

面向低空经济的高速公路路空协同应急抢险体系研究

熊 静

云南省交通投资建设集团有限公司保山管理处分公司 云南 保山 678000

【摘 要】：云南山区高速桥隧密布、气象复杂，地面救援局限性突出。本文依托低空经济发展背景，围绕政策标准、基建资源、技术应用、场景机制、组织管理、效益路径六大维度，以无人机与 AI 勘测技术为核心，识别路空协同抢险风险，搭建完整运行体系并配套量化评估模型。方案适配本地峡谷路网与空域管控条件，盘活现有巡检无人机，缩短应急处置时长，规避高危人工勘查难题，为西南山区高速低空应急提供参考。

【关键词】：低空经济；高速公路；路空协同；应急抢险

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.019

引言

云南山区高速地形崎岖、极端天气频发，道路阻断会大幅拖慢地面救援效率。当前无人机与 AI 技术已逐步投入交通应急，但滇西区域仍缺少标准化路空协同抢险体系，存在协同风险高、巡检资源有限等问题。本文结合本地交通、空域数据，借鉴行业政策与各地实践，搭建一体化路空协同应急抢险体系，弥补山区高速空地联合救援的短板。

1 政策法规与标准体系研究

1.1 宏观政策层面

国内多项交通领域顶层规划文件，明确立体交通融合发展的建设方向，为高速公路低空应用、路空协同作业提供政策支撑。新版《民用航空法》新增低空经济发展相关章节，界定 300 米以下低空空域分级管控规则，明确低空作业合规范围，消除山区高速无人机常态化应急作业的空域制度阻碍，地方应急场景空域报备简化工作也拥有明确的上位法依据^[1]。

1.2 标准规范层面

低空经济相关国家级设计、运维标准持续完善，可为路空协同体系架构搭建、功能模块设置、协同作业逻辑提供统一技术依据。无人机实名登记、设备运维等强制性国标落地实施，规范低空设备准入及日常管理，为高速公路规模化无人机作业筑牢安全根基。高速低空应急专项标准仍存在空白，结合云南山区地形、气象特点，细化无人机起降场地建设、空地调度、设备选型、航线规划、安全防护等专项技术要求，可完善山区高速低空作业标准体系。

1.3 地方立法实践

国内多个低空经济发展先行区域已出台地方性管理规范，搭建多主体协同管理模式，空域分级开放、跨部门联合审批、应急空域绿色通道等机制积累大量可复用经验。云南结合本地高山峡谷路网特征与空域管控实际，借鉴先进地区落地经验，简化应急抢险场景空域报备流程，搭建交通、空管、应急管理部门常态化协同机制，能够为本地高速路空协同应急工作落地提供制度保障。

2 基础设施与资源协同研究

云南山区高速路网分布零散，地形作业条件受限，盘活路域现有存量基础设施，搭建轻量化低空应急保障网络，是贴合本地实际的落地方式。

2.1 存量资源盘活

国内高速公路沿线分布大量服务区、通信塔、供电设施，多数设施仅用于基础运维，资源利用效率偏低。云南高速沿线服务区空地、养护工区、收费站、隧道管理站广场等平整场地，可改造为无人机应急起降点位，依托现有通信、供电设备搭建低空调度、能源补给节点，无需新增建设用地即可完成低空应急保障能力搭建，实现存量路域资源的高效复用。

2.2 应急起降网络布局

固定与移动式无人机机巢可布设于高速沿线服务区、收费站、隧道管理站及养护工区，形成全域覆盖的应急起降网络，点位间距控制在 30-50 公里。滇西高山峡谷路段桥隧集中，事故及灾害高发，杭瑞高速公路、昆磨高速等重点路段可加密机巢布局，保障无人机快速抵达事故现场，解决道路阻断后地面救援无法进场的实操难题^[2]。常态化巡检无人机可兼顾应急作业，实现设备多功能复用。

2.3 感知基础设施共享

高速路面监控、气象监测站、车流检测设备的采集数据，可与无人机低空感知数据融合联动，构建地空一体化应急感知网络。本地交通应急指挥云平台可整合路面车流、环境气象、低空航拍多维度数据，弥补山区路段感知盲区，解决单一监测数据精度不足问题，为应急指挥决策提供全面的数据支撑。

2.4 能源与通信保障

服务区现有电力资源可适配改造，搭建无人机无线充电、换电设施，满足长时间、多频次应急作业的能源需求。山区复杂地形易形成通信盲区，数据传输稳定性不足，沿线 5G 基站可升级为通感一体化基站，搭配车载移动基站、无人机空中中继设备，压缩应急场景数据传输延迟，保障低空画面、操控指令持续稳定传输。

