

ISSN 2096-5915  
CN 10-1565/TJ

# 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

有人机 / 无人机协同作战专刊

特约主编：丁达理



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



9 772096 591205

2020.4  
第3卷 NO.

# 《无人系统技术》 2020年编委会会议顺利召开



为促进期刊更好更快发展，总结过去一年的工作经验与不足，讨论 2021 年期刊选题和活动策划，同时进一步发挥青年科研人员的骨干作用，荟聚领域青年精英，搭建展示与交流的平台，《无人系统技术》编辑部组织召开了 2020 年编委会会议。

会议由航天三院科技委李风雷总师主持，大同市委副书记、市长武宏文到场致辞。北京海鹰科技情报研究所谷满仓所长致欢迎辞，宣读第一届优秀青年编委名单并颁发证书，航天三院科技委宋斌总师宣读青年编委会章程，西北工业大学无人系统技术研究院符文星副院长宣读第二届青年编委会名单，中北大学李东光副校长、南京航空航天大学昂海松教授、北京理工大学邓宏彬教授、哈尔滨工业大学航天学院郭继峰副院长为第二届青年编委代表颁发聘书，期刊主编张冬青研究员汇报了期刊工作总结及后续策划。

会中，编委专家畅所欲言，对期刊在 2019 年里取得的成绩予以充分肯定，并就期刊编辑出版、新媒体平台建设、学术活动组织等方面的创新思路进行了广泛而深入的交流，提出了很多宝贵意见。青年编委也纷纷表态，将大力支持期刊的建设与发展，积极为期刊撰稿、约稿、组稿、审稿，同时加强期刊的宣传与推广工作。希望通过青年编委会的建设，能够发现、培养更多无人系统领域青年人才，搭建研究成果与技术交流的平台，凝聚国内青年研究力量，活跃科研氛围。

后续，编辑部将认真研究落实编委专家提出的宝贵意见，以期刊为核心，结合网站、微信等新媒体平台，以及国际无人系统大会、无人系统高峰论坛等品牌活动，整体联动，打造国内无人系统领域一流的学术交流平台。

会后，大同市副市长郭蕾陪同领导专家参观考察了大同市通用航空产业园。此次会议的成功举办对于促进大同市政府和《无人系统技术》期刊平台及相关领域专家团队开展深度合作、实现互利共赢高质量发展起到了巨大的推动作用。



# 无人系统技术

第3卷第4期 2020年7月

## 目次

### 系统综述

有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响 .....	01
丁达理, 谢磊, 王渊	
防空压制任务中的智能协同作战体系研究 .....	10
王兴虎, 程家林, 郭强, 何胜杰, 郭菲, 陈韵竹	

### 技术研究

#### · 控制技术 ·

有人机/无人机协同系统航迹控制关键技术浅析 .....	22
李樾, 韩维, 仲维国	
基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法 .....	29
时晨光, 丁琳涛, 周建江	
多无人机监督控制系统设计与实践 .....	42
吴立珍, 牛轶峰, 王菖, 方斌	
无人机载武器预先准备控制逻辑和仿真研究 .....	53
聂光成, 王勇, 邢驰, 谢磊	

#### · 决策系统 ·

小型有人/无人协同特混编队对舰攻击策略研究 .....	58
李兵, 廖志远, 滕传福, 崔金雷	
有人机/无人机编队协同作战决策系统架构设计 .....	66
王新尧, 孙厚俊, 王朝阳, 曹云峰	
基于机动动作库的UCAV逃逸机动决策 .....	73
谭目来, 朱文强, 刘远飞	

### 前沿动态分析

国外典型有人机/无人机协同作战项目发展分析 .....	83
李磊	
由美军作战概念出发的有人机/无人机智能协同作战解析 .....	91
张旭东, 吴利荣, 肖和业, 郝明月, 尹航	

《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.3 No.4 2020

## Contents

### Systematic Review

The Application of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Combat and Its Influence on War Form ..... 01

DING Dali, XIE Lei, WANG Yuan

Research on Intelligent Cooperative Combat System in Air Defense Suppression Mission ..... 10

WANG Xinghu, CHENG Jialin, GUO Qiang, HE Shengjie, GUO Fei, CHEN Yunzhu

### Technical Study

#### • Control Technology •

Review of Trajectory Controlling for Manned/Unmanned Aerial Vehicle Cooperative System ... 22

LI Yue, HAN Wei, ZHONG Weiguo

Transmit Power Control Algorithm in Manned/Unmanned Aerial Vehicle Hybrid Swarm Based on Stackelberg Game Theoretic Model ..... 29

SHI Chenguang, DING Lintao, ZHOU Jianjiang

Design and Practice of Supervisory Control System for Multiple Unmanned Aircraft Systems ... 42

WU Lizhen, NIU Yifeng, WANG Chang, FANG Bin

Study on Pre-preparation Control Logic and Simulation of UCAV Weapon ..... 53

NIE Guangshu, WANG Yong, XING Chi, XIE Lei

#### • Decision Making System •

Research on the Attack Strategy of Small Manned/Unmanned Coordinated Special Mixed Formations on Ships ..... 58

LI Bing, LIAO Zhiyuan, TENG Chuanfu, CUI Jinlei

Architecture of Decision System for Manned/Unmanned Aerial Vehicle Formation Cooperative Combat ..... 66

WANG Xinyao, SUN Houjun, WANG Zhaoyang, CAO Yunfeng

UCAV Escape Maneuver Decision Based on Maneuver Library ..... 73

TAN Mulai, ZHU Wenqiang, LIU Yuanfei

### Frontier Dynamic Analysis

Development Analysis of Typical Manned/Unmanned Aerial Vehicle Collaborative Operations Projects Abroad ..... 83

LI Lei

Analysis on Concept of Intelligent Cooperative Combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Evolving from the Combat Concept of American ..... 91

ZHANG Xudong, WU Lirong, XIAO Heye, HAO Mingyue, YIN Hang

[引用格式] 丁达理, 谢磊, 王渊. 有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 1-9.

# 有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响

丁达理, 谢磊, 王渊  
(空军工程大学, 西安 710038)

**摘要:** 智能化战争即将到来, 在人工智能和无人作战飞机技术与装备发展的推动下, 有人机/无人机智能协同作战得到世界各军事强国的高度重视。通过分析智能化武器装备的直接动因和现有无人飞机作战模式的局限性, 论述了有人机/无人机智能协同作战的背景和军事意义, 重点阐述了有人机/无人机智能协同对空中机动作战、近距离空中支援作战、空中遮断作战、制空作战、战略空袭作战五种作战样式的颠覆与冲击, 继而分析了空中作战样式、作战潜力、飞行员和军事技术体系结构等战争形态因素的影响。对于促进相关行业和部门提高对有人机/无人机协同作战的重视和提前谋划具有一定的参考价值。

**关键词:** 有人机/无人机协同; 智能化; 武器装备; 作战样式; 战争形态; 攻击模式

中图分类号: V19 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2020)04-01-09

## The Application of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Combat and Its Influence on War Form

DING Dali, XIE Lei, WANG Yuan  
(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Intelligent warfare is coming soon. Driven by the development of artificial intelligence and unmanned combat aircraft technology and equipment, the intelligent coordinated combat of manned and unmanned aerial vehicles is highly valued by military powers in the world. By analyzing the direct causes of intelligent weapons and equipment and the limitations of existing unmanned aircraft combat modes, the background and military significance of manned/unmanned aerial vehicle intelligent collaborative operations are discussed, and the focus is on the manned/unmanned aerial vehicle intelligent collaborative air mobility the subversion and impact of the five combat styles of combat, close air support combat, air interdiction combat, air dominance combat, and strategic air strike combat, followed by analysis of the impact of air combat styles, combat potential, pilots, and military technology architecture and other warfare factors. It has a certain reference value for promoting relevant industries and departments to pay more attention to the manned/unmanned cooperative operation and plan ahead of time.

**Key words:** Manned/Unmanned Aerial Vehicle Coordination; Intelligence; Weapon Equipment; Combat Style; War Form; Attack Mode

## 1 引言

人工智能是继第三次工业革命以后科技发展的战略制高点, 各世界强国相继把人工智能提升到国家发展战略层面, 同样, 在国防科技领域, 智能化

武器装备得到了空前的重视和发展。人工智能将推动新的军事技术革命, 并成为战争形态演变的第一推动力。在新作战概念、自主武器装备军事需求及人工智能技术驱动下, 无人作战飞机的智能化程度和自主性得到了显著提升, 以美国忠诚僚机为典

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-06-27

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2020JQ-481); 航空科学基金项目(201951096002)

型代表的研究概念与计划将大幅提升有人机/无人机协同作战能力,有人机/无人机协同作战样式已经初露端倪,并将给航空兵作战思想、作战模式和组织编制带来深远的影响乃至变革。

## 2 有人机/无人机协同作战的背景与需求

### 2.1 人工智能是新一轮科技革命和产业革命的重要驱动力量,也是智能化武器装备的直接动因。

2016年以谷歌阿尔法狗(AlphaGo)、美国国际商用机器公司(IBM)类脑芯片为代表的人工智能典型应用名声大噪,深度学习、模式识别、脑与认知等人工智能基础科研领域取得突破性进展,人工智能技术在武器装备发展中的基础性支撑作用逐步显现。人工智能被认为是第三次工业革命以后科技发展的战略制高点,其迅猛发展决定未来智能化作战的胜负,受到各国政府高度重视。2016年10月,白宫发布了两份人工智能领域发展报告:《为未来人工智能做好准备》和《国家人工智能研究与发展战略规划》,从国家预算规划层面提出了人工智能技术研究和发展战略。2016年8月,日本防卫省发布了第二次世界大战后的首个军事技术发展顶层战略《防卫技术战略》,强调发展人工智能技术的重要性<sup>[1]</sup>。2016年3月,俄罗斯国防部长批准了《2025年前发展军事科学综合体构想》,重点关注人工智能等前沿颠覆性技术的发展应用。2017年7月,中国国务院发布《新一代人工智能发展规划》,明确指出要以提升新一代人工智能科技创新能力为主攻方向。习近平总书记在中央政治局就人工智能发展现状和趋势举行的第九次集体学习时强调指出:人工智能是新一轮科技革命和产业革命的重要驱动力量,加快发展新一代人工智能是事关我国能否抓住新一轮科技革命和产业革命的战略问题<sup>[2]</sup>。同样,人工智能也是武器装备科技革命和战争演进的重要驱动力量。军事领域是对科技前沿感知最敏感的领域。当前,随着人工智能等相关科技的飞速发展,对于未来的潜在军事影响,世界各军事强国都高度关注。美国海军研究办公室和空军研究实验室于2000年率先提出了无人战斗机(UCAV)自主作战(Autonomous Operations)的概念。《美国空军无人航空器飞行计划2009-2047》指出,自主化运行模式

有利于提高无人飞行器系统的总体效能。未来的无人飞行器系统将能够独立地观察作战态势并采取行动,仅需要有限或很少的人力参与,这将极大缩短决策和攻击时间。《美国空军2010—2030年科学技术展望》指出:接下来十年,美国空军有两个关键领域需要优先发展和重点投入,强化使用自主化和自动化系统。《美国无人机发展路线图2017—2042》在前面序列发展路线图的基础上,更加强调通过人工智能和机器学习提高无人作战飞机的自主性能力,并在综合自主能力路线图提出的四大自主能力中明确提出要发展可执行人类决策的忠诚僚机。美国空军发布的《2019空军人工智能战略》也指出要加速人工智能技术的融合和武器化,将在所有任务中利用和运用最具代表性的人工智能,以更好的速度和准确性实现成果,同时优化每个飞行员的能力。

### 2.2 传统攻击模式不能满足空战军事需求,亟需提升智能自主作战能力。

现代信息化高技术战争中,无人机正在发挥着越来越大的作用。近年的阿富汗战争、叙利亚战争等频繁出现捕食者、全球鹰等无人作战飞机,在这些无人机武器系统中驾驶员不在飞机上,但驾驶员仍然保留在UCAV系统回路中,这种模式可称之为操控员远程操控模式。而且,其作战使用需要地面控制站具备远程目标人工识别、目标搜索、攻击决策等功能,并通过地面控制站任务规划系统指挥控制UCAV进入可发射区,构成制导武器的发射条件。可见,当前无人机武器系统作战均采用操控员远程操控攻击模式。但是这种攻击模式具有以下局限性。

(1)不可避免的要求地面指挥控制站与UCAV之间大数据量的交互,特别是在复杂作战环境和强对抗作战条件下,不仅增加了无人机对通讯的带宽、可靠性、实时性等需求,还使得地面操控人员必须实时处理和完成态势评估与威胁估计、战术决策、机动攻击/规避/干扰轨迹规划、机动飞行控制、特情处置、武器发射与控制等一系列复杂的作战任务,这将使得地面操控人员难以胜任。

(2)无人机在与地面通讯过程中极易受到干扰,存在作战指挥控制和信息交互的链路隐患。典型的事件有2011年伊朗成功通过电子战技术干扰

美国RQ-170哨兵无人机的控制链路,使得无人机在伊朗境内降落。

(3)地面操控人员的固有生理因素,如估算精度、动作准确性、反应时间、攻击决策的优劣程度等限制导致地面操控人员并不能充分利用飞机和武器系统的全部能力,甚至产生错过或丧失攻击时机,乃至错误攻击目标等严重后果。

然而,UCAV制空作战面临严峻的强对抗作战环境,目标具有高速/高超声速、大机动、低可探测性等特点,攻击时间窗口极短,战机稍纵即逝。使得无人对地打击采用的操控员远程操控作战模式不能适应无人制空作战。在人工智能技术的发展和推动下,智能自主作战模式成为解决空战所面临关键难题的必然技术发展方向,并具有以下两方面主要优势。

(1)飞行员进行大量地面模拟飞行训练和战法研讨,研究各种战术动作,累积经验。特别是近百年的飞行员实战与空中飞行训练,得到了丰富的实战经验,飞行员作战与训练经验为UCAV智能自主空战提供优秀的学习样本。空战知识来源于飞行员,但从飞行员处直接获得的是关于空战决策、飞行操纵等方面的一组离散的客观事实描述数据,通过飞机数据记录设备获得数据,大部分情况下对于飞行员的经验数据只能通过与飞行员的交流获得,它们是构成信息和知识的原始材料,对于空战战术决策显然是至关重要的数据财富。随着人工智能技术的发展,通过对飞行员数据进行处理,消除数据的不确定性,找到具有特定含义的彼此有关联的数据,形成空战知识,通过知识集成形成知识库,知识是结构化的、对于战术决策与战术机动具有指导意义的信息,对于提高作战能力具有重要的支撑作用。

(2)机器智能与飞行员智能具有很好的互补、移植和共生关系,在有人机/无人机协同作战中具有显著的军事应用发展潜力。智能互补指人的智能与机器智能间相互取长补短。人的长处体现在创造性、灵活性、主动性,适宜从事非常规的、不确定的、未确知的管理活动,如高层决策、总体规划、发展预测等;人的短处是易疲劳、会遗忘、有情绪,其脑力和体力劳动能力受到心理和生理条件的限制,不适于进行重复性、繁琐性、单调性的工作,如

大量记忆、精确计算、高速查询等。相反地,计算机的长处是抗疲劳、不遗忘、无情绪,适宜担负重复的、繁琐的、单调的,需要大量记忆、精确计算、高速查询的工作;计算机的短处是规范性、呆板性、被动性,不适于处理非常规、不确定、未确知的管理问题,而适于处理常规的、确定的、确知的问题。因此通过智能互补可以充分发挥机器智能和飞行员智能的优势。另外,通过机器学习,在智能技术的研究、开发、应用过程中,机器智能还可以不断挖掘、学习和应用飞行员智能,使得人的智能不断地向机器智能转移,将逐步提高机器的人工智能水平。

### 2.3 智能化无人机武器装备运用加速发展,有人机/无人机协同作战已初露端倪。

尽管在深度学习、模式识别、脑科学等人工智能基础领域取得了突破性进展,推动了无人机的智能化和自主性水平加速提升,并具备了较好的机动轨迹规划与跟踪控制等方面的能力,但是在不确定、多任务、高威胁的现代强对抗作战条件下,无人机全自主模式距离实战仍具有较大的距离。因此,具有战术宏观决策优势的有人机和具有技术微观规划与控制优势的无人系统协同作战应运而生,并已初露端倪。美国防部认为,由于当前无人机技术尚未达到全自主的水平,利用当前现有装备进行有人机/无人机协同是一种可行的作战方式。

(1)全自主作战模式无人系统从技术攻关到实战运用仍有较大距离,操控员远程操控攻击模式是当前一段时间的主要选择。

要实现无人机完全自主作战需要具备复杂战场环境理解能力、战场态势综合分析判断能力、对手和目标战术意图的预估、及时响应能力以及面对意外事件的处理能力,这都对无人系统的自主性和智能性提出了极高的要求,目前全自主模式仅能够在特殊场景下使用。2011年2月4日,X-47B验证机在爱德华兹空军基地首飞成功,X-47B一改过去无人机地面遥控的历史,工作人员只需预先输入程序,X-47B自动完成起飞、打击固定目标、返回和降落等一系列任务。2013年5月和7月,X-47B成功在乔治布什号航空母舰上完成自主弹射起飞、着舰复飞和降落任务,引发世界持续关注。说明美国在UCAV的自主性已经走在世界前列,但是只能适应于任务确定、目标已知、航路预先规划好这样的

确定性场景。也就是操控员远程操控攻击模式是当前一段时间的主要选择,在强对抗、多场景、多任务或者具有不确定因素条件下全自主作战模式还有较大的距离。

(2)人工智能技术在有人机辅助决策和无人系统自主性能上的基础性支撑作用逐步显现,并具备了较强的自主作战能力。

人工智能技术在航空兵作战领域的应用可以追溯到20世纪70年代开始的美国和俄罗斯等军事强国分别推出的飞行员助手(Pilot's Associate)、机载专家咨询系统(BOCЭC)等研发计划,在威胁估计和态势评估、机动轨迹规划、火力/飞行综合控制等关键技术作了深入的研究与工程开发,并运用在F-16、苏-30等战机上,美国空军空战模拟系统已经能够根据12000条产生规则,执行130个作战目的和450种空中动作,参加训练的飞行员已经不能区分对手的有/无人身份。2016年辛辛那提大学与美国空军实验室合作的ALPHA智能空战系统在模拟器中战胜了人类飞行员——已退役的空战专家GeneLee上校,他将ALPHA描述为“迄今为止最具侵略性,反应迅速,最具活力和可行度的AI”。ALPHA智能空战系统调整战术计划的速度是人类的250倍,从传感器收集信息、分析处理到做出正确反应,整个过程不超过1ms。2016年,在美国国防部支持国防科技预先研究项目预算125亿美元的变革性技术中,在自主系统领域主要投向人机协作、提高机器智能、促进跨平台分布式传感器融合技术的发展。美国国防预先研究计划局(DARPA)2017年财年预算29.7亿美元支持先进算法和软件,提高自适应规划和态势感知等人机协作能力<sup>[3]</sup>。

(3)有人机/无人机协同作战已初露端倪,美国等军事强国率先进行了概念发展计划与能力试飞验证。

有人机/无人机协同作战思想最早出现在20世纪60年代后期,主要是利用无人机不怕牺牲、工作时间长、价格低廉等优点,在有人机的指挥控制下,于“危险、脏、累、枯燥等”环境下执行侦察、打击、目标指示等作战任务。随着防空系统的飞速发展,美国率先在生存环境越来越恶劣的直升机战场大力发展有人机/无人机协同作战。1993年美国空军作

战实验室提出了“基于编队的有人/无人航空平台能力”先进概念,希望无人机充当猎人(有人机)的“捕鸟猎犬”深入危险或未知区域进行侦察和打击任务<sup>[4]</sup>。1996年,波音公司启动了机载有人机/无人机项目。2014年美军在阿拉巴马州的红石兵工厂和加利福尼亚州的飞行测试中心成功完成了AH-64E阿帕奇武装直升机同时控制灰鹰无人机和影子无人机执行任务的测试<sup>[5]</sup>,并对飞行演示进行了对比评估,美国空军作战实验室的有人机/无人机协同作战能力评估结论<sup>[6]</sup>是:(1)完成战术侦察任务所需的时间缩短10%;(2)识别和上报高价值目标的数量增加15%;(3)提供给指挥官的关键信息增加了30%。

有人机/无人机协同作战的巨大军事应用潜力出现后,更多作战技术概念计划纷纷推出,最具代表性的是美国国防部2016年举行的忠诚僚机概念研讨会,确定美国空军计划将F-16改装为可以自主飞行的无人机,并在未来战场上作为F-35战斗机的僚机与其协同使用。美国空军研究实验室目前正致力于研发无人机的自主运算数据库,以期实现以最小的成本将F-16忠诚僚机在若干架五代机之间来回转换控制的愿景。2017年美国空军实验室和以制造无人靶机闻名的克瑞托斯无人机系统公司联合研发的XQ-58A女武神无人作战飞机,根据美国空军忠诚僚机的概念,该型无人作战飞机作为无人验证机,将由F-35/F-16等有人机控制发起攻击,实现有人机/无人机协同作战。2019年3月XQ-58A女武神无人机在亚利桑那州尤马试验场完成首飞。这是一款隐身、高亚声速无人驾驶飞机,是美国忠诚僚机计划的一部分,单机成本200~300万美元。可以说,这是小一号的无人廉价版F-35,美国空军负责人指出:这是一种改变游戏规则的低成本无人作战飞机。同年7月,XQ-58A女武神无人机进行了第二次试飞,美国空军研究实验所宣布,这架喷气式无人作战飞机在71min的飞行中成功完成了所有的测试目标。虽然女武神计划研发的是一款无人僚机,但更广泛的天空博格(Skyborg)计划正致力于有人驾驶和无人驾驶战斗机结合起来,美国空军高级武器采购员威尔·罗珀表示,美空军的F-35A隐身战斗机新版本和希望采购的F-15深度改进型,都可以作为空军无人僚机的长机(指挥

机),美空军并准备修改F-15EX和F-35A Block4(第四批)战斗机,以适应天空博格计划所需的数据连接与处理器。罗珀证实,美空军最终将XQ-58A女武神并入天空博格计划。计划2019年和2020年试飞无人僚机,希望能在2023年之前等到好消息。

### 3 有人机/无人机协同作战运用

各国军队在重视先进空战技术研究的同时,更加关注新质的、变革性的空中作战力量的作战运用。美军的联合作战条令认为,空中力量的作战运用主要包括空中机动作战、近距离空中支援作战、空中遮断作战、制空作战、战略空袭作战五种样式<sup>[7]</sup>。有人机/无人机协同作战作为一种可以预见的全新的作战力量,将作为生成体系作战能力的有效途径,对空中力量的作战运用产生巨大而深刻的影响<sup>[8]</sup>。

#### 3.1 空中机动作战

空中机动作战是指战斗部队机器装备在指挥官的控制下,搭乘直升机等平台,从陆地或海上平台起飞并在战场上机动,以进行地面战斗的一种空中力量作战运用的作战样式。

随着空战武器和地面防空系统的飞速发展,直升机战场生存环境愈加恶劣,近年来美军直升机在索马里战争、伊拉克战争、阿富汗战争中,以及俄罗斯直升机在叙利亚战争中频频被敌方采用伏击战术击毁。2015年11月24日,俄苏-24被土耳其击落,1名飞行员空中被击毙,1名飞行员获救,但搜救的米-8飞机被击落1架;2018年2月3日俄苏-25被肩扛式导弹击落,为解决伏击杀伤带来的装备毁伤与飞行员生存问题。大力发展和提升有人机/无人机协同作战能力就成为军事强国空中机动作战的重点发展方向。

为了应对航空兵空中机动作战面临的严峻防空威胁,提高航空兵在危险和防守严密的高价值区域的侦察和打击能力,早在1993年美国空中机动作战实验室就提出了“基于编队的有人/无人航空平台系统能力”先进概念,力图研发无人机充当猎人,作为有人机的“捕鸟猎犬”,在作战任务中,根据有人机的指挥控制,前突到危险或不明区域,执行侦察或打击任务。2013年开始,美国海军组建了由海鹰直升机和火力侦察兵无人直升机的混合编队,

搭载于海军新型濒海战斗舰。2014年,第35海上打击中队的海鹰直升机和火力侦察兵无人直升机开始部署在西太平洋的濒海战斗舰,将作为对面作战、反潜作战和反水雷任务的关键构成部分。

#### 3.2 近距离空中支援作战

近距离空中支援作战是由航空兵作战力量对距己方地面部队附近(一般为前锋前方3~15 km)的敌方目标实施的空中打击行动。从20世纪90年代以来发生的多次局部战争来看,近距离空中支援作战在联合作战,特别是陆空军联合作战中扮演着十分重要的角色。如美国中央司令部空军部队提交的《“伊拉克自由”行动——数据见证》报告中指出,2003年美军挺进巴格达的作战行动中,美海军和航空兵的飞行任务中有75%属于近距离空中支援作战性质。

目前,战术无人机系统(如美军的捕食者系列)的一般配置有:合成孔径雷达、光电探测系统、对敌制导武器、数据链等,已经具备和有人机协同对地/面攻击的作战能力。美军现装备捕食者、全球鹰等型无人机300多架,配属14个无人机联队(大队),主要部署在12个本土及10余个海外基地。有人机/无人机在近距离空中支援作战中的作用主要体现在接敌运动和进攻歼灭任务中。在接敌运动中,无人机凭借成本低、侦察时间长、侦察灵活性强等特点,可以担任前方侦察的任务,通过数据链实时把敌方信息发送至有人机或地面联合指挥所,为作战行动提供实时目标情报信息。在进攻歼灭任务中,无人机可以在有人机的指挥控制下进行电子干扰和压制,为对地目标打击提供一个安全通道,还可以发挥无人机航程远、续航能力强、超低空突防等特点,携带制导弹药深入敌纵深对目标进行突发性的攻击摧毁。最近经典的战例是2019年9月,沙特的石油设施遭受数十架无人机和巡航导弹的机群攻击,损失惨重,而沙特的防空系统却对此毫无反应。

#### 3.3 空中遮断作战

空中遮断作战是指在敌军事潜力能有效地用于对付己方部队或达成其目标之前,将其牵制、瓦解、迟滞或摧毁而进行的空中作战行动。这种作战运用方式最大的特点就是要在联合作战过程中,空中作战力量能够前出己方前锋线数百公里甚至上

千公里,独立地促成联合部队司令的作战目标。

作为敌方作战系统的关键环节,空中遮断作战主要目标是指挥所、机场、桥梁、弹药库等指挥、机动、物质输送等目标。这些目标必将面临复杂的作战环境和火力强大的防空守卫力量。自从美军在阿富汗战争中首次使用MQ-1型捕食者无人机发射地狱火激光制导弹打击地面目标开始,无人机力量已经成为有效实施对敌打击的火力发射平台,也成为了空中遮断作战力量的重要组成部分。空中遮断作战需要科学运用作战资源,有人机具有飞行速度大、载弹量大、全局决策能力强等优势,无人机具有更长的滞空时间,可以在更广阔的作战区域上空长时间游弋,更重要的是没有人员伤亡和被俘等风险。因此,无人机在广阔的作战区域通过高效能探测系统获得完整的侦察信息,有人机通过综合情报信息,根据作战任务,给无人机分配高威胁目标或紧急突发目标,协助有人机达成作战任务,不仅能有效降低有人机执行作战任务的风险,还能够大幅提高有人机作战能力。根据忠诚僚机2020—2022财年自主技术无人机集成验证计划公告<sup>[10]</sup>,2022财年该项目主要验证有人-无人忠诚僚机编队对敌方防空系统的压制能力,试验场景为GPS和通讯系统受到干扰、敌方防空系统较强,且使用了电子对抗措施。无人机作为敌防空系统压制平台,对作战区域敌方电子辐射装置进行感知、辨别和定位,同时具备独自灵活编队电子战能力。无人机单机或编队同有人长机进行战术协同,能够根据目标威胁程度和目标反映措施在防区内/防区外进行反辐射作战。

### 3.4 制空作战

制空作战是指在一定时间内,运用空中作战力量和地面防空力量,为赢得一定空域的控制权而进行的作战行动。按照美军《2020年联合构想》,制空作战的主要趋势是实现“三化”:空间化、信息化、无人化,并明确提出制空无人作战飞机是具体实现“三化”的八大系统之一。

信息化条件下的制空作战,表现出空中协同的明显特点<sup>[9]</sup>。空中作战单元或小编队的作战能力是发挥空中力量战略功能的基石。美国2016年公开忠诚僚机计划,到2019年XQ-58的多次试飞,F-35与无人作战飞机协同的分布式空中打击平台一

旦成功,就可以实现有人机向无人机赋能,标志着智能化正式成为空战能力的倍增器,引起了世界各军事强国的高度关注。无人作战飞机具有价格低廉、信息处理完整、机动轨迹规划精细、跟踪控制能力精准等优点,而有人机可以在无人机的保护和辅助全方位态势感知的支持下,更加关注整体态势判断和战术决策,根据整体效能最优的原则指挥无人机执行具体目标的攻击、电子干扰等任务。随着无人机智能程度的提升,无人机还可能充当佯攻,配合有人机完成对目标的攻击。波音鬼怪工厂负责无人僚机项目的沙恩·阿诺特表示,当飞行员驾驶超级大黄蜂以600节的速度飞行时,可以随时控制无人僚机在周围飞行,每名飞行员可以在座舱指挥和控制4~6架无人机执行各种任务,从而延伸了作战范围,降低了自身的风险。在未来一段时间内,有人机/无人机在协同作战中的关系将是控制与被控制、功能相互补充的关系。有美国空军军事专家设想:由一架F-22控制3架无人作战飞机,组成混合编队实施制空作战,无人机部署在F-22前面打头阵,F-22则保持无线电静默,被动接收由无人机及卫星传送的作战信息数据,实施攻击前,F-22迅速打开机载无线电装置,搜索、发现和跟踪目标,并指挥无人机发射武器,实施攻击<sup>[11]</sup>。

### 3.5 战略空袭

战略空袭是指使用航空器、导弹等兵器对敌战略目标进行袭击的作战行动。美军认为,战略空袭对战争的进程和结局具有决定性影响。

典型的实施平台有美国的B-52、B-1B和B-2等战略轰炸机。战略空袭一般具有远程、大吨位、纵深、零失误、高风险等特点,而无人机更具有优势来执行此类作战任务。2016年2月,美国空军部长德博拉·李·詹姆斯在美国空军年会上宣布,新一代远程战略轰炸机正式命名为B-21,同时美国媒体报道称,B-21除了有人版,还有无人版,而且可能会与其他隐身战机配合深入敌境,打击防守严密的目标。

## 4 有人机/无人机协同作战对战争形态的影响

战争形态是战争的形式与状态的总称,是指战争这一事物所具有的外在形式或其内在的、本质的必然联系的外在表现。包括下列基本要素:战争主

导要素、战争中介系统、军队战斗力系统整体涌现性、战争空间形态、军事运动基本形式、军事技术体系结构、战争接触方式等<sup>[12]</sup>。

随着人工智能技术的不断突破,军事智能化应用加快,有人机/无人机协同作战已经完成多次试验与关键技术验证,已经成为世界各个军事强国重点支持的变革性技术,并被普遍认为是一种最具可能性的革命性的全新作战模式,也必将对不远将来的战争形态带来深刻影响。这里主要从作战样式、作战能力整体涌现性、空战主导要素与对航空兵技术体系与人才的影响等四个方面进行探讨。

#### 4.1 改变空战游戏规则

随着新主导军事技术(群)核心地位的确立,其发展呈加速推进、以指数增长的强劲态势,对军事技术体系及战争体系的拉动效应明显,是名副其实的战斗能力增长“引擎”。与之相适应的技术体系、作战理论、组织和制度体系在军事和国家层面日渐建立,新型作战武器(系统)技术战术性能大幅提升并得到广泛应用,战争整体能力加速增长<sup>[13]</sup>。在智能化浪潮冲击下,世界军事竞争激烈展开,武器装备加速智能化,适应智能化武器的作战方式、体制编制开始探索,以2014年美国国防部提出以人工智能技术为支撑的“第三次抵消战略”为标志,一场以智能化为核心的世界新军事革命已拉开帷幕。人工智能在航空兵作战上的应用使得有人机/无人机协同作战的全新空战样式变得逐渐清晰,被认为将改变空战游戏规则。在未来网络化作战条件下,有人作战飞机从传统的“射手”向“指挥官”的角色转变。有人机/无人机协同作战将有人机从直接交战的“射手”任务中解放出来,成为获取无人机前突后的火力/信息指挥决策节点,并指挥无人机“射手”完成打击任务。

#### 4.2 能力优势决定制空作战的巨大潜力

尽管以后相当长一段时间,无人作战飞机在整个战场态势的理解与宏观全局战术决策上还有很大的技术局限性,需要由有人机负责指挥与控制,但是无人机技术战术性能的巨大优势将大幅提升现有武器系统的性能,而且能够创造出新的作战能力。2019年波音自动化系统副总裁兼总经理克里斯汀·罗伯特森在波音制空权训练系统(BATS)——绰号忠诚僚机原型机的新闻发布会上说,“波

音制空权训练系统将为盟军的有人/无人飞行任务开创前所未有的优势,凭借其快速重新配置的能力,以及与其他飞机一起执行不同类型任务的能力,波音制空权训练系统将成为一个力量倍增器”。首先无人机具有强大的突防能力,采用的隐身技术和精准控制技术让无人机能够以最优的隐蔽方式空中接敌或超低空甚至贴地突防;其次具有超长持续行动时间,有人机持续执行任务时间最多10个小时,而无人机正常执行任务时间主要取决于燃油动力,如X-47B在空中加油的条件下可以连续飞行50~100小时,很明显,武器装备的连续工作时间从以“小时”计数到以“天”计数,是武器装备的革命性进步,不但使远距离侦察打击或长时间制空作战成为可能,由此构成的军事威慑和持续打击能力使得无人作战飞机具有了前所未有的战略价值;再次是无人机具有有人机无法比拟的机动性能,无人机因为没有飞行员,所以机动性能不受8~9个过载的最大限制,机动是作战飞机完成作战机动占位攻击或战术规避等核心作战任务的最主要方法,一旦自主性能很强的超大机动无人作战飞机成为航空兵作战的力量,这将对作战飞机的设计与生产装备,特别是对传统战术战法带来颠覆性变革;另外,无人机还具有执行命令不打折扣、训练周期大幅缩短、综合成本低、政治风险低等优势。这些优势的汇聚,可以预见将来有人/无人协同作战将不可避免的成为航空兵作战的主导力量。

#### 4.3 给空战飞行员带来全新的心理挑战

飞行员是遂行航空兵作战任务的主导因素。随着有人/无人协同作战概念不断走向清晰,其巨大的能力优势和技术潜力对飞行员带来了全新的心理挑战。美空军上校吉恩·李作为美空军假想敌教官,曾指挥和进行过上千场模拟空战,但是被美国辛辛那提大学开发的“阿尔法”击败后说,“它非常能掌握情况,反应也很快,似乎能预测我的意图,并在我改变飞行动作或发射导弹前立即回应。它知道如何躲避我的攻击,也能在必要时迅速在攻击/防守动作间切换。”可以设想,如果这种情况不是在地面模拟对抗试验,而是发生在将来某个时候的真实空战场景,那将对有人机飞行员产生怎样的影响。从心理发展的一般规律看,作战人员在长期稳定的作战训练下,在心理建立了认识与作战环境

的平衡,使得作战人员形成了一系列习惯化的行为方式,当这个作战环境突然发生变化,特别是出现了随时都有威胁生存的杀人机器时,就会造成作战人员心理压力陡增,出现了与作战环境的不平衡,过去习惯化的行为方式受到了严格的限制。接着,心理上的超负荷压力就很容易摧毁一些人的意志而导致过度的紧张和恐惧。恐惧心理实质上是缺乏处理可怕情境的力量或能力而产生的一种企图摆脱危险的逃避情绪<sup>[14]</sup>。无人作战飞机一旦真正用于空战,使得飞行员这个传统空战的主导因素将面临环境的急剧变化、对作战对象的完全不可预知、作战信心很难建立、缺乏类似训练经验等严峻挑战,而这些都是引起作战人员恐惧心理的重要共性因素。可以预测,一旦有人/无人协同作战应用于实战,并展现出压倒性作战能力优势,将给对手带来不可避免的巨大心理压力甚至恐惧,继而形成碾压式战略威慑。

#### 4.4 对航空兵的军事技术体系结构提出新的技术和人才需求

2016年美国空军发布了《2030空中优势飞行规划》反映了未来航空兵作战将通过信息化技术联合不同平台,聚合形成“能力簇”,以提供获取未来空中优势的整体解决方案,因此,有人机/无人机协同技术不仅要突出平台能力、聚焦自主协同,还需要关注体系优化。首先,从平台技术来看,通过美国的SR-72高超声速无人机计划、TR-X隐身侦察无人机、X-47B、XQ-58A无人机,欧洲的神经元,俄罗斯的猎人无人机等,可以总结出高空、高速/高超声速、隐身、低廉、模块化、先进航电和飞行控制律等关键技术的研发与验证。其次,自主与协同技术,俄军研制可控制无人机的虚拟现实头盔、美国海军进行低成本无人机蜂群项目测试、DARPA选中洛克希德·马丁公司和雷锡恩公司承担拒止环境中协同作战项目发展一套包含协同算法的软件系统,美国空军研究实验室要求洛克希德·马丁公司发展综合的分布式作战管理能力,美军开展的忠诚僚机计划与飞行试验,华沙理工和洛克希德·马丁公司验证无人机编队优化技术,西班牙开展无人机与有人机同空域飞行测试等,无人机的作战管理、自主决策、机动轨迹规划、自主攻击、协同控制、编队优化等关键技术是未来的重点突破方向。最后是用于

体系优化的数据链技术和任务载荷技术,DARPA授予雷锡恩公司承担“满足任务最优化的动态适应网络”任务,还授予诺思罗普·格鲁曼公司“耐力”项目推进高功率激光武器开发,英国皇家海军在扫描鹰无人机上验证ViDAR雷达的探测与自动识别能力等,目标探测技术、新概念武器、动态适应网络等技术也是有人机/无人机后续发展的重点关键技术。

有人机/无人机协同作战是智能化程度很高的高层级联合作战单元,不仅需要关键技术的突破,也需要能够有效组织和指挥的技术与指挥人才。这里主要从作战理论、学科与专业设置、人才培养谈几点思考:一是需要拓展和增强联合作战理论学习,2017年11月2号《解放军报》刊发军事科学院战争研究院文章《以习近平强军思想为指引开创战争研究新境界》中指出,“战争形态加速演变和国际地区安全的严峻挑战,迫切要求军队做实研战课题,夯实胜战根基。在自主作战大前提下深化战争指导,研究打赢战争的方法途径。在科技博弈的制高点上拓展战争手段,高度重视研究新技术的战争效用,用先进理念引领军事技术发展,深化研究新型作战手段和作战力量的研究。”有人机/无人机协同作战作为一种全新的作战样式,无人平台的机动能力、持续执行任务能力等新的作战能力迫使我们必须深化研究这种新型作战手段和作战力量。二是学科与专业设置,学科和专业设置是人才培养的基础制度,关系到人才培养方向与规模,具体人才培养方案、教学大纲和教学内容的设置。目前相关军队院校均设置了无人机相关专业,但是仍存在专业较分散、学科方向不聚焦不清晰等问题,需要加强和完善。三是人才培养,首先是我们的教员队伍基本上是从有人机教学岗位抽调组建的,存在创新教学理念、教学内容的转变适应等方面的需要;其次是无人机装备时间较短,实战实训经验不充足,带来的实战教学内容有待补充完善;再其次是要加强学员的部队见习与实践,培养学员的爱岗敬业、懂装备、善谋打仗等军人素养;最后是无人机部队主要分布在边疆地区,需要有针对性的加强对学员的不怕艰苦、敢于奉献、献身边疆的思想政治教育。

## 5 结束语

现代战争正从信息化战争向智能化战争转化,

无人作战飞机作为航空兵作战的重要力量,正在朝有人机/无人机协同作战的方向发展。通过分析现有局限性,从人工智能推动等方面论述了有人机/无人机智能协同作战的背景和军事意义,并分析了将对空中机动作战、近距离空中支援作战、空中遮断作战、制空作战、战略空袭作战五种典型作战样式产生的深远影响,继而展望了对空战样式、作战潜力、飞行员和军事技术体系结构等战争形态因素的影响。

### 参考文献

- [1] 中国航天科工集团第三研究院三一〇所. 自主系统与人工智能领域科技发展报告[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [2] 习近平谈治国理政(第二卷)[M]. 北京: 外文出版社, 2017.
- [3] 中国航空工业发展研究中心. 空战领域科技发展报告[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [4] Peterson A L, Kuck K F. Airborne Manned Unmanned system Technology (AMUST) Program [C]. American Helicopter Society 55th Annual From, 1999.
- [5] Insinna V. Army's helicopter-drone teams to get capability boost in 2019[EB/OL]. 2019[2020]. <http://www.defense-news.com>.
- [6] Barnes D W. Considerations for the maneuver commander: Could the emergence of unmanned aerial vehicles spell the demise of the ARMY's RAH-66 COMANCHE in the armed reconnaissance role?[D]. Phoenix: University of Phoenix, 1999.
- [7] 武文军. 美军空中力量作战运用研究[M]. 北京: 蓝天出版

社, 2014.

- [8] 魏瑞轩, 李学任. 先进无人机系统与作战运用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [9] 陈洪. 高技术时代的空中力量与作战运用[M]. 北京: 空军指挥学院, 2003.
- [10] Air Force Laboratory. Autonomy for loyal wingman. BFI-AFRL-RQKH-2015-0003, 2015.
- [11] 贾高伟, 侯中喜. 美军有/无人协同作战研究现状与分析[J]. 国防科技, 2017, 38(6): 57-59.
- [12] 董子峰. 信息化战争形态论[M]. 北京: 解放军出版社, 2004.
- [13] 庞宏亮. 智能化战争[M]. 上海: 上海社会科学院出版社, 2018.
- [14] 中国军事心理学研究协作中心, 中国社会心理学会军事专业委员会. 作战心理[M]. 北京: 军事科学院出版社, 1988.

### 作者简介:



丁达理(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为武器系统与运用工程。



谢磊(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人飞行器作战系统与技术。



王渊(1990-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为无人飞行器作战系统与技术。

[引用格式] 王兴虎, 程家林, 郭强, 等. 防空压制任务中的智能协同作战体系研究[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 10-21.

# 防空压制任务中的智能协同作战体系研究

王兴虎, 程家林, 郭强, 何胜杰, 郭菲, 陈韵竹

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091)

**摘要:** 针对现代防空系统对执行防空压制任务的有人机构成了极高威胁的问题, 基于智能协同作战的思想, 构建了一种有人/无人智能协同防空压制作战体系, 帮助空中力量获得对地作战的优势。首先从多个作战案例中分析了有人机和无人机在防空压制任务中的作战能力和各自优势, 接着采用集散式架构建立了智能协同防空压制作战体系。该体系以有人机为指挥决策中心, 多个专业化的作战无人机承担侦察、电子干扰、突防打击等任务, 各作战单元之间通过数据链和智能决策系统进行高效协同。最后设计了智能协同防空压制作战体系的智能决策系统运行原理和逻辑架构。有人/无人智能协同防空压制体系将有人机和无人机的优势充分融合, 是提升空中力量在防空压制任务中的作战效能的有效手段。

**关键词:** 防空压制; 智能协同; 作战体系; 专业化无人作战飞机; 集散式架构; 智能决策

**中图分类号:** V19      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2020)04-10-12

## Research on Intelligent Cooperative Combat System in Air Defense Suppression Mission

WANG Xinghu, CHENG Jialin, GUO Qiang, HE Shengjie, GUO Fei, CHEN Yunzhu

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd, Chengdu 610091, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that modern air defense systems pose a very high threat to the manned institutions performing air defense suppression, a manned/unmanned intelligent cooperative air defense suppression combat system is constructed based on the concept of intelligent cooperative combat, which can help air forces gain the advantage of ground combat. Firstly, the combat capability and their respective advantages of manned aerial vehicle and unmanned aerial vehicle in air defense suppression are analyzed from several combat cases, and then the intelligent cooperative air defense suppression system is established by using the centralized decentralized architecture. The system takes manned aerial vehicle as the command and decision center, and a number of specialized unmanned combat aerial vehicles undertake reconnaissance, electronic interference, penetration and strike tasks. Through data link and intelligent decision system, all combat units can cooperate with each other efficiently. Finally, the operation principle and logic architecture of intelligent decision system of intelligent cooperative air defense suppression combat system are designed. Manned/unmanned intelligent cooperative air defense suppression system is an effective means to improve the combat effectiveness of air forces in air defense suppression missions, which fully integrates the advantages of manned and unmanned aerial vehicle.

