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

哈尔滨工程大学
水下机器人技术重点实验室
驭浪者号自然能驱动水面机器人

中国学术期刊网络出版总库（CNKI）收录
万方数据—数字化期刊群收录
超星数字期刊数据库收录
维普网数据库收录

ISSN 2096-5915

2019.6
第2卷 NO.

第二届IEEE国际无人系统大会（IEEE ICUS 2019）顺利召开

由北京理工大学、中国指挥与控制学会、美国电气和电子工程师协会（IEEE）联合主办，复杂系统控制与智能协同技术重点实验室、北京海鹰科技情报研究所《无人系统技术》编辑部、中国指挥与控制学会无人系统专业委员会、机电动态控制重点实验室联合承办的第二届IEEE国际无人系统大会（IEEE ICUS 2019）于2019年10月17日至19日在北京理工大学（中关村校区）顺利召开。

本次大会以“无人系统技术的颠覆性创新”为主题，来自国内外高等院校、科研院所和工业部门的250余名专家学者出席，共同探讨和交流了无人系统领域相关的学术和技术问题。本次大会共征集论文280余篇，经过学术工作委员会严格审稿程序，录用172篇，所有录用论文进入IEEE会议出版程序。

大会邀请了来自德国、新加坡、英国、加拿大、荷兰等多个国家的9位无人系统领域的国际知名专家做大会报告，分享最新学术见解，把握技术发展脉搏。会议按照“无人机技术、无人车与机器人技术、人工智能与图像处理技术、空间智能无人系统技术、无人系统自主规划/制导与控制、无人系统建模/控制与估计、无人系统微纳载荷技术、复杂系统控制与智能协同技术”等专业方向设置11个小组进行分组研讨交流，共计112位学者进行了口头报告。大会期间共有60篇论文进行了海报展示，专家通过和作者的现场交流完成海报评优。

HIWING

无人系统技术

第2卷第6期　2019年11月

目　次

系统综述

无人水面艇技术发展回顾与趋势分析 …… 01
张　伟，廖煜雷，姜　峰，赵铁军

技术研究

基于改进型人工势场的路径规划方法 ……10
成昌巍，胡劲文，王　策，赵春晖，潘　泉
面向无人机小样本目标识别的元学习方法研究 ……17
李宏男，吴立珍，牛轶峰，王　菖
基于SPEA2算法的UCAV多目标机动轨迹规划 ……23
朱文强，杨卫莉，库　硕，王　杰
“一对多”的空间在轨服务序列规划研究 ……34
郑红星，周思雨，李伟杰
一种欠驱动无人船避障及目标跟踪鲁棒控制方法 ……40
张亚博，姜　明，肖　强，王　军，陈　霖，张海燕
无人机下投探空仪投放过程数值模拟 ……46
肖良华，闫林明，曹世坤，郭　然，陈　斌

前沿动态分析

2019年无人系统领域发展综述 ……53
王雅琳，杨依然，王　彤，葛悦涛
面向数据共享交换的联邦学习技术发展综述 ……58
王亚珅

其他

《无人系统技术》2019年总目次 ……63
中国航天科工集团有限公司科技期刊联合征订启事 ……65

《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。

Unmanned Systems Technology

Vol.2 **No.**6 2019

Contents

Systematic Review

Development Review and Trend Analysis of Unmanned Surface Vehicles Technology ····· 01
ZHANG Wei, LIAO Yulei, JIANG Feng, ZHAO Tiejun

Technical Study

Path Planning Method Based on Improved Artificial Potential Field ····· 10
CHENG Changwei, HU Jinwen, WANG Ce, ZHAO Chunhui, PAN Quan

Small-Sample Meta Learning Towards Object Recognition Through UAV Observations ····· 17
LI Hongnan, WU Lizhen, NIU Yifeng, WANG Chang

Multi-objective Maneuvering Trajectory Planning Based on SPEA2 Algorithm for UCAV ····· 23
ZHU Wenqiang, YANG Weili, KU Shuo, WANG Jie

Research on "One-to-Many" Orbit Service Sequence Planning ····· 34
ZHENG Hongxing, ZHOU Siyu, LI Weijie

A Robust Control Method for Obstacle Avoidance and Target Tracking of Underactuated Surface Vessels ····· 40
ZHANG Yabo, JIANG Ming, XIAO Qiang, WANG Jun, CHEN Lin, ZHANG Haiyan

Numerical Simulation of the Release of Dropsonde from UAV ····· 46
XIAO Lianghua, YAN Linming, CAO Shikun, GUO Ran, CHEN Bin

Frontier Dynamic Analysis

Summary of the Development of Unmanned Systems in 2019 ····· 53
WANG Yalin, YANG Yiran, WANG Tong, GE Yuetao

A Survey on Federated Learning for Data Sharing and Exchange ····· 58
WANG Yashen

[引用格式] 张伟，廖煜雷，姜峰，等. 无人水面艇技术发展回顾与趋势分析[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：1-9.

无人水面艇技术发展回顾与趋势分析

张 伟[1,2]，廖煜雷[1]，姜 峰[2]，赵铁军[2]
（1. 哈尔滨工程大学，哈尔滨 150001；2. 哈尔滨工业大学，哈尔滨 150001）

摘 要： 无人水面艇（USV）与无人机、无人车和无人潜航器同属于四大无人平台成员，受到计算机、控制、人工智能、材料、通信、传感器等高新技术的推动，近30年来发展十分迅猛。首先从认识海洋、海洋经济和海洋安全等角度出发，论证了发展USV的必要性，并对其系统组成和技术分类进行了详细的阐述。对USV发展萌芽阶段、起步阶段和快速发展阶段中，各主要军事强国特别是中国的经典型号进行了介绍。最后总结了载体设计、先进材料、自主控制和环境感知四项关键技术和未来发展趋势。

关键词： 无人水面艇（USV）；载体设计；先进材料开发；自主控制；环境感知；多无人艇编队
中图分类号： TP273，U664 **文献标识码：** A **文章编号：** 2096-5915(2019)06-0586-09

Development Review and Trend Analysis of Unmanned Surface Vehicles Technology

ZHANG Wei[1,2], LIAO Yulei[1], JIANG Feng[2], ZHAO Tiejun[2]
(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Unmanned surface vehicle (USV), together with unmanned aerial vehicles, unmanned vehicle, and underwater unmanned vehicles, are members of the four unmanned platforms. Unmanned surface vehicles have been developed rapidly in the past 30 years, driven by high technology such as computers, control, artificial intelligence, materials, communications, and sensors. First of all, from the perspective of understanding the ocean, marine economy and marine safety, the necessity of developing USV is demonstrated, and its system composition and technical classification are described in detail. This paper introduces the classic models of major military powers, especially China, in the embryonic stage, initial stage and rapid development stage of USV. Finally, four key technologies and future development trends of carrier design, advanced materials, autonomous control and environmental awareness are summarized.

Key words: Unmanned Surface Vehicle (USV); Platform Design; Advanced Material Development; Autonomous Control; Environment Perception; Swarm Intelligence of Multi-USV

1 引 言

近年来，无人平台技术获得了世界范围内的广泛重视和深入研究，尤其是无人机技术发展尤为迅猛，并在多个领域实现了成功应用。无人水面艇与无人机、无人车和无人潜航器同属于四大无人平台成员，如图1所示。受到控制、计算机、人工智能、材料、通信等高新技术的有力推动，近30年来无人水面艇（Unmanned Surface Vehicles，USV）技术发展较快，并被应用于民用及军事领域。

在2007年，美国海军制定发布了第一个无人艇总体规划图，在规划中把无人艇定义为一种静止时浮于水面，而在运动时几乎持续地同水面接触，具有不同自动操控能力的无人运载器[1]。同其它无人

收稿日期：2019-10-24； 修回日期：2019-11-01
基金项目：国家自然科学基金（51779052，51579022，51709214，51879057），国防科技创新特区项目（KY70100190012），黑龙江省“头雁”创新团队，黑龙江省博士后科研启动金（LBH-Q17046）。

图1 四大无人平台(源自互联网)

Fig. 1 Four unmanned platforms (from the Internet)

平台一样,无人艇被应用于环境恶劣、危险、枯燥或不适于人的任务中,无人艇的显著特点为:(1)环境适应性强;(2)活动范围广、经济性好;(3)小型轻便、艇型丰富;(4)多种推进方式;(5)信息化载体;(6)减轻人的负担、无人员伤亡[2]。装备在海洋环境中执行任务或作业时,首先要考虑到海洋独特的工作空间环境。相比于其它工作环境,海洋装备的工作效率、性价比和人员设备安全是重要的参考条件。无人艇与常规装备相比,具有自主操控、部署便捷、运维成本低、吃水浅等特点,无人艇通过搭载不同的功能模块,能够无人化、低成本、灵活自主地执行多种海上任务,包括海域测绘、水文气象观测、应对化学/核辐射污染突发事件、情报侦察、反水雷、反恐等[3-4]。

2 研究背景及意义

随着人口剧增,陆上资源的日益匮乏,人们迫切地需要从占地表面积70%的海洋获得资源;近年来海洋环境保护、全球气候变暖等问题也越来越受到人们的高度重视。同时,各军事大国历来极为重视经略海洋,未来海上斗争激烈,维护海洋权益任务艰巨。然而,我们对于海洋的了解甚至落后于太空。发展无人艇技术对于推动海洋开发、保护海洋环境、保卫海洋安全等具有重要作用。对无人艇技术的研究、应用需求,主要体现在以下三个方面:

(1)认识海洋的需要

俄国科学家门捷列夫说:“科学是从测量开始的”。工欲善其事,必先利其器,海上任何活动,无论是海洋开发,还是海洋军事,都需要技术先进、性能可靠、使用方便的监测装备来保驾护航。我国海洋科学考察正在进入世界先进行列,考察区域已由海岸带、近海拓展到三大洋和南北极等远海区域。

随着资源、能源开发利用进程的逐步深入,对全球气候变化的广泛重视以及海洋科学的发展,使得海洋观测正在发生革命性的变化。研制和构建由科考船、卫星、无人艇、无人机、潜/浮标、无人潜航器等有人/无人装备组成的海洋立体监测系统(如图2所示),将显著提升观测的时间宽度、空间广度,这对有效认识海洋具有深远影响。

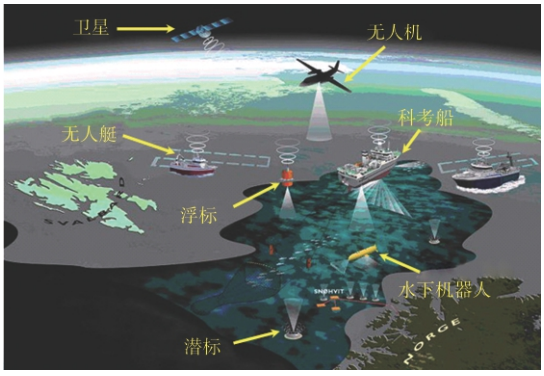

图2 欧盟2020年海洋立体监测系统想象图

Fig. 2 Imagination of EU marine stereoscopic monitoring system in 2020

(2)海洋经济的需要

船舶是极其复杂的系统,为了保证在复杂海洋环境中船舶航行与作业安全,目前船上仍配备了大量技术人员。随着运输、人力等成本高涨,造成了航运经济性较差;同时人工操纵存在失误、疲劳等问题导致海上事故频发;而且由于海上环境恶劣,必须考虑到人员耐受性要求,这严重影响了舰船作业时间和范围。

随着通信、计算机、自动化等科学技术发展,船舶的自动化程度逐渐提高,操控船舶所需的人员变得越来越少。未来船上甚至不再需要配置船员,逐步实现无人化(如图3所示),这将显著提高经济性和适应性。

(3)海洋安全的需要

海军是极其复杂的高技术型军种,其发展需要数十年的技术积淀。尽管21世纪以来海军装备信息化水平得以极大提高,然而目前处于最高发展水平的美国海军,一艘常规驱逐舰上仍有数百名战斗

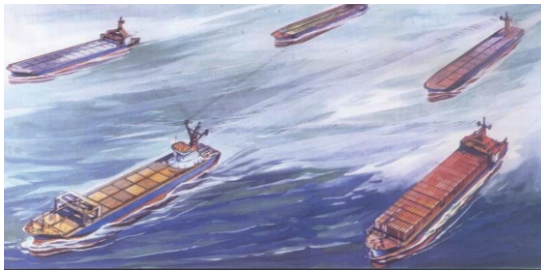

图3　未来海上无人运输船队想象图

Fig. 3　Imagination of the future maritime unmanned transport fleet

和执勤人员,一支航母编队则由上万人组成。生命最为宝贵,然而战争就意味着流血和牺牲,如何减小伤亡并打赢战争显得极为重要,无人武器系统的出现让我们看到了希望。

随着作战方式的变革,无人作战系统成为现代武器装备的发展趋势,得到各国高度重视。主要军事强国正在大力推动有人/无人系统的深度融合,逐步实现智能、协同的海陆空联合作战(如图4所示),这将是未来战争的一个发展趋势。

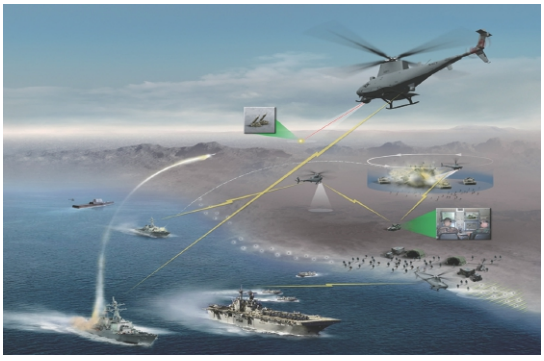

图4　未来的海陆空立体作战模式想象图

Fig. 4　Imagination of future sea, land, and air three-dimensional combat mode

因此,在认识海洋、经略海洋、保护海洋的战略需求驱动下,深入发展无人艇技术、推动无人装备应用,具有显著的理论价值和现实意义。

3　无人艇的系统构成及技术内涵

3.1　系统构成

无人艇的架构设计一般划分为监控站(岸基/母舰监控分系统)、无人艇(本体分系统)两大部分。对于无人艇本体而言,根据任务、功能的不同,无人艇的系统构成主要包括:载体、动力、操纵、控制、感知、通信、导航、载荷、作业、保障等子系统。基于模块化的设计理念,可将子系统细分为各个功能模块。无人艇研制中,依据使命任务需求和总体设计方案,分别对各功能模块进行技术攻关、详细设计、软硬件开发,通过系统集成最终构建出具备自主操控、安全航行及特定功能的无人系统。

一种典型的无人艇系统构成图如图5所示,为了保障无人艇有效运行,其中包含约20个子系统(功能模块),显然无人艇是一个非常复杂的系统。

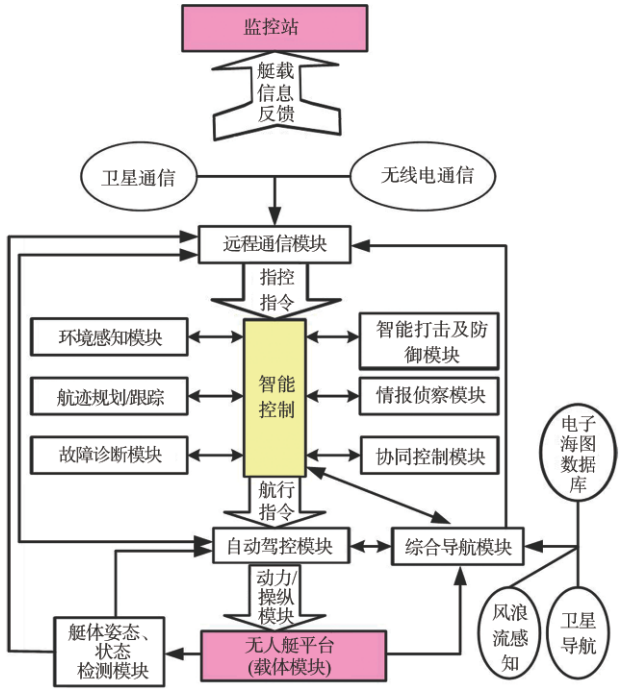

图5　一种典型的无人艇系统构成图

Fig. 5　Typical system composition of unmanned surface vehicles

无人艇的各个子系统(模块)之间紧密联系,相互支撑、缺一不可。无人艇遂行任务时,通过远程通信模块实现无人艇与监控站之间的无线信息交互,接收指控指令,并反馈艇载信息(艇体、环境、目标等数据);无人艇的核心是智能控制分系统,它结合艇体姿态、环境感知模块获得环境/目标信息及使命任务,进行任务决策、路径规划、障碍规避、航迹跟踪,甚至协同控制;对于一些军用无人艇,会通过目标感知及态势,启动智能打击及防御模块,对目标进行打击或自身防御。在无人艇出现故障后,可以通过故障诊断模块进行分析、处理,启动相应的安全策略。同时,通过自动驾驶模块可以切换遥控模式或自主模式,根据不同任务及需求选择适宜的运行模式。

3.2 技术内涵

(1)技术研究角度

无人艇技术具有多学科交叉融合、集成性和前瞻性的特点,涉及船舶与海洋工程、电子工程、计算机技术、信息技术、控制技术、人工智能、通信技术等众多学科领域。

无人艇的关键技术主要包括载体设计、自主规划与控制、环境感知、布放回收、武器投放、通信、动力、有效载荷等技术。其中,无人艇的通信技术基本上可以借鉴来自水面有人舰船的成熟技术,而动力系统则主要采用柴油发动机或锂电池,因此这两项技术门槛相对较低。而无人艇的有效载荷技术方面的门槛较高,突破难度较大。

①载体设计技术

载体系统是无人艇的"身体"即平台基础,载体设计技术包括无人艇的艇型设计、动力学分析与测试、总体设计与集成、高速航行稳定性、抗倾覆性、浮态自恢复等技术。

目前,无人艇主要包括滑行、排水、多体、水翼、半潜等五类艇型。其中军用领域一般采用滑行或半滑行艇型,而民用领域则一般以排水、多体型为主。

②自主规划与控制技术

如果把无人艇比作一个人的话,那么智能控制系统将是无人艇的"大脑",而自主技术则是其核心。

自主技术能够降低无人艇对于人员和通信带宽的需求,同时扩展任务范围或改善操控性能。一直以来自主技术都是无人装备的核心研究领域,虽然近年来发展迅速,但是自主等级、可靠性和环境适应性等仍有很大提升空间。

③环境感知技术

环境感知系统是无人艇的"眼睛",是实现自主航行和作业的前提。

近年来,尽管在无人艇传感器及处理技术方面有了较大发展,但在环境感知技术领域仍存在较多技术问题。比如海上视觉感知算法,当前仍处在初期发展阶段,可靠跟踪、识别能力亟待提高。

④武器投放技术

载荷系统是无人艇的"拳头",为执行反水雷、反潜、反恐等任务,要求无人艇能够携载、投送专门的武器(载荷)。

面临的主要技术挑战是在各种海况下可靠地跟踪、瞄准目标并遂行打击。目前,主要是通过遥控站的方式进行武器控制,还未实现自主式武器控制。

⑤布放与回收技术

部署系统是无人艇的"保障",布放回收技术是无人艇能否成功运行的关键。

无人艇布放回收技术面临的挑战,包括布放、回收作业的安全和可操作性,系统的通用、自主与可移植性,无人艇与母平台潜在冲突等。目前,美国的无人艇布放回收技术水平最高、发展最快。

(2)军事应用角度

无人艇作为一种依靠遥控、半自主、自主甚至全自主方式在水面运行的无人化平台,它通过搭载多种传感器、特种装备或武器模块等载荷,在目标海域执行反水雷、反潜、反舰、电子战以及海上安全等任务使命。

2007年7月,美国海军首次发布《海军无人艇总体计划》,该计划中规划了无人艇的七项使命任务和五大重点发展技术,成为了美国海军无人艇技术研发、作战运用的纲领性文件。其中,七大任务使命包括反水雷、反潜、海上安全、反舰、支持特种部队作战、电子战、支持海上封锁行动;五大重点发展技术包括自主技术、障碍规避技术、载荷/武器耦合技术、布放与回收技术、先进船体/机械/电气/系统技术[5]。

4 无人艇技术的研究现状

参考技术发展水平、遂行任务能力等因素,可将无人艇技术的发展分为三个主要阶段。

4.1 萌芽阶段

萌芽阶段为二战时期至20世纪90年代初。无人艇的发展历史最早可以追溯到1898年,当时著名发明家尼古拉特斯拉发明了一艘名为Wireless robot的遥控艇。

在二战时期,无人艇第一次被应用在实战中。1944年,盟军在诺曼底登陆期间,开发了可以运载大量烟幕剂的无人艇,按照预先设定的航向驶往特定海域,造成盟军舰队登陆的假象,实现其作战掩护和战略欺骗的目的。二战后期,美国海军还曾通过在小型登陆艇上加装无线电控制的操舵装置和扫雷火箭弹,用于浅海雷区作业。

二战结束后,无人艇得到了进一步发展,主要用于扫雷和战场损伤评估等任务,如1946年的"十字路口行动"中,原子弹每次爆炸后,均使用无人艇收

集辐射水域样品。20世纪60年代苏联开发了小型遥控无人艇,主要用于向敌方舰艇发动自杀式的撞击爆炸性攻击。20世纪70至80年代,由于技术的限制,无人艇技术并未获得很大突破,主要应用于军事演习和火炮射击的海上靶标(如图6所示)。

图6　美国军事演习中的无人靶船

Fig. 6　Unmanned target ship during US military exercise

4.2　起步阶段

起步阶段为20世纪90年代至本世纪初。20世纪90年代后,随着关键技术的发展,真正意义上的无人艇开始出现。比较典型的是美国研制的遥控猎雷作战原型艇(如图7所示),成功在波斯湾跟从库欣号驱逐舰进行了海上作业。1997年1~2月的"SHAREM 119"演习中,该艇进行了长达12天的猎雷行动。

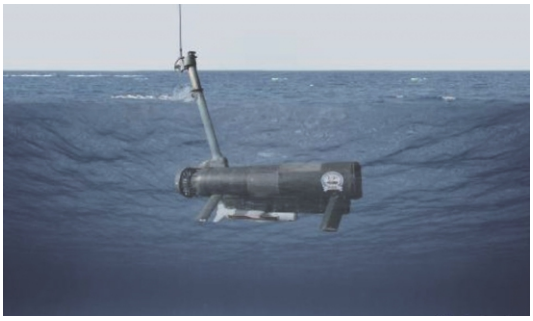

图7　美国AN/WLS-1型遥控猎雷作战艇

Fig. 7　American AN / WLS-1 remotely controlled mine hunting combat boat

这一阶段,无人艇更多地处在概念武器的试验和验证阶段,逐步具备了现代无人艇的基本技术特征,具有较高的自主航行能力,这与早期遥控式无人艇有本质区别。

4.3　快速发展阶段

快速发展阶段为21世纪初至今。随着计算机、信息、控制、导航、通信、新材料等相关技术的进步,无人艇技术得到了快速发展,其自主等级、性能显著提升,并向智能化方向发展[6-11]。下面从单无人艇及多无人艇两个角度,简要回顾国内外近年来的研究进展。

(1)单无人艇技术方面

美国、以色列等军事强国高度重视无人艇技术发展,持续大力投入,据统计在研、现役无人艇共约19型63艘(美国占总数的50%),在情报侦察、反水雷、反潜等领域发挥了重要作用,典型代表有Protector(保护者)、Spartan(斯巴达)、Sea Hunter(海上猎手)。

2003年,美军在葛底斯堡号巡洋舰上部署了第一艘斯巴达侦察兵号无人艇,在阿拉伯湾地区参与执行了"伊拉克自由行动"和"持久自由行动"等任务。2007年,美国海军发布《海军无人艇主计划》(如图8所示),为无人艇赋予了7项任务,同时还界定了无人艇的船型、尺寸和标准等要素,这标志着美国无人艇走上了正规发展阶段。

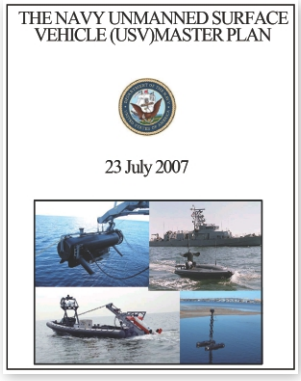

图8　2007年美国海军首次发布《海军无人艇总体计划》

Fig. 8　The U. S. Navy first released the *Navy Unmanned Master Plan* in 2007

2010年,美国预先研究计划局(DARPA)启动了海上猎手大型反潜无人艇研制项目(如图9所示)。海上猎手由美国DARPA与海军共同资助雷多斯工程公司研制,2010年3月正式启动,2015年11月交付,2016年4月命名下水,计划部署100艘。海上猎手号反潜持续跟踪无人艇是目前美国甚至全球最先进的无人水面装备,专门为对抗中国、俄罗斯的潜艇(尤其是安静型潜艇)而研制,达到以建造潜艇不到1/10的成本消除敌方潜艇威胁的目的,被美国军方誉为"预示美国机器人在作战领域取得的巨大进步,可以改变美国海上作战的性质"。

图9 美国DARPA的海上猎手号反潜持续跟踪无人艇

Fig. 9 Anti-submarine anti-submarine continuous tracking unmanned surface vehicle of US DARPA

2014年,哈尔滨工程大学在国家863项目支持下研制了天行Ⅰ号多任务高速无人艇(如图10所示)。该艇采用复合推进方式,艇长12m,满载排水量7.5t,最高航速50kn,续航力1000km,可以四级海况安全航行,具备自主航行、危险感知与规避功能,以及全自主海洋环境监测/侦察、地形探测等多任务能力[11]。

图10 哈尔滨工程大学的天行Ⅰ号多任务高速无人艇

Fig. 10 TianXing Ⅰ multi-task high-speed unmanned surface vehicle of Harbin Engineering University

2018年,珠海云洲智能有限公司展示了瞭望者Ⅱ号察打一体导弹无人艇(如图11所示)。在艇艏位置配备四联装导弹装置,采用图像制导方式,火力覆盖范围为5km,同时还搭载了先进的光电系统和雷达系统。据报道这是中国第一艘导弹无人艇,也是全球第二个成功发射导弹的无人艇,填补了国内导弹无人艇这一技术空白。

(2)多无人艇技术方面

2014年,美国海军研究局(Office Naval Research,ONR)使用13艘无人艇进行了蜂群战术测试(如图12所示),在测试中,所有无人艇成功实现将各自获得的数据进行共享并遵循一致作战协议,集群拦截了潜在敌方舰船。但在测试中一旦无人艇蜂群形成基体认知,每艘无人艇将各自执行蜂拥行动而缺乏计划性,即所有无人艇会涌向第一个威胁,而忽略其他危机。

图11 珠海云洲公司的瞭望者Ⅱ号察打一体无人艇

Fig. 11 Zhuhai Yunzhou Company's Watcher II Observation and combat integrated unmanned surface vehicle

图12 美国ONR首次测试多无人艇集群协同防护重要目标

Fig. 12 The US ONR test utilized multi-unmanned surface vehicles cluster for critical target protection

2016年,美国ONR再次进行了无人艇蜂群技术演示验证(如图13所示)。测试中共使用4艘无人艇执行重要港口巡逻警戒任务。据报道新版本的软件系统在自主协同、行为引擎和自主目标识别方面取得了突破性进展,使得无人艇蜂群具有更丰富的作战行为模式和更高的自主水平。

图13 美国ONR第二次测试多无人艇集群协同港口警戒

Fig. 13 The US ONR test utilized multi-unmanned surface vehicles cluster for port alert

2017年,哈尔滨工程大学在山东海域完成了7艘同构无人艇的群体编队海上试验(如图14所示)。

并于2018、2019年多次完成了3艘异构无人艇的协同编队、水上目标围捕等外场演示试验。

图14　哈尔滨工程大学的7艘无人艇编队海上试验

Fig. 14　Sea trial of seven unmanned surface vehicles formation from Harbin Engineering University

2018年,在南海万山群岛海域,珠海云洲智能有限公司开展了一场迄今为止最大规模的无人艇多艇编队技术测试(如图15所示)。在复杂多变的实际海况中,由56艘同构无人艇组成的海上编队整齐划一地前行,成功完成了躲避岛礁、穿越人工设置的桥洞等任务,并能快速切换编队造型,完成无人艇编队的队形保持、队形变换等多项测试科目。

图15　珠海云洲公司的56艘无人艇编队海上试验

Fig. 15　Sea trial of 56 unmanned surface vehicles formation of Zhuhai Yunzhou Company

5　无人艇关键技术的发展趋势

无人艇技术研发和应用历史已逾80年,伴随着计算机技术、通讯技术、自动控制、信息技术、动力与能源技术、材料技术、人工智能等高新技术的日益发展,无人艇应用领域将不断拓展,呈现出综合化发展的良好态势。无人艇的发展目标已经由完成某些特定任务,向拥有智能决策、群体协同能力迈进[12-14]。

综合国内外无人艇技术研究现状及未来需求,无人艇关键技术发展将呈现四个主要趋势。

5.1　载体设计技术

(1)总体采用模块化设计和开放式体系结构,降低研发成本,兼具执行多种任务的能力。

模块化设计和开放式体系是分别设计系统的不同组件,将系统细分为较小的部分的方法,这些部分可以独立搭建,然后在不同的系统中用于执行多个功能。目前,各国开发的无人艇几乎都采用了模块化设计和开放式体系架构。可根据不同的作战任务进行不同的功能组合。整个设计是高度模块化的,可以根据所需任务、有效负载或环境条件来替换或修改每个模块。例如美军研发的斯巴达侦察兵号无人艇,技术成熟的模块囊括了监视和侦察、反舰作战、排除水雷、反潜、目标打击等模块,可在一个小时内利用“即插即用”型任务模块完成一艘基本版斯巴达侦察兵无人艇装配。模块化设计和开放式体系结构提高了无人艇研发进度和功能的多样性,同时有效降低了科研成本。

(2)任务驱动的高性能、新概念艇型设计层出不穷,无人艇的载体性能得到显著提升,并演变出更多新功能。

当前无人艇的载体构型,仍以滑行、排水、多体、水翼、半潜等五类艇型为主。但是随着军民领域对高性能的不断追求,对新需求、工作域的逐渐扩展,导致常规无人艇型,已较难满足或适应高性能、新任务对载体的苛刻需求。比如,研究可变结构、多航态的载体,提升隐蔽性或高海况生存能力;研制具备海陆两栖航行能力的复合型载体,以应对岛礁、濒海任务需要;探索具备水下、水面、空中跨域适应性的新型航行器,以适应隐蔽潜行、快速突防的需要;研究具备高海况甚至全海况安全航行、超长航时续航能力的大型/多体载体,以执行反潜、有人/无人协同作战等使命。总之,推动无人艇工作空间从单域向多域、跨域发展,工作时间从局部短期向广域长航时发展,环境耐受性从低海况向高海况发展,将是一个发展趋势。

(3)研发续航持久高效的动力系统,提高无人艇的活动半径和续航能力。

在实际应用中,无人艇主要执行环境监测、情报搜集、海域监视以及反水雷等任务,要求无人艇具有出色的续航能力。目前,已经有国家着力研究

长航时的无人艇。例如，美国开发的SD 1021号和海上猎手号无人艇，英国研发的C-Enduro号无人艇等利用多种动力提高续航能力。

根据目前技术，主要从能源技术方面提高无人艇续航能力，例如用高性能电池、高能比燃料和新型能源等增大动力系统提供的能量。此外，基于太阳能、风能和波浪能等海洋能捕获技术，开发海洋能驱动的新型无人艇，并成功获得了工程应用，在这方面民用领域的研究最为活跃。

5.2 先进材料技术

先进材料技术将有可能为无人艇提供更轻、更坚固、更隐身的基础平台。先进材料是指能够提供物理或功能方面高性能、新属性的材料。先进材料技术在无人艇上的应用体现在以下几个方面：

(1)电磁隐身。导电纳米棒分散于液晶超结构中的可调超材料结构体能够吸收和反射电磁能量，可以帮助无人艇获得期望的隐身效果。

(2)艇型优化。一种名为纳米工程电活化表面的材料有可能实现船壳的变形，在作战时艇体的形变将改变艇体的空气动力、水动力和声传播(吸收)效率等。

(3)电子设备小型化。分子电子材料技术的应用不仅可以提高设备的可靠性和降低成本，而且可以减轻重量并减少耗电量。设备小型化带来最大的好处就是可以增加更多的负载，无人艇的多功能性更强、综合性能更佳[15-18]。

5.3 自主控制技术

鉴于无人平台特性，自主控制技术一直是非常重要的研究方向。目前较为成功的自动控制系统有以色列银色马林鱼号、黄貂鱼号无人艇搭载的自动舵手系统，这是一套具有高度自适应性和决策能力的智能决策专家系统，能够根据所处任务环境和执行任务的种类自主完成无人艇的控制。

(1)高新技术驱动自主等级不断提升，环境适应性更强、支持任务更复杂。

随着博弈论、智能决策、控制论、机器学习、群智优化等先进技术及新方法的不断涌现，并与无人艇进行有效融合，将逐渐突破高级任务决策、快速路径规划、自主多动态危险规避、敏捷运动控制等核心算法，推动无人艇的自主等级不断提升。

目前美国开发了一套成熟的海上自主导航系统，主要融合了人工智能、三维数字成像和传感器融合技术，显著提高了无人艇单独执行任务或与其它平台协同作业时的自主能力。可以预见人工智能技术、先进计算机技术和新型信息处理技术的融合应用，将会是未来无人艇自主控制技术发展的一个趋势。

(2)面向实战注重多平台、跨平台组网，提高协同化作战能力。

考虑到未来战争将是海陆空天多维一体作战的模式，无人艇与其它有人或无人平台协同作战是未来发展的一个重要趋势。从技术角度讲，如果采用相同的标准和开放式体系架构设计，无人艇就可以同其它有人/无人平台共享信息、载荷，从而与作战网络中的其他平台无缝连接，使得这些平台能够在网络的支持下集成一个整体，实施多维、一体化作战。目前，美、以、俄、英和中国均在积极开展相关研究与实践。

5.4 环境感知技术

无人艇的环境感知技术主要包括光视觉、雷达、红外以及水声等感知手段。环境感知技术是实现无人艇自主航行、自主作业的基础，也是无人艇具备智能特征的关键。

(1)多传感器信息融合处理，提供实时精确的环境感知信息。

环境感知领域的信息和判断可以作为无人艇控制和规划的依据，环境感知信息来源也不再局限于单个传感器的输入，将相机和雷达、水声及红外等其他传感器信息融合的技术也为无人艇环境感知技术开辟了新的道路，但当前仍存在许多研究难题，包括克服各个传感器的缺点，提供实时、准确的环境感知信息等，毫无疑问多传感器信息融合是未来无人艇环境感知的关键技术。未来无人艇的环境感知、决策控制和作业技术将更加深入融合。

(2)水面图像的增强复原研究，在复杂恶劣天气条件下获取失真度低的环境信息。

无人艇需要在雨、雾、雪、浪等恶劣天气下开展工作，这些工作环境使得水面图像模糊不清，图像的质量退化，一些关键信息存在丢失或损坏。需要建立一种满足恶劣天气环境的水面图像增强复原机制，根据外界环境自适应对图像进行复原，保留图像的关键信息，并满足水面图像目标信息获取的实时性要求。

(3)传统感知算法和深度学习感知算法的融合研究。

传统的感知算法具有理论性强、应用广和可靠性高的特点,深度学习的感知算法具有鲁棒性强、准确度高等特点。可以融合传统算法和深度学习算法,即克服传统算法鲁棒性低、准确度低和深度学习算法需要大量数据、人工标注等缺点,构建拥有两种算法优势的感知框架,提高无人艇的环境感知性能。

6　结束语

无人艇的最大特点是具有独立自主运行的能力,因此研究如何提高无人艇的智能水平非常重要。近年来,一些研究为提高无人艇的智能水平做出了积极贡献,包括任务决策、智能控制、非结构环境感知等,但仍有许多问题需要解决。其次,多学科交叉融合将极大促进无人艇技术的发展。有人/无人平台(无人机、无人艇、无人车及无人潜航器等)协同执行任务将是大势所趋,因此必须高度重视多平台协同技术研究和验证。

随着无人艇技术日趋完善、运维成本不断降低,可望在科考、测绘、运输、勘探、救援等任务场景获得大量应用。军用无人艇作为未来海战场的重要节点,大型化、智能化、功能及隐身化将是一个发展趋势,各种高性能、新型无人艇也将不断涌现。

参　考　文　献

[1] 曾文静. 基于光视觉的无人艇水面目标检测与跟踪研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.

