基于 Fisher 判别分析法的井巷围岩质量分类研究

张紫昭[1,2],陈 凯[1],程文瑜[1],刘 军[1],田忠锋[3]
(1. 新疆大学 地质与矿业工程学院,新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产研究所,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 为建立在煤矿勘探阶段井巷围岩质量分类的判别模型,选取岩石的天然单轴抗压强度、饱和单轴抗压强度、软化系数、天然抗剪强度、饱和抗剪强度、含水率和岩石质量指标 *RQD* 值等 7 项因子作为分类指标,以新疆乌鲁木齐市某煤矿的 2 个煤层顶底板的 40 组岩样作为学习样本,采用 Fisher 判别分析方法对该 40 组岩样进行训练,建立了判别模型,采用回代估计方法对每个岩样进行验证,正确率达到 97.5%,利用该判别分类模型对另一煤矿的 8 组岩样进行分类,其分类结果与实际分类结果完全相符。研究结果表明: Fisher 判别分析方法是一种有效的围岩质量分类方法,该判别模型可在实际煤矿井巷围岩质量分类中进行推广应用。

关键词: 井巷围岩; 围岩质量分类; 分类指标; Fisher 判别分析法; 回代估计法
中图分类号: TD313; P624 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)11-0036-06

Study on classification of surrounding rock quality in mine shaft and roadway based on Fisher discrimination analysis

Zhang Zizhao[1,2], Chen Kai[1], Cheng Wenyu[1], Liu Jun[1], Tian Zhongfeng[3]
(1. *School of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*; 2. *School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*; 3. *Xinjiang Uygur Autonomous Region Research Institute of Geology and Mineral Resources, Urumqi* 830000, *China*)

Abstract: In order to establish discrimination model of the surrounding rock quality classification for the mine shaft and roadway at the mine exploration stage, seven factors of a natural uniaxial compression strength, saturated uniaxial compression strength, softening coefficient, natural shearing strength, saturated shearing strength, moisture content and *RQD* value were selected as the classification indexes. Based on 40 group rock samples from the roof and floor of two seams in a mine of Urumqi, Xinjiang as the study samples, the Fisher discrimination analysis method was applied to the training of the 40 group rock samples. A discrimination model was established. A back substitution estimation method was applied to test and verify each sample and the accuracy rate was 97.5%. The discrimination classification model was applied to classify 8 group rock samples from another mine and the classification results were fully fitted with the actual classification results. The study results showed that the Fisher discrimination analysis method was an effective classification method of the surrounding rock quality and the discrimination model could be promoted and applied to the surrounding rock quality classification of the actual mine shaft and roadway.

Key words: surrounding rock of roadway; surrounding rock quality classification; classification index; Fisher discrimination analysis; back substitution estimation method

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

收稿日期: 2016-05-22; **责任编辑:** 曾康生 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.11.007
基金项目: 中国地质调查局资助项目(1212011120477)
作者简介: 张紫昭(1981—),男,山东威海人,副教授,博士研究生。Tel: 13639977295, E-mail: 253569481@qq.com
引用格式: 张紫昭,陈 凯,程文瑜,等.基于 Fisher 判别分析法的井巷围岩质量分类研究[J].煤炭科学技术,2016,44(11):36-41.
Zhang Zizhao, Chen Kai, Cheng Wenyu, *et al*. Study on classification of surrounding rock quality in mine shaft and roadway based on Fisher discrimination analysis[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 36-41.

