



航空兵器

Aero Weaponry

ISSN 1673-5048, CN 41-1228/TJ

《航空兵器》网络首发论文

题目：美国无人机集群作战的研究现状与发展趋势
作者：张邦楚，廖剑，匡宇，张敏，周绍磊，康宇航
收稿日期：2020-05-20
网络首发日期：2020-07-08
引用格式：张邦楚，廖剑，匡宇，张敏，周绍磊，康宇航. 美国无人机集群作战的研究现状与发展趋势. 航空兵器.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1228.TJ.20200708.1022.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.12321/ISSN.1679-5048.2020.0082.

美国无人机集群作战的研究现状与发展趋势

张邦楚¹, 廖剑^{2*}, 匡宇¹, 张敏³, 周绍磊⁴, 康宇航^{4, 5}

(1. 中山大学, 广州 510275; 2. 赣南师范大学, 江西 赣州 341000;

3. 重庆第二师范学院, 重庆 400065; 4. 海军航空大学, 山东 烟台 264001;

5. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055)

摘 要: 作为未来无人化、网络化、信息化、智能化战场环境下的新型作战武器装备, 无人机集群作战受到了越来越多国家的青睐。本文首先介绍了美国无人机集群技术的概念与发展历程, 然后阐述了美国无人机集群作战的研究现状; 依据未来战场态势与技术革新, 着重剖析了无人机集群的关键技术, 最后思考了无人机集群技术的发展趋势。

关键词: 无人机集群; 集群反制; 通信受阻; 安全避碰; 智能评估

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-5048 (2020) 06-XXXX-XX

0 引 言

无人机集群系统指由若干架具备相互通信能力的无人机构成, 融合智慧感知、自主决策、协同控制, 遂行同一作战任务的系统。因其具有效费比高、使用灵活、部署便捷等优点而在军事领域得到青睐^[1-6]。受大自然中的鸽群、狼群、虫群、鱼群、蚁群、蜂群等群体动物生活习惯启发, 人类开始了集群方法技术的研究, Grasse 作为先驱者在 1953 年对虫群的群体行为开展了研究并首次提出了“集群”的概念^[7-10]。

在无人机集群技术研究方面, 美国军方一马当先, 美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 于 2000 年通过借鉴蚁群中的信息素交互方式进行无人侦察机与无人攻击机编队协同作战的仿真实验, 开创了集群系统作战研究的先河; 其后, DARPA 于 2014~2016 年分别开展了具有相当影响力的“拒止环境中协同作战 (CODE)”项目、“小精灵 (Gremlins)”项目 (图 1 所示) 与“进攻蜂群战术 (OFFSET)”项目。2002 年, 美国联合部队司令部 (JFCOM) 的“阿尔法计划”实验室与空军研究实验室 (AFRL) 先后开展了无人机集群系统的作战效能与简单

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1308000); 国家自然科学基金项目 (U1813205; U1913202; U1713213; 61772508); 国防预研项目基金项目 (F062102009)

作者简介: 张邦楚 (1976-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 研究方向是无人机系统控制。

*通讯作者: 廖剑 (1985-), 男, 江西赣州人, 博士, 研究方向是多无人机编队控制, 故障诊断。E-mail: 251250544@qq.com

引用格式: 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).

Zhang Bangchu, Liao Jian, Kuang Yu, et al. Research Status and Development Trend of UAV Swarm Battlefield for the United States [J]. Aero Weaponry, 2020, 27 (6). (in Chinese)

作战任务仿真试验研究。为了实现有人机与无人机集群系统的混合编队作战, AFRL 于 2005 年率先提出协同空域作战概念并进行了初步探究, 分别于 2006 年与 2008 年提出了一套基于进化机制的无人机集群自组织框架以及引入马尔可夫过程的控制模型, 并通过模拟仿真测试了集群适应战争环境不断进化的过程。美军预估将于 2036 年全面实现无人机系统集群作战。除美国之外, 英国、欧盟、俄罗斯、韩国、芬兰等国也相继开展了一系列的无人机集群作战研究, 如英国国防部、欧洲防务局与俄罗斯都曾于 2016 年分别开展了无人机集群的竞赛、“无人机蜂群”项目以及蜂群无人机协同作战项目, 意图解决与之相关诸如无人机集群协同定位、自主决策、任务规划、协同编队控制等关键技术^[11-15]。



