

海上无人系统发展及关键技术研究

邱志明*, 孟祥尧, 马焱, 陈轶, 冯炜

(海军研究院, 北京 100422)

摘要: 海上无人系统是未来智能化、无人化战争中的重要组成部分, 已经成为世界各国海上竞争新的制高点, 在国家和国防安全方面将扮演越来越重要的角色。本文从国家智能无人战略发展需求出发, 从战略规划和概念引领、技术研究和装备研发、系统演示和能力验证三个层面系统分析了当前国内外海上无人系统及其技术的发展现状, 凝练了当前海上无人系统技术各方面发展趋势和面临的挑战, 论证提出了未来海上无人系统发展中需攻克的关键技术。据此结合实际发展情况和未来发展趋势, 分析提出了海上无人系统的重点发展方向, 最后从总体思路、体系构成、装备发展、技术攻关四个不同层面提出了推动海上无人系统持续、稳步、快速发展的对策建议, 以期促进我国海洋装备发展。

关键词: 海上无人系统; 集群智能; 跨域协同; 关键技术

中图分类号: TJ0 **文献标识码:** A

Development and Key Technologies of Maritime Unmanned Systems

Qiu Zhiming*, Meng Xiangyao, Ma Yan, Chen Yi, Feng Wei

(Naval Research Institute, Beijing 100422, China)

Abstract: Maritime unmanned systems are crucial for future intelligent and unmanned warfare. They have become a new height of competition in the maritime domain and will play an increasingly important role in national defense security. Considering the development demand for national intelligence and unmanned strategies, the study analyzes the development status of maritime unmanned systems and corresponding technologies in China and abroad from the aspects of strategic planning and conceptual guidance, technological research and equipment development, and system demonstration and capability verification. The challenges and trends for the development of maritime unmanned systems are summarized and key technical challenges are proposed. Moreover, development pathways of maritime unmanned systems in key directions are explored and countermeasures to promote the sustained, steady, and rapid development of maritime unmanned systems are recommended from the perspectives of overall thinking, system composition, equipment development, and technology breakthroughs.

Keywords: maritime unmanned systems; cluster intelligent; cross-domain collaboration; key technologies

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-04-30

通讯作者: *邱志明, 海军研究院研究员, 中国工程院院士, 研究方向为舰载武器系统与运用工程;

E-mail: qiuzhiming280@sohu.com.

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋装备重大基础技术与创新能力建设战略研究”(2022-HYZD-07)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

党的二十大报告提出要以国家战略需求为导向,集聚力量进行原创性、引领性科技攻关,坚决打赢关键核心技术攻坚战。在军事智能技术发展推动下,无人系统将对未来战争产生非对称、颠覆性作用,在智能化海战中的地位日益突出^[1]。2017年国务院印发的《新一代人工智能发展规划》中,将无人系统作为四个主要研究方向之一^[2],由此可见,无人系统已成为我国实现创新型国家和世界科技强国的重点关注领域。海上无人系统作为无人系统中的重要组成部分,在未来国家海上竞争中的地位日益突出,关乎国家和国防安全,是世界军事强国抢占军事竞争战略制高点的重要途径^[3-5]。

海上无人系统是指以海洋为活动空间,具有无人化、智能化、自主性等特点的平台装备或应用系统,是现代智能化革命的产物。典型的海上无人系统有无人水面艇(USV)、无人水下航行器(UUV)、水下无人预置系统等。在人工智能(AI)技术的支撑下,海上无人系统可执行复杂多样化任务,具备有人装备难以比拟的应用优势^[6]。近年来,国内外在海上无人系统装备和技术方面开展了大量研究,特别是以美国、俄罗斯和欧洲等为代表的国家和地区都加强了海上无人系统装备技术和应用部署的研究;国内虽起步较晚,但近年来在海上无人系统技术研发和装备研制方面大力投入、快速推进。随着装备日益智能化,海上无人系统从有人指挥控制向无人自主、有人/无人协同、集群组网方向发展,未来将逐步开展海上无人自主和跨域协同作战能力生成^[1]。

本文针对无人系统战略发展需求,从战略规划和概念引领、技术研究和装备研发、系统演示和能力验证三个层面总结分析了海上无人系统的发展现状。为解决当前海上无人系统技术发展各方面面临的挑战,论证提出未来海上无人系统发展中需攻克的关键技术和重点发展方向,并从总体思路、体系构成、装备发展、技术攻关四个不同层面提出未来海上无人系统发展的对策建议,以期为我国未来海上无人系统及相关技术的持续、稳步和快速发展提供支撑。

二、海上无人系统的发展现状

近年来,世界各国越来越重视海上无人系统的

发展,在作战概念以及发展规划的顶层引领下,各国持续增加经费投入、加大研发力度,通过关键技术攻关,相关装备性能水平不断提升,发展出了成体系的基础平台和装备系统,并通过演习演示等实际应用,逐步迭代升级,提升装备能力和体系运用能力。

