

数值模拟及算法

基于数值模拟与聚类分析的矿山边坡
监测网络优化研究

Optimization of Mine Slope Monitoring Network Based on Numerical Simulation and Cluster Analysis

王俊杰¹, 王刚², 廖承兴¹, 骆先红², 侯士兵², 童小畅¹

(1. 重庆绿色低碳能源科学技术研究院, 重庆 402160; 2. 重庆华新参天水泥有限公司, 重庆 402160)

摘要:针对矿山边坡监测中因设备成本与地形限制导致的监测网络稀疏及空间代表性不足问题,本文提出一种融合数值模拟与聚类分析算法的矿山边坡监测网络优化方法。本方法首先基于强度折减法探究边坡在正常及降雨工况下的稳定性演化规律,并划分边坡风险区域;在此基础上引入粒子群算法以确定各分区聚类中心,并结合空间相关系数剔除冗余监测点,最终实现矿山边坡监测网络的优化。本文以重庆华新灰岩-白云岩矿山为案例,以验证该监测网络优化方法的有效性。结果表明,优化后监测点数量由35个降至18个,重叠信息熵降低29.3%,在保障监测覆盖率前提下显著降低监测成本,为矿山边坡经济化监测提供理论依据。

关键词:矿山边坡; 监测网络; 聚类分析; 粒子群算法; 强度折减法

中图分类号: U4161+4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)05-0016-08

Abstract: This study proposes a mining slope monitoring network optimization method that integrates numerical simulation and clustering analysis algorithms to address the problems of sparse monitoring networks and insufficient spatial representativeness caused by equipment costs and terrain limitations in mining slope monitoring. This method first explores the stability evolution law of slopes under normal and rainfall conditions based on the strength reduction method, and divides the slope risk areas; On this basis, particle swarm optimization algorithm is introduced to determine the clustering centers of each partition, and redundant monitoring points are eliminated by combining spatial correlation coefficient, ultimately achieving the optimization of the mining slope monitoring network. This article takes the Chongqing Huaxin limestone dolomite mine as a case study to verify the effectiveness of the monitoring network optimization method. The results showed that after optimization, the number of monitoring points decreased from 35 to 18, and the overlapping information entropy decreased by 29.3%. While ensuring monitoring coverage, the monitoring cost was significantly reduced, providing a theoretical basis for the economic monitoring of mine slopes.

Key words: mine slope; monitoring network; cluster analysis; particle swarm optimization algorithm; strength reduction method

1 前言

近年来,频发的边坡崩塌灾害对矿山的运营安全造成严重威胁。为了保证矿山正常运营,对开挖边坡进行监测可有效预防边坡变形破坏的发生^[1]。然而目前暂无相关矿山边坡监测部署标准可供参考,这导致工程中监测设备的部署缺乏合理性。因此开展矿山边坡监测网络优化研究具有重要的工程意义。

自20世纪开始,国内外学者便针对边坡的监测

网络部署方法进行了大量研究。研究者多采用精密大地测量方法及全覆盖式监测布设进行边坡变形监测^[2-3]。然而受制于岩土体的复杂性、监测部署的经济性及现场施工的便利性^[4],实际工程中监测网络部署数量有限,若监测网络过多将导致所采集数据的重叠,若监测网络过少将导致采集的位移数据不能较好反映边坡整体变形情况。

目前对监测网络优化方法的研究主要采用经验工程法与理论分析法两类:对于工程经验法,该方法

[作者简介] 王俊杰(1999—),男,硕士,主要从事边坡监测研究。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(课题编号:2024YFC3211201);重庆市永川区技术创新与应用发展专项项目(2024yc-cxfz30129)。

[引用格式] 王俊杰,王刚,廖承兴,等.基于数值模拟与聚类分析的矿山边坡监测网络优化研究[J].中国矿山工程,2025,54(5):16-23.

依赖专家经验建立危岩体“关键特征点”,并在此基础上确定监测网络^[5-8],然而该方法较为依赖人员的工程经验,不同的人员可能同一边坡上部署不同的监测网络,其部署过程存在主观偏差;对于理论分析法,该方法采用数值模拟手段对潜在变形区进行划分,基于分区结果开展监测网络部署工作^[9-14]。然而由于边坡岩土体结构特性较为复杂,尤其是矿山岩体结构多为高度非均质性,若仅采用数值模拟方法存在岩体的实际结构特性表征不明确^[15]、网络优化部署精度低等问题,使得监测结果无法完全反映边坡的实际变形状态。

