

系统工程与电子技术
Systems Engineering and Electronics
ISSN 1001-506X, CN 11-2422/TN

《系统工程与电子技术》网络首发论文

题目： 无人机集群任务规划方法研究综述
作者： 贾高伟，王建峰
收稿日期： 2020-04-15
网络首发日期： 2020-08-20
引用格式： 贾高伟，王建峰. 无人机集群任务规划方法研究综述[J/OL]. 系统工程与电子技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20200819.1037.042.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。

无人机集群任务规划方法研究综述

贾高伟, 王建峰

(国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 无人机集群以其高度的灵活性、广泛的适应性, 可控的经济性, 拥有越来越广泛的应用潜力, 受到国内外的高度关注。任务规划是无人机集群应用的关键技术之一, 本文从基于逻辑与规则的自上而下式任务规划和基于集群智能涌现的自下而上式任务规划两个方面, 对无人机集群任务规划技术现状进行了全面的归纳与总结, 分析了当前无人机集群任务规划技术研究应当关注的若干发展方向。本文的工作对于全面了解无人机集群任务规划技术现状具有重要参考意义。

关键词: 无人机集群; 任务规划; 群体智能; 集群行为; 研究现状

中图分类号: V 37 **文献标识码:** A

Research status and development of UAV swarms mission planning

JIA Gaowei, WANG Jianfeng

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: With the advantages of flexibility, adaptability, and economical efficiency, the unmanned aerial vehicle (UAV) swarming has plenty of applications and owns more and more attentions. It is noted that the task planning is one of the key technologies of UAV swarming and is essential for the final task results. In this paper, the review of task planning technology is proposed from two different aspects. One is based on the rule, style of top-down, and the other is based on the swarm intelligence, style of down-top. Both of these two kinds of task planning method have rapid development and vast achievement. It is hoped that the summary in this paper is helpful for the understanding of task planning technology of the UAV swarming.

Keywords: unmanned aerial vehicle swarming; mission planning; swarm intelligence; swarm behavior; research status

0 引言

任务规划是指在任务执行过程中对个体工作状态或使用方法及步骤的规划及安排, 它遍布于社会生活诸多领域, 几乎所有社会系统的运作都必须明确什么样的任务该由什么样的成员来完成。任务规划理论是多类领域特殊任务规划问题求解发展的结果。鉴于任务规划之于群体运行的重要意义, 长时间的研究使得该方面

成果丰富。理论上讲, 任务规划是一类多约束条件下的优化问题, 从任务规划理论的发展历程看, 20世纪60年代以前, 主要的理论模型包括线性规划问题及单纯形方法^[1]、指派问题^[2]及匈牙利法^[3]、整数规划问题^[4]及分支定界方法^[5]等经典的任务分配理论; 随后受分布式系统发展的影响, 任务规划理论得到的快速发展, 随之而来的关键成果包括典型的0-1规划模型^[6]、图论模型^[7]、负载均衡模型^[8]; 20世纪80

年代后，分布式智能任务规划方法开始出现，该类算法对数学模型的依赖很小，借鉴生物习性，逐步形成一类优化方法。

无人机具有低成本、无人员伤亡、操作方便简单、灵活可靠等优点，近年来发展迅速，各式各样的无人机层出不穷；结合日益发展的网络信息技术，促使了无人机集群的出现和高速发展。无人机集群技术已经演化为航空工业的核心技术之一，表现出巨大的应用潜力，尤其在军事应用领域。类似于其他社会系统，无人机集群的任务规划是无人机集群应用的核心技术，是指根据无人机集群要完成的任务、无人机集群的数量及任务载荷情况的不同，对无人机集群所需完成的具体任务的预先设定与统筹管理，决定着无人机集群的应用效能。因此，相关研究在全世界范围内得到了广泛持续的关注。从复杂程度上讲，无人机集群是由多无人机进一步提升发展而来，无人机集群是多无人机的高阶形式，二者的区别与联系可以由表1来概括。

表1 无人机集群与多无人机的区别与联系

Table 1 comparison between multi-UAV and UAV swarms

	多无人机	无人机集群
组成数量	较少	多
人工干预	多	少
协同等级	低	高
空间密度	小	大
任务类型	有限	更多
控制难度	易	难
平台特征	通常为高端无人机	个体偏小、成本更低
链路控制	点对点、星状网	无中心自组网

无人机集群的灵活组织与运用，离不开科学的体系架构设计，不同的架构设计又牵引着不同的技术路线和方向，影响着无人机集群的任务规划、协同决策与实际效益。概括来讲，适合于无人机集群的控制架构包括集中式、分布式、集散式等多类^[9]。

(1) 集中式：该体系的确立源自“单无人机-多无人机-无人机集群”的发展思路，是当前最直接、最成熟的集群架构模式，无人机集群接受单个或多个中心控制。该体系架构对无人机数据链带宽、速率、功率以及可靠性提出了很高要求。

(2) 分布式：该体系类似于自然界生物集群，无人机之间地位平等，通过彼此信息交

互，协同完成任务。该体系是一种朝“完全自主”方向发展的任务构型，对无人机机间协同能力要求很高。分布式体系下各无人机单元之间的通信信息量较大。

(3) 集散式：该体系结合了集中式和分布式的优点，利用分布式自治与集中式协作相结合的方式，来解决全局控制问题。该体系符合现阶段集群技术发展现状，在可预见的今后一段时间，可能成为常态的实用化体系架构。

鉴于任务规划理论的多样性以及无人机任务样式的复杂性，截止目前，关于多无人机任务规划技术的研究成果丰富^[10]，而无人机集群是多无人机的高阶形式，对应的任务规划技术将呈现更为复杂的技术特征，本文拟针对近几年无人机集群如火如荼的研究现状，从两个角度归纳无人机集群任务规划技术的发展特点、关键方向。

1 基于逻辑与规则的多无人机任务规划典型方法

基于人类知识所建立起来的逻辑与规则，是实现多无人机任务规划的重要渠道，它沿袭了分层递阶的思想^[10]，从顶层规划到分层逐步实施，降低了问题的复杂性。该思路符合人类社会管理的一般规律，易于理解，成果丰富。典型的任务规划方法也秉承了这一思想。

概括地讲，多无人机任务规划的内涵十分宽泛，可以包括但不限于任务目标分配、航迹规划、任务载荷规划、数据链路规划、应急处置规划等等。一般地，任务载荷规划、数据链路规划以及应急处置规划等功能相对独立，对无人机集群属性的依赖度不够强（比如有专用的传感器使用规划、链路配置规划系统等），常见的做法是在无人机集群的任务分配与航迹规划中将任务载荷、链路设置、安全飞行等因素作为规划的约束条件。

因此，本文对多无人机（乃至无人机集群）任务规划技术的介绍，主要分为任务分配和航迹规划两个层次展开。任务分配与航迹规划是无人机集群任务规划中的关键环节，决定了无人机集群执行任务的时序关系，多无人机

与多目标之间的映射关系，单架无人机的可执行航线等，确保无人机能够安全适时地抵达任务区域并最大效能地完成任务。任务分配和航迹规划共同奠定了无人机集群执行任务的基本能力基础。

1.1 典型多无人机任务分配方法分类

无人机任务分配用于建立无人机与任务之间的关联和映射关系，是多约束条件下的离散空间组合优化问题，其实施的关键是建立可数学表达的目标函数并有效地处理各项约束。本节从集中式任务分配和分布式任务分配两个方面简要地归纳相应的典型方法。

1.1.1 集中式任务分配典型方法

适合于多无人机集中式任务分配的数学模型主要包括：多旅行商问题（multiple traveling salesman problem, MTSP）^[11]、车辆路径问题（vehicle routing problem, VRP）^[12]，多选择背包问题（multiple choice knapsack problem, MCKP）^[13]，混合整数线性规划问题（mixed integer linear programming, MILP）^[14]，动态网络流优化（dynamic network flow optimization, DNFO）模型^[15]，多处理器资源分配模型（multiple processors resource allocation, CMTAP）模型^[16]等。这些模型一般可以推广应用于无人机集群，但随着无人机数量和任务类型增多，分配问题的描述将变得愈加复杂。

