

海上跨域无人集群研究进展综述

梁晓龙^{1,2}, 王宁^{1,2}, 王维佳³, 可唯一⁴

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室, 西安, 710051;
3. 军事科学院系统工程研究院, 北京, 100020; 4. 中国舰船研究设计中心, 武汉, 430064)

摘要 海战场是军事对抗的重要战场之一, 海上作战涉及空中、水面、水下以及海岸陆地等空间, 作战资源对象数量庞大且能力多样。随着无人系统技术的不断发展, 跨域无人集群将成为未来海上作战的重要力量。以海上跨域无人集群作为研究对象, 首先梳理了跨域作战的相关概念及演变过程, 定义了跨域无人集群的内涵, 然后阐述了美军单域无人集群项目的发展趋势及现状, 分析了近期跨域无人集群演习的主要内容, 之后对无人集群关键技术现有研究成果进行了提炼总结, 指出了跨域无人集群发展面临的挑战。最后给出了跨域无人集群未来的发展趋势。

关键词 海上跨域集群; 概念演变; 发展概况; 关键技术

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.05.001

中图分类号 V279; E925.4 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)05-0002-14

Progress in Maritime Cross-Domain Manned Swarms

LIANG Xiaolong^{1,2}, WANG Ning^{1,2}, WANG Weijia³, KE Weiyi⁴

(1. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Shaanxi Province Lab. of Meta-Synthesis for Electronic & Information System,
Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. Institute of Systems Engineering, Military Academy of Sciences, Beijing 100020, China;
4. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract Naval battlefield is one of the important battlefields in military confrontation. The naval battle space is involved with air, water, underwater and coastal land, etc., and combat resources are enormous in quantity and are diverse from each other in capability. With the continuous development of unmanned system technology, the cross-domain unmanned swarm will become an important force in future maritime warfare. Taking the maritime cross-domain unmanned swarm as a research object, firstly, the paper combs out the related concepts and evolution process of cross-domain operations, and defines the connotation of cross-domain unmanned swarm. And then the development trend and current situation of the US military single-domain unmanned swarm project are described, and the main contents of the recent cross-domain unmanned swarm exercise are analyzed. Finally, the existing research results in the key technologies for the unmanned swarms are refined and summarized, and the challenges facing the development of cross-domain unmanned swarms are pointed out. Simultaneously, the future development trend of cross-domain unmanned swarms is given.

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61703427)

作者简介: 梁晓龙(1981—), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士生导师, 研究方向为航空集群技术。E-mail: afeu_lxl@sina.com

引用格式: 梁晓龙, 王宁, 王维佳, 等. 海上跨域无人集群研究进展综述[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(5): 2-15. LIANG Xiaolong, WANG Ning, WANG Weijia, et al. Progress in Maritime Cross-Domain Manned Swarms[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(5): 2-15.

Key words cross-domain unmanned swarm; concept evolution; development overview; key technologies

无人系统具有成本低、操作灵活、不惧伤亡等优势,能够深入恶劣、危险的环境中执行任务^[1-2],在现代作战中具有广阔的应用前景。已有诸多学者对无人集群的编队控制^[3-5]、构型演化^[6-7]、路径规划^[8-10]、任务分配^[11-13]等问题开展了研究,取得了一定的成果。

2022年10月29日,乌克兰采用无人机和无人艇组成的无人集群对俄军黑海舰队进行突袭并取得成功,受到了广泛关注。相较于单域无人集群,运用多域无人系统组成跨域无人集群,能够通过跨域平台间的任务协同、信息融合、资源互补实现优势互补,进一步拓展无人集群作战运用场景,充分发挥无人集群的体系作战优势。

从当前无人作战案例和各国无人系统发展趋势上可以看出,跨域无人集群将成为无人作战系统发展的一个重要方向。为促进相关技术的研究和发展,本文从“跨域作战”概念的演变过程入手,对跨域无人集群的发展概况、作战样式、关键技术研究现状进行了梳理和分析,最后指出跨域无人集群的未来发展趋势。

1 “跨域作战”相关概念演变

“域(Domain)”的概念最早起源于20世纪90年代美军提出的“网络中心战”,在这一作战概念中,美军从实体和虚拟空间的角度,将“域”划分为物理域、信息域、认知域和社会域,但并未给出“域”的明确定义。

2017年,在美海军陆战队与陆军联合发布的《多域战:21世纪合成兵种》白皮书中,美军对“域”这一概念进行了明确的界定^[14-15]——“域”是指组织与实施作战行动所涉及的作战环境,包括陆域、海域、空域、太空域和赛博域等。

同时,该文件也对“多域”和“跨域”的概念进行了区分——“多域”是指同时在多个域内展开作战行动的能力,“跨域”是指从一个域到另一个域所产生的影响。“多域”“跨域”均涉及多个域,但“多域”不一定有“跨域”活动。

在2011年美国国防部发布的《无人系统发展路线图》及其后来迭代更新的版本中^[16],美军不断强调要把所有无人系统的软硬件进行统一,通过实现无人系统的互操作性,支撑未来异构无人系统、跨域无人系统的协同作战。实际上,自美空军、海军在2009年提出“空海一体战”作战概念后,跨域作战的概念就不断被丰富和发展。

表 1 美军“跨域作战”相关概念及内涵

时间	部门	文件	主要内容
2009年	空军、海军	备忘录	提出美国空军和海军将共同开发一个新的作战概念——“空海一体战”
2010年	战略与预算评估中心	《为什么要运用空海一体战?》 《空海一体战:初始作战概念》	详细阐述了“空海一体战”概念的定义、必要性及具体实现途径
2011年	国防部	《无人系统发展路线图》	阐述了无人系统发展面临的重要挑战,并指出跨域无人系统的互操作性是无人系统互操作性的首要需求
2012年	国防部	《联合作战介入概念》	指出了美军未来作战面临的三大挑战,提出以“跨域协同”为核心的联合作战介入概念
2013年	空海一体战办公室	《空海一体战:军种协作应对反介入和区域拒止挑战》	更新了“空海一体战”定义,并公布了实施框架
2015年	国防部	备忘录	将“空海一体战”概念更新为“全球公域介入与机动联合”
2017年	海军陆战队、陆军	《多域战:21世纪全成兵种》	明确界定了“域”的概念,阐述了“多域”“跨域”作战的必要性
2020年	空军	《空军条令说明 1-20:美空军在联合全域作战中的作用》	首次将联合全域作战概念写入空军条令
2020年	海军、海军陆战队、海岸警卫队	《海上优势:通过一体化全域海军力量取胜》	提出了“一体化全域海军”的建设目标

从表 1 中美军跨域作战概念的演变过程可以看出,通过多域异构平台协同形成跨域作战体系是未来作战发展的必然趋势。总的来看,跨域协同作战是联合作战的新样式,具有以下特点:

一是作战资源多样化。跨域作战中作战资源更加丰富,作战空间进一步拓展,需要整合的作战单元趋向复杂多样。

二是作战能力体系化。跨域作战更加关注多域有人/无人平台的协作能力,注重体系能力生成。

三是作战体系去中心化。作战任务的复杂性决定了跨域作战的体系架构势必朝着去中心化、分布式的方向发展,平台间的组合将更加灵活敏捷,作战体系的抗毁性将受到更多关注。

基于上述特点,可以给出跨域无人集群的定义——以陆域、海域、空域为主要作战空间,依靠大量在陆、海、空、天等不同空间域运行的、具有显著功能差异性的无人系统组成的有机整体,通过任务规划、信息交互、行为协同等方式实现功能互补,从而取得作战优势。

2 跨域无人集群发展概况

以无人机集群为代表的单域无人集群近年来发展迅速,取得了许多成果,能够为跨域无人集群的发展提供有益借鉴。其中,美军在单域无人集群系统方面开展的研究项目最多,成果也最为丰富。本节首先梳理了美军单域无人集群项目的发展概况,分析了相关平台特点与适用场景,对项目中涉及到的关键技术进行了归纳。在此基础上,对近 3 年来的跨域无人集群相关演习进行了分析和总结。

2.1 无人机集群发展概况

无人机集群是由一定数量的单一功能或者多功能无人驾驶飞行器组成的空中移动系统,其以交感网络为基础,具有整体作战能力涌现和行为可测、可控、可用的特点^[17]。无人机集群是无人系统集群中研究最多、技术相对成熟的领域,美军的无人机集群技术处于领先地位,率先开展了一系列研究,其中以下几个项目较为典型,见表 2。

表 2 美军典型无人机集群平台项目

项目名称	平台特点	适用场景	关键技术	主导单位	发起时间
小精灵 ^[18-19] (GREMLIN)	空射式可重复使用,约 700 kg,速度 0.7~0.8 Ma,载重 27.3~54.5 kg,可携带光电/红外、电子战载荷	侦察监视、电子战、反潜搜索	空中发射回收、小型无人空中加油技术、有人/无人指挥控制	DARPA	2015 年
郊狼 ^[19] (LOCUST)	管射式可重复使用,约 6 kg,速度 110 km/h,载重 0.9 kg,可携带光电/红外传感器	对地攻击、对海攻击、反无人机	自主编队飞行、信息共享、协同机动	海军	2015 年
山鹑 ^[20] (PERDIX)	管射式一次性使用,0.5 kg,可携带干扰载荷	侦察监视、电子干扰、空中诱饵	自组网通信、自主编队飞行	SCO	2013 年
蝉 (CICADA)	管射式一次性使用,约 65 g,可携带天气、气压、温湿度等传感器	侦察探测	自主控制、微型传感器探测	海军	2015 年

2.1.1 “小精灵”无人机

“小精灵”无人机是美国国防部高级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)重点发展的一项低成本无人机项目,旨在验证和评估智能无人机集群的投放及回收技术。“小精灵”无人机可通过 C-130 运输机、B-52/B-1 轰炸机等平台空中发射,无人机间能够互相通信和协同,在空中组网与其他有人平台协同执行情报监视侦察、电子战、破坏导弹防御系统等任务,完成任务后通过 C-130 运输机最大限度地回收。

2020 年 7 月, DARPA 完成了“小精灵”无人机

第二次试飞,重点测试了无人机的发射回收系统、发射母机控制台、无人机与母机间的指挥、控制与通信系统等性能和能力。2021 年 1 月, DARPA 采用 C-130 运输机作为载机,再次对“小精灵”无人机的回收技术进行验证,但并未成功。

2.1.2 “郊狼”无人机

“郊狼”无人机是美国海军研究署“低成本无人机蜂群技术”项目的主要成果。项目旨在研制一种管式发射无人机,满足在岸上或舰艇甲板上以 1 架/秒的速率连续发射上百架小型无人机的需求。“郊狼”无人机集群可通过数据链路实现信息共享和自

主协作,通过集群战术吸引敌方火力或执行情报监视侦察、通信干扰等任务,还可作为武器攻击地面目标^[2]。

2016年8月,该项目在“海斗士”小水线面双体船上成功发射30架“郊狼”无人机,首次实现舰基发射。2018年10月,该项目通过美军资助评审后,相关技术不再公开。

2.1.3 “山鹑”无人机

“山鹑”无人机是美国战略能力办公室通过“小型空射诱饵”项目发展出的微型无人机蜂群作战战术,由麻省理工学院林肯实验室负责开发,该项目旨在通过大量部署一次性无人机,对自主蜂群行为及其作战有效性和战术优势进行验证^[21-22]。

2016年10月,美国成功完成了“山鹑”无人机大规模蜂群演示试验,随后由美国海军3架“超级大黄蜂”战斗机在0.6马赫航速下从干扰弹发射管发射的103架“山鹑”无人机实现了集体决策和自适应编队飞行,约90%的无人机成功完成试验。

2.2 无人艇集群发展概况

美国海军从20世纪90年代率先展开水面无人艇研究,并于2007年发布了《海军水面无人艇主计划》,对无人水面艇的船型、尺寸和标准等要素进行了界定。2013年后,美军水面无人艇的发展规划被纳入到《无人系统路线图》中,水面无人艇作为海上无人系统的重要一环,得到了高度重视和广泛研究。

表 3 美军典型无人艇集群项目

项目/演习名称	平台特点	任务目标	关键技术	主导单位	发起时间
反潜战持续追踪无人艇 ^[23] (AC-TUV)	以 Sea Hunter 为代表,重140吨,最大航速27节,携带声呐、光电传感器和近距离、远程雷达系统	研制一种可自行决策、能与有人舰艇协同、具备在海上连续数月执行任务能力的高自主无人艇	自主导航与决策、多源信息融合	DARPA	2013
无人艇“蜂群”作战演习	4艘水面无人艇	实现对任务区域的自主巡逻,对水面目标的监测、识别、跟踪	多源信息融合、任务规划		2016
用于增强机动性的低成本无人水面舰艇(US-VME)		开发一种自主/无人补给艇,为海军陆战队“远征前进基地作战行动”提供支撑	任务规划	海军	2022

2.2.1 反潜战持续追踪无人艇

“持续反潜追踪无人艇”项目是美国 DARPA 在2010年8月启动的一项用于反潜探测的无人艇发展项目。项目旨在发展一型能够对亚太地区新型柴电潜艇进行跟踪定位,抵消其隐蔽性优势的反潜无人艇。

2016年1月,该项目第1艘原型艇“海上猎人”(sea hunter)下水,进行平台性能、任务载荷性能测试,随后该艇于2018年初被美海军接收。2021年4月,该项目第2艘样艇“海鹰”号完成对美海军的交付。此外,根据美军2021年预算文件,美海军计划在“海上猎人”无人艇的基础上发展一型最大排水量可达2000吨的大型无人舰艇,并于2023年完成首批采购。

2.2.2 无人艇“蜂群”作战演习

美国海军研究办公室先后在2014年8月和

2016年10月组织了2次无人艇“蜂群”作战演习,第1次演习将13艘无人水面艇组成编队为一个重要目标护航,在人工指令辅助条件下,实现了对敌船的发现、包围、拦截。第2次演习在16平方海里海域内采用4艘水面无人艇实现了完全自主巡逻、探测、识别、跟踪。