综上所述,现阶段监测网络部署方法多通过增加监测点数量来解决监测范围小及精度低的问题,这将极大的增加矿山边坡监测成本。为此,本文以监测网络为研究对象,采用数值模拟方法,明确矿山边坡的危险区域,并对危险区域开展监测网络初步部署;在此基础上,引入粒子群算法优化,综合考虑监测点的空间特性与边坡岩土体特性、变形特性及环境特性之间的关系,以期更经济高效的部署监测网络,为矿山边坡监测工程设计提供参考。

2 矿山边坡区域划分及监测网络优化部署方法

2.1 矿山边坡区域划分方法

对于监测网络的优化部署,首先使用三维扫描技术得到待监测边坡的三维模型并根据相关监测规范预先在模型上布设数据监测点,然后采用强度折减法对边坡正常及降雨工况的稳定性演变过程进行分析并计算,提取各监测网络的强度折减系数、累积位移量、位移速率等关键风险因素,在此基础上结合强度折减系数演化特征划分边坡稳定性风险区域。然后引入粒子群算法优化,对各分区的集群中心进行确定,以集群中心为控制点,计算出区域内剩余监测点与控制点的相关系数,并根据相关系数的大小对监测点进行排序,去除各区域中其中相关系数较高的数据监测网络,最终得到最佳的监测网络部署。本文采用数值模拟结合聚类分析的方法,综合考虑监测网络的空间特性、岩土体特性及降雨因素之间的关系,探究了矿山边坡监测网络优化部署的方法,其结果为矿山边坡监测网络的部署选择提供了理论依据。

1) 强度折减法

边坡的安全系数定义为把强度指标减小到边坡

临界破坏时的强度折减系数,根据 Mohr-Coulomb 强度准则,对于满足强度准则的岩土体,其抗剪强度参数折减方法如下:

$$\tau_f = c_f + \sigma \tan \varphi_f \quad (1)$$

$$c_f = c / F_s \quad (2)$$

$$\tan \varphi_f = \tan \varphi / F_s \quad (3)$$

式中: F_s 为折减系数; τ_f 为折减后土体的抗剪强度; c_f 、 φ_f 为折减后岩土体内聚力和内摩擦角。

通过不断调整岩土体的强度指标 c 、 φ 然后对边坡进行有限差分分析,直至其达到临界破坏状态,此时得到的折减系数即为安全系数。通过有限差分分析和后处理可很快找出滑裂面,此法的优点是安全系数直接求出,不需要事先假设滑裂面的形式和位置,另外可以考虑边坡渐进破坏过程和变形对稳定的影响。

2) 岩土体本构和屈服准则

本文采用 $M-C$ 本构模型描述岩土体应力应变关系,屈服准则的确定和岩土体所处的状态有关。按公式(4)的屈服准则判断岩土体状态。

$$\tau_{\max} = (\sigma - P_a) \tan \varphi_f + S_w (P_a - P_w) \tan \varphi_f + c_f \quad (4)$$

式中: τ_{\max} 为土体抗剪强度; P_a 为孔隙气压力; P_w 孔隙水压力。

2.2 监测网络聚类分析优化方法

采用粒子集群优化和相关性分析相结合的方法研究了监测网络优化问题。首先,引入粒子集群算法,对边坡各风险分区的集群中心进行确定;其次,以集群中心为控制点,计算出区域内剩余监测点与控制点的相关系数,并根据相关系数的大小对监测点进行排序,去除各区域中相关系数较高的数据监测网络,最终完成矿山边坡监测网络的优化部署。

1) 粒子群算法

粒子群算法(PSO)是一种基于群体智能的随机优化方法。每个粒子根据个体历史最优解和群体历史最优解,通过协作搜索实现空间的探索与开发,最终收敛至最优解,以此得到各区域最优集群中心。

首先,从强度折减系数数据集中提取特征向量,并进行标准化处理以消除量纲影响,标准化处理如下。

对 m 条样本数据展开 n 次观测,根据观测值 F_{ij} 建立观测矩阵 F :

$$F = [F_{ij}]_{m \times n} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1m} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ F_{n1} & F_{n2} & \cdots & F_{nm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

通过下式计算数据的均值 \bar{F}_j 和标准差 s_j :

$$\begin{cases} \bar{F}_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F_{ij}}{m} \\ s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (F_{ij} - \bar{F}_j)^2}{m}} \end{cases} \quad (6)$$

标准化处理数据,获得标准值 \bar{F}_{ij} ,并建立标准化观测矩阵 \tilde{F} :

$$\tilde{F}_{ij} = \frac{F_{ij} - \bar{F}_j}{s_j} \quad (7)$$

$$\tilde{F} = [\tilde{F}_{ij}]_{n \times m} = \begin{pmatrix} \tilde{F}_{11} & \tilde{F}_{12} & \cdots & \tilde{F}_{1m} \\ \tilde{F}_{21} & \tilde{F}_{22} & \cdots & \tilde{F}_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{F}_{n1} & \tilde{F}_{n2} & \cdots & \tilde{F}_{nm} \end{pmatrix} \quad (8)$$

