

## 无人机集群对抗博弈综述\*

轩书哲 周 昊 柯良军

(西安交通大学自动化科学与工程学院机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

**摘 要:** 无人机集群对抗是未来作战的重要样式之一。对无人机集群智能博弈与对抗技术进行了综述。首先,介绍了集群对抗问题的定义和涉及的关键技术,梳理了无人机集群对抗在问题建模、协同控制结构和博弈层面的研究现状;然后,分别综述了基于专家系统、基于群体智能、基于神经网络和基于强化学习4种无人机集群对抗博弈方法的特点和原理,分析了各个方法的优势与局限性;最后,讨论了无人机集群对抗从理论研究到实际应用面临的问题和挑战。

**关键词:** 无人机集群;攻防对抗;智能博弈

**中图分类号:** V279;TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-909X(2021)02-0027-05

### Review of UAV Swarm Confrontation Game

XUAN Shuzhe ZHOU Hao KE Liangjun

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Automation Science and Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Unmanned aerial vehicle (UAV) swarm confrontation is one of the important modes of future war. The intelligent game and the confrontation technologies for UAV swarms are summarized. Firstly, the definition of the swarm confrontation problem and involved key technologies are introduced. The research status of UAV swarm confrontation in problem modeling, the cooperative control structure and the game is sorted out. Then, the characteristics and the principles of the four confrontation game methods for the UAV swarms based on the expert system, the swarm intelligence, the neural network and the reinforcement learning are summarized respectively, and the advantages and the limitations of each method are analyzed. Finally, the facing problems and challenges of UAV swarm confrontation from theoretical research to practical application are discussed.

**Key words:** unmanned aerial vehicle (UAV) swarm; attack-defense confrontation; intelligent game

## 0 引 言

随着无人机技术的发展,无人机功能越来越多样化,性能不断提升,广泛应用于农业、交通和军事等多个领域。在战场中,由于单个无人机载荷能力弱,难以独立完成任务,各国近年来陆续提出了无人

机集群作战的作战模式。无人机集群是一种通过模仿自然界中蜂群、鸟群和鱼群等生物集群,借助信息共享和协调行动等手段实现无人机间能力互补,通过集群中个体简单行为在整体上实现复杂行为逻辑的作战群体。

无人机集群系统规模庞大且复杂,在战场中常

\* 基金项目:国家自然科学基金(61973244)资助项目。

收稿日期:2021-01-28

引用格式:轩书哲,周昊,柯良军.无人机集群对抗博弈综述[J].指挥信息系统与技术,2021,12(2):27-31.

XUAN Shuzhe, ZHOU Hao, KE Liangjun. Review of UAV Swarm Confrontation Game[J]. Command Information System and Technology, 2021, 12(2): 27-31.

包含数十甚至成百上千架无人机,且会有装备、功能不同的无人机,此外无人机集群所处环境具有随机性和高度不确定性。为了使无人机能够在复杂环境下协作完成任务,无人机集群对抗系统对多机协同任务规划与决策、信息交互与自主控制和自适应学习等提出了更高技术要求。

## 1 无人机集群对抗问题与建模研究

无人机集群对抗博弈问题本质上是疆土防御问题<sup>[1]</sup>和追捕逃脱问题的结合<sup>[1-2]</sup>。在集群系统中包含大量无人机,每架无人机观测环境能力有限,且在真实战场中无人机间交互信息不完全,无人机集群对抗系统模型是一种分散的、部分可观测的马尔可夫决策过程(Dec-POMDP)。

20世纪50年代,Rufus Isaacs<sup>[1]</sup>研究对抗双方都能自由决策行动的追捕逃脱问题,并进行数学建模,提出了微分对策方法,但他研究的追逃模型与实际问题的相比过于简化,实用性不强。1965年,何毓琦等<sup>[3]</sup>研究了线性化追逃模型,给出了该模型的捕获条件。20世纪90年代,M.H.Breitner和R.Lachner<sup>[4]</sup>研究了无约束下非线性微分对策追逃模型,并使用打靶法获得其数值解。1997年,盛蔚等<sup>[5]</sup>将大规模空战对抗转化为小规模作战,利用协同准则,将小集群中的多对多问题转化为1对1问题,继而转化为多个1对1问题,利用微分对策对多个1对1问题进行求解,从而求解协同空战对抗问题。