2.3 无人潜航器集群发展概况

无人潜航器的研制始于20世纪60年代,起初主要用于沉船打捞、水下电缆铺设等领域。1999年,美海军首次提出无人潜航器的发展计划,并对无人潜航器的战术使用要求、技术性能、主要任务(探雷、情报搜集、战场侦察)进行了分析和论证。近年来,随着无人系统集群技术的快速发展与无人潜航器技术的日渐成熟,美军对无人潜航器集群的关注明显升温,见表4。

表4 美军典型无人潜航器集群项目

项目名称	项目目标	平台组成	关键技术	主导单位	发起时间
持续濒海水下监控网络项目 ^[24-25] (PLUSNet)	利用核潜艇搭载无人潜航器,构建水下探测网络,加强潜艇对近海环境中低噪场柴电潜艇的反潜探测能力	1艘重型无人潜航器、6艘重型无人潜航器以及18艘携带低频拖曳阵的无动力无人潜航器,无人潜航器由“俄亥俄”级巡航导弹核潜艇从远处布放	自主导航与决策、编队控制	海军	2013
分布式敏捷反潜系统 ^[26] (DASH)	探索利用无人机和无人潜航器集群系统实施反潜探测,提高反潜探测水平	能够避免海面声散射的影响的无人潜航器集群	多源信息融合、跨介质通信、目标探测、任务规划	DARPA	2011
协作自主的分布式侦察与探测系统(CADRE)	实现无人平台执行广域探测与反水雷任务的自主化	由执行导航、探测和识别水雷任务的3种不同类型的水下无人潜航器组成集群	水下通信/导航、目标探测	Bluefin 机器人技术公司等	2005

2.3.1 持续濒海水下监控网络项目

“持续濒海水下监控网络(persistent littoral undersea surveillance network, PLUSNet)”是美国海军研究办公室于2006年提出的潜艇/潜航器协同反潜项目,旨在利用无人潜航器加强潜艇近海反潜探测能力。由“俄亥俄”级核潜艇携带的无人潜航器之间可相互通信,并按预定路径巡逻,潜艇可根据需要实时调整各无人潜航器航线,整个系统部署后监视范围可达 $185\text{ km}\times 185\text{ km}$ ^[27]。2015年,PLUS-Net已成功完成各项海上测试工作,目前已小规模部署进行作战评估。

2.3.2 分布式敏捷反潜系统

“分布式敏捷反潜”是美国DARPA于2011年提出的作战概念,旨在利用无人机和无人潜航器集

群系统实施反潜探测^[28-29]。其中,浅海系统以无人机集群为核心;深海系统由固定式海底声呐阵和无人潜航器集群构成固定式、移动式相结合的深海探测网络,进行反潜探测。

2015年7月,该系统的深海探测部分于在菲律宾海域完成演示验证,2017年该系统完成了系统样机研制^[30]。

2.4 跨域无人集群发展概况

跨域无人集群是无人集群中极具应用前景的研究领域,近年来,针对跨域无人集群研究,以美国为代表的军事强国以军事演习为依托,在运用场景、作战样式、关键技术等方面进行了一系列探索性的研究。见表5。

表5 典型跨域无人集群演习

项目/演习名称	参演平台	任务场景	演习目标	关键技术	主导单位	演习时间
年度海军技术演习	1架无人机、2艘无人艇、1艘无人潜航器	协同反潜	对跨域无人集群的作战任务规划技术进行验证	任务规划	美国海军	2016
“欧洲海上协同态势感知”(open cooperation for european maritime awareness, OCEAN2020)	4架无人机、3艘水面无人艇、2艘无人潜航器	威胁舰艇拦截、反水雷两种场景	对跨域异构平台互操作性进行验证	异构平台互操作、多源信息融合	欧洲防务局	2019
无人系统综合战斗问题(unmanned integrated battle problem, UxS IBP) 21演习	10余型艘有人舰艇及10余型无人空中、海上、水下无人系统	区域巡逻、威胁舰艇拦截	将分散部署的无人系统收集的信息整合形成可识别海事图像	多源信息融合	美国海军	2021
无人系统综合战斗问题(unmanned integrated battle problem, UxS IBP) 21演习	10余型艘有人舰艇及10余型无人空中、海上、水下无人系统	协同反潜搜索、水下目标跟踪、全方位侦察、超视距目标打击	对多域无人系统协同、有人/无人系统能力进行验证	有人/无人协同指挥、跨介质通信	美国海军	2021

续表5

项目/演习名称	参演平台	任务场景	演习目标	关键技术	主导单位	演习时间
国际海上演习 (international maritime exercise, IMX22)	50 余艘舰艇及 80 多型空中、海上、水下无人系统	电子干扰、空中诱饵、侦察监视	对跨域异构平台互操作性、协同态势感知等技术进行验证	异构平台互操作、跨介质通信、协同态势感知	美国海军	2022
环太平洋军演 (RIMPAC-2022)	4 艘无人艇及多型无人机	态势感知、海上巡逻、协同反潜	对无人系统数据通信网络进行测试	任务规划、协同态势感知	美国海军	2022

2.4.1 欧洲海上协同态势感知

“欧洲海上协同态势感知”(Open Cooperation for European Maritime Awareness, OCEAN2020)是由欧洲防务局于2018年提出的一项为期3年的合作性研究项目。项目旨在利用异构无人平台(固定翼/旋翼无人机、无人艇、无人潜航器)实现海上监视与拦截任务。

2019年11月,该项目对跨域无人集群在威胁舰艇拦截、反水雷两种场景下的相关技术进行了验证,2021年10月,该项目测试了将分散部署的无人系统收集的信息进行整合,形成统一的可识别海事图像(RMP)的可行性。

2.4.2 无人系统综合战斗问题

“无人系统综合战斗问题”是由美国海军于2021年4月进行的一次大规模无人平台军事演习。演习的主要目的是对跨域无人系统协同、有人/无人系统能力进行验证。

该次演习对跨域无人集群的作战运用场景进行了探索,具体包括:

1)由MQ-9B无人机投放声呐浮标,将水下目标数据传输给水面舰艇和岸上反潜作战指挥控制节点,实现无人系统反潜搜索;

2)由“汉普顿”号洛杉矶级核潜艇,发射并回收一艘“Iver 4”型无人潜航器,一艘中型无人水面艇使用拖曳阵列声呐搜索、跟踪水下潜艇;

3)由LCS濒海战斗舰、MQ-9无人机与无人潜航器相互配合,对假定目标进行全方位的侦察;

4)携带声呐浮标的MQ-9B与“普林斯顿”号巡洋舰配合使用,执行远程超视距目标打击。

2.4.3 国际海上演习 IMX22

国际海上演习IMX22是由美国海军于2022年2月主导的一次海上军事演习,涉及50余艘舰艇及80多型空中、海上、水下无人系统,是迄今为止目规模最大的海上无人系统演习。该演习旨在对异构平台互操作性、协同态势感知等多项技术进行验证。

2.4.4 环太平洋军演

在2022年6~8月美军举办的环太平洋军演中,美军对包括水面、空中和水下的无人系统进行了大规模的测试。演习的主要目的包括测试无人舰艇自主长距离航行时战术数据链的可靠性、跨域无人系统间数据链的兼容性以及盟军之间指挥控制系统的互操作性等。

