

采矿工程边坡稳定性动态监测技术研究

淡文杰

准格尔旗应急管理局, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 本文研究边坡稳定性动态监测技术。构建空-天-地一体化监测与传感器网络传输技术, 建立多源数据预处理、融合及智能分析模型, 提取边坡演化特征; 提出动态监测指标与判据, 构建机器学习及多参数综合指数预警模型, 设计监测-反馈-决策一体化系统; 探讨技术在矿山全生命周期的应用价值, 分析核心挑战与发展趋势。研究形成完整技术支撑体系, 助力边坡安全管控向主动防控转型。

关键词: 采矿工程; 边坡稳定性; 动态监测

Research on Dynamic Monitoring Technology of Mining Engineering Slope Stability

Dan Wenjie

Zhungeer Banner Emergency Management Bureau, China Inner Mongolia Ordos 010300

Abstract: This study investigates dynamic monitoring technologies for slope stability. We develop an integrated space-air-ground monitoring system with sensor network transmission capabilities, establishing multi-source data preprocessing, fusion, and intelligent analysis models to extract slope evolution characteristics. The research proposes dynamic monitoring indicators and criteria, constructs machine learning-based multi-parameter composite index early warning models, and designs an integrated monitoring-feedback-decision system. It explores the application value of these technologies throughout the entire mine lifecycle, analyzing core challenges and development trends. The study establishes a comprehensive technical support framework, facilitating the transition from passive slope safety management to proactive prevention and control.

Keywords: Mining engineering; Slope stability; Dynamic monitoring

0 引言

采矿工程边坡稳定性关乎矿山安全与周边环境, 失稳事故危害大, 传统监测存在范围有限、数据滞后等局限。本文聚焦边坡动态监测技术, 研究一体化监测、数据融合、评价预警及应用路径, 旨在实现边坡实时监测与精准预警, 为矿山边坡安全管控提供依据。

1 边坡稳定性动态监测关键技术体系

1.1 空-天-地一体化监测技术

边坡稳定性动态监测关键技术体系以立体监测为核心, 构建了空-天-地一体化监测技术为基础的完整框架。该技术通过多维度手段协同实现边坡全范围动态监测, 地基 InSAR 技术可完成大范围边坡宏观形变远距离监测, 捕捉整体变形趋势; 空基无人机摄影测量与 LiDAR 技术机动高效, 能快速获取地表三维地形信息; 地表 GNSS、三维激光扫描仪等设备实现地表点位精准位移监测, 地下测斜仪、光纤传感等技术则捕捉岩体内部位移、应变及微震活动, 形成立体监测格局。

1.2 传感器网络与实时传输技术

传感器网络与实时传输技术是动态监测的关键保障,

有效解决了多源监测数据的整合与实时反馈难题。传感器优化布设围绕监测精度、边坡地质条件及成本, 合理确定布设位置、数量与密度, 避免冗余和监测盲区, 确保数据全面真实反映边坡状态; 多源异构传感器集成与组网技术突破数据兼容瓶颈, 实现各类传感器的数据互联互通, 打破单一监测的局限性; 监测数据无线实时传输与远程遥测技术, 依托先进无线通信实现数据实时上传、存储与远程访问, 缩短数据处理周期, 为边坡失稳预警提供可靠支撑, 推动监测向远程化、智能化转型^[1]。

1.3 技术对比与适用性分析

技术对比与适用性分析是提升监测科学性和针对性的核心环节, 通过梳理各类技术核心特征, 为监测方案设计提供依据。各类监测技术在原理、精度、范围、成本及优缺点上差异明显: InSAR 监测范围广、效率高, 但受天气影响大, 近距离精准度不足; 无人机 LiDAR 兼顾效率与精度, 却受复杂地形和植被影响; 地下监测中, 光纤传感可实现分布式监测但成本较高, 测斜仪操作简便、成本适中, 适用于常规地下位移监测。基于此, 针对不同边坡类型、监测阶段及风险等级, 需组合适配监测方案, 确保监测贴

合实际需求,提升失稳防控有效性^[2]。

2 多源监测数据融合与智能分析模型

2.1 多源监测数据预处理与标准化

多源监测数据预处理与标准化是实现数据有效融合、保障分析结果可靠性的前提的基础,核心是解决多源异构监测数据的统一性与可用性问题。采矿工程边坡监测涉及地基、空基、地表及地下各类设备,所获取的数据在格式、精度、时空基准上存在显著差异,且易受环境干扰、设备误差影响出现噪声与异常值,因此需先开展系统的预处理工作。数据清洗、降噪与异常值处理主要通过剔除无效数据、抑制环境噪声、修正异常测点数据等方式,排除设备故障、外界干扰带来的误差,确保监测数据的真实性与完整性;时空基准统一与数据配准则重点解决不同监测技术时空坐标系不统一的问题,通过坐标转换、数据配准等操作,将各类监测数据统一到同一时空框架下,为后续多源数据融合奠定数据基础,避免因基准差异导致的融合偏差与分析误差^[3]。

