

公路边坡智能化监测系统应用与风险防控

贺超平

南京交通建管工程咨询有限公司 江苏 南京 210000

摘 要:公路边坡是公路工程的核心组成部分,其运行稳定性直接决定公路整体运营安全。传统边坡监测方式较为传统,存在监测频次不足、覆盖范围有限、数据完整性差、预警响应滞后等诸多缺陷,无法适配复杂地质环境下边坡精细化安全管控需求。本文聚焦公路边坡智能化监测系统应用与风险防控开展系统性研究,梳理边坡典型病害特征、诱发因素及失稳演化机理,搭建四层智能化监测系统架构,探究智能感知、数据传输、算法分析、预警研判等核心技术,优化差异化监测布设方案,构建分级评价、智能预警、主动防控一体化风险防控体系,可为公路边坡安全管控与智慧运维提供技术参考。

关键词:公路边坡;智能化监测;风险防控

引言:当前我国公路路网持续向山区拓展,边坡工程数量大幅增长,受复杂地质与气象条件影响,边坡失稳灾害频发,严重危害公路通行安全与群众生命财产安全。现阶段边坡监测多依赖人工巡检与简易仪器,存在监测滞后、数据离散、覆盖面窄等短板,难以实现灾害前置防控。随着物联网、GNSS、智能传感及人工智能技术的成熟,边坡智能化监测技术逐步落地。基于此,本文系统开展公路边坡智能监测应用与风险防控研究,剖析边坡致灾机理,搭建智能监测体系,探索精准高效的风险防控路径,对提升边坡灾害预警能力、保障公路安全运营具有重要理论与工程价值。

1 公路边坡病害特征与致灾机理分析

1.1 公路边坡常见病害类型

公路边坡常见病害主要包含滑坡、崩塌、落石、泥石流、坡面冲刷及护坡结构开裂等类型。其中,滑坡是最典型的失稳形式,坡体沿软弱结构面整体滑移,灾害规模大、破坏性强;崩塌与落石多发于岩质陡坡,具有突发性特征;泥石流多见于沟谷边坡,由暴雨诱发形成水石混合冲击流。坡面冲刷易引发坡面破损与水土流失,支护结构开裂是边坡失稳的前置预警特征。各类病害并非独立存在,易相互诱发形成灾害链,持续加剧边坡破损程度与安全风险。

1.2 边坡灾害主要诱发因素

公路边坡失稳诱因主要分为地质、水文、气候、工程及人为五大类。地质条件决定边坡固有稳定性,岩土特性、软弱夹层是失稳的内在基础;降雨入渗提升孔隙水压力、降低土体抗剪强度,是最核心的外部诱因。冻

融、干湿交替的气候作用会加速岩土体风化劣化;路基开挖、爆破振动、支护不到位等工程施工行为,会破坏边坡原有应力平衡。同时坡顶超载、植被破坏、排水不畅等人为行为,会进一步叠加放大边坡失稳风险^[1]。

1.3 边坡失稳演变机理与风险特征

边坡失稳是渐进式量变转质变的过程,分为初始变形、等速变形、加速变形、破坏失稳四个阶段。初始阶段坡体应力微调,产生微小形变;等速阶段变形速率稳定,边坡处于相对平衡状态;加速阶段形变持续加快,边坡进入临界失稳状态,最终发生整体破坏。边坡灾害具备典型的突发性、链式性、区域性与社会性特征,灾害预判难度大、易引发次生灾害,且受地域地质气候控制,直接威胁公路通行安全与沿线群众生命财产安全。

2 公路边坡智能化监测系统总体架构与关键技术

2.1 智能化监测系统总体架构设计

公路边坡智能化监测系统采用感知层、传输层、平台层和应用层四层架构。感知层负责多源监测数据的采集,部署GNSS位移站、测斜仪、孔隙水压力计、雨量计、裂缝计、光纤传感器等设备,实现表面位移、深部位移、地下水、降雨、裂缝等多参数监测。传输层负责数据的可靠传输,采用无线通信、光纤通信、物联网通信等方式,保障数据低时延、高可靠传输。平台层负责数据的存储、清洗、融合与分析,构建监测数据库和智能分析平台,实现多源数据的时空融合与深度挖掘。应用层负责监测预警、风险评估、决策支持和应急指挥等业务功能,为边坡安全管理提供决策依据。四层架构协同联动,实现边坡状