集中式任务分配求解方法又可以分为最优化方法和启发式方法。其中，典型的最优化方法如图1所示。

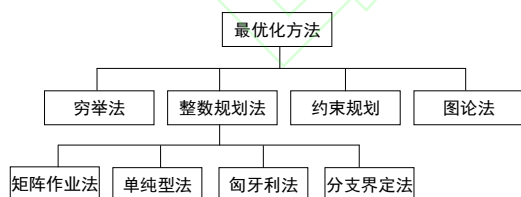


图1 部分最优化方法分类

Fig. 1 Classification of partial optimization methods

整数规划方法（integer linear programming, ILP）通过建立目标函数和约束条件的方法进行求解，矩阵作业法^[17]、单纯型法、匈牙利法、分支定界法等是常见的整数规划方法，这一方法也演变出一类混合整数线性规划算法^[13]。约束规划（constraint programming, CP）方法由变

量集和约束集两者组成，变量集内的所有变量都有自己对应的值域，是求解组合优化问题的常用方法。图论方法通过图示的方法把目标和接收任务的对象特征表征出来^[7]，利用图论方法在任务和系统成员之间建立匹配，网络流模型和偶图匹配模型是经典的图论任务分配模型。一般而言，最优化算法具有描述简洁、直接等特点，可以灵活调整约束条件来求解实际问题，具有理论最优解，但规模不宜过大，一般可用于无人机集群离线式任务分配。

启发类方法的基本思想是在算法时间和求解结果之间进行调节，在能够接受的时间内求得局部最优解或满意解，具体分类如图2所示。

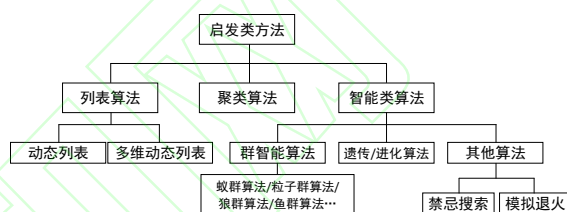


图2 启发类算法分类

Fig. 2 Classification of partial heuristic methods

在启发式算法中，列表算法基于优先权函数对任务处理次序进行排列，随后分发给各成员^[18]；聚类算法是将任务作为一个簇进行聚类，通过满足任务簇与系统成员数达到一致^[19]实现分配，两者都有一定应用。相比较，智能类算法的应用比较普遍，尤其以遗传算法、粒子群算法、蚁群算法为多。这几类算法通常具有较强的健壮性，适合分布式计算机制、也能够与多类其他算法结合，但它们缺乏严谨的数学基础，没有对应的深刻的具有普遍意义的理论分析，对其机理的数学解释薄弱，也缺乏规范化的、针对算法优化性能的评价准则。尽管如此，这些方法及其改进算法依然广泛应用于无人机任务分配。

1.1.2 分布式任务分配典型方法

分布式任务分配的典型模型主要包括多智能体决策理论、市场机制（合同/竞拍）、分布式马尔科夫、分布式约束等。多 Agent 理论^[20]广泛应用于机器人领域，其中一致性问题是多智能体协同控制的根本问题。随着应用样式的多样化，多 Agent 理论衍生了很多分支，并取得了诸多成果，具体如图3所示。

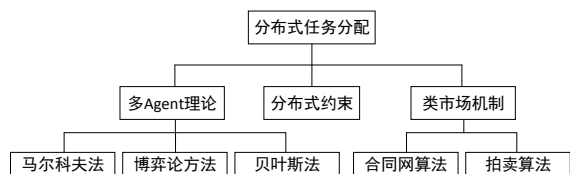


图3 分布式任务分配模型及方法

Fig. 3 Decentralized task assignment models and methods

例如针对智能体与不确定因素之间的矛盾，已有的常用算法包括博弈论方法^[21]、分布式马尔科夫法^[22]、分布式贝叶斯方法^[23]等。分布式约束可以形式化为一个约束网，网中变量有各自离散值域，且各自约束相互联系，求解过程即是求出变量的某个组合使得所有约束值相加获得极值^[24]。分布式约束也可以看作是多Agent理论的分支应用。

类市场机制的方法是多无人机任务分配中应用广泛的一种分布式方法，其核心处理是防止冲突，对每个问题的求解采用通信协商的方式解决。合同网方法^[25]由发布者和竞标者两个角色，由“招标-投标-中标-确认”4个交互阶段组成。而拍卖法^[26]则是将要拍卖的物品用公开竞价的方式转卖给应价最高者。一个拍卖主要有参与方、拍卖品、收益函数和应价策略等要素组成。拍卖算法的演化算法也逐渐引起广泛重视，如一致性包算法（consensus-based bundle algorithm, CBBA）^[27]。

1.2 无人机航迹规划的典型方法

1.2.1 单机航迹规划方法

航迹规划的作用在于为每架无人机执行所分配的任务建立可执行的航迹安排，其本质上是连续空间的路径寻优问题，是任务规划分层递阶策略的底层实现。从航迹规划的发展历程看，已有的典型规划方法可以分为基于路标图形的航迹规划、基于格栅的航迹规划、基于优化模型的航迹规划等，此处进行简要概括，具体如图4所示。

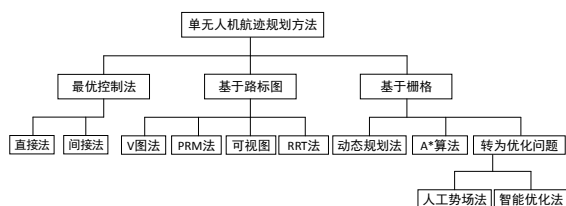


图4 部分适合于单无人机航迹规划的典型方法

Fig. 4 Partial traditional trajectory planning methods

最优控制方法^[28-29]是将航迹规划问题看作非线性、带有状态约束和控制约束的控制问题，进而求解得到符合实际飞行要求的规划路径。又可分为间接法和直接法，后者的应用更广，它利用数值化将最优控制问题转化为非线性规划问题，典型代表有伪谱法^[30]。

路标图法本质上是对规划环境的采样，是对规划空间的一种压缩处理^[31-32]；可以结合目标与规划空间的威胁等因素构建多类型图形，如 Voronoi 图，概率路标图（probabilistic road map, PRM）^[33]，可视图和快速扩展随机树（rapidly exploring random tree, RRT）等^[32]，最后通过搜索算法得到合理路径^[34]。

栅格处理同样是对连续规划空间的离散化，由于现代数字地图都是栅格化处理得到，因此基于栅格的航迹规划方法发展迅速。A*算法是启发式搜索算法，将搜索空间表示为网络的形式，以网络的中心点或顶点作为航迹点，搜索邻域内代价函数值最小的航迹点，从起始点逐步搜索至目标点，最后逆向回溯当前节点的父节点完成航迹生成^[35]。

利用优化求解方法获得航迹规划方面，人工势场法算法简明、实时性好、规划速度快、在局部规划和实时规划领域应用广泛^[36]，但主要问题是在复杂环境中容易产生局部极小值，在障碍物附近抖动或频繁摆动。智能类优化法的优点是算法求解对初始解状态依赖较小，能够渐近收敛于全局最优解^[37]。

在实际应用中，上述多类算法也可互相借鉴与融合应用，解决航迹规划速度问题、动态性问题、航迹与载荷使用耦合问题等^[38]，例如 Haider A. F. Almurib 等人针对多无人机搜索与营救任务，采用 Dijkstra 算法和人工势场算法结合，完成静态和动态规划^[39]。

1.2.2 多无人机协同航迹规划

多无人机航迹规划协同性的体现，大多针对特定的目标或者具体任务。例如，庞强伟^[40]围绕多无人机对多目标的协同侦察，依据 K-means 聚类算法完成目标集合的聚类，求解侦察序列，由侦察序列对应生成各无人机的任务航迹。胡超芳^[41]针对多无人机协同追踪地面移动目标的问题，基于分布式预测控制架构，引

入多无人机之间避碰约束,求解得到有限时域内每架无人机的局部航迹。周德云^[42]针对多无人机区域内协同打击任务,强调“同时抵达”的时间和空间强约束环境,建立了基于多目标优化的航迹规划方法。王道波等人^[43]针对地面移动目标,考虑了传感器安装姿态及有效观测模型约束,建立了基于化学反应优化理论框架的启发式多无人机航迹优化策略,得到了具有更长的目标检测时间的规划方案。M. A. Shah^[44]考虑无人机间观测区域必须重叠、所有无人机同时抵达、无人机间满足通信条件等约束,基于 Pythagorean 曲线完成了有障碍环境内的多无人机航迹规划。Ema Falomir^[45]针对市区环境内协同避障,通过无人机间的信息交互为其他无人机在线提供障碍信息,得到了一种基于人工势场和全局规划策略结合的多无人机航迹规划策略。概括来看,多无人机航迹协同是由于所执行任务之间的耦合性牵引多机之间的时空协同。

