

# 无人机集群增雨催化路径规划

高育兴

江西省新余市人工影响天气中心, 江西省新余市, 338000;

**摘要:** 本文聚焦于无人机集群增雨催化路径规划问题。在阐述无人机集群用于增雨催化的重要意义基础上, 分析当前路径规划面临的诸如气象条件复杂、多机协同困难等挑战。通过对不同路径规划算法的研究, 如遗传算法、蚁群算法等, 结合实际增雨作业需求, 探讨如何优化路径规划以提高增雨效果和作业效率。同时, 考虑无人机集群的协同作业模式, 提出保障路径规划顺利实施的相关措施。研究结果对于提高人工增雨作业的科学性和精准性具有重要参考价值。

**关键词:** 无人机集群; 增雨催化; 路径规划; 协同作业

**DOI:** 10.64216/3080-1508.25.07.046

## 引言

人工增雨作为缓解水资源短缺、改善生态环境的重要手段, 近年来得到了广泛关注。无人机集群在增雨催化作业中具有独特优势, 可实现多区域、多高度的精准催化。然而, 要充分发挥无人机集群的作用, 合理的路径规划至关重要。路径规划不仅要考虑气象条件、地形地貌等自然因素, 还要解决多机之间的协同配合问题。科学合理的路径规划能够提高增雨效率, 降低作业成本, 减少对环境的潜在影响。因此, 深入研究无人机集群增雨催化路径规划具有重要的现实意义。

## 1 无人机集群增雨催化概述

### 1.1 无人机集群增雨催化的原理

无人机集群增雨催化主要是利用无人机携带催化剂, 将其播撒到云层中合适的位置。云层中的水汽在催化剂的作用下, 加速凝结和碰并过程, 形成更大的水滴, 从而增加降水的可能性和降水量。不同类型的催化剂, 如碘化银、干冰等, 其作用机制有所不同。碘化银可以作为凝结核, 促使水汽在其表面凝结; 干冰则通过降低云层温度, 使水汽快速凝结成冰晶。无人机集群可以根据云层的特征和分布, 在不同高度和区域同时进行催化作业, 提高催化效果<sup>[1]</sup>。

### 1.2 无人机集群增雨催化的优势

相较于传统的增雨作业方式, 无人机集群在增雨催化中展现出显著优势。精准性是其核心亮点, 无人机可灵活深入云层内部, 结合实时气象数据动态调整飞行路径与高度, 将催化剂精准播撒至云层关键部位, 突破了传统地面火箭、高炮难以抵达云层核心区域的局限, 大幅提升催化效果。

在作业范围与效率上, 无人机集群能同时覆盖多个区域, 通过协同作业形成规模化催化网络, 较单架次飞

机或地面设备的单点作业模式, 覆盖面积提升数倍, 作业效率显著提高。

此外, 其环境适应性更强, 受地形与气象条件限制小, 无论是山区峡谷等复杂地形, 还是低云、浓雾等恶劣天气, 都能稳定执行任务, 为复杂环境下的增雨作业提供了全新解决方案, 有效弥补了传统方式在复杂场景中的短板<sup>[2]</sup>。

## 2 无人机集群增雨催化路径规划的挑战

### 2.1 气象条件的复杂性

气象条件作为无人机集群增雨催化作业的核心影响因素, 其动态变化特性给路径规划带来了根本性挑战。云层系统始终处于动态演化中, 厚度的增减、温度的起伏、湿度的波动以及风向风速的瞬时变化, 共同构成了复杂多变的空中环境。不同地域的气象背景差异显著, 即使在同一区域, 短时间内也可能出现气流紊乱、云层形态突变等情况。在不稳定天气系统下, 云层的水平运动速度与垂直发展方向难以通过传统观测手段精准预判, 导致预设的飞行路径与实际云层位置频繁偏离, 直接影响催化作业的精准度。更严峻的是, 强对流天气中可能突发的强风、雷电等极端气象, 不仅会干扰无人机的姿态控制, 还可能对机身电子设备造成损坏, 甚至引发坠机风险, 这要求路径规划必须具备对恶劣气象的提前感知与规避能力。

### 2.2 多机协同的困难

无人机集群作业的高效性依赖于多机之间的紧密协同, 而这种协同在路径规划层面面临多重难题。首先是空间冲突规避, 集群中每架无人机的飞行轨迹需保持安全距离, 避免碰撞事故, 但在复杂气象条件下, 无人机的实际飞行姿态可能因气流干扰发生偏差, 传统的静态路径规划难以应对这种动态偏移。其次是信息交互的

实时性, 集群需要建立高频次的通信机制, 实时共享位置、剩余电量、催化作业进度等状态信息, 但在偏远地区可能面临信号弱、延迟高等问题, 影响协同决策效率。此外, 不同无人机的性能参数存在差异, 如何根据任务需求动态分配催化区域与优先级, 平衡各机的作业负荷, 也是路径规划中需要解决的关键问题。

