

无人机集群协同控制技术综述

张鹏飞^{1,2}, 何 印^{1,2}, 马振华^{1,2}, 李亚文^{1,2}

(1. 中北大学 航空宇航学院, 太原 030051; 2. 中北大学 智能武器研究院, 太原 030051)

摘要: 协同控制技术作为多智能体分工合作完成任务的关键核心技术,能解决无人机集群编队、队形重构和避障避碰等问题,是无人机集群正常运作的基础。针对近几年国内外无人机集群协同控制技术的发展历程,概述3种控制结构原理及其优缺点;分析了基于3种控制结构的编队控制方法及其优缺点;从无人机集群协同编队控制技术出发,分析基于编队控制的避障方法;指出了现阶段无人机集群协同控制技术面临的瓶颈问题,并对协同控制技术的未来发展方向进行了展望,为无人机集群编队控制和避障方法研究提供一定的借鉴。

关键词: 无人机集群; 协同控制; 控制结构; 编队控制; 协同避障

本文引用格式: 张鹏飞, 何印, 马振华, 等. 无人机集群协同控制技术综述[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(4): 1-9.

Citation format: ZHANG Pengfei, HE Yin, MA Zhenhua, et al. Review on cooperative control technology of UAV swarm [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(4): 1-9.

中图分类号: V249

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2024)04-0001-09

Review on cooperative control technology of UAV swarm

ZHANG Pengfei^{1,2}, HE Yin^{1,2}, MA Zhenhua^{1,2}, LI Yawen^{1,2}

(1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Intelligent Weapon Research Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Cooperative control technology is one of the key technologies of multi-agent to complete cooperative tasks, it can solve the problems of UAVs formation, formation reconstruction and obstacle avoidance. It is the basis for the normal operation of UAV swarm. Aiming at the development process of UAV swarm cooperative control technology at home and abroad in recent years, firstly, three control structures and their advantages and disadvantages are summarized; then the formation control methods based on three control structures and their characteristics are analyzed; in addition, various obstacle avoidance methods are analyzed from the perspective of cooperative formation control technology; finally, the bottleneck problem of the current UAV swarm cooperative control technology is proposed, and the future development direction of cooperative control technology is prospected, which provides some help for the research of UAVs formation control and obstacle avoidance methods.

Key words: UAV swarm; cooperative control; control structure; formation control; cooperative obstacle avoidance

0 引言

随着科学技术的发展,无人机技术开始在农田播种、森

林搜救、边境监控、战场干扰、电子对抗等民用和军事领域有了广泛的应用。但随着任务和环境的复杂变化,单一无人机已经难以满足任务的需求,由多个无人机组成的无人机集群因其高效率、高鲁棒、多功能及可扩展等优秀性能逐渐受到

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-05-29; 录用日期: 2023-07-02

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202103021224182); 山西省基础研究计划资助项目(202103021224187); 山西省研究生创新项目(2022Y594)

作者简介: 张鹏飞(1986—), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhangpf@nuc.edu.cn。

世界各国的重视。

作为一种执行高难度、高危险性任务的有效手段,无人机集群技术在近十年得到了快速的发展。无人机集群能够通过空中组网实现集群间的信息共享,并通过人工智能技术和飞控技术达到群体的智能决策,实现协同自主运动,满足各种复杂任务的需求,拥有单一无人机无法比拟的优势。在其研究领域逐渐形成了环境感知、路径规划、任务分配、协同决策、协同定位、编队控制及碰撞规避等研究热点。由于无人机集群广泛的应用前景和巨大的作战优势,其相关技术研究成为前沿发展方向。

协同控制技术是指控制多智能体协同完成任务,实现群体效率最大化,是无人机集群能够正常运行的关键核心技术。编队控制和碰撞规避是无人机集群协同控制领域的研究重点。目前,无人机集群协同控制技术亟待解决的关键问题在于减轻集中式控制的通信负载、增强其集群控制鲁棒性;优化分布式控制的算法设计、提高集群控制精度;增强分散式控制的控制效果,提升集群稳定性。研究难点主要在于控制性能良好的算法设计复杂、无人机之间的通信延迟、对电磁环境的抗干扰能力较弱等。因此无人机集群协同控制技术成为无人机集群研究领域需要突破的关键技术。

本研究中首先分析无人机集群协同编队控制结构;接着分析基于控制结构的常用编队控制方法及其优缺点;然后综述基于编队控制方法的避障方法以及单一避障方法研究的新进展;最后总结目前无人机集群协同控制技术面临的瓶颈问题并展望无人机集群协同控制的发展方向。