2 多机任务规划方法向无人机集群的拓展应用

2.1 无人机集群任务分配方法新发展

第2节阐述的多无人机任务分配典型方法,随着无人机集群数量和任务样式的增多以及协同性要求的提高,适用性受限。无人机集群相对于多无人机,在任务分配上面临的新的挑战包括:模型的合理性与应用适应性需进一步拓展、任务分配的求解速度与动态可塑性要求进一步提升、亟需适应信息的不完整与不确定性。上述3个主要挑战对应的科学问题如下。

2.1.1 分配模型的完善与复杂度之间的均衡

无人机集群数量规模的增大,要求求解算法的效率大为提升,这是分配模型需要完善的重要驱动力。进化类算法对数学模型依赖小,因而得到了持续研究和发展,针对性地,对智能类算法的初始化、粒子编码的改进是常见的应对思想。王婷^[46]通过设计新的遗传算子,对适应度值进行标定,避免了传统遗传算法在最优解附近摆动的现象。沈林成^[47]根据PSO算法离散化映射方式,将DPSO分为基于连续空间

的DPSO和基于离散空间的DPSO两类模型,能够用于求解集群高维复杂离散优化问题。朱德法^[48]设计新的粒子群位置和速度更新过程,国博^[49]对粒子分群处理与合并优化。V.T. Hoang^[50]对无人机航向角进行粒子编码等策略,都促使粒子群算法分配模型针对性优化以能够适应大规模集群,加速了粒子收敛速度。此外, Vincent Roberge^[51]和 Ugur Cekmez^[52]结合硬件设备特点,实现了遗传算法、粒子群算法以及蚁群算法的并行化处理,也提升了进化速度。

无人机集群任务样式的多样性和特殊性,要求分配模型进行针对性与适应性拓展。针对性地,结合任务属性增加模型约束条件并维持求解复杂度是常见的处理思想。张耀中^[53]针对不同侦察能力的无人机集群多任务区协同侦察,将达到时间作为强约束,结合分布式拓展一致性束算法,在多项式时间复杂度的层面实现了遍历侦察任务规划。林君灿^[54]针对侦察/控制/打击/评估一体化无人机集群作战应用,在分配模型中增加了时间窗约束,并利用混合整数线性规划算法实现了集群离线式任务分配。严飞^[55]针对多无人机协同搜索和同时攻击的任务约束,引入协同粒子群、协同函数、协同变量,并结合合同网模型实现任务分配;罗德林^[56]针对大规模无人机集群对抗任务,引入了规避不利目标、支援处于劣势友机的功能约束,结合分布式博弈决策模型,实现了群对群对抗中的目标分配。Khaled A. Ghamry^[57]针对森林着火点监视与探测,引入无人机间冲突规避约束,以及无人机控制参量化、时间离散化等建模策略,丰富了对无人机单机的控制模型的描述,实现了着火点目标的分配。

2.1.2 求解空间剧增条件下的快速收敛优化

满足多目标条件下的共同优化是应对协同等级提高的新需求,无人机集群多目标任务分配使得求解空间大幅扩增。针对性地,以智能类优化算法为例,加速进化进程和结构化减小解空间是常见的快速收敛优化思想。Ali M. F.^[58]针对无人机群对群对抗,在减少视场区域和满足规避动作的约束下,对比了多目标粒子群算法(multiple PSO)、多目标遗传算法

NSGA2^[59]、SPEA2 (strength pareto evolutionary algorithm version 2)、多目标进化 (multi-objective evolutionary algorithm, MOEA) 等算法任务规划性能。施展^[60]基于量子粒子群算法, 通过将粒子高斯变异改为混沌变异, 增加粒子群的遍历性和随机性, 提升了多目标分配收敛速度; 王建峰^[61]在量子粒子群算法中设计了多层编码策略和约束调度方法, 通过非支配解评估引导算法进化, 兼顾了收敛性和分布性。韩博文^[62]基于量子粒子群算法, 通过佳点集构造产生初值解, 基于量子变异和混沌因子拓展遍历解空间, 设置动态惯性引导前期全局搜索、后期局部精细搜索, 最终实现在保证遍历性的基础上加速进化搜索。

实战或者对抗背景下无人机集群的动态调整导致求解空间增加, 并迫切需要分配算法的快速收敛性。集群任务分配算法应对动态调整的直接思路是在原有任务方案基础上对局部任务进行重新分配调整, 针对性地, 当前主要的处理思想是约束动态重置对任务分配解空间产生非线性剧增。具体算法方面, Carlos Sampedro^[63]提出了一种通用的包括全局任务规划和单智能体任务规划的动态分配架构, 以全局规划-局部调整的策略支持实时在线的任务调整。史豪斌等人^[64]提出了基于ISODATA (迭代自组织数据分析) 约束聚类的多无人机动态任务分配方法, ISODATA是无监督分类机器学习方法的一种, 克服了K-means聚类方法需要人为设定K数值的不足, 能够动态地进行类的合并与分裂, 最后得到满足动态性要求的任务方案。一致性竞拍算法 (consensus-based auction algorithm, CBAA) 和一致性包算法是基于市场竞拍策略的分布式任务分配算法^[65], Noam Buckman^[66]针对分布式时间敏感任务, 将一致性包算法与部分重规划策略结合, 通过改变任务重规划过程中重置任务数, 在收敛速度和协调规模之间折衷, 针对性重置最少的竞拍任务, 使得任务分配解空间同重置任务数和集群规模保持线性复杂度关系, 在满足任务约束的情况下大幅降低了运算量。

2.1.3 信息不完整条件下的模糊度量和优化分配

无人机集群的实战对抗要求任务分配算法

能够在不确定因素 (如态势不明确、信息被阻滞、欺骗和干扰) 存在的情况下完成高效的方案规划。而集群数量规模的增大以及协同等级的提升, 也放大了不确定因素的影响。针对性地, 该问题的关键处理思想是不确定度的建模与量化。陈侠^[68]以目标价值收益、毁伤代价以及航程代价的不确定信息为依据, 采用主观赋值与客观赋值相结合的方法确定指标综合权重, 利用区间数表示不确定因素, 建立了不确定多因素下多属性任务分配模型, 将离散粒子群算法与区间数排序方法相结合, 适应了不确定环境下的任务分配问题; 任佳^[69]提出了一种基于变结构离散动态贝叶斯网络的决策模型, 利用贝叶斯推理量化不确定度, 得到当前时刻的任务决策。H.A. Le Thi^[70]将无人机集群动态环境下的非线性任务规划问题转换为差分凸函数规划问题, 并利用差分凸函数算法进行求解; Sarra Alqahtani^[71]针对多无人机侦察任务, 利用四叉树表述不确定性, 建立基于四叉树和K部图 (K-Partite) 结合的分配架构, 能够在通信受限情况下完成任务分配。

2.2 无人机集群对航迹规划的新要求

结合第 1.2.2 节多无人机航迹协同技术现状的论述可知, 在充分的协同任务分配基础上, 任务规划对于无人机集群航迹层面的逻辑协同要求降低。无人机集群任务对航迹规划的核心要求体现为: 精确的时间协同与空间冲突消解。精确的时间协同是任务协同分配方案得以实施的关键保障, 而冲突消解则是无人机集群安全可靠应用的基础。需要说明的是, 高精度的时间协同和空间冲突消解的应用范围不仅限于无人机集群, 因此下文的阐述, 着重于对两类技术的现状总结。

2.2.1 航迹的高精度时间协同

高精度时间协同条件下的航迹规划演变为有时间约束的路径规划, 即四维路径优化问题。相关研究分为离散 4D 航迹规划和连续 4D 航迹规划。前者是以一系列离散的航路点来控制航迹形状并为航路点设置到达时间, 后者以位置和时间作为变量, 并采用连续数学表达式表述 4D 航迹时空关系。

离散 4D 航迹规划方面, Supatcha

Chaimatanan^[72]将航迹规划转换为混合元启发式优化问题，优化航线和设定出发时间，实现了四维航迹设计。Jose Antonio Cobano^[73]通过对航路点设置时间属性，基于调整飞机速度策略满足时间要求。丁强^[74]在 Tau-H 运动策略基础上，利用粒子群算法形成全局航迹预测，随后利用采样间隔与冲突判断双驱动的滚动优化方法，实现航迹不断更新。周青^[75]将到达时间偏差引入到 A*算法中的估价函数中，不断扩展偏差最小的节点，同时加入速度调整策略进一步缩小时间误差，满足了到达时间要求。整体而言，离散 4D 航迹规划方法具有直接、简便、规划效率高的优点，但是忽略了航迹点之间速度变化的过渡过程，通常会导致航路规划的灵活性及航线精度降低。

