

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

郝 杰¹, 侍克斌¹, 王显丽¹, 白现军², 陈功民²

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 葛洲坝新疆工程局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 岩爆等级评价具有模糊性和不确定性, 而粗糙集理论的云模型对处理模糊性和不确定性问题具有独特优势, 由此提出了基于模糊 C 均值 (简称 FCM) 算法粗糙集的云模型理论在岩爆等级评价中的新模型。该模型选用岩石单轴抗压强度 σ_c 、洞室围岩最大的切向应力 σ_θ 、岩石单轴抗拉强度 σ_t 和岩石弹性能量指数 W_{et} 作为岩爆等级评价因子, 依据岩爆分级标准计算各评价因子隶属于不同岩爆等级的云数字特征。同时, 以国内外 40 例岩爆工程为研究对象, 运用基于 FCM 算法的粗糙度理论进行因子属性重要性评价, 计算各评价因子权重。根据正向正态云发生器, 得到待评样本的综合确定度, 由最大综合确定度判定岩爆级别。研究表明: 该模型的评价结果与实际情况基本一致, 具有一定的可行性, 为岩爆预测提供了一种新的研究方法思路。

关 键 词: 岩爆等级评价; 云模型; 粗糙集; 模糊 C-均值 (FCM) 算法; 综合确定度

中图分类号: O 159

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 03-0859-09

Application of cloud model to rating of rockburst based on rough set of FCM algorithm

HAO Jie¹, SHI Ke-bin¹, WANG Xian-li¹, BAI Xian-jun², CHEN Gong-min²

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830000, China;

2. Gezhouba Xinjiang Engineering Co., Ltd, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: The rating of rockburst is fuzzy and uncertainty, though the cloud model of rough set theory has a unique advantage to dealing with fuzzy and uncertainty problem. A new cloud model for evaluating rockburst grade is proposed on the basis of the rough set of fuzzy C-means (FCM) algorithm. Some main evaluation factors of rockburst are chosen in this study, such as uniaxial compressive strength σ_c , the maximum tangential stress σ_θ , tensile strength σ_t and elastic energy index W_{et} . According to the criteria of rockburst classification, each evaluation factor is calculated by using the characteristics of cloud number of different rockburst levels. The rough set theory based on FCM algorithm is employed to analyze each factor attributed in the forty samples of rockburst engineering in China and internationally, and then the weight of each evaluation factor is calculated. The comprehensive degrees of certainty of the samples for evaluation are calculated by the positive normal cloud generator, and the level of rockburst is finally specified by the maximum certainty degree. The results show that the evaluated results agree well with the practical records, which implies that the proposed procedure is of feasibility and reliability, and is a new idea for rockburst prediction.

Keywords: rating of rockburst; cloud model; rough set; fuzzy C-means algorithm; comprehensive degrees of certainty

1 引 言

随着地下空间的开发利用, 在深部高地应力区

进行地下岩体工程开挖, 由于开挖卸荷引起围岩内应力场重新分布, 导致储存于硬脆性围岩中的弹性应变能突然释放, 产生爆裂、松脱、剥离、弹射甚

收稿日期: 2014-06-29

基金项目: 新疆水利水电工程重点学科资助项目 (No.xjzdxk-2010-02-12); 新疆科技支撑项目 (No.201233132)。

This work was supported by the Key Discipline of Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Engineering (xjzdxk-2010-02-12) and Xinjiang Science and Technology Support Project (201233132).

第一作者简介: 郝杰, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事地下洞室围岩稳定性方面的研究。E-mail: 723865876@qq.com

通讯作者: 侍克斌, 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事水利水电工程科研与教学工作。E-mail: xndsg@sina.com

至抛掷等破坏现象,这种地质灾害称为岩爆^[1-2]。针对岩爆造成人员伤亡和设备损坏的事故频繁发生,如何对岩爆准确预测预报就显得十分必要^[3]。近年来,学者们先后提出了灰色理论法^[4]、粒子群优化投影寻踪法^[5]、基于遗传-RBF 神经网络法^[6]、距离判别法^[7]、基于数值模拟的三维地应力量测法^[8]、基于 AE 时间序列方法^[9]等对岩爆进行预测,虽然这些方法对岩爆的预测提供了一定的科学评判,但不可否认,这些方法仍存在着一些不足,如灰色理论预测法易于受到原始数据信息的干扰,预测精度无法保证;粒子群优化投影寻踪法需要提供实际工程精确的指标测值,并且当判别指标增多时模型最优化问题尚未解决;基于遗传-RBF 神经网络法外延能力较弱,要求学习样本要有足够大的分布空间,才能保证岩爆预测结果的精度;距离判别法受原始数据代表性、准确性的影响较大;基于数值模拟的三维地应力量测法需要对预测区域地应力进行全面量测,且精度要求高,难以实现;基于 AE 时间序列法收敛速度慢且适用性不强。在岩爆等级评价中,由于岩爆与评价因子呈现高度非线性、评价因子难以同时满足某一等级、实测值存在误差以及专家赋权重具有主观性等问题,使得岩爆等级划分存在模糊性和不确定性,而云模型和粗糙度理论的特点就是善于分析研究具有模糊性和不确定性问题。