(一) 战略规划和概念引领

在新一轮科技革命和世界海军强国竞争的双重驱动下,无人系统在海战中的地位日益突出,以无人对有人将对战争胜负产生非对称、颠覆性作用,无人装备已经成为世界军事强国构建新型海上作战体系、抢占军事竞争战略制高点的重要途径。因此,各国高度重视海上无人系统发展,纷纷制定发展规划。以美国为代表,自2000年以来,已先后发布了8个无人系统发展路线图,提出了未来无人系统发展的总体思路和架构。在以水面无人艇、水下无人航行器为代表的无人系统方面形成了详细的发展规划,明确了使命任务、级别类型、关键技术等内容,有力支撑了海上无人系统的发展。2021年,美国海军部又发布了最新的《美国海军部无人作战框架》,进一步提出加速将无人系统融入未来舰队,确保海上军种协作,最大化无人系统对国家安全的价值。

同时“网络中心战”“分布式作战”“多域战”“远征前进作战”“马赛克战”等新的作战概念层出不穷。海上无人系统作为新质力量,一方面有力支撑了新作战概念的实现,拓展了作战单元维度和独立部署能力,加快了海上无人作战力量体系化实战能力形成;另一方面引领了海上无人作战力量分布协同发展,对通信网络和一体化指挥控制等都提出了新的要求,进一步引领了有人/无人新型海上作战体系的发展。

(二) 技术研究和装备研发

在战略规划以及作战概念牵引下,海上无人系统在平台、载荷、控制、应用等方面开展了一系列技术攻关,各种类型的海上无人系统和平台装备层出不穷,技术性能快速提升。

1. 单平台技术发展

目前,典型的海上无人平台有无人水面艇、无人水下航行器、水下无人预置系统等,另外还有如水下仿生航行器、水空跨介质航行器等新概念和新

构型海上无人平台。

(1) 无人水面艇

无人水面艇可承担警戒巡逻、反水雷、侦察预警、反潜、通信中继等任务。无人水面艇发展早期以中小型为主，为增强多任务能力和平台通用性，在传感器和任务载荷技术发展支撑下，搭载载荷从单一任务模块向通用任务模块发展，例如美“斯巴达侦察兵”无人艇通过通用任务模块设计，能够在1 h内完成多种“即插即用”型任务模块的装配^[4]。近年来，随着任务和应用范围逐步扩大，为增强负载和自持能力，无人水面艇的艇型结构向大型发展。2010年美国国防高级研究计划局（DARPA）率先开展了“海上猎手”大型反潜无人艇项目^[5]。2020年以来，美军又陆续启动了中型无人水面艇（MUSV）、大型无人水面艇（LUSV）、海上无人值守船（NOMARS）、幽灵舰队/霸主计划等中大型无人水面艇项目^[6,7]。

国内无人水面艇发展同期也经历了从普通艇型向特殊艇型发展的过程，平台执行任务能力也由单任务向多任务转变。比较典型的有珠海云州智能科技股份有限公司、中国船舶集团有限公司等单位研制的无人水面艇，初期以执行特定任务为主，目前则向着多任务能力方向发展^[8,9]，例如中国船舶集团有限公司研制的JARI-USV多用途无人作战艇，具备态势感知、火力打击等多任务遂行能力，如图1所示。

(2) 无人水下航行器

无人水下航行器具有隐身性能好、效费比较高、机动性能好、作战用途广等优势^[10]，主要承担海洋环境监视和调查、情报/侦察/监视、反水雷、时敏打击、反潜战、特种作战等任务。在各国顶层战略规划文件指导下^[8]，无人水下航行器已实现了多层次、全方位、体系化发展，例如美国Bluefin、



图1 JARI-USV多用途无人作战艇

REMUS系列等^[9-13]。目前部分国家的海军中已装备中小型无人水下航行器，但为增强平台任务能力，近几年加快了概念更新、遂行功能任务更多的大型UUV发展，如美国的“虎鲸”“蛇头”，俄罗斯的“大琴键”等大型察打一体UUV等。凭借更强的载荷能力和自持能力，有效支撑了察打一体、载荷输送、信息搜集、通信互联、支援保障等能力。

我国UUV发展虽然起步较晚，但近几年也进入快速发展时期。各种类型的UUV呈系列化快速发展态势，例如中国科学院沈阳自动化研究所的CR系列、“潜龙”系列UUV^[11,12]（见图2），天津大学的“海燕”系列水下滑翔机；民用系列化中小型UUV产品种类更是繁多。同时，UUV在长航时、大海深等能力方面不断提升，天津大学“海燕-L”号于2018年挑战了水下续航4个月^[11]，“海燕-X”号于2020年完成了水下10 619 m持续现场观测，哈尔滨工程大学的“悟空”号于2021年实现了10 896 m水深独立工作等。

(3) 无人水下预置系统

无人水下预置系统是一类搭载有不同类型载荷，预先部署在敏感海域中，可在水下长期待机、远程唤醒的全自主的新概念水下无人系统，具有隐蔽性好、长期潜伏、任务多样、无人员伤亡等优点。美国为强化其前沿存在能力，引领开发了“海德拉”（Hydra）、上浮式有效载荷（UFP）、前沿部署能源和通信前哨站（FDECO）等为代表的无人水下预置系统^[12]，还构建了以近海水下持续监视网络（PLUSNet）、可部署自动分布式系统（DADS）为代表的水下预置感知网络^[1]；俄罗斯研制了“赛艇”海底导弹系统^[13,14]。另外，还有用于水下导航、

