

岩爆预测的多维云模型综合评判方法

过江, 张为星, 赵岩

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 岩爆是地下空间开发和矿业工程中遭遇的重大挑战, 其倾向性预测是一个迫切需要解决的难题。针对其预测过程中的不确定性, 在一维云模型理论的基础上提出了基于多维云模型的岩爆倾向性预测方法。将各个预测指标分别作为多维云模型的一维变量, 根据云理论和岩爆预测标准, 选取合适的云模型数字特征, 考虑指标的信息量和相关性, 改进 CRITIC 法确定预测指标权重, 生成综合所有预测指标的对应于各个岩爆等级的多维云模型, 输入指标实测值得到岩体隶属于各个岩爆等级的综合确定度, 依据最大确定度原则判定岩体岩爆等级。以国内外 20 组典型岩爆实例数据验证本文模型的合理性和有效性, 并与一维云模型、RS-TOPSIS 方法的预测结果进行对比。结果表明, 多维云模型应用于岩爆倾向性预测是有效的, 其可以直观、快速判定岩体的岩爆等级, 为岩爆倾向性预测提供了一种新方法。

关键词: 岩石力学; 岩爆; 岩爆倾向性; CRITIC 法; 多维云模型; 预测

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)05 - 1199 - 08

A multidimensional cloud model for rockburst prediction

GUO Jiang, ZHANG Weixing, ZHAO Yan

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Rockburst is a significant challenge to the development of underground space and mining engineering. The prediction of rockburst is an urgent issue need be solved. Based on the one-dimensional cloud theory, a multidimensional cloud model for prediction of rockburst is proposed to deal with the uncertainty in the forecasting process. It regards each prediction index as a one-dimensional variable in a multidimensional cloud model, chooses the reasonable numerical characteristics of each cloud model according to the cloud theory and the classification standard for prediction of rockburst, and determines the weighting coefficient for each prediction index with the improved CRITIC method in view of the information and correlation of the indexes. Thus, the multidimensional cloud models belonging to each rockburst level that synthesizes all prediction indexes are generated and the final rockburst level of rock mass is determined according to the comprehensive certainty with the values of each index input into the models. Then the model proposed in the present paper is validated with the data of 20 groups of typical rock engineering at home and abroad. The predicted results of the proposed model are found to be consistent with the actual rock status and are compared with those from the related method, one-dimensional cloud model and the technique for order preference by similarity to ideal solution combined with rough set (RS-TOPSIS). The results show that the multidimensional cloud model is effective and determines the rockburst level quickly.

收稿日期: 2017 - 11 - 27; **修回日期:** 2018 - 01 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774321)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51774321)

作者简介: 过江(1973 -), 男, 1994年毕业于中南工业大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事采矿与充填技术方面的教学与研究工作。E-mail: guojiang@csu.edu.cn。通讯作者: 张为星(1993 -), 男, 现为硕士研究生。E-mail: zhangwx@csu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1522

Key words: rock mechanics; rockburst; rockburst proneness; CRITIC method; multidimensional cloud model; prediction

1 引言

岩爆是深部高应力岩体开挖过程中发生的动力破坏现象,具有突发、难控制和破坏范围大等特征,在深部隧道和采矿工程中的危害极大,目前已成为国际深部矿业工程、地下空间开发工程中迫切需要解决的一个重大难题^[1]。由于岩爆影响因素众多,成因机制复杂,岩爆的分析多基于假设和经验的结果,目前还缺乏完善的理论。

鉴于岩爆问题的严重性和急迫性,众多研究者利用应力分级、原位测试技术、定性研究等方法预测岩爆^[2-5]。通常,岩爆预测可分为短期预测和长期预测,短期预测中一般利用原位测试技术,如利用微震监测^[6]、地质雷达^[7]、声发射^[8]、断层扫描^[9]等方法确定岩爆发生的确切位置和具体时间;岩爆的长期预测一般是在地下工程的初期阶段初步预测或定性判断岩爆的趋势,基本预测方法包括突变理论、分岔理论、刚度理论、能量理论、分形和混沌理论,也包括一些常用的方法如机器学习、专家系统^[2, 10]。

