

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.021

美军无人机蜂群作战研究现状及启示

尹涛¹, 梅源¹, 赵启兵², 金志伟¹

(1. 芜湖职业技术学院汽车与航空学院, 安徽 芜湖 241006;

2. 芜湖造船厂有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 针对无人机蜂群作战体系化、智能化、低成本、网络化作战的特点, 对无人机自组网、相互协调共同完成作战任务进行分析。从美国无人机蜂群作战发展的背景以及该理念的先进性 2 方面分析无人机蜂群作战实现的必要性; 深入分析美军多个重要蜂群项目, 阐述无人机蜂群当前发展现状; 结合所需突破的关键技术, 提出了无人机蜂群作战的发展趋势。结果表明, 该分析可为无人平台使用、载荷搭配和作战规划等提供支撑。

关键词: 无人机蜂群; 蜂群作战; 作战样式; 协同作战

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

Status and Enlightenment of UAV Swarm Operations in US Army

Yin Tao¹, Mei Yuan¹, Zhao Qibing², Jin ZhiWei¹

(1. School of Automobile and Aviation of Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241006, China;

2. Wuhu Shipyard Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: According to the characteristics of systematic, intelligent, low-cost and networked operations of UAV swarm operations, the self-networking and mutual coordination of UAVs to complete combat tasks are analyzed. The necessity of UAV swarm combat is analyzed from the background of the development of UAV swarm combat in the United States and the advancement of the concept. Several important swarm projects of the United States Army are analyzed in depth, and the current development status of UAV swarm combat is expounded. Combined with the key technologies to be broken through, the development trend of UAV swarm combat is put forward. The results show that the analysis can provide support for the use of unmanned platform, load matching and operational planning.

Keywords: UAV swarm; swarm combat; combat mode; cooperative combat

0 引言

无人机蜂群作战是指数百上千架具有自主能力的无人机, 在有限的人员干预下, 利用集群的独特风格, 可在战场实现更高强度的协作、更快速度的节奏, 完成预期一个或多个任务的一种全新作战方式。

1 无人机蜂群作战

1.1 发展背景

早在美苏争霸时期, 已提出“饱和攻击”战术。饱和攻击的核心是对单个目标采用多维度发射超出其对空防御上限的导弹, 利用绝对的高密度火力优势, 致使其防御体系瘫痪, 并彻底摧毁目标。该战术与之匹配的装备是足够数量的发射平台和弹药, 与之对应的要求是足够的经济实力和军事实力, 不具备普适性。

经济、军事实力相对弱的国家, 提出通过加装/改装退役飞行器衍生出导弹, 从而大量耗费对手先进的地对空导弹, 以获得军事经济学上的优势。

伴随着美苏冷战的结束, 美国国防预算持续缩减, 美军对自身技术优势的丧失和未来发展方向感到担忧^[1]。如果假想敌的防御系统能力大幅提升, 可对美军取得战场制空权构成威胁。2014 年美国在《战场机器人: 即将到来的蜂群》报告中系统级阐述无人机蜂群作战的系统作战概念。次年发布《空军未来作战概念》中描述了小型无人机集群的作战设想。2016 年美国空军在《空军未来作战概念》中再次提及其新型作战方式大多与小型无人机集群作战相关^[2]。

面向未来战场, 无人机蜂群战术在一定程度上让传统饱和攻击理论在未来升华并得以实践。无人机蜂群作战的概念横空出世, 颠覆性涌现新质作战效能, 提升体系的信息控制范围和火力投送半径, 必将颠覆未来战争, 引起各国的高度关注。

1.2 理念的先进性

1.2.1 作战成本的非对称效益

无人机蜂群作战理念中提到的无人机指的是微

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-19

第一作者: 尹涛(1995—), 男, 安徽人, 硕士。

型、小型无人机平台。该类型无人机成本低，部分可重复回收使用，相对于传统飞机等昂贵设备全寿命周期费用极低；无需飞行员操作，极大程度上减少等身高黄金价值的飞行员的伤亡；在高度对抗性、动态性的战场环境中，散布空中的无人机群既能组织较大规模集结、侦察等行动，可快速消耗敌方导弹或者压迫防御系统，充分实现作战成本的非对称效益。

