

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.026

基于 DEMATEL-SEWM 云模型的 露天矿爆破效果评价方法及应用*

柯丽华^{1,2}, 陈魁香^{1,2}, 张光权^{1,2}, 谭 铭³, 胡南燕^{1,2}, 孟欢欢^{1,2}

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 武汉 430081; 2. 湖北省工业安全工程技术研究中心, 武汉 430081;
3. 武钢资源集团 乌龙泉矿业有限公司, 武汉 430213)

摘要: 为了更好地处理爆破效果评价中语言模糊性和评价等级定量分析随机性, 建立了基于 DEMATEL-SEWM 的露天矿爆破效果云模型评价方法。运用 DEMATEL(决策实验室分析法)和 SEWM(结构熵权法), 计算爆破效果评价指标的权重系数, 客观反映了指标之间相互关联和指标权重判断差异程度对指标权重的影响。利用云模型特征值 E_x 、 E_n 和 H_x , 客观地描述了爆破效果评价过程中随机性和模糊性。考虑各类指标权重的影响, 分析爆破效果综合隶属程度, 依据最大隶属度原则确定露天矿爆破效果的评价等级, 较好地实现爆破效果评价中定性概念模糊随机性的定量直观表征。运用该模型对某露天矿爆破效果进行了评价, 结果表明: 各个指标的混合权重分别为 0.101、0.102、0.154、0.163、0.128、0.112、0.132、0.107, 由权重的大小可知, 炸药单耗、大块率和振动速度三个指标对爆破效果影响较大; 炸药单耗的原因度为 1.2961, 其他指标的原因度均小于零, 炸药单耗为原因要素, 是改善爆破效果的关键要素; 四次爆破效果的综合隶属度分别为 0.358、0.339、0.360、0.469, 评价等级均为较好以上, 评价结果与实际情况相符, 验证了该模型在爆破效果评价中的有效性与可行性。

关键词: 露天矿; 爆破效果评价; 决策实验室分析法(DEMATEL); 结构熵权法(SEWM); 云模型

中图分类号: TD804 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0172-07

Evaluation Method and Application of Open-pit Mine Blasting Effect based on Dematel-SeWM Cloud Model

KE Li-hua^{1,2}, CHEN Kui-xiang^{1,2}, ZHANG Guang-quan^{1,2}, TAN Ming³,
HU Nan-yan^{1,2}, MENG Huan-huan^{1,2}

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and
Technology, Wuhan 430081, China; 2. Industrial Safety Engineering Technology
Research Center of Hubei Province, Wuhan 430081, China;
3. Wulongquan Corporation Limited, WISCO Resources Group, Wuhan 430213, China)

Abstract: In order to better deal with the fuzziness of language and randomness of quantitative analysis of evaluation grade in blasting effect evaluation, a cloud model evaluation method for open-pit mine blasting effect was established based on DEMATEL-SEWM. DEMATEL(Decision Laboratory Analysis Method) and SEWM(Structural Entropy Weight Method) are used to calculate the weight coefficient of blasting effect evaluation indexes, which objectively reflects the influence of the correlation among indexes and the difference degree of index weight judgment. The randomness and fuzziness of blasting effect evaluation are objectively described by using cloud model eigenvalues, such as Expected Value E_x , Entropy E_n and Excess Entropy H_x . Considering the influence of various index weights, the comprehensive membership degree of blasting effect is analyzed and the evaluation grade of blasting effect of open-pit mine is determined according to the principle of maximum membership degree, so as to better realize the

quantitative visual representation of fuzzy randomness of qualitative concept in blasting effect evaluation. The model was applied to evaluate the blasting effect of an open-pit mine, and the results showed that the mixed weights of each index are 0.101, 0.102, 0.154, 0.163, 0.128, 0.112, 0.132, 0.107, respectively. According to the weight, it can be known that the powder factor, the big block percentage and the vibration velocity have a great influence on the blasting effect. The cause degree of the powder factor is 1.2961 and the cause degrees of other indicators are negative. Therefore, the powder factor is the reason element which is the key factor to improve the blasting effect. The comprehensive membership degrees of the four blasting effects are 0.358, 0.339, 0.360 and 0.469, respectively. Meanwhile, the evaluation grades of the four evaluation results are all above good, which are consistent with the actual situation and verified the effectiveness and feasibility of the model in blasting effect evaluation.