总的来看,美军在历次演习中不仅对相关无人平台的协同作战能力进行了验证,更为跨域无人集群潜在的作战样式与应用场景进行了深入探索。从相关演习内容来看,围绕未来无人艇/无人潜航器协同、无人机/无人艇协同以及无人/有人协同的跨域协同技术将成为跨域无人集群的主要作战样式,路径规划、任务分配、信息融合、自组织通信等技术将是未来跨域无人集群重点发展的关键技术。

3 作战样式与关键技术分析

相较于单域无人集群,跨域无人集群在作战样式增多的同时也对协同性提出了更高的要求,在关键技术上面临新的挑战。本节首先探讨可能率先运用跨域无人集群的作战样式,进一步从智能决策、任务分配、路径规划和通信网络4个方面分析相关技术的现有手段及面临的挑战。

3.1 作战运用场景分析

3.1.1 “深海+浅海”全域搜索监视

广域搜索监视任务是无人集群的典型运用场景,尽管无人机、水面无人艇、无人潜航器可分别独立执行搜索任务,但无人机通常只能对海面目标进行侦察搜索,难以有效获取水下目标信息;无人艇能够对水下目标进行探测,但存在较大的虚警漏警概率;无人潜航器能够对水下目标进行跟踪查证,但速度较慢。

从以上项目研究内容来看,可以使用无人机、无人艇、无人潜航器组成跨域无人集群共同完成“深海

“+浅海”的大范围全域探测任务,通过发挥不同平台优势提高对任务区域的态势感知能力。其中,浅海探测以无人机集群为核心,水面无人艇为辅助,可由搭载多种传感器的无人机对海面 and 浅海区域展开广域探测和协同搜索,并充当指挥中心与跨域集群间的通信中继。水面无人艇可负责海面态势感知,并与无人潜航器保持声学通信。深海探测以无人潜航器为核心,在水面无人艇和固定式海底声呐阵的辅助下组成深海声探网络,对水下目标信息进行大范围感知。

3.1.2 海上目标时敏打击

时敏打击是指在极短时间内完成从探测目标到打击目标的一系列过程,将弹药投向目标。无人潜航器具有隐蔽性好、杀伤力强等特点,能够对海上目标构成较大威胁,但缺少对海上目标的搜索捕获手段。无人机具有活动空间广、移动速度快的优点,采用无人机集群对海上目标进行搜索,能够有效补充无人潜航器的不足。无人艇则可以作为无人机组件和 underwater 通信中继。因此,可以利用无人机进行目标搜索与定位,然后通过无人潜航器对目标实施跟踪、打击,从而实现跨域无人集群对海上目标的时敏打击。

此外,可以利用无人机与大型有人舰艇协同,执行超视距目标打击任务,例如美军曾在演习中采用携带声呐浮标的 MQ-9B 为巡洋舰提供远程超视距打击目标指示,通过无人系统与有人平台协同,有效提升了有人平台的感知、打击范围。

3.1.3 潜射无人集群协同作战

美军在 PLUSNet 项目和 UxS IBP 演习中利用潜射无人潜航器增加潜艇对敌水下目标的感知能力,类似地,可以利用潜射无人机引导潜艇对敌方岸上重要目标、海上舰艇和空中目标进行攻击。作为一种有效的场外传感器,潜射无人机可以帮助潜艇扩大侦察范围,有效提升潜艇的侦察纵深。此外,潜射无人机可以在保证潜艇隐蔽性和安全性的条件下,作为通信中继将潜艇收集到的信息通过卫星实时传回指挥所,从而拓展潜艇的远距离通信空间。

3.2 关键技术与挑战

跨域协同本质上是通过提高平台自主水平与平台间协同能力,实现单无人平台和单域无人平台的能力增强与效能提升。因此,无人系统相关的决策、规划、感知、控制等技术均需在跨域协同的框架下进一步研究。其中,智能决策是提高无人系统自主化水平,实现跨域协同的核心,任务分配、路径规划是

发挥跨域体系作战优势的基础,可靠的通信网络是保证跨域平台间有效协同的支撑。

3.2.1 智能决策

智能决策技术旨在提升无人系统的决策质量与速度,实现任务的自主化与协同化。从技术需求来看,跨域无人集群的智能决策技术可以划分为单平台自主决策技术与多平台协同决策技术两个层次。在单平台自主决策方面,学者们主要围绕空战机动、路径冲突解脱等问题展开研究,提出了博弈论法、专家系统法、速度障碍法以及强化学习等方法,这些方法通过对敌方当前环境态势进行评估分析,实现了特定场景下的无人系统自主决策,但仍存在算法智能化水平不高、约束条件较为理想等局限。在多平台协同决策方面,当前研究主要围绕搜索、跟踪、定位和打击等场景下的任务重分配、路径重规划、实时控制等问题展开,提出了仿生决策、虚拟领导者等方法,这些方法一定程度上解决了单域无人集群的协同决策问题,但仍存在应用场景单一等不足。

在智能决策方面,跨域无人集群主要面临以下挑战:

1) 多源信息融合下的快速自主决策

跨域平台的传感器资源更加丰富,态势感知信息源数量众多、信息类型多样,需要对多域、异构平台的信息进行有效融合,生成统一的态势感知信息。同时,平台的决策空间进一步拓展,信息交互频率与交互内容的增加将给现有算法的实时性带来挑战。

2) 面向多域平台的协同决策

跨域无人集群涉及陆、海、空等多个维度,不同空间域内平台的运动能力差异明显,将给多域平台的协同决策增加严苛的约束条件。单域无人集群中基于时空同步的协同决策方法将面临挑战,基于任务的协同决策方法将成为跨域平台间协同的主要内容。如何在充分考虑平台运动学差异的基础上对任务进行合理分解与实时分配,保证跨域平台间协同行为的有效性,将是跨域平台协同决策面临的一个重要挑战。

3) 通信受限下的协同决策

跨域平台的协同决策需要依赖有效的通信手段获取其他平台的感知信息、状态信息和决策信息。然而,跨域平台宽广的活动空间对多域平台间的通信可靠性提出了严峻的挑战,如何在通信受限的条件下充分利用有限的通信资源进行协同决策,将成为制约未来跨域无人集群体系能力提升的一项关键技术。

3.2.2 任务分配

无人集群任务分配旨在建立一定约束条件下的

平台与任务之间的映射关系,属于离散空间中的组合优化问题。当前关于任务分配的研究大致可以分为两类,一类是离线式任务分配方法^[32-33],侧重于将具体的任务分配问题抽象为、数学模型来求解,另一类是在线式任务分配方法^[34-36],这类方法侧重于建立集群平台间的协同机制,通过竞争、合作等方式实现“任务-平台”间的映射,见图 1。表 6 归纳了近年来较有代表性的无人系统任务分配研究成果。可以看出,当前研究主要是针对同构无人系统展开的,即认为参与任务分配的平台具有相同的能力,对异