由于岩爆预测过程充满不确定性,越来越多的研究中考虑了岩爆影响因素的模糊性和随机性,将一些新的数学方法引入到岩爆预测中,例如模糊综合评判法^[11]、神经网络^[12]、距离判别法^[13]、粒子群算法^[14]、灰评估模型^[15]、逼近理想解排序法(TOPSIS)^[16]、支持向量机^[17]、云模型^[18-19]、自适应神经模糊推理系统(ANFIS)^[2]等,并取得了一定成果。但是由于岩爆的复杂性,以上方法也存在一些局限,这主要体现在2个方面:(1)理论自身存在缺陷,不能准确反映岩爆预测过程中不确定性这个最大特点,如模糊综合评判法忽略了系统的随机性,神经网络收敛速度慢,距离判别法严重依赖样本数据。云模型为描述不确定性现象而提出,其用于岩爆预测有着一定的优越性,但是目前用于评价的一维云模型不能反映岩爆受多个因素共同作用的特点,没有反映作用过程中因素的相关性。(2)目前很多预测方法都是基于多因素综合评判的角度对岩爆倾向性进行预测,这就必然涉及到因素权重分配问题,权重分配的合理性是岩爆预测结果具备可信度的关键。赋权法主要分为主观赋权法和客观赋权法,由于岩爆机制还缺乏完善的理论,基于专家观点的主观赋权法有着明显的缺陷;从现有岩爆预

测研究成果来看,客观赋权法中应用比较多的是熵权法,熵权法是一种基于样本数据确定评价指标的变异性以计算指标所包含的信息量,从而根据指标的信息量的大小赋予对应大小的权重,但是没有考虑指标间的相关性。因此有必要引入相对更完善的岩爆预测模型。

本文针对岩爆预测的不确定性、多因素共同作用下的复杂性、因素之间的相关性,基于不确定性人工智能^[20]理论,利用多维云模型解决岩爆倾向性预测问题,采用改进的CRITIC法确定指标权重,建立岩爆倾向性预测的改进的CRITIC法-多维云模型,将该模型用于国内外地下工程岩爆实例中,检验了本文模型的有效性。

2 云模型理论

2.1 云和云滴

云是用语言值表示的某个定性概念与其定量表示之间的双向认知模型,以反映自然语言中概念的不确定性,即随机性和模糊性,其相关定义如下^[20]:

设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的一个定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数:

$$\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x) \quad (1)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云,每一个 x 称为一个云滴。

2.2 正向正态云

正向正态云是一种基于正态分布但不同于正态分布的最常用的云模型,能够实现从用数字特征表示的定性概念到定量数据集合的转换,其相关定义如下^[20]:

设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, $C(Ex, En, He)$ 是 U 上的定性概念,其中, Ex, En, He 是用来表征定性概念的3个数字特征,若定量值 $x (x \in U)$ 是定性概念 C 的一次随机实现,服从以 Ex 为期望、 En'^2 为方差的正态分布 $x \sim N(Ex, En'^2)$;其中, En' 又是服从以 En 为期望、 He^2 为方差的正态分布 $En' \sim N(En, He^2)$;进而, x 对 C 的确定度满足:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x - Ex)^2}{2(En')^2}\right) \quad (2)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为正态云。

2.3 多维正向正态云

多维正向正态云由一维正向正态云推广而来，能够反映多维定性概念，其相关定义如下^[20-21]：

设 $U\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 是一个用精确数值表示的 n 维定量论域， C 是 $U\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 上的定性概念，若定量值 $x(x_1, x_2, \dots, x_n) (x \in U)$ 是定性概念 C 的一次随机实现，服从正态分布 $x(x_1, x_2, \dots, x_n) \sim N(Ex(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n), En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n)^2)$ ；其中， En' 又是服从正态分布 $En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n) \sim N(En(En_1, En_2, \dots, En_n), He(He_1, He_2, \dots, He_n)^2)$ ；进而， $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 对 C 的确定度满足：

$$\mu(x(x_1, x_2, \dots, x_n)) = \exp\left(-\sum_{j=1}^n \frac{(x_j - Ex_j)^2}{2(En'_j)^2}\right) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

则 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 在论域 U 上的分布称为 n 维正态云。

多维正向正态云发生器算法如下^[20-21]：

输入：多维云模型数字特征 $(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n, En_1, En_2, \dots, En_n, He_1, He_2, \dots, He_n)$ ，生成云滴的个数 N 。

输出：drop $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}, \mu_i) (i=1, 2, \dots, N)$ 。

