

无人机集群对抗技术新进展

罗德林¹, 徐扬¹, 张金鹏²

1. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005

2. 中国空空导弹研究院, 洛阳 471009

摘要 无人机集群对抗是未来无人机作战的重要模式,它是一群无人机对另一群无人机进行拦截而形成的空中协作式的缠斗,对抗中无人机具有自组织、自适应特点和拟人思维属性,通过感知环境,对周围态势进行判断,依据一定的行为规则,采取攻击、避让、分散、集中、协作、援助等有利策略,使得在整体上涌现出集群对抗系统的动态特性。本文对近年来无人机集群对抗的研究进展进行综述,分析总结相关的关键技术,对研究思路和方法进行深入探讨,以期从事无人机集群对抗建模研究提供参考。

关键词 无人机;集群对抗;空战建模;复杂系统

无人机是无人驾驶的飞行器,可以在遥控操纵或自主控制方式下完成复杂飞行任务。由于无人机具有造价低、经济性好、留空时间长、能够在恶劣环境下执行任务并可避免人员伤亡等优点,在电网巡检、森林防护、搜索与救援、航拍等民用领域以及目标侦察、跟踪、打击等军事领域都有着广泛应用,并且已在过去的多次局部战争中发挥了重要作用,因而受到广泛关注。随着无人机自主化和网络化通信技术的发展,无人机的作战运用模式也在不断发展,使得无人机已在战争中起着越来越重要的作用,单架无人机由于受到探测能力、武器载荷等因素限制,难于完成复杂的作战任务。采用多架无人机协同方式,无人机之间通过通讯,进行信息共享,扩大对环境态势的感知,实现协同任务分配、协同搜索、侦察与攻击,能有效提高无人机的生存能力和整体作战效能^[1-2]。此外,由于微小无人机雷达截面小,成本低,速度快,可利用数量众多的具有自主控制能力的微小无人机组成无人机集群,用于突破敌方防御系统,对敌方目标实施饱和攻击。为对抗无人机集群的攻击,目前最有效的方法就是利用无人机集群对入侵的无

人机集群进行拦截,这必将导致无人机之间的集群空中对抗^[3]。

文献[3]已对无人机集群作战概念、发展及关键技术,包括大规模无人机管理与控制、自主编队飞行、集群感知与态势共享、集群突防与攻击、集群作战任务控制站等,作了较为详细的论述。本文针对近年来无人机集群对抗方面的研究进展进行综述,总结和阐述了无人机集群对抗研究的关键问题,并对无人机集群对抗的研究思路与方法进行探讨。

1 无人机集群对抗研究进展

无人机集群概念是建立在仿生学基础上的,如蚁群、蜂群、鸽群、鱼群、狼群等在群体运动过程能够避免相互碰撞,协同地完成觅食、迁徙、攻击防御等任务,或模拟有人驾驶战斗机群之间的空战对抗过程,充分体现出群体协作的优势,例如英伦空战中数百架战斗机在空中的相互厮杀就是有人战斗机集群对抗的例子。无人机集群技术研究目标就是模拟群聚生物的协作行为与信息交互方式,作为一个自主化和智能化的整体协同完成任务。在未来战争中,利用大量具有自主作战能力且成本低

廉的无人机组成无人机集群突破敌方防御体系,对目标实施饱和和打击以及对入侵机群进行空中拦截是无人机集群作战的重要手段。无人机集群是集群智能技术在空中无人化作战中的具体应用和军用人工智能的核心,其特点是自主控制、分布式、自适应、自组织及涌现。要实现无人机集群之间的自主对抗,首先要解决无人机集群的自主控制问题。

2015年4月,美国海军公布了“蝗虫”(LOCUST)项目,该项目研究可从舰艇、飞机等发射平台上利用发射管发射具有自主能力的无人机集群,通过集群对敌方火力进行压制和攻击,该项目已利用“郊狼”(Coyote drone)无人机进行了集群发射试验。2016年4月成功完成30架“郊狼”(Coyote drone)无人机的连续发射及编队飞行试验,图1显示了无人机发射和无人机发射后机翼的展开过程。

2015年5月美国五角大楼展示了一款为未来战争准备的微型无人机“蝉”(Cicada),该机型为“隐藏自主式一次性飞行器”,不安装引擎,大小类似长了翅膀的手机,全身只有10个通用零部件,兼具坚固耐用、尺寸小、成本