Key words: open-pit mine; blasting effect evaluation; decision laboratory analysis method (DEMATEL); structural entropy weight method (SEWM); cloud model

爆破效果的好坏,对提高采装工作效率和矿山经济效益有着重要影响^[1]。采用合适的评价方法对爆破效果进行系统综合评价,可为爆破设计参数优化和矿山安全生产措施的制定提供重要的决策依据。

爆破效果评价工作是典型的不确定性决策问题。目前,通常采用未确知测度理论^[2,3]、可拓物元模型^[4-6]、灰色理论^[7]、模糊数学等方法对爆破效果评价中的随机性或模糊性进行综合处理^[8]。雷振等针对爆破效果评价等级定量分级的随机不确定性^[2],利用未确知测度理论建立台阶爆破效果的置信度识别模型,对遵义市某平场工程山体爆破效果分级评价,为台阶爆破参数的优化提供了理论依据。朱必勇利用未确知测度理论和熵权法^[3],对某石灰石露天矿台阶爆破效果进行分析,为矿山爆破方案优选提供了决策依据,较好处理了爆破效果评价等级定量分级的不利影响。张建华等引入可拓理论方法对黄麦岭磷矿的台阶爆破效果进行了综合评价^[5],客观反映了各个指标隶属于不同评价等级的程度。江文武等从矿岩破碎质量、经济效益和环境影响等三方面^[6],建立基于物元模型的爆破效果评价方法,对鞍山铁矿台阶爆破效果进行优化分析,有效解决模糊判断的定量化问题和验证了物元可拓评价方法的有效性。张阳光等为改善爆破效果^[7],采用灰色关联法分析了影响爆破效果指标的主次关系,识别出主要优化爆破参数。段军等针对爆破参数和爆破效果之间模糊性和复杂性^[8],结合采用模糊综合评价理论和融合权重方法,对爆破方案的爆破效果进行了综合分析,优选最佳爆破方案。可见,

众多学者采用不同的方法对爆破效果评价中存在的随机或模糊性进行综合处理,取得了一定的成效。但是,由于爆破工作现场条件的复杂性,环境因素变化具有较大的不确定性,爆破效果评价过程中专家意见的模糊性和评价等级定量分级的随机性并存,都容易影响爆破效果评价的有效性。同时,研究者往往弱化或忽略指标之间相互关系对爆破效果评价的重要影响,不利于全面反映爆破效果评价的客观情况,也无法锁定有效改善爆破效果的关键要素。虽然也有研究者开始关注爆破效果影响因素的敏感性分析^[7],但基于评价指标相互影响关系之间的关联性对爆破效果评价结果的影响研究鲜见。

为此,针对爆破效果评价中语言模糊性和评价等级定量分级随机性并存的状态,采用统计分析方法梳理并建立典型爆破效果评价指标系统,构建了基于决策实验室分析法 (DEMATEL) 和结构熵权法 (SEWM) 的指标混合权重的计算方法,通过建立指标综合影响矩阵、计算平均认识度和认识盲度以客观描述爆破效果评价指标之间关联性和反映专家组对指标重要度判断的差异程度,并根据原因度 R_i 分析指标属性以锁定改善爆破效果评价的关键原因要素;利用云模型确定爆破效果评价指标分级的期望值 Ex_{ii} 、熵 En_{ii} 和超熵 He_{ii} ,经过 X 条件云发生器的综合处理,确定各评价指标隶属不同评价等级的隶属度 μ_{ii} ,按隶属度最大原则确定爆破效果等级,不仅直观定量表征爆破效果评价中的模糊性和随机性,也为客观分析爆破效果提供有效方法。

1 露天矿爆破效果评价指标及分级

影响露天矿爆破效果的因素众多,从爆破安全、爆破质量及经济效益等三个方面,查阅国内外相关文献^[2,3,9,10],选取了飞石距离、振动速度及延米爆破量等8个典型影响因素作为露天矿爆破效果评价指标,将各评价指标分为“非常差、差、较好、

