

DOI: 10.11779/CJGE201712013

基于组合权重-理想点法的应变型岩爆五因素预测分级

徐琛¹, 刘晓丽^{*1, 2}, 王思志^{1, 2}, 王思敬^{1, 3}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学三江源协同创新中心, 北京 100084;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 基于理想点法的基本理论, 综合考虑了岩爆发生机理, 选取围岩洞壁最大主应力与岩石单轴抗压强度的比值、围岩洞壁最大切向应力与岩石单轴抗压强度的比值、岩石单轴抗压强度与岩石单轴抗拉强度比值、岩石弹性指数以及岩体完整性系数作为评判预测指标, 通过层次分析法和熵权理论计算主客观权重, 综合确定各个指标的权重系数, 构建了应变型岩爆组合权重-理想点法预测分析模型。通过统计相关工程案例, 利用模型进行工程实例分析, 验证了该模型的可行性与适用性。基于岩爆预测分级模型, 开发了相应程序, 可以为类似工程岩爆预测与等级划分提供重要支撑。

关键词: 理想点法; 岩爆; 组合权重; 层次分析法; 熵权理论

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2245-08

作者简介: 徐琛(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事TBM地下工程开发和稳定性分析方面的研究工作。E-mail: xuchen16@mails.tsinghua.edu.cn。

Prediction and classification of strain mode rockburst based on five-factor criterion and combined weight-ideal point method

XU Chen¹, LIU Xiao-li^{*1, 2}, WANG En-zhi^{1, 2}, WANG Si-jing^{1, 3}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Sanjiangyuan Collaborative

Innovation Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Geology and Geophysics of the Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the basic theory of ideal point method, considering the mechanism of rock burst, a model for predicting and classifying rockbursts is established. Five factors are selected as the evaluation indexes, including the ratio of the maximum main stress of the surrounding cave wall to uniaxial compressive strength of rock, the ratio of the maximum tangential stress of the surrounding cave wall to uniaxial compressive strength of rock, the ratio of compressive to tensile strength of rock, the elastic energy index of rock and the intactness index of rock mass. The weight coefficients of these evaluation indexes are determined by the AHP and information entropy theory. The statistics-related projects and the engineering case analyses show the feasibility and applicability of the proposed model. A computer evaluation interface for rockburst classification is developed based on the proposed model. This model and computer interface can be referred to for other similar engineering practice.

Key words: ideal point method; rockburst; combination weight; AHP; entropy weight method

0 引言

岩爆是一种块体岩石突然炸裂爆出的现象, 主要是由于岩体内积聚的弹性变形势能大于岩石破坏所需要的能量, 当这些多余的弹性变形势能在一定的方式下突然卸荷释放导致。岩爆的发生严重威胁施工人员以及施工设备的安全, 因此预防岩爆的发生对于高地应力工程施工具有重要意义。

岩爆预测是预防岩爆的关键所在。无论是从岩爆判别的方法, 还是形成的机理上, 在国内外研究方面, 已经有大量的学者进行过研究探讨。利用模糊数学^[1]、

神经网络^[2]、蚁群聚类模型^[3]、可拓学^[4]、功效系数法^[5]等多种方法对岩爆问题进行了分析。常用的岩爆判据有 Russense 判据法^[6]、Barton 判据法^[7]、陶振宇判据^[8]、

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB013503, 2013CB035902); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501104); 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51522903); 国家自然科学基金项目(51479094, U1361103, 51379104); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题资助项目(2015-KY-04, 2016-KY-05, 2016-KY-02)

收稿日期: 2016-09-26

*通讯作者(E-mail: xiaoli.liu@tsinghua.edu.cn)

二郎山判据^[9]等多种判断方法。

根据张镜剑等^[10]、吕庆等^[11]、张倬元等^[12]学者的研究：岩爆发生的机理复杂，预测评判指标众多，目前提出的一些评判方法只适用于所构建模型基于的工程背景，不能得到广泛的应用，普适性不强。本文结合 Zhang 等^[13]的应变型岩爆五因素综合判据作为岩爆预测分级的评价指标(该方法在多个工程中得到验证，结论可取)，提出了基于组合权重-理想点法的岩爆预测分级模型。通过统计大量的工程实例数据，分析验证了所构建模型的适用性和可行性。

1 基于岩爆五因素指标的组合权重-理想点法

1.1 岩爆五因素指标

Zhang 等^[13]提出从五个因素综合考虑岩爆，分别将地应力、岩石强度和岩体完整性等 3 个方面的 6 个指标因素进行分析，并将提出的五因素细分为决定性因素和内因，来研究岩爆问题。本文即采用五因素作为岩爆预测模型的评价指标。