### 2.3 地形地貌的影响

地形地貌通过改变气流运动规律, 间接影响云层分布与演化, 给路径规划增添了额外复杂度。山区的高低起伏会导致气流在翻越山脊时产生抬升或下沉运动, 使云层在特定区域聚集或消散, 若路径规划未充分考虑这种地形诱导的云层变化, 可能导致无人机到达目标区域时错失最佳催化时机。河流、湖泊等水域会通过蒸发改变局部湿度, 形成独特的小气候, 进一步增加云层状态的不确定性。同时, 地形中的障碍物如高大建筑物、输电线路等, 对无人机的低空飞行构成直接威胁, 需要在路径规划中进行精细化的三维建模, 确保飞行轨迹始终处于安全空域。更重要的是, 地形差异还会导致区域气象条件呈现碎片化特征, 同一集群内的无人机可能面临截然不同的风速、温度环境, 要求路径规划具备针对不同地形单元的个性化调整能力。

## 3 无人机集群增雨催化路径规划算法

### 3.1 遗传算法

遗传算法借鉴生物进化机制, 在集群路径规划中优势显著。它将路径规划转化为多维度优化问题, 通过适应度函数评估路径, 综合飞行距离、催化覆盖度、气象适应性等, 对靠近目标云层且避强风的路径评分更高。初始生成含多条候选路径的“种群”, 路径以染色体编码呈现, 对应飞行节点序列。经选择、交叉、变异操作迭代进化: 选择筛选优质路径, 交叉重组关键节点产生新路径, 变异随机改变节点避免停滞。该算法全局搜索能力强, 能在复杂气象中找到较优解, 鲁棒性好, 但大规模集群规划时计算量大, 易延迟, 需结合并行计算优化。

### 3.2 蚁群算法

蚁群算法模拟蚂蚁觅食协作, 为集群规划提供分布式方案。先将作业区域离散为网格节点, 标记坐标、气象风险值等。“虚拟蚂蚁”从起点出发, 依据节点间信息素浓度和启发式信息选下一站, 信息素浓度高的路径更优。搜索后按路径质量更新信息素, 优质路径增加沉积, 劣质路径因挥发降低浓度, 形成正反馈。对集群, 可通过多蚁群并行搜索分工, 各负责子区域探索, 汇总成全局最优轨迹。其优势是分布式计算适配协同需求,

能动态响应环境, 但收敛慢, 初期易重复搜索低质量路径, 还可能因信息素集中陷入局部最优, 需用自适应挥发系数改进。

### 3.3 其他算法

其他智能优化方法各有侧重。粒子群算法模拟鸟群协作, 将无人机视为“粒子”, 通过跟踪自身与群体最优解调整方向, 收敛快, 适合实时性场景, 但复杂地形下易局部最优。模拟退火算法受固体退火启发, 初期高概率接受较差路径, 随迭代降低概率, 可跳出局部最优, 能优化遗传或蚁群算法的局部解。混合算法成趋势, 如结合遗传算法全局搜索与蚁群算法局部优化, 或用粒子群优化蚁群信息素初始分布, 平衡效率与质量, 适配动态气象和集群协同需求。

## 4 无人机集群增雨催化路径规划的协同作业模式

### 4.1 集中式协同模式

在集中式协同模式下, 有一个中心控制节点负责对所有无人机进行统一的路径规划和任务分配。中心控制节点收集实时的气象数据、无人机状态信息等, 根据这些信息生成最优的路径方案, 并将任务指令发送给每架无人机。每架无人机按照中心控制节点的指令执行任务, 并实时反馈自身的状态信息。集中式协同模式的优点是便于统一管理和协调, 能够保证路径规划的一致性和最优性。但缺点是对中心控制节点的依赖性较强, 一旦中心控制节点出现故障, 整个集群作业将受到影响<sup>[3]</sup>。

### 4.2 分布式协同模式

分布式协同模式下, 每架无人机都具有一定的自主决策能力。无人机之间通过通信网络实时交换信息, 根据自身的状态和周围环境的变化, 自主调整飞行路径。在这种模式下, 没有中心控制节点, 每架无人机都是平等的。分布式协同模式的优点是具有较强的鲁棒性和适应性, 能够在部分无人机出现故障或通信中断的情况下继续完成任务。但缺点是路径规划的一致性较难保证, 需要更复杂的协调机制。

### 4.3 混合式协同模式

混合式协同模式结合了集中式协同模式和分布式协同模式的优点。在作业初期, 由中心控制节点进行全局的路径规划和任务分配, 确保无人机集群的整体作业效率。在作业过程中, 每架无人机根据实时情况进行局部的路径调整, 并与其他无人机进行信息共享和协同。当遇到突发情况时, 无人机可以自主决策, 采取相应的措施。混合式协同模式能够在保证路径规划最优性的同

