

## 基于改进层次法与 CRITIC 法的 多维云模型岩爆预测

刘晓悦, 杨伟<sup>†</sup>, 张雪梅

(华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063200)

**摘要:**在 高 地 应 力 区 域, 岩 爆 是 严 重 影 响 地 下 工 程 建 设 的 重 大 地 质 灾 害, 如 何 进 行 有 效 而 准 确 的 岩 爆 预 测 是 有 待 解 决 的 问 题. 综 合 考 虑 指 标 数 据 的 客 观 信 息 和 岩 爆 预 测 中 主 观 评 判、决 策 的 重 要 作 用, 采 用 改 进 层 次 分 析 法 和 基 于 指 标 相 关 性 的 CRITIC 法 分 别 获 得 各 指 标 的 主 观 权 重 和 客 观 权 重, 并 依 据 最 小 鉴 别 信 息 原 理 进 行 融 合, 求 得 综 合 权 重. 对 原 始 云 模 型 和 预 测 指 标 分 类 区 间 进 行 修 正, 弥 补 原 始 云 模 型 对 等 级 区 间 均 值 过 于 敏 感 的 不 足, 并 通 过 云 算 法 生 成 各 指 标 的 等 级 综 合 云 模 型. 最 后, 通 过 岩 爆 实 例 验 证 模 型 的 可 靠 性 和 有 效 性, 并 与 熵 权-云 模 型、CRITIC-云 模 型 和 集 对 分 析-多 维 云 模 型 对 比. 结 果 表 明: 该 模 型 可 以 描 述 区 间 值 指 标 的 各 种 不 确 定 性, 快 速、有 效 地 判 定 岩 爆 烈 度 等 级.

**关键词:**岩爆; 预测; 层次分析法; CRITIC 法; 多维云模型

**中图分类号:** TU45

**文献标志码:** A

## Rockburst Prediction of Multi-dimensional Cloud Model Based on Improved Hierarchical Analytic Method and Critic Method

LIU Xiaoyue, YANG Wei<sup>†</sup>, ZHANG Xuemei

(College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063200, China)

**Abstract:** In high terrestrial stress regions, rockburst is a major geological disaster significantly influencing the underground engineering construction. How to carry out the efficient and accurate rock burst prediction remains to be solved. In order to comprehensively consider the objective information of index data and the important role of subjective judgment and decision-making in rockburst prediction, the improved analytic hierarchy process and the CRITIC method based on index correlation are used to obtain the subjective and objective weights of each index, respectively. Fusion is carried out to obtain the comprehensive weight according to the principle of minimum discriminative information. The original cloud model and the classification interval of the predictive index are revised to make up for the excessive sensitivity of original cloud model to the average of the grade interval. A hierarchical comprehensive cloud model of each index is generated through a cloud algorithm. Finally, the reliability and validity of the model are verified by rockburst examples. The model in this paper is compared with the entropy cloud model, the CRITIC cloud model and the set pair analysis multi-dimensional cloud model. The results show that the model can not only describe

\* 收稿日期:2020-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574102,51474086), National Natural Science Foundation of China(51574102,51474086);河北省自然科学基金资助项目(E2019209492), Natural Science Foundation of Hebei Province(E2019209492)

作者简介:刘晓悦(1965—),女,河北唐山人,华北理工大学教授

<sup>†</sup> 通信联系人, E-mail: 1417705803@qq.com

the various uncertainties of interval value indicators, but also quickly and effectively determine the rockburst strength level.

