

无人系统技术

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

主管：中国航天科工集团有限公司 主办：北京海鹰科技情报研究所



徐德民（中国工程院院士）

智能无人系统改变未来

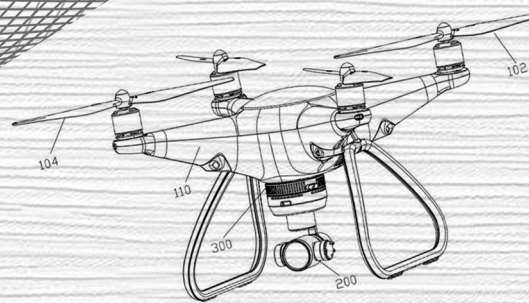
智能化是无人系统的重要发展方向
无人系统是人工智能的重要应用领域

ISSN 2096-5915



2018.3
第1卷 NO.

首届“天鹰杯”



无人飞行器创意设计大赛

纳设计创意

促技术创新

聚领域英才

谋合作共享

为搭建学术交流、科技创新、创意展示的平台，激发我国无人飞行器设计爱好者的创新思想和创意设计，共绘无人飞行器的未来发展蓝图，中国航天科工集团三院三〇二所联合中国航空学会无人机及微型飞行器专业分会、北京海鹰科技情报研究所《无人系统技术》编辑部共同举办首届“天鹰杯”无人飞行器创意设计大赛，诚邀青年英才走进三院了解无人机产业发展及企业文化。

一、大赛题目

智能变形/体无人飞行器

参赛者以专业知识为基础，充分发散创新思维，设计一款外形新颖并能显著提升飞行器某些特定性能的智能变形/体无人飞行器。在综合考虑相关影响因素及技术可实现性的前提下，采用变翼型、变构型、变模态等技术途径，来适应多任务、多环境、宽速域、宽空域的未来飞行器的发展需求，并要求通过性能或功能的分析计算，体现出变形/体后效果的显著提升，支撑创意方案。要求参赛作品具备创新性、科学性以及在未来10~20年内的可实现性。

二、参赛方式及要求

1. 参赛方式：以个人或团队形式参赛均可，其中团队人数不超过8人。
2. 参赛对象：高校在读生、无人飞行器专业技术人员、无人飞行器爱好者。
3. 选拔方式：本届大赛采取初赛选拔、总决赛的方式。初赛由评审专家组对收到的作品进行函审，评出优秀作品，总决赛采取现场答辩会审形式评选出获奖作品。
4. 提交内容：作品由简介、图片、作品方案报告及其它相关文件四部分构成，其中简介800字以内、4张作品图片、1张参赛者照片，单张照片大小在1M以内。
5. 参赛其它详细要求（大赛评定标准、参赛程序节点、作品方案报告内容要求等），详见大赛官网。
6. 以投稿方式参加比赛，参赛作品不退稿。

三、参赛奖项

1. 本次大赛设置大赛主题奖、专项奖和优秀创意导师团队奖、优秀组织奖4个奖项，奖金丰厚：特等奖（奖金2万元）、一等奖（奖金1万元）、二等奖（奖金5千元）、三等奖（奖金3千元）。
2. 获奖参赛者及参赛团队颁发奖状，并有机会获取航天三院三〇二所“就业直通卡”。
3. 获奖作品将在国内知名媒体、航空航天展会、专业刊物、核心期刊等进行推介宣传。
4. 拟于2019年9月在北京航展上举行正式颁奖仪式。

四、联系方式

联系人：何老师、攀老师

联系电话：010-68191412

通信地址：北京市丰台区云岗北区西里1号院（100074）

邮箱：fan-sisi@foxmail.com

系统综述

智能无人系统改变未来.....	01
张思齐, 沈钧戈, 郭行, 闫杰, 徐德民	

技术研究

腿-轮复合机器人全方位运动控制器的设计与仿真.....	08
辛亚先, 李贻斌, 荣学文, 柴汇, 李彬	
多智能体领航跟随一致性和轨迹跟踪问题研究.....	21
林敏, 夏元清, 吴爽	
基于IB-LBM与人工势场方法的2D机器蛇水中动态避障算法.....	29
周志昊, 邓宏彬, 高庆海, 李东方	
四旋翼无人机的主动容错控制.....	38
王君, 尹雄东, 岑苗苗	
一种水面无人艇航行及任务载荷复合控制方法.....	46
韩佩好, 韩玮, 梁旭	
面向无人机任务载荷的通用数据记录技术.....	52
林天静, 沈浩, 杭飞	

情报分析

美国CODE项目推进分布式协同作战发展.....	59
李磊, 王彤, 蒋琪	

《无人系统技术》办刊宗旨是刊载无人系统领域新进展、新成果、新技术, 促进学术交流, 推动成果转化, 提高我国在该领域的科研装备水平。

现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主, 广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时, 也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。



Systematic Review

Intelligent Unmanned System Changing Future	01
ZHANG Siqi, SHEN Junge, GUO Hang, YAN Jie, XU Demin	

Technical Study

Design and Simulation on Omnidirectional Motion Controller of Wheel-Legged Hybrid Robot	08
XIN Yaxian, LI Yibin, RONG Xuewen, CHAI Hui, LI Bin	

Leader-Following Consensus and Trajectory Tracking for Nonholonomic Mobile Robots	21
LIN Min, XIA Yuanqing, WU Shuang	

2D Aquatic Dynamic Obstacle Avoidance Approach for Snake-Like Robot Based on IB-LBM and Artificial Potential Field Method	29
ZHOU Zhihao, DENG Hongbin, GAO Qinghai, LI Dongfang	

Active Fault Tolerant Control of Quadrotor UAV	38
WANG Jun, YIN Xiongdong, LING Miaomiao	

A Compound Controlling Method of Sailing and Task Execution for Unmanned Surface Boat	46
HAN Peiyu, HAN Wei, LIANG Xu	

Universal Data Recording Technology for UAV Task Loading	52
LIN Tianjing, SHEN Hao, HANG Fei	

Information Analysis

DARPA CODE Program Promotes the Development of Distributed Collaborative Operations	59
LI Lei, WANG Tong, JIANG Qi	



智能无人系统改变未来

张思齐¹, 沈钧戈², 郭行³, 闫杰^{1, 3}, 徐德民^{1, 4}

(1. 西北工业大学无人系统发展战略研究中心, 西安 710072; 2. 西北工业大学无人系统技术研究院, 西安 710072;
3. 西北工业大学航天学院, 西安 710072; 4. 西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 系统总结了智能无人系统在农业、医疗保健、教育、交通和军事领域的应用与发展, 分析认为智能无人农业的主要特征为农业规模化、绿色化、智慧化; 智能无人医疗可以使优质医疗服务大众化、精准化、精细化发展; 智能无人教育正在改变教育生态环境、教育观念和教育方式; 智能无人驾驶是解决现代交通问题的重要技术途径, 未来市场巨大, 但依然面临车辆技术、智慧道路、法律法规等问题; 军事智能无人系统能够显著增强陆、海、空等多军种作战能力, 未来主要朝着分布式智能协同作战、高度人机融合协同作战、军用智能无人系统集群作战等方向发展。

关键词: 智能无人系统; 智能无人农业; 智能无人医疗; 智能无人教育; 智能无人驾驶; 军用智能无人系统
中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 03-0159-07

Intelligent Unmanned System Changing Future

ZHANG Siqi¹, SHEN Junge², GUO Hang³, YAN Jie^{1, 3}, XU Demin^{1, 4}

(1. Research Center for Unmanned System Strategy Development, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
4. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The application and development of Intelligent Unmanned System (IUS) in agriculture, medical care, education, transportation and military fields are summarized systematically. The main characteristics of intelligent unmanned agriculture are scale, green and intelligent; Intelligent unmanned medical care can make mass medical service popular, precise and meticulous; Intelligent unmanned education is changing the educational ecological environment, educational concepts and educational methods; Intelligent unmanned driving is an important technical approach to solve modern traffic problems, the market influence is huge in the future, but it still face many problems in vehicle technology, intelligent roads, laws and regulations; Military intelligent unmanned system can significantly enhance the combat capabilities of land, sea and air forces. In the future, it will mainly develop in the direction of distributed intelligent cooperative operations, highly human-computer integrated cooperative operations and military intelligent unmanned systems cluster operations.

Keywords: Intelligent Unmanned System (IUS); Intelligent Unmanned Agriculture; Intelligent Unmanned Medical Care; Intelligent Unmanned Education; Intelligent Unmanned Driving; Military Intelligent Unmanned System

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2018-09-17

基金项目: 西北工业大学政策与战略研究基金资助(2018ZCY23); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(3102018JCC031)

1 引言

科学技术的进步拓宽和提升了人类认识世界、改造世界、利用世界的能力，机械化、电气化拓展和提升了人类的体能，信息化、智能化提升了人类的智能，智能无人系统将机械化、电气化、信息化、智能化集成融合为一体，将人类认识世界、改造世界、利用世界的能力提高到一个新的历史水平，将推动生产方式、生活方式、作战模式、社会文化和社会治理等方面发生深刻的、颠覆性的改变。

21世纪以来，无人系统快速发展，从空中到空间，从陆地到海洋，从物理系统到信息系统，各种类型的智能无人系统大量涌现，无人机、无人车、无人舰船、无人潜航器、各种机器人在工业、农业、物流、交通、教育、医疗保健、军事等领域得到了广泛应用。智能无人系统是推动经济发展、社会进步、军事变革的新引擎。本文将从农业、医疗、教育、交通和军事方面介绍智能无人系统的应用和发展。

2 智能无人系统应用与发展

2.1 智能无人农业

十九大报告指出，要加快推进农业农村现代化发展，推动我国从农业大国向农业强国加快迈进^[1]。智能无人系统是实现农村农业现代化，推动农业高质量发展、绿色发展的重要技术途径。

智能无人系统可以推动农业的规模化发展，2017年我国农作物耕种收综合机械化水平达到了67%^[2]，在机械化基础上推动先进的智能化发展

是农业农村现代化的重要技术途径。智能无人农业可以提高农业生产效率和资源利用率，在人口老龄化、劳动力下降的情况下，保证全国人民吃得饱。

陕西省是苹果种植大省，传统的人工苹果采摘方法，不仅效率低而且容易产生损伤。利用智能采摘苹果机器人可以精准判断苹果的大小和成熟度，既可以提高采摘效率，一台可以抵数十人的采摘工作，还可以提高采摘品质。



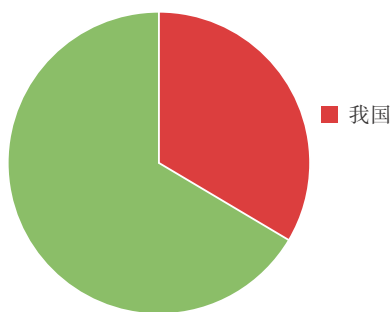
图2 采摘苹果机器人

绿色农业是农业的重要发展方向，全国政协委员、农业部总经济师钱克明表示，我国化肥的施用量是发达国家的3~4倍，我国每年使用的农药高达140多万吨，占世界总量的1/3。化肥和农药的过度使用不仅污染环境，使农业产品质量降低，还会增加农业成本。精准喷洒农药的智能无人系统，可以辨别连人眼都看不明显的害虫，可针对虫害部位及虫害类型杀虫，精准喷洒农药，有效减少杀虫剂使用量，达到最佳的杀虫效果。智能水肥无人系统，识别作物种类及强弱生长状况，进行全自动灌溉精准施肥，实现对灌溉、施肥的定时、定量控制，充分提高水肥利用率，实



图1 无人系统大量涌现，得到广泛应用

现节水、节肥，改善土壤环境，提高作物品质的目的。除草剂也是一种污染源，杂草检测无人系统可以精准地区分农作物和杂草，并检测出杂草的位置，高精度地和有针对性地使用除草剂，可减少90%的除草剂用量，推动绿色农业进程。智能无人农业系统的发展可减少农药、化肥和除草剂使用，使农业生产高质量发展、保护环境，在吃得饱的基础上吃得更好、更健康。



2016年我国农药使用情况

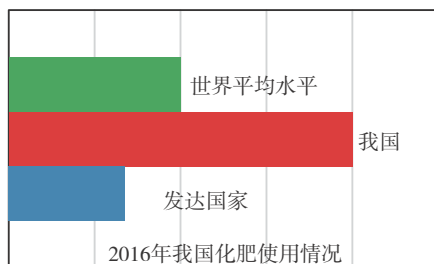


图3 2016年我国化肥和农药使用情况

智慧农业涉及农业电子商务、农业信息服务等方面内容，可以根据病虫害发展规律、气候变化、市场规律等因素，进行种植决策，提高农业生产效率；通过大数据、互联网等信息化手段进行市场预测，变“以产定销”为“以销定产”，适应现代社会生产和生活节奏，创造更大的价值。通过农业规模化、绿色化、智慧化生产，可以推动农业农村现代化发展，全面实现农业强、农村美、农民富的发展目标。

2.2 智能无人医疗

医疗是当前社会大众关注的热点问题，关注焦点在于看病难、看病贵，以及优质医疗资源利用不充分、分布不平衡。智能无人医疗可以使优

质医疗服务大众化、精准化、精细化发展，是解决民生医疗问题的重要途径。

(1) 优质医疗资源大众化。IBM公司的Watson机器人可对医疗影像进行快速读片和智能判断，进而规划个性化的诊疗方案，提高诊疗效率。Watson机器人对三种癌症诊断吻合度可以达到权威治疗方案的90%左右，但诊断时间却缩短78%。2017年，Watson医疗机器人在我国已经面向大众推广使用，未来的优质医疗资源将进一步大众化。

表1 Watson机器人诊断癌症吻合度

诊断癌症类型	与权威治疗方案吻合度(2017)/%
肺癌	96
直肠癌	93
结肠癌	81

(2) 医疗诊断精准化。2018年9月28号，“2018西安硬科技中国AI+医疗创新大会”在陕西西安召开，来自主会场（陕西西安）和分会场（青海西宁）两地近百名国内顶尖神经内科专家与“领创医学大脑DeepDoc”进行脑膜炎的医学诊断竞赛。最终西安主会场医生平均诊断准确率为38%、西宁分会场医生平均诊断准确率为39%，而DeepDoc平均诊断准确率达到80%。结果表明，DeepDoc的平均诊断准确率高出了人类医生1倍。可见，智能诊断机器人超越医生的认知，使诊断更加准确，识别率更高，显著降低误诊、漏诊出现概率。

表2 脑膜炎诊断人机比赛结果

时间	地点	脑膜炎诊断准确率 / %	
		参赛者	DeepDoc
2018.03.24	陕西汉中	23	80
2018.03.31	陕西西安	29	80
2018.04.18	陕西咸阳	33	85
2018.09.28	陕西西安	38	80
	青海西宁	39	

(3) 医疗用药精细化。我国抗生素、抗菌药物的使用存在着严重不合理的状况，其中抗生素的使用量是发达国家的3~4倍，药物综合不良反应发生率为10%~20%，重度抗菌药物不良反应发生

为473.8万人次/年。而智能无人医疗可以针对病例特征和病史等情况对症下药、精细用药，保证在最恰当的时间使用最合适的药品和药量，杜绝药品乱用、滥用现象，同时降低医疗成本，有效解决医疗“看病贵”的问题。

十九大报告提出，要实施健康中国战略，改善民众生活品质和健康水平。智能无人医疗系统可以解决优质医疗资源不均衡和相对匮乏的窘境，并监测个人健康状况，保证及时、及早治疗，还能提前预防流行病蔓延，防患于未然。也正因此，2012年以来，我国智能无人医疗融资额由30万美元发展到2017年的824万美元，具有广阔的市场发展前景。

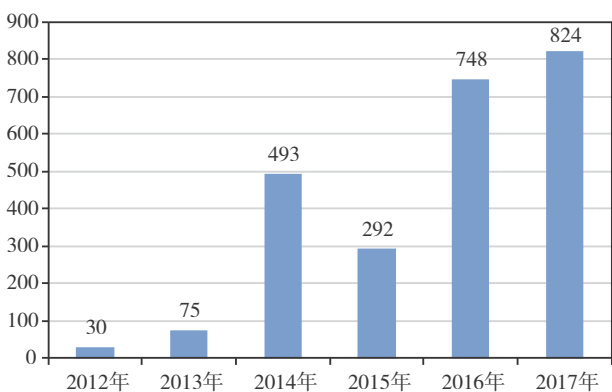


图4 我国智能无人医疗融资变化曲线

2.3 智能无人教育

教育也是当前社会关注的一个热点，关注的焦点仍然是优质教育资源不充分、不平衡的问题。十九大报告提出，要把教育事业放在优先位置，深化教育改革，加快教育现代化。智能无人教育是实现教育现代化办好人民满意教育的主要技术途径。《国家教育事业发展“十三五”规划》中提到，支持学校建设智慧校园，综合利用大数据、人工智能和虚拟现实技术探索未来教育教学新模式^[3]。智能无人教育有三大特征——网络化、智能化、无人化。

智能无人教育的特征之一是网络化。网络教育既可以免费提供优质的教学资源，又可提供完整的学习体验；即时互动，有利于留下思想碰撞

的火花和灵感闪现的痕迹。目前，我国高等学校正在推广互联网教学示范区，示范区以互联网和信息技术为基础，实现了传统课堂与移动课堂的整合与统一。课堂学习的空间和时间极大扩展，并支持学习者和助学者在课前、课中和课后的互动式、社交化学习。互联网教学示范区可进一步提升其智能化和无人化的水平，是未来智能无人教育的雏形。



图5 西北工业大学互联网教学示范区

智能无人教育的特征之二是智能化。通过借助大数据与AI技术，针对每一位学生生成个性化知识图谱，进而精准推荐个性化学习资源，帮助学生按图索骥、高效学习。智能无人教育系统可承担大部分重复性工作，大幅度提高优秀教师的工作效率，为教师减负增效。科大讯飞作为教育技术引领企业，通过人工智能、云计算、大数据等先进技术，为广大教育用户提供了覆盖“教、学、考、评、管”的一系列典型特色的智能教育应用案例，通过智慧的教与学，促进全体学生实现符合个性化成长规律的智慧发展。

智能无人系统的特征之三是无人化。大型开放式网络课程(Massive Open Online Courses, MOOC)教育、虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术是无人教育的初级阶段，它们可朝着无人化发展，是智能无人课堂的未来发展趋势之一，是下一代未来课堂的标配。人大附中在课堂上引入VR技术，学生被带入微观或宏观的虚拟世界中，身临其境地观察、探究，极大激发了学生的兴趣和



图6 VR技术走进课堂

好奇心，增强学习的主动性。它还将学科的复杂知识和抽象结构形象展现，帮助学生更好地理解知识。无人化特征使得教师可大规模教学，任何人可随时学习，使得优质教育资源大众化。

智能无人教育系统正在改变教育生态环境，改变教育观念和教育方式，但教育传承文化、创新知识和培养人才的本质不会变，立德树人的根本目的更不会改变。

2.4 智能无人驾驶

无人驾驶是智能无人系统发展的一个重要应用方向，它涉及无人驾驶飞机、无人驾驶车辆、无人船、无人潜航器等行业领域。

交通出行作为当前社会关注的热点问题，关注焦点是交通拥堵、停车难和尾气排放问题，而智能无人驾驶是解决这些问题的一个重要技术途径。

智能无人驾驶的未来市场十分巨大。全球无人驾驶行业发展已经呈现白热化趋势，在《无人驾驶汽车行业发展前景预测与投资战略规划分析

报告》中指出，2018年全球无人驾驶汽车市场规模达到48.2亿美元，2021年将达70.3亿美元；2035年，全球无人驾驶汽车销量将达2100万辆^[4]；谷歌、优步、福特、特斯拉等正在全力争夺无人驾驶市场。

我国有望成为全球最大的无人驾驶市场。2017年《节能与新能源汽车技术路线图》中指出，力求2026年到2030年，每辆车都采用无人驾驶或辅助驾驶系统^[5]。行业研究机构IHS Research预测，2035年中国无人驾驶汽车市场份额为24%^[4]。我国无人驾驶全面进入开放道路测试阶段，2018年3月，我国发出第一张无人驾驶路测牌照，至今国内数十家公司拿到路测牌照。

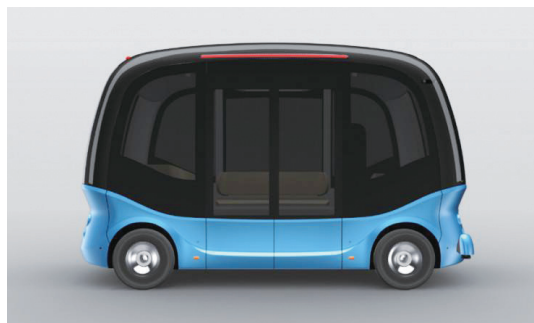


图8 2018年9月28日，百度阿波龙在广东潼湖科技小镇正式落地运营

智能无人驾驶的发展不仅是车辆本身的问题，更是交通的系统工程，涉及到车辆技术的完善，智慧道路基础设施的建设，还有法律法规的健全。

此外，无人化是重型卡车发展的一个重要方向。《2018年中国物流科技发展研究报告》指出，

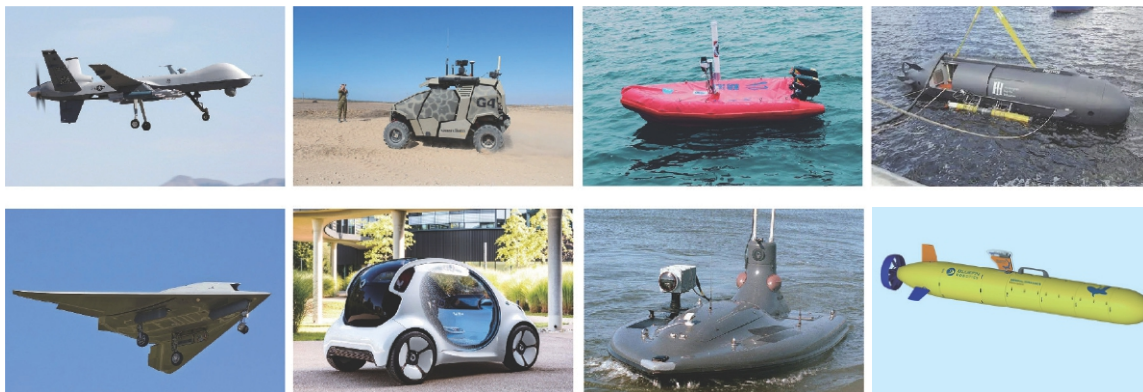


图7 无人驾驶涉及多个行业领域

物流行业要着重发展智能无人重卡^[6]。智能无人重卡可以使每辆重卡配备的司机从2~3人减少到1人,创造市场价值高达5000亿元;车辆的传动控制系统和跟车行驶系统可以减低单位油耗;还可以降低事故率,提高安全性,节省物流成本。

2.5 军用智能无人系统

十九大报告明确提出“加快军事智能化发展”要求,军用智能无人系统是军事智能化的关键领域,军事领域的智能无人化发展是“加快军事智能化发展”的重要内容,也是军事智能“由人向物”迁移的关键领域^[7]。

截至今年,美军已发布8个版本的无人系统发展路线图,大力推进军用智能无人系统发展。无人化作战被列为改变未来作战模式的十大颠覆性技术之首;无人化战场将成为未来军事冲突的重要特征;军用智能无人系统将会支配战场态势,在地面、空中,尤其是太空中将占主导地位。

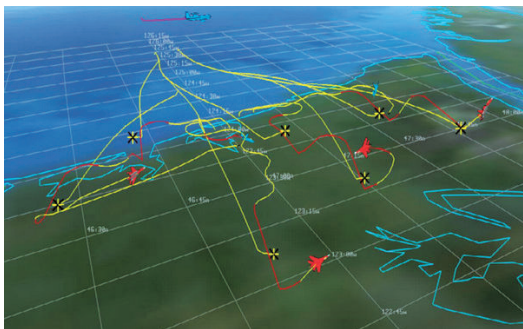


图9 ALPHA操作F15战胜人类飞行员操作F22

军用智能无人系统可以显著增强陆、海、空等多军种的作战能力。美军地面X战车技术项目使陆地战车具有战场智能感知、灵活机动智能躲避

和电磁隐身等优秀作战能力,改变地面作战方式。美军反潜战持续跟踪无人艇可以智能自主的进行潜艇侦测、追踪,并具有优异的续航能力,航行数千千米,持续数月,显著提高反潜能力。

分布式智能协同作战是军用智能无人系统未来的发展方向之一^[8],系统将由集中式综合性作战平台向分布式协同作战单元发展。2015年美军启动的拒止环境中的协同作战(CODE)项目中,通讯无人机、电子战无人机、攻击无人机等采用智能协同模式,显著提高了空军介入作战能力。

高度人机融合协同作战是军用智能无人系统未来的另一个发展方向^[9]。2016年,美军大力推进忠诚僚机项目。在未来无人战场,人机高度融合可实现更加高级、复杂的作战功能和作战方式,降低战争损失和人员伤亡,获得未来战争优势。

军用智能无人系统的第三个发展方向是集群作战。群体智能是人工智能自主性的高级阶段,军用智能无人系统将由“智能个体作战”向“智能集群作战”发展。2016年,美军的进攻性蜂群战术(OFFSET)项目,不仅将数量优势转化为质量优势,整体功能远远超越个体功能的叠加,而且抗摧毁能力强,个体成本低,作战效费比高。



图11 军用智能无人系统集群作战

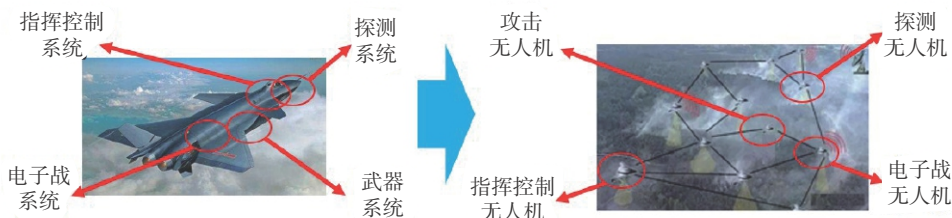


图10 未来军用智能无人系统分布式智能协同作战方式

3 结束语

智能无人系统正在成为新一轮科技革命和产业变革的重要着力点。目前,智能无人系统的发展尚处于初级阶段,还要在发展中不断完善。智能无人系统的发展也面临一些问题和挑战,比如说有人担心智能无人系统发展会产生失业。据剑桥的学者预测,未来10~20年,美国702个工种中将有47%的岗位有可能被淘汰,国际无人协会也预测智能无人系统的发展将为美国提供7万个重要高薪岗位。也有人担心智能无人系统的能力可能超过人类,可能会对人类的安全构成威胁。然而,在无人系统智能化发展过程中,它不能具有主观意志、自主意识,也不能自主进化,其所执行的动作是由人来支配、操纵的。科学技术的发展还是要以人为本,人的主导作用也不会发生改变,有人又在考虑为智能无人系统设计一个法律调节器,让智能无人系统学习伦理道德和法律法规,受到法律法规的约束。

智能无人系统发展的整个进程必然会遇到很多的挑战和困难,但是这些挑战和问题只能在发展的实践中逐渐得到解决,毕竟办法总比问题多。

参 考 文 献

- [1] 习近平. 决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[R]. 2017年10月.
- [2] 唐华俊. 中国农业农村科技发展报告(2012-2017)[R]. 2018年9月.
- [3] 国务院. 国家教育事业发展“十三五”规划[R]. 2017年1月.
- [4] 前瞻产业研究院. 中国无人驾驶汽车行业发展前景预测与投资战略规划分析报告[R]. 2018年1月.
- [5] 中国汽车工程学会. 2017年节能与新能源汽车技术路线图[R]. 2017年12月.
- [6] 亿欧智库. 2018年中国物流科技发展研究报告[R]. 2018年8月.
- [7] 张斌, 付东. 智能无人作战系统的发展[J]. 科技导报, 2018, 36(12):71-75.
- [8] 李风雷, 卢昊, 宋闯, 等. 智能化战争与无人系统技术的发展[J]. 无人系统技术, 2018(2):14-23.
- [9] 张涛, 李清, 张长水, 等. 智能无人自主系统的发展趋势[J]. 无人系统技术, 2018(1):11-22.
- 作者简介:**
- 张思齐(1989-), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为智能无人系统、科技型智库管理。
- 沈钧戈(1987-), 女, 博士, 助理教授, 主要研究方向为人工智能、计算机视觉。
- 郭 行(1990-), 男, 博士生, 主要研究方向为高超声速飞行器制导控制、半实物仿真。
- 闫 杰(1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器制导、自动控制及飞行动力学。
- 徐德民(1937-), 男, 硕士, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为水下航行器精确制导。



腿-轮复合机器人全方位运动控制器的设计与仿真

辛亚先^{1,2}, 李贻斌^{1,2}, 荣学文^{1,2}, 柴汇^{1,2}, 李彬³

(1.山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061; 2.山东大学机器人研究中心, 济南 250061;

3.齐鲁工业大学(山东省科学院)数学与统计学院, 济南 250353)

摘要: 针对腿-轮复合机器人进行了运动学与动力学模型构建, 构造控制器实现了基本的运动功能。将整体平台解耦为四个子系统, 利用拉格朗日方法分别对手臂子系统、腿部子系统、头部子系统以及虚拟倒立摆子系统进行动力学分析; 结合整体运动学与齐次坐标变换方法, 将机体总质量映射为虚拟倒立摆质心总质量, 与驱动轮构成虚拟两轮倒立摆。将手臂与腿部的关节状态空间动力学方程通过速度雅可比矩阵转换为笛卡尔状态空间动力学方程, 构造加入前馈补偿的比例增益反馈线性化控制器, 控制手臂末端执行器与足端到达期望位置; 分别构造三个控制器对虚拟倒立摆的平衡、直行与自转功能进行解耦控制。最后, 在Webots中进行了平衡仿真、直行仿真、转弯仿真以及身体姿态调整仿真, 结果体现了所提方法的有效性。

关键词: 腿-轮复合机器人; 虚拟倒立摆; 模块化控制; 解耦控制; 笛卡尔空间控制; 全方位运动

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 03-0166-13

Design and Simulation on Omnidirectional Motion Controller of Wheel-Legged Hybrid Robot

XIN Yaxian^{1,2}, LI Yibin^{1,2}, RONG Xuwen^{1,2}, CHAI Hui^{1,2}, LI Bin³

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Center for Robotics of Shandong University, Jinan 250061, China;

3. School of Mathematics and Statistics, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

Abstract: The kinematics and dynamics model is constructed for the wheel-legged hybrid robot, and the controllers are built to realize the Omnidirectional motion. Decouple the whole robot into four subsystems, and the Lagrangian method is used to analyze the dynamics of the arm subsystem, the leg subsystem, the head subsystem and the virtual inverted pendulum system respectively. Combined with the overall kinematics and homogeneous coordinates, the total mass of the body is transformed to one point as the virtual centroid of virtual inverted pendulum, and forms a virtual two-wheel inverted pendulum with the driving wheel. The state space dynamics equation of the joint state of the arm and the leg is converted into the Cartesian state space dynamics equation through the velocity Jacobian matrix, and a proportional gain feedback linearization controller with feedforward compensation is constructed to control the end of the arm and the end of the foot to desired position; three controllers are respectively constructed to decoupling the balance, straight line and rotation functions of the virtual inverted pendulum. Finally, balanced simulation, straight-through simulation, turning simulation and body posture adjustment simulation were carried out in Webots. The results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Wheel-Legged Hybrid Robot; Virtual Inverted Pendulum; Modular Control; Decoupling Control; Cartesian Space Control; Omnidirectional Motion

收稿日期: 2018-08-11; 修回日期: 2018-08-25

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2017MEE033); 国家自然科学基金(61773226); 山东省重点研发计划(2018GCX103054)

1 引言

随着科技的发展,越来越多的自主侦察、运输、作战平台或智能机器人走向战场,代替士兵进入复杂地形环境实施作战或侦察任务。目前的移动式作战平台均采用履带式、轮式或腿足式移动方式行走。履带式和轮式移动平台的移动均需连续的支撑条件,适应地形变化的能力较差。而腿足式移动平台在平坦地面上的移动速度较慢,能耗较高。腿-轮复合移动机器人在结构化地形下运动速度快、效率高,同时能够工作在非结构环境下(崎岖不平的山地、丛林和冰雪地面等)。

目前,国内对腿-轮复合移动机器人的研究尚处在起始阶段,相对国外腿-轮复合移动机器人的研究存在较大差距。美国波士顿动力公司在军方资助下于2017年推出的仿人型腿-轮机器人Handle不仅能够在平坦地面快速移动,而且能够跳过垂直障碍、平稳通过左右陡直障碍、上下台阶等复杂地形环境,还具有较强的负重能力和受到外部干扰后的快速反应能力,证明了腿-轮机器人更好的实用性。另外,两轮机器人平台的研究开展较早,目前已有较为成熟的应用,如2002年Grasser F等人^[1]研制了JOE两轮移动倒立摆平台,可实现自平衡与转弯;日本庆应大学搭建了两轮机械手平台,并提出诸多非线性控制方法^[2-6];2014年Kook A J等人^[7]搭建了拥有两个机械手的两轮机器人平台,并对机器人与外界环境的交互力进行了分析与控制。迄今为止,将双足与两轮平台相结合的平台并不多见,2009年Lee H等人研制出BalBot V^[8],将双足机器人固定于两轮移动平台上,通过遥控控制双足机器人踝关节转动,引起质心位置的前后变化,从而间接控制机器人行进速度。已有的两轮机器人平台大多不能调整平台高度,工作空间受到限制,身体或者机械臂均搭建在车架上,不可以改变身体姿态的冗余自由度,两轮之间、车架与身体之间相对位置固定,不利于通过崎岖不平地面,不利于身体的隔振。