[2] 廖煜雷. 无人艇的非线性运动控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

[3] 廖煜雷, 张铭钧, 董早鹏, 等. 无人艇运动控制方法的回顾与展望[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 206-216.

[4] Wang J H, Gu W, Zhu J X, et al. An unmanned surface vehicle for multi-mission applications [C]. The 15th Electronic Computer Technology Conference, Macau, China, February 20-22, 2009.

[5] 徐鹏. 无人艇动态障碍目标检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016.

[6] Pinto E, Santana P, Marques F, et al. On the design of a robotic system composed of an unmanned surface vehicle and a piggybacked VTOL[M]. Technological Innovation for Collective Awareness Systems, 2014.

[7] Mousazadeh H, Jafarbiglu H, Abdolmaleki H, et al. Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an Unmanned Surface Vehicle by algorithms fusion [J]. Ocean Engineering, 2018, 159(7): 56-65.

[8] Wang H, Wei Z. Stereovision based obstacle detection system for unmanned surface vehicle [C]. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Shenzhen, China, December 12-14, 2013.

[9] Pfeffer A, Curt W, Gerald F, et al. Software adaptation for an unmanned undersea vehicle[J]. IEEE Software, 2019, 36(2): 91-96.

[10] 王刚.《"十二五"国家战略性新兴产业发展规划》解读[J]. 物联网技术, 2012, 2(6): 12.

[11] 廖静. 水上机器人惊艳面世全球最快无人艇"天行一号"[J]. 海洋与渔业, 2018(8): 46-47.

[12] 马善伟, 刘赟. 无人艇发展现状及启示[C]. 中国海洋工程装备技术论坛论, 上海, 2015.

[13] Ko N Y, Jeong S, Choi H T, et al. Fusion of multiple sensor measurements for navigation of an unmanned marine surface vehicle [C]. The 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Gyeongju, South Korea, October 16-19, 2016.

[14] 朱炜, 张磊. 现代无人水面艇技术[J]. 造船技术, 2017(2): 1-6.

[15] 刘泽雨. 海洋强国背景下的海洋意识教育与培养[J]. 航海教育研究, 2018, 35(1): 91-95.

[16] 罗凤灵. 划设东海防空识别区强化我国防御空间[J]. 太平洋学报, 2013, 21(12): 3.

[17] 许彪, 张宇, 范鹏程. 美海军无人艇发展现状与趋势[J]. 飞航导弹, 2018(1): 12-16.

[18] 曹晓光. 无人的时尚-美国海军无人作战水面艇发展[J]. 兵器知识, 2010(2): 20-26.

[19] 曹娟, 王雪松. 国内外无人船发展现状及未来前景[J]. 中国船检, 2018(05): 94-97.

[20] 宋磊. 全球自主: 国外无人艇未来发展及关键技术[J]. 军事文摘, 2015(13): 26-28.

作者简介:

张　伟(1992-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无人艇技术。

廖煜雷(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋机器人技术。本文通信作者。

姜　峰(1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为人工智能。

赵铁军(1952-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为计算机应用。

[引用格式] 成昌巍，胡劲文，王策，等. 基于改进型人工势场的路径规划方法[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：10-16.

基于改进型人工势场的路径规划方法

成昌巍，胡劲文，王　策，赵春晖，潘　泉
（西北工业大学自动化学院，西安 710072）

摘　要：人工势场法作为机器人路径规划的一种经典算法，具有数学描述简单、运算快速等优点，但在使用人工势场法时，容易遇到局部极小值和目标点不可达问题。本文针对人工势场法局部极小值与目标点不可达问题，提出一种基于动态窗口法（DWA）的改进方法。当机器人遇到局部极小值或者目标点不可达问题后，选取机器人周围的路径点并对这些路径点进行评估，选取评估结果最好的路径点作为下一个路径点，重复以上步骤直至机器人逃离局部极小值或者到达目标点。在和传统人工势场法比较后的仿真结果表明，当机器人遇到局部极小值或者目标点不可达问题后，使用改进型人工势场法，可以有效地使机器人成功逃离局部极小值点并到达目标点。

关键词：路径规划；人工势场法；动态窗口法（DWA）；局部极小值；目标点不可达；自主避障
中图分类号：TP242　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-5915(2019)06-0595-07

Path Planning Method Based on Improved Artificial Potential Field

CHENG Changwei, HU Jinwen, WANG Ce, ZHAO Chunhui, PAN Quan
(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Artificial potential field method is a classic algorithm for robot path planning. It has several advantages such as simple mathematical description and fast computing. However, it suffers from local minimum problem and target unreachable problem. In this paper, an improved artificial potential field method based on Dynamic Window Approach (DWA) is proposed to solve the local minimum problem and the target unreachable problem. When the robot encounters the local minimum problem or the target unreachable problem, it selects the way points around the robot and evaluate their performance. Choose the way point with the best evaluation result as the next way point and repeat the above steps until the robot escapes from the local minimum or reaches the target point. After compared with traditional artificial potential field method, the simulation results show that when the robot encounters the local minimum problem or the target unreachable problem, the improved artificial potential field method can help the robot successfully escape from the local minimum or reach the target point effectively.

Key words: Path Planning; Artificial Potential Field Method; Dynamic Window Approach (DWA); Local Minimum; Target Unreachable; Autonomous Obstacle Avoidance

1　引　言

机器人的路径规划问题一直是机器人领域的一个研究热点，很多学者针对不同环境提出了不同的路径规划算法。这些算法可以被分为经典算法与启发式算法[1]。各个路径规划算法都有其优缺点，所以到目前为止没有一种可以适应所有环境的路径规划算法。

由 Hart 和 Nilsson 于 1968 年提出的 A*算法是路径规划问题中较为常用的一个方法[2]。A*算法计算

收稿日期：2019-10-01；　修回日期：2019-11-02
基金项目：国家自然科学基金(61603303，61803309，61703343)；陕西自然科学基金(2018JQ6070)；中国博士后科学基金(2018M633574)；中央高校基础研究经费(3102019ZDHKY02，3102018JCC003)

量小、可以得到较优的路径,广泛地应用于游戏、无人机与移动机器人领域[3]。由 LaValle 于 1998 年提出的RRT算法[4-5],可以根据环境中已知信息快速地探索环境,是一种概率完备算法。但是该方法采用随机撒点的方式探索环境,所需时间较长、规划出的路径不是最优,且相同环境下规划出的路径还可能不相同。Fox 提出的动态窗口法[6-7](DWA),不同于其它路径规划算法,DWA 考虑了机器人的动力学特性与运动学特性,根据这两个特性得到一系列速度离散值,然后用这些速度模拟接下来一段时间内机器人的轨迹,并采用评价函数评价这些轨迹,选取得分最高的轨迹对应的速度作为下一阶段的速度。DWA 数学模型简单,但容易陷入死区。其它常见的路径规划算法还有模拟退火法[8]、Q-learning[9-10]、模糊逻辑[11]、人工势场法[12]等。

人工势场法的基本原理是假定机器人在虚拟力场中运动,其中目标点产生引力场,障碍物产生斥力场,这与电荷在电场中的运动相类似。人工势场法得到了广泛地应用,因为它的数学表达式简单、运算快。但是该方法也有缺陷,比如局部极小值、目标点不可达问题。针对这些缺陷,国内外学者提出了很多解决方法。比如引入虚拟障碍物[13]、将人工势场法与模拟退火法结合[14]、修改力场函数[15-16]等。

本文提出了一种改进型人工势场法。在已知环境中障碍物位置的情况下,当机器人遇到局部极小值或者目标点不可达问题后,仿照 DWA 评估路径的方法,首先在机器人当前位置周围按照指定规则选择一系列点,然后对这一系列点进行前向延伸,经过多次延伸之后,会得到多条路径。然后采用评价函数对这一系列路径进行评价。选取评估结果最好的路径对应的路径点作为下一个路径点。重复以上步骤直至机器人逃离局部极小值或者到达目标点。

2　问题描述

2.1　传统人工势场法

在人工势场法中,假设机器人在虚拟力场中运动,虚拟力场由引力场与斥力场组成。同时将机器人视为一个点,因此在规划路径时不需要考虑机器人的大小。

引力场 $U_{att}(q)$ 由目标点产生,其计算式为:

$$U_{att}(q)=\frac{1}{2}k_{att}(q-q_g)^2 \tag{1}$$

其中 k_{att} 为引力增益系数,$q=(x,y)^{\mathrm{T}}$ 为机器人当前位置,$q_g=(x_g,y_g)^{\mathrm{T}}$ 为目标点位置。斥力场 $U_{rep}(q)$ 由障碍物产生,其计算式为:

$$U_{rep}(q)=\begin{cases}0, & \rho(q)\geqslant\rho_0\\ \dfrac{1}{2}k_{rep}\left(\dfrac{1}{\rho(q)}-\dfrac{1}{\rho_0}\right)^2, & \rho(q)<\rho_0\end{cases} \tag{2}$$

其中 k_{rep} 为斥力增益系数,$\rho(q)=\|q-q_{obs}\|$ 为机器人与障碍物的距离,$q_{obs}=(x_{obs},y_{obs})^{\mathrm{T}}$ 为障碍物位置,ρ_0 为障碍物的影响距离,当机器人与障碍物距离大于 ρ_0 时,则忽略障碍物对机器人的影响。

机器人所受的合力场 $U(q)$ 为引力场与斥力场的和,即 $U(q)=U_{att}(q)+U_{rep}(q)$。势场函数的负梯度定义为人工力,则计算引力场与斥力场的负梯度可以得到引力 $F_{att}(q)$ 与斥力 $F_{rep}(q)$,即

$$F_{att}(q)=-\nabla U_{att}(q)=-k_{att}(q-q_g) \tag{3}$$

$$F_{att}(q)=-\nabla U_{rep}(q)=\begin{cases}0, & \rho(q)\geqslant\rho_0\\ K_{rep}\left(\dfrac{1}{\rho(q)}-\dfrac{1}{\rho_0}\right)\left(\dfrac{1}{\rho^2(q)}\right)\dfrac{q-q_{obs}}{\|q-q_{obs}\|}, & \rho(q)<\rho_0\end{cases} \tag{4}$$

机器人所受合力 $F(q)$ 为引力 $F_{att}(q)$ 与斥力 $F_{rep}(q)$ 的和,即 $F(q)=F_{att}(q)+F_{rep}(q)$。由于在环境中可能有多个障碍物,因此所受斥力为多个斥力之和,即 $F_{rep}(q)=\sum_{i=1}^{n}F_{repi}(q)$,其中 n 为障碍物个数。机器人移动方向为所受合力方向,如图 1 所示。

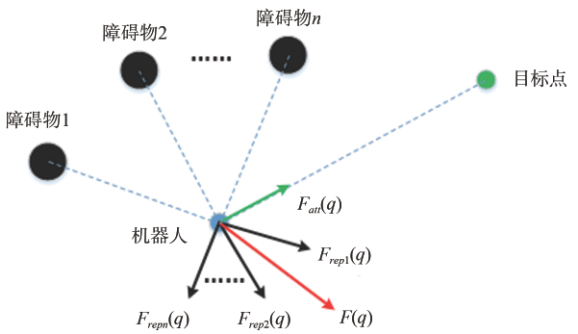

图 1　机器人受力分析

Fig. 1　Force analysis of robot

2.2　局部极小值与目标点不可达问题

人工势场法由于其数学表达式简单、运算速度快而得到广泛应用,但是其缺陷也是很明显的。人

工势场法主要缺陷为局部极小值问题与目标点不可达问题。当机器人所受合力为0或者机器人附近障碍物较多时，机器人容易陷入局部极小值。当目标点附近有障碍物时，可能导致机器人无法到达目标点。

其中局部极小值问题也是在使用人工势场法时最容易遇到的问题。机器人陷入局部极小值分为多种情况。

如图2所示，当机器人、障碍物和目标点位于同一条直线上时。若此时所受合力为0，则机器人停止运动；若合力不为0，则机器人容易陷入振荡。

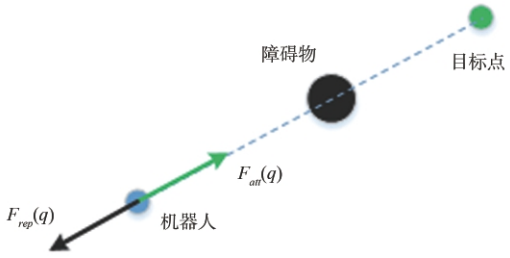

图2 局部极小值第一种情况

Fig. 2 First condition of local minimum

如图3所示当机器人附近有两个及以上障碍物时，在机器人附近容易形成势阱，此时容易陷入局部极小值。在势阱内部，机器人所受合力将会指向局部极小值点，而机器人此时可能不在局部极小值点，因此此时合力可能不为0。

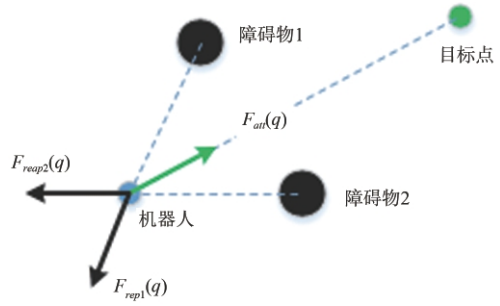

图3 局部极小值第二种情况

Fig. 3 Second condition of local minimum

除了局部极小值问题外，人工势场法还面临目标点不可达问题。如图4所示，当目标点周围有障碍物时，机器人在朝向目标点运动时，也在朝向障碍物运动。因为机器人离目标点越近引力越小，离障碍物越近斥力越大，所以在目标点周围机器人受到的引力较小，而受到的斥力较大。这种情况下易出现目标点不可达问题。

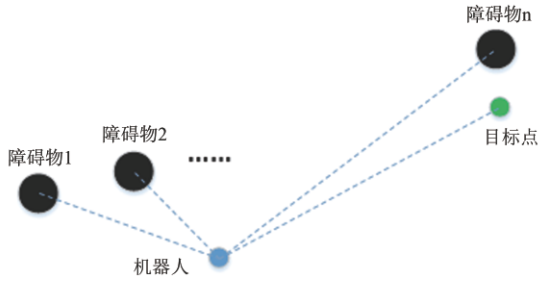

图4 目标点不可达问题

Fig. 4 Target unreachable

3 基于DWA的改进型人工势场法

3.1 引力场改进

在传统人工势场法中，引力大小与机器人到目标点的距离成正比。当机器人距离目标点较远时，引力会比较大。这就会导致引力在机器人所受合力中占比较大，可能会使机器人忽略障碍物产生的斥力而与障碍物相撞。因此我们使用一种改进型引力场与引力[2]：

$$U_{att}=\begin{cases}\frac{1}{2}k_{att}\rho_{goal}^{2}(q), & \left\|q-q_g\right\|\leqslant d_0\\ d_0k_{att}\rho_{goal}(q), & \left\|q-q_g\right\|>d_0\end{cases} \tag{5}$$

$$F_{att}=\begin{cases}-k_{att}(q-q_g), & \left\|q-q_g\right\|\leqslant d_0\\ -dk_{att}\dfrac{q-q_g}{\left\|q-q_g\right\|}, & \left\|q-q_g\right\|>d_0\end{cases} \tag{6}$$

其中d_0为目标点的影响距离。当机器人与目标点距离较近时，引力大小与机器人到目标点距离成正比；当机器人与目标点距离较远时，引力为常数。这样可以有效地解决机器人离目标点较远时引力较大的问题。

3.2 基于DWA的改进算法

DWA算法是一种经典的路径规划算法，主要思想是：首先根据机器人的动力学与运动学特性，确定机器人在下一阶段的线速度v与角速度ω范围。然后对v与ω进行离散采样，得到一系列速度(v,ω)，根据机器人运动学特性对这一系列速度进行模拟，进而得到一系列轨迹。最后采用评价函数对这些轨迹进行评价，选取评价得分最高的一组轨迹对应的速度(v,ω)作为下一时刻的速度。

受DWA算法的启发，当机器人遇到局部极小

值或者目标点不可达问题后,我们在机器人周围选取 m 个点,然后在这 m 个点的基础上,再继续选取点。重复以上步骤 n 次,我们可以得到 m^n 条轨迹。接着采用评价函数对这 m^n 条轨迹进行评价,选取得分最高的一条轨迹对应的点作为下一个路径点。重复以上步骤直至机器人逃离局部极小值点或者到达目标点。

如图 5 所示,蓝色点代表机器人,当机器人遇到局部极小值或者目标点不可达问题后,以机器人为圆心,以人工势场法的步长(*stepSize*)为半径,这样可以得到 1 个圆,我们称之为第 1 层圆。在第 1 层圆上均匀地取 m 个点(图 5 中的红色点)。然后以这 m 个点为圆心,以 *stepSize* 为半径,可以得到 m 个圆,称之为第 2 层圆。在第二层的每个圆上均匀地取 m 个点(图 5 中的黄色点),可以得到 m^2 个点……重复以上步骤 n 次,便可以在第 n 层圆上得到 m^n 个点。

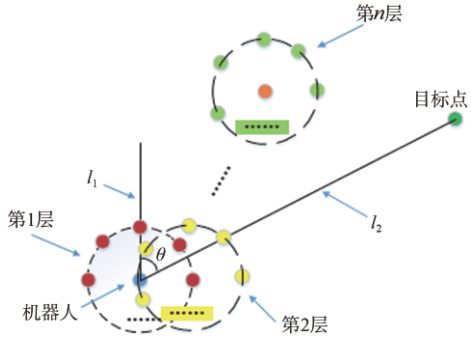

图 5　改进型人工势场法原理图

Fig. 5　Improved artificial potential field method

在得到第 1 层圆后,将机器人所在点与第 1 层圆上的 m 个点连接便可以得到 m 条路径。在得到第 2 层圆后,将第 1 层圆上的 m 个点与对应的第 2 层圆上的 m^2 个点相连,便可以得到 m^2 条路径,此时每一条路径由 2 条长度均为 *stepSize* 的线段组成。在得到第 n 层圆后,将第 $n-1$ 层圆上的 m^{n-1} 个点与对应的第 n 层圆上的 m^n 个点相连,便可以得到 m^n 条路径,此时每一条路径由 n 条长度均为 *stepSize* 的线段组成。即在得到 m^n 个点后,也即得到了 m^n 条路径。

最后采用评价函数对这 m^n 条路径进行评价,然后选取评价得分最高的一组路径对应的第 1 层圆上的点作为下一次的路径点,这样机器人下一次前进的距离依旧是一个 *stepSize*。评价函数的设置直接影响最终选取的路径点,因此设计一个合适的评价函数就显得至关重要。下面介绍本文采用的评价函数:

$$G(x,y)=G_1(x,y)+G_2(x,y) \tag{7}$$

$$G_1(x,y)=\left[\alpha\cdot heading(x_i,y_i)+\beta\cdot dist(x_i,y_i)\right] \tag{8}$$

$$G_2(x,y)=\gamma\cdot total(x,y) \tag{9}$$

其中每一条路径的总得分为 $G(x,y)$,它由两部分组成,即 $G_1(x,y)$ 与 $G_2(x,y)$,其中:

$$heading(x_i,y_i)=(180°-\theta)/180°$$

θ 为直线 l_1 与 l_2 的夹角,其中 l_1 由连接第 $i-1$ 层上的一个点与第 i 层上的一个点得到,l_2 由连接第 $i-1$ 层上的一个点与目标点得到。当 $i=1$ 时,此时 $i-1$ 层上的点即为机器人所在的点。若机器人朝目标驶去,该行为得分很高,而此时 θ 很小。在仿真环境下,由于 $(180-\theta)$ 的范围很大,而 $dist(x_i,y_i)$ 的范围很小,这就导致 $G_1(x,y)$ 主要由 $heading(x_i,y_i)$ 决定,所以我们设计 $heading(x_i,y_i)=(180°-\theta)/180°$。

$$dist(x_i,y_i)=dist(x_i,\ y_i)/d_1$$

$dist(x_i,y_i)$ 为第 i 层圆上的一个点与最近障碍物的距离。d_1 为我们设计的阈值,目的是将 $dist(x_i,y_i)$ 归一化。

$$total(x,y)=tot(x,y)/(n*stepSize)$$

$tot(x,y)$ 为第 n 层圆上的一个点距离机器人所在点的距离,距离机器人所在点距离越大,得分越高。$tot(x,y)$ 的最大值为 $n*stepSize$。经过以上归一化处理,所得 $heading(x_i,y_i)$、$dist(x_i,y_i)$、$total(x,y)$ 均属于 $[0,1]$。

α、β 与 γ 分别为 $heading(x_i,y_i)$、$dist(x_i,y_i)$ 与 $total(x,y)$ 的权重。在本文中,α、β 与 γ 的值均为固定值,不同的权重参数对应不同的计算结果。比如设置 $\alpha=0$,即表示不考虑路径点是否朝向目标点,这种情况下得到的路径点将会与障碍物保持一定的距离,但是却可能远离目标点。所以设置合理的 α、β 与 γ 就显得尤为重要。

设计 $G_1(x,y)$ 这一项,主要是优先考虑尽可能朝向目标点的路径,但同时机器人也需要与障碍物保持距离;设计 $G_2(x,y)$ 这一项,主要是优先考虑起始

点与第n层圆上的点距离较远的路径。但由于随着前向探索的次数增多，需要评价的路径呈指数增长，所以在实际的仿真实验中，尽可能选择较小的n值。

4 仿真实验

仿真环境为 MATLAB 2017a，机器人运动在10×10的环境中，机器人的起点与目标点均已知。环境中的障碍物位置也已知，障碍物是半径为0.5的圆。仿真实验分为两个环节：局部极小值问题、目标点不可达问题。有关局部极小值问题的评价指标为机器人在陷入局部极小值后，使用我们的改进型人工势场法后，机器人可以顺利逃离局部极小值点。有关目标点不可达问题的评价指标为目标点附件有障碍物时，使用我们的改进型人工势场法后，机器人可以成功到达目标点。

对于局部极小值问题，一共设置5组实验场景，其中三组为手动设置障碍物，另外两组采用随机数的方式设置障碍物，随机数由 MATLAB 的 unidrnd 函数生成，为离散均匀随机数。对于目标点不可达问题，设置2组实验场景，障碍物为手动设置。表1是实验参数设置。

表1 参数设置

Table 1 Parameter setting

参数名称	参数符号	参数值
引力增益系数	k_{att}	5
斥力增益系数	k_{rep}	15
障碍物影响距离	ρ_0	2
步长	*stepSize*	0.1
目标点影响距离	d_0	2
阈值	d_1	1
每个圆上取点数	m	36
前向模拟次数	n	3
权重	α	1
权重	β	2
权重	γ	2

4.1 局部极小值实验结果

在前三组实验中，手动设置障碍物得到三组不同的实验场景，如图6~8所示。在每幅图中，左边部分为传统人工势场法，右边是改进型人工势场法。在三组仿真实验中，起点位置分别为(0,0)、(0,0)和(9,0)，目标点位置分别为(6,6)、(9,9)和(1,9)。在改进型人工势场法中，在无人车陷入局部极小值后，采用改进型算法，规划出的路径为图中绿色路径，其他情况下使用传统人工势场法，规划出的路径为图中蓝色部分。在三组场景中，机器人均遇到了局部极小值，在使用了改进型人工势场法后，机器人均可以成功逃离局部极小值，这说明我们的改进型人工势场法可以有效解决传统人工势场法中面临的局部极小值问题。

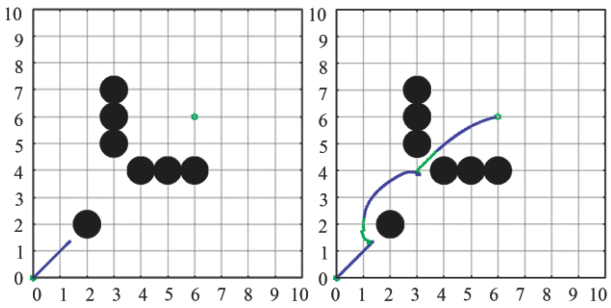

图6 场景一

Fig. 6 Condition 1

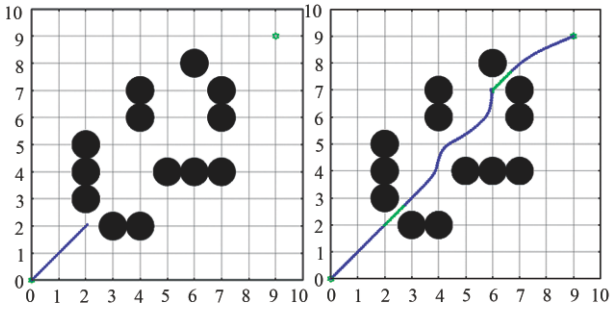

图7 场景二

Fig. 7 Condition 2

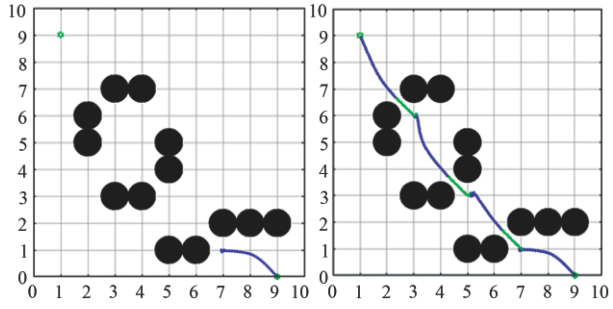

图8 场景三

Fig. 8 Condition 3

在以上三组实验的基础上，再增加两组随机试验，在已知起点与目标点位置的情况下，随机设置障碍物。在图9两组随机试验中，机器人经过由多

个障碍物构成的狭窄通道时,陷入了局部极小值,然后调用改进型算法,成功逃离局部极小值,说明改进型人工势场法适用较为复杂的静态未知环境。

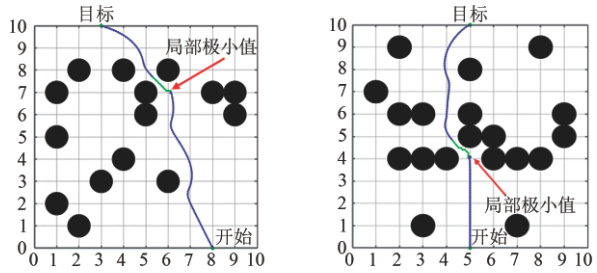

图 9　随机障碍物

Fig. 9　Random obstacle

4.2　目标点不可达实验结果

针对目标点不可达问题,设置两组不同实验场景。如图 10 与图 12 所示,目标点周围有几个障碍物,在使用传统人工势场法后,机器人无法到达目标点。在图 11 和图 13 中,机器人检测到目标点附近有障碍物后,启用改进型人工势场法,顺利到达了目标点,说明改进型人工势场法可以解决目标点不可达问题。

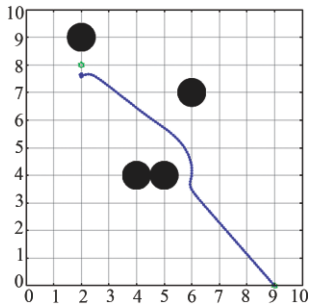

图 10　传统人工势场法

Fig. 10　Traditional artificial potential field method

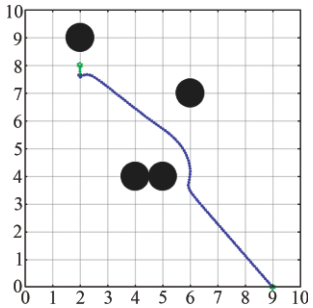

图 11　改进型人工势场法

Fig. 11　Improved artificial potential field method

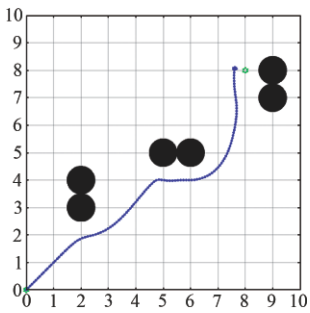

图 12　传统人工势场法

Fig. 12　Traditional artificial potential field method

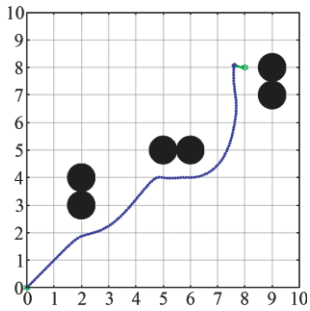

图 13　改进型人工势场法

Fig. 13　Improved artificial potential field method

5　结　论

在使用传统人工势场法时,容易遇到局部极小值和目标点不可达这两个问题。针对以上问题,本文提出了基于DWA的改进型人工势场法。仿真实验结果表明,我们的改进型人工势场法可以解决传统人工势场法面临的局部极小值和目标点不可达问题。在未来的工作中,本文将会加入动态障碍物规避以及在实际机器人上进行实验。

参　考　文　献

[1] Masehiam E, Sedighizadeh D. Classic and heuristic approaches in robot motion planning – A chronological review [J]. Word Academy of Science, Engineering and Technology, 2007, 29: 101-106.

[2] Duchon F, Babinec A, Kajan M, et al. Path planning with modified A star algorithm for a mobile robot [J]. Procedia Engineering, 2014: 59-69.

[3] 王中玉, 曾国辉, 黄勃, 等. 改进A*算法的机器人全局最优路径规划[M]. 计算机应用, 2019(9): 2517-2522.

[4] Kuffner J J, LaValle S M. RRT-connect: an efficient approach to single-query path planning [C]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2000: 995-1001.

[5] LaValle S M. Rapidly-exploring random trees: a new tool for

path planning [R]. Ames, USA: Iowa State University. Department of Computer Science, 1998.

[6] Fox D, Burgard W, Thrun S. The Dynamic Window Ap-proach to Collision Avoidance [C]. IEEE Robotics Automation Magazine, 1997: 23-33.

[7] Brock O, Khatib O. High-speed navigation using the global dynamic window approach [C]. Proceedings of the 1999 lEEE International Conference on Robotics & Automation, 1999: 341-346.

[8] Romeijn H E, Smith R L. Simulated anneaing for constrained global optimization [J]. Journal of Global Optimization, 1994: 101-124.

[9] Watkins C J, Dayan P. Q-learning [J]. Machine learning, 1992, 8(3): 279-292.

[10] Das P K, Mandhata S C. An improved Q-learning algorithm for path-planning of a mobile robot [J]. International Journal of Computer Applications, 2012, 51(9): 0975-8887.

[11] Li Q, Zhang C, Han C. Path planning based on fuzzy logic algorithm for mobile robots in static environment [C]. Proceedings of IEEE Conference on Control and Decision Conference, 2013: 2866-2871.

[12] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. Autonomous Robot Vehicles, 1986: 396-404.

[13] Park M G, Lee M C. Artificial potential field based path planning for mobile robots using a virtual obstacle concept [C]. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003: 735-740.

[14] Park M G, Jeon J H, Lee M C. Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field approach with simulated annealing [C]. International Conference of the International Society for Industrial Ecology, Pusan Korea, 2001: 1530-1535.

[15] Yan P, Yan Z, Zheng H X, et al. Real time robot path planning method based on improved artificial potential field method [C]. Proceedings of the 37th Chinese Control Conference, 2018: 4814-4820.

[16] Wang Q Z, Cheng J Y, Li X L. Path planning of robot based on improved artificial potentional field method [C]. Proceedings of the 2017 International Conference on Artificial Intelligence, Automation and Control Technologies, 2017.

作者简介：

成昌巍(1995-)，男，硕士研究生，主要研究方向为无人车的路径规划与控制。

胡劲文(1983-)，男，博士，副教授，主要研究方向为无人机编队、智能车、协同控制、网络控制、分布式滤波与控制、智能制造、大数据分析、传感器网络。本文通信作者。

王　策(1995-)，男，硕士研究生，主要研究方向为激光雷达与相机检测。

赵春晖(1973-)，男，博士，副教授，主要研究方向为无人机感知规避与视觉导航、图像处理、目标跟踪识别。

潘　泉(1961-)，男，博士，教授，主要研究方向为信息融合、目标跟踪与识别、深度网络与机器学习、无人机探测导航与安全控制、偏振光谱成像及图像处理、工业控制系统信息安全、商业密码应用与现代保密技术。

[引用格式] 李宏男，吴立珍，牛轶峰，等. 面向无人机小样本目标识别的元学习方法研究[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：17-22.

面向无人机小样本目标识别的元学习方法研究

李宏男，吴立珍，牛轶峰，王 菖
（国防科技大学智能科学学院，长沙 410073）

摘 要：深度学习在基于图像检测和识别的问题上取得了显著的成果，然而该方法通常需要大量标记的样本进行大规模的预先训练，因而难以解决样本量不足条件下的场景感知和认知问题。以无人机识别地面目标为背景，提出一种基于小样本训练的学习框架。首先将元学习与迁移学习相结合，通过预训练和元学习等步骤，有效减少了解决未知新任务所需的训练样本量和迭代次数。并在公共数据集（Omniglot）对该算法进行验证，得到了良好的识别结果。最后对无人机拍摄的图像数据集进行小规模样本的识别模型定义，在算法经过学习后能够输出较为准确的样本识别和分类，从而验证了该算法的有效性和先进性。

关键词：小样本学习；目标检测；图像识别；元学习；迁移学习；无人机目标识别
中图分类号：TP181 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-5915(2019)06-0602-06

Small-Sample Meta Learning Towards Object Recognition Through UAV Observations

LI Hongnan, WU Lizhen, NIU Yifeng, WANG Chang
(School of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Deep learning has achieved impressive results for image classification and object recognition. However, deep learning typically requires too many labeled data for model training which is not always applicable in the tasks that data collection is difficult or expensive. In this paper, the combination of meta learning and transfer learning, after pretraining and meta learning, effectively reduces the number of training samples and iterations needed to solve the unknown new task. The algorithm is validated in the published dataset (Omniglot), and good recognition results are obtained. Finally, a small scale of sample recognition model is defined for the image data set captured by UAV. Processed by this algorithm, it can output more accurate sample recognition and classification, thus verifying the effectiveness and advancement of the algorithm.

