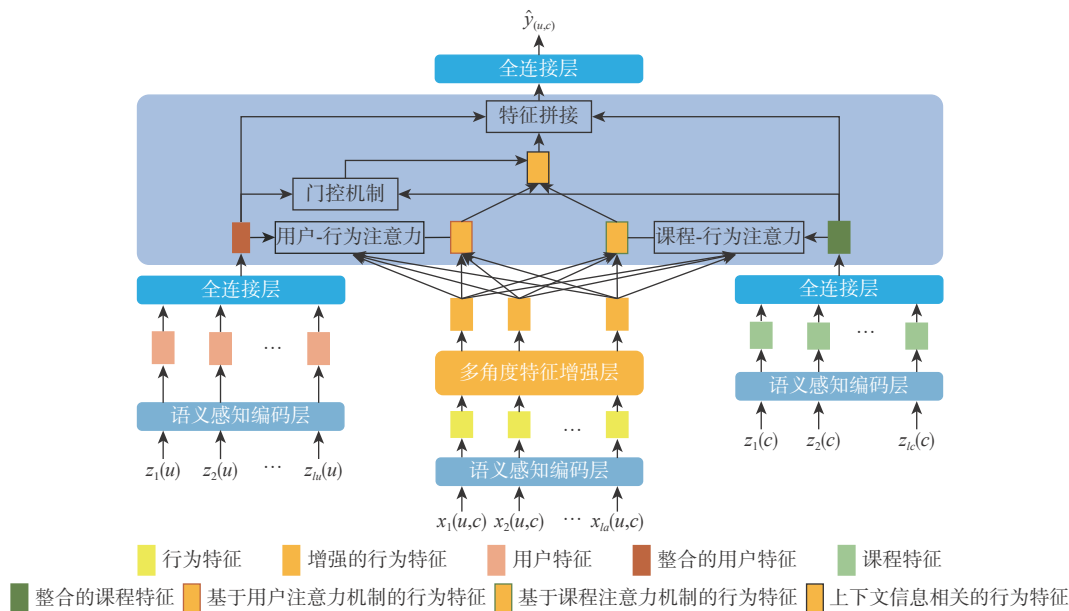


图 1 基于用户和课程信息感知增强的退课预测框架

Fig. 1 User and course information perception enhancement based dropout prediction framework

2.2.1 用户和课程的语义编码

为了构建一个有效的退课预测框架, 本文需要设计一个有效的方法来表示上下文信息和学习行为。早期工作一般直接使用随机初始化的嵌入层

或学习行为统计值作为表示层, 而忽略了此类信息的语义。因此, 本文提出语义感知编码层(semantic aware encoding, SAE), 从上下文信息和学习行为中提取语义感知特征。

本文以学习行为的编码为例, 如图 2 所示。给定名称为 $s_i = \{w_{ij}\}_{j=1}^{l_s}$ 及归一化统计值为 v_i 的学习行为, 使用 GloVe 词嵌入将 s_i 中的每个词映射到向量空间并对统计值进行归一化。使用 LSTM 作为编码器, 从 s_i 的词嵌入中提取行为对应的语义。LSTM 在 t 时刻的输入门 z_t^I 、遗忘门 z_t^F 、输出门 z_t^O 分别计算如下:

$$z_t^I = \sigma(W_I[g(w_{it}); \mathbf{h}_{t-1}] + \mathbf{b}_I) \quad (1)$$

$$z_t^F = \sigma(W_F[g(w_{it}); \mathbf{h}_{t-1}] + \mathbf{b}_F) \quad (2)$$

$$z_t^O = \sigma(W_O[g(w_{it}); \mathbf{h}_{t-1}] + \mathbf{b}_O) \quad (3)$$

式中: W_I 、 W_F 、 W_O 和 \mathbf{b}_I 、 \mathbf{b}_F 、 \mathbf{b}_O 为 LSTM 中可学习的参数; $g(w_{it})$ 为词 w_{it} 对应的 GloVe 词嵌入; \mathbf{h}_{t-1} 为 $t-1$ 时刻的隐状态; $[a; b]$ 为张量 a 和 b 的拼接结果; σ 为 sigmoid 激活函数。候选单元状态 \tilde{c}_t 为

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_C[g(w_{it}); \mathbf{h}_{t-1}] + \mathbf{b}_C) \quad (4)$$

式中: W_C 、 \mathbf{b}_C 分别为用于计算候选单元状态线性层的映射矩阵和偏置; 下标 C 为单元状态。

使用输入门和遗忘门计算单元状态, 其中 \odot 表示张量的按位乘法运算:

$$\mathbf{c}_t = z_t^I \odot \tilde{c}_t + z_t^F \odot \mathbf{c}_{t-1} \quad (5)$$

t 时刻的隐状态 \mathbf{h}_t 为

$$\mathbf{h}_t = z_t^O \odot \tanh(\mathbf{c}_t) \quad (6)$$

最后时刻的隐状态将作为学习行为的语义特征, 将其乘以归一化后的统计值得到最终的学习行为特征表示 \mathbf{f}_i^a 为

$$\mathbf{f}_i^a = v_i \odot \mathbf{h}_{l_s} \quad (7)$$

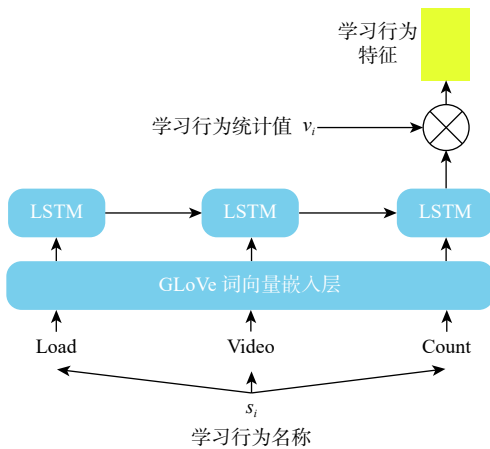


图 2 基于语义编码的点击活动特征编码
Fig. 2 Semantic oriented based click activity feature encoding

2.2.2 多角度特征增强

在退课预测任务中, 有一些学习行为是相互关联的, 如“加载视频”和“播放视频”有时序先后关系。这类相关性可以帮助框架更深入地了解用户

行为。为了使框架具备对学习行为之间相互作用的建模能力, 本文提出了多角度特征增强层 (multi-perspective feature enhancement, MFE), 该层从多个角度提取了学习行为之间的相关性。

令 $\mathbf{F}^a \in \mathbf{R}^{l_a \times d_c}$ 表示学习行为特征张量, \mathbf{f}_i^a 表示 \mathbf{F}^a 中第 i 类行为所对应的分量, 其中 l_a 和 d_c 分别表示学习行为的数量和学习行为特征张量的长度。为了从多角度提取学习行为之间的相关性, 本文采用了多头缩放点积自注意力机制, 每个头的特征 \mathbf{H}_i 用于提取单个角度的相关性, 其计算式如下:

$$\mathbf{H}_i = \text{softmax} \left(\frac{\mathbf{F}^a (\mathbf{F}^a)^T}{\sqrt{d_h}} \right) \mathbf{F}^a \quad (8)$$

式中: d_h 为 \mathbf{H}_i 特征对应的维度。随后将所有的 \mathbf{H}_i 特征进行拼接得到多角度行为相关性特征 $\tilde{\mathbf{H}}$:

$$\tilde{\mathbf{H}} = [\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_{l_h}] \quad (9)$$

式中: l_h 为注意力多头数, 本文利用线性层整合不同的头特征, 并分别使用层归一化和残差连接来稳定特征比例和梯度。于是获得了具有多角度相关性增强的学习行为特征 $\tilde{\mathbf{F}}^a$:

$$\tilde{\mathbf{F}}^a = \text{LayerNorm}(\mathbf{F}^a) \quad (10)$$

2.2.3 基于门控机制的上下文相关特征优化

每个学习行为的重要性会根据用户和课程的不同而变化, 因此, 直接使用所有学习行为的特征会存在很多噪声从而导致预测性能较差。为了融合学习行为的相关上下文信息来优化行为特征, 本文提出了基于门控机制的上下文相关特征提取优化层 (gated context-related feature refine, GCR), 该层分别基于用户信息特征和课程信息特征得到带有相关注意力机制的行为特征, 然后使用门控机制合并这 2 个特征。

令 $\mathbf{F}^u \in \mathbf{R}^{l_u \times d_c}$ 和 $\mathbf{F}^c \in \mathbf{R}^{l_c \times d_c}$ 分别表示从语义感知编码层得到的用户信息特征和课程信息特征, 其中 l_u 和 l_c 分别为用户和课程包含的特征种类数量, 本文利用全连接层将 \mathbf{F}^u 和 \mathbf{F}^c 分别整合成单个特征张量:

$$\tilde{\mathbf{f}}^u = \mathbf{W}_{P_u} \text{Flatten}(\mathbf{F}^u) + \mathbf{b}_{P_u} \quad (11)$$

$$\tilde{\mathbf{f}}^c = \mathbf{W}_{P_c} \text{Flatten}(\mathbf{F}^c) + \mathbf{b}_{P_c} \quad (12)$$

式中: \mathbf{W}_{P_u} 和 \mathbf{b}_{P_u} 分别为用于整合用户信息特征的线性层的映射矩阵和偏置; \mathbf{W}_{P_c} 和 \mathbf{b}_{P_c} 分别为用于整合课程信息特征的线性层的映射和偏置; Flatten 表示将多维特征铺平成一维特征, 从而能够将其输入全连接层进行运算。提取基于用户注意力机制的行为特征, 上述被整合的用户特征 $\tilde{\mathbf{f}}^u$ 与每个增强的学习行为特征 $\hat{\mathbf{f}}_i^a$ 进行拼接, 用于计算用户-行为注意力得分 α_i :

$$\hat{\alpha}_i = \mathbf{W}_{Att2} \text{RELU}(\mathbf{W}_{Att1} [\tilde{f}_i^u; \hat{f}_i^a]) \quad (13)$$

$$\alpha_i = \frac{\exp(\hat{\alpha}_i)}{\sum_{j=1}^{l_u} \exp(\hat{\alpha}_j)} \quad (14)$$

式中: \mathbf{W}_{Att2} 、 \mathbf{W}_{Att1} 分别为用于计算用户-行为注意力得分的第1层、第2层线性层的映射矩阵。

用户-行为注意力得分 α_i 体现了学习行为 $x_i(u, c)$ 对于用户的重要性程度, 进一步使用注意力得分对增强的学习行为特征进行加权求和, 从而得到基于用户注意力机制的行为特征 \hat{f}_u^a :

$$\hat{f}_u^a = \sum_{i=1}^{l_u} \alpha_i \hat{f}_i^a \quad (15)$$

可以采用相同的方式得到基于课程注意力机制的行为特征 \hat{f}_c^a , 现在本文有了 \hat{f}_u^a 和 \hat{f}_c^a 这2个特征, 由于用户信息和课程信息对于不同实例的重要性不同, 因此进一步采用门控机制来合并这些特征。利用整合的用户特征 \tilde{f}_u^a 和课程特征 \tilde{f}_c^a 计算门控得分的实数值, 将其用于权衡基于用户注意力机制的行为特征和基于课程注意力机制的行为特征:

$$g = \sigma(\mathbf{W}_G [\tilde{f}_u^a; \tilde{f}_c^a]) \quad (16)$$

式中: \mathbf{W}_G 为用于计算门孔得分的线性层映射矩阵。

根据门控得分融合 \hat{f}_u^a 和 \hat{f}_c^a 得到与上下文信息相关的行为特征:

$$\tilde{f}^a = g \odot \hat{f}_u^a + (1-g) \odot \hat{f}_c^a \quad (17)$$

将整合的用户特征 \tilde{f}_u^a , 课程特征 \tilde{f}_c^a 和上下文信息相关的学习行为特征 \tilde{f}^a 进行拼接作为分类特征, 传入线性层和 sigmoid 激活函数获得预测的退学概率:

$$\hat{y}_{(u,c)} = \sigma(\mathbf{W}_P [\tilde{f}_u^a; \tilde{f}_c^a; \tilde{f}^a] + \mathbf{b}_P) \quad (18)$$

式中: \mathbf{W}_P 和 \mathbf{b}_P 分别为用于计算退学概率的线性层映射矩阵和偏置。

在训练阶段, 本文使用交叉熵损失函数来学习所有的框架参数:

$$\text{Loss} = -y_{(u,c)} \ln(\hat{y}_{(u,c)}) - (1-y_{(u,c)}) \ln(1-\hat{y}_{(u,c)}) \quad (19)$$

3 实验验证

3.1 数据集

为了验证所提出的框架, 在本文研究中, 对 XuetangX 数据集的教师定型模式课程进行了实验。XuetangX 数据集发布于 2019 年, 包含超过 220 000 个实例, 并且比 KDDCUP 2015 大得多, KDDCUP 2015 也来自 XuetangX 数据集, 且包含超过 120 000 个活

动日志。本文通过预处理并将整个数据集拆分为 142 149 个训练实例, 15 794 个开发实例和 67 699 个测试实例, 与文献 [8] 采用了相同的配置, 历史期和预测期分别为 35 d 和 10 d。

3.2 实验设置

本文根据开发集上框架的性能选择超参数。选择与文献 [8] 相似的配置, 使用 50 维的 GloVe 嵌入向量和 1 个包含 50 个隐藏单元的 LSTM 层。此外, 使用了 1 层 4 头自注意力层, 使用 Adam 优化器对框架进行了优化, 并将学习率设置为 10^{-4} 。权重为 10^{-5} 的 L2 正则化还可以避免过度拟合。将批次大小设置为 32, 训练了 50 个 epoch, 使用在开发集上表现最佳的框架参数来进行评估。

3.3 对比方法

为了验证所提框架, 本文将其与其他方法进行比较。

1) 逻辑回归(logistics regression, LR): LR 是一种广泛用于分类的线性回归分析方法。能够基于对不同变量之间的回归系数的分析来估计某个事件是否会发生。LR 已作为基本技术^[31-32] 应用于许多 MOOC 退课预测任务中。

2) 支持向量机(support vector machine, SVM): SVM 广泛用于二分类任务, 并且能够利用从点击流^[33] 中精心选择的特征来预测 MOOC 退课。

3) 随机森林(random forest, RF): RF 是基于决策树的方法, 在训练过程中引入随机性来提高分类器的性能, 也是一种 MOOC 退课预测^[34] 中广泛使用的基本方法。

4) 梯度提升决策树(gradient boosting decision tree, GBDT): 基于 GBDT 的退课预测模型是使用决策树的整体来预测标签, 深度大于 1, 并且在此任务中显示了可喜的结果^[35]。

5) 全连接神经网络(deep neural network, DNN): 1 个 3 层 DNN, 用于研究将深度学习技术用于退课预测任务的可行性。

6) CFIN: 上下文感知功能交互网络^[8], 是目前面向较大的 XuetangX 数据集的重要模型。

3.4 评估指标

本文使用精度(ACC)^[36]、接受者操作特征曲线(ROC)、曲线下的面积(AUC)^[37] 来评估所提框架的性能。对于二分类问题, 根据预测分类和实际标签可以将样本划分为 4 类, 即真正例(TP)、假正例(FP)、真反例(TN)和假反例(FN)。分类结果可以用“混淆矩阵”表示, 如表 1 所示。

分类框架中每个样本的输出结果一般为实数值, 对于设定的阈值, 将该实数值和阈值比较, 大于

表 1 分类结果混淆矩阵

Table 1 Confusion table confusion matrix for classification results

实际标签	预测分类	
	正例数量	反例数量
正例数量	TP	FN
反例数量	FP	TN

阈值的为正样本, 反之为负样本。通过设定不同的阈值, 可以得到不同的分类结果。将样本按照预测得到的实数值从高到低进行排序, 将每个样本对应的实数值作为阈值, 就可以得到和样本数量相当的分

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (20)$$

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (21)$$

根据 FPR 和 TPR, ACC 可定义为

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (22)$$

ROC 也可以利用 FPR 和 TPR 来计算, 将每个阈值对应的 (FPR, TPR) 点绘制在坐标图中, 得到 ROC 曲线, ROC 曲线的横坐标为假正例率, 纵坐标为真正例率。利用 ROC 曲线对分类框架效果进行比较时, 若各框架的 ROC 曲线没有发生交叉, 直观上来讲, 最外层的 ROC 曲线包覆住了其他框架的 ROC 曲线, 因此, 最外层的 ROC 曲线对应的分类框架效果最好。若框架的 ROC 曲线发生了交叉, 那么通常采用比较 ROC 曲线下面积的方式^[37]。因此, 该面积即 AUC 被采纳为通用的分类框架优劣判据。在实际训练过程中一般只有有限个样本, 因此绘制得到的 ROC 曲线由有限个 (FPR, TPR) 点连接而成, 点坐标集合为: $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$, 则 AUC 可以采用将黎曼积分化为求和形式的方法求解:

$$AUC = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m-1} (x_{i+1} - x_i)(y_i + y_{i+1}) \quad (23)$$

3.5 结果与分析

表 2 列出了有关 ACC 和 AUC 的总体性能, 就 AUC 而言, 本文提出的框架可以胜过大多数机器学习方法, 但要比最先进的方法 CFIN 要低一些。而在 ACC 方面, 本文提出的框架可以胜过 CFIN。表 2 表明, 本文提出的框架与大型数据集中的复杂方法相比具有竞争优势。

为了进一步分析提出的 SAE、MFE 和 GCR 组件

表 2 ACC 和 AUC 总体性能

Table 2 Overall performance in terms of ACC and AUC

方法	ACC/%	AUC/%
LR		82.23
SVM		82.86
RF		83.11
DNN		85.64
GBDT		85.18
CFIN	84.78	86.40
本文方法	85.09	86.07

的效果, 本文还通过以下方法进行消融研究: ①使用随机初始化的特征向量而不是语义感知编码层(不包含 SAE); ②删除多视角特征增强层(不包含 MFE); ③用平均池化层替换增强的学习行为特征(不包含 GCR)上门控的上下文相关特征优化层。本文注意到最明显的下降发生在没有 MFE 的情况下, 这证明了捕获学习行为之间交互关系的重要性。在没有 SAE 的情况下, 所获得的框架特征语义要比具有随机初始化特征的框架更好。如表 3 所示, 门控上下文相关特征细化层可以帮助框架过滤不相关的活动特征, 并根据不带 GCR 的结果提高性能。

表 3 消融实验

Table 3 Ablation test

方法	ACC/%	AUC/%
本文方法	85.09	86.07
w/o SAE	84.97	85.96
w/o MFE	84.91	85.99
w/o GCR	84.91	86.00

注: w/o 表示消融实验中的 without。

3.6 案例与分析

本文对一个测试样本进行采样, 并可可视化其学习行为-学习行为注意力得分、上下文信息-学习行为注意力得分。

如图 3 所示, 学习行为与学习行为之间的注意力系数热度图, 可以看到框架可以捕捉到一些具有明显时序关系的学习行为之间的交互关系, 如“点击论坛”与“问题获取”、“问题获取”与“创建评论”之间的注意力分数明显要更高。而对一些相关性较低的学习行为组合则分配了较低的注意力分数, 如“播放视频”和“关闭课件”。

如图 4 所示, 上下文信息与学习行为之间的注意力系数热度图, 可以看到用户功能主要集中在学习行为“问题获取”和“创建评论”上, 而课程功能则关注于学习行为“点击课件”、“关闭课件”及“载入视频”等, 这有助于框架过滤噪和提取与上下文最相关的学习行为特征。

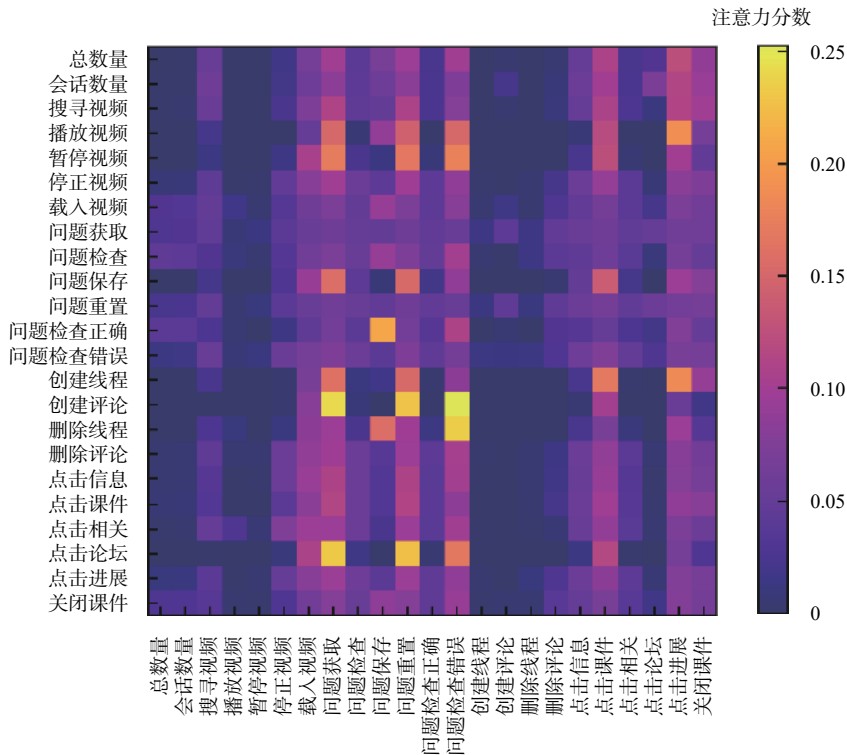


图3 学习行为-学习行为注意力热度图

Fig. 3 Study activity-study activity attention heat map

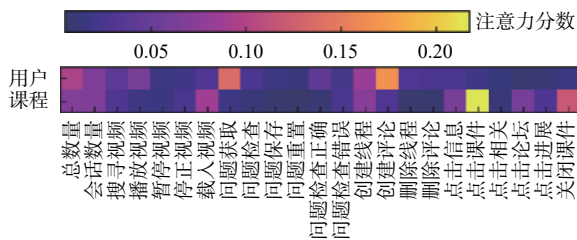


图4 上下文信息-学习行为注意力热度图

Fig. 4 Context-study activity attention heat map

4 结论

针对 MOOC 平台较高退课率的问题, 本文提出了一个基于长短时记忆机和多头注意力机制的 MOOC 平台用户学习情况预测框架, 在该框架中:

- 1) 提出语义编码机制, 将用户的学习行为进行分析, 为用户和相应课程进行编码, 可以更好地获得用户和课程的特征。
- 2) 提出一个多角度的用户和课程之间交互的编码方法, 更好地将用户和课程之间的交互关系进行分析。
- 3) 提出基于门控机制的上下文相关行为特征优化机制, 最后将获得的用户、课程及优化后的行为交互特征融合并用于退课预测, 并在 XuexiangX 数据集上进行了实验验证。
- 4) 所提框架能获得较好的总体性能, 消融实验也验证了本文提出的不同编码机制和特征融合机制的有效性。本文所提方法能够使得 MOOC 平台

能够尽可能早的对用户活动进行干预, 从而提升整体的 MOOC 平台使用体验。

参考文献 (References)

- [1] MARTIN F G. Will massive open online courses change how we teach?[J]. *Communications of the ACM*, 2012, 55(8): 26-28.
- [2] LYKOURENTZOU I, GIANNOUKOS I, NIKOLOPOULOS V, et al. Dropout prediction in E-learning courses through the combination of machine learning techniques[J]. *Computers & Education*, 2009, 53(3): 950-965.
- [3] FISHBEIN M, AJZEN I. Belief, attitude, intention, and behavior: An introduction to theory and research[J]. *Journal of Business Venturing*, 1977, 5: 177-189.
- [4] CHEN C, SONNERT G, SADLER P M, et al. Computational thinking and assignment resubmission predict persistence in a computer science MOOC[J]. *Journal of Computer Assisted Learning*, 2020, 36(5): 581-594.
- [5] CROSSLEY S A, PAQUETTE L, DASCALU M, et al. Combining click-stream data with NLP tools to better understand MOOC completion[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Learning Analytics & Knowledge. New York: Association for Computing Machinery, 2016: 6-14.
- [6] GARDNER J, BROOKS C. Dropout model evaluation in MOOCs[C]//Proceedings of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto: AAAI Press, 2018: 7906-7912.
- [7] DALIPI F, IMRAN A S, KASTRATI Z. MOOC dropout prediction using machine learning techniques: Review and research challenges[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Engineering Education Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1007-1014.
- [8] FENG W, TANG J, LIU T X. Understanding DROPOUTs in MOOCs[C]//Proceedings of the 33rd AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto: AAAI Press, 2019: 1007-1014.

- cial Intelligence. Palo Alto: AAAI Press, 2019: 517-524.
- [9] ALRAIMI K M, ZO H, CIGANEK A P. Understanding the MOOCs continuance: The role of openness and reputation[J]. *Computers & Education*, 2015, 80: 28-38.
- [10] ITANI A, BRISSON L, GARLATTI S. Understanding learner's drop-out in MOOCs[C]//Proceedings of 19th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning. Berlin: Springer, 2018: 233-244.
- [11] YANG D, WEN M, HOWLEY I K, et al. Exploring the effect of confusion in discussion forums of massive open online courses[C]//Proceedings of the 2nd ACM Conference on Learning @ Scale. New York: Association for Computing Machinery, 2015: 121-130.
- [12] YANG D, SINHA T, ADAMSON D, et al. "Turn on, tune in, drop out": Anticipating student dropouts in massive open online courses[C]//Proceedings of 2013 NIPS Workshop on Data Driven Education. New York: Curran Associates, 2013.
- [13] JEON B, PARK N. Dropout prediction over weeks in MOOCs by learning representations of clicks and videos[C]//Proceedings of 2020 AAAI Workshop on Artificial Intelligence for Education. Palo Alto: AAAI Press, 2020.
- [14] JIN C. MOOC student dropout prediction model based on learning behavior features and parameter optimization[J/OL]. *Interactive Learning Environments*, 2020 (2020-08-12)[2021-02-12]. <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1802300>.
- [15] ADAMOPOULOS P. What makes a great MOOC? An interdisciplinary analysis of student retention in online courses[C]//Proceedings of the 2013 International Conference of Information Systems. Milano: AIS eLibrary, 2013.
- [16] GOOPIO J, CHEUNG C. The MOOC dropout phenomenon and retention strategies[J]. *Journal of Teaching in Travel & Tourism*, 2021, 21(2): 177-197.
- [17] XING W, DU D. Dropout prediction in MOOCs: Using deep learning for personalized intervention[J]. *Journal of Educational Computing Research*, 2019, 57(3): 547-570.
- [18] QIU J, TANG J, LIU T X, et al. Modeling and predicting learning behavior in MOOCs[C]//Proceedings of the 9th ACM International Conference on Web Search and Data Mining. New York: Association for Computing Machinery, 2016: 93-102.
- [19] QIU L, LIU Y, HU Q, et al. Student dropout prediction in massive open online courses by convolutional neural networks[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(20): 10287-10301.
- [20] JEON B, SHAFRAN E, BREITFELLER L, et al. Time-series insights into the process of passing or failing online university courses using neural-induced interpretable student states[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Educational Data Mining. Montreal: IEDM, 2019.
- [21] SINHA T, JERMANN P, LI N, et al. Your click decides your fate: Leveraging clickstream patterns in MOOC videos to infer students' information processing and attrition behavior[EB/OL]. (2014-09-16)[2021-03-01]. <https://arxiv.org/abs/1407.7131>.
- [22] YU C H, WU J, LIU A C. Predicting learning outcomes with MOOC clickstreams[J]. *Education Sciences*, 2014, 9(2): 104.
- [23] WEN Y, TIAN Y, WEN B, et al. Consideration of the local correlation of learning behavior to predict dropouts from MOOCs[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2020, 25(3): 336-347.
- [24] WHITEHILL J, WILLIAMS J J, LOPEZ G, et al. Beyond prediction: Towards automatic intervention in MOOC student stop-out[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Educational Data Mining. Madrid: IEDM, 2015: 171-178.
- [25] FEI M, YEUNG D. Temporal models for predicting student dropout in massive open online courses[C]//Proceedings of 2015 ICDM Workshop on Data Mining for Educational Assessment and Feedback. Piscataway: IEEE Press, 2015: 256-263.
- [26] WANG W, YU H, MIAO C. Deep model for dropout prediction in MOOCs[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Crowd Science and Engineering. New York: Association for Computing Machinery, 2017: 26-32.
- [27] TANG C, OUYANG Y, RONG W, et al. Time series model for predicting dropout in massive open online courses[C]//Proceedings of 19th International Conference on Artificial Intelligence in Education. Berlin: Springer, 2018: 353-357.
- [28] XIONG F, ZOU K, LIU Z, et al. Predicting learning status in MOOCs using LSTM[C]//Proceedings of the 2019 ACM Turing Celebration Conference-China. New York: Association for Computing Machinery, 2019: 1-5.
- [29] YIN S, LEI L, WANG H, et al. Power of attention in MOOC dropout prediction[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 202993-203002.
- [30] SUN D, MAO Y, DU J, et al. Deep learning for dropout prediction in MOOCs[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Educational Innovation through Technology. Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [31] ZHENG Y, GAO Z, WANG Y, et al. MOOC dropout prediction using FWTS-CNN model based on fused feature weighting and time series[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 225324-225335.
- [32] MORENO-MARCOS P M, MUÑOZ-MERINO P J, MALDONADO-MAHAUAD J, et al. Temporal analysis for dropout prediction using self-regulated learning strategies in self-paced MOOCs[J]. *Computers & Education*, 2020, 145: 103728.
- [33] KLOFT M, STIEHLER F, ZHENG Z, et al. Predicting MOOC dropout over weeks using machine learning methods[C]//Proceedings of the EMNLP 2014 Workshop on Analysis of Large Scale Social Interaction in MOOCs. Stroudsburg: ACL, 2014: 60-65.
- [34] NAGRECHA S, DILLON J Z, CHAWLA N V. MOOC dropout prediction: Lessons learned from making pipelines interpretable [C]//Proceedings of the 26th International Conference on World Wide Web Companion. New York: Association for Computing Machinery, 2017: 351-359.
- [35] LIANG J, LI C, ZHENG L. Machine learning application in MOOCs: Dropout prediction[C]//Proceedings of 11th International Conference on Computer Science & Education. Piscataway: IEEE Press, 2016: 52-57.
- [36] AL-SHABANDAR R, HUSSAIN A, LAWS A, et al. Machine learning approaches to predict learning outcomes in massive open online courses[C]//Proceedings of 2017 International Joint Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Press, 2017: 713-720.
- [37] HANLEY J A, MCNEIL B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve[J]. *Radiology*, 1982, 143(1): 29-36.

Behavior based MOOC user dropout predication framework

CHEN Hui^{1,*}, BAI Jun¹, YIN Chuantao², RONG Wenge¹, XIONG Zhang¹

(1. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Sino-French Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Though the massive open online courses (MOOC) have greatly changed the way of learning, properly understanding the user's behavior and then predication of dropout is one of the most challenging tasks. MOOC have significantly altered the way that people learn, yet one of the most difficult challenges is correctly interpreting user behavior and then predicting dropout. In this research, to improve the dropout prediction performance, we firstly analyzed users and courses from the perspective of activities by using the long short term memory mechanism. In this study, we used the long short term memory mechanism to analyze users and courses from the perspective of activities in order to improve the dropout prediction performance. Afterwards we further proposed a multi-attention based multi-perspective feature enhancement method to investigate the correlated activities among users and courses. Finally, we provided a gated mechanism-based feature integration framework for dropout prediction. The experiment study on the public dataset has shown our framework's promising potential, thereby making it possible to better investigate the reason beneath these phenomena and improve the overall study experience. The experiment study on the open dataset has demonstrated the promising potential of our framework, allowing us to more thoroughly explore the causes of these events and enhance the learning environment as a whole.

Keywords: massive open online courses; prediction framework; user; content; study behavior

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0455

增材制造技术在载人航天工程中的应用与展望

刘洋^{1,*}, 周建平², 张晓天¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191; 2. 中国载人航天工程办公室, 北京 100094)

摘 要: 近年来, 增材制造技术在载人航天工程中的应用迅速发展。对熔融沉积成型技术、激光选区熔化技术、线材电弧增材制造技术、热喷涂增材技术、月壤增材制造技术等用于载人航天工程的增材制造技术及这些技术的应用领域进行了总结。对增材制造技术在在轨制造飞行器替换件、制造大型桁架等难以在地面制造或发射的部件、制造飞行器复杂部件等应用领域进行了总结。提出未来载人航天工程技术的增材制造中应发展适合载人航天工程的材料体系, 应研究微重力环境下的增材制造技术, 同时未来还应发展相关工艺。

关键词: 载人航天; 增材制造; 航天器; 在轨制造; 航天应用

中图分类号: V461

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0083-09

增材制造技术(additive manufacturing, AM)也被称为3D打印技术。传统制造工艺是在原材料的基础上,进行去除、切削等的“减材制造”,而增材制造是以数字模型文件为基础,通过计算机软件与专门的控制系统将专用的材料等,通过多种制造方式逐层堆积,制造出实体物品的制造技术。在载人航天领域,增材制造技术具有良好的应用前景。他可以用于制造飞行器的复杂零部件,也可以实现在轨制造难以由地面发射的飞行器部件。因此,主要航天大国都将增材制造技术作为载人航天的重要研究方向。

自2010年起,美国国家航空航天局(NASA)和欧洲航天局在增材制造技术的研发上投入了大量的人力物力,开展了一系列空间增材制造项目的研究。NASA制定了从地面制造到国际空间站制造,再到地外天体就地制造的三阶段增材制造技术发展计划^[1]。

中国航天系统近年来对增材制造技术进行了大量研究。2013年,中国航天科技集团一院211厂与华中科技大学合作,成立联合实验室,开展增材制造技术研究^[2]。近年来,中国也实现了增材制造

的在轨试验,并将增材制造产品应用于航天飞行器。在2020年的中国航天大会上,面向空间超大型天线结构的在轨增材制造技术作为2020年宇航领域十大科学问题和技术难题之一被发布^[3],在轨增材制造技术对空间超大型天线系统的在轨建设具有重要意义。

当前,应用于载人航天领域的增材制造技术主要有针对高分子材料与热塑性良好的复合材料的熔融沉积成型技术;针对金属材料的激光选区熔化技术、热喷涂增材技术与线材电弧增材制造技术;月壤增材制造技术。本文总结了上述技术,梳理了增材制造技术在载人航天领域的应用方向,并对增材制造技术在载人航天工程的未来发展方向进行了整理。当前,增材制造技术在载人航天领域的挑战有:①现有常用材料,如粉末材料与丝材存在在轨制造的缺陷,应发展适合载人航天工程的材料体系;②微重力环境下,流体的形态与制造的物理化学过程与重力条件下有显著差别,应进一步研究微重力环境对增材制造的影响;③增材制造的配套工艺需要进一步发展。

收稿日期: 2022-06-02; 录用日期: 2022-07-17; 网络出版时间: 2022-08-02 14:16

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220801.1649.001.html

*通信作者. E-mail: liuyang15@buaa.edu.cn

引用格式: 刘洋, 周建平, 张晓天. 增材制造技术在载人航天工程中的应用与展望[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 83-91.

LIU Y, ZHOU J P, ZHANG X T. Application and prospect of additive manufacturing technology in manned space engineering[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 83-91 (in Chinese).

1 载人航天增材制造方法

1.1 熔融沉积成型技术

熔融沉积成型技术 (fused deposition modeling, FDM) 诞生于 1988 年。该技术通过电加热的方式, 将原材料热熔性丝材升温至熔融状态, 随后通过计算机软件, 使用带有细微喷嘴的喷头喷挤熔融的丝材, 实现熔体逐层堆积, 从而实现立体成型^[4]。通常熔融沉积成型技术需要使用 2 种材料, 分别实现成品的建模与支撑, 支撑材料可在成型过程完成后剥除, 或由特殊溶液溶解, 得到最终零件。

熔融沉积成型技术主要使用热塑性良好的复合材料与高分子材料。这一类材料具有一系列适应增材制造技术的性质, 如良好的流动性, 在相对较低温度下的热塑性及快速冷却黏结性。此外, 一些高分子材料还具有在光照等条件下快速固化的能力。这些特性使其得以在增材制造领域得到大规模应用。

在航天领域, 熔融沉积技术是较早应用和试验的空间增材制造技术。当前主要用于航天熔融沉积成型技术的高分子材料有丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS)、聚醚醚酮 (PEEK)、聚乳酸 (PLA) 等。ABS 适用于熔融沉积成型技术, 具有良好的耐热性、韧性与柔韧性, 同时其制品尺寸稳定, 表面光泽性好^[5]; 与 ABS 相比, PLA 还具有其他优异的性能, 如熔化后容易附着和延展, 打印时无异味且打印后的材料几乎不会收缩^[6]; PEEK 具有良好的耐热性与稳定性, 并且与碳纤维、陶瓷材料、金属化合物等增强相改性形成的 PEEK 基复合材料具有更为优异的物化性能或可以形成具有某种特定作用的功能性材料^[7]。目前, 中美等国已开展了多个地面和在轨熔融沉积成型增材制造试验。

2014 年 9 月 21 日, SpaceX 公司的货运飞船将太空制造公司 (made in space, MIS) 与 NASA 合作开发的零重力增材制造设备运送到了国际空间站。如图 1 所示, 该设备使用熔融沉积成型技术, 于 2014 年 11 月 24 日制造了一个挤压机的外壳面板, 实现了太空中的首次增材制造试验^[8]。2015 年, 意大利航天局 ASI 资助凯捷公司、泰勒斯阿莱尼亚太空公司与意大利理工学院制造的一台增材制造设备也被送入国际空间站, 该设备使用 PLA 作为打印材料, 进行了一系列在轨增材制造试验^[9]。

2016 年 3 月, 中国科学院团队利用抛物线飞机, 在微重力和正常重力环境下开展了 PLA 与碳纤维增强 PLA 材料的熔融沉积工艺研究, 以验证微重力对熔融沉积制造技术的影响^[10]。2020 年, 中国自主研发的复合材料空间增材制造系统在由长征五



图 1 NASA 实现的首次太空增材制造试验^[8]

Fig. 1 NASA's first space additive manufacturing test^[8]

号 B 型运载火箭发射的试验飞船在轨期间, 完成了连续纤维增强复合材料的打印^[11]。长征五号 B 运载火箭在轨完成的复合材料打印试验, 是中国首次开展的在轨增材制造试验, 同时也是世界首次连续碳纤维增强复合材料的在轨增材制造试验。在本次试验中使用的连续纤维增强复合材料具有较高的比强度和比模量, 具有密度低、强度高特点, 是当前应用于国内外航天器结构制造的主要材料。

在轨制造时, 太空环境会对 FDM 技术使用的高分子材料产生影响。例如 PLA 材料受高真空、高交变温度、强辐射的影响较大, 因此难以用于舱外制造, 但可以在舱内制造中进行使用。而微重力环境会对熔融的高分子材料的流体性能产生影响, 导致制造部件的性能与地面试验有所差异。微重力对增材制造技术的影响将在 3.2 节详述。

1.2 激光选区熔化技术

激光选区熔化技术 (selective laser melting, SLM) 是一种被广泛应用于金属材料的增材制造技术, 采用高能量密度激光器作为热源, 在 20~100 μm 的范围内集中激光光斑, 选择颗粒直径在 5~50 μm 间的球形金属粉末进行融化, 可以制备高自由度的复杂金属零件, 生成高致密度零件。激光选区熔化技术成形精度高, 适用于薄壁、复杂曲面、空间点阵等特殊的复杂结构。相较于传统制造工艺, SLM 能够很大程度上节约加工周期, 避免浪费材料, 降低模具成本^[12]。

NASA 和洛克达因公司合作, 基于 SLM 增材制造技术实现了液氧、气氢火箭喷注器的整体制造。喷注器是火箭发动机系统的重要组成部分, 在制造成本中占最大部分。NASA 和洛克达因公司在严格的测试环境中对激光增材制造的喷注器整体结构开展了试验, 实现了结构减重, 并且显著提高了制造效率、节约了 70% 的生产成本^[12-13]。

2016 年, 航天科工三院与西北工业大学合作, 针对航天发动机涡轮泵核心零件油冷涡轮叶片轴转子, 进行了增材制造技术的工程应用研究。该研究通过使用 SLM 技术, 使结构的换热冷却效果提升了 90%^[14]。

近年来, 利用 SLM 技术生成复杂结构的优势, 进行复杂构型轻量化点阵结构的制造也是热点研究方向之一。文献 [15-16] 通过把经典的八隅体桁架结构应用于激光增材制造点阵结构中, 设计出了在动态和静态载荷下均具有优异的能量吸收功能的八隅体金属点阵结构, 最终的成形结构在高达 $10^3/s$ 的应变速率条件下仍具有良好吸能效果。

1.3 线材电弧增材制造技术

线材电弧增材制造技术 (wire and arc additive manufacturing, WAAM) 是一种采用不同焊机产生的电弧为热源, 在程序的控制下, 利用逐层熔覆原理, 不断添加丝材实现金属零件构造的技术 [17-20]。WAAM 具有沉积效率和丝材利用率高, 整体制造周期短且成本低, 对零件尺寸限制少, 易于修复零件等优势, 此外还可以使用原位合金化改变材料的化学成分, 从而改变加工工件的材料性能。WAAM 具有原位复合制造及在轨制造成形大尺寸零部件的能力, 因此, WAAM 被认为在轨制造大规模金属设备方面具有广阔的前景 [21]。

1.4 热喷涂增材技术

热喷涂增材制造技术是将粉末或丝状的丝材加热至熔化状态, 在高速气流的推动下将材料加速喷涂到基材表面, 形成涂层的加工技术。根据不同的热源, 热喷涂技术可以分为电弧喷涂、火焰喷涂、爆炸喷涂、等离子喷涂等技术 [22]。热喷涂增材技术可用于航天部件, 例如火箭头部和喷管、整流罩、天线等的涂层制造, 实现耐热、防黏连、抗辐射、抗冲蚀等功能。

1.5 月壤增材制造技术

月球是离地球最近的星球, 是至今人类了解最多的星球, 月球探测是 21 世纪世界航天活动的重点方向。以月球为跳板, 建立月球基地, 逐步开展宇宙深空探索, 是全球航天界聚焦的技术路线。然而, 如果建立月球基地的材料均由地球运输至月球, 将产生大量的原材料运输成本。据估算, 在月球表面建造一个与国际空间站相似规模的永久性基地, 仅原材料从地球运送至月球的成本就高达 50 亿美元 [23]。因此, 研究月壤增材制造技术, 进而用于月球原位制造具有重大意义。

由于月壤中的纳米铁颗粒可以吸收微波辐射, 因此月壤增材制造技术可以运用 SLM 技术 [24]。利用特殊设计, 适应环境的激光选区熔化技术的相关设备, 使用月球表面的月壤资源, 在月球表面原位制造出结构单元、维修工具和零件等, 可以满足未来月面探测任务的需要。2014 年, Barmatz 等 [25] 对 SLM 工艺设备的激光打印头进行了改造, 添加了微波加热模块的打印头, 可以直接模拟月壤粉体熔合烧结成为结构件, 该项技术缩短了构件成型时间,

也提高了激光的使用效率。如图 2 所示, 2019 年, 北京航空航天的李雯等 [24] 对基于激光选区熔化技术的模拟月壤原位成形技术进行了研究, 对该技术的可行性进行了验证。

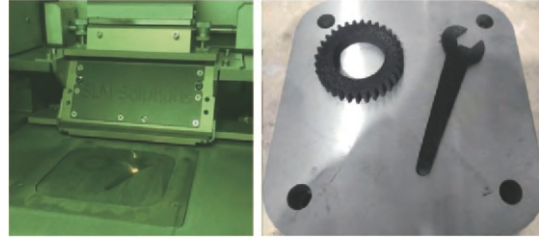


图 2 模拟月壤 SLM 实验结果 [24]

Fig. 2 Experimental results of lunar regolith simulant by SLM [24]

光固化增材制造技术是另一种可用于月壤增材制造的技术。现有的光固化增材制造工艺可以分为立体光固化成型 (stereo lithography apparatus, SLA) 技术和数字光处理 (digital light processing, DLP) 技术。SLA 技术的光源是波长为 355 nm 或 405 nm 的紫外激光, 当激光点在第 1 层光敏树脂薄层上进行扫描时, 会激活树脂体系中的光引发剂与树脂单体迅速发生交联固化反应而形成固化层, 然后设备成型平台会下降一定的高度, 当第 2 层液态光敏树脂薄层在之前形成的固化层表面流平后, 再开启激光光源对树脂薄层进行扫描从而形成新的固化层, 如此反复, 最终得到所需构件。DLP 技术原理与 SLA 技术十分相似, DLP 技术同样也是利用光源激活光敏树脂体系中的光引发剂发生光固化反应形成结构件, 但 DLP 技术采用的是投影仪数字面光源, 该构件的每个固化层是经由整个面光源一次照射成型的。在实际应用中, DLP 具有成型速度快、成型工艺限制少、设备体积较小、尺寸精度高等优点 [26]。2019 年, Liu 等 [27] 将 CLRS-2 模拟月壤粉体与光敏树脂混合, 采用光固化 3D 打印机成功打印出了精度高达 $(99.0 \pm 0.5)\%$ 的打印件胚体, 验证了数字光处理技术进行月壤 3D 打印的可行性。

如表 1 所示, 对应用于载人航天工程的增材制造技术与其应用领域进行了总结。

表 1 应用于载人航天工程的增材制造技术及其具体应用领域

增材制造技术	可用于制造的载人航天工程领域
熔融沉积成型技术	功能材料、保护壳等高分子材料制品
激光选区熔化技术	薄壁、复杂曲面、空间点阵等复杂结构; 助推器、涡轮叶片轴转子
线材电弧增材制造技术	在轨制造大规模金属设备
热喷涂增材技术	火箭、飞船部件涂层
月壤增材制造技术	月面原位增材制造

2 应用方向

2.1 在轨制造飞行器替换件

为了提高在轨飞行器的可靠性,防止意外发生,长时间的载人航天任务往往需要大量的在轨维修部件。如图3所示,Cirillo等^[28]使用2011年国际空间站的平均故障间隔时间估计了2012—2020年国际空间站后勤维护的需求。他们的结果显示,

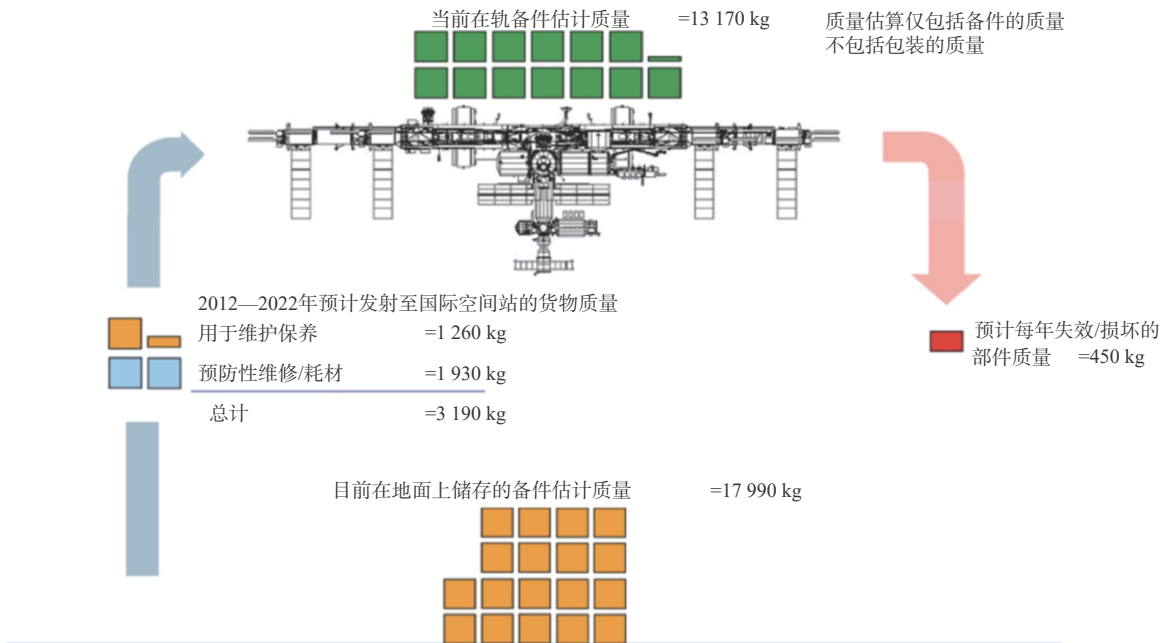


图3 国际空间站2012—2020年后勤维护需求估计示意图^[28]

Fig. 3 Schematic diagram of logistics maintenance demand estimation of International Space Station from 2012 to 2020^[28]

2016年,太空制造公司研制的第2代增材制造设备被送往国际空间站,该设备提高了xyz轴成型尺寸和分辨率,制造了科学试验样条、辐射探测器保护壳等多种工具。

太空制造公司研究的“VULCAN”太空金属制造系统采用了增材减材复合工艺与机器人技术,可实现较高精度金属零件的制造。该系统在增材制造方面使用了线材电弧增材制造技术。“VULCAN”系统可以使用30多种材料,包括高性能热塑性复合材料、钛、不锈钢、铝等材料,可以在航天器中实现金属零件的在轨增材制造^[29]。

通过增材制造技术在轨制造飞行器替换件的主要优势在于,航天员可以按需使用原材料制造备件,这种及时的制造能力为故障维修提供了灵活性,减少了不确定性,从而减少了需要保留的备件库存。增材制造技术可以为载人航天任务提供更为广泛的风险覆盖。此外,增材制造原材料在体积上比备件更紧凑,从而降低了装载体积。2014年,美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)

为了应对国际空间站可能发生的各种故障,需要有13 000 kg的在轨备件及18 000 kg可以随时升空的地面备件。然而,只有不到5%的备件最后会被真正用于替换。为了覆盖几乎所有潜在的故障,需要准备各种备件,但故障本身是随机的,因此只有少数备件最终投入使用。如果以这种方式为未来的深空载人航天任务提供保障,那么备件发射升空将耗费大量资源。

估计增材制造的原材料可以包装成比当前配件高100倍的密度进行发射。通过该方案对空间利用效率的提升,可以用于增加载人航天任务中航天员的可居住空间或用于科学实验的空间。同时,结合增材制造材料回收技术,在轨原材料的质量可以进一步降低。在未来载人航天的深空探索中,实现飞行器在轨可更换部件可以应对有效载荷维护和科学实验中的突发情况,保障飞行安全^[30]。

2.2 在轨制造难以发射升空的部件

大型空间结构在轨制造的方法通常是将三角形横截面梁与预制横梁连接形成三角形支柱。这种方法只能构建预定义几何形状的支柱型结构,因此缺乏灵活性^[31]。增材制造技术为在轨制造大型部件创造了条件。在太空制造的部件不必考虑发射时的加速度与振动,也不受整流罩尺寸的限制,因此可以以更高的自由度重新优化部件,在空间站制造远超火箭发射条件限制规模的大型天线和天线阵列、反射器、桁架等。

以大型桁架的制造为例,基于现有技术的空间

桁架结构航天器,在轨运行规模区间通常在10~100 m量级。未来太空探索中,大型化、轻质化、高性能、低成本的空间桁架需求广泛;以空间桁架为支撑平台的巨型设施,如超大面积天线、在轨服务平台等,其建成后的几何尺寸将达0.1~10 km量级,且质量超万吨规模,这种结构难以按照现有“地面制备,火箭运输,空间应用”的运营模式实施,但增材制造技术使在轨制造这种大型桁架成为了可能。2012年,NASA提出了千米级空间大型桁架结构的在轨制造概念^[32]。2017年,美国太空制造公司在地面上使用增材制造技术制造了一个37.7 m长的横梁,证明增材制造技术可以制造规模数倍于增材制造机器本身的部件^[29]。

2.3 制造飞行器复杂部件

在飞行器复杂部件的制造方面,相比传统制造技术,增材制造技术在某些情况下更有优势。

2018年,中国发射的嫦娥四号中继星搭载了航天科技集团五院采用增材制造技术研制的多个复杂结构的铝合金结构件,是中国采用增材制造的型号产品首次实现在轨应用。该卫星搭载的增材制造零件采用了拓扑优化构型,大幅降低了零件质量,有效提升了承载比^[33]。

2019年,中国航天科技集团一院通过增材制造技术实现了首批长征五号运载火箭芯级捆绑支座的批生产。这是中国首个采用全增材制造技术制造的m级关键承力构件。此前制造这一部件的方法是材料去除量大、加工周期长的锻造再机械加工高强度钢的方式成型。而增材制造技术采用具有更高比强度的钛合金材料,利用激光同步送粉增材制造技术,实现制造部件的整体成形。该产品经过检测,整体的综合性能已经达到了此前锻件的水平,且实现了较大的质量减轻,较原设计减重30%^[34]。

2021年,长征二号F遥十二运载火箭使用了航天六院利用增材制造技术制造的发动机加强肋。通过增材制造技术替代了过去的熔膜精密铸造工艺,使加强肋制造周期缩短了75%,合格率由不足20%提升至98%,成本降低了30%^[35]。此外,航天六院使用增材制造技术后大大降低了整流栅的生产流程与周期,生产流程从原先的19个缩短至3个,生产周期从20 d缩短为2 d,同时也显著提升了产品的合格率^[36]。

目前,NASA正开发更轻、更高效的液体火箭发动机部件,以用于未来的月球、火星探测任务。NASA使用增材制造方法来打印燃烧室和喷嘴。增材制造出的铜燃烧室由碳纤维复合材料包裹,与此前的金属材料相比,质量最多可以减轻50%;喷嘴与传统工艺相比,生产时间从2年减少到几个月^[37]。

2.4 宇航员生命健康保障

载人航天工程中,可利用增材制造技术,为宇航员提供生命健康保障。

2014年,Wong和Pfahl^[38]研究了增材制造技术制造ABS热塑手术器械的可能性,为未来在严峻的长期空间任务中可能需要进行的外科手术提供了初步验证。研究发现,增材制造技术制造的器械在执行模拟手术任务的速度上没有实质性的差异。

2018年,阿列维公司与太空制造公司合作,设计了可以在微重力下挤出生物材料和细胞,逐层构建组织的增材制造设备“ZeroG”。Allevi计划在未来使用生物材料增材制造技术来支持宇航员的太空医疗^[39]。

NASA与系统和材料研究公司(systems and materials research corporation, SMRC)合作,将蛋白质、淀粉等营养素以干粉的形式直接送入增材制造设备,在打印喷头中与油或水混合。该计划的最终目的是为在轨飞行的航天员提供精确、个性化的营养品^[40]。2016年,中国航天员训练中心主导的“太空180”试验中也配备了增材制造食物设备^[41]。食物增材制造可以最大限度利用食物的原材料,实现更长时间的食物保存,即产即食的模式可以显著改善太空食品的口感并节约物资供给。

3 未来发展方向

3.1 发展适合载人航天工程材料体系

载人航天工程对增材制造材料的性能有较高的要求。近年来,国内外学者对应用于载人航天工程领域的增材制造材料进行了相关研究。

韩寿波等^[42]对氩气雾化(AA)法、等离子旋转电极(PREP)法等航空航天领域高品质金属粉末材料的制备工艺进行了研究。

近年来,NASA研发了一系列有关在轨增材制造材料的技术。例如,在PEEK丝中加入碳纤维提高材料的整体强度,同时浸渍金纳米粒子以提高碳纤维的性能,提高丝间的结合强度。开发具有金属强度的新型高强度热塑性塑料,从而提高了层间的黏结强度,从而提高构件的强度。此外,NASA还开发了激光烧结金属增材制造技术和电喷雾法,使在轨制造金属部件与光伏产品成为可能^[1]。

如图4所示,2018年,中国科学院研究团队在抛物线失重飞机中完成了国际首次微重力环境下的陶瓷材料立体光刻成形技术试验。该试验突破了以往的粉末材料与丝状材料的劣势。在在轨飞行的微重力环境下,粉末材料难以有效控制,而丝状材料的成型精度和表面光洁度较低。本次试验使用的新型类固态陶瓷膏体材料可在微重力环境中约束精细粉末,可以适应微重力条件^[43]。

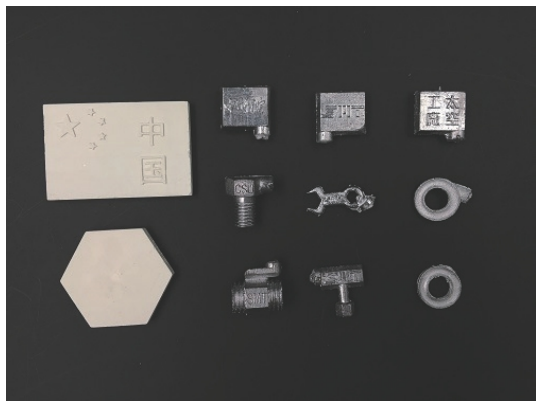


图4 中国科学院进行的微重力陶瓷材料立体光刻成型试验打印样件

Fig. 4 Printing prototype of microgravity ceramic material three-dimensional lithography molding experiment conducted by Chinese Academy of Sciences

面对载人航天工程对制备材料的高标准要求,应完善与发展相应材料的制备技术,例如,探索颗粒细度小、低含氧量、无空心粉、夹杂少的高品质金属粉末材料的制备方案,以用于载人航天工程增材制造。而随着材料性能的改善、新材料的研发,还需发展计算机仿真建模技术,用于选择在轨制造的材料系统,将材料的性能数据作为输入,对打印部件的性能特性进行仿真建模和分析,以确定材料各方面的性能是否适合在空间制造^[44]。

3.2 研究微重力环境对增材制造的影响

太空环境的微重力条件下,流体中的浮力对流、重力沉降、液体压力梯度等现象基本消失,导致流体形态和物理/化学过程等发生显著变化,影响材料的加工及制备过程。此外,粉末状的增材制造材料在微重力环境中难以约束,难以在微重力环境中使用。近年来,一些学者对微重力环境下增材制造材料的性质变化及微重力环境下的增材制造方案进行了研究。

Huang等^[45]研发了一种可以操纵喷射轨迹的金属微液滴喷射装置,用于微重力下的金属微液滴增材制造。该团队利用充电电场对金属液滴进行充电,当液滴进入偏转电场时,以电场力产生的反重力加速度实现反重力飞行,通过适当的充电电压和偏转电压,可以精确地调节其飞行轨迹并最终沉积在目标坐标点上。这一研究为研究空间金属液滴增材制造技术提供了基础。

王震等^[46]开展了熔融沉积成型技术的变重力成形试验研究,研究的结果说明,熔融沉积成型技术在不同重力环境下均具有制成标准试样的能力,空间微重力对成型的性能影响不大,熔融沉积成型技术适用于载人航天工程中的在轨增材。

面对载人航天工程的在轨增材制造要求,未来需要进一步研究微重力环境对增材制造材料的影响,探索微重力环境下的增材制造新工艺。

3.3 发展相关工艺

随着可利用材料的逐渐丰富,可以在空间环境下探索更多、更广泛适用的增材制造工艺,如高精度微尺度结构的制备方法和控制方法,以及大型复杂结构的快速成型技术。除了增材制造工艺外,未来仍需要发展一系列相关工艺,来配合在轨增材制造技术的发展,例如,在制造过程中进行在线监测和闭环反馈、在微重力环境下检测早期缺陷,使设计者能够更好地理解和掌握过程、结构和性能之间的关系,从而更好地控制最终产品地性能。

研究建模、仿真等技术对在轨微重力环境下的增材制造技术同样重要。通过良好的建模仿真和分析,可以在制造前大大优化待建设备的结构和布局。NASA的研究表明,使用高水平的流程设备可以使整体生产成本和生产时间减少30%,生产设置布局节省25%,劳动力使用减少30%,材料的使用优化35%^[47]。

此外,增材制造过程中的材料收缩、伺服误差等都会影响生产精度,生产过程中的传热和内应力也会影响最终产品的完整性。因此,需要为目标产品建立增材制造数据库,为增材制造提供必要的精度保证^[44]。

4 结 论

增材制造技术是未来太空探索就地制造的重要技术手段,也是制造各种航天部件的重要技术。目前,增材制造技术已经在载人航天项目中有较多实际应用,各航天大国也都进行了各种在轨增材制造技术试验。未来,增材制造将在载人航天领域的备件制造、复杂部件制造、大型部件在轨制造等方面发挥重要作用。中国应进一步研究各种适用于载人航天领域增材制造材料的研制。随着中国空间站的建设,未来也应进一步开展更多在轨增材制造试验,为未来的深空载人航天探索及长时间载人航天项目提供技术支持。

参考文献 (References)

- [1] CLINTON JR R G. Overview of NASA initiatives in 3D printing and additive manufacturing[C]//AIRTEC International Congress. Munich: AIRTEC, 2014: 4191.
- [2] 中国运载火箭技术研究院. 3D打印,引领航天制造进入新时代——航天科技一院211厂3D打印技术发展纪实[EB/OL]. (2017-11-06) [2021-10-12]. <http://calt.spacechina.com/n485/n700/c9951/content.html>.
China Academy of Launch Vehicle Technology. 3D print, leading

- aerospace manufacturing into a new era: Documentary on the development of 3D print technology in the 211 factory of the first institute of China aerospace science and technology corporation[EB/OL]. (2017-11-06)[2021-10-12]. <http://cait.spacechina.com/n485/n700/c9951/content.html>(in Chinese).
- [3] 中国宇航学会. 2020年宇航领域科学问题和技术难题发布[EB/OL]. (2020-09-18)[2021-10-12]. <http://www.csaspace.org.cn/n2489262/n2489292/c3016456/content.html>. Chinese Society of Astronautics. Scientific and technical problems in the field of astronautics in 2020 were published [EB/OL]. (2020-09-18)[2021-10-12]. <http://www.csaspace.org.cn/n2489262/n2489292/c3016456/content.html>(in Chinese).
- [4] 杨洋, 宋昌江, 费磊. 熔融沉积快速成型技术与三维扫描技术的结合应用[J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(12): 39-43. YANG Y, SONG C J, FEI L. Application of fused deposition rapid prototyping technology and 3D scanning technology[J]. Techniques of Automation and Applications, 2014, 33(12): 39-43(in Chinese).
- [5] 方禄辉. 基于FDM的ABS类3D打印材料的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 2-3. FANG L H. Research on 3D-printed materials of ABS based on FDM[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 2-3(in Chinese).
- [6] 陈硕平, 易和平, 罗志虹, 等. 高分子3D打印材料和打印工艺[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 54-59. CHEN S P, YI H P, LUO Z H, et al. The 3D printing polymers and their printing technologies[J]. Materials Reports, 2016, 30(7): 54-59(in Chinese).
- [7] 李涤尘, 鲁中良, 田小永, 等. 增材制造——面向航空航天制造的变革性技术[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 525387. LI D C, LU Z L, TIAN X Y, et al. Additive manufacturing-revolutionary technology for leading the aerospace manufacturing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 525387(in Chinese).
- [8] 王功, 赵伟, 刘亦飞, 等. 太空制造技术发展现状与展望[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(4): 95-105. WANG G, ZHAO W, LIU Y F, et al. Review of space manufacturing technique and developments[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(4): 95-105(in Chinese).
- [9] Leonardo Company. POP3D the 3D printer for use in space [EB/OL]. (2015-09-09)[2021-10-12]. <https://www.leonardocompany.com/en/news-and-stories-detail/-/detail/pop-3-d-stampante-spazio-printer-space>.
- [10] 李金翠, 迟百宏, 王丹, 等. 空间在轨增材制造技术进展与电子功能件的增材制造实现[J]. 工业技术创新, 2018, 5(4): 46-49. LI J C, CHI B H, WANG D, et al. Development of space on-orbit additive manufacturing technology and additive manufacturing realization of electronic functional components[J]. Industrial Technology Innovation, 2018, 5(4): 46-49(in Chinese).
- [11] 央视新闻客户端. 新飞船搭载“3D打印机”我国成功完成首次太空“3D打印”[EB/OL]. (2020-05-07)[2021-10-12]. <http://m.news.cctv.com/2020/05/07/ARTIOwn5Q3O0fOK3R947OZo1200507.shtml>. CCTV. China successfully completed first space “3D Print” on new spaceship[EB/OL]. (2020-05-07)[2021-10-12]. <http://m.news.cctv.com/2020/05/07/ARTIOwn5Q3O0fOK3R947OZo1200507.shtml>(in Chinese).
- [12] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32-55. GU D D, ZHANG H M, CHEN H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 32-55(in Chinese).
- [13] RHIAN J. NASA, aerojet rocketdyne test 3D printed rocket engine component [EB/OL]. (2013-07-12)[2021-10-12]. <http://www.americaspace.com/2013/07/12/nasa-aerojet-rocketdyne-test-3d-printed-rocket-engine-component/>.
- [14] 刘一丹. 我国首次实现航天发动机涡轮轴转子3D打印[J]. 军民两用技术与产品, 2016(3): 18. LIU Y D. China realized 3D printing of turboshaft rotors for aerospace engines for the first time[J]. Dual Use Technologies & Products, 2016(3): 18(in Chinese).
- [15] TANCOGNE D T, SPIERINGS A B, MOHR D. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading[J]. Acta Materialia, 2016, 116(17): 14-28.
- [16] LATTURE R M, RODRIGUEZ R X, HOLMES JR L R, et al. Effects of nodal fillets and external boundaries on compressive response of an octet truss[J]. Acta Materialia, 2018, 149(9): 78-87.
- [17] FILIPPO M, GIUSEPPE V, SCIPPA A, et al. Finite element modelling of wire-arc-additive-manufacturing process[J]. Procedia Cirp, 2016, 55(17): 109-114.
- [18] ASALA G, KHAN A K, ANDERSSON J, et al. Microstructural analyses of ATI 718Plus, produced by wire-ARC additive manufacturing process[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2017, 48(9): 4211-4228.
- [19] 何智. 超声冲击电弧增材制造钛合金零件的组织性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 5-6. HE Z. Effect of ultrasonic impact on the properties of arc additive manufacturing of titanium alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 5-6 (in Chinese).
- [20] 刘金平. Inconel625合金GTAW电弧增材制造工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 3-4. LIU J P. Research on Inconel625 alloy fabricated by GTAW arc additive manufacturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 3-4(in Chinese).
- [21] REISGEN U, SHARMA R, OSTER L. Plasma multiwire technology with alternating wire feed for tailor-made material properties in wire and arc additive manufacturing[J]. Metals, 2019, 9(7): 745-758.
- [22] 陈永雄, 罗政刚, 梁秀兵, 等. 热喷涂技术的装备应用现状及发展前景[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 12-18. CHEN Y X, LUO Z G, LIANG X B, et al. Development status and prospect on equipment application of thermal spray technology[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(4): 12-18(in Chinese).
- [23] FATERI M, GEBHARDT A, THUEMMLER S, et al. Experimental investigation on selective laser melting of glass[J]. Physics Procedia, 2014, 56(6): 357-364.
- [24] 李雯, 徐可宁, 黄勇, 等. 基于SLM的模拟月壤原位成形技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(10): 1931-1937. LI W, XU K N, HUANG Y, et al. In-situ forming of lunar regolith simulant via selective laser melting[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(10): 1931-1937(in Chinese).
- [25] BARMATZ M, STEINFELD D, ANDERSON M, et al. 3D microwave print head approach for processing lunar and mars regolith[C]//Lunar and Planetary Science Conference. Maryland: USRA,

- 2014, 1777: 1137-1138.
- [26] 孙一萌, 陈盛贵, 花开慧, 等. 模拟月壤原位增材制造技术研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2021, 15(2): 178-185.
SUN Y M, CHEN S G, HUA K H, et al. A progress of the research on in-situ additive manufacturing technology of lunar regolith simulant[J]. *Materials Research and Application*, 2021, 15(2): 178-185 (in Chinese).
- [27] LIU M, TANG W, DUAN W, et al. Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5): 5829-5836.
- [28] CIRILLO W, AASENG G, GOODLIFF K, et al. Supportability for beyond low earth orbit missions[C]//AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. Reston: AIAA, 2011: 7231-7242.
- [29] PATANE S, JOYCE E R, SNYDER M P, et al. Archinaut: In-space manufacturing and assembly for next-generation space habitats [C]//AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Reston: AIAA, 2017: 5227-5236.
- [30] National Research Council. 3D printing in space[M]. Washington, D. C.: National Academies Press, 2014: 39.
- [31] TAMINGER K M B, HAFLEY R A, DICUS D L. Solid freeform fabrication: An enabling technology for future space missions [C]//2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 2002.
- [32] 杨杰, 黎静, 吴文杰, 等. 空间大型桁架在轨增材制造技术的研究现状与展望[J]. *材料导报*, 2021, 35(3): 3159-3167.
YANG J, LI J, WU W J, et al. Research status and prospect of on-orbit additive manufacturing technology for large space truss[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(3): 3159-3167 (in Chinese).
- [33] 中国航天科技集团有限公司. 航天科技自主研制3D打印产品首次实现在轨应用[EB/OL]. (2018-07-23)[2021-10-12]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c9280766/content.html>.
China Aerospace Science and Technology Corporation. 3D printing products independently developed by China aerospace science and technology corporation have applied in orbit for the first time [EB/OL]. (2018-07-23) [2021-10-12]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c9280766/content.html> (in Chinese).
- [34] 中国航天报. 全3D打印航天关键承力件通过飞行考核[EB/OL]. (2020-05-22) [2021-10-12]. <http://www.spacechina.com/n25/n2014789/n2014804/c2922144/content.html>.
China Space News. 3D printed aerospace key bearing parts have passed the flight examination[EB/OL]. (2020-05-22) [2021-10-12]. <http://www.spacechina.com/n25/n2014789/n2014804/c2922144/content.html> (in Chinese).
- [35] 陕西日报. 航天六院突破航天液体动力领域3D打印全流程技术——30余种产品应用于长征系列火箭50余次发射和飞行试验[EB/OL]. (2021-08-16) [2021-10-12]. <http://gxt.shaanxi.gov.cn/zsxx/69307.jhtml>.
Shaanxi Daily. The sixth academy of China aerospace sciency adn industry corporation made breakthroughs in the whole process of 3D print technology in the field of liquid power—More than 30 products have been applied to more than 50 launches and flight tests of the long march rocket series [EB/OL]. (2021-08-16) [2021-10-12]. <http://gxt.shaanxi.gov.cn/zsxx/69307.jhtml> (in Chinese).
- [36] 中国青年报. 图纸变现实!3D打印技术“打印”航天装备新蓝图[EB/OL]. (2021-12-01) [2022-01-11]. http://news.cyol.com/gb/articles/2021-12/01/content_NnxWgT8WV.html.
China Youth Daily. Drawings become reality! 3D printing technology “prints” the new blueprint of space equipment[EB/OL]. (2021-12-01) [2022-01-11]. http://news.cyol.com/gb/articles/2021-12/01/content_NnxWgT8WV.html (in Chinese).
- [37] NASA. Rapid analysis and manufacturing propulsion technology (RAMPT) [EB/OL]. (2020-06-02) [2021-10-12]. https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/game_changing_development/projects/RAMPT.
- [38] WONG J Y, PFAHNL A C. 3D printing of surgical instruments for long-duration space missions[J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 2014, 85(7): 758-763.
- [39] NASA. 3D生物打印机将赴国际空间站, 材料是太空生物打印最大挑战[EB/OL]. (2018-08-16) [2021-10-12]. <https://tech.qq.com/a/20180816/038736.html>.
NASA. 3D bioprinter is headed to the international space station, while material is the biggest challenge [EB/OL]. (2018-8-16) [2021-10-12]. <https://tech.qq.com/a/20180816/038736.html> (in Chinese).
- [40] NASA. Deep-space food science research improves 3D-printing capabilities[EB/OL]. (2019-10-01) [2021-10-12]. https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2019/ip_2.html#:~:text=Systems%20and%20Materials%20Research%20Corporation%20%28SMRC%29%20proposed%20building,micronutrients%2C%20flavor%2C%20and%20aroma%20delivered%20by%20inkjet%20technology.
- [41] 光明日报. “太空180”试验成功 我们离地外星球基地还远吗?[EB/OL]. (2016-12-16) [2021-10-12]. <http://news.cctv.com/2016/12/16/ARTIGve5vHN0TGWeeZQP1A4S161216.shtml>.
Guangming Daily. “Space 180” test succeeded. Are we far from an extraterrestrial base?[EB/OL]. (2016-12-16) [2021-10-12]. <http://news.cctv.com/2016/12/16/ARTIGve5vHN0TGWeeZQP1A4S161216.shtml> (in Chinese).
- [42] 韩寿波, 张义文, 田象军, 等. 航空航天用高品质3D打印金属粉末的研究与应用[J]. *粉末冶金工业*, 2017, 27(6): 44-51.
HAN S B, ZHANG Y W, TIAN X J, et al. Research and application of high quality 3D printing metal powders for aerospace use[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2017, 27(6): 44-51 (in Chinese).
- [43] 中国科学院空间应用工程与技术中心. 空间应用中心完成国际上首次微重力环境下陶瓷材料立体光刻制造技术试验[EB/OL]. (2018-06-20) [2021-10-12]. http://www.csu.cas.cn/xwzx/tpxw/201806/t20180620_5028655.html.
Technology and Engineering Center for Space Utilization, China Academy of Sciences. Technology and engineering center for space utilization has completed the first test of stereo lithography manufacturing technology for ceramic materials in microgravity environment[EB/OL]. (2018-06-20) [2021-10-12]. http://www.csu.cas.cn/xwzx/tpxw/201806/t20180620_5028655.html (in Chinese).
- [44] ZHANG Y Y, JIN Z J, ZHANG W. Application of 3D printing in future manned space exploration[J]. *Materials Science Forum*, 2020(982): 92-97.
- [45] HAUNG J, LUO J, ZHANG K, et al. Development of a metal micro-droplet ejecting equipment for manipulation jetting trajectory[C]//2018 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). Piscataway: IEEE Press, 2018: 101-104.
- [46] 王震, 李秀杰, 巩维艳, 等. FDM变重力成形试验研究[J]. *新技术新工艺*, 2018(12): 33-36.

WANG Z, LI X J, GONG W Y, et al. Experimental research on fused deposition modeling in variable gravity forming[J]. *New Technology & New Process*, 2018(12): 33-36(in Chinese).

[47] OWENS A, DEWECK O. Systems analysis of in-space manufactur-

ing applications for international space station in support of the evolvable mars campaign[C]//Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics SPACE Forum. Reston: AIAA, 2016.

Application and prospect of additive manufacturing technology in manned space engineering

LIU Yang^{1,*}, ZHOU Jianping², ZHANG Xiaotian¹

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. China Manned Space Agency, Beijing 100094, China)

Abstract: In recent years, the application of additive manufacturing technology in manned space engineering has developed rapidly. This paper summarizes the additive manufacturing technologies used in manned space engineering, such as fused deposition modeling technology, selective laser melting technology, wire and arc additive manufacturing technology, thermal spraying additive technology, lunar soil additive manufacturing technology and their application fields. This paper also summarizes the application fields of additive manufacturing technology in on-orbit manufacturing of aircraft replacement parts, manufacturing of large truss and other components that are difficult to be manufactured or launched on the ground, and manufacturing of complex aircraft components. Finally, this study makes the case that in order to implement additive manufacturing in the future, a material system appropriate for manned space engineering must be developed. Additive manufacturing in a microgravity environment should be studied. Also, relevant processes should be developed in the future.

Keywords: manned space; additive manufacturing; spacecraft; in-orbit manufacturing; space applications

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0170

纳米酚醛气凝胶材料高温热物性参数辨识方法

张红军*, 李海群, 康宏琳, 罗金玲

(北京空天技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 临近空间高超声速飞行器大面积区域可能广泛采用纳米酚醛气凝胶 (IPC) 材料, 获取高超声速气动加热作用下 IPC 材料的高温热物性参数, 对于高超声速飞行器热防护系统的精细化设计具有重要的意义。考虑烧蚀效应的材料高温热物性参数辨识方法研究, 基于 Ablation Workshop 烧蚀热响应标准算例对高温热物性参数辨识方法进行验证, 计算结果表明: 热物性参数辨识分析方法计算精度较高; 通过带分层温度/烧蚀传感器的 IPC 材料电弧风洞试验, 得到典型来流状态下不同厚度 IPC 材料内部的温度分布及热解厚度分布数据, 通过辨识获得高温烧蚀条件下 IPC 材料热导率随温度的变化关系, IPC 材料原始层热导率在温度低于 800 K 时随温度缓慢上升 (热导率维持在 0.1 W/(m·K) 以下), 之后材料热解使得热导率发生突变, 碳化层热导率在温度高于 800 K 时随着温度的上升急剧增大, 到 1300 K 左右时上升到 0.17 W/(m·K)。

关键词: 纳米酚醛气凝胶; 高温热物性参数; 辨识方法; 分层温度传感器; 烧蚀传感器
中图分类号: V19

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0092-08

树脂基烧蚀类热防护材料具有价格低廉、耐烧蚀、抗热震、成型面积大、工艺周期短、加工性能好等优点, 被广泛应用于弹道导弹弹头、飞船及返回式卫星等再入飞行器的热防护。近年来, 随着材料技术的飞速发展, 通过纤维织物及树脂基体的改性和微结构设计、非均匀密度的梯度功能结构设计、表面高温可陶瓷化设计等手段, 可以在减小烧蚀材料热导率及密度的同时提高材料的抗剪切和耐烧蚀性能, 显著提高树脂基复合材料的防隔热一体化综合性能, 基本能够满足长时间临近空间高超声速飞行器大面积区域的零/微烧蚀热防护需求, 目前树脂基复合材料已经成为临近空间高超声速飞行器大面积区域热防护的重要备选材料之一^[1-3]。

纳米酚醛气凝胶 (inorganic-organic hybrid phenolic composite, IPC) 材料是一类具有纳米多孔结构的轻质高效防隔热一体化烧蚀材料, 已被广泛应用于临近空间高超声速飞行器大面积区域的热防护^[4-6]。IPC 材料属于烧蚀型复合材料, 该材料在热解/烧蚀

过程中发生热解反应, 原始层材料中的树脂聚合物发生热分解反应, 热解反应产生大量的气体, 并最终形成多孔的碳化层结构; 伴随着这一复杂物理化学过程, 材料的热导率、比热容、密度等热物性参数会发生明显的变化 (热导率通常增大, 隔热性能降低), 并会显著影响烧蚀材料的结构热响应计算精度, 直接影响飞行器热防护系统设计。获取准确的 IPC 材料热物性参数随温度的变化规律对于飞行器热防护系统温度计算及精细化设计具有重要的意义。

烧蚀热防护系统在气动加热作用下的氧化烧蚀现象是流动/传热/传质/化学反应等多场耦合的复杂物理化学过程, 伴随着材料的热解和烧蚀, 烧蚀材料的热导率、比热容等热物性参数会发生显著的非线性变化, 并且热物性参数的变化规律与气动加热条件紧密相关, 目前广泛采用的瞬态激光脉冲法、热探针法等传统方法^[7-10] 只能应用于非烧蚀类材料, 不能反应动态烧蚀过程中复杂物理化学过程对高温热物性参数的影响, 难以满足高超声速飞行

收稿日期: 2021-04-06; 录用日期: 2021-06-11; 网络出版时间: 2021-07-06 10:45

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210706.1005.001.html

基金项目: 国家自然科学基金 (11802296); 装备预研领域基金 (61402060301)

*通信作者. E-mail: zhjbuaa@126.com

引用格式: 张红军, 李海群, 康宏琳, 等. 纳米酚醛气凝胶材料高温热物性参数辨识方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 92-99.
ZHANG H J, LI H Q, KANG H L, et al. High temperature thermal conductivity estimation method of inorganic-organic hybrid phenolic composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 92-99 (in Chinese).

器烧蚀型热防护系统的精细化设计要求。

目前,反问题分析方法已成为一种根据试验数据计算材料/环境参数、改善模型预报精度的有力工具,并且逐渐应用到热物性参数或壁面热环境辨识等工程实际问题中。由于烧蚀传热方程的复杂性,目前反问题技术领域中的研究工作主要是针对非烧蚀材料^[11-15],针对烧蚀材料的反问题研究主要集中在理论分析方面,在实际工程问题中的应用研究相对较少。Hosein 等^[16]基于热解层模型及优化算法发展了烧蚀材料的高温热物性参数辨识方法。Chen 和 Milos^[17]、Zien 和 Wei^[18]、Mahzari 和 Braun^[19]对于火星科学实验室(Mars Science Laboratory, MSL)再入阶段进行了热结构分析,并根据测量得到的温度数据计算了热防护材料不同位置处的热流密度大小。Kanevce 等^[20]利用地面烧蚀试验的温度测量数据对酚醛材料的热物性参数和材料热解反应系数进行了辨识;文献[21-23]建立了考虑隔热材料烧蚀情况下的表面热流反演辨识算法,其中烧蚀模型分别采用热解面和热解层模型,并利用试验数据进行了验证。

本文针对考虑烧蚀效应的材料高温热物性参数辨识方法进行了研究,基于热解层模型发展了典型烧蚀材料的传热正问题计算和高温热物性参数反问题辨识分析方法,并基于典型算例进行了初步验证;在此基础上,通过带分层温度/烧蚀传感器的 IPC 材料电弧风洞试验,获得了典型来流状态下不同厚度 IPC 材料内部的温度分布及热解厚度分布数据,并通过辨识掌握了高温烧蚀条件下 IPC 材料热导率随温度的变化关系,为临近空间高超声速飞行器大面积区域的热防护精细化设计提供支撑。

1 考虑烧蚀效应的热物性参数辨识方法

1.1 烧蚀热解层模型

隔热材料的烧蚀热解是一个复杂的物理化学过程,本文利用 Arrhenius 函数模拟热解反应。如图 1 所示,左边界 S_1 为材料受热边界,右边界 S_2 为隔热材料绝热边界。

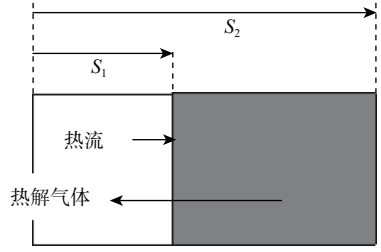


图 1 热解层烧蚀模型

Fig. 1 Ablation model of pyrolysis layer

为热解反应吸收热; T_{surf} 为材料表面温度; T_{envir} 为环境温度; ε 为材料表面发射率; σ 为 Boltzmann 常数。

对热解气体和固体材料,存在质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \frac{\partial \dot{m}_g}{\partial x} = -\dot{W}_g = (\rho_v - \rho_c) \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (2)$$

式中: \dot{W}_g 为热解气体质量流率; $\alpha = \frac{1 - \rho_c / \rho_s}{1 - \rho_c / \rho_v}$ 为材料原始层和碳化层密度定义的热解率参数; ρ_v 和 ρ_c 分别为材料原始层和碳化层密度。

热解热平衡方程:

$$\dot{W}_g \Delta H_p = (Q_p - h_s + h_g)(\rho_v - \rho_c) \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (3)$$

$$h_s = \frac{\rho_v H_v - \rho_c H_c}{\rho_v - \rho_c} \quad (4)$$

式中: 下标 v 表示材料原始层参数; 下标 c 表示材料碳化层参数; H_v 和 H_c 分别为材料原始层和碳化层焓值; h_g 为热解气焓值。热解反应速率采用 Arrhenius 函数形式表示为

$$\frac{\partial \rho_{si}}{\partial t} = -A_i \rho_{vi} \left(\frac{\rho_{si} - \rho_{ci}}{\rho_{vi}} \right)^{n_i} \exp \left(\frac{-E_i}{RT} \right) \quad (5)$$

式中: A_i 为第 i 种组份的热解反应速率指前系数; n_i 为第 i 种组份的化学反应级数; ρ_{si} 为材料中第 i 种组分固体密度; ρ_{ci} 和 ρ_{vi} 分别为第 i 种组分的原始层和碳化层密度; R 为摩尔气体常数; E_i 为第 i 种组份的热解反应活化能。

热解区材料热物性参数随密度变化的关系式可按 $k = k_c + (k_v - k_c)\alpha$, $c = c_c + (c_v - c_c)\alpha$ 进行选取。

采用变几何域的有限控制体积法来对基于热解层模型的烧蚀传热方程进行数值求解,由于计算域几何外形随时间变化,计算网格相应随时间变化,在离散方程中需考虑由于控制体边界运动而引起的控制体内能变化项。

如图 2 所示的典型控制体,“ $i-1$ ”、“ i ”、“ $i+1$ ”为网格节点,阴影部分为对应节点“ i ”的控制体,箭头表示控制体边界“ w ”和“ e ”运动方向,此时简单传热方程的半离散形式为

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w^e + (\rho C_p T u)_e - (\rho C_p T u)_w = \frac{d}{dt} \left(\int_w^e \rho C_p T dx \right) \quad (6)$$

式中: C_p 为材料比热容。

热解层烧蚀模型所对应的数学模型为

$$\begin{cases} \rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{m}_g C_g \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \dot{W}_g \Delta H_p \\ T(x, 0) = T_0 \\ -k_s \frac{\partial T}{\partial x} = Q(t) - \varepsilon \sigma (T_{\text{surf}}^4 - T_{\text{envir}}^4) & x = S_1(t) \\ k_s \frac{\partial T}{\partial x} = 0 & x = S_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ_s 为固体材料密度; C_s 为固体材料比热容; k_s 为固体材料热导率; C_g 为热解气体比热容; $Q(t)$ 为材料表面热流密度; \dot{m}_g 为热解气体质量流率; $\dot{W}_g \Delta H_p$

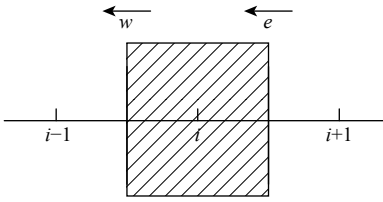


图2 变几何域的控制体

Fig. 2 Control volume of variable geometric domain

与固定几何域下的方程相比,方程左端的后2项为新增项,表示由于控制体边界运动而引起的控制体内能的变化, u 为控制体边界的运动速度。将烧蚀传热控制方程离散后,采用牛顿迭代法进行求解,具体参见文献[24]。

1.2 高温热物性参数辨识方法

导热系数辨识问题是在碳化层与原始材料层导热系数未知的情况下,由防热层中的温度测量信息、外边界 S_1 位置测量信息及表面热流 $Q(t)$ 辨识各层导热系数。将烧蚀传热反问题转化为优化问题,即选取合适的 k_c 、 k_v 使目标函数达极小,而传热模型则视为对未知参数的约束。利用拉格朗日乘数法将辨识问题转化为式(7)目标函数达极小的无约束优化问题:

$$J = \int_0^{t_f} \sum_{m=1}^n [T(x_m, k_c, k_v, t) - \tilde{T}(x_m, t)] dt + \int_0^{t_f} \int_{S_1(t)}^{S_2(t)} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right] - \dot{W}_g \Delta H_p + \dot{m}_p C_g \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} \right) \lambda(x, t) dx dt \quad (7)$$

式中: λ 为伴随变量; $T(x_m, k_c, k_v, t)$ 为测点温度历程的计算值; \tilde{T} 为相应的实测值; S_1 、 S_2 为边界位置。对式(7)做分部积分,代入式(7)中的相应边界条件后,再做变分,可知为使式(7)中的目标函数达极小,伴随变量需满足如下伴随方程:

$$\begin{cases} k_s \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} - C_g \frac{\partial \dot{m}_g \lambda}{\partial x} + \rho_s C_s \frac{\partial \lambda}{\partial t} + 2(T - \tilde{T})\delta(x - x_m) = 0 \\ \lambda(x, t_f) = 0 \\ k_s \frac{\partial \lambda}{\partial x} - \dot{m}_p C_g \lambda - \rho_s C_s \lambda x' = 0 & x = S_1(t) \\ k_s \frac{\partial \lambda}{\partial x} - \dot{m}_p C_g \lambda - \rho_s C_s \lambda x' = 0 & x = S_2(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_m 为作为辨识条件的温度测点的坐标; x' 为边界处的烧蚀后退速率。

目标函数对 k 的梯度为

$$\frac{\partial J}{\partial k_s} = - \int_0^{t_f} \int_{S_1(t)}^{S_2(t)} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} dx dt \quad (9)$$

材料热物性参数随密度变化的关系式可按 $k = k_c + (k_v - k_c)\alpha$, $c = c_c + (c_v - c_c)\alpha$ 进行选取,其中 $\alpha = \frac{1 - \rho_c / \rho_s}{1 - \rho_c / \rho_v}$ 。 k_c 、 k_v 随温度变化,采用分段线性函数形式。

在各区间取线性插值函数,当 $T \in [T_i, T_{i+1}]$ 时:

$$k(T) = \frac{k_{i+1} - k_i}{T_{i+1} - T_i} (T - T_i) + k_i = k_{i+1} \frac{T - T_i}{T_{i+1} - T_i} + k_i \frac{T_{i+1} - T}{T_{i+1} - T_i} = \sum_{i=1}^N k_i \varphi_i(T) \quad (10)$$

式中: T_i 、 T_{i+1} 为相邻的温度分区; k_i 、 k_{i+1} 为相邻温度分区所对应的材料热导率; φ_i 为相邻温度分区的函数。

目标函数的导数可写为

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial k_{ci}} = - \int_0^{t_f} \int_0^L \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \varphi_{ci}(T) (1 - \alpha) dx dt \\ \frac{\partial J}{\partial k_{vi}} = - \int_0^{t_f} \int_0^L \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \varphi_{vi}(T) \alpha dx dt \end{cases} \quad (11)$$

由此梯度出发即可进行后续的优化计算。

如图3所示,采用伴随方程法反演烧蚀材料高温热物性参数的计算流程,其中材料的热物性参数表示为位置和时间的函数,基于初始热物性参数求解烧蚀热响应正问题,计算材料内部测点处的温度;然后基于计算温度和实际测量温度来求解温度灵敏度方程,采用共轭梯度法获得材料热导率和比热容的修正量,同时基于测点处的温度误差计算辨识准则函数;如果准则函数满足误差要求时结束计算,否则就利用修正量来更新热物性参数,进行下一步的迭代计算,直到误差准则函数满足要求。

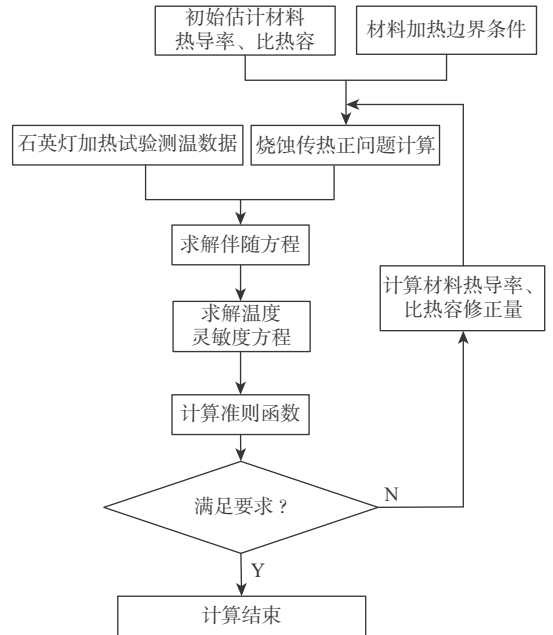


图3 基于烧蚀传热逆问题的高温热物性参数辨识流程

Fig. 3 Flowchart of thermophysical parameter identification based on inverse problem of ablation heat transfer

2 高温热物性辨识方法验证

基于Ablation Workshop提供的烧蚀热响应标准算例^[25],针对考虑烧蚀效应的高温热物性参数辨识反问题分析方法进行初步验证。所选取的材料

为烧灼热响应标模算例(theoretical ablative composite for open test, TACOT), 该材料随温度变化的物性参数在文献 [25]中有详细给出。计算条件如下:

- 1) 材料: TACOT, 厚度 50 mm。
 - 2) 初始条件: 温度 $T=298\text{ K}$ 。
 - 3) 温度场边界条件: 顶部 $T=1\ 644\text{ K}$, 底部绝热。
- 表 1 为树脂基的热解反应参数。

表 1 热解反应参数

Table 1 Pyrolysis reaction parameters

反应	$\rho_{vi}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_{ci}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	A_i/s^{-1}	$(E_i\cdot R^{-1})/\text{K}$	n_i	T/K
A	300	0	1.20×10^4	8 556	3	333.33
B	900	600	4.48×10^9	20 440	3	555.6

以材料内部温度响应来作为辨识条件, 设热导率初值为 0.1, 图 4 为计算所得温度与试验结果的对比, 材料热导率初值较小使得内部测点温度明显低于测量值。

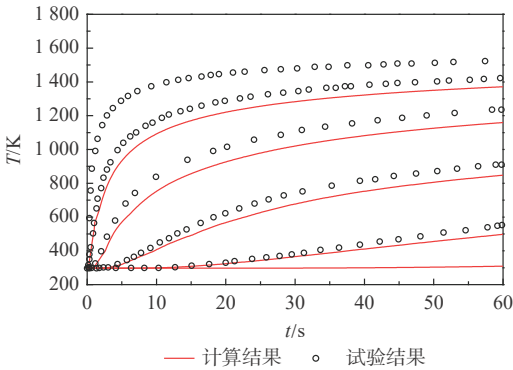


图 4 基于辨识初值热导率的温度场计算结果对比

Fig. 4 Comparison of temperature field between ablation model of pyrolysis layer and test based on initial value of thermal conductivity

经过迭代优化计算可得热导率, 图 5 为测点处的误差函数收敛曲线, 迭代约 100 步后误差曲线基本变平。图 6 为辨识温度与测量结果的对比, 可以看到辨识温度和测点温度符合的很好。

表 2 和表 3 分别为材料原始层和碳化层热导率

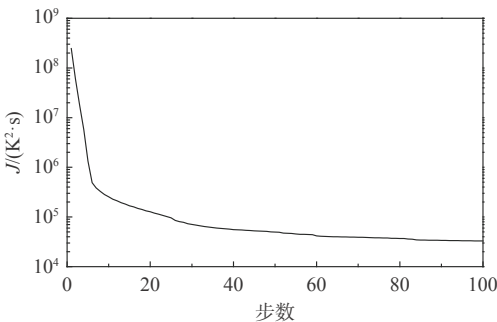


图 5 测点误差函数收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of error function of measuring point

