

# 露天开采边坡变形监测与滑移预警方法研究

杨松

江西晶楚工程技术有限公司, 江西南昌, 330200;

**摘要:** 本文聚焦于露天开采边坡变形监测与滑移预警方法。首先阐述露天开采边坡变形监测的重要性, 分析其面临的挑战。接着详细探讨变形监测技术, 包括传统监测手段的局限与新兴技术的优势。对滑移预警方法进行深入研究, 从预警模型构建、数据处理到预警指标设定展开论述。同时, 探讨监测与预警的集成应用, 以提升边坡安全管理效率。最后总结研究成果, 指出未来发展方向, 旨在为露天开采边坡安全管理提供科学依据和技术支持, 保障矿山生产安全。

**关键词:** 露天开采; 边坡变形监测; 滑移预警; 技术应用; 安全管理

**DOI:** 10.64216/3104-9664.25.03.042

## 引言

在露天矿山开采过程中, 边坡稳定性是关乎矿山安全生产的关键因素。边坡一旦发生变形甚至滑移, 将对人员、设备以及周边环境造成巨大威胁。随着开采深度不断增加和规模扩大, 边坡变形监测与滑移预警的重要性日益凸显。准确监测边坡变形情况并及时发出滑移预警, 对于提前采取防范措施、降低事故风险至关重要。本文将系统研究露天开采边坡变形监测与滑移预警方法, 以期为矿山边坡安全管理提供有效策略。

## 1 露天开采边坡变形监测技术概述

### 1.1 传统边坡变形监测技术及其局限性

传统的边坡变形监测技术主要包括水准测量、经纬仪测量等人工操作方法。水准测量通过测量边坡上各监测点的高程变化来判断垂直方向的变形情况, 其优点是操作相对简单、成本较低, 但测量精度受多种因素影响, 如仪器误差、观测人员技术水平等, 且测量周期长, 难以实时获取数据。经纬仪测量主要用于监测边坡的水平位移, 通过测量监测点与基准点之间的角度变化来计算位移量, 但同样存在测量精度有限、受天气等外界环境干扰大的问题。这些传统技术在快速、精准监测边坡变形方面存在明显不足, 难以满足现代露天矿山对边坡变形监测的高要求。

### 1.2 新兴边坡变形监测技术原理与优势

近年来, 随着科技的不断进步, 新兴的边坡变形监测技术逐渐涌现。其中, 全球定位系统 (GPS) 技术利用卫星信号对边坡上的监测点进行定位, 能够实时、连续地获取监测点的三维坐标变化, 精度可达毫米级, 且

不受地形、天气等因素限制, 大大提高了监测效率和数据的可靠性。合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 技术则通过分析雷达卫星获取的影像数据, 对大面积边坡区域的地面沉降、位移情况进行监测, 具有监测范围广、精度高、可获取历史数据等优势, 尤其适用于对大面积露天矿山边坡进行长期监测。这些新兴技术的出现, 为更准确地掌握边坡变形动态提供了有力支持。

### 1.3 多种监测技术集成应用的必要性与挑战

为了更全面、准确地监测边坡变形, 多种监测技术的集成应用成为必然趋势。例如, 将 GPS 技术与全站仪测量相结合, GPS 提供实时的三维位移数据, 全站仪则对局部关键区域进行高精度的水平位移和倾斜角度测量, 二者相互补充, 可更精确地反映边坡变形情况。然而, 这种集成应用也面临诸多挑战, 如不同技术获取的数据格式、精度和时间分辨率存在差异, 数据融合处理难度大; 多种监测设备的安装、维护和协调管理较为复杂, 需要投入更多的人力、物力和财力。如何克服这些挑战, 实现多种监测技术的高效集成, 是当前边坡变形监测领域亟待解决的问题。

## 2 露天开采边坡滑移预警模型构建

### 2.1 边坡滑移影响因素分析与数据收集

边坡滑移是一个复杂的地质灾害过程, 受到多种因素的影响, 包括地质条件 (如岩土体性质、结构面特征等)、开采活动 (如开采方式、爆破震动等)、水文地质条件 (如地下水位变化、降雨等) 以及外部环境因素 (如地震、气温变化等)。为了构建准确的滑移预警模型, 需要对这些影响因素进行全面分析, 并收集相应的

数据。例如,通过地质勘探获取边坡岩土体的力学参数,利用监测设备记录开采过程中的爆破震动数据,通过水文地质观测获取地下水位动态变化数据,同时收集气象数据以了解降雨等外部环境因素对边坡的影响。