1998年,Jun Lung Hu<sup>[6]</sup>证明了在动态零和博弈环境下,多智能体协作会收敛到纳什平衡点,为无人机集群协作提供了理论基础。Beard等<sup>[7-8]</sup>研究发现,无人机集群系统中集中式控制对无人机的通信能力和中心节点计算能力要求较高,且难以实时控制,而分布式控制能够充分发挥无人机个体能力。此后,多采用分布式控制方法对无人机集群进行控制<sup>[9-10]</sup>。

2015年,罗德林等<sup>[11]</sup>将无人机集群中无人机个体视为独立的智能体,对无人机建立了运动模型,设计了独立的个体行为集及对应决策方法,建立了大规模无人机集群对抗模型,使无人机集群能够自适应完成协作对抗任务。

在无人机集群协同控制方面,无人机有自治特性,无人机集群系统可视作多智能系统(MAS)进行研究<sup>[12]</sup>,其典型作战指挥控制结构可分为无中心控制结构和分层控制结构。

分布式控制的无人机集群中个体根据自身局部观测和与其他个体的简单通信进行决策。分布式控

制无人机集群系统中个体智能化要求低,且个体发生故障或损毁后不影响其他个体决策,作战体系能够保持完整,系统具有可扩展性、自组织性和强鲁棒性。

狼群作战式层级化结构控制的无人机集群中包含头狼无人机和群狼无人机。头狼无人机智能化水平较高,获取战场有效信息后决策、指挥群狼无人机行动;群狼无人机执行完头狼给予的作战指令后快速撤离,等待头狼的下一个指令。狼群作战式无人机集群系统注重集群中的角色分配和任务逻辑,能够完成复杂作战任务,但对决策中心依赖性强。

无人机集群对抗是个复杂的博弈问题,利用博弈论思想对无人机集群协作对抗过程建模是目前主流研究方式之一。Hyunju Park等<sup>[13]</sup>采用分层决策结构,基于博弈论理论设计无人机的得分函数矩阵,建立了无人机视距内空对空作战机动自动生成方法,在动态且具有挑战性的作战态势下寻找最优机动策略。Alexander Alexopoulos等<sup>[14]</sup>将多人动态博弈分解方法应用于多无人机系统的追逃问题。2014年,陈侠等<sup>[15]</sup>分析无人机对抗中态势信息的不确定性,建立模糊信息下多无人机动态博弈的作战优势函数,并将多无人机对抗问题转化成静态策略式博弈,构建基于模糊信息的双方博弈的支付矩阵,求解模糊信息下多无人机动态博弈的纳什均衡解。

## 2 无人机集群对抗博弈决策与控制研究

在无人机集群对抗环境中,无人机需在尽可能少人为干预下自主分析环境态势,实时自适应决策。无人机集群作战性能与无人机集群的决策与控制方法高度相关。当前,主流的无人机集群决策与控制方法有:基于专家系统、基于群体智能、基于神经网络和基于强化学习4种。

### 2.1 基于专家系统的方法

无人机集群对抗决策与控制方法十分复杂,但有人机集群对抗的案例十分丰富,在长期指挥有人机集群对抗中,诞生了一批集群对抗的指挥专家。通过对这些专家的知识与推理整理得到专家知识库,建立专家系统,能够在小规模的、环境较简单和静态的无人机集群对抗系统中获得较好表现。

Hubert H. Chin和Bechtel R J等<sup>[16-17]</sup>提出了基于专家系统的空战决策方法,结合了模糊逻辑和专家知识库,帮助飞行员进行机动决策。其后,美国国家航空航天局(NASA)资助研发了自适应机动逻辑(AML)系列基于专家系统的机动决策系统。

基于专家系统的多无人机机动决策相关方法研究较早,目前技术较成熟。专家系统基于专家知识库决策,制定的决策可解释性优,出现错误后易于分析原因。但专家系统给出的决策常常并非最优决策,且当新问题和场景出现后,专家系统常不再适用,需重新反复调试。专家系统应用于大规模的场景区动态复杂的无人机集群系统时,调试过程漫长,难以调试出较优决策。

## 2.2 基于群体智能的方法

群体智能方法起源于对蚂蚁和蜜蜂等具有社会性结构昆虫的群体行为研究,研究者发现集群中生物个体通过简单的信息交互与合作,能表现出远超个体能力的群体智能。目前常用的群体智能方法有蚁群、粒子群优化、人工蜂群、萤火虫、鸟群、鱼群和狼群等方法。

