

智能化技术赋能无人机集群作战能力提升

许辉 赵国宏 刘超 刘召庆 龚学兵 赵德 陈平

Intelligent technology empowers advancement of UAV cluster combat capabilities

XU Hui, ZHAO Guohong, LIU Chao, LIU Zhaoqing, GONG Xuebing, ZHAO De, CHEN Ping

引用本文:

许辉, 赵国宏, 刘超, 等. 智能化技术赋能无人机集群作战能力提升[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1385–1397. DOI: 10.5768/JAO202546.0601005

XU Hui, ZHAO Guohong, LIU Chao, et al. Intelligent technology empowers advancement of UAV cluster combat capabilities[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1385–1397. DOI: 10.5768/JAO202546.0601005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0601005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无人机光电对抗技术研究

Research on UAV photoelectric countermeasure technology

应用光学. 2021, 42(3): 377–382 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301001>

无人机载光电载荷自主侦察的参数计算与分析

Parameter calculation and analysis of autonomous reconnaissance for UAV-borne photoelectric payload

应用光学. 2024, 45(5): 930–936 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501007>

无人机对地目标跟踪的快速初始化和自适应优化

Bounding box initialization and optimization for ground target tracking in UAV Videos

应用光学. 2023, 44(6): 1332–1342 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0602003>

无人机载昼夜单通道自然感彩色热成像技术

UAVs-mounted day and night single-channel natural sensing color thermal imaging technology

应用光学. 2025, 46(3): 481–495 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311002>

高能激光对小型无人机塑料蒙皮材料的毁伤效果研究

Research on damage effects of high-energy lasers on plastic skin materials of small UAVs

应用光学. 2025, 46(3): 515–521 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311005>

多尺度融合超分辨率算法在无人机探测中的应用

Application of multi-scale fusion super-resolution algorithm in UAV detection

应用光学. 2021, 42(3): 462–473 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1385-13

引用格式: 许辉, 赵国宏, 刘超, 等. 智能化技术赋能无人机集群作战能力提升 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1385-1397.

XU Hui, ZHAO Guohong, LIU Chao, et al. Intelligent technology empowers advancement of UAV cluster combat capabilities[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1385-1397.



在线阅读

智能化技术赋能无人机集群作战能力提升

许 辉¹, 赵国宏², 刘 超³, 刘召庆¹, 龚学兵¹, 赵 德¹, 陈 平¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 西安 710000;

3. 陆军装备部驻西安地区第五代表室, 陕西 西安 710043)

摘 要: 无人机集群是未来战争的主要作战力量。通过分析并总结国内外智能化技术在无人机集群作战中的优势及发展现状, 预测智能化无人机集群作战能力的发展方向。首先, 分析了美国、欧洲国家和中国无人机集群智能技术的发展特点, 结合战场态势和作战使用需求, 分析了智能化无人机集群技术的现状、技术难点和关键技术。最后, 总结并展望了无人机集群智能化技术的未来发展趋势, 明确了智能化技术提升无人机集群自主侦察、打击与毁伤评估能力的发展方向。

关键词: 智能化; 无人机集群; 协同控制; 自主决策

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202546.0601005](https://doi.org/10.5768/JAO202546.0601005)

Intelligent technology empowers advancement of UAV cluster combat capabilities

XU Hui¹, ZHAO Guohong², LIU Chao³, LIU Zhaoqing¹, GONG Xuebing¹, ZHAO De¹, CHEN Ping¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Norinco Group Testing and

Research Institute, Xi'an 710000, China; 3. The 5th Representative Office of the Army

Armaments Department of the PLA in Xi'an, Xi'an 710043, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle (UAV) cluster is becoming a major combat force in future wars. This paper analysed and summarized the advantages and current states of intelligent technologies in UAV cluster operations both domestically and internationally, thereby predicting development trends in intelligent unmanned cluster combat capabilities. Firstly, the development characteristics of UAV cluster intelligent technologies in the United States, Europe, and China were analysed. In combination with battlefield situations and operational requirements, the current status, technical difficulties, and key technologies of intelligent UAV cluster technologies were analysed. Finally, the development trends of intelligent UAV cluster technologies were summarized, and the development path for intelligent technologies to enhance the autonomous reconnaissance, strike, and damage assessment capabilities of UAV clusters was identified.

Key words: intelligence; UAV cluster; cooperative control; autonomous decision-making

引言

随着各国军事科技的快速发展, 现代战争中的攻防对抗越来越激烈。与有人机相比, 无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 凭借成本低廉、操作便捷、机动性强 (相对地面部队)、实时性高、效

费比高和无人员伤亡等作战优势, 在未来的军事对抗中占据日益重要的战术与战略地位。美军率先重视并探索无人机的相关战术与战略应用。当前, 美军以体系化的方式率先开展无人机集群作战框架设计, 并结合现代战争的攻防对抗需求, 明

收稿日期: 2025-04-23; 修回日期: 2025-07-27

第一作者: 许辉, E-mail: xuhui0320@126.com

通信作者: 赵国宏, E-mail: 22694567@qq.com

确了无人机集群作战的关键技术,包括智能感知技术、网络通信技术、自主决策技术、系统控制技术 & 自主导航与路径规划技术。

无人机集群^[1]的作战优势主要体现在规模化、智能化和信息化三个方面:规模化的军事对抗优势主要在于无人机具备“广域侦察实时性、多重毁伤可叠加、蜂群成本低廉”的特性,极大提升了作战方的作战效费比;智能化的军事对抗优势主要体现在无人机集群的“无中心化、自主化和自治化”特征上,能有效地减少作战人员伤亡;信息化的军事对抗优势主要体现在无人机集群作战时成员之间、成员与地面指挥站、成员与空中平台的复杂信息收发与交换,确保指控信息、导航信息和通信交互信息在无人机集群中快速、有效传递,保障超视距作战任务的完成。

智能化技术发展迅猛,多种文献提出的算法模型能有效提升无人机的智能化水平,例如:基于值分布学习和多智能体强化学习算法^[2]、基于公共品博弈的无人机集群演化博弈模型算法^[3]、基于以太网区块链智能合约的 UAV 集群访问控制模型算法^[4]、基于虚拟子目标的领航-跟随法并优化修正力函数模型算法^[5]、基于用户精力矩阵模型优化算法^[6]、基于狼群算法和模拟退火算法相结合的混合群智能算法^[7]等。这些算法可以解决无人机协同

控制、队形控制、自主等级控制、机群信息加密和侦查打击任务智能分配等工程问题。文献 [8] 从新体制雷达认知探测模式、多维特征信息处理、多传感器协同闭环等角度,归纳总结了无人机集群目标智能化跟踪水平的提升策略。文献 [9] 分析了遗传算法、粒子群优化算法、蚁群算法等智能算法在无人机集群任务分配中的特点和性能,归纳了不同智能算法的工程应用方向。文献 [10] 采用基于深度确定性策略梯度网络的智能算法提高了训练效率,并将任务达成率提升至 95%。人工智能与无人装备的结合,特别是在多智能体和无人集群装备方面,已经成为当今科技领域和装备发展的前沿。这一结合的核心是利用人工智能的学习与决策能力,制定高度协同、自主且智能的作战计划。

