

高岭,李建朋,曹正波.基于反分析赋权方法的岩爆预测云模型研究[J].地震工程学报,2020,42(2):498-504.doi:10.3969/j.issn.1000—0844.2020.02.498

GAO Ling, LI Jianpeng, CAO Zhengbo. A Cloud Model for Rock Burst Prediction Based on the Back Analysis Weighting Approach [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 498-504. doi:10.3969/j.issn.1000—0844.2020.02.498

基于反分析赋权方法的岩爆预测云模型研究

高 岭, 李建朋, 曹正波

(河北省交通规划设计院, 河北 石家庄 050011)

摘要: 为了综合考虑岩爆预测实践中的随机性与模糊性, 云模型理论被引入到岩爆预测方法中。然而现有岩爆预测云模型的指标权重值在客观性和准确性方面尚需提高, 为此本文提出基于反分析赋权方法的岩爆云模型。在给出该模型具体实现步骤的基础上, 推导建立优化目标函数之后选用洞室最大切向应力与岩石抗压强度的比值、岩石抗压强度与抗拉强度的比值、弹性能量指数等作为评判指标, 基于 18 个岩爆工程实例, 利用 Matlab 软件开展了指标权重的反分析计算。最后, 将新建立的岩爆预测云模型应用于江边水电站和马路坪矿的岩爆预测中, 并与主观赋权方法云模型的预测结果对比分析, 检验了其可行性与有效性。研究表明, 基于反分析赋权方法的岩爆预测云模型赋权过程中主观性干扰因素较小, 预测结果准确率较高。

关键词: 岩爆; 云模型; 因子权重; 反分析

中图分类号: P319.56

文献标志码: A

文章编号: 1000—0844(2020)02—0498—07

DOI:10.3969/j.issn.1000—0844.2020.02.498

A Cloud Model for Rock Burst Prediction Based on the Back Analysis Weighting Approach

GAO Ling, LI Jianpeng, CAO Zhengbo

(Hebei Provincial Communications Planning and Design Institute, Shijiazhuang 050011, Hebei, China)

Abstract: To comprehensively consider the randomness and ambiguity in rock burst prediction practice, a cloud model theory is introduced into the method. However, the index weight value of the existing rock burst prediction cloud model needs to be improved in terms of objectivity and accuracy. Therefore, this paper proposes a rock burst cloud model based on a back analysis weighting approach. First, the specific implementation steps of the model are given, and the optimization objective function is established. Next, the ratio of maximum tangential stress of cavern to the compressive strength of rock, the ratio of compressive strength of rock to the tensile strength, and the elastic energy index were selected as judging indexes. Based on 18 rock burst engineering examples, the back analysis of index weights was carried out using MATLAB software. Finally, the newly-built cloud model was applied to the rock burst prediction of the Jiangbi-

an hydropower station and Maluping mine. Results were compared with the predictive results of the cloud model based on a subjective weighting method to test the feasibility and effectiveness of the proposed model. The research showed that the subjective interference factors in the weighting process of the rock burst cloud model based on back analysis weighting approach were few, thus the accuracy of prediction results was high.

Keywords: rock burst; cloud model; weight; back analysis

0 引言

岩爆是高地应力条件下地下岩体工程开挖过程中遇到的一种常见的动力失稳现象,具体表现为围岩片状剥落、严重片帮、爆裂声响与岩片弹射等。岩爆破坏力巨大,且具有突发性,常常会造成工期延误和设备损失,严重的会造成人员伤亡。因而对岩爆发生及其烈度等级的预测评判研究一直是地下岩石工程领域的研究热点之一。

在岩爆等级预测评判过程中,一方面因岩层地质条件复杂、试验仪器误差与操作人员水平等因素使得评价指标的实测值存在随机性误差;另一方面,实践中常出现多个评价指标的实测值分别满足不同岩爆级别标准的“亦此亦彼”的模糊现象。为综合考虑上述随机性与模糊性,近年来很多学者将云模型理论引入到岩爆等级预测中,取得了较好的应用效果。

