



改进加权距离判别分析模型的 边坡爆破稳定性判别

齐留洋¹, 王德胜¹, 刘占全², 崔 凤²

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 包钢钢联巴润矿业分公司, 包头 014080)

摘 要: 针对爆破振动对矿山边坡稳定性评价中存在诸多不确定性因素的问题, 采用距离判别分析理论并对该模型进行加权赋值的改进, 用以区别不同参数之间的重要性。选用振动速度峰值(水平、垂直)、振动主频(水平、垂直)、爆心距共 5 个影响因素作为判别因子, 建立露天采矿受到爆破振动时产生边坡危害判别的距离判别分析模型(DDA 模型)和改进加权距离判别分析模型(改进 DDA 模型); 通过 6 次现场爆破试验收集到 24 组爆破振动实测数据, 以其中 18 组现场数据作为模型的学习样本对模型进行训练, 建立与之相对应的判别函数, 利用回代法进行误判率的回检, 并用 6 组现场数据作为预测样本进行测试。结果表明: DDA 模型回检误判率为 5.6%, 对影响因素的重要性进行加权的改进 DDA 模型回检误判率为 0%, 其判别结果与实际结果完全吻合。改进加权距离判别分析模型的算法简单、收敛速度快、预测精度高, 为露天采矿爆破振动对边坡危害程度的判别提供了一种新思路。

关键词: 爆破振动; 边坡危害; 距离判别分析模型

文章编号: 1004-0609(2021)-07-1989-08

中图分类号: TD235

文献标志码: A

引文格式: 齐留洋, 王德胜, 刘占全, 等. 改进加权距离判别分析模型的边坡爆破稳定性判别[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1989–1996. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39534

QI Liu-yang, WANG De-sheng, LIU Zhan-quan, et al. Improved distance discriminant analysis model for slope blasting stability discrimination[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1989–1996. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39534

露天矿山在预裂爆破^[1]开挖形成岩性边坡时, 爆破荷载在对岩石完成破碎的同时, 还将对保留区域内的岩体产生爆破的震动损伤^[2-5], 边坡损伤区域在后续开挖施工作业期间也将继续受到扰动、降雨等因素的不利影响, 尤其是当开挖台阶不断下降, 靠帮边坡越来越陡, 更加需要控制爆破振动对边坡稳定性的影响^[6-8]。

传统的爆破振动危害评价以测点的峰值振动速度和主振频率作为衡量爆破振动强度及其危害的技术指标^[9], 在安全规程中也详细规定了一些地上建筑物、地下开挖设施、人工或天然边坡的振动

安全极限, 判据单一、操作简单、监测容易等是此方法的显著优点, 因而在对爆破振动危害进行评价的矿山边坡工程中得到了广泛应用^[10-12]。

但是, 由于边坡受爆破产生的危害除了与爆破振动因素有关, 还与现场岩体特征性质、地质支护条件等因素密切相关^[9], 因此, 在对边坡这类大型的整体性工程进行爆破振动的危害评价时, 单一地考虑质点振速和频率往往不能满足要求^[9]。矿山靠帮边坡不同于路堑、水利边坡等, 矿山边坡在形成的前后就不断地受到矿山生产过程中爆破振动的影响, 并且矿山生产在几十年内不会发生较大的位

置迁移,地质条件变化较小,因此,相对于地质条件和岩体特征,爆破振动对矿山边坡的稳定性判别更加起到主要性作用。

随着边坡破坏判别方法的发展,距离判别法思想逐渐应用于该领域。然而,距离判别法会将影响边坡体破坏的各个参数之间的重要性同等对待,这种同等对待显然是不恰当的。因此,本文将距离判别法中存在的这个问题进行了改进,将参数进行加权赋值,利用3标度层次分析法确定权重系数,成功地将改进的距离判别分析法引入矿山边坡受爆破振动破坏的判别评价中^[13]。结合内蒙古包钢钢联巴润矿业的工程地质条件,选择振动速度峰值(水平、垂直)、振动主频(水平、垂直)、爆心距共5项指标作为判别因子,建立矿山边坡受爆破振动破坏的加权距离判别分析模型。

1 距离判别分析计算理论

1.1 马氏距离分析计算理论

判别分析法^[13-15]是将所研究的事物对象根据判别需要判别的不同类别进行划分,同时获得划分类别的观测数据,根据某些准则建立判别式,对未知类型的样本对象进行分类。其中,马氏距离判别分析法是将已掌握的每个类别的事物对象,在其特有的数据信息的基础上,总结出该类事物的规律,建立判别函数,根据总结的判别函数,判别新样本所属类别,其多个总体的距离判定如下。