两轮自平衡机器人平台作为典型的欠驱动非

线性系统受到广泛关注,研究人员利用其对众多线性、非线性方法进行检验^[9-15],但在实际应用中,将机器人动力学模型在平衡点附近进行线性化,然后采用线性控制方法如LQR进行控制是最为常见的^[16, 17],另外,利用不基于模型的PID控制方法对两轮自平衡机器人进行控制也获得了良好性能^[18-21]。

本文对高动态、高效率的小型腿-轮复合移动平台的整体建模与控制进行了研究,采用模块化策略,对每一模块分别进行运动学与动力学分析,利用虚拟模型控制方法,将机器人整体虚拟为两轮一级倒立摆,各模块通过运动学解算与坐标变换得到倒立摆的虚拟质心,通过控制两轮输入力矩,实现平衡、行进与转向;通过控制腿部伸缩,实现平台的升高和降低;通过控制手臂关节,使末端执行器到达目标任务点;并进行了仿真实验以验证所提控制器的有效性。

2 机器人结构

机器人的结构示意图如图1所示,可将整体分为轮、腿、双臂、头部四部分,腿、双臂与头部通过驱动关节固连于躯干上。其中,两轮为轴线平行的驱动轮,通过施加适当驱动力实现平台的平衡、移动;每条腿配置两个俯仰关节,并通过一个欠驱动关节与驱动轮相连,可以通过控制腿部伸缩实现移动平台的升高和降低;本文暂不考虑手部末端执行器,每条手臂配置一个横滚关节,两个俯仰关节,可在手部目标位置进入手部工作空间后灵活执行任务;头部通过一个俯仰关节与躯干固连,本文未对其进行控制,未来将通过加入头部关节的控制实现对各种扰动与故障的反应式补偿。

由于机器人整体结构较复杂,控制难度大,本文采用解耦的分布式控制架构,腿与双臂根据平台高度要求与末端执行器目标位置的要求,作为两个子控制系统进行控制;虚拟倒立摆子系统通过控制轮的力矩,使得机器人在保持平衡的同

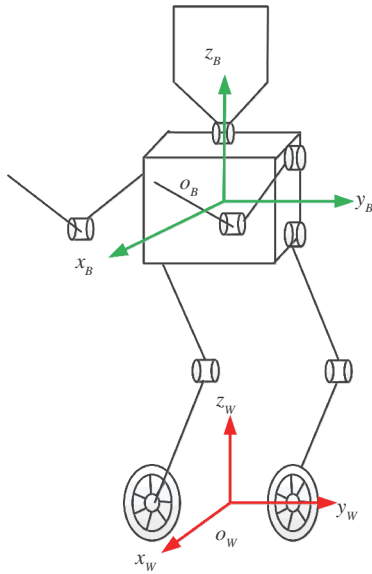


图1 腿-轮复合式机器人结构示意图

时达到期望位置。针对以上三个控制模块，展开各模块的运动学与动力学建模，根据各模块控制任务的特点，构造适当的控制器。

本文仅考虑机器人姿态的矢状面运动，将双臂的横滚关节锁死，且左右手臂姿态相同，左右腿姿态相同，因此只在矢状面中展开运动学、动力学建模与控制。文中涉及到的机器人参数及其定义如表1所示。

3 系统建模

3.1 腿部运动学与动力学建模

腿部运动学与动力学分析在躯干坐标系中进

表1 机器人参数及定义表

	定义	符号	数值	单位
虚拟倒立摆子系统	虚拟倒立摆杆长	L	-	m
	虚拟倒立摆俯仰角度	θ_5	-	rad
	虚拟倒立摆偏航角	θ_6	-	rad
	虚拟质心质量	m_l	32	kg
	轮的质量	m_w	2	kg
	轮的半径	R	0.15	m
	左轮编码器返回值	θ_l	-	rad
	右轮编码器返回值	θ_r	-	rad
	虚拟质心在世界坐标系中的坐标	$\{x_{COG}^G, y_{COG}^G, z_{COG}^G\}$	-	{m,m,m}
	轮轴连线中点在世界坐标系中的坐标	$\{x_w^G, y_w^G, z_w^G\}$	-	{m,m,m}
轮轴连线长度的一半	d	0.25	m	
腿部子系统	躯干长\宽\高	$l/w/h$	0.2/0.5/0.3	m/m/m
	大腿长	L_0	0.44	m
	小腿长	L_1	0.5	m
	大腿质量	m_0	1	kg
	小腿质量	m_1	1	kg
	髋关节角度	θ_0	-	rad
	膝关节角度	θ_1	-	rad
	髋关节在躯干坐标系中位置坐标	$\{x_{hip}^B, y_{hip}^B, z_{hip}^B\}$	-	{m,m,m}
	膝关节在躯干坐标系中位置坐标	$\{x_{knee}^B, y_{knee}^B, z_{knee}^B\}$	-	{m,m,m}
	足端在躯干坐标系中位置坐标	$\{x_{toe}^B, y_{toe}^B, z_{toe}^B\}$	-	{m,m,m}
手臂子系统	大臂长	L_2	0.4	m
	小臂长	L_3	0.4	m
	大臂质量	m_2	1	kg
	小臂质量	m_3	1	kg
	肩部俯仰关节角度	θ_2	-	rad
	肘部关节角度	θ_3	-	rad

行。两条腿结构相同，简化模型如图2所示。采用D-H方法，在每一连杆上固接一个坐标系，通过坐标系之间的平移、旋转关系描述连杆之间的相对位置。

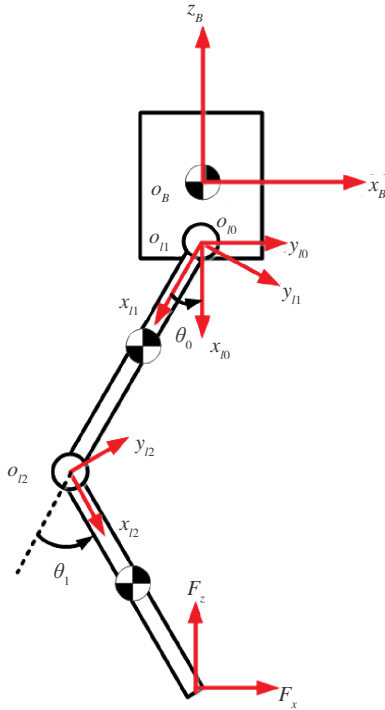


图2 以躯干坐标系为基坐标系的腿部简化模型

足端位置即腿部运动学方程为：

$$p_{toe}^B = \begin{bmatrix} L_0 s_0 + L_1 s_{01} \\ -h/2 - L_0 c_0 - L_1 c_{01} \end{bmatrix} \quad (1)$$

文中， $s_i = \sin \theta_i$ ， $c_i = \cos \theta_i$ ， $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ ， $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ 。

足端在y轴不存在运动，两腿的雅可比矩阵相同：

$$J_{toe} = \begin{bmatrix} L_0 c_0 + L_1 c_{01} & L_1 c_{01} \\ L_0 s_0 + L_1 s_{01} & L_1 s_{01} \end{bmatrix} \quad (2)$$

采用拉格朗日方法对腿部子系统进行动力学分析。腿部子系统的总动能可表示为：

$$M_L(q_L) \ddot{q}_L + C_L(q_L, \dot{q}_L) \dot{q}_L + G_L(q_L) + J_L^T F_{Levt} + d_L = \tau_L \quad (3)$$

其中， $q_L = [\theta_0 \ \theta_1]^T$ ， $\tau_L = [\tau_{L0} \ \tau_{L1}]$ 。 $M_L(q_L) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 代

表惯性矩阵， $C_L(q_L, \dot{q}_L) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 表示向心-科氏力矩阵， $G_L(q_L) \in \mathbb{R}^2$ 为重力向量， $F_{Levt} \in \mathbb{R}^2$ 为末端受到的外部力 $F_{Levt} = [f_{Lx}, f_{Lz}]^T$ ， $d_L \in \mathbb{R}^2$ 为对未建模动态与外部扰动所产生的建模误差的补偿。

3.2 双臂运动学与动力学建模

手臂作为一个子系统，通过控制肩关节与肘关节的运动，使手臂末端到达期望位置。手臂的运动学与动力学分析在躯干坐标系中进行，其示意图如图3所示。

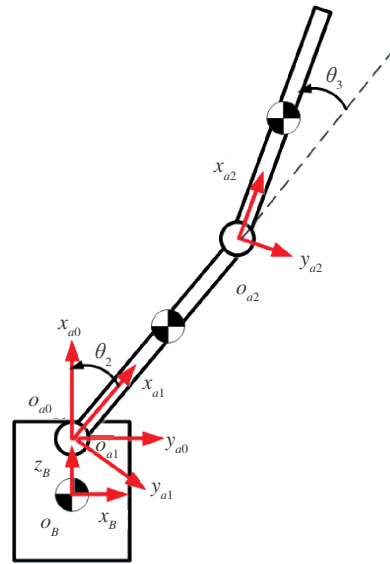


图3 以躯干坐标系为基坐标系的手臂简化模型

手臂正运动学方程为：

$$\begin{aligned} x_{hand}^B &= -L_2 s_2 - L_3 s_{23} \\ z_{hand}^B &= \frac{h}{2} + L_2 c_2 + L_3 c_{23} \end{aligned} \quad (4)$$

手臂雅可比矩阵为：

$$J_A = \begin{bmatrix} -L_2 c_2 - L_3 c_{23} & -L_3 c_{23} \\ -L_2 s_2 - L_3 s_{23} & -L_3 s_{23} \end{bmatrix} \quad (5)$$

手臂总质心位置坐标为：

$$\begin{aligned} x_{Acog}^B &= \frac{-m_2 L_2 s_2 / 2 - m_3 L_3 s_2 - m_3 L_3 s_{23} / 2}{m_2 + m_3} \\ z_{Acog}^B &= \frac{m_2 h / 2 + m_2 L_2 c_2 / 2 + m_3 h / 2 + m_3 L_2 c_2 + m_3 L_3 c_{23} / 2}{m_2 + m_3} \end{aligned} \quad (6)$$

仍然采用拉格朗日方法建立动力学模型，并整理为如下标准形式

$$M_A(q_A)\ddot{q}_A + C_A(q_A, \dot{q}_A)\dot{q}_A + G_A(q_A) + J_A^T F_{Aext} + d_A = \tau_A \quad (7)$$

其中， $q_A = [\theta_2 \ \theta_3]^T$ ， $\tau_A = [\tau_2 \ \tau_3]^T$ 。

3.3 头部运动学与动力学建模

头部通过一个俯仰关节与躯干相连，作为一个子系统进行分析。在躯干坐标系中分析该子系统的运动学与动力学，如图4所示。

头部质心在躯干坐标系中的位置为：

$$\begin{aligned} x_{HCOG}^B &= L_5 s_4 \\ z_{HCOG}^B &= h/2 + L_5 c_4 \end{aligned} \quad (8)$$

头部子系统的动力学描述为：

$$\frac{1}{3} L_4^2 m_4 \ddot{\theta}_4 = \tau_4 \quad (9)$$

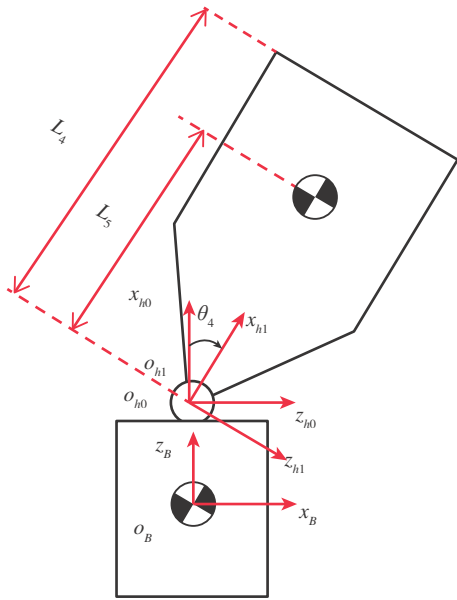


图4 以躯干坐标系为基坐标系的头部简化模型

3.4 倒立摆运动学与动力学建模

虚拟倒立摆子系统是最为一个子系统，它是保持机器人平衡的关键，是实现机器人整体运动的基础，其简化示意图如图5所示。考虑到机器人采用分块控制，利用双腿、双臂以及头部

运动学计算出位于躯干坐标系中虚拟质心的位置

$\{x_{COG}^B, z_{COG}^B\}$ 。

$$\begin{aligned} x_{COG}^B &= \frac{x_{LCOG}^B (m_0 + m_1 + m_b) + x_{ACOG}^B (m_2 + m_3) + x_{HCOG}^B m_4}{m_t} \\ z_{COG}^B &= \frac{z_{LCOG}^B (m_0 + m_1 + m_b) + z_{ACOG}^B (m_2 + m_3) + z_{HCOG}^B m_4}{m_t} \end{aligned} \quad (10)$$

坐标系 $\{o_B\}$ 到 $\{o_w\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^w T_B = \begin{bmatrix} {}^w R_B & {}^w p_B \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中， ${}^w R_B \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 、 ${}^w p_B \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 分别表示坐标系 $\{o_w\}$ 相对于 $\{o_B\}$ 坐标系的旋转矩阵与相对位置向量。利用公式 (12)，计算出位于轮轴坐标系 $\{o_w\}$ 中的虚拟质心位置 $\{x_{COG}^w, z_{COG}^w\}$ 。

$$\begin{bmatrix} x_{COG}^w \\ z_{COG}^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{COG}^B \\ z_{COG}^B \end{bmatrix} {}^w R_B + {}^w p_B \quad (12)$$

此时，将身体各个连杆的质心集中于一点，作为一级倒立摆的虚拟质心，在轮轴坐标系中对虚拟质心位置进行计算，利用公式 (13) 和公式 (14) 得到轮轴与虚拟质心之间的连杆长度及虚拟俯仰角。

$$L = \sqrt{x_{COG}^w{}^2 + z_{COG}^w{}^2} \quad (13)$$

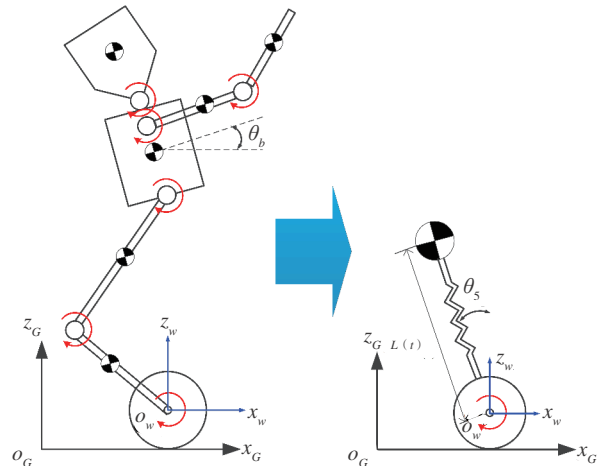


图5 机器人简化为虚拟倒立摆模型

$$\theta_s = \arcsin\left(\frac{x_{cog}^w}{L}\right) \quad (14)$$

假设该虚拟倒立摆的驱动轮始终与地面保持接触，并且不产生滑动，其运动学满足：

$$\begin{aligned} x_w^G &= \theta_w R, & \dot{x}_w^G &= \dot{\theta}_w R \\ z_w^G &= R, & \dot{z}_w^G &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

其中， $\theta_w = (\theta_r + \theta_l) / 2$ 。

虚拟杆的转动惯量 I_b 与轮的转动惯量 I_w 分别为： $I_b = m_b L^2$ 、 $I_w = m_w R^2 / 2$ 。

选取系统的状态变量为 $q = [x_w^G \ y_w^G \ \theta_r \ \theta_s \ \theta_l \ \theta_i]$ ，对虚拟倒立摆进行拉格朗日动力学分析，得到每一状态变量对应的动力学公式，整理为拉格朗日形式：

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G = E\tau \quad (16)$$

假设该虚拟倒立摆的驱动轮始终与地面保持接触，并且不产生滑动，根据运动学关系得到如下三个非完整约束：

$$\begin{aligned} \dot{x}_w^G s_6 - \dot{y}_w^G c_6 &= 0 \\ \dot{x}_w^G c_6 + \dot{y}_w^G s_6 &= \frac{R}{2}(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) \\ \dot{\theta}_6 &= \frac{R}{2d}(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l) \end{aligned} \quad (17)$$

为得到这一约束方程组的零空间，即公式(17)的可行解空间，首先将该约束整理为 $A(q)\dot{q} = 0$ 的形式，其中，

$$A = \begin{bmatrix} s_6 & -c_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_6 & s_6 & 0 & 0 & -R/2 & -R/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -R/(2d) & R/(2d) \end{bmatrix} \quad (18)$$

将该约束条件利用拉格朗日乘法引入动力学方程，动力学方程变为：

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G = E\tau + A^T \lambda \quad (19)$$

此时，取新的状态变量为 $\zeta = [\dot{\theta}_s \ \dot{x}_6^G \ \dot{\theta}_6]^T$ ，其中， \dot{x}_6^G 为机器人延前进方向的速度。构造矩阵 S 使得 $AS = 0$ 成立。

得到 $\dot{q} = S(q)v$ 以及 $\ddot{q} = \dot{S}v + S\dot{v}$ ，式(19)可重写为：

$$\bar{M}(\zeta)\dot{\zeta} + \bar{H}(\int \zeta, \zeta) + \bar{G}(\int \zeta) = \tilde{E}u \quad (20)$$

其中， $\bar{M} = S^T M S$ ， $\bar{H} = S^T M \dot{S} v + S^T H$ ，

$$\bar{G} = S^T G, \quad \tilde{E} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{d}{R} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} \tau_r + \tau_l \\ \tau_r - \tau_l \end{bmatrix}.$$

4 控制器设计

由于系统的自由度较高，整体动力学系统的建立非常复杂，并且不利于满足机器人控制的实时性。考虑到工程应用中对控制器执行性能的要求，本文将整体机器人系统分为三个控制模块，既相互独立又互相影响，其关系框图如图6所示。

4.1 腿部与手臂的控制

腿部与手臂的控制有许多相似之处，都为控制两个驱动俯仰关节使末端到达期望位置，本文对腿部与手臂的控制采用相同的控制器——加入前馈补偿的比例微分反馈线性化控制器。

假设外部扰动 $d_L = d_A = 0$ ，以腿部与手臂的动力学通用形式如公式(21)与(22)所示进行分析。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau_p \quad (21)$$

$$J^T F_{ext} = \tau_f \quad (22)$$

其中， τ_f 为前馈力矩， τ_p 为反馈力矩。状态变量 q 为关节空间的变量，对于机器人腿与手臂的运动控制，运动聚焦在操作空间，因此期望值一般为末端位置，而不是关节角度值。利用公式(22)进行非线性状态坐标变换：

$$\dot{p} = J\dot{q} \quad (23)$$

$$\ddot{p} = \dot{J}\dot{q} + J\ddot{q} \quad (24)$$

其中， p 为末端位置坐标。解得：

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{p} \quad (25)$$

$$\ddot{q} = J^{-1}\ddot{p} - J^{-1}\dot{J}J^{-1}\dot{p} \quad (26)$$

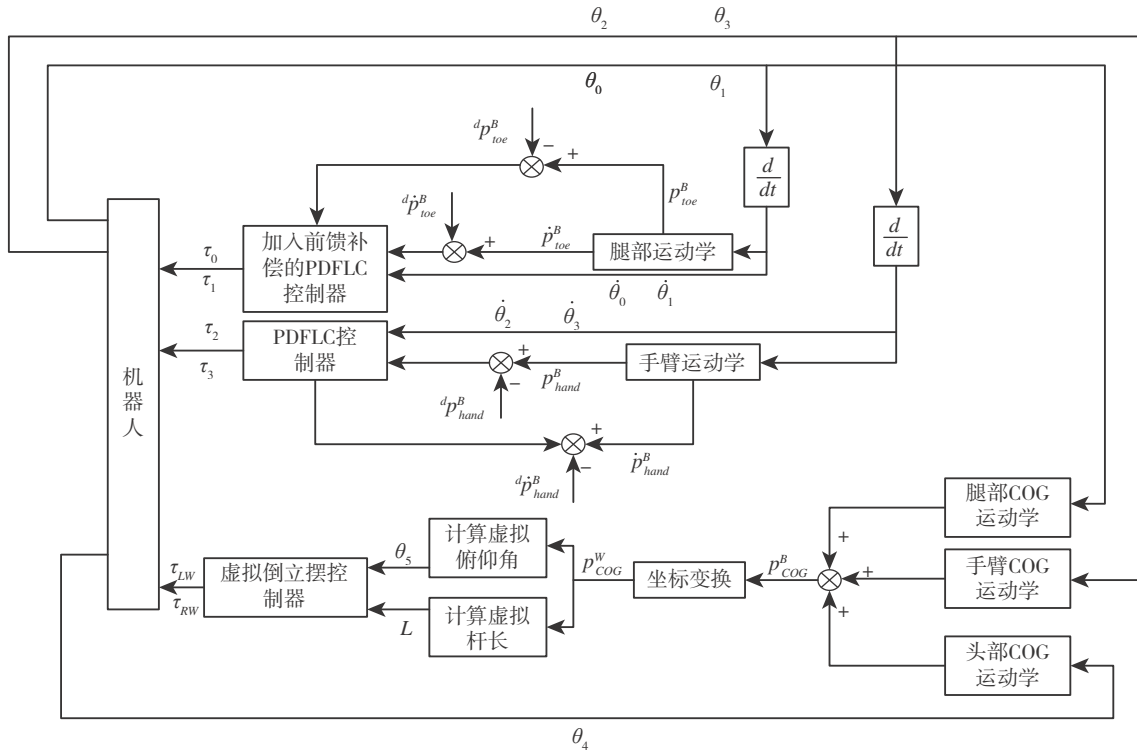


图6 平台总体控制框图

将公式 (25)、(26) 带入公式 (21)

$$M_p(q)\ddot{p} + V_p(q, \dot{q})\dot{p} + G_p(q) = \tau_{fb} \quad (27)$$

其中, $M_p(q) = M(q)J^{-1}$, $G_p(q) = G(q)$, $C_p(q, \dot{q}) = -M(q)J^{-1}\dot{J}J^{-1} + C(q, \dot{q})J^{-1}$ 。

此时, 式 (27) 的动力学系统状态变量为末端位置向量, 输入仍为关节力矩。在此基础上构造控制器保证末端位置 p 、速度 \dot{q} 、加速度 \ddot{p} 分别渐进收敛至期望位置轨迹 p_d 、期望速度轨迹与期望加速度轨迹 \dot{p}_d , 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} [p \ \dot{p} \ \ddot{p}]^T = [p_d \ \dot{p}_d \ \ddot{p}_d]^T$ 。

反馈线性化是处理非线性系统较为常见的一种控制方法, 由内环控制率与外环控制率组成, 内环控制率为:

$$\tau_{fb} = M_p(q)v_1 + C_p(q, \dot{q})v_2 + G_p \quad (28)$$

其中, v_1, v_2 为外环控制率的输出:

$$v_1 = \ddot{p}_d + K_{d1}(\dot{p}_d - \dot{p}) + K_{p1}(p_d - p) \quad (29)$$

$$v_2 = \dot{p}_d + K_{p2}(p_d - p) \quad (30)$$

其中, $K_{d1}, K_{p1}, K_{p2} \in R^+$ 表示正的控制增益。

所提控制方法所产生的输入力矩为:

$$\tau = \tau_{fb} + \tau_{ff} \quad (31)$$

其控制框图如图 7 所示。

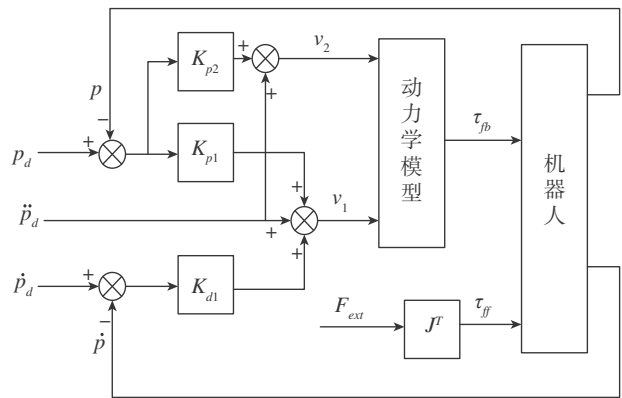


图7 腿部与手臂控制框图

4.2 虚拟倒立摆运动控制器

为推导方便, 采用符号形式表示虚拟倒立摆动力学公式:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{12} & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_5 \\ \ddot{x}_w^G \\ \ddot{\theta}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_1 \\ \frac{1}{R}u_1 \\ \frac{d}{R}u_2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

由公式(32)可看出子系统 $-\theta_5$ 与子系统 $-x_w^G$ 是耦合的,子系统 $-\theta_6$ 则与另外两个子系统完全解耦。整理得到如下形式的动力学方程:

$$\frac{m_{11}m_{22} - m_{12}^2}{m_{22}} \ddot{\theta}_5 + \frac{m_{12}}{m_{22}} \left(\frac{u_1}{R} - V_2 \right) + V_1 + g_1 = 0 \quad (33)$$

$$\frac{m_{11}m_{22} - m_{12}^2}{m_{11}} \ddot{x}_w^G + \frac{m_{12}}{m_{11}} (-g_1 - V_1) + V_2 = \frac{u_1}{R} \quad (34)$$

$$m_{33} \ddot{\theta}_6 + V_3 = \frac{d}{R} u_2 \quad (35)$$

4.2.1 状态变量的获取

机器人利用三个传感器,分别为左右轮上的编码器与躯干几何中心处的惯性测量单元,获取左右轮弧度信息与躯干俯仰角度。通过运动学推导得到虚拟倒立摆的俯仰角与质心高度。但是该控制器中的状态变量不能由传感器直接获得,需要根据机体位置约束,利用传感器信息实时计算状态变量,其中,俯仰角 θ_s 为计算得到, $\dot{\theta}_s$ 由 θ_s 差分得到。其他状态量的计算如下:

$$p_c = \frac{1}{2} [R(\theta_r - \theta_s) + R(\theta_l - \theta_s)] \quad (36)$$

$$\dot{p}_c = \frac{1}{2} \left[\frac{d(\theta_r - \theta_s)}{dt} R + \frac{d(\theta_l - \theta_s)}{dt} R \right] \quad (37)$$

$$\theta_6 = \frac{1}{d} [R(\theta_r - \theta_s) - R(\theta_l - \theta_s)] \quad (38)$$

$$\dot{\theta}_6 = \frac{1}{d} \left[\frac{d(\theta_r - \theta_s)}{dt} R - \frac{d(\theta_l - \theta_s)}{dt} R \right] \quad (39)$$

其中, p_c 为机器人左右轮轮轴连线中点所行驶的总路程,对应地, \dot{p}_c 为行驶速度。

4.2.2 控制器设计

分别给出俯仰角、俯仰角速度、偏航角、偏航角速度、小车行驶路程、小车线速度期望值 θ_{5d} 、 $\dot{\theta}_{5d}$ 、 θ_{6d} 、 $\dot{\theta}_{6d}$ 、 p_{cd} 、 \dot{p}_{cd} ,构造控制器,使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\theta_{5d} \dot{\theta}_{5d} \theta_{6d} \dot{\theta}_{6d} p_c \dot{p}_c]^T = [\theta_{5d} \dot{\theta}_{5d} \theta_{6d} \dot{\theta}_{6d} p_{cd} \dot{p}_{cd}]^T$$

设计一个PD控制器,两个PID控制器,分别

对俯仰角、偏航角、小车路程进行控制。

$$u_{\theta_5} = k_1(\theta_{5d} - \theta_5) + k_2(\dot{\theta}_{5d} - \dot{\theta}_5) \quad (40)$$

$$u_{\theta_6} = k_3(\theta_{6d} - \theta_6) + k_4 \int (\theta_{6d} - \theta_6) dt + k_5(\dot{\theta}_{6d} - \dot{\theta}_6) \quad (41)$$

$$u_p = k_6(p_{cd} - p_c) + k_7 \int (p_{cd} - p_c) dt + k_8(\dot{p}_{cd} - \dot{p}_c) \quad (42)$$

两个驱动轮的输入力矩为:

$$\tau_r = u_{\theta_5} + u_{\theta_6} + u_p \quad (43)$$

$$\tau_l = u_{\theta_5} - u_{\theta_6} + u_p \quad (44)$$

5 仿真实验

5.1 实验设置

本文提出的控制方法利用仿真软件Webots进行仿真,仿真软件运行环境为Core i7,采样时间为100Hz。仿真模型如图8所示,腿部两个俯仰关节、手臂两个俯仰关节以及头部一个俯仰关节处安装有位置传感器,驱动轮装有编码器,躯干的几何中心处装有惯性测量单元。为验证文中所提控制方法的有效性,分别进行了平衡实验、直行实验、转弯实验、姿态调整实验,并对数据进行分析。

5.2 平衡控制

该机器人的控制模块中,作为其他控制模块的前提,最为重要的是虚拟倒立摆的平衡控制,

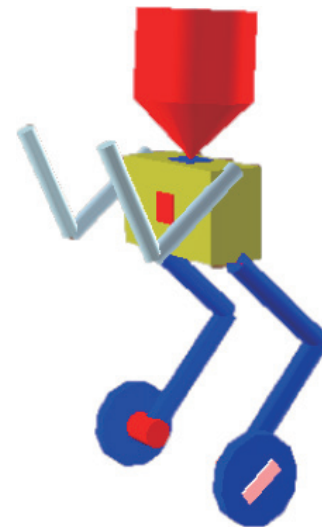


图8 于Webots环境中搭建的机器人仿真平台

为了验证所提方法的有效性抗外扰能力，分别利用20kg的摆锤与70kg的摆锤垂直击打处于平衡状态的机器人后侧，选取增益分别为 $k_1 = -25$ ， $k_2 = -5$ ，此时，机器人能够迅速回复到平衡状态而不会失稳。如图9所示，分别展示了初始俯仰角与俯仰角速度都为0时，受到20kg与70kg摆锤击打时，机器人恢复稳定过程中的虚拟俯仰角与虚拟俯仰角速度曲线。可看出受到20kg摆锤击打时，虚拟俯仰角峰值达到11度，受到70kg摆锤击打时，虚拟俯仰角峰值达到25.6度，都能够在4s内恢复平衡状态，未出现震荡。

5.3 直线运动控制

在成功实现平衡的前提下，希望机器人摆脱遥控操作，摆脱对参考位置曲线、参考速度曲线的要求，到达期望位置的同时达到期望速度。首先，对直行运动进行实验，选取增益为 $k_3 = -0.06$ ， $k_4 = -0.001$ ， $k_5 = -0.23$ ，只给出期望位置 $p_{cd} = 5$ ，期望速度 $\dot{p}_{cd} = 0$ ，机器人由世界坐标系的原点出发，根据当前位置、当前速度，自主规划下一时刻速度，最终使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} [p_c \ \dot{p}_c]^T = [p_{cd} \ \dot{p}_{cd}]^T$ 。实验数据如图

10所示，机器人自主规划平滑的速度曲线，先加速，后减速，当速度降为0时，恰好到达期望位置。由虚拟俯仰角曲线图可看出，机器人的加速度与俯仰角的方向和大小有关，当机器人虚拟质心前倾，存在前向加速度，且角度越大加速度越大，当机器人虚拟质心位于轮轴上方时，加速度为0，当虚拟质心后倾时，产生后向加速度。当机器人到达期望位置时，虚拟俯仰角恰好恢复到平衡位置，未发生抖动。

5.4 曲线运动控制

令机器人跟随一条曲线轨迹时，可将跟随任务分解为直行与转向，该实验结合上文中的直行控制器，验证航向角控制器的有效性。期望轨迹 $p_{cd} = 5$ ，轨迹各点处弧度均不相同，其弧度曲线如图11(b)中的期望轨迹所示，航向角控制器增益为 $k_6 = 65$ ， $k_7 = 0.0075$ ， $k_8 = 3.4$ 。此时，机器人能够实现位置与航向角的同时跟随，由世界坐标系的原点处出发，实际运行轨迹如图12所示，左右轮的输入力矩如图13所示。

