

无人机巡检技术在山区公路桥梁施工现场安全管理应用

香艳艳

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：山区公路桥梁施工环境复杂，立体作业模式让现场安全管控存在诸多盲区与难点，传统人工巡检模式难以适配山地施工的管控需求。本文结合山区施工场地与作业特点，剖析无人机巡检适配复杂山地场景的技术特性，系统梳理无人机巡检硬件配置、飞行参数及数据传输体系，多维度阐述其在施工现场安全管控中的具体应用方式，针对性提出适配山地环境的巡检优化策略与全方位保障体系，为山区路桥工程施工现场安全精细化管理提供技术参考。

关键词：山区公路桥梁；施工现场；安全管理；无人机巡检；设备适配

引言：山区公路桥梁工程建设多处于地形复杂、环境多变的野外区域，施工存在作业点位分散、高空作业多、隐患隐蔽性强等特点，传统安全巡查方式覆盖不足、效率有限，难以适配现代化施工安全管控需求。无人机巡检具备机动灵活、全域覆盖、高危作业适配性强的突出优势，可有效弥补人工巡检的各类短板。依托无人机技术适配山地施工场景，搭建系统化巡检与管控体系，能够切实提升山区路桥施工现场安全管理的精细化与规范化水平。

1 山区公路桥梁施工现场及无人机巡检技术特性

1.1 山区公路桥梁施工现场作业特征

山区公路桥梁施工多依托山地起伏地形开展作业，场地整体平整度较低，周边地势落差较大。施工区域多毗邻陡坡、沟壑与山体坡面，可作业场地分布零散，有效施工空间较为有限。桥梁墩柱、挂篮架设、高空模板搭建等工序集中于高空区域，作业点位垂直跨度大。岩土体结构稳定性偏弱，坡面松散土体分布较多，施工扰动容易引发地质状态变动^[1]。物料转运、设备停放与人员作业区域分区难度较高，各类施工工序呈现分散化、立体式分布状态。野外露天作业时占比高，气象环境波动会持续干扰施工开展，现场作业状态具备明显的不确定性。

1.2 山区施工场景安全管控难点

山地复杂地形会大幅压缩人工排查的可达范围，大量高空、坡面、偏远区域难以通过常规巡查方式覆盖。施工现场危险源分布较为零散，立体作业模式让风险点位呈现多层级散布特征，隐患排查存在盲区。野外环境动态变化频繁，坡面岩土状态、周边植被覆盖与场地稳定性会出现持续变动，风险状态处于动态更新过程。高空作业设备架设、临时支架搭建、坡面防护布设的作业条件复杂，隐患隐蔽性较强。常规安全管控手段多针对

平整场地设计，适配山地立体施工场景的能力不足，安全管控覆盖范围存在明显缺口。

1.3 适配山区路桥施工的无人机巡检技术特征

适配山区路桥施工的无人机设备具备较强的空间机动能力，可灵活穿梭高空作业区域与地形复杂地段，摆脱地面通行条件限制。飞行控制系统具备稳定的抗风、抗扰动性能，能够适应山地空域气流波动的复杂环境。搭载的高清影像采集设备，可捕捉细微结构状态与现场作业细节，完成远距离、高精度画面采集。飞行姿态可灵活调节，支持低空悬停、定点拍摄与长距离平移采集，适配桥梁墩柱、梁体、坡面等不同结构形态。数据采集全程具备动态连续性，可对大范围施工区域完成全覆盖扫描，适配山区施工场地分散、跨度较长的作业特点。

1.4 无人机巡检与传统人工巡检的差异化优势

传统人工巡检依赖地面通行条件与人员视野范围，巡检覆盖区域受地形约束程度较高。人员现场攀爬、高空排查的作业模式，会增加巡查过程中的安全风险。人工排查进度受人员体力、作业路径影响，单点巡检耗时较长，全域排查需要投入大量人力成本。无人机巡检依托空中作业模式，不受地面路况与地形阻隔影响，可直达各类高危作业区域完成信息采集。设备操作流程简便，单次作业可完成大范围区域扫描，缩减现场巡查的人力投入。影像采集留存可视化数据，可完整记录施工现场实时状态，为安全管控提供客观、可追溯的现场资料。

2 适配山区公路桥梁施工的无人机巡检系统与配置

2.1 无人机巡检硬件设备选型配置

山区公路桥梁施工场景环境复杂，无人机主机设备选型需匹配山地空域与施工场地的特殊条件。多旋翼无人机结构灵活性突出，机身启停占用空间小，适配山区狭窄作业空域与零散施工点位的巡检需求。设备机身采用轻量化抗损材质，可抵御山间气流冲击与轻微磕碰损