时,提高集群作业的鲁棒性和适应性。

## 5 保障无人机集群增雨催化路径规划实施的措施

### 5.1 气象监测与预报

构建全域覆盖、高精度的气象监测体系是路径规划精准实施的前提。整合地面观测站、气象雷达、卫星遥感等多元监测设备,形成“地空一体”的数据采集网络,实时捕捉云层厚度、垂直温度梯度、湿度廓线及三维风场等关键参数。引入人工智能驱动的预报模型,通过历史数据训练与实时观测数据融合,提升对短时间内云层移动轨迹、强度变化及极端天气的预判能力,尤其强化对强风、雷电等危险气象的早期预警。建立气象信息快速分发机制,通过专用数据链路将动态气象数据实时推送至无人机控制中心和每架无人机的机载系统,确保集群能根据云层实时位置与演化趋势,动态调整飞行路径,始终锁定最佳催化区域<sup>[4]</sup>。

### 5.2 通信保障

打造稳定可靠的通信网络是实现集群协同作业的核心支撑。采用“主干+备份”的混合通信架构,以远距离无线电通信作为主要传输通道,保障无人机与控制中心的常规指令交互;同步部署卫星通信作为应急备份,解决偏远地区信号覆盖不足的问题,确保极端环境下通信不中断。制定标准化的通信协议,明确位置信息、电量状态、作业进度等数据的传输格式与频率,通过时分复用技术避免多机信息交互时的信号冲突。搭建边缘计算节点,在无人机集群内部实现本地化数据处理与快速响应,减少对远程控制中心的依赖,降低信息传输延迟,提升集群在复杂环境下的协同决策效率<sup>[5]</sup>。

### 5.3 飞行安全保障

建立全流程的飞行安全管控体系是作业顺利开展的底线要求。在路径规划阶段,利用高精度三维地形模型与障碍物数据库,自动规避山脉、高层建筑、输电线路等潜在风险区域,预留充足的安全缓冲空间。为无人机配备多模态避障系统,融合激光雷达、视觉识别与红外传感技术,实现对突发障碍物的实时探测与自主绕飞。搭载冗余设计的动力系统与应急处理模块,在遭遇动力故障或极端天气时,能自动触发迫降程序或返航指令。同时,完善安全管理制度,制定标准化作业流程与应急处置预案,定期开展模拟训练,提升操作人员对突发情况的应对能力;建立无人机身份识别与空域申请机制,与空管部门实时联动,避免与其他航空器发生空中冲突,

全方位筑牢飞行安全防线<sup>[6]</sup>。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

本文对无人机集群增雨催化路径规划进行了深入研究。通过分析无人机集群增雨催化的原理和优势,明确了路径规划的重要性。同时,指出了路径规划面临的气象条件复杂、多机协同困难、地形地貌影响等挑战。研究了遗传算法、蚁群算法等多种路径规划算法,并探讨了集中式、分布式和混合式等协同作业模式。提出了气象监测与预报、通信保障、飞行安全保障等保障路径规划实施的措施。研究结果表明,科学合理的路径规划和协同作业模式能够提高无人机集群增雨催化的效果和效率,为人工增雨作业提供有力支持。

### 6.2 展望

未来,随着无人机技术、气象科学和人工智能技术的不断发展,无人机集群增雨催化路径规划将迎来新的发展机遇。一方面,无人机的性能将不断提高,飞行更加稳定、灵活,能够携带更多的催化剂,为增雨作业提供更强大的支持。另一方面,气象监测和预报技术将更加精准,能够为路径规划提供更准确的气象信息。同时,人工智能算法将不断优化,能够更快速、更准确地找到最优的路径方案。此外,还可以进一步研究无人机集群与其他增雨作业方式的联合应用,提高人工增雨作业的整体效果。总之,无人机集群增雨催化路径规划具有广阔的发展前景,值得深入研究和探索。

### 参考文献

- [1]李有森.大型无人机操控员空情意识胜任力评估方法研究[D].中国民用航空飞行学院,2025.
- [2]王菁.无人机的过程与控制教学思考[J].安徽教育科研,2025,(14):70-72+81.
- [3]李鹏举,毛鹏军,耿乾,等.无人机集群技术研究现状与趋势[J].航空兵器,2020,27(04):25-32.
- [4]赵丽斌.基于无人机的气象数据采集系统设计[J].科技创新与应用,2022,12(25):117-120.
- [5]钟屹林.无人机编队保持及其避障方法研究[D].大连交通大学,2025.
- [6]徐可,赵景怡,冯梦桥.无人机在飞机维护中的应用研究[J].中国设备工程,2025,(12):75-78.

作者简介:高育兴,(1990—),性别:男,籍贯:江西鄱阳,学历:本科,职称:工程师,研究方向:人工影响天气。