**Key words:** rock bursts; prediction; analytic hierarchy process; CRITIC method; multidimensional cloud model

随着隧道和地下工程的不断发展,岩爆具有突发性、难控制和破坏性大的特点,严重威胁工作人员的生命安全,耽误工期并造成巨大的经济损失,已经成为国际深部矿业工程、地下空间开发工程中急需解决的重大问题,迫切需要寻找更有效的岩爆预测方法.岩爆预测包括施工前的长期预测和施工过程中的短期预测.短期预测一般利用微震<sup>[1]</sup>、红外辐射<sup>[2]</sup>、声发射<sup>[1-2]</sup>、电磁辐射等方法对岩爆发生的确切位置和时间做出实时预警,其中微震和声发射在工程领域应用最多.施工前对岩爆存在与否和强度等级的宏观预测,对工程可行性研究阶段具有指导意义.长期预测方法主要是理论分析预测,目前常用的处理方法有数学综合处理分析法、模型试验验证法、数值模拟分析验证法等.其中数学综合处理分析法在岩爆预测上均取得了很好的预测效果并成功运用于实际工程,例如模糊数学综合评判法<sup>[3]</sup>、广义人工神经网络<sup>[4]</sup>、粒子群算法<sup>[4]</sup>、概率神经网络<sup>[5]</sup>、支持向量机<sup>[6-7]</sup>、决策树<sup>[7]</sup>、多层感知机(MLP)<sup>[7-8]</sup>、K-近邻(KNN)<sup>[7-8]</sup>、粗糙集理论<sup>[9]</sup>、云模型<sup>[9-12]</sup>等.需要注意的是,不同的判据和理论分析方法有自身的局限,如:人工神经网络收敛速度慢;模糊数学综合评判法不能体现系统的随机性,距离判别法对样本依赖程度高等.在权重赋值方面,基于专家的主观赋权法由于岩爆机制影响因素复杂且尚未形成完善的体制,存在明显缺陷;客观赋权法未考虑到指标间的相关性,忽略了主观决策在实际应用中的作用;层次分析法的主观性太强,且存在不满足判断矩阵的可能,单一权重赋值无法准确衡量各因素的影响,使得预测结果与实际结果有偏差,而组合赋权缺少相应依据等.云模型因具有模糊性和随机性对岩爆预测有一定的优越性,但随着指标增多,一维云模型计算过程复杂,且不能体现多因素之间的相互影响.

本文采用改进层次分析法和基于指标相关性的 CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)法相结合的组合赋权方法,并基于最小鉴别信息原理将主、客观权重相结合得到组合权重,充分利用主观、客观因素,使得赋权更加合理;采用

多维云模型预测岩爆等级,体现各指标的综合影响,简化模型的计算过程,并对原始云模型和预测指标分类区间进行修正,弥补原始云模型对等级区间均值过于敏感的不足.最后,通过岩爆实例数据验证模型的可靠性.

## 1 组合赋权

### 1.1 改进层次分析法

本文采用标度构造法构造判断矩阵,从而改进 AHP 计算主观权重,避免一致性检验.判断矩阵  $R = [r_{ij}]$  满足如下条件:1)  $r_{ij} > 0$ ; 2)  $r_{ii} = 1$ ; 3)  $r_{ji} = 1/r_{ij}$ ; 4)  $r_{ij} = r_{ik}r_{kj}$ . 其中  $r_{ij}$  为第  $i$  个指标相对于第  $j$  个指标的标度值.标度值含义见表 1.

表 1 标度值含义  
Tab.1 Meaning of scale values

标度值	含义	标度值	含义
1.0	同等重要	1.6	明显重要
1.2	稍微重要	1.8	绝对重要
1.4	强烈重要		

设有  $n$  个指标  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 按重要程度不减的原则对指标进行主观排序, 确定标度值并将对应标度记为  $t_i$ . 根据重要程度的传递性得到判断矩阵中的其他元素, 那么最终的判断矩阵  $R$  如式(1)所示.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1 t_2 & \dots & \prod_{i=1}^n t_i \\ 1/t_1 & 1 & t_2 & \dots & \prod_{i=2}^n t_i \\ 1/t_1 t_2 & 1/t_2 & 1 & \dots & \prod_{i=3}^n t_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\prod_{i=1}^n t_i} & \frac{1}{\prod_{i=2}^n t_i} & \frac{1}{\prod_{i=3}^n t_i} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\prod_{i=1}^n t_i$  表示矩阵  $R$  中第  $i$  行所有元素的乘积.由

此可定量确定岩爆预测中各指标的主观权重为:

$$\alpha_i = \left( \prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} \quad (2)$$

1.2 CRITIC 法

CRITIC 法是一种基于评价指标的客观赋权法,考虑了样本的对比强度和各指标间的冲突性,计算结果更加客观合理.假设共有  $m$  个样本,  $n$  个指标,  $x_{ij}$  表示第  $i$  个样本的第  $j$  个评价指标的取值,评价矩阵可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

客观权重的计算步骤如下:

1) 指标归一化处理

对越大越优的指标有:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (3)$$

对越小越优的指标有:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (4)$$

计算得到标准化矩阵  $Y$ .