1.2.2 提升作战效能

无人机或者无人机蜂群能够做出更多的高风险动作，可抵达更危险更恶劣的前沿阵地，从事高风险或者自杀式任务。

单个智能无人机通过智能组网和自主协调形成蜂群后具备的能力远超单机。当无人蜂群有充足的数量时，就无须关注其中每个个体生存性，作为一个整体它对遭受的攻击仍有一定的韧性而不会被瘫痪^[2]。

蜂群的规模体量使得蜂群个体在消耗时，蜂群整体的作战能力只是个退化过程，而不至于像单个比较考究的平台，遭受损失就会导致作战能力突然衰落。

规模庞大的无人机蜂群任意组网任意解散，在空中变幻阵型，使得敌军防空系统难以锁定目标，即便单体被摧毁不影响其他单体组成新的蜂群继续战斗，从而提升系统的机动性、韧性，更好地完成任务。

2 美国无人机蜂群研究项目

基于深度学习、计算机视觉、云计算等智能技术的积累和发展，在发展战略的指导下，美军正进行大量的研究项目，积极推动无人机蜂群向多功能化发展。美国前期无人机蜂群研究项目对比如表 1 所示。

表 1 无人机的出动方式对比

项目名称	蝉蜂群项目	山鹑蜂群项目	LOCUST 蜂群项目	小精灵蜂群项目
发起年份	2011 年	2014 年	2015 年	2015 年
发起机构	美国海军研究实验室	美国国防部战略能力办公室	美国海军研究办公室	美国国防部高级研究计划局
重量/g	35	450	6 000	320 000
最大飞行速度/(km/h)	120	110	110	850
性能特点	没有电机，非常安静，可以从美国海军的 P-3 飞机上的发射管发射，每个发射管可携带 32 个无人机。最新的设计具有扁平的机翼和机身可以轻松堆叠	前部和后部机翼在被投放前处于折叠状态，方便装入干扰弹发射筒进行一次性大量投射。具有信息共享、集体决策、自修正和自适应编队飞行能力	具有低成本和可折叠快速管射等优点，可共享友机信息，具备一定自主和协同能力	可回收，预计使用寿命为 20 次飞行。用于执行攻击作战前的侦察监视任务，以及通过电子攻击摧毁或瘫痪敌通信系统、导弹防御系统与战场网络系统等

2.1 蝉蜂群项目

2015 年 5 月，美国海军研究实验室公开展出“蝉”（Cicada）微型无人机。如图 1 所示，“蝉”微型无人机其大小与手掌相当，仅由 10 个组件组装完成，预先设定终点坐标后在空中布撒再依靠滑翔调整姿态实现飞行，具有极强的隐身性。可兼容搭载多种轻型传感器组成蜂群自主执行任务。同时该单架样机成本低至 1 000 美元。

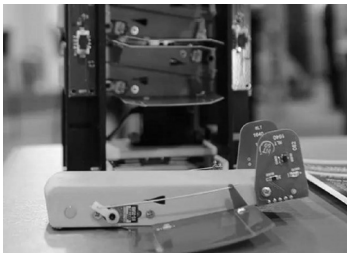


图 1 “蝉”微型无人机

2017 年 4 月，美军开展“蝉”微型无人机蜂群

测试，从 P-3 猎户座侦察机上一次性释放 32 架蝉微型无人机。迄今为止，美国海军研究实验室已交付了 150 架^[3]。

2.2 山鹑蜂群项目

美国国防部战略能力办公室积极研发山鹑（Perdix）无人机^[4]。该微型无人机使用先进的 3D 打印技术生产制造，全质量仅 0.45 kg，机翼宽度不到 3 cm，如图 2 所示。“山鹑”群通过人工/有人机/弹射装置等方式被投放至指定区域，旨在执行态势感知、情报侦察和电子干扰等任务^[5]。

据悉山鹑无人机已完成超过数百次样机试验以验证战斗机装备和人工抛投的可行性。2016 年策划了一场山鹑蜂群演示验证活动，离实战装备更进一步。演示过程中 103 架无人机被存放在胶囊容器中由战机升空择机释放，空中进行开伞、减速、脱离、滑翔、组网等连续操作，形成蜂群。美国国防部宣