建立数据的相关阵 E :

$$E = \frac{\tilde{X}^T \tilde{X}}{m} = [e_{ij}]_{n \times m} \quad (9)$$

粒子群初始化后,以轮廓系数(Silhouette Coefficient)构建适应度函数,驱动粒子群迭代优化,输出全局最优粒子位置对应的聚类中心向量,轮廓系数(Silhouette Coefficient)的计算方法为:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (10)$$

式中, $a(i)$ 为*i*向量到同一簇内其他点不相似程度的平均值; $b(i)$ 为*i*向量到其他簇的平均不相似程度的最小值。

2) 相关分析

使用相关系数量化各监测点与控制网络移数据之间的相关性。将各分区聚类中心监测点*i*为控制点,可以计算出控制点和剩余监测点的 R_{ij} 值,如果监测点*i*与任意监测点*x*的相关系数 R_{ij} 较大,则这两个监测点的相关性更高,并且它们的位置处于相同的变形状态。反之,两个监测点的相关性更低,它们位置变形状态存在一定差异。基于此,两监测点间基于位移数据的相关系数(r_{ij})表示为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik} - \bar{u}_i) \cdot (u_{jk} - \bar{u}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (u_{ik} - \bar{u}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n (u_{jk} - \bar{u}_j)^2}} \quad (11)$$

式中, u_{ik} 和 u_{jk} 分别表示监测点的第*k*个累积位移值; \bar{u}_i 、 \bar{u}_j 表示监控点*i*、*j*处监控数据序列 u_{ik} 、 u_{jk} 的平均值。

为比较两个监测点之间的距离对监测点相关性的影响,采用*LI*等定义的考虑空间位置影响的相关系数 R_{ij} :

$$R_{ij} = D_{ij} \cdot r_{ij} \quad (12)$$

$$D_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{\max}} \quad (13)$$

式中, D_{ij} 为各分区归一化的空间相关量表指数; d_{ij} 为分区内控制点到任意监测点之间的空间距离; d_{\max} 为分区内控制点到最远监控点之间的距离。

具体优化流程如下:

- ①首先,以控制点为质心,计算控制点与控制点以外监测点的相关系数 R_{ij} ;
- ②对各区域 R_{ij} 值进行排序;
- ③消除区域内除控制点外 R_{ij} 大于0.75的所有点,保留 R_{ij} 小于0.75的监测网络;
- ④如果区域内仅有一个监测点,则不考虑优化该区域。

为判断监测点的优化程度,引入信息熵对优化结果进行验证,熵值越高,系统越混乱,熵值越低,系统越有序(General properties of entropy)。根据相关系数计算方程建立矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix} = I + M \quad (14)$$

式中, I 表示 R 的自相关矩阵; M 表示互相关矩阵。设 λ_i^R 、 λ_i^I 和 λ_i^M 分别为矩阵 Y 、 I 和 M 的特征值,故相关信息熵和重叠信息熵分别定义如下:

$$H_R = - \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i^R}{h} \log_2 \frac{\lambda_i^R}{h} \quad (15)$$

$$H_M = 1 + \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i^R}{h} \log_2 \frac{\lambda_i^R}{h} \quad (16)$$

3 工程应用

3.1 工程概况

本文选取中国重庆华新矿山北侧边坡作为研究

对象,对矿山边坡变形监测网络的优化部署进行研究,具体如图1所示。华新矿区位于新店背斜西翼,属于岩溶低山地貌,地层主要由嘉陵江组第二、三、四段(T_{2j}^{2-4})及须家河组第一、二段(T_{3xj}^{1-2})灰岩、白云岩组成。岩层受区域动力构造作用影响,岩石节理、裂隙较发育,但经后期胶结,较为稳固。经取样进行岩石力学性质测试,均为硬质岩石,工程力学

性能较好,抗风化力较强,稳定性较好。根据现场调查可知,研究区无断层产出,岩层总体完整性较好,无危岩分布。目前矿山边坡已开挖完成,共分为五级,边坡坡长约220 m,宽约80 m,最大高度65 m,坡角整体约43°,每阶约51°,岩层倾向北西,倾角30°~46°,与坡向相反。

