

doi: 10.7690/bgzd.2025.02.017

## 两栖作战中舰载无人机的应用与展望

郭亚楠<sup>1,2,3</sup>, 曹小群<sup>3</sup>, 何友<sup>2</sup>, 张源原<sup>1</sup>, 彭柯澄<sup>3</sup>

(1. 海军航空大学教练机模拟训练中心, 辽宁 葫芦岛 125001; 2. 海军航空大学信息融合研究所, 山东 烟台 264001;  
3. 国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410073)

**摘要:** 针对两栖作战在实际应用中仍然面临诸多挑战, 且系统理论研究较少, 缺乏实战化训练的理论指导等问题, 提出两栖作战中舰载无人机在实践中的理论探索。首先分析两栖作战特点、舰载无人机的研发进展及关键技术; 然后分析两栖作战中舰载无人机的未来发展与应用趋势; 最后以智能驱动、体系支撑以及人机协同的两栖作战作为核心力量进行探讨。结果表明: 该分析可为两栖作战中舰载无人机作战体系建设提供借鉴和参考。

**关键词:** 两栖作战; 舰载无人机; 无人集群; 编队协同

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A

## Application and Prospect of Shipborne UAV in Amphibious Warfare

Guo Ya'nan<sup>1,2,3</sup>, Cao Xiaoqun<sup>3</sup>, He You<sup>2</sup>, Zhang Yuanyuan<sup>1</sup>, Peng Kecheng<sup>3</sup>

(1. *Simulation and Training Center, Naval Aviation University, Huludao 125001, China;*

*2. Institute of Information Fusion, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;*

*3. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)*

**Abstract:** In view of the fact that amphibious warfare still faces many challenges in practical application, and there is little systematic theoretical research and lack of theoretical guidance for actual combat training, this paper puts forward the theoretical exploration of carrier-based UAV in amphibious warfare in practice. Firstly, the characteristics of amphibious warfare, the development progress and key technologies of carrier-based UAV are analyzed. Then, the future development and application trend of carrier-based UAV in amphibious warfare are analyzed. Finally, the amphibious warfare with intelligent drive, system support and man-machine cooperation as the core force is discussed. The results show that the analysis can provide reference for the construction of carrier-based UAV combat system in amphibious operations.

**Keywords:** amphibious operation; shipborne UAV; unmanned group; formation coordination

### 0 引言

两栖作战是一种极为复杂的战争形式, 其组织和实施受多种不确定因素影响。随着科技的发展和武器装备的迭代更新, 现代两栖作战的作战理论、作战方法、作战指挥等方面正在发生巨大的变化<sup>[1-3]</sup>。进入 21 世纪后, 在信息化战争背景下, 世界各军事强国一直在不断提升其两栖作战能力, 以争取这一战争领域的主动权。美国一直高度重视其两栖作战能力的提升, 并且在各类实战演习、兵棋推演中进行了大量的针对性模拟对抗。近年来, 日本在发展军事力量方面异常活跃, 尤其重视其两栖作战力量的发展与升级, 借助其先进的工业体系, 不断提升两栖作战武器装备水平, 已具备强大的两栖作战能力。此外, 日本自卫队与美军频繁进行大规模军事演习, 从中检验和提升两栖作战能力。预计日本在未来仍会继续扩大其两栖作战部队规模, 并充分利用其科技优势提升两栖作战装备性能和作战水平; 因此, 加强两栖作战力量的建设是国防力量

建设的重要组成部分, 必须对此高度重视。

近年来, 无人机技术发展迅速, 尤其在人工智能、物联网以及区块链等技术的推动下, 正进入一个前所未有的机遇期<sup>[4-6]</sup>。作为一种新型作战力量, 战场无人机已经从传统情报收集、战场环境侦察等任务, 向无人机蜂群协同作战、火力支援等方向发展。在现代化海上军事力量建设中, 舰载无人机受到了各国的广泛关注。作为现代航母战斗力体系的重要组成部分, 舰载无人机在海空协同作战中的价值日益凸显<sup>[7-9]</sup>。毋庸置疑, 未来航母一体化作战中, 舰载无人机的场景将日益增加。同时, 舰载无人机在两栖作战中的作战应用, 已成为当今信息化、智能化、网络化作战中的一个重要研究课题。