连续 4D 航迹规划方面，Goerzen^[76]等人运用勾股速端曲线(Pythagorean Hodograph, PH)进行航迹规划，基于可变参数的矢量场中参数的调整，实现向终点的收敛以达到期望的四维协同。Antonio Barrientos^[77]和 Kouamana Bousson^[78]基于 3 次至 5 次样条曲线近似的方法，提出了搜索两个连续航点之间最短轨迹的算法，在区域监视的框架下实现了无人机的 4D 航迹规划。概括地讲，连续 4D 航迹规划保证了时域的可微性和连续性，能够提供更为光滑的航迹，且提供连续的速度和加速度，但通常航迹的表达式参数较多、形式复杂。

2.2.2 空间冲突消解

无人机集群飞行面临空间冲突，尽管空间冲突的规避不完全由航迹规划克服（控制层面也可发挥重要作用），但全面的、有预案的无人机集群航迹规划能够大幅减小空间冲突概率。

传统的多机航迹规划中，常采用以安全飞行距离为半径的“管道”来包围航迹，保证多 UAV 之间不发生碰撞。这一处理思路同样可以搬移应用到空间位置较为松散的无人机集群。一般地，无人机间冲突消解流程包括冲突的预判/检测和基于规则的规避。预判/检测方面，可以分为基于几何形状的确定性方法和基于预测的概率性方法两类，判决标准分别对应于有其他物体进入无人机安全保护区或者飞行器间

冲突概率超过一定阈值^[78-79]。冲突消解的典型策略可以分为基于航线、基于势场、和模型转化等三类，如图 5 所示。

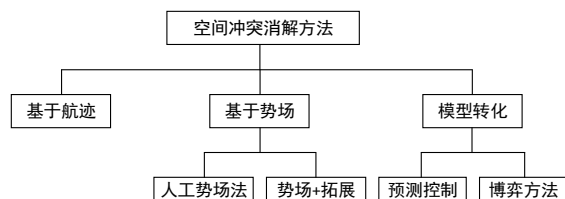


图5 部分空间冲突消解典型方法
Fig. 5 Partial traditional collision avoidance methods

航线法冲突消解简单、直接，一般可以在时间维度消解，即调整无人机到达冲突位置时间；但在飞行器数量多、航线密集条件下应用受限^[81]。势场法中定义无人机目标为引力、空间冲突物为斥力，两者合力作为无人机安全飞行方向，具有含义清晰、易于处理的特点，但应避免陷入局部极值。模型转化类方法较为灵活、应用广泛，将冲突消解问题转化为在线预测控制问题或博弈问题。魏瑞轩^[82]提出了基于 DE 算法和 DMPC 相结合的防碰撞控制策略，将编队问题转化为滚动在线优化问题，将碰撞约束纳入代价函数。Y. Kurik^[83]将冲突消解转化为基于一致性编队控制问题。茹常剑^[84]提出将无人机碰撞规避问题转化为两方博弈问题，建立了无人机间运动学模型，实现了基于认知博弈制导的防碰撞方法^[85]。Senthil Hariharan Arul^[86]在无人机集群协同侦察应用方面，将冲突消解转化为速度空间的速度障碍问题，在保证侦察覆盖范围的条件下实现了无人机间动态避障，其前提是假定无人机能够很大的范围内安全调整速度。

2.2.3 无人机集群航迹规划的难点

整体来看，当前有时间约束的路径规划以及多机间冲突消解方法的技术现状尚不完全适应于无人机集群。其一，无人机集群数量大、编队密集等约束对连续4D航迹规划的精确度和实时性提出了挑战。其二，无人机集群数量大，以安全距离（区域）为约束的分割会限制集群的密集程度，基于概率的冲突检测处理也面临巨大计算压力。其三，从时间维度看，无人机集群航迹是可以存在交叠的，当任务类型或协同要求更复杂时，基于局部调整的冲突消

解容易引入新的冲突。满足无人机集群应用的航迹规划问题仍需要持续关注和深入研究。

3 基于集群智能涌现机理的任务规划方法

与秉承“自上而下”的思路研究集群技术相对应,“自下而上”思路研究集群技术也逐渐引起研究学者的广泛兴趣,该类技术的突出特点是对无人机集群的数量不敏感,而这一优势是“自上而下”式集群技术所缺乏的。

从生物、数学、计算机、控制、机器人等领域看,集群的出现和研究已经历时很久,人们对集群的关注重点包括自然界中的鸽群、鱼群、蜂群、狼群等群居动物^[87],并不断探索集群现象产生的原因及其衍生的工程应用^[87-88]。研究发现,动物集群一般具有临近交互性、群体稳定性、环境适应性。动物行为学表明可以通过个体间简单行为规则的合作产生复杂有序的集体行为。无人机集群技术的另一重要研究思路,即是基于生物集群行为的模仿,逐步向群体决策和认知理论发展,最终实现飞行的智能、决策的智能,以及集群的智能。无人机飞行的智能化是实现无人机决策智能和集群智能的基础,而集群协同的智能化的终极目标是无人机集群的完全自主^[90]。

3.1 生物集群行为的描述与建模

Boid模型^[91]、Vicsek模型^[91-92]以及Couzin模型^[94]是描述集群行为最为常见的三种模型。Boid模型于1986年由美国科学家Craig W. Reynolds提出,基于靠近、对齐和避碰三条规则,假设每只鸟只能观察到它周围固定范围内的个体,就可以在计算机中复现出自然界中鸟类等动物的集群现象、模拟它们的群体运动。Vicsek模型于1995年由匈牙利物理学家T.Vicsek及其合作者从统计力学的角度提出的,通过改变群体密度以及噪声强度,对集群行为进行定量分析。Conzin模型将个体的感知区域由内而外分为排斥区域、对齐区域和吸引区域,三个区域互不重叠,分别对应群体中分离、速度一致和聚集规则。这三类模型构成了现有集群行为理论研究的重要基石,为后续的集群研究提

供了必要的理论架构、分析工具和方法支撑。近年来Tanner H.G.^[94-95], Olfati-Saber R.^[97],以及Levine H.^[98]等也提出了新的群集模型。

共识主动性(stigmergy)是生物群体中的一个核心概念:它代表生物个体自治的信息协调机制,个体之间间接协调,无需任何集中规划以及直接通信即能完成复杂智能活动。典型的例子是:蚂蚁的大脑或基因中并没有巢穴建造的计划、组织和控制机制,个体间也没有直接的交流,但是蚂蚁个体通过识别其他蚂蚁留下的信息素,达成共识,共同完成了复杂和精致的蚁巢建造^[99]。

在集群行为模拟与验证方面,美国南加州大学Mataric等人^[100]研制的The Nerd Herd系统被应用在多机器人学习、群体行为、协调与协作等方面;美国麻省理工大学的James McLurkin和Leslie Kaelbling等人^[101]基于“在多机器人上进行并行算法运算的复杂性度量项目”研制的多移动机器人系统,能够开展大量多机器人行为协调算法设计以及性能预测研究。此外,典型系统还包括加拿大阿尔伯达大学Kube C.R.等人研制的Collective Robotics系统^[102]以及比利时布鲁塞尔自由大学Dorigo M.等人开发的SWARM-BOTS系统^[103]。

实际的无人机集群系统方面,近年来引起广泛关注的包括美国DARPA支持的“小精灵”项目、美国海军支持的“郊狼(LOCUST)”计划、美国海军参与研制的“山鹑”项目等^[104],但这些项目的技术体制和方案细节并未公布。所见报道的其他无人机集群系统包括:匈牙利罗兰大学Vicsek团队于2014年实现10架四旋翼飞机在室外的自主集群飞行^[104-105],该项目在任务决策层利用了生物集群行为机制,四旋翼飞机与临近个体之间进行信息交互,实现了在GPS噪声、通信延迟环境下的自主决策和稳定飞行,包括区域内碰撞规避、聚集、队形保持和集群目标跟踪。Chung团队在2015年实现了一人控制50架固定翼飞机的集群飞行,无人机按照主从模式飞行,其工作重点是无人机操控权的转移以及无人机自主飞行和决策^[107]。