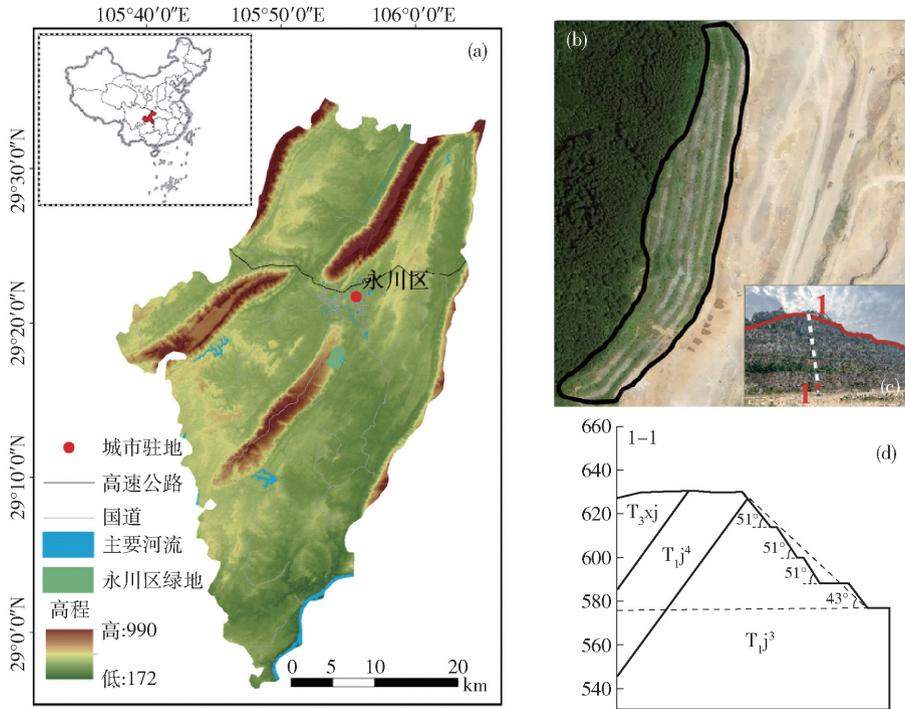


图1 研究区地理及地层岩性图

该工程需要采用自动化监测手段来实现对数据的实时采集、运输、计算、分析,当监测到的数据异常变化时,会及时发布预警。监测的内容包括边坡的表面位移、裂缝、倾角、雨量等。

3.2 数值模拟参数确定及模型建立

边坡岩石的单轴抗压、抗拉和抗剪强度根据《工程岩体试验方法》(GB/T 50266—2013)开展室内试验获得,其他参数由标准值折减获得。根据《工程地质勘察规范》(DBJ 50-043—2016):当岩体完整、较完整或较破碎时,岩体内摩擦角标准值可由岩石内摩擦角标准值根据岩体完整性乘以0.85~

0.95(完整取0.95,较完整取0.90,较破碎取0.85)的折减系数确定。岩体黏聚力标准值可由岩石粘聚力标准值乘以0.20~0.40(完整取0.40,较完整取0.30,较破碎取0.20)的折减系数确定。研究区内岩体灰岩完整性为较完整,白云质灰岩完整性为较破碎,故研究区域边坡稳定性定量计算灰岩岩体参数取内摩擦角折减系数0.9、黏聚力折减系数0.3;白云质灰岩岩体参数取内摩擦角折减系数0.85、粘聚力折减系数0.2。岩土工程材料模型采用Mohr-Coulomb强度准则,内力和位移收敛准则用于边坡模型的非线性弹塑性静力分析。具体参数见表1。

表1 岩石力学参数

| | 天然密度/ $g \cdot cm^{-3}$ | 黏聚力/ kPa | 内摩擦角/ (°) | 弹性模量 E/GPa | 泊松比 μ | 体积模量 K/GPa | 剪切模量 G/GPa | 抗拉强度/ MPa | 单轴抗压 强度/MPa |
|-----|----------------------------|-------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|
| 灰岩 | 2.7 | 280 | 33 | 2.8 | 0.25 | 1.87 | 1.12 | 2.66 | 71.5 |
| 白云岩 | 2.67 | 420 | 36 | 3.5 | 0.27 | 2.54 | 1.38 | 2.47 | 47.4 |

矿山边坡数值模型如图2所示。为提高模型计算效率,对模型底部在Z方向、侧面X、Y方向的位移进行约束以模拟实际工程中地基约束条件,同时假设边坡仅受其自重产生的载荷影响。

