

无人机集群蜂群作战综述及其 预警探测应对策略

李 浩 孙合敏 李宏权 王晗中

摘 要 蜂群作战样式已成为各国科学技术与军事研究的热点。从矛与盾的两方面,基于博弈的思想,以时间线索论述了蜂群作战从兴起到成为研究热点的历程,并基于构建的蜂群作战时序,梳理了出蜂群作战的五大关键技术。梳理并总结了蜂群作战的系统优势。基于蜂群作战的特点,从硬杀伤与软摧毁两个方面总结了对应的反制手段,并针对蜂群作战,对预警探测能力的建设提出了可行的研究方向。

关键词 群体智能 无人机集群 蜂群作战
反制手段 预警探测能力

引 言

空军的诞生和发展使得空中力量成为 21 世纪对战争影响最大的军事力量。在现代战争中,夺取和保持空中优势的空中作战成为决定现代战争胜负的关键。而随着无人机技术的快速发展,空中武器装备发展呈现出两种趋势,即大规模和精确化。因此,中美两国在全球均率先提出了以无人机为核心的蜂群作战技术,该技术代表了未来空中作战的发展趋势,发展路线为:有人机编队协同作战→有人机/无人机编队半自主协同作战→无人机集群全自主作战。

1 蜂群作战基本概念

自然界中,生物的群体几乎随处可见,鱼群游水底,看似杂乱,实则高度协作防御与觅食^[1-2];蚁群遍布大地相互协作觅食,能合力搬运重于其身体百千倍的东西^[3-4];狼群分工明确各司其职,可协

作捕获大型猎物^[5-6]。受此启发,人类借鉴动物的群体性智能行为,通过多个小型、功能简单的无人机组成的集群,更大限度地发挥整体战斗力^[7-9]。

随着 MEMS 微电子、通信导航、C³I、人工智能等现代前沿科技领域的迅猛发展,从生物群体智能中受到启发的中美两国空军,都希望由数量庞大、成本低廉的小型无人机组成蜂群作战系统^[10-11],依靠无人机集群的整体战斗力,应对未来复杂电磁环境下的高强度、高对抗性和高不确定的战争行动。目前,无人机蜂群作战已成为全球各大军事科研机构广泛研究的热点之一^[12-15]。

美国海军曾模拟 8 架无人机集群攻击宙斯盾防空系统,结果表明至少有 2.8 架无人机能突破防空系统。如果模拟的无人机集群数量增至 10 架,也至少有 3 架能够成功突破宙斯盾防空系统。因此,无人机集群作战是突破敌防空系统的有效作战方式。

2 蜂群作战国内外现状

2012 年,美国陆军在 AH-64D 阿帕奇 Block III 武装直升机上配备了与无人机系统兼容的无人机战术通用数据链组件(UTA),协助直升机乘员操纵 MQ-4 灰隼无人机执行空中侦察任务。2015 年 6 月中旬,一架美国 F-46 战斗机从阿拉斯加的空军基地起飞,并以约 692 km/h 的速度发射了灰山鹑(Perdix)无人机集群。2016 年 5 月,美国空军发布了《2016—2036 年小型无人机系统飞行规划》,计

基金项目:国家自然科学基金项目(61502522)

本文 2018-06-22 收到,李浩、孙合敏分别系空军预警学院讲师、副教授

计划在 2036 年实现无人机集群作战,系统规划中的无人机集群横跨了航空、太空、网空三大作战疆域。2016 年 11 月,在美国海军项目资助下,雷锡恩公司用大概 30 架郊狼舰基无人机进行了无人机集群的蜂群实验(LOCUST)。2017 年 1 月 7 日,三架美国海军超级大黄蜂战斗机(F/A-18F)进行了 104 架微型集群专用无人机的抛撒和集群控制实验。美军对集群作战投入了大量的人力和物力,将其视为下次空战致胜的关键因素。

2016 年 9 月底,中航工业在西安军民融合展上就公布了蜂群无人机集群作战系统的宣传视频;2016 年 11 月,珠海航展上,由中国电科、清华大学和泊松技术联合研制的固定翼无人机进行了 67 架无人机集群飞行试验;2017 年 6 月 10 日,中国电科成功完成了 119 架固定翼无人机集群飞行试验;2017 年 12 月,国防科技大学进行了 21 架固定翼无人机集群的飞行试验。

