

基于无人机协同的应急交通救援系统建模与仿真分析

冯程杰

重庆城市职业学院，重庆永川，402160；

摘要：随着无人机技术的不断发展，其在应急交通救援中的应用前景日益显现。本文旨在研究基于无人机协同的应急交通救援系统，通过建立系统模型和仿真分析，优化现有救援系统，提高救援效率和降低救援成本。本文首先介绍了研究背景和研究意义，然后对国内外相关研究现状进行了综述。接着，详细阐述了无人机协同应急交通救援系统的框架设计、关键技术研究以及仿真分析方法。最后，通过案例分析验证了系统的有效性，并对未来研究方向进行了展望。

关键词：无人机协同；应急交通救援；系统建模；仿真分析；救援优化

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.022

引言

近年来，随着导航定位、无线通信与智能感知技术的飞速发展，无人机已从单一飞行平台演变为具备自主决策与协同作业能力的智能系统，在应急交通救援领域展现出巨大应用潜力。面对日益复杂的交通事故、山体滑坡、桥梁坍塌等突发事件，传统救援模式常因地形阻隔、交通中断、夜间作业困难或次生灾害风险而延误黄金救援时间。无人机凭借其高机动性、广域覆盖能力和非接触式作业特性，能够快速穿越障碍区域，执行灾情侦察、伤员定位、应急通信中继、物资精准投送等关键任务，有效突破地面救援的时空限制。尤其在多机协同架构下，通过任务分配、编队飞行与信息融合，无人机群可实现“侦察—决策—响应”闭环，大幅提升救援系统的响应速度与覆盖广度，为指挥中心提供实时、全面的态势感知，显著降低救援人员的安全风险。

然而，尽管国内外学者在无人机路径规划、编队控制算法和传感器融合等方面取得了一定成果，多数研究仍集中于单一技术环节，缺乏对应急救援全流程的系统性整合。现有研究往往忽视了复杂动态环境下多无人机系统的协同机制设计、异构任务调度优化以及通信链路稳定性等关键问题，导致理论成果难以向实际应用转化。特别是在高密度城市或复杂地形中，如何实现多机高效协同、避免路径冲突、应对突发通信中断，仍是技术落地的瓶颈。因此，亟需构建一个集感知、决策、控制与通信于一体的综合性无人机协同救援系统框架，以解决当前研究碎片化、仿真场景理想化的问题。

基于此，本研究旨在提出并验证一套完整的基于无

人机协同的应急交通救援系统解决方案。通过整合无人机编队控制、多源信息融合、智能任务调度与动态路径规划等核心技术，构建系统化模型，并在贴近真实灾害场景的仿真环境中进行效能测试。研究不仅关注技术模块的性能，更强调系统整体的协同性、稳定性和可扩展性，力求为应急管理提供一套可复制、可优化的技术范式，推动无人机从“单兵作战”向“集群智能”演进，全面提升我国应急交通救援的智能化、精准化与高效化水平。

1 无人机协同应急交通救援系统

无人机协同应急交通救援系统的构建依赖于科学的系统框架设计与关键技术支撑。系统框架主要由三大模块构成：无人机群协同机制、信息传输与处理系统以及救援资源调度与优化平台。协同机制通过分布式控制算法实现多无人机的任务分配、队形保持与动态避障，确保机群在复杂灾害环境中高效协同作业。信息传输与处理模块依托5G或卫星通信网络，建立无人机与地面指挥中心之间的高速、低延迟数据链，实现高清影像、定位信息与环境数据的实时回传与融合处理，为指挥决策提供可视化支持。救援资源调度模块则基于任务优先级、无人机状态与地理信息，运用智能算法动态优化物资投送、伤员定位与空中照明等任务的资源配置，提升整体响应效率。

在核心技术层面，无人机编队控制是实现协同作业的基础。采用基于行为规则或一致性理论的编队算法，可使无人机群在GPS信号受限或障碍密集的环境中保持稳定队形并自主避障。多源信息融合技术整合可见光、