0 引　　言

煤矿地下开采的一个核心问题是巷道围岩的稳定性,而围岩性质的好坏直接决定围岩的自稳能力,因此煤矿井巷围岩质量分类是煤矿地下开采工作中的一项重要工作,是煤矿地质勘探工作的重要内容,准确地将煤矿围岩质量进行分类可很好地反映井巷工程地质类型和煤矿开采技术条件。近年来,关于围岩质量分类方法的研究取得多种成果,如基于概率论和数学计算的分类方法[1-2]、模糊数学方法[3-4]、神经网络分类方法[5-6]、加权平均评价法[7]、Bayes 判别分析法[8-9]、支持向量机分类法[10]、距离判别法[11-12]和 Fisher 判别分析法[13-14]等,但这些分类方法主要是在巷道开采后针对围岩进行岩体质量分类的,而针对矿井勘探阶段围岩岩体质量进行分类的研究目前还很少,在考虑影响围岩分类的因素上,前期研究重点是偏于整个围岩岩体,而针对围岩岩石物理性质指标的选取则很少,一般仅考虑饱和单轴抗压强度和岩石质量指标(RQD),这与实际应用中的《矿区水文地质工程地质勘探规范》相一致,而此次分类的煤矿巷道围岩顶底板大都为粉砂岩,呈厚层状,岩体完整,节理、裂隙等结构面不发育,因此,笔者所作的分类在指标的选取上重点考虑围岩岩石物理性质指标,在选取饱和单轴抗压强度和 RQD 值等常用参数外,将天然单轴抗压强度、软化系数、天然抗剪强度、饱和抗剪强度和含水率等影响围岩岩石质量的因素也作为分类依据,采用 Fisher 判别分析建立相应的分类模型。

1 井巷围岩质量分类

1.1 Fisher 判别分析方法

判别分析是判别样品所属类型的一种统计方法,是在已知研究对象分成若干类型(或组别)并已取得各种类型的一批已知样品的观测数据,在此基础上根据某些准则建立判别式,然后对未知类型的样品进行判别分类。Fisher 判别分析法于 1936 年提出,该方法的基本思想是投影,将 k 组 m 元数据投影到某一个方向,使得投影后组与组之间尽可能地放开,然后再选择合适的判别规则,将新的样品进行分类判别[15-16]。

1.2 多类总体的 Fisher 判别

设共有 k 个总体 $\boldsymbol{G}_1$、$\boldsymbol{G}_2$、…、$\boldsymbol{G}_k$,从中抽取样品数分别为 n_1、n_2、…、n_k,令 $n=n_1+n_2+\cdots+n_k$。$\boldsymbol{x}_{ai}=(x_{1,i},x_{2,i},\cdots,x_{p,i})$ 为第 i 个总体的 p 个样品的观测向量。设判别函数为

$$y(x)=c_1x_1+c_2x_2+\cdots+c_px_p=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \tag{1}$$

其中: $\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,\cdots c_p)^{\mathrm{T}}$ 为系数向量矩阵; $\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_p)^{\mathrm{T}}$; p 为样品指标观测数量。

记 $\bar{\boldsymbol{x}}_i$ 和 $\boldsymbol{s}_i$ 分别是总体 G_i 内 x 的样本均值向量和样本协方差阵,根据求随机变量线性组和均值和方差的性质可知,$y(x)$ 在 G_i 上的样本均值 $\bar{y}_{(i)}$ 和样本方差 σ_i^2 为

$$\bar{y}_i=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{x}}_i,\sigma_i^2=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_i\boldsymbol{c}$$

记 $\bar{x}$ 为总的均值向量,则 $\bar{y}=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{x}}$。

在多种体情况下,Fisher 准则就是要选取系数向量 $\boldsymbol{c}$,使能够衡量判别函数判别效果的判别效率 λ 达到最大,即

$$\lambda=\frac{\sum_{i=1}^{k}n_i(\bar{y}_i-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{k}q_i\sigma_i^2} \tag{2}$$

其中, q_i 为人为重合的正加权系数,可取为先验概率。

如果取 $q_i=n_i-1$,并将 $\bar{y}_i=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{x}}_i,\bar{\boldsymbol{y}}=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{x}},\sigma_i^2=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_i\boldsymbol{c}$ 代入式(2),可简化为

$$\lambda=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{c}/(\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{c}) \tag{3}$$

其中: $\boldsymbol{E}$ 为组内离差阵; $\boldsymbol{A}$ 为组间离差平方和,即

$$\boldsymbol{E}=\sum_{i=1}^{k}q_i\boldsymbol{s}_i,\ \boldsymbol{A}=\sum_{i=1}^{k}n_i(\bar{\boldsymbol{x}}_i-\bar{\boldsymbol{x}})(\bar{\boldsymbol{x}}_i-\bar{\boldsymbol{x}})^{\mathrm{T}}$$