1 协同编队控制结构

随着无人机集群技术研究的展开和深入,基于队形生成、保持和重构的协同编队控制技术形成了集中式、分布式和分散式3种控制结构^[1],如图1所示。

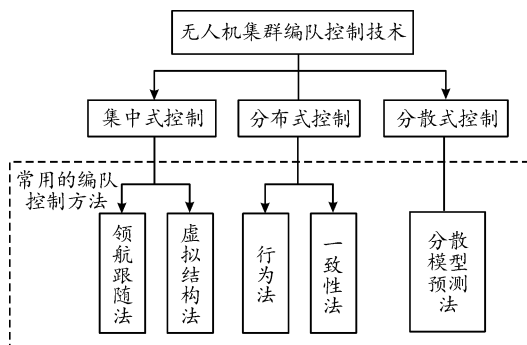


图1 编队控制结构及方法

Fig. 1 Structure and method of formation control

1.1 集中式控制

集中式控制需要指定1台无人机作为集群核心,用于处理集群的所有信息,并由该无人机负责对所有无人机下达控制指令,实现对集群控制,其控制结构如图2所示。

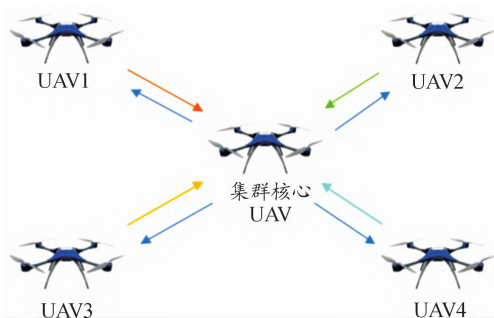


图2 集中式控制结构

Fig. 2 Structure of centralized control

集中式控制结构易于实现,且编队精度高,但是集群过于依赖集群核心。当集群核心发生故障时,容易导致集群编队控制失效,其鲁棒性较差,并且集群数量较多时,信息处理量大、通信负载大。因此,集中式控制应用场景局限于通信环境良好的小型无人机集群,如小型无人机集群表演,货物的定点运输、装卸等。基于集中式结构的控制方法主要包括领航—跟随法、虚拟结构法等。

1.2 分布式控制

分布式控制没有信息处理核心,仅通过与邻近的节点的信息交互实现对集群的控制,实现方式较为简单,其控制结构如图3所示。

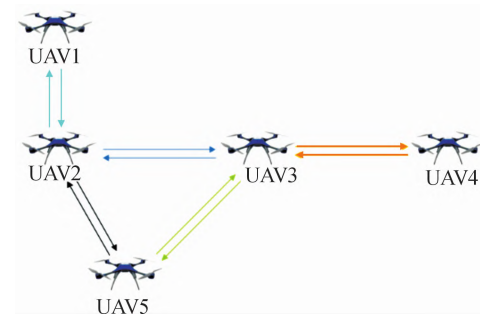


图3 分布式控制结构

Fig. 3 Structure of distributed control

分布式控制结构只需获取邻近的无人机状态信息特点,极大降低了集群的信息交互量和计算量,使得集群更加稳定、灵活,增强了集群的鲁棒性和适应性。但是其算法设计相对复杂,控制精度较低。基于分布式结构的控制方法主要包括行为法、一致性法、最优控制法等。

1.3 分散式控制

分散式控制采用控制器与无人机一一对应的控制方式,没有控制中心,各节点之间也不存在通信关系,每个节点只需要保持事先设定的相对距离,便能控制队形,其控制结构如图4所示。

分散式控制结构实现简单,具有可扩展性,但是适应性和鲁棒性较差,由于每架无人机都需要单一独立的控制器,其构建成本较高。基于分散式结构的控制方法主要为分散

模型预测法。

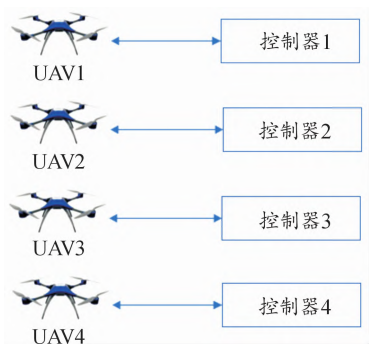


图4 分散式控制结构

Fig.4 Structure of decentralized control

基于以上控制结构的编队控制技术对比如表1所示。

表1 控制结构对比

Table 1 Comparison of control structure

控制结构	优点	缺点
集中式	控制精度高 实现简单	鲁棒性差 通信负载大
分布式	通信负载小 鲁棒性强	控制精度较低 算法设计复杂
分散式	可扩展性强 实现简单	构建成本高 鲁棒性差

2 协同编队控制方法

2.1 领航—跟随法

领航—跟随法需要指定集群中的某一无人机为领航者,使其按照预先设定的轨迹飞行,其他无人机与其信息共享后,跟随其运动轨迹保持一定的相对距离飞行,从而达到对集群的控制目的,控制方式如图5所示。

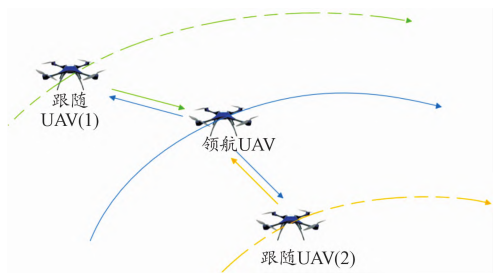


图5 领航—跟随法示意图

Fig.5 Diagram of pilot-follower method

Wang 等^[2]基于时变编队跟踪控制,研究了具有动态输入的领航者,通过滑模控制理论,提出了连续时间和离散时间的分布式编队跟踪协议,通过虚拟实验证明了该协议的有

效性。Wang 等^[3]针对固定翼无人机编队控制问题,设计了一种新的分布式滑模控制律,其中跟随无人机的控制律只使用自身信息和领航者的信息,在满足线速度和角速度约束的条件下,能够实现期望的编队。Wang 等^[4]针对多智能体编队保持控制问题,提出了基于领航—跟随者的控制模型,并通过 Routh-Hurwitz 准则判断了领航无人机的稳定性。然后基于一致性协议,引入模型预测机制,使跟随者能够预测领航者的状态,并能保持队形中的相对位置。通过实例仿真验证了该方法的正确性。Zhang 等^[5]针对风场干扰队形保持的问题,提出了一种基于领航—跟随者结构的自适应控制方法,该方法能有效估计空间中风力的大小和方向,以便控制无人机相对运动抵消风场干扰引起的距离误差。仿真实验证明了该方法具有良好的鲁棒性。