## 2.2 基于数据挖掘的滑坡预警模型构建方法

在收集到大量边坡变形监测数据和滑坡影响因素数据后,可以运用数据挖掘技术构建滑坡预警模型。数据挖掘是一种从大量数据中提取有价值信息和模式的技术,通过分析数据之间的关系和规律,建立数学模型来预测边坡滑坡的可能性。例如,可以采用神经网络算法,将边坡变形数据和影响因素数据作为输入,滑坡事件的发生与否作为输出,通过训练神经网络模型,使其学习数据之间的复杂非线性关系,从而实现了对边坡滑坡的预警。

## 2.3 预警模型的验证与优化

构建好的滑坡预警模型需要经过严格的验证和优化才能应用于实际的边坡安全管理中。验证方法通常包括历史数据验证和实地监测数据验证。历史数据验证是将模型应用于已知滑坡事件的历史数据中,检验模型是否能够准确预测过去的滑坡情况,从而评估模型的有效性。实地监测数据验证则是将模型应用于当前的边坡监测数据中,与实际的边坡变形和滑坡情况进行对比,进一步验证模型的准确性。在验证过程中,如果发现模型存在预测偏差或误差较大的问题,需要对模型进行优化调整。

## 3 边坡变形监测数据处理与分析

### 3.1 数据预处理方法与目的

边坡变形监测数据在采集时易受干扰,常包含噪声、异常值和缺失等问题。为此,在开展数据分析前,需对数据进行预处理,以提高数据质量,为后续工作奠定可靠基础。常用的预处理方法包括数据清洗、数据平滑和数据插补。数据清洗主要是去除噪声和异常值,可借助合理阈值设定、统计分析等手段,识别并剔除不合理或明显偏离正常物理含义的监测值。数据平滑旨在降低数据波动,使其更为平缓、连续,常用方法包括移动平均法和指数平滑法等。

### 3.2 变形数据特征提取与分析方法

对预处理后的监测数据进行分析时,需提取其中蕴含的特征信息,以更好理解边坡变形规律。常见的变形特征包括位移速率、变形加速度、变形趋势等。位移速

率是表征边坡变形速度的关键指标,可通过计算相邻监测周期内位移变化与时间的比值获得,直观反映变形快慢。变形加速度则表示位移速率的变化率,其数值增大通常意味着变形速度加快,提示边坡可能存在滑坡风险。

## 3.3 数据融合技术在边坡变形监测中的应用

边坡变形监测常采用多种技术手段,所获数据各具特点。通过数据融合处理,可综合利用不同监测技术的优势,提高监测结果的精度与可靠性。数据融合主要包括数据级融合、特征级融合和决策级融合三种方式。数据级融合在原始数据层面进行,对不同来源数据直接开展加权平均、插值等处理,得到更为准确的变形数据。特征级融合先提取各类数据的特征,再通过特征融合模型进行综合分析,形成更全面的边坡变形特征描述。决策级融合则是在各自独立分析并形成初步判断后,综合各类决策信息,最终对边坡变形状态做出判定。

## 4 边坡滑坡预警指标与阈值设定

### 4.1 滑坡预警指标体系构建原则与方法

构建边坡滑坡预警指标体系是实现有效预警的关键。该体系应遵循科学性、全面性、实用性和可操作性等原则。科学性要求指标基于可靠理论与实践,真实反映边坡滑坡的物理机制;全面性指指标应涵盖滑坡的主要影响因素与变形特征,多角度评估稳定性;实用性强调指标简明易懂,便于现场管理人员理解与使用;可操作性则要求指标数据易于获取、计算简便,适合在边坡安全管理中实际应用。在构建过程中,还需注重指标间的关联性与层次性,避免信息重叠,并建立与矿山实际监测能力相匹配的指标集,确保预警系统既能全面覆盖风险因素,又不至于因指标过多而难以操作,从而形成一套结构清晰、重点突出、便于执行的预警指标体系,为边坡风险的早期识别与分级管控提供可靠依据。

### 4.2 基于边坡变形特征的预警指标选取与计算

根据边坡变形监测数据的特征,可选取与滑坡风险密切相关的关键指标作为预警依据。例如,位移速率是反映变形速度的重要指标,当其超过某一限值时,往往表明变形加快、滑坡风险上升。变形加速度也是常用预警指标,持续增大的加速度常预示边坡处于加速变形阶段,滑坡可能性显著提高。此外,边坡倾斜角度、裂缝宽度变化等也可作为辅助预警指标。在具体应用中,应结合边坡的地质结构、岩体性质和外部荷载条件,对指标进行合理筛选与权重分配。例如,对于土质边坡,含