2) 计算均值  $\bar{x}_j$  和标准差  $s_j$ :

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (5)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (6)$$

3) 计算变异系数:

$$v_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j} \quad (7)$$

4) 计算相关系数矩阵:

$$\rho_{ij} = \text{cov}(y_k, y_l) / (s_k s_j), k=1, 2, \dots, n; l=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中:  $\rho_{ij}$  为第  $i$  个指标和第  $j$  个指标之间的相关系数,  $\text{cov}(y_k, y_l)$  表示第  $k$  个指标和第  $l$  个指标之间的协方差.

5) 计算指标所含信息量:

$$\eta_j = v_j \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{kj}), j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

6) 确定客观权重为:

$$\beta_j = \frac{\eta_j}{\sum_{i=1}^n \eta_i}, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

1.3 综合权重

为了使综合权重  $\omega_i$  尽可能地接近  $\alpha_i$  和  $\beta_i$ , 而不偏重其中任意 1 项, 依据最小鉴别信息原理求取综合权重  $\omega_i$ , 目标函数为<sup>[13]</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min J(\omega) = \sum_{i=1}^n (\omega_i \ln \frac{\omega_i}{\alpha_i} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\beta_i}) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (11)$$

求解此优化模型, 得到综合权重为:

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\alpha_i \beta_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j}} \quad (12)$$

2 多维云模型

2.1 多维云模型定义及数字特征

在一维云模型定义上推出多维云模型定义如下<sup>[11]</sup>: 设  $C$  是定量论域  $U\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  上的定性概念, 若  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$  是概念的一次随机实现,  $x$  对  $U$  的确定度  $\mu(x(x_1, x_2, \dots, x_n)) \in [0, 1]$ , 且服从正态分布  $x(x_1, x_2, \dots, x_n) = N(E_x(E_{x1}, E_{x2}, \dots, E_{xn}))$ , 则满足正态分布:

$$E_{x_j} = \frac{C_{\min j}^i + C_{\max j}^i}{2} \quad (13)$$

$$E_n = \frac{a_{ij}}{3} \quad (14)$$

$$H_c = \beta \quad (15)$$

式中:  $C_{\max j}^i$  和  $C_{\min j}^i$  表示第  $j$  个指标第  $i$  等级区间的最大值和最小值;  $a_{ij}$  为连接云的左右半分支的宽度;  $E_x$  代表定性概念的基本确定性, 是云滴在论域空间分布中的数学期望; 熵  $E_n$  代表定性概念的不确定性度量; 超熵  $H_c$  代表熵的不确定性, 反映定性概念所对应的随机变量偏离正态分布的程度.

2.2 预测指标及分类

岩爆发生机制复杂, 影响因素众多, 指标的选取对预测结果的准确性至关重要. 本文根据岩爆方面已有的研究成果<sup>[4, 7, 8, 10-12, 14]</sup>, 结合岩爆的形成原因、影响因素, 选取岩石抗压强度与抗拉强度之比  $\sigma_c/\sigma_t$  表示岩性. 在高应力区, 硬岩的弹性应变能高于软岩, 因此岩洞的最大切向应力  $\sigma_\theta$  与单轴抗压强度  $\sigma_c$  之比  $(\sigma_\theta/\sigma_c)$  表示压力特性. 先前的研究还表明, 岩体中存储的弹性能越大, 发生岩爆的可能性就越大, 弹性能指数  $w_{el}$  是到达峰值强度之前累计的弹性应变能与卸载后的损耗应变能的比值, 用来表示岩体储存

弹性势能的能力. 另外, 选用岩体的完整性  $k_s$  描述裂缝和节理的发展程度.