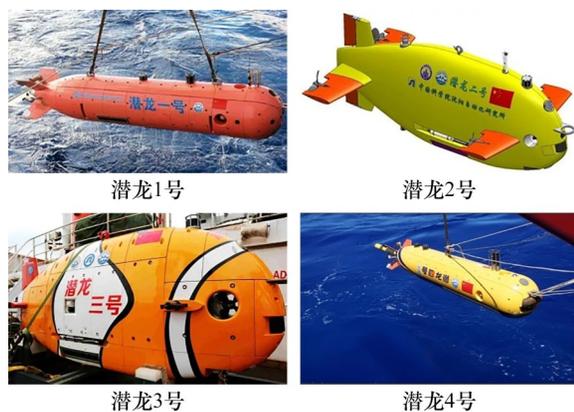


图2 “潜龙”系列无人水下航行器

通信以及能源补给的水下预置系统,例如中国科学院海洋研究所研发的深海潜标完成了深海6000 m的观测数据实时传输,初步构建了覆盖深浅海域,包含移动固定、打击探测载荷的水下无人预置装备体系,推动形成了新型前沿预置作战概念,形成了分布式跨域作战能力。

(4) 新概念海上无人平台

随着仿生、跨介质等前沿技术发展,近年来一系列新概念、新构型的海上无人平台快速发展。在仿生方面,西北工业大学研制了系列化仿蝠鲼水下航行器,具备滑扑一体自主变形能力,实现了与鱼和谐混游^[11]。在跨介质方面,水空跨介质航行器发展迅速,国内外研制了固定翼、多旋翼等不同形式的跨介质航行器,部分采用仿生学设计思想,兼顾水下航行和空中飞行能力,有效拓展了任务域,例如加拿大舍布鲁克大学的“海鸭”、麻省理工学院的“飞鱼”、美国哈佛大学的仿生扑翼昆虫、北卡罗来纳州立大学和特力丹科学与成像公司联合开发的“鹰鳐”^[15]、英国帝国理工学院研制的“AquaMAV”、北京航空航天大学“鳀鸟”、上海交通大学的“龙虱-Δ”等^[13,16]。

2. 集群协同技术发展

由于海上无人系统个体在一定程度上仍存在载荷和任务能力有限、作战功能较为单一等不足,导致独立执行复杂任务存在一定困难。目前,一方面通过大型化发展,增加无人系统负载以提升任务能力,另一方面通过多无人系统集群、多无人系统跨域协同,利用集群协同所具有的任务能力强、任务范围广、抗毁重构性强、执行任务意志坚决等优势,弥补单平台能力不足,提高多任务适应能力。因此,在突破群组协同控制和组网通信等关键技术基础上,海上无人系统集群控制与组网协同成为发展重要方向。

在无人集群技术研究方面,早期国内外开展了以程控为主的编队控制测试和演示,智能化水平相对较低。近年来,由美国海军研究署牵头分别于2014年和2016年开展了两次无人水面艇“蜂群”演示,在“数据融合系统(DADFS)”和“感知与指控系统(CARACaS)”支撑下,实现了无人水面艇集群从行动协同、任务协同到任务自协同,整个控制回路无需人工参与,智能无人集群技术初具雏形^[14]。2018年美国SwarmDiver微型无人潜航

器集群系统,通过采用蜂群算法实现集群决策,并具备与其他无人水下航行器协同能力。2021年哈佛大学Blueswarm鱼型水下机器人首次在水下机器人领域展示了具有内隐协调的复杂三维群体行为,展示了一个分散但具有自主性的集群系统,具备高度自主性和灵活性。

在跨域协同技术研究方面,美国、英国、法国等国家通过作战概念验证,重点突破跨域通信和指控能力,初步解决了与无人系统集群协同作战密切相关的集群发射回收、编队机动、自主控制与任务管理、信息共享、跨域通信指控等关键技术问题^[17-21]。2015年DARPA启动的跨域海上监视和瞄准项目,构建了一种能够跨域执行监视与瞄准任务的“系统之系统”体系结构,形成能够快速响应、无处不在的进攻能力,迫使对手大幅提升海上行动成本。另外还有“潜艇-UUVs-UAV”子母式协同作战系统、欧盟GreX项目、海上无人系统研究OCEAN2020项目、法国Action项目^[22,23]等。国内相比国外起步较晚,还处于通信自组网与简单任务决策演示验证阶段。2018年中国科学院沈阳自动化研究所联合多家单位完成了空海一体化立体协同观测试验(见图3),实现了弱通信、低空近海复杂环境状态下对海上快速移动小目标的自主精确跟踪和调查取证,是国内首次多平台跨域技术验证试验^[24]。