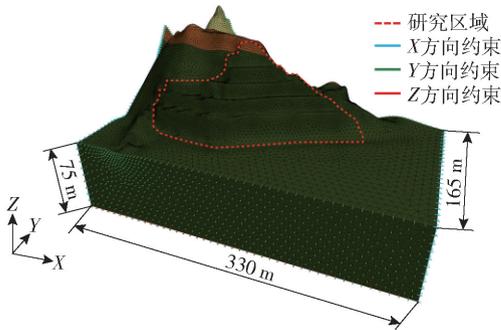


图2 矿山边坡数值模型

根据矿山边坡实际情况并结合《金属非金属露天矿山高陡边坡安全监测技术规范》(AQ/T 2063—2018)要求,同一平台的数据采集点间距为20 m,垂直间距由边坡的几何形状决定,因此在网格的节点中共布设了35个数据采集点。数据采集点布设位置如图3所示。

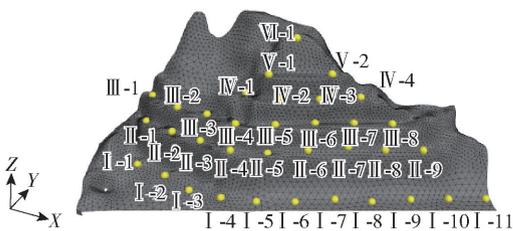


图3 边坡监测网络数据采集点布设示意图

3.3 数值模拟结果分析

矿山边坡应变率及相应位移分布变化情况如图4所示。图中边坡变形趋势主要集中于第一级边坡阶梯处,表现出显著的空间不均匀性。位移幅值自坡顶区域呈现明显的梯度递增趋势,表明坡体存在显著的剪切滑移变形。

为直观展示边坡内部的塑性区域变化特征,选取穿越高应变梯度区与位移变形区的A-A'、B-B'截面分析不同强度折减系数下边坡内部塑性区发育情况,具体如图5所示。由模拟结果可知边坡的塑性区域随强度折减系数的增加而扩大,同时随坡高增大应变逐渐减小,塑性区域处于第一级阶梯位置处,如A-A'截面在边坡坡脚附近区域的应变相对较大,B-B'截面应变率变化与A-A'截面具有相似规律,但是其塑性区域相较A-A'截面更大。

进一步通过分析边坡塑性区变化可以发现,随

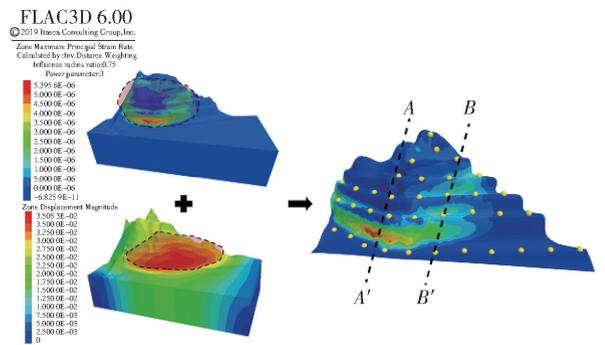


图4 边坡的应变率、相应位移分布情况及各截面位置

着折减系数的增加,边坡潜在滑移面逐渐增大,且在A-A'界面边坡第一阶梯、B-B'界面边坡第一至三阶梯破坏可能最大。

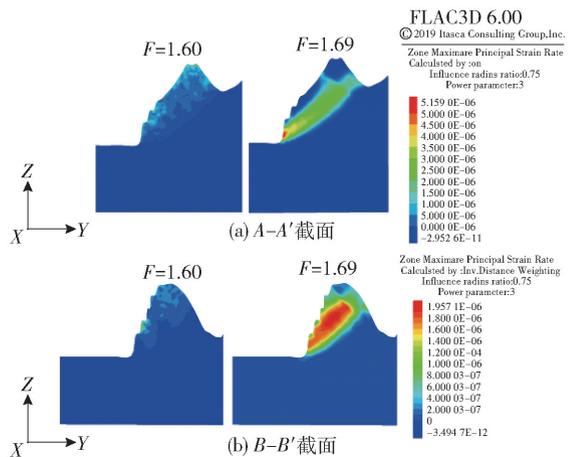


图5 矿山边坡内部塑性区变化云图

考虑到降雨是影响露天采场边坡稳定性的主要因素,为更好的对矿山边坡进行风险区划分,进一步采用流体-力学耦合模型对矿山边坡开展降水工况的模拟。由于模型底部为不透水基岩面,故将模型的底部边界设置为0水头边界,同时,将模型的XY方向边界同样设置为0水头边界,另外,由于模型的底部为非渗透边界,根据地勘报告可知,研究区域内地下水位埋深较深,故在整个模拟过程中,并未考虑地下水位的影响。其中降雨工况计算参数取值见表2。降雨强度的大小取该地区本年度日均最大降雨强度,其值为63.0 mm/d,换算成秒约为 0.729×10^{-3} mm/s。降雨工况模拟采用非饱和渗流本构模型,通过在坡面施加恒定降雨通量边界,计算边坡在降雨入渗条件下6H后的边坡安全系数及变形分布情况。以A-A'、B-B'截面为例,降雨工况下边坡变形分布情况如图6所示。