为求式(3)中 λ 的最大值,根据极值存在的必要条件,令 $\partial\lambda/\partial\boldsymbol{c}=0$,可得

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{c}=\lambda\boldsymbol{E}\boldsymbol{c} \tag{4}$$

这说明 λ 及 $\boldsymbol{c}$ 恰好是 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{E}$ 矩阵的广义特征根及其对应的特征向量。由代数知识可知,式(4)非零特征根个数 m 不超过 $\min(k-1,p)$,又因为 $\boldsymbol{A}$ 为非负数,所以非零特征根必为正根,记为 $\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\lambda_m>0$,于是可构造 m 个判别函数,即

$$y_l(x)=\boldsymbol{c}^{(l)\ \mathrm{T}}\boldsymbol{x}\quad(l=1,2,\cdots,m) \tag{5}$$

对于每一个判别函数必须给出一个用以衡量判别能力的指标 p_i 定义为

$$p_i=\frac{\lambda_l}{\sum_{i=1}^{m}\lambda_i} \tag{6}$$

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

m_0 个判别函数 $y_1, y_2, \cdots, y_{m0}$ 的判别能力定义为

$$sp_{m_0} = \sum_{l=1}^{m_0} p_l = \sum_{l=1}^{m_0} \lambda_l / \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \quad (7)$$

如果 sp_{m_0} 达到某个特定的值(比如 85%),则认为有 m_0 个判别函数即可。判别函数确定之后,采用不加权法对待判样本进行分类。

记 $\overline{y_{l,i}} = \boldsymbol{c}^{(l)\mathrm{T}} \overline{\boldsymbol{x}_i}$ ($l = 1,2,\cdots,m_0$; $i = 1,2,\cdots,k$),对待判样品 $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_p)^{\mathrm{T}}$,先计算每个样本函数值 $y_l(x) = \boldsymbol{c}^{(l)\mathrm{T}} \boldsymbol{x}$,然后计算每个样本函数值至每一组样本均值的距离的平方和,即: $D_i^2 = \sum_{l=1}^{m_0} [y_l(x) - \overline{y_{li}}]$ ($i = 1,2,\cdots,k$)

若样本函数值到第 r 组样本均值的距离的平方和最小,即 $D_r^2 = \min_{1 \leqslant i \leqslant k} D_i^2$,则判 $x \in G_r$。

1.3　Fisher 判别效果检验

为考察上述判别准则是否优良,采用以训练样本为基础的回代估计法计算误判率。

来自总体容量为 x 的训练样本 $\boldsymbol{x}_{a,i} = (x_{a1,i}, x_{a2,i}, \cdots, x_{ap,i})$,($a = 1,2,\ldots,n_i$; $i = 1,2,\ldots,k$),以所有的训练样本作为新样本,依次代入建立的判别函数中,并且利用判别准则进行判别,该过程称为回判。用 n_{ij} 表示将属于总体 G_i 的样本误判为总体 G_i 的个数,设总的误判个数为 N,则误判率的回代估计为

$$\eta = N/(n_1 + n_2 + \cdots + n_m) \quad (8)$$

1.4　分类指标的选取

影响煤矿井巷围岩岩石质量的因素有很多,笔者在选择分类指标时重点选取能够反映岩石物理性质的指标,此次分类选取了 7 个因子作为分类指标(表 1),即: 天然单轴抗压强度 X_1、饱和单轴抗压强度 X_2、软化系数 X_3、天然抗剪强度 X_4、饱和抗剪强度 X_5、含水率 X_6 和 RQD 值 X_7。