尽管舰载无人机的应用已取得了显著进展, 但在两栖作战中的应用仍然面临诸多挑战, 并且其系统的理论研究较少, 缺乏实战化训练的理论指导。为深入理解两栖作战中舰载无人机应用与发展面临的机遇及挑战, 笔者介绍了两栖作战的特点以及舰

收稿日期: 2024-07-15; 修回日期: 2024-08-16

第一作者: 郭亚楠(1995—), 男, 山东人, 硕士。

载无人机的研发和应用进展,梳理了舰载无人机的关键技术,对两栖作战中舰载无人机应用与发展趋势进行展望,为相关研究提供探索方向和思路。

## 1 两栖作战与舰载无人机简介

### 1.1 两栖作战

两栖作战是一种进攻性军事行动,通过使用舰艇等方式将己方作战力量投射到敌方或潜在的敌方海岸,实现抢滩登陆的作战目标<sup>[1-3]</sup>。历史上,两栖作战行动都是以船只作为主要的方式运送部队到目标区域,以完成由海上到陆上的兵力投送任务。相比于其它作战场景,两栖作战具有时空跨度大、影响因素多、组织实施复杂等特点,其行动区域涵盖近岸岛屿、远海岛礁、海峡通道以及海外要点等,现代两栖作战正在突破传统陆、海、空有形的作战样式,逐步向网络、空天、电磁以及心理等无形作战领域辐射。

在人工智能技术、无人机技术、物联网技术等科技力量的推动下,两栖作战方式正在发生深刻变化,逐渐向无人化、智能化方向发展,新质作战力量将成为未来两栖作战的关键角色。在传统两栖作战中,普遍采用两栖登陆舰、两栖装甲车、直升机等进行快速突击上陆。在未来的两栖作战中,除依赖先进的有人作战装备,智能决策、物联网、云计算技术支撑下的无人武器装备将发挥越来越大的作用,以无人机、无人艇、无人潜航器为代表的无人作战力量将成为未来两栖作战中的先锋部队,用于执行危险复杂的作战任务。例如,在战争初期,使用无人机部队进行先期火力打击,对战场环境进行情报搜集和态势评估;同时,使用无人潜航器、水下机器人完成水下情报侦察、水下攻击等危险任务。无人武器装备加入两栖作战后,能够大大减少作战中的人员损伤,尤其是在突击抢滩登陆、水下作战等阶段,为实现两栖作战目标提供极大优势。图 1 为想定的两栖作战示意图。