Key words: Few Shot Learning; Object Detection; Image Recognition; Meta Learning; Transfer Learning; UAV Image Shooting

1 引 言

近年来，深度学习理论不断发展并且在人工智能的多个领域取得了极大的进步，在图像识别、目标分割、医疗影像、游戏博弈、无人驾驶等多个领域得到了广泛的应用[1]，比如火车站自动检票、无人超市、人脸识别打卡、医疗辅助诊断等。然而深度学习的模型的训练需要依赖大量的样本来克服过拟合等问题。但是现实中有一些识别任务并没有大量的样本进行训练，比如逃犯抓捕过程中的人脸识别、军事目标的识别、比较罕见的疑难杂症的处理等。本文研究无人机对地面目标的小样本识别问题，其难点在于无人机对目标的观察视角变化较多，且无人机实飞图像数据较难获取。

受人类从少量样本抽象一般概念能力的启发，

收稿日期：2019-10-23； 修回日期：2019-11-02
基金项目：国家自然科学基金(61876187)

利用较少量样本实现目标识别的问题被称为“小样本学习”问题[2]。这种问题通常每一类目标只包含一个或几个样本，根据这些样本就能够识别出一类目标。以车辆目标为例，我们可以通过拍摄的一张车辆图片识别出一大类车辆的照片，如图1所示。

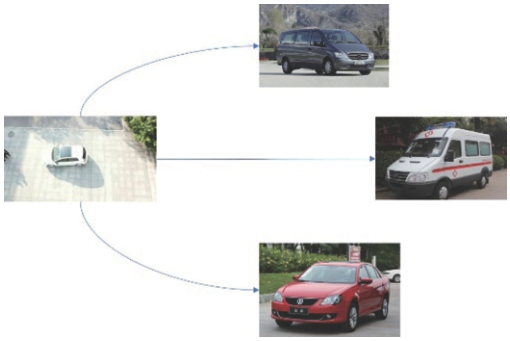

图1 小样本识别问题示意图

Fig. 1 Few shot learning

无人机对地目标的感知与理解一直以来都是无人机系统典型任务之一，得到了广泛的关注。本文主要面向无人机的自动感知问题，即利用机器视觉算法在数据层面对目标特征的捕捉能力进行感知，从而实现对地目标的检测和识别。经典的模式识别方法主要分为几个环节：特征描述、特征提取、特征分类、边缘检测、轮廓提取、轮廓匹配、图像分割等，在每一个环节都有很多成熟的方法。当前比较常见的处理策略是将这些成熟的算法相互结合，比如当前一种比较先进的行人检测方法就是HOG特征与SVM方法的结合[3]。

深度学习理论的提出为目标检测和识别提供了新的思路，当前较为先进的几种基于卷积神经网络和深度学习的算法比如RCNN[4]、Faster RCNN[5]、YOLO[6]、SSD[7]等算法在检测的准确率和速度上都取得了传统目标识别方法难以实现的进步，并且可以在一定程度上与人类相媲美。然而深度学习算法的一个特点是需要大量的数据，但是对于无人机应用的某些领域，比如一些罕见目标的识别、罪犯的追捕等，大量的数据是很难获取的，这使得基于传统的深度学习的目标识别方法的效果不尽理想。因此，本文主要针对无人机在小样本条件下的识别问题进行研究。

2006年李飞飞提出了小样本学习的概念[2]，引起了大家对于小样本学习领域的关注。之后越来越多的科研工作者加入了这一领域，为小样本识别问题提出了很多思路和实现方法。基于度量学习的思想，孪生网络(Siamese Neural Networks)[8]和匹配网络(Matching Networks)[9]先后被提出，该类方法通过学习图像空间到特征空间的映射，从而度量训练样本与测试样本之间的相似度，实现小样本物体的识别。同时，为了使模型在较少的迭代次数中得到比较好的训练效果，从而“学会学习”，人们提出了元学习[10]的思想，这一思想在小样本学习领域的经典应用为Model-Agnostic Meta-Learning(MAML)模型[11]。MAML通过前期对模型“元学习者”的训练使得模型保持一个比较好的初始参数，之后通过极少量的样本，能够很快地迭代到合适的参数范围。

迁移学习放宽了训练数据必须与测试数据独立分布的假设，从一定程度上解决了部分领域样本不足、标注困难等问题，这启发我们利用迁移学习来解决小样本识别的问题。根据这一思想，Liu等将迁移学习的思想与元学习理论相结合提出了Meta Transfer Learning(MTL)模型[12]，该模型首先训练出分类器模型，之后通过迁移学习的方式将学习到的信息应用到小样本识别模型中，在训练的速度和精确度方面都有了很大的提高。

MTL模型在miniImagenet数据集上取得了较好的表现，但是要将该方法应用于无人机领域仍旧存在着一些问题。考虑到无人机所能搭载的计算资源有限，而MTL模型的计算量很大，参数极多，本文对MTL模型进行简化，降低参数的数量，提高了运行效率，使得该模型可以应用于无人机领域。

本文改进了一种基于元学习和迁移学习的思想的无人机目标识别方法，通过对学习者和元学习者的训练使得模型在未知任务中仅利用较少量的样本便能够实现地面目标的识别。引入迁移学习的思想对模型进行预训练，提高了模型的训练效率。并且对模型的结构进行简化，减少了模型的训练参数和计算量，使其可以应用于无人机领域。

利用当前较为常用的小样本识别数据集Omniglot对本文的方法与当前较为先进的小样本识别方法进行比较，利用无人机实际飞行过程中采集到的图像对本文的模型进行评估，分析本文方法的优缺点。本文的模型只需要利用miniImageNet数据集进行训练，之后可直接应用于无人机实拍数据的识别任务中，具有良好的迁移性能。

2　基于元学习和迁移学习的小样本识别方法

人类之所以能够快速学习的关键是人类具备学会学习的能力,能够充分的利用以往的知识经验来指导新任务的学习。因此,本文采用基于元学习与迁移学习的小样本学习方法,大大提高了小样本目标识别的效率和正确率。本文模型的核心思想就是让人工智能自己学会思考,学会推理,从而具有学习的能力。通过在已知任务环境中对模型进行训练,使模型获得在不可见任务中的识别能力,同时借鉴迁移学习的思想,对模型进行预训练,提高模型的训练效率。整个模型主要分为预学习、元学习、测试几个部分,如图 2 所示。

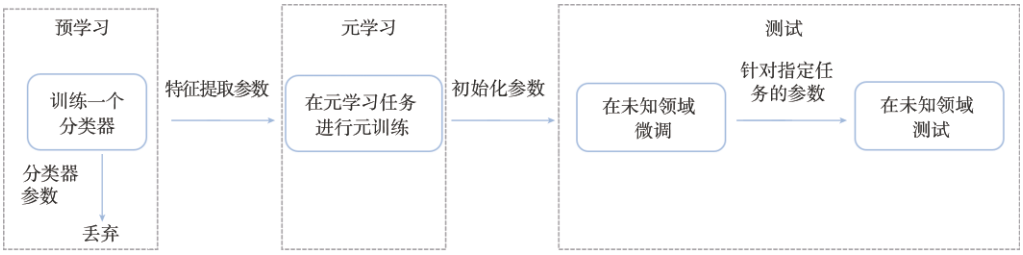

图2　基于元学习和迁移学习的样本识别方法

Fig. 2　Few shot learning method based on transfer learning and meta learning

2.1　预训练

大多数模型在开始训练时的参数都是随机初始化产生的,这使得模型需要同时训练大量的参数从而得到较好的结果。但是小样本识别模型中的很大一部分参数都属于特征提取部分,所以我们借鉴迁移学习的思想,加入预训练过程,通过预训练一个分类器模型得到模型特征提取部分的权重参数并将其固定,之后将这些参数应用到后续的元学习模型中,这样在训练时可以针对小样本识别方面进行参数学习,而不需要考虑特征提取部分的学习。

我们设计了一个由卷积层、池化层和全连接层的分类器模型,首先对模型参数进行初始化,特征提取部分的参数定义为Θ,表示卷积层的参数;分类器部分的参数定义为θ,表示全连接层的参数。之后利用训练集D内的所有数据对分类器模型进行训练,利用梯度下降法对参数进行优化,如式(1)所示:

$$[\Theta;\ \theta] = :[\Theta;\ \theta] - \alpha\nabla L_D\left([\Theta;\ \theta]\right) \tag{1}$$

其中α代表学习率,L代表误差,如式(2)所示:

$$L_D\left([\Theta;\ \theta]\right) = \frac{1}{|D|}\sum_{(x,y)\in D} l\left(f_{[\Theta;\ \theta]}(x), y\right) \tag{2}$$

经过优化,模型在这一部分学习到了特征提取参数Θ,这一参数将会被保存且固定,用于下一部分的元学习过程。而用于分类的参数θ则将会被舍弃。

2.2　元学习

利用上一阶段保存的特征提取层参数,设计一系列的小样本训练任务,对模型进行训练。在整个模型学习过程中,模型在元训练集中学习不同的任务,在该过程中存在两种优化[8]:学习新任务的学习者和训练学习者的元学习者。在每个训练回合中,会有一系列任务,学习者针对每一个任务进行迭代,元学习者利用这些任务中学习者的迭代梯度更新自己的梯度。通过优化,我们得到一组能够快速适应新任务的参数,在面对新任务时,这些参数只需要利用少量的样本进行较少次数的梯度迭代,就能具有良好的表现。同时考虑到目标存在着位置和尺度的变化,引入形状变化参数Φ_{S_1}和Φ_{S_2},将其加入到神经网络中,对卷积层的权重和偏置进行调整,调整过程如式(3)所示:

$$SS\left(X;\ W, b;\ \Phi_{S_{\{1,2\}}}\right) = \left(W\odot\Phi_{S_1}\right)X + \left(b + \Phi_{S_2}\right) \tag{3}$$

首先,我们随机采样一系列小样本学习任务,并对形状变化参数Φ_{S_1}和Φ_{S_2}进行初始化,同时重新初始化全连接层的参数θ,因为此部分的训练任务为小样本学习任务,所对应的类别数也与预训练部分不同。

对于每一个任务T_i,我们从训练数据集和测试数据集分别采样任务T^{train}和T^{test},利用T^{train}任务中的样本进行学习,并对参数θ'按照式(4)进行多次迭代。

$$\theta' \leftarrow \theta - \beta\nabla_\theta L_{T^{train}}\left([\Theta;\ \theta], \Phi_{S_{\{1,2\}}}\right) \tag{4}$$

其中θ'只是一个阶段性参数,它由上一个训练阶段的θ来初始化,当一个任务完成之后,θ、Φ_{S_1}和Φ_{S_2}将

会依据最后一次得到的θ'参数进行更新，如式(5)、(6)所示

$$\Phi_{S_i} =: \Phi_{S_i} - \gamma\nabla_{\Phi_{S_i}} L_{T^{test}}\left([\Theta;\ \theta'], \Phi_{S_{\{1,2\}}}\right) \quad (5)$$

$$\theta =: \theta - \gamma\nabla_{\theta} L_{T^{test}}\left([\Theta;\ \theta'], \Phi_{S_{\{1,2\}}}\right) \quad (6)$$

之后在T^{test}任务中对模型进行测试，检验该回合训练的效果。经过多个任务的更新后，得到比较好的小样本识别模型的初始化参数。

2.3 测试

模型的测试部分在验证集上采样一系列的小样本识别任务作为验证任务T^{val}，将元训练部分得到的参数作为模型的初始化参数，利用少量的样本作为训练样本对参数进行微调，只需要较少的迭代次数即可在测试样本中达到较好的识别效果。

3 实验结果及对比分析

模型的测试部分在验证集上采样一系列的小样本识别任务作为验证任务T^{val}，将元训练部分得到的参数作为模型的初始化参数，利用少量的样本对参数进行微调，只需要较少的迭代次数即可达到较好的识别效果。

为了验证算法的有效性，我们首先将算法在公共数据集(Omniglot数据集)上进行实验，并与经典的小样本识别算法进行比较，分析本文方法的优缺点。

同时为了更好地验证本文算法在无人机实际应用中的识别效果，我们利用无人机实际飞行过程中拍摄的照片作为样本，对本文模型进行测试和对比分析，从而为未来的实际飞行应用奠定基础。

3.1 公共数据集上的算法测试

为了更好地对本文算法与其他算法进行性能对比，我们选择小样本学习领域比较经典的Omniglot数据集进行实验。

Omniglot数据集[13]是一个由1623个手写字母组成的数据集，这些手写字母来自于50个字母表，每一个字母表包含的字母数不等。每一个字母只包含20个样本，由20个不同的人手写完成，是当前小样本识别领域比较具有代表性的数据集之一。本文选择160类作为元训练集，选择60类作为元测试集，选择80类作为验证集。

为了提高算法测试结果的准确性，我们采取多次实验取平均值的方法进行验证。测试过程中在验证集随机产生20000个分类任务，模型在每个任务中进行50次迭代，我们以5 ways 1 shot任务(5类任务，每类包含1个样本)和5 ways 5 shot任务(5类任务，每类包含5个样本)为例，选择20000次任务的平均正确率绘制迭代过程的平均正确率变化如图3和图4所示。

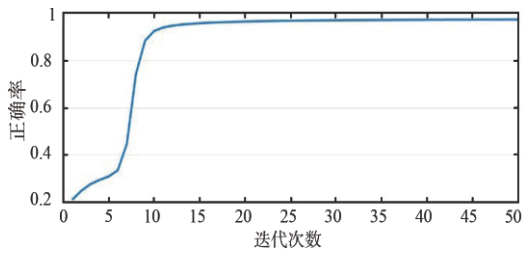

图3 单样本3分类正确率变化图

Fig. 3 Accuracy for 5 ways 1 shot

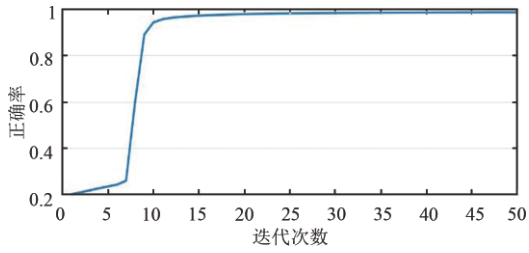

图4 单样本3分类正确率变化图

Fig. 4 Accuracy for 5 ways 5 shot

由图3和图4可以看出，本文模型只需要较小的数据量，经过数次迭代即可达到较高的正确率，逐渐接近于人类水平。

同时为了比较本文算法的性能，我们利用比较经典的孪生网络模型[8]进行对比实验，并选取最近邻方法的结果作为参考，测试结果如表1所示。

表1 Omniglot数据集测试结果

Table 1 Result in Omniglot

	5 way 1 shot	10 way 1 shot
最近邻方法	51.2%	35.4%
孪生网络模型	95.3%	88.0%
本文方法	97.6%	94.5%

由表1可以看出，我们的模型在面对未知任务时，只需要利用较少量的样本经过较少次数的迭代，即可达到较高的识别正确率，与经典的孪生网络模型相比较也有较大的优势，尤其是当分类数目比较多时，本文算法的优势更为明显，这是因为孪生网络模型是以度量学习为主要依据的算法，而当

分类数目较多时,很难学习出适应所有类别的度量映射,类别之间的分类也更加困难。本文算法能够学习一个具有较强泛化能力的模型,在样本数目变大时仍能具有良好的表现。

另外,为了对预训练步骤的效果进行评估,我们对MAML模型和本文改进后的模型在元学习过程中正确率的变化过程进行对比,以Omniglot数据集为例,在5 ways 5 shot条件下绘制正确率变化图像如图5和图6所示,其中MAML模型训练次数为60000次,本文模型训练15000次,为了保持坐标轴的一致性,只绘制MAML模型的前15000次迭代进行比较

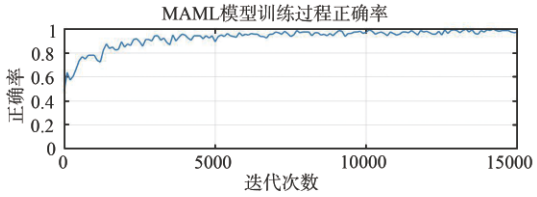

图5　MAML训练过程正确率变化

Fig. 5　Training accuracy for MAML

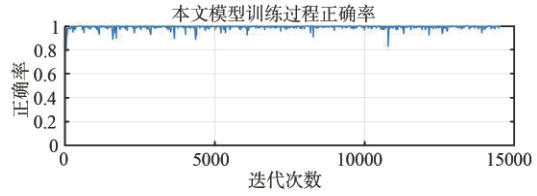

图6　本文模型训练过程正确率变化

Fig. 6　Training accuracy for our model

由图5和图6对比可以看出,MAML模型的初始正确率在0.5左右,而本文模型的初始正确率在0.8左右,所以与MAML模型相比,加入预训练环节的模型具有较高的初始正确率,这是由于预训练的过程学习到的特征提取参数能够帮助模型更快的适应于新的任务,说明预训练环节具有一定的效果,能够加快训练速度,节省训练时间。

3.2　无人机采集的图片数据集上的算法测试

为了验证本文算法的有效性,我们选取无人机实际拍摄的图像进行识别。由于真实场景中适用于分类的目标较少,所以我们制作了“飞机”、“舰艇”、“装甲车”三类模型,其中装甲车包括棕色和绿色。并且利用无人机在不同的高度和角度进行拍摄,拍摄的数据如图7所示。

为了更好地验证本文模型的泛化能力,我们利用miniImageNet数据集进行预训练和元学习,只在

(a)飞机　(b)舰艇　(c)装甲车

图7　无人机采集的模型图片

Fig. 7　Pictures taken by drones

测试环节使用我们采集的真实样本,实验分为3 ways 1 shot和3 ways 5 shot两种,即每次测试任务每一类样本都只有1张或者5张无人机真实采集的图像作为已知样本,其余的训练过程的样本均来自于公开的miniImageNet数据集。测试共进行20000次,每次迭代50次,同时我们仍旧选择最近邻方法作为参考,最终的正确率如表2所示。

表2　无人机采集的样本中的分类正确率

Table.2　Accuracy using pictures taken by drones

	单样本3分类正确率	5样本3分类正确率
我们的模型	68.3%	76.0%
最近邻方法	33.2%	

同时绘制测试过程中的正确率曲线变化如图8和图9所示。

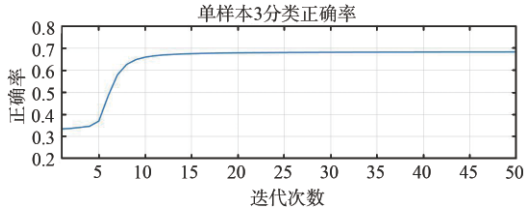

图8　单样本3分类正确率变化图

Fig. 8　Accuracy for 3 ways 1 shot

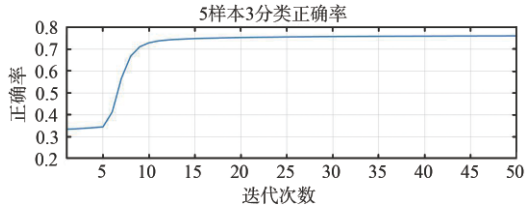

图9　5样本3分类正确率变化图

Fig. 9　Accuracy for 3 ways 5 shot

由表2和图8、图9可以看出,本文的模型具有良好的迁移学习能力和泛化能力,在训练过程可以借助公开数据集进行训练,只需要在测试过程中每

类给与一个或几个样本，即可得到较好的分类效果。

4 结 论

本文针对无人机的小样本识别问题提出了一种基于元学习和迁移学习的解决方案。该方法先通过训练一个分类器模型得到一个特征提取器，之后又利用元学习的思想在一系列任务中训练“学习者”和“元学习者”，从而得到一组泛化性能比较好的模型参数，在面对未知问题时，这些参数能够利用少量样本训练出识别模型。

之后在小样本识别领域较为常用的公开数据集上进行测试，并与当前较为典型的小样本识别算法进行比较，从而验证本文算法的效果。为了验证本文算法在无人机实际飞行过程中的效果，我们利用无人机实际飞行过程中采集到的飞机、舰艇、装甲车图片作为测试集，对本文算法进行测试和分析，为该算法在无人机上的实际应用奠定基础。

总体来说，本文算法在实验中取得了较好的效果。在公开数据集中，我们的算法只需要几个样本，经过较少次数的迭代即可达到较高的识别正确率。而在真实的应用场景中，我们使用miniImageNet数据集训练得到的模型可以直接用于无人机采集的实际数据识别任务，说明本文的模型具有一定的泛化能力。未来我们将对算法进行进一步的改进，利用贝叶斯理论对模型的梯度迭代过程进行修正，同时也将对模型的特征提取网络进行进一步的分析和优化。

参 考 文 献

[1] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep Learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.

[2] Fei-Fei L, Fergus R, Perona P. One-shot learning of object categories[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(4): 594-611.

[3] Benenson R, Mathias M, Timofte R, et al. Pedestrian detection at 100 frames per second[C]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012.

[4] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]. : 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Columbus, OH, USA, 2014.

[5] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2017, 39(6): 1137-1149.

[6] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once unified, real-time object detection[C]. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016.

[7] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector[M]. Computer Vision - ECCV, vol 9905. Springer, 2016.

[8] Koch G, Zemel R, Salakhutdinov R. Siamese neural networks for one-shot image recognition[C]. 2015 International Conference on Machine Learning Deep Learning workshop, Lille, France, 2015.

[9] Vinyals O, Blundell C, Lillicrap T, et al. Matching Networks for One Shot Learning[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2016: 3630-3638.

[10] Vanschoren J. Meta-Learning: A Survey[J]. arXiv: 1810.03548, 2018.

[11] Finn C, Abbeel P, Levine S. Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks[C]. 2017 International Conference on Machine Learning Deep Learning workshop, Sydney, NSW, Australia, 2017.

[12] Sun Q, Liu Y, Chua T, et al. Meta-transfer learning for few-shot learning[C]. 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), SALT LAKE CITY, UTAH, 2018.

[13] Lake B M, Salakhutdinov R, Tenenbaum J B. Human-level concept learning through probabilistic problem induction[J]. Science, 2015, 6266(350): 1332-1338.

作者简介：

李宏男(1995-)，女，硕士研究生，主要研究方向为目标检测、小样本识别。

吴立珍(1982-)，男，博士，助理研究员，主要研究方向为环境感知、协同探测。 本文通信作者。

牛轶峰(1979-)，男，博士，副教授，主要研究方向为无人机系统自主控制、多机协同控制。

王 菖(1985-)，男，博士，讲师，主要研究方向为机器学习、人机智能融合。

[引用格式] 朱文强，杨卫莉，库硕，等. 基于SPEA2算法的UCAV多目标机动轨迹规划[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：23-33.

基于SPEA2算法的UCAV多目标机动轨迹规划

朱文强[1]，杨卫莉[2]，库 硕[1]，王 杰[1]
（1. 空军工程大学航空工程学院，西安，710038；2. 中国人民解放军93617部队，北京，101400）

摘 要： 由于无人战斗机（UCAV）具有无人员损失、结构简单、性价比高和可执行危险任务等特点，从而得到了广泛的关注和研究。针对自主空战中UCAV机动轨迹规划需要考虑轨迹的可跟踪特性与态势最优等要求，构建了UCAV多目标机动轨迹规划模型。针对特定的机动轨迹，在该轨迹上设置n个能够表征其特征的特征点；同时为了提高轨迹的可跟踪特性，针对轨迹的特性将其划分为m条轨迹片段，在每一条轨迹片段中对应恒定的控制量变化率。最后，采用SPEA2算法对模型进行求解，得到一组Pareto最优解集。针对“S”形战术机动进行仿真验证，仿真结果表明，构建的模型能够规划出满足多目标要求的机动轨迹。

关键词： 无人战斗机（UCAV）；轨迹规划；态势评估；多目标优化；Pareto最优；SPEA2算法
中图分类号： V279 **文献标识码：** A **文章编号：** 2096-5915(2019)06-0608-11

Multi-objective Maneuvering Trajectory Planning Based on SPEA2 Algorithm for UCAV

ZHU Wenqiang[1], YANG Weili[2], KU Shuo[1], WANG Jie[1]
(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. People's Liberation Army 93617 Unit, Beijing 101400, China)

Abstract: Due to the characteristics of no damage of personnel, simple structure, high cost performance and the ability to perform dangerous tasks, unmanned combat aerial vehicles (UCAV) has been widely concerned and studied. Aiming at the demand of traceability and optimal situation in maneuvering trajectory planning for UCAV in autonomous air combat, the multi-objective maneuvering trajectory planning model for UCAV was established. For the specific maneuvering trajectory, several feature points which characterized the trajectory were set on the trajectory while the trajectory was divided into several segments according to the feature of the trajectory and there was a constant rate of control on each trajectory segment. At last, the SPEA2 algorithm was used to solve the model and a set of Pareto optimal solution aggregate was gained. During the simulation, the S-shape maneuvering was analyzed. The simulation result showed that the model established could plan the maneuvering trajectory which could satisfy multi-objective demand.

Key words: Unmanned Combat Aerial Vehicles (UCAV); Trajectory Planning; Situation Assessment; Multi-Objective Optimization; Pareto-Optimal; SPEA2 Algorithm

1 引 言

无人战斗机(UCAV)经过战术决策与机动决策后，急需将决策的结果转换为飞行控制系统能够识别的轨迹指令，这一过程称为UCAV机动轨迹规划[1]。其目的是为UCAV规划出一条最优的机动轨迹，使得UCAV能够顺利执行决策出的结果。在规划过程中，既需要考虑UCAV飞行控制系统的控制性能，即轨迹的可跟踪性；同时也要考虑UCAV相对于敌机的态势在当前情况下最优。目前，针对各种飞行器(或UCAV)的轨迹规划问题已有不少相关文献。文献[2]综合考虑了UCAV的动态RCS特性与

收稿日期：2019-10-21； 修回日期：2019-11-03
基金项目：国家自然科学基金(No.61601505)

攻击时间最短的要求，采用可变低阶自适应伪谱法解得最优攻击轨迹。文献[3]针对高超声速滑翔飞行器轨迹优化问题，提出了轨迹分段优化策略，利用高斯伪谱法将连续多段最优控制问题转换为非线性规划问题进行求解。

传统的UCAV轨迹规划问题一般都是单目标问题，例如威胁代价最小、燃油消耗最小[4]、飞机操纵性最好[5]等。或者涉及到多个优化目标时，为了使问题简化，通过引入权重再求和，从而将多个性能指标函数结合成一个目标函数，将问题转化为单目标优化问题[6]。这种方法虽然使得问题简化了，但是权重因子的确定又增加了问题的复杂性，且无法评价权重因子的好坏[7]。本文提出的UCAV机动轨迹规划是一个多目标优化问题，且两个优化目标之间具有一定的冲突性，不存在某一个解能够同时使得两个目标的性能指标最优，因此只能求出一组均匀分布的Pareto最优解集[8]。针对上述多目标优化问题的特殊性，本文采用SPEA2多目标遗传算法进行求解。

2 UCAV机动轨迹规划模型

2.1 UCAV运动模型

2.1.1 UCAV运动方程

采用UCAV三自由度模型对UCAV的运动状态进行描述。现做出如下假设：(1)将UCAV视为质点，不考虑其形状；(2)忽略侧滑角；(3)忽略地球自转和曲率的影响，将地面坐标系作为惯性坐标系；(4)忽略气流与阵风的影响；(5)忽略高度与经纬度对重力加速度的影响。基于以上假设条件，可以建立如下UCAV在惯性坐标系下的运动模型[9]：

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= V\cos\gamma\sin\psi \\
\dot{y} &= V\cos\gamma\cos\psi \\
\dot{z} &= V\sin\gamma \\
\dot{V} &= \frac{\delta T_{\max}\cos\alpha - D}{m} - g\sin\gamma \\
\dot{\gamma} &= \frac{(\delta T_{\max}\sin\alpha + L)\cos\phi}{mV} - \frac{g\cos\gamma}{V} \\
\dot{\psi} &= \frac{(\delta T_{\max}\sin\alpha + L)\sin\phi}{mV\cos\gamma}
\end{aligned} \tag{1}$$

其中$x, y, z, V, \gamma, \phi, \psi, \alpha$分别表示UCAV在惯性坐标系中$x, y, z$轴的坐标、速度、航迹倾角、滚转角、偏航角和迎角，$\delta, T_{\max}, L, D$分别表示油门位置、发动机最大可用推力、UCAV受到的升力、空气阻力。选取$X = [x, y, z, V, \gamma, \psi]$作为状态量，$U = [\delta, \alpha, \phi]$作为控制量。

2.1.2 UCAV气动力模型

UCAV受到的气动力为升力和阻力，其具体模型如下：

$$\begin{aligned}
L &= \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L \\
D &= \frac{1}{2}\rho V^2 S C_D
\end{aligned} \tag{2}$$

其中ρ为空气密度，其具体值随着UCAV的高度变化，S为UCAV的参考横截面积，C_L, C_D分别为升力系数和阻力系数。具体可采用F-4涡喷发动机的相关气动数据进行拟合，拟合公式如下：

$$\begin{aligned}
\rho &= 1.225\exp(-z/9300) \\
C_L &= \sin\alpha(-0.0434 + 0.1369\alpha) \\
&\quad + \cos\alpha(0.131 + 3.0825\alpha) \\
C_D &= \cos\alpha(0.0434 - 0.1369\alpha) \\
&\quad + \sin\alpha(0.131 + 3.0825\alpha)
\end{aligned} \tag{3}$$

2.1.3 UCAV燃料消耗模型

由于在实际飞行过程中，UCAV的燃料不断消耗，故其质量会持续减小，通常使用以下模型来近似描述UCAV的质量变化情况：

$$\dot{m} = -cT \tag{4}$$

其中c为UCAV的燃料消耗系数，$c = 6.377551\times10^{-6}$，$T$为发动机实时推力。

2.1.4 UCAV发动机推力模型

由于实际发动机推力模型比较复杂，涉及到的参数众多，故在实际应用中常采用如下简化模型：

$$T = \delta T_{\max}(Ma, h) \tag{5}$$

其中的发动机最大可用推力$T_{\max}$可采用F-4涡喷发动机模型：

$$\begin{aligned}
T_{\max} &= ABC \\
A &= [\,1 \quad Ma \quad Ma^2 \quad Ma^3 \quad Ma^4\,] \\
B &= \begin{bmatrix}
30.21 & -0.668 & -6.877 & 1.951 & -0.1512 \\
-33.80 & 3.347 & 18.13 & -5.865 & 0.4757 \\
100.80 & -77.56 & 5.441 & 2.864 & -0.3355 \\
-78.99 & 101.40 & -30.28 & 3.236 & -0.1089 \\
18.74 & -31.60 & 12.04 & -1.785 & 0.09417
\end{bmatrix} \\
C &= [\,1 \quad h \quad h^2 \quad h^3 \quad h^4\,]^{\mathrm{T}}
\end{aligned} \tag{6}$$

其中Ma为UCAV马赫数，h为UCAV的高度z转换

为以10000英尺为单位后的高度,$T_{\max}$以1000磅为一个单位。

2.2　空战态势评估模型

本文以超视距空战为背景,超视距空战几何态势如图1所示。V,VT分别表示UCAV与目标机的速度,D表示UCAV与目标机的相对距离,φ表示目标机相对于UCAV的方位角,q表示目标机进入角,θ表示目标机航向角,其中q,θ互补。

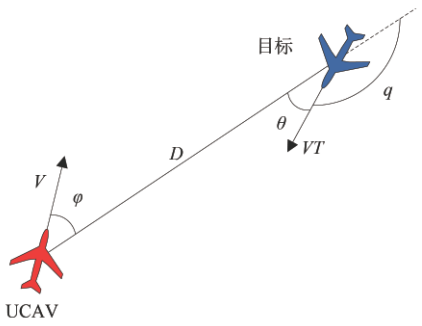

图1　空战几何态势图

Fig. 1　Geometric situation of air battle

由于超视距空战的最终目的是使得目标机进入我机的导弹攻击区内,并发射导弹,因此导弹攻击区对于空战态势的影响十分重要,除此之外,影响空战态势的因素还有方位角、进入角、速度、高度和距离[10]。针对这一特点,构建基于导弹攻击区的态势评估模型。

2.2.1　导弹攻击区拟合

导弹攻击区是由当前的敌我方位决定的,是在敌我连线上的一段距离,主要由近边界和远边界两个距离组成。由于导弹攻击区的实时解算计算量大且比较复杂,故在此选择一组某型三代中距空空导弹进行拟合:

(1)迎头攻击时

即当$60^\circ \leqslant q \leqslant 300^\circ$时,同时满足:$|\varphi| \leqslant \varphi_{\max} = 40^\circ$,$-0.293V < \dot{D} < 3V$,$z \leqslant 15\text{km}$且$V < 1.8Ma$时:

$$\begin{aligned} D_{\max} &= a_1 + a_2 z + a_3 V + a_4 \varphi + a_5 \dot{D} \\ &\quad + a_6 z V + a_7 z \dot{D} + a_8 z^2 + a_9 z^3 + a_{10} z^2 \dot{D} \\ D_{\min} &= b_1 + b_2 z + b_3 \dot{D} + b_4 z \dot{D} + b_5 \varphi \dot{D} \\ &\quad + b_6 \varphi^2 + b_7 z \varphi^2 + b_8 \varphi^2 \dot{D} \end{aligned} \tag{7}$$

其中$\dot{D}$表示UCAV与目标机距离变化率,$D_{\max}$,$D_{\min}$分别表示导弹攻击区的远边界和近边界。

(2)尾后攻击时

即当$-60^\circ < q < 60^\circ$时,同时满足:$|\varphi| \leqslant \varphi_{\max} = 40^\circ$,$-0.293V < \dot{D} < 1V$,$z \leqslant 20\text{km}$且$V < 2.2Ma$时:

$$\begin{aligned} D_{\max} &= a_1 + a_2 z + a_3 V + a_4 \varphi \\ &\quad + a_5 \dot{D} + a_6 z V + a_7 z^2 + a_8 z^3 \\ D_{\min} &= b_1 + b_2 z + b_3 \varphi + b_4 \dot{D} + b_5 z \dot{D} \\ &\quad + b_6 V \dot{D} + b_7 \varphi^2 + b_8 z \varphi^2 + b_9 \varphi^2 \dot{D} \end{aligned} \tag{8}$$

2.2.2　角度态势因子

在空战过程中,方位角和进入角对于空战态势的影响具有耦合关系,同时考虑到UCAV的机载雷达探测性能以及预警机和地面指挥所的信息支援,可采用如下角度隶属度函数:

$$S_A = \begin{cases} (1 - \dfrac{|\varphi|}{5\varphi_{mk\max}})^{\frac{3}{4}} (\exp(-\dfrac{90^\circ - |q|}{60^\circ}))^{\frac{1}{4}}, \\ \quad \text{if } 0 \leqslant |\varphi| < \varphi_{mk\max}, 0^\circ \leqslant |q| < 60^\circ \\ (1 - \dfrac{|\varphi|}{5\varphi_{mk\max}})^{\frac{3}{4}} (\exp(\dfrac{|q| - 180^\circ}{360^\circ}))^{\frac{1}{4}}, \\ \quad \text{if } 0 \leqslant |\varphi| < \varphi_{mk\max}, 60^\circ \leqslant |q| \leqslant 180^\circ \\ (0.8 - \dfrac{|\varphi| - \varphi_{mk\max}}{2(\varphi_{m\max} - \varphi_{mk\max})})^{\frac{2}{3}} (\exp(-\dfrac{90^\circ - |q|}{60^\circ}))^{\frac{1}{3}}, \\ \quad \text{if } \varphi_{mk\max} \leqslant |\varphi| < \varphi_{m\max}, 0^\circ \leqslant |q| < 60^\circ \\ (0.8 - \dfrac{|\varphi| - \varphi_{mk\max}}{2(\varphi_{m\max} - \varphi_{mk\max})})^{\frac{2}{3}} (\exp(\dfrac{|q| - 180^\circ}{360^\circ}))^{\frac{1}{3}}, \\ \quad \text{if } \varphi_{mk\max} \leqslant |\varphi| < \varphi_{m\max}, 60^\circ \leqslant |q| \leqslant 180^\circ \\ (0.3 - \dfrac{|\varphi| - \varphi_{m\max}}{10(\varphi_{R\max} - \varphi_{m\max})})^{\frac{1}{2}} (\exp(-\dfrac{90^\circ - |q|}{60^\circ}))^{\frac{1}{2}}, \\ \quad \text{if } \varphi_{m\max} \leqslant |\varphi| < \varphi_{R\max}, 0^\circ \leqslant |q| < 60^\circ \\ (0.3 - \dfrac{|\varphi| - \varphi_{m\max}}{10(\varphi_{R\max} - \varphi_{m\max})})^{\frac{1}{2}} (\exp(\dfrac{|q| - 180^\circ}{360^\circ}))^{\frac{1}{2}}, \\ \quad \text{if } \varphi_{m\max} \leqslant |\varphi| < \varphi_{R\max}, 60^\circ \leqslant |q| \leqslant 180^\circ \\ (0.1 - \dfrac{|\varphi| - \varphi_{R\max}}{10(180^\circ - \varphi_{R\max})})^{\frac{2}{5}} (\exp(-\dfrac{90^\circ - |q|}{60^\circ}))^{\frac{3}{5}}, \\ \quad \text{if } \varphi_{R\max} \leqslant |\varphi| \leqslant 180^\circ, 0^\circ \leqslant |q| < 60^\circ \\ (0.1 - \dfrac{|\varphi| - \varphi_{R\max}}{10(180^\circ - \varphi_{R\max})})^{\frac{2}{5}} (\exp(\dfrac{|q| - 180^\circ}{360^\circ}))^{\frac{3}{5}}, \\ \quad \text{if } \varphi_{R\max} \leqslant |\varphi| \leqslant 180^\circ, 60^\circ \leqslant |q| \leqslant 180^\circ \end{cases} \tag{9}$$

其中$\varphi_{mk\max}$表示不可逃逸区最大偏角，$\varphi_{m\max}$表示导弹可发射最大离轴角，$\varphi_{R\max}$表示机载雷达搜索区最大偏角。

2.2.3 速度态势因子

在空战中，速度优势对于空战态势的影响十分明显，对于同一型空空导弹而言，当载机具有更大的速度优势时，导弹相应的攻击区也更大。然而，当载机速度过大时，载机的机动能力也会相对变差。针对速度的这一特点，可以采用如下速度隶属度函数：

$$S_V=\begin{cases}\exp\left(-\dfrac{V-V_{\max}}{V_{\max}}\right), & \text{if } V_{\max}>1.5V_T \text{ and } V>V_{\max}\\ 1, & \text{if } V_{\max}>1.5V_T \text{ and } 1.5V_T<V\leqslant V_{\max}\\ \dfrac{V}{V_T}-0.5, & \text{if } V_{\max}>1.5V_T \text{ and } 0.6V_T<V\leqslant 1.5V_T\\ 0.1, & \text{if } V_{\max}>1.5V_T \text{ and } V\leqslant 0.6V_T\\ \exp\left(-\dfrac{V-V_{\max}}{V_{\max}}\right), & \text{if } V_{\max}\leqslant 1.5V_T \text{ and } V\geqslant V_{\max}\\ \dfrac{2}{5}\left(\dfrac{V}{V_{\max}}+\dfrac{V}{V_T}\right), & \text{if } V_{\max}\leqslant 1.5V_T \text{ and } 0.6V_T<V<V_{\max}\\ 0.1, & \text{if } V_{\max}\leqslant 1.5V_T \text{ and } V\leqslant 0.6V_T\end{cases} \tag{10}$$