收稿日期:2022-01-11

作者简介:柯丽华(1974-),女,湖北鄂州人,教授、博士,硕士研究生导师,从事矿业系统优化与决策研究,(E-mail) 413404880@qq.com。

通讯作者:张光权(1981-),男,湖北荆州人,副教授、博士,硕士研究生导师,从事矿山企业管理、爆破安全技术研究,(E-mail) zhanggq@wust.edu.cn。

基金项目:湖北省重点研发计划项目(编号:2020BCA082)

好、很好”五级,各指标等级及其范围值见表1。其中,松散系数、爆堆形态和延米爆破量为极大型指标,其他指标为极小型指标。飞石距离由实际测量确定;炸药单耗、松散系数、根底率、延米爆破量等信

息由现场资料和爆破相关参数计算确定;大块率和振动速度分别采用块度分析软件和爆破振动仪确定;爆堆形态由专家根据爆破形态的集中程度和爆堆高度综合确定。

表1 各指标评价等级及范围

Table 1 Evaluations level and scopes of indexes

	非常差	差	较好	好	很好
飞石距离/m	[165-200]	[125-165)	[85-125)	[45-85)	[0-45)
爆堆形态/分	[0-6)	[6-7)	[7-8)	[8-9)	[9-10]
大块率/%	[6-9]	[4-6)	[2-4)	[1-2)	[0-1)
炸药单耗/(kg·m ⁻³)	[1.50-1.8]	[1.20-1.50)	[0.9-1.20)	[0.6-0.9)	[0.30-0.6)
松散系数/%	[1.0-1.1)	[1.1-1.2)	[1.2-1.3)	[1.3-1.4)	[1.4-1.5]
根底率/%	[0.4-0.5]	[0.3-0.4)	[0.2-0.3)	[0.1-0.2)	[0-0.1)
振动速度/(cm·s ⁻¹)	[2.5-5]	[1.5-2.5)	[1-1.5)	[0.5-1)	[0-0.5)
延米爆破量/(m ³ ·m ⁻¹)	[0-5)	[5-10)	[10-15)	[15-20)	[20-30]

2 DEMATEL-SEWM 混合权重算法

为更好地刻画各个指标在指标系统中的重要程度,构建指标相关影响矩阵,采用 DEMATEL 法计算指标中心度的大小,分析指标间相互关联程度对指标权重的影响,并采用 SEWM 法对指标重要性排序进行分析,综合专家组对指标重要度判断的共同意见和差异程度,进而建立基于 DEMATEL-SEWM 混合权重算法,其步骤如下:

(1) 构建指标相关影响矩阵

由于爆破效果评价是典型的多指标群决策综合评价问题,因此,客观地反映各位专家对各指标权重大小的意见并对其进行有效综合处理至关重要。故建立指标集为 $V = \{V_i\} (i=1, 2, \dots, n)$, 评价指标值为 v_i , 专家组成的集合为 $P = \{P_s\} (s=1, 2, \dots, k)$ 。

采用 DEMATEL 方法建立指标综合影响矩阵。考虑评价指标间相互影响,由各专家按照 5 位标度法建立矩阵 $Y^{(s)} = [y_{ij}^{(s)}]_{n \times n}$, 以反映第 s 位专家对任意两个指标 V_i 和 V_j 间相互影响的判断。 $y_{ij}^{(s)}$ 取值范围为 0~4, 其中,0 表示指标间无影响,1 表示指标间影响微小,2 表示指标间影响较小,3 表示指标间影响明显,4 表示指标间影响强烈。需要说明的是,指标本身不作比较,赋值为 0。按式(1)综合处理各专家对任意两个指标 V_i 和 V_j 之间影响关系的意见,建立矩阵 $Y = [y_{ij}]_{n \times n}$ 。

$$y_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{s=1}^k y_{ij}^{(s)} \quad (1)$$