(三) 系统演示和能力验证

在技术研究和装备研发基础上,国外近年来加速推进海上无人系统技术演示验证,并通过军事演习等活动,对海上无人系统技术在任务中的关键能力进行应用验证和迭代升级。

2016年英国在“无人战士”(unmanned warrior)军事演习中演示了25种无人系统的情报/监视/侦察、反潜、反水雷作战能力,展示了持久高效执行自主反潜任务和实时交换数据的能力。在2016年和2017年的美国“先进海军技术演习”(ANTX)中,美国利用开发的跨域无人系统协同作战控制架构



图3 空海一体化立体协同观测试验

“先进任务管理与控制系统”(AMMCS),成功完成了跨域无人协同的演示验证。2017年的演示实现了同时控制8个无人系统(包括无人水下航行器、无人水面艇、无人机)对水下目标进行定位和攻击。2019年美国“先进海军技术演习”中,使用“金枪鱼-9”无人潜航器、通用无人水面艇、濒海战斗舰以及核潜艇等作战平台演示了有人/无人平台、系统跨域协同探测和识别等潜在作战概念。2016—2019年,美国每年组织的无人演习逐步实现了协同组网、行动协同、任务协同、有人/无人协同的迭代发展,验证了海上无人系统的侦察、反潜、反水雷、护航等协同任务能力。

2021年4月,美国海军在圣迭戈附近海域首次开展“无人综合作战问题-21”演习。演习着眼高端战争需求,将多域有人、无人能力整合到各种有挑战性的作战场景中,开展了情报侦察和监视,目标跟踪和精确打击,空中、水面、水下无人系统以及有人/无人编队协同、无人“蜂群”作战等演习科目,旨在加强有人/无人协同作战能力建设,积累混合舰队作战运用经验,标志着美国海军编组有人/无人协同作战迈出实质性步伐^[25]。2023年5月,美国太平洋舰队又开展了“无人系统综合作战问题23.1”演习,聚焦验证无人系统运用情况,测试和开展“舰队中心”概念和能力,重点关注海上和水下远程火力、监视侦察、指挥控制以及情报能力。

通过系统演示和能力验证,推动了海上无人系统新型装备列装、旧型装备升级,提升了态势感知、协同作战能力,扩展了作战域,任务执行向多样化发展,指挥控制向智能化发展。由于无人平台的智能化水平短期内尚无法达到有人平台程度,未来有人/无人系统高效协同将是发展的重要方向。

三、海上无人系统发展趋势与面临挑战

(一) 发展趋势

综合当前发展现状,无人水面艇、无人水下航行器、无人水下预置系统等海上无人系统逐步形成了多层次、全方位、体系化的装备谱系,呈现出平台关键性能持续提升、载荷功能逐渐多样、自主能力不断增强等发展特点。

在平台关键性能方面,逐步向长航时、远航程、大深度方向发展,以适应未来跨域、多维、立体战

场要求;在任务载荷方面,逐步向综合化、通用化、模块化发展,可根据任务需求搭载不同载荷,与其他有人/无人系统搭配形成协同作战体系;在单体智能化方面,单个无人平台逐步具备环境信息感知、数据预评估与处理、自主决策、自学习等能力。

在未来协同作战发展趋势下,集群、跨域成为研究热点。在智能集群协同方面,集群控制向全自主协同模式发展,使命任务由单一的侦察、监视、跟踪等向多任务转变;在跨域协同方面,单平台从单域运行向水空跨介质多域航行发展,多平台从单域协同向多平台跨域协同方向发展,作战模式和作战空间更加灵活和广阔。

(二) 面临挑战

目前随着技术的发展,海上无人系统装备逐步走向应用,但在发展和应用过程中也面临着诸多挑战。

1. 平台方面

动力能源的限制。海上无人平台特别是水下无人平台,由于其自身质量和体积等的限制,单体负载能力有限,搭载的能源和动力装置功率有限,约束了无人平台的续航能力和机动能力,在一定程度上限制了其活动范围,对能源保障提出了较高要求,同时也限制了其搭载的任务载荷,因此单个海上无人平台在独立执行长期复杂任务方面面临极大挑战^[17]。

复杂环境的影响。由于海上无人平台长期处于复杂、恶劣的高动态条件下,对海上无人系统的复杂环境适应性提出了挑战,特别是复杂高动态环境中系统任务能力以及系统可靠性等,都直接关系到任务是否能够顺利执行^[18,19]。而对于无人水下预置系统,深远海部署和使用方式的特殊性对装备在深水高压、海水腐蚀、微生物污损、海底沉积物影响等严苛环境条件下的适应性和可靠性都提出了挑战^[21]。

新型构型的设计。随着仿生、跨介质等新型海上无人系统的发展,在新型构型方面提出了更复杂的设计要求。例如,跨介质航行器需要平台兼顾空中巡飞、平稳入水、水下巡航和稳定出水等不同阶段的环境介质特性,在构型设计时需考虑水空介质对结构设计不同要求所带来的影响,并克服入水瞬间由于气液密度差异引起的巨大冲击力和出水时自