一维云模型要求指标在无限间隔内服从正态分布, 实际上, 指标的测量值通常是模糊的, 并且在有限间隔内随机分布, 这可能与指标的实际分布不符, 导致预测结果偏离实际情况. 根据王元汉<sup>[3]</sup>和周科平<sup>[11]</sup>等人的研究工作, 公式(16)修订岩爆倾向性指标预测标准区间, 如表 2 所示.

$$\begin{aligned} C_{\max}^n &= E_{x^{n-1}} + (E_{x^{n-1}} - C_{\min}^{n-2}) \\ C_{\max}^1 &= E_{x^2} + (E_{x^2} - C_{\min}^3) \end{aligned} \quad (16)$$

表 2 修改后岩爆倾向性预测指标

岩爆等级	I 无岩爆	II 弱岩爆	III 中岩爆	IV 强岩爆
$\sigma_c/\sigma_t$	40.00~52.2	26.7~40.00	14.5~26.7	0~14.5
$\sigma_\theta/\sigma_c$	0~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9
$w_{et}$	0~2.00	2.00~4.00	4.00~6.00	6.00~8.00
$k_s$	0~0.555	0.55~0.65	0.65~0.75	0.75~0.85

### 2.3 确定岩爆等级

确定岩爆等级的步骤如下:

1) 根据修改后的岩爆倾向性预测指标(表 2), 代入公式(13)求得多维云模型的数字特征  $E_x$ ;

2) 根据公式(17)~(18)求得  $a_j^i$ , 代入公式(14), 求得数字特征  $E_n$ ;  $H_c$  取固定值 0.01.

增长型指标<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} a_{j\text{left}}^i &= E_{x_j^i} - C_{\min y}^{i-1} \\ a_{j\text{right}}^i &= C_{\max j}^{i+1} - E_{x_j^i} \end{aligned} \quad (17)$$

消耗型指标<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} a_{j\text{left}}^i &= E_{x_j^i} - C_{\min y}^{i+1} \\ a_{j\text{right}}^i &= C_{\max j}^{i-1} - E_{x_j^i} \end{aligned} \quad (18)$$

3) 求得的  $E_n$  代入公式(19)生成服从正态分布的随机数  $E_n^i$ ;

$$E_n^i(E_{n1}^i, E_{n2}^i, \dots, E_{nm}^i) = N(E_n(E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{nm})) \quad (19)$$

4) 根据公式(20)求得  $k_j^i$ , 并将岩爆样本数据代入公式(21)可得该样本某一等级的隶属度.

$$k_j^i = \frac{\ln\left(\frac{\ln 4}{9}\right)}{\ln\left|\frac{C_j^i - E_{x_j^i}}{3E_{n_j^i}}\right|} \quad (20)$$

式中:  $C_j^i$  表示  $C_{\max j}^i$  或  $C_{\min j}^i$ .

$$\mu^i[x^i(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)] = \exp\left(-\frac{9}{2} \sum_{j=1}^m \left|\frac{x_j^i - E_{x_j^i}}{3E_{n_j^i}}\right|^{k_j^i}\right) \quad (21)$$

5) 重复以上步骤可得样本各个等级的隶属度, 根据最大隶属度原则确定岩爆等级.

## 3 实例分析

### 3.1 岩爆案例

本文 31 组岩爆实际案例均源于已发表的文章, 1~12 组数据来自文献 [11], 13~31 组数据来自文献[10].