图1 “小精灵”作战构想^[16]

Fig.1 “Gremlins” operational concept^[16]

面对未来无人化、网络化、信息化、智能化的战场环境, 各国势必要与时俱进利用相关技术研究对等甚至更加先进的作战武器、作战平台、作战方法。随着二战中战列舰的淘汰以及航母地位的日益提高, 暗示着制空权的重要性, 未来战争中, 制空权必定也是克敌制胜的关键, 无人机集群作战作为其中的佼佼者, 必然成为了热点, 有矛的地方就有盾, 各国在竞相研究无人机集群作战这一新战法时也针对性的着手预警探测(雷达探测、声波探测、光电探测、复合探测等)以及各种诸如软杀伤(卫星信号欺骗/干扰、通信干扰、网络攻击、声波干扰等)、硬杀伤(激光、微波、导弹、榴霰弹等)、无人机集群对抗(网捕、自杀式物理碰撞等)等反制手段的研究^[17-18]。无人机集群作战固然可以大大提高整个作战系统性能, 然而其也需要解决敌我识别、态势感知、动态调整、队列控制、目标分配、效能评估等诸多问题, 解决的不好, 毫无疑问无人机集群作战将无法高效完成给定的任务, 更甚之将对战争进程及结果产生负面影响。因此研究如何设计高效的无人机集群作战战法以实现集群系统的快速、准确、可靠、合理调控并出色地完成作战任务将变得十分有现实意义^[19-20]。

1 研究现状

无人机集群系统作战自美军提出以来至今已经历 20 余年, 对集群系统作战的研究从理论进 Grelins 阶到实物验证阶段, 截至目前美国在无人机集群系统作战方面的研究一直处于领先地位。2014 年, 美国 DARPA、陆、海、空军等机构先后启动多个关于无人机集群作战的项目。

1.1 拒止环境中协同作战 (CODE) 项目

CODE 项目(图 3 所示)是 DARPA 于 2014 年启动的, 旨在是通过研发出足够先进的无人机控制与系统算法及其配套模块化软件系统, 使得一名经过简单培训的战场指挥官能够在通信不畅、干扰较强情况下实现对战场态势的掌控以及战场无人机的控制, 极大地提高无人机集群的自主性、智能性以及协同性。



图2 拒止环境中协同作战^[21]

Fig.2 Collaborative operations in denied environments^[21]

该项目分为三个阶段。第一阶段主要是方案论证阶段, 旨在验证 CODE 项目的潜力, 完成人机交互界面、人机接口、架构标准等的创建研发以及一些初级理论仿真。第二阶段主要是初步实物验证阶段, 旨在承接第一阶段, 为第三阶段的实施打下坚实基础, 依赖第一阶段完成的界面、接口、标准创建研发, 进行阶段性的实物验证。截止目前前两阶段的工作已分别于 2016 年初与 2017 年底完成, 并且 DARPA 也选定了雷神公司来完成 CODE 的第三阶段, 该阶段将实现三个任务场景飞行试验验证及全任务能力, 测试 6 个无人机系统并协同其他模拟飞行器合作的能力。

DARPA 于 2019 年在美国 Yuma 基地进行了一系列试验, 试验中战场指挥官通过地面工作站操控由 6 架装备 CODE 系统的 RQ-23 无人机与 14 架虚拟仿真无人机组成无人机集群系统, 试验成功验证了装备 CODE 系统的无人机集群系统(实物无人机与虚拟仿真无人机)能够在存在通信受阻的环境下完成作战给定任务。

1.2 小精灵 (Grelins) 项目

Grelins 项目(图 4 所示)是 DARPA 于 2015 年启动的, 旨在通过 C-130 运输机等大型空中运输平台从空中发射无人机集群以实施侦察、干扰、监视等军事任务, 任

务完成后未被打击的无人机集群能够再次回收。C-130 中, 未被打击的无人机能够重复使用, 以最大限度地节约成本。



图3 小精灵^[17]