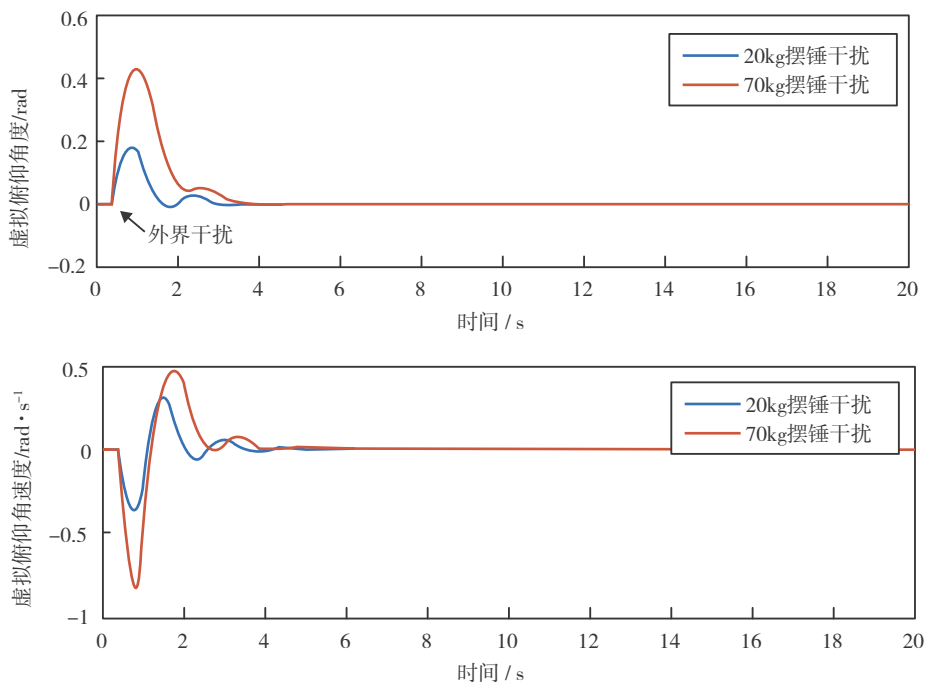


图9 机器人受到外力冲击时的虚拟俯仰角、俯仰角速度曲线

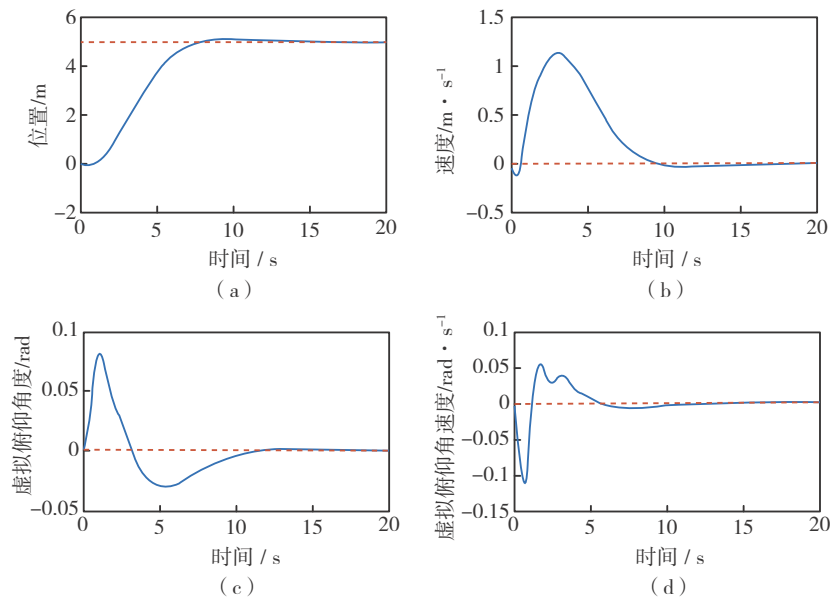


图10 机器人直线运动时的实验数据曲线

(a) 为两轮轴线中点的所走过的总路程，本实验航向角为零，因此也为在世界坐标系中沿 x 轴的位置；(b) 为轴线中点处的实时速度；
(c)、(d) 分别为直行过程中虚拟俯仰角的角度曲线以及角速度曲线

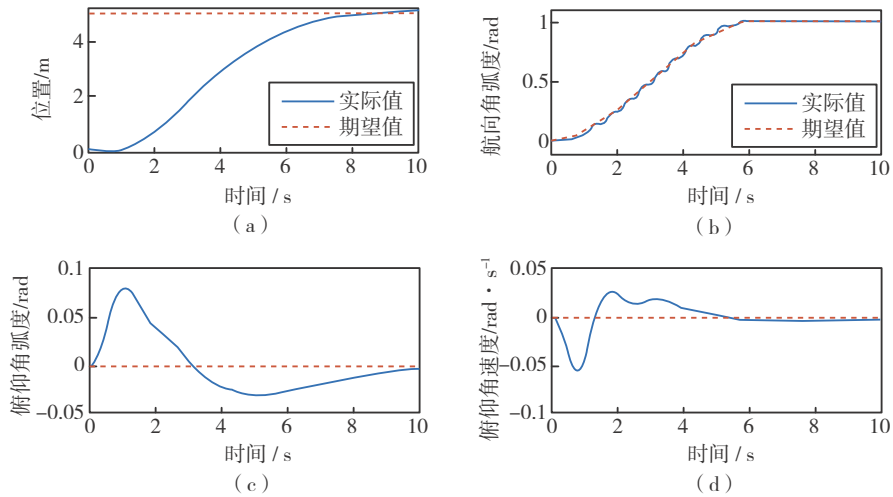


图11 机器人转弯运动的实验数据曲线

(a) 行进总路程曲线；(b) 航向角曲线；(c) 俯仰角曲线；(d) 俯仰角速度曲线

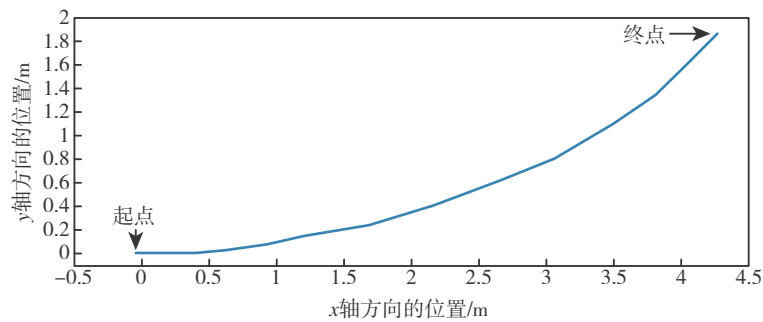


图12 机器人的行进轨迹曲线

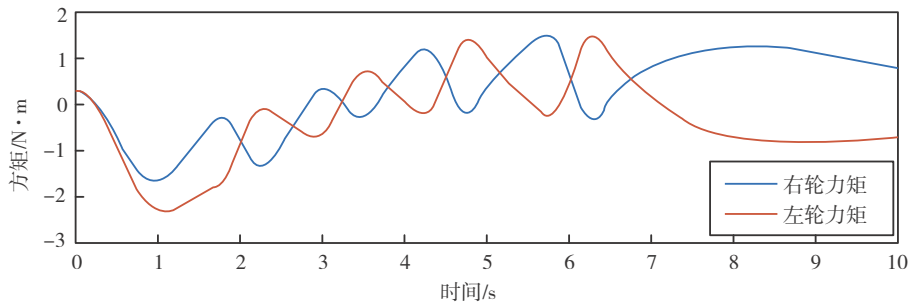


图13 左右轮力矩曲线

5.5 身体姿态控制

同时进行腿部、手臂位置跟随实验以验证所提控制器的有效性。本实验同时控制手臂末端与足端跟随规划的期望轨迹，规划、控制、数据收集均在躯干坐标系中进行；平衡控制器对腿部、手臂运动产生的虚拟质心前后移动所造成的机器人不稳定进行控制，对虚拟质心位置的计算在轮轴坐标系中进行；位置控制器保证了机器人姿态变化时的位置跟随能力，对机器人位置的数据收集在世界坐标系中进行。控制左右手臂、左右腿分别进行相同运动，且无外摆，因此，只对手臂末端与足端的前后位置与上下位置进行规划即可。手臂控制器的增益为 $K_{d1}=800$ ， $K_{p1}=1000$ ， $K_{p2}=3000$ ，手臂末端初始位置为 $(0,0.8)$ ，期望位置为 $(0.5,0.1)$ ，对两

点进行三次样条差值，得到图14(a)、(b)中的期望轨迹。腿部控制器的增益为 $K_{d1}=900$ ， $K_{p1}=1000$ ， $K_{p2}=4000$ ，足端初始位置为 $(0,-0.94)$ ，期望位置为 $(0.01,-0.6)$ ，对两点进行三次样条差值，得到图14(c)、(d)中的期望轨迹。图15(a)为虚拟倒立摆模型的身体质心位置曲线，可见身体姿态的变化引起虚拟质心的实时变化，由质心位置所计算出的虚拟俯仰角的曲线如15(b)所示，俯仰角的变化范围为 $[-0.015178, 0.02756]$ rad，机器人处于稳定状态。其次，虚拟俯仰角的前后波动对机器人位置产生了影响，其变化范围为 $[-0.100366, 0.288195]$ m，处于允许范围。15(d)为同时保证机器人的平衡与位置轮的输出力矩曲线，变化范围为 $[-1.168327, 1.681358]$ N·m。这

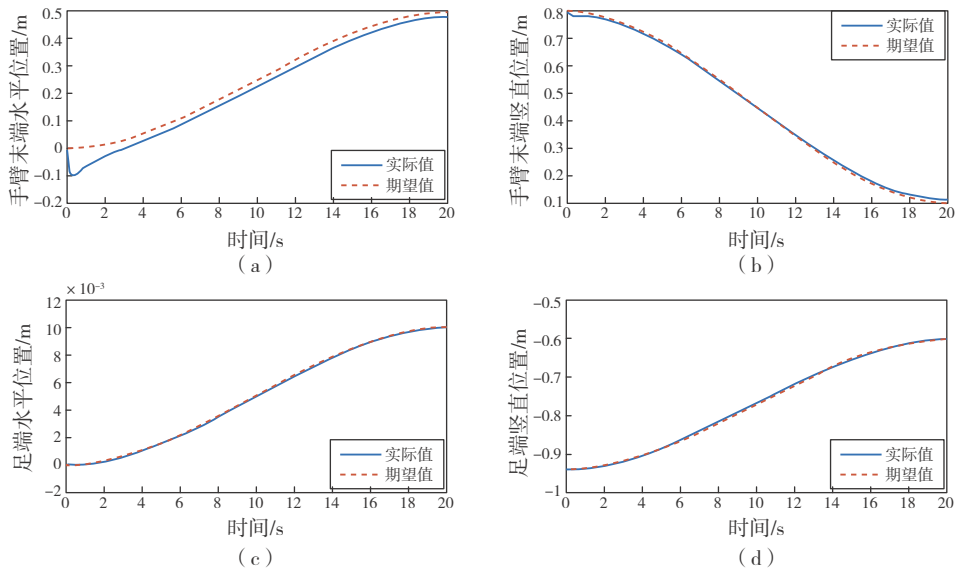


图14 手臂与腿部姿态变化曲线

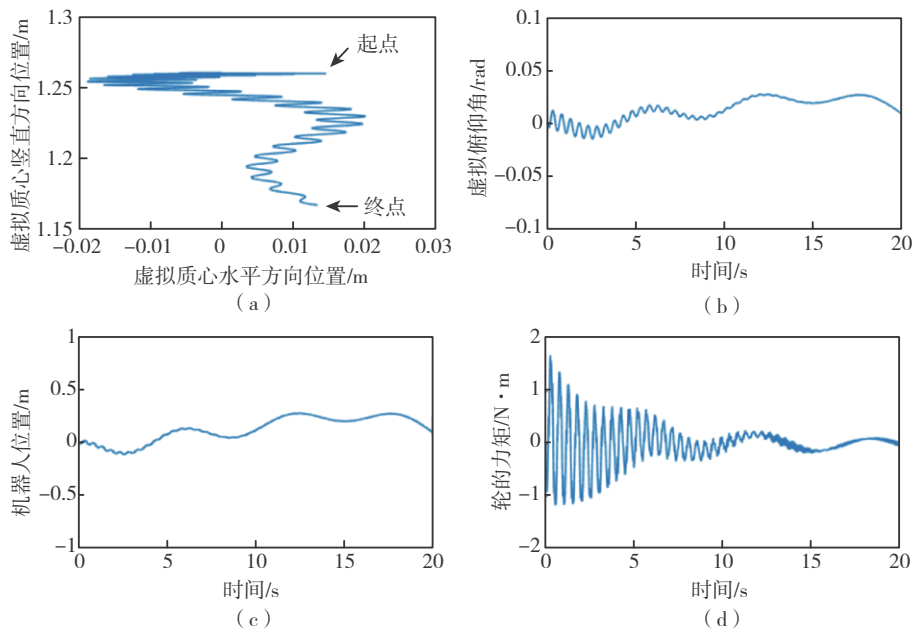


图15 机器人姿态调节的相关实验数据曲线

(a) 虚拟质心在轮轴坐标系中矢状面的位置变化曲线；(b) 姿态调整过程中虚拟俯仰角的变化曲线；(c) 姿态调整过程中位置的前后变化曲线；(d) 姿态调整过程中轮的力矩

一实验在验证了手臂、腿部控制器有效性的同时，也验证了平衡控制单元与位置控制单元的抗持续外扰能力。

6 结论

本文提出一种腿-轮复合机器人，并对平台进行运动学、动力学建模与控制。考虑到整体建模与控制的复杂度，将平台分为手臂子系统、腿部子系统、头部子系统以及虚拟倒立摆子系统，构造基于笛卡尔状态空间的加入前馈补偿的比例增益反馈线性化控制器对手臂子系统与腿部子系统进行控制；将各子系统的质心映射为虚拟倒立摆子系统的杆件质心，并作为一级倒立摆进行控制，实现平台的前后移动与转弯运动。

参考文献

[1] Grasser F, Darrigo A, Colombi S, et al. JOE: a mobile, inverted pendulum [J]. IEEE Trans Industrial

Electronics, 2002, 49 (1): 107-114.

[2] Abeygunawardhana P K W, Murakami T. Vibration suppression of two-wheel mobile manipulator using resonance-ratio-control-based null-space control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (12): 4137-4146.

[3] Abeygunawardhana P K W, Murakami T. Workspace control of two wheel mobile manipulator by resonance ratio control [C] // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2009: 1270-1275.

[4] Kv S, George N, Chinmaya K A, et al. Stability control and trajectory tracking of two wheeled mobile manipulator [C] // IEEE India Conference. IEEE, 2015.

[5] Acar C, Murakami T. Underactuated two-wheeled mobile manipulator control using nonlinear backstepping method [C] // Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. Conference of IEEE. IEEE, 2008: 1680-1685.

[6] Acar C, Murakami T. Multi-task control for dynamically balanced two-wheeled mobile manipulator through task-priority [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2011: 2195-2200.

- [7] Kook A J, Seul J. Development of a two-wheel mobile manipulator: balancing and interaction control [J] . Robotica, 2014, 32 (7): 1135-1152.
- [8] Lee H, Choi H J, Park J H, et al. Center of gravity based control of a humanoid balancing robot for boxing games: BalBot V [C] // Lccas-Sice. IEEE, 2009: 124-128.
- [9] Li Z, Luo J. Adaptive robust dynamic balance and motion controls of mobile wheeled inverted pendulums [J] . IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 17 (1): 233-241.
- [10] Lin S C, Tsai C C, Huang H C. Adaptive robust self-balancing and steering of a two-wheeled human transportation vehicle [J] . Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 62 (1): 103-123.
- [11] Azizi A, Nourisola H, Sadeghi-Emamgholi A, et al. Adaptive PSO-LS-wavelet H_{∞} control for two-wheeled self-balancing scooter [J] . International Journal of Control Automation & Systems, 2017 (2): 1-12.
- [12] Huang J, Guan Z H, Matsuno T, et al. Sliding-mode velocity control of mobile-wheeled inverted-pendulum systems [J] . IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26 (4): 750-758.
- [13] Uddin N, Nugroho T A, Pramudito W A. Passivity-based control for two-wheeled robot stabilization [C] // 2018: 012056.
- [14] Qian Q, Wu J, Wang Z. A novel configuration of two-wheeled self-balancing robot [J] . Tehnicki Vjesnik, 2017, 24 (2): 459-464.
- [15] Esmaeili N, Alfi A, Khosravi H. Balancing and trajectory tracking of two-wheeled mobile robot using backstepping sliding mode control: design and experiments [J] . Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017: 1-13.
- [16] Choi D, Oh J H. Human-friendly motion control of a wheeled inverted pendulum by reduced-order disturbance observer [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008: 2521-2526.
- [17] Jeong S, Takahashi T. Wheeled inverted pendulum type assistant robot: design concept and mobile control [J] . Intelligent Service Robotics, 2008, 1 (4): 313-320.
- [18] Kim Y, Kim S H, Kwak Y K. Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot [J] . Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2005, 44 (1): 25-46.
- [19] Kim S, Kwon S. Nonlinear optimal control design for underactuated two-wheeled inverted pendulum mobile platform [J] . IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, PP (99): 1-1.
- [20] Lee S J, Jung S. Object handling control among two-wheel robots and a human operator: An empirical approach [J] . International Journal of Control Automation & Systems, 2013, 11 (2): 346-353.
- [21] Lee H, Jung S. Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors [J] . Mechatronics, 2012, 22 (1): 95-105.

作者简介:

辛亚先(1990-),女,博士生,主要研究方向为机器人运动控制。

李贻斌(1960-),男,博士,教授,主要研究方向为智能机器人技术、智能控制系统等。

荣学文(1973-),男,博士,研究员,主要研究方向为工业机器人、移动机器人、仿生机器人、液压传动与控制等。

柴汇(1983-),男,博士,副研究员,主要研究方向为自动控制、机器人技术。

李彬(1979-),男,博士,副教授,主要研究方向为机器学习、机器人运动控制。

多智能体领航跟随一致性和 轨迹跟踪问题研究

林 敏, 夏元清, 吴 爽

(北京理工大学自动化学院, 北京 100081)

摘 要: 针对具有领航者和跟随者的多智能体时变编队问题, 在考虑具体模型的基础上分别对领航者和跟随者的控制算法展开研究。首先对跟随者提出参考位姿时变情况下的一致性算法, 给出了稳定性证明; 然后针对具有非完整性约束的轮式机器人模型设计领航者的轨迹跟踪算法, 使领航车辆以期望的速度、角速度行驶在规定的轨迹上; 同时考虑了环境障碍物和编队车辆之间的碰撞问题, 设计了人工势能场避障算法。最后综合以上算法, 以“行星-卫星”式时变编队为例, 成功地让领航者走固定轨迹、跟随者始终保持在领航者坐标系下某一轨迹上, 并且通过仿真验证了该时变编队算法可行性, 所提算法为后续更复杂的时变编队研究提供了思路。

关键词: 多智能体; 一致性算法; 轨迹跟踪; 人工势能场; 非完整性约束

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 03-0179-08

Leader-Following Consensus and Trajectory Tracking for Nonholonomic Mobile Robots

LIN Min, XIA Yuanqing, WU Shuang

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081, China)

Abstract: With regard to time-varying formation control problem for leader and followers, a leader-following consensus control law with collision avoidance for followers and a trajectory tracking algorithm for leader are investigated for nonholonomic mobile robots. First, by using the trajectory tracking algorithm, the leader of formation can be guaranteed on the desired position, attitude, velocity and angular velocity. Second, based on the traditional consensus algorithm, we propose a new consensus protocol with collision avoidance using artificial potential field. Finally, a “Planet-Satellite” formation is achieved. In the formation, the leader moves in the trajectory expected in the mission, while the followers convoy the leader with a certain formation, which can be time-varying or time-invariant. The performance of the algorithms is demonstrated by simulation. The proposed algorithm can be expanded to more complex time-varying formation research.

Keywords: Multi-Agent; Consensus Algorithm; Trajectory Tracking; Artificial Potential Field; Nonholonomic Constraints

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-09-15

基金项目: 中国国家重点研究与发展项目(2018YFB1003700); 国家自然科学基金国际交流与合作项目(61720106010)。

1 引言

随着移动机器人技术的发展以及通讯技术、计算机小型化技术的日益成熟, 将一个复杂的任务分配给多个结构、功能都相对简单的智能体来完成已经成为了一个热门的研究方向。多智能体协同完成一项任务在军事、民用等领域都有很大的发展潜力。目前的典型应用有集合^[1, 2]、编队控制^[3, 4]、集群^[5, 6]以及任务分配^[7]等。

多智能体系统一般都具有智能体数量大、分布式感知、复杂通讯的特点, 智能体之间经常存在着彼此的信息交互, 因此用图论来描述这种信息交互渠道就显得十分自然。在一个多智能体系统中, 若一个智能体能将自身信息传给另一个智能体, 那么就可以将这种通讯关系描述成两个结点间以一条有向边连接。若这两个智能体间能互相将自身信息传给对方, 这种通讯关系则可以描述成两个结点间以一条无向边连接。若两个智能体间的通讯联系关系随着它们间距的增大而减弱, 则可描述为两结点间边的权值减小。由此, 多智能体通讯拓扑网络就能完全用图来描述, 进而用图论中的代数方式来描述和研究通讯拓扑的性质和编队的性质。

代数图论借助矩阵代数的方式来描述图及其变换与性质。多智能体控制算法中经常用到邻接矩阵来描述编队的通讯拓扑, 用拉普拉斯矩阵证明编队的稳定性^[8]、收敛速率等关键性质。

在基于图论的方法中, 刚性图理论也得到了关注。“刚性”就是指当无向图顶点运动后, 每个顶点间距得以保持的性质。刚性图理论最早诞生于机械领域, 后被应用于多智能体编队控制。基于刚性图论, 可以方便地通过算子描述刚性编队的分裂和重组^[9, 10], 还可以利用智能体间距设计编队控制律以确保刚性。基于同样的理论, Anderson团队研究了多智能体编队的刚性保持和队形切换, 解决了队形变形、分裂、合并问题^[11], 做出了许多原创性理论贡献。

本文在基于图论的一致性编队算法基础上,

加入人工势能场避障方法, 使得跟随者收敛至领航者坐标系下的理想位置时可以避开环境障碍物, 且跟随车辆之间不会相撞。同时, 针对具有非完整性约束的轮式机器人模型设计了领航者轨迹跟踪算法, 使得领航车辆以期望的速度角和速度行驶在规定的轨迹上。最终实现“行星-卫星”式编队, 即领航者为有固定轨迹的“行星”, 跟随者为“卫星”, 始终以一定的半径围绕领航者行驶。最后通过仿真验证了算法的有效性。

2 背景知识

2.1 图论

用有向图或无向图来对多智能体间的通讯拓扑进行建模, 可以将通讯拓扑结构代数化, 从而能借用矩阵的性质对通讯图的连通性等关键性质进行研究。在这部分介绍一些图论中的符号以供后续使用。

一个由 n 个智能体组成的多智能体系统, 可以用图中的 n 个顶点代表这 n 个智能体, 用图的边代表这些智能体间的通讯拓扑连接关系。由于智能体间的通讯都是有向的, 所以一般用有向图来描述多智能体系统的通讯拓扑。当系统中有通讯关系的两个智能体间的通讯都是双向的时, 可以将有向图简化成无向图。

一个有向图 G 由一个有限顶点集合 $V(G) = \{1, 2, \dots, n\}$ 以及一个边集 $\varepsilon \subseteq V \times V$ 组成, 其中边是一对顶点的有序对。定义有向图的邻接矩阵为 $A = [a_{ij}] \in R^{V \times V}$, 其中的元素都是非负的, $|V|$ 表示 V 的基。如果 (i, j) 是 G 的一条边, 即 $(i, j) \in \varepsilon$, 意味着从 i 到 j 有一条有向路径, 那么元素 a_{ji} 是正数, 否则为0。规定对任何 $v_i \in V$ 都有 (i, i) 不属于 ε 。记智能体 i 能通讯到的所有智能体的集合为 $N_i = \{v_j \in V : (i, j) \in \varepsilon\}$, 称作智能体 i 的通讯集。如果一幅有向图中存在一个称作根的顶点, 使得它到其他所有顶点都有路径连接, 则称这幅有向图存在有向生成树, 该顶点称作生成树的根。顶

点 i 的度 d_i 定义为 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$ 。用 D 表示 d_i 的 $N \times N$

的对角阵, 那么 D 就是图 G 的度矩阵。图 G 的拉普拉斯矩阵就用半正定矩阵 $L=D-A$ 来定义, 或也可以定义为 $L=[l_{ij}]$, 其中:

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{j \in N_i} a_{ik}, & i = j \\ -a_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

拉普拉斯矩阵是图论中十分重要的一个矩阵。从式 (1) 中可以看出拉普拉斯阵 L 的行和为 0, 因此一定有一个零特征根, 且 L 的特征根总是非负实部的。 L 中有几个零特征根, 则代表图中有几个连通子图 (即独立的子网)。若用 $\{\lambda_i(L); i=1, \dots, m\}$ 表示拉普拉斯矩阵 L 的 m 个特征根, 且

$$0 = \lambda_1(L) < \lambda_2(L) < \dots < \lambda_m(L)$$

则此通讯拓扑图是连通的判别条件为 $Re\{\lambda_2(L)\} > 0$ 。最小非零特征值称作图的代数连通度, 能够衡量基于图论的一致性算法的收敛速度 (连通度越大, 收敛越快)。

2.2 系统模型

考虑一个含有 n 个智能体的系统, $[x, y]^T \in \mathbb{R}$ 为全局坐标系下的位置, $\theta \in \mathbb{R}$ 为速度方向与坐标系 x 轴的夹角, $v \in \mathbb{R}$ 为线速度, $\omega \in \mathbb{R}$ 为角速度, 则根据运动学模型容易获得领航者模型为:

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于跟随者, 为了简化一致性控制算法, 采用简单的一阶积分器模型如下:

$$u_i = \dot{\xi}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中 $u_i = [u_{xi}, u_{yi}]^T$ 为系统的控制输入, $\xi_i = [x_i, y_i]^T$ 为第 i 辆车的位置。但是考虑到非完整性约束, 在模型 (3) 的基础上, 定义“头部”节点 $h = [h_x, h_y]^T$, 位于两轮连线中垂线上距离 ℓ 处, 用“头部”节点代替中心节点可得到如下系统模型^[12]:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) \\ -\frac{1}{\ell} \sin(\theta_i) & \frac{1}{\ell} \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

3 领航者轨迹跟踪算法

在实际应用中, 领航者的轨迹通常是很复杂的, 为了让领航者能以预期的角速度和线速度走在某个特定预期轨迹上, 同时也为了让其预期轨迹更加多样, 就需要对领航者施加轨迹跟踪算法。即设计控制律使小车实现对参考位姿 (x_r, y_r, θ_r) 、参考线速度 v_r 和参考角速度 ω_r 的跟踪。轨迹跟踪模型如图 1 所示。

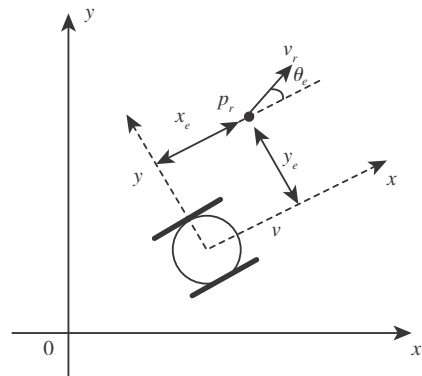


图 1 轨迹跟踪模型示意图

由图 1 中的几何关系, 首先写出小车当前位姿与参考位姿之间的误差模型:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

对式 (5) 左右两边求导, 结合小车运动学模型式 (2), 可得:

$$\dot{x}_e = y_e \dot{\theta} - v + v_r \cos \theta_e = y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \quad (6a)$$

$$\dot{y}_e = -x_e \dot{\theta} + v_r \sin \theta_e = -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \quad (6b)$$

$$\dot{\theta}_e = \omega_r - \omega \quad (6c)$$

注 1. 从式 (6) 中可以看出, 当参考角速度 ω_r 为 0 的时候, y_e 的收敛依赖于 θ_e 。若在 $\omega_r = 0$ 的前提下, θ_e 将早于 y_e 收敛到 0, 那么 y_e 将变得无

法控制，这就是在设计轨迹跟踪算法时要注意的控制奇异点的问题。为了解决这个问题，可以在设计控制律时采用引导角^[13]，即在 y_e 未收敛时先控制 θ_e 为某一非零角度，这样就避免了控制奇异点的产生。本文中引导角设计为：

$$\theta_d = -\arctan \frac{y_e}{D} \quad (7)$$

其中 $D > 0$ 是引导角参数， $\theta_d \in (-\pi, \pi]$ 。

定理1. 对于具有非完整性约束的轮式机器人，可设计如下控制器(8)和(9)保证系统稳定。

$$v = k_1 x_e + v_r \cos \theta_e, k_1 > 0 \quad (8)$$

$$\omega = \frac{(D^2 + y_e^2)(\omega_r - k_2 \theta_z) + D v_r \sin \theta_e}{D x_e + D^2 + y_e^2}, k_2 > 0 \quad (9)$$

其中， $4k_2 \alpha > D v_r$ ， $\theta_z = \theta_d - \theta_e$ 是误差角， $\cos \theta_z > \alpha$ ， $\alpha = \cos \theta_x > 0$ ， $\theta_x \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$ 。

证. 首先针对 x_e, y_e 的收敛，设计如下Lyapunov函数：

$$V_1 = \frac{1}{2} x_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2 \quad (10)$$

对式(10)求导，代入式(6)可得

$$\dot{V}_1 = x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e = -v x_e + x_e v_r \cos \theta_e + y_e v_r \sin \theta_e \quad (11)$$

将控制器(8)代入式(11)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -(k_1 x_e + v_r \cos \theta_e) x_e + x_e v_r \cos \theta_e + y_e v_r \sin \theta_e \\ &= -k_1 x_e^2 + y_e v_r \sin \theta_e \\ &= -k_1 x_e^2 + y_e v_r \frac{-y_e}{\sqrt{D^2 + y_e^2}} \\ &= -k_1 x_e^2 - \frac{v_r y_e^2}{\sqrt{D^2 + y_e^2}} \end{aligned} \quad (12)$$

由于 $k_1, v_r > 0$ ，所以 $\dot{V}_1 < 0$ 。则当 θ_e 为一特定角度时， y_e 可以收敛。

接下来针对 θ_e 的收敛，设计Lyapunov函数：

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \theta_z^2 \quad (13)$$

定义 $\theta_z = \theta_d - \theta_e = \arctan \left(\frac{-y_e}{D} \right) - \theta_e$ ，那么

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_z &= \frac{1}{1 + \frac{y_e^2}{D^2}} \cdot \left(-\frac{1}{D} \right) \cdot (\dot{y}_e) - (\omega_r - \omega) \\ &= \frac{D x_e + D^2 + y_e^2}{D^2 + y_e^2} \omega - \frac{D v_r \sin \theta_e}{D^2 + y_e^2} - \omega_r \end{aligned} \quad (14)$$

对式(13)求导得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \theta_z \dot{\theta}_z \quad (15)$$

将控制器(9)和式(14)带入式(15)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \theta_z \left(\frac{D x_e + D^2 + y_e^2}{D^2 + y_e^2} \omega - \frac{D v_r \sin \theta_e}{D^2 + y_e^2} - \omega_r \right) \\ &= -k_1 x_e^2 + y_e v_r \sin(\theta_d - \theta_z) - k_2 \theta_z^2 \end{aligned} \quad (16)$$

若要证明 \dot{V}_2 是负定的，还需引入新的变量

$\theta_x \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$ 。当 $|\theta_z| < \theta_x$ 时，一定有 $\alpha = \cos \theta_x > 0$ ，

$\cos \theta_z > \alpha$ ， $|\theta_z| > |\sin \theta_z|$ 。考虑式(16)中的后两项，有：

$$\begin{aligned} &y_e v_r \sin(\theta_d - \theta_z) - k_2 \theta_z^2 \\ &= -k_2 \theta_z^2 - \frac{v_r y_e^2}{\sqrt{D^2 + y_e^2}} \cos \theta_z - \frac{v_r y_e D}{\sqrt{D^2 + y_e^2}} \sin \theta_z \\ &\leq -k_2 \theta_z^2 - \frac{v_r y_e^2}{\sqrt{D^2 + y_e^2}} \alpha + \frac{v_r D}{\sqrt{D^2 + y_e^2}} |y_e \theta_z| \end{aligned} \quad (17)$$

由基本不定式 $a^2 + b^2 \geq 2|ab|$ ，设 $\beta > 0$ ，有

$$\frac{v_r D}{\sqrt{D^2 + y_e^2}} |y_e \theta_z| \leq \frac{v_r D \beta}{2\sqrt{D^2 + y_e^2}} y_e^2 + \frac{v_r D}{2\beta\sqrt{D^2 + y_e^2}} \theta_z^2 \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)可得：

$$\begin{aligned} &y_e v_r \sin(\theta_d - \theta_z) - k_2 \theta_z^2 \\ &\leq -\frac{v_r y_e^2}{\sqrt{D^2 + y_e^2}} \alpha + \frac{v_r D \beta}{2\sqrt{D^2 + y_e^2}} y_e^2 - k_2 \theta_z^2 + \frac{v_r D}{2\beta\sqrt{D^2 + y_e^2}} \theta_z^2 \\ &= -\frac{v_r}{2\sqrt{D^2 + y_e^2}} (2\alpha - D\beta) y_e^2 - \left(k_2 - \frac{v_r D}{2\beta\sqrt{D^2 + y_e^2}} \right) \theta_z^2 \end{aligned} \quad (19)$$

结合式(16)与式(19)可得：

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -k_1 x_e^2 - \frac{v_r}{2\sqrt{D^2 + y_e^2}} (2\alpha - D\beta) y_e^2 \\ &\quad - \left(k_2 - \frac{v_r D}{2\beta} \right) \theta_z^2 \end{aligned} \quad (20)$$

要使 $\dot{V}_2 < 0$ ，则要求

$$\begin{cases} 2\alpha - D\beta > 0 \\ k_2 - \frac{v_r D}{2\beta} > 0 \end{cases}$$

由此解得：

$$4k_2\alpha > Dv_r \quad (21)$$

所以当选取参数满足式(21)时， \dot{V}_2 就是负定的，即系统是稳定的，小车能实现无控制奇异点的轨迹跟踪。

4 跟随者一致性算法

引理1.一阶积分器模型在有向固定/切换拓扑下的连续时间基本一致性算法如下^[14]：

$$u_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(t)(\xi_i - \xi_j), \quad i=1, \dots, n \quad (22)$$

式(22)达成一致性的条件为无向图连通或者有向图存在生成树，在拓扑结构切换的情况下，达到一致性的条件为拓扑结构图的并集对应的无向图连通或者有向图存在生成树。具体的证明可见文献[15]。