因此,本文在深入研究以往岩爆预测方法的基础上,提出基于 FCM 算法粗糙集理论的云模型岩爆等级评价方法,该方法以 40 个国内外岩爆样本为对象,应用基于 FCM 聚类算法的粗糙集理论进行权重计算,结合正向正态云发生器求得综合确定度,根据最大综合确定度确定岩爆等级,最后通过对秦岭隧道、括苍山隧道和冬瓜山铜矿的岩爆实例进行预测,将预测结果与可拓理论预测法、Russense 判据法和实际岩爆发生情况进行对比,结果表明,本方法具有较高的准确性。

2 基于 FCM 算法粗糙集理论权重计算和云模型简介

2.1 基于 FCM 算法粗糙集理论计算权重

粗糙集理论是波兰数学家 Pawlak 于 1982 年提出的一种新的处理模糊和不确定性知识的离散数据分析理论^[10-11]。设四元组 $S=(U,A,V,f)$ 是一个知识表达系统,其中论域 U 、属性集 A 都为非空有限集, $A=C\cup D$, $C\cap D=\emptyset$, C 和 D 分别为条件属性集和决策属性集; V 为属性的值域集; f 为信息函数。这种具有条件属性和决策属性的知识表达系统

称为决策表,粗糙集理论中用决策表描述论域中对象,决策表是基于 FCM 算法^[12-13]离散化过的一个二维表格,每一行描述一种对象,每一列描述对象的一种属性。

若 $U/C=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$ 、 $U/D=\{Y_1,Y_2,\dots,Y_m\}$, 则决策属性 D 关于条件属性 C 的(或称 C 对 D)支持度定义为

$$\text{spt}_C(D)=\frac{1}{|U|}\sum_{i=1}^m|\text{pos}_C(Y_i)|, Y_i\in U/D \quad (1)$$

式中: $\text{spt}_C(D)$ 称为决策属性 D 依赖于条件属性 C 的程度,取值范围为 $[0,1]$ 。当 $\text{spt}_C(D)=1$ 时,称 D 完全依赖于 C ; 当 $\text{spt}_C(D)=0$ 时,称 D 完全独立于 C ; 当 $0<\text{spt}_C(D)<1$ 时,称 D 粗糙依赖于 C ; $\text{pos}_C(D)$ 表示 Q 在 C 下的正域; $|\#|$ 为集合 $\#$ 的基数或势,对于有限集合表示集合中包括元素的个数。

条件属性子集 $C_i(\emptyset\subset C_i\subseteq C)$ 关于决策属性 D 的重要性定义为

$$\text{sig}_{C-\{C_i\}}^D=\text{spt}_C(D)-\text{spt}_{C-\{C_i\}}(D) \quad (2)$$

根据条件属性子集重要性的大小,可知其对决策属性的影响强弱,各条件属性子集的权重可表示为

$$\omega_i=\frac{\text{spt}_C(D)-\text{spt}_{C-\{C_i\}}(D)}{\sum_{i=1}^m[\text{spt}_C(D)-\text{spt}_{C-\{C_i\}}(D)]} \quad (3)$$

式中: ω_i 为第 i 个评价指标权重。

2.2 云模型简介

云模型是李德毅院士于 1995 年提出的一种定性概念与定量数值表示之间的不确定性转换模型,在数据挖掘、模拟预测和评价等多个领域得到应用^[14-16]。设 Z 是一个用精确数值表示的定量论域, B 是 Z 上的定性概念,若定量值 $x\in Z$, 且 x 是定性概念 B 的一次随机实现, x 对 B 的确定度 $\mu(x)\in[0,1]$, 是有稳定倾向的随机数,则 x 在论域 Z 上的分布称为云(cloud),每一个 x 称为一个云滴。即

$$\mu:Z\rightarrow[0,1], \forall x\in Z_x\rightarrow\mu(x) \quad (4)$$

从云的定义可以看出,云理论是研究定性概念量化方法,定性概念转换成一个个定量值是个离散的转换过程,具有偶然性。云滴的确定度反映了模糊性,该值自身也是随机值,可用其概率分布函数描述。在论域空间中,大量云滴构成的云,可表征某一定性概念,并用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 3 个

数字特征来整体表征一个概念。期望 E_x 是表示云滴在论域空间分布的期望, 最能够代表定性概念的点, 即概念在论域空间的中心值。熵 E_n 是定性概念不确定性的度量, 是由定性概念的随机性和模糊性共同决定的, 它不仅是定性概念随机性的度量, 反映了能代表这个定性概念的云滴的离散程度, 也是定性概念亦此亦彼的度量, 即是对定性概念模糊性的度量, 其可反映论域空间中可被定性概念接受的云滴的取值范围。超熵 H_e 是描述熵的不确定性的度量, 反映了在论域空间代表该语言值的所有点的不确定度的凝聚性, 它的大小间接地反映了云滴的厚度。

