

基于熵权属性识别模型的岩体质量分级

刘志祥, 吴蝶媚, 唐志祥

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为克服岩体质量分级中确定评价指标权重系数带有专家打分的主观偏向性, 利用熵理论客观地确定岩体质量分级评价指标的熵权系数, 结合属性识别理论, 建立岩体质量分级判别的属性识别模型。模型选取岩石单轴抗压强度、*RQD*值、结构面间距、结构面摩擦系数、岩体钻进速度和岩体声波速度6个参数作为岩体质量分级综合评价指标, 以三山岛金矿7个采场为研究背景, 建立岩体质量分级的属性识别模型, 根据信息熵理论计算各评判指标的权重, 计算各指标属性测度, 利用置信度准则和评分准则, 预测岩体质量排序和等级。研究结果表明, 属性识别结果较RMR法更准确, 评价结果客观、可信。

关键词 属性识别; 熵权; 岩体质量分级

中图分类号 TU45

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.22.008

Quality Classification of Rock Mass Based on Attribute Recognition Model of Entropy Weight

LIU Zhixiang, WU Diemei, TANG Zhixiang

College of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract In order to overcome subjective and erroneous tendency problems existing in expert determination methods in assessment of classification for rock mass quality, an attribute recognition model for rock mass quality classification criterion is established based on the entropy weight theory which can confirm the relevant entropy coefficients of evaluation indexes and combines the attribute recognition theory. The model chooses rock uniaxial compressive strength, *RQD*, structural face interval, friction coefficient, rock drilling speed and acoustic velocity of rock mass as the comprehensive evaluation indexes. The paper takes seven stopes of Sanshan island gold mine as the research background to develop the model. And it has successfully given an attribute measure for each index based on its weight, and obtained the ranking and classification of rock quality according to the criterions of confidence degree and rating. The result shows that the attribute recognition results are more accurate than those of RMR method, and that the evaluation results are objective and reliable.

Keywords attribute recognition; entropy weight; quality classification of rock mass

当前, 国外地下岩体工程中应用较多的岩体分级方法有巴顿岩体质量*Q*系统分类法和岩体的岩土力学分类(RMR岩体分类)法。中国岩体分级方法主要有工程岩体*BQ*分级标准(GB50218-94)和水利水电工程地质勘察规范地下洞室围岩*HC*分类法。同时, 随着科学技术方法的发展, 诸如分形理论、神经网络、模糊理论、可拓理论等一些非线性理论也被引入到地下岩体工程稳定性评价中, 并得到应用。纵观国内外岩体质量分级研究成果, *Q*系统分类方法没有考虑节理方向

性^[1], RMR岩体分类法较难反映质量欠佳的岩体, 评价结果有时过于保守^[2], 工程岩体*BQ*分级标准对岩体强度过于的敏感^[3], *HC*分类方法在中低应力区的围岩分级中适用性较好, 在高地应力区适用性较差^[4]。对于不同地质工程在采取岩体质量评价方法时, 还需要根据工程自身的条件进行修正, 有必要研究更为客观有效的分析方法。

属性识别理论模型由程乾生提出, 能对事物进行有效识别和比较分析, 为岩体质量综合评价提供了一种新的方法^[5,6]。

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-06-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2013BAB02B05, 2012BAB08B01)

作者简介: 刘志祥, 教授, 研究方向为采矿与岩石力学, 电子邮箱: liulzx@csu.com

引用格式: 刘志祥, 吴蝶媚, 唐志祥. 基于熵权属性识别模型的岩体质量分级[J]. 2014, 32(22): 52-56.