上式中$V_{\max}$表示UCAV的最佳空战速度。

2.2.4 高度态势因子

超视距空战过程中，对同一型空空导弹而言，在其他条件相同的情况下，载机的高度越高，导弹具有的势能越大，导弹对目标机的攻击区越大，因此会具备更好的空战态势。但是，当载机与目标机的高度差过大时，会影响到导弹自身的性能，因此，不是高度差越大越好。采用如下高度隶属度函数：

$$S_z=\begin{cases}\exp\left(-\dfrac{z-z_{\max}}{z_{\max}}\right) & \text{if } z\geqslant z_{\max}\\ \exp\left(\dfrac{z-z_{\max}}{z_T}\right) & \text{if } z_T\leqslant z<z_{\max}\\ \dfrac{z}{z_T}-0.5 & \text{if } z<z_T\end{cases} \tag{11}$$

上式中$z_{\max}$，z_T分别表示UCAV最佳空战高度和目标机当前高度。

2.2.5 距离态势因子

考虑机载雷达探测距离以及导弹攻击区对于空战态势的影响后，可采用如下距离隶属度函数：

$$S_D=\begin{cases}0.18\exp\left(-\dfrac{D-D_{R\max}}{D_{R\max}}\right) & \text{if } D\geqslant D_{R\max}\\ 0.5\exp\left(\dfrac{D-D_{M\max}}{D_{R\max}-D_{M\max}}\right) & \text{if } D_{M\max}\leqslant D<D_{R\max}\\ 2^{-\frac{D-D_{MK\max}}{D_{M\max}-D_{MK\max}}} & \text{if } D_{MK\max}\leqslant D<D_{M\max}\\ 1 & \text{if } D_{MK\min}\leqslant D<D_{MK\max}\\ 2^{-\frac{D-D_{M\min}}{D_{MK\min}-D_{M\min}}} & \text{if } D_{M\min}\leqslant D<D_{MK\min}\end{cases} \tag{12}$$

上式中$D_{R\max}$，$D_{M\max}$，$D_{M\min}$，$D_{MK\max}$，$D_{MK\min}$分别表示UCAV机载雷达最大探测距离、导弹攻击区远边界、导弹攻击区近边界、导弹不可逃逸区远边界和导弹不可逃逸区近边界。

2.2.6 超视距空战态势评估模型

在实际空战中，由于距离与角度具有耦合关系：当UCAV与目标机距离较近时，角度优势对于态势的影响较大；当距离较远时，角度优势影响较小。针对这一特点，采用如下形式的态势评估模型：

$$S=C(\beta_1 S_A^{\alpha_1}S_D^{\alpha_2}+\beta_2 S_V+\beta_3 S_z) \tag{13}$$

上式中权重系数满足：$\alpha_1+\alpha_2=1$，$\beta_1+\beta_2+\beta_3=1$；$C$表示UCAV的空战能力[11]，决定UCAV空战能力的因素主要有：战机生存力、探测目标能力和战机火力和外部信息支援。

2.3 UCAV机动轨迹规划模型

考虑到机动轨迹的可跟踪性以及态势的最优，其中UCAV的态势最优即等价于目标机对于UCAV的威胁最小，故优化的目标即为：

$$\min\begin{cases}J_1=\omega\sum_{i=1}^{n}W_iP_i(X)+(1-\omega)\sum_{j=1}^{m-1}F_j+K\sum_{k=1}^{l}g_k\\ J_2=\int_{t_0}^{t_f}S_T\mathrm{d}t\end{cases}$$
$$s.t.\begin{cases}D(tf)<D_{M\max}\\ \left|\varphi(tf)\right|<\varphi_{m\max}\end{cases} \tag{14}$$

上式中J_1表示轨迹的跟踪特性，即规划的轨迹以及控制量的平滑度，J_1越小，则轨迹越平滑，跟踪特性越好。J_2表示目标机对于UCAV累积的威胁，J_2越小，则表示UCAV相对于目标机的态势越好。针对J_1的具体表达式进行分析，在一条机动轨迹上设置

n个能够表征其特征的特征点,同时针对该轨迹的特性将其划分为m条轨迹片段,设定在每一个轨迹片段内的控制量变化率是定值,即在各个轨迹片段内的控制量将均匀变化,这样将使得整条轨迹更加平滑,也将提升该轨迹的可跟踪性。上式中$P_i(X)$表示第i个特征点处的罚函数,用来约束轨迹的状态,W_i表示第i个特征点的权重,其中$P_i(X)$表达式如下:

$$P_i(X)=\sum_j w_{i,j}p_{i,j} \tag{15}$$

上式中的特征点对应j个参数需要被约束,其中$p_{i,j}$表示第i个特征点的第j个参数的罚函数,$w_{i,j}$表示第j个参数的罚函数对应的权重。

除了状态约束之外,为了减小飞控系统操纵的剧烈程度即增加轨迹的跟踪特性,还需要对相邻轨迹片段控制量变化率的差异进行约束。式(14)中的F_j表示第j个轨迹片段与第$j+1$个轨迹片段的控制量变化率之差所表征的罚函数:

$$F_j=\begin{cases}0 & \text{if } 0\leqslant\Delta f\leqslant\Delta f_1\\ \dfrac{\Delta f-\Delta f_1}{\Delta f_2-\Delta f_1} & \text{if } \Delta f_1<\Delta f<\Delta f_2\\ 1 & \text{if } \Delta f\geqslant\Delta f_2\end{cases} \tag{16}$$

上式中$\Delta f=\left|f_{j+1}-f_j\right|$,$f_j$表示第$j$个轨迹片段对应的控制量变化率。$\Delta f_1$表示理想变化率之差区间的上限,$\Delta f_2$表示可接受变化率之差区间的上限。

此外,为了防止之前的状态约束过于严苛,从而导致无解的情况发生,还应该约束各个状态不能超过临界值。在式(14)中共有l个状态需要被约束,K为一个较大的正值,g_k表示第k个参数对应的罚函数,其表达式如下形式:

$$g_k=\begin{cases}0 & \text{if } x_{\min}\leqslant x\leqslant x_{\max}\\ 1 & \text{if } x>x_{\max}\ or\ x<x_{\min}\end{cases} \tag{17}$$

上式中x表示状态,$x_{\min}$,$x_{\max}$表示x的临界最小值和最大值。

3　最优“S”形战术机动控制模型

本文选取“S”形战术机动进行建模与分析。“S”形战术机动一般用在超视距空战阶段,可用于摆脱目标机机载雷达稳定跟踪,从而隐蔽接敌;也可用于在被动态势下,破坏目标机导弹发射条件,从而寻找机会进行反击。对“S”形战术机动分析可知:“S”形战术机动的形成原因主要是UCAV进行有规律的滚转和偏航,如图2所示。

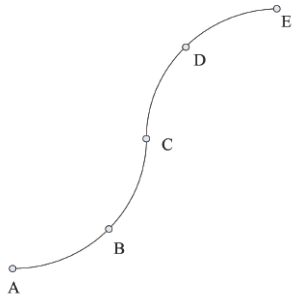

图2　“S”形战术机动示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the S-shape maneuver

在“S”形战术机动轨迹上设置5个特征点,相邻两个特征点之间的轨迹分为6个片段,总共划分成24个轨迹片段。在AB段,UCAV滚转角从0°开始不断减小,在B点减至最小,偏航角也从0°开始不断减小;在BC段,UCAV滚转角开始增加,在C点增加至0°,而偏航角由于滚转角为负而继续减小,在C点减至最小;在CD段,UCAV滚转角从0°开始增加,在D点增至最大,偏航角开始增加;在DE段,UCAV滚转角开始减小,在E点减小至0°,而偏航角由于滚转角为正而继续增加,在E点增至0°附近。为了表征5个特征点,现列出特征点的位置,如表1所示。

表1　“S”形战术机动特征点

Table 1　Feature points in the S-shape maneuver

特征点	特征量
A	$-10^\circ\leqslant\phi\leqslant-2^\circ$
B	$-60^\circ\leqslant\phi\leqslant-55^\circ$
C	$-3^\circ\leqslant\phi\leqslant3^\circ$
D	$55^\circ\leqslant\phi\leqslant60^\circ$
E	$2^\circ\leqslant\phi\leqslant10^\circ$

下面针对特征点处的约束进行具体分析,由于“S”形战术机动具有对称性,因此可选取点A,B,C进行分析,三个特征点处的状态罚函数如表2所示。

通过以上特征点状态罚函数的约束,可以表征“S”形战术机动的轨迹特性。除此之外,对于“S”形战术机动,还存在状态临界值约束,共有3组,其表达式如下:

表2 “S”形战术机动特征点标准状态及其罚函数

Table 2 Standard states and penalty functions of feature points in the S-shape maneuver

特征点	状态	标准状态	罚函数
A	ψ	$-8^\circ \leqslant \psi \leqslant -0.5^\circ$	$p_{1,1}=\begin{cases}0 & \text{if } -8^\circ \leqslant \psi \leqslant -0.5^\circ \\ \dfrac{\psi+0.5^\circ}{\psi_{\max 1}+0.5^\circ} & \text{if } -0.5^\circ < \psi \leqslant \psi_{\max 1} \\ \dfrac{-8^\circ-\psi}{-8^\circ-\psi_{\min 1}} & \text{if } \psi_{\min 1} \leqslant \psi < -8^\circ \\ 1 & \text{if } \psi > \psi_{\max 1} \text{ or } \psi < \psi_{\min 1}\end{cases}$
	γ	$-2^\circ \leqslant \gamma \leqslant 2^\circ$	$p_{1,2}=\begin{cases}0 & \text{if } -2^\circ \leqslant \gamma \leqslant 2^\circ \\ \dfrac{\gamma-2^\circ}{\gamma_{\max 1}-2^\circ} & \text{if } 2^\circ < \gamma \leqslant \gamma_{\max 1} \\ \dfrac{-2^\circ-\gamma}{-2^\circ-\gamma_{\min 1}} & \text{if } \gamma_{\min 1} \leqslant \gamma < -2^\circ \\ 1 & \text{if } \gamma > \gamma_{\max 1} \text{ or } \gamma < \gamma_{\min 1}\end{cases}$
B	ψ	$-42^\circ \leqslant \psi \leqslant -36^\circ$	$p_{2,1}=\begin{cases}0 & \text{if } -42^\circ \leqslant \psi \leqslant -36^\circ \\ \dfrac{\psi+36^\circ}{\psi_{\max 2}+36^\circ} & \text{if } -36^\circ < \psi \leqslant \psi_{\max 2} \\ \dfrac{-42^\circ-\psi}{-42^\circ-\psi_{\min 2}} & \text{if } \psi_{\min 2} \leqslant \psi < -42^\circ \\ 1 & \text{if } \psi > \psi_{\max 2} \text{ or } \psi < \psi_{\min 2}\end{cases}$
	γ	$-2^\circ \leqslant \gamma \leqslant 2^\circ$	$p_{2,2}=\begin{cases}0 & \text{if } -2^\circ \leqslant \gamma \leqslant 2^\circ \\ \dfrac{\gamma-2^\circ}{\gamma_{\max 2}-2^\circ} & \text{if } 2^\circ < \gamma \leqslant \gamma_{\max 2} \\ \dfrac{-2^\circ-\gamma}{-2^\circ-\gamma_{\min 2}} & \text{if } \gamma_{\min 2} \leqslant \gamma < -2^\circ \\ 1 & \text{if } \gamma > \gamma_{\max 2} \text{ or } \gamma < \gamma_{\min 2}\end{cases}$
C	ψ	$-88^\circ \leqslant \psi \leqslant -82^\circ$	$p_{3,1}=\begin{cases}0 & \text{if } -88^\circ \leqslant \psi \leqslant -82^\circ \\ \dfrac{\psi+82^\circ}{\psi_{\max 3}+82^\circ} & \text{if } -82^\circ < \psi \leqslant \psi_{\max 3} \\ \dfrac{-88^\circ-\psi}{-88^\circ-\psi_{\min 3}} & \text{if } \psi_{\min 3} \leqslant \psi < -88^\circ \\ 1 & \text{if } \psi > \psi_{\max 3} \text{ or } \psi < \psi_{\min 3}\end{cases}$
	γ	$-2^\circ \leqslant \gamma \leqslant 2^\circ$	$p_{3,2}=\begin{cases}0 & \text{if } -2^\circ \leqslant \gamma \leqslant 2^\circ \\ \dfrac{\gamma-2^\circ}{\gamma_{\max 3}-2^\circ} & \text{if } 2^\circ < \gamma \leqslant \gamma_{\max 3} \\ \dfrac{-2^\circ-\gamma}{-2^\circ-\gamma_{\min 3}} & \text{if } \gamma_{\min 3} \leqslant \gamma < -2^\circ \\ 1 & \text{if } \gamma > \gamma_{\max 3} \text{ or } \gamma < \gamma_{\min 3}\end{cases}$

$$g_1=\begin{cases}0 & \text{if } \alpha_{\min}\leqslant\alpha\leqslant\alpha_{\max}\\ 1 & \text{if } \alpha>\alpha_{\max}\ or\ \alpha<\alpha_{\min}\end{cases}$$
$$g_2=\begin{cases}0 & \text{if } \phi_{\min}\leqslant\phi\leqslant\phi_{\max}\\ 1 & \text{if } \phi>\phi_{\max}\ or\ \phi<\phi_{\min}\end{cases}\qquad(18)$$
$$g_3=\begin{cases}0 & \text{if } \psi_{\min}\leqslant\psi\leqslant\psi_{\max}\\ 1 & \text{if } \psi>\psi_{\max}\ or\ \psi<\psi_{\min}\end{cases}$$

4　SPEA2算法

4.1　Pareto最优解理论

对于多目标优化问题来说,多个优化的目标之间往往是冲突的,因此不存在某一个解能够同时使得多个目标达到最优,只能确定一组折中解,一般称为Pareto最优解集,人们只能依据具体的需求从Pareto最优解集中选取满足自己要求的解。从广义上理解的话,在搜索空间里没有比Pareto最优解集更好的解了。

Pareto最优解定义如下:假设求解最小值问题,$F(x)=[f_1(x),\cdots,f_m(x)]$为目标向量,$X$为问题的决策空间。若不存在任何$x\in X$,使得$f_i(x)\leqslant f_i(x^*)$,$\forall i\in\{1,2,\cdots,m\}$,并且不存在任何$x\in X$,使得$f_j(x)<f_j(x^*),\exists j\in\{1,2,\cdots,m\}$,则称$x^*$是多目标优化问题的一个Pareto最优解[12]。

Pareto支配关系定义如下:对于m个目标分量的最小化多目标向量$F(x)=[f_1(x),\cdots,f_m(x)]$,对于任意两个决策变量$x_1,x_2\in X$,当且仅当$i\in\{1,\cdots,m\}$时,有$f_i(x_1)<f_i(x_2)$,则称$x_1$支配$x_2$,记作$x_1>x_2$。在整个解空间$S$中都不被其他解支配的所有解的集合$P$称为Pareto最优解集。

Pareto前沿定义如下:由Pareto最优解集P中所有Pareto最优解所对应的目标函数向量组成的曲面称为Pareto前沿P_f。

4.2　SPEA2算法

SPEA2算法是Zitzler等在强度Pareto进化算法(Strengthen Pareto Evolutionary Algorithm, SPEA)的基础上提出的一种改进型算法[13]。算法主要步骤如下:

Step1:初始化进化种群P_t,设置外部种群P_t^*,将P_t^*初始化为空集;

Step2:计算P_t和P_t^*中的个体的适应度值;

Step3:环境选择:将P_t和P_t^*中所有的非支配个体存入外部种群P_{t+1}^*,如果P_{t+1}^*中的个体数量大于外部种群容量,则对这些非支配个体进行删减;如果P_{t+1}^*中的个体数量小于外部种群容量,则需要从进化种群选择其他支配个体存入P_{t+1}^*;

Step4:判断是否达到种群进化条件,如果达到则将P_{t+1}^*作为结果输出,算法结束;否则,进入下一步;

Step5:采用锦标赛选择方法从外部种群P_{t+1}^*中选择个体作为父代种群进入交配池;

Step6:对父代种群进行交叉、变异操作,产生新一代进化种群P_{t+1},令$t=t+1$,转入Step2。

SPEA2算法流程如图3所示。

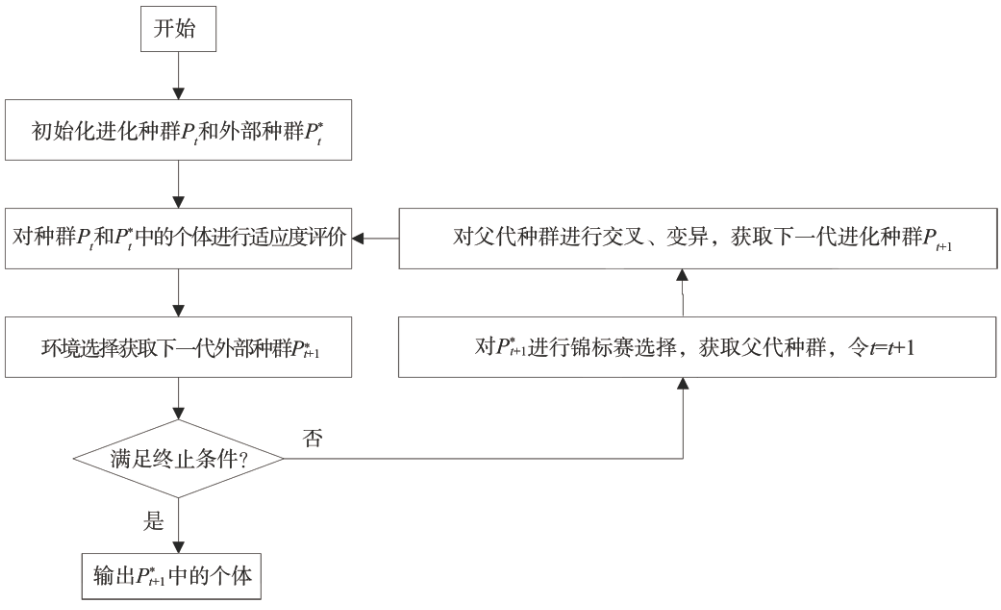

图3　SPEA2算法流程图

Fig. 3　Flow diagram of SPEA2 algorithm

相比于SPEA算法，SPEA2算法在种群个体评价机制和环境选择机制上做出了改进。为了避免出现被相同的外部种群个体支配的进化种群个体具有相同的适应度值，SPEA2算法在计算个体适应度值时，同时考虑了该个体的支配信息和被支配信息[14]。适应度函数定义如下：

$$\begin{cases} f(i) = R(i) + D(i) \\ R(i) = \sum\limits_{j \in P_t + P_t^*, i < j} S(j) \\ S(i) = \left| \{ j \mid j \in P_t \cup P_t^* \wedge j < i \} \right| \\ D(i) = \dfrac{1}{\sigma_i^k + 2} \end{cases} \tag{19}$$

上式中$S(i)$表示个体i所支配的个体数量。$R(i)$表示所有支配i的个体j在进化种群P_t和外部种群P_t^*中支配其他个体的数量和。通过$R(i)$对支配个体进行排序，而对于非支配个体，无法通过$R(i)$对其进行排序，因此，在SPEA2中增加了个体的密度信息$D(i)$，从而对非支配个体进行排序。式中σ_i^k表示个体i到第k个个体的欧式距离，其中$k = \sqrt{N + M}$，N为进化种群的容量，M为外部种群的容量。通过上式对适应度函数的定义，不仅能得到个体的支配信息与非支配信息，还能了解个体在种群中的分布情况。

除此之外，在环境选择机制上，SPEA2算法设置的外部种群的容量是不变的，当选出的非支配个体超过外部种群的容量时，需要对其进行删减，SPEA2算法采用基于密度的删减策略，其基本原理就是位于密集区域的非支配个体比位于稀疏区域的非支配个体会有更大的概率被删减[15]。通过这种删减策略，相比于SPEA算法，SPEA2算法能够获得分布较好的外部种群。

5 仿真结果

仿真验证以UCAV超视距隐蔽接敌为背景，选取迎角和滚转角作为机动轨迹规划模型的控制量，由于本次机动轨迹规划将“S”形战术机动划分成24条轨迹片段，因此最终求解的结果为一组迎角和滚转角变化率。针对“S”形战术机动设置的前三个特征点的标准状态约束，设置如下：

$[\psi_{\min 1}, \psi_{\max 1}] = [-10^\circ, 0^\circ]$，$[\gamma_{\min 1}, \gamma_{\max 1}] = [-4^\circ, 4^\circ]$，

$[\psi_{\min 2}, \psi_{\max 2}] = [-44^\circ, 34^\circ]$，$[\gamma_{\min 2}, \gamma_{\max 2}] = [-4^\circ, 4^\circ]$，

$[\psi_{\min 3}, \psi_{\max 3}] = [-90^\circ, 80^\circ]$，$[\gamma_{\min 3}, \gamma_{\max 3}] = [-4^\circ, 4^\circ]$。

针对“S”形战术机动设置的状态临界值约束如下：$[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] = [-5^\circ, 20^\circ]$，$[\phi_{\min}, \phi_{\max}] = [-65^\circ, 65^\circ]$，$[\psi_{\min}, \psi_{\max}] = [-90^\circ, 0^\circ]$。针对SPEA2算法，设定进化种群容量和外部种群容量为500，染色体长度为48，交叉概率为0.95，变异概率为0.02。经过SPEA2算法求解出的Pareto前沿P_f如图4所示。

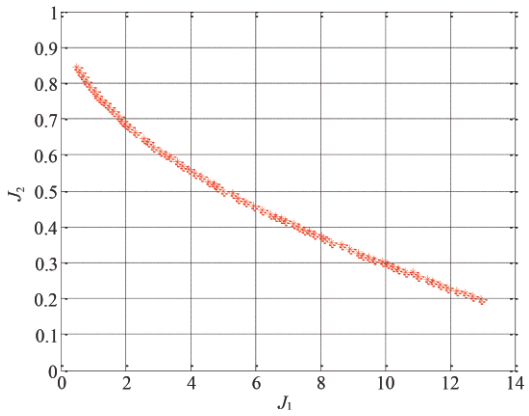

图4 Pareto前沿面

Fig. 4 Pareto optimal front

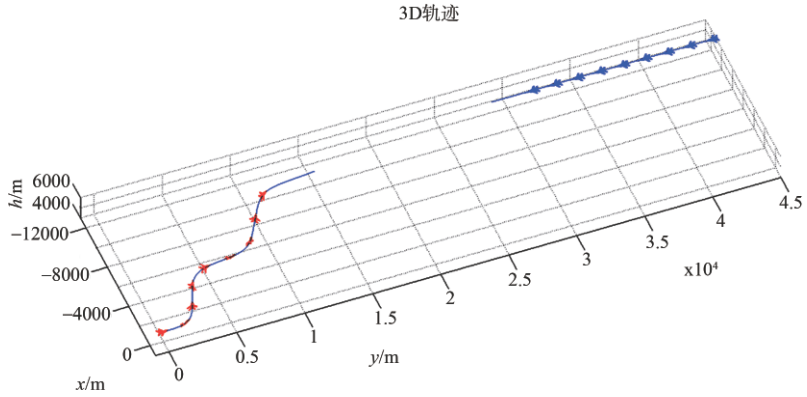

图5 UCAV超视距隐蔽接敌

Fig. 5 Stealthy approach to the enemy for UCAV beyond visual range

由图4可以看出,若需要J_1达到最小,即轨迹的跟踪特性最好,则目标机对于UCAV累积的威胁J_2则最大;而当J_1达到最大时,目标机对于UCAV累积的威胁J_2最小,即UCAV当前态势最好。现从Pareto最优解集中选取一点(2.125,0.6765),对其进行分析,其对应的轨迹及相关状态变量曲线如图5所示。

图5为UCAV执行"S"形战术机动以便摆脱目标机机载雷达的稳定跟踪,从而实现隐蔽接敌的轨迹示意图。期间UCAV的三个角度变化曲线如图6所示。

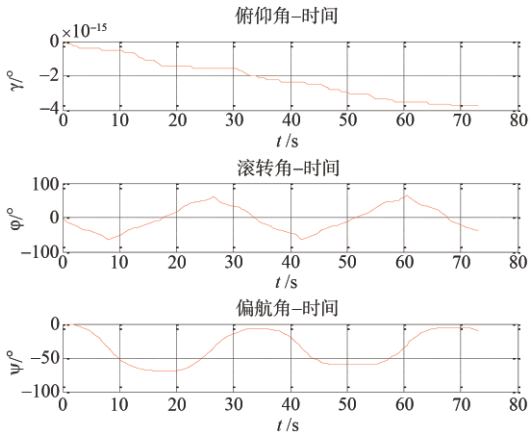

图6　UCAV航迹倾角、滚转角及偏航角曲线

Fig. 6　Curves of flight path angle, roll angle and yaw angle of UCAV

UCAV迎角变化曲线如图7所示。

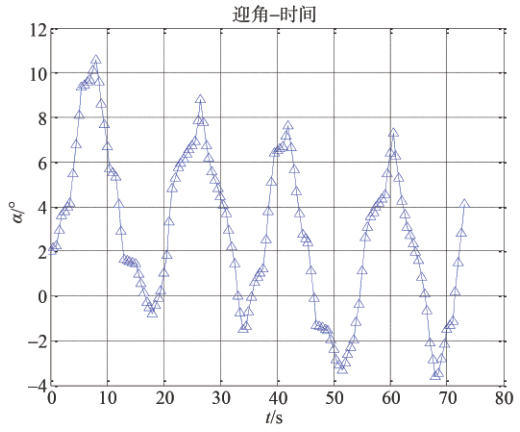

图7　UCAV迎角曲线

Fig. 7　Curve of angle of attack of UCAV

UCAV速度变化曲线如图8所示,UCAV所受升力、阻力及推力变化曲线如图9所示。

UCAV法向过载变化曲线如图10所示:UCAV机动轨迹规划的输入量:迎角变化率曲线如图11所示。

滚转角变化率曲线如图12所示。

UCAV与目标机机载空空导弹攻击区变化曲线如图13所示。

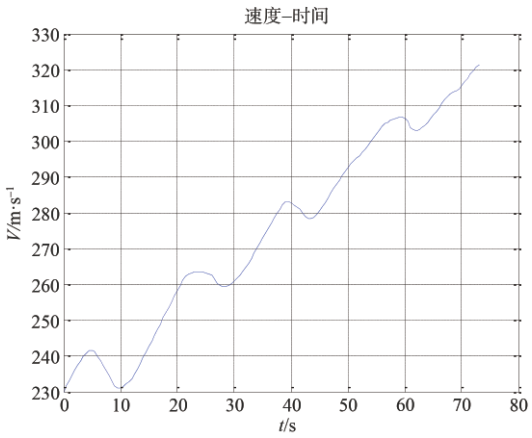

图8　UCAV速度曲线

Fig. 8　Curve of velocity of UCAV

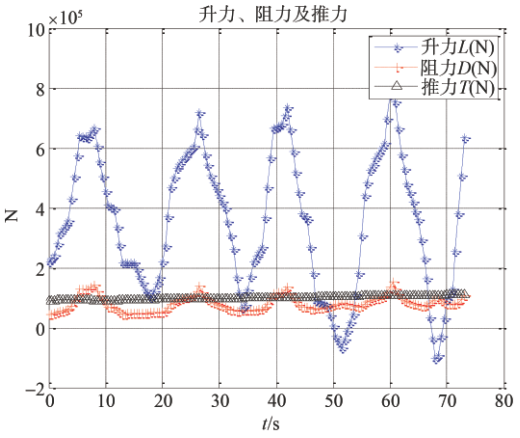

图9　UCAV所受升力、阻力及推力曲线

Fig. 9　Curves of lift force, air drag and thrust of UCAV

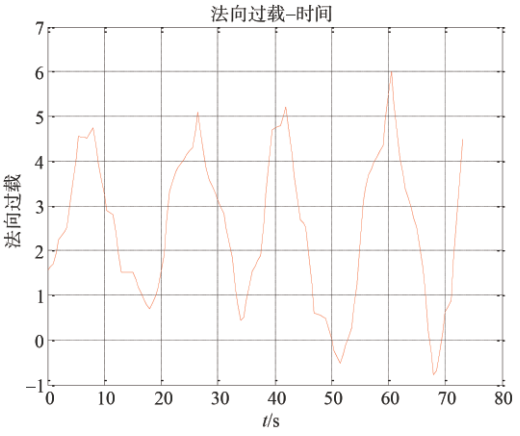

图10　UCAV法向过载曲线

Fig. 10　Curve of normal overload of UCAV

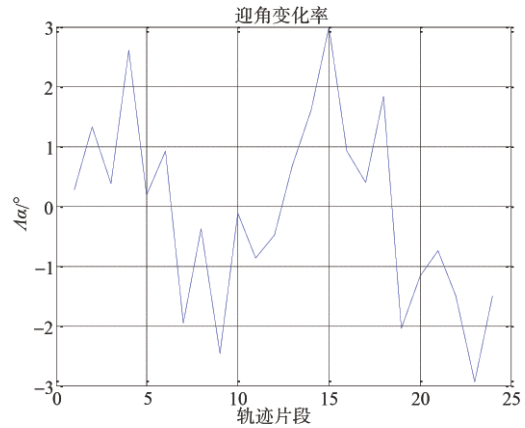

图 11 UCAV 迎角变化率曲线

Fig. 11 Curve of rate of angle of attack of UCAV

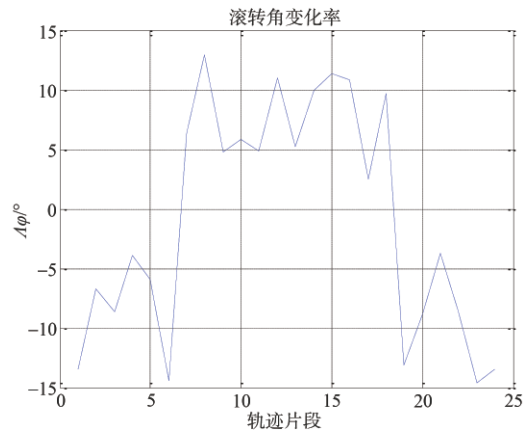

图 12 UCAV 滚转角变化率曲线

Fig. 12 Curve of rate of roll angle of UCAV

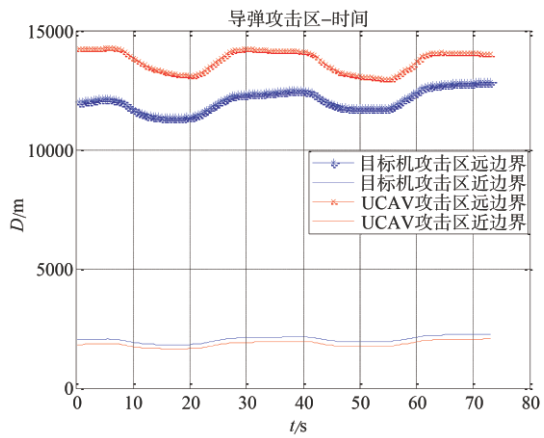

图 13 导弹攻击区变化曲线

Fig. 13 Curve of attacking area of air-to-air missile

空战态势因子变化曲线如图 14 所示。

图 14 中红色曲线表示 UCAV 的空战态势因子，蓝色曲线表示目标机的空战态势因子。空战累积态势变化情况如图 15 所示。

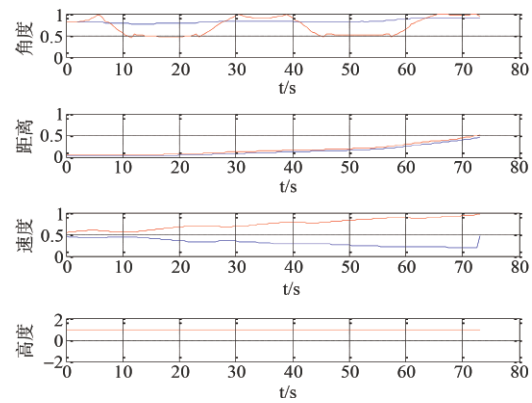

图 14 空战态势因子变化曲线

Fig. 14 Curve of situational factors of aerial warfare

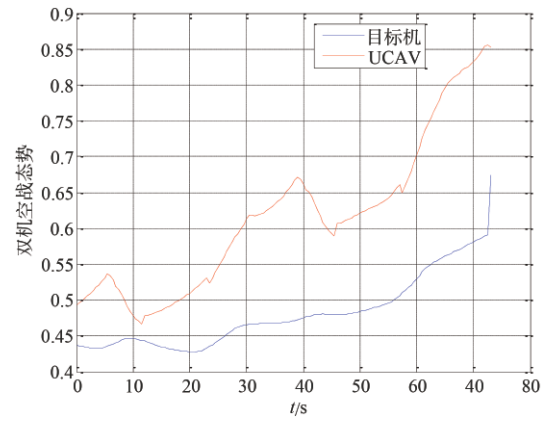

图 15 空战态势变化曲线

Fig. 15 Curve of situation of aerial warfare

通过图 15 可知 UCAV 通过“S”形战术机动摆脱目标机机载雷达的稳定跟踪，从而实现隐蔽接敌，使得 UCAV 的空战态势不断提升，最终抢先达到导弹发射条件。

6 结 论

本文在传统轨迹规划问题上，综合考虑了规划轨迹的跟踪特性与态势最优，将问题转化为多目标优化问题，利用 SPEA2 算法求解出问题的 Pareto 最优解集。在无法兼顾规划轨迹的跟踪特性与空战态势均为最优的情况下，求解出的 Pareto 最优解集包含了优化目标不同权重时的所有最优轨迹，可根据实际需要的不同进行选择。

参 考 文 献

[1] 唐传林. 无人作战飞机自主空战决策相关问题研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2016.

[2] 刘鹤鸣, 丁达理, 黄长强, 等. 基于自适应伪谱法的 UCAV 低

可探测攻击轨迹规划研究[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 78-84.
[3] 谢愈, 刘鲁华, 汤国建, 等. 多约束条件下高超声速滑翔飞行器轨迹优化[J]. 宇航学报, 2011, 32(12): 2499-2504.
[4] 赵克新, 黄长强, 王渊, 等. 基于混沌蚁狮算法的无人机航迹规划[J]. 飞行力学, 2018, 36(1): 93-96.
[5] 刘瑛, 李敏强, 张瑞峰. 复杂机动动作最优航迹控制模型及操纵特性分析[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(5): 566-576.
[6] 王会方, 朱世强, 吴文祥. 基于INSGA-Ⅱ算法的机械手多目标轨迹规划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4): 622-628.
[7] 陈刚, 胡莹, 徐敏, 等. 基于NSGA-Ⅱ算法的RLV多目标再入轨迹优化设计[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(2): 133-137.
[8] 申晓宁, 郭毓, 陈庆伟, 等. 多目标遗传算法在机器人路径规划中的应用[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(6): 659-663.
[9] 姜甲玉, 周思羽, 尚崇伟. 空战自主机动决策问题建模[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(5): 112-114.
[10] 吴文海, 周思羽, 高丽, 等. 基于导弹攻击区的超视距空战态势评估改进[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2679-2685.
[11] 顾佼佼, 刘卫华, 姜文志. 基于攻击区和杀伤概率的视距内空战态势评估[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(6): 1306-1312.
[12] 李中林. 求解多目标优化问题的混合遗传算法的研究与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
[13] 李辉健. 多目标进化算法中新型非支配个体排序研究及应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
[14] 黄林峰. 多目标进化算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
[15] 刘鎏. 多目标优化进化算法及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.

作者简介:

朱文强(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机作战系统与技术。

杨卫莉(1972-), 女, 工程师, 主要研究方向通信与信息系统。

王　杰(1994-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 无人飞行器作战系统与技术。

库　硕(1993-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 无人飞行器作战系统与技术。

[引用格式] 郑红星，周思雨，李伟杰."一对多"的空间在轨服务序列规划研究[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：34-39.