算法步骤如下：

(1) 产生一个期望值为 $En(En_1, En_2, \dots, En_n)$ ，方差为 $He(He_1, He_2, \dots, He_n)^2$ 的 n 维正态随机数 $En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n)$ ；

(2) 产生一个期望值为 $Ex(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n)$ ，方差为 $En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n)^2$ 的 n 维正态随机数 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ；

(3) 计算 $\mu_i[x(x_1, x_2, \dots, x_n)] = \exp\left\{-\sum_{j=1}^n \frac{(x_{ji} - Ex_j)^2}{2(En'_j)^2}\right\} (j=1, 2, \dots, n)$ ；

(4) 令 drop $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}, \mu_i)$ 为一个云滴，它是该云表示的语言值在数量上的一次具体实现，其中， $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$ 为定性概念在论域中这一次对应的数值， μ_i 为 $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$ 属于这个语言值的程度的度量；

(5) 重复步骤(1)~(4)，直到产生 N 个云滴为止。

由上述算法生成的二维云模型如图 1 所示，该云模型的数字特征期望 Ex 都为 10，熵 En 都为 10/3，超熵 He 都取为 0.1，云滴个数 N 取 15 000。

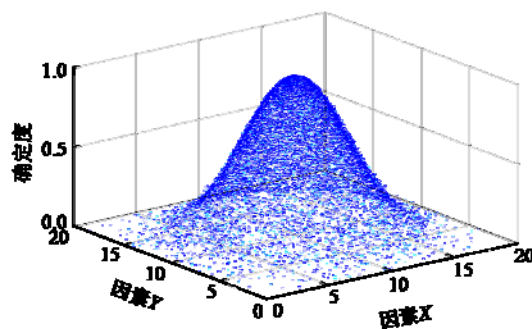


图 1 用因素 X, Y 表示某定性概念的二维云模型
Fig.1 A two-dimensional cloud model of a qualitative concept affected by the factors X and Y

2.4 多维云模型的数字特征

云模型用期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 三个数字特征来整体表征定性概念，期望 Ex 是云滴在论域空间分布中的数学期望；熵 En 是定性概念的不确定性度量，一方面反映云滴的离散程度，另一方面决定论域空间中可被概念接受的云滴的确定度；超熵 He 是熵的不确定度量^[20]。一维云模型三个数字特征的确定已有相应的公式，多维云模型数字特征的确定尚无定论，参考郭戎潇等^[21-23]，本文按下述方法确定岩爆预测指标对某一等级标准的云数字特征：

$$Ex = (C_{\min} + C_{\max}) / 2 \quad (4)$$

式中： C_{\min} ， C_{\max} 分别为对应等级标准的上、下边界值。对于单边界限的情况，如 $(-\infty, C_{\max}]$ 或 $[C_{\min}, +\infty)$ ，依据指标实测值的上、下限确定缺省边界。

由于多维云模型综合考虑各个预测指标的各等级标准，所以要依据各个预测指标取值的最大范围确定数字特征 En ，并且各个指标的各个等级标准的熵不变，根据正态云的“ $3En$ 规则”^[20]有

$$En = Ex_{\max} / 3 \quad (5)$$

式中： Ex_{\max} 为某指标对应各个等级标准期望中的最大值。

超熵 He 可以将指标值 x 的随机性约束弱化为某种“泛正态分布”，是熵 En 的不确定性度量，所以可以根据 En 的大小给 He 取一个合适的常数， En 值大者对应较大的 He 值，一般 $0.01 \leq He \leq 0.1$ ^[20]。

将多维正向正态云模型应用到岩爆预测中，主要基于以下 4 个原因：

(1) 岩爆预测过程充满着不确定性，云模型正是

研究通过期望、熵和超熵这 3 个数字特征反映人类认知过程中概念的不确定性;

(2) 正态云模型基于正态分布,是最常用的云模型,具有普适性,自然科学中大量定性概念的云模型的期望曲线都近似服从正态或泛正态分布;

(3) 云模型是一个定性、定量转换的双向认知模型,分为正向云和逆向云,岩爆预测是从定性到定量的研究,对应于正向云模型;

(4) 岩爆是多个因素共同影响一个变量的问题,多维云模型可将各个因素分别作为它的一维变量,直观、快速地处理岩爆预测问题,并且能够反映不同岩体隶属于同一岩爆等级的程度高低。

3 岩爆倾向性预测的多维云模型

3.1 岩爆预测模型框架

本文提出的岩爆倾向性预测的多维云模型方法的基本框架如下:

(1) 根据以往对岩爆成因机制的研究^[3-5, 10-11, 24],建立岩爆预测指标体系及其倾向性预测标准;

(2) 根据岩爆倾向性预测标准,结合多维云模型理论,确定综合考虑 n 个指标的 l 个岩爆级别的 3 个云模型数字特征 $[Ex_k(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n), En_k(En_1, En_2, \dots, En_n), He_k(He_1, He_2, \dots, He_n)]$, $k=1, 2, \dots, l$;

(3) 采用改进的 CRITIC 法计算指标权重;

(4) 输入云模型数字特征和各个指标的权重,多维正向正态云发生器生成 l 朵综合考虑 n 个预测指标的对应于 l 个岩爆级别的 n 维云模型;

(5) 输入岩体 n 个指标的实测值,利用综合确定度公式(见下文)计算出该岩体隶属于各个岩爆等级的确定度,继而依据最大确定度原则判定该岩体的岩爆等级。

基于多维云模型的岩爆倾向性预测的具体实现流程如图 2 所示。

3.2 岩爆预测指标及其倾向性预测标准

岩爆发生机制复杂,影响因素众多,指标的选取是预测过程的关键一步,本文根据岩爆方面的相关研究^[3-5, 10-11, 24-25],综合考虑岩爆发生的地应力因素、岩性因素、能量因素、地质因素,选取切向应力与岩石单轴抗压强度比 σ_θ/σ_c (应力系数)、岩石单轴抗压强度与抗拉强度比 σ_c/σ_t (脆性系数)、弹性变形能指数 W_{et} 和岩体完整性系数 K_v 作为岩爆倾向性预测的指标。从目前的研究现状来看,大多数文

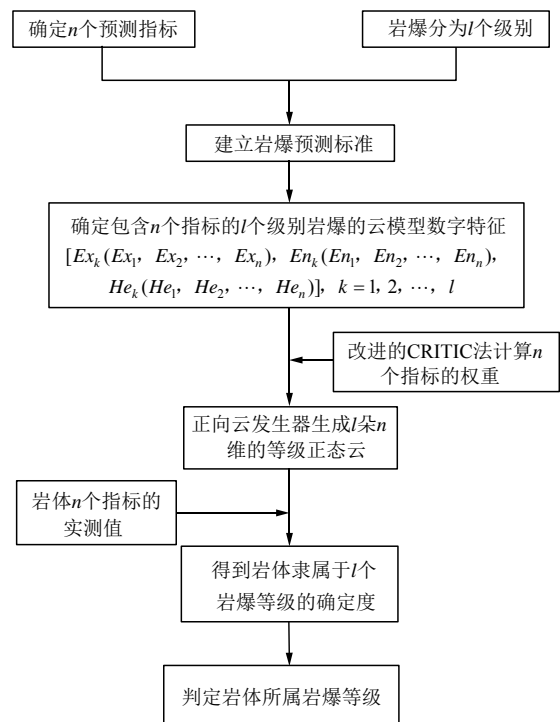


图 2 岩爆倾向性预测具体流程图

Fig.2 Flow chart of prediction of rockburst proneness

献都选取了类似的预测指标。根据王元汉等^[11, 16]的研究工作,建立岩爆倾向性预测标准,如表 1 所示。

表 1 岩爆倾向性预测标准^[11, 16]

Table 1 Classification standard for prediction of rockburst proneness^[11, 16]

岩爆等级	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	K_v
I(无岩爆)	<0.30	>40.00	<2.00	<0.55
II(弱岩爆)	0.30~0.50	26.70~40.00	2.00~4.00	0.55~0.65
III(中等岩爆)	0.50~0.70	14.50~26.70	4.00~6.00	0.65~0.75
IV(强烈岩爆)	>0.70	<14.50	>6.00	>0.75

3.3 改进 CRITIC 法确定指标权重

确定权重的方法主要包括两大类:主观赋权法和客观赋权法。由于岩爆预测指标都有实测值,同时考虑到主观赋权法有很大的不确定性,所以采用客观赋权法确定指标权重。熵权法是一种常用的客观赋权法,但是只考虑了指标信息量的大小,未考虑指标间的相关性,简单的统计分析可以发现岩爆预测指标间存在一定的相关性(参见下文),所以本文采用另一种客观赋权法——CRITIC 法,确定岩爆预测指标权重。