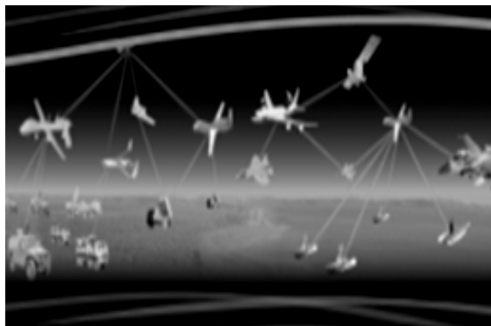


图 1 两栖作战

### 1.2 国外舰载无人机研发与应用进展

在智能化、信息化、网络化技术的推动下,两栖作战的作战模式、力量编成发生了显著变化,其中舰载无人作战力量成为了两栖作战中不可忽视的重要因素。

美国拥有世界上数量最多、性能最先进、实战经验最丰富的舰载无人机。在 2010 年,美海军提出了空中监视与打击系统,该系统旨在打造能够突破敌方防空系统并且具备航母弹射起飞能力的无人打击平台,该平台利用先进的隐身无人机实现精确的对敌火力打击。作为美军最早投入使用的舰载无人机, X-47B 隐身舰载无人机在 2011 年实现了陆地首飞,已发展形成一套较为完整的舰载起降技术<sup>[10]</sup>。在具体性能上, X-47B 隐身舰载无人机可装载 2 t 作战武器弹药,其续航时长约为 6 h。X-47B 隐身舰载无人机航程短,载弹量有限,难以承担预期的作战任务,美海军已转向开发新的舰载无人机项目。2016 年,美国国防部开启 MQ-25“黄貂鱼”(Stingray)舰载无人机项目<sup>[11-12]</sup>,该项目合同达 4 300 万美元,由波音公司、洛马公司等竞争研发。MQ-25 被定位为新一代舰载无人加油机,旨在为舰载机提供空中加油。图 2 展示了 MQ-25A T1 对 E-2D 进行空中加油测试的场景。作为目前最新的航母舰载无人加油机, MQ-25 能够装载约 6 803.89 kg 的燃油,可航行约 926 km 外,为 4~6 架舰载机提供空中加油,增大了舰载机作战的任务半径,实现航母作战力量的远程火力打击,有效增大了航母编队火力拦截和反潜对抗区域,从而弥补了目前航母打击群在情报搜集、远程打击方面的短板。未来在多智能体技术支撑下, MQ-25 舰载无人机将配合多种无人作战武器协同作战,形成先进的无人作战力量体系。



图 2 MQ-25A T1 对 E-2D 的空中加油测试

固定翼无人机具有滞空时间长、载重大等优势,但固定翼舰载无人机的起飞对甲板空间的要求较高。此外,固定翼无人机往往需要特殊的舰载回收

装备进行回收，因此对水面舰艇的体积、起降条件等均有严格要求。旋翼无人机一般可进行垂直起降，因此其上舰的适应性更好。其中，倾转旋翼无人机既具有直升机的垂直起降和悬停能力，同时兼具固定翼飞机速度快、航程远、升限高等优势，其战术优势得到广泛关注。近年来，美军推出了基于 V280 技术发展起来的 V247 倾旋翼无人机。V247 作为一个多用途无人机，配有不同的载荷，包括武器、雷达和其他先进传感器，以及其他任务专用设备。V247 上的空中加油探头有效扩大了其航程，使其在战场特定区域能够工作更长时间。作为舰载预警机时，V247 能在两栖攻击舰 160.93 km 外盘旋警戒 12 h 以上。此外，除了能搭载在两栖攻击舰上，V-247 的尺寸也使其能够停放在阿利·伯克级驱逐舰的机库中，从而能够大大提升驱逐舰的作战能力。同时，其机身侧面安装的声纳浮标发射器，使其比普通直升机更适合执行航空反潜与警戒任务。



图 3 V247 倾转旋翼机无人机

在舰载无人机研发经费投入方面，2022 年，美国国会研究服务部发布的美军无人机项目综合评估报告指出，单套 MQ-25 “黄貂鱼” 舰载无人机系统（1 个地面站、1 架无人机）平均采购价已高达 1.21 亿美元。由此可见，美军在舰载无人机项目上投入了极大的资金支持，舰载无人机作战价值可见一斑。除美国以外，世界其他军事强国也一直在推动舰载无人机的研发工作，如以色列、加拿大和法国等国相继开发了“拓荒者”“哨兵”以及“塘鹅”等舰载无人机。由此不难发现，舰载无人机将成为未来海上作战、两栖登陆作战的重要力量，抓住舰载无人力量建设的先机，对于掌控未来战场的主动权具有重要意义。

## 2 舰载无人机关键技术

### 2.1 舰载无人机测控与通信技术

为实现精准的遥控、遥测、跟踪定位，舰载无人机需要具备先进的测控系统<sup>[13-15]</sup>。数据链是测控

系统的重要组成部分，主要包括测量设备、数据传输设备、通信中继设备等。不同于航天测控系统面向的航天飞行器，无人机会受到大气环境因素影响，而且相比一般无人机，舰载无人机更容易受到强烈的海上风浪、海盐泡沫等不确定因素干扰，导致测控难度更大，更需要注重测控系统的准确性、鲁棒性以及舰载适配性。图 4 为舰载无人机集群通信数据网络示意图。