收稿日期:2016-12-12;修回日期:2017-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(61673327);2016年度航空科学基金项目(20160168001)

作者简介:罗德林,副教授,研究方向为飞行器制导与控制、无人机指挥控制,电子信箱:luodelin1204@xmu.edu.cn

引用格式: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;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.07.002



图1 “郊狼”无人机发射过程
Fig. 1 Launch of Coyote drone

低、结构简单、噪声小等特点,可配备多种轻型传感器,执行多种任务。美国海军希望未来可实现在 30 min 内在 17.5 km 投放千架“蝉”微型无人机,覆盖近 5000 km²的区域,进行对敌探测和电磁干扰,图2展示了“蝉”微型无人机的投放过程的构想。

2015年9月美国国防高级研究计划局(DARPA)发布了“小精灵”(Grem-lins)项目公告,项目设想通过发射大量微小无人机对敌防御系统进行饱和攻击,如通过C-130运输机在防区外发射携带侦察与电子战装备的无人机蜂群执行离岸电子攻击与侦察等任务,在执行完任务后,对幸存的无人机进行回收,其概念如图3所示。该项目于2016年3月正式启动,项目目前主要探索无人机集群空中发射和回收等关键技术的可行性并进行验证^[4]。

2016年5月,美国空军针对小型无人系统发布了《2016—2036年小型无人系统飞行规划》,提出了美空军近期、中期和远期小型无人机发展目标,其中包括运用微小无人机组成蜂群的作战概念及作战规划,用于执行压制或摧毁敌方防空、协同攻击与侦察、对抗敌方无人系统等作战任务。图4为该规划中无人机“蜂群”的作战构想图。

无人机集群除了在军事领域的用途外,在民用方面也可用于遥感遥测、地质勘探、应急救援、气象探测、空中分层网络、精确农业和商业娱乐等方面,图5为2016年6月新加坡国立大学陈本美教授的无人机团队在福州闽江边举办大型灯光秀表演场景,16架无



图2 “蝉”微型无人机投放过程构想
Fig. 2 Imagination of drop of Cicada Nano UAVs

人机从起飞到降落整个飞行编队表演过程按程序自动完成。2017年2月亿航无人机公司在广州海心沙广场成功上演了1000架无人机的编队灯光秀表演,展示了无人机集群技术在商业领域的应用前景。

此外,无人机集群协作还可以被设想用于建筑领域,文献[5]介绍了瑞士苏黎世联邦理工大学Raffaello的无人机团队采用多架四旋翼无人机自主协同建造由1500块泡沫砖块组成的高达6 m的塔式建筑的系统设计与开发过



图3 “小精灵”无人机集群发射概念图
Fig. 3 Conception of launch of the Gremlin UAV swarm

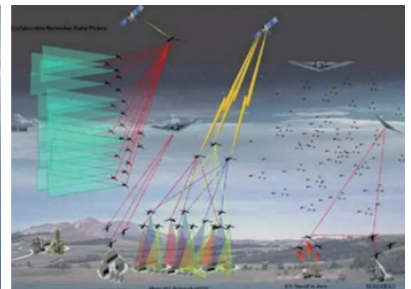


图4 无人机“蜂群”作战构想
Fig. 4 Combat imagination of UAV swarms



图5 无人机集群的灯光秀表演
Fig. 5 Light show performed by UAV swarms

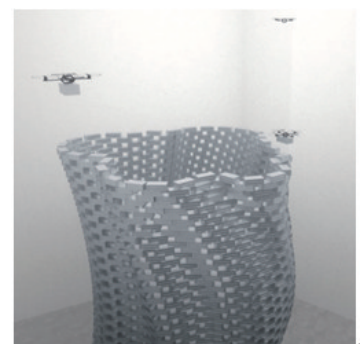


图6 “垂直村落”的建造
Fig. 6 Construction of vertical village

程,无人机能像蜜蜂一样盘旋舞动,从砖堆逐一抓取砖块,进行精准定位,将砖块依次堆放,层层叠叠地堆砌出一个曲线形状的称为“垂直村落”的庞大构建筑,如图6所示。

由于飞行速度和续航时间的要求,固定翼无人机一直是集群对抗的主要成员。2015年8月美国海军研究生院Timothy H. Chung领导的无人机团队完成50架固定翼无人机的集群自主对抗竞赛。2016年10月美军在加州的“中国湖靶场”上空进行了无人机抛洒实验,三架海军F/A-18F“超级大黄蜂”战斗机成功抛洒出103架“灰山鹑”(Perdix)微型无人机。无人机在脱离发射箱后的短时间内能相互发现队友并组成集群队形,展示了美军的集群组网技术达到了实用性阶段。中国在无人机集群自主控制研究方面也取得了突破性进展,2016年11月在珠海航展上,中国电子科技集团公司公布了67架规模的无人机集群编队飞行原理验证测试,标志着中国无人机集群控制技术进入世界先进行列。