(2) 基于指标中心度的权重确定

按式(2)~式(4)对矩阵 Y 进行标准化处理,确定指标标准化影响关系矩阵 Y^* 和指标综合关系矩

阵 $T = [t_{ij}]_{n \times n}$, 进而根据式(5)~式(7), 计算指标综合关系矩阵 T 的参数,包括指标影响度 B_i 、指标被影响度 C_i 和指标中心度 M_i , 分别反映了指标 V_i 对其他指标的综合影响程度、指标 V_i 受其他指标综合影响程度和指标 V_i 在评价指标系统中的重要程度。按式(8)对指标中心度 M_i 归一化处理,计算指标影响权重集 $W^{(1)} = [w_i^{(1)}]$ 。可进一步依据式(9),计算指标 V_i 原因度 R_i ,分析指标 V_i 是否为原因要素或结果要素。当原因度 $R_i > 0$ 时,要素 R_i 为原因要素,否则为结果要素。

$$\lambda = \sqrt{[\max_{1 \leq j \leq n} (\sum_{j=1}^n y_{ij})]^2 + [\max_{1 \leq i \leq n} (\sum_{i=1}^n y_{ij})]^2} \quad (2)$$

$$Y^* = \frac{1}{\lambda} Y \quad (3)$$

$$T = Y^* (I - Y^*)^{-1} \quad (I \text{ 为单位矩阵}) \quad (4)$$

$$B_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$M_i = B_i + C_i \quad (7)$$

$$w_i^{(1)} = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (8)$$

$$R_i = B_i - C_i \quad (9)$$

(3) 混合权重算法

采用 SEWM 方法确定指标权重,其步骤为:邀请 k 位专家对 n 个指标进行重要性排序,建立矩阵 $A = [a_{pi}]_{k \times n} (p=1, 2, \dots, k; i=1, 2, \dots, n)$, 反映第 p 个专家对指标 V_i 重要程度的判断;按式(10)对矩阵 A 进行处理,确定矩阵 $D = [d_{pi}]_{k \times n}$;按式(11)~

(12) 计算指标 V_i 的平均认识度 d_i 和认识盲目度 Q_i , 分别反映专家组对指标 V_i 重要度判断的共同意见和差异程度; 进而按式(13)~式(14)确定指标的权重集 $W^{(2)} = [w_i^{(2)}]$, 较好地反映了专家组对指标重要性判断差异带来的影响。

考虑指标间相互影响关系, 利用指标影响权重集 $W^{(1)}$ 和指标权重集 $W^{(2)}$, 建立基于 DEMATEL-SEWM 混合权重算法, 如式(15)所示, 计算各指标混合权重集 $W = [w_i]$, 客观反映了指标间相互关联、专家组意见差异对权重大小的影响。

$$d_{pi} = \frac{\log_{10}(m - a_{pi})}{\log_{10}(m - 1)} \quad (m \text{ 为转化参数量, } m = n + 2) \quad (10)$$

$$d_i = (d_{1i} + d_{2i} + \dots + d_{ki})/k \quad (11)$$

$$Q_i = \frac{[\max(d_{1i} + d_{2i} + \dots + d_{ki}) - d_i]}{2} + \frac{[\min(d_{1i} + d_{2i} + \dots + d_{ki}) - d_i]}{2} \quad (12)$$

$$\rho_i = d_i(1 - Q_i) \quad (13)$$

$$w_i^{(2)} = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i} \quad (14)$$

$$W = \alpha W^{(1)} + (1 - \alpha) W^{(2)} \quad (\alpha \text{ 取 } 0.5) \quad (15)$$

3 爆破效果云模型评价方法

3.1 爆破效果评价问题及模型化

爆破效果待评方案集为 $A = \{A_t\} (t = 1, 2, \dots, q)$, 指标集为 $V = \{V_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$, 评价指标值为 v_i 。各个指标的权重集为 $W = \{W_i\}$, 指标权重为 w_i 。爆破效果评价评语集为 $G = \{g_l\}$, 根据评价需要确定评价等级数量, 各个指标 v_i 的各评价等级 g_l 的上下限分别为 g_{il}^{\min} 和 g_{il}^{\max} 。专家集为 $P = \{P_s\} (s = 1, 2, \dots, k)$ 。

按照云模型方法, 爆破效果评价的评语集 G 为论域, 各个评价等级 g_l 是论域上的定性概念, 可采用稳定倾向随机数 μ_{il} 反映各指标 v_i 隶属于各评价等级 g_l 的程度, 形成云滴 $drop(v_i, \mu_{il})$, 进而建立爆破效果各评价指标等级的正态云模型。根据各评价指标等级区间上下限值 g_{il}^{\min} 和 g_{il}^{\max} 的大小, 计算评价指标等级正态云模型的期望值 Ex_{il} 、熵 En_{il} 和超熵 He_{il} 等特征值。期望值 Ex_{il} 反映爆破效果评价指标 v_i 隶属等级 g_l 的最典型样本值。熵 En_{il} 反映了爆破效果评价等级 g_l 内涵的随机性, 超熵 He_{il} 反映了爆破效果评价模糊性的凝聚程度。熵 En_{il} 和超熵 He_{il}