无人机集群希望通过无人机个体通过简单通信实现协作,分布式控制无人机,个体能够遵循自身得到的对环境的部分观测进行决策,在集群层面上表现出复杂行为和强作战能力。这与群体智能的思想非常接近,因此群体智能的思想和群体智能方法广泛应用于无人机集群对抗的决策和控制。

目标分配和路径规划是无人机集群对抗决策与控制的重要部分,群体智能方法在求解目标分配和路径规划上已很成熟。例如,M. Brand等<sup>[18]</sup>利用蚁群法求解机器人的路径规划问题;段海滨等<sup>[19]</sup>利用蚁群法实现生产调度中多目标分配问题;Bhattacharjee等<sup>[20]</sup>通过人工蜂群法对多机器人路径规划进行优化;此外,粒子群法<sup>[21]</sup>、萤火虫法<sup>[22]</sup>和狼群法<sup>[23]</sup>也广泛应用于无人机集群协调控制。对于无人机集群编队飞行,周子为等<sup>[24]</sup>研究了雁群行为和无人机集群行为间的仿生映射机理,设计了仿雁群行为的无人机集群紧密编队和控制方法。冉惟之<sup>[25]</sup>基于群体智能的思想设计了无人机集群信息素、协同任务分配、个体路径规划和对抗行为规划,实现了在无人机集群人工蜂群信息素群体协同方法。

在实际场景中,匈牙利罗德大学的TamásVicssek团队利用群体智能行为机制,实现了10架四旋翼无人机的自主集群飞行试验<sup>[26]</sup>。DAPRA采用群体智能理论构建了面向对象的无人机集群的蜂群战术,实现了进攻型蜂群使能战术项目<sup>[27]</sup>。

## 2.3 基于神经网络的方法

人工神经网络具有自学习能力、联想存储能力和万用逼近性,很适用于实现无人机集群决策与控制。

Schvaneveldt和McMahon等<sup>[28-29]</sup>结合专家知识和神经网络,通过专家知识总结出的一系列规则对神经网络进行训练,利用神经网络的自学习能力和联想能力对专家知识进行拓展,实现了鲁棒性强、适应性优的无人机决策控制方法。在20世纪早期,Johnson和Calise<sup>[30]</sup>首先提出了自适应神经网络的无人机决策控制方法。Roger等通过反向传播(BP)神经网络,建立无人机决策模型,以每架无人机获取的过去和当前组成的环境局部观测历史为输入,以机动决策动作为输出,很好解决了无人机机动决策问题。李峰等<sup>[31]</sup>针对专家知识用纯数学模型难以表达以及专家系统难以满足实时性要求的缺陷,利用模糊逻辑系统将输入信息模糊化,并用神经网络实现模糊信息到决策控制的映射,实现了基于模糊神经网络的无人机决策控制系统。

Fan等<sup>[32]</sup>利用增强拓扑神经网络(NEAT)建立模型预测路径控制器(MPPI),解决了复杂无人机集群对抗场景中模型预测控制(MPC)短视的缺陷,实现了对无人机集群的灵活控制。

## 2.4 基于强化学习的方法

强化学习是一种可以不依赖模型和任何先验信息、通过环境中不断试错,根据获取的奖励对自身行为策略进行优化的方法。通过将深度神经网络与强化学习方法相结合,智能体可以在仿真环境中不断迭代优化无人机集群策略,非常适用于解决无人机集群决策控制这类建模困难、决策复杂多变的问题。

在处理无人机集群对抗博弈问题中,一种基本的强化学习方法是假定存在一个统一的顶端智能体,该智能体掌握所有无人机的状态和操作信息,将多无人机问题转变成单智能体问题。另一类方法是将每个无人机视为独立的个体,在该类方法中,每个无人机仅处理自己获得的信息,无人机间完全独立。

