

绿色矿山建设背景下地质灾害 智能化监测技术的应用

徐付强¹, 李军伟², 王 辉², 雷晓强³, 滕泽宇^{4*}

1. 青岛国道通设计咨询有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 青岛尚裕盛工程科技有限公司, 山东 青岛 266000;
3. 安徽中掘建设工程有限公司, 安徽 淮北 235000;
4. 青岛交科建设集团有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 本文针对绿色矿山高陡边坡及排土场在复杂地质条件下的稳定性监测需求, 探究智能化监测技术在岩土体形变感知中的应用路径。通过集成高精度传感器、无线网络及边缘计算模块, 构建全天候、非接触式的地质环境感知体系, 解析多源异构数据在时空维度上的相关性, 实现对岩体位移、应力变化及水文地质参数的实时捕捉, 研究侧重于技术架构的物理实现与数据流转逻辑, 旨在解决传统人工监测在时效性与覆盖率上的不足, 为矿山地质环境的动态演变提供精准量化参考, 进而支撑绿色矿山地质环境的数字化重构。

关键词 绿色矿山; 地质灾害; 智能化监测; 多源传感

中图分类号: TD1; TP2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.013

0 引言

绿色矿山建设要求在地质环境扰动最小化的前提下进行资源开采, 这对地质灾害的早期识别与动态追踪提出了极高标准。传统点式、周期性的人工测量方式在应对突发性崩塌、滑坡等地质异常时, 存在数据滞后与样本缺失问题, 难以捕捉岩土体临界破坏前的微观征兆。随着物联网与传感技术的迭代, 利用智能化手段对矿山地质体进行全维度扫描成为技术发展的必然趋势。通过部署自动化传感阵列, 能够实现对地质体物理力学行为的连续追踪, 将离散的监测点位转化为连续的应力应变场云图, 从而精准揭示地质灾害的孕育演化规律。

1 绿色矿山地质环境监测现状

绿色矿山开采环境具有地形切割强烈、岩体结构破碎及水文地质条件复杂的特征, 当前地质监测主要依赖光学仪器与机械式量测工具, 受地形遮挡与气候条件制约明显, 难以在极端天气下保持数据的连续性, 在地质构造发育区域, 单一的表面位移监测无法穿透岩体内部获取深部滑动面信息, 导致对深层蠕变机制的认知存在盲区。同时, 传统监测数据采集频率固定,

无法根据岩体形变速率自动调整采样间隔, 在形变加速阶段极易丢失关键拐点数据, 现有的有线传输网络在矿山爆破及机械作业震动下易发生物理断路, 维护成本较高且数据传输稳定性差, 这种非连续、表象化的监测模式难以满足绿色矿山对地质环境微小形变的精准感知需求, 亟须引入智能化、集成化的监测技术体系^[1]。

2 智能化感知设备与关键技术

2.1 高精度北斗卫星位移监测

利用北斗卫星导航系统(BDS)的高精度载波相位差分技术, 在矿山边坡关键部位部署监测站, 实现毫米级地表位移感知, 监测终端通过解算卫星信号的多普勒频移与相位延迟, 实时获取测点的三维坐标变化量。系统采用双频接收机架构, 有效消除电离层延迟误差, 确保在露天矿坑深部信号遮挡区域的定位稳定性, 通过基准站与监测站的差分运算, 去除卫星钟差与轨道误差, 将平面定位精度控制在2.5 mm以内, 高程精度控制在5 mm以内, 该技术能够全天候捕捉边坡顶部及台阶边缘的水平位移与沉降趋势, 为分析滑坡体的整体运动矢量提供绝对空间基准。

作者简介: 徐付强(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿建工程。

***通信作者**: 滕泽宇(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿山建设。E-mail: 1048144705@qq.com

2.2 深部岩体倾斜与剪切感知

针对地质体内部滑动面的识别,采用基于微机电系统(MEMS)的阵列式位移计深入钻孔内部,该设备由多节重力加速度传感器串联组成,通过测量各节点的倾斜角度变化,反演钻孔轴向的侧向位移曲线。传感器通过柔性连接管下放至预定深度的地质钻孔中,能够适应岩土体的剪切变形而不易损坏,系统能够精确捕捉岩层层理间的相对错动,分辨率可达 0.01° ,通过对不同深度节点数据的差分计算,能够精确定位潜在滑动面的埋深位置及剪切方向,弥补地表监测无法反映深部岩体破坏机制的缺陷,实现对深层蠕滑行为的早期捕捉。