2.2 多源数据融合理论与方法

多源数据融合理论与方法是衔接数据预处理与智能分析的核心环节,其核心目标是通过整合多维度、多类型监测数据,弥补单一数据源的局限性,提升边坡状态监测的全面性与准确性。目前主流的多源数据融合采用数据级、特征级与决策级三级融合框架,其中数据级融合是对原始监测数据直接进行整合处理,保留数据原始信息但对数据质量要求较高;特征级融合通过提取各类数据的核心特征并进行融合,兼顾数据完整性与处理效率;决策级融合则基于各单一数据源的分析结果,通过融合决策形成最终的边坡状态判断,可靠性与容错性更强。在实际应用中,基于统计学的融合方法可实现多源数据的静态整合与误差分析,而卡尔曼滤波技术则适用于边坡动态监测数据的实时融合,能够有效处理监测数据中的随机误差,动态更新边坡状态参数,提升数据融合的时效性与准确性。

2.3 边坡状态智能分析与演化特征提取

边坡状态智能分析及演化特征提取是多源数据融合的最终目的,即先对融合后的数据做系统、严谨的分析,由此自然、合理地提取边坡稳定性演化规律及失稳前兆信息:时序分析方法适合于对边坡位移速率、加速度等参数做动态跟踪,从参数变化趋势中判断边坡变形的活跃程度及变形方向,微震事件簇分析可用于分析边坡内部微震信号的空间分布特征、频次规律,因而能可靠地识别岩体破裂位置、范围及发展趋势,多参数关联分析则将位移、应

变、微震、渗流诸种监测参数纳入统一的协同演化模型中,系统、定量地厘清各参数间的内在关系,据此客观、准确地判定边坡整体稳定性状态,因此也是采矿工程边坡失稳预警与防控最有力的工具^[4]。

3 基于动态监测的边坡稳定性综合评价与预警

3.1 动态监测指标与稳定性判据

从动态监测角度出发讨论边坡稳定性综合评价及预警,就必然要先利用前期监测数据及分析结果建立科学、合理的评价标准及判据体系,由此自然、妥帖地引出动态监测指标及稳定性判据的确定问题:即要结合采矿工程边坡的地质条件、采矿工况及变形规律,系统、严谨地选出能真正反映边坡稳定性状态的关键动态预警指标,而累积位移、位移速率阈值、加速度拐点被公认为最核心的指标,这些指标能直观体现边坡变形的活跃程度与发展趋势,其阈值确定需结合边坡岩体性质、受力状态综合研判,而非固定数值。同时,需建立结合监测数据的稳定性系数动态修正方法,突破传统静态稳定性系数难以反映边坡动态变化的局限,通过实时监测数据持续修正稳定性计算参数,使稳定性系数能动态匹配边坡实际状态,提升综合评价的准确性与时效性,避免因静态评价导致的预警滞后或误判。

3.2 动态预警模型构建

动态预警模型构建是实现边坡失稳精准预警的核心手段,需结合多源融合数据与智能分析方法,构建适配采矿工程边坡特点的多元预警模型体系。基于机器学习的预警模型凭借强大的数据挖掘与趋势预测能力,在边坡预警中应用广泛,其中支持向量机(SVM)适用于小样本监测数据的预警分析,能有效处理高维监测参数;随机森林可实现多参数协同预警,抗干扰能力较强;LSTM神经网络则擅长捕捉监测数据的时序变化特征,能精准预测边坡变形的未来发展趋势。基于多参数综合指数的预警模型,通过整合位移、微震、应变等多类监测参数,构建综合评价指数,量化边坡稳定性等级,弥补单一参数预警的局限性。此外,需明确蓝、黄、橙、红四级预警等级的划分标准,结合监测指标阈值与稳定性系数,制定分级对应的预警发布机制、处置流程,确保预警信息能及时、精准传递,为应急处置争取时间^[5]。

3.3 监测-反馈-决策一体化系统架构

监测-反馈-决策一体化系统架构,是实现边坡稳定性动态监测、综合评价与预警闭环管理的重要载体,核心是打通监测、分析、预警、决策的全流程,实现各环节

的协同联动。系统总体架构设计遵循分层递进的原则,分为感知层、传输层、数据层、应用层,其中感知层负责采集边坡各类监测数据,是系统的数据来源;传输层承担多源监测数据的实时传输任务,衔接感知层与数据层;数据层负责数据的存储、预处理与融合分析,为应用层提供支撑;应用层则实现边坡稳定性综合评价、智能预警与决策建议输出,形成完整的技术闭环。可视化监测预警平台作为应用层的核心载体,其功能设计围绕实际应用需求展开,重点实现监测数据实时可视化展示、边坡状态动态研判、预警信息分级推送、应急处置方案辅助决策等功能,让监测人员能直观掌握边坡动态,快速响应预警信息。