表2 降雨工况参数设置

| | 灰岩 | 白云岩 |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| 饱和密度/ $g \cdot cm^{-3}$ | 2.73 | 2.71 |
| 黏聚力/kPa | 273 | 413 |
| 内摩擦角/ $(^\circ)$ | 31 | 34 |
| 饱和渗透系数/ $m \cdot s^{-1}$ | 2.34×10^{-9} | 2.15×10^{-11} |
| 孔隙率/% | 1.83 | 0.72 |

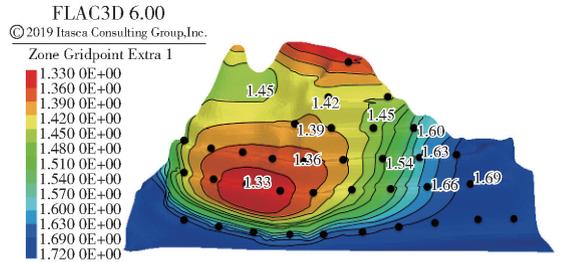


图8 强度折减系数分布区域划分

3.4 基于聚类分析算法的监测网络部署优化

选取35个监测点的强度折减系数作为测试数据,建立了考虑监测点空间位置的监测点相关矩阵E,具体如图9所示。由图可知,监测点之间的距离相关性差异很大,关联度分布在 $[0,1]$ 区间内。距离较远的两个监测点之间的相关性远低于距离较近的网络,表明距离因子对监测点间的相关性存在影响。

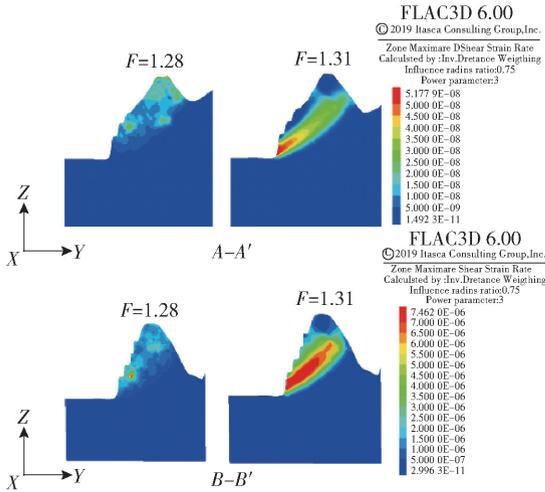


图6 矿山边坡内部塑性区变化云图(降雨工况)

不同工况下矿山边坡应变率对比如图7所示。由图可知,该边坡变形受降雨引发的水力劣化效应影响严重,导致边坡滑动面呈现渐进式扩展特征,对强度折减系数具有较大影响,但是边坡依然保持以局部破坏为主的破坏模式。

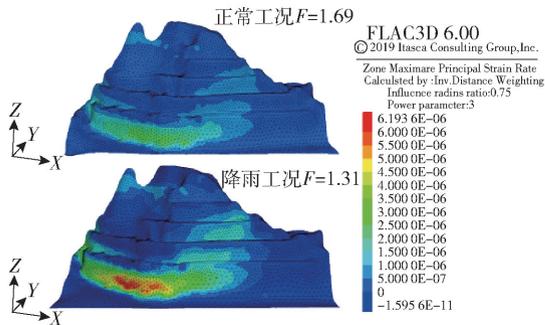


图7 不同工况矿山边坡应变率云图对比

基于上述不同工况下边坡稳定性分析,采用迭代算法,对模型进行多阶段折减和求解,得到边坡整体的强度折减系数分布云图,具体如图8所示。由图可知边坡风险最大的区域位于边坡的中下部区域以及平台以上两级平台。



图9 考虑空间距离的任意两个监测点的地表位移相关矩阵热力图

将该边坡分区内监测点位设置,以边界两侧监测点的连接线的中心作为变形分区的边界进行分区边界的划定。根据轮廓系数 $S(t)$ 的特征, $S(t)$ 值越大,分区结果就越科学合理。通过优化结果表明,当边坡划分为12个分区时, $S(t)$ 最大,达到0.73,分区结果及聚类结果如图10和表3所示。

利用基于聚类分析的边坡监测网络分区后,对12个变形分区中的监测点采用相关分析的方法进行冗余优化。选择每个分区中的聚类中心作为各分区的控制点,消除与控制点相关性强的监控点。根据优化计算,将监测点从35个优化为18个,其中,设置3处最稳定位置作为监测基准网络,具体见表4。