如表 1 所示，根据岩爆五因素综合判据将岩爆划分为四个级别 I、II、III、IV，分别对应着无岩爆、弱岩爆、中岩爆以及强岩爆。岩爆五因素综合判据主要考虑的因素是：主应力与岩石抗压强度的比、最大切向应力和抗压强度的比、脆性系数、弹性能指数以及岩体的完整性 5 个方面。这 5 个方面从岩爆发生机理出发，较全面的分析了岩爆发生的各种因素与指标，因此选用岩爆五因素综合判据作为本模型的评价指标是可靠的。但如何利用上述 5 个指标对实际工程中发生岩爆的可能性进行量化分析还没有一套可行和完整的方法。本文提出的基于组合权重-理想点法的岩爆预测分级模型就是为了解决这一难题。

表 1 岩爆五因素综合判据和岩爆分级^[13]

Table 1 Five factors of rock burst criterion and classification				
影响因素	I	II	III	IV
s_1/R_c	<0.15	0.15~0.20	0.20~0.40	>0.40
s_θ/R_c	<0.20	0.20~0.30	0.30~0.55	>0.55
R_c/R_t	<15	15~18	18~22	>22
W_{et}	<2.0	2.0~3.5	3.5~5.0	>5.0
K_v	<0.55	0.55~0.60	0.60~0.80	>0.80

注： s_1 为围岩洞壁最大主应力， s_θ 为围岩洞壁最大切向应力， R_c 为岩石单轴抗压强度， R_t 为岩石单轴抗拉强度， W_{et} 为岩石弹性能指数， K_v 为岩体完整性系数。

1.2 组合权重

(1) 层次分析法^[12]

层次分析法 (analytic hierarchy process, 简称

AHP) 是一种简易的决策方法，主要适用于一些模糊、复杂的决策问题，具有简便、灵活、适用的特点。是 20 世纪 70 年代由美国著名的运筹学家 Saaty 所提出来的。

对于岩爆预测问题，其中的影响因素是相互制约，相互关联的关系，由于缺少定量的数据系统，因此层次分析法在岩爆预测中可以发挥重要的作用。运用层次分析法建模，可以分为以下 4 个步骤：(I) 建立层次结构；(II) 构造判断矩阵；(III) 求解判断矩阵；(IV) 一致性检验并修正。

a) 建立层次结构：本文中采用五因素法中的 s_1/R_c , s_θ/R_c , R_c/R_t , W_{et} , K_v 为预测指标，由此构建的岩爆预测层次结构如图 1 所示。

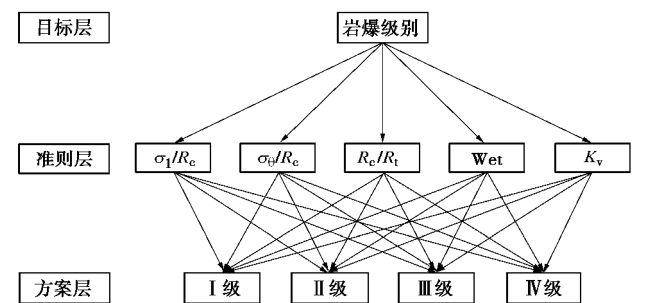


图 1 岩爆等级评价层次结构

Fig. 1 Grade evaluation of rock burst hierarchy

b) 构造判断矩阵：判断矩阵的元素表示的是五个指标的相对重要性，常用 1~9 标度的方法确定；赋值方法如表 2 所示。分析构造见表 3。

表 2 层次分析法分析赋值原则

Table 2 AHP analysis of principles of assignment	
赋值	重要性差异
1	A_i 与 A_j 一样重要
3	A_i 比 A_j 重要一点
5	A_i 比 A_j 重要
7	A_i 比 A_j 重要很多
9	A_i 比 A_j 极端重要
2, 4, 6, 8	不能确认重要性差异时可赋予的中间值
说明	当 A_j 比 A_i 比较时，其赋值是 A_i 与 A_j 标量的倒数

表 3 分析构造表

Table 3 Construction chart of analysis				
项目	A_1	A_2	----	A_N
A_1	A_{11}	A_{12}	----	A_{1N}
A_2	A_{21}	A_{22}	----	A_{2N}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A_N	A_{N1}	A_{N2}	----	A_{NN}

c) 求解判断矩阵：求解特征向量的方法有方根法、和法、最小二乘法、特征根法等。本文采用方根法进行求解。

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (i=1,2,\mathbf{L},n) \quad , \quad (1)$$

由此可得

$$\bar{W} = [\bar{w}_i]^T \quad (2)$$

对 $\bar{W}$ 进行归一化处理:

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (i=1,2,\mathbf{L},n) \quad (3)$$

由式 (3) 就可以得到第 i 层相关元素相对于该层的权重。

用下式计算判断矩阵 A 的最大特征根:

$$l_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (4)$$

d) 一致性检验并修正

计算一致性比率 CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad , \quad (5)$$

式中, RI 为 A 的随机一致性指标, 数值可查阅表 4 规定, CI 为 A 的一致性指标, 计算公式为

$$CI = \frac{l_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

当 $CR < 0.1$ 时, 即判断矩阵满足一致性要求, 可用标准化后的特征向量作为权向量, 否则需重新调整判断矩阵 A 。

表 4 判断矩阵 RI 数值表

Table 4 Values of matrix RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

(2) 熵权理论^[11]

熵原本是热力学概念, 是用来表征运动的混乱程度。自数学家申农将其引入信息论后, 熵可以度量系统的不确定性, 并在工程技术、科学管理乃至社会经济领域均得到了广泛的应用。“熵权”的本质是利用给指标信息的效用值来计算各指标权重, 是一种客观赋权法。效用值越高, 则其对评价的重要性越大。本文利用其对岩爆评价指标进行客观赋权。

a) 建立原始数据矩阵 (m 个评价对象, t 个评价指标)

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \mathbf{L} & x_{1t} \\ x_{21} & x_{22} & \mathbf{L} & x_{2t} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ x_{m1} & x_{m2} & \mathbf{L} & x_{mt} \end{bmatrix} \quad (7)$$

b) 对原始数据进行标准化处理

对于越大越优型指标, 转化公式如下:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad , \quad (7)$$

对于越小越优型指标, 转化公式为

$$y_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad , \quad (8)$$

则可得到标准化后的矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \mathbf{L} & y_{1t} \\ y_{21} & y_{22} & \mathbf{L} & y_{2t} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ y_{m1} & y_{m2} & \mathbf{L} & y_{mt} \end{bmatrix} \quad (9)$$

c) 根据熵的定义, 对于 t 个评价指标, m 个评价对象, 利用下式计算第 i 个评价指标的熵值

$$E_i = -k \sum_{j=1}^t f_{ij} \ln f_{ij} \quad , \quad (9)$$

式中,

$$f_{ij} = \frac{1 + y_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + y_{ij})} \quad , \quad k = 1/\ln t \quad (10)$$

d) 根据熵值, 计算第 i 个评价指标的熵权, 作为评价指标的客观权重

$$l_i = \frac{1 - E_i}{t - \sum_{j=1}^t E_i} \quad (i=1,2,\mathbf{L},m) \quad (11)$$

(3) 组合权重^[12]

层次分析法赋权具有一定的主观性, 为了全面反映评价指标的重要性, 使得评价结果更加准确, 又添加了熵权理论作为客观评价方法。本文采用主客观权重法相结合的组合权重, 获得各个评价指标的组合权重。

权重的组合方法有乘法合成法及线性加权组合法, 线性加权组合法应用范围更广, 乘法合成法适用于权重分配均匀的情况。

乘法合成法计算公式为

$$c_i = \frac{w_i l_i}{\sum w_i l_i} \quad (12)$$

线性加权组合法的计算公式为

$$c_i = \alpha w_i + (1 - \alpha) l_i \quad , \quad (13)$$

式中, c_i 为第 i 个评价指标的组合权重, α 为第 i 个评价指标的分配系数, w_i 为第 i 个评价指标的层次分析法权重, l_i 为第 i 个评价指标的熵权。

1.3 理想点评价函数^[14]

(1) 理想点决策矩阵构建

对于一个 k 个评价指标的分类对象, 可以看成 k 个目标函数, 即可构造目标函数为

$$F(x) = [f_1(x), f_2(x), \mathbf{L}, f_k(x)] \quad (14)$$

其分别对应的权重为 $W_1, W_2, \mathbf{L}, W_k$, 这个分类对象 B 在目标函数 $f_i(\mathbf{x})$ 下取值为 x_i 。则其指标矩阵为

$$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \mathbf{L}, x_k\} [W_1, W_2, \mathbf{L}, W_k]^T \quad (15)$$

(2) 理想点设置

理想点的评价指标可以根据不同的性质进行分类, 在这里可以主要分为三类, 分别是“增长型”指标, 即指标得值越大越好, “减少型”, 同理即指标的值越小越好, 另一类是“区间型”指标, 即认为指标的值某个理想的区间。