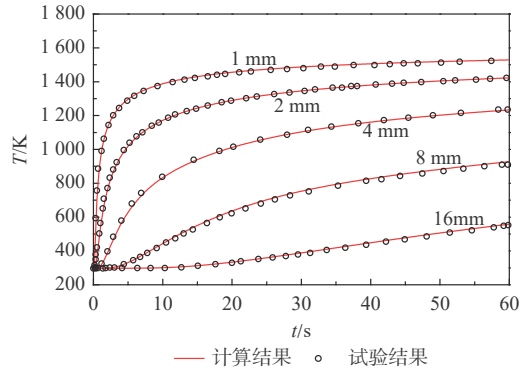


图 6 基于辨识热导率的温度场计算结果对比

Fig. 6 Comparison of temperature field between ablation model of pyrolysis layer and test based on identification value of thermal conductivity

表 2 辨识所得原始层热导率参数

Table 2 Thermal conductivity obtained by identification method (original layer)

温度/K	$k_v/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$		相对误差/%
	辨识值	真值	
255.6	0.370	0.397 5	6.91
444.6	0.420	0.416 2	0.91
644.6	0.472	0.469 8	0.47
1 111.6	0.565	0.523 4	7.95
1 667.6	0.317	0.697 8	54.6

表 3 辨识所得碳化层热导率参数

Table 3 Thermal conductivity obtained by identification method (carbonized layer)

温度/K	$k_c/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$		相对误差/%
	辨识值	真值	
255.6	0.1	0.397 5	74.8
444.6	0.1	0.416 2	75.9
644.6	0.315	0.469 8	32.9
1 111.6	0.525	0.523 4	0.31
1 667.6	0.604	0.605 0	0.17

的辨识值与真值对比结果, 由于低温段材料未热解, 材料内部温度对于碳化层热导率不敏感, 低温段碳化层辨识精度低, 原始层的热导率辨识精度高; 高温段材料热解度较高, 材料内部温度对于原始层热导率不敏感, 高温段材料热导率辨识精度较低, 碳化层热导率辨识精度高。但由于原始层高温热导率和碳化层低温热导率基本不影响烧灼热防护系统的热响应计算精度, 目前的材料高温热物性参数辨识方法能够应用于工程实际问题。

3 试验结果与分析

带分层温度/烧蚀传感器的 IPC 材料电弧风洞热考核试验在高焓电弧风洞中完成, 试验获取了典型来流状态下不同厚度 IPC 材料内部的温度分布及热解厚度分布数据, 为开展考虑烧蚀效应的 IPC 材料热物性参数辨识奠定基础。

3.1 热考核试验件

为了获得不同厚度条件下 IPC 材料的热解厚度演化特征及其对防隔热特性的影响规律,本次电弧风洞的试验件为 2 种厚度的 IPC 隔热层+铝合金背板,试验件的尺寸为 150 mm×150 mm, IPC 材料厚度分别为 15 mm 和 20 mm,铝合金板厚度为 5 mm。为了测量试验条件下 IPC 材料热解厚度及其内部测点温度随时间的变化规律,试验件中心区域布置一对分层/烧蚀传感器,具体试验件外形示意图如图 7 所示。由于不同试验件的热防护材料层的厚度不一致,相配套的分层/烧蚀传感器的敏感芯元件尺寸也根据材料厚度发生相应的变化。分层温度传感器内部布置 4 个测温热电偶,距离材料表面的距离分别为 2 mm、4 mm、8 mm、12 mm。

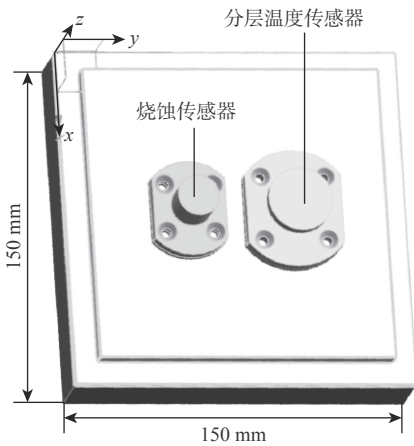


图 7 分层温度/烧蚀传感器平板试验件结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of flat plate test piece with stratified temperature and ablation sensors

试验在 20 MW 高焓电弧风洞中完成,试验持续时间为 500 s,试验来流总焓为 9.65 MJ/kg,试验件表面热流为 1 350 kW/m²。

3.2 IPC 材料高温热物性参数辨识

基于 20 mm 厚 IPC 平板试验件内部的 4 个温度测点开展材料的高温热导率辨识研究,其中高温热物性参数辨识考虑了材料的热解及烧蚀过程,材料烧蚀模型采用热解层模型。辨识过程中以两端的第 1 和第 4 个测点的温度历程来作为边界条件,以中间的第 2 和第 3 个测点的温度历程作为辨识条件。

表 4 为 IPC 材料原始层和碳化层的热导率辨识结果,其中热导率初值给定为 0.05,可以看出,由于低温段材料未热解,材料内部温度对于碳化层热导率不敏感;而高温段材料热解度较高,材料内部温度对于原始层热导率不敏感。故高温段原始层热导率辨识结果与初值很接近,低温段碳化层热导率辨识结果与初值很接近。

图 8 为 IPC 材料原始层和碳化层辨识热导率随温度的变化规律,温度低于 800 K 时原始层辨识热

表 4 IPC 材料辨识热导率

Table 4 Thermal conductivity parameters of IPC by identification method

温度/K	原始层辨识热导率/(W·(m·K) ⁻¹)	碳化层辨识热导率/(W·(m·K) ⁻¹)
300	0.061 80	0.050 00
400	0.064 80	0.050 00
500	0.076 00	0.048 90
600	0.080 10	0.044 70
700	0.082 80	0.046 10
800	0.074 80	0.035 10
900	0.110 00	0.085 60
1 000	0.052 30	0.063 00
1 100	0.052 40	0.064 60
1 200	0.054 70	0.121 94
1 300	0.053 70	0.166 06
1 400	0.051 60	0.163 53
1 500	0.050 00	0.160 43

导率随温度缓慢上升,之后材料热解使得辨识热导率发生突变;温度高于 800 K 时碳化层辨识热导率随着温度的上升急剧增大,温度达 1 300 K 左右时热导率上升到约 0.17 W/(m·K)。

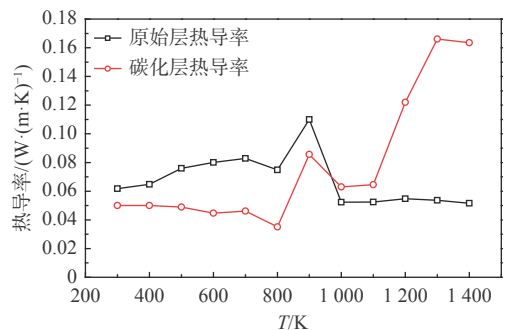


图 8 IPC 材料原始层和碳化层热导率随温度的变化曲线
Fig. 8 Temperature dependence of thermal conductivity of original layer and carbonized layer of IPC

图 9 为基于初值热导率的材料内部第 2、第 3 这 2 个测点的温度对比,由于设定的材料初始热导率比实际热导率要小,材料内部计算温度比测量温度要低得多,最大偏差超过 200 ℃。图 10 为基于辨识热导率的材料内部计算温度与试验温度的对比,可以看出,2 个测点的试验温度与辨识温度吻合较好。

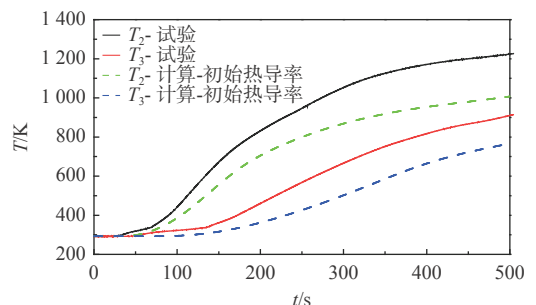


图 9 材料内部测点温度和试验结果的对比
Fig. 9 Comparison of measuring point temperature between calculation and test

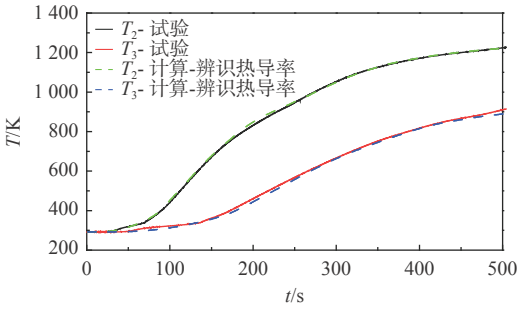


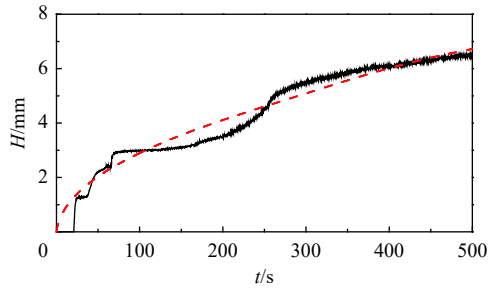
图 10 IPC 材料内部辨识温度和试验结果的对比

Fig. 10 Comparison of internal identification temperature between calculation and test

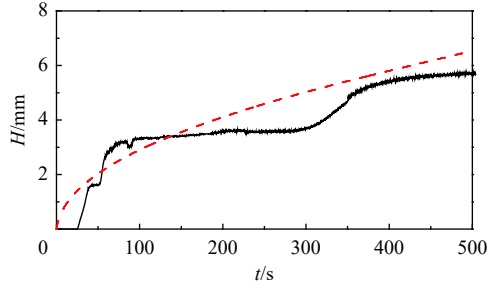
3.3 烧蚀传热正问题分析

基于试验来流及所辨识的材料高温热物性参数开展 IPC 平板试验件的热响应分析, 烧蚀模型采用热解层模型, 材料表面给定实测的冷壁热流和恢复焓, 其中传感器安装位置处的校测热流为 1350 kW/m^2 ; 铝合金背面给定绝热边界条件。

图 11 为 15 mm 和 20 mm 厚试验件内部测点温度与试验结果的对比, 可以看出, 温度计算结果和试验数据的变化趋势和量值吻合较好, 基于辨识高温热物性参数的烧蚀计算精度较好。图 12 给出了 IPC 材料内部的热解厚度预测结果与试验结果的对比, 图 13 为金属背温预测结果与试验结果的对比, 可以看出预测结果与试验结果吻合较好, 目前所辨识出的 IPC 材料高温热物性参数能够有效支撑烧蚀热防护系统的精细化设计。



(a) 15 mm厚度

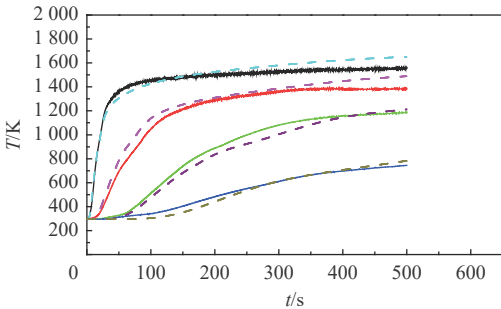


(b) 20 mm厚度

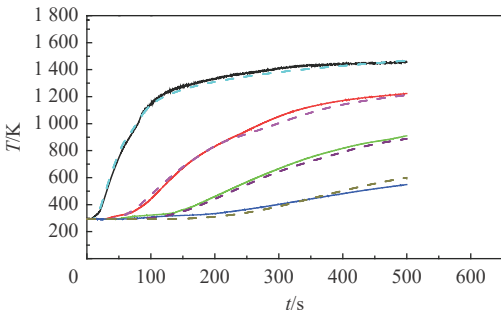
— 热解厚度-试验 - - 热解厚度-计算

图 12 IPC 材料热解厚度对比

Fig. 12 Comparison of pyrolysis thickness of IPC between calculation and test



(a) 15 mm厚度

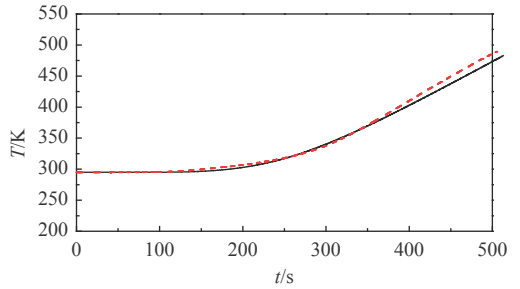


(b) 20 mm厚度

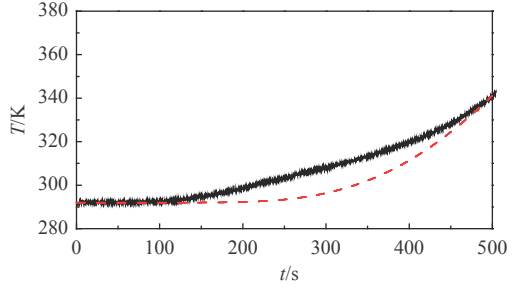
— T_1 -试验 — T_2 -试验 — T_3 -试验 — T_4 -试验
- - T_1 -计算 - - T_2 -计算 - - T_3 -计算 - - T_4 -计算

图 11 IPC 材料内部温度对比

Fig. 11 Comparison of internal temperature of IPC between calculation and test



(a) 15 mm厚度



(b) 20 mm厚度

— 背温-试验 - - 背温-计算

图 13 铝合金背温对比

Fig. 13 Comparison of back temperature of aluminum alloy between calculation and test

4 结 论

1) 基于 Ablation Workshop 烧蚀热响应标准算例的校验结果表明, 所发展的考虑烧蚀效应的材料高温热物性参数辨识方法计算精度较高。

2) 随着烧蚀材料的不断热解, 材料辨识热导率参数会发生显著变化, 其中 IPC 材料原始层热导率

在温度低于 800 K 时随温度缓慢上升,热导率参数保持在 0.1 W/(m·K) 以下,隔热性能较好;材料热解后碳化层热导率随着温度的上升急剧增大,温度到 1 300 K 左右时热导率上升到约 0.17 W/(m·K),材料隔热性能显著下降。

3) 烧蚀正问题计算结果表明,烧蚀材料内部温度及热解厚度参数与试验结果吻合得很好,目前所辨识出的 IPC 材料高温热物性参数能够有效支撑烧蚀热防护系统的精细化设计。

参考文献 (References)

- [1] 程海明,薛华飞,洪长青,等.一种新型低密度低热导率碳/酚醛复合材料的制备与隔热性能研究[J].稀有金属材料与工程,2015,44(1):478-481.
CHENG H M, XUE H F, HONG C Q, et al. Fabrication and heat-insulation of a novel low-density and low thermal conductivity carbon/phenolic composite[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(1): 478-481 (in Chinese).
- [2] 王晓鹏,罗振华,张勃兴,等.轻质隔热纳米孔结构耐烧蚀酚醛材料[J].宇航材料工艺,2014,1:84-88.
WANG X P, LUO Z H, ZHANG B X, et al. Preparation and properties of ablation-resistant phenolic resin with low density, heat insulation and nanopores[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014, 1: 84-88 (in Chinese).
- [3] 张幸红,韩杰才,董世运,等.梯度功能材料制备技术及其发展趋势[J].宇航材料工艺,1999,2:1-5.
ZHANG X H, HAN J C, DONG S Y, et al. Preparing techniques and developing tendency of functionally gradient materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1999, 2: 1-5 (in Chinese).
- [4] 贾献峰,刘旭华,乔文明,等.酚醛浸渍碳烧蚀体(PICA)的制备、结构及性能[J].宇航材料工艺,2016,46(1):77-80.
JIA X F, LIU X H, QIAO W M, et al. Preparation and properties of phenolic impregnated carbon ablator[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2016, 46(1): 77-80 (in Chinese).
- [5] 贾献峰,王际童,龙东辉,等.PICA-X 的制备及其碳化前后性能研究[J].宇航材料工艺,2016,46(6):46-49.
JIA X F, WANG J T, LONG D H, et al. Preparation and properties of PICA-X before and after carbonization[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2016, 46(6): 46-49 (in Chinese).
- [6] 董金鑫,朱召贤,姚鸿俊,等.酚醛气凝胶/碳纤维复合材料的结构调控及性能研究[J].化工学报,2018,69(11):4896-4901.
DONG J X, ZHU Z X, YAO H J, et al. Structural control and properties of phenolic aerogel/carbon fiber composites[J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(11): 4896-4901 (in Chinese).
- [7] 陈昭栋,陈丕,陈芬,等.热针法瞬态测量热物性研究[J].中国测试,2015,41(1):66-70.
CHEN Z D, CHEN P, CHEN F, et al. Transient measurement of thermal physics properties by hot needles method[J]. *China Measurement & Test*, 2015, 41(1): 66-70 (in Chinese).
- [8] 程文龙,张宏泽,赵锐.基于蒙特卡罗反演的热探针导热系数测量方法[J].中国科学技术大学学报,2008,34(8):414-418.
CHENG W L, ZHANG H Z, ZHAO R, et al. A new method of thermal probe for thermal conductivities measurement based on Monte Carlo inversion[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2008, 34(8): 414-418 (in Chinese).
- [9] 程文龙,马然,宋嘉梁.基于随机近似热探针方法的土壤热物性高精度测量系统[J].流体机械,2013,41(8):63-66.
CHENG W L, MA R, SONG J L, et al. Measurement apparatus of soil thermal properties by stochastic approximation thermal probe method with high accuracy[J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41(8): 63-66 (in Chinese).
- [10] 胡芑,陈则韶.量热技术和热物性测定[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009:79-84.
HU P, CHEN Z S. Calorimetry and thermophysical property determination[M]. Hefei: China University of science and Technology Press, 2009: 79-84 (in Chinese).
- [11] HUANG C H, YAN J Y. An inverse problem in simultaneously measuring temperature-dependent thermal conductivity and heat capacity[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1995, 38(18): 3433-3441.
- [12] BECK J V, MCMASTERS R L. Solutions for multidimensional transient heat conduction with solid body motion[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 3757-3768.
- [13] ALIFANOV O M, NENAROKOMOV A V, BUDNIK S A, et al. Identification of thermal properties of materials with applications for spacecraft structures[J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2004, 12(5): 579-594.
- [14] 唐中华,钱炜祺,刘永利.基于伴随方程法的材料热传导系数反演方法[J].计算物理,2010,27(4):561-566.
TANG Z H, QIAN W Q, LIU Y L. Thermal conductivity inversion with adjoint equation method[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2010, 27(4): 561-566 (in Chinese).
- [15] 周焕林,徐兴盛,李秀丽,等.反演二维瞬态热传导问题随温度变化的导热系数[J].应用数学和力学,2014,35(12):1341-1351.
ZHOU H L, XU X S, LI X L, et al. Identification of temperature-dependent thermal conductivity for 2-D transient heat conduction problems[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, 35(12): 1341-1351 (in Chinese).
- [16] HOSEIN M, IRAJ P, ALI H. Inverse identification of thermal properties of charring ablators[J]. *Numerical Heat Transfer*, 2009, 56: 478-501.
- [17] CHEN Y K, MILOS F S. Ablation and thermal response program for spacecraft heat shield analysis[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, 36(3): 475-483.
- [18] ZIEN T F, WEI C Y. Heat transfer in the melt layer of a simple ablation model[J]. *Journal of thermophysics and Heat Transfer*, 1999, 13(4): 450-459.
- [19] MAHZARI M, BRAUN R D. Time-dependent estimation of Mars Science Laboratory surface heating from simulated MEDLI data[C]//43rd AIAA Thermophysics Conference. Reston: AIAA, 2012: 2871.
- [20] KANEVCE L P, KANEVCE G H, ANGELEVSKI Z Z. Comparison of two kinds of experiments for estimation of thermal properties of ablative composite[C]//Conference on Inverse Problems in Engineering, 1999: 1-7.
- [21] OLIVEIRA A P D, ORLANDE H R B. Estimation of the heat flux at the surface of ablating materials by using temperature and surface position measurements[J]. *Inverse Problems in Science and*

Engineering, 2004, 12(5): 563-577.

- [22] HAKKAKI-FARD A, KOWSARY F. Heat flux estimation in a charring ablator[J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 2008, 53: 543-560.
- [23] 钱炜祺, 周宇, 何开锋, 等. 考虑烧蚀情况下的表面热流辨识[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(6): 772-776.
- QIAN W Q, ZHOU Y, HE K F, et al. Heat flux estimation for heat transfer problem with ablation[J]. Acta Aerodynamica Sinica,

2014, 32(6): 772-776(in Chinese).

- [24] AMAR A J, BLACKWELL B F, EDWARDS J R. One-dimensional ablation using a full Newton's method and finite control volume procedure[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2008, 22(1): 71-82.
- [25] LACHAUD J, MARTIN A, COZMUTA I, et al. Ablation workshop test case[EB/OL]. (2011-03-03)[2021-04-06]. http://ablation2012.engineering.uky.edu/files/2012/02/Test_Case_1.pdf.

High temperature thermal conductivity estimation method of inorganic-organic hybrid phenolic composites

ZHANG Hongjun*, LI Haiqun, KANG Honglin, LUO Jinling

(Beijing Aerospace Technology Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: The inorganic-organic hybrid phenolic composite (IPC) tends to be widely used for the thermal protection of near-space hypersonic vehicles. The thermal conductivity estimation of IPCs plays an important role in the fine design of thermal protection system. A thermal conductivity identification method considering ablation effect is proposed and verified based on the benchmark of Ablation Workshop. The results show the computation precision of the proposed method. Through the arc wind tunnel test of IPCs with stratified temperature and ablation sensors, the temperature and pyrolysis thickness distribution data of IPCs with different thicknesses are obtained, and the relationship between the thermal conductivity and temperature of IPCs is achieved. Before 800 K, the thermal conductivity of the original layer of the IPC increases slowly with temperature, remaining below 0.1 W/(m·K). After 800 K, however, changes occur abruptly, and the thermal conductivity of the carbonization layer increases sharply with the increase of temperature, reaching 0.17 W/(m·K) at 1 300 K.

Keywords: inorganic-organic hybrid phenolic composite; high temperature thermophysical parameter; identification method; stratified temperature sensor; ablation sensor

Received: 2021-04-06; Accepted: 2021-06-11; Published Online: 2021-07-06 10:45

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210706.1005.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (11802296); Equipment Pre Research Fund (61402060301)

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

基于试飞分析的直升机动力系统边界保护控制方法

宋招桢*, 赵敬超, 杨文凤

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘 要: 涡轴发动机作为直升机等旋翼飞行器动力系统的主要部件, 一旦发动机关键参数超限, 一般采用降低燃油量及功率的方法进行限制, 会暂时降低动力涡轮转速, 使其低于正常额定状态约4%~6%。若未及时脱离超限状态, 可导致动力涡轮转速继续降低, 威胁飞行安全。为解决上述问题, 基于对某型直升机从现象到数据的试飞分析, 提出一种控制方法, 通过设计总距控制律, 在发参超限状态下实现动力系统边界保护控制, 若未及时脱离超限状态, 则自动改出, 恢复动力系统正常控制, 大幅增强了直升机动力系统控制的鲁棒性及飞行的安全性。通过动力系统建模, 并对控制律进行仿真, 验证了所提方法的正确性。

关键词: 直升机; 涡轴发动机; 动力系统; 动力涡轮转速; 试飞分析; 总距控制律; 飞行安全

中图分类号: V249

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0100-06

直升机等旋翼类飞行器, 其动力系统的主要部件一般为涡轴发动机^[1], 为飞行器提供升力及拉力, 驱动飞机正常飞行, 在旋翼类飞行器各系统部件中的作用举足轻重^[2], 动力系统异常状态极易引发重大飞行事故。近年来, 动力系统的传统机械液压式燃油调节方法正逐步转向电传燃油控制方法^[3], 日益趋向于“稳、准、快”的优良控制效果。同时, 更加可靠的信号和更加优异的系统性能, 可支持更多更高级的控制功能, 保障飞行安全^[4]。

以涡轴发动机为主要部件的动力系统, 依靠输出轴功率来提供飞行器所需的动力^[5]。涡轴发动机具有体积小、质量小及输出功率高等特点^[6]。由于燃气涡轮和动力涡轮之间无机械连接, 依靠气动传导, 因此在发动机的工作过程中, 气动热力特性极为复杂。受环境及发动机本体的影响, 工作过程中参数变化剧烈^[7], 必须依靠高效且可靠的控制才能保证发动机的正常工作。同时, 对于发动机的参数边界, 应使用限制及保护措施^[8], 利于脱离危险状态, 防止危及飞行安全。

出于对发动机及旋翼系统的热力特性、机械强度、加工工艺等方面的考虑, 目前工程中实际应用的涡轴发动机, 在关键工作参数上都有明确的限制。例如: 扭矩限制、涡轮间温度限制及转速限制等。发动机特定参数一旦超限, 一般采取自动降低油门、减少功率的方法, 保证发动机持续工作不超载^[9]。

针对当前发动机控制领域的研究现状, 中国航空工业集团公司航空动力控制系统研究所姚华^[10]着重研究了发动机的容错控制; 杨征山等^[11]全面研究了发动机控制回路方案等。但减少功率方法的缺陷多发生在发动机超限工况下, 常规操作习惯可能产生不利影响, 且不属于容错控制领域, 在减少功率同时兼顾负载安全和自动改出的超限保护类功能领域的研究较少。

基于动力系统和发动机的特点、不足及研究现状, 本文提出一种边界保护控制方法, 通过总距控制律设计, 在发参超限状态下实现自动保护及自动改出, 及时恢复动力涡轮转速的正常额定控制, 减轻飞行员操纵负担并保障飞行安全。在控制领域,

收稿日期: 2021-07-30; 录用日期: 2021-09-23; 网络出版时间: 2021-11-09 11:48

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20211109.0943.003.html

*通信作者. E-mail: echo_leslie@163.com

引用格式: 宋招桢, 赵敬超, 杨文凤. 基于试飞分析的直升机动力系统边界保护控制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 100-105.
SONG Z R, ZHAO J C, YANG W F. Boundary protection control method of helicopter power system based on flight test analysis[J].
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 100-105 (in Chinese).

实现对当前发参限制功能的显著优化, 从控制理论上凸显设计的全面性, 提升了动力系统在全工况下的控制性能。所提方法基于某型直升机的实际试飞数据, 通过对数据及现象的分析, 结合动力系统控制原理和控制律设计方法, 最终通过仿真结果验证了边界保护控制方法原理和设计的正确性。

1 飞行试验发参数据超限分析

图 1 为某型直升机试飞过程中的发参数据。图中: WF 为总距角度; Q 为总扭矩; N_r 为旋翼转速; N_g 为燃气涡轮转速; H_p 为气压高度; N_{gc} 为燃气涡轮换算转速, 该值决定发动机的燃料燃烧及转速输出情况, 该数值超限时意味着发动机进入燃烧极限状态, 长时间工作在该状态将对燃烧系统和部件造成损害; T_{45L} 和 T_{45R} 为左右两侧 4、5 级涡轮间温度 (4、5 级涡轮位置靠后), 其温度体现发动机的动力输出状态, 在发动机中作为关键参数进行监测, 超限时易对末端涡轮造成损伤; 总扭矩值体现动力轴承载程度, 为避免轴出现损坏, 作为关键参数进行监测; 根据图 1 曲线, 上述参数均未超限, 动力涡轮转速 N_p 在控制系统作用下, 较为稳定地维持在额定状态, 实现正常稳态控制。

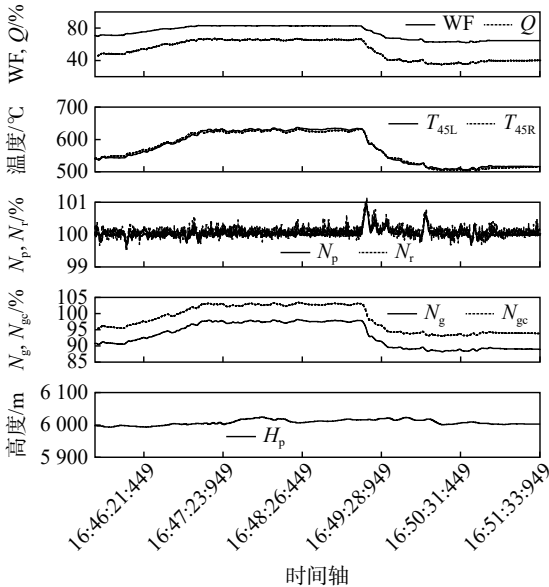


图 1 未超限工况发参数据曲线

Fig. 1 Parameter data curve of unexceeded working condition

图 2 为某型直升机在高寒环境下进行连续爬升科目试飞时的发参数据, 在横轴约 13: 57: 54 时刻, 动力涡轮转速 N_p 因燃气涡轮换算转速 N_{gc} 超限饱和, 且总距在较长时间内保持在高量值, 并伴随间隔性小幅提距指令输入, 导致 N_p 降至约 96%, 小于额定值 100%。

根据试飞曲线的后段, 当横轴约 14: 05: 19 时刻, 总距量值下降之后, 旋翼气动扭矩降低, 所需

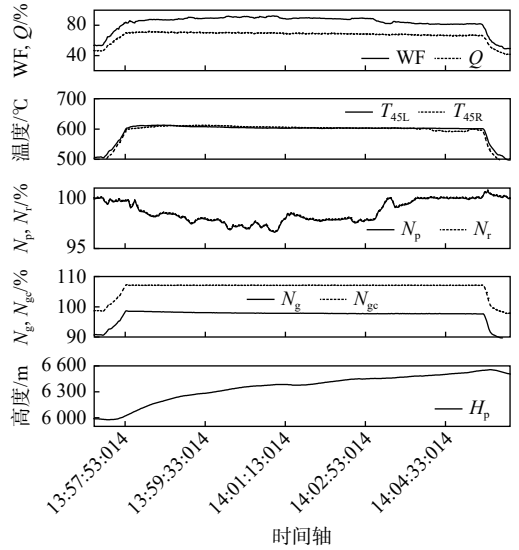


图 2 超限工况发参数据曲线

Fig. 2 Parameter data curve of exceeded working condition

N_{gc} 量值减小, 所有发参低于限制值, 控制系统调节燃油和功率后, 动力涡轮转速迅速恢复至 100%, 即正常额定值。根据图 1 及图 2 曲线可得: ① 为保证动力系统的安全运行, 任一参数超限都将导致动力系统控制的单向限制, 降低动力功率来实施保护。② 通过减小总距操纵, 减少旋翼气动扭矩, 对于飞行中恢复动力涡轮转速的作用显著, 总距对于动力系统安全控制的意义重大。

2 涡轴发动机动力控制与总距影响

2.1 涡轴发动机结构与稳态控制原理

涡轴发动机与一般航空发动机的最大不同, 在于其动力是依靠输出轴带动旋翼, 以旋转的形式体现, 轴功率是最主要的输出参数, 主要应用在旋翼飞行器领域, 而一般的航空发动机以推力为主要的输出形式, 作用于飞机的纵轴域, 推动飞机并保障其飞行速度。涡轴发动机主要包括进气道、压气机、燃烧室、燃气及动力涡轮等部件。各部件的建模及发动机控制结构, 国内外的学者已有详细的研究及成果^[12-13], 此处基于文献 [12-13] 中的控制结构直接予以分析, 为总距控制律设计奠定基础。发动机控制结构框图如图 3 所示。

各部件数学模型如下。

燃油流量-燃气涡轮转速数学模型^[14]:

$$G_{Q_r-N_g}(s) = \frac{N_g(s)}{Q_r(s)} = \frac{A_g}{\tau_g s + 1} \quad (1)$$

式中: N_g 为燃气涡轮转速; Q_r 为燃油流量; A_g 和 τ_g 分别为传递函数分子和时间常数。

燃气涡轮转速-发动机输出扭矩模型^[14]:

$$G_{N_g-M_p}(s) = \frac{M_p(s)}{N_g(s)} = \frac{T_p s + 1}{\tau_p s + 1} \quad (2)$$

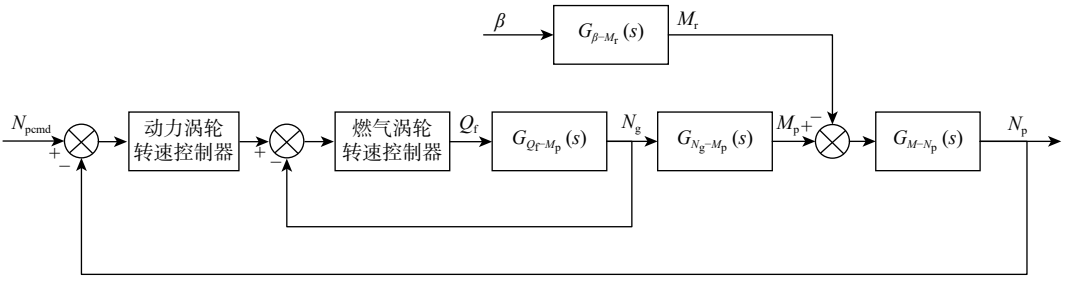


图3 发动机控制结构

Fig. 3 Engine control structure

式中： M_p 为发动机输出扭矩； T_p 和 τ_p 分别为传递函数分子时间常数和分母时间常数。

总距-旋翼扭矩负载模型^[14]:

$$G_{\beta-M_r}(s) = \frac{M_r(s)}{\beta(s)} = \frac{A_r}{\tau_r s + 1} \quad (3)$$

式中： M_r 为旋翼扭矩负载； β 为总距； A_r 和 τ_r 分别为传递函数分子和时间常数。

扭矩-动力涡轮转速模型^[14]:

$$G_{M-N_p}(s) = \frac{M(s)}{N_p(s)} = \frac{A_p}{\tau_p s + 1} \quad (4)$$

式中： M 为扭矩； N_p 为动力涡轮转速，决定旋翼转速，直接影响直升机飞行过程中的旋翼转速稳态控制，该数值实时显示在座舱中，超限说明旋翼转速超载，下降说明发动机工作状态受限下降，对飞行员的心理和操纵状态影响显著，数值波动不应过大； A_p 和 τ_p 分别为传递函数分子和分母时间常数。

在稳态工作的过程中，控制系统内环采用燃气涡轮转速控制，外环采用动力涡轮转速控制，内环与外环分别设计控制器，最终被控对象为外环输出的动力涡轮转速。当动力涡轮转速受扰改变，反馈至前端与目标转速形成偏差并输入外环控制器，输出燃气涡轮转速指令，指令与实际燃气涡轮转速的偏差输入内环控制器，调节燃油流量，在发参不超限时使其稳定在100%动力涡轮转速的额定状态，实现转速的稳态自动控制^[15]。

2.2 总距对动力系统稳态控制的影响

在飞行中，总距的变化直接改变旋翼提供的升力和旋翼所受气动阻力，即改变旋翼负载。根据上述总距-旋翼扭矩负载模型，负载与总距的输入-输出关系为一阶惯性环节的形式，在总距改变时，负载及动力涡轮转速的响应速度很快，通过闭环，快速对动力涡轮转速进行纠偏控制。

在直升机飞行中，提总距杆，产生额外扭矩负载，在发动机输出扭矩不变的情况下，动力涡轮转速下降，产生转速偏差，经外环控制器改变燃气涡轮转速指令，进而通过内环控制器改变燃油流量和输出扭矩，增加动力涡轮转速，消除偏差，达到总距

改变、油门随动的控制效果。放总距杆降低总距，原理相似。发动机关键参数未超限时，控制系统符合上述控制原理。

如果发生参数超限，则动力系统控制会进入单向限制，降低燃油流量和涡轮轴输出功率实施保护，进而降低动力功率。但该方法的不足有：①减少燃油量和轴功率，在负载不变的情况下，燃气/动力涡轮转速下降，因转速信号重要性，会造成飞行员心理负担，对操纵造成不良影响；②减少燃油量和轴功率并不限制总距的变化，提距指令在超限工况下的意外输入，会造成燃气/动力涡轮转速持续衰减；③减少功率仅能在超限过程中实现保护，对发参超限的改出没有帮助，不脱离超限状态依然对动力系统和飞行安全很不利；④发参超限状态异常，功率很大，若总距降低速率过快，可导致功率转速超限或旋翼系统超载，威胁飞行安全，需考虑总距安全性。

在直升机操纵过程中，飞行员直接控制总距，提距过程中动力关键参数随发动机功率增加而增加，一旦出现参数临界，则需要边界保护，维持发动机的正常工作状态。根据本文分析，需要从总距控制角度入手，优化设计总距控制律，在发参超限的特殊状态，既要具备边界保护功能，抑制总距增加，并限制发参超限时的总距降低速率；又要在满足条件时，自动协助飞行员改出超限状态。

3 边界保护总距控制律设计

3.1 超限保护总距控制律

超限保护控制的核心方法，是在系统判定发参超限时，抑制总距提距信号，避免动力涡轮转速进一步降低。根据第2节关键发参及试飞数据，设计发参超限逻辑结构如图4所示。超限标识Limit_Sw为超限逻辑的最终输出，利用关键发参信号的逻辑判定结果，使用“或”逻辑，关键信号一旦存在异常都将触发超限逻辑。

当超限标识Limit_Sw=1时，发动机控制系统接收超限信号，接通超限保护功能，包括提距抑制及放距速率限制。控制功能框如图5所示。超限时根据总距信号增量 $\Delta\beta$ 的极性，识别提距信号，通过

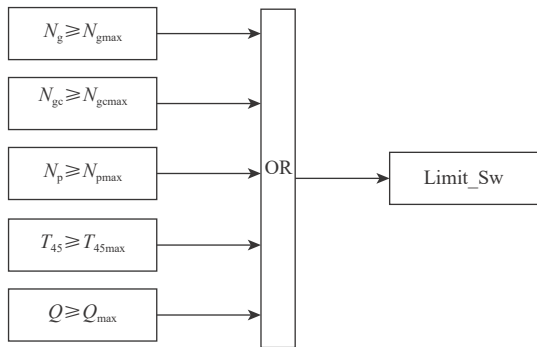


图 4 发参超限逻辑结构

Fig. 4 Logic structure of over-limit source parameter

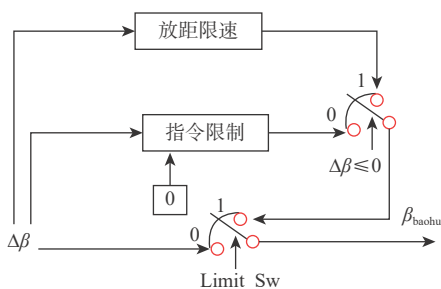


图 5 超限保护控制律结构

Fig. 5 Structure of overrun protection control law

指令转换, 将指令增量平滑过渡置 0, 抑制提距; 同时, 识别放距信号, 通过设计放距限速控制律, 保证在大功率状态下限速减距, 避免动力涡轮转速二次超限, 保障飞行安全。 β_{baohu} 为最终指令增量值, 作为超限保护控制律的输出, 兼具超限保护和减载保护, 提高了控制律的有效性和飞机飞行安全性。

3.2 自动改出总距控制律

实现超限保护控制, 可避免总距增加引发转速持续降低。基于第 1 节真实试飞数据分析, 仅维持总距不增加, 不能降低旋翼负载, 同样不利于飞行员及动力系统。因此在保护控制功能的基础上, 设计自动改出控制律, 自动改出控制律设计如图 6 所示。

自动改出控制律的关键是超限计时信号的识别, 决定了改出指令的有效性、安全性。当系统检

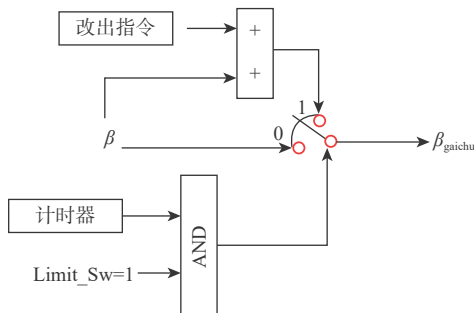


图 6 自动改出控制律结构

Fig. 6 Structure diagram of automatic change out control law

测到 $Limit_Sw=1$ 时, 计时器开始累积时间, 当达到一定时间仍未改出超限状态, 系统自动加入改出指令。根据控制功能的快速响应需求及飞行员的建议, 设计改出指令为: 总距量以 $0.5(^{\circ})/s$ 的速率降低, 平稳过渡直到 $Limit_Sw=0$, 超限状态改出, 恢复动力系统正常控制。

4 仿真结果及分析

根据 3.1 节和 3.2 节控制律设计结果, 选择状态点气压高度 5 km, 表速 (VI) 120 km/h 进行仿真分析。仿真中的总距变化按阶跃信号, 以最剧烈变化的方式输入, 仿真曲线如图 7 所示。

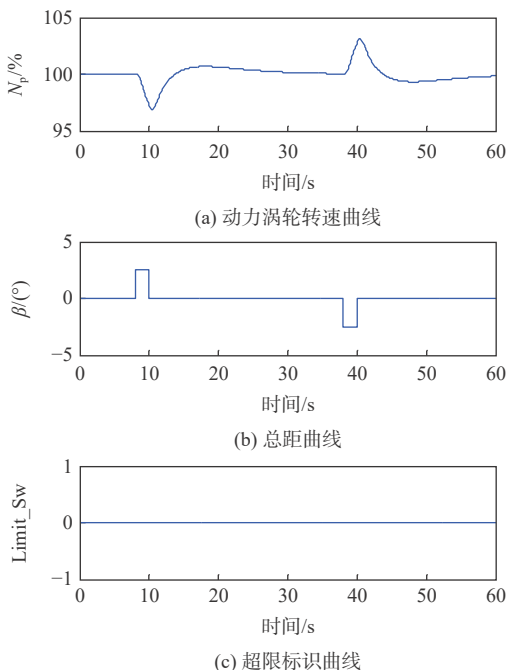


图 7 正常状态总距变化转速仿真曲线

Fig. 7 Simulation curve of total distance change speed under normal circumstances

由图 7 可知, 总距上提或下放时, 作为负载输入, 引起动力涡轮转速 N_p 的降低或增加。在全程未发生发参超限时, 动力涡轮转速及燃气涡轮转速闭环控制可快速将动力涡轮转速调回额定值, 保证发动机正常运转。

选择状态点气压高度 6 000 m, 表速 (VI) 150 km/h 状态点进行仿真分析。以燃气涡轮换算转速超限为例, 根据第 3 节控制逻辑设计, 在仿真时间 5 s 时 $Limit_Sw=1$, 发参超限, 仿真曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, $Limit_Sw=1$ 时, 总距保护自动进行提距信号的置 0 抑制 (见 20 s 时图 8(b) 中的实线), 根据动力涡轮转速的响应, 有超限保护可抑制转速进一步下降 (见 20 s 时图 8(a) 中的实/虚线对比), 在放距或 $Limit_Sw=0$ 时, 恢复正常指令输入 (图 8(a) 曲线后部实/虚线重合部分), 提高飞行安全性。

采用相同的状态点, 仿真分析自动改出的发参响应, 如图9所示。

在仿真时间5s时 $Limit_Sw=1$, 累积时间达5s时, $Limit_Sw$ 不为0, 总距在超限5s后自动以 $0.5(^{\circ})/s$ 的速率降低, 在15s时改出超限状态, 动力涡轮转速信号回复到额定100%控制, 实现了自动改出功能, 控制律的设计结果符合预期。

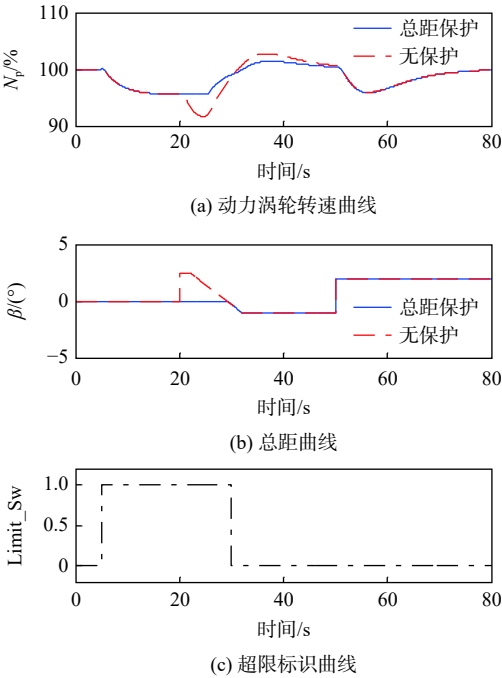


图8 发参超限保护仿真曲线

Fig. 8 Simulation curve of over-limit protection for engine parameter

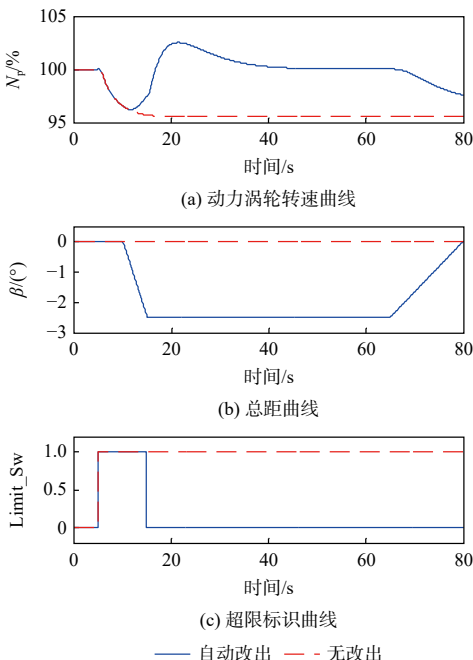


图9 发参超限自动改出仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve of automatic correction out of over-limit engine parameter

根据总距和动力涡轮转速仿真曲线可知, 超限保护和自动改出通过屏蔽信号和稳速降距等方法控制总距, 控制方法安全有效, 最终将动力系统从边界状态回复到正常工作状态。

5 结论

本文根据直升机动力系统稳态控制原理及发参超限带来的不良影响, 基于控制律设计原理, 设计了一种包含总距保护和自动改出控制律的动力系统边界保护控制方法, 总结如下:

1) 设计总距保护控制律, 实现了发参超限状态下对提距信号的抑制, 避免动力涡轮转速继续下降, 减少了总距增加的风险和飞行员心理负担。

2) 飞行员在超限状态下减距改出, 控制律中的减距速率限制设计, 可防止转速急剧加快而超限, 利于动力系统的控制安全。

3) 在保证控制安全的基础上, 当一定时间内未脱离超限状态时, 自动改出控制律可协助飞行员以安全的减距速率改出, 平稳解除危险状态, 恢复动力系统的正常控制。

该方法从控制律设计的角度, 设计了兼顾功率限制、总距负载限制和改出功能的动力系统边界保护控制方法, 显著优化动力系统控制功能, 并通过仿真系统验证了设计的正确性。

参考文献 (References)

- [1] PAKMEHR M, FITZGERALD N, PADUANO J, et al. Dynamic modeling of a turboshaft engine driving a variable pitch propeller: A decentralized approach[C]//47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011.
- [2] 方振平, 陈万春, 张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 14-15.
FANG Z P, CHEN W C, ZHANG S G. Aeronautical vehicle flight dynamics [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010: 14-15 (in Chinese).
- [3] 方振平. 带自动器飞机飞行动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 36-37.
FANG Z P. Flight dynamics of aircraft with automatic [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 36-37(in Chinese).
- [4] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 50-52.
WU S T, FEI Y H. Flight control system[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009: 50-52(in Chinese).
- [5] 麻士东, 韩亮, 龚光红, 等. 涡轴发动机旋翼系统仿真建模研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 47-50.
MA S D, HAN L, GONG G H, et al. Research on simulation modeling of turboshaft engine rotor system[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(9): 47-50(in Chinese).
- [6] CORPORAN E, CASSELBERRY R Q, KLINGSHIRN C D, et al. Fuel effects on the lean operational limits of a T63 turboshaft engine[C]// AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.

- [7] KERLER M R, C SCHAFFER, ERHARD W, et al. Design parameter identification of the air supply for a turboshaft engine quick-start system[C]//52nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2016.
- [8] 陈义峰, 郭迎清, 李睿超, 等. 涡轴发动机分布式控制系统架构设计[J]. 航空计算技术, 2019, 49(5): 21-26.
CHEN Y F, GUO Y Q, LI R C, et al. Design of distributed control system for turboshaft engine[J]. *Aeronautical Computing Technology*, 2019, 49(5): 21-26(in Chinese).
- [9] 李家云, 陈华. 直升机发动机数学控制系统简述[J]. 直升机技术, 2002(3): 46-49.
LI J Y, CHEN H. Brief introduction of helicopter engine mathematical control system[J]. *Helicopter Technology*, 2002(3): 46-49 (in Chinese).
- [10] 姚华. 涡轴发动机数控系统控制规律及容错控制[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(2): 475-480.
YAO H. Control law and fault tolerant control of turboshaft engine numerical control system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(2): 475-480(in Chinese).
- [11] 杨征山, 李胜泉, 章霖官. 涡轴发动机动力涡轮转速控制回路方案研究[J]. 航空发动机, 2005, 31(2): 46-50.
YANG Z S, LI S Q, ZHANG L G. Study on turbine speed control loop scheme of turboshaft engine[J]. *Aero Engine*, 2005, 31(2): 46-50(in Chinese).
- [12] 姚文荣. 涡轴发动机/旋翼综合建模、控制及优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 50-51.
YAO W R. Research on integrated modeling, control and optimization of turboshaft engine/rotor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008: 50-51(in Chinese).
- [13] 冯海峰. 航空涡轴发动机数学建模方法与控制规律研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 43-44.
FENG H F. Research on mathematical modeling method and control law of aero turboshaft engine [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007: 43-44(in Chinese).
- [14] 丁琳. 涡轴发动机数字控制与仿真技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 34-35.
DING L. Research on digital control and simulation technology of turboshaft engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 34-35(in Chinese).
- [15] 赵海刚, 郭佳男, 王俊琦. 某型涡轴发动机试飞平台设计与试验验证[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 820-824.
ZHAO H G, GUO J N, WANG J Q. Design and test verification of a turboshaft engine flight test platform [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(2): 820-824(in Chinese).

Boundary protection control method of helicopter power system based on flight test analysis

SONG Zhaorui*, ZHAO Jingchao, YANG Wenfeng

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Turboshaft engine is the main part of the power system of rotor aircraft such as helicopter. Once the key engine parameters exceed the limit, the method of reducing fuel quantity and power is generally adopted to limit, which will temporarily reduce the speed of power turbine, making it about 4%–6% lower than the normal rated state. However, if the overlimit state is not removed in time, the speed of the power turbine will continue to decrease, threatening the flight safety. Based on the flight test analysis of a certain helicopter from phenomena to data to solve the above problems. This paper proposes a control method, through the design from the total distance control law, achieve dynamic system boundary protection control in the condition of engine parameters overrun. if overrun status can't get out timely, then engine change automatically to recover the normal control of power system. This method significantly enhances the robustness of helicopter power system control and the safety of the flight. The correctness of the design is verified by modeling the power system and simulating the control law.

Keywords: helicopters; turboshaft engine; power system; speed of power turbine; flight test analysis; total distance control law; flight safety

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0495

提高冲碾机跟踪规划路径精度的方法

宋二波, 姚仰平*

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 近年来在机场高填方工程中应用无人冲击碾压机已成为一种新趋势, 而冲碾机在地头转向处常出现较大的跟踪误差, 从而影响工作区的压实。提出一种适用于冲碾机地头转向的路径优化方法, 有效提高冲碾机转向跟踪精度。基于2种广义初等曲线的计算方法, 建立U型转向路径, 并综合考虑最小转弯半径和曲率连续的条件, 在靠近原规划路径处筛选出有效路径。基于广义双初等曲线的计算方法, 建立 Ω 型转向路径, 并综合考虑了最小转弯半径和曲率连续的约束条件, 在靠近原规划路径处筛选出有效路径。基于MATLAB/Simulink平台搭建的模型预测控制器(MPC), 仿真对比原规划路径与优化后路径的轨迹跟踪效果, 结果表明: U型转向和 Ω 型转向优化后的路径跟踪效果都较好, 从而验证所提优化方法的有效性。

关键词: 广义初等曲线; 双初等曲线; 最小转弯半径; 模型预测控制; 无人冲碾机

中图分类号: TU47; TU666; TP13; U412.3

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0106-09

压路机作为一种典型的土石方压实机械, 在机场高填方工程中发挥着重要作用, 为了降低作业人员的劳动强度, 同时提高压实效率, 无人驾驶冲击压路机的发展成为一种有效解决方案。

路径规划和路径跟踪是无人驾驶压路机中2个重要的问题。根据施工现场的情况, 在地头转向处均采用圆弧过渡, 如文献[1-3], 这种转向满足了冲碾机的最小转弯半径要求, 且易于规划, 但冲碾机在该处附近常产生较大跟踪误差, 从而影响碾压机工作面的压实质量。分析其原因主要是由于冲碾机的规划路径曲率不连续使得控制器中方向偏差和横向偏差发生了突变, 而造成输出转角控制量发生了突变, 跟踪误差增大。因此, 研究的重点是优化地头转向路径, 以提高冲碾机地头转向的跟踪精度。

由于主要研究是针对冲碾机的地头转向段进行轨迹优化, 而农业中有关地头转向^[4-5]的研究已较为成熟。目前对于路径光滑化的处理方法主要

用曲线拟合的方法, 常用的光滑曲线有3次B样条曲线、 β 样条曲线、贝塞尔曲线、回旋曲线及广义初等曲线等。Song和Zhang^[6]针对无人压路机规划路径中存在曲率不连续的问题, 采用了3次B样条曲线拟合的方法对规划路径进行了平滑处理。Gómez-Bravo等^[7]在自动泊车系统中利用 β 样条曲线生成了曲率连续无碰撞的路径。Dong等^[8]利用Bézier曲线实现了2条直线间的平滑过渡。Backman等^[9]指出Dubins曲线的缺陷, 引入了回旋线, 以生成地头转向平滑路径, 该路径的曲率和速度都连续, 且综合考虑了车辆的最大转向率和最大加速度。Graf Plessen和Bemporad^[10]参考回旋曲线, 生成了广义初等路径和双初等路径, 对规划的轨迹进行了平滑处理, 有效的解决了农田覆盖参考路径的尖锐点问题。

本文的目的是提高冲碾机跟踪规划路径的精度, 因此以原规划路径为目标路径, 优化方法采用

收稿日期: 2021-08-27; 录用日期: 2021-11-19; 网络出版时间: 2021-12-16 10:11

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20211215.1502.003.html

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0207100); 国家重点基础研究发展计划(2014CB047006)

*通信作者. E-mail: yypiao@buaa.edu.cn

引用格式: 宋二波, 姚仰平. 提高冲碾机跟踪规划路径精度的方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 106-114.

SONG E B, YAO Y P. Method of improving tracking precision of planning path for impact rollers[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 106-114 (in Chinese).

广义初等路径和双初等路径, 要求优化后的路径不仅光滑且曲率连续, 还需邻近原规划路径。综合考虑以上 2 个要求, 提出了一种符合冲碾机作业的地头转向路径优化方法。

1 冲碾机压实工艺

冲击式压路机通过专用牵引车牵动冲击轮, 利用冲击轮自身的质量及滚动前进的冲击力, 对填方土体进行静压和冲击, 使土体被均匀压实。目前根据现场施工的情况, 对于施工路面宽度 ≥ 24 m 的工况, 主要采用“环形针环跑”(U 型) 路线, 地头转向处采用 U 型转向, 符合冲碾机最小转向半径的要求, 而对于路面宽度 < 24 m 的工况, 则需要采用一种“大骨头绕跑”(Ω 型) 的路线, 地头转向处出现 Ω 型转向, 如图 1 所示。

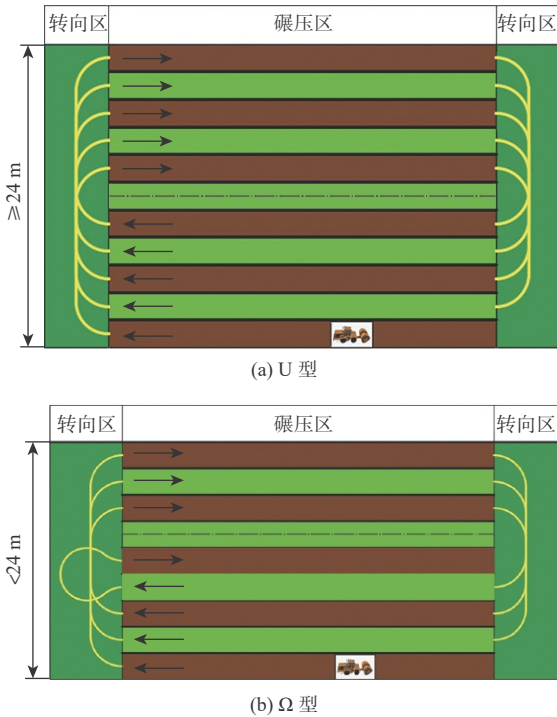


图 1 冲碾机转向方式

Fig. 1 Headland turning mode of impact roller

在机场高填方工程中, 考虑压实效果和作业效率, 冲碾机压实工艺主要有错轮碾压和错峰碾压。以 25 kJ 的冲击压路机为研究对象, 轮宽 l_v 为 0.9 m, 两轮内边距 l_d 为 1.17 m, 冲击轮错轮碾一遍为整体碾压一遍, 因此冲碾工作面宽度 l 为 4 m。错轮碾压^[3]形成的理论间隙 $(l_d - l_v)/2$ 为 0.13 m, 如图 2(a) 所示。冲碾轮周长 C_s 为 4.8 m, 两谷底或峰顶之间的距离 $\Delta d = C_s/3$ 为 1.6 m, 每遍错轮为 1/6, 5 遍完成错峰碾压, 达到冲击压实质量均匀的效果。错峰碾压如图 2(b) 所示。

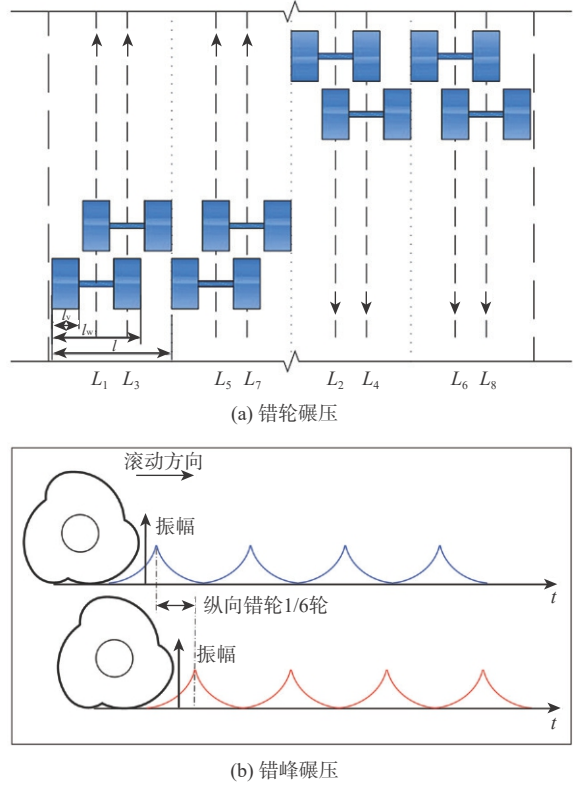


图 2 冲碾机压实工艺

Fig. 2 Compaction technology of impact roller

2 冲碾机 U 型转向路径优化

冲碾机 U 型转向路径是在直线和直线之间采用圆弧过渡, 因此, 转向路径存在曲率不连续的问题, 参照广义初等曲线曲率连续的特点, 利用广义初等曲线来构造过渡曲线, 由于对称性, 以 U 型转向路径的 1/2 部分进行分析讨论。

2.1 广义初等曲线特性

1) 连续性。广义初等曲线由入口回旋曲线、过渡圆弧及出口回旋曲线组成。广义初等曲线曲率分布呈梯形状。其中, λ 为圆弧弧长 L_h 与曲线总长度 L 的比值。广义初等曲线曲率 κ 如图 3(a) 所示。

$$\kappa(s) = \begin{cases} \sigma s & \forall s \in \left[0, L \frac{1-\lambda}{2}\right] \\ \sigma L \frac{1-\lambda}{2} & \forall s \in \left(L \frac{1-\lambda}{2}, L \frac{1+\lambda}{2}\right) \\ \sigma(L-s) & \forall s \in \left[L \frac{1+\lambda}{2}, L\right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为曲线长; σ 为曲率变化率。

2) 对称性。由于广义初等曲线的曲率是对称函数, 得到路径起点和终点的航向与连接这 2 个位置的直线具有相同的偏移角^[11], 如图 3(b) 所示, α 定义为起点切线角 ψ_2 和终点切线角 ψ_1 的差值:

$$\alpha = \psi_2 - \psi_1 = \int_0^L k(z) dz = \frac{\sigma L^2}{4} (1 - \lambda^2) \quad (2)$$

文献 [10] 有构造曲线相关的计算方法如下:

$$\lambda = \frac{L_h}{L} \quad (3a)$$

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3b)$$

$$\alpha = \psi_2 - \psi_1 = 2\arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (3c)$$

$$L = \frac{d}{D(a, \lambda)} \quad (3d)$$

$$\sigma = \frac{4a}{D(1 - \lambda^2)} \quad (3e)$$

$$D(\alpha, \lambda) = 2 \int_0^{0.5} \cos[\psi(z)] dz \quad (3f)$$

$$\psi(z) = \begin{cases} \frac{2\alpha}{1 + \lambda} z & \forall z \in \left[0, \frac{\lambda}{2}\right] \\ \frac{2\alpha}{1 - \lambda^2} \left(-z^2 + z - \frac{\lambda^2}{4}\right) & \forall z \in \left(\frac{\lambda}{2}, \frac{1}{2}\right] \end{cases} \quad (3g)$$

式中: d 为 2 点直线距离; (x_1, y_1) 为起点坐标; (x_2, y_2) 为终点坐标; $\psi(z)$ 为回旋曲线的方向角。

广义初等曲线虽然光滑,但在构造过程中并未考虑曲率的约束,2.2 节与 2.3 节将结合冲碾机实际工况对 U 型转向路径进行优化,且从广义初等曲线的构造方法角度进行了总结分析。

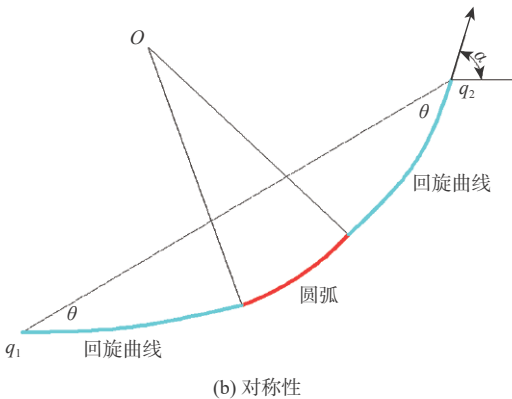
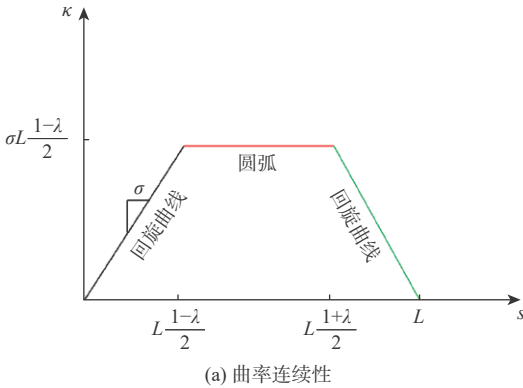


图 3 广义初等路径

Fig. 3 Generalized elementary path

2.2 基于广义初等曲线的 U 型转向路径构造方法 1

在参考文献 [10] 中已证得,起始点坐标相同的条件下,广义初等曲线可替代圆弧,且起始点状态都与圆弧保持一致。方法 1 中 R 表示可替代的圆

弧半径,并以 R 和 λ 为参数,先确定回旋线,再确定过渡圆弧。设冲碾机的原规划路径为圆弧 $R=6$ m,根据广义初等曲线的定义,在不同 (R, λ) 组合中根据 2.2.1 节约束条件筛选有效路径。

2.2.1 满足冲碾机转向约束

由广义初等曲线的定义,广义初等曲线圆弧半径 R 为

$$R = \frac{2}{\sigma L_s} = \frac{2}{\sigma L(1 - \lambda)} \quad (4)$$

并与式 (3b)~式 (3e) 联立,且满足冲碾机转向约束,可得

$$\frac{\sqrt{2}R}{\pi D}(1 - \sigma) \geq R_{\min} \quad (5)$$

式中: R_{\min} 为最小转弯半径。

R 一定, λ 分别取值 0、0.2、0.5、0.7、1, λ 一定, R 分别取值 6 m、7 m、8 m,共组合为 15 组不同的 (R, λ) 组合曲线。得到的广义初等路径的规律均一致,如图 4 所示,其中 Line 表示 $y=0$ m 和 $x=12$ m 的 2 条直线。假定冲碾机的最小转弯半径 $R_{\min}=6$ m,得到符合冲碾机转向约束的路径组合 (R, λ) 。

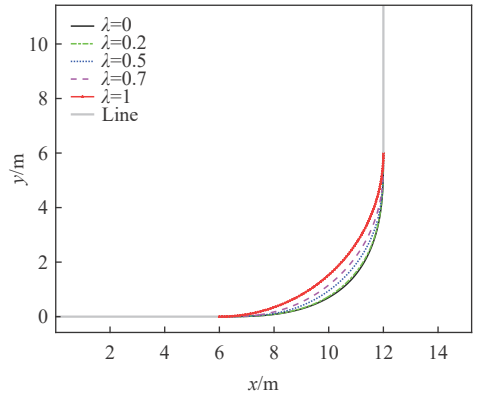


图 4 $R=6$ m 不同 λ 取值的广义初等曲线

Fig. 4 Generalized elementary curves with different λ for $R=6$ m

由于 D 是关于 λ 的隐式函数, λ 若条件给定则 D 确定。因此,对于不同 λ 取值的 R 有条件约束,如表 1 所示。

表 1 不同 λ 值的 R 约束值

Table 1 R constraint values with different λ values

组	λ	D	$R \geq$	组	λ	D	$R \geq$
第1组	0	0.841 8	11.22	第4组	0.7	0.873 8	6.85
第2组	0.2	0.845	9.39	第5组	0.9	0.890 8	6.25
第3组	0.5	0.859 2	7.63				

2.2.2 邻近目标路径

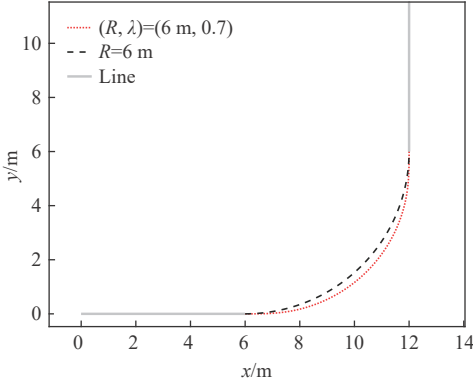
由于跟踪的目标路径是原规划路径,设原规划路径为 p ,优化后的路径为 p^* ,实际跟踪后的轨迹为 p' ,因此需要减小 p' 与 p 的距离,即让 $\text{dist}|p' - p|$ 最小化,而实际的跟踪误差是 $\text{dist}|p' - p^*|$ 。因此,只

有当 $\text{dist}|p - p'| \approx 0$ 时, 实际的跟踪误差才是跟踪规划路径的误差。

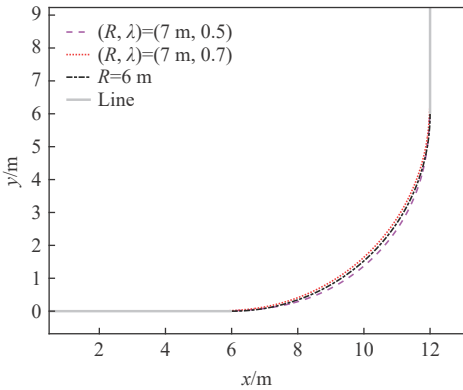
设定一个阈值 $\Delta\epsilon$, 即远离规划路径的上限值, 则筛选路径的标准如下:

$$\begin{cases} \text{dist}|p^* - p| \geq \Delta\epsilon & \text{不合格} \\ \text{dist}|p^* - p| < \Delta\epsilon & \text{合格} \end{cases} \quad (6)$$

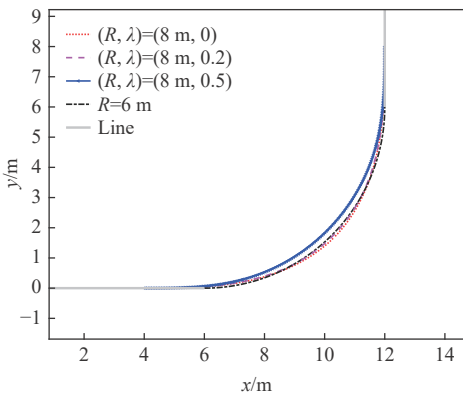
在优化后的路径组合中寻找符合邻近目标路径条件的组合, 有 (8 m, 0.5) 和 (7 m, 0.7), 如图 5 所示。



(a) $R=6\text{ m}$ 广义初等曲线



(b) $R=7\text{ m}$ 广义初等曲线



(c) $R=8\text{ m}$ 广义初等曲线

图 5 方法 1 得到的与 $R=6\text{ m}$ 相近的路径

Fig. 5 Paths close to $R=6\text{ m}$ by method 1

2.3 基于广义初等曲线的 U 型路径构造方法 2

2.3.1 广义初等曲线构造方法 2

文献 [12] 中利用广义初等曲线来连接 2 条定向的直线段, 如图 6 所示。根据文中的算法, R 表示过渡圆弧半径, 并以 R 和 λ 为参数先确定过渡圆

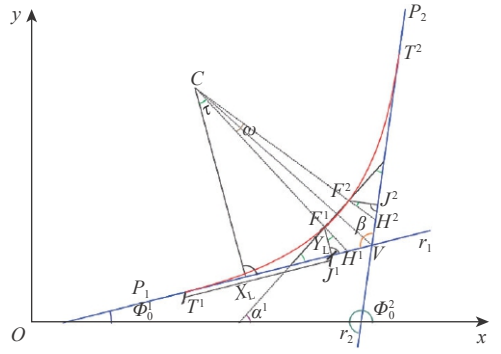


图 6 连接两直线的过渡曲线

Fig. 6 Transition curve used to connect two straight stretches

弧, 再确定回旋线。为区别第 1 种构造曲线的方法, 以下均采用 R' 表示。

对于 90° 转向有, $\Phi_0^1 = 0, \Phi_0^2 = \pi/2, \beta = \pi/2$ 。

1) 根据 β 计算 τ :

$$\tau = \frac{\pi - (w + \beta)}{2} \quad (7a)$$

式中: τ 为在点 F_1 处于 $\overrightarrow{P_1V}$ 形成曲线切线向量的角度; w 为圆弧的角度; β 为 $\overrightarrow{P_1V}$ 和 $\overrightarrow{P_2V}$ 的夹角。

2) 根据 R 和 τ 计算 L_s 和 A :

$$\begin{cases} L_s = 2R'\tau \\ A = \sqrt{R'L_s} \end{cases} \quad (7b)$$

式中: L_s 为回旋线的长度; A 为回旋线参数。

3) 定义: $\Delta s = L_s/N, s^n = n\Delta s$, 根据式 (7b), 计算式 (7c):

$$\begin{cases} X_L = \Delta s \sum_{k=0}^{N-1} \left(\cos \left(\frac{(s^k)^2}{2A^2} \right) \right) \\ Y_L = \Delta s \sum_{k=0}^{N-1} \left(\sin \left(\frac{(s^k)^2}{2A^2} \right) \right) \end{cases} \quad (7c)$$

式中: X_L 为回旋线在 x 方向上的增量; Y_L 为回旋线在 y 方向上的增量。

4) 计算切点位置:

$$\begin{cases} \text{dist}(T^1, J^1) = \text{dist}(T^2, J^2) = X_L \\ \text{dist}(J^1, H^1) = \text{dist}(J^2, H^2) = Y_L \tan \tau \\ \text{dist}(H^1, V) = \text{dist}(H^2, V) = \left(R' + \frac{Y_L}{\cos \tau} \right) \left(\frac{\sin(\omega/2)}{\sin(\beta/2)} \right) \end{cases} \quad (7d)$$

式中: T^1 为回旋曲线 T^1F^1 在 r_1 线上的切点; T^2 为回旋曲线 T^2F^2 在 r_2 线上的切点; J^1 为回旋曲线 T^1F^1 的 F^1 点在 r_1 线上的投影点; J^2 为回旋曲线 T^2F^2 的 F^2 点在 r_2 线上的投影点; H^1 为圆弧中心 C 点与 F^1 点的连线在 r_2 线上的交点; H^2 为圆弧中心 C 点与 F^2 点的连线在 r_2 线上的交点; V 为直线 r_1 与直线 r_2 的交点。

$$\begin{aligned} \text{dist}(T^1, V) &= \text{dist}(T^2, V) = \text{dist}(T^1, J^1) + \\ &\text{dist}(J^1, H^1) + \text{dist}(H^1, V) \end{aligned} \quad (7e)$$

设定的冲碾机的最小转向半径为6 m,以 $R' \geq 6$ m为约束条件,分别取 (R', λ) 组合进行对比分析。

2.3.2 满足冲碾机转向约束

设定圆弧的半径 R' 分别取3种数值(6 m, 7 m, 8 m),并以 R' 一定, λ 分别取5类比值(0,0.2,0.5,0.7,1),共组合15组不同的 (R', λ) 组合曲线。图7为 $R' = 6$ m时不同 λ 值下的曲线。

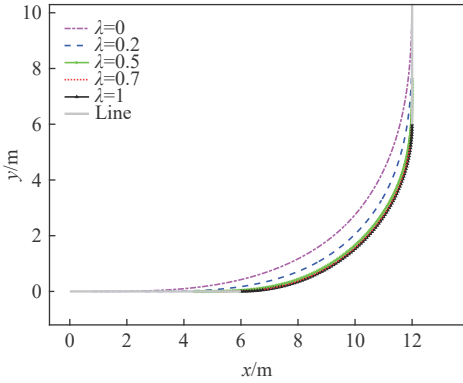
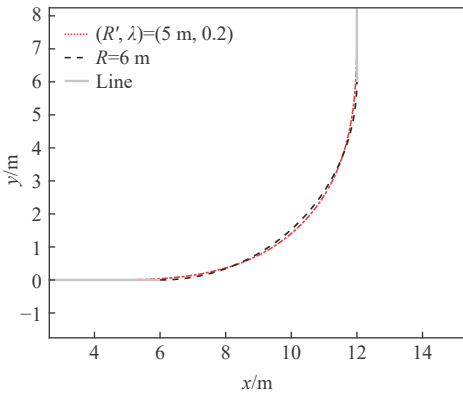


图7 $R' = 6$ m不同 λ 值的曲线

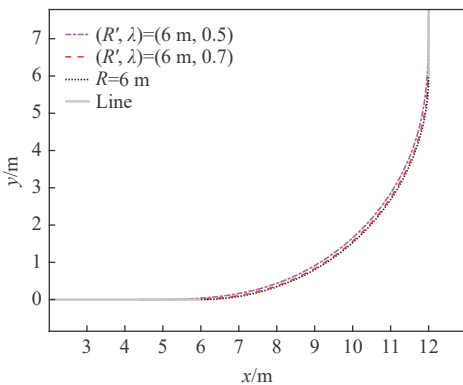
Fig. 7 Generalized elementary curves with different λ for $R' = 6$ m

2.3.3 邻近目标路径

与2.2节方法判定邻近的方法相一致。在15组的曲线中筛选得到邻近规划路径 p^* ,有(5 m,0.2)、(6 m,0.5)和(6 m,0.7),如图8所示。



(a) $R' = 5$ m广义初等曲线



(b) $R' = 6$ m广义初等曲线

图8 方法2得到的与 $R = 6$ m相近的路径

Fig. 8 Paths close to $R = 6$ m by method 2

3 冲碾机 Ω 型转向路径优化

冲碾机 Ω 型转向路径是在地头宽度小于转向半径时所采用的转向方式,由圆弧连接组成,常用Dubins算法生成,但是转向路径依旧存在曲率不连续的问题,参照双初等曲线可实现 0° 光滑过渡的特性,利用双初等曲线来构造 Ω 型转向路径,并进行相应的分析讨论。

3.1 双初等曲线

双初等曲线^[10]是由2条广义初等曲线组成,定义为起始点 $P_{\Omega 1}$ 点和终点 $P_{\Omega 3}$ 点的航向相同,连接这2点的路径称为双初等路径。

与广义初等曲线不同的是其参数 γ 的定义, γ 的大小决定了连接点 $P_{\Omega 2}$ 。

$$\gamma = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}} \quad (8a)$$

$$y_2 = \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} x_2 + y_1 \quad (8b)$$

双初等曲线主要因为其可圆滑的实现 0° 航向过渡,如图9所示,但是其未考虑路径的曲率是否符合车辆转向曲率约束条件。

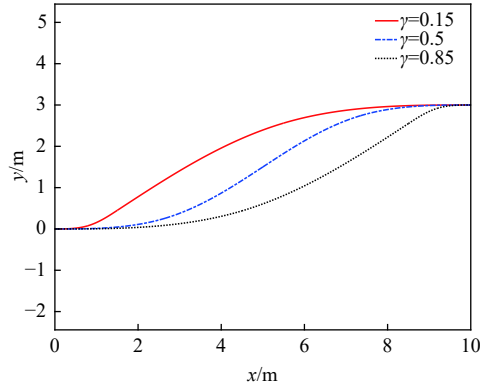


图9 不同 γ 取值的双初等路径示意图

Fig. 9 Schematic diagram of bi-elementary paths with different γ values

3.2 考虑 R_{min} 的双初等路径 Ω 型转向

文献[10]针对农机的地头转向,采用的双初等路径来替代原先的圆弧,如图10(a)所示,没有考虑 R_{min} ,其中Arc表示半径为6 m的半圆弧,Dubins为在满足曲率约束和规定的始端与末端的切线方向的条件下,连接2个二维平面点的最短路径。因此在其基础上进行优化计算。

设双初等路径的起点坐标为 $P_{\Omega 1}(0,0)$,终点坐标为 $P_{\Omega 3}(x_3, y_3)$,中间点坐标为 $P_{\Omega 2}(x_2, y_2)$ 。可计算得到双初等路径的 $R_{\Omega min}$ 。

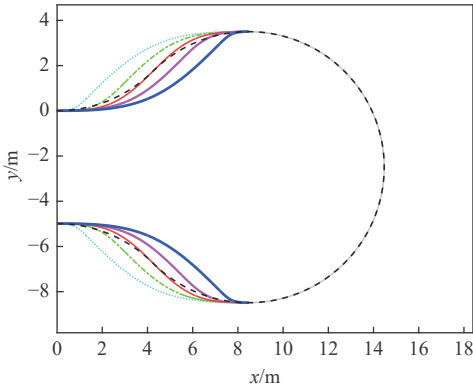
$$R_{\Omega min} = \frac{1}{\frac{\sigma}{L}} = \frac{2}{\sigma L} \quad (9a)$$

$$\begin{cases} \sigma = \frac{4\alpha}{L^2} \\ L = \frac{dy}{D} \\ d = \sqrt{x_3^2 + y_3^2} \\ x_2 = \gamma x_3 \\ y_2 = \gamma x_3 \\ \alpha = 2\arctan(x_2/y_2) \end{cases} \quad (9b)$$

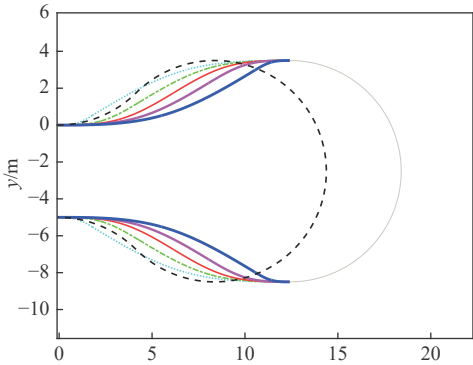
$$R_{\Omega\min} = \begin{cases} \frac{\gamma \sqrt{x_3^2 + y_3^2}}{2\arctan\left(\frac{x_3}{y_3}\right) D} \\ (1-\gamma) \sqrt{x_3^2 + y_3^2} \\ \frac{2\arctan\left(\frac{x_3}{y_3}\right) D}{2\arctan\left(\frac{x_3}{y_3}\right) D} \end{cases} \quad (9c)$$

因为 D 是 α 的函数, α 又可通过 P_{Ω_3} 点求得, 因此, 当 γ 一定时, $R_{\Omega\min}$ 是关于 (x_3, y_3) 的函数。

R_{\min} 是冲碾机最小转向半径, 因此有约束 $R_{\Omega\min} \geq R_{\min}$, R_{\min} 取 6 m。当 $\gamma=0.5$ 时, 得到一个可行解, 从而得到 (x_3, y_3) 的坐标点。再以 (x_3, y_3) 为 P_{Ω_3} 点坐标, 取不同的 γ 值, 可得到曲线组合, 如图 10(b) 所示。但路径在双初等曲线与圆弧的连接处曲率不连续。



(a) 不考虑 R_{\min}



(b) 考虑 R_{\min}

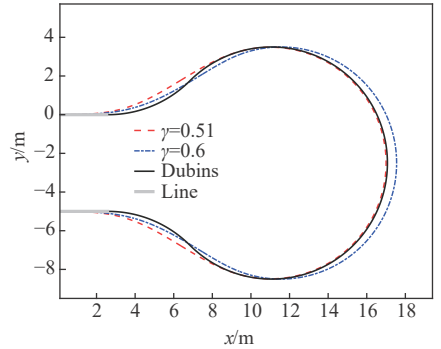
— $\gamma=0.15$ — $\gamma=0.35$ — $\gamma=0.5$ — $\gamma=0.65$
— $\gamma=0.85$ — Arc - - - Dubins

图 10 不同 γ 取值的 Ω 型转向路径及曲率

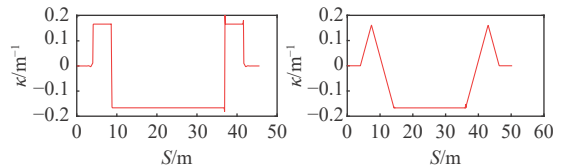
Fig. 10 Ω -shaped turning paths and curvature with different γ values

3.3 曲率连续的 Ω 型转向路径

文献 [13] 中有对 Ω 型转向路径的描述, 如图 11 所示, γ 在 0.5~0.65 范围内构造路径与 Dubins 路径相邻近, 对该范围内 γ 路径进行优化, 使其曲率连续:

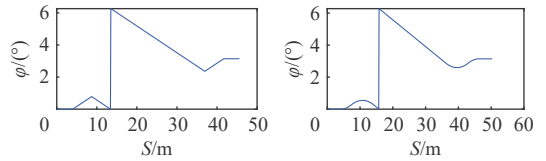


(a) 曲率连续的 Ω 型转向路径 ($R=6$ m)



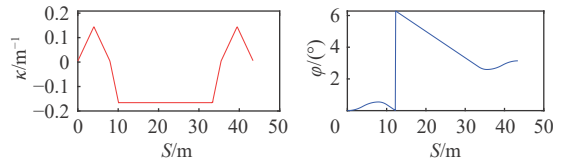
(b) Dubins 路径的参考曲率

(c) $\gamma=0.51$ 路径的参考曲率



(d) Dubins 路径的参考航向角

(e) $\gamma=0.51$ 路径的参考航向角



(f) $\gamma=0.6$ 路径的参考曲率

(g) $\gamma=0.6$ 路径的参考航向角

图 11 曲率连续的 Ω 型转向路径及曲率

Fig. 11 Ω -shaped turning path with continuous curvature and curvature change of the path

- 1) 去掉双初等路径中的末端回旋线(即曲率 κ 减小为 0 的部分)。
- 2) 保持前 2 条回旋线不变。
- 3) 第 3 条回旋线的曲率变化率不变, 但是曲率 κ 的变化范围改为曲率从 0 增大至曲率最大值 κ_{\max} 。
- 4) 变动 γ 值, 使相切圆半径为 R_{\min} , 得到 γ_{des} 。

分别计算得到 γ_{des} 为 0.51、0.6 的优化路径。原规划路径是 Dubins 路径, 由最小转向半径 R_{\min} 组成, 如图 11 所示。

优化 Ω 型转向路径和 U 型转向路径相比, 所用回旋线的构造方法一样, 但由于路径组成不同, Ω 型转向路径计算更复杂, 考虑因素更多。

4 线性时变 MPC 的轨迹跟踪仿真

4.1 控制系统

由于本文研究重点是对转向路径的优化, 因此

对转向路径的跟踪采用的车辆模型为单车模型,即只考虑牵引车在规划路径下的跟踪效果。提出一种基于模型预测控制器(model prediction control, MPC)的线性时变模型预测方法,作为跟踪控制方法,搭建控制器,控制系统框图如图12所示。控制变量 \mathbf{u} 为 $[v, \omega]$,状态变量 ξ 为 $[x, y, \varphi]$,其中 x 和 y 分别表示牵引车的横向和纵向位置, φ 表示牵引车的航向角,参考状态量为 ξ_r ,参考控制量为 \mathbf{u}_r ,参考速度表示为 v_r ,参考角速度为 ω_r ,参考航向角为 φ_r 。路径跟踪控制仿真中的牵引车轴距为3 m,车身宽为1.916 m,车体质量为1412 kg,前轮最大转角为 35° 。

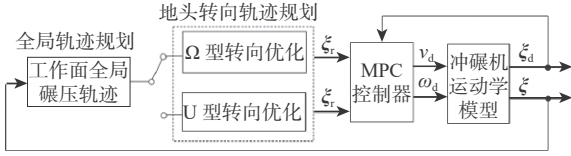


图12 控制系统框图

Fig. 12 Block diagram of control system

线性空间方程为

$$\dot{\xi} = f(\xi, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \varphi \\ v \sin \varphi \\ \omega \end{bmatrix} \quad (10a)$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\xi}} = \xi - \xi_r \\ \dot{\tilde{\mathbf{u}}} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_r \end{cases} \quad (10b)$$

式中: $\tilde{\xi}$ 为状态量误差; $\tilde{\mathbf{u}}$ 为控制量误差。

$$\dot{\tilde{\xi}} = \mathbf{A}\tilde{\xi} + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}} \quad (10c)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v \sin \varphi_r \\ 0 & 0 & v \cos \varphi_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_r & 0 \\ \sin \varphi_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_1 \\ \tilde{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v - v_r \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix}$$

离散后组合状态量 ζ 和控制量 \mathbf{u} ,为新的状态量 ζ ,凑得新的线性时变状态方程^[14]为

$$\begin{cases} \zeta(k+1|t) = \tilde{\mathbf{A}}_{k,t} \zeta(k|t) + \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta \mathbf{u}(k|t) \\ \mathbf{y}(k|t) = \tilde{\mathbf{C}}_{k,t} \zeta(k|t) \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$$\tilde{\mathbf{A}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{k,t} & \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{I}_m \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_{k,t} = [\mathbf{C}_{k,t} \quad \mathbf{0}_{3 \times 2}]$$

$$\zeta(k|t) = \begin{bmatrix} \tilde{\xi}(k|t) \\ \tilde{\mathbf{u}}(k-1|t) \end{bmatrix}$$

其中: $\mathbf{C}_{k,t}$ 为原输出变量的系数矩阵; $\tilde{\mathbf{C}}_{k,t}$ 为组合后输出变量的系数矩阵。

4.2 轨迹跟踪仿真结果

4.2.1 优化前后U型转向路径的轨迹跟踪效果对比
冲碾机的牵引车规划路径为 $R=6$ m的圆弧,所对比的优化路径分别为(6 m,0.5)、(6 m,0.7)、(7 m,0.7)和(8 m,0.5)。

基于MPC的控制器参数:预测时域 $N_p=3$,控制时域 $N_c=2$,采用时间 $T=0.1$ s。权重 Q 取1000, R 按转向角的光滑程度而定。初始状态设置:初始转角 δ_0 和角速度 ω_0 ,均设置为0。在转向过程中设定为匀速, v 为2 m/s。约束条件的边界设置如下:

$$\begin{cases} -2 \leq \tilde{u}_1 \leq 2 \\ -0.4668 \leq \tilde{u}_2 \leq 0.4668 \\ -0.1 \leq \Delta \tilde{u}_1 \leq 0.1 \\ -0.1 \leq \Delta \tilde{u}_2 \leq 0.1 \end{cases} \quad (12)$$

不同U型转向路径车辆的横向跟踪误差如图13所示,车辆前轮转向角变化如图14所示。

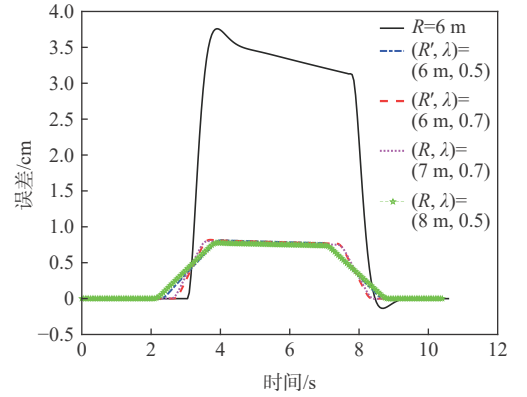


图13 不同U型转向路径下横向跟踪误差

Fig. 13 Lateral error of trajectory tracking for different U-shaped turning paths

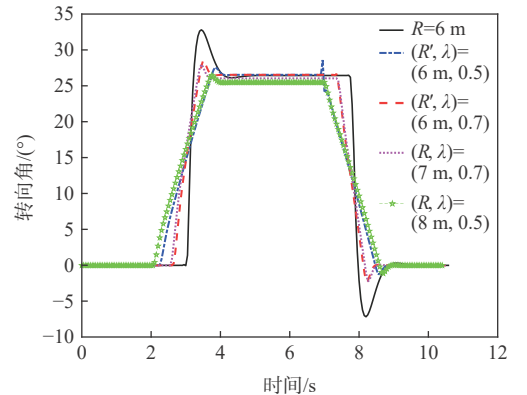


图14 不同U型转向路径下轨迹跟踪的转向角

Fig. 14 Steering angle of trajectory tracking for different U-shaped turning paths

从图13看出,优化后路径误差降低了70%,从图14看出,优化的路径转向角超调量小,转向角小。
4.2.2 优化前后Ω型转向路径的轨迹跟踪效果对比
冲碾机的牵引车规划路径为Dubins($R=6$ m)路径,所对比的优化路径分别为 $\gamma=0.51$ 、 $\gamma=0.6$ 的双初

等路径。基于 MPC 的控制器参数如 4.1 节设置。为优化后的 Ω 型转向路径与原规划路径 Dubins 的跟踪对比图分别如图 15 和图 16 所示。

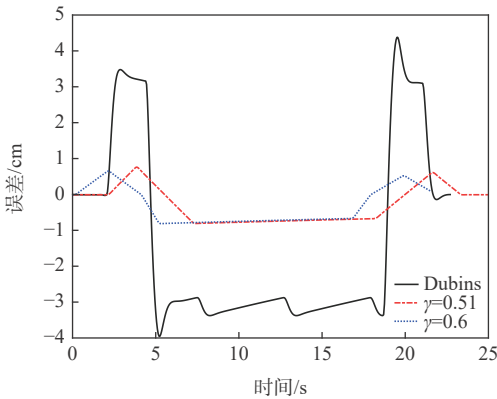


图 15 不同 Ω 型转向路径下横向跟踪误差

Fig. 15 Lateral error of trajectory tracking for different Ω -shaped turning paths

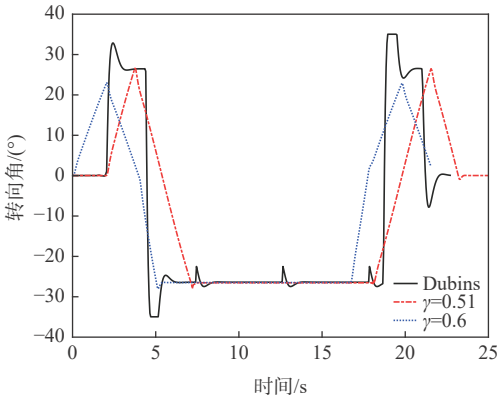


图 16 不同 Ω 型转向路径下轨迹跟踪转向角

Fig. 16 Steering angle of trajectory tracking for different Ω -shaped turning paths

从图 15 看出, 优化的路径误差 e_{\max} 降低了 80%, 从图 16 看出, 优化路径转向角控制简单, 无超调量。

5 结论

本文提出了一种适用于冲碾机转向路径的优化方法, 通过建立 U 型转向路径和 Ω 型转向路径主要有以下结论:

1) 基于广义初等曲线的 U 型转向路径可利用不同含义的参数 R 来构造, 通过 2 种方法生成了 4 组路径与原规划路径 $R=6$ m 相近的曲线。从 MPC 控制器的仿真结果看, 优化后的路径横向跟踪误差降低了 70%, 转向角超调量减小, 说明了方法的有效性。

2) 基于双初等曲线的 Ω 型转向路径采用了优化手段, 同时考虑曲率连续和 R_{\min} 约束, 得到有效路径 $\gamma=0.51$ 和 $\gamma=0.6$ 。从 MPC 控制器的仿真结果

看, 优化后的路径横向跟踪误差降低了 80%, 转向角小, 且控制简单, 证明了路径优化方法的有效性。

基于广义初等曲线和双初等曲线所构造的冲碾机地头转向的最优 U 型转向路径和 Ω 型转向路径, 丰富了冲碾机地头转向路径的研究, 对于无人冲碾机的路径规划也有一定的借鉴意义。

参考文献 (References)

- [1] YAO Y P, RUAN Y Z, CHEN J, et al. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering[J]. *Journal of Construction Engineering & Management*, 2018, 144(1): 04017096.
- [2] 王常顺, 张焯, 潘为刚, 等. 冲击压路机自动驾驶控制系统及方法: CN109799830A[P]. 2019-05-24.
WANG C S, ZHANG H, PAN W G, et al. Automatic driving control system and method for impact roller: CN109799830 A[P]. 2019-05-24(in Chinese).
- [3] ZHANG X, LUO T, SONG E B, et al. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2020, 8(5): 159-163.
- [4] 杨洁. 基于 WSN 的农机自动驾驶技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018: 17-19.
YANG J. Research on agricultural machinery automatic navigation based on wireless sensor networks[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018: 17-19(in Chinese).
- [5] 黄小毛, 丁幼春, 宗望远, 等. 农机作业地头转弯方式及路径生成算法研究[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会, 2011: 1-6.
HUANG X M, DING Y C, ZONG W Y, et al. Turning mode and path generation algorithm for the agricultural vehicles[C]// Proceedings of 2011 Academic Annual Meeting of China Agricultural Engineering Society, 2011: 1-6(in Chinese).
- [6] SONG E B, ZHANG X. Research on the path optimization of unmanned rolling impaction for high embankment of airport[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2020, 8(5): 142-148.
- [7] GÓMEZ-BRAVO F, CUESTA F, OLLERO A, et al. Continuous curvature path generation based on β -spline curves for parking manoeuvres[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56: 360-372.
- [8] DONG W, DING Y, HUANG J, et al. An optimal curvature smoothing method and the associated real-time interpolation for the trajectory generation of flying robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 115: 73-82.
- [9] BACKMAN J, PIIRAINEN P, OKSANEN T. Smooth turning path generation for agricultural vehicles in headlands[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 139: 76-86.
- [10] GRAF PLESSSEN M M, BEMPORAD A. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 153: 28-41.
- [11] FUNKE J, GERDES J C. Simple clothoid lane change trajectories for automated vehicles incorporating friction constraints[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2016, 138: 021002.