2017 年 5 月,DARPA 组织西点军校、美国海军学院和美国空军学院进行无人集群实飞挑战赛,比赛设置三个比赛项目:空对空打击,通过使用模拟(虚拟)武器击中对手飞行中无人机的传感器;空对地打击,无人机的物理发射装置对准并打击地面上的目标“军旗”;无人集群后勤,通过尽可能快地发射尽可能多地无人机并尽可能长时间地保持高空。而中国空军装备部也于 2017 年 9 月 25 日开始了无人争锋智能无人机集群系统挑战赛预报名工作,挑战赛共设 3 个科目,分别为:SC-1 密集编队突防、SC-2 协同侦搜攻击、SC-3 自主返回空中回收,比赛于 2018 年 6 月 27 日进行初赛,7 月 7 日进行决赛,国内军地双方共计 50 支队伍参赛。

在理论研究层面,美国主要研究机构是 DARPA 和 MIT,而美国已经走到了有人/无人协同空战试验阶段。总之,无人机集群蜂群作战问题涉及系统论、控制理论、运筹学、决策理论、图论、信息论、计算机科学、人工智能和通信导航等多个学科领域,而无人机集群作战问题,本身也呈现高度的非线性、动态性、对抗性和多模态等复杂特点,要达到实际应用阶段,还需要大量的理论研究和工程实践。

飞航导弹 2018 年第 11 期

3 蜂群作战关键技术

作战行为不是突发式的一蹴而就,而是战前基于作战任务进行规划部署,即构建蜂群作战时序。为此,本文从战前的任务规划、战时的信息交互、实现对敌我态势的感知后的实时航迹规划、飞向目标的编队飞行与群内的跟踪技术这几个方面,基于作战流程,论述对应的关键技术。

3.1 集群协同任务分配技术

集群协同任务分配技术主要研究预先静态或实时动态的战场环境中,在满足任务目标和各项战技术指标等多约束条件下,无人机集群个体与个体、个体与整体、个体与武器装备等优化配置问题。协同任务的分配,既涉及到系统层面的宏观表现,又有集群个体对于任务的微观执行,更有集群个体之间的信息传输、节点的激励与响应等协同。因此,为实现未来仿生自主作战,其任务分配系统应从系统层、任务层和协同层 3 个层面来进行优化求解。