伤, 适配野外长期露天作业场景。飞行续航时长满足长跨度路桥施工区域的巡检覆盖需求, 减少多次起降带来的作业中断问题^[2]。机身搭载高精度定位模块, 依托空间定位信号锁定飞行轨迹, 弱化山地地形遮挡对飞行定位的干扰。

2.2 无人机巡检辅助搭载设备适配设计

基础飞行设备无法满足山区路桥施工精细化巡检需求, 需搭配专用搭载设备完善巡检功能。高清防抖摄像设备为核心搭载装置, 可抑制山间气流引发的画面抖动问题, 清晰捕捉桥梁结构外观、高空作业状态等细节画面。变焦拍摄组件可调节拍摄焦距, 适配远距离高空结构与近距离隐蔽点位的拍摄采集工作。存储模块具备大容量存储性能, 可批量留存高清影像资料, 满足全域巡检的数据存储需求。增稳云台设备可多角度调节拍摄角度, 消除机身姿态变动带来的拍摄盲区, 覆盖桥梁底面、山体边坡等特殊巡检区域。

2.3 山区复杂环境下无人机飞行参数设定

山地空域气流多变、地形遮挡繁多, 固定飞行参数无法适配全场景巡检作业。飞行高度结合桥梁结构高度、山体起伏落差进行设定, 规避山体凸起、施工架体等障碍物的碰撞风险。飞行速度依据巡检区域疏密程度动态调整, 稀疏开阔区域适度提升飞行速度, 结构密集的高空作业区域放缓飞行节奏。悬停时长根据点位巡检难度设定, 复杂结构点位预留充足拍摄采集时间, 保障数据采集完整度。结合现场障碍物分布规划合理飞行路径, 避开高压线路、高大植被等干扰因素, 构建稳定、安全的巡检飞行通道。

2.4 无人机巡检数据采集与传输体系构建

山区路桥施工巡检数据类型多样, 需搭建规范化的采集与传输体系保障数据完整流转。数据采集涵盖桥梁结构外观、高空作业工况、场地环境状态、边坡稳定情况等多维度内容, 覆盖施工现场主要安全管控点位。采集过程按照分区、分段模式开展, 有序收录不同施工区域的影像资料。无线传输模块承担数据实时传输工作, 依托稳定信号通道完成现场数据回传, 规避山地遮挡造成的数据卡顿与断连问题。数据传输过程搭载加密机制, 保障施工现场影像资料不会出现外泄问题。

3 无人机巡检技术在山区路桥施工现场安全管理的核心应用维度

3.1 施工现场作业区域全覆盖巡检监测

山区路桥施工场地覆盖范围广, 施工点位分布零散, 传统人工巡检模式很难完成整片场区的完整排查。无人机具备灵活的空中作业优势, 不受地面路况与地形

阻碍的约束, 能够对整片施工区域开展系统化巡查^[3]。飞行航线可以贯通前场作业区域、桥梁主体施工区域、后场物料堆放区域等全部施工板块。划分不同空域与区块开展分段巡检, 能够补齐人工巡查无法抵达的场地盲区。

3.2 高空及临边危险作业场景动态监测

山区桥梁施工涉及墩柱浇筑、梁体架设、临边支护等大量高空作业内容, 整体作业风险较高。人工近距离进驻高空区域排查, 会暴露在高危作业环境中, 存在极大安全隐患。无人机可在安全空域完成远距离影像采集, 清晰记录高空人员作业状态与安全防护设施布设情况。针对桥梁临边、山体悬空边缘等危险区域定点巡查, 及时发现防护设施缺损、作业操作不规范、结构外露等不良施工状态。

3.3 施工设备与机具作业状态巡检管控

山区路桥施工现场配置各类起重设备、支护机具与运输设备, 机具运行状态直接关系现场施工安全水平。无人机可以常态化巡查各类施工机具的摆放位置、作业姿态以及静置停放状态。精准识别机具杂乱摆放、占道停放、违规停靠等不规范现场情况。重点核查高空配套作业机具的架设方式与固定状态, 及时发现机具安装布设存在的问题。

3.4 施工现场临时设施与通道安全巡检

山区施工现场的施工棚、操作平台、围挡等临时设施搭建标准偏低, 长期处于野外复杂环境中, 容易出现结构松动、构件老化等问题。施工通道依托山地地形修建, 道路宽度有限、两侧边坡陡峭, 日常通行潜藏较多安全隐患。无人机可全面核查临时设施整体结构形态, 排查结构变形、构件缺失、搭建松动等各类问题。