称, 该蜂群共享一个分布式大脑^[6], 同时每个“山鹑”均可与另一个“山鹑”传递信息, 所以蜂群无旗舰, 可允许每个“山鹑”加入或者离开该蜂群, 如图 3 所示黑色点为无人机指定的位置, 灰色点为无人机个体实时位置。



图 2 “山鹑”无人机



图 3 无人机指定与实时位置对比

2.3 LOCUST 蜂群项目

美国海军研究局 (ONR) 牵引低成本无人机机群技术的研发验证项目 (low-cost uav sarm technology, LOCUST)。LOCUST 项目^[7]选用管式发射、体积小、成本低的郊狼 (Coyote) 无人机, 如图 4 所示, 可在船只、车辆、飞行器等多类型平台上发射。

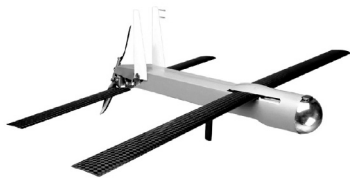


图 4 “郊狼”无人机

由 BAE 系统公司设计, 美国 Sensintel 公司生产的郊狼无人机全尺度约 900 mm, 最大起飞重量 6 kg, 有效载荷不小于 0.9 kg, 经济航速为 110 km/h, 最长飞行时间 90 min, 单架成本仅为 1.5 万美元, 性价比高。如图 5 所示, 郊狼无人机贮存在发射管

内, 发射后空中飞行一段时间后机翼由折叠状态转换为展开状态, 推进系统开始工作, 开始进入固定翼飞行模式。单架无人机通过相互分享自身定位等重要信息, 与其他同型无人机共同组网, 形成无人机蜂群执行任务。

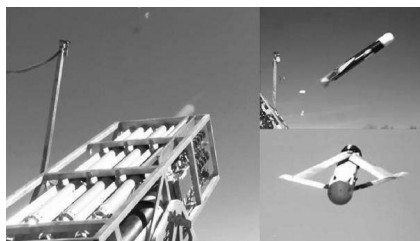


图 5 单架“郊狼”无人机发射过程

美国海军研究局于 2015 年 3 月开展了单架郊狼无人机和 9 架无人机的载荷任务、编队飞行的测试, 2016 年 4 月再次组织试验, 30 架郊狼无人机被相继发射并正常飞行, 完成编组飞行的试验。

2.4 小精灵蜂群项目

传统空中作战任务中, 一般采用有人驾驶的飞机方式完成, 往往以牺牲飞行员为代价。无人机相对于战斗机而言, 暴露出飞行高度低、作战半径小、滞空时间短等劣势。如通过有人驾驶飞机搭载无人机在目标区域外释放和回收, 恰好取长补短, 既能提升任务完成的可靠度、安全性, 又能实现目标区域的情报搜集、监视、侦察和作战等任务。

基于前期论证, 美国国防部于 2015 年公布小了精灵项目, 拟研制一型低成本 ISR 无人机和费动能有效载荷^[8]。

小精灵 (Gremlins) 项目按照 3 阶段计划推进, 逐步深入并竞选出唯一承研单位。2017 年 3 月, 美国国防高级研究计划局 (DARPA) 宣称已完成第 1 阶段的研制任务, 实现了空中发射及回收 Gremlins, 如图 6 所示。



(a) ①和②显示无人机发射前状态

(b) ③和④表示无人机发射后状态

图 6 “小精灵”无人机空中发射过程

该机的最大巡航速度为 0.6 马赫，可从 40 000 英尺的高度放飞，并在 20 000 英尺的最高进行回收。它的任务半径为 25 海里，最长续航达 4 h。最大飞行半径为 300 海里，续航时间为 1 h。

第 2 阶段, Dynetics 公司和通用原子航空系统公司被共同授予项目承研资格,并于 2018 年 4 月完成全面技术示范系统的初步设计;随后次月进入第 3 个阶段,旨在开发一套技术示范系统以及完成空中发射多架无人机和多机回收的演示验证。