设有 β 个总体 $G_1, G_2, \dots, G_\beta, G_\alpha$ 的均值为 μ_α ,协方差矩阵为 $\Sigma_\alpha (\Sigma_\alpha > 0)$,且 $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \dots = \Sigma_\beta$, $\alpha = 1, 2, \dots, \beta$ 。 X 为待判别的样品,则样本 X 到总体 G_α 的马氏距离为

$$d(X, G_\alpha) = \sqrt{(X - \mu_\alpha)^T \Sigma_\alpha^{-1} (X - \mu_\alpha)} = \sqrt{X^T \Sigma_\alpha^{-1} X - 2\mu_\alpha^T \Sigma_\alpha^{-1} X + \mu_\alpha^T \Sigma_\alpha^{-1} \mu_\alpha} = \sqrt{X^T \Sigma_\alpha^{-1} X - 2(\lambda_\alpha^T X + C_\alpha)} \quad (1)$$

式中: $\alpha = 1, 2, \dots, \beta$; $\lambda_\alpha = \Sigma_\alpha^{-1} \mu_\alpha$; $C_\alpha = -\frac{1}{2} \mu_\alpha^T \Sigma_\alpha^{-1} \mu_\alpha$ 。

由式(1)可得线性判别函数为

$$\hat{\psi}_\alpha(X) = \lambda_\alpha^T X + C_\alpha; \quad \alpha = 1, 2, \dots, \beta$$

则多总体的距离判别规则为

$$\text{若 } \hat{\psi}_\alpha(X) = \max_{1 \leq \alpha \leq \beta} (\lambda_\alpha^T X + C_\alpha), X \in G_\alpha \quad (2)$$

马氏距离判别分析在决定距离大小时,将样本中的每个指标因素的重要性视作相同,但实际上,这些指标因素在判定样本属于哪一类别时所起的作用不是同等重要的^[16]。在研究爆破振动对于矿山边坡稳定分析时,振动速度和振动频率指标因素的重要性就会大于地下水、地应力等^[17]。因此,如果不对各个指标因素的重要性进行事先划分,距离判别分析法就会将一些重要性较低的指标因素的作用夸大,对预测判别结果造成误判。

1.2 层次分析法改进的加权马氏距离

过往在研究二维爆破振动波对结构体的影响时,发现爆破振动速度、振动主频和持续时间会在不同程度上对受爆破振动影响的结构体产生不同的破坏作用,影响程度按照大小依次排序为:振速、主频、持续时间^[18]。考虑到马氏距离判别分析法在判别的过程中,将各个因素的重要性视为相同,为更加合理、科学地确定振动速度、振动主频和爆心距对判别结果的影响,在马氏距离判别分析的基础上,对各个因素指标加入指标权重,建立改进后的马氏距离判别分析模型。在指标权重的确定上,不同学者对于如何确定权重矩阵的观点和认识也不尽相同。层次分析法是通过指标因子之间的两两比较,确定不同指标因子的重要性,进而描述其权重。对于难以完全定量分析的矿山边坡破坏程度判别的问题,利用层次分析法确定各因素指标的权重是较为理想的^[19-22]。

传统的层次分析法在生成权重矩阵时采用的是9标度法,占主导地位的专家主观因素会使得评判结果容易带有片面性^[23]。本文尝试采用3标度法^[19],即:(-1, 0, 1),建立权重的判断矩阵,计算各指标之间的权重,这种方法能够使矩阵元素两两比较时产生误判的概率大幅度减小,同时也能够省略检验判断矩阵一致性的环节,提高计算效率。

2 露天采矿爆破振动对边坡危害预测的距离判别分析模型及其应用

2.1 判别参数及评价体系的确定

爆破振动对矿山边坡破坏程度判别的影响因素很多, 既有爆破振动特征参量, 又有边坡岩土体自身特性特点, 还有边坡所处的地质条件等。根据爆破振动作用下边坡的破坏机制, 经综合分析, 选取振动速度峰值(水平 X_1 、垂直 X_2)、振动主频(水平 X_3 、垂直 X_4)、爆心距(X_5)这 5 个主要受爆破影响矿山边坡破坏程度的参量作为判别因子^[23]。

