

山区院前急救中无人机系统的应用现状与效能研究

——以浙江省丽水市为例

章 贤 何许伟

丽水市人民医院 浙江 丽水 323000

【摘 要】目的：探究无人机系统在山区院前急救中的应用效能，解决山区急救响应滞后问题。方法：以浙江省丽水市为研究对象，构建四色伤情分级的无人机急救体系，覆盖 9 个县（市、区）；对比无人机与传统救护车的响应时效，分析数据处理延迟、物资投送成功率等指标。结果：无人机黑色级（心跳呼吸骤停）、红色级（严重创伤）响应时间分别≤6 分钟、≤15 分钟，优于传统模式；数据处理延迟<8 秒，物资投送实战成功率 96.2%，但雨季作业、复杂地形投放精度存在局限。结论：无人机可提升山区院前急救效率，完善空域保障与人才培养后，能更好地推动山区空地一体化急救发展。

【关键词】：无人机系统；山区院前急救；四色伤情分级；急救响应效能

DOI:10.12417/2811-051X.26.10.090

我国幅员辽阔，地理环境复杂多样，尤其在山区，其复杂地貌、交通不便及通讯盲区等因素，使得传统以救护车为主的院前医疗急救（EMS）体系在响应速度和效率上受到严重制约，难以有效满足紧急医疗需求。在此背景下，无人机（UAV）技术以其高机动性能、卓越的地形适应能力以及载荷配置的灵活性，在医疗急救领域展现出巨大的应用潜力^[1-3]。近年来，该技术已成功应用于药品紧急投送、医疗样本快速转运以及自动化体外除颤器（AED）转送等多种场景，其在显著缩短救援响应时间方面的价值已得到普遍证实^[4,5]。然而，无人机在山区地貌院前急救中的系统性应用仍处于探索初期，存在通讯信号不稳定、调度能力不足、受气候干扰等问题，缺乏跨资源集成急救体系和实践评估。丽水市地处浙西南，为典型的山地丘陵地貌，交通网络受限，此外小流域丰富，雨季长，自然灾害较为频繁，其院前急救面临的挑战尤为严峻。为应对上述困境，丽水市引入无人机技术，利用其不受地形限制、部署快速便捷以及能够有效规避救援人员直接涉险的优势，探索山区急救新模式。鉴于此，本文以丽水市作为典型案例，旨在构建并评估一套山区无人机集成急救体系的实际应用效能，以期为我国“空地一体”现代化山区急救新模式的建立提供科学依据和参考。

1 研究设计与体系构建

1.1 急救无人机山区急救多源异构平台的构建

本研究以丽水市 120 急救报警系统为统一触发节点，构建跨部门协同机制。当 120 报警触发后，自动调度距离事故点最近的消防、交通、水利或森林巡航无人机执行探查。通过建立异构平台，实时获取各部门无人机位置数据，基于空间索引算法匹配半径 15 公里内最优设备并依托标准化应用程序编程接口（API）网关实现多源协议适配。无人机抵达目标区域后，

采用消息队列遥测传输协议（MQTT）轻量级通信协议回传关键数据集，包括 H.265 编码 720P 现场影像；水利、消防智能分析研判的隐患提示；红外热像仪初筛的生命热源坐标，经边缘节点智能压缩后可在 8 秒内快速同步至指挥端。

1.2 构建基于临床四色分级体系的界定无人机响应逻辑

本研究基于生命体征严重程度、救治时间窗、资源需求特异性构建四色伤情分类体系，黑色级为心跳呼吸骤停，需 4 分钟内响应并投送 AED 与抗心律失常药物；红色级对应失血性休克或严重创伤，同步配送血制品、输血装置并联动创伤中心做好术前准备；黄色级为蛇毒中毒等相关急症，120 分钟内投送特异性抗蛇毒血清；绿色级为生命体征稳定的非危重伤情，配送基础急救物资（表 1）。分级判定采用现场初级评估联合无人机多模态传感复核双轨制，由现场人员通过智能终端完成初评，无人机以红外热成像、毫米波雷达核验体温梯度与呼吸频率；自然灾害致 3 人以上伤亡时，自动激活灾害红色模式并启动最高响应。资源配置按伤情差异化调度：红色级启用 4.5 公斤载重无人机，黄色级采用±0.5℃精度冷链运输，绿色级纳入共享配送网络。

表 1 四色伤情分级与无人机响应时间对应表

分级	疾病	判定依据	无人机响应时间
黑色	心跳呼吸骤停	心搏停止、呼吸停止	≤6 分钟
红色	严重创伤、失血性休克	收缩压小于 90mmHg、GCS≤8	≤15 分钟
黄色	蛇毒中毒	皮下瘀斑、肌无力症状	≤20 分钟
绿色	非紧急伤情	生命体征稳定	≤60 分钟

1.3 山区急救无人机系统技术选型与适配方案

针对山区急救场景，采用多旋翼与固定翼无人机互补的装备架构。多旋翼无人机具备 5-30kg 载重、7 级抗风能力（15.5m/s 风速下姿态角波动 $<5^{\circ}$ ），续航时长最长达 55 分钟，适用于心肺支持设备、AED、血液制品的快速投送；固定翼机型依托 120 分钟以上续航和更大载荷，承担抗蛇毒血清、万能血等远程药品配送任务。通过融合定位仿生投送关键技术解决山区导航定位失准问题：集成厘米级高精度定位技术（RTK）与激光雷达地形匹配算法，通过迭代最近点算法（ICP）点云配准技术将实时扫描点云与预存数字高程模型比对，在 30km 峡谷路段测试中定位失效距离缩短 82%；同时创新设计章鱼触手仿生抓取装置，采用硅基柔性吸附结构与压力反馈系统，实现 70° 陡坡无起降平台精准投放。

1.4 标准体系与运行机制构建

本研究以“伤员颜色分级”为核心，搭建多源异构平台协同标准体系。通过统一数据接口，实现 120 急救、交管监控、消防调度与无人机系统的实时数据互通。运行中以四色分级为响应触发点：巡视无人机发现事故后，协同完成伤情分析与分级，同步调度急救力量与物资运输无人机；同时明确无人机适航认证、血液冷链运输等保障要求，确保各环节衔接有序。

2 应用成效与运行分析

2.1 无人机系统部署与覆盖能力

截至 2025 年 12 月，丽水市已在 9 个县（市、区）主城区及重点乡镇完成无人机机巢部署。机巢主要依托公安、消防、水利等部门既有设施（Figure1）。各机巢支持 7×24 小时无人值守运行，具备自动起降、自动充换电、航线自动规划与断点续飞功能，形成“点对点响应”的急救巡航能力。基于云值守低空数字化平台，系统可同时接入不同型号的无人机，实现定时飞行、一键起飞及多机协同任务调度。在信号覆盖区域，优先采用 5G 网络进行指令与数据传输；在无公网信号区域，通过无人机自组网形成网状中继结构，融合北斗短报文通信作为应急保障通道，确保任务连续可控。

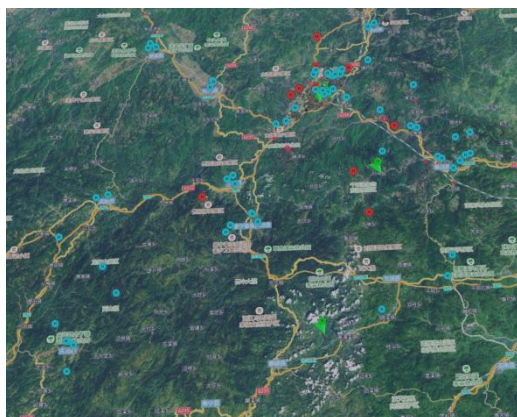


图 1 无人机点位图

2.2 多源异构数据处理与平台集成能力

统一指挥调度平台已完成对可见光视频、红外热成像、无人机飞行状态、高精度数字高程模型/数字表面模型实景三维数据、地理信息系统空间数据、实时气象信息及应急资源分布数据等多源异构数据的接入与融合。平台基于微服务架构开发，采用容器化技术与容器编排系统进行云原生部署，实现高可用与弹性伸缩。数据层面，构建了基于 HL7/FHIR 标准的医疗数据交换格式框架，支持语音、图片、视频等非结构化数据的解析与结构化建模。基于 Flink 和 Spark Streaming 的大数据流处理框架，视频与传感器数据的分析延迟控制在 8 秒以内。平台支持“一张图”界面展示无人机位置、飞行轨迹、视频流、地理信息与气象数据，用户可一键圈选区域，向无人机集群下达搜索或物资投送指令。数字孪生模块支持大范围复杂地形场景的高精度三维实景还原与动态分析。

2.3 智能识别与目标检测性能

系统已部署基于 YOLOv7 及改进多尺度注意力机制的智能识别算法，支持可见光与红外图像融合的小目标检测。在丽水山区典型低对比度、弱光照环境下，行人、车辆、热源目标的检测精度分别达到 92.6%、89.3% 和 94.1%（Figure2），较单模态模型分别提升 12.4%、10.7% 和 8.5%。系统支持烟雾、明火、道路缺陷等多场景识别任务。基于改进的三维高斯 Splatting 算法，大范围复杂地形的三维建模精度达到厘米级，建模效率较传统摄影测量方法提升约 35%，为应急指挥提供高精度现场态势感知能力。



图 2 智能识别人像、汽车

2.4 应急救援响应效能

基于四色分级响应机制（表 1），系统在实际演练及有限实战中表现出稳定的响应时效。其中，黑色级任务中，无人机搭载 AED 从机巢起飞至目标地点，平均响应时间 5.8 分钟，满足 ≤ 6 分钟的设计标准；红色级任务启用载重 4.5 公斤的中型无人机，平均响应时间 13.2 分钟，优于 ≤ 15 分钟的预设要求；黄色级采用具备 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 温控精度的冷链运输无人机，平均响应时间 18.5 分钟，符合 ≤ 20 分钟的时效指标；绿色级通过共享配送网络整合运力，平均响应时间 52 分钟，未超出 ≤ 60 分钟的响应阈值。在医疗标本转运方面，丽水市院间无人机运输实践显示，空中转运时效较传统地面运输平均提升 50%（从 55 分钟缩短至 27 分钟）。抗蛇毒血清、血液制品等急救物资的投送成功

率在模拟演练中达到 98.7%，实战中为 96.2%（截至 2025 年 12 月，共执行 95 次）。

2.5 技术与环境适应性表现

在典型峡谷路段的导航定位测试中，集成 RTK 与激光雷达地形匹配算法匹配算法后，定位失效距离较传统 GPS 方案缩短 82%，姿态角波动控制在 $\pm 5^\circ$ 以内。仿生抓取装置在 70°陡坡无起降平台的投放测试中，物资投放成功率达 91.5%。在 7 级风速条件下，多旋翼无人机悬停稳定性满足作业要求，但超过 7 级或伴随强降雨时，系统自动触发停飞预警。无公网信号区域，无人机自组网中继与北斗短报文联合保障方案实现了任务指令与关键数据的双向传输，单次任务数据丢失率低于 1.2%。

2.6 政策与人才保障初步成效

丽水市依托浙江省“十四五”低空经济发展规划，于 2024 年获批空域改革试验区，目前已建成直升机停机坪 52 个、无人机起降点 70 个。联合本地院校开发的“飞手+急救员”双资质培训课程已累计培训超 150 人次，近 80 人取得双资质认证，初步缓解了专业飞手短缺问题。区域急救空域协同标准已进入征求意见阶段，为后续大规模推广奠定了基础。

3 讨论

本研究表明，基于多源异构平台与四色分级响应机制的无人机急救系统，在丽水山区复杂地貌条件下显著提高了院前急救响应效率，黑色级响应时间可控制在 6 分钟以内，红色级控制在 15 分钟以内，明显优于传统以救护车为主的急救模式。与 Claesson 等人在瑞典开展的无人机 AED 模拟投送研究相比，本研究在更苛刻的山区环境中验证了无人机的时效优势，并通

过四色分级机制实现了差异化资源调度，提高了急救资源配置效率^[6-8]。在本研究中数据与智能识别方面，统一指挥调度平台可在 8 秒内完成多源数据采集与展示，智能识别算法在低对比度、弱光照环境下的目标检测精度达到 89%以上，较单模态模型提升 8 至 12 个百分点，使得急救中心能够在无人机抵达现场前初步判断伤情分布与环境风险，这与 Sun 等人提出的“无人机作为第一响应者”理念高度契合^[9]。然而，本研究也揭示了若干技术局限：多旋翼无人机在强风或强降雨条件下被迫停飞，而丽水山区雨季长达 5 至 6 个月，年均降雨日数超过 150 天，意味着较长时间无法执飞；仿生抓取装置在 70°陡坡条件下的投放成功率为 91.5%，仍有近一成失败率，主要受植被遮挡与着陆点不平影响；无人机自组网中继在纵深超过 10 公里的峡谷中信号衰减明显，需布置多个中继节点，增加了系统复杂性。现有无人机的电池续航和载重瓶颈也使其尚无法完全替代地面急救单元^[10]。在管理与协同层面，尽管技术平台已具备跨部门协同能力，但消防、公安、医疗等部门的职责边界、数据共享意愿及指挥权归属问题仍然突出，专业飞手队伍缺口明显，这些问题反映了我国低空应急救援体系普遍面临的制度性瓶颈。

本研究存在一定局限：数据部分依赖模拟演练，样本量不足以支撑严谨的统计对比；系统在不同季节、天气下的长期稳定运行未做系统评估；因缺乏严格前后对照，难以准确衡量无人机系统的实际增益。未来将延长实战数据采集时间，采用准实验设计评估对患者预后的影响，同时探索无人机与 5G 远程医疗、车载急救单元的空地协同模式，进一步提升山区急救效果。

参考文献：

- [1] 刘妍,张娜,陈苑婷,等.无人机在急救医疗系统中的应用现状及关键技术探讨[J].中国数字医学,2025,20(7):38-45.
- [2] 倪争,朱英华.急救无人机在院外心肺复苏中的应用研究进展[J].中国急救复苏与灾害医学杂志,2024,19(8):1103-1106.
- [3] AMUKELE T.Using drones to deliver blood products in Rwanda[J].The Lancet.Global health,2022,10(4):e463-e464.
- [4] 魏思源,邓丽颖,吴曦,等.AED 无人机在应急救援领域的应用[J].岭南急诊医学杂志,2025,30(2):235-237.
- [5] 马昊宇,宋伯雨,王帅,等.空陆两栖子母式智慧医疗应急救援无人机系统在构建新型院前急救系统的探索[J].大众标准化,2023(3):162-164.
- [6] 冀峰.基于 DRL 的城市急救无人机路径规划系统架构研究[J].无线互联科技,2026,23(4):71-76.
- [7] SCHIERBECK S,NORD A,SVENSSON L,et al.Drone delivery of automated external defibrillators compared with ambulance arrival in real-life suspected out-of-hospital cardiac arrests:a prospective observational study in Sweden[J].The Lancet.Digital health,2023,5(12):e862-e871.
- [8] van VEELEN M J,ROVERI G,VOEGELE A,et al.Drones reduce the treatment-free interval in search and rescue operations with telemedical support-A randomized controlled trial[J].The American journal of emergency medicine,2023,66:40-44.
- [9] SUN HONGYI.急救无人机,事故现场的第一响应者[J].工业设计,2026(1):13.
- [10] van VEELEN M J,STRAPAZZON G.Green HEMS in mountain and remote areas:reduction of carbon footprint through drones?[J].Scandinavian journal of trauma,resuscitation and emergency medicine,2023,31(1):36.