由液面效应及水冢效应影响,这对跨介质构型的设计提出了巨大挑战。

2. 通信组网方面

由于海洋环境的复杂性和特殊性,海上无人系统面临着复杂恶劣通信环境的严重制约。无人水面艇受天线限制,恶劣海况下会影响其与其他平台以及与岸上的通信距离,并且通信组网在无人艇集群数量较多、距离较远时将面临很大挑战^[18]。而对于无人水下平台,由于海水介质的特殊性,现有手段水下通信距离短且效率低,在很大程度上制约了水下无人平台之间以及与外界之间的信息传递^[19],弱通信约束条件下协调控制难,导致难以实时有效掌控其状态。组网通信上面临的挑战,在一定程度上影响了无人平台融入现有海上装备体系,同时也成为目前限制海上无人集群协同运用效能发挥的重要因素之一。

3. 集群协同方面

复杂态势信息一致性。态势感知是无人系统必须具备的能力和解决的问题,由于构成集群协同的海上无人系统所搭载载荷获得的信息在感知方式、数据类型、数据尺度、噪声水平等方面都存在显著差异,同时海上无人集群协同系统处在复杂、高动态性的环境中,所感知信息和信息传输都容易被各种因素干扰,因此对于协同感知来说,将不同无人系统得到的感知信息进行统一融合和表述,是态势感知信息共享共用的关键,是海上无人系统集群协同应用需要解决的重要问题。

实时智能决策控制。集群协同中不同无人系统在进行智能决策和控制时,将以协同系统中获得的各种数据为基础,这些数据包括不同大小维度的环境信息、任务信息、目标信息等,这些信息数据为实现全局最优决策提供了基础。但是多维度复杂约束下的实时决策控制给算法实现带来了实时性问题,并且由于多约束作用,最优决策求解也会遇到局部极小和不可解的问题,这些都给实时智能决策控制带来了挑战。

4. 跨域协同方面

多平台跨域高效协同面临异构数据融合、跨介质通信、高动态任务分配控制等关键问题挑战。跨域协同系统中平台的传感器具有多源性、异构性,随着传感器节点的增多,数据呈现指数型增长,异构数据融合计算的挑战性巨大;跨介质通信时存在

信息容量和延迟的差异,致使组网通信信息传递的网络拓扑存在高动态性、链路质量存在频动性,跨介质通信亟待理论突破;针对跨域协同作战面临的高对抗、时敏环境中存在态势变化,需多平台跨域无人系统具备实时任务调整和重规划能力,高动态任务规划控制理论急需发展。

在跨域协同应用中,由于无人水面艇、无人水下航行器等不同域无人系统在指挥控制方式上的差异,需要更加高效智能的指挥和干预方法,保证有效地实现不同域无人系统的集群协同运用,优势互补,充分发挥各自的能力。目前,海上无人系统还难以完全独立执行任务,应用中需要根据任务情况和执行过程对无人系统进行指挥和干预。通过人机协同的方式执行使命任务,在未来一段时期内都将是无人装备的主要运用方式。

四、海上无人系统发展重点关键技术

针对海上无人系统技术发展所面临的挑战,未来重点针对海上无人平台、系统智能技术、跨域协同、指挥控制、应用支撑等方面开展关键技术研究。

(一) 海上无人平台总体技术

海上无人平台需要适应复杂海洋环境,才能可靠发挥其能力,需要重点突破总体结构、动力能源、可靠性等方面的关键技术。总体结构方面,针对深远海复杂海洋环境,开展高强度复合材料结构成型技术、长时耐压防腐蚀技术、模块化集成技术等,支撑平台在深远海环境中持续执行任务;动力能源方面,重点开展高比能能源系统技术、深远海能源自持及补给技术等,满足海上无人系统长效自持运行;可靠性方面,重点针对恶劣环境下平台设备组件可靠性设计、自主检测维护技术等开展研究,保证无人系统的持续有效运行;新构型设计方面,针对仿生、跨介质等不同要求,重点开展高效灵活仿生设计、跨介质总体构型设计等技术研究,推动新概念平台发展。

(二) 海上无人系统智能关键技术

海上无人系统的智能化是实现和提升海上无人系统任务能力的关键,对于单个海上无人平台,需

要具备环境信息感知、数据预评估与处理、自主决策等能力，对于海上无人集群需要具备集群控制、态势感知、信息共享、任务规划等能力。在智能环境感知方面，针对复杂海洋环境感知信息多源性、异构性、动态性等特点，开展智能数据关联与数据融合^[20]、协同目标状态预测、协同态势理解等技术研究；在智能决策控制方面，为应对高对抗、高动态环境任务，需要重点开展面向任务的智能自主控制、自适应动态编队、协同任务规划与决策等技术研究，实现海上无人系统在时间、空间、功能上的统一控制协调、高度自主协作。在集群智能方面，为形成具备体系开放、弹性互联、动态重构、自组织协同、集群认知等特性的海上无人集群，重点开展集群信息共享交互、集群态势智能认知、集群智能控制等关键技术研究，支撑无人集群成为一个自组织、自适应协作的整体。另外，针对生物集群智能行为特征机理、无人集群智能演进技术等开展探索研究，通过生物集群智能行为机理助推无人系统集群群体行为智能水平提升。