Fig.3 Grelins^[17]

该项目分为三个阶段。第一阶是方案论证阶段, 验证方案的可行性。第二阶段是集群无人机的外形尺寸、技术指标、战斗参数等设计以及关键技术的初始地面试验与飞行试验。目前前两阶段的工作已分别于 2016 年与 2018 年完成, 并且 DARPA 选定了 Dynetics 公司来完成 Grelins 的第三阶段, 该阶段需要采用 C-130 运输开展无人机集群的空中发射与回收试验。2019 年 11 月, Dynetics 公司在美国的达格韦试验场进行了首次飞行试验并达到了预定目标。

1.3 进攻性蜂群使能战术 (OFFSET) 项目

OFFSET 项目是 DARPA 于 2017 年启动的, 旨在通过组建无人机蜂群作战系统 (由 250 个无人作战系统组成, 包括无人机与无人车等无人作战平台), 以此支援城市环境下的地面作战部队。

DARPA 于 2019 年在美国密西西比 Shelby 联合部队训练中心开展了第三轮场地试验, 此次试验以大量的无人机与无人车组成无人集群验证城市环境中的突袭战术。由于世界各地城市化的进程, 密集的城市战场也将极大可能成为未来的主战场, 为了更好的应对这一新战场, 无人集群系统需要具备一些新的技能, 研发一些新的战术技术, OFFSET 就是为此而准备的。

1.4 低成本无人机集群技术 (LOCUST) 项目

LOCUST 项目是美国海军研究室于 2015 年启动的, 旨在通过大量低成本且性能可靠的小型无人机组建集群系统实施作战。该项目主要强调的是数量上的优势, 且对发射载体的要求比较低, 大大提升了集群的战场适应能力与生存能力。

2 关键技术

无人机集群作战被认为是未来智能信息化战场的重

要作战模式, 在一定空间范围内通过有效的通信实现信息共享, 集群内的无人机单体具备高度自主能力, 能够独立完成上级下达的任务指令, 同时又与集群内的其他无人机密切配合, 协调互助, 在充分发挥无人机单体能力的同时, 又能积极形成合力挖掘更大的潜能。即使某架无人机被敌击落或因自身故障而掉队, 集群的作战能力也不会受到影响, 掉队无人机的作用能够忽略不计或者被其他无人机取代。未来的战场复杂多变, 为获得更强的生存能力, 无人机集群作战系统势必要解决诸多关键技术。

2.1 通信受阻环境下的通讯技术

自然界的鸟群、鸽群、鱼群、狼群等群居动物在群体行动 (飞行、捕食等) 时必然进行了沟通, 而无人机集群的思想源自于群居动物, 为了能够像他们那样亲密无间地配合行动, 集群作战定然要解决通信问题。理想的无干扰、无时滞的通信环境在真实的战场中是不可能存在的, 瞬变的天气环境、无人机自身的偶发通信故障、电磁干扰、网络攻击等情况都极有可能降低无人机集群系统的通信, 导致无人机之间无法保障正常及时的信息传输, 从而影响战机、作战。如何在存在外部电磁干扰、网电攻击与通信时滞等情况下实现无人机集群的高效及时通信是无人机集群作战必须要研究的关键技术之一, 解决这一关键技术不仅需要可靠高效的算法, 也需要良好的硬件设施作为基础支撑, 通信是无人机集群系统作战的基础、根本, 唯有解决好此关键技术才能进行集群作战的后续研究^[22]。

2.2 信息不完备条件下的自主队形控制及重构技术

战场态势瞬息万变, 战场时机稍纵即逝, 每一个战场都如此, 虚假的情报、敌方战场对战武装力量的重新布局、防御力量的突现、周遭环境约束的突变、我方任务安排的重新部署都会导致无人机集群系统队形重构。无人机集群执行任务的过程中面对的是一个未知的环境, 当突发的危险、上级下达的指令来临时, 无人机集群需要立马做出改变, 以躲避危险、重新规划, 现有文献中关于无人机集群重构方面的研究多是提前设定的队形, 而真实的战场是动态的, 随着无人机集群执行任务过程的推进, 集群感知的信息将会越来越全面, 而无人机集群应该具备的是能够根据当前已掌握的信息自主思考, 构建能够应对当前情况的新队形, 并快速实现自主重构, 唯有如此才能最大限度地完成任务, 随着人工智能、机器学习、大数据等新型技术的日渐成熟, 无人机集群应当具备能够根据战场态势自主确定集群构型并快速、稳定完成队形重构的能力。