- [12] VAZQUEZ-MENDEZ M E, CASAL G. The clothoid computation: A simple and efficient numerical algorithm[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2016, 142(3): 04016005.
- [13] CARIOUS C, GOBOR Z, SEIFERTH B, et al. Mobile robot trajectory planning under kinematic and dynamic constraints for partial and full field coverage[J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(7): 1297-1312.
- [14] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 45-48.
- GONG J W, JIANG Y, XU W. Model predictive control of unmanned vehicle[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 45-48 (in Chinese).

Method of improving tracking precision of planning path for impact rollers

SONG Erbo, YAO Yangping*

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

Abstract: In recent years, the application of unmanned impact rollers in high embankment engineering of airport has become a new trend. However, large tracking errors often occur at the start and the end point of the headland, which affects the compaction effectiveness of the working area. In this paper, a path optimization method is proposed to improve the steering tracking performance. Firstly, the U-shaped turning path derived from generalized elementary curve is established based on two calculation methods, and the optimized path is selected near the original planning path considering minimum turning radius and the smoothness of the curvature of curve. Then, the Ω -shaped turning path is formed by bi-elementary curve, and the optimized path is selected with the same method as above. Finally, the model predictive control (MPC) simulator is established to simulate the trajectory tracking effect of various paths. The results showed that the tracking effect of the optimized path is better than the original path, indicating the effectiveness of the proposed path optimization method.

Keywords: generalized elementary path; bi-elementary path; minimum turning radius; model predictive control; unmanned impact roller

Received: 2021-08-27; Accepted: 2021-11-19; Published Online: 2021-12-16 10:11

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20211215.1502.003.html

Foundation items: National Key R & D Program of China (2018YFE0207100); National Basic Research Program of China (2014CB047006)

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

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0166

航线联营下基于转运的飞机航线路径优化

闫妍^{1,2}, 马啸来^{2,3,*}

(1. 西安财经大学 管理学院, 西安 710100; 2. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031;

3. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 成都 610031)

摘 要: 为解决航空运输成本高, 运输资源闲置、浪费多的问题, 对航线联营下基于转运的飞机航线路径优化问题进行研究。基于货物转运问题, 考虑联盟对运营的影响, 引入航空联盟选择概率, 确定转运前后航段运输的承运及托运问题, 并考虑托运运输的衔接问题。由于航空网络中双机场容量限制, 运行中全货机飞行时段及空域容量的限制, 以总成本最小化为目标, 建立了航线联营下基于转运的航线路径优化模型 (T-AAAFRP)。设计了改进的遗传算法求解模型。通过实例分析, 研究选址和路径优化问题。研究表明: 设计的算法具有较高的收敛性; 转运点数量变化的过程中, 双机场城市总被选择作为转运点; 需求量、飞机固定成本的变化对优化决策有较大影响; 飞机载重量、联盟承运与托运的分摊系数、决策者风险偏好的变化对优化决策有较小影响; 总体上转运点数量越多, 所承担的总成本越小, 使用的飞机数量越少。

关键词: 航线联营; 货物转运; 飞机航线路径优化; 转运点数量限制; 遗传算法

中图分类号: F062.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0115-13

中国航空运输货运量逐年增加, 航空基础设施建设加快, 枢纽机场的作用日益显现, 整体上我国航空物流发展速度很快, 但仍存在如航空货运的资源闲置导致的高成本等问题。因此, 本文以降低航空运输企业的运营总成本为目标, 对飞机航线路径进行优化研究。

目前国内外对研究航空联盟环境下飞机航线路径优化的研究较少, 对航线网络优化的研究集中在线路优化^[1-2]、航线调配^[3-4]、飞机排班优化^[5]方面。多采用定性与定量分析方法优化航线, 通过建立的指标评估体系、数学模型, 采用决策树法^[6]、聚类法、迭代法^[7]、松弛法^[8]等精确算法, 设计遗传算法^[9]、列生成算法等启发式算法, 也有部分采用数学求解器, 如 MATLAB 优化工具箱^[1]、CPLEX^[10]等软件解决模型, 确定最优航线。联盟环境下的飞机航线路径优化研究主要有王苗苗^[11]基于航空节点联盟, 不考虑枢纽点的建设成本, 以网络总成本最小化为目标, 构建航线网络优化模型, 并求解分析航空网络

布局。不考虑航空联盟的飞机航线路径优化研究中的选址-路径问题 (location-routing problems, LRP), 杨忠振等^[12]构建总运输成本最小化的双层规划模型, 确定航空枢纽点选址及航段上的指派路径。不考虑航空联盟的飞机航线路径优化 (fleet route optimization, FRP), 裴一麟^[5]构建航线网络航班时刻双层优化模型, 利用二分法精确求解航班时刻、各航线的成本和总成本。Armacost 等^[13]同时确定联合包裹服务 (united parcel service, UPS) 飞机航线、机队分配和包裹路线, 确保以最低成本实现隔夜交付, 并应用复合变量法解决模型。

基于现有研究, 本文将研究点点式、轴辐式组成的混合式航空货运网络的转运点选址与飞机航线路径优化问题。本文的创新性在于引入航空联盟运营选择概率函数, 构建联盟环境多起讫点的航空货物中转及飞机航线路径优化模型, 并设计自适应遗传算法求解模型。

因此, 本文将以航空联盟为基础, 解决航空货

收稿日期: 2021-04-01; 录用日期: 2021-07-04; 网络出版时间: 2021-08-31 09:14

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210830.1901.001.html

*通信作者. E-mail: maxiaolai@swjtu.edu.cn

引用格式: 闫妍, 马啸来. 航线联营下基于转运的飞机航线路径优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 115-127.

YAN Y, MA X L. Air freight route planning based on transshipment under air alliance [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 115-127 (in Chinese).

运中转点选址及飞机航线路径优化问题,以转运点数量及转运次数为限制条件,不考虑飞行过程中的时间成本及等待时间成本,以总成本最小化为目标,建立了航线联营下基于转运的航线路径优化模型(aircraft fleet route problem based on transshipment and airline alliance, T-AAAFRP)。采用改进的遗传算法求解模型,并通过案例分析航空线路联盟下的航空中转点选址、飞机飞行路径及在不同转运点限制条件下的选址及路径问题。

1 问题描述

本文研究的问题可描述为在已知货运需求起终点*i*、*j*的位置及需求量 D_{ij} 的基础上,考虑航空网络中单、双机场城市飞机容量限制,实际运行中全货机飞行时段及空域容量的限制,联盟其他航司的飞行时段及空域容量的限制。任意一架飞机必须从航空基地集合 $O \in [1, 2, \dots, N]$ 出发,完成一天运输任务后,返回到出发航空基地。并考虑联盟对运营的影响,引入航空联盟选择概率,确定非转运、转运前后各航段运输的承运及托运问题,若存在运输无法完成的情况,则需要承担相应的惩罚成本。因此,本文是研究航线联营下基于转运的航线路径优化问题,即T-AAAFRP问题。航线联营下基于转运的飞机航线路径优化问题示意图如图1所示。

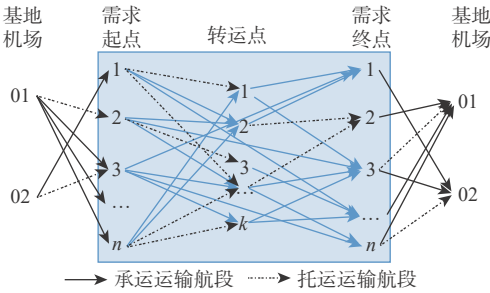


图1 基于转运的飞机航线路径优化问题示意图

Fig. 1 Aircraft route optimization based on transshipment

2 模型假设及建立

2.1 模型假设

飞机飞行过程中的运量反应示意图如图2所示。T-AAAFRP问题建模思路如图3所示。

- 1) 货物转运最多1次。根据大多数航空货运转运的研究,转运次数限制在1~2次最好,本文根据文献[14]中的转运最优结果,因此假设转运最多1次。
- 2) 不考虑飞机降落的排队问题。假设飞机降落所需时间一样,且错开时间降落,因此不存在排队问题。
- 3) 转运货物计算2次装卸费用。根据物流转运业务费用核算的一般规律,对转运货物计算2次装卸费用。

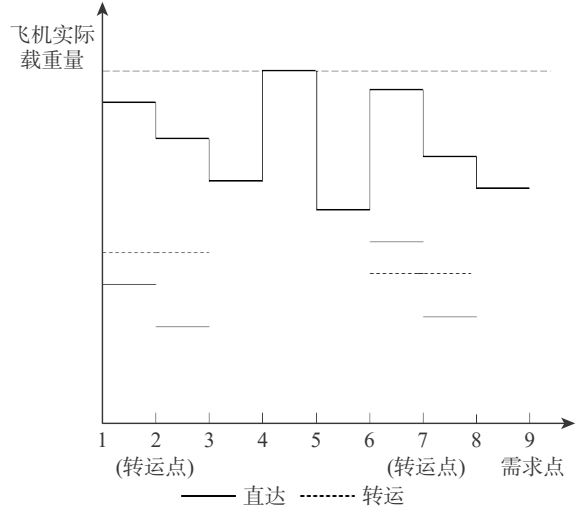


图2 飞机飞行过程中的运量反应示意图

Fig. 2 Traffic response of aircraft in flight

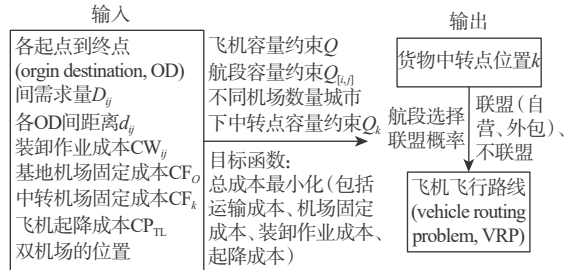


图3 T-AAAFRP问题建模思路

Fig. 3 Modeling ideas of T-AAAFRP problem

4) 转运过程中不考虑时间等待成本。若飞机在枢纽点不等待,直接飞往下一航段,只需将转运的货物在枢纽点卸下,并等待下一飞机到达枢纽点后飞往目的地,其中货物的时间等待成本不计,但是枢纽点暂存货物,需要支付枢纽点固定成本;若飞机在枢纽点等待,则还需要承担停机费用。

5) 运输过程中各航段的单位运输成本相同。飞机的单位运输成本与飞机的类型相关,假设所用的飞机类型一致。

6) 航空公司所有的需求点及转运点都是航空公司承运。

7) 航线承运时,任意2个航空节点间的货物只能沿着一条运输成本最小的航线完成运输。航空公司在运营中,以成本最小为目标,则必选择成本最小的航线完成运输。

8) 枢纽点的容量限制与机场数相关。假设双机场城市选择枢纽点的容量限制是单机场城市选择枢纽点的容量限制的2倍。

9) 若航段运营托运时,则该航段航空公司的承运货运量为0。

2.2 航空联盟运营选择概率函数

当航空公司选择加入联盟时,不同航段上的运营选择与其货运量、其他合作航空公司货运量及其

他合作航空公司运营选择有关。

当航空公司选择联盟承运时, 效益为

$$R_1 = P_x U_{11} + (1 - P_x) U_{12} \quad (1)$$

式中: R_1 为该航空公司业务承运时的效益; P_x 为其他合作联盟公司选择业务承运的概率; U_{11} 为该航空公司选择承运时, 其他航司也选择承运时的效益; U_{12} 为该航空公司选择承运时, 其他航司选择托运行时的效益。

$$U_{11} = \delta d_{ij} D_{ij} - (C_P + CT_{ij} d_{ij} D_{ij}) \quad (2)$$

式中: δ 为收益系数; i 和 j 分别为需求起点和终点; d_{ij} 为需求点 i 到点 j 的距离; D_{ij} 为需求点 i 到点 j 的发送量; C_P 为全货机在任一航段的固定飞行成本; CT_{ij} 为需求点 i 到点 j 的单位运输成本。

$$U_{12} = \delta d_{ij} D_{ij} - (C_P + CW_{ij} D_{ij} + CP_{TL[i,j]} + \alpha CT_{ij} d_{ij} D_{ij}) \quad (3)$$

式中: CW_{ij} 为需求点 i 到点 j 的单位重量装卸作业成本; $CP_{TL[i,j]}$ 为货机在任一航段的起降成本, 且每一次的起降合为 1 次, 且每次起降都相同; α 为航空公司联盟承运时的成本分摊系数, $0 < \alpha < 1$ 。

当航空公司选择联盟托运时, 效益为

$$R_2 = P_x U_{21} + (1 - P_x) U_{22} \quad (4)$$

式中: R_2 为该航空公司业务托运时的效益; U_{21} 为该航空公司选择托运时, 其他航司选择承运时的效益; U_{22} 为该航空公司选择托运时, 其他航司也选择托运行时的效益。

$$U_{21} = A_4 + \delta d_{ij} D_{ij} - (\beta CT_{ij} d_{ij} D_{ij}) \quad (5)$$

式中: A_4 为其他航司在承运时, 自身航空公司业务无法正常进行时的损失值; β 为航空公司联盟托运时的成本分摊系数, $\beta > 1$ 。

$$U_{22} = A_8 \quad (6)$$

式中: A_8 为其他航司在托运时, 该航空公司业务无法正常进行时的损失值。

因此, 航线选择承运的概率 $P_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$, 托运的概率 $P_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 。

为求解 A_4 、 A_8 , 通过使用改进前景理论函数。根据 Rieger 研究的风险厌恶问题, 提出改进损失价值的前景理论函数。

使用权重函数反映风险损失程度, 权重函数为

$$\pi(p) = \begin{cases} \pi^+(p) = \frac{p^\xi}{(p^\xi + (1-p)^\xi)^{1/\xi}} \\ \pi^-(p) = \frac{p^\tau}{(p^\tau + (1-p)^\tau)^{1/\tau}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: p 为概率; ξ 和 τ 为权重的变化程度, 也反映了决策者对待收益和风险的不同态度。

采用改进的风险价值函数, 评估风险损失大

小, 风险价值函数为

$$v(x) = \begin{cases} \lambda_1 x & x \geq 0 \\ -\theta + \theta \lambda_2 x & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: θ 为风险价值函数, 决策者对于损失敏感时, $\theta > 1$, 对于损失不太敏感时, $\theta \leq 1$; λ_1 和 λ_2 分别为价值函数在收益和损失时的凹凸程度, $0 < \lambda_1, \lambda_2 < 1$ 。

基于改进风险价值损失的前景理论函数为

$$V = \sum v(x) \pi(p) \quad (9)$$

因此,

$$A_4 = (-\theta + \theta \lambda_2 CW_{ij} d_{ij} D_{ij}) \cdot \frac{((D_{1ij} + D_{ij} - Q)/D_{ij})^\tau}{((D_{1ij} + D_{ij} - Q)/D_{ij}^\tau + (1 - (D_{1ij} + D_{2j} - Q)/D_{ij})^\tau)^{1/\tau}}$$

$$A_8 = -\theta + \theta \lambda_2 CW_{ij} d_{ij} D_{ij}$$

式中: Q 为飞机的最大载重量; D_{1ij} 为其他合作航空公司需求点 i 到点 j 的货运量。

2.3 基于转运的飞机航线路径优化模型

对于转运中心选址, 一般采用枢纽选址模型^[15], 解决需求点间的枢纽转运问题。针对飞机航线路径优化, 一般采用 FRP 模型^[16], 解决飞机路线设计、航空运输问题。因此, 本文将以总成本最小化为目标函数, 建立基于转运的飞机航线路径优化模型:

$$\min Z = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8 \quad (10)$$

飞机、基地及转运点的固定成本:

$$C_1 = \sum_{i=1}^T C_P^i + \sum_{n=1}^N CF_O^n + \sum_{k=1}^M (CF_k X_k) \quad (11)$$

式中: CF_O 为建设航空基地 $X_{[i,j]}^i$ 需要的固定成本; O 为航空基地, $O \in [1, 2, \dots, N]$; CF_k 为建设转运点 k 需要的固定成本, k 为转运点, $k \in [1, 2, \dots, M]$; X_k 为转运点 k 的转运概率, 服从 $0 \sim 1$ 分布。

运输成本, 包括航段直达承运、航段直达托运、航段转运承运、航段转运托运的总成本:

$$C_2 = \sum_{i=1, j=1}^M [(\alpha CT_{ij} d_{ij} D_{ij} y_{ij}) + \beta CT_{ij} d_{ij} D_{ij} (1 - y_{ij}) P_x] + \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K [(\alpha \theta CT_{ik} d_{ik} D_{ik} y_{ik}) + \beta CT_{ik} d_{ik} D_{ik} (1 - y_{ik}) P_x] + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M [(\alpha \theta CT_{kj} d_{kj} D_{kj} y_{kj}) + \beta CT_{kj} d_{kj} D_{kj} \cdot (1 - y_{kj}) P_x P_{okj}] \quad (12)$$

式中: y_{ij} 为航段 i 到 j 选择承运, 服从 $0 \sim 1$ 分布; CT_{ikj} 为点 i 经点 k 到点 j 的单位运输成本, $CT_{ikj} = \theta_1 CT_{ik} + \theta_3 CT_{kj} \approx \theta (CT_{ik} + CT_{kj})$, 总运输成本与重量、距离相关, θ_1 、 θ_3 为直达成本与转运成本之间系

数,且与运输航段有关, θ 为标准的直达成本与转运成本之间系数,可简化表示为 $CT_{ikj} = \theta(CT_{ik} + CT_{kj})$, d_{ikj} 为点*i*经点*k*到点*j*的距离, $d_{ikj} = d_{ik} + d_{kj}$; P_{Okj} 为转运前的出发点是基地的概率。

装卸降落成本,包括航段直达与转运两部分:

$$C_3 = \sum_{i=1, j=1}^M [(CW_{ij}D_{ij} + CP_{TL[i,j]})y_{ij}] + \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K [(CW_{ik}D_{ik} + CP_{TL[i,k]})y_{ik}] + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M [(CW_{kj}D_{kj} + CP_{TL[k,j]})y_{kj}] \quad (13)$$

等待作业时间成本:

$$C_4 = c_w \left(\sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T W_{jt} y_{jt} - \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T W_{ot} y_{ot} \right) \quad (14)$$

式中: c_w 为停机等待单位时间费用; W_{jt} 为第*t*架全货机在点*j*进行下一段服务的等待时间,与此架飞机在该机场装卸货的总运量相关, $W_{jt} = (D_{ijt} + D_{jtt}) \cdot \varsigma_1 + \varsigma_2$, ς_1 为单位货物的装卸时间, ς_2 为等待时间的固定值,指飞机飞行前的检修时间,在基地机场的等待费用不计。

提前服务时间成本:

$$C_5 = c_e \left[\sum_{i=1, j=1}^M \sum_{t=1}^T [\max((a - T_{ij}^t), 0)] y_{ij} \right] + \sum_{i=1, j=1}^M \sum_{t=1}^T [\max((a - T_{kj}^t), 0)] y_{kj} \quad (15)$$

式中: c_e 为提前开始服务的单位时间惩罚成本; T_{ij}^t 为第*t*架全货机在航段[*i*, *j*]上实际开始飞行的时间,为前一段起飞的时间、前一航段的运输时间及在机场的等候时间之和,假设飞机的平均时速为 800 km/h,即 $T_{ij(2)}^t = T_{ij(1)}^t + \frac{d_{ij(1)}}{8} + W_{jt}$; $T_{[a,b][i,j]}$ 中[*a*, *b*]为航段允许飞行的时间窗,*a*为最早时间,*b*为最晚时间。

延迟服务时间成本:

$$C_6 = c_d \sum_{i=1, j=1}^M \sum_{t=1}^T [\max((T_{ij}^t - b), 0)] y_{ij} \quad (16)$$

式中: c_d 为推迟服务的单位时间惩罚成本。

超过 24 h 的服务时间成本:

$$C_7 = \sum_{i=1, j=1}^M \sum_{t=1}^T E_{ij}^t e \quad (17)$$

式中: E_{ij}^t 为飞行开始时间超过 24 h 的航段,服从 0~1 分布; e 为超过飞行时间约束的惩罚成本。

无人运输的惩罚成本:

$$C_8 = \sum_{i=1, j=1}^M [(\delta CT_{ij} + C_w) d_{ij} D_{ij} (1 - y_{ij}) (1 - P_x)] + \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K [(\delta CT_{ik} + C_w) d_{ik} D_{ik} (1 - y_{ik}) (1 - P_x)] + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M [(\delta CT_{kj} + C_w) d_{kj} D_{kj} (1 - y_{kj}) (1 - P_x)] + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M [(\delta CT_{kj} + C_w) d_{kj} D_{kj} (1 - y_{kj}) P_x (1 - P_{Okj})] \quad (18)$$

式中: C_w 为无承运时的单位损失成本。

约束条件包括车场限制、转运点限制、车辆限制、需求限制及其他限制。

车场限制:

$$\sum_{i=1}^M X_{[O,i]}^t = 1 \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^M X_{[i,O]}^t = 1 \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{T \in R} X_{[O,i]}^t \leq Q_N \quad (21)$$

式中: $X_{[O,i]}^t$ 为第*t*架全货机在航空基地到下一个任意机场被使用的概率,服从 0~1 分布; $X_{[i,O]}^t$ 为第*t*架全货机从到任意机场返回到航空基地被使用的概率; Q_N 为航空公司在基地*N*的最大飞机数量约束。

转运点限制:

$$\sum_{k=1}^M X_k = K \quad (22)$$

$$\begin{cases} CT_{ikj} = \theta(CT_{ik} + CT_{kj}) < CT_{ij} \\ \sum_{i=1}^N D_{[i,k]} < Q, \sum_{j=1}^N D_{[k,j]} < Q, X_{ikj} = 1 \\ CT_{ikj} = \theta(CT_{ik} + CT_{kj}) \geq CT_{ij} & X_{ij} = 1 \end{cases} \quad (23)$$

$$\sum_k X_{ikj} + X_{ij} = 1 \quad (24)$$

$$2X_{ikj} + X_{ik} + X_{kj} \leq Q_k \quad (25)$$

式中: $D_{[i,k]}$ 、 $D_{[k,j]}$ 分别为航段[*i*, *k*]和[*k*, *j*]上的流量; X_{ikj} 为需求量 D_{ij} 从点*i*经点*k*到点*j*的概率,服从 0~1 分布; X_{ij} 为需求量 D_{ij} 从点*i*直达到点*j*(不经点*k*)的概率,服从 0~1 分布,且任意 2 个航空节点间的货物只能沿着一条运输成本最小的航线完成运输; Q_k 为航空公司在转运点*k*的最大起降能力。

车辆限制:

$$D_{[i,j]}^t \leq Q \quad (26)$$

式中: $D_{[i,j]}^t$ 为第*t*架全货机在航段[*i*, *j*]上的运输量。

需求限制:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^T y_{ij} X_{[i,j]}^t D_{ij} + (1 - y_{ij}) D_{ij} = D_{ij} \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^M X_{[i,k]}^t - \sum_{j=1}^M X_{[k,j]}^t = 0 \quad \forall k \in M \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{T \in \mathbf{R}} X_{[i,j]}^t \geq 0 \quad (29)$$

$$\sum_{T \in \mathbf{R}} D_{[i,j]}^t = D_{[i,j]} \quad (30)$$

$$D_{[i,j]}^t \leq Q_{[i,j]} \quad (31)$$

式中: $X_{[i,j]}^t$ 为第 t 架全货机在任意航段被使用的概率, 服从 $0 \sim 1$ 分布; y_{ij} 为航段 i 到 j 选择承运的概率, 服从 $0 \sim 1$ 分布; $Q_{[i,j]}$ 为航段 $[i, j]$ 空域上的最大容量, $D_{[i,j]}$ 为航段 $[i, j]$ 上的总流量, $D_{[i,j]} = \sum_{l \in M} (D_{lij} + D_{ijl}) + D_{ij}$ 。

其他限制:

$$T_{kj}^t = \max(T_{ik}^t + W_{ik} + W_{kj} T_2[i, k]) \quad \forall i \in M, \forall t \in T \quad (32)$$

$$P_{okj} = \begin{cases} 1 & b_2 - \frac{d_{kj}}{8} - 2W_{kj} - T_{ik}^t > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (33)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{[i,j]}^t \leq |S| - 1 \quad \forall t \in \mathbf{R}, S \subset V \quad (34)$$

式中: $T_2[i, k]$ 为转运情况下另外一条转运航线第一段的运输时间。

决策变量:

$$X_k = \{0, 1\} \quad (35)$$

$$X_{ij} = \{0, 1\} \quad (36)$$

$$X_{ikj} = \{0, 1\} \quad (37)$$

$$X_{[i,j]}^t \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall t \in \mathbf{R} \quad (38)$$

3 算法设计

3.1 算法选择及流程

本文研究的航空公司转运点选址和飞机路径联合优化问题, 需要解决的问题有: ①确定货物的转运点; ②每架飞机的飞行路线。

对该类联合优化问题的求解大多采用遗传算法, 考虑本文研究属于 LRP, 也将采用遗传算法求解, 本文研究的创新性是基于有向需求的优化问题, 因此, 将基因工程中的剪切技术运用在遗传算法的交叉与变异过程中, 设计自适应遗传算法求解转运点选址及飞机路径优化问题, 优化过程如图 4 所示, 其中, 终止条件 1 为: 需要将所有的需求点全部计算完, 终止条件 2 为: 根据计算结果, 与上一轮的结果比较留质最优的结果, 且迭代次数达到了规定。

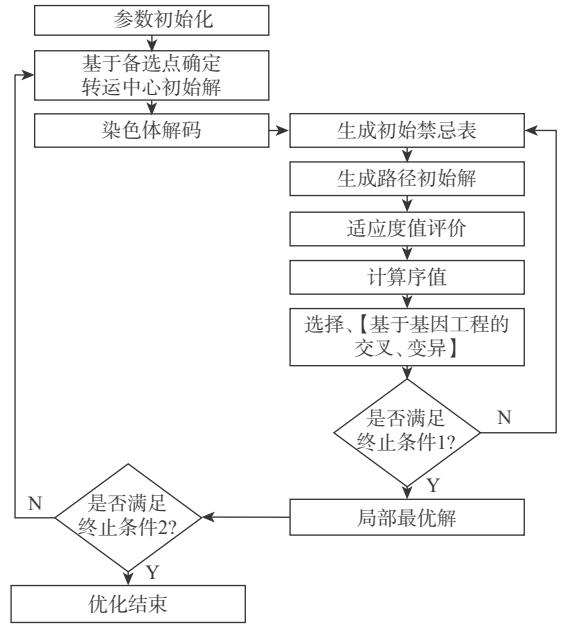


图 4 算法流程

Fig. 4 Algorithm flow

3.2 算法改进及设计

步骤 1 改进编码形式及参数初始化, 改进的编码形式如图 5 所示。

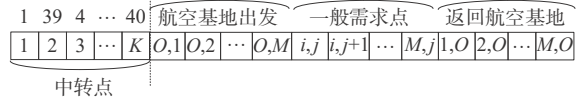


图 5 改进的编码形式

Fig. 5 Improved coding form

采用分段编码的形式, 分为 2 段。第 1 段采用整数染色体编码形式, 共有 K 个个体, 表示 K 个中转点, 每一个染色体基因代表第几个机场被选为中转点。第 2 段采用向量编码的形式, 在可行域内随机产生 $M \times M$ 个个体, 且将第 2 段编码分为 3 个部分, 第 1 部分代表基地机场出发的需求, 第 2 部分为需求点的需求, 第 3 部分代表返回基地机场的需求, 构成初始种群。若有 2 个航空基地, 10 个需求点, 则将产生一条 10×10 的群体, 编号为 $[(1,3), (3,4), (4,5), (5,1), (1,2), (2,6), (6,7), (7,8), (8,2), (2,1), (1,9), (9,10), (10,1)]$, 代表相应的路径, 需要 3 架飞机进行运输, 路线 1 为 1-2-3-5-1, 路线 2 为 2-6-7-8-2, 路线 3 为 1-9-10-1。

步骤 2 基于备选点确定转运中心初始解。在给定的 K 个备选点中, 随机选择确定 K 个个体, 作为转运点初始解。

步骤 3 染色体解码。染色体解码的目的是为了获取每一架飞机所运输的起终点需求, 即 OD 对解码的具体过程如下: ①初始化一条路径; ②将染色体中的基因值顺序插入到当前路径中, 其中经中转运输的航段必须符合转运点的约束条件, 若 1 个基因值的插入导致该路径的负荷超过了飞机、航段

的最大容量或飞机飞行时长的约束,则开始构建新的路径;③重复1、2操作,通过扫描方式直至所有OD对均被插入到路径中分割成多个染色体,最终形成一个可行解。若有2个航空基地,10个需求点,则将产生1个可行解。为避免出现不可行解等问题,在该步骤按照假设条件及约束条件,进行解码,确保解的可行性。假设染色体的编码为[(1,3),(3,4),(4,5),(5,1),(1,2),(2,6),(6,7),(7,8),(8,2)],初始化一条路径(即一个空的数组),将染色体的基因依次插入路径中,假设当插入“(1,2)”时,该路径的负荷超过了飞机的最大容量或飞机到达航段(1,2)时的时长超过了规定时间,则将1-2-3-5-1分配给飞机1。因为染色体的基因还没有完全分配完,所以构建一个新的路径,将未分配的基因依次插入路径,假设插入到(8,2)时,该路径的负荷满足要求同时飞机飞行时长也符合规定,由于需求OD对已经全部分配完毕,因此将2-6-7-8-2分配给飞机2。至此解码结束。

步骤4 生成禁忌表。根据各需求OD对,可随机生成一条染色体,应用式(23)计算转运选择,如图6所示。

初始禁忌表					
起点	1	2	3	4	3
终点	6	8	4	7	6
是否转运	1	0	1	0	1
转运点	4	0	2	0	4

图6 初始禁忌表示意

Fig. 6 Diagram of initial taboo list

步骤5 生成路径初始解:①根据航段上总的OD需求,应用航司随机选择均衡函数,初步确定不同航段上的运输选择行为;②总OD需求合并后若大于1架飞机总载重时,多余的航段需求OD全部托运,该位置记为空;③根据步骤3、4的信息,依次连续选择飞机运输航线,且出发点为1,2开头的航空基地,返回点也需为1,2结尾,当1架飞机新增1个航段任务导致飞行时间超过24h,则返回上一航段结束,并将已完成运输航段记为-1;④当2架飞机完成1个经转运的OD需求时,若后一段运输发生时间早于前一段,则需要将后一段需求托运,将转运后联盟承运记为0,更新选择行为;⑤根据最新选择行为,将转运前后联盟承运记为1的航段,按照第3步重新生成路径,如图7所示,[]表示自营飞机不承担运输,由联盟的其他公司承担运输。

步骤6 适应度值评价。根据式(10)~式(18),计算适应度值。

步骤7 选择。根据步骤3、4、5计算结果,采用锦标赛法进行选择操作,选择 $N/2$ 染色体。具体选择方法为,当锦标赛法排序选择时,染色体 z_1 锦标赛的大小大于染色体 z_2 锦标赛的大小,染色体 z_2 优于染色体 z_1 ;或当锦标赛值相等且染色体 z_2 适

修正后禁忌表					
起点	1	2	3	4	3
终点	6	8	4	7	6
转运	1	0	1	0	1
转运点	4	0	2	0	4
转运前联盟自营	1	0	1	1	1
转运后联盟自营	0	0	1	1	0
转运前运输飞机	1	[]	2	4	5
转运后运输飞机	[]	[]	3	4	[]

图7 修正后禁忌表示意

Fig. 7 Diagram of revised taboo list

应度值大于染色体 z_1 ,染色体 z_2 优于染色体 z_1 。

步骤8 基于基因工程的交叉、变异。根据交叉概率 p_c ,借鉴染色体重组技术,利用剪切酶思想,选择其中任意一段剪切,且将切割位点表示为剪切基因位,并在该条染色体的其他位置选择相同剪切基因位的任意长度进行剪切,并交换2段的位置。此时2段基因交叉可近似视为一般遗传算法的单点交叉,基于基因工程的染色体交叉过程如图8所示。根据变异概率 p_m ,和改进交叉方法相同,基于染色体中的某段基因,选择将其中一小段基因进行变异,同时在变异位置后,选择与前段基因连接相同的基因,并将该段基因中的一小段基因与前段基因变异,此时的2段基因变异可近似视为一般遗传算法的单点变异,基于基因工程的染色体变异过程如图9所示。

步骤9 精英数目。合并父代及子代的种群染色体,形成新种群 $P(h)$,经过序值、拥挤度、交叉等

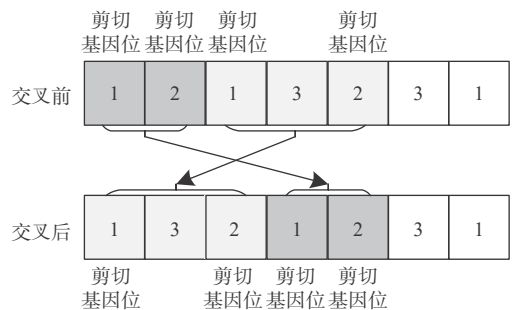


图8 基于基因工程的染色体交叉过程

Fig. 8 Chromosome crossover process based on genetic engineering

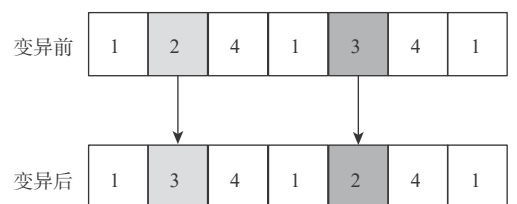


图9 基于基因工程的染色体变异过程

Fig. 9 Chromosome mutation process based on genetic engineering

操作得到下一代群体 $P(t+1)$, 并按照适应度值升序排列选择染色体, 最终选择 H 个染色体。

步骤 10 终止判断 1。即需要将所有的需求点全部计算完后达到终止条件 1, 则终止程序, 并通过结果验证, 选择的染色体不能重复输出结果, 否则返回步骤 3。

步骤 11 终止判断 2。即根据计算的结果, 与上一轮的结果比较留取最优的结果, 且迭代次数达到了规定, 则终止程序, 并通过结果验证, 选择的染色体不能重复输出结果, 否则返回步骤 2。

4 算例分析

4.1 参数设置及基本情况

S 货运航空公司实际运营时, 单位运输成本 $CT=0.0033$ 元/(kg·km), 假设飞机的最大载重量 $Q=30000$ kg, 每段航程所需的固定费用(包括飞机折旧)为 $C_p=25000$ 元/(架·次), 装卸作业成本为 $CW=0.5$ 元/kg, 飞机的起降费 $CP_{TL}=20000$ 元/(架·次), 无承运时的单位损失成本为 $C_w=-0.001$ 元/(kg·km), 航空基地分摊至每天的建设成本 CF_0 服从均匀分布 $U(300000, 400000)$, 每个基地的飞机容量限制 Q_N 服从均匀分布 $U[10000, 20000]$, 且双机场城市 {上海、北京、成都} 的容量限制 Q 服从其他单机场容量限制的 2 倍, 即服从 $U[20000, 40000]$ 。枢纽点建设成本 CF_k 服从均匀分布 $U(20000, 40000)$, 枢纽转运运输成本系数为 $\theta=0.8$, 备选航空枢纽点数量为 $N=6$, 假设不同航段的容量限制服从均匀分布 $U[30000, 60000]$, 各航段的时间窗满足 $[U(0, 18000), U(0, 18000)+U(2000, 6000)]$, 超过飞行时间约束的惩罚成本 e 为 500000 元。已知航空公司基地为 {4 深圳、5 杭州}, 航空枢纽点备选集合为 {1 北京、2 广州、6 沈阳、7 郑州、8 武汉、9 成都}, 其他参数如表 1 所示。

表 1 修正后禁忌表主要参数设置

Table 1 Revised taboo list Main parameter setting

参数	数值
δ	2.5
α	0.6
β	1.6
τ	0.9
θ	2.5
P_x	服从 $U(0.4, 1)$
D_{ij}	服从 $U(0, 30000)$
$c_1/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	2000
$c_2/\text{元}$	30000
λ_2	0.8

4.2 计算结果

改进的自适应遗传算法利用 MATLAB R2016b 软件, 在 Inter Core i7-8550U CPU @ 1.80 GHz 1.99 GHz, 8.00 GB 内存电脑上运行计算, 通过数值实验分析改进算法的参数对计算结果的影响如图 10 所示, 求解算法的具体参数设置如下: 种群大小 $NP=100$, 交叉概率 $p_c=0.8$, 变异概率 $p_m=0.8$, 最大迭代数 $G=100$ 。当转运点数量为 2 时, 在第 27 代算法收敛, 说明设计的改进算法具有较高的收敛性, 算法的迭代收敛曲线如图 11 所示。

不同转运点数量的优化选择结果如表 2 所示, 不同优化方案的最优飞机机队路线如表 3 所示。从表 2 可以看出, 基地机场数量越多, 总成本越小, 且任意转运点数量时转运点都包含成都, 即双机场所在城市, 符合航空公司、机场各方业务发展需要。但是总成本越小的方案, 不一定是最优的决策方案。企业的决策者需根据不同时期的需求确定不同的计划。当企业资本较小时, 应选择表 2 中的最优选择 4 或 5; 当企业在市场扩充时, 为赢得更多客户, 应该选择表 2 中的最优选择 1 或 2。

4.3 敏感性分析

1) 不同需求量下的结果分析。不同转运点的数量及位置, 在需求量倍数增长下, 单位数量的总

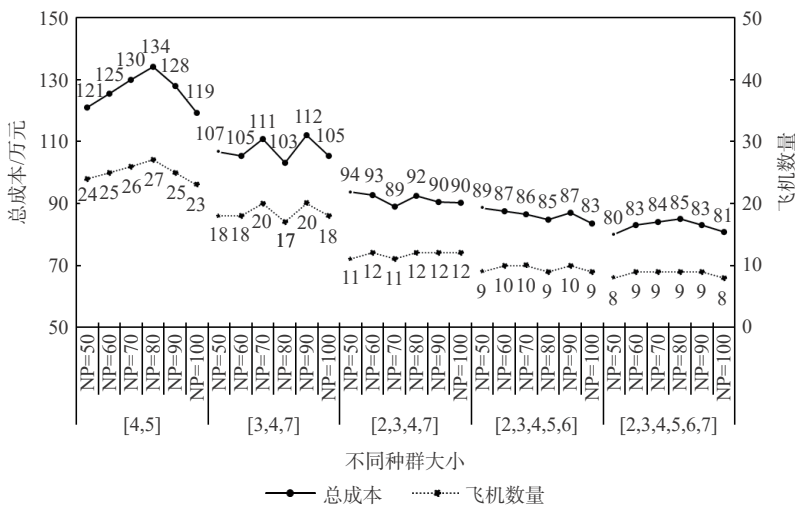


图 10 种群大小对计算结果的影响

Fig. 10 Effect of population size on calculation results

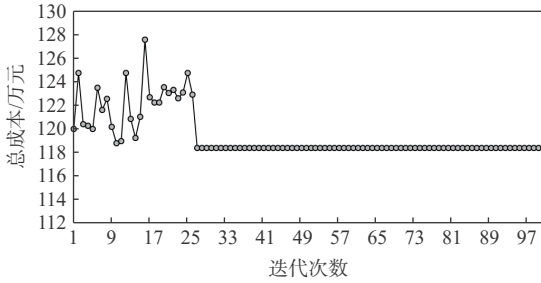


图 11 收敛曲线

Fig. 11 Convergence curve

成本与飞机数量会有所增长,且增长率不断增大。总成本的平均增长率为-19.3%,飞机数量的平均增长率为106.8%。在同一种转运点类型下,单位数量的总成本与飞机数量的增长率相差不大,其中2个转运点的总成本的平均增长率为-12.5%,飞机数量的平均增长率为41%;其中3个转运点的总成本的平均增长率为-11.5%,飞机数量的平均增长率为60.1%;其中4个转运点的总成本的平均增长率为-14.2%,飞机数量的平均增长率为91.7%;其中2个转运点的总成本的平均增长率为-18.7%,飞机数量

表 2 不同转运点数量的优化选择结果

Table 2 Optimal selection results of different number of transfer points

转运点个数	转运点位置	飞机数量	总成本/元	最优选择
2	[7郑州, 8武汉]	30	1 422 415	-
	[6沈阳, 7郑州]	23	1 191 386	√1
	[1北京, 6沈阳, 8武汉]	20	1 109 964	-
	[2广州, 6沈阳, 9成都]	18	1 054 360	√2
4	[1北京, 7郑州, 8武汉, 9成都]	25	1 237 837	-
	[1北京, 2广州, 6沈阳, 9成都]	11	901 209	√3
	[1北京, 6沈阳, 7郑州, 8武汉, 9成都]	16	1 010 882	-
6	[1北京, 2广州, 6沈阳, 8武汉, 9成都]	9	834 697	√4
	[1北京, 2广州, 6沈阳, 7郑州, 8武汉, 9成都]	8	807 710	5

注:“-”表示不是最优选择;“√1、√2、√3、√4、√5”表示最优选择1、最优选择2、最优选择3、最优选择4、最优选择5。

表 3 5种方案的最优飞机机队路线

Table 3 Optimal aircraft fleet route of five schemes

转运点位置	飞机线路
[6沈阳, 7郑州]	5-(7)-11-(7)-32-(6)-2-5 4-2-(6)-5-(7)-25-4
	5-31-(6)-2-(6)-26-17-9-5 4-37-10-(7)-5-(7)-37-4
	5-37-(6)-22-(6)-37-5-32-5 5-(7)-2-(6)-5-(6)-36-5
	4-21-37-(7)-25-(6)-2-4 5-22-2-(6)-35-(6)-2-5
	4-36-(6)-2-(6)-26-9-4 4-(7)-15-(6)-2-(6)-37-4
	5-9-11-(7)-5-(7)-25-(7)-18-5 5-2-(6)-36-(7)-5-(7)-2-(7)-5
	5-26-11-37-26-11-5 4-37-(7)-5-(7)-18-(7)-2-4
	5-(7)-20-(7)-2-(6)-5 5-11-37-(6)-9-(6)-2-37-5
	5-21-5-(7)-25-26-(6)-2-5 5-2-(6)-12-37-(6)-30-5
	5-37-11-(7)-5-(7)-21-2-5 5-37-(6)-2-(6)-15-2-5
	5-(6)-22-(6)-5-17-25-5 4-18-2-(6)-37-4
	5-17-37-20-(7)-5-(7)-31-5
[2广州, 6沈阳, 9成都]	4-3-9-(6)-7-(6)-5-11-12-4 5-37-(6)-20-(2)-5-(2)-5
	5-(9)-11-(9)-32-(9)-11-(2)-3-5 4-(6)-22-(6)-5-(9)-25-(2)-10-4
	5-31-5-32-5-(6)-21-5 4-37-(2)-3-(9)-5-(2)-22-25-4
	4-37-(2)-22-(2)-25-37-(6)-26-4 5-37-(9)-5-(2)-22-(2)-5
	4-10-(6)-36-(9)-5-(9)-11-(2)-3-4 4-18-17-(2)-25-(2)-17-37-4
	4-17-(2)-3-(2)-5-(6)-21-4 4-11-(9)-5-(9)-31-7-(6)-37-4
	4-(9)-25-(2)-18-(2)-26-11-4 5-7-(6)-36-(9)-5-(9)-15-37-5
	4-37-(2)-25-26-11-(9)-11-4 4-(2)-21-(6)-37-(9)-5-(9)-3-4
	5-(9)-3-(2)-25-3-5 5-37-(9)-5-(9)-37-(9)-36-5
[1北京, 2广州, 6沈阳, 9成都]	5-(2)-31-5-32-5 5-(9)-37-(7)-7-5
	4-11-(2)-32-(2)-11-(7)-21-(7)-37-4 5-25-(9)-17-37-11-5
	5-22-(9)-37-(2)-25-26-(9)-5 4-(6)-22-(9)-37-(2)-25-26-(9)-10-37-4
	4-37-(9)-5-25-(9)-10-4 5-26-5-(2)-25-(2)-5-(6)-20-5
	4-36-(9)-5-(9)-17-(7)-5-(7)-21-4 4-37-(6)-20-(6)-36-37-4
4-11-26-11-(7)-25-4 4-22-(6)-5-(2)-25-(2)-18-4	
[1北京, 2广州, 6沈阳, 8武汉, 9成都]	4-38-(3)-5-11-4 4-32-11-22-(9)-38-(2)-26-4
	5-12-(2)-35-(2)-12-26-5 4-27-12-37-5-38-(3)-25-(6)-4
	4-11-(9)-38-5-11-22-4 5-21-11-(2)-26-(2)-11-27-5
	5-(9)-18-(3)-26-(3)-18-(9)-38-5 4-38-27-37-38-4
[1北京, 2广州, 6沈阳, 7郑州, 8武汉, 9成都]	5-32-5-11-5-(8)-21-5 4-25-(2)-17-(7)-36-5-11-26-(8)-37-4
	4-11-(1)-32-(1)-11-(8)-25-4 5-(7)-18-(1)-25-(1)-18-(7)-37-5
	5-26-5 4-26-5-(1)-25-4
4-11-(8)-21-(7)-37-(2)-22-(2)-37-4 5-37-(8)-5-5	

的平均增长率为 111.6%; 其中 2 个转运点的总成本的平均增长率为 -20.1%, 飞机数量的平均增长率为 122%。对比总体可知, 当转运点数量越多, 所节省

的成本不断扩大, 所使用的飞机数量也越多, 如图 12 所示。因此建议在企业运营决策中, 多考虑多转运点的情况, 降低成本。

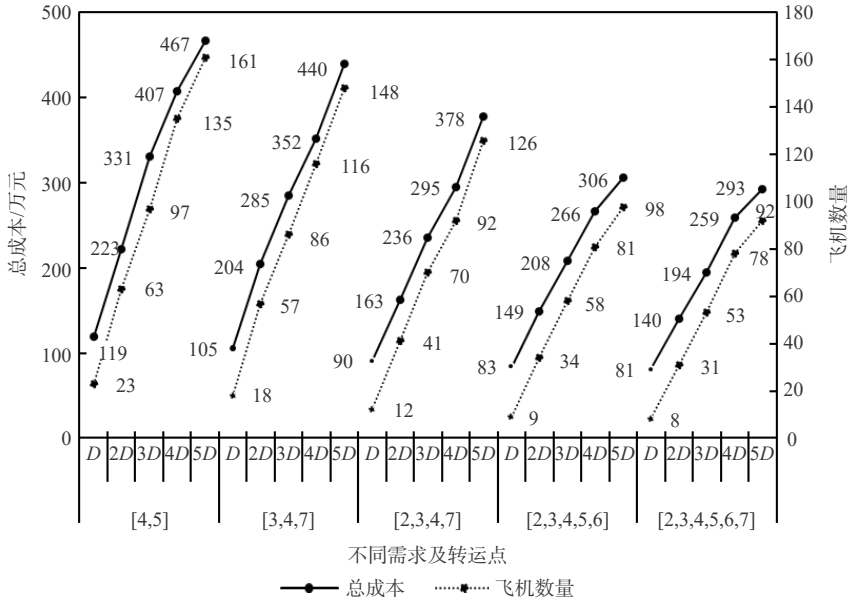


图 12 不同需求量下的计算结果

Fig. 12 Calculation results under different demands

2) 不同飞机载重量下的结果分析。不同转运点的数量及位置, 在飞机载重量增长下, 总成本与飞机数量有所下降, 但趋势较缓。不同数量的转运点对比中, 同一载重量的总成本随着转运点数量的增多而降低的幅度较大。随着载重量从 30 000 kg, 35 000 kg, 40 000 kg, 45 000 kg, 50 000 kg 的变化过程, 总成本平均增

长率分别为 -23%、-26.1%、-23%、-24.5%、-25%, 飞机数量平均增长率分别为 -45.7%、-48.9%、-50%、-53.3%、-54.5%, 下降的趋势明显, 如图 13 所示。总之, 转运点数量较少时, 飞机的载重量对优化结果的影响较小, 当飞机载重量较大时, 决策者需考虑转运点数量多的方案。

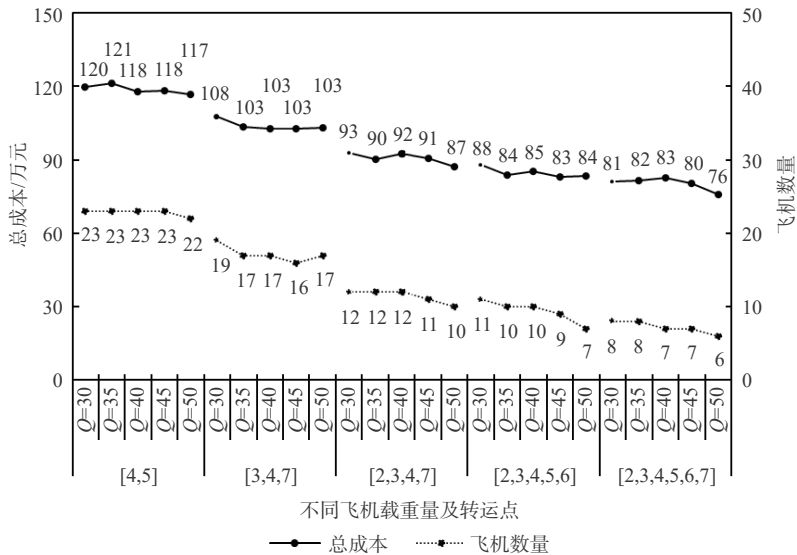


图 13 不同飞机载重量下的计算结果

Fig. 13 Calculation results under different aircraft load

3) 不同飞机固定成本下的结果分析。不同转运点的数量及位置, 在飞机固定成本增长下, 总成本与飞机数量会呈负增长趋势, 且增长率逐渐趋于

平缓。若飞机固定成本较小时, 较多的转运点数量可以减少总成本、降低飞机使用数量。若当飞机固定成本较高时, 转运点越多, 则航空公司越多的无

法进行承运运输,此时选择托运的概率越大。随着飞机固定成本从25 000元,30 000元,35 000元,40 000元,45 000元的变化过程,总成本平均增长率分别为-24.5%、-23.7%、-10.3%、-7.2%、-9.7%,飞机数量平均增长率分别为-48.9%、-62.5%、-27.3%、-22.2%、-28.6%,下降的趋势明显,如图14所示。总而言之,飞机的固定成本较少时,越多的转运点则总成本、飞机使用数量越小。当飞机的固定成本较大时,企业选择托运的概率越大。

4) 不同成本与收益的系数结果分析。不同的收益系数,较大程度影响决策。当收益系数保持不变时,转运点数量越多,总成本与飞机的数量越小,平均增长率分别为-25.5%和-48.6%。但当转运点数量保持不变时,收益系数越多,总成本与飞机的数量越多,平均增长率为56.3%和234%,如图15所示。因此,航空公司成本与收益的系数的大小对决策的影响很大,系数越大时,可选择转运点数量越少的决策方案。

5) 不同航空联盟成本分摊系数结果分析。当航空联盟承运成本分摊系数 α 一定时,随着托运成本分摊系数 β 的增多,总成本平均增长率为5%,飞机数量平均增长率为17.3%。当航空联盟托运成本分摊系数 β 一定时,随着承运成本分摊系数 α 的增多,总成本平均增长率为-9.3%,飞机数量平均增长率为-22.4%,如图16所示。总之,托运分摊系数越大,选择承运运输的概率越大,使用的飞机数越多,但同时总成本越大。反之承运分摊系数越大,航空托运的概率越大,使用的飞机数越少,但同时总成本越小。

6) 决策者风险损失偏好不同参数的结果分析。①决策者对损失的敏感度。当转运点数量保持不变时,不同的决策者对损失的敏感度对优化结果的影响较小,总成本的平均增长率为3%,飞机数量的平均增长率为9.5%。但当决策者对损失的敏感度保持一定时,随着转运点数量的增多,总成本的平均增长率为24.4%,飞机数量的平均增长率为

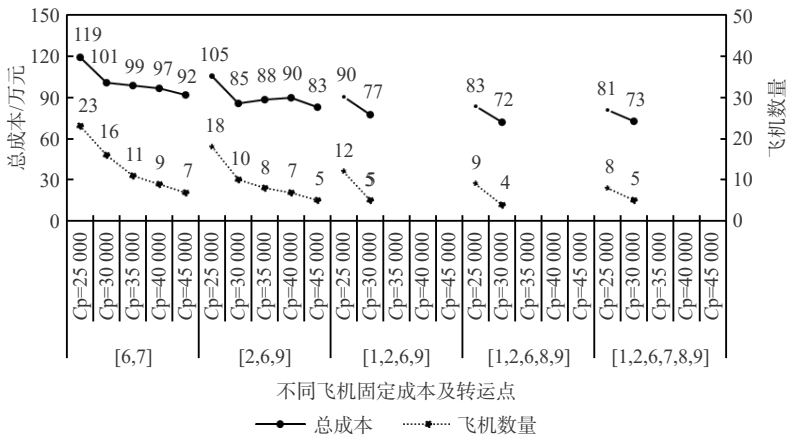


图14 不同飞机固定成本下的计算结果

Fig. 14 Calculation results under different aircraft fixed costs

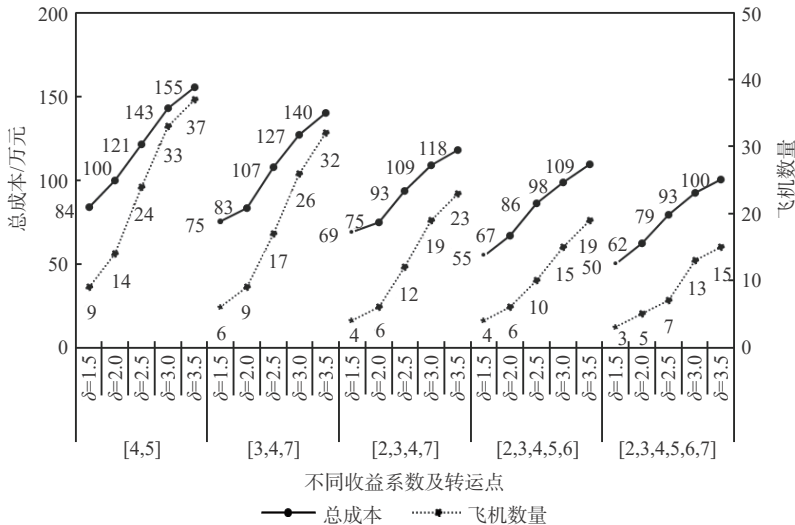


图15 不同成本与收益的系数下的计算结果

Fig. 15 Calculation results under different coefficients of cost and benefit

51.3%, 如图 17 所示。因此, 决策者对风险损失敏感度越高, 则选择承运的概率越大, 此时所需的总成本、飞机数量越多。②风险损失时权重的大小。当转运点数量保持不变时, 不同的决策者对风险损失时权重大小对优化结果的影响较小, 总成本的平均增长率为 0.4%, 飞机数量的平均增长率为 2.1%。

但当决策者对风险损失时权重大小保持一定时, 随着转运点数量的增多, 总成本的平均增长率为 25.6%, 飞机数量的平均增长率为 50.8%, 如图 18 所示。因此, 决策者对风险损失时权重大小, 对企业决策影响较小。若为取得更低的成本, 应多采取转运点数量多的方案。

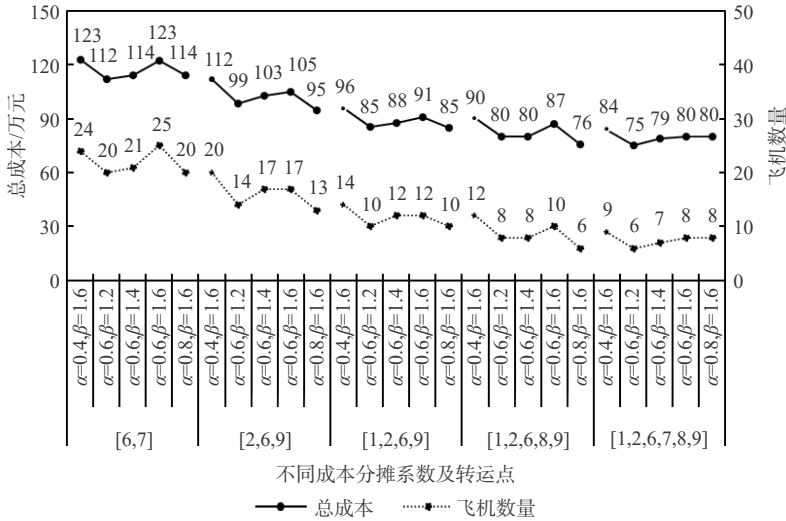


图 16 不同航空联盟成本分摊系数下的计算结果

Fig. 16 Calculation results under different cost sharing coefficients of aviation alliance

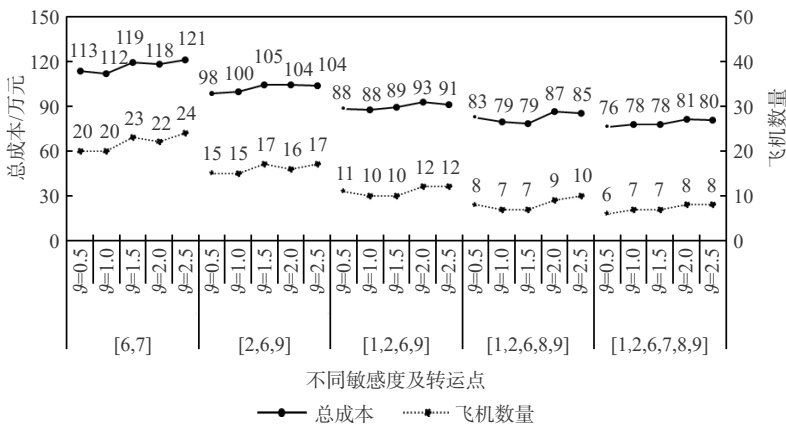


图 17 不同决策者对损失的敏感度下的计算结果

Fig. 17 Calculation results under different sensitivity of decision maker to loss

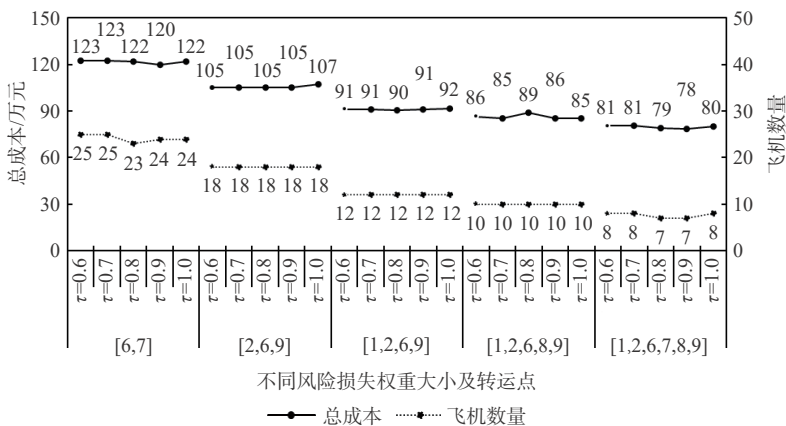


图 18 不同风险损失时权重的大小下的计算结果

Fig. 18 Calculation results under the weight of different risk losses

5 结论

本文主要解决航线联营下基于转运的飞机航线路径优化问题。引入损失价值的前景理论,确定航空联盟选择概率函数,建立基于转运的飞机航线路径优化模型,将基因工程引入到交叉变异过程中,设计改进的遗传算法求解模型,最后通过案例分析,可得到以下结论:

1) 在转运点的确定过程中,当转运点数量超过3个时,双机场城市被货运航空公司选为转运点的概率为1。当转运点数量较少时,转运点的位置一般集中在与基地位置较远的区域中心城市。在航空运输过程中,企业的决策与机场的建设之间相互影响。

2) 当货运航空公司航段上的货运需求量大于1/6飞机载重量时,公司93.4%会选择直达运输,此时公司会选择自己承运航段上的业务。若当货运需求量小于1/80飞机载重量时,公司90%会选择中转运输,但有56%会选择自己承运航段上的业务。

3) 需求量、飞机固定成本、收益系数的大小、承运成本与托运成本的大小对飞机航线路径优化决策的影响较大。飞机载重量的大小对飞机航线路径优化决策的影响较小,代表机型对优化结果的影响较小,在轴辐式网络及航线联营下,货运航空公司可自主选择任意飞机机型。

参考文献 (References)

[1] 胡皓月,朱金福,葛伟,等.基于多层QSI的航空联盟网络优化研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016,40(5):880-884.
HU H Y, ZHU J F, GE W, et al. Research on network optimization of aviation alliance based on multi-layer QSI[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Traffic Science and Engineering), 2016, 40(5): 880-884(in Chinese).

[2] YANS, CHEN C. Optimal flight scheduling models for cargo airlines under alliances[J]. Journal of Scheduling, 2008, 11(3): 175-186.

[3] 于焯,樊玮.基于均衡条件的成本最小化航线调配问题研究[J].计算机技术与发展,2017,27(8):145-148.
YU Z, FAN W. Research on cost minimization route allocation based on equilibrium conditions[J]. Computer Technology and Development, 2017, 27(8): 145-148(in Chinese).

[4] 于焯,樊玮.机场航班航线调度优化管理仿真研究[J].计算机仿真,2018,35(7):54-58.
YU Z, FAN W. Simulation Research on optimization management of airport flight route scheduling [J]. Computer Simulation, 2018, 35 (7): 54-58 (in Chinese).

[5] 裴一麟.基于双层规划的航线网络和航班时刻优化研究[D].天

津:中国民航大学,2018:44-48.
PEI Y L. Research on route network and flight schedule optimization based on bi level programming [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018:44-48 (in Chinese).

[6] 陈梵驿,杨新渥,翟文鹏,等.基于决策树C4.5算法的京津冀机场群航线网络优化[J].中国科技论文,2017,12(7):798-801.
CHEN F Y, YANG X S, ZHAI W P, et al. Route network optimization of Beijing Tianjin Hebei airport group based on decision tree C4.5 algorithm[J]. Chinese Scientific Paper, 2017, 12(7): 798-801 (in Chinese).

[7] 周琨.航空公司航班运行调度模型与算法研究[D].南京:南京航空航天大学,2012:23-32.
ZHOU K. Research on airline flight scheduling model and algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012:23-32 (in Chinese).

[8] ZHANG Y, SU R, LI Q, et al. Distributed flight routing and scheduling for air traffic flow management[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(10): 2681-2692.

[9] 刘家鹏,张雪松.基于改进自适应遗传算法的特种飞机航线规划方法[J].中国电子科学研究院学报,2014,9(5):526-530.
LIU J P, ZHANG X S. Route planning method for special aircraft based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Journal of China Academy of Electronic Sciences, 2014, 9(5): 526-530(in Chinese).

[10] 谷润平,王倩,李佳妮.基于机型航线优化的多目标规划[J].南京航空航天大学学报,2016,48(6):917-921.
GU R P, WANG Q, LI J N. Multi objective programming based on aircraft route optimization[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 48(6): 917-921(in Chinese).

[11] 王苗苗.联盟环境下航空公司航线网络优化研究[D].南京:南京航空航天大学,2016:19-22.
WANG M M. Research on airline route network optimization in alliance environment [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016:19-22 (in Chinese).

[12] 杨忠振,于述南,陈刚.混合式航空货运网络优化[J].交通运输工程学报,2016,16(1):104-114.
YANG Z Z, YU S N, CHEN G. Hybrid air cargo network optimization[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 16(1): 104-114(in Chinese).

[13] ARMACOST A P, BARNHART C, WARE K A, et al. UPS optimizes its air network[J]. Interfaces, 2004, 34(1): 15-25.

[14] MOHRI S S, KARIMI H, KORDANI A A, et al. Airline hub-and-spoke network design based on airport capacity envelope curve: A practical view[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 125: 375-393.

[15] YANG Z, YU S, NOTTEBOOM T. Airport location in multiple airport regions (MARs): The role of land and airside accessibility[J]. Journal of Transport Geography, 2016, 52: 98-110.

[16] 陈梵驿.京津冀机场群协同发展下的航线优化研究[D].天津:中国民航大学,2017:55-56.
CHEN F Y. Research on route optimization under the collaborative development of Beijing Tianjin Hebei airport group [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017: 55-56 (in Chinese).

Air freight route planning based on transshipment under air alliance

YAN Yan^{1, 2}, MA Xiaolai^{2, 3, *}

(1. School of Management, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, China;

2. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to solve the problems of the high cost of air transportation and waste of idle transportation resources, this paper puts forward the research on route optimization of aircraft based on transshipment under route alliance. Firstly, based on the problem of cargo transfer, considering the impact of the alliance on the operation, the selection probability of aviation alliance is introduced to determine the self operation and outsourcing of segment transportation before and after the transfer, and the connection of outsourcing transportation is also considered. The aircraft route optimization model based on transshipment, known as the T-AAAFRP model, is then built in the alliance environment while taking into account the capacity limitation of double airports in the aviation network, the capacity limitation of all cargo aircraft in flight time and airspace in operation, and taking the total cost minimization as the goal. Secondly, an adaptive genetic algorithm is used to solve the model. Finally, through a case study, the location and path optimization problems are studied. The results show that the algorithm designed in this paper has high convergence. In the process of changing the number of transfer points, double airport cities are always selected as transfer points. The change of demand and aircraft fixed cost has great influence on optimization decision. The decision to optimize is greatly influenced by changes in demand and aircraft fixed costs. The weight of aircraft, the sharing coefficient of alliance self operation and outsourcing, and the change of decision-maker's risk preference have little influence on the optimization decision. But on the whole, the larger the number of transfer points, the smaller the total cost and the smaller the number of aircraft used. However, generally speaking, the more transfer sites there are, the lower the overall cost and the fewer aircraft are needed.

Keywords: route alliance; cargo transshipment; aircraft route optimization; number limit of transshipment points; genetic algorithm

使用三天线的联合定姿和欺骗检测方法

陈佳佳^{1,2}, 袁洪^{1,*}, 徐颖¹, 于丰正^{1,2}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘 要: 全球卫星导航系统 (GNSS) 的安全性已经引发了广泛关注。使用多天线的欺骗检测方法由于其独一无二的空间特性, 已成为当前最有效的欺骗检测方法之一。提出一种使用三天线的联合定姿和欺骗检测方法, 能够在确定天线载体姿态的同时检测出欺骗信号的存在。针对直接定姿法受限于基线向量精度的问题, 使用长度约束的基线向量估计方法以获得高精度定姿结果。在姿态信息已知的前提下, 根据星历信息、姿态变换矩阵及天线的几何关系可以获得载波相位单差的期望值。使用误差平方和 (SSE) 来评估载波相位单差观测值和期望值之间的偏差, 并构建了欺骗信号的二元检验。结果表明: 在无欺骗的情形下, 所提方法能降低定姿的标准差 76.1% 以上; 在有欺骗的情形, 所提方法能够实现 100% 检测率, 并降低定姿的标准差 77.3% 以上。

关键词: 全球卫星导航系统; 三天线; 定姿; 欺骗检测; 载波相位

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0128-10

多天线的全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 欺骗检测方法利用欺骗信号与真实信号之间的几何空间差异来进行欺骗检测, 是当前 GNSS 反欺骗领域的研究热点^[1-3]。由于 GNSS 卫星的几何空间信息几乎不可能被模仿, 因此, 多天线的欺骗检测方法已经成为最有效的欺骗检测方法之一^[4-5]。使用多天线的欺骗检测方法通常基于 2 种思路。第 1 种思路基于所有欺骗信号来自同一方向的假设^[6-7]。当不存在欺骗源时, 由于真实信号到达方向各不相同, 不同卫星的载波相位值也应存在明显的差异。当存在欺骗源时, 欺骗源的天线会播发多路欺骗信号, 欺骗信号的到达方向完全一致, 对应的载波相位差值也基本相同^[8]。该方法可以有效地检测出单个天线广播多个欺骗信号的情形。但当存在来自多个方向的欺骗信号时, 该方法可能会失效。

第 2 种思路是利用多天线接收到的 GNSS 信号和天线的几何结构信息获得信号在载体坐标系

(b 系) 的实际到达方向。另一方面可以通过星历信息中的卫星位置确定信号在东北天 (ENU) 坐标系 (n 系) 中的理论到达方向^[9]。在 multiline 载体姿态已知的前提下, 信号理论和实际方向矢量之间可以通过姿态阵进行旋转变化。当二者不一致时, 则认为存在欺骗信号^[10]。在当前的技术条件下, 欺骗信号几乎不可能与真实信号实现严格的相位同步, 也很难提前获取用户的位置信息, 因而无法模仿真实信号的到达方向^[11]。该方法是当前最为强大的欺骗检测方法, 能够快速检测出复杂的欺骗信号。但是该方法需要安装惯性导航系统或大规模阵列天线以实时获取姿态信息^[12-13], 其成本和硬件复杂度相对较高, 应用场景相对受限。

使用双天线的欺骗检测方法已经有了一定的研究, 该方法能够对信号来向和基线之间的夹角进行估计。但由于仅使用 2 个天线, 无法对信号的仰角和方位角进行准确估计。该方法存在到达角模糊度的问题, 并导致存在较大的检测盲区。但当使

收稿日期: 2021-04-13; 录用日期: 2021-09-23; 网络出版时间: 2021-10-09 10:51

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20211008.1716.002.html

基金项目: 中国科学院青年创新促进会 (E03314020D); 中国科学院科研仪器设备研制项目 (YJKYYQ20200069)

* 通信作者. E-mail: yuanhong@aircas.ac.cn

引用格式: 陈佳佳, 袁洪, 徐颖, 等. 使用三天线的联合定姿和欺骗检测方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 128-137.

CHEN J J, YUAN H, XU Y, et al. Joint attitude determination and spoofing detection method using three antennas [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 128-137 (in Chinese).

用 3 个非共线天线时, 信号的来向可以唯一的确定, 进而能够极大地减小检测盲区, 提升整体的检测率^[14]。针对传统多天线的欺骗检测方法不能检测来自多个方向的欺骗信号或成本过高的问题, 本文提出了一种使用三天线的联合定姿和欺骗检测方法。传统的直接定姿法虽然方法简单, 但其结果受到基线向量精度的影响^[15]。为了提升基线向量的解算精度, 本文使用了长度约束的基线向量估计方法。该方法假设基线长度是精确已知的, 并使用基线长度对 GNSS 观测解算的基线向量进行约束, 以得到精准的基线向量和天线载体姿态的估计值。

根据载体的姿态和卫星的星历信息, 能够得到载波相位单差的期望值。载波相位单差的观测值由接收机的输出结果得知。当不存在欺骗信号时, 二者之间的残差应当服从 0 均值的正态分布; 当存在欺骗信号时, 残差应当服从非 0 均值的正态分布。本文构建了载波相位单差观测值和期望值之间误差平方和 (sum of the squared errors, SSE) 统计值的分布模型, 并提出了合适的门限值以检测欺骗信号的存在。最后, 通过模拟仿真和实验的形式, 验证了本文所提方法的正确性。

本文使用 3 个单频 GNSS 天线实现了联合定姿和欺骗检测的功能。该方法无需惯导等任何额外的设备提供姿态信息, 成本相对较低。同时, 为了解决传统长度约束基线解算方法过于复杂的问题, 还采用了长度约束的基线向量线性化求解方法。该方法能够在提高运算效率的同时, 实现较高的基线解算精度, 进而获得精准的姿态信息。同时, 所构建的欺骗检测模型不依赖欺骗信号来自同一方向的假设, 能够实现对复杂欺骗信号快速检测。

1 直接定姿法

直接定姿法的优点是算法简单, 计算量小, 可

以直接从 GNSS 定位获得的基线向量中计算出姿态角^[15]。直接定姿法需要使用 2 组基线, 长度分别记为 L_{12} 、 L_{13} , 基线之间的夹角记为 α_0 。根据如图 1 所示的基线几何关系, 可以得到基线在载体坐标系的投影坐标为 \mathbf{X}_{12}^b 、 \mathbf{X}_{13}^b 。为了评估基线解算结果中水平方向和垂直方向的误差分布情况, 本文选用了 ENU 作为导航坐标系。基线在 ENU 坐标系下的投影坐标 \mathbf{X}_{12}^n 和 \mathbf{X}_{13}^n 可以通过 GNSS 观测解算获得:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{12}^b = [0, L_{12}, 0]^T \\ \mathbf{X}_{13}^b = [L_{13} \sin \alpha_0, L_{13} \cos \alpha_0, 0]^T \\ \mathbf{X}_{12}^n = [e_{12}, n_{12}, u_{12}]^T \\ \mathbf{X}_{13}^n = [e_{13}, n_{13}, u_{13}]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中: e 为基线在东方向上的坐标; n 为北方向上的坐标; u 为天方向上的坐标; 下标数字为不同的基线。

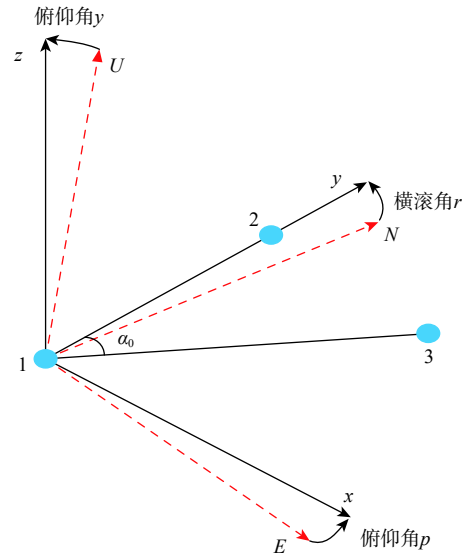


图 1 载体坐标系和 ENU 坐标系

Fig. 1 Body coordinate frame and ENU coordinate frame

b 系和 n 系之间的坐标满足如下的转换关系:

$$\mathbf{X}^b = \mathbf{R}_n^b \mathbf{X}^n = \begin{bmatrix} \cos r \cos y - \sin r \sin y \sin p & \cos r \sin y + \sin r \sin p \cos y & -\sin r \cos p \\ -\cos p \sin y & \cos p \cos y & \sin p \\ \sin r \cos y + \cos r \sin y \sin p & \sin r \sin y - \cos r \sin p \cos y & \cos r \cos p \end{bmatrix} \mathbf{X}^n \quad (2)$$

式中: \mathbf{R}_n^b 为姿态变换矩阵; y 、 p 和 r 分别为航向角、俯仰角和横滚角。

则 $\mathbf{X}_{12}^b = \mathbf{R}_n^b \mathbf{X}_{12}^n$, 式(2)可以重新写为

$$\begin{bmatrix} e_{12} \\ n_{12} \\ u_{12} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_b^n \begin{bmatrix} 0 \\ L_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此, 可以得到航向角 y 和俯仰角 p 为

$$y = -\arctan(e_{12}/n_{12}) \quad (4)$$

$$p = \arctan(u_{12}/\sqrt{e_{12}^2 + n_{12}^2}) \quad (5)$$

根据 \mathbf{X}_{13}^n 、 \mathbf{X}_{13}^b 及式(2)、式(4)和式(5), 可以得到横滚角 r 为

$$r = -\arctan\left(\frac{-e_{13} \sin p \sin y - n_{13} \sin p \cos y + u_{13} \cos p}{e_{13} \cos y - n_{13} \sin y}\right) \quad (6)$$

对式(4)求偏导可得:

$$\delta_y = (-n_{12} \delta e_{12} + e_{12} \delta n_{12}) / (e_{12}^2 + n_{12}^2) \quad (7)$$

假设各坐标分量之间是互相独立的, 根据误差传播规律, 航向角 y 的误差 σ_y 可以表示为

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{n_{12}^2 \sigma_{e12}^2 + e_{12}^2 \sigma_{n12}^2 / (e_{12}^2 + n_{12}^2)}}{\sqrt{\cos^2 y \sigma_{e12}^2 + \sin^2 y \sigma_{n12}^2 / (L_{12} \cos p)}} \quad (8)$$

式中: σ_e 、 σ_n 和 σ_u 分别为基线向量东向、北向和天向的观测精度,下标数字为不同的基线。

俯仰角 p 和横滚角 r 的误差可以类似地求得:

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{(\sin y \sin p)^2 \sigma_{e12}^2 + (\cos y \sin p)^2 \sigma_{n12}^2 + (\cos p)^2 \sigma_{u12}^2}}{L_{12}} \quad (9)$$

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{(\sin r)^2 \sigma_{e'13}^2 + (\cos r)^2 \sigma_{u'13}^2}}{L_{13} \sin \alpha_0} \quad (10)$$

式中:

$$\sigma_{e'13}^2 = (\cos y)^2 \sigma_{e13}^2 + (\sin p)^2 \sigma_{n13}^2 \quad (11)$$

$$\sigma_{u'13}^2 = (\sin y \sin p)^2 \sigma_{e13}^2 + (\cos y \sin p)^2 \sigma_{n13}^2 + (\cos p)^2 \sigma_{u13}^2 \quad (12)$$

根据式(8)~式(10)可以看出,航向角、俯仰角、横滚角的精度和基线的长度、基线之间的夹角 α_0 及GNSS解算的基线向量精度有关。基线越长、基线向量精度越高,姿态的精度也越高。当2个基线正交时,横滚角的误差最小。在实际的运用中,基线的长度受限于载体的面积,不可能无限制提升。因此,提高基线向量的解算质量是提升定姿精度的有效途径。但基线向量的精度会受到卫星空间分布或欺骗干扰的影响,并导致定姿结果的不准确^[16]。因此,本文使用了长度约束的基线向量估计方法,使用已知的基线长度来约束基线向量的观测值,以获得高精度的基线向量估计值,进而提升定姿的精度。

2 长度约束的基线向量线性化求解法

长度约束的基线向量估计方法的有效性已经得到了充分的认证。传统的长度约束基线向量估计方法本质上是求解带二次约束的最小二乘问题,其计算效率相对较低^[17]。为了提升运算速度以实现实时输出,本文构建了长度约束的基线向量线性化求解模型,能够在保持基线向量估计精度的同时,极大地提升计算效率。

基线向量解算通常采用载波相位双差观测方程进行求解,载波相位的整周模糊度采用经典的最小二乘模糊度去相关调整(least-squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)算法固定^[18-19]。以基线 \mathbf{X}_{12} 为例,本文选取最高仰角的卫星作为参考星,则载波相位双差观测方程为

$$\nabla \Delta \varphi_{12} \lambda = \mathbf{H} \mathbf{X}_{12} + \mathbf{n}_{r12} \lambda \quad (13)$$

式中: $\nabla \Delta \varphi_{12}$ 为载波相位双差观测值; λ 为波长; \mathbf{H} 为

卫星方向余弦矩阵,由星历计算得到; \mathbf{X}_{12} 为基线向量的真值; \mathbf{n}_{r12} 为服从正态分布的观测噪声矩阵, $\mathbf{n}_{r12} \sim N_n(\mathbf{0}, \sigma^2)$ 。对式(13)使用最小二乘法可以得到基线向量的观测值 $\hat{\mathbf{X}}_{12}$ 为

$$\hat{\mathbf{X}}_{12} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \nabla \Delta \varphi_{12} \lambda \quad (14)$$

可以很明显的看出 $\hat{\mathbf{X}}_{12}$ 服从正态分布,其协方差矩阵 Σ 可以根据式(13)计算得到:

$$\Sigma = \sigma^2 (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \quad (15)$$

基线的长度认为是精确已知的,因此,可以使用基线长度对基线向量 $\hat{\mathbf{X}}_{12}$ 的观测值进行约束,以得到基线向量的估计值 $\check{\mathbf{X}}_{12}$,能够有效提升基线向量的精度。首先构造如下的迭代方程:

$$\begin{cases} \check{\mathbf{X}}_{N+1} = \check{\mathbf{X}}_N + \delta_N \\ \check{\mathbf{X}}_N = [\check{e}_N, \check{n}_N, \check{u}_N]^T \\ \check{\mathbf{X}}_{N+1} = [\check{e}_{N+1}, \check{n}_{N+1}, \check{u}_{N+1}]^T \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\check{\mathbf{X}}_{N+1}$ 、 $\check{\mathbf{X}}_N$ 分别为第 $N+1$ 和 N 次迭代的基线向量; \check{e} 、 \check{n} 和 \check{u} 分别为基线向量在东向、北向和天向上的坐标分量估计值; δ_N 为第 N 次迭代估计的残差, $\delta_N = [\delta_e, \delta_n, \delta_u]^T$, δ_e 、 δ_n 和 δ_u 分别为3个坐标分量的残差。迭代的初值为基线向量的观测值 $\check{\mathbf{X}}_0 = \hat{\mathbf{X}}_{12}$ 。基线的长度 L_{12} 为

$$L_{12} = \frac{\sqrt{\check{e}_{N+1}^2 + \check{n}_{N+1}^2 + \check{u}_{N+1}^2}}{\sqrt{(\check{e}_N + \delta_e)^2 + (\check{n}_N + \delta_n)^2 + (\check{u}_N + \delta_u)^2}} \quad (17)$$

使用一阶泰勒展开将式(17)进行线性展开:

$$L_{12} = \sqrt{\check{e}_N^2 + \check{n}_N^2 + \check{u}_N^2} + \mathbf{l}_N \delta_N \quad (18)$$

式中: $\mathbf{l}_N = [l_e, l_n, l_u]^T$; $l_e = \check{e}_N / \sqrt{\check{e}_N^2 + \check{n}_N^2 + \check{u}_N^2}$; $l_n = \check{n}_N / \sqrt{\check{e}_N^2 + \check{n}_N^2 + \check{u}_N^2}$; $l_u = \check{u}_N / \sqrt{\check{e}_N^2 + \check{n}_N^2 + \check{u}_N^2}$ 。将式(18)和式(13)联立方程组:

$$\begin{cases} L_{12} = \sqrt{\check{e}_N^2 + \check{n}_N^2 + \check{u}_N^2} + \mathbf{l}_N \delta_N \\ \nabla \Delta \varphi_{12} \lambda = \mathbf{H} \cdot (\check{\mathbf{X}}_N + \delta_N) + \mathbf{n}_{r12} \lambda \end{cases} \quad (19)$$

对式(19)使用最小二乘法可以得到第 N 次迭代估计的残差 δ_N 。经过若干次迭代以后,式(16)收敛于稳定值,记作 $\check{\mathbf{X}}_{12}$, $\check{\mathbf{X}}_{12}$ 视作基线向量的估计值。

3 欺骗检测的原理

三天线欺骗检测系统的结构示意图如图2所示。三天线构成的2个基线向量相互正交。以天线1为原点、天线1和2构成的基线方向为 Y 轴、天线1和3构成的基线方向为 X 轴构建载体坐标

系。Z 轴垂直于 X 轴和 Y 轴构成的平面并满足右手坐标系。2 组基线的长度同样记作 L_{12} 、 L_{13} 。 θ 和 φ 分别为卫星信号 i 在载体坐标系的仰角和方位角。为了消除接收机钟差的影响, 天线所连接的接收机采用同一振荡器驱动, 以实现同步输出。根据天线之间的几何关系, 卫星信号 i 的载波相位单差观测值 $\Delta\hat{\varphi}_i$ 可以表示为

$$\Delta\hat{\varphi}_{i12}\lambda = L_{12} \cos \theta \sin \varphi + m\lambda \quad (20)$$

$$\Delta\hat{\varphi}_{i13}\lambda = L_{13} \cos \theta \cos \varphi + m\lambda \quad (21)$$

式中: $\Delta\hat{\varphi}_{i12}$ 、 $\Delta\hat{\varphi}_{i13}$ 分别为天线 1 和 2、天线 1 和 3 之间的载波相位单差观测值; m 为载波相位单差观测噪声, $m \sim N(0, \sigma_0^2)$, $\sigma_0^2 = 0.5\sigma^2$ 。

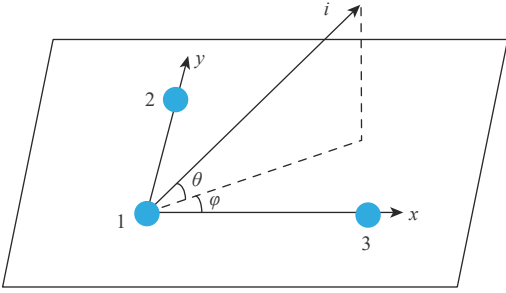


图 2 系统结构示意图

Fig. 2 System structure diagram

卫星信号在载体坐标系中的方向矢量 $\mathbf{g}_b(\theta, \varphi)$ 和在 ENU 坐标系中的方向矢量 $\mathbf{g}_{enu}(El, Az)$ 可以通过姿态矩阵 \mathbf{R}_n^b 进行转换:

$$\mathbf{g}_b(\theta, \varphi) = \mathbf{R}_n^b \mathbf{g}_{enu}(El, Az) \quad (22)$$

$$\mathbf{g}_b(\theta, \varphi) = [\cos \theta \cos \varphi, \cos \theta \sin \varphi, \sin \theta]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{g}_{enu}(El, Az) = [\cos El \sin Az, \cos El \cos Az, \sin El]^T \quad (24)$$

式中: El 、 Az 分别为卫星信号在 ENU 坐标系下的仰角和方位角, 由卫星的星历信息计算得到。当 $\mathbf{g}_{enu}(El, Az)$ 和 \mathbf{R}_n^b 已知时, 根据式 (22) 和式 (24) 可以求得入射信号在载体坐标系的仰角 θ 和方位角 φ 。则载波相位单差期望值 $\Delta\varphi_i$ 可以表示为

$$\Delta\varphi_{i12}\lambda = L_{12} \cos \theta \sin \varphi \quad (25)$$

$$\Delta\varphi_{i13}\lambda = L_{13} \cos \theta \cos \varphi \quad (26)$$

假设卫星数目为 M , 并且认为不同卫星的载波相位观测值是互相独立的。可以用归一化误差平方和 (sum of squares of errors, SSE) 统计值来评估载波相位单差观测值和期望值之间的差异:

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^M (\Delta\hat{\varphi}_{i12} - \Delta\varphi_{i12})^2 / \sigma_0^2 + \sum_{i=1}^M (\Delta\hat{\varphi}_{i13} - \Delta\varphi_{i13})^2 / \sigma_0^2 \quad (27)$$

如果不存在欺骗信号, GNSS 信号的载波相位单差观测值 $\Delta\hat{\varphi}_i$ 和期望值 $\Delta\varphi_i$ 应当保持一致, 二者之间的残差应当是 0 均值的正态分布。在这种情形下, SSE 统计值应当满足自由度 $k=2M$ 的卡方分布, 记作 $\chi^2(k)$ 。当存在欺骗信号时, 载波相位单差观测值 $\Delta\hat{\varphi}_i$ 和期望值 $\Delta\varphi_i$ 之间将变得有偏差, SSE 统计值应当满足非中心的卡方分布, 自由度同样为 $k=2M$, 偏心量 γ 为

$$\begin{cases} H_0: \text{SSE} \chi^2(k) \\ H_1: \text{SSE} \chi^2(k, \gamma) \\ \gamma = \sum_{i=1}^S (\Delta\phi_{isp12}^2 + \Delta\phi_{isp13}^2) / \sigma_0^2 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\Delta\phi_{isp12}$ 、 $\Delta\phi_{isp13}$ 分别为欺骗信号所导致的载波相位观测值的偏移量; S 为欺骗信号的数量; H_0 为无欺骗信号对应的统计假设; H_1 为有欺骗信号时对应的统计假设。根据奈曼-皮尔逊准则, 本文可以通过设置适当的门限值 SSE_{th} 来确定一定虚警率 P_{fa} 下的检测概率 P_{D} :

$$\begin{cases} P_{\text{fa}} = P\{\text{SSE} > \text{SSE}_{\text{th}} | H_0\} = 1 - \int_0^{\text{SSE}_{\text{th}}} p_{\chi^2(k)}(x) dx \\ P_{\text{D}} = P\{\text{SSE} > \text{SSE}_{\text{th}} | H_1\} = \int_{\text{SSE}_{\text{th}}}^{\infty} p_{\chi^2(k, \gamma)}(x) dx \end{cases} \quad (29)$$

4 仿真实验

采用了蒙特卡罗软件模拟的方式对本文所提方法进行了仿真。每种情形下的仿真次数均为 10 000 次。在仿真的场景中, 基线的长度 L_{12} 、 L_{13} 均为 1 m。载体的 3 个姿态角分别为 $y=90^\circ$ 、 $p=15^\circ$ 、 $r=10^\circ$ 。则基线在载体坐标系下的坐标 $\mathbf{X}_b^{12}=[0, 1, 0]^T$, $\mathbf{X}_b^{13}=[1, 0, 0]^T$ 。根据式 (2) 可以计算出基线在 ENU 坐标系下的真值为 $\mathbf{X}_b^{12}=[-0.966, 0, 0.259]^T$, $\mathbf{X}_b^{13}=[-0.045, 0.985, -0.168]^T$ 。分无欺骗和有欺骗 2 种情形进行了验证。

4.1 无欺骗情形

在验证的情景中, 存在 7 颗 GNSS 卫星, 其在 ENU 坐标系下的星座分布图如图 3 所示。天线 1 和 2 构成的基线向量解算结果的概率密度分布如图 4 所示。从图 4 中可以看出基线向量的观测值 $\hat{\mathbf{X}}_{12}$ 和长度约束线性化求解后的估计值 $\check{\mathbf{X}}_{12}$ 均服从正态分布, 但估计值 $\check{\mathbf{X}}_{12}$ 的分布明显更加集中, 误差更小。

为了比较本文使用的长度约束的基线向量线性化求解法和传统长度约束方法的优劣, 分别对基线向量的观测值、传统长度约束法解算的基线向量及线性化求解法所估计的基线向量进行统计, 如表 1 所示。此外在表 1 中还比较了 2 种方法的计算效率。从表 1 中可以看出, 3 组数据均为真值的无偏估计。其均值等于基线向量的真值。另一方面, 传

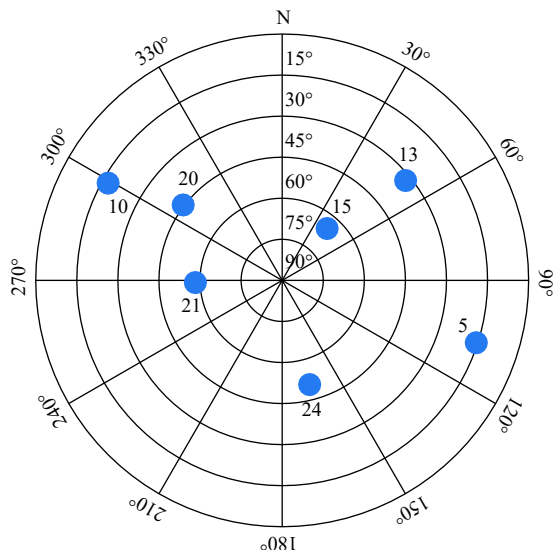


图3 ENU坐标系下的卫星分布

Fig. 3 Satellite distribution in ENU coordinate system

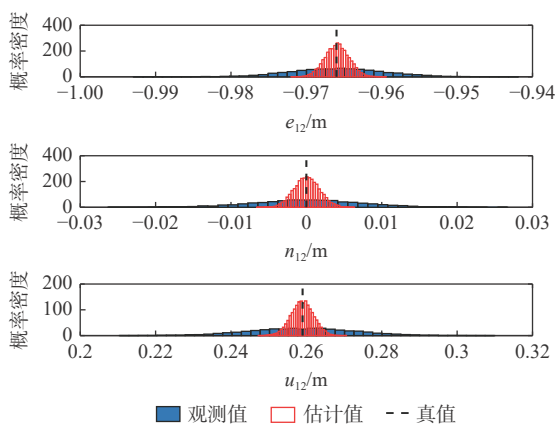


图4 ENU坐标系下的基线向量观测值和估计值

Fig. 4 The observed and estimated values of baseline vector in ENU coordinate system

表1 基线向量解算结果的统计量

Table 1 Statistics of baseline vector solution results

项目	时间/s	统计值	e_{12}/m	n_{12}/m	u_{12}/m
观测值		均值	-0.966	0.000	0.259
		标准差	0.006 2	0.007 1	0.014 1
传统法	593.8	均值	-0.966	0.000	0.259
		标准差	0.001 7	0.001 9	0.002 9
线性化法	141.2	均值	-0.966	0.000	0.259
		标准差	0.001 6	0.001 7	0.003 0

统法和线性化法所计算的基线向量精度无显著的差异,但线性化法的计算效率大大提升。相较于传统法,线性化法所需的计算时间降低了76.2%。因此,线性化法能够在保持高精度基线解算的同时,显著提升运算效率。

同时,基线解算垂直方向的标准差明显要比水平方向要高,这与经验结果是完全一致的。由于地

球的遮挡,地面上的用户只能观测到天空一侧的卫星,造成垂直方向上的误差传播要大于水平面上的误差传播。相较于观测值,线性化法估计值的标准差明显地降低。标准差在ENU这3个坐标轴上分别降低了74.2%、76.1%和78.7%。

采用直接定姿法分别计算基线向量观测值和线性化法的估计值对应的姿态角,姿态角的误差分布如图5和表2所示,航向角,俯仰角和横滚角的标准差分别降低了76.1%、79.2%和78.8%。可以看出,姿态角的结果同样具有无偏性。根据GNSS定姿理论,1 m长基线对应的姿态角的标准差大约为 0.6° ^[20]。该结论与基线向量观测值对应的姿态角标准差完全一致。