目前,属性数学理论已成功应用于岩土工程领域,文畅平等^[7-9]应用属性综合评价系统对隧道瓦斯突出危险性、岩土边坡地震稳定性、岩爆预测与烈度分级进行评价。然而运用属性理论对岩体质量分级方面的研究相对较少,且在计算各指标权重时,如文献[10]采用等权,忽略了各指标对系统影响大小有别这一重要特征。文献[11]采用相似权,相似系数定义相似权重法计算比较复杂。熵值法可根据各项指标值的差异程度,由评价指标构成判断矩阵来确定各指标的权重^[12,13],是一种客观赋权法,能较好地消除人为因素带来的偏差,使评价结果更符合实际,为岩体质量分级评价提供了一种更科学的方法。

本文利用熵理论确定岩体质量分级评价指标的熵系数,建立岩体质量分级的属性识别模型,并将其应用于三山岛金矿新立矿区-200~-400中段开采中的7个采场岩体质量分级。

1 岩体质量分级的属性识别模型

工程实践中的综合评价问题可归结为对定性描述的度量问题,而属性数学理论主要讨论和解决定性描述的度量问题和不同的定性描述之间的关系,为解决该类问题提供了理论基础。属性综合评价系统可分为3个子系统:单指标属性测度系统、多指标综合属性测度系统和属性识别分析。

设 Z 为评级对象空间, Z 中每一个评价对象 $x_i(i=1,2,\dots,n)$, 有 m 个被评价指标 $I_j(j=1,2,\dots,m)$; 对于 x_i 的第 j 个评价指标 I_j 的测量值 t_j , 都有 p 个评价等级 $C_k(k=1,2,\dots,p)$ 。属性空间 $F=\{\text{岩体质量分级}\}=\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$, 属性空间中的每一种情况称为一个属性集; 例如本文将岩体质量等级分为 I、II、III、IV 和 V5 级: 稳定 I(C_1), 基本稳定 II(C_2), 稳定性差 III(C_3), 不稳定 IV(C_4), 极不稳定 V(C_5)。

1.1 单指标属性测度分析

对于单指标 I_j 的测量值 t_j , 具有属性 C_k 的属性测度 $u_{x_{ij}} = u(x_{ij} \in C_k) (1 \leq k \leq p)$ 的确定方法是建立其属性测度函数, 以表示 I_j 的测量值 t_j 变化时属性测度 $u_{x_{ij}} = u(x_{ij} \in C_k) (1 \leq k \leq p)$ 的变化情况。以表 1 中的数据形式来建立属性测度函数。

表 1 单指标等级划分
Table 1 Single index classification

评价 指标	评价等级			
	C_1	C_2	...	C_p
I_1	$a_{10} \sim a_{11}$	$a_{11} \sim a_{12}$...	$a_{1p-1} \sim a_{1p}$ 或 $> (<) a_{1p}$
I_2	$a_{20} \sim a_{21}$	$a_{21} \sim a_{22}$...	$a_{2p-1} \sim a_{2p}$ 或 $> (<) a_{2p}$
...
I_m	$a_{m0} \sim a_{m1}$	$a_{m1} \sim a_{m2}$...	$a_{mp-1} \sim a_{mp}$ 或 $> (<) a_{mp}$

表 1 中, a_{jk} 满足 $a_{j0} < a_{j1} < \dots < a_{jp}$, 或 $a_{j0} > a_{j1} > \dots > a_{jp}$ 。令

$$b_{jk} = \frac{a_{j,k-1} + a_{jk}}{2} \quad (1)$$

$$d_{jk} = \min\{|b_{jk} - a_{jk}|, |b_{j,k+1} - a_{j,k+1}|\} \quad (2)$$

式(3)中 k 满足 $k=1,2,\dots,p$; 式(2)中 k 满足 $k=1,2,\dots,p-1$ 。

当 $a_{j0} > a_{j1} > \dots > a_{jp}$ 时, 单指标属性测度函数 $u_{x_{ij}}(t)$ 可参考文献[14]; 当 $a_{j0} < a_{j1} < \dots < a_{jp}$ 时, 确定单指标属性测度函数 $u_{x_{ij}}(t)$ 为

$$u_{x_{j1}}(t) = \begin{cases} 1 & t < a_{j1} - d_{j1} \\ \frac{a_{j1} + d_{j1} - t}{2d_{j1}} & a_{j1} - d_{j1} \leq t \leq a_{j1} + d_{j1} \\ 0 & t > a_{j1} + d_{j1} \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{x_{jk}}(t) = \begin{cases} 0 & t < a_{j,k-1} - d_{j,k-1} \\ \frac{t - a_{j,k-1} + d_{j,k-1}}{2d_{j,k-1}} & a_{j,k-1} - d_{j,k-1} \leq t \leq a_{j,k-1} + d_{j,k-1} \\ 1 & a_{j,k-1} + d_{j,k-1} < t < a_{jk} - d_{jk} \\ \frac{a_{jk} + d_{jk} - t}{2d_{jk}} & a_{jk} - d_{jk} \leq t \leq a_{jk} + d_{jk} \\ 0 & t > a_{jk} + d_{jk} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{x_{jp}}(t) = \begin{cases} 0 & t < a_{jp-1} - d_{jp-1} \\ \frac{t - a_{jp-1} + d_{jp-1}}{2d_{jp-1}} & a_{jp-1} - d_{jp-1} \leq t \leq a_{jp-1} + d_{jp-1} \\ 1 & t > a_{jp-1} + d_{jp-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $k=1,2,\dots,p-1; j=1,2,\dots,m$ 。

1.2 多指标综合属性测度分析

综合属性测度 $u_{x_{ik}}$ 为

$$u_{x_{ik}} = \sum_{j=1}^m w_j u_{x_{ij}} \quad (6)$$

式中, w_j 为第 j 个指标的权重, 满足

$$0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (7)$$

1.3 基于熵理论的权重系数的确定

采用熵理论确定权重, 即“熵权”。“熵权”理论是一种客观赋权方法, 其计算步骤为^[12]:

1) 构建 n 个评价对象(方案), m 个评价指标的判断矩阵 $R'=(x_{ij})_{nm}(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$;

2) 对判断矩阵 R' 进行同度量量化可得归一化判断矩阵 R 。计算公式为

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & (\text{效益型}) \\ \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} & (\text{成本型}) \end{cases} \quad (8)$$

其中, x_{\max} 为有量纲指标最大值, x_{\min} 为有量纲指标最小值。

因为上述 6 个评价指标都是指标越大岩石质量越好, 故选取效益型公式。

3) 根据熵的定义, n 个评价对象, m 个评价指标, 可以确定评价指标的熵为

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \left(\sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right), \quad i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m \quad (10)$$

式中, $f_{ij} = 1 + b_{ij} / \sum_{i=1}^n (1 + b_{ij})$

4) 计算评价指标的熵权 W :

$$w_j = 1 - \frac{H_j}{m} - \sum_{j=1}^m H_j, \quad W = (w_j)_{1 \times m} \quad (11)$$

1.4 属性识别分析

属性识别的目的是由综合属性测度 u_{nk} 对于 x 属于哪一个评价级别 C_k 做出判断。在属性综合评价中, 评价集 (C_1, C_2, \dots, C_k) 通常是个有序集, 对有序评价集 (C_1, C_2, \dots, C_k) 判定 x 属于哪一个评价级别 C_k , 可采用置信度准则。

置信度准则: 设 (C_1, C_2, \dots, C_k) 是属性空间 F 的一个有序评价集, λ 为置信度, 且 $0.5 < \lambda \leq 1$, 一般取 0.6~0.7 之间。

当 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ 时, 若满足

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^k u_{xi} \geq \lambda, 1 \leq k \leq p \right\} \quad (12)$$

则认为 x 属于 C_{k_0} 级别。

当 $C_1 < C_2 < \dots < C_p$ 时, 若满足

$$k_0 = \max \left\{ k: \sum_{i=1}^k u_{xi} \geq \lambda, 1 \leq k \leq p \right\} \quad (13)$$

则认为 x 属于 C_{k_0} 级别。

用相对级别特征值对同一岩体质量等级进行排序(相对级别特征值越小, 排序越难)。计算公式为

$$q_{xi} = \sum_{l=1}^p n_l \lambda_{xi}(C_l) \quad (14)$$

式中, q_{xi} 为相对级别特征值; $n_l = p + 1 - l$, 为评价级别量。根据 q_{xi} 对 x_i 进行比较和排序。

2 岩体质量评价实例

选取三山岛金矿新立矿区-200~-400 中段开采中的 7 个采场作为评价对象。通过对采场的工程实测调查、资料数据的收集与岩石物理实验测试结果得到的新立矿区岩体质量评价指标实测数据如表 2 所示, 其中 σ_c 为岩石单轴抗压强度, MPa; J_d 为结构面间距, m; f 为结构面摩擦系数; T 为岩体钻进速度, $10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$; V 为岩体的声波速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 2 岩体参数值

Table 2 Parameter values

采场编号	σ_c/MPa	$RQD/\%$	J_d/m	f	$T/(10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1})$	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
240 [#]	81.22	75	0.80	0.57	4.9	3000
360 [#]	82.66	30	0.40	0.49	3.2	2400
364 [#]	80.31	55	0.35	0.32	7.5	3500
401 [#]	67.59	27	0.30	0.29	5.8	2200
402 [#]	78.83	62	0.37	0.45	6.9	4100
403 [#]	63.11	46	0.31	0.33	7.2	2700
404 [#]	87.56	57	0.38	0.37	6.1	3200

2.1 岩体质量属性识别模型的建立

将岩体质量分级综合评价指标确定为: 岩石单轴抗压强度 σ_c (该指标反映岩体的软硬程度及岩性特征)、 RQD 指标 (该指标反映岩块大小及完整程度)、结构面间距 J_d (该参数反映地质结构及岩体结构特征)、结构面摩擦系数 f (该项指标反映结构面粗细程度、蚀变及充填情况等特征)、岩体钻进速度 T (以钻进 10 cm 所需时间来衡量, 该指标在一定程度反映工

程岩体的强度特征) 和岩体的声波速度 V (该指标反映了岩体的刚度特征)。

参照国内外对岩体质量评价的经验, 将岩体稳定性分为 5 种级别: I 级为稳定 (C_1), II 级为基本稳定 (C_2), III 级为稳定性差 (C_3), IV 级为不稳定 (C_4), V 级为极不稳定 (C_5)。根据文献[15]对岩体质量等级与各评价指标关系的研究, 选取各指标的分类标准如表 3 所示。

表 3 岩体质量评价指标和分级标准

Table 3 Evaluating indexes of rock mass quality and grading standard

岩体质量	评价指标					
	σ_c/MPa	$RQD/\%$	J_d/m	f	$T/(10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1})$	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
V	1~25	0~25	0.01~0.05	0.1~0.2	1~3	< 2000
IV	25~50	25~50	0.05~0.3	0.2~0.4	3~5	2000~2500
III	50~100	50~75	0.3~1	0.4~0.6	5~7	2500~4000
II	100~200	75~90	1~3	0.6~0.8	7~12	4000~5000
I	200~300	90~100	3~5	0.8~1.2	12~15	5000~7500

2.2 用熵值法确定各指标的权重

各评价指标的实测值按式(8)和式(9)进行归一化处理,得到判断矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.7407 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.3953 & 0.4211 \\ 0.7996 & 0.0625 & 0.2000 & 0.7143 & 0.0000 & 0.1053 \\ 0.7035 & 0.5833 & 0.1000 & 0.1071 & 1.0000 & 0.6842 \\ 0.1832 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.6047 & 0.0000 \\ 0.6429 & 0.7292 & 0.1400 & 0.5714 & 0.8605 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.3958 & 0.0200 & 0.1429 & 0.9302 & 0.2632 \\ 1.0000 & 0.6250 & 0.1600 & 0.2857 & 0.6744 & 0.5263 \end{bmatrix}$$

由式(12)和(13)计算各指标的熵 H_j :

$$H_j = (0.9881 \ 0.9867 \ 0.9847 \ 0.9852 \ 0.9892 \ 0.9873)$$

用熵值法计算各指标的权重。由式(11)计算各指标的权重 w_j ,其计算结果如下:岩石单轴抗压强度 σ_c 的权重为 0.1513; RQD 指标的权重为 0.1681; 结构面间距 J_d 的权重为 0.1944; 结构面摩擦系数 f 的权重为 0.1877; 岩体钻进速度 T 的权重为 0.1368; 岩体的声波速度 V 的权重为 0.1616。

2.3 属性测度的计算及属性识别

1) 计算单指标属性测度。按照表2中的数据 and 式(1)~式(5),构造并计算各单指标属性测度函数 $u_{ijk}(t)$ 。

2) 计算综合属性测度和属性识别。根据单指标属性测度 $u_{ijk}(t)$ 的计算结果及熵权计算结果,按式(6)得到综合属性测度矩阵 u_{ik} 。

$$u_{7 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2094 & 0.7153 & 0.0752 & 0 \\ 0 & 0.0232 & 0.5299 & 0.3417 & 0.1051 \\ 0 & 0.1187 & 0.6036 & 0.2777 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3716 & 0.5415 & 0.0868 \\ 0 & 0.1701 & 0.7367 & 0.0931 & 0 \\ 0 & 0.2275 & 0.4669 & 0.3055 & 0 \\ 0 & 0.0448 & 0.7611 & 0.1940 & 0 \end{bmatrix}$$

为了解个样本岩体具体的岩体质量状况,可根据式(14)计算级别特征向量 q_{si} ,

$$q_s = (3.1339 \ 2.4710 \ 2.8410 \ 2.2846 \ 3.0767 \ 2.9127 \ 2.8505)$$

对各样本岩体进行分值排序可知,240#采场岩体样本分值最高为 3.134,401#采场岩体样本分值最低为 2.285,402#采场、403#采场、404#采场、364#采场和 360#采场岩体样本分值从高到低依次为 3.077、2.922、2.851、2.841 和 2.471。

为对比分析,取 $\lambda = 0.6$ 、 $\lambda = 0.7$,根据式(12)进行属性识别,得到各样本的属性综合评价结果,见表4。

表4 岩体质量属性识别结果

Table 4 Attribute recognition results of rock quality

编号	综合属性测度					RMR法	属性识别结果		实际情况
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5		$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.7$	
240#	0	0.2094	0.7153	0.0752	0	III	III	III	一般岩体
360#	0	0.0232	0.5299	0.3417	0.1051	III	IV	IV	局部极破碎
364#	0	0.1187	0.6036	0.2777	0	III	III	III	一般岩体
401#	0	0	0.3716	0.5415	0.0868	IV	IV	IV	局部较破碎
402#	0	0.1701	0.7367	0.0931	0	III	III	III	一般岩体
403#	0	0.2275	0.4669	0.3055	0	IV	III	IV	较差岩体
404#	0	0.0448	0.7611	0.1940	0	III	III	III	一般岩体

2.4 结果分析

从表4可以看出,无论置信度 λ 取 0.6 还是 0.7,360#采场和 401#采场岩体都属于第IV级(不稳定), λ 取 0.7 时,403#采场岩体属性识别结果由第III级变成第IV级,说明 403#采场岩体介于第III级和第IV级之间。与 $\lambda = 0.6$ 时的辨识结果相比较, $\lambda = 0.7$ 的结果偏于安全。从表4可看出,置信度 $\lambda = 0.7$ 时,对于 240#、364#、401#、402#、403#和 404#采场,“RMR”法和属性识别的评价结果是一致的。对于 360#采场,属性识别结果为岩体质量IV级,“RMR”法评价结果为岩体质量III级,但属性识别的结果偏于安全。而且,即便是取较危险的置信度 $\lambda = 0.6$,360#采场的属性辨识结果还是IV级岩体,由此说明属性识别结果较“RMR”法更安全、更准确。

利用本模型可以预测岩体质量等级,还可以对同一等级围岩的稳定性进行强弱排序、比较分析。级别特征向量 q_{si} 越大,岩体质量越稳定,根据岩体分值排序结果可知,240#采场岩体最稳定,401#采场岩体最不稳定。403#采场岩体分值为 2.922,将其划分为第IV级岩体,结果较安全。

3 结论

利用熵权法确定各评价指标的权重,并结合属性识别理论,建立了基于熵权理论的岩体质量分级的属性识别模型,计算各样本岩体综合属性测度,对比分析了不同置信度下岩体质量分级识别结果。并将评价结果与“RMR”法进行对比分析,研究结果表明:

1) 属性识别结果较“RMR”法更准确。本文模型不但可以预测岩体质量等级,还可以对同一等级围岩的稳定性进行强弱排序和比较分析。

2) 采用熵权来确定权重,解决了传统方法确定权重时受人为因素影响大的缺点,避免了主观确定权重的随意性,评价结果客观、可信。

3) 选取岩石单轴抗压强度、*RQD* 指标,结构面间距、结构面摩擦系数、岩体钻进速度和岩体声波速度6个主要影响岩体稳定性的因素进行分析。结果表明,该模型科学合理,评价结果符合实际。实际上,本模型不受影响因素多少的限制,因而可尽量考虑各方面的影响因素,以使结果更可靠。

参考文献(References)

- [1] Goel R K, Jethwa J L, Paithankar A G. Indian experiences with Q and RMR systems[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1995, 10(1): 97-109.
- [2] Barton N, Grimstad E. Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Elsevier, 1995, 32(3): 135A-135A.
- [3] 张理, 龚函, 赵奎. 工程岩体分类评价方法综述[J]. *有色金属科学与工程*, 2010, 1(1): 91-95.
Zhang Li, Gong Cong, Zhao Kui. On the evaluation methodology of engineering rock masses[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2010, 1(1): 91-95.
- [4] 葛华, 王广德, 石豫川, 等. 常用围岩分类方法对某深埋隧洞的适用性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(2): 44-49.
Ge Hua, Wang Guangde, Shi Yuchuan, et al. The applicability of the common surrounding rock mass classification methods in a deep buried tunnel[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(2): 44-49.
- [5] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 1997, 33(1): 12-20.
Cheng Qiansheng. Attribute recognition theoretical model with application[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1997, 33(1): 12-20.
- [6] 程乾生. 质量评价的属性数学模型和模糊数学模型[J]. *数理统计与管理*, 1997, 16(6): 18-23.
Cheng Qiansheng. Attribute mathematical model and fuzzy mathematical model for quality assessment[J]. *Application of Statistics*
- and Management, 1997, 16(6): 18-23.
- [7] 文畅平. 隧道瓦斯突出危险性评价的属性识别模型与实例[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(8): 1322-1328.
Wen Changping. Attribute recognition model and its application of fatalness assessment of gas burst in tunnel[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(8): 1322-1328.
- [8] 文畅平, 杨果林. 基于属性数学理论的岩土边坡地震稳定性评价[J]. *中国铁道科学*, 2010, 31(5): 8-14.
Wen Changping, Yang Guolin. The seismic stability evaluation of the rock and soil slope based on the attribute mathematical theory[J]. *China Railway Science*, 2010, 31(5): 8-14.
- [9] 文畅平. 属性综合评价系统在岩爆发生和烈度分级中的应用[J]. *工程力学*, 2008, 25(6): 153-158.
Wen Changping. Application of attribute synthetic evaluation system in prediction of possibility and classification of rock bursts[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(6): 153-158.
- [10] 曹洪洋, 边亚东. 地下工程围岩质量分级的属性数学方法[J]. *建筑科学*, 2012, 28(5): 26-29.
Cao Hongyang, Bian Yadong. Attribute recognition theory model of adjoining rock classification[J]. *Building Science*, 2012, 28(5): 26-29.
- [11] 文畅平. 基于属性数学理论的岩体质量分级方法[J]. *水力发电学报*, 2008, 27(3): 75-80.
Wen Changping. Classification of rock-mass stability based on attributive mathematical theory[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, 27(3): 75-80.
- [12] 邱莞华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
Qiu Wanhua. Manage decision and entropy[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2002.
- [13] Yan W, Gu L. Application of the method of entropy proportion in the engineering mark[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2004, 1: 23.
- [14] 张强, 刘克, 高自友. 属性综合评价系统在城市交通规划中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2002, 22(6): 113-120.
Zhang Qiang, Liu Ke, Gao Ziyou. An application of attribute synthetic evaluation system in urban traffic planning[J]. *System Engineering-Theory & Practice*, 2002, 22(6): 113-120.
- [15] 贾超, 肖树芳, 刘宁. 可拓学理论在硐室岩体质量评价中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 751-756.
Jia Chao, Xiao Shufang, Liu Ning. Application of extenics theory to evaluation of tunnel rock quality[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 751-756.

(责任编辑 吴晓丽)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。