越小, 则评价过程中随机不确定性和离散程度越小。

根据云模型算法中正向云发生器、逆向云发生器、 X 条件云发生器和 Y 条件云发生器的特点^[11], 结合爆破效果评价分析的需要, 按 X 条件云发生器要求输入评价指标等级正态云模型的期望值 Ex_{il} 、熵 En_{il} 和超熵 He_{il} 等特征值和爆破效果评价指标值 v_i 的大小, 如图 1 所示, 进而确定爆破效果各类评价指标隶属各评价等级的隶属度 μ_{il} 。

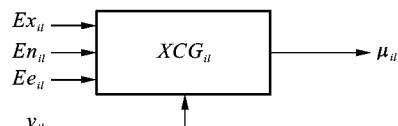


图 1 指标 V_i 在第 g_i 等级隶属度的计算方法图

Fig. 1 The membership degree calculation method of index V_i in the grade g_i

3.2 露天矿爆破效果评价方法的基本步骤

针对爆破效果评价中语言模糊性和评价等级定量分析随机性并存的问题, 采用云模型方法的期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He 等特征参数来客观描述爆破效果评价过程的状态特点, 建立露天矿爆破效果评价方法步骤:

(1) 指标体系建立及指标云模型构建

从爆破安全、爆破质量、矿山经济效益三个方面选取了飞石距离等八个典型指标, 构建了露天矿爆破效果评价指标体系, 并将指标进行分级及赋值, 如表 1 所示。根据露天矿爆破效果评价指标等级划分情况及等级赋值范围, 按式(16)~式(18)计算各指标各个评价等级 g_l 的数字特征^[12], 主要包括期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He , 利用 MATLAB 软件绘制评价指标标准云。

$$Ex_{il} = \frac{g_{il}^{\min} + g_{il}^{\max}}{2} \quad (16)$$

$$En_{il} = \frac{g_{il}^{\max} - g_{il}^{\min}}{2\sqrt{2} \ln 2} \quad (17)$$

$$He_{il} = \beta \quad (18)$$

超熵 He_{il} 取常数值, 具体数值根据评价对象进行确定, 本文将所有超熵值取为 0.01。

(2) 指标混合权重的确定

为了更好地反映指标间相互关联、专家组意见差异对权重大小的影响, 利用 DEMATEL-SEWM 混合权重算法, 按式(1)~(15)计算各指标混合权重集 W 。

(3) 各指标隶属度 μ_{il} 的确定

利用 X 条件云发生器, 确定指标 V_l 在 l 等级的隶属度 μ_{il} 。输入指标 V_l 的各评价等级 g_i 云模型特征参数 Ex_{il} 、 En_{il} 、 He_{il} 和指标值 v_i , 设定云滴数为 3000, 获取各指标隶属度 μ_{il} 。

(4) 爆破效果评价

考虑爆破评价指标权重的影响, 按式(19)计算爆破效果综合隶属度 μ_i , 反映每次爆破状态隶属各评价等级 g_i 的程度, 进而按最大隶属度准则确定露天矿爆破效果的好坏。

$$\mu_i = \sum_{i=1}^n \mu_{il} w_i (i = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, 5) \tag{19}$$

4 应用实例

4.1 露天矿基本情况

某露天石灰石矿开采条件较复杂, 具有“断层多且分布广”、“工业品级多样”、“矿床内岩溶、裂隙较为发育”、“夹层多”等特征。矿床工程地质条件类型为中等类型, 矿区地质环境条件为复杂类型。根据多次单轴压缩实验可知, 爆破区域岩石单轴抗压强度为 12.28 MPa, 抗拉强度 1.76 MPa, 点荷载强度 0.88 MPa。四次台阶爆破处于同一水平面, 台阶高度 12.5 m, 孔径为 115 mm, 采用 2 号岩石乳化炸药, 逐孔顺序起爆。每次爆破数据采集情况如表 2 所示。