“增长型”指标, 有

$$f_i^*(+) = \max f_i(\mathbf{x}) \quad (16)$$

“减少型”指标, 有

$$f_i^*(+) = \min f_i(\mathbf{x}) \quad (17)$$

“区间型”指标, 有

$$f_i^*(+) = f_i((z_i^L + z_i^U)/2) \quad (18)$$

式中 $f_i^*(+)$ 为第 i 个评价指标的理想值, z_i^L 和 z_i^U 分别为评价指标的下限值和上限值。

(3) 理想点评价函数确定

理想点法评价对象的本质是通过计算各点与理想点的距离来进行判断, 一点离理想点的距离越近, 说明评价对象最为接近理想点。因此, 常用的距离函数是闵可夫斯基距离函数:

$$|L| = \left\{ \sum_{i=1}^n w_i \left[\frac{f_i(\mathbf{x}) - f_i^*(+)}{f_i^{*U} - f_i^{*L}} \right]^H \right\}^{1/H} \quad (19)$$

式中 $f_i(\mathbf{x})$ 值代表不同评价指标的真实值 $f_i(\mathbf{x})$ 为评价对象第 i 个评价指标真实值; $f_i^*(+)$ 值代表不同评价指标的理想值为第 i 个评价指标理想值; f_i^{*U} 为不同指标的上限值, f_i^{*L} 为不同指标的下限值; 其中 H 为闵可夫斯基距离函数系数, 当 $H=1$ 时, 为曼哈顿距离, 当 $H=2$ 时, 为欧氏距离, 当 $H=\infty$ 时, 为切比雪夫距离。在实际岩爆的应用中, 该模型的闵可夫斯基距离函数

是为了衡量各个因素指标与理想点的距离, 因此 H 取值对最终评价分级结果的影响可分为 H 取奇数和偶数两种情况。在本文中为了应用计算方便, 分别选取 H 取 1 和 2 进行计算分析。若 H 取奇数时, 各影响指标与理想点的距离可能为正也可能为负, 综合影响后只会拉近评价指标与理想点的距离, 从而导致预测结果偏小; H 取偶数时, 各影响指标与理想点的距离均为正, 综合影响后在本文中为了应用计算方便, 分别选取 H 取 1 和 2 进行计算分析。

2 组合权重-理想点法岩爆分级预测模型

2.1 原始工程数据及处理

为了检验构建的组合权重-理想点法模型预测应变型岩爆的合理性和有效性, 根据各种文献提供的应变型岩爆数据, 统计整理了近些年来的一些工程数据^[2, 15-20]如表 5 所示。

因为很多文献给出的数值都是一个范围, 这对于定量评估预测产生了一定的难度, 因此本文对于原始数据进行统一说明处理。对于给出范围的数据, 采用取平均值的方式得到确定数值; 对于实际岩爆等级处在两级之间的数值, 为了更加安全合理起见, 统一取岩爆等级较高的数值。处理后的工程数据如表 6 所示。

2.2 评价指标体系及理想点的确定

由表 1 可知, 五项评价指标均为“效益型”指标, 根据 II 级与 III 级岩爆各评价指标分布的区间状况, 为了确保岩爆可以正确分级, 相应地应该为 I、IV 级岩爆的理想区间补充相应的上限值和下限值来确定理想点^[21], 经过补充修正之后的岩爆等级和评价指标关系如表 7 所示。

表 5 原始工程数据表^[2, 15-20]

Table 5 Data of original projects

序号	工程名称	最大主应力 s_1 /MPa	最大切向应力 s_θ /MPa	抗压强度 R_c /MPa	抗拉强度 R_t /MPa	岩石弹性能 指数 W_{et}	岩体完整性指 数 K_v	实际岩爆 级别	数据来源
1	锦屏 I 级	9.00~35.00	18.00~70.00	50.00~70.00	5.0	3.5	0.53	II 级~III 级	文献[15, 16]
2	锦屏 II 级	38.02~71.00	98.6	120	6.5	3.8	0.76	III 级~IV 级	文献[2, 15]
3	天生桥 II 级水电 站引水隧洞	25.80	30.00	88.7	3.7	6.6	0.75	III 级	文献[15, 17]
4	太平驿水电站引 水隧洞	31.40	62.60	130.0~180.0	9.4	9.0	0.75	III 级	文献[2, 15]
5	秦岭铁路隧道	20.00~40.00	105.00	95.0~130.0	7.0	6.25~7.8	0.75	IV 级	文献[15, 18]
6	铜陵冬瓜山铜矿	34.33	105.50	132.2	16.4	7.27	0.75	III 级	文献[15, 19]
7	瀑布沟地下水电 站地下洞室	21.10~27.30	42.00~54.00	82.3~207.5	5.9	5.0	0.80	III 级	文献[2, 15]
8	渔子溪一级水电 站引水隧洞	30.00~45.00	90.00	170.0	11.3	9.0	0.80	III 级	文献[2, 15]
9	台靖高速公路苍 岭隧道	59.50	48.90	160.0	7.0	5.0	0.75	III 级	文献[15, 20]