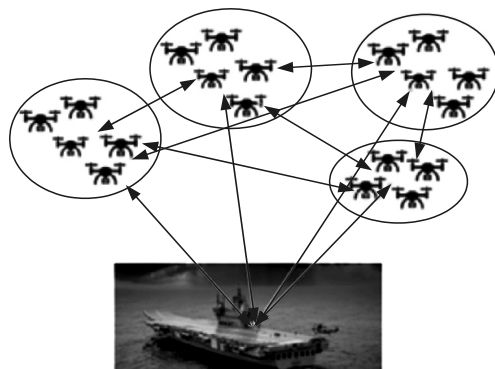


图 4 舰载无人机集群通信数据网络

目前，无人机数据链系统还存在许多问题，例如当前数据传输实时性较差、数据丢失现象频发，特别是在复杂环境中，数据传输量较大时，无人机同舰艇编队的数据通信极易发生故障，从而影响实时的数据传输与共享，使无人机集群协同作战的优势难以发挥，大大削弱了无人集群和舰艇编队协同作战效果，难以达到预期目标。由此，必须充分考虑真实战场环境中的各种隐患问题，设计稳定可靠的数据链通信系统，保证数据情报、指挥控制、无人集群协同等数据信息能够快速、安全、准确地传输。例如，为保证无人侦查数据的实时传输，要尽可能为航母编队与无人机集群之间的数据链预留足够的带宽；在数据传输量较大的情况下，要自主智能地优先处理重要情报和指挥控制信息，充分利用分布式协同、智能控制技术，实现最佳的数据通信和信息共享，使得指挥人员快速掌握战场上的关键信息，保证情报获取的时效性以及准确性，从而提升指挥效率和无人机编队作战的机动性和灵活性。

### 2.2 舰载无人机侦察与反侦察技术

在复杂战场环境下，无人机要躲避敌方火力攻击并且完成情报侦察任务，必须具备强大的情报搜集和反侦察能力。为此，无人集群需要进行实时的情报信息共享与交互，从而实现无人机蜂群协同侦察。在战场环境中，无人机通过光电、雷达等机载

设备侦察环境信息，将搜集到的战场环境数据进行快速处理传输，借助数据处理系统实现目标识别、态势分析，提供尽可能全面准确的战场环境态势信息，为决策系统做出准确合理的战术决策提供情报支持。目前，无人机侦察的关键技术包括多传感器数据采集、多源异构信息融合等。随着探测手和仪器的不断升级，无人机的情报侦察能力正在不断提升。

为提升战场生存几率，无人机需要具备强大的反侦察能力，隐身技术成为实现这一目标的重要手段<sup>[16-18]</sup>。隐身技术的关键内容是提升反雷达探测的能力，即提高目标在雷达探测下的隐身性能。当前，隐身无人机主要通过外形隐身技术、材料隐身技术以及红外隐身技术等实现反雷达探测的目标。通过使用隐身技术，无人机能够大大提升己方生存几率，在关键时刻甚至能够起到决定性作用，形成战场上的不对称优势。鉴于隐身技术在现代化战争中的巨大潜力，世界各军事强国均高度重视隐身技术的研究和应用，对于新型隐身材料的研发投入了大量资金支持。在各国军方推动下，隐身无人机的隐身性能、生存能力、反侦察能力已有显著提升。

表 1 为相关方法的对比介绍

方法	优点	缺点
经典控制方法	理论成熟，物理意义明确，易于工程设计与实现	在舰船上飞行验证的实例极少，舰尾气流抑制、故障容错控制等问题有待进一步工程实现及验证
现代控制方法	得到了大量的仿真验证	难以实现无人机系统发生故障下的精确着舰/回收
非线性与自适应控制方法	对于复杂非线性系统具有较好控制效果	解决系统故障引起的不确定性问题时，需要与自适应控制或智能控制进行有效结合
智能控制方法	随着人工智能技术的迅猛发展，智能控制在无人机自主着舰中具有广阔的应用前景	智能控制与优化在无人机自主着舰的应用尚处于起步阶段