（三）海上无人系统跨域协同关键技术

海上无人系统的跨域协同是无人系统自主性的升华，是平台能力提升的倍增器，关键技术涉及多平台跨域协同系统的态势信息融合、通信组网和任务协同规划等。在多源态势信息融合方面，为充分发挥各无人平台运动和信获取优势，发展无人平台边缘计算的广域分布式数据融合技术，通过跨域边缘节点构建数据信息融合处理体系，提升目标融合精度和全域态势一致性。在跨介质通信组网方面，为克服跨介质信息交互和电磁环境强干扰的问题，加强跨域通信网络资源状态动态监测和调整技术，设计抗干扰措施与时空一致性保障手段，实现跨域通信链路的有效可靠^[23]。在高动态任务协同规划方面，为能够快速响应作战指令，提高跨域作战体系的作战能力，需发展跨域无人系统高动态任务协同规划技术，具备战场态势强实时动态变化下的战场资源分配、冲突消解和联合任务能力。

（四）海上无人系统指挥控制关键技术

海上无人系统的指挥控制是复杂多样的无人系统融合成一个组织有序、适应力强、稳定性好的统一整体，是应对未来高弹性作战任务及海洋环境变

化的关键。海上无人系统指挥控制涉及指挥控制架构、有人/无人协同等。在指挥控制架构设计方面，面对海上复杂多样的任务，可参考水面舰艇编队和自然生物群集控制开展指挥控制体系架构设计，保证无人系统组织有序、适应力强；在有人/无人协同方面，发展人机高效协同技术，通过有人指挥和干预，在当前技术条件下保证无人集群应用有效落地，通过有人/无人集群协同作战，优势互补，充分发挥各自的能力。

（五）海上无人系统支撑关键技术

海上无人系统支撑技术主要指保障海上无人系统作战使用的相关技术，是系统能力发挥的重要基础，涉及通信、导航、定位、能源等。海上无人系统支撑关键技术重点关注信息网络、导航定位、综合保障等方面。在信息网络方面，针对海洋复杂特殊环境，开展通用数据链技术^[21]、自适应网络通信技术、新型水下通信技术等方面研究，实现海上无人平台与指控站、无人平台之间、无人平台与中继设备、武器系统与操作平台之间的指令和信息传输。在导航定位方面，基于传统及新型导航定位技术，开展新型导航原理、复合导航定位、集群协同导航定位等技术研究，探索水下导航通信网络基础设施建设，解决环境复杂、信息源少、任务范围广等要求下的导航定位问题。在综合保障方面，针对布放回收、能源补给、检测维修等内容，重点开展复杂环境下通用布放回收装置设计、水下精确导引对接技术、高动态大功率无线电能传输技术、综合快速维修保障技术等研究，为系统任务转换、状态恢复和任务再执行提供各种保障。

五、海上无人系统重点发展方向及对策建议

海上无人系统的发展，要紧盯总体规划、任务使命需求、核心关键技术、重点平台系统和应用演示迭代等方面，按层次逐步推动技术和装备的发展。

（一）重点发展方向

在平台总体方面，从长期发展视角建立完整的平台总体规划路线，明确不同层次子系统定义，设计不同子系统之间的接口标准化和兼容性规则，形

成海上无人系统平台标准化规范。同时通过国内国外多领域交流合作,共同推进技术进步和总体标准化工作。

在系统智能方面,基于当前智能化技术的快速发展,在信息处理和决策方面,增强智能学习算法的鲁棒性和可扩展性,实现海上无人系统的自主决策和智能控制。采用深度学习、神经网络等技术,推进智能学习模型模拟训练,提高海上无人系统的感知、识别和自主决策能力。

在跨域协同方面,通过采用海上通信卫星、第五代移动通信技术(5G)、军事物联网等技术,加强海上、空中、陆地等多领域间的信息互联互通,增强海上无人系统与其他领域的协同能力,促进跨域合作和技术创新。加强对跨域通信网络的建设和维护,建立海上无人系统的数据共享机制,促进跨领域融合。

在指挥控制方面,建立完善的指挥控制系统,包括人机交互、自主任务规划和动态路径规划等功能,实现对无人系统的远程监控和控制。在实现这一目标的过程中,注重基于任务需求开展指挥控制系统的人性化设计,提高用户体验,同时加强对指挥控制系统的安全防护。

在系统保障方面,为了确保海上无人系统的稳定运行,建立健全的后勤保障体系,包括设备维护、故障诊断和修复、备件保障等方面。同时,加强后勤保障技术研究,提高关键部件的维修、更换等技术能力,以确保复杂环境下的适应性和稳定性。

(二) 对策建议

1. 总体思路,坚持战略引领,突出新型无人装备体系化发展

准确把握未来战争形态,将海上无人系统作为必须抢先发展的战略领域。以使命任务为牵引,坚持问题导向、聚焦实战,坚持体系设计、攻防并举,坚持创新驱动、打破常规。按照“高端加强、中端扶持、低端放开”的策略,遵循平台通用化、系列化、标准化和载荷综合化、组合化、模块化发展思路,强化基型平台发展,夯实平台技术基础,以先进成熟的基型主线为中心辐射发展,真正形成基础扎实的体系化装备。同时注重深海、极地等未来战略空间和跨域、集群等前沿方向,实现新型无人装备体系化发展。