表 3 工程实例数据<sup>[10-11]</sup>

样本	$\sigma_c/\sigma_t$	$\sigma_\theta/\sigma_c$	$w_{et}$	$k_s$
1	13.20	0.58	6.3	0.79
2	17.50	0.45	5.1	0.68
3	20.90	0.39	4.6	0.65
4	41.00	0.20	1.7	0.50
5	13.20	0.66	6.8	0.82
6	15.00	0.53	6.5	0.70
7	21.70	0.42	4.5	0.67
8	21.70	0.39	5.0	0.73
9	26.90	0.44	5.5	0.78
10	18.50	0.81	3.8	0.68
11	29.40	0.41	7.3	0.64
12	19.70	0.38	5.0	0.69
13	28.40	0.38	5.3	0.58
14	22.30	0.66	3.2	0.88
15	29.73	0.37	3.5	0.68
16	32.77	0.42	3.0	0.71
17	42.73	0.28	2.2	0.49
18	20.13	0.49	3.8	0.91
19	28.77	0.38	3.0	0.70
20	27.52	0.72	4.3	0.73
21	16.55	0.69	5.7	0.90
22	15.50	0.42	3.2	0.62
23	30.12	0.58	4.5	0.64
24	36.42	0.22	1.8	0.46
25	19.35	0.62	4.50	0.88
26	31.20	0.57	3.15	0.58
27	12.36	0.65	5.41	0.91
28	18.75	0.59	4.20	0.84
29	29.70	0.73	3.82	0.70
30	42.30	0.37	2.75	0.36
31	37.35	0.37	3.08	0.66

### 3.2 确定权重

#### 3.2.1 计算主观权重

根据 2.1 节改进层次分析法 (AHP), 结合文献 [14], 表 3 所示指标的评价矩阵(按照  $\sigma_\theta/\sigma_c$ 、 $w_{et}$ 、 $k_s$ 、 $\sigma_c/\sigma_t$  的顺序)为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1.8 & 1.7 & 1.6 \\ \frac{1}{1.8} & 1 & \frac{1}{1.3} & \frac{1}{1.4} \\ \frac{1}{1.7} & 1.3 & 1 & \frac{1}{1.2} \\ \frac{1}{1.6} & 1.4 & 1.2 & 1 \end{bmatrix}$$

根据公式(1)可得最终的判断矩阵  $R$  为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1.8 & 1.7 \times 1.8 & 1.6 \times 1.7 \times 1.8 \\ \frac{1}{1.8} & 1 & \frac{1}{1.3} & \frac{1}{1.4} \times \frac{1}{1.3} \\ \frac{1}{1.7 \times 1.8} & 1.3 & 1 & \frac{1}{1.2} \\ \frac{1}{1.6 \times 1.7 \times 1.8} & 1.4 \times 1.3 & 1.2 & 1 \end{bmatrix}$$

根据公式(2)求得主观权重(按照  $\sigma_\theta/\sigma_c, w_{et}, k_s, \sigma_c/\sigma_t$  的顺序)为:

$$\alpha = [0.4994 \quad 0.1791 \quad 0.1525 \quad 0.1690]$$

### 3.2.2 计算客观权重

根据 1.2 节 CRITIC 法,将样本数据(表 3)进行归一化处理(其中仅  $\sigma_c/\sigma_t$  为越大越优型),并将样本数据代入公式(5)~(7)求得平均数、方差和变异系数为:

$$\bar{x} = [24.1388 \quad 0.4506 \quad 4.4531 \quad 0.6750]$$

$$s = [7.7175 \quad 0.1755 \quad 1.3942 \quad 0.1093]$$

$$v = [0.3197 \quad 0.3895 \quad 0.3131 \quad 0.1619]$$

相关系数矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -0.5606 & -0.6533 & -0.5166 \\ -0.5606 & 1 & 0.4034 & 0.5850 \\ -0.6533 & 0.4034 & 1 & 0.3603 \\ -0.5166 & 0.5850 & 0.3603 & 1 \end{bmatrix}$$

根据公式(9)和(10)求得客观权重(按照  $\sigma_\theta/\sigma_c, w_{et}, k_s, \sigma_c/\sigma_t$  的顺序)为:

$$\beta = [0.3943 \quad 0.2612 \quad 0.2359 \quad 0.1985]$$

### 3.2.3 计算综合权重

根据最小信息鉴别原理,将  $\alpha$  和  $\beta$  代入公式(12)得到综合权重(按照  $\sigma_\theta/\sigma_c, w_{et}, k_s, \sigma_c/\sigma_t$  的顺序)为:

$$\omega = [0.4517 \quad 0.2032 \quad 0.2032 \quad 0.1419]$$

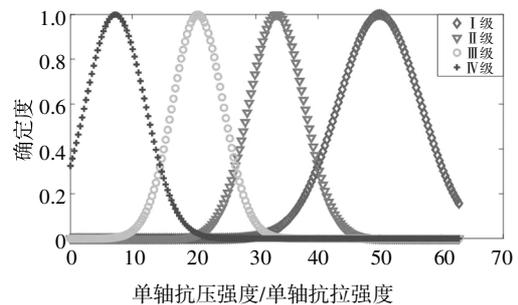
### 3.3 预测模型及结果

根据 2.3 节岩爆等级的确定步骤,将表 2 岩爆预测指标及等级区间代入,可得数字特征  $E_x, E_n, k_j$  的取值见表 4,并代入公式(21)生成各指标云模型见图 1. 根据上述结果,将岩爆实例实测值代入构建的模型进行预测,并与实际岩爆等级、熵权-云模型、Crit-ic-多维云模型和分析-多维云模型对比. 具体结果见表 5.

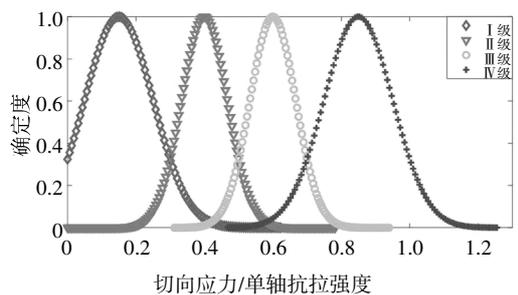
表 4 各级岩爆指标多维云模型数字特征<sup>[10]</sup>

Tab.4 Digital characteristics of multidimensional cloud model for rock burst indicators at all levels

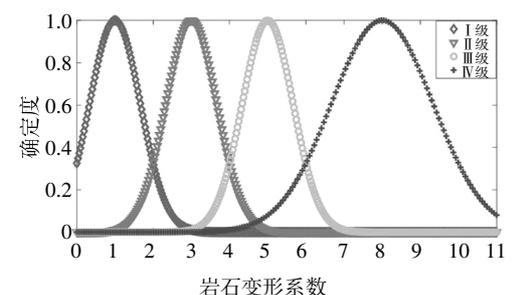
等级	指标	$E_x$	$E_{nleft}$	$E_{nright}$	$H_c$	$k_{jleft}^i$	$k_{jright}^i$
I	$\sigma_\theta/\sigma_c$	0.15	0.00	0.117	0.01	0.00	2.208
	$\sigma_c/\sigma_t$	46.10	6.467	0.00	0.01	1.617	0.00
	$w_{et}$	1.00	0.00	1.00	0.01	0.00	1.703
	$k_s$	0.275	0.00	0.125	0.01	0.00	6.031
II	$\sigma_\theta/\sigma_c$	0.40	0.133	0.100	0.01	1.349	1.703
	$\sigma_c/\sigma_t$	33.35	6.283	6.283	0.01	1.795	1.795
	$w_{et}$	3.00	1.00	1.00	0.01	1.703	1.703
	$k_s$	0.60	0.20	0.05	0.01	0.753	1.703
III	$\sigma_\theta/\sigma_c$	0.60	0.10	0.10	0.01	1.703	1.703
	$\sigma_c/\sigma_t$	20.60	6.867	6.467	0.01	1.537	1.617
	$w_{et}$	5.00	1.00	1.00	0.01	1.703	1.703
	$k_s$	0.70	0.05	0.05	0.01	1.703	1.703
IV	$\sigma_\theta/\sigma_c$	0.80	0.10	0.00	0.01	1.703	0.00
	$\sigma_c/\sigma_t$	7.25	0.00	6.483	0.01	0.00	1.896
	$w_{et}$	7.00	1.00	0.00	0.01	1.703	0.00
	$k_s$	0.80	0.05	0.00	0.01	1.703	0.00



(a)



(b)



(c)