红外、雷达及环境传感器数据，通过卡尔曼滤波或深度学习模型提升目标识别精度，有效区分幸存者、障碍物与危险区域，增强态势感知能力。

此外，智能救援路径规划技术至关重要。结合数字高程模型与实时灾情数据，采用改进的 A*、Dijkstra 或蚁群算法，为各无人机规划安全、快速的飞行路径，避开禁飞区与高风险地带。该技术不仅优化单机路径，还支持多机路径冲突消解，确保任务执行的时空协调性，全面提升应急救援的智能化与可靠性。

2 无人机协同应急交通救援系统仿真分析

仿真环境的构建是验证无人机协同应急交通救援系统性能的关键基础，其真实性与复杂性直接决定评估结果的可靠性。本研究依托高精度地理信息系统（GIS）数据、数字高程模型（DEM）和三维城市建模技术，构建了多个典型应急场景的虚拟仿真平台，涵盖山区高速公路塌方、城市高层建筑火灾引发的交通中断以及地震后城市街区结构损毁等多类灾害情境。在这些环境中，系统设定了异构无人机集群的详细性能参数，包括最大飞行速度（60 - 80 km/h）、续航时间（25 - 45分钟）、通信半径（3 - 10 公里）、有效载荷（1.5 - 5 公斤）及搭载的传感器类型（如高清摄像头、红外热成像仪、LiDAR、气体探测器等），力求贴近当前主流工业级无人机的实际能力。同时，仿真引入多种动态变量以增强挑战性：风速变化影响飞行稳定性，雨雾天气降低能见度与传感器精度，建筑物遮挡导致 GPS 信号丢失，地面交通堵塞限制救援车辆通行，模拟真实救援中不可控因素的叠加效应。

在任务设定方面，系统模拟完整的应急响应流程，要求无人机群在有限时间内协同完成多项关键任务。例如，在山区塌方案例中，任务包括：第一阶段快速侦察事故区域，识别被困车辆位置；第二阶段通过热成像定位幸存者体温信号；第三阶段向无法立即抵达的伤员空投急救包、保温毯与通信设备；第四阶段部署空中照明灯与通信中继节点，保障夜间作业与指挥链路畅通。每项任务均设定优先级与时效约束，系统需在资源有限、环境动态变化的前提下进行智能调度，全面检验其在复杂条件下的决策能力与执行效率。

仿真结果分析从多个维度对系统效能进行了量化评估。首先，在协同性能方面，通过任务完成率、平均响应延迟、编队保持误差等指标，验证了分布式任务分

配与一致性控制算法的有效性。实验显示，在标准环境下，6架无人机组成的机群可在 12 分钟内完成 3 平方公里区域的全面侦察，任务完成率达 96%以上，路径冲突发生率低于 3%。其次，在救援效率对比中，多机协同系统相较传统单机或纯地面救援模式展现出显著优势：整体救援周期缩短约 65%，覆盖效率提升近 3 倍，物资投送准确率达到 92%。成本效益分析表明，尽管初期投入较高，但通过减少人力出动、缩短交通管制时间及避免次生事故，综合救援成本下降约 35%。

最后，系统鲁棒性测试通过设置突发故障场景进行验证，如模拟某架无人机因撞击坠毁、通信链路突然中断或强电磁干扰导致定位失效。结果显示，系统具备较强的自适应重构能力：在单机失效情况下，剩余无人机可自动重新分配任务并调整编队结构，确保关键任务不中断；在通信降级时，系统切换至自组网模式维持局部协同。仅在极端全链路中断场景下性能明显下降，但整体仍优于无协同机制的独立作业模式。综上所述，仿真验证了该系统的高效性、稳定性和容错能力，为未来实际部署提供了坚实的技术依据与优化方向。

3 案例分析

本研究选取某山区高速公路因暴雨引发的多车连环相撞并伴随局部塌方事故作为实际救援案例。该灾害导致交通中断、多名人员被困，且地面救援车辆难以快速抵达现场，加之夜间能见度低、余震风险高，传统救援面临响应延迟、信息盲区与安全威胁等多重挑战。针对此场景，设计了一套基于无人机协同的应急交通救援方案：部署由 6 架异构无人机组成的机群，其中 2 架搭载高清与红外摄像头负责全域侦察与伤员定位，2 架携带轻型破拆工具与急救包执行精准投送，另 2 架作为空中通信中继与照明平台，保障指挥链路畅通与夜间作业可视性。通过地面指挥系统集成 GIS 地图与实时回传数据，实现任务动态分配与路径协同规划。