定理2.当系统存在领航者，且领航者位置时变时，为使跟随者与领航者的位置量保持一个可时变的偏差，可设计如下控制器：

$$u_i = \dot{\delta}_i + \frac{1}{\eta_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} \left\{ \xi_j - \dot{\delta}_j - \gamma \left[(\xi_i - \xi_j) - (\delta_i - \delta_j) \right] \right\} + \frac{1}{\eta_i} a_{i(n+1)} \left[\dot{\xi}^r - \gamma (\xi_i - \delta_i - \xi^r) \right], \quad i=1, \dots, n \quad (23)$$

其中 $\tilde{\xi}_i = \xi_i - \delta_i$ 为第 i 辆车的理想位置， δ_i 则为理想位置与实际位置的偏差， γ 是一个正的常数标量， ξ^r 为领航者的位置信息。当有向图 G_{n+1} 存在有向生成树时，该算法最终会收敛到 $\xi_i(t) \rightarrow \xi^r(t) + \delta_i(t)$ 且 $\xi_i(t) - \xi_j(t) \rightarrow \delta_i - \delta_j, \forall i \neq j$ 。

证. 令 $\tilde{\xi}_i = \xi_i - \delta_i, \tilde{\xi}_j = \xi_j - \delta_j, \tilde{u}_i = u_i - \dot{\delta}_i$ ，式(23)可化简为：

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{\eta_i(t)} \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) \left[\dot{\tilde{\xi}}_j - \gamma (\tilde{\xi}_i - \tilde{\xi}_j) \right] + \frac{1}{\eta_i(t)} a_{i(n+1)}(t) \left[\dot{\xi}^r - \gamma (\tilde{\xi}_i - \xi^r) \right], \quad i=1, \dots, n \quad (24)$$

将式(24)两边同乘 $\eta_i(t) = \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij}(t)$ ，并移项整理得

$$\left(\sum_{j=1}^{n+1} a_{ij} \right) \tilde{u}_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \tilde{u}_j - a_{i(n+1)} \dot{\xi}^r = -\gamma \left[\sum_{j=1}^n a_{ij} (\tilde{\xi}_i - \tilde{\xi}_j) + a_{i(n+1)} (\tilde{\xi}_i - \xi^r) \right]$$

若 $\tilde{\xi}_i \in R^m, \tilde{u}_i \in R^m$ ，则上式可写成如下矩阵形式：

$$\left[L_{n \times (n+1)} \otimes I_m \right] \underline{u} = -\gamma \left[L_{n \times (n+1)} \otimes I_m \right] \underline{\xi} \quad (25)$$

其中， $\underline{u} = [\tilde{u}_1^T, \dots, \tilde{u}_n^T, \dot{\xi}^{rT}]^T, \underline{\xi} = [\tilde{\xi}_1^T, \dots, \tilde{\xi}_n^T, \xi^{rT}]^T, L_{n \times (n+1)}$ 是通讯拓扑对应的拉普拉斯矩阵。 \otimes 表示 Kronecker 积运算。

注意到，因为第 $n+1$ 个智能体是领航者，不需要接收其他节点的信息，所以对邻接矩阵 A_{n+1} 的最后一行全为 0。又因为有向图 G_{n+1} 存在有向生成树，所以 A_{n+1} 没有其他全为 0 的行。于是对应的拉普拉斯矩阵 $L_{n \times (n+1)}$ 的秩为 n 。将 $L_{n \times (n+1)}$ 写成 $L_{n \times (n+1)} = [M \ b]$ ，其中 $M = [m_{ij}] \in R^{n \times n}, m_{ij} = -a_{ij}, i \neq j, m_{ii} = \sum_{i=1, j \neq i}^{n+1} a_{ij}, b = [-a_{1(n+1)}, \dots, -a_{n(n+1)}]^T$ 。由于 $L_{n \times (n+1)}$ 有行和为 0 的性质，所以其第 $n+1$ 列取决于前 n 列，即：

$$b = -M1_n \quad (26)$$

所以，有向图 G_{n+1} 存在有向生成树的充要条件是 $\text{rank}(M) = \text{rank}(L_{n \times (n+1)}) = n$ 。

于是式(25)可以写成：

$$(M \otimes I_m) \underline{u} + (b \otimes I_m) \dot{\xi}^r = -\gamma \left[(M \otimes I_m) \underline{\xi} + (b \otimes I_m) \xi^r \right]$$

由于矩阵 M 满秩，所以可逆，因此有：

$$\underline{u} = (M \otimes I_m)^{-1} \left[-\gamma (M \otimes I_m) \underline{\xi} - \gamma (b \otimes I_m) \xi^r - (b \otimes I_m) \dot{\xi}^r \right]$$

由式(26)可知 $-M^{-1}b = 1_n$ ，由此可得：

$$\underline{u} = -\gamma \underline{\xi} + \gamma (1_n \otimes \xi^r) + 1_n \otimes \dot{\xi}^r$$

即：

$$\underline{\xi} - 1_n \otimes \xi^r = -\gamma (\underline{\xi} - 1_n \otimes \xi^r)$$

由上式可看出当 $t \rightarrow \infty$ 时， $\underline{\xi}(t) \rightarrow 1_n \otimes \xi^r$ ，也就

是 $\tilde{\xi}_i(t) \rightarrow \xi^r, i=1, \dots, n$, 当且仅当有向图 G_{n+1} 存在有向生成树。

5 基于人工势能场的避障算法

对于避障控制, 最广为采用的方法就是由 Khatib 于 1986 年提出的人工势能场方法^[16]。机器人在人工势能场中的运动可以类比于带电粒子在电场中的运动。在电场中, 带电粒子沿着电场的梯度向量方向运动, 由高势能点向低势能点运动, 梯度可以看作是作用于带电粒子上的力。在机器人的运动过程中, 可以将机器人看作在势能场中运动的粒子, 障碍物对这个粒子产生排斥力, 运动的目标点对这个粒子产生吸引力, 在引力和斥力的作用下, 粒子就能在向目标点前进的过程中避开障碍物。

在本文讨论的情况下, 由于每个智能体都有自己需要跟踪的轨迹, 不需要额外设置产生吸引力的势能函数, 只需设置产生斥力的势能场进行避障即可。对于运动的车辆来说, 产生斥力的势能场来自于与之邻近的其他车辆。只有其他车辆进入到其避障范围内时, 势能场就迅速升高, 产生排斥力, 而在避障范围外, 势能场就为 0。图 2 是这种势能场的示意图。

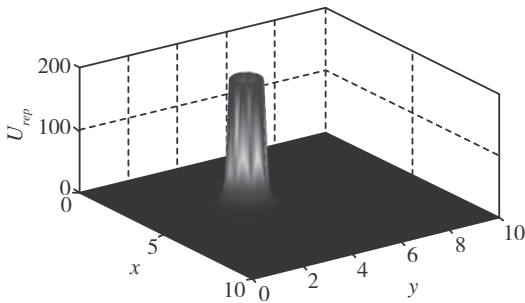


图 2 人工势能场示意图

设计势能函数如下:

$$U_{ij}(\xi_i, \xi_j) = \left(\min \left\{ 0, \frac{\|\xi_i - \xi_j\|^2 - R_a^2}{\|\xi_i - \xi_j\|^2 - r_a^2} \right\} \right)^2 \quad i, j \in N \quad i \neq j \quad (27)$$

其中, $R_a > r_a > 0$, $\|\cdot\|$ 表示向量的范数, 若无特殊说明, 默认是 2-范数。此势能函数取值如下:

$$U_{ij}(\xi_i, \xi_j) = \begin{cases} 0 & \|\xi_i - \xi_j\| > R_a \\ \left(\frac{\|\xi_i - \xi_j\|^2 - R_a^2}{\|\xi_i - \xi_j\|^2 - r_a^2} \right)^2 & r_a < \|\xi_i - \xi_j\| < R_a \\ 0 & \|\xi_i - \xi_j\| < r_a \end{cases}$$

那么小车受到的力就是沿着势函数的负梯度方向, 作为小车的避障输入:

$$u_i^a = - \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial U_{ij}(\xi_i, \xi_j)}{\partial \xi_i} \quad \forall i \in N \quad (28)$$

则跟随车辆的控制器可在式(23)的基础上重新设计为:

$$u_i = \delta_i + \frac{1}{\eta_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} \left\{ \dot{\xi}_j - \dot{\delta}_j - \gamma \left[(\xi_i - \xi_j) - (\delta_i - \delta_j) \right] \right\} + \frac{1}{\eta_i} a_{i(n+1)} \left[\dot{\xi}^r - \gamma (\xi_i - \delta_i - \xi^r) \right] + u_i^a \quad i=1, \dots, n \quad (29)$$

6 仿真结果及分析

本节选取了一辆领航车和两辆跟随车对上文中提到的算法分别进行数值仿真, 三辆车之间的网络拓扑关系由邻接矩阵表示为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对于领航者的轨迹跟踪算法(8)和(9), 在具体仿真时, 选择 $k_1 = k_2 = 1$, $L = 0.5$, 使领航者以 $v_r = 1$, $\omega_r = 0.6$ 行走在一个圆形轨迹上。得到仿真结果如下: 图 3 为领航者期望轨迹与实际轨迹, 图 4 为 x, y 与 θ 方向上的跟踪误差, 图 5、图 6 分别为期望速度、角速度与实际速度和角速度的比较情况。由仿真结果可得, 算法(8)、(9)可保证领航者以期望的速度角速度行驶在规定轨迹上。

对于带有人工势能场避障的跟随者一致性算法(29), 令 $\gamma = 2$, $R_a = 0.5$, $r_a = 0.25$, 先任意给定领航者速度 $v_r = 0.5$, $\omega_r = 0.3$, 当期望误差 $\delta_i = \delta_j = 0$ 时, 可得到图 7 轨迹, 表明算法(29)可

使跟随者位置达到一致，为了便于观察给出图8为x方向上位置收敛情况。

将领航者轨迹跟踪算法(8)和(9)与跟随者一致性和避障算法(29)结合，同时令 $\delta_{xi} = R_f * \sin(\theta_0 + \omega_f * \Delta T)$, $\delta_{yi} = R_f * \cos(\theta_0 + \omega_f * \Delta T)$, 即跟随者以领航者为圆心画圆。其中 $R_f = 1.5$, $\omega_f = \pi$, $\Delta T = 0.03$, $\gamma = 2$ 。最终可实现“行星-卫星”式编队，仿真效果如图9。

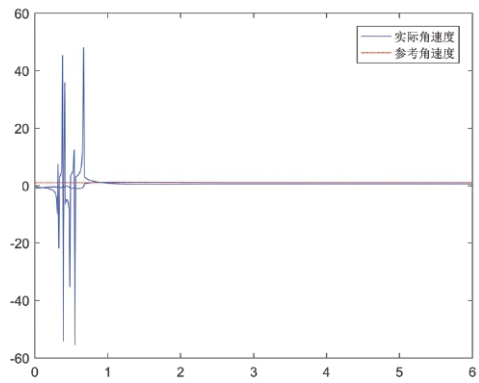


图6 领航者期望角速度与实际角速度

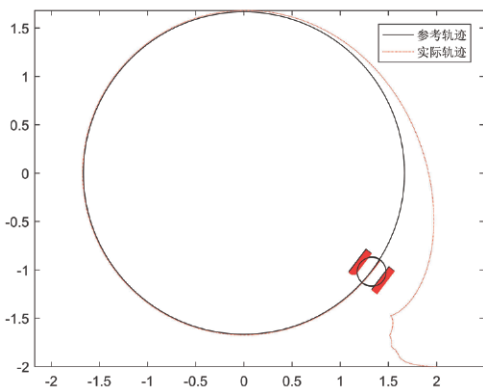


图3 领航者期望轨迹与实际轨迹

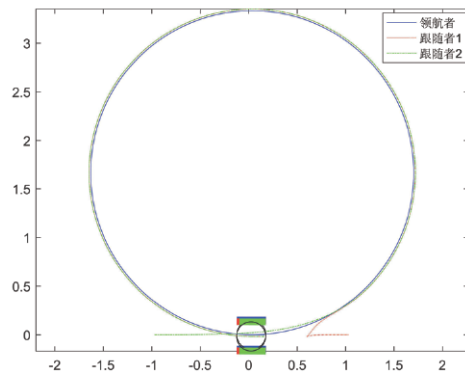


图7 期望误差为零时跟随者轨迹

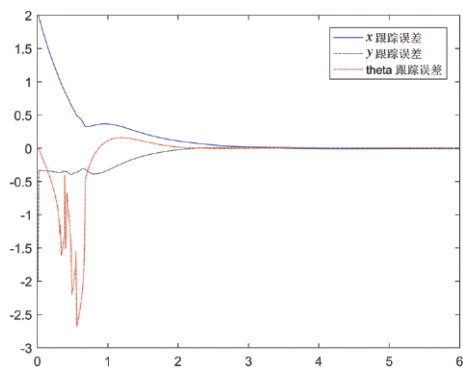


图4 领航者追踪误差

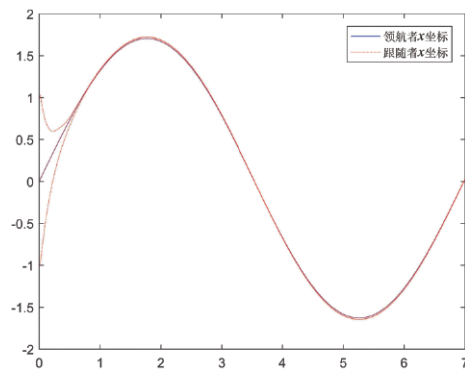


图8 期望误差为零时跟随者x坐标收敛情况

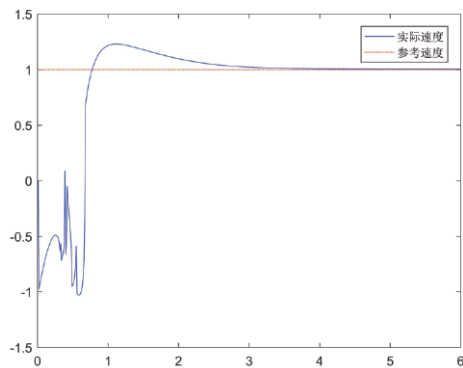


图5 领航者期望速度与实际速度

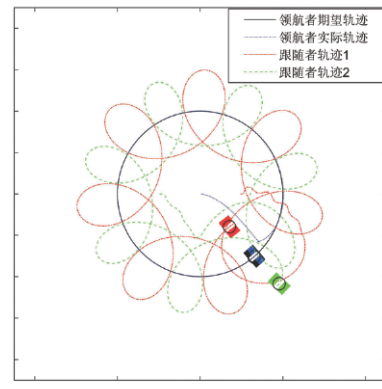


图9 “行星-卫星”式编队效果

7 结 论

本文研究了一种“行星-卫星”式编队方式,即领航者以期望的速度和角速度行驶在规定轨迹上,跟随者保持在领航者坐标系下一特定圆形轨迹上。首先对领航者的轨迹跟踪算法进行了研究,设计了领航者控制器并对其稳定性进行了证明。然后在传统一致性算法基础上,结合人工势能场避障方法,给出了领航者时变情况下的跟随者控制器与稳定性证明。最后通过数值仿真证明了所提算法的有效性。

后续还可围绕文中所提算法进行以下研究:

(1)在实际应用中,当输入达到一定程度时,再增加输入常常不会影响输出的变化,现有算法并未考虑这种输入饱和问题,可以考虑增加饱和限制。

(2)对于很多智能体,速度信息常常难以获得,即使装有速度传感器也可能出现失效等情况,因此可以考虑设计不需要速度信息的控制器,以提高系统鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] Lin J, Morse A S, Anderson B D. The multi-agent rendezvous problem—the asynchronous case [C] // Decision and Control, 2004 CDC 43rd IEEE Conference on IEEE, 2004, 2: 1926–1931.
- [2] Martinez S, Cortés J, Bullo F. On robust rendezvous for mobile autonomous agents [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2005, 38 (1): 115–120.
- [3] Lafferriere G, Williams A, Caughman J, et al. Decentralized control of vehicle formations [J]. Systems & Control Letters, 2005, 54 (9): 899–910.
- [4] Fax J A, Murray R M. Information flow and cooperative control of vehicle formations [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49 (9): 1465–1476.
- [5] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51 (3): 401–420.
- [6] Tanner H G, Jadbabaie A, Pappas G J. Stable flocking of mobile agents part I: dynamic topology [C] // Decision and Control, 2003 Proceedings 42nd IEEE Conference on IEEE, 2003, 2: 2016–2021.
- [7] Alighanbari M, How J P. Decentralized task assignment for unmanned aerial vehicles [C] // Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference CDC-ECC 44th IEEE Conference on IEEE, 2005: 5668–5673.
- [8] Lin Z, Francis B, Maggiore M. Necessary and sufficient graphical conditions for formation control of unicycles [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50 (1): 121–127.
- [9] Olfati-Saber R, Murray R M. Graph rigidity and distributed formation stabilization of multi-vehicle systems [C] // Decision and Control, 2002 Proceedings of the 41st IEEE Conference on IEEE, 2002, 3: 2965–2971.
- [10] Eren T, Anderson B D, Morse A S, et al. Operations on rigid formations of autonomous agents [J]. Communications in Information & Systems, 2003, 3 (4): 223–258.
- [11] Hendrickx J M, Fidan B, Yu C, et al. Formation reorganization by primitive operations on directed graphs [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53 (4): 968–979.
- [12] Wei R E, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control theory and applications [J]. Communications & Control Engineering, 2008, 27 (2): 71–82.
- [13] 于浩. 非完整轮式移动机器人运动规划与控制研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [14] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49 (9): 1520–1533.
- [15] Ren W, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control [M]. London: Springer London, 2008.
- [16] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [M] // Autonomous Robot Vehicles. Springer, New York, NY, 1986: 396–404.

作者简介:

林 敏 (1995-), 男, 博士生, 主要研究方向为多智能体协同控制与云控制。

夏元清 (1971-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为网络化信息处理与控制。

吴 爽 (1994-), 女, 硕士生, 主要研究方向为多智能体协同控制。

基于IB-LBM与人工势场方法的 2D机器蛇水中动态避障算法

周志昊¹, 邓宏彬¹, 高庆海², 李东方¹

(1.北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2.辽沈工业集团有限公司, 辽宁 110013)

摘要: 为了研究多冗余度、多自由度的机器蛇水下环境适应能力, 针对机器蛇水下动态环境中避障控制以及路径规划的问题, 提出了基于人工势场与IB-LBM (Immersed Boundary Method- Lattice Boltzmann Method) 相结合的2D机器蛇水中动态避障算法。算法首先根据实际水流情况, 采用LBM方法构建带有障碍的2D水下流场模型, 并结合现有的蛇形曲线运动模型, 引入IB方法搭建出2D机器蛇水中流固耦合模型, 然后对水下运动的障碍和机器蛇加入人工势场法引力与斥力的作用, 通过改变障碍影响距离、机器蛇尾部摆动振幅、机器蛇尾部摆动频率、障碍点斥力系数、目标点引力系数、水流雷诺数、动态障碍运动速度等重要参数, 研究机器蛇对水中动态障碍的避障能力和避障效率。利用MATLAB多次仿真求取机器蛇水中动态避障的最优解。仿真结果表明, 当各项参数适当时, 该动态避障算法能够使机器蛇有效避开水下环境中动态障碍而到达目标点, 为未来实现机器蛇水下监测创造了条件, 有重要的理论和实验意义。

关键词: 机器蛇; IB-LBM; 人工势场; 避障; 蜿蜒运动步态; 自适应控制

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 03-0187-09

2D Aquatic Dynamic Obstacle Avoidance Approach for Snake-Like Robot Based on IB-LBM and Artificial Potential Field Method

ZHOU Zhihao¹, DENG Hongbin¹, GAO Qinghai², LI Dongfang¹

(1.School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2.Liaoshen Industries Group CO., LTD., Liaoning 110013, China)

Abstract: The 2D aquatic intellectual obstacle avoidance algorithm backed up by artificial potential field principle and IB-IBM (Immersed Boundary Method-Lattice Boltzmann Method) are designed to enhance the underwater adaptation of snake-like robot which is featured with high degree of redundancy and freedom. According to the actual water flow situation, Lattice Boltzmann method is firstly used to build 2D underwater flow-field model with obstacles. Then combined with the existing serpentine curve motion model, Immersed Boundary method is introduced to build a water snake robot 2D fluid solid coupling model. After that, we introduced the action of the attraction and repulsion in artificial potential field on the underwater dynamic obstacles and snake-like robot, and studied the ability and efficiency of avoiding underwater dynamic obstacles by altering obstacle's affecting range, the snake tail's swing amplitude and frequency, the repulsive point repulsion, the target point gravitational force, the Reynolds number, dynamic obstacle motion speed and direction, and other important parameters. The optimistic evaluation of each parameter are available after several simulations. This algorithm can be used in Matlab simulation experiments and the results demonstrates that the algorithm manages to help Snake-like robot avoid the underwater dynamic obstacles and get to its destinations effectively when the parameters are optimistic, which provides the conditions for the underwater monitoring of snake-like robot in the future and has important theoretical and experimental significance.

Keywords: Snake-Like Robot; IB-LBM; Artificial Potential Field; Obstacle Avoidance; Serpentine Gait; Adaptive Control

收稿日期: 2018-08-02; 修回日期: 2018-09-01

基金项目: 国防基础科研资助 (B2220133015); 国家自然科学基金 (5177041109)

1 引言

在过去的二十年中，人类在水下勘察、目标获取、搜索与援救、监督、环境监测等方面广泛的应用需求，使得水下机器人技术得到了快速的发展，在军事、科学研究和商业领域逐渐得到广泛应用。然而水下存在岩石、珊瑚、动态及其他悬浮物，给机器人的水下探索带来了很大的复杂性和危险性，加之人类水下探测技术的受限，使探索这些大型水下环境存在诸多挑战^[1]。

生物蛇凭借细长无肢的身体和多种灵活的步态，可在陆地、水中和沙漠等多种环境中运动和生存。模仿生物蛇的外形和运动机理设计一种重心低、与地面有多个接触点的仿生机器蛇，使其能够凭借多关节多冗余自由度的特性有效实现水陆两栖作业。因此，提出合适的机器蛇水下避障算法对探索水下环境有重要的意义。

为解决经典力学中微积分方法不能解释类似流体运动、粒子运动以及随机运动等互斥理论不足的问题，从概率统计学角度出发，引入Lattice Boltzmann方法^[2]，从不同角度解决宏观与微观、离散与连续的关系，方法计算简单、易于并行实现，在处理比较复杂的边界条件时，也实现了宏观与微观的相互转化。LBM采用不可压缩的D2Q9模型对空间和时间都进行离散。在空间上，将物理模型离散成有规律的笛卡尔网格，并将每一个网格定义为一个细胞；在时间上，将模型演化时间离散成多个时间步长。与此同时，引入Bhatnagar、Gross和Krook的松弛因子控制平衡态分布函数建立LBGK模型^[3]，进一步强化网格之间的碰撞方法，增加模型的稳定性。

为了减少网格划分的复杂性，节省避障算法的计算速度，引入Immersed Boundary法^[4]，通过在流体控制方程中加入一个附加柔性体的力源，使流场在力源固体附近满足无滑移的边界条件，大大提高了计算效率。

根据LBM方法构建的2D水下流场模型和IB方法搭建的2D机器蛇水中流固耦合模型，借助于

Khatib O提出的人工势场法^[5]，将机器蛇所在空间工作环境视为一种受控虚拟力场，将目标看作吸引点，障碍物看成排斥点，规划的路径沿吸引点和排斥点产生的合力方向伸展。基本思想是依据某种性能指标（如时间最短、能量最少、路径最短等），寻找一条从起始点到目标点的无碰撞最优或近似最优的路径。构造一个叫势函数的标量函数，使得目标点对应于最小值，障碍物区域对应于一些较大的值。在任何其它的位置，势函数都是向目标点单调递减的。这样，起始点在自由空间的任何位置，只要路径存在，都能通过势能值的负梯度方向找到目标点。对应于障碍物的区域有较大值可以保证生成路径的无碰性。方法简单且能够实现机器蛇的实时避障。

本文提出了一种基于IB-LBM与人工势场法的2D机器蛇水中动态避障算法，并对其进行MATLAB仿真验证算法的可行性与准确性。文章首先分析IB-LBM流固耦合方法，建立2D机器蛇水下运动模型；然后分析了人工势场的智能避障算法原理，并使机器蛇运用于人工势场和IB-LBM方法的避障算法中；最后，通过仿真分析了障碍影响距离、机器蛇尾部摆动振幅、机器蛇尾部摆动频率、障碍点斥力系数、目标点引力系数、水流雷诺数、动态障碍运动速度对机器蛇避障情况的影响，验证了该算法的有效性。

2 IB-LBM流固耦合方法

2.1 Lattice Boltzmann 方法

在每一个宏观分子运动中，分子的运动规律都符合一定的力学规律。因此，先计算得到微观每一处分子不同状态下的概率，再利用统计的方法就可以得到系统的宏观参数变化。格子Boltzmann方法仅考虑分子与分子之间的二体碰撞，方法认为三个及三个以上的分子碰撞的概率很小，可以忽略不计。在此，各分子的速度分布不依赖其他分子而独立存在；并且外力不影响局部分子

碰撞的动力学行为。为了降低计算的复杂性，在建立微观分子运动模型时，将实际情况下自由流动的流体分子比作理想的格子网格流体分子。

首先，在无碰撞情况下，设置 dt 时刻内分子从 x 位置运动到 $x+dx$ 位置，速度由 ζ 变化为 $\zeta+adt$ ，其中 a 为分子加速度，时间由 t 时刻变化为 $t+dt$ 时刻。流体分子的变化分布函数，如式(1)所示。

$$f_i(x+dx, \zeta+adt, t+dt)dx d\zeta = f_i(x, \zeta, t)dx d\zeta \quad (1)$$

将 $f_i(x+dx, \zeta+adt, t+dt)$ 进行泰勒展开，并在此基础上对速度、时间和空间进行离散，与此同时，引入一个简单算子 $\Omega_i(f_i)$ 来代替碰撞函数得到近似BGK模型，得到离散的Lattice Boltzmann方程，如式(2)所示。

$$f_i(x+e_i\delta x, t+\delta t) - f_i(x, t) = \Omega_i(f_i) + \delta t \cdot G_i \quad (2)$$

其中 $\delta t \cdot G_i$ 为外力项， e_i 为粒子微观速度， δx 为格子单位长度， δt 为单位时间步长。

对于流体而言，LBM中的碰撞项必须满足质量守恒定律以及动量守恒原理。

2.2 Immersed Boundary方法

在用Lattice Boltzmann方法对流体进行模拟的时候，针对这样的动边界、复杂流场以及流固耦合的问题，仅仅生成一个高质量、高精度的结构化网格已经不足以满足仿真的要求。因此，Charles S Peskin等人在1972年提出一种新的非贴体网格方法——Immersed Boundary法^[6, 7]，该方法在20世纪初流固耦合领域受到重视。IB方法既是一种数学建模方法，又是一种数值离散方法。

IB方法在模拟建模过程中，使用两套独立存在的网格变量：欧拉变量和拉格朗日变量，其中，欧拉变量来描述流场中流体分子的运动状态；拉格朗日变量描述浸入结构的边界状态，当浸入边界运动时，这些拉格朗日点的位置也随之发生变化，浸入边界相邻点之间存在拉伸、压缩、弯曲、剪切等内力的约束作用，其运动规律由流体和各相邻点之间的内力共同控制。点与点之间相连接形成的边界称为浸入边界。

在D2Q9的二维模型情况下，一个拉格朗日

点与相邻的16个欧拉点联系，当该拉格朗日点发生变化时，周围的16个欧拉点也发生变化。如果在该拉格朗日点附近还存在另外一个拉格朗日点，则这两个拉格朗日点所对应的欧拉点会出现重叠。在IB方法中，设置浸入边界体的边界 Ω 浸入在流场中，并设 x 为边界 Ω 的位置。在建立好拉格朗日点空间和欧拉点空间后，设拉格朗日点受到的弹性边界力为 $F(s, t)$ ，为了将这个弹性边界力 $F(s, t)$ 的影响分配到相应的周围16个欧拉点上，依据欧拉点距离拉格朗日点的大小，采用Dirac-delta近似函数 $D(x_f)$ 得到浸入边界体的力源项的分布函数为^[6]：

$$f(x, t) = \int F(s, t) D(x_f - X(s, t)) ds \quad (3)$$

其中： f 是浸入边界产生的单位力， s 是边界弧长。

如果两个拉格朗日点所对应的欧拉点有重叠情况，则欧拉点上被分配的力需要进行累积叠加。当浸入边界点上的弹性边界力 $F(s, t)$ 转化到背景网格欧拉点上后，就得到了流场的外力作用，从而利用LBM流场模型，进行一个步长的流场更新，得到下一时刻的流场情况。

流场发生更新变化后，此时原来的浸入边界体拉格朗日点的位置还没有更新，所以，接下来应对拉格朗日点的位置进行更新。浸入边界体附近欧拉点的速度赋予相应拉格朗日点的速度，其赋值过程与弹性边界力 $F(s, t)$ 的分配过程相反，满足Dirac-delta方程关系^[6]：

$$U(s, t) = \int_{\Omega} u(x, t) D(x_f - X(s, t)) ds \quad (4)$$

得到拉格朗日点的速度后，再对拉格朗日点的位置进行更新得：

$$\frac{\partial x(s, t)}{\partial t} = U(s, t) \quad (5)$$

其中： Ω 是浸入边界体的点， δx 是格子宽度， $U(s, t)$ 是浸入边界点速度。

Dirac-delta近似函数 $D(x_f)$ 为：

$$D_j(x - X_j) = \delta(x - X_j) \delta(y - Y_j) \quad (6)$$

$$\delta(r) = \begin{cases} \frac{1}{4h} \left(1 + \cos \frac{\pi r}{2h} \right), & |r| \leq 2h \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

化简为：

$$\delta(r) = \begin{cases} \frac{1}{8}(3-2|r|+\sqrt{1+4|r|-4r^2}), & |r| \leq 1 \\ \frac{1}{8}(5-2|r|+\sqrt{-7+12|r|-4r^2}), & 1 \leq |r| \leq 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中， r 是浸入边界体的点到网格点的距离。

3 水下机器蛇建模

根据生物蛇在蜿蜒运动过程中留下的痕迹和生物蛇在水中的游动状态，日本东京工业大学的Hirose教授提出了仿照生物蛇蜿蜒运动的二维蛇形曲线^[8, 9]，如图1所示，并从运动学角度得到曲线方程为^[10]：

$$\rho = -absin(bs) \quad (9)$$

其中： a 为幅值角， b 为比例常数， s 为蛇形曲线长度。

机器蛇在按照类似于正弦波形式的蛇形曲线蜿蜒摆动时，蛇体的各个部位与工作环境中的流体碰撞、摩擦，产生不断向前运动的力。

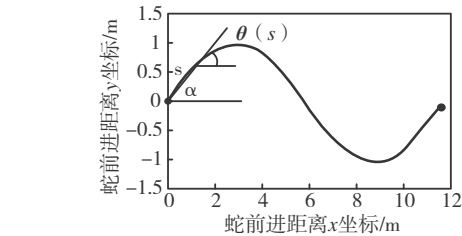


图1 生物蛇蜿蜒运动痕迹和水中游动状态及二维蛇形曲线

首先，在浸入边界的力源体——机器蛇的建模过程中，可以把机器蛇分成两部分，即头部和尾部。头部负责控制机器蛇运动中的前进方向，将其设定为椭圆形；尾部通过摆动提供机器蛇前进的动力，将其设定成由机器蛇头部长轴上下两个点位置连接尾部最左边点形成锥形，其整体波动运动可以通过尾部蛇形曲线摆动描述，如图2所示。

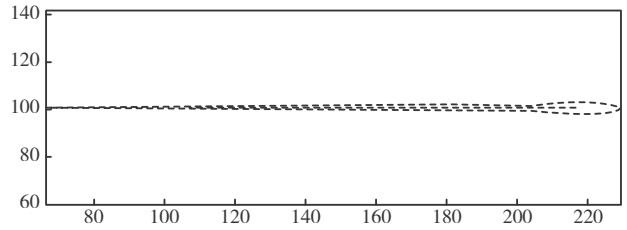


图2 机器蛇静止状态

计算头部所受压力 $F(s,t)$ 为拉格朗日力，其大小与流体作用力相同，方向相反，计算式为：

$$F(s,t) = \frac{\delta}{\delta s} \left[T(s) \frac{\delta X(s,t)}{\delta s} \right] - K_b \frac{\partial^4 X(s,t)}{\partial s^4} + F_r \quad (10)$$

尾部的弯曲力矩为：

$$M_f = A_y \sin(Fre + f_{i1} + f_{i0}) \quad (11)$$

其中 $\frac{\partial^4 X(s,t)}{\partial s^4}$ 为弯曲项， $\frac{\partial}{\partial s} \left[T(s) \frac{\partial X(s,t)}{\partial s} \right]$ 为拉伸项； K_b 为弯曲模量， M_f 为弯曲力矩， F_r 为辐条力， A_y 为摆动振幅， Fre 为尾部摆动频率， f_{i1} 为尾部初始相位， f_{i0} 为有差异空间分布的初始相位。

4 人工势场智能避障控制算法建模

由于水下环境的特殊性，机器蛇在运动的同时需要避开水中游动的动态，单纯的使用IB-LBM方法就会出现一定的局限性，并且在复杂的动态环境中，获取运动的参数以及通过实验优化机器蛇的控制策略有一定的难度。