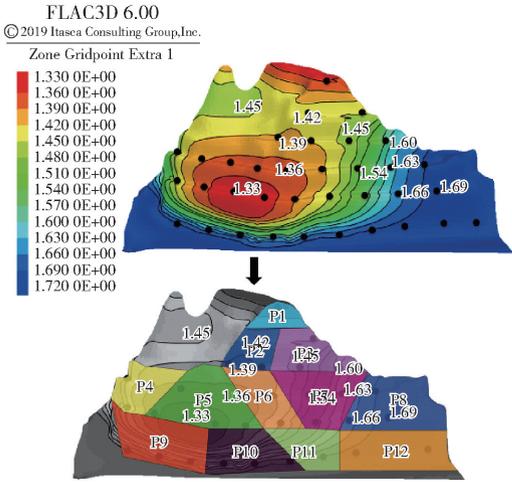


图 10 边坡分区

利用基于重叠信息熵的冗余优化进一步评估了 35 个监测点的水平位移。结果表明,35 个监测点的重叠信息熵相对较高(即 $H_M = 0.8532$),而 18 个监测点的重叠信息熵 H_M 仅为 0.6035,优化后的监测点信息熵重叠度下降 29.3%,表明这 18 个监测点的布置可以经济高效地完成监测任务。优化后监测网络如图 11 所示。

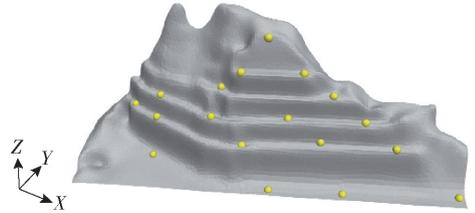


图 11 优化后监测网络图

表 3 坡监测点聚类结果

| 分区 | 监控点数 | 集群中心 | 区域内监控点 |
|-----|------|-------|---------------------------------------|
| P1 | 1 | VI-1 | VI-1 |
| P2 | 3 | V-1 | V-1、IV-1、IV-2 |
| P3 | 3 | V-2 | V-2、IV-3、IV-4 |
| P4 | 3 | III-2 | III-1、III-2、II-1 |
| P5 | 7 | III-4 | III-3、III-4、III-5、II-2、II-3、II-4、II-5 |
| P6 | 2 | III-6 | III-6、II-6 |
| P7 | 3 | II-7 | III-7、III-8、II-7 |
| P8 | 3 | II-9 | III-9、II-8、II-9 |
| P9 | 3 | I-2 | I-1、I-2、I-3 |
| P10 | 3 | I-5 | I-4、I-5、I-6 |
| P11 | 2 | I-7 | I-7、I-8 |
| P12 | 3 | I-10 | I-9、I-10、I-11 |

表 4 监测网络优化结果

| 分区 | 监控点数 | 集群中心 | 区域内监控点 | 优化后的监控点 |
|-----|------|-------|---------------------------------------|-----------------|
| P1 | 1 | VI-1 | VI-1 | VI-1 |
| P2 | 3 | V-1 | V-1、IV-1、IV-2 | V-1、IV-1 |
| P3 | 3 | V-2 | V-2、IV-3、IV-4 | V-2、IV-4 |
| P4 | 3 | III-2 | III-1、III-2、II-1 | III-2、II-1 |
| P5 | 7 | III-4 | III-3、III-4、III-5、II-2、II-3、II-4、II-5 | III-4、II-5、II-2 |
| P6 | 2 | III-6 | III-6、II-6 | III-6 |
| P7 | 3 | II-7 | III-7、III-8、II-7 | II-7、III-8 |
| P8 | 3 | II-9 | III-9、II-8、II-9 | II-9 |
| P9 | 3 | I-2 | I-1、I-2、I-3 | I-2 |
| P10 | 3 | I-5 | I-4、I-5、I-6 | I-5 |
| P11 | 2 | I-7 | I-7、I-8 | I-7 |
| P12 | 3 | I-10 | I-9、I-10、I-11 | I-10 |

4 结论

本文提出了一种基于数值模拟与聚类分析的边坡监测网络优化方法,并将该方法应用于重庆某灰岩-白云岩开挖边坡的监测项目中,主要研究结果如下:

(1) 本文基于数值模拟及聚类分析的矿山边坡监测网络优化方法,在保证监测范围及精度不变的条件,实现了监测经济高效的目的,对矿山边坡监测网络部署具有较好的适用性。

(2) 以轮廓系数验证分区科学性,并以聚类中心为控制点,通过阈值筛选剔除冗余监测点,使监测网络减少 48.6%。

(3) 通过重叠信息熵验证优化效果:优化后熵值降低 29.3%,证明优化布设方案可精准捕获关键变形区,在保障监测效果的同时显著降低成本。

[参考文献]

[1] 吴浩. GPS 原理及工程安全监测应用[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2014.