3 关键技术体系研究

无人机与智能技术的深度适配应用,可提升路空协同抢险的作业效能,贴合云南山区高频灾害场景的专项技术优化尤为关键。

3.1 地质灾害识别技术

滑坡、塌方是云南山区高速高发地质灾害, AI 时序 InSAR 监测技术搭配无人机抵近摄影测量,可精准识别边坡微小形变隐患。日常运维阶段依托大范围遥感监测锁定高风险隐患区域,灾害发生后,无人机快速抵近作业,通过三维倾斜摄影构建高精度灾害模型,为道路管控、抢险方案制定提供数据支撑。山间云雾、地形遮挡会干扰图像识别精度,山区场景专属算法优化可提升复杂环境下的目标识别稳定性。

3.2 气象灾害监测技术

暴雨、冰雪、大雾等极端气象易引发山区高速通行风险,搭载多光谱设备的无人机可实时采集路面温度、大气能见度等环境参数。低温冰雪天气可精准定位桥面、隧道口等易结冰关键点位,指导除冰作业精准开展。大雾天气可通过低空探测掌握高空能见度动态,提前预判团雾隐患^[1]。山区阵风、乱流多发,结合本地气象条件划定无人机飞行安全标准,规避复杂气象下的飞行作业风险。

3.3 事故灾难勘测技术

危化品泄漏、车辆自燃等高速突发事件风险等级高,搭载气体传感、热成像设备的无人机,可远距离完成隐患排查,判别危化品类型、锁定火源位置。高空勘测模式无需救援人员近距离接触危险区域,可快速划定危险扩散范围,明确人员疏散半径与救援通行路线。隧道浓烟密闭场景中,热成像设备可穿透烟雾识别被困人员与隐蔽火源,弥补传统光学勘测的作业短板。

3.4 车流管控与空地调度算法

无人机广域航拍视角可结合车流分析算法,预判长距离拥堵发展趋势。突发事件处置过程中,多无人机任务分配模型可统筹勘查、预警、喊话、物资投送等多项作业,匹配地面巡逻、清障救援力量的行进节奏,统一空地作业时空调度标准,减少无效飞行与重复作业,提升整体处置效率。

4 应用场景与应急响应机制研究

结合云南山区高速灾害发生规律与通行特征,搭建覆盖应急处置、日常巡检的全场景应用体系,配套分级响应机制保障各项作业落地执行。

4.1 突发事件应急处置

无人机可同步完成现场勘查与信息回传工作,依据事故损毁程度、处置压力划分四级应急响应,匹配对应空地作业力量。地质灾害发生后,无人机快速升空开展三维建模,研判道路封

闭与抢通方案,同步搭载喊话设备引导车辆避险。气象灾害处置聚焦低空抗冰除雪、团雾预警,精准针对桥面、隧道口等关键点位开展除冰作业,依托高空能见度探测数据发布路况预警,规避全域作业造成的资源浪费。

轻微车辆追尾、侧翻等小型事故适用四级响应,单台无人机快速抵近完成取证、现场记录,引导车辆快速撤离,缩短道路占用时长。常规交通事故适用三级响应,多台无人机联动监测火情、车流状态,配合地面队伍开展清障救援,拥堵长度超标后自动提升响应等级^[4]。较大事故启动二级响应,投入辖区全部备用无人机,划定专属应急空域,优先排查浓烟区域人员被困情况与潜在安全隐患。特重大事故启用一级响应,省级平台统筹全域低空资源,协调空域调整,完成全域隐患排查与应急物资投送,动态更新处置进展。危化品、火灾类高危事故依托无人机红外与气体检测设备,远距离划定危险区域,规避人员近距离作业风险。

道路恶意拥堵、群体性车辆滞留、路产设施破坏等特殊场景,无人机高空航拍留存现场证据,通过语音喊话传递执法管控要求,疏导现场对峙氛围。长时间滞留司乘人员可依托无人机完成应急物资投送,提升高速通行服务保障能力。节假日车流高峰、路段分流引发的车流激增场景,无人机常态化空中巡航,探测车流排队态势,联动情报板发布车流预警信息,引导车辆提前分流避让,同步监测服务区承载状态,防范车流倒灌影响主线通行。见表 1

表 1 四级应急响应指标表

响应等级	空域要求	处置标准
四级	百米低空,无需报备	单台无人机快速勘查
三级	局部临时空域	主线拥堵超 2km 自动升级
二级	3km×1.5km 专属空域	无人机集群作业
一级	大范围协调空域	全省无人机统一调度

4.2 常态化巡检与预防

参照公路无人机巡检相关技术指南,将低空巡检模式应用于路面病害排查、边坡隐患监测、桥梁结构检测等日常运维工作。无人化巡检模式可替代人工高危作业,实现高频次、全覆盖的数据采集,消除山区路段人工巡检盲区,缩短道路病害、地质隐患的发现周期。路网运维可依托低空巡检数据提前识别滑坡、崩塌等风险隐患,前置开展防控工作,降低后期应急处置成本与路网运营风险。