### 2.3 舰载无人机着舰技术

起降性能对舰载无人机而言尤为重要，直接关系到舰载无人机的作战性能。机动灵活的起降能力是舰载无人机参与现代化战争的重要保证。舰载无人机自主着舰作为多学科交叉融合的前沿问题，涉及控制科学与工程、飞行器设计、信息与通信工程等多门学科，具有极大的挑战性和应用价值<sup>[19-21]</sup>。目前，相比于无人机着陆技术，舰载无人机着舰存在诸多困难：舰载无人机着舰平台是一个非静止的 6 自由度运动平台，落点的控制难度大、精度要求更高，与陆基相比，着舰过程没有拉平阶段，着舰环

境更加复杂，海上风浪等水文气象要素对无人机干扰更加严重，舰载无人机下滑轨迹的微小偏差就有可能造成着舰失败。鉴于着舰环境复杂且充满各种不确定因素，舰载无人机系统容易出现各种故障，精确制导与控制成为了核心问题，直接决定舰载无人机能否安全着舰。

经过数十年的发展，舰载无人机着舰技术取得了较大进展，在理论研究、数值仿真验证及工程应用方面均取得了一系列成果。无人机着舰控制系统设计方面，先后建立了经典控制方法、现代控制方法、非线性与自适应控制方法以及智能控制方法。

目前，美国等军事强国已经开展了舰载无人机的工程化应用，在该领域处于领先地位，图 5 展示了美军 X-47B 舰载无人机拦阻着舰的场景。相对而言，我国在舰载无人机着舰领域一直扮演追赶者角色，近年来已较完整地掌握了舰载无人机着舰的关键技术，目前正向工程化应用推进。此外，在人工智能技术的强力推动下，智能控制技术正被广泛应用于舰载无人机自主着舰任务，抓住人工智能赋能舰载无人机自主着舰的机遇，有望实现该领域的弯道超车。



图 5 美军 X-47B 舰载无人机拦阻着舰

## 3 两栖作战中舰载无人机作战应用展望

两栖登陆作战中，舰载无人机以两栖登陆作战使命任务为牵引，开展舰机协同防空作战、战场情报侦察预警、蜂群作战、与有人战斗机协同作战，将成为未来两栖作战行动中不可忽视的重要力量。

### 3.1 体系支撑的舰机协同防空作战体系

在海上航渡和突击上陆等作战中，舰艇与舰载无人机为实施两栖作战任务需要进行密切配合，从而最大化其作战效能，完成预定作战任务。强大的防空力量关乎两栖作战发展走向，舰艇与战斗机的密切协同是构建强大防空作战力量的关键，在当前智能化、无人化作战背景下，借助先进的人工智能、

物联网通信、云计算等技术提升舰机协同的效能具有重要意义。图 6 展示了假想的体系支撑下的舰机协同防空作战场景。

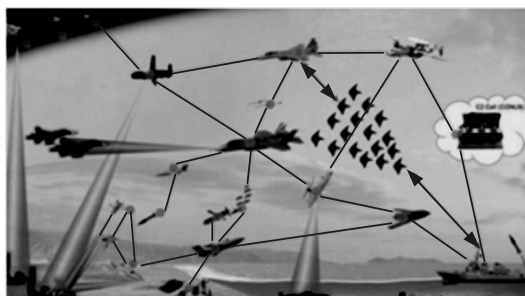


图 6 体系支撑的舰机协同防空作战体系

在两栖作战中，舰机协同作战需要构建强大的通信网络，实现航母编队与舰载无人机以及无人集群实时高效的协同防空作战。通过充分利用舰载预警无人机灵活机动的优势，为航母编队内其他舰艇提供强大的通信中继制导。此时，舰载预警无人机不仅提供预警探测功能，也是一个空中情报与指挥节点，指挥引导舰载无人战斗机集群完成对空中威胁目标的打击和拦截；因此，未来两栖作战中，舰机协同体系将以舰载预警无人机为节点，充分发挥舰载预警无人机的预警探测优势，融合无人集群的情报信息，消除航母编队内其他舰艇的探测盲区，从而为己方作战成员提供完整的战场态势情报，充分发挥舰机协同优势。此外，借助舰载预警无人机，实现舰艇导弹武器的中继制导，对敌方目标进行远程打击；因此，在舰机协同防空作战模式下，两栖作战编队将以舰载预警无人机为节点构建舰机协同的作战系统，形成无人机侦察探测网络、空中通信中继制导网络及火力打击网络纵横交错的联合作战网络结构，这一复杂网络将成为提升两栖作战战斗力的关键所在。