结合白云鄂博巴润矿靠帮边坡长期受爆破振动影响所产生的破坏特征, 将边坡的破坏程度划分为 3 个等级: 1) 边坡完好, 无明显损伤现象, 模型输出结果为 G_1 ; 2) 岩体出现小裂缝, 受结构面影响的边部出现明显掉块现象, 模型输出结果为 G_2 ; 3) 岩体开始破裂, 边部开始崩塌, 伴有沉降和较深较宽的裂缝产生, 模型输出结果为 G_3 。

2.2 学习样本的构造和马氏距离判别模型的建立

通过对内蒙古包钢钢联巴润矿露天采场 6 次靠帮预裂爆破振动作用下, 预裂形成的靠帮边坡破坏

程度的实验观察, 获取了 24 组爆破振动与矿山边坡破坏程度之间的关联数据(见表 1)。将获得的样本数据分成两部分: 一部用于对模型进行训练, 另一部分用于检验模型的精度可靠性。鉴于样本数据取自 6 次不同的预裂爆破试验, 考虑到能够全面检验模型的性能, 从这 6 次试验获得的数据中各取 1 组, 组成检测样本。剩下的 18 组数据作为距离判别分析模型的学习样本对模型进行训练, 由此建立距离判别分析模型。该模型的输入层节点数为 5, 即: $\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5]$, 输出层节点数为 3, 即: $\mathbf{G} = [G_1, G_2, G_3]$, 分别对应于 3 类边坡破坏等级。根据本文距离判别分析计算理论进行计算、学习, 其中距离判别分析模型示意图如图 1 所示。

对训练样本进行计算、学习后可求得相应的判别系数, 进而可得如下判别函数:

$$\hat{\psi}_1(X) = -498.273 - 0.624X_1 + 4.157X_2 + 3.796X_3 + 10.362X_4 - 1.479X_5$$

$$\hat{\psi}_2(X) = -603.289 - 1.443X_1 + 5.689X_2 + 4.213X_3 + 9.447X_4 - 2.462X_5$$

$$\hat{\psi}_3(X) = -556.343 - 1.738X_1 + 4.279X_2 - 1.279X_3 + 11.948X_4 - 0.923X_5$$

表 1 距离判别分析模型学习样本

Table 1 Training samples of distance discriminant analysis model

Sample No.	Vibration velocity peak/(cm·s ⁻¹)		Vibration frequency/Hz		Distance/m	Sample No.	Vibration velocity peak/(cm·s ⁻¹)		Vibration frequency/Hz		Distance/m
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical			Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	
1	4.568	4.774	16.602	17.090	76.20	13	5.262	6.386	28.809	28.809	71.60
2	2.437	2.256	18.066	19.043	120.8	14	1.151	1.361	14.993	15.381	123.5
3	4.840	4.963	31.250	31.250	70.60	15	6.836	8.448	13.184	12.940	73.80
4	2.622	2.834	28.026	30.139	101.5	16	3.519	3.869	29.053	29.053	121.2
5	4.554	4.570	28.687	10.376	71.30	17	4.382	4.977	29.907	30.518	78.30
6	0.953	0.956	29.907	31.128	110.7	18	2.254	3.015	26.856	26.856	119.6
7	4.541	4.557	25.024	23.804	65.30	19	4.476	5.318	18.311	20.084	82.40
8	0.950	0.958	2.4410	15.259	93.40	20	2.484	3.264	28.327	30.412	112.9
9	5.335	7.075	16.113	15.137	68.90	21	2.329	4.454	43.945	43.457	72.40
10	2.962	4.543	13.672	13.428	113.6	22	1.035	1.762	43.945	21.973	116.5
11	7.539	8.248	9.766	9.766	71.40	23	5.642	5.563	9.7656	20.508	77.10
12	3.627	4.129	15.137	16.113	119.2	24	2.342	2.675	43.945	43.945	109.8