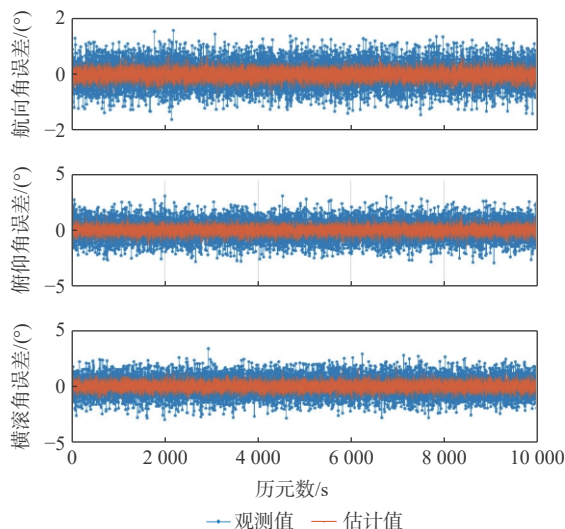


图5 姿态角的误差

Fig. 5 Error of attitude angle

表2 姿态角误差的均值和标准差

Table 2 Mean and standard deviation of attitude angle error

项目	统计值	航向角/(°)	俯仰角/(°)	横滚角/(°)
观测值	均值	-0.004 9	0.006 0	-0.003 6
	标准差	0.422 7	0.835 8	0.825 1
估计值	均值	-0.000 8	0.000 4	-0.000 3
	标准差	0.100 8	0.174 2	0.174 8

和观测值相比,基线向量估计值所对应姿态角误差的均值更接近0,且标准差显著降低。这表明本文使用的长度约束的基线向量估计方法能够有效地提升直接定姿法的精度。另一方面也可以看出,航向角的精度明显要高于俯仰角和横滚角。根据式(8)~式(10)可以得知,航向角的精度仅和基线的水平分量有关,而俯仰角和横滚角还和基线的垂直分量有关。基线垂直分量的精度直接导致了俯仰角和横滚角精度的降低。

当姿态角确定以后,根据卫星在ENU坐标系

下的仰角 EI 和方位角 Az , 可以求出卫星在载体坐标系下的仰角 θ 和方位角 φ , 进而求出载波相位单差的期望值 $\Delta\varphi_i$ 。载波相位单差的观测值 $\Delta\hat{\varphi}_i$ 和期望值 $\Delta\varphi_i$ 之间的 SSE 统计值如图 6 所示。SSE 统计值的概率密度分布和理论分布 $\chi^2(14)$ 之间存在微小的偏差, 该偏差是由于定姿误差所导致的。本文使用 R 方值评估 SSE 统计值和理论分布函数之间的拟合程度。 R 方是拟合优度指标, R 方的取值范围为 $0 \sim 1$, R 方越接近 1, 则认为拟合效果越好^[21]。

通常 R 方大于 0.8 就表明拟合度很高。图 6 中对应的 R 方值为 0.864, 因此, 笔者认为 $\chi^2(14)$ 是 SSE 统计值非常有效的分布拟合。根据式 (29), 可以设置门限值 $SSE_{th}=50$, 则对应的理论虚警率为 1.1×10^{-5} 。SSE 统计值的真实虚警率为 $p_{fa}=3 \times 10^{-4}$ 。考虑到噪声的影响, 虚警率与理论值基本一致。

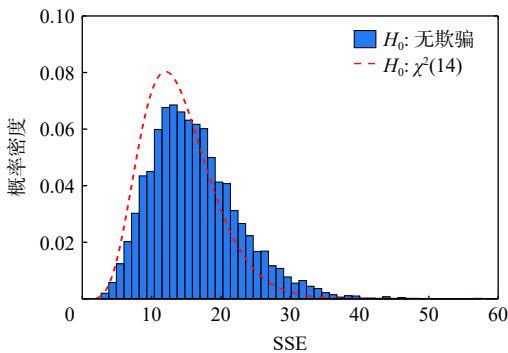


图 6 SSE 统计值的概率密度分布

Fig. 6 Probability density distribution of SSE statistics

4.2 有欺骗情形

欺骗信号由于其功率高于真实信号, 能够夺取接收机的跟踪环路, 进而导致载波相位的观测值产生偏差。在有欺骗的情形中, 本文为 SV13 和 SV21 两颗卫星的载波相位值引入偏差, 以模拟 2 个转发式欺骗信号源分别转发一路欺骗信号的场景。2 个欺骗源和真实信号在载体坐标系中的仰角和方位角偏差均为 -10° , 其他参数与无欺骗情形完全一致。真实信号和欺骗信号在载体坐标系下星座分布图如图 7 所示。

有欺骗信号时的姿态角误差的概率密度分布和统计值如图 8 和表 3 所示。从图 8 中可以很明显地看出, 由于存在欺骗信号, 基线向量观测值对应的姿态角产生了很大的误差, 不再具有无偏性。航向角、俯仰角和横滚角误差的均值分别为 7.48° 、 -2.66° 和 9.07° 。标准差和无欺骗情形基本一致。

基线向量估计值所对应的姿态角同样不是无偏的。相较于观测值, 估计值所对应姿态角误差的均值大幅度降低了。航向角、俯仰角和横滚角误差的均值分别为 -0.229° 、 -0.353° 和 -0.381° 。同时, 姿

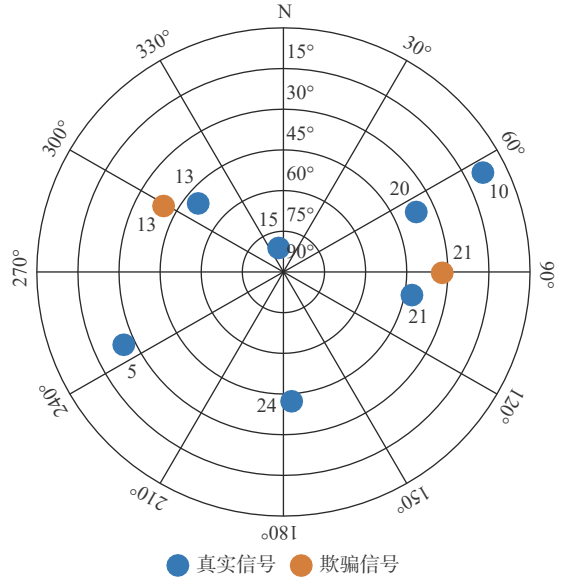


图 7 载体坐标系下的卫星分布

Fig. 7 Satellite distribution in body coordinate system

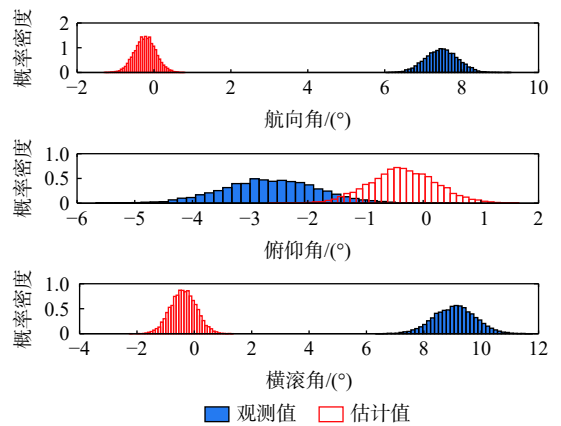


图 8 有欺骗信号时姿态角误差的概率密度分布

Fig. 8 Probability density distribution of attitude angle error with spoofing signals

表 3 有欺骗信号时姿态角误差的统计值

Table 3 Statistical values of attitude angle error with spoofing signals

项目	统计值	航向角/(°)	俯仰角/(°)	横滚角/(°)
观测值	均值	7.478 0	-2.656 9	9.070 9
	均方根	7.489 8	2.782 9	9.099 6
	标准差	0.419 0	0.828 0	0.722 5
估计值	均值	-0.229 3	-0.353 3	-0.380 9
	均方根	0.360 6	0.680 0	0.588 8
	标准差	0.278 0	0.581 0	0.449 0

态角的均方根误差和标准差均显著降低了。标准差分别降低了 33.7%、29.8% 和 37.9%。由于欺骗信号的影响, 估计值所对应姿态角标准差相较于无欺骗情形明显提升。俯仰角和横滚角的标准差要高

于航向角,与无欺骗的情形一致。本节结果表明,即使存在欺骗信号的干扰,本文使用的长度约束的基线向量估计方法也能够得到较为精准的姿态角信息。

根据式 (25)、式 (26) 和式 (28) 可以得到 H_1 假设所对应的理论分布函数 $\chi^2(14,\gamma)$ 。SSE 统计值的概率密度分布如图 9 所示。与图 5 相比较可以看出,有欺骗信号时的 SSE 统计值要超过无欺骗时 2 个数量级。因此,通过 SSE 统计值可以很轻易地分辨出是否存在欺骗信号。根据上文设置的 SSE_{th} ,检测率 $p_D=100\%$ 。由于欺骗信号的干扰,SSE 统计值和理论分布函数 $\chi^2(14,\gamma)$ 之间的误差增大,二者之间的 R 方值为 0.802。相较于无欺骗情形, R 方值降低,但依然大于 0.8。

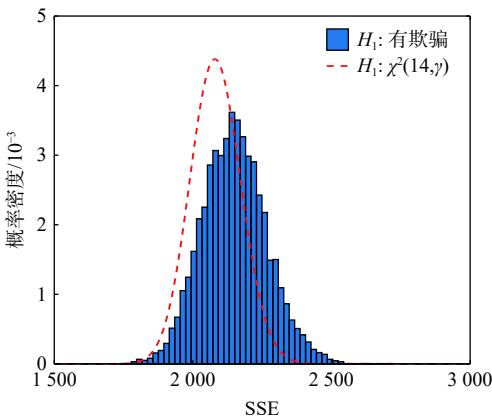


图 9 有欺骗信号 SSE 统计值的概率密度分布

Fig. 9 Probability density distribution of SSE statistics with spoofing signals

5 实验验证

为了验证本文所提方法的性能,在中国科学院空天信息创新研究院开展了欺骗检测实验。使用北斗星通 UB482 接收机板卡搭建了三天线的定姿和欺骗检测系统。北斗星通 UB482 接收机能够对多天线同步驱动以消除天线之间的钟差,UB482 板卡实物图如图 10 所示。实验使用同型号、同批次的天线,以消除可能的传输延迟和相位中心偏差。采用 GNSS 转发器作为欺骗源,转发器型号为 Gensnav RGA30-DV。转发放大器的实物图如图 11 所示。

基线的长度 L_{12} 、 L_{13} 同样为 1 m。本文提前进行了 30 min 持续无欺骗的观测,并取定姿结果的均值作为天线载体姿态的真值为 $y=-62.1^\circ$ 、 $p=-1.2^\circ$ 、 $r=1.8^\circ$ 。欺骗场景的测试时间为 200 s,接收机输出频率为 1 Hz。欺骗源转发一路 GPS 信号并对真实信号造成干扰。和模拟的场景类似,本文分别计算了基线向量观测值和长度约束后的估计值所对应的定姿

结果。姿态的 3 个欧拉角随时间变化趋势如图 12 和图 13 所示。由于存在欺骗信号,导致图 12 中的定姿结果存在大量的散点。对比 2 幅图可以看出,图 13 的定姿结果非常稳定,波动幅度很小。

2 组定姿结果的 3 个欧拉角统计值如表 4 所示。从表 4 中可以看出,基线向量观测值的定姿结



图 10 UB482 接收机实物图

Fig. 10 Physical picture of UB482 receiver



图 11 RGA30-DV 转发放大器

Fig. 11 Physical picture of RGA30-DV repeater amplifier

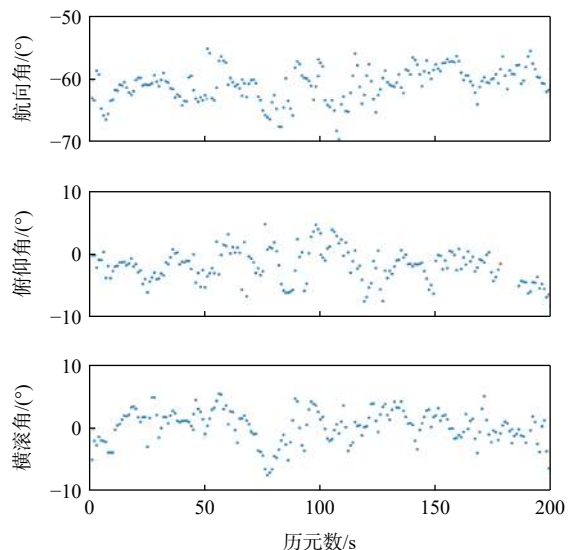


图 12 基线向量观测值的定姿结果

Fig. 12 Attitude determination results of baseline vector observations

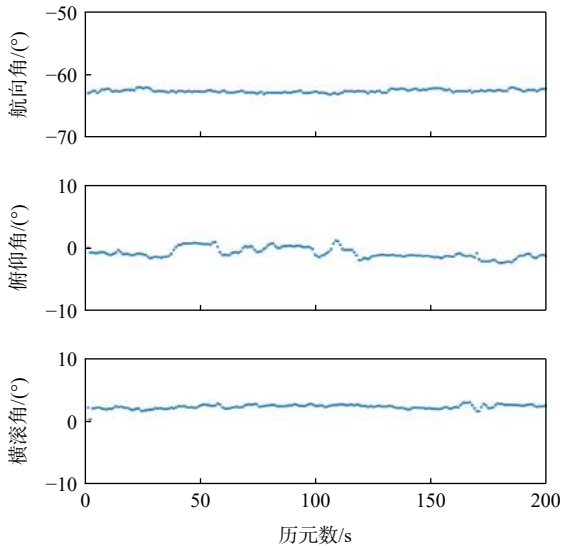


图 13 基线向量估计值的定姿结果
Fig. 13 Attitude determination results of baseline vector estimation

表 4 姿态角均值和标准差

Table 4 Mean and standard deviation of attitude angle

项目	统计值	航向角/(°)	俯仰角/(°)	横滚角/(°)
观测值	均值	-60.31	-2.21	-0.30
	标准差	2.42	2.65	3.14
估计值	均值	-62.29	-1.08	1.86
	标准差	0.32	0.60	0.37

果的均值和真值产生了较大的偏差, 3 个欧拉角的均值分别产生了 1.79°、1.01°、2.1° 的偏差。而估计值的定姿结果均值分别产生了 0.18°、0.12°、0.06° 的偏差。即使存在欺骗信号的干扰, 估计值的定姿结果与真值也非常接近。同时还可以看出, 估计值的定姿结果的标准差相较于观测值分别降低了 86.7%、77.3% 和 88.2%。航向角的精度要略高于其他 2 个姿态角, 和模拟的结果完全一致。

欺骗场景的 SSE 统计值随时间变化趋势如图 14 所示。欺骗场景的 SSE 统计值要远远大于门

限值, 检测率达到了 100%。和图 9 模拟的结果进行比较可以看出, 由于实验场景仅存在一个欺骗信号, 因而 SSE 统计值要小于模拟场景, 但也高于门限值一个数量级。

6 结论

1) 本文所提方法能够有效提升基线向量的精度。模拟结果表明, 所提方法能够实现无偏估计, 同时, 基线向量在东北天 3 个坐标轴的标准差分别降低了 74.2%、76.1% 和 78.7%。所提方法能够提升传统的直接定姿法的精度。航向角、俯仰角和横滚角的标准差分别降低了 76.1%、79.2% 和 78.8%。

2) 本文所提方法的虚警率和理论虚警率保持一致。

3) 实验结果表明, 在有欺骗信号存在的情形, 本文所提方法能够实现 100% 检测率, 且能够降低姿态角的误差 77.3% 以上。

4) 本文提出了欺骗检测的二元检验理论分布模型。模拟和实验结果表明, 该模型具有较高的可用性。

参考文献 (References)

[1] BROUMANDAN A, JAFARNIA-JAHROMI A, DANESHMAND S, et al. Overview of spatial processing approaches for GNSS structural interference detection and mitigation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(6): 1246-1257.

[2] WANG F, LI H, LU M Q. GNSS spoofing detection based on unsynchronized double-antenna measurements[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 31203-31212.

[3] CHEN J J, XU Y, YUAN H, et al. A new GNSS spoofing detection method using two antennas[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 110738-110747.

[4] DANESHMAND S, JAFARNIA A, BROUMANDAN A, et al. Low-complexity spoofing mitigation[J]. *GPS World Magazine*, 2011, 22: 44-46.

[5] 黄龙, 雍玲, 徐博, 等. 采用双天线载波相位差技术的卫星导航接收机抗欺骗方法[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(4): 103-106.
HUANG L, YONG L, XU B, et al. Analysis of carry phase difference detection for satellite navigation receivers anti-spoofing[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(4): 103-106 (in Chinese).

[6] SWASZEK P F, HARTNETT R J. A multiple COTS receiver GNSS spoof detector-Extensions[C]//Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation. San Diego: Institute of Navigation, 2014: 1-12.

[7] BORIO D, GIOIA C. A dual-antenna spoofing detection system using GNSS commercial receivers[C]//Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Tampa: Institute of Navigation, 2015: 325-330.

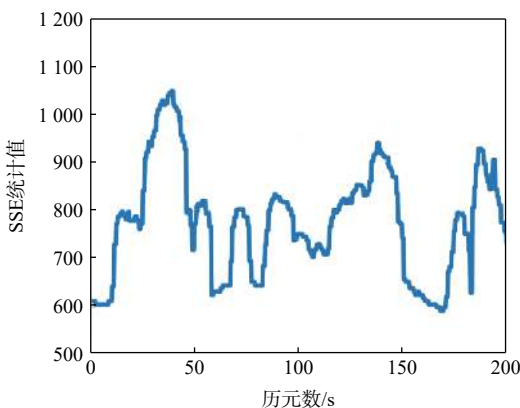


图 14 欺骗场景的 SSE 统计值

Fig. 14 SSE statistics in spoofing scenario

- [8] PSIAKI M L, O'HANLON B W, POWELL S P, et al. GNSS spoofing detection using two-antenna differential carrier phase[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Tampa: Institute of Navigation, 2014: 2776-2800.
- [9] KONOVALTSEV A, CUNTZ M, HAETTICH C, et al. Autonomous spoofing detection and mitigation in a GNSS receiver with an adaptive antenna array[C]//Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville: Institute of Navigation, 2013: 2937-2948.
- [10] MEUER M, KONOVALTSEV A, CUNTZ M, et al. Robust joint multi-antenna spoofing detection and attitude estimation using direction assisted multiple hypotheses RAIM[C]//Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville: Institute of Navigation, 2012: 3007-3016.
- [11] XU H L, CUI X W, SHEN J N, et al. A two-step beam-forming method based on carrier phases for GNSS adaptive array anti-jamming[C]//The International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Monterey: Institute of Navigation, 2016: 793-804.
- [12] SWASZEK P F, PRATZ S A, AROCHO B N, et al. GNSS spoof detection using shipboard IMU measurements[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Tampa: Institute of Navigation, 2014: 745-758.
- [13] APPEL M, KONOVALTSEV A, MEURER M. Joint antenna array attitude tracking and spoofing detection based on phase difference measurements[C]//Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: Institute of Navigation, 2016: 3018-3026.
- [14] 张鑫, 庞晶, 苏映雪, 等. 天线阵列载波相位双差的欺骗干扰检测技术[J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(4): 55-60.
- ZHANG X, PANG J, SU Y X, et al. Spoofing detection technique on antenna array carrier phase double difference[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(4): 55-60 (in Chinese).
- [15] ZHANG P, ZHAO Y Z, LIN H, et al. A novel GNSS attitude determination method based on primary baseline switching for a multi-antenna platform[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 747.
- [16] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, WASLE E. GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more[M]. Vienna: Springer Vienna, 2007: 441-450.
- [17] BUIST P J, TEUNISSEN P J G, GIORGI G, et al. Multiplatform instantaneous GNSS ambiguity resolution for triple- and quadruple-antenna configurations with constraints[J]. *International Journal of Navigation and Observation*, 2009, 2009: 565426.
- [18] GONG A, ZHAO X B, PANG C L, et al. GNSS single frequency, single epoch reliable attitude determination method with baseline vector constraint[J]. *Sensors*, 2015, 15(12): 30093-30103.
- [19] 舒宝, 刘晖, 张晋升, 等. 基于BDS/GPS组合定位的部分模糊度固定效果分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(7): 989-994.
- SHU B, LIU H, ZHANG J S, et al. Performance assessment of partial ambiguity resolution based on BDS/GPS combined positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(7): 989-994 (in Chinese).
- [20] GROVES P D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems[M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2013: 288-289.
- [21] DEVORE J L. Probability and statistics for engineering and the sciences[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 136-172.

Joint attitude determination and spoofing detection method using three antennas

CHEN Jiajia^{1,2}, YUAN Hong^{1,*}, XU Ying¹, YU Fengzheng^{1,2}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communicating Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The security of the global navigation satellite system (GNSS) has aroused widespread concern. The multiple-antennas method has become the most effective spoofing detection method due to its unique spatial characteristics. A joint attitude determination and spoofing detection method using three antennas is proposed, detecting spoofing signals and determining the attitude information. The baseline accuracy limits the traditional direct attitude determination method, so a length-constrained baseline vector estimation method is adopted to obtain high-precision attitude determination results. When attitude information is known, the carrier phase single-difference expected value can be obtained by the ephemeris, attitude transformation matrix, and the antennas' geometric relationship. The sum of the squared error (SSE) is used to evaluate the deviation between the observed and expected value of carrier phase single-difference, and the spoofing signal binary detection is constructed. The results shows that this method can reduce the standard deviation of attitude determination by more than 76.1% when there is no spoofing signal, and achieve 100% detection efficiency with a more than 77.3% reduction on standard deviation of attitude when spoofing signal involved.

Keywords: global navigation satellite system; three antennas; attitude determination; spoofing detection; carrier phase

Received: 2021-04-13; **Accepted:** 2021-09-23; **Published Online:** 2021-10-09 10:51

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20211008.1716.002.html

Foundation items: The Youth Innovation Promotion Association CAS (E03314020D); The Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (YJKYYQ20200069)

* **Corresponding author.** E-mail: yuanhong@aircas.ac.cn

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0202

基于最小化新息协方差的修正 SRCKF 算法

杨永建^{1,2}, 甘轶², 李春辉^{2,*}, 邓有为², 肖冰松², 彭芳²

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 西安 710072; 2. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘 要: 目标跟踪过程中的模型误差会使得平方根容积卡尔曼滤波 (SRCKF) 性能下降, 滤波精度降低; 自适应滤波中的修正卡尔曼滤波 (AKF) 算法可以有效解决这一问题, 但是难以应用到非线性滤波中。为了克服模型误差带来的不利影响, 同时, 进一步提高修正思想的应用范围, 在 SRCKF 的基础上, 基于最小化新息协方差准则推导了修正系数的向量形式, 提出修正 SRCKF (ASRCKF) 算法。所提算法通过利用后期的测量数据, 增加对测量值的信任度, 从而达到对目标模型误差进行补偿的目的。仿真结果表明: 与 SRCKF 和强跟踪 SRCKF 算法相比, 所提 ASRCKF 算法能有效抑制模型误差, 有着更优的滤波性能。

关键词: 修正卡尔曼滤波; 运动模型误差; 平方根容积卡尔曼滤波; 新息协方差; 修正系数

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0138-07

容积卡尔曼滤波^[1-2](cubature Kalman filter, CKF) 基于三阶球面径向原则逼近最优框架中的状态后验分布^[3], 是一种新兴的非线性状态估计方法, 在目标跟踪、信号处理和导航等领域^[3] 广泛应用。和扩展卡尔曼滤波^[4](extended Kalman filter, EKF) 相比, CKF 不需要计算雅可比矩阵; 和无迹卡尔曼滤波^[5](unscented Kalman filter, UKF) 相比, CKF 在强非线性和高阶时的状态估计性能更加稳定。理论上已经证明, CKF 能够至少以二阶泰勒精度逼近各种非线性系统的后验协方差和均值^[6], 具有简单、精度高、收敛性好等优点^[7]。平方根 CKF (square-root CKF, SRCKF) 是 CKF 的平方根版本^[8], 进一步提高了算法的数值稳定性和滤波精度, 同时减小了运算量。

由于实际系统的先验统计特性无法精确得到, 且跟踪过程存在目标机动、状态突变、模型不匹配等问题, 模型误差不可避免且会导致平方根容积卡尔曼滤波 (square-root cubature Kalman filter, SRCKF) 的滤波性能严重下降。

为了克服模型误差的影响, 获得良好的目标跟踪性能, 主要有两类方法: ①提高目标建模的准确性或利用多模型提高模型的自适应性, 如改进的当前统计 (current statistical, CS) 模型^[9-10] 和交互式多模型 (interacting multiple model, IMM)^[11] 与 SRCKF 结合, 有效改善了滤波器性能; ②改进滤波算法构成自适应滤波器, 如 Sage 自适应滤波器^[12-13], 基于渐消记忆滤波理论的强跟踪滤波器^[14] (strong tracking filter, STF)。其中, STF 通过引入渐消因子实时调整增益矩阵, 迫使残差序列保持正交, 以此提高克服模型误差的性能^[15-20], 在目标跟踪系统中被广泛使用。尽管 STF 性能良好, 但 STF 是一种次优算法, 而且存在渐消因子插入位置随意^[21] 的问题。

文献 [22] 中提出了一种基于修正卡尔曼滤波 (amended Kalman filter, AKF) 算法, 可以克服目标状态突变和目标运动建模不准确的不良影响, 在此基础上文献 [23] 基于概率论进一步优化了判定准则。但是文献 [22-23] 所提算法仅修正了状态值而

收稿日期: 2021-04-20; 录用日期: 2021-08-22; 网络出版时间: 2021-09-14 14:23

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210914.1221.002.html

*通信作者. E-mail: 929652284@qq.com

引用格式: 杨永建, 甘轶, 李春辉, 等. 基于最小化新息协方差的修正 SRCKF 算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 138-144.

YANG Y J, GAN Y, LI C H, et al. Amended SRCKF algorithm based on minimum variance of innovation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 138-144 (in Chinese).

未修正相应的协方差矩阵, 会造成误差; 且修正门限及修正参数的设置是基于经验的, 也会对滤波精度和滤波稳定性造成影响。因此, 文献 [24] 提出基于最小新息协方差的修正卡尔曼滤波算法, 新的修正算法理论推导完善, 避免了修正门限的设置, 能够较好地解决由于模型误差而引起的滤波精度下降甚至发散的问题。文献 [25] 将修正算法应用到了数据缺失时的目标跟踪系统中, 通过有效利用后期测量数据, 提高了数据缺失时目标跟踪的精度和稳定性。文献 [22-25] 中修正算法的主要思想是利用后期的测量数据, 增加对测量值的信任度, 以达到对模型误差进行补偿的目的。

为了进一步提高修正思想的应用范围和性能, 本文基于最小化新息协方差原则推导了相应的修正系数, 并将其应用到 SRCKF 算法中, 提出了基于最小化新息协方差的修正 SRCKF(amended SRCKF, ASRCKF) 算法。仿真结果验证了所提算法的有效性, 同时与 SRCKF 和 STF-SRCKF 算法相比, ASRCKF 算法有着更高的位置、速度和加速度跟踪滤波精度。

1 目标运动建模与 SRCKF 算法

目标运动建模考虑如下离散状态方程和量测方程:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} = h(\mathbf{x}_{k+1}) + \mathbf{v}_{k+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_{k+1} \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; $\mathbf{y}_{k+1} \in \mathbf{R}^l$ 为量测向量; f 和 h 分别为状态转移函数和量测函数; 系统过程噪声 \mathbf{w}_k 和量测噪声 \mathbf{v}_k 为互不相关的高斯白噪声, 协方差矩阵分别为 \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_{k+1} 。

SRCKF 的初始步骤是使用 k 时刻的先验均值 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 和先验协方差矩阵 $\mathbf{P}_{k|k}$ 确定容积点:

$$\mathbf{X}_{i,k|k} = \mathbf{S}_{k|k} \boldsymbol{\xi}_i + \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}_{k|k}$ 为协方差矩阵 $\mathbf{P}_{k|k}$ 的平方根; $\mathbf{X}_{i,k|k}$ 为容积点; m 为容积点的个数, 且 m 为状态向量维数 n 的 2 倍; $\boldsymbol{\xi}_i$ 为基本容积点集^[19]。

容积点经过状态转移函数传播后为

$$\mathbf{X}_{i,k+1|k}^{is} = f(\mathbf{X}_{i,k|k}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

使用传播后的容积点计算得到状态预测值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ 和预测误差协方差矩阵的平方根 $\mathbf{S}_{k+1|k}$ 为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{X}_{i,k+1|k}^{is} \quad (4)$$

$$\mathbf{S}_{k+1|k} = \text{Tria}([\mathbf{X}_{k+1|k}^*, \mathbf{S}_Q]) \quad (5)$$

式中: \mathbf{S}_Q 为 \mathbf{Q}_k 的平方根; $\text{Tria}(\cdot)$ 和 $\mathbf{X}_{k+1|k}^*$ 分别定义为 QR 矩阵分解运算^[21] 和中心加权矩阵:

$$\mathbf{X}_{k+1|k}^* = 1/\sqrt{m} [\mathbf{X}_{k+1|k}^{1*} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \mathbf{X}_{k+1|k}^{2*} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \dots, \mathbf{X}_{k+1|k}^{m*} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}] \quad (6)$$

使用 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ 和 $\mathbf{S}_{k+1|k}$ 再次计算容积点:

$$\mathbf{X}_{i,k+1|k}^i = \mathbf{S}_{k+1|k} \boldsymbol{\xi}_i + \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

容积点经过量测函数传播后为

$$\mathbf{Z}_{i,k+1|k}^i = h(\mathbf{X}_{i,k+1|k}^i) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

使用传播后的容积点计算得到量测预测值 $\hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}$, 进而可以计算新息 \mathbf{r}_{k+1} 、新息误差协方差矩阵的平方根 $\mathbf{S}_{z,z,k+1|k}$ 和互协方差矩阵 $\mathbf{P}_{x,z,k+1|k}$:

$$\hat{\mathbf{z}}_{k+1|k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{Z}_{i,k+1|k}^i \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{z}_{k+1} - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k} \quad (10)$$

$$\mathbf{S}_{z,z,k+1|k} = \text{Tria}([\mathbf{Y}_{k+1|k}, \mathbf{S}_R]) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_{x,z,k+1|k} = \mathbf{X}_{k+1|k} \mathbf{Y}_{k+1|k}^T \quad (12)$$

式中: \mathbf{S}_R 为 \mathbf{R}_{k+1} 的平方根; $\mathbf{X}_{k+1|k}$ 和 $\mathbf{Y}_{k+1|k}$ 分别为中心加权矩阵:

$$\mathbf{Y}_{k+1|k} = 1/\sqrt{m} [\mathbf{Z}_{k+1|k}^1 - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}, \mathbf{Z}_{k+1|k}^2 - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}, \dots, \mathbf{Z}_{k+1|k}^m - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}] \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_{k+1|k} = 1/\sqrt{m} [\mathbf{X}_{k+1|k}^1 - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \mathbf{X}_{k+1|k}^2 - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \dots, \mathbf{X}_{k+1|k}^m - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}] \quad (14)$$

最后进行状态更新, 计算 $k+1$ 时刻目标状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}$ 、增益 \mathbf{K}_{k+1} 、和估计误差协方差矩阵的平方根 $\mathbf{S}_{k+1|k+1}$:

$$\mathbf{K}_{k+1} = (\mathbf{P}_{x,z,k+1|k} / \mathbf{S}_{z,z,k+1|k}^T) / \mathbf{S}_{z,z,k+1|k} \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1} - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}) \quad (16)$$

$$\mathbf{S}_{k+1|k+1} = \text{Tria}([\mathbf{X}_{k+1|k} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{Y}_{k+1|k}, \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{S}_R]) \quad (17)$$

2 修正思想与 ASRCKF 算法

2.1 修正卡尔曼滤波

修正思想的核心源自式 (16)。由式 (16) 可以看出, 影响系统 $k+1$ 时刻状态估计的因素有 2 个, ① 状态预测值; ② 来自新息或量测值的反馈修正。自适应滤波一般是对第 2 个因素的增益进行修正, 如 STF 就是通过膨胀预测误差协方差来自适应地增大增益, 从而增大量测值在滤波中的贡献以避免发散。不同的是, 修正卡尔曼滤波着眼于第 1 个因素即状态预测值, 通过对状态预测值进行合理的补偿和修正, 进而消除模型误差造成的偏差, 达到降低预测误差和估计误差的目的。

在对量测值信任的基础上, $k+1$ 时刻的新息 \mathbf{r}_{k+1} 发生突变说明 $k+1$ 时刻状态预测值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ 与真实

值偏差较大,而这一偏差又源于 k 时刻目标机动或状态突变造成的状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 的不准确。因此,通过对 k 时刻状态估计值进行修正,并用修正后的状态估计值重新计算 $k+1$ 时刻的预测值,就可以减小预测误差进而减小估计误差。同时新息反映了预测值与真实值偏差的趋势和程度,所以对 k 时刻状态估计值的修正是基于新息的。

文献[22-24]将修正思想应用在卡尔曼滤波中,并对判定准则和修正准则不断改进。最初的判定准则和修正准则是基于经验的^[22],之后文献[23]基于概率论优化了判定准则。文献[24]基于最小新息协方差原则推导出修正系数的向量表达式,不仅避免了判定准则的设置,且修正系数也是基于理论推导得到的,减小了基于经验设置参数的影响。

2.2 修正系数推导

本文基于最小新息协方差准则来推导修正系数的向量形式。

对 k 时刻估计值按式(18)进行修正:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{C}_k \cdot \mathbf{r}_{k+1} \quad (18)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 为修正后的状态估计值; $\mathbf{C}_k = [c_1, c_2, \dots, c_l]^T$ 为修正系数,其中 l 为量测向量的维数。则可以推导得到修正后的估计误差协方差矩阵和预测误差协方差矩阵分别为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{P}}_{k|k} &= \mathbf{P}_{k|k} + \mathbf{C}_k \mathbf{P}_{zz,k+1|k} \mathbf{C}_k^T - \\ & \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{\Phi}_k^T \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{C}_k^T - \mathbf{C}_k \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{\Phi}_k \mathbf{P}_{k|k}^T \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{P}}_{k+1|k} &= \mathbf{P}_{k+1|k} + \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{zz,k+1|k} \mathbf{A}_k^T - \\ & \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{A}_k^T - \mathbf{A}_k \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{S}_{k|k} \mathbf{S}_{k|k}^T$, $\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{S}_{k+1|k} \mathbf{S}_{k+1|k}^T$, $\mathbf{P}_{zz,k+1|k} = \mathbf{S}_{zz,k+1|k}$, $\mathbf{S}_{zz,k+1|k}^T$ 分别为修正前的估计误差协方差矩阵、预测误差协方差矩阵、新息协方差矩阵; $\mathbf{A}_k = \mathbf{\Phi}_k \mathbf{C}_k$ 。

$\mathbf{\Phi}_k = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_k} \right|_{\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}}$, $\mathbf{H}_{k+1} = \left. \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}_k} \right|_{\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}}$ 为状态转移函数和量测函数的线性化近似。

则可以推导出修正后的新息协方差为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{P}}_{zz,k+1|k} &= \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{P}}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1} = \\ & \mathbf{P}_{zz,k+1|k} + \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{zz,k+1|k} \mathbf{A}_k^T \mathbf{H}_{k+1}^T - \\ & \mathbf{B}_{k+1} \mathbf{A}_k^T \mathbf{H}_{k+1}^T - \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{A}_k \mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{P}_{zz,k+1|k} + \\ & \mathbf{L}_{k+1} \mathbf{P}_{zz,k+1} \mathbf{L}_{k+1}^T - \mathbf{B}_{k+1} \mathbf{L}_{k+1}^T - \mathbf{L}_{k+1} \mathbf{B}_{k+1} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T$; $\mathbf{L}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{A}_k$ 。为了使修正后的新息协方差矩阵最小,则:

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{P}}_{zz,k+1|k}}{\partial \mathbf{L}_{k+1}} = [\mathbf{P}_{zz,k+1|k} + \mathbf{P}_{zz,k+1|k}^T] \mathbf{L}_{k+1} - \mathbf{B}_{k+1} - \mathbf{B}_{k+1}^T = 0 \quad (22)$$

$$\mathbf{L}_{k+1} = (\mathbf{P}_{zz,k+1|k} + \mathbf{P}_{zz,k+1|k}^T)^{-1} (\mathbf{B}_{k+1} + \mathbf{B}_{k+1}^T) \quad (23)$$

当 $\mathbf{P}_{k+1|k}$ 和 $\mathbf{P}_{zz,k+1|k}$ 是对称矩阵时,式(21)可以写为

$$\mathbf{L}_{k+1} = \mathbf{P}_{zz,k+1|k}^{-1} \mathbf{B}_{k+1} \quad (24)$$

则可得到使得新息协方差矩阵最小时的修正系数为

$$\mathbf{C}_k = (\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{\Phi}_k)^+ \mathbf{P}_{zz,k+1|k}^{-1} \mathbf{B}_{k+1} \quad (25)$$

式中: $(\cdot)^+$ 表示 Moore-Penrose 逆,因为矩阵 $\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{\Phi}_k$ 的逆不一定总是存在。

2.3 ASRCKF 算法实现

总结得到 ASRCKF 算法的流程如图 1 所示,具体的实现步骤如下:

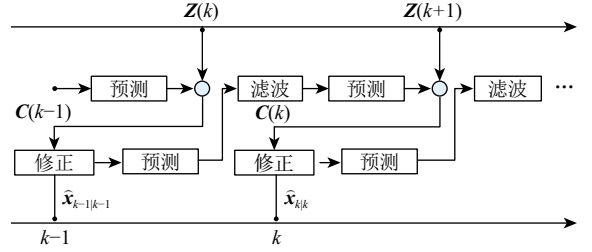


图 1 算法流程

Fig. 1 Flow chart of the algorithm

步骤 1 通过式(2)~式(17)完成时间更新及量测更新,得到 SRCKF 的滤波参数。

步骤 2 用式(25)计算修正系数 \mathbf{C}_k ,并通过式(18)和式(19)修正状态估计值和估计误差协方差矩阵。

步骤 3 用修正后的状态估计值和估计误差协方差矩阵重新按式(2)~式(17)完成滤波。

步骤 4 重复步骤 1~3。

ASRCKF 算法利用了 k 时刻之后的量测值,类似于平滑算法但和平滑算法的本质不同。

3 仿真与分析

为了验证 ASRCKF 算法的有效性,将其与标准 SRCKF 算法、STF-SRCKF^[21]算法进行对比。仿真中目标做匀加速运动,状态转移矩阵和测量矩阵分别为

$$\mathbf{H}_k = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (26)$$

$$\mathbf{\Phi}_k = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中: $T=1$ s 为采样时间。

系统状态向量 $\mathbf{X} = [p, v, a]^T$,量测 $Z = p$, p 、 v 和 a 分别为对应的位置、速度和加速度分量;修正系数 $\mathbf{C}_k = [c_1, c_2, c_3]^T$ 。过程噪声协方差矩阵为

$$\mathbf{Q}_k = q^2 \begin{bmatrix} T^5/20 & T^4/8 & T^3/6 \\ T^4/8 & T^3/3 & T^2/22 \\ T^3/6 & T^2/2 & T \end{bmatrix} \quad (28)$$

目标初始状态为 $\mathbf{x}_0=[10 \text{ m}, 60 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2]^T$, 系统初始协方差 $\mathbf{P}_0=\text{diag}(100,10,1)$; 系统过程噪声协方差矩阵中 $q=2$, q 为连续时间白噪声的功率密度, 反映了模型误差的程度; 量测噪声协方差 $\mathbf{R}=100 \text{ m}^2$; STF-SRCKF 算法中的遗忘因子取 0.96。

仿真进行 200 次蒙特卡罗实验, 同时用目标位置, 速度和加速度的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 作为评价指标:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\mathbf{X}_d(k) - \hat{\mathbf{X}}_d^j(k|k))^2} \quad (29)$$

式中: N 为蒙特卡罗实验次数; j 为第 j 次仿真; $\mathbf{X}_d(k)$ 和 $\hat{\mathbf{X}}_d^j(k|k)$ 分别为 k 时刻状态向量的第 d 维分量的真实值和状态估计值。

仿真场景 1 主要考虑状态突变造成的模型误差。目标初始运动状态为 $\mathbf{x}_0=[0 \text{ m}, 50 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2]^T$, 前 30 s 目标保持状态不变, 在 31 s 时加速度突变为 20 m/s^2 , 在 81 s 时加速度突变为 -20 m/s^2 。每次蒙特卡罗仿真的初始估计状态为 $\hat{\mathbf{x}}_0=[0 \text{ m}, 50 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2]^T$, 初始估计误差较小。

图 2~图 4 分别为目标位置、速度和加速度的均方根误差对比, 表 1 为 3 种算法误差均值对比。

对目标位置的跟踪是关键, 从图 2 可以看出, SRCKF 算法在滤波正常时比 STF-SRCKF 的跟踪精度更高, 但是在引入加速度突变的 31 s 和 81 s, 其 RMSE 曲线发生跳变, 产生较大误差。而 ASRCKF 和 STF-SRCKF 能够克服状态突变的不良影响, 始终保持较为平稳的跟踪精度; 同时可以明显看到 ASRCKF 有着比 STF-SRCKF 及 SRCKF 更好的滤波精度。从图 3 和图 4 中速度和加速度跟踪误差可以看到, 在状态突变发生时, ASRCKF 算法有着更高的精度及更快的收敛速度。

结合表 1 可以看到, 尽管 STF-SRCKF 有着较

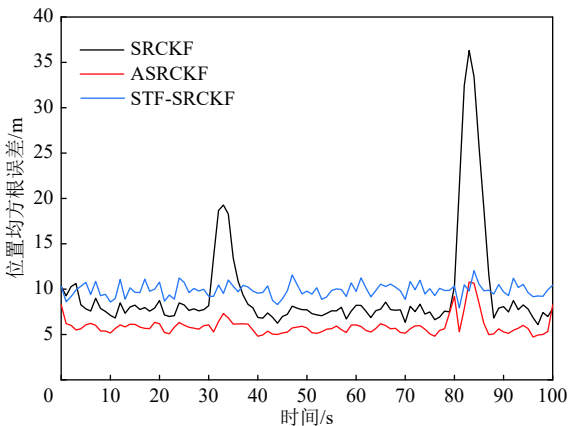


图 2 场景 1 位置均方根误差

Fig. 2 RMSE of position in case 1

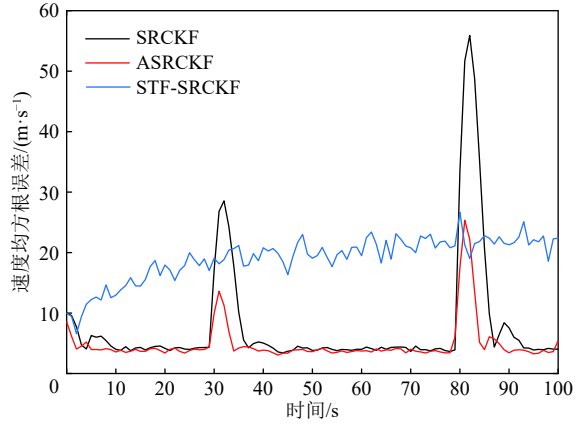


图 3 场景 1 速度均方根误差

Fig. 3 RMSE of velocity in case 1

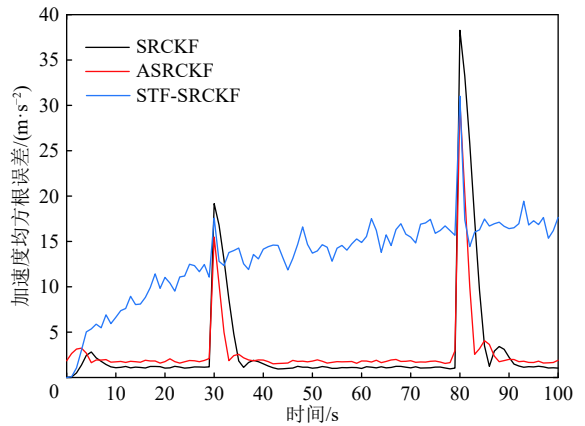


图 4 场景 1 加速度均方根误差

Fig. 4 RMSE of acceleration in case 1

表 1 场景 1 误差均值对比

Table 1 Comparison of mean error for each algorithm in case 1

算法	位置误差均值/m	速度误差均值/(m·s ⁻¹)	加速度误差均值/(m·s ⁻²)
SRCKF	7.970 7	6.984 2	2.808 3
ASRCKF	4.752 0	4.119 1	2.320 1
STF-SRCKF	7.520 7	14.643 5	10.654 1

好的滤波稳定性, 但却是次优算法, 在速度、加速度的跟踪精度上还要低于 SRCKF。相比之下, ASRCKF 在位置、速度、加速度跟踪精度上都要明显更优。

仿真场景 2 在场景 1 的基础上, 一方面引入模型不匹配造成的模型误差, 即在 50~55 s 期间 3 种算法均使用匀速直线运动的状态转移矩阵来代替 CA 模型中的 Φ_k ; 另一方面设定仿真初始估计状态为 $\hat{\mathbf{x}}_0=[60 \text{ m}, 0 \text{ m/s}, 20 \text{ m/s}^2]^T$, 从而引入较大的初始估计误差; 其余设置和场景 1 相同。

图 5~图 7 分别为场景 2 中目标位置、速度和加速度的均方根误差对比, 表 2 为 3 种算法在场景 2 中的误差均值对比。

仍然从位置跟踪上进行分析,如图5所示,在较大初始误差引入下,ASRCKF和STF-SRCKF有着比SRCKF更好的误差收敛速度;在31s和81s引入的加速度突变对3种算法的影响和场景1仿真结果一致;在模型不匹配引入的50~55s,STF-SRCKF的稳定性最好,其他2种算法都出现了RMSE曲线的跳变,但是ASRCKF受到的影响更小。如

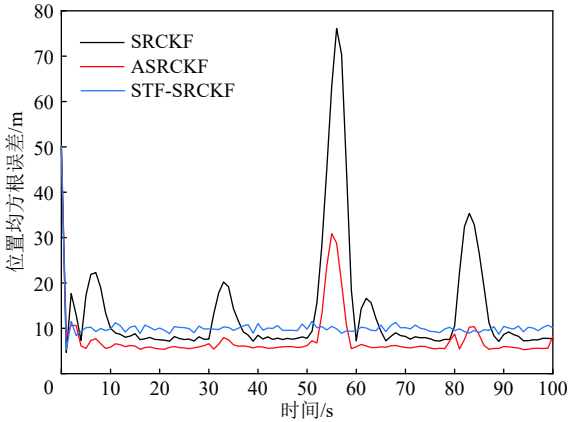


图5 场景2位置均方根误差
Fig. 5 RMSE of position in case 2

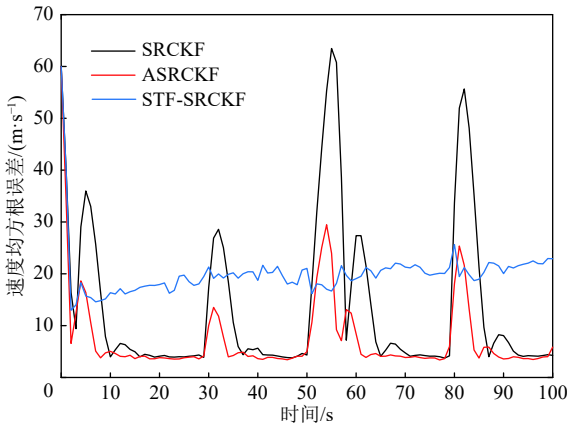


图6 场景2速度均方根误差
Fig. 6 RMSE of velocity in case 2

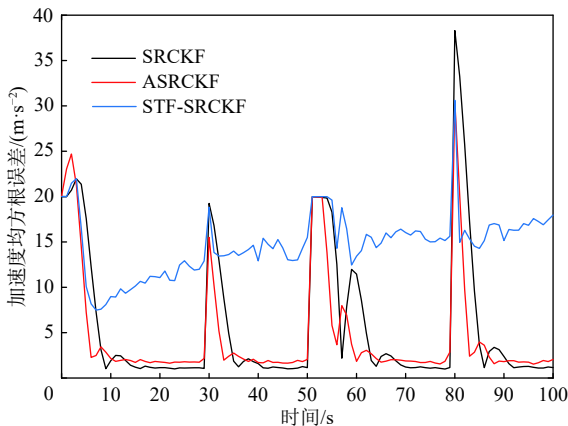


图7 场景2加速度均方根误差
Fig. 7 RMSE of acceleration in case 2

表2 场景2误差均值对比

Table 2 Comparison of mean error for each algorithm in case 2

算法	位置误差均值/m	速度误差均值/(m·s ⁻¹)	加速度误差均值/(m·s ⁻²)
SRCKF	12.5175	13.1114	5.6948
ASRCKF	6.4368	6.7186	4.2920
STF-SRCKF	8.2924	16.1961	12.1711

图6和图7所示,在状态突变和模型误差发生时,STF-SRCKF无法保持位置跟踪时的良好稳定性和精度;相比之下ASRCKF算法保持着更低的滤波误差及更快的收敛速度。

结合表2可知,STF-SRCKF在位置跟踪上的精度和稳定性比较好,但是在速度、加速度跟踪上却不理想;相比之下,ASRCKF在位置速度、加速度跟踪精度上都要明显更优。

4 结论

为了克服模型误差带来的不良影响,同时,进一步提高修正思想的应用范围,本文基于最小化新息协方差原则推导了相应的修正系数,并将其与SRCKF算法结合,提出了ASRCKF算法。仿真结果表明:

- 1) 目标状态突变存在时,ASRCKF有着更好的滤波性能,收敛速度更快;从位置、速度和加速度误差均值上看,ASRCKF都是最低的。
- 2) 在引入较大初始误差和模型不匹配后,ASRCKF依旧保持着高滤波精度和快速收敛速度,位置、速度和加速度误差是3种算法中最低的。
- 3) ASRCKF算法的有效性和优良跟踪性能得到验证,有效地提高了SRCKF算法的场景适应能力。

参考文献 (References)

- [1] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filters[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1254-1269.
- [2] ARASARATNAM I, HAYKIN S, HURD T R. Cubature Kalman filtering for continuous-discrete systems: Theory and simulations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(10): 4977-4993.
- [3] 王小旭,潘泉,黄鹤,等.非线性系统确定采样型滤波算法综述[J]. *控制与决策*, 2012, 27(6): 801-812.
WANG X X, PAN Q, HUANG H, et al. Overview of deterministic sampling filtering algorithms for nonlinear system[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(6): 801-812(in Chinese).
- [4] CORTINA E, OTERO D, D'ATELLIS C E. Maneuvering target tracking using extended Kalman filter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(1): 155-158.
- [5] JULIER S, UHLMANN J, DURRANT-WHYTE H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in fil-

- ters and estimators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(3): 477-482.
- [6] JULIER S J, UHLMANN J K. A general method for approximating nonlinear transformation of probability distributions [EB/OL]. (1996-11-01)[2021-04-05]. <http://www.eng.ox.ac.uk/>.
- [7] ZHAO L Q, WANG J L, YU T, et al. Design of adaptive robust square-root cubature Kalman filter with noise statistic estimator[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2015, 256: 352-367.
- [8] 赵利强, 罗达灿, 王建林, 等. 自适应强跟踪容积分卡尔曼滤波算法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2013, 40(3): 98-103.
ZHAO L Q, LUO D C, WANG J L, et al. An adaptive strong tracking cubature Kalman filter[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 40(3): 98-103(in Chinese).
- [9] ZHANG H W, XIE J W, GE J A, et al. Adaptive strong tracking square-root cubature Kalman filter for maneuvering aircraft tracking[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 10052-10061.
- [10] ZHANG H W, XIE J W, GE J A, et al. Strong tracking SCKF based on adaptive CS model for manoeuvring aircraft tracking[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(7): 742-749.
- [11] HAN B, HUANG H Q, LEI L, et al. An improved IMM algorithm based on STSRCKF for maneuvering target tracking[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 57795-57804.
- [12] 徐天河, 杨元喜. 改进的Sage自适应滤波方法[J]. *测绘科学*, 2000, 25(3): 22-24.
XU T H, YANG Y X. The improved method of sage adaptive filtering[J]. *Developments in Surveying and Mapping*, 2000, 25(3): 22-24(in Chinese).
- [13] 鲁平, 赵龙, 陈哲. 改进的Sage-Husa自适应滤波及其应用[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(15): 3503-3505.
LU P, ZHAO L, CHEN Z. Improved sage-husa adaptive filtering and its application[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(15): 3503-3505(in Chinese).
- [14] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器[J]. *自动化学报*, 1991, 17(6): 689-695.
ZHOU D H, XI Y G, ZHANG Z J. A suboptimal multiple fading extended Kalman filter[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1991, 17(6): 689-695(in Chinese).
- [15] 徐树生, 林孝工, 李新飞. 强跟踪自适应平方根容积分卡尔曼滤波算法[J]. *电子学报*, 2014, 42(12): 2394-2400.
XU S S, LIN X G, LI X F. Strong tracking adaptive square-root cubature Kalman filter algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(12): 2394-2400(in Chinese).
- [16] 徐树生, 林孝工, 赵大威, 等. 强跟踪SRCKF及其在船舶定位中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(6): 1266-1272.
XU S S, LIN X G, ZHAO D W, et al. Strong tracking SRCKF and its application in vessel dynamic positioning[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(6): 1266-1272(in Chinese).
- [17] GE Q B, LI W B, WEN C L. SCKF-STF-CN: A universal nonlinear filter for maneuver target tracking[J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 2011, 12(8): 678-686.
- [18] LI N, ZHU R H, ZHANG Y G. A strong tracking square root CKF algorithm based on multiple fading factors for target tracking[C]//2014 Seventh International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization. Piscataway: IEEE Press, 2014: 16-20.
- [19] ZHANG A, BAO S D, BI W H, et al. Low-cost adaptive square-root cubature Kalman filter for systems with process model uncertainty[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016, 27(5): 945-953.
- [20] ZHANG A, BAO S D, GAO F, et al. A novel strong tracking cubature Kalman filter and its application in maneuvering target tracking[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(11): 2489-2502.
- [21] 张浩为, 谢军伟, 葛佳昂, 等. 自适应CS模型的强跟踪平方根容积分卡尔曼滤波算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(6): 1186-1194.
ZHANG H W, XIE J W, GE J A, et al. Strong tracking square-root cubature Kalman filter over adaptive current statistical model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(6): 1186-1194(in Chinese).
- [22] 杨永建, 樊晓光, 王晟达, 等. 基于修正卡尔曼滤波的目标跟踪[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(5): 846-851.
YANG Y J, FAN X G, WANG S D, et al. Target tracking based on amended Kalman filter[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(5): 846-851(in Chinese).
- [23] YANG Y J, FAN X G, ZHUO Z F, et al. AFAKF for manoeuvring target tracking based on current statistical model[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2016, 10(6): 637-643.
- [24] YANG Y J, FAN X G, ZHUO Z F, et al. Amended Kalman filter for maneuvering target tracking[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2016, 25(6): 1166-1171.
- [25] YANG Y J, FAN X G, TANG S J, et al. Amended Kalman filtering with intermittent measurements in target tracking[J]. *Journal of Information Science and Engineering*, 2019, 35(6): 1329-1341.

Amended SRCKF algorithm based on minimum variance of innovation

YANG Yongjian^{1,2}, GAN Yi², LI Chunhui^{2,*}, DENG Youwei², XIAO Bingsong², PENG Fang²

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Aviation Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The model errors in the target tracking process will lead to the degraded performance and decreased filtering accuracy of the square-root cubature Kalman filter (SRCKF). Amended Kalman filter (AKF) can solve this problem effectively, but it is difficult to be applied to nonlinear filtering. To overcome the negative impact of the model errors and to further improve the application scope of the amendment thought, the vector form of the amendment coefficient is derived by minimizing innovation covariance on the basis of the SRCKF. Then, the amended SRCKF (ASRCKF) algorithm is proposed. By using posterior measurements, the ASRCKF algorithm can increase confidence level to measurement, so that the target model error can be compensated. The simulation results indicate the ASRCKF can suppress the model errors effectively with better filtering performance, compared with SRCKF and STF-SRCKF algorithms.

Keywords: amended Kalman filter; target motion model error; square-root cubature Kalman filter; variance of innovation; amendment coefficient

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0211

基于 EEG 信号特征的脑力疲劳快速检测方法

张朋¹, 周前祥¹, 于洪强², 王川^{3,*}

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 北京 100191; 2. 航天员科研训练中心, 北京 100194;

3. 中国人民解放军海军特色医学中心, 上海 200433)

摘 要: 空间站飞行过程中航天员容易产生脑力疲劳, 其是影响作业效率和引起失误的主要因素。为此, 研究人体脑力疲劳的快速检测方法, 将有利于保障在轨运行安全。脑电波 (EEG) 的特征变化能够反映出大脑疲劳状态, 但现有 EEG 方法分析脑力疲劳时需要多个导联的信号, 这严重限制了其在空间站环境中的实际应用。通过地基实验, 采用 36 h 睡眠剥夺的方式成功诱发出 45 名受试者的多种脑力疲劳状态。针对 EEG 信号的非平稳性, 设计的 8 层 db4 小波变换结构, 有效分解出了 δ 、 θ 、 α 和 β 脑节律波。先使用方差分析 (ANOVA) 和 Logistic 回归筛选出脑力疲劳敏感特征, 再依据脑力疲劳敏感特征数量进一步筛选出脑力疲劳敏感导联, 应用 6 个敏感导联的特征分别构建了随机森林回归模型。加权融合 6 个导联处的回归模型, 形成脑力疲劳快速检测模型, 其平均精确率高达 85.25%。

关键词: 脑力疲劳; 脑电波; 脑电特征; 随机森林; 检测模型

中图分类号: V7

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0145-10

人长时从事高强度认知活动或睡眠不足容易产生脑力疲劳, 特别是在密闭环境中, 如空间在轨飞行阶段。脑力疲劳会降低作业绩效, 严重时甚至引发安全事故^[1-2]。早在 20 世纪 90 年代, 美国宇航局便开展了飞行员的脑力疲劳相关研究^[3-6]。约半数人在慢性脑疲劳状态中的认知和绩效能力明显降低, 不能正常工作^[7], 依据脑力疲劳程度能有效预测出操控者犯错误的可能性^[8]。脑力疲劳在主观上的表现为精神不振、机动性能差和警觉度下降等^[9]; 在行为上的主要表现为认知能力和任务绩效降低^[10-11]; 在生理上的主要表现为大脑功能活动的改变^[12-13]。

人脑有约 1 000 亿的神经元细胞, 其 1%~5% 分布于大脑皮层^[14]。神经递质是 2 个元细胞之间传输信息的媒介, 其本质是具有微弱电荷的化学物质^[15]。人在进行认知、思考和记忆等思维活动时, 大脑皮层的神经元细胞被激活, 从而产生神经冲动。

大量神经递质的定向移动对外所形成实时变化的电位差, 通过头皮电位传感器记录的这种电位差, 即为脑电波 (electroencephalogram, EEG)。脑节律波通常有 4 个频段, 分别为 δ (0.5~4 Hz)、 θ (4~8 Hz)、 α (8~14 Hz) 和 β (14~30 Hz)。研究表明: δ 波是大脑进入意识昏迷或深度睡眠状态的标志物, 人在清醒状态下无法检测到 δ 波; θ 波在人脑力疲劳、情绪压抑或受药物抑制时出现; α 波属于快节律波, 在人受到外界刺激时会瞬间消失; β 波是最快的基本节律波、人在兴奋状态时会出现 β 波, 其可表征脑的清醒程度^[16-18]。

EEG 是一种人体客观生理信号, 可定量评估大脑的疲劳程度。Trejo 等^[19]使用 30 个导联, 验证了脑电波特征与脑疲劳状态间存在收敛性。在此基础上, Jap 等^[20]通过快速傅里叶变换深入分析了 4 个脑电特征, 发现脑严重疲劳时 α 波的含量相对

收稿日期: 2021-04-23; 录用日期: 2021-07-18; 网络出版时间: 2021-07-24 12:23

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210723.1318.002.html

基金项目: 载人航天空间医学试验项目 (HYZHXM03003); 武器装备军内科研项目基金 (20AZ0702)

*通信作者. E-mail: hg04381@163.com

引用格式: 张朋, 周前祥, 于洪强, 等. 基于 EEG 信号特征的脑力疲劳快速检测方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 145-154.

ZHANG P, ZHOU Q X, YU H Q, et al. Fast detection method of mental fatigue based on EEG signal characteristics [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 145-154 (in Chinese).

增加,而 β 波的含量相对减少, $(\theta+\alpha)/\beta$ 的含量明显增加。Kar等^[21]重点研究了左额极点 F_p1 ,右颞极点 F_p2 ,左额点 F_3 ,右额点 F_4 ,额中线点 F_z ,中央中线点 C_z ,左枕点 O_1 和右枕点 O_2 导联的EEG信号,应用5种熵特征评估了脑力疲劳的程度。他们的结果为采用EEG信号分析脑力疲劳提供了理论依据,但未构建出有效的检测模型。

Liu等^[22]应用隐马尔可夫和主成分分析算法训练的分类模型,虽然能降低特征维度以提高检测速度,但构建此模型所用的导联数目多,且仅能区分一种脑力疲劳状态。Zhang等^[23]使用滑窗技术提取出枕区导联的小波熵、样本熵和峰值等特征,有效识别出正常状态、轻度疲劳、情绪波动和过度疲劳4种状态。这种方法虽然能缩减脑电导联的使用数量,但附加有肌电和眼电信号的特征,增大了实际应用难度。

本文获得中国载人航天医学领域第一批经费资助,其主要目的是提出一种适合在空间站开展的航天员脑力疲劳检测方案。由于在轨实验的耗材有限,且航天员的时间宝贵,因此,本文在深入分析大脑皮层EEG信号的基础上,揭示出更多的脑力疲劳敏感特征,然后依据敏感特征的数量进一步筛选出敏感导联。通过筛选敏感导联,减少脑力疲劳检测方案实际应用时所需的导联数量,在保证检测准确性的同时缩短实验准备时间、降低后续数据分析量和时间成本,提高在轨空间站航天员脑力疲劳检测实验的可行性。

1 实验与方法

1.1 睡眠剥夺实验

目前,主流的脑力疲劳诱发方式有睡眠剥夺和持续认知任务2种形式,本文采用36h睡眠剥夺来诱发受试者的脑力疲劳。受试者均为北京航空航天大学在校学生,年龄在22~28岁之间,共45人。他们身体健康,均为右利手,矫正视力1.0以上。无精神方面相关病史,实验过程中状态正常、情绪稳定。无颅脑外伤史,1个月内没有服用各种镇静剂、兴奋剂等影响脑功能的药物。

实验方案经伦理委员会批准,受试者均签署了知情同意书。45名受试者分多次入组,每次有2~3名参加。他们于实验当天早8:00到达实验室,次日晚20:00离开,回宿舍休息12h和24h后再分别采集1次数据。整个实验期间受试者可自由进行阅读、上网等非剧烈活动,不能远距离外出,饮食、水果等由实验室统一提供。实验环境中无床或躺椅,仅配备有书桌、座椅和电脑等常用办公用品,全过程由6名研究人员轮流监视。

受试者每4h需填写一次主观疲劳自评问卷,其设计主要依据日本卫生学会产业疲劳研究会编制的作业疲劳症状自评量表^[24](newly developed questionnaire for work related fatigue feelings, WRFFQ),包括困倦感、情绪不安感、注意力状态、思维状态和视觉疲劳感5个问题。采用10分制的评价标准,即0分代表完全没有困倦感、情绪不安感、视觉疲劳感或注意力非常集中、思维非常清晰;10分代表非常严重的困倦感、情绪不安感、视觉疲劳感或注意力非常涣散、思维非常混乱。受试者关于5个问题的自评得分被加权平均后,形成最终的脑力疲劳主观评分,各分段及相应等级如表1所示。

表1 脑力疲劳主观评分及等级划分
Table 1 Subjective score and grade division of mental fatigue

脑力疲劳分级	主观评分
无疲劳感	$s < 2$
轻微疲劳	$2 \leq s < 4$
中度疲劳	$4 \leq s < 6$
较严重疲劳	$6 \leq s < 8$
很严重疲劳	$s \geq 8$

1.2 脑电信号的预处理

在睡眠剥夺期间使用德国32导联Brain Products脑电设备,受试者每隔4h被采集一次时长约6min的静息态EEG信号,场景如图1所示。前、后30s左右的EEG容易受到活动干扰,因此,截取中间5min的平稳信号用于研究。首先,静息态EEG信号经过0.1~40Hz的带通滤波器。其次,以1s为间隔将滤波后5min的EEG信号切分成片段,用左耳TP9及右耳乳突TP10作参考电极,人工剔除尖刺数据片段和异常导联信号。最后,检查脑电数据是否有较大的基线漂移,剔除基线漂移和伪



图1 脑电信号采集场景

Fig. 1 EEG acquisition scene

迹较大的数据片段。采集过程中可能存在参考电极脱落或环境噪声干扰等现象, 这会严重影响信号质量, 形成难以通过滤波等方式修正的异常数据, 在本实验中共计剔除了 8 个无效的 5 min 脑电数据。

1.3 小波变换提取脑节律波

实验选用的脑电采样频率为 1 000 Hz, 根据脑电节律的频率分段标准, 设计了 8 层 db4 小波变换结构, 以提取 δ 、 θ 、 α 和 β 波, 其中 $X[m]$ 为原始信

号, $g[m]$ 和 $h[m]$ 分别为小波分解后的低频段和 高频段信号, A 和 D 分别为同一层小波结构的低频成分和 高频成分, 如图 2 所示。 δ 波在 A8 段、 θ 波在 D8 段、 α 波在 D7 段、 β 波在 D6 段。某段脑电信号的 4 个节律波及其频率范围如图 3 所示。小波包分解可以准确提取脑电信号中的不同节律波, 其具有一般频谱分析所不具备的时间和频率同步定位功能, 对非平稳性脑电信号有很强的还原能力。

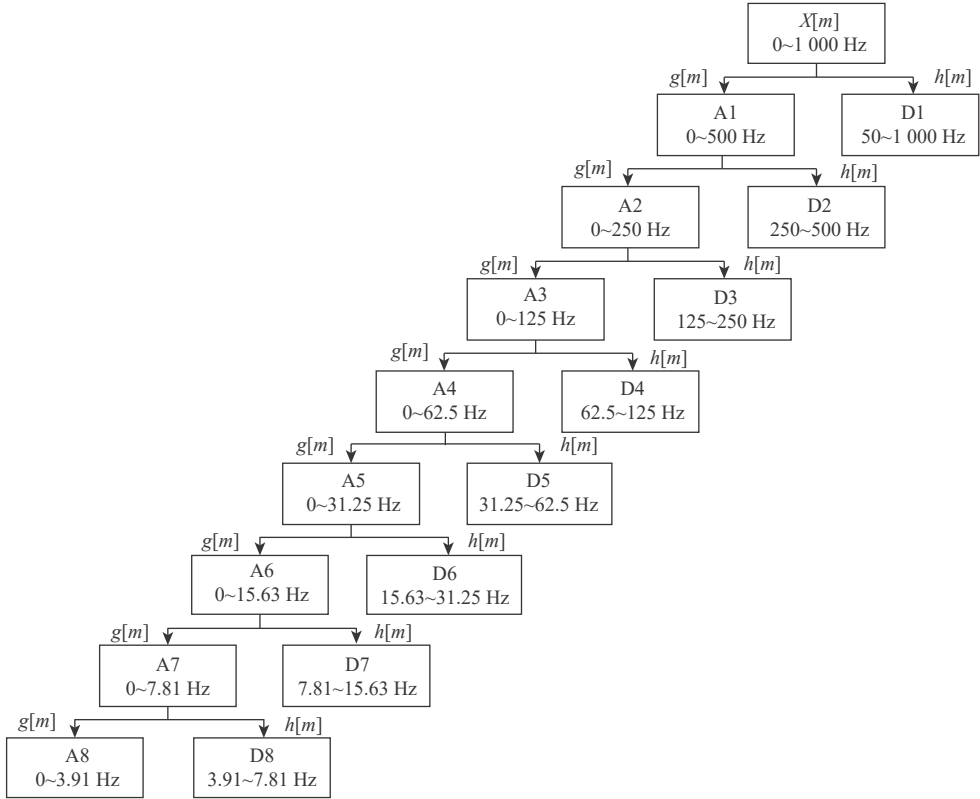


图 2 小波变换结构

Fig. 2 Wavelet transform structure

1.4 各导联脑电特征的计算

采集 EEG 时不可避免地会存在人体活动或外界环境干扰, 为提高特征指标的鲁棒性, 本文在片段水平上处理脑电信号。5 min 的静息态脑电信号以 1 s 为单位被平均分成 300 段, 在每段中分别计算脑电特征值。计算获得的 300 个特征值经 3 倍标准差法剔除异常值后, 再求平均形成最终的脑电特征。经统计, 此过程被删除的数值约占总体的 0~5%, 不影响数据质量。

在每个导联的脑电信号中分别计算最小值、最大值、自回归系数、平均值、方差、标准差、算数平均值、Renyi 熵、对数能量熵、Shannon 熵、Tsallis 熵、时变对数方根、Teager 平均能量、平均能量、平均曲线长度、归一化二阶差、二阶差、归一化第一差、一阶差、峰度、偏度、Hjorth 复杂性、Hjorth 移动性、Hjorth 活动性、 $(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 总能量、 δ 波绝对能量、 θ 波绝对能量、 α 波绝对能量、 β 波绝对能

量、 $\delta/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量、 $\theta/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量、 $\alpha/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量、 $\beta/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量、 $(\theta+\alpha)/\beta$ 相对能量、 α/β 相对能量、 $(\theta+\alpha)/(\beta+\alpha)$ 相对能量和 θ/β 相对能量共计 37 个脑电特征。

1.5 脑力疲劳快速检测模型的构建

为提高检测速度, 本文希望筛选出脑力疲劳敏感导联, 使用各敏感导联处的脑电特征构建随机森林回归模型。随机森林算法具有突出优点: 能够处理高维度特征, 无需做特征选择, 能在众多数据集中表现出很强的鲁棒性; 随机森林模型建立时无剪枝过程, 与决策树相比不易产生过拟合; 随机森林模型建立时对广义误差使用无偏估计, 有较强的泛化能力; 通过平均降低的准确率或平均降低的基尼系数自动评价特征的重要性等。因此, 本文选用随机森林算法构建回归模型。

另外, 为提高检测准确性, 本文将在各敏感导联处构建的回归模型进行融合, 以形成最终的脑力

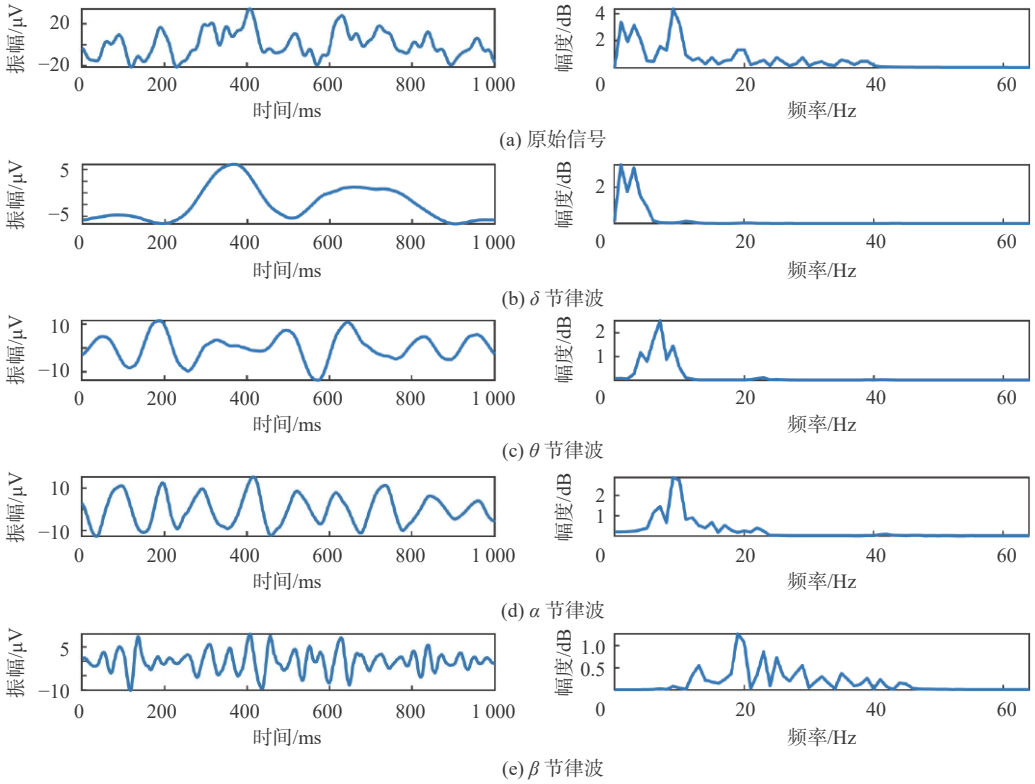


图3 小波变换提取的脑节律波

Fig. 3 Brain rhythm wave extracted by wavelet transform

疲劳快速检测模型。最直接的融合方法是同时用多个导联的脑电特征构建回归模型,即特征融合,但这种特征融合所构建的向量空间维度高,导致回归模型易出现过拟合现象。为增强融合模型的泛化能力,本文采用各子模型输出值加权平均的方式将其融合,即模型融合。具体步骤如下:

步骤1 使用各导联的37个脑电特征,分别训练出 N 个敏感导联的随机森林回归模型,得到 N 组回归值 $\{p_n(i)|n \in 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, L\}$,其中 L 为训练样本数。

步骤2 计算训练集 N 组回归值的受试者工作特性(receiver operating characteristic, ROC)曲线下的面积(area under curve, AUC),记为 $\{AUC_n|n \in 1, 2, \dots, N\}$ 。

步骤3 以 AUC_n 为系数,加权平均测试样本的回归值,测试样本的回归值记为 p ,加权后的回归值记为 \bar{p} 。

$$\bar{p} = \frac{\sum_{n=1}^N (AUC_n p_n)}{\sum_{n=1}^N AUC_n} \quad (1)$$

2 结果

2.1 脑力疲劳状态的诱发

整个实验过程中共计采集到45名受试者的有效数据412次,依据主观评分将他们划分为不同脑

力疲劳等级,包括无疲劳感98例,轻微疲劳107例,中度疲劳81例,较重疲劳67例,严重疲劳59例。受试者的脑力疲劳主观评分一致性良好,如图4所示。由统计结果可以发现,36h睡眠剥夺可以成功诱发出受试者的4种脑力疲劳状态。睡眠剥夺期间的前8h受试者基本无疲劳感,只有少数受试者感到轻微疲劳。睡眠剥夺20h后大部分受试者仍处于轻微脑力疲劳状态,睡眠剥夺12~20h内少数受试者在进入中度脑力疲劳状态。睡眠剥夺24h后受试者的脑力疲劳开始由中度向较重状态过度。睡眠剥夺32h后受试者均处于较重脑力疲劳状态,睡眠剥夺32~36h内受试者开始进入严重脑力疲劳状态。受试者的主观评分可以表明,本次睡

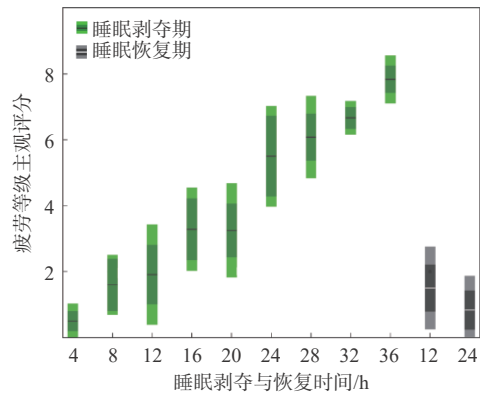


图4 脑力疲劳状态统计结果

Fig. 4 Statistical results of mental fatigue

眼剥夺实验成功诱发了受试者的脑力疲劳, 并且脑力疲劳随着睡眠剥夺时间的增长而逐渐加剧。另外, 睡眠剥夺 36 h 内受试者依次进入脑力无疲劳感、轻微疲劳、中度疲劳、较重疲劳和严重疲劳状态, 说明 36 h 睡眠剥夺能满足对多种脑力疲劳状态的研究需求。

2.2 脑力疲劳的敏感特征

在每个导联上分别提取了共计 37 个特征, 进行敏感特征数量统计为定量评价各导联与脑力疲劳之间的关联度, 利用少数敏感导联中的脑电特征来检测脑力疲劳, 以提高检测速度、降低方案实施难度。首先, 对每个脑电特征进行 Shapiro-Wilk(SW) 检验, 发现 SW 检验的 P 值均大于 0.05, 所以不能拒绝 0 假设, 样本来自正态分布。因此, 本文采用方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 方法检验 5 种脑力疲劳状态间的脑电特征差别, P 值小于 0.05 被认为具有显著的统计学差异。同时, 用单个特征构建 Logistic 回归器, 通过 AUC 评价其检测脑力疲劳的能力。将 $P < 0.05$ 且 $AUC > 0.5$ 的特征定义为敏感特征。表 2 为每种特征所对应的最敏感导联及其统计值, 图 5 展示了前 4 个敏感特征在各脑力疲劳状态间分布的具体差异。

表 2 脑力疲劳的敏感特征统计

Table 2 Statistics of sensitive characteristics of mental fatigue

敏感特征	导联位置	P	AUC
α 波绝对能量	F_3	0.000 4	0.695±0.054
θ/β 相对能量	F_z	0.000 6	0.682±0.049
Hjorth复杂性	O_z	0.000 8	0.669±0.057
Renyi熵	F_z	0.000 8	0.655±0.062
$\alpha/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量	O_1	0.001 2	0.647±0.053
δ 波绝对能量	O_2	0.001 8	0.649±0.042
Tsallis熵	F_3	0.003 7	0.603±0.057
Shannon熵	F_4	0.005 1	0.612±0.046
$\delta/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量	FC_1	0.008 3	0.623±0.052
Hjorth活动性	F_4	0.012 9	0.598±0.051
$(\alpha+\theta)/(\alpha+\beta)$ 相对能量	P_z	0.014 6	0.587±0.045
β 波绝对能量	O_1	0.017 3	0.591±0.050
Teager平均能量	F_4	0.024 0	0.584±0.049
对数能量熵	O_z	0.026 9	0.575±0.054
$(\alpha+\theta)/\beta$ 相对能量	F_3	0.030 5	0.572±0.043
θ 波绝对能量	O_1	0.034 9	0.565±0.038
Hjorth移动性	C_z	0.038 5	0.560±0.047
α/β 相对能量	F_z	0.042 7	0.552±0.039
$\beta/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量	F_z	0.048 3	0.554±0.042

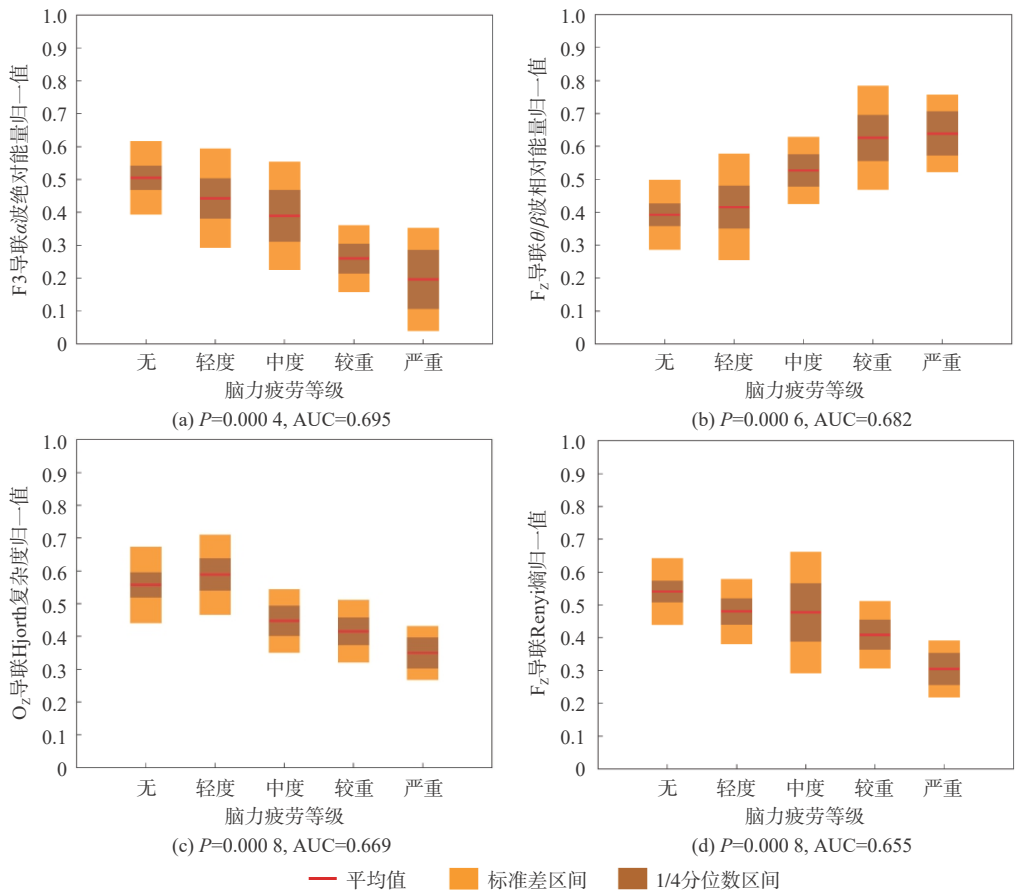


图 5 前 4 个敏感特征的分布差异

Fig. 5 Distribution differences of the first 4 sensitive features

2.3 脑力疲劳的敏感导联

为寻找脑力疲劳敏感导联,本文在2.2节统计敏感特征的基础上,通过敏感特征数量评价了各导联与脑力疲劳的关联程度。如图6所示,纵坐标为单特征 Logistic 回归的 AUC 值,横坐标为该特征 ANOVA 检验 P 值的对数。当 P 值为 0.05 时, $-\lg P = 1.3010$ 。因此,某一脑电特征越靠近统计图的右上角区域,代表此特征与脑力疲劳的关联性越强,不仅具有显著的统计学意义,而且用他构建的脑力疲劳状态回

归模型性能优越。

图6中右上角点的数量,即为该导联处脑力疲劳敏感特征的数量。如1.4节所述,每个导联处的脑电特征总量为37。经统计, F_z 导联拥有16个敏感特征,占特征总量的43.2%; O_1 导联拥有14个敏感特征,占特征总量的37.8%; F_4 导联拥有14个敏感特征,占特征总量的37.8%; O_2 导联拥有13个敏感特征,占特征总量的35.1%; O_z 导联拥有12个敏感特征,占特征总量的32.4%; F_3 导联拥有9个敏感

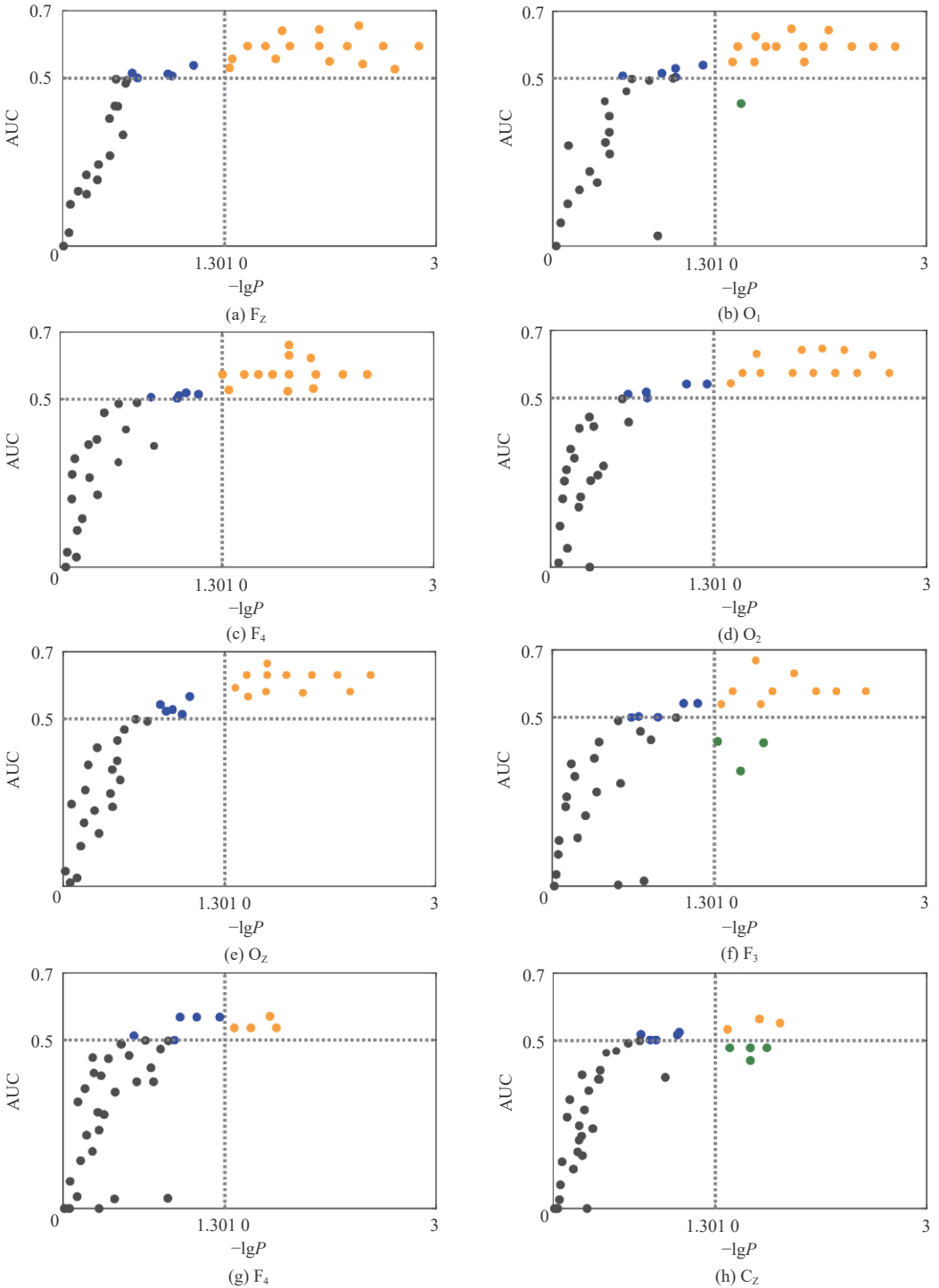


图6 脑力疲劳敏感导联的特征统计

Fig. 6 Feature statistics of sensitive leads of mental fatigue

特征, 占特征总量的 24.3%。从第 7 个导联开始, 敏感特征的比例低于 20%。

2.4 脑力疲劳的快速检测模型

本文采用模型融合的方法, 以提高对脑力疲劳检测的准确性。经统计筛选, 32 个导联中有 6 个导联 20% 以上的特征与脑力疲劳敏感, 即枕叶 O_1 、 O_2 、 O_z 和额叶 F_3 、 F_z 、 F_4 导联被保留。使用各导联处 37 个脑电特征分别构建 1 个随机森林回归模型, 通过 1.5 节提出的方法将 6 个导联的回归模型加权融合, 形成最终的脑力疲劳检测模型。

为充分利用实验数据, 同时避免模型出现过拟合现象, 选用“留一交叉验证法”来建立脑力疲劳

回归模型。即每次选取 1 名受试者作为测试样本, 其余受试者作为训练样本, 依次循环直到所有样本均被测试 1 次。首先, 提取某个敏感导联的 37 个脑电特征; 然后, 在每次留一过程中应用皮尔逊相关系数, 删除线性相关性大于 0.8 的冗余特征, 对留一后的训练集进行十折交叉验证, 通过参数遍历的方式寻找出随机森林的最佳参数。最后, 6 个敏感导联处所构建的回归模型被加权融合, 以形成最终的脑力疲劳检测模型。根据交叉验证过程中平均准确率的降低, 各敏感导联处的前 10 个重要特征的排序如表 3 所示。

6 个敏感导联处随机森林回归模型的 AUC 值如表 4 所示。

表 3 脑力疲劳敏感导联的重要特征

Table 3 Important characteristics of mental fatigue sensitive leads

F_z	O_1	F_4	O_2	O_z	F_3
θ/β 相对能量	$\alpha/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量	Hjorth活动性	δ 波绝对能量	Hjorth复杂性	α 波绝对能量
Renyi熵	β 波绝对能量	Shannon熵	$\alpha/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量	Teager平均能量	$(\alpha+\theta)/\beta$ 相对能量
α/β 相对能量	θ 波绝对能量	θ/β 相对能量	Hjorth复杂性	对数能量熵	Tsallis熵
$\beta/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量	Hjorth活动性	δ 波绝对能量	θ/β 相对能量	α/β 相对能量	θ/β 相对能量
δ 波绝对能量	Teager平均能量	$\delta/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量	$(\alpha+\theta)/(\alpha+\beta)$ 相对能量	$\beta/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量	$\alpha/(\delta+\theta+\alpha+\beta)$ 相对能量
Teager平均能量	δ 波绝对能量	$(\alpha+\theta)/(\alpha+\beta)$ 相对能量	Teager平均能量	Shannon熵	δ 波绝对能量
Hjorth活动性	θ/β 相对能量	Hjorth移动性	对数能量熵	Hjorth移动性	Hjorth活动性
Renyi熵	Shannon熵	β 波绝对能量	Hjorth移动性	β 波绝对能量	α/β 相对能量
β 波绝对能量	Hjorth移动性	Renyi熵	α/β 相对能量	$(\alpha+\theta)/\beta$ 相对能量	Renyi熵
$(\alpha+\theta)/(\alpha+\beta)$ 相对能量	α/β 相对能量	Teager平均能量	θ 波绝对能量	θ/β 相对能量	Teager平均能量

表 4 敏感导联回归模型的 AUC 值

Table 4 AUC value of sensitive lead regression model

敏感导联	无疲劳感	轻度疲劳	中度疲劳	较重疲劳	严重疲劳
F_z	0.795 1	0.705 6	0.785 4	0.705 6	0.746 9
O_1	0.745 8	0.689 1	0.712 1	0.790 5	0.785 4
F_4	0.795 6	0.723 6	0.754 1	0.712 5	0.796 5
O_2	0.752 1	0.753 2	0.695 7	0.755 8	0.723 6
O_z	0.802 3	0.745 6	0.755 4	0.741 5	0.745 1
F_3	0.768 5	0.678 5	0.702 8	0.730 7	0.821 8

6 个敏感导联处所构建的回归模型被加权融合后, 形成的最终脑力疲劳检测模型的 ROC 曲线如图 7 所示。评价结果表明, 检测模型对严重疲劳状态的敏感性最强, 其 AUC 达 0.892, 意味着此模型对脑力严重疲劳状态的检出率最高, 而且虚报率最低。同时, 模型对无疲劳感、轻微疲劳、中度疲劳和较重疲劳 4 种等级的脑力疲劳状态也有较强的敏感性, AUC 值分别为 0.863、0.801、0.830、0.844, 模型检测 5 种脑力疲劳状态的平均 AUC 为 0.846。

为进一步验证随机森林算法的有效性, 本文用

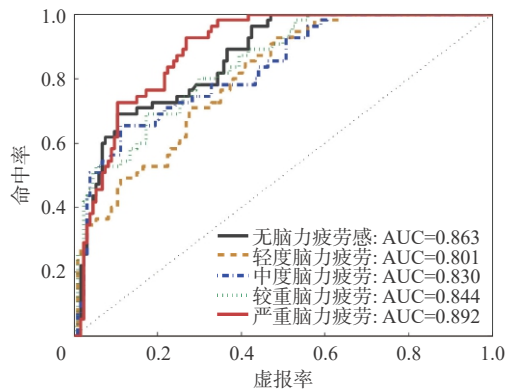


图 7 脑力疲劳检测模型的 ROC 曲线

Fig. 7 ROC curve of mental fatigue detection model

相同的方法构建了支持向量机 (support vector machine, SVM)、Logistic 回归和人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 的融合模型, 他们与随机森林 (random forests, RF) 融合检测模型比较的 P 值如表 5 所示。

从表 5 统计结果得知, RF 算法比 SVM、Logistic 回归和 ANN 更适合构建脑力疲劳检测模型, 其 AUC 比较的 P 值均小于 0.05, 具有显著的统计学意义。另外, RF 脑力疲劳检测模型的分类结果如

表5 脑力疲劳融合检测模型的比较

Table 5 Comparison of fusion detection models for mental fatigue

模型	Logistic	ANN	RF
SVM	0.445 6↓	0.389 5↑	0.024 5↑
Logistic		0.245 3↑	0.018 7↑
ANN			0.023 6↑
RF			

注: ↑指横向单元格中的方法优于纵向单元格中的方法, ↓指横向单元格中的方法差于纵向单元格中的方法。

表6所示, 平均精确率为85.25%, 平均召回率为23.96%, 平均 F_1 值为36.98%, F_1 为反映模型稳健性的评估标准。

表6 脑力疲劳检测模型分类结果

Table 6 Classification results of mental fatigue detection model

检测模型	精确率/%	召回率/%	F_1 /%
无疲劳感	87.71	20.82	33.65
轻度疲劳	81.04	31.20	45.05
中度疲劳	82.71	29.86	43.88
较重疲劳	86.08	19.64	31.98
严重疲劳	88.73	18.29	30.33
平均值	85.25	23.96	36.98

3 结论

本文通过睡眠剥夺实验成功诱发出受试者的4种脑力疲劳状态, 即轻微脑力疲劳、中度脑力疲劳、较重脑力疲劳和严重脑力疲劳。在分析脑力疲劳的敏感特征和导联时, 得出如下有意义的结论:

1) 随着脑力疲劳状态的加剧, 额叶 F_3 导联处 α 节律波段的绝对能量逐渐下降, 而且额叶 F_z 导联处 θ/β 节律波相对能量逐渐增加。此现象表明脑力疲劳越严重, 在大脑皮层处所检测到的快节律波活动能量减少, 而慢节律波的活动能量增大。

2) 随着脑力疲劳状态的加剧, 枕叶 O_z 导联处脑电信号的Hjorth复杂度降低, 而额叶 F_z 导联处脑电信号的Renyi熵降低。此现象表明严重脑力疲劳状态时, 大脑皮层释放的电信号复杂性变低、确定性增加, 相比于正常状态释放的电信号更为平稳、多样性减少。

大脑枕叶和额叶的脑电信号, 对检测脑力疲劳最有帮助。经统计, 在枕叶 O_1 、 O_z 、 O_2 和额叶 F_3 、 F_z 、 F_4 导联处37个脑电特征中, 20%以上均与脑力疲劳高度关联。 O_1 、 O_z 、 O_2 、 F_3 、 F_z 和 F_4 这6个导联所构建的回归模型, 能有效识别出无疲劳感、轻微脑力疲劳、中度脑力疲劳、较重脑力疲劳和严重

脑力疲劳。6个独立的回归模型被加权融合后, 能明显改善对脑力疲劳的检测效果。另外, 在使用EEG信号检测脑力疲劳方面, RF算法优于SVM、Logistic回归和ANN。RF检测模型具有高敏感性和特异性, 对严重脑力疲劳状态的敏感性最强, 平均精确率高达85.25%。

3) 本文仅使用了6个敏感导联的脑电特征来构建分类模型, 可缩短脑电膏光射用时, 降低脑电膏消耗量, 不必通过水洗的方式清理头发, 节约实验耗材, 大幅度降低在轨实施难度。整体减少实验准备时间和减少数据计算量, 以提高检测速度, 为脑电设备在空间站环境中检测脑力疲劳提供理论和技术支撑。

本文仅在地面环境中开展了脑力疲劳检测实验, 仍然存在以下不足之处, 更多内容有待于进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 田芸, 于赛克, 周前祥, 等. 眼动指标在脑力疲劳研究中的应用分析[J]. 人工工效学, 2015, 21(4): 69-73.
TIAN Y, YU S K, ZHOU Q X, et al. Analysis of the application of eye movement index in the study of mental fatigue[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2015, 21(4): 69-73 (in Chinese).
- [2] 牛国庆, 李师. 脑力疲劳与非疲劳状态眼动指标的判别[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 88-93.
NIU G Q, LI S. Identification and determination of the mental fatigue status through the eyelid movement frequencies[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1): 88-93 (in Chinese).
- [3] FOONG R, ANG K K, QUEK C, et al. Assessment of the efficacy of EEG-based MI-BCI with visual feedback and EEG correlates of mental fatigue for upper-limb stroke rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2020, 67(3): 786-795.
- [4] KAR G, HEDGE A. Effects of a sit-stand-walk intervention on musculoskeletal discomfort, productivity, and perceived physical and mental fatigue, for computer-based work[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2020, 78(4): 102983.
- [5] MONTEIRO T G, SKOURUP C, ZHANG H X. Using EEG for mental fatigue assessment: A comprehensive look into the current state of the art[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2019, 49(6): 599-610.
- [6] MARTIN K, THOMPSON K G, KEEGAN R, et al. Mental fatigue does not affect maximal anaerobic exercise performance[J]. European Journal of Applied Physiology, 2015, 115(4): 715-725.
- [7] HOLMES G P, KAPLAN J E, GANTZ N M, et al. Chronic fatigue syndrome: A working case definition[J]. Annals of Internal Medicine, 1988, 108(3): 387-389.
- [8] MCCORMICK F, KADZIELSKI J, LANDRIGAN C P, et al. Surgeon fatigue: A prospective analysis of the incidence, risk, and intervals of predicted fatigue-related impairment in residents[J]. Archives of Surgery, 2012, 147(5): 430-435.
- [9] 邱健, 赵显超, 程金湘, 等. 健康青年男性脑力疲劳模型构建以及基于节律类型的分析[J]. 中风与神经疾病杂志, 2019, 36(11): 1008-1012.