构、跨域平台的任务分配研究还较少。

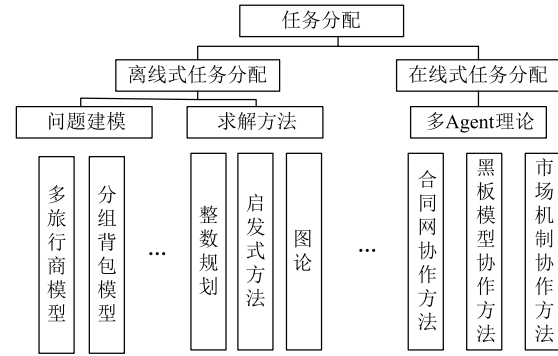


图 1 任务分配模型与方法

表 6 任务分配方法对比

问题类型	文献	主要研究内容	优缺点
在线式任务分配	[37]	采用市场机制建立了有任务时序约束的异构无人机任务分配模型,并采用离散粒粒子群算法进行求解;	优点:考虑了任务分配过程中的时序约束,并且算法适用于含侦察、攻击、察打等功能在内的三型无人机的协同任务分配; 不足:所规划航迹为折线形式,未考虑无人机自身飞行性能约束;
	[38]	采用市场机制建立了无人机集群任务分配模型,并使用改进狼群算法进行求解;	优点:通过改进狼群算法中的游走、召唤行为提高了算法对于任务分配问题的求解性能; 不足:任务分配模型较为简化,未考虑异构平台、多种任务以及任务时序等约束;
	[39]	采用合同网机制建立了含通信约束的无人机集群协同任务分配模型,并与离线式方法的分配效能进行了对比;	优点:考虑了目标分配任务中的通信拓扑约束; 不足:未考虑异构平台、多类型任务、多数量任务及任务时序等约束;
	[40]	采用分布式固定无线充电站与通信中继站提高了无人机集群信息交互的能力,增加了任务分配的效率;	优点:通过引入通信中继站增加了无人机集群信息交互频率,提高了任务分配效率; 不足:未考虑异构平台、多种任务及任务时序等约束;
离线式任务分配	[41]	将任务分配映射为多旅行商模型,把不确定性理论引入到了任务分配中目标函数与约束条件的设计中,并使用改进焰火算法进行求解;	优点:将不确定性引入到了目标函数与约束条件中,增加了方法的适用性; 不足:未考虑障碍物对航迹合理性的影响,算法未考虑无人机自身飞行性能约束;
	[42]	基于无人机集群遥感应用场景,在将任务区域分解的基础上,建立了基于最小化总飞行距离的目标函数,采用粒子群算法求解;	优点:采用聚类算法将遥感任务划分为若干子任务,拓展了算法的应用场景; 不足:未考虑任务分配后无人机侦察目标点的航迹的可行性;
	[43]	建立了含最短航迹约束的 TSP 模型,考虑了无人机与海面通信站的距离约束,使用改进 GA-PSO 算法求解;	优点:将路径规划与任务分配需求相结合建模,提高了算法的适用性; 不足:算法仅针对同构无人机集群与单一类型目标,未考虑目标类型与无人机平台的多样性;
	[44]	建立了多基地、多目标场景中的无人机集群任务分配模型,考虑了路径规划的可行性约束,使用生命周期群算法进行求解;	优点:考虑了路径规划可行性的约束条件,能够适用于多基地场景下的任务分配; 不足:未考虑多类型目标、异构平台及任务时序等约束条件;

在任务分配问题方面,跨域无人集群主要面临以下挑战:目标/平台数量多、平台间关联性强,需要对基于时空同步约束的跨域平台协同任务分配方法进行研究;任务执行序列约束条件严格,需要考虑算法无解条件下的跨域无人集群协同决策策略^[45-49];算法求解空间大,跨域平台的协同对多智能体深度学习强化学习等方法的求解有效性提出了严峻挑战,需要设计更加有效的网络架构与奖励函数。

3.2.3 路径规划

自主路径规划旨在为无人系统规划出一条合理有效的运动路径,使无人系统能够遂行侦察^[50-51]、攻击、跟踪^[52-54]等任务。从应用场景来看,当前关于无人系统集群路径规划问题的研究可以分为两类,一类是搜索路径规划问题^[55-56],主要针对覆盖率、能量消耗、转弯半径、速度性能、通信拓扑等约束条件下的最优路径规划问题展开研究,旨在提高无人系统集群遂行侦察、救援、区域巡逻、农药喷洒等任务的效能;另一类是安全路径规划问题^[57-59],主要针对存在威胁源、障碍物、复杂地形等条件下的无人系统安全路径规划展开研究,旨在为无人系统提

供安全可行的运动路径。从问题求解方法来看,无人系统集群路径规划问题的求解通常包括环境建模与算法求解两部分,如图 2 所示。表 7 归纳了近年来较有代表性的无人系统路径规划研究成果。

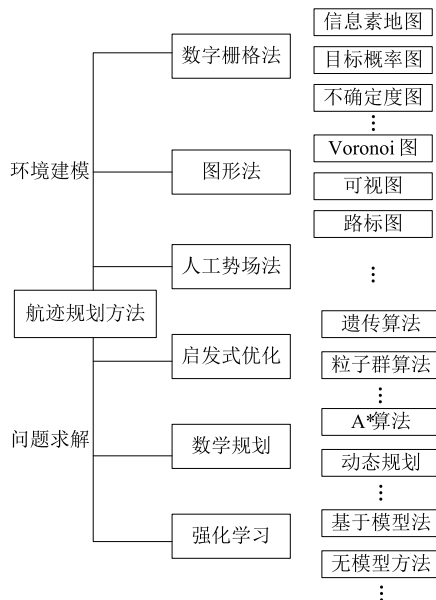


图 2 路径规划模型及方法

表 7 路径规划方法对比

文献	数字栅格法	图形法	人工势场法	启发式优化	数学规划	强化学习	方法	主要研究内容	优缺点
[60]	×	√	×	√	×	×	采用启发式方法求解无人机集群的三维覆盖搜索路径规划问题;	优点:建立了三维空间的无人机运动模型和静态障碍物环境模型,考虑了防相撞约束条件; 不足:方法难以适用于非规划任务区域;	
[61]	√	×	×	×	×	√	采用强化学习对无人机集群覆盖搜索路径规划的最优决策类型进行研究,对比了集中式决策与分布式决策的优不足;	优点:能够适用不规则的任务区域; 不足:需要大量的训练,规划效果受地图尺寸影响较大;	
[62]	×	√	×	×	×	√	搜索路径规划 采用启发式优化方法求解雷达成像特性与无人机最优转弯半径约束下的覆盖搜索路径规划;	优点:考虑了传感器成像特性对搜索航迹的影响,更加符合实际; 不足:训练时间较长且规划效果受地图尺寸影响较大;	
[63]	√	×	×	√	×	×	提出了一种面向持续监视任务的无人机、无人车协同路径规划方法	优点:将协同路径规划方法抽象为大规模 0-1 优化问题,简化了问题求解难度; 不足:对无人机、无人车初始位置分布的假设缺少合理性;	
[64]	√	×	×	√	×	×	以无人车作为无人机运载平台,分别规划无人机最优起降点和无人机最优覆盖搜索航迹;	优点:以无人车作为无人载体,有效利用了不同无人平台优势; 不足:方法仅适用于农业田间管理,难以直接拓展到其他场景;	