与其他多指标综合评判方法一样,合理的指标权重对岩爆预测云模型的预测准确率有重要影响。现有的云模型指标赋权方法有经验赋权法^[1]、德尔菲法^[2]、粗糙集理论^[3]、熵权法^[4-5]、投影寻踪法^[6-8]、指标距离法^[9]、CRITIC 法^[10]等。其中经验赋权法和德尔菲法属于主观赋权法,其他为客观赋权法。这两类方法各有优缺点:主观赋权法是专家经验的体现,但客观性差,容易受到主观因素干扰;客观赋权法确定的权重精度较高,但有时会出现与主观认知层面的重要性相左的情况。有些学者将主客观权重结合起来,采用组合赋权方法给定指标权重^[11-14]。然而,这一结合过程又需要确定主观权重和客观权重的结合权重,使得问题变得复杂,因而组合赋权法在实际中的应用较少。一般而言,人们更倾向于采用客观赋权方法,并对所得结果从实践角度检验其合理性。

本文拟采用反分析方法确定云模型指标权重,进而建立基于反分析赋权方法的岩爆预测云模型,并通过与其他方法建立的岩爆预测云模型进行对比分析来验证新模型的合理性与有效性。

1 云模型理论简介

云模型^[15]是一种将概率论和模糊集合理论有机结合,可实现定性语言概念与其定量数据表示之间的转换的认知模型。云模型理论认为,表达语言概念的云由许许多多云滴组成,每个云滴都是概念在数量上的一次具体样例实现。某一定性概念可以用三个数字特征:期望 E_x , 熵 E_n 和超熵 H_e 来表征,三个数字特征的示意图见图 1。期望 E_x , 是云滴在论域空间分布的期望,是最能代表该定性概念的点,熵 E_n 是定性概念随机性和亦此亦彼性的度量,反映了在论域空间中可被定性概念接受的云滴的离散程度。超熵 H_e 则是熵的不确定性度量,反映了云滴的凝聚程度, H_e 越大, 云的厚度越大, 雾化程度也越大。

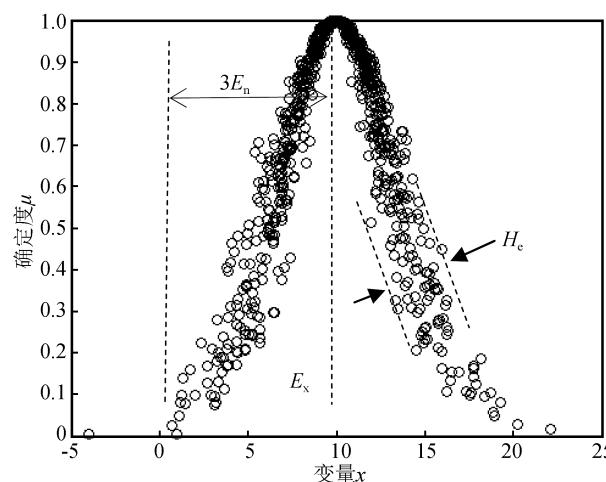


图 1 云模型数字特征示意图

Fig.1 Sketch map of digital characteristics of the cloud model

岩爆等级预测云模型中,某一岩爆等级即为定性的语言概念, E_x , E_n 和 H_e 是用来刻画这一定性概念的数字特征。这些数字特征的具体含义分别为不同工程实例中岩爆状态数据的均值、数据离散范围和范围的不确定性。基于以上三个数字特征,利用式(1)即可计算出某一评价指标实测值 x 属于某

一等级的确定度 μ 。

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2E_n'^2}\right) \quad (1)$$

式中: $\mu \in [0, 1]$, $E_n'^2$ 是一个随机值, 服从以 E_n 为期望、 H_n^2 为方差的高斯分布, 即 $E_n'^2 \sim N(E_n, H_n^2)$ 。基于不同的概率分布可以构成不同的云模型。本文中采用了高斯云模型。

由式(1)计算出某评价指标实测数据隶属某一等级的确定度 μ_i 后, 还需结合各指标权重 ω_i , 由式(2)计算综合确定度 Ω , 根据综合确定度值给出岩爆级别。

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \mu_i \omega_i \quad (2)$$

2 云模型指标权重反分析

云模型各指标权重值的反分析就是将权重值视为未知数, 以样本数据为分析对象, 采用优化算法全局寻优, 找到云模型预测结果与实际结果最为一致的那一组指标权重值。上述方法的具体实现流程见图 2 所示。云模型指标权重值的反分析的步骤为:

- (1) 选定评价指标;
- (2) 收集整理样本实例, 计算云模型的数字特征 E_x, E_n 和 H_n , 初步建立云模型;
- (3) 构建优化适应度函数;
- (4) 以样本集为分析对象, 采用遗传算法对指标权重向量进行全局寻优, 求得与实际情况最吻合的指标权重;
- (5) 依据式(2)计算综合确定度 Ω , 进而由综合确定度给出预测结果;
- (6) 对新建立的云模型进行回代检验和泛化能力测试, 以验证其可行性和有效性。

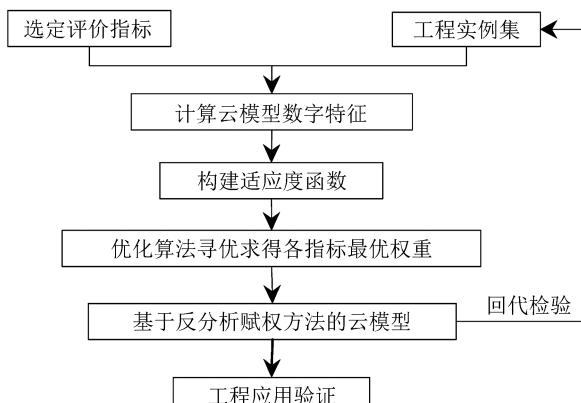


图 2 云模型指标权重的反分析确定方法

Fig.2 Back analysis method of index weight of the cloud model

上述步骤中最为关键的是第三步适应度函数的构建。依据前文所述云模型反分析赋权方法的基本思想, 编写了适应度函数 fitness, 见式(3)。

$$\left. \begin{aligned} \mu(i, j) &= \exp\left(-\frac{x(k, j) - E_x(i, j)}{2E_n'(i, j)^2}\right) \\ \Omega_i &= \sum_{j=1}^n \mu(i, j) \omega_j \\ \max_{i=1}^p \Omega_i &= \Omega_i \Rightarrow y_k = i \\ g_k &= \begin{cases} 1 & (y_k = Y_k) \\ 0 & (y_k \neq Y_k) \end{cases} \\ \text{fitness} &= \sum_{k=1}^m g_k \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: i, j, k 分别代表第 i 个等级、第 j 个评价指标、第 k 个样本, p, n, m 分别为等级总数、评价指标总数和样本总数, $x(k, j)$ 为第 k 个样本第 j 个评价指标的实测值, Y_k 为第 k 个样本的实际等级, y_k 为第 k 个样本的预测等级。

由以上适应度函数的构成可知, 采用反分析方法确定指标权重是以云模型预测结果与样本实际情况的吻合度为优化目标, 这有助于减小云模型构建过程中主观因素的干扰, 并提高云模型的评价效果。

3 岩爆等级预测

3.1 评价指标和分级标准

影响岩爆等级的主要因素有洞室最大切向应力 σ_θ 、岩石抗压强度 σ_c 、岩石抗拉强度 σ_t 、洞室最大切向应力与岩石抗压强度的比值 σ_θ/σ_c 、岩石抗压强度与抗拉强度的比值 σ_c/σ_t 以及弹性能量指数 W_{et} 。文献^[16]的研究表明 $\sigma_\theta, \sigma_c, \sigma_t$ 等指标的权重相对较小。因此本文选用 $\sigma_\theta/\sigma_c, \sigma_c/\sigma_t$ 和 W_{et} 等三个指标作为岩爆等级预测评判的评价指标, 并将岩爆等级分为无岩爆(I)、轻微岩爆(II)、中等岩爆(III)和强烈岩爆(IV)4个类别。岩爆等级分类依据如表 1 所列。

表 1 岩爆等级分类依据^[1]

Table 1 Classification of rock burst intensities^[1]

岩爆等级	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}
I	0.00~0.30	40.00~55.00	0.00~2.00
II	0.30~0.50	40.00~26.70	2.00~3.50
III	0.50~0.70	26.70~14.50	3.50~5.00
IV	0.70~1.00	0.00~14.50	5.00~6.50