蜂群作战中,首先将任务进行分解,其流程如图 1 所示。

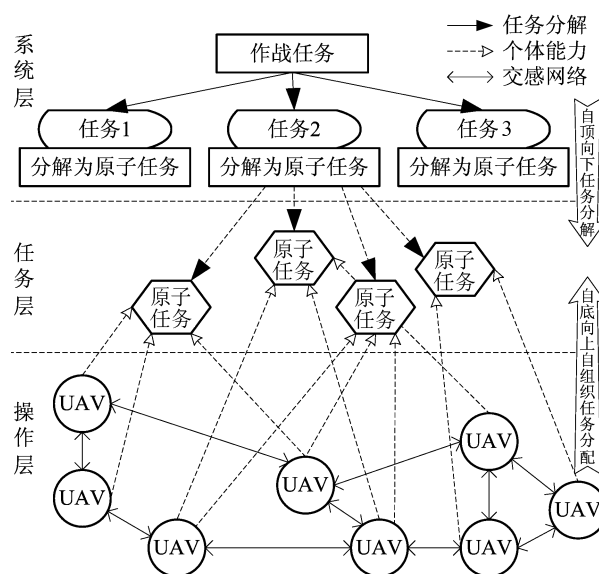


图1 任务分解流程

将 UAV 行为由原子任务激励,在具体执行过程中,往往形成一定的最优编队构型,通过 UAV 之间的协同,基于群体智能思想自组织地进行原子任

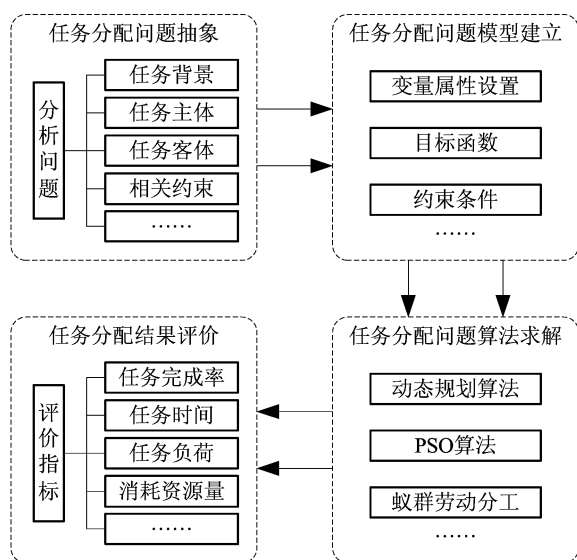


图2 任务分配求解流程

务分配。基于无人机蜂群的任务规划是个典型的 NP-hard 问题，其求解流程如图 2 所示。

任务分配问题的求解一般分为 4 个步骤，即问题抽象、模型建立、算法求解和结果评价。其与求解算法之间的对应关系如表 1 所示。

表 1 任务分配与求解算法之间的关系

| 任务分配问题要素 | 群体智能算法要素 |
|-----------------------------|-------------|
| 无人机集群中 UAV 数量 | 种群规模 |
| UAV | 智能个体 |
| UAV 任务状态 $\{x_{i,j}^k(t)\}$ | 解空间中的候选解 |
| $f(x)$ | 候选解对应的目标函数值 |
| 新 UAV 加入 | 新个体产生 |
| 任务分配的过程 | 搜索最优解的过程 |
| 最佳任务分配方案 | 解空间中的最优解 |

3.2 集群智能自组网技术

在蜂群作战的自组织系统中，为了提高协同完成任务的效能，特别是在采用分布式控制的无人机集群中，无人机之间会直接进行信息交互。为了准确、及时、高效和可靠地进行信息传输，集群通信方面需要实时进行动态自组网。同时，在无人机集群作战中，无人机既是任务网络节点，也是通信网

络节点，无人机集群中的个体面临的任務可能不同，空间位置也不同，因此需要的信息要素也不尽相同。在一定的通信拓扑及性能下，根据执行任务的不同和无人机空间分布不同，智能分配通信资源，按照作战任务交换信息，提高通信质量，是无人机集群蜂群作战技术的难题之一。分布控制的无人机集群典型信息交互如图 3 所示。

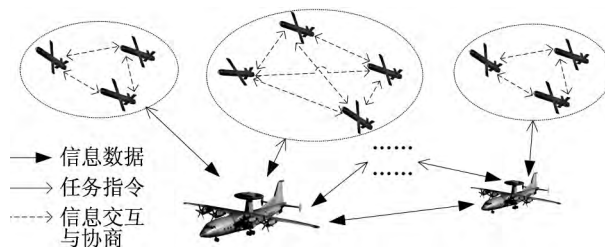


图3 典型信息交互流程传输流程

3.3 集群协同态势感知与数据融合技术

无人机集群中的多个体功能、空间位置的协同分布为集群态势感知提供了更多可能性。每个无人机节点作为任务执行主体，可以将自身周围态势通过集群智能自组网进行共享，从而提升集群整体态势感知能力，同时还可以借鉴无源雷达、多基地雷达和地基雷达网探测思路，无人机集群形成多机无源探测、多机收发分置探测和空基移动雷达探测等架构，进一步提升协同态势感知能力。而针对不同的协同态势感知方式和架构，需要采用不同的模型，针对性地采用不同的数据融合技术(见图 4)。