- QIU J, ZHAO X C, CHENG J X, et al. Construction of mental fatigue model of healthy young men and analysis based on different chronotype[J]. *Journal of Apoplexy and Nervous Diseases*, 2019, 36(11): 1008-1012(in Chinese).
- [10] WASCHER E, RASCH B, SÄNGER J, et al. Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue[J]. *Biological Psychology*, 2014, 96: 57-65.
- [11] MÖCKEL T, BESTE C, WASCHER E. The effects of time on task in response selection - An ERP study of mental fatigue[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10113.
- [12] BROWNSBERGER J, EDWARDS A, CROWTHER R, et al. Impact of mental fatigue on self-paced exercise[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2013, 34(12): 1029-1036.
- [13] HOPSTAKEN J F, Van Der LINDEN D, BAKKER A B, et al. A multifaceted investigation of the link between mental fatigue and task disengagement[J]. *Psychophysiology*, 2015, 52(3): 305-315.
- [14] TELEŃCZUK B, BAKER S N, KEMPTER R, et al. Correlates of a single cortical action potential in the epidural EEG[J]. *NeuroImage*, 2015, 109: 357-367.
- [15] ROELANDS B, DE PAUW K, MEEUSEN R. Neurophysiological effects of exercise in the heat[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2015, 25(S1): 65-78.
- [16] 王群,程佳,刘志文.一种新的脑电信号睡眠分期方法[J].*航天医学与医学工程*, 2015, 28(1): 22-27.
WANG Q, CHENG J, LIU Z W. A novel sleep staging method of EEG signals[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2015, 28(1): 22-27(in Chinese).
- [17] 罗志增,鲁先举,周莹.基于脑功能网络和样本熵的脑电信号特征提取[J].*电子与信息学报*, 2021, 43(2): 412-418.
LUO Z Z, LU X J, ZHOU Y. EEG feature extraction based on brain function network and sample entropy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(2): 412-418(in Chinese).
- [18] 张丽平,詹长安.心算任务复杂度对脑电theta, alpha和beta波的影响[J].*航天医学与医学工程*, 2019, 32(3): 235-242.
ZHANG L P, ZHAN C A. Impact of mental arithmetic complexity on theta, alpha and beta power of EEG[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2019, 32(3): 235-242(in Chinese).
- [19] TREJO L J, KNUTH K, PRADO R, et al. EEG-based estimation of mental fatigue: Convergent evidence for a three-state model [C]// *Foundations of Augmented Cognition*. Berlin : Springer, 2007: 201-211.
- [20] JAP B T, LAL S, FISCHER P, et al. Using EEG spectral components to assess algorithms for detecting fatigue[J]. *Expert Systems With Applications*, 2009, 36(2): 2352-2359.
- [21] KAR S, BHAGAT M, ROUSTRAY A. EEG signal analysis for the assessment and quantification of driver's fatigue[J]. *Transportation Research Part F:Traffic Psychology and Behaviour*, 2010, 13(5): 297-306.
- [22] LIU J P, ZHANG C, ZHENG C X. EEG-based estimation of mental fatigue by using KPCA-HMM and complexity parameters[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2010, 5(2): 124-130.
- [23] ZHANG C, WANG H, FU R R. Automated detection of driver fatigue based on entropy and complexity measures[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(1): 168-177.
- [24] 张振祥,张璟.关于日本《疲劳症状自评量表》(2002)[J].*人类工效学*, 2003, 9(3): 60-62.
ZHANG Z X, ZHANG J. About Japan's self rating scale of fatigue symptoms 2002[J]. *Chinese Ergonomics*, 2003, 9(3): 60-62(in Chinese).

Fast detection method of mental fatigue based on EEG signal characteristics

ZHANG Peng¹, ZHOU Qianxiang¹, YU Hongqiang², WANG Chuan^{3,*}

(1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Astronaut Research and Training Center, Beijing 100194, China;

3. Naval Medical Center of PLA, Shanghai 200433, China)

Abstract: During the flight in space station, astronauts are prone to mental fatigue, which is the main factor that affects the efficiency of operations and causes errors. For this reason, studying rapid detection methods for human mental fatigue will help ensure the safety of on-orbit operations. The characteristic changes of the electroencephalogram (EEG) can reflect the fatigue state of the brain. Still, the existing EEG method requires multiple lead signals when analyzing mental fatigue, which seriously limits its practical application in the space station environment. This study successfully induced various mental fatigue states in 45 subjects through a foundation experiment using 36 hours of sleep deprivation. Aiming at the non-stationarity of EEG signals, the designed 8-layer db4 wavelet transform structure effectively decomposes δ , θ , α , and β brain rhythm waves. First, screen out the mental fatigue sensitivity characteristics using analysis of variance (ANOVA) and Logistic regression. Secondly, according to the number of sensitive features of mental fatigue, the sharp leads of mental fatigue were further screened out. Finally, the characteristics of 6 keen leaders were used to construct random forest regression models. Finally, the weighted fusion of the regression models at 6 leads to a rapid detection model of mental fatigue, with an average accuracy rate of up to 85.25%.

Keywords: mental fatigue; electroencephalogram; electroencephalogram characteristics; random forest; detection model

Received: 2021-04-23; Accepted: 2021-07-18; Published Online: 2021-07-24 12:23

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210723.1318.002.html

Foundation items: Manned Space Medical Experiment Project (HYZHXM03003); Military Scientific Research Project Fund of Weapons and Equipment of China (20AZ0702)

* Corresponding author. E-mail: hg04381@163.com

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0213

小样本下基于孪生神经网络的柱塞泵故障诊断

高浩寒, 潮群, 徐孜, 陶建峰*, 刘明阳, 刘成良

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 针对目前基于深度神经网络的柱塞泵故障诊断方法在小样本条件下精度低、模型欠拟合问题, 提出一种小样本条件下基于孪生神经网络的柱塞泵故障诊断方法。搭建了柱塞泵故障实验台, 采集柱塞泵在不同健康状态下的壳体振动信号; 使用由卷积层和池化层组成孪生子网络自适应地从原始振动信号中提取低维特征, 使用欧式距离判定输入样本对的特征相似度; 通过相似度对比的方法扩大训练样本数量并训练孪生神经网络模型; 最后, 对测试样本进行健康状态识别。实验结果表明: 与传统深度神经相比, 所提方法在小样本情况下具有更高的准确率。同时, 多通道数据融合实验表明: 所提方法能够从不同通道的信号中学习有关故障信息, 多通道数据融合可以进一步提高诊断准确率。

关键词: 柱塞泵; 卷积神经网络; 孪生神经网络; 小样本; 故障诊断; 数据融合

中图分类号: TH322; TH17

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0155-10

液压传动具有能量密度高、响应速度快、抗负载刚度大等优点, 广泛应用于各种机械设备中^[1]。柱塞泵作为液压系统的关键能量转换元件, 对保证液压系统的稳定性有着至关重要的作用^[2]。由于长期在高温、高压、大负载等恶劣工况下服役, 柱塞泵易出现各种故障, 导致液压系统运行不稳定, 给设备的正常运转造成严重不良影响^[3]。因此, 开发快速准确的柱塞泵故障诊断方法对提高液压系统的稳定性和可靠性具有重要意义。

故障诊断是根据信号在不同状态下的特征变化来判定设备的健康状态^[4]。柱塞泵的故障会造成泵的振动信号和出口压力信号异常, 可以反映故障位置及故障程度, 因此, 可以通过分析柱塞泵的振动信号和出口压力信号对柱塞泵进行故障诊断^[5]。在柱塞泵故障诊断方面, 许多研究者通过从原始信号中选择和提取特征, 结合机器学习的方法对故障模式进行识别, 取得了良好的诊断效果^[6]。Lan 等^[7]

使用局部切空间排列算法、小波包变换等方法, 从原始振动信号中提取故障特征, 利用极限学习机作为故障分类器, 实现了柱塞泵滑靴磨损的故障诊断。Lu 等^[8]对泵出口压力信号进行集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)得到本征模函数(intrinsic mode function, IMF), 并从敏感 IMF 中提取出时域、频域和时频域特征作为故障特征向量, 最后构建支持向量回归模型实现对航空泵不同故障程度的识别。杜振东等^[9]对提取的振动信号特征进行敏感度分析, 找出敏感度较高的特征参数, 然后将所提取特征以向量的形式输入概率神经网络进行训练和测试。王鹏飞等^[10]通过希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)对原始振动信号进行解调, 根据包络谱上供油频率及其倍频处的峰值构造特征向量, 最后采用支持向量机(support vector machine, SVM)对柱塞泵负荷状态进行识别。可见, 这些方法主要集中在特征提取与故障分

收稿日期: 2021-04-25; 录用日期: 2021-06-13; 网络出版时间: 2021-06-30 14:03

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210630.1129.002.html

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2007202)

*通信作者. E-mail: jftao@sjtu.edu.cn

引用格式: 高浩寒, 潮群, 徐孜, 等. 小样本下基于孪生神经网络的柱塞泵故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 155-164.

GAO H H, CHAO Q, XU Z, et al. Piston pump fault diagnosis based on Siamese neural network with small samples[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 155-164 (in Chinese).

类器的构建2个方面,虽然取得了较好的效果,但同时存在明显的不足:需对原始信号手动提取特征,特征的选择依赖丰富的经验知识;不同的特征提取方法在适用性上存在局限性,方法泛化能力较差;割裂了特征提取过程和故障诊断过程,难以得到最优解^[11]。

自2006年Hinton等^[12]提出深度学习理论框架以来,神经网络受到学者们越来越多的重视,并在计算机视觉^[13]、自然语言处理^[14]、图像处理^[15]等领域取得了巨大的成功。神经网络可以利用层数优势,从原始输入信号中逐层进行非线性转化,自动进行特征提取^[16]。卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)是神经网络的典型代表,其利用卷积核从数据中提取从浅层到抽象的特征。同时,卷积神经网络采用权值共享与局部连接的网络结构,有效地减少了模型复杂度与训练参数量。近年来,卷积神经网络在故障诊断中的应用越来越广泛^[17]。魏晓良等^[18]利用长短时记忆网络(long short-term memory, LSTM)和一维卷积神经网络(1D-CNN)搭建分类模型,将不同进口压力情况下的振动信号作为输入,进行柱塞泵空化等级识别。Sun等^[19]使用短时傅里叶变换和小波变换得到液压泵振动信号的时频图,构建二维卷积神经网络进行特征提取与故障分类。Xu等^[20]通过改变离心泵振动信号的排列方式,将一维振动信号转变为二维灰度图像,利用二维卷积神经网络提取灰度图中的特征,实现了离心泵故障部位的诊断。Wang和Xiang^[21]使用最小熵反褶积(minimum entropy deconvolution, MED)对原始信号进行预处理,基于卷积神经网络构建故障诊断模型,实现了对轴向柱塞泵的多故障分类。相对于传统机器学习算法,这些方法能够自动提取特征,具有更高的准确率,但是他们都要求足够多的样本来训练模型。而在实际工程中,复杂的环境往往导致无法获得各种故障状态的足够样本,在小样本条件下,这些模型难以奏效。

孪生神经网络(Siamese network, SN)是一种基于样本相似度的模式识别方法,该方法使用2个权值共享的子网络同时接收2个输入样本,输出结果为2个样本的相似度^[22]。当训练样本的数量为 m 时,每次训练向孪生神经网络输入2个样本,可以对模型进行 C_m^2 次有效训练。因此,在小样本的情况下,孪生神经网络可以扩大模型的训练次数,深度挖掘不同样本之间的关系,避免因样本数量不足导致的网络欠拟合等问题^[23]。现阶段,孪生神经网络主要应用于人脸识别^[24]、语音处理^[25]、签名验证^[26]等领域,但在机械设备故障诊断领域的研究应用较少。

针对当前基于深度神经网络的柱塞泵故障诊断方法在小样本条件下表现欠佳、准确率低的问题,利用孪生神经网络小样本分类的优势,提出了基于孪生神经网络的小样本柱塞泵故障诊断方法。建立孪生子网络从柱塞泵振动信号中提取低维特征,利用距离度量得到特征的相似度作为分类依据。结果表明,在小样本条件下,所提方法相较于现有方法拥有更高的准确率。

1 实验方案与信号采集

为了获取柱塞泵不同健康状态的数据,验证孪生神经网络故障诊断方法的优越性,搭建了柱塞泵故障模拟实验台,如图1所示。

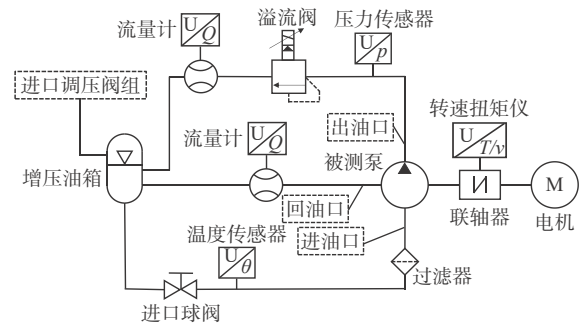


图1 柱塞泵实验台原理

Fig. 1 Schematic diagram of axial piston pump test bench

电机通过联轴器带动被测高速柱塞泵转动,转速扭矩仪用来测量柱塞泵的转速 v 与输入扭矩 T 。进口调压阀组和溢流阀可以调节被测柱塞泵的进口压力和出口压力,从而使被测泵能够在额定工况下运行。温度传感器用来监测油液温度,使油液温度 θ 保持在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,避免温度波动对泵性能的影响。在出油管路安装有压力传感器和流量计,用于采集被测泵的出口压力 P 和流量 Q 。安装在回油管路的流量计用于采集泵的回油流量。被测泵的额定参数如表1所示。

表1 被测泵的额定参数

Table 1 Rated parameters of tested pump

参数	数值
柱塞数	9
排量/($\text{mL}\cdot\text{r}^{-1}$)	1.2
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1 000
出口压力/MPa	21
进口压力/MPa	0.25

为获得壳体振动信号作为故障诊断模型的输入,在泵壳体上安装有三通道振动加速度传感器,采集泵不同健康状态下3个方向的振动信号。振动加速度传感器的安装方式和位置如图2所示,其中, x 方向与 y 方向如图2所示, z 方向为垂直纸面向外。

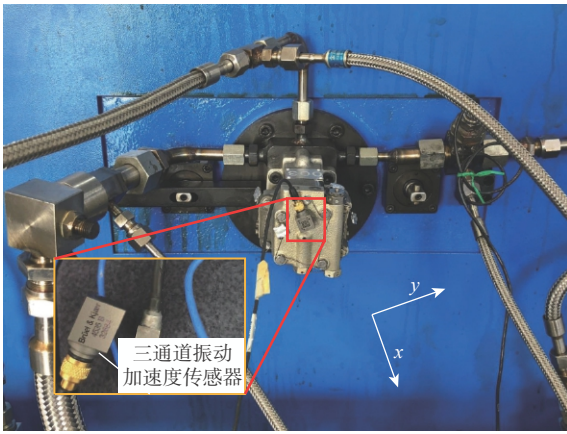


图 2 振动传感器的安装

Fig. 2 Installation of acceleration sensor

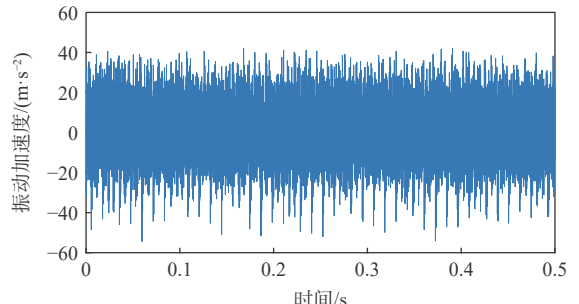
磨损故障是柱塞泵最常见的失效形式, 因此, 对柱塞泵进行磨损故障诊断有着重要的意义。柱塞泵的磨损主要发生在滑靴副与配流副^[27], 为了采集柱塞泵在磨损故障时的数据, 需要对被测泵进行故障注入。测试泵装配时, 分别将滑靴副间隙按 0.05 mm, 0.15 mm, 0.2 mm 增大调整, 模拟滑靴的轻度磨损、中度磨损和严重磨损; 采用剪短 1.0 mm, 3.6 mm, 5.6 mm 的缸体转子弹簧进行装配, 模拟配流副的轻度磨损、中度磨损和严重磨损。在柱塞泵故障实验过程中, 控制被测泵在表 1 所示的额定工况下运行, 通过调整滑靴副装配间隙和转子弹簧长度, 使被测泵出现不同的故障, 共得到 1 个正常状态与 6 种故障状态。被测柱塞泵健康状态、故障注入方式与状态标签如表 2 所示。

表 2 被测泵的健康状态、故障注入方式与状态标签

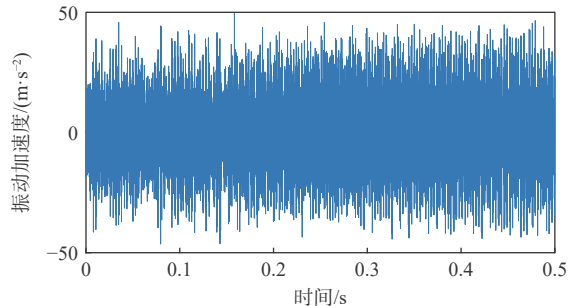
Table 2 Health states, fault injection modes and labels of tested pump

健康状态	注入方式/mm	标签
正常		0
滑靴副轻度磨损	摩擦副间隙0.05	1
滑靴副中度磨损	摩擦副间隙0.15	2
滑靴副严重磨损	摩擦副间隙0.20	3
配流副轻度磨损	转子弹簧剪短1.0	4
配流副中度磨损	转子弹簧剪短3.6	5
配流副严重磨损	转子弹簧剪短5.6	6

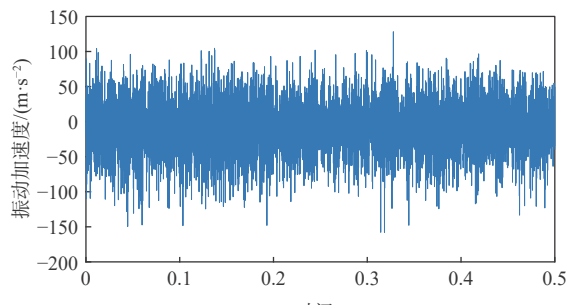
根据本节讨论, 通过柱塞泵故障实验台采集 7 种健康状态下的泵壳体振动信号, 采样频率为 10 240 Hz, 每种健康状态分别采集 X 通道、Y 通道与 Z 通道的 61 440 个点。图 3 为 5 种代表健康状态下的 x 轴振动信号。可以看出, 不同健康状态的振动信号有所差异, 但是难以直接根据原始信号确定柱塞泵的故障种类与故障程度。实际工程应用中要求在小样本条件下, 能够快速准确地识别出故障, 因此, 本文提出了基于孪生神经网络的小样本柱塞泵故障诊断方法。



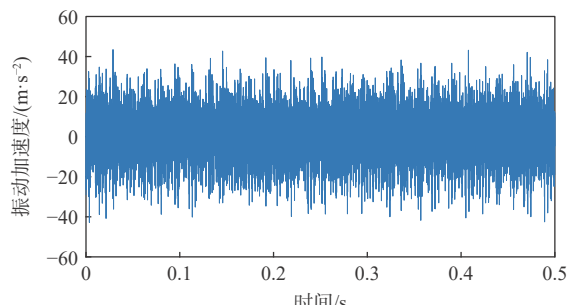
(a) 正常状态



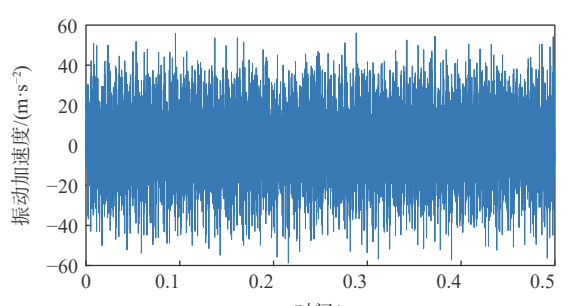
(b) 滑靴副轻度磨损



(c) 滑靴副严重磨损



(d) 配流副轻度磨损



(e) 配流副严重磨损

图 3 不同健康状态的振动信号

Fig. 3 Vibration signals for different health states

2 基于孪生神经网络的故障诊断

2.1 卷积神经网络

卷积神经网络是深度神经网络的代表,典型的卷积神经网络由卷积层、池化层和全连接层等部分组成,其结构如图4所示。通过堆叠多个卷积层和池化层,网络可以从原始输入信号中自动逐层提取特征,并且可以通过增加网络的层数提高特征的抽象性^[28];最后将提取的特征送入全连接层进行分类输出结果。

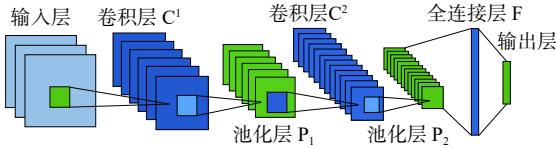


图4 典型卷积神经网络结构

Fig. 4 Typical structure of a convolutional neural network

2.1.1 卷积层

卷积层也被称为特征提取层,是卷积神经网络的核心。一个卷积层包含许多卷积核,卷积核的参数可以通过梯度下降法迭代更新。每个卷积核具有较小的感知区域,但可以通过遍历扫描的方式延伸到输入卷积层的所有数据。多个卷积核与输入数据进行卷积运算,就可以从输入数据中提取到一系列的特征。卷积层运算的数学表达式为

$$\mathbf{x}_i^n = f(\mathbf{W}_i^n * \mathbf{X}^{n-1} + b_i^n) \quad (1)$$

式中:运算符*表示卷积运算; \mathbf{W}_i^n 和 b_i^n 分别为第 n 层的第 i 个卷积核权重矩阵与偏置项; \mathbf{X}^{n-1} 为第 $n-1$ 层输出特征; \mathbf{x}_i^n 为第 n 层第 i 个卷积核卷积后的输出; $f(\cdot)$ 为该层的激活函数。

2.1.2 池化层

通过卷积层获得了输入的特征,但这个特征往往维度较大,训练时计算困难。为了减少网络的训练参数,防止网络出现过拟合,同时突出重要的特征,通常在2个卷积层之间加入池化层,对特征矩阵进行降采样。通常卷积神经网络采用最大池化的方法,即取池化核范围内的最大值,其表达式为

$$\mathbf{y}_i^{n+1}(j) = \max_{k \in D_j} \{\mathbf{x}_i^n(k)\} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}_i^n(k)$ 为第 n 层第 i 个卷积核提取的特征在池化核范围的元素; $\mathbf{y}_i^{n+1}(j)$ 为经过池化后的第 $n+1$ 层第 i 个卷积核提取的特征图中的元素; D_j 为第 j 个池化区域。

2.1.3 全连接层

经过多个卷积层与池化层的交替处理,可以从输入数据中得到维度较低的特征矩阵。将提取的

二维特征矩阵展成一维特征向量,作为全连接层的输入。

2.1.4 激活函数

激活函数的作用是对输出结果进行非线性变换,提高模型的表达能力。常用的激活函数有ReLU、sigmoid、tanh,表达式为

$$\text{ReLU} = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ x & x \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{sigmoid} = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4)$$

$$\text{tanh} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (5)$$

2.2 孪生神经网络

当样本类型较多,每类样本数量又较少时,传统神经网络没有充足的样本训练,容易造成网络的欠拟合,难以训练出好的分类器。这种情况下,可以通过对比样本间相似度的方法扩大训练次数。孪生神经网络就是基于样本相似度的方法,可以从输入样本中学习不同样本的相似性度量,在测试时,根据相似性程度判定未知分类的样本属于哪一类。孪生网络的结构如图5所示。

由图5可知,孪生神经网络需要成对的样本 $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, y)$ 作为输入,其中 $y = 1$ 表示输入样本 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 属于同一种健康状态, $y = 0$ 表示输入样本 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 不属于同一种健康状态。本文所提方法使用原始振动信号作为孪生神经网络的输入,从而实现端

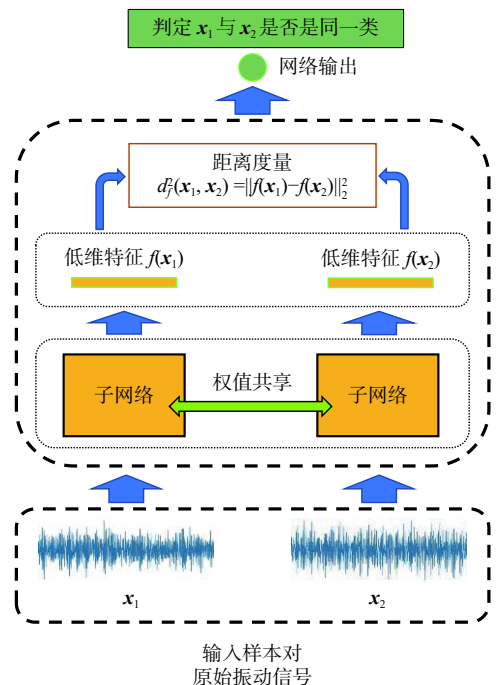


图5 孪生神经网络结构

Fig. 5 Structure of Siamese neural network

到端的故障诊断。通过权值共享的子网络从原始数据中提取低维特征, 在低维空间使用距离进行相似度的对比。常用欧氏距离作为度量式:

$$d_f^2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \|f(\mathbf{x}_1) - f(\mathbf{x}_2)\|_2^2 \quad (6)$$

式中: \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 为输入样本对; $f(\mathbf{x}_1)$ 和 $f(\mathbf{x}_2)$ 为输入样本对经子网络提取的低维特征; $d_f^2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 为低维特征的欧氏距离; 运算符 $\| \cdot \|_2^2$ 为计算欧氏距离。

孪生神经网络的输出是样本对的差异度, 即样本对来自同一健康状态的概率。当输入 \mathbf{x}_1 与 \mathbf{x}_2 来自同一种健康状态时, 输出差异度是一个较小的值, 表示输入样本对的相似程度大, 来自同一健康状态的概率大; 当输入 \mathbf{x}_1 与 \mathbf{x}_2 来自不同健康状态时, 输出差异度是一个较大的值, 表示输入样本对的相似程度小, 来自同一健康状态的概率小。输出的计算式为

$$P(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \text{sigm}(d_f^2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)) \quad (7)$$

式中: sigm 为 sigmoid 函数; $P(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 为样本对的差异度。

使用交叉熵作为孪生神经网络的损失函数, 单次训练的损失函数为

$$\text{Loss}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, y) = -(y \ln(P(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)) + (1 - y) \ln(1 - P(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2))) \quad (8)$$

通过式(8)确定了损失函数之后, 就可以使用梯度下降算法对孪生神经网络的子模型进行训练。孪生网络的训练目标是, 当输入样本 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 属于同一种健康状态, 输出差异度尽可能接近于 0; 当输入样本 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 不属于同一种健康状态, 输出差异度尽可能接近于 1。

2.3 故障诊断模型

在分析卷积神经网络和孪生神经网络的原理之后, 提出基于孪生神经网络的小样本柱塞泵故障诊断模型。模型的输入信号是柱塞泵壳体的振动信号样本对, 输出是样本对是否来自同一种健康状态。网络的结构如图 6 所示, 孪生神经网络的子网络采用 2 个卷积神经网络, 他们权值共享, 同步更新。子网络堆叠了 5 层卷积池化层, 用来从原始振动信号中提取低维特征, 随后求出 2 个低维特征的欧氏距离, 并计算 2 个输入样本是否来自同一健康状态。网络各层的具体参数如表 3 所示。

如图 7 所示为基于孪生神经网络的故障诊断模型的训练与测试步骤, 具体如下:

步骤 1 数据集划分。对采集到的原始振动信号进行切片, 划分出训练集与测试集。

步骤 2 训练模型。从训练集中随机抽取 2 个训练样本组合成样本对作为孪生神经网络的输入, 按照式(8)计算损失函数, 利用梯度下降算法更新

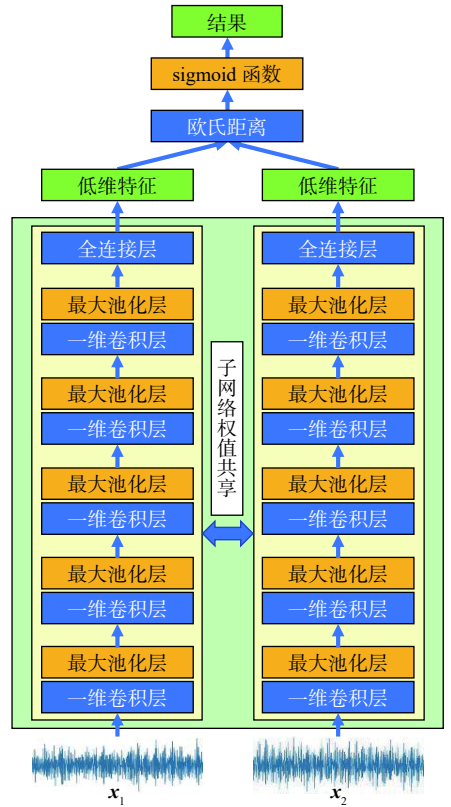


图 6 孪生神经网络故障诊断模型结构

Fig. 6 Structure of fault diagnosis model based on Siamese neural network

表 3 孪生神经网络主要结构参数

Table 3 Main structural parameters of Siamese neural network

网络层	关键参数	激活函数
卷积层1	卷积核为32, 数目为16, 步长为8	ReLU
池化层1	池化核为2	
卷积层2	卷积核为3, 数目为16, 步长为1	ReLU
池化层2	池化核为2	
卷积层3	卷积核为2, 数目为32, 步长为1	ReLU
池化层3	池化核为2	
卷积层4	卷积核为3, 数目为32, 步长为1	ReLU
池化层4	池化核为2	
卷积层5	卷积核为3, 数目为64, 步长为1	ReLU
池化层5	池化核为2	
全连接层	神经元数量为100	sigmoid
输出层	神经元数量为1	sigmoid

模型参数。当模型收敛或达到设定训练次数时, 停止训练并保存模型。

步骤 3 未知样本故障诊断。对于一个健康状态未知的测试样本, 从 7 类健康状态的训练样本中分别随机选 1 个样本, 构成 7 个样本对。将 7 个样本对依次输入孪生神经网络, 得到测试样本与 7 个训练样本属于同一类的概率, 选择概率最大值的健康状态作为测试样本的健康状态, 这种测试方式被称为“one-shot”测试。

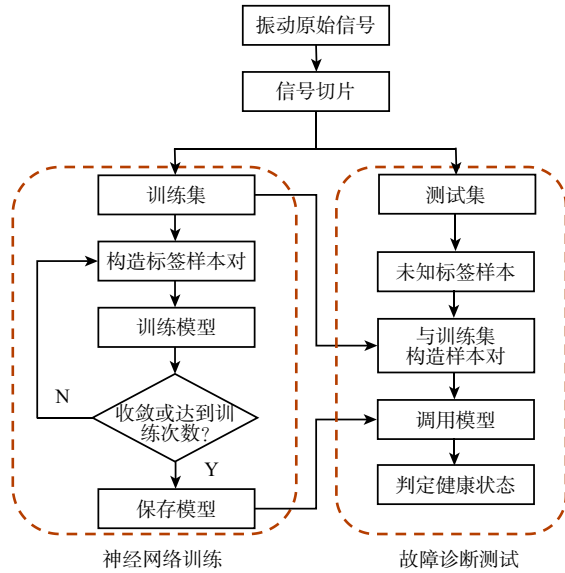


图7 孪生神经网络故障诊断流程

Fig. 7 Process of fault diagnosis based on Siamese neural network

3 实验结果及分析

3.1 训练集与测试集划分

根据第1节的描述,采集7种不同健康状态下的柱塞泵壳体3个通道的振动信号,每个通道振动信号的长度为61 440个点。使用一半的采样点生成训练集,另一半生成测试集。训练样本由1 024个采样点组成,每2个训练样本之间滑动50个采样点;测试样本的长度与训练样本相同,但测试样本取样时没有重叠部分。测试集与训练集划分过程如图8所示。

根据本节上述讨论,每种健康状态得到600个训练样本与30个测试样本,7种健康状态共得到4 200个训练样本与210个测试样本,如表4所示。

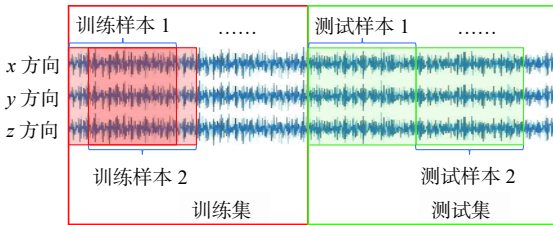


图8 训练集与测试集划分

Fig. 8 Division of training set and testing set

表4 数据集划分

Table 4 Data set division

健康状态	状态标签	训练集数量	测试集数量
正常	0	600	30
滑靴副轻度磨损	1	600	30
滑靴副中度磨损	2	600	30
滑靴副严重磨损	3	600	30
配流副轻度磨损	4	600	30
配流副中度磨损	5	600	30
配流副严重磨损	6	600	30

3.2 训练样本数量对诊断结果的影响

为了验证所提方法在小样本条件下的性能,利用X通道采集到的振动信号,依照3.1节划分数据集,从训练集中依次随机选择35, 70, 140, 210, 280, 350, 490, 700, 1 400, 2 100, 2 800, 3 500, 4 200个训练样本作为孪生神经网络的输入,依照第2节的描述建立故障诊断模型并对模型进行训练。与此同时,建立一维卷积神经网络模型和支持向量机模型作为对比,使用同样数量的训练样本进行训练。其中1D-CNN的参数与孪生神经网络子网络一致;SVM选用径向基(radial basis function, RBF)核函数,惩罚系数C设为10。训练完成后,将全部210个测试样本输入到3个模型进行测试。每组实验均重复5次取平均,最后诊断结果如图9与表5所示。可以看出,SVM、1D-CNN和本文所提方法的识别准确率都随着训练样本数量的增加而提高,当训练样本的数量达到1 400时,3种方法的准确率都能达到95%以上,均能达到较高的分类精度。然而在训练样本数量为35到350的小样本条件下,本文所提方法的识别准确率明显优于1D-CNN和SVM。特别是当训练样本数量为140时,本文所提方法的识别准确率达到90%以上,识别准确率比1D-CNN高27.24%,比SVM高39.72%。在训练样本数量仅有35的极端小样本条件下,本文所提方法仍能有70.86%的准确率,远远高于同条件下的1D-CNN模型和SVM。说明了所提方法在小样本条件下故障诊断的优越性。

3.3 通道数量对诊断结果的影响

柱塞泵发生故障时,对壳体产生的振动冲击在不同方向上是不一致的,不同方向的振动信号都能在一定程度上反映柱塞泵的故障信息,因此只使用X单通道的振动信号,不能充分利用采集的数据。为了验证通道数量对诊断结果的影响,基于多通道数据融合的思想,在3.2节的基础上,分别使用单通道(X通道)、双通道(X与Y通道)和三通道(X、Y和Z通道)的振动数据,按照同样的方式划分数据与训练模型,得到了通道数量对诊断结果的影响,如图10与表6所示。可以看出,通道数量对识别准确率有明显的影响。总体而言,随着通道数量的增加,识别准确率也越高,尤其是当训练样本数量为70到490的小样本情况下,三通道的识别准确率明显高于双通道与单通道。例如,当训练样本数量设置为70时,仅使用X通道的信号,故障识别准确率为78.38%;使用X通道与Y通道的信号,故障识别准确率提升为91.24%;同时使用X、Y和Z这3个通道的信号,故障识别准确率达到95%以上,能够满足极少样本下故障诊断的要求。这说

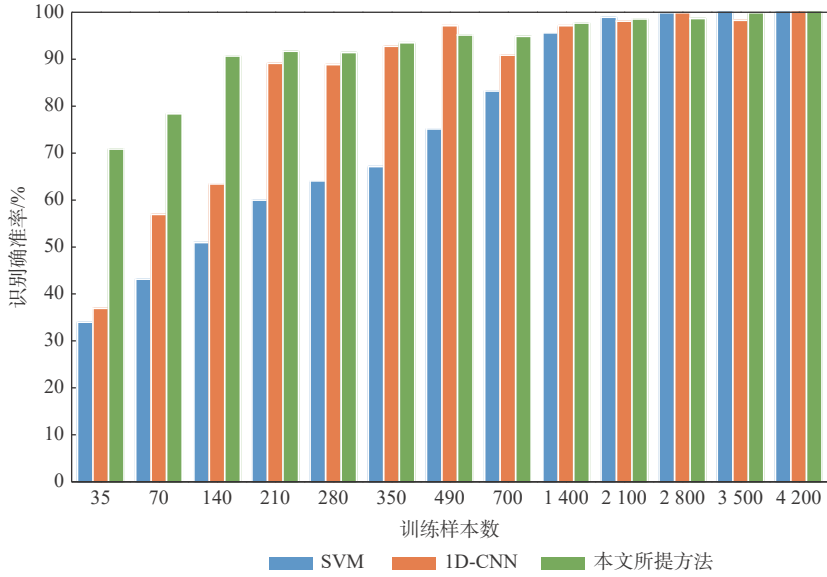


图 9 训练样本数量对诊断结果的影响

Fig. 9 Influence of number of training samples on diagnosis results

表 5 不同训练样本数量下对各模型的诊断结果

Table 5 Diagnosis results of models under different number of training samples

诊断模型	不同训练样本数量下的识别准确率/%												
	35	70	140	210	280	350	490	700	1400	2100	2800	3500	4200
SVM	34.00	43.14	50.59	60.00	64.10	67.14	75.14	83.24	95.62	98.95	99.80	99.90	100
1D-CNN	36.95	56.95	63.43	89.14	88.86	92.76	97.14	90.86	97.14	98.10	99.90	98.29	100
本文所提方法	70.86	78.38	90.67	91.71	91.43	93.52	95.14	94.68	97.71	98.57	98.67	99.90	100

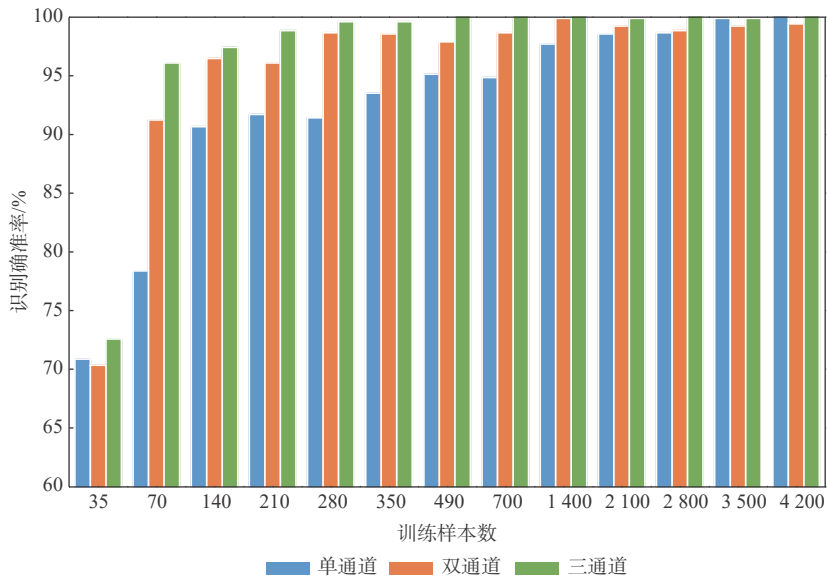


图 10 通道数量对诊断结果的影响

Fig. 10 Influence of channel number on diagnosis results

表 6 不同通道数量下的诊断结果

Table 6 Diagnosis results under different number of channels

诊断模型	不同训练样本数量下的识别准确率/%												
	35	70	140	210	280	350	490	700	1400	2100	2800	3500	4200
单通道	70.86	78.38	90.67	91.71	91.43	93.52	95.14	94.68	97.71	98.57	98.67	99.90	100
双通道	70.34	91.24	96.48	96.10	98.67	98.57	97.90	98.67	99.90	99.24	98.86	99.24	99.43
三通道	72.57	96.10	97.43	98.86	99.62	99.62	100	100	100	99.90	100	99.90	100

明模型能够从不同通道的信号中学习到有关的故障信息,有助于提高模型的诊断精度,验证了多通道数据融合的优势。

3.4 模型可视化

孪生神经网络在小样本故障诊断中的效果得到了初步验证,但学习过程难以表达。为了直观理解本文所提方法对原始信号的特征提取过程,在训练样本数量为 140 的小样本情况下,使用 T 分布随机近邻嵌入 (T-stochastic neighbor embedding, T-SNE) 降维的方法对本文模型提取的特征进行降维与可

视化,如图 11 所示,其中图 11(a)为孪生神经网络的全连接层输出的降维可视化情况,图 11(b)为 1D-CNN 的全连接层输出的降维可视化情况。同时给出此时 2 种方法在测试集上的故障诊断混淆矩阵,如图 12 所示。可以看出,相较 1D-CNN,本文所提方法能将同一健康状态的数据更好地聚集在一起,不同健康状态的数据具有较好的可分性,在测试集上的识别精度也更高,验证了孪生神经网络能从原始时域振动信号中自适应提取有效的特征,从而实现小样本情况下的故障诊断。

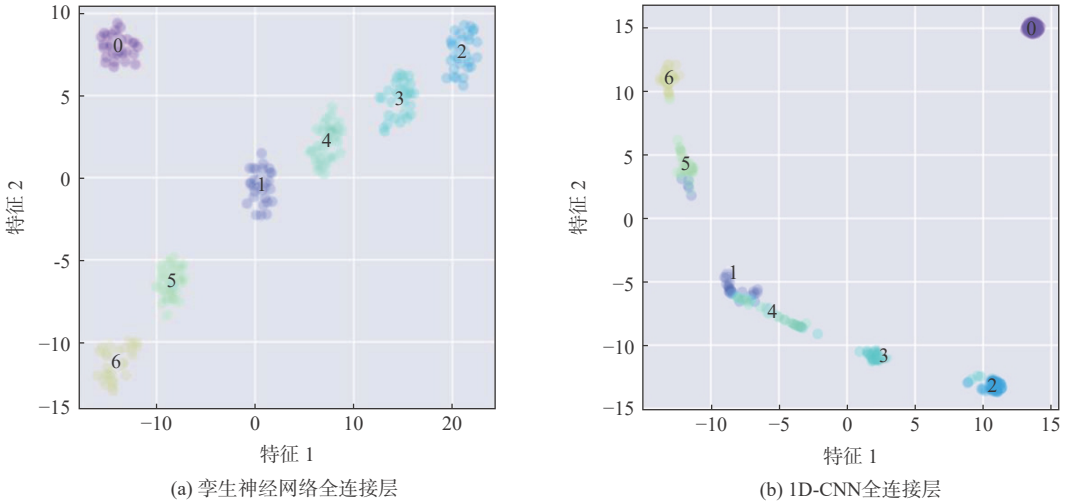


图 11 提取特征的 T-SNE 可视化

Fig. 11 T-SNE visualization of extracted features

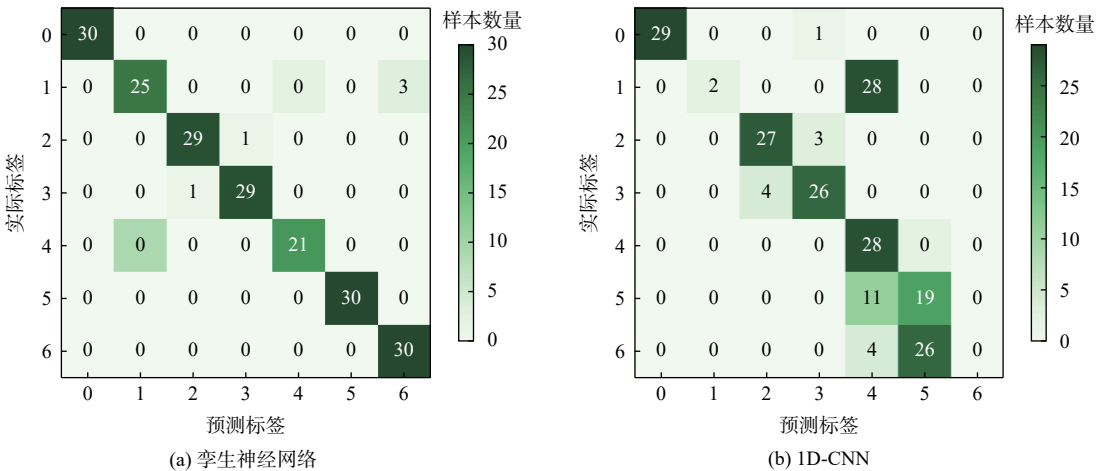


图 12 模型诊断结果混淆矩阵

Fig. 12 Confusion matrix of model diagnosis results

4 结论

针对小样本条件下已有的基于深度神经网络的柱塞泵故障诊断方法准确率低、模型欠拟合问题,提出基于孪生神经网络的柱塞泵小样本故障诊断方法。

1) 过卷积层和池化层直接从原始振动信号中

提取特征,从而避免了人工选取特征的局限性,提高了模型的泛化性能。

2) 出基于孪生神经网络的柱塞泵故障诊断方法。使用欧式距离判定样本对特征的相似度,使用相似度对比的方法扩大训练样本数量。相比于 SVM、1D-CNN,本文所提方法在小样本情况下具有更高的准确率。在训练样本数量为 140 的小样

本条件下,所提方法的识别准确率达到90%以上,比1D-CNN高27.24%,比SVM高39.72%。

3) 用多通道数据融合的方法可以有效提高识别准确率。实验验证,随着输入信号通道数量的增加,识别准确率随之增加。当训练样本数量为70时,使用三通道的振动数据,识别准确率达到95%以上,表明本文所提方法能从不同通道的信号中学习有关的故障信息,验证了多通道数据融合的优势。

参考文献 (References)

- [1] 彭熙伟, 陈建萍. 液压技术的发展动向[J]. *液压与气动*, 2007(3): 1-5.
PENG X W, CHEN J P. The future trends of hydraulics[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2007(3): 1-5(in Chinese).
- [2] TANG S N, ZHU Y, YUAN S Q, et al. Intelligent diagnosis towards hydraulic axial piston pump using a novel integrated CNN model[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7152.
- [3] KUMAR S, BERGADA J M, WATTON J. Axial piston pump grooved slipper analysis by CFD simulation of three-dimensional NVS equation in cylindrical coordinates[J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(3): 648-663.
- [4] 雷亚国, 贾峰, 孔德同, 等. 大数据下机械智能故障诊断的机遇与挑战[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(5): 94-104.
LEI Y G, JIA F, KONG D T, et al. Opportunities and challenges of machinery intelligent fault diagnosis in big data era[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(5): 94-104(in Chinese).
- [5] WANG S H, XIANG J W, ZHONG Y T, et al. A data indicator-based deep belief networks to detect multiple faults in axial piston pumps[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 112: 154-170.
- [6] LIU R N, YANG B Y, ZIO E, et al. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 108: 33-47.
- [7] LAN Y, HU J W, HUANG J H, et al. Fault diagnosis on slipper abrasion of axial piston pump based on Extreme Learning Machine[J]. *Measurement*, 2018, 124: 378-385.
- [8] LU C Q, WANG S P, MAKIS V. Fault severity recognition of aviation piston pump based on feature extraction of EEMD paving and optimized support vector regression model[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 67: 105-117.
- [9] 杜振东, 赵建民, 李海平, 等. 基于SA-EMD-PNN的柱塞泵故障诊断方法研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(8): 145-152.
DU Z D, ZHAO J M, LI H P, et al. A fault diagnosis method of a plunger pump based on SA-EMD-PNN[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(8): 145-152(in Chinese).
- [10] 王鹏飞, 王新晴, 高天宇, 等. 基于包络谱和SVM的柱塞泵负荷状态识别[J]. *机械设计与制造*, 2015(12): 237-239.
WANG P F, WANG X Q, GAO T Y, et al. The recognition of piston pump's load condition based on envelop spectrum and SVM[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2015(12): 237-239(in Chinese).
- [11] 汪海晋, 尹宗宇, 柯臻铮, 等. 基于一维卷积神经网络的螺旋铣刀具磨损监测[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(5): 931-939.
WANG H J, YIN Z Y, KE Z Z, et al. Wear monitoring of helical milling tool based on one-dimensional convolutional neural network[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(5): 931-939(in Chinese).
- [12] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. *Neural Computation*, 2006, 18(7): 1527-1554.
- [13] VOULODIMOS A, DOULAMIS N, DOULAMIS A, et al. Deep learning for computer vision: A brief review[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2018, 2018: 7068349.
- [14] YOUNG T, HAZARIKA D, PORIA S, et al. Recent trends in deep learning based natural language processing[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2018, 13(3): 55-75.
- [15] TIAN C W, FEI L K, ZHENG W X, et al. Deep learning on image denoising: an overview[J]. *Neural Networks*, 2020, 131: 251-275.
- [16] HOANG D T, KANG H J. A survey on deep learning based bearing fault diagnosis[J]. *Neurocomputing*, 2019, 335: 327-335.
- [17] 任浩, 屈剑锋, 柴毅, 等. 深度学习在故障诊断领域中的研究现状与挑战[J]. *控制与决策*, 2017, 32(8): 1345-1358.
REN H, QU J F, CHAI Y, et al. Deep learning for fault diagnosis: The state of the art and challenge[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(8): 1345-1358(in Chinese).
- [18] 魏晓良, 潮群, 陶建峰, 等. 基于LSTM和CNN的高速柱塞泵故障诊断[J]. *航空学报*, 2021, 42(3): 423876.
WEI X L, CHAO Q, TAO J F, et al. Cavitation fault diagnosis method for high-speed plunger pumps based on LSTM and CNN[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(3): 423876(in Chinese).
- [19] SUN S W, ZHANG S, JIANG W L, et al. Study on the health condition monitoring method of hydraulic pump based on convolutional neural network[C]//2020 12th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Piscataway: IEEE Press, 2020: 149-153.
- [20] XU G W, LIU M, JIANG Z F, et al. Online fault diagnosis method based on transfer convolutional neural networks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(2): 509-520.
- [21] WANG S H, XIANG J W. A minimum entropy deconvolution-enhanced convolutional neural networks for fault diagnosis of axial piston pumps[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(4): 2983-2997.
- [22] CHICCO D. Siamese neural networks: An overview[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2021, 2190: 73-94.
- [23] 贾智涵. 基于深度神经网络的机械故障诊断技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019: 32-34.
JIA Z H. A study of mechanical fault diagnosis technology based on deep neural network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019: 32-34(in Chinese).
- [24] 樊琳, 张惊雷. 联合损失优化孪生网络的行人重识别[J]. *计算机工程与科学*, 2020, 42(2): 273-280.
FAN L, ZHANG J L. Person re-identification based on joint loss and Siamese network[J]. *Computer Engineering & Science*, 2020, 42(2): 273-280(in Chinese).
- [25] ZHANG Y C, PARDO B, DUAN Z Y. Siamese style convolutional neural networks for sound search by vocal imitation[J]. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2019, 27(2): 429-441.
- [26] AHRABIAN K, BABAALI B. Usage of autoencoders and Sia-

- mese networks for online handwritten signature verification[J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(12): 9321-9334.
- [27] 汤何胜, 李晶, 阎耀保. 轴向柱塞泵滑靴副功率损失特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 361-369.
- TANG H S, LI J, YIN Y B. Power loss characteristics of slipper/swash plate pair in axial piston pump[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(2): 361-369(in Chinese).
- [28] 金列俊, 詹建明, 陈俊华, 等. 基于一维卷积神经网络的钻杆故障诊断[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(3): 467-474.
- JIN L J, ZHAN J M, CHEN J H, et al. Drill pipe fault diagnosis method based on one-dimensional convolutional neural network[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(3): 467-474(in Chinese).

Piston pump fault diagnosis based on Siamese neural network with small samples

GAO Haohan, CHAO Qun, XU Zi, TAO Jianfeng*, LIU Mingyang, LIU Chengliang

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the problems of low accuracy and under-fitting in current fault diagnosis methods for piston pumps based on deep neural networks with small samples, a new fault diagnosis method for piston pumps based on Siamese neural networks was proposed. A test bench for piston pumps was built to collect the vibration signals of the pump housing under different health states. The convolution layers and pooling layers were used to construct the Siamese sub network and adaptively extract low-dimensional features from the raw vibration signals. The similarity of the input sample pairs was determined by Euclidean distance to expand training samples, train the Siamese neural network model. And finally identify the health states on the testing dataset. Experimental results demonstrate that compared with traditional deep neural networks, the proposed method has higher diagnosis accuracy with small samples. In addition, data fusion experiments show that the proposed method can learn relevant fault information from signals in different channels, which can improve the accuracy of the fault diagnosis.

Keywords: piston pump; convolution neural network; Siamese neural network; small sample; fault diagnosis; data fusion

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0214

基于 BEMD 与 DCT 的彩色图像多重水印鲁棒算法

胡坤^{1,2,3}, 李聪⁴, 胡建平⁵, 王小超^{6,*}, 杜玲⁷, 王红飞^{2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院 太空应用重点实验室, 北京 100094; 3. 中国科学院 空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 4. 北京师范大学 系统科学学院, 北京 100875; 5. 东北电力大学 理学院, 吉林 132012; 6. 天津工业大学 数学科学学院, 天津 300387; 7. 天津工业大学 计算机科学与技术学院, 天津 300387)

摘 要: 为解决现有彩色图像水印算法容错性低及宿主图像与水印图像在嵌入时尺寸匹配问题, 并提高算法抵御各种攻击的鲁棒性, 提出一种基于二维经验模态分解 (BEMD) 和离散余弦变换 (DCT) 的彩色图像多重水印鲁棒算法。使用 Arnold 变换对 3 幅二值水印图像进行置乱, 分别对彩色宿主图像的三通道进行 BEMD, 得到各通道的内蕴模态函数 (IMF) 和余量信息, 选择各通道的第 1 个 IMF (记作 IMF_1) 作为水印嵌入层, 对每个通道的 IMF_1 分割成不重叠子块后进行 DCT; 再将置乱后的二值水印图像依次重复嵌入在各通道子块经过之字形 (Zigzag) 扫描后的中频系数中, 使用逆 Zigzag 扫描和逆 DCT 得到各通道嵌入水印信息后的 IMF_1 , 并与每个通道其余的 IMF 及余量重建得到嵌入水印后的彩色图像。水印提取为嵌入过程的逆过程, 算法可以实现彩色图像嵌入水印的盲提取。在水印提取过程中对重复嵌入提取到的水印图像使用投票策略, 增强了算法的容错性。大量实验结果表明: 嵌入水印后的图像峰值信噪比 (PSNR) 在 34 dB 以上, 水印信息具有较高的不可见性; 对嵌入多重水印后的宿主图像进行大尺寸剪切、椒盐噪声等攻击实验, 提取到的水印图像与原始图像的归一化系数均在 0.96 以上, 且可达到 1, 水印信息提取完整清晰可辨。与现有大量彩色图像水印算法相比, 所提算法具有较强抵御各种攻击的能力, 同时嵌入水印后图像具有较高的不可见性。

关键词: 二维经验模态分解; 多重数字水印; 离散余弦变换; 伪随机序列; 彩色图像

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0165-12

近年来, 随着计算机网络技术的快速发展, 数字媒体产品, 如图像、视频、音频和文本等的访问、分享和传播变得越来越迅速。然而, 对数字媒体的非法篡改、复制、盗用和恶意传播的事件也层出不穷。如何保护数字媒体产品的版权成为人们关注的焦点。数字水印作为一种通用技术, 在算法上具有良好的不可感知性和鲁棒性, 被广泛应用于多媒体版权保护、篡改定位和信息完整性认证等领域^[1-3]。

在彩色图像水印方面, 现有彩色图像水印算法通常将宿主图像变换到相应的频域空间, 将水印信息对应嵌入在图像频域中, 然后通过相应的逆变换

得到嵌入水印后的彩色图像。文献 [4] 提出了基于离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 和奇异值分解的动态彩色图像水印算法, 通过对随机生成序列块的奇异值进行修改, 达到嵌入水印的目的, 该算法仅在 YCbCr 色彩空间的 Y 分量中嵌入了一个水印图像, 导致算法对椒盐噪声和高斯噪声的攻击较为敏感。文献 [5] 对彩色图像进行离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT) 和 DWT, 将水印图像降维后均匀分块嵌入宿主图像的 DWT 子带中, 该算法分块的水印信息被置于人为构造的零矩阵左上角进行嵌入, 没有解决宿主图像和水印图

收稿日期: 2021-04-22; 录用日期: 2021-06-06; 网络出版时间: 2021-06-15 16:58

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210615.1541.008.html

基金项目: 天津市高等学校基本科研业务费 (2018KJ222); 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室开放基金 (BUAA-VR-16KF-23, BUAA-VR-17KF-04)

*通信作者. E-mail: wangxiaochao18@163.com

引用格式: 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).

像尺寸匹配的问题。文献 [6] 提出了基于 DCT 的水印算法, 2 个二值水印图像分别嵌入在彩色图像的 G 和 B 色彩通道, 通过水印位像素的大小交换宿主图像 DCT 后的中频系数实现水印信息的嵌入, 该算法在受到某些图像攻击后, 仍可能会显著修改中频系数, 破坏其原有大小关系, 水印无法被完全提取, 导致算法的容错性较低, 算法的鲁棒性仍有待提升。

文献 [7] 提出一种基于三元编码的彩色水印算法, 该算法将三元编码应用于彩色图像水印算法中。由于 QR 分解对宿主图像有分块尺寸的要求, 导致水印图像必须满足规定尺寸才能嵌入, 限制了水印算法的应用范围。文献 [8] 提出一种基于近似 Schur 分解的彩色图像水印算法, 该算法利用了 Schur 分解得到的最大特征矩阵构造空间域水印算法。但该算法只使用最大特征矩阵左上角的单个位置记录水印信息, 使得算法抵御高强度椒盐噪声攻击和大规模剪切攻击的能力较差。文献 [9] 提出一种基于 Schur 分解和仿射变换的彩色图像盲水印算法, 该算法选择 Schur 分解之后的低复杂度部分, 并在宿主图像的不同色彩通道上的矩阵进行操作, 仿射变换用于对水印图像进行加密以进一步提高算法的安全性, 该算法具有较好的隐蔽性, 与文献 [8] 类似, 该算法的鲁棒性有待提高。文献 [10] 提出了一种改进 Schur 分解的彩色图像盲水印算法, 在文献 [8-9] 的算法基础上, 嵌入位置增加了 Schur 分解之后的单位矩阵, 算法使用结构化相关系数和归一化相关系数的曲线交点确定嵌入系数, 该算法具有较好的不可感知性, 但其对高斯噪声、缩放等攻击的鲁棒性较低。

针对上述彩色图像水印算法中宿主图像与水印图像尺寸匹配问题和受到攻击后提取水印的容错性较低问题, 为提高水印算法在抵御各种攻击的鲁棒性, 本文提出了一种结合二维经验模态分解 (bidimensional empirical mode decomposition, BEMD) 和 DCT 的彩色图像多重水印鲁棒算法。所提算法首先对彩色宿主图像的 3 个通道分别进行 BEMD, 选择含有高频信息的第 1 个内蕴模态函数 (first intrinsic mode functions, IMF₁) 作为水印信息的嵌入层。根据人类视觉系统的纹理掩蔽特性, 将水印嵌入到图像纹理丰富区域不易被察觉, 可以增强水印算法的不可见性。其次, 通过 Arnold 变换置乱 3 个水印图像以增强水印图像的安全性。最后, 对 3 个通道的 IMF₁ 分割成像素为 8×8 的不重叠子块并进行 DCT, 对 DCT 后的子块进行 Zigzag 扫描, 将水印信息分别嵌入在 Zigzag 扫描序列的中频系数中。同时, 在每个通道中重复嵌入相同的水印。水印的提取为上述嵌入过程的逆过程。在水印提取时, 对重复嵌

入的水印通过投票确定最终水印, 可以有效提升算法的容错性和鲁棒性。

1 相关工作

1.1 二维经验模态分解

Huang 等^[11]于 1998 年提出经验模态算法 (empirical mode decomposition, EMD), 该算法被广泛应用于非平稳、非线性信号序列的分析。经验模态算法与传统的时频算法原理相比, 可以自适应地将信号筛分为频率不同的各个分量, 最终得到多个内蕴模态函数 (intrinsic mode functions, IMF) 和一个余量。给定一维信号 f , 经过 EMD 分解得到^[12]:

$$f = \sum_{j=1}^k \text{IMF}_j + r$$

式中: r 为经验模态分解的余量; IMF _{j} 为分解得到的第 j 个内蕴模态函数, 从第 1 个 IMF 到最后 1 个 IMF 代表了图像高频信息到低频信息的渐变过程。

EMD 能够在本质上摆脱传统时频算法对平稳数据处理的依赖性, 因此, EMD 算法从提出以来被广泛应用于不同领域, 如图像融合^[13]、矿物质识别^[14]、数字图像处理^[15-16]等。2003 年, Nunes 等^[17]将一维 EMD 算法推广到二维图像领域, 提出了 BEMD 算法, 该算法通过计算图像的极值点, 并分别对极大值点和极小值点进行包络拟合确定包络均值曲面; 然后, 将输入的图像减去包络均值曲面, 根据筛分约束条件判断其是否满足 IMF 的条件; 最后, 计算余量, 更多算法细节见文献 [17]。

1.2 离散余弦变换

DCT 将空域信号转到频域, 是图像编码的核心技术之一^[18-19]。经过 DCT 后, 图像由一个直流 (DC) 系数和多个交流 (AC) 系数组成, DC 系数是图像像素的平均值, AC 系数虽包含图像的重要信息, 但少于 DC 分量表示的信息。在量化编码后, 对其进行逆变换复原图像的原始信息。对于灰度图像 $f(x, y)$, $0 \leq x, y \leq N-1$, N 为图像的尺寸, DCT 的计算如下^[20]:

$$F(u, v) = \alpha(u)\alpha(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot$$

$$\cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N} \right]$$

式中: u 和 v 分别为频域变量, $u, v = 0, 1, 2, \dots, N-1$;

$$\alpha(u) = \begin{cases} \sqrt{1/N} & u = 0 \\ \sqrt{2/N} & \text{其他} \end{cases}; \alpha(v) = \begin{cases} \sqrt{1/N} & v = 0 \\ \sqrt{2/N} & \text{其他} \end{cases}。$$

本文选择将图像的 RGB 三通道的 IMF₁ 均匀分

割为 8×8 像素的不重叠子块, 对每一个 8×8 像素的子块分别进行 DCT, 以便进行多重水印的嵌入。

2 本文算法

本文结合 BEMD 和 DCT 提出一种鲁棒的彩色图像多重水印算法。在本文所提算法中以像素大小为 $512 \times 512 \times 3$ 的 Lena 彩色图像作为宿主图像, 以像素大小为 32×32 的带有“中国加油”、“CADCG”和“众志成城”字样的 3 张二值图像为水印图像, 展示提出的彩色图像水印嵌入和提取算法。

2.1 水印嵌入算法

为提高嵌入水印图像的安全性, 本文利用 Arnold 变换^[21]将水印图像进行置乱操作并保存其置乱次数 E 作为密钥 \mathbf{Key}_1 。经过 Arnold 变换后图像的像素位置会重新排列, 使得图像杂乱无章, 打乱原始图像相邻像素间的关联性, 从而实现图像的加密效果。Arnold 变换算法简单, 并具有周期性, 当迭代到某一步时又将得到原始图像。设固定周期为 T , 置乱次数为 E , 复原水印图像时继续置换 $T - E$ 次可以得到原始图像^[22]。

为了多重水印嵌入的顺利进行, 需要提前生成一对 M 伪随机序列, 并保证 2 个序列间的相关性很低。 M 伪随机序列是基于码分技术(扩频技术)和多址技术通信系统中采用的最基本的 PN 序列, 他是由带线性反馈的移寄存器产生的周期最长的序列^[23], 在实际工程中, 常用二元 $\{0, 1\}$ 序列生成伪噪声码。对于一个 k 级线性反馈移寄存器可能产生的最长周期为 $2^k - 1$, 周期达到 $2^k - 1$ 的序列称为最长线性移位寄存器序列。通过大量实验, 本文选取序列 $\{2, -1\}$, 可以有效提高算法对某些攻击的鲁棒性。生成序列的同时记录序列的生成密钥为 \mathbf{Key}_2 , 本文实验中的密钥设置为 $\mathbf{Key}_2 = [0 \ 0 \ 1 \ 1]$ 。

对彩色宿主图像, 利用 BEMD 得到不同尺度信息的 IMF 和余量 r , 如图 1 所示。前几个 IMF 包含了原始图像的高频信息, 体现图像的纹理和细节特征, 而后几个 IMF 及余量包含原始图像的低频信息, 体现图像的整体几何特征^[24-25]。Zigzag 扫描是一种矩阵扫描的方法^[26]。Zigzag 扫描从图像矩阵 $(0, 0)$ 位置开始, 前进的方向有 4 个, 分别是右、下、左下、右上。若 Zigzag 扫描向右、下 2 个方向, 只前进一步会改变方向, 改变后的方向因情况而异; 而左下和右上 2 个方向则会一直延伸, 直至前方无法继续直行时再变向为向右或向下方向, 如图 2 所示。

在 Zigzag 扫描后的 DCT 图像矩阵中, 左上角的系数为图像的低频子带, 聚集了图像的大部分信号能量, 一般用于图像压缩; 中间部分的系数为中频子带, 其系数对修改的不可感知度较高; 而右下

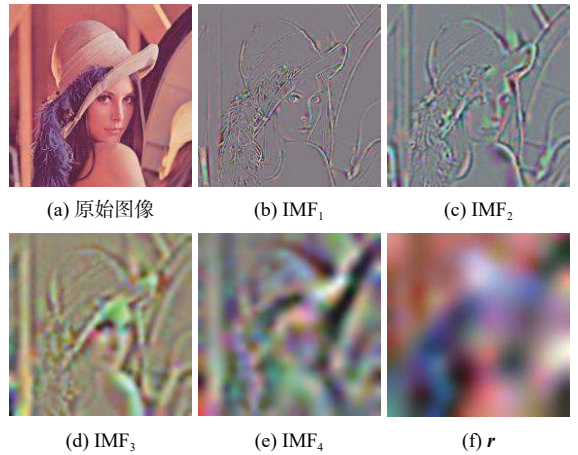


图 1 彩色图像 BEMD

Fig. 1 Example of colored image BEMD

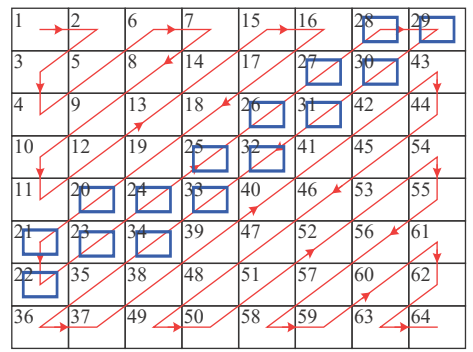


图 2 Zigzag 扫描

Fig. 2 Curve of Zigzag scan

角为高频子带, 修改高频子带系数会影响图像的感知度, 降低图像质量。

因此, 为了平衡嵌入水印后宿主图像的不可感知性和算法的鲁棒性, 本文所提算法考虑将包含图像高频信息的彩色宿主图像 RGB 通道的 IMF_i 作为水印信息的嵌入层, 将 DCT 后使用 Zigzag 扫描得到一维序列的中频子带的 15 个系数作为水印的嵌入位置, 分别嵌入不同的水印, 可以减少水印图像对宿主图像的破坏, 同时兼顾了水印信息的不可感知性。

在确定多重水印嵌入的位置后, 需要将 Arnold 置乱后的水印信息进行嵌入。为此, 本文分别将 3 个通道的 IMF_i 分割成不重叠的 8×8 像素子块, 对每一个子块进行 DCT 后, 使用 Zigzag 扫描提取中频子带, 将水印信号依次嵌入在中频子带的系数中, 如图 2 蓝色矩形所示。在嵌入的过程中, 由于宿主图像像素尺寸为 $512 \times 512 \times 3$, 水印图像像素尺寸为 32×32 , 使得分割后的 8×8 像素子块数量远大于水印信号的尺寸。

因此, 彩色图像每一个通道的 IMF_i 中可以规则的按照几何顺序(从上到下、从左到右)依次嵌入

4次水印图像,使得水印信息均匀分布于整个彩色图像中。因此,重复嵌入在一定程度上可以解决宿主图像与水印图像在嵌入时尺寸匹配上的局限性,增强了提取水印时的容错能力。

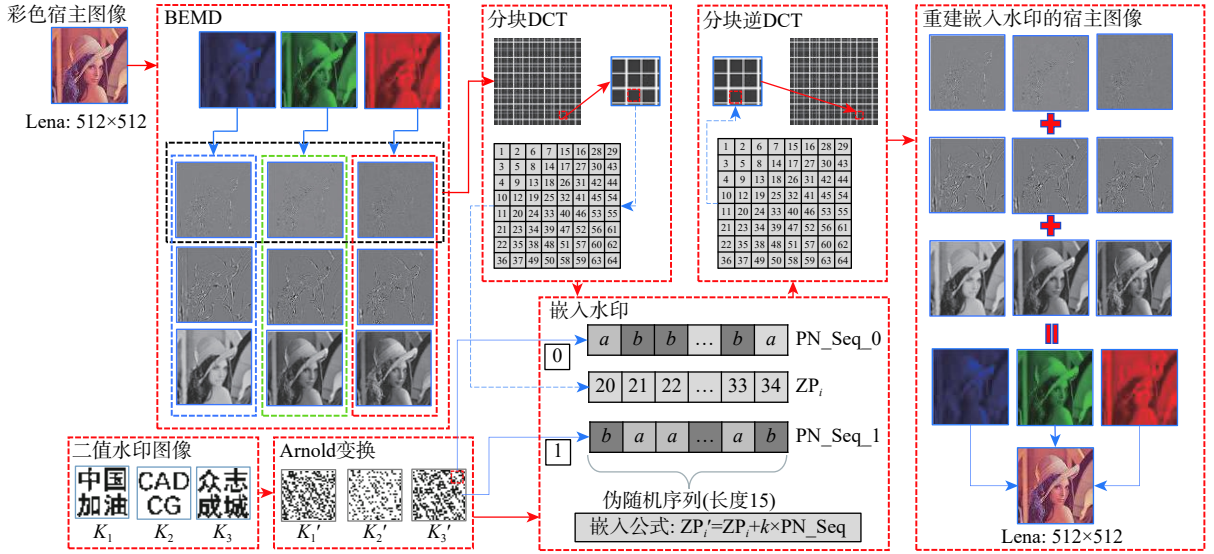


图3 本文算法流程

Fig. 3 Framework of the proposed algorithm

步骤 1 读取宿主图像 I , 分别对宿主图像的 RGB 三通道进行 BEMD, 得到各通道的多尺度分解 IMF $_{ij}$ 和各个通道的余量 r_i , 其中 $i=1,2,3$ 为 RGB 三色通道, $j=1,2,3$ 为 IMF 不同分量, 即:

$$I_i = \sum_{j=1}^3 (\text{IMF}_{ij}) + r_i$$

步骤 2 选择 RGB 这 3 个分量的 IMF $_1$ 作为水印信号的嵌入层, 分别记为 IMF $_{11}$ 、IMF $_{21}$ 、IMF $_{31}$ 。

步骤 3 读取 3 幅二值水印图像 K_i ($i=1,2,3$), 进行 Arnold 置乱后得到图像 K'_i ($i=1,2,3$), 并将置乱次数 n 保存为密钥 Key_1 。

步骤 4 分别将 3 个通道的 IMF $_1$ 分割成像素尺寸为 8×8 的不重叠子块, 对每一个子块使用 DCT。

步骤 5 对 3 个通道的每一个 8×8 像素子块的 64 个像素使用 Zigzag 扫描, 生成 1×64 的 Zigzag 序列。提取其中频子带的 15 个系数, 如图 2 蓝色方框部分所示, 并记为 ZP_{im} , 其中, $m=1,2,\dots,64 \times 64$, 为第 m 个 8×8 子块。

步骤 6 使用序列取值 $\{a,b\}$ 生成一条 15 位伪随机序列 PN_Seq_1 , 并通过取反运算生成另一条 M 序列 PN_Seq_0 , 保证产生的一对序列相关性很低。保存序列的生成密钥为 Key_2 (本文使用的序列 $\{a,b\}$ 为 $\{2,-1\}$, 密钥 Key_2 为 $[0\ 0\ 1\ 1]$)。

步骤 7 分通道依次嵌入水印信息, 每个通道规则地按照从上到下、从左到右的顺序重复嵌入 4 次水印, 水印嵌入规则如下。如果当前水印数值

至此, 将每个通道嵌入水印后的 IMF 连同其他 IMF $_j$ 和余量信息重建后得到嵌入水印的彩色宿主图像, 完成整个水印图像的嵌入。图 3 展示了本文所提算法的流程, 具体步骤如下:

为 1, 使用式 (1) 改变中频子带的 15 个系数:

$$ZP'_{im} = ZP_{im} + k \times \text{PN_Seq}_1 \quad (1)$$

式中: k 为嵌入强度系数。

如果当前水印数值为 0, 使用式 (2) 改变中频子带的 15 个系数:

$$ZP'_{im} = ZP_{im} + k \times \text{PN_Seq}_0 \quad (2)$$

步骤 8 用新中频子带系数替换所有 1×64 的 Zigzag 序列的原始中频系数, 使用逆 Zigzag 扫描将序列复原为 8×8 像素子块, 并进行逆 DCT。

步骤 9 对 DCT 后的 8×8 子块重建为 RGB 三通道的 IMF' $_{11}$ 、IMF' $_{21}$ 、IMF' $_{31}$ 。

步骤 10 分别将 3 个色彩通道的 IMF' $_1$ 与其他 IMF $_{ij}$ 及余量 r_i 结合, 得到嵌入水印后的图像为

$$I' = \sum_{i=1}^3 \text{IMF}'_{i1} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=2}^3 (\text{IMF}_{ij} + r_i)$$

2.2 水印提取算法

水印提取算法为水印嵌入算法的逆过程, 无需依靠原始宿主图像的信息。为提升算法的鲁棒性, 利用重复嵌入的水印, 建立投票机制提取出最终水印, 提取过程中需要用到二值水印置乱过程中的密钥 Key_1 和伪随机序列生成的密钥 Key_2 。水印提取算法过程如下:

步骤 1 读取嵌入水印后的彩色图像 I' 。

步骤 2 对彩色图像 I' 分 RGB 这 3 个通道进行 BEMD, 提取 3 个色彩通道的 IMF $_1$, 分别记为 IMF'' $_{11}$ 、IMF'' $_{21}$ 、IMF'' $_{31}$ 。

步骤 3 分别将 3 个通道的 IMF₁ 分割为像素尺寸为 8×8 的不重叠子块, 对每一个子块进行 DCT。

步骤 4 用 Zigzag 扫描对 DCT 后 8×8 像素子块的 64 个像素扫描, 生成 1×64 的 Zigzag 序列。记录每一个序列中频子带的 15 个系数 (20~34) 为 ZP_{im}^{''}。

步骤 5 使用伪随机序列生成密钥 Key₂ 生成伪随机序列 PN_Seq_1 和 PN_Seq_0。

步骤 6 计算 ZP_{im}^{''} 与伪随机序列 PN_Seq_1 和 PN_Seq_0 的相关系数, 记为 V₁ 和 V₀。

步骤 7 根据相关系数的大小关系, 按从上到下、从左到右的顺序提取每个通道重复嵌入的二值水印, 得到每个通道的 4 个水印信息 K_{it}^{''}, 其中 t = 1, 2, 3, 4 为第 t 个水印信息, 规则如下:

$$\begin{cases} \text{Bit} = 1 & V_1 \geq V_0 \\ \text{Bit} = 0 & V_1 < V_0 \end{cases}$$

式中: Bit 为重复嵌入的当前水印位像素值。

步骤 8 使用密钥 Key₁, 对得到的加密水印图像进行 Arnold 逆变换, 分别得到解密后 3 个通道初步提取的水印图像 K_{it}['] (i = 1, 2, 3; t = 1, 2, 3, 4)。

步骤 9 将初步提取的水印图像 K_{it}['] 的分通道进行加法运算, 得到 3 张待投票的水印 K_i['] (i = 1, 2, 3), 运算规则为

$$K_i' = \sum_{t=1}^4 K_{it}'$$

步骤 10 对待投票水印 K_i['] 建立投票机制, 得到最终 3 张二值水印图像 K_i[~] (i = 1, 2, 3)。该处理方式遵循少数服从多数的原则, 如图 4 所示。其中, p = 1, 2, ..., 32; q = 1, 2, ..., 32。Bit_i['](p, q) 为待投票水印的当前数值, K_i[~](p, q) 为投票确定之后的数值。

由图 4 可以得到, 对于每一个通道水印图像的数值进行判断后, 若当该位置数值 ≥ 2, 则该位置数值取 1; 若当该位置数值 < 2, 则该位置数值取 0。投票机制有效降低了攻击后所有水印均遭受严重破坏的可能性, 提升了算法的容错性。

3 实验结果与分析

本节首先定义评价图像质量的指标并介绍算法参数信息; 然后, 对嵌入水印后的宿主图像进行不同类型、不同参数和不同数据集上的攻击实验, 验证本文所提算法抗攻击的鲁棒性; 最后, 将通过对比实验说明本文所提算法的有效性和优势。

3.1 评价指标

本文采用峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 衡量嵌入水印的不可感知性, 定义嵌入水印的彩色图像一个色彩通道 I'(x, y) 与原始图像对应通道 I(x, y) 间的差异程度, 其式为

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{255^2}{\frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (I(x, y) - I'(x, y))^2} \right)$$

式中: (x, y) 为彩色宿主图像单通道中的位置; I(x, y) 为宿主图像在 (x, y) 位置的数值; I'(x, y) 为嵌入水印后图像在 (x, y) 位置的数值。由于宿主图像为彩色图像, 对三通道计算的 PSNR 值取平均得到最终值。若 PSNR 值在 30 dB 以上, 则认为嵌入水印后的图像具有较好的不可感知性^[27]。

本文采用归一化相关系数 (normalized correlation coefficient, NC) 来衡量提取到的水印图像 K[~] 和原始水印图像 K 的相似程度。NC 值越大, 图像的相似性越高。NC 值的计算式为

$$NC = \frac{\sum_{x=1}^p \sum_{y=1}^q K(x, y) \tilde{K}(x, y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^p \sum_{y=1}^q K(x, y)^2} \sqrt{\sum_{x=1}^p \sum_{y=1}^q \tilde{K}(x, y)^2}}$$

式中: K(x, y) 为二值水印图像的第 x 行第 y 列的像素值; K[~](x, y) 为实际提取到的二值水印图像第 x 行第 y 列的像素值。

3.2 实验参数

本文算法中主要参数包括 Arnold 置乱次数 (密钥 Key₁) 伪随机序列的生成密钥 Key₂、水印嵌入强度 k、3 个色彩通道分别重复嵌入的水印次数 c。在本文实验中 Arnold 置乱次数为 5; 每个通道对应的二值水印按顺序重复嵌入的次数为 4, 共嵌入 12 次水印信息。

对于水印嵌入强度 k, 随着水印算法嵌入强度的增大, 提取出的水印越接近原始水印, NC 值越高, 可以显著的提升算法对某些攻击的鲁棒性。但高强度的水印嵌入会使宿主图像遭到较大的破坏,

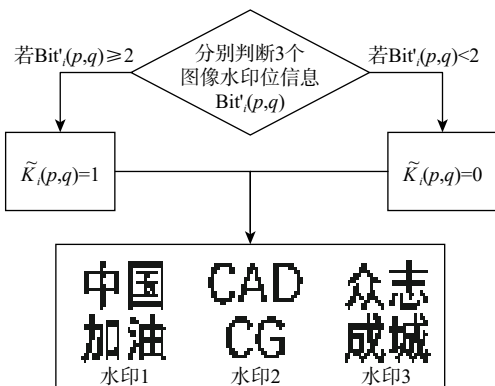


图 4 水印提取投票机制

Fig. 4 Mechanism of watermark image extraction voting mechanism

降低了水印图像的不可感知性。本文在大量实验的基础上,综合考虑水印的不可感知性和抗各类攻击的鲁棒性,选取 $k=6$ 的嵌入强度。

3.3 实验结果

本文的宿主图像包含像素大小为 $512 \times 512 \times 3$ 的Lena、Baboon、Airplane、Car、Peppers和Sailboat彩色图像,如图5(a)所示。水印图像(见图5(b))包含像素大小为 32×32 带有“中国加油”、“CADCG”和“众志成城”字样的二值图像,如图5(c)所示。

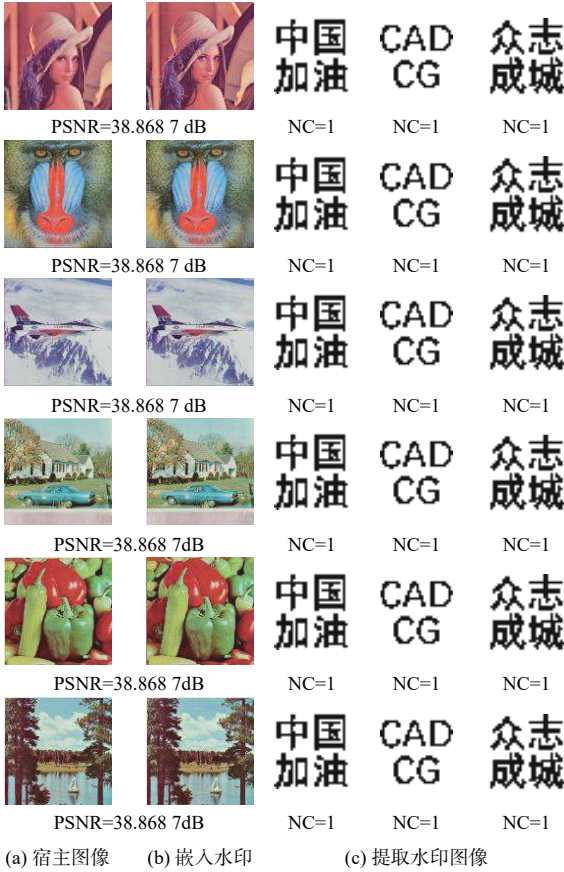


图5 不可感知性实验结果

Fig. 5 Experimental results of invisibility

3.3.1 不可感知性实验

图5展示了不同彩色宿主图像在本文所提算法框架下嵌入并提取水印后的实验结果。由实验结果可以看到,在未受到任何攻击的情况下,原始宿主图像和嵌入水印后的宿主图像的峰值信噪比PSNR值均在38.8 dB以上,具有很好的不可感知性。值得注意的是,6张不同宿主图像的PSNR相同,原因是在没有任何攻击的情况下,相同的水印图像,相同尺寸的宿主图像,相同的嵌入强度,对宿主图像的改变是一样的。由嵌入式(1)和式(2)可知,算法是根据水印数值是0还是1来选择在DCT中频系数增加对应PN序列乘以强度 k 之后的数据。原始宿主图像与嵌入水印之后的宿主图像

之间的差值为PN序列本身,而且只有中频系数的部分会产生差值,其他系数都是0。同时,提取到的水印图像与原始水印图像的NC值均为1,可以完整提取水印信息,提取出的水印图像字样清晰可见。

3.3.2 鲁棒性实验

为了验证本文所提算法的鲁棒性,本节将对嵌入水印后的图像在提取水印前进行攻击,包括大比例剪切、椒盐噪声、高斯噪声、滤波器、图像锐化、JPEG压缩、散斑噪声、图像缩放等攻击。

图6为宿主图像受到剪切攻击下的水印提取结果。对Lena图像左上角和4个边角分别进行了25%的剪切,由结果可以看到3个水印图像均可以被完整提取,NC值均为1。实验结果表明本文所提算法对大比例、复杂形状的剪切攻击具有较强的抗攻击能力。

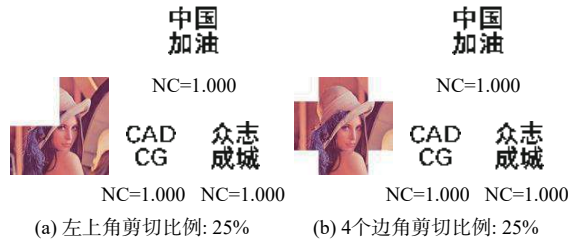


图6 大比例剪切攻击实验结果

Fig. 6 Experimental results of large scale cropping attack

图7为嵌入水印后Sailboat彩色图像在受到1%和5%比例的椒盐噪声攻击下水印的提取结果。由图7可以看到,在1%比例的攻击下,提取出的3个水印NC值均为1。在5%比例的椒盐噪声攻击下,提取出的水印NC值均高达0.998以上。因此,本文所提算法对椒盐噪声具有良好的鲁棒性。

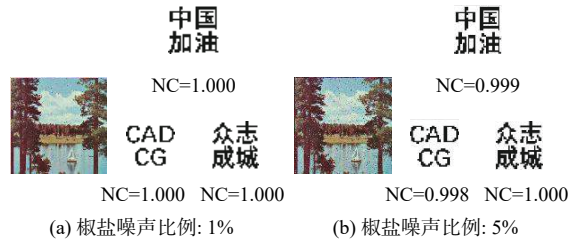


图7 椒盐噪声攻击实验结果

Fig. 7 Experimental results of salt and pepper noise attack

图8为嵌入水印后Car图像在受到均值为0,方差 σ^2 分别为0.005和0.01的高斯噪声攻击的提取结果。可以看出宿主图像受到不同强度的高斯噪声攻击后,均可以完全提取出清晰可辨的水印图像“中国加油”、“CADCG”和“众志成城”,2种攻击强度下提取出水印的NC值均为1。本文所提算法不会随着高斯噪声攻击强度的增大而显著影响水印信息的提取,提取的水印基本不受噪声的干扰。

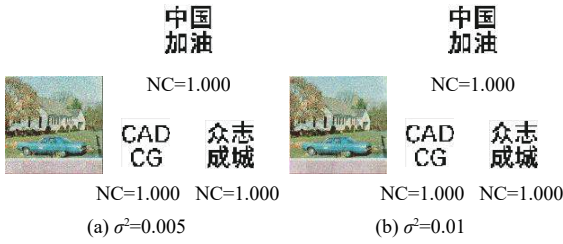


图 8 高斯噪声攻击实验结果

Fig. 8 Experimental results of Gaussian noise attack

图 9 为彩色图像 Baboon 经过灰度级数为 64 和 128 的直方图均衡化处理后的水印提取结果。由实验结果可以看出 Baboon 的对比度和图像亮度明显增加,但在直方图均衡化后提取出的水印 NC 值均高达 0.999。本文所提算法未出现随着灰度级数的增加,水印提取的准确度显著下降的情况。因此,本文所提算法对直方图均衡化具有较强的抗攻击能力,提取的水印图像清晰可见,具有较强的鲁棒性。

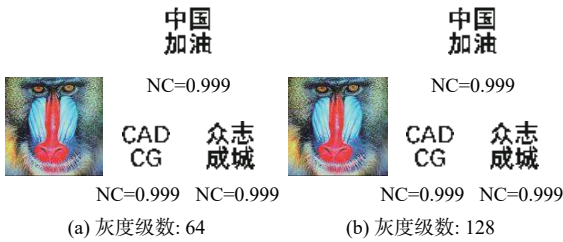


图 9 直方图均衡化攻击实验结果

Fig. 9 Experimental results of histogram equalization attack

图 10 为图像 Baboon 在受到尺寸为 [2,2] 的高斯低通滤波、中值滤波、维纳滤波、均值滤波攻击后的水印提取结果。在经过尺寸为 [2,2] 的维纳滤波后,提取水印的 NC 值分别高达 0.997、0.996 和 0.995,水印信息清晰可见,提取出的水印没有明显的噪点。经过高斯低通滤波、中值滤波、平滑滤波攻击后,部分水印图像出现噪点,提取水印 NC 值均达到 0.968 以上,仍有效地提取水印信息,字体轮廓清晰,受噪声影响的程度较小。

图 11 为彩色图像辣椒在受到图像锐化攻击后的水印信息提取结果。实验结果表明,在 2 种半径的锐化攻击后,均能完整的提取出清晰可见的 3 个水印图像,没有出现噪点,NC 值均为 1,说明本文算法对锐化攻击不敏感,鲁棒性较好。

图 12 为图像辣椒在受到图像质量因子 $Q = 40$ 和 $Q = 60$ 的 JPEG 压缩后提取水印的结果。结果表明在 $Q = 40$ 的 JPEG 压缩后,提取水印的 NC 值分别为 0.994、0.996 和 0.991,水印轮廓完整清晰可辨,不存在明显噪点。经过 $Q = 60$ 的 JPEG 压缩后,水印信息能被完全提取,NC 值均为 1。因此,本文所提算法对 JPEG 压缩攻击较为鲁棒。

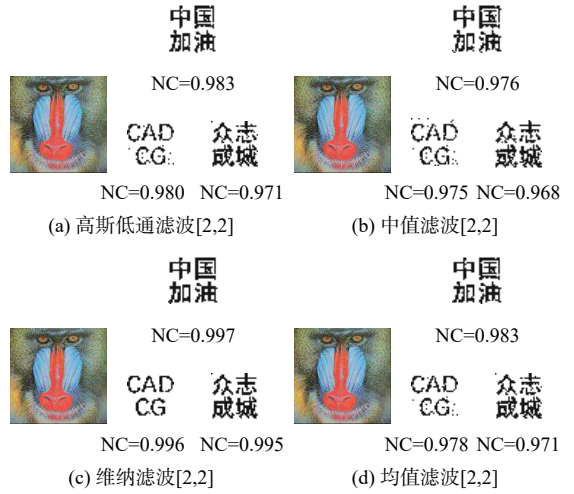


图 10 滤波器攻击实验结果

Fig. 10 Experimental results of filter attack

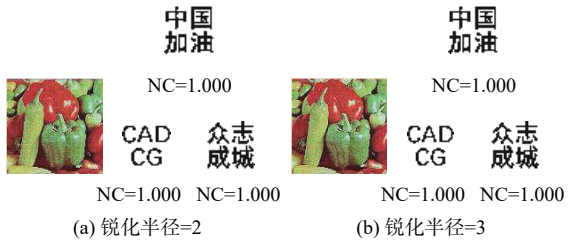


图 11 图像锐化攻击实验结果

Fig. 11 Experimental results of sharpening attack

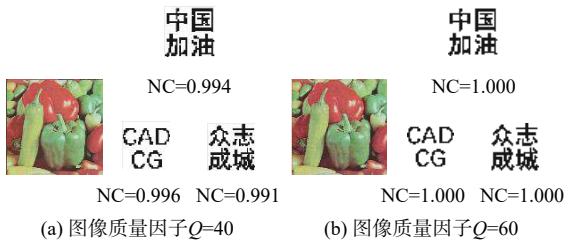


图 12 JPEG 压缩攻击实验结果

Fig. 12 Experimental results of JPEG compression attack

图 13 为图像 Airplane 在受到均值为 0, 方差分别为 0.001 和 0.005 的散斑噪声攻击后的水印提取结果。由实验结果得到,在不同方差的散斑噪声攻击下,均可以从宿主图像中提取出完整清晰的水印图像,水印字样没有缺陷,2 种强度下提取水印的 NC 值均为 1。实验结果说明本文所提算法对散斑噪声的攻击不敏感,算法鲁棒性较好。