正向正态云发生器是在正态分布和模糊数学的基础上发展起来的全新模型, 具有描述一般事物由定性概念向定量数值转换的普适性特点。正态云定义如本节第1段所述, 若 x 满足: $x \sim N(E_x, E_n'^2)$, 其中, $E_n' \sim N(E_n, H_e^2)$, 且 x 对 C 的确定度满足:

$$\mu = \exp\left(\frac{-(x - E_x)^2}{2(E_n')^2}\right) \quad (5)$$

则 x 在论域 Z 上的分布称为正态云。

3 云模型岩爆倾向性评价

3.1 岩爆倾向性评价模型的建立

若把每一定性的岩爆等级看作是一个自然语言的概念, 对应映射成一朵云, 并假设待评样本的实测数据隶属于某岩爆等级的确定度 μ 服从正态分布, 则基于 FCM 算法粗糙集理论的云模型岩爆等级评价基本流程为: 首先, 根据所确定的岩爆评价指标标准集计算相应等级的云数字特征 (E_x, E_n, H_e) , 全云、半降云、半升云数字特征值 (E_x, E_n, H_e) 计算见公式 (6)~(8), 进而基于熵 E_n 和超熵 H_e 生成正态分布随机数以构成云的云滴, 并由正态云发生器生成该评价因子隶属于某岩爆级别的云模型; 其次, 结合国内外已发生岩爆实测资料, 选取主要评价因子和岩爆级别作为条件属性和决策属性, 应用基于 FCM 算法的粗糙集理论进行权重计算; 最后, 读取待评样本的实测数据, 由式 (3) 和式 (5) 分别计算出各评价因子权重和每种评价指标属于各个级别的确定度, 二者相乘即为综合确定度, 根据综合确定度最大值所对应的岩爆级别来确定该样本所属岩爆级别, 具体流程如图 1 所示。

3.2 岩爆倾向性评价模型评价指标及分级标准的确定

以往的研究表明^[17-18], 围岩应力、岩性和能量是影响岩爆等级的主要因素, 围岩应力可以用洞

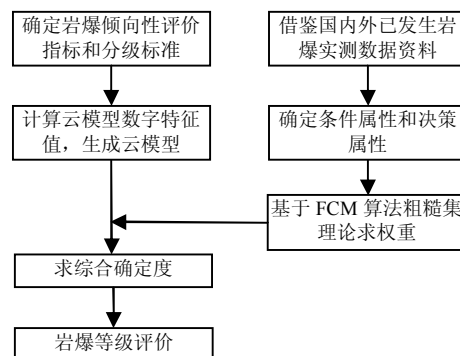


图 1 基于 FCM 算法粗糙集理论的云模型岩爆等级评价流程图

Fig.1 Flow chart of the rating of rockburst using a cloud model based on the rough set of FCM algorithm

室最大切向应力 σ_θ 来描述; 岩性可以通过岩石单轴抗压强度 σ_c 和抗拉强度 σ_t 来描述; 弹性能量指数 W_{et} 是弹性岩石试件在受力变形过程中达到峰值强度以前积累的弹性应变能与卸载所得的耗损应变能之比, 其值越大, 破坏时释放的能量越多, 因此, W_{et} 可以反映岩石的能量特征。这 4 个参数充分地表征了岩爆的特征, 且各参数之间具有相对独立性, 基本综合了岩爆发生的内外因条件, 且可以通过室内试验或现场测试获取。本文选取选取岩石 σ_c 、 σ_θ 、 σ_t 、 W_{et} 作为岩爆的倾向性评价指标, 岩爆分级标准见表 1。

表 1 岩爆分级标准^[19-20]

Table 1 Classification criteria of rockburst

岩爆级别	岩石单轴抗压强度 σ_c / MPa	洞室最大切向应力 σ_θ / MPa	岩石单轴抗拉强度 σ_t / MPa	弹性能量指数 W_{et}
无岩爆 I	0~80	0~24	0~5	0~2.0
弱岩爆 II	80~120	24~60	5~7	2.0~3.5
中级岩爆 III	120~180	60~126	7~9	3.5~5.0
强岩爆 IV	180~320	126~200	9~30	5.0~20.0

根据云模型理论可知, 岩爆评价指标对某一等级标准的全云数字特征可按式计算^[21-22]:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \\ E_n &= \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \\ H_e &= k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

半降云数字特征可按式计算:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= C_{\max} \\ E_n &= \frac{C_{\max} - C_{\min}}{3} \\ H_e &= k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