2.3 降雨量与地下水渗流监测

水动力条件是诱发矿山地质灾害的关键因素,采用翻斗式雨量计与孔隙水压力计构建水文地质耦合监测网,雨量计通过记录降雨脉冲信号,实时统计瞬时降雨强度与累计降雨量,数据精度达到 0.1 mm 。孔隙水压力计埋设于边坡渗流通道及含水层中,利用振弦式传感原理测量岩土体内部的渗透压力变化,传感器内部的钢弦频率随水压力变化而产生漂移,通过频率读数换算为水头高度,该监测组合能够揭示降雨入渗对岩土体有效应力的削弱作用,分析地下水位抬升与边坡抗剪强度降低之间的滞后响应关系,量化水力作用对地质体稳定性的扰动程度^[2]。

2.4 锚索应力与岩土压力监测

在边坡加固区域,利用穿透式锚索测力计监测支护结构的受力状态,测力计安装于锚索锚具与垫板之间,内部集成的多个弦式传感器能够测量锚索轴向拉力的变化,反映岩体的松动膨胀压力。当岩体发生扩容变形时,锚索受力即时增加,传感器输出频率同步改变,同时,在挡土墙及抗滑桩后埋设土压力盒,直接测量滑体对支护结构的推力,通过对比设计锚固力与实测应力值,可以判断支护体系的各个节点是否处于弹性工作区间,这种力学量的直接监测能够先于位移变形反映地质体的应力集中趋势,为判识岩体破坏前兆提供力学依据。

3 多源数据传输与处理架构

3.1 自组网无线传输网络构建

考虑到矿山地形复杂且存在信号盲区,构建基于LoRa与ZigBee融合的无线自组网传输体系。监测终端通过低功耗广域网协议将数据发送至中继节点,中继节点根据链路质量自动选择最佳跳数路径回传至网关,

该网络拓扑具备自愈功能,当单一节点因地质灾害损坏或断电时,网络能够自动重构路由,确保数据链路的连通性,在视距受阻的深凹矿坑,采用多级中继接力传输,有效规避山体遮挡对无线信号的衰减,传输协议中嵌入前向纠错编码,降低电磁干扰下的丢包率,确保原始监测数据完整上传至本地服务器或云端平台。

3.2 自适应滤波与异常值剔除

矿山作业现场存在爆破震动、重型车辆行驶等强背景噪声,需采用自适应滤波算法对原始信号进行降噪处理。利用小波变换技术将监测信号分解为不同频率的子带,识别并滤除高频随机噪声,保留反映地质体真实形变的低频趋势项,针对传感器故障或传输错误产生的离群值,设计基于滑动窗口的统计学检验算法,自动剔除超出物理极值或突变阈值的无效数据,通过卡尔曼滤波算法对动态数据进行平滑处理,在保留形变突变特征的同时抑制观测噪声,经过清洗的数据序列信噪比显著提升,能够更真实地还原岩土体的细微蠕变过程,防止误判^[3]。

3.3 边缘计算节点预处理机制

为减轻中心服务器的计算负荷并降低传输延迟,在数据汇聚网关处部署边缘计算节点,边缘节点内置轻量化算法,对采集的高频原始数据进行初步特征提取。例如:计算单位时间内的位移速率、加速度及累计变化量,仅将处理后的特征指标上传至云端,大幅降低带宽占用,在检测到数据超过预设的触发阈值时,边缘节点自动向底层传感器发送指令,提高采样频率,进入加密监测模式,这种分布式的计算架构实现了数据采集与初步分析的本地化,保证了在网络带宽受限情况下仍能对地质异常做出快速响应,提升了监测系统的实时性。

3.4 地质监测数据库存储策略

构建专门针对时序性地质监测数据的存储架构,采用时序数据库(TSDB)替换传统的关系型数据库,该架构针对高并发写入进行了优化,能够高效处理海量传感器每秒产生的连续数据流。设计分级存储策略,近期的高频热数据存储于高速固态介质中,支持快速查询与实时分析;历史冷数据自动归档至低成本存储介质,用于长周期的地质演化规律研究,数据库结构设计包含设备ID、时间戳、物理量值及状态码等核心字段,支持按时间窗口、区域范围及参数类型进行多维索引检索,这种存储机制确保了海量地质监测数据的持久化保存与快速调取。