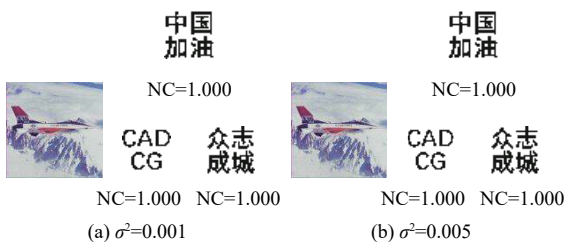


图 13 散斑噪声攻击实验结果

Fig. 13 Experimental results of speckle noise attack

图 14 为彩色图像 Airplane 在受到缩放倍数为 4 和 8 的缩放攻击后的提取结果。实验结果表明,在受到 2 种倍数的攻击后,本文所提算法均能从宿主图像中提取出完整的 3 个水印信息,水印字样清晰可辨,与原始水印图像的 NC 值均为 1。因此,本文所提算法对图像缩放攻击也具有较强的鲁棒性。

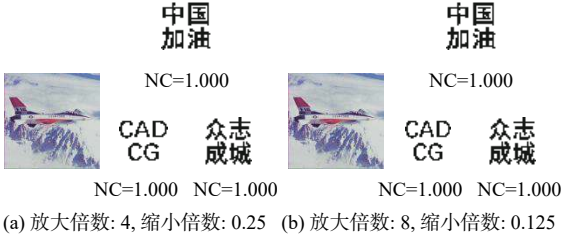


图 14 图像缩放攻击实验结果

Fig. 14 Experimental results of image scaling attack

图 15 为选取 USC-SIPI 图像数据库 Aerials 中的 2 幅彩色遥感图像在分别受到剪切比例为 25% 的剪切攻击和方差为 0.005 的高斯噪声攻击后的水印提取结果。实验结果表明,遥感图像在经过 2 种类型的攻击后,均能提取出完整的水印信息,NC 值均为 1。因此,本文所提算法对遥感图像也具有较 强的鲁棒性。

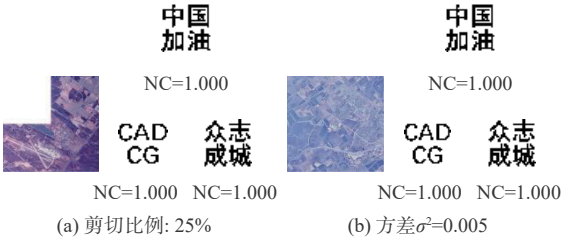


图 15 Aerials 数据库中遥感图像攻击实验结果

Fig. 15 Experimental results of remote sensing image attack in aerials database

3.3.3 与彩色图像水印算法实验对比

本文选择文献 [6-10, 28] 作为彩色图像水印的

对比算法,以此来进一步说明本文所提算法的鲁棒性,表 1 和表 2 中水印 1 为“中国加油”,水印 2 为“CADCG”,水印 3 为“众志成城”的二值图像。表 1 分别给出了文献 [6] 在彩色 Lena 图像的 G 和 B 通道内分别嵌入水印、文献 [28] 在 RGB 三通道中嵌入水印及本文所提算法将水印图像分别嵌入在 Lena、Baboon、Airplane 的 RGB 三通道进行 DCT 后经过 Zigzag 扫描的中频序列中,经过各种攻击提取出的水印 NC 值。

嵌入水印后的宿主图像分别受到 25% 比例的剪切攻击,尺寸为 [2, 2] 的高斯低通滤波攻击,尺寸为 [3, 3] 的中值滤波攻击,半径为 2 像素的图像锐化攻击,比率为 3% 的椒盐噪声攻击,均值为 0、方差为 0.005 的高斯噪声攻击,图像质量因子 $Q = 60$ 的 JPEG 压缩攻击,缩放倍数为 4 的图像缩放攻击。

由表 1 所示,文献 [6] 在 3% 的椒盐噪声攻击和均值为 0、方差为 0.005 的高斯噪声攻击后,提取水印图像 NC 值分别为 0.897、0.951 和 0.912、0.926, NC 值较低。本文所提算法在宿主图像同为 Lena 的情况下均可实现 3 个水印图像的完全提取,NC 值均为 1。在其他几种攻击下,本文所提算法相比于文献 [6] 也展现出了更好的鲁棒性。文献 [28] 在尺寸为 [3, 3] 的中值滤波攻击后,无法提取出有效水印信息,NC 值仅有 0.410;在比例为 25% 的剪切攻击,尺寸为 [2, 2] 的高斯低通滤波攻击后,提取水印的 NC 值较低,没有达到 0.9。而本文所提算法在上述所有攻击后均表现了更好的鲁棒性。

表 2 给出了本文所提算法与文献 [7-10] 在不同宿主图像 (Lena 和 Airplane) 下,进行不同类型攻击下的实验对比结果。由表 2 可知,本文所提算法在抵御 90% 的 JPEG 压缩、2% 的椒盐噪声、10% 的高斯噪声、60% 的高斯噪声、缩放 0.25~4、剪切比例

表 1 本文算法与彩色图像水印算法^[6, 28]在不同攻击下的 NC 值对比

Table 1 Comparison with color image watermarking algorithm^[6, 28] under different attacks NC values

攻击类型	攻击强度	Lena图像NC值 (文献[6])		Lena图像NC值 (文献[28])		Lena图像NC值 (所提算法)			Baboon图像NC值 (所提算法)			Airplane图像NC值 (所提算法)		
		水印1	水印2	水印1	水印1	水印2	水印3	水印1	水印2	水印3	水印1	水印2	水印3	
剪切攻击	25%	0.992	1.000	0.873	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
高斯低通滤波	[2,2]	0.938	0.972	0.855	1.000	1.000	0.999	0.983	0.980	0.971	1.000	1.000	1.000	
中值滤波	[3,3]	0.995	0.997	0.410	0.948	0.962	0.907	0.860	0.907	0.856	0.936	0.956	0.921	
图像锐化	$R=2$	0.998	1.000	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
椒盐噪声	3%	0.897	0.951	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	0.999	1.000	1.000	1.000	
高斯噪声	0.005	0.912	0.926	0.765	1.000	1.000	1.000	0.996	0.998	0.995	0.998	1.000	1.000	
JPEG压缩	$Q=60$	1.000	1.000	0.906	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	
图像缩放	0.25~4	0.990	0.995	0.938	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	

表 2 本文算法与彩色图像水印算法^[7-10]在不同宿主图像下进行不同攻击的 NC 值对比

Table 2 Comparison with color image watermarking algorithms^[7-10] for different attacks NC values under different host images

		Lena图像NC值						
攻击类型	攻击强度	文献[7]	文献[8]	文献[9]	文献[10]	本文所提算法		
						水印1	水印2	水印3
JPEG压缩	30	0.758 3	0.93~0.94	0.91~0.92	0.905 1	0.847 1	0.939 6	0.875 9
JPEG压缩	90	0.958 6	1.000 0	1.000 0	0.995 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0
椒盐噪声	0.02	0.998	0.96~0.97	0.99~1	0.991 1	1.000 0	1.000 0	1.000 0
椒盐噪声	0.1	0.991 7	0.94~0.95	0.97~0.98	0.960 7	0.993 8	0.998 1	0.997 6
高斯噪声	0.1	0.874 3	1.000 0	0.73~0.75	0.940 6	1.000 0	1.000 0	1.000 0
高斯噪声	0.6	0.790 5	0.95~0.96	0.55~0.56	0.828 3	1.000 0	1.000 0	1.000 0
缩放	4~0.25	0.999 8	0.79~0.80	0.67~0.68	0.870 2	1.000 0	1.000 0	1.000 0
剪切	25%	0.889 5	0.73~0.75	0.8~0.81	0.772 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0
剪切	50%	0.833 5	0.600 0	0.52~0.53	0.514 1	1.000 0	1.000 0	1.000 0

		Airplane图像NC值						
攻击类型	攻击强度	文献[7]	文献[8]	文献[9]	文献[10]	本文所提算法		
						水印1	水印2	水印3
JPEG压缩	30	0.778 8	0.94~0.95	0.90~0.91	0.920 4	0.853 4	0.931 4	0.842 8
JPEG压缩	90	0.967 5	1.000	1.000	0.998 6	1.000 0	1.000 0	1.000 0
椒盐噪声	0.02	0.999	0.94~0.95	0.99~1	0.995 8	1.000 0	1.000 0	1.000 0
椒盐噪声	0.1	0.987 5	0.92~0.93	0.98~0.99	0.978 7	0.997 6	0.998 1	0.995 3
高斯噪声	0.1	0.888 2	1.000 0	0.78~0.79	0.957 7	1.000 0	1.000 0	1.000 0
高斯噪声	0.6	0.592 8	0.92~0.93	0.57~0.58	0.855 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
缩放	4~0.25	0.926 5	0.78~0.79	0.69~0.70	0.877 3	1.000 0	1.000 0	1.000 0
剪切	25%	0.889 5	0.74~0.76	0.8~0.81	0.772 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0
剪切	50%	0.833 5	0.600 0	0.52~0.53	0.514 1	1.000 0	1.000 0	1.000 0

为 25% 和 50% 的攻击上相较于文献 [7-10] 均具有绝对优势,提取水印图像的 NC 数值均为 1。在高强度 10% 的椒盐噪声攻击下,本文所提算法依然能保持很高的 NC 数值,最低为 0.993 8,比文献 [7] 取得的 0.991 7 的数值还高。

本文所提算法使用了重复嵌入的策略,既解决了宿主图像和水印图像尺寸匹配的问题,又提高算法抵抗大规模剪切的能力,即使在剪切 50% 的情况下,本文所提算法依然能够完整提取水印图像,在对比的 4 篇文献中,文献 [7] 的实验效果较好,但 NC 值也只有 0.833 5。这说明本文所提算法在大规模剪切攻击上较文献 [7-10] 具有明显优势。

3.3.4 USC-SIPI 数据集鲁棒性实验

为了说明本文所提算法在更复杂图像和更大数据集上的鲁棒性,选取了 USC-SIPI 图像数据库 Aerials 中的 37 张彩色图像进行实验。攻击类型选择具有代表性的 3 种:剪切 25%、椒盐噪声 3% 和高斯噪声 $\sigma^2 = 0.005$ 。如图 16 所示,37 张彩色图像在受到剪切攻击左上角 25% 的情况下,依然能够很好地提取出水印图像,NC 数值均在 0.98 以上。37 张图像中有 35 张图像的提取水印 NC 数值为 1,说明本文所提算法在抵抗剪切攻击上具有非常好

的鲁棒性。

由图 17 和图 18 可知,对于强度为 5% 的高斯噪声攻击和强度为 3% 的椒盐噪声攻击,本文所提算法展现出非常好的鲁棒性。37 张彩色图像在高斯噪声攻击下提取出三重水印的 NC 值均在 0.98 以上,在椒盐攻击下提取水印的 NC 数值均在 0.994 以上,并且大部分 NC 值为 1。通过在大规模数据集上的实验说明本文提出的基于 BEMD 和 DCT 盲水印算法能够完整提取水印图像,具有较高的鲁棒性。

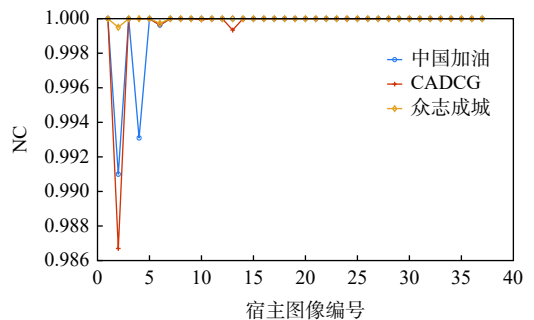


图 16 左上角 25% 剪切攻击实验结果

Fig. 16 Experimental results of 25% shear attack in the upper left corner

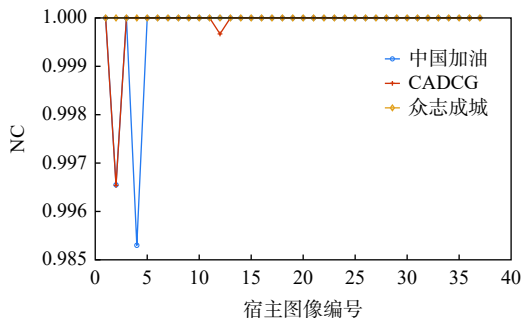


图 17 高斯噪声攻击实验结果

Fig. 17 Experimental results of Gaussian noise attack

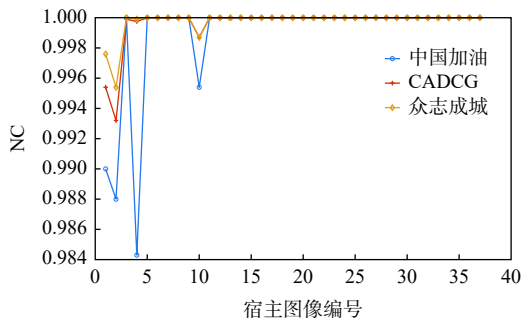


图 18 3% 的椒盐噪声攻击实验结果

Fig. 18 Results of 3% salt and pepper noise attack

4 结论

1) 文所提算法使用重复嵌入策略提高了水印算法的容错性,即使在提取单个水印错误的情况下,采用投票策略依然能够提取与原始图像相近的水印图像,增加了算法抵御各种攻击的鲁棒性。

2) 文所提算法使用的水印图像在不超过最大嵌入容量的前提下可以任意尺寸,与现有水印算法要求宿主图像与水印图像之间必须满足某种匹配的要求相比,大大提升了算法的适用性,较好的解决了宿主图像与水印图像之间尺寸匹配问题。

3) 文所提算法可以有效抵抗大尺度剪切、高斯噪声、椒盐噪声、缩放攻击、图像锐化、JPEG 压缩等攻击。与大量现有彩色图像水印算法相比,本文所提算法具备良好的不可感知性,能够较好地抵御大部分常见攻击,具有较高的算法鲁棒性。

参考文献 (References)

[1] ATTAULLAH, SHAH T, JAMAL S S. An improved chaotic cryptosystem for image encryption and digital watermarking[J]. *Wireless Personal Communications*, 2020, 110(3): 1429-1442.

[2] THANKI R, DWIVEDI V, BORISAGAR K. A hybrid watermarking scheme with CS theory for security of multimedia data[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2019, 31(4): 436-451.

[3] KARAJEH H, KHATIB T, RAJAB L, et al. A robust digital audio watermarking scheme based on DWT and Schur decomposition[J].

Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(13): 18395-18418.

[4] LAKRISSI Y, SAAIDI A, ESSAHLAOU A. Novel dynamic color image watermarking based on DWT-SVD and the human visual system[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77(11): 13531-13555.

[5] 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.

[6] ROY S, PAL A K. A blind DCT based color watermarking algorithm for embedding multiple watermarks[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 72: 149-161.

[7] SU Q T, LIU Y H, LIU D C, et al. A new watermarking scheme for colour image using QR decomposition and ternary coding[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(7): 8113-8132.

[8] SU Q T, YUAN Z H, LIU D C. An approximate schur decomposition-based spatial domain color image watermarking method[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 4358-4370.

[9] LIU D C, YUAN Z H, SU Q T. A blind color image watermarking scheme with variable steps based on Schur decomposition[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(11-12): 7491-7513.

[10] SU Q T, ZHANG X F, WANG G. An improved watermarking algorithm for color image using Schur decomposition[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(1): 445-460.

[11] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.

[12] 李翠芸, 曹潇男, 姬红兵, 等. 基于偏微分方程的快速二维经验模态分解方法及其应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2014, 26(7): 1143-1150.

LI C Y, CAO X N, JI H B, et al. A fast bidimensional empirical mode decomposition based on partial differential equation and its application on image processing[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(7): 1143-1150(in Chinese).

[13] DING S F, DU P, ZHAO X Y, et al. BEMD image fusion based on PCNN and compressed sensing[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(20): 10045-10054.

[14] CHEN Y Q, ZHANG L N, ZHAO B B. Identification of the anomaly component using BEMD combined with PCA from element concentrations in the Tengchong tin belt, SW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(4): 1561-1576.

[15] AN F P, LIU Z W. Bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) algorithm based on particle swarm optimization-fractal interpolation[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(12): 17239-17264.

[16] MA X M, ZHOU X W, AN F P. Bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) and the stopping criterion based on the number and change of extreme points[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2020, 11(2): 623-633.

[17] NUNES J C, BOUAOUNE Y, DELECELLE E, et al. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(12): 1019-1026.

[18] REN G H, HAN J N, FU J H, et al. Asymmetric multiple-image interference cryptosystem using discrete cosine transform and conditional decomposition[J]. *Optical Review*, 2020, 27(1): 1-8.

- [19] MOGHADDASI Z, JALAB H A, NOOR R M. Image splicing forgery detection based on low-dimensional singular value decomposition of discrete cosine transform coefficients[J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(11): 7867-7877.
- [20] ZHANG L N, WEI D Y. Dual DCT-DWT-SVD digital watermarking algorithm based on particle swarm optimization[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(19): 28003-28023.
- [21] ABBAS N A. Image encryption based on independent component analysis and arnold's cat map[J]. *Egyptian Informatics Journal*, 2016, 17(1): 139-146.
- [22] LI X S, LI T Y, WU J, et al. Joint image compression and encryption based on sparse Bayesian learning and bit-level 3D Arnold cat maps[J]. *PLoS One*, 2019, 14(11): 0224382.
- [23] XIE J H, WU D L, WANG J, et al. The analysis of additive noise of thermal test low-frequency cable fault detection based on M sequence correlation algorithm[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(4): 9303-9312.
- [24] 王小超, 胡坤, 胡建平. 结合 BEMD 与 Hilbert 曲线的重复嵌入图像水印算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(2): 287-296.
- [25] WANG X C, HU K, HU J P. Repeated embedding algorithm for image watermarking based on BEMD and Hilbert curve[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2020, 32(2): 287-296(in Chinese).
- [26] WANG X C, HU K, HU J P, et al. Robust and blind image watermarking via circular embedding and bidimensional empirical mode decomposition[J]. *The Visual Computer*, 2020, 36(10-12): 2201-2214.
- [27] HONG D, CHO H, LEE S, et al. Volumetric image reconstruction in a dental panoramic imaging system with a limited-angle zigzag scan geometry[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2013, 62(2): 333-338.
- [28] HUYNH-THU Q, GHANBARI M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(13): 800.
- [29] SU Q T, WANG G, JIA S L, et al. Embedding color image watermark in color image based on two-level DCT[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2015, 9(5): 991-1007.

Robust multiple watermarking algorithm for color image via BEMD and DCT

HU Kun^{1,2,3}, LI Cong⁴, HU Jianping⁵, WANG Xiaochao^{6,*}, DU Ling⁷, WANG Hongfei^{2,3}

(1. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China;

2. Key Laboratory of Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

4. School of System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

5. School of Science, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

6. School of Mathematical Sciences, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

7. School of Computer Science and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to solve the problem that the color image watermarking algorithm has low algorithm fault tolerance, and the size matching problem between the host image and the watermark image during embedding, and to improve the robustness of the algorithm in attack resistance, this paper proposes a robust multiple water-marking algorithm for color images based on bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) and discrete cosine transform (DCT). Firstly, Arnold transform is used to scramble three binary watermark images. Then, the RGB channels of the color host image are then decomposed using BEMD in addition to derive the intrinsic modal functions (IMFs) and residues for each channel. The first IMF of each channel is selected as the watermark embedding layer and recorded as IMF1. After that, each channel is divided into non-overlapping sub-blocks, and DCT is performed on each sub-blocks. Finally, the scrambled binary watermark image is repeatedly embedded in the middle bands coefficients of each channel sub-block after a Zigzag scan, and the inverse Zigzag scan and inverse DCT are adopted to obtain the IMF1 after embedding watermark information in each channel, and then the remaining intrinsic modal functions and residues of each channel are used to reconstruct the color image after the watermark embedding. The watermark extraction is the inverse of the watermark embedding process. The algorithm in this paper can implement blind extraction of embedded watermarks. In the process of watermark extraction, the voting strategy is used to extract the repeatedly embedded watermarks, which enhances the fault tolerance of the algorithm. A large number of experimental results show that the peak signal-to-noise ratio (PSNR) of the host images is above 34 dB after several watermarks have been embedded on various sets of host photos, according to a vast number of experimental results, and the watermark images have a high degree of invisibility. The host images after embedding can be against various attacks such as large-scale cropping, salt and pepper noise, etc. The values of the extracted watermark images are all above 0.96, and some can reach 1, watermark images can be completely extracted and precisely recognized. Compared with a large number of existing color image watermarking algorithms, the color image watermarking algorithm proposed in this paper has a strong ability to resist various attacks, and the images after embedding watermarks have higher invisibility.

Keywords: bi-dimensional empirical mode decomposition; multiple image watermarking; discrete cosine transform; pseudo random sequence; color image

Received: 2021-04-22; **Accepted:** 2021-06-06; **Published Online:** 2021-06-15 16:58

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210615.1541.008.html

Foundation items: The Science & Technology Development Fund of Tianjin Education Commission for Higher Education (2018KJ222); The Open Funding Projection of State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University (BUAA-VR-16KF-23, BUAA-VR-17KF-04)

* **Corresponding author.** E-mail: wangxiaochao18@163.com

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0174

低速冲击下碳/玻混杂复合材料红外辐射特征

赵志彬¹, 杨正伟^{1,2,*}, 李胤³, 寇光杰¹, 陈金树¹, 张炜¹

(1. 火箭军工程大学 导弹工程学院, 西安 710038; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049;
3. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

摘 要: 碳/玻混杂复合材料在工业应用中表现出巨大的应用潜力。基于红外热像法试验研究了碳/玻混杂复合材料层压板与2种非混杂材料低速冲击下的红外辐射特征。通过目视、超声C扫描和光学显微镜等方法确定冲击后层压板的损伤模式, 分析热图序列的时序变化特征和温度分布特征, 从而表征冲击过程中的热耗散效应。结果表明: 红外热成像技术非常适合监测低速冲击下纤维增强复合材料的损伤过程, 通过热图序列可以建立起监测特征与各损伤模式之间的联系; 同时发现碳/玻纤维的层间混杂可有效提升碳纤维增强基复合材料(CFRP)的抗分层能力, 随着冲击能量增加其抗分层能力愈加明显, 冲击后的碳/玻混杂复合材料兼具较大的表面损伤和较小的分层损伤, 拥有较好的损伤容限。

关键词: 碳/玻混杂复合材料; 红外热成像; 低速冲击; 在线监测; 损伤表征

中图分类号: V45; V258^{+.5}

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0177-10

近年来, 复合材料因其轻质、高比强度和优异的可设计性等特点被广泛应用于航空航天领域^[1-2]。其中, 碳纤维增强基复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)和玻璃纤维增强塑料(glass fiber reinforced plastics, GFRP)是最常用的2种复合材料, 长期以来, CFRP强度高但价格昂贵, GFRP虽然价格低廉但性能往往无法满足要求, 因此, 二者的混杂受到了广泛关注^[3-5]。通常, 混杂后的复合材料可以提供较好的强度、刚度甚至断裂韧性, 同时使成本大大降低^[6], 满足了大量中等强度要求的场合。混杂复合材料对冲击载荷十分敏感, 即使是低速的冲击也会造成严重的内部损伤, 但表面无任何变化, 这种目视不可见损伤会严重降低复合材料的剩余强度^[7-8], 严重威胁着航空领域复合材料结构的安全性。然而, 由于复合材料的损伤模式多种多样(基体开裂、分层、脱黏、纤维断裂等), 且相互交织^[9-10],

因此, 复合材料低速冲击过程的损伤机理和损伤演化研究仍是目前的热点和难点。最近, 集检测速度快、非接触、检测效果直观等特点于一身的红外热成像技术受到了广泛关注^[11-13], 更重要的是其可以实现材料的在线监测, 对研究航空领域复合材料低速冲击损伤的起始和扩展具有重要意义。

关于红外热成像的在线监测, 目前已被证实可以应用于多种复合材料^[14-15]。Krstulovic-Opara等^[16]使用红外热成像技术被动检测GFRP冲击过程的损伤扩展, 发现与热弹性应力分析方法观察到的损伤一致, 从而验证了红外热成像方法的可靠性。Jakubczak等^[17]开展了基于被动热成像的CFRP层合板冲击损伤检测试验研究, 结果表明被动热成像可作为一种有效的监测手段对冲击损伤进行评估, 还发现冲击过程中试件与冲头之间的接触力最大时试件表面的温度最高。此外, Meola等^[18-22]在复合材料低

收稿日期: 2021-04-06; 录用日期: 2021-07-23; 网络出版时间: 2021-07-30 09:18

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210729.1653.004.html

基金项目: 国家自然科学基金(52075541, 52005495); 中国博士后科学基金(2019M650262); 陕西省自然科学基金(2020JM-354)

*通信作者. E-mail: yangzhengwei1136@163.com

引用格式: 赵志彬, 杨正伟, 李胤, 等. 低速冲击下碳/玻混杂复合材料红外辐射特征[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 177-186.

ZHAO Z B, YANG Z W, LI Y, et al. Infrared radiation characteristics of carbon/glass hybrid composites under low-velocity impact[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 177-186 (in Chinese).

速冲击被动热成像监测领域开展了大量工作。2010年, Meola 和 Carlomagno^[18] 研究了冲头形状对 GFRP 低速冲击被动热成像监测的影响, 分析了热图温度与冲头接触面积之间的关系; 通过监测 CFRP 层压板的冲击过程, 分析了热图温升与损伤模式之间的关系, 指出纤维断裂在其中起主导作用, 同时, Meola 等^[19] 认为层压板背部的局部破坏可使温升达 10 K 以上, 但其并未对各损伤模式造成的温升进行量化。且 Meola 等^[20-21] 研究了不同纤维和基体对复合材料低速冲击下的热弹性效应和热塑性效应, 发现热固性 CFRP 的热弹性效应受冲击能量大小影响较大, 热固性 GFRP 次之, 而热塑性 GFRP 的热弹性效应与冲击能量无关且热弹性效应持续时间较长, 同时总结了不同材料的热斑形状, 发现热固性 CFRP 热斑呈长条状, 热固性 GFRP 热斑为亮点, 而热塑性复合材料呈现面积更大的圆状热斑, 并且指出生热的过程对应着损伤的萌生、扩展和形成。Meola 等^[22] 研究了载荷形式(冲击载荷和弯曲载荷)对 GFRP 热成像监测的影响, 发现载荷形式的不同会导致监测得到的温度变化不同, 并讨论了 2 种载荷下的损伤起始点。另外, Boccardi 等^[23] 通过红外热成像监测 GFRP 的低速冲击过程, 对比了添加相容剂前后对被动监测材料热现象的影响, 发现相容剂的添加使材料韧性变差, 更易发生纤维断裂, 从而导致监测热斑面积减小但温度增加, 这与文献^[24] 在玄武岩增强纤维复合材料低速冲击的被动热成像监测中得到的结论一致。Boccardi 等^[25] 又分析了厚度对 CFRP 冲击热现象的影响。Maierhofer 等^[26] 分别从正面和背面实时监测 3 类不同 GFRP(2 种热固性基体和一种热塑性基体)和 CFRP 的冲击过程, 并通过复合材料光学和热物理特性从监测的热谱图中计算出了冲击时的绝对耗散能量, 研究发现: 层压板的损伤类型、热斑面积和耗散能量主要与纤维类型有关, 基体类型对 3 个指标无明显影响。由上述可知, 以往的被动热成像监测研究主要针对 CFRP、GFRP 或不同基体的复合材料, 而关于混杂纤维的复合材料冲击过程的被动热成像监测很少被关注; 同时, 复合材料低速冲击下的损伤机理与被动热成像监测结果之间的联系仍不够明确, 需要进一步探索。

迄今为止, 碳/玻混杂复合材料冲击过程的被动热成像监测试验及低速冲击下的红外辐射特征研究在国内外均很少开展。为对比分析低速冲击载荷下碳/玻混杂复合材料与 2 种非混杂材料(CFRP 与 GFRP)的红外辐射特征, 本文采用目视、超声 C 扫描和光学显微镜等方法确定冲击后层压板的损伤模式, 通过分析热图序列的时序变化特征和温

度分布特征, 从而表征冲击过程中的热耗散效应, 建立起被动热成像监测热图特征与损伤模式之间的联系。研究结果可进一步扩展红外热成像技术在复合材料损伤机理研究方面的应用, 同时也为飞行器用混杂复合材料的结构设计提供一定的科学依据。

1 材料及试验研究

1.1 试样制备

3 种层压板试件依据 ASTM D7136/D 7136M-12 标准^[27] 进行制作, 其中 T800 级碳纤维增强环氧树脂基复合材料和 E-玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料牌号分别为 CF150/YH69 和 GF150/YH69, 碳/玻混杂复合材料由上述 2 种材料预浸料铺叠而成, 碳纤维和玻璃纤维分别来自日本东丽公司和中国巨石集团有限公司。采用热压罐工艺对铺设好的预浸料进行固化(两类预浸料中纤维参数如表 1 所示), 预浸料铺设过程均在恒定的环境条件下进行(温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(40 \pm 5)\%$)。使用水切割技术获得 $150\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的层压板试件, 试件铺层配置及具体参数如表 2 所示, 其中碳/玻混杂复合材料采用交替铺层方式。利用 Rapid Scan 2 型滚轮式超声相控阵探伤仪进行出厂检测, 结果显示试件表面质量良好, 且内部无分层、夹杂等缺陷。

表 1 两类预浸料纤维物理和力学性能参数

Table 1 Physical and mechanical properties of two prepreg fibers

纤维类型	丝直径/ μm	纤维密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	伸长率/ $\%$	线密度/ tex
碳纤	7	1.8	4 300	240	2.1	223
玻纤	19.2	2.55	2 300	81	2.9	410

注: 1tex=1g/km。

表 2 层压板试件结构参数

Table 2 Structural parameters of laminate specimens

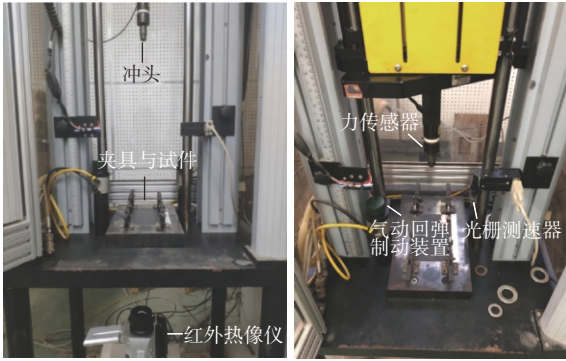
试件	杂交结构	层配置	面密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	厚度/ mm	树脂
SI-C	单碳纤维	$[45_0^0/-45_0^0]_{4s}$	0.59	4.8	环氧 YH69
SI-G	单玻璃纤维	$[45_0^0/-45_0^0]_{4s}$	0.82	4.6	环氧 YH69
C-G	碳/玻纤维混杂	$[45_0^0/-45_0^0]_{4s}$	0.70	4.7	环氧 YH69

注: 下标 c 为铺层角度, g 为单层纤维类型。

1.2 低速冲击在线监测试验

依据 ASTM D7136/D 7136M-12 标准^[27], 使用 Instron Dynatup 9250HV 冲击试验机(见图 1(a))进行低速冲击试验, 该试验机由冲击器, 气动夹装置, 气动回弹制动装置和数字采集单元组成(见图 1(b))。冲击器质量为 12.527 kg, 锤头选用直径为 16 mm 的

半球形锤头。设置 4 种冲击能量水平 10, 20, 30, 45 J 冲击试件, 期间将试件放置在中央具有 150 mm×100 mm 敞开窗口的相框固定架中, 4 个圆柱状橡胶头用于固定试件, 以防止试件冲击过程中的颤动。InfraTec Vhr 680 型红外热像仪(可探测红外光谱范围为 7.5~14 μm, 可测量温度范围为-40~+1 200 °C, 热灵敏度在常温状态下<0.04 °C, 测量精度为±1.5 °C (0~100 °C 室温范围内); 被竖直放置在层压板冲击面背侧, 用于低速冲击过程的在线监测, 为实现较好的空间分辨率, 将镜头平行于试件放置, 同时将高度调整距试件表面约 35 cm。为了尽可能完整地采集冲击前后试件表面温度场的变化, 采集帧数设为 1 000 帧, 同时以 50 Hz 的帧频获取热图序列。为使热效应相对于环境温度的变化完全可视化, 采集应在撞击前几秒钟开始, 并在撞击后持续一段时间。



(a) 落锤冲击试验机 (b) 采集单元

图 1 试验设备
Fig. 1 Test equipment

2 结果与讨论

由于热图序列分析需要结合层压板宏观损伤特性去描述, 因此, 本节先对层压板损伤特性进行讨论。

2.1 损伤特性分析

根据试验方案, 完成不同能量的冲击试验后, 对试件表面进行目视检查和超声 C 扫描, 结果如图 2 和图 3 所示, 其中标尺为 15 mm, 标尺是材料领域中常见的一种描述图片尺寸与真实尺寸的一种标度。

从图 2 和图 3 中可以看出, 随着冲击能量的增加, 层压板的损伤愈加明显, 主要以塑性变形产生的凹坑、基体开裂和分层等模式为主。在相同冲击能量水平下, C-G 试件产生比非混杂试件更为严重的表面损伤, 这可能是由于碳/玻层间混杂纤维不同的表面传热性能影响了固化过程中层压板的黏附性所致, 试件产生的表面损伤包括压缩、剪切或弯

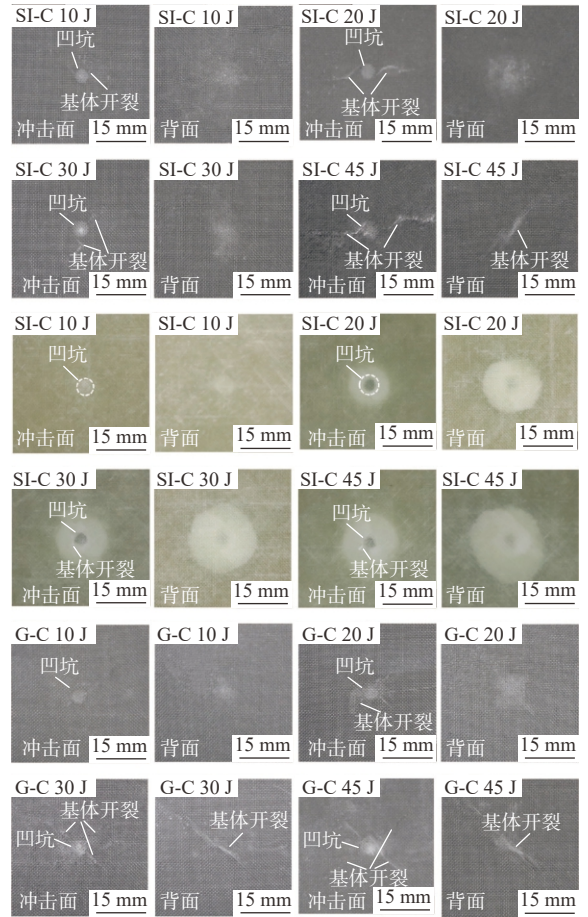


图 2 3 类层压板不同冲击能下的表面状态
Fig. 2 Surface states of three laminates under different impact energies

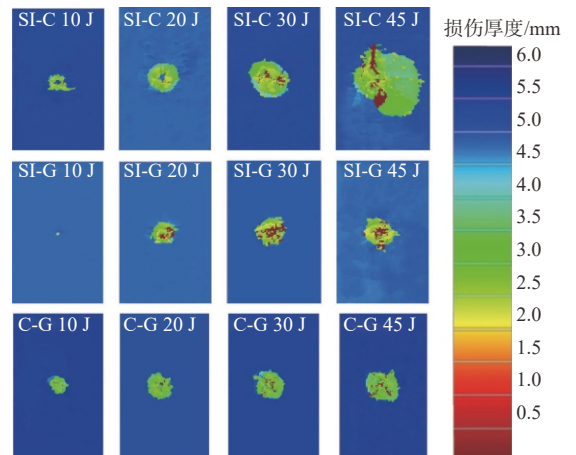


图 3 3 类层压板不同冲击能下的超声 C 扫描结果
Fig. 3 Ultrasonic C-scan results of three laminates under different impact energies

曲引起的基体裂纹, 这些裂纹主要平行于纤维(压缩裂纹)和平行于冲击面次表面层纤维(45°剪切裂纹), 或垂直于靠近背面的次表面层(弯曲裂纹)^[28], 如图 4 所示, 标尺为 500 μm。与非混杂试件相比, 混杂复合材料结构较高的卷曲度使得 C-G 试件拥

有较好的韧性^[26],因此,冲击行为造成的碳/玻混杂复合材料鼓包更加明显,如图4(a)所示。

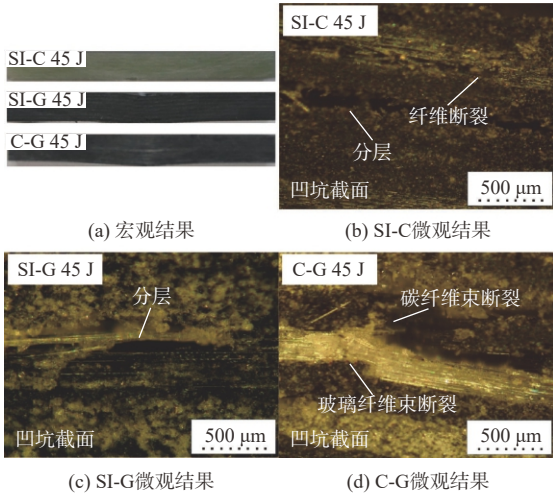


图4 冲击截面宏、微观结果

Fig. 4 Impact sections of macroscopic and microscopic results

3类试件分层损伤面积变化如图5所示,与SI-C试件相比,C-G试件在4种冲击能量下的分层损伤面积分别减少了8.2%、33.5%、38.5%、71.7%,这表明碳/玻纤维的层间混杂可有效提升复合材料的抗分层能力,而且随着冲击能量的增加,这种抗分层能力愈加明显;而纤维层间混杂后碳纤维更大的刚性导致C-G试件的分层损伤高于SI-G试件。综合来看,C-G试件同时兼容较大的表面损伤和较小的分层损伤,这表明混杂复合材料有较好的损伤容限。

由于目视检查会忽略许多内部损伤细节,而超声C扫描只能观察到层压板的分层情况,因此,使用Aosvi M330高倍金相显微镜对45 J冲击能量水平下3类试件的凹坑截面进行观察。结果如图4所示。从中可以观察到3类试件内部明显的分层损伤,损伤边缘细长且相对光滑,这与图5超声C扫

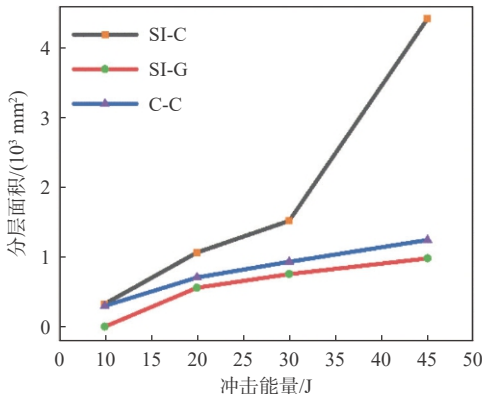


图5 层压板不同冲击能下的超声C扫描参数变化

Fig. 5 Variation of C-scan parameters of laminates under different impact energies

结果一致。但不同的是与SI-G相比,SI-C和C-G试件内部存在纤维断裂损伤,损伤方向大体上垂直于纤维铺层方向,同时,在损伤周围还发现了部分基体开裂损伤,事实上,纤维断裂的同时通常会伴随基体开裂的出现,这主要是因为层合板结构中基体包裹着纤维,基体强度又远低于纤维强度^[28]。

由本节损伤检测结果可知,3种复合材料层压板的抗冲击性能有明显差别。其中玻璃纤维层压板因其良好的冲击韧性而表现出较为优异的抗冲击性能,在相同冲击能量下损伤最小;碳纤维层压板由于刚性较大,层间易发生分层,因此,同一冲击能量下分层面积最大。而在相同冲击能量下碳/玻混杂层压板分层损伤面积虽与玻璃纤维层压板相近,但由于将碳纤维层作为表面层,试件表面刚度较大,同时其整体强度与非混杂碳纤维层压板相比有所降低,因此,同一冲击能量下抗冲击性能较差,损伤也最为严重。

2.2 热图序列分析

结合2.1节试验结果分析可知:试件受到冲击后,其表面和内部会产生各种损伤,此外,冲击作用在宏观上还会引发试件的微幅振动。因此,利用能量守恒定律,可得^[18]

$$E_a = E_v + E_p + E_d \quad (1)$$

由式(1)可知,试件吸收的能量 E_a 主要用于3个方面:损伤能 E_d 、塑性变形能 E_p 和振动动能 E_v 。Kang和Kim^[29]指出:在冲击过程中,塑性变形能 E_p 和损伤能 E_d 是最主要的2种能量吸收机制,而冲击过程中物体振荡非常轻微,相应的振动动能 E_v 占整个吸收能量 E_a 的比重非常小,可以忽略。因此,冲击过程中材料表面温度的变化主要来自于损伤的产生。

如图6所示,在冲击后的0.04 s,热斑开始以冲击点为中心向周围呈螺旋形扩展,最后逐渐消退。冲击能量越大,试件损伤程度越重,能量耗散增多,受冲击部位的温度越高,热异常区域越大。但3种材料的热异常区域形状并不相同,SI-C试件热区域整体呈椭圆形,SI-G试件为近似圆形,C-G试件为沿纤维方向的长条形热斑,这与各材料主要的损伤模式有关。与其他试件相比,C-G试件热区域较小但温度较高,这说明在深度方向其产生了更多的损伤。

在20 J冲击能量水平下的热图序列中,冲击发生后的0.2 s内,在冲击点处出现了一个温度低于周围的暗斑,而且不同材料暗斑持续时间不同,出现这种现象的主要原因是因为复合材料的热弹性效应,冲击行为使得层压板背部受到一定的拉应力,背面的张紧状态会吸收外界能量从而使区域温度

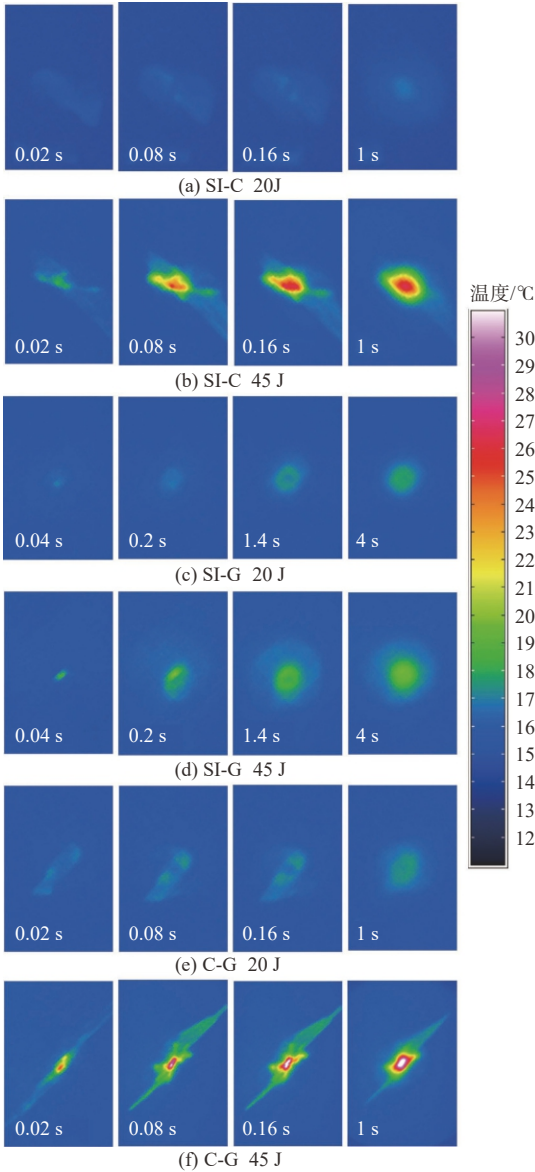


图 6 层压板冲击过程被动热成像监测热图序列

Fig. 6 Heat map sequence of passive thermal imaging monitoring during laminate impact

降低^[30],当冲头反弹后,该区域温度逐渐恢复正常。然而,在 45 J 冲击能量水平下的热图序列中,冲击点处温度明显高于周围亮斑,这是由于试件在对应冲击点背面出现的基体开裂或内部的大量分层甚至纤维断裂,导致热耗散高,引起局部温度显著上升。

为进一步直观地表征冲击过程中的热耗散效应,本文对 3 类试件表面温度的变化过程进行分析。为消除环境干扰和试件表面特性对表面温度的影响,利用表面温差来分析不同冲击能量下表面温度的时序变化特征,如下:

$$\Delta T_t^d = T_t^d - T_t^b \quad (2)$$

式中: ΔT_t^d 为在 t 时刻试件表面损伤区域与背景区域的温差; T_t^d 为在 t 时刻试件表面损伤区域的温

度; T_t^b 为在 t 时刻试件表面背景区域的温度。利用式(2),得到 3 类试件冲击区域与背景区域的表面温差-时间曲线变化如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,在 1 s 以前,试件表面温差基本为 0 °C,这是由于试件还未受到冲击,没有热量耗散;而在 1 s 后,试件受到冲击产生损伤释放热量,从而引起试件表面局部温差突然上升;随后,由于热量不断向外界环境耗散,试件表面温度场将会趋于平衡,相应的表面温差也在逐渐下降。但 3 种材料热量的耗散趋势不同,其中 SI-C 试件温度耗散

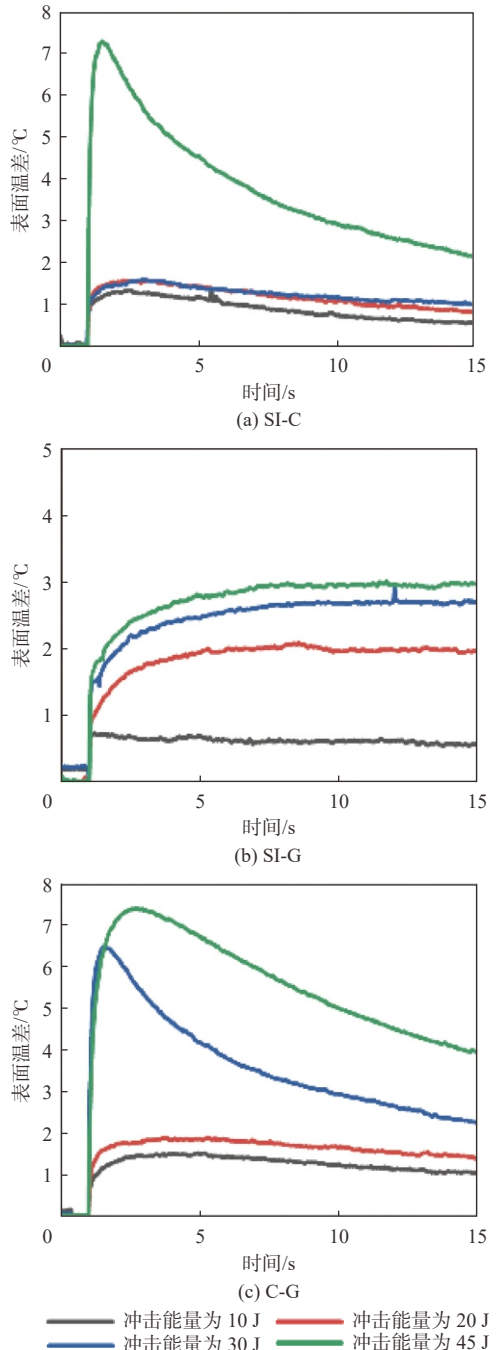


图 7 3 类层压板试件表面温差随时间变化曲线

Fig. 7 Surface temperature difference curves of three laminate specimens over time

最迅速, C-G 试件次之, 而 SI-G 冲击后温度耗散变化不明显, 这可能是由于玻璃纤维的热导率较差, 热阻较高, 从而阻碍了损伤能量的耗散。

如图 8 所示为不同冲击能量下 3 类试件的最大表面温差(最大表面温差为冲击过程中试件表面某一点处最大温差)。从图 8 中可以看出, 在冲击能量小于 20 J 时, 3 类试件最大表面温差变化较小, 约为 1~3 °C, 而当冲击能量大于 30 J 时, SI-C 和 C-G 试件表面温差上升显著, 在 10 °C 以上。结合 2.1 节的超声 C 扫描和微观检测结果分析, 导致这种现象的原因是随着冲击能量的增加, 试件中的主要损伤模式发生了变化, 而 SI-G 试件整体呈近似线性关系, 试件之间的最大表面温差变化不大, 在 1~6 °C 之间。这说明 20 J 冲击能量以下的 SI-C、C-G 试件及 4 种冲击能量下的 SI-G 试件的冲击损伤主要为基体开裂和分层, 而 30 J 冲击能量以上的 SI-C 和 C-G 试件的损伤除了基体开裂和分层, 还出现了大量纤维断裂。从而进一步推断出基体开裂和分层损伤的形成产生的能量耗散较少, 而纤维断裂则伴随着较大的能量耗散, 这与 Meola 等^[21,31]所观察到的现象一致。因此, 在冲击损伤的被动热成像检测中, 温升效应可作为表征损伤模式的一种有效途径: 在冲击作用下, 弱温升效应可表明试件产生了基体开裂和分层, 强温升效应则表明试件产生了纤维断裂损伤。同时, 通过与 Meola 等^[21,31]的试验结果对比可知, 试件最大表面温差的大小除了与试件损伤程度相关外还可能与材料本身的纤维和基体类型相关, 在复合材料的基体和纤维类型不同时, 即使损伤模式和损伤程度相同, 其造成的最大表面温差也有可能不同。对于分别由 T800 级碳纤维(牌号 CF150)和 E-玻璃纤维(牌号 GF150)增强, 环氧树脂(牌号 HY69)为基体的 3 种复合材料, 基体开裂和分层所导致的最大表面温差范围在 1~6 °C 之间,

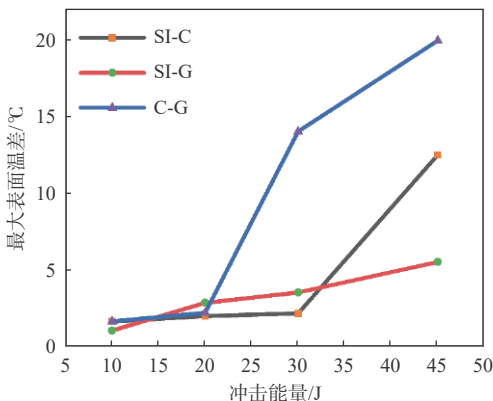


图 8 3 类层压板试件不同冲击能量下的最大表面温差
Fig. 8 Maximum surface temperature differences of three laminate specimens under different impact energies

纤维断裂所导致的最大表面温差在 10 °C 以上。

对于同一冲击能量下表面温度的分布特征, 鉴于试件在不同的冲击能量下损伤模式不尽相同, 分别以 3 类层压板 20 J 和 45 J 冲击能量下的被动热成像检测结果为例, 对其表面温度的分布特征进行分析。在试件冲击损伤区域和背景区域标记 6 个像素点, 如图 9 第 1 列图像所示, a1 为冲击位置的像素点, a2~a5 为冲击损伤区域的像素点, a6 为背景区域的像素点, 之后提取各像素点的温度时序变化曲线, 从图 9 第 2 列图像可以看出, 试件在受到冲击后, 冲击损伤区域温度瞬时上升直至最大, 但各像素点上升速率不同。图 9 第 3 列图像分别给出了试件在受到冲击后 0.1 s 内各像素点的温度变化曲线。对于 20 J 冲击时的 3 种试件和 45 J 冲击时的 SI-G 试件, 像素点 a1 的温升速率明显低于像素点 a2, 相应的像素点 a1 的温度比像素点 a2 的温度低; 而对于 45 J 冲击时的 SI-C 和 C-G 试件, 由于纤维断裂的产生致使冲击点处的热耗散高于其他区域, 故像素点 a1 的温升速率高于其他区域, 这进一步证实了热图序列中 20 J 冲击 SI-G 试件冲击点处暗斑与 45 J 冲击 SZ-G 试件冲击点处亮斑的分析结果。

为进一步分析损伤区域与背景区域的热差异, 分别以 3 类试件在 0.04 s 时刻后的热图为例, 在热图中定义了 2 条测温线, 其中一条 l_1 通过冲击点的测温线; 另外一条 l_2 通过背景区域, 如图 10 第 1 列图像所示, 依次提取测温线 l_1 和 l_2 上的温度数据, 然后作差, 得到 2 条测温线的温差, 结果如图 10 第 2 列图像所示。

从图 10 中可以清楚地看到, 3 类层压板在损伤区域内的像素点温度值大于在背景区域内的像素点温度值。对于 20 J 冲击时的 3 类试件, l_1 和 l_2 的温差曲线均呈双峰状, 存在 2 个极大值和一个极小值, 这也说明了暗斑的存在; 而对于 45 J 冲击时的试件, 温差曲线虽然均呈单峰状, 只有一个极大值, 但三者冲击点处温升效应却并不同, SI-C 和 C-G 试件是因纤维断裂损伤而带来的强温升, 而 SI-G 试件此时是弱温升, 却依然出现了单峰测温线, 通过图 4(c) 微观结果可知 SI-G 试件虽然并没有大量纤维断裂, 但出现了大量分层和基体开裂。

通过热图序列和温度演化分析可得: 结合冲击处的暗斑、弱温升效应、双峰测温线可以表征基体开裂和较小分层的出现, 结合亮斑、弱温升效应、单峰测温线可以表征大量基体开裂、分层的出现, 结合亮斑、强温升效应、单峰测温线可以表征纤维断裂的出现。

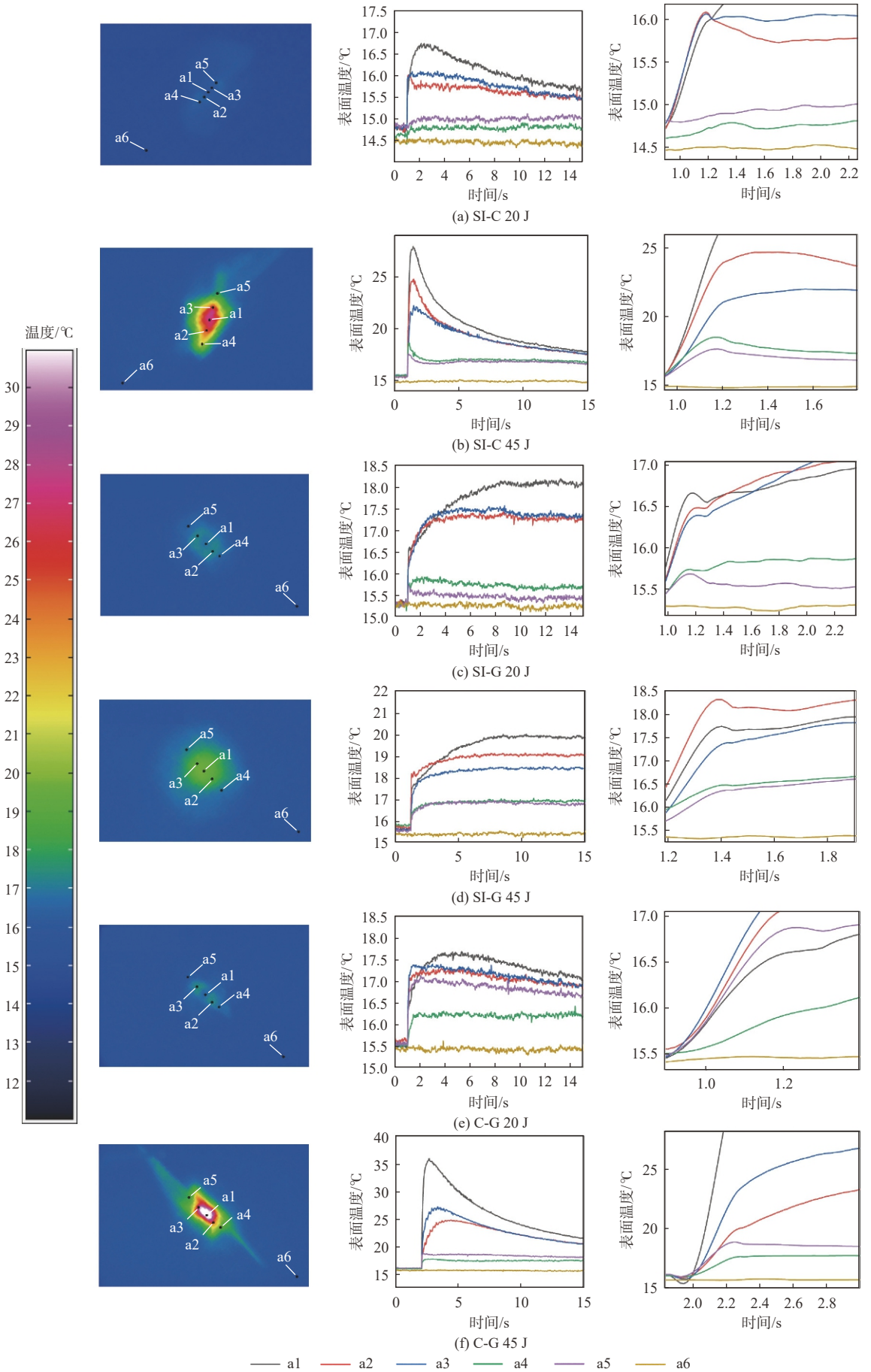


图 9 标记像素点表面温度随时间变化曲线及其局部变化曲线

Fig. 9 Time variation curve and local variation of surface temperature of marked pixels

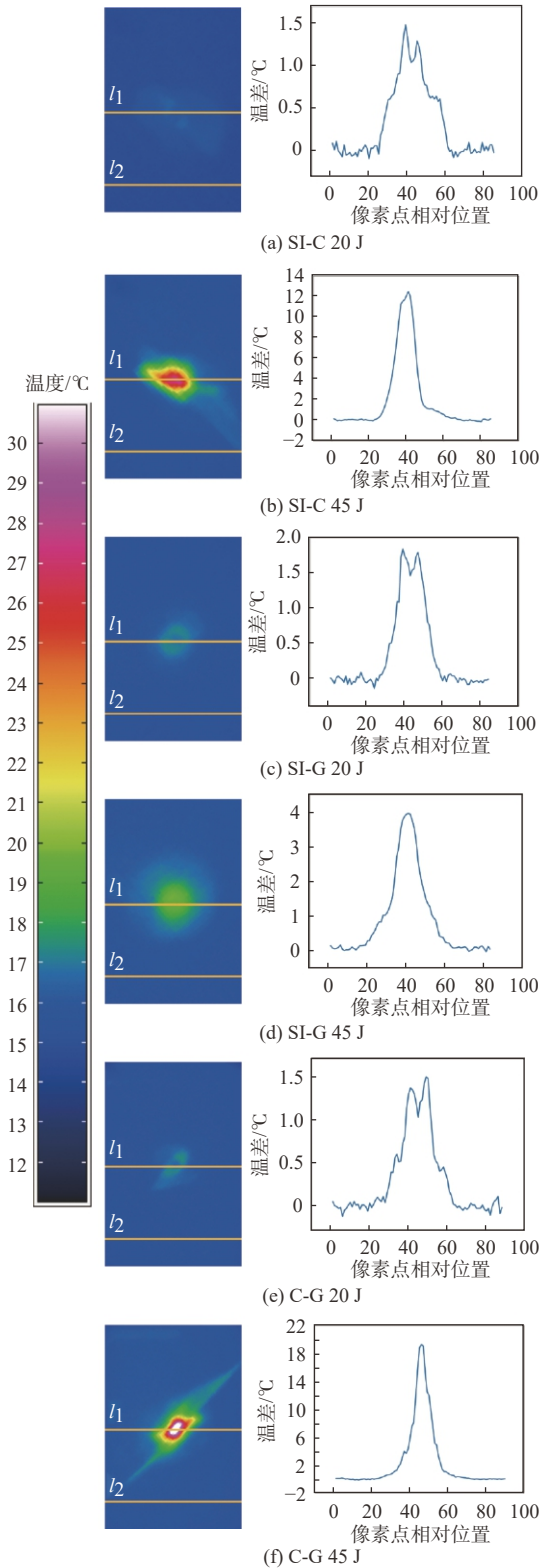


图10 试件测温线及其温差曲线

Fig. 10 Temperature measurement lines and temperature difference curves of specimens

3 结论

通过开展碳/玻混杂和2种非混杂复合材料冲击过程的被动热成像监测试验研究,得出以下结论:

1) 碳/玻璃纤维的层间混杂可有效提升 CFRP

复合材料的抗分层能力,随着冲击能量增加其抗分层能力愈加明显,同时冲击后的碳/玻混杂复合材料兼具较大的表面损伤和较小的分层损伤,拥有较好的损伤容限。

2) 红外热成像技术非常适合于监测低速冲击下纤维增强复合材料的损伤过程,并且从中可以区别材料的损伤模式:结合冲击处的整体温度、温升曲线和测温线之间的差异可判断复合材料基体开裂、分层和纤维断裂损伤的严重程度。

3) 不同类型复合材料的冲击热斑区域形状不同,SI-C 热斑整体呈椭圆形,SI-G 为近似圆形,C-G 复合材料为沿纤维方向的长条形热斑。不同的损伤模式造成的温升也不同,其中纤维断裂所导致的温升要明显高于分层和基体开裂。对于纤维增强环氧树脂基复合材料,基体开裂和分层损伤时的最大表面温差在 $1\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,纤维断裂损伤时的最大表面温差要高于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献 (References)

- [1] GHORI S W, SIAKENG R, RASHEED M, et al. The role of advanced polymer materials in aerospace[C]//Sustainable Composites for Aerospace Applications. Amsterdam: Elsevier, 2018: 19-34.
- [2] ZHOU J, LIAO B, SHI Y, et al. Low-velocity impact behavior and residual tensile strength of CFRP laminates[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 161: 300-313.
- [3] JAGANNATHA T D, HARISH G. Mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced epoxy hybrid polymer composites[J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2015, 4(2): 131-137.
- [4] CHEN D D, LUO Q T, MENG M Z, et al. Low velocity impact behavior of interlayer hybrid composite laminates with carbon/glass/basalt fibres[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 176: 107191.
- [5] PAPA I, BOCCARUSSO L, LANGELLA A, et al. Carbon/glass hybrid composite laminates in vinyl ester resin: Bending and low velocity impact tests[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111571.
- [6] SAFRIS N A, SULTAN M T H, JAWAID M, et al. Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2018, 133: 112-121.
- [7] NAIK N K, RAMASIMHA R, ARYA H, et al. Impact response and damage tolerance characteristics of glass-carbon/epoxy hybrid composite plates[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2001, 32(7): 565-574.
- [8] 管清宇, 冯剑飞, 夏品奇, 等. 复合材料层压板低速冲击行为及剩余拉伸强度[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(6): 1220-1232. GUAN Q Y, FENG J F, XIA P Q, et al. Low-velocity impact behavior and residual tensile strength of composite laminates[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(6): 1220-1232(in Chinese).
- [9] ZHOU J, LIAO B, SHI Y, et al. Experimental investigation of the double impact position effect on the mechanical behavior of lowve-

- locity impact in CFRP laminates[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2020, 193: 108020.
- [10] 张超, 方鑫, 刘建春. 复合材料层板冰雹高速冲击损伤预测及失效分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(4): 698-707.
ZHANG C, FANG X, LIU J C. Damage prediction and failure mechanism of composite laminates under high-velocity hailstone impact[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(4): 698-707(in Chinese).
- [11] LOGANATHAN T M, SULTAN M T H, MUHAMMAD AMIR S M, et al. Infrared thermographic and ultrasonic inspection of randomly-oriented short-natural fiber-reinforced polymeric composites[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 7: 604459.
- [12] DOSHVARPASSAND S, WU C Z, WANG X Y. An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 96: 366-389.
- [13] ALFREDO OSORNIO-RIOS R, ANTONINO-DAVIU J A, DE JESUS ROMERO-TRONCOSO R. Recent industrial applications of infrared thermography: A review[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(2): 615-625.
- [14] VAVILOV V, BURLEIGH D. Infrared thermography and thermal nondestructive testing[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 7-11.
- [15] BAGAVATHIAPPAN S, LAHIRI B B, SARAVANAN T, et al. Infrared thermography for condition monitoring: A review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 35-55.
- [16] KRSTULOVIC-OPARA L, KLARIN B, NEVES P, et al. Thermal imaging and thermoelastic stress analysis of impact damage of composite materials[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(2): 713-719.
- [17] JAKUBCZAK P, BIENIAŚ J, SUROWSKA B. Impact damage live-time analysis of modern composite materials using thermography[J]. *Composites Theory and Practice*, 2014, 14: 219-223.
- [18] MEOLA C, CARLOMAGNO G M. Impact damage in GFRP: New insights with infrared thermography[J]. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(12): 1839-1847.
- [19] MEOLA C, BOCCARDI S, CARLOMAGNO G M, et al. Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics[J]. *Composite Structures*, 2015, 134: 845-853.
- [20] MEOLA C, BOCCARDI S, BOFFA N D, et al. New perspectives on impact damaging of thermoset-and thermoplastic-matrix composites from thermographic images[J]. *Composite Structures*, 2016, 152: 746-754.
- [21] MEOLA C, BOCCARDI S, CARLOMAGNO G M, et al. Impact damaging of composites through online monitoring and non-destructive evaluation with infrared thermography[J]. *NDT & E International*, 2017, 85: 34-42.
- [22] MEOLA C, BOCCARDI S, CARLOMAGNO G M. Infrared thermography for inline monitoring of glass/epoxy under impact and quasi-static bending[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(2): 301.
- [23] BOCCARDI S, CARLOMAGNO G M, SIMEOLI G, et al. Evaluation of impact-affected areas of glass fibre thermoplastic composites from thermographic images[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(7): 075602.
- [24] BOCCARDI S, BOFFA N D, CARLOMAGNO G M, et al. Inline monitoring of basalt-based composites under impact tests[J]. *Composite Structures*, 2019, 210: 152-158.
- [25] BOCCARDI S, CARLOMAGNO G M, BOFFA N D, et al. Infrared thermography to locate impact damage in thin and thicker carbon/epoxy panels[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2017, 57(7): 657-664.
- [26] MAIERHOFER C, KRANKENHAGEN R, RÖLLIG M. Application of thermographic testing for the characterization of impact damage during and after impact load[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 173: 106899.
- [27] ASTM Committee. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event: ASTM D7136/D7136M-12[S]. West Conshohocken: [s.n.], 2015: 1-16.
- [28] RICHARDSON M O W, WISHEART M J. Review of low-velocity impact properties of composite materials[J]. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 1996, 27(12): 1123-1131.
- [29] KANG T J, KIM C. Impact energy absorption mechanism of largely deformable composites with different reinforcing structures[J]. *Fibers and Polymers*, 2000, 1(1): 45-54.
- [30] BIOT M A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics[J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(3): 240-253.
- [31] MEOLA C, CARLOMAGNO G M. Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 67: 1-11.

Infrared radiation characteristics of carbon/glass hybrid composites under low-velocity impact

ZHAO Zhibin¹, YANG Zhengwei^{1,2,*}, LI Yin³, KOU Guangjie¹, CHEN Jinshu¹, ZHANG Wei¹

(1. School of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710038, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Carbon/glass hybrid composites have shown great potential in industrial applications. The infrared radiation characteristics of carbon/glass hybrid composite laminates and two types of non-hybrid composites under low velocity impact were studied experimentally by infrared thermography. The damage mode of the laminates was determined after impact by visual, ultrasonic C-scan and optical microscopy, and then the time series variation and temperature distribution characteristics of the thermal map sequence were analyzed to characterize the heat dissipation effect during the impact. Results show that the infrared thermography is highly suitable for monitoring the damage process of fiber reinforced composites under low velocity impact, and that the relationship between the monitoring characteristics and the damage modes can be established through the thermal map sequence. It is also found that the interlaminar hybrid of carbon glass fibers can effectively improve the anti-delamination ability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites. With the increase of impact energy, the anti-delamination ability becomes more obvious. After impact, carbon glass hybrid composites show both larger surface damage and smaller delamination damage with better damage tolerance.

Keywords: carbon/glass hybrid composite; infrared thermography; low-velocity impact; on-line monitoring; damage mode characterization

Received: 2021-04-06; **Accepted:** 2021-07-23; **Published Online:** 2021-07-30 09:18

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210729.1653.004.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52075541,52005495); China Postdoctoral Science Foundation (2019M650262); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JM-354)

* **Corresponding author.** E-mail: yangzhengwei1136@163.com

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0181

新型聚乙烯醇/聚乙二醇水凝胶热沉性能研究

殷健宝, 邢玉明, 郝兆龙*, 王仕淞, 王子贤, 侯煦

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为研究水凝胶作为热管理技术的可行性和潜力, 采用物理循环冷冻法制备一种力学和经济性良好的新型聚乙烯醇 (PVA)/聚乙二醇 (PEG) 复合水凝胶热沉, 热沉尺寸为 $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, 通过表面的水分蒸发来实现自冷。在 2712 W/m^2 热流下进行散热性能探究实验, 得到了升温特性、蒸发对流强度变化关系和溶胀变化规律。发现加入 2.5% 质量分数的 PEG 减小了随循环冷冻次数增加造成的制备变形, 减小了 75.53% 的含水量衰减, 同时使芯片表面控温下降 7.53%。根据实验结果计算得到了蒸发换热系数, 并研究了热流、厚度和湿度对蒸发散热的影响。通过对水凝胶不同温度和使用情况 (4 h 连续使用及 120 d 常温储存) 下溶胀率的测定, 证明水凝胶具备一定的短时使用可靠性, 但对温度的敏感响应并不显著。

关键词: 聚乙烯醇水凝胶; 热沉; 蒸发冷却; 热管理; 电子设备

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0187-08

近年来, 电子设备拥有更高速的处理器、更大容量的闪存、更高分辨率的显示屏和更小的体积, 使得电子组件的热流密度不断上升, 需要采用合适的热管理技术来维持电子设备元件的可靠性和稳定性^[1]。其中, 相变材料(phase change materials, PCM)的融化相变可以吸收大量热量, 受到广泛研究。PCM在电子设备领域的应用中, 封装技术和导热增强技术是主要手段^[2], 且多被运用于弹载设备, 目前仍然不是一个经济的电子系统散热方法。

在各种热管理技术中, 蒸发冷却占据着重要的地位, 如工厂中的大型冷却塔和人类的排汗降温^[3]。水的蒸发潜热(一个大气压(1 atm)下约 2257 kJ/kg)比大多数材料的蒸发潜热值要高, 如液氨(常温时蒸发潜热约为 1166 kJ/kg)、三氟甲烷 R32(沸点时蒸发潜热约为 390 kJ/kg)和乙醇(常温时蒸发潜热约为 944 kJ/kg)。水无毒无害易获取, 还拥有较强的显热储存能力。但该技术一般需要较大的表面积和大型风力驱动, 因此多应用于工业领域中。在小型化运用场合中, 由于缺乏合适的载体, 水的蒸

发冷却的运用存在一定困难。水凝胶是一种含有大量水分的亲水网状聚合物^[4], 可以视作一种多孔材料。其中, 温敏水凝胶有类似人体皮肤自发汗的优良性质, 如 N-异丙基丙烯酰胺 (poly(N-isopropylacrylamide), PNIPAM)^[5] 在超过约 $32\text{ }^\circ\text{C}$ 的下临界溶解温度时, 会由亲水性向疏水性转换, 从而释放水分。Rotzetter 等^[6] 将 PNIPAM 应用在建筑散热领域, 搭建了 $5.9\text{ cm}\times 4.9\text{ cm}\times 5.9\text{ cm}$ 的房屋缩小模型, 以 1000 W/m^2 的光照模拟太阳光, 并在屋顶上铺上 2.6 mm 厚的 PNIPAM 水凝胶, 在实验开始的 3 h 内, 屋顶温度下降约 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 推测热带光照条件下, 每 100 m^2 的 PNIPAM 屋顶每年可以减少 220 kWh 的电耗和 140 kg 碳排放。Huang 等^[7] 将 PNIPAM 运用到手持设备的芯片散热中, 在 5.75 W 的功率下, 将表面温度由 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 并发现常温下, 空气相对湿度 (relative humidity, RH) 由 0 增加到 1 时, 下降约 43% 的散热能力。Cui 等^[8] 用数值模拟对 PNIPAM 进行了 CFD 仿真, 并用实验验证了模型的可靠性。Pu 等^[9] 将 PNIPAM 应用在 VR

收稿日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-06-04; 网络出版时间: 2021-07-01 16:42

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210701.1523.002.html

* 通信作者. E-mail: haozhaolong@buaa.edu.cn

引用格式: 殷健宝, 邢玉明, 郝兆龙, 等. 新型聚乙烯醇/聚乙二醇水凝胶热沉性能研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 187-194.
YIN J B, XING Y M, HAO Z L, et al. Performance of a novel polyvinyl alcohol/polyethylene glycol hydrogel for heat sink [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 187-194 (in Chinese).

设备中,在 $1\ 555.5\ \text{W/m}^2$ 的热流密度下将芯片表面控温到 $70\ ^\circ\text{C}$ 以下,并在高温高湿条件($90\ ^\circ\text{C}$, $85\%\text{RH}$)下进行60个循环,共450 h的疲劳实验,发现材料的含水量和溶胀性无明显退化。但是传统PNIPAM湿强度较差^[10]、易碎、韧性不佳,这些都限制了其应用和发展^[11-12]。罗加祺^[13]制备的PNIPAM水凝胶的拉伸强度为4.5 kPa,拉伸断裂率为36.4%,在与过渡金属碳/氮化物(MXene)复合后,凝胶的拉伸强度提高到8.6 kPa,拉伸断裂率提高了140.9%。

近年来,聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)水凝胶由于其较高的机械强度、良好的生物降解性、较好的生物相容性、低廉的价格和无毒无害,受到广泛研究^[14]。李东^[15]用循环冷冻法^[16]制备了纯PVA水凝胶,并测得拉伸强度为1.1 MPa。与此同时,PVA水凝胶也具有作为热沉的潜力,Zamengo和Morikawa^[17]基于PVA水凝胶高于一般PCM的导热系数和蒸发潜热值制作了散热器,并在 $340\sim 1\ 012\ \text{W/m}^2$ 的热流密度下进行了实验,发现蒸发散热的功率占据总功率的51%~79%,是可选的优良热管理材料。高分子聚合物聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)常被用于调节物质的物理化学性能^[18],被广泛应用在食品、化妆和锻造等方面^[19]。PEG可用于提高水凝胶的机械性能,杜倩雯等^[20]发现向2%含量的PVA复合水凝胶中加入2%的PEG可以提高67%的拉伸强度,使水凝胶的结构更加紧密。在热性能方面,PEG可作为致孔剂,提高水凝胶的传热传质速率。周学华^[21]用循环冷冻法(冻融法)制备了PVA/PEG水凝胶支架,发现加入PEG可以增加孔隙尺寸和孔隙率,提高载物的释放速率。Zhang等^[22]用PEG制备了大孔径水凝胶,发现多孔网络结构可以使水分和热量更容易进出水凝胶基体,减小由于凝胶收缩形成的致密表面对水分和热量的阻挡作用。除此之外,PEG还可以赋予PVA水凝胶一定的温度敏感性。张梅等^[23]将具有相变特征的PEG接枝共聚到了PVA主链上,发现PEG相变后,PVA主链限制了PEG的流动,实现了固态储能。孙大辉等^[24]进一步研究了接枝法制备的PVA/PEG复合水凝胶,发现PEG使凝胶具备了温度敏感的特性。这种温敏特性是靠PEG的相转变实现的,不同于PNIPAM水凝胶的温敏原理^[25]。

水凝胶作为热沉的文献研究并不多,且大多集中在PNIPAM上,热流密度也多在 $1\ 555\ \text{W/m}^2$ 以下。但是PNIPAM水凝胶较差的机械强度和复杂的制备工艺都一定程度上限制了其进一步应用。而PVA水凝胶的物理循环冷冻法制备简单,力学性能优良,对环境对人体无害,成本远低于PNIPAM

水凝胶。少有学者研究PVA水凝胶在热沉方面的性能表现。本文以物理循环冷冻法制备了PVA/PEG复合水凝胶,并在 $2\ 712\ \text{W/m}^2$ 热流下对比了纯PVA水凝胶在散热性能方面的表现,研究了热流、水凝胶厚度和环境湿度对水凝胶散热的影响。通过对溶胀特性的测量,探究了制得水凝胶的温度敏感性和短时间使用、储存的可靠性。

1 实验

1.1 材料制备

水凝胶的循环冷冻制备法,即通过PVA溶液在较低温度(通常为 $-20\ ^\circ\text{C}$ 以下)和零上温度(通常为常温)下的反复冷冻与解冻^[26],分子通过氢键和微晶结构进行物理交联,形成水凝胶^[27],避免了化学交联法中试剂残留对应用的影响^[28],在再生医学和可控给药方面有广泛应用^[29]。本文中用此法制备了3类凝胶,具体配比如表1所示。

表1 水凝胶制备材料

Table 1 Materials for hydrogel preparation

水凝胶	PVA/g	PEG/g	去离子水/mL
P10/0	10	0	90
P10/2.5	10	2.5	87.5
P5/2.5	5	2.5	92.5

表1中,P10/2.5代表PVA的质量分数为10%,PEG的质量分数为2.5%。具体选用材料为PVA1799(山东优索化工科技有限公司,聚合度1700,醇解度99%)和PEG6000(山东优索化工科技有限公司,聚合度6000)。先将PVA在去离子水中浸泡,然后在 $90\ ^\circ\text{C}$ 下水浴搅拌($200\ \text{r/min}$)3 h至完全溶解,再混入PEG溶液,形成共混溶液,待去除气泡后倒入模具,在 $-25\ ^\circ\text{C}$ 下冷冻10 h,之后置于常温(约 $20\ ^\circ\text{C}$)下解冻14 h,总共循环4次。最后制得 $60\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}$ 的小片。PEG致孔的原因可能有2个:①在水凝胶聚合和交联中,PEG占据着额外的空间;②PEG的存在使水凝胶聚合时发生相分离^[22]。实验所用水凝胶若无特殊说明,均为新鲜制备。

1.2 实验装置

为测量水凝胶作为热沉的散热能力,搭建了实验台,如图1所示,包含直流电源、模拟芯片、水凝胶热沉、硅酸铝纤维隔热材料、数据采集器和计算机。图中:#1、#4热电偶测量水凝胶表面温度,#2、#5测量水凝胶本身的温度,#3、#6测量芯片表面温度,湿度传感器测量环境温湿度。水凝胶由一块中心切去 $50\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ 方形的亚克力板压紧,以减小接触热阻。

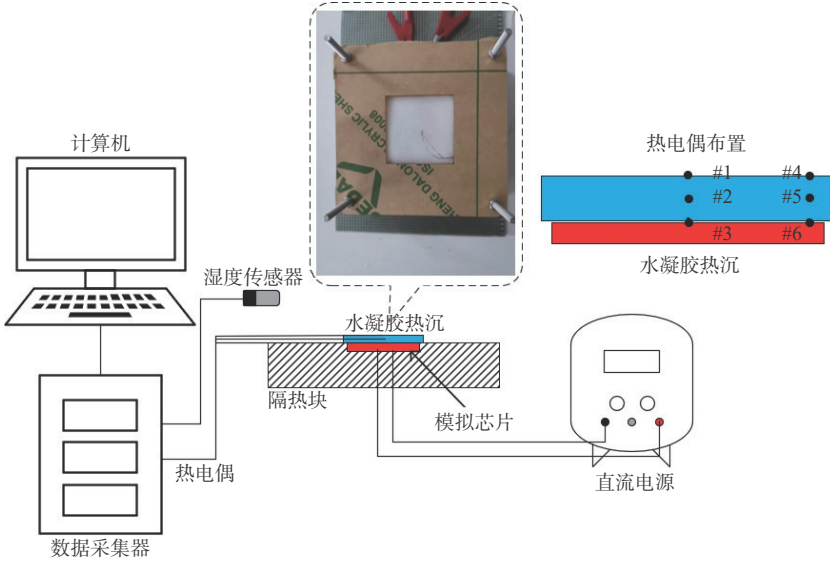


图 1 水凝胶热沉散热能力测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device for heat dissipation capacity of hydrogel heat sink

1.3 水凝胶换热模型

水凝胶的蒸发换热量可以通过热流、自然对流散热量、辐射散热量和显热值计算得到^[9], 这些热流的关系如下:

$$q = q_{sens} + q_{conv} + q_{rad} + q_{evap} \quad (1)$$

式中: q 为芯片功率, 即总热流; q_{sens} 为水凝胶升温吸收的热流; q_{conv} 为自然对流的散热热流; q_{rad} 为辐射散热热流; q_{evap} 为蒸发的散热热流。

绝热材料硅酸铝的导热系数为 $0.07 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 芯片的热损失可以忽略不计。具体热流关系如图 2 所示。各热量的计算公式如式(2)~式(5)所示, 为了便于对比蒸发散热的强度, 进行等效计算, 采取文献[9]的计算方式:

$$q_{sens} = c_h m_h \Delta T_h / \Delta t \quad (2)$$

$$q_{conv} = h_c (T_s - T_a) \quad (3)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) \quad (4)$$

$$q_{evap} = h_e (T_s - T_a) \quad (5)$$

式中: c_h 为水凝胶的比热容; m_h 为水凝胶的质量; h_c 和 h_e 分别为对流传热系数和蒸发换热系数; ΔT_h 、 T_s 和 T_a 分别为水凝胶的温升、水凝胶表面温度和

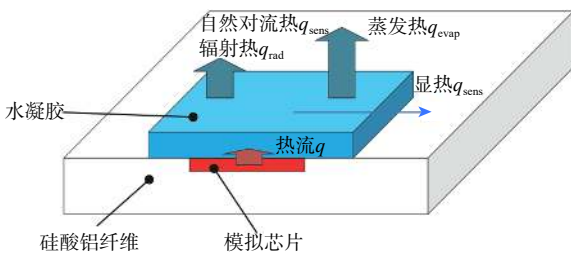


图 2 水凝胶热量平衡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hydrogel heat balance

空气温度; Δt 为时间差; ε 为发射率; σ 为黑体辐射常数。

水凝胶比热容通过加权计算得到, 取水凝胶与水的占比为 1:9, 其中, PVA 的比热容 $c_{pva} = 1.32 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 液态水的比热容 $c_{h_2o} = 4.17 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 故取 $c_h = 3.89 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。根据水凝胶的零级蒸发动力学^[30-31], 假定水的蒸发速率为常数, 本文通过测定实验台的质量变化来确定蒸发热的大小, 测量精度 $\pm 0.05 \text{ g}$ 。

水凝胶表面的自然对流换热系数的计算通过式(6)实现, 取热板上表面自然对流的准则式^[32]:

$$Nu = 0.54 Ra^{1/4} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^7, Pr \geq 0.7 \quad (6)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \beta (T_s - T_a) L^3}{\nu^2} Pr \quad (7)$$

式中: Nu 、 Ra 、 Gr 和 Pr 分别为努塞尔数、瑞利数、格拉晓夫数和普朗特数; g 、 β 、 ν 和 L 分别为重力加速度、流体的体胀系数、运动黏度和水凝胶的特征长度。

水凝胶的溶胀率 (swelling ratio, SR) 是重要的物性参数^[9,22], 其计算公式如下:

$$SR = (w_s - w_d) / w_d \quad (8)$$

式中: w_s 和 w_d 分别为水凝胶溶胀平衡后的质量和脱水干凝胶的质量。水凝胶在一定温度水浴下吸水膨胀与收缩平衡时, 称溶胀平衡。SR 是测定温敏特性^[24] 和可靠性^[9] 的重要指标。

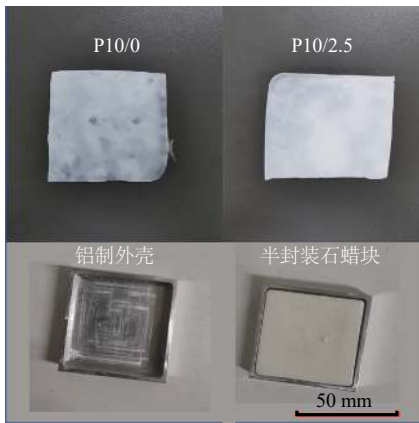
2 结果与讨论

2.1 PVA/PEG 复合水凝胶冷却性能评估

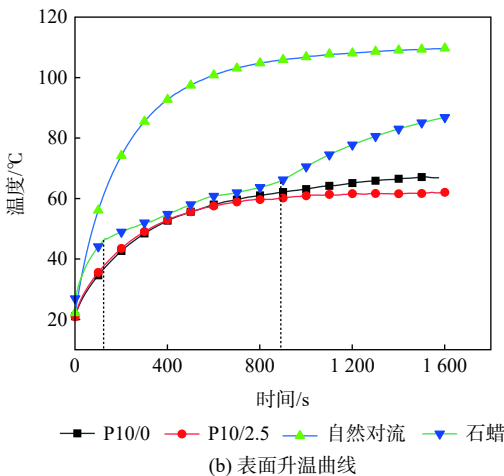
为评估 PVA/PEG 复合水凝胶的冷却性能, 对比了芯片使用 P10/0、P10/2.5、石蜡半封装块和自

然对流散热时表面温度的变化情况。图3(a)为实验的样品材料, P10/0 质量为 13.1 g, P10/2.5 质量为 13.3 g, 铝制石蜡封装外壳质量为 21.8 g, 长×宽×高为 50 mm×50 mm×10 mm, 铝壳厚度为 2 mm, 半封装完成的石蜡块质量为 32.3 g。其中水凝胶都只经过 1 次循环冷冻, 尺寸为 60 mm×60 mm×2 mm, 石蜡熔点为 37 °C, 液态导热系数为 0.2 W/(m·K), 潜热值 175 kJ/kg。图 3(b) 为环境温度 20 °C、23%RH 下, 芯片使用对应散热方式的表面升温曲线, 热流均为 2 712 W/m²。热流密度的取值以某导弹芯片在识别模式下测温实验测得的数据为依据, 并保留一定裕度。实验如图 4 所示, 要求工作时间为 180 s 以上。

由图 3 中可以看出, 初始铝块温度迅速上升, 上升程度大于水凝胶, 因为水凝胶比热 (3.89 kJ/(kg·K)) 远大于铝块比热 (0.88 kJ/(kg·K)), 具有良好的显热储存能力。之后由于石蜡融化吸收大量热量, 封装块升温速率大幅下降, 与水凝胶相近, 但约持续 900 s 后



(a) 实验样品实物图



(b) 表面升温曲线

图 3 1 次循环冷冻后的实验样品及 2 712 W/m² 热流下芯片表面的升温曲线

Fig. 3 Physical image of experimental sample after a cycle of freezing, and heating curves of chip surface with heat flow of 2 712 W/m²

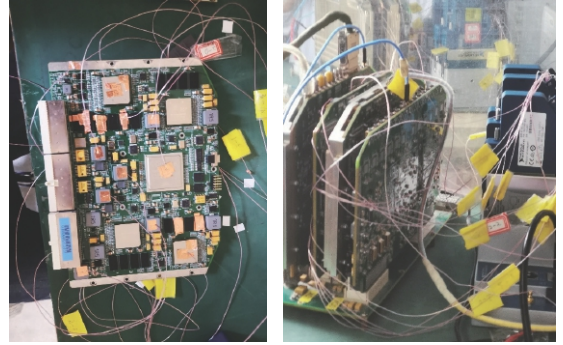
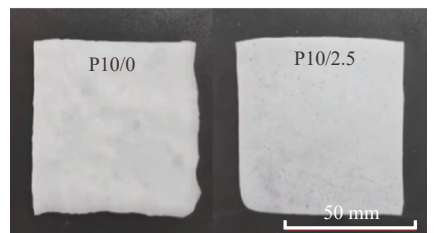


图 4 实际芯片升温曲线的测定

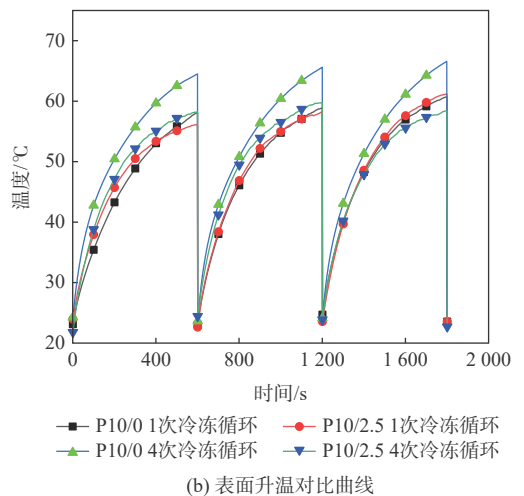
Fig. 4 Measurement of actual chip heating curve

石蜡融尽, 散热效果变差。P10/0 和 P10/2.5 在 1 600 s 均能将芯片表面温度控制在 67 °C 以下, 大大强于自然对流的散热效果, 满足芯片 85 °C 的控温要求。可以看到, 从 600 s 后, 添加 PEG 的水凝胶控温效果开始优于纯 PVA 凝胶, 在 1 600 s 时, 控温相比降低了 2.8 °C。但是, 1 次循环冷冻制备的水凝胶并未完全成型^[33], 结晶度较低, 力学性能较差。2 次冷冻循环后水凝胶才开始真正凝胶化, 而直到第 4 次循环后才能得到稳定物理交联的 PVA 水凝胶^[4,33], 实物图和散热情况如图 5 所示。

降温阶段由于条件不易控制, 故不在图中显示。随着循环冷冻次数的增加, 纯 PVA 水凝胶的



(a) 实验样品示意图



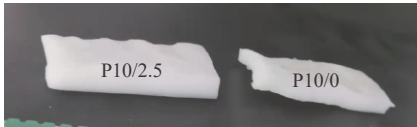
(b) 表面升温对比曲线

图 5 4 次循环冷冻的水凝胶实物图和对芯片表面的控温效果对比

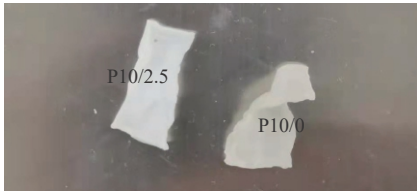
Fig. 5 Physical picture of frozen hydrogel with four cycles, and temperature control effect of these cycles on chip surface

散热能力明显下降, 而加入 PEG 后散热能力变化却不大, 相比纯 PVA 降低了 7.53% 的温度变化率。可能由于循环后纯 PVA 较 PVA/PEG 水凝胶出现较大的收缩, 如图 6(a)、图 6(b) 所示, 导致部分小孔隙坍塌, 孔隙率随之下降。含水量的差异并不会导致较大的散热差异。具体验证还需要进行孔隙率的测定。可以看出, PVA/PEG 复合水凝胶较纯 PVA 水凝胶在散热方面有一定优势, 特别在 4 次循环冷冻凝胶成型后。下文若无说明, 水凝胶均经历过 4 次循环冷冻。

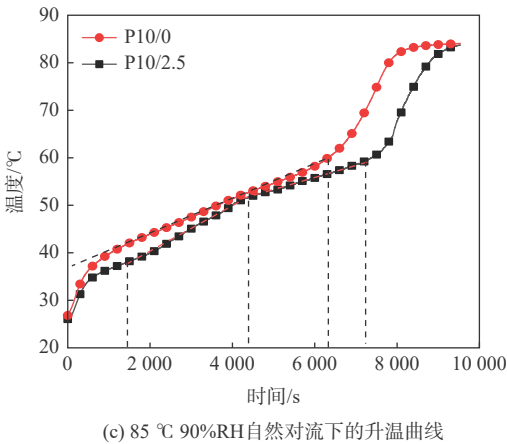
应动力学模型), 可以认为 PVA 水凝胶在脱水过程中保持相同的蒸发散热强度。之前的非线性升温则是因为环境温度是逐渐加热到 85 °C 的。而 PVA/PEG 复合水凝胶在 1 400 s 左右经历 2 段线性升温, 1 400~4 405 s 升温速率约为 0.004 6 K/s, 4 405~7 200 s 升温速率约为 0.002 7 K/s。与 Potkonjak 等的成核蒸发动力学模型^[31]相似, 但是由于脱水过程十分复杂, 涉及机理较多, 且图中升温速率变化并不大, 本文针对所有水凝胶均采用零级蒸发动力学进行计算。图 6(c) 中, P10/2.5 的温度比 P10/0 平均低 4.18 °C, 蒸发散热时间延长约 10.5%, 散热时间的提高是由于 P10/2.5 较高的含水量。随着循环冷冻的进行, 水凝胶的含水量会减小, P10/0 和 P10/2.5 的含水量分别由 93.02%、92.54% 降低至 86.36%、90.91%。PEG 的加入使这种含水量的下降趋势减小了 75.53%。而更好的控温效果则是因为有较高的平均蒸发率。实验中水凝胶与接触面绝热, 本身的显热和外界自然对流强度都保持近似相同, 因此散热效果取决于蒸发的强度。可以看到, P10/2.5 在 50 °C 时升温速率有了一个大的转折, 这个温度与 PEG6000 的熔点相近 (54~60 °C), 这时凝胶表面部分的 PEG 可能开始融化, 由于 PVA 主链的约束, 并未有溶液流出, 凝胶内部组分的相转变可能对蒸发强度产生了影响。但进一步验证还需要热重分析等技术的支持。



(a) 实验前水凝胶实物图



(b) 实验后水凝胶实物图



(c) 85 °C 90%RH 自然对流下的升温曲线

图 6 高温自然对流散热的实验样品图与对应升温曲线

Fig. 6 Experimental sample diagram and corresponding heating curves of high temperature natural convection heat dissipation