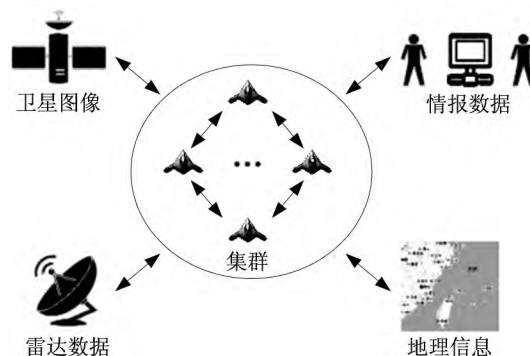


图4 数据融合传输流

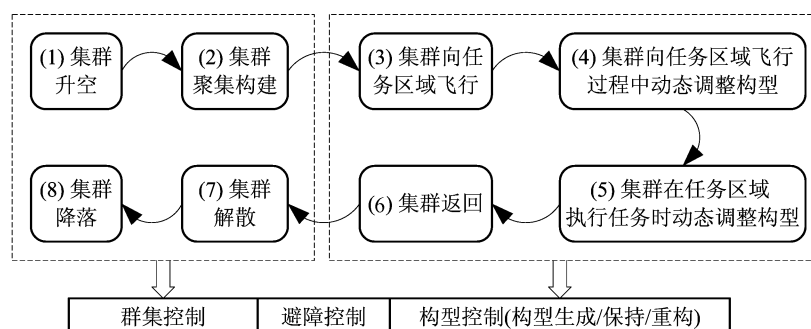


图5 无人机集群运动控制流程

3.4 集群编队飞行与协同控制技术

无人机集群既可以由同构无人机构成,也可以由异构无人机组成,可以包含侦察机,也有战斗机、预警机、电子战飞机和轰炸机等。无人机集群在作战空间进行协同机动运动时,应采用编队控制律^[16],而且还要根据集群个体任务目标、机动特性和空间位置的不同,综合研究编队个体之间的防相撞自主避障、个体机动飞行包线预先控制和限定时间内的集群协同飞行控制技术。其运动控制如图5所示。

4 蜂群作战主要优势

相比于功能复杂全面的某一单机作战平台,蜂群作战具备以下优势:

1) 相对更高的胜算。根据 Lanchester 平方率理论,参战平台数量比单个平台作战能力在战争胜负的决定上更为重要。无人机集群蜂群作战就是充分利用集群的数量优势来提升局部战争的胜算。

2) 相对低的作战成本。无人机集群蜂群作战的初衷就是将复杂的作战任务通过多个简单、低成本的无人机来协作完成。而敌方在应对无人机集群攻击时往往需要耗费多倍的成本来进行防御,使得无人机集群作战的综合成本相对较低。

3) 战场生存力强。无人机集群具有无中心性或者多中心性,集群个体之间还具有自主协同特性,在集群作战的高度对抗中,少数的集群个体损伤不会对无人机集群整体造成毁灭性伤害,而且集群仍然可以继续执行作战任务,生存能力强。

4) 功能的涌现性。无人机集群作战并非一定

数量的无人机简单叠加,不同无人机具有侦察、攻击、电子对抗等多种不同功能,通过集群和个体之间的高度协同和自组织,使无人机集群涌现出远超个体功能之和的能力涌现,整体作战能力大幅提升。

5 主要的反制手段

蜂群作战对于防空作战防御方来说,具备较大的防御难度,目前主要的军事反制手段有以下几种:

1) 传统火力拦截。目前的密集防空火炮和弹炮结合系统都能够对无人集群实施拦截打击。以密集阵系统为例,其采用搜索雷达、跟踪雷达和近防火炮三位一体的结构,加上“闭环多点”的技术,可以无需人工操作,自动修正射击误差,反应速度极快,是目前较为有效的方法。此外,美国的西恩公司采用空空导弹和用火炮发射带有前向爆炸型碎片杀伤弹头的炮弹,俄军的铠甲-S1 弹炮结合防空系统,也都曾成功防御了无人机机群攻击。

2) 电子对抗手段。无人机集群在作战过程中依赖于通信导航来获取相关信息和进行实时控制,因此可以采用电子战中的干扰和诱骗来对无人机集群实施电子战。对于固定频点,如 GPS,可采用电子诱骗来使无人机失去定位能力,而针对无人机集群的通信和控制信号,可利用电子监听收集对方的通信和控制信号后,针对性地实施阻塞式干扰。英国的 AUDS 和俄军的蔷薇电子战系统均为此类的典型系统。