CRITIC 法由 D. Diakoulaki 等^[26]在 1995 年提出,它的基本思路是结合指标的信息量和相关性分

配权重，指标的信息量和相关性分别通过指标的变异性和指标间的冲突性来反映。指标变异性表示同一个指标对各预测对象取值大小的差异，以指标的标准差来衡量，标准差越大，各对象差异越大，指标提供的信息量越大，则指标占的权重越大。指标间冲突性的大小以指标间的相关系数来衡量，相关系数越大，指标间的正相关性越强，冲突性越低，2 个指标提供的信息量重复性越大，则指标占的权重越小。

CRITIC 法既考虑了指标的信息量又考虑了指标间的相关性，优越性显著。但是指标间的量纲、数量级往往不同，用标准差衡量指标的变异性存在不足，所以本文采用变异系数改进 CRITIC 法，其主要步骤如下^[27]：

(1) m 个预测对象和 n 个预测指标中第 i 个对象的第 j 个指标取值 x_{ij} 构成原始预测指标数值矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 采用 Z -score 方法对矩阵 \mathbf{X} 中各指标值标准化：

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中，

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

式中： \bar{x}_j 和 s_j 分别为第 j 个指标的均值和标准差。

(3) 求指标的变异系数：

$$v_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中： v_j 为第 j 个指标的变异系数。

(4) 利用步骤(2)得到的标准化矩阵 \mathbf{X}^* 计算相关系数，得到相关系数矩阵：

$$\mathbf{R} = (r_{kl})_{n \times n} \quad (k=1, 2, \dots, n; l=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中： r_{kl} 为第 k 个指标和第 l 个指标间的相关系数。

(5) 求各指标独立性程度的量化系数：

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

(6) 求各指标的综合信息量和独立性程度的量化系数：

$$C_j = v_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{kj}) \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

(7) 确定各指标权重：

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

3.4 确定多维云模型数字特征

根据表 1 岩爆倾向性预测标准和节 2.4 所述方法，计算岩爆预测多维云模型数字特征，表 2 列出了多维云模型的 3 个数字特征的具体数值。

表 2 各级岩爆多维云模型的数字特征

Table 2 Numerical characteristics of multidimensional cloud models for prediction of rockburst proneness

岩爆等级	数字特征	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{ct}	K_v
I	Ex	0.20	42.50	1.50	0.525
	En	0.267	14.16	2.50	0.272
	He	0.01	0.10	0.05	0.01
II	Ex	0.40	33.35	3.00	0.6
	En	0.267	14.16	2.50	0.272
	He	0.01	0.10	0.05	0.01
III	Ex	0.60	20.60	5.00	0.70
	En	0.267	14.16	2.50	0.272
	He	0.01	0.10	0.05	0.01
IV	Ex	0.80	11.75	7.50	0.815
	En	0.267	14.16	2.50	0.272
	He	0.01	0.10	0.05	0.01

3.5 确定岩爆等级

读取某岩体 n 个指标实测值，结合各指标权重 ω_j ，通过下式计算出该岩体隶属于各岩爆等级的综合确定度 μ_k ：

$$\mu_k[x(x_1, x_2, \dots, x_n)] = \exp\left[-\sum_{j=1}^n \frac{\omega_j (x_j - Ex_{jk})^2}{2(En_j')^2}\right]$$

$$(j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, l) \quad (12)$$

式中： $\mu_k[x(x_1, x_2, \dots, x_n)](k=1, 2, \dots, l)$ 为该岩体隶属于第 k 级岩爆的确定度，本文 $l=4$ 。

综合确定度计算过程中需要注意的是，如果岩体的某个指标值超出了该指标在最低等级或最高等级岩爆下的期望值，那么该指标对综合确定度的贡献为最大值 1，此时应令该指标值等于最低等级或最高等级时的期望代入到式(12)中。

计算出该岩体隶属于各岩爆等级的综合确定度之后，根据最大确定度原则预测该岩体的岩爆等级。

4 工程实例应用

为了验证本文采用的岩爆倾向性预测模型的合理性和有效性，从周科平等^[16]中选取了国内外 20 组典型岩爆的实例数据，详细指标实测值及实际岩

爆等级列于表 3。应用本文提出的多维云模型对所选 20 组实例进行预测, 并将预测结果与熵权 - 正态云模型、RS-TOPSIS 法的预测结果进行对比, 以说明本文所用模型的有效性和适用性。