表 2 四次爆破效果各评价指标调查统计值

Table 2 Survey statistics of evaluation index about the four blasting effects

爆破编号	飞石距离 (V_1)	爆堆形态 (V_2)	大块率 (V_3)	炸药单耗 (V_4)	松散系数 (V_5)	根底率 (V_6)	振动速度 (V_7)	延米爆破量 (V_8)
第 1 次爆破	74.30	8.20	0.60	0.51	1.30	0.16	1.11	8.84
第 2 次爆破	82.50	8.50	2.06	0.56	1.47	0.24	1.27	7.42
第 3 次爆破	61.50	9.00	0.11	0.69	1.21	0.18	1.40	7.21
第 4 次爆破	64.80	8.60	1.48	0.41	1.37	0.27	1.84	7.22

4.2 爆破效果评价

通过组织专家从研究目的出发, 量化系统中各指标之间的逻辑关系, 通过式(1)~(4)建立综合影

响矩阵 T , 并计算指标影响度 B_i 、指标被影响度 C_i 、指标中心度 M_i 和指标原因度 R_i , 见表 3~表 4, 进一步绘制指标间因果关系图以分析指标属性, 见图 2。

表 3 爆破效果评价指标综合影响矩阵 T

Table 3 Comprehensive influence matrix T of blasting effect evaluation index

	飞石距离 (V_1)	爆堆形态 (V_2)	大块率 (V_3)	炸药单耗 (V_4)	松散系数 (V_5)	根底率 (V_6)	振动速度 (V_7)	延米爆破量 (V_8)
V_1	0.0047	0.0555	0.0530	0.0000	0.0535	0.0026	0.0069	0.0487
V_2	0.0024	0.0087	0.0466	0.0000	0.0469	0.0022	0.0044	0.0045
V_3	0.0485	0.1002	0.0157	0.0000	0.0598	0.0047	0.0492	0.0512
V_4	0.1566	0.1954	0.1820	0.0000	0.2030	0.1482	0.2064	0.2129
V_5	0.0069	0.1003	0.0557	0.0000	0.0200	0.0466	0.0510	0.0513
V_6	0.0050	0.0583	0.0138	0.0000	0.0998	0.0066	0.0509	0.0511
V_7	0.0489	0.0648	0.0583	0.0000	0.1045	0.0485	0.0116	0.0553
V_8	0.0507	0.0665	0.1000	0.0000	0.1028	0.0068	0.0532	0.0136

表 4 评价指标的中心度 M_i 和原因度 R_i

Table 4 Centrality M_i and Reason R_i of the evaluation index

	飞石距离 (V_1)	爆堆形态 (V_2)	大块率 (V_3)	炸药单耗 (V_4)	松散系数 (V_5)	根底率 (V_6)	振动速度 (V_7)	延米爆破量 (V_8)
中心度 M_i	0.5481	0.7599	0.8511	1.2961	0.9634	0.4910	0.8198	0.8792
原因度 R_i	-0.0988	-0.5287	-0.1929	1.2961	-0.3051	-0.0364	-0.0416	-0.0925

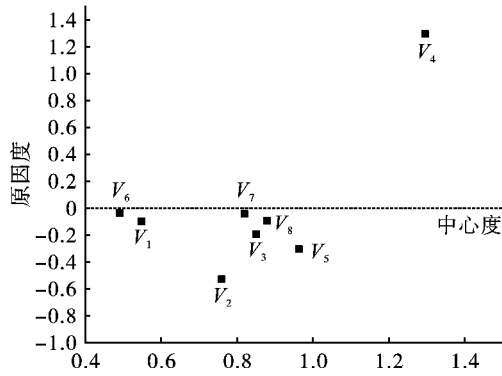


图 2 指标因果关系图

Fig. 2 Indicator causality diagram

根据式(5)~式(15)计算各指标混合权重系数,见表 5。

通过式(16)~(18)获得各指标各个评价等级 g_i 云模型的数字特征及标准云,因篇幅所限, 仅展

示根底率标准云图,如图 3 所示。输入指标 V_i 的各评价等级 g_i 云模型特征参数 Ex_{g_i} 、 En_{g_i} 、 He_{g_i} 和指标值 v_i ,按式(19)计算四次爆破效果的综合隶属度 μ_i ,结果如表 6 所示。