态的实时感知、动态评估与智能预警。

2.2 多源智能感知监测技术

多源智能感知是智能化监测系统的基础,主要包括GNSS高精度位移监测、光纤传感监测、雷达监测、无人机巡检及物联网传感等技术。GNSS位移监测利用多星座融合与实时动态差分技术,实现边坡表面位移的毫米级监测;光纤传感监测利用分布式光纤和光纤光栅传感技术,实现边坡应变、温度、渗流等参数的分布式监测;雷达监测利用地基合成孔径雷达技术,实现边坡大范围形变监测;无人机巡检利用航测与三维激光扫描技术,实现边坡表面病害的快速识别;物联网传感技术利用低功耗传感器网络和边缘计算,实现边坡多参数的实时采集与处理。多源感知技术相互补充,共同构成边坡立体化监测网络。

2.3 数据传输与通信技术

数据传输与通信是连接感知层与平台层的关键环节,直接影响监测系统的实时性与可靠性。边坡监测数据传输方式主要包括无线通信、光纤通信和物联网通信三类。无线通信适用于偏远山区,采用4G/5G、LoRa、NB-IoT等技术,实现数据的远程传输;光纤通信适用于监测点集中的区域,具有抗干扰强、传输速率高的优点;物联网通信适用于低功耗传感器网络,采用ZigBee、LoRa等技术,实现数据的低功耗传输。北斗短报文通信可在无地面网络覆盖区域实现数据传输,适用于偏远山区边坡监测。数据传输应采用加密协议,保障数据安全;应采用冗余设计,提高通信可靠性。通过多种通信方式的组合应用,构建覆盖全场景的数据传输网络。

2.4 智能数据处理与分析技术

智能数据处理与分析是智能化监测系统的核心,主要包括数据清洗、数据融合、特征提取和智能分析等内容。数据清洗通过异常值剔除、缺失值填补、噪声滤波等手段,提高数据质量;数据融合通过时空对齐、多源关联等方法,实现多源数据的深度融合;特征提取通过时域分析、频域分析、时频分析等方法,提取边坡状态的特征信息;智能分析采用机器学习、深度学习等方法,建立边坡稳定性评估模型和失稳预测模型^[2]。常用的智能分析方法包括神经网络、支持向量机、随机森林、长短记忆网络等。通过智能数据处理与分析,实现边坡状态的准确评估和失稳趋势的有效预测。

2.5 智能预警与研判技术

智能预警与研判是智能化监测系统的输出环节,直

接关系到风险防控的时效性。智能预警技术基于多源监测数据和稳定性评估模型,建立分级预警机制,根据边坡变形速率、累计位移、降雨量、孔隙水压力等指标,划分蓝色、黄色、橙色、红色四级预警,分别对应不同的响应措施。智能研判技术基于历史数据和实时监测数据,采用趋势分析、突变检测、概率预测等方法,研判边坡失稳的可能性和发展趋势。预警阈值的确定应结合历史数据、数值模拟和现场试验,并应根据边坡实际运行状态动态调整。通过智能预警与研判,实现边坡风险的早期识别和及时预警,为风险防控提供决策依据。

3 公路边坡智能化监测系统应用体系研究

3.1 边坡智能化监测布设原则

边坡智能化监测布设应遵循代表性、系统性、层次性和经济性四项原则。代表性原则要求监测点应布设在最能反映边坡状态的关键部位,如滑坡体主滑方向、变形敏感区、地质软弱带等;系统性原则要求监测内容应涵盖表面位移、深部位移、地下水、降雨、裂缝等多参数,形成完整的监测体系;层次性原则要求监测布设应分为表面监测、浅层监测和深层监测三个层次,实现从表及里的立体监测;经济性原则要求监测布设应结合边坡重要性和风险等级,合理确定监测密度和监测频率,避免过度监测造成资源浪费。布设时应充分利用已有地质勘察资料和监测经验,确保监测点布置科学合理。

3.2 不同类型边坡监测方案适配应用

不同类型边坡的监测方案应差异化设计。岩质高边坡以表面位移和裂缝监测为主,辅以雷达监测和无人机巡检,重点关注岩体结构面和裂隙发育;土质边坡以深部位移和孔隙水压力监测为主,辅以雨量监测和表面位移监测,重点关注降雨入渗和地下水变化;滑坡体以深部位移、表面位移和地下水监测为主,辅以裂缝监测和雨量监测,重点关注滑面位置和变形趋势;膨胀土边坡以含水率、变形和裂缝监测为主,重点关注干湿循环引起的胀缩变形;高填方边坡以沉降、侧向位移和孔隙水压力监测为主,重点关注填筑体固结和稳定性。监测方案应根据边坡类型、地质条件、风险等级动态调整。

3.3 智能化监测系统运行流程

智能化监测系统运行流程包括数据采集、数据传输、数据处理、状态评估、预警研判和决策响应六个环节。数据采集环节,各监测设备按设定频率采集数据,实现边坡状态的多参数感知;数据传输环节,采集数据经通信网络传输至数据中心,实现数据的实时汇聚;数据处理环节,对原始数据进行清洗、融合和特征提取,