近年来,随着强化学习方法的研究与深入,基于强化学习的无人机集群对抗方法得到了进一步发展,包括多智能体强化学习、分层强化学习、基于模型的强化学习和逆强化学习等多种强化学习方法都在集群对抗问题中得到了广泛应用。如Akhiloufi等<sup>[33]</sup>利用深度强化学习方法对追捕脱逃问题中的对手建模,预测对手无人机的动作,从而实现对目标无人机的跟踪或逃离。魏航<sup>[34]</sup>从无人机决策动机入手,结合径向基函数(RBF)神经网络和强化学习,设计了不同决策意图下的无人机飞行轨迹。轩书哲等<sup>[35]</sup>深入研究了无人机集群攻防对抗问题,在无人机环境



中设计使用了基于多智能体的深度确定策略梯度(MADDPG)方法,在集群中每架无人机只能获取局部观测情况下,使用包含全局信息的Critic网络和只包含无人机个体局部信息的Actor网络,采用集中训练、分布式执行的框架,使无人机集群能够在不依赖通信情况下完成协作,有效学习了决策控制策略,并将该框架推广到近端策略优化(PPO)方法中。

### 3 无人机集群系统面临的挑战

当前无人机集群对抗系统建模较简单,对无人机集群的演化、自组织能力认识不够,而且常简化了无人机间通信关系,实际应用中无人机通信常会受到敌方干扰。目前的无人机集群多对多协作对抗处理,大多采用分解成多个无人机1对1对抗或应用多智能体系统和博弈论原理给出简化模型,与真实场景仍存在较大差距。无人机集群对抗理论层面的研究到实际应用还有较大距离。

未来无人机集群的规模会越来越大,且集群中无人机种类越来越多,需考虑如何处理大规模无人机系统,避免无人机数量过多带来的系统状态维度灾难问题,以及如何协调不同种类无人机以实现合理协作。

无人机集群中个体在有限的通信能力和观测能力状态下,仅能获取环境中小部分信息,如何基于这部分信息进行决策,同时在无人机间交流有限的情况下实现协作也是无人机集群系统的一个难题。

在无人机集群对抗决策控制方法中,基于神经网络的方法和基于强化学习的方法都是黑盒,如何实现可靠的决策控制,解释制定决策的原理,让指挥员理解和信任决策也是一个重要挑战。

### 4 结束语

无人机集群对抗是未来无人作战的重要样式,深刻影响着未来战争的发展走向。本文围绕对无人机集群问题建模与决策控制方法,梳理了无人机集群决策控制研究方法,并分析了无人机集群对抗面临的挑战。后续需从态势感知、博弈方法和博弈试验平台等诸方面开展无人机集群对抗技术的研究,实现军事技术变革,以增强军事实力。

#### 参考文献(References):

[1] ISAACS R. Differential games: a mathematical theory with applications to warfare and pursuit, control and optimization[J]. Physics Bulletin, 1965, 17(2): 60.

- [2] TABACHNIKOV S. Chases and escapes: the mathematics of pursuit and evasion by Paul J. Nahin[J]. The Mathematical Intelligencer, 2009, 31(2): 78-79.
- [3] HO Y C, BRYSON A, BARON S. Differential games and optimal pursuit-evasion strategies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1965, 10(4): 385-389.
- [4] LACHNER R, BREITNER M H, PESCH H J. Three-dimensional air combat: numerical solution of complex differential games[C]//Proceedings of Annals of the International Society of Dynamic Games: New Trends in Dynamic Games and Applications. [S.l.]: Springer, 1996: 165-190.
- [5] 盛蔚, 李建勋, 佟明安. 微分对策论在多机协同攻击中的应用研究[J]. 系统工程与电子技术, 1998(3): 7-11.
- [6] HU J, WELLMAN M P. Multiagent reinforcement learning: theoretical framework and an algorithm[C]//Proceedings of 15th International Conference on Machine Learning. Madison: Morgan Kaufmann, 1998: 242-250.
- [7] BEARD R W, MCLAIN T W, GOODRICH M A, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6): 911-922.
- [8] PONGPUNWATTANA A. Real-time planning for teams of autonomous vehicles in dynamic uncertain environments[D]. Washington D C: University of Washington, 2004.
- [9] SROVNAL V, NEVRIVA P. Distributed control systems of pipeline networks using multi-agent technologies [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2000, 33(17): 1093-1098.
- [10] BLAKE M B. Rule-driven coordination agents: a self-configurable agent architecture for distributed control [C]//Proceedings of 5th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. Dallas: IEEE, 2001: 271-277.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] PARK H, LEE B Y, TAHK M J, et al. Differential game based air combat maneuver generation using scoring function matrix[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2016, 17(2): 204-213.
- [14] ALEXOPOULOS A, BADREDDIN E. Decomposition of multi-player games on the example of pursuit-evasion games with unmanned aerial vehicles[C]//Pro-