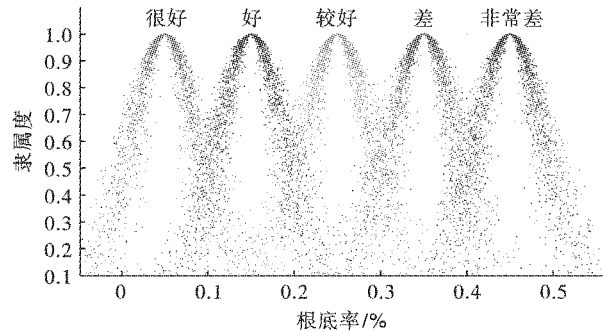


图 3 根底率标准云图

Fig. 3 Standard cloud chart of root rate

表 5 各指标混合权重

Table 5 Mixed weights of various indexes

权重	飞石距离 (V_1)	爆堆形态 (V_2)	大块率 (V_3)	炸药单耗 (V_4)	松散系数 (V_5)	根底率 (V_6)	振动速度 (V_7)	延米爆破量 (V_8)
$W^{(1)}$	0.120	0.090	0.180	0.130	0.110	0.150	0.140	0.080
$W^{(2)}$	0.083	0.115	0.129	0.196	0.146	0.074	0.124	0.133
W	0.101	0.102	0.154	0.163	0.128	0.112	0.132	0.107

表 6 四次爆破效果的综合隶属度 μ_i

Table 6 Comprehensive membership degree μ_i of four blasting effects

爆破编号	分级等级				
	非常差	差	较好	好	很好
第 1 次爆破	0.008	0.088	0.205	0.358	0.295
第 2 次爆破	0.010	0.128	0.339	0.251	0.211
第 3 次爆破	0.010	0.179	0.194	0.360	0.148
第 4 次爆破	0.021	0.242	0.122	0.469	0.183

由表 4 可知,依照指标中心度 M_i 大小对指标重要性排序为 $V_4 > V_5 > V_8 > V_3 > V_7 > V_2 > V_1 > V_6$,炸药单耗的原因度为 1.2961,其他指标的原因度小于 0,故炸药单耗 V_4 为原因要素,其他指标均为结果要素,说明炸药单耗在指标体系中处于核心地位,可通过对炸药单耗的调整获得更好的爆破效果。

各个指标的混合权重分别为 0.101、0.102、0.154、0.163、0.128、0.112、0.132、0.107,指标的混合权重越大,则表明该指标与其他指标的综合关联程度越大,故对爆破效果影响越大;因此,炸药单耗、大块率和振动速度等三个指标对爆破效果影响较大。四次爆破效果的最大隶属度分别为 0.358、0.339、0.360、0.469,根据最大隶属度原则,评价结

果依次是“好、较好、好、好”,与实际情况相符,验证了本评价方法在爆破效果评价中的可行性。

5 结论

(1) 构建了基于 DEMATEL-SEWM 的混合权重算法,既考虑了指标间相互关联程度对指标权重的影响,也客观地反映了专家组对指标权重判断差异程度带来的影响,为确定爆破效果指标的属性提供了有效方法。通过爆破评价效果评价指标的混合权重和原因度可知,炸药单耗、大块率和振动速度等三个指标对爆破效果影响较大,且炸药单耗为原因要素,通过改变炸药单耗量可使爆破效果显著提升。

(2) 建立了基于 DEMATEL-SEWM 云模型的爆

破效果评价方法,客观地描述了爆破效果评价指标的典型样本值和爆破效果评价等级 g_i 内涵的随机性和模糊性的程度;利用云模型 X 条件云发生器并考虑各类指标权重的影响,分析各指标隶属不同评价等级的隶属程度,提高了爆破效果评价的有效性和客观性。利用该方法对某露天矿四次爆破效果进行分析,确定该矿四次爆破效果评价等级均为较好以上,评价结果与实际情况相符。

参考文献 (References)