半升云数字特征可按式(8)计算:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= C_{\min} \\ E_n &= \frac{C_{\max} - C_{\min}}{3} \\ H_e &= k \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $C_{\min}$ 和 $C_{\max}$ 分别为某一等级标准的最小与最大边界; k 为常数, 可根据变量的模糊阙度进行调整, 表征熵 E_n 的离散程度, 若 k 取 0, 则表示熵的值是精确值, 参阅文献[23], k 取 0.01。

假设某岩爆评价指标的 4 个评价区间分别为 I (0, a], II (a, b], III (b, c] 和 IV (c, d], 则岩爆评价指标按上述模型确定的云模型特征参数计算方法如表 2 所示, 其中 I (0, a] 采用半降云数字特征值式(7)

计算, 其余采用全云数字特征式(6)计算。

表 2 岩爆等级评价云模型数字特征
Table 2 Numerical characteristics of cloud model in rockburst classification

等级	期望 E_x	熵 E_n	超熵 H_e
I	$E_{x1} = a$	$E_{n1} = (a-0)/3$	0.01
II	$E_{x2} = (a+b)/2$	$E_{n2} = (b-a)/6$	0.01
III	$E_{x3} = (b+c)/2$	$E_{n3} = (c-b)/6$	0.01
IV	$E_{x4} = (c+d)/2$	$E_{n4} = (d-c)/6$	0.01

3.3 岩爆评价指标云模型的生成

根据表 1、2, 运用正向正态云发生器分别对 σ_c 、 σ_θ 、 σ_t 和 W_{et} 生成相对应各级岩爆的云模型, 如图 2 所示, 图中横坐标为评价指标取值, 纵坐标为对应的确定度。图 2(a)~图 2(d)分别代表该评价指标对应 I 级至 IV 级岩爆云图。