### 3.2 智能驱动的舰载无人机侦察预警体系

在信息化、智能化对抗日益激烈的高科技战场，无人机若仍旧依赖人的遥控指挥进行侦查预警，必然会丧失作战的灵活性和主动性；因此，无人机智能感知必将成为未来战场的常态。尤其对于两栖作战而言，其不同阶段更是充满了各种不确定性，舰载无人机侦察能力直接决定了无人机自身的生存几率，对于两栖作战的演变发展有着重要影响；因此，对舰载预警无人机的战场信息智能感知能力提出了更高的要求，全维感知、自主认知、实时精准的情报搜集能力成为了舰载无人机侦察预警体系的发展目标。

近年来，随着无人机技术和智能感知技术的发展，构建智能驱动的舰载无人机侦察预警体系，成为了各国军事发展的共同选择。舰载无人机依托分布式的侦察网络，能够形成全时域、多平台、多维度的侦察体系，具有强大的战场透视能力，能够完成持久化智能无人作战侦察预警，以最小成本代价换取高价值的战场情报。两栖作战中，利用小型舰载无人机快速机动、静默航行等特点隐蔽潜入敌方区域，进行情报搜集，充分发挥其目标小、隐蔽性强的优势，从而替代有人机执行各种危险的情报侦察与监视任务；因此，着眼于两栖作战复杂的战场环境，构建以小微型舰载无人机为节点的情报侦察体系，借助先进的通信卫星、天基平台以及稳定高速的舰机一体化通信网络，形成强大的情报数据交互系统；同时，借鉴吸收物联网、云计算以及多源异构信息融合等技术，实现舰载无人机智能感知与预警，将成为两栖作战侦察预警体系建设的重要目标。图 7 展示了假想的智能驱动的舰载无人机侦察预警场景。



图 7 智能驱动的舰载无人机侦察预警体系

### 3.3 去中心化的舰载无人蜂群作战体系

无人机蜂群作战是人工智能在现代化战场运用的典型代表。目前，各国均大力开展无人机集群的研究，无人机蜂群作战已经迅速成为无人机领域的前沿方向<sup>[22-24]</sup>。美军已将无人机蜂群作战列为军事力量升级的重要突破口，先后实施了“小精灵”“山鹑”等小微型无人机项目，正在加快相关技术的研究与落地，从而保持其无人化作战的优势。

在两栖作战中，为有效分散敌方火力，从而给舰艇部队、有人战斗机、登陆突击部队创造进攻优势，各国争相发展舰载无人机蜂群力量。舰载无人机蜂群由大量小型无人机共同组成，在强大的通信网络的支撑下，单个舰载无人机之间能够进行交互与协同。此外，借助先进的智能算法，单个舰载无人机快速地进行自主决策，并且与蜂群内部舰载无

人机共同构成群体智能作战力量。在这一作战模式下,两栖作战中,舰载无人机蜂群利用实时的情报数据交互网络实现高效配合,从而在战场态势感知、防空作战对抗、关键目标打击等方面形成分布式协同的作战力量,实现分散敌人火力、冲击敌方防御系统的目的。

无人机蜂群一般由数以百计、千计甚至万计的微型无人机组成,传统算法难以对其进行有效控制,无法充分发挥其优势,需要借助去中心化的智能算法驱动无人机蜂群进行协同作战。同时,舰载无人机蜂群作战对于智能决策技术的准确性、时效性以及可靠性要求极高,而目前单机的算力水平难以满足蜂群作战的需要,导致无人机蜂群的作战行动受到严重制约。随着数据链通信以及分布式云计算等技术不断升级,舰载无人机正逐渐从单机孤立作战向群体协同作战模式发展,即采用先进的分布式计算与通信进行态势分析和智能决策,并通过数据链将决策信息提供给无人机蜂群;因此,如何利用多智能体强化学习、分布式云计算以及群体智能决策等前沿技术赋能舰载无人机集群作战是当前重要的研究课题。图 8 展示了假想的舰载无人蜂群作战体系示意图。



