

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.005

基于组合赋权的台阶爆破效果灰聚类评估模型*

杜承磊¹,周传波¹,王凤喜²,刘磊²,殷欣³,陈仕钊¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院,武汉 430074;2. 中铁十六局集团第三工程有限公司,湖州 313000;

3. 武汉大学土木建筑工程学院,武汉 430072)

摘要: 台阶爆破效果评价是爆破生产过程中一个重要环节,直接影响到后续施工的效率。为了解台阶爆破效果,建立灰色聚类评估模型,利用混合中心点三角白化权函数,对灰色聚类法进行优化。根据台阶爆破的特点,选取大块率、松散系数、根底率、后裂距离、振动速度、飞散距离作为影响台阶爆破效果的评价指标。结合层次分析法和 CRITIC 分别对评价指标的主观权重和客观权重进行赋值,克服传统指标权重赋值主观性大和数据差异性敏感较大的问题;提出了一种基于离差平方和的最优组合赋权方法,建立台阶爆破效果评价的最优组合赋权-灰色聚类评估模型;以洪水台土石方平场工程项目4次深孔台阶爆破效果来检验模型的有效性和实用性,分析台阶爆破效果评价等级,确定逐孔起爆3.5 m间距为最优台阶爆破方案。

关键词: 台阶爆破;灰聚类评估模型;层次分析法;CRITIC;组合赋权

中图分类号: TD822

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2021)01-0028-08

Grey Clustering Evaluation Model of Bench Blasting Effect based on Combination Weighting

DU Cheng-lei¹, ZHOU Chuan-bo¹, WANG Feng-xi², LIU Lei², YIN Xin³, CHEN Shi-chao¹

(1. College of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. The 3th Construction Company Ltd. of China 16th Corporation, Huzhou 313000, China;

3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Bench blasting effect evaluation is an important link in the process of blasting production, which directly affects the efficiency of subsequent construction. In order to understand the effect of bench blasting, the grey clustering evaluation model was established and optimized by using the trigonometric whiten weight function of mixed center point. According to the characteristics of bench blasting, the boulder rate, loosening coefficient, root ratio, back crack distance, vibration velocity and flying distance were selected as the evaluation indices affecting bench blasting effect. Combining the analytic hierarchy process and the CRITIC method, subjective weights and objective weights of the evaluation indices were assigned respectively, which overcame the subjectivity of traditional index weight assignment and the sensitivity of data difference. An optimal combination weighting method based on the sum of squares of deviations was proposed, and the optimal combination weighting grey clustering evaluation model for bench blasting effect evaluation was established. The effectiveness and practicability of the model were tested by four deep hole bench blasts of Hongshuitai earthwork leveling project. In addition, the evaluation grade of bench blasting effect was analyzed, and hole-by-hole blasting with a spacing of 3.5 m was determined as the optimal bench blasting scheme.

Key words: bench blasting; grey clustering evaluation model; analytic hierarchy process; CRITIC; combination weighting method

随着爆破技术的发展,台阶爆破已广泛应用于露天矿山、铁路、公路以及水利水电等多个工程建设领域,其技术水平的高低决定了爆破生成的安全、质量和成本,因此在实际爆破工程中,准确、合理的对台阶爆破效果进行评价,寻找出最优的台阶爆破技术方案是十分必要的^[1,2]。

在台阶爆破生产中,爆破效果的评价是一个重要环节,根据一系列的评价指标,结合工程概况和相关爆破要求,对每一次爆破效果进行评估,找出其中的优点和不足,进而对爆破技术进行优化,使各项指标达到最优。近年来,学者们尝试用不同的方法对爆破效果进行综合评价。王长友等基于BP神经网络的基本原理,从岩石力学性质、周边爆破参数两方面建立爆破效果BP神经网络模型^[3]。韩新平等选取大块率、高尾矿率、根底等多指标,建立层次模糊综合评价模型,得出该矿最佳爆破方案^[4]。赵国彦、黄治成等利用层次分析法与模糊综合评价相结合的综合评价模型对井下中深孔爆破进行效果评价^[5]。胡新华等针对传统灰色关联分析模型权重分配主观性大,综合灰色关联理论和层次分析法,建立评价模型^[6]。陶铁军等针对爆破效果因素指标不确定性问题,建立未确知测度的爆破效果综合评价模型,结合某露天铁矿深孔台阶爆破实际情况,基于未确知测度理论进行效果评判^[7]。随着研究的不断深入,在采取不同的评价方法结合指标进行爆破效果综合评价时,指标权重的确定仍存在一些局限性。灰色关联分析、模糊数学分析、层次分析法等在确定指标权重时主观性较大,易受专家经验限制;未确知测度理论需专家经验作为知识补充,评价模型也存在主观误判性;BP神经网络模型结构复杂,受样本容量的影响;熵权法存在对指标的差异度敏感性较大的问题^[8]。

为合理确定台阶爆破效果评价指标权重,利用层次分析法和CRITIC相结合的赋权方法,将灰色聚类评估模型引入台阶爆破效果评价中。该模型通过混合中心点三角白化权函数,对灰色聚类法进行优化,并基于离差平方和最大的原则将主、客观权重相结合得到综合权重。研究表明:该模型的评价结果能客观反映台阶爆破效果的现场情况,为台

阶爆破效果评价提供了一种新途径。

1 灰色聚类评估模型

灰色聚类是利用灰色关联矩阵或灰色白化权函数将指标(对象)聚集分层成若干个类别的评估方法,是灰色系统理论的重要组成部分,它根据不同聚类指标所具有的白化权函数将聚类对象按已划分的灰类进行归纳,来判断该聚类对象的类别^[9]。

设有 n 个台阶爆破对象, m 个爆破指标, s 个不同的灰类,记第 i ($i=1, \dots, n$) 个对象关于 j ($j=1, \dots, m$) 指标的样本值为 x_{ij} ; j 指标 k 子类的白化权函数为 $f_j^k(x)$; j 指标关于 k 子类的权为 σ_j^k ; 对象 i 属于 k 灰类的灰色变权聚类系数为 φ_i^k 。其中

$$\varphi_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot \sigma_j^k \quad (1)$$

使用灰色聚类法时,需考虑评价指标数据的特点,避免白化权函数的多重交叉及不规范性,构造适用于台阶爆破各评价指标的中心点白化权函数,计算步骤如下:

(1) 给出 j 指标 k 子类白化权函数: $f_j^k(x)$ ($j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, s$);

(2) 构造测量值 x 属于 k 灰类的隶属度 $f_j^k(x)$, 并确定权重系数 σ_j^k ;

(3) 计算各指标权重并得出灰色变权聚类系数 φ_i^k ;

(4) 判断矿山爆破对象 i 属于灰类 k^* 的关系式满足

$$\varphi_i^{k^*} = \max_{1 \leq k \leq s} \{ \varphi_i^k \} \quad (2)$$

2 组合赋权

2.1 层次分析法

层次分析法(AHP)是20世纪70年代美国著名运筹学家Saaty提出的一种多准则决策方法^[10]。层次分析法具有解决复杂层次结构的多目标决策问题能力。该方法简单实用、易于计算分析,但不能为决策提供新方案,在构造比较判断矩阵时受设计人员主观判断的影响,不够客观全面。运用层次分析法确定权重的步骤如下。

建立判断矩阵。判断矩阵中的元素表示的是同一层次指标之间的相对重要性。设判断矩阵为 R , b_{ij} 为指标 b_i 较指标 b_j 的重要性比例标度,在指标进行两两比较时,采用1~9标度法,则判断矩阵的基本形式为

收稿日期:2020-11-28

作者简介:杜承磊(1994-),男,硕士研究生,主要从事地下建筑方面研究,(E-mail) clduuu@163.com。

通讯作者:周传波(1963-),男,安徽人,教授,主要从事地下爆破研究,(E-mail) cbzhou@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41807265、41972286);爆破工程湖北省重点实验室开放基金重点项(HKLBEF202001)

$$R = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

式中： n 是指标数目， $b_{ij} > 0$ ； $b_{ij} = 1/b_{ji}$ ； $b_{ii} = 1$ 。

(1) 计算各指标相对权重。权重计算的方法有两种，即几何平均法（根法）和规范列平均法（和法），本文采用几何平均法，求出判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} ，所对应的特征向量为 W ，对该向量进行归一化处理得到每个指标相应的权重。

(2) 一致性检验。为提高指标权重的科学性，在求得最大特征根 λ_{\max} 后，相继计算一致性指标 C_i 和一致性比例 C_R ，相关公式为

$$C_i = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$C_R = \frac{C_i}{RI} \quad (4)$$

式中： n 为判断矩阵阶数，当 $C_R < 0.1$ 时，判断矩阵具有良好的一致性，随机性一致表如表 1 所示。

表 1 随机一致性指标赋值标准

Table 1 Random consistency index assignment criteria

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

2.2 CRITIC 赋值法

CRITIC 法是由 Diakoulaki 在 1995 年提出的一种客观权重赋值法，其核心思想是利用指标的辨别力和指标间的冲突性来确定各指标权重^[11,12]。首先，指标的辨别力是指同一指标在不同样本中取值的范围，反映了指标所含信息量的大小，用标准差来度量指标的辨别力，标准差越大，说明其辨别力越强，所含信息量越多，相应的指标的权重越大；反之，标准差越小，说明其辨别力越弱，所含信息量越小，相应的指标的权重越小。其次，指标的冲突性是指各指标间相关性的 大小，一般用相关系数来度量指标冲突性的 大小，若指标间所含重复信息越多，则指标冲突性越小，相关系数越大，对应的指标权重就越小。其主要计算步骤可归纳如下：

(1) 建立原始数据矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$

(2) 对原始数据进行标准化处理

对属性值越大越好的效益型指标有

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j \{a_{ij}\}}{\max_j \{a_{ij}\} - \min_j \{a_{ij}\}} \quad (5)$$

对属性值越小越好的成本型指标有

$$b_{ij} = \frac{\max_j \{a_{ij}\} - a_{ij}}{\max_j \{a_{ij}\} - \min_j \{a_{ij}\}} \quad (6)$$

(3) 计算第 j 指标与其他指标的冲突性量化指标

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (7)$$

$$P_j = \sigma_j R_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中： r_{ij} 为评价指标 i 和 j 之间的相关系数； σ_j 为第 j 指标的标准差； P_j 为第 j 评价指标所包含的信息量， P_j 越大，包含信息量越大，该指标的相对重要性越大。

(4) 计算各指标权重

$$w_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j}, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

2.3 基于离差平方和的最优组合赋权

层次分析法是根据评价者的主观经验来确定指标权重，CRITIC 赋权法则是依据评价对象的测量数据来确定权重，故将主客观权重相结合可以计算出指标的 组合权重，使指标赋权满足主观和客观的一致性。基于离差平方和最大的最优组合赋权方法，计算主、客观权重在组合权重中的比重，使评价对象的总离差平方和最大^[13,14]。

针对台阶爆破效果评价问题，假设 n 个指标有 s 种赋权方法对其赋值，设第 k 种赋权方法的权向量值为

$$W_k = (w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{nk})^T, k = 1, 2, \dots, s \quad (10)$$

式中： $w_{ik} \geq 0$ ， $\sum w_{ik} = 1, k = 1, 2, \dots, s, j = 1, 2, \dots, n$ 。

结合组合赋权方法的特点可得

$$W_c = \theta_1 W_1 + \theta_2 W_2 + \dots + \theta_s W_s \quad (11)$$

式中： W_c 为组合赋权系数向量； $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s$ 为组合系数， $k = 1, 2, \dots, s$ 。

为使 m 个评价对象的总离差平方和达到最大，构造如下目标函数

$$J(W_c) = \sum_{i=1}^m v_i(W_c) = \sum_{i=1}^m \sum_{j_1=1}^m \left[\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_{ij_1}) w_{cj} \right] = \sum_{i=1}^m \sum_{j_1=1}^m \left[\sum_{j_2=1}^n (y_{ij_1} - y_{ij_2}) w_{cj_1} (y_{ij_2} - y_{ij_2}) w_{cj_2} \right] = \sum_{j_1=1}^n \sum_{j_2=1}^n \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij_1} - y_{ij_2}) (y_{ij_2} - y_{ij_2}) \right] w_{cj_1} w_{cj_2} \quad (12)$$

若令矩阵 Y_1 为

$$Y_1 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{i1} - y_{i_11})(y_{i1} - y_{i_11}) & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{i1} - y_{i_11})(y_{i2} - y_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{i1} - y_{i_11})(y_{in} - y_{i_1n}) \\ \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{i2} - y_{i_12})(y_{i1} - y_{i_11}) & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{i2} - y_{i_12})(y_{i2} - y_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{i2} - y_{i_12})(y_{in} - y_{i_1n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{in} - y_{i_1n})(y_{i1} - y_{i_11}) & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{in} - y_{i_1n})(y_{i2} - y_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (y_{in} - y_{i_1n})(y_{in} - y_{i_1n}) \end{bmatrix}$$

可知 Y_1 为 n 阶对称方阵,则目标函数 (JW_c) 可表示为

$$J(W_c) = W_c^T Y W_c \tag{13}$$

要求出组合权向量 W_c ,由式(11)知需求出系数向量 Θ 即可,于是基于离差平方和的最优组合赋权即为如下的优化问题

$$\begin{aligned} \max F(\Theta) &= \Theta^T W^T Y_1 W \Theta \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \Theta^T \Theta = 1 \\ \Theta \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{14}$$

根据矩阵理论, $F(\Theta)$ 是线性表出系数向量的 Rayleigh 商,显然 $W^T Y_1 W$ 是对称矩阵, $F(\Theta)$ 存在最大值。设 λ_{\max} 为矩阵 $W^T Y_1 W$ 的最大特征值, Θ^* 为最大特征值所对应的单位特征向量,则 $F(\Theta)$ 的最大值为 λ_{\max} ,且 Θ^* 为式(14)式最优解,进一步代入公式(11)中求出组合权向量 W_c^* 。由于权向量满足归一化条件,即可令

$$w_{c_j}^{*} = w_{c_j}^* / \sum_{j=1}^n w_{c_j}^* \quad (j = 1, 2, \dots, n) \tag{15}$$

3 基于组合赋权的台阶爆破效果灰聚类评估模型

3.1 台阶爆破效果评价指标

台阶爆破效果评价指标的确定需全面考虑爆破

质量、效率以及经济等因素的影响。评价指标过多,会使评价过程复杂化,而评价指标过少,又不能全面客观的台阶爆破效果,所以评价指标应具有较好的代表性,还易于获取数据。参考相关台阶爆破效果评价的研究文献[1]、[2]、[7],根据台阶爆破的特点,选取 6 项因素作为台阶爆破效果的综合评价指标,分别用 $D_1 \sim D_6$ 表示,即大块率 D_1 、松散系数 D_2 、根底率 D_3 、后裂距离 D_4 、振动速度 D_5 、飞散距离 D_6 。其中松散系数、根底率、后裂距离、振动速度、飞散距离采用实测值进行评价,对大块率采用半定量化的方法进行取值,将大块率定性分为五个等级,依次对大块多,需要进行大量二次粉碎,赋值为 1; 大块较多,需要进行少量二次粉碎,赋值为 2; 大块一般,个别需进行二次粉碎,赋值为 3; 大块较少,可不进行二次粉碎,赋值为 4; 无,赋值 5; 建立指标等级分级标准(见表 2)。

用于台阶爆破效果评价的聚类指标数 $m = 6$,可化分的台阶爆破灰类数 $s = 5$,各灰类对应的台阶爆破效果评价等级依次划分为台阶爆破效果很好 ($k = 1$)、爆破效果较好 ($k = 2$)、爆破效果一般 ($k = 3$)、爆破效果较差 ($k = 4$)、爆破效果差 ($k = 5$)。

表 2 台阶爆破评价指标与等级间的关系

Table 2 Relationship between bench blasting evaluation index and grade

评价指标	很好 (k_1)	较好 (k_2)	一般 (k_3)	较差 (k_4)	差 (k_5)
大块率 $D_1/\%$	5 (0.82 ~ 1.00)	4 (0.64 ~ 0.82)	3 (0.46 ~ 0.64)	2 (0.28 ~ 0.46)	1 (0 ~ 0.28)
松散系数 D_2	> 1.4	1.4 ~ 1.3	1.3 ~ 1.2	1.2 ~ 1.1	1.1 ~ 1.0
根底率 $D_3/\%$	0 ~ 0.1	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 0.8	> 0.8
后裂距离 D_4/m	0 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	> 2.5
振动速度 $D_5/(cm \cdot s^{-1})$	0 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	> 2.0
飞散距离 D_6/m	0 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200	> 200

注:大块率括号中数据取值是对分级标准进行无量纲化处理后的结果

3.2 构造改进的三角白化权函数

根据表 2,构造适用于台阶爆破效果评价的混

合中心点三角白化权函数(见图 1)。在图 1 中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ 分别为 5 个灰类的中心点,同时连接

点 $(\lambda_k, 1)$ 与第 $k-1$ 个小区间的中心点 $(\lambda_{k-1}, 0)$ 以及第 $k+1$ 个小区间的中心点 $(\lambda_{k+1}, 0)$ 得到 j 指标关于 k 灰类的三角白化权函数 $f_j^k(x)$,其中 $j=1, 2, 3, 4, 5, 6; k=2, 3, 4$ 。对 $f_1^1(x)$ 采用下限测度白化权函数,将指标数域向左延扩,对 $f_5^5(x)$ 采用下限测度白化权函数,将指标数域向右延扩。不同类型的三角白化权函数表达式为式(16)~(18),各评价指标的三角白化权函数见图2。

$$f_j^1 = \begin{cases} 0, & x \notin [\lambda_0, \lambda_2] \\ 1, & x \in [\lambda_0, \lambda_1] \\ \frac{\lambda_2 - x}{\lambda_2 - \lambda_1}, & x \in [\lambda_1, \lambda_2] \end{cases} \quad (16)$$

$$f_j^i = \begin{cases} 0, & x \notin [\lambda_{i-1}, \lambda_{i+1}] \\ \frac{x - \lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_{i-1}}, & x \in [\lambda_{i-1}, \lambda_i] \\ \frac{\lambda_{i+1} - x}{\lambda_{i+1} - \lambda_i}, & x \in [\lambda_i, \lambda_{i+1}] \end{cases}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (17)$$

$$f_j^5 = \begin{cases} 0, & x < \lambda_4 \\ 1, & x > \lambda_5 \\ \frac{x - \lambda_4}{\lambda_5 - \lambda_4}, & x \in [\lambda_4, \lambda_5] \end{cases} \quad (18)$$

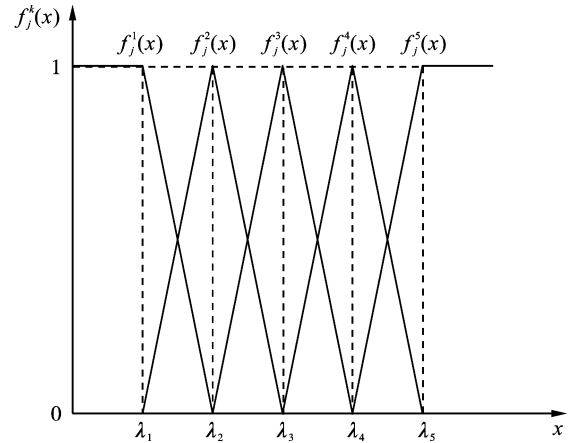


图1 混合中心点三角白化权函数

Fig. 1 Mixed center triangle whitening weight function

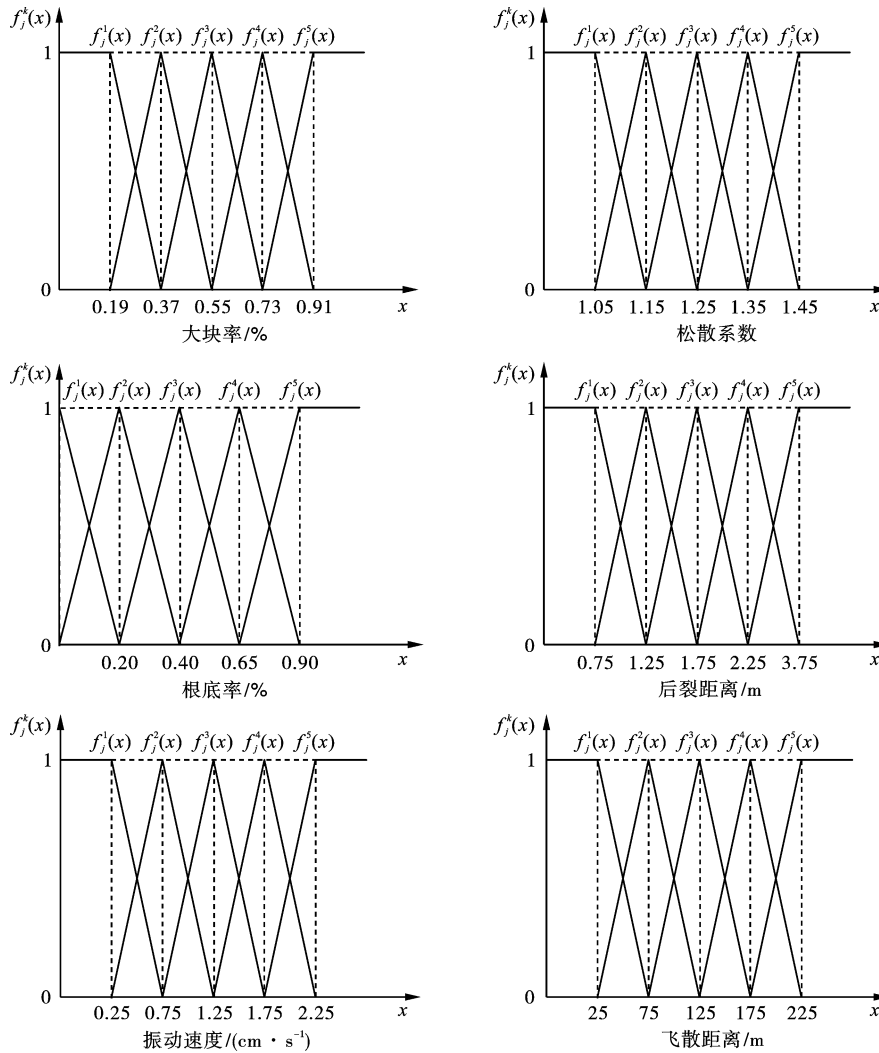


图2 各指标三角白化权函数

Fig. 2 Triangle whitening weight function of each index

4 工程应用

工程位于遵义市洪水台,属溶蚀盆地,覆盖层厚薄不均,含有泥夹石构造,节理裂隙发育,以中风化石灰岩为主,岩石硬度系数 f 为 6.0 ~ 10.0,部分地区软弱夹层岩质呈砂石状。为了检验基于离差平方和最优组合赋权的灰聚类评估模型在台阶爆破效果评价中的有效性和实用性,参考遵义市洪水台土石方平场工程的 4 次深孔台阶爆破资料(见表 3)及各爆破效果指标监测数据(见表 4),利用组合赋权的

灰聚类评估模型对台阶爆破效果进行评价,具体实现过程如图 3 所示。

表 3 4 次台阶爆破参数
Table 3 Blasting parameters of 4 steps

爆破参数	1	2	3	4
孔距/m	3.0	3.0	3.5	3.5
排距/m	3	3	3	3
起爆方式	逐排起爆	逐孔起爆	逐排起爆	逐孔起爆

表 4 4 次爆破效果及监控数据

Table 4 Blasting effect and monitoring data of 4 times

爆破编号	大块率/%	松散系数	根底率/%	后裂距离/m	振动速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	飞散距离/m
1	0.73	1.28	0.08	2.10	1.82	120
2	0.73	1.33	0.08	1.20	0.79	67
3	0.73	0.73	0.09	1.00	1.48	98
4	0.70	1.28	0.09	0.42	0.42	54

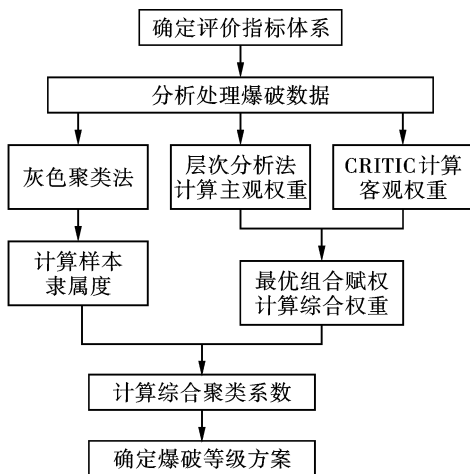


图 3 组合赋权灰聚类评估模型计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of combined weighted grey clustering evaluation model

4.1 组合赋权

(1) 层次分析法计算主观权重

根据前述层次分析法,综合文献[15]和相关专家意见构建的判断矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & 7 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 4 & 1 & 2 \\ 1 & 3 & 1 & 7 & 2 & 5 \\ 1/7 & 1/4 & 1/7 & 1 & 1/6 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 6 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/2 & 1/5 & 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

经公式(3)、(4)可得判断矩阵 R 的最大特征值

$\lambda_{\max} = 6.0966$, 最大特征值所对应的特征向量

$$\bar{W} = (0.6324, 0.2551, 0.6324, 0.0678, 0.3343, 0.1364)^T$$

$$C_I = 0.01932, R_I = 1.24, C_R = 0.01558 < 0.1$$

可知判断矩阵 R 满足一致性要求,归一化后可得主观权重向量

$$W_1 = (0.3072, 0.1239, 0.3072, 0.0329, 0.1624, 0.0663)^T$$

(2) CRITIC 赋值法

将表 3 中数据进行标准化处理,代入公式(7) ~ (9),进一步求得各评价指标的客观权重向量

$$W_2 = (0.230, 0.094, 0.284, 0.134, 0.128, 0.130)^T$$

(3) 离差平方和确定组合权重

对洪水台土石方平场的 4 次爆破数据标准化处理后,根据 Y_1 定义式有

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 6 & -0.9 & -4 & 4 & -1.96 & 3.74 \\ -0.9 & 4.1542 & 4.4 & 1.08 & 2.4508 & 1.4998 \\ -4 & 4.4 & 8 & -2.48 & 2 & -2.12 \\ 4 & 1.08 & -2.48 & 4.5776 & 0.76 & 4.7144 \\ -1.96 & 2.4508 & 2 & 0.76 & 2.9208 & 1.1948 \\ 3.74 & 1.4998 & -2.12 & 4.7144 & 1.1948 & 4.9174 \end{bmatrix}$$

由公式(10)、(11)构建两个权重系数向量组成的分块矩阵 $W = (W_1, W_2)$

再根据公式(13)、(14)计算 $W^T Y_1 W$ 得

$$W^T Y_1 W = \begin{bmatrix} 1.2872 & 1.3125 \\ 1.3125 & 1.3938 \end{bmatrix}$$

最大特征根 $\lambda_{\max} = 2.6541$, 其对应的单位化特征向量

$$\Theta^* = (0.6926, 0.7213)$$

根据公式(15)求得单位化的组合权重

$$W_c^{**} = (0.2679, 0.1086, 0.2954, 0.0845, 0.1449, 0.0988)^T$$

4.2 模型检验

首先根据式(3)~(15)计算台阶爆破各聚类指标的综合权重 W_c^{**} , 其次根据式(16)~(18)计算4

次台阶爆破方案所属 K 灰聚类隶属度 $f_j^k(x)$, 最后综合聚类表达式(1)以及台阶爆破效果评价关系式(2)来判断爆破效果等级。将台阶爆破综合聚类系数及评价结果列入表5中, 同时统计了未确知测度模型的评价结果。

表5 评价结果

Table 5 Evaluation results 评价指标

评价指标	很好(k_1)	较好(k_2)	一般(k_3)	较差(k_4)	差(k_5)	实际	本文模型	未确知测度模型
1	0.1772	0.1280	0.1903	0.4842	0.0203	较好	较差	一般
2	0.2015	0.4105	0.0333	0.3548	0	很好	较好	很好
3	0.1625	0.2056	0.3575	0.3245	0	较好	一般	较好
4	0.3756	0.2479	0.1316	0.2449	0	很好	很好	很好

由表5知,4次台阶爆破效果评价等级依次为较差、较好、一般、很好。实际工程中,采用3.5 m孔距的爆破效果优于3.0 m孔距的爆破效果,逐孔起爆的爆破效果优于逐排起爆的爆破效果,因此建议采用3.5 m孔距的逐孔起爆方法。此模型评价结果与未确知测度模型评价结果基本一致,具有更高的精确度,说明采用灰聚类评估模型进行台阶爆破效果评价是合理的,具有一定的工程应用价值。

5 结论

(1)根据台阶爆破效果评价特点,考虑影响台阶爆破因数的重要性,选取大块率、松散系数、根底率、后裂距离、振动速度、飞散距离作为台阶爆破效果评估的评价指标。

(2)为了避免指标权重确定主观性大和数据差异性敏感较大的问题,采用CRITIC赋权法确定客观权重,并利用一种基于离差平方和的最优组合赋权方法将层析分析法确定的主观权重和CRITIC确定的客观权重相结合,使组合权重更全面、客观合理。

(3)台阶爆破效果评价是一个多因素影响的问题,灰色聚类评估模型在解决这类问题上具有显著的优越性。本文通过混合中心点三角白化权函数对灰聚类模型进行优化,建立台阶爆破效果评价的组合赋权-灰聚类模型,结合洪水台土石方平场工程的4次深孔台阶爆破实例表明:该模型计算结果与实际情况较吻合,具有一定的准确性和可靠性。

参考文献 (References)

[1] 周 磊. 台阶爆破效果评价及爆破参数优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

[1] ZHOU Lei. Evaluation of bench blasting effect and optimization of blasting parameters[D]. Wuhan:Wuhan University of technology,2012. (in Chinese)

[2] 任海芝,洪曼绮. 台阶爆破效果的熵权物元可拓法综合评价[J]. 金属矿山,2016(1):1-7.

[2] REN Hai-zhi, HONG Man-qi. Entropy weight matter element extension method for comprehensive evaluation of bench blasting effect[J]. Metal mine,2016(1):1-7. (in Chinese)

[3] 王长友,唐又驰,刘 涛. 光面爆破效果BP神经网络预测[J]. 辽宁工程技术大学学报,2005(1):73-75.

[3] WANG Chang-you, TANG You-chi, LIU Tao. BP neural network prediction of smooth blasting effect[J]. Journal of Liaoning University of engineering and technology, 2005(1):73-75. (in Chinese)

[4] 韩新平,李世丰. 基于层次分析法的露天矿爆破方案模糊综合优选[J]. 爆破,2015,32(4):64-68.

[4] HAN Xin-ping, LI Shi-feng. Fuzzy comprehensive optimization of blasting scheme in open pit mine based on analytic hierarchy process [J]. Blasting, 2015, 32(4):64-68. (in Chinese)

[5] 赵国彦,黄治成,刘 高,等. 中深孔爆破效果的AHP-模糊综合评价方法[J]. 矿业研究与开发,2010,30(2):106-108.

[5] ZHAO Guo-yan, HUANG Zhi-cheng, LIU Gao, et al. AHP fuzzy comprehensive evaluation method for medium deep hole blasting effect [J]. Mining research and development,2010,30(2):106-108. (in Chinese)

[6] 胡新华,杨旭升. 基于灰色关联分析的爆破效果综合评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008(S1):142-144.

[6] HU Xin-hua, YANG Xu-sheng. Comprehensive evaluation of blasting effect based on grey relational analysis[J]. Journal of Liaoning University of engineering and Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2008(S1):142-

144. (in Chinese)
- [7] 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.
- [7] LEI Zhen, YANG Ren-shu, TAO Tie-jun. Comprehensive evaluation of bench blasting effect based on unascertained measurement theory[J]. Acta coal Sinica,2015,40(2):353-359. (in Chinese)
- [8] 单仁亮,黄宝龙,李广景. 基于灰色关联分析的综合评价模型在爆破方案选定中的应用[J]. 岩土力学,2009,30(S1):206-210.
- [8] SHAN Ren-liang, HUANG Bao-long, LI Guang-jing. Application of comprehensive evaluation model based on Grey Relational Analysis in blasting scheme selection [J]. Geotechnical mechanics, 2009, 30 (S1): 206-210. (in Chinese)
- [9] 裴启涛,李海波,刘亚群,等. 基于组合赋权的岩爆倾向性预测灰评估模型及应用[J]. 岩土力学,2014,35(S1):49-56.
- [9] PEI Qi-tao, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, et al. Grey evaluation model of rockburst tendency prediction based on combination weighting and its application [J]. Geotechnical Mechanics,2014,35(S1):49-56. (in Chinese)
- [10] 张建华,王 琪,黄其冲. 基于 AHP 和灰色关联分析法的爆破参数优化[J]. 爆破,2014,31(4):72-75.
- [10] ZHANG Jian-hua, WANG Qi, HUANG Qi-chong. Optimization of blasting parameters based on AHP and grey correlation analysis method [J]. Blasting,2014,31(4):72-75. (in Chinese)
- [11] 张 玉,魏华波. 基于 CRITIC 的多属性决策组合赋权方法[J]. 统计与决策,2012(16):75-77.
- [11] ZHANG Yu, WEI Hua-bo. Combination weighting method for multiple attribute decision making based on critic [J]. Statistics and Decision Making,2012(16):75-77. (in Chinese)
- [12] 谢学斌,李德玄,孔令燕,等. 基于 CRITIC-XGB 算法的岩爆倾向等级预测模[J/OL]. 岩石力学与工程学报:1-8. [2020-08-16]. doi: 10. 13722/j. cnki. jme. 2019. 1049.
- [12] XIE Xue-bin, LI De-xuan, KONG Ling-yan, et al. Rockburst propensity prediction model based on CRITIC-XGB algorithm [J/OL]. Journal of rock mechanics and Engineering: 1-8. [2020-08-16]. doi: 10. 13722/j. cnki. jme. 2019. 1049. (in Chinese)
- [13] 陈 伟,夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. 数学的实践与认识,2007(1):17-22.
- [13] CHEN Wei, XIA Jian-hua. Optimal combination weighting method based on subjective and objective weight information [J]. Practice and understanding of mathematics,2007(1):17-22. (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.
- [14] YIN Xin, LIU Quan-sheng, WANG Xin-yu, et al. Application of attribute interval recognition model based on optimal combined weighting to prediction of classification of rockburst intensity [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(11):3772-3780. (in Chinese)
- [15] 罗 毅,张义平,陶铁军,等. 台阶爆破方案优选的 AHP-熵模糊物元模型研究[J]. 爆破,2019,36(4):80-85,145.
- [15] LUO Yi, ZHANG Yi-ping, TAO Tie-jun, et al. Study on AHP entropy fuzzy matter element model for optimization of bench blasting scheme [J]. Blasting,2019,36(4):80-85,145. (in Chinese)

英文编辑:赵 亮

(上接第20页)

- [21] 卢文波,周创兵,陈 明,等. 开挖卸荷的瞬态特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(11):2184-2192.
- [21] LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, CHEN Ming. Research on transient characteristics of excavation unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(11):2184-2192. (in Chinese)
- [22] 甄育才,朱传云. 中远区微差爆破振动叠加效应影响因素分析[J]. 爆破,2005(2):11-16.
- [22] ZHEN Yu-cai, ZHU Chuan-yun. Analysis on influential factors of vibration superposition in middle and far field of millisecond blasting [J]. Blasting,2005(2):11-16. (in Chinese)
- [23] 卢文波,张 乐,周俊汝,等. 爆破振动频率衰减机制和衰减规律的理论分析[J]. 爆破,2013,30(2):1-6.
- [23] LU Wen-bo, ZHANG Le, ZHOU Jun-ru, et al. Theoretical analysis on decay mechanism and law of blasting vibration frequency [J]. Blasting,2013,30(2):1-6. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