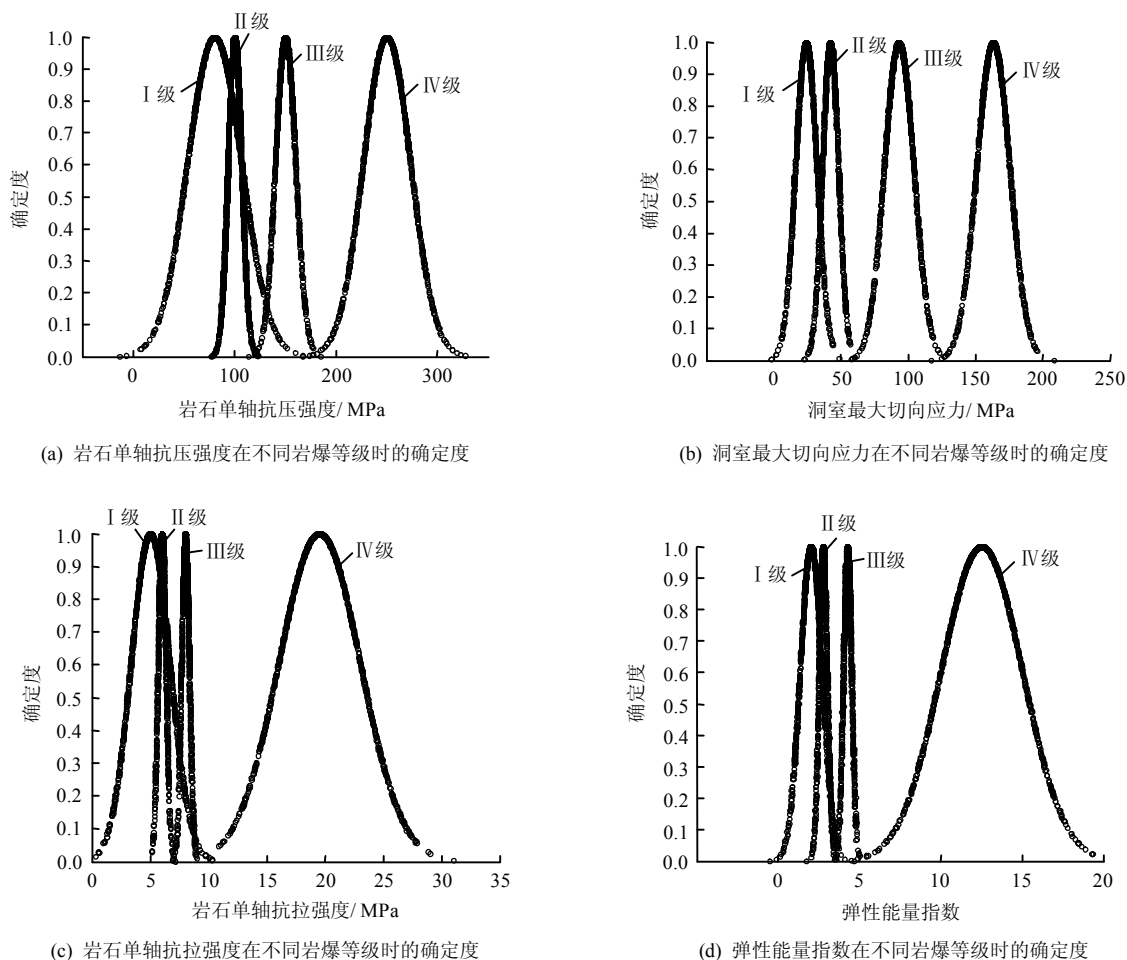


图 2 各评价指标隶属于岩爆级别的云模型

Fig.2 Cloud models of rockburst for each evaluation index

3.4 基于 FCM 算法粗糙集理论的岩爆评价指标权重计算

为了尽量涵盖多个已发生岩爆工程, 提高权重计算的准确度, 本文依据文献[7]列出国内外 40 个具有详细实测数据的岩爆实例, 并基于 FCM 算法

进行了数据离散化处理, 其中 U 为论域, A 为属性集。 $C_1(\sigma_c)$ 、 $C_2(\sigma_\theta)$ 、 $C_3(\sigma_t)$ 和 $C_4(W_{et})$ 为条件属性, 聚类数为 3, 各因素水平值 {1, 2, 3} 对应参数值由低到高变化。 D 为决策属性, 聚类数为 4, 各因素水平值 {1, 2, 3, 4} 对应岩爆等级依次是无岩爆

(I)、弱岩爆(II)、中级岩爆(III)和强岩爆(IV), 详见表3。

表3 实测岩爆样本数据及评价指标决策表

Table 3 Decision table of measured rock burst sample data and evaluation indexes

实例序号	条件属性				决策属性 岩爆等级	U	A				
	σ_c/MPa	σ_θ/MPa	σ_t/MPa	W_{et}			C_1	C_2	C_3	C_4	D
1	180.00	48.75	8.30	5.00	III	1	2	2	2	2	3
2	175.00	62.50	7.25	5.00	III	2	2	2	2	2	3
3	180.00	75.00	8.30	5.00	III	3	2	2	2	2	3
4	180.00	57.00	8.30	5.00	III	4	2	2	2	2	3
5	236.00	89.00	8.30	5.00	III	5	3	3	2	2	3
6	130.00	50.00	6.00	5.00	III	6	1	2	1	2	3
7	140.00	108.00	8.00	5.50	IV	7	2	3	2	2	4
8	178.00	18.80	5.70	7.40	I	8	2	1	1	3	1
9	115.00	11.00	5.00	5.70	I	9	1	1	1	2	1
10	176.00	55.40	7.30	9.30	III	10	2	2	2	3	3
11	120.00	48.00	1.50	5.80	III	11	1	2	1	2	3
12	115.00	63.00	1.50	5.70	III	12	1	2	1	2	3
13	110.00	49.50	1.50	5.70	III	13	1	2	1	2	3
14	82.56	30.90	6.50	3.20	II	14	1	1	1	1	2
15	128.60	89.00	13.20	4.90	IV	15	1	3	2	2	4
16	237.10	12.30	17.66	6.90	I	16	3	1	3	2	1
17	256.50	55.60	18.90	9.10	III	17	3	2	3	3	3
18	225.60	91.30	17.20	7.30	IV	18	3	3	3	3	4
19	171.50	61.00	22.60	7.50	II	19	2	2	3	3	2
20	54.20	34.15	12.10	3.17	II	20	1	1	2	1	2
21	138.40	108.40	7.70	1.90	IV	21	2	3	2	1	4
22	198.00	69.80	22.40	4.68	II	22	2	2	3	2	2
23	171.30	105.00	22.60	7.27	IV	23	2	3	3	3	4
24	237.16	105.00	17.66	6.38	IV	24	3	3	3	2	4
25	304.21	105.00	20.90	10.57	IV	25	3	3	3	3	4
26	54.20	25.49	2.49	3.17	II	26	1	1	1	1	2
27	147.09	72.07	10.98	6.53	III	27	2	2	2	2	3
28	160.00	21.80	5.20	2.22	I	28	2	1	1	1	1
29	160.00	20.90	5.20	2.22	I	29	2	1	1	1	1
30	160.00	12.10	5.20	2.22	I	30	2	1	1	1	1
31	170.00	75.00	11.30	9.00	III	31	2	2	2	3	3
32	123.00	43.40	6.00	5.00	III	32	1	2	1	2	3
33	165.00	62.60	9.40	9.00	III	33	2	2	2	3	3
34	88.70	30.00	3.70	6.60	III	34	1	1	1	2	3
35	128.61	105.00	13.00	5.76	III	35	1	3	2	2	4
36	304.00	105.00	9.12	5.76	III	36	3	3	2	2	3
37	306.58	105.00	13.90	6.38	IV	37	3	3	2	2	4
38	52.00	7.50	3.70	1.30	I	38	1	1	1	1	1
39	99.70	24.93	4.80	3.80	I	39	1	1	1	1	1
40	99.70	14.96	4.80	3.80	I	40	1	1	1	1	1