2. 体系构成上,遵循稳步前进,推进有人/无人融合化发展

深入开展战争设计研究,围绕我国战略和国家安全需求,以切实解决具体问题、满足国家军事需求为根本,依据自身环境和优势,构建完善具有我国特色的海上无人装备体系,有效发挥国家战略需求支撑作用。考虑和遵循技术发展现实,未来一定时期内以构建有人/无人协同体系为目标,稳步前进,按照先小规模后大规模、先同域后跨域、先少人后无人的思路,积极探索海上无人系统体系运用,满足多样化任务需求。重视海上无人系统融入现有装备体系问题,针对融合基础条件、技术体制、操作系统、一体化网络信息体系、无人系统集成验证等方面开展针对性的筹划和研究,促进体系真正融合。

3. 装备发展上,紧跟前沿科技,加快无人系统智能化发展

结合当前智能技术特别是军事智能技术的发展,紧跟大数据、云计算、物联网等前沿科技,加速前沿理论和技术在无人系统中的转化和应用,通过智能加持,统筹推进海上无人系统智能化发展。按照现有装备“+智能”以及新型装备“智能+”的发展模式,对于现有海上无人系统装备,通过智能技术增量,提升智能水平,进一步发挥使用效能;对于未来发展的海上无人系统装备,通过智能化设计,使其具有智能属性。在海上无人系统智能化水平不断提升的基础上,瞄准未来全域任务需求,通过军事智能技术创新应用,加快实现海上无人系统跨域协同、自主集群、智能博弈对抗等能力。

4. 技术攻关上,着眼自主创新,大胆探索智能无人技术自主化发展

在海上无人系统重点关键技术攻关上,以侦察预警为优先、察打一体为方向,着眼技术自主创新,大胆探索,掌握关键核心技术。瞄准海上无人系统能力短板,在组网通信、导航定位以及探测识别等传统瓶颈技术方面,持续深入重难点问题攻关,提升水下自主作战能力;瞄准新型海上无人系统发展趋势,在跨域、仿生等新概念技术方面,积极探索创新,挖掘创新技术转化应用,助推我国智能无人装备自主发展;瞄准海上无人系统集群、跨域协同运用,在集群控制、集群智能、跨域协同、跨域指控等技术方面,挖掘智能技术应用潜力,推

进未来海上无人系统集群、跨域多维化发展。通过技术攻关上自主创新,走出自主化发展之路,为占领无人系统发展领域制高点奠定基础。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 15, 2023; **Revised date:** April 30, 2023

Corresponding author: Qiu Zhiming is a research fellow from the Naval Research Institute and member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is shipborne weapon systems and application engineering. E-mail: qiuzhiming280@sohu.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project "Strategic Research on Major Basic Technology and Innovation Capability Development of Marine Equipment" (2022-HYZD-07)