形成标准化数据；状态评估环节，基于多源数据融合模型，评估边坡稳定性状态；预警研判环节，根据评估结果和预警阈值，研判边坡风险等级并发布预警；决策响应环节，根据预警等级启动相应的响应措施，实现风险的及时处置^[3]。六个环节形成闭环运行机制，持续提升监测系统的运行效能。

4 基于智能监测的边坡风险防控体系构建

4.1 边坡风险等级评价体系

边坡风险等级评价体系是风险防控的基础，应综合考虑边坡失稳可能性和后果严重性。可能性评价指标包括地质条件、边坡结构、变形状态、降雨影响、地下水状况等；后果严重性评价指标包括公路等级、交通量、人员暴露、经济损失、环境影响等。采用风险矩阵、风险熵、贝叶斯网络等方法，将边坡风险划分为低风险、中风险、高风险和极高风险四个等级。评价体系应具有动态性，能够根据监测数据实时更新风险等级。通过风险等级评价，明确边坡风险状况，为分级管控提供依据。

4.2 边坡智能预警分级机制

边坡智能预警分级机制是风险防控的关键环节，应建立蓝色、黄色、橙色、红色四级预警体系。蓝色预警对应低风险状态，监测指标接近但未超过预警阈值，应加强监测；黄色预警对应中风险状态，监测指标超过预警阈值，应启动预警响应；橙色预警对应高风险状态，监测指标持续恶化，应启动应急响应；红色预警对应极高风险状态，监测指标显示即将失稳，应立即启动抢险救灾。各级预警应明确判别标准、响应措施和责任主体，建立预警信息发布与传递机制。预警阈值应根据历史数据、数值模拟和现场试验确定，并应根据边坡实际运行状态动态调整。

4.3 边坡主动防控与分级处置策略

边坡主动防控与分级处置策略应体现“预防为主、分级管控、快速响应”的原则。低风险状态下，以日常监测和定期巡检为主，做好排水维护和植被保护；中风险状态下，加强监测频率，采取坡面防护、排水加固等主动防控措施；高风险状态下，启动应急预案，采取削坡减载、锚固加固、支挡防护等工程措施，必要时实施交通管制；极高风险状态下，立即启动抢险救灾，组织人员撤离和交通封闭，实施紧急加固和应急处置^[4]。分级处

置策略应与预警分级机制衔接，形成“监测—预警—处置”的闭环管理。处置措施应根据边坡实际条件和风险特征动态调整，确保防控效果。

4.4 边坡长效运维与病害治理优化对策

边坡长效运维与病害治理优化是风险防控的长期任务。长效运维方面，应建立边坡全生命周期管理机制，明确运维责任主体，制定运维计划，落实运维经费；应建立边坡监测系统定期校验和维护制度，确保监测设备正常运行；应建立边坡病害档案，记录病害发展过程和治理效果。病害治理优化方面，应坚持“防治结合、综合治理”的原则，根据病害类型和成因，采取排水、支挡、锚固、防护等综合措施；应注重新技术、新材料、新工艺的应用，提高治理效果和耐久性；应建立治理效果后评价机制，总结经验教训，持续优化治理方案。通过长效运维与病害治理优化，实现边坡安全的持续保障。

结束语

公路边坡智能化监测系统应用与风险防控是保障公路运营安全的重要课题。本文分析了边坡常见病害类型、诱发因素及失稳演变机理，构建了包含感知层、传输层、平台层和应用层的智能化监测系统架构，探讨了多源智能感知、数据传输、智能处理及预警研判等关键技术，研究了监测布设原则、监测方案适配及系统运行流程，并构建了风险等级评价、智能预警分级与分级处置相结合的风险防控体系。未来，随着物联网、人工智能、数字孪生等技术的深入应用，公路边坡智能化监测与风险防控将迈向更加精准化、智能化的新阶段，为公路安全运营提供坚实保障。

参考文献

- [1] 乔朋腾, 陈如意, 王伟. 智能化监测技术在公路路基与边坡工程中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2026(8):177-179.
- [2] 杨水生, 易杨, 邓凌燕, 等. 基于北斗技术的高速公路边坡位移监测系统研究 [J]. 山东交通科技, 2024(2):41-44.
- [3] 张龙, 白旭光, 田腾飞, 等. 基于物联网的公路工程边坡智能动态监测系统研究 [J]. 公路, 2022, 67(9):122-127.
- [4] 赵亮, 徐悦, 蔡尉伟, 等. 物联网驱动的公路边坡自动化监测系统智能化升级路径分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2025, 13(27):125-127.