3.2 基于集群智能涌现的规划决策

生物群体在去中心化、邻近个体信息交互、

整体自组织等方面的特点与无人机集群追求目标一致，因此仿生研究是无人机集群任务规划决策的重要研究方向之一^[107-108]。对应地，基于集群智能的无人机集群任务规划的内容包括但不限于：威胁的判断、目标优先权的排序、任务的动态分配与调度、飞机航迹的规划与任务载荷的协调等^[110]，且需要重点考虑多机之间逻辑与行为冲突消解；基于集群智能涌现的无人机集群任务规划的一般过程可以表述为：无人机个体收集并处理外界信息进而更新个体知识以适应环境，再同集群内其他个体交互，完成经验交互和社会学习，实现共同进化，并执行复杂有序的集体行为^[111]。而智能涌现现在任务规划方面的表征体现在三个层面：单机、群集以及任务，分别对应于无人机单机对环境的学习与适应，无人机集群群集行为的形成，以及无人机集群对复杂多样化任务的完成。

具体进展方面，苏厚胜^[112]提出一种具有多个变速度虚拟领导者的多智能体蜂拥控制算法，从理论上证明了该方法可以准确跟踪对应的虚拟领导者。周子为^[113]分析研究了雁群长途迁徙过程中的编队飞行机制，并设计实现了一种仿雁群行为机制的多无人机紧密编队控制与编队变拓扑重构方法。段海滨^[114]提出一种基于注意力机制的群集模型，能够通过刺激单一或者多个个体影响群体快速一致性反应。王训^[21]提出基于合作博弈的智能自主聚集策略，以实现群体聚集为“合作目标”，以降低自身消耗为“竞争目标”开展博弈，最终引导群体系统出现聚集行为。段海滨团队^[98,114]结合狼群的等级特性与社会组织，建立狼群合作狩猎运动模型，提出一种基于狼群行为机制的自主编队控制方法，设计了基于狼群层级行为机制的编队保持控制器。此外，邱华鑫等人^[116]针对鸟群运动中拓扑交互、策略切换等群集行为机制，映射建立了具有动态环境适应性的无人机集群协调决策控制模型。

除了模拟群体行为建立映射决策模型，研究学者的另一种思路是试图提出通用的自组织集群模型架构，例如，美国空军试验室的D.J. Nowak面向战场环境中集群任务的动态性、部分可观性提出了基于集群行为激励的通用控制

等级模型^[117]，见图6所示。

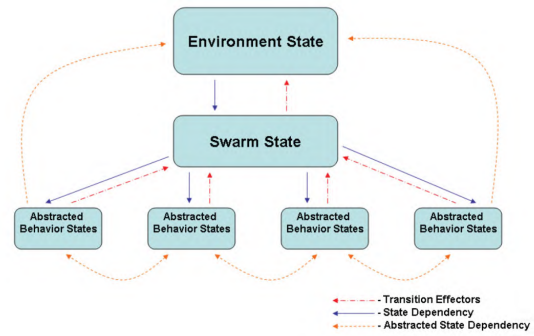


图6 基于智能涌现的通用控制等级
Fig. 6 Emergent self-organization hierarchy

Antonio L. Alfeo针对分布式目标定位，提出了FSE (flocking, stigmergy, evolution) 算法^[118]，基于共识主动性用潜在目标吸引无人机，基于聚集特性保证成员间协调观测，基于进化特性来适应动态环境，如图7所示。其他应用场景方面，Alex Wallar^[119]基于集群行为建模，设计实现了无人机集群对某敏感危险区域的监视；David J. Howden^[120]基于聚集和共识主动性，在无人机局部通信的约束下，实现了无人机集群对森林火场的自主监视。

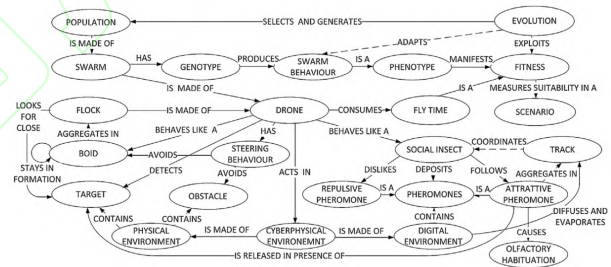


图7 FSE算法结构图
Fig. 7 Ontology of the FSE swarming algorithm.

总的来看，基于生物集群行为学习与映射的集群任务规划决策，受当前研究水平限制，更适合于组织较为松散的简单反应型任务，是否能够满足高端无人机在行为更为严格受限条件下的任务执行，还有待深入研究和验证。但这是一个充满挑战与希望的领域，有潜力产生涌现式的集群智能，发挥不可替代的作用，值得持续深入的研究。

3.3 与基于逻辑规则类任务规划的区别

上文分析了基于逻辑规则与集群智能涌现两类不同的无人机集群任务规划方法，为便于对比，在表2中罗列了二者的区别。

表2 两类方法特性对比

Table 2 Comparison of two different methods

	基于逻辑与规则	基于集群智能涌现
基本架构	由上至下	由下至上
知识机理	人类认知	生物集群自然行为
知识形态	显示表达	隐式表达
行为样式	可编程行为	涌现式行为
规模效应	敏感	不敏感
数学模型	复杂建模	简单准则
控制范围	区域内全局控制	个体局部控制
任务样式	计划样式内复杂多变	受研究现状制约
人为干预	直接	间接
发展路线	单机-多机-集群	生物集群行为模仿与映射

4 无人机集群任务规划技术的发展方向

从第2节和第3节的内容看，无人机集群任务规划的方式方法多样，集群任务规划技术的研究既有广泛化、理论化等优势方面，也存在重复化和低端化的不足。以无人机集群实际能力建设为牵引，围绕无人机集群系统的应用前景，梳理无人机集群任务规划技术的发展方向如下。

4.1 多约束下的集群系统群智涌现式规划理论

无人机集群任务规划需要考虑单个无人机的动力学和运动学约束、输入饱和及状态有界约束、模型非线性及不确定性约束，此外，还需要满足多无人机到达目的地的时间和空间协同约束，以及数据链系统连通性方面的网络拓扑约束等。基于逻辑与规则的任务规划模型在集群数量剧增的情况下很难以较低的复杂度准确描述多约束条件以及协作机理，迫切需要研究多约束条件下基于集群智能涌现的系统建模和分布式协同控制机理。

4.2 基于深度学习和分布式优化的任务规划技术

在面临时变任务和突发威胁条件下，无人机集群的实时协同规划与决策在当前和未来一段时间内将是集群任务规划的难点。不确定、动态环境下的任务规划机理上依赖于推理判断与优化求解，鉴于深度学习方法在推理的其他应用方面展现出极大优势，将深度学习与分布式优化相结合，在提升无人机集群任务协同分配和航迹规划的实时性和最优性方面具有巨大潜力。

4.3 局部信息反馈条件下的自组织航迹协同技术

无人机集群航迹规划与调整要能够满足既

定分配任务，又要能够自主防碰撞（由控制层面进行的规避技术不在本文阐述范围内），而分布式控制下的无人机集群个体仅同局部临近节点进行信息交换和反馈，要兼顾集群系统的任务使命和智能个体的多约束条件，迫切需要研究局部信息反馈条件下的自组织航迹协同技术，能够应对突发威胁并具备一定的容错和自愈能力。

4.4 通信受限时逻辑与群集行为结合的规划技术

逻辑规则与集群智能涌现相结合的规划决策模式能够增强无人机集群在通信受限环境下的适应能力，在群间自组织通信正常情况下可采用基于逻辑/规则指派或动态调整任务规划方案，在电磁干扰导致通信受阻，可以结合集群个体间底层协调，保持稳定的队形及功能，增强集群鲁棒性。

4.5 无人机集群系统总体设计技术

作为“先进的任务规划技术能够更好的发挥无人机集群能力”的逆问题，设计满足一定功能的无人机集群系统具有重要现实意义，无论是基于逻辑与规则，还是基于集群智能涌现，均需建立个体行为（能力）与集群整体效能的关系模型，形成个体能力与集体状态之间的量化联系。并根据系统的性能指标要求，完成个体设计、结合（改善）个体间驱动与激励模式组织应用，形成实用的无人机集群系统。

4.6 无人机集群任务规划方案的量化评估技术

对于基于逻辑与规则的无人机集群任务规划，目标函数是评价任务方案优良与否的基石，全面的目标函数能够度量任务方案的最优性，但目标函数复杂度的提升将大幅扩增优化解空间，影响求解效率，甚至无法求解。而基于集群智能涌现的任务规划决策是开放式的架构，缺乏量化的能力评价。迫切需要开展无人机集群任务规划方案的应用效能评估技术^[120-121]，在无人机集群执行任务前形成规划闭环。

