

矿山边坡数字化监测数据的智能分析与滑坡风险预警机制构建

王利军

中国煤炭地质总局水文地质工程地质环境地质勘察院 河北 邯郸 056004

摘要: 本文聚焦矿山边坡数字化监测数据的智能分析与滑坡风险预警机制构建, 阐述了边坡滑坡类型、成因及数字化监测技术体系, 分析监测数据特征与处理难点。接着介绍智能分析方法, 包括数据预处理、变形预测模型和前兆特征识别。然后构建预警机制, 涵盖指标体系、模型构建与验证、发布响应流程。最后通过工程应用验证机制有效性, 实现边坡安全管理从被动响应到主动预防的转变。

关键词: 矿山边坡; 数字化监测; 滑坡预警; 智能分析; 机器学习

引言: 矿山边坡滑坡是严重地质灾害, 威胁人员生命安全与设备财产, 制约矿山可持续发展。准确监测与预警滑坡风险至关重要。传统监测预警方式存在局限性, 难以满足复杂矿山边坡需求。随着数字化技术发展, 数字化监测为边坡安全监测提供新手段。本文旨在探讨矿山边坡数字化监测数据智能分析方法, 构建科学有效的滑坡风险预警机制, 提升矿山边坡安全管理水平。

1 矿山边坡滑坡机理与监测技术

1.1 边坡滑坡的主要类型与成因

矿山边坡滑坡是指岩土体沿滑动面整体下滑的地质现象。根据滑动面形态可分为平面滑坡、楔形体滑坡、圆弧滑坡和倾倒破坏四种类型。平面滑坡多发生在顺层边坡, 滑动面为单一结构面; 楔形体滑坡由多组结构面切割形成; 圆弧滑坡常见于均质土体或破碎岩体; 倾倒破坏是层状岩体发生弯曲折断。滑坡的根本原因是驱动力超过抗滑力, 影响因素分为内因和外因。内因包括岩土体力学性质、地质构造、地下水分布等, 是决定稳定性的基础条件。外因包括降雨、爆破震动、开挖卸荷等, 是诱发滑坡的直接因素。统计表明, 降雨是最主要的诱发因素, 约60%以上的滑坡发生在雨季。降雨导致岩土体含水量增加, 增大自重并降低结构面抗剪强度, 形成不利条件。

1.2 数字化监测技术体系

数字化监测技术体系由传感器层、数据传输层和数

据处理层构成。传感器层负责采集边坡状态参数, 包括表面位移、深部位移、应力应变、地下水位、降雨量等。表面位移采用全球导航卫星系统, 精度达毫米级; 深部位移采用固定式测斜仪; 应力监测采用振弦式压力盒。数据传输层将数据实时传输至中心服务器, 有线传输包括光纤和电缆, 稳定可靠但成本较高; 无线传输包括无线传感网络和移动通信, 适用于地形复杂边坡。现代矿山普遍采用有线和无线混合组网。数据处理层对数据进行存储、清洗、分析和可视化^[1]。一般边坡每小时采集一次, 重点边坡可加密至每分钟一次, 并配备数据备份和容灾机制。

1.3 监测数据特征与处理难点

矿山边坡监测数据具有多源异构性、时序相关性、空间相关性和非平稳性等特征。多源异构性体现在传感器类型、量纲和采样频率各不相同; 时序相关性指当前状态与历史状态密切相关; 空间相关性表现为不同部位变形相互影响。监测数据处理面临的主要难点包括: 一是数据噪声干扰严重, 环境温度、电磁干扰等因素会掩盖真实变形信号; 二是异常检测困难, 滑坡前兆常表现为微小变形; 三是预测模型构建复杂, 传统单一模型难以准确描述演化规律; 四是预警阈值主观性强, 缺乏科学化标准。这些问题需要通过智能分析技术加以解决。

2 监测数据智能分析方法

2.1 数据预处理与特征提取

原始监测数据需进行预处理。数据清洗采用拉依达准则, 对超出均值三倍标准差的数据点进行剔除或修正。缺失值采用线性插值或邻近点均值填充。数据降噪采用小波变换, 通过选择合适的小波基函数和分解层数分离有效信号与噪声, 小波阈值去噪能在保留突变特征

作者简介: 王利军, 1976年4月, 男, 汉族, 河北邯郸, 本科学历, 高级工程师, 现任职中国煤炭地质总局水文地质工程地质环境地质勘察院, 职务: 副院长, 主要研究方向为: 水文地质、工程地质、环境地质等领域。邮箱: wlj760418@163.com。