表 3 国内外岩爆实例数据^[16]

Table 3 Data of rockburst at home and abroad^[16]

样本 编号	预测指标实测值				实际岩 爆等级
	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	K_v	
1	0.58	13.2	6.3	0.79	IV
2	0.45	17.5	5.1	0.68	III
3	0.39	20.9	4.6	0.65	III
4	0.20	41.0	1.7	0.50	I
5	0.66	13.2	6.8	0.82	IV
6	0.38	17.5	4.5	0.56	II
7	0.41	29.7	3.3	0.64	I
8	0.11	31.2	3.7	0.71	I
9	0.23	27.8	3.9	0.59	I
10	0.53	15.0	6.5	0.70	III
11	0.42	21.7	4.5	0.67	III
12	0.39	21.7	5.0	0.73	III
13	0.10	23.0	4.7	0.52	I
14	0.44	26.9	5.5	0.78	III
15	0.81	18.5	3.8	0.68	III
16	0.41	29.4	7.3	0.64	II
17	0.59	22.9	5.0	0.63	II
18	0.54	17.5	6.6	0.61	II
19	0.38	19.7	5.0	0.69	III
20	0.38	28.4	5.0	0.58	II

4.1 指标权重确定

本文采用改进的 CRITIC 法计算指标权值, 综合考虑指标的信息量和指标间的相关性。按照节 3.3 所述步骤, 首先采用 Z-score 方法将表 3 中各指标值标准化, 同时计算各指标的均值和方差, 采用式(7)得到各指标的变异系数, 然后根据标准化后的数据计算指标间的相关系数, 如表 4 所示, 采用式(9)得到各指标独立性程度系数, 采用式(10)将各指标变异系数和独立性系数相乘, 最后采用式(11)得到各预测指标 σ_θ/σ_c , σ_c/σ_t , W_{et} 和 K_v 的权值为 $\omega = [0.307, 0.403, 0.201, 0.089]$ 。

4.2 预测结果及分析

依据表 2 分别输入各级岩爆多维云模型的 3 个数字特征, 利用考虑 4 个指标权值的多维正向正态云发生器生成 4 朵 4 维的正态云, 每朵云对应每个

表 4 岩爆预测指标间的相关系数

Table 4 Correlations between indexes for rockburst prediction with Pearson correlation coefficient

预测指标	皮尔逊相关系数			
	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	K_v
σ_θ/σ_c	1	-0.628 9	0.449 5	0.513 4
σ_c/σ_t	-0.628 9	1	-0.631 1	-0.507 1
W_{et}	0.449 5	-0.631 1	1	0.502 7
K_v	0.513 4	-0.507 1	0.502 7	1

岩爆等级, 输入 4 个指标实测值由式(12)得到岩体隶属于各级岩爆的确定度, 根据最大确定度原则判定岩体的岩爆等级。按照上述步骤得到 20 组典型工程岩爆实例的岩爆等级判定结果, 并与实际情况、熵权 - 正态云模型^[19]以及 RS-TOPSIS 法^[16]的预测结果进行对比, 具体见表 5。

表 5 岩爆倾向性预测结果

Table 5 Prediction results of rockburst proneness and comparison with the related methods

样本 编号	综合确定度				本文 预测 结果	实际 等级	熵权 - 云模 型 ^[19]	RS- TOPSIS ^[16]
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4				
1	0.150 6	0.409 4	0.828 4	0.900 6	IV	IV	IV	IV
2	0.372 8	0.716 9	0.943 0	0.669 2	III	III	III	III
3	0.491 0	0.819 8	0.905 0	0.548 7	III	III	III	III
4	0.997 1	0.838 6	0.383 6	0.107 5	I	I	I	I
5	0.161 5	0.442 8	0.884 3	0.948 9	IV	IV	III~IV	IV
6	0.449 6	0.779 1	0.751 5	0.430 2	II-III	II	II	II
7	0.810 4	0.984 1	0.725 8	0.384 4	II*	I	II*	I
8	0.796 7	0.799 2	0.615 6	0.247 8	I~II	I	II*	II*
9	0.826 0	0.732 1	0.679 9	0.295 4	I	I	I	I
10	0.242 6	0.561 0	0.924 7	0.824 9	III	III	III	III
11	0.497 8	0.838 1	0.926 9	0.565 8	III	III	III	III
12	0.479 1	0.809 4	0.907 4	0.566 8	III	III	III	III
13	0.783 5	0.708 9	0.578 8	0.339 4	I	I	I	I
14	0.513 5	0.847 3	0.901 9	0.562 0	III	III	III	III
15	0.234 1	0.559 9	0.892 3	0.757 8	III	III	III	III
16	0.516 3	0.784 1	0.730 3	0.441 8	II	II	II	III*
17	0.399 3	0.876 8	0.991 5	0.710 6	III*	II	III*	II
18	0.272 3	0.873 4	0.928 4	0.803 9	II~III	II	II~III	III*
19	0.446 6	0.773 1	0.899 8	0.574 1	III	III	III	III
20	0.625 5	0.913 8	0.839 7	0.451 8	II	II	II	II