从报道看,当前无人机集群自主控制已经进入实验验证阶段,但是无人机集群之间的对抗仍然处于理论研究阶段,成果并不多见。文献[6]提出了一种基于规则的无人机集群系统飞行与规避自主协同控制方法。文献[7]对机群协同空战指挥控制系统进行了分析,运用随机 Petri 网技术分别建立了机群协同空战指挥控制系统模型。文献[7]采用多 agent 理论对集群对抗建模,将每个无人机视为一个 agent,并对每个 agent 赋予一个行为规则集,无人机集群双方对抗的结果就是在单个无人机决策和相互作用下涌现出的整体行为。并利用双层马尔可夫过程来对空战过程进行建模,第1层描述一对一的对抗,第2层在第1层基础上建立多对多的空战对抗模型,仿真验证了50架对50架无人机集群的对抗。文献[9]采用影响图方法研究了多对多无人机之间的对抗,将多对多无人机之间的对抗分时段转化为一对一的空战对抗。文献[10]在参考文献[7]的基础上,利用多 agent 理论方法,引入态势评估和威胁规避、友机协作、火力支援和巡航中寻找有利目标等行为规则,建立了无人机对抗模型,提高大规模无人机集群对抗模型的实用性和作战效率。文献[11]利用动态对策理论、捕食与被捕食者粒子群优化方法对多无人机的空战模型问题进行了研究。文献[12]综合考虑多智能体排斥、一致、吸引和意愿4种因素,建立了一种集群运动的变系数控制器模型,实现了全部和部分个体掌握航迹信息条件下的无人机集群自组织飞行控制。文献[13]结合了模糊结构元方法和粒子群算法,给出了模糊信息下动态博弈的空战纳什均衡求解方法,为研究复杂环境下多无人机攻防对抗空战决策提供了参考。

目前对无人机集群技术研究主要集中在多无人机协同任务与目标分配优化,集群飞行控制,航迹规划等方面。对于无人机集群对抗问题,由于该问题非常复杂,目前主要是将多对多的协同空战分解为单个无人机之间的对抗,或者给出一些简单的决策方法,这

与无人机空战动态过程的实际情况存在较大的差距,还缺少有效的描述针对大规模无人机集群协同体系对抗的非线性动态模型。

2 无人机集群对抗研究的关键问题

1) 无人机集群协同对抗演化过程机理及其表述。

由于集群对抗中信息的多元化和不完全、不确定性,对抗系统是一个复杂的动态随机过程,空战对抗态势随着时空不断演化,每个无人机作为一个智能体必须依据不断变化的态势并依据一定的准则调整自己的策略,进行己方个体之间的合作、与对方的博弈。因此,在充分分析无人机集群对抗演化过程特点及其内涵的基础上,理解无人机集群对抗的非线性动态过程演化机制,利用系统动力学和复杂系统理论建立各种因素的相互作用和信息的传递关系的网络拓扑架构,有利于对无人机集群对抗过程的定量和定性分析。

2) 无人机自适应自主决策对抗行为。

集群对抗中,无人机个体是直接动作发出和执行者,无人机个体不断与环境进行交互并相互作用,促使对抗过程不断演化。因此,集群对抗最终是要依赖于无人机的对抗规则,即无人机依据敌方态势、友机态势及自身飞行状态、武器状况、健康情况等因素,采取某种机动和攻击策略,如攻击敌机、威胁回避、支援友机、战术协同,使在最大化对敌杀伤、对敌态势、瓦解敌方意图和最小化自身损失等方面的综合效益取得最大化。