续表 7

文献	数字栅格法	图形法	人工势场法	启发式优化	数学规划	强化学习	方法	主要内容	优缺点
[65]	×	√	×	√	×	×		使用改进蚁群算法完成无人机自组织编队与安全路径规划;	优点:将社会学习机制与蚁群算法相结合,提高了算法求解的性能; 不足:仿真所采用障碍物设置较为简单且为静态障碍物,算法对于复杂障碍物分布可能无法求解;
[66]	√	×	×	√	×	×	安全路径规划	采用强化学习方法求解无人机集群规避威胁区的安全航迹;	优点:将樽海鞘群算法与 Aquila 优化器相结合,提高了算法的性能; 不足:算法未考虑无人机集群的通信条件约束,且无法规避动态障碍物;
[67]	×	√	×	√	×	×		采用博弈论和粒子群方法求解无人机集群规避威胁区的安全航迹;	优点:采用博弈论框架将最优化问题转化为求解纳什均衡问题,提高了路径规划质量,并进行了实飞验证; 不足:算法计算量较大,难以适用于大规模无人机集群;

可以看出,当前研究成果主要集中于单域无人集群。其中,文献[63]~[64]等研究了无人机、无人车等异构平台的协同路径规划问题,为跨域无人集群路径规划问题提供了借鉴,但在假设条件合理性、协同机制设计等方面仍有不足。

在路径规划问题方面,跨域无人集群主要面临以下挑战:求解空间进一步扩大,多域平台的运动学性能差异对可行解的存在提出新的挑战;约束条件更加复杂,通信可靠性对平台间交互决策的影响更加重要;协同机制更加多样,需要在综合考虑任务总体目标、不同平台优势及限制等方面约束条件的前提下,实现异构平台之间的优势互补。

3.2.4 通信网络

从无人集群通信技术发展现状来看,自组织通信网络将是今后无人集群通信发展的主要方向。无人集群通信网络旨在构建平台之间的通信数据链和指控数据链,设计合适的通信拓扑、通信协议等^[63-65],是无人集群形成体系作战优势的重要支撑。当前无人集群通信网络一般采用移动自组织网络(Ad-hoc)的体系结构,整个协议栈通常分为 5 层,即物理层、链路层、网络层、传输层和应用层。其涉及的关键技术主要包括:高可靠路由协议^[66-68]、高精度网络时钟同步技术^[69-71]、信息加密技

术^[72-73]、跨介质通信技术^[74-76]等。其中,高可靠路由协议和跨介质通信技术是跨域无人集群面临的主要挑战。

在路由协议方面,现有成果主要针对无人集群内系统间的信息转发方式、路径发现方式等问题展开研究,大致可以分为基于拓扑的路由协议、基于地理位置的路由协议和基于蜂群智能的路由协议等^[77-80]。相较于单域无人集群,跨域无人集群具有平台运动速度差异明显、活动空间范围广的特点,集群网络拓扑结构变化更加频繁,由传统 Ad-Hoc 算法计算得到的通信路径难以适应平台位置、状态的迅速变化,路由算法的鲁棒性将是跨域无人集群面临的重要挑战。

在跨介质通信方面,海上跨域无人集群通信涉及空气、海水等介质,当前水上、水下平台的跨介质通信手段主要是长波/超长波通信,信息传输效率极低(目前超长波信号水下传输速度约为 1 bit/min^[81]),无法满足平台信息交互需求,亟待提出有效的跨介质通信方法。

从表 8 归纳的无人系统集群自组织通信的部分相关研究可以看出,已有针对无人系统集群路由协议的鲁棒性展开研究,取得了一定的成果。光通信等新型通信手段则为跨介质通信提供了新的解决手段。

表 8 无人系统集群自组织通信相关研究

文献	技术领域	主要研究内容	主要优点
[82]		提出了一种基于无人机相对位置的群路由方法,在给节点分配坐标的基础上,产生节点间的最短路由和候选路由;	相较于单路由方法,通过引入最短路由和候选路由,提高了集群通信的鲁棒性;
[83]	路由协议	提出了一种基于随机网络编码的无人机集群路由协议,采用平均传输延迟与超时概率对所提方法有效性进行了验证;	通过引入随机网络编码,提高了存储转发效率,减少了每跳之间的时间间隔;
[84]		提出了一种基于无人机剩余续航时间和当前位置的路由选择方法,通过计算欧氏距离与群内其它成员剩余续航时间,实现最优路由选择;	引入了对无人机续航时间的考虑,提高了无人机集群路由协议的鲁棒性;
[85-86]	跨介质通信	提出了基于 GaN 微型 LED 等元件的跨介质光通信方法,并进行了实验验证;	提供了一种无人机与无人潜航器之间直接实现高速通信的潜在手段;

4 未来发展趋势

从第 3 节对相关文献的梳理可以看出,尽管已有不少文献对无人集群技术展开研究,但存在重复化工作的问题,且主要面向单域无人集群。以跨域无人集群实际能力需求为牵引,梳理跨域无人集群发展趋势如下。

4.1 多重算法融合的路径规划技术

跨域无人集群的路径规划空间更加复杂,面临的平台动力学和运动学约束、通信拓扑约束等约束条件更加严格,单一建模和求解算法很难满足整个路径规划的需求。例如数字栅格法能够准确地对任务区域进行表征,但规划空间大,不适用于动态路径规划;人工势场法实时性好,但可能出现闭环航迹,不适用于障碍物多的任务区域;图形法通常能够规划出全局最优航迹,但无法实时调整,不适用于动态路径规划。

因此在跨域无人集群路径规划算法上,应当针对不同的规划阶段,选择不同的任务区域建模与求解算法,综合考虑异构无人平台传感器优势特性及航程油耗、到达时间、威胁分布等约束条件,提出有效的路径规划方法和在线协同机制,确保各无人系统和搜索任务中路径规划的有效性和实时性。

4.2 多约束条件下的任务分配技术

动态环境中的任务分配问题将是当前和未来一

段时间内跨域无人集群任务分配的难点。当前任务分配方法主要依赖于推理判断与启发式优化求解,难以适用于存在时变任务和突发威胁的动态环境。例如,TSP 建模的求解结果难以根据时变任务进行实时调整;多 Agent 建模方法缺少对通信约束的考虑。

鉴于深度强化学习方法在智能体决策方面展现出的优势,在跨域无人集群实时任务分配方面具有巨大潜力。通过建立多阶段的任务分配奖励函数,对不同任务阶段的约束条件进行区分,能够有效对多约束条件下的任务分配技术进行求解,提高跨域无人集群任务分配的鲁棒性和实时性。

4.3 基于先进通信手段的自组织通信网络技术

通信可靠性是当前无人集群体系作战的重要制约因素。跨域无人集群涉及空中、水面、水下等多个空间维度,由于海水对高频电磁波的衰减,平台间的信息交互与协同决策给跨介质通信技术带来了严峻的挑战。