注: $\mu_1 \sim \mu_4$ 表示各样本隶属于 I~IV 等级的确定度; *表示误判。

表 5 显示, 本文提出模型预测的结果与实际岩爆等级基本吻合, 与其他几种预测模型得出的结果

也相差无几,表明本文提出的改进的 CRITIC 法 - 多维云模型应用于岩爆倾向性分级是合理的、有效的。CRITIC 法赋权过程中综合考虑了指标的信息量和指标之间的相关性,提高了权重计算结果的可靠性。云模型作为一种实现定性概念和定量数据双向转换的认知模型,可将岩爆预测过程的模糊性和随机性转换为确定度这个定量数据,准确反映了岩爆分级的不确定性这个特点,这也正是比其他方法更加优越之处。多维云模型将各个因素分别作为它的一维变量生成综合云模型,与一维云模型相比建立过程更加简便,一次性输入 4 个指标数据由 4 个多维云模型即可确定岩体的岩爆级别,而一维云模型要分别生成 16 个云模型,加权计算隶属于 4 个岩爆等级的综合确定度。本文中所有指标共同生成的综合云模型考虑了指标间的相关作用,反映了岩爆多因素共同作用的特点。另外多维云模型的数字特征 En 的取值更大,即每个岩爆级别覆盖的指标的取值范围更广,减弱了云模型对区间均值的敏感程度,更能客观反映岩爆的复杂性,预测结果更有可信度。

5 结 论

(1) 将岩爆倾向性分为 4 个等级,选取岩体应力系数 σ_θ/σ_c 、岩石脆性系数 σ_c/σ_t 、弹性变形能指数 W_{et} 和岩体完整性系数 K_v 四个指标建立岩爆倾向性预测标准,考虑岩爆预测指标之间的相关性,基于样本数据采用改进的 CRITIC 法确定各预测指标的权重。

(2) 针对岩爆预测的不确定性、多因素共同作用下的复杂性、因素之间的相关性,将多维正态云模型应用于岩爆预测,通过国内外 20 组地下工程岩爆实例数据验证了改进的 CRITIC 法 - 多维正态云模型用于岩爆倾向性预测的合理性和有效性,与其他预测方法的比较显示了本文模型的适用性。

(3) 与一维云模型相比,多维云模型的建立过程更加简洁,各岩爆级别对指标实测值的覆盖更为广泛,模型的综合性更强,更能反映岩爆预测的复杂性,预测结果的可信度更高;与其他预测方法相比,多维正态云模型更能反映岩爆预测中的不确定性,并且预测过程更加直观、全面。

多维云模型理论应用于岩爆预测还只是初步尝试,由于多维云模型数字特征的选取目前尚无定论,

所以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。

参考文献(References):