集群分为简单集群、群体智能集群和单体智能集群^[11]。通常,集群中的每一个个体都具备一定的自主能力,可通过各种传感器感知环境信息,并通过智能化算法进行路径规划、障碍规避和行为决策。个体之间通过无线数传技术进行实时通信和数据共享,从而实现协同作战与任务分配。可通过智能化算法^[12-14]为集群设定规则,实现群体的自动组队、任务分工与协同作战,也可通过机器学习技术让无人装备在执行任务过程中进行自我学习和优化,实现自主决策^[15]。总体来说,如图 1 所

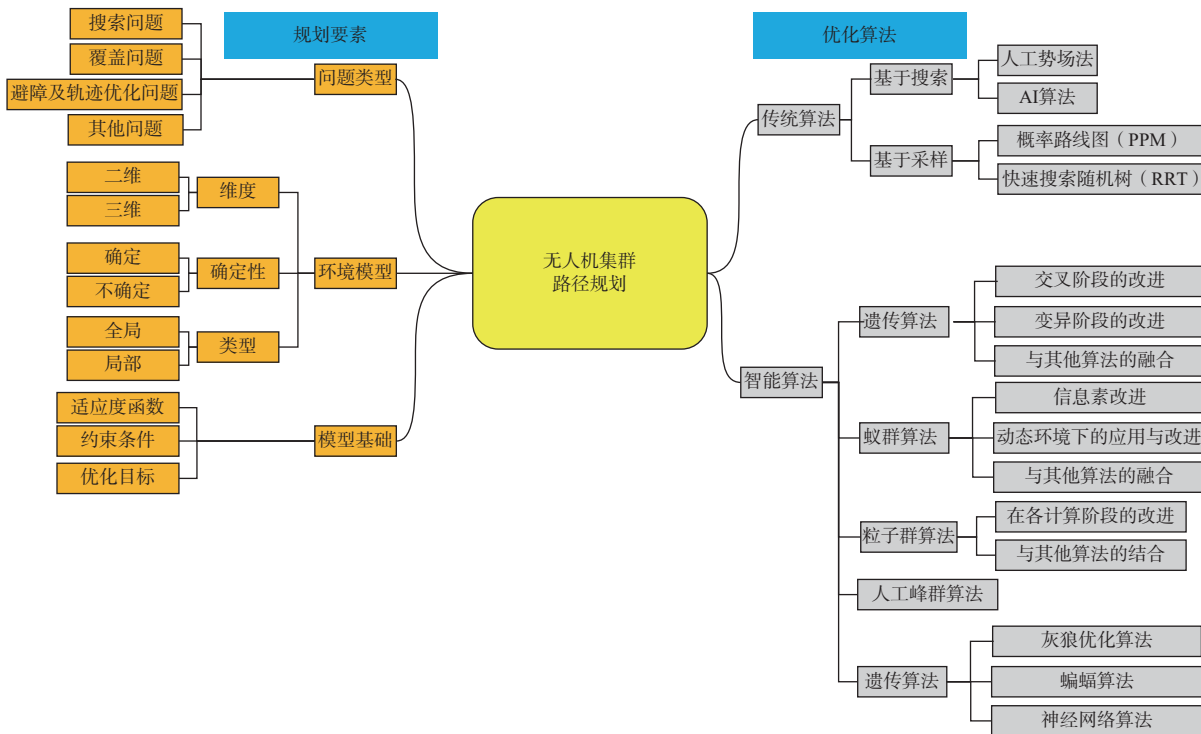


图 1 无人机集群路径规划结构

Fig. 1 Architecture of path planning for a UAV cluster

示的智能化技术与无人集群装备的结合,是一种高度协同、自主、智能的作战方式^[16],极大地扩展了无人装备的应用场景,提升了无人装备的作战效能。

无人机集群和无人机蜂群是无人机技术中两种不同的协同工作模式,在控制方式、通信需求、任务适应等方面存在显著差异。在控制方式方面,无人机集群通常采用中央指令控制,所有无人机统一行动,而蜂群则模拟自然界行为,每架无人机相互通讯和协作,具备自主决策能力。在通信需求方面,无人机集群要求高可靠性、低延迟的通信链路,通信中断或延迟可能导致无人机机动偏差,需专用频段,而蜂群需要构建自适应、灵活的通信网络,无人机之间的通信频繁且复杂,容易出现通信拥塞和信号衰减,常采用自组网技术。在任务适应方面,无人机集群适合同步性和一致性要求高的任务,需要预先编程和中央指令驱动,而蜂群擅长复杂、动态的任务,能自主规划路径,环境适应性强。可以看到,蜂群是集群技术向智能化、分布式方向发展的结果,在军事领域,两种技术常融合使用。

1 智能化对无人机作战的影响

1.1 美国无人机

美国无人机集群^[17-21]项目的智能化发展主要体现在两方面:一是单兵精确打击与集群饱和和攻击,以应对未来战场复杂环境下(通讯不畅、干扰较强)的高价值目标打击任务;二是适应大国冲突中的作战需求,包括情报侦察、制空作战、防空压制、空中护航、无人加油等。不同的作战任务需配备不同的无人机发射平台,因此,无人机蜂群具有多样化的发射平台,包括机载平台、舰载平台和陆基平台,根据任务需求还可进行多平台协同发射。

1.1.1 机载平台

图2所示为C-130运输机机载平台^[22],可从空中发射无人机集群(gremlins),并从空中再次回收。该无人机集群的主要作战任务是在空中完成侦察、干扰和监视,其项目目标为验证无人机与母机之间的指挥、控制、通信等系统性能。这种有人驾驶飞机在敌方防区外发射和回收无人机集群的作战模式,可实现侦察监视、电子攻击、导弹防御与战场网络系统组网等分布式空中协同作战。



图2 美军 C-130 运输机回收“小精灵”无人机^[22]

Fig. 2 US military C-130 transport retrieves a “Gremlins” UAV^[22]

1.1.2 舰载平台

图3所示为舰载平台发射无人机进行空中组网试验,形成海上侦察和打击一体化的集群作战编队,增强海军的战场对抗能力。传统海上态势感知手段(卫星、雷达和有人侦察机)能力不足,存在覆盖范围有限及精度不高的局限。相比之下,“低、小、慢”的蜂群无人机能够深入敌方纵深或战斗前沿,通过广域侦察和信息共享,实现海上战场态势的透明化。

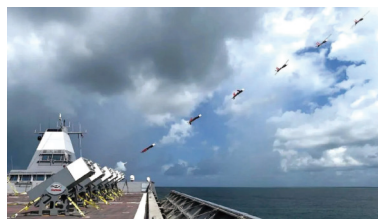


图3 “郊狼”无人机^[23]

Fig. 3 “Coyote” UAV^[23]