的同时滤除高频噪声。特征提取是从预处理数据中提取表征边坡状态的关键指标,时域特征包括均值、方差、峰值、偏度、峰度等统计量;频域特征通过傅里叶变换提取频谱能量分布、主频等参数,揭示变形周期性规律;趋势特征通过计算滑动窗口内的变形速率和加速度,判断变形是否处于加速阶段。多源特征的综合运用能够更全面地刻画边坡稳定性状态。

2.2 基于机器学习的变形预测模型

边坡变形预测是实现滑坡预警的核心环节。支持向量机适用于小样本数据,通过核函数将低维非线性问题映射为高维线性问题,具有良好的泛化能力。以历史位移、降雨量等作为输入,未来位移作为输出,建立非线性回归模型。径向基核函数是较为常用的选择。长短期记忆网络是处理时间序列数据的循环神经网络,其遗忘门、输入门和输出门结构能有效捕捉长期依赖关系。以连续时间窗口内的监测数据作为输入,网络自动学习变形演化规律,输出未来多个时刻的预测值,能够更好处理非线性、非平稳的变形数据^[2]。支持向量机与长短期记忆网络的组合模型可发挥各自优势,采用支持向量机对数据进行初步分类,识别正常和异常状态;对异常状态数据采用长短期记忆网络进行精细预测,在保证效率的同时提高预测精度。

2.3 滑坡前兆特征识别

滑坡前兆特征是预警机制的关键依据。位移加速是最直观的前兆,当变形速率持续增加超过阈值时,表明边坡进入加速蠕变阶段。加速度指标更为敏感,能在位移速率尚不明显时捕捉加速趋势。位移方向发生明显偏转时,可能意味着滑动面形态改变。地下水位变化与边坡稳定性密切相关,降雨入渗导致水位上升、孔隙水压力增大、有效应力降低。当水位上升速率超过阈值或水位达到临界高度时,应触发预警。声发射信号是岩体破裂的直接表征,事件率突然增加是滑坡即将发生的重要信号。多参数综合识别比单一参数判断具有更高的可靠性,通过分析位移、水位、声发射等多个指标的变化特征,可有效降低误报率。

3 滑坡风险预警机制构建

3.1 预警指标体系设计

预警指标体系是预警机制的核心,需遵循科学性、敏感性、可操作性原则。根据边坡监测数据的可获取性和滑坡前兆特征的典型性,设计四级预警指标体系。一级指标为位移速率,反映边坡变形的活跃程度;二级指标为位移加速度,反映变形速率的变化趋势;三级指标为地下水位变化率,反映水文条件的影响;四级指标为

声发射事件率,反映岩体破裂程度。各指标的预警阈值分为蓝色、黄色、橙色、红色四个等级。蓝色预警为关注级,位移速率达到0.5毫米每天,提示边坡进入初期变形阶段,需加强监测。黄色预警为警示级,位移速率达到1.0毫米每天或位移加速度持续为正,提示变形加速,建议加密监测频次。橙色预警为警告级,位移速率达到2.0毫米每天且地下水位快速上升,提示滑坡风险较高,建议启动应急预案。红色预警为危险级,位移速率超过5.0毫米每天或出现声发射事件率骤增,提示滑坡即将发生,应立即撤离人员设备。多指标综合预警采用加权评分方法,根据各指标对边坡稳定性的敏感程度分配权重。位移速率权重0.35,位移加速度权重0.30,地下水位变化率权重0.20,声发射事件率权重0.15。综合得分超过设定阈值时触发相应等级预警,避免单一指标异常导致误报。

3.2 预警模型构建与验证

预警模型采用支持向量机与长短期记忆网络组合架构。首先构建支持向量机分类模型,以位移速率、位移加速度、降雨强度、地下水位变化为输入特征,输出边坡状态类别。收集历史边坡变形数据,其中正常状态样本3000组,滑坡前兆样本200组,用于模型训练。采用交叉验证方法评估模型性能,分类准确率达到85%以上。对于支持向量机判定为异常状态的数据,输入长短期记忆网络进行时序预测。长短期记忆网络模型采用三层结构,输入层包含过去6个时刻的监测数据,隐含层设置64个神经元,输出层预测未来1至4小时的位移变化。模型训练采用均方误差作为损失函数,亚当优化器进行参数更新。训练完成后,在独立测试集上评估预测精度,位移预测的平均绝对误差小于0.15毫米。预警机制验证采用留一法交叉验证,将部分历史滑坡事件数据作为验证集,检验模型对滑坡前兆的识别能力。在某露天石灰岩矿的验证中,模型成功识别了全部5次小型滑坡的前兆特征,平均提前预警时间为3.2小时,误报率为12.5%。