"一对多"的空间在轨服务序列规划研究

郑红星[1]，周思雨[1]，李伟杰[2]
（1. 哈尔滨工业大学航天学院，哈尔滨 150001；2. 北京空间飞行器总体设计部，北京 100094）

摘 要：为提高航天器在轨机动能力、工作寿命，升级扩大航天器功能，创造经济效益，近年来空间在轨服务与维护越来越成为空间技术的研究热点之一。为了降低地球静止轨道（GEO）卫星的发射成本，延长其在轨寿命，服务星采用"一对多"的方式为同一轨道平面上运行的多个工作星依次提供在轨服务。采用脉冲机动变轨与基于遗传算法的序列规划相结合的方法，利用霍曼转移、异面圆轨道转移和Lambert转移等算法建立数学模型，针对同面与异面服务两种情况进行仿真与结果分析，给出总脉冲速度增量最小的服务策略，为GEO卫星在轨服务任务规划提供参考。

关键词：在轨服务；一对多服务；脉冲机动；遗传算法；序列规划；霍曼转移；异面圆轨道转移；Lambert转移

中图分类号：V412.4 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-5915(2019)06-0619-06

Research on "One-to-Many" Orbit Service Sequence Planning

ZHENG Hongxing[1], ZHOU Siyu[1], LI Weijie[2]
(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In recent years, in order to improve the on-orbit maneuverability and working life of spacecraft, upgrade and expand the functions of spacecraft, and create economic benefits, on-orbit service and maintenance have become one of the hotspots in space technology research. In order to reduce the launch cost of GEO satellites and extend their on-orbit life, service satellites use a "one-to-many" approach to providing on-orbit service in turn for multiple working satellites in the same orbital plane. In this paper, the method of combining pulse maneuvering and genetic algorithm-based sequence planning is used to simulate and analyze the results of the same-plane and different-plane services. The mathematical model is established by using the Hohmann transfer, non-coplanar elliptical orbit transfer and Lambert transfer, and the service strategy with the smallest total pulse speed increment is given, providing reference for on-orbit service mission planning of GEO satellites.

Key words: On-orbit Service; One-to-many Service; Pulse Maneuver; Genetic Algorithm; Sequence Planning; Hohmann Transfer; Non-coplanar Elliptical Orbit Transfer; Lambert Transfer

1 引 言

目前各航天大国纷纷提出以"在轨服务"的方式提高航天器在轨机动能力和工作寿命，升级扩大航天器功能，创造经济效益[1]。美国已经开展了XSS[2]、DART[3]、轨道快车[4]等飞行器试验项目，进行货物运输、模块更换、地面遥操作等技术验证和预先研究[5]。在"在轨服务"任务中，当一颗服务星对多颗在轨运行的目标星进行服务时称为"一对多"服务方式。国外研究表明，"一对多"服务方式优于"一对一"服务方式，并将成为未来在轨服务的主流方式[6]。

收稿日期：2019-10-22； 修回日期：2019-10-30
基金项目：国家自然科学基金(11472090)

国内外已经针对在轨服务的轨道机动方式和自主决策规划等展开了深入的研究。文献[7]针对未来服务型航天器总结了漂移式、组合式、直接弹道式3种共轨式机动模型,并给出了机动时间、能量、相位的关系式与仿真曲线。文献[8]针对圆轨道航天器在轨燃料加注任务,提出了一种基于聚类分析的在轨加注任务调度及优化算法。文献[9]对运行在地球同步轨道上且倾角较小的卫星群的“一对多”在轨加注任务开展了相关研究,文中将共面转移与变轨道面机动所消耗的燃料进行了比较,并在小角度近似下将该任务规划问题简化成旅行商(TSP)问题进行求解。文献[10]针对在轨服务任务规划问题,建立了一套系统的建模与优化方法,深入研究了在轨服务任务规划模型建模方法。尤其针对在轨加注任务,提出了一套可应用于P2P、“一对多”和混合模式的在轨加注任务规划问题中的系统建模与优化方法。许多文献均将研究重点放在对地球静止轨道(GEO)卫星的服务上,这是由于GEO轨道高度较高,发射卫星的代价较大,如果能够利用发射到低轨的服务星为其提供在轨服务,延长其寿命,将更有利于减小成本[11]。

本文也将重点研究针对GEO轨道上“一对多”的在轨服务任务,分别考虑服务星与工作星轨道共面与异面情况,服务星的轨道机动采用脉冲变轨的方式,重点通过求解Lambert问题得到有限转移时间约束下的机动速度增量,以此作为优化指标与遗传算法序列规划相结合,得出使得总脉冲速度增量最小的服务策略。

2　数学模型

2.1　轨道转移任务

为了简化问题我们忽略摄动等因素的影响,将轨道转移简化成只考虑地球一个中心天体的二体问题。一个服务星可以为同一轨道上的多颗工作星提供服务,即“一对多”。首先介绍三种轨道转移的方式。

2.1.1　霍曼转移

在同一轨道平面内,两不相交圆轨道之间的过渡霍曼转移为能量最省的方式。霍曼过渡轨道是一条外切于小圆轨道,内切于大圆轨道的椭圆轨道,由两次脉冲机动实现[1]。

两次机动的脉冲大小分别为:

$$\Delta v_a = v_a - v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}}\left(\sqrt{\frac{2r_2}{r_1 + r_2}} - 1\right) \tag{1}$$

$$\Delta v_b = v_2 - v_b = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}}\left(1 - \sqrt{\frac{2r_1}{r_1 + r_2}}\right) \tag{2}$$

2.1.2　异面圆轨道转移

对于没有时间约束的两个轨道半径不同的异面圆轨道之间的转移,本文采用了先在初始轨道平面内进行霍曼转移将轨道转移到与新轨道半径相同的异面轨道上,这里进行两次机动。然后在两个异面轨道的交点再施加一次脉冲,用于改变轨道平面,完成转移。

相交的同轨道半径异面轨道机动速度:

$$\Delta v = 2v\sin\frac{\Delta i}{2} \tag{3}$$

2.1.3　Lambert转移

Lambert问题是航天动力学中的两点边界值问题,主要研究如何根据两个位置矢量和转移时间确定航天器转移轨道[1]。根据初始时刻服务星的轨道六根数可以得到其位置和速度$(r_{10}、v_{10})$,工作星的轨道六根数可以得到同一时刻工作星的$(r_{20}、v_{20})$。给定转移时间t,迭代求解出工作星在t时刻后的位置速度$(r_{2f}、v_{2f})$,经过t时间后服务星也要到达同一位置。已知服务星初始位置、转移时间和最终位置后,就可以采用转化为Lambert两点边值问题求解出初始速度v_{1t}与最终速度v_{1f}。由此可以得到两次的脉冲速度:$\Delta v_1 = v_{1t} - v_{10}$和$\Delta v_2 = v_{2t} - v_{1f}$。

2.2　任务规划

该服务任务规划可以理解为服务星选择合适的路径来对工作星进行在轨服务,它将每颗工作星服务一次后回到自身轨道,使得任务完成后消耗的总推进剂最少。该问题实际上就是不对称的TSP。从图论的角度来看,该问题实质是在一个带权完全无向图中,找一个权值最小的回路。由于该问题的可行解是所有顶点的全排列,随着顶点数的增加,会产生组合爆炸,它是一个非确定性多项式完全(Non-deterministic Polynomial Complete, NPC)问题。

3　分析与讨论

3.1　同面轨道服务

考虑一个服务星为三个工作星提供在轨服务,三颗工作星间隔120°均布GEO轨道平面上。服务

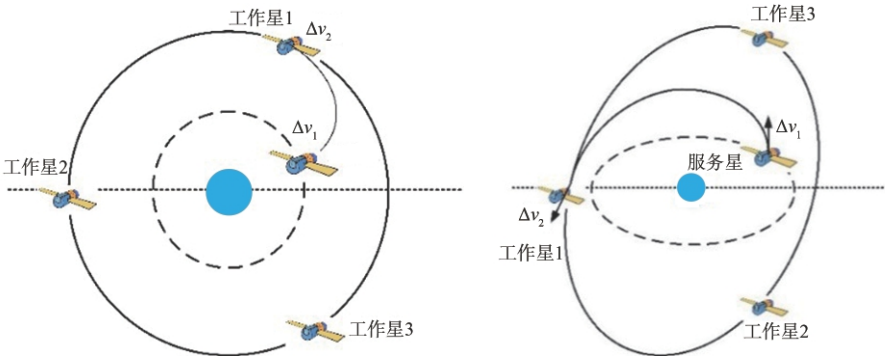

图 1　同面轨道转移(左)与异面轨道转移(右)

Fig. 1　Same-plane orbit transfer (left) and different-plane orbit transfer (right)

星工作在 10000km 轨道上。如图 1 分别为工作星轨道与服务星轨道共面和异面两种情况。

将发出在轨服务的指令的时刻记为初始时刻，假设此时三颗工作星的轨道六根数分别为：

$$E_1 = [a_1, e_1, i_1, \omega_1, \Omega_1, \varphi_1]$$
$$= [36000\text{km}, 0, 0°, 20°, 30°, 0°]$$
$$E_2 = [a_2, e_2, i_2, \omega_2, \Omega_2, \varphi_2]$$
$$= [36000\text{km}, 0, 0°, 20°, 30°, 120°]$$
$$E_3 = [a_3, e_3, i_3, \omega_3, \Omega_3, \varphi_3]$$
$$= [36000\text{km}, 0, 0°, 20°, 30°, 240°]$$

服务卫星的轨道六根数为：

$$E_0 = [a_0, e_0, i_0, \omega_0, \Omega_0, \varphi_0]$$
$$= [10000\text{km}, 0, 0°, 20°, 30°, -100°]$$

假设转移时间 t_f = 7200s。为方便后面的任务，采用整数编码，服务卫星编号 0，工作星分别编号 1、2、3。

服务星依次轨道转移到第一颗工作星，第二颗工作星再到第三颗工作星，结束服务后再返回原轨道。前几次服务通常由于存在时间限制采用 Lambert 轨道转移，最后一次返回原轨道不存在时间限制，所以采用霍曼转移即可。仿真结果计算见表 1。

MATLAB 仿真得到的部分结果如图 2。蓝色为工作星运行轨道，绿色为服务星运行轨道，红色虚线为转移轨道。转移初始时刻服务星位置为绿点，工作星初始位置蓝点，转移结束后同时到达红点处。

表 1　同面机动速度

Table 1　Same-face maneuvering speed

转移方向	0-1	0-2	0-3	1-2	1-3	2-3
机动速度 km/s	6.8939	21.3726	11.9768	16.4875	18.8562	16.4875
转移方向	1-0	2-0	3-0	2-1	3-1	3-2
机动速度 km/s	2.7186	2.7186	2.7186	18.8562	16.4875	18.8562

3.2　异面轨道服务

异面时的情况如图 1 右图所示。服务指令发出时刻假设三颗工作星的轨道六根数与 3.1 节中相

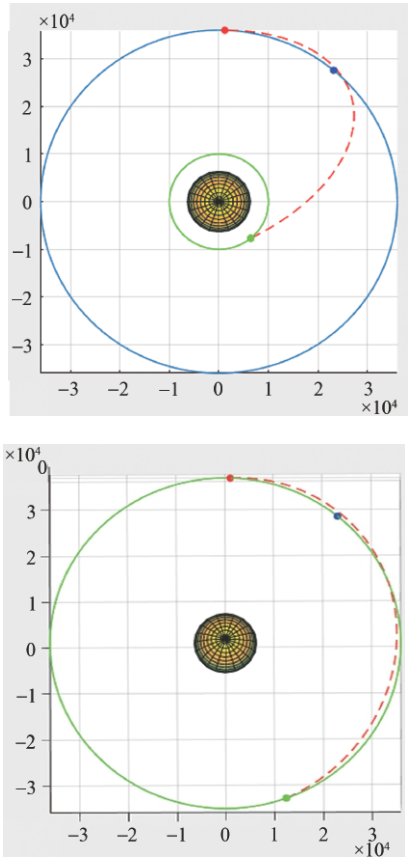

图 2　同面轨道转移仿真结果图

Fig. 2　Simulation results of same-plane orbit transfer

同,服务卫星轨道六根数为:

$$E_0 = [a_0, e_0, i_0, \omega_0, \Omega_0, \varphi_0]$$
$$= [10000\text{km}, 0, 20°, 30°, 10°, -60°]$$

同样假设服务星依次轨道转移到第一颗工作星,第二颗工作星再到第三颗工作星,结束服务后再返回原轨道。前几次服务采用 Lambert 轨道转移,最后一次返回无时间限制,所以采用先霍曼再异面的转移方式。仿真结果计算如表2。

表2　异面机动速度

Table 2　Different-plane maneuvering speed

转移方向	0–1	0–2	0–3	1–2	1–3	2–3
机动速度 km/s	7.1766	21.9932	14.9403	16.4875	18.8562	16.4875
转移方向	1–0	2–0	3–0	2–1	3–1	3–2
机动速度 km/s	3.8742	3.8742	3.8742	18.8562	16.4875	18.8562

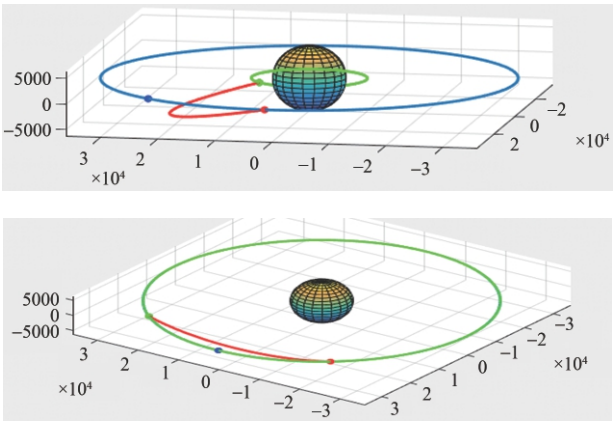

图3　异面轨道转移仿真结果图

Fig. 3　Simulation results of different-plane orbit transfer

3.3　基于遗传算法的规划

根据3.1和3.2节的分析,已得到同面变轨和异面变轨的模型,并计算得出 0↔1、0↔2、0↔3、1↔2、2↔3、1↔3的机动速度,接下来需要求解使得机动速度总和最小的在轨服务方案。该问题隶属于整数规划问题,解空间为离散变量,模型的梯度等信息不存在。针对此类问题的特点,遗传算法具有较强的优势,它通过模仿物种群中优胜劣汰的选择机制以及种群中优势个体的繁衍进化来实现优化功能[1],因此本文采用遗传算法求解。算法流程如图4所示。

3.3.1　求解过程

随机产生一个种群作为初始种群,同时计算这个初始种群的适应度——取机动速度总和的倒数作为适应度,适应度越高,被保留概率越大。值得注意的是,由于整个在轨服务的模型需从服务星开始机动,所以种群的首序号不为0时,适应度函数为无穷大。每次完成交叉、变异运算之后也需要重新评价。

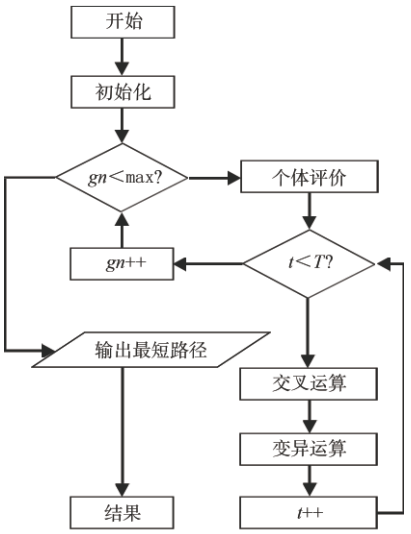

图4　算法流程图

Fig. 4　Algorithm flowchart

交叉运算操作如图5和图6所示,选择两个个体,在[1,*sz*](*sz* 为服务星和工作星的总数量)的范围内,随机产生两个交叉位 *min* 和 *max*(*min*<*max*),将两个个体的[*min*,*max*]区域互换。

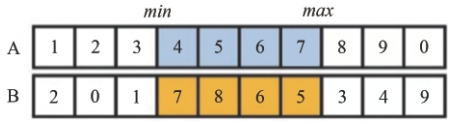

图5　交叉前示意图

Fig. 5　Schematic diagram before crossing

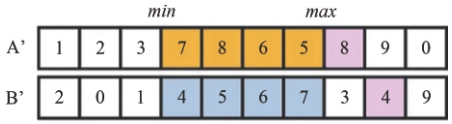

图6　交叉后示意图

Fig. 6　Schematic diagram after crossing

其中,A、B是未发生交叉之前的染色体(个体),A'和B'是A、B发生交叉之后产生的新个体。通过冲突检测,发现交叉之后会产生同一个基因在同一条染色体上重复出现,此为交叉的冲突,如图6粉色标注部分。对图6消除基因冲突的示意图如图7~10所示。

变异运算操作首先在随机产生两个变异位 *min*、*max*，其中 *min*<*max*，且0<*min*，*max*<染色体长度。然后将选中的变异区域反顺，对图10中的染色体A'进行变异的结果如图11所示。

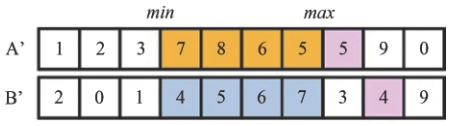

图7 将染色体A冲突基因8改为染色体B对应位置的5

Fig. 7 Change chromosome A conflict gene 8 to 5 corresponding to chromosome B

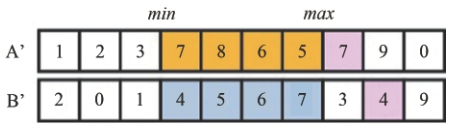

图8 将染色体A冲突基因5改为染色体B对应位置的7

Fig. 8 Change chromosome A conflict gene 5 to 7 corresponding to chromosome B

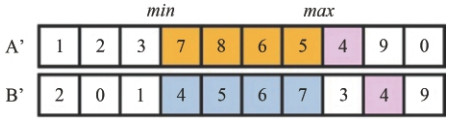

图9 将染色体A冲突基因7改为染色体B对应位置的4

Fig. 9 Change chromosome A conflict gene 7 to 4 corresponding to chromosome B

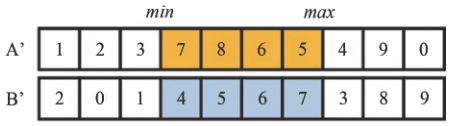

图10 对染色体B同样进行消除冲突

Fig. 10 Conflict elimination on chromosome B

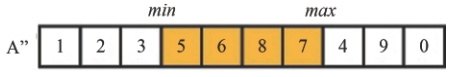

图11 变异结果

Fig. 11 Variation results

算法的终止条件是达到最大代数的迭代次数，每一次迭代结束后将得到的路径长度和当前代数（第几代）记录在数组中，然后在搜索完成之后，将数组中记录的最短路径和对应的代数输出，作为搜索结果。

3.3.2 结果分析

求解TSP的遗传算法是利用MATLAB软件编程的。由于遗传算法包含了随机搜索方法，所求的最优解不一定是实际最优的。在求解过程中，发现遗传算法得到的结果的精确度除了和交叉算子、变异算子、适应度计算方法有关，还受交叉概率、变异概率、迭代次数的影响。对于本文算法，在一定范围内，迭代次数也大，变异概率越小，遗传算法的精确度越高；执行时间随着迭代次数的增加而增加。当交叉概率为0.8，变异概率为0.5，最大代数为10000时，能得到较理想的结果，如图12所示。

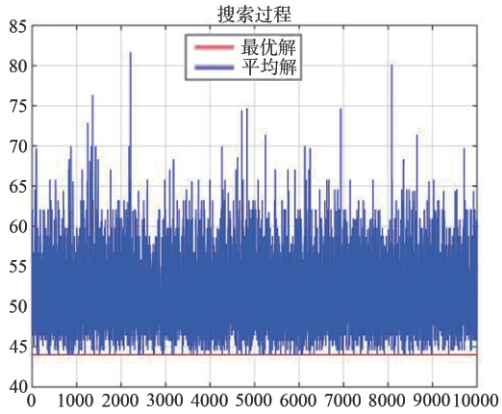

图12 搜索过程图

Fig. 12 Search process diagram

遗传算法得到的最小机动速度总和为44.00km/s，最短路线为0 → 1 → 2 → 3 → 0。

4 结 论

本文忽略轨道摄动等影响因素简化轨道转移问题，对“一对多”模式的在轨服务任务规划问题进行了研究。分别考虑了服务星与工作星轨道共面与异面的情况，假设轨道机动采用脉冲变轨的方式，针对不同的约束条件通过求解Lambert问题、霍曼转移或异面圆轨道转移得到相应的机动速度增量，并将总机动速度增量作为优化指标，采用遗传算法序列规划得出使得总脉冲速度增量最小的服务策略。

参 考 文 献

[1] 谭春林，刘永健，于登云. 在轨维护与服务体系研究[J]. 航天器工程，2008(3)：45-50.

[2] Madison R W. Micro-satellite based，on-orbit servicing work at the air force research laboratory[C]2000 IEEE Proceedings of Aerospace Conference，March 18-25，2000.

[3] Hintze G C，Cornett K G，Rahmatipour M H，et al. AVGS，AR&D for satellites，ISS，the moon，mars and beyond[C]AIAA

2007 Aerospace and Exhibit, Rohnert Park, California, USA, May 7-10, 2007.
[4] Pete T J, Anthony H, Jane P, et al. Autonomous satellite docking system [C] AIAA Space 2001 Conference and Exposition, Albuquerque, NM, USA, August 28-30, 2001.
[5] 陈萌, 肖余之, 张涛. 空间服务与操控中的人工智能技术[J]. 载人航天, 2018, 24(3): 285-291.
[6] Tsiotras P, Nailly A. Comparison between peer-to-peer and single spacecraft refueling strategies for spacecraft in circular orbits[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
[7] 蔡远文, 于小红. 服务型航天器共轨式轨道机动方式研究[J]. 航天控制, 2007(5): 7-12.
[8] 朱啸宇, 乔兵, 张庆展, 等. 圆轨道航天器在轨加注任务空间燃料站部署问题[J]. 中国空间科学技术, 2017, 37(3): 35-43.
[9] Kyle T, Lee D J, Glenn C N. Optimal servicing of geosynchronous satellites [R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
[10] 余婧. 航天器在轨服务任务规划技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
[11] 肖东东. 星座燃料补给问题的轨道优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
[12] 赵钧. 航天器轨道动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011.
[13] 谭迎龙, 乔兵, 朱啸宇, 等. 一种以燃耗为优化目标的航天器在轨加注作业调度[J]. 载人航天, 2018, 24(2): 143-149.
[14] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

作者简介:

郑红星(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能无人系统智能感知与自主规划。本文通信作者。

周思雨(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为任务规划和运动规划。

李伟杰(1981-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为在轨服务航天器技术。

[引用格式] 张亚博，姜明，肖强，等. 一种欠驱动无人船避障及目标跟踪鲁棒控制方法[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：40-45.

一种欠驱动无人船避障及目标跟踪鲁棒控制方法

张亚博[1]，姜 明[2]，肖 强[1]，王 军[1]，陈 霖[2]，张海燕[1]
（1. 北京航天发射技术研究所，北京 100076；2. 北京中星时代科技有限公司，北京 100070）

摘 要： 无人船由于其成本低、制造周期短、环境适应能力强等特点，近年来受到了广泛的关注。针对欠驱动无人船的碰撞规避和目标跟踪问题，提出了一种基于滑模变结构控制和改进人工势函数理论的控制方法。首先建立了考虑不确定干扰和参数摄动的无人船水平面二阶非线性动力学模型，通过引入滑模控制方法为其设计了目标跟踪鲁棒控制器。同时基于改进人工势函数设计了无人船碰撞规避控制算法。最后对设计的控制算法进行了稳定性证明和数值仿真。仿真结果表明，提出的控制方法在无人船做平面运动时可以有效进行目标跟踪和碰撞规避。

关键词： 欠驱动无人船；目标跟踪；碰撞规避；滑模控制；人工势场法；李阿普诺夫稳定
中图分类号： U664.82 **文献标识码：** A **文章编号：** 2096-5915(2019)06-0625-06

A Robust Control Method for Obstacle Avoidance and Target Tracking of Underactuated Surface Vessels

ZHANG Yabo[1], JIANG Ming[2], XIAO Qiang[1], WANG Jun[1], CHEN Lin[2], ZHANG Haiyan[1]
(1. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China;
2. Beijing ZhongXing Times Technology Co. Ltd, Beijing 100070, China)

Abstract: Due to its low cost, short manufacturing cycle and strong adaptability to the environment, the unmanned surface vessel has been widely concerned in recent years. In view of the collision avoidance and target tracking of underactuated unmanned surface vessel, an improved control method based on the sliding mode control and the theory of artificial potential function is proposed. Firstly, a second-order nonlinear dynamics model of the unmanned ship in horizontal surface, which takes into account uncertain interference and parameter interference, is established. A control method of target tracking is designed through introducing sliding mode control. At the same time, on the base of the improving artificial potential function, the control algorithm of unmanned ship collision avoidance is designed. Finally, the stability of the designed control algorithm are carried out. The simulation results show that the method can track the target effectively and avoid collision.

Key words: Underactuated Unmanned Surface Vessel; Target Tracking; Collision Avoidance; Sliding Model Control; Artificial Potential Field Method; Lyapunov Stable

1 引 言

无人船是一种能够在海洋环境中自主航行，并且能够完成各种海上任务的运载平台。无人船因其加工成本低、制造周期短、环境适应能力强等特点，可以用于各种海上任务。这也为进一步开发海洋资源提供了一种更为安全的方式。因此，无人船的研究已成为船舶行业的热点问题[1-2]。

为使无人船在复杂的海洋环境中具有自主航行的能力，首先需要解决其对目标的跟踪控制问题。罗伟林等[3]针对船舶航向非线性系统，提出了一种基于神经网络方法的鲁棒跟踪控制器。夏云鹏等[4]针对无人船航迹控制问题，提出了基于模拟

收稿日期：2019-10-09； 修回日期：2019-10-20

退火优化NMPC算法的非线性模型预测控制算法,设计了直接型无人船航迹控制器,该算法能够提高航迹控制的准确性和实时性。Breivik等[5]采用一种新的导航方法,实现了对任意路径的跟踪控制。Miao J等[6]基于时滞控制方法和降阶线性扩展状态观测器(LESOS)技术,提出了一种改进的复合视距制导律,其能估计未知的侧滑角,并能补偿时变海流的影响。廖煜雷等[7]考虑了外界干扰以及船舶模型参数不确定的问题,采用滑模变结构控制方法,设计了轨迹跟踪控制器,通过仿真,验证了该控制器的有效性。

其次,在无人船航行的过程中,其周围的环境可能会出现紧急情况,比如航路上出现障碍物。这就需要无人船有碰撞规避的能力。对此问题刘琨等[8]提出了一种改进的人工势场法,设计了无人船碰撞规避控制算法。陈文玉[9]对无人船的避碰算法问题,基于改进的人工势场法进行了规则约束下具体避碰算法的设计与实现。

本文针对欠驱动无人船的碰撞规避和目标跟踪问题,提出了一种基于滑模变结构控制和改进人工势函数理论的控制方法。首先建立了考虑不确定干扰和参数摄动的无人船水平面二阶非线性动力学模型,通过引入滑模控制方法为其设计了目标跟踪鲁棒控制器。同时基于改进人工势函数设计了无人船碰撞规避控制算法。最后对设计的控制算法进行了稳定性证明和数值仿真。仿真结果表明,提出的控制方法在无人船做平面运动时可以有效进行目标跟踪和碰撞规避。

2　无人船动力学模型

为描述无人船的运动,首先引入两个参考坐标系,即地面坐标系S_e和船体坐标系S_b,如图1所示。地面坐标系用来描述船在惯性系下的位置和姿态,选取地球表面任意位置为其原点,X轴指向正北方向,Y轴指向正东方向,Z指向地心方向,Y轴与X轴、Z轴构成右手坐标系。船体坐标系用来描述船舶的受力和速度,其固连于船体,坐标原点位于船体质心,x轴沿径向指向船头,y轴指向右舷,z轴垂直于xy平面并指向船底方向。z轴与x轴、y轴构成右手坐标系。

考虑到实际情况,在研究无人船运动控制过程

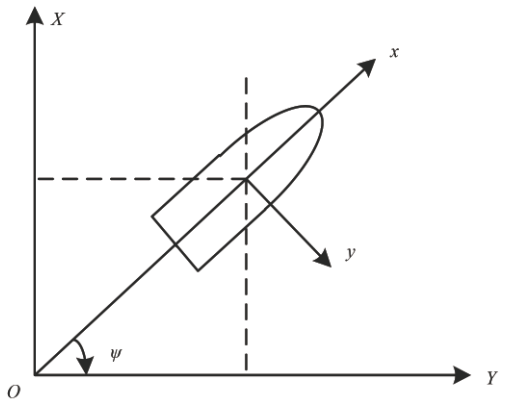

图1　无人船水面运动模型

Fig. 1　Motion model of unmanned ship

中,一般忽略船舶垂荡、横摇和纵摇运动,只讨论无人船在水平面的纵荡、横荡和艏摇运动。同时,考虑无人船在运动过程中受到的风、浪等环境引起的扰动未知但有界,则无人船的运动模型可以由式(1)、(2)描述。

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\tau}_T + \boldsymbol{\tau}_E \tag{2}$$

其中$\boldsymbol{\eta} = (x \quad y \quad \psi)^T$为无人船的位置状态,$x$、$y$分别表示无人船在地面坐标系中的位置,$\psi$表示无人船的艏向角。$\boldsymbol{v} = (u \quad v \quad r)^T$表示无人船的速度状态,各分量分别表示在船体坐标系中的纵向速度、横向速度和偏航角速度。$\boldsymbol{\tau}_T = (F_u \quad 0 \quad N_r)^T$表示无人船的控制,其中$F_u$表示无人船受到的纵向推力,$N_r$表示无人船受到的偏航力矩。$\boldsymbol{\tau}_E = (\tau_{uE} \quad \tau_{vE} \quad \tau_{rE})$表示无人船受到的环境干扰以及动力学方程中的参数摄动。$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})$为地面坐标系到船体坐标系的转换矩阵,$\boldsymbol{M}$是船舶的惯量矩阵,一般无人船是左右对称前后不对称的,但通常来说$m_{23} = m_{32} \approx 0$,因此为简单分析,本文假定$\boldsymbol{M}$是一个对角正定矩阵,$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})$表示科里奥利/向心力矩阵,$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})$是阻尼矩阵,此处将阻尼中的非线性部分考虑在了系统的扰动参数中,因此此处只考虑线性阻尼。各矩阵具体的值为:

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{22} \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})=\begin{pmatrix}0 & 0 & -m_{22}\boldsymbol{v}\\ 0 & 0 & m_{11}u\\ m_{22}\boldsymbol{v} & -m_{11}u & 0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})=\begin{pmatrix}X_u & 0 & 0\\ 0 & Y_v & 0\\ 0 & 0 & Z_r\end{pmatrix}$$

其中不确定项τ_E可以由式(3)描述

$$\left|\tau_E\right|\leqslant\tau_{EMAX},\tau_{EMAX}>0 \tag{3}$$

无人船数学模型中的惯性矩阵、阻尼矩阵等都是与无人船本身属性有关的常量,一般称之为模型参数,在对算法做仿真验证时,必须利用这些参数构建数学模型。对于一艘特定的无人船,这些参数的值是确定的。然而,这些参数的获取是比较困难的,需要通过大量的航行实验数据,使用参数辨识理论获得。本文采用最小二乘算法对研究无人船运动控制问题需要的参数进行了辨识。在系统辨识前,首先对无人船动力学方程进行了小角度线化,然后对线性化之后的动力学方程采用最小二乘算法进行参数辨识。表1给出最终的辨识结果。

表1 无人船模型参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results of unmanned ship model

参数	数值
m_{11}	141.85
m_{22}	197.75
m_{33}	15.60
X_u	−45.6
Y_v	−29.54
Z_r	−10.7

其中m_{11}、m_{22}表示无人船的广义质量,m_{33}表示无人船广义转动惯量。X_u、Y_v、Z_r分别表示无人船沿本地坐标系三轴的阻尼。

3 无人船目标跟踪及碰撞规避鲁棒控制方法

3.1 控制方法设计

滑模控制能够有效克服系统的不确定性,对干扰和未建模动态具有很强的鲁棒性,且具有响应迅速、物理实现简单等优点。本文将以滑模控制方法为基础实现无人船的控制。

首先对无人船的动力学模型进行变换,为对各个状态进行统一的分析,将式(1)(2)合并为一个二阶方程。对式(1)求导得到式(4):

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}=\dot{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v}+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{v}} \tag{4}$$

令

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\eta})=\dot{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{\eta})=\dot{\psi}\cdot\begin{pmatrix}-\sin(\psi) & -\cos(\psi) & 0\\ \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}$$

得到

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}=\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v}+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{v}} \tag{5}$$

又

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}} \tag{6}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}=-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v}-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{D}\boldsymbol{v}+\boldsymbol{M}^{-1}\tau_T+\boldsymbol{M}^{-1}\tau_E \tag{7}$$

将式(6)、(7)代入式(5)可以得到

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}=\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})(-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v}-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{D}\boldsymbol{v}+\boldsymbol{M}^{-1}\tau_T+\boldsymbol{M}^{-1}\tau_E) \tag{8}$$

进一步可以写为

$$\begin{aligned}\ddot{\boldsymbol{\eta}}-(&\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}(\dot{\boldsymbol{\eta}})\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\\&+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{D}\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}))\dot{\boldsymbol{\eta}}\\&=\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\tau_T+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\tau_E\end{aligned} \tag{9}$$

设

$$\begin{aligned}\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\eta},\dot{\boldsymbol{\eta}})=&\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}(\dot{\boldsymbol{\eta}})\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\\&+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{D}\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\end{aligned}$$

上式可以改写为

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}-\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\eta},\dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}}=\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\tau_T+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\tau_E \tag{10}$$

令无人船的目标状态为$\boldsymbol{\eta}^*$、$\dot{\boldsymbol{\eta}}^*$,可以求得当前状态和目标状态的偏差为

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}}=\boldsymbol{\eta}-\boldsymbol{\eta}^*、\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}}=\dot{\boldsymbol{\eta}}-\dot{\boldsymbol{\eta}}^*$$

选取滑动面为

$$\boldsymbol{s}=\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}}+\Lambda\tilde{\boldsymbol{\eta}} \tag{11}$$

其中Λ=diag$\{\lambda_r\}$,λ_r>0,r=1,2,3,显然滑动面上的状态运动是稳定的。接下来设计到达运动,对式(11)的滑动面函数求导。本文研究无人船对点目标的目标跟踪问题,因此有$\dot{\boldsymbol{\eta}}^*=0$、$\ddot{\boldsymbol{\eta}}^*=0$。可以对滑动面求导公式做进一步化简:

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{s}}&=\ddot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}}+\Lambda\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}}=\ddot{\boldsymbol{\eta}}+\Lambda\dot{\boldsymbol{\eta}}\\&=\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\eta},\dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}}+\Lambda\dot{\boldsymbol{\eta}}+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\tau_T\\&\quad+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}^{-1}\tau_E\end{aligned} \tag{12}$$

选择到达控制律为:

$$\dot{\boldsymbol{s}}=-\boldsymbol{H}\boldsymbol{s}-\varepsilon\cdot\mathrm{sat}(\boldsymbol{s}) \tag{13}$$

式中$\boldsymbol{H}$,$\varepsilon\in\mathrm{R}^{3\times3}$。为了消除滑动运动在滑模面上的抖颤,在此处选择饱和函数sat(x)代替符号函数。

$$\mathrm{sat}(x)=\begin{cases}1 & x>\varphi\\ x & -\varphi\leqslant x\leqslant\varphi\\ -1 & x<-\varphi\end{cases} \tag{14}$$

其中φ为饱和函数边界层厚度。对比式(12)、(13)

可以得到等效控制为:

$$\tau_T = -\boldsymbol{M}\boldsymbol{J}^{-1}(\eta)\boldsymbol{H}\boldsymbol{s} - \boldsymbol{M}\boldsymbol{J}^{-1}(\eta)\varepsilon \cdot \mathrm{sat}(\boldsymbol{s}) - \boldsymbol{M}\boldsymbol{J}^{-1}(\eta)\boldsymbol{K}(\eta,\dot{\eta})\dot{\eta} - \boldsymbol{M}\boldsymbol{J}^{-1}(\eta)\Lambda\dot{\eta} - \tau_E \tag{15}$$