3) 无人机集群智能控制方法。

实际对抗过程中,大规模的无人集群必须迅速并准确地分布于各个作战区域,进行有效的作战编队。大规模无人机集群,从其特征上看,是一类非线性复杂系统,具有群体智能涌现固有的复杂性和随机性的特性,其控制方法跟传统方法有很大的区别。集群系统可以视为大量弱耦合子系统的集成,每个个体均具有一定的自主能力,但其能力

具有局限性,而且集群中每个个体必须相互配合与协调才能完成复杂任务,因而,集群无人机具有分布式控制的本质特征。单一方法控制无人机集群往往不够理想,可以采用一些外部干预,并进行控制规则深度化和广度化对集群效果进行量化研究,使得不同对抗阶段的无人机集群能够进行精准的单机或多机协同,达到所预期的对抗要求。

4) 无人机集群探测与识别。

复杂而多变的集群对抗环境具有极大的状态不确定性和极强的时间约束,对于敌我双方大规模无人机个体和集群进行精确地探测和识别是对抗行为成功与否的先决条件。在不确定和部分确定条件下,实时在线进行主动感知和目标区分,对于集群对抗任务的上层决策具有指导意义。对抗过程中,实时采集到的图像等各类传感器信号,可以结合信息融合理论与部分可观马尔科夫等规划理论,推测并优化最佳的个体机动和集群行为,协同感应、定时并协同攻击,实现无人机集群对抗效果的最优化。

5) 无人机集群对抗态势评估。

态势评估是对抗决策的依据,由于集群对抗威胁可以来自任意方向,数量多,友机与敌方飞机相互缠绕,信息量大,且存在不完全、不确定性,态势评估比单机对抗情况复杂的多。这就需要集群中每个无人机利用其对周围环境的感知信息和接收到的邻近友机传来的信息,根据所获得的综合数据信息进行数据挖掘,分析理解敌方的作战意图、战术战法。例如,目标移动轨迹数据蕴含着丰富的信息,采用机器学习、深度学习等方法对其进行知识挖掘和模式分类,进行敌方战术意图推断,对于态势评估和对抗决策有着重要意义。

6) 无人机集群通信技术。

集群对抗环境对通信链路的要求也十分严苛,既要满足地面站与无人机、无人机与无人机、无人机编队与无人机编队之间必须存在一定冗余的信息交互,同时应减少通信的延迟,保证信息交互的实时性。空战过程中,无人机存在受伤、击落、增援等多个状态,其

同偏好。个性包括:胆量、勇气、健康状况、武器性能等。行为属性包括:1) 与环境的交互,包括对环境的感知,做出反应。2) 目标驱动的动机,如满足局部状态、收益最大。3) 智能思维,具有信息处理和决策能力,能利用局部信息进行行动决策。4) 规则动态调整,能够通过学习行为与环境的关联及通过对未来事态发生可能性的预测,对规则进行自适应调整。

无人机集群对抗是一个非常复杂的系统,具有强烈非线性、复杂性、混沌、自组织、涌现特征,应用非线性动态系统和复杂系统理论、决策理论、人工

智能与仿生智能、机器学习、深度学习等方法可以从大量空战数据背后挖掘出潜在的对抗规律与模式,揭示集群空战的动态演化机制。因此,这些方法为无人机集群对抗研究提供了有效手段。

4 结论

随着无人机智能化水平的提高和集群控制技术的发展,无人机集群对抗将成为未来无人机空战的关键技术。集群对抗作为一个复杂系统,对抗个体数量庞大,环境复杂,态势瞬息万变,由于计算维度过大,采用图论等方法难以用于大规模集群对抗问题的求解,分布