“星链”和光通信技术可能成为跨域平台的实时交互通信有效解决方案。在“星链”大量低轨道小型卫星支持下,空中、水面平台之间能够实现高通量、低时延、广覆盖的高速通信^[87]。同时,水下激光通信技术的发展为水下平台与其他平台的信息交互提供了可能,如何实现通信激光光源的高功率、低成本将成为未来一段时间内跨域平台通信技术发展的重要方向。

5 结语

本文从概念演变、发展概况、关键技术及挑战、发展趋势等4个方面对当前跨域无人集群的研究进行了综述。其中,在作战概念演变方面,首先介绍了“域”“多域”“跨域”等概念的定义,然后分析了跨域作战的概念演变过程。在发展概况方面,首先介绍了单域无人平台集群中的典型项目,分析了相关项目的应用场景及关键技术,然后对近年来跨域无人集群相关演习进行了总结与分析。在关键技术方面,梳理了无人集群路径规划、任务分配、自组织通信等方面的研究现状,阐述了跨域无人集群相关技术面临的挑战。最后给出了跨域无人集群技术的潜在发展方向。

参考文献

- [1] 胡利平,黄晓阳,梁晓龙,等. 美军无人机蜂群作战研究动态及应对策略[J]. 国防科技, 2021, 42(4): 17-25.
- [2] 王祥科,刘志宏,丛一睿,等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 20-45.
- [3] 谢伟,陶浩,龚俊斌,等. 海上无人系统集群发展现状及关键技术研究进展[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 7-17, 31.
- [4] 王丹丹. 多无人机分布式编队保持与重构控制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [5] ALI Z A, HAN Z. Multi-Unmanned Aerial Vehicle Swarm Formation Control Using Hybrid Strategy[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(12): 2689-2701.
- [6] 马子玉,何明,刘祖均,等. 无人机协同控制研究综述[J]. 计算机应用, 2021, 41(5): 1477-1483.
- [7] 杨彦祥. 无人机集群拓扑构型关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [8] 申晓东. 无人机集群视觉编队构型切换规划方法研究[D]. 北京: 军事科学院, 2022.
- [9] 樊娇,雷涛,韩伟,等. 无人机路径规划技术研究综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(3): 39-46.
- [10] 王琼,刘美万,任伟建,等. 无人机路径规划常用算法综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2019, 37(1): 58-67.
- [11] 尹依伊,王晓芳,周健. 基于Q学习的多无人机协同路径规划方法[J]. 兵工学报, 44(2): 484-495.
- [12] LI K, GE F, HAN Y, et al. Path Planning Of Multiple Uavs with Online Changing Tasks by an ORP-FOA Algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 94: 103807.
- [13] 贾高伟,王建峰. 无人机集群任务规划方法研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 99-111.
- [14] 太阳谷. 美军联合全域作战探索路线浅析[J]. 军事文摘, 2020(23): 32-34.
- [15] 雷炎. 美国陆军将被多域战理论重塑[J]. 坦克装甲车辆, 2021(2): 40-47.
- [16] 杨亚丽,贾欢欢,薛晓东. 美国无人系统未来发展路线[J]. 飞航导弹, 2015(5): 18-24.
- [17] 梁晓龙,何吕龙,张佳强,等. 航空集群构型控制及其演化方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(3): 277-287.
- [18] 黄雷. 美军小精灵无人机群项目发展现状综述[J]. 飞航导弹, 2018(7): 44-47.
- [19] 雷声公司推出“郊狼”无人机系统[J]. 国防科技工业, 2018, (8): 11.
- [20] 张博,梁延峰,李建营,等. 空中无人蜂群作战发展现状及对抗策略研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(8): 755-763.
- [21] 刘丽,王森,胡然. 美军主要无人机集群项目发展浅析[J]. 飞航导弹, 2018(7): 37-43.
- [22] 贾高伟,侯中喜. 美军无人机集群项目发展[J]. 国防科技, 2017, 38(4): 53-56.
- [23] 孔维玮,冯伟强,诸葛文章,等. 美军大中型水面无人艇发展现状及启示[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(5): 14-18.
- [24] 张伟,王乃新,魏世琳,等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289-297.
- [25] 楚立鹏,鄢宏华,范强,等. 国外水下无人潜航器及其通信技术发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(2): 112-118.
- [26] 穆松,张建,王晓静,等. 美国海军深海装备发展研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(14): 186-189.
- [27] 钟宏伟,李国良,宋林桦,等. 国外大型无人水下航行器发展综述[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(4): 273-282.
- [28] 孙盛智,苗壮,朵豪,等. 无人潜航器作战运用模式及关键技术[J]. 现代防御技术, 2023, 45(9): 89-93.
- [29] 王雅琳,杨依然,王彤,等. 2019年无人系统领域发展综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(6): 53-57.
- [30] 孙碧娇,何静. 美海军无人潜航器关键技术综述[J]. 鱼雷技术, 2006(4): 7-10; 31.
- [31] 罗远林. 无人机集群编队控制与任务分配算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [32] 宋福平. 多无人机协同目标分配算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [33] 彭雅兰,段海滨,张岱峰,等. 仿灰狼合作捕食行为的无人机集群动态任务分配[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(11): 1855-1862.
- [34] 向庭立,王红军,史英春. 区域覆盖的多机协同探测任