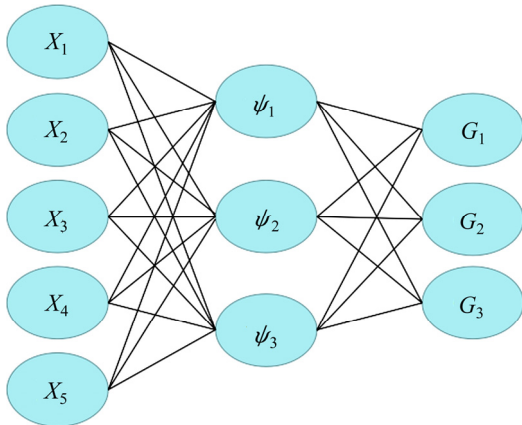


图1 距离判别分析模型示意图

Fig. 1 Model of distance discriminant analysis method

2.3 改进加权马氏距离判别模型的建立

利用提出的 3 标度层次分析法对样本 $X=[X_1, X_2, X_3, X_4, X_5]$ 的指标进行权重计算, 将得到的权重矩阵 W 引入式(1), 以区分各指标重要性的差异程度, 即可得到本文提出的改进的距离判别分析法, X 为待判别的样品, 则样本 X 到总体 G_α 的加权马氏距离用式(3)计算, 距离判别分析模型示意图如图 2 所示。

$$d(X, G_\alpha) = \sqrt{(X - \mu_\alpha)^T W \sum_{\alpha}^{-1} (X - \mu_\alpha)} \quad (3)$$

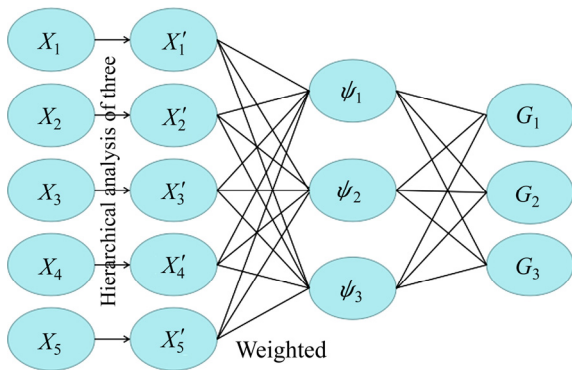


图2 加权距离判别分析法模型建立过程

Fig. 2 Building process of improved distance discriminant analysis method

根据 3 标度判断方法, 对 5 个分级指标构造两两比较的判断矩阵 A 如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

矩阵 A 的最优传递矩阵 O 的元素与矩阵 A 存在如下关系:

$$o_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (a_{it} + a_{jt});$$

最优传递矩阵 O 转化为一致性矩阵 D 的元素有如下关系:

$$d_{ij} = \exp(o_{ij});$$

$$O = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 1.4 & 0.8 & 1.4 \\ -0.4 & 0 & 1 & 0.4 & 1 \\ -1.4 & -1 & 0 & -0.6 & 0 \\ -0.8 & -0.4 & 0.6 & 0 & 0.6 \\ -1.4 & -1 & 0 & 0.6 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1.492 & 4.055 & 2.226 & 4.055 \\ 0.670 & 1 & 2.718 & 1.492 & 2.718 \\ 0.247 & 0.368 & 1 & 0.579 & 1 \\ 0.449 & 0.670 & 1.822 & 1 & 1.822 \\ 0.247 & 0.368 & 1 & 0.549 & 1 \end{bmatrix}$$

首先计算矩阵 D 的每一行元素的乘积 P_i , 其中, 然后利用方根法计算 $w_i = \sqrt[n]{P_i}$, 再对向量 $\bar{W} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \bar{w}_3, \bar{w}_4, \bar{w}_5)^T$ 进行归一化处理, 求得特征向量 $W = (0.383, 0.257, 0.094, 0.172, 0.094)^T$, 即可作为各指标的权重系数。将得到的权重系数矩阵代入式(5)计算出马氏加权距离, 依据马氏加权距离判别边坡破坏程度。

对训练样本进行计算、学习后可求得相应的判别系数, 进而可得如下加权判别函数:

$$\hat{\psi}_1(X) = -467.438 - 0.734X_1 + 5.038X_2 + 3.529X_3 + 12.429X_4 - 2.337X_5$$

$$\hat{\psi}_2(X) = -589.757 - 2.346X_1 + 5.044X_2 + 5.374X_3 + 10.472X_4 - 1.758X_5$$

$$\hat{\psi}_3(X) = -606.233 - 5.342X_1 + 1.289X_2 - 4.348X_3 + 8.274X_4 - 5.132X_5$$

2.4 判别模型的检验及工程应用

为了考察爆破振动对边坡破坏效应预测的距离判别分析模型的有效性和可靠性, 采用马氏距离判别模型(DDA)、加权马氏距离判别模型(加权 DDA)、神经网络分别训练样本 18 组, 所得结果情况对比如表 2 所示。