4 动态监测技术的工程管理应用与挑战

4.1 在矿山全生命周期的应用价值

动态监测技术在采矿工程边坡管理中具有不可或缺的工程应用价值,可全面贯穿矿山全生命周期的各个关键阶段,为边坡安全管控提供精准、高效的技术支撑,推动矿山边坡管理从被动防控向主动预判转型。在矿山设计阶段,动态监测技术可通过前期现场监测获取边坡岩体的实际变形数据与力学响应特征,开展岩体力学参数反演,修正设计中采用的理论参数偏差,进而优化边坡坡角、坡型及防护方案,从源头规避设计不合理带来的安全隐患,提升边坡设计的科学性与适用性。在施工与生产期,依托动态监测系统的实时数据反馈,能够精准把控边坡在施工扰动、采矿作业影响下的变形与受力变化规律,及时发现潜在失稳迹象,据此调整施工工序、划定安全作业区域,实现施工过程的安全控制;同时,监测数据可作为矿山生产调度的重要参考,平衡采矿效率与边坡安全,避免因边坡风险导致生产中断,保障矿山生产的连续性与安全性。在闭矿后,边坡长期处于自然演化状态,仍存在失稳风险,动态监测技术可用于边坡长期稳定性监护,持续跟踪边坡变形演化趋势,及时预警地质灾害隐患,保障矿山闭矿后的生态环境与周边区域安全。

4.2 实施中的关键挑战与对策

尽管动态监测技术在矿山边坡管理中的应用价值显著,但在实际推广实施过程中,仍面临技术与管理层面的双重关键挑战,需结合矿山实际情况制定针对性对策,同时把握未来技术发展趋势,推动技术不断完善。技术层面,矿山作业环境复杂,多存在暴雨、扬尘、岩体破碎等恶劣

条件,对监测设备的复杂环境适应性、长期稳定运行可靠性提出了较高要求;此外,多源监测产生的海量数据需经过高效处理、分析才能转化为有效信息,海量数据的实时处理效率与精准度仍是当前面临的技术难点。管理层面,动态监测技术的设备购置、安装调试、后期维护均需投入一定成本,如何平衡监测成本与安全效益,实现成本效益最优化,是矿山企业面临的重要难题;同时,目前采矿工程边坡动态监测领域缺乏统一的标准规范,导致不同矿山的监测工作流程、技术要求不统一,影响监测数据的通用性与对比性;此外,监测工作需兼具采矿工程、测绘技术、信息技术等多领域知识,专业从业人员的技能水平参差不齐,也制约了监测技术的高效应用,需通过技术优化、规范完善、技能培训等对策逐步破解这些难题。未来,随着物联网、数字孪生、人工智能技术与动态监测技术的深度融合,将实现监测设备的智能化联动、边坡状态的虚拟仿真模拟、监测数据的智能分析与精准预警,进一步提升边坡监测的智能化、精准化、高效化水平。

5 结语

综上所述,本文研究采矿工程边坡稳定性动态监测技术,构建监测、数据处理、评价预警及应用框架。通过一体化监测与数据融合分析,提取边坡演化特征;确立监测指标与判据,构建预警模型及系统;明确其矿山全生命周期应用价值,分析挑战并展望融合趋势,为边坡安全管控提供支撑。

参考文献:

- [1] 槐荣国,周凯,许迪等. 软弱地层浅埋双线隧道开挖地表沉降及隔离桩控制研究[J/OL]. 交通科学与工程, 1-11[2025-03-11].
- [2] 张世殊. 水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势[J/OL]. 岩石力学与工程学报, 1-28[2025-03-11].
- [3] 杨宗平. 关于某尾矿库续建场地工程地质评价分析[J]. 石材, 2025,(03):13-15+18.
- [4] 高晴晴,纪晓阳. 矿山测绘新技术的发展趋势与挑战[J]. 世界有色金属, 2024,(24):138-140.
- [5] 王海棣,王宏业,孟德峰. 新时期矿山测绘工程测量技术的发展与应用探讨[J]. 中国金属通报, 2024,(12):10-12.

作者简介:淡文杰(1975.01-),男,汉族,内蒙古准格尔旗,毕业于中央党校函授学院,本科,工程师,研究方向:主要从事地质工程方面研究。