[2] Cina A, Piras M. Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results[J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2015, 6(5-7): 497-514.

[3] 吴浩, 李珍, 鲁清华, 等. 敏感度与关联度协同优化的边坡变形监测布点方法[J]. 金属矿山, 2019: 180-184.

[4] Šegina E, Peternel T, Urbančič T, et al. Monitoring Surface Displacement of a Deep-Seated Landslide by a Low-Cost and near Real-Time GNSS System[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3375.

[5] Hastaoglu K O, Sanli D U. Monitoring Koyulhisar

- landslide using rapid static GPS: a strategy to remove biases from vertical velocities [J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(3): 1275–1294.
- [6] 姜卫平, 刘鸿飞, 刘万科, 等. 西龙池上水库 GPS 变形监测系统研究及实现[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012: 949–952, 1009.
- [7] Li Y-Z, Shen J-H, Zhang W-X, et al. Slope deformation partitioning and monitoring points optimization based on cluster analysis[J]. *Journal of Mountain Science*, 2023, 20(8): 2405–2421.
- [8] Wang J, Li H, Jiang Y, et al. Slope monitoring optimization considering three-dimensional deformation and failure characteristics using the strength reduction method: A case study[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 4049.
- [9] 殷学超. 基于监测数据的大岗山高边坡稳定性预测预报研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [10] 邓贤国. 基于数值计算的边坡位移监测点优化布设方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- [11] 王洪德, 高幼龙, 薛星桥, 等. 典型滑坡监测点优化布置[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43: 858–866.
- [12] Giorgetti A, Lucchi M, Tavelli E, et al. A Robust Wireless Sensor Network for Landslide Risk Analysis: System Design, Deployment, and Field Testing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(16): 6374–6386.
- [13] Liu Z, Liu P, Zhou C, et al. Structural Health Monitoring of Underground Structures in Reclamation Area Using Fiber Bragg Grating Sensors[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(3): 2849.
- [14] Notti D, Cina A, Manzano A, et al. Low-Cost GNSS Solution for Continuous Monitoring of Slope Instabilities Applied to Madonna Del Sasso Sanctuary (NW Italy) [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(1): 289.
- [15] Azarfar B, Ahmadvand S, Sattarvand J, et al. Stability Analysis of Rock Structure in Large Slopes and Open-Pit Mine: Numerical and Experimental Fault Modeling[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2019, 52(12): 4889–4905.
- (上接第6页)
- [2] 尚磊. 超深井大尺寸分级箍固井技术研究[J]. *石化技术*, 2024, 31(09): 79–81.
- [3] 丁子晨. 深部开采对下盘竖井稳定性影响的研究[J]. *采矿技术*, 2023, 23(01): 90–93.
- [4] 马宏伟, 李明, 张丽丽, 等. 深部开采对地表及竖井稳定性影响分析[J]. *金属矿山*, 2024, (02): 239–246.
- [5] 马凤山, 赵海军, 郭捷, 等. 山东望儿山矿区浅部复采对井筒稳定性影响的数值模拟[J]. *黄金科学技术*, 2012, 20(04): 49–53.
- [6] 张飞, 王昊, 郝勇浙. 鑫达金矿竖井保安矿柱圈定及稳定性分析[J]. *采矿技术*, 2021, 21(05): 52–56 + 60.
- [7] 王胜开, 朱志根, 余一松等. 深部高应力竖井井壁稳定性分析及支护优化[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(04): 38–44.
- [8] 胡盼庆. 关键层对地表移动范围影响的数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [9] 付俊, 金属矿山急倾斜薄矿体开采岩层移动及地表影响研究[D]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2014.
- [10] 贺桂成, 刘永, 丁德馨, 等. 废石胶结充填体强度特性及其应用研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(01): 74–79.
- [11] 王作鹏, 金爱兵, 孙文斌, 等. 水砂-胶结充填隔离矿柱稳定性及宽度研究[J]. *金属矿山*, 2024, (03): 19–28.
- [12] 霍润科, 李宁, 马英军. 工程岩体 c, ψ 值选取的模糊-关联分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, (09): 1481–1485.
- [13] 高玉倩, 胡亚军, 赵淑芳. 采空区不同充填接顶率的充填体稳定性研究[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(03): 140–144.
- [14] 张佳琳, 王孝东. 基于模型试验的某矿区地下开采过程中采场稳定性研究[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2024, 76(04): 43–53.