4 智能化监测系统运行机制

4.1 形变速率与加速度耦合分析

系统依据岩石力学流变理论,通过分析位移—时间曲线的切线斜率,实时计算岩土体的形变速率,当监测到位移速率呈指数级增长且加速度持续为正时,表明岩体已进入非稳定蠕变阶段。系统算法自动关联同一断面上不同深度的位移矢量,判断是否存在整体剪切滑移趋势,通过计算切向位移与法向沉降的比值,分析滑坡体的运动模式(牵引式或推移式),这种基于运动学参数的实时解算,能够将静态的累积位移转化为动态的形变趋势指标,直观反映地质体的稳定性演化状态,为技术人员判断边坡所处的蠕变阶段提供量化支撑^[4]。

4.2 多参数阈值联动触发逻辑

建立基于多物理量耦合的阈值触发机制,改变单一参数超限即报警的粗放模式,逻辑设定中,将降雨量、孔隙水压力增量与深部位移速率进行逻辑“与”运算。仅当强降雨导致孔压显著升高,且同步观测到深部剪切位移加速时,才判定为有效地质异常,针对不同岩性的边坡,设定差异化的分级阈值,包括初始蠕变阈值、等速变形阈值及加速破坏阈值,系统实时扫描各传感器数值与阈值的比对结果,一旦满足多参数联动触发条件,立即启动高频采集与重点区域扫描,该机制利用物理量之间的内在因果联系,有效过滤了单一传感器误报,提高了地质异常识别的准确度。

4.3 边坡稳定性三维动态反演

结合地质勘探资料与实时监测数据,利用数值模拟软件构建边坡三维地质模型,系统将实测的位移边界条件与应力状态实时导入模型中,进行岩土体稳定性系数的动态反演计算。通过有限元或离散元分析方法,模拟当前工况下边坡内部的塑性区分布范围及潜在贯通面位置,随着监测数据的更新,模型参数不断修正,使其力学响应特征趋近于真实地质体,这种虚实结合的反演机制,能够可视化展示岩体内部的应力集中区与损伤演化路径,将监测点的数据推演至整个地质体,实现对未布设传感器区域的稳定性状态评估^[5]。

4.4 自动化报表生成与推送

系统内置自动化报表引擎,定期生成地质环境监测日报、周报及月报,报表内容涵盖各监测点的累计形变曲线、速率变化图、降雨响应特征图及稳定性系数波动图。程序自动抓取关键时段的极值数据,计算变化趋势的统计学指标,如均方差、相关系数等,生

成的数字化文档通过内部网络自动分发至相关技术部门,在遇到极端天气或数据异常波动时,系统自动生成专项分析简报,罗列异常点位、发生时间及关联参数的变化情况,这种标准化的信息产出机制,减少了人工整理数据的繁琐工作,确保了地质环境信息在技术层面的流畅传递与留档。

4.5 监测设备远程自诊断与维护

为确保监测体系的长期可靠运行,系统集成设备健康状态自诊断功能,监测终端定时上报电池电压、信号强度(RSSI)、内部温度及传感器自检状态码。服务器端算法根据回传的电压下降曲线预测设备剩余续航时间,提前生成更换电池的维护计划,对于信号强度持续低于阈值的节点,系统自动标记并在网络拓扑图中显示通信盲区,当传感器读数出现恒定值或空值时,系统远程下发重启指令尝试恢复,这种基于设备状态数据的运维机制,实现了对庞大硬件网络的精细化掌控,将被动维修转变为视情维护,保障了地质数据采集的连续性与完整性。

5 结束语

地质灾害智能化监测技术在绿色矿山建设中的应用,实现了从传统经验判断向数据驱动分析的跨越,通过高精度传感器的立体布设与多源数据的深度融合,构建了岩土体全生命周期的数字化感知体系。该技术不仅解决了复杂环境下地质参数获取难的问题,更通过边缘计算与多参数耦合分析,揭示了地质灾害演化的内在物理机制。未来,随着传感精度的进一步提升与传输协议的优化,智能化监测将更深度地嵌入矿山地质环境的各个层面,为矿山地质环境的稳定性提供更坚实的技术支撑,推动矿山地质工程向精准化、数字化方向持续发展。

参考文献:

- [1] 李秀雯,孙衍辉.绿色矿山建设中地质灾害预防与治理[J].世界有色金属,2025(11):139-141.
- [2] 于文浩,王佩韬.绿色矿山建设中的地质勘探技术应用研究[J].绿色中国,2025(10):82-84.
- [3] 汪光炎.地质灾害监测技术在绿色矿山建设中的应用探讨[J].世界有色金属,2025(06):145-147.
- [4] 江志鹏.绿色矿山建设下的矿区水工环地质勘查技术[J].中国金属通报,2025(03):151-153.
- [5] 刘郁平.绿色矿山建设中水文地质的灾害防治策略分析[J].中国金属通报,2024(11):234-236.