基于领航—跟随者的控制方法具有实现简单、编队精度高等优点,但由于集群内的所有通信都需要通过领航无人机处理,其计算量大,当领航无人机出现故障时,容易导致整个集群失控,其系统鲁棒性和灵活性差。通过上述研究可以发现,目前针对领航—跟随者控制方法的研究主要集中在改善其系统的稳定性和鲁棒性方面。

2.2 虚拟结构法

虚拟结构法通过将整个集群看作一个整体处理,对虚拟结构进行运动学和动力学分析,确定虚拟结构上每个目标点的相应特性,控制无人机跟踪对应目标点,从而实现编队控制,如图6所示。

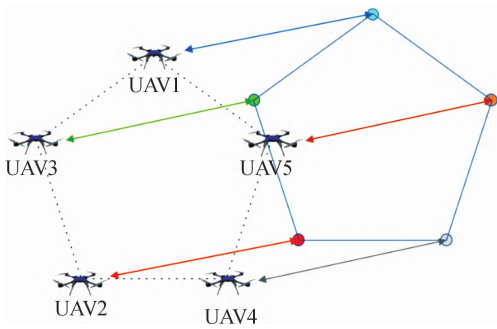


图6 虚拟结构法示意图

Fig.6 Diagram of virtual structure method

Rabelo 等^[6]针对无人机和无人车异构系统的降落问题,提出了基于虚拟结构的控制方法。通过李雅普诺夫理论证明了该方法的稳定性,并通过实验仿真证明了其有效性。Bacheti 等^[7]针对异构无人系统协同任务问题,提出了基于虚拟结构的控制器来引导编队,使无人机在完成的任务后能够准确降落到无人车上。通过仿真分析,验证了该方法的有效性。Villa 等^[8]针对无人机承载问题,提出了基于虚拟结构法的自适应动态控制器。实验证明,该控制方法能够在风干扰、20% 模型参数误差等不利条件下实现有效控制。

基于虚拟结构的控制方法具有较高的控制精度和一定的容错度,但是因为其要求整个系统作为刚体运动,限制了系统的灵活性和适应性。

2.3 行为法

行为法需要对集群中每架无人机设置编队、避障、跟随等基本行为,并根据不同的外界信息,采取不同的集群行为,以实现集群的编队控制,如图7所示。

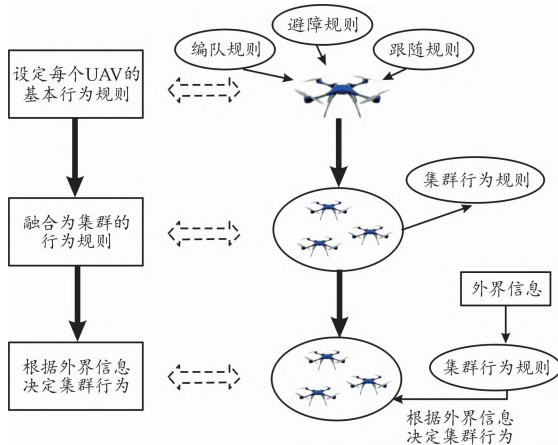


图7 行为法示意图

Fig. 7 Diagram of behavior method

基本行为规则设定模块用于设置每架无人机的编队、避障及跟踪等基本规则;行为规则融合模块主要对每架无人机的基本行为进行系统融合,以构建集群的整体行为规则;最后根据集群行为规则,针对无人机集群感知的外界信息采取相应的控制行动,以完成对集群的控制。

El-ferik 等^[9]针对无人机在执行任务时的避障问题,提出了基于捕食者—食饵行为的生物模型,无人机作为捕食者为了到达食饵位置,需要避开目标周围的障碍物,为了识别周围的无人机成员,引入了基于密度的聚类算法。仿真结果证明该方法编队控制和避障的有效性。Duan 等^[10]提出了一种基于鸽子归巢行为的控制方法,并进一步实现了基于信鸽的自主导航方法,仿真实验表明,该方法能够实现自主控制。Liu 等^[11]针对无人机集群的队形形成和保持问题,提出了基于邻近行为信息反馈的控制方法,该方法以邻近无人机行为信息为观测量,建立了一种自适应分布式控制方法,拥有比其他分布式控制方法更好的灵活性和通信能力。仿真实验表明了该算法的正确性和有效性。

基于行为法的控制方法具有易实现、灵活性好等优点,但对系统的整体行为难以明确,集群整体的精准度难以控制,难以进行稳定性分析。

2.4 一致性法

一致性法是指无人机通过邻接节点的信息共享,使每架无人机的速度、加速度和欧拉角等运动状态量逐渐达到一致,实现对集群的控制,如图8所示。

其中,状态设定模块用于确定集群的一致性运动状态量及其相应的阈值;当运动状态量超过阈值时,表明尚未达成运动一致性条件,需要更改无人机集群运动状态;运动状态收集模块用于收集邻近无人机的运动状态量,用于一致性条