该项目随着研究的不断深入,为更加贴近实战,美军对无人机蜂群中的个体技术要求逐步清晰,意味着小精灵无人机朝着多平台兼容发射、支持空中回收、可反复使用等技术方向发展。

2.5 进攻性蜂群战术项目

2017 年 DARPA 启动“进攻性蜂群使能战术”(OFFSET)项目,项目设置 3 个阶段递进开展,总周期约为 42 个月。OFFSET 是一种用于创建和学习蜂群战术的元强化学习方法。OFFSET 项目搭建开放式系统架构和测试平台,未来将应用于无人机等无人装备的蜂群战术,将加速美军对无人蜂群战术的理解。

OFFSET 项目通过构建的试验环境,演示验证数百个战术,随即对该战术进行自动优化以实现多种任务目标。经参数化设计后,可调整多类型参数生成丰富的试验环境场景,达到贴近实战的目的。

构建的试验环境之所以包含城市内作战场景，是因为建筑密集、空间狭窄闭塞、道路错综复杂不利于兵团施展全部兵力火力。如果运用无人机实施“进攻性蜂群战术”，能够明显克服以上困难，可大幅提升通信效率和态势感知能力并减少人员伤亡。

2.6 “超级蜂群”项目

俄乌冲突证明了无人机在未来战争中的确占据着主导地位，尤其是交战双方使用那些并不先进的无人机却战果辉煌。于是美国五角大楼在新财年预算报告中悄悄增加了一个庞大的“超级蜂群”项目，如图 7 所示，将使用数以千计的低成本无人机形成规模庞大的“蜂群”，使其在战场上“所向披靡”。这种小型廉价无人机可以完成包括侦查、制导和反坦克在内的多种任务，得益于其价格低廉，可以用数量上的优势来弥补性能上的不足。



图7 五角大楼规划的“超级蜂群”无人机项目

不同于需要单独操控的无人机，这些成百上千的无人机被视为一个单元控制，旨在从水面舰艇、潜艇、飞机和地面车辆发射无人机群，并配备多种有效载荷，用于侦察任务的传感器、电子压制任务的干扰器或其他电子战装备以及携带弹药执行攻击任务。

2.7 “空射效应”项目

面对拥有强大的“反介入 / 区域拒止”能力的手
对手，隐身性能、机动性较差的无人机战场生存能
力面临巨大挑战。基于上述背景，美陆军于 2020
年提出“空射效应”(ALE)项目，旨在开发一系列
可从大型有人或无人飞机上发射的小型无人机，并
以集群组网的方式协同工作，提供范围广且详尽的
未来战场图景。

依托“空射效应”(ALE)项目,美陆军在2022年“试验性验证网关演习”(EDGE)期间,成功完成规模为30架的无人机集群作战试验,这是美陆军迄今为止规模最大的无人机集群作战试验。美陆军将参加此次试验的无人机集群由过去的“无人机蜂群”重新定义为“无人机狼群”,反映出美陆军在面对低成本无人机性能不足时,对低成本无人机集群作战理念的转变,如图8所示。

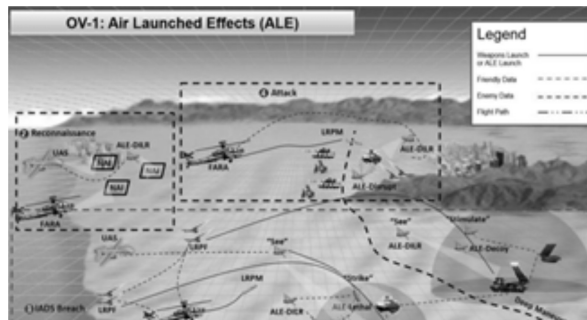


图8 “空射效应”(ALE)将执行侦察、电子战和对地打击任务

3 无人机蜂群作战样式

无人机蜂群在未来战争中更多可能扮演渗透侦

察、饱和突防、智能干扰、潜伏打击等角色。不同任务、不同协作作战单元的条件下,即使无人机蜂群扮演同样的角色,作战样式也区别较大。

3.1 无人机蜂群自主作战

1) 无人机蜂群按照指定飞行航迹在任务区域侦察,形成全方位的监测;