**Key words:** Suppression of Enemy Air Defense; Intelligent Collaboration; Combat System; Specialized UCAV; Centralized Decentralized Architecture; Intelligent Decision-making

## 1 引言

防空压制任务是指空中作战力量通过对敌方防空系统的侦察、定位,主动使用电子干扰对其进行干扰/压制,或以反辐射武器、激光制导武器等进行打击的一种作战样式,作战目的是压制、摧毁敌方防空系统或降低其作战效能。

现代战争中防空压制任务的典型特征是任务复杂度高、危险系数大。有人机受限于人体本身对于高对抗作战的耐受力和对复杂战场态势的认知与决策能力,已逐渐难以适应需要综合感知、实时分析、迅即决策、即时应对、高效协同作战的未来防空压制任务。

无人机凭借着较高的作战效费比,已成为多种作战任务中的主要装备<sup>[1]</sup>。伊拉克战争、阿富汗战争等多次高技术局部战争的促进使无人机在战场态势感知、复杂环境适应、危险任务执行等方面已具备超越有人机的能力。

近年来,随着先进载荷、人工智能技术在无人机领域应用开来,无人机的作用将从现有的侦察为主、低烈度打击为辅,拓展到电子干扰、突防打击、战场辅助决策等更专业化的领域。可以想见,未来以有人机作为指挥决策中心,无人机作为战场侦察、电子干扰/压制、突防打击、空中警戒与护卫的主要兵力,依托智能协同技术,形成的有人/无人智能协同作战体,能够带来防空压制作战体系的新变革<sup>[2]</sup>。

## 2 发展现状

防空压制作战最早成体系运用始于越南战争<sup>[3]</sup>。为了压制越南防空导弹,美军发展了F-4G、F-4E、F-16CJ等防空压制专用飞机。作战时,组成战术编队,F-4G负责搜索越南雷达,并将目标位置数据传给F-4E或F-16CJ,后者使用幼畜导弹或集束弹将其摧毁。

防空压制作战的经典战例是1982年的贝卡谷地之战。此战,以色列借助无人机、E-2C预警机、波音707电子干扰机和F-15、F-16突击机群组成的作战体系,仅用6分钟就摧毁了叙利亚的29个萨姆-6防空导弹阵地。

随着雷达和计算机技术的进步,现代防空系统

(如俄罗斯的S-300、S-400,美国的爱国者-2、爱国者-3等)配备了大型有源相控阵雷达作为“眼睛”,高性能计算机作为“大脑”,射程远、制导和抗干扰能力强的导弹作为“拳头”,作战能力相比萨姆等老式防空系统有了质的飞跃,具备了强大的对空探测、目标分析处理和多目标交战能力,更强的抗电子干扰和快速反应能力,还可以机动转移。

有人机组成的防空压制体系在面对现代防空系统时,再也未取得类似于贝卡谷地之战的辉煌战绩,有人机本身的行动安全反而受到了严重威胁。例如,以色列在近两年的针对叙利亚的空袭中,其F-16、F-35I等机群在面对S-300PMU-2防空系统时,不仅未达成压制效果,反而被S-300PMU-2发射导弹成功逼退,甚至F-16遭到击落,F-35I发射的空地导弹也多次被拦截。

由此可见,面对现代防空导弹系统,以有人机为主的空中力量进攻能力受到了限制与削减。而反观由无人机执行的空中突袭任务,无人机取得了不俗的战果,为未来的防空压制任务带来了新的启迪。

案例一:2018年1月8日,叙利亚叛军使用20架小型无人机,挂载轻型迫击炮,以“蜂群”战术突袭了俄罗斯的两处军事基地,尽管军事基地受到防空系统的保护,但叛军的“蜂群”无人机仍击毁了7架军用飞机,造成了俄罗斯近30年来对外战争中较大的一次战损。

案例二:2019年9月14日,也门胡塞武装多架无人机采用低空突防、集群协同的战术突袭了沙特的炼油厂和油田,导致沙特石油减产,国际油价上涨15%,而部署于沙特的爱国者防空导弹系统并未对无人机进行有效拦截。

案例三:2020年4月,土耳其的攻击型无人机在叙利亚战场上数天之内击毁了上百辆坦克和装甲车,还摧毁了多部本来专门用于拦截无人机的铠甲-S1弹炮合一防空系统,证明了无人机与地面防空系统较量时的作战能力。

上述三个案例证明了无人机在面对现代防空系统时,通过合理的战术运用,并凭借自身目标特征小的优势,可以成功突防并取得显著战果,但上述案例成功的一个重要原因是无人机使用方在作战前已基本掌握敌方的作战部署等事先情报,并提前制定了针对性的战术。下面这个案例则说明,现

有的无人机在单独面对随机出现的防空威胁时,缺少体系支撑,易被防空系统击落。

案例四:利比亚战场上,利比亚国民军使用阿联酋提供的翼龙-2无人机击毁了利比亚政府军的大量无人机、军事设施,但随着利比亚政府军引入多套霍克-3机动式防空导弹,翼龙-2面对位置不定、开机时机未知的霍克-3时,缺乏全面的战场态势感知能力、高效的战场态势分析与决策能力,作战效能明显下降,甚至被霍克-3击落。

结合以色列的多次战例和无人机在叙利亚等国的应用,可以预测,为了降低有人机在防空压制任务中的风险,同时提高无人机面临随机战场情况时的反应能力,一种新的防空压制作战体系需要充分融合有人机和无人机各自的优势,以有人机和多种无人机组成高效协同的作战体系来激发出新的战斗力。

### 3 作战需求分析

#### 3.1 危险性不断升高的有人机防空压制作战

防空系统的发展从未停歇,尽管S-300等现代防空系统已大量服役,并在多次实战对抗中不落风,但性能更先进、探测与打击能力更强的防空系统仍在研发中。S-500将在2020年底服役,其有效射程达到600km(超过大部分空地导弹的射程),射高达到185km,响应时间缩短到了4s,并具备打击隐身战斗机的能力。

在面对综合作战能力更强的防空系统时,有人机执行防空压制任务的危险性陡增,现有防空压制体系面临严重挑战,因此,需要作战能力更强、协同效率更高、突防能力更强的防空压制作战体系来突破新型防空系统构筑的空中防御。

#### 3.2 无人机防空压制作战的优势及其面临的问题

多次战争实践证明,无人机通过合理的战术运用,在完善的情报支撑下,可以取得有人机无法比拟的作战效费比。

但现有的无人机也暴露出多个短板:一是作战规划严重依赖事先情报,无法应对随机出现的战场情况并做出即时决策;二是不具备自主协同能力,其作战规划仍然依赖“人在回路”的指挥;三是单体的侦察、电子干扰/压制、攻击能力仍不够强大,功能不够专业化,面对敌方导弹攻击时不具备体系化

的对抗能力。

为了进一步提高无人机在未来防空压制任务的作战效能,需要多型专业化的作战无人机(Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV),UCAV可按功能分为不同编队,但要突出侦察、电子干扰/压制、突防打击等专业化能力,再以智能技术为依托,组成战术编队,形成高效协同、态势共享、即时决策、统一行动的新型防空压制作战力量<sup>[4]</sup>。

#### 3.3 有人机/无人机协同应用于防空压制的重要推动力量

近年来,人工智能技术已在有人/无人协同作战的智能协同任务编队、智能协同态势感知、智能情报信息处理、智能任务决策、智能目标分配、智能协同攻击等多个关键领域取得了一定成绩,相关的理论算法与试验验证在世界范围内呈现出很高的研究热度,未来甚至可能赋予UCAV自主学习的能力<sup>[5]</sup>。人工智能技术的进步将在很大程度上解决有人/无人智能协同防空压制任务中的海量信息处理、即时任务决策、战术任务组织等需要大量分析、计算工作的问题,促进新战斗模式的战斗力生成与作战效能释放<sup>[5]</sup>。

#### 3.4 提升未来防空压制能力的新选择

有人/无人智能协同体系要立足于有人机和UCAV各自的特点与优势,以有人机为指挥决策中心,UCAV为侦察、干扰与进攻主力,通过智能作战体系将有人机的战场指挥决策能力和UCAV目标特征小、感知能力强、突防能力强、成本低的优势有机融合。

通过智能协同作战体系,有人机不必再像以色列空袭叙利亚时“冲锋陷阵”,而是居于后方,通过数据链和多架UCAV共享态势,并得到UCAV的空中掩护,因此,有人机的安全性得以保证;通过有人机和智能作战体系的辅助,单独UCAV面对随机、复杂战场情况时的决策、应对能力不足的问题也得以解决。

### 4 智能协同作战体系构建

执行防空压制任务的作战飞机通常构成一个完整的体系,包含侦察机、电子战飞机、遂行打击任务的飞机,以及提供空情预警与战场指挥决策的飞机等。

在智能协同防空压制作战体系中,与敌方防空系统直接交战的任务应当由UCAV承担,UCAV承担几乎所有的侦察、干扰/压制、打击任务,而有人机负责总体任务的指挥和决策,作战体系中的智能决策系统负责态势分析和给出决策建议,并组织UCAV的突防战术。

#### 4.1 作战体系的能力需求

依据未来对抗先进防空系统的需要,防空压制任务中的有人/无人智能协同作战体系应当基于以下能力进行构建。

##### (1) 多维度、远距离的战场态势感知能力

信息化战争中,被发现即意味着被摧毁。为了保护自己,防空系统对抗空中侦察的手段花样繁多,例如使用假的电磁诱饵、借助地形地物的掩护、采用低可视化的涂装等。

为了满足多种战场环境下的快速侦察需要和应对敌方可能的反侦察手段,我方的UCAV需要具备电子侦察、合成孔径雷达、可见光、红外等多维度的战场态势感知能力,多个维度的侦察情报可相互印证。为了避免侦察时被敌方察觉并遭击毁,我方UCAV需要具备远距离的战场态势感知能力<sup>[6]</sup>,以保证安全的作战距离。

##### (2) 强电子干扰/压制能力

为了在我方编队发起突防打击时提供强有力的掩护,我方UCAV需要具备强电子干扰/压制能力,以扰乱敌方防空系统雷达的搜索、锁定与引导攻击<sup>[7]</sup>。

##### (3) 高效突防打击能力

执行打击任务的UCAV需要凭借高隐身性能、高速、高机动能力,采用合理的突防战术,在我方实时战场情报和电子干扰/压制的支援下,使用反辐射导弹、激光制导导弹等武器对敌方防空系统进行高效的打击。

##### (4) 多平台互联、多链路共享、多任务协同能力

有人/无人协同作战的作战效能很大程度上取决于体系内各单元的情报和资源共享效率与即时分析、决策能力,因此需要多个作战平台之间通过战场数据链紧密连接,多个链路传递的情报能够统一处理并实时共享,为了完成整体作战任务,执行多个战术任务的编队在统一决策下,高效协同,体系联动<sup>[8]</sup>。

##### (5) 高任务完成率能力

高任务完成率由高可靠性、快速响应能力、高

鲁棒性保证。作战体系的平台、链路、智能决策系统需要具备高可靠性,即能承受高烈度对抗带来的高负荷工作而不失效;快速响应能力是指针对随机与突发状况的即时应对能力;高鲁棒性是指某一平台被摧毁,或某一环节被削弱甚至损失之后,剩余体系具有快速补充完成任务的能力。因此,作战体系内既需要专业化的UCAV作为主力,也不能缺少多功能的UCAV作为必要的补充。

#### 4.2 作战体系的基本组成

如图1所示,有人/无人智能协同防空压制作战体系采用集散式架构,基于强协同作战理念和智能协同技术进行构建,由有人机及多个UCAV编队通过数据链相互连接构成,每个UCAV编队承担一定的作战任务,编队之间高效协同,共同完成防空压制任务<sup>[9]</sup>。

有人机在体系中的作用主要是指指挥、决策。UCAV获取到的战场态势信息先由智能决策系统进行分析处理,再将关键信息报告给有人机供其做最后决策,有人机负责从任务层面对UCAV编队进行指挥,在一定的授权基础上,UCAV可对部分情况自主决策。

UCAV在体系中的作用不再局限于充当有人机的传感器与武器,而是要作为核心力量完成对敌方防空系统的侦察、定位、态势评估,通过作战体系统一决策之后,由UCAV组成多个战术编队,协同完成对敌方防空系统的干扰/压制、突防打击任务。此外,UCAV还要协助有人机完成战场情报数据分析和辅助决策<sup>[10]</sup>。

同一个UCAV编队内有长机和僚机的分工。有人机通过数据链将作战指令下达给各个UCAV编队长机,由长机带领僚机执行具体作战任务。UCAV长机负责编队内的态势分析、任务决策以及与有人机和其他UCAV编队的态势信息共享。UCAV僚机负责协助、警戒,同时作为长机的替补。

根据承担的作战功能不同,有人/无人智能协同防空压制作战体系由6种主要作战力量和2种支撑保障力量共8个部分组成。

##### (1) 指挥决策中心

指挥决策中心由有人机承担,作战时居于后方,负责作战任务的总指挥,能够即时分析处理前方UCAV传回的关键战场态势信息,快速得出任务

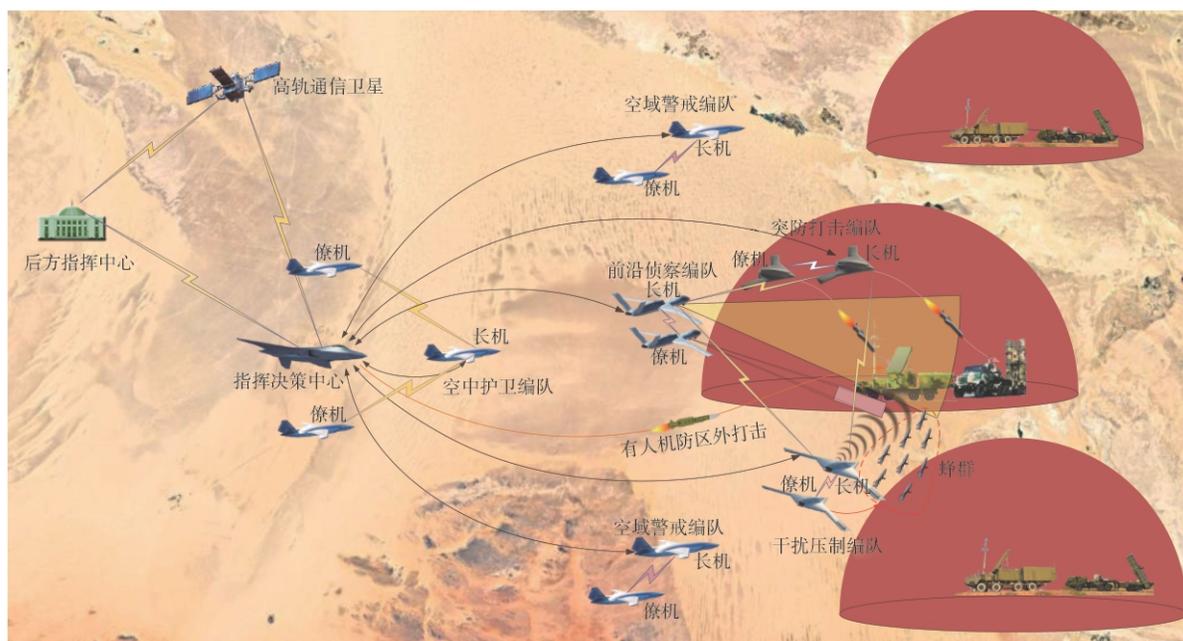


图1 有人/无人智能协同防空压制作战体系

Fig. 1 Manned/unmanned intelligent cooperative air defense suppression operation system

决策和战术方案,并将任务执行指令发送给具体的UCAV编队。必要时,可用远程武器对敌防空系统发动防区外打击,配合UCAV突防。

#### (2) 前沿侦察编队

前沿侦察编队由专业化侦察型UCAV构成,任务开始时,部署于整个作战体系的最前沿,是掌握战场态势、确保制信息权的重要作战力量,通过电子侦察、合成孔径雷达、可见光、红外等多种高性能的侦察设备,从远距离对敌方防空系统进行全方位的侦察,生成实时战场目标态势,为后续的干扰/压制、突防打击提供决策信息。

前沿侦察编队自主分析、决策,完成多种侦察载荷的联合运用,依据战场态势感知结果,实时自主调整载荷工作模式、参数,并对战场态势做综合处理后,将特定关键信息传送到指挥决策中心,并为干扰压制编队和突防打击编队提供作战信息支援。如图1所示,前沿侦察编队的长机和僚机分别使用电子侦察和合成孔径雷达对敌方防空系统进行侦察。

#### (3) 干扰压制编队

干扰压制编队的UCAV有两种任务构型,长机搭载专用的大功率电子干扰/压制设备,僚机除搭载电子干扰/压制设备外,携带数量众多的小型“蜂群”无人机。

干扰压制编队的作战样式有两类,一类是通过UCAV本身携带的电子干扰/压制设备,对敌方防空系统的雷达实施电子干扰,使其无法有效探测或捕获我方作战单位;另一类是通过投放数量众多的小型无人机,组成“蜂群”,引诱敌雷达开机或吸引火力,亦可执行情报搜集、抵近干扰、自杀攻击等任务。如图1所示,在前沿侦察编队的信息支援下,干扰压制编队的两架UCAV分别使用远距离支援干扰和“蜂群”压制式干扰掩护突防打击编队。

#### (4) 突防打击编队

突防打击编队由侧重突防进攻能力的UCAV组成,负责对敌防空系统进行打击摧毁。传统的防区外武器和反辐射无人机均留给敌方较长反应时间,而突防打击编队的UCAV需要尽可能压缩敌方防空系统的反应时间。为此,突防打击编队的UCAV需要具备全向全频段隐身和良好的飞行性能(低空敏捷性和超声速巡航)、强大的攻击能力、即时决策与战术执行能力,武器弹药以高速反辐射导弹或激光制导导弹为主,必要时可采用自杀式攻击。

如图1,突防打击编队的两架UCAV凭借隐身性能成功突防,使用高速反辐射导弹对敌防空系统的雷达进行攻击。

#### (5) 空中护卫编队

空中护卫编队的作用类似于忠诚僚机,主要负

责拦截敌方空中目标,护卫有人机的安全,并保证我方各UCAV的任务顺利执行。空中护卫编队的UCAV主要侧重制空作战,需要搭载对空探测设备,如红外探测与追踪(IRST)和有源相控阵雷达,并具备使用空空导弹进行对空打击的能力。如图1,空中护卫编队呈“品”字队形,为有人机和UCAV提供空中护卫。

#### (6) 空域警戒编队

空域警戒编队由数量较多的多功能型UCAV组成,主要任务是外围空域警戒,次要任务是作为专业化UCAV的补充力量。作战过程中,空域警戒编队要严密监视周围空域,发现敌方来袭单位后,迅即将目标属性、位置、航迹等信息报告指挥决策中心,并由空中护卫编队进行拦截。

作为一种补充力量,空域警戒编队具备一定的对地探测与攻击能力,在专业化的UCAV损失过量后,空域警戒编队需要进行补充,确保整体任务完成。如图1,空域警戒编队分成两个编队,分别在左右两翼进行空中警戒。

#### (7) 战场数据链路

战场数据链路是将各个作战单元连接成一个高效协同作战体系的“神经网络”,承担了决策指令信息的上传和战场态势信息的下传。为了保障作战体系高效、可靠、安全的运行,战场数据链路必须具备较大数据传输带宽、超强抗干扰能力、超强数据加密能力。

如图1,作为指挥决策中心的有人机通过战场数据链路与各作战编队建立信息的上传和下传,前沿指挥编队通过战场数据链将侦察获取的信息共享给干扰压制编队和突防打击编队,后方指挥中心与高轨通信卫星也通过数据链与有人机做到信息互联。

#### (8) 支援保障力量

支援保障力量包括后方指挥中心、高轨通信卫星,远纵深、全体系对抗环境下,还应包含预警机与通信中继飞机。如图1,支援保障力量的作用主要是为我方防空压制作战体系提供通信、战场信息传递等支撑。

### 4.3 作战体系的主要特点

#### (1) 强单体作战能力

有人/无人智能协同防空压制作战体系是由多

个专业UCAV编队为主体,少量多功能的UCAV组成。在高烈度对抗环境下进行作战的UCAV,本身体量不宜设计得过大、过重。在平台承载能力有限的情况下,要实现与防空系统的对抗,就需要充分发挥UCAV的专业化作战能力,放弃多种载荷集于一身的思路,将几乎全部可用重量、尺寸用于携带高性能、大功率的电子对抗设备,以形成具有强大电子战能力的UCAV。为克服单一功能平台作战的局限性,多个专业化UCAV编队必须协同作战,形成强而有力的作战体系。

#### (2) 多编队、强协同

有人/无人智能协同防空压制作战体系由多个作战编队构成,分别承担前沿侦察、干扰压制、突防打击、空中护卫、外围警戒等作战任务,多个编队在智能决策系统的统一调度下,进行战术规划,高效协同地完成防空压制各个环节的战术行动。因此,整个作战体系的功能是分散化的,而非集中式的,但整体作战体系的运行原理是基于“强协同”理念构建的,不同任务模块在统一的决策系统架构下协同完成任务。

#### (3) 作战体系智能化

有人/无人智能协同防空压制作战体系的智能化体现在多个层面,例如:智能协同态势感知、智能情报信息处理、智能任务决策、智能目标分配、智能协同任务编队、智能协同攻击等,从海量信息的处理,到任务决策时的策略寻优,再到任务执行时的战术组织,智能化技术大大提高了作战体系的运行效率和作战效能<sup>[11]</sup>。

### 4.4 作战体系的运行流程

如图2所示有人/无人智能协同防空压制作战体系的作战流程中,作战力量以多编队协同的形式完成防空压制任务,在各编队进入作战状态后,承担不同作战任务的各UCAV编队在指挥决策中心的授权或统一调度下遂行作战任务<sup>[12]</sup>,并由智能决策系统协助进行战术组织。

作为任务执行的主要兵力,前沿侦察编队、干扰压制编队、突防打击编队的作战活动高效协同。空中护卫编队和空域警戒编队作为制空保障及后备兵力,全程负责我方作战单位的空中安全,并在必要时作为其他UCAV编队的替补。

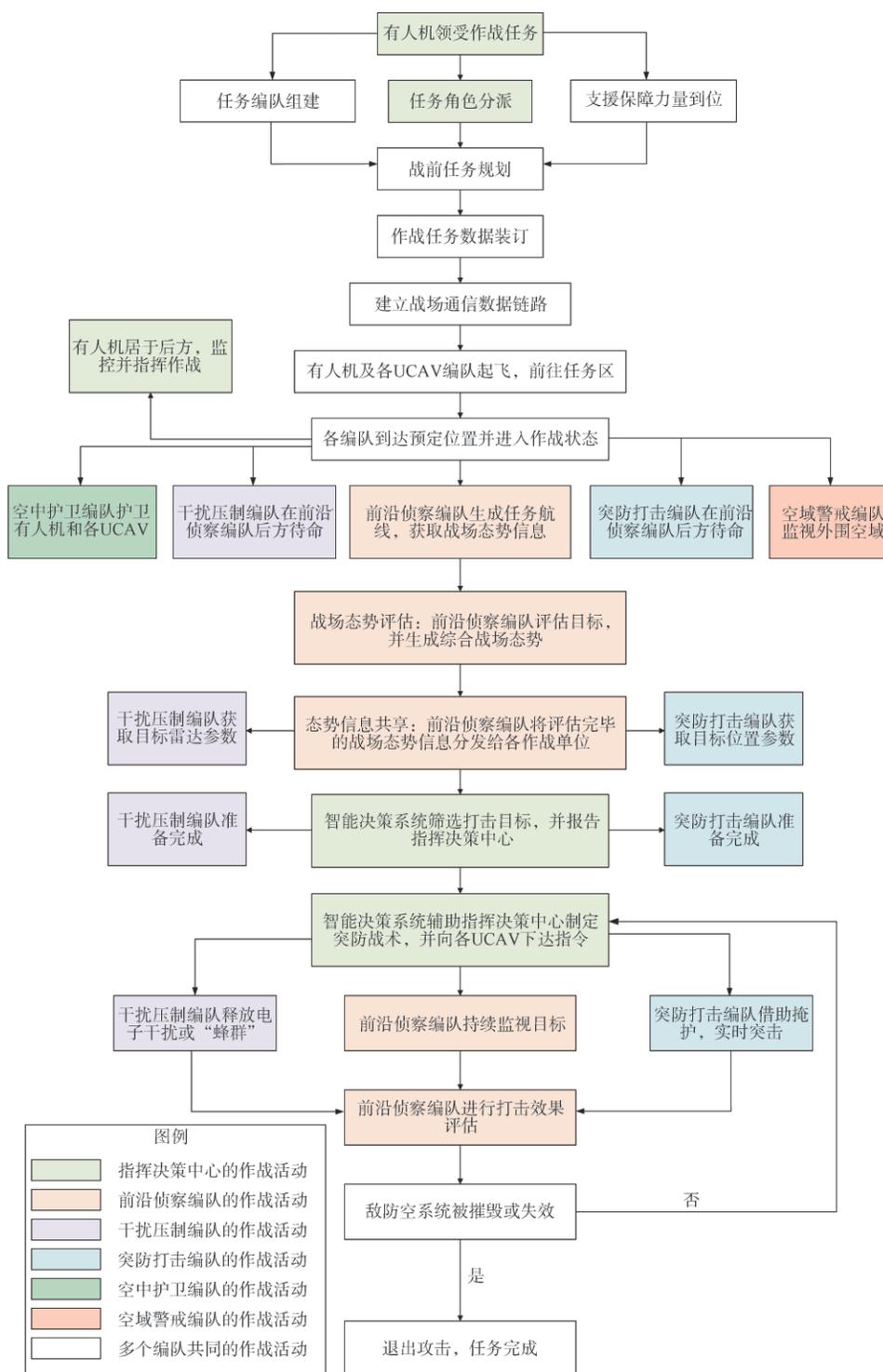


图2 有人/无人智能协同防空压制作战体系的作战流程

Fig. 2 Operational process of manned/unmanned intelligent cooperative air defense suppression combat system

### 5 智能决策系统设计

智能决策系统是作战体系的“思想”核心,是各作战力量之间完成态势共享、战术制定和联合行动的纽带,是维系作战体系高效运转的基本保障。智

能决策系统的功能包括目标信息处理、战场态势评估、态势信息共享、战场即时决策、打击目标确定、战术方案制定、行动过程的组织协调等,几乎贯穿所有作战活动。

### 5.1 智能决策系统总体架构

智能决策系统分布在整个作战体系中,作战过程中产生的大量战场态势、任务组织等信息先由分布在各个编队中的智能决策系统分析处理,生成整体态势后,再传递给有人机上搭载的智能决策系统,并由有人机上的人员决策关键任务指令,大部分信息与作战命令由智能决策系统自主分析、判定、制定方案并组织实施<sup>[13]</sup>。

如图 3 所示,有人/无人智能协同防空压制作战

体系采用集散式决策架构<sup>[14]</sup>,智能决策系统分布在三个层级:作为指挥决策中心的有人机负责整体作战任务的决策,直接指挥各 UCAV 编队的长机;UCAV 编队中的长机负责本编队遂行的作战任务的决策,向有人机呈报本编队任务决策和执行情况,并向编队内的 UCAV 僚机下达指令;UCAV 编队中的僚机负责对自身获取的战场态势进行分析处理,将结果呈报给本编队的长机,并按照长机指令进行作战行动<sup>[15]</sup>。

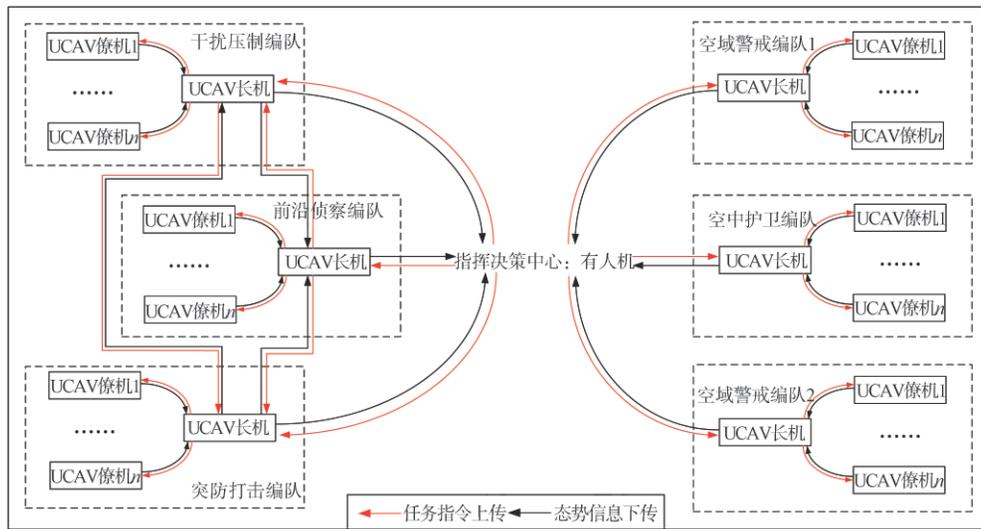


图 3 有人/无人智能协同防空压制作战体系的集散式决策架构

Fig. 3 Centralized decentralized decision architecture of manned/unmanned intelligent cooperative air defense suppression combat system

作为核心作战兵力,前沿侦察编队、干扰压制编队、突防打击编队的UCAV长机之间可以不依赖于有人机,直接实现任务指令互达和态势信息共享,任务决策的链条大大缩短,从而保证在高烈度对抗中前方作战兵力有一定决策自主权,即时应对瞬息万变的战场环境,从而提高任务完成率。

集散式决策架构相比于集中式或分布式决策架构,有三个显著优势:一是大大减轻了有人机的决策负担;二是赋予身处战场的UCAV一定的自主权限,能够根据战场态势做出即时决策,缩短了决策链条,提高了即时应对能力,从而更有利于抓住稍纵即逝的战机;三是保留了有人机的关键权限,人类任务指挥官的核心决策指令可以得到贯彻执行,避免过分依赖UCAV,完全忽视人的经验判别。

### 5.2 智能决策系统权限分配

Parasuraman 提出了一套人机交互系统的自动化等级划分方法<sup>[16]</sup>。根据决策过程中有人机和UCAV各自的权限比重,将智能化决策系统划分为10个等级。越接近于1级,有人机的决策权限越大;越接近10级,UCAV的决策权限越大,即UCAV的智能化程度越高。具体的等级划分与参考标准列于表1。

防空压制任务是一种高烈度、高对抗的作战任务,危险性大、任务复杂度高。如上节所述,为了确保作战体系能对战场态势即时感知,以最短时间得出最优命令,在决策权限的划分上,作战体系应当给予各UCAV编队较大的自主决策权限,从而在激烈的作战任务中缩短决策链条,获得快速决策能力,而处于指挥决策中心的人类任务指挥官应当有

最高决策权限,使人的经验判别与机器的智能算法相结合,随时保持人对任务执行的监督和干预。

表1 有人/无人智能决策的自主等级划分

Table 1 Autonomous hierarchy of manned/unmanned intelligent decision making

等级	描述
1	有人机完成所有决策和操作,无人机不提供任何帮助
2	无人机提供决策或行动方案
3	无人机缩小方案选择范围
4	无人机提供一个建议方案
5	如果有人机同意则执行这个方案
6	在未执行方案前允许有人机在限定时间内否决
7	自动执行,并通知有人机
8	如果有人机需要则告知
9	是否通知有人机由无人机决定
10	无人机协同决策所有工作,拒绝有人机的干预

因此,有人/无人智能协同防空压制作战体系的自主等级应当在5~9之间,敌我态势不同或作战任务的进程不同,自主等级有所不同,每个自主等级对应的具体事项列于表2。

表2 不同自主决策等级对应的任务事件

Table 2 Task events corresponding to different levels of autonomy

自主等级	适用情况(包括但不限于以下情况)
5	作战任务启动; 作战任务继续; 作战任务结束。
6	前沿侦察编队沿自动生成的航线飞行,并实时更新战场态势; 前沿侦察编队截获敌方信号,申请启动打击; 前沿侦察编队、干扰压制编队、突防打击编队联合制定战术方案; 空域警戒编队发现空中敌情,申请启动应对程序; 空中护卫编队准备接敌。
7	干扰压制编队申请实施电子干扰; 突防打击编队申请发动攻击; 空域警戒编队发布敌情预警; 空中护卫编队与敌进行空战。
8	前沿侦察编队自动切换侦察载荷或调整工作模式; 干扰压制编队实施电子干扰; 突防打击编队制定突防战术。
9	干扰压制编队转换干扰策略; 干扰压制编队释放“蜂群”; 突防打击编队按战术进行突防; 前沿侦察编队进行打击效果评估。

作战过程中,虽然大多数决策环节与战术组织由智能决策系统协助各UCAV编队自主完成,但实时的敌我当前情势、UCAV采取的进攻行动、敌方的防御行动、作战进程、作战效果等战场态势与情报信息却需要全方位呈现给指挥决策中心的有人机,以便人监督和随时干预,注入新的指令。同时,智能决策系统具备对人的指令进行评判的功能,可对不完善的指令及时提出建议,但最终的决策权仍归于有人机。

### 5.3 智能决策系统运行逻辑

智能决策系统的运行逻辑如图4所示。

智能决策系统由决策主体、决策活动、决策信息、决策算法四个要素构成。

决策主体是指执行决策活动的主要作战单元,主要包括指挥决策中心、前沿侦察编队、干扰压制编队和突防打击编队。空中护卫编队和空域警戒编队一般不与敌方防空系统产生对抗,主要负责保护其他力量的空中安全,不参与核心决策;决策活动是指构成决策过程的基本环节,例如任务航线生成、目标威胁评估、突防打击战术制定等;决策信息是指由决策主体产生的信息或指令,决策活动既可能需要输入决策信息,也可能产生新的决策信息提供给下一个决策活动,例如前沿侦察编队需要获取自动生成的航线作为输入,同时也会输出敌方雷达信息给干扰压制编队;决策算法是决策主体赖以生成决策信息的运算规则,例如,智能任务航线生成算法等。

主要决策活动可分为智能任务航线生成、态势评估、战术方案制定、战术行动授权、战术行动实施、打击效果评估六个部分,每部分又由若干更细化的决策活动构成,部分决策活动需要用到决策算法和接收决策信息<sup>[17]</sup>。

以航线生成和态势评估的决策活动为例。首先,有人机需将任务区域的几何参数告知前沿侦察编队,前沿侦察编队根据侦察载荷的工作参数,基于任务航线算法,生成任务航线,将航线信息发送给有人机,并沿航线进行侦察。侦察到敌方目标后,前沿侦察编队依据目标态势评估算法进行战场态势评估,并将得出的战场态势与目标信息作为输出的决策信息共享给指挥决策中心、干扰压制编队与突防打击编队。结合任务预设信息

(如任务中优先打击某型防空系统),利用打击条件判定算法,前沿侦察编队完成打击目标筛选的决策活动,由智能决策系统判断是否需要发起突防打击。

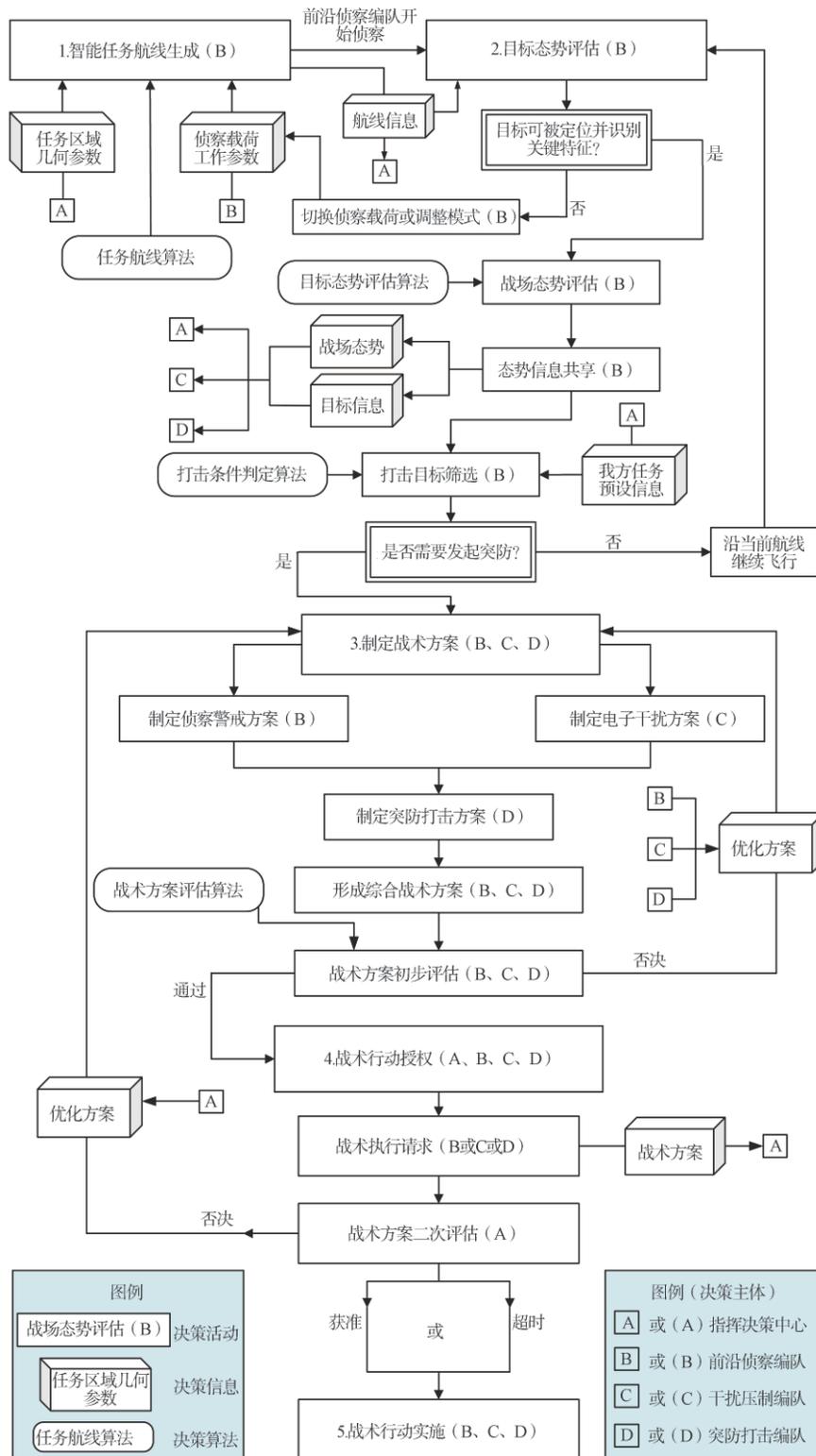
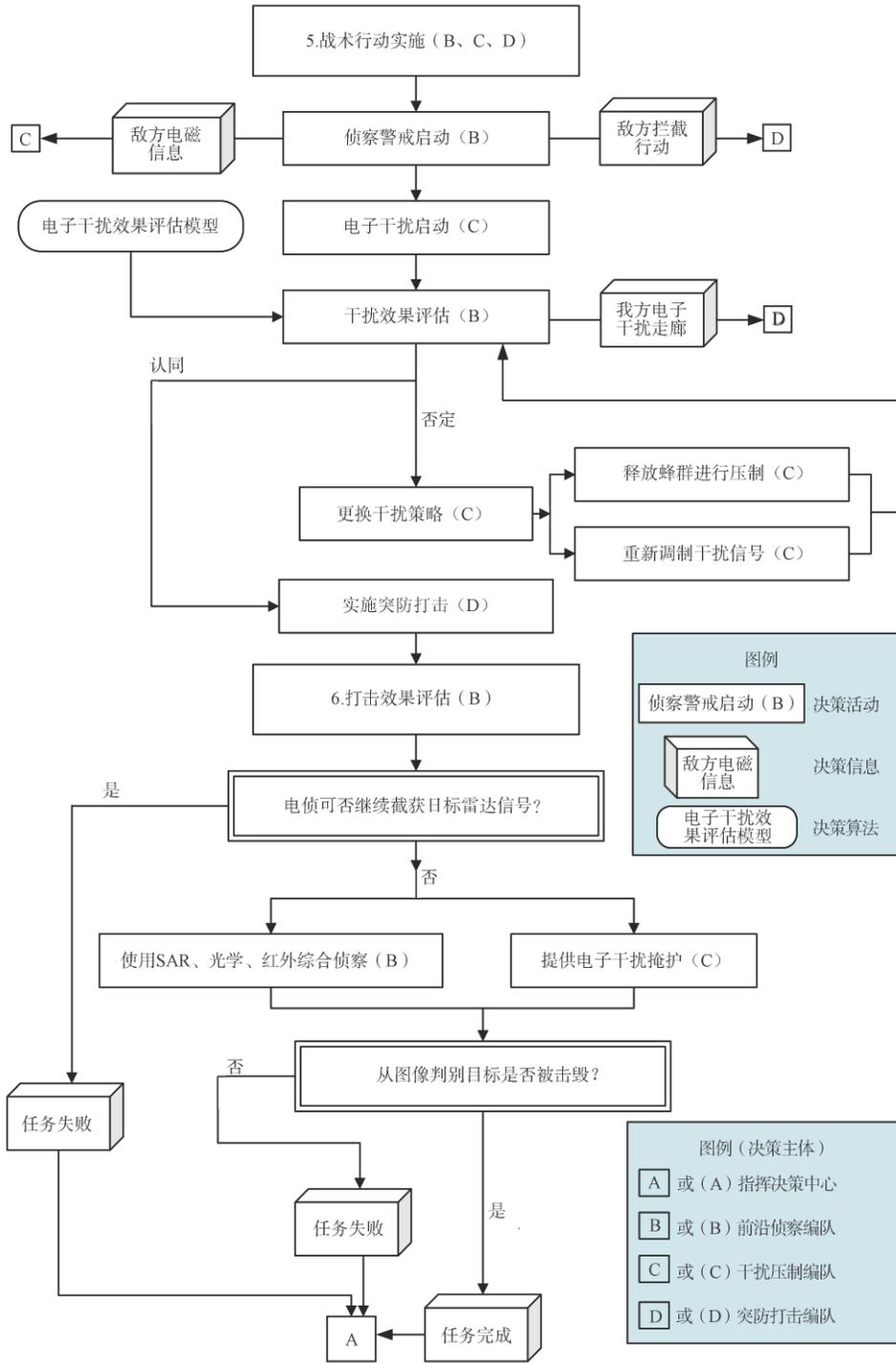


图 4 智能决策系统的运行逻辑(接下图)

Fig. 4 Operation logic of intelligent decision system(Continue to the next figure)



续图4 智能决策系统的运行逻辑

Fig. 4 Operation logic of intelligent decision system(Follow the previous figure)

通过智能决策系统,各作战单元得以突破自身专业化的局限性,在态势共享的基础上,统一决策,协同行动,以高效的战术来对抗防空系统,从而确保防空压制中的作战优势。

### 6 结论

防空系统的作战能力仍在不断发展中,防空压制作战正面临日益增高的危险度。本文基于现代

及未来防空压制任务的作战需求,构建了一种有人/无人智能协同作战体系,并初步建立了该体系的智能决策系统。该作战体系采用集散式架构,有人机作为战场指挥官,负责任务层面的指挥和决策,而多个专业化作战能力较强的UCAV完成侦察、电子干扰、突防打击等较危险任务,各作战单元之间通过数据链共享战场态势,在智能决策系统的协助下,高效率地完成即时决策、战术制定和行动组织等任务。现阶段下,本文所构建的作战体系距离完全实现尚有一些技术问题需要解决,但随着人工智能、先进作战无人机、战场大数据处理及策略优化等技术的发展,本文所构建的防空压制作战体系将逐渐具备实现条件,空中力量在面对未来防空系统时将有更多的技术和战术方案可供选择。

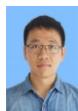
### 参考文献

- [1] 陶建义. 无人机在防空压制和摧毁中的应用及发展[J]. 航天电子对抗, 2002(3): 26-29.
- [2] 林玉琛, 金孟江. 无人机将成为压制防空作战的有效武器——科索沃战争经验总结之一[J]. 现代防御技术, 2001, 29(1): 1-7.
- [3] 唐嘉钰, 李相民, 代进进. 美军无人机防空压制作战运用分析[J]. 飞航导弹, 2019(3): 1-5.
- [4] Quaranta P. Unmanned capabilities for 2020 and beyond[J]. Military Technology, 2017(5): 47-52.
- [5] Gao X, Xiong J. Concept and relevant technologies of cooperative operation for manned-unmanned aerial vehicles[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(12): 1612-1616.
- [6] Cai J W, Long H Y, Zhang X. Key technologies for cooperative combat system of manned/unmanned aerial vehicles[J]. Command Information System and Technology, 2013, 4(2): 10-14.
- [7] DeGarmo M, Nelson G M. Prospective unmanned aerial vehicle operations in the future national system[C]. Proceeding of the AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations Forum, Chicago, USA, 22-24 September 2004.
- [8] 黄汉桥, 白俊强, 周欢, 等. 智能空战体系下无人机协同作战发展现状及关键技术[J]. 导航与控制, 2019, 18(1): 10-18.
- [9] Keller J. DARPA artificial intelligence project aims to help humans and machines get along better [EB/OL]. 2016-08-11 [2018-02-10]. <http://www.militaryaerospace.com/articles/2016/08/artificial-intelligence-machine-learning.html>.
- [10] Wu L Z, Li Y, Peng H, et al. Design and implementation of the

instruction set for manned vehicle-UAV cooperation and missions[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(S1): 514-517.

- [11] 车继波. 人工智能在无人作战飞机上的应用与展望[J]. 电讯技术, 2018, 58(7): 859-864.
- [12] 顾海燕, 徐驰. 有人/无人机组队协同作战技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(6): 33-41.
- [13] 史志富, 何为超, 张安, 等. UCAV编队对地攻击智能决策系统总体结构[J]. 火力与控制, 2009, 34(10): 95-99.
- [14] 杨镜宇, 徐邦年, 金雪燕. 多机空战仿真分布式智能决策支持系统设计[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(9): 70-73.
- [15] Dong Y F. Air operations decision and intelligent design of unmanned combat aerial vehicle[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2015, 33(5): 13-16.
- [16] Parasuraman R, Sheridan T B, Wickens C D, et al. A model for types and levels of human interaction with automation[J]. IEEE Transactions on Systems, 2000, 30(3): 286-297.
- [17] Liu Y F, Chenn S D, Zhao Z Y, et al. Command and control system general research of manned vehicle/UCAV formation air-to-ground attack[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(10): 1-5.

### 作者简介:



王兴虎(1992-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为无人机需求论证及作战使用研究。



郭强(1990-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为无人机需求论证及作战使用研究。



何胜杰(1993-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为无人机需求论证及作战使用研究。



程家林(1965-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无人机总体设计与产品开发。



郭菲(1974-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无人机需求论证及作战使用研究。



陈韵竹(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人机需求论证及作战使用研究。

[引用格式] 李越, 韩维, 仲维国. 有人机/无人机协同系统航迹控制关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 22-28.

# 有人机/无人机协同系统航迹控制关键技术浅析

李越<sup>1</sup>, 韩维<sup>1</sup>, 仲维国<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学航空基础学院, 烟台 264001; 2. 海军航空大学91206部队, 青岛 266108)

**摘要:** 对有人机/无人机协同系统航迹控制关键技术进行了综合评述, 并对未来研究进行了展望。首先阐述了有人机/无人机协同系统的研究意义和特点; 其次, 从飞行动力学与控制学科角度出发, 就协同系统航迹控制问题展开讨论, 总结和提炼了四个关键技术, 即基于时空约束的异构机群离线航迹规划技术、基于通行法则的异构机群中远距在线航迹机动调整技术、基于深度强化学习理论的异构机群近距智能机动决策技术以及基于风场影响的异构机群队形鲁棒控制技术; 之后对各个关键技术的研究现状进行了梳理和归纳; 最后, 对文章进行了总结并对有人机/无人机协同系统航迹控制未来的发展给出建议。综述表明, 四个关键技术都还需要持续研究, 其中在通行法则和控制器设计等方面可借鉴现有的有人机研究成果, 并根据协同系统的特点进行改进和拓展, 同时大力发展以人工智能为基础的无人机自主决策和空战技术, 以更好地发挥其作为有人机忠诚僚机的作用。

**关键词:** 有人机/无人机; 航迹控制; 时空约束; 通行法则; 智能决策; 鲁棒控制

**中图分类号:** V249.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2020)04-22-07

## Review of Trajectory Controlling for Manned/Unmanned Aerial Vehicle Cooperative System

LI Yue<sup>1</sup>, HAN Wei<sup>1</sup>, ZHONG Weiguo<sup>2</sup>

(1. Naval Aviation University, Aviation fundamental college, Yantai 264001, China;

2. 91206 Army, Naval Aviation University, Qingdao 266108, China)

**Abstract:** The key technology of trajectory controlling of Manned Aerial Vehicle/Unmanned Aerial Vehicle (MAV/UAV) is reviewed and the future research is prospected. Firstly, the significance and characteristics of the research on the MAV/UAV cooperative system are introduced. Secondly, from the view of flight dynamics and control, trajectory controlling for MAV/UAV cooperative system is discussed and four key technologies are refined, which contain the offline trajectory planning technology of heterogeneous cluster based on space-time constraints, the online trajectory maneuvering technology of heterogeneous cluster with long distance based on traffic law, the intelligent decision-making technology of heterogeneous cluster with short distance based on deep reinforcement learning theory and the robust control technology for formation maintaining of heterogeneous cluster in the circumstance of wind field. Then, the latest progress of each key technology is summarized. Finally, the prospect of trajectory controlling for MAV/UAV cooperative system is analyzed. The review shows that four key technologies should be researched further. On one hand, the traffic rules and design of controller can be referred from the existing achievement of MAVs and improved according to the characteristics of cooperative system. On the other hand, the autonomous decision-making and air combat technology of UAV based on artificial intelligence should be developed vigorously, which is the significance of UAV in the cooperative system.

**Key words:** MAV/UAV; Trajectory Controlling; Space-time Constraints; Traffic Law; Intelligent Decision-making; Robust Control

## 1 引言

有人机/无人机协同作战是指在信息化、网络化及体系对抗环境下,有人机与无人机联合实施攻击的作战方式<sup>[1]</sup>。该协同方式通过平台及载荷类型的相互补充、平台性能的优势互补特别是对当前无人机自主水平的弥补,将无人机无缝融入到现代作战体系之中,同时有效提高了作战资源利用率、任务成功率、平台生存性,并缩短观察-调整-决策-行动(Oberve-Orient-Decide-Act, OODA)环路,最终提升协同作战系统的效费比,是潜在的第六代穿透型战机的发展方向之一<sup>[2]</sup>。该协同系统与其他编队系统的区别之处主要体现在以下两方面:一是有人机在协同系统中的安全性至关重要,无人机要不惜牺牲自己的方式保护有人机;二是有人机飞行员在作战中的作用更加关键,其不仅要控制有人机,还要依靠机载通讯网络兼顾指挥无人机,为其下达作战指令。

目前,对有人机/无人机协同系统的探索和研究是一个热点,文献[3-5]列出了该协同系统作战的几大关键技术和研究现状,主要包含有人机/无人机协同交互控制技术、协同态势感知技术、协同任务分配技术、协同航迹控制技术和协同效能评估技术等,但由于公开的关于有人机/无人机协同系统的技术研究较少,目前缺乏对上述关键技术的具体探讨和分析。基于此,本文从飞行动力学与控制学科角度出发,结合本课题组的一些最新研究成果,对有人机/无人机协同系统航迹控制这一关键技术进行梳理和总结。

## 2 有人机/无人机协同系统航迹控制关键技术

首先,协同航迹规划是航迹控制的重要基础,是发挥系统联合突防作用的有效保证,其按照航迹生成的实时性可分为离线航迹规划和在线航迹规划。对于异构机群离线航迹规划,需要结合任务规划指标、飞行约束条件和战场环境等因素,设计协同飞行航路,以优化总体作战效能,这是一个具有复杂性和耦合性的多约束、多目标优化决策问题<sup>[6]</sup>。针对有人机/无人机协同系统,在考虑同构机群航迹规划的基础上,还应该着重考虑有人机的安全性和特殊性,为此可首先对有

人机航迹进行规划,充分确保其飞行安全和任务实现,进而将有人机的航迹作为已知条件输入到无人机航迹规划器中,并重点设计和引入时空约束,即考虑无人机与有人机到达目标区域的时序约束、无人机终端状态量关系约束及其与有人机的防碰撞约束等,以确保无人机与有人机的有效协同。

在离线航迹规划的基础上,还需要考虑异构机群在线航迹机动调整技术,其主要应对中远程突发的机动障碍或内部队形调整等情况,这一技术可以有效保证协同系统航迹的灵活性变换。具体针对于有人机/无人机协同系统,应突出有人机的绝对领导地位,确保其在线机动调整的绝对安全。为此,还应当引入一定的在线调整策略,即通行法则。其思想是令无人机群为有人机航迹调整“让步”,优先调整有人机航迹,令有人机仅考虑外部障碍等不可控威胁,降低其机动带来的风险和难度,在此基础上进一步考虑无人机的机动调整。值得一提的是,必要时可令无人机选择“自杀”的方式抵消外部威胁,以确保有人机的安全。

其次,通过经典的OODA作战理论<sup>[7]</sup>可以看出,决策环节对航迹控制起着关键作用,并且会影响整个作战平台的空战水平<sup>[8]</sup>。其中,近距离空中异构机群的智能机动决策技术,具有重要的研究价值,但同时也是一个难点。与异构机群在线航迹机动调整主要考虑中远距且机动性较弱、规律性较强的障碍不同,在近距离空中,敌我机群的机动变化剧烈,战场态势更迭迅速,对决策的实时性和智能程度要求更高。近年来,随着人工智能技术的普及,特别是深度强化学习理论的迅速发展,其凭借着不需要先验知识输入,仅依靠与环境交互“试错”实现自我学习的特点而具备了与近距离空战决策进行结合的可能,同时该技术的运用可以极大地缓解有人机飞行员决策的压力,为其争取更多的时间去指挥调度整个有人机/无人机协同系统,从而最大限度地发挥协同系统的作战效力。

最后,在上述研究的基础上,研究风场环境下异构机群队形鲁棒控制技术,该技术是协同系统航迹控制的最终落脚点。按照无人机是否以伴飞的形式跟踪有人机,可以分为编队保持控制器的

设计和单机航迹跟踪控制器的设计两个子关键技术。当无人机执行实时避障、空战打击等非伴飞任务时,其与有人机的地位是近乎平等的,可统一为单机航迹鲁棒控制器设计的问题,其目标是实现在风场影响下对已知航迹的快速稳定跟踪;当无人机协同有人机巡航或以固定编队队形执行其他伴飞任务时,有人机作为长机,其飞行航迹通过单机航迹鲁棒控制器实现,而无人机作为僚机,需设计鲁棒性较好的编队保持控制器以实现对其跟踪。

### 3 关键技术的研究现状

#### 3.1 基于时空约束的异构机群离线航迹规划技术

目前,机群离线航迹规划从建模的方式上可分为两种,一种是基于加速度或过载等控制量来建立微分运动方程,将航迹规划作为最优控制问题进行研究;另一种是基于转弯角、航段长度而建立代数运动方程,相应的规划方法主要有图搜索、树搜索、势场法等<sup>[9]</sup>。由于利用前者进行建模的方式更容易与动力学控制接轨,因而在实际工程领域受到了更广泛的关注,其求解思路主要分为直接法和间接法。直接法将最优控制问题转化为有限维参数优化问题,用非线性规划方法进行求解,其缺点是求解精度不高;间接法则重点研究最优控制问题的一阶必要条件并将其转化为哈密顿边值问题,其缺点是收敛半径较小,对初值要求较高<sup>[10]</sup>。近年来,凸优化理论得到不断地完善,特别是在求解多维最优控制问题方面优势明显<sup>[11]</sup>,其本质上属于直接法的一种,主要采用内点法进行求解<sup>[12]</sup>,该理论在星际轨道转移、多智能体航迹规划以及无人机编队队形重构等领域均有应用。文献[13]以四旋翼为研究对象,将最优控制问题转化为若干二阶锥规划的子问题,并利用内点法求解机体避障航迹;文献[14]利用序列凸规划思想,将非凸最优控制问题近似为一系列凸优化子问题,解决了多无人机编队重构问题。

另一方面,对于机群时空约束的研究有以下方法:文献[15]针对无人机编队控制,研究了可行拓扑图的特征值分布规律,并以此解决了编队控制和观测信息时空一致性的问题;文献[16]设计了“时空解耦”特性的多分散控制体系结构,其将空间任

务-路径跟踪和时间任务-协调编队进行了解耦;文献[17]针对复杂环境中的机器人的时空约束进行了研究,提出了一种具有时间约束的与或(And/OR)任务树方法对任务进行建模,并利用市场拍卖机制,解决了网络分区引起的候选者缺席问题。然而,目前针对基于时空约束的有人机/无人机机群离线航迹规划技术的研究较少,具有代表性的是文献[18]根据协同系统中有人机与无人机的任务特点,分别设计航迹规划器与编队规划器,并在编队规划器中引入协同时空约束条件,进而对两规划器模型进行近似与凸化,利用凸优化算法进行求解,并通过对比仿真,验证了凸优化算法在求解成功率和效率上的优势,并且验证了协同时空约束对提高系统飞行安全性的作用。

从上述分析中可以看出,将机群离线航迹规划问题视为最优控制问题进行求解是一个趋势,可采用的方法较多且不同程度的适用于有人机/无人机协同系统。同时,时空约束是异构机群离线航迹规划中需要着重考虑的约束是实现异构机群协同的重要保障,但目前该约束与有人机/无人机协同系统的结合还缺乏深入的研究,主要表现为对约束过于理想化的处理导致问题研究与实际工程脱轨、系统的异构特点特别是有人机的地位未能突显等,这些不足是该关键技术亟待解决的问题。

#### 3.2 基于通行法则的异构机群中远距在线航迹机动调整技术

交互避障法是目前最常用的一种在线航迹机动调整的方法,主要包括势能域法、几何引导法。几何引导法又包括威胁锥法<sup>[19]</sup>、速度障碍物法<sup>[20]</sup>和几何微分法<sup>[21]</sup>等。由于速度障碍物法更为适用于复杂环境下的多障碍物避障,且对计算要求不高,因此该方法在单智能体实时避障的研究中被广泛采用。文献[22]根据机器人和障碍物的实时状态量,采取传统的速度障碍法对动态环境下的机器人进行航迹规划,文献[23]改进了速度障碍法,并将其运用到无人机领域,着重考虑了“潜在危险障碍”的影响和多障碍避障的问题,为无人机自主避障提供了依据。从目前文献来看,研究协同系统特别是有人机/无人机协同在线航迹机动调整的成果不多,主要受限于避障空间多停留在二维、对障碍物机动性的影响缺乏预测以及针对多机异构系统缺