表 6 处理后的各项评价指标数据表

Table 6 Data of evaluation indexes after treatment

序号	工程名称	s_1/R_c	s_0/R_c	R_c/R_t	W_{et}	K_v	实际岩爆级别	数据来源
1	锦屏 I 级	0.37	0.67	12.00	3.50	0.53	III 级	文献[15, 16]
2	锦屏 II 级	0.45	0.82	18.46	3.80	0.76	IV 级	文献[2, 15]
3	天生桥 II 级水电站引水隧洞	0.29	0.34	23.97	6.60	0.75	III 级	文献[15, 17]
4	太平驿水电站引水隧洞	0.20	0.40	16.49	9.00	0.75	III 级	文献[2, 15]
5	秦岭铁路隧道	0.26	0.91	16.43	7.00	0.75	IV 级	文献[15, 18]
6	铜陵冬瓜山铜矿	0.26	0.80	8.06	7.27	0.75	III 级	文献[15, 19]
7	瀑布沟地下水电站地下洞室	0.17	0.33	24.56	5.00	0.80	III 级	文献[2, 15]
8	渔子溪一级水电站引水隧洞	0.22	0.53	15.04	9.00	0.80	III 级	文献[2, 15]
9	台靖高速公路苍岭隧道	0.37	0.31	22.86	5.00	0.75	III 级	文献[15, 20]

表 7 补充修正后岩爆等级与评价指标关系

Table 7 Relation between revised rating and evaluation indexes of rock burst

影响	I	II	III	IV
s_1/R_c	0.10~0.15	0.15~0.20	0.20~0.40	0.40~0.60
s_0/R_c	0.10~0.20	0.20~0.30	0.30~0.55	0.55~0.95
R_c/R_t	8~15	15~18	18~22	22~25
W_{et}	1~2	2~3.5	3.5~5	5~9
K_v	0.50~0.55	0.55~0.60	0.60~0.80	0.80~0.90

根据表 7、式 (18), 就可以构建出理想点矩阵:

$$F_i^*(+)=\begin{bmatrix} 0.10 & 0.18 & 0.30 & 0.60 \\ 0.10 & 0.25 & 0.43 & 0.95 \\ 8.00 & 16.50 & 20.00 & 25.00 \\ 1.00 & 2.75 & 4.25 & 9.00 \\ 0.50 & 0.58 & 0.70 & 0.90 \end{bmatrix}。(20)$$

2.3 组合权重的确定

(1) 层次分析法计算权重

对于岩爆问题, 综合文献[21, 22]和相关专家意见可知, 可以认为洞室最大切向应力与岩石单轴抗压强度的比值 s_0/R_c 最重要, 比围岩洞壁最大主应力与岩石单轴抗压强度的比值 s_1/R_c 重要, 与岩石单轴抗压强度与抗拉强度比值 R_c/R_t 的关系介于重要与重要很多之间, 与岩石弹性指数 W_{et} 的关系是重要很多的关系, 比岩体完整性系数 K_v 重要很多与重要一点之间。其余两个指标之间的重要程度关系可以参见下面的分析矩阵所示。

按照 s_1/R_c , s_0/R_c , R_c/R_t , W_{et} , K_v 的顺序, 分析矩阵为

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 3 & 7 & 4 \\ 5 & 1 & 6 & 8 & 7 \\ 1/3 & 1/6 & 1 & 4 & 2 \\ 1/7 & 1/8 & 1/4 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 1/7 & 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}。(21)$$

求解判断矩阵

$$\overline{w_i}=\sqrt[n]{\prod_{j=1}^na_{ij}}\quad(i=1,2,\text{L},n),\quad(22)$$

$$\overline{W}=[1.7582\quad 4.4163\quad 0.8503\quad 0.2720\quad 0.5569]。$$

判断矩阵归一化处理:

$$W=[0.2239\quad 0.5623\quad 0.1083\quad 0.0346\quad 0.0709]。$$

一致性检验:

$$l_{\max}=\sum_{i=1}^n\frac{(AW)_i}{nW_i}=5.3106。$$

则一致性指标为

$$CI=\frac{l_{\max}-n}{n-1}=0.0693,$$

$$CR=\frac{CI}{RI}=0.0693<0.1\text{ 满足一致性要求。}$$

(2) 熵权理论计算权重

原始数据矩阵为

$$X=\begin{bmatrix} 0.37 & 0.67 & 12.00 & 3.5 & 0.53 \\ 0.45 & 0.82 & 18.46 & 3.8 & 0.76 \\ 0.29 & 0.34 & 23.97 & 6.6 & 0.75 \\ 0.20 & 0.40 & 16.49 & 9.0 & 0.75 \\ 0.26 & 0.91 & 16.43 & 7.0 & 0.75 \\ 0.26 & 0.80 & 8.06 & 7.27 & 0.75 \\ 0.17 & 0.33 & 24.56 & 5.0 & 0.80 \\ 0.22 & 0.53 & 15.04 & 9.0 & 0.80 \\ 0.37 & 0.31 & 22.86 & 5.0 & 0.75 \end{bmatrix}。(23)$$

因为这五项指标都是越小越优型, 故可以构建起标准化后的矩阵:

$$Y=\begin{bmatrix} 0.286 & 0.400 & 0.761 & 1.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.150 & 0.370 & 0.945 & 0.148 \\ 0.571 & 0.950 & 0.036 & 0.436 & 0.185 \\ 0.893 & 0.850 & 0.489 & 0.000 & 0.185 \\ 0.679 & 0.000 & 0.493 & 0.364 & 0.185 \\ 0.679 & 0.183 & 1.000 & 0.315 & 0.185 \\ 1.000 & 0.967 & 0.000 & 0.727 & 0.000 \\ 0.821 & 0.633 & 0.577 & 0.000 & 0.000 \\ 0.286 & 1.000 & 0.103 & 0.727 & 0.185 \end{bmatrix}。(24)$$

由式 (9)、(10), 可以计算得到各个指标的熵值

E_i 为

$$E=[0.9909\quad 0.9868\quad 0.9886\quad 0.9873\quad 0.9895]。$$

表 8 岩爆预测结果表
Table 8 Predicted results of rock burst

序号	工程名称	H=1					H=2					实际岩爆 级别
		I 级	II 级	III级	IV级	岩爆 预测值	I 级	II 级	III级	IV级	岩爆预 测值	
1	锦屏 I 级	7.0730	2.2829	0.0389	1.6120	III级	8.5287	3.3055	1.0545	2.1871	III级	III级
2	锦屏 II 级	9.2382	4.1147	0.7662	0.8277	III级	10.8526	4.625	1.0957	1.0817	IV级	IV级
3	天生桥 II 级水电 站引水隧洞	4.4633	1.8625	0.1805	1.0831	III级	4.7334	2.068	0.6902	1.1887	III级	III级
4	太平驿水电站引 水隧洞	4.4934	1.5781	0.0995	1.3535	III级	5.0275	2.0626	1.1307	1.5486	III级	III级
5	秦岭铁路隧道	9.0579	3.8611	0.8879	0.8364	IV级	11.0935	4.6345	1.4446	1.2607	IV级	IV级
6	铜陵冬瓜山铜矿	7.9677	3.0033	0.4152	1.3516	III级	9.7279	4.1248	1.6417	2.2532	III级	III级
7	瀑布沟地下水电 站地下洞室	3.458	1.3704	0.0228	1.1042	III级	3.6363	1.9563	0.6306	1.2018	III级	III级
8	渔子溪一级水电 站引水隧洞	5.7532	2.263	0.3197	1.2168	III级	6.5311	2.7741	1.2067	1.5263	III级	III级
9	台靖高速公路苍 岭隧道	4.5353	1.88	0.0506	1.1777	III级	5.1387	2.2943	0.482	1.2644	III级	III级

然后再由式 (11), 可以计算得出各个评价预测指标的熵权 I_i 为
 $I=[0.1605\ 0.2322\ 0.1999\ 0.2232\ 0.1842]$ 。
(3) 组合权重确定
岩爆各个评价预测指标之间的主观权重值分配并不均匀, 故采用线性加权组合法计算组合权重, 即利用式 (13) 进行计算。又由于工程数据在统计时可能存在统计误差, 故应该优先考虑层次分析法建立的权重, 故可分配系数 $a=0.6$, 可以计算得出各指标综合权重 c_i 为
 $C=[0.1985\ 0.4303\ 0.1449\ 0.1101\ 0.1162]$ 。

2.4 岩爆分级预测模型检验

根据前文所述, 可以构建出岩爆分级预测模型, 为了检验构建的组合权-理想点法模型预测岩爆的合理性和有效性, 收集总结了近年来的工程数据, 用于验证模型的准确性。判别结果如表 8 所示。

