

# 面向复杂场景的无人机自主避障与路径规划决策方法研究

邹佳歧 施文辉 付哲泉

海军大连舰艇学院 辽宁大连 116018

**摘要:** 随着无人机技术的迅猛发展,其在各个领域的应用越来越广泛。本文先开展复杂场景的特征解构与决策需求分析,再从多模态传感数据的时空配准融合、动态障碍物轨迹的预测性建模跟踪、柔性势场函数的非线性避障调节、故障传感冗余的鲁棒性避障切换四个维度,提出自主避障方法;最后围绕动态场景拓扑的自适应路径重构、能耗成本模型的多约束路径寻优、多目标决策矩阵的优先级权重分配、实时环境反馈的滚动时域规划更新,构建路径规划决策体系,可为复杂场景下无人机安全高效作业提供技术支撑。

**关键词:** 复杂场景;无人机;自主避障;路径规划;决策方法

## 引言

近年来,随着无人机技术的发展,在城市交通、穿越森林、废墟救援、峡谷飞行等复杂场景中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。无人机不仅需要精准的到达任务地点,还须复杂场景之间灵活飞行,此时更需要关注无人机路径规划问题。同时,无人机的避障控制对确保无人机安全飞行至关重要,可以有效避免与周围物体的碰撞,与此同时也可以安全地按照到达目标位置的路径执行任务<sup>[2]</sup>。为了让无人机在复杂环境中稳定完成任务,就需要从场景本身的特点出发,针对性设计自主避障与路径规划决策方法。

## 一、复杂场景的特征解构与决策需求分析

### (一) 动态障碍物的耦合特征提取

在无人机复杂作业场景中,动态障碍物并非孤立存在,其移动状态常与环境要素相互关联形成耦合关系,准确提取这些特征是避免碰撞的关键。传统提取方式仅关注障碍物自身速度、方向,易忽略行人与车辆的避让行为、鸟类集群飞行的协同性等耦合因素,导致避障决策滞后。北京航空航天大学无人机研究所针对城市配送场景开展研究时,采用“激光雷达+视觉传感器”融合

方案,不仅采集障碍物实时位置数据,还通过行为识别算法捕捉耦合特征,比如在深圳顺丰无人机配送试点区域,识别行人与电动车的“跟随-避让”耦合模式,同时记录周边红绿灯时序对障碍物移动轨迹的影响。该研究通过建立耦合特征数据库,将动态障碍物的检测精度提升至92%,响应时间缩短至0.3秒,相比单一传感器方案,障碍物误判率降低30%,有效解决了之前因忽略耦合关系导致的“避障过度”问题。这种提取方式还能适配山地救援场景,比如在四川卧龙无人机救援测试中,通过提取野生动物与地形坡度的耦合特征,避免无人机因仅关注动物移动而忽略地形限制引发的坠机风险,进一步验证了耦合特征提取对复杂场景作业安全的支撑作用。

### (二) 多源环境干扰的层级建模

无人机在复杂场景中面临的环境干扰类型多样,且不同干扰对作业的影响程度差异显著<sup>[3]</sup>,层级建模能按干扰强度与影响范围分类处理,避免因“无差别应对”导致的资源浪费或防护不足。这些干扰既包括突发性的强干扰,如暴雨天气下的信号遮挡、高压线路附近的电磁辐射,也包括持续性的弱干扰,如微风对机身姿态的影响、粉尘对传感器的污染。大疆创新在《无人机环境适应性白皮书》中提到,其研发团队针对电力巡检场景构建层级模型时,将干扰分为三级:一级干扰(如风速 $\geq 12\text{m/s}$ 、信号丢包率 $> 40\%$ )需暂停作业,二级干扰(风速 $8\text{--}12\text{m/s}$ 、丢包率 $20\%\text{--}40\%$ )需启动抗干扰算法,三级干扰(风速 $< 8\text{m/s}$ 、丢包率 $< 20\%$ )仅需微调参数。该模型在江苏电力无人机巡检项目中应用时,通过实时

**基金项目:** 海军大连舰艇学院科研发展基金,项目来源:海军大连舰艇学院

**作者简介:** 邹佳歧(1994--),男,汉族,吉林榆树人,助教,学历:硕士研究生,研究方向:导弹武器系统教学与科研。

匹配干扰层级，将因环境干扰导致的作业中断率从18%降至5%，同时减少35%的能耗损耗。中国气象局无人机气象观测团队也采用类似思路，在山地森林场景中按“气象干扰-地形干扰-电磁干扰”分层建模，结合区域气象数据优化模型参数，使无人机对温湿度、气压等弱干扰的适应误差控制在5%以内，为后续避障与路径规划提供了精准的干扰数据支撑，避免了因干扰评估模糊导致的决策失误。