3.3 预警发布与响应机制

预警发布与响应是预警机制落地实施的关键环节。建立分级预警发布流程,蓝色和黄色预警由矿山安全部门通过监测系统自动发布至相关责任人手机和现场显示屏,要求加密监测频次并加强现场巡视。橙色和红色预警需经安全总监确认后发布,除系统自动通知外还需启动应急广播和警报装置,通知全体作业人员。预警响应措施根据预警等级分级实施。蓝色预警响应措施包括检查监测设备运行状态、核对数据准确性、关注天气预报。黄色预警响应措施包括加密监测频次至每10分钟一

次、组织技术人员进行边坡现场检查、暂停边坡附近的非必要作业。橙色预警响应措施包括安排作业人员有序撤离、设置警戒区域限制人员进入、准备应急抢险物资。红色预警响应措施包括全面停止作业、所有人员撤离至安全区域、启动应急救援预案^[3]。

4 工程应用与效果分析

4.1 工程概况与监测系统部署

以某大型露天石灰岩矿为工程背景开展应用研究。该矿年采剥总量超过5000万吨,采场最终边坡高度达到360米,边坡角设计为45度至55度。矿区地质条件复杂,岩性以石灰岩为主,节理裂隙发育。历史上曾发生多次小型滑坡,对安全生产构成威胁。监测系统部署包括表面位移监测点35个,布设在边坡各级平台,采用全球导航卫星系统连续监测,水平位移精度达到5毫米加0.5ppm。深部位移监测孔12个,孔深30米至60米,每个测孔安装固定式测斜仪,每0.5米设置一个测点。地下水位监测孔8个,采用振弦式渗压计。雨量站2个,用于监测降雨强度和累计降雨量。

4.2 智能分析结果

对连续6个月的监测数据进行智能分析。数据预处理阶段共识别异常值156个,占总数据量的0.3%,采用邻近点均值进行填充。小波降噪后,位移时间序列的噪声水平降低约60%,变形趋势更加清晰。支持向量机分类模型对边坡状态的识别准确率为86.7%。模型成功识别出处于加速变形阶段的监测点5个,分别位于边坡东北角和西南角。长短期记忆网络预测模型对上述异常点未来2小时的位移预测值与实测值的平均误差为0.12毫米,预测精度满足预警要求。滑坡前兆特征识别结果显示,东北角边坡的位移速率从0.3毫米每天逐渐增加至1.8毫米每天,位移加速度持续为正,同时该区域地下水位在连续降雨后上升了2.5米。综合分析判定边坡进入加速变形阶段,触发黄色预警。

4.3 预警效果评价

预警机制在运行期间共触发预警7次,其中蓝色预警3次、黄色预警3次、橙色预警1次,未触发红色预警。预警事件中,有6次得到了现场验证,确认存在不同程度的边坡变形或局部垮塌,预警准确率为85.7%。1次预警经现场核查未发现明显异常,判断为误报,主要原因是降雨导致地下水位短暂上升但未影响边坡稳定性。预警提前时间方面,蓝色预警平均提前12小时,黄色预警平均提前5小时,橙色预警平均提前2.5小时。提前时间的差异反映了边坡变形从初始阶段到破坏阶段的时间跨度。较长的预警提前时间为矿山采取应对措施提供了充足准备时间。预警机制的运行使矿山边坡安全管理从被动响应转变为主动预防。实施预警机制后,矿山未发生因滑坡导致的人员伤亡事故,因滑坡造成的设备损失较实施前降低约70%。现场作业人员的安全意识和应急响应能力也得到显著提升。

结束语

矿山边坡数字化监测数据的智能分析与滑坡风险预警机制构建研究意义重大。通过综合运用多种智能分析技术,结合科学合理的预警指标体系和模型,实现了对边坡滑坡风险的有效预警。工程应用表明,该机制能显著提高预警准确率,为矿山采取应对措施争取时间,降低滑坡事故损失,提升安全管理水平。未来可进一步优化模型,提高预警的及时性与精准性。

参考文献

- [1]仝雷雷,闫杰,肖光军,等.三维激光扫描在矿山动态监测中的应用研究[J].世界有色金属,2025(16):167-169.
- [2]孙立民.数字化测量技术在矿山测量中的应用试析[J].中国金属通报,2025(16):161-163.
- [3]张玉淋.边坡控制爆破技术在绿色矿山建设中的应用[J].采矿技术,2023,23(1):135-138.