图 8 去中心化的舰载无人蜂群作战体系

### 3.4 舰载有人/无人机协同的作战体系

伴随着无人机技术的迅猛发展,无人机装备数量迅速增加,作战无人机成为了战场对抗中不可忽视的重要力量。但必须清醒认识到,当前无人机的智能化水平仍然较低,在现代战场上,无人机战斗机尚不能替代有人战斗机,尤其是面对日趋复杂和激烈的两栖作战场景,无人机难以独立完成复杂对抗环境下的作战任务;因此,基于未来两栖作战对舰载无人机的作战需求,综合分析舰载有人机、无人机的作战特点及优势,通过取长补短来实现二者作战效能的最大化,进而构建舰载有人/无人机协同的作战体系是未来两栖作战力量建设的重要方向<sup>[25-27]</sup>。

此外,在未来两栖作战的战场上,无人机作战绝不仅限于与有人战斗机的战机协同,而是会进一步向人机融合作战方向发展。在脑科学、认知科学以及人工智能技术深度融合的时代背景下,采用人机融合技术,实现人对舰载无人机的直接控制与指挥,使得舰载无人机的行动由智能辅助决策与人的作战意图共同决定,实现战斗员与有人战斗机以及舰载无人机蜂群的深度融合。人机融合、人机交互将成为提升两栖作战力量的重要突破口。图 9 展示了有人/无人机协同作战的场景。



图 9 有人/无人机协同作战场景

## 4 结束语

笔者针对舰载无人机在两栖作战中的应用这一重要课题,对两栖作战特点和舰载无人机研发进展进行简要介绍和分析,论述舰载无人机的关键技术。针对舰载无人机在两栖作战应用中面临的机遇与挑战,对舰载无人机的作战应用趋势进行展望,提出了体系支撑的舰机协同防空作战体系、智能驱动的舰载无人机侦察预警体系、去中心化的舰载无人蜂群作战体系以及舰载有人/无人机协同的作战体系。在未来两栖作战中,人工智能技术赋能下的舰载无人集群将发挥越来越大的作用,以智能驱动、体系支撑以及人机协同的两栖作战力量将成为未来两栖作战力量的核心。

### 参考文献:

- [1] 闫小伟, 刘立辉. 两栖作战中无人化装备发展现状分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(1): 1-6, 18.
- [2] 孙超伟. 国外海军两栖作战装备发展动向分析[J]. 现代军事, 2015(8): 56-59.
- [3] 张海峰, 胡颖, 黄庆龙. 美国海军两栖攻击舰发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(3): 146-150.
- [4] 谷康. 外军无人蜂群作战概念研究进展及分析[J]. 航空兵器, 2022, 29(1): 52-57.
- [5] 辛昕, 谢川. 人工智能在无人机系统中的应用与发展研究[J]. 飞航导弹, 2021(5): 48-51.
- [6] 郁一帆, 王磊. 无人机技术发展新动态[J]. 飞航导弹, 2019(2): 34-42.