1.5　Fisher 判别分析模型

此次分类选取 40 个岩样作为研究对象,分别对各岩样进行判别分析,将围岩质量判别分类结果划分为 5 类,构建 Fisher 判别分析模型。

Fisher 判别模型计算样本见表 1 数据,计算过程采用 SPSS 进行,分析结果见表 2—表 4。

表 1　围岩分析样本

Table 1　Rock-mass samples

样品编号	X_1/MPa	X_2/MPa	X_3	X_4/MPa	X_5/MPa	X_6/%	X_7/%
1	39.50	3.40	0.09	5.36	2.70	1.32	19.2
2	40.00	4.00	0.10	5.08	3.20	1.25	21.1
3	39.60	3.30	0.08	5.12	2.90	1.33	18.7
4	59.90	13.30	0.22	16.10	3.21	1.21	28.5
5	59.70	13.20	0.22	17.20	3.32	1.22	28.3
6	60.50	25.70	0.42	19.60	7.09	0.61	42.2
7	60.90	25.10	0.41	18.90	6.83	0.58	38.8
8	60.80	25.20	0.41	19.20	6.96	0.63	36.3
9	19.20	12.90	0.67	11.10	4.20	1.22	26.5
10	20.00	12.20	0.61	10.80	3.80	1.28	37.2
11	19.70	12.40	0.63	11.00	4.90	1.21	31.4
12	17.20	3.02	0.18	3.90	0.89	3.41	6.2
13	18.00	2.79	0.16	4.40	0.93	3.37	5.8
14	17.90	2.86	0.16	4.20	0.86	3.28	5.7
15	46.50	9.90	0.21	10.20	7.09	2.24	34.3
16	47.10	9.62	0.20	11.20	2.97	1.98	22.1
17	20.80	3.76	0.18	13.60	2.09	2.23	15.4
18	21.60	4.07	0.19	14.40	2.97	2.13	17.2
19	21.40	4.12	0.19	14.60	2.02	2.09	19.3
20	30.20	7.87	0.26	11.20	3.72	3.45	29.8
21	29.70	8.02	0.27	10.90	5.07	2.32	38.9
22	43.20	13.20	0.31	9.10	4.20	1.28	33.2
23	24.60	13.70	0.56	8.70	3.70	1.25	39.8
24	25.20	14.00	0.56	8.90	4.80	1.23	40.1
25	19.30	2.90	0.15	8.40	1.10	2.98	5.6
26	18.90	3.20	0.17	7.80	1.10	2.89	10.2
27	66.20	34.40	0.52	15.10	8.30	0.59	47.2
28	66.10	34.30	0.52	14.90	7.50	0.53	46.7
29	11.00	3.90	0.35	2.30	1.80	2.64	7.3
30	11.60	4.10	0.35	2.40	1.60	2.45	8.2
31	5.80	1.80	0.31	4.50	0.50	3.03	0.0
32	5.60	1.70	0.30	4.20	0.90	2.99	0.8
33	5.50	1.70	0.31	4.30	0.70	3.05	0.7
34	82.20	34.90	0.42	16.20	10.30	0.47	48.2
35	52.70	33.40	0.63	13.30	8.30	0.43	44.5
36	82.00	34.70	0.42	14.00	7.50	0.51	50.2
37	16.90	2.70	0.16	4.50	1.40	3.73	0.0
38	17.60	2.20	0.13	4.70	1.30	3.68	0.7
39	102.30	29.00	0.28	19.30	8.10	0.61	51.2
40	103.40	28.70	0.28	19.50	7.90	0.57	50.7

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 2　典型判别式函数系数

Table 2　Typical discriminant function coefficients

因子	函数系数			
	y_1	y_2	y_3	y_4
天然抗压强度 X_1	−0. 065	0. 017	0. 102	0. 038
饱和抗压强度 X_2	0. 200	0. 382	−0. 186	−0. 235
软化系数 X_3	−5. 708	−0. 457	16. 251	6. 463
天然抗剪强度 X_4	0. 362	−0. 064	−0. 051	0. 175
饱和抗剪强度 X_5	0. 783	0. 151	−0. 084	0. 984
含水率 X_6	−2. 441	0. 967	1. 265	−0. 255
RQD 值 X_7	0. 181	−0. 216	−0. 005	−0. 158
常量	−5. 263	−1. 533	−7. 966	−1. 831

根据表 2 中 Fisher 判别式函数各项系数可以建立以下 4 个判别函数表达式，即

$$y_1 = -0.065X_1 + 0.200X_2 - 5.708X_3 + 0.362X_4 + 0.783X_5 - 2.441X_6 + 0.181X_7 - 5.263 \quad (9)$$

$$y_2 = 0.017X_1 + 0.382X_2 - 0.457X_3 - 0.064X_4 + 0.151X_5 + 0.967X_6 - 0.216X_7 - 1.533 \quad (10)$$

$$y_3 = 0.102X_1 - 0.186X_2 + 16.251X_3 - 0.051X_4 - 0.084X_5 + 1.265X_6 - 0.005X_7 - 7.966 \quad (11)$$

$$y_4 = 0.038X_1 - 0.235X_2 + 6.463X_3 + 0.175X_4 + 0.984X_5 - 0.255X_6 - 0.158X_7 - 1.831 \quad (12)$$

判别函数在各组别的中心值见表 3，可以通过比较待判岩样样本函数值与这 5 类组别的中心值的距离的平方来判别某一岩样样本归属哪一类别。

表 3　判别函数在各类别的中心值

Table 3　Values of discriminant functions at group centroids

类别	函数中心值			
	y_1	y_2	y_3	y_4
Ⅰ	12. 826	1. 963	−0. 145	−0. 006
Ⅱ	2. 699	−2. 421	0. 921	0. 002
Ⅲ	−2. 565	−1. 848	−1. 306	0. 102
Ⅳ	−10. 311	1. 152	0. 033	−0. 442
Ⅴ	−12. 508	2. 258	0. 491	0. 464

1. 6　Fisher 判别分析模型检验

根据已建立的 Fisher 判别模型，对 40 组学习样本利用回代估计法进行检验，判别分析检验结果见表 4。

表 4　判别分析检验结果

Table 4　Results of test for discriminant analysis

编号	实际分类结果	预测判别结果	判别式得分			
			y_1	y_2	y_3	y_4
1	Ⅲ	Ⅲ	−3. 320	−2. 414	−2. 098	−0. 339
2	Ⅲ	Ⅲ	−2. 507	−2. 568	−2. 058	−0. 211
3	Ⅲ	Ⅲ	−3. 376	−2. 286	−2. 103	−0. 099
4	Ⅱ	Ⅱ	2. 802	−1. 072	−0. 426	−0. 062
5	Ⅱ	Ⅱ	3. 223	−1. 113	−0. 495	0. 278
6	Ⅰ	Ⅰ	12. 329	0. 401	−0. 706	0. 774
7	Ⅰ	Ⅰ	11. 257	0. 896	−0. 723	1. 016
8	Ⅰ	Ⅰ	10. 906	1. 521	−0. 665	1. 567
9	Ⅱ	Ⅱ	1. 360	−1. 212	3. 006	1. 791
10	Ⅱ	Ⅱ	2. 890	−3. 735	2. 287	−0. 569
11	Ⅱ	Ⅱ	2. 893	−2. 333	2. 371	1. 551
12	Ⅳ	Ⅴ*	−11. 865	1. 676	0. 089	−1. 036
13	Ⅳ	Ⅳ	−11. 607	1. 633	−0. 199	−0. 884
14	Ⅳ	Ⅳ	−11. 540	1. 593	−0. 242	−0. 939
15	Ⅱ	Ⅱ	2. 477	−1. 893	−0. 058	1. 765
16	Ⅲ	Ⅲ	−2. 004	−0. 282	−0. 060	−0. 082
17	Ⅲ	Ⅲ	−2. 986	−1. 550	−1. 731	0. 688
18	Ⅲ	Ⅲ	−1. 472	−1. 826	−1. 833	1. 441
19	Ⅲ	Ⅲ	−1. 666	−2. 461	−1. 787	0. 227
20	Ⅲ	Ⅲ	−3. 192	−1. 394	1. 220	−0. 809
21	Ⅱ	Ⅱ	2. 169	−4. 189	−0. 277	−0. 680
22	Ⅱ	Ⅱ	2. 305	−1. 787	−0. 411	−1. 155
23	Ⅱ	Ⅱ	2. 901	−3. 533	1. 679	−1. 959
24	Ⅱ	Ⅱ	3. 967	−3. 339	1. 533	−0. 941
25	Ⅳ	Ⅳ	−9. 147	1. 137	−0. 876	0. 109
26	Ⅳ	Ⅳ	−8. 335	0. 192	−0. 768	−0. 664
27	Ⅰ	Ⅰ	13. 431	3. 145	−0. 123	−0. 823
28	Ⅰ	Ⅰ	12. 779	3. 048	−0. 122	−1. 536
29	Ⅳ	Ⅳ	−10. 099	1. 081	1. 227	0. 313
30	Ⅳ	Ⅳ	−9. 585	0. 753	1. 001	0. 008
31	Ⅴ	Ⅴ	−12. 425	1. 832	0. 895	0. 484
32	Ⅴ	Ⅴ	−11. 946	1. 661	0. 710	0. 681
33	Ⅴ	Ⅴ	−12. 256	1. 700	0. 878	0. 534
34	Ⅰ	Ⅰ	15. 477	3. 550	−0. 512	1. 090
35	Ⅰ	Ⅰ	12. 701	3. 025	0. 445	−0. 215
36	Ⅰ	Ⅰ	12. 736	2. 795	−0. 128	−2. 346
37	Ⅴ	Ⅴ	−13. 106	3. 245	0. 221	0. 432
38	Ⅴ	Ⅴ	−12. 809	2. 855	−0. 248	0. 190
39	Ⅰ	Ⅰ	13. 408	0. 659	0. 530	0. 203
40	Ⅰ	Ⅰ	13. 233	0. 593	0. 560	0. 205

注　“*”为误判样品。

由表 4 可以看出，40 个样品中只有 1 个岩样样

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

本(12 号岩样) 的 Fisher 判别结果与实际分类结果不符,判别正确率达 97.5%,出现误判的 12 号样本,因在实际分类中Ⅳ和Ⅴ类围岩岩石质量非常接近,容易出现分类错误问题。

2　井巷围岩质量分类结果分析

分别计算 5 类样品 7 项分类指标的平均值,具体结果见表 5。由表 5 可知 7 项分类指标中,有 6 项指标随着岩石质量的变差其值也有逐渐变小的趋势,只有 1 项指标即含水率随着岩石质量的变差其值逐渐增大。这是因为各种强度(包括抗压和抗剪) 越高,反映出该岩石性质越优; 软化系数反映出岩石的抗软化能力,软化系数越大其抗软化能力越强,岩石性质越优,总体来看,Ⅰ、Ⅱ类围岩其软化系数大于后面 3 类; *RQD* 值反映的是岩石的完整程度,其值越大说明岩石越完整,性质也就越优。而含水率正好相反,含水率越高反映出该岩石性质也就越差,因此Ⅴ类围岩岩石其含水率值最高,这些规律反映出此次进行分类所选取的 7 项指标均能影响到围岩分类的结果,且大小变化规律符合自然规律,指标选取合理。

表 5　各类别岩样分类指标对比结果

Table 5　Comparison results of rock samples in each category classification index

类别	X_1/MPa	X_2/MPa	X_3	X_4/MPa	X_5/MPa	X_6/%	X_7/%
Ⅰ	73.71	30.54	0.433	17.00	7.88	0.55	45.60
Ⅱ	34.77	12.28	0.426	11.40	4.43	1.45	33.82
Ⅲ	32.53	5.02	0.162	10.07	2.82	1.97	20.35
Ⅳ	16.27	3.25	0.217	4.77	1.18	3.00	7.00
Ⅴ	10.28	2.02	0.242	4.44	0.96	3.30	0.44

3　工程应用

利用上述所建的判别模型对另一煤矿的井巷围岩进行分类研究,将表 6 中 8 个岩样的各指标数值分别代入第 1 判别式(式(1)) 、第 2 判别式(式(2)) 、第 3 判别式(式(3)) 和第 4 判别式(式(4)) 中,每个岩样分别可以求出 4 个判别函数值,结果见表 7,然后分别计算各岩样判别函数值到各类别中心值的距离的平方,以①号岩样为例,将 7 个影响因子值分别代入式(1) 、式(2) 、式(3) 和式(4) ,得出 $y_1 = 15.53$, $y_2 = 38.40$, $y_3 = 159.70$, $y_4 = 14.47$,这些值到 5 类中心判别函数值的距离的平方分别为 27 093.97、27 250.38、28 076.09、27 770.36 和 27 635.27,由于其距第Ⅰ类中心点的值最小,因此,可以将该围岩样品判别为第Ⅰ类。同理,可以对其他 7 组岩样进行判别,由表 6 可见,8 组待检样本的判别分类结果与实际分类情况完全相符。

表 6　待检样本参数

Table 6　Parameters of testing samples

编号	天然抗压强度/MPa	饱和抗压强度/MPa	软化系数	天然抗剪强度/MPa	饱和抗剪强度/MPa	含水率/%	*RQD* 值/%
①	65.6	34.90	0.53	15.40	10.30	0.62	49.6
②	17.4	2.60	0.15	6.90	1.30	2.89	0
③	26.9	3.58	0.13	10.20	3.60	3.48	33.2
④	11.3	3.40	0.30	1.40	0.70	2.59	3.9
⑤	60.3	13.70	0.23	16.40	2.97	1.19	31.3
⑥	103.3	31.00	0.30	19.20	8.30	0.54	49.8
⑦	46.8	9.27	0.20	10.90	2.02	2.05	19.8
⑧	19.7	3.40	0.17	8.50	1.20	2.12	7.8

表 7　待检样本判别结果

Table 7　Discriminant results of testing samples

编号	判别函数值 y_1	y_2	y_3	y_4	D_1^2	D_2^2	D_3^2	D_4^2	D_5^2	$\min_{1\leqslant i\leqslant 5} D_i^2$	Fisher 模型判别结果	实际分类结果
①	15.53	38.40	159.70	14.47	27 093.97	27 250.38	28 076.09	27 770.36	27 635.27	27 093.97	Ⅰ	Ⅰ
②	-10.26	-4.23	11.72	15.53	953.60	529.09	472.76	420.86	400.42	400.42	Ⅴ	Ⅴ
③	-3.02	-3.69	-0.31	-1.59	285.67	38.39	7.47	78.03	130.26	7.47	Ⅲ	Ⅲ
④	-11.59	1.50	0.57	-0.59	597.25	220.03	96.67	2.07	2.55	2.07	Ⅳ	Ⅳ
⑤	3.30	-1.60	-0.41	-0.73	103.95	3.35	35.99	193.15	267.06	3.35	Ⅱ	Ⅱ
⑥	13.69	1.70	0.44	0.30	1.24	138.06	279.79	576.86	686.47	1.24	Ⅰ	Ⅰ
⑦	-3.46	0.02	0.07	-0.69	269.44	45.08	6.82	48.30	88.42	6.82	Ⅲ	Ⅲ
⑧	-6.59	0.03	-1.68	0.14	383.04	99.00	19.83	18.39	44.84	18.39	Ⅳ	Ⅳ

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

4 结　论

1) 此次井巷围岩分类选取了 7 个指标作为分类依据,重点分析岩石的物理性质指标在围岩分类中的作用,采用乌鲁木齐市某煤矿的 40 组围岩样品作为训练样本建立了 Fisher 判别函数模型,经模型检验及实例计算结果证明,Fisher 判别方法的分类结果与实际分类结果相符程度高,表明 Fisher 判别模型用于煤矿井巷围岩质量分类方面是有效的。

2) 对分类结果进行分析,分析 5 类围岩 7 项分类指标的大小关系,对比结果显示 7 项指标各类别围岩的平均值均有差异,大小变化关系正好反映岩石质量的好坏,说明 7 项指标选取合理,可作为围岩分类指标。

3) 此次判别分类分析是针对一个煤矿的 40 组样本进行的,分析样品数量有限,而分析样本的数量和代表性对判别分析结果非常重要,因此在今后的研究中将广泛收集相关实际数据资料,增加样本数量,不断完善分类方法和判别模型。

参考文献(References) :

[1] 周　桥,高　谦.破碎带工程围岩分类及其应用[J].湖南科技大学学报: 自然科学版,2009,24(4):66-69.
Zhou Qiao,Gao Qian.Rock classification of underground engineering in fractured zone and its application [J].Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science,2009,24(4):66-69.

[2] 刘小平.采动岩体工程分类及力学参数估算方法研究[J].煤炭科学技术,2014,42(1):146-150.
Liu Xiaoping.Research on engineering classification and mechanical parameters estimation method for mining rock mass [J].Coal Science and Technology,2014,42(1):146-150.

[3] 韩桂武,刘　斌,范　鹤.模糊择近原则在隧洞围岩分类中的应用[J].东北大学学报: 自然科学版,2006,27(7):819-822.
Han Guiwu,Liu Bin,Fan He.Application of principle of fuzzy closeness optimization to classification of surrounding rock in tunnel [J].Journal of Northeastern University: Natural Science,2006,27(7):819-822.

[4] 顾秀根.跨采软岩巷道分类及支护对策分析[J].煤炭科学技术,2007,35(8):96-101.
Gu Xiugen.Analysis on soft rock roadway classification and support countermeasures for mining over roadway [J].Coal Science and Technology,2007,35(8):96-101.

[5] 周翠英,张　亮,黄显艺.基于改进 BP 网络算法的隧洞围岩分类[J].地球科学: 中国地质大学学报,2005,30(4):480-486.
Zhou Cuiying,Zhang Liang,Huang Xianyi.Classification of rocks surrounding tunnel based on improved BP network algorithm [J].Earth Science: Journal of China University of Geosciences,2005,30(4):480-486.

[6] 李天斌,王　睿.ART1 神经网络在隧道围岩分类中的应用[J].成都理工大学学报: 自然科学版,2006,33(5):455-459.
Li Tianbin,Wang Rui.The application of ART1 neural network to the classification of surrounding rocks in tunnels [J].Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition,2006,33(5):455-459.

[7] 张召千,徐明德,刘泉声.煤巷围岩稳定性加权平均评价方法研究[J].岩土力学,2009,30(11):3464-3468.
Zhang Zhaoqian,Xu Mingde,Liu Quansheng.The research on the methodology of weighted average for surrounding rock stability of tunnel [J].Rock and Soil Mechanics,2009,30(11):3464-3468.

[8] 文畅平.岩体质量分级的 Bayes 判别分析方法[J].煤炭学报,2008,33(4):395-399.
Wen Changping.Bayes discriminant analysis method of rock-mass quality classification [J].Journal of China Coal Society,2008,33(4):395-399.

[9] 李春萍,郝会兵.煤巷围岩分类的 Bayes 判别分析法[J].煤炭学报,2011,36(S2):304-307.
Li Chunping,Hao Huibing.Method of Bayes discriminant analysis for classifying mine-lane surrounding rocks [J].Journal of China Coal Society,2011,36(S2):304-307.

[10] 朱一丁,马文涛.回采巷道围岩分类的支持向量机方法[J].采矿与安全工程学报,2006,23(3):362-365.
Zhu Yiding,Ma Wentao.Method of support vector machines for classifying surrounding rocks of gateway [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2006,23(3):362-365.

[11] 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 Fengqiang,Li Xibing.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):190-194.

[12] 王吉亮,陈剑平,杨　静.距离判别法在公路隧道围岩分类中的应用[J].吉林大学学报: 地球科学版,2008,38(6):999-1004.
Wang Jiliang,Chen Jianping,Yang Jing.Application of distance discriminant analysis method in classification of surrounding rock mass in highway tunnel [J].Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2008,38(6):999-1004.

[13] 姜春露,姜振泉,孙　强.基于 Fisher 判别分析法的隧洞围岩分类[J].煤炭学报,2012,37(10):1665-1670.
Jiang Chunlu,Jiang Zhenquan,Sun Qiang.Classification of rocks surrounding tunnel using Fisher discriminant analysis method [J].Journal of China Coal Society,2012,37(10):1665-1670.

[14] Zhou Jian,Shi Xiuzhi,Lei Dong,*et al*.Fisher discriminant analysis model and its application for prediction of classification of rockburst in deep-buried long tunnel [J].International Journal of Coal Science & Technology,2010,16(2):144-149.

[15] 向东进,李宏伟,刘小雅.实用多元统计分析[M].武汉: 中国地质大学出版社,2005: 91.

[16] 王力宾,顾光同.多元统计分析: 模型、案例及 SPSS 应用[M].北京: 经济科学出版社,2010: 173-175.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net