件判断;直至满足一致性条件,完成对集群的编队控制。

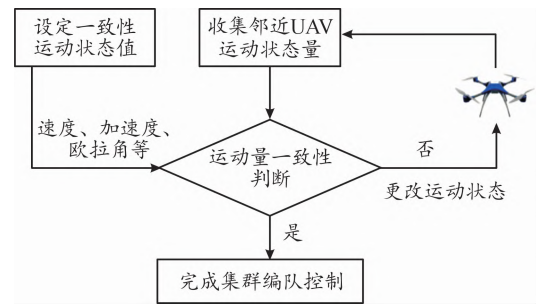


图8 一致性法示意图

Fig. 8 Diagram of consistency method

He 等^[12]研究了一种适用于高速无人机集群的一致性控制算法,它能在必要时动态指定其中一架无人机为领航者,并且能通过其他无人机的导航反馈来进一步控制编队队形。Xue 等^[13]针对包含无人机和无人车的异构多智能体系统,设计了基于模糊的滑模控制和一致性法相结合的控制方法,保证了编队的收敛性。Tao 等^[14]针对非对称通信干扰和网络拥塞等问题,提出了一种具有运动约束的一致性控制方法,通过约束条件调整无人机的运动状态,使其在具有通信延迟和切换拓扑的情况下,能够使无人机快速收敛到期望状态,并保持队形。Zhen 等^[15]针对具有不确定参数的外部干扰影响的编队飞行问题,提出了基于多变量模型自适应控制的一致性控制方案。仿真实验表明,该自适应控制方案比固定控制方案具有更强的鲁棒性和自适应性。符小卫等^[16]针对无人机集群躲避动态障碍物下的队形控制问题,在一致性控制与人工势场法的基础上,引入了碰撞预判机制,以减少不必要的避障行为。仿真结果表明了该方法能够在避障的同时实现队形的形成、保持与重构。

基于一致性的控制方法具有良好的灵活性、鲁棒性和适应性,但其分布式结构的通信能力较差,算法设计复杂。

2.5 最优控制法

最优控制是指在考虑无人机集群某方面的约束条件时,选择使系统性能的指标达到极小值,如时间最短、耗能最少等能够实现集群控制的最优方法,如图9所示。

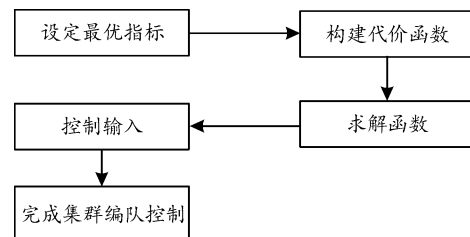


图9 最优控制法示意图

Fig. 9 Diagram of optimal control method

最优指标设定模块用于确定某个系统性能指标或任务需求指标;代价函数构建模块中根据系统状态、控制输入量、

运动状态量及该指标需要满足的约束条件来构建指标最优的代价函数;解算模块用于对代价函数的求解,其中,代价函数和指标约束条件简明的最优问题能够通过解析法求其解析解,常用方法有微分法、变分法、极大值原理等。当代价函数过于复杂时,仅能通过多次迭代求其数值解,常用方法有动态规划法、插值法、梯度法等;控制输入模块用于输入求得的解析解或数值解以实现集群控制。算法的稳定性可由李雅普诺夫法判断,收敛性由2个相邻迭代点与最优值点之商的Q-收敛法判断。

Liu等^[17]针对异构无人机编队问题,提出了一种基于强化学习的分布式最优控制方法。该方法能够在不了解跟随无人机的动力学情况下,在线获取最优控制输入,实现无人机集群的稳定控制。Yang等^[18]针对有限时间内集群运动的最优控制问题,提出了基于单积分和双积分模型的优化算法,该算法能够在有限时间内实现集群收敛,同时最小化智能系统的性能指标。实验模拟表明,该算法能够在一定条件下保持最小能量函数,达到集群编队时间最优的控制目的。Yang等^[19]针对异构无人系统最优控制问题,提出了基于一致性控制的线性二次调节器优化方法。Bai等^[20]针对四旋翼无人机设计了一种具有固定控制拓扑结构的高阶一致性控制算法;为了获得姿态控制的全局最优解,提出了一种基于变权杂交的姿态控制算法,实验表明,该算法能够动态改变惯性权重,并能够调整系数以控制权重的影响程度。

基于最优条件的控制方法具有良好的鲁棒性、稳定性和较高的控制精度,但其算法设计复杂,需要大量函数表示系统性能指标,在复杂问题中,不能显式求得最优解,需要采用数值解法。

2.6 分散模型预测法

分散模型预测法是指在无人机之间不进行信息交流的情况下,由每架无人机各自的控制器处理接收的局部状态信息,并预测未来状态信息,以实施对每架无人机的控制,如图10所示。