5 结 论

基于逻辑与规则的集群任务规划技术研究成果丰富，可以直接应用于现有无人机集群系统；对应的研究大多是多无人机系统任务规划技术针对无人机集群系统的拓展和适应性调

整,尚不能满足在信息不完全、环境不确定、高动态调整等对抗环境下的集群任务规划要求,以无人机集群为对象的任务规划建模与理论方面缺乏足够创新。此外,基于集群智能涌现的任务规划决策受当前研究水平限制,尚不能灵活/机动/高效/可控地完成复杂性耦合性强的集群任务。无人机集群任务规划技术仍需要持续深入的研究与发展。

文章的最后总结了无人机集群任务规划技术潜在发展方向。本文的研究对于全面了解无人机集群任务规划研究现状具有良好的参考意义。

参考文献

- [1] NELDER J A, MEAD R. A Simplex method for function minimization[J]. The Computer Journal, 1965, 7(4): 308-313.
- [2] LAWLER E L. The quadratic assignment problem[J]. Management science, 1963, 9: 586-599.
- [3] KUHN H W. The Hungarian method for the assignment problem[J]. Naval Research Logistics, 1955, 2: 83-97.
- [4] ALIGHANBARI M. Task assignment algorithms for teams of UAVs in dynamic environment [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [5] HONG S R, NIKOLAOS V S. Global optimization of multiplicative programs[J]. Journal of Global Optimization, 2003, 26: 387-418.
- [6] 姚敏, 王绪芝, 赵敏. 无人机群协同作战任务分配方法研究[J]. 电子科技大学报, 2013, 42(5): 723-727.
YAO M, WANG X Z, ZHAO M. Cooperative combat task assignment optimization design for unmanned aerial vehicles cluster[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China . 2013, 42(5): 723-727.
- [7] 殷剑宏, 金菊良. 现代图论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 23-29.
- YIN J H, JIN J L. Modern graph theory[M]. Beijing: Beihang University Press, 2015: 23-29.
- [8] TALL A, ALTMAN Z, ALTMAN E. Self-optimizing load balancing with backhaul-constrained radio access networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(6): 645-648.
- [9] 黄长强, 翁兴伟, 王勇,等. 多无人机协同作战技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 12-15.
HUANG C Q, WEN X W, WANG Y, et al. cooperative combat technology for multi-UAVS[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 12-15.
- [10] 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: 24-33.
SHEN L C, NIU Y F, ZHU H Y. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013:24-33.
- [11] SECREST B R. Traveling salesman problem for surveillance mission using particle swarm optimization[D]. Wright-Patterson: Air Force Institute of Technology, 2003.
- [12] ROURKE O K P, BAILEY T G, HILL R, et al. Dynamic routing of unmanned aerial vehicles using reactive tabu search[J]. Military Operations Research Journal, 2001(6): 5-30.
- [13] 李相民, 颜骥, 刘波, 等. 多智能体协同任务分配问题研究综述[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(12): 2443-2450.
LI X M, YAN J, LIU B, et al. A survey of multi-agents cooperative task allocation research[J]. Computer and Digital Engineering, 2014, 42(12): 2443-2450.
- [14] AN S, KIM H J. Simultaneous task assignment and path planning using mixed-integer linear programming and potential field method[C]//Proc. of the 13th

- International Conference on Control, Automation and Systems: 1845-1848.
- [15] ZHU D, HUANG H, YANG S X. Dynamic task assignment and path planning of multi-AUV system based on an improved self-organizing map and velocity synthesis method in three-dimensional underwater workspace[J]. IEEE Trans. on Cybernetics, 2013, 43(2): 504-514.
- [16] 臧斌宇. 面向多核处理器的虚拟机性能优化 [D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- ZANG B Y. Optimize virtual machine on multi-core processor[D]. Shanghai: Fudan University, 2014.
- [17] LI D W, LU L G, LI W. On network dynamic planar location problem based on matrix operation[C]//Proc. of the Chinese Control Conference, 2007: 158-161.
- [18] LEVCHUK G M, LEVCHUK Y N, LUO J, et al. Normative design of organizations-part I: mission planning[J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 2002, 32(3): 346-359.
- [19] HOANG P D, RABAIEY J M. Scheduling of DSP programs onto multiprocessors for maximum throughput[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, 41(6): 2225-2235.
- [20] 陈杰, 方浩, 辛斌. 多智能体系统的协同群集运动控制[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- CHEN J, FANG H, XIN B. Cooperative flocking motion control of multi-agent system[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [21] 王训, 王兆魁, 张育林. 基于合作博弈的智能集群自主聚集策略[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(2): 146-151.
- WANG X, WANG Z K, ZHANG Y L. Strategy about autonomous aggregation of intelligent swarm based on cooperative game[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(2): 146-151.
- [22] HAKSAR R N, SCHWAGER M. Distributed deep reinforcement learning for fighting forest fires with a network of aerial robots[C]//Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2018: 1067-1074.
- [23] HU J, XIE L, LU M K, et al. Multi agent information fusion and cooperative control in target search[J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1223-1235.
- [24] JIN Y, WU Y, FAN N. Research on distributed cooperative control of swarm UAVs for persistent coverage[C]//Proc. of the 33rd Chinese Control Conference, 2014: 1162-1167.
- [25] SMITH R G. The contract net protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver[J]. IEEE Trans. on Computers, 1980, 29(12): 1104-1113.
- [26] FU X, FENG P, GAO X. Swarm UAVs task and resource dynamic assignment algorithm based on task sequence mechanism[J]. IEEE Access, 2019, 7: 41090-41100.
- [27] HUNT S, MENG Q, HINDE C J. An extension of the consensus-based bundle algorithm for multi-agent tasks with task based requirements[C]//Proc. of the 11th International Conference on Machine Learning and Applications, 2012: 451-456.
- [28] 沈林成, 王祥科, 朱华勇, 等. 基于拟态物理法的无人机集群与重构控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 266-285.
- SHEN L C, WANG X K, ZHU H Y, et al. UAVs flocking and reconfiguration control based on artificial physics[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2017, 47: 266-285.
- [29] 朱华勇, 牛轶峰, 沈林成, 等. 无人机系统自主控制技术研究现状与发展趋势[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(3): 115-120.
- ZHU H Y, NIU Y F, SHEN L C. State of the Art and trends of autonomous control of UAV Systems[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(3): 115-120.
- [30] 任鹏飞, 王洪波, 周国峰. 基于自适应伪谱

- 法的高超声速飞行器再入轨迹优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(11): 2257-2265.
- REN P F, WANG H B, ZHOU G F. Reentry trajectory optimization for hypersonic vehicle based on adaptive pseudospectral method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(11): 2257-2265.
- [31] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Wireless communication using unmanned aerial vehicles (UAVs): optimal transport theory for hover time optimization[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2017, 16(12): 8052-8066.
- [32] LATOMBE J C. Robot Motion Planning[M]. Kluwer Boston, 1991.
- [33] HSU D, LATOMBE J, MOTWANI R. Path planning in expansive configuration spaces[J]. International Journal of Computational Geometry and Applications, 1999, 9(4): 495-515.
- [34] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 1-14.
- ZONG Q, WANG D D, SHAO S K. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1-14.
- [35] LI J, DENG G, LUO C, et al. A hybrid path planning method in unmanned air/ground vehicle (UAV/UGV) cooperative systems[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9585-9596.
- [36] Sun J, Tang J, Lao S. Collision avoidance for cooperative UAVs with optimized artificial potential field algorithm[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18382-18390.
- [37] 孙浩磊. 基于群体智能算法的无人机路径规划技术研究[D]. 辽宁: 沈阳理工大学, 2018.
- SUN H L. Research on UAV path planning technology based on swarm intelligence algorithms[D]. Liaoning: Shenyang Ligong University, 2018.
- [38] 贾永楠, 田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(S1): 723738.
- JIA Y N, TIAN S Y, LI Q. The development of unmanned aerial vehicle swarms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S1): 723738.
- [39] HAIDER A F, ALMURIB P T N, T. NANDHA K. Control and path planning of quadrotor aerial vehicles for search and rescue[C]//Proc. of the SICE Annual Conference 2011.
- [40] 庞强伟, 胡永江, 李文广. 多无人机多目标协同侦察航迹规划算法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(3): 340-348.
- PANG Q W, HU Y J, LI W G. Path planning algorithm for multi-UAVs cooperative reconnaissance on multiple targets[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27(3): 340-348.
- [41] 胡超芳, 杨娜, 王娜. 多无人机模糊多目标分布式地面目标协同追踪[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(8): 1101-1110.
- HU C F, YANG N, WANG N. Fuzzy multi-objective distributed cooperative tracking of ground target for multiple unmanned aerial vehicles[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(8): 1101-1110.
- [42] 周德云, 王鹏飞, 李梹扬, 等. 基于多目标优化算法的多无人机协同航迹规划[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(4): 782-787.
- ZHOU D Y, WANG P F, LI X Y, et al. Cooperative path planning of multi-UAV based on multi-objective optimization algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(4): 782-787.
- [43] 王道波, 王寅, 蒋婉玥, 等. 基于化学反应优化的多无人机地面移动目标协同观测航迹规划[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 583-594.