表 2 学习样本判别结果

Table 2 Discriminant result of training samples

Sample No.	DDA	Weighted DDA	Neural network	Actual situation
1	G_1	G_1	G_1	G_1
2	G_1	G_1	G_1	G_1
3	G_1	G_1	G_1	G_1
5	G_1	G_1	G_1	G_1
6	G_1	G_1	G_1	G_1
7	G_1	G_1	G_1	G_1
9	G_2	G_2	G_2	G_2
10	G_2	G_2	G_2	G_2
11	G_2	G_2	G_2	G_2
13	G_2	G_2	G_2	G_2
14	G_2	G_2	G_2	G_2
15	G_2	G_2	G_2	G_2
17	G_3	G_3	G_3	G_3
18	G_3	G_3	G_3	G_3
19	G_3	G_3	G_3	G_3
21	G_2	G_2	G_2	G_2
22	G_2	G_2	G_2	G_2
23	G_3	G_2	G_2	G_2

判别结果中, 使用马氏距离判别分析模型(DDA)的预测除 23 号样本误判为第 G_3 类外(实际类别为第 G_2 类), 其余样本的判定结果与实际情况较吻合。其回代估计法计算误判率, 样本 23 发生误判, 误判率 $\sigma=1/18 \times 100\%=5.6\%$ 。从回判结果来看, 该距离判别模型训练结果正确率仍然较高。

表 4 监测数据

Table 4 Monitoring data

Sample No.	Vibration velocity peak/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		Vibration frequency/Hz		Distance/m	Result
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical		
1	4.029	4.938	31.250	31.250	60.68	G_2
2	4.240	4.763	18.343	19.072	72.32	G_2
3	2.576	2.484	18.902	19.011	81.20	G_3

改进加权距离判别分析模型与神经网络预测的判别结果以及与实际情况完全吻合, 判别效果的准确率高于马氏距离判别分析模型, 与使用神经网络判别的结果相同, 说明改进加权距离判别分析模型是高效、可靠的, 因此可以投入使用。

采用上面已经完成学习的距离判别分析模型, 对另外 6 组测试样本(每次预裂爆破试验选取 1 组数据)进行判别, 结果见表 3。

表 3 测试样本判别结果

Table 3 Discriminant result of testing samples

Sample No.	DDA	Weighted DDA	Neural network	Actual situation
4	G_1	G_1	G_1	G_1
8	G_2	G_1	G_1	G_1
12	G_1	G_1	G_1	G_1
16	G_2	G_2	G_2	G_2
20	G_3	G_3	G_3	G_3
24	G_2	G_2	G_2	G_2

由表 3 可看出, 本文虽然是使用小样本数据对模型进行训练, 但改进之后的距离判别分析模型的预测结果和实际结果全部相符, 判别的正确率与采用 BP 神经网络所判别的结果一致, 误判率低。更重要的是, 相比较于 BP 神经网络的训练收敛速度, 距离判别分析方法的计算方法简单, 训练速度更快, 同时不存在神经网络算法中陷入局部极小值的问题, 综合效果更优。

2.5 判别模型的生产应用

将加权马氏距离判别模型投入生产实际中检测应用, 于 2018 年 10 月 27 日在巴润矿一次靠帮边坡预裂爆破中, 对振动速度峰值(水平、垂直)、振动主频(水平、垂直)、爆心距这 5 项指标进行实时监测, 所获取的监测数据及根据监测数据得到的判别结果如表 4 所示。

结合判别的结果,考虑到白云鄂博地区秋冬季爆破时为达到爆破效果、减少二次爆破,炸药单耗普遍偏高,因此,当电铲装铲到预裂边坡面时,将坡顶的矿山环线电缆后移 10 m,保证环线电缆不受边坡破裂、边部崩塌沉降和裂缝等危害的影响。



图3 预裂边坡开挖后实际效果

Fig. 3 Actual effect of pre-crack slope excavation

通过边坡预裂面开挖后的实际效果可以看出,使用加权马氏距离判别模型对边坡爆破稳定性的判别是可行的,判别结果符合实际效果,为边坡爆破后的稳定性判别提供了一条新途径。

3 结论

1) 将距离判别分析理论应用于露天采矿爆破振动对矿山边坡破坏程度的预测,并考虑了爆破振动对边坡破坏效应的主要影响因素。选取振动速度峰值(水平、垂直)、振动主频(水平、垂直)、爆心距共 5 个影响因素作为判别因子,建立了爆破振动对矿山边坡破坏程度预测的距离判别模型。