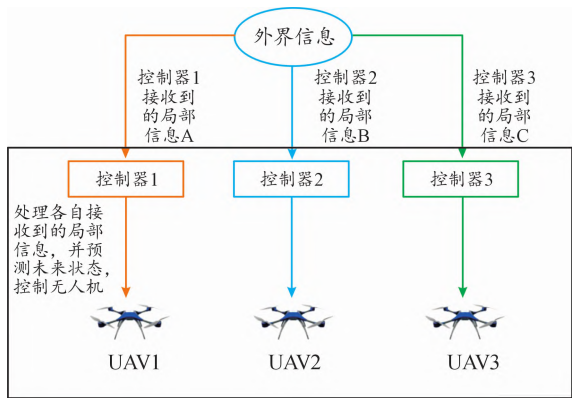


图10 分散模型预测法示意图

Fig. 10 Diagram of decentralized model predictive

Sun等^[21]采用了分散式模型预测控制法,利用每架无人机各自的控制器实现对集群的控制,以改善对目标的跟踪性

能,并采用了一种更新迭代方案来提高迭代效率。仿真实验证明了该控制方法的有效性。Huang等^[22]针对无人机监控问题,提出了一种基于模型预测控制的分散式无人机在线轨迹规划方法,由于无人机之间并未进行信息通信,其难以被地面观测点所察觉,能够达到伪装监控的目的,同时引入的误差边界的在线轨迹规划能够实现对集群的鲁棒性控制。仿真结果表明了该方法的有效性。Hu等^[23]针对未知地面目标的跟踪,提出了基于信息滤波、一致性分析和快速模型预测控制的分散式跟踪控制方法,信息滤波用于处理每架无人机传感器的测量值估计目标状态,一致性分析用于改善无人机之间的估计差异,快速模型预测控制用于满足无人机控制系统的实时性要求,仿真实验证明了该方法的有效性。

基于分散模型预测的控制方法具有通信负载小,实现简单,可扩展性良好等优点,能与其他算法结合,提升集群鲁棒性。但是其仅采用了局部信息,无人机之间也未进行信息交流,因此很难获得全局最优解,需要不断迭代,处理数据,控制效果较差。

常用编队控制方法对比如表2所示。

表2 编队控制方法对比
Table 2 Comparison of formation control methods

常用方法	结构类型	优点	缺点
领航—跟随法	集中式	控制精度高 实现简单	鲁棒性差 通信负载大
虚拟结构法	集中式	有一定容错度 控制精度较高	灵活性差 适应性差
行为法	分布式	灵活性较好 实现简单	稳定性差 精确度较低
一致性法	分布式	灵活性、鲁棒性 和稳定性好	算法设计复杂 抗干扰能力差
最优控制法	分布式	鲁棒性良好 控制精度较高	算法设计复杂 难以求最优解
分散模型 预测法	分散式	通信负载小 扩展性好	计算量大 控制效果较差

3 碰撞规避技术

无人机集群的碰撞规避技术能够极大地提升集群的安全性和稳定性,已成为无人机集群协同控制技术中的重要研究内容。

3.1 融合编队控制避障技术

协同避障是指集群内有部分无人机检测到障碍物时,通过集群内的信息交流,使得没有感知到障碍物的无人机也能避开障碍物,达到集群整体避障的目的。目前常用的协同避障技术通常采用编队控制方法与避障算法相融合的形式,如

一致性与人工势场法、一致性与粒子群优化算法、鸽群行为法、分散式模型预测法等。

朱创创等^[24]通过地球偏转力影响对人工势场法进行改进,并与一致性控制方法相结合,实现集群自组织避障。仿真结果表明了该避障方法的有效性。Fang等^[25]针对无人机不同状态下的航迹规划问题,提出了一种结合一致性控制的分段人工势场航迹规划方法。该方法对势场进行分段处理,使其满足设定的运动约束,并通过附加势场调整航迹点速度,使其在局部振荡点的轨迹更加平滑,仿真结果表明,在满足运动约束的条件下该算法规划的轨迹比传统算法更加平滑,并且无人机之间不会发生碰撞。Huang等^[26]对传统人工势场法存在的缺陷进行了改进,并将改进后的平滑人工势场法与二阶一致性法相结合,通过在静态障碍物和动态障碍物2种情况下的编队和避碰实验仿真,证明了该方法的有效性。Wang等^[27]针对无人机集群在三维障碍环境的避障和位置速度一致性问题,通过协调增益和规划角影响对人工势场法进行了改进,提出了将改进的人工势场法和一致性法相结合的编队避障控制方法。仿真实验表明,该方法在避障避碰后,能够快速恢复预期编队队形。

Wu等^[28]通过增加无人机的机动性约束条件对一致性法进行了改良,并基于改良后的一致性法和粒子群优化算法,提出了不同初始条件下的无人机运动模型预测控制,实现了无人机集群对静态障碍物和动态障碍物的高效避障能力。Wu等^[29]提出了一种混合遗传模拟退火结合一致性协议的控制算法,该算法能够在队形重构时快速确定无人机的编队位置,减少重构时间,避免了无人机之间的碰撞。

申燕凯等^[30]对鸽群避障行为进行分析,设计了一种仿鸽群被动式惯性应急避障方法,通过对地面静态障碍物和空中动态障碍物2种情况进行仿真,证明了该方法的有效性。Li^[31]等在行为法的基础上融入编队决策函数,提出了基于鸽群行为的轨迹规划模型和分层预警机制,能够有效避免无人机和静态、动态障碍物的碰撞,并且能够适用于风现象干扰和其他复杂环境下的无人机集群避障控制。

Bassolillo等^[32]针对无人机之间保持给定的连接拓扑和指定距离,设计了一种分散式制导控制策略,在存在障碍物时,结合模型预测控制方法,实现了集群避障避碰功能。Chevet等^[33]针对无人机集群在凸有界多边形区域中的控制和重构问题,提出了一种基于线性模型预测控制器的分散算法,在部分无人机出现故障或执行其他任务时,能够自动离开编队并避免与其他无人机的碰撞。