- WANG D B, WANG Y, JIANG W Y. Unmanned aerial vehicles cooperative path planning for ground target tracking via chemical reaction optimization[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2015, 45: 583-594.
- [44] SHAH M A, AOUF N. 3D cooperative pythagorean hodograph path planning and obstacle avoidance for multiple UAVs[C]//Proc. of the 9th International Conference on Cyberntic Intelligent Systems.
- [45] Ema F, Serge C, Gilles G. A 3D mobility model for autonomous swarms of collaborative UAVs[C]//Proc. of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2019: 11-14.
- [46] 王婷, 符小卫, 高晓光. 基于改进遗传算法的异构多无人机任务分配[J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38(5): 37-41.
- WANG T, FU X W, GAO X G. Cooperative task assignment for heterogeneous multi-UAVs based on improved genetic algorithm[J]. *Fire Control & Command Control*, 2013, 38(5): 37-41.
- [47] 沈林成, 霍霄华, 牛轶峰. 离散粒子群优化算法研究现状综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(10): 1986-1991.
- SHEN L C, HUO X H, NIU Y F. Survey of discrete particle swarm optimization algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*. 2008, 30(10): 1986-1991.
- [48] 朱德法, 单连平, 管莹莹. 基于改进粒子群算法的多机协同目标分配[J]. *火力与指挥控制*, 2015, 40(8): 38-41.
- ZHU D F, SHAN L P, GUAN Y Y. Multi-fighters cooperative target assignment based on improved PSO[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(8): 38-41.
- [49] 国博, 王社伟, 陶军. 基于改进粒子群算法的多无人机任务分配研究[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(7): 62-65.
- GUO B, WANG S W, TAO J. Cooperative task allocation for unmanned combat aerial vehicles using improved particle colony algorithm[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(7): 62-65.
- [50] Hoang V T, Phung M D, Dinh T H, et al. Angle-encoded swarm optimization for uav formation path planning[C]//Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2018.
- [51] VINCENT R, MOHAMMED T, GILLES L. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning[J]. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 132-141.
- [52] UGUR C, MUSTAFA O, OZGUR K S. A UAV path planning with parallel aco algorithm on CUDA Platform[C]//Proc. of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2014: 27-30.
- [53] 张耀中, 谢松岩, 张蕾, 等. 异构型多 UAV 协同侦察最优化任务决策研究[J]. *西北工业大学学报*, 2017, 35(3): 385-392.
- ZHANG Y Z, XIE S Y, ZHANG L, et al. Optimal task decision-making for heterogeneous multi-UAV cooperation reconnaissance[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2017, 35(3): 385-392.
- [54] 林君灿, 贾高伟, 侯中喜. 异构 UAV 编队反雷达作战中任务分配方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(9): 1986-1992.
- LIN J C, JIA G W, HOU Z X. Research on task assignment of heterogeneous UAV formation in the anti-radar combat[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(9): 1986-1992.
- [55] 严飞, 祝小平, 周洲, 等. 考虑同时攻击约束的多异构无人机实时任务分配[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 555-569.
- YAN F, ZHU X P, ZHOU Z, et al. Real-time task allocation for a heterogeneous multi-UAV simultaneous attack[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2019, 49: 555-569.

- [56] 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 D L, ZHANG H Y, XIE R Z, et al. Unmanned aerial vehicles swarm conflict based on multi-agent system[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(11): 1498-1504.
- [57] Khaled A G, Mohamed A K, Zhang Y M. Multiple UAVs in forest fire fighting mission using particle swarm optimization[C]//Proc. of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2017: 13-16.
- [58] FARID A M, EGERTON S, BARCA J C, et al. Adaptive multi-objective search in a swarm vs swarm context[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2018.
- [59] DEB K A, PRATAP S A, MEYARIVAN T. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [60] 施展, 陈庆伟. 基于改进的多目标量子行为粒子群优化算法的多无人机协同任务分配[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 945-951.
- SHI Z, CHEN Q W. Cooperative task allocation for multiple UAVs based on improved multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(6): 945-951.
- [61] 王建峰. 异构多空中单元协同任务分配方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- WANG J F. Research on cooperate mission planning method for the heterogeneous multiple aerial units[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [62] 韩博文, 姚佩阳, 孙昱. 基于多目标 MSQPSO 算法的 UAVS 协同任务分配[J]. 电子学报, 2017, 45(8): 1856-1863.
- HAN B W, YAO P Y, Sun Y. UAVS cooperative task allocation based on multi-objective MSQPSO algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(8): 1856-1863.
- [63] CARLOS S, HRIDAY B, JOSE L S L, et al. A flexible and dynamic mission planning architecture for UAV swarm coordination[C]//Proc. of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2016: 7-10.
- [64] 史豪斌, 张仁宇, 孙钢. 一种基于 ISODATA 算法的多智能体任务分配策略[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(3): 507-512.
- SHI H B, ZHANG R Y, SUN G. Task allocation strategy of multi-agent based on ISODATA algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(3): 507-512.
- [65] 陈昨, 张鑫, 金鑫, 等. 一种多智能体协同信息一致性算法[J]. 航空学报, 2017, 38(12): 321222.
- CHEN X, ZHANG X, JIN X. A cooperative information consensus algorithm for multi-agent system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(12): 321222.
- [66] NOAM B. Decentralized task allocation for dynamic, time-sensitive tasks[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2018.
- [67] 陈侠, 乔艳芝. 无人机任务分配综述[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(6): 1-7.
- CHEN X, QIAO Y Z. Summary of unmanned aerial vehicle task allocation[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016, 33(6): 1-7.
- [68] 陈侠, 刘敏, 胡永新. 基于不确定信息的无人机攻防博弈策略研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(12): 1510-1515.
- CHEN X, LIU M, HU Y X. Study on UAV offensive/defensive game strategy based on uncertain information[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(12): 1510-1515.

- [69] 任佳, 杜文才, 白勇. 基于贝叶斯网络自适应推理的无人机任务决策[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2575-2582.
- REN J, DU W C, BAI Y. UAV mission decision-making based on Bayesian networks adaptive inference[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33(10): 2575-2582.
- [70] LE T H A, NGUYEN Q T. A robust approach for nonlinear UAV task assignment problem under uncertainty[J]. Transactions on Computational Collective Intelligence, 2010: 147-159.
- [71] Alqahtani S, Riley I, Taylor S. Task allocation in uncertain environments using a quadtree and flow network[C]//Proc. of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2018: 12-15.
- [72] CHAIMATANAN S, DELAHAYE D, MONGEAUL M. A hybrid metaheuristic optimization algorithm for strategic planning of 4D aircraft trajectories at the continental scale[J]. Computational Intelligence Magazine, IEEE, 2014, 9(4): 46-61.
- [73] Antonio J C, Alejo D, Heredia G, et al. 4D trajectory planning in ATM with an anytime stochastic approach[C]//Proc. of the Naples: ACM, 2013.
- [74] 丁强, 陶伟明. 多无人机协同四维航迹规划的改进的 Tau-H 策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(7): 1398-1406.
- DING Q, TAO W M. Improved Tau-H strategy for four-dimensional cooperative route planning of multi-UAVs[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(7): 1398-1406.
- [75] 周青, 李广文. 基于 A*算法的无人机四维航迹规划研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(4): 92-96.
- ZHOU Q, LI G W. Study on 4D route planning for UAV based on A* algorithm[J]. Computer Simulation, 2014, 31(4): 92-96.
- [76] DIJKHUIZEN J, VORMER F, MULDER M, et al. Four-dimensional guidance displays theoretical considerations and experimental evaluation[C]//Proc. of the Providence: AIAA, 2004: 5234.
- [77] ANTONIO B, PEDRO G. Advanced UAV trajectory generation: planning and guidance[J]. Recent advances in signal processing, 2009: 55-82.
- [78] Bousson K, Alexandre T G. A quintic spline approach to 4D trajectory generation for unmanned aerial vehicles[J]. International Review of Aerospace Engineering, 2015, 8(1): 1-9.
- [79] 朱创创, 梁晓龙, 张佳强, 等. 无人机集群编队控制演示验证系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(8): 1739-1747.
- ZHU C C, LIANG X L, ZHANG J Q. Demonstration and verification system for UAV swarm formation control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(8): 1739-1747.
- [80] 沈林成, 陈璟, 王楠. 飞行器任务规划技术综述[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 593-606.
- SHEN L C, CHEN J, WANG N. Overview of air vehicle mission planning techniques[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 593-606.
- [81] 魏瑞轩, 许卓凡, 王树磊, 等. 基于 Laguerre 图的自优化 A-Star 无人机航路规划算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 577-582.
- WEI R X, XU Z F, WANG S L, et al. Self-optimization A-Star algorithm for UAV path planning based on laguerre diagram[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(3): 577-582.
- [82] 魏瑞轩, 吕明海, 茹常剑, 等. 基于 DE DMPC 的 UAV 编队重构防碰撞控制[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(12): 2473-2478.
- WEI R X, LV M H, RU C J, et al. Reconfiguration collision avoidance method