2) 利用上述因素建立的马氏距离判别分析模型(DDA)和改进加权马氏距离判别模型(加权 DDA)判别爆破振动对矿山边坡破坏程度,二者的判别结果与神经网络的预测结果接近,预测精度高;在小样本的情况下,DDA 回判估计的误判率为 5.6%,加权 DDA 回判估计的误判率为 0%。加权 DDA 的判别结果准确、可靠,较神经网络简单实用,为爆破振动对矿山边坡破坏效应的预测提供了一条新途径。

3) 通过比较马氏距离判别分析模型、加权马氏距离判别分析模型、神经网络模型这三种方法,在

模型的误判率方面,神经网络和加权马氏距离判别法的误判率低,在三种方法中精度最高;在计算、回归收敛的方面,加权距离判别分析法较神经网络计算方法简单,训练和收敛速度快。综合比较,加权距离判别模型精度高、误判率低、计算方法简单、收敛速度快,最为适用。

REFERENCES

- [1] 李建华. 预裂爆破技术在大型露天矿山的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(3): 74-76, 81.
LI Jian-hua. Application of pre-blasting technology in large-scale open-pit mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2015, 67(3): 74-76, 81.
- [2] 杨明财. 爆破振动作用下南芬露天矿边坡稳定性分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
YANG Ming-cai. Analysis of slope stability of Nan-fen open pit mine under blasting vibration[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [3] 李海波, 蒋会军, 赵 坚, 等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1887-1891.
LI Hai-bo, JIANG Hui-jun, ZHAO Jian, et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 22(11): 1887-1891.
- [4] 闫长斌. 爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
YAN Chang-bin. Study on cumulative damage effects and stability of rock mass under blasting loading[D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [5] 刘美山. 特高陡边坡开挖爆破技术及其对边坡稳定性的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
LIU Mei-shan. The excavation blasting technique of particularly high and steep slope and the influence on its stability[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [6] 唐 海, 李海波, 周青春, 等. 预裂爆破震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2277-2285.
TANG Hai, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Experimental study of vibration effect of presplit blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,

- 29(11): 2277-2285.
- [7] 夏 祥. 爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究[D]. 武汉: 中国科学院, 2006.
XIA Xiang. Study of damage characteristics and safety threshold of rock vibration by blast[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [8] 胡英国, 卢文波, 陈 明. 不同开挖方式下岩石高边坡损伤演化过程比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1176-1184.
HU Ying-guo, LU Wen-bo, CHEN Ming. Comparison of damage evolution process of high rock slope excavated by different methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1176-1184.
- [9] 宋光明, 史秀志, 陈寿如. 露天矿边坡爆破振动破坏判断新方法及其应用[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2000, 31(6): 485-488.
SONG Guang-ming, SHI Xiu-zhi, CHEN Shou-ru. New method for determining blasting vibration damage criterion on open-pit slope and its application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2000, 31(6): 485-488.
- [10] 陈寿如, 宋光明, 周胜利, 等. 近河堤采矿爆破的震动监测与控制[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(1): 136-139.
CHEN Shou-ru, SONG Guang-ming, ZHOU Sheng-li, et al. Controlling blasting ground vibration near bank[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(1): 136-139.
- [11] 宋光明, 江文明, 史秀志, 等. 岩土结构爆破地震动态应力比评价标准的研究[J]. 矿冶工程, 2000, 20(1): 23-25.
SONG Guang-ming, JIANG Wen-ming, SHI Xiu-zhi, et al. Dynamic stress ratios of ground blasting vibration of rock-soil construction: an assessment criterion[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(1): 23-25.
- [12] YU T R. New blast damage criteria for underground blasting[J]. CIM Bulletin, 1996, 89(3): 139-145.
- [13] 闫长斌, 路新景. 基于改进的距离判别分析法的南水北调西线工程 TBM 施工围岩分级[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1446-1451.
YAN Chang-bin, LU Xin-jing. Classification of surrounding rock mass by TBM tunneling based on improved distance discriminant analysis method in west route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1446-1451.
- [14] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1012-1018.
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1012-1018.
- [15] 梅长林, 范金城. 数据分析方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 142-153.
MEI Chang-lin, FAN Jin-cheng. Data analysis method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 142-153.
- [16] 周 健, 史秀志, 王怀勇. 矿井突水水源识别的距离判别分析模型[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 278-282.
ZHOU Jian, SHI Xiu-zhi, WANG Huai-yong. Water source determination of mine inflow based on distance discriminant analysis model[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 278-282.
- [17] 杨天鸿, 张锋春, 于庆磊, 等. 露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1437-1451.
YANG Tian-hong, ZHANG Feng-chun, YU Qing-lei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1437-1451.
- [18] 宫凤强, 李夕兵. 距离判别分析法在岩体质量等级分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 190-194.
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. Application of distance discriminant analysis method to classification of engineering quality of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 190-193.
- [19] 赵 琳, 罗 汉, 刘 京. 加权马氏距离判别分析方法及其权值确定-旅游信息服务系统的智能推荐[J]. 经济数学, 2007, 24(2): 185-188.
ZHAO Lin, LUO Han, LIU Jing. Weighted Mahalanobis distance and the weighted-determining method the arithmetic of tourism information recommender system[J]. Mathematics in Economics, 2007, 24(2): 185-188.
- [20] 朱 茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 119-122.
ZHU Yin, MENG Zhi-yong, KAN Shu-yu. Determination of weight value by AHP[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(5): 119-122.
- [21] 秦波涛, 李增华. 改进层次分析法用于矿井安全性综合评价[J]. 西安科技学院学报, 2002, 22(2): 126-129.