- 务分配策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 33-38, +71.
- [35] 彭雅兰, 段海滨, 魏晨. 基于交替方向网络进化博弈的无人机集群任务分配[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 792-800.
- [36] ZHANG J, CHEN Y, YANG Q, et al. Dynamic Task Allocation of Multiple UAVs Based on Improved A-QCDPSO[J]. *Electronics*, 2022, 11(7): 1028.
- [37] XU S, LI L, ZHOU Z, et al. A Task Allocation Strategy of the UAV Swarm Based on Multi-Discrete Wolf Pack Algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1331.
- [38] XIE T, GUO J, ZHANG X, et al. Mathematical Problems in Engineering Improved CNP-Method-Based Local Real-Time Cooperative Task Allocation of Heterogeneous Multi-UAV in Communication-Constrained Environment[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022.
- [39] WEN W, JIA Y, XIA W. Joint Scheduling and Resource Allocation for Federated Learning in SWIPT-Enabled Micro UAV Swarm Networks[J]. *China Communications*, 2022, 19(1): 119-135.
- [40] WANG W, LV M, RU L, et al. Multi-UAV Unbalanced Targets Coordinated Dynamic Task Allocation in Phases[J]. *Aerospace*, 2022, 9(9): 491.
- [41] LIU J, LIAO X, YE H, et al. UAV Swarm Scheduling Method for Remote Sensing Observations during Emergency Scenarios[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1406.
- [42] YAN M, YUAN H, XU J, et al. Task Allocation And Route Planning of Multiple UAVs in a Marine Environment Based on an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2021(1): 1-23.
- [43] LIU H, CHEN Q, PAN N, et al. Three-Dimensional Mountain Complex Terrain and Heterogeneous Multi-Uav Cooperative Combat Mission Planning[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 197407-197419.
- [44] 何玉庆, 秦天一, 王楠. 跨域协同: 无人系统技术发展和应用新趋势[J]. *无人系统技术*, 2021, 4(4): 1-13.
- [45] 张毅, 于浩, 杨秀霞, 等. 无人机集群分组编队自适应跟踪-包含控制[J/OL]. *北京航空航天大学学报*: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.v.20220705.0908.002.html>.
- [46] 秦明星, 王忠, 李海龙, 等. 基于分布式模型预测的无人机编队避障控制[J/OL]. *北京航空航天大学学报*: <http://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0509>.
- [47] 梁晓龙, 刘流, 何吕龙, 等. 基于固定时间一致性的无人机集群构型变换[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(7): 1506-1512.
- [48] 梁晓龙, 何吕龙, 张佳强, 等. 航空集群构型控制及其演化方法[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(3): 277-287.
- [49] 刘流, 梁晓龙, 张佳强, 等. 切换通信拓扑条件下的无人机集群构型变换控制[J]. *兵工学报*, 2019, 40(5): 996-1002.
- [50] FLORES C G, RODRÍGUEZ M A, Aldape-Pérez M, et al. Optimized Path-Planning in Continuous Spaces for Unmanned Aerial Vehicles Using Meta-Heuristics[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 176774-176788.
- [51] 徐广通, 孟子阳, 龙腾, 等. 通信距离受限下无人机集群轨迹分布式滚动规划[J]. *中国科学: 信息科学*, 2022, 52(8): 1527-1541.
- [52] 郭华, 郭小和. 改进速度障碍法的无人机局部路径规划算法[J]. *航空学报*, 2023, 44(1): 271-281.
- [53] 毕可心, 吴明功, 张文斌, 等. 基于速度障碍法的飞行冲突网络建模与分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(8): 2163-2173.
- [54] 张宏宏, 甘旭升, 李昂, 等. 基于速度障碍法的无人机避障与航迹恢复策略[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(8): 1759-1767.
- [55] AHMED N, PAWASE C J, CHANG K H. Distributed 3-D Path Planning for Multi-UAVs with Full Area Surveillance Based on Particle Swarm Optimization[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3417.
- [56] PUENTE C A, RIVERO D, PAZOS A, et al. UAV Swarm Path Planning with rEinforcement Learning for Field Prospecting[J]. *Applied Intelligence*, 2022: 1-18.
- [57] SHI Y, LIU Y, JU B, et al. Multi-UAV Cooperative Reconnaissance Mission Planning Novel Method Under Multi-Radar Detection[J]. *Science Progress*, 2022, 105(2): 00368504221103785.
- [58] AMINE R M, BOUTALBI M C, AHRICHE A. Design and Performance Evaluation of a Pseudo-Flocking Unmanned Aerial Vehicles Mobility Model for Surveillance Applications[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2022, 19(8): 511-521.
- [59] WU Y, WU S, HU X. Cooperative Path Planning of Uavs & Ugvs for A Persistent Surveillance Task in Urban Environments[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(6): 4906-4919.
- [60] 王瑛, 周楚涵. 改航路径规划问题研究综述[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(1): 1-8, 84.
- [61] XU Y, XUE X, SUN Z, et al. Joint Path Planning and Scheduling for Vehicle-Assisted Multiple Unmanned Aerial Systems Plant Protection Operation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 200: 107221.
- [62] SHAFIQ M, ALI Z A, ISRAR A, et al. A Multi-Colony Social Learning Approach for the Self-Organization of a Swarm of UAVs[J]. *Drones*, 2022, 6(5):

- 104.
- [63] 闫朝星,付林罡,郑雪峰,等. 基于无人机自组网的空海一体化组网观测技术[J]. 海洋科学, 2018, 42(1): 21-27.
- [64] 邓婕. 浅海水声自组网 MAC 协议的设计与实现[D]. 厦门:厦门大学, 2009.
- [65] 黄睿. 水下自组网中基于能耗以及时间优化的分簇协议研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2021.
- [66] 黄益瑞. 基于模糊逻辑和强化学习的无人机 Ad Hoc 网络路由协议研究[D]. 南京:南京大学, 2021.
- [67] 祝经,周新力,宋斌斌,等. 无人机自组网 GPSR 路由协议研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(12): 81-86.
- [68] 姚玉坤,张本俊,周杨. 无人机自组网中基于 Q-learning 算法的及时稳定路由策略[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(2): 531-536.
- [69] 沈威,许娜. 一种基于 Ad hoc 网络测距的时钟同步协议[J]. 微型机与应用, 2010, 29(8): 11-14.
- [70] 罗林. 无线自组网协议设计中的群体智能优化算法研究[D]. 厦门:厦门大学, 2017.
- [71] 刘瑞霖. 车载自组网分布式时隙预约链路接入协议研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
- [72] 徐雪松. 移动 Ad Hoc 网络入侵检测与安全路由关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007.
- [73] 李光松. 移动 Ad Hoc 网络安全性研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2005.
- [74] 余晓德. 电磁波跨海水-空气界面传播特性理论研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
- [75] 丁健楠. 跨介质异构无人集群系统协同组网技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021.
- [76] 李亚平,万梓傲,费礼,等. 跨介质对潜激光通信后向散射研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(8): 127-130.
- [77] ROVIRA-S A, RAZI A, AFGHAH F, et al. A Review of AI-enabled Routing Protocols for UAV Networks: Trends, Challenges and Future Outlook[J]. Ad Hoc Networks, 2022, 130: 102790.
- [78] ALAM M M, MOH S. Survey on Q-Learning-Based Position-Aware Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks[J]. Electronics, 2022, 11(7): 1099.
- [79] SONG H, LIU L, PUDLEWSKI S M, et al. Random Network Coding Enabled Routing Protocol in Unmanned Aerial Vehicle Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(12): 8382-8395.
- [80] ARAFAT M Y, MOH S. Localization and Clustering Based on Swarm Intelligence in Uav Networks for Emergency Communications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8958-8976.
- [81] 方尔正,李宗儒,桂晨阳. 穿海牵天 提升对潜通信保障能力——跨介质通信技术现状及展望[J]. 国防科技工业, 2022, (2): 59-62.
- [82] TOORCHI N, HU F, BENTLEY E S, et al. Skeleton-based Swarm Routing (SSR): Intelligent Smooth Routing for Dynamic UAV Networks[J]. IEEE Access, 2020, 9: 1286-1303.
- [83] SONG H, LIU L, Pudlewski S M, et al. Random Network Coding Enabled Routing Protocol in Unmanned Aerial Vehicle Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(12): 8382-8395.
- [84] KHAN A, KHAN S, FAZAL A S, et al. Intelligent Cluster Routing Scheme for Flying ad Hoc Networks [J]. Science China Information Sciences, 2021, 64(8): 1-14.
- [85] ZHU S, QIU P, SHAN X, et al. Micro-LED Based Double-Sided Emission Display and Cross-Medium Communication[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 1-5.
- [86] CHEN L K, SHAO Y, DI Y. Underwater and Water-air Optical Wireless Communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(5): 1440-1452.
- [87] 杨广华,王强,陈国玖,等. 美国“星链”低轨星座军事应用前景探析[J]. 中国航天, 2022, (9): 60-63.

(编辑:徐敏)