乏一套完整的通行法则等。其中,通行法则的设定也是为了保障有人机在实时航迹机动调整中的绝对优势地位,使得在遇到突发战场情况时,能首先保证协同系统中有人机飞行的安全,对于这方面的研究有:文献[24]在二维平面内根据飞机间的相对位置确定相应的通行法则,以确保同一空域内多机的飞行安全,不足之处在于未考虑外部障碍对系统中飞机的影响;文献[25]提出一种有人机/无人机协同系统的三维实时避障方法,其思想是将三维空间离散成若干避障平面,通过设定系统遭遇机动障碍时的通行法则,选择飞行模式,进而确定最佳的避障平面以实现有人机与无人机的协同避障。

从上述分析可以看出,在线航迹机动调整的关键是算法的效率和避障的效果,速度障碍法作为目前处理在线机动的典型算法,受到了广泛的关注。针对异构机群,通行法则的设定有利于提高协同系统机动调整的有序性,减少算法的求解空间,降低航迹的优化难度,提高求解效率。但目前的研究中,通行法则的设定还不够深入和系统,缺少一套权威的、专门适用于异构机群的通行法则,并且从现有的公开文献中,我们发现对于机动威胁的处理,还存在过于简化的情况,今后应在机动威胁的建模上花费更多精力。

### 3.3 基于深度强化学习理论的异构机群近距智能机动决策技术

目前空战机动决策的方法可大致分为两大类<sup>[26]</sup>:一类是以微分对策和专家系统为代表的传统方法;另一类是以遗传算法、影响图法、蚁群算法、人工免疫系统为代表的智能方法。机动决策的核心在于预测未来的空战状态,但上述方法在长期预测方面不能取得良好的效果,主要受限于计算的复杂性等因素。近年来,人工智能技术在机动决策领域的应用得到了越来越多学者的关注,比较有代表性的有:2016年,美国辛辛那提大学研发了名为Alpha的智能空战系统,其采用了遗传模糊随机树的思想,并在与著名的美国空军上校Gene Lee的模拟空战对抗中取得了完胜<sup>[27]</sup>;在同一年,美军提出了Commander's Virtual Staff项目<sup>[28]</sup>,具体通过融合人工智能和信息系统的的方式来减轻空战中指挥官在识别和认知战场态势方面的负担;2019年8月,美国空军研究实验室和DZYNE公司联合开发了

ROBOPilot项目<sup>[29]</sup>,其研发人员利用相机收集飞机仪表盘数据,并使用机械传输设备控制操纵杆、踏板和开关等,以代替飞行员操纵指挥和分析飞行数据,进而与飞机进行交互;美国在2015年提出的忠诚僚机计划,旨在为飞行员提供合理且快速地空战建议<sup>[30]</sup>。但综合看来,目前人工智能技术在机动决策领域的应用主要存在以下三个不足:一是由动作空间离散化或者奖励函数简化等导致的决策模型失真的问题<sup>[31]</sup>。文献[32]提出了一种基于强化学习方法的无人机短程空战自主机动决策模型,根据离散控制的要求,采用了一种传统的求解离散空间的深度强化学习方法——深度Q网络(DQN)算法,虽然该成果是对强化学习与空战决策相结合的一次有效探索,但决策模型过于理想化,导致结果与真实空战决策仍有差距。第二个不足是虽然不少学者通过改进提高了强化学习方法的效率,但面对高维复杂空战问题,仍存在计算效率问题。在这一方面比较有代表性的探索包括:DeepMind公司在2016年提出了一种求解连续控制模型的算法——深度确定性策略梯度(DDPG)算法<sup>[33]</sup>。在此之后,2017年7月,OpenAI公司引入了近端策略优化(PPO)方法<sup>[34]</sup>,该方法是对策略优化体系的延伸,该方法具有信任区域策略优化的一些优点,但实现简单得多,效率更高。之后,DeepMind公司在PPO方法的基础上又提出了分布式近端策略优化方法(DDPPO)<sup>[35]</sup>。第三个不足是智能体机动决策的任务和目标相对单一,如无人机多以实现空战打击、无人车多以实现安全驾驶为目标,缺乏人为的有效干预和引导,不能充分发挥人在协同系统中的指挥协调作用,针对这一问题,文献[36]将标准Q学习中状态到动机的二层映射,转变为动机引导的Q学习状态-动机-动作的三层映射,并且用模拟退火算法的思想对强化学习过程进行了优化,但在动机层以及动机到动作规则的设计上采用的是IF-THEN规则,具有较大的主观性,仍有改进空间。

就目前的研究现状而言,将深度强化学习与有人机/无人机智能决策理论相结合的研究相对较少,特别是对二者之间的适用性和可行性方面的研究更是比较匮乏,较为有代表性的是文献[37]将深度强化学习理论与有人/无人智能空战决策模型相结合,并创新地提出了四种典型的作战意图,具体

包括: 强攻、逃离、追击和能量积蓄, 这四种意图分别对应不同的优化模型; 该文献对传统的DDPG算法进行了结构改进, 主要针对经验池进行了重构设计, 具体表现为增加了经验判断机制和改良了经验取样策略, 其对于神经网络训练的收敛和稳定有积极作用; 同时, 该文献设计了空战自我博弈环节, 通过不同意图之间的反复对抗训练, 有效地提升了空战智能决策水平, 这对于训练深度神经网络和最终实现真正的智能空战有着重要的指导意义。

综合上述分析, 我们发现将深度强化学习理论与异构机群近距智能机动决策相结合是当今的研究热点和趋势, 各军事强国都在大力推进相关技术的发展与研究, 并取得了一定的成果。深度强化学习理论仍在不断发展之中, 将其最新的理论成果运用到异构机群决策技术之中, 降低飞行员的指挥难度, 即达到仅在必要时刻才需要飞行员干预和决策的目的, 以实现真正的智能空战, 是今后的研究目标。

### 3.4 基于风场影响的异构机群队形鲁棒控制技术

当无人机协同有人机执行非伴飞任务时, 可将二者视为相互独立、地位平等的单智能体, 此时研究队形控制时, 只需设计单机航迹跟踪控制器。纵观飞行控制技术的发展, PID控制作为经典理论控制方法的代表, 被广泛运用到各类飞行器控制中, 但该方法的参数调节是一个复杂繁琐的过程, 特别是当无人机遇到外界扰动时, 其控制精度较差。针对这一问题, 现代控制技术中的鲁棒控制理论逐渐兴起, 其能够有效应对包括外界干扰(如风场)及模型摄动引起的系统不确定性问题<sup>[38]</sup>。该理论包含Kharitonov区间理论、 $H_\infty$ 控制理论和结构奇异值理论( $\mu$ 理论)等, 其中 $H_\infty$ 控制理论通过设计反馈控制器, 使闭环系统稳定且闭环传递函数阵的 $H_\infty$ 范数最小或小于某一给定值, 以达到被控对象满足理想性能要求的目标, 这一理论应用最为广泛<sup>[39]</sup>: 如文献[38]为解决无人机飞行过程中由于外界干扰及被控对象模型摄动引起的系统不确定性问题, 对鲁棒 $H_\infty$ 控制器进行了模型降阶和离散化, 并通过半物理仿真验证了其良好的控制效果; 文献[40]利用鲁棒 $H_\infty$ 模型对其进行改进, 设计了一种基于鲁棒 $H_\infty/S$ 面模型的控制方法, 并针对该控制方法, 以某型无人机为例进行了纵向飞行仿真试验、横侧向

飞行仿真试验和模型参数不确定性的研究; 文献[41]基于状态反馈 $H_\infty$ 最优控制, 对于小扰动假设下的无人机纵向飞行和无人机横侧向飞行的动态方程分别设计了对应的反馈控制器并拟通过频域分析的方式对其鲁棒稳定性进行分析。随着计算机硬件水平的不断提升, 限制鲁棒控制理论应用的计算量较大的问题已逐渐解决, 因而针对风场影响下的单机航迹跟踪控制器设计问题, 运用鲁棒 $H_\infty$ 等控制理论进行研究, 是一个不错的选择。

另一方面, 当无人机协同有人机进行伴飞时, 无人机作为僚机, 需设计鲁棒性较好的编队保持控制器以实现长机即有人机的跟踪。目前, 以有人机/无人机为研究对象的编队保持研究不是很多, 我们可以从现有的多智能体编队控制中提取相关技术经验, 如: 文献[42]基于动态面方法设计了自主水下航行器编队控制律, 使得自主水下航行器之间保持期望的距离, 达到编队控制的目的; 文献[43]针对多无人机集结期望的队形和达到稳态速度缓慢影响作战效率, 基于反步推演法设计了一种协同导引控制律, 用于解决多无人机快速队形重构和快速达到稳定状态; 文献[44]针对四旋翼无人机群在轨迹跟踪过程中易受外界干扰而引起跟踪误差的问题, 首先通过积分反步法(IFS)对所建四旋翼飞行器模型设计leader无人机的轨迹跟踪控制器, 其次设计了基于滑模法的控制器(SMC)以控制leader与follower无人机实现期望的编队队形并同时跟踪参考轨迹。从上述研究可以看出, 现代控制方法中典型代表之一——反步法, 在多智能体队形保持控制器设计上应用广泛, 其以李雅普(Lyapunov)理论为基础, 设计子系统期望的虚拟输入信号, 然后反馈给控制器得到真实子系统的控制输入。该控制方法在处理非线性、不确定性影响问题时有良好的效果, 并且收敛速度很快。

综上所述, 异构机群队形鲁棒控制技术包含单机航迹跟踪控制器设计和编队保持控制器设计两个子技术。现代控制技术中一些相对成熟的控制理论可以引入到两类控制器的设计中。目前, 国内关于有人机/无人机异构机群队形鲁棒控制的飞行试验成果尚属空白。实验室仿真与真实的风场等不确定环境下的飞行试验, 这两者在验证控制方法效果上还有一定的差距, 今后应重点开展利用飞行

试验验证相关关键技术的研究。

#### 4 结束语

有人机/无人机协同系统的研究是新兴的一大热点,其符合未来战争的发展方向。本文从飞行动力学与控制学科的角度出发,对协同系统的航迹控制问题进行了探讨,对其中的关键技术进行了梳理和总结。研究发现,该协同系统与现有的多智能体编队在航迹控制方面既有联系又有不同。联系在于二者之间的关键技术有相通之处,许多已有的求解思路和成熟理论可以在有人机/无人机协同系统中得以借鉴和使用;而不同之处在于,有人机/无人机协同系统的航迹控制更为复杂,需要考虑的约束更多,特别是该系统中有无人机的地位特殊,一方面要充分考虑其飞行安全,另一方面,又要通过设计辅助决策系统,协助有人机飞行员指挥控制整个系统的航迹,进而发挥联合作战的优势,为打赢未来高技术局部战争打下基础。

在今后有人机/无人机协同系统航迹控制领域,还可以针对特殊机型研究大迎角、过失速的机动,以完成特殊的空战任务,增加战术的多样性;另外,可以对面向作战的有人机引导下的大规模无人机编队的航迹控制进行探索,即“蜂群战术”,这需要在建立通信拓扑的基础上,设计更为复杂和庞大的控制系统,这都是未来有人机/无人机协同系统航迹控制发展的新挑战。

#### 参考文献

- [1] 申超,李磊,吴洋,等.美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J].战术导弹技术,2018(1):16-21.
- [2] Humphreys C J, Cobbs R G, Jacques D R, et al. Optimal mission paths for the uninhabited loyal wingman[C]. 16th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Dallas, USA, June 22-26, 2015.
- [3] 贾高伟,侯中喜.美军有/无人机协同作战研究现状与分析[J].国防科技,2017,38(6):57-59.
- [4] 牛轶峰,沈林成,李杰,等.无人-有人机协同控制关键问题[J].中国科学:信息科学,2019,49:538-554.
- [5] 钟赞,张杰勇,邓长来.有人/无人机协同作战问题[J].指挥信息系统与技术,2017,8(4):19-26.
- [6] 樊洁茹,李东光.有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J].无人系统技术,2019,2(1):39-47.
- [7] Veerasamy N. A high-level mapping of cyberterrorism to the OODA loop[C]. The 5th European Conference on Information Management and Evaluation, Sonning Common, UK, June 28-30, 2011.
- [8] 杜海文,崔明朗,韩统,等.基于多目标优化与强化学习的空战机动决策[J].北京航空航天大学学报,2018,44(11):2247-2256.
- [9] 丁明跃,郑昌文,周成平,等.无人飞行器航迹规划[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [10] Zhang Z, Jin G M, Li J X, et al. Penalty boundary sequential convex programming algorithm for non-convex optimal control problems[J]. ISA Transactions, 2018, 72(1): 229-244.
- [11] Wang Z B, Grant M. Optimization of minimum-time low-thrust transfers using convex programming [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2018, 55(3): 586-598.
- [12] Wang Z B, Grant M. Constrained Trajectory optimization for planetary entry via sequential convex programming [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2017, 40(10): 2603-2615.
- [13] Wang Z, Xu G T, Liu L, et al. Obstacle-avoidance trajectory planning for attitude constrained quadrotors using second-order cone programming [C]. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, USA, June 25-29, 2018.
- [14] 王祝,刘莉,龙腾,等.基于罚函数序列凸规划的多无人机轨迹规划[J].航空学报,2016,37(10):3149-3158.
- [15] 王小亮.面向对地观测的无人机路径规划与编队控制方法研究[D].武汉:武汉大学,2017.
- [16] 牟春晖.面向空间曲线路径跟踪的多UUV协调编队控制[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [17] 刘亚波.异构多机器人系统协同技术研究[D].浙江:浙江大学,2011.
- [18] 李樾,韩维,陈清阳,等.凸优化算法在有人/无人机协同系统航迹规划中的应用[J].宇航学报,2020,41(3):276-286.
- [19] Schmitt L, Fichter W. Collision-avoidance framework for small fixed-wing unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(4): 1323-1329.
- [20] Andriy A, Aleksandr V, Oleksander V, et al. Improvement of the anticollision method 'velocity obstacle' by taking into consideration the dynamics of an operating vessel [J]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, 6(3): 14-19.
- [21] Mujumdar A, Padhi R. Reactive collision avoidance of using nonlinear geometric and differential geometric guidance [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 34(1): 303-311.
- [22] Fiorini P, Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles [J]. International Journal of Robotics Research, 1998, 17(7): 760-772.
- [23] 杨秀霞,周础础,张毅.基于速度障碍圆弧法的UAV自主避障规划研究[J].系统工程与电子技术,2017,39(1):168-177.
- [24] Jenie Y I, Van E J, Devisser C C, et al. Selective velocity

- obstacle method for deconflicting maneuvers applied to unmanned aerial vehicles [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 38(6): 1140–1145.
- [25] 李越, 韩维, 陈清阳, 等. 基于改进的速度障碍法的有人/无人机协同系统三维实时避障方法[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(2): 309–318.
- [26] Zhou S, Wu W, Zhang N, and Zhang J. Overview of autonomous air combat maneuver decision [J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2012, 42(1): 27–31.
- [27] Reilly M B. Beyond video games: New artificial intelligence beats tactical experts in combat simulation [EB/OL]. 2018–04–06 [2020–05–15]. [http://magazine.uc.edu/editors\\_picks/recent\\_features/alpha.html](http://magazine.uc.edu/editors_picks/recent_features/alpha.html).
- [28] Seffers G. I. Commanding the future mission [EB/OL]. 2016–05–01 [2020–05–15]. <https://www.afcea.org/content/Article-commanding-future-mission>.
- [29] David H. Robot pilot gets its wings and takes to the skies [J]. *New Scientist*, 2019, 243(3246): 16.
- [30] Department of Defense. Unmanned system integrated roadmap FY 2013–2038 [EB/OL]. 2013 [2020]. <https://info.publicintelligence.net/DoD-UnmannedRoadmap-2013.pdf>.
- [31] Zhang X, Liu G, Yang C, et al. Research on air confrontation maneuver decision-making method based on reinforcement learning [J]. *Electronics*, 2018, 7(11): 279–298.
- [32] Yang Q, Zhang J, Shi G, et al. Maneuver decision of UAV in short-range air combat based on deep reinforcement learning [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 363–378.
- [33] Lillicrap T P, Hunt J J, Pritzel A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning [C]. *The International Conference on Learning Representations*, San Juan, Puerto Rico, 2016.
- [34] Schulman J, Wolski F, Dhariwal P, et al. Proximal policy optimization algorithms [EB/OL]. 2017–08–28 [2020–05–15]. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsarx&AN=edsarx.1707.06347&lang=zh-cn&site=eds-live>.
- [35] Heess N D, Sriram T S, et al. Emergence of locomotion behaviours in rich environments [EB/OL]. 2017–09–10 [2020–05–15]. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsarx&AN=edsarx.1707.02286&lang=zh-cn&site=eds-live>.
- [36] 魏航. 基于强化学习的无人机空中格斗算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [37] Li Y, Han W, Wang Y Q. Deep reinforcement learning with application to air confrontation intelligent decision-making of manned/unmanned aerial vehicle cooperative system [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 67887–67897.
- [38] 李蒙, 石泳, 刘莉. 基于鲁棒  $H_\infty$  的无人机飞行控制系统设计及实现 [J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(8): 807–812.
- [39] 王美仙, 李明, 张子军. 飞行器控制律设计方法发展综述 [J]. *飞行力学*, 2007(2): 1–4.
- [40] 赵兴成. 鲁棒  $H_\infty/S$  面模型的无人机飞行控制方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [41] 左湛. 复杂风力环境下固定翼无人机回收末段导航及鲁棒控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [42] 韩丽君. 基于滤波反步法的 AUV 轨迹跟踪及编队控制研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [43] 张佳龙, 闫建国, 张普. 基于反步推演法的多机编队队形重构控制 [J]. *航空学报*, 2019, 40(11): 208–220.
- [44] 王晶, 顾维博, 窦立亚. 基于 Leader-Follower 的多无人机编队轨迹跟踪设计 [J/OL]. *航空报*: 1–11 [2020–06–24]. <https://kns.cnki-net-s.nudtproxy.yitlink.com:443/kcms/detail/11.1929.V.20191227.0947.002.html>.

#### 作者简介:



李越(1991–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为飞行动力学与控制, 有人/无人机协同控制。



韩维(1970–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器动力学。



仲维国(1992–), 男, 本科, 讲师, 主要研究方向为飞行器设计。

[引用格式] 时晨光, 丁琳涛, 周建江. 基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 29-41.

# 基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法

时晨光, 丁琳涛, 周建江

(南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 研究了基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法。首先, 基于Stackelberg博弈理论, 将有人机作为博弈领导者 (Leader), 将各无人机作为博弈跟随者 (Followers), 各无人机雷达工作于同一频段并以辐射功率为单位支付给有人机相应的费用, 而有人机则通过调整单位辐射功率价格, 控制各无人机的总辐射功率, 以获得最大收益。同时, 各无人机与目标之间根据有人机制定的价格, 进行合作博弈功率分配。在此基础上, 分别设计综合考虑目标探测性能、无人机辐射功率及敌方截获接收机接收到无人机辐射功率的各博弈参与者效用函数, 并建立基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制模型。最后, 采用牛顿迭代法获得各无人机的最优辐射功率迭代公式, 并证明纳什议价解的存在性和唯一性。仿真结果验证了该文所提算法的正确性和有效性。

**关键词:** 射频隐身; 辐射功率控制; 有人机/无人机混合集群; Stackelberg博弈; 目标探测

**中图分类号:** TN958      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2020)04-29-13

## Transmit Power Control Algorithm in Manned/Unmanned Aerial Vehicle Hybrid Swarm Based on Stackelberg Game Theoretic Model

SHI Chenguang, DING Lintao, ZHOU Jianjiang

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** This paper investigates the problem of Stackelberg game-based transmit power control for manned/unmanned aerial vehicle hybrid swarm. It is formulated that the transmit power control process is treated as a hierarchical Stackelberg game model. In the underlying game model, the manned aerial vehicle of the manned/unmanned aerial vehicle hybrid swarm acts as a leader, who decides the prices first through the maximization of its own profit. The multiple unmanned aerial vehicles play the role of followers and subsequently operate in a cooperative behavior to maximize the overall profit according to the released prices from the manned aerial vehicle. The Nash bargaining solution (NBS) solution for the formulated game is derived analytically. Then, the existence of the NBS and uniqueness of the solution are strictly proved. In addition, a distributed iterative approach is developed to solve the resulting optimization problem. Finally, several simulation results are provided to verify the effectiveness of the proposed power control algorithm.

**Key words:** Radio Frequency Stealth; Transmit Power Control; Manned/Unmanned Aerial Vehicle Hybrid Swarm; Stackelberg Game; Target Detection

收稿日期: 2020-05-08; 修回日期: 2020-06-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61801212); 中国博士后科学基金面上项目(2019M650113); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180423); 中央高校基本科研业务费(NT2019010)

## 1 引言

随着电子对抗技术的不断发展,未来空战中,单一的有人机作战或无人机作战将很难满足作战需求。而有人机/无人机混合集群协同作战,可以充分发挥两者的优势,安全高效的完成作战任务,注定会成为未来空战中的一种重要作战形式。有人机/无人机混合集群通常由一架有人机和多架无人机组成,有人机作为长机,为无人机提供指挥和控制;无人机作为僚机,可以执行战场信息搜集、目标打击等危险的任务。在提高有人机战场生存能力的同时,又延伸了无人机的探测攻击距离,充分结合二者的作战优势,发挥综合效能。因此,有人机/无人机混合集群协同作战受到了国内外学者的广泛关注<sup>[1-8]</sup>。2016年,空军工程大学的钟贇等<sup>[3]</sup>采用一种区间直觉模糊多属性决策方法,对有人机/无人机编队决策分配过程中的属性值和专家建议的不确定性问题展开了研究。2017年,合肥工业大学的胡凯<sup>[4]</sup>建立了有人机/无人机混合编队协同能力的评估模型和优化模型,用以解决面向任务的有人机/无人机混合编队协同问题。针对有人机/无人机群对目标群协同作战的任务分配问题,2018年,空军工程大学的韩博文等<sup>[5]</sup>基于Holon组织构建理论,根据有人机和无人机的任务资源需求和作战资源能力,探讨并构建了最优的有人机/无人机群的作战联盟。2019年,海军航空大学的薄宁等<sup>[6]</sup>提出了一种基于马尔科夫决策过程模型策略,用于解决有人机/无人机的对地攻击作战行动规划问题。为了促进有人机/无人机编队协同作战技术发展,空军工程大学的罗维尔和魏瑞轩<sup>[7]</sup>对演示试飞验证进行了研究,详细论述了编队作战过程中试飞项目规划、环境构建、任务规划、虚拟试飞和结果评估等主要研究内容,为该领域相关技术的发展提供了指导。2020年,海军航空大学的吴立尧等<sup>[9]</sup>以无人机的运动学模型为基础,设计了一种路径跟踪为主、速度调节为辅的有人机/无人机编队队形变换策略,有效减轻了有人机驾驶员操纵压力并提高了编队队形变换效率。

近年来,Stackelberg博弈已被广泛地应用在认知无线电以及雷达信号处理等问题中<sup>[10-13]</sup>。2010年,南京邮电大学的罗荣华和杨震<sup>[14]</sup>提出了认知

无线电中基于Stackelberg博弈的分布式功率分配算法,将主用户作为博弈模型中的领导者(Leader),认知用户作为跟随者(Followers),认知用户使用主用户的工作频段时需要支付给主用户相应的费用,而主用户则通过调整干扰功率价格,限制认知用户产生的干扰功率不超过其最大可接受的干扰温度阈值,以获得最大收益。另外,不同认知用户之间则根据主用户制定的干扰功率价格,进行非合作博弈。仿真结果表明,该算法不仅减少了主用户与认知用户之间的信息交互,而且可以获得与最优功率分配算法相近的系统性能。文献[15]研究了协作通信中基于Stackelberg博弈的功率与带宽资源联合分配算法。2014年,文献[16]提出了异构网络中基于能效的低复杂度Stackelberg博弈功率分配算法,并用拉格朗日对偶分解法对此问题进行了求解。北京邮电大学的都晨辉等<sup>[17]</sup>则运用Stackelberg博弈理论研究了基于物理层安全的协作干扰策略,仿真结果表明,与平均功率分配算法相比,该算法具有明显更优的能效。2016年,Yin等<sup>[18]</sup>研究了设备到设备(Device to Device, D2D)通信与蜂窝网络共存下的频谱与功率资源联合分配问题。作者将通信基站作为博弈领导者,将D2D通信对作为博弈跟随者,建立了基于Stackelberg博弈的频谱与功率联合优化模型,并从数学上严格证明了纳什均衡解的存在性和唯一性。2018年,重庆邮电大学的朱江等<sup>[19-20]</sup>针对认知无线网络功耗过大的问题,提出了一种基于Stackelberg博弈的功率控制算法,将主用户作为博弈领导者,次用户作为博弈跟随者,建立主次用户双层博弈模型,并定量分析了次用户对主用户产生的干扰。2019年,王汝言等<sup>[21]</sup>针对虚拟化无线传感器网络中的资源竞争问题,提出了基于Stackelberg博弈的虚拟化无线传感器网络资源分配算法,根据不同业务对服务质量的需求,采用分布式迭代算法,获取无线传感器网络的最优价格和虚拟传感网络请求的最优资源需求,并根据纳什均衡进行优化分配。针对无人机网络的抗干扰问题,北京邮电大学的张新宇<sup>[22]</sup>采用Stackelberg博弈理论,建立了单一信道和多信道传输的无人机网络模型,并通过分析求得博弈均衡解,从而得到无人机Stackelberg博弈最优抗干扰策略。

2012年, Song等<sup>[23]</sup>首次利用Stackelberg博弈理论研究了目标与分布式MIMO雷达之间的电子对抗问题。2015年, 空军工程大学的兰星等<sup>[24-26]</sup>提出了基于Stackelberg博弈的MIMO雷达信号与目标干扰优化算法, 将环境中的杂波因素考虑进博弈模型中, 分别获得了强弱杂波环境下目标占优与雷达占优两种Stackelberg博弈优化策略, 可为杂波环境中雷达与目标的博弈提供有用的借鉴。

上述研究成果提出了基于Stackelberg博弈的认知无线电功率分配思想, 在保证认知用户正常通信的条件下, 有效降低了认知无线电系统的功耗。同时减少对授权用户的干扰, 为后续研究打下了坚实的基础。然而, 上述算法却存在如下几个不足之处: (1) 虽然文献[10-22]中的算法均采用Stackelberg博弈模型研究无线传感网络功率分配问题, 进一步提升了系统能效, 然而, 已有的研究成果绝大部分是针对认知无线通信中的功率控制问题, 如何将Stackelberg博弈思想应用于有人机/无人机混合集群辐射功率控制的问题, 还有待进一步研究; (2) 虽然文献[23-26]等将Stackelberg博弈模型运用于雷达信号处理问题中, 分析了杂波背景中MIMO雷达与目标之间的动态博弈问题, 而现代战争对雷达系统射频隐身性能的需求, 则要求最小化有人机/无人机混合集群的总辐射功率<sup>[27-40]</sup>。因此, 如何利用Stackelberg博弈思想优化控制各雷达发射功率, 从而在保证雷达系统目标探测性能的前提下, 获得更好的射频隐身性能, 是有人机/无人机混合集群设计的一个关键问题。另外, 至今尚未有基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制的公开报道, 这促使我们首次研究这个问题。

本文针对上述存在的问题, 研究基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法。首先, 基于Stackelberg博弈理论, 将有人机作为博弈领导者, 将各无人机作为博弈跟随者, 各无人机雷达工作于同一频段并以辐射功率为单位支付给有人机相应的费用, 而有人机则通过调整单位辐射功率价格, 控制各无人机载雷达的总辐射功率, 以获得最大收益。同时, 各无人机与目标之间根据有人机制定的价格, 进行合作博弈功率分配。在此基础上, 分别设计综合考虑目标探测性

能、无人机辐射功率及敌方截获接收机接收到无人机辐射功率的各博弈参与者效用函数, 并建立基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制模型, 该优化模型在满足一定目标探测性能和系统辐射功率资源约束的条件下, 最小化混合集群的总辐射功率, 同时可实现各无人机之间的公平性。最后, 将基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制问题转化为经典的最优化问题, 采用牛顿迭代法获得各无人机的最优辐射功率迭代公式, 并证明纳什议价解的存在性和唯一性。仿真结果验证了该文所提算法的正确性和有效性。

## 2 系统模型

本文考虑一个由一架有人机和 $N_i$ 架无人机组成的有人机/无人机混合集群, 如图1所示。为了提高系统的频谱资源利用率, 系统中各无人机载雷达工作于同一频段, 且由于各无人机难以做到精确同步, 从而造成不同雷达间的发射信号互相相关。第 $i$ 架无人机发射并接收经目标反射的雷达信号以对目标进行探测。同时, 无人机可由两条信道接收其他无人机发射的信号: 一条是无人机 $j$  ( $j = 1, \dots, N_i$ ) 到无人机 $i$ 接收机的直达波信号, 另一条是无人机 $j$ 发射并经目标反射达到无人机 $i$ 接收机的回波信号。另外, 假设各无人机载雷达的高增益、窄波束定向天线指向目标, 从而使得敌方截获接收机只能接收到各无人机发射的直达波信号。

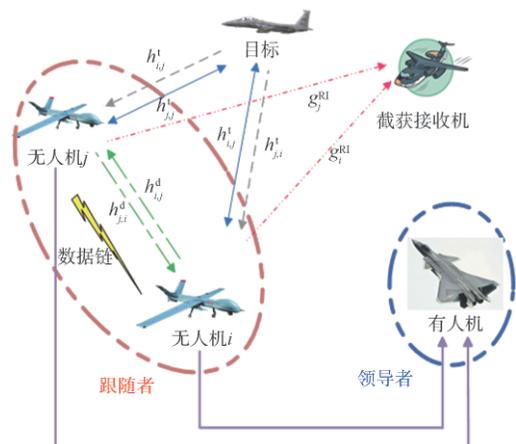


图1 有人机/无人机混合集群模型

Fig. 1 System model for manned/unmanned aerial vehicle hybrid swarm

由于经目标反射到达截获接收机的雷达信号强度远远小于直达波信号,为方便起见,忽略不计。假设系统中每架无人机可以独立对目标进行探测,并将目标探测数据经数据链路发送至有人机进行信息融合。当目标存在时,无人机*i*接收到的信号为<sup>[40]</sup>

$$\mathbf{s}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_i} \zeta_{i,j} \sqrt{P_j} \mathbf{x}_j + \mathbf{w}_i \quad (1)$$

当目标不存在时,无人机*i*接收到的信号为

$$\mathbf{s}_i = \chi_i \sqrt{P_i} \mathbf{x}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_i} \zeta_{i,j} \sqrt{P_j} \mathbf{x}_j + \mathbf{w}_i \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{x}_i = \phi_i \mathbf{a}_i$  表示无人机*i*的发射信号,  $\mathbf{a}_i = [1, e^{j2\pi f_{D,i}}, \dots, e^{j2\pi(N-1)f_{D,i}}]$  表示无人机*i*相对目标的多普勒转向矢量,  $f_{D,i}$  为目标相对于无人机*i*的多普勒频移,  $N$  为无人机电载雷达驻留时间内接收到的脉冲数目,  $\phi_i$  为无人机*i*的发射信号。  $\chi_i$  表示无人机*i*与目标之间的信道增益,  $P_i$  为无人机*i*的发射功率, 为无人机*i*与无人机*j*之间的互信道增益,  $\mathbf{w}_i$  表示无人机*i*接收机处均值为0、方差为 $\sigma^2$ 的高斯白噪声。假设有  $\alpha_i \sim \mathcal{CN}(0, h_{i,i}^i)$ ,  $\beta_{i,j} \sim \mathcal{CN}(0, c_{i,j}(h_{i,j}^i + h_{i,j}^d))$ , 且  $\mathbf{w}_i \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_N)$ , 其中,  $h_{i,i}^i$  表示无人机*i*-目标-无人机*i*信道增益的方差,  $c_{i,j} h_{i,j}^i$  表示无人机*i*-目标-无人机*j*信道增益的方差,  $c_{i,j} h_{i,j}^d$  表示无人机*i*-无人机*j*信道增益的方差,  $c_{i,j}$  表示无人机*i*与无人机*j*之间的互相关系数,  $\mathbf{I}_N$  为 $N$ 阶单位矩阵。定义相应信道增益的方差如下

$$\begin{cases} h_{i,i}^i = \frac{G_i G_r \sigma_{i,i}^{\text{RCS}} \lambda^2}{(4\pi)^3 R_i^4}, h_{i,j}^i = \frac{G_i G_r \sigma_{i,j}^{\text{RCS}} \lambda^2}{(4\pi)^3 R_i^2 R_j^2} \\ h_{i,j}^d = \frac{G_i' G_r' \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{i,j}^2}, g_i^{\text{RI}} = \frac{G_i' G_i \lambda^2}{(4\pi)^2 d_i^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $g_i^{\text{RI}}$  表示无人机*i*与截获接收机之间信道增益的方差,  $G_i$  为无人机电载雷达发射天线主瓣增益,  $G_r$  为无人机电载雷达接收天线主瓣增益,  $G_i'$  为无人机电载雷达发射天线旁瓣增益,  $G_r'$  为无人机电载雷达接收天线旁瓣增益,  $G_i$  为敌方截获接收机接收天线增益,  $\sigma_{i,i}^{\text{RCS}}$  为目标相对于无人机*i*的RCS,  $\sigma_{i,j}^{\text{RCS}}$  为目标相对于无人机*i*和无人机*j*的双站RCS,  $\lambda$  为雷达发射信号波长,  $R_i$  为无人机*i*与目标之间的距离,  $R_j$  为无人机*j*与目标之间的距离,  $d_{i,j}$  为无人机*i*与无人机*j*之间的直线距离,  $d_i$  为无人机*i*与截获接收机之间的

直线距离。假设所有信道增益的方差先验已知,且在雷达波束驻留时间内保持恒定。

在此,采用广义似然比检验作为无人机电载雷达的最优检测器<sup>[40]</sup>。无人机*i*的目标检测概率  $p_{D,i}(\delta_i, \gamma_i)$  和虚警概率  $p_{\text{FA},i}(\delta_i)$  分别定义如下

$$\left. \begin{aligned} p_{D,i}(\delta_i, \gamma_i) &= \left( 1 + \frac{\delta_i}{1 - \delta_i} \cdot \frac{1}{1 + N\gamma_i} \right)^{1-N} \\ p_{\text{FA},i}(\delta_i) &= (1 - \delta_i)^{N-1} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $\delta_i$  为检测门限,  $\gamma_i$  表示无人机*i*所获得的SINR值,其定义为

$$\gamma_i = \frac{h_{i,i}^i P_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_i} c_{i,j} (h_{i,j}^d P_j + h_{i,j}^i P_j) + \sigma^2} \quad (5)$$

式(5)可以重写为

$$\gamma_i = \frac{h_{i,i}^i P_i}{I_i} \quad (6)$$

式中,无人机*i*接收到的总干扰加噪声可表示为

$$I_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_i} c_{i,j} (h_{i,j}^d P_j + h_{i,j}^i P_j) + \sigma^2 \quad (7)$$

根据Bacci G和Panoui A等<sup>[39-40]</sup>的分析易知,可由预先设定的检测概率  $p_{D,i}(\delta_i, \gamma_i)$  和虚警概率  $p_{\text{FA},i}(\delta_i)$  求得检测门限  $\delta_i$ , 随后可得到各无人机所获得的SINR值  $\gamma_i$ , 并可用其表征目标探测性能。为了得到有人机/无人机混合集群的最优发射功率策略,本文基于Stackelberg博弈理论来建模和分析系统中各无人机、目标及敌方截获接收机之间的相互影响。在Stackelberg博弈中,将有人机作为博弈领导者,将各无人机作为博弈跟随者,各无人机电载雷达工作于同一频段并以辐射功率为单位支付给有人机相应的费用,而有人机则通过调整单位辐射功率价格,控制无人机产生的射频辐射,以获得最大收益。同时,各无人机与目标之间根据有人机制定的价格,进行合作博弈功率分配,从而最大化无人机集群的综合效用函数。

### 3 数学建模

本节建立基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制模型,该模型以最小化系统中各无人机电载雷达的辐射功率为目标,以给定目标探测性能以及系统辐射功率资源为约束条件,借

助Stackelberg博弈理论对优化模型进行求解,控制各无人机的辐射功率,从而提升有人机/无人机混合集群的射频隐身性能。

### 3.1 基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制模型

本文将有人机与各无人机之间的动态交互过程建模为Stackelberg博弈,其中,将有人机作为博弈领导者,将混合集群中各无人机作为博弈跟随者。有人机出售功率资源给集群中各架无人机,并根据敌方截获接收机所接收到的无人机射频辐射,设定单位辐射功率价格,同时将价格发送给各无人机。各无人机根据有人机设定的单位辐射功率价格,通过合作博弈功率分配,最大化无人机集群的综合效用函数。在这一博弈过程中,有人机就单位辐射功率价格与各无人机进行动态交互,直至博弈领导者和博弈跟随者的效用最大化,即达到Stackelberg均衡。

作为Stackelberg博弈模型中的领导者,在整个射频辐射资源动态分配过程中,有人机通过制定单位辐射功率价格以获取最大收益。因此,考虑截获接收机所接收到无人机射频辐射,设计博弈领导者的效用函数为各无人机支付给有人机的费用<sup>[39]</sup>,即

$$U_{\text{MAV}}(\xi, \mathbf{P}) \triangleq \left[ \sum_{i=1}^{N_i} \xi_i g_i^{\text{RI}} P_i - \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_i} \xi_i g_i^{\text{RI}} P_i - T_{\text{tar}} \right)^2}{S_{\text{min}}} \right] \varepsilon \left( S_{\text{min}} - \sum_{i=1}^{N_i} g_i^{\text{RI}} P_i \right) \quad (8)$$

式中,  $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_{N_i}]^T$  为有人机对无人机的单位辐射功率价格矢量,其中,  $\xi_i$  为有人机对无人机  $i$  的单位辐射功率价格;  $\mathbf{P} = [P_1, \dots, P_{N_i}]^T$  为无人机集群辐射功率矢量,  $S_{\text{min}}$  为截获接收机灵敏度,  $T_{\text{tar}}$  为截获接收机接收无人机辐射功率的目标值,  $\varepsilon(\cdot)$  为单位阶跃函数。由式(8)可以看出,  $\sum_{i=1}^{N_i} \xi_i g_i^{\text{RI}} P_i$  表示无人机集群因对外辐射功率而支付给有人机的费用<sup>[19]</sup>。在整个辐射功率动态优化过程中,有人机作为博弈领导者,通过制定单位辐射功率价格  $\xi_i$

以获得最大收益。值得说明的是,单位辐射功率价格在整个动态博弈过程中扮演着重要角色,如果  $\xi_i$  较大,则集群中各无人机将采用较小的辐射功率以降低目标探测所付出的成本,同时,也可能由于无人机辐射功率过低而无法预先设定的目标探测性能需求;如果  $\xi_i$  较小,则集群中各无人机将采用较大的辐射功率,这也有可能导致敌方截获接收机所接收到的无人机辐射功率超过其灵敏度,从而降低有人机/无人机混合集群的射频隐身性能。

因此,作为博弈领导者,有人机的主要目的是根据截获接收机所接收到各无人机的射频辐射,通过调整单位功率价格,最大化其自身效用函数。于是,有人机的效用函数优化模型为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\xi} U_{\text{MAV}}(\xi, \mathbf{P}), \\ & \text{s.t.}: \sum_{i=1}^{N_i} g_i^{\text{RI}} P_i < S_{\text{min}}, \\ & \xi_i \geq 0, \forall i. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

作为Stackelberg博弈模型中的跟随者,各无人机与目标之间根据有人机制定的价格,进行合作博弈功率分配。在目标探测场景下,各无人机对目标的SINR值必须大于等于预先设定的目标检测性能SINR阈值。较高的SINR值将获得较好的目标检测性能,然而各无人机将辐射较大的功率,这不仅有害于有人机/无人机混合集群的射频隐身性能,又会使得各无人机之间的干扰问题进一步恶化。由于无人机集群通过对外辐射功率进行目标探测,各无人机需要向有人机支付一定的费用。在此,综合考虑目标探测性能需求、无人机辐射功率资源约束及截获接收机所接收到无人机射频辐射,设计无人机  $i$  的效用函数为

$$U_{\text{UAV},i}(P_i, \mathbf{P}_{-i}, \xi_i) \triangleq h'_{i,i} \ln(\gamma_i - \gamma_{\text{min}}) - \xi_i g_i^{\text{RI}} P_i \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{P}_{-i} = [P_1, P_2, \dots, P_{i-1}, P_{i+1}, \dots, P_{N_i}]^T$  为除无人机  $i$  外其他无人机的辐射功率矢量,且有  $P_i \in \mathcal{P}_i$ , 其中,  $\mathcal{P}_i$  为博弈参与者  $i$  的辐射功率策略集;  $\gamma_{\text{min}}$  为表征目标检测性能的SINR阈值。由式(10)可以看出,各无人机既要通过增大辐射功率来提高目标探测SINR值,又必须为无人机辐射射频信号给有人机支付一定的费用。因此,各无人机无法盲目追求自身利益而忽略整体利益,这从一定程度上保证了

混合集群的射频隐身性能。

在传统的 Stackelberg 博弈模型中, 博弈跟随者之间通过非合作博弈使得自身的效用最大化, 然而, 系统的整体效能并不能达到最优。在本文中, 博弈跟随者通过合作博弈, 采用妥协和讨价还价的方式, 提升系统的整体效能。根据纳什定理, 合作博弈模型下无人机集群的综合效用函数为

$$U_{\text{UAVS},i}(P_i, P_{-i}, \xi_i) \triangleq \sum_{i=1}^{N_i} U_{\text{UAV},i}(P_i, P_{-i}, \xi_i) \quad (11)$$

$$= \sum_{i=1}^{N_i} \{h_{i,i}^t \ln(\gamma_i - \gamma_{\min}) - \xi_i g_i^{\text{RI}} P_i\}$$

因此, 作为博弈跟随者, 组网雷达系统的主要目的是在满足一定目标探测性能和无人机集群辐射功率资源约束的条件下, 最小化各无人机的总辐射功率。于是, 在有人机对各无人机单位辐射功率价格已知的前提下, 基于合作博弈的无人机集群分布式功率控制模型为

$$\left. \begin{aligned} \max_{P_i, \forall i} & U_{\text{UAVS},i}(P_i, P_{-i}, \xi_i), \\ \text{s.t.} & \gamma_i \geq \gamma_{\min}, \forall i, \\ & 0 \leq P_i \leq P_i^{\max}, \forall i, \\ & \sum_{i=1}^{N_i} P_i < P_{\text{tot}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中,  $P_i^{\max}$  为无人机  $i$  辐射功率的上限,  $P_{\text{tot}}$  为无人机集群总辐射功率的上限。如前文所述, 为了满足分布式计算的需要, 各无人机需要预先获得各信道增益的方差  $\{h_{i,j}^t\}_{j=1, j \neq i}^{N_i}$ ,  $\{h_{i,j}^d\}_{j=1, j \neq i}^{N_i}$ ,  $\{h_{i,j}^l\}_{j=1}^{N_i}$  和  $\{g_i^{\text{RI}}\}_{j=1}^{N_i}$ 。

### 3.2 无人机辐射功率迭代公式求解

本小节采用牛顿迭代法来推导各无人机的最优发射功率迭代公式。当得到有人机对无人机集群的单位辐射功率价格后, 各无人机通过合作博弈来获得最优辐射功率, 有人机则根据敌方截获接收机接收到的无人机集群射频辐射, 动态调整单位辐射功率价格, 以获得自身收益的最大化。

由式(12)可知, 基于合作博弈的无人机集群分布式功率控制模型是一个具有多重约束条件的最优化问题。于是, 在有人机对各无人机单位辐射功率价格已知的前提下, 可采用拉格朗日乘子法对式(12)进行求解。引入拉格朗日乘子  $\{\mu_i\}_{i=1}^{N_i}$ ,  $\{\varpi_i\}_{i=1}^{N_i}$ ,  $\{\varphi_i\}_{i=1}^{N_i}$  和  $\tau$ , 优化模型(12)可以等价转化为

$$K \left( \left\{ U_{\text{UAVS},i}(P_i, P_{-i}, \xi_i) \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \mu_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \varpi_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \varphi_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \tau \right)$$

$$= \sum_{i=1}^{N_i} \left\{ h_{i,i}^t \ln(\gamma_i - \gamma_{\min}) - \xi_i g_i^{\text{RI}} P_i \right\} - \mu_i (\gamma_i - \gamma_{\min}) +$$

$$\varpi_i (P_i - P_i^{\max}) - \varphi_i P_i + \tau \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_i} P_i - P_{\text{tot}} \right) \quad (13)$$

令  $\partial K \left( \left\{ U_{\text{UAVS},i}(P_i, P_{-i}, \xi_i) \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \mu_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \varpi_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \varphi_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \tau \right) / \partial P_i = 0$ , 则有

$$\frac{\partial K \left( \left\{ U_{\text{UAVS},i}(P_i, P_{-i}, \xi_i) \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \mu_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \varpi_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \left\{ \varphi_i \right\}_{i=1}^{N_i}, \tau \right)}{\partial P_i}$$

$$= \frac{h_{i,i}^t}{\gamma_i - \gamma_{\min}} \cdot \frac{h_{i,i}^t}{I_{-i}} - \mu_i \cdot \frac{h_{i,i}^t}{I_{-i}} + \varpi_i - \varphi_i + \tau = 0 \quad (14)$$

重新整理式(14)后, 可得无人机  $i$  的辐射功率  $P_i$  为:

$$P_i = \frac{I_{-i}}{h_{i,i}^t} \gamma_{\min} + \frac{h_{i,i}^t}{\mu_i \cdot \frac{h_{i,i}^t}{I_{-i}} - \varpi_i + \varphi_i - \tau} \quad (15)$$

因此, 借助牛顿迭代法, 得到无人机  $i$  的辐射功率迭代表达式为

$$P_i^{(\text{ite}+1)} = \left[ \frac{P_i^{(\text{ite})}}{\gamma_i^{(\text{ite})}} \gamma_{\min} + \frac{h_{i,i}^t}{\mu_i^{(\text{ite})} \cdot \frac{\gamma_i^{(\text{ite})}}{P_i^{(\text{ite})}} - \varpi_i^{(\text{ite})} + \varphi_i^{(\text{ite})} - \tau_i^{(\text{ite})}} \right]^{P_i^{\max}} \quad (16)$$

式中,

$$\gamma_i^{(\text{ite})} = \frac{h_{i,i}^t P_i^{(\text{ite})}}{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_i} c_{i,j} (h_{i,j}^d P_j^{(\text{ite})} + h_{i,j}^l P_j^{(\text{ite})}) + \sigma^2} \quad (17)$$

$\text{ite}$  为迭代次数索引,  $[x]_a^b = \max\{\min(x, b), a\}$ 。另外, 采用次梯度方法对拉格朗日乘子  $\{\mu_i^{(\text{ite})}\}_{i=1}^{N_i}$ ,  $\{\varpi_i^{(\text{ite})}\}_{i=1}^{N_i}$ ,  $\{\varphi_i^{(\text{ite})}\}_{i=1}^{N_i}$  和  $\tau^{(\text{ite})}$  进行更新, 从而保证算法的快速收敛性, 即

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_i^{(n+1)} &= \left[ \mu_i^{(n)} + s_1 \cdot (\gamma_i^{(\text{ite})} - \gamma_{\min}) \right]_0^+ \\ \varpi_i^{(\text{ite}+1)} &= \left[ \varpi_i^{(\text{ite})} + s_1 \cdot (P_i^{\max} - P_i^{(\text{ite})}) \right]_0^+ \\ \varphi_i^{(\text{ite}+1)} &= \left[ \varphi_i^{(\text{ite})} + s_1 \cdot P_i^{(\text{ite})} \right]_0^+ \\ \tau^{(\text{ite}+1)} &= \left[ \tau^{(\text{ite})} + s_1 \cdot \left( P_{\text{tot}} - \sum_{i=1}^{N_i} P_i^{(\text{ite})} \right) \right]_0^+ \end{aligned} \right. \quad (18)$$

式中,  $s_i > 0$  为迭代步长; 当  $x > 0$  时,  $[x]_a^+ = x$ , 否则,  $[x]_a^+ = a$ 。

### 3.3 纳什议价解的存在性与唯一性证明

**定理1(存在性):** 当对于  $\forall i$ , 满足下列两个条件时, 本文提出的基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法至少有一个纳什议价解存在<sup>[38]</sup>:

(a) 无人机  $i$  的辐射功率  $P_i$  是欧几里得空间上的非空、闭合、有界的凸集合;

(b) 无人机  $i$  的效用函数  $U_{\text{UAV},i}(P_i, \mathbf{P}_{-i}, \xi_i)$  是连续的拟凹函数。

**证明:** 由式(12)中各无人机的辐射功率策略可以得到, 无人机  $i$  的辐射功率  $P_i$  是欧几里得空间上的非空、闭合、有界的凸集合, 故满足第1个条件。

对效用函数  $U_{\text{UAV},i}(P_i, \mathbf{P}_{-i}, \xi_i)$  相对于  $P_i$  求二阶偏导数, 可得

$$\frac{\partial^2 U_{\text{UAV},i}(P_i, \mathbf{P}_{-i}, \xi_i)}{\partial P_i^2} = -\frac{(h_{i,i}^t)^3}{I_{-i}^2(\gamma_i - \gamma_{\min})^2} < 0 \quad (19)$$

则效用函数  $U_{\text{UAV},i}(P_i, \mathbf{P}_{-i}, \xi_i)$  在策略空间上为连续的凹函数, 而凹函数也是拟凹函数。因此, 本文所提算法存在纳什议价解, 得证。

**定理2(唯一性):** 本文提出的基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法具有唯一的纳什议价解。

**证明:** 根据文献[38]可知, 当且仅当下列四个条件满足时, 合作博弈模型存在唯一纳什议价解:

(1)  $A_i = \{P_i \in S, f(P_i) = \bar{P} - P_i \geq 0\}$  为非空集合, 其中,  $\bar{P}$  为各无人机的平均辐射功率,  $S$  为博弈方的策略集合;

(2) 存在  $P_i \in S_i$  使得  $f(P_i) \geq 0$  满足, 其中,  $S_i$  为博弈方  $i$  的策略集合;

(3) 博弈方  $i$  的效用函数  $U_{\text{UAV},i}(P_i, \mathbf{P}_{-i}, \xi_i)$  是连续的拟凹函数;

(4) 对于任意的  $(\mathbf{P}^{(0)} \neq \mathbf{P}^{(1)})$ , 其中,  $\mathbf{P}^{(k)} = [P_1^k, \dots, P_{N_i}^k] \in S$ ,  $k = 0, 1$ , 且有  $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_{N_i}] \geq 0$ , 满足

$$(\mathbf{P}^{(0)} - \mathbf{P}^{(1)})^T \mathbf{d}(\mathbf{P}^{(0)}, \mathbf{t}) + (\mathbf{P}^{(1)} - \mathbf{P}^{(0)})^T \mathbf{d}(\mathbf{P}^{(1)}, \mathbf{t}) < 0 \quad (20)$$

式中,

$$\mathbf{d}(\mathbf{P}, \mathbf{t}) = \left[ t_1 \frac{\partial U_{\text{UAV},1}}{\partial P_1}, \dots, t_{N_i} \frac{\partial U_{\text{UAV},N_i}}{\partial P_{N_i}} \right]^T \quad (21)$$