式(15)控制中存在不确定参数,无法直接使用,为消去不确定参数,首先采用式(16)控制进行替换:

$$\tau_T = -\boldsymbol{M}\boldsymbol{J}^{-1}(\eta)\boldsymbol{H}\boldsymbol{s} - \boldsymbol{M}\boldsymbol{J}^{-1}(\eta)\varepsilon \cdot \mathrm{sat}(\boldsymbol{s}) - \boldsymbol{M}\boldsymbol{J}^{-1}(\eta)\boldsymbol{K}(\eta,\dot{\eta})\dot{\eta} - \boldsymbol{M}\boldsymbol{J}^{-1}(\eta)\Lambda\dot{\eta} - z_E \tag{16}$$

为确定 z_E,将式(16)代入式(12)中得到式(17):

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{s}} &= \boldsymbol{K}(\eta,\dot{\eta})\dot{\eta} + \Lambda\dot{\eta} + \boldsymbol{J}(\eta)\boldsymbol{M}^{-1}\tau_T \\ &\quad + \boldsymbol{J}(\eta)\boldsymbol{M}^{-1}\tau_E \\ &= -\boldsymbol{H}\boldsymbol{s} - \varepsilon \cdot \mathrm{sat}(\boldsymbol{s}) - z_E + \tau_E\end{aligned} \tag{17}$$

又滑模控制到达条件为:

$$\mathrm{diag}(\boldsymbol{s})\,\mathrm{diag}(\dot{\boldsymbol{s}}) < 0 \tag{18}$$

将式(17)带入式(18)之后写成分量形式得到式(19):

$$\boldsymbol{s}_i\dot{\boldsymbol{s}}_i = -\boldsymbol{H}_{ii}(\boldsymbol{s}_i)^2 - \varepsilon_i|\boldsymbol{s}_i| - (z_{Ei} - \tau_{Ei})\boldsymbol{s}_i \tag{19}$$

因此为使得滑模控制到达条件满足,比较式(19)各项大小可以得到:

$$z_E = |\tau_{EMAX}|\,\mathrm{sat}(\boldsymbol{s}) \tag{20}$$

式(16)、(20)构成了无人船鲁棒控制律,该控制率能够实现无人船对点目标的跟踪,并且对干扰具有较强的鲁棒性。但是在无人船实际航行的过程中,很有可能在规划的运动路径上发现障碍物,因此无人船设计碰撞规避的控制是很有必要的,本文接下来的部分将详细叙述关于无人船碰撞规避的控制。

3.2　无人船碰撞规避控制设计

为提高无人船在真实环境中的自主运行能力,且使得无人船在运行过程中受到各种不确定干扰的情况下仍然能够顺利完成任务,在无人船进行了目标跟踪的前提下,需要进行碰撞规避的设计。本小节将利用人工势场函数理论为无人船设计碰撞规避控制。

人工势场法是通过构建虚拟的势能场,使无人船沿着势能场的趋势进行运动,最终到达目的地的一种方法。这是一种非最优的机动策略,但相对于其他算法具有反应快速、计算简单以及实时性强等优点,对算法加以改进能在无人船路径规划任务中得到很好的应用。

本文前面部分已经完成了无人船从起始点到目的地的控制设计问题,因此本文的对障碍物的碰撞规避问题只需要考虑障碍物和无人船之间的斥力。这能够避开同时存在引力和斥力时进入局部极小值的问题。

大多数人工势场的斥力势场函数都是以无人船与障碍物的相对位置的倒数为自变量的二次函数,无人船小幅度地移动就能引起势场强度大幅度的变化,即斥力场强度变化较快。而在实际应用中,斥力场强度的数值变化过快会影响对运动路径的判断,对斥力常量的选择要求较为苛刻,指数型势函数能够有效避免此问题,因此本文构建式(21)所示的指数型势函数:

$$V(\eta,\eta_g) = 0.5\lambda_1 \exp\left(-\lambda_2(\eta-\eta_g)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}(\eta-\eta_g)\right) \tag{21}$$

式(21)对 η 求导得到:

$$\frac{\partial V(\eta,\eta_g)}{\partial\eta} = w(\eta,\eta_g)(\eta-\eta_g) \tag{22}$$

其中

$$w(\eta,\eta_g) = -\lambda_1\lambda_2 \exp\left(-\lambda_2(\eta-\eta_g)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}(\eta-\eta_g)\right) \tag{23}$$

式(21)中,$V(\eta,\eta_g)$ 表示势函数,η_g 表示障碍物的位置,$\boldsymbol{Q}$ 为正定对称阵,λ_1、λ_2 为相对近距离限制参数,通过调整 $\boldsymbol{Q}$、λ_1、λ_2 可以实现无人船和障碍物的距离大于设计的最小距离,从而防止碰撞的发生。下面将对上述势函数进行仿真,直观地观察其变化规律。

从图2可以看出,随着无人船和障碍物的距离减小,人工势函数将增大,无人船受到的斥力也会

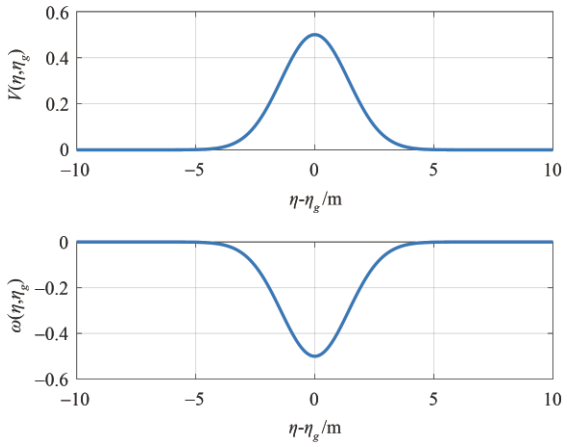

图2　势函数模型仿真

Fig. 2　Potential function model simulation

增加，该斥力能够控制无人船远离障碍物，从而实现碰撞规避。

4 控制器的稳定性证明

前两节设计了无人船目标跟踪和碰撞规避算法，本小节将证明上面设计的算法的稳定性。首先选择李雅普诺夫函数为：

$$V = V\left(\eta, \eta_g\right) + \frac{1}{2} s^{\mathrm{T}} s \tag{24}$$

对上面函数求导得到：

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{V}\left(\eta, \eta_g\right) + s^{\mathrm{T}} \dot{s} \\ &= \dot{\eta}^{\mathrm{T}} \frac{\partial V\left(\eta, \eta_g\right)}{\partial \eta} + s^{\mathrm{T}}\left(-\boldsymbol{H} s - \varepsilon \cdot \operatorname{sat}(s) - z_E + \tau_E\right) \\ &= \dot{\eta}^{\mathrm{T}} w\left(\eta, \eta_g\right)\left(\eta - \eta_g\right) - s^{\mathrm{T}} \boldsymbol{H} s - \varepsilon |s| - \left(z_E - \tau_E\right)\end{aligned} \tag{25}$$

根据z_E的求解过程可以看出，式(25)中后三项的和是小于0的。对于第一项，显然当无人船在障碍物附近运动时，$\dot{\eta}^{\mathrm{T}} w\left(\eta, \eta_g\right)\left(\eta - \eta_g\right) < 0$，进一步可以得到上面定义的李雅普诺夫函数对时间的导数小于0，因此设计的控制能够使得该系统稳定。

5 数值仿真

为验证设计的目标跟踪和碰撞规避控制器的性能，本文对此控制器进行数值仿真。仿真中假设无人船和目标距离1000m以内时，文中设计的碰撞规避算法开始运行。仿真用到的具体的参数设置如下。控制器的参数选择为 $\boldsymbol{H}=10^{-2}\times\boldsymbol{I}^{3\times3}$、$\varepsilon=10^{-7}\times\boldsymbol{I}^{3\times3}$、$\Lambda=10^{-2}\times\boldsymbol{I}^{3\times3}$。

表2 无人船状态信息

Table 2 State of unmanned ship

初始状态	期望状态	障碍物位置
[0 0 0]	[500 1000 0]	[300 600 0]

从图3、4可以看出，随着时间的推移，无人船的各个状态均达到了其期望值，由此可以证明本文设计的目标跟踪控制的有效性。在大概600s左右，无人船在障碍物附近重新调整了路线，绕开了障碍物。

从图5可以明显看出，当无人船在运动过程中遇到障碍物时，能够及时调整自己的位置，最终避开障碍物且到达期望的位置，这也说明本文设计的碰撞规避算法能够实现无人船的避障。

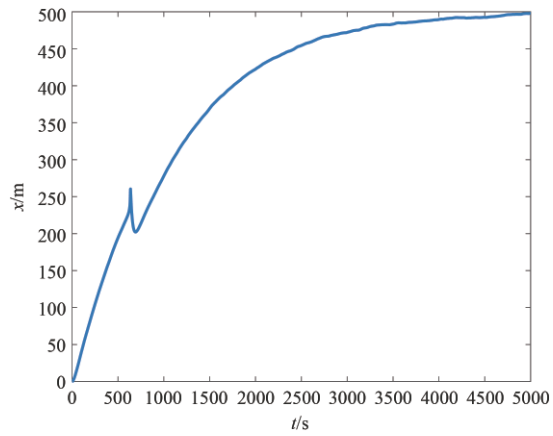

图3 无人船x坐标

Fig. 3 X coordinate of unmanned ship

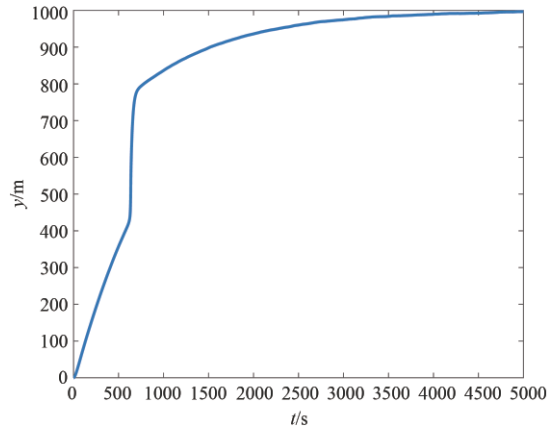

图4 无人船y坐标

Fig. 4 Y coordinate of unmanned ship

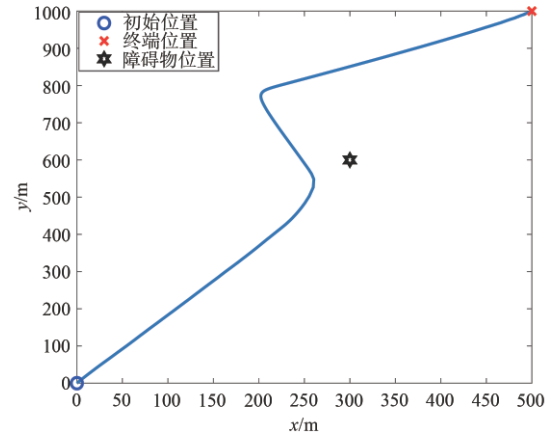

图5 无人船运动轨迹

Fig. 5 Trajectory of unmanned ship

6 结 论

本文针对欠驱动无人船的碰撞规避和目标跟踪问题，提出了一种基于滑模变结构控制和改进人

工势函数理论的控制方法。建立了考虑不确定干扰和参数摄动的无人船水平面二阶非线性动力学模型,并为其设计了基于滑模控制的目标跟踪鲁棒控制器,同时基于改进人工势函数设计了无人船碰撞规避控制算法。最后对设计的控制算法进行了稳定性证明和数值仿真。仿真结果表明,提出的控制方法在无人船做平面运动时可以有效进行目标跟踪和碰撞规避。

参　考　文　献

[1] 周立, 张阳, 张一, 等. 无人时代的海洋测绘技术展望[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(1): 89-95.

[2] 曹娟, 王雪松. 国内外无人船发展现状及未来前景[J]. 中国船检, 2018, 216(5): 96-99.

[3] 罗伟林, 邹早建, 李铁山. 船舶航向非线性系统鲁棒跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2009(8): 893-895.

[4] 夏云鹏, 杨田田. 基于模拟退火优化的直接航迹控制算法设计[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(6): 50-55.

[5] Breivik M, Fossen T I. Path following of straight lines and circles for marine surface vessels [C]. IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems - CAMS 2004, ELSEVIER, 2004.

[6] Miao J, Wang S, Tomovic M, et al. Compound line-of-sight nonlinear path following control of underactuated marine vehicles exposed to wind, waves, and ocean currents [J]. Nonlinear Dynamics, 2017.

[7] 廖煜雷, 庄佳园, 李晔, 等. 欠驱动无人艇轨迹跟踪的滑模控制方法[J]. 应用科学学报, 2011, 29(4): 428-434.

[8] 刘琨, 张永辉, 任佳. 基于改进人工势场法的无人船路径规划算法[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 99-104.

[9] 陈文玉. 规则约束下无人船实时避碰方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.

作者简介:

张亚博(1994-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为动力学与控制。

姜　明(1981-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为光电智能装备领域、产品应用市场等。

肖　强(1988-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为无人艇系统设计, 智能控制系统等。

王　军(1970-), 女, 学士, 工程师, 主要研究方向为软件工程化系统管理。

陈　霖, 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向船舶与海洋工程。

张海燕(1981-), 女, 学士, 工程师, 研究方向为计算机软件等。

[引用格式] 肖良华，闫林明，曹世坤，等. 无人机下投探空仪投放过程数值模拟[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：46-52.

无人机下投探空仪投放过程数值模拟

肖良华[1]，闫林明[1]，曹世坤[1]，郭 然[2]，陈 斌[1]
（1. 航空工业成都飞机工业（集团）有限责任公司，成都 610092；2. 中国气象局气象探测中心，北京 100081）

摘 要：下投探空在台风监测和预报中具有重要的应用价值，高空长航时无人机是下投探空首选平台。针对云影无人机投放探空仪的安全性问题，采用非结构动态嵌套网格技术，基于RANS及六自由度运动的方法，对轻质复杂外形探空仪的投放过程开展了数值模拟研究，结果表明在投放过程中气动力明显大于重力，其中气动阻力可达5倍重力以上；探空仪流向运动大于重力方向，展向运动不明显；开口端的存在使探空仪具有一定稳定性，姿态较为稳定；探空仪尺寸较小，投放初始阶段受吊舱尾迹影响大。采用Euler方程模拟流体域，并和RANS方法进行了对比研究，发现忽略流体粘性无法准确获得气动力，从而验证了该方法的准确性。

关键词：下投探空仪；无人机投放；非结构网格；动态嵌套网格；六自由度；云影无人机；高空长航时无人机

中图分类号：V421.1 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-5915(2019)06-0631-07

Numerical Simulation of the Release of Dropsonde from UAV

XIAO Lianghua[1], YAN Linming[1], CAO Shikun[1], GUO Ran[2], CHEN Bin[1]
(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd, Chengdu 610092, China;
2. Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: Release of dropsonde has an important application value in typhoon monitoring and forecast. The UAV with high altitude and long flight time is the first choice platform. Based on the RANS and 6 degree of freedom motion method, numerical simulation of the release of dropsonde from Cloud Shadow unmanned aerial vehicle is conducted by adopting the moving chimera mesh technology. The results show that the aerodynamic force is much larger than the gravity force (G), especially the drag force can reach more than 5G. The dropsonde's motion of flow wise is much obviously than that of the direction of gravity, and the motion of spanwise can be negative. The dropsonde's attitude is stable as the existence of the open end. The aerodynamic force of the dropsonde can be affected by the wake flow of the pod. Euler method is also adopted to conduct the simulation compared with RANS method. The results show that the fluid viscosity cannot be negative in the simulations and the accuracy of the proposed method is verified

Key words: Release of Dropsonde; UAV Release; Unstructured Mesh; Moving Chimera Mesh; 6 Degree of Freedom; Cloud Shadow Unmanned Aerial Vehicle; High Altitude Long Endurance UAV

1 引 言

利用飞机进行下投探空，可对大气温度、压力、湿度和风速风向等气象要素的垂直分布进行高分辨率测量，为台风的监测和预报提供数据支持，因此具有极其重要的实际应用价值。考虑到台风的特点及其探测的风险，高空长航时无人机是下投探空的首选平台[1-2]。为此，成都飞机工业(集团)有限公司基于自主研制的云影无人机平台设计了机载下投探空系统[3]。

在具体投放中，探空仪按照一定的时间间隔从无人机翼下吊舱尾部投出。类似“弹类”物体从

收稿日期：2019-10-17； 修回日期：2019-11-05
基金项目：科技部“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项(2018YFC1506401)

飞机上的投放,探空仪的投放也需要开展安全性分析,以避免其投出后同飞机机体或尾翼发生碰撞。一般可以通过风洞试验或者数值模拟的手段来研究探空仪投放过程。试验方法有动力相似法、捕获轨迹法和网格法[4]。由于探空仪重量轻、尺寸小,轨迹法和网格法试验难度大,而基于动力相似法的缩比试验又难以保证弗劳德数(Fr)等参数的相似,如同时满足重量、惯量及重心要求比较困难[5],因此总体而言试验方法难度大、成本高。数值模拟则可以以较低成本、按照真实尺寸开展研究。

探空仪投放过程的数值模拟需要通过非定常流场的模拟来获得气动力,然后将气动力代入动力学方程中求解其速度及角速度,最后通过运动学方程积分获得运动轨迹及姿态。显然,气动力的求解尤为关键。投放过程中,探空仪同载机的相对位置一直在变,流体域的求解网格需要随之变化。目前针对探空仪投放过程的数值模拟鲜见报道,其具体模拟方法可以参考“弹类”物体从飞机上分离的数值模拟。如张启南等[6]基于面元法和工程估算法的气动力获取方法开发了外挂物与载机分离过程的数值模拟系统。李孝伟等[7]利用动态嵌套网格技术,通过求解Euler方程和六自由度动力学方程,模拟了副油箱从飞机上的投放过程。Deryl 等[8]、冯文梁等[9]采用基于Euler方程的方法,模拟了武器外挂物的投放过程,模拟结果同风洞试验结果吻合较好。杨磊[10] 、杜小强[11]通过求解雷诺平均Navier-Stokes(RANS)方程获得气动力,分别模拟了机载武器投放过程和其流动特性。可见随着计算能力的提升,气动力获得方法越来越复杂,也越来越准确。

同时,同“弹类”物体相比,探空仪的“密度”(重量同其外壳所占流体域体积之比)小得多,从而导致气动力在投放过程中的作用更加突出;转动惯量小、稳定性较低,导致探空仪姿态更容易发生变化,因此对气动的模拟需要更加小心。而且探空仪为钝头体外形,开口端流动分离严重,流场模拟难度大。

为此,本文采用动态嵌套网格技术,通过非定常RANS方程的求解获得气动力,来实现探空仪投放过程的数值模拟。利用模拟结果分析了探空仪的运动及其受力变化过程。最后,为了评估流体粘性对模拟结果的影响,采用欧拉方法开展了同样的数值模拟。

2　物理模型

2.1　模拟对象

模拟对象包括带吊舱载机和探空仪。载机为云影无人机,其模型如图1所示,取坐标系 O-XYZ,坐标原点为机头位置,X 轴为机体轴指向后,Z 轴在对称平面内指向上,Y 轴指向右,构成右手坐标系。模拟中,载机固定不动,可选坐标系 O-XYZ 为惯性坐标系。

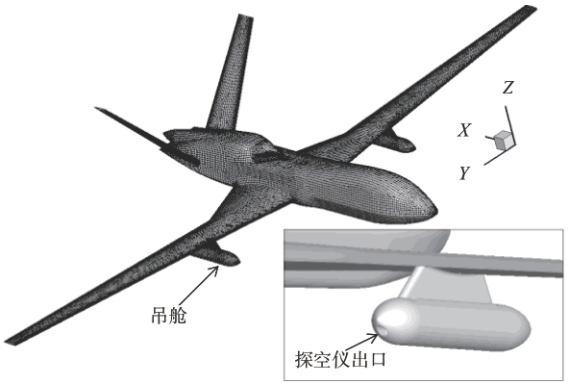

图1　云影无人机模型及表面网格

Fig. 1　Model and surface mesh of Cloud Shadow unmanned aerial vehicle

探空仪模型如图2所示,整体呈圆柱形,开口端内安装有传感器(数值模拟的模型中忽略了内部的传感器),开口端的外支架可对传感器起保护作用;封闭端内安装有降落伞等。投放时开口端先出舱,因此封闭端为迎风面。为方便后续分析,建立如图2所示探空仪固连坐标系 O_1-$X_1Y_1Z_1$,原点 O_1 为探空仪质心,X_1 轴穿过探空仪轴线指向后,Y_1 轴及 Z_1 轴与 X_1 轴垂直,且构成右手坐标系。探空仪直径 D 为65mm,总长 L 为350mm,其中开口段长24.8%L,质量为380g,重心距离封闭端长34.4%L。

2.2　非定常RANS方程

采用雷诺平均N-S方程求解流体域,非定常可压缩RANS方程在直角坐标系下积分形式如下:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(H_1+J_1\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(H_2+J_2\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(H_3+J_3\right)=0 \tag{1}$$

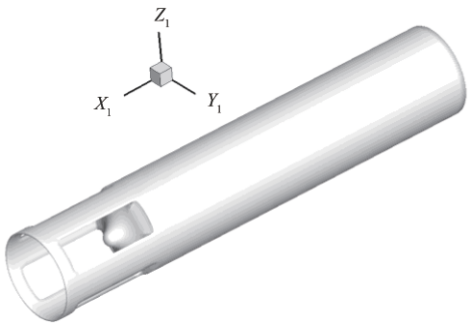

图2 探空仪模型

Fig. 2 Model of dropsonde

其中 $Q=\begin{pmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ e\end{pmatrix}$, $H_1=\begin{pmatrix}\rho u\\ \rho u^2+p\\ \rho vu\\ \rho wu\\ (e+p)u\end{pmatrix}$, $H_2=\begin{pmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2+p\\ \rho wv\\ (e+p)v\end{pmatrix}$,

$H_3=\begin{pmatrix}\rho w\\ \rho uw\\ \rho vw\\ \rho w^2+p\\ (e+p)w\end{pmatrix}$, $J_1=\begin{pmatrix}0\\ -\tau_{xx}\\ -\tau_{xy}\\ -\tau_{xz}\\ \bar{q}_x\end{pmatrix}$, $J_2=\begin{pmatrix}0\\ -\tau_{xy}\\ -\tau_{yy}\\ -\tau_{zy}\\ \bar{q}_y\end{pmatrix}$, $J_3=\begin{pmatrix}0\\ -\tau_{xz}\\ -\tau_{yz}\\ -\tau_{zz}\\ \bar{q}_z\end{pmatrix}$,

$$\begin{pmatrix}\bar{q}_x\\ \bar{q}_y\\ \bar{q}_z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}q_x-u\tau_{xx}-v\tau_{xy}-w\tau_{xz}\\ q_y-u\tau_{xy}-v\tau_{yy}-w\tau_{zy}\\ q_z-u\tau_{xz}-v\tau_{yz}-w\tau_{zz}\end{pmatrix}$$

其中，ρ 为空气密度，p 为压力，u,v,w 分别为气流在 x,y,z 方向的速度分量，e 为内能，H_1,H_2,H_3 为无粘通量，J_1,J_2,J_3 为粘性通量，$\tau_{ij}(i,j=x,y,z)$ 为切应力张量，包含分子粘性应力和雷诺应力。雷诺应力项需要通过湍流模式来封闭，在模拟中采用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模式[12]。

2.3 六自由度动力学方程

探空仪投放后在气动力和重力的作用下自由运动，其运动遵循六自由度动力学方程，该方程在探空仪固连坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 下的表达式为[13]：

$$\begin{aligned}\vec{F}&=m\frac{d\vec{V}}{dt}+m\vec{\omega}\times\vec{V}\\ \vec{M}&=I\frac{d\vec{\omega}}{dt}+\vec{\omega}\times(I\cdot\vec{\omega})\end{aligned}\tag{2}$$

其中，$\vec{F}$ 为探空仪受到的合力，包括重力和气动力；$\vec{M}$ 为探空仪所受相对质心的气动力矩；$\vec{V}$、$\vec{\omega}$ 分别为探空仪相对惯性坐标系 $O-XYZ$ 的速度和角速度，即相对于载机的速度和角速度；I 为探空仪在质心位置取的转动惯量，由于对称性，惯性积 $I_{xy}=I_{xz}=I_{yz}=0$，转动惯量 $I_{xx}=1.93\times10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^3$，$I_{yy}=I_{zz}=27.3\times10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^3$。

通过式(1)迭代求解流体域，可以获得探空仪所受气动力，将气动力带入式(2)，进而可求得探空仪相对惯性坐标系 $O-XYZ$ 的速度和角速度，然后通过时间推进求解运动学方程获得下一时刻探空仪质心位置及姿态角，其中姿态采用欧拉角偏航角 Ψ、俯仰角 Θ 和滚转角 Φ 表示，以更新后的相对位置重复上述步骤，即可获得探空仪投放过程运动轨迹。

3 数值模拟方法

3.1 动态嵌套网格方法

动态嵌套网格方法具有网格生成简单、易于描述不同物体之间的相对运动的优点，非常适合投放过程数值模拟[10]。

模拟中，分别生成载机网格(背景网格)和探空仪网格(子网格)。载机网格为静止网格，其表面网格如图1所示，计算域取为20倍机身长度，非结构网格总量约为一千万，其中对探空仪运动过程中可能出现的区域进行了加密处理。

探空仪网格为动态网格，即探空仪网格相对探空仪静止并随探空仪一起运动，网格如图3所示，网格量为110万，在开口端尾迹区进行了加密。

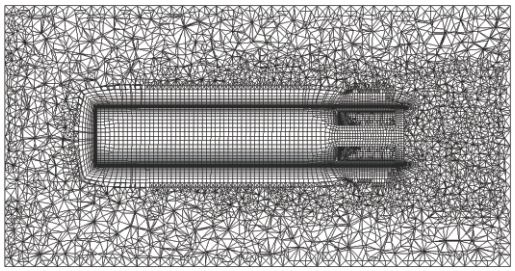

图3 探空仪网格

Fig. 3 Mesh of dropsonde

一般情况下，使用探空仪网格外边界切割载机网格，在切割边界上进行传值，即可使整个流场域实现非定常流场模拟。当探空仪距离吊舱很近时(如图4)，探空仪网格同吊舱物面相交，此时需在切割载机网格前，先利用吊舱物面切割探空仪网格形成BC_cut0，如图5红色粗线所示，继而利用BC_cut0和探空仪网格剩余外边界一起切割载机网格，形成BC_cut1(图4中蓝色中等粗线)。

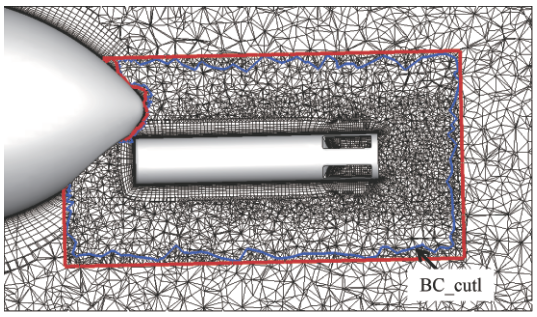

图4　网格切割边界

Fig. 4　Boundary of grid cutting

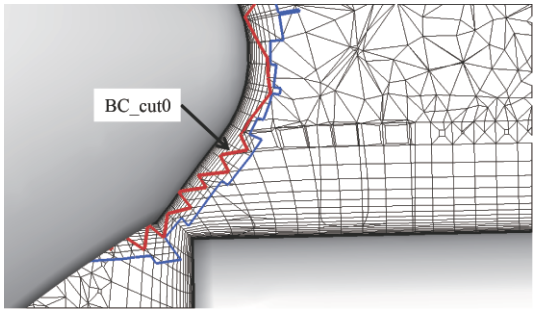

图5　网格切割边界局部放大图

Fig. 5　Partial detail of grid cutting boundary

由于在模拟中的不同时刻,两套网格的相对位置不同,因此网格的切割在每个时间步中都需要进行。

3.2　其他

在CFD++软件的数值模拟中除了采用动态嵌套网格方法外,空间离散采用二阶 Total Variation Diminishing(TVD)格式,时间推进则采用双时间步隐式推进方法,并采取多重网格加速措施。

边界条件上,远场设置为基于特征值的进出口边界,来流马赫数(Ma)为0.5,飞行高度设置为10km,攻角为-2°,侧滑角为0°。物面边界均设置为绝热无滑移壁面。

实际投放中,探空仪以一定出射速度从吊舱中弹出。为方便仿真计算,将探空仪刚离开吊舱的状态设为初始状态,且假设此时探空仪轴线与吊舱轴线平行,出射速度沿探空仪轴线方向,大小为1m/s,初始时刻探空仪位置如图4所示。由于探空仪出口轴线同X-Y平面成-1.2°夹角(迎风端朝下),因此探空仪初始姿态欧拉角Θ=-1.2°。数值模拟时,先通过定常模拟获得初始位置的稳定流场,以便为自由运动模拟提供初始流场,然后开启探空仪六自由度运动和非定常模拟。

4　仿真结果及分析

4.1　非定常模拟收敛性验证

非定常时间推进过程中,随着探空仪的运动,流场不断变化,因此一方面需要确保流体域求解的收敛,另一方面需要时间推进步长足够小,以保证探空仪运动轨迹积分过程的精确度。因此,为衡量非定常计算中的收敛情况,首先开展了不同子迭代步数和不同时间步长的数值模拟。

子迭代步数分别取为10步和15步,模拟所得探空仪轨迹及姿态角分别如图6、图7所示,其中位移以探空仪长度L无量纲化处理。可见,两个模拟所得的探空仪轨迹吻合很好,欧拉角差别也很小,尤其是偏航角和俯仰角吻合很好,而滚转角对探空仪气动力影响小,因此为了兼顾计算效率,在模拟中选择子迭代步数为10。

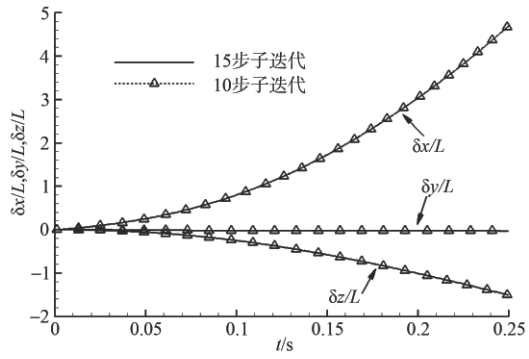

图6　不同子迭代步数模拟的探空仪轨迹

Fig. 6　Dropsonde trajectory of simulations with different sub-iteration steps

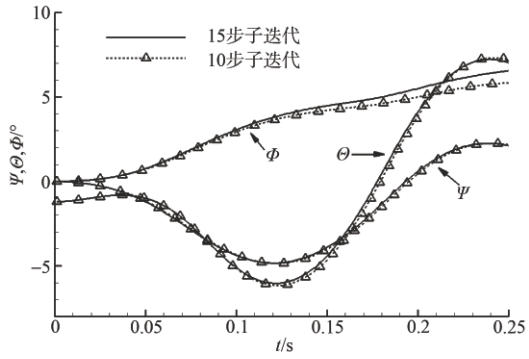

图7　不同子迭代步数模拟的探空仪欧拉角

Fig. 7　Dropsonde euler angle of simulations with different sub-iteration steps

在子迭代步数取为10的基础上,选取时间步长分别为0.002s、0.001s和0.0005s,模拟所得探空仪

轨迹及姿态角分别如图8、图9所示。可见，不同时间步长模拟所得的探空仪轨迹吻合很好，而姿态角存在一定的差别。当时间步长大于0.001s时，姿态角的差别较为明显，而时间步长小于0.001s时，姿态角的差别较小，因此在一般模拟中选择时间步长为0.001s。

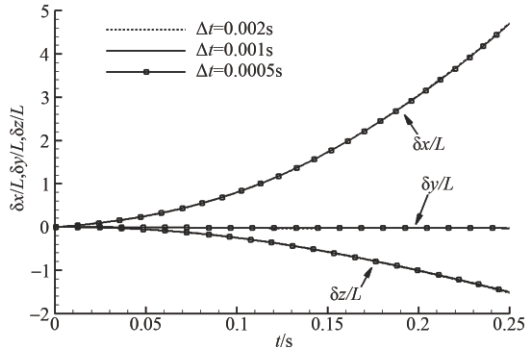

图8 不同时间步长模拟的探空仪轨迹

Fig. 8 Dropsonde trajectory of simulations with different time step lengths

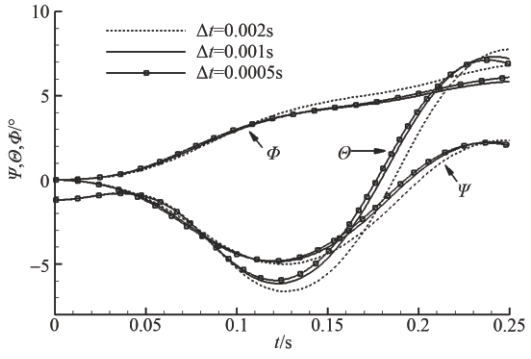

图9 不同子迭代步数模拟的探空仪轨迹

Fig. 9 Dropsonde euler angle of simulations with different time step lengths

4.2 探空仪运动分析

基于子迭代步数为10、时间步长为0.001s的数值模拟结果，作出不同时刻探空仪运动位置图，如图10和图11所示。投放过程中，探空仪主要在流动方向（向后）和重力方向（向下）运动，且流动方向运动速度明显大于重力方向。而一般的“弹类”物体的投放过程中，其运动主要体现在重力方向。可见，探空仪这类轻质物体的投放过程受气动力的影响更为明显。这也是本文选择RANS方程而非欧拉方程求解流体域的原因（4.4节中进一步对比了RANS方法和欧拉方法模拟的结果）。

投放过程中，探空仪未出现翻滚，姿态角变化范围不大，可见由于开口端的存在，使得探空仪气动力作用点处于重心之后，从而具有一定的稳定性。探空仪离开吊舱0.2s后则已经脱离无人机机尾，因此数值模拟中只模拟0.25s时长。

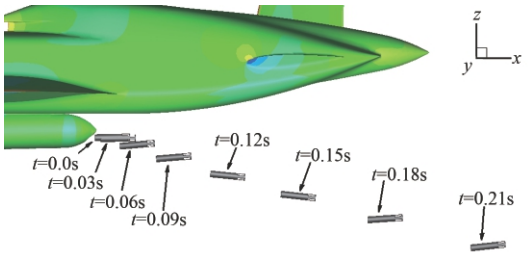

图10 不同时刻探空仪位置（侧视图）

Fig. 10 Dropsonde release events (side view)

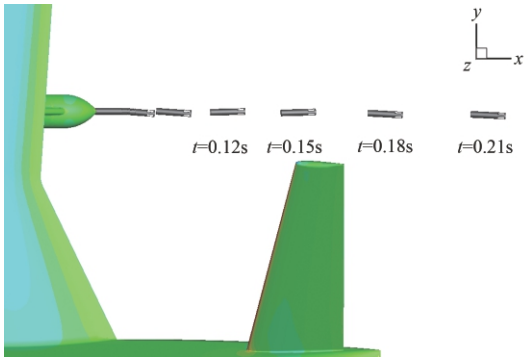

图11 不同时刻探空仪位置（俯视图）

Fig. 11 Dropsonde release events (top view)

进一步对气动力进行量化分析，作不同时刻三个方向的气动力和力矩如图12、图13所示。可见，y方向的气动力很小，其原因是偏航角Ψ较小（如图7所示），并进而使得y方向的速度（图14）及位移均很小。俯仰角Θ较大，因此z方向气动力亦较大。至于x方向的气动力，即气动阻力，明显大于其他两个分量，其值可达重力（G）的5倍以上，即x方向加速度可超过5g。对于气动力矩而言，由于探空仪呈圆柱体状，因此其轴线方向（即x方向）气动力矩明显小于其他两个方向力矩。

4.3 吊舱尾迹影响

由图12可见，气动阻力在t=0.06s之前的值较之后的值偏小，结合图10所示探空仪位置，可知探空仪在0.06s之前距离吊舱较近，因此吊舱尾迹可影响探空仪受力。为此作出不同时刻过吊舱轴线的展向截面流场（吊舱尾迹附近，如图15），可见t=0.06s之前探空仪处于吊舱尾迹区内，而尾迹区流速较低，故探空仪受到的气动力偏小；当时间达到

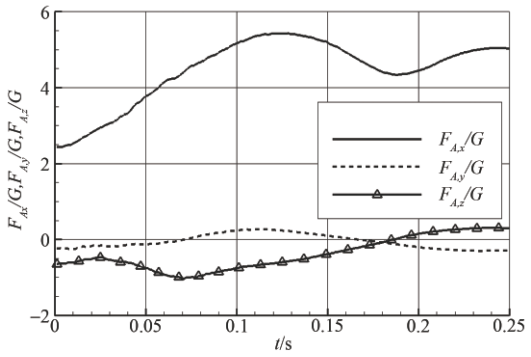

图 12　探空仪所受气动力

Fig. 12　The aerodynamic force of the dropsonde

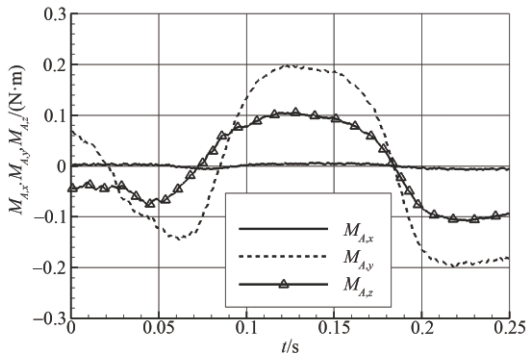

图 13　探空仪所受相对质心的气动力矩

Fig. 13　The aerodynamic moment of the dropsonde

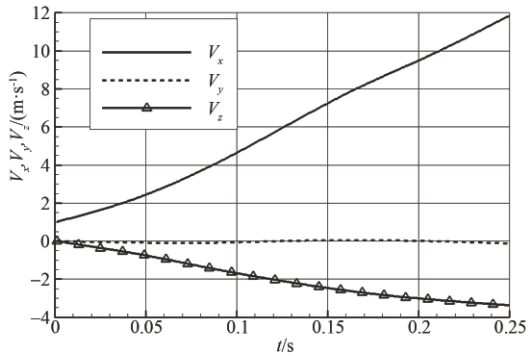

图 14　不同时刻探空仪速度

Fig. 14　The velocity of the dropsonde

0. 1s 后,探空仪已经脱离吊舱尾迹,其受到的来流几乎就是载机飞行来流,故在探空仪姿态变化不大、相对载机运动速度也不太大的时候,气动阻力稳定在较大值附近。

4. 4　流体粘性的影响

在“弹类”物体的投放过程模拟中,流体域采用欧拉(Euler)方程求解,获得的投放物轨迹及姿态同实验值吻合较好[8-9]。为衡量流体粘性对探空仪轨迹预测的影响,本文还采用 Euler 方程来代替

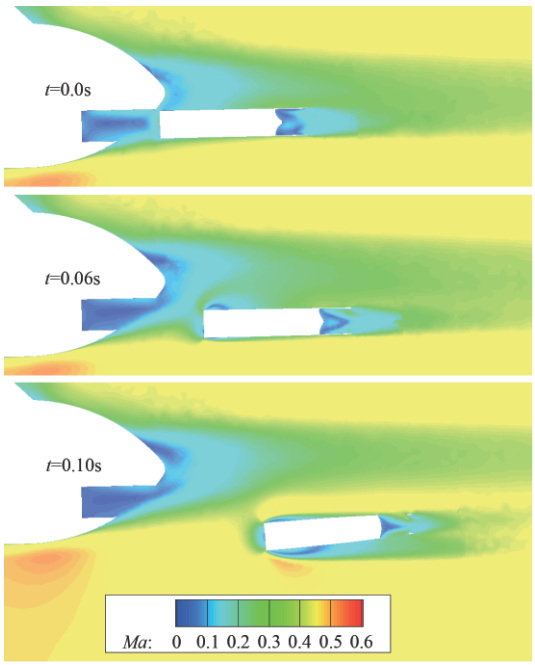

图 15　不同时刻吊舱尾迹流场

Fig. 15　The wake flow of the pod

RANS 方程求解流体域,模拟探空仪投放过程。Euler 方程本质上是忽略了 RANS 方程(1)中的粘性项。同时,壁面边界改为滑移壁面,其他设置保持不变。

探空仪轨迹如图 16 所示,可见欧拉方法获得的轨迹同 RANS 方法差别很大,其本质上是由两种方法模拟的流场存在很大差异引起的,如图 17 所示,欧拉方法模拟的初始时刻流场同 RANS 方法模拟的流场存在很大差别。尤其是吊舱尾迹区,RANS 方法模拟的尾迹区较大,而欧拉方法由于没有考虑粘性,其尾迹区范围小得多,因此探空仪所受气动力亦差别很大。

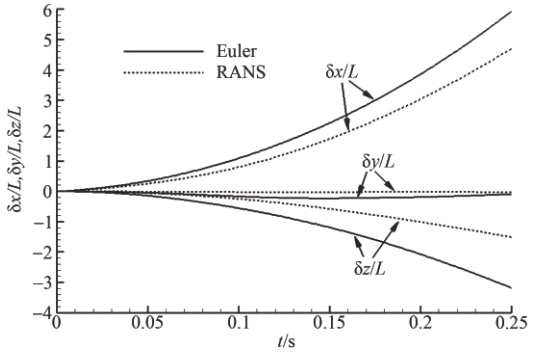

图 16　欧拉方法及 RANS 模拟的探空仪轨迹

Fig. 16　Dropsonde trajectory of simulations with Euler method and RANS

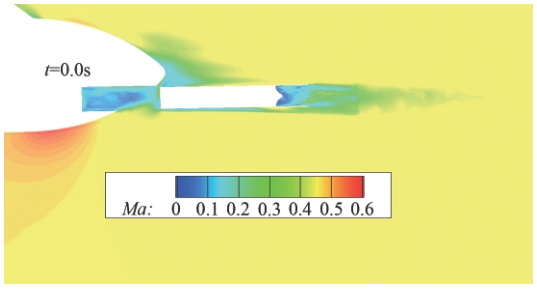

图 17 欧拉方法模拟的吊舱尾迹

Fig. 17 The pod wake flow of the Euler simulation

5 结 论

本文针对下投探空仪从云影无人机翼下吊舱尾部投放安全性问题，采用非结构动态嵌套网格技术，通过求解RANS方程及六自由度动力-运动学方程，数值模拟了探空仪的投放过程，分析了其运动轨迹、姿态变化及受力情况。作为对比，同时开展了基于欧拉方法的数值模拟。通过研究探索出了适合探空仪投放仿真的数值模拟方法，并得到了下面主要结论：

(1)对于嵌套网格切割问题，一般情况下使用子网格外边界切割背景网格即可；但当子网格同背景网格物面相交时，需要先采用背景网格物面对子网格进行切割。

(2)探空仪的“密度”(重量同其外壳所占流体域体积之比)小，因此投放过程中气动力明显大于重力，流向加速度可达5g以上。

(3)由于探空仪设计有开口端，使其气动力作用点处于重心之后，从而具有一定的稳定性，投放过程中未出现翻滚，姿态角变化范围不大，因此阻力方向气动力明显大于另外两个方向。

(4)相比于吊舱，探空仪尺寸较小，其投放初始段受吊舱尾迹影响很大，气动阻力明显较小。

(5)同“弹类”物体相比，探空仪外形不具有流线型，且开口端流场复杂，如流体域采用Euler方程模拟，则探空仪投放过程的仪轨迹偏离很大，表明忽略流体粘性不能获得合理的气动力及力矩。在探空仪投放过程的模拟中必须采用RANS，甚至更精确的流动模拟手段。

参 考 文 献

[1] 陈洪滨，朱彦良. 大气下投探空技术的发展与应用[J]. 地球科学进展，2008，23(4)：337-541.

[2] 李杨，马舒庆，官福顺. 飞机下投探空在台风探测中的应用[J]. 气象科技，2016，44(5)：710-714.

[3] 安大卫，郭文，陈良，等. 大型无人机挂载下投探空系统的设计[C]. 第四届军民融合发展高技术装备成果展览暨论坛，北京，2018.

[4] 尹承顺，雷武涛. 飞机外挂物投放风洞与飞行相关性研究思路探讨[J]. 航空科学技术，2015，26(3)：14-18.

[5] 张召明. 飞机外挂物投放低速风洞试验技术研究[J]. 南京航空航天大学学报，2003，35(3)：318-321.

[6] 张启南，肖业伦，陈炳永，等. 外挂物与载机分离过程的数值模拟系统[J]. 北京航空航天大学学报，1996，22(6)：712-716.

[7] 李孝伟，范绪箕. 基于动态嵌套网格的飞行器外挂物投放的数值模拟[J]. 空气动力学学报，2004，22(1)：114-117.

[8] Deryl O S，Evangelos K K，John S R A. Transonic store separation using unstructured CFD with dynamic meshing[C]. 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit，Florida，USA，June 23-26，2003.

[9] 冯文梁，程家林，吕凌英. 武器外挂物投放安全性分析方法[J]. 弹箭与制导学报，2014，34(4)：191-195.

[10] 杨磊. 基于非结构嵌套网格的六自由度武器投放过程数值研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2014.

[11] 杜小强. 不同状态下机载导弹发射的绕流特性的研究[D]. 太原：中北大学，2015.

[12] Wilcox D C. Turbulence Modeling for CFD [M]. DCW Industries，1998.

[13] 方振平. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2005.

作者简介：

肖良华(1985-)，男，博士，工程师，主要研究方向为空气动力学和计算流体力学。

闫林明(1991-)，男，硕士，工程师，主要研究方向为计算流体力学。本文通信作者。

曹世坤(1989-)，男，硕士，工程师，主要研究方向为空气动力学。

郭 然(1988-)，男，硕士，工程师，主要研究方向为无人机气象探测。

陈 斌(1965-)，男，本科，研究员，主要研究方向为飞行器总体、气动及无人机试飞设计等技术。

[引用格式] 王雅琳，杨依然，王彤，等. 2019年无人系统领域发展综述[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：53-57.

2019年无人系统领域发展综述

王雅琳，杨依然，王 彤，葛悦涛
（北京海鹰科技情报研究所，北京 100074）

摘 要： 无人系统包括无人机、无人潜航器和无人车等，在当前复杂战场环境中的作战价值日益凸显。首先研究了美国、欧洲和日本等世界主要军事国家2019年在无人系统领域发布的相关战略规划，然后梳理了各国主要无人系统型号装备的发展情况，最后总结了影响无人系统作战效能的人机协同技术、集群技术等关键技术的研究现状和实际应用情况。表明世界各主要军事强国均高度重视无人系统研发和应用，从总体规划、装备研发和技术研究等维度全面发展无人系统，值得持续关注研究。

关键词： 无人系统；无人机；无人潜航器；无人车；人机协同技术；集群技术；无人战争；新概念总体设计；导航技术；无人驾驶；能源技术

中图分类号： **文献标识码：** **文章编号：** 2096-5915(2019)06-0638-05

Summary of the Development of Unmanned Systems in 2019

WANG Yalin, YANG Yiran, WANG Tong, GE Yuetao
(Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Unmanned systems, including unmanned aerial vehicles, unmanned undersea vehicle, and unmanned ground vehicle, have become increasingly prominent in combat value in today's complex battlefield environments. Firstly, the relevant strategic planning of unmanned systems released by USA, Europe, Japan and other major military countries in 2019 is studied. Secondly, the development of related equipment is compiled. Lastly, key technologies such as man-machine collaboration technology and cluster technology that affect the operational effectiveness of unmanned systems are summarized .It shows that all major military powers in the world attach great importance to unmanned systems, and develop unmanned systems from the dimensions of overall planning, equipment research and development, and technical research, which deserve continuous attention and research.

Key words: Unmanned System; Unmanned Aerial Vehicle; Unmanned Undersea Vehicle; Unmanned Ground Vehicle; Man-machine Collaboration Technology; Cluster Technology; Unmanned War; New Concept Design; Navigation Technology; Unmanned Driving; Energy Technology

1 引 言

随着战场环境的日趋复杂，无人机、无人潜航器和无人车等无人系统承担起越来越多的作战任务，其军事价值受到世界各主要军事强国的高度肯定和重视。2019年，美国、俄罗斯、欧洲和日本等国家和地区持续推进无人系统能力建设，加大顶层规划投入，增强无人系统装备研发，并对关键技术开展攻关，全面推动无人系统快速发展。

2 战略规划

2019年，美国从预算出发，增加无人系统投入和采购量；欧洲主要国家在欧盟和北约合作框架下加强无人系统能力建设；日本为落实新版《防卫计划大纲》能力要求，出台技术愿景文件指导无人系统发展。

2.1 美国

2018年，美国发布新版《无人系统综合路线图

收稿日期：2019-10-15； 修回日期：2019-11-01

(2017–2042)》,同时各军兵种根据自身需求,集中推出各自的无人系统战略规划,并逐步落实相关规划,不断加大资源投入[1]。

根据2019年3月发布的美军2020财年预算,美军在无人系统方向共投资37亿美元,包括MQ–25A黄貂鱼无人加油机、超大型无人潜航器(XLUUV)等项目的预算较上一财年均大幅增长,各类无人系统的采购量也相应增加,以实现预算文件中提到的"增强美军在竞争环境下的机动自由和杀伤力"[2]。

2.2 欧洲

2019年,欧盟的主要防务协议:欧盟永久性结构合作倡议(PESCO)下实施的无人系统项目数量持续增加,包括海上无人反潜系统、港口和海上监视和保护(HARMSPRO)计划、海上(半)自主反水雷系统、欧洲中空长航时无人机(MALE RPAS)等,旨在开发可执行多任务、携带不同载荷和传感器的模块化无人系统[3]。

欧洲多国与美国等北约国家2019年6月举办波罗的海行动–2019(BALTOPS 2019)海上联合军演,期间进行了反水雷演习,多种有人舰船、直升机和无人潜航器等参与,提升了北约各国间的联合反水雷作战能力。11月,涉及意大利、希腊、西班牙、葡萄牙和立陶宛等15个欧洲国家的海洋2020科研项目进行首次演示验证,该项目旨在评估无人机在应对海洋监视挑战方面的作用,本次演示还评估了欧洲与北约联合行动的一体化互操作能力。

2.3 日本

日本防卫省防卫装备厅2019年8月公布《多域综合防卫力量构建研究开发愿景》文件,旨在基于2018年公布的新版《防卫计划大纲》中提出的能力需求,对日本未来的技术创新进行指导,文件强调了无人机和无人潜航器相关技术的发展[4]。随着预警监视范围的扩大和监视对象的增加,需要提升无人机等无人平台的传感器效能和预警监视能力,要求从整体上实现长航时水下无人系统的装备部署,提升无人装备的认知和判断能力,加强警戒监视、后方支援作战和交战方面的技术发展。

3 装备研发

2019年,世界各国加大无人系统的发展力度,无人机研发持续升温,多型在研无人机完成首飞,在役无人机重点提升组网能力;无人潜航器以反水雷作战和探测等任务为重点,同时加速核动力无人潜航器研制进程;无人车和先进机器人公布多个新方案,支撑部队地面任务。

3.1 无人机

各国多型在研无人机进行试飞。2019年8月,俄罗斯首款重型察打一体无人机S–70猎人、牵牛星中空长航时无人机和前哨–P无人机先后成功完成首次试飞[5]。同月,英国空军、美国海军陆战队和澳大利亚空军联合进行MQ–9B天空卫士无人机飞行演示,通过卫星通信实现自动起飞、着陆和滑行。9月,美国海军完成MQ–25A无人加油机原型机首飞。

在役无人机提升作战能力。2019年2月,美国MQ–9死神无人机新地面控制站完成首次测试,通过高安全级别通信系统,可与全球地面控制站和运行中心进行信息共享,以提升态势感知能力。4月,美国MQ–8C火力侦察兵无人直升机加装Link 16数据链,增强与MH–60舰载直升机的组网能力,6月,MQ–8C达到初始作战能力,为上舰作战和训练铺平道路,未来几年将有38架服役[6]。8月,美国宣布MQ–1C灰鹰无人机将在2022年实现Ka频段通信能力。

图1 MQ–8C火力侦察兵无人直升机

Fig. 1 MQ–8C Fire Scout Unmanned Helicopter

新概念无人机快速发展。2019年1月,欧洲多国合作的神经元隐身无人作战飞机技术验证机在第四轮飞行试验中完成第150次试飞。本轮试验从2018年11月开始,目标是评估现有雷达和其他传感器系统对该类飞机的探测与跟踪能力。7月,英国空军快速能力办公室(RCO)和英国国防科技实验室(DSTL)宣布轻型经济可承受新型作战飞机(LANCA)概念,开展无人机系统设计,计划于2022年首飞。11月,空中客车公司公开低可探测性无人试验平台演示验证项目,该平台外形为类似钻石的

菱形,采用无尾布局。2019年,美国XQ-58A女武神远程高亚声速无人机演示验证机完成三次试飞,前两次均成功完成了所有测试目标,第三次在着陆时受损。

图2　XQ-58A女武神无人机

Fig. 2　XQ-58A Valkyrie UAV

3.2　无人潜航器

美国全面发展各类无人潜航器。2019年1月,美国海军刀鱼无人潜航器与无人扫雷系统完成濒海战斗舰反水雷任务模块舰载集成测试,8月刀鱼无人潜航器进入小批量生产阶段,美国海军计划采购30艘[7]。美国国防预先研究计划局(DARPA)于1月发布名为垂钓者(Angler)的项目公告,开发能在深海环境中发现和操纵物体的深海无人潜航器及控制系统,要求在没有全球定位系统(GPS)的深海环境中自主执行搜索操纵目标的任务。美国海军还授予波音公司合同,制造和测试5艘超大型无人潜航器(XLUUV)。此外,美国海军还采购蜂群潜水者(SwarmDiver)超轻型无人潜航器,可执行集群式侦察和反水雷任务,布放和回收可由单人操作。

图3　波音公司的XLUUV设计方案

Fig. 3　Boeing'design of XLUUV

俄罗斯加快核动力无人潜航器试验进程。波塞冬(Poseidon)核动力无人潜航器2019年2月成功完成测试,进入工厂试验阶段。4月,首艘搭载波塞冬无人潜航器的别尔哥罗德号特种核潜艇下水,将于2020年服役,未来哈巴罗夫斯克号特种核潜艇和949A型奥斯卡Ⅱ级巡航导弹核潜艇均可携载波塞冬潜航器。

多国积极发展水下无人系统。英国国防部2019年4月发布公告发展超大型的无人潜航器,对隐秘收集情报,传感器的部署和回收,以及反潜作战等能力提出要求。通用动力公司9月首次展出金枪鱼(Bluefin)-12轻型无人潜航器,具备模块化和智能化等特点,澳大利亚成为首个采购国家。法国海军集团和ECA集团10月展示其为比利时和荷兰设计的反水雷联合解决方案,由无人潜航器、远程遥控潜航器、无人机和声呐等组成。

3.3　无人车和先进机器人

多款无人车公布方案设计。俄罗斯2019年2月发布标记武装无人车,装备红外摄像机、目标探测跟踪设备等,可遥控操作或与士兵协同工作,采用开放式信息架构,便于集成未来技术。6月,Gahat机器人公司展示了三种不同版本的Argo全地形无人车,具有水陆两栖功能。美国机器人研发公司8月展出飞马座可变形无人机/无人车混合系统,具备障碍规避和三维绘图能力,可执行情报搜集、侦察、核生化与爆炸物处理等任务。9月,英国国防科学与技术实验室和美国陆军作战能力发展司令部联合测试无人运输车,检验后勤和补给能力,为两国陆军后勤行动发展和合作奠定基础。

军用机器人仍是重点发展装备。美国陆军2019年2月授出合同为部署量超过4000的魔爪机器人提供日常维护保养和升级,该机器人主要用于对爆炸装置进行探测和无害化处理。以色列通用机器人公司9月展示新型杜高MkⅡ战术机器人,用于特种作战和近战,只需点击屏幕即可操作机器人精准移动、瞄准并使用武器。L3哈里斯技术公司9月推出首款机械臂可向遥控手柄反馈触觉的中型机器人T4,用于在城市和空间受限环境中执行特种武器和战术(SWAT)任务。

4　技术发展

2019年,以美国为代表的军事强国积极发展无

图4 魔爪机器人

Fig. 4 TALON Military Robot

人系统技术，加强人机交互和集群技术发展，同时发展无人机、无人潜航器和无人车领域特定技术，全方位提升无人系统作战效能。

4.1 人机协同技术

未来战争中无人系统将占据越来越重要的地位，但目前无人系统的智能化水平不可能在短期内达到有人平台的程度，在未来相当长的一段时间内，无人平台也难以完全取代有人平台，而二者相互补充、分工协作，可以将各自的效能发挥到最大，因此美国和俄罗斯高度重视人机协同技术发展，不断提升交互能力。

美国空军研究实验室2019年1月授予通用电气航空公司有人-无人系统编队使能架构（TEAMS）原型项目合同，将在灵活、可靠的有人-无人系统（FAMUS）项目下进行架构建模和原型设计工作，将定义一系列架构、流程、方法、工具和环境，为异构、多人、多机团队走向实战奠定基础。

美国陆军3月启动高级组队有人-无人协同演示项目，旨在帮助直升机飞行员在作战中能与无人机进行更好的协同。美国陆军还于8月完成首次架构、自动、自主和交互界面系统能力试验，由MH-47支奴干直升机上的武器操作员使用平板电脑控制一架MQ-1C无人机发射一枚GBU-69精确制导弹药，并引导其成功打击了刚刚探测到的时敏目标。

美国海军8月举办先进海军技术演习（ANTX），通用动力任务系统公司演示了有人-无人平台协同作战能力，实现有人潜艇、无人潜航器和无人艇的跨域指控通信[8]。

俄罗斯猎人无人机与苏-57战机9月进行首次联合飞行测试，演练了苏-57不进入敌防空区的情况下，利用猎人无人机为其远程机载武器提供目标指示。

4.2 集群技术

无人系统集群以单平台的作战能力为基础，以平台间的协同交互能力为支撑，基于开放式体系架构和人工智能技术等构建，具有抗毁性、低成本、功能分布化等优势，是世界主要军事强国重点发展的技术领域。

美国海军与诺斯罗普·格鲁曼公司于2019年2月合作开展项目，使用EA-18G咆哮者电子战飞机等综合电子战平台释放小型无人机群，由无人机前出侦察敌方雷达，参与电子战任务。

2019年3月DARPA进行拒止环境中的协同作战（CODE）项目演示，6架搭载了各种载荷的RQ-23虎鲨无人机和14架虚拟无人机在通信断开、GPS不可用情况下执行任务，并集合自主算法与白军网络，形成了逼真的实时、虚拟测试环境。7月，进攻性蜂群战术（OFFSET）项目完成第二次外场试验，演示地面机器人和无人机组成的自主编队为模拟建筑提供安保。

雷锡恩公司5月利用开放式体系结构和无人航空系统控制标准开发出一项新技术，使美海军可在舰上赛博加固的控制站内管理一支由空中、水下和水面无人系统组成的编队。

欧盟10月推动实施旨在压制敌方防空系统的自主学习无人机群项目，旨在使用智能无人机群迷惑、摧毁敌军防空系统，击落有人驾驶飞机。该项目需要创建特殊算法，使机群能够识别防空系统的特性，并计算出针对防空系统弱点的攻击计划。

4.3 其它关键技术

无人机关注概念总体设计和导航技术。2019年4月，美陆军计划在未来几年快速发展和完善大型空射无人机概念，进行无人机在GPS干扰环境下工作、承担诱饵和电子战任务以及突破防空系统的技术验证。4月，SBG系统公司公布为无人机设计

的小型低功耗惯导系统,可提供实时精确定位和厘米级的位置数据,并能进行后处理。6月,DARPA开展用于射频任务运行的融合式协作组件(CONCERTO)项目,旨在开发一种集成雷达、电子战系统与中型无人机载通信部件的融合射频系统,可在空间更小、功率更低的情况下进行多功能操作。

水下无人系统聚焦通信、能源和导航技术。2019年1月,日本研发出水下光通信技术,可根据水的混浊度改变蓝、绿、红三种激光束,以每秒100Mbps的传输速度实现10m距离内的双向通信。2月,美海军大排量无人潜航器(LDUUV)原型机发展锂离子容错电池系统,可防止电池故障并提高安全性[9]。3月,通用原子电磁系统公司完成铝动力系统首次端到端演示,表明其可与燃料电池系统集成,用于驱动无人潜航器。8月,英国国家海洋学中心与多家公司开展持久性自主水下潜航器精确定位(P3AUV)项目,为无人潜航器提供更高的定位精度,同时降低电力消耗。

无人车发展无人驾驶和能源技术。2019年3月,英伟达公司推出新型英伟达驾驶星座无人车模拟平台,可生成全面、多样和复杂的测试环境。9月,爱普斯勒公司为无人车和战术机器人研制的锂离子电池完成超过3000km的全地形外场试验,在不同地形和天气条件下均具有良好的实用性和安全性。

5　结束语

2019年,以美国为代表的世界军事强国,通过总体规划、装备新研与升级改造、技术探索、演示验证等手段,全面推进无人系统能力建设,并开展跨国跨域跨平台试验演习,取得了一系列重要进展,需要我们持续密切跟踪。

参　考　文　献

[1] 李磊, 王彤, 蒋琪. 从美军2042年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向[J]. 无人系统技术, 2018, 1(4): 79-84.

[2] U. S. Department of Defense Budget Materials - FY2020[EB/OL]. [2019]. https://comptroller.defense.gov/Budget-Materials.

[3] PESCO Member States Driven[EB/OL]. [2019]. https://pesco.europa.eu.

[4] 研究開発ヴィジョン～多次元統合防衛力の実現とその先へ[EB/OL]. [2019]. https://www.mod.go.jp/atla/soubiseisaku/vision/rd_vision_full.pdf.

[5] Тяжелый беспилотник "Охотник" совершил первый полет [EB/OL]. [2019]. https://tass.ru/armiya-i-opk/6730536.

[6] US Navy declares IOC for MQ-8C Fire Scout unmanned helicopter [EB/OL]. [2019]. https://www.flightglobal.com/helicopters/us-navy-declares-ioc-for-mq-8c-fire-scout-unmanned-helicopter/133473.article.

[7] Knifefish achieves milestone C, contract to GD for five systems awarded [EB/OL]. [2019]. https://insidedefense.com/daily-news/knifefish-achieves-milestone-c-contract-gd-five-systems-awarded.

[8] ANTX 2019 to feature 70 new underwater technologies, incubate collaboration [EB/OL]. [2019]. https://insidedefense.com/daily-news/antx-2019-feature-70-new-underwater-technologies-incubate-collaboration.

[9] ATI awards contract to GA-EMS to develop LiFT battery system for LDUUV [EB/OL]. [2019]. https://www.naval-technology.com/news/ati-lift-battery-system-lduuv.

作者简介:

王雅琳(1991-),女,硕士,工程师,主要研究方向为水下无人系统、精确打击武器及作战等。本文通信作者。

杨依然(1993-),女,学士,工程师,主要研究方向为我国周边地区国防战略。

王　彤(1992-),女,硕士,工程师,主要研究方向为无人系统、集群/分布式作战等。

葛悦涛(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为智能通信、导航、人工智能技术发展等。

[引用格式] 王亚珅. 面向数据共享交换的联邦学习技术发展综述[J]. 无人系统技术，2019，2(6)：58-62.

面向数据共享交换的联邦学习技术发展综述

王亚珅
（中国电子科技集团公司电子科学研究院，社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室，北京 100041）

摘 要：联邦学习是一种新兴的人工智能基础技术，其设计目标是在保障大数据共享交换时的信息安全、保护终端个人数据隐私、保证合法合规的前提下，在多参与者或多计算节点之间开展高效率的机器学习，有望成为下一代人工智能协同算法和协作网络的基础。对近期联邦学习的相关研究与成果进行了综合评述，并对未来发展趋势进行了展望。首先，从数据孤岛和隐私保护等两个角度介绍联邦学习的兴起背景，并概述联邦学习内涵与机理；随后，聚焦技术革新和标准化建设“双轮驱动”，概述联邦学习最新进展，并以公共文化服务领域为示范应用场景，介绍基于联邦学习技术的数据共享交换典型应用案例；最后，从通信费用高、统计异构性、系统异构性、隐私问题等四个角度讨论联邦学习面临的困难与挑战。

关键词：联邦学习；数据共享交换；人工智能；隐私安全；数据孤岛；机器学习；系统架构设计；分布式计算
中图分类号：TN915.41 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-5915(2019)06-0643-05

A Survey on Federated Learning for Data Sharing and Exchange

WANG Yashen
(China Academy of Electronics and Information Technology, National Engineering Laboratory for Public Safety Risk Perception and Control by Big Data (PSRPC), Beijing 100041, China)

Abstract: Federated learning is a new basic technology of artificial intelligence (AI). It aims at operating efficient machine learning among multi participants or multi computing nodes, on the premise of ensuring the information security when sharing and exchanging big data, protecting the personal data privacy of the terminal, and ensuring the legal compliance. It is expected to become the basis of the next generation of AI collaborative algorithms and collaborative networks. This paper reviews the recent research and achievements of Federated learning, and looks forward to the future development trend. First of all, this paper introduces the background of federal learning from the perspectives of data island and privacy protection, and summarizes its connotation and mechanism. Then, this paper summarizes the latest progress of federal learning from the perspectives of technological innovation and standardized construction. Moreover, take the public-cultural service field as the demonstration application, this paper introduces a typical application case of data sharing and exchange based on federal learning. Finally, the problems faced by federal learning about high communication costs, statistical heterogeneity, system heterogeneity and privacy issues, are discussed.

Key words: Federated Learning; Data Sharing and Exchange; Artificial Intelligence; Privacy Security; Data Island; Machine Learning; System Architecture Design; Distributed Computing

1 引 言

从2017年首次提出概念、2018年崭露头角，到2019年被学术界和产业界重点关注，联邦学习(Federated Learning)已经成为当前人工智能研究与应用领域的热门技术，展现出强大的打破“数据孤

收稿日期：2019-10-01； 修回日期：2019-10-28
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFC0820503)；中国电科新一代人工智能专项行动计划项目(AI20191125008)；全国一体化国家大数据中心先导工程(17111001，17111002)；国家自然科学基金项目(U19B2026)；中国博士后科学基金第 64 批面上资助项目(2018M641436)；文旅部2018年度文化和旅游智库项目(18K01)；中国电科装备预研联合基金项目(6141B08010102)

岛”能力和用户隐私保护能力。2019年被业界称为“联邦学习元年”。在当前强调数据安全和隐私保护的大环境中，联邦学习技术作为一种新的人工智能技术范式，有望成为下一代人工智能协作网络架构的基础，建立跨域异构参与者之间的数据信任，并促进科学技术的发展与演进。

2　联邦学习兴起背景

在当前人工智能和深度学习浪潮中，存在两个突出而尖锐的难题——“数据孤岛”难题和隐私安全难题[1-2]。更严重的是两者之前存在一定程度的制衡。

（1）“数据孤岛”难题

大多数实际应用领域均存在数据量有限、质量较差的问题，在某些专业性很强的细分领域更是难以获得足以支撑人工智能和机器学习模型进行训练的标注数据；同时在不同数据源之间存在着难以打破的壁垒，难以跨域共享交换，导致当前大数据在某种意义上越来越多地成为“数据孤岛”的总称。

（2）隐私保护难题

重视数据隐私和安全已经成为一种世界性共识和趋势，以2018年5月欧盟出台的《通用数据保护条例》（General Data Protection Regulation，GDPR）为代表的一系列对于数据收集、传输、保留或者处理过程进行约束的条例规定更是加大了数据获取和共享交换的难度，给众多人工智能技术与应用的落地带来了前所未有的挑战。

面对上述挑战，联邦学习技术应运而生，成为解决传统机器学习和人工智能方法在获取标注数据以落地过程中所面临的“数据孤岛”和隐私安全难题而进行的全新尝试。联邦学习是人工智能领域的一项新的基础性技术，其基础便是保护数据隐私并满足法律法规要求，在此基础上它可以在多个参与者或计算节点之间执行高效的机器学习。此外，联邦学习提供“闭环”学习机制，其有效性取决于数据提供者对自己和他人的贡献，这有助于激励更多参与者加入整个数据“联邦”生态。联邦学习具有以下优势与特点[1,4]：

（1）数据保存在终端设备本地以避免数据泄露，满足用户隐私保护和数据安全的需求。

（2）所有参与者都有平等的地位，可以实现公平的合作；确保参与者可以在保持独立性的同时以加密方式交换信息和模型参数，并且可以同时成长。

（3）模型建模效果类似于传统的深度学习算法，尤其是在联邦迁移学习过程中，可以做到最大限度无损训练，避免迁移学习存在性能损失的负面迁移。

3　联邦学习机理概述

联邦学习是机器学习和人工智能面对更加严格的数据管理规定的解决方案。在联邦学习框架中，中央服务器保存可以初始共享的全局数据；每个客户端（参与者或者边缘设备）都保存本地数据，并根据本地数据训练本地机器学习和人工智能模型。然后，根据某种通信机制，客户端将模型参数和其他数据传输到中央服务器（在该过程中，客户端的完整原始数据将不会传输）。中央服务器收集每个客户端上传的数据并进行训练以构建全局模型，每个客户在整个联邦学习机制中都具有相同的角色和地位[3]。联邦学习有效解决了客户端作为使用实体在两个或多个数据之间共享数据而又不贡献数据的问题，因此在很大程度上解决了“数据孤岛”的问题。更重要的是，联邦学习的全局模型可以在每个客户端数据特征对齐的前提下，实现与集中式数据存储相同的建模效果。

图1是联邦学习概念示意图。为了保护文本数据的私密性并减轻通信网络的压力，联邦学习以分布式策略训练预测变量，而不是将原始数据（即参与者的本地数据）发送到中央服务器进行集中训练。在这种情况下，远程客户端设备与中央服务器定期通信以建立全局模型，在每个通信回合中，所选定参与者客户端的子集对其非独立同分布的参与者数据执行本地训练，并将这些局部参数更新发送到中央服务器。中央服务器在融合和更新后将

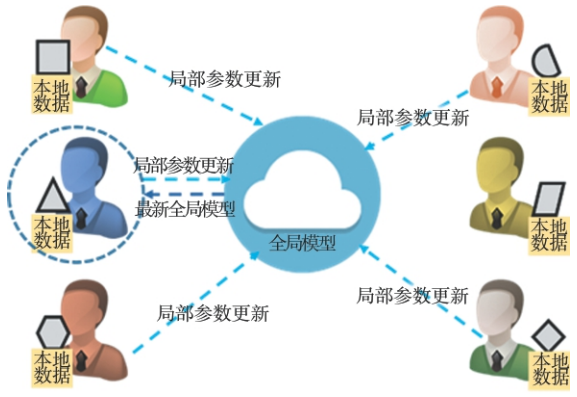

图1　联邦学习概念示意图

Fig. 1　The concept sketch of Federated Learning

最新的全局模型发送回选定参与者客户端。该迭代训练过程将在整个联邦学习网络中不断进行，直到满足收敛或某些终止条件为止[5]。上述过程中，联邦学习的数据汇总与合并并不只是简单地合并各参与者的数据，而是各参与者数据不出本地、采用加密机制完成数据传输，从而在各参与者的客户端均建立高质量的模型。

总体而言，联邦学习可以分为以下三步：第一步，联系和学习通过加密而不是用户数据本身来交换所有参与者的用户标识符；第二步，参与联邦学习的双方可以根据用户标识符找到同类参与者，并以这些参与者的不同特征作为输入，迭代训练模型和交换参数，在此过程中，任何一方无法破解对方具有但己方没有的特征，因此可以保护数据隐私[4]；第三步，联邦学习的参与者可以在不共享己方数据的前提下，利用多方数据优势来实现自己的模型赋能[1]。根据数据样本的不同类型，联邦学习通常被分为横向联邦学习、纵向联邦学习、联邦迁移学习三类[2]。其中，横向联邦学习针对具有相同业务类型和不同区域的场景，参与者之间无需交换信息，对深度学习有很好的支持；纵向联邦学习针对具有相同区域和不同业务类型的场景，参与者之间需要交换中间结果；联邦迁移学习针对不同区域和不同业务类型的场景，解决单侧数据规模和标注样本数据不足的问题，参与者之间需要交换中间结果[6]。相对而言，大规模纵向联邦学习和大规模联邦迁移学习的系统复杂度更高。