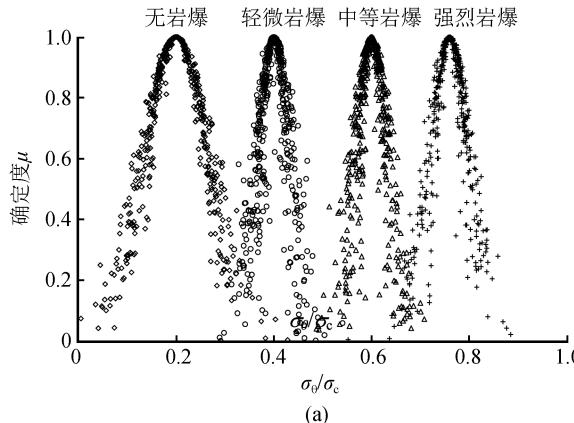
3.2 云模型数字特征

根据云模型原理, 岩爆等级的云数字特征可由式(4)计算得出, 具体结果见表 2 所列。

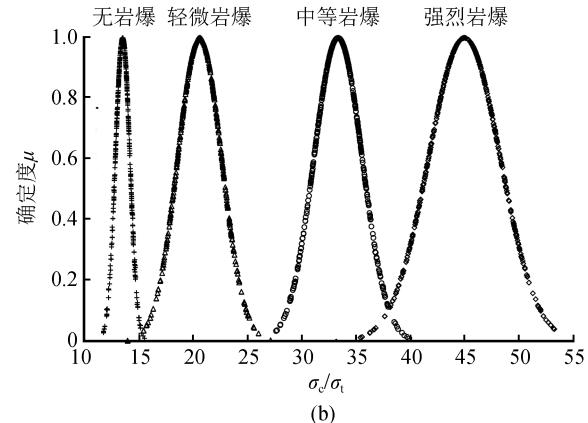
$$\left. \begin{array}{l} E_x = (\alpha_{\min} + \alpha_{\max})/2 \\ E_n = (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})/6 \\ H_e = 0.01 \end{array} \right\} \quad (4)$$

式中: α_{\max} 和 α_{\min} 分别表示评价指标某一岩爆等级对应的上限值和下限值。

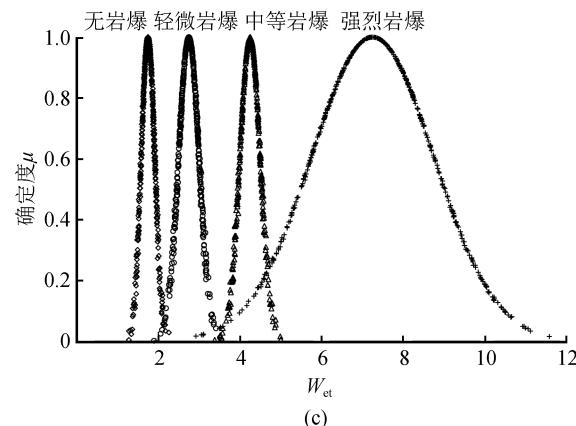
确定云模型数字特征 E_x, E_n, H_e 后, 依据式(1)即可生成 $\sigma_\theta/\sigma_c, \sigma_c/\sigma_t$ 和 W_{et} 等指标相应的岩爆等级云模型, 如图3所示。图中横坐标为评价指标



(a)



(b)



(c)

图 3 各评价指标隶属于各岩爆等级的云模型

Fig.3 Cloud model with different evaluation index corresponding to different rock burst level

取值, 纵坐标为确定度。

3.3 指标权重反分析

获得云模型数字特征后, 依据式3在Matlab中编写的优化适应度函数fitness如下:

%遗传算法适应函数

```
function[sol,z]=rockburstfun(sol,options)
```

%云模型指标权重向量

```
xx=sol(1:3);
```

```
k_sum=xx(1)+xx(2)+xx(3);
```

```
xx(1)=xx(1)/ k_sum;
```

```
xx(2)=xx(2)/ k_sum;
```

```
xx(3)=xx(3)/ k_sum;
```

```
k=[xx(1);xx(2);xx(3)];
```

%由表3所得的学习样本集X

```
X=[0.300 24.000 6.600 3.000;.....;0.774 17.500 5.500  
4.000];
```

%由表2所得的云模型数字特征

```
Ex=[0.150 47.500 1.000;.....;0.850 7.250 5.750];
```

```
En=[0.100 2.500 0.667;.....;0.050 4.833 0.250];
```

```
He=0.01;
```

%确定度

```
u=[0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0];
```

%某个样本的属于第一、二、三、四类型的隶属度 P(I)、P(II)、%P(III)、P(IV), i,j,m 分别表示评价类别序号, 指标序号和

%样本序号。

```

sum=0;
for m=1:18
    for i=1:4
        for j=1:3
            Enn = normrnd(En(i,j),He);
            u(i,j)=exp(-(X(m,j)-Ex(i,j))^2/(2 * Enn-
2));
            sum=sum+k(j)*u(i,j);
        end
        P(m,i)=sum;
        sum=0;
    end
end
%云模型预测结果矩阵 Y,0 表示预测与实际不符,1 表示相符。
Y=[];
for n=1:18
    [C,I]=max(P);
    if I(n)==X(n,4)
        Y(n)=1;
    else Y(n)=0;
    end
end