3) 高功率定向能武器。定向能武器是利用各

种束能产生强大杀伤力的武器。高功率微波武器(HPM)能够烧毁敌方电子设备,损坏电子系统,具备区域性杀伤能力;高功率激光武器(HEL)在配备跟踪识别系统后,可以快速击穿无人机,配合发电机,可以为作战部队提供快速反无人机能力和几乎无限量的弹药。2018年3月,美国陆军利用雷锡恩公司的相位器高功率定向能武器系统一次性击落了45架无人机。

除上述方法外,2016年12月,美海军空战中心武器分部(NAWCWD)在加利福尼亚中国湖试验了长钉(Spike)微型轻量级精确制导弹拦截空中无人机的能力;2017年3月,美国陆军欧洲司令部对两辆斯特瑞克(Stryker)装甲车进行了特别改装,使其成为具备移动综合能力的反无人机系统,该系统能对无人机进行识别、跟踪及非杀伤性攻击。

6 蜂群作战对预警探测能力建设的思考

6.1 提高基于声光电磁多维全空域探测能力

由于作战任务和作战环境的不同,导致无人机大小、功能和机动特性差异化,对于无人机集群中低空突防行动,由于目标特性和地物遮挡等多重因素,导致发现探测距离往往极为有限。因此,在提高中高空雷达预警能力的同时,低空也应该大力发展除雷达以外的声光电磁多维综合探测能力,如基于音素音源建模的复杂背景条件下的航空器飞行音场辨识技术、基于光子并列阵列式探测传感器技术等相关技术研究。

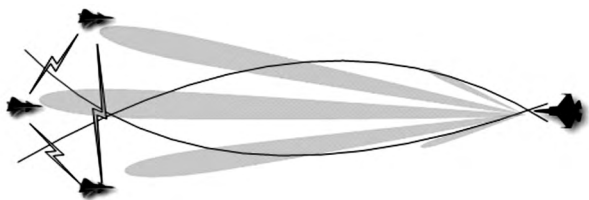


图6 无人机蜂群协同探测

6.2 形成机动无人雷达集群协同探测能力

目前,传统机动雷达车还是需要人工操作进行探测,如果能解决雷达天线转台的数字化、矢量控

制、大扭矩和姿态自平衡等关键技术环节,再经过适当改造,机动雷达车就可以具备车辆边行进、边天线扫描探测能力,再配合新兴的无线自组网和无人驾驶技术,用多个相对成本较低、探测范围小的机动雷达组成地面有人/无人雷达机动集群,形成无人雷达集群预警探测能力来应对空中无人机集群行动。无人机蜂群协同探测如图6所示。

6.3 研究多模型机动特性雷达网情报处理技术

与传统固定翼战斗机机动特性不同,多旋翼无人机具备悬停和折返等新的机动特性,这对预警情报组网融合文中的航迹起始、航迹关联和航迹融合提出了新的挑战。因此,需要针对无人机所具备的新的机动特性进行研究,调整和改进现有目标机动模型和相应算法,实现新目标机动特性下对目标的持续预警探测跟踪能力。

7 结束语

本文立足于军事特色,基于时间线索,梳理并总结了国内外研究蜂群作战的起源、发展与成为研究热点的历程,对蜂群作战的研究进行了较为综合全面的论述。基于构建的蜂群作战的时序,定位并凝练出蜂群作战的四个关键技术,论述了关键技术的作用可能实现的途径,并梳理总结了蜂群作战的主要优势。针对蜂群作战技术的广泛研究与应用,作者从硬摧毁与软杀伤两个层面,结合现有研究成果,归纳了三种行之有效的方案,即火力拦截、电子对抗与定向能武器,为反制蜂群作战提供了可行的研究方向。知己知彼百战百胜。文章基于蜂群作战的特点与性能,思考总结了应对蜂群作战及预警探测体系的发展思路。

参考文献

- [1] Si Zhang, Jie Xu, Loo Hay Lee, et al. Optimal computing budget allocation for particle swarm optimization in stochastic optimization. IEEE, 2017
- [2] Shafi Ullah Khan, Shiyong Yang, Luyu Wang, et al. A modified particle swarm optimization algorithm for global optimizations of inverse problems. IEEE, 2016
- [3] Dong Lin, Lingchao He, Xinxin Feng, et al. Niching pareto ant colony optimization algorithm for bi-objective pathfinding problem. IEEE, 2018