根据式(1)~(3)计算得到岩石单轴抗压强度权重为0.231, 洞室最大切向应力权重为0.359, 岩石单轴抗拉强度权重为0.282, 弹性能量指数权重为0.128。

3.5 综合确定度的计算

根据正向正态云发生器的算法, 由式(5)计算某指标数据隶属于某云的确定度。结合由粗糙集理论计算出来的各评价因子权重, 由下式计算得到综合确定度 Ω 。根据最大的综合确定度值, 判别样本

主要发生的岩爆级别, 同时根据其余综合确定度的大小可以确定可能会发生的岩爆级别。

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \mu \omega_i \quad (9)$$

4 实例应用

为了验证构建模型的正确性和有效性, 采用文献[6-7, 24]中的数据进行应用及验证对比分析, 岩爆发生级别分级标准见表1。岩爆评价指标详见

表 4。

表 4 工程岩爆段围岩力学参数
Table 4 Mechanical parameters of rock mass at rockburst engineering site

工程名称	序号	σ_c /MPa	σ_0 /MPa	σ_l /MPa	W_{et}
秦岭隧道	1	131.99	56.1	9.44	7.44
	2	133.99	54.2	9.09	7.08
	3	128.52	70.3	8.73	6.43
括苍山隧道	4	133.40	35.0	9.30	2.90
冬瓜山铜矿	5	190.30	89.56	17.13	3.97
	6	170.28	89.56	12.07	5.76
	7	187.17	89.56	19.17	7.27

由上述理论可知, 将表 1 中各指标对应岩爆级别的界限值代入式 (6)~(8), 求得各岩爆级别的云模型的数字特征, 具体计算公式见表 2, 并根据正向正态云发生器生成各评价因子隶属于各岩爆级别的云模型, 如图 2 所示。通过式 (5), 由待评样本的评价因子的实测值计算样本对于各岩爆级别的确定度, 然后结合基于 FCM 算法的粗糙度理论(式 (1)~(3)) 求取的各指标权重, 再由式 (9) 即可求得待评样本的综合确定度, 则基于求得的最大综合确定度所属的级别可判定样本所处岩爆级别, 同时根据综合确定度大小排序可知岩爆向邻近级别发生的可能性。基于 FCM 算法粗糙集的云模型在实际岩爆工程中的应用计算结果见表 5。

表 5 岩爆评价结果
Table 5 Predicted results of rockburst

序号	综合确定度				本文判定结果
	$\Omega(I)$	$\Omega(II)$	$\Omega(III)$	$\Omega(IV)$	
1	0.00	0.43	0.19	0.03	弱、中级岩爆
2	0.00	0.47	0.25	0.03	弱、中级岩爆
3	0.00	0.32	0.40	0.02	中级岩爆
4	0.02	0.66	0.19	0.01	弱、中级岩爆
5	0.00	0.06	0.47	0.28	中级岩爆
6	0.00	0.03	0.46	0.07	中级岩爆
7	0.00	0.01	0.37	0.34	中、强级岩爆

为了对比分析本文计算结果的正确性, 笔者分别根据可拓理论^[19]和 Russenes 判据^[25]进行了岩爆等级预测, 限于篇幅, 仅将计算结果列于表 6、7。

表 6 岩爆等级对各个评价等级的隶属度及评价结果
Table 6 Rockburst grade and evaluation results of membership degree of each evaluation grade

序号	隶属于岩爆等级的隶属度				等级变量特征值	判定结果
	I	II	III	IV		
1	-0.348	-0.169	-0.047	-0.093	3.104	中级岩爆
2	-0.345	-0.156	-0.026	-0.105	3.086	中级岩爆
3	-0.346	-0.173	0.050	-0.151	3.029	中级岩爆
4	-0.266	0.091	-0.077	-0.319	2.268	弱岩爆
5	-0.418	-0.278	0.086	-0.006	3.258	中级岩爆
6	-0.391	-0.269	0.009	-0.047	3.235	中级岩爆
7	-0.478	-0.383	-0.115	0.137	3.641	中级、强烈岩爆

表 7 Russenes 判据岩爆预测结果
Table 7 Prediction results of rockburst by Russenes criteria

序号	σ_0/σ_c	Russenes 判定结果	Russenes 判据
1	0.43	中级岩爆	$\sigma_0/\sigma_c < 0.2$, 无岩爆
2	0.40	中级岩爆	$0.2 < \sigma_0/\sigma_c < 0.3$, 弱岩爆
3	0.55	中级、强烈岩爆	$0.3 < \sigma_0/\sigma_c < 0.55$, 中级岩爆
4	0.26	弱岩爆	$\sigma_0/\sigma_c \geq 0.55$, 弱岩爆
5	0.47	中级岩爆	其中, σ_0 为隧洞开挖后洞壁最大切向应力(MPa); σ_c 为岩石单轴抗压强度(MPa)。
6	0.53	中级岩爆	
7	0.48	中级岩爆	