```

%统计预测正确的总次数 z

```

SUM2=0;
for t=1:18
    SUM2=SUM2+Y(t);
end
z=SUM2;

```

以文献[1]给出的 18 个国内外隧道工程岩爆实例为分析对象(见表 3),利用 Matlab 中的遗传算法工具箱搜索使 fitness 取最大值的权重向量,所得到的各指标权重见表 4 所列。为对比分析,表 4 还列出了主观赋权方法给出的指标权重值。

由表 4 可知,与基于专家经验的主观赋权方法相同,反分析所得的 3 个评价指标的权重有明显差异,且认为指标 W_{et} 相对于另外两个指标而言权重值较小。已有的研究表明,岩爆等级的影响因素主要包括围岩应力、围岩岩性和围岩的冲击倾向等^[1]。 σ_0/σ_c 是表征围岩应力状态的主要指标、 σ_e/σ_t 是表征围岩岩性的主要指标,而弹性能量指数 W_{et} 基于完整岩石试件得出,仅能部分表征包含节理裂隙的岩体的冲击倾向,故其权重值相对较小。

表 4 中还给出了不同赋权方法下岩爆等级预测云模型对文献[1]中的 18 个实例的预测准确率,显然,本文方法建立的云模型显著高于其他赋权方法

下云模型的预测准确率,初步证明本文方法可行且预测效果较好。

表 3 岩爆工程实例^[1]

Table 3 Data of engineering cases with rock burst^[1]

编号	工程名称	$\frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	$\frac{\sigma_e}{\sigma_c}$	W_{et}	岩爆等级
1	天生桥二级水电站	24.0	0.30	6.6	中等
2	二滩水电站	29.7	0.41	7.3	轻微
3	龙羊峡水电站	31.2	0.11	7.4	无
4	鲁布革水电站	27.8	0.23	7.8	无
5	渔子溪水电站	14.8	0.53	9.0	中等
6	太平驿水电站	17.5	0.38	9.0	轻微
7	李家峡水电站	23.0	0.10	5.7	无
8	瀑布沟水电站	24.6	0.36	5.0	轻微
9	锦屏二级水电站	18.5	0.82	3.8	中等
10	拉西瓦水电站	24.1	0.32	9.3	中等
11	Sima 水电站(挪威)	21.7	0.27	5.0	中等
12	Heggura 公路隧道(挪威)	24.1	0.37	5.0	中等
13	Sewage 隧道(挪威)	21.7	0.42	5.0	中等
14	Forsmark 核电站(瑞典)	21.7	0.38	5.0	中等
15	Vistas 水电站(瑞典)	26.7	0.44	5.5	轻微
16	Rasvumchorr 矿(苏联)	21.7	0.32	5.0	中等
17	关越隧道(日本)	22.1	0.38	5.0	中等
18	Raibl 铅硫化锌矿(意大利)	17.5	0.77	5.5	强烈

表 4 基于不同赋权方法的云模型预测效果

Table 4 Prediction effect of cloud model based on different weighting method

赋权方法	权重值			预测准确率 /%
	σ_0/σ_c	σ_e/σ_t	W_{et}	
等值权重	0.333	0.333	0.333	50.0
专家经验 ^[1]	0.400	0.300	0.300	61.1
德尔菲法 ^[2]	0.163	0.674	0.163	66.7
反分析	0.318	0.422	0.260	88.9

4 工程应用

将本文方法应用于反分析样本之外的江边水电站和马路坪矿的岩爆等级预测中,并与等值权重、专家经验赋权和德尔菲法等主观赋权方法的云模型预测结果对比,以进一步检验本文方法可行性与有效性。

实例一:江边水电站

江边水电站是雅砻江支流九龙河上规划的最后一级电站,采用有坝引水方案建设。引水隧洞位于九龙河左岸,全长约 8.5 km,最大埋深 1 690 m,埋深超过 300 m 的洞段占总长度的 53%,隧道围岩主要为黑云母花岗岩,其饱和单轴抗压强度可达 100 MPa 左右,最大地应力约为 40 MPa,依据经验可知该隧洞具备了发生岩爆的基本条件。现场实测获得的岩爆指征数据^[17]见表 5。采用本文方法和主观赋权云模型对该隧洞部分洞段开展了岩爆等级预测,结果见表 5。由表 5 可知,本文方法的预测结果