- ceedings of 2016 American Control Conference. Boston:IEEE,2016: 3789-3795.
- [15] 陈侠,赵明明,徐光延.基于模糊动态博弈的多无人机电空战策略研究[J].电光与控制,2014,21(6):19-23.
- [16] CHIN H H. Knowledge-based system of supermaneuver selection for pilot aiding [J]. Journal of Aircraft, 1989,26(12):1111-1117.
- [17] BECHTEL R J. Air combat maneuvering expert system trainer: AD-A246459 [R]. Texas: Air Force Systems Command,1992.
- [18] BRAND M, MASUDA M, WEHNER N, et al. Ant colony optimization algorithm for robot path planning [C]//Proceedings of 2010 International Conference on Computer Design and Applications. Qinhuaangdao: IEEE,2010:V3-436-V3-440.
- [19] 段海滨,王道波,朱家强,等.蚁群算法理论及应用研究的进展[J].控制与决策,2004,19(12):1321-1326.
- [20] BHATTACHARJEE P, RAKSHIT P, GOSWAMI I, et al. Multi-robot path-planning using artificial bee colony optimization algorithm [C]//Proceedings of 2011 Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing. Salamanca:IEEE,2011:219-224.
- [21] BUTENKO S, MURPHEY R, PARDALOS P. Cooperative control: models, applications and algorithms [M]. Berlin:Springer Science & Business Media,2003.
- [22] Łukasik S, Żak S. Firefly algorithm for continuous constrained optimization tasks[C]//Proceedings of International Conference on Computational Collective Intelligence: Semantic Web, Social Networks and Multiagent Systems. Wrocław:Springer,2009:97-106.
- [23] WU H S, ZHANG F M, WU L S. New swarm intelligence algorithm: wolf pack algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics,2013,35(11):2430-2438.
- [24] 周子为,段海滨,范彦铭.仿雁群行为机制的多无人机电空战编队[J].中国科学:技术科学,2017,47(3):230-238.
- [25] 冉惟之.基于群体智能的无人机集群协同对抗系统的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2020.
- [26] 樊邦奎,张瑞雨.无人机系统与人工智能[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11):1523-1529.
- [27] VÁSÁRHELYI G, VIRÁGH C, SOMORJAI G, et al. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots [C]//Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago:IEEE,2014:3866-3873.
- [28] SCHVANEVELDT R W, GOLDSMITH T E, BENSON A E, et al. Neural network models of air combat maneuvering: ADA254653 [R]. Las Cruces: New Mexico State University,1992.
- [29] MCMAHON D C. A neural network trained to select aircraft maneuvers during air combat: a comparison of network and rule based performance [C]//Proceedings of 1990 International Joint Conference on Neural Networks. San Diego:IEEE,1990:107-112.
- [30] JOHNSON E N, CALISE A J. Limited authority adaptive flight control for reusable launch vehicles [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics,2003,26(6):906-913.
- [31] 李锋,孙隆和,佟明安.基于模糊神经网络的超视距空战战术决策研究[J].西北工业大学学报,2001,19(2):317-322.
- [32] FAN D D, THEODOROU E, REEDER J. Evolving cost functions for model predictive control of multi-agent UAV combat swarms [C]//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. SIGEVO: Association for Computing Machinery,2017:55-56.
- [33] AKHLOUFI M A, AROLA S, BONNET A. Drones chasing drones: reinforcement learning and deep search area proposal[J]. Drones,2019,3(3):58.
- [34] 魏航.基于强化学习的无人机空中格斗算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [35] XUAN S Z, KE L J. UAV swarm attack-defense confrontation based on multi-agent reinforcement learning [C]//Proceedings of 2020 International Conference on Guidance, Navigation and Control. Tianjin: Springer,2021:1-10.

#### 作者简介:

轩书哲,男(1995—),硕士研究生,研究方向为强化学习。

周昊,男(1997—),硕士研究生,研究方向为强化学习和智能博弈。

柯良军,男(1976—),教授,博士,研究方向为智能计算、强化学习和无人系统智能感知与协同。

(编辑:李素华)