3.5 山区特殊地形施工隐患常态化排查

山区施工场地紧邻山体坡面与沟壑陡坡, 地形构造复杂, 整体岩土稳定性较差。施工开挖、填筑、机具碾压等作业扰动, 会改变山体原有岩土平衡状态, 逐步滋生各类地质安全隐患。无人机可对大范围山体坡面、施工边坡、开挖断面开展高频次巡查工作。细致观察坡面岩土散落、土体松动、表层开裂等异常现象, 动态掌握山地场地的地形变化规律。

4 山区公路桥梁施工现场无人机安全巡检的优化与保障体系

4.1 山区复杂气象与地形下巡检作业优化策略

山区空域环境多变, 山间气流紊乱、地形遮挡繁多, 常规飞行模式难以适配复杂巡检场景。针对风力波动较大的山间区域, 调整飞行高度与飞行姿态, 降低气流扰动对飞行稳定性的影响。阴雨、雾气天气能见度降

低,可调整设备拍摄参数,提升画面通透程度,保障图像采集质量^[4]。针对高差起伏较大的坡面与桥梁区域,采用分段阶梯式飞行模式,规避山体凸起结构与高空架体造成的遮挡问题。根据每日环境变化调整飞行时段,选择环境条件稳定的时段开展重点区域巡检,规避恶劣环境带来的飞行干扰。

4.2 无人机巡检作业流程标准化优化

零散随意的飞行巡检模式,容易出现巡检漏查、重复采集的问题,标准化流程可以规范现场巡检行为。依据路桥施工分区特征划分巡检单元,明确每个单元的飞行范围与采集重点。依次完成场地环境巡检、结构外观巡检、设备工况巡检、通道设施巡检的分步作业流程。统一各区域的拍摄角度、悬停点位与画面采集数量,让巡检作业保持统一标准。梳理数据采集、画面筛选、资料存档的完整步骤,规范各环节操作细节,让巡检工作有序推进。

4.3 巡检人员专业能力建设与作业规范

无人机巡检作业质量,依托操作人员的实操水平与现场判断能力。针对山区特殊飞行环境开展专项技能培训,强化操作人员应对乱流、信号遮挡、地形障碍等场景的处置能力。普及设备基础调试、参数设置、影像采集的专业知识,提升人员精细化作业水平。明确山区巡检的操作准则,规范起降点位选择、飞行空域管控、设备调试等实操细节。培养人员现场隐患辨识能力,让操作人员在采集画面的过程中,精准分辨各类施工安全问题,提升巡检工作的实际价值。

4.4 无人机巡检安全作业保障机制构建

野外山地飞行存在诸多不确定因素,需要完善的机制规避飞行作业风险。作业前对设备机身、云台、信号系统、电池状态开展全面检查,排除设备故障隐患。提前梳理作业区域内的高压线路、高大植被、施工架体等障碍物,规划安全可行的飞行路线。设定飞行边界限

制,杜绝无人机飞入无信号、高风险的偏远空域。建立飞行作业监护机制,地面人员全程关注飞行状态与现场环境变化,及时处置突发状况,维持巡检作业全程稳定。

4.5 巡检数据整合与安全管理联动优化

单次巡检采集的影像资料较为零散,需要系统整合才能服务现场安全管理工作。分类收纳结构隐患、作业违规、设施破损、场地异常等不同类型的巡检资料,完成系统化归档整理。对比不同时段的巡检资料,观察施工现场隐患的变化状态与演变趋势。将巡检发现的安全问题对接现场管控流程,依托影像资料明确隐患位置与问题类型,辅助现场完成整改处置。通过数据积累完善现场安全管控重点,持续提升山区路桥施工现场安全管理的精细化程度。

结束语

山地复杂地形与多变气象条件,给公路桥梁施工安全管控带来诸多难题,无人机巡检技术可突破传统巡查模式的场地与视野限制,适配山区各类高危、偏远施工区域的排查工作。通过优化设备配置、飞行参数与作业流程,完善人员能力建设与作业保障机制,可充分发挥无人机巡检的技术优势,强化施工现场隐患排查与动态管控能力,持续提升山区路桥工程施工安全管理的整体质量与实效。

参考文献

- [1]蔡亚芬,刘(枫),孔亮,等.高速公路无人机智能巡检系统应用探究[J].中国交通信息化,2025,316(11):95-98.
- [2]王勇,岑宗羲,何正龙,等.低空无人机遥感技术在公路巡检中的应用进展、挑战和前景[J].资源科学,2025,47(8):1675-1688.
- [3]王桔.无人机航拍技术在高速公路病害检测中的应用研究[J].运输经理世界,2025(23):104-106.
- [4]刘德英.公路桥梁现场施工安全管理技术研究[J].运输经理世界,2023(14):157-159.