表 5 江边水电站引水隧洞岩爆等级预测

Table 5 Prediction of rock burst for Jiangbian hydropower station

里程	评价指标实测值			等权重	不同赋权方法下的云模型			实际 ^[17]
	σ_0/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}		德尔菲法	专家经验	反分析	
300	0.47	18.24	2.46	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
400	0.52	17.66	2.86	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
500	0.54	17.23	2.94	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
600	0.58	16.57	3.05	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

与实际相符,而主观赋权云模型的预测结果与实际情况部分不一致。

实例二:马路坪矿

马路坪矿位于贵州省开阳县金中镇,该矿已开采 40 余年,随着开采深度不断增加,地应力也不断增加,并且作业区附近的围岩显示出了较高的脆性

和硬度,故岩爆风险不断增加。通过试验得出的该矿岩爆评判指标实测数据见表 6^[18]。采用本文方法和等权重赋权云模型对现主要开采中段之一的 600 m 中段的岩爆等级进行了预测分析,结果亦列于表 6。由表 6 可知,本文方法所得结果与实际情况完全相符,且预测效果优于主观赋权云模型。

表 6 马路坪矿岩爆等级预测

Table 6 Prediction of rock burst for Maluping mine

岩性	评价指标实测值			等权重	不同赋权方法下的云模型			实际 ^[18]
	σ_0/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}		德尔菲法	专家经验	反分析	
A	0.74	24.44	6.31	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
B	0.23	6.67	1.39	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
C	0.61	24.00	5.10	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
D	1.00	11.24	2.03	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ

注:表中 ABCD 分别代表砂岩、白云岩、矿石和红页岩。

由以上工程实例分析可知,总共 8 组数据中,本文方法的预测准确率为 100%,证明其具有较好的泛化能力。

岩爆成因机制复杂,影响因素众多,对其发生与否和发生烈度等级的预测预报至今仍是本领域研究的重难点。本文尝试采用反分析方法确定云模型的权重,提高了云模型预测效果。然而,本文方法本质上属于基于现有知识库的数据挖掘方法,故样本实例的数量和质量会影响该方法的应用效果。因此,搜集更多的样本实例并采用合理方法优选数据是需要进一步开展的工作。

5 结论

本文提出基于反分析赋权云模型的具体实现方法,并将其并应用于岩爆等级预测中,取得的主要结论如下:

(1) 选用应力系数 σ_0/σ_c 、脆性系数 σ_c/σ_t 、弹性能量指数 W_{et} 作为评判指标,建立了以权重为自变量的优化目标函数,进而利用遗传算法全局寻优得到了各评判指标的客观权重。

(2) 反分析赋权方法所得的各评价指标权重值分别为:应力系数 0.318、脆性系数 0.422、弹性能量指数 0.260。

(3) 样本回代检验与工程实例应用分析表明,与德尔菲法、专家经验法、简单等值权重云模型相比,反分析赋权云模型,不仅能减少主观性因素干扰,而且可以显著提高云模型的预测准确率。

(4) 搜集更多的样本实例并采用合理方法优选数据是需要进一步开展的工作。

参考文献(References)

- [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 Yuanhan, LI Wodong, LI Qiguang, et al. Method of Fuzzy Comprehensive Evaluations for Rockburst Prediction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5):493-501.
- [2] 王迎超,靖洪文,张强等.基于正态云模型的深埋地下工程岩爆烈度分级预测研究[J].岩土力学,2015,36(4):1189-1194.
WANG Yingchao, JING Hongwen, ZHANG Qiang, et al. A Normal Cloud Model-based Study of Grading Prediction of Rockburst Intensity in Deep Underground Engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4):1189-1194.
- [3] 郝杰,侍克斌,王显丽,等.基于模糊 C-均值算法粗糙集理论的云模型在岩爆等级评价中的应用[J].岩土力学,2016,37(3):859-866,874.
HAO Jie, SHI Kebin, WANG Xianli, et al. Application of Cloud Model to Rating of Rockburst Based on Rough Set of FCM Algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3):859-866,874.