2) 通过释放大量诱饵,在信息层面迷惑敌预警侦察体系,诱骗敌防空武器系统设备开机以便精准定位目标,配合蜂群携带的轻型作战单元直接摧毁目标;

3) 无人机蜂群智能分析探测数据^[9],根据目标特征寻找特定靶标并发起攻击,达到突袭的奇效。

3.2 有人机与无人机蜂群协同作战

1) 待无人机蜂群标记雷达或侦察设备的精确位置之后,后方战斗机实施精确打击。

2) 无人机被投放至前沿阵地,自行编队组成蜂群。通过搭载电子干扰设备,对敌方雷达实施逼近式干扰压制,实现敌方雷达暂时致盲、通信中断,从而掩护我核心作战单元纵深攻击,占领敌方空域。

3.3 舰船与无人机蜂群协同作战

1) 舰船作为无人机蜂群的母平台,抵达目标位置附近,确保无人机蜂群作业半径可覆盖。战舰释放无人机蜂群执行任务,待任务执行结束后回收无人机。

2) 舰船作为火力支援平台,待无人机蜂群精确标记打击目标后,发射制导导弹摧毁目标。

4 关键技术

为实现无人机蜂群在未来战场具备实战化能力,梳理分析无人机蜂群作战过程,可知其主要面临以下技术难点。

4.1 主动感知与数据处理技术

未来战场局势瞬息万变,态势感知、正确决策显得愈发重要。无人机主动感知与数据处理技术主要是拥有海量数据的收集、处理、分析、共享的能力,进一步发挥集群系统的优势,获得更精准的战场态势,增强系统任务实现可靠性。

目前国内外相关领域专家正通过基于生物视觉认知机理的目标识别与环境建模^[10]、复杂环境感知与认识算法、非结构化感知方法等手段,实现能够适应智能无人机集群的主动感知与数据处理技术。

4.2 同构或异构主体

无人机集群分为同构集群和异构集群。同构集群是指由相同类型无人机构成的集群,由不同类型无人机构成的集群则是异构集群。无人机蜂群中的无人机往往各自携带的作战武器单元、通信设备或其他任务载荷,个体存在差异性,故无人机蜂群作战系统包含了丰富的异构主体,构成了广义异构集群。

无人机“蜂群”采用分布式结构解决单机平台功能和技术限制,实现各平台间模块化组合,提升群体作战能力。“蜂群”的去中心化也是一种动态更新的、更加灵活的编队组网方式,可将单一平台的作战能力分布到其他可互操作的平台上,在作战过程中,部分随机个体的失能并不会破坏整个无人机“蜂群”的功能完整性,“蜂群”仍可继续执行作战任务。

目前,针对无人机蜂群协同作战技术作用机理的研究仅限于近战(Melee)、聚合(Massing)、机动(Maneuver)和群集(Swarming)。在有人/无人机蜂群协同作战方面,作为空中指挥者的有人机搭载的机载武器、通信设备均与无人机蜂群的单个体不同,这种有人-无人机协同作战系统视为一个异构动力学多智能体系统,控制难度大,是研究的重点之一。

4.3 集群化交互与自主控制技术

无人机蜂群作业的系统鲁棒性强、执行效率高,可以将任务进行模块化处理,分散到不同的集群上完成,避免单机运算过于复杂。单机可利用无人机集群化交互^[11]实现自主选择接收有用信息,以完成自主控制与任务调整,是大规模集群相互协调、运动有序以及规划合理的基础。

其关键技术包括蜂群飞行协调规划与控制、多机协调与交互技术、复杂环境下的航迹实时规划技术、基于故障预测的任务规划技术等^[12]。为此,需要制定蜂群工作的方法规则,分析单机的功能和属性,协调任务的分工合作,提高实时判断和决策能力。

4.4 蜂群规划与决策技术

规划决策是无人机蜂群的核心技术之一,是智能性的直接体现,对无人机集群系统在复杂的战场态势中同时完成情报、监视、侦察(ISR)以及多目标攻击等任务起到了决定性作用^[13]。基于多传感器