表 5 岩爆等级的预测结果及对比

Tab.5 Prediction results and comparison of rock burst grade

样本	各等级预测值				实际等级	本文预测等级	熵权-云模型 <sup>[1]</sup>	CRITIC-多维云模型 <sup>[12]</sup>	集对分析-多维云模型 <sup>[10]</sup>
	I	II	III	IV					
1	0	0.013 2	0.365 8	0.432 6	IV	IV	IV	IV	IV
2	0.002 2	0.109 0	0.623 8	0.070 4	III	III	III	III	III
3	0.010 7	0.251 2	0.487 2	0.021 0	III	III	III	III	III
4	0.881 9	0.279 6	0.003 7	0	I	I	I	I	I
5	0	0.006 5	0.258 1	0.610 2	IV	IV	III-IV*	IV	IV
6	0	0.027 9	0.532 0	0.227 3	III	III	III	III	III
7	0.009 1	0.272 3	0.569 3	0.024 9	III	III	III	III	III
8	0.002 4	0.188 1	0.530 0	0.035 1	III	III	III	III	III
9	0	0.208 7	0.370 2	0.026 8	III	III	III	III	III
10	0	0.057 7	0.436 5	0.112 9	III	III	III	III	III
11	0.005 4	0.150 9	0.167 6	0.008 6	II	II-III*	II	II	II
12	0.004 1	0.162 0	0.548 9	0.035 8	III	III	III	III	III
13	0.036 0	0.443 3	0.221 3	0.003 8	II	II	II	II	II
14	0	0.081 5	0.276 8	0.045 6	III	III	III	III	III
15	0.054 1	0.704 2	0.215 6	0.002 5	II	II	II	II	II
16	0.044 9	0.745 3	0.162 6	0.001 5	II	II	II	II	II
17	0.714 1	0.319 8	0.005 5	0	I	I	I	I	I
18	0	0.075 4	0.262 0	0.037 2	III	III	III	III	III
19	0.040 0	0.659 9	0.224 5	0.002 8	II	II	II	II	II
20	0	0.188 2	0.464 6	0.039 4	III	III	III	III	III
21	0	0.012 5	0.278 6	0.298 8	IV	IV	IV	IV	IV
22	0.008 9	0.149 6	0.269 7	0.018 1	II	III*	III*	III*	III*
23	0.017 7	0.454 1	0.402 1	0.009 2	II	II	II	II	II
24	0.689 6	0.364 4	0.007 0	0	I	I	I	I	I
25	0	0.047 2	0.415 0	0.122 7	III	III	III	III	III
26	0.060 5	0.670 3	0.191 0	0.002 0	II	II	II	II	II
27	0	0.006 9	0.211 0	0.322 8	IV	IV	IV	IV	IV
28	0	0.065 5	0.480 3	0.118 8	III	III	III	III	III
29	0.002 8	0.261 6	0.369 7	0.017 0	III	III	III	III	III
30	0.496 3	0.237 1	0.004 8	0	I	I	I	I	I
31	0.178 2	0.751 5	0.065 1	0	II	II	II	II	II

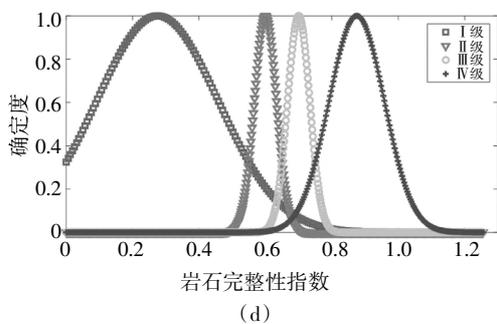


图 1 评价指标岩爆倾向云模型

Fig.1 Rockburst tendency cloud model for evaluation index

结果显示, 本文预测结果与实际岩爆等级基本

吻合, 与其他模型的预测结果相符, 表明本文提出的基于改进层次法与 CRITIC 法的多维云模型岩爆预测是合理且有效的. 改进层次分析法给出了基于决策主观性的权重, CRITIC 法给出了基于岩爆实例数据的权重值, 基于最小信息鉴别原理融合得到的综合权重更为合理, 提高了预测的可靠性. 多维云模型以模糊性和随机性反映了岩爆等级预测的不确定性, 并且比一维云模型计算过程更为简单; 分别给出多维云左右两部分的特征值, 优化多维云模型的特征区间, 提高了云模型的预测精度, 尤其是一级和二级岩爆的预测精度有明显提高.