式人工智能技术为大规模集群对抗研究提供了有效的手段,包括采用多智能体系统方法和基于仿生智能的集群控制方法,通过对无人机个体的行为和策略的设计,可使得大量的能力有限的无人机聚集在一起相互作用,完成复杂的集群对抗任务。无人机集群对抗是未来空战的重要方式,由于该问题研究的重要性和复杂性而受到广泛关注。本文对无人机集群对抗技术的最新研究进展和关键问题进行了总结和分析,并对未来无人机集群对抗的研究方法进行了探讨,以期从事该领域的研究者提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 5-9.
Shen Lincheng, Niu Yifeng, Zhu Huayong. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 5-9.
- [2] 周绍磊, 康宇航, 万兵, 等. 多无人机协同编队控制的研究现状与发展前景[J]. 飞航导弹, 2016(1): 78-83.
Zhou Shaolei, Kang Yuhang, Wan Bing, et al. Research status and development prospect of multi UAV cooperative formation control[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(1): 78-83.
- [3] 牛轶峰, 肖湘江, 柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析[J]. 国防科技, 2013, 34(5): 37-43.
Niu Yifeng, Xiao Xiangjiang, Ke Guanyan. operation concept and key techniques of unmanned aerial vehicle swarms[J]. National Defence science and technology, 2013, 34(5): 37-43.
- [4] 宋怡然, 申超, 李东兵. 美国分布式低成本无人机集群研究进展[J]. 飞航导弹, 2016(8): 17-22.
Song Yiran, Shen Chao, Li Dongbing. Research progress of distributed low cost unmanned aerial vehicle cluster in USA[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(8): 17-22.
- [5] Augugliaro F. The Flight assembled architecture installation[J]. IEEE Control Systems, 2014, 34(4): 46-64.
- [6] 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[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1375-1382.
Zhou Huan, Zhao Hui, Han Tong, et al. Cooperative flight and evasion control of UAV swarm based rule[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(6): 1375-1382.
- [7] 陈军, 高晓光. 机群协同空战中的指控系统建模与分析[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(10): 195-198.
Chen Jun, Gao Xiaoguang. Modeling and analysis of command and control system in cooperative air combat[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45 (10): 195-198.
- [8] Gaertner U. UAV Swarm Tactics: An agent-based simulation and Markov process analysis[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2013.
- [9] Xie R Z, Li J Y, Luo D L. Research on maneuvering decisions for multi-UAVs Air combat[C]//IEEE International Conference on Control & Automation. New York: IEEE, 2014: 767-772.
- [10] 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): 1498-1504.
Luo Delin, Zhang Haiyang, Xie Rongzeng, et al. Unmanned aerial vehicles swarm conflict based on multi-agent system[J]. Control Theory and Applications, 2015, 32(11): 1498-1504.
- [11] Duan H B, Li P, Yu Y X. A predator-prey particle swarm optimization approach to multiple UCAV air combat modeled by dynamic game theory[J]. IEEE/CAA Journal of Automation, 2015, 2(1): 11-18.
- [12] 孙强, 梁晓龙, 尹忠海, 等. UAV集群自组织飞行建模与控制策略研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(7): 1649-1653.
Sun Qiang, Liang Xiaolong, Yin Zhonghai, et al. UAV swarm self-organized flight modeling and control strategy[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(7): 1649-1653.
- [13] 陈侠, 赵明明, 徐光延. 基于模糊动态博弈的多无人机空战策略研究[J]. 电光与控制, 2014(6): 19-23.
Chen Xia, Zhao Mingming, Xu Guangyan. Fuzzy dynamic game based operation strategy[J]. Electronics Optics and Control, 2014(6): 19-23.
- [14] Ilachinski A. Artificial war: Multiagent-based simulation of combat[M]. New Jersey: World Scientific Press, 2004.
- [15] 刘金星. 空战指挥控制的自主决策思维属性[J]. 电光与控制, 2010, 17(6): 1-4.
Liu Jinxing. Mental attributes of autonomous decision-making in air combat command and control[J]. Electronics Optics and Control, 2010, 17(6): 1-4.

New progresses on UAV swarm confrontation

LUO Delin¹, XU Yang¹, ZHANG Jinpeng²

1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China

Abstract Unmanned aerial vehicle (UAV) swarm confrontation will be an important combat mode for UAVs in the future. It is coordinated airborne dogfight between two adversary UAV swarms when one side attempts to intercept the other. UAVs in the conflict have the abilities of self-organization and self-adaption and the property of human-like thinking. By sensing environment, UAVs can evaluate their surrounding situation and take actions to their advantages, like target attack, evasion, separation, concentration, coordination, fire support, etc. according to their behavior regularities. The interaction process between UAVs and environments, as a whole, exhibits nonlinear dynamic characteristics. UAV swarm confrontation is a nonlinear dynamic complex system and also is an emerging research field, therefore, it has received extensive attention. This paper reviews the recent research advances on UAV swarm confrontation, analyzes and summarizes its key techniques as well as discusses related study thoughts and approaches. The paper is also expected to be a reference to the research of modeling of UAV swarm confrontation.

Keywords unmanned aerial vehicle; swarm confrontation; air combat modeling; complex system

(责任编辑 刘志远)