为了方便机器蛇水下有效避开动态的障碍物，通过引入人工势场法，借助一个虚拟势场^[11]，将目标看作吸引点，障碍物看成排斥点，其中障碍物对机器蛇产生排斥力，而目标对机器蛇产生吸引力，吸引力和排斥力的合力作为机器蛇的加速度来控制机器蛇的运动方向和计算机器蛇的位置^[12]。从避障范围来看，引力场作用于整个工作区域；斥力场仅作用于局部规定范围内的工作区域，而不在这个局部范围内的区域不受斥力场的影响，这就使机器蛇路径沿吸引点和排斥点产生的合力方向伸展。无论起始点在空间的任何位置，

只要路径存在，机器蛇都能通过势能值的负梯度方向找到目标点。

当机器蛇的蛇体受到多个障碍点的作用时，机器蛇在下一时刻的运动方向是沿着引力、多个斥力的合力和惯性力的总体合力方向。当机器蛇逃离了工作区域的所有障碍后，即机器蛇所受最后一个障碍点施加的斥力为0后，视为斥力消失，机器蛇只受引力和惯性力的作用以正常的蛇形曲线运动到目标点。

机器蛇在空间区域避障的过程中，会不断计算自身所有拉格朗日点与障碍所有固定的拉格朗日点的距离，如图3所示。当机器蛇在前方不同情况遇到障碍时，如图3(a)所示，机器蛇向左前方发生偏转，但此障碍点距离机器蛇的距离大于障碍影响距离时；如图3(b)所示，此障碍点对机器蛇施加的斥力为0，不影响机械蛇当前运动轨迹；当机器蛇前方遇到两个障碍点时，如图3(c)所示，机器蛇会自动选择较短路径，即从两个障碍点之间穿过；当机器蛇正前方遇到障碍时，如图3(d)所示，机器蛇会自动选择从障碍点周围环绕并离目标最近的路径^[11, 12]。

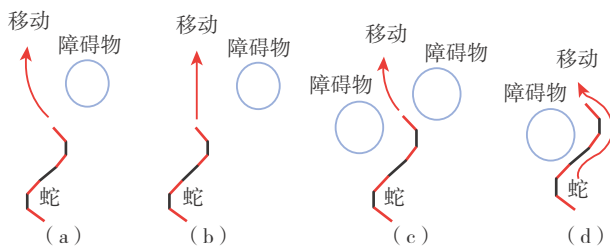


图3 机器蛇避障过程

5 机器蛇动力学仿真

由于机器蛇运动受障碍点的障碍影响距离、尾部摆动振幅、尾部摆动频率、障碍斥力大小、雷诺数、目标点引力大小、动态障碍运动速度等内外不同因素的影响，本节从数值实验模拟角度出发，对比不同内外因素的基于IB-LBM与人工势场方法下的机器蛇2D动态避障算法仿真情况。在此设置初始参数如表1所示。

表1 机器蛇水中动力学仿真参数

位置	参数名称	参数
通道	通道长度 $x \times y$	800×150
障碍	障碍个数 obn	50
	障碍点半径 obn_s	2~7
机器蛇	弯曲模量 K_b	0.5
	拉伸模量 K_s	5

在计算中，为了增加计算机的计算速度，控制每次迭代计算后的出图量，设置每进行100次迭代出一张图。

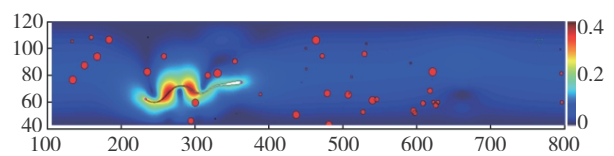


图4 机器蛇在障碍流场中的运动矢量图

5.1 障碍影响距离对机器蛇运动的影响

障碍影响距离对机器蛇避障影响如表2所示，机器蛇的避障轨迹如图5所示。从表2和图5可知，障碍影响距离在 $10 \leq P_o \leq 15$ 时，机器蛇的运动轨迹都保持正常的蛇形曲线运动。另外，从表2可以看出，在机器蛇可到达目标点的有效障碍影响距离范围内，计算迭代次数与障碍影响距离呈现一个负相关的关系，因此选择 $P_o=12$ ，既可以使机器蛇有效动态避障，又可以减轻计算机的运算压力，是比较适当的最优解。

表2 障碍影响距离对机器蛇避障影响

障碍影响距离	迭代次数 ($\times 100$)	到达目标
7	621	撞上障碍
10	1052	到达
11	876	到达
12	783	到达
15	691	到达
20	398	撞上障碍

5.2 尾部摆动振幅对机器蛇运动的影响

尾部摆动振幅对机器蛇避障影响如表3所示，机器蛇的避障轨迹如图6所示。从表3和图6可以得出，当机器蛇尾部摆动振幅 $A_s \leq 0.4$ 时，机器蛇

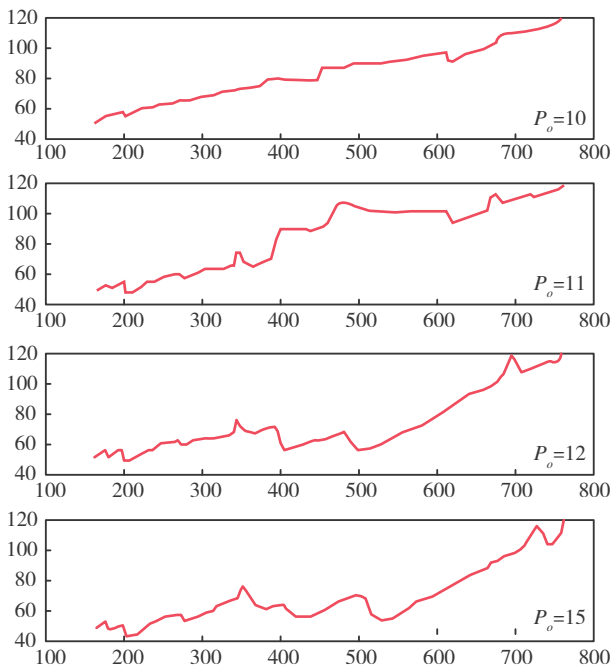


图5 机器蛇不同障碍影响距离避障轨迹

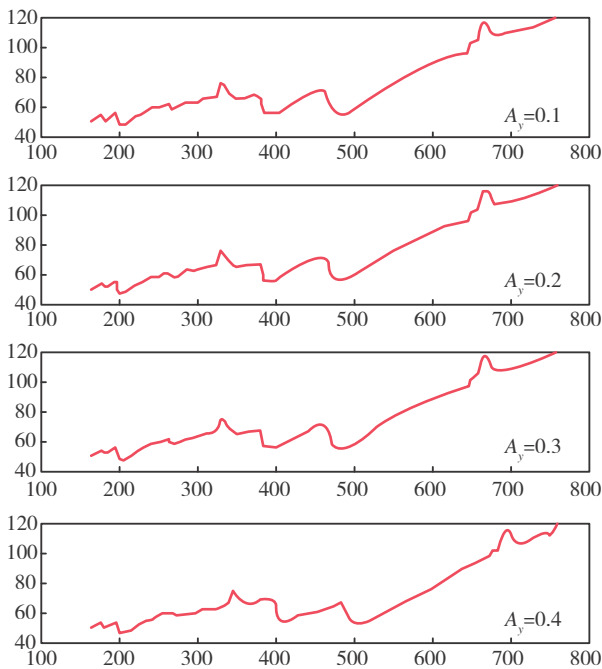


图6 机器蛇不同摆动振幅下避障轨迹

不仅可以保持完整的蛇形曲线向前运动到达目标点，而且振幅在这样的可行范围内，振幅增大，迭代次数会有所减小，机器蛇运动速度会有所加快。当机器蛇的尾部摆动振幅小于这个范围时，机器蛇前进速度变慢，导致迭代次数增加。考虑以上因素，在此选择 $A_y=0.4$ 。

表3 尾部摆动振幅对机器蛇避障影响

摆动振幅	迭代次数 (×100)	到达目标
0.2	866	到达
0.3	865	到达
0.4	781	到达
0.45	546	撞上障碍

5.3 尾部摆动频率对机器蛇运动的影响

尾部摆动频率对机器蛇避障影响如表4所示，机器蛇的避障轨迹如图7所示。从表4和图7可以得出，机器蛇尾部摆动频率 $F_{re} \leq 4500/\pi$ 时可以顺利避开障碍而到达目标点。在可行范围内，摆动频率越大，机器蛇尾部摆动所带给蛇体的向前推动力越多，迭代次数也就越少。当 $F_{re} > 4500/\pi$ 时，机器蛇会因为摆动频率过大而撞上障碍。考虑以上快速性与稳定性的因素，在此选择 $F_{re}=3000/\pi$ 。

表4 尾部摆动频率对机器蛇避障影响

摆动频率	迭代次数 (×100)	到达目标
$1500/\pi$	835	到达
$2250/\pi$	816	到达
$3000/\pi$	784	到达
$4500/\pi$	778	到达
$6000/\pi$	563	撞上障碍

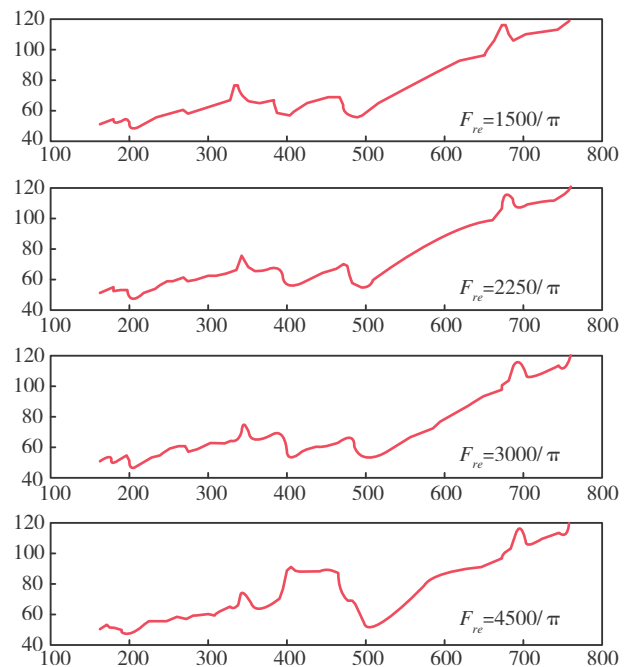


图7 机器蛇不同摆动频率下避障轨迹

5.4 障碍斥力增益系数对机器蛇运动的影响

障碍斥力增益系数对机器蛇避障影响如表5所示, 机器蛇的避障轨迹如图8所示。从表5和图8可以得出, 当障碍点的斥力增益系数 $K_{re} \leq 0.8$ 时, 机器蛇均能顺利避开障碍到达目标点, 而当斥力增益系数 $K_{re} \geq 0.3$ 时, 斥力增益增加, 机器蛇避障过程会出现一定的不稳定性, 考虑以上的因素, 在此选择 $K_{re}=0.1$ 。

表5 障碍斥力增益对机器蛇避障影响

障碍斥力增益	迭代次数 (×100)	到达目标
0.1	788	到达
0.3	744	到达
0.5	692	到达
0.8	639	到达
1.0	493	撞上障碍

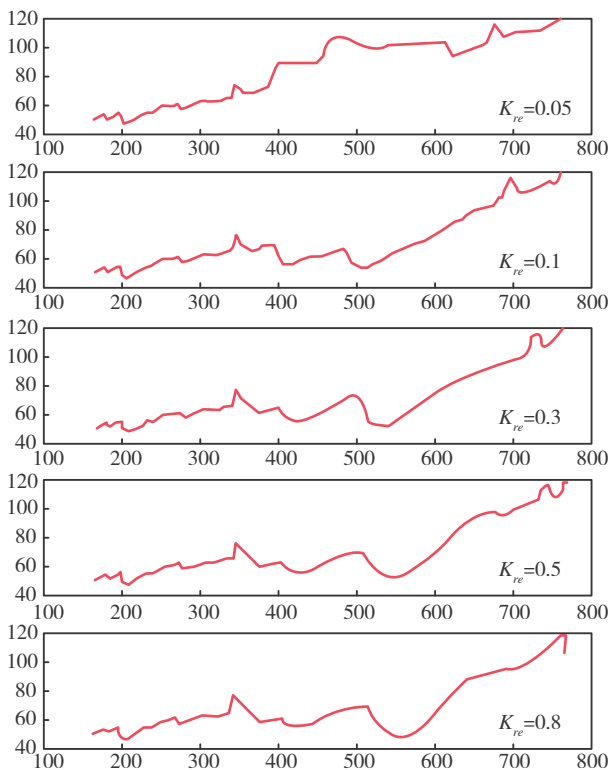


图8 机器蛇不同斥力增益下避障轨迹

以在空间中动态避障到达目标点, 在此, 雷诺数越大, 迭代次数越少, 运算时间越快, 不稳定性也会越强。当雷诺数超出这一范围时, 机器蛇无法控制自身的蛇形曲线形态, 导致机器蛇在空间区域中产生漂移运动, 最终使机器蛇撞上障碍。另外, 雷诺数较小时, 也会造成机器蛇避障不稳定而撞上障碍的现象。考虑以上的因素, 在此选择 $Re=1250$ 。

表6 雷诺数对机器蛇避障影响

雷诺数	迭代次数 (×100)	到达目标
300	1034	撞上障碍
500	884	到达
750	774	到达
1000	639	到达
1250	574	到达
2000	479	路径混乱
3000	144	撞上障碍

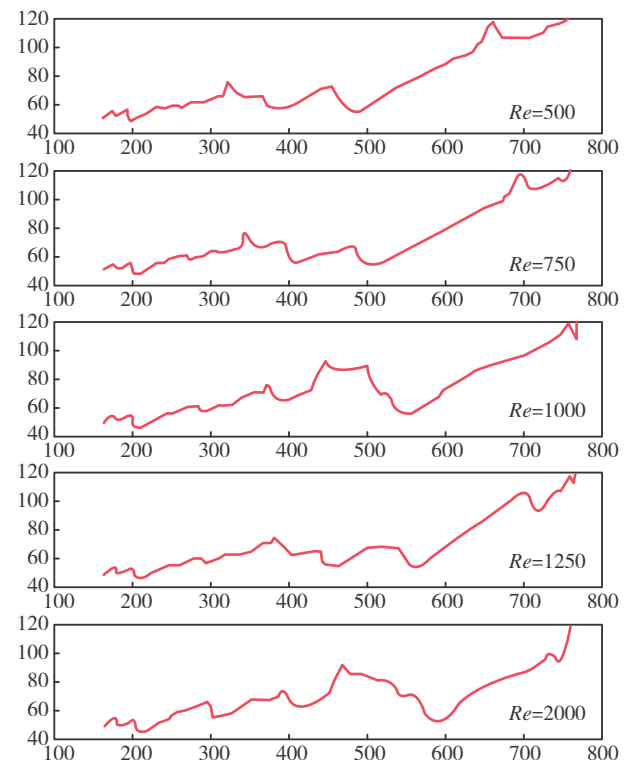


图9 机器蛇不同雷诺数下避障轨迹

5.5 水流雷诺数对机器蛇运动的影响

雷诺数对机器蛇避障影响如表6所示, 机器蛇的避障轨迹如图9所示。从表6和图9可以得出, 当雷诺数保持在 $500 \leq Re \leq 2000$ 范围时, 机器蛇可

5.6 目标点引力增益系数对机器蛇运动的影响

目标点引力增益系数对机器蛇避障影响如表7所示, 机器蛇的避障轨迹如图10所示。从表7和图10可以得出, 当 $4 < K_{at} \leq 15$ 时, 机器蛇都可以保

持良好的蛇形曲线运动；引力增益系数越小，机器蛇运动速度越慢，迭代次数越多，避障时间越长；同时引力增益系数越大，机器蛇运动速度越快，迭代次数越少，避障时间越短。考虑以上的因素，在此选择 $K_{at}=15$ 。

表7 目标引力增益对机器蛇避障影响

目标引力增益	迭代次数 (× 100)	到达目标
1	1946	方向偏移
4	1297	方向偏移
5	1207	到达
10	885	到达
15	782	到达
17	546	撞上障碍

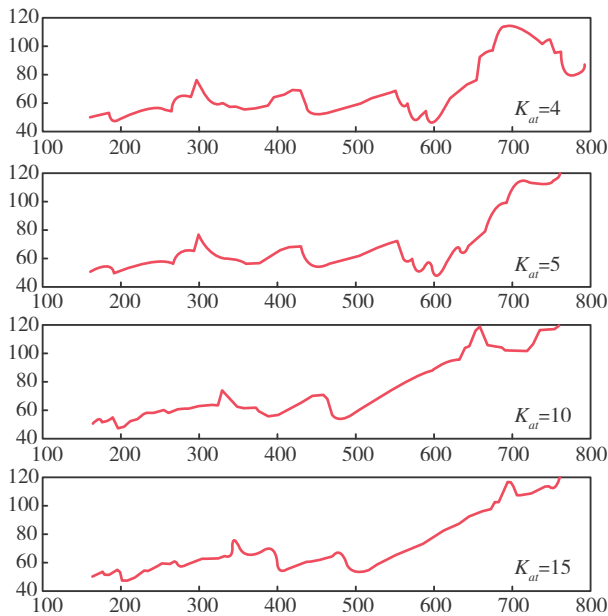


图10 机器蛇不同引力增益下避障轨迹

5.7 动态障碍运动速度

动态障碍运动速度对机器蛇避障影响如表8所示，机器蛇的避障轨迹如图11所示。在设置动态障碍的运动速度时，参考水流速度，设置鱼游速度是水流速度的倍数关系，方向是自右向左与机器蛇相向运动，在此水流速度 $U=1.5\text{m/s}$ 。从表8和图11所示可以看出，当动态障碍速度在 $0.5 \leq v \leq 2$ 倍水流速度时，机器蛇都可以保持良好的蛇形曲线运动。并且在鱼游速度加快时，机器蛇需要反映的速度就要增加，这就导致了计算速度下降，迭代次数增加。考虑以上的因素，在此选择 $v=1$ 。

表8 动态障碍运动速度对机器蛇避障影响

障碍运动速度与水流速度关系	迭代次数 (× 100)	到达目标
0.5	647	到达
1	784	到达
2	983	到达
3	445	撞上障碍

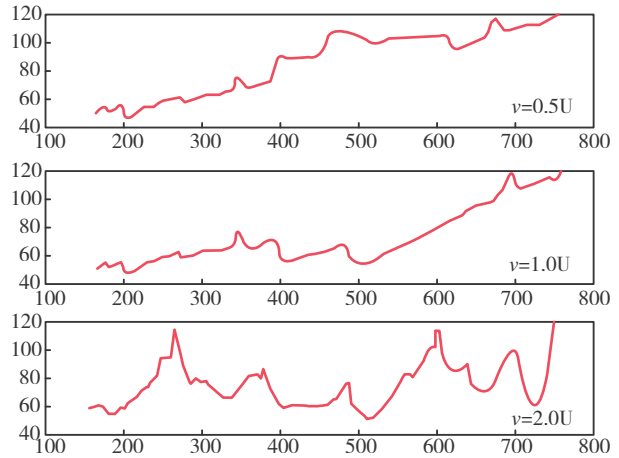


图11 机器蛇不同动态障碍运动速度下避障轨迹

5.8 机器蛇水下避障最佳属性

根据上述仿真分析得出基于IB-LBM与人工势场方法下的机器蛇2D动态避障算法仿真中各参数的最佳属性值如表9所示。通道长度增加到 1100×200 ，如图12、13所示。从图中可以看出，机器蛇可以找到一条速度最快、时间最短、最安全的路径，并保持比较完整的蛇形曲线运动方式从目标点出发避开空间区域中的障碍到达目标点。

表9 IB-LBM下机器蛇水中最佳运动参数

编号	参数名称	符号	参数值
1	障碍点个数	obn	50
2	障碍影响距离	P_o	12
3	尾部摆动振幅	A_y	0.4
4	尾部摆动频率	F_{re}	$3000/\pi$
5	障碍点斥力增益系数	K_{re}	0.1
6	雷诺数	Re	1250
7	目标点引力增益系数	K_{at}	15
8	动态障碍运动速度	v	1倍

综上所述，在IB-LBM和人工势场避障算法的控制下，机器蛇可以保持良好的蛇形曲线运动轨迹；与此同时，机器蛇在遇到动态障碍时，可以

产生良好的转弯角度避开动态障碍，机器蛇运动稳定且最终能到达目标点。

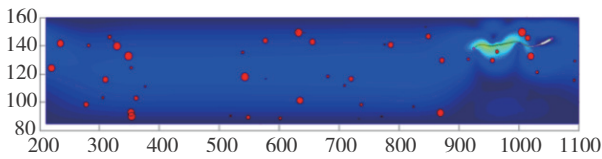


图12 综合最佳属性机器蛇避障矢量图

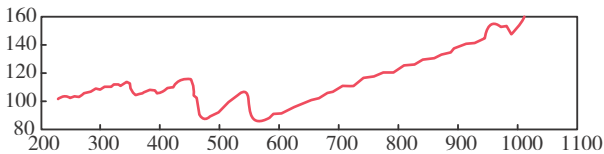


图13 综合最佳属性机器蛇避障轨迹

6 结论

利用IB-LBM和人工势场避障算法控制机器蛇在水下2D环境随机障碍下进行游动，在障碍影响距离、尾部摆动振幅、尾部摆动频率、障碍斥力增益系数、雷诺数、目标点引力增益系数、动态障碍运动速度等参数最优的情况下，机器蛇以最快的速度、最短的时间、最安全的较短路径躲避空间工作区的障碍而到达目标点，且从起点开始一直保持良好的蛇形曲线运动方式。该算法对未实现机器蛇水下探索创造了条件，有着重要的理论价值和应用前景。

参考文献

- [1] 卢振利, 李斌. 蛇形机器人蜿蜒游动性能动力学仿真分析[J]. 机器人, 2015, (6): 748-53.
- [2] Cheng S, Xu Y, Tang X, et al. Lattice boltzmann study of micro branch array of crossflow filtration for fluid partitioning [C] // ICME International Conference on Complex Medical Engineering. IEEE, 2013: 586-589.
- [3] Guo Z, Shi B, Wang N. Lattice BGK model for incompressible navier - stokes equation [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 165 (1): 288-306.
- [4] Wei Q, Xu Y Q, Tian F B, et al. IB-LBM simulation on blood cell sorting with a micro-fence structure [J]. Bio-medical Materials and Engineering, 2014, 24 (1): 475-81.
- [5] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003: 90-98.
- [6] Xu Y Q, Tang X Y, Tian F B, et al. IB-LBM simulation of the haemocyte dynamics in a stenotic capillary [J]. Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering, 2014, 17 (9): 978-985.
- [7] Tian F B, Luo H, Zhu L, et al. Interaction between a flexible filament and a downstream rigid body [J]. Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics), 2010, 82 (02).
- [8] Hirose S. Biologically inspired robots: snake-like locomotors and manipulators [J]. Applied Mechanics Reviews, 1995, 48 (03).
- [9] Hirose S, Yamada H. Snake-like robots: Machine design of biologically inspired robots [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2009, 16 (1): 88-98.
- [10] Ma S, Araya H, Li L. Development of a creeping locomotion snake robot [J]. International Journal of Robotics & Automation, 2002, 17 (4): 146-153.
- [11] Chen L, Liu C, Shi H, et al. New robot planning algorithm based on improved artificial potential field [C] // Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. IEEE, 2014: 228-232.
- [12] Montiel O, Sepúlveda R, Orozco-Rosas U. Optimal path planning generation for mobile robots using parallel evolutionary artificial potential field [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 79 (2): 1-21.

作者简介:

周志昊(1995-), 男, 硕士生, 主要研究方向为仿生机器人运动控制与决策。

邓宏彬(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能机器人理论与技术。

高庆海(1963-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为机械设计制造及自动化。

李东方(1991-), 男, 博士生, 主要研究方向为仿生机器人理论与技术。



四旋翼无人机的主动容错控制

王 君, 尹雄东, 苓苗苗

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 针对四旋翼无人机PID控制器参数通过经验试凑难以获得最优和执行器部分失效问题, 提出了基于PID控制器参数优化的容错控制器设计方法。首先利用遗传算法离线优化PID参数, 然后引入故障补偿机制, 设计5个基于区间故障的容错控制器, 使其可以通过深度置信网络和softmax对故障进行区间分类来调用相应的控制器, 对故障进行容错处理。最后, 在Matlab实验平台上对所提方法的可行性和有效性进行仿真验证, 结果表明提出的方法可以明显改善四旋翼无人机的飞行效果及对故障的处理能力。

关键词: 四旋翼无人机; 遗传算法; 容错控制; 参数优化; 深度置信网络; 执行器故障; 故障补偿
中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 03-0196-08

Active Fault Tolerant Control of Quadrotor UAV

WANG Jun, YIN Xiongdong, LING Miaomiao

(School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the problem that the parameters of the four-rotor UAV PID controller are difficult to obtain optimal and the partial failure of the actuator, the design of the fault-tolerant controller based on the parameter optimization of the PID controller is proposed. Firstly, the genetic algorithm is used to optimize the PID parameters offline, and then the fault compensation mechanism is introduced to design five similar passive fault-tolerant controllers, so that the fault can be classified by DBN and softmax to call the corresponding controller, and fault-tolerant processing is performed. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by the matlab experimental platform. The results show that the proposed method can significantly improve the flight effect and fault handling ability of the quadrotor UAV.

Keywords: Quadrotor UAV; Genetic Algorithm; Fault-Tolerant Control; Parameter Optimization; DBN; Actuator Failure; Fault Compensation

收稿日期: 2018-08-02; 修回日期: 2018-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61463030, 61563031)

1 引言

近年来, 由于四旋翼无人机 (Quadrotor UAV) 具有全自主飞行、结构轻巧、垂直起降等优势, 在军事和民用领域备受青睐, 因此, 为确保四旋翼无人机的飞行性能而对控制器的研究吸引了大量学者的广泛关注^[1]。各种不同的先进控制方法已经广泛应用于四旋翼无人机的控制中, 如自适应控制^[2], 滑膜控制^[3]、反步法控制^[4]、PID控制^[5]等, 其中PID控制技术由于不需要精确的数学模型, 控制算法简单而在无人机的飞控系统中最为流行。在实际工程中, 四旋翼无人机的PID控制器参数利用传统的经验试凑法很难达到最优, 因此许多研究者提出了各种参数优化算法, 如神经网络^[6]、遗传算法^[7]、粒子群算法^[8]等, 但这些优化算法多数是在线调节控制器的参数, 需要花费一定时间, 时效性不足。

另外, 四旋翼无人机的执行机构数量较多, 在飞行过程中难免会发生故障, 因此, 对四旋翼无人机的容错控制技术的需求越来越迫切^[9]。被动容错控制^[10]具有一定的鲁棒性, 不需要在线估计故障, 可以保障在执行机构发生可能的失效故障情形下正常飞行, 但被动容错控制器的设计具有一定的保守性。而主动容错控制通过故障调节或信号重构保证故障发生后系统的稳定性能。但是, 它需要先对故障进行诊断。基于模型的故障诊断方法依靠模型的准确度, 然而四旋翼无人机的模型很难准确得到, 因此, 基于数据驱动的神经网络已经引起了研究者的关注, 深度学习是能够模拟人脑的结构建立进行分析和学习的多层神经网络, 可用于故障诊断分类^[11]。

本文针对四旋翼无人机正常飞行和执行器任意部分失效故障情况下, 提出了基于遗传算法离线优化PID参数的主动容错控制方案。首先利用遗传算法离线优化PID的参数, 使四旋翼无人机正常飞行, 然后设计5个基于区间故障的容错控制器使无人机对执行器的任意部分失效故障容错处理, 在无人机飞行过程中, 实时通过深度置信网

络 (DBN) 和softmax对故障进行判断分类, 从而选择对应的容错控制器, 确保四旋翼无人机的飞行性能。

2 四旋翼无人机动力学模型

2.1 四旋翼无人机运动学模型

通过牛顿-欧拉公式可得四旋翼无人机运动学模型^[6]为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = u_z (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \\ m\ddot{y} = u_z (\cos \phi \sin \theta \sin \psi + \sin \phi \cos \psi) \\ m\ddot{z} = u_z (\cos \phi \cos \theta) - mg \\ J_1 \ddot{\theta} = u_\theta + (J_2 - J_3) \dot{\phi} \dot{\psi} \\ J_2 \ddot{\phi} = u_\phi + (J_3 - J_1) \dot{\psi} \dot{\theta} \\ J_3 \ddot{\psi} = u_\psi + (J_1 - J_2) \dot{\theta} \dot{\phi} \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 、 ϕ 、 ψ 分别表示四旋翼无人机的俯仰角、滚转角和偏航角, J_1 表示四旋翼无人机绕x轴的转动惯量, J_2 表示四旋翼无人机绕y轴的转动惯量, J_3 表示四旋翼无人机绕z轴的转动惯量, x 、 y 、 z 分别表示四旋翼无人机在三轴方向位移, m 是四旋翼无人机的质量, g 是重力加速度, u_z 、 u_θ 、 u_ϕ 、 u_ψ 是四旋翼无人机的四个虚拟控制输入, 将它们表示为四个电机的转速形式, 如式(2)所示:

$$\begin{cases} u_z = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ u_\theta = bl(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2) \\ u_\phi = bl(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ u_\psi = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中, Ω_i 表示第*i*个电机的转速, b 表示拉力系数, l 表示臂长, d 表示推力转动量系数。将式(2)表示成矩阵形式, 如式(3)所示:

$$u = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ -bl & 0 & bl & 0 \\ 0 & -bl & 0 & bl \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中转速和虚拟控制输入的关系用系数矩阵 Γ 表示即:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ -bl & 0 & bl & 0 \\ 0 & -bl & 0 & bl \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 四旋翼无人机执行器失效故障表示

当四旋翼无人机执行器发生失效故障时，四个旋翼的升力将发生变化，导致四个虚拟控制输入发生变化，则引入执行器失效故障之后的系数矩阵如式(5)所示。

$$\Gamma_f = \begin{bmatrix} \gamma_1 b & \gamma_2 b & \gamma_3 b & \gamma_4 b \\ -\gamma_1 bl & 0 & \gamma_3 bl & 0 \\ 0 & -\gamma_2 bl & 0 & \gamma_4 bl \\ -\gamma_1 d & \gamma_2 d & -\gamma_3 d & \gamma_4 d \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 γ_i 表示第*i*个执行机构失效故障因子，当 $\gamma_i=1$ 时，执行机构无故障；当 $\gamma_i=0$ ，执行器发生完全失效故障；当 $0<\gamma_i<1$ 时，执行器发生部分失效故障。

3 DBN和softmax故障分类

3.1 DBN和softmax描述

人类大脑在接收外部信号时，是通过一个多层的结构来获取数据的规律，这些大脑机理的发现，促使了深度学习的产生和使用。DBN作为深度学习的经典算法之一，能够通过一系列的非线性变换自动从原始数据中提取由低层到高层、由具体到抽象的特征。

DBN是由多个限制玻尔兹曼机(RBM)组成的多隐含层神经网络，其核心就是用逐层贪婪学习算法去优化深度神经网络的连接权重，即首先使用无监督逐层训练的方式，有效挖掘待诊断设备中的故障特征，然后在增加相应分类器的基础上，通过反向的有监督微调，优化DBN的故障诊断能力。其中无监督逐层训练通过直接把数据从输入映射到输出，能够学习一些非线性复杂函数，这也是其具备强大特征提取能力的关键所在，RBM

作为DBN模型的基石，在DBN模型构建和训练中，起到至关重要的作用。

每个RBM包含一个可视层和一个隐含层，通过RBM的逐层堆叠，DBN模型可从原始数据中逐层提取特征，获得一些高层次表达。RBM中的权重和阈值被持续更新，直到达到最大的迭代次数。RBM的图形描述如图1所示。

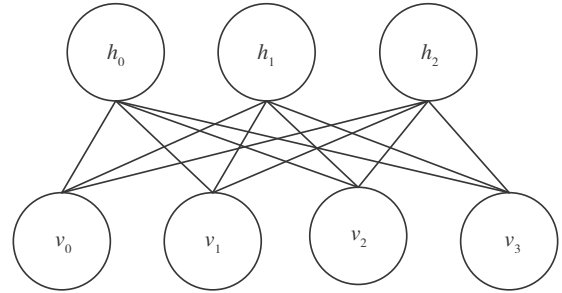


图1 限制玻尔兹曼机结构示意图

RBM能量方程 $E(v, h)$ 可表示为：

$$E(v, h) = -b'v - c'h - h'Wv \quad (6)$$

W 表示隐藏单元和可见单元连接的权重， b 和 c 是可见层和隐藏层的偏置。

转化成自由能量公式如式(7)所示：

$$F(v) = -b'v - \sum_i \log \sum_{h_i} e^{h_i(c_i + W_i v)} \quad (7)$$

由于RBM的特殊结构，可见和隐藏单元是条件独立的，利用这个特性，可以得出条件概率密度函数为：

$$p(h|v) = \prod_i p(h_i|v) \quad (8)$$

$$p(v|h) = \prod_j p(v_j|h) \quad (9)$$

得到RBM网络的概率密度函数后，需要学习 (w, a, b) 等参数使RBM网络表示的吉布斯分布最大可能的拟合输入数据，一般采用求解输入样本的最大似然的方法来进行参数的求解。