- for UAV's formation based on DE-DMPC[J], Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(12): 2473-2478.
- [83] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-UAV system[C]//Proc. of the American Control Conference, 2014: 2077-2082.
- [84] 茹常剑, 魏瑞轩, 戴静, 等. 基于纳什议价无人机编队自主重构控制方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(8): 1349-1359.
- RU C J, WEI R X, DAI J, et al. Autonomous reconfiguration control method for UAV's formation based on Nash bargain[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8): 1349-1359.
- [85] 魏瑞轩, 张启瑞, 许卓凡, 等. 类脑发育无人机防碰撞控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 175-182.
- WEI R X, ZHANG Q R, XU Z F, et al. A brain-like mechanism for developmental UAVs' collision avoidance[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(2): 175-182.
- [86] Senthil H A, Adarsh J S, Shivang Patel, et al. LSwarm: efficient collision avoidance for large swarms with coverage constraints in complex urban scenes[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3940-3947.
- [87] HUTH A, WISSEL C. The simulation of the movement of fish schools[J]. Journal of Theoretical Biology, 1992, 156(3): 365-385.
- [88] 孙瑶洁, 熊智, 李文龙, 等. 无人机集群类脑导航系统综述[J]. 航空计算技术, 2019, 49(3): 130-134.
- SUN Y J, XIONG Z, LI W L, et al. Research status and progress of brain-like formation navigation system[J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(3): 130-134.
- [89] 段海滨, 张祥银, 徐春芳. 仿生智能计算[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 2-18.
- DUAN H B, ZHANG X Y, XU C F. Bioinspired Computing[M]. Beijing: Science Press, 2011: 2-18.
- [90] 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: 112-118.
- DUAN H B, ZHANG D F, FAN Y M. From wolf pack intelligence to UAV swarm cooperative decision-making[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2019, 49: 112-118.
- [91] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
- [92] VICSEK T, CZIROK A, BEN-JACOB E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6): 1226.
- [93] ALDANA M, DOSSETTI V, HUEPE C, et al. Phase transitions in systems of self-propelled agents and related network models[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(9): 095702.
- [94] COUZIN I D, KRAUSE J, JAMES R, et al. Collective memory and spatial sorting in animal groups[J]. Journal of Theoretical Biology, 2002, 218(1): 1-11.
- [95] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2003, 48(6): 988-1001.
- [96] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Flocking in fixed and switching networks[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2007, 52(5): 863-868.
- [97] OLFATI-SABER R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithm and theory[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [98] LEVINE H, RAPPEL W J, COHEN I. Self-organization in systems of self-propelled particles[J]. Physical Review E, 2000, 63(1): 017101.
- [99] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 2-

25.
DUAN H B, QIU H X. Unmanned aerial vehicle swarm autonomous control based on swarm interlligence[M]. Beijing: Science Press, 2018: 2-25.
- [100] MATARIC M J. Reinforcement learning in the multi-robot domain. *Autonomous Robots*, 1997, 4(1): 73-83.
- [101] JAMES M, DANIEL Y. Dynamic task assignment in robot swarms[C]//Proc. of the Robotics: Science and Systems, 2005.
- [102] KUBE C R, ZHANG H. The use of perceptual cues in multi-robot box-pushing[C]//Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, 1996: 2085-2090.
- [103] DORIGO M. SWARM-BOT: an experiment in swarm[C]//Proc. of the Robotics Swarm Intelligence Symposium, 2005: 192-200.
- [104] The United States Air Force. Small unmanned aircraft systems flight plan: 2016-2036[R]. Washington D.C., 2016.
- [105] VASARHELYI G, VIRAGH C, SOMORJAI G, et al. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots[C]//Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and System, 2014: 14-18.
- [106] VIRAGH C, VASARHELYI G, TARCAI N, et al. Flocking algorithm for autonomous flying robots[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(2): 025012
- [107] CHUNG T H, CLEMENT M R, DAY M A, et al. Live-fly, large-scale field experimentation for large numbers of fixed-wing UAVs[C]//Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, 2016: 16-21.
- [108] CHATE H, GINELLI F, GREGOIRE G, et al. Modeling collective motion :variations on the vicsek model[J]. *The European Physical Journal B*, 2008, 64(3/4): 451-456.
- [109] REYES L A V, TANNER H G. Flocking, formation control, and path following for a group of mobile robots[J]. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2015, 23(4): 1268-1282.
- [110] 邱华鑫, 段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(3): 317-322.
- QIU H X, DUAN H B. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(3): 317-322.
- [111] 梁晓龙, 孙强, 尹忠海. 大规模无人系统集群智能控制方法综述[J]. *计算机应用研究*, 2015, 32(1): 11-16.
- LIANG X L, SUN Q, YIN Z H. Review on large-scale unmanned system swarm intelligence control method[J]. *Application Research of Computers*, 2015, 32(1):11-16.
- [112] SU H S. Flocking in multi-agent systems with multiple virtual leaders based only on position measurements[J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2012(5): 801-807.
- [113] 周子为, 段海滨, 范彦铭. 仿雁群行为机制的多无人机紧密编队[J]. *中国科学:技术科学*, 2017, 47(3): 230-238
- ZHOU Z W, DUAN H B, FAN Y M. Unmanned aerial vehicle close formation control based on the behavior mechanism in wild geese[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2017, 47(3):30-238.
- [114] 段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制[J]. *科技导报*, 2017, 35(7): 17-25.
- DUAN H B, LI P. Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(7): 17-25.
- [115] 段海滨, 邱华鑫, 陈琳, 等. 无人机自主集群技术研究展望[J]. *科技导报*, 2018, 36(21): 90-98.

- DUAN H B, QIU H X, CHEN L, et al. Prospects on unmanned aerial vehicle autonomous swarm technology[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(21): 90-98.
- [116] 段海滨, 邱华鑫, 范彦铭. 基于捕食逃逸鸽群优化的无人机紧密编队协同控制[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(6): 559-572.
- DUAN H B, QIU H X, FAN Y M. Unmanned aerial vehicle close formation cooperative control based on predatory escaping pigeon-inspired optimization[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2015, 45(6): 559-572.
- [117] NOWAK D J. Exploitation of self-organization in uav swarms for optimization in combat environments[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2008.
- [118] ANTONIO L A, MARIO G C A C, NICOLETTA D F, et al. Design and simulation of the emergent behavior of small drones swarming for distributed target localization[J]. Journal of Computational Science, 2018, 29: 19-33.
- [119] WALLAR A, PLAKU E, DONALD A S. A planner for autonomous risk-sensitive coverage by a team of unmanned aerial vehicles[C]//Proc. of the IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, 2014.
- [120] Howden D J. Fire tracking with collective intelligence using dynamic priority maps[C]//Proc. of the Congress on Evolutionary Computation, 2013: 20-23.
- [121] 高杨, 李东生, 柳向. 无人机集群协同态势觉察一致性评估[J]. 电子学报, 2019, 47(1): 190-196.
- GAO Y, LI D S, LIU X. UAV swarm cooperative situation perception consensus evaluation[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 190-196.
- [122] 高杨, 李东生, 程泽新. 无人机分布式集群态势感知模型研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(6): 1271-1278.
- GAO Y, LI D S, CHENG Z X. UAV distributed swarm situation awareness model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(6): 1271-1278.

作者简介

贾高伟 (1989-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为先进飞行器设计与智能集群技术。

E-mail: ji_as@126.com

王建峰 (1995-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无人机集群任务分配。

E-mail: jianfeng129@foxmail.com