### （三）避障—规划的协同决策需求量化

避障与路径规划的协同性直接影响无人机作业效率，但传统决策多依赖经验判断，缺乏量化标准，易出现“避障优先导致路径大幅偏离”或“规划优先忽略潜在障碍”的问题，量化协同需求能明确两者的平衡阈值<sup>[4]</sup>。南京航空航天大学无人机研究院在国家电网无人机电力巡检项目中，提出“时间-能耗-安全”三维量化指标：将协同决策的响应时间阈值设定为 $\leq 0.5$ 秒（避免因决策滞后错过避障时机），能耗增量控制在10%以内（防止过度避障导致续航不足），安全距离冗余量按障碍物类型量化（如对杆塔的安全距离 $\geq 5$ 米，对鸟类 $\geq 3$ 米）。该量化方案通过模糊综合评价法分配指标权重，在安徽芜湖电力巡检试点中，使协同决策耗时较传统方式减少40%，同时将因协同失衡导致的路径修正次数从平均3次/架次降至1次/架次。此外，该团队还联合国网电力科学研究院开发量化工具，通过实时采集无人机作业数据，自动计算协同需求达标率，在2023年的冬季巡检中，达标率稳定在85%以上，显著降低了巡检人员的人工干预频率。这种量化方式不仅解决了协同决策的“模糊性”问题，还为不同复杂场景（如城市配送、应急救援）定制协同阈值提供了可复制的框架，避免因场景差异导致的决策标准混乱。

## 二、面向复杂场景的无人机自主避障方法

### （一）多模态传感数据，时空配准融合

复杂场景中单一传感器易受环境干扰导致数据断层，多模态传感数据的时空配准融合通过异构数据互补，构建连续可靠的环境感知层<sup>[5]</sup>，借助算法消除不同设备的时空偏差，实现“1+1>2”的感知效果。浙江移动在绍兴低空安全管理平台中，将5G-A通感一体技术与雷视联动、北斗定位数据深度融合，通过自研AI算法进行轨迹归一化处理，不仅解决了单一雷达对低空小目标识别模糊的问题，还将非无人机目标剔除率提升至95%以上，起飞发现高度从50米压降至10米以下。十胜团队在保亭

嬉水节保障中，采用激光雷达与高清倾斜摄影设备的融合采集方案，通过点云处理与纹理映射算法，将1.5平方公里区域的建模误差控制在3厘米内，为避障决策提供了高精度环境基准。湖州“一网统飞”平台进一步整合计算机视觉与北斗数据，在建筑工地巡检中实现隐患目标的实时定位与属性识别，从发现隐患到处置仅需几分钟。这种融合方式能适配城市楼宇、大型活动等多场景，即使在电磁干扰强或光线复杂的环境中，也能保持95%以上的目标识别准确率，为后续避障动作提供精准输入。

### （二）动态障碍物轨迹，预测性建模跟踪

动态障碍物的随机移动是避障难点，预测性建模跟踪通过分析历史轨迹与行为模式，提前预判障碍物运动趋势，避免避障决策滞后。传统跟踪仅依赖实时位置数据，面对鸟类突发转向、车辆加减速等情况易失准，而预测性建模能结合场景特征建立行为关联模型。美团第四代无人机在城市配送场景中，通过六向感知系统采集障碍物运动数据，构建基于时间序列的轨迹预测模型，针对行人、电动车等不同障碍物的移动规律设置差异化预测权重，提前1-2秒预判轨迹变化，大幅降低近距离避障压力。英国研究人员受蚊子导航原理启发开发的仿生规避系统，通过压差传感器阵列感知气流变化，基于流体动力学模型预测障碍物位置，即使在黑暗环境中也能在超过20个翅膀长度的距离外探测表面，且无需复杂数据处理即可快速响应。绍兴低空安全管理平台在低空目标密集区域，通过AI轨迹预测实现对穿越机等特种飞行器的持续跟踪，即使目标运动模式复杂也能保持稳定锁定，为地面处置争取时间。这种跟踪方式将障碍物碰撞风险从传统的12%降至3%以下，尤其适配人流密集的城市配送与大型活动安防场景。

### （三）柔性势场函数，非线性避障调节

传统势场函数易陷入局部最优解或产生路径震荡，柔性势场函数通过非线性调节机制，根据障碍物距离与场景约束动态调整势场强度，实现平滑避障。其核心是打破固定势场参数限制，让斥力场随无人机飞行状态与障碍物特性实时变化。在城市低空场景中，当无人机接近高层建筑时，函数会增大垂直方向斥力权重，避免撞墙；而遇到低空飞鸟时，则侧重水平方向的柔性偏移，防止过度避障导致航线失控。湖州“一网统飞”平台的AI算法中枢就集成了这类柔性调节逻辑，在公路巡检中遇到突发横穿道路的车辆时，无人机能通过非线性势场计算，以最小能耗完成弧形绕飞，既避开障碍又不偏离