- [4] 汤能见.基于熵—云耦合模型的引水隧洞岩爆预测研究[J].水力发电,2015,33(12):116-118.
TANG Nengjian. Rockburst Prediction of Diversion Tunnel Based on Entropy Weight Method and Cloud Model[J]. Water Resources and Power, 2015,33(12):116-118.
- [5] ZHOUK P, LIN Y, DENG H W, et al. Prediction of Rock Burst Classification Using Cloud Model with Entropy Weight [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (7):1995-2002.
- [6] 张保同.基于PPA-正态云的深埋隧洞岩爆分级预测[J].人民黄河,2017,39(9):121-124.
ZHANG Baotong. Rockburst Prediction of Deep Buried Tunnels Based on Projection Pursuit Analysis-Normal Cloud Model [J]. Yellow River, 2017,39(9):121-124.
- [7] 廖建,PPA-NCM模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J].水力发电,2016,42(4):36-40.
LIAO Jian. Application of Projection Pursuit Analysis (PPA)-Normal Cloud Model (NCM) in Rockburst Grade Prediction [J]. Water Power, 2016,42(4):36-40.
- [8] 陈杰,孟锦根.岩爆烈度分级预测的云模型法及其应用[J].人民长江,2016,47(15):82-86.
CHEN Jie, MENG Jinggen. Normal Cloud Model for Rockburst Intensity Forecast and Its Application[J]. Yangtze River, 2016, 47(15):82-86.
- [9] 张彪,戴兴国.基于指标距离与不确定度量的岩爆云模型预测研究[J].岩土力学,2017,38(S2):257-265.
ZHANG Biao, DAI Xingguo. A Cloud Model for Predicting Rockburst Intensity Grade Based on Index Distance and Uncertainty Measure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (S2): 257-265.
- [10] 过江,张为星,赵岩.岩爆预测的多维云模型综合评判方法[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1199-1206.
GUO Jiang, ZHANG Weixing, ZHAO Yan. A Multidimensional Cloud Model for Rockburst Prediction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (5): 1199-1206.
- [11] 董源,裴向军,张引,等.基于组合赋权-云模型理论的岩爆预测研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(z1):409-415.
DONG Yuan, PEI Xiangjun, ZHANG Yin, et al. Prediction of Rock Burst-based on Combination Weighting and Cloud Model Theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(z1):409-415.
- [12] 张继军.基于组合赋权的大型引水隧洞岩爆正态云模型预测[J].水电能源科学,2016,34(3):120-123.
ZHANG Jijun. Normal Cloud Model for Predicting Rock Burst of Large Diversion Tunnel Based on Combination Weight[J]. Water Resources and Power, 2016,34(3):120-123.
- [13] 李绍红,王少阳,朱建东,等.基于权重融合和云模型的岩爆倾向性预测研究[J].岩土工程学报,2018,40(6):1075-1083.
LI Shaohong, WANG Shaoyang, ZHU Jiandong, et al. Prediction of Rock Burst Tendency Based on Weighted Fusion and Improved Cloud Model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(6):1075-1083.
- [14] 汪明武,董昊,叶晖,等.基于联系云-证据理论的岩爆烈度预测模型[J].应用数学和力学,2018,39(9):1021-1029.
WANG Mingwu, DONG Hao, YE Hui, et al. A Connection Cloud-Evidence Theory Coupling Model for Prediction of Rockburst Intensity[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2018,39(9):1021-1029.
- [15] 李德毅,杜鹃.不确定性人工智能[M].北京:国防工业出版社,2005.
LI Deyi, Du Yi. Artificial Intelligence with Uncertainty [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.
- [16] LIU Z B, SHAO J F, XU W Y, et al. Prediction of Rock Burst Classification Using the Technique of Cloud Models with Attribution Weight[J]. Natural Hazards, 2013, 68(2):549-568.
- [17] 邱道宏,张乐文,李术才,等.基于优化理论的权重反分析方法研究[J].岩土工程学报,2010,32(2):259-264.
QIU Daohong, ZHANG Lewen, LI Shucai, et al. Weight back Analysis Method Based on Optimization Theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(2):259-264.
- [18] 杨金林,李夕兵,周子龙,等.基于粗糙集理论的岩爆预测模糊综合评价[J].金属矿山,2010(6):26-29.
YANG Jinlin, LI Xibing, ZHOU Zilong, et al. A Fuzzy Assessment Method of Rock-burst Prediction Based on Rough Set Theory[J]. Metal Mine, 2010(6):26-29.