DBN作为一种自我学习的特征提取算法，以其强大的特征提取能力和不需要大量标签数据的参与，在很多应用领域已经被广泛使用。DBN示意图如图2所示。

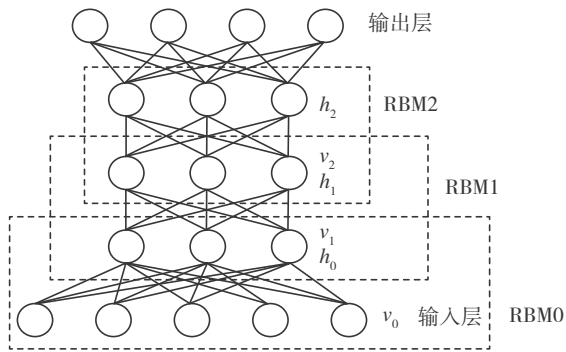


图2 DBN结构示意图

3.2 DBN和softmax对四旋翼无人机故障分类

在运用DBN对四旋翼无人机进行故障诊断时，首先需要获取故障数据，对故障数据使用无监督方式逐层进行训练，实现对四旋翼无人机典型故障特征的有效挖掘；然后在增加softmax分类器的基础上，通过BP算法以有监督的方式对DBN进行反向微调，从而使DBN具有对于故障的诊断能力。其诊断流程图如图3所示。

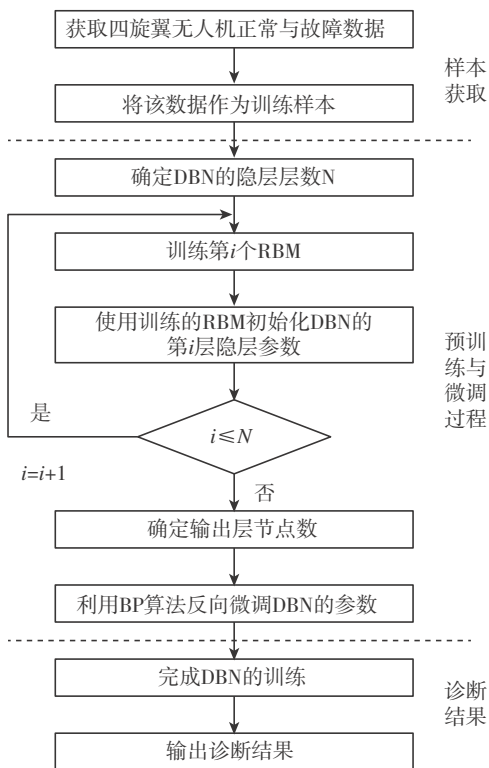


图3 DBN故障诊断流程图

考虑到四旋翼无人机故障类型繁多，本文只针对常见的执行器部分失效故障的情况对其进行

分类。为便于数据的采集，将四旋翼无人机按照正常运行和故障严重程度分为5种情况，下面是对单个执行器发生失效故障的区间分类：

(1) 正常情况： $\gamma_i=1$ ，此时四旋翼无人机的第*i*个旋翼无故障发生；

(2) 轻微失效故障： $0.7 \leq \gamma_i < 1$ ，此时四旋翼无人机的第*i*个旋翼由于老化等原因发生较少的折损；

(3) 较轻微失效故障： $0.5 \leq \gamma_i < 0.7$ ，此时四旋翼无人机的第*i*个旋翼发生一般的折损；

(4) 中等失效故障： $0.3 \leq \gamma_i < 0.5$ ，此时四旋翼无人机的第*i*个旋翼发生较大程度的折损；

(5) 严重失效故障： $0.1 \leq \gamma_i < 0.3$ ，此时四旋翼无人机的第*i*个旋翼发生很大程度的折损。

假设四旋翼无人机四个旋翼中只有一个旋翼发生故障并通过以上的分类采集大量的数据用于DBN和softmax的离线训练与学习，采集数据和样本标签如表1所示。

表1 四旋翼无人机故障数据集描述

四旋翼无人机状况类型	样本集个数	状况标签
正常	400	1
轻微失效故障	400	2
较轻微失效故障	400	3
中等失效故障	300	4
严重失效故障	400	5

基于DBN模型进行四旋翼无人机故障诊断中，对采集的数据进行归一化以消除数据之间的量纲影响，然后将数据按比例随机产生训练集与测试集，其中75%的数据用于DBN和softmax离线的训练与学习，25%的数据测试验证网络的正确性。当执行器发生故障时，可通过训练好的网络对故障进行快速估计分类。

4 四旋翼无人机容错控制器设计

4.1 四旋翼无人机PID控制器的设计及参数优化

PID控制器是一个经典控制器，具有一定的鲁棒性，在线性和非线性领域具有广泛的研究，通

过使实际输出和期望输入的误差变得最小来调节控制变量 $u(t)$ ，如式(10)所示：

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (10)$$

式中， $u(t)$ 是输入信号， $e(t)$ 是信号误差。PID最优控制性能和参数优化，就是确定最佳 k_p 、 k_i 和 k_d 三个参数，从而使控制系统的某一动态性能指标达到最优。传统PID控制器参数的寻优主要依靠大量的反复调试和经验，而遗传算法是一种模拟自然选择和进化过程的寻优算法，将遗传算法与PID控制结合起来，把PID控制参数编码成遗传算法的染色体，应用遗传算法实现PID参数寻优，从而使PID参数达到最优。

本文中，为了提高控制效率和减小系统振动，适应度的目标函数可表示为：

$$J = \int_0^{\infty} [\lambda_1 |e(t)| + \lambda_2 \dot{t}] dt \quad (11)$$

式中 λ_1 、 λ_2 代表权重系数， $e(t)$ 代表系统误差。遗传算法的流程图如图4所示。

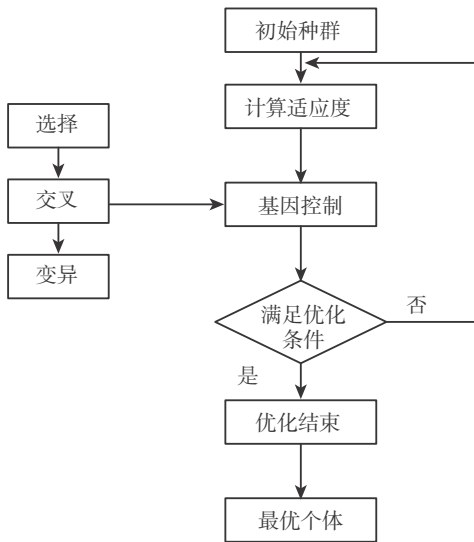


图4 遗传算法流程图

因此，利用遗传算法离线整定四旋翼无人机的PID控制器参数，可得到最优的PID控制器。

4.2 容错控制器的设计

利用遗传算法优化PID参数之后，四旋翼无人

机在无故障条件下可以正常飞行，但由于四旋翼无人机执行机构的数量较多，在飞行过程中难免会发生故障，因此，设计容错控制器是研究的目标。但四旋翼无人机的模型很难精确的得到，因此，模型不确定用PID控制可提高控制性能，本文中容错控制器的设计是在PID控制器的基础上，对特定的故障进行补偿，构成容错控制器，利用所设计控制器的鲁棒性，来处理一定区间的故障。利用遗传算法优化PID的参数，然后和故障补偿机制构成容错控制器，控制原理如图5所示。

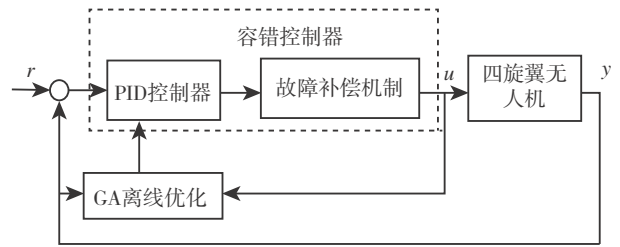


图5 容错控制原理图

四旋翼无人机单个执行器发生失效故障时，按照故障区间分类可设计5个带有故障补偿机制的容错控制器，如式(12)所示：

$$u_j = u + u_{fj} \quad (j=0, 1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

式中 u_j 代表四旋翼无人机在第 j 种情况下的实际输入， u 代表PID控制器的输出， u_{fj} 代表第 j 种故障补偿机制所产生的输出，即

$$u_{fj} = \Gamma_f \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中故障区间分类如下：

(1) 正常情况：此时四旋翼无人机只有PID控制器工作，即 $u_0 = u$ ， $u_{f0} = 0$ ；

(2) 轻微失效故障：此时四旋翼无人机利用PID和故障补偿机制来飞行，即

$$u_1 = u + u_{f1} \quad (14)$$

式中 u_{f1} 是通过在轻微失效故障 $0.7 \leq \gamma_i < 1$ 中选取 $\gamma_i = 0.8$ 时，由式(13)获得，然后利用所设计控制

器的鲁棒性来容错区间范围内的故障；

(3) 较轻微失效故障：此时四旋翼无人机利用PID和故障补偿机制来飞行，即

$$u_2 = u + u_{f2} \quad (15)$$

式中 u_{f2} 是通过较轻微失效故障 $0.5 \leq \gamma_i < 0.7$ 中选取 $\gamma_i = 0.6$ 时，由式(13)获得，然后利用所设计控制器的鲁棒性来容错区间范围内的故障；

(4) 中等失效故障：此时四旋翼无人机利用PID和故障补偿机制来飞行，即

$$u_3 = u + u_{f3} \quad (16)$$

式中 u_{f3} 是通过中等失效故障 $0.3 \leq \gamma_i < 0.5$ 中选取 $\gamma_i = 0.4$ 时，由式(13)获得，然后利用所设计控制器的鲁棒性来容错区间范围内的故障；

(5) 严重失效故障：此时四旋翼无人机利用PID和故障补偿机制来飞行，即

$$u_4 = u + u_{f4} \quad (17)$$

式中 u_{f4} 是通过严重失效故障 $0.1 \leq \gamma_i < 0.3$ 中选取 $\gamma_i = 0.2$ 时，由式(13)获得，然后利用所设计控制器的鲁棒性来容错区间范围内的故障。

四旋翼无人机在飞行过程中，通过DBN和softmax诊断分类出其所处状态，然后调用相应的容错控制器来进行控制飞行，系统结构如图6所示。

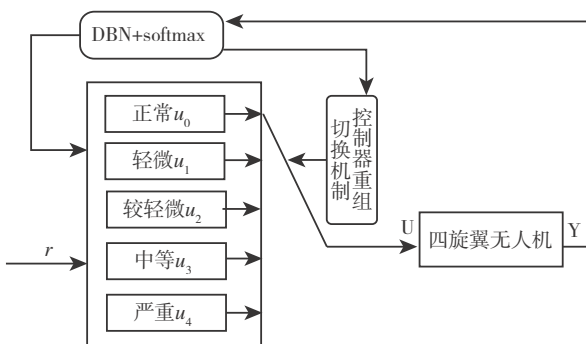


图6 四旋翼无人机的控制结构图

5 实验验证

为了验证所设计的四旋翼无人机容错控制器的有效性，本文在Matlab仿真平台上构建四旋翼无人机仿真系统，并对所提出的方法进行实验验证。

5.1 四旋翼无人机仿真系统相关参数

仿真实验中，根据参考文献[6]，四旋翼无人机相关参数如表2所示。

表2 四旋翼无人机相关参数表

参数	含义	数值	单位
l	臂长	0.15	m
J_1	横滚惯量	$4.9e-5$	$kg \cdot m^2$
J_2	俯仰惯量	$4.9e-5$	$kg \cdot m^2$
J_3	偏航惯量	$8.56e-5$	$kg \cdot m^2$
g	重力加速度	9.79	m/s^2
m	质量	0.5	kg
b	推力系数	$3.13e-5$	-
d	推力转动量系数	$3.13e-5$	-

5.2 仿真实验

对四旋翼无人机的PID控制器的参数优化和执行器可能出现的失效故障情况进行仿真，仿真中先用遗传算法对PID控制器参数进行优化，然后给执行器1施加故障，使其发生失效故障，通过DBN和softmax对其进行故障区间判断分类，然后调用相应的容错控制器进行容错控制。

四旋翼无人机在正常飞行时，只有PID控制器作用，因此，首先使用遗传算法优化PID控制器参数，可以得到遗传算法的适应值曲线如图7所示。

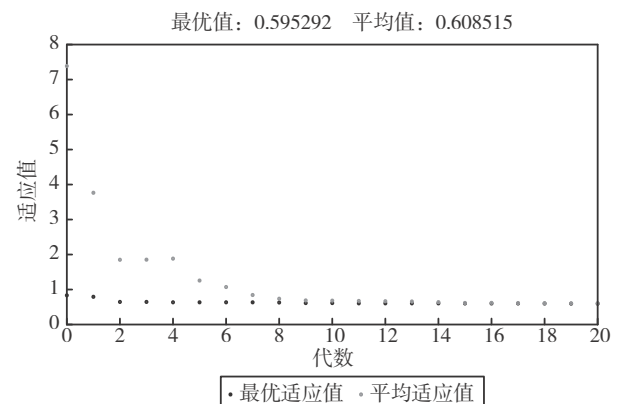


图7 遗传算法适应值曲线

由图7可知，利用遗传算法优化PID控制器参数，可以得到很好的适应值。

四旋翼无人机的PID控制器利用遗传算法优化参数，可以得到优化之后的PID参数，其中

$k_p=14.6491$, $k_i=0.2089$, $k_d=8.9356$ 。

四旋翼无人机在遗传算法优化后的PID控制下飞行时，利用DBN和softmax对无人机执行器状态进行监控，如图8和图10所示，系统的高度曲线如图9和图11所示。

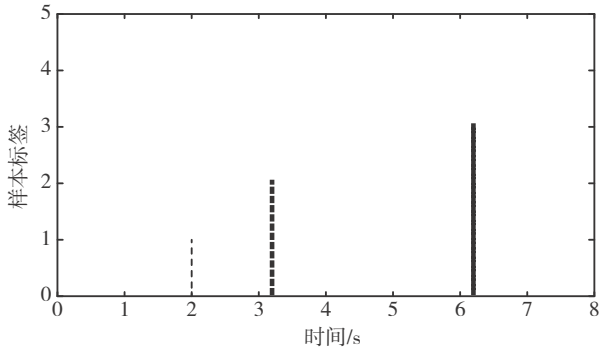


图8 DBN和softmax故障诊断图

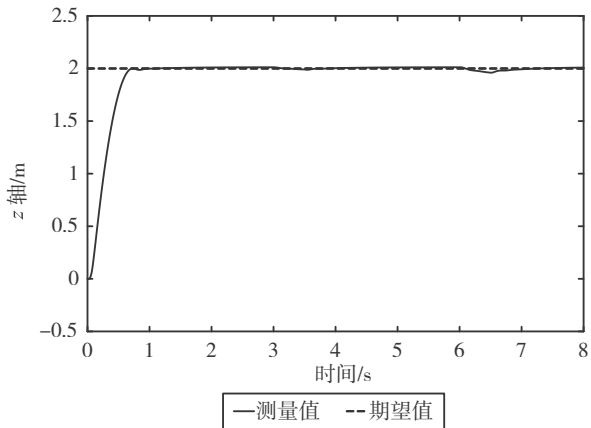


图9 四旋翼无人机状态响应图

由图8和图9可知，四旋翼无人机在无故障条件下飞行时，即DBN和softmax的故障诊断结果为1，此时在容错控制器 u_0 的控制下，系统可以很快跟踪期望值；当执行器1在 $t=3s$ 发生故障时，由DBN和softmax快速诊断出故障结果为2，此时发生轻微失效故障，四旋翼无人机的高度响应曲线发生轻微的抖动，调用容错控制器 u_1 ，可以很好的跟踪期望值；当执行器1在 $t=6s$ 发生故障时，由DBN和softmax快速诊断故障结果为3，此时发生较轻微失效故障，四旋翼无人机的高度响应曲线发生轻微的降低，调用容错控制器 u_2 ，可以很好的跟踪期望值。

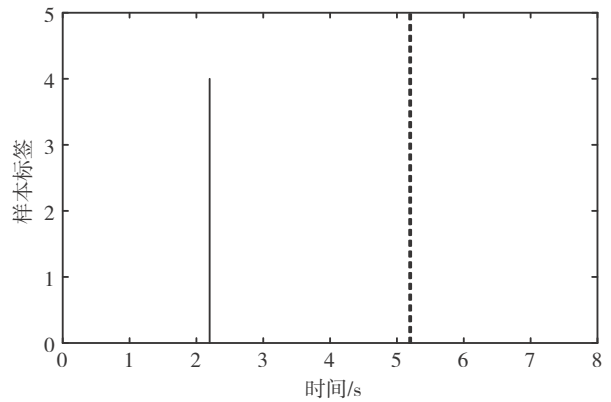


图10 DBN和softmax故障诊断图

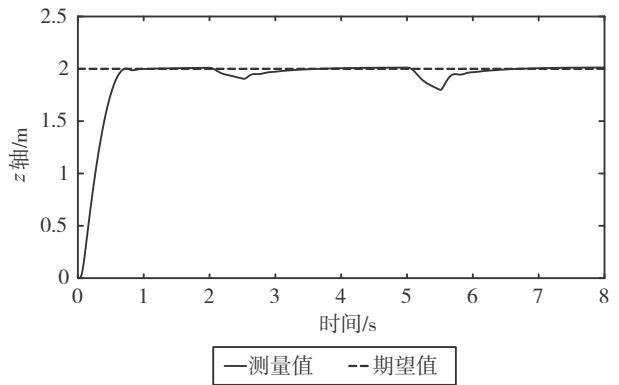


图11 四旋翼无人机状态响应图

由图10和图11可知，四旋翼无人机的执行器1在 $t=2s$ 发生故障时，由DBN和softmax快速诊断出故障结果为4，此时发生中等失效故障，四旋翼无人机的高度响应曲线发生一定程度的降低，调用容错控制器 u_3 ，可以很好的跟踪期望值；当执行器1在 $t=5s$ 发生故障时，由DBN和softmax快速诊断故障结果为5，此时发生严重失效故障，四旋翼无人机的高度响应曲线发生一定程度的降低，调用容错控制器 u_4 ，可以很好的跟踪期望值。

6 结论

本文针对四旋翼无人机的PID控制器参数通过经验试凑难以获得最优和执行器部分失效故障问题，提出了基于PID控制器参数优化的容错控制器设计方法。首先利用遗传算法离线优化PID参数，然后引入故障补偿机制，设计5个针对不同故障区

间的容错控制器,使其可以通过DBN和softmax在线对故障进行区间分类来调用相应的控制器,对故障进行容错处理。仿真实验表明所提出的方法对四旋翼无人机正常飞行和执行器部分失效故障都具有很好的容错效果。

参 考 文 献

- [1] Lee D B, Nataraj C, Burg T, et al. Adaptive tracking control of an underactuated aerial vehicle [J]. 2011, 47 (3): 2326-2331.
- [2] 陈国定, 程嘉晖, 张晓峰, 等. 四旋翼无人机飞行姿态模型参考自适应控制 [J]. 计算机系统应用, 2015, 24 (11): 247-251.
- [3] Zheng E H, Xiong J J, Luo J L. Second order sliding mode control for a quadrotor UAV [J]. Isa Transactions, 2014, 53 (4): 1350-1356.
- [4] Dou L, Fei L. Trajectory tracking control for underactuated quadrotor UAV based on ESO and backstepping [J]. Journal of Tianjin University, 2017, 50 (5): 500-506.
- [5] Zhou M D, Guo Y J, Gao F Q, et al. Design of self-tuning PID controller for quadrotor UAV [J]. Computer Simulation, 2017.
- [6] Teng Y F, Hu B, Liu Z W, et al. Adaptive neural network control for quadrotor unmanned aerial vehicles [C] // Asian Control Conference. 2017: 988-992.
- [7] Li X, Qu S, Cai L. Studing of PID parameter optimization method for attitude controller of quadrotor [J]. Journal of Computational Information Systems, 2014, 10 (18): 7805-7812.
- [8] Noordin A, Basri M A M, Mohamed Z, et al. Modelling and PSO fine-tuned PID control of quadrotor UAV [J]. 2017, 7 (4): 1367.
- [9] Qu Q, Gao S, Huang D, et al. Fault tolerant control for UAV with finite-time convergence [C] // 中国控制与决策会议. 2014: 2857-2862.
- [10] Merheb A R, Noura H, Bateman F. Passive fault tolerant control of quadrotor UAV using regular and cascaded sliding mode control [C] // Control and Fault-Tolerant Systems. 2013: 330-335.
- [11] 赵光权, 葛强强, 刘小勇, 等. 基于DBN的故障特征提取及诊断方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (9): 1946-1953.
- [12] 周树森. 基于深度置信网络的分类方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [13] 孙劲光, 蒋金叶, 孟祥福, 等. 一种数值属性的深度置信网络分类方法 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (2): 112-115.

作者简介:

王 君 (1973-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为网络化系统的主被动混合容错控制。

尹雄东 (1992-), 男, 硕士生, 主要研究方向为 quadrotor UAV 的主被动混合容错控制。

苓苗苗 (1993-), 女, 硕士生, 主要研究方向为网络化系统的主被动混合容错控制。





一种水面无人艇航行及任务 载荷复合控制方法

韩佩妤, 韩 玮, 梁 旭

(中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100194)

摘 要: 水面无人艇航行及任务载荷复合控制方法将原本分离的任务控制与航行控制有机地结合在一起, 组成了一个闭环航行及任务控制系统, 实现了复合控制。设计航行及任务载荷复合控制单元, 根据任务控制输出的指向误差及水面无人艇航行状态, 令核心的智能耦合控制单元做出控制决策, 自动输出任务控制修正命令与航行控制命令, 平衡任务执行与航行安全的关系, 提高了任务控制的精度。智能耦合控制单元具有机器学习能力, 可通过任务执行, 对智能化机器学习模型进行训练, 实现航行及任务载荷复合控制策略的持续优化。

关键词: 水面无人艇; 航行及任务载荷; 任务执行; 复合控制; 智能耦合控制单元

中图分类号: TN **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 03-0204-06

A Compound Controlling Method of Sailing and Task Execution for Unmanned Surface Boat

HAN Peiyu, HAN Wei, LIANG Xu

(Systems Engineering Research Institute, Beijing 100194, China)

Abstract: According to the compound controlling method of sailing and task execution for unmanned surface boat in this paper, sailing controlling and task controlling which are separated original, have been combined together organically into a loop-locked sailing and task controlling system, and the compound controlling has been realized. The unit of compound controlling of sailing and task execution has been designed. According to the pointing errors and sailing condition of unmanned surface boat, the intelligent coupling controlling unit which is kernel can make the controlling decision, and the task orders and sailing orders can be outputting automatically. The relationship between task executing and sailing safety has been balanced, and task controlling precision has been enhanced. The intelligent coupling controlling unit has the capability of machine learning. By the way of task executing, the machine learning model can be training, and the controlling decisions of compound controlling method of sailing and task execution can be enhanced persistently.

Keywords: Unmanned Surface Boat; Sailing and Task Execution; Task Executing; Compound Controlling; Intelligent Coupling Controlling Unit

1 引言

水面无人艇是一种无人操作的水面舰艇，能够自主规划、自主航行，并且可以采用自主方式或人工干预方式完成环境感知、目标探测等各项任务的小型水面舰艇，主要用于执行危险及不适合有人船只执行的任务。水面无人艇一旦配备先进的控制系统、感知系统、通讯系统和任务系统后，可执行多种任务，且具有高航速、大航程、浅吃水、多功能、机动性强、搭载方便、自主操控等突出优点^[1]，无论是在情报侦察和战场监视等军事领域，还是在海洋探测、调查取证、货物运输等民用领域，都有十分广阔的应用前景。

直到20世纪90年代，关于水面无人艇的研究项目才大量出现。美国、以色列、英国、法国和德国等国已将水面无人艇作为重要军事项目进行研究和开发^[2]，其中最具代表性的是美国的斯巴达侦察兵(Spartan Scout)和以色列的保护者等。美国通用动力公司研制的斯巴达侦察兵水面无人艇拟作为一种扩展的传感器和武器平台，执行侦察、搜索和情报任务、精确打击任务和浅海海域水下作战任务等，以支持美军联合特遣部队、航母打击编队、两栖部队和海上补给作战任务。以色列

主要发展执行情报侦察和战场监视、警戒巡逻、反水雷、火力打击等任务的水面无人艇，以保护其港口及海上设施安全^[3]，以色列水面无人艇的共同特点是充分借鉴无人机技术。目前，国外主要的水面无人艇都具备多任务的特点，可以通过搭载不同的任务载荷，实现战场监视、警戒巡逻、反水雷、火力打击等任务，并具有一定的自主控制能力。

国外无人装备正致力于动力控制系统与任务系统的复合控制研究^[4]。美国等西方国家正大力研究无人作战飞机飞行控制系统和火力控制系统的耦合，将任务、飞行、作战三方面进行综合并提高综合化、自动化、智能化水平以构成全自动攻击系统。无人作战飞机激光制导武器自动攻击技术，基于火力/飞行耦合控制器把火力指挥与控制系统与飞行控制系统综合成一个闭环武器自动攻击系统，用火控系统输出的瞄准误差，自动操纵飞机的飞行系统。该技术将传感、跟踪设备获得的信息处理后得到目标位置、速度、加速度的精确估值作为火力控制的输入，火力控制系统解算出俯仰偏差、方位偏差和相对距离等信息，由智能耦合控制器经综合计算后，产生可由飞行控制系统接收的俯仰、滚转、偏航指令分配到飞行控制系统的各个通道中，以便控制飞机实现快速瞄准和精确打击。另外，国外的无人车等无人装备也在开展类似的研究。

国内在无人机等无人装备领域已经开展了动力控制系统与任务系统的复合控制相关研究^[5, 6]，并取得了一定进展。在水面无人艇领域，航行自主控制方面已经有一定的技术积累和发展；但在任务执行方面，只能在人工指挥下按照预先规划的航路和步骤进行，尚未开展针对任务的航行与任务复合控制的相关研究。

2 水面无人艇的自动化与智能化发展趋势

智能化和自动化已经成为水面无人艇的发展趋势之一^[7]。水面无人艇及其搭载的任务载荷的



图1 美国斯巴达侦察兵无人艇



图2 以色列保护者无人艇

智能控制将带来性能的进一步提升。

水面无人艇的控制包括航行控制和任务控制。航行控制按照设定的航路对艇平台及动力系统进行控制，并通过分析导航设备、航行探测设备采集的信息等实施避障。任务控制按照任务执行要求进行目标探测、目标信息计算处理，并对目标进行相关操作。通常在执行任务时，需要同时进行航行控制和任务控制，使水面无人艇航行状态与任务载荷执行任务状态相适应，该过程依赖于对当前态势精准灵活的判断及指挥控制。在水面无人艇航行与任务相互独立控制时，无人艇航速、艏向等航行状态会影响任务载荷的使用，为保证任务的正常进行，需要对无人艇实施有效的航行控制来保障任务载荷的使用条件。如果航行控制与任务控制相互独立，则只能依赖指挥员完成态势判断和指挥。

基于无人驾驶的特性，水面无人艇可以放宽航行品质的限制和要求，只根据任务执行的要求，最大限度地追求控制效率。但是因为艇上没有驾驶员和指挥员，使得水面无人艇的航行必须依靠自动航路规划及控制，或者依靠无线通信进行的远程指挥，任务控制必须在水面无人艇当前航行姿态下进行。无线通信带宽有限，数据传输面临的干扰大，准确率低于有线传输，传输过程中的数据安全性也更难保证。指挥员判断指挥需要的数据量大，对数据实时性要求高，且对无线通信

的要求极高，这一要求很难实现。这种指挥方式下，航行控制部分与任务控制部分信息交互很少，大量信息汇集到控制中心，由远程指挥的指挥员进行协调控制。此外，由于固有的生理因素限制，如估算精度、动作准确性、反应时间等，指挥员并不能充分利用水面无人艇及任务载荷的全部能力，较难实现机动灵活的航行及任务载荷复合控制。

将航行控制与任务控制进行有机结合，进行航行及任务复合控制，就可自主进行态势判断和决策，能够有效避免无线通信和远程指挥的不足，提高任务执行质量，缩短决策时间，降低指挥员的工作负担，提升水面无人艇自主控制的智能化和自动化水平。

3 水面无人艇航行及任务载荷复合控制方法

3.1 基本原理

水面无人艇航行及任务载荷复合控制方法，将互不干涉的水面无人艇任务控制和航行控制有机结合，将基于外部海洋环境和障碍物信息进行避障等航行控制的控制模式，转变为不仅基于海洋环境和障碍物信息，同时也基于目标信息和任务背景，以任务执行为制导，进行水面无人艇航行及任务载荷复合控制的模式。航行及任务载荷复合控制原理如图3所示。

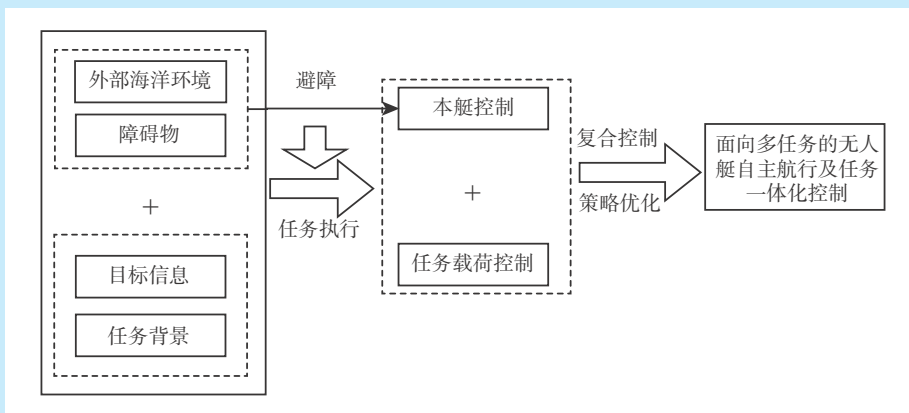


图3 航行及任务载荷复合控制原理示意图

3.2 航行及任务载荷复合控制信息连接关系

根据航行及任务载荷复合控制流程，以及各控制单元之间的反馈关系，分析各控制单元与航行载荷、任务载荷之间的信息连接关系^[8]，如图4所示。

水面无人艇动力装置将水面无人艇姿态信息发送到航行及任务载荷复合控制单元与任务控制单元。航行控制单元根据障碍物探测设备发送的障碍物位置，将舵角和发动机转速发送到水面无人艇动力装置，控制水面无人艇实施避障。任务控制单元接收目标探测设备发送的目标位置、目标速度、目标方向、目标大小等信息，并可对多个目标探测设备发送的目标信息进行信息融合，形成水面无人艇对外部环境的综合态势感知。水面无人艇根据环境态势感知发送执行动作命令，由任务执行设备对机动目标实施动作。航行及任务载荷复合控制单元根据任务控制单元反馈的任务执行设备指向偏差和航行控制单元反馈的避障信息，综合分析当前的任务执行状态和航行状态，输出任务控制命令和航行控制命令。

根据任务载荷运行原理，分析各任务载荷能够有效执行任务的区域范围，构建任务有效区模型。任务载荷应当包括目标探测设备、任务执行设备等，应当构建目标探测设备有效工作区模型，以及任务执行设备有效工作区模型。

在构建任务有效区模型的同时，依据水面无人艇艇体基本参数、推进系统性能、任务载荷搭载能力等，分析水面无人艇极限机动能力范围，构建航控有效区模型。

3.3 航行及任务载荷复合控制单元

将每个航行及任务控制目标实现过程分解为多个任务控制与航行控制的组合，并分析各控制单元之间的控制与制约关系，构建航行及任务载荷复合控制单元。航行及任务载荷复合控制单元原理如图5所示。

航行及任务载荷复合控制单元根据当前任务执行状态和航行状态，判断是否可以通过调整航行状态来配合任务执行。当需要通过调整航行状态来配合任务执行时，根据任务执行要求设定参

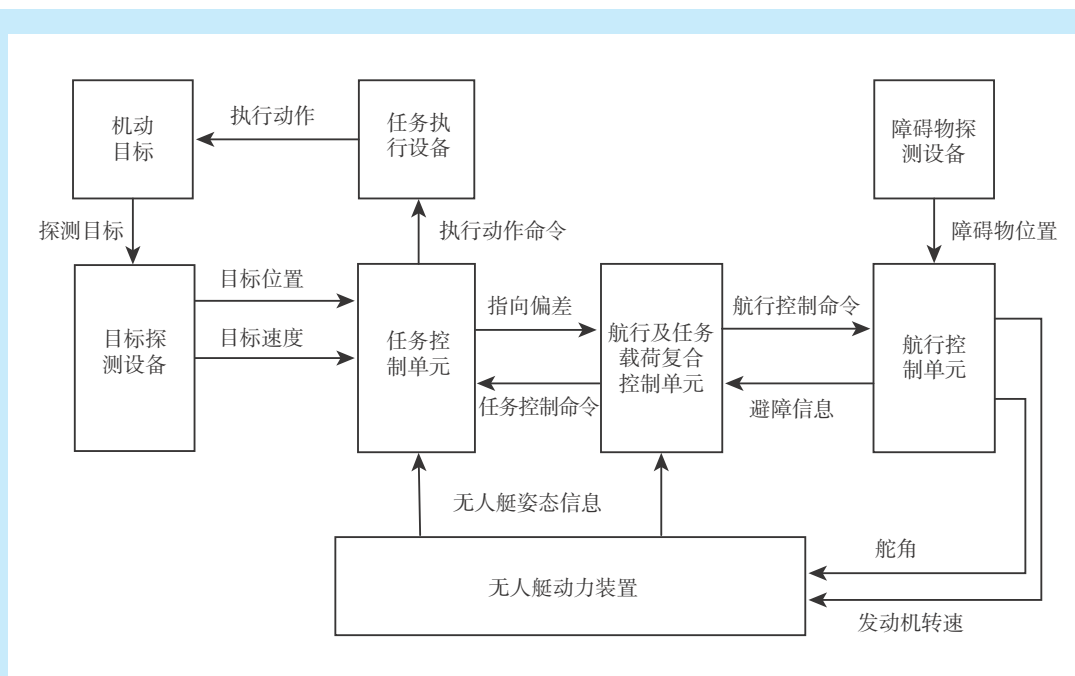
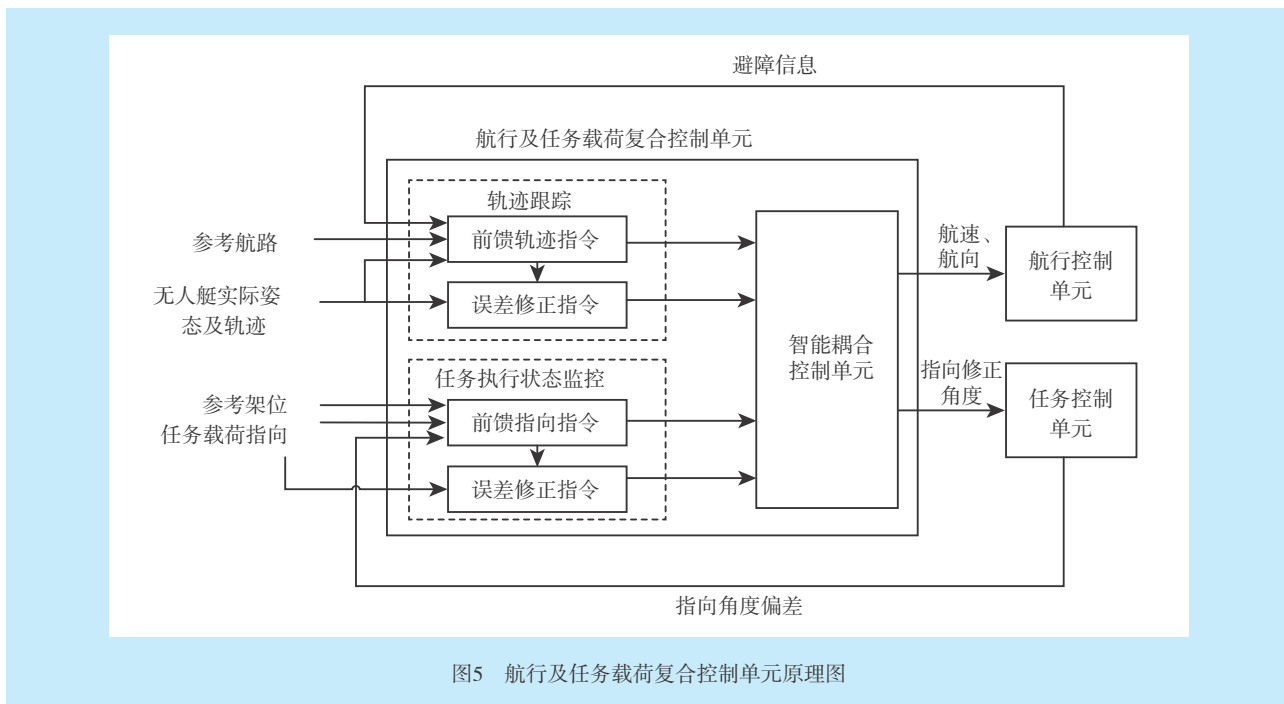


图4 航行及任务载荷复合控制信息连接关系图



考航路，并不断修正，由智能耦合控制单元将航行控制所需的航速、航向等输出到航行控制单元，同时航行控制单元也可向智能耦合控制单元反馈避障信息等限制航行控制的条件。

当需要通过调整任务控制状态来直接实现任务执行时，先设定任务载荷参考指向，并不断修正，由智能耦合控制单元将任务控制所需的任务载荷修正角度等输出到任务控制单元，同时任务控制单元也可向智能耦合控制单元进行反馈。当任务执行状态受到航行状态变化等因素干扰时，为了保证任务的顺利执行，智能耦合控制单元也可以迅速制定航行及任务控制策略，通过改变航行状态或是任务载荷状态，进行航行及任务自适应控制。

智能耦合控制单元作为航行及任务载荷复合控制的联结，在水面无人艇原来的航行控制单元和任务控制单元未作改动的情况下，只根据任务执行的需要，输出需要调整的航速、航向等航行控制参数，以及任务载荷的指向修正角度等参数，分别输入到航行控制单元和任务控制单元，由航行控制单元和任务控制单元分别对航行状态和任

务执行状态进行实时修正。

3.4 智能耦合控制单元

智能耦合控制单元是航行及任务载荷复合控制单元的核心，可根据水面无人艇当前的航行轨迹和任务执行状态，结合任务执行目标、当前海况、综合态势等因素，进行综合分析，做出决策，将该决策结果分解为任务控制目标和航行控制目标，进而分别将航行控制目标转化为航速、航向输入到航行控制单元，将任务控制目标转化为任务执行设备的指向修正角度输入到任务控制单元。

智能耦合控制单元制定的航行及任务载荷复合控制策略是水面无人艇任务执行质量的关键因素。为了不断提高智能耦合控制单元制定决策的能力，应当使其具有机器学习能力^[9]，可根据神经网络、模糊数学等智能化机器学习模型，设计适用于智能耦合控制单元的机器学习模型^[10]。通过任务执行，对该模型进行训练，实现航行及任务载荷复合控制策略的持续优化。

航行及任务载荷复合控制策略的优化过程需要结束判定条件，当有多种控制策略时，也需要最优策略判定标准。通过建立控制策略判定规则

库, 构建控制策略智能判定模型, 确定控制策略的选取和判定标准。

4 结束语

航行及任务载荷复合控制单元是水面无人艇航行及任务载荷复合控制的核心, 是联系任务控制与航行控制的枢纽。它用任务控制输出的指向误差, 自动进行航行控制, 提高任务控制的精度, 将原本分离的任务控制与航行控制有机地结合在一起, 组成了一个闭环航行及任务控制系统, 实现复合控制。智能耦合控制单元的好坏与智能化程度都直接影响任务执行的质量。

参 考 文 献

- [1] 张波, 王磊, 李英军. 无人艇的发展趋势 [J]. 科技视界, 2016 (19): 301-302.
- [2] 田勇. 水面无人艇运动控制系统设计与实现 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [3] Shao S, Chen M, Mei R. Disturbance observer-based discrete-time neural control for unmanned aerial vehicles with uncertainties and disturbances [J]. IFAC-PapersOnLine, 2017 (50): 15289-15294.
- [4] Devaprakash M, Mark C P, Kyle T G, et al. Path-following control of small fixed-wing unmanned aircraft systems with H_{∞} type performance [J]. European Journal of Cardio-Thoracic Surgery, 2010, 37 (2): 302-306.
- [5] 刘凯悦, 冷建伟. 基于滑模控制的四旋翼无人机自适应跟踪控制 [J]. 飞行力学, 2017 (01): 43-47.
- [6] 罗均, 王德超, 彭艳, 等. 一种基于非线性控制理论的无人艇轨迹跟踪控制装置及方法, CN 103955218 A [P]. 2014.
- [7] 阚亚雄, 卢道华, 仲伟波, 等. 小型无人艇集成控制系统设计与实验研究 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38 (19): 67-71.
- [8] 黄长强. 无人作战飞机精确打击技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [9] 金涛, 刘淑芬, 齐红. 无人艇保卫目标的仿真技术 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2017 (01): 123-127.
- [10] 魏子凡, 井升平, 杨松林. 基于改进遗传算法的新型水面无人艇性能综合优化分析 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2017 (01): 6-11.
- [11] 卫毓骊. 水面无人艇的复合自适应控制研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [12] 徐达. 水下回收过程中UUV轨迹规划与跟踪控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [13] 林剑锋, 马善伟. 水面高速无人艇自主控制系统研究分析 [J]. 船舶与海洋工程, 2014 (4): 57-60.
- [14] 李家良. 水面无人艇发展与应用 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37 (6): 203-207.
- [15] 牟鹏程. 水面无人船轨迹跟踪控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.

作者简介:

韩佩妤 (1985-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为舰炮武器系统及水面无人艇研究。

韩 玮 (1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为舰炮武器系统及水面无人艇研究。

梁 旭 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水面无人艇研究。





面向无人机任务载荷的通用 数据记录技术

林天静, 沈浩, 杭飞

(中国电子科技集团公司第五十二研究所, 杭州 310012)

摘要: 鉴于当前无人机任务载荷已由原来单载荷侦察/遥感发展为多载荷侦察/遥感(包括高分辨率可见光相机平台、红外相机平台、成像光谱仪、激光雷达及SAR雷达平台等), 针对实际应用中多个载荷同时装载时, 数据统一在线记录和回放的使用要求。提出了新架构下的无人机机载数据记录设备, 针对当前无人机任务载荷的新特点, 能够实现多源数据的同步记录, 接口通用, 扩展性优越, 具有广阔的应用前景。

关键词: 新架构; 小型低功耗; 多源同步; 通用化; 接口适配; 模块化; 超高清压缩

中图分类号: V243.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 03-0210-07

Universal Data Recording Technology for UAV Task Loading

LIN Tianjing, SHEN Hao, HANG Fei

(China Electronics Technology Group Corporation 52nd Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Due to the fact that the current UAV mission load has changed from the original single load detection/remote sensing to multi-load detection/remote sensing (including high-resolution visible light camera platforms, infrared camera platforms, imaging spectrometers, lidar and SAR radar platforms, etc.), the new architecture of UAV airborne recording equipment has been proposed in this paper for the actual application of data requirements unified online recording and playback when multiple loads at the same time. This new architecture of UAV airborne recording equipment can achieve synchronous recording of multi-source data, universal interface, superior scalability and broad application background for the new characteristics of the current UAV mission load.

Keywords: New Architecture; Small-Scale Low-Power; Multi-Source Synchronization; Universalization; Interface Adaptation; Modularization; Ultra High Definition Compression

1 引言

现代无人机航空侦察与探测平台会同时装载多种传感器载荷以适应各种任务需要,可同时实现光电侦察、SAR雷达侦察、高光谱侦察、大气检测、地理测绘等多种任务的需求^[1]。通过这些载荷采集到的原始数据信息需要与飞行姿态、经纬度、飞行高度等多种参数保持同步才能正确的形成情报;在某些特殊情况下,两种或多种传感器信息需要同步合成处理才能准确描述现场态势。所以,现代侦察系统一般要求装载的所有传感器载荷信息同步采集保持,并实行集中存储与管理^[2-5]。

为适应无人机机载平台任务载荷综合化、模块化、网络化的发展要求,系统性的规划研发一套面向无人机任务载荷的高密度、大容量的通用数据记录设备势在必行^[6-8]。

2 常见数据记录设备架构

常见数据记录设备包括以下几种架构:

图1(a)(b)所示的两种常见数据记录设备架构是以高性能CPU为核心,通过PCIe总线前端扩展数据采集模块,后端由PCIe Switch或Raid卡扩展PCIe SSD或SATA SSD,该种架构为传统计算机架构,优点是扩展性、通用性较好,但功耗较大(100W以上),不利于小型化设计,且由于数据总线经过了CPU,使得CPU自身的总线交互能力会成为实现高速记录的瓶颈^[9-11]。

图1(c)所示的记录设备架构,是以PCIe交换为核心。外围扩展CPU、FPGA和存储阵列,其中存储阵列可以直接是PCIe SSD或通过PCIe转SATA桥连接SATA SSD,该种架构是目前构建高速数据记录设备比较主流的一种架构,具有密度大、速率高等优点,但由于PCIe SSD以面向商用领域为主,环境适应性较差,无法满足机载产品的高低温使用要求,在PCIe SSD自身的可靠性未达到恶劣环境下的使用要求之前,不适于在机载环境下使用。另外,虽然PCIe SSD自身速度优势较大,

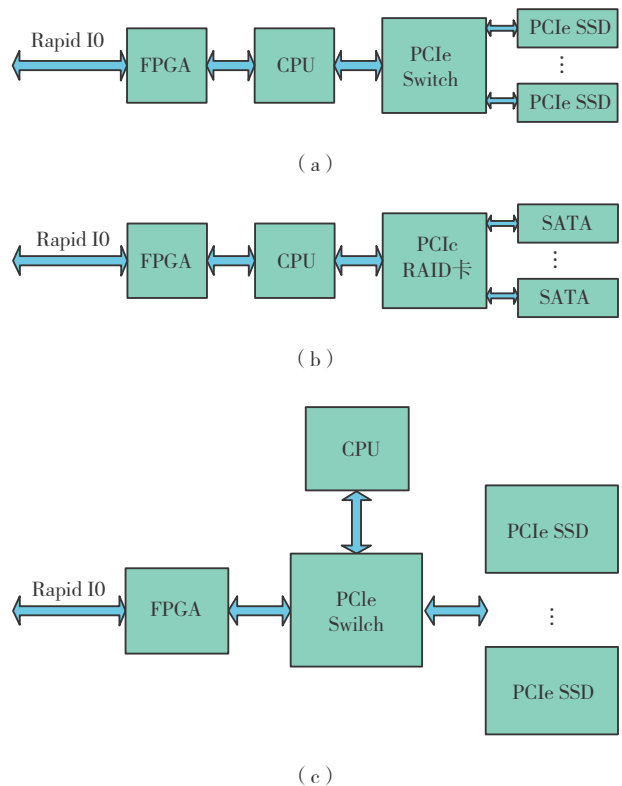


图1 数据记录设备常见架构

但自身功耗偏大,由多块PCIe SSD构建存储阵列时,整体功耗较大,增加无人机机载电源负荷,不利于无人机平台的持续长航时工作^[12, 13]。

3 通用数据记录设备使用模式规划

通用数据记录设备的工作模式主要包括:记录模式、回放模式、实时转发模式和卸载模式。其中前3种工作模式为机载功能(记录、回放和实时转发可同时进行),卸载模式为地面功能^[14, 15]。

(1) 记录模式

机载控制平台可以通过RS422向通用数据记录设备发送记录指令,通用数据记录设备按照控制命令的要求实时采集各路载荷(可见光相机、成像光谱仪、激光雷达、SAR等高分传感器)发送的非格式化流式数据,进行格式化封装后存入记录设备内部存储模块中,并在记录过程中建立参数索引表。

(2) 回放模式

机载控制平台可以通过RS422串口查询已记

录在记录设备内部各载荷数据的任务信息，并按任务号、数据类型、时间、地理位置等索引信息，将记录数据通过光纤回放给指定机载处理设备。

(3) 实时转发模式

通用数据记录设备在接收到图像类数据时，可以根据设置，将该类数据进行实时压缩后，通过设备的同步422接口转发到机载链路单元中，再由机载链路单元将实时压缩图像下传至地面接收站。

(4) 卸载模式

飞机返航后可将通用数据记录设备上的可插拔存储体取下，安装至地面卸载设备，再由地面卸载设备将数据导入数据管理设备，并进行数据入库管理，提供数据应用服务^[16, 17]。

图2显示的是通用数据记录设备的工作模式及连接关系。



图2 通用数据记录设备的应用层次关系及功能组成框图

4 通用数据记录设备架构规划

通过对传统架构记录设备的对比分析，并结合无人机任务载荷的实际使用要求，本文提出了一种以低功耗ARM处理器与FPGA相结合方式构建通用数据记录设备的核心架构，如图3所示。

借助FPGA灵活的可编程能力，在其内部集

成RapidIO控制器、DDR控制器、SATA控制器、RAID控制器等逻辑单元，体现硬件集成电路软件化的设计思想，既可最大限度的节约电路布板面积和整体功耗，又可在不改变硬件设计的前提下，通过在线软件重构，灵活适应前后端的需求变化。前端传感器输出无法调节为指定接口标准时，可以由记录设备主动适应传感器接口，后端存储模块接口由FPGA的GTX总线构建，可以适应多种协议变化、各级容量（数量）配置的存储体。此外，

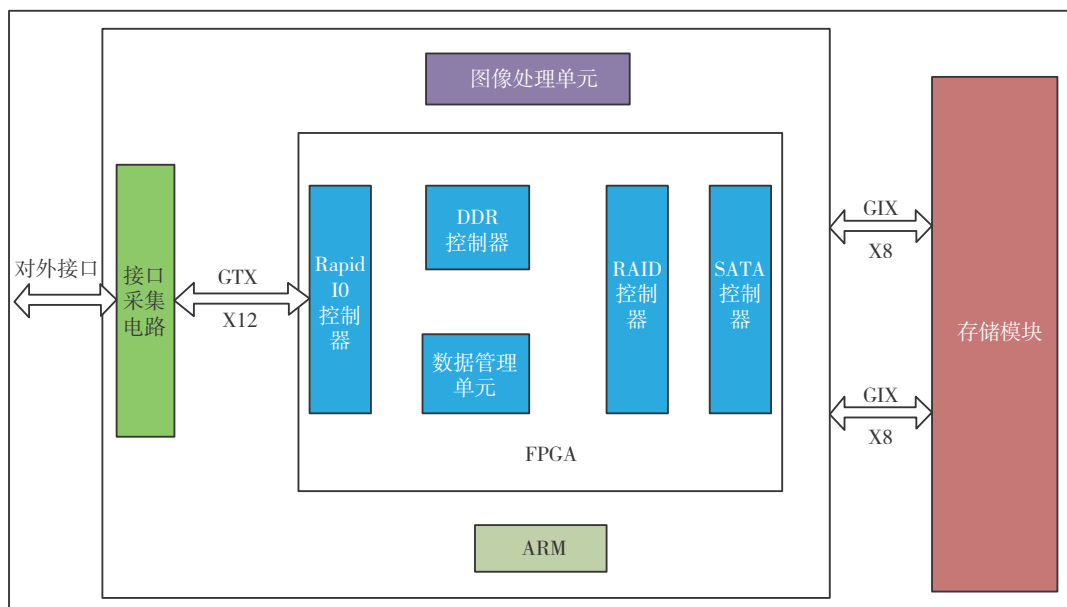


图3 通用数据记录设备新架构框图

考虑到无人机系统常见的图像实时压缩下传的应用要求，主控模块上预布图像处理模块，最大可支持 $4K \times 3K$ 分辨率图像的压缩处理。

在该架构中，ARM负责命令调度，可充分发挥其命令管理性能和低功耗的优势；FPGA负责数据调度，可充分发挥高速管理并行数据流的优势，数据流程均为高速串行GTX总线（支持RapidIO、SATA等协议）和高度DDR4缓冲，确保整体记录、访问带宽满足指标要求；图像处理模块可根据需要完成对图像类数据的压缩处理。

4.1 小型低功耗设计

以高集成度的FPGA为核心，采用FPGA+低功耗处理器芯片ARM的架构通过扩展外围电路来实现设备的各项功能。FPGA作为数据交互中心，将RapidIO控制器、DDR控制器、SATA控制器、RAID控制器等，由嵌入其内的可编程功能模块来实现，既达到了简化硬件电路设计的目的，也显著降低了电路的整体功耗。集成于主控模块的图像压缩功能由海思专用视频处理芯片完成，与传统图像处理使用的DSP芯片相比，专用视频处理芯片的外围电路简洁、功耗较低。主控模块组成图见图4。

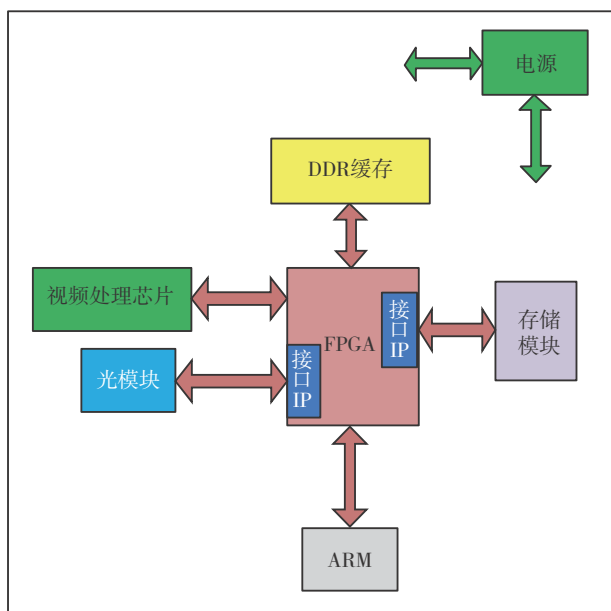


图4 低功耗架构框图

针对通用数据记录设备的工作运行方式，为降低设备在运行中的功耗，优化设备的供电模式。在设备电源设计时为各个功能模块规划独立的供电开关电路，在不影响任务执行的前提下，独立关闭不参与当前任务的电路单元。例如，没有图像数据压缩处理要求时，可以对视频处理模块的供电采用低功耗休眠模式；当数据记录速率和存储容量需求降低时，可以关闭部分SSD电源。

4.2 多源同步记录设计

多源同步记录工作原理如图5所示，多源同步记录功能由数据采集单元、存储控制单元、存储单元三部分协同完成。

数据采集单元负责对用户的各种数据进行采集和缓存。数据采集接口负责对用户数据的直接采集，并按照特定格式对采集到的数据打包后送入数据缓冲单元。各个通路的数据采集单元之间一般是相互独立、并发工作的，因此具有灵活性强、总带宽高等优点。

存储控制单元负责收集数据采集单元送来的各种数据，将数据和预分配的暂存地址按类型一一匹配，组成一定数据格式并发往存储单元。主要由数据判断与分发单元、数据暂存单元和地址暂存单元、地址数据匹配与数据包生成单元、元数据管理以及存储体接口物理层构成。

存储单元提供海量数据存储空间，可接收外部命令执行对存储介质的读写。存储单元采用轻量级嵌入式数据库，把各类传感器产生的文件索引信息存入数据库。不同类型的数据存入不同的文件，多个文件打包存入一个文件中，文件系统通过数据库中的索引快速访问每一个文件，用于实现读写删除等功能。

4.3 接口通用化设计

从现状及未来几年的发展需求来看，选择SRIO（Serial RapidIO）接口作为机上传感器载荷与数据记录设备之间的传输接口，在传输率要求、扩展性要求及集成设计要求等方面都非常合适。

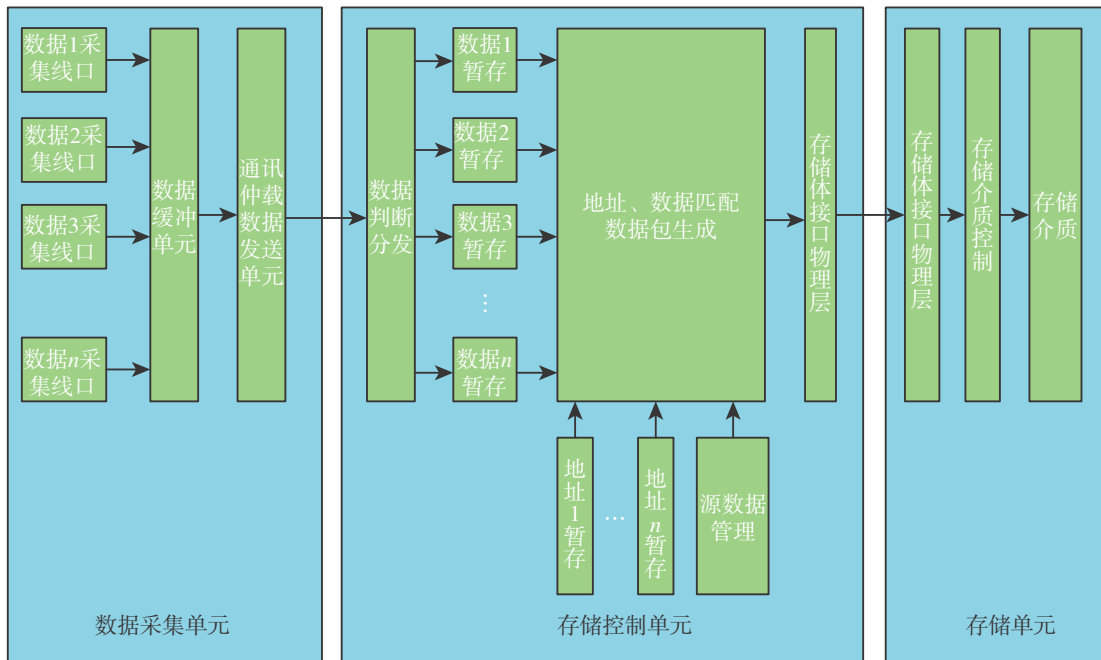


图5 多源同步记录工作原理框图

SRIO是面向嵌入式系统开发提出的高可靠、高性能、基于包交换的新一代高速互联技术，于2004年被国际标准化组织(ISO)和国际电工协会(IEC)批准为ISO/IECDIS18372标准。SRIO速率高、延时小，可以实现最低引脚数量，采用DMA传输，支持复杂的可拓展拓扑，支持1.25Gbps、2.5Gbps、3.125Gbps、5Gbps、6.25Gbps等波特率，适用于嵌入式系统/设备之间的高速数据交互。

SRIO包含三层结构的协议，物理层、传输层、逻辑层。物理层：定义电气特性、链路控制、低级错误管理、底层流控制数据；传输层：定义包交换、路由和寻址机制；逻辑层：定义总体协议和包格式。其层级结构见图6。

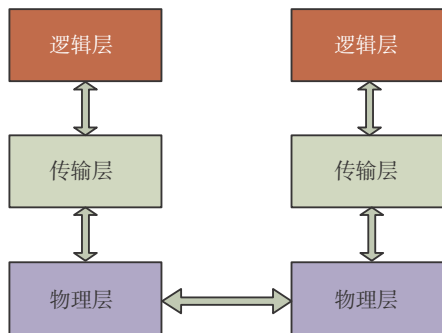


图6 SRIO的层级结构

它具有以下优势：(1)基于GTX，速度快，引脚少；(2)可交换，扩展性强；(3)支持事务多，有SWRITE、NWrite、NRead、Message、DoorBell，能适应不同应用场景；(4)效率高，基于SWRITE协议的传输效率最高能达到91%以上。

统一SRIO的三层设计，是传感器载荷与通用数据记录设备建立通讯的基础。通过FPGA的GTX总线例化SRIO协议，可灵活编程，实现X1、X4等各种组合模式。GTX总线自身支持的线速率为12.5Gbps，可以满足当前速率最高6.25Gbps SRIO的例化需要，并具备一定扩展使用潜力。

统一SRIO的物理层、传输层、逻辑层三层协议之后，传感器载荷与通用数据记录设备就可以建立起正常通讯，但为了便于更好地实现数据管理与后期的数据挖掘分析，以及通用数据记录设备能够自适应各种类型的传感器载荷接入，需要在SRIO自身的三层协议之外，综合考虑各传感器载荷数据特点，规划一层普遍适用于高分系统各传感器载荷与通用数据记录设备互联通讯的应用层协议。传感器载荷向通用数据记录设备发送数据时，需将自身数据按应用层协议进行封装。

表1所示的应用层协议结构是初步推荐的一种比较常见且较为实用的结构,当传感器载荷数据由可编程器件输出时,可以在线编程实现封装。结构表中第二部分的参数区主要保存后期回放、卸载时用户可用其作为特征检索的参数,该参数区尽量简洁,只保存检索参数,以提高通用数据记录设备提取特征参数,建立索引的效率。对于部分用于数据分析而不用于数据检索的参数,需保留在第三部分的数据区。

表1 应用层协议结构示例

定义	内容
帧头(固定长度)	固定内容的帧头标识。
参数区(固定长度)	包括:传感器类型、时间信息、经纬度信息、高度、航速、航向、俯仰角、倾斜角、横滚角、帧长等。
数据区(可变长度)	传感器采集的原始数据,自身带帧格式的数据每次发送一帧,无帧格式的数据定量发送。

通用数据记录设备规划12路RapidIO光纤接口,可设置为8路X1或2路X4数据采集接口和1路X4的卸载接口,也可在载荷增加的情况下将1路X4卸载接口配置为4路X1或1路X4数据采集接口;对于低速的载荷数据,设备预留一个RS422接口作为采集接口;设备通过一个RS422接口同机载控制设备进行命令交互及状态上传;图像类数据经通用数据记录设备内嵌的图像压缩单元压缩后可以由同步422接口转发给机载链路单元;设备内部预留1路X4 RapidIO电接口,用于扩展接口设计,实现与无法引出RapidIO光纤接口的传感器载荷对接。

5 通用数据记录设备设计创新

5.1 灵活通用

通用数据记录设备重点面向无人机领域的特定使用要求,建立以ARM+FPGA为核心,扩展外围接口单元和存储单元的整体架构,是实现小型低功耗设计的基础。可在不改变硬件设计的前提

下,通过在线软件重构,灵活适应前后端的需求变化。前端传感器输出无法调节为指定接口标准时,可以由记录设备主动适应传感器接口,后端存储单元接口由FPGA的GTX总线构建,可定义为SATA2.0、SATA3.0、PCIE2.0、PCIE3.0等多种多个通用存储器接口,可以适应多种协议变化、各级容量(数量)配置的存储模块。

5.2 数据安全

为保证记录数据的可靠性,从多种类型数据优先管理控制、硬件故障时RAID冗余、异常断电时数据保护等方面入手展开研究。多种类型数据共享存储空间时可建立优先机制,保证重要等级较高数据优先获得存储空间。建立基于FPGA的RAID冗余机制,在存储颗粒发生硬件故障时,保证记录数据的延续性和可恢复性。实现紧急情况下数据快速销毁,包括数据销毁(软销毁)和介质销毁(硬销毁)两种实现方案。数据销毁采用软件方式销毁,实现对已记录数据的净格处理,但不破坏存储介质,硬件可复用;介质销毁采用物理方式销毁,彻底破坏存储介质,硬件不可复用。在异常断电时,保证已记录数据不应受断电瞬间影响而被破坏。

6 结束语

本文介绍了一种在无人机平台上具有广泛应用前景的通用数据记录设备设计方案,其采样速率高达2GB/s,可以满足多种任务载荷数据的连续采集、实时存储、处理、分析的需求。作为一种设计精炼而又实用的通用数据记录设备,采用ARM+FPGA的SOPC技术,解决了无人机载荷中经常遇到的高速大容量存储要求和小型低功耗之间的矛盾,可以与各种侦察/探测载荷配合使用,实现情报数据的高速采集、安全存储、高效管理及有效使用。

参 考 文 献

- [1] 王捷, 周伟, 姚力波. 国外成像侦察技术现状及发展趋势 [J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27 (2): 199-204.
- [2] 蒋定定, 吕晓国, 尚顶洪. 战场图像情报侦察处理技术及其发展 [J]. 现代防御技术, 2006 (6): 71-73.
- [3] 李耀楠. 无人机载荷系统中OFDM通信同步模块设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [4] 刘雪. 通信对抗盲侦查关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [5] 吴技. 国外航空侦察系统的现状与发展趋势 [J]. 电视技术, 2009, 49 (6): 107-112.
- [6] 张凤晶. 无人机光电侦察任务载荷研究 [C] // 2016 (第六届) 中国国际无人驾驶航空器系统大会论文集. 中国航空学会, 2016.
- [7] 李全忠. 无人机任务载荷云台技术研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [8] 王东阳, 周亚凡, 叶宗民. 舰载无人机光电任务载荷试验方法研究 [J]. 红外, 2011, 32 (3): 10-13.
- [9] 韩冰. 战术无人机的任务载荷与发展分析 [J]. 舰船电子工程, 2007 (3): 31-35.
- [10] 康小伟. 军用无人机任务载荷发展趋势 [C] // 第二届 中国航空学会青年科技论坛文集. 中国航空学会, 2006.
- [11] 杜木. 战术无人侦察机的几款任务载荷 [J]. 现代兵器, 2006 (2): 12-15.
- [12] 王勋, 张纪阳, 张代兵, 等. 无人机编队飞行快速试验系统设计 [J]. 机器人, 2017, 39 (2): 160-166.
- [13] 李鹏飞, 孙开敏, 李德仁, 等. 无人机影像应急并行处理负载均衡方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43 (2): 268-274.
- [14] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49 (3): 1-14.
- [15] 黄楠楠, 刘贵喜, 张音哲, 等. 无人机视觉导航算法 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45 (7): 269-277.
- [16] 王森, 杜毅, 张忠瑞. 无人机辅助巡视及绝缘子缺陷图像识别研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (12): 1862-1869.
- [17] 符小卫, 李建, 高晓光. 带通信约束的多无人机协同搜索中的目标分配 [J]. 航空学报, 2014, 35 (5): 1347-1356.

作者简介:

林天静(1964-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为高速存储技术、高速串行交换技术及网络安全技术。

沈浩(1984-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为固态存储技术、RapidIO接口技术。

杭飞(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为小型低功耗数据记录技术、视频处理技术。





美国CODE项目推进分布式 协同作战发展

李磊, 王彤, 蒋琪

(北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074)

摘要: 美国国防预先研究计划局 (DARPA) 为增强现有无人系统 (无人机、导弹等) 能力, 使其更好适应拒止环境作战, 发展了“拒止环境中的协同作战” (CODE) 项目。通过对相关资料的梳理及分析, 首先给出该项目的发展背景、愿景、目标等, 然后介绍了该项目的研究内容、应用场景, 接着重点阐述了项目涉及的重点技术、评估指标及实现情况, 最后分析了该项目在分布式作战中的作用。

关键词: 协同作战; 飞行器自主; 编队自主; 人机界面; 开放架构

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915 (2018) 03-0217-08

DARPA CODE Program Promotes the Development of Distributed Collaborative Operations

LI Lei, WANG Tong, JIANG Qi

(Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute, Beijing 10074, China)

Abstract: DARPA has developed the Collaborative Operations in Denied Environment (CODE) program to enhance the capacity of existing unmanned systems (drones, missiles, etc.) to better adapt to the denied environment. Through combining and analyzing the related data of CODE program, firstly, gave the background, vision and goal of the CODE program, then introduced the research content and the application scene. After that, expound the key technology, the evaluation index and the realization situation, and finally analyzed the function of the program in the distributed warfare.

Keywords: Collaborative Operations; Single Vehicle Level Autonomy; Team Level Autonomy; Human-System Interface; Open Architecture

1 引言

2018年1月，洛克希德·马丁公司和雷锡恩公司领导的团队成功完成美国国防预先研究计划局（DARPA）“拒止环境中协同作战”（CODE）项目第二阶段的飞行测试。DARPA将第三阶段合同授予雷锡恩公司，进一步开发CODE的能力，并通过一系列飞行试验对作战能力进行验证。该项目一旦得到充分验证，将大大提高现有空中平台的可生存性、灵活性和有效性，并可减少未来系统的开发时间和成本。本文系统梳理了美国CODE项目相关资料信息，分析其对未来作战的影响，以期提供有益的参考。

2 发展概况

所谓的拒止环境，是美军对强对抗环境的别称，在这种环境中，强大对手使用军事力量对抗美军进入战区实现作战目的。

2014年，DARPA战术技术办公室（TTO）启动CODE项目，旨在研发先进的自主协同算法和监督控制技术以增强无人机（该项目无人机包括巡航导弹、诱饵无人机及其他无人机系统）在拒止环境的作战能力。关键技术主要涉及四个方面：编队协同自主、飞行器自主、监控界面，以及适用于分布式系统的开放架构。关键技术的发展注重自主协同作战传感、打击、通信和导航、低通信带宽、人机交互等方面。目前，已研发相应的软件和硬

件，正在使用实体和虚拟无人机，在通信拒止环境中进行全任务大规模飞行演示验证。

2.1 研究背景、愿景和能力

拒止环境变化难测，危险性高，交战各方将在电磁领域进行争夺，敌方军事目标不断改变。与较宽松作战环境相比，具有以下特点：作战距离远；电磁域超负荷运转且敌我双方对此争夺激烈，此情况对己方天基高带宽通讯及定位服务极为不利；敌方目标为可移动目标或者可重新部署的目标；敌方使用诱饵无人机、伪装设施和其他拒止技术；载人军事装备面临高危险；以及高度综合防御作战行动要求协同作战。

然而，现有绝大部分库存无人机很难满足拒止环境作战要求，具体面临的挑战包括：无人机自主应对战争情况变化的能力有限，缺乏对不断变化环境的适应能力（如导弹）或严格受控于人类操作员（如无人机）；利用常规方法来改善现有无人机系统的生存能力，成本高或技术上不可行；目前无人机的应用模式为单机模式，此类无人机系统需要依靠远程战略军事设备来实现关键功能，如导航功能、外部目标锁定功能及通信功能；现有无人机需要大量人员对其进行操控，这种运作模式成本高且无法兼容于能快速针对动态状况进行反应的原有作战系统。

协同自主技术具备大幅改善现有无人机设备功能的潜力，且能降低未来作战系统（组建无人机异构编队）的费用，并非简单的将某项无人机的功

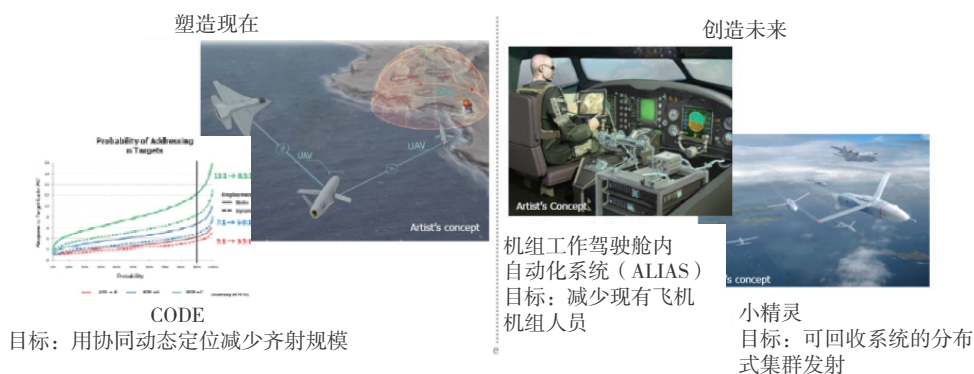


图1 CODE项目塑造现有无人系统的能力

能复制或集成到单个无人机平台。通过协同算法，无人机之间能为彼此提供支援，具体包括：编队能为没有配置远程感应器的无人机提供目标地理位置定位信息；能从多个角度对目标进行观测，提供对目标的识别情况；能利用网络传输关键信息；为没有导航功能的军事设备提供导航支援；在数量上具备压倒性优势，能以此方式及其他方式对彼此进行相互保护。协同作战可极大地提高作战效能和效率，并可减少群射的导弹数量，这种基于效应的思路既可节省资源，又可优化任务。

CODE项目旨在基于现有无人机开发自主算法和软件，扩展无人机执行任务能力，提高在拒止环境中的作战能力。该项目研究人员正在创建一种超越当前最新技术水平的模块化软件架构，该架构能适应带宽限制和通信中断，与现有标准兼容，并可在现有平台上进行低成本改造。

CODE项目的愿景是开发协同自主技术及算法，增强传统无人飞行器（导弹和无人机）实用性，培育异构系统的互操作性等。具体的能力包括：可应对三个参考作战任务（战术侦察、反水面战、摧毁地面的防空力量）；验证算法有效性；验证对抗三个任务的有效性。

CODE项目的主要目标包括四个：开发、执行

和验证自主协同算法，以增强现有无人系统执行任务能力；机载软件能在一个“通用任务计算机”（UMC）上运行，并能过渡到小型无人机系统和远程导弹上；该软件在一个开放架构上开发，并能与无人机系统新的标准实现兼容；相关能力能进行仿真验证，最初在飞行验证平台上，最终能在相应智能体平台上进行实地验证。

2.2 研究内容及进展

CODE项目为实现拒止环境中无人机的自主协同作战，充分利用先进的交互设计思想、开放架构等，主要技术包括飞行器自主、监控界面、编队协同自主、开放架构，主要想定作战场景包括战术侦察、反水面战、摧毁地面的防空力量。项目分为三个阶段：

第一阶段，2016年初完成，完成了需求定义和初步系统设计，验证了无人机自主协同的应用潜力，并起草了技术转化计划；选择了约20个可以提升无人机在拒止或对抗环境中有效作战的自主行为；人机接口和开放架构基于“未来机载能力环境”（FACE）标准、“无人控制程序”（UCS）标准、“开放任务系统”（OMS）标准、“通用任务指挥和控制”（CMCC）标准进行研发，并已取得一

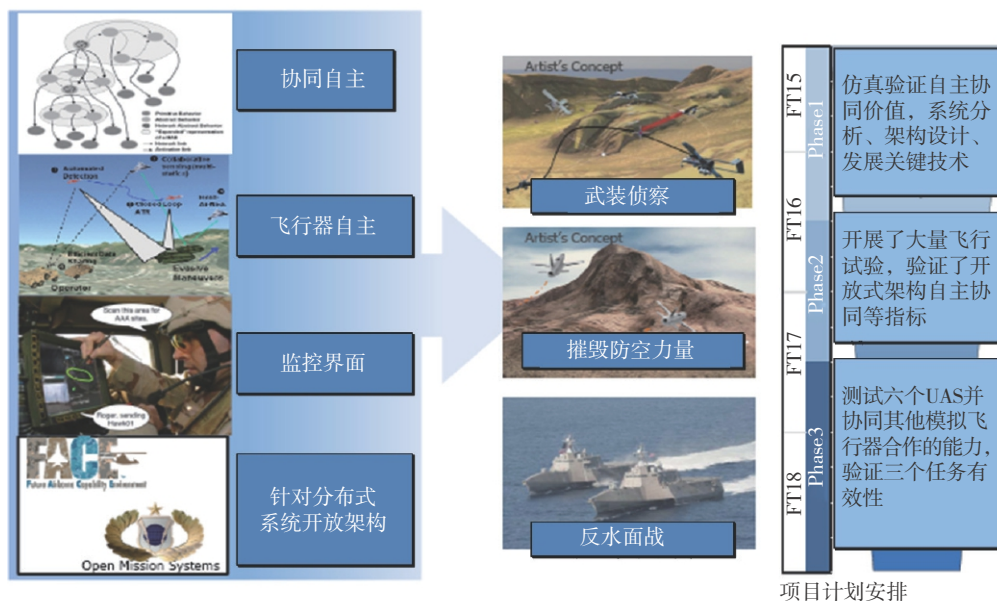


图2 主要的技术、任务场景和进展

定进展。第一阶段的承包商分为两类，一是系统承包商（雷锡恩公司和洛马公司）；二是技术开发商，包括：尼尔H·瓦格纳协会（弗吉尼亚州汉普顿），科学系统公司（马萨诸塞州沃本），智能信息流技术有限责任公司（明尼苏达州明尼阿波利斯），飞腾科技公司（密歇根州安阿伯），SRI国际公司（加州门洛帕克），Vencore实验室管理员应用通信科学公司（新泽西州巴斯金里奇）。

第二阶段从2016年初到2017年底，洛马和雷锡恩公司以RQ-23虎鲨无人机为测试平台，加装相关硬件和软件，并开展了大量飞行试验，验证了开放架构、自主协同等指标。第二阶段的系统承包商与第一阶段相同。

第三阶段将于2018年底结束，雷锡恩公司将完成三个任务场景飞行试验验证及全任务能力，测试六个无人机系统并协同其他模拟飞行器合作的能力。试验将通过单人指挥无人机编队执行复杂任务，包括目标搜索、识别以及对主动、不可预知的对手的打击。

3 关键技术分析

CODE项目涉及的关键技术包括单飞行器自主、无人机编队协同自主、监控界面、开放架构、验证全任务能力技术以及过渡到军队飞行器所用的技术等，具体如表1所示。此外，表1还给出了

该项目一些具体指标。

3.1 飞行器自主技术实现无人系统自主管理能力

为了组建自主无人机编队，每架无人机需要有足够的自主级别，包括：无人机平台子系统、任务设备及飞行轨迹的自主管理，自主管理能处理常规和异常情况。具体为分析飞行器状态数据（无人机的温度、压力、剩余能量等状况以及其他功能）；能识别意外且可处理；可应对数据链突然失效的情况（执行任务、防撞等），平台上处理数据（减少通信数据量）；自动跟踪移动目标，可以定义并控制复杂的飞行轨迹。

目前，降低通信带宽、飞行器自身状态的分析以及其他飞行器状态的状况评估主要通过机载健康预测模型实现。

3.2 协同自主技术实现多无人系统协同完成任务

为了发挥协同作战优势且考虑编队的共同目标以及各种限制，无人机编队共享作战环境，该作战环境的数据在被收集的同时也在不断地产生变化。随着从各种数据源得到的（预处理）数据增加，可以通过数据融合和分析（包括在人类团队指挥员的帮助下），获取可用于执行作战任务的信息，且闭环控制能改善编队的全局模型。基于全局模型，可确认能发挥每个编队成员优势的行动计划。

表1 主要的目标、关键技术和指标

目标	关键技术	指标
<ul style="list-style-type: none"> ◆开发验证无人飞行器自主与协同算法 ◆开发通信困难环境下协同能力 ◆提供任务指挥官和任务规划者界面 ◆开发软件架构兼容新兴开放标准，现有平台可重复使用 	<ul style="list-style-type: none"> ◆单飞行器自主 <ul style="list-style-type: none"> ●复杂飞行路径生成 ●机载传感器开发 ◆协同自主 <ul style="list-style-type: none"> ●间歇低带宽通信 ●高度自主动态回应 ◆监控界面 <ul style="list-style-type: none"> ●从操作者到监测者变更 ●打破线性操作平台比例缩放 ◆在兼容新兴标准的开放架构中开发 S/W ◆飞行验证阶段在政府提供平台验证全任务能力 ◆目前和将来发展的无人飞行器技术将过渡给海军、空军、陆军、海军陆战队 	<ul style="list-style-type: none"> ◆任务效率：与参考相比性能提高 2 倍 ◆通信要求：与指挥站之间的平均带宽小于 50kbit/s ◆人员配置：只需 1 人操控或无人操控 ◆指挥站：与战术部署兼容 ◆开放架构：每个开发性架构评估工具开放性达到最高水平 ◆转化能力：成本低于参考成本的 10% ◆多任务能力：在三个参考任务中软件有高于 90% 通用性。

协同自主技术具体包括：能够多来源数据融合（形成统一战场图像），具有共同决策架构（适应不同网络情况，通信带宽降低时给出传输任务优先级排序），能够动态组合编队和子编队，可在无天基/空基的支援下工作，能够适应高度的不确定性。

协同自主技术主要包括协同感知、协同打击、协同通信、协同导航技术、编队飞行、多限制自动路径规划、带宽降低的措施。

如多限制自动路径规划验证过程中，编队执行ISR任务时，一架无人机遭遇突发威胁，自主重新规划路径，与其他无人机协同重新生成行动方案，如图3所示。

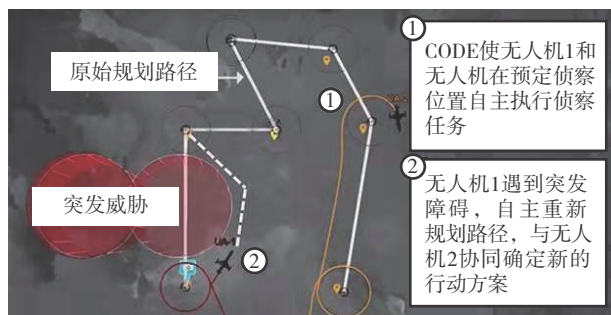


图3 自主重新规划路径示意图

带宽降低方面主要通过以下措施实现：据任务情况压缩、价值信息（排序）、健康监测（模型）、行为模型等。

3.3 监控界面实现异构多无人系统的监测控制

监控界面最终目标为使指挥官的角色提升为监督角色。主要能力包括可部署在移动控制站，可以控制多于4架无人机，促进任务规划（定义），人机之间可自然交互，简洁但综合性较强的组合（指挥官可以运用人的判断力判断当前状态），满足训练和实战需求，支持双向信息流动。主要技术包括：多模型接口耦合点触/声音、理解指挥官意图、上下文理解、不确定性表示、决策辅助、目标分类要求、编队和子编队可视化、编队和子编队任务规划、定义系统权限或自主水平、视觉和听觉的预警。

为实现拒止环境中指挥员监控多无人机协同作战执行任务，美国智能信息流技术有限公司开发了人机交互应急规划（SuperC3DE）系统。SuperC3DE是一套人机交互和智能决策辅助工具，提供综合多视角人机界面，开启调用可直接进入地图进行可视化显示，能使一人同时有效控制监督管理多架无人机。此外，该系统还包括监督应急规划评估子系统（SCOPE），对任务方案自主分析、预估、优化、反馈，实现自主辅助决策。

图4给出了SuperC3DE系统的架构，包括两个关键组件（黄色区域和金色区域）：战术手册交互（Playbook HSI）和应急规划子系统（SCOPE）。红色区域和绿色区域代表拒止环境中协同作战项目其

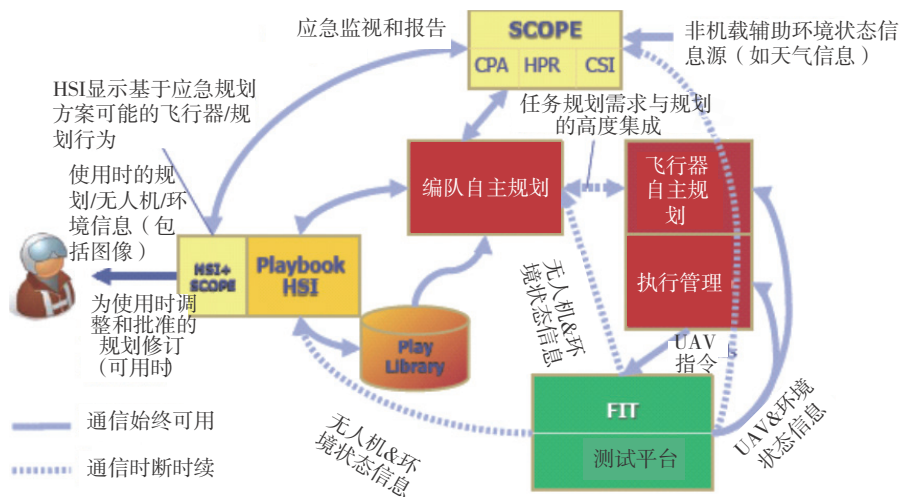


图4 SuperC3DE系统架构

他软件组件。SuperC3DE系统组件直接与编队自主规划(ATP)组件(用于编队无人机协同和规划路径生成)交互。ATP组件生成路径后由无人机执行。为评估和验证, SuperC3DE系统基于美国空军实验室的Fusion/IMPACT测试平台(FIT)进行测试。

3.4 开放架构实现不同类型无人系统功能的快速整合

拒止环境中协同作战开放架构需要自适应性、快速整合、通过白军网络测试过渡、兼容各种标准、高度模块化。开放架构对于拒止环境中协同作战通信的发展极为重要。现有的系统和尚未构建的新设计必须能够在允许连续改进的环境中共同运行。若要实现这个目标, 必须向所有的相关方提供明确界定的界面, 这些界面由政府拥有, 适合快速整合、自主调整灵活测试。

开放架构是必须融入系统研发的每一步。鉴于系统目标是促进许多不同无人系统的协同作战,

开放架构是实现拒止环境中协同作战愿景不可或缺的条件, 建议的拒止环境下的协同作战架构如图5所示。

白军网络将注入可视化空中平台、可视化威胁和可视化目标、突发性任务。突发性任务包括仿真GPS或通信丢失情况及其他任务失败仿真。为实现白军网络的运行, 拒止环境中协同作战项目采用了WFN软件, 软件构成如图6所示。WFN软件是一个由两部分组成的分布式系统, 包括通过TENA总线通信的基于地面的模块, TENA总线通过实时网络链路 with SUT中嵌入的软件模块进行通信。该软件实现了白军网络的架构。

4 在分布式协同作战中的影响分析

4.1 基于现有无人系统采用分布式协同作战样式实现作战能力的倍增

CODE项目基于协同自主算法重点解决三个任

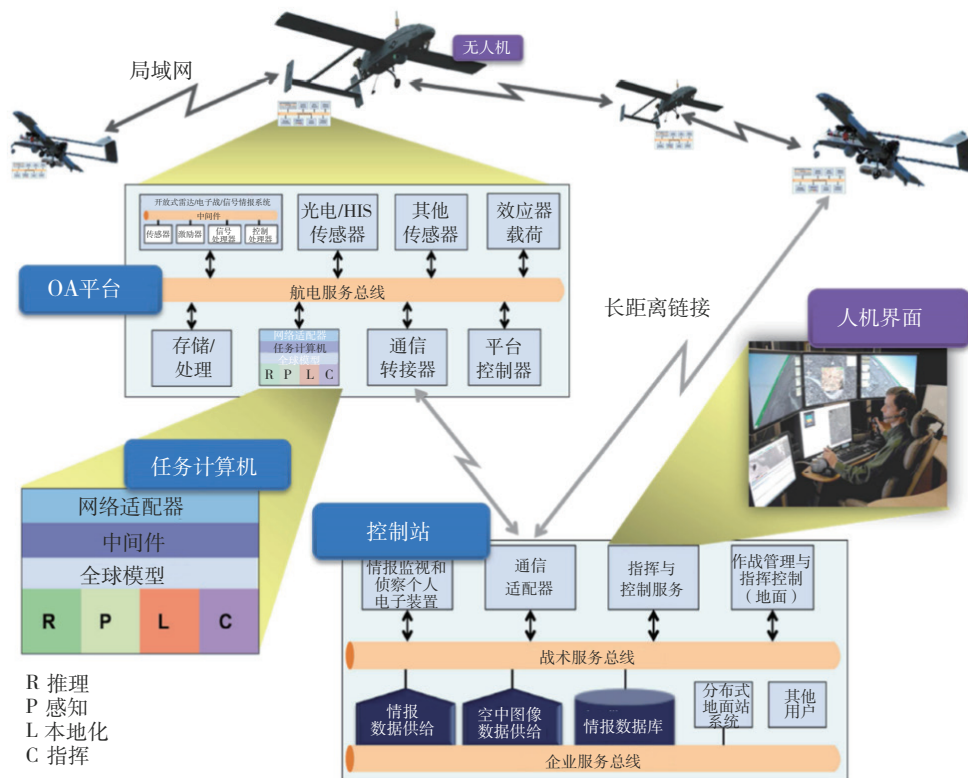


图5 建议的拒止环境下的协同作战架构

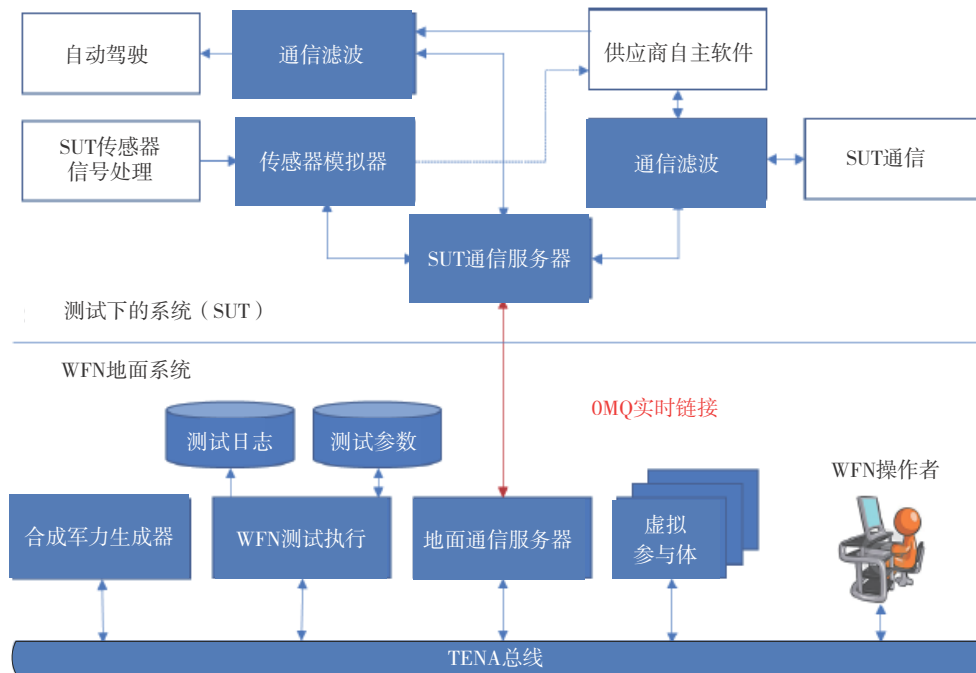


图6 WFN软件构成图

务场景的作战——战术侦察、反水面战、摧毁地面的防空力量。拒止环境中协同作战开发和演示协作自主算法——无人机编队在单个人的监督控制下协同工作。无人机将不断评估自身的状态和环境，并向任务指挥者提出协调无人机行动的建议，任务指挥者将决定是否批准此类编队行动并指导任何任务变更。使用协作自主，启用拒止环境中协同作战无人机将根据既定的交战规则找到目标并参战，利用附近其他无人系统，只需最少的监督，并适应动态情况，如友军的消耗或意外威胁的出现。拒止环境中协同作战通过协同自主算法，改进无人机的操作，使每个指挥者操作多个无人机。指挥者可以混合和匹配具有特定能力的不同系统，以适应各个任务，而不是依赖于具有集成能力的单个无人机。这种灵活性可以显著提高现有无人机任务和成本效益，缩短未来无人机的开发时间和成本，并实现新的部署概念。

4.2 从整体上提高分布式协同作战控制力

CODE项目主要解决拒止环境作战中无人系

统的自主协同问题，属于系统之系统之类的项目。DARPA支撑空中分布式作战概念，发展了一系列项目，如图7所示，支持分布式作战的各种能力，而CODE项目能够提高分布式作战的整体协同作战能力。除四项关键技术外，其他例如安全网络无线电技术、信息安全技术、紧密耦合的分布式孔径、平台和传感器设计技术等，都不属于CODE项目的重点技术，但在分布式作战中具有重要或者潜在高价值。此外，CODE项目从整体上解决了分布式作战的关键能力，可避免因为经费问题中断分布式作战实现。

5 结束语

DARPA TTO开展CODE项目，重点研究利用先进自主和协同算法，全面提升现有和/或新的无人机有效性、生存性和经济性，以适应拒止环境中作战。目前该项目进入最后的飞行演示验证阶段，该项目的成果将推动分布式蜂群在战场上的应用。

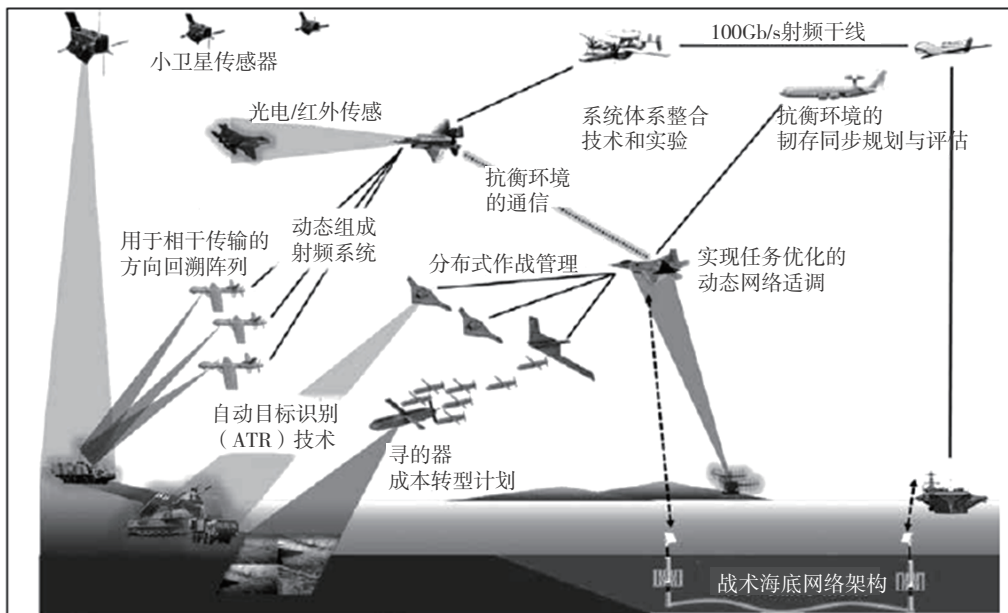


图7 支撑分布式作战其他项目

参考文献

- [1] Jean-Charles Ledé . Collaborative Operations in Denied Environment (CODE) .<https://www.darpa.mil/program/collaborative-operations-in-denied-environment>.2014.04.25.
- [2] Jean-Charles Ledé . Collaborative Operations in Denied Environment (CODE) program overview. AIAA workshop. 2018.08.04.
- [3] CODE BAA. <https://www.fbo.gov/spg/ODA/DARPA/CMO/DARPA-BAA-14-33/listing.html>.
- [4] David Scheidt. The DARPA CODE white force network. Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (IITSEC) 2017.
- [5] 陈世适, 姜臻, 董晓飞, 等. 微小型飞行器发展现状及关键技术浅析 [J]. 无人系统技术, 2018 (1): 38-53.
- [6] 昂海松. 无人机系统概念和关键技术 [J]. 无人系统技术, 2018 (1): 66-71.
- [7] 张涛, 李清, 张长水, 等. 智能无人自主系统的发展趋势 [J]. 无人系统技术, 2018 (1): 11-22.
- [8] 罗阳, 巩轶男, 黄屹. 蜂群作战技术与反制措施跟踪与启示 [J]. 飞航导弹, 2018 (8): 42-48.
- [9] 祁圣君, 井立, 王亚龙. 无人机系统及发展趋势综述 [J]. 飞航导弹, 2018 (4): 17-21.
- [10] 韩旭, 盛怀洁. 多无人机协同搜索研究综述 [J]. 飞航导弹, 2018 (3): 40-45.
- [11] 赵振森, 王克印, 李永健, 等. 小型无人机武器化及其发展前景分析 [J]. 飞航导弹, 2018 (6): 22-25+48.
- [12] 申超, 李磊, 吴洋, 等. 美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究 [J]. 战术导弹技术, 2018 (1): 16-21.
- [13] 槐泽鹏, 龚旻, 陈克. 未来战争形态发展研究 [J]. 战术导弹技术, 2018 (1): 1-8+29.
- [14] 侯满义, 杨永波, 荆献勇. 多无人机协同作战武器目标分配建模 [J]. 战术导弹技术, 2017 (5): 68-73.

作者简介:

李 磊 (1982-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为无人系统技术及新型作战模式、装备保障技术等方面的情报研究。

王 彤 (1992-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为作战模式、无人系统等方面的情报研究。

蒋 琪 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为精确打击、电子对抗、作战模式、前沿技术等方面的情报研究。



征稿启事

《无人系统技术》期刊

《无人系统技术》期刊是由中国航天科工集团有限公司主管，北京海鹰科技情报研究所主办，中国无人系统产业联盟（筹）、中国指挥与控制学会无人系统专业委员会、西北工业大学无人系统发展战略研究中心、西北工业大学无人系统技术研究院联合协办的学术期刊。现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。

◆ 约稿方向

稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主，广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时，也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。

◆ 投稿方式

期刊网络采编系统正在建设中，目前通过互联网邮箱：chinauas310@163.com，进行投稿。

◆ 投稿要求

1. 本刊选录稿件主要视其是否有创新点及其价值大小，并综合考虑：立题的科学 / 工程意义；对科研进展的了解和引用；方法或其应用的创新性；方法和论证的科学性；结论 / 结果的合理可信性和写作质量。
2. 投稿时须提交“保密审查表”电子版，稿件正式录用后请将保密审查证明邮寄至：北京 7254 信箱 4 分箱《无人系统技术》编辑部，邮编：100074。

◆ 写作要求

1. 来稿应含中英文题目、中英文摘要（说明研究目的、创新试验方法、研究成果和最终结论等，重点是方法创新和成果结论。中英文摘要对应，英文摘要最好在 150 个实词左右）、关键词（5 ~ 8 个）。引言应说明课题的背景，引述该领域的国内外同行已经取得的进展，以说明本文的选题意义和创新点所在。
2. 量和单位应符合国家规定。外文字符要分清大小写、正斜体，上下角字符的位置高低应区别明显。
3. 图、表应提供中英文图题、表题；图表的设计，一般不超过 8cm 宽。
4. 参考文献引用文献应遵循“最新、关键、必要和亲自阅读过”的原则；在正文中顺次引述；数量以不少于 15 篇为宜，未公开发表的资料一般不宜引用。
5. 建议提供全部作者简介，以便于读者了解和联系。作者简介内容应包括：姓名、出生年、性别、学位、职称、研究方向、电子邮箱、联系电话等。

◆ 关于稿酬

稿件一经录用，将按照字数和文章质量情况，向作者一次性支付稿酬。

顾 问

李德毅 封锡盛 李伯虎 徐德民 刘永才 费爱国 樊邦奎 陈 杰 魏毅寅 王飞跃

第一 届 编 委 会

主 任

李风雷

副主任

王长青 宋 斌 谷满仓 张 涛 符文星

委 员 (按姓氏拼音排序)

昂海松 蔡顺才 陈 斌 戴江勇 邓宏彬 都基焱 方 浩 符小卫 郭继峰 黄 强 黄长强

李必军 李东光 李贻斌 林 平 刘 莉 刘培志 罗 均 马洪忠 孟 红 潘 泉 齐俊桐

时兆峰 田大新 王宏伦 韦锦峰 吴向阳 夏元清 向锦武 徐 昕 薛建儒 颜国正 杨 宁

杨宏晖 于进勇 于林宇 张 梅 张 宁 张 山 张冬青 张卫平 朱 枫 朱小燕

Simon X.YANG Wei Ren Yang SHI Yantao Shen

无人系统技术 2018 年创刊 (双月刊)

主管单位: 中国航天科工集团有限公司

主办单位: 北京海鹰科技情报研究所

协办单位: 中国无人系统产业联盟 (筹)

中国指挥与控制学会无人系统专业委员会

西北工业大学无人系统发展战略研究中心

西北工业大学无人系统技术研究院

主 编: 张冬青

副 主 编: 蔡顺才 孙柏原 李东光 陈少春

执行主编: 王一琳

编辑出版: 《无人系统技术》编辑部

地 址: 北京 7254 信箱 4 分箱 (100074)

电 话: 010-68190652 (编辑部)

010-68375084 (发行部)

邮 箱: chinauas310@163.com

国内发行: 北京海鹰科技情报研究所

印刷单位: 北京博海升彩色印刷有限公司

Unmanned Systems Technology Started in 2018 (Bimonthly)

Administrated by: China Aerospace Science & Industry Corporation Limited

Sponsored by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Co-organized by: Association for Unmanned Vehicle Systems of China

Technical Committee on Unmanned Systems, CICC

Research Center for Unmanned System Strategy

Development, NWPU

Unmanned System Research Institute, NWPU

Editor-in-Chief: ZHANG Dongqing

Associate Editor: CAI Shuncai SUN Baiyuan LI Dongguang

CHEN Shaochun

Executive Editor: WANG Yilin

Edited & Published by: Editorial Office of Unmanned Systems Technology

Add: P.O. Box 7254-4, Beijing 100074, China

Tel: (8610) 68190652 (Editorial office)

(8610) 68375084 (Circulation office)

E-mail: chinauas310@163.com

Distributed by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Printed by: Beijing BOHS Colour Printing Co., Ltd.

本期责任编辑: 李 志

ISSN 2096-5915

CN 10-1565/TJ

国内定价: 30 元 / 期