5 组织管理与协同指挥体系研究

规范化的组织管理模式与协同指挥机制,是路空协同应急体系稳定运行的核心保障。

5.1 应急指挥调度流程再造

无人机升空勘查可作为应急处置前置动作,突发事件触发

后即刻启动作业，构建快速预警、即时勘查的先期处置模式，改变传统接警派单的滞后性问题。事故接报后同步推进无人机升空报备、空域申请、地面力量集结各项工作，现场移动指挥终端整合低空航拍、路面监控、应急对讲数据，实现空地态势一体化管控。常态化分级演练机制可保障作业熟练度，月度开展路段专项实操、季度开展市域综合演练、雨季开展跨区域实战演练，演练结束后及时复盘整改，形成闭环优化模式。见图1

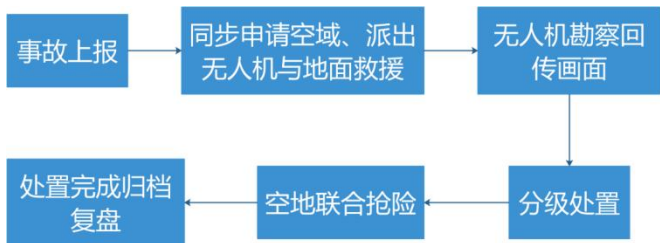


图1 路空协同应急指挥调度流程

5.2 “一路多方”协同定位

明确公路管养、公安交管、消防、交通综合执法、空管及属地应急等部门的协同职责。公路管养部门负责道路养护与运营服务，主动发现并消除安全隐患，加强日常养护；遇突发事件时，及时调度清障车辆，协助公安交管部门疏导交通，必要时派出无人机班组执行空中勘查、物资投送等任务。公安交管负责强化路面管控，科学配置警力，严查交通违法行为，主动发现并快速处置各类警情和隐患。消防部门承担火灾扑救、被困人员破拆解救及危化品泄漏处置与洗消工作。交通综合执法部门负责保护路产路权，依法查处各类侵占、损坏公路的违法行为。空管部门负责开放应急临时空域并管控飞行冲突。属地应急机构配合开展群众疏散与物资补给工作。统一数据信息推送标准，打通低空设备与公安交管部门、消防指挥系统的数据通道，缩短信息传递时差，减少协同作业失误。

5.3 跨路段区域协同

跨路段车流拥堵、大范围地质气象灾害场景，需建立跨主体无人机数据共享、接力巡航机制。由交通应急平台统筹全域高速无人机应急队伍，重大突发事件可实现跨区域力量调配。相邻路段管理单位常态化共享路况数据，车流分流期间依托无

人机接力巡航，持续监测路网通行态势，保障跨路段应急处置工作衔接顺畅。

6 效益评估与发展路径研究

通过量化评估模型校验体系运行综合效能，结合云南路网发展现状制定阶段性建设规划，实现体系持续迭代优化。

6.1 多维效益量化评估

结合云南省应急效能评价相关标准，搭建路空协同抢险评估模型，从自然灾害处置、事故灾难处置、车流管控、全生命周期运维四个维度开展效益测算。统计道路管制时长、除冰物资消耗、事故勘查效率、二次事故发生率、拥堵消散时长、服务区预警准确率等核心指标，对比传统人工运维模式的人力投入、路产损耗、作业风险等数据，量化体系落地的综合收益^[5]。评估数据依托一线抢险记录、演练台账、系统运行日志整理汇总，结合本地真实作业案例确定评价基准，梳理体系设计、人员操作、空域调度、算法适配等环节的效能损耗问题，针对性优化作业预案、调度规则与技术参数，每半年完成全域数据校准更新。

6.2 分阶段发展路径

结合云南山区高速建设运营实际，分阶段推进路空协同应急体系建设。1-2年建设期聚焦事故处置、车流管控核心场景，完成重点路段低空基础设施布设，搭建基础跨部门协同机制，实现常规应急场景落地应用。3-5年优化期重点攻克复杂气象、重大地质灾害的低空处置技术，完善地方行业标准与跨部门协同制度，拓宽全灾种应急应用场景。远期建设全域智能化应急体系，搭建高速低空应急智慧平台，实现全网无人机智能调度、自主勘查、精准处置。

7 结语

本文立足云南山区高速实情，从政策标准、基建资源、技术、场景、组织管理、效益路径六维度搭建路空协同应急抢险体系，落地无人机与AI技术，适配本地路网、气象及空域条件，形成可执行的调度与分级响应流程，化解救援权责不清、处置滞后、场景适配差等难题。后续将依托本土抢险案例优化评估指标，持续提升低空装备山区应急适配水平。

参考文献：

- [1] 耿瑶.低空经济背景下高速公路无人机的应用价值与应用场景[J].河北企业,2025(6):46-49.
- [2] 江亮.路空一体新基建:基于高速公路光纤网的低空经济发展路径[J].交通建设与管理,2025(5):42-43.
- [3] 李亮亮,张骋.浙江高速公路服务区路空协同建设思考[J].交通建设与管理,2025(5):36-37.
- [4] 陈莹星,吴澳平,李春霖,等.基于低空经济和AI的高速公路三维智能交通新范式[J].中国交通信息化,2025,(S2):8-10+14.
- [5] “保险+服务+科技”:平安产险赋能低空经济与公路交通融合新路径[J].交通建设与管理,2025,(5):64-65.