参考文献

- [1] 邱志明, 马焱, 孟祥尧, 等. 水下无人装备前沿发展趋势与关键技术分析 [J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(1): 1-9.
Qiu Z M, Ma Y, Meng X Y, et al. Analysis on the development trend and key technologies of unmanned underwater equipment [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(1): 1-9.
- [2] 张卫东, 刘笑成, 韩鹏. 水上无人系统研究进展及其面临的挑战 [J]. 自动化学报, 2020, 46(5): 847-857.
Zhang W D, Liu X C, Han P. Progress and challenges of overwater unmanned systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(5): 847-857.
- [3] 徐玉如, 苏玉民, 庞永杰. 海洋空间智能无人运载器技术发展展望 [J]. 中国舰船研究, 2006, 1(3): 1-4.
Xu Y R, Su Y M, Pang Y J. Expectation of the development in the technology on ocean space intelligent unmanned vehicles [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2006, 1(3): 1-4.
- [4] 张波, 王磊, 李英军. 无人艇的发展趋势 [J]. 科技视界, 2016: 301-302.
Zhang B, Wang L, Li Y J. Development trend of unmanned surface vehicle [J]. Science & Technology Vision, 2016: 301-302.
- [5] 唐波, 孟获, 范文涛. 水面无人艇在水面舰艇编队水下防御的发展展望 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(2): 121-126.
Tang B, Meng D, Fan W T. Development prospect of unmanned surface vehicle in underwater defense of surface ship formation [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2022, 5(2): 121-126.
- [6] 邱志明, 罗荣, 王亮, 等. 军事智能技术在海战领域应用的几点思考 [J]. 空天防御, 2019, 2(1): 1-5.
Qiu Z M, Luo R, Wang L, et al. Some thoughts on the application of military intelligence technology in naval warfare [J]. Air & Space Defense, 2019, 2(1): 1-5.
- [7] 孔维玮, 冯伟强, 诸葛文章, 等. 美军大中小型水面无人艇发展现状及启示 [J]. 指挥控制与仿真, 2022: 1-6.
Kong W W, Feng W Q, Zhuge W Z, et al. Development and enlightenment of large and medium-sized unmanned surface vehicles of the US Navy [J]. Command Control & Simulation, 2022: 1-6.
- [8] 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.
Chu L P, Yan H H, Fan Q, et al. Overview of unmanned underwater vehicles and the communication technologies abroad [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(2): 112-118.
- [9] 柯冠岩, 吴涛, 李明, 等. 水下机器人发展现状和趋势 [J]. 国防科技, 2013, 34(5): 44-47, 6.
Ke G Y, Wu T, Li M, et al. The improvements and trends of the unmanned underwater vehicles [J]. National Defense Technology, 2013, 34(5): 44-47, 6.
- [10] 肖玉杰, 邱志明, 石章松. UUV 国内外研究现状及若干关键问题综述 [J]. 电光与控制, 2014, 21(2): 46-49, 89.
Xiao Y J, Qiu Z M, Shi Z S. On current research status of UUV and its critical technologies [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(2): 46-49, 89.
- [11] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27-44.
Song B W, Pan G, Zhang L C, et al. Development trend and key technologies of autonomous underwater vehicles [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 27-44.
- [12] 姚明超, 焦慧锋, 张琳丹, 等. 水下预置式无人装备现状及发展分析 [R]. 西安: 第五届水下无人系统技术高峰论坛, 2022.
Yao M C, Jiao H F, Zhang L D, et al. Current situation and development analysis of underwater preset unmanned equipment [R]. Xi'an: Proceedings of the 5th Underwater Unmanned Systems Technology Summit Forum, 2022.
- [13] 王凯朋, 孟祥尧, 滕月慧, 等. 海空跨域飞行器流体动力特性研究 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(19): 46-50.
Wang K P, Meng X Y, Teng Y H, et al. Study of aerodynamic and hydrodynamic characteristics for aerial underwater vehicle [J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(19): 46-50.
- [14] 况阳, 顾颖闽. 基于几何力学的水面无人艇艇群控制技术 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(12): 123-126.
Kuang Y, Gu Y M. control technology of USV group based on geometry mechanics [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(12): 123-126.
- [15] 孙祥仁, 曹建, 姜言清, 等. 潜空跨介质无人飞行器发展现状与展望 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(3): 178-184.
Sun X R, Cao J, Jiang Y Q, et al. Development status of unmanned underwater-aerial cross-domain vehicles [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2020, 3(3): 178-184.
- [16] 秦靖淳. 跨介质多旋翼潜空两栖飞行器运动控制研究 [D]. 长春: 吉林大学(硕士学位论文), 2020.
Qin J C. Research on motion control of trans-medium multi-rotor water-air amphibious vehicle [D]. Changchun: Jilin University (Master's thesis), 2020.
- [17] 王金云, 杨在林, 王孟军, 等. 美军无人水下潜航器技术发展综述 [J]. 飞航导弹, 2015, 371(11): 54-58, 63.
Wang J Y, Yang Z L, Wang M J, et al. Summary of the development of US unmanned underwater vehicle technology [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015, 371(11): 54-58, 63.
- [18] 彭周华, 吴文涛, 王丹, 等. 多无人艇集群协同控制研究进展与未来趋势 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 51-64.
Peng Z H, Wu W T, Wang D, et al. Coordinated control of multiple unmanned surface vehicles: Recent advances and future

- trends [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 51–64.
- [19] 赵留平, 李环, 王鹏. 水下无人系统智能化关键技术发展现状 [J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 12–24.
- Zhao L P, Li H, Wang P. Development of key technologies for intelligent unmanned underwater system [J]. Unmanned Systems Technology, 2020, 3(6): 12–24.
- [20] 张京晶, 万宇婷. 测量无人艇研究进展综述 [J]. 海洋测绘, 2020, 40(4): 39–43.
- Zhang J J, Wan Y T. Summary on USV based on maritime measurement [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2020, 40(4): 39–43.
- [21] 朱丰, 袁艺, 王永华, 等. 智能无人系统大步登上战争舞台 [J]. 军事文摘, 2022, 523(19): 28–31.
- Zhu F, Yuan Y, Wang Y H, et al. Intelligent unmanned systems step onto the stage of war [J]. Military Digest, 2022, 523(19): 28–31.
- [22] 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.
- He Y Q, Qin T Y, Wang N. Cross-domain collaboration: New trends in the development and application of unmanned systems technology [J]. Unmanned Systems Technology, 2021, 4(4): 1–13.
- [23] 初军田, 张武, 丁超, 等. 跨域无人系统协同作战需求分析 [J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(6): 1–8.
- Chu J T, Zhang W, Ding C, et al. Requirement analysis on cross-domain unmanned system cooperative operation [J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(6): 1–8.
- [24] 王伟平, 张允君, 董超, 等. 海洋无人系统跨域协同观测技术进展 [J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 14–21.
- Wang W P, Zhang Y J, Dong C, et al. Progress of cross domain collaborative observation technology for marine unmanned system [J]. Unmanned Systems Technology, 2021, 4(4): 14–21.
- [25] 孟祥尧, 马焱, 曹渊, 等. 海洋维权无人装备发展研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 49–55.
- Meng X Y, Ma Y, Cao Y, et al. Development of unmanned equipment in marine rights protection [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 49–55.