4 技术革新与标准化工作同步推进

联邦学习的概念最早由谷歌公司在2017年提出。联邦学习最初的形态是为了解决安卓移动用户个人终端设备上训练模型（例如输入法预选的推荐模型等）产生的数据安全和大量数据传输问题。为此，谷歌公司在2017年提出了联邦学习的原始方案，使参与者（安卓手机用户）在使用安卓手机时可以在本地更新模型参数（如梯度信息等），并将模型参数上传到云，从而使具有相同特征维度的参与者可以联手训练和建立全局模型，并从全局模型中获益。

2019年8月，在第二十八届国际联合人工智能大会（IJCAI 2019）上举办的首届联邦学习国际研讨会是联邦学习的一个重要里程碑和时间节点，标志着联邦学习国际社区的正式成立，联邦学习进入了一个新阶段。2019年12月举办的深度学习与神经网络国际会议（NeurIPS 2019）同样举办了联邦学习研讨会。2019年2月，谷歌公司提出不可知联邦学习架构，全局模型针对由各参与者客户端分布聚合而成的任意目标分布进行优化，以克服经典联邦学习的全局模型训练结果可能会倾向于某些参与者客户端上载的更新参数的问题。2019年5月，日本京都大学团队提出一种全新联邦学习架构，能够根据联邦学习参与者客户端资源条件实现动态管理客户端设备，从而突破具有资源约束的客户端选择问题，允许中心服务器聚合尽可能多的参与者更新信息，并加速改进联邦学习全局模型的性能。2019年6月，美国IBM公司提出了针对贝叶斯非参数神经网络训练的联邦学习架构，每个参与者客户端基于本地数据计算神经网络参数进而构建本地模型，利用联合概率神经匹配策略完成全局神经网络模型的构建，实现了在没有额外监控、数据池等信息且只执行一轮通信的情况下，生成效果更优的全局神经网络模型。2019年6月，美国苹果公司提出面向联邦学习的“本地隐私”机制，实现了在中心服务器或其他参与者的模型能够观察到数据之前，对这些数据进行差异化处理和模糊化处理，从而无法在一定的误差范围内重建数据，进而提升对个人数据的保护。2019年6月，微众银行开源全球首个工业级联邦学习技术框架（Federated AI Technology Enabler，FATE），提供了一系列联邦学习算法以及实现联邦学习算法和系统的范本，致力解决计算架构可并行、信息交互可审计、接口清晰可扩展等工业应用常见数据治理与隐私保护问题。

为了提供联邦学习落地应用的技术规范，为学术界和产业界共建联邦生态提供合作依据，IEEE联邦学习国际标准项目应运而生。2018年12月，IEEE标准协会审批通过关于建立联邦学习标准的提案《联邦学习基础架构与应用标准》（《Guide for Architectural Framework and Application of Federated Machine Learning》）；IEEE P3652.1（《联邦学习基础架构与应用》）标准工作组已于2019年2月、6月、8月和11月分别召开了第一次、第二次、第三次和第四次会议；中国作为联邦学习的先行者，已在标准化领域产生诸多重要举措，例如2019年6月，中国人工智能开源软件发展联盟发布国内首个关于联邦学习的团体规范标准《信息技术服务联邦学习参考架

构》；联邦学习标准草案预计将于2020年2月推出，正式标准预计将于2020年上半年出台。联邦学习进入国际标准流程，标志着加入联邦学习联盟的参与者（企业或者机构等）可以在同一框架范畴内进行交流，同时意味着如果新的参与者希望加入联邦学习生态，则必须根据标准的规定应用相同的框架。联邦学习标准化工作的不断推进，是整个联邦学习生态建设的基础，可以促进联邦学习生态的扩展。

5　基于联邦学习技术的数据共享交换

以公共文化服务领域为示范验证场景，介绍基于联邦学习技术的数据共享交换应用。公共文化服务通常是指由政府主导、社会力量参与，以满足公民基本文化需求为主要目的而提供的公共文化设施、文化产品、文化活动以及其他相关服务。现阶段我国公共文化服务领域数据壁垒突出、面临无法实现跨系统、跨地域、跨部门、跨层级、跨业务的数据共享交换。在该典型应用案例中，建立基于联邦学习技术的文化大数据生态系统，突破基于统一逻辑标准体系的分析、交换、应用技术，融合文化场馆、设施设备、演出活动、专家人员、教学活动、演出节目、人员（视频）行为、群体情绪、愉悦指数等多源异构数据资源，实现跨系统、跨地域、跨部门、跨层级、跨业务的公共文化服务领域数据交换共享，形成覆盖文化原生数据、文化衍生数据的大数据采集应与汇聚融合用体系，在公共文化服务领域内实现“数据分布存储、全领域逻辑一体”，增强业务协同能力、创新智能业务。最终开展基于跨域共享交换的公共文化服务数据采集分析与效能评估示范应用，以联邦学习技术为手段解决以往公共文化效能评估等业务执行与协同过程中普遍存在的跨域数据无法充分汇聚融合进而难以产生综合研判与全要素量化结果的痛点。

基于公共文化服务领域联邦学习技术实现不少于多类型公共文化服务数据共享交换任务，涵盖跨系统、跨地域、跨部门、跨层级、跨业务的公共文化服务数据的共享交换任务：

（1）跨系统共享交换

实现跨图书馆图书借阅管理相关系统、博物馆/美术馆策展相关系统、文化活动中心报名预约管理相关系统和公共文化资源信息管理相关系统、博物馆/美术馆藏品信息管理相关系统、剧场演出系统等多类型系统的公共文化服务数据共享交换任务。

（2）跨地域共享交换

实现跨某地级市某辖区华阳路街道、某地级市某辖区北新泾街道、某地级市某辖区仙霞新村街道、某地级市某辖区古北市民中心等街道社区（镇）以及某地级市其他辖区等多地域的公共文化服务数据共享交换任务。

（3）跨部门共享交换

实现跨文化局、文化艺术中心、民俗文化中心、图书馆、街道社区文化活动中心等多部门的公共文化服务数据共享交换任务。

（4）跨层级共享交换

实现跨某地级市某辖区层级、某地级市某辖区区属街道社区（镇）层级、某地级市某辖区区属街道社区（镇）下辖场馆/群团层级等多层级的公共文化服务数据共享交换任务。

（5）跨业务共享交换

实现跨文化服务推荐、文化资源策展、藏品信息管理、资源底数管理、文化服务效能评估、文化活动报名预约、文化资源借阅、演出展映管理等多类型业务的公共文化服务数据共享交换任务。

最终，建设联邦学习技术驱动的公共文化服务领域数据共享交换平台，融合文化场馆、文群团队、专业人才、演出节目、教学课程等多类型数据资源，实现跨系统、跨地域、跨部门、跨层级、跨业务的公共文化服务领域信息交换共享。在此基础上，完成面向“数据抽取-信息加工-知识融合-认知评估”全流程的异构数据表达组织与存储检索方法，进一步构建大规模公共文化服务资源知识图谱及推理模型，为构建和拓展文化大数据的全新价值链提供基础性智库支撑和决策辅助。

6　联邦学习面临的困难与挑战

经典的联邦学习问题是基于存储在数以千万计的远程客户端设备中的全局数据学习模型，在训练模型参数过程中，客户端设备需要定期与中央服务器通信。当前，联邦学习面临的困难与挑战可以概述为以下四个方面：

（1）通信费用高。在联邦学习问题中，原始数据被本地存储在远程客户端设备中，需要与中心服务器不断交互，才能完成全局模型的构建（包括参数训练等）。一般来说，整个联邦学习网络可能包

含数量庞大的终端设备(即客户端),因此很容易造成较高的通信成本,该问题成为联邦学习的关键瓶颈[3,7]。

(2)统计异构性。终端设备通常以不同的分发方式在网络上生成、处理和收集数据,跨终端设备的数据体量和特征可能会有很大差异。因此,联邦学习网络架构中的数据是非独立同分布的[8]。然而,主流的机器学习和人工智能算法主要基于数据独立同分布假设。因此,如何对非独立同分布数据特征的异构性数据进行建模、分析和评估,是联邦学习进一步推广所必须解决的关键问题。

(3)系统异构性。由于硬件条件(CPU、内存等)、网络连接(3G、4G,5G、WIFI等)和供电(电池电源)的变化,联邦学习网络架构中每个终端设备的存储、计算和通信功能可能会有所不同,联邦学习网络体系架构和终端设备本身的局限性可能导致仅有部分设备在特定时间处于活动状态[9]。此外,与边缘计算所面临的困难一样,数量庞大的终端设备需要特定的空间和环境来部署电力供应资源,因此联邦学习网络架构中的终端设备可能会出现电源故障、网络访问故障和其他紧急情况,从而导致瞬时无法连接。这种异构的系统架构会影响联邦学习的整体效能。

(4)隐私问题。联邦学习共享模型参数更新(例如梯度信息、参数特征等),而不是客户端设备中的原始数据(终端设备中的原始数据依然存储在终端设备中),因此在数据隐私保护方面,联邦学习优于其他分布式学习方法[3]。虽然拥有该优势,但是在训练过程中仍然存在将敏感信息暴露给第三方或中央服务器的风险,因此隐私保护依然是联邦学习的主要关注点。

7 结 论

在当前大数据和人工智能时代背景下,如果无法实现参与者之间的交换数据,除了少数拥有巨体量用户、产品和服务进而坐拥“顶端数据优势”的参与者之外,大多数参与者无法以合理合法且低成本、高效率的方式跨越人工智能的数据“鸿沟”——人工智能应用中对数据的多方集成的需求达到了前所未有的水平。未来人工智能的主要挑战之一仍在于数据,随着互联网的发展和5G技术的突破以及廉价传感器带来的边缘计算及物联网的普及和广泛应用,未来数据将出现不可阻挡的大规模“碎片化”的趋势。联邦学习正是在现有机制规则无法改变的条件下,通过技术手段建立一个虚拟的全局通用模型,以达到与“每个参与者通过汇总数据而建立最优模型”这种方式相同的效果,实现跨域数据共享交换。联邦学习的优势和潜能对于打破“数据孤岛”和促进人工智能在更多行业中的实施具有重要意义。此外,联邦学习对隐私保护、大规模机器学习以及人工智能方法和分布式优化有特殊要求,由此产生了新的跨学科交叉研究方向,包括机器学习、系统架构设计、分布式计算等,这对于推动人工智能理论和基础进一步延伸与拓展具有极为重要的意义。同时,联邦学习国际标准的制定将进一步为其在各行业中的应用提供一个标准化的系统。未来在统一技术标准的基础上,社会各界将建立“联邦”生态,促进联邦学习发挥更大的效能,进而为人工智能产业的发展开辟新的方向。

参 考 文 献

[1] Kairouz P. Advances and open problems in federated learning [J]. ArXiv abs/1912.04977. 2019.

[2] 杨强. AI与数据隐私保护:联邦学习的破解之道[J]. 信息安全研究, 2019, 5(11): 961-965.

[3] Niknam S, Dhillon H S, Reed J H. Federated learning for wireless communications: motivation, opportunities and challenges[J]. ArXiv abs/1908.06847. 2019.

[4] Bhowmick A, Duchi J, Freudiger J, et al. Protection against reconstruction and its applications in private fed-erated learning [J]. ArXiv abs/1812.00984. 2018.

[5] Bonawitz A. Towards federated learning at scale: system design [J]. ArXiv abs/1902.01046. 2019.

[6] Liu Y, Chen T, Yang Q. Secure federated transfer learning[J]. ArXiv.abs/1812.03337. 2018.

[7] Konecný J. Federated learning: strategies for improving communication efficiency[J]. ArXiv abs/1610.05492. 2018.

[8] Mohri M, Gary S, Ananda S. Agnostic federated learning[J]. ArXiv abs/1902.00146. 2019

[9] Nishio T, Yonetani R. Client selection for federated learning with heterogeneous resources in mobile edge [J]. ArXiv. abs/1804.08333. 2018.

作者简介:

王亚珅(1989-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为自然语言处理、大数据共享交换、人工智能等。

《无人系统技术》2019 年总目次

·系统综述·

无人系统之“眼”——计算机视觉技术与应用浅析 …… 张 丹, 单海军, 王 哲, 吴陈炜(2-01)
基于深度学习的单目视觉深度估计研究综述 …… 郭继峰, 白成超, 郭 爽(2-12)
基于不确定性分析的巡视器地形估计方法 …… 郭继峰, 白成超(3-01)
光学遥感影像超分辨率重构研究进展 …… 赵晓冬, 张洵颖, 程雪梅(3-20)
智能无人飞行器技术发展趋势综述 …… 符文星, 郭 行, 闫 杰(4-31)
多移动机器人编队领航跟随方法研究进展 …… 王 帅, 周乐来, 李贻斌, 路广林(5-01)
基于无人机航拍图像的车道线检测方法综述 …… 王秋生, 贺云涛, 张晓辉, 刘 莉(5-09)
无人水面艇技术发展回顾与趋势分析 …… 张 伟, 廖煜雷, 姜 峰, 赵铁军(6-01)

·技术研究·

有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析 …… 樊洁茹, 李东光(1-39)
柔性充气结构在无人系统中的应用 …… 李沫宁, 孟军辉, 刘 莉(1-48)
垂面栖息微型无人机飞行原理与技术进展 …… 昌 敏, 孙 杨, 白俊强(2-22)
无人机编队避障与控制技术研究现状及发展趋势 …… 方洋旺, 欧阳楚月, 符文星, 程昊宇(2-32)
基于 Voronoi 图质心的多无人机协同区域搜索算法 …… 朱 利, 符小卫(2-39)
无人潜航器仿生推进技术专利分析 …… 张鸣宇, 李 峰, 周 鹏(2-52)
基于单目深度估计的视觉里程计算法 …… 郭 爽(3-28)
无人行星车自适应协同探测方法 …… 罗汝斌, 颜 鹏(3-37)
有限推力空间飞行器自主避障研究 …… 赵 毓(3-43)
基于深度学习的空间多目标识别方法研究 …… 王 柳(3-49)
基于深度强化学习的行星车路径规划方法研究 …… 周思雨, 白成超(4-38)
基于拓展 CBBA 算法的在轨装配航天器任务分配技术研究 …… 于晓强, 郑红星(4-46)
基于 OBB 表示的交通场景多传感数据操纵 …… 刘 钰, 张 驰, 李垚辰, 李 力, 刘跃虎, 郑南宁(5-17)
基于视觉和激光数据融合的 3D 多目标跟踪 …… 房建武, 王 贺, 薛建儒, 许宏科(5-24)
基于无人小车嗅觉的混合型气体溯源定位算法 …… 董文轩, 陈建国, 黄 宇, 苏国锋(5-30)
微型筒式共轴双旋翼飞行器共形桨叶设计与气动仿真 … 危怡然, 邓宏彬, 江 明, 潘 海, 王保国(5-39)
防空作战多传感器任务规划算法设计 …… 唐俊林, 张 栋, 王玉茜, 刘 莉(5-46)
基于灰色层次分析法的无人机回收系统评估 …… 赵悦岑, 娄文忠, 汪金奎, 刘伟桐, 苏子龙(5-56)

基于改进型人工势场的路径规划方法 …… 成昌巍, 胡劲文, 王 策, 赵春晖, 潘 泉(6–10)
面向无人机小样本目标识别的元学习方法研究…… 李宏男, 吴立珍, 牛轶峰, 王 菖(6–17)
基于SPEA2算法的UCAV多目标机动轨迹规划…… 朱文强, 杨卫莉, 库 硕, 王 杰(6–23)
“一对多”的空间在轨服务序列规划研究 …… 郑红星, 周思雨, 李伟杰(6–34)
一种欠驱动无人船避障及目标跟踪鲁棒控制方法 ……
…… 张亚博, 姜 明, 肖 强, 王 军, 陈 霖, 张海燕(6–40)
无人机下投探空仪投放过程数值模拟 …… 肖良华, 闫林明, 曹世坤, 郭 然, 陈 斌(6–46)

·前沿动态分析·

美国“快速轻量自主”项目推进无人系统自主能力发展 …… 王 彤, 李 磊, 蒋 琪(1–58)
边缘计算的发展趋势综述 …… 葛悦涛, 尹晓桐(2–60)
5G 在无人驾驶汽车中的应用前景分析…… 张朝阳, 李星宏(2–65)
国外无人在轨服务和模块化可重构航天器发展分析 …… 贾 平, 刘 笛(3–56)
智能遥感研究现状与展望 …… 陈 昕, 刘昌昊, 陈培永, 华 春, 刘延芳(3–62)
浅析国外人工智能技术发展现状与趋势 …… 杨卫丽(4–54)
2019年美国空军人工智能附录——响应国防部人工智能战略 …… 刘晓娟, 李 志, 王 彤(4–59)
美国《2018国防部人工智能战略概要》解析…… 孙 璞(4–62)
2019 年无人系统领域发展综述 …… 王雅琳, 杨依然, 王 彤, 葛悦涛(6–53)
面向数据共享交换的联邦学习技术发展综述 …… 王亚珅(6–58)

·人工智能专栏·

从人工智能到智能产业:迈向第三轴心时代的智慧世界 …… 王飞跃(1–1)
人工智能与“星际争霸”:多智能体博弈研究新进展 …… 张宏达, 李德才, 何玉庆(1–5)
基于人工智能技术的25个行业发展趋势 …… 张肇聿, 王一琳, 李 志(1–17)
人工智能在自动驾驶领域的应用及启示…… 吴 琦, 于海靖, 谢 勇, 刘 贝(1–23)
行人检测算法ACF的后处理改进…… 梁桥康, 汤 鹏, 晏昕童, 孙 炜(1–29)

·水下无人系统专栏·

被动水下目标识别研究进展综述 …… 杨宏晖, 徐光辉, 李俊豪, 申 昇, 姚晓辉(1–7)
基于最小一致性的自治式水下机器人路径规划…… 姚 鹏, 王 琨(4–8)
深海AUV有动力螺旋下潜技术及试验研究 …… 冯 朝, 肖 婷(4–15)
2018年水下无人系统发展综述 …… 王雅琳, 郭 佳, 刘都群(4–20)
用于水声目标信号时频特征提取与识别的深度卷积神经网络 …… 李俊豪, 杨宏晖(4–26)

中国航天科工集团有限公司科技期刊联合征订启事

《**无人系统技术**》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中文学术期刊，创刊于2018年，双月刊。主要刊登无人空中系统、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，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。刊物被中国知网、万方数据、超星数据等数据库收录。国际标准连续出版物号ISSN 2096-5915，国内统一刊号CN 10-1565/TJ。期定价30元，年定价180元。可通过期刊编辑部联系订阅（通信地址：北京7254信箱4分箱，邮编：100074，编辑部电话：010-68191488，发行部电话：010-68375084），E-mail：chinauas310@163. com。

《**飞航导弹**》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，1992年-2018年连续七次被北大图书馆出版的《中文核心期刊要目总览》收录，2012年-2017年连续六年入选中国科技核心期刊。刊物是航天导弹总体专业情报网网刊，为中国学术期刊综合评价数据库来源期刊，被中国核心期刊（遴选）数据库、中国学术期刊（光盘版）和中国期刊网全文收录。刊物主要报道国外飞航武器系统总体技术、制导与控制技术、推进技术，包括飞航导弹、无人机、高超声速技术、临近空间飞行器的研制、试验、生产、装备、作战、改型以及相关的新技术、新材料和新工艺。刊物1971年创刊，月刊，国内外公开发行，大16开本，期定价50元，年定价600元，全年合订本定价800元；入选“2018期刊数字影响力100强（学术类期刊）”，入选2019年北京国际图书博览会（BIBF）“庆祝中华人民共和国成立70周年精品期刊展”。国际标准连续出版物号ISSN 1009-1319；国内统一刊号CN 11-1770/TJ。订阅本刊请与天津市大寺泉集北里别墅17号（300385）“联合征订服务部”联系，可上网www. LHZD. com索要订单；也可与北京7254信箱4分箱（100074）《飞航导弹》编辑部联系订购，电话：010-68376009，68375084（发行部）。E-mail：310feihang@sina. com；网址：http：//www. haiying. org. cn。欢迎登录期刊网站在线投稿。

《**战术导弹技术**》由中国航天科工集团有限公司主管，中国航天科工飞航技术研究院主办，北京海鹰科技情报研究所承办。2014年、2018年连续入选《中文核心期刊要目总览》，2017年、2018年连续入选中国科技核心期刊。刊物是为导弹的研究、设计、制造、试验、使用服务的综合性学术技术类刊物。主要刊登导弹和导弹武器系统总体技术，任务规划技术，制导、导航与控制技术，推进技术，计算机在导弹武器系统及其分系统中的应用技术等方面的学术技术论文。刊物是航天导弹总体专业情报网网刊，入选俄罗斯《文摘杂志》（AJ），为中国学术期刊综合评价数据库来源期刊，由中国学术期刊（光盘版）和中国期刊网全文收录；曾荣获航天科技期刊优秀奖。刊物1980年创刊，双月刊，国内外公开发行，大16开本，期定价50元，全年定价300元。国际标准连续出版物号ISSN 1009-1300；国内统一刊号CN 11-1771/TJ。订阅本刊请与天津市大寺泉集北里别墅17号（300385）“联合征订服务部”联系，可上网www. LHZD. com索要订单；也可与北京7254信箱4分箱（100074）《战术导弹技术》编辑部联系订购，电话：010-68375662，68375084（发行）。E-mail：zhanshu310@126. com；网址：http：//www. haiying. org. cn。欢迎登录期刊网站在线投稿。

《Journal of Systems Engineering and Electronics》是由中国航天科工集团有限公司主管，中国航天科工防御技术研究院、中国宇航学会、中国系统工程学会、北京航天情报与信息研究所联合主办的英文学术期刊，创刊于1990年，双月刊。主要栏目为：电子技术，防御电子技术，系统工程，控制理论与实践，软件、

算法与仿真，可靠性等。刊物被美国科学引文索引（SCI）、美国工程索引（EI）、IEEE Xplore、荷兰Scopus数据库、英国科学文摘（INSPEC）美国剑桥科学文摘（CSA）、中国知网、万方数据以及中国科学引文数据库（CSCD）等国内外多种权威检索机构或数据库收录，荣获由国家新闻出版广电总局组织评选的第三届全国“百强报刊”称号、“中国最具国际影响力学术期刊”“中国国际影响力优秀学术期刊”等多项荣誉，并入选2019年北京国际图书博览会（BIBF）“庆祝中华人民共和国成立70周年精品期刊展”。刊物与美国电气和电子工程师学会（IEEE）签约，成为国内首批与IEEE建立合作关系的期刊，并于2019年在IEEE Xplore实现开放获取（OA）。国际标准连续出版物号ISSN 1004-4132；国内统一刊号CN 11-3018/N。期定价：90元，年定价：540元；邮发代号：82-270。可通过刊物编辑部联系订阅（通信地址：北京142信箱32分箱，邮编：100854，发行电话：010-68386015），也可通过邮局订阅。E-mail：jseeoffice@126. com，网址：http://www. jseepub. com。

《系统工程与电子技术》是由中国航天科工集团有限公司主管，中国航天科工防御技术研究院、中国宇航学会、中国系统工程学会、北京航天情报与信息研究所联合主办的中文学术期刊，创刊于1979年，月刊。主要栏目为：电子技术，传感器与信号处理，系统工程，制导、导航与控制，通信与网络，可靠性等。刊物被美国工程索引（EI）、荷兰Scopus数据库、英国科学文摘（INSPEC）、EBSCO数据库、日本科学技术振兴机构数据库（JST）、中国科学引文数据库（CSCD）、中文核心期刊要目总览等国内外多种权威检索机构或数据库收录，曾获“中国期刊方阵双百期刊”“国家期刊奖百种重点期刊”“中国精品科技期刊”、“中国国际影响力优秀学术期刊”等多项殊荣，并入选2019年北京国际图书博览会（BIBF）“庆祝中华人民共和国成立70周年精品期刊展”。国际标准连续出版物号ISSN 1001-506X；国内统一刊号CN 11-2422/TN。期定价：40元，年定价：480元；邮发代号：82-269。可通过编辑部联系订阅（通信地址：北京142信箱32分箱，邮编：100854，发行电话：010-68386015），也可通过邮局订阅。E-mail：xtgcydzjs@126. com，网址：http://www. sys-ele. com。

《计算机测量与控制》是由中国航天科工集团有限公司主管，中国计算机自动测量与控制技术协会主办的向国内外公开发行的科技期刊。办刊宗旨是报道前沿技术、引领测控技术发展方向，突出前瞻性、导向性和实用性。是从事研究、设计、开发和应用计算机测试和控制技术的科研人员喜爱的科技刊物。刊物为中国科技核心期刊、国家百种重点期刊，被俄罗斯《文摘杂志》、英国科学文摘、美国剑桥科学文摘等著名的国外检索机构收录。刊出的论文体现了技术上的先进性、方法上的新颖性、工程上的实用性、设计上的导向性，内容丰富、信息量大、涵盖面广、适用面宽。栏目设有：专家论坛、综述与评论、自动化测试、控制技术、试验与验证技术、军事测控技术、设计与应用、软件工程技术、数采与处理等。1993年创刊，月刊，大16开本，每期300多页，期定价40元，全年定价480元，在各地邮局订阅。错过订阅时间可随时向杂志社订阅。邮发代号：82-16。帐户：《计算机测量与控制》杂志社，帐号：11001085400059612076，开户行：建行北京阜成路支行；地址：北京海淀区阜成路甲8号航天科工大厦4层《计算机测量与控制》杂志社（100048）。电话：010-68767886，68371556-12～18/23；传真：010-68372068；E-mail：ck@chinamca. com。

《航天电子对抗》由中国航天科工集团有限公司主管，中国航天科工集团八五一一研究所主办，是中国宇航学会电磁信息专业委员会会刊，国内外公开发行。报道内容涉及与空间系统、导弹武器系统相关的雷达、制导与引信、通讯、导航、C^4I等电子设备和系统的电子/光电攻防对抗技术等。主要报道电子/光电攻防对抗的最新技术、科研成果、工程设计和应用、导弹武器系统性能检测与评估、模拟试验等论文与信息。刊物为中国学术期刊（光盘版）、中国期刊网的全文收录用刊，是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”，并被多种文献数据库收录。1985年创刊，双月刊，大16开本，64页码，期定价15元，年定价90元，国际标准连续出版物号ISSN1673-2421；国内统一刊号CN32-1329/TN。订阅请与天津市大寺泉集北里别墅17号（300385）“联合征订服务部”联系，电话：022-23973378，022-23962479；也可与南京1610信箱（210007）编辑部联系，电话：025-84638543。E-mail：htdz8511@126. com。

《现代防御技术》是由中国航天科工集团有限公司主管，北京电子工程总体研究所主办的学术技术性刊

物，中国宇航学会无人飞行器分会会刊。1973年创刊，双月刊，国内外公开发行。2004-2017年连续入编《中文核心期刊要目总览》，2008年起连续被收录为“中国科技核心期刊”（中国科技论文统计源期刊），2009年被评为“RCCSE中国核心学术期刊”，2014年成为国家新闻出版广电总局第一批通过认证的科技学术期刊。主要刊登国内外防御技术，包括空天防御体系、战略战术、防御武器总体、精确制导技术等方面的科技论文。主要栏目有：专家约稿、空天防御体系与武器，导弹技术，导航、制导与控制，指挥控制与通信，探测跟踪技术，军事电子信息系统，综合保障性技术，测试、发控技术，仿真技术等。被俄罗斯《文摘杂志》，清华知网，万方数据——数字化期刊群和中国核心期刊（遴选）数据库等多种文献数据库收录。国内统一刊号CN 11-3019/TJ，国际标准刊号ISSN 1009-086X，大16开本，逢双月末出版。2020年，每期约140页，单价20元，年定价120元。邮发代号2-443。通信地址：北京142信箱30分箱《现代防御技术》编辑部（100854）。电话：010-88528614，E-mail：xdfj@263. net，网址：www. xdfyjs. cn（http：//xdfj. cbpt. cnki. net），作者请在网站http：//www. xdfyjs. cn（http：//xdfj. cbpt. cnki. net）上在线注册投稿。

《系统仿真学报》由中国航天科工集团有限公司主管，创刊于1989年7月，月刊，国内外公开发行；是中国仿真学会会刊，由中国仿真学会和北京仿真中心联合主办，是中国仿真技术领域具有权威性、代表性的学术刊物。其宗旨是报道我国仿真技术领域具有国际、国内领先水平的科研成果，刊登具有创新性学术见解的研究论文。被荷兰文摘与引文数据库（SCOPUS），英国科学文摘（INSPEC/SA），美国UPD，《中文核心期刊要目总览》，中国科学引文数据库CSCD扩展刊，中国科技期刊统计源核心刊，中国核心学术期刊、RCCSE等国内外著名的检索机构收录。连续两年荣获中国最具国际影响力学术期刊。国际标准连续出版物号ISSN 1004-731X；国内统一刊号CN 11-3092/V。大16开本，每期200页左右，单期定价50元，全年总价600元，邮发代号82-9。通信地址：北京市142信箱13分箱《系统仿真学报》编辑部，邮编100854；电话：010-88527147/68388709；网址：http：//www. china-simulation. com；E-mail：simu-xb@vip. sina. com。

《计算机工程与设计》由中国航天科工集团有限公司主管，中国航天科工集团第二研究院七〇六所主办。是中国计算机学会会刊，中国宇航学会会刊，连续入选《中文核心期刊要目总览》、中国科技核心期刊，被国内外多家著名检索数据库收录。刊载论文实行多级审核制度，严控出版质量，努力提升期刊影响力。着力报道计算机科学技术领域最新科研成果，内容覆盖计算机领域各个学科，是各大院校导师、博士、硕士以及科研机构学者和专家投稿之优选。主要栏目：信息安全技术、网络与通信技术、嵌入式系统工程、软件与算法、多媒体技术、仿真技术、智能技术、抗恶劣环境技术、体系结构与外围设备、开发与应用等。欢迎从事计算机领域研究开发的科研机构和个人以及图书馆踊跃订阅。1980年创刊，国内公开发行，邮发代号82-425，月刊，大16开本，每期300页左右，定价38元/册，全年总价456元。国际统一刊号ISSN 1000-7024，国内标准刊号CN 11-1775/TP。通信地址：北京142信箱37分箱，邮编：100039。联系电话：010-68389884，010-88528214。投稿网址：www. china-ced. com，E-mail：ced@china-ced. com。

《推进技术》是由中国航天科工集团有限公司主管，中国航天科工集团三十一研究所主办的全国优秀科技期刊，是国务院学位委员会和教育部研究生办联合指定的重要期刊。1980年创刊，月刊，主要刊登航空、航天和航海推进技术各领域理论研究、设计、实验等方面的学术论文。主要栏目有：综述，总体与系统，气动热力学，燃烧 传热，结构 强度 可靠性，测试与控制，材料 推进剂 燃料，航海推进，电推进和其他推进。曾4次荣获航天科技期刊一等奖，两次荣获全国科技期刊评比二等奖，并荣获第二届国家期刊奖银奖，2002年-2005年，连续4次被评选为“百种中国杰出学术期刊”。2008年荣获“中国精品科技期刊”称号。2015年、2017年连续荣获由国家新闻出版广电总局组织评选的“百强报刊”称号。2018年在国际航空航天学科排名中进入Q2区。刊物被美国工程索引（EI）的核心检索EI Compendex数据库、美国化学文摘（CA）、美国剑桥科学文摘（CSA）、美国国际宇航文摘（IAA）、荷兰文摘与引文数据库SCOPUS、中国核心期刊（遴选）数据库、中国期刊全文数据库（CJFD）、中国科技期刊数据库等收录，是中国科技论文统计源期刊、中文核心期刊和中国

学术期刊综合评价数据库(CAJCED)统计刊源。2014年注册DOI编码。国际标准连续出版物号ISSN 1001-4055,国内统一刊号CN 11-1813/V。国内外公开发行,大16开本,每期240页,每期定价60元,年定价:720元。广告经营许可证号:京丰工商广字第8014号。邮发代号:80-937。欢迎订阅。联系电话:010-88532837,010-68376141;网址:http://www.tjjscasic.cn/或http://www.tjjscasic.com;通信地址:北京7208信箱26分箱(100074);E-mail:tjjs@sina.com。

《导航定位与授时》由中国航天科工集团有限公司主管,北京自动化控制设备研究所、中国宇航出版有限责任公司主办的学术期刊。主要栏目有:导航与控制、定位与授时、仪表与部件、仿真与测试,以及专题专栏。刊物是中国宇航学会无人飞行器分会会刊、中国航天第四专业信息网网刊。由万方数据、中国知识资源总库、维普期刊资源数据库等全文收录。现为中国科技期刊统计源核心刊,《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。 2014年创刊,双月刊,国内公开发行,大16开本,140页左右,定价30元,全年定价180元。国际标准连续出版物号ISSN 2095-8110;国内统一刊号CN 10-1226/V。订阅请与天津市大寺泉集北里别墅17号(300385)"联合征订服务部"联系,电话:022-23973378,022-23962479。编辑部电话:010-88532644,68377087;E-mail:pnt333@126.com;网址:http://dhdwyss.zghtqk.com/ch/index.aspx。

《红外与激光工程》由中国航天科工集团有限公司主管,天津津航技术物理研究所主办,创刊于1972年,是国家新闻出版署批准的国内外公开发行的学术刊物。中国科技论文统计源期刊,中文核心期刊。被美国工程索引(EI),英国科学文摘(SA),美国剑桥科学文摘(CSA),俄罗斯文摘杂志(AJ),日本科学技术振兴机构数据库(JST),荷兰SCOPUS数据库等收录。刊物是中国航天界光电子技术领域内学术性与工程应用性集于一体的综合性刊物,主要刊登国内红外与激光技术方面的学术论文和工程研究报告,集中反映中国光电技术的工程应用水平。期刊常设专栏包括红外技术及应用、激光与光电子技术应用、光学遥感与空间探测、光通信与光传感、光电测量、太赫兹、光谱成像等。刊物为大16开本,336页,月刊,期定价120元,年定价1440元。国际标准连续出版刊物号ISSN 1007-2276;国内统一刊号CN 12-1261/TN,邮发代号6-133。通信地址:天津市空港经济区中环西路58号(300308);联系电话:022-58168883,58168884,58168885;QQ群:275667167,164892997;微信号:irla83589;E-mail:irla@csoe.org.cn;网址:http://www.irla.cn。欢迎登录期刊网站在线投稿。

《计算机仿真》是由中国航天科工集团有限公司主管,北京控制与电子技术研究所主办,《计算机仿真》杂志社编辑出版发行的中国计算机用户协会会刊。旨在促进我国仿真技术交流和发展,既总结过去、探索基础理论,又跟踪发展前沿,重点报导仿真应用成果。内容包括仿真对象建模、仿真算法研究、仿真软件开发、仿真系统的设计与实现、仿真培训系统的研制、连续系统仿真、离散系统仿真、复杂系统仿真、统计仿真、优化仿真、定性仿真、智能仿真、虚拟仿真、分布交互式仿真、建模与仿真的VV&A、基于仿真的设计研究和采办,以及信息网络技术仿真等20个栏目。现已是北大中文核心期刊、中国科技论文核心期刊,多年被中国科学文献计量评价研究中心评为优秀期刊,同时被选入中国学术期刊(光盘版)文献检索系统、中国科学引文数据库等。创刊于1984年,月刊,大16开本,国内外公开发行,可刊登广告。广告许可证:京西工商广字第8201号。国内邮发代号为82-773,全年定价600元(每期单价50元)。欢迎订阅。E-mail:jsjfz@vip.163.com;网址:www.jsjfz.com。投稿系统为:compusimu.gnway.cc。联系电话:59474818。

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

通过期刊网络采编系统进行投稿，网址http://umst.cbpt.cnki.net，或直接搜索无人系统技术。

◆ 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　陈家斌　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　孟凡彬
潘　泉　齐俊桐　时兆峰　孙富春　田大新　王宏伦　韦锦峰　吴向阳　夏元清　向锦武　徐　昕
徐海刚　薛建儒　颜国正　杨　宁　杨宏晖　于进勇　于林宇　赵　杰　张　梅　张　宁　张　山
张冬青　张卫平　朱　枫　朱小燕　Simon X.YA　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：010-68191488（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）68191488（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：张肇聿

ISSN 2096-5915
CN 10-1565/TJ

国内定价：30 元 / 期