- [1] 陈庆凯,孙俊鹏,李松鹏,等. 基于高速摄影的露天矿山爆破效果评价[J]. 爆破,2012,29(3):31-34.
- [1] CHEN Qing-kai, SUN Jun-peng, LI Song-peng, et al. Evaluation of blasting effect in open-pit mine based on high-speed photography[J]. Blasting,2012,29(3):31-34. (in Chinese)
- [2] 雷 振,杨仁树,陶铁军. 基于未确知测度理论的台阶爆破效果综合评价[J]. 煤炭学报,2015,40(2):353-359.
- [2] LEI Zhen, YANG Ren-shu, TAO Tie-jun. Comprehensive evaluation of bench blasting effect based on unascertained measure theory[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(2):353-359. (in Chinese)
- [3] 朱必勇. 基于未确知测度理论的露天矿深孔爆破效果评价[J]. 爆破,2015,32(1):141-145.
- [3] ZHU Bi-yong. Evaluation of the effect of deep-hole blasting in open-pit mine based on unascertained measure theory[J]. Blasting,2015,32(1):141-145. (in Chinese)
- [4] 王训洪,郑明贵. 基于 AG-AHP 和物元模型的爆破效果评价研究[J]. 爆破,2015,32(4):162-167.
- [4] WANG Xun-hong, ZHENG Ming-gui. Evaluation of blasting effect based on AG-AHP and matter element model [J]. Blasting,2015,32(4):162-167. (in Chinese)
- [5] 张建华,李泽安,周乐静怡. 矿山爆破效果的拓学评价[J]. 金属矿山,2015(11):33-36.
- [5] ZHANG Jian-hua, LI Ze-an, ZHOU LE Jing-yi. Extension evaluation of mine blasting effect [J]. Metal Mine, 2015(11):33-36. (in Chinese)
- [6] 江文武,廖明萍,郭 云,等. 基于物元模型的露天爆破效果评价[J]. 爆破,2016,33(1):137-141.
- [6] JIANG Wen-wu, LIAO Ming-ping, GUO Yun, et al. Evaluation of open-air blasting effect based on matter-element model[J]. Blasting,2016,33(1):137-141. (in Chinese)
- [7] 张阳光,李 强,林 飞,等. 基于灰色关联分析法的爆破效果影响因素敏感性分析[J]. 煤矿爆破,2020,38(4):12-15.
- [7] ZHANG Yang-guang, LI Qiang, LIN Fei, et al. Sensitivity analysis of influencing factors of blasting effect based on grey relational analysis method [J]. Coal Mine Blasting, 2020,38(4):12-15. (in Chinese)
- [8] 段 军,焦登铭,张轰玉,等. 融合权重和模糊综合在爆破方案优选中的应用[J]. 中国矿业,2020,29(12):176-182.
- [8] DUAN Jun, JIAO Deng-ming, ZHANG Hong-yu, et al. Application of fusion weight and fuzzy synthesis in optimization of blasting plan [J]. China Mining Industry, 2020,29(12):176-182. (in Chinese)
- [9] LIU M, LIU J, ZHEN M, et al. A Comprehensive evaluation method of bench blast performance in open-pit mine [J]. Applied sciences,2020,10(16):5398.
- [10] 张建华,夏岸雄,王 涛,等. 逐孔起爆爆破效果的模糊综合评价[J]. 爆破,2013,30(4):83-86.
- [10] ZHANG Jian-hua, XIA An-xiong, WANG Tao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the effect of hole-by-hole blasting [J]. Blasting,2013,30(4):83-86. (in Chinese)
- [11] 张艳琼,陈祖琴,苏新宁. 基于云模型的突发事件分级模型研究[J]. 情报学报,2015(1):76-84.
- [11] ZHANG Yan-qiong, CHEN Zu-qin, SU Xin-ning. Research on emergencies classification model based on cloud model [J]. Journal of Information,2015(1):76-84. (in Chinese)
- [12] 王志强,张樵民,吕云翔. 基于云模型的装配式混凝土建筑施工质量综合评价[J]. 混凝土,2020(3):138-141.
- [12] WANG Zhi-qiang, ZHANG Qiao-min, LV Yun-xiang. Comprehensive evaluation of construction quality of prefabricated concrete buildings based on cloud model [J]. Concrete, 2020(3):138-141. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页浏览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。