将本文方法、可拓理论以及 Russenes 判据法预测结果与实际岩爆发生情况汇总于表 8。

表 8 不同岩爆预测方法结果对比
Table 8 Comparison of results between different rockburst prediction methods

序号	本文预测结果	可拓理论预测结果	Russenes 判据结果	实际发生情况
1	弱、中级岩爆	中级岩爆	中级岩爆	中级岩爆
2	弱、中级岩爆	中级岩爆	中级岩爆	中级岩爆
3	中级岩爆	中级岩爆	中级、强烈岩爆	中级岩爆
4	弱、中级岩爆	弱岩爆	弱岩爆	弱、中级岩爆
5	中级岩爆	中级岩爆	中级岩爆	中级岩爆
6	中级岩爆	中级岩爆	中级岩爆	中级岩爆
7	中级、强级岩爆	中级、强烈岩爆	中级岩爆	中级岩爆

分析表 8 可以看出, 本文方法对 1、2 号样本岩爆预测主要为弱岩爆, 可能发生中级岩爆, 较实际岩爆发生情况、可拓理论预测结果和 Russenes 判据结果稍低, 其他判据结果基本与可拓理论预测结果、Russenes 判据结果和实际情况岩爆级别相符合且更偏于安全, 在岩爆判定结果中基本包括了实际岩爆发生的级别, 由此说明本文方法在岩爆预测方面具有一定的准确性。然而实际工程中, 岩爆的发生级别并不是仅仅依据几个有限的力学参数而被惟一确定的, 由于岩爆受地质构造、应力环境、施工方式等影响而表现出一定的动力复杂性, 岩爆级别往往在主要判定级别附近出现波动。根据本文提出的基于 FCM 算法粗糙集理论的云模型岩爆判据理论, 根据综合确定度的大小可以很好地判断岩爆主要发生级别和可能发生级别, 体现了岩爆判据的模糊性和不确定性。例如, 根据秦岭 1、2 号岩爆工程的综合确定度其排序为: $\Omega(II) > \Omega(III) > \Omega(IV) > \Omega(I)$, 且后两者的综合确定度几乎为 0, 故而可以判定为该岩爆虽然属于 II 类岩爆, 但不排除发生 III 类岩爆的可能。而对于 6 号岩爆工程而言, 虽然综合确定度排序为: $\Omega(III) > \Omega(IV) > \Omega(II) > \Omega(I)$, 但后 3 者综合确定度几乎为 0, 因此, 该岩爆属于 III 类岩爆, 几乎不存在其他岩爆形式, 其他情况类似, 不

再赘述。

5 结 论

(1) 针对岩爆评价中难以综合考虑评价指标的随机性和模糊性的问题, 本文引入云模型进行定性与定量转化, 即将岩爆级别的定性描述和岩爆级别所对应的评价指标取值区间的定量数值转化为云模型特征值。

(2) 在正态分布和模糊数学的基础上, 通过算法生成样本对概念的隶属度函数, 弥补了主观确定隶属度函数的缺陷。

(3) 粗糙集理论在发现关键属性和属性重要性评价方面有着很好的处理能力, 本文立足国内外 40 例已发生岩爆实例数据, 利用基于 FCM 算法的粗糙度理论计算各指标权重值, 与传统主观赋权和客观赋权形成鲜明对比, 为权重计算提供了新的途径。

(4) 本文方法与可拓理论预测法、Russenes 判据法和实际情况进行对比, 发现本文方法具有一定的可行性, 判别结果包括实际发生的所有岩爆情况。同时根据综合确定度可以为岩爆发生的主要级别及其有可能发生的级别提供理论依据。

岩爆是一种复杂的动力失稳现象, 不论采取何种方法, 若要对其准确预测及评价均存在很大困难。本文将基于 FCM 算法粗糙集理论的云模型应用于岩爆倾向性评价中还只是初步尝试, 有些问题仍然需要深入研究。譬如, 文中隶属度函数是基于各评价指标服从正态分布而提出的, 对不服从正态分布的指标预测精度会降低; 本文权重计算完全基于以往发生岩爆资料基础上提出的, 故对原始数据准确度有较高要求。