2.3 复杂战场条件下的敌我识别和安全避碰技术

随着各国加紧对干扰/诱导欺骗等技术的研究,无人机集群作战很有可能会出现误伤、误打击情况。据统计,2019年阿富汗平民伤亡有一半是来源于美军无人机的误伤,其中相当一部分是由于无人机的敌我识别技术故障,未来的战场无人机集群面对的各种干扰/诱导欺骗手段将更多更复杂,如果能够准确地识别出敌我将极大地减少己方的损失或避免误伤无辜。无人机集群系统属于多无人机协同系统的一个范畴,但是前者强调更多的是数量,从美军 Grelins 等项目中不难看出,这个数量不仅是数架数十架,而是数百架甚至更多,面对如此数量的集群系统时如何安全控制以实现无人机之间不发生碰撞对科研工作者来说将是非常大的挑战。另一方面,无人机集群执行任务的环境不可能毫无二致,平旷的作战环境毕竟只占少数,从近二十年的局部战争来看,战场环境往往是高楼大厦林立的城市环境、空间狭小的街道环境、杂草密布的丛林环境甚至物体快速移动的动态环境等,如何让数百架次规模的集群系统实现安全避碰突以完成任务也是摆在集群研究工作者面前的一大挑战。

2.4 新型作战样式下的智能评估技术

作为未来战场的重要作战手段,无人机集群作战技术吸引了各国军事部门集团企业竞相开发研究,如美国的 CODE 项目、小精灵项目等就吸引了多个公司竞争研发。如何让参与研发的军工部门集团企业生产出适合未来战场需求的无人机集群产品?如何从参与研发的军工部门集团企业中挑选出最优者?这就涉及到无人机集群在新型作战样式下的智能评估技术,当下的作战武器装备强调的是“向实战聚焦”,唯有从实战出发,提出能够应对未来动态战场环境的评估指标以及智能评估技术,并以此严格要求军工部门集团企业研究出相应的无人机集群产品,进一步优中评优,选出性能与效能最优的产品^[23-24]。

3 未来发展趋势

无人机集群作战是未来战争中的主战场(可执行监视侦察、电网干扰、毁伤评估、集群对抗等任务),为了应对未来战场环境的不确定,根据已知迹象,可以对未来无人机集群的发展趋势做出如下判断:

3.1 小型化、低成本、易携带、可回收

与当前战场的大中型无人机相比,未来战场上集群无人机肯定倾向于小型化,虽然续航时间、载弹量、作战能力不如大中型无人机,但是面对未来战场上更加强大的侦察识别能力,小型化无人机的反侦察能力肯定要更强的,如此其生存能力也必将大大提高,随着集成电子技术的发展,小型化乃至微小型化都更加近在咫尺;低成本是任何武器平台追求的目标,大中型无人机价格昂

贵,一旦被击毁损失较大,而小型化的无人机成本更低,同样经费的前提下能够生产出更多的无人机,即使在任务执行过程中被击落一架或者数架,花费仍旧更低,节约的经费可以用来研发其他有价值的武器装备;小型化无人机的外形特征决定了其可能拥有比较强的续航能力,为了将其投向战场,必然需要依靠运输平台或者作战人员,如若集群无人机便于携带,也将一定程度上节约装载时间与运输时间、提高无人机集群自身生存能力与运输平台的安全性;从节约成本的角度,执行任务的无人机如果没有被击毁,肯定需要具备自主返回的能力,美军小精灵项目中也将会可回收作为考察无人机集群作战效能的一项重要指标,特别是遇到需要在战场上与运输平台或作战人员进行信息交互时,具备回收能力的无人机集群不仅可以节约成本,还可以使得集群立即具备二次执行任务的能力。

3.2 物理形态多样、能力形态多变、能力柔性配置的异构无人武器装备平台协同执行任务

从古至今,双方交战都不可能只使用单一的作战武器平台,往往是多种作战手段并举协同作战,对于无人机集群也是如此,作为一个系统,集群执行任务时需要综合考虑侦察、监视、攻击、毁伤评估、电磁干扰、空中预警等作战方式,因此未来的无人机集群作战一定是物理形态多样、能力形态多变、能力柔性配置的异构无人机集群协同作战或者与其他无人武器装备平台(无人战车、无人舰艇、无人潜艇)协同作战,目前关于无人机集群系统的研究多以同构无人机集群作为对象,最近也逐渐发展到异构无人机集群乃至异构武器装备平台组建的集群,然而目前的研究多以理论研究为主,要想走向实战还有相当长的路要走,如何组建异构无人机集群或异构无人武器装备平台实现整个大无人集群的协同作战将是未来发展的一个重要方向^[25]。

3.3 构建有人/无人机集群混合编组协同作战

进入新世纪后各国竞相发展的多项无人机集群作战项目都基于减轻战场指挥官的负担,无人机的智能水平一直在进化,提高智能化水平肯定会一直是无人机集群追求的目标,但是在可以遇见的未来无人机如人类这般思考思维大概率是不可期的,战场指挥注重灵活多变,这就更加强调“人”的作用了,“人”仍在“机”之上。但是当前的无人机集群多是以战场指挥官在后方对其进行操控指挥,考虑各种因素造成的通信受限,无人机集群可能时常难以及时收到后面战场指挥官的信息,如若无人机集群能够与某架有人机或者某个有人机集群混合编组协同作战,这一弊端必然能够大力得到缓解,有人机中的人能够发挥主观能动性,对战场时局有个大局把握,一旦发生突发事件,无人机集群也能快速及时接收

到变换的指令, 战场上时间就是一切, 有时哪怕是一秒也能改变战局, 战场上的有人机与无人机能够取长补短, 优势互补, 极大提高整个作战系统的效能, 因此提高无人机集群智能化水平并构建有人/无人机集群混合编组协同作战将是未来无人机集群发展的重要方向^[26-27]。

3.4 强化无人机集群与人工智能的融合

虽然无人机集群的智能难以在短期内达到人类智能的级别, 但是现阶段无论是对于集群内的无人机单体还是集群整体, 其智能都需要不断进化发展。即使构建了有人/无人机集群混合编组, 充分发挥了人在战场的灵活应变能力, 然而一旦突发事件出现, 战场指挥官需要先将突发事件展现的信息吸收消化, 然后再传递给无人机集群, 需要耗费不少时间, 这些时间可能很短暂, 但是也有可能左右战场时局。空战战场是非常典型的高强度、高速度、高节奏对抗, 在这种战场上武器装备固然重要, 但是一旦开战, 体能、毅力、冷静程度等因素往往更加容易成为夺取战争胜利的关键因素。如果能够进一步强化无人机集群与人工智能的融合能力与融合度, 则有些决策、规划完全不用经过战场指挥官, 可以直接依靠无人机自身感知的信息来做决策规划, 而且无人机集群依靠自身强大的学习能力还可以不断进化, 应对更多更加复杂的战场突发事件, 因此, 增强无人机集群与人工智能的融合必将成为无人机集群发展的重要趋势。

4 结 论

一方面美军对无人机集群作战研究了 20 多年, 其研究也从最初的理论研究逐渐走向了试验验证, 从美军公布的各项无人机集群发展规划可以看出, 其力图在不久的将来将无人机集群这一颠覆传统作战模式的新兴作战模式应用于实战, 除美军外, 其他主要军事强国对无人机集群系统作战的研究也一直紧锣密鼓。另一方面为了应对无人机集群系统作战模式, 近年来诸如激光拦截、信号诱导等无人机集群反制方法、技术也不断推成出新, 与此同时, 战场环境也变得更加复杂, 未来战场无人机集群面对的困难将更加艰巨。如何将现有的无人机集群作战技术、作战模式应用于真实战场, 同时针对无人机反制技术方法开发出应对方法需要各国进行更加深入的探究。

参考文献

- [1] 段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2019 年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 170-187.

Duan Haibin, Shen Kaiyan, Zhao Yanjie, et al. Review of Technological Hotspots of Unmanned Aerial Vehicle in 2019[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(1): 170-

187. (in Chinese)

- [2] 罗德林, 张海洋, 谢荣增, 等. 基于多 agent 系统的大规模无人机集群对抗[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(11): 1498-1502.

Luo Delin, Zhang Haiyang, Xie Rongzeng, et al. Unmanned aerial vehicles swarm conflict based on multi-agent system [J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(11): 1498-1502. (in Chinese)

- [3] 段海滨, 张岱峰, 范彦铭, 等. 从狼群智能到无人机集群协同决策[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(11): 112-118.

Duan Haibin, Zhang Daifeng, Fan Yanming, et al. From Wolf Pack Intelligence to UAV Swarm Cooperative Decision-Making [J]. Sci Sin Inform, 2019, 49(11): 112-118. (in Chinese)

- [4] 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 and System Safe, 2019(193): 106602.

- [5] Zhen Z Y, Chen Y, Wen L D, et al. An Intelligent Cooperative Mission Planning Scheme of UAV Swarm in Uncertain Dynamic Environment [J]. Aerospace Science and Technology, 2020(100): 105826.

- [6] Theraulaz G, Bonbeau E. A Brief History of Stigmergy [J]. Artificial Life, 1999, 5(2): 97-116.

- [7] Zhang X M, Ali M. A Bees Optimization-Based Cooperation Method for Target Searching by Swarm UAVs in Unknown Environments [J]. IEEE Access, 2020.10.1109/ACCESS.2020.2977499

- [8] 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): 8958-8970.

- [9] Koushik A M, Hu F, Kumar S. Deep Q -Learning Based Node Positioning for Throughput-Optimal Communications in Dynamic UAV Swarm Network [J]. Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(3): 544-558.

- [10] Dong X W, Li Y F, Lu C, et al. Time-Varying Formation Tracking for UAV Swarm Systems With Switching Directed

- Topologies [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(12): 3674-3686.
- [11] Mukherjee A, Misra S, Chandra V S P, et al. Resource-Optimized Multiarmed Bandit-Based Offload Path Selection in Edge UAV Swarms [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4889-4896.
- [12] Mukherjee A, Misra S, Sukrutha A, et al. Distributed Aerial Processing for IoT-Based Edge UAV Swarms in Smart Farming[J]. Computer Networks, 2019(167): 107038.
- [13] Zhu L H, Du J F, Wang Y, et al. An Online Priority Configuration Algorithm for the UAV Swarm in Complex Context[J]. Procedia Computer Science, 2019(150): 567-578.
- [14] Alfeo L, C.A. Cimino M G, Vaglini G. Enhancing Biologically Inspired Swarm Behavior: Metaheuristics to Foster the Optimization of UAVs Coordination in Target Search[J]. Computers & Operations Research, 2019(110): 34-47.
- [15] Shao S K, Peng Y, He C L, et al. Efficient Path Planning for UAV Formation via Comprehensively Improved Particle Swarm Optimization[J]. ISA Transactions, 2020, 97: 415-430.
- [16] 搜狐网.DARPA“小精灵”(Gremlins)项目进入第三阶段 [EB/OL].(2018-05-22)[2020-05-22].https://www.sohu.com/a/232529728_465915.
- Sohu.DARPA“Gremlins”Project Enters the Third Phase [EB/OL].(2018-05-22)[2020-05-22].https://www.sohu.com/a/232529728_465915.(in Chinese)
- [17] 刘献伟, 陈虎林, 李飞, 等. 一网打尽——无人集群时代的新攻防[J]. 航空兵器, 2019, 26(1): 70-75.
- Liu Xianwei, Chen Hulin, Li Fei, et al. Catch All in Nets: New Attack and Defense in the Age of Unmanned Cluster[J]. Aero Weaponry, 2019, 26(1): 70-75. (in Chinese)
- [18] 罗德林, 徐扬, 张金鹏. 无人机集群对抗技术新进展 [J]. 科技导报, 2017, 35(7): 26-31.
- Luo Delin, Xu Yang, Zhang Jinpeng. New Progresses on UAV Swarm Confrontation[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(7): 26-31. (in Chinese)
- [19] Spanogianopoulos S, Zhang Q, Sarah S. Fast Formation of Swarm of UAVs in Congested Urban Environment[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017(50): 8031-8036.
- [20] 孙盛智, 孟春宁, 侯妍. 无人机与巡航导弹自主协同作战模式及关键技术[J]. 航空兵器, 2019, 26(4): 10-15.
- Sun Shengzhi, Meng Chunling, Hou Yan. Autonomous Coordinated Operation Modes and Key Technologies between UAVs and Cruise Missiles[J]. Aero Weaponry, 2019, 26(4): 10-15. (in Chinese)
- [21] 腾讯网.未来空战新模式, 无人机蜂群制霸战场, 我国此领域已获得重大突破[EB/OL].(2019-07-02)[2020-05-22].<https://xw.qq.com/cmsid/20190702A07NA A00>.
- Tencent.The New Mode of Air Combat in the Future, Drone Colony System Dominates the Battle Field, and China has Made Significant Breakthroughs in This Field [EB/OL].(2019-07-02)[2020-05-22].<https://xw.qq.com/cmsid/20190702A07NAA00>. (in Chinese)
- [22] Amy H, Chang S N. A Meta-Analysis of Human-System Interfaces in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Swarm Management[J]. Applied Ergonomics, 2017(58): 66-80.
- [23] 廖方圆, 周华吉, 李京华, 等. 无人机通信网络态势感知研究现状与发展趋势[J]. 航空兵器, 2019, 26(4): 16-22.
- Liao Fangyuan, Zhou Huaji, Li Jinghua. Research Status and Development Trend of Situational Awareness in UAV Swarm Communication Networks [J]. Aero Weaponry, 2019, 26(4): 16-22. (in Chinese)
- [24] 陈士涛, 张海林. 基于作战网络模型的异构无人机集群作战能力评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2019, 33(1): 38-43.
- Chen Shitao, Zhang Hailin. Combat Capability Evaluation of Heterogeneous UAV Cluster Based on Combat Network Model [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2019, 33(1): 38-43. (in Chinese)
- [25] 周思全, 化永朝, 董希旺, 等. 面向地空协同作战的无人机—无人车异构时变编队跟踪控制[J]. 航空兵器, 2019, 26(4): 54-60.
- Zhou Siqun, Hua Yongchao, Dong Xiwang, et al. Air-Ground Time Varying Formation Tracking Control for

Heterogeneous UAV-UGV Swarm System [J]. Aero Weaponry, 2019, 26(4): 54-60. (in Chinese)

[26] 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.

Du Zibing, Zhang Lifeng, Chen Jingzhi, et al. Critical Technologies of Demonstration Flight Test of Cooperative Operation for Manned/Unmanned Aerial Vehicles [J]. Aero

Weaponry, 2019, 26(4): 75-81. (in Chinese)

[27] 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, 2019, 48(9): 1270-1274.

Chen Jie, Xin Bin. Key Scientific Problems in the Autonomous Cooperation of Manned-Unmanned System [J]. Sci Sin Inform., 2019, 48(9): 1270-1274. (in Chinese)

Research Status and Development Trend of UAV Swarm Battlefield for the United States

Zhang Bangchu¹, Liao Jian^{2*}, Kuang Yu¹, Zhang Min³, Zhou Shaolei⁴, Kang Yuhang^{4, 5}

(1. Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China;

3. Chongqing Second Normal University, Chongqing 400065, China;

4. Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China;

5. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: As a new type of battlefield weapon equipment in the future unmanned, networked, information and intelligent battlefield environment, UAV swarm battlefield is favored by more and more countries. Firstly, this paper introduces the concept and development process of the United States' UAV swarm system technology, then expounds the research status of the United States' UAV swarm, further analyzes the key technology of UAV swarm based on the future battlefield situation and technical innovation, and finally considers the development trend of UAV swarm technology.

Keywords: UAV swarm; swarm countermeasure; communication disruption; safe collision avoidance; intelligent assessment