上述的研究表明,编队控制与避障方法融合的协同避障技术能够达到集群的避障要求,并且在通过障碍物后,能够快速的重构编队队形。其中,一致性控制方法用于编队生成、保持以及避障后的队形重构,改进人工势场法用于解决传统人工势场法的局部最优解缺陷问题,提升避障性能。

3.2 其他避障避碰方法

除了与编队控制相融合的避障方法外,也有许多考虑通

过队形控制实现避障能力或仅考虑避障算法能力的研究。

吕智虎等^[34]针对模糊控制避障算法难以有效规避“凹形”障碍物的问题,提出了一种基于模糊神经网络的无人机实时避障算法,通过仿真对比,证明了模糊神经网络方法具有更强的适应性和灵活性,其避障成功率更高。徐文钰等^[35]针对现有常规智能避障算法的局限性,提出了基于鸽群优化与人工势场法融合的局部航迹规划方法。该方法克服了人工势场法的局部最优解和常规智能算法的耗时问题,并能够在突发情况下,躲避障碍物。仿真实验表明了该算法的有效性。孙淑光等^[36]针对传统A*算法路径不平滑、无法动态避障等问题,提出了一种基于A*算法与人工势场法的融合算法,并利用粒子群算法对融合算法的参数进行了优化。仿真结果表明,融合算法能够节省燃油损耗,使规划的路径更加平滑,并且具备动态避障能力。陈博琛等^[37]针对未知障碍物环境下的避障问题,提出了基于改进人工势场法的避障方法,该方法能在避障避碰的同时,有效减少机间通信量,并能在避障后实现队形重构。仿真实验表明了该方法的有效性。彭皓月等^[38]采用分段自适应B样条法与快速粒子群优化算法,实现了多无人机的避障避碰能力,并与圆弧插补技术进行了对比。仿真结果表明,采用自适应B样条法能使无人机航迹更为光滑。

Rastgoftar等^[39]研究了在共享空间运行的多组无人机集群的避碰和避障的必要条件,提出了一种基于连续变形的控制方式,能够在给定初始位置和目标位置的条件下,实现多组无人机集群的无碰撞运动。Huang等^[40]通过将雷诺规则用于无人机的自组织飞行,对单组无人机集群和多组无人机集群的避碰控制分别进行了研究,其中单组无人机集群采用了统计分析来衡量避碰效果,多组无人机集群采用基于三维几何位置方法,计算其最近接近点,以达到避碰效果。Liu等^[41]针对雷达威胁和固体障碍物问题,提出了生命周期群优化算法,并与粒子群优化算法和鲸鱼优化算法进行了对比,通过数值仿真证明了该算法的有效性。

上述研究通过对避障结果分析证明所采用避障算法的有效性,能够满足集群避障的要求。单纯考虑避障能力的研究结果更加精准,仿真实验更加高效,但是减少了对集群队形控制的考虑,容易降低对整个集群的队形保持、重构能力的适应性。

4 总结与展望

随着无人机集群任务的日趋复杂化,具有高效、稳定、灵活、安全以及高精度的协同控制技术将受到越来越多的青睐。

4.1 关键问题

从无人机集群协同控制技术研究现状及未来发展方向来看,当前面临的瓶颈问题主要集中在:

1) 算法优化设计问题。面对无人机集群协同控制技术

越来越高的性能需求,所采用的编队控制算法和避障避碰算法将会越来越复杂,增加了对运算模块的负载,占据了整个无人系统的大量运算资源,甚至引发无人机系统失灵。因此,在满足控制要求的条件下,对原有的算法进行优化改进,减少运算量是目前具有挑战的问题。

2) 通信时延问题。无人机之间的信息交流是实现集群控制的前提,当前机间无线通信依然存在一定的时延。特别是大规模、高机动的无人机集群,其需要处理的信息量更大,更容易引起较高的通信时延,导致系统不稳定。针对无人机通信时延问题,还需要进一步的研究。

3) 电磁干扰问题。无人机集群的应用环境中不可避免的存在大量电磁干扰,在复杂电磁环境干扰下,容易导致无人机电子元件失效,引发无人系统故障,使整个无人机集群失控。如何降低或消除电磁干扰的影响是目前面临的重要挑战。

4) 突发避障问题。无人机集群的避障功能是整个集群正常飞行的重要基础,当前的避障技术虽然能够解决部分碰撞问题,但还不足以应对无人机实际飞行过程中的突发障碍。针对无人机在飞行过程中出现的突发避障问题,还需要进一步的研究。

4.2 发展趋势

未来无人机集群协同控制技术的研究重点和方向主要集中在以下几点:

1) 结合视觉定位和构图(simulation localization and mapping, SLAM)的协同控制技术。随着无人机集群应用环境的复杂化,当前单一的协同控制技术难以实现精准的定位以及高效的避障。视觉SLAM技术能够通过搭载的设备来获取复杂环境中的信息数据,利用这些信息无人机能够获取自身的位置信息,并提升在复杂环境中的控制精度。通过与视觉SLAM技术的结合,能够提升无人机集群对环境的感知识别能力,提升控制精度及避障效果,是当前的重要研究趋势。

2) 异构无人系统协同控制技术。随着执行任务和功能的复杂化,未来的无人系统,必然是由包含无人车、无人船和无人机组成的多种无人系统。如何在异构无人系统中保留原有的性能优点,减少性能缺陷,实现异构无人系统的精准控制、协同避障、任务分配等问题将是未来的协同控制技术的重要研究方向。