为了避免电源不稳定和接触热阻的影响, 将相同质量和相近表面积 PVA 和 PVA/PEG 水凝胶 (质量均为 2.2 g) 固定在环境温度 85 °C、90%RH 的高温箱中进行升温实验, 结果如图 6 所示。

实物图 (见图 6(a)、图 6(b)) 中可以更明显的看出, 纯 PVA 水凝胶冷冻循环后产生了肉眼可见的收缩, 脱水后的扭转也十分明显, 而 PVA/PEG 复合水凝胶形态保持能力更为优异。从升温图 (见图 6(c)) 中可以看出, 纯 PVA 水凝胶在 1 100~6 400 s 左右时升温曲线近乎直线, 升温速率约为 0.003 8 K/s, 符合等温条件下零级蒸发动力学模型 (即零级化学反

2.2 PVA/PEG 复合水凝胶蒸发散热强度分析

选取便于控制厚度的 P5/2.5, 研究了热流密度、水凝胶厚度和环境湿度对 PVA/PEG 复合水凝胶散热强度的影响。其中, 热流密度和水凝胶厚度的影响结果如表 2 所示。

可以看出, 随着热流的增加, h_e 和水凝胶散热占比总体上是增加的。在低热流密度时, 水凝胶升温差距并不显著, 由 760 W/m² 升至 2 000 W/m² 时, h_e 提高了 15.28%。水凝胶的散热贡献率也比较相

表 2 不同参数下 PVA/PEG 复合水凝胶的蒸发换热系数及水凝胶的散热贡献率

Table 2 Evaporation heat transfer coefficient of PVA/PEG composite hydrogel with different parameters, and contribution of hydrogel to heat dissipation

热流密度/ (W·m ⁻²)	水凝胶 厚度/mm	蒸发换热 系数 h_e /(W·(m ² ·K) ⁻¹)	$\frac{q_{sens} + q_{evap}}{q}/\%$
760	3	21.60	52.39
1 280	3	25.57	50.85
2 000	3	24.90	48.82
2 712	3	30.21	58.32
3 640	3	42.29	65.28
2 712	2	43.01	62.30
2 712	8	31.06	63.04

近。可以看出,水凝胶的工作温度是决定其散热能力的重要因素,与文献[9]中PNIPAM的响应机理也许有相似的地方。相同热流下,水凝胶厚度增加,蒸发强度大致减小,而从3 mm增加到8 mm, h_c 相差仅 $0.85 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,但在开始加热的600 s内,水蒸气的蒸发量减少了约2/3。这是由于8 mm水凝胶升温测定时间并不足够充分(1000 s以内),表面升温未达到最高值,显热占据了较大部分的散热量,而且传热传质过程复杂,容易受测量误差的影响,等效的蒸发换热系数和水凝胶散热占比并未有较大的变化。如果进一步探究,可以参考文献[31]的蒸发模型,并对不同工作时间进行探究。图7为不同湿度下复合水凝胶的升温曲线。

环境温度 20°C , 湿度从40%RH上升到70%RH, 芯片表面控温上升了 1.3°C , 可以看出增大湿度会一定程度上降低蒸发的强度,但并不会完全降低到零,即高湿度环境下,水凝胶仍有一定的蒸发换热强度。增加实验时长可以更明显得到换热差异,并进一步量化蒸发换热系数随湿度的变化。

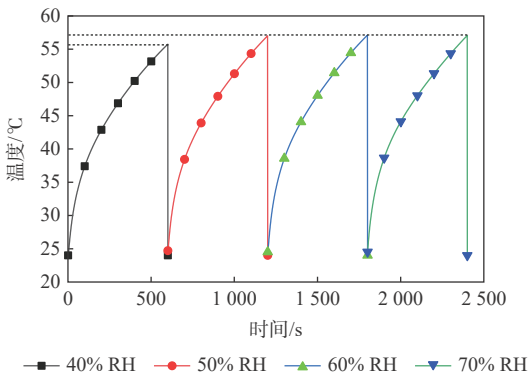


图7 不同湿度条件下的水凝胶升温曲线

Fig. 7 Hydrogel heating curves under different humidity conditions

2.3 PVA/PEG 复合水凝胶溶胀特性研究

PVA/PEG 复合水凝胶溶胀率SR随温度的变化如图8所示,选用样品为P5/2.5。图9为图8对应的部分加热升温曲线。

循环冷冻次数从1增加到4时,SR平均下降了约53.63%,水凝胶吸水膨胀的能力减弱,这是因为循环次数增加,水凝胶的结构更加紧密,机械性能上升的同时,膨胀吸水能力也随之下降。1次冷冻循环后的PVA/PEG复合水凝胶有明显的溶胀变化,温度由 3°C 升至 65°C 时,SR下降了38.14%,这表明水凝胶具备一定的温度敏感性,而经历4次冷冻循环的水凝胶,SR仅下降了17.70%,相较更加稳定。经历4 h的连续加热实验和后续120 d的常温去离子水浸没密闭储存后,SR平均升高了6.63%,

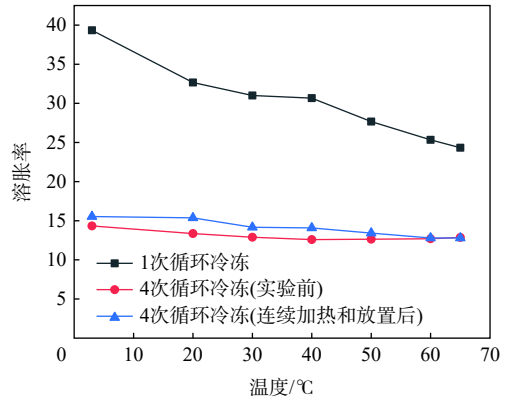


图8 水凝胶溶胀率随循环次数和温度的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of hydrogel swelling ratio with cycle numbers and temperature

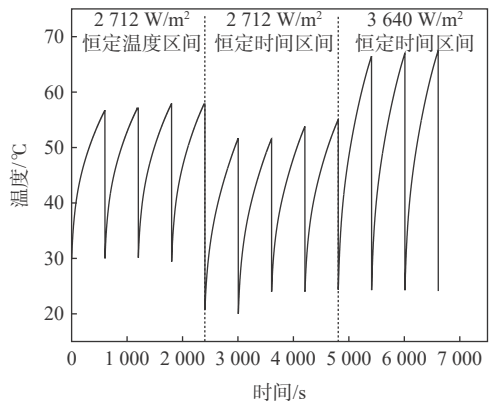


图9 不同条件下水凝胶的连续升温曲线

Fig. 9 Continuous heating curves of hydrogel under different conditions

可以认为材料短时使用与储存具备一定的可靠性。制备水凝胶的温度敏感相较接枝法^[24]和PNIPAM水凝胶^[22]要弱,而且没有明显的SR骤变点,可能是由于物理制备方法中PEG的含量较低。但此复合水凝胶与温敏水凝胶的散热效果^[9]相当,有可能是PEG致孔后的PVA凝胶能更容易地传递水分和热量,而温敏水凝胶在加热过程中,表面因为收缩而变得紧密,加大了传热传质的阻力。

3 结论

本文中通过实验证明了PVA/PEG复合水凝胶作为热沉的可行性和散热效果。通过对比纯PVA水凝胶,发现:

1) PEG致孔剂在增加凝胶孔隙率的同时也增强了散热效果,并能减小PVA水凝胶在循环冷冻过程中和加热过程中的形变。4次冷冻循环后使含水量的衰减降低了75.53%,被控芯片表面温度下降7.53%。

2) 高热流和小厚度水凝胶更利于换热,热流

从 760 W/m^2 增加到 $3\,640 \text{ W/m}^2$ 时,蒸发换热系数由 $21.6 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 增加到 $42.29 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。控温 $1\,000 \text{ s}$ 内,厚度由 8 mm 下降至 2 mm ,蒸发换热系数由 $31.06 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 增加到 $43.01 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。控温 600 s 内,湿度由 $40\% \text{ RH}$ 增加到 $70\% \text{ RH}$,芯片表面温度上升 $1.3 \text{ }^\circ\text{C}$,控温效果略有下降。

3) 制备的复合水凝胶有一定的温度敏感性,但并不显著,溶胀温度由 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $65 \text{ }^\circ\text{C}$,1次循环和4次循环水凝胶的溶胀率分别下降 53.63% 和 17.70% 。

4) 在 4 h 的连续加热和 120 d 的储存后,复合水凝胶溶胀率升高 6.63% ,短时储存和使用具有一定可靠性。

参考文献 (References)

- [1] 唐广笛,张天昊,章桐.面向大功率芯片散热的电动汽车电机控制器结构优化[J].电机与控制应用,2020,47(10):80-84.
TANG G D, ZHANG T H, ZHANG T. Structural optimization of motor controller in electric vehicle aiming at high-power chips cooling[J]. Electric Machines and Control Application, 2020, 47(10): 80-84(in Chinese).
- [2] 侯煦,邢玉明,郝兆龙,等.高碳醇/膨胀石墨复合相变热沉多目标优化研究[J].北京航空航天大学学报,2021,47(9):1866-1873.
HOU X, XING Y M, HAO Z L, et al. Multi-objective geometric optimization of a high alcohol/expanded graphite composite PCM based heat sink[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1866-1873 (in Chinese).
- [3] 孙潇.用于芯片散热的蒸发冷却技术[D].上海:东华大学,2011:1-5.
SUN X. Evaporative cooling technology used for chip cooling[D]. Shanghai: Donghua University, 2011: 1-5 (in Chinese).
- [4] HOLLOWAY J L, LOWMAN A M, PALMESE G R. The role of crystallization and phase separation in the formation of physically cross-linked PVA hydrogels[J]. Soft Matter, 2012, 9(3): 826-833.
- [5] LEE W F, CHIU R J. Investigation of charge effects on drug release behavior for ionic thermosensitive hydrogels[J]. Materials Science and Engineering:C, 2002, 20(1/2): 161-166.
- [6] ROTZETTER A C C, SCHUMACHER C M, BUBENHOFER S B, et al. Thermoresponsive polymers: Thermoresponsive polymer induced sweating surfaces as an efficient way to passively cool buildings[J]. Advanced Materials, 2012, 24(39): 5277-5277.
- [7] HUANG Z, ZHANG X, ZHOU M, et al. Bio-inspired passive skin cooling for handheld microelectronics devices[J]. Journal of Electronic Packaging, 2012, 134(1): 014501.
- [8] CUI S, HU Y, HUANG Z, et al. Cooling performance of bio-mimic perspiration by temperature-sensitive hydrogel[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 79: 276-282.
- [9] PU S, SU J, LI L, et al. Bioinspired sweating with temperature sensitive hydrogel to passively dissipate heat from high-end wearable electronics[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 180: 747-756.
- [10] YI G B, HUANG Y W, XIONG F H, et al. Preparation and swelling behaviors of rapid responsive semi-IPN NaCMC/PNIPAm hydrogels[J]. Journal of Wuhan University of Technology Materials Science Edition, 2011, 26(6): 1073-1078.
- [11] MENG H, LI G Q. Reversible switching transitions of stimuli-responsive shape changing polymers[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(27): 7838-7865.
- [12] HUBBARD A M, CUI W, HUANG Y, et al. Hydrogel/elastomer laminates bonded via fabric interphases for stimuli-responsive actuators[J]. Matter, 2019, 1(3): 674-689.
- [13] 罗加祺.过渡金属碳/氮化物(MXene)-聚合物纳米复合材料的制备及其性能研究[D].北京:北京化工大学,2020:35-40.
LUO J Q. Preparation and properties of transition metal carbide/nitride(MXene)-polymer nanocomposites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020: 35-40 (in Chinese).
- [14] 张林,张娜,曹秋枫.PVA水凝胶制备方法研究进展[J].化工时刊,2018,32(2):29-32.
ZHANG L, ZHANG N, CAO Q F. Research progress in preparation methods of PVA hydrogels[J]. Chemical Industry Times, 2018, 32(2): 29-32(in Chinese).
- [15] 李东.聚乙烯醇水凝胶薄膜的力学性能调控及应用[D].大连:大连理工大学,2020:35-45.
LI D. Mechanical property modulation and application of poly(vinyl alcohol) hydrogel membrane[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020: 35-45(in Chinese).
- [16] PEPPAS N A, MERRILL E W. Differential scanning calorimetry of crystallized PVA hydrogels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1976, 20(6): 1457-1465.
- [17] ZAMENGO M, MORIKAWA J. Evaluation of cooling ability for a novel heat sink made of polyvinyl alcohol hydrogel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 143: 118523.
- [18] QIU M, CHEN D, SHEN C, et al. Platelet-rich plasma-loaded poly(D, L-lactide)-poly(ethylene glycol)-poly(D, L-lactide) hydrogel dressing promotes full-thickness skin wound healing in a rodent model[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(7): 1001.
- [19] CHANG C F, CHANG C Y, TSAI W T, et al. Adsorption equilibrium of polyethylene glycol in the copper electroplating solution on activated carbon[J]. Journal of Colloid and Interface, 2000, 232(1): 207-209.
- [20] 杜倩雯,陈琳,钟春燕,等.BC/PVA/PEG增强型复合水凝胶的制备及其表征[J].广东化工,2014,41(16):17-18.
DU Q W, CHEN L, ZHONG C Y, et al. Production and characterization of bacterial cellulose-poly (vinyl alcohol)-poly (ethylene glycol) enhanced nanocomposite hydrogel[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(16): 17-18(in Chinese).
- [21] 周学华.高强度多孔PVA水凝胶的制备及其性能的研究[D].北京:中国石油大学,2016:20-30.
ZHOU X H. Preparation of polyvinyl alcohol porous hydrogel with high strength and well ciprofloxacin release efficiency[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2016: 20-30 (in Chinese).
- [22] MA K X, ZHANG X Z, YANG Y Y, et al. Preparation and characterization of fast response macroporous poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels[J]. Langmuir, 2001, 17(20): 6094-6099.
- [23] 张梅,那莹,姜振华.接枝共聚法制备聚乙二醇(PEG)/聚乙烯醇(PVA)高分子固-固相变材料性能研究[J].高等学校化学学报,2005,26(1):181-185.
ZHANG M, NA Y, JIANG Z H. Preparation and properties of polymeric solid-solid phase change materials of polyethylene glycol(PEG)/poly(vinyl alcohol)(PVA) copolymers by graft copolymerization[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2005,

- 26(1): 181-185(in Chinese).
- [24] 孙大辉, 崔艳, 疏官胜, 等. 聚乙二醇(PEG)/聚乙烯醇(PVA)温敏水凝胶的制备及温敏特性研究[C]//2009年全国功能材料科技与产业高层论坛, 2009: 355-358.
- SUN D H, CUI Y, SHU G S, et al. Study on preparation and sensitive properties of polyethylene glycol (PEG)/polyvinyl alcohol (PVA) thermo-sensitive hydrogel[C]//Proceedings of 2009 China Functional Materials Technology and Industry Forum, 2009: 355-358 (in Chinese).
- [25] 徐天宇. 聚乙烯醇/聚乙二醇新型温敏水凝胶的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 15-30.
- XU T Y. Study on preparation and sensitive properties of polyethylene glycol (PEG)/polyvinyl alcohol (PVA) thermo-sensitive hydrogel[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 15-30 (in Chinese).
- [26] PEPPAS N A, MERRILL E W. Crosslinked poly(vinyl alcohol) hydrogels as swollen elastic networks[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1977, 21(7): 1763-1770.
- [27] MORI Y, TOKURA H, YOSHIKAWA M. Properties of hydrogels synthesized by freezing and thawing aqueous polyvinyl alcohol solutions and their applications[J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32(2): 491-496.
- [28] KOSKI A, YIM K, SHIVKUMAR S. Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning[J]. *Materials Letters*, 2004, 58(3-4): 493-497.
- [29] AGU D L J D, BADANO J M, RINTOUL I. Kinetics and thermodynamics of swelling and dissolution of PVA gels obtained by freeze-thaw technique[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 216: 14-16.
- [30] SIROUSAZAR M, YARI M. Dehydration kinetics of polyvinyl alcohol hydrogel wound dressings during wound healing process[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2010, 28(4): 121-128.
- [31] POTKONJAK B, JOVANOVIĆ J, STANKOVIĆ B, et al. Comparative analyses on isothermal kinetics of water evaporation and hydrogel dehydration by a novel nucleation kinetics model[J]. *Chemical Engineering Research & Design Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 2015, 100: 323-330.
- [32] THEODORE L, BERGMAN L, ADRIENNE S, et al. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. 7th ed. Hoboken: Wiley Press, 2011: 594-625.
- [33] MACHIDA Y, KUROKI S, KANEKIYO M, et al. A structural study of water in a poly(vinyl alcohol) gel by 17O NMR spectroscopy[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2000, 554(1): 81-90.

Performance of a novel polyvinyl alcohol/polyethylene glycol hydrogel for heat sink

YIN Jianbao, XING Yuming, HAO Zhaolong*, WANG Shisong, WANG Zixian, HOU Xu

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

Abstract: To study the feasibility and potential of hydrogels for thermal management, a novel polyvinyl alcohol (PVA) /polyethylene glycol (PEG) composite hydrogel heat sink with good mechanics and economy was prepared by freezing-thaw method. The size of the sink is 60 mm×60 mm×2 mm, and self-cooling is realized by water evaporation on the surface. A heat dissipation experiment was carried out with a heat flow of 2 712 W/m², and the heating characteristics, the relationship of the evaporative convection intensity change and the swelling change law were obtained. It was found that the addition of 2.5% PEG reduced the preparation deformation caused by the increase in the number of freezing cycles, with the water content attenuation being decreased by 75.53%, and the chip surface temperature 7.53%. Based on the experimental results, the evaporation heat transfer coefficient was calculated, and the effects of heat flow, thickness, and humidity on evaporative heat dissipation were studied. The swelling rates of the hydrogel with different temperatures and usage conditions (4 h continuous use and 120-day storage at room temperature) were then measured, showing that the hydrogel has a certain short-term reliability in spite of the insignificant sensitive response to temperature.

Keywords: polyvinyl alcohol hydrogel; heat sink; evaporative cooling; thermal management; electronic device

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0182

无人机自主引导跟踪与避障的近端策略优化

胡多修¹, 董文瀚^{2,*}, 解武杰²

(1. 空军工程大学 研究生院, 西安 710038; 2. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对无人机地面动态目标跟踪问题, 建立了远距离自主引导与近距离伴飞避障 2 个阶段的马尔可夫决策过程模型。在此基础上, 提出了一种改进的近端策略优化 (PPO) 算法。考虑到无人机接收到的数据具有时序性且环境状态存在上下文关联, 所提算法采用长短期记忆 (LSTM) 网络, 通过无人机与目标的实时位置关系等状态信息来计算奖励值, 更新网络参数, 并进行自适应优化迭代。通过基于 ROS 系统的仿真测试平台进行试验, 结果表明: 所提算法安全有效地实现了侦察任务全过程的自主机动, 与传统的 PPO 算法相比, LSTM 的引入缩短了模型训练时间, 跟踪与避障的效率明显提高, 进一步加强了算法的鲁棒性、准确性和实时性。

关键词: 多旋翼无人机; 自主引导; 马尔可夫决策过程; 近端策略优化; 长短期记忆

中图分类号: TP181

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0195-11

多旋翼无人机具有结构简单、机动性强、安全性高等特点, 使其成为计算机技术、智能控制技术、微机电系统传感器技术等多学科领域融合研究的理想平台。近年来, 随着计算机视觉和人工智能技术的逐步成熟, 基于多旋翼无人机的地面动目标跟踪成为了研究热点^[1-2]。无人机自主化、智能化的任务处理能力是完成上述研究的关键技术, 也是当今无人机的发展趋势^[3]。

传统无人机飞行引导控制方法, 如 PID 控制、滑模控制、模型预测控制和自适应控制等, 根据控制理论设计轨迹跟踪控制器, 通过对应飞航迹的跟踪, 达到引导无人机飞行的目的。这类控制器通常针对静态目标或者已知航迹的飞行任务。对于未知运动规律的对地侦察任务机动策略的设计方法, 目前主要分为基于对策的决策算法 (如矩阵对策法^[4]、影响图法^[5]) 和基于人工智能的决策算法 (如遗传算法^[6]、深度学习算法^[7] 等)。尤其是深度学习在物体分类、物体检测等任务中表现出了非常优异的性能, 因而得到广泛应用^[8-11]。然而上述算法也在一定程度上存在着局限性, 如矩阵对策法的算法计算量大、结果精度低, 响应图法建模过程复杂、求

解计算量大。智能算法虽然无需复杂的建模过程, 但遗传算法容易陷入局部最优, 且算法复杂度高, 难以满足无人机自主决策的实时性要求, 深度学习需要已知的飞行数据及投入较高的时间成本。

强化学习是机器学习的一条分支, 其本质是智能体感知环境, 同时利用评价性的环境反馈信号来优化所采取的行为策略^[12]。优化方法主要分为基于值函数的方法和基于策略的方法。基于值函数的方法适用于离散动作空间, 策略改进时, 需要针对每个状态行为对求取行为值函数, 以便求取最优解, 但在无人机机动这类状态空间很大的连续动作集问题中, 基于值函数的方法无法有效求解了。研究者们提出了基于策略的解决方案, 其中, 近端策略优化 (proximal policy optimization, PPO) 算法有效解决了传统策略梯度算法中学习步长难以确定的问题, 并在连续状态空间上得到了应用^[13-15]。

在指定的任务空间内, 对于静态目标而言, 实际上解决的是无人机定点引导问题。文献 [16] 采用视觉引导的方法, 提出一种轻量高效的 Onboard-YOLO 算法, 实现了无人机的实时精准降落, 但未考虑动态靶标的降落问题; 文献 [17] 利用深度确定

收稿日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-06-06; 网络出版时间: 2021-06-15 15:16

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210615.1352.005.html

* 通信作者. E-mail: dongwenhan@sina.com

引用格式: 胡多修, 董文瀚, 解武杰. 无人机自主引导跟踪与避障的近端策略优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 195-205.

HU D X, DONG W H, XIE W J. Proximal policy optimization for UAV autonomous guidance, tracking and obstacle avoidance [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 195-205 (in Chinese).

性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)算法实现了无人机对动态目标的持续跟踪,但缺乏无人机高度变化时的机动策略,并且没有提出对突发情况^[18-19](禁飞区、障碍物等)的解决方案。

本文基于深度强化理论,提出无人机自主引导与跟踪避障的机动控制方法。首先,基于马尔可夫决策过程(Markov decision process, MDP)理论设计自主引导模型与伴飞避障模型;然后,针对上述模型设计相对应的PPO网络结构;最后,通过基于ROS、GAZEBO、PX4的3D仿真试验平台进行验证^[20-22]。经过试验分析,本文提出的设计方法具有很高的合理性,有效实现了侦察任务全过程的自主机动。

1 问题描述

无人机在跟踪地面目标时,初始距离难以掌控,往往需要远距离自主引导和近距离伴飞跟踪2个阶段共同完成整个侦察任务。

1.1 远距离自主引导过程

第 n 周期内,无人机的空间位置记为 $\mathbf{P}_n^{\text{UAV}}$,水平线速度记为 $\mathbf{V}_n^{\text{UAV}h}$,垂直线速度记为 $\mathbf{V}_n^{\text{UAV}v}$,无人机在目标所在平面的投影位置记为 $\mathbf{P}_n^{\text{UAV}'}$,速度记为 $\mathbf{V}_n^{\text{UAV}'h}$,目标空间位置记为 $\mathbf{P}_n^{\text{TAG}}$,速度记为 $\mathbf{V}_n^{\text{TAG}}$, $\mathbf{V}_n^{\text{UAV}'h}$ 相对于 $\mathbf{P}_n^{\text{UAV}'}$ 的方位角记为 β_n ,目标相对于 $\mathbf{P}_n^{\text{UAV}'}$ 的方位角记为 α_n ,无人机与目标的相对位置在竖直方向的夹角记为 θ_n , θ_n 取值范围为 $[0^\circ, 90^\circ)$,无人机的相对高度记为 H_n^{UAV} ,无人机与目标的相对距离记为 $L_n^{\text{U-T}}$, α_n 、 β_n 及 θ_n 由无人机和目标的实时位置计算得到。

假设侦察任务开始时刻为 t_0 ,以 t_0 时刻无人机在目标所在平面上的投影点 $\mathbf{P}_n^{\text{UAV}'}$ 为坐标原点,采用北-东-天坐标系。无人机与目标的空间相对位置关系如图1所示。这一阶段主要考察的是如何控制无人机的速度方向,以减小二者之间的相对距离。

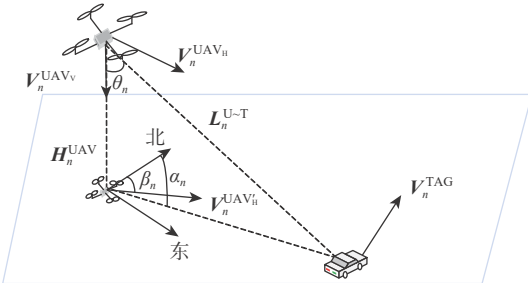


图1 无人机与目标的空间位置关系

Fig. 1 Relative position of UAV and its target

1.2 近距离伴飞避障过程

当无人机与目标的相对位置关系达到阈值时,侦察任务进入伴飞避障阶段。假设禁飞区 O_{nfz} 的空间位置为 \mathbf{P}^{nfz} ,最大距离为 D_{nfz} ,最小安全距离为 d_{nfz} 。为了简化模型,采用禁飞区外截圆模型代替本身的不规则区域,并设置大小可调的安全距离

d_{nfz} 以确保无人机的飞行安全。此时,需要调整无人机的速度,使其在竖直方向上的速度 $\mathbf{V}_n^{\text{UAV}v}$ 为零,水平速度 $\mathbf{V}_n^{\text{UAV}h} \rightarrow \mathbf{V}_n^{\text{TAG}}$,并在无人机所在平面内指定跟踪点 $\mathbf{P}_{\text{th}}^{\text{UAV}}$ 。在第 n 周期内,无人机与禁飞区的相对距离为 $\mathbf{P}_n^{\text{nfz}}$,无人机与目标跟踪点的相对位置变化值为 $\Delta \mathbf{P}_n^{\text{TAG}}$,其中:

$$\Delta \mathbf{V}_{n+1} \triangleq \left| \left| \mathbf{V}_{n+1}^{\text{UAV}h} - \mathbf{V}_{n+1}^{\text{TAG}} \right| - \left| \mathbf{V}_n^{\text{UAV}h} - \mathbf{V}_n^{\text{TAG}} \right| \right| \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{P}_{n+1}^{\text{TAG}} \triangleq \left| \left| \mathbf{P}_{n+1}^{\text{UAV}} - \mathbf{P}_{n+1}^{\text{TAG}} \right| - \left| \mathbf{P}_n^{\text{UAV}} - \mathbf{P}_n^{\text{TAG}} \right| \right| \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_n^{\text{nfz}} \triangleq \left| \mathbf{P}_n^{\text{UAV}} - \mathbf{P}^{\text{nfz}} \right| \quad (3)$$

无人机、目标及障碍物的相对位置关系如图2所示。这一阶段的环境复杂度相对较高,考虑无人机如何在定高空域快速接近目标的同时,更要兼顾禁飞区、障碍物等诸多不利因素对侦察任务造成的威胁,通过设计合理的机动策略,可以实现规避障碍、持续跟踪的目的。

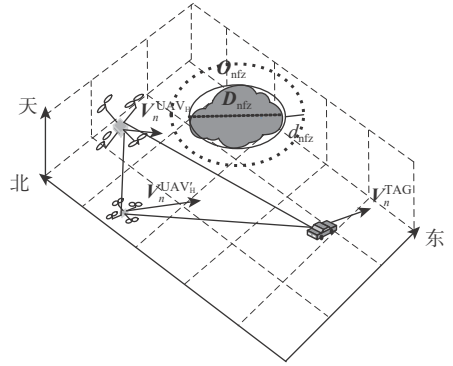


图2 障碍物、目标与无人机的空间位置关系

Fig. 2 Relative position of obstacle, target and UAV

2 地面目标跟踪系统建模

2.1 马尔可夫决策过程模型

MDP是研究离散时间动态系统状态空间的重要方法,该过程针对具有马尔可夫性的随机过程序贯地作出决策。本文将无人机对地面动态目标的侦察任务在时间上进行离散化处理(周期为 N),并利用MDP进行分段建模。MDP可以由五元组 (S, A, R, P, γ) 进行描述,其中, S 为状态空间, A 为动作空间, R 为奖励, P 为状态转移概率, γ 为衰减系数,在区间 $[0, 1]$ 上取值。在第 n 个周期内,状态 $s \in S$ 记作 S_n ,无人机控制信号 $a \in A$ 记作 A_n ,无人机机动所对应的奖励 R 记作 $R_{n+1}(S_n, A_n)$,无人机在状态 s 下采取动作 a 后,环境状态转移为 s' 的概率 P 记作 $P_{s's}^a$ 。图3为MDP的运行流程。环境的初始状态为 S_0 ,决策者从可用动作集合选择并执行动作 A_0 ,环境在 A_0 的作用下,以一定的状态转移概率 $P_{S_0 S_1}^{A_0}$ 转换至新的状态 S_1 ,并获得奖励 $R_1(S_0, A_0)$,依此反复进行,产生一系列动作状态对 $(S_0, A_0, R_1, S_1, A_1, R_2, \dots)$ 。

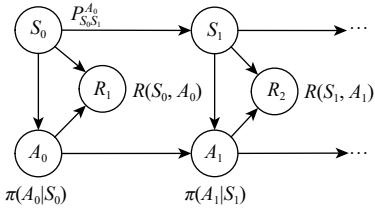


图3 马尔可夫决策过程模型描述

Fig. 3 Description of Markov decision process model

策略 π (无人机在状态 $s \in S$ 下进行动作 $a \in A$ 的概率)记作 $\pi(a|s)$ 。定义 $\eta(\pi)$ 为上述序列的回报, $Q_\pi(S_n, A_n)$ 表示在状态 S_n 下采用动作 A_n 的期望累积回报, $V_\pi(S_n)$ 表示状态 S_n 的价值,同时为了描述动作的优劣,定义优势函数 $A_\pi(S, A)$,计算公式如下:

$$\eta(\pi) = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma^n E_\pi^s [R_{n+1}(S_n, A_n)] \quad (4)$$

$$Q_\pi(S_n, A_n) = E_{\substack{S_{n+1} \\ \dots \\ A_{n+1}}} \left[\sum_{l=0}^{\infty} \gamma^l R_{n+l+1}(S_{n+l}, A_{n+l}) \right] \quad (5)$$

$$V_\pi(S_n) = E_{\substack{A_n \\ S_{n+1} \\ \dots}} \left[\sum_{l=0}^{\infty} \gamma^l R_{n+l+1}(S_{n+l}, A_{n+l}) \right] \quad (6)$$

$$A_\pi(S, A) = Q_\pi(S, A) - V_\pi(S) \quad (7)$$

式中: l 为转移步数,且

$$A_n \sim \pi(A_n|S_n), S_{n+1} \sim P_{S_n S_{n+1}}^{A_n} \quad (8)$$

2.2 基于位置和速度信息的无人机机动模型

2.2.1 自主引导模型

假设无人机以最大水平线速度(大小为 $V_{\max}^{\text{UAV}_h}$)接近目标,本文依据 α_n 、 β_n 及 θ_n 进行建模。MDP中的状态空间 S 、动作空间 A 及奖励 R 的设置如下:

$$S = \{L_n, \sigma_n, \dot{\sigma}_n, \tau_n\} \quad (9)$$

$$A = \{w_n^{\text{UAV}}, v_n^{\text{UAV}_v}\} \quad (10)$$

$$R_{n+1} = c_L r_{n+1}^L + c_\sigma r_{n+1}^\sigma + c_{\dot{\sigma}} r_{n+1}^{\dot{\sigma}} + c_\tau r_{n+1}^\tau \quad (11)$$

状态空间内, L_n 为 $L_n^{\text{U-T}}$ 与任务要求的阈值距离 $L_{\text{th}}^{\text{U-T}}$ 的差值,理论上,当自主引导过程完成时, L_n 的值为零,而在实际的引导过程中,地面目标运动的随机性使得 L_n 的实际值与理论值之间的误差客观存在且难以消除,无人机需要实时调整机动策略以快速减小这一误差对引导任务造成的影响。 σ_n 为 α_n 和 β_n 差值的绝对值,用以控制无人机引导过程的水平机动,假设地面目标静止,无人机获得目标位置后,朝着目标点位飞行,此时 σ_n 为零,当目标状态发生变化时, σ_n 变大,无人机需要朝着减小 σ_n 的方向及时调整偏航角,从而达到实时跟踪的目的。 $\dot{\sigma}_n$ 为 σ_n 的导数,表示无人机相对于自身与目标相对位置的角速度,可以通过计算 σ_n 的差分得到,也可以由飞控系统对无人机位姿解算得到。 τ_n 为 θ_n 的余弦值,用以控制无人机引导过程的垂直机动,设定不同的 θ_n 初值,可以使无人机以不同姿态接近目

标,有利于实现多场景的侦察任务。动作空间内, w_n^{UAV} 为无人机的偏航角速度,用以调整无人机的水平速度方向,使无人机在平面内接近目标, $v_n^{\text{UAV}_v}$ 用于引导无人机在竖直方向接近目标,其中:

$$L_n = L_n^{\text{U-T}} - L_{\text{th}}^{\text{U-T}} \quad (12)$$

$$\sigma_n = |\alpha_n - \beta_n| \quad (13)$$

$$\tau_n = \cos \theta_n \quad (14)$$

式(11)中, c_L 、 c_σ 、 $c_{\dot{\sigma}}$ 、 c_τ 为权重系数,用以调整局部奖励对全局奖励的贡献值比重,并且 c_σ 、 c_L 应远大于 $c_{\dot{\sigma}}$ 、 c_τ 以确保奖励函数朝着最优策略方向平稳的收敛。 r_{n+1}^σ 、 r_{n+1}^τ 、 $r_{n+1}^{\dot{\sigma}}$ 、 r_{n+1}^L 为局部奖励,按照如下方法定义:

$$r_{n+1}^L = -\left(\frac{L_n}{1+L_n}\right)^2 \quad (15)$$

$$r_{n+1}^\sigma = -\sigma_n^2 \quad (16)$$

$$r_{n+1}^{\dot{\sigma}} = -\dot{\sigma}_n^2 \quad (17)$$

$$r_{n+1}^\tau = -(\tau_n - \tau_0)^2 \quad (18)$$

式中: τ_0 为 t_0 时刻 θ_0 的余弦值。

在侦察任务的第一阶段,无人机根据当前环境状态反馈,输出速度控制信号,改变当前偏航角速度 w_n^{UAV} 及垂直速度 $v_n^{\text{UAV}_v}$,朝着目标方向迅速移动。当达到阈值(无人机相对高度为 $H_{\text{th}}^{\text{UAV}}$,无人机与目标的相对距离不大于 $L_{\text{th}}^{\text{U-T}}$)时,无人机自主引导过程结束,进入伴飞避障阶段。

2.2.2 伴飞避障模型

第一阶段结束后,无人机达到理想跟踪位置,此时,将 $|\mathbf{P}_n^{\text{TAG}} - \mathbf{P}_n^{\text{UAV}}|$ 控制在理想范围并使 $\mathbf{V}_n^{\text{UAV}} \rightarrow \mathbf{V}_n^{\text{TAG}}$,同时兼顾飞行过程中可能出现的障碍物,将 $|\mathbf{P}_n^{\text{nfz}} - \mathbf{P}_n^{\text{UAV}}|$ 控制在安全裕度以内。本文将无人机的输出速度控制信号 u_n^{UAV} 沿坐标轴分解以模拟目标运动,实现伴飞避障目的。其中, u_n^{UAV} 记为

$$u_n^{\text{UAV}} = (u_{nx}^{\text{UAV}}, u_{ny}^{\text{UAV}}) \quad (19)$$

MDP中的状态空间 S 、动作空间 A 及奖励 R 的设置如下:

$$S = \{\mathbf{P}_n^{\text{TAG}} - \mathbf{P}_n^{\text{UAV}}, \mathbf{P}_n^{\text{nfz}} - \mathbf{P}_n^{\text{UAV}}, \mathbf{V}_n^{\text{TAG}} - \mathbf{V}_n^{\text{UAV}}\} \quad (20)$$

$$A = \{u_{nx}^{\text{UAV}}, u_{ny}^{\text{UAV}}\} \quad (21)$$

$$R_{n+1} = l_v r_{n+1}^v + l_\tau r_{n+1}^\tau + l_z r_{n+1}^z \quad (22)$$

式中: l_v 、 l_τ 、 l_z 为权重系数,用以调整局部奖励对全局奖励的贡献值比重, l_z 应远大于 l_v 、 l_τ 以确保奖励函数朝着较优策略方向平稳地收敛; r_{n+1}^v 、 r_{n+1}^τ 、 r_{n+1}^z 为局部奖励,按照如下方法定义:

$$r_{n+1}^v = -\frac{\Delta V_{n+1}}{1 + \Delta V_{n+1}} \quad (23)$$

$$r_{n+1}^\tau = -\frac{\Delta P_{n+1}^{\text{TAG}}}{1 + \Delta P_{n+1}^{\text{TAG}}} \quad (24)$$

$$J_{n+1}^z = -\frac{D_{\text{nfz}} + d_{\text{nfz}}}{2} + d_{\text{nfz}} \quad (25)$$

无人机最大化奖励函数以寻求最优的机动策略,本节中的全局奖励 R_{n+1} 由多个局部奖励构成,不同的权重参数设置对跟踪效果有着很大的影响,尤其当 l_z 设置不合理时,将会直接造成无人机闯入禁飞区,导致侦察任务失败。

2.3 地面目标随机运动模型

文献[17]中提出的地面目标马尔可夫随机运动模型体现了实际侦察任务中目标运动规律的复杂性。假设随机运动目标作速率为 V^{TAG} 、方向随机变化的匀速率运动。当周期 N 足够小时,可近似为目标在每个周期内作匀速直线运动(为便于研究,忽略因地面起伏而引起的目标高度变化)。对目标在第 n 周期内的位置 $\mathbf{P}_n^{\text{TAG}}$ 矢量分解,得到 $\mathbf{P}_n^{\text{TAG}} = (X_n^{\text{TAG}}, Y_n^{\text{TAG}}, 0)$,方位角记为 δ_n ,设 t_0 时刻的位置为 $(X_0^{\text{TAG}}, Y_0^{\text{TAG}}, 0)$,方位角 δ_0 随机,则任意周期内目标的位置计算如下:

$$\begin{cases} X_n^{\text{TAG}} = X_0^{\text{TAG}} + NV^{\text{TAG}} \sum_{k=0}^N \sin \alpha_k \\ Y_n^{\text{TAG}} = Y_0^{\text{TAG}} + NV^{\text{TAG}} \sum_{k=0}^N \cos \alpha_k \end{cases} \quad (26)$$

式中: α_k 为地面目标的速度方向与正北的顺时针夹角。

目标运动方向具有马尔可夫性,即在 $n+1$ 周期的方位角 δ_{n+1} 仅取决于 n 周期的方位角 δ_n ,对应的一步状态转移概率如下:

$$\begin{cases} P(\delta_{n+1} \neq \delta_n | \delta_n) = p_\delta \\ P(\delta_{n+1} = \delta_n | \delta_n) = 1 - p_\delta \end{cases} \quad (27)$$

式中: $p_\delta \in [0, 1)$ 为目标速度方向发生变化的概率,表征目标方向随机变化的强度。当 $\delta_{n+1} \neq \delta_n$ 时,目标在 $n+1$ 周期的 δ_{n+1} 服从截尾正态分布 $f_{\delta_{n+1}}(x)$:

$$f_{\delta_{n+1}}(x) = \begin{cases} g(x) & 0 \leq g(x) \leq 2\pi \\ g(x) + 2\pi & g(x) < 0 \\ g(x) - 2\pi & g(x) > 2\pi \end{cases} \quad (28)$$

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} \exp\left[-\frac{(x - \delta_n)^2}{2\sigma_\delta^2}\right] \quad (29)$$

式中: $\sigma_\alpha > 0$ 用于表征目标速度方向变化的幅; I_α 为概率归一化常量,计算公式如下:

$$I_\alpha = \int_{\delta_n - \omega_{\text{max}}^{\text{TAG}}}^{\delta_n + \omega_{\text{max}}^{\text{TAG}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} \exp\left[-\frac{(x - \delta_n)^2}{2\sigma_\delta^2}\right] dx \quad (30)$$

其中: $\omega_{\text{max}}^{\text{TAG}}$ 为目标运动的最大角速度。

3 无人机目标跟踪方法

针对无人机自主侦察任务2个阶段不同的任务需求,设置相互独立的子任务环境并进行单独训练,完整的方法流程如图4所示。

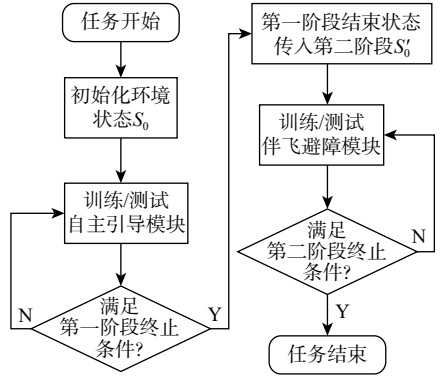


图4 自主引导与伴飞避障流程

Fig. 4 Flowchart for autonomous guidance and obstacle avoidance of accompanying flight

3.1 PPO 训练框架

强化学习任务中,可以通过建立状态值函数估计,也可以直接建立策略的估计来解决一系列问题,根据估计方法的不同,强化学习方法可以分为基于值函数的方法、基于策略的方法及行动者-评论家(actor-critic, AC)方法。本文采用的PPO算法延续了置信域策略优化算法的步长选择机制^[23],借鉴了基于策略的方法的估计思想,继承了AC算法中策略与价值双网络的经验^[24],算法的基本框架如图5所示。

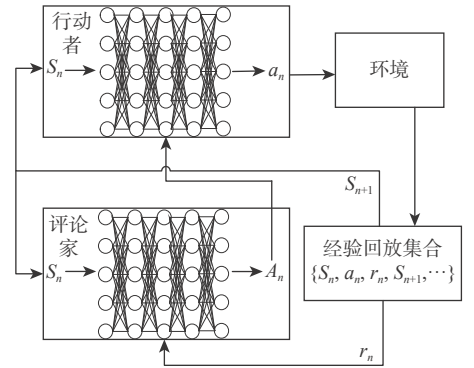


图5 PPO算法框架

Fig. 5 Structure of PPO algorithm

图5中,环境为无人机与地面目标构成的任务空间,行动者网络生成策略,评论家网络通过估计优势函数 A_n 来评估并改进当前策略,二者都是根据策略梯度进行优化,且行动者网络参数 θ_A 、评论家网络的参数 ϕ_C 的更新公式如下:

$$A_n = y_n - Q_{\phi_C}(s_n, a_n) \quad (31)$$

$$L^{\text{clip}}(\theta_A) = E_n [r_{\theta_A} A_n, \text{clip}(r_{\theta_A}, 1 - \epsilon, 1 + \epsilon) A_n] \quad (32)$$

$$L(\phi_C) = E [A_n^2] \quad (33)$$

式中:

$$y_n = r_n + \gamma Q_{\phi_C}(s_{n+1}, \pi_{\theta_A}(s_{n+1})) \quad (34)$$

$$r_{\theta_A} = \frac{\pi_{\theta_A}(a_n | s_n)}{\pi_{\theta_{\text{old}}}(a_n | s_n)} \quad (35)$$

其中: ε 为超参数。

行动者网络根据当前状态 s_n 产生控制信号 a_n , 无人机执行动作产生状态 s_{n+1} 并获得奖励 r_n , 经验回放集合将上述信息打包为一组 $\{s_n, a_n, r_n, s_{n+1}\}$ 并进行存储, 最终用于更新网络参数, 获得相对最优策略。

输入: 初始化行动者网络参数 θ_A^0 、评论家网络参数 ϕ_C^0 , 初始化记忆库容量 R 。

对于每一条轨迹, for episode = 1, ..., M : 初始化环境, 得到 S_1 ;

对于轨迹中的每一步, for $n = 1, \dots, N$: 根据策略 $a_n = \pi_{\theta_A}(S_n)$, 执行行为 a_n ; 获得回报 r_n 和下一个状态 S_{n+1} ; 将状态转换序列 (S_n, a_n, r_n, S_{n+1}) 存入记忆库中; 更新状态 $S_n = S_{n+1}$; 计算优势函数 A_n ;

每执行 L 步

通过计算策略梯度 $\nabla_{\theta_A} L^{chp}(\theta_A)$, 更新行动者网络参数 θ_A ; 通过计算策略梯度 $\nabla_{\phi_C} L(\phi_C)$, 更新评论家网络参数 ϕ_C ; 更新参数 $\theta_{Aold} = \theta_A$;

单条轨迹循环结束

M 条轨迹循环结束

输出: 最优网络参数: θ_A^* 及最优策略 π^* 。

算法中有 2 个结构相同的行动者网络, 一个生成待优化的策略 $\pi_{\theta_A}(a_n|s_n)$, 另一个 $\pi_{\theta_{Aold}}(a_n|s_n)$ 用于收集数据, 并通过重要性采样来估计新策略, 更新过程中, PPO 算法利用式 (32) 的损失函数限制了 $\pi_{\theta_A}(a_n|s_n)$ 的更新幅度, 确保新旧策略的偏离程度不会太大。

3.2 网络结构及参数

3.2.1 LSTM 循环神经网络结构

长短期记忆 (long short-term memory, LSTM) 网络应用于输入数据是序列模式且具有依赖性时的场景^[25-26], 在目标跟踪任务中, 无人机接收到的数据具有时序性且环境状态存在上下文关联, 使得 LSTM 网络能够很好地满足任务需求^[27]。将 LSTM 与深度强化学习算法相结合并应用于无人机侦察任务, 其本质就是将目标运动轨迹等状态信息作为输入, 当前时刻无人机对应的机动控制信号作为输出, 计算奖励值, 更新网络参数, 并通过自适应优化算法反复迭代得到最终模型。

LSTM 框架^[28] 的循环单元由 4 部分组成: 遗忘门 f 、输入门 i 、输出门 o 及记忆单元 C 。图 6 展示了 LSTM 中每一个单元的计算细节。

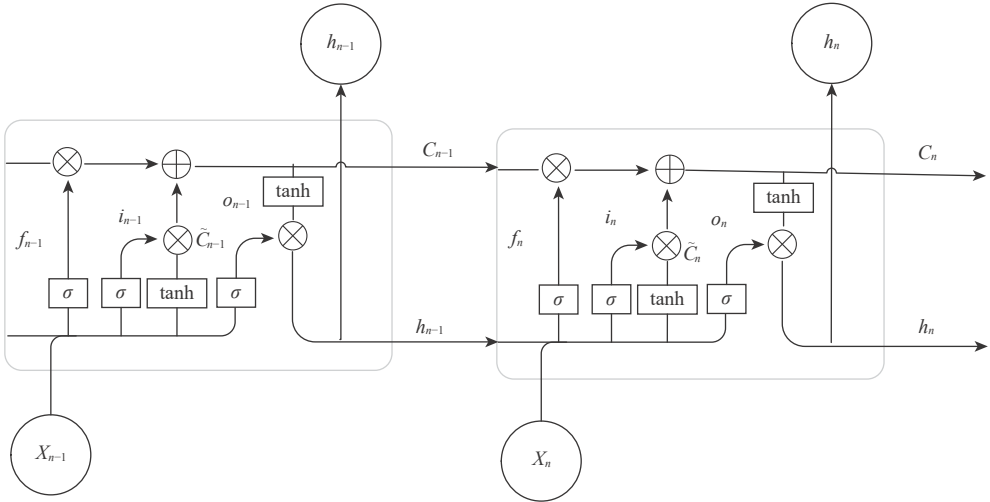


图 6 LSTM 结构示意图

Fig. 6 Schematic of LSTM structure

3.2.2 LSTM 循环神经网络参数设置

1) 数据归一化处理。为了减小因输入的特征数据间数量级差别较大引起的模型误差, 并使不同维度的特征在数值上有一定的比较性, 需要对输入的特征参数作归一化处理。针对无人机目标跟踪的 2 个阶段, 采用转换函数将原始特征数据转换成取值范围在 $[0, 1]$ 之间的数据。其中, 对自主引导模型的行动者网络输入层参数进行非线性变换, 利用 $\sin(\cdot)$ 、 $\cos(\cdot)$ 函数将 σ_n 进行分解, 利用 $\tanh(\cdot)$ 函数限定参数 σ_n 、 L_n , 参数 τ_n 不变。伴飞跟踪模型的行动者网络输入层由 $P_n^{TAG} - P_n^{UAV}$ 、 $P_n^{mfz} - P_n^{UAV}$ 及 $V_n^{TAG} - V_n^{UAV}$ 通过矢量分解而来, 对输入层参数作线性变换, 转换函数如下:

$$X^* = \frac{X}{1+X} \quad (36)$$

式中: X 为特征数据; X^* 为归一化后的特征数据。

自主引导模型与伴飞跟踪模型的行动者网络输出无人机速度控制信号, 且均采用 $\tanh(\cdot)$ 函数实现输入量与输出量的归一化。

评论家网络用于计算优势函数以评估并改进当前策略, 输入层参数为状态 S 与动作 A 的集合, 其网络结构与输入层参数的归一化方法与行动者网络相同, 不同之处在于输出量并未做归一化处理, 直接参与损失函数计算。

2) LSTM 隐藏层神经元个数选择。隐藏层能够把输入数据的特征抽象到另一个维度空间, 从而进行更好地线性划分, 隐藏层的神经元个数对网络的拟合能力有着很大的影响, 神经元个数不足会降低网络的拟合能力, 达不到预期的预测精度, 而神

经元个数过多则会造成网络过拟合或者徒增训练时长,因此,根据任务要求,合理选择隐藏层的神经元个数非常重要。本文所涉及的实验内容选择了256个隐藏层神经元。

4 模型验证及分析

4.1 试验方案

选取3类任务场景验证模型的可靠性:场景1采用自主引导模型,场景2采用伴飞避障模型,场

景3则通过设置阈值(无人机高度为10 m,无人机与目标相对距离不大于20 m)将2个模型规整到同一任务流程中,并分别将场景1和场景2收敛后的模型训练网络运用于全过程。上述3类场景所对应的模型训练参数如表1所示。基于上述场景,分别将基于传统PPO算法和本文提出的基于LSTM网络的PPO算法设置为对照组,隐藏层神经元个数均设置为256,并采用相同的参数优化器对模型训练参数进行更新。

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

参数	场景1	场景2	场景3
任务阶段	自主引导过程	伴飞避障过程	全过程
采用的模型	自主引导模型	伴飞避障模型	自主引导与伴飞避障模型
时间周期 N/s	0.033 3	0.033 3	0.033 3
γ	0.99	0.99	0.99
ε	0.2	0.2	0.2
初始条件/m	$H_0^{UAV} = 30$ $70 \leq P_0^{UAV} - P_0^{TAG} \leq 100$	$H_0^{UAV} = 10$ $50 \leq P_0^{UAV} - P_0^{TAG} \leq 80$	$H_0^{UAV} = 30$ $70 \leq P_0^{UAV} - P_0^{TAG} \leq 100$
终止条件/m	$t \geq 35$ s 或 $ P_n^{UAV} - P_n^{TAG} \leq 2$	$t \geq 35$ s 或 $ P_n^{UAV} - P_n^{TAG} \leq 10$	$t \geq 35$ s 或 $ P_n^{UAV} - P_n^{TAG} \leq 10$

4.2 试验结果与性能分析

通过不同场景中无人机单步平均奖励曲线的变化情况,定量评估传统PPO算法与基于LSTM网络的PPO算法在无人机自主机动这类任务中的实时性、准确性和鲁棒性。

假设无人机的状态信息和输出量均为无偏信号。由图7(a)可见,场景1中由改进后的PPO算法训练的无人机单步平均奖励初始值为-8.8,并在训练轮数达到250次时稳定在-2.6。传统PPO算法训练的无人机单步平均奖励初始值为-11.1,训练轮数达到325次时逐渐收敛于-7.5。场景2的环境复杂度相对较高,试验所设置的环境奖励力度较大,由此导致初始累计奖励较低,如图7(b)所示,改进后的PPO算法训练的无人机单步平均奖励初始值为-69,训练轮数达到400次时稳定在-8,而传统PPO算法训练的无人机单步平均奖励初始值为-78,训练轮数达到600次时收敛至-42。在实际的侦察任务中,气流等环境因素的变化使得无人机系统的状态信息存在一定的偏差,本节通过给输出量叠加其自身0.2倍的噪声信号以模拟无人机系统状态的不稳定性。由图7(a)可见,由于干扰信号的存在,改进后的PPO算法训练的前75次无人机单步平均奖励值出现下降趋势,但随着训练的进行,干扰信号带来的影响逐渐减弱,并在训练轮数达到250次时,奖励值收敛至-3。传统PPO算法训练的无人机单步平均奖励值出现较大波动,且训练轮数达到350次时逐渐收敛于-11。类似的现象也出现在图7(b)中,干扰出现后,改进后的PPO算法收敛速度略微降低,但整体处于上升趋势,并在训练轮数

达到450次时,无人机单步平均奖励值稳定在-10。传统PPO算法训练的无人机单步平均奖励涨幅不明显,训练轮数达到650次时收敛于-60。

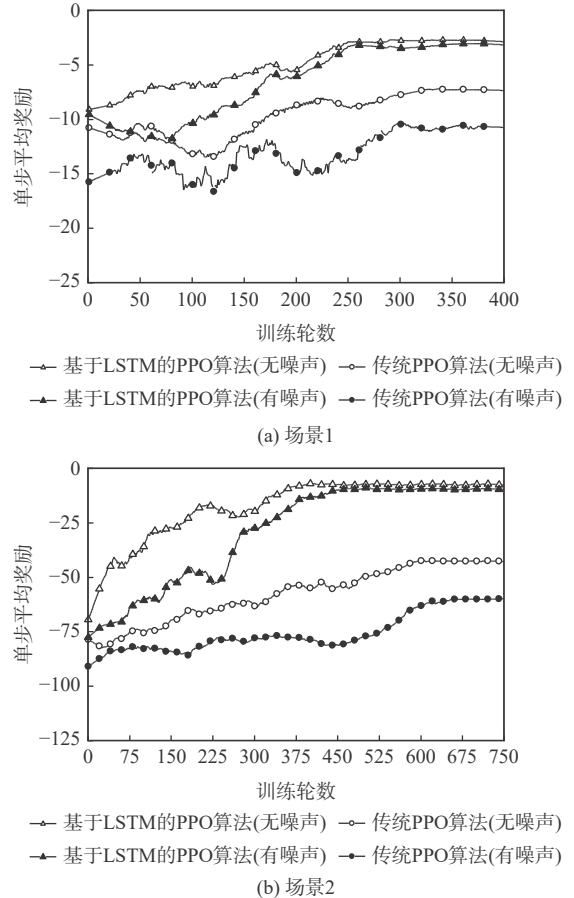


图7 单步平均奖励变化曲线

Fig. 7 Variation curves of single step average reward

图 8 为基于传统 PPO 算法训练下的自主引导模型与伴飞避障模型的无人机飞行轨迹。由图 8(a) 可见, 无人机执行引导过程且引导结束时, 无人机与地面目标的距离相对较远, 引导效果较差。如图 8(b) 所示, 无人机执行伴飞避障过程, 当环境状

态发生变化时, 无人机能够有效进行避障, 确保无人机的飞行安全, 但无人机跟踪性能显著下降, 导致侦察任务失败。如图 8(c) 所示, 结合场景 1 与场景 2 进行自主引导与伴飞避障全过程验证, 由于传统 PPO 算法训练下的自主引导模型效果较差, 为避

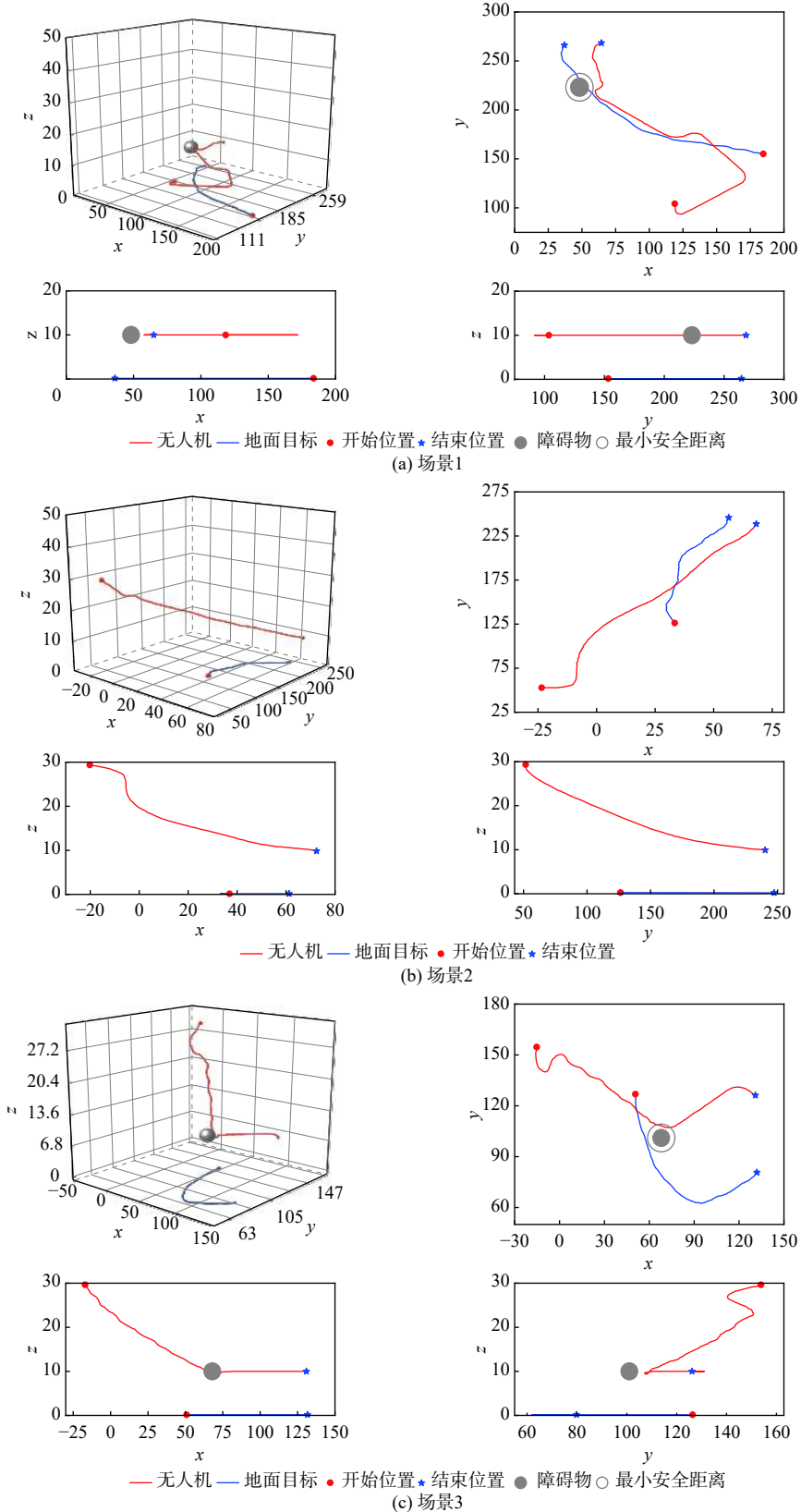


图 8 不同场景下基于传统 PPO 算法的运动轨迹

Fig. 8 Motion paths in different scenarios based on traditional PPO algorithm

免终止时间条件内,无人机无法达到模型切换阈值,本文放宽了阈值条件。仿真结果表明,无人机进行第一阶段的机动决策耗时较长,导致第二阶段进行避障后,无法在所设置的终止时间内对地面目标重新跟踪。

图9为基于改进后的PPO算法训练后的无人机飞行轨迹。由图9(a)可见,无人机与地面目标初始相对距离较远时,自主引导模型有效作用,二者相对距离迅速减小且无人机高度逐步下降。如图9(b)所示,无人机与地面目标初始相对距离较近时,伴

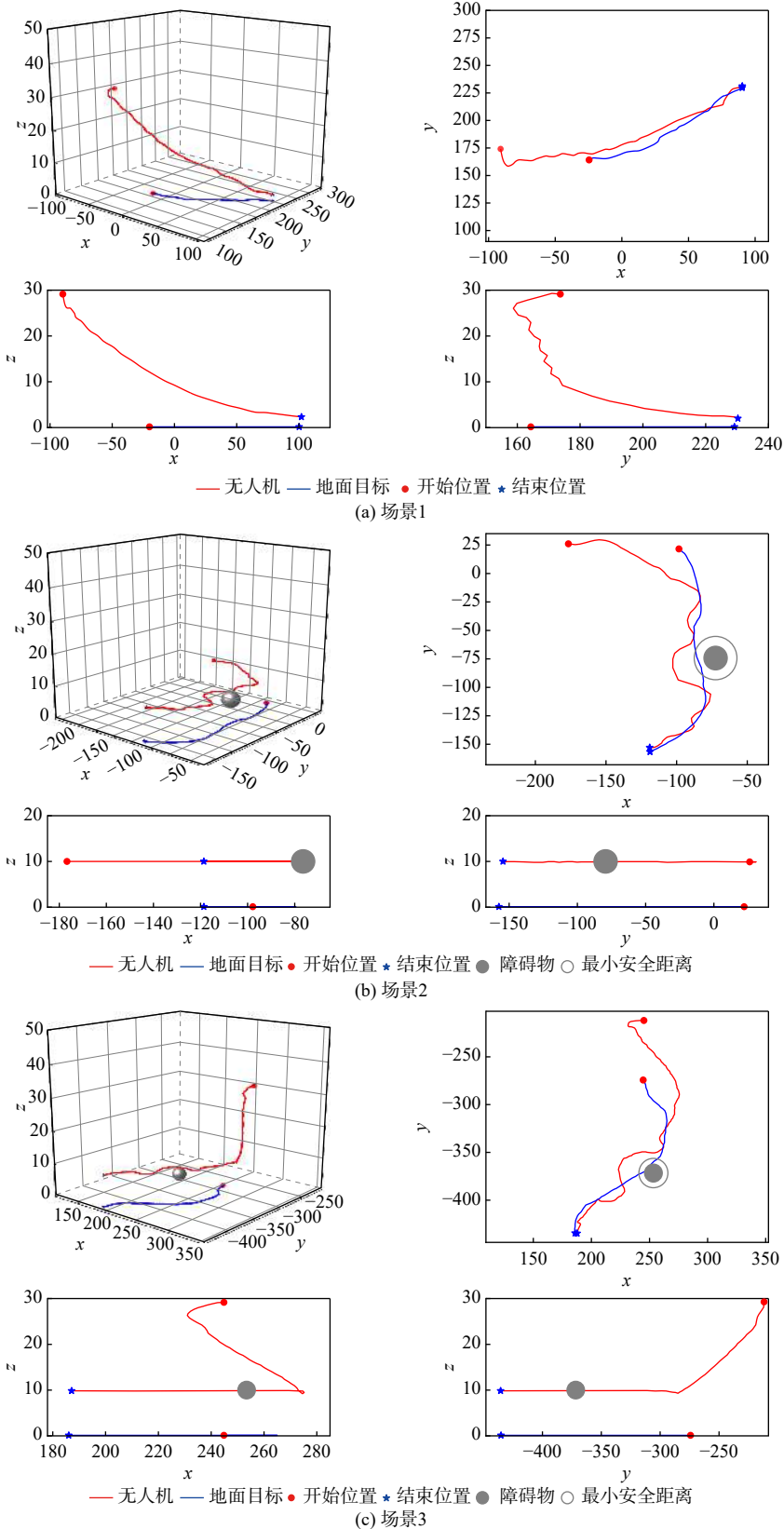


图9 不同场景下基于改进PPO算法的运动轨迹

Fig. 9 Motion paths in different scenarios based on improved PPO algorithm

飞避障模型有效作用, 无人机与侦察目标的相对高度保持不变, 在定高空域执行侦察任务。图 9(c) 则结合了场景 1 与场景 2 中各模型的优势, 自主引导阶段完成时, 无人机迅速转变机动策略, 接近目标的同时兼顾了可能出现的低空威胁, 进行了合理有效的避障跟踪。

上述结果表明, 无人机自主引导与伴飞避障过程是合理的, 且相较于传统神经网络, LSTM 网络拥有独特的记忆单元结构, 地面目标的历史轨迹属性在训练时就已经存入隐藏层记忆细胞内, 对地面目标进行下一轮跟踪时, 可以迅速找到相应的细胞状态。当目标出现新的轨迹属性时, LSTM 网络的遗忘门会清除较旧的上下文轨迹信息, 并通过状态更新将新的目标位置信息添加到细胞状态中。因此, 基于 LSTM 网络的 PPO 算法具有更强的实时性、准确性和鲁棒性。

5 结 论

1) 针对多旋翼无人机地面动目标跟踪与自主避障问题, 结合不同空域环境复杂度的差异, 细化了空中侦查的任务流程, 并基于 MDP 建立了自主引导模型与伴飞避障模型。

2) 针对基于值函数优化的强化学习算法在无人机自主机动任务中适用性差的问题, 采用 PPO 算法证明基于策略的优化算法在连续状态空间上的可行性, 在此基础上, 采用 LSTM 网络对传统 PPO 算法进行改进, 并在基于 ROS 的无人机仿真测试平台上进行试验验证。

3) 仿真结果表明, 本文提出的无人机跟踪、避障模型能够实现对地面随机运动目标的持续跟踪与障碍物的合理规避, 且与传统 PPO 算法相比, 基于 LSTM 网络的 PPO 算法控制策略能够有效抑制环境扰动带来的影响, 使系统具有更好的鲁棒性。

本文假设单个障碍物位置固定且由视觉传感器获取的障碍物位置信息无偏差, 而在实际的侦察任务中, 应当考虑障碍物随机运动且障碍数目大大增加的影响, 在类似场景中, 无人机如何作出机动决策将是后续研究的重点。

参考文献 (References)

[1] 代君, 管宇峰, 任淑红. 多旋翼无人机研究现状与发展趋势探讨[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2016, 32(16): 22-24.
DAI J, GUAN Y F, REN S H. Multi-rotor UAV discussion on the research status and development trend[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2016, 32(16): 22-24(in Chinese).

[2] 李博, 李小民, 杨森. 美国四旋翼无人机研究现状与关键技术[J]. 飞航导弹, 2018(2): 25-30.
LI B, LI X M, YANG S. Research status and key technologies of

quadrotor UAVs in the U. S. [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(2): 25-30(in Chinese).

[3] 黄长强. 未来空战过程智能化关键技术研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(1): 11-19.
HUANG C Q. Research on key technology of future air combat process intelligentization[J]. Aero Weaponry, 2019, 26(1): 11-19 (in Chinese).

[4] 邓可, 彭宣淇, 周德云. 基于矩阵对策与遗传算法的无人机空战决策[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(12): 61-66.
DENG K, PENG X Q, ZHOU D Y. UAV air combat decision based on matrix game and genetic algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(12): 61-66(in Chinese).

[5] 邵将, 徐扬, 罗德林. 无人机多机协同对抗决策研究[J]. 信息与控制, 2018, 47(3): 347-354.
SHAO J, XU Y, LUO D L. Research on UAV multi-aircraft cooperative countermeasure decision[J]. Information and Control, 2018, 47(3): 347-354(in Chinese).

[6] 陈宇, 张公平, 宋韬, 等. 多任务空地武器多目标协同优化任务规划算法研究[J]. 航空兵器, 2021, 28(2): 62-68.
CHEN Y, ZHANG G P, SONG T, et al. Research on multi-mission airborne weapon multi-target cooperative optimization planning algorithm[J]. Aero Weaponry, 2021, 28(2): 62-68 (in Chinese).

[7] 蒲良, 张学军. 基于深度学习的无人机视觉目标检测与跟踪[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 872-880.
PU L, ZHANG X J. Deep learning based UAV vision object detection and tracking[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 872-880(in Chinese).

[8] 王聪. 基于深度学习的无人机单目标识别与跟踪算法研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
WANG C. Research on single target recognition and tracking algorithm for UAV based on deep learning[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019 (in Chinese).

[9] 彭闯. 输电线路无人机巡检图像中电力部件识别方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.
PENG C. Research on identification method of power components in UAV inspection images of transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020 (in Chinese).

[10] 马乐乐, 李照洋, 董嘉蓉, 等. 基于计算机视觉及深度学习的无人机手势控制系统[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(5): 872-879.
MA L L, LI Z Y, DONG J R, et al. UAV gesture control system based on computer vision and deep learning[J]. Computer Engineering & Science, 2018, 40(5): 872-879(in Chinese).

[11] KRAFT M, PIECHOCKI M, PTAK B, et al. Autonomous, on-board vision-based trash and litter detection in low altitude aerial images collected by an unmanned aerial vehicle[J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 965.

[12] 秦智慧, 李宁, 刘晓彤, 等. 无模型强化学习研究综述[J]. 计算机科学, 2021, 48(3): 180-187.
QIN Z H, LI N, LIU X T, et al. Overview of research on model-free reinforcement learning[J]. Computer Science, 2021, 48(3): 180-187 (in Chinese).

[13] 赖俊, 饶瑞. 深度强化学习在室内无人机目标搜索中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(17): 156-160.
LAI J, RAO R. Application of deep reinforcement learning in indoor uav target search[J]. Computer Engineering and Applications,

- 2020, 56(17): 156-160(in Chinese).
- [14] LEE J H, KIM T K, SONG J G, et al. Flight trajectory simulation via reinforcement learning in virtual environment[J]. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 2018, 27(4): 1-8.
- [15] MAGED S A, MIKHAIL B H. Deep reinforcement learning collision avoidance using policy gradient optimisation and Q-learning[J]. *International Journal of Computational Vision and Robotics*, 2020, 10(3): 260.
- [16] 饶颖露, 邢金昊, 张恒, 等. 基于视觉的无人机板载自主实时精确着陆系统[J]. *计算机工程*, 2021, 47(10): 290-297.
- RAO Y L, XING J H, ZHANG H, et al. Vision-based autonomous real-time precise landing system for UAV-borne processors[J]. *Computer Engineering*, 2021, 47(10): 290-297(in Chinese).
- [17] 何准, 董文瀚, 蔡鸣, 等. 基于DDPG的多旋翼无人机自主引导与跟踪方法[J]. *飞行力学*, 2021, 39(2): 63-69.
- HE Z, DONG W H, CAI M, et al. Multi-rotor UAV autonomous guidance and tracking method based on DDPG[J]. *Flight Dynamics*, 2021, 39(2): 63-69(in Chinese).
- [18] YANG S Y, MENG Z J, CHEN X Z, et al. Real-time obstacle avoidance with deep reinforcement learning three-dimensional autonomous obstacle avoidance for UAV[C]// *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*. New York: ACM, 2019: 324-329.
- [19] ZHAO W W, CHU H R, MIAO X K, et al. Research on the multi-agent joint proximal policy optimization algorithm controlling cooperative fixed-wing UAV obstacle avoidance[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(16): 4546.
- [20] MAJUMDAR A, GAMEZ N, BENAVIDEZ P, et al. Development of robot operating system (ROS) compatible open source quadcopter flight controller and interface[C]// *12th System of Systems Engineering Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [21] MEIER L, HONEGGER D, POLLEFEYS M. PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 6235-6240.
- [22] KOENIG N, HOWARD A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator[C]// *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2004: 2149-2154.
- [23] 汪亮, 王文, 王禹又, 等. 强化学习方法在通信拒止战场仿真环境中多无人机目标搜寻问题上的适用性研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(3): 375-395.
- WANG L, WANG W, WANG Y Y, et al. Feasibility of reinforcement learning for UAV-based target searching in a simulated communication denied environment[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2020, 50(3): 375-395(in Chinese).
- [24] 李琛, 黄炎焱, 张永亮, 等. Actor-Critic框架下的多智能体决策方法及其在兵棋上的应用[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(3): 755-762.
- LI C, HUANG Y Y, ZHANG Y L, et al. Multi-agent decision-making method based on Actor-Critic framework and its application in wargame[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(3): 755-762(in Chinese).
- [25] 杨星鑫, 吕泽均. 基于LSTM的无人机轨迹识别技术研究[J]. *现代计算机*, 2020(5): 18-22.
- YANG X X, LV Z J. Research on UAV trajectory recognition based on LSTM[J]. *Modern Computer*, 2020(5): 18-22(in Chinese).
- [26] 夏瑜璐. 循环神经网络的发展综述[J]. *电脑知识与技术*, 2019, 15(21): 182-184.
- XIA Y L. A review of the development of recurrent neural network[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2019, 15(21): 182-184(in Chinese).
- [27] 张玉人, 龚志猛. 基于RNN-LSTM的船舶位置预测分析[J]. *计算机与数字工程*, 2021, 49(2): 252-258.
- ZHANG Y R, GONG Z M. Ship position prediction analysis based on RNN-LSTM[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2021, 49(2): 252-258(in Chinese).
- [28] 刘红艳. 基于Attention-LSTM模型的移动目标跟踪技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- LIU H Y. Research of moving target tracking technology based on attention-LSTM model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018(in Chinese).

Proximal policy optimization for UAV autonomous guidance, tracking and obstacle avoidance

HU Duoxiu¹, DONG Wenhan^{2,*}, XIE Wujie²

(1. Graduate School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: We established a Markov decision process model with two stages of long-distance autonomous guidance and short-distance companion flight avoidance for multi-rotor UAVs to track dynamic ground targets. An improved proximal policy optimization (PPO) algorithm is proposed. Considering that the data received by the UAV are time-sequential and that the environment has contextual relevance, the algorithm uses long short-term memory (LSTM) network to calculate reward values, update network parameters, and perform adaptive optimization iterations through status information such as the real-time position relationship between the UAV and the target. Experiments were conducted with a simulation testing platform based on ROS. Results show that the method proposed safely and effectively realizes autonomous maneuvering during the whole process of the reconnaissance mission. Compared with the traditional PPO algorithm, the algorithm proposed shortens the model training time due to the introduction of LSTM neural network, thus significantly improving the efficiency of obstacle tracking and avoidance. This result further strengthens the robustness, accuracy, and real-time performance of the algorithm.

Keywords: multi-rotor UAV; autonomous guidance; Markov decision process; proximal policy optimization; long short-term memory

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0194

点阵夹芯结构非接触式损伤成像研究

赵倩, 冯侃*

(江苏大学 土木工程与力学学院, 镇江 212013)

摘 要: 针对点阵夹芯结构的脱焊等损伤问题, 提出了基于高频动态响应的非接触式损伤成像技术, 根据无基线损伤指标分析结构高频响应, 实现脱焊损伤成像。数值仿真中, 依据局部共振理论, 以损伤区域低阶固有频率作为中心频率计算结构在声场激励下宽频段内振动响应, 采用无基线损伤指标实现损伤成像, 由损伤成像结果准确识别脱焊损伤位置; 试验中, 采用扬声器激励, 扫描时激光测振系统全场振型拾取的非接触式试验测量方案, 成功识别脱焊损伤的位置。验证了非接触式成像技术对点阵夹芯结构脱焊损伤检测的适用性与可行性, 实现了无附加结构质量、无健康基准信号下的损伤识别。

关键词: 点阵夹芯结构; 局部共振; 高频动态响应; 非接触式测量; 全场损伤检测

中图分类号: O329; TB52*3

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0206-06

随着科学技术的迅猛发展, 人们已经不再满足于材料的单一性能, 寻找具有优良性能的多功能材料已经迫不及待。点阵夹芯结构凭借其优越的力学性能^[1-3], 如轻质高强、隔声减振、降噪等, 备受工程界的青睐, 被广泛应用于航空航天^[4]、高铁^[5]等工程领域。然而由于点阵夹芯结构的复杂性, 在制造过程或使用过程中受到外部冲击^[6], 可能会产生各类缺陷, 如脱焊、杆件屈曲和分层^[7-8]。这些缺陷显著降低了力学性能, 严重威胁结构安全, 甚至导致灾难性事故。因此, 为了保证结构安全服役, 预防事故发生, 亟需建立一种高效智能的点阵夹芯结构健康监测系统, 可靠高效地检测损伤的存在^[8-10]。

近年来, 无损检测技术发展很快, 被广泛应用于结构健康监测中^[11-15]。然而, 当点阵夹芯结构夹芯层存在损伤时, 由于内部结构的复杂性, 采用超声导波等无损检测方法信号非常复杂, 难以对损伤进行识别。因此, 基于振动响应的全局无损检测方法常被应用到点阵夹芯结构的损伤识别。Sokolinsky 等^[16]提出基于局部振动, 假设沿夹芯梁

长度方向上任意分布的局部损伤可防止应力通过该损伤部位在健康结构中转移, 数值模拟结果表明, 该方法能够检测夹层梁局部损伤的存在。Lu 等^[17]提出了一种基于柔度矩阵和间隙平滑法的无基线损伤识别方法, 该方法无需结构健康状态信息作为参考, 可有效抑制面板与芯子的节点的奇异性对真实损伤识别的影响, 引入的权重系数能够解决单损伤或多损伤不同类型的损伤定位。Li 等^[18]结合间隔平滑法和 Teger 能量算法, 提出了一种基于均匀载荷面曲率的无损检测方法, 采用该方法对复合材料夹层板前四阶振动模态进行分析, 实现了损伤定位。Lou 等^[8]将损伤前后结构的固有频率作为损伤指标, 通过对比健康结构与损伤结构的固有频率变化, 识别了损伤位置。Lu 等^[19]在时域下分析了点阵结构的动态响应, 并对结构中的损伤识别定位。

目前, 针对点阵夹芯结构基于振动响应的损伤检测提出了很多方案, 但以上研究均采用低阶模态进行损伤识别。实际上在低频下, 小损伤的局部变形并不明显, 因此, 需基准信号对结构存在的所有

收稿日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-07-16; 网络出版时间: 2021-09-06 11:08

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210906.1056.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(11702118); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20170520)

*通信作者. E-mail: fengkan@ujs.edu.cn

引用格式: 赵倩, 冯侃. 点阵夹芯结构非接触式损伤成像研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 206-211.

ZHAO Q, FENG K. Noncontact damage imaging method in lattice sandwich structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 206-211 (in Chinese).

隐患进行排除。相反地, 在高频激励下, 小损伤更加敏感, 无需基准信号便能高效识别损伤。此外, 在以上提出的试验检测方法中, 均需在试件表面粘贴压电片、电磁激振器或激振台达到激振效果。但对一些精密仪器或具有轻质特点的点阵材料, 上述接触式激励方式常常会带来一系列问题, 进而影响振动响应测试精度和材料参数识别精度。声场激励作为一种非接触激励方式^[20], 实现了无附加结构质量、无健康基准信号, 仅通过结构在声场激励下的振动特性, 便可快速定位损伤。

综上, 针对点阵夹芯结构的损伤检测, 本文提出了基于高频动态响应的声场非接触激励损伤识别方法。基于局部共振的概念, 模拟高频响应下脱焊区域的局部振动特性, 以此选择合适的激励频段。试验中, 采用扬声器实现声场激励, 非接触式扫描式激光测振系统进行全场振型扫描, 拾取点阵面板高频宽频带内单频激励下的振动响应, 并基于提出的无基线损伤成像方法, 准确定位点阵夹芯结构的脱焊损伤。

1 基于声场激励的点阵夹芯结构数值模拟

根据夹芯层不同的设计形式, 点阵夹芯结构有不同的称谓。本文主要以正四面体型的夹芯结构模型为例, 说明并验证了提出的非接触式声场激励下点阵夹芯结构的损伤成像方法。如图 1 所示, 正四面体单胞形式是由 3 根杆件组成, 构型为四面体, 并按周期排列为整体结构 (见 图 1(b)), 单胞尺寸如图 1(a) 所示, 桁架杆件的矩形截面为 1 mm×2 mm。面板与桁架的材料均为铝, 材料参数取为: 弹性模量 71 GPa, 泊松比 0.33, 密度 2 700 kg/m³。本文中的整体与局部结构均在 COMSOL Multiphysics 5.6 中建模分析。

健康的点阵夹芯结构, 由于面板与杆件焊接, 2 个面板受到中间桁架杆件的约束, 整体结构可看作均质板, 在低频声场激励下其响应会呈现一定的振动规律。但当杆件与面板发生单点脱焊时, 与脱焊点相邻的几个焊点会形成“自由面板”, 如图 2(a) 所示。基于局部共振理论, 当以局部共振频率激励整体结构时, 局部损伤区域会产生较大的振动响应。

仿真时, 可通过提取局部损伤区域, 设置一定的边界约束计算固有频率。点阵夹芯结构发生单点脱焊时的局部损伤区域为正六边形的“自由面板”, 六边形的边长为 15 mm, 仿真中“自由面板”的材料参数与整体结构相同, 设置简支边界约束, 计算局部损伤区域基频为 7 888 Hz, 固有振型如图 2(b) 所示。

为实现对整体结构的声场激励, 在建立点阵夹

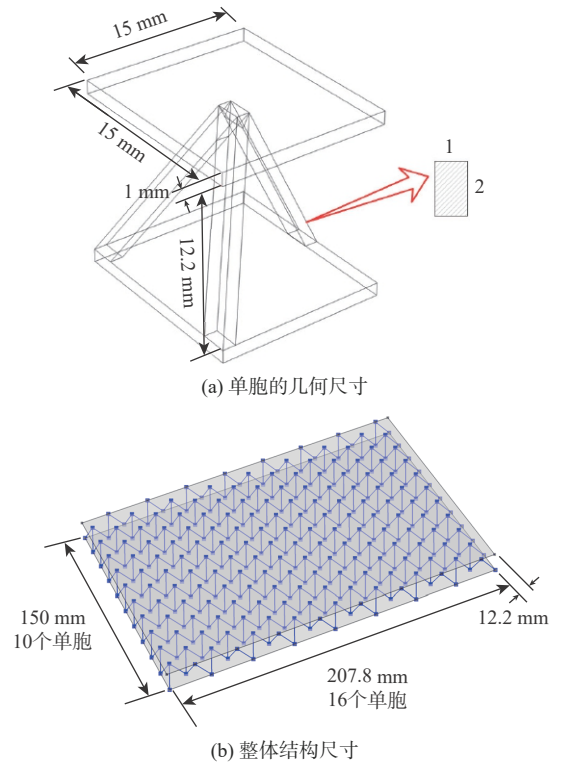


图 1 点阵夹芯结构的几何尺寸

Fig. 1 Dimension of lattice sandwich structure

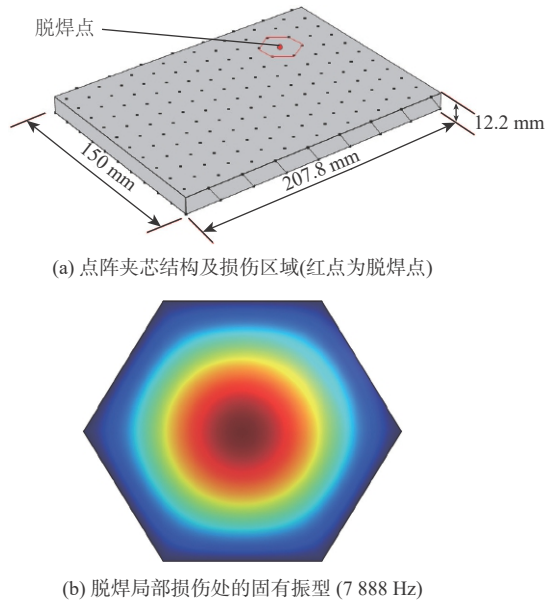


图 2 点阵夹芯结构单点脱焊

Fig. 2 Single point debonding of lattice sandwich structure

芯结构的整体模型时, 采用边界元法 (boundary element method, BEM) 与有限元法 (finite element method, FEM) 相结合的气固耦合系统。对点阵夹芯结构模型及夹芯层内部空气建立采用有限元法, 而激励声场中的无限空域采用边界元法。采用边界元法减少了无限空域网格的划分, 同时在求解声场频域响应时, 仅需对频率区间进行离散, 因而减少了计算量及求解时间, 极大提高了运算效率。

以局部损伤区域的共振频率 7 888 Hz 为基准, 基于所建立的气固耦合模型, 计算声压激励下整体结构在 6~10 kHz 宽频带且激励频率步长为 500 Hz 的高频振动响应。此频段包含了结构在脱焊情况下面板的局部共振频率, 因此在结构的响应中将明显显示出脱焊点的位置。模拟中, 指定点阵结构受到沿全局 z 方向传播的单位幅值入射平面声波, 其中平面波入射示意图如图 3 所示。

根据声学原理, 声波在穿过点阵夹芯结构时, 结构面板在声波作用下会产生振动, 分析声激励引起结构面板振动的响应特性, 得到宽频带激励下全场总声压级分布如图 4 所示。

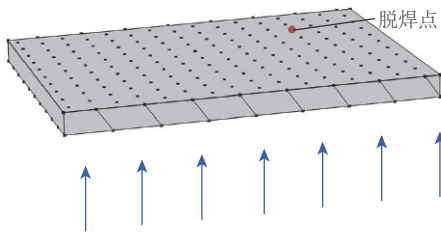


图 3 点阵夹芯结构声激励平面波示意图

Fig. 3 Schematic diagram of acoustic incident plane wave with lattice sandwich structure

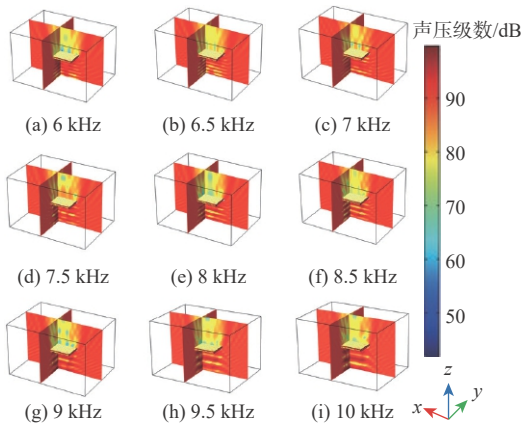
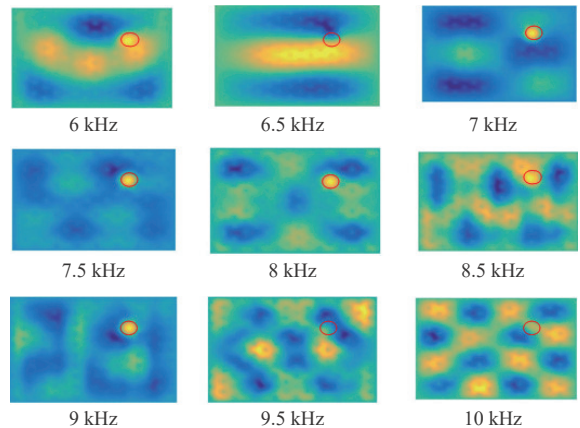


图 4 全场总声压级分布 (6~10 kHz)

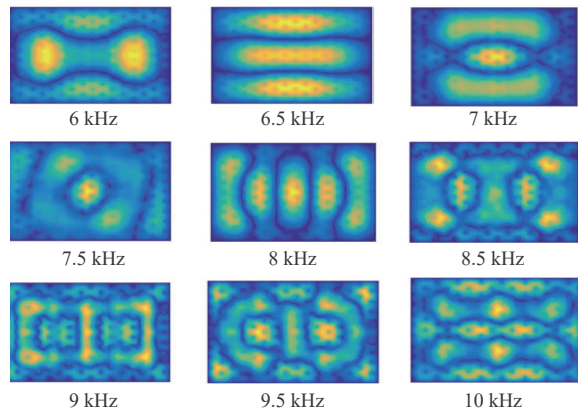
Fig. 4 Total sound pressure level distribution in whole field

图 4 显示了宽频带内全场声压级分布, 并显示了压力分布多切面图。2 个切面的坐标分别为: 与 yz 面平行, 位于 $x=150$ mm 处; 以及与 xz 面平行, 位于 $y=100$ mm 处。通过声压分布的多切面图说明, 点阵夹芯结构明显阻碍了声场的传播, 声压有效地施加在了整体结构上。

在各频率声压激励下, 整体结构发生振动, 得到该频段内结构的位移响应 ODS (operational deflection shape), 如图 5(a) 所示 (圆圈区域为脱焊区域)。由于在数值计算中采用线性频域分析, 为了综合考虑各频率下 ODS 的响应, 对其结果做了最大值归一化处理。同时, 为了对比在相同频率激励下, 健康结构与损伤结构不同的振动响应, 首先检测了在该频段内健康结构的 ODS (见图 5(b))。



(a) 脱焊损伤



(b) 健康结构

图 5 声场激励下结构频域响应

Fig. 5 Frequency domain response of structure excited by sound field

健康结构在外界频率激励下的振动响应呈现出对称性及规律性, 为整体振动响应。而对于含脱焊损伤的点阵夹芯结构而言, 由于损伤的存在, 使得脱焊区域的强度和刚度大大降低, 此时的整体结构振动响应不同于健康状态表现出整体振动特性, 而是在结构损伤区域处, 振动变形比较明显。因此, 可通过分析局部振动, 有效检测损伤的存在, 如图 5(a) 所示。此外, 当脱焊点位于振型节线或节点处时, 损伤在频率 9.5 kHz 及 10 kHz 的振动响应中并不明显。因此, 在实际的损伤识别检测中, 须选用相对宽的频率信号进行激励, 以避免漏检。

由宽频带内结构的 ODS 可得, 局部损伤区域的变形不是在每个频率激励下都可清晰的识别。为使损伤定位更加精确, 且能够综合考虑宽频带内每个单频激励下的振动响应, 本文提出了基于多振型平方相叠加的无基线损伤成像方法。即对宽频带内所有单频激励下结构测点的振动位移 w 取平方进行叠加, 将叠加后的结果作为损伤指标, 根据该损伤指标完成损伤成像, 进而更加精确地识别损伤。损伤指标的具体计算公式为

$$DI = \sum_{i=1}^n w_i^2 \tag{1}$$

式中: w_i 为单频激励下测点振动位移; n 为宽频带内特定频率个数。

对图 5(a) 中的 9 个 ODS 采用式 (1) 计算损伤指标, 可得到声场激励下点阵夹芯结构的损伤成像结果。为了显示准确的损伤定位, 对成像结果进行最大值归一化处理, 损伤指标为 1 处, 即为脱焊点, 如图 6 中圆圈标记所示。

从图 6 的损伤成像结果可见, 模型中预设的脱焊损伤点处明显存在峰值, 可准确识别出损伤位置。损伤成像结果验证了非接触激励方法检测局部损伤的有效性和精确性。

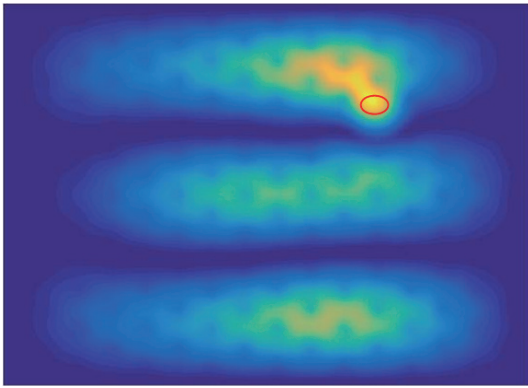


图 6 声场激励下结构损伤成像

Fig. 6 Structural damage imaging under acoustic excitation

2 高频动态响应特性及非接触式损伤成像试验

本文选取的试件及搭建的试验平台如图 7 所示。试件单胞尺寸与仿真相同, 总尺寸为 380 mm×43 mm×12.2 mm, 包含 26×3 个单胞。试验中, 脱焊点是在对健康结构进行检测之后人工锉断而成, 并将面板测量区域设置为 300 mm×40 mm, 测点间隔为 5 mm, 共有 549 个测点。

采用扬声器实现声场非接触激励, 替代了传统的激励方式, 扬声器与试件摆放位置如图 7 所示。为了增强激励信号, 将生成的激励信号经 KH7602 M 功率放大器放大, 再连接至扬声器上进行激励。采用 PSV-500 扫描式多普勒激光测振仪 (scanning laser Doppler vibrometry, SLDV) 拾取测量区域的振动响应信号, 即采集点阵结构面板的离面位移。为了获得更高的测量精度, 试验中在被测区域表面贴上了反光膜以增强测量信号。为了精确测得结构各频率下的响应, 采用扬声器分次以单频简谐作为输入的激励信号, 并对每个测点测量 10 次信号取平均, 进而获得多个频率下损伤结构的振动响应。由于试验中试件较小, 选用普通的音箱作为激励器。若

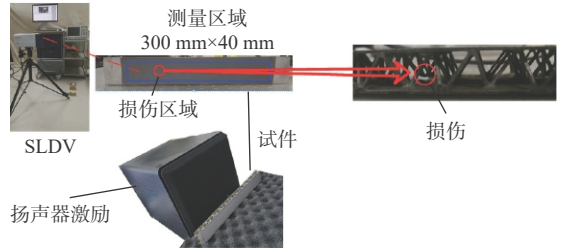


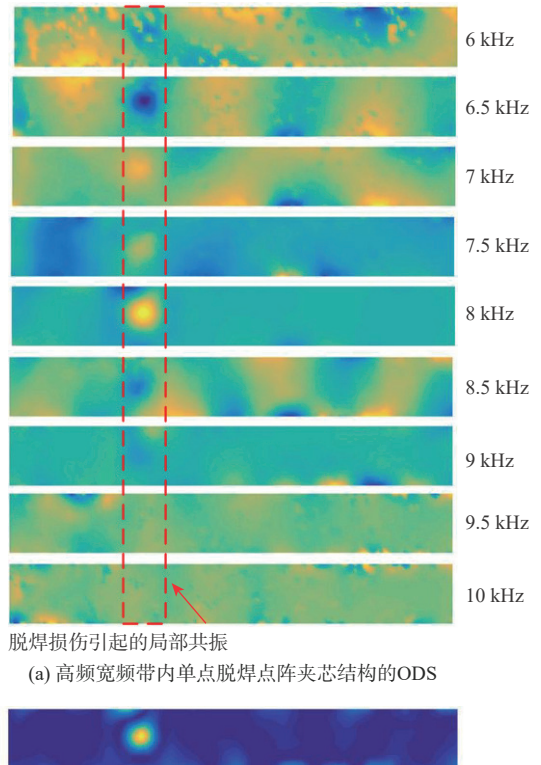
图 7 试验示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experiment

需激励大型构件, 可定制大功率扬声器, 或者对结构分区激励检测。

试验中, 激励仍以局部损伤区域的基频 7 888 Hz 为基准, 选择激励频带为 6~10 kHz, 激励频率间隔为 500 Hz, 测量结构在宽频带内单频激励时的振动响应, 得到宽频带内多个特定频率激励下结构的 ODS (见图 8(a))。与数值仿真分析相同, 各 ODS 结果均作了最大值归一化处理。采用式 (1) 计算损伤指标, 得到的最大值归一化损伤成像结果如图 8(b) 所示。图中损伤指标高亮处 (值为单位 1) 即是脱焊点位置。

由试验结果可得, 脱焊点在不同频率激励下均有着不同程度的响应, 尤其是在 6.5 kHz 和 8 kHz 下的响应最为明显。综合考虑点阵结构所有的振动响应, 由损伤成像结果可清晰地获取损伤位置, 与实际面板中脱焊点的实际位置一致 (见图 7), 验证了本文提出的非接触式点阵结构损伤检测方法



脱焊损伤引起的局部共振

(a) 高频宽频带内单点脱焊点阵夹芯结构的ODS

(b) 损伤成像结果

图 8 试验损伤成像结果

Fig. 8 Experimental damage imaging results

的有效性。由于试验中选取试件尺寸较小,在边缘处的面板也发生了振动响应。但由损伤成像结果可知,边缘效应对识别损伤的影响并不大,故可忽略不计。

3 结论

针对点阵夹芯结构中的脱焊损伤问题,本文提出了基于高频动态响应的非接触式损伤成像方法,并通过数值模拟与试验研究验证了该方法的可行性。结果表明:

1) 局部损伤对高频激励更加敏感,脱焊损伤处的振动响应相比于未损伤区域更为明显,并在脱焊点处出现峰值。

2) 综合考虑多个特定频率下点阵结构的 ODS,采用无基线的振型平方和作为损伤指标,可提高损伤成像精度。

3) 试验中,非接触式激光测振系统实现了无附加结构质量、无健康基准信号下的损伤识别,可快速有效地测量点阵夹芯结构在高频段内的频率响应,并通过损伤成像,能够清晰地识别脱焊点的位置。

综上,本文方法为点阵夹芯结构的损伤检测提供了新的技术支持。

参考文献 (References)

- [1] 陈东,吴永鹏,李忠盛,等. 轻质高强多功能点阵夹层结构研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(4): 87-94.
CHEN D, WU Y P, LI Z S, et al. Research progress of light weight, high strength and multifunctional lattice sandwich structure[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(4): 87-94(in Chinese).
- [2] 曾卫. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 科技传播, 2016(14): 218-219.
ZENG W. Multifunctional properties and applications of ultra-light porous metal materials[J]. *Science and Technology Communication*, 2016(14): 218-219(in Chinese).
- [3] HAN Y, JIANG W, WANG J, et al. Multi-functional sandwich structure with metamaterial antenna lattice cores: Protection, radiation and absorption[J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2020, 14(7): 593-599.
- [4] 王向明,苏亚东,吴斌,等. 微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 16-25.
WANG X M, SU Y D, WU B, et al. Application for additive manufacturing of lattice materials on integrated aircraft structures and functions[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2018, 61(10): 16-25(in Chinese).
- [5] 郑云. 中空夹芯复合材料在轨道交通内装上的应用[J]. 玻璃纤维, 2013(4): 19-23.
ZHENG Y. Application of 3D sandwich composite in interiors of rail vehicles[J]. *Fiber Glass*, 2013(4): 19-23(in Chinese).
- [6] WANG B, ZHANG G Q, WANG S X, et al. High velocity impact response of composite lattice core sandwich structures[J]. *Applied Composite Materials*, 2014, 21(2): 377-389.
- [7] 励争,周洁,李冰,等. 轻质点阵夹芯板热屈曲的实验研究[J].