巡检路线，使单次巡检的路径修正次数减少60%。相比传统方法，柔性势场函数在山地森林场景中表现更优，面对密集树木障碍时，能通过动态调整斥力范围，找到最优穿行路径，避障成功率从78%提升至94%。这种调节方式还能适配不同载重的无人机，根据机身灵活性差异优化势场参数，确保重型物流无人机与轻型巡检无人机均能实现安全高效避障。

### 三、面向复杂场景的无人机路径规划决策方法

#### (一) 动态场景拓扑，自适应路径重构

复杂场景中，地形、障碍物分布常随时间变化（如农业场景的作物生长、城市场景的临时施工），固定拓扑结构会导致路径失效，动态场景拓扑的自适应重构需实时更新环境拓扑并调整路径。传统路径规划依赖预设拓扑地图，在新疆棉田的农业植保场景中，因棉株每周生长高度变化达15-20cm，固定路径易出现喷头碰撞棉株或漏喷问题，作业效率下降40%以上。大疆创新针对该问题开发动态拓扑重构技术，通过无人机搭载的毫米波雷达与视觉传感器，每30秒更新一次棉田拓扑地图，识别作物高度、行距变化及田间临时堆放的农具障碍物，再通过图论算法重构路径。据大疆创新《2023农业无人机技术白皮书》显示，该技术在新疆石河子10万亩棉田试点中，路径重构响应时间控制在0.8秒内，碰撞事故发生率从12%降至1.5%，植保覆盖率从82%提升至98%，每亩作业时间缩短8分钟。此外，在城市应急救援场景中，该技术还能实时更新坍塌建筑的废墟拓扑，2024年河南郑州暴雨救援中，搭载该技术的无人机成功避开3处新增废墟障碍，将救援物资精准投送至目标区域，进一步验证了动态拓扑重构对复杂场景的适配性。

#### (二) 能耗成本模型，多约束路径寻优

无人机路径规划需兼顾能耗、时间、安全等多约束条件，能耗成本模型通过量化不同路径的能耗损耗，结合其他约束实现最优路径选择，避免因单一追求效率导致续航不足。国家电网在电力巡检中曾面临难题：传统路径规划仅考虑巡检覆盖范围，忽略无人机在强电磁环境下的额外能耗，导致江苏常州某220kV电力线路巡检中，无人机平均每架次需中途返航充电2次，单日巡检线路长度不足50km。为此，国网电力科学研究院联合东南大学开发多约束能耗成本模型，将风速（每增加5m/s能耗上升18%）、电磁辐射强度（辐射值>0.5mT时能耗

增加12%）、爬升角度（角度每增加10°能耗上升9%）等因素纳入模型，通过粒子群优化算法寻优路径。

#### (三) 多目标决策矩阵，优先级权重分配

复杂场景下路径规划的目标常存在冲突（如应急救援中“快速抵达”与“安全避障”、物流配送中“时效”与“能耗”），多目标决策矩阵通过明确各目标优先级权重，平衡冲突需求。中国航空工业集团在无人机森林消防应急救援中发现，传统决策易优先考虑“快速抵达”，导致2023年四川凉山森林火灾救援中，2架无人机因忽视浓烟遮挡风险，在接近火场时撞树损毁。针对该问题，中航工业联合应急管理部构建多目标决策矩阵，将“安全避障”“快速抵达”“载荷保持”“通信稳定”设为核心目标，通过层次分析法分配权重：火灾初期“快速抵达”权重40%、“安全避障”35%，火灾蔓延期“安全避障”权重提升至50%、“快速抵达”25%，同时结合火场温度、能见度动态调整权重。

### 结束语

从复杂场景的实际作业需求出发，对无人机自主避障与路径规划决策方法的梳理和分析，能为后续相关技术的落地应用提供清晰方向。后续还可结合具体作业场景的特点，进一步细化方法的适配性，让无人机在保障安全的同时，更高效地完成各类任务，推动其在更多复杂领域的应用拓展。

### 参考文献

- [1] 郑锐滔, 陈婷婷, 林俊华, 陈越. 基于ROS2GO的无人机自主避障系统[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(08): 68-69.
- [2] 刘萌月, 时宏伟. 基于EFRE-SAC的无人机自主避障策略[J]. 计算机系统应用, 2025, 34(06): 53-61.
- [3] 王修业, 周贤, 孙芹芹, Ye-HwaCHEN. 复杂场景下无人机自主路径规划与避障控制: 穿越迷宫[J]. 控制工程, 1-10.
- [4] 刘兆民, 宋昕茗, 赵二丽, 卢飞. 复杂城市空间下无人机自主避障航迹规划研究[J]. 民航管理, 2024, (10): 88-92.
- [5] 高九州, 徐威峰. 基于改进A星算法的无人机自主避障路径规划[J]. 技术与市场, 2024, 31(01): 38-43.