3) 结合5G通信的协同控制技术。随着无人机集群在森林探索、边境巡防、战场打击等领域的广泛应用,信号接收端对高效、实时、稳定的信号传递将有更高的要求。5G通信技术具备大宽带、低时延、高可靠等优点,能够增强无人机之间的信息传递能力,提升无人机协同控制的时效性。如何利用5G通信技术实现在复杂电磁环境下,对外界有高效、可靠、即时的信息交流,维持集群的稳定控制将是一个重要的研究方向。

4) 结合人工智能的协同控制技术。随着未来无人机集群的应用发展及更高精度的控制需求,需要控制系统识别处

理更多的环境感知信息。机器学习、机器感知、神经网络等人工智能算法的出现,使无人机集群对环境信息的识别处理更加高效。利用人工智能技术处理无人机集群的环境信息,使其具备自主感知、控制的能力将是未来协同控制技术的重要研究方向。

5) 具备故障容错的协同控制技术。随着无人机集群的广泛应用,迫切需提升无人机集群的鲁棒性与稳定性。故障容错技术通过检测无人机发生的故障,结合容错控制技术,确保无人机基础功能的正常运行,能够提升无人机集群的鲁棒性和稳定性。利用故障检测与容错机制,使其在执行任务时具备更高的安全性和可靠性是未来协同控制技术的重要研究方向。

6) 结合自主决策的协同控制技术。随着无人机接收的信息多元化,需要控制系统快速处理并筛选有用信息。自主决策技术利用智能算法通过对当前获得的多元信息进行数据分析,综合相关约束条件和最终目的,获取最优策略,能够优化无人机集群协同控制能力。利用自主决策技术,提升无人机集群对多元信息的处理速度和能力,优化无人机集群的协同控制性能是未来协同控制技术的重要研究方向。

5 结论

本文从编队控制方法和碰撞规避技术2个方面对国内外无人机集群协同控制技术进行了综述研究,总结了几种常用编队控制方法的优缺点和碰撞规避技术的研究热点。提出了协同控制技术目前面临的瓶颈问题和未来的发展方向,对无人机集群协同控制领域的研究提供了一定帮助。本文中难免会存在一些相关研究的疏漏,仅期望所做工作能帮助读者了解无人机集群协同控制领域的相关内容。

参考文献:

- [1] 刘树光,刘荣华,王欢,等. 国外无人机集群协同控制技术新进展[J]. 飞航导弹,2021(8):24-31.
LIU Shuguang, LIU Ronghua, WANG Huan, et al. New progress of foreign UAV cluster cooperative control technology[J]. Aerospace Technology, 2021(8):24-31.
- [2] WANG J, HAN L, DONG X, et al. Distributed sliding mode control for time-varying formation tracking of multi-UAV system with a dynamic leader[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 111:106549.
- [3] WANG X, YU Y, LI Z. Distributed sliding mode control for leader-follower formation flight of fixed-wing unmanned aerial vehicles subject to velocity constraints[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 31(6):2110-2125.
- [4] WANG Y, CHENG Z, XIAO M. UAVs formation keeping

- control based on multi-agent system consensus [J]. IEEE Access, 2020(8):49000–49012.
- [5] ZHANG J, ZHANG P, YAN J. Distributed adaptive finite-time compensation control for UAV swarm with uncertain disturbances[J]. IEEE-Inst Electrical Electronics Engineers Inc, 2021, 68(2):829–841.
- [6] RABELO M, BRANDAO A S, SARCINELLI-FILHO M. Landing a UAV on static or moving platforms using a formation controller[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(1):37–45.
- [7] BACHETI V P, BRANDAO A S, SARCINELLI-FILHO M. Path-following with a UGV-UAV formation considering that the UAV lands on the UGV[C]//2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2020.
- [8] VILLA D, BRANDAO A S, CARELLI R, et al. Cooperative load transportation with two quadrotors using adaptive control[J]. IEEE Access, 2021(9):129148–129160.
- [9] EL-FERIK S. Biologically based control of a fleet of unmanned aerial vehicles facing multiple threats [J]. IEEE Access, 2020, 8:107146–107160.
- [10] DUAN H, XIN L, SHI Y. Homing pigeon-inspired autonomous navigation system for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(4):2218–2224.
- [11] LIU W H, ZHENG X, DENG Z H. Adaptive distributed formation maintenance for multiple UAVs: exploiting proximity behavior observations[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021:784.
- [12] HE L, BAI P, LIANG X, et al. Feedback formation control of UAV swarm with multiple implicit leaders[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 72:327–334.
- [13] XUE K, WU T. Distributed consensus of USVs under heterogeneous UAV-USV multi-agent systems cooperative control scheme [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(11):1314.
- [14] TAO C, ZHANG R, SONG Z, et al. Multi-UAV formation control in complex conditions based on improved consistency algorithm[J]. Drone, 2023, 7(3):185.
- [15] ZHEN Z, TAO G, XU Y, et al. Multivariable adaptive control based consensus flight control system for UAVs formation [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 93:105336.
- [16] 符小卫, 潘静. 无人机集群规避动态障碍物的分布式队形控制[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(2):529–537.
- FU Xiaowei, PAN Jing. Distributed formation control of UAV cluster avoiding dynamic obstacles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(2):529–537.
- [17] LIU H, MENG Q, PENG F, et al. Heterogeneous formation control of multiple UAVs with limited-input leader via reinforcement learning[J]. Neurocomputing, 2020, 412:63–71.
- [18] YANG Y, YANG H, LIU F, et al. Optimal control of distributed multiagent systems with finite-time group flocking[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2020, 35(9):1416–1432.
- [19] YANG X, WANG W, HUANG P. Distributed optimal consensus with obstacle avoidance algorithm of mixed-order UAVs-USVs-UUVs systems [J]. ISA Transactions, 2020, 107:270–286.
- [20] BAI T T, WANG D B, MASOOD R J. Formation control of quad-rotor UAV via PIO[J]. 中国科学:技术科学英文版, 2022, 65(2):8.
- [21] SHUN S, YU L, GUO S, et al. Observation-driven multiple UAV coordinated standoff target tracking based on model predictive control [J]. Tsinghua Science and Technology, 2022, 27(6):948–963.
- [22] HUANG H, SAVKIN A V, NI W. Decentralized navigation of a UAV team for collaborative covert eavesdropping on a group of mobile ground nodes [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(4):3932–3941.
- [23] HU C, ZHANG Z, TAO Y, et al. Decentralized real-time estimation and tracking for unknown ground moving target using UAVs[J]. IEEE Access, 2019(7):1808–1817.
- [24] 朱创创, 梁晓龙, 孙强, 等. 无人机集群自组织避障建模与控制策略研究[J]. 飞行力学, 2018, 36(1):46–51.
- ZHU Chuangchuang, LIANG Xiaolong, SUN Qiang, et al. Research on self-organized obstacle avoidance modeling and control strategy of UAV cluster[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(1):46–51.
- [25] FANG Y, YAO Y, ZHU F, et al. Piecewise-potential-field-based path planning method for fixed-wing UAV formation [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):2234.
- [26] HUANG Y, J TANG, LAO S. UAV group formation collision avoidance method based on second-order consensus algorithm and improved artificial potential field[J]. Symmetry-Basel, 2019, 11(9):1162.
- [27] WANG N, DAI J, YING J. UAV formation obstacle avoidance control algorithm based on improved artificial potential field and consensus[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2021, 22(6):1413–1427.
- [28] WU Y, J GOU, HU X, et al. A new consensus theory-based method for formation control and obstacle avoidance of UAVs [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 107:106332.
- [29] WU Y, XU S, DAI W, et al. Heuristic position allocation