- QIN Bo-tao, LI Zeng-hua. Application of improved AHP method in safety evaluation of mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2002, 22(2): 126-129.
- [22] 魏海霞, 陈士海, 张安康, 茅晓辉. 二维爆破地震波作用下三自由度弹性结构的动力响应[J]. 工程爆破, 2009, 15(4): 1-4, 12.
- WEI Hai-xia, CHEN Shi-hai, ZHANG An-kang, MAO Xiao-hui. Dynamic response of three-freedom elastic structure to two-dimensional blasting seismic waves[J]. Engineering Blasting, 2009, 15(4): 1-4, 12.
- [23] 秦晨, 陈晓方, 杨玉婷, 桂卫华. 基于FAHP-IE算法的尾矿库安全性三级评估研究及应用[J]. 控制工程, 2014, 21(6): 995-1000.
- QIN Chen, CHEN Xiao-fang, YANG Yu-ting, GUI Wei-hua. Research on safety three-level evaluation of tailings reservoir based on FAHP-IE method[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(6): 995-1000.
- [24] 范金城, 梅长林. 数据分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- FAN Jin-cheng, MEI Chang-lin. Data analysis[M]. Beijing: Science Press, 2002.

Improved distance discriminant analysis model for slope blasting stability discrimination

QI Liu-yang¹, WANG De-sheng¹, LIU Zhan-quan², CUI Feng²

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. BaRun Mining Branch, Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014080, China)

Abstract: Aiming at the problem that there are many uncertain factors in the evaluation of mine slope stability by blasting vibration, the distance discriminant analysis theory was adopted and the weighted value of the model was improved to distinguish the importance of different parameters. The distance discriminant analysis model (DDA model) and the improved distance discriminant analysis model (improved DDA model) of slope hazards caused by blasting vibration in open-pit mining were established by selecting five influencing factors, namely, peak vibration velocity (horizontal and vertical), dominant vibration frequency (horizontal and vertical), and distance from blasting center as discriminant factors. The 24 groups of measured blasting vibration data were collected from 6 field blasting tests, 18 groups of which were used as the learning samples to train the model, and the corresponding discriminant function was established. The misjudgment rate was checked back by the back substitution method, and 6 groups of field data were used as the prediction samples for testing. The results show that the misdiagnosis rate of the DDA model is 5.6%, and the misdiagnosis rate of the improved DDA model weighted by the importance of influencing factors is 0%. The discriminant results of the improved weighted distance discriminant analysis model are completely consistent with the actual results. Because the algorithm is simple, the convergence speed is fast, and the prediction accuracy is high, the improved DDA model provides a new idea for the discrimination of the damage degree of the slope caused by blasting vibration in open-pit mining.

Key words: blasting vibration; slope failure; distance discriminant analysis model

Received date: 2019-05-24; **Accepted date:** 2019-07-14

Corresponding author: QI Liu-yang; Tel: +86-15611005757; E-mail: qiliuyang2013@ustb.com.cn

(编辑 龙怀中)