实验力学, 2018, 33(2): 167-174.

LI Z, ZHOU J, LI B, et al. Experimental study of thermal buckling of lightweight lattice sandwich panel[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(2): 167-174(in Chinese).

- [8] LOU J, WU L, MA L, et al. Effects of local damage on vibration characteristics of composite pyramidal truss core sandwich structure [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 62: 73-87.
- [9] MCELROY M, LEONE F, RATCLIFFE J, et al. Simulation of delamination-migration and core crushing in a CFRP sandwich structure [J]. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 79: 192-202.
- [10] YUAN W, SONG H, LU L, et al. Effect of local damages on the buckling behaviour of pyramidal truss core sandwich panels[J]. *Composite Structures*, 2016, 149: 271-278.
- [11] 袁梅, 商富凯, 董韶鹏. 基于经验小波变换的复合材料板声发射源定位[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1395-1401.
YUAN M, SHANG F K, DONG S P. Acoustic emission source location for composite plate based on empirical wavelet transform[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(7): 1395-1401(in Chinese).
- [12] 曾康洋. 浅谈射线检测技术在无损检测中的应用[J]. 城市建设理论(电子版), 2015, 5(26): 2377.
ZENG K Y. On the application of ray detection technology in nondestructive testing[J]. *Theoretical Research on Urban Construction (Electronic Version)*, 2015, 5(26): 2377(in Chinese).
- [13] 王树志, 刘广华, 贾玉军, 等. 表面状态对铝合金铸件荧光渗透检测的影响[J]. 无损检测, 2016, 38(2): 48-51.
WANG S Z, LIU G H, JIA Y J, et al. Influence of surface state on fluorescent penetrant inspection of aluminium alloy casting[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(2): 48-51(in Chinese).
- [14] BALASUBRAMANIAM K, SIKDAR S, FIBOREK P, et al. Ultrasonic guided wave signal based nondestructive testing of a bonded composite structure using piezoelectric transducers[J]. *Signals*, 2021, 2(1): 13-24.
- [15] PARK S M, KWAK Y, LEE J, et al. Nondestructive spot weld quality evaluation by measurement of structural vibration transfer through joined panels[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, 38: 71.
- [16] SOKOLINSKY V S, BREMEN H, LESKO J, et al. Higher-order free vibrations of sandwich beams with a locally damaged core[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2004, 41(22-23): 6529-6547.
- [17] LU L L, SONG H W, YUAN W, et al. Baseline-free damage identification of metallic sandwich panels with truss core based on vibration characteristics[J]. *Structural Health Monitoring*, 2017, 16(1): 24-38.
- [18] LI B, LI Z, ZHOU J, et al. Damage localization in composite lattice truss core sandwich structures based on vibration characteristics[J]. *Composite Structures*, 2015, 126: 34-51.
- [19] LU L L, LE J, SONG H, et al. Damage detection of sandwich panels with truss core based on time domain dynamic responses[J]. *Composite Structures*, 2019, 211: 443-454.
- [20] 孙建刚, 赵晓宇, 吴有生, 等. 针对一型深水结构物的水下声场计算与试验研究[J]. 船舶力学, 2018, 22(8): 1011-1019.
SUN J G, ZHAO X Y, WU Y S, et al. Numerical analysis and acoustic test of sound field characteristics for some type of deepwater structure[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(8): 1011-1019(in Chinese).

Noncontact damage imaging method in lattice sandwich structures

ZHAO Qian, FENG Kan*

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the damage problems such as debonding of lattice sandwich structure, a non-contact damage imaging technology based on high-frequency dynamic response is proposed. The high-frequency response of the structure is analysed according to the non-baseline damage index to realize debonding damage imaging. In the numerical simulation, based on the local resonance theory, the low-order natural frequency of the damage area is used as the centre frequency to calculate the response of the structure in a wide frequency range under sound field excitation, and the damage imaging is realized by using no baseline damage index. The damage imaging results can accurately identify the damage location; In the test, the non-contact test measurement scheme of using the loudspeaker to excite, and the laser vibration measurement system to pick up the full-field mode shape during scanning successfully identified the location of the debonding damage. The applicability and feasibility of the non-contact imaging technology for the damage detection of the dot matrix sandwich structure debonding is verified, and the damage identification without additional structural quality and without health reference signals is realized.

Keywords: lattice sandwich structure; local resonance; high frequency dynamic response; non-contact measurement; full-field damage detection

Received: 2021-04-14; **Accepted:** 2021-07-16; **Published Online:** 2021-09-06 11:08

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210906.1056.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (11702118); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20170520)

* **Corresponding author.** E-mail: fengkan@ujs.edu.cn

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0197

卷积线性混合模型下的复非高斯信号盲源提取

李苗苗^{1,2,3}, 吕晓德^{1,2,*}, 王宁^{1,2,3}, 刘忠胜^{1,2}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 2. 微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 雷达信号的多径效应导致基于瞬时线性混合模型的盲源分离算法不再适用。为此, 提出了一种基于 FastICA 的复非高斯信号盲源提取方法。该方法将混合系统建模为卷积线性混合模型, 使得信号模型中不需要将每个多径信号都看作一个独立的源信号, 既节约了接收通道数量, 又降低了盲源分离过程的复杂度, 利用待提取信号的非高斯性实现高斯背景下复非高斯信源的提取。实验结果表明: 在信干比为 -30 dB 时, 所提方法能够快速、有效地处理卷积线性混合模型下复非高斯信源的提取问题, 为该场景下的微弱信号提取提供了一种新的方法。

关键词: 多径效应; 卷积线性混合; 复 FastICA 算法; 非高斯信号; 盲源提取

中图分类号: TN973; TN958

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)01-0212-08

单个雷达发射信号一般具有特定的波形、幅度和相位变化规律, 并不具有随机性, 为非高斯信号, 其在传播过程中, 由于受到周边环境的影响, 会产生多径。目前, 发展较为成熟的盲源分离算法一般将混合系统建模为瞬时线性混合模型, 当处理具有多径现象的混合源时, 将各个发射基地的每个多径信号看作一个独立的信号源, 而该类算法通常要求接收通道数量大于或等于源信号数量, 导致接收通道需求量大, 复杂的分离情况还可能导致盲源分离效果不佳, 进而不能准确提取出想要的目标信号。另外, 在实际测量过程中, 由于受到干扰尤其是恶劣环境的影响, 使得目标信号淹没在强干扰之中, 造成雷达信号目标检测能力大幅下降。因此, 如何在低信干比的情况下提取出想要的目标信号, 也是雷达信号处理领域比较关注的问题, 这些都给在高斯背景中的复非高斯微弱信号提取问题带来挑战。

针对多信号盲源分离问题, 目前已有大量研究工作, 学者们也根据不同角度提出了很多有效的算法。其中, 独立分量分析(independent component analy-

sis, ICA)是 Comon 于 1994 年针对盲源分离问题提出的一种开拓性方法^[1-2], 其目的是通过互信息最小化或者负熵最大化等准则将混合系统中的各混合信源分离开。随着学者们对该方法研究的深入, 尤其是快速独立分量分析(FastICA)算法^[3-4]的出现使得计算效率大幅提高, 该方法也逐渐被应用在生物医学、语音、图像处理、雷达信号处理等领域, 近年来, 学者们在利用 ICA 方法进行雷达信号同频干扰抑制^[5-8]、多信号分离及滤波^[9-11]、图像及混合信号去噪^[12-15]等方面取得了一些成果。文献^[5-6]将 ICA 方法应用到雷达信号同频干扰抑制上, 利用 ICA 方法在时域上提取出与同频干扰相互重叠的目标信号, 从而达到抑制同频干扰的目的; 文献^[11]利用 FastICA 算法作为一种自适应滤波方法, 通过对线性混合在高斯噪声中的多正弦信号进行滤波, 验证了该方法的滤波能力; 文献^[12]提出了一种基于 FastICA 的低信噪比探地雷达信号去噪方法, 仿真实验了 FastICA 算法对混合在探地雷达数据中的高斯白噪声、脉冲噪声及阶跃噪声的去噪处理, 得到了不错的效果。上述研究将 ICA 应用在雷达同频

收稿日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-07-04; 网络出版时间: 2021-07-14 14:55

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210714.1140.003.html

*通信作者. E-mail: lvxd@aircas.ac.cn

引用格式: 李苗苗, 吕晓德, 王宁, 等. 卷积线性混合模型下的复非高斯信号盲源提取 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 212-219.
LI M M, LYU X D, WANG N, et al. Blind source extraction of complex non-Gaussian signals based on convolution linear mixture model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 212-219 (in Chinese).

干扰抑制及信号去噪方面,但使用的仿真模型均为瞬时线性混合模型,未考虑实际场景中的多径传播问题,并且对于复数情况下的处理未做详细说明。文献 [16] 考虑了信号在实际传播中的多径问题,提出一种基于二阶循环平稳统计的卷积混合盲源提取方法,并用仿真结果验证了该方法的有效性,但必须要求感兴趣源具有唯一的循环平稳频率,才可以将其从实测数据中有效地恢复出来;文献 [8] 针对无源雷达中的同频干扰问题,在卷积混合模型下提出一种基于二阶统计量的盲源分离算法,利用了源信号的非平稳特性,通过分离同频干扰直达波和多径杂波来抑制同频干扰,但是该方法对于单高斯场景下的盲源分离问题并无显著优势,这是因为呈高斯分布的随机信号的高阶统计量为零,所以基于高阶统计量的盲源分离算法与基于二阶统计量的盲源分离算法相比具有天然的抗高斯特性;文献 [10] 考虑到眼动“源”与外部观测信号之间的传播路径问题,为寻找一种能够有效分离眼跳运动信号的盲源分离模型,针对瞬时和卷积混合 2 种盲源分离模型进行了多通道眼电图信号分离对比实验,实验结果表明,卷积混合模型分离出的眼跳信号质量比瞬时模型分离出的眼跳信号质量高,体现了卷积混合模型对于该场景的分离优势。

综上所述,基于高阶统计量的盲源分离算法具有天然的抗高斯特性,可以在混合源中对高斯信号实现有效去除,但是信号在传播过程中普遍存在多径现象,若不考虑此现象,可能会出现盲源分离类算法对接收通道数量需求大、分离复杂导致性能不佳等问题,同时由于大多数实用的调制形式都是复数类型,复值信号经常出现在通信、雷达、生物医学等应用中,相应的处理也需要在复数域进行,使得信号的完整信息得以充分利用^[17]。本文同时考虑了雷达信号实际处理中存在多径传播及算法对复值信号的处理问题,提出一种基于卷积线性混合模型的复非高斯信号盲源提取方法。将混合系统建模为卷积线性混合系统,更改了复数 FastICA 算法中观测向量和权值向量的构造方式,与瞬时线性混合系统相比,大大节约了接收通道数量,通过利用基于高阶统计量的 FastICA 算法在强高斯干扰背景中对非高斯信源的提取优势,即使在极低的信干比情况下也能在混合信源中成功提取出复非高斯信号,从而达到微弱信号提取或去噪的效果,并通过仿真实验验证了该方法的有效性。

1 卷积线性混合模型

设有 n 个未知源信号组成一个列向量: $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T \in \mathbf{C}^n$, 各个源信号经过混合 FIR 滤波器,

卷积得到一路观测信号 $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T \in \mathbf{C}^m$, 观测信号与源信号的关系为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{H}(z)\mathbf{S}(t) \quad (1)$$

式中: 混合 FIR 滤波器矩阵用 $\mathbf{H}(z) \in \mathbf{C}^{m \times n}$ 表示:

$$\mathbf{H}(z) = \begin{bmatrix} H_{11}(z) & H_{12}(z) & \cdots & H_{1n}(z) \\ H_{21}(z) & H_{22}(z) & \cdots & H_{2n}(z) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ H_{m1}(z) & H_{m2}(z) & \cdots & H_{mn}(z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: m 为通道个数; n 为信号源个数; $H_{ij}(z)$ 为时间延迟算子 z 的多项式, 展开式为

$$H_{ij}(z) = \sum_{k=0}^L h_{ij}(k)z^{-k} \quad (3)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; L$ 为滤波器 $H_{ij}(z)$ 的最大阶次; $h_{ij}(k)$ 为滤波器系数。

第 i 个通道的观测信号表示为

$$x_i(t) = H_{i1}(z)s_1(t) + \cdots + H_{in}(z)s_n(t) = \sum_{j=1}^n H_{ij}(z)s_j(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^L h_{ij}(k)s_j(t-k) \quad (4)$$

为了将混合信号中的各个源信号分离开, 需要设计一个解混合 FIR 滤波器矩阵 $\mathbf{W}(z) \in \mathbf{C}^{n \times m}$, 使得输出为

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}(z)\mathbf{X}(t) \quad (5)$$

即

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}(z)\mathbf{H}(z)\mathbf{S}(t) \quad (6)$$

式中:

$$\mathbf{W}(z) = \begin{bmatrix} w_{11}(z) & w_{12}(z) & \cdots & w_{1m}(z) \\ w_{21}(z) & w_{22}(z) & \cdots & w_{2m}(z) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_{n1}(z) & w_{n2}(z) & \cdots & w_{nm}(z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{Y}(t)$ 为分离后信号; $w_{ij}(z)$ 为单个解混合滤波器。

2 非高斯信源提取

若混合信源中具有非高斯信源, 则对其进行提取需作出如下假设:

1) 所提取的信号必须是非高斯信号。

2) 接收数据通道数大于或等于 2。

3) 混合矩阵 $\mathbf{H}(z)$ 为 $m \times n$ 维的 FIR 多项式矩阵, 且 $\mathbf{H}(z)$ 的秩对每个非零的时延列满秩。

若要对卷积混合信源中的非高斯信源进行提取, 提取向量的设计尤为关键。由于 $\mathbf{H}(z)$ 是完全未知的, $\mathbf{W}(z)\mathbf{H}(z) = \mathbf{I}$ 不可实现, 于是将设计目标松弛为^[2]

$$\mathbf{W}(z)\mathbf{H}(z) = \mathbf{G}(z) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{G}(z) = [g_1(z), g_2(z), \dots, g_n(z)] \in \mathbf{C}^{n \times n}$ 为广义交换 FIR 多项式向量。

对于单路源信号的提取,可以表示为

$$y_i(t) = \mathbf{w}_i^H(z) \mathbf{H}(z) s(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=0}^L w_{ij} h_{ji}(k) s(t-k) = d_i s_i(t - \tau_i) \quad (9)$$

式中: d_i 表示输出信号与相应源信号相差一个比例因子; τ_i 表示二者的时延。

式(9)表明,从卷积混合的 n 个独立信源中可以人为抽取其中任何一个信源。结合 FastICA 算法依据源信号非高斯性进行盲源分离这一特征,从而达到提取复非高斯信源的目的。

盲信号分离问题的目的是求解混合矩阵 \mathbf{W} , 而对于单个信源的提取则只要求:

$$\mathbf{w}_i^T(z) = [w_{i1}(z), w_{i2}(z), \dots, w_{im}(z)] \quad (10)$$

令解混合矩阵的最大阶次为 K (K 应该大于或等于混合 FIR 滤波器的阶次 L), 单个解混合 FIR 滤波器的表达式为

$$w_{ij}(z) = \sum_{k=0}^K w_{ij}(k) z^{-k} \quad (11)$$

则待提取的单个分离信号的具体表达式为

$$y_i(t) = \mathbf{w}_i^T(z) \mathbf{x}(t) = [w_{i1}(z), w_{i2}(z), \dots, w_{im}(z)] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix} = \sum_{k=0}^K w_{i1}(k) x_1(t-k) + \dots + \sum_{k=0}^K w_{im}(k) x_m(t-k) \quad (12)$$

为了方便对比卷积线性混合模型与瞬时线性混合模型的异同,写出瞬时线性混合模型的单个分离信号的具体表达式,如下:

$$y_i(t) = \mathbf{w}_i^T(t) \mathbf{x}(t) = [w_{i1}(t), w_{i2}(t), \dots, w_{im}(t)] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix} = w_{i1}(t) x_1(t) + \dots + w_{im}(t) x_m(t) \quad (13)$$

通过对比式(12)和式(13)可以看出,卷积线性混合模型与瞬时线性混合模型的盲信号分离不同之处在于解混合向量和观测向量的选取。在卷积线性混合模型中,解混合向量和观测向量的选取分别如式(14)和式(15)所示,本文的目的则是通过求式(14)来提取混合源中的复非高斯信号。

$$\mathbf{w}_i = [w_{i1}(0), \dots, w_{i1}(K), \dots, w_{im}(0), \dots, w_{im}(K)]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_1(t-K), \dots, x_m(t), \dots, x_m(t-K)]^T \quad (15)$$

假设单个或多个复非高斯信号与复高斯干扰信号卷积混合,通过 2 个信道接收,未知源信号混合方式及复非高斯信源的提取过程如图 1 所示。将复非高斯信源看作混合系统的一路输入,复高斯信源看作另一路输入,则需要 4 个混合 FIR 滤波器,各信源经过不同的混合滤波器之后再线性叠加得到 2 组观测数据,使用复数 FastICA 算法从 2 组观测数据中提取复非高斯信源。信干比定义如下:

$$\text{SIR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_n |s[n]|^2}{\sum_m |a \cdot q[m]|^2} \right) \quad (16)$$

式中: $s[n]$ 为待提取信号; $q[m]$ 为干扰信号。待提取信号幅度为 1, 干扰信号相对幅度为 a , 通过 a 控制 SIR 的大小。

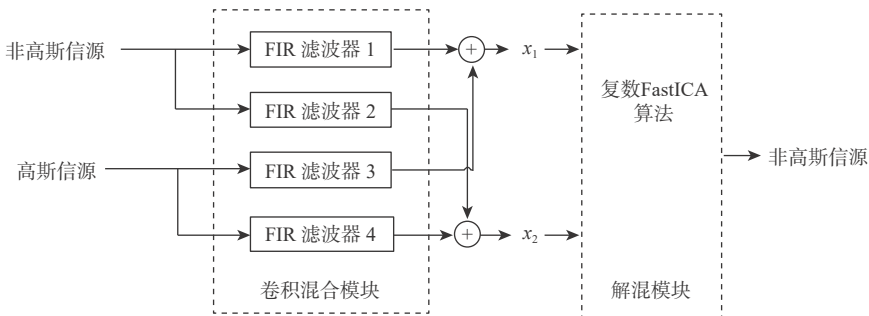


图 1 复非高斯信源提取模型

Fig. 1 Complex non-Gaussian source extraction model

3 复数 FastICA 算法

为了实现复非高斯信号的盲源提取,本文使用了复数 FastICA 算法。在高斯背景下,该算法表现出良好的分离性能,能够很好地避免局部最优问

题,当除了感兴趣源外没有其他非高斯分量时,具有很好的全局收敛性^[18]。由于高斯信号没有高于二阶的统计量,基于高阶统计量的 FastICA 算法具有天然的抗高斯特性,通过利用输出信号高阶累积量的最大化实现去高斯化,从而达到从混合信源中

提取出非高斯微弱信号的目的。

为了实现独立分量分析, FastICA 算法衡量信号向量各分量之间统计独立性的测度是负熵, 当信号各分量负熵达到最大时, 可认为将混合信号完全分离^[2]。设信号向量为: $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, 其微分熵的表达式为^[3]

$$H(\mathbf{y}, \mathbf{W}) = - \int f(\mathbf{y}) \ln f(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = - \int \dots \int f(y_1 \dots y_n) \ln f(y_1 \dots y_n) dy_1 \dots dy_n \quad (17)$$

负熵的定义是在与高斯变量的熵比较中得出^[3]:

$$J(\mathbf{y}) = H(\mathbf{y}_{\text{gauss}}, \mathbf{W}) - H(\mathbf{y}, \mathbf{W}) \quad (18)$$

式中: $\mathbf{y}_{\text{gauss}}$ 为分离矩阵 \mathbf{W} 的高斯随机变量输出。

复数 FastICA 算法的代价函数为^[4]

$$J_G(\mathbf{w}) = E \left\{ G \left(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 \right) \right\} \quad (19)$$

权值向量 \mathbf{w} 的表达式由式 (14) 给出, 观测向量的表达式由式 (15) 给出, 并且满足 $E \left\{ |\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 \right\} = 1$ 。

对于 G 函数的选择, 通常有以下 3 种表示形式^[4]:

$$\begin{cases} G_1(y) = \sqrt{a_1 + y} \\ g_1(y) = \frac{1}{2\sqrt{a_1 + y}} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} G_2(y) = \ln(a_2 + y) \\ g_2(y) = \frac{1}{a_2 + y} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} G_3(y) = \frac{1}{2}y^2 \\ g_3(y) = y \end{cases} \quad (22)$$

式中: a_1 和 a_2 为任意常数, 通常取值为 0.1。上述函数式 (20)~式 (22) 中, G_1 和 G_2 相比 G_3 来说具有更加稳健的估计^[4]。经实验验证, 在保证分离效果的前提下, G_2 在本文实验场景中具有更快的收敛速度, 因此在本文实验中, 选择 G_2 作为对比函数。

对于每次只提取单个独立分量的固定点算法, 可以将 n 个源信号的独立分量分析变成以下约束问题的求解:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_j &= \arg \max \sum_{j=1}^n J_G(\mathbf{w}_j) \\ \text{s.t. } E \left\{ (\mathbf{w}_k^H \mathbf{x}) (\mathbf{w}_j^H \mathbf{x})^* \right\} &= \delta_{jk} \end{aligned} \quad (23)$$

其中:

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1 & j = k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

对于式 (23) 的优化问题, 复数 FastICA 算法的迭代公式为^[3]

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^+ &= E \left\{ \mathbf{x} (\mathbf{w}^H \mathbf{x})^* g \left(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 \right) \right\} - \\ & E \left\{ g \left(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 \right) + |\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 g' \left(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 \right) \right\} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\mathbf{w}_{\text{new}} = \frac{\mathbf{w}^+}{\|\mathbf{w}^+\|} \quad (26)$$

式中: $g(u) = dG(u)/du$; $g'(u) = dg(u)/du$; \mathbf{w}^+ 为迭代过程的中间变量; \mathbf{w}_{new} 为 \mathbf{w}^+ 的归一化, 表示经迭代之后的新权值, 归一化的作用是提高算法稳定性。

复数 FastICA 算法步骤如下:

步骤 1 输入: 通过式 (15) 构造观测矩阵 \mathbf{X} , 中心化、白化观测矩阵。

步骤 2 初始化: $\mathbf{W} = \mathbf{I}_{n \times (K+1)m}$, $\mathbf{w}_i = \mathbf{I}_{1 \times (K+1)m}$, Threshold = 10^{-6} , MaxNum = 5 000。

步骤 3 循环:

1) 根据式 (25) 和式 (26) 更新权值。

2) 判断: 2 次权值的差小于 Threshold 或大于最大迭代次数 MaxNum 后结束循环。

步骤 4 输出: $\mathbf{W} \in \mathbf{C}^{n \times (K+1)m}$ 。

4 仿真分析

为了验证本文方法的有效性, 仿真了 3 种卷积线性混合情况的分离实验, 以及本文方法与基于线性混合模型方法的解混对比实验, 3 种卷积线性混合情况分别为单个复线性调频信号与复高斯干扰信号混合、多个复线性调频信号与复高斯信号混合、实测雷达脉冲回波数据与复高斯信号混合, 两路信号的卷积线性混合过程由 2 阶 FIR 滤波器实现, 滤波器系数为随机产生的复向量。源信号的自相关曲线与分离后信号和源信号的互相关曲线的重叠程度表示分离后信号是否很好地保留了原有的自相关特性, 重叠程度高, 代表分离后信号很好地保留了原有信号的自相关特性。通过分离后信号与源信号的相关性评估复非高斯信源提取质量的好坏, 得到的相关系数越趋近于 1, 相关性越强, 复非高斯信源的提取质量越好, 反之则越差, 相关系数为 0 则代表提取出的信号与源信号不相关。为了尽可能避免偶然性, 以下实验中得到的相关系数均为 500 次蒙特卡罗实验之后的结果, 实验样本点数为 5 000 个。其中相关系数定义如下:

$$\xi_{ij} = \xi(y_i, s_j) = \frac{\left| \sum_{t=1}^n y_i(t) s_j^*(t) \right|}{\sqrt{\sum_{t=1}^n |y_i(t)|^2 \sum_{t=1}^n |s_j(t)|^2}} \quad (27)$$

式中: s_j 和 y_i 分别为信源信号和盲源分离后的信源信号(信源信号的估计信号)^[19]。

1) 瞬时和卷积线性混合模型对比实验

为了说明本文方法针对卷积线性混合模型的解混有效性, 与未考虑时间延迟的解混算法进行了对比实验。图 2 为信干比为 -30 dB 时的卷积线性混

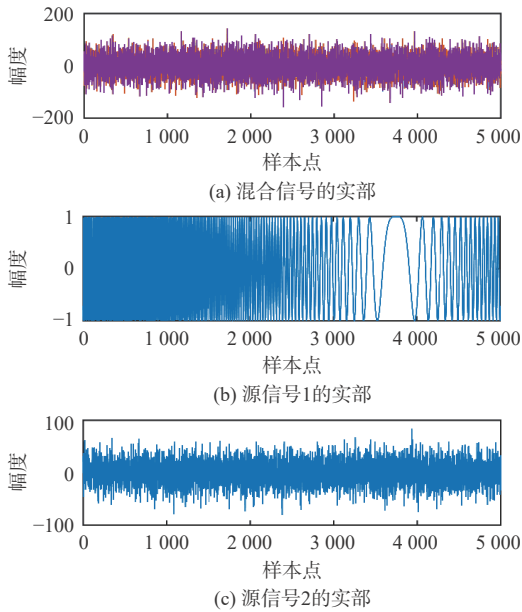


图2 单个线性调频信号与高斯干扰信号混合

Fig. 2 Mixture of single linear frequency modulation signal and Gaussian interference signal

合信号及2个源信号的实部。可以看出,线性调频信号已经完全被淹没在高斯干扰信号中。图3分别表示使用本文方法对卷积线性混合信源解混之后的信号及模型失配时分离卷积线性混合信号的情况,图4为瞬时和卷积线性混合模型分离相关性对比。可以看出,没有考虑时间延迟的解混算法得到的分离信号不仅丢失了原有的自相关特性,而且与源信号的相关性很低,通过实验得到使用本文方法提取的信号与源信号的相关系数为0.9988,模型失配时的相关系数为0.0408,说明本文方法的有效性及其明显的分离优势。

2) 多个复线性调频信号与复高斯干扰信号混合

为了验证本文方法也可以对多个非高斯混合信号进行有效提取,将2个复线性调频信号与复高斯干扰信号卷积混合,在信干比为 -30 dB下,也取得了不错的分离效果。如图1所示,在卷积线性混合模型下,将2个复线性调频信号看作一路独立的源信号与复高斯干扰信号卷积得到两路观测信号。图5(a)~(c)为信干比为 -30 dB时的卷积线性混合信号及2个源信号的实部。可以看出,线性调频信号已经完全淹没在高斯干扰信号中,通过本文方法解混,发现该方法可以将2个复线性调频信号的混合形式率先分离出来。图5(d)、(e)为分离后的两路输出信号的实部显示。由于盲源分离算法具有相位模糊,得到的输出信号与源信号相比具有一定的相位差。图5(f)中,2条曲线重叠程度较高,表明分离后的复多线性调频信号很好地保留了原有的

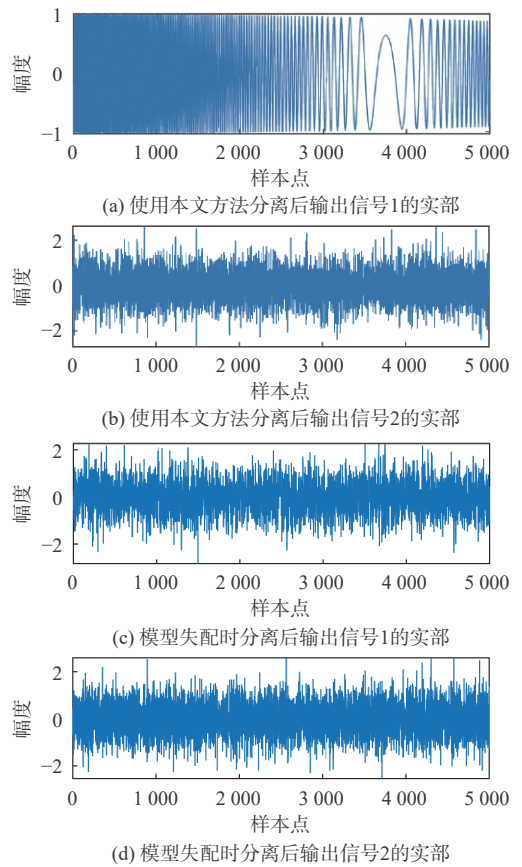


图3 瞬时和卷积线性混合模型分离效果对比

Fig. 3 Comparison of separation effect between instantaneous and convolution linear mixture models

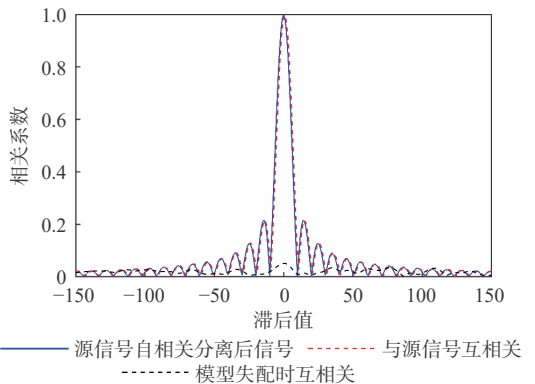


图4 瞬时和卷积线性混合模型分离相关性对比

Fig. 4 Comparison of separation correlation between instantaneous and convolution linear mixture models

自相关特性,并且与分离之前的复多线性调频信号具有强相关性,图中正负1000处2个凸起分别为分离前后2个复线性调频信号的互相关结果,分离后单个复线性调频信号与分离前单个复线性调频信号的互相关结果变化一致,说明将多个复线性调频信号看做一个独立源进行盲信号提取并不破坏单个复线性调频信号的相关性,通过实验得到提取的信号与源信号的相关系数为0.9703。

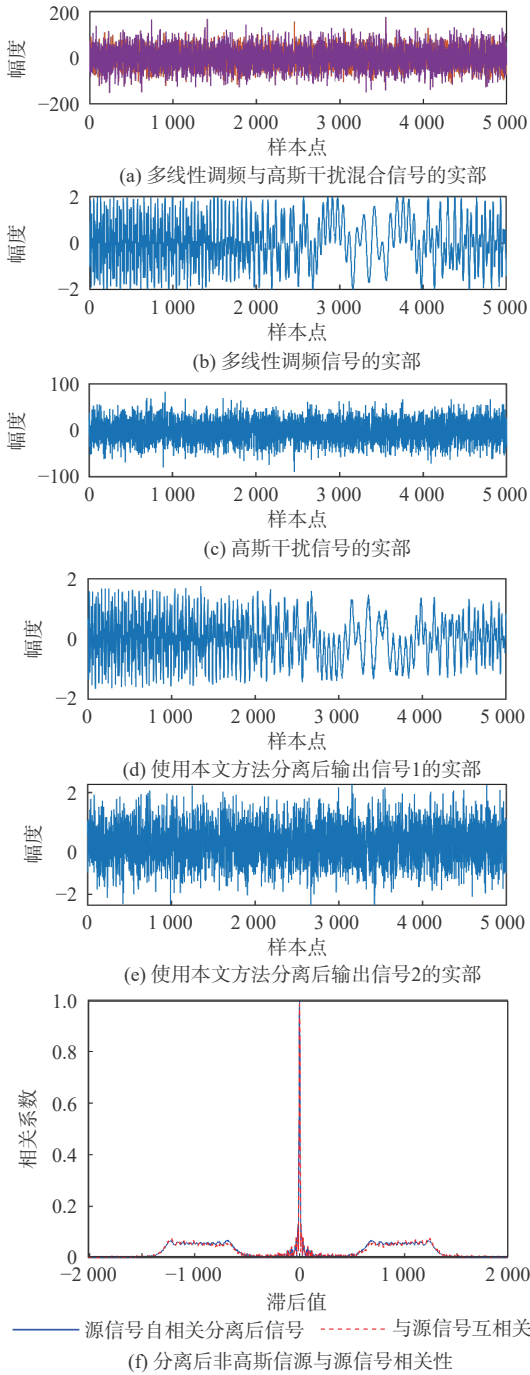


图 5 多线性调频信号盲源提取

Fig. 5 Blind source extraction of multiple linear frequency modulation signals

3) 半实测半仿真实验

通过对实测数据的处理验证本文方法的有效性,所选用的实测数据来自某型 S 波段的线性调频信号的外辐射源雷达系统接收数据,该系统工作于脉冲体制,试验模式。图 6(a)为实测的单通道雷达脉冲回波数据经脉冲压缩之后的结果。图 6(b)为实测雷达脉冲回波数据与一路复高斯干扰信号经过 2 阶 FIR 滤波器卷积线性混合之后再经脉冲压缩的结果,每个滤波器的系数是随机产生的一组复

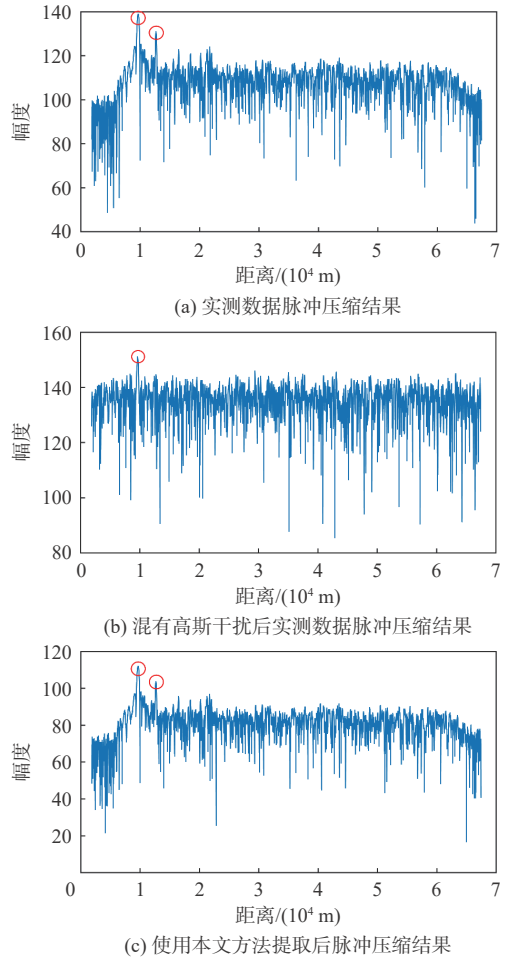


图 6 雷达脉冲回波数据盲源提取

Fig. 6 Blind source extraction of radar pulse echo data

向量,信干比为 -15 dB,可以看出,其中一个目标已经完全被高斯干扰信号淹没无法辨别。图 6(c)为使用本文方法对该混合信号进行复非高斯信源提取之后再脉冲压缩得到的结果,可以看出,即使在被高斯干扰信号完全淹没的极端情况下,卷积线性混合模型下的复非高斯信源提取方法对于实测雷达脉冲回波数据的提取仍然有效。

5 结 论

针对雷达信号在传播过程中具有多径现象的情况,同时为了能够对复值微弱信号进行快速、有效提取,本文提出了一种基于卷积线性混合模型的复非高斯信源提取方法,主要结论如下:

- 1) 对基于瞬时线性混合模型的盲源分离算法进行改进,用混合 FIR 滤波器矩阵代替原有的瞬时线性混合模型来描述雷达信号中的多径问题。
- 2) 对复数 FastICA 算法中观测向量和权值向量的构造方式进行重建,既节约了接收通道数量,又在一定程度上降低了盲源分离过程的复杂度,与没有考虑多径问题的盲源分离算法相比具有明显的分离优势。

3) 利用复数 FastICA 算法对复非高斯信源的自然提取优势, 实现了对混合信源中复非高斯信号的提取或对原混合信号去噪的目的。

4) 通过仿真分析证明, 该方法能够对混合在强高斯信号中的复值微弱信号进行快速、有效提取。

本文方法为雷达信号处理领域中强高斯干扰背景下的微弱信号提取提供了新方法。但是在实际应用环境中, 面临的情况将变得复杂, 后续将针对混合多非高斯信源情况下的特定信号提取开展研究。

参考文献 (References)

- [1] COMON P. Independent component analysis, a new concept?[J]. *Signal Processing*, 1994, 36(3): 287-314.
- [2] 张贤达. 现代信号处理[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2015: 367.
- ZHANG X D. Modern signal processing[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 367 (in Chinese).
- [3] HYVÄRINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, 10(3): 626-634.
- [4] BINGHAM E, HYVÄRINEN A. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals[J]. *International Journal of Neural Systems*, 2000, 10(1): 1-8.
- [5] 王冬华, 杨吟华, 陈正禄, 等. 独立分量分析联合时域处理同频干扰抑制方法[J]. *现代防御技术*, 2015, 43(5): 159-164.
- WANG D H, YANG Y H, CHEN Z L, et al. Co-channel interference suppression based on joint independent component analysis and time domain[J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(5): 159-164(in Chinese).
- [6] 陈希信, 王峰, 龙伟军. 基于独立成分分析的外辐射源雷达同频干扰抑制[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2015, 10(1): 75-77.
- CHEN X X, WANG F, LONG W J. Co-channel interference suppression for passive radar based on independent component analysis[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2015, 10(1): 75-77(in Chinese).
- [7] YOU H, YU W Z, YOU H. Co-channel interference restraining for passive radar with illuminators of opportunity based on ICA[C]//2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-3.
- [8] 吕晓德, 孙正豪, 刘忠胜, 等. 基于二阶统计量盲源分离算法的无源雷达同频干扰抑制研究[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(5): 1288-1296.
- LÜ X D, SUN Z H, LIU Z S, et al. Research on suppressing co-channel interference of passive radar based on blind source separation using second order statistics[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(5): 1288-1296(in Chinese).
- [9] 袁梅, 牛奔, 董韶鹏, 等. 伪多源采样复域FastICA冲击定位算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(2): 243-250.
- YUAN M, NIU B, DONG S P, et al. Pseudo-multi-source-sampling complex domain FastICA for impact location[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(2): 243-250 (in Chinese).
- [10] SUN W H, LV Z, WU M C, et al. A comparative experimental study between instantaneous and convolutional BSS models for saccadic EOG signal separation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 70: 1-11.
- [11] TUTÅ L, NICOLAESCU M, ROSU G, et al. A robust adaptive filtering method based on independent component analysis (ICA)[C]//2020 13th International Conference on Communications (COMM). Piscataway: IEEE Press, 2020: 59-64.
- [12] 戴前伟, 成沁宇, 冯德山. 基于FastICA的低信噪比探地雷达信号去噪[J]. *物探化探计算技术*, 2017, 39(6): 727-735.
- DAI Q W, CHENG Q Y, FENG D S. Low signal-noise ratio GPR signal denoising based on FastICA[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 39(6): 727-735 (in Chinese).
- [13] WANG H J, DUAN W Y, ZHAO H, et al. Research of night vision image denoising method based on the improved FastICA[C]//2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2017: 332-336.
- [14] FOU DA M E, SHABOYAN S, ELEZABI A, et al. Application of ICA on self-interference cancellation of in-band full duplex systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(7): 924-927.
- [15] LIU J, SONG H, SUN H W, et al. High-precision identification of power quality disturbances under strong noise environment based on FastICA and random forest[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(1): 377-387.
- [16] XIANG Y, PENG D Z, UBHAYARATNE I, et al. Second-order cyclostationary statistics-based blind source extraction from convolutional mixtures[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 2011-2019.
- [17] ADALI T, HAYKIN S. Adaptive signal processing[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [18] KOLDOVSKÝ Z, TICHA VSKÝ P. Gradient algorithms for complex non-Gaussian independent component/vector extraction, question of convergence[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(4): 1050-1064.
- [19] 贾雁飞. 独立分量分析及在信号提取中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 30.
- JIA Y F. Research on independent component analysis and its application in extraction of signal[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018: 30 (in Chinese).

Blind source extraction of complex non-Gaussian signals based on convolution linear mixture model

LI Miaomiao^{1,2,3}, LYU Xiaode^{1,2,*}, WANG Ning^{1,2,3}, LIU Zhongsheng^{1,2}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. National Key Lab of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Due to the multipath effect of the radar signal, the blind source separation algorithm based on the instantaneous linear mixture model is no longer applicable. A blind source extraction method for complex non-Gaussian signals based on the FastICA algorithm is proposed. The mixed system is modeled as a convolutional linear mixture model, so that each multipath signal does not need to be regarded as an independent source signal in the signal model, which not only saves the number of receiving channels, but also reduces the complexity of blind source separation process. The non-Gaussian feature of the signal to be extracted is used to extract complex non-Gaussian sources in Gaussian background. The experimental results show that when the signal to interference ratio is -30 dB, the proposed method can quickly and effectively deal with the extraction of complex non-Gaussian sources in the convolutional linear mixture model, which provides a new method for weak signal extraction in this scene.

Keywords: multipath effect; convolution linear mixing; complex FastICA algorithm; non-Gaussian signal; blind source extraction

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0201

基于 SRCKF 的多传感器融合自适应鲁棒算法

李春辉, 马健*, 杨永建, 肖冰松, 邓有为

(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘 要: 为解决模型误差和异常量测值发生时平方根容积卡尔曼滤波 (SRCKF) 算法滤波性能下降甚至滤波发散的问题, 提出了一种多传感器融合自适应鲁棒算法。基于新息协方差匹配原则设计了鲁棒子系统以抑制量测异常值, 同时为克服模型误差使用基于新息修正的低复杂度自适应 SRCKF (LCASRCKF) 算法设计了自适应子系统, 根据 2 种子系统的特点和局限提出全局融合架构, 使系统可以充分平衡并利用滤波过程中先验的模型预测值信息和后验的量测值信息, 最终降低估计误差。仿真结果表明: 相比鲁棒多渐消因子容积卡尔曼滤波 (RMCKF) 等算法, 所提融合算法在滤波精度、稳定性和收敛速度等方面有明显优势。

关键词: 平方根容积卡尔曼滤波; 模型误差; 异常量测值; 多传感器融合; 自适应滤波

中图分类号: TN953

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)01-0220-09

容积卡尔曼滤波^[1-2](cubature Kalman filter, CKF) 是 Arasaratnam 等学者提出的一种非线性滤波算法。CKF 基于三阶球面径向原则进行数值运算, 逼近最优滤波框架中的状态后验分布^[3], 能以至少二阶泰勒精度逼近任何非线性系统的后验协方差和均值^[4], 在目标跟踪^[5]、导航^[6]等领域应用广泛。为了获得更高的数值稳定性, 正交三角分解被引入 CKF 迭代过程, 构成了平方根 CKF (square-root CKF, SRCKF) 算法。

但是, CKF/SRCKF 算法的自适应性和鲁棒性并不总能满足实际应用场景的需求, 如机动目标的跟踪。从滤波的角度出发, 影响 SRCKF 状态估计性能的主要因素有 2 类: ①目标建模与实际不匹配、目标机动后状态发生突变等造成的模型误差; ②量测缺失、量测偏差等造成的异常量测值^[7]。

目前, 主要有 2 种途径克服模型误差: ①从提高模型自适应性和准确性出发对目标进行再建模^[8-10]; ②构建和改进各种自适应滤波算法^[11-13]。其中,

SRCKF 与强跟踪滤波器 (strong tracking filter, STF) 架构的结合可以有效克服模型误差的影响^[14-17], 但是也存在求解计算量大^[17]等局限, 因此, 文献 [18] 提出了基于新息修正的低复杂度自适应 CKF (low complexity adaptive cubature Kalman filter, LCACKF) 算法, 可以作为 STF 的有效替代算法。另外, 针对异常量测值也有各种鲁棒技术^[19-21]。但是上述方法难以克服模型误差和异常量测值同时发生带来的不良影响。

实际上, 也有一些鲁棒滤波器可以解决上述问题, 如鲁棒 M-M 滤波器^[22]、 H_∞ 滤波器^[23]和重尾分布噪声滤波器^[24-25]等。但是这些滤波算法存在理论推导复杂、迭代次数多的局限性。此外, 构建自适应鲁棒滤波器^[26-30]也可以有效克服这一问题。Yang 等^[26-27]建立了一套自适应鲁棒卡尔曼滤波 (adaptively robust Kalman filter, ARKF) 理论, 利用鲁棒估计方法控制测量异常值, 并引入自适应渐消因子克服模型误差, 成功运用于动态导航定位^[28]。但

收稿日期: 2021-04-20; 录用日期: 2021-05-31; 网络出版时间: 2021-06-03 10:20

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210602.1454.002.html

基金项目: 空军工程大学校长基金 (XZJ2020039)

*通信作者. E-mail: majiankgd@163.com

引用格式: 李春辉, 马健, 杨永建, 等. 基于 SRCKF 的多传感器融合自适应鲁棒算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (1): 220-228.

LI C H, MA J, YANG Y J, et al. Adaptively robust multi-sensor fusion algorithm based on square-root cubature Kalman filter [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (1): 220-228 (in Chinese).

是当在无法获得全局状态的鲁棒估计解时, ARKF 就可能失效^[29], 因此文献 [30] 基于 ARKF 架构提出了一种鲁棒多渐消因子容积卡尔曼滤波 (robust multiple fading factors cubature Kalman filter, RMCKF), 克服了 ARKF 的局限性, 且迭代次数少。RMCKF 结合了 STF 架构及基于 Huber 函数的鲁棒估计, 但是 RMCKF 为次优算法的结合, 滤波精度不够高, 而且当新息出现较大偏差时, 均是基于新息构建的渐消因子和修正的量测误差协方差矩阵就难以正确有效的获得。

因此, 为了克服模型误差和异常量测值的影响, 一方面受到自适应鲁棒滤波器结构的启发, 另一方面结合多传感器信息融合技术精度高和互补性强等优点^[31], 本文提出一种多传感器融合自适应鲁棒算法。首先, 基于新息协方差匹配原则设计了鲁棒子系统以控制异常量测值; 然后, 将文献 [18] 中提出的自适应算法与 SRCKF 结合构成 LCASRCKF, 并用其代替 STF 设计了自适应子系统, 以此克服模型误差; 最后, 结合 2 种子系统的特点和算法设计缺陷提出了一种基于分布式的融合架构, 使得全局输出可以充分平衡并利用先验的模型预测值信息和后验的量测值信息。仿真结果验证了本文所提融合架构和融合算法的有效性, 在存在模型误差和异常量测值的情况下, 融合算法有着明显更优的状态估计性能。

1 平方根容积卡尔曼滤波

考虑如下非线性离散加性噪声系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} = h(\mathbf{x}_{k+1}) + \mathbf{v}_{k+1} \end{cases} \quad (1)$$

该系统满足如下统计特性:

$$\begin{cases} E(\mathbf{w}_k) = 0, \text{cov}(\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T) = \mathbf{Q}_k \delta_{kj} \\ E(\mathbf{v}_{k+1}) = 0, \text{cov}(\mathbf{v}_{k+1} \mathbf{v}_j^T) = \mathbf{R}_{k+1} \delta_{k+1,j} \\ \text{cov}(\mathbf{w}_k \mathbf{v}_j^T) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f()$ 和 $h()$ 分别为非线性状态转移函数和量测函数; \mathbf{x}_{k+1} 和 \mathbf{z}_{k+1} 分别为 n 维和 l 维的状态向量和量测向量; \mathbf{w}_k 和 \mathbf{v}_{k+1} 分别为过程噪声和量测噪声, 两者相互独立且对应的噪声协方差矩阵分别为 \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_{k+1} , 均为高斯白噪声。

对于式(1)和式(2)所建模的系统, 假设 k 时刻系统的状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 和估计误差协方差 $\mathbf{P}_{k|k}$ 已知, 则 SRCKF 算法在 $k+1$ 时刻的状态估计步骤可以总结如 1.1 节、1.2 节所示。

1.1 时间更新

1) 使用 k 时刻状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 和估计误差协方差 $\mathbf{P}_{k|k}$ 估计容积点:

$$\mathbf{X}_{i,k|k} = \mathbf{S}_{k|k} \boldsymbol{\xi}_i + \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中: $\mathbf{S}_{k|k}$ 为 $\mathbf{P}_{k|k}$ 的平方根系数, 可以通过 Cholesky 分解获得, 表示为 $\mathbf{S}_{k|k} = \text{Chol}(\mathbf{P}_{k|k})$; $\mathbf{X}_{i,k|k}$ 为容积点; $\boldsymbol{\xi}_i$ 为基本容积点集^[17], 且容积点的个数满足 $m = 2n$ 。

2) 计算传播后的容积点 $\mathbf{X}_{k+1|k}^{is}$, 进而确定状态预测值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ 和预测误差协方差矩阵的平方根系数 $\mathbf{S}_{k+1|k}$:

$$\mathbf{X}_{k+1|k}^{is} = f(\mathbf{X}_{i,k|k}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{X}_{k+1|k}^{is} \quad (5)$$

$$\mathbf{S}_{k+1|k} = \text{Tria}([\mathbf{X}_{k+1|k}^*, \mathbf{S}_Q]) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{S}_Q = \text{Chol}(\mathbf{Q}_k)$; $\text{Tria}(\cdot)$ 代表正交三角矩阵分解运算^[16]; $\mathbf{X}_{k+1|k}^*$ 为中心加权矩阵, 表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1|k}^* = & \frac{1}{\sqrt{m}} [\mathbf{X}_{k+1|k}^{1*} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \mathbf{X}_{k+1|k}^{2*} - \\ & \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \dots, \mathbf{X}_{k+1|k}^{m*} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}] \end{aligned} \quad (7)$$

1.2 量测更新

1) 使用 $k+1$ 时刻状态预测值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ 和预测误差协方差的平方根系数 $\mathbf{S}_{k+1|k}$ 估计容积点:

$$\mathbf{X}_{k+1|k}^i = \mathbf{S}_{k+1|k} \boldsymbol{\xi}_i + \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

2) 计算传播后的容积点 $\mathbf{Z}_{k+1|k}^i$, 进而确定量测预测值 $\hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}$ 、新息 \mathbf{r}_{k+1} 、新息误差协方差矩阵的平方根系数 $\mathbf{S}_{zz,k+1|k}$ 和互协方差矩阵 $\mathbf{P}_{xz,k+1|k}$ 。

$$\mathbf{Z}_{k+1|k}^i = h(\mathbf{X}_{k+1|k}^i) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$\mathbf{z}_{k+1|k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{Z}_{k+1|k}^i \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{z}_{k+1|k} - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k} \quad (11)$$

$$\mathbf{S}_{zz,k+1|k} = \text{Tria}([\mathbf{Y}_{k+1|k}, \mathbf{S}_R]) \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{xz,k+1|k} = \mathbf{X}_{k+1|k} \mathbf{Y}_{k+1|k}^T \quad (13)$$

式中: $\mathbf{S}_R = \text{Chol}(\mathbf{R}_{k+1})$; $\mathbf{X}_{k+1|k}$ 和 $\mathbf{Y}_{k+1|k}$ 为中心加权矩阵, 表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{k+1|k} = & \frac{1}{\sqrt{m}} [\mathbf{z}_{k+1|k}^1 - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}, \mathbf{z}_{k+1|k}^2 - \\ & \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}, \dots, \mathbf{z}_{k+1|k}^m - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1|k} = & \frac{1}{\sqrt{m}} [\mathbf{X}_{k+1|k}^1 - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \mathbf{X}_{k+1|k}^2 - \\ & \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \dots, \mathbf{X}_{k+1|k}^m - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}] \end{aligned} \quad (15)$$

3) 计算卡尔曼增益 \mathbf{K}_{k+1} 、 $k+1$ 时刻状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}$ 和估计误差协方差矩阵的平方根系数 $\mathbf{S}_{k+1|k+1}$:

$$\mathbf{K}_{k+1} = (\mathbf{P}_{xz,k+1|k} / \mathbf{S}_{zz,k+1|k}^T) / \mathbf{S}_{zz,k+1|k} \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1|k} - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}) \quad (17)$$

$$\mathbf{S}_{k+1|k+1} = \text{Tria}([\mathbf{X}_{k+1|k} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{Y}_{k+1|k}, \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{S}_R]) \quad (18)$$

2 子系统设计与融合架构

2.1 基于新息协方差匹配的鲁棒 SRCKF 子系统

对于多传感器融合算法,子系统的鲁棒性是保证系统整体性能的关键因素。如果子系统对异常量测值不具有鲁棒性且不能及时识别和隔离误差,融合效果就会产生偏差甚至发散。因此,文献[7,32]都是先设计鲁棒滤波算法,再对全局融合进行设计。

协方差匹配原则是一种理论简单且计算量小的鲁棒技术^[12],可以通过对量测噪声进行修正和调整,以此削弱异常量测值在滤波过程中的作用。因此,基于新息协方差匹配来建立鲁棒 SRCKF 子系统。当系统滤波正常时,理论和实际的新息协方差矩阵相匹配:

$$\mathbf{r}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1}^T = \mathbf{P}_{z,z,k+1|k} = \mathbf{P}_{z,k+1|k} + \mathbf{R}_{k+1} \quad (19)$$

式(19)使用了 $\mathbf{r}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1}^T$ 来估计实际的新息协方差矩阵,也可以使用 Sage 开窗法,但是之前的新息序列对当前时刻产生平滑效应。特别是对于突变型的异常量测值, Sage 开窗法无法准确反映当前新息中包含的误差信息。

$$\mathbf{P}_{z,z,k+1|k} = \mathbf{S}_{z,z,k+1} \mathbf{S}_{z,z,k+1}^T \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{z,k+1|k} = \mathbf{P}_{z,z,k+1|k} - \mathbf{R}_{k+1} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{P}_{z,z,k+1|k}$ 和 $\mathbf{P}_{z,k+1|k}$ 分别为理论新息协方差矩阵和观测量自协方差矩阵。

当系统存在异常量测值时,新息会增大,为使式(22)继续成立,对量测噪声协方差矩阵 \mathbf{R}_{k+1} 进行自适应修正:

$$\hat{\mathbf{R}}_{k+1} = \mathbf{r}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1}^T - \mathbf{P}_{z,k+1|k} \quad (22)$$

在得到修正后的量测噪声协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{k+1}$ 后,式(23)和式(24)就会变成

$$\mathbf{S}_{z,z,k+1|k} = \text{Tria} \left(\left[\mathbf{Y}_{k+1|k}, \hat{\mathbf{S}}_{\mathbf{R}} \right] \right) \quad (23)$$

$$\mathbf{S}_{k+1|k+1} = \text{Tria} \left(\left[\chi_{k+1|k} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{Y}_{k+1|k}, \mathbf{K}_{k+1} \hat{\mathbf{S}}_{\mathbf{R}} \right] \right) \quad (24)$$

式中: $\hat{\mathbf{S}}_{\mathbf{R}} = \text{Chol} \left(\hat{\mathbf{R}}_{k+1} \right)$ 。

实际上,鲁棒算法应该在异常量测值存在的情况下再去影响滤波器特性,否则就会对滤波最优性造成影响。因此需要建立切换准则,根据数据实际情况来选择标准或者鲁棒 SRCKF。基于假设检验理论建立的服从 χ^2 分布的质量检测统计函数是一种有效的方法^[8-9,17],但是随着量测向量维数的增加,统计函数的计算负载也随之增大,实时性会受到影响。

结合文献[18]中的门限思想及概率论可以建立起基于门限判决的切换准则。从式(1)可以看到, $\mathbf{z}_{k+1} \sim N(\hat{\mathbf{z}}_{k+1}, \mathbf{R}_{k+1})$, 则根据概率论(3σ 准则),在系统滤波正常时,量测向量的第 i 个分量 $z_{k+1,i}$ 将以 99.73% 的概率在区间 $[\hat{z}_{k+1,i} - 3\sqrt{R_{k+1,i}}, \hat{z}_{k+1,i} + 3\sqrt{R_{k+1,i}}]$, 其中, $R_{i,k+1}$ 为 \mathbf{R}_{k+1} 对角线上第 i 个分量,也代表了对应维度变量的量测误差。因此当 $|r_{k+1,i}| > 3\sqrt{R_{k+1,i}}$, 说明异常量测值的出现使得新息增大,从而超出了门限,这时需要切换到鲁棒 SRCKF。

基于门限判决的切换准则和基于 χ^2 分布的质量检测统计函数实质上都是概率论的运用,两者的容错率都可以得到保证。

2.2 基于修正的自适应 SRCKF 子系统

目标机动或者目标建模不匹配造成的模型误差也会使得滤波器性能下降甚至滤波发散,这是因为之前的数据在滤波过程中起到了过强的牵制作用^[3],需要加强新的量测数据的作用来使系统及时跟踪真值。当模型误差存在时,状态预测值就会与真实目标状态产生偏差,进而使新息增大。从式(20)可以看到,若子系统仍然运行鲁棒 SRCKF 算法,修正后的 \mathbf{R}_{k+1} 会增大,反而导致量测信息在滤波过程中比重进一步减小。显然,算法设计的基本思想导致鲁棒子系统难以克服模型误差。

这就需要设计自适应子系统来解决这一问题。LCACKF 算法通过设置与新息关联的判定门限和修正准则,直接对状态预测值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ 进行修正,使得预测值可以及时“跟上”目标真实状态,减小预测误差,进而减小状态估计误差^[18]。文献[18]通过误差分析和仿真验证表明该算法不仅有较高的滤波精度,还具有低算法复杂度和快速收敛等优势,将其与 SRCKF 结合构成 LCASRCKF 后可以作为 STF-SRCKF 的有效替代算法,用以克服模型误差带来的不良影响。但是该算法还存在一些问题,需要改进。

文献[18]中对修正判决门限的设置基于经验和具体仿真场景。本文将判决门限缩放因子 λ 区间调整为 [2,3], 调整结合了设计鲁棒系统时用到的 3σ 准则。之所以比 3 稍小一些是为了增加修正区域对模型误差的敏感性,减小滤波过程中积累误差的影响。

LCASRCKF 算法并不能有效控制异常量测值,这也是由算法设计的基本思想造成的:对于状态预测值的修正是基于新息的,当新息偏差源自异常量测值而非目标状态的突变时,新息就不能反映出预测值偏离实际状态的趋势,此时再使用修正算法反而会进一步增大预测误差。实际上,这也是很多克

服模型误差的自适应算法都有的缺陷, 如 STF 通过实时调整增益矩阵, 加重量测数据在滤波中的作用, 可以有效克服模型误差, 但是在异常量测值出现时其滤波性能显然会受到较大影响。

2.3 融合准则和融合架构

由上述分析可知, 单独的自适应子系统和鲁棒子系统难以同时克服模型误差和异常量测值的影响, 这是 2 种算法设计时的基本思想造成的, 也就使得直接进行简单的量测融合或者状态融合并不能达到预期的效果和精度。因此, 本文中对融合架构进行改进, 主要考虑以下几点因素:

1) 鲁棒 SRCKF 子系统的鲁棒量测值和高量测精度是自适应 SRCKF 子系统所需要的。

2) 对于自适应 SRCKF 子系统, 修正后的状态预测值贴近目标真实状态, 一方面可以为全局融合提供更多信息, 另一方面也是难以自适应跟随目标状态变化的鲁棒 SRCKF 子系统所需要的。

3) 融合系统的设计类似于 RMCKF, 将鲁棒估计结果和自适应估计结果结合以平衡先验的模型信息和后验的量测信息对状态估计过程的贡献。但是前文也提到 RMCKF 算法的不足: ①由于这种算法是次优算法, 滤波精度不高; ②在模型误差和突变型异常量测值同时存在时, 新息会剧增, 此时渐消因子的自适应作用会对改进的量测误差协方差矩阵的鲁棒作用产生“抵消”。因此, 在鲁棒子系统中再添加一个门限 $\beta\sqrt{\mathbf{R}_{k+1}^R}$ 来判别这种情况, 当新息超过这一门限时, 偏差的主要来源是异常量测值而非模型误差, 此时全局系统应该降低对量测的需求, 即只使用鲁棒 SRCKF 算法, 并将鲁棒子系统得到的估计值作为系统的输出值。 β 是一个基于误差分析和经验的门限调节参数, 其取值与实际目标机动状态、量测环境和系统量测精度相关。设置 β 时要先满足门限可以判别并控制突变的量测偏差及量测缺失。另外, β 可以设置稍小点, 因为此时仍然是异常量测带来的误差更大, 仅使用鲁棒子系统的输出要比加上自适应子系统效果更好。但是如果 β 继续减小, 即使新息超出了门限也不能判定此时的偏差就是来自模型误差或者异常量测或者两者的叠加, 门限的设置也就没有了意义, 而且这种情况下通过融合自适应子系统和鲁棒子系统的输出更能充分利用模型信息和量测信息, 减小估计误差。

图 1 为信息融合架构框。图中: $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^A$ 为自适应子系统中经过修正的状态预测值的融合值; $\hat{\mathbf{R}}_{k+1}^R$ 和 \mathbf{z}_{k+1}^R 分别为鲁棒子系统经过修正后的量测噪声协方差矩阵和量测值的融合值; S 为融合输出系数, 当所有鲁棒子系统都受到突变型异常量测的影响, 即新息都大于门限 $\beta\sqrt{\mathbf{R}_{k+1}^R}$ 时, 此时自适应子系统的输

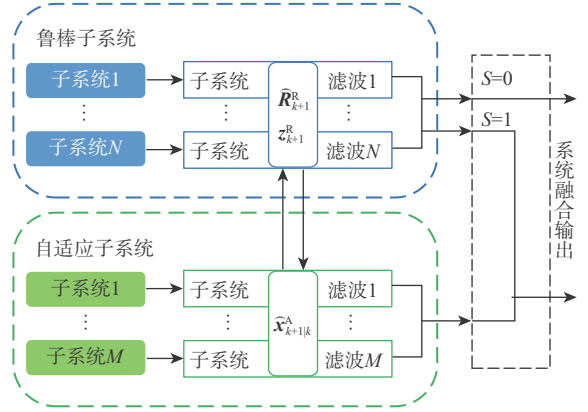


图 1 融合架构

Fig. 1 Fusion architecture

出对于全局融合无效甚至会产生“抵消”效果, 将鲁棒子系统的融合输出作为系统融合输出。

$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^A$ 、 $\hat{\mathbf{R}}_{k+1}^R$ 和 \mathbf{z}_{k+1}^R 的融合方式如式(25)~式(27)所示。其中, $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^A$ 和 \mathbf{z}_{k+1}^R 均使用融合最优权分配原则^[34]。

$$\hat{\mathbf{R}}_{k+1}^R = \left[\sum_{i=1}^N \left(\hat{\mathbf{R}}_{k+1}^i \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (25)$$

$$\mathbf{z}_{k+1}^R = \hat{\mathbf{R}}_{k+1}^R \sum_{i=1}^N \left(\hat{\mathbf{R}}_{k+1}^i \right)^{-1} \mathbf{z}_{k+1}^i \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^A = \left[\sum_{j=1}^M \left(\mathbf{S}_{k+1|k}^j \left(\mathbf{S}_{k+1|k}^j \right)^T \right)^{-1} \right]^{-1} \cdot \sum_{j=1}^M \left(\mathbf{S}_{k+1|k}^j \left(\mathbf{S}_{k+1|k}^j \right)^T \right)^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^j \quad (27)$$

式中: i 和 j 分别为鲁棒子系统和自适应子系统序号。

在子系统参数互传后, 再完成各自的滤波过程, 最终按式(28)和式(29)进行融合得到系统全局融合输出 $\mathbf{S}_{k+1|k+1}^F$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}^F$ 。

$$\mathbf{S}_{k+1|k+1}^F = \text{Chol} \left\{ \left[\sum_{i=1}^N \left(\left(\mathbf{P}_{k+1|k+1}^i \right)^{-1} - \left(\mathbf{P}_{k+1|k}^i \right)^{-1} \right) + \sum_{j=1}^M \left(\left(\mathbf{P}_{k+1|k+1}^j \right)^{-1} - \left(\mathbf{P}_{k+1|k}^j \right)^{-1} \right) \right] \right\} \quad (28)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}^F = \mathbf{P}_{k+1|k+1}^F \left[\sum_{i=1}^N \left(\left(\mathbf{P}_{k+1|k+1}^i \right)^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}^i - \left(\mathbf{P}_{k+1|k}^i \right)^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^i \right) + \sum_{j=1}^M \left(\left(\mathbf{P}_{k+1|k+1}^j \right)^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}^j - \left(\mathbf{P}_{k+1|k}^j \right)^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^j \right) \right] \quad (29)$$

式中: $\mathbf{P}_{k+1|k+1}$ 和 $\mathbf{P}_{k+1|k}$ 分别为估计误差协方差矩阵和预测误差协方差矩阵, 由滤波算法中对应的矩阵平方根系数求得。

通过设计一种基于分布式的融合架构可以实

现:在所有系统滤波正常时,融合使用了更多的信息,因此全局输出的精度会明显提升;当存在模型误差和量测偏差时,通过融合使得全局输出可以有效充分地利用先验的模型信息和后验的量测信息;当突变型不良量测甚至量测缺失的情况出现时,可以避免自适应子系统对全局输出的“抵消”作用。

3 数值仿真与分析

3.1 仿真条件设置

仿真中,状态向量为 $\mathbf{X}_k = [x, \dot{x}, y, \dot{y}]^T$,量测向量为 $\mathbf{Z}_k = [x, y]^T$, x 和 y 为位置变量, \dot{x} 和 \dot{y} 为速度变量。目标在二维平面进行匀速(constant velocity, CV)运动和协调转弯(coordinated turn, CT)运动交替的混合机动,两者的状态转移矩阵分别建模为

$$\mathbf{F}_{CV} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{F}_{CT} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(\omega T)}{\omega} & 0 & \frac{\cos(\omega T) - 1}{\omega} \\ 0 & \cos(\omega T) & 0 & -\sin(\omega T) \\ 0 & \frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega} & 1 & \frac{\sin(\omega T)}{\omega} \\ 0 & \sin(\omega T) & 0 & \cos(\omega T) \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中: T 为采样时间; ω 为转弯率。

仿真中,运动总时长为160 s, $T=1$ s;目标初始位置为 $[x, y]=[1\ 000, 1\ 000]$ m,初始速度为 $[\dot{x}, \dot{y}]=[200, 10]$ m/s;目标在30~60 s之间匀速右转弯,在90~120 s之间匀速左转弯,其他时间段保持匀速直线运动,其中右转弯率为 -4 rad/s,左转弯率为 4 rad/s。

融合系统由1个高量测精度的鲁棒SRCKF子系统和2个自适应SRCKF子系统组成,按照图1中的架构进行融合输出。在滤波过程中,3个子系统的过程噪声协方差矩阵均为 $\mathbf{Q}=\text{diag}(1,1,1,1)$,鲁棒子系统和自适应子系统的量测噪声协方差矩阵分别为 $\mathbf{R}^R=\text{diag}(50,50)$, $\mathbf{R}^A=\text{diag}(100,100)$ 。

为验证本文所提融合算法在模型误差和异常量测值存在时的有效性,将本文算法与SRCKF算法、LCASRCKF算法、RMCKF算法进行对比。融合算法中的门限调节参数 β 为9,同时为了对比有效,LCASRCKF和RMCKF所使用的量测噪声协方差矩阵也设置为 \mathbf{R}^R 。

使用 x 和 y 方向上的位置均方根误差(root mean square error, RMSE)对滤波算法的状态估计性能进行量化评价,并进行200次蒙特卡罗实验,得到统计平均结果, RMSE通过式(32)计算:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\mathbf{X}_i(k) - \hat{\mathbf{X}}_i^j(k|k))^2} \quad (32)$$

式中: N 为仿真总次数; j 和 k 指第 j 次仿真的 k 时刻;

$\mathbf{X}_i(k)$ 和 $\hat{\mathbf{X}}_i^j(k|k)$ 分别为状态向量第 i 维分量的真实值和状态估计值。每次蒙特卡罗仿真中,滤波初始值和目标初始状态保持一致。

3.2 仿真场景1:模型误差

在仿真场景1中,4种算法在滤波过程中均一直使用 \mathbf{F}_{CV} ,以此在30~60 s及90~120 s两个时间段引入由于模型不匹配造成的模型误差;其次在80 s时引入 $[0, 30 \text{ m/s}, 0, 30 \text{ m/s}]^T$ 的速度突变,以此引入由于状态突变造成的模型误差。其中一次仿真的目标真实轨迹及4种算法的滤波轨迹如图2所示。可以看出,4种算法都能跟踪目标实际运动,但是目标2次转弯阶段即存在模型不匹配时,SRCKF算法性能下降,估计出的轨迹和真实轨迹不能很好契合。

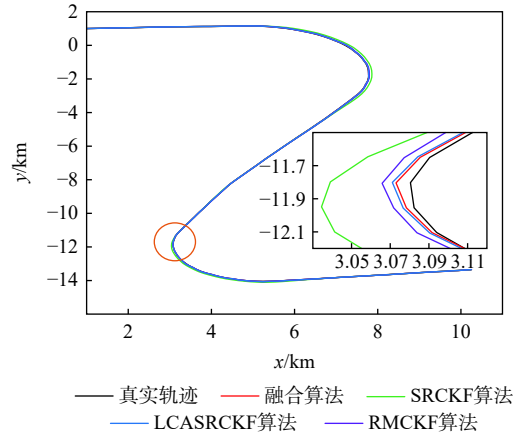


图2 目标运动轨迹(场景1)

Fig. 2 Target trajectory (scenario 1)

4种算法在 x 和 y 方向上位置的RMSE曲线对比如图3和图4所示,对应的平均RMSE值如表1所示。

从图3和图4可以看出,在模型准确的情况下,本文所提融合算法的滤波精度明显高于其他3种算法,而由于RMCKF和LCASRCKF都是次优算法,量测精度比SRCKF算法还要差一些。另外,在模型不匹配和状态突变造成模型误差时,SRCKF算法的RMSE曲线会发生较大跳变, RMCKF和LCASRCKF算法都能克服模型误差的不良影响,值得注意的是, RMCKF算法精度低于LCASRCKF算法,这是因为此时偏差的主要来源是模型误差, RMCKF-算法对 \mathbf{R}_{k+1} 的鲁棒修正会对渐消因子的作用产生一定的“削弱”。

结合表1可以看到,融合算法有着明显更优的滤波精度和收敛速度,这是因为融合架构中不仅包含更多鲁棒子系统的量测信息,还融入了更多自适应子系统修正后的状态预测信息。

3.3 仿真场景2:异常量测值

在场景2中,模型误差(同场景1)及异常量测

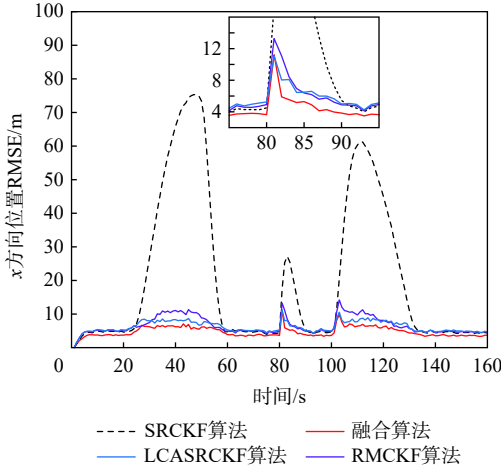


图 3 x 方向位置均方根误差(场景 1)

Fig. 3 RMSE of position in x axis (scenario 1)

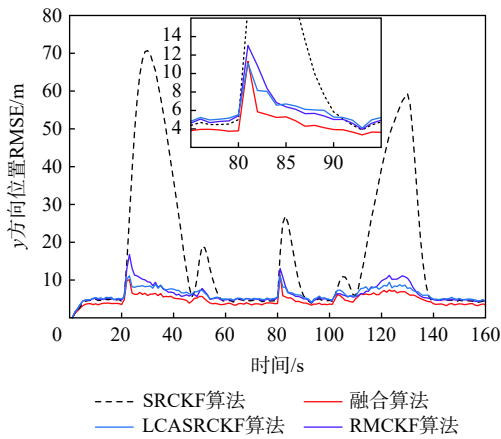


图 4 y 方向位置均方根误差(场景 1)

Fig. 4 RMSE of position in y axis (scenario 1)

表 1 平均 RMSE 对比 (场景 1)

Table 1 Comparison of mean RMSEs (scenario 1)

算法	x 方向位置平均 RMSE/m	y 方向位置平均 RMSE/m
融合算法	4.744 5	4.711 4
SRCKF	21.009 1	17.731 6
LCASRCKF	6.212 1	6.188 1
RMCKF	6.587 0	6.327 9

值同时发生。将 10 ~ 12 s 的量测值置零以引入量测缺失的情况,同时对 80 s 和 105 s 的量测值分别引入 $[400 \text{ m}, 400 \text{ m/s}, 400 \text{ m}, 400 \text{ m}]^T$ 和 $[300 \text{ m}, 300 \text{ m/s}, 300 \text{ m}, 300 \text{ m}]^T$ 的量测偏差。

4 种算法在 x 和 y 方向上的位置 RMSE 曲线对比如图 5 和图 6 所示,图 7 和图 8 为对应 RMSE 曲线的放大图;表 2 为 4 种算法平均 RMSE 值的对比。

从图 5 和图 6 可以看到,在异常量测值引入的时刻,SRCKF、RMCKF 和 LCASRCKF 这 3 种算法的 RMSE 曲线都出现很大的跳变,而 RMCKF 算法能以快速的收敛速度迅速降低误差,LCASRCKF 算法收敛速度稍慢但也优于 SRCKF 算法。值得注意

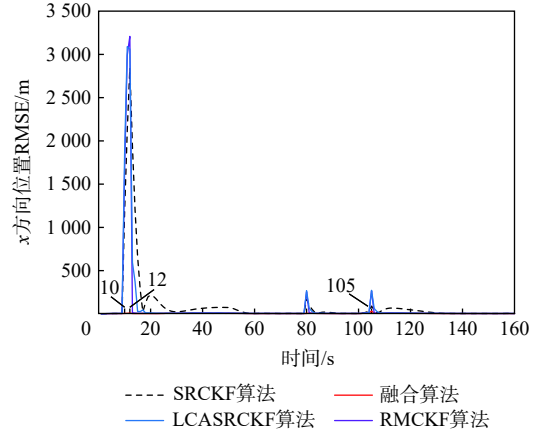


图 5 x 方向位置均方根误差(场景 2)

Fig. 5 RMSE of position in y axis (scenario 2)

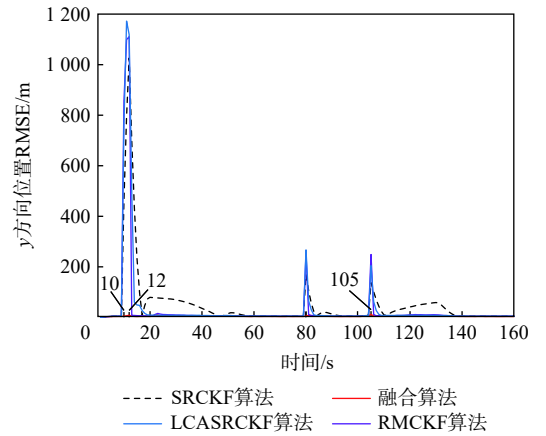


图 6 y 方向位置均方根误差(场景 2)

Fig. 6 RMSE of position in y axis (scenario 2)

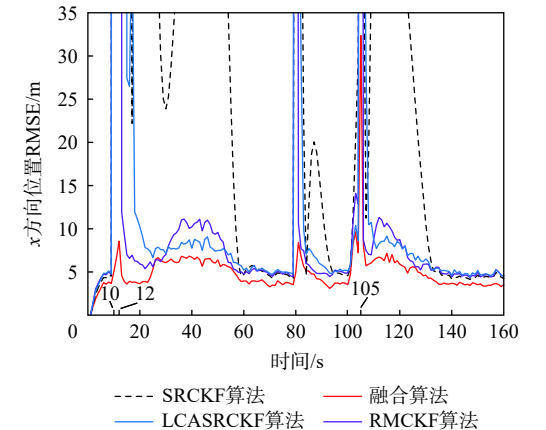


图 7 x 方向位置 RMSE 细节(场景 2)

Fig. 7 Details of RMSE of position in x axis (scenario 2)

的是,在异常量测值和模型误差同时发生时,LCASRCKF 和 RMCKF 算法甚至出现了比 SRCKF 算法更高的峰值,这也符合之前的分析:此时新息的偏差主要来自于异常量测值,LCASRCKF 算法在此时修正状态预测值显然难以克服其不良影响甚至使误差进一步增大;而对于 RMCKF 算法而言,此时基

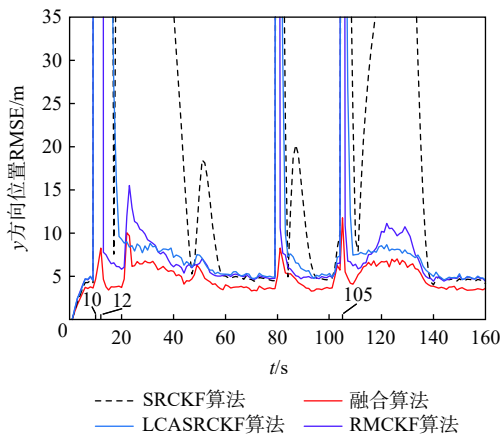


图8 y方向位置RMSE细节(场景2)

Fig. 8 Details of RMSE of position in y axis (scenario 2)

表2 平均RMSE对比(场景2)

Table 2 Comparison of mean RMSEs (scenario 2)

算法	x方向位置平均RMSE/m	y方向位置平均RMSE/m
融合算法	4.964 3	4.797 0
SRCKF	94.409 0	47.955 4
LCASRCKF	67.171 1	33.293 6
RMCKF	58.766 6	28.517 5

于较大新息得到的渐消因子会对改进的量测误差协方差矩阵的鲁棒作用产生“抵消”，这种仿真现象也出现在了文献[30]中。

相比之下，本文所提融合算法在误差存在时有着理想的收敛速度，同时保持了较高的滤波精度和稳定性。融合架构中的融合输出系数 S 使得全局输出可以平衡并充分利用先验预测值和后验量测值在状态估计过程中所提供的信息，因此融合算法的RMSE曲线始终保持相对平稳，没有出现其他算法那样的跳变。结合表2可以看到，融合算法在滤波精度上的优势明显。

从图7和图8可以进一步看到本文融合算法对10~12s之间连续性的量测缺失也能保持鲁棒性；在80s时状态突变和异常量测值的同时发生对融合算法的精度影响不大；但是在105s模型不匹配和异常量测值的同时发生使得融合算法产生了一个稍高的峰值。

4 结论

1) 为保持全局融合时的鲁棒性，基于新息协方差匹配原则建立了鲁棒子系统，为克服模型误差，基于LCASRCKF算法建立了自适应子系统。通过融合架构的改进，使得全局输出可以充分平衡并利用先验的模型预测值信息和后验的量测值信息。

2) 仿真结果验证了所提融合算法及融合架构的有效性。在模型误差存在时，融合算法有着比

RMCKF算法、LCASRCKF算法及SRCKF算法更高的滤波精度和收敛速度；在异常量测值同时被引入时，所提融合算法具有更优的稳定性和收敛速度，同时有着比其他3种算法明显更高的滤波精度。

在融合架构的设计及全局输出的融合方式上主要考虑的是利用更多的信息，采用了分布式结构下无反馈的融合方式。下一步考虑结合联邦滤波器的信息分配等特点，对融合架构进一步优化，使之应用场景更广泛和多变。

参考文献 (References)

- [1] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filters[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1254-1269.
- [2] ARASARATNAM I, HAYKIN S, HURO T R. Cubature Kalman filtering for continuous-discrete systems: Theory and simulations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(10): 4977-4993.
- [3] 王小旭, 潘泉, 黄鹤, 等. 非线性系统确定采样型滤波算法综述[J]. *控制与决策*, 2012, 27(6): 801-812.
WANG X X, PAN Q, HUANG H, et al. Overview of deterministic sampling filtering algorithms for nonlinear system[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(6): 801-812(in Chinese).
- [4] JULIER S J, UHLMANN J K. A general method for approximating nonlinear transformation of probability distributions[EB/OL]. (1996-11-01) [2021-04-01]. <http://www.eng.ox.ac.uk/>.
- [5] ZHANG A, BAO S D, GAO F, et al. A novel strong tracking cubature Kalman filter and its application in maneuvering target tracking[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(11): 2489-2502.
- [6] YUE Z, LIAN B W, TONG K X, et al. Novel strong tracking square-root cubature Kalman filter for GNSS/INS integrated navigation system[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(6): 976-982.
- [7] 徐博, 刘德政, 张勋. 基于交互式模型的多AUV协同导航鲁棒性滤波算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(9): 2087-2093.
XU B, LIU D Z, ZHANG X. Multiple AUV cooperative navigation algorithm of robust filter based on interacting model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(9): 2087-2093(in Chinese).
- [8] ZHANG H W, XIE J W, GE J A, et al. Adaptive strong tracking square-root cubature Kalman filter for maneuvering aircraft tracking[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 10052-10061.
- [9] ZHANG H W, XIE J W, GE J A, et al. Strong tracking SCKF based on adaptive CS model for manoeuvring aircraft tracking[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(7): 742-749.
- [10] HAN B, HUANG H Q, LEI L, et al. An improved IMM algorithm based on STSRCKF for maneuvering target tracking[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 57795-57804.
- [11] 鲁平, 赵龙, 陈哲. 改进的Sage-Husa自适应滤波及其应用[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(15): 3503-3505.
LU P, ZHAO L, CHEN Z. Improved Sage-Husa adaptive filtering and its application[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(15): 3503-3505(in Chinese).
- [12] MEHRA R. Approaches to adaptive filtering[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1972, 17(5): 693-698.

- [13] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器[J]. 自动化学报, 1991, 17(6): 689-695.
ZHOU D H, XI Y G, ZHANG Z J. A suboptimal multiple fading extended Kalman filter[J]. Acta Automatica Sinica, 1991, 17(6): 689-695(in Chinese).
- [14] 徐树生, 林孝工, 李新飞. 强跟踪自适应平方根容积卡尔曼滤波算法[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2394-2400.
XU S S, LIN X G, LI X F. Strong tracking adaptive square-root cubature Kalman filter algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(12): 2394-2400(in Chinese).
- [15] LI N, ZHU R H, ZHANG Y G. A strong tracking square-root CKF algorithm based on multiple fading factors for target tracking[C]// 2014 Seventh International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization. Piscataway: IEEE Press, 2014: 16-20.
- [16] 张浩为, 谢军伟, 葛佳昂, 等. 自适应CS模型的强跟踪平方根容积卡尔曼滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(6): 19-27.
ZHANG H W, XIE J W, GE J A, et al. Strong tracking square-root cubature Kalman filter over adaptive current statistical model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(6): 19-27(in Chinese).
- [17] ZHANG A, BAO S D, BI W H, et al. Low-cost adaptive square-root cubature Kalman filter for systems with process model uncertainty[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(5): 945-953.
- [18] 李春辉, 马健, 杨永建, 等. 低复杂度自适应容积卡尔曼滤波算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(4): 716-724.
LI C H, MA J, YANG Y J, et al. Low complexity adaptive cubature Kalman filter algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(4): 716-724 (in Chinese).
- [19] MARONNA R A, MARTIN R D, YOHAI V J, et al. Robust statistics: Theory and methods(with R)[M]. New York: John Wiley & Sons, 2019.
- [20] SOKEN H E, HAJIYEV C. Pico satellite attitude estimation via robust unscented Kalman filter in the presence of measurement faults[J]. ISA Transactions, 2010, 49(3): 249-256.
- [21] SOKEN H E, HAJIYEV C, SAKAI S. Robust Kalman filtering for small satellite attitude estimation in the presence of measurement faults[J]. European Journal of Control, 2014, 20(2): 64-72.
- [22] YANG Y X. Robust Bayesian estimation[J]. Bulletin Géodésique, 1991, 65(3): 145-150.
- [23] HU J S, YANG C H. Second-order extended H_∞ filter for nonlinear discrete-time systems using quadratic error matrix approximation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(7): 3110-3119.
- [24] HUANG Y L, ZHANG Y G, LI N, et al. Robust student's t based nonlinear filter and smoother[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(5): 2586-2596.
- [25] BILIK I, TABRIKIAN J. Maneuvering target tracking in the presence of glint using the nonlinear Gaussian mixture Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(1): 246-262.
- [26] YANG Y X. Adaptive navigation and kinematic positioning[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006: 95-97.
- [27] YANG Y X, HE H, XU G. Adaptively robust filtering for kinematic geodetic positioning[J]. Journal of Geodesy, 2001, 75(2-3): 109-116.
- [28] 杨元喜, 任夏, 许艳. 自适应抗差滤波理论及应用的主要进展[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 9-15.
YANG Y X, REN X, XU Y. Main progress of adaptively robust filter with applications in navigation[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(1): 9-15(in Chinese).
- [29] WANG Y D, SUN S M, LI L. Adaptively robust unscented Kalman filter for tracking a maneuvering vehicle[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(5): 1696-1701.
- [30] QIU Z B, QIAN H M, WANG G Q. Adaptive robust cubature Kalman filtering for satellite attitude estimation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(4): 806-819.
- [31] 胡振涛, 曹志伟, 李松, 等. 基于容积卡尔曼滤波的异质多传感器融合算法[J]. 光子·激光, 2014, 25(4): 697-703.
HU Z T, CAO Z W, LI S, et al. Heterogeneous multi-sensor fusion algorithm based on cubature Kalman filter[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2014, 25(4): 697-703(in Chinese).
- [32] 徐树生, 林孝工. 基于鲁棒CKF的多传感器全信息融合算法[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(2): 90-97.
XU S S, LIN X G. Multi-sensor all information fusion algorithm based on robust CKF[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(2): 90-97(in Chinese).
- [33] 徐树生, 林孝工, 赵大威, 等. 强跟踪SRCKF及其在船舶动力定位中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 67-73.
XU S S, LIN X G, ZHAO D W, et al. Strong tracking SRCKF and its application in vessel dynamic positioning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 67-73(in Chinese).
- [34] 凌林本, 李滋刚, 陈超英, 等. 多传感器数据融合时权的最优分配原则[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(2): 33-36.
LING L B, LI Z G, CHEN C Y, et al. Optimal weight distribution principle used in the fusion of multi-sensor data[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2000, 8(2): 33-36(in Chinese).

Adaptively robust multi-sensor fusion algorithm based on square-root cubature Kalman filter

LI Chunhui, MA Jian*, YANG Yongjian, XIAO Bingsong, DENG Youwei

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To deal with the problem that the square-root cubature Kalman filter (SRCKF) will have declined filtering performance or even filtering diverge when model errors and abnormal measurements occur, an adaptively robust multi-sensor fusion algorithm is proposed. Firstly, a robust subsystem is designed based on the innovation covariance matching principle to suppress abnormal measurements. Then, to overcome the model errors, an adaptive subsystem is designed based on the low complexity adaptive SRCKF (LCASRCKF) algorithm. Finally, according to the characteristics and limitations of the two subsystems, a global fusion architecture is proposed, which enables the system to fully balance and utilize the prior model prediction information and the posterior measurement information in the filtering process, and thus reduce the estimation error. The simulation results show that the proposed fusion algorithm has obvious advantages in terms of filtering accuracy, stability and convergence speed compared with the robust multiple fading factors cubature Kalman filter (RMCKF) and other algorithms.

Keywords: square-root cubature Kalman filter; model errors; abnormal measurements; multi-sensor fusion; adaptive filtering

《北京航空航天大学学报》征稿简则

《北京航空航天大学学报》是北京航空航天大学主办的以航空航天科学技术为特色的综合性自然科学学术期刊(月刊)。本刊以反映航空航天领域研究成果与动态、促进学术交流、培养科技人才和推动科技成果向社会生产力转化为办刊宗旨。本刊为中国自然科学技术核心期刊,并被 Ei Compendex 等国内外权威文献检索系统收录。本刊向国内外公开发行人,为进一步提高办刊质量和所刊出文章的学术水平,特制定本简则。

1 论文作者及内容

1.1 本刊面向海内外所有学者。

1.2 主要刊载与航空航天科学技术有关的材料科学与工程、飞行器设计与制造、宇航科学与工程、信息与电子技术、控制技术和自动化工程、流体力学和动力工程、计算机科学及应用技术、可靠性工程与失效分析等领域的研究文章。航空航天科学技术民用方面以及具有航空航天工程背景的应用数学、应用物理、应用力学和工程管理等方面的文章也在本刊优先考虑之列。

2 来稿要求

2.1 论文应具有创新性、科学性、学术性和可读性。

2.2 论文为原创作品,尚未公开发表过,并且不涉及泄密问题。若发生侵权或泄密问题,一切责任由作者承担。

2.3 主题明确,数据可靠,图表清晰,逻辑严谨,文字精练,公式符号标准规范,标点符号正确。

2.4 文稿撰写顺序:中文题名(一般不超过 20 个汉字),作者中文姓名、单位、所在城市、邮政编码(作者顺序始终不得更改),中文摘要(包括目的、方法、结果及结论),中文关键词(5~8 个),中图分类号,引言,正文,参考文献,英文题名,作者英文姓名、单位、所在城市、邮政编码、国别,英文摘要,英文关键词。首、末页下角注明基金项目名称及编号,作者信息。

2.5 作者请登录本刊网页进行在线投稿。

3 稿件的审核、录用与版权

3.1 来稿须经专家两审和主编、编委讨论后决定录用与否。

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49卷 第1期 2023年1月

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS
(JBUEAA)

(Monthly, Started in 1956)

Vol.49 No.1 January 2023

主管单位 中华人民共和国工业和信息化部
主办单位 北京航空航天大学
主编 赵沁平
编辑出版 《北京航空航天大学学报》编辑部
邮编 100191
地址 北京市海淀区学院路37号
印刷 北京科信印刷有限公司
发行 《北京航空航天大学学报》编辑部
发行范围 国内外发行
联系电话 (010) 82316698 82316981
82315499 82317448
电子信箱 jbuua@buaa.edu.cn

Administrated by Ministry of Industry and Information
Technology of the People's Republic of China
Sponsored by Beijing University of Aeronautics
and Astronautics (BUAA)
(Beijing 100191, P. R. China)
Chief Editor ZHAO Qinpings
Edited and Published by Editorial Board of JBUEAA
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.
Distributed by Editorial Board of JBUEAA
Telephone (010) 82316698 82316981
82315499 82317448
E-mail jbuua@buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn

中国标准连续出版物号: $\frac{\text{ISSN } 1001-5965}{\text{CN } 11-2625/V}$

国内定价: 50.00元/期