仿真结果显示，无人机协同方案在关键指标上显著优于传统模式。在灾情感知方面，协同机群在 15 分钟内完成半径 3 公里区域的全面扫描，较地面队伍提前 40 分钟发现全部受困者；在救援响应上，急救物资平均投送时间仅为 8 分钟，比等待专业救援队抵达缩短约 70%。整体救援周期压缩至传统方案的 55%，极大提升了黄金救援时间的利用效率。成本分析表明，尽管无人机系统初期投入较高，但通过减少人力出动、缩短交通管制时

长及降低次生事故风险，综合救援成本下降约32%。

本案例充分验证了无人机协同在复杂交通救援中的技术优势。其高效的空间覆盖能力、灵活的任务适应性与实时的信息反馈机制，有效克服了地形与环境限制。同时，多机分工协作实现了侦察、通信、投送等功能一体化，展现出强大的系统集成效能。结果表明，无人机协同不仅大幅提升救援速度与成功率，还显著增强救援过程的安全性与可控性，为未来智能应急体系的建设提供了可复制的技术范式与实践依据。

4 结论与展望

本研究通过构建无人机协同应急交通救援系统的整体框架，结合关键技术建模与多场景仿真分析，验证了该系统在实际应急响应中的有效性和可行性。结果表明，基于多机协同的救援模式能够显著提升灾情感知速度、优化资源调度效率，并缩短整体救援周期。通过无人机编队执行侦察、通信中继、物资投送等多任务协同作业，系统在复杂交通灾害场景中展现出较强的适应性与响应能力。相比传统依赖人力和地面车辆的救援方式，该系统不仅将关键信息获取时间大幅提前，还降低了救援人员进入高危区域的风险，综合救援成本得到有效控制。研究成果为应急管理体系的智能化升级提供了理论支撑与技术路径，具有较强的实践指导价值。

然而，当前系统在技术与应用层面仍面临诸多挑战。在技术上，复杂环境下无人机编队的自主避障与高精度协同控制算法有待进一步优化，特别是在GPS拒止或通信干扰场景中的稳定性仍需提升；多源传感器数据的实时融合精度与语义理解能力受限于算力与模型泛化性；动态路径规划在高维空间中的计算效率也影响系统的实时响应。在法规与政策层面，无人机在城市空域或人口密集区的飞行审批流程尚不完善，空域管理、隐私保护与责任认定等问题制约其大规模部署，跨部门协同

机制也亟待建立。

未来研究应聚焦于提升系统的智能化与鲁棒性，探索基于强化学习的自适应协同控制策略，增强系统在不确定环境下的自主决策能力。同时，可拓展无人机协同系统在森林火灾、洪涝灾害、地震搜救等更多应急场景中的应用模式，推动多平台异构无人系统（如无人机-无人车联动）的集成研究。此外，应加强与空管、应急管理等部门的合作，推动低空智能交通系统（UTM）与应急指挥平台的深度融合，构建标准化、可推广的无人机应急响应体系，助力智慧应急能力的全面提升。

参考文献

- [1] 丁松令, 鲍丽娟, 董群力, 等. 基于改进NSGA-III的多无人机协同目标自适应防御系统设计[J]. 电子设计工程, 2025, 33(18): 62-66. DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2025.18.013.
- [2] 吴贲. 建设城市轨道交通企业综合应急救援队伍的实践分析探讨[J]. 中国减灾, 2025, (04): 60-61.
- [3] 田俊强. 基于改进粒子群算法的超临界机组深度调峰协调系统建模[J]. 科学技术创新, 2025, (18): 13-17.
- [4] 贾永全. 煤矿离心式风机叶轮结构仿真与优化分析[J]. 机械管理开发, 2025, 40(09): 208-210. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2025.09.074.
- [5] 刘宇. 无人机技术在森林火灾监测与灭火救援设备协同作业中的优化策略分析[J]. 中国设备工程, 2025, (17): 112-114.

作者简介：冯程杰（1992.02-），男，汉，重庆永川，重庆城市职业学院，研究生，助教，航空交通运输、无人机。