由式(12)中各无人机的辐射功率策略可得, 条件(1)和(2)满足, 而条件(3)已由定理1证明。下面证明条件(4), 由于

$$\begin{aligned} & (\mathbf{P}^{(0)} - \mathbf{P}^{(1)})^T \mathbf{d}(\mathbf{P}^{(0)}, \mathbf{t}) + (\mathbf{P}^{(1)} - \mathbf{P}^{(0)})^T \mathbf{d}(\mathbf{P}^{(1)}, \mathbf{t}) \\ &= (\mathbf{P}^{(0)} - \mathbf{P}^{(1)})^T [\mathbf{d}(\mathbf{P}^{(0)}, \mathbf{t}) - \mathbf{d}(\mathbf{P}^{(1)}, \mathbf{t})] \\ &= \mathbf{d}(\mathbf{P}^{(0)}, \mathbf{t}) \left[ t_1 \left( \frac{\partial U_{\text{UAV},1}}{\partial P_1^{(0)}} - \frac{\partial U_{\text{UAV},1}}{\partial P_1^{(1)}} \right), \dots, \right. \\ & \quad \left. t_{N_i} \left( \frac{\partial U_{\text{UAV},N_i}}{\partial P_{N_i}^{(0)}} - \frac{\partial U_{\text{UAV},N_i}}{\partial P_{N_i}^{(1)}} \right) \right]^T \end{aligned} \quad (22)$$

$$= \sum_{i=1}^{N_i} t_i (P_i^{(0)} - P_i^{(1)}) \left( \frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i^{(0)}} - \frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i^{(1)}} \right)$$

$$\text{令 } \chi_i = t_i (P_i^{(0)} - P_i^{(1)}) \left( \frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i^{(0)}} - \frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i^{(1)}} \right), \text{ 其中,}$$

$t_i \geq 0$ 。根据定理1可知,  $\frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i}$  为  $P_i$  的单调递减函

数。由此可得, 对于  $P_i^{(0)} > P_i^{(1)}$ , 有  $\frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i^{(0)}} - \frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i^{(1)}} <$

0 成立, 则  $\chi_i \leq 0$ 。同样地, 当  $P_i^{(0)} < P_i^{(1)}$  时, 有

$\frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i^{(0)}} - \frac{\partial U_{\text{UAV},i}}{\partial P_i^{(1)}} > 0$  成立, 则  $\chi_i < 0$ 。因此, 条件

(4) 满足。

综上所述, 本文提出的基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法具有唯一的纳什议价解, 证毕。

### 3.4 基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合编队辐射功率迭代算法

在证明本文基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合编队辐射功率控制算法具有唯一纳什议价解的基础上, 根据无人机  $i$  的辐射功率迭代表达式(18), 给出基于Stackelberg博弈的有人机/无人机混合编队辐射功率迭代算法流程, 如图2所示。首先, 有人机根据截获接收机接收到的无人机集群射频辐射, 设定单位辐射功率价格, 并将价格发送给各无人机。各无人机根据有人机设定的单位辐射功率价格, 通过合作博弈功率分配, 经过多次博弈直至综

合效用函数最大化。之后,有人机再根据各无人机的辐射功率调整单位功率价格,多次动态博弈后使得各博弈参与者的收益最大化,即达到 Stackelberg 均衡。

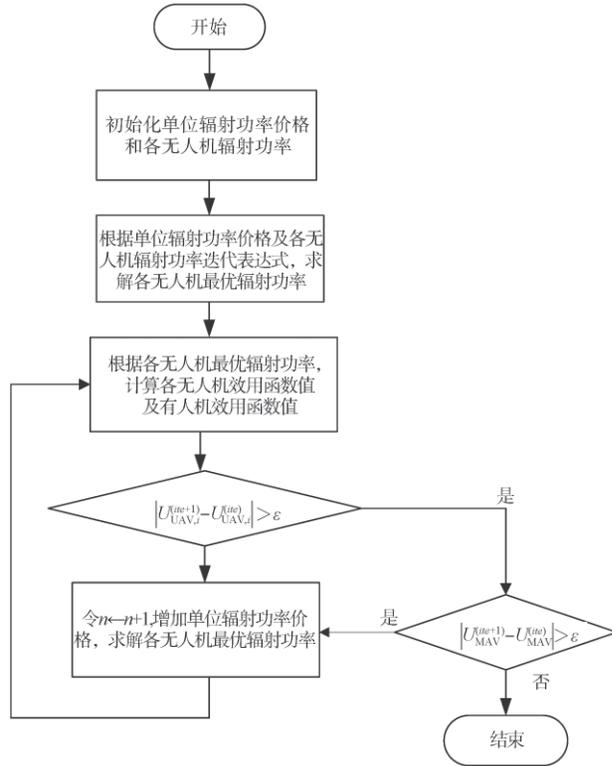


图2 基于 Stackelberg 博弈的有人机/无人机混合编队辐射功率迭代算法流程图

Fig. 2 Flow diagram for transmit power control iterative algorithm in manned/unmanned aerial vehicle hybrid swarm based on Stackelberg game theoretic model

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 仿真参数设置

为了验证基于 Stackelberg 博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法的正确性和有效性,本文进行了如下仿真。假设有人机/无人机混合集群由一架有人机和  $N_i = 8$  架无人机组成,且各无人机在目标探测模式下某一时刻的相对位置如表 1 所示。敌方截获接收机的位置为  $[20, 0]$  km。为了验证目标相对于集群中各无人机的位置关系对功率分配结果的影响,本文考虑某一时刻两种不同的目标位置。其中,第一种情况下目标位置为  $[0, 0]$  km,第二种情况下目标位置为  $[20, -30]$  km。各无人机间的互干扰系数为  $c_{i,j} = 0.01 (i \neq j)$ 。其

他系统参数分别设置如下:无人机雷达天线增益  $G_i = G_r = 30$  dB,  $G'_i = G'_r = -30$  dB,雷达信号波长  $\lambda = 0.03$  m;每部无人机的辐射功率上限为  $P_{i,\max} = 7000$  W,混合集群的总辐射功率上限为  $P_{\text{tot}} = 14000$  W;漏检概率  $p_{\text{d},i}(\delta_i, \gamma_i) = 0.9973$ ,虚警概率  $p_{\text{FA},i}(\delta_i) = 10^{-6}$ ,雷达发射脉冲数  $N = 512$ ,检测门限  $\delta_i = 0.0267$ ,由式(4)可计算得到相应的 SINR 门限  $\gamma_{\min} = 10$  dB;截获接收机接收天线增益  $G_t = 0$  dB,其接收无人机辐射功率的目标值为  $T_{\text{tot}} = 10^{-18}$  W,灵敏度为  $S_{\min} = -97$  dBmW;背景噪声功率  $\sigma^2 = 10^{-18}$  W;单位辐射功率价格  $\xi_i^{(0)} = 5 \times 10^{20} (\forall i)$ ,误差容限  $\varepsilon = 10^{-16}$ 。

表 1 各无人机在空间中的相对位置分布

Table 1 The relative position distribution of each drone in space

无人机编号	空间位置/km
无人机 1	[50, 0]
无人机 2	$[25/\sqrt{2}, 25/\sqrt{2}]$
无人机 3	[0, 50]
无人机 4	$[-25/\sqrt{2}, 25/\sqrt{2}]$
无人机 5	[-50, 0]
无人机 6	$[-25/\sqrt{2}, -25/\sqrt{2}]$
无人机 7	[0, -50]
无人机 8	$[25/\sqrt{2}, -25/\sqrt{2}]$

在此,考虑两种目标 RCS 模型  $\sigma_1^{\text{RCS}}$  和  $\sigma_2^{\text{RCS}}$ 。其中,第一种 RCS 模型为  $\sigma_1^{\text{RCS}} = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1] \text{ m}^2$ ,表示目标相对各无人机视角下的 RCS 均相等,功率分配结果只与目标到无人机的距离以及它们之间的相对位置有关。为了进一步分析目标 RCS 对功率分配结果的影响,本节还考虑了第二种 RCS 模型  $\sigma_2^{\text{RCS}} = [10, 15, 6, 21, 8, 2, 12, 25] \text{ m}^2$ ,表示目标相对各无人机视角下的 RCS 不相等。

### 4.2 功率控制结果

图 3 示出了所提算法中各无人机辐射功率随博弈迭代次数变化的曲线,其中,不同情况下各无人机发射功率初值分别设为  $P^{(0)} = [1500, 300, 800, 4800, 500, 2400, 1800, 3600] \text{ W}$ ,  $P^{(0)} = [1500, 1500, 800, 800, 0, 0, 2400, 2400] \text{ W}$ ,  $P^{(0)} = [3000, 3000,$

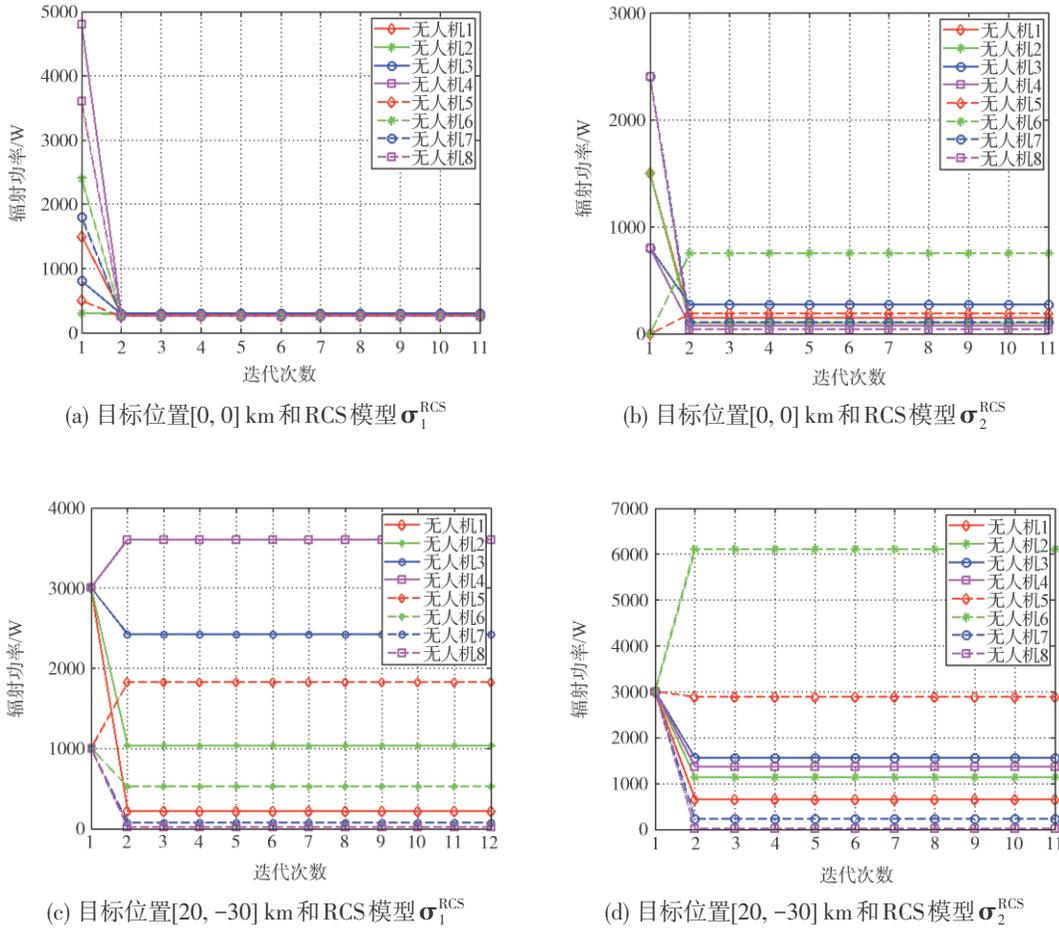


图 3 不同情况下各无人机辐射功率收敛性能

Fig. 3 Convergence behavior for the transmit power of each unmanned aerial vehicle in different cases

3000, 3000, 1000, 1000, 1000, 1000] W,  $P^{(0)} = [3000, 3000, 3000, 3000, 3000, 3000, 3000, 3000]$  W。从图 3 中可以看出,所提算法大致经过 3~5 次迭代计算可以达到 Stackelberg 均衡点,从而验证了算法的收敛性。为了分析不同因素对无人机功率分配结果的影响,图 4 给出了不同情况下的无人机辐射功率分配比,其中,定义第  $i$  架无人机的功率分配比为

$$\begin{cases} \eta_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^{N_i} P_i} \\ \sum_{i=1}^{N_i} \eta_i = 1 \end{cases} \quad (23)$$

如图 4(b) 所示,在第二种目标 RCS 模型下,无人机 3 和无人机 6 发射较大的功率,而其他无

人机则发射较小的功率,这是由于无人机 3 和无人机 6 相对目标视角 RCS 较小,需要发射更多的功率以满足其目标探测 SINR 性能要求。由图 4(c) 给出的功率分配结果可以发现,在第二种目标位置下,无人机 3 和无人机 4 发射较大的功率,说明距离目标较远的无人机发射较大的功率。因此,目标相对于各无人机位置关系及 RCS 的不同会产生不同的辐射功率,从而影响有人机/无人机混合集群的射频隐身性能。由图 4(d) 给出的功率控制结果可以发现,无人机 3、无人机 4、无人机 5 和无人机 6 发射较大的功率,而无人机 1、无人机 2、无人机 7 和无人机 8 则发射很小的功率,这是由于无人机 3、无人机 4、无人机 5 和无人机 6 距离目标较远,且相对目标视角 RCS 较小。综上所述,基于 Stackelberg 博弈的有人机/无人机混合

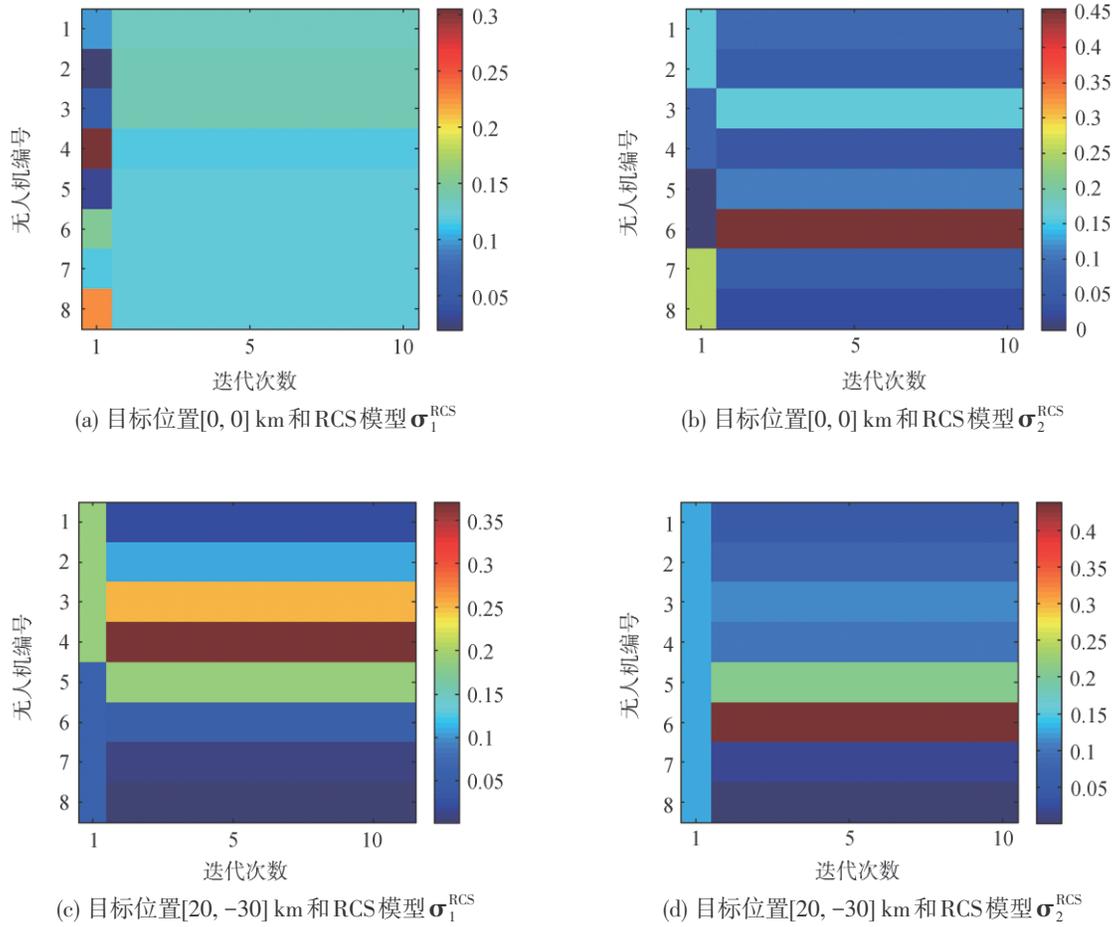


图4 不同情况下无人机发射功率分配比

Fig. 4 Convergence behavior for the transmit power allocation in different cases

集群辐射功率控制算法的无人机载雷达辐射功率与目标相对系统中各无人机的位置关系以及目标相对各无人机视角下的 RCS 有关,且距离目标较远、相对目标视角 RCS 较小的无人机需要辐射较大的功率,从而满足其设定的目标探测 SINR 性能要求。

图 5 给出了所提算法的各无人机 SINR 收敛性能。结果显示,经过 3~5 次迭代计算,各无人机所得的 SINR 收敛到预先设定的 SINR 阈值  $\gamma_{\min}$ ,从而验证了本文算法可以在控制各无人机载雷达辐射功率的同时,满足给定的目标探测 SINR 性能要求,同时实现了各无人机之间的公平性。

为了验证有人机/无人机混合集群辐射功率控制对系统射频隐身性能的影响,图 6 给出了不同情

况下截获接收机接收到各无人机总辐射功率的收敛性能。从仿真结果可以看出,在不同目标位置和 RCS 模型条件下,经过 3~5 次左右的迭代计算,采用本文算法所得的截获接收机接收到各无人机总辐射功率收敛到截获接收机灵敏度以下,且低于平均功率分配算法下载获接收机所接收的无人机辐射功率,这是由于后者是在没有利用目标位置及 RCS 先验信息的情况下,将系统辐射功率均匀分配给各架无人机,从而具有更差的射频隐身性能。特别地,从图 6(c)和图 6(d)可以看出,当达到博弈均衡状态后,平均功率分配算法所得的截获接收机接收到各无人机总辐射功率明显高于截获接收机灵敏度,从而使得无人机的射频辐射极易被敌方截获。因此,基于 Stackelberg 博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法能够在满足一定目标探测性能和系统辐射功率资源约束的条

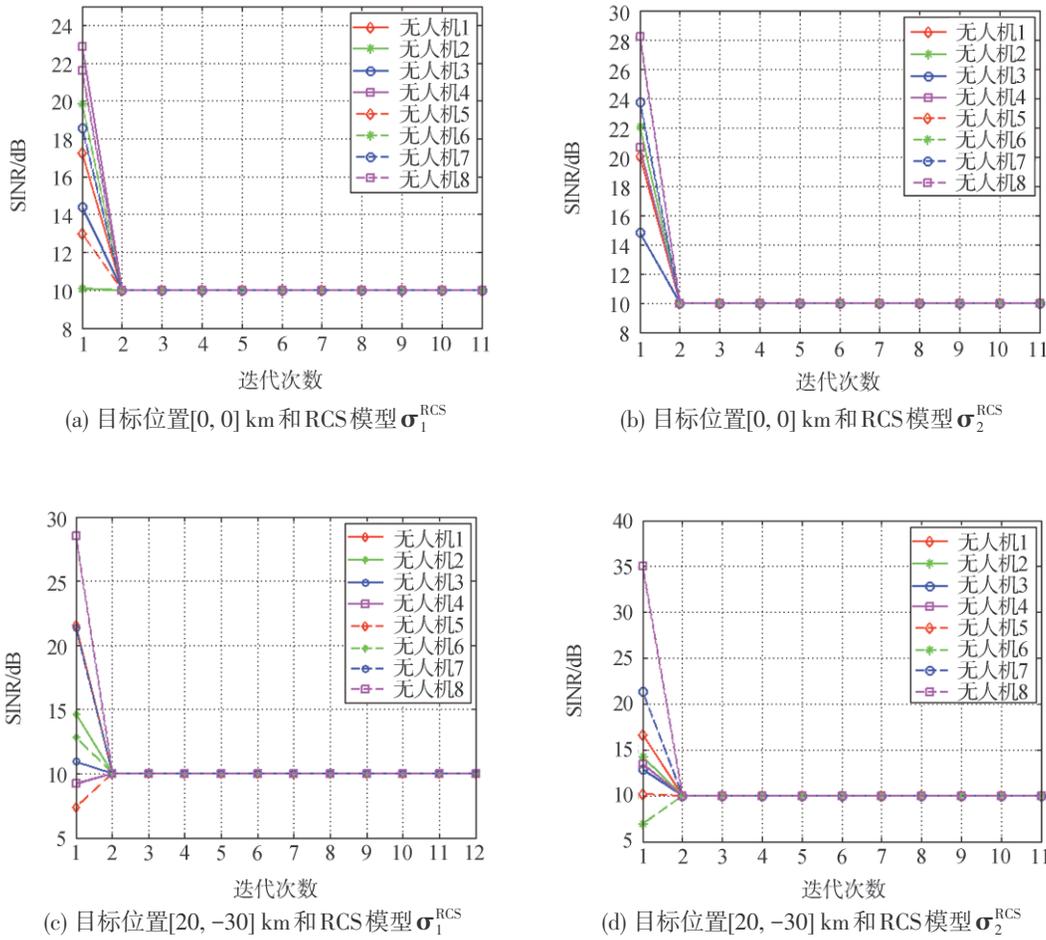


图5 不同情况下各无人机 SINR 收敛性能

Fig. 5 Convergence behavior for the achievable SINR of each unmanned aerial vehicle in different cases

件下,有效降低各无人机的辐射功率,不仅减少了各无人机间的相互干扰,而且有效提升了混合集群的射频隐身性能,实现了系统射频隐身性能与目标探测性能之间的好折中。

### 5 结 论

本文针对有人机/无人机混合集群目标探测时的射频隐身问题,基于 Stackelberg 博弈理论,将混合集群中的有人机作为博弈领导者,将各无人机作为博弈跟随者,分别设计了综合考虑目标探测性能、无人机辐射功率及敌方截获接收机接收到无人机辐射功率的各博弈参与者效益函数,并提出了一种基于 Stackelberg 博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制模型。该算法可在满足一定

目标探测性能和系统辐射功率资源约束的条件下,最小化混合集群的总辐射功率。之后,采用牛顿迭代法获得了各无人机的最优辐射功率迭代公式,并证明了纳什议价解的存在性和唯一性。仿真结果表明,基于 Stackelberg 博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法能在满足一定目标探测性能和系统辐射功率资源约束的条件下,有效降低了各无人机的辐射功率,不仅减少了各无人机间的相互干扰,而且有效提升了有人机/无人机混合集群的射频隐身性能,实现了系统射频隐身性能与目标探测性能之间的好折中。后续研究将在有人机/无人机混合集群射频辐射控制问题中兼顾目标探测范围约束,从而在未来集群协同作战条件下,实现对战场态势的全域感知。

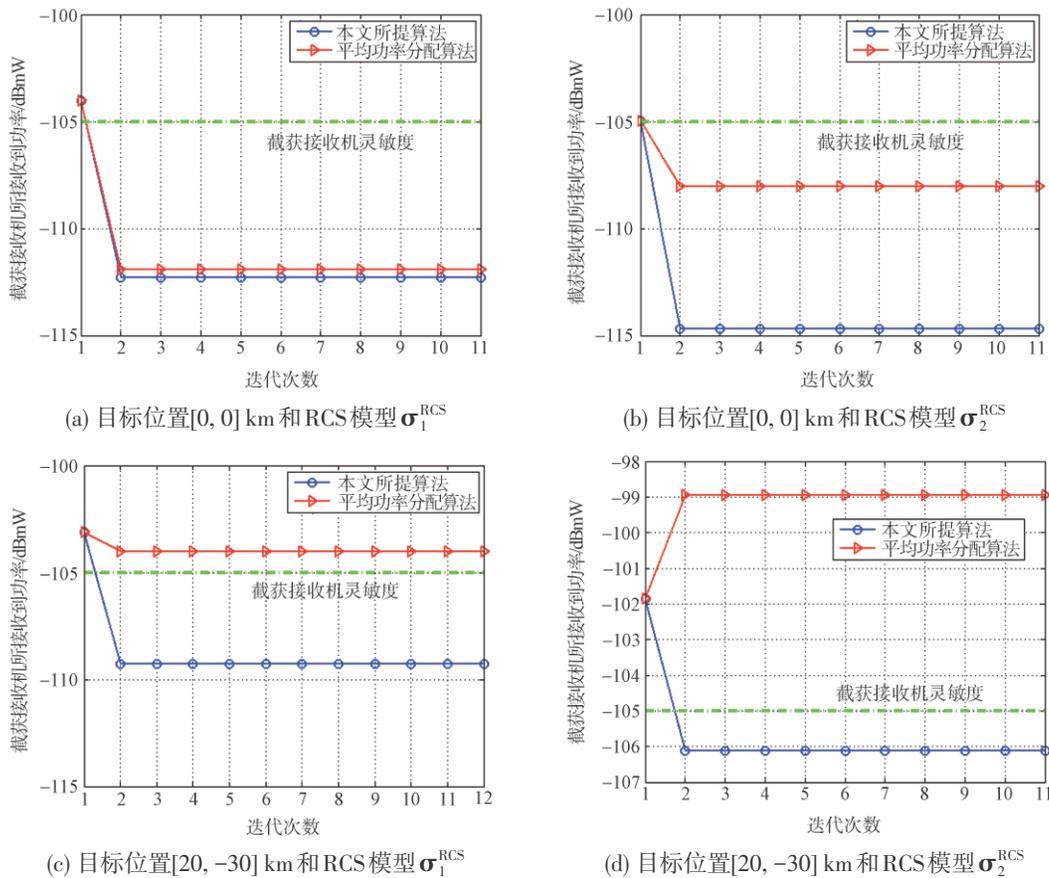


图6 不同情况下截获接收机接收到各无人机总辐射功率收敛性能

Fig. 6 Convergence behavior for the received power of all unmanned aerial vehicle at intercept receiver in different cases

## 参考文献

- [1] 李文, 陈建. 有人机/无人机混合编队协同作战研究综述与展望[J]. 航天控制, 2017, 35(3): 90-96.
- [2] 高遐, 熊健. 有人机/无人机协同概念及相关技术[J]. 电讯技术, 2014, 54(12): 1612-1616.
- [3] 钟赞, 姚佩阳, 孙昱. 有人机/UCAV编队协同作战决策分配方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11): 2984-2992.
- [4] 胡凯. 面向任务的无人/有人机混合编队协同问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [5] 韩博文, 姚佩阳. 基于Holon组织的有人/无人机作战联盟形成[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1): 91-97.
- [6] 薄宁, 李相民, 代进进, 等. 基于MDP的有/无人机编队对地攻击行动方案规划[J]. 光电与控制, 2019, 26(2): 16-22.
- [7] 罗维尔, 魏瑞轩. 有人/无人机协同打击航路智能规划[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(7): 1090-1095.
- [8] 杜梓冰, 张立丰, 陈敬志, 等. 有人/无人机协同作战演示验证试飞关键技术[J]. 航空兵器, 2019, 26(4): 75-81.
- [9] 吴立尧, 韩维, 张勇, 等. 基于人机合作的有人/无人机编队队形变换策略[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(2): 434-444.
- [10] Razaviyayn M, Morin Y, Luo Z Q. A Stackelberg game approach to distributed spectrum management [C]. 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Dallas, Texas, USA, May 15-19, 2010.
- [11] Duong N D, Madhukumar A S, Niyato D. Stackelberg Bayesian game for power allocation in two-tier networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2341-2354.
- [12] Zhu K, Hossain E, Anpalagan A. Downlink power control in two-tier cellular OFDMA networks under uncertainties: A robust Stackelberg game [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(2): 520-535.
- [13] Liu Z X, Li S Y, Yang H J, et al. Approach for power allocation in two-tier femtocell networks based on robust non-cooperative game [J]. IET Communications, 2017, 11(10): 1549-1557.
- [14] 罗荣华, 杨震. 认知无线电中基于Stackelberg博弈的分布式功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2964-2969.
- [15] Al-Tous H, Barhumi I. Joint power and bandwidth allocation for amplify-and-forward cooperative communications using Stackelberg game [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1678-1691.
- [16] Wang Y S, Wang X, Wang L. Low-complexity Stackelberg

- game approach for energy-efficient resource allocation in heterogeneous networks [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(11): 2011-2014.
- [17] 都晨辉, 宋梅, 王莉, 等. 基于Stackelberg博弈的协作干扰策略[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(5): 11-15.
- [18] Yin R, Zhong C J, Yu G D, et al. Joint spectrum and power allocation for D2D communications underlying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2182-2195.
- [19] 朱江, 蒋涛涛. 认知无线网络中基于Stackelberg博弈的功率控制新算法[J]. 电讯技术, 2018, 58(4): 363-369.
- [20] 巴少为. 认知无线电中基于博弈论的功率控制机制的研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2017.
- [21] 王汝言, 李宏娟, 吴大鹏. 基于Stackelberg博弈的虚拟化无线传感网络资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(2): 377-384.
- [22] 张新宇. 无人机网络抗干扰方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [23] Song X F, Peter W, Zhou S L, et al. The MIMO radar and jammer games [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 60(2): 687-699.
- [24] 兰星, 王兴亮, 李伟, 等. 基于Stackelberg博弈的多输入多输出雷达信号与目标干扰优化[J]. 计算机应用, 2015, 35(4): 1185-1189.
- [25] Lan X, Li W, Wang X L, et al. MIMO radar and target Stackelberg game in the presence of clutter [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 6912-6920.
- [26] 兰星, 李伟, 王兴亮, 等. 杂波背景MIMO雷达与目标博弈时优化策略研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(7): 2102-2105.
- [27] Schleher D C. LPI radar: fact or fiction [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(5): 3-6.
- [28] Pace P E. Detecting and classifying low probability of intercept radar[M]. Boston: Artech House, 2009.
- [29] Stove A G, Hume A L, Baker C J. Low probability of intercept radar strategies [J]. IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation, 2004, 151(5): 249-260.
- [30] Lawrence D E. Low probability of intercept antenna array beamforming [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(9): 2858-2865.
- [31] Zhang Z K, Zhou J J, Wang F, et al. Multiple-target tracking with adaptive sampling intervals for phased-array radar [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(5): 760-766.
- [32] Zhang Z K, Salous S, Li H L, et al. Optimal coordination method of opportunistic array radars for multi-target-tracking-based radio frequency stealth in clutter [J]. Radio Science, 2015, 55(11): 1187-1196.
- [33] Shi C G, Wang F, Zhou J J, et al. Security information factor based low probability of identification in distributed multiple-radar system [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brisbane, Australia, April 19-24, 2015.
- [34] Shi C G, Zhou J J, Wang F. LPI based resource management for target tracking in distributed radar network [C]. IEEE Radar Conference (RadarConf), Philadelphia, PA, USA, May 2-6, 2016.
- [35] Zhang Z K, Tian Y B. A novel resource scheduling method of netted radars based on Markov decision process during target tracking in clutter [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016(1): 1-9.
- [36] Shi C G, Wang F, Sellathurai M, et al. Low probability of intercept based multicarrier radar jamming power allocation for joint radar and wireless communications systems [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2017, 11(5): 802-811.
- [37] Shi C G, Wang F, Sellathurai M, et al. Power minimization based robust OFDM radar waveform design for radar and communication systems in coexistence [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(5): 1316-1330.
- [38] 时晨光, 周建江, 汪飞, 等. 机载雷达组网射频隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 12-45.
- [39] Shi C G, Wang F, Salous S, et al. Distributed power allocation for spectral coexisting multistatic radar and communications systems based on Stackelberg game [C]. 44th IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, United Kingdom, May 12-17, 2019.
- [40] Shi C G, Qiu W, Wang F, et al. Stackelberg game-theoretic low probability of intercept performance optimization for multistatic radar system [J]. Electronics, 2019, 8(4): 1-21.

#### 作者简介:



时晨光(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为飞机射频隐身技术, 有人机/无人机混合集群资源管理等。本文通讯作者。



丁琳涛(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为组网雷达资源管理。



周建江(1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达目标特性分析, 飞机射频隐身技术等。

[引用格式] 吴立珍, 牛轶峰, 王菡. 多无人机监督控制系统设计与实践[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 42-52.

# 多无人机监督控制系统设计与实践

吴立珍<sup>1</sup>, 牛轶峰<sup>1</sup>, 王菡<sup>1</sup>, 方斌<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073; 2. 湖南警察学院交通管理系, 长沙 410138)

**摘要:** 随着无人机系统的大规模应用, 海量信息处理与多样化控制需求使得无人机操作员的工作负荷和操作难度不断增大, 极易导致误判和误操作。对此, 设计和实现了一种基于多模态交互的多无人机监督控制系统, 用于辅助操作员完成决策与控制, 提高人机协作水平。该系统由无人机操作员状态监视模块和多无人机混合主动控制模块组成, 前者完成对操作员实时状态的测量, 并采用神经网络学习方法辨识其工作状态, 获取操作员当前适合的决策等级; 在此基础上, 后者进一步结合无人机平台的自主能力、环境与任务复杂度等因素, 完成不同层次的人机混合主动控制。半物理仿真试验表明系统可实时评估操作员状态, 并有效实现了多无人机的监督控制, 为人机高效协同奠定基础。

**关键词:** 无人机系统; 监督控制; 操作员状态评估; 决策等级; 混合主动控制; 人机协同

**中图分类号:** V279      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2020)04-42-11

## Design and Practice of Supervisory Control System for Multiple Unmanned Aircraft Systems

WU Lizhen<sup>1</sup>, NIU Yifeng<sup>1</sup>, WANG Chang<sup>1</sup>, FAN Bin<sup>2</sup>

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Department of Traffic Administration and Engineering, Hunan Police Academy, Changsha 410138, China)

**Abstract:** With the large-scale application of unmanned aircraft system (UAS), the requirements for massive information processing and diversified control make the workload and operational difficulty of operators increasing, which can easily lead to misjudgment and misoperation. Therefore, this paper designs and implements a multiple UAS supervisory control system based on multi-modal interaction, which is used to assist the operator in completing decision and control. The system consists of a state monitoring module for the UAS operator and a mixed initiative control module for multiple unmanned aircraft systems. The former could complete the measurement of the real-time state of the operator, in which a neural network learning algorithm is used to assessment the work state, and the decision level of human operator is given. The latter further combines the autonomous capability of UAS, and the complexity of environment and mission to realize different levels of mixed-initiative control. Finally, the hardware in the loop simulation experiment is completed. The results show that the system can evaluate the operator status in real time, and implement supervisory control effectively, laying the foundation for efficient human-robot cooperation.

**Key words:** Unmanned Aircraft System (UAS); Supervisory Control; Operator State Assessment; Decision Level; Mixed-Initiative Control; Human-Robot Cooperation

## 1 引言

随着无人机系统技术的迅猛发展,其应用范畴不断拓展,应用样式呈现出由独立执行任务向多无

人机协同、有人机/无人机协同加速发展的趋势,对多机指挥控制提出新的挑战<sup>[1]</sup>。一方面,随着传感器和数据链性能的不不断提升,多机协同带来的海量信息叠加显示和融合处理难度不断增大,与操作员

有限的信息关注能力形成矛盾;另一方面,多样化协同控制需求使操作员操作难度增大,需要将更多的精力用于处理多机冲突消解和任务协调。在这种情况下,传统的人在回路中(Man-in-the-loop)的交互控制方式显然已不能适应,极易出现操作员误判和误操作,从而导致事故发生<sup>[2]</sup>。

监督控制(Supervisory Control)作为一种人在回路上(Man-on-the-loop)的控制方式<sup>[3]</sup>,能够支持操作员通过自主代理的方法实现上层操作员对底层多无人机平台的监督与管理,其核心是面向人机智能融合,根据多任务动态分配原则<sup>[4]</sup>,通过操作员和自主系统二者决策等级的适时变化,实现人机之间的主动混合,达到少量操作员控制更多无人机的目标。本文在深入研究监督控制技术发展的基础上,设计和实现了一种基于多传感器测量和多模式交互的多无人机监督控制系统,并通过多机协同探测任务仿真试验验证了系统的有效性。

## 2 多无人机监督控制技术研究现状

随着无人机自主能力的提高,操作员对无人机的控制由低级的基于行为的控制转变为高级的基于知识的控制,这种基于知识的控制就是监督控制。在监督控制中,无人机的飞行控制基本由无人机系统自主完成,操作员主要负责高层的载荷管理和任务控制。监督控制使得单个操作员控制多架无人机成为可能,一方面平台自动化程度的提高为这种转变提供了技术支持,另一方面协同任务带来的交互需求为这种转变提供了动力。

监督控制技术的研究主要源于多无人机分布式作战的指挥控制需求。自2004年起,Ruff<sup>[5]</sup>、Dixon<sup>[6]</sup>、Dunlap<sup>[7]</sup>等研究初步建立了监督控制的基本概念和体系架构,客观分析了自动化组件在监督控制中的作用以及对整体系统性能的影响。麻省理工学院的Cummings等<sup>[8-9]</sup>深入研究了单操作员能够控制无人机的最大数量问题,分析了制约操作员监督控制性能的关键因素。国内相关研究尚处于概念探索阶段,人(地面站操作员或位于有人机上的飞行员)在协同系统中的重要性及其同无人机之间的协作交互关系未得到足够重视。国防科技大学提出一种多无人机监督控制系统的混合三层结构<sup>[10]</sup>,即可变自主级别控制器、任务管理系统、智能

人-系统接口模块,用于降低地面站指挥控制无人机的人机比;同时,面向有人机/无人机协同任务控制设计了基于自然语言的交互接口<sup>[11]</sup>。空军工程大学黄长强等<sup>[12]</sup>提出人机协同感知-决策-执行的半自主式武器控制思想,并设计了基于人机协同的无人攻击机武器控制系统框架。浙江大学<sup>[13]</sup>提出人机共商决策方法,将人的智慧与机器的智能融合一体,提高决策的可靠性,具有很好的借鉴价值。

在监督控制技术验证方面,美、欧等军事强国竞相开展了一系列试验项目,尤其在近年来呈现出加速发展的态势。按照监督控制系统部署方式的不同,大致可以分为基于地面站的监督控制以及基于有人机的监督控制两类。

### (1) 基于地面站的监督控制技术验证

早期验证项目主要聚焦于概念演示和技术探索,代表性的项目包括:波音公司开展的单操作员控制多架X-45A无人作战飞机项目以及单操作员同时管理3架扫描鹰无人作战飞机项目;诺斯罗普·格鲁门公司完成的航母空域内同时控制4架X-47B无人作战飞机模拟演练项目;洛克希德·马丁公司基于沙漠鹰III型无人机演示的单操作员管理多无人系统项目;雷锡恩公司推出的能同时控制8架无人机的通用控制系统(UCS)等<sup>[14]</sup>。

近年来,监督控制技术验证不断深化,最具影响力的是北约HFM-170项目<sup>[15]</sup>。该项目由多个国家参与的15个演示验证项目组成,旨在针对多无人系统监督控制框架下的一系列核心技术分别展开技术验证,具体项目情况如表1所示。

### (2) 基于有人机的监督控制技术验证

有人机/无人机协同是监督控制技术应用的重要载体和方向。英国QinetiQ公司在2007年进行的狂风战斗机飞行员监督控制4架无人机的飞行试验是典型的基于有人机的监督控制技术验证,该项目成功实现了操作员高层决策与无人机系统自主执行战术任务的有机结合。

德国慕尼黑国防军大学于2007—2011年间联合德国航空航天中心等开展了有人/无人编队(MUM-T)项目<sup>[16]</sup>,旨在利用无人机提高有人机态势感知能力、缩短任务完成时间、降低有人机风险。

值得关注的是,该项目在设计操作员辅助系统时采用了协同控制和监督控制两种模式,提出一种

表1 HFM-170项目情况  
Table 1 HFM-170 project

编号	子项目名称	参研国
1	多操作员对单个无人机控制	加拿大
2	多无人机冲突消解和编队控制	加拿大
3	监督控制: 全方位感知	加拿大
4	无人机集群/多Agent系统交互作用	法国
5	人的因素和权限共享	法国
6	无人机编队的认知与协同自动化	德国
7	无人机对有声目标探测	荷兰
8	混合主动控制操作员工作量最优分布	葡萄牙
9	多无人车的任务切换控制	瑞典
10	多无人车战术侦察中的监督控制	瑞典
11	动态机载任务管理能力概念演示	英国
12	多无人机监督控制界面技术演示	美国
13	多无人机系统委托(代理)控制	美国
14	多无人系统中智能体监督控制	美国
15	无人艇控制和两栖任务人机交互界面	美国

双模式认知自动化方法,以替代传统的自动化方法(图1),使得操作员辅助系统具备了复杂任务决策能力。同时,设计了无人机人工认知单元(ACU),使无人机具备根据自身感知态势理解有人机指派的目标或任务能力。该项目实现了人-机器(无人机操作员辅助系统)、机器(ACU)-机器(ACU)之间的有效协同,通过双座模拟器(图2)完成了协同侦察/运输、协同防空压制/打击等典型任务的仿真研究。

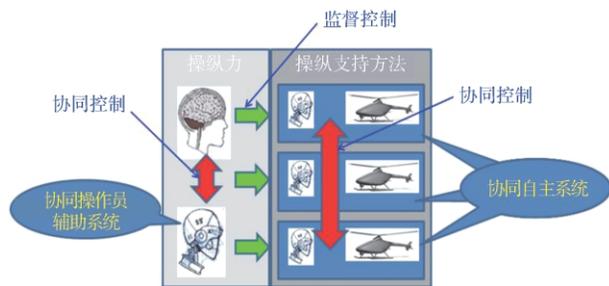


图1 双模式认知自动化方法

Fig. 1 Dual-mode cognitive automation



图2 德国MUM-T项目仿真环境

Fig. 2 Simulation environment for MUM-T

近年来,有人机/无人机协同作战模式的蓬勃发展进一步推动了监督控制技术的进步。美国通用原子公司提出了16架捕食者C复仇者(Avenger)无人机集群在2架F-22战斗机指挥下协同作战概念(图3),涉及的关键技术主要包括开放式的监督控制体系结构、人机交互以及多机集群控制等。



图3 捕食者C复仇者与F-22协同作战

Fig. 3 Cooperation between Avenger and F-22

在监督控制的技术框架下,2017年,美空军忠诚僚机项目开展了基于无人化F-16战斗机的有人机/无人机编组技术演示,验证了有人/无人协同开放式系统架构、僚机自主规划并适应对地打击任务、以及意外事件处置等能力。2018年,美军拒止环境下无人机协同作战项目基于RQ-23虎鲨无人机,开展了单操作员指挥无人机编队执行战术侦察、压制/摧毁敌防空系统等任务的技术验证<sup>[17]</sup>。2019年2月,完成了6架虎鲨无人机和14架仿真机的飞行试验验证。2019年5月,美国国防预先研究计划局(DARPA)为了实现其新型作战概念——马赛克战,而启动了空战演进(ACE)项目。该项目旨在通过建立操作员与无人系统之间可信任的互动,加速飞行员从操作员到任务指挥官的转变。

应当指出,国内外目前在监督控制方面取得了一定的研究成果,但主要是基于相对安全的空域或弱对抗条件。有人机/无人机在对抗空域协同执行作战任务,飞行员将面临更复杂的问题,比如:工作量大幅增加,环境压迫性和任务复杂度显著提升等。在这种复杂快变的战场环境中同时实现多无人机控制,现有的方法可能失效,需要深入研究如何能够充分发挥人和自主系统的各自优势,尽可能降低人的底层操作负担,实现基于人机认知模型的高效协同。

### 3 系统设计

本文设计的监督控制系统主要由无人机操作

员状态监视模块和多无人机混合主动控制模块组成。前者主要用于实时评估操作员的工作状态,获取操作员当前适合的决策等级,并避免“人不在回路”事件的发生。后者则以操纵员状态为依据,实现人机多种权限的混合主动控制。

### 3.1 无人机操作员状态监视模块

现有操作员状态监视的研究主要集中在操作员生理特征方面,大多采用脑电图和心电图分析的方式。为了减少对操作员的干扰,减少接触式传感

器的使用,本文设计了一种基于多传感器融合的无人机操作员状态监视模块。

该模块主要采集的数据包括:姿态特征、面部表情、眼睛疲劳度、心率和体温特征等。通过对这些数据的实时测量和融合可分析得出操作员当前的状态、行为和注意力,输出操作员工作状态评估结果,最后给出人机交互中操作员的决策等级,为后续的监督控制提供依据。模块框架和信息流程如图4所示。

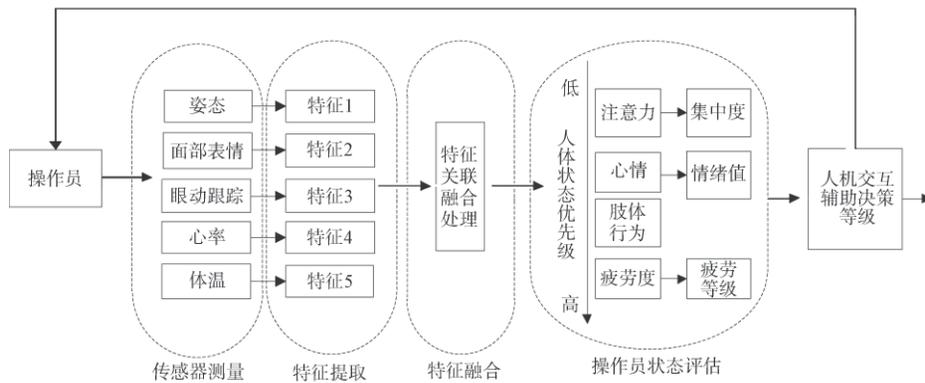


图4 操作员状态监视模块框架

Fig. 4 Framework of state monitoring module for the UAS operator

#### (1) 姿态特征检测

姿态特征主要采集面部以外身体其他部位(如手势、躯干、头部)的状态,可通过交互式传感器获取的深度图像进行检测(图5)。测量姿态特征的目的,主要是通过分析姿态动作的各种特性(如行为动作的方式、力度、频率等),判断操作员的工作状态。比如,当操作员疲劳的时候,头部的摆动频率会增加。同时,手势等特征也可用于交互控制。

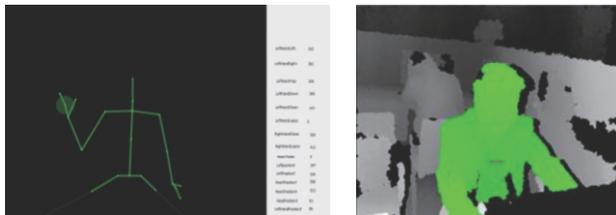


图5 姿态特征检测

Fig. 5 Attitude feature detection

以头部姿态检测为例,可以假设头部位置为  $Head(x, y, z)$ , 脖子位置为  $Neck(x, y, z)$ , 则计算头

部水平姿态为

$$\alpha_H = a \tan ((Neck_x - Head_x) / (Neck_y - Head_y)) \quad (1)$$

头部俯仰姿态为

$$\beta_H = a \tan ((Neck_z - Head_z) / (Neck_y - Head_y)) \quad (2)$$

对于无人机操作员,如果头部位置超过设定阈值则判断操作员离开了视场中心位置;如果头部俯仰姿态超过设定阈值,即  $\beta_H > T_{max}$  或者  $\beta_H < T_{min}$ , 则认为操作员可能低头或者抬头幅度过大。系统根据一段时间的频率数据分析,可用于判断操作员的疲劳度。

#### (2) 面部表情识别

面部表情主要通过可见光图像进行检测识别。不同的表情会带来五官或者五官之间相对位置的变化,进而导致特征点连接形成的几何拓扑形状、大小、间距等发生相应变化。例如,当人惊恐的时候,嘴巴上的特征点会张开,眼睛上的特征点也会向上移动。识别出相应特征并依据人类情绪的相关模式进行归类分析,就可以基本实现情绪的把握。检测效果如图6所示。

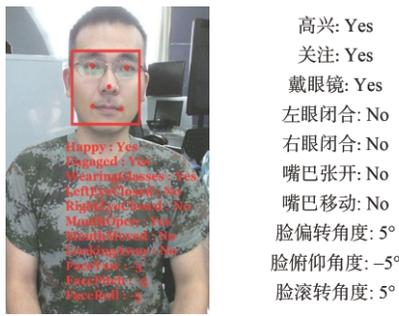


图6 面部表情识别

Fig. 6 Facial expression recognition

(3) 眼睛疲劳度检测

系统通过眼动仪实现操作员的眼睛疲劳度检测。该设备的原理是采用近红外光源在眼睛和角膜上产生图像,进而进行检测识别和定位。眼睛疲劳度检测采用PERCLOS指标,即单位时间内眼睛闭合的次数。相关研究指出,该指标是公认的疲劳检测的视觉参数,它反映了缓慢的眼皮闭合,可以有效表达精神疲劳程度。图7给出了PERCLOS检测示意。

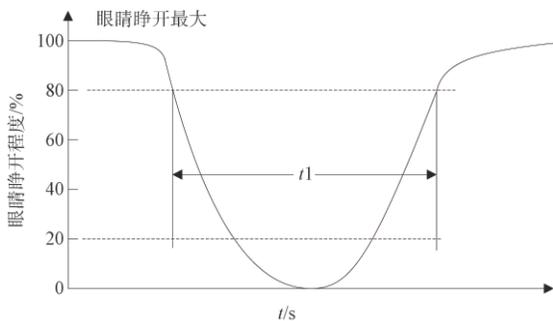


图7 PERCLOS眼睛状态检测

Fig. 7 Eye state detection using PERCLOS

(4) 心率和体温特征检测

心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)与人的负荷水平、疲劳程度有关,主要用心率传感器进行测量<sup>[18]</sup>。通过一段时间内心率值的低频和高频数据的比值,可以估计操作员当前的身体状态。图8为获取的操作员心率数据,其中上图为原始心率值,下图为心率低频高频的比值,可以明显看出操作员心率特征变化。

体温特征与操作员心情状态也存在相关性。相关研究表明,不同情绪下身体的热量分布存在一定的模式,比如愤怒时,头部和胸部的温度会升高;

沮丧时全身体温会降低。根据测量身体多个部位的温度值,与相关模式对比分析,可用于估计操作员当前的身体状态和心情。

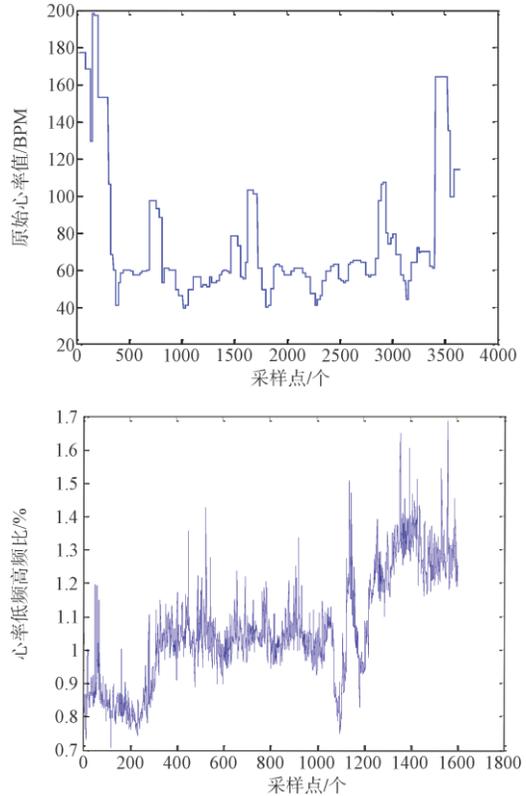


图8 心率检测

Fig. 8 Heart rate detection

(5) 基于神经网络学习的操作员状态融合评估  
 采用基于神经网络学习的操作员状态融合评估方法,结构如图9所示。

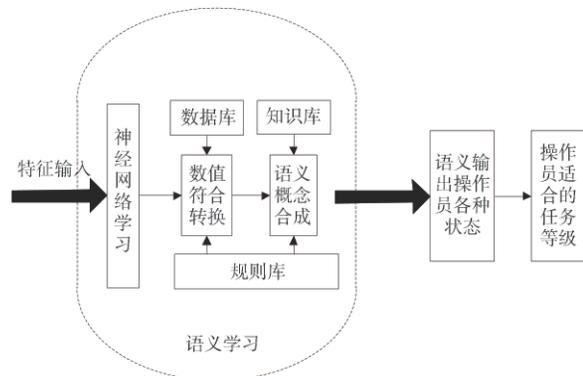


图9 基于神经网络学习的状态评估

Fig. 9 State evaluation based on neural network learning

主要步骤如下:

- ① 根据传感器信息构建多维特征空间样本库。

确定操作员状态特征输入矢量  $X$  (姿态、表情、眼动跟踪、心率、体温), 目标矢量  $T$  (关注度、心情、肢体行为、疲劳度)。输入输出之间存在一定对应关系。

② 设计神经网络训练学习感知器<sup>[19]</sup>。

③ 根据不同的操作员样本, 进行训练, 建立传感器特征与语义之间的映射关系。

首先, 对状态模型进行语义量化, 选择多对形容词用于建立操作员状态模型形容词集 (表2), 对每个形容词对进行多等级量化, 并分别设定边界条件。如“疲劳的-平静的”, 其评价可以是重度疲劳、轻微疲劳、良好、非常好。

表2 操作员状态模型形容词集  
Table 2 The adjective set of operator state model

形容词集	形容词集
悲伤的-快乐的	轻松的-压抑的
疲劳的-平静的	注意力集中的-分散的
焦虑的-中性的	低头的-抬头的
紧张的-放松的	清晰的-模糊的

其次, 建立状态空间。按上述量化方法, 获得操作员某一状态  $m$  的第  $n$  对形容词的评价量化值, 得到一维矩阵  $Y = [y_{m1}, y_{m2}, \dots, y_{mn}]$ , 按照下式标准化得到  $X_m$ , 其中

$$x_{mn} = \frac{y_{mn} - \bar{y}_n}{s_n} \quad (3)$$

式中  $\bar{y}_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y_{mn}$ ,  $S_n^2 = \sum_{m=1}^M (y_{mn} - \bar{y}_n)^2$

设  $E$  为公共因子矩阵,  $Z$  为载荷矩阵, 其中  $E$  的第  $m$  行  $e_m = (e_{m1}, e_{m2}, \dots, e_{mn})$  对应操作员状态  $m$  在状态空间的坐标, 载荷矩阵  $Z$  的第  $n$  行  $Z_n = (Z_{n1}, Z_{n2}, \dots, Z_{nk})$  对应形容词  $n$  在  $K$  维空间的坐标。

设  $U$  为独特因子,  $D$  作为独特因子的权值, 对获得的矩阵  $X_m$  做因子分析:

$$(X = EZ') + UD \quad (4)$$

通过以上步骤, 将原先的  $N$  维状态空间降至  $K$  维, 建立形容词与操作员向量的映射。

④ 建立语义组合构建的树形结构, 采用D-S证据决策操作员的的状态为:

$$Q = \frac{\lambda_1 * T_1 + \lambda_2 * T_2 + \lambda_3 * T_3 + \lambda_4 * T_4}{1 - \lambda_1 * T_1 + \lambda_2 * T_2 + \lambda_3 * T_3 + \lambda_4 * T_4} \quad (5)$$

其中,  $T_i$  为目标矢量  $T$  的分量,  $\lambda_i$  为各种状态的权值

系数。

### 3.2 多无人机混合主动控制模块

混合主动控制是实现监督控制的核心。它通过综合考虑操作员实时状态 (适合的决策等级)、无人机的自主能力、环境和任务的复杂程度等因素, 实现人机之间多等级的、权限适时可变的控制模式。在上一节的基础上, 本节建立了一种基于多模态交互的多无人机混合主动控制系统。

为了实现多无人机的同时控制, 操作员必须以简单、直观的方式与无人机交互, 将认知精力集中于关键活动和关键环节上, 如目视确认、打击决策等。对此, 设计了语音、眼动、手势、操纵杆、触摸屏等多模态的自然交互控制接口。不同的交互模式带来的操作员负荷不同, 适应于不同的操作员状态和决策等级, 并支持任务层、导航层、底层等多种控制模式。

其中, 语音控制模式用于控制无人机执行特定任务指令, 眼动控制模式用于控制无人机实现目标锁定, 二者都属于任务层控制; 手势控制模式 (如指向信号等) 用于无人机飞行方向引导、编队避碰、编队变换等, 属于导航层控制; 操纵杆控制模式一般用于操纵无人机底层飞行控制。此外, 操作员还可以利用触摸屏获取无人机状态、当前任务、操作状态反馈等信息, 并进行载荷控制、路径规划、航点导航等任务。图10展示了一种多模态控制过程。假设无人机当前从A点到B点运动, 并执行沿途目标搜索任务。根据任务需求, I和II可以分别通过语音或者手势指令实现无人机进入区域搜索模式和并行搜索模式。III为目标发现后, 可以利用眼动跟踪实现对目标的锁定。

为了实现可变的自主权限控制, 设计了无人机

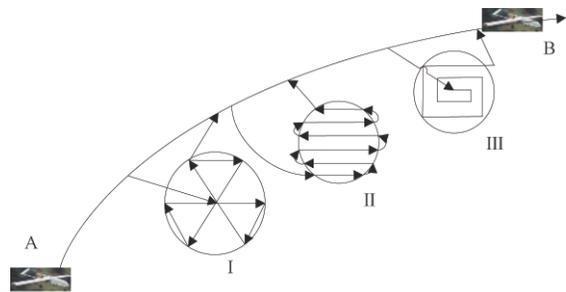


图10 多模态控制过程

Fig. 10 Multimode control process

的四层控制模式：(1)自主控制模式：无人机不需要人的介入，自主完成任务，这种模式适用于简单任务，并且对无人机自主能力提出了很高的要求；(2)半自主模式：无人机具备一定程度的机载任务控制能力，可以在人给定抽象任务条件下自主完成复杂任务规划；(3)自主飞行模式：无人机在人给定导航目标、编队控制指令、飞行路径(由控制站完成重规划)等前提下，自主进行路径跟踪和飞行控制。(4)手动模式：人可以直接对无人机和传感器进行操作

纵，对操作员精力要求较高。四种控制模式根据监督控制需求动态切换。

结合不同的操作员控制权限和平台控制权限，同时考虑实际面临的环境/任务复杂度等因素，可以通过模糊认知图等方法实现人机控制权限的实时调节，进而实现人机混合主动控制(图11)。例如在目标检测时，系统可根据图像中的目标数量以及当前操作员状态等信息，自主提示用户可以采用什么样的控制模式，以最大化发挥人和机器的优势。

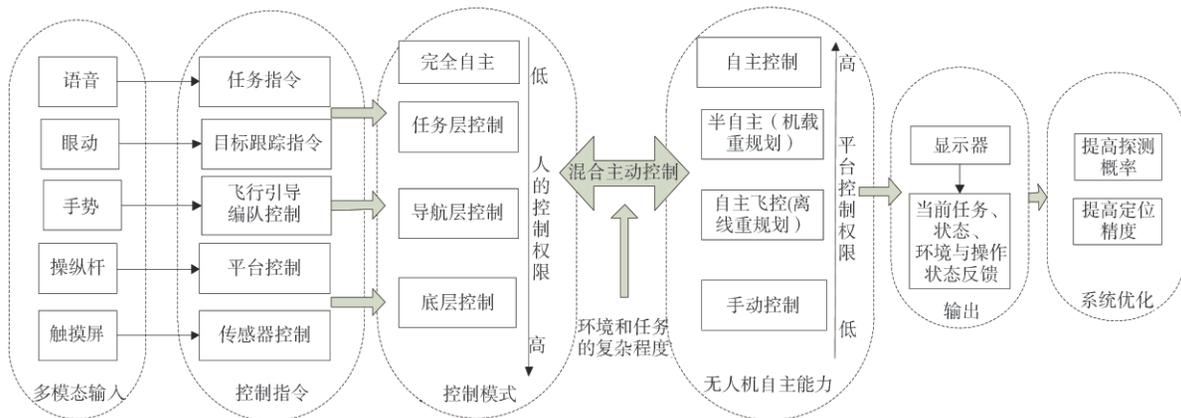


图11 混合主动控制模块框架

Fig. 11 Framework of mixed initiative control module

### 4 仿真结果及分析

#### 4.1 实验环境

系统实验装置如图12所示，采用了体感设备、眼动仪、心率和体温传感器等，所有传感器通过有线或无线的途径输入到计算机中。其中，体感设备采用了微软 Kinect2，眼动仪采用 Tobii eye X。

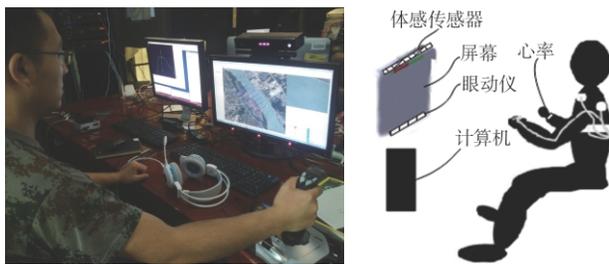


图12 监督控制系统实验装置

Fig. 12 Experimental devices of supervisory control system

实验任务设定为多无人机对地面多目标的协同搜索。任务区域如图13所示，其中C为待搜索区域的地图；A、B分别为两架无人机机载传感器实时

采集的可见光图像。图14为多机协同路径规划获



图13 多无人机协同目标检测场景

Fig. 13 The scene of multi UAS cooperative target detection

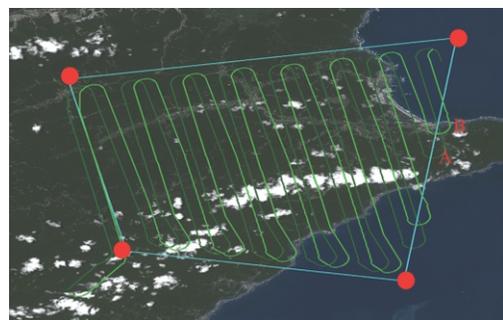


图14 区域搜索航线规划

Fig. 14 Path planning for regional search

得的飞行航线,采用了凸多边形区域的无人机覆盖航迹规划算法<sup>[20]</sup>,A、B代表不同的无人机的飞行路径。

### 4.2 仿真结果

实验一:开展长时间工作情形下操作员状态的监视实验。设定姿态和表情检测频率为5Hz,眼动仪检测频率为20Hz,心率和体温检测频率为10Hz,

通过融合评估,绘制出操作员状态随时间变化曲线,如图15所示。其中,左图为关注度(注意力)、心情、头部动作频率等信息,右图为眼睛闭合PERCLOS值、心率低频高频比等信息。可以看出,操作员随时间的变化,关注度会逐渐降低,心情变的厌恶和愤怒,头部的运动频率也相应的增加,反映了疲劳度的持续增加。

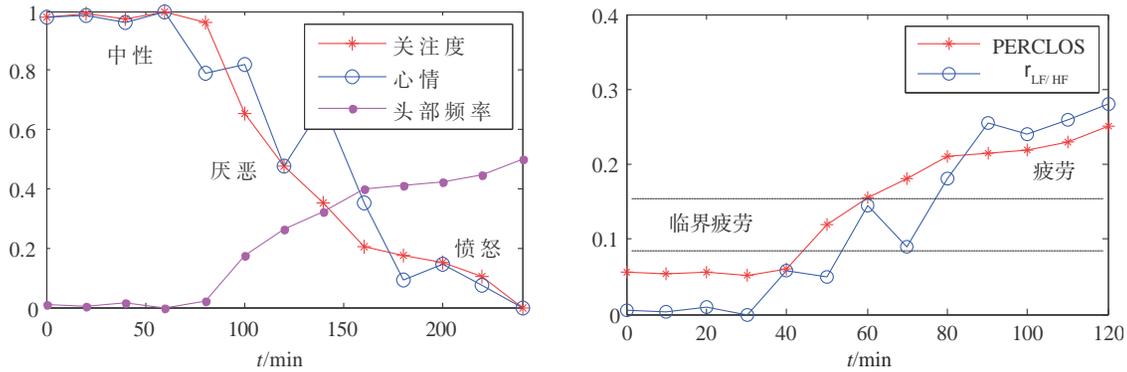


图 15 操作员状态随时间变化的趋势图

Fig. 15 Operator status over time

表3为操作员状态与适合的决策等级随时间变化的情况。决策等级采用前文提出的四层划分。根据实验结果,在操作员连续紧张工作的情况下,

工作能力会随着时间的变化而降低,决策等级也需要相应调整,以降低工作负荷。

表3 操作员状态与决策等级  
Table 3 Operator status and decision level

测试时间/min	操作员状态	操作员适合的决策等级	状态描述
30	疲劳度:非常好 关注度:高度集中	心情:中性 行为:直视	底层控制 不需要系统提供帮助,操作员有足够精力完成所有决策和控制
60	疲劳度:良好 关注度:集中	心情:中性 行为:直视	导航层控制 系统接收操作员指令,自动完成底层操纵
90	疲劳度:轻度疲劳 关注度:关注度低	心情:厌恶 行为:低头	任务层控制 系统提供任务级决策/行动方案,允许操作员在一段时间内选择
120	疲劳度:重度疲劳 关注度:没关注	心情:愤怒 行为:晃动	不适合参与决策 系统自主控制

实验二:开展多目标协同探测实验。采用的传感器探测模型<sup>[21]</sup>如图16所示。左图为无人机对地面目标探测的数学建模,其中传感器安装角度为斜向下30°;右图为无人机在不同高度探测目标的成功概率,横坐标0点为目标位置,不同颜色曲线代表不同的飞行高度。无人机越靠近目标,目的探测概率越大;无人机飞行高度增加,目标探测概率

减小。  
基于上述探测概率模型,分别采用全自主控制探测以及混合主动控制探测展开实验比较,结果如图17所示,不同颜色的方框代表目标点被探测的次数及探测位置。图17(b)中的蓝线和红线为无人机的飞行轨迹,其中蓝线为自动飞行轨迹,红线为手动飞行轨迹。M区域为语音/手势指令控制的盘

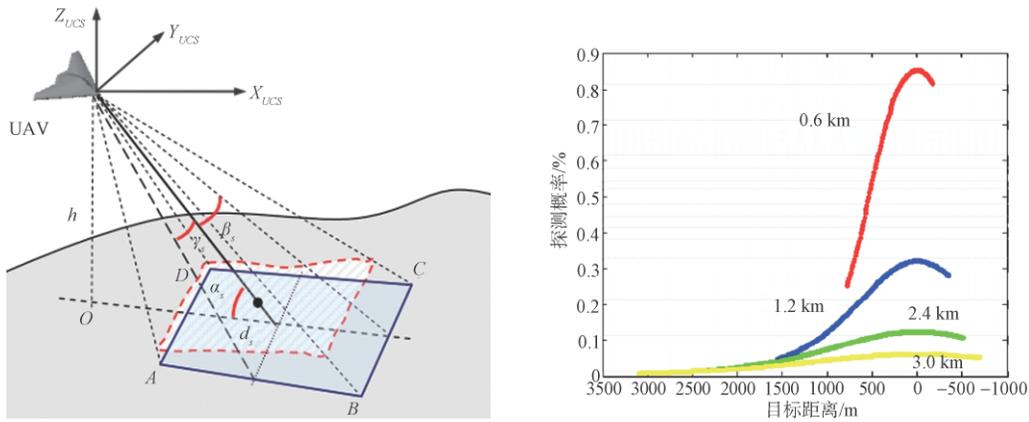


图 16 无人机地面目标探测概率模型

Fig. 16 Probability model for UAV ground target detection

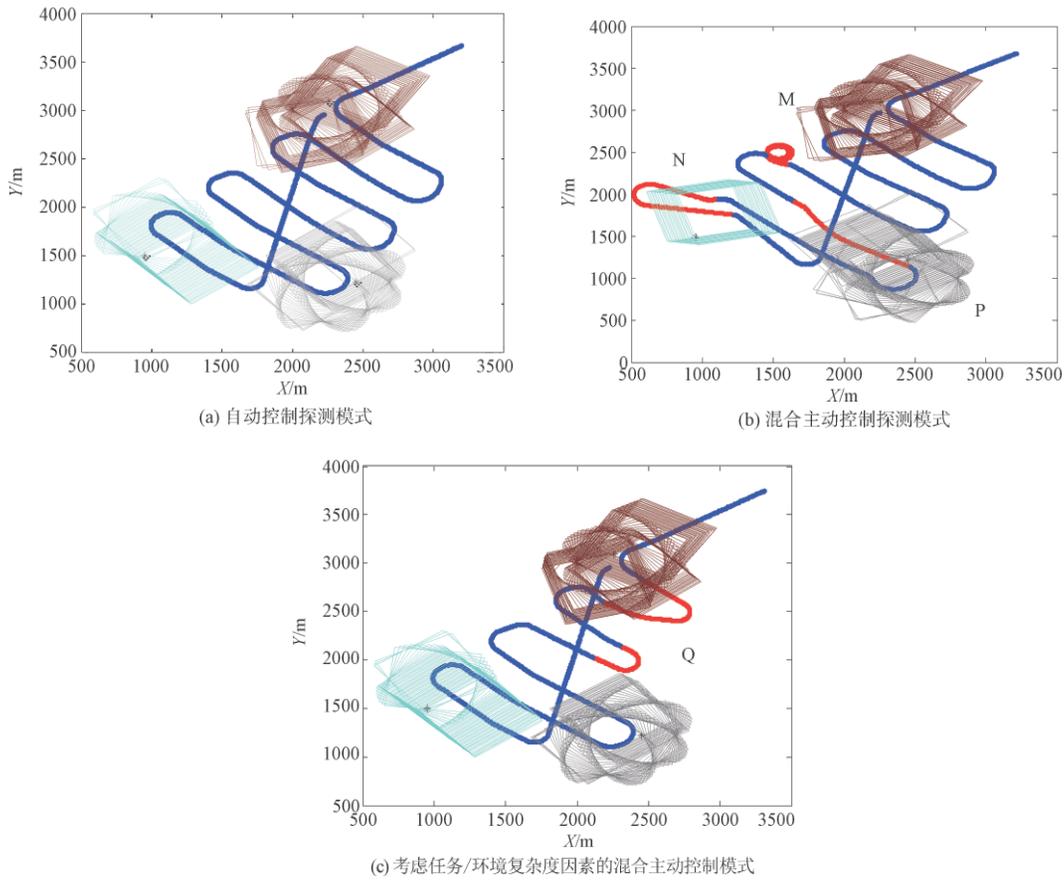


图 17 不同控制模式下对目标区域的探测

Fig. 17 Comparison of different control modes

旋探测, N 区域为摇杆控制的目标探测。图 17(c) 中标示的 Q 区域对应图 12 任务环境的水域, 不存在需要探测的目标, 通过任务环境分析采用了绕行的方式提高整体效能。

针对特定目标 P 和目标 N 的探测结果如图 18

所示。其中, 上图为目标 P 的探测概率, 下图为目标 N 的探测概率, 红色为混合主动控制的探测概率, 蓝色为全自主控制的探测概率。可以看出, 当 P 目标探测概率较低的时候, 可以采用混合主动控制提高探测概率, 针对 N 目标探测概率较大的情形,

自主探测效果更好,操作员可以给予系统足够的信任。

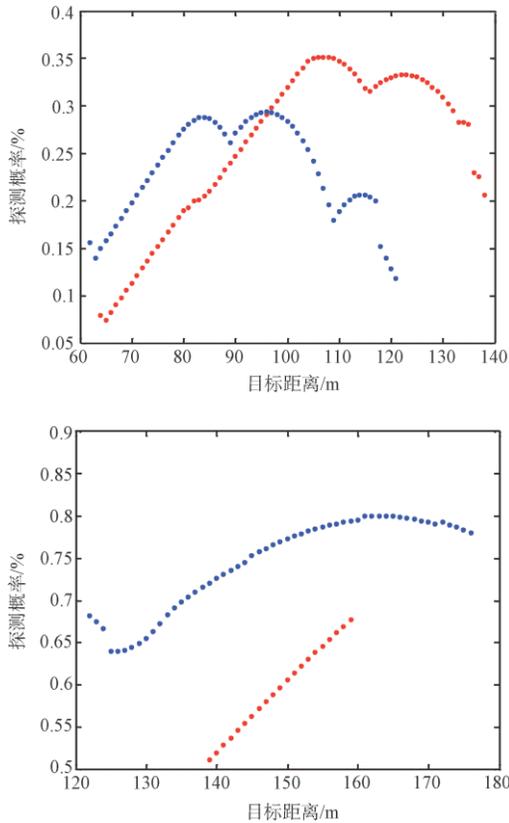


图18 特定目标的探测概率

Fig. 18 Detection probability of specific targets

## 5 结束语

本文针对无人机控制站操作员在操作控制多无人机时面临的工作负担过大、操作性能下降的问题,详细研究了多无人机监督控制系统的发展现状。从操作员状态评估和多模态自然交互出发,设计了一种基于多传感器的多无人机监督控制系统。系统通过传感器测量获取操作员相关状态数据,并利用神经网络方法实时评估操作员状态,获得当前人机交互辅助决策等级。根据该决策等级和多任务动态分配原则切换人的控制权限和无人机的控制权限,实现操作员对多无人机的混合主动控制。结果表明,该系统可实时评估操作员状态,并有效实现了多无人机的监督控制,相比于单纯自主控制能够有效提升人机协同系统的整体效能。

应当指出,多无人机监督控制在实际应用中仍然面临很大挑战:

(1)本文探索的基于多传感器测量的操作员状态评估受到监督控制系统部署环境的制约,嘈杂背景、复杂光照、以及有限空间等对语音、眼动、手势等交互手段形成干扰,测量存在不可预期的误差,需要进一步研究特定应用背景下的交互信息处理方法以提高测量结果的可信度。

(2)操作员状态的外在表现存在个性因素,也会伴随工作环境和工作压力变化,呈现一定的差异。因此,传感器统计数据难以作为状态判断唯一的衡量标准,需要在应用环境中针对不同的操作员开展长时间适应性的学习和训练。

(3)复杂背景下多无人机监督控制面临高度的复杂性和不确定性,需要在混合主动控制框架下充分考虑各类动态意外事件,进一步深化研究控制权限的分配策略,既有限制的最大化自主系统的能力范围,又确保核心权限掌握在人类操作员手中。

(4)多无人机监督控制需要解决操作员对自主系统的信任问题。一方面要研究增强无人机自主系统的决策透明性、可解释性和可干预性,另一方面还要研究构建操作员对自主系统信任程度的模拟和度量手段,通过可量化的信任度建立和扩展人机互信,促进人机高效协同。

## 参考文献

- [1] 陈杰, 辛斌. 有人/无人系统自主协同的关键科学问题[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1270-1274.
- [2] Endsley M. Autonomous horizons: system autonomy in the air force—a path to the future (Volume I: human autonomy teaming) [M]. Washington: U.S. Department of the Air Force, 2015.
- [3] 朱华勇, 牛轶峰, 沈林成, 等. 无人机系统自主控制技术现状与发展趋势[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(3): 115-120.
- [4] Landén D, Heintz F, Doherty P. Complex task allocation in mixed-initiative delegation: a UAV case study [C]. International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems, Kolkata, India, November 12-15, 2010.
- [5] Ruff H A, Calhoun G, Draper M, et al. Exploring automation issues in supervisory control of multiple UAVs [C]. In: Proceedings of Human Performance, Situation Awareness, Automation Technology Conference, 2004.
- [6] Dixon S R, Wickens C D. Automation reliability in unmanned aerial vehicle control: a reliance compliance model of

- automation dependence in high workload [J]. Human Factors, 2006, 48(3): 474-486.
- [7] Dunlap R D. The evolution of a distributed command and control architecture for semiautonomous air vehicle operations [C]. Moving Autonomy Forward Conference, Grantham, UK, 2006.
- [8] Cummings M L, Guerlain S. Human performance issues in supervisory control of autonomous airborne vehicles [C]. AUVSI's Unmanned Systems North America Conference, Anaheim, CA, USA, 2004.
- [9] Cummings M L, Bruni S, Mercier S, et al. Automation architecture for single operator, multiple UAV command and control [J]. International C2 Journal, 2008, 1(2): 1-24.
- [10] Zhang G Z, Lei X, Niu Y F, et al. Architecture design and performance analysis of supervisory control system of multiple UAVs [J]. Defense Science Journal, 2015, 65(2): 93-98.
- [11] 彭辉, 相晓嘉, 吴立珍, 等. 有人机/无人机协同任务控制系统 [J]. 航空学报, 2008, 029(B05): 135-141.
- [12] 黄长强, 曹林平, 翁兴伟, 等. 无人作战飞机精确打击技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [13] 陈鹰, 杨灿军. 人机智能系统理论与方法 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [14] 张国忠, 沈林成, 朱华勇. 多无人机监督控制技术的发展现状及启示 [J]. 国防科技, 2009(4): 5-10.
- [15] Leo van, B. Supervisory control of multiple uninhabited systems—methodologies and enabling human-robot interface technologies [R]. Brussels, Belgium: NATO, 2012.
- [16] Onken R, Schulte A. System-ergonomic design of cognitive automation: dual-mode cognitive design of vehicle guidance and control work systems [M], Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.
- [17] 牛轶峰, 沈林成, 李杰, 等. 无人-有人机协同控制关键问题 [J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(5): 538-554.
- [18] 王婉芬, 张建华, 王行愚. 基于小波包变换的过程控制操作人员心率变异性分析 [J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(9): 14.
- [19] 牛轶峰, 钟志伟, 尹栋, 等. 基于多传感器测量与神经网络学习的无人机操作员状态评估方法: 中国, 106447184 B [P]. 2019-04-05.
- [20] 陈海, 王新民, 焦裕松, 等. 一种凸多边形区域的无人机覆盖航迹规划算法 [J]. 航空学报, 2010, 31(9): 1802-1808.
- [21] Niu Y F, Zhong Z W, Zhang D B, et al. A method of visual sensor employment planning for UAV target detection [C]. 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yinchuan, China, May 28-30, 2016.

#### 作者简介:



吴立珍(1982-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为多无人机协同控制。



牛轶峰(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能无人系统。本文通讯作者。



王 菡(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为机器学习与人机协作。



方 斌(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为多智能体协同控制。

[引用格式] 聂光戌, 王勇, 邢驰, 等. 无人机载武器预先准备控制逻辑和仿真研究[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 53-57.

# 无人机载武器预先准备控制逻辑和仿真研究

聂光戌, 王勇, 邢驰, 谢磊

(空军工程大学航空工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 无人机在自主攻击目标前必须判定武器的发射/投放条件是否满足, 除了是否处于攻击区这一重要判定条件外, 无人机自主攻击决策系统还必须完成武器发射或投放前的许多预先准备。针对无人机自主攻击中武器预先准备的问题, 给出了电源供应部件、导引头目标指示部件的模型结构和控制逻辑, 并对其它预先准备控制逻辑作了简要分析; 最后建立了武器预先准备控制逻辑的仿真框架, 通过各预先准备功能仿真模块指令控制逻辑的分析, 设计了武器预先准备控制仿真实验。此仿真方案能够弥补无人机自主攻击决策系统发射控制程序的不足, 为自主攻击决策系统控制程序的优化打下基础。

**关键词:** 无人机载武器; 自主攻击决策; 预先准备; 控制逻辑; 电源供应部件; 导引头目标指示部件

中图分类号: V271;E926 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2020)04-53-05

## Study on Pre-preparation Control Logic and Simulation of UCAV Weapon

NIE Guangshu, WANG Yong, XING Chi, XIE Lei

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The UCAV must determine whether the launch or delivery conditions of the weapon is satisfied before autonomous attack. In addition to the important judgment condition of whether the UCAV is in the attack area, the UCAV autonomous attack decision-making system must also complete a lot of preparation before launching or launching weapons. Aiming at the problem of weapon pre-preparation in UCAV autonomous attack, the model structure and control logic of power supply unit and seeker target indication unit are given, and other pre-preparation control logic are briefly analyzed. Finally, the simulation framework of weapon pre-preparation control logic is established. Through the analysis of command control logic of each pre-preparation function simulation module, simulation experiment of weapon pre-preparation control is designed. This simulation scheme can make up for the deficiency of launch control program of UCAV autonomous attack decision-making system, and lay a foundation for the optimization of control program of autonomous attack decision-making system.

**Key words:** UCAV Weapon; Autonomous Attack Decision-making; Pre-preparation; Control Logic; Electric Power Supply Component; Target Indication Component of Seeker

## 1 引言

在当前多个局部冲突中, 无人机对地攻击效果显著, 但这种攻击仍依赖于“人在回路”的地面操控和地面站与无人机之间的数据通讯。无人机真正

完全独立自主的对目标进行攻击将是未来的发展方向, 这离不开无人机自主攻击决策系统。自主攻击决策系统是无人作战飞机完成作战任务的重要系统, 包括目标信息传感器和任务软件。而任务软件必须具备的功能之一是进行武器发射/投放前的

预先准备以满足发射/投放条件。目前对无人机自主攻击的研究主要集中于航迹规划、攻击决策、态势评估等方面<sup>[1-2]</sup>, 本文着重于对无人机自主决策攻击系统的武器预先准备控制逻辑进行分析和仿真建模, 为自主决策攻击系统的优化打下基础。

## 2 机载武器预先准备的特点

机载武器的预先准备根据武器类型不同而不同, 总体上包括以下几个方面: 武器所需不同状态电压电流的供给, 武器导引头位标器的目标指示, 陀螺定位仪校准和武器投放或发射初始条件的输入, 武器导引程序的输入, 引信起动控制和引信设定值的输入等。相应地, 在武器的组成中包括以下部分: 武器电源供应部件、目标指示部件、陀螺定位仪校准部件和投放或发射初始条件输入部件、导引程序输入部件、引信起动控制仪和引信设定值输入部件等。在无人机的自主攻击决策系统中有不同武器的任务软件, 根据任务软件的调度, 进行该种武器发射前的预先准备<sup>[3]</sup>。

## 3 机载武器预先准备模型结构和控制逻辑

### 3.1 电源供应部件模型结构和控制逻辑

电源供应部件的功能主要是保证在发射或投

放前由载机供电、发射或投放后转换为由武器自身供电, 在供电转换时对武器自身供电的参数进行判断以确定是否达标。电源供应部件包括变流器和稳压器、武器自身电源鉴别部件和转换电路等<sup>[4]</sup>。变流器和稳压器将载机来的电源转换成适合于武器的电源; 武器自身电源鉴别部件用于检验武器所产生的电源是否达到标称值; 转换电路用于由电源供应部件供电转换到武器自身供电, 并形成允许武器分离的信号。

图1是电源供应部件的模型结构和控制逻辑图。载机给电源变换器和稳定器及转换电路供电后形成指令 $S_2$ , 在转换电路的作用下断开武器的自身供电。电源变流器和稳压器产生电压 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $\dots$ 、 $U_n$ 给需要者。这种状态保持到武器分离前。

在有指令 $S_0$ 时进入到武器自身电源状态, 产生的电压 $U'$ 供给鉴别部件, 在电压的被测参数达到标称值时鉴别部件形成指令 $S_1$ , 在 $S_1$ 的作用下转换电路取消指令 $S_2$ 并形成指令 $S_3$ 。指令 $S_2$ 的取消促使电源变换器和稳定器断开, 武器转为自身供电。指令 $S_3$ 传给机载计算机系统以表示允许武器分离。

### 3.2 导引头目标指示部件模型结构和控制逻辑

导弹导引头的类型不同, 其目标指示的工作过程不同, 相应的控制逻辑就不同。现以红外导引头的目标指示过程为例分析其模型结构和控制逻辑。

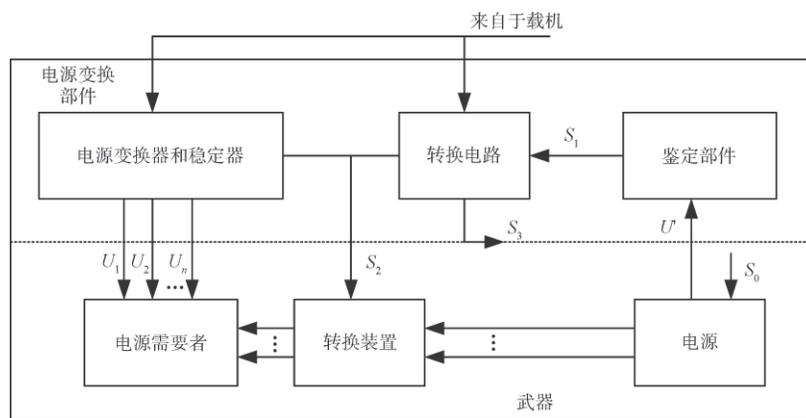


图1 电源供应部件模型结构和控制逻辑

Fig. 1 The mode structure and control logic of electric power supply component

红外导引头目标指示部件的主要功能是在导弹发射前控制导引头对目标选择截获、检验截获目标可靠性、形成发射前准备好的导引头指令及将导引头转到自动跟踪目标的状态。

目标指示的第一个阶段——对目标选择截获, 选择截获目标的功能由目标选择截获控制系统来完成, 在目标指示过程中它与无人机瞄准系统和导弹导引头相互作用, 该功能在瞄准过程中紧随着瞄

准任务而完成,是目标指示的第一个阶段。

为了实现对目标的选择截获必须提供被选择截获目标的典型特征信息<sup>[5]</sup>。这些典型特征信息通常指目标到攻击机的距离、目标角坐标、目标接近或离开攻击机的速度及瞄准线角速度等。

瞄准导航系统传感器获取目标的信息,用于调整位标器定向角、位标器轴的转动角速度和其它参数。根据进入到目标指示部件的信息,目标选择截获控制系统形成相应的误差信号,并形成控制指令传到导引头的执行装置中。在这些指令的作用下,所选目标的信号通过导引头的接收通道,并调整导引头。导引头的调整误差信号为0时表示达到了所需的调整,目标选择截获控制到此结束。

目标指示的第二个阶段——检验导引头截获目标的可靠性,采用有用目标信号和人为输入干扰信号的比较、目标信号频率振幅分析等手段来检验。

目标指示的两个阶段可重合在一起。如果检验结果表明截获可靠性不高,系统需转回到第一个

阶段,如此反复,直到截获可靠为止。

目标指示的第三个阶段——形成导弹发射前导引头准备好的指令,并将导引头转到自动跟踪目标的状态,这是在可靠截获目标的情况下完成的<sup>[6]</sup>。这个指令通常是在导引头截获目标可靠性检验系统中形成的,它是导弹发射的必须条件之一。

目标指示部件模型结构和控制逻辑如图2所示。根据由瞄准导航系统进入来的信息 $p$ (关于所选择目标的标志),以及由位标器给出的实际参数量 $q$ ,选择截获控制系统得出误差信号 $\Delta=p-q$ ,并形成控制指令 $U(\Delta)$ ,传给位标器执行装置,使位标器进入到所需的状态,当误差信号 $\Delta=0$ 时位标器开始接收所选择目标的信号,即实现它的截获。同时信号 $\Delta$ 进入到目标截获可靠性检验系统,当 $\Delta=0$ 时,形成指令 $S_1$ ,在指令 $S_1$ 的作用下位标器转入到自动跟踪目标的状态,同时目标信号 $r$ 进入到目标截获可靠性检验系统。在对这个信号进行分析并得出可靠的截获目标时,形成导弹发射前导引头准备好的指令 $S_2$ 。

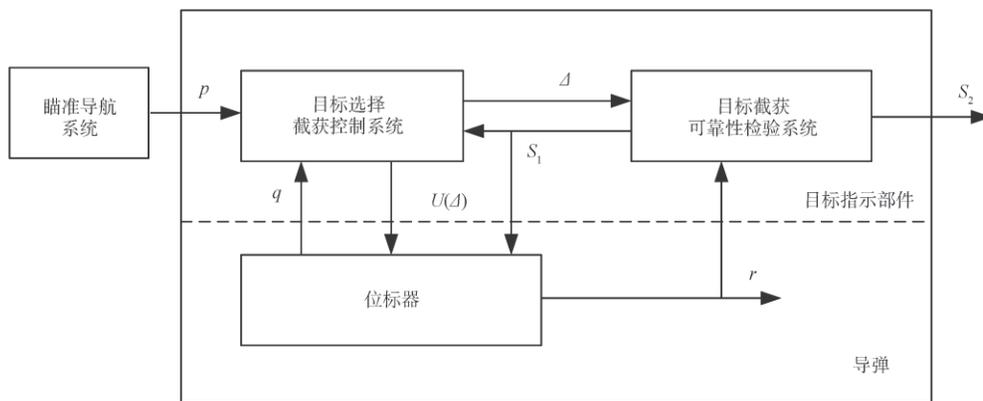


图2 导引头目标指示部件的模型结构和控制逻辑

Fig. 2 The mode structure and control logic of target indication component of seeker

在有些情况下信号 $r$ 不进入目标指示部件中,是否可靠地截获目标要根据误差信号 $\Delta$ 的大小确定。随着信号 $S_1$ 形成,位标器的调整被干扰,导致信号 $\Delta$ 增大。如果这个干扰被位标器自动跟踪系统补偿,并且稳定地接收目标信号,目标截获可靠性检验系统形成指令 $S_2$ 。

### 3.3 其它预先准备的控制逻辑

导引程序输入部件用于向武器输入导引程序,导引武器飞向目标。根据攻击条件、目标的性质和

其它影响因素的不同,飞行弹道会有所不同,具体表现为武器的飞行路线、在飞行路线上固定点处的参数值(飞行方向、高度、速度及它们随时间的变化等)不同<sup>[7]</sup>。在武器的预先准备过程中从载机的火控系统向武器传送有序的运动参数值集合(按武器飞行路线固定点号),这些参数值是通过程序预先设定的。发射后在飞行弹道上相应的弹载传感器测量武器运动参数,构成武器运动参数测量值。按照所需值和测量值形成失调量,进一步形成控制信

号,从而完成在该固定点处的导引控制<sup>[8]</sup>。

引信起动控制仪由起动系统、爆炸系统和自炸系统组成。起动和爆炸系统用于在平时保存、飞机上运输和在弹道上处于禁止爆炸的区域范围内飞行时排除武器爆炸的可能性。自炸系统用于在自主飞行弹道上脱靶或出现紧急情况时,为了保证己方地面部队和财产安全或保密方面的考虑而销毁武器<sup>[9]</sup>。对于无控炸弹而言,其控制逻辑相对简单,主要就是通过爆控机构、挂机索和爆控拉杆控制引信的起动。根据作战任务,通过输入部件完成远解保险时间和延期作用时间的装订。对于导弹而言,引信的工作受导弹飞控组件的控制,在飞行过程中和与目标遭遇时按照一定的控制逻辑进行,不属于预先准备的程序。

根据武器的不同,还有其它一些预先准备程序,如红外导引头的制冷、陀螺定位仪校准和武器投放或发射初始条件的输入等,都可作出类似的模

型结构和控制逻辑分析。

## 4 机载武器预先准备的仿真

### 4.1 仿真方案

设计仿真实验用以检验各种武器预先准备的控制逻辑<sup>[10]</sup>,武器预先准备控制逻辑仿真框架如图3所示。仿真计算机中存有各种武器的预先准备程序,武器类型不同,预先准备的程序不同,图中给出了几种典型的预先准备功能仿真模块:电源变换部件仿真模块、目标指示部件仿真模块、导引程序输入部件仿真模块和引信设定输入部件仿真模块。各仿真模块传给武器的信号用 $X_{4i}$  ( $i=1\sim 4$ )表示。各种功能仿真模块和信息变换通道的接通或断开由指令 $U_i$  ( $i=1\sim 4$ )控制,指令 $U_i$ 由仿真计算机控制。以 $S_i$  ( $i=1\sim 4$ )表示完成相应操作后武器的回馈信号,而关于武器状态良好性的信息以 $S_0$ 表示。

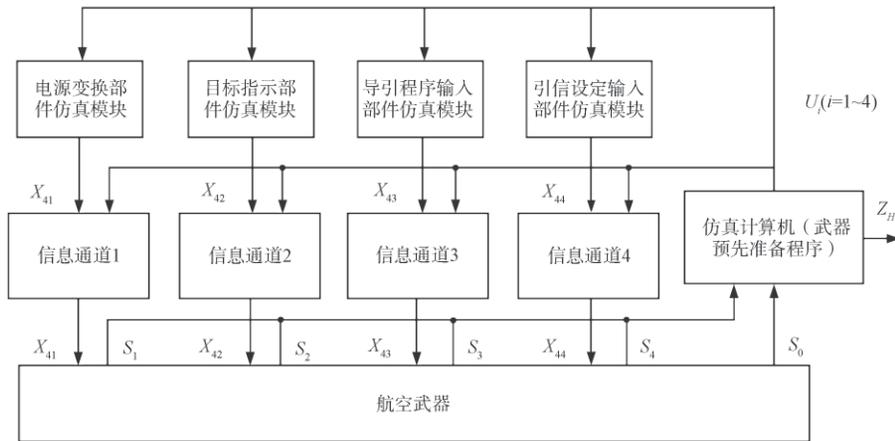


图3 武器预先准备控制逻辑仿真框架

Fig. 3 The simulation framework of the pre-preparation control logic of the weapon

### 4.2 仿真实验控制逻辑

回馈信号 $S_1$ 进入武器预先准备程序仿真计算机的条件是:武器良好(信号 $S_0$ 存在),电源供应部件与对应的信息变换通道接通( $U_1$ 指令存在),电源进入武器(信号 $X_{41}$ 存在)。机载计算机根据回馈信号 $S_1$ 的进入<sup>[11]</sup>,确定电源供应的完成,有如下控制逻辑表达式:

$$S_1 = S_0 \wedge U_1 \wedge X_{41} \quad (1)$$

对回馈信号 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 可写出类似的表达式:

$$S_2 = S_0 \wedge U_2 \wedge X_{42} \quad (2)$$

$$S_3 = S_0 \wedge U_3 \wedge X_{43} \quad (3)$$

$$S_4 = S_0 \wedge U_4 \wedge X_{44} \quad (4)$$

假设某种武器预先准备时需要完成电源供应、导引程序输入和引信设定(该种武器无需目标指示),那么回馈信号 $S_1$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 进入到机载计算机中,这说明已完成了发射前的准备操作,实现了从电源供应部件来的电源供应( $S_1=1$ ),进行了导引程序的输入( $S_3=1$ )和对引信装置按需要进行了调整( $S_4=1$ )。此后,在机载计算机中形成信号 $Z_H$ ,用以表示武器非良好或未准备好运用, $Z_H$ 可表示为:

$$Z_H = \bar{S}_0 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3 + \bar{S}_4 \quad (5)$$

将 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 的表达式代入并变化得:

$$Z_H = \bar{S}_0 + \bar{U}_2 + \bar{X}_{42} + \bar{U}_3 + \bar{X}_{43} + \bar{U}_4 + \bar{X}_{44} \quad (6)$$

根据武器预先准备内容的不同,可写出相应的预先准备控制逻辑表达式。

### 4.3 仿真结论

式(6)表示,如果某种武器的某一自动装置非良好( $\bar{S}_0=1$ ),或某一信息变换通道未接通( $\bar{U}_i=1$ ,  $i=2\sim 4$ ),或某个信号 $X_{4i}$ 未进入到武器自动装置( $\bar{X}_{4i}=1$ ,  $i=2\sim 4$ ),那么武器被认为非良好或未准备好运用,就不能进行发射或投放;相反,如果 $Z_H=0$ ,那么武器被认为准备好了,作为武器发射或投放的判定条件<sup>[12]</sup>。武器准备好,并且处于攻击区或满足发射/投放的距离角度条件,就可以自主发射或投放该武器<sup>[13]</sup>。通过仿真可验证该控制逻辑是否正确。

利用武器发射前预先准备的控制逻辑,在地面可以进行武器半实物或计算机仿真,对武器和无人机的自主攻击决策系统的发射控制程序进行联合设计和检验<sup>[14]</sup>。

## 5 结 论

自主攻击决策系统对无人机载武器进行发射/投放前的预先准备是其功能之一,在根据目标选定武器后,通过机载计算机武器预先准备程序,根据选定武器的特点进行发射前的预先准备。对无人机载武器预先准备模型结构和控制逻辑的分析研究将为自主攻击决策系统控制程序的优化打下基础。在融入人工智能技术与实时信息网柔性结合后,自主攻击决策系统将更为先进,无人机将可以执行各种更为复杂的作战任务,甚至包括将来的无人机空战<sup>[15]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 王庆江,彭军,曾儒伟,等. 无人机对地多目标攻击决策研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(11): 57-61.
- [2] Wang G G, Chu H C E, Mirjalili S. Three-dimensional path planning for UCAV using an improved bat algorithm [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 49: 231-238.

- [3] 罗畅,王浩,王鹏飞,等. 无人机作战智能化及其自主攻击研究[J]. 飞航导弹, 2019(4): 18-24.
- [4] 许连虎,丁新. 空空导弹电源模拟负载设计与热仿真分析[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 83-87.
- [5] 郑玉军,田康生,刘俊凯,等. 早期预警雷达和多功能相控阵雷达的目标指示交接方法[J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 106-113.
- [6] 王娜,金振中,贺荣国. 舰空导弹武器系统协同作战能力试验中协同目标指示模拟[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(4): 358-363.
- [7] 叶喜发,张欧亚,李新其,等. 高超声速巡航导弹的作战运用及对未来战争的影响[J]. 飞航导弹, 2019(4): 38-41.
- [8] 查颖,周长省,鞠玉涛. 制导火箭弹MEMS陀螺仪信号处理仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(12): 70-73.
- [9] 刘亮,程妹华. 基于软件仿真获取引信启动特性研究[J]. 制导与引信, 2018, 39(2): 5-8.
- [10] 张治生,陈怀民,吴成富,等. 小型无人机控制逻辑建模及仿真[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(9): 93-97.
- [11] 朱亮植. 民机显示系统架构与控制逻辑的设计研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2019, 1: 34-39.
- [12] 黄克明,王涛,胡军. 无人机作战仿真平台设计及其关键技术研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(1): 90-92.
- [13] 张峥,周勇,高瑞周,等. 无人机作战飞机自动机动轰炸原理及技术分析[J]. 测控技术, 2012, 31(7): 126-129.
- [14] 王磊,贺天宇,李文涛. 无人机作战效能综合评价[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(5): 5-6.
- [15] 徐啟云,王洁,罗畅,等. 无人机对地自主攻击方法仿真与研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(12): 55-59.

作者简介:



聂光成(1971-),男,博士,副教授,主要研究方向为机载武器系统的作战仿真、效能评估研究。



王勇(1974-),男,硕士,教授,主要研究方向为机载武器系统的作战仿真、效能评估研究。



邢驰(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人机武器系统的作战仿真、效能评估。



谢磊(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人飞行器作战系统与技术。

[引用格式] 李兵, 廖志远, 滕传福, 等. 小型有人/无人协同特混编队对舰攻击策略研究[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 58-65.

# 小型有人/无人协同特混编队对舰攻击策略研究

李兵<sup>1</sup>, 廖志远<sup>1</sup>, 滕传福<sup>2</sup>, 崔金雷<sup>1</sup>

(1. 四川航天系统工程研究所, 成都 610000; 2. 中国人民解放军91040部队, 青岛 266231)

**摘要:** 随着科学技术的迅速发展, 有人/无人协同作战可通过能力互补, 形成一个有机的战斗系统, 体现出巨大的非对称优势, 在现代战争中发挥的作用日趋明显, 将成为下一代战争的重要特征。首先探讨了有人/无人协同反舰作战的任务模式, 并设计了使用有人机、无人机和反舰导弹组成的有人/无人集群对小型水面舰艇编队的攻击作战流程; 随后利用了多智能体建模和蒙特卡洛仿真的方法, 对有人/无人编队对舰攻击策略进行了仿真实验, 并利用相同的办法对传统的反舰导弹饱和攻击进行了仿真实验; 最后对两次仿真实验结果进行了对比。结果表明有人/无人协同对舰攻击相对于传统的饱和攻击具有良好的打击效果, 具体表现为作战效费比高, 使对方作战能力完全瘫痪的概率高。提出的作战策略为未来反舰作战提供了一种重要的思路。

**关键词:** 有人/无人协同; 作战模式; 多智能体; 协同攻击策略; 饱和打击

**中图分类号:** E843 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)04-58-08

## Research on the Attack Strategy of Small Manned/Unmanned Coordinated Special Mixed Formations on Ships

LI Bing<sup>1</sup>, LIAO Zhiyuan<sup>1</sup>, TENG Chuanfu<sup>2</sup>, CUI Jinlei<sup>1</sup>

(1. Sichuan Aerospace System Engineering Institute, Chengdu 610000, China;

2. 91040 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Qingdao 266231, China)

**Abstract:** With the rapid development of science and technology, manned/unmanned coordinated combat can form an organic combat system through complementary capabilities, which embodies huge asymmetric advantages, and plays an increasingly obvious role in modern warfare. It will be an important feature of the next generation of warfare. Firstly, the mission mode of manned/unmanned cooperative group for anti-ship combat is discussed, and accordingly the process of using manned/unmanned group composed of manned aircraft, drones and anti-ship missiles to attack a basic fleet is designed. Secondly, based on the methods of multi-agent modeling and Monte Carlo simulation, a simulation experiments were carried out on the manned/unmanned group to the anti-fleet strike strategy, and the same method was used to simulate the traditional anti-ship missile saturation attack. Finally, the results of the two simulation experiments are compared. The results show that the manned/unmanned coordinated attack on the ship has a good strike effect compared to the traditional saturation attack, which is specifically manifested in the high cost-effectiveness, and the higher probability of completely paralyzing the opponent's combat capability. The combat strategy proposed in this article provides an important idea for future anti-ship operations.