水量变化引起的孔隙水压力指标可能更为敏感；对于岩质边坡，结构面张开度与错动量则更具指示意义。

### 4.3 预警阈值确定方法与动态调整机制

预警阈值是判断边坡滑移风险程度的关键，其确定需综合多种方法。通常可采用历史数据统计分析、理论计算与专家经验相结合的方式。历史数据统计分析依托以往边坡变形数据与滑移事件记录，总结各指标在滑移前的数值变化规律，据此设定阈值。理论计算基于边坡力学模型与稳定性分析，推算不同安全系数下各指标的临界值，作为阈值参考。专家经验则是在综合考虑地质条件、开采历史等因素基础上，由专业人员凭借经验提出阈值建议。此外，阈值应具备动态调整机制，随监测数据积累与边坡条件变化进行适时修正。具体而言，可引入机器学习算法，对持续更新的监测数据进行训练和学习，实现阈值的自适应优化。

## 5 边坡变形监测与滑移预警集成应用

### 5.1 监测与预警系统集成架构设计

为实现边坡变形监测与滑移预警的有效集成，需设计合理的系统架构，一般包括数据采集层、数据处理层、预警分析层和应用层。数据采集层负责通过各类监测设备获取边坡变形数据及相关影响因素信息，并将数据传输至上层。数据处理层对原始数据进行预处理、融合与存储，为预警分析提供高质量数据。预警分析层作为系统核心，依据预警模型与指标体系，对处理后的数据进行分析计算，判断滑移风险并发布预警信号。应用层则面向用户，提供信息查询、预警展示与决策支持等功能。

### 5.2 集成应用中的信息共享与协同工作

在集成应用中，信息共享与多部门协同至关重要。矿山的地质、生产、安全等相关部门需共同参与边坡安全管理。通过构建信息共享平台，可实现监测数据、预警信息及相关地质、开采资料的集中管理与共享。各部门人员可据此实时掌握边坡安全状况，协同开展工作。例如，地质部门可依据预警信息调整勘探安排，为边坡治理提供支持；生产部门可根据风险情况优化开采计划与作业方式；安全管理部门则可及时启动应急预案，确保人员设备安全。

### 5.3 集成应用效果评估与持续改进

对集成应用效果进行评估是保障系统有效运行与持续优化的重要环节。评估可从预警准确性、预警及时

性、系统可靠性和用户满意度等方面展开。预警准确性侧重系统判断风险的能力，可通过预警信号与实际滑移事件的匹配程度进行统计分析。预警及时性关注系统能否在风险出现早期发出警报，为应对争取时间，可通过预警发出与滑移发生的时间差进行评估。系统可靠性反映长期运行的稳定性，可借助故障率、数据完整性等指标衡量。用户满意度则体现系统是否贴合实际管理需求，可通过调研与反馈收集进行评价。基于评估结果，可对系统进行持续改进，提升其整体效能。

## 6 总结

本文系统研究了露天开采边坡变形监测与滑移预警方法。通过对传统和新兴边坡变形监测技术的分析，探讨了多种监测技术集成应用的必要性与挑战。详细阐述了边坡滑移预警模型的构建过程，包括影响因素分析、数据挖掘方法应用以及模型验证与优化。研究了边坡变形监测数据的处理与分析方法，以及数据融合技术在其中的应用。深入探讨了边坡滑移预警指标与阈值的设定原则、方法和动态调整机制。最后，设计了边坡变形监测与滑移预警集成应用的系统架构，分析了集成应用中的信息共享与协同工作模式，并提出了集成应用效果评估与持续改进的思路。研究成果为露天开采边坡安全管理提供了科学依据和技术支持，有助于提高边坡滑移预警的准确性和及时性，保障矿山生产安全。然而，随着科技的不断发展和矿山开采环境的日益复杂，边坡变形监测与滑移预警技术仍需不断创新和完善，以适应新的挑战和需求。

### 参考文献

- [1] 李红清. 露天煤矿边坡变形治理与控制开采技术[J]. 能源科技, 2025, 23(03): 26-30.
- [2] 张建雄. 无人机在露天开采边坡变化监测中的技术研究[D]. 昆明理工大学, 2024.
- [3] 孙世国, 于磊, 于云鹤. 露天矿延深开采诱发边坡地表变形研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(01): 122-128.
- [4] 刘作利, 刘景玉, 申修强, 等. 唐山马兰庄铁矿露天开采边坡变形监测的GB-InSAR技术[J]. 现代矿业, 2018, 34(04): 165-170.
- [5] 王胜. 基于监测手段边坡滑坡模式分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2016, 28(03): 234-236+243.