- [1] 许迎年,徐文胜,王元汉,等. 岩爆模拟试验及岩爆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1 462 - 1 466.(XU Yingnian, XU Wensheng, WANG Yuanhan, et al. Simulation testing and mechanism studies on rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1 462 - 1 466.(in Chinese))
- [2] ADOKO A C, GOKCEOGLU C, WU L, et al. Knowledge-based and data-driven fuzzy modeling for rockburst prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 61: 86 - 95.
- [3] TURCHANINOV I A, MARKOV G A, GZOVSKY M V, et al. State of stress in the upper part of the earth's crust based on direct measurements in mines and on tectonophysical and seismological studies[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1972, 6(4): 229 - 234.
- [4] RUSSENESEN B F. Analyses of rockburst in tunnels in valley sides[M. S. Thesis][D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1974.
- [5] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1 165 - 1 186.
- [6] 马天辉,唐春安,唐烈先,等. 基于微震监测技术的岩爆预测机制研究[J].岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 470 - 483.(MA Tianhui, TANG Chun'an, TANG Liexian, et al. Mechanism of rock burst forecasting based on micro-seismic monitoring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 470 - 483.(in Chinese))
- [7] GRODNER M. Delineation of rockburst fractures with ground penetrating radar in the Witwatersrand Basin, South Africa[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6): 885 - 891.
- [8] MENG F Z, ZHOU H, WANG Z Q, et al. Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 210 - 223.
- [9] DOU L M, CHEN T J, GONG S Y, et al. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workplace[J]. Safety Science, 2012, 50(4): 736 - 740.
- [10] FENG X T, WEBBER S, OZBAY M U, et al. An expert system on assessing rockburst risks for South African deep gold mines[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 1996, 2(2): 23 - 32.
- [11] 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.(in Chinese)
- [12] 杨涛, 李国维. 基于先验知识的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 429 - 431.(YANG Tao, LI Guowei. Study on rockburst prediction method based on the prior knowledge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 429 - 431.(in Chinese))
- [13] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1 012 - 1 018.(GONG Fengqiang, LI Xibing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 012 - 1 018.(in Chinese))
- [14] 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 Yipeng, LU Qing, SHANG Yuequan. 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))
- [15] 裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等. 基于改进的灰评估模型在岩爆中的预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2 088 - 2 093.(PEI Qitao, LI Haibo, LIU Yaqun, et al. Rockburst prediction based on a modified grey evaluation model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2 088 - 2 093.(in Chinese))
- [16] 周科平, 雷涛, 胡建华. 深部金属矿山 RS-TOPSIS 岩爆预测模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3 705 - 3 711.(ZHOU Keping, LEI Tao, HU Jianhua. RS-TOPSIS model of rockburst prediction in deep metal mines and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3 705 - 3 711.(in Chinese))
- [17] 李宁, 王李管, 贾明涛. 基于粗糙集理论和支持向量机的岩爆预测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(5): 1 268 - 1 275.(LI Ning, WANG Liguan, JIA Mingtao. Rockburst prediction based on rough set theory and support vector machine[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(5): 1 268 - 1 275.(in Chinese))
- [18] 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): 1 189 - 1 194.(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): 1 189 - 1 194.(in Chinese))
- [19] 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(增1): 596 - 602.(ZHOU Keping, LIN Yun, HU Jianhua, et al. Grading Prediction of rockburst intensity based on entropy and normal cloud model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Supp.1): 596 - 602.(in Chinese))
- [20] 李德毅, 杜鹤. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 44 - 55.(LI Deyi, DU Yu. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 44 - 55.(in Chinese))
- [21] 郭戎潇, 夏靖波, 董淑福, 等. 一种基于多维云模型的多属性综合评价方法[J]. 计算机科学, 2010, 37(11): 75 - 77.(GUO Rongxiao, XIA Jingbo, DONG Shufu, et al. Multiple attribute evaluation method based on multidimensional cloud model[J]. Computer Science, 2010, 37(11): 75 - 77.(in Chinese))
- [22] 杜湘瑜, 尹全军, 黄柯棣, 等. 基于云模型的定性定量转换方法及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(4): 772 - 776.(DU Xiangyu, YIN Quanjun, HUANG Kedi, et al. Transformation between qualitative variables and quantity based on cloud models and its application[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(4): 772 - 776.(in Chinese))
- [23] WANG D, ZENG D B, SINGH V P, et al. A multidimension cloud model-based approach for water quality assessment[J]. Environmental Research, 2016, 149: 113 - 121.
- [24] 郭建强, 赵青, 王军保, 等. 基于弹性应变能岩爆倾向性评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1 886 - 1 893.(GUO Jianqiang, ZHAO Qing, WANG Junbao, et al. Rockburst prediction based on elastic strain energy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1 886 - 1 893.(in Chinese))
- [25] KIDYBIŃSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 295 - 304.
- [26] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers and Operations Research, 1995, 22(7): 763 - 770.
- [27] 王瑛, 蒋晓东, 张璐. 基于改进的 CRITIC 法和云模型的科技奖励评价研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 118 - 124.(WANG Ying, JIANG Xiaodong, ZHANG Lu. Research on the evaluation of science and technological awards based on improved CRITIC method and cloud model[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2014, 41(4): 118 - 124.(in Chinese))