**Key words:** Manned/Unmanned Coordinated; Combat Mode; Multi Agent; Coordinated Attack Strategy; Saturation Blow

## 1 引言

近年来,科学技术的迅速发展引发了世界军事领域的重大变革。无人系统作为新质作战力量的重要组成部分,在现代战争中发挥的作用日趋明

显,无人化作战可能成为下一代战争的重要特征。随着大数据、云计算、边缘计算等技术的发展,感知与识别、信息传递、信息存储与处理作为电子信息技术的核心要素,正处于重大变革发展期,无人系统凭借“高适应、高机动、高效率”的优良性能代替

收稿日期:2020-05-12; 修回日期:2020-06-23

基金项目:装备发展部预先研究项目(41411050101);中国博士后科学基金项目(2018M643849)

士兵承担枯燥、污染和危险作战任务,在科索沃、伊拉克、阿富汗等近代战争中发挥了重要作用,受到世界高度关注。

无人机大量投入常规情报搜集与实际战争并获得极大的成功,这催生了扩展无人机能力的新需求,而无人机与有人机组编协同作战正是这种能力扩展的重要方面。美国国防部在最新发布的无人系统综合路线图中指出“美国军事中心从中东转移至亚太地区以后,有人/无人协同作战将成为一种基本作战模式”。为了提高作战任务的成功率,无人作战系统可与有人系统配合,通过二者的相互支援、能力互补,形成一个有机的战斗系统,协同执行恶劣、危险和枯燥任务,提高作战实效性,体现出巨大的非对称优势,有人/无人协同作战模式将成为当下及未来研究的重点,已经成为世界各军事强国竞相研发的热点。

## 2 有人/无人协同对舰作战模式研究

本文主要研究如何利用有人/无人编队配合反舰导弹对敌方小型舰艇编队进行突防,反舰导弹战斗部威力大,命中后会对敌舰造成毁灭性的打击,而有人/无人编队携带的武器相对而言威力较小,因此有人/无人编队主要用于干扰敌方防御性武器。由于反舰导弹目标特征明显易于被探测拦截,价格也很昂贵,利用反舰导弹群进行饱和打击效费比较低。这里设想一种有人/无人集群和反舰导弹协同作战模式,该模式最大的特点是尽力避免我方大型装备直接与敌方接触。首先利用远程传感器阵列(远程预警雷达、侦察卫星等)对敌方目标粗略

侦察得到敌方目标数目,指挥中心判读情报后由任务规划系统根据敌编队数量决定发射反舰导弹的数量和时机,选择有人机机载武器挂载以及有人机/无人机集群起飞时刻,最后形成作战指令下发到各火力单元。有人/无人协同作战编队整体作为体系对抗系统的一个节点,受预警机或地(海)面指挥中心的统一指挥控制,包括整体作战计划制定、远距占位引导等,同时共享整个战场的态势信息。敌方作战编队的定位与识别的任务可由上级情报支持,可以从天基预警探测系统中获得。

有人/无人协同对舰作战的主要流程如图 1 所示。

上级指挥机关经过情报研判,决定对敌方舰艇编队进行打击,为了减小伤亡,选择有人/无人编队和重型反舰导弹共同对目标进行打击。

任务规划系统对作战任务进行分解确定各火力单元发射弹药数量、起飞的有人机和无人机的数量、机载弹药携带数量等,并确定发射时序流程等。

各火力单元执行各自作战使命,协同对敌舰群进行攻击。

## 3 有人/无人协同对小型特混编队攻击作战的实施策略

这里考虑敌方舰艇编队的构成如表 1 所示。

表 1 敌方装备与威胁源  
Table 1 The enemy's equipment and threat sources

舰种	数量	舰队防空配置
阿利·伯克级驱逐舰	2	宙斯盾系统
提康德罗加级巡洋舰	1	(标准 2 导弹)
综合补给舰	2	(海麻雀防空导弹)

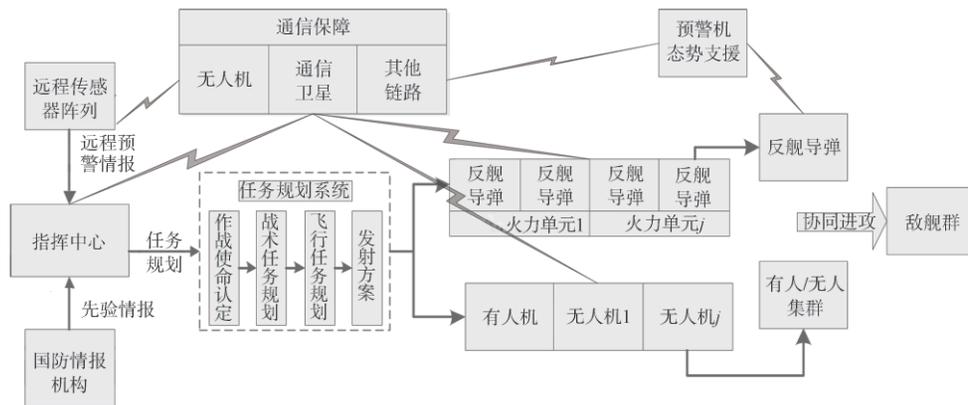


图 1 有人/无人协同的典型作战模式

Fig. 1 A typical manned/unmanned coordinated combat mode

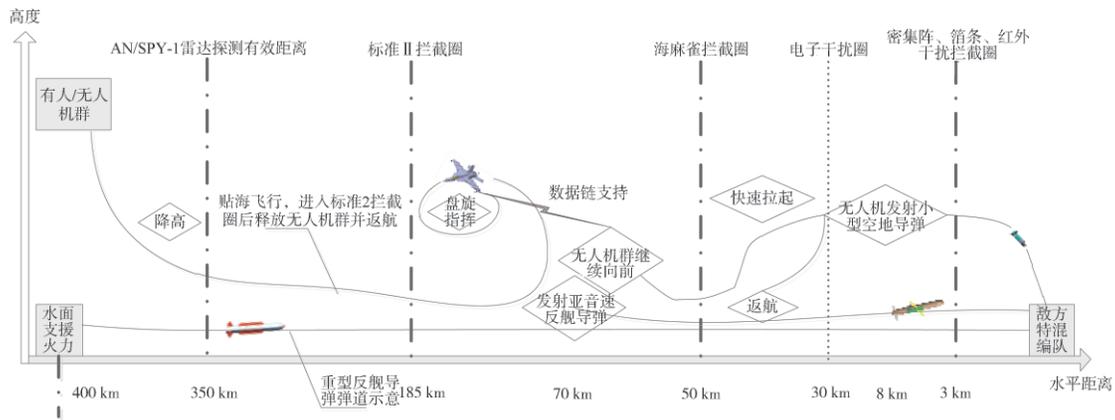


图2 小型舰艇编队作战流程

Fig. 2 The combat process of a small ship formation

综合分析敌方防空系统威胁,我方有人/无人编队所遭遇的威胁等级由低到高能:被搜索雷达发现、被搜索雷达跟踪、被火控雷达锁定、被电子干扰、被拦截弹锁定、被箔条云/红外干扰、进入近防武器防卫范围、被击毁。根据威胁源的作用距离,可大致设计有人/无人协同对舰攻击的作战实施策略如图2所示。将直接对舰攻击武器分为三个波次:第一波次为有人机携带的中程反舰导弹,第二波次为无人机携带的近程空面导弹,第三波次为水面支援舰艇发射的重型远程反舰导弹。

(1)依据上级指挥机关的命令,在0时刻,距离敌方特混编队400 km处我方水面火力单元发射若干枚亚超结合反舰导弹组,作战飞机协同亚音速反舰导弹,快速降低高度贴海飞行,尽量降低被AN/SPY-1雷达发现的概率。

(2)在离目标350 km时,编队进入AN/SPY-1雷达的有效探测距离,此时应当采用密集编队,尽量隐藏回波信号特征。

(3)在离目标150 km时,编队进入标准II导弹拦截圈,此时可能已有标准II导弹来袭,作战飞机发射中程反舰导弹后在敌方拦截圈边缘盘旋指挥无人机群。

(4)在离目标70 km时,无人机群协同反舰导弹继续在低高度飞向敌方舰艇编队。

(5)在离目标50 km时,编队进入海麻雀导弹拦截圈,无人机群快速拉起加速,并尽可能散开。

(6)无人机群掩护反舰导弹向敌舰群突击,吸引海麻雀导弹的火力,尽可能减小自身伤亡,在自身被击毁前发射小型空地导弹。

(7)重型反舰导弹抛喷气发动机,点燃助推火箭进入末制导,和小型空地导弹群协同对特混编队内层防御区进行突破。

(8)无人机对打击效果进行评估并上报。

(9)根据打击情况决定是否发动下一轮打击。

## 4 有人/无人协同对舰攻击仿真

### 4.1 仿真实验

由于有人/无人协同对舰攻击是一个体系与体系对抗的作战问题,此类问题常采用装备性能模型进行仿真研究。装备性能模型是直接使用武器装备在作战中所表现出的宏观性能指标进行作战仿真评估的一类模型。对装备内部的运行细节进行了大量的简化,忽略了中间操作过程,只取装备的运行结果,适用于体系对抗仿真模拟。

本文利用多线程技术和Agent智能体技术对第三部分所述的作战实施过程进行了仿真。Agent智能体利用有限状态机模型实现,有限状态机模型的例子如图3所示。作战仿真的主流程如图4所示。为了准确反应作战实施的效果,采用蒙特卡洛法进行多次仿真并取平均来对作战效果进行统计分析。

#### 4.1.1 敌我双方装备性能汇总

对于作战仿真,实验的数据输入非常重要,由于军事信息的敏感性,不可能准确知道每一件参与作战仿真实验的装备信息,必须利用现有装备和其他信息源对输入仿真实验的数据进行校验,以达到准确评估作战结果的目的。由于体系作战仿真本身目的在于趋势分析,只要仿真输入数据不出现颠覆性的错误,得到的结果已足以说明问题。

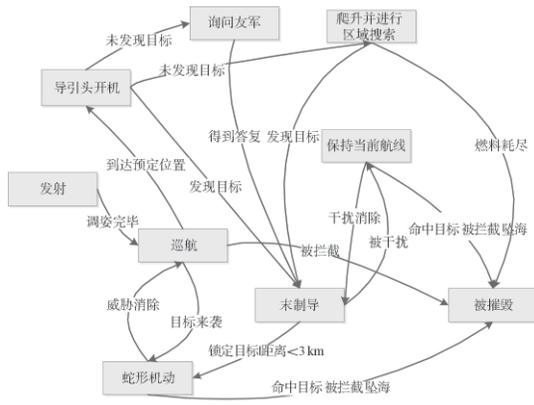


图3 反舰导弹的有限状态机模型

Fig. 3 The finite state machine model of anti-ship missiles

以下数据均采用目前公开的数据。并根据我国海军同类武器装备情况进行了修正,其中舰艇、雷达、弹药和飞机模型如表 2~5 所示。

4.1.2 仿真设置与结果

红方支援火力发射重型反舰导弹 15 枚,有人机 2 架,每架红方有人机装备亚音速反舰导弹 8 枚,指挥 10 架无人机,每架无人机装备小型空面导弹 10 枚,红方有人/无人协同作战集群采用与重型反舰导弹航向相差 $\pm 5^\circ$ ,距离相差 $\pm 30$  km 的随机航线接近蓝方舰队。红方仿真结果如图 5 所示,蓝方仿真结果如图 6 所示。仿真结果中横坐标表示仿真实

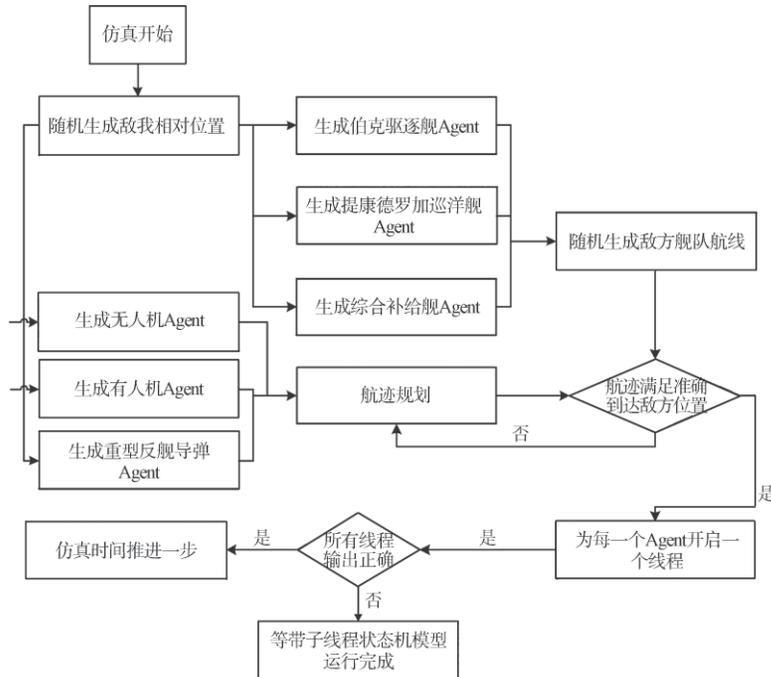


图4 仿真实验的流程

Fig. 4 The simulation process

表2 舰艇模型

Table 2 The ship models

名称	最大速度/节	最大转弯速率/ $((^\circ)\cdot s^{-1})$	近防武器/套	标准2导弹/枚	海麻雀导弹/枚	预警雷达	火控雷达
阿利·伯克	31	5	密集阵 2	96	40	AN/SPY-1D	AMDR-S
提康德罗加	33	3	密集阵 2	122	88	AN/SPY-1D	AMDR-S
综合补给舰	31	5	—	—	—	—	—

表3 雷达模型

Table 3 The radar models

名称	最大探测距离/km	最小探测距离/km	最大探测距离下搜索到目标的概率	最小探测距离下搜索到目标的概率	最大探测距离下的精度	最小探测距离下的精度/m
AN/SPY-1D	350	0.5	0.1	1	距离 10 km, 方位角误差 $10^\circ$	10
AMDR-S	185	0.5	0.5	1	距离 10 km, 方位角误差 $10^\circ$	1

表4 弹药模型

Table 4 The ammunition models

名称	主动段末速/ $Ma$	巡航速度/ $Ma$	最小射程/km	最大射程/km	单发命中概率	最大可用过载/ $g$
海麻雀	2.5	—	1	22.23	0.9	40
标准II	4	—	15	185	0.75	40
重型反舰导弹	2.2	0.8	10	400	0.55	10
亚音速反舰导弹	—	0.9	10	180	0.7	10
小型空面导弹	1.4	—	1	15	0.95	10

表5 飞机模型

Table 5 The airplane models

名称	最小马赫数	最大马赫数	稳盘可用过载/ $g$
	2000 m高度	2000 m高度	2000 m高度
有人机	0.35	1.6	-3 ~ +6
无人机	0.4	0.89	-3 ~ +6

验的编号,纵坐标表示在某次仿真实验中,武器装备命中或被命中的数量。蓝方舰艇损失值表示红方武器爆炸的破坏力。假设5000破坏力能摧毁一艘驱逐舰和补给舰,10000的破坏力能摧毁一艘巡洋舰。

红方战果与损失统计结果如下:重型反舰导弹命

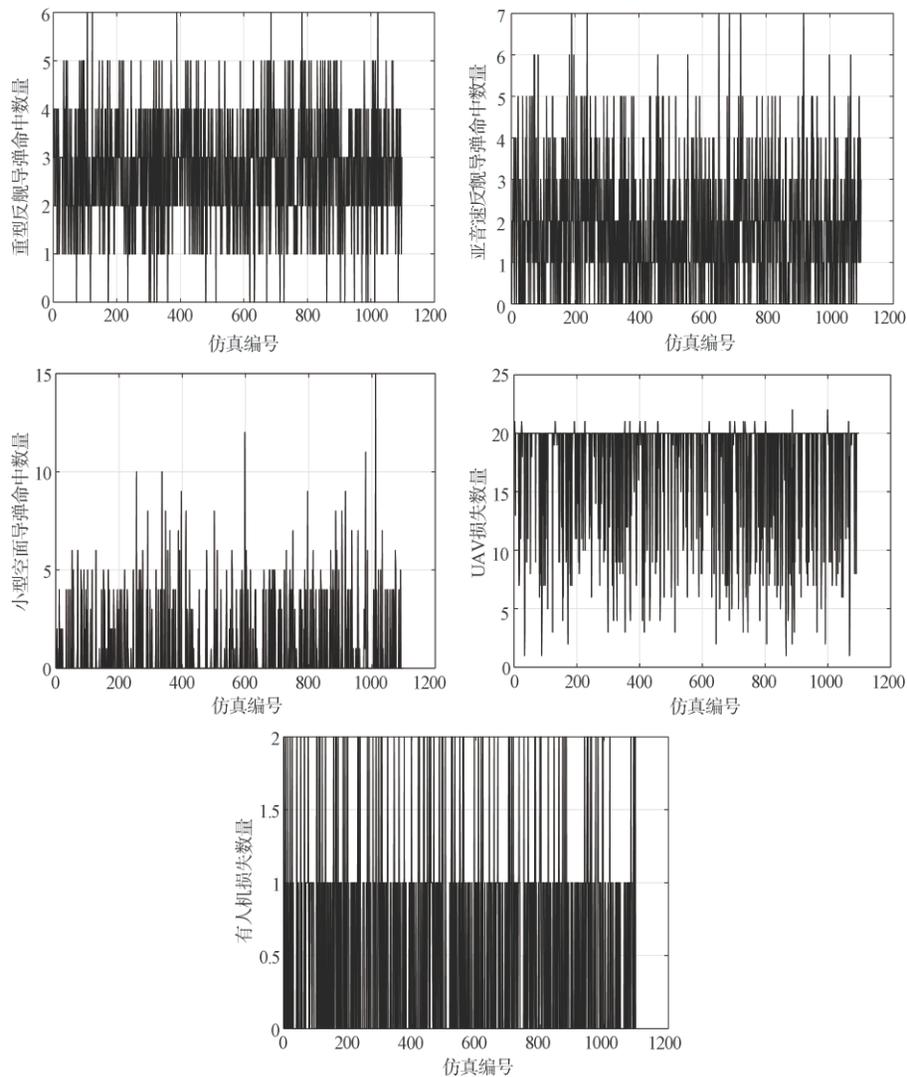


图5 有人/无人协同基于蒙特卡洛的红方仿真结果

Fig. 5 The red party's simulation results of the manned/unmanned coordinated attack based on the Monte Carlo method

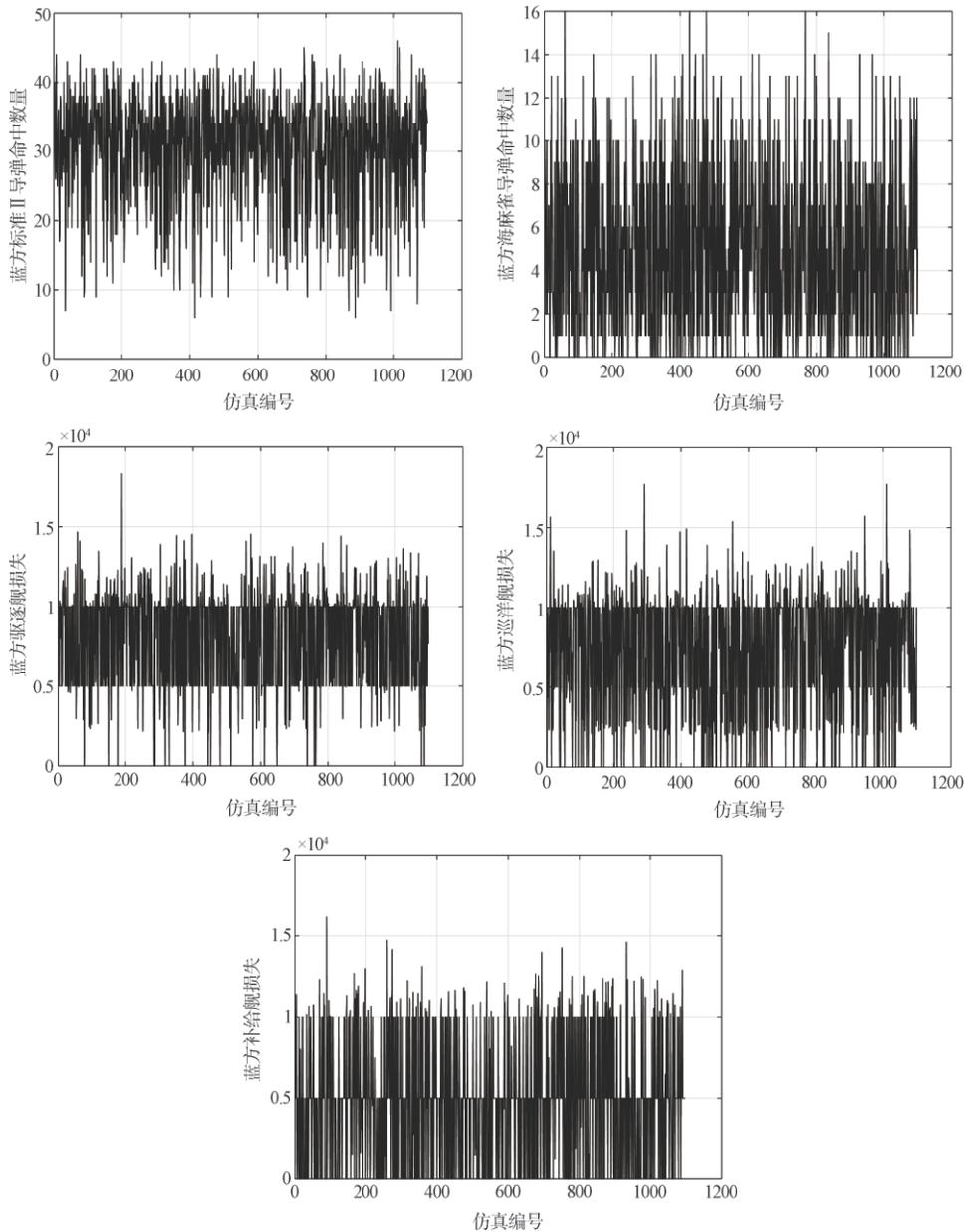


图6 有人/无人协同基于蒙特卡洛的蓝方仿真结果

Fig. 6 The blue party's simulation results of the Manned-Unmanned coordinated attack based on the Monte Carlo method

中率为0.18112,亚音速反舰导弹命中率为0.11248,小型空面导弹命中率为0.022391,红方无人机损失率为0.8699,红方有人机损失率为0.25455。

蓝方战果与损失统计结果如下:蓝方标准II导弹综合命中率为0.23887,蓝方海麻雀导弹综合命中率为0.64484,蓝方驱逐舰平均损失1.595艘,蓝方巡洋舰平均损失0.72793艘,蓝方补给舰平均损失0.9381艘。

4.1.3 与传统饱和攻击的对比分析

将红方所有武器换为30枚重型反舰导弹重新

运行仿真,红方仿真结果如图7所示,蓝方仿真结果如图8所示。

红方重型反舰导弹命中率为0.07175。

蓝方战果与损失统计结果如下:蓝方标准II导弹综合命中率为0.26139,蓝方海麻雀导弹综合命中率为0.72156,蓝方驱逐舰平均损失为0.5095艘,蓝方巡洋舰平均损失为0.39544艘,蓝方补给舰平均损失为0.1673艘。

将有人/无人协同对舰攻击和传统大规模饱和攻击的作战仿真结果对比如表6所示。

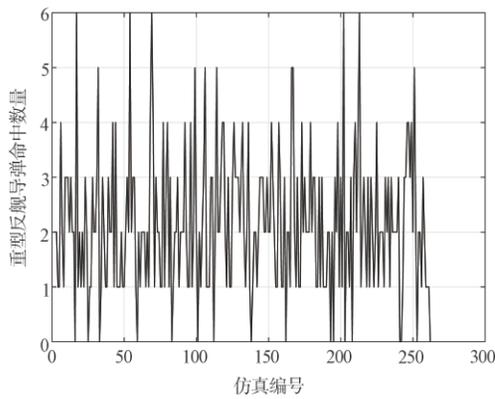


图7 饱和攻击基于蒙特卡洛的红方仿真结果

Fig. 7 The red party's simulation results of the saturation attack based on the Monte Carlo method

表6 两种作战模式的综合对比

Table 6 The comprehensive comparison between the two combat modes

比较项	有人/无人协同作战	传统饱和攻击
红方反舰导弹命中率	0.18112	0.07175
蓝方标准II导弹综合命中率	0.23887	0.26139
蓝方海麻雀导弹综合命中率	0.64484	0.72156
蓝方驱逐舰平均损失	1.595	0.5095
蓝方巡洋舰平均损失	0.72793	0.39544
蓝方补给舰平均损失	0.9381	0.1673

由表6可见,有人/无人协同对舰攻击可以有效减少有人机的损失,大大的提高了反舰导弹的作战

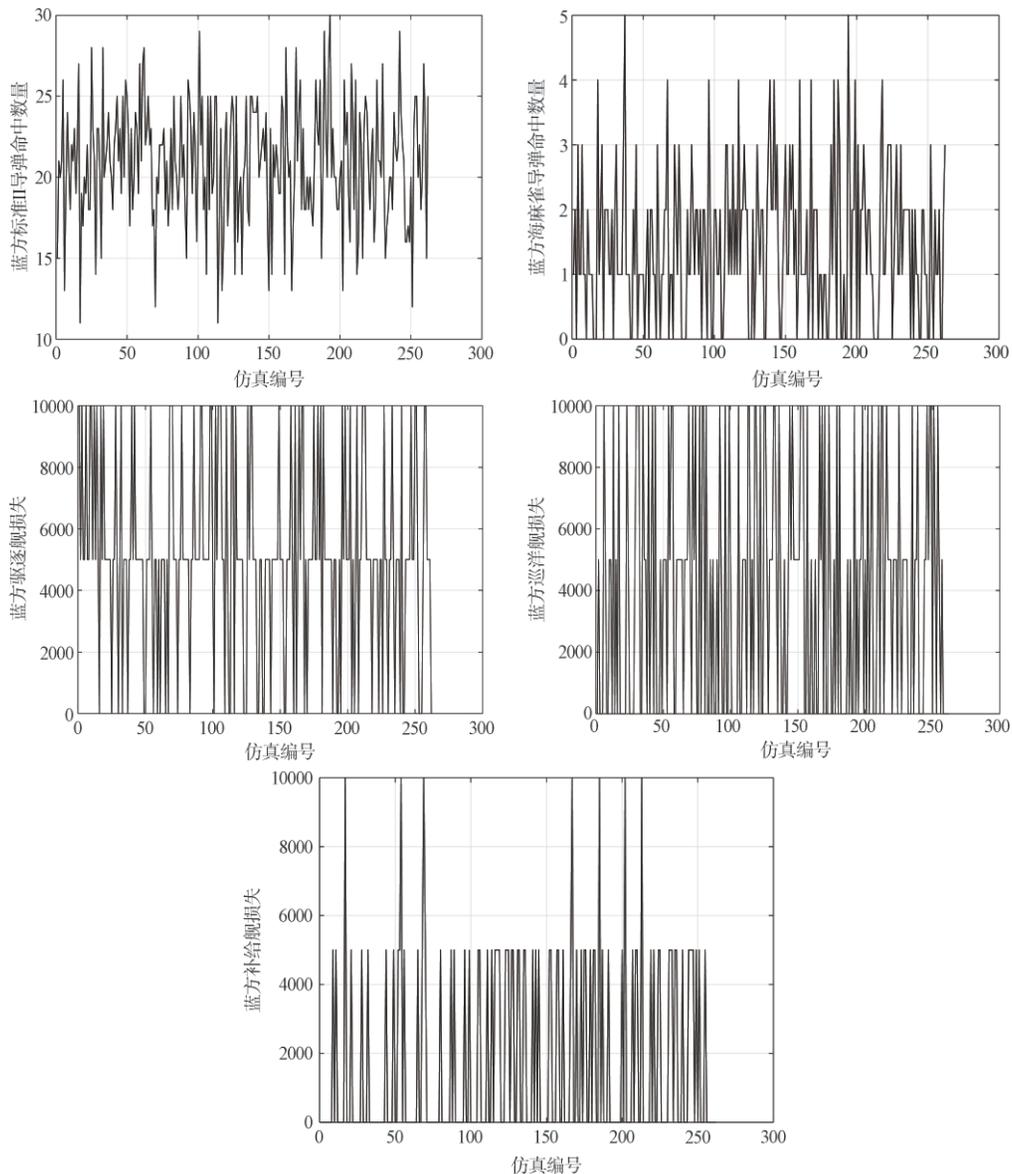


图8 饱和攻击基于蒙特卡洛的蓝方仿真结果

Fig. 8 The blue party's simulation results of the saturation attack based on the Monte Carlo method

效能。有人/无人协同对舰攻击,是一种较为有效的对具有严密防空体系舰艇编队的攻击方式,基本上能使一个带宙斯盾系统的舰艇编队近乎全灭。而传统的大规模饱和攻击无法有效摧毁一个带宙斯盾系统的舰艇编队。反舰导弹命中率下降到原来的39.6%。击毁敌方驱逐舰的平均数量下降到原来的31.9%,击毁敌方巡洋舰的平均数量下降到原来的54.3%,击毁敌方补给舰的平均数量下降到原来的17.83%。

结果表明有人/无人协同攻击相对于传统的饱和打击具有良好的打击效果。

## 5 结束语

现阶段技术水平使得有人机/无人机协同作战的实施存在一定的难点与问题,距离形成新质作战能力尚有较大差距。灵活、可变、模块化的作战模式将对未来信息化条件下的作战产生重大影响,其在指挥关系、组织、训练模式等方面可能跟现有的编制体系存在不同之处,今后仍有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 樊洁茹,李东光.有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J].无人系统技术,2019,2(1):39-47.
- [2] 马向玲,雷宇曜,孙永芹,等.有人/无人机协同空地作战关

键技术综述[J].电光与控制,2011,18(3):56-60.

- [3] 蒋琪,申超,张冬青.认知/动态与分布式作战对导弹武器装备影响研究[J].战术导弹技术,2016,37(3):1-6.
- [4] 包战,王树文.有人/无人机协同作战能力生成问题研究[J].国防科技,2017,38(3):76-79.
- [5] 申超,李磊,吴洋,等.美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J].战术导弹技术,2018,39(1):16-22.
- [6] 张洋,谭健美,朱家强.美国空军未来25年无人机系统路线图解析[J].飞航导弹,2015,45(1):54-57.
- [7] 李文,陈建.有人机/无人机混合编队协同作战研究综述与展望[J].航天控制,2017,35(3):90-96.

## 作者简介:



李 兵(1983-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为武器装备体系总体技术、无人作战体系与指挥控制领域等。



廖志远(1992-),男,硕士,工程师,主要研究方向为飞行仿真、飞行动力学与控制。



滕传福(1983-),男,本科,讲师,主要研究方向为舰艇航海技术。



崔金雷(1991-),男,硕士,工程师,主要研究方向为武器装备体系总体技术、科研管理体系、安全管理研究等。

[引用格式] 王新尧, 孙厚俊, 王朝阳, 等. 有人机/无人机编队协同作战决策系统架构设计[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 66-72.

# 有人机/无人机编队协同作战决策系统架构设计

王新尧<sup>1</sup>, 孙厚俊<sup>2</sup>, 王朝阳<sup>1</sup>, 曹云峰<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航天学院, 南京 210016; 2. 洛阳电光设备研究所, 洛阳 471000)

**摘要:** 针对有人机/无人机编队协同作战决策系统架构设计问题, 开展了同时考虑有人机指挥操作员状态变化以及异构无人机对有人机决策依赖程度不同对决策系统带来影响的架构设计研究。首先, 分析了有人机/无人机编队系统体系结构及其对决策系统需求。其次, 基于三模认知自动化方法设计了有人机/无人机编队协同作战决策系统架构, 该架构包含三个决策主体: 操作员、有人机机载智能决策系统和无人机机载智能决策系统, 三个决策主体的交互机制可以为无人机提供任务管理冗余功能, 进而提高系统鲁棒性。最后, 通过动态仿真对系统架构有效性进行验证。实验表明, 该决策系统架构逻辑合理, 可适应不同态势下无人机对决策的需求。

**关键词:** 决策系统; 有人机/无人机编队; 系统架构; 协同作战; 任务管理

**中图分类号:** TP302;V219      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2020)04-66-07

## Architecture of Decision System for Manned/Unmanned Aerial Vehicle Formation Cooperative Combat

WANG Xinyao<sup>1</sup>, SUN Houjun<sup>2</sup>, WANG Zhaoyang<sup>1</sup>, CAO Yunfeng<sup>1</sup>

(1. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Luoyang Institute of Electro-optic Equipment, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of architecture design of manned/unmanned aerial vehicle formation collaborative operation decision system, an architecture design research was carried out considering both the state change of manned and unmanned aerial vehicle command operator and the influence of different degree of dependence of heterogeneous unmanned aerial vehicle on manned and unmanned aerial vehicle on decision-making system. Firstly, the architecture of manned/unmanned aerial vehicle formation system and its requirement for decision system are analyzed. Secondly, the decision-making system architecture of manned/unmanned aerial vehicle formation collaborative operation is designed based on the three-mode cognitive automation method. The architecture consists of three decision bodies: operator, intelligent decision system with man-machine onboard and intelligent decision system of UAV (Unmanned Aerial Vehicles). The interaction mechanism of the three decision bodies can provide redundant function of task management for UAV, thus improving the robustness of the system. Finally, the effectiveness of the system architecture is verified through dynamic simulation. The experiment shows that the decision system architecture is logical and can adapt to the decision-making requirements of UAV in different situations.

**Key words:** Decision System; Manned/Unmanned Aerial Vehicle Formation; System Architecture; Cooperative Combat; Task Management

### 1 引 言

当前,无人机系统承担的军事任务正在由安全空域执行情报、监视与侦察任务向战场对抗环境下执行对地打击、空战等作战任务方向扩展<sup>[1]</sup>,但由于技术水平的限制,目前现役无人机不具备对意外事件实时响应处理能力,因此在对抗环境中易处于诱骗、干扰和被打击的险境,导致其自卫和空中对抗能力不足,甚至失去制空权。综上,在未来较长的时期内无人机难以在战场对抗环境中实现完全自主作战,其执行任务时还需要由人通过数据链进行操作和控制。然而,现有的“地面站远程异地控制无人机”模式<sup>[2]</sup>,存在数据链中断和决策延时等缺陷,难以支撑无人机在战场对抗环境下遂行作战任务,而采用有人机决策模式,可以实现对无人机的就近指挥。同时,无人机与有人机在认知能力、平台能力、机载传感器和武器性能等方面存在能力互补的天然优势<sup>[3]</sup>。通过两者优势互补,可有效弥补有人机/无人机能力不足,提高无人机对作战环境变化的应对能力、作战效能和战场生存能力。有人机/无人机编队协同作战将是未来战场中重要的空中作战模式。

有人机/无人机编队协同作战的重点是针对无人机和有人机混合编队,研究多无人机与有人机决策体系结构与架构设计<sup>[4-6]</sup>、协同任务规划<sup>[7-10]</sup>、协同成像侦察<sup>[11]</sup>、人机协作<sup>[12-13]</sup>等方向。其中人机协作问题是有人机/无人机编队协同区别于传统单一有人系统或单一无人系统的主要问题。人机协作中,操作员的状态、无人机自主程度以及当前态势等变化,会给整个系统带来不确定因素。Marcus Wohler 针对操作员的状态和无人机通信链路的变化,提出了双模认知自动化智能辅助系统架构<sup>[12]</sup>,该架构系统的表述了人与无人机系统的整体结构。然而,该系统架构仍然面临操作员耐力不足的危机,主要原因是原系统的操作员是在地面控制且只需要决策一架无人机,难以实现一架有人机同时指挥引导多架无人机的作战要求。

为了解决上述问题,本文研究了有人机/无人机编队决策系统体系结构,并针对不同场景下对决策结构的适应性要求,将双模认知自动化智能辅助系统架构改进扩展为三模认知自动化决策系统架

构,给出操作员决策策略和与智能系统的交互机制,通过提供冗余的任务管理功能,提高操作员指挥多架无人机的能力。

### 2 有人机/无人机编队系统体系结构

多智能体控制系统体系结构主要是表示多智能体系统中的信息和控制关系,反映该系统的信息存储、共享方式以及问题求解能力的分布模式等<sup>[14]</sup>。常见的有人机/无人机编队体系结构有:完全集中式(无人机配合有人机,完全依赖有人机决策)、有限集中分布式(有人机协助无人机,无人机具有一定的自主功能,有人机可修正决策)、无中心分布式(无人机能够自主决策,与有人机互补互动)<sup>[2]</sup>。分别如图 1~3 所示。

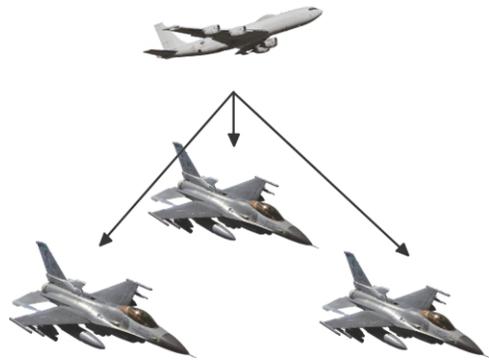


图1 集中式结构

Fig. 1 Centralized structure

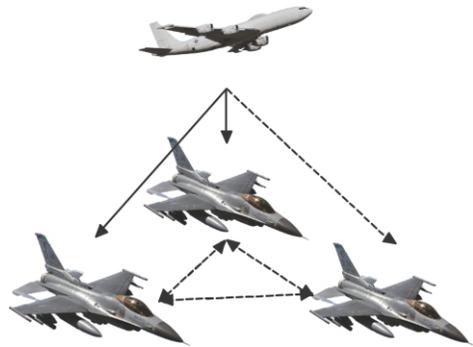


图2 有限集中分布式结构

Fig. 2 Limited centralized distributed command structure

在不同的决策结构中,有人机和无人机的功能分配不同<sup>[14]</sup>。集中式决策结构中有人机直接生成决策指令发送给无人机,无人机之间不通

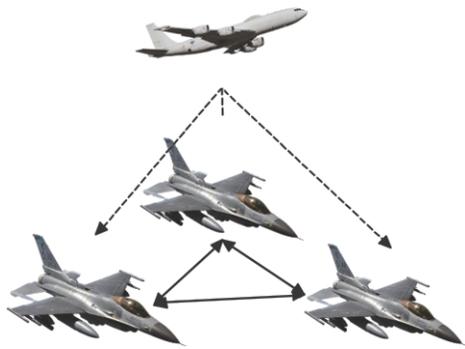


图3 无中心分布式结构  
Fig. 3 Distributed structure

信;全自主分布式指挥结构指有人机不再发送决策指令,决策结果由各个无人机协商生成;有限集中式控制指挥结构是指部分无人机完全依赖有人机决策控制。通常异构无人机会处于不同智能等级或发生通信状态异常等情况,导致无人机对有人机决策依赖程度存在的差异。因此,有必要将三种控制结构集成到一个统一的框架下,根据实际任务需求的不同采取相对应的决策结构,而实现上述功能的关键在于其决策系统的架构设计。

### 3 有人机/无人机编队系统架构设计

在有人机/无人机编队协同作战决策系统中起到决策功能的智能决策智能体包括人类操作员、有人机机载智能决策辅助系统和无人机机载智能决策辅助系统,如图4所示,机器人头部所象征机载智能决策系统安装在有人机和每一架无人机上。传统的人机接口(Human Machine Interface, HMI)被扩展到人、机器和智能体的接口(Human Machine and Agent Interface, HMAI),以实现人类和智能体之间通信。智能决策体通过控制机载无人机自身装备的飞行控制系统(Flight Control System, FCS)和飞行管理系统(Flight Management System, FMS),决策无人机执行任务。

将人类操作员工作状态分为“人在回路内”“人在回路上”和“人在回路外”,以适应不同态势、不同操作员状态下对决策主体的需求,“人在回路内”“人在回路上”和“人在回路外”的三种人类工作状态所对应的机载智能决策系统可处于3种状态,如图5~7所示。

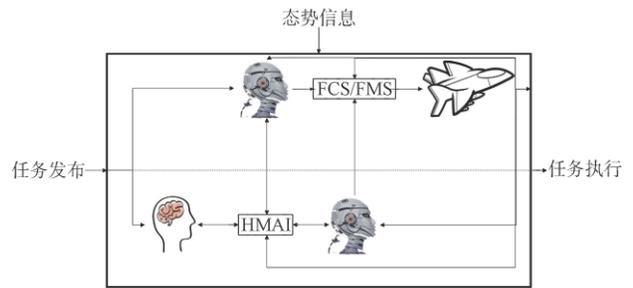


图4 有人机/无人机编队协同作战决策系统组成  
Fig. 4 Manned/unmanned aerial vehicle formation collaborative operation decision system composition

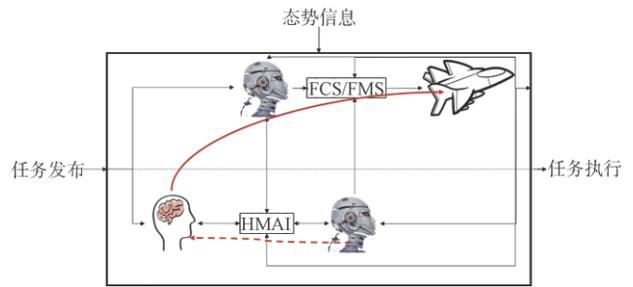


图5 人在回路内  
Fig. 5 People in the loop

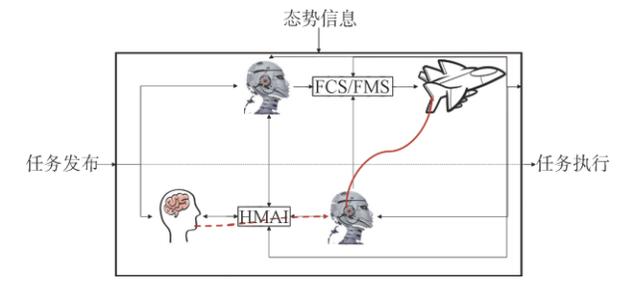


图6 人在回路上  
Fig. 6 People on the loop

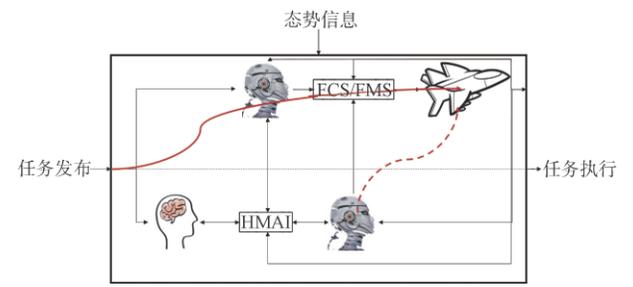


图7 人在回路外  
Fig. 7 People off the loop

人在回路内时:工作目标主要由操作人员完成,有人机机载智能决策系统仍在工作,起到提示操作员的功能,对应体系结构为集中式体系结构。

无人机机载决策系统负责监督无人机飞行状态和执行任务状态,并将无人机系统状态反馈给有人机。

人在回路上时:当无人机智能程度不足时,人类监督有人机机载智能决策系统决策无人机,无人机机载决策系统仍然只负责监督无人机飞行状态和执行任务状态。当无人机智能程度满足当前任务需求时,无人机可自主协同执行任务,将决策结果反馈回有人机,取代了有人机智能决策系统地位。

人在回路外时:当无人机链路可用,有人机机

载智能决策系统取代人类操作员工作;反之,无人机链路不可用时,无人机机载智能决策系统取代人类操作员工作。

由上述可知,除了直接采用有人机机载智能决策系统、无人机机载智能决策系统决策结果和操作员直接输入决策指令外,还有操作员与机载智能决策系统的切换(操作员与机载决策系统的切换机制流程图如图 8 所示)。值得注意的是,当有人机/无人机编队中无人机数量大于 1 时,对于不同的无人机来说,无人机可处于不同的通信链路状态或不同的自主程度,因此其决策来源也会因此不同。

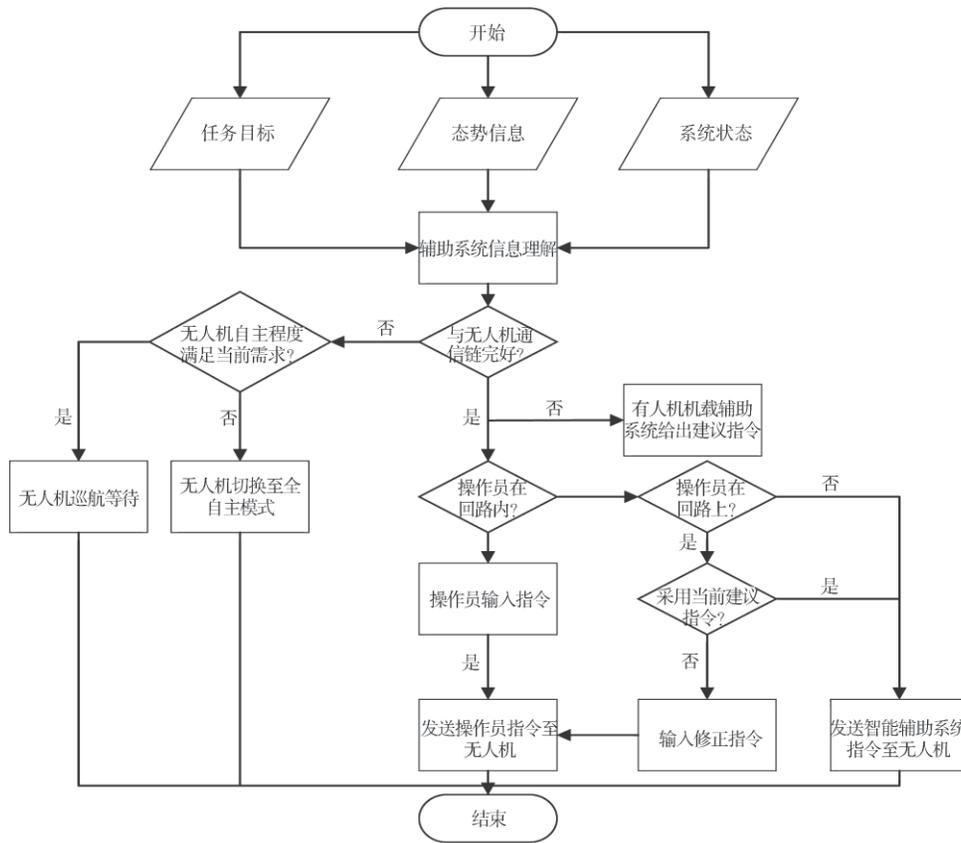


图 8 操作员与机载智能决策系统切换机制流程图

Fig. 8 Flow chart of switching mechanism between operator and airborne intelligent decision system

操作员和有人机机载智能决策系统均可为无人机提供决策指令,实现集中式决策体系结构;无人机机载智能决策系统可实现无人机间协同决策,实现无中心分布式决策体系结构和有限集中分布式控制体系结构。因此,上述架构可以适应不同体系结构的有人机/无人机编队决策系统。此外有人机机载智能决策系统和无人机机载智能决策系统

可提供任务管理的冗余功能,提高操作员决策多架无人机的能力。

### 4 仿真结果及分析

虽然提出的基于三模认知自动化的决策系统架构能够减轻操作员决策无人机负担问题,但该架构也带来存在多个决策指令时可能导致的逻辑混

乱的问题。因此,仿真实验的主要目标是对该架构进行决策逻辑验证,避免由于决策主体增加而产生的决策冲突等问题。IBM Rational Rhapsody可以实现模型与底层代码(C++、Java或Ada)的双向关联,通过构建架构的动态模型,支持对架构的验证分析,因此选择该工具来构建有人机/无人机编队协同作战决策系统架构的可执行模型<sup>[15]</sup>。

以有人机/无人机编队协同作战协同对空攻击作战为背景,对有人机/无人机编队协同作战决策系统架构的逻辑合理性进行验证。本项目考虑的影响决策智能体变化的因素主要有:无人机-无人机通信、有人机-无人机通信条件、操作员状态和无人机自主等级,具体如表1所示。

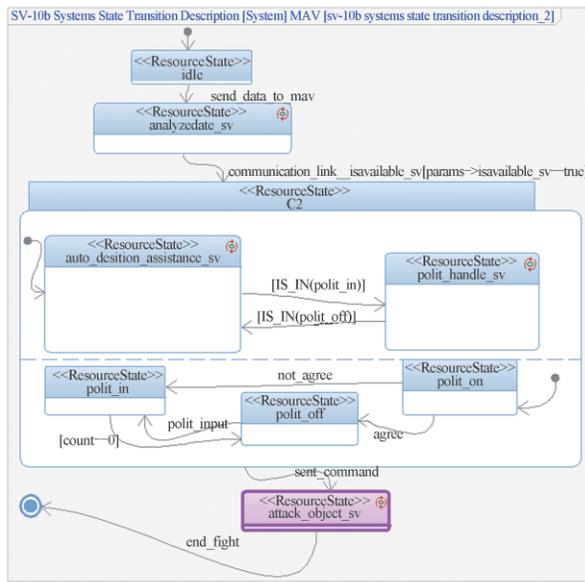
表1 有人机/无人机编队协同作战决策指令来源

Table 1 Source of decision for manned/unmanned aerial vehicle formations

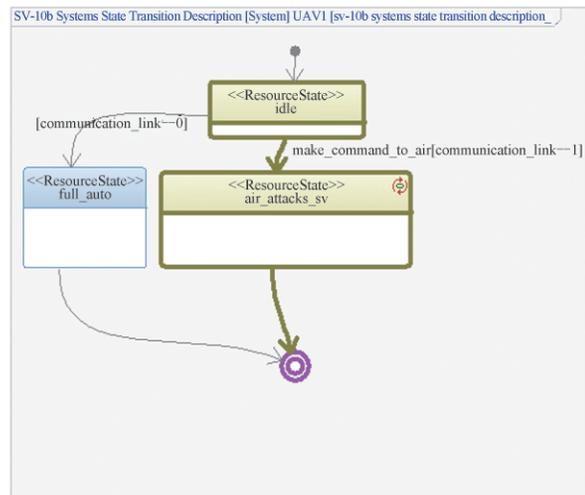
有人机-无人机通信条件	无人机可能的指令来源	进一步判断条件	决策指令来源
通信链路可用	操作员 有人机智能决策系统	操作员状态可用 请求操作员指令超时	操作员 有人机智能决策系统
通信链路不可用	无人机智能决策系统	无人机-无人机通信正常且无人机自主等级≥6 无人机-无人机通信不可用或无人机自主等级≤5	无人机智能决策系统 无决策指令,无人机进入巡航,等待指令状态

在有人机-无人机通信链路可用状态下,有人机和无人机状态图如图9所示。当有人机发送 send\_command(.) (决策指令) 转入 attack\_object(.)

(攻击任务) 状态,触发 make\_command\_to\_air(.) 事件,即无人机接受到决策指令,转入 air\_attack(作战模式) 状态。



(a) 有人机状态图



(b) 无人机状态图

图9 通信链路正常-有人机/无人机状态图

Fig. 9 Communication link normal-status diagram of manned/unmanned aerial vehicle

当操作员在控制回路内,发送操作员输入的指令决策无人机时,有人机状态图如图10所示。auto\_decision\_assistance(.) (有人机机载决策系统) 为操作员建议,但操作人触发 not\_agree 事件

(不同意当前有人机机载决策系统提供的建议指令),操作人状态由 polit\_on(.) (操作员在控制回路上) 转为 polit\_in(.) (操作员在控制回路内) 状态,决策指令由 polit\_handle(.) (操作员手动输

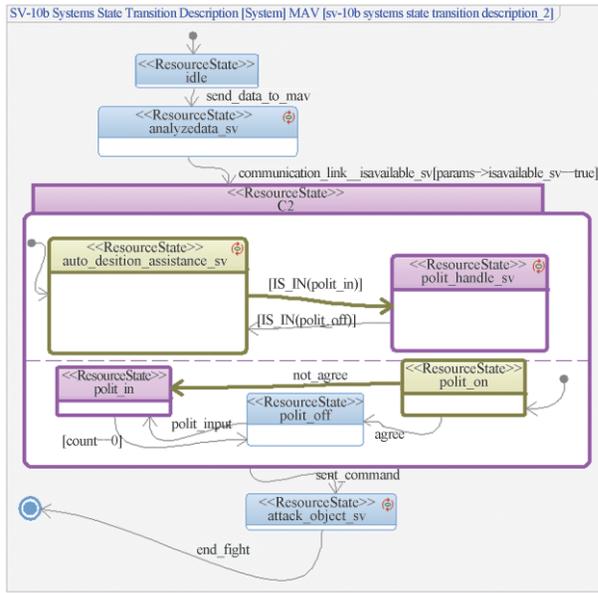


图 10 操作员在线-有人机状态图

Fig. 10 People in the loop—status diagram of manned aerial vehicle

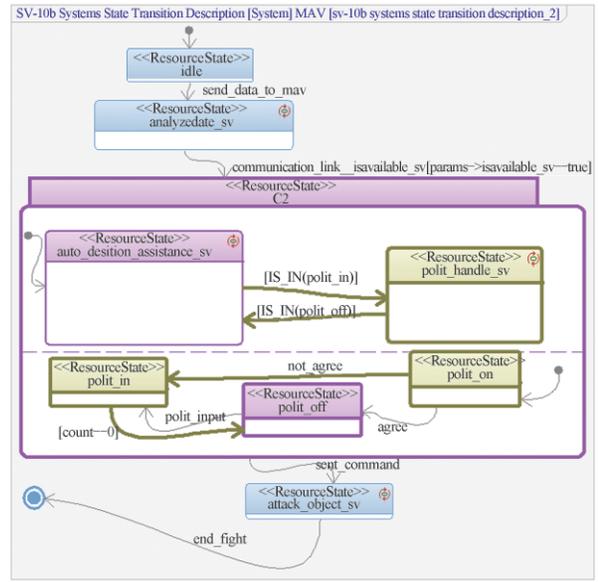


图 12 操作员输入超时-有人机状态图

Fig. 12 People off the loop—status diagram of manned aerial vehicle

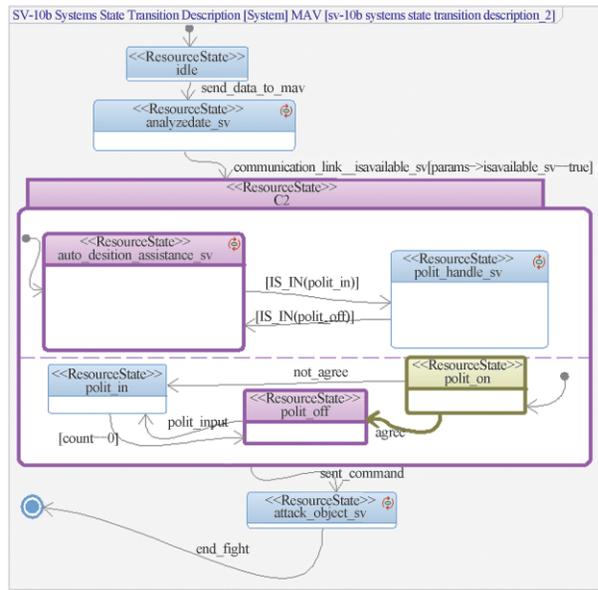


图 11 操作员采纳建议-有人机状态图

Fig. 11 People on the loop—status diagram of manned aerial vehicle

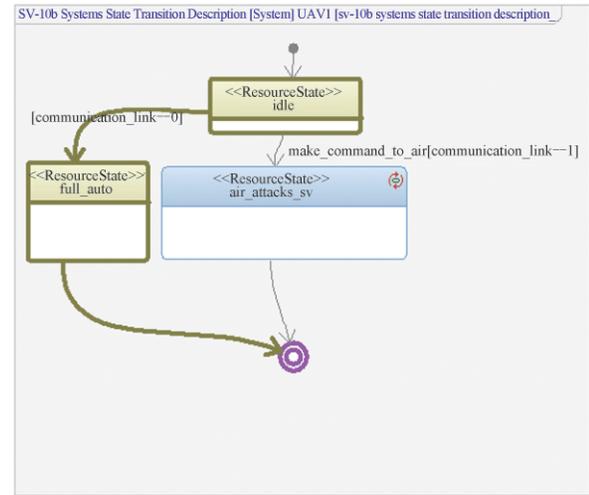


图 13 通信链路断-无人机状态图

Fig. 13 Communication link unnormal—status diagram of unmanned aerial vehicle

入)实现。

当操作员在控制回路上,但采用了有人机机载决策系统的建议方案,有人机状态图如图 11 所示。操作员触发 agree 事件,操作员状态由 polit\_on(.) (操作员在控制回路上)转为 polit\_off(.) (操作员在控制回路外),直接发送由有人机机载决策系统提

供的指挥命令。

当操作员在控制回路上,但由于操作员状态不佳等问题导致输入指令超时,则操作员状态由 polit\_in(.) (操作员在控制回路内)转至 polit\_off(.) (操作员在控制回路外),状态图如图 12 所示。此时,决策指令仍由 auto\_desition\_assistance(.) (有人机机载决策系统)提供。

在有人机/无人机通信链路不可用状态下,无

人机状态图如图13所示。有人机无法发送决策指令,无人机直接转入full\_auto(.) (全自主控制模式) 状态。

## 5 结 论

本文针对有人机/无人机编队协同作战决策系统中三种典型的决策结构,探讨了三种决策结构对有人机和无人机功能分配的影响和对不同任务需求的适应性。提出的三模认知自动化决策架构将三种决策结构集成到一个统一的架构下,架构中作为决策系统的组件有操作员、有人机机载智能决策系统和无人机机载智能决策系统,其中有人机机载智能决策系统和无人机机载智能决策系统可提供任务管理的冗余功能,以提高整体决策系统的鲁棒性和决策能力。仿真实验中,针对有人机操作员负荷、无人机与有人机通信链路状态和无人机自主等级等因素影响,验证了决策指令获取的逻辑,结果表明,面向不同任务需求或处于不同系统状态时,无人机都有效适应并执行任务。

## 参 考 文 献

- [1] 牛轶峰,肖湘江,柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析[J]. 国防科技, 2013, 34(5): 37-43.
- [2] United States Air Force. RPA (Remotely Piloted Aircraft) Vector: Vision and Enabling Concepts 2013-2038 [R]. USA: United States Air Force, February 17 2014.
- [3] 牛轶峰,沈林成,李杰,等. 无人/有人机协同控制关键问题[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 538-554.
- [4] SHAW J. System of systems integration technology and experimentation[EB/OL].[2019-11-25].<http://www.darpa.mil/program/system-of-systems-integration-technology-and-experimentation>.
- [5] 李东兵,申超,蒋琪. SoSITE等项目推动美军分布式作战体系建设和发展[J]. 飞航导弹, 2016(9): 65-70.
- [6] 王新尧,曹云峰,孙厚俊,等. 基于DoDAF的有人/无人机协同作战体系结构建模[J/OL].[2020-05-18]系统工程与电子技术. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20200518.1040.012.html>.
- [7] 钟赞,张杰勇,邓长来. 有人/无人机协同作战问题[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(4): 19-25.
- [8] Jun C, Qiu X J, Jia R, et al. Design method of organizational

structure for MAVs and UAVs heterogeneous team with adjustable autonomy [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 286-295.

- [9] Zhong Y, Yao P Y, Zhang J Y, et al. Formation and adjustment of manned/unmanned combat aerial vehicle cooperative engagement system [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4): 756-767.
- [10] Zhong Y, Yao P Y, Sun Y, et al. Cooperative task allocation method of MCAV/UCAV formation [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(2016): 1-9.
- [11] Meng Z, Li X, Lu C, et al. Collaborative forward-looking imaging and reconnaissance technology for Manned/Unmanned Aerial Vehicles [J]. Journal of Engineering. 2019, 19: 6117-6121.
- [12] Wohler M, Schulte A. On board assistant system for UAS integration into civil airspace [C]. AIAA Infotech@ Aerospace (I@A) Conference, Seattle, USA, 2013.
- [13] Taylor G S, Alicia T J, Turpin T, et al. Controlling multiple unmanned aircraft from a manned helicopter: the need for advanced autonomy and refined pilot-vehicle interface [J]. Proceedings of the Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting, 2017, 61(1): 78-82.
- [14] 曹文静. 多无人机协同体系结构研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [15] 占国熊. 基于MBSE的武器装备体系建模与分析方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.

## 作者简介:



王新尧(1992-),女,博士研究生,主要研究方向为复杂系统体系结构建模、多武器平台任务规划。



孙厚俊(1979-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为控制工程、火力控制。



王朝阳(1993-),男,博士研究生,主要研究方向为基于机器视觉和深度学习的无人机智能控制、复杂系统体系结构数字化。



曹云峰(1964-),男,博士,教授,主要研究方向为无人机飞行控制、智能无人系统、基于MBSE的系统工程。

[引用格式] 谭目来, 朱文强, 刘远飞. 基于机动动作库的UCAV逃逸机动决策[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 73-82.

# 基于机动动作库的UCAV逃逸机动决策

谭目来, 朱文强, 刘远飞

(空军工程大学航空工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 空战追击科目是空战BFM训练模拟器的重要项目, 以航炮作为机载武器且UCAV处于逃逸态势的情况下, 提出UCAV基于机动动作库逃逸机动决策的方法。首先分析了基本机动动作库, 额外提出了五种机动动作并给出控制率; 其次建立态势函数用以计算空战态势, 采用滚动时域优化策略进行机动决策, 并提出求解框架和改进的基于航炮示迹线的终止条件判据; 最后进行了被敌方追击的典型态势下的空战仿真和验证, 仿真结果表明提出的逃逸决策方法能让UCAV在不同战场态势情况下快速实现机动动作选择, 有效地降低了被敌方击中概率, 提高UCAV生存能力。

**关键词:** 无人机; 机动动作库; 飞行跟踪控制; 态势函数; 逃逸机动决策; 滚动时域

**中图分类号:** V271.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2020)04-73-10

## UCAV Escape Maneuver Decision Based on Maneuver Library

TAN Mulai, ZHU Wenqiang, LIU Yuanfei

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The air combat pursuit subject is an important project of the air combat BFM training simulator. It analyzes the situation that the aircraft gun is used as the airborne weapon and the UCAV is in an escape situation, and the UCAV escape maneuver decision method based on the maneuver library is proposed. First, the basic maneuver library is analyzed, and five maneuvers are also proposed and the control rate is given; secondly, the situation function is established to calculate the air combat situation, and the rolling time domain optimization strategy is adopted to make the maneuver decision, and the solution framework and improved based The criterion for the termination condition of the artillery display trace; finally, the air combat in the typical situation of being pursued by the enemy was simulated and verified. The simulation results show that the proposed escape decision method can enable UCAV to quickly realize maneuver selection in different battlefield situations, effectively reduce the probability of being hit by the enemy and improve the survivability of UCAV.

**Key words:** UAV; Maneuver Library; Situation Function; Trajectory Tracking Control; Escape Maneuver Decision; Rolling Horizon Strategy

## 1 引言

当前在实时空战仿真中, 自主机动决策问题是模拟无人机对抗过程的核心内容。在自主决策算法设计中, 常用的方法有矩阵对策法、微分对策法、专家系统法、神经网络法和影响图法<sup>[1]</sup>。无论应用何种方法, 传统的做法均是在每一个仿真步长内对无人机当前所处态势进行判断, 选择下一步合适的

动作, 不断改变无人机的姿态, 目的是为了使无人机每一步的运动都达到相对最优的飞行轨迹<sup>[2]</sup>。当前基于机动动作库的无人战斗机(Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV)航迹仿真与可视化<sup>[3]</sup>已有不少相关文献, 但普遍只给出典型战术动作具有的几何形态、战术意义和适用条件, 而没有对动作进行定量的描述。文献[4]提出了含描述参数的

机动动作库,提出要以定量参数对机动动作进行刻画,以体现角度、速度、曲率等空间特性和起止、持续等时间特性,但每种动作的描述参数很少。针对这种情况,本文对基本机动动作库进行拓展,提出了六种机动动作并给出机动动作的控制律<sup>[5]</sup>进而进行仿真。

关于进一步采用机动动作库进行空战决策的文章很少,大部分只停留在机动动作库的航迹仿真与可视化层面。在王锐平等<sup>[6]</sup>的文章中,提出以基于机动动作库的空战专家系统快速选择机动动作,从而完成自主空战决策,但是建立的专家系统具体如何选择机动动作方面语焉不详,且未建立具体的数学模型,实际中可用性不强。本文针对这一问题,采用滚动时域优化策略<sup>[7]</sup>,以建立的机动动作库作为预测模型,预测机动试探后的态势信息,以态势最优选择机动动作,从而完成机动决策,提出具体的优化框架,可操作性比较强。

尽管在超视距空战<sup>[8]</sup>中以导弹作为武器,先发现先摧毁,通过机动摆脱几率较低,主要采用干扰弹<sup>[7]</sup>进行干扰,采用机动意义不大,但在近距离格斗中,航炮还是一种重要的作战手段,UCAV采取机动仍具有重要意义,因此本文采用航炮作为武器,并对航炮弹丸弹道进行解算。

而对于滚动时域优化终止条件问题,付昭旺等<sup>[9]</sup>将态势条件满足作为终止条件不太符合实际情况。本文以航炮作为机载武器,采用航炮示迹线与UCAV质心距离小于3 m作为优化终止条件,比较符合实际情况。

本文最终采取双机在攻击机以追踪法<sup>[10]</sup>进行追击的典型态势下空战进行仿真,得到双机的三维运动图像以及态势函数变化曲线。

## 2 无人机运动学与动力学模型

本文从无人机三自由度运动模型入手:(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,视地面坐标系为惯性坐标系;(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,建立无人机的运动学以及动力学模型<sup>[11]</sup>

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= v \cos \theta \cos \psi \\ \frac{dy}{dt} &= v \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} &= v \cos \theta \sin \psi \\ \frac{dv}{dt} &= g(n_x - \sin \theta) \\ \frac{d\theta}{dt} &= g(n_z \cos \gamma - \cos \theta) \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{gn_z \sin \gamma}{v \cos \theta}\end{aligned}\quad (1)$$

式中 $x, y, z, v, \gamma, \theta, \psi$ 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, $n_x, n_z$ 分别表示切向过载和法向过载。选取 $X = [x, y, z, v, \psi, \theta]$ 作为状态量, $U = [n_x, n_z, \gamma]$ 作为控制量。

基于过载和滚转角的模型以及基于迎角、推力和滚转角的UCAV三自由度模型都是常用模型。基于过载和滚转角的模型是一种间接控制模型,通过间接控制过载量来实现对UCAV的机动控制,模型相对简单容易实现,但是基于迎角、推力和滚转角的模型更加贴近真实,能够更加直观看出UCAV是如何进行控制的。本文采取的是基于过载和滚转角的模型,对两种三自由度模型的控制量进行转化:

根据油门位置 $\mu$ 、迎角 $\alpha$ 和切向过载 $n_x$ 、法向过载 $n_z$ 关系式:

$$\begin{aligned}n_x &= \frac{\mu P_{\max} \cos \alpha - X}{mg} \\ n_z &= \frac{\mu P_{\max} \sin \alpha + Y}{mg}\end{aligned}\quad (2)$$

以及阻力 $X$ 、升力 $Y$ 与速度 $v$ 和迎角 $\alpha$ 的关系式,联立方程组可以求得油门位置 $\mu$ 、迎角 $\alpha$ 以及阻力 $X$ 、升力 $Y$ 。

## 3 机动动作与仿真

机动动作可分为典型机动动作和基本机动动作,通过对三个控制量切向过载 $n_x$ 、法向过载 $n_z$ 和滚转角 $\gamma$ 的控制,即可生成相应的机动动作。在机动动作库建立后,根据态势信息由系统规划飞机机动战术,即可从机动动作库中选取合适的机动动作,按照机动动作库选取相应的控制参数,最后生

成相应的机动轨迹。

### 3.1 典型机动动作

典型机动动作<sup>[12]</sup>是空战中常用的动作集合,这种战术动作库早期设计的主要动作有16种:直线飞行、定常盘旋、将机头转向目标、下滑增速、俯冲、急拉起、半斤斗、半滚倒转、战斗转弯、跟踪瞄准、急规避转弯、急盘降、蛇形机动、筒滚、高速YO-YO、低速YO-YO。

以上动作库经过多年研究和发展后得到了扩充,从而设计和建立了现今较为流行的拥有25种动作的战术动作库,包含的动作有:直线飞行、定常盘旋、前置跟踪、俯冲增速、斜拉起、急拉起、纯跟踪、半斤斗、跃升半滚、高过载上滚、高过载下滚、规避转弯、急规避、增速转弯、蛇形机动、筒滚、急盘降、大坡度外转、回转、急上升转弯、下降急转、下滑倒转、半滚倒转、高速YO-YO、低速YO-YO。

由于相应机动动作的控制算法较为复杂,且每一种动作的控制量不具有普遍性,故在此不讨论典型机动动作的控制参数。

### 3.2 基本操纵动作库

这个动作库是由美国的研究人员根据空战中最常用最简单的机动方式提出来的,主要包括7种动作:最大加速、最大减速、最大过载爬升、最大过载俯冲、最大过载左转、最大过载右转、稳定飞行(一种各控制量不变的情况)。由于现实中飞机存在诸多限制,因此设置了最大过载,最大滚转角变化率等,更加贴近实际情况。

(1) 最大加速

控制参数为:

$$n_x = n_{x\max}; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma}; \gamma = 0$$

(2) 最大减速

控制参数为:

$$n_x = n_{x\min}; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma}; \gamma = 0$$

(3) 最大过载爬升

控制参数为:

$$n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma} + n_{\max}; \gamma = 0$$

仿真结果如图1所示。

(4) 最大过载俯冲

控制参数为:

$$n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma} - n_{\max}; \gamma = 0$$

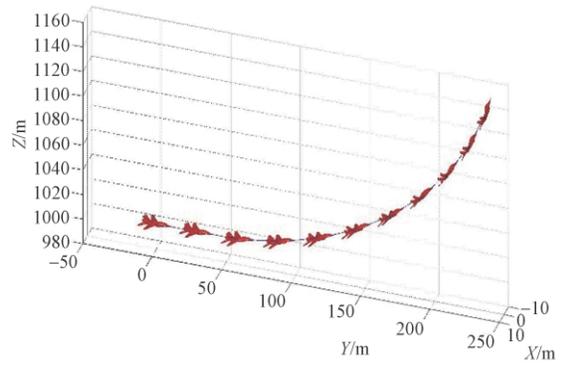


图1 最大过载爬升仿真图

Fig. 1 Simulation diagram of maximum overload climb

仿真结果如图2所示。

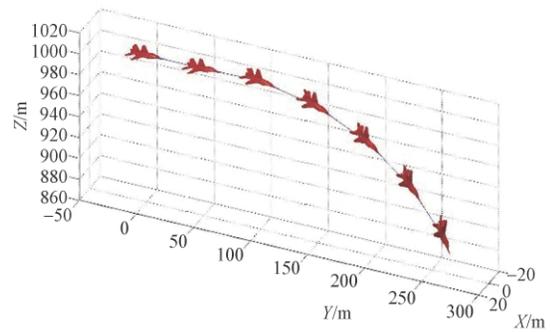


图2 最大过载俯冲仿真图

Fig. 2 Simulation diagram of maximum overload dive

(5) 最大过载右转

在典型条件下进行最大过载右转时,航迹倾斜角控制为0,只有航迹偏转角和滚转角变化,由于为最大过载右转,因此滚转角变化率需达到最大值,  $L(\gamma)_{\max}$  为滚转角变化率最大值。

控制参数为:  $n_x = \sin\theta; n_z = \frac{1}{\cos\gamma}; \frac{d\gamma}{dt} = L(\gamma)_{\max}$

仿真结果如图3所示。

(6) 最大过载左转

控制参数为:

$$n_x = \sin\theta; n_z = \frac{1}{\cos\gamma}; \frac{d\gamma}{dt} = -L(\gamma)_{\max}$$

仿真结果如图4所示。

(7) 保持稳定飞行

控制参数为:  $n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma}; \gamma = 0$

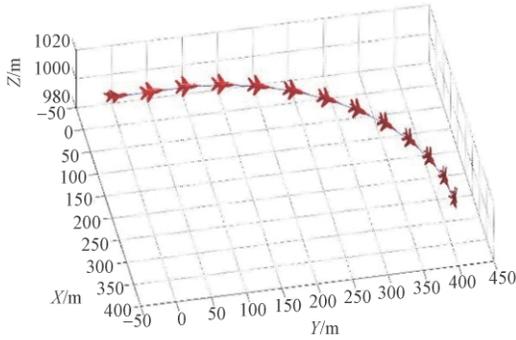


图3 最大过载右转仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of maximum overload right turn

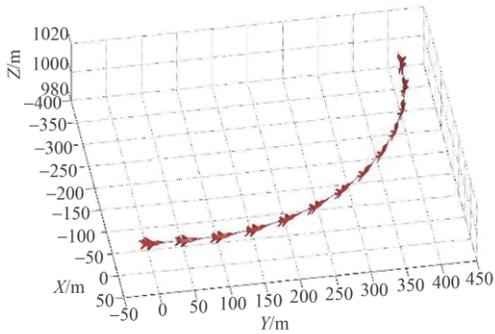


图4 最大过载左转仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of maximum overload left turn

### 3.3 基本操纵动作库拓展

在这七种基本操纵动作的基础上,本文另外提出了五种机动动作:

#### (1) 半滚倒转

飞机初始时刻为平飞状态,之后以纵轴为中心滚转 $180^\circ$ ,然后执行向下的半斤斗动作,在铅垂面内以横轴为中心使俯仰角的变化为 $180^\circ$ ,最终以平飞结束动作。 $n_2$ 取过载允许范围内的值, $L(\gamma)$ 为滚转角变化率允许范围内的值。全程需控制 $\frac{d\psi}{dt} = 0$ 。

控制参数为:

$$\text{初始段: } n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma}; \frac{d\gamma}{dt} = L(\gamma)$$

当完成滚转 $180^\circ$ 后即 $\gamma \geq \pi$

$$n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma} + n_2; \frac{d\gamma}{dt} = 0$$

当完成半斤斗动作后即 $\theta \leq -\pi$

$$n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma}; \frac{d\gamma}{dt} = 0$$

仿真结果如图5所示。

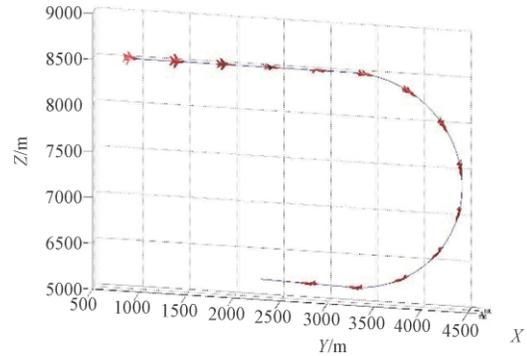


图5 半滚倒转仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of half-roll and reverse

#### (2) 加速盘旋上升

加速盘旋上升是既能获得高度优势又能获得速度优势的一种机动方式,相对机动动作比较简单。 $n_1, n_2$ 为过载允许范围内的值,滚转角变化率取最大值。

$$\text{控制参数为: } n_x = \sin\theta + n_1; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma} + n_2;$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = L(\gamma)_{\max}$$

仿真结果如图6所示。

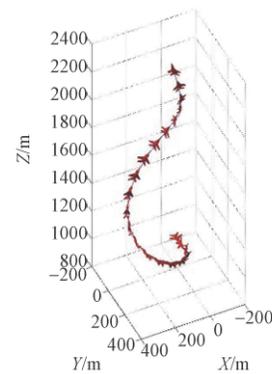


图6 加速盘旋上升仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of accelerated circling ascent

#### (3) 加速盘旋下降

加速盘旋下降是一种牺牲高度优势来换取速度优势的机动方式,常用于躲避敌方发射的导弹或火箭弹等武器。 $n_1, n_2$ 为过载允许范围内的值,滚

转角变化率取最大值。

$$\text{控制参数为: } n_x = \sin\theta + n_1; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma} - n_2;$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = L(\gamma)_{\max}$$

仿真结果如图 7 所示。

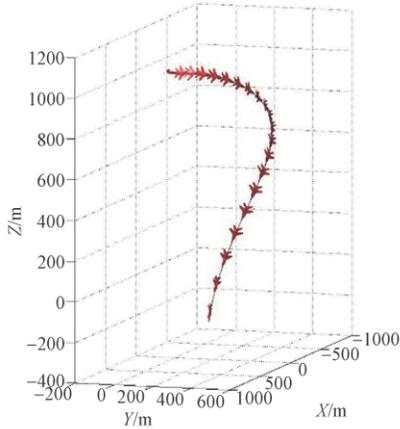


图 7 加速盘旋下降仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of acceleration, hovering and descending

(4) S型机动

S型机动是一种机动轨迹呈S形的机动动作, 从而称为是S型机动,其垂直高度不改变,在水平面内进行机动。如图 8 为两个弧形大小一致的,理想状态下的S型机动,实际中两个弧形大小往往不一致。经过对该动作进行分析,滚转角取常用值  $\pi/4$ 。

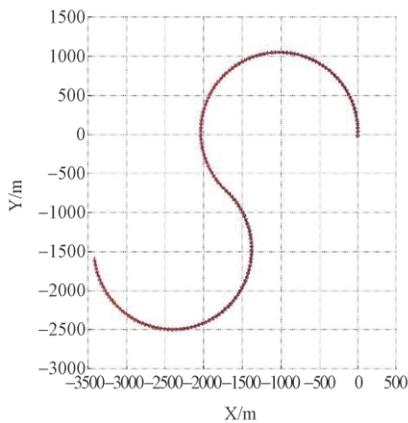


图 8 S型机动仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of S-type maneuvering

控制参数为:if  $0 \leq t \leq 20$

$$n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma}; \gamma = -\pi/4$$

if  $20 < t \leq 40$

$$n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma}; \gamma = \pi/4$$

仿真结果如图 8 所示。

(5) 高速 YO - YO

“高速摇摇”机动是在UCAV以高速接近目标时,由于错失了武器发射机会且距离较近,为避免“冲前”敌机而采取的一个战术动作。“高速摇摇”机动首先进行的是一个爬升动作,即通过爬升高度将动能转化为高度势能且避免超前敌机,既保存了能量也保持了方位优势。在爬升到一定高度后,UCAV进行俯视观察以寻找俯冲攻击的机会;在满足一定的态势条件下,UCAV进行俯冲机动并最终形成尾后攻击态势。“高速摇摇”机动以其灵活的机动特性和较高的战术意义,在空战中使用频繁。 $n_2$ 为过载允许范围内的值, $L(\gamma)$ 为滚转角变化率允许范围内的值。

$$\text{控制参数为: } n_x = \sin\theta; n_z = \frac{\cos\theta}{\cos\gamma} + n_2; \frac{d\gamma}{dt} =$$

$L(\gamma)$

仿真结果如图 9 所示。

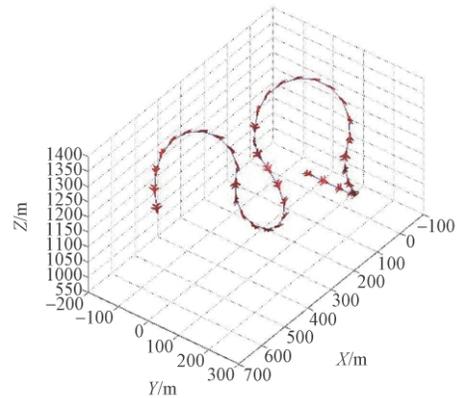


图 9 高速 YO-YO 仿真图

Fig. 9 Simulation diagram of high-speed YO-YO

4 态势函数建立

无人机进行机动的目的是在与敌机进行空战时,通过改变相对位置、速度和角度等,以获取空战优势或者改变不利态势,因此需要引入态势函

数<sup>[13]</sup>,通过计算所得的优势指标来评价机动的好坏,其表达式为:

$$S = S_o + S_r + S_e \quad (3)$$

其中, $S_o$ 、 $S_r$ 、 $S_e$ 分别为角度优势指标函数、距离优势指标函数和能量优势指标函数, $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ , $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 的大小代表权重系数。由于在不同情况下不同指标的重要性不同,在以航炮为武器的近距空战中,角度优势指标居主导地位,其次就是距离优势指标相对比较重要,最终才是能量优势指标。在更加贴近真实的空战态势评估中,需根据贝叶斯理论实时确定态势类型,根据变权理论动态调整指标权重。

#### 4.1 角度优势指标函数

在空战中,敌机和本机的相对角度是一个很重要的因素,如图10所示。

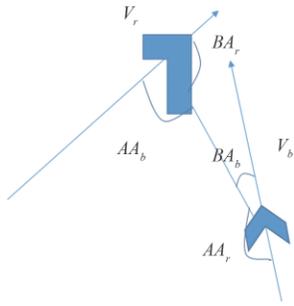


图10 相对角度示意图

Fig. 10 Schematic diagram of relative angle

图10中:上面的飞机代表敌机,下面的飞机代表本机,要使优势指标扩大需要做到两点:本机机头指向敌机和本机位于敌机尾部。则角度优势函数可以表示为:

$$S_o = \frac{2\pi - (BA_b + AA_b)}{2\pi} \quad (4)$$

$$AA_b + BA_r = AA_r + BA_b = \pi$$

式中, $BA_b$ 为敌机的目标方位角, $AA_b$ 为目标进入角。

#### 4.2 距离优势指标函数

在本机与敌机处于安全距离的条件下,要尽量使敌机处于本机的武器射程范围内。因此构建距离优势指标函数:

$$S_r = 1 - \left( \frac{a_1 - a_0}{R_c + a_1} \right)^2 c^{-(R_c - a_d)^2 / a_d^2}$$

$$R_c = |R| - R_s \quad (5)$$

式中, $R_c$ 为距离差值, $R$ 为本机与敌机的实际相对距离, $R_s$ 为本机与敌机需要保持的安全距离, $a_d$ 是理想中的 $R_c$ 值, $a_0$ 是距离优势指标函数在 $x$ 轴的截距, $a_1$ 表示函数 $S_r$ 的垂直渐近线, $a_e$ 控制函数在 $R_c > a_d$ 时进行衰减,以保持最优位置。

#### 4.3 能量优势指标函数

飞机的能量优势指标包括飞行速度和飞行高度两部分。当飞机爬升时,此时速度能量转换为高度能量,占据有利位置;从高处俯冲时,高度能量转换为速度能量,因此能量优势指标函数由速度优势和高度优势两部分组成:

$$E_f = H + \frac{v^2}{2g} \quad (f = 1, 2) \quad (6)$$

式中, $H$ 为飞机高度, $v$ 为飞机当前速度, $g$ 为重力加速度,1代表本机,2代表敌机。则能量优势指标函数为:

$$S_e = \left| \frac{E_1 - E_2}{E_1} \right| \quad (7)$$

### 5 逃逸机动决策方法

#### 5.1 滚动时域优化策略

19世纪70年代,滚动时域控制<sup>[9]</sup>的思想首次提出并应用于工业。滚动时域控制也称为模型预测控制,并在此基础上提出了滚动时域优化算法。将滚动优化算法应用于航迹规划,将全局规划时间分解为一系列小的连续时间窗口,并将全局优化问题转换为每个独立时域中的局部优化问题。在每一个优化时间窗口内,通过对UCAV下一步机动位置进行预测,由于第3部分建立的机动动作库可以用来进行“一步一判”,在优化时域窗口内进行机动决策选择动作,因此预测模型采用第3部分建立的机动动作库。在每次时间窗优化结束时和下一次优化窗优化开始时,算法建立的反馈机制都会根据当前情况修改优化的初始值,整个过程会随着时间窗的进行不断向前滚动。UCAV可以通过该算法实现航迹在线规划,由于每一个时间窗口内的优化时间很短,一步一优化,可以应对复杂空中战场的突发情形,航迹可以满足实时性需求。

#### 5.2 求解框架

$A_0$ 、 $T_0$ 是攻击机和UCAV的初始状态(不只有位置信息,还包括飞行状态在内的全部信息),在 $k$ 时刻,二者分别处于 $A_{(k)}$ 、 $T_{(k)}$ 状态。此时,UCAV根据

敌我信息做机动试探,在下一时刻可能选取 12 个机动动作中的某一个,这些不同的机动结束状态  $T_{(k+1)}^i$  使得攻击机对 UCAV 的相对态势也各不同。其中最大值为:

$$\max J = J(A_{(k)}, T_{(k+1)}^i) \quad i = 1, 2, \dots, 11 \quad (8)$$

式中,  $J$  表示 UCAV 相对攻击机状态的评价函数,从而得到使  $J$  取最大值时对应的机动编号为  $p$ , 得到最有利于 UCAV 逃逸的预测末状态为  $T_{(k+1)}^p$ 。

由于 UCAV 真实机动动作的选择与预测机动可能不同。从  $k$  到  $k+1$  时刻,从 UCAV 角度出发,实际得到的最优机动动作结束状态  $T_{(k+1)}$  可能与预测状态  $T_{(k+1)}^p$  不同,那么就需要对下一时间窗口的预测模型做一个校正,在下一优化时刻,UCAV 以自身的真实状态  $T_{(k+1)}$  作为机动预测起点。

### 5.2.1 机动决策模型

第 3 部分建立了基本操纵动作库作为 UCAV 运动动作来源。UCAV 选取机动动作的标准由式(8)确定。

此处假设目标极为看重角度模糊态势参数的取值,因为角度反映了逃脱与追踪两方面的信息。基于此,选取 UCAV 调用机动动作的评价函数为:

$$\max J_i^t = 0.6S_o^t + 0.3S_r^t + 0.1S_c^t \quad i = 1, 2, \dots, 13 \quad (9)$$

式中,  $i$  表示机动动作序列,上角标  $t$  表示参数与攻击机相关。

### 5.2.2 仿真终止条件判据

本文以航炮作为武器,并对航炮弹丸弹道<sup>[14]</sup>进行解算,由于 UCAV 为质点模型,所得到坐标为质心坐标,而真实情况下 UCAV 是存在一定空间大小的,而且弹丸速度远大于 UCAV 速度,因此只需对攻击机同一时间的弹丸弹道进行判断,若 UCAV 与弹道距离小于 2m,即可认为 UCAV 被击中,即可停止优化。

$$r(X, Y, Z; X_d^i, Y_d^i, Z_d^i) < 2 \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (10)$$

式中,  $(X, Y, Z)$  为当前时刻 UCAV 坐标,  $(X_d^i, Y_d^i, Z_d^i)$   $i = 1, 2, \dots, 10$  为航炮弹丸坐标向量。

每次滚动优化后对 UCAV 与弹丸弹道进行判断,满足上述条件即达到被击中状态即停止优化。

整个滚动时域预测控制流程见图 11。

首先需要初始化时域窗口,将全局规划时间分解为一系列小的连续时间窗口,将全局优化问题转换为每个独立时域中的局部优化问题。在每一个

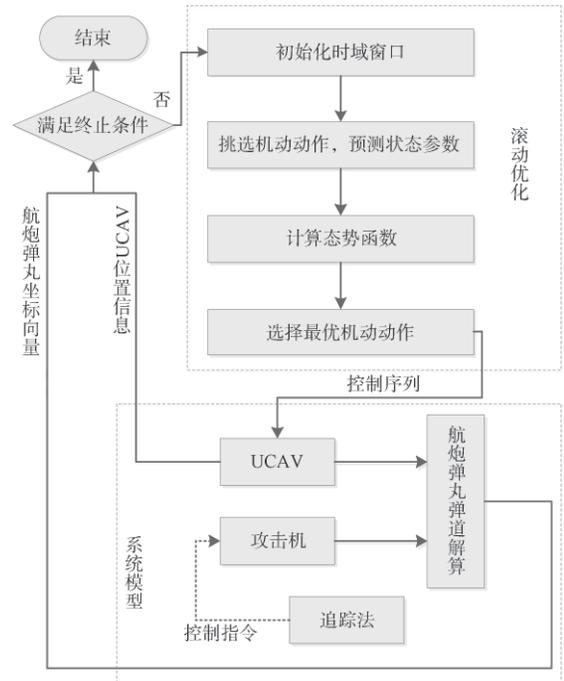


图 11 滚动时域预测控制流程

Fig. 11 Rolling time domain predictive control process

优化时间窗口内,根据敌我信息做机动试探,选取 12 个机动动作中的某一个,对 UCAV 下一步机动位置进行预测,计算每一个机动动作的机动位置的态势函数值,选取态势函数最大值所对应的机动动作,完成机动决策。追击机同时进行追击,对追击飞机的航炮示迹线进行计算,当 UCAV 位置与航炮示迹线满足仿真终止条件时,结束仿真;若不满足,则进入下一个时间窗口继续优化。

## 6 基于追踪法的双机格斗仿真

在 BFM 对抗的追击科目中,为提高航炮的命中率,追击机常采用追踪法的导引方法进行追击,据此,我们采取追击机采用追踪法的典型态势下进行仿真,以此验证提出的逃逸机动决策方法。

### 6.1 追踪法

追踪法,是指在攻击目标的导引过程中,飞机的速度矢量始终指向目标的一种导引方法。则有:

$$\begin{aligned} r &= [(X - X_T)^2 + (Y - Y_T)^2 + (Z - Z_T)^2]^{1/2} \\ \theta_T &= \arcsin\left(\frac{Z - Z_T}{r}\right) \\ \psi_T &= \arctan\left(\frac{Y - Y_T}{X - X_T}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $(X, Y, Z)$  为目标坐标,  $(X_T, Y_T, Z_T)$  为追击飞机坐标,  $\theta_T$  为追击飞机速度倾角,  $\psi_T$  为追击飞机速度偏角。

### 6.2 仿真示例

在逃逸飞机以建立的基本操纵动作库中的最大过载右转机动,UCAV 初始坐标为  $(1000, 1000, 8000)$ , 初始速度为  $280 \text{ m/s}$ ,  $\theta_{T0} = 0, \psi_{T0} = 0$ ; 以追踪法追击的敌机初始坐标为  $(0, 0, 8000)$ , 初始速度指向目标方向, 大小为  $300 \text{ m/s}$ , 空战仿真结果如图 12~16 所示。

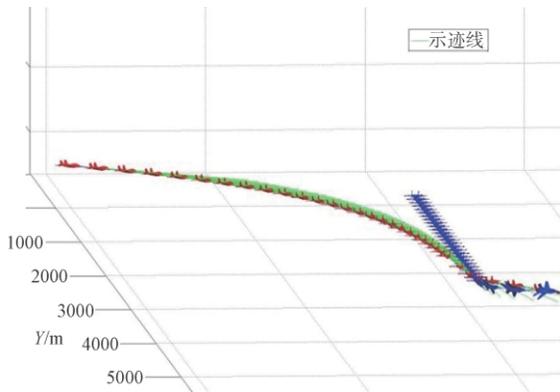


图 12 逃逸过程初始阶段  
Fig. 12 Escape process initial stage

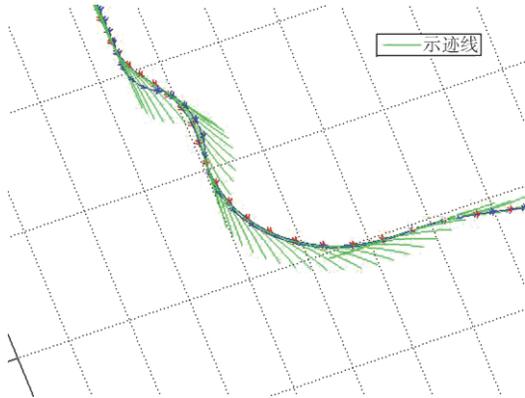


图 13 S形机动阶段局部放大图  
Fig. 13 Partial enlarged view of S-shaped maneuver

结果分析: 图 12~15 中蓝色代表我机, 红色代表敌机, 绿色为航炮弹丸示迹线。初始阶段, UCAV 与敌机距离较远, 尚未探测到敌机, 因此 UCAV 采取匀速直线运动, 而敌机采取追踪法接近; 在距离小于 500 米时, 根据提出的逃逸机动决策方法, UCAV 首先在建立的机动动作库中选择 S 形机动, 采用 S 形机动有利于避免敌机航炮构成发

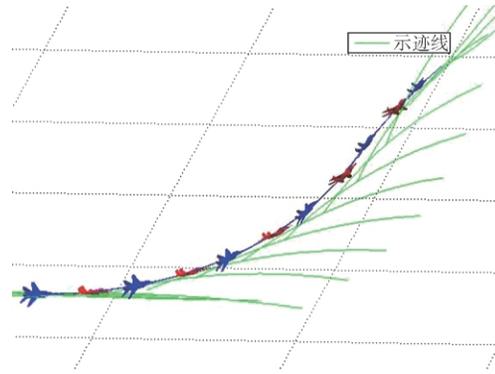


图 14 爬升机动阶段局部放大图  
Fig. 14 A partial enlarged view of the climbing maneuver stage

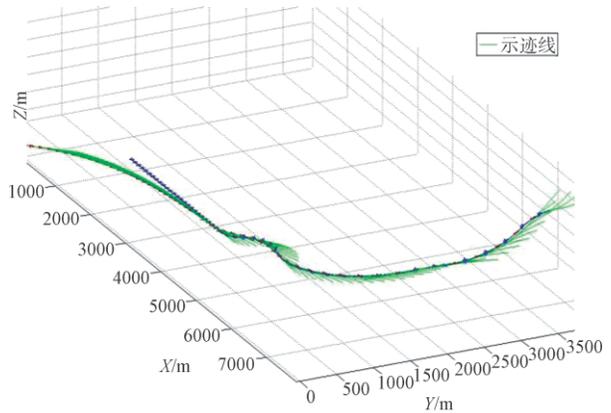


图 15 逃逸过程整体图像  
Fig. 15 Escape process overall image

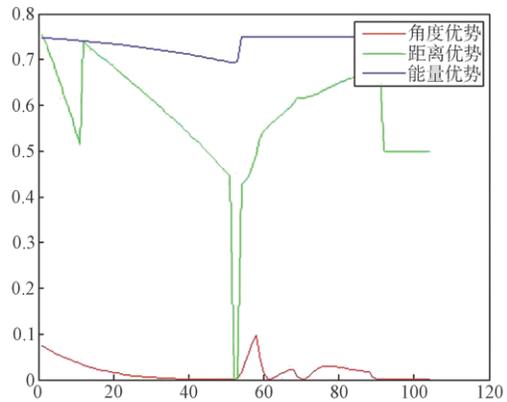


图 16 逃逸过程优势曲线图  
Fig. 16 Escape process advantage curve

射条件, 且由于敌机速度较大, 容易造成前冲态势, 之后 UCAV 即可获得占后优势; 在 S 形机动不能摆脱敌机后, UCAV 自主决策选择爬升机动, 作为逃逸策略, 爬升机动能够把速度优势转化为高

度优势,最终构成滚动优化终止条件,仿真结束。从优势曲线图中可以看出,由于开始UCAV不采取机动,因此三个优势指标都在下降,之后UCAV采取S形机动距离优势陡降,但角度优势上升,最终采取爬升机动,距离优势上升一段后下降。由于敌机采用追踪法,基本上处在我机尾部,因此UCAV的角度优势一直保持在一个很低的水平。

逃逸过程中,UCAV三个角度(滚转角、航迹偏转角、航迹倾角)变化曲线如图17所示。

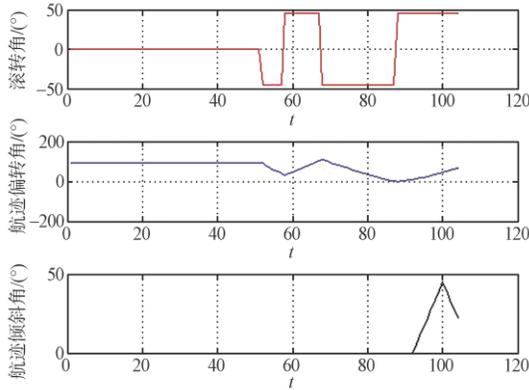


图 17 角度变化曲线  
Fig. 17 Angle change curve

UCAV的油门、迎角变化如图18所示。

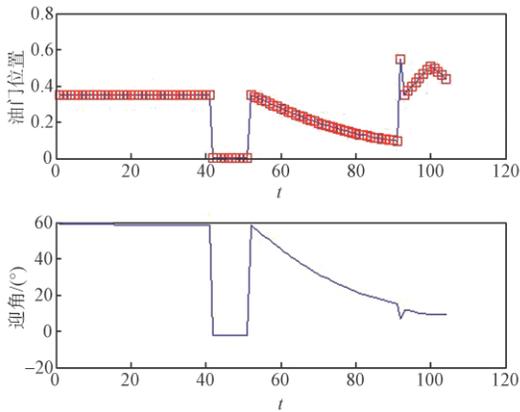


图 18 油门、迎角变化曲线  
Fig. 18 The change curve of throttle and angle of attack

UCAV所受的升力、阻力及推力变化曲线如图19所示。

UCAV运动的切向过载及法向过载变化如图20所示。

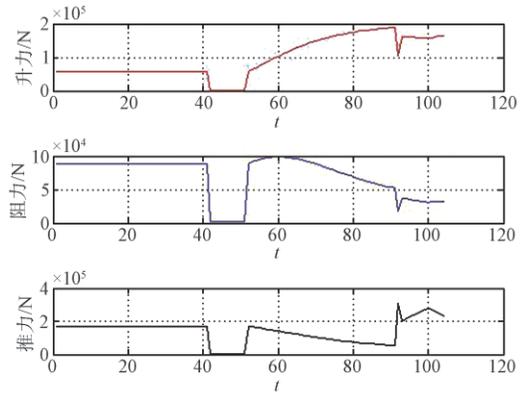


图 19 所受升力、阻力及推力曲线  
Fig. 19 Curves of lift, drag and thrust received

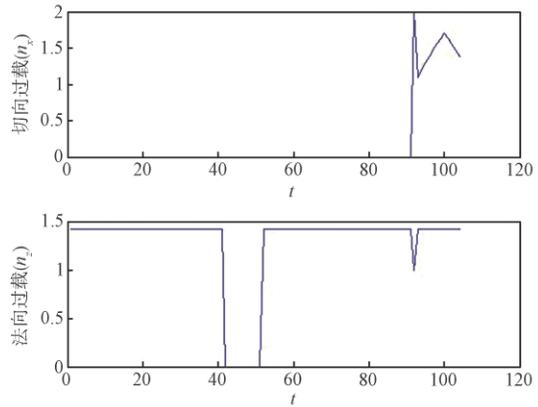


图 20 切向过载及法向过载变化曲线  
Fig. 20 Change curve of tangential overload and normal overload

## 7 结 论

根据空战训练模拟器BFM对抗中追击科目的需要,建立了以航炮为机载武器的、基于拓展的机动动作库的逃逸机动决策方法,同时改进了滚动优化终止条件。仿真结果表明,该方法能实现UCAV根据不同战场态势情况快速实现机动动作选择,完成逃逸,这为空战训练模拟器中虚拟对手的研发提供了思路,也可应用到空战自主决策系统中。但也存在不足,机动动作库所含动作太少,不能保证挑选的机动动作为最优机动动作,需要接下来继续加以拓展完善。

## 参 考 文 献

[ 1 ] 董彦非, 郭基联, 张恒喜. 空战机动决策方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2002(2): 75-78.

- [2] 孙楚, 赵辉, 王渊, 等. 基于强化学习的无人机自主机动决策方法[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(4): 142-149.
- [3] 焦连猛, 杨峰, 郭善鹏, 等. 基于机动动作库的飞机航路飞行仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(12): 73-76.
- [4] 钟友武, 柳嘉润, 杨凌宇, 等. 自主近距空战中机动动作库及其综合控制系统[J]. 航空学报, 2008(S1): 114-121.
- [5] 董肖杰, 余敏建, 宋帅. 空战机动动作库及控制算法设计研究[C]. 中国指挥与控制学会. 第五届中国指挥控制大会论文集, 北京, 中国, July 3 2017.
- [6] 王锐平, 高正红. 无人机空战仿真中基于机动动作库的决策模型[J]. 飞行力学, 2009, 27(6): 72-75.
- [7] 王文彬, 秦小林, 张力戈, 等. 基于滚动时域的无人机动态航迹规划[J]. 智能系统学报, 2018, 13(4): 524-533.
- [8] 石文斌, 管秀清. 超视距空战: 日趋重要的空战样式[J]. 现代军事, 2001(4): 46-47.
- [9] 付昭旺, 李战武, 强晓明, 等. 基于滚动时域控制的战斗机空战机动决策[J]. 电光与控制, 2013, 20(3): 20-24.
- [10] 孙浩轩. 追踪导引法的 MATLAB 仿真实现[J]. 科技传播, 2018, 10(1): 141-143.
- [11] 王嘉. 几种典型机动动作的自动飞行仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [12] 张小龙. 空战仿真模型的研究与开发[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [13] 黄长强, 赵克新, 韩邦杰, 等. 一种近似动态规划的无人机机动决策方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(10): 2447-2452.
- [14] 黄吉传, 刘占辰, 房振生. 高速旋转弹丸外弹道仿真研究[J]. 微计算机信息, 2008(16): 227-229.

## 作者简介:



谭目来(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机作战系统与技术。



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。



刘远飞(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航空电子与飞行控制。

[引用格式] 李磊. 国外典型有人机/无人机协同作战项目发展分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 83-90.

# 国外典型有人机/无人机协同作战项目发展分析

李磊

(北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074)

**摘要:** 2020年5月波音澳大利亚公司推出首架空中力量编组系统(ATS)无人机, 将与有人战斗机编组协同作战, 距离自主僚机的实现更进一步。首先, 阐述有人机/无人机协同作战基本概念, 总结归纳有人机/无人机协同作战能实现的潜在作战任务; 其次, 系统梳理国外有人机/无人机协同作战的研究情况, 重点对美国、澳大利亚、俄罗斯典型忠诚僚机发展及相关技术支撑项目如空战演进、空中博格等开展系统分析研究; 最后, 分析国外有人机/无人机协同作战发展得出三点认识: 各国正推进无人机作为僚机的实战化应用、有人机/无人机协同作战正被探索用于空对空作战、有人机/无人机协同作战技术聚焦于自主性低成本和可扩展性。相关研究为我国未来有人机/无人机协同作战相关发展提供参考。

**关键词:** 忠诚僚机; 有人机/无人机协同作战; XQ-58A女武神; 空中力量编组系统; S-70猎人; 空战演进; 空中博格

中图分类号: U674.941

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2020)04-83-08

## Development Analysis of Typical Manned/Unmanned Aerial Vehicle Collaborative Operations Projects Abroad

LI Lei

(Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** On May 2020 Boeing Australia launched the first Airpower Teaming System (ATS) that will coordinated operations with manned vehicle. It is a step closer to the realization of autonomous wingmen. Firstly, the basic concept of manned/unmanned aerial vehicle cooperative operations was described, and the potential operational missions that can be realized by manned/unmanned aerial vehicle cooperative operations were summarized. Secondly, the development of manned/unmanned aerial vehicle collaborative operations in foreign countries were systematically carried out systematic analysis and research, focusing on the typical loyal wingman in USA, Australia and Canada, and related technical support projects such as the Air Combat Evolution project, the skyborg project, etc. Finally, three understandings were obtained. First, the practical application of UAV as a wingman were promoting; second, manned-unmanned collaborative operations was being explored for air-to-air combat; third, manned-unmanned collaborative operations technology focused on autonomy, low-cost and scalability. Relevant research provided reference for the development of manned-unmanned collaborative operations in China in the future.

**Key words:** Loyal Wingman; Manned/Unmanned Collaborative Operations; XQ-58A Valkyrie; Airpower Teaming System; S-70 Hunter; Air Combat Evolution; Skyborg

### 1 引言

2020年5月5日,波音澳大利亚公司推出了首架空中力量编组系统(ATS)无人机,距离实际部署

与有人机协同作战的自主忠诚僚机更近了一步。近年来,随着自主技术、信息处理能力的发展,国外军事强国高度重视有人机/无人机协同作战技术的发展,期望短期内通过无人机与有人机的协同作

战,解决有人机短板问题,具备低成本的颠覆性的作战能力。

## 2 有人机/无人机协同作战概述

### 2.1 概念的形成

有人机/无人机协同作战概念源自长机和僚机的协同作战。长机负责率领僚机执行任务;僚机负责保持编队规定的位置,观察空中情况,执行长机命令。历史上曾出现一长三僚(一架长机三架僚机)、一长两僚、一长一僚,以及六机环编队互为僚机。无人机技术的发展推进其作为僚机作战的发展,从而促进了有人机/无人机协同作战。

有人机/无人机协同作战是指有人机与无人机组成编队,协同完成作战任务,具体为:有人机发挥指控作用,可以远距探测;无人机发挥侦察、攻击、护航等作用,具备良好的隐身性、自主性且能携带制导武器;无人机位于有人机的监视范围内;在一定的通信条件下,有人机和无人机通过协同完成态势感知、战术决策、武器打击等作战任务<sup>[1]</sup>。

### 2.2 可执行作战任务

有人机/无人机协同作战,主要能完成的作战任务包括情报监视侦察(ISR)防御、使用延长杀伤链执行空对地打击以及防区外空对空交战等<sup>[2]</sup>。所有任务的执行,都需要自主技术的支撑。

有人机/无人机协同执行情报监视侦察任务时,需利用自主技术在任务前访问大量地形与目标数据,进而训练自主系统,以达到相关的任务传感器能快速识别优先对象的目的。基地防御场景中的无人机,可利用先进的态势感知能力,认知其物理环境。敌方飞机来袭时,可预测敌方飞行路径,并识别出口路线。无人机及与其协同的有人机将实时跟踪敌方飞机,提供敌方进入时的清晰图像。

有人机/无人机协同执行空对地打击任务时,自主技术支撑无人机识别特定目标并加以打击。具体功能包括侦察识别目标,并对优先目标排序,有人机决定使用精打武器打击目标。为了降低复杂性,有人机/无人机协同任务集中于打击固定目标。这会将更强大的有人机解放出来打击更动态的目标。无人机还可收集有价值的态势数据并将其融入有人机/无人机编队的总体态势感知中,或执行用激光指定目标引导精确弹药打击的功能。

有人机/无人机协同执行空对空任务时,有人机/无人机组编队,能在空域部署大量传感器,极大的提高了态势感知水平。有人机与无人机的混合编队将携带大量导弹,当敌方飞机飞进无人机打击区域时,有人机作为指控节点,可利用有效的打击方式,把握打击时机。无人机可在编队前方飞行,有人机则在编队尾部飞行,这将使有人机飞行员能扮演四分卫的角色,多架飞机可提供多个打击选项,齐射攻击敌方飞机。

## 3 国外典型忠诚僚机的发展

随着无人机和自主技术的不断发展,美国、俄罗斯、澳大利亚推进有人机/无人机协同作战中无人僚机的不断发展<sup>[3]</sup>。

### 3.1 美国忠诚僚机

美国XQ-58A女武神是美国忠诚僚机的典型代表,是美国克瑞托斯防务公司(Kratos)与美国空军研究实验室合作开发的一款高亚声速、远距离攻击的无人机。该机主要用于监视、侦察和远程作战,可提高作战灵活性和实用性。作战中,该机主要作为有人机的无人护航或僚机发挥作用<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.1 发展历程

XQ-58A女武神无人机是在空军研究实验室低成本可消耗飞机技术(LCAAT)项目中低成本可消耗攻击演示样机(LCASD)方案下研制的。该项目旨在通过开发卓越的设计工具和采用商业制造工艺,缩短生产时间和降低成本,从而快速设计和制造无人机。

克瑞托斯防务公司于2016年7月获得空军研究所实验室授予的4080万美元的合同,用于开发低成本可损耗攻击无人机。该公司根据合同负责设计、开发和测试一款高速、长航时和低成本无人机。

XQ-58A无人机的飞行试验方案包括两个阶段的5次试飞计划。其目的是评估系统功能、空气动力性能以及发射和回收系统。截止目前,已完成四次:演示样机于2019年3月在尤马试验场完成首飞;2019年6月进行了第二次飞行试验;2019年10月,XQ-58A在第三次试飞中,经过90分钟的飞行后在尤马试验场坠毁,水面风大和临时飞行试验回收系统故障被确认为事故的主要原因;XQ-58A的

第四次飞行试验于2020年1月完成,在60分钟的飞行中,该无人机展示了其在高空飞行的能力,它使用降落伞安全着陆,验证了第三次试飞后对气囊系统的设计修改。截至2020年1月,XQ-58A无人机已累计飞行5个多小时,超过了飞行试验方案的原定目标。

### 3.1.2 性能特点

XQ-58A 隐身设计使其难以被探测,其采用了简洁的机身设计(如图1),梯形机身集成了后掠式主翼、V形尾翼及上方的进气口。该机利用商用现成的(COTS)组件,采用手动或预先编程的飞行控制系统,确保在执行任务时具有高度的机动性。该无人机长9.14m,翼展8.23m。该机的干重为1134kg,最大起飞重量(MTOW)为2700kg,最大可携带540kg的有效载荷。开放式的任务系统结构可根据任务要求集成客户特定的有效载荷。内埋舱可挂载至少两枚GBU-39小直径炸弹,同时机翼挂点还可携带其他武器,如表1。



图1 XQ-58女武神(Valkyrie)无人机  
Fig. 1 XQ-58A Valkyrie UAV

XQ-58A由一台涡轮风扇发动机提供动力,其最大推力约为900kg。由于采用火箭辅助发射和降落伞回收系统,该机的起降不需要跑道设施。该机紧凑的尺寸和较少的后勤保障,保证其在偏远和受限地点的行动。该机的巡航速度为0.72Ma,可在15.24~13714m的高度上飞行,最大航程可达5556Km。

该机可与F-22或F-35组成编队协同作战,在有人机的指挥下实施侦察与打击任务,也可自组合形成无人机蜂群,实现自主察打一体任务<sup>[5]</sup>。

表1 XQ-58女武神(Valkyrie)无人机性能参数

Table 1 Performance parameters of XQ-58A Valkyrie UAV

性能	性能参数
机长	9.144m
翼展	8.23m
空载重量	1125kg
发动机类型	涡轮风扇发动机-900kg
最大起飞重量	2700kg
内部挂载能力	270kg
翼中挂载能力	270kg
巡航速度	72Ma
作战高度	15.24~13714m
指挥与控制	手动/预编程控制
最大飞行距离	约5556km(3000海里)

### 3.2 澳大利亚忠诚僚机

空中力量编组系统(ATS)无人机是由波音公司领导的澳大利亚工业团队合作开发的一款使用人工智能的新型无人机(如图2),可成为空军力量的“倍增器”,可执行从情报、侦察与监视(ISR)到战术预警等任务,是澳大利亚首架军用无人机。<sup>[6]</sup>



图2 空中力量编组系统(ATS)无人机  
Fig. 2 Airpower Teaming System UAV

#### 3.2.1 发展历程

在澳大利亚空军忠诚僚机先期开发项目的支持下,2019年2月,波音澳大利亚公司启动发展了空中力量编组系统忠诚僚机。该机是波音公司在美国本土以外研制的第一款全新设计的无人机,也是澳大利亚50年以来设计制造的第一架军用无人机。空中力量编组系统无人机可与多款战机协同作战,如E-7A预警机、EA-18G电子战飞机、F/A-18E/F和F-15E等。波音公司于2019年底验证了空中力量编组系统无人机的通信能力。2020年4月,

由波音公司领导的澳大利亚工业团队向澳大利亚皇家空军提交了第一架空中力量编组系统无人机。该机是忠诚僚机先期开发项目中首批三架原型机的第一架,计划2020年将开展首飞验证,之后计划开展无人-无人和有人-无人编组飞行训练试验,并最终开展作战演示验证。澳大利亚政府迄今已经为忠诚僚机投入了2571万美元,超过35家澳大利亚工业企业在澳大利亚四个州支持原型机的建造工作<sup>[7]</sup>。

该无人机的设计目的是利用人工智能为载人和无人系统提供协作能力,是50多年来澳大利亚设计和制造的第一架飞机,也是波音公司在美国境外最大的一笔无人驾驶飞机投资。飞机被设计使用一个数字双模来模拟它的结构、系统、能力和全生命周期要求,采用波音有史以来最大的树脂注入单一复合材料片,并使用先进的制造工艺进行组装。

### 3.2.2 性能特点

在有人和无人协同作战任务中,空中力量编组系统无人机具备颠覆性优势。它将提供战斗机般的性能,长11.7m,能够飞行3700km。机上集成多种传感器,支持情报、监视和侦察、战术预警任务等。

空中力量编组系统无人机旨在为全球国防客户提供转型能力,是该公司在美国以外的新无人机项目上的最大投资。这款无人机可以根据各国的具体需求进行任务安排。波音公司的澳大利亚团队开发了一款全新的无人机生产系统,澳大利亚供应商也参与其中,利用了先进制造、数字化生产和增强现实等技术。

波音公司公布的视频中,给出了ATS特殊设计说明,可根据作战任务灵活更换机头,即将飞机机头拆下,换装不同配置的机头(如图3)。机头有4种设计,可能包括雷达、雷达与光电设备、光电设备,以及燃油箱等,对应的任务为对空、对地、侦察以及空中加油等。

### 3.3 俄罗斯忠诚僚机

2019年俄罗斯通过视频公布S-70猎人隐形攻击无人机首次试飞,并指出该无人机设计的目的是与苏-57战斗机协同执行作战任务。可以推断,S-70猎人为俄罗斯版本的忠诚僚机。



图3 空中力量编组系统无人机更换机头示意图

Fig. 3 Schematic diagram of replacing handpiece for Airpower Teaming System UAV

S-70猎人无人机(如图4)在2012年由俄罗斯苏霍伊公司开始研制,2018年6月完成首次地面滑行试验。该机AL-31/41系列涡扇喷气发动机,最大起飞重量约25t,最大飞行时速可达1400km,最大航程约为5000km<sup>[8]</sup>。该机机体大量采用复合材料和隐形涂层,且具有飞翼式布局和内置弹舱,具有很强的隐身突防能力。除具有很好的机动能力外,该机具备一定独立自主能力。目前,它已具备自主起飞并返回机场的能力。<sup>[9]</sup>



图4 S-70猎人无人机

Fig. 4 S-70 hunter UAV

## 4 国外支撑忠诚僚机关键技术项目分析

自主技术是支撑忠诚僚机用于实战的关键。目前,美国重点推进的两项技术包括空战演变项目和空中博格项目。

### 4.1 空战演变项目

空战演变(ACE)项目(如图5),是由美国国防预先研究计划局(DARPA)战略技术办公室(STO)2019年5月启动,旨在发展空中近距离格斗(俗称

狗斗)的自主能力,提高作战人员对自主化作战的信任(如表2)。该项目是实现人机协同的具体切入点,支撑马赛克战的能力实现<sup>[10-11]</sup>。

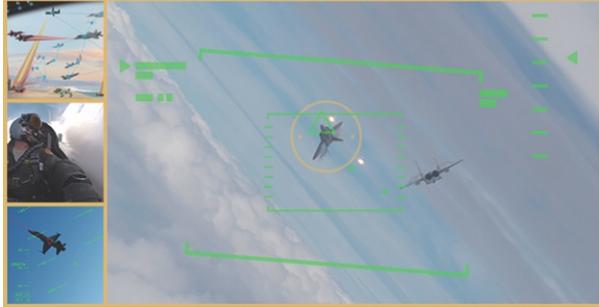


图5 空战演变项目示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Air Combat Evaluation

表2 空战演变项目的基本信息

Table 2 Basic Information of Air Combat Evaluation

项目条目	内容
项目名称	空战演变
起始时间	2019年5月6日
结束时间	2023年
资助机构	美国 DARPA 战略技术办公室(STO)
管理机构	美国 DARPA 战略技术办公室(STO)
承研单位	Dynetics 公司
负责人	丹·贾沃斯克(Dan Javorsek)
经费投入	6360 万美元

#### 4.1.1 研究内容

空战演变项目把人机协同近距离格斗自主能力的实现作为攻克重点,同时提高作战人员对自主作战系统的信任。将在逐步真实的试验环境中使用现有 AI 技术进行近距离格斗;还将采用各种方法评估、校正、提高和预测人类对自主作战系统的信任程度;最后,该项目将在更复杂、具有多种飞行器,且能获得实时数据的作战级模拟场景中进行自主近距离格斗试验,以为未来的战役级现场马赛克作战演习奠定基础<sup>[12]</sup>。

该项目将从四个技术领域开展研究<sup>[13]</sup>。

(1)研发用于局部行为(个体和编队战术行为)的自主作战系统(构建近距离空战算法),开发和验证视距内个体和编队控制算法,其动态机动结果可测量人类飞行员对其信任程度。该领域前期通过阿尔法狗斗试验(AlphaDogfight Trial)竞赛,激发并扩大 AI 开发人员和潜在提案者的基础能力。

(2)设计实验方法,用于模拟和测量飞行员对空战格斗中的自主作战系统的信任(测量信任度)。具体包括三个方面:设计方法,用于建模衡量作战人员对自主作战算法的信任;设计和开发人机界面,用于双作战任务模式的执行和管理;构建模型,用于双任务模式下信任度的衡量。

(3)在全局行为中使用并信任自主系统(扩大至马赛克战应用范围)。具体包括四个方面:开发用于大型部队演习数据分析的数据集和模型;构建双作战任务中的任务指挥官场景;在大型部队演习中应用局部自主作战系统并进行数据分析;量化局部行为和全局行为性能标准之间的关系。

(4)建设具有作战代表性的全尺寸飞行器实验基础设施(提供全尺寸飞行器演示)。主要包括五个方面:提供全尺寸飞机并整合近距离格斗算法;为全尺寸飞行器开发和整合人机界面;保留安全驾驶员优先控制权和/或断开自动驾驶连接以进行信任评估;执行所有安全/适航审查并获得受监督的近距离格斗现场的适航认证;进行全尺寸飞行器飞行试验。

此外,项目整合团队将构建仿真架构,整合自主算法,同时对项目评估提供支持。

#### 4.1.2 研究进度

项目分三个阶段,共持续五年。第一阶段(18个月)的重点是在模拟和仿真环境中开发和验证关键能力。第二阶段(16个月)和第三阶段(16个月)将分别在小型飞行器和全尺寸飞行器中进行相同任务。

2019年5月6日首次发布举办提议日通知。2019年5月17日举办工业提议日。2019年6月5日发布技术领域2、3、4的跨部门公告。2019年6月28日发布阿尔法格斗试验竞赛公告<sup>[14]</sup>。2019年7月11日发布跨部门公告相关问题。2019年10月21日 DARPA 通过其官网发布公告,DARPA 宣布选定八支队伍参加其组织的阿尔法狗斗试验(AlphaDogfight Trial)竞赛。2019年10月,自主研究协作网络(ARCNet)选出八个团队于2019年11月到2020年3月开发和展示其“狗斗”。2020年5月6日,授予 Dynetics 公司价值 1230 万美元的合同,用于完成第一阶段工作,即技术领域3的相关工作,在全局行为中使用并信任自主系统(扩大至马赛克战应用范

围)。2020年6月,DARPA启动技术领域2的工作,委托 SoarTech 公司用于建立和测量对自主系统信任<sup>[15]</sup>。

#### 4.2 空中博格项目

空中博格(Skyborg)项目旨在发展一款模块化、类似战斗机的无人机(如图6),可快速更新复杂的自主能力,支持作战人员执行任务。美空军计划其原型机在2021年开展飞行测试,在2023年具备初始作战任务评估条件。该项目(见表3)是美空军首批“先锋计划”项目之一。所有的自主技术都可用于忠诚僚机。<sup>[16]</sup>



图6 Skyborg概念图

Fig. 6 Skyborg concept drawing

表3 空中博格项目基本情况

Table3 Basic information of Skyborg

项目条目	内容
名称	空中博格
起始时间	2018年10月
结束时间	2023年
资助机构	美国空军战略发展规划和实验办公室 (Air Force SDPE)
管理机构	美国空军战略发展规划和实验办公室 (Air Force SDPE)
研制单位	美空军研究实验室 加利福尼亚州爱德华兹空军基地第412测试部
负责人	本·特兰(Ben Tran)

##### 4.2.1 研究内容

美国空军建立能快速满足作战需求的Skyborg自主系统,可作为人工智能技术更新迭代的平台,在该平台上可进行人工智能技术的开发、原型设计、实验和部署。该项目旨在开发部署在无人机上

的技术,使无人机具备可消耗、自主、开放架构、弹性等特征,并可作为人工智能技术迭代升级的实验平台,可在该平台上实验简单的自主飞行算法以及复杂的任务级人工智能技术<sup>[17]</sup>。

Skyborg需要具备以下的特点,以满足未来作战需求:(1)可消耗性:需要低成本,以达到军事目的所需的损失率容忍度,需要设计成具有较高的寿命和较低的单程飞行故障概率,且被设计成可重复使用;(2)自主性:可根据外界、自身和当前态势的理解,在不同的作战行动中,能自主组合实现作战目标;(3)开放性:模块化的设计,易于第三方集成,避免技术过时、供应商特有技术以及单一供应/维护的风险;(4)弹性:具有一个或多个显著提高生存能力和/或战术能力的特征。

Skyborg需要具备以下能力:自主避障;自主起飞和返回;有效载荷(传感器)和机身可分离,允许模块化调整;可与下一代美国空军任务规划工具兼容并可集成。

##### 4.2.2 研究进展

2019年3月,Skyborg项目负责人本·特兰(Ben Tran)表示曾在SCO与罗伯一起在Avatar项目下工作,也就是Skyborg项目的第一代。2019年3月15日,美空军装备司令部战略发展规划与实验(SDPE)办公室正式发布Skyborg自主无人作战飞机项目能力信息征询书<sup>[18]</sup>。2019年5月,空军负责采购、技术和后勤的副部长威尔·罗珀(Will Roper)称,XQ-58A无人机将过渡到3月公布的Skyborg项目中,该无人机将配备新的传感器和有效载荷,并将与载人战斗机联网。2019年7月,Skyborg项目负责人本·特兰(Ben Tran)称,Skyborg团队正在与美国空军合作制定采购战略,人工智能自主无人机研究将在空军2021财年预算中占据一席之地。2019年7月,第412联队的新兴技术联合测试部队在加利福尼亚州爱德华兹空军基地对复杂环境自主测试(TACE)软件进行了一次飞行测试。测试目标是验证由约翰·霍普金斯大学应用物理实验室开发的自主安全网。TACE程序是空军研究实验室的Skyborg计划的一部分,该程序通过与诸如自主地面和空中防撞系统等程序一起对AFRL先前的工作进行了补充<sup>[19]</sup>。2019年10月15日,美空军研究实验室发布请求,寻求一个以软件为中心的系统设计

代理(SDA)的白皮书,该白皮书可以促进模块化、开放架构的方法。2019年11月21日,美空军装备司令部(AFMC)司令阿诺德·邦齐上将宣布,已选定空中博格(Skyborg)智能无人僚机、金色部落(Golden Horde)改造弹药蜂群和导航技术卫星3(NTS-3)三大项目作为其首批先锋(Vanguard)项目。空军SDPE希望原型机可以在2021财年进行飞行测试,在2023年底具备初始作战能力(EOC),并且该平台可用于军事任务评估。

## 5 对国外有人机/无人机协同作战发展的几点认识

### 5.1 各国积极推进无人机作为僚机的实战化应用

美国、澳大利亚、俄罗斯相继推出无人僚机型号,用途侧重各有不同,逐步推进有人机-无人机协同向实战化方向迈进。美国空军加快XQ-58A的试验验证及相关自主能力发展如空中博格项目,美国侧重两个方面:一是与F-22、F-35等高端有人战飞机协同,4~6架无人机作为僚机前出飞行,用于作战先期的“敲门”,有人机跟进打击;二是承担预警机、加油机、巡逻机等大型机的护航,主要在无人机上上加装相控阵雷达、红外载荷等加大战场态势感知能力。俄罗斯的忠诚僚机注重体系能力发展同时,强调多用途作战功能。苏-57是多用途五代机。与猎人无人机协同,构建了多用途战斗组合。

### 5.2 有人机/无人机协同作战探索用于空对空作战任务

DARPA于2019年启动发展的空战演进项目是将有人机/无人机协同作战用于空对空作战任务探索的典型代表,将近距离格斗作为突破口。但目前美国的XQ-58A女武神无人机和澳大利亚的空中力量编组系统无人机,从启动外形和采用的发动机来看,不利于近距离格斗。空对空的作战任务中,这两款无人机很可能充当有人机的导弹射手,但是其载弹量比较有限,俄罗斯的S-70猎人无人机更有可能。目前三款无人僚机可协同有人机开展侦察探测、电子战干扰或充当有人机的替身,利用其低成本优势吸引敌方的火力。此外,无人僚机若更好的用于空对空的作战任务,需要人工智能技术支撑,如空战演进项目和空中博格项目,这些人工智能技术的开发难度不亚于无人机本身。

### 5.3 有人机/无人机协同作战技术聚焦于自主性、低成本和功能扩展性

有人机/无人机协同作战快速形成作战能力的关键是自主技术的支撑。为此,美国借助空战演进空中博格项目,发展有人机/无人机协同作战的自主技术。空战演进项目中的技术领域1重点关注为单机和编队战术行动构建自主战斗能力。空中博格项目将开发自主系统的测试平台(Test Bed),促进自主技术的快速迭代。

美国的XQ-58A与澳大利亚的空中力量编组系统无人机都注重低成本和多功能。两款无人僚机都采用数字孪生技术,大幅度降低生产成本。XQ-58A作为F-22、F-35等战斗机和轰炸机的僚机,在不增加预算的情况下,极大的提高了整体战斗效能。空中力量编组系统无人机更换机体的设计,可快速改变其携带的载荷,执行ISR、电子战等多种不同的任务,其与不同的飞机能够协同如E-7、EA-18G、F/A-18E等,也体现了其作战能力的可扩展性。

## 6 结束语

有人机/无人机协同作战是未来智能化作战的关键现实切入点,将极大提高战场空间的感知能力、危险目标的攻击能力、电子战攻击能力等,支撑未来穿透性制空、马赛克作战概念愿景的形成。随着无人机技术、传感器技术、数据链技术、自主技术等不断发展,有人机/无人机协同作战能力将不断提升,能够执行的作战任务将不断得到扩展。后续,我们在研究过国外有人机/无人机协同作战技术的基础上,将利用对抗手段,系统对有人机/无人机在空对地打击、空对空作战中如何协同作战开展深入系统分析研究。

### 参考文献

- [1] 申超,李磊,吴洋,等.美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J].战术导弹技术,2018,39(1):16-21.
- [2] Birkey D, Deptula L G D, Stutzriem M G L. Manned-unmanned aircraft teaming: taking combat airpower to the next level [EB/OL]. 2018-07-15 [2020-05-01]. [http://docs.wixstatic.com/ugd/a2dd91\\_65dcf7607f144e729dfb1d873e1f0163.pdf](http://docs.wixstatic.com/ugd/a2dd91_65dcf7607f144e729dfb1d873e1f0163.pdf).
- [3] 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.
- [4] Air Force Technology. XQ-58A valkyrie unmanned aerial vehicle [EB/OL]. 2019 [2020-05-01]. <https://www.airforce-technology.com/projects/xq-58a- Valkyrie-unmanned-aerial-vehicle/>.
- [5] Alex Hollings. This experimental drone could change america's war strategy [EB/OL]. 2020-03-17 [2020-05-01]. <https://www.popularmechanics.com/military/a31122720/kratos-xq58a- Valkyrie-future/>.
- [6] The Boeing Company. Airpower teaming system [EB/OL]. 2019 [2020]. <https://www.boeing.com/defense/airpower-teaming-system/>.
- [7] Staff Reporter. Major systems go in milestone for airpower teaming system program [EB/OL]. 2020 [2020-04-09]. <https://australianaviation.com.au/2020/04/major-systems-go-in-milestone-for-airpower-teaming-system-program/>.
- [8] Weaponews. S-70 the "Hunter" was tested on the jump in Novosibirsk [EB/OL]. 2019-5-25 [2020-05-01]. <https://weaponews.com/news/65351035-s-70-the-hunter-was-tested-on-the-jump-in-novosibirsk.html>.
- [9] Reddit. Sukhoi okhotnik-B UCAV [EB/OL]. 2019 [2020-05-01]. [https://www.reddit.com/t/MilitaryPorn/comments/aj312t/sukhoi\\_okhotnikb\\_ucav\\_1200x926/](https://www.reddit.com/t/MilitaryPorn/comments/aj312t/sukhoi_okhotnikb_ucav_1200x926/).
- [10] 李磊, 蒋琪, 王彤. 美国马赛克战分析[J]. 战术导弹技术, 2019, 39(6): 108-114.
- [11] Dan Javorsek. Air Combat Evolution [EB/OL]. 2019-05-17 [2020-05-01]. [https://www.darpa.mil/attachments/ACE\\_ProposersDayProgramBrief.pdf](https://www.darpa.mil/attachments/ACE_ProposersDayProgramBrief.pdf).
- [12] DARPA. Training AI to win a dogfight [EB/OL]. 2019-05-08 [2020-05-01]. <https://www.darpa.mil/news-events/2019-05-08>.
- [13] 李磊, 蒋琪, 王彤. 美国 DARPA 空战演变项目分析[J]. 飞航导弹, 2020, 50(4): 52-58.
- [14] Webinar. Air Combat Evolution (ACE) technical area 1 proposers day (archived) (archived) [EB/OL]. 2020-03-26 [2020-05-01]. <https://www.darpa.mil/news-events/air-combat-evolution-technical-area-one-proposers-day>.
- [15] Sypniewski L. SoarTech awarded contract for DARPA's Air Combat Evolution (ACE) technical area two; building and calibrating trust. [EB/OL]. 2020-06-23 [2020-06-28]. <https://soartech.com/2020/06/23/soartech-awarded-ace-ta2/>.
- [16] Trevithick J. USAF plans for its Skyborg AI computer brain to be flying drones in the next two years [EB/OL]. 2019-03-20 [2020-05-01]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/27067/usaf-plans-for-its-skyborg-ai-computer-brain-to-be-flying-drones-in-the-next-two-years>.
- [17] Sara Sirota Air Force seeks 'quarterback in the sky' with Skyborg program by 2023 [EB/OL]. 2019-03-21 [2020-05-01]. <https://insidedefense.com/daily-news/air-force-seeks-quarterback-sky-skyborg-program-2023>.
- [18] Remove Me. AFRL's Skyborg Program To Develop Unmanned Wingman With 'AI Brain' [EB/OL]. 2019-03-27 [2020-05-01]. <https://aviationweek.com/defense-space/afrls-skyborg-program-develop-unmanned-wingman-ai-brain>.
- [19] Sara Sirota Skyborg team working with USAF leadership on acquisition strategy, future budget planning [EB/OL]. 2019-07-09 [2020-05-01]. <https://insidedefense.com/daily-news/skyborg-team-working-usaf-leadership-acquisition-strategy-future-budget-planning>.

#### 作者简介:



李磊(1982-),女,博士,高级工程师,主要研究方向为新型作战概念、无人系统等方面的情报研究。

[引用格式] 张旭东, 吴利荣, 肖和业, 等. 由美军作战概念出发的有人机/无人机智能协同作战解析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 91-96.

# 由美军作战概念出发的有人机/无人机智能协同作战解析

张旭东<sup>1</sup>, 吴利荣<sup>1</sup>, 肖和业<sup>2</sup>, 郝明月<sup>3</sup>, 尹航<sup>1</sup>

(1. 空军研究院, 北京 100085; 2. 西北工业大学, 西安 710072; 3. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074)

**摘要:** 无人机正向着集群化、智能化、协同化不断发展, 有人机/无人机智能协同作战作为其主要作战样式之一, 推动无人机向主战装备迈进。从美军以分布式为特征的作战云、网络中心战、马赛克战、忠诚僚机、无人机蜂群等热点作战概念出发, 对有人机/无人机智能协同作战与这些热点作战概念的内在联系进行了分析。结合美军正在进行的多个热点项目, 提出了有人机/无人机智能协同作战关键技术体系, 并对该概念的本质及内涵进行了解析。最后对该概念进行了SWOT分析, 进一步明晰了该概念发展的优势、劣势、机遇和挑战, 以期为我国有人机/无人机智能协同相关的作战概念及作战行动提供参考与借鉴。

**关键词:** 无人机; 协同作战; 作战概念; 分布式作战; 马赛克战; 忠诚僚机; SWOT分析

**中图分类号:** V279      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2020)04-91-06

## Analysis on Concept of Intelligent Cooperative Combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Evolving from the Combat Concept of American

ZHANG Xudong<sup>1</sup>, WU Lirong<sup>1</sup>, XIAO Heye<sup>2</sup>, HAO Mingyue<sup>3</sup>, YIN Hang<sup>1</sup>

(1. Air Force Academy, Beijing 100085, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Hiwing aviation general equipment co. Ltd, Beijing 100074, China)

**Abstract:** With the developing of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) capability due to clustering, intelligent and cooperative technology, the intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle is becoming one of a major mode of modern combat, which driving UAV to be a kind of main combat equipment. Based on the concept of American distributed operations, such as mosaic warfare, loyal wingman, drone swarms and other hot spots, the analyzes of the internal relationship between intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle and these hot spots combat concepts is done in the paper. Combined with several hot projects of the US military, the key technology system of intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle is proposed. Then, the essence of the concept is analyzed. SWOT analysis of the concept is carried out to further clarify influences from the development of the concept, which include strength, weakness, opportunity and threat, expecting to provide a reference for the combat concept and operation relative to the intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle.

**Key words:** UAV; Cooperative Combat; Combat Concept; Distributed Operations; Mosaic Warfare; Loyal Wingman; SWOT Analysis.

## 1 引言

随着中俄军事实力的不断提高, 尤其是反介

入/区域拒止能力的不断加强, 美军认为必须通过变革, 加快军事力量转型、创新兵力设计理念、创新颠覆性技术才能保持其军事优势。在这个时代背

景和作战概念创新的传统下,美军发布了多域作战、马赛克战、忠诚僚机、无人机蜂群、作战云、网络中心战等一系列作战概念,且各具特点,在一定程度上反映了无人机作战运用的前沿水平。

无人机是军事斗争技术的前沿,是作战模式创新的着力点,是人工智能等热点技术的有力载体。随着无人机运用规模逐渐扩大,执行的任务从支援向打击拓展,能力提升迅猛。无人机蜂群、忠诚僚机、有人机/无人机智能协同作战等概念正是在无人机及相关技术发展达到一定水平后,根据当前的认知,提出的颠覆无人机传统运用的作战概念。同时,新质作战概念牵引着无人机向集群化、智能化、协同化不断发展,从而推动无人机向主战装备迈进。

## 2 美军相关热点作战概念解析

### 2.1 分布式作战

美军近年来密集提出的新质作战概念,均围绕参联会和国防部顶层作战概念中的“跨域协同”展开,与美国空中力量相应的作战云、网络中心战、系统之系统(System of System, SoS)均以“分布式作战”为核心特征,各种不同作战概念侧重点各有不同,通过“分布”将能力解耦,再通过“协同”将能力聚合,从而构建完整地作战体系。反映到具体空中装备运用上,就是少量有人飞机控制大量功能分解的无人机共同构成作战体系<sup>[1-4]</sup>。飞行员将成为无人机的管理和决策者,指挥无人机协同作战。

从以分布式为特征的作战概念内涵和特点可以看出,有人机/无人机智能协同作战是空中装备分布式作战实现的必要条件。作战云、忠诚僚机等分布式作战作为军种作战概念,更多的是侧重于作战思想和构想,而有人机/无人机智能协同作战侧重于技术,支撑军种作战概念的实现。从某种意义上说,空中装备的分布式作战可以看成是多个有人机/无人机智能协同作战通过先进分布式作战管理的叠加。

### 2.2 马赛克战

马赛克战是美国国防预先研究计划局(DARPA)提出的基于技术的作战概念,体现出一种未来作战的兵力设计愿景。其以任务完成率为目标,以传统作战单元为基础,融合大量低成本、单功能装备,形成自适应杀伤网,实现任务手段动态多样、指挥控

制弹性抗毁、兵力体系灵活运用、战场态势复杂难测、装备组成低廉可消耗、作战能力快速形成的愿景。既能加快自身博伊德(OODA)循环,也使对手OODA环陷入困难,进而取得作战优势<sup>[5-7]</sup>。其体现了跨域、分布的特点,单在空中力量的运用上也体现出了分布式特征。

马赛克战是在“系统之系统”“适应性杀伤网”等以分布式为特征的系统架构概念基础上发展起来的,既是分布式为特征的作战实现途径,也可融合其他作战思想产生更具作战效益的新概念。有人机/无人机智能协同作战同样是马赛克战实现的必要条件,有人机和无人机作为马赛克拼图资源,按照马赛克战思想根据任务高动态灵活组建作战体系,协同对敌作战。

### 2.3 忠诚僚机

忠诚僚机是有人驾驶作战飞机与无人作战飞机形成长、僚机编组,高效协同作战。在具体装备运用上,作为僚机的无人机具有以下优势:可以携带机载武器,作为武库机充当有人机的弹药库;可以携带传感器,作为传感器飞机为有人机的协同打击提供目标指示和导引;可以携带电子战载荷,作为电子支援飞机为有人机提供电子支援<sup>[8-10]</sup>。随着概念的发展,其作战样式也不拘泥于具体形态,可以一架长机随行多架不同功能僚机协同作战。

可以说,忠诚僚机属于有人机/无人机智能协同作战范畴,是其表现形式之一。因空战的高动态特性,可以说忠诚僚机是其发展的最高水平。随着忠诚僚机作战概念的发展,二者的界限逐渐模糊,都代表了有人机/无人机智能协同作战的发展。

### 2.4 无人机蜂群

无人机蜂群是大量小型无人机,以自组织信息网络为基础,以群体智能为核心,通过分工协作以期实现群体智能涌现,实现从量变到质变的颠覆性飞跃。作为一种新兴的无人机运用形态,其特征为群智能、低成本、数量多,进而造成对抗多样性及反制的困难。蜂群强调多、小、协、智,而其相应理念技术完全可以由小型无人机应用于中大型无人机,其本质是智能协作,可以用无人机集群泛指<sup>[11-14]</sup>。

随着小精灵、小型空射干扰机等兴起,无人机集群作战的样式更加丰富,无人机集群也不仅仅是作为集群出现,其已经融入到了分布式作战、马

赛克战和有人机/无人机智能协同作战。因此,有人机/无人机智能协同作战已经不是有人机与一架或几架无人机进行协同作战,在必要时可能是一架或多架多型有人机与无人机集群进行多任务、多目标的协同作战。

### 3 有人机/无人机智能协同作战解析

#### 3.1 作战样式解析

协同作战的概念并不新颖,是多个单元在时空上达到同步,以形成1+1>2的作战效益。有人机/无人机协同作战作为一种作战样式,在无人机发展到一定阶段也随之出现,通过语音、行动前约定时间等手段,有人机与无人机定时出现在各自预定位置,对目标实施协同侦察、协同火力打击等。

有人机/无人机智能协同作战区别于以往作战样式范畴的本质在于:一是运用包含智能辅助决策的分布式作战管理技术,辅助飞行员快速决策,并能够高效的管理包括有人机、无人机在内的战场资源,快速构建作战体系;二是运用开放式系统架构技术、网络通信技术,实现了有人机与无人机的互联互通,使态势共享、互操作得以实现;三是运用智能自主与协同控制技术,使无人机及集群的自主能力极大提升,减少无人机对于人的操作依赖;四是运用先进无人机平台技术,特别是运用低成本设计技术,发展适合与有人机协同作战的无人机平台。通过以上为代表的先进技术运用,使有人机与无人机实现互联互通互享互操作协同,并根据作战任务及战场环境灵活高效的构建作战体系、制定行动计划,提升作战效能,加速OODA循环,从而形成作战优势。

#### 3.2 技术体系解析

作战云、网络中心战、马赛克战、忠诚僚机、无人机蜂群等具有代表性的新质作战概念,体现出两个特点:一是都围绕“跨域协同”展开,各种作战概念体现不同层次和程度的联合,这主要是由于美军参联会和国防部连续颁布了多版顶层作战概念,以“跨域协同”为关键词与中心思想,形成了美军所有作战概念的顶层牵引,指出了美军未来作战方式的宏观方向;二是作战概念虽然种类繁多,但各有侧重,分布式作战侧重作战思想,属于概念和理念维度,反映了军兵种的理念与诉求,马赛克战侧重于技术能力推进并兼顾作战体系设计,属于技术能力

维度,忠诚僚机、小精灵、蜂群等属于战术与物理支撑维度,侧重于物理平台研制与具体战术开发。这些作战概念形成了定位于分工有所区分、互有交差融合、互相牵引、支撑的有人机/无人机智能协同作战的创新体系。

在美军新质作战概念构想下,有人机/无人机智能协同作战颠覆了传统的杀伤链组织形式以及军事体系架构的设计方法,需要自顶层向下一直到底层工具与算法的一系列关键技术进行支撑。美军为了实现其作战概念构想,安排进行了一系列项目。这些项目包括了作战管理、网络通信、系统架构、智能自主、平台设计等方向<sup>[15]</sup>,可以对分布式作战、马赛克战、忠诚僚机、无人机蜂群以及多域作战等进行技术探索和支撑。具体项目如下。

分布式作战管理(DBM),研究控制算法和辅助决策,协助飞行员在通信受限的反介入环境下,有效的管理无人机等作战资源,持续作战。其关键技术主要包括反介入实时任务管理、分布态势感知、人机交互等。

拒止环境中的协同作战(CODE),开发自主协同算法和软件,提高无人机在高对抗环境下的自主性和协同作战能力。其关键技术主要包括自主协同技术、开放式体系架构技术等。

体系综合技术与实验(SoSITE),研究开放式体系架构和集成工具,对分布式空战进行技术支撑,可以看做是马赛克战的前身。其关键技术主要为开放式体系架构技术<sup>[16]</sup>。

自适应杀伤网(ACK),建立杀伤网的架构方案和相关工具集,解决马赛克战中并发资源需求冲突的决策问题。其关键技术主要包括指挥控制决策辅助技术、资源调度技术、测试评估技术等。

对抗环境中的通信(C2E),发展低可探测、抗干扰的通信技术,为拒止环境下的通信提供支撑。其关键技术主要为网络通信技术。

用于任务优化的动态网络(DyNAMO),打通不同网络之间的通信,并在干扰环境下能够保持通信。其关键技术主要为网络通信技术。

女武神(XQ-58A),可作为忠诚僚机与有人机协同作战,注重低成本设计。其关键技术主要为包括低成本设计等在内的无人机平台技术。

天空博格(Skyborg),开发无人僚机智能空战系

统,可以应用于女武神等无人机。其关键技术主要为无人机智能自主技术。

小精灵(Gremlins),研制能够协同执行侦察、电子战等任务的无人机集群。其关键技术主要包括低成本设计等在内的无人机平台技术、空基发射回收技术等。

有人机/无人机智能协同作战的关键技术体系并不孤立,和其它作战概念的关键技术体系互有交叉,多个单项关键技术或项目的突破都能给其它作战概念的进展带来突破。从实现上看,有人机/无人机智能协同作战有如下关键技术。

(1)复杂系统体系工程方法与复杂战场建模、弹性作战系统设计技术

通过开发新的数学技术,对复杂系统进行通用化建模,相对于传统的链条式杀伤链设计方法,在复杂系统体系工程方法论的支撑下形成对群体智能协作能力涌现和对各个作战单元的相互作用深层次的理解,形成统一的系统描述,进一步形成统一的复杂系统设计语言与开发环境,可以从根本上改变对动态、不可预测环境的系统设计方法,以使系统具备实时弹性的能力。该方向下的关键技术,是有人机/无人机智能协同作战的理论与设计基础,特别是当体系复杂度提高到有人机与无人机集群进行智能化协同作战时,传统的方法论将无法支持指控管理人员去理解战场行为。

(2)分布式作战管理和作战控制技术

有人机/无人机智能协同作战需要新的强大的作战管理与指挥控制技术支持,这其中包括态势理解、智能辅助决策、协同任务规划、高效人机交互等技术。有人机/无人机智能协同作战条件下,复杂战场的态势理解无法直接显像的表现出来,存在多种分支、多种选择、多种可能结果,需要在新型方法论的支持下通过大规模快速运算,探索可能发生的多种可能性的未来态势,基于协同任务规划综合考虑战场所有资源的可利用程度、多任务之间的协调调度,智能化的形成建议性的多项战场理解与决策方向,辅助指控人员形成战场决策,并利用高效探测人际交互技术,由地面指挥控制人员或者辅助飞行员对战场各作战力量进行指控,在通信受限条件下保持作战能力<sup>[17-20]</sup>。

(3)开放式系统架构技术

在战场作战武器单元能力达到一定程度后,没

有实现跨代性的武器代差之前,未来战场能力将更多的体现在“软”的方面,标准化的或者通用化的开放式系统架构技术将是未来作战能力提升的基础。通过标准化接口、协议和服务,不仅可以使有人机与无人机实现互联互通互操作<sup>[21]</sup>,通过不断更新作战软件和集成新的硬件模块,还可进一步实现作战能力的快速提升。

(4)协同态势感知技术

完成作战任务的基本前提是对战场态势正确可靠的感知与理解,有人机/无人机智能协同作战情况下的战场态势将呈现出复杂化、复合化、隐蔽化的特点。所以,有人机/无人机协同作战体现出了双刃剑的两面性,使敌我双方都极大的提升了复合手段对抗能力和战场目标探测与感知的难度,基于有人机/无人机协同作战,需要攻克并开展分布式协同探测、多源信息融合、智能目标识别和跟踪技术等一系列提高战场目标感知与目指能力的关键技术<sup>[22-27]</sup>,适应有人机/无人机协同作战带来的潜在能力提升,避免被复杂战场环境迷惑。

(5)网络通信技术

网络通信技术是有人机/无人机智能协同作战实现的基础,有人机/无人机协同作战环境下,需要应对各种频谱战的威胁,适应于传统平台的异构网络联通能力,适应新型/改进型通信网络的系统架构。要求网络通信高效、安全、按需可变。

(6)智能自主与协同控制技术

在有人机/无人机智能协同作战环境下,受限于网络通信、响应速度、硬件资源等,特别受限于人对复杂战场环境和群体智能涌现能力的判断与决策,通过指控人员分别控制每一个作战单元进行作战是不现实的,必须不断提高无人机及无人机集群的自主能力和协同控制能力<sup>[28]</sup>。这其中包括基础的本体应急情况判断与处理、高危/易损区域的规避、协同飞行的安全策略等,也包括多重杀伤网络情况下群体智能协作模式的决策,单体平台对自身能力与作战角色的智能决策,以及进一步的行动决策与规划等,甚至包括伴随着任务推进过程中的自身角色、任务模式、作战行为的智能演进。

(7)无人机平台技术

有人机/无人机协同作战构想下,针对单一能力的缺失或不足研制新型平台的效率和性价比是

低下的,为了适应智能化协同作战,除了传统的无人机平台技术外,强调低成本设计技术、模块化载荷技术,使无人机平台向单平台多功能高效费比的系列化平台族方向发展将是解决作战成本与战场响应速度的方案之一。

## 4 发展有人机/无人机智能协同作战概念的SWOT分析

通过对有人机/无人机智能协同作战优势(Strength)、劣势(Weakness)、机遇(Opportunity)和威胁(Threat)进行SWOT分析、研判<sup>[29-32]</sup>,进一步对该概念的发展进行辨析。

### 4.1 优势

#### (1)推动无人机作战运用变革

有人机/无人机智能协同作战颠覆了无人机的传统作战样式,使无人机从单机作战向协同作战转变,战术战法更加多变。

#### (2)促进无人机融入作战体系

改变传统的地面站控制,使有人机与无人机的态势感知共享,有人机对无人机直接指控,减少了中间环节,使无人机更深的融入作战体系。

#### (3)发挥优势互补作用

充分利用无人机战术响应快、可消耗等自身优势和人的决策优势,互补融合产生新的作战优势。

### 4.2 劣势

(1)系统复杂带来认知困难,以及不确定性影响发展

对于有人机/无人机智能协同作战最终形态的认知尚有不不确定性,其智能自主技术发展程度也存在不确定性,相应的作战效能评估难度较大,给协同作战体系构建带来不确定性。同时,下一代战斗机的不确定性也影响智能协同作战发展。

#### (2)关键技术突破难度大

多个关键技术的攻关难度较大,且能力上相互制约,只能采用渐进式的发展模式,逐步突破关键技术,使协同作战能力逐渐提升。

### 4.3 机遇

#### (1)无人机发展带来的认知共识

有人机/无人机智能协同作战是在无人机及相关技术发展到达一定水平后提出的,是国内外公认的无人机运用和技术的明确发展方向。同时,其也

是分布式作战、马赛克战等新兴作战概念的必要基础,发展需求强烈。

#### (2)关键技术自身发展推动

人工智能技术、网络通信技术等是目前军民两用的热点技术,发展需求强烈,技术发展迅猛,给智能协同作战的实现提供了良好的技术发展环境和技术储备。

## 4.4 威胁

有人机/无人机智能协同作战灵活多样,能够改变作战模式,以智能协同空战为例,美军F-22/F-35与忠诚僚机协同空战可以进一步扩大其空中优势,形成复合手段对抗、多机联合对抗态势,给我方制空作战带来极大威胁。因此,应积极推动智能协同作战发展。

## 5 结束语

从美军正在发展的分布式作战、马赛克战、忠诚僚机等热点作战概念分析,有人机/无人机智能协同作战极其重要,既反映了无人机智能化、协同化的发展方向,也是未来作战的主要作战样式之一。

有人机/无人机智能协同作战以能力聚合,注重体系对抗,作战样式灵活高效。涉及到的关键技术种类繁多且都处在高速发展中,任意单项技术的突破均可在相关方面提升其作战能力。甚至可以说,智能协同作战已经不是未来,而是现在必须面对的作战样式,其随时可能出现作战能力的跨越式提升,必须尽早布局,促进其能力渐进跨越。

## 参考文献

- [1] 宋琛,张蓬蓬.有人/无人协同制空作战的特点及影响[J].飞航导弹,2019,49(12):78-81.
- [2] Sarkesain J F, O'Brien T W. A framework for achieving dynamic cyber effects through distributed cyber command and control/battle management (C-2/BM) [J]. Modeling and Simulation Support for System of Systems Engineering Applications, 2015, 20: 531-564.
- [3] Lummus R. Mission battle management system fighter engagement manager concept [C]. Proceedings of Symposium and Exposition Conference on AIAA International Air and Space, Ohio, USA, July 14-17, 2003.
- [4] Loe R, Maracchion C, Drozd A. Semi-autonomous management of multiple ad-hoc teams of UAVs [C]. 2015 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Applications, New York, USA, May 26-28, 2015.

- [5] 黄汉桥, 白俊强, 周欢, 等. 智能空战体系下无人协同作战发展现状及关键技术[J]. 导航与控制, 2019, 18(1): 10-18.
- [6] Zhen Z Y, Zhu P, Xue Y X, et al. Distributed intelligent self-organized mission planning of multi-UAV for dynamic targets cooperative search-attack [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(12): 2706-2716.
- [7] Li A, Wu Q Q, Zhang R. UAV-enabled cooperative jamming for improving secrecy of ground wiretap channel [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(1): 181-183.
- [8] 申超, 李磊, 吴洋, 等. 美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J]. 战术导弹技术, 2018, 39(1): 16-21.
- [9] Palacios E S, Smith H. Impact of mission requirements on the design of low observable UCAV configurations [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2019, 91(10): 1295-1307.
- [10] Sepulveda E., Smith H, Szirczák D. Multidisciplinary analysis of subsonic stealth unmanned combat aerial vehicles [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2018, 10(2): 431-442.
- [11] 党爱国, 王坤, 王延密, 等. 无人机集群作战概念发展对未来战场攻防影响[J]. 战术导弹技术, 2019, 40(1): 37-41.
- [12] Bai G H, Li Y J, Fang Y N, et al. Network approach for resilience evaluation of a UAV swarm by considering communication limits [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193: 106602.
- [13] Xing D J, Zhen Z Y, Gong H J. Offense-defense confrontation decision making for dynamic UAV swarm versus UAV swarm [J]. Proceeding of The Institution of Mechanical Engineers Part G-Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(15): 5689-5702.
- [14] Qiu H X, Wei C, Dou R, et al. Fully autonomous flying: from collective motion in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarms[J]. Sci China, 2015, 58: 128201.
- [15] 李磊, 王彤, 蒋琪. 美国CODE项目推进分布式协同作战发展[J]. 无人系统技术, 2018, 1(3): 59-66.
- [16] 李东兵, 申超, 蒋琪. SoSITE等项目推动美军分布式空战体系建设和发展[J]. 飞航导弹, 2016, 46(9): 65-70.
- [17] 张晓海, 操新文. 基于深度学习的军事智能决策支持系统[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(2): 1-7.
- [18] 顾海燕, 徐弛. 有人/无人机组队协同作战技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(6): 33-41.
- [19] Zhong Y, Yao P Y, Wan L J, et al. Intervention decision-making in MAV/UAV cooperative engagement based on human factors engineering [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(3): 530-538.
- [20] Zhong Y, Yao P Y, Sun Y, et al. Research on command and control of MAV/UAV engagement from the cooperative perspective [C]. 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence, Hong Kong, China, June 24-26, 2016.
- [21] 贾高伟, 侯中喜. 美军有/无人机协同作战研究现状与分析[J]. 国防科技, 2017, 38(6): 57-59.
- [22] 李文, 陈建. 有人机/无人机混合编队协同作战研究综述与展望[J]. 航天控制, 2017, 35(3): 90-96.
- [23] 樊洁茹, 李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2018, 1(1): 39-47.
- [24] Zhao Y Y, Wang X K, Wang C, et al. Systemic design of distributed multi-UAV cooperative decision-making for multi-target tracking [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2019, 33(1-2): 132-158.
- [25] Xu, J, Guo Q, Li Z X. Dynamic selection method for cooperative decision-making center of multi-UAV system based on cloud trust model [C]. Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, October 12-14, 2018.
- [26] Causa F, Vetrella A R, Fasano G, et al. Multi-UAV formation geometries for cooperative navigation in GNSS-challenging environments [C]. IEEE-ION Position Location and Navigation Symposium, Monterey, USA, April 23-26, 2018.
- [27] Sivaneri V O, Gross J N. UGV-to-UAV cooperative ranging for robust navigation in GNSS-challenged environments [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 245-255.
- [28] 黄长强. 未来空战过程智能化关键技术研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(1): 11-19.
- [29] 徐幸. 浅析SWOT战略分析方法在阿里巴巴中的应用[J]. 当代经济, 2017(8): 74-75.
- [30] Makhdoom I H, Yin Q S. Simultaneous arrival of multiple UAVs under imperfect communication [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2012, 84(1): 37-50.
- [31] Sun X F, Derrick W K N, Ding Z G, et al. Physical layer security in UAV systems: challenges and opportunities [J]. IEEE Wireless communications, 2019, 26(5): 40-47.
- [32] Zhao J W, Gao F F, Ding G R, et al. Integrating communications and control for UAV systems: opportunities and challenges[J]. IEEE ACCESS, 2018, 6: 67519-67527.

#### 作者简介:



张旭东(1981-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为无人机总体技术、飞行力学与控制。



吴利荣(1977-), 男, 博士, 高工, 主要研究方向为无人机总体技术。



肖和业(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计、智能结构设计、缓冲减振、降噪结构设计。



郝明月(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人机总体技术。



尹航(1986-), 男, 博士, 工程师。主要研究方向为飞行器总体、飞行控制。



# 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. 投稿时须提交电子版“保密审查证明”，稿件正式录用后请将“保密审查证明”“版权转让协议”原件邮寄至：北京 7254 信箱 4 分箱《无人系统技术》编辑部，邮编：100074，电话：010-68191488。

### ◆ 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，英文摘要在 250 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。图、表应提供中英文图题、表题。
3. 参考文献引用应遵循“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 20 篇为宜，未公开发表的资料一般不宜引用。
4. 需提供全部作者简介，内容包括：姓名、出生年、性别、学位、职称、研究方向、照片等。

### ◆ 关于稿酬

暂不收取版面费、审稿费，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. YANG  
Wei Ren Yang SHI Yantao Shen

无人系统技术 2018 年创刊 (双月刊)

主管单位: 中国航天科工集团有限公司

主办单位: 北京海鹰科技情报研究所

协办单位: 中国无人系统产业联盟 (筹)

中国指挥与控制学会无人系统专业委员会

西北工业大学无人系统发展战略研究中心

西北工业大学无人系统技术研究院

主 编: 张冬青

副 主 编: 蔡顺才 孙柏原 李东光 陈少春

执行主编: 王一琳

编辑出版: 《无人系统技术》编辑部

地 址: 北京 7254 信箱 4 分箱 (100074)

电 话: 010-68191488 (编辑部)

010-68375084 (发行部)

邮 箱: chinauas310@163.com

网 址: <http://umst.cbpt.cnki.net>

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

Website: <http://umst.cbpt.cnki.net>

Distributed by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

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