1.1.3 陆基平台

陆基平台主要包括单兵地面发射平台和蜂群式车载发射平台。与传统的标枪反坦克导弹相比,图4所示的“弹簧刀”600生产成本低、侦察时间长,其先进的导航和控制系统使其能在极端天气条件下作战。此外,“弹簧刀”600具备多功能作战能力:在情报侦察方面,可通过自身先进传感器和通信设备为班组指挥官提供实时、动态的战场态势感知;在精确打击方面,可通过自身配备的多种弹头对敌方关键目标实施分类打击,降低误伤

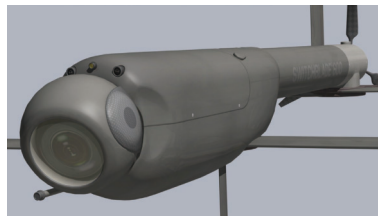


图4 “弹簧刀”600 巡飞弹^[18]

Fig. 4 “Switchblade” 600 loitering munition^[18]

率;在电子对抗方面,能够干扰敌方通信和信息系统,削弱其指挥控制能力。

“弹簧刀”600可与“美洲狮”等无人机开展协同作战,增强己方的目标识别能力,提升战场人员的任务分配效率,确保在复杂战场环境中实现动态任务分配及目标位置自动更新,减轻操作人员负担。

总而言之,“弹簧刀”600和“弹簧刀”300已形成系列化产品,在未来战场上能够快速部署并实施高机动协同作战。通过智能化升级,它们能够提高战场效率,降低操作人员负担,其强大的侦察能力,为设计多样化任务的协同打击方案奠定了基础。未来,该系列无人机在多种任务场景和协同作战模式下的应用潜力不可小觑。

1.1.4 陆海空多平台

模块化设计能够有效提升战场武器装备补给速度与维护效率。图5所示的“郊狼”无人机蜂群可通过多平台发射,为陆、海、空平台提供有效的武器装备补给与维护。“郊狼”无人机具有舰载发射版本及地面车载发射版本,其续航时间为1.5 h,作战半径约37 km。“郊狼”无人机搭载有GPS导航系统和双向数据链,既能根据无线指令进行单机飞行,也能组网成“蜂群”协同飞行,并可借助人工智能实现完全的自主同步与编队飞行,实现队形变换、协同打击等功能。

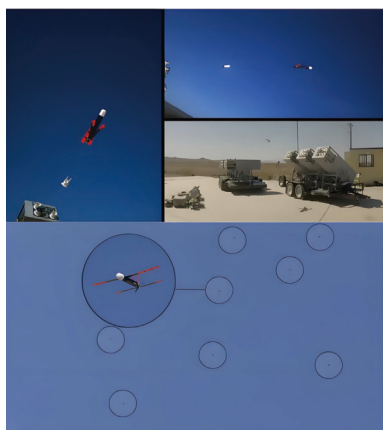


图5 “郊狼”无人机蜂群飞行试验^[24]

Fig. 5 “Coyote” UAV swarm flight test^[24]

“灰山鹑”无人机具备陆、海、空多平台发射能力,可从地面车辆、水面舰艇以及空中战机等多种载体上发射。如图6所示,“灰山鹑”无人机采用3D打印技术制造,降低生产成本,易于大规模快速生产。该机还配备数据链,可实现蜂群内部信息共享,同时,还能与多个指挥站进行通信。在

战场对抗中,“灰山鹑”无人机主要作为诱饵迷惑敌方的防空系统,或搭载电子发射机干扰敌方雷达,从而保障己方作战平台的安全。



图6 “灰山鹑”无人机^[21]

Fig. 6 “Perdix” UAV^[21]

如图7所示,“灰山鹑”蜂群的协同飞行并未预先编写飞行程序,而是在地面站指挥下实现蜂群自主协同,通过执行4类任务,分别演示了蜂群集体决策、自修正和自适应编队飞行能力。



图7 “灰山鹑”无人机蜂群进行定点盘旋^[21]

Fig. 7 Fixed-point hovering of “Perdix” UAV swarm^[21]

1.2 欧洲无人机

1.2.1 德国

德国的无人机项目主要针对GPS拒止环境中的协同作战。德军在空客无人机中心开展了无人机与人工AI智能算法融合研究,通过“Fortion”联合指挥控制系统实现了单人操控,将“矢量”和“蝎式”无人机与空客平台整合,使无人机的实时侦察数据接入空客作战管理系统。图8所示的德国HX-2攻击无人机是一款电动推进的X翼精确制导武器系统,射程最远达100 km,并搭载了先进



图8 德国HX-2无人机^[25]

Fig. 8 German HX-2 UAV^[25]

的人工智能技术, 通过与 Altra 软件相结合组成协同集群, 可由单个操作员控制多架无人机完成协同作战任务。

1.2.2 法国

法国无人机的项目主要致力于解决全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)拒止环境下的导航控制问题, 可在复杂电磁环境中运行。鸚鵡公司的阿纳菲乌克兰无人机系统, 旨在 GNSS 拒止及敌对电磁条件下保持全面运行。该系统集成了先进光学导航系统、抗干扰跳频军用无线电及强化网络安全架构。其光学导航系统融合了视觉惯性里程计和基于卫星图像匹配的地理定位技术, 在纹理不清和能见度低的条件下, 该系统也可以动态地检测和避开障碍物。此外, 该系统采用增强的微光导航算法, 并通过人工智能辅助卡尔曼滤波系统维持稳定的飞行控制。其他功能还包括实时视频增强、智能缩放取景以及目标光标功能。目标光标功能可直接从视频源精确定位并传输感兴趣对象的 GPS 坐标。图 9 所示为阿纳菲乌克兰无人机系统。



图 9 鸚鵡公司的阿纳菲乌克兰无人机^[26]

Fig. 9 Parrot Anafi-Ukr UAV^[26]

1.2.3 英国

英国的无人机蜂群项目旨在对战场中的单个或多个目标实施复杂的低成本自主集群攻击。其无人机智能化技术的目标是通过机器学习和人工智能减少操作员的数量、培训时间和认知负担。蓝熊系统公司与英国国防科技实验室于 2020 年 10 月完成了无人机群演示飞行试验, 如图 10 所示,



图 10 蓝熊系统公司为无人机蜂群提供控制系统^[17]

Fig. 10 Blue bear systems provides control systems for UAV swarms^[17]

在人工智能辅助下, 3 名操作人员指挥 220 架无人机(包含 5 种类型、6 种载荷)完成了态势感知、后勤补给、电子干扰、爆炸物监测、医疗援助及典型作战等多项任务。

1.2.4 俄罗斯与乌克兰

随着战争持续, 俄乌双方无人机在不断演进。战争初期, 双方主要利用中大型无人机执行侦察、打击等任务。乌克兰使用土耳其的 TB-2 无人机、美国的“弹簧刀”300 及“弹簧刀”600 等进行侦察打击; 俄罗斯则利用自主研发的“柳叶刀”无人机执行同类任务。战争后期, 随着防空系统和电子战设备投入使用, 初期使用的无人机战场生存能力显著下降, 因此俄乌均转而使用小型、低成本的无人机, 例如, 乌克兰便采用了由商用无人机改装的穿越机。如图 11 所示, 乌克兰曾利用蜂群无人机作为侦察机突破俄方防空系统, 获取俄军装甲集群位置, 并利用数据链传回乌克兰指挥中心。同时, 操作 116 架第一人称视角(first person view, FPV)无人机, 借助航路规划、地形掩护和建筑掩护规避俄军防空火力, 实施了协同攻击。综合卫星图像、乌军视频和社交平台袭击视频等多源信息, 可得知在此次行动中, 俄军有 8 架图-95、4 架图-22M3 和 1 架伊尔-76 运输机被击中, 另有 1 架 A-50 和 1 架安-12 运输机疑似被击中。



图 11 俄乌战场上出现的无人蜂群^[27]

Fig. 11 UAV swarms appearing on battlefield of Russia and Ukraine^[27]

1.3 中国无人机

随着我国人工智能和无人机技术的全面发展, 我国的无人机集群技术^[28-30]已在全球范围内处于领先地位, 现已研制出多型无人机集群系统。例如, 中国电科集团曾创下 200 架无人机群协同飞行的世界纪录, 如图 12 所示, 该蜂群系统采用地面平台发射, 也可由直升机或无人机进行空中投放。其发射箱一次可存储 48 架无人机, 单机配备战斗部和小型光电导引头, 具备广域侦察和饱和攻击能力^[31]。

图 12 中国电子科技集团陆空无人机蜂群系统^[32]Fig. 12 Land-air UAV swarm system of china electronics technology group^[32]

紫燕科技依托自主研发的智能化蜂群算法,实现了系统的高度自动化和智能化,具备“1架控制30架”的高效控制能力,支持智能编组和灵活变换,具有单兵便携、快速部署、操控简单等优势,系统无中心节点,单机损毁时可自动补位,维持整体队形继续执行任务。图 13 所示为紫燕无人机蜂群。目前,该公司已成功研发“隼”、“河豚 A3C”、“渗透者 2”和“穿越者 P2X”等多款无人机,并配套了空地、防务一体化设备,构建了智能化空地协同无人系统。

图 13 紫燕无人机蜂群^[33]Fig. 13 Ziyuan UAV swarm^[33]

图 14 所示为“九天”无人机母舰,其最大起飞重量达 16 t,续航时间突破 36 h,作战范围覆盖 8 000 km。该舰能携带 4 个异构蜂巢任务舱,理论上单舰可携带 200 架小型巡飞弹或自杀式无人机,其载荷、航时、航程等都远优于美国的 MQ-9 无人,展现了我国无人机系统的研发实力与技术水平。

图 14 “九天”无人机母舰^[34]Fig. 14 SS-UAV^[34]

2 无人机集群智能化技术现状

人与机器的紧密结合是未来战争的发展趋势。其中,无人机作为关键装备,需具备与人自主交流、自主学习、自主协同、自主侦察打击与自主毁伤评估等一系列自主认知能力。未来作战将依托人机混合编队,以“人在回路”为核心,由人类指挥战斗,无人机负责执行作战任务。智能化技术能提高作战人员与蜂群系统的信息交互能力,人工智能技术,如军民两用的人工智能技术、智能化协同控制技术、智能化自主决策技术、智能化制造技术和智能化跨域协同技术,可简化繁琐、复杂的无人机集群作战任务,提升无人机集群的作战效率。

2.1 军民两用人工智能技术

人工智能技术不仅在军事领域中广泛应用,民用领域中也快速发展(包括视觉感知、语音识别、人脸识别、自主导航、道路规划等)。例如,人工智能算法支撑态势感知、目标识别和路径规划,边缘计算实现实时数据处理以减少对中心服务器的依赖等,已深度融入社会生活并极大地改善民生。DeepSeek 的出现将人工智能推到风口浪尖,它通过深度学习模型实现语义理解,能够更智能化地进行数据分析。无人装备与 DeepSeek 的结合应用已在多个领域展开。例如,DeepSeek 与无人机结合,使无人机在智能化设计研发、导航控制、调度管理等方面均获得较大的能力提升。在无人机集群方面,DeepSeek 可通过构建具备多智能体博弈能力的调度模型,利用强化学习^[2]等先进技术,使无人机具备自主飞行和协同控制能力,能够在复杂环境中自主规划飞行路线,并与其他无人机保持协同。

可以看到,军民两用人工智能技术应用于无人机蜂群系统,并结合蜂群自身的传感器平台、自动目标识别系统、数据分析系统等,能显著提升蜂群战场自主能力。

2.2 智能化协同控制技术

随着现代战争形态的快速演变,人工智能技术的深度融合将极大推进无人机集群系统的自主协同控制能力。例如,基于深度学习和群体智能算法^[35]的无人蜂群已具备动态路径规划、实时信息共享和任务分配能力,蜂群中的每架无人机都是一个独立智能体,能通过传感器感知环境并进行自主决策,进而实现群体协作。中国民用无人机团队操控 6 000 架无人机完成编队表演,便是此项

技术实力的有力证明。为实现协同飞行、灯光同步、任务规划与执行、避障及碰撞预防等功能,此类无人机集群通常采用多智能体系统,该系统由多个具有自主性、交互性与协作性的智能体组成,通过信息共享和协同操作来共同完成复杂任务。

2.3 智能化自主决策技术

集群无人机通过侦察与任务分解,能够持续感知态势信息和任务目标的动态变化,并评估自身性能。人工智能算法能综合利用先验知识(如军事专家经验)、逻辑推理和机器博弈动态调整蜂群的任务分配,体现了其自主决策能力。作为提升无人机集群自主化水平的关键,智能化自主决策技术可根据外界环境和任务变化,通过强化学习与深度学习,自主调整作战目标、飞行航路和任务分配等,生成最优策略。目前,美国已制定了关于无人机智能决策水平与全局规划能力的发展路线图,并推进了“小精灵”、“忠诚僚机”等项目。国内自主决策技术近年也取得了较大进展,例如,西北工业大学的“云鹞”扑翼式无人机,采用模仿鸟类扇动翅膀的飞行驱动设计,通过智能化算法实时更新飞行航迹并规避障碍,以适应复杂飞行环境。

2.4 智能化制造技术

现代战争是综合国力的对抗。当前,俄乌军事斗争已进入持久战、拉锯战和消耗战。因此,能够适应大规模批量生产且成本低廉的武器装备将是未来战争的首选。与此同时,传统制造企业在人工智能算法的加持下不断提升智能制造水平,显著降低了企业的人工成本与生产成本。例如,大疆无人机的零配件成功吸引俄乌军火商的注意力,将其用于本国的无人机生产。此外,美国的“郊狼”无人机单价仅1.5万美元,且其关键部件采用3D打印等技术制造,可持续降低成本,为蜂群技术的规模化应用奠定了基础。

2.5 智能化的跨域协同技术

跨域协同技术是智能无人机集群系统形成颠覆性作战能力的核心。世界主要军事强国已相继提出了多域战、全域战、分布式作战、马赛克战等一系列跨域协同作战概念。随着相关关键技术的突破,这些概念将逐步推动海、陆、空、天全域覆盖作战体系的形成。智能化集群将在该体系中发挥重要作用,成为跨域协同作战的新形式^[36-42]。如图15所示,智能无人集群系统的跨域协同,是指在

相同任务目标驱动下,运行在不同空间域、有显著功能差异的无人系统相互配合,共同完成指定任务。与传统单域协同的智能无人集群系统相比,跨域协同系统具有平台优势互补、全方位联动的特点,在大幅提升智能无人集群系统效能的同时,也能不断扩大其应用范围。



图 15 无人集群跨域协同作战概念^[43]

Fig. 15 Concept of multi-domain unmanned cluster coordinated operations^[43]

3 技术难点与有待突破的关键技术

3.1 强对抗环境导航控制

当前的无人机集群项目多在理想的战场环境下进行功能、性能演示与模拟对抗,但未来战场环境复杂多变。实际战场环境容易出现复杂干扰(如偶发通信故障、电磁干扰、网络攻击)和恶劣环境(如海上低能见度、高空突变大风、陆上极端高、低温环境),这对无人机集群系统的智能决策技术提出了远高于测试环境的要求。为应对上述挑战,需重点突破以下两项关键技术:一是人工智能视觉导航技术,该技术可在无/弱 GNSS 信号环境中进行导航、定位,辅助小型无人机在室内等封闭场景完成自主飞行任务,或与 GNSS 传感器数据融合,实现目标点的精准定位与导航;二是智能无线通信技术,基于无线认知的智能通信技术可以优化网络通讯资源,增强无人机蜂群系统的电磁频谱感知、通信参数自适应和网络拓扑智能重构能力。为了使无人机蜂群在电子干扰、通信降级及其他恶劣环境中可编队协同执行任务,面对虚假的情报、敌我双方战场态势突变、攻防力量突变、上级下达临时指令等复杂情况,无线紫外光通信^[44]可利用紫外信标模型完成无人机信息交互,进而帮助无人机集群系统迅速做出响应并重新规划。面对跨域协同作战、跨域通信不完整、多源信息矛盾等战场问题,利用先进的智能决策技术提升无人机集群的战场决策能力,才能最大程度发挥智能无人集群系统的作战效能。

3.2 蜂群分布式智能组网

无人机蜂群智能组网主要包含中心式编队、主从式编队和分布式编队。其中,分布式编队具有去中心化,集群拓扑动态可变的特性,在应对突发情况时具有较好的扩充性和容错性,非常适合未来复杂多变的战场环境。近几年,随着边缘计算技术和机器学习技术的发展,轻量化强化学习模型、边缘计算实时决策、复杂环境适应性等技术的突破快速推动蜂群网络的智能化。蜂群分布式智能组网目前需要突破以下四项关键技术:第一,持续增强自主技术,包括自主感知技术、自主控制技术和其他使能技术,高自主性的蜂群可以快速理解更高层级的任务监督与执行控制,降低人为操作风险,帮助蜂群快速理解并适应环境,在任务分配、发布和处理过程中实现高度自主;第二,人机协同技术,蜂群最终由人管控,高等级的人机协同要求蜂群能自主理解友军的意图与判断(默契组网),通过融合人工智能、机器学习和自主化等技术,实现空中、地面和海上无人系统从战术至战略层面的同步协同控制,获得更好的态势感知、生存和杀伤能力,形成不对称优势;第三,蜂群网络安全技术,包括数据加密技术和网络防御技术,具体应用于网络运行安全、信息保障安全和电磁频谱与电子战领域,蜂群网络安全系统必须保持敏感信息的完整性、可用性和机密性;第四,实时感知规避技术,蜂群系统使用基于人工智能与深度学习的感知技术,通过红外或光电传感器对传统雷达难以探测到的图像流中的目标进行自动检测、定位、跟踪和分类,在作战期间收集情报并增强态势感知能力,该技术能为蜂群提供视觉提示和避让机动建议,从而有效避免蜂群内部间的碰撞,提高系统安全性。

3.3 混合蜂群智能决策

战争应以人的决策为主,作战的核心判断权与节奏控制权必须由人把控。战时的数据分析、辅助判断与任务分流可由人工智能执行,且可根据任务容错率、作战节奏需求灵活调整人工智能权限,形成人在回路、人监控回路和人脱离回路的弹性协同模式。当前,无人机蜂群系统已投入实战应用,未来,由机器狗、无人车、无人艇等构成的多域蜂群系统也将得到应用推广。此类多域混合蜂群系统借助人工智能重塑作战节奏与决策权重,推动人工智能决策从基于规则的智能决策转向

“多域网络化、蜂群平台化、认知协同化”的自主智能决策,最终使混合蜂群成为“作战搭档”。情报融合、威胁感知与决策链闭环是逐步提升控制层级和互操作性的关键,为此,需要突破以下三项关键技术:第一,混合蜂群环境感知与认知技术,包括导航感知、任务感知、系统健康感知以及操作感知四个方面,需整合多源数据并构建立体控制界面,实现对混合蜂群的实时、可持续管控,支撑混合蜂群的智能决策;第二,混合蜂群互操作技术,多域混合蜂群系统在执行任务时,为改进蜂群的协同作战和系统集成能力,需建立C4ISR/EW模块化开放式标准套件,以实现跨海、陆、空多域无人系统和地面控制平台的最佳互操作性;第三,集群智能算法,如狼群算法、蚁群算法和粒子群算法等,仅模拟某单一种群的集体任务分配与行动,然而,未来多功能无人机集群将根据瞬时多变的战场态势,为各个群体分配作战任务,驱动其按照“侦-控-打-评”的作战闭环流程完成各自的作战任务。

4 无人机蜂群智能化发展趋势

无人机集群的实战效果引起各国军方的高度重视。2018年1月5日,俄驻叙利亚赫梅米姆空军基地和塔尔图斯海军基地分别遭到由10架和3架无人机组成的集群空袭。2025年6月1日,乌克兰开展“蛛网”行动,利用人工智能识别系统锁定目标,直接摧毁41架俄军战机。无人机集群与人工智能的深度融合,能实现毫秒级多维信息处理、综合态势自主感知和快速决策,大幅降低人员损失风险和提升作战效费比,极大赋能并提升无人机集群的作战能力。智能化技术可作为无人机集群威力倍增器的核心原因在于:1)智能化技术能够降低操作人员的认知负担和工作强度;2)智能化技术能够快速处理海量作战信息并高效完成作战任务分配;3)智能化技术能够辅助有人机实施饱和火力打击与全天候防空作战;4)智能化技术能够提升战场装备运输效率;5)智能化技术能够减少作战人员的数量,降低战场伤亡率。

4.1 智能平台——蜂群微型化

未来空中战场将呈现高强度、高速度、快节奏的对抗特点,传统战争中,交战双方的装备数量旗鼓相当,而在未来,这种数量对比可能存在较大差异,一旦开战,战争胜利的关键将在于谁拥有更强大的“智能平台”及衍生的数据优势。小巧、功能

专一的“蜂”通过大幅增加种类和数量规模,形成复杂、强大的“群”,能显著提升作战效能。智能平台需要多维度地广泛感知外部环境与内部状态信息,基于感知信息实时自主完成深度挖掘、推理和融合,实现战场态势构建,自主产生控制策略并执行,同时具有一定的自主认知和学习能力。通过蜂群微型化策略,在载荷重量有限的条件下,能极大地增加蜂群个体数量,为平台智能化升级提供丰富数据,实现智能平台感知多源化、认知融合化、决策智能化、控制自主化、作战协同化以及保障全局化。智能平台利用蜂群能在较短的时间内提供准确的战场信息,确保精确打击。因此,智能平台的蜂群微型化是未来蜂群智能化技术的重要发展方向之一。

4.2 有/无人机协同——忠诚僚机

无人机集群作战最终由人指挥控制。有人机位于作战前沿,能够发挥主观能动性,对战时的敌我态势进行更全面的把握,更高效地指挥无人机集群作战。遭遇突发事件时,无人机集群能够快速、及时接收战场指令,实现单兵精确打击或饱和火力覆盖,并将毁伤效果及时反馈给有人机系统,实现有人机、无人机优势互补,极大地提高整个作战系统的效能。在战场中,忠诚僚机并非有人战机的替代品,而是有人战机的有效补充和战力倍

增器。面对高对抗、高强度、高危险的战场,无人机与有人机协同作战将大幅提升效率,降低军耗。无人僚机的发展趋势可概括为:可消耗、低成本、智能化、集群作战。当前的多项无人机集群作战项目均以减轻战场指挥官负担为目标,在可以预见的未来,无人机难以具备与人类相同的思考能力,但战场指挥的核心在于灵活多变,这就更加强调了“人”的作用。因此,有/无人机集群混合编队,即忠诚僚机是蜂群智能化的主要发展趋势之一。

4.3 自主飞行——察打一体

经过 20 多年的研究,美军仍未研究出具备实操水平的自主等级划分方法,对人工智能自主性、自主等级等概念的认知仍处于不断深化的过程中^[45-46]。为了有效评估无人操控系统等级和人工智能等级,便于对比不同蜂群的优势,本文选择美国空军研究实验室的自主控制水平等级(autonomy control level, ACL)作为评价标准。ACL 标准分为 10 个等级,从低级到高级蜂群的自主性逐步提升。智能等级主要以人为主导,故按照人力资源需求的不同,将智能等级划分为 4 级:人操作、人授权、人监督和完全自主。具体的评价结果如表 1 所示。可以看到,蜂群的自主能力将逐步向最高层级的自主控制水平和智能水平发展。

表 1 蜂群自主控制与智能水平评价

Table 1 Swarm autonomous control and intelligence level evaluation

蜂群无人机	最大集群数量	自主控制水平	智能水平
"小精灵"	50	六级: 团队战术重规划	Ⅲ级智能水平——人监督: 在特定的作战场景中, 通过数据反馈进行自动调整和改进, 可实现50架无人机自主编队, 通过人工智能算法动态分配目标, 饱和攻击成功率超95%。
"郊狼"	30	八级: 分布式控制	Ⅲ级智能水平——人监督: 由人工智能算法训练, "郊狼"系统实施快速单个、多个或蜂群目标打击。例如, 在陆上完成30s内发射30架"郊狼"无人机的试验, 验证了其编队飞行、协同机动和队形变换的能力。
"灰山鹑"	103	九级: 团队战略目标	Ⅱ级智能水平——人授权: 地面控制员为"蜂群"设置目标点, 蜂群飞向目标点, 或者"蜂群"绕一设定中心点, 进行半径约100 m的绕圈飞行。
HX-2电动无人机	≤10	四级: 在线航路重规划	Ⅱ级智能水平——人授权: 多架HX-2可编组行动, 由单个操作员控制, 通过软件实现人类控制和监督功能。单架HX-2能在高度对抗环境中可靠打击装甲目标。
阿纳菲乌克兰无人机	50	四级: 在线航路重规划	Ⅱ级智能水平——人授权: 利用场景匹配技术将光学输入与机载内存中存储的地形图数据进行比较和匹配, 在没有GNSS信号的情况下实现自主导航。
蓝熊系统公司 无人机蜂群	20	四级: 在线航路重规划	Ⅱ级智能水平——人授权: 蓝熊系统公司即插即用的开放式架构插件可以控制蜂群(20架固定翼无人机携带6种载荷, 形成协作、异构无人机蜂群)进行超视距飞行。
"九天"无人机母舰	200	八级: 分布式控制	Ⅲ级智能水平——人监督: "九天"无人机可通过人工智能算法实现集群侦察、集群干扰和集群打击, 经多次模拟测算, 该模式能使敌方防空系统的拦截成功率从98%降至37%。

5 结束语

人工智能技术重构无人机集群的智能核心,推进无人机集群实现从“提线木偶”到“智能飞行”的跨越式发展。例如,智能避障、复杂环境自主导航、自适应飞行等智能化技术,显著降低了操作人员的认知负担。智能化技术赋予无人机集群强大的数据处理能力,通过实时分析侦察数据,可高效识别打击目标,并根据首轮打击结果快速预测饱和攻击所需次数,从而显著提升无人机集群的自主侦察、打击与毁伤评估能力。因此,智能化技术正深刻重塑无人集群装备的作战模式。未来,随着关键技术的突破与多域协同体系的完善,智能化无人集群装备将逐步成为战场的主导力量,推动战争形态向“无人化、智能化、分布式”的方向演进。可以预见,无人机集群这一颠覆传统作战模式的新兴作战模式必将在实战中得以广泛应用。

参考文献:

- [1] 王肖飞,李冬,丁伟锋,等.反无人机集群作战研究[J].飞航导弹,2020(9):48-51,56.
WANG Xiaofei, LI Dong, DING Weifeng, et al. Research on anti-UAV cluster operation[J]. Aeronautical Missile, 2020(9): 48-51,56.
- [2] 张伯雷,马艳琴,刘林,等.基于值分布多智能体强化学习的无人机协同方法[J].现代雷达,2023,45(12):94-101.
ZHANG Bolei, MA Yanqin, LIU Lin, et al. Cooperative method of UAV based on multi-agent reinforcement learning of value distribution[J]. Modern Radar, 2023, 45(12): 94-101.
- [3] 毕文豪,王昭晰,吴伟,等.基于公共品博弈的无人机集群自主协同机制[J].兵工学报,2023,44(11):3407-3421.
BI Wenhao, WANG Zhaoxi, WU Wei, et al. Autonomous cooperation mechanism of UAV cluster based on public goods game[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(11): 3407-3421.
- [4] 段婷,王维平,朱一凡,等.基于区块链智能合约的UAV集群访问控制机制[J].系统仿真学报,2021,33(11):2656-2662.
DUAN Ting, WANG Weiping, ZHU Yifan, et al. Access control mechanism of UAV cluster based on blockchain intelligent contract[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(11): 2656-2662.
- [5] 王曼,李大鹏,丁良辉,等.基于虚拟子目标联合边界力的编队避障算法[J].系统仿真学报,2023,35(9):1918-1930.
WANG Man, LI Dapeng, DING Lianghui, et al. Formation obstacle avoidance algorithm based on virtual sub-target joint boundary force[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(9): 1918-1930.
- [6] 张冬,杨继国,尤灵辰,等.基于可变自主等级的有人机/无人机控制方法[J].无人系统技术,2023,6(6):80-90.
ZHANG Dong, YANG Jiguo, YOU Lingchen, et al. A control method for manned/unmanned aerial vehicle formation based on variable autonomy[J]. Unmanned Systems Technology, 2023, 6(6): 80-90.
- [7] 袁德平.基于混合群智能算法的无人机集群任务分配[J].中国电子科学研究院学报,2023,18(6):531-538.
YUAN Deping. UAVS task assignment based on hybrid swarm intelligence algorithm[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2023, 18(6): 531-538.
- [8] 董凯,修建娟,丁自然,等.无人机集群目标智能化跟踪技术[J].指挥信息系统与技术,2022,13(1):45-50.
DONG Kai, XIU Jianjuan, DING Ziran, et al. Intelligent tracking technology of UAV cluster target[J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(1): 45-50.
- [9] 梁智韬,贾高伟,王建峰,等.无人机集群任务分配中群智能算法性能对比[J].火力与指挥控制,2022,47(6):28-37.
LIANG Zhitao, JIA Gaowei, WANG Jianfeng, et al. Performance comparison of swarm intelligence algorithms in UAV cluster task assignment[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(6): 28-37.
- [10] 张耀中,许佳林,姚康佳,等.基于DDPG算法的无人机集群追击任务[J].航空学报,2020,41(10):309-321.
ZHANG Yaozhong, XU Jialin, YAO Kangjia, et al. Cluster pursuit mission of UAV based on DDPG algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 309-321.
- [11] 任建新,耿荣妹,梁昌智,等.无人机集群协同编队控制技术[J].科技创新与应用,2024,14(3):8-12.
REN Jianxin, GENG Rongmei, LIANG Changzhi, et al. Research on cooperative formation control technology of UAV cluster[J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(3): 8-12.
- [12] 周睿.无人机集群队形保持中的信息交互拓扑构建方

- 法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- ZHOU Rui. Research on construction method of information interaction topology for UAV swarm formation keeping[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [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(1): 99-111.
- JIA Gaowei, WANG Jianfeng. Research review of UAV swarm mission planning method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021(1): 99-111.
- [14] 许瑞明. 无人机集群智能涌现与演化建模论述[J]. 兵工自动化, 2021, 40(3): 5-9.
- XU Ruiming. Discussion on intelligent emergence and evolution modeling of UAV cluster[J]. Ordnance Industry Automation, 2021, 40(3): 5-9.
- [15] 张栋, 王孟阳, 唐硕, 等. 面向任务的无人机集群自主决策技术[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(4): 365-377.
- ZHANG Dong, WANG Mengyang, TANG Shuo, et al. Task-oriented autonomous decision-making technology for UAV cluster[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(4): 365-377.
- [16] 赵艳丽, 刘星宇, 陶业荣, 等. 无人机集群对地攻击协同控制算法及性能度量研究[J]. 飞行力学, 2023, 41(4): 52-58.
- ZHAO Yanli, LIU Xingyu, TAO Yerong, et al. Research on cooperative control algorithm and performance measurement of UAV swarm in ground attack[J]. Flight Dynamics, 2023, 41(4): 52-58.
- [17] 张旭东, 李少波, 李传江, 等. 无人机集群综述: 技术、挑战与未来[J]. 无线电工程, 2023, 53(7): 1487-1501.
- ZHANG Xudong, LI Shaobo, LI Chuanjiang, et al. Overview of UAV cluster: technology, challenge and future[J]. Radio Engineering, 2023, 53(7): 1487-1501.
- [18] 李军, 陈士超. 无人机蜂群关键技术发展综述[J]. 兵工学报, 2023, 44(9): 2533-2545.
- LI Jun, CHEN Shichao. Overview of key technology and its development of drone swarm[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(9): 2533-2545.
- [19] 周末, 孙海文, 王亮, 等. 国外反无人机蜂群作战研究[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(2): 24-30.
- ZHOU Mo, SUN Haiwen, WANG Liang, et al. Research on foreign anti-UAV bee colony operations[J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(2): 24-30.
- [20] 邹立岩, 张明智, 荣明, 等. 智能无人机集群概念及主要发展趋势分析[J]. 战术导弹技术, 2019(5): 1-11.
- ZOU Liyan, ZHANG Mingzhi, RONG Ming, et al. Concept and main development trend analysis of intelligent UAV cluster[J]. Tactical Missile Technology, 2019(5): 1-11.
- [21] 武晓龙, 王茜, 焦晓静, 等. 美国小型无人机集群发展分析[J]. 飞航导弹, 2018(2): 31-37.
- WU Xiaolong, WANG Qian, JIAO Xiaojing, et al. Analysis on the development of small UAV cluster in the United States[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(2): 31-37.
- [22] 张邦楚, 廖剑, 匡宇, 等. 美国无人机集群作战的研究现状与发展趋势[J]. 航空兵器, 2020, 27(6): 7-12.
- ZHANG Bangchu, LIAO Jian, KUANG Yu, et al. Research status and development trend of UAV cluster operations in the United States[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(6): 7-12.
- [23] 解贻泽. 以矛治矛——“郊狼”反无人机系统[EB/OL]. (2024-01-03)[2025-03-28]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1787034477724949745&wfr=spider&for=pc&searchword.htm>.
- XIE Yize. Fight fire with fire: the "Coyote" counter-drone system[EB/OL]. (2024-01-03)[2025-03-28]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1787034477724949745&wfr=spider&for=pc&searchword.htm>.
- [24] 陈珊珊. 美国雷神公司“郊狼”巡飞弹发展及未来趋势[EB/OL]. (2021-05-30)[2025-03-28]. <https://www.eet-china.com/mp/a53978.html>.
- CHEN Shanshan. Development and future trends of the Raytheon "Coyote" loitering munition[EB/OL]. (2021-05-30)[2025-03-28]. <https://www.eet-china.com/mp/a53978.html>.
- [25] HELSING. HX-2 – AI Strike Drone – Helsing[EB/OL]. (2024-12-03)[2025-11-15]. <https://helsing.ai/hx-2>.
- [26] PARROT. Parrot ANAFI UKR | Parrot drones[EB/OL]. (2025-09-08)[2025-11-15]. <https://www.parrot.com/en/anafi-ukr-technical-specifications>.
- [27] 林森. 观察 | 俄军轰炸机基地遭“珍珠港式”袭击, 给我们哪些启示[EB/OL]. (2025-06-03)[2025-07-28]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_30922678.
- LIN Sen. Observation | What insights does the "Pearl harbor-style" attack on a Russian bomber base offer us? [EB/OL]. (2025-06-03)[2025-07-28]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_30922678.
- [28] 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): 15-40.

- WANG Xiangke, LIU Zhihong, CONG Yirui, et al. Summary and future development of small fixed-wing UAV cluster[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(4): 15-40.
- [29] 赵建霞, 段海滨, 赵彦杰, 等. 基于鸽群层级交互的有人/无人机集群一致性控制[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(9): 973-980.
- ZHAO Jianxia, DUAN Haibin, ZHAO Yanjie, et al. Consistency control of manned/unmanned aerial vehicle cluster based on hierarchical interaction of pigeons[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(9): 973-980.
- [30] 赵齐民, 陈晨. 舰载无人机集群系统作战构想[J]. *指挥控制与仿真*, 2019, 41(5): 1-6.
- ZHAO Qimin, CHEN Chen. Combat concept for future naval UAV cluster system[J]. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(5): 1-6.
- [31] 刘召庆, 张芳, 朱镭, 等. 巡飞弹目标定位精度分析[J]. *应用光学*, 2022, 43(4): 592-598.
- LIU Zhaoqing, ZHANG Fang, ZHU Lei, et al. Target location accuracy analysis on loitering missile platform[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 592-598.
- [32] 兵工科技. 蜂群+巡飞弹, 国产蜂群 1 号无人作战车辆系统厉害在哪里[EB/OL]. (2024-08-10)[2025-03-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/7urcK0QfVIBCX94wmAooDA>.
- Ordnance science and technology. What makes China's "Swarm 1" unmanned combat vehicle system formidable? The power of swarms and loitering munitions[EB/OL]. (2024-08-10)[2025-03-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/7urcK0QfVIBCX94wmAooDA>.
- [33] 紫燕科技. 紫燕科技第三代蜂群无人机全面进化, 具备 AI 视觉引导, 支持抛投[EB/OL]. (2024-11-24)[2025-03-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/9O1xaTTf-FOqRwUa0AUzRA>.
- ZIYAN UAV. ZIYAN third-generation swarm drones are fully upgraded, featuring AI visual guidance and aerial delivery capability[EB/OL]. (2024-11-24)[2025-03-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/9O1xaTTf-FOqRwUa0AUzRA>.
- [34] 西安日报. “九天”察打一体无人机, 首飞时间定了[EB/OL]. (2025-03-24)[2025-03-24]. <https://www.cnnnews.com.cn/chanye/2025/03-24/VDp6Qa91.html>.
- XI'AN DAILY. The first flight date for the SS-UAV has been set[EB/OL]. (2025-03-24)[2025-03-24]. <https://www.cnnnews.com.cn/chanye/2025/03-24/VDp6Qa91.html>.
- [35] 于周锋, 王惠林. 无人机光电对抗技术研究[J]. *应用光学*, 2021, 42(3): 377-382.
- YU Zhoufeng, WANG Huilin. Research on UAV photoelectric countermeasure technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 377-382.
- [36] 李楚为, 张志龙, 钟平, 等. 无人机对地目标跟踪的快速初始化和自适应优化[J]. *应用光学*, 2023, 44(6): 1332-1342.
- LI Chuwei, ZHANG Zhilong, ZHONG Ping, et al. Fast initialization and adaptive optimization of UAV tracking to ground target[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(6): 1332-1342.
- [37] 林晋福, 朱玉, 张佳强, 等. 基于并行作战环的无人机集群协同作战能力评估方法[J]. *空军工程大学学报*, 2023, 24(5): 33-40.
- LIN Jinfu, ZHU Yu, ZHANG Jiaqiang, et al. Evaluation method of cooperative combat capability of UAV cluster based on parallel combat loop[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2023, 24(5): 33-40.
- [38] 陈都, 孟秀云. 基于自适应郊狼算法的无人机离线航迹规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(2): 603-611.
- CHEN Dou, MENG Xiuyun. UAV offline path planning based on self-adaptive coyote optimization algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(2): 603-611.
- [39] 朱超磊, 金钰, 王靖娴, 等. 2022 年国外军用无人机装备技术发展综述[J]. *战术导弹技术*, 2023(3): 11-25.
- ZHU Chaolei, JIN Yu, WANG Jingxian, et al. Overview of the development of foreign military UAV systems and technology in 2022[J]. *Tactical Missile Technology*, 2023(3): 11-25.
- [40] 徐同乐, 刘方, 肖玉杰, 等. 国外无人机蜂群作战典型案例及发展趋势[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2023, 18(10): 946-951.
- XU Tongle, LIU Fang, XIAO Yujie, et al. Typical examples and development trends of foreign UAV bee colony operations[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2023, 18(10): 946-951.
- [41] 王殿勋, 郭萃, 谢君, 等. 无人机集群对海上舰船的作战样式研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(10): 1-9.
- WANG Dianxun, GUO Cui, XIE Jun, et al. Research on the combat style of UAV cluster against ships at sea[J].

- Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(10): 1-9.
- [42] 刘雷, 刘大卫, 王晓光, 等. 无人机集群与反无人机集群发展现状及展望[J]. 航空学报, 2022(增刊1): 4-20.
LIU Lei, LIU Dawei, WANG Xiaoguang, et al. Development status and outlook of UAV clusters and anti-UAV clusters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022(S1): 4-20.
- [43] 江碧涛. 智能无人集群 | 典型场景跨域协同技术研究现状[EB/OL]. (2025-03-08)[2025-03-24]. <https://mp.weixin.qq.com/s/aFrLzBKG0WzJul41RmhgMQ.html>.
JIANG Bitao. Intelligent unmanned clusters | Current research status of cross-domain collaborative technologies for typical scenarios[EB/OL]. (2025-03-08)[2025-03-24]. <https://mp.weixin.qq.com/s/aFrLzBKG0WzJul41RmhgMQ.html>.
- [44] 赵太飞, 王一琼, 郭佳豪, 等. 无线紫外光中继协作无人机集结编队方法[J]. 激光技术, 2024, 48(4): 477-483.
ZHAO Taifei, WANG Yiqiong, GUO Jiahao, et al. Method for assemble formation of cooperative unmanned aerial vehicle with wireless ultraviolet relay[J]. Laser Technology, 2024, 48(4): 477-483.
- [45] 董康生, 胡伟波, 沈雁鸣, 等. 美军无人空战装备智能化发展动态及启示[J]. 现代防御技术, 2022, 50(4): 28-37.
DONG Kangsheng, HU Weibo, SHEN Yanming, et al. Development trends and enlightenment of intelligence of U. S. unmanned air combat equipment[J]. Modern Defense Technology, 2022, 50(4): 28-37.
- [46] 卢新来, 杜子亮, 许赟. 航空人工智能概念与应用发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 245-258.
LU Xinlai, DU Ziliang, XU Yun. Review on basic concept and applications for artificial intelligence in aviation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 245-258.