信息融合处理技术生成的总体态势, 蜂群根据具体作战任务在无工干预的情况下开展阵型规划和飞行路径规划等一系列决策规划^[14], 以快速响应战场环境变化。

无人机蜂群任务规划实际上是针对多而复杂约束的组合优化问题, 因此, 可以利用组合优化问题的求解方法来解决无人机蜂群的任务规划问题^[15]。无人机蜂群任务规划关键技术在于算法的研究, 主要算法类型有遗传算法、蚁群算法、市场机制拍卖算法、粒子群算法、匈牙利算法等。合理的规划决策要综合考虑任务空间聚集性、单机运动有序性以及目标环境适应性, 充分发挥单机作战功效, 体现集群资源的智能化作战优势, 体现集群协同作战优势, 降低风险和成本^[16]。目前大多数算法并不成熟, 不适用于大规模的复杂任务规划。

虽然目前美军掌握了数百架无人机组成的蜂群控制技术, 试验中取得一定的成果, 但随着蜂群的规模不断扩展, 规划与决策难度不断提升, 如何保证蜂群控制系统的鲁棒性, 如何保证飞行路径自主规划的实时性, 如何保证在无 GPS 定位的情况下蜂群抵达目的地等问题成为研究的焦点。

5 结束语

综上所述, 目前无人机蜂群项目在组网通信、态势感知与融合、协同任务规划和编队控制等技术领域都发展较为成熟, 但面向未来战争中无人机蜂群作战规模化和智能化的需求, 在无人机平台设计、指挥决策体系、人机交互模式和作战方法的研究相对较少。笔者结合未来战争特点和无人装备集群指控的发展趋势, 提出 5 个未来无人机蜂群作战的发展方向:

1) 通用化低成本无人机平台。

开发适用于蜂群战术的通用化、小型化低和成本化无人机作战平台, 通用化包括载荷接口通用化、投送方式通用化和通信方式通用化, 使无人机能在各种战场环境下执行多样化任务, 充分发挥蜂群作战的效费比优势。

2) 编队分层决策体系。

随着蜂群无人机编队平台数量的增加以及未来战场态势复杂性, 传统人为决策指挥存在局限性、实时性不高等劣势, 所以应研究有人/无人分层架构的指挥决策体系, 即以有人为最高决策层, 但赋予无人机编队中部分平台一定程度的行动自主决策和

执行的权限, 减少战场反应时间、提高作战效率, 并使在蜂群编队在复杂通信环境下具备一定自主作战能力。

3) 人机友好交互。

未来无人装备作战呈现规模化的趋势, 但随之而来对指挥控制手段的要求也越来越高, 在规模数量增长的同时以更少的人员进行指控, 开发人机友好交互是重点, 利用 VR 和眼球追踪等技术, 简化指挥官战场实时态势的认知方式, 充分提高作战指挥效率。

4) 蜂群作战样式。

通信、控制和导航等底层控制技术的开发较为成熟, 但应结合无人机蜂群作战的特点和优势, 分析未来战场中无人机蜂群作战的任务需求, 研究在两栖作战、反恐和民众震慑等典型作战场景下的作战样式, 充分发挥无人机蜂群作战效能。

5) 有人/无人协同作战效能评估。

在无人机蜂群的作战任务和样式多样化的基础之上, 传统的有人作战效能指标体系已经不再适用。为达到最佳作战效能, 需要对应地构建有人/无人综合作战指标体系, 研究协同作战效能评估模型和综合态势评估模型, 从而为无人平台使用、载荷搭配和作战规划等提供支撑。

参考文献:

- [1] 许彪, 张宇, 王超. 美军无人系统蜂群技术发展现状与趋势分析[J]. 飞航导弹, 2018(3): 36-39.
- [2] 阙渭焰. 蜂群式导弹攻防[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(1): 5-8.
- [3] 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.
- [4] 董强健, 赵海涛, 郑超轶, 等. 无人机自组网典型场景构建及路由协议性能分析[J]. 通信技术, 2019, 52(9): 2149-2155.
- [5] 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.
- [6] 姜俊新. 无人机蜂群对防空作战的威胁与对策[J]. 国防科技, 2019, 40(6): 108-113.
- [7] 张昊. 美国无人机协同作战研究[J]. 飞航导弹, 2017(8): 12-16, 21.
- [8] 焦士俊, 王冰切, 刘剑豪, 等. 国内外无人机蜂群研究现状综述[J]. 航天电子对抗, 2019(1): 61-64.
- [9] 李五洲, 胡雷刚, 王峰. 美军直升机与无人机蜂群协同作战使用分析[J]. 军事文摘, 2020(4): 29-32.
- [10] 刘施阳, 师帅. 纳卡冲突中无人机的应用与启示[J].