飞航导弹 2018年第11期

- [4] Gunaseelan JayaBrindha , Gopi Subbu E S. Ant colony technique for optimizing the order of cascaded ,SVM classifier for sunflower seed classification. IEEE ,2018
- [5] Radu Emil Precup , Radu Codrut David , Emil M Petriu. Grey wolf optimizer algorithm-based tuning of fuzzy control systems with reduced parametric sensitivity. IEEE , 2016
- [6] Lanyong Zhang , Lei Zhang , Sheng Liu , et al. Three-dimensional underwater path planning , based on modified wolf pack algorithm. IEEE ,2017
- [7] Vicsek T. A question of scale. Nature , Vol.411 ,2001
- [8] Weimerskirch H , Martin J , Clerquin Y , et al. Energy saving in flight formation . Nature , Vol.413 ,2001
- [9] Couzin I D , Krause J , Franks N R , et al. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. Nature , Vol.433 ,2005
- [10] 薛俊杰,王瑛,祝捷,等. 美国无人机分布式处理系统研究现状综述. 飞航导弹,2015(10)
- [11] 沈林成,王祥科,朱华,等. 基于拟态物理法的无人机集群与重构控制. 中国科学,2017(47)
- [12] 王虎,邓大松. 集群式无人机能力分析及其防御对策研究. 飞航导弹,2017(4)
- [13] 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. 控制理论与应用,2015(32)
- [14] 周欢,赵辉,韩统,等. 基于规则的无人机集群飞行与规避协同控制. 系统工程与电子技术,2016(38)
- [15] 申超,武坤琳,宋怡然,等. 无人机蜂群作战发展重点动态. 飞航导弹,2016(11)
- [16] 李文,陈建. 有人机/无人机混合编队协同作战研究综述与展望. 航天控制,2017(3)

(上接第 45 页)

长航时等各类无人机平台的日趋成熟,基于智能导航算法的蜂群技术、集群编队、自动避障等无人机人工智能应用爆发增长,由此出现各种持续空中干扰/监视/攻击等作战应用,特别是由地面无人车、水下无人潜航器、水面无人艇、空中无人机等组成的低成本无人蜂群体系。

基于油电混合动力各类低成本无人机,能组成空中长航时侦察、亚声速高速突防以及水下穿透性监视/中继/导引突防等平台,提高体系快速情报收集、高速突防等节点能力。

4 结束语

采用常规动力形式的无人机平台技术和功能应用日趋完善,而基于混合动力等非常规动力形式的新型无人机技术处于发展初期,特别是基于油电混合动力的可重复入水跨介质无人机、小型亚声速长航时无人机、高效垂直起降无人机和中小型高原型短距起降无人机等非常规无人机意义重大。这类无人机的应用能在高原山地快速反应、海上情报侦察与隐蔽突防、低成本火炮/导弹/空战模拟训练及空

中干扰/监视/中继/攻击等军事需求上发挥作用,对提升未来战场作战效果具有一定潜在优势。

参考文献

- [1] 武晓龙,王茜,焦晓静. 美国小型无人机集群发展分析. 飞航导弹,2018(2)
- [2] 尹泽勇,李上福,李概奇. 无人机动力装置的现状与发展. 航空发动机,2007,33(1)
- [3] Patterson M D , Derlaga J M , Borer N K , et al. High-lift propeller system configuration selection for NASA ' s SCEPTOR distributed electric propulsion flight demonstrator. AIAA 2016-3922
- [4] Rothhaar P M , Murphy P C , Bacon B J , et al. NASA Langley distributed propulsion VTOL tilt-wing aircraft testing , modeling , simulation , control , and flight test development. AIAA 2014-2999
- [5] 杨小川,刘刚,王运涛. Pixhawk 开源飞控项目概述及其航空应用展望. 飞航导弹,2018(4)
- [6] Air superiority 2030 flight plan. <http://www.af.mil> , 2016