参 考 文 献

- [1] 徐桂生, 王兰生, 李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 300—303.
XU Gui-sheng, WANG Lan-sheng, LI Yong-lin. Study on mechanism and judgment of rock bursts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 300—303.
- [2] 齐庆新, 陈尚本, 王怀新, 等. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1852—1858.
QI Qing-xin, CHEN Shang-ben, WANG Huai-xin, et al. Study on the relations among coal bump, rockburst and mining tremor with numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1852—1858.
- [3] 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 Bing-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2034—2042.
- [4] 姜彤, 黄志全, 赵彦彦. 动态权重灰色归类模型在南水北调西线工程岩爆风险评估中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1104—1108.
JIANG Tong, HUANG Zhi-quan, ZHAO Yan-yan. Dynamically weighted grey optimization model for rockburst risk forecasting and its application to western route of South-North Water Transfer Project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(7): 1104—1108.
- [5] 徐飞, 徐卫亚. 岩爆预测的粒子群优化投影寻踪模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 3(5): 718—723.
XU Fei, XU Wei-ya. Projection pursuit model based on particle swarm optimization for rock burst prediction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 3(5): 718—723.
- [6] 张乐文, 张德永, 李术才, 等. 基于粗糙集理论的遗传-RBF 神经网络在岩爆预测中的应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 270—276.
ZHANG Le-wen, ZHANG De-yong, LI Shu-cai, et al. Application of RBF neural network to rockburst prediction based on rough set theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.1): 270—276.
- [7] 王吉亮, 陈剑平, 杨静, 等. 岩爆等级判定的距离判别分析方法及应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2203—2208.
WANG Ji-liang, CHEN Jian-ping, YANG Jing, et al. Method of distance discriminate analysis for determination of classification of rock burst[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2203—2208.
- [8] 王斌, 李夕兵, 马春德, 等. 基于三维地应力测量的岩爆预测问题研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 849—854.
WANG Bin, LI Xi-bing, MA Chun-de, et al. Study of forecast of rock burst based on three-dimensional in-situ stress measurement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 849—854.
- [9] 彭琦, 张茹, 谢和平, 等. 基于 AE 时间序列的岩爆预测模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1436—1440.
PENG Qi, ZHANG Ru, XIE He-ping, et al. Prediction model for rock burst based on acoustic emission time series[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1436—

- 1440.
- [10] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHANG Wen-xiu, WU Wei-zhi, LIANG Ji-ye, et al. Rough set theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [11] PAWLAK Z. Rough sets[J]. **International Journal of Computer and Information Science**, 1982, 11(5): 341—356.
- [12] BEZDEK J C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms[M]. New York: Plenum Press, 1981.
- [13] 于怀昌, 刘汉东, 余宏明, 等. 基于 FCM 算法的粗糙集理论在边坡稳定性影响因素敏感性分析中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1889—1894.
- YU Huai-chang, LIU Han-dong, YU Hong-ming, et al. Application of rough set to sensitivity analysis of influencing factors for slope stability based on FCM algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1889—1894.
- [14] 李德毅, 杜鹁. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- LI De-yi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2005.
- [15] 岳训, 孙忠林, 张艳琦, 等. 基于云模型的 Web 日志数据挖掘技术[J]. 计算机应用研究, 2001, (11): 113—116.
- YUE Xun, SUN Zhong-lin, ZHANG Yan-qi, et al. Data mining technology in web logs based on the cloud model[J]. **Application Research of Computers**, 2001, (11): 113—116.
- [16] 张秋文, 章永志, 钟鸣. 基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 87—95.
- ZHANG Qiu-wen, ZHANG Yong-zhi, ZHONG Ming. A cloud model based approach for multi-hierarchy fuzzy comprehensive evaluation of reservoir-induced seismic risk[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2014, 45(1): 87—95.
- [17] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493—501.
- WANG Yuan-han, LI Wo-dong, LEE P K K, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(5): 493—501.
- [18] 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 Guo-wei. Study on rockburst prediction method based on the prior knowledge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 429—431.
- [19] 张永习. 可拓综合评判在某水工隧洞岩爆等级评价中的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(2): 58—63.
- ZHANG Yong-xi. Application of extensible comprehensive evaluation for rockburst prediction in a hydro-tunnel[J]. **Journal of Shandong University (Engineering Science)**, 2012, 42(2): 58—63.
- [20] 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, 32(8): 1520—1527.
- SHANG Yan-jun, ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Analysis of three parameters for strain mode rockburst and expression of rockburst potential[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1520—1527.
- [21] 黄海生, 王汝传. 基于隶属云理论的主观信任评估模型研究[J]. 通信学报, 2008, 29(4): 13—19.
- HUANG Hai-sheng, WANG Ru-chuan. Subjective trust evaluation model based on membership cloud theory[J]. **Journal on Communications**, 2008, 29(4): 13—19.
- [22] 谢立军, 朱智强, 孙磊, 等. 基于隶属度理论的云服务行为信任评估模型研究[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(4): 1051—1054.
- XIE Li-jun, ZHU Qiang, SUN Lei, et al. Research on behavior trust evaluation model of cloud service based on membership theory[J]. **Application Research of Computers**, 2013, 30(4): 1051—1054.
- [23] 李健, 汪明武, 徐鹏, 等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 83—87.
- LI Jian, WANG Ming-wu, XU Peng, et al. Classification of stability of surrounding rock using cloud model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(1): 83—87.