兵工自动化, 2021, 11(40): 43-45, 59.

- [11] 王宇, 郭兴旺. 无人系统集群海上作战应用研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(12): 21-25.
- [12] 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.
- [13] 李晗, 苏京昭, 闫咏. 智能无人机集群技术概述[J]. 科技视界, 2017(26): 5-7.

(上接第 76 页)

- [2] KARTHIK G, DEB S. A methodology for assembly sequence optimization by hybrid cuckoo-search genetic algorithm[J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2018, 17(1): 47-59.
- [3] 朱雨雷, 李瑞, 陈宏伟. 基于 MBD 的船体装配三维作业指导技术研究[J]. 船舶标准化与质量, 2021(4): 33-38.
- [4] 曾芬芳, 杜坤鹏, 王华昌. 基于 MBD 的三维装配工艺规划系统的应用[J]. 制造技术与机床, 2022(9): 148-152.
- [5] 康颜奎, 顾寄南. 基于 MBD 的三维装配工艺系统关键技术研究[J]. 制造业自动化, 2020, 42(5): 67-70.
- [6] DING S H, FENG Q, SUN Z Y, et al. MBD Based 3D CAD Model Automatic Feature Recognition and

(上接第 86 页)

- [34] 侯凯宇, 贺敏, 金鹏飞. 未来远程对空导弹发展思考[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 68-75.
- [35] 孟博. 美国远程反舰导弹 LRASM 分析与思考[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(2): 137-140.
- [36] 钱立志, 李俊, 宁全利. 高过载环境下弹载器件结构动态响应研究[J]. 科技导报, 2011, 29(1): 40-43.
- [37] 钱立志, 蒋滨安, 郭佳晖. 信息化炮弹抗高过载设计方法[J]. 兵工学报, 2022, 13(7): 1-11.
- [38] 张树云, 秦栋泽, 焦国太, 等. 多模式复合引信安全系

- [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, 3(40): 5-9, 35.
- [15] 钮伟, 黄佳沁, 缪礼锋. 无人机蜂群对海作战概念与关键技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(1): 20-27.
- [16] 申燕凯, 段海滨, 邓亦敏, 等. 仿鸽群被动式惯性应急避障的无人机集群飞行验证[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(10): 1343-1352.

Similarity Evaluation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 150403-150425.

- [7] XU T M, LI J X, CHEN Z N. Automatic machining feature recognition based on MBD and process semantics[J]. Computers in Industry, 2022, 142: 103736.
 - [8] XIA L Y, LU J F, LU Y Q, et al. Semantic knowledge-driven A-GASeq: A dynamic graph learning approach for assembly sequence optimization[J]. Computers in Industry, 2024, 154: 104040.
 - [9] 印宇珂, 郑银环, 周斌, 等. 基于拆卸法的 SA-GA 混合算法的装配规划研究[J]. 现代制造工程, 2023(5): 15-21, 57.
 - [10] XIAO Y M, ZHOU J C, XING S X, et al. Research on Assembly Sequence Optimization Classification Method of Remanufacturing Parts Based on Different Precision Levels[J]. Processes, 2023, 11(2): 383.
- 统技术路线研究[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(1): 63-65, 72.
- [39] 余建辉. 大口径炮弹引信发射环境模拟试验系统设计与仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 23-78.
 - [40] 范一清, 王灵, 谢全民, 等. 聚能装药对引信的冲击试验与仿真研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 261-267.
 - [41] 孟程. 引信外弹道环境模拟试验装置原理方案设计与仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 16-76.
 - [42] 闫晓伟, 谭思炜, 孙强, 等. 鱼雷电磁引信半实物仿真试验系统设计[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(10): 99-103.