- methods for forming multiple UAV formations[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 118: 105654.
- [30] 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.
- SHEN Yankai, DUAN Haibin, DENG Yimin, et al. UAV cluster flight verification of passive inertial emergency obstacle avoidance based on pigeon Group[J]. Science China (Information Sciences), 2019, 49(10): 1343–1352.
- [31] LI S, FANG X. A modified adaptive formation of UAV swarm by pigeon flock behavior within local visual field[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 114: 106736.
- [32] BASSOLILLO S R, NOTARO I, BLASI L, et al. Decentralized mesh-based model predictive control for swarms of UAVs[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4324.
- [33] CHEVET T, VLAD C, MANIU C S, et al. Decentralized MPC for UAVs formation deployment and reconfiguration with multiple outgoing agents[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 97(1): 155–170.
- [34] 吕智虎,梁晓龙,任宝祥,等. 基于模糊神经网络的无人机实时避障算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(5): 82–89.
- LYU Zhihu, LIANG Xiaolong, REN Baoxiang, et al. Real time obstacle avoidance algorithm of UAV based on fuzzy neural network[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2021, 22(5): 82–89.
- [35] 徐文钰,敖海跃,刘燕斌. 基于鸽群优化算法的多无人机局部航迹重规划[J]. 战术导弹技术, 2022(1): 46–52.
- XU Wenyu, AO Haiyue, LIU Yanbin. Local path replanning of multiple UAVs based on pigeon swarm optimization algorithm[J]. Tactical Missile Technology, 2022(1): 46–52.
- [36] 孙淑光,孙涛. 基于融合 A* 算法的无人机路径规划研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 82–91.
- SUN Shuguang, SUN Tao. Research on UAV path planning based on fusion A* algorithm[J]. Electronic Measurement-Technology, 2022, 45(9): 82–91.
- [37] 陈博琛,唐文兵,黄鸿云,等. 基于改进人工势场的未知障碍物无人机编队避障[J]. 计算机科学, 2022, 49(1): 686–693.
- CHEN Bochen, TANG Wenbing, HUANG Hongyun, et al. Obstacle avoidance of UAV formation with unknown obstacles based on improved artificial potential field[J]. Computer Science, 2022, 49(1): 686–693.
- [38] 彭皓月,秦小林,侯屿,等. 多无人机航迹规划的自适应 B 样条算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(9): 260–266.
- PENG Haoyue, QIN Xiaolin, HOU Yu, et al. Adaptive B-spline algorithm for multi-UAV track planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(9): 260–266.
- [39] RASTGOFTAR H, ATKINS E. Safe multi-cluster UAV continuum deformation coordination[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 91: 640–655.
- [40] HUANG Y, TANG J, LAO S. Collision avoidance method for self-organizing unmanned aerial vehicle flights[J]. IEEE Access, 2019(7): 85536–85547.
- [41] LIU H, CHEN Q, PAN N, et al. Three-dimensional mountain complex terrain and heterogeneous multi-UAV cooperative combat mission planning[J]. IEEE Access, 2020(8): 197407–197419.

科学编辑 杨继森 博士(重庆理工大学 教授)
责任编辑 唐定国