- [7] 闫明松. 舰载无人机作战使用及关键技术综述[J]. 航空电子技术, 2020, 51(2): 16-20.
- [8] 于力, 张金榜, 徐磊武. 外军舰载无人机应用现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2020(6): 46-49.
- [9] 马凯, 陈豪, 郝桐, 等. 美国舰载无人机系统研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(5): 1-4, 20.
- [10] 方勇. 未来无人化战争的引领者—美国舰载无人攻击机 X-47B 发展及影响[J]. 军事文摘, 2015(13): 22-25.
- [11] 陈松云, 王达, 戚艳嘉. 美舰载无人机 MQ-25 航母适配性研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(9): 154-157.
- [12] 张洋. 美国 MQ-25A “黄貂鱼”舰载无人加油机方案[J]. 兵器知识, 2018(5): 72-73.
- [13] 陈翔宇. 无人机测控系统通用化关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [14] 刘蓉, 肖颖峰. 一种多机协同无人机测控系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(5): 706-711.
- [15] 邓静, 陈鹏, 翁呈祥, 等. 对无人机蜂群测控链路干扰策略研究[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(3): 31-36.
- [16] 陈士涛, 李大喜, 赵保军. 隐身有人/无人机组编队协同空战概念研究[J]. 战术导弹技术, 2020(6): 75-80.
- [17] 贾高伟, 郭正. 国外隐身无人机的发展[J]. 国防科技, 2019, 40(2): 13-16.
- [18] 李洪兴. 美国空军寻求远程隐身无人机[J]. 现代军事, 2017(1): 20.
- [19] 梁磊, 肖静, 邓扬晨. 舰载无人机着舰技术现状及发展趋势[J]. 西安航空学院学报, 2020, 38(5): 23-28.
- [20] 甄子洋. 舰载无人机自主着舰回收制导与控制研究进展[J]. 自动化学报, 2019, 45(4): 669-681.
- [21] 刘刚, 刘晓航. 基于机载视觉的舰载无人机自主着舰引导技术研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(20): 189-191.
- [22] 冯远博, 王冰切, 赵上. 电子对抗无人机蜂群构建构想[J]. 飞航导弹, 2021(10): 47-51.
- [23] 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.
- [24] 张兆鑫, 高兴隆, 马建光. 无人作战系统的智能决策与对抗能力[J]. 军事文摘, 2021(23): 17-21.
- [25] 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.
- [26] 张路, 邓静, 邵正途. 俄军有人机与无人机协同作战分析及启示[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(3): 1-6.
- [27] 于星棋, 陈春, 王渊. 联合作战条件下有人机与无人机蜂群协同作战研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(10): 5-6, 29.

\*\*\*\*\*  
(上接第 73 页)

- [2] 周圣栋, 解蕾, 宋若晨. 基于 BIM 的变电站数字化建设管控平台构建及应用[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 142-147.
- [3] 蒲天骄, 王晓辉. 基于云计算的电网培训仿真系统架构及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2533-2540.
- [4] 李青芯, 孙宏斌, 盛同天. 变电站状态估计中互感器虚假数据注入攻击分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 79-86.
- [5] 林立鹏, 郭晋芳. 基于变电站三维设计模型的进度造价管理[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 17-22.
- [6] 王江, 鄢大为, 王盛辉. 智能变电站继电保护典型缺陷的处理及分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(S1): 179-185.
- [7] 李辉, 刘海峰, 赵永生. 智能变电站过程层组网改进方案[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 218-223.
- [8] 李保恩. 智能变电站继电保护装置自动测试平台的研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 131-135.
- [9] 同嘉. 基于 BIM 全景可视化的架空电力线磁场三维仿真计算研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 169-175.
- [10] 胡绍谦, 李力, 朱晓彤. 提高智能变电站自动化系统工程实施效率的思路与实践[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 173-180.
- [11] 朱泽磊, 罗治强. 基于电网模型等值的省地协同发电计划优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4333-4343, 4573.
- [12] 郝少华, 李勇, 朱玛. 新一代智能变电站通信网络及管理系统方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 148-154.
- [13] 李鹏, 卫星. 智能变电站继电保护运维防误技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 123-129.
- [14] 吴冰, 黄陈, 朱喜荣. 沉浸式变电站故障仿真系统开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 102-108.
- [15] 王益, 陈珉, 王涛. 智能变电站仿真三维可视化组件装配技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 118-126.
- [16] 崔玉, 吴奕, 张志. 基于电力无线虚拟专网的继电保护智能移动运维系统设计及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 175-181.
- [17] 王廷凤, 简学之, 刘子俊. 基于虚拟现实技术的智能变电站运维培训系统的实现与应用[J]. 南方电网技术, 2018, 12(10): 61-65.