## 4 结论

1)选取最大主应力与岩石单轴抗拉强度之比、最大切向应力与最大主应力之比、岩石弹性指数和岩体完整性指数四个指标,修订指标的无穷区间上限值,建立倾向性多指标预测标准.采用改进层次法(AHP)与CRITIC法分别获得主观权重和客观权重,并依据最小鉴别信息原理求得综合权重.

2)采用的多维云模型建立岩爆倾向性预测的等级综合云,其中对典型多维云模型中非对称区间分左右两个部分进行预测,通过31组岩爆工程实例的数据检验该模型用于岩爆倾向性预测的合理性和有效性,与其他预测方法相比显示了本文模型的适用性.

3)云模型与其他方法相比较,能够反映多指标预测的不确定性,直观显示预测过程.一维云模型建立过程复杂、计算时间长,而多维云模型建立过程简洁,计算时间短,预测结果更为准确;研究多维云模型数字特征的选取有利于提高岩爆预测的准确性,研究影响岩爆分级的指标划分可以进一步完善岩爆预测云模型,预测结果会更符合实际.

## 参考文献

- [1] HE S Q, SONG D Z, LI Z L, *et al.* Precursor of spatio-temporal evolution law of MS and AE activities for rock burst warning in steeply inclined and extremely thick coal seams under caving mining conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(7): 2415—2435.
- [2] XIAO F K, HE J, LIU Z J, *et al.* Analysis on warning signs of damage of coal samples with different water contents and relevant damage evolution based on acoustic emission and infrared characterization [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 287—299.
- [3] 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): 3—5.  
WANG Y H, LI W D, LI Q G, *et al.* Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(5): 3—5. (In Chinese)
- [4] 贾义鹏, 吕庆, 尚岳全. 基于粒子群算法和广义回归神经网络的岩爆预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(2): 343—348.  
JIA Y P, LÜ Q, SHANG Y Q. Rockburst prediction using particle swarm optimization algorithm and general regression neural network [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 343—348. (In Chinese)
- [5] 吴顺川, 张晨曦, 成子桥. 基于PCA-PNN原理的岩爆烈度分级预测方法[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2767—2776.  
WU S C, ZHANG C X, CHENG Z Q. Prediction of intensity classification of rockburst based on PCA-PNN principle [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2767—2776. (In Chinese)
- [6] PU Y Y, APEL D B, WEI C. Applying machine learning approaches to evaluating rockburst liability: a comparison of generative and discriminative models [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, 176(10): 4503—4517.
- [7] AFRAEI S, SHAHRIAR K, MADANI S H. Developing intelligent classification models for rock burst prediction after recognizing significant predictor variables, Section 1: Literature review and data preprocessing procedure [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83: 324—353.
- [8] 汤志立, 徐千军. 基于9种机器学习算法的岩爆预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 773—781.  
TANG Z L, XU Q J. Rockburst prediction based on nine machine learning algorithms [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 773—781. (In Chinese)
- [9] LIU R, YE Y C, HU N Y, *et al.* Classified prediction model of rockburst using rough sets-normal cloud [J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(12): 8185—8193.
- [10] WANG M W, LIU Q Y, WANG X, *et al.* Prediction of rockburst based on multidimensional connection cloud model and set pair analysis [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(1): 04019147.
- [11] 周科平, 林允, 胡建华, 等. 基于熵权-正态云模型的岩爆烈度分级预测研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 596—602.  
ZHOU K P, LIN Y, HU J H, *et al.* Grading prediction of rockburst intensity based on entropy and normal cloud model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 596—602. (In Chinese)
- [12] 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 J, ZHANG W X, ZHAO Y. A multidimensional cloud model for rockburst prediction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1199—1206. (In Chinese)
- [13] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价 [J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3): 143—148.  
ZHAO S Q, TANG S F. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3): 143—148. (In Chinese)
- [14] 殷欣, 刘泉声, 王心语, 等. 基于组合赋权和属性区间识别理论的岩爆烈度分级预测模型 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11): 3772—3780.  
YIN X, LIU Q S, WANG X Y, *et al.* Rockburst intensity classification prediction model based on combination weighting and attribute interval recognition theory [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3772—3780. (In Chinese)