由表 8 的预测结果可以看出, 当 $H=1$, 即理想点的距离为曼哈顿距离时, 在预测锦屏 II 级水电站时, 预测结果出现偏差, 比实际的岩爆结果小一个等级。当 $H=2$, 即理想点的距离为欧氏距离时, 理想点模型预测预测的结果与实际结果完全相符。进一步分析, 当 H 取奇数时, 各影响指标与理想点的距离可能为正也可能为负, 综合影响后只会拉近评价指标与理想点的距离, 从而导致预测结果偏小 (预测锦屏 II 级水电站时得到验证); H 取偶数时, 各影响指标与理想点的距离均为正, 能真实反映理想点与各个评价指标之间

的距离。另一方面, 在预测岩爆等级时, 选取岩爆预测结果高的有利于施工安全。因此, 选用 $H=2$ 的欧式距离作为本模型理想点的预测模型比较合适。

2.5 岩爆预测分级系统

根据本文构建的组合权重-理想点法模型开发了一套用于岩爆预测分级的软件系统, 通过该界面, 可以直观准确的预测工程岩爆的发生及分级, 具体的软件界面如图 2 所示。

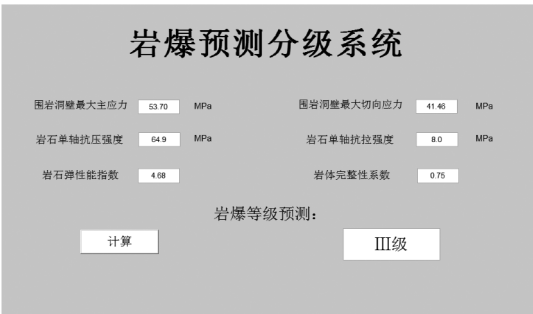


图 2 岩爆预测分级系统界面

Fig. 2 Prediction and classification system interface for rock burst

根据图 2 的系统界面, 只需要输入五因素指标对应的数值, 就可以直接计算出岩爆的级别, 便于工程师应用。

3 结 论

本文基于前人提出的应变型岩爆五因素判据, 综合考虑岩体工程及岩爆发生的不确定性, 提出了基于组合权重-理想点法的岩爆预测分级模型。

(1) 将岩爆五因素法引入到了岩爆的分级预测中,并且采用了层次分析法与熵法相结合的主客观组合法。

(2) 在综合考虑岩爆的影响因素基础上,充分考虑了岩爆发生的条件,采用了岩爆五因素法作为评价指标,提出了基于组合权重-理想点法的岩爆预测分级模型,并给出了详细的计算步骤和过程,在此基础上,开发了简单易用的岩爆预测分级系统。通过工程分析与验证,说明构建的组合权-理想点法是有效的。

(3) 在实际预测模型中,选用 $H=2$ 时的欧式距离作为理想点模型进行预测比较合适,预测结果与实际结果完全相符。

(4) 本文提出的预测分级模型主要有两方面的优势:①考虑影响岩爆的因素比前人方法多,本文是基于应变型岩爆发生的五因素进行预测分级的;②本文统计了9个不同工程的实例数据,所提出的模型在这些工程中均得到了很好的验证,这在一定程度上也增加了本文所提出模型的适用性。当然,岩爆预测一直以来都是一个世界性的难题,要想实现岩爆的精确预测,还需要不断的深入研究与努力。

尽管本文岩爆预测分级方法是基于岩爆的五因素判据提出的,但对于其他岩爆判据,本文方法的计算过程和步骤同样适用。

参考文献:

- [1] 王元汉,李卧东,李启光,等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493 - 501. (WANG Yuan-han, LI Wo-dong, LI Qi-guang, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493 - 501. (in Chinese))
- [2] 梁志勇. 锦屏二级水电站引水隧洞岩爆预测及防治对策研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004. (LIANG Zhi-yong. Study on the prediction and prevention of rockburst in the diversion tunnel of Jinping II Hydropower[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [3] DORIGO M, BIRATTARI M. Ant colony optimization[M]// Encyclopedia of Machine Learning. New York: Springer US, 2010: 36 - 39.
- [4] SANDRU O I, VLADAREANU L, SCHIOPU P, et al. Multidimensional extenics theory[J]. UPB Sci Bull, 2013(1): 75.
- [5] 王迎超,尚岳全,孙红月,等. 基于功效系数的岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 529 - 534. (WANG Ying-chao, SHANG Yue-quan, SUN Hong-yue, et al. Study of prediction of rockburst intensity based on efficacy coefficient method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 529 - 534. (in Chinese))
- [6] BUSH G W, SI Y, ZHANG B, et al. Abc is abc[J]. Rock Mechanics, 2000, 22(2): 117 - 122.
- [7] RUSSENESE B F. Analysis of rock spalling for tunnels in steep vally sides (in Norwegian)[D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1974.
- [8] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mechaniacs, 1974, 6: 189 - 236.
- [9] 徐林生,王兰生. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 569 - 572. (XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng. Study on the laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang Mountain road[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 569 - 572. (in Chinese))
- [10] 张镜剑,傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2034 - 2042. (ZHANG Jing-jian, FU Bin-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034 - 2042. (in Chinese))
- [11] 吕庆,孙红月,尚岳全,等. 深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2982 - 2988. (LÜ Qing, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Comprehensive study on prediction of rockburst in deep and over-length highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2982 - 2988. (in Chinese))
- [12] 张俦元,宋建波,李攀峰. 地下厂房洞室群岩爆趋势综合预测方法[J]. 地球科学进展, 2004(3): 451 - 456. (ZHANG Zhuo-yuan, SONG Jian-bo, LI Pan-feng. Rock burst comprehensive forecasting method for the chamber group of underground power house[J]. Advance in Earth Sciences, 2004(3): 451 - 456. (in Chinese))
- [13] ZHANG J J, FU B J, LI Z K, et al. Criterion and classification for strain mode rockbursts based on five-factor comprehensive method[C]// Harmonising Rock Engineering and the Environment. Beijing, 2011: 562 - 563.
- [14] 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(5): 119 - 122. (ZHU Ying, MENG Zhi-yong, KAN Shu-yu. Determination of weight value by AHP[J]. Journal of Northern Jiao Tong University, 1999(5): 119 - 122. (in Chinese))

- [15] 袁诗龙, 王金山. 基于熵权理想解法的炮兵 C^4ISR 系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 81 - 83, 94. (YUAN Shi-long, WANG Jin-shan. Evaluation of artillery battling efficiency based on entropy and the ideal point analysis manner[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(12): 81 - 83, 94. (in Chinese))
- [16] 裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等. 基于组合赋权的岩爆倾向性预测灰评估模型及应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 49 - 56. (PEI Qi-tao, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, et al. A grey evaluation model for predicting rockburst proneness based on combination weight and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S1): 49 - 56. (in Chinese))
- [17] 应玫茜. 多目标规划的理想点法[J]. 系统科学与数学, 1981(1): 1 - 8. (YING Mei-qian. The ideal point method of multi-objective programming[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1981(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [18] 尚彦军, 张镜剑, 傅冰骏. 应变型岩爆三要素分析及岩爆势表达[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(8): 1520 - 1527. (SHANG Yan-jun, ZHANG Jing-jian, FU Bin-jun. Analyses of three parameters for strain mode rockburst and expression of rockburst potential[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(8): 1520 - 1527. (in Chinese))
- [19] 贾哲强, 张茹, 张艳飞, 等. 猴子岩水电站地下厂房岩爆综合预测研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 110 - 116. (JIA Zhe-qiang, ZHANG Ru, ZHANG Yan-fei, et al. Integrated prediction for rockburst of underground powerhouse of Houziyan hydropower station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 110 - 116. (in Chinese))
- [20] 贾愚如, 范正绮. 水工地下洞室中的岩爆机制与判据[J]. 水力发电, 1990(6): 30 - 34. (JIA Yu-ru, FAN Zheng-qi. Hydraulic underground tunnel rockburst mechanism and criteria[J]. Water Power, 1990(6): 30 - 34. (in Chinese))
- [21] 舒磊, 王磊, 彭金伟. 秦岭铁路隧道岩爆预报的模糊综合评判研究[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1998(4): 55 - 60. (SHU Lei, WANG Lei, PENG Jin-wei. The rockburst forecast based on fuzzy comprehensive evaluation of Qinling railway tunnel[J]. Journal of Sichuan Union University (Engineering Science Edition), 1998(4): 55 - 60. (in Chinese))
- [22] 李素蓉. 深部金属矿地震活动特性及岩爆的支持向量机预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011. (LI Su-rong. Study of characteristics of mining induced seismicity in deep metal and rockburst prediction based on support vector machine[D]. Changsha: Zhongnan University, 2011. (in Chinese))
- [23] 吴德兴, 杨健. 苍岭特长公路隧道岩爆预测和工程对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(21): 167 - 173. (WU De-xing, YANG Jian. Prediction and countermeasure for rockburst in cangling mountain highway tunnel[D]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(21): 167 - 173. (in Chinese))
- [24] 贾义鹏. 岩爆预测方法与理论模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (JIA Yi-peng. Study on prediction method and theorial mode of rocklburst[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [25] 刘磊磊. 高地应力地区隧道岩爆预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014. (LIU Lei-lei. Prediction of rockburst while tunnelling in high geological stress areas[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese))