

文章编号: 1000-7598-(2009) 增 1-0206-05

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

单仁亮, 黄宝龙, 李广景

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对爆破方案选择的复杂性, 在灰色关联分析的基础上, 利用层次分析法, 结合判断矩阵对各指标进行权值分配, 将指标的关联系数与其权值相结合, 提出了爆破方案综合评价模型, 该模型以权重的形式体现各个评价指标对整体的影响程度, 利用判断矩阵进行权值分配克服了以往权重赋值主观性较强的局限, 最终以关联度为定量指标来对爆破方案进行比较分析, 并以回坡底矿爆破方案评价为实例, 具体说明了该模型的科学合理性。

关 键 词: 灰色关联分析; 爆破方案; 层次分析法; 判断矩阵; 综合评价模型

中图分类号: TD 235

文献标识码: A

Comprehensive evaluation model based on gray correlative analysis and its application to selecting blasting scheme

SHAN Ren-liang, HUANG Bao-long, LI Guang-jing

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the complexity in the choice of blasting scheme, based on gray correlative analysis, by means of analytical hierarchy process, judgement matrix is adopted to determine weight of each evaluating index; a comprehensive evaluation model which combines correlation coefficient with the weight of evaluating index is presented. The model embodies the influence extent of each evaluating index to the whole by weight form; it uses judgement matrix method to determine weight in order to avoid subjective factor and analyze blasting scheme by correlation degree. Evaluation of blasting scheme of Huipodi mine indicates that the comprehensive evaluation model makes results more scientific and rational.

Key words: gray correlative analysis; blasting scheme; analytical hierarchy process; judgement matrix; comprehensive evaluation model

1 引 言

巷道掘进通常有多个爆破方案可供选择, 但在选择的过程中普遍存在主观随意性, 而且决策的难度很大, 如何科学有效地选择爆破方案成为众多爆破工作者面临的颇为棘手的问题。近年来, 灰色系统理论和方法已渗透到许多领域, 许多研究者^[1-2]利用灰色理论的方法进行了工程评价。高树友^[3]利用灰色关联分析法对矿井建设方案进行了综合评价。许民利等^[4]利用灰色关联分析方法对铁矿资源开发利用数据进行了处理。按系统论的观点, 爆破

过程是一个典型的灰色系统, 可利用灰色系统理论和方法来评价爆破方案。孟中泽等^[5]、王洪强等^[6]应用关联度分析法对掘进方案进行了优选。考虑到各项评价指标对方案的总体效果的影响并不同, 为了更客观地评价方案, 许多学者从不同途径来确定各指标的权重。舒航等^[7]对层次分析法进行了改进, 并用来确定权系数。蒲传金等^[8]建立了一个评价爆破效果的模糊层次分析法模型。曹庆奎等^[9]提出了主观赋权法和客观赋权法相结合的灰色加权关联度综合评价方法。汪明武等^[10]应用实码加速遗传算法, 检验和修正了模糊层次分析方法。针对爆破方

收稿日期: 2009-03-20

第一作者简介: 单仁亮, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学和研究。

案选择所存在的难题，本文在灰色关联分析的基础上，结合层次分析法，构造判断矩阵对各指标进行权值分配，将指标的关联系数及其权值相结合提出了爆破方案综合评价模型，并运用该评价模型进行实例分析，证实了该模型可在一定程度上解决目前多方案选择过程中主观因素影响偏大的问题。

2 灰色关联分析基本原理

灰色关联分析法是灰色系统理论最常用的方法之一，是一种按照待分析系统的各特征参量序列（指标）构成的发展趋势接近程度来度量待分析系统与参照系统之间的相关程度的方法，待分析系统与参照系统越贴近，则关联度越大。

爆破方案评价涉及到多种因素，确定采用哪一种施工方案，不仅需考察研究经济、技术可行性和施工是否方便等多种综合指标，还要考虑施工条件、难易程度等指标。其中，多数指标之间具有随机性和模糊性，同时受多方面因素的影响以及评估中信息的不完备使得指标难以量化，且指标之间并不相互独立，故可运用灰色关联分析法进行爆破方案评价：把参选方案作为待分析系统，设一理想方案作为参照系统，则与理想方案最接近的方案，关联度最大，即为最优方案，从而使评价结果客观合理，为施工提供了科学的依据。

3 综合评价模型的建立及其计算

在灰色关联分析的基础上，通过指标间的相互比较，利用判断矩阵法来确定各指标的权值，考虑各个因素对整体的不同影响以建立综合评价模型。

3.1 建立指标评价体系

方案指标体系的内容应包括技术、经济等各个方面，而每一方面又包括许多评价指标，将这些指标所组成的集合称为指标集，用 X 表示，设 X 有 n 个指标，则：

$$X = \{X(1), X(2), \dots, X(n)\} \quad (1)$$

对于 m 个比较方案，则：

$$X = \{X_j(1), X_j(2), \dots, X_j(n)\} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

在指标集中，一般会有非量化指标，通过分析指标性质，给出白化权函数曲线，确定其量化值。在工程实际中，亦可通过专家经验法和工程类比进行确定。经过对此类指标的处理，指标集为一由有序数值组成的数学集合。

考虑工程实际，按“相对优化”的原则，从 m

个参选方案中选出各项指标的最佳值，作为参照系统建立评价目标体系，此参照系统综合了所有方案优点的理想方案，即

$$X = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\} \quad (3)$$

3.2 确定各项指标的权值

利用层次分析法的判断矩阵进行权值分配。通过指标间的两两比较，构造反映 n 个指标 $\{X(1), X(2), \dots, X(n)\}$ 相对重要性程度的判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ， A 中的元素 a_{ij} 标度值为 $1 \sim 9$ 及其倒数，取值标准按表 1，其中 a_{ij} 为 u_i 对 u_j 相对重要性的数值表现形式。

表 1 u_{ij} 的标度值取法
Table 1 Scale value assignments of u_{ij}

参数	重要性					上述两相邻的中值	反比较
	同样重要	稍微重要	明显重要	重要得多	极端重要		
u_{ij}	1	3	5	7	9	2, 4, 6, 8	倒数

根据判断矩阵，求出最大特征根所对应的特征向量 $W = \{W(1), W(2), \dots, W(n)\}$ ，所求特征向量即为各指标重要性排序，也就是权值分配。判断矩阵特征向量以方根法按以下步骤计算：

(1) 计算判断矩阵每一行元素的乘积 B_i ：

$$B_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(2) 计算 B_i 的 n 次方根 $\bar{B}_i$ ：

$$\bar{B}_i = \sqrt[n]{B_i} \quad (5)$$

(3) 对向量 $\bar{B} = [\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_n]$ 作正规化处理，即

$$W_i = \frac{\bar{B}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{B}_i} \quad (6)$$

则 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 为所求的特征向量。

(4) 计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (7)$$

(5) 检验

以上得到的特征向量即为所求权值，但权值分配的是否合理，需要对判断矩阵进行一致性检验，检验使用以下公式：

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{1}{n-1} \frac{(\lambda_{\max} - n)}{RI} \quad (8)$$

由层次分析法可知，对于 $1 \sim 9$ 阶判断矩阵，其中 5 阶判断矩阵 RI 的值取 1.12。

当 $\lambda_{\max} \geq n$, 且随机一致性比率 $CR \leq 0.10$ 时, 即认为判断矩阵具有满意的一致性, 说明权值分配是合理的; 否则, 就需要调整判断矩阵, 直到取得满意的一致性为止。

3.3 计算关联系数及关联度

确定出指标权值集后, 根据灰色系统理论关联度分析基本原理, 求出 m 个方案 n 个指标的关联系数。按以下公式:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: $\zeta_i(k)$ 为第 i 方案与参照方案中第 k 个指标的关联系数; $X_0(k)$ 、 $X_i(k)$ 为参照系统 X_0 、 X_i 的第 k 个指标; $|X_0(k) - X_i(k)|$ 为 X_0 与 X_i 的绝对差; $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 为两极最小差; $\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 为两极最大差。

由于关联系数很多, 信息过于分散, 不便于比较, 为此将评价指标的关联系数与其权值相结合建立综合评价模型, 亦称关联度:

$$\gamma_j = \sum_{k=1}^n \zeta_j(k) \cdot W(k) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

关联度最大的方案为优。

4 实例分析

4.1 工程概况

霍州煤电集团公司回坡底煤矿东区+556 水平轨道运输大巷设计断面为半圆拱, 毛宽为 5.10 m, 毛高为 4.15 m, 毛断面积为 18.36 m², 掘进面为灰岩, 块状、坚硬、裂隙较发育。

该矿一直沿用的爆破方案主要有:

(1) 方案 I: 浅孔全断面一次爆破, 单循环进尺为 1.4 m, 每班两个循环, 三八工作制; 采用锚网喷支护, 锚杆间排距为 800 mm×800 mm, 锚杆规格为 $\phi 20$ mm×2 000 mm, 金属网规格为 $\phi 6$ mm×1 015 mm×1 700 mm, 喷射混凝土厚度为 80~100 mm, 此方案每米进尺造价约为 3 500 元。该方案采用浅孔爆破、两掘一喷的施工工艺。由于该巷道岩石较破碎, 2.8 m 的空顶安全性较低, 但炮眼较浅, 施工较易。

(2) 方案 II: 采用全断面分次装药分次起爆, 单循环进尺为 1.8 m, 三八工作制; 采用一掘一喷

施工工艺, 支护形式同方案 I, 此方案每米进尺造价约为 3 400 元。该方案掘进面空顶距较小, 施工容易, 但采用分次装药分次起爆, 工作环境、安全性一般。

(3) 方案 III: 深孔全断面一次起爆, 单循环进尺 2.3 m, 三八工作制, 按正规循环作业; 采用锚网喷支护, 间排距为 800 mm×800 mm, 锚杆规格为 $\phi 20$ mm×2 000 mm, 金属网规格为 $\phi 6$ mm×1 015 mm×1 700 mm, 喷射混凝土厚度为 60 mm, 此方案每米进尺造价约为 3 200 元。该施工方案掘进面空顶距相对较小, 采用中空孔掏槽使碎石崩落集中, 较安全, 但炮眼较深, 造成施工较难。

4.2 建立指标评价体系

比较分析初步拟定的 3 种爆破方案, 从中选取延米成本、每班进尺、工作环境、安全性以及施工难易程度作为评价指标。

在评价指标中, 有工作环境、施工难易程度、安全性 3 个非量化指标。根据专家经验对其性质进行分析, 将其分为较好、一般、较差 3 个等级并将其评价进行量化, 其结果见表 2。

表 2 方案评价表

Table 2 Scheme appraisal form

序号	符号	指标	方案 I	方案 II	方案 III
1	C_1	成本 /(元/m)	3 500	3 400	3 200
2	C_2	每班进尺 /m	2.8	1.8	2.3
3	C_3	工作环境	较差(0.25)	一般(0.5)	较好(0.75)
4	C_4	安全性	较差(0.25)	一般(0.5)	较好(0.75)
5	C_5	施工难易程度	较易(0.75)	一般(0.5)	较难(0.25)

由此 3 方案可构成以下指标集, 见表 3。

表 3 指标集表

Table 3 Index set

指标	C_1 /(元/m)	C_2 /m	C_3	C_4	C_5
X_1	3 500	2.8	0.25	0.25	0.75
X_2	3 400	1.8	0.50	0.50	0.50
X_3	3 200	2.3	0.75	0.75	0.25

按理想方案(费用最低、时间最短、各项指标均最佳)要求, 取 3 个方案中的最佳值, 构成参照系统, 见表 4。

表 4 参照系统

Table 4 Reference system

指标	C_1 /(元/m)	C_2 /m	C_3	C_4	C_5
X_0	3 200	2.8	0.75	0.75	0.75

4.3 确定指标权值

以其对方案的影响程度为基准，对各种评价指标进行两两比较，构成判断矩阵 A 如下：

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 2 & 5 & 1 & 6 \\ 1/2 & 1 & 4 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 1/5 & 3 \\ 1 & 1 & 5 & 1 & 6 \\ 1/6 & 1/4 & 1/3 & 1/6 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

判断矩阵 A 中评价指标含义见表 5。

表 5 评价指标含义
Table 5 Indices meanings

评价指标	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
含义	成本	每班进尺	工作环境	安全性	施工难易程度

按上述方根法求出判断矩阵的特征向量 $W = [0.348\ 2, 0.232\ 7, 0.076\ 1, 0.303\ 1, 0.039\ 7]^T$, $\lambda_{\max} = 0.517\ 24$, 根据一致性检验公式 (8): $CR = 0.038\ 4 \leq 0.10$, 即判断矩阵具有满意的一致性, 所求特征向量可作为权值分配, 因此各项指标的权值见表 6。

表 6 权值表
Table 6 Weight values

指标	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
权值	0.348 2	0.232 7	0.076 1	0.303 1	0.039 7

4.4 计算关联系数及关联度

(1) 以参照系统的各指标数值为初值化算子, 对数据做归一化处理, 处理后的数据见表 7。

表 7 关联系数计算数据
Table 7 Calculation data of correlation coefficients

指标	C'_1	C'_2	C'_3	C'_4	C'_5
方案 I	1.09	1	0.33	0.33	1
方案 II	1.06	0.64	0.67	0.67	0.67
方案 III	1	0.82	1	1	0.33
参照系统	1	1	1	1	1

(2) 求 $|X_0 - X_i|$ 值, 结果见表 8。

表 8 $|X_0 - X_i|$ 值
Table 8 $|X_0 - X_i|$ values

指标	C'_1	C'_2	C'_3	C'_4	C'_5	Max	Min
方案 I	0.09	0	0.67	0.67	0	0.67	0
方案 II	0.06	0.36	0.33	0.33	0.33	0.36	0.06
方案 III	0	0.18	0	0	0.67	0.67	0

(3) 根据关联系数计算式 (9), 计算出各关联系数, 见表 9。

$$\zeta_i(k) = \frac{0.5 \times 0.67}{|X_0(k) - X_i(k)| + 0.5 \times 0.67} \quad (12)$$

表 9 关联系数表
Table 9 Correlation coefficients

指标	C'_1	C'_2	C'_3	C'_4	C'_5
方案 I	0.788	1	0.333	0.333	1
方案 II	0.848	0.482	0.504	0.504	0.504
方案 III	1	0.650	1	1	0.333

按式 (10) 求得各方案的关联度得 $\gamma_1 = 0.673$, $\gamma_2 = 0.618$, $\gamma_3 = 0.892$ 。

由此可见, 方案 III 与参照方案的关联度最大, 综合评价价值高于其他两个方案, 即该方案最接近参考方案, 为最优方案。

5 结 论

本文在灰色系统分析的基础上, 将爆破方案中各指标的关联系数及其权值相结合, 提出了综合评价模型, 并对回坡底矿 3 种爆破方案进行了综合评价。

(1) 通过灰色关联分析, 建立了指标评价体系, 结合回坡底矿工程实例, 根据专家经验及工程类比, 对爆破方案中非定量指标的性质进行了分析, 并对其量化评价, 选取爆破方案中的主要因素建立了指标集。

(2) 根据各评价指标间的相对重要性构造了判断矩阵, 利用判断矩阵对评价指标进行权值分配, 并采用 CR 值来检验权值分配的合理性, 大幅度减少了权值赋值的主观因素; 结合回坡底矿实例, 定量分析出了爆破方案中各评价指标的重要性, 表明单米成本、安全性和循环进尺在爆破方案评价中较为重要, 这也与专家的定性分析相吻合。

(3) 结合关联系数和权值, 提出了综合评价模型, 以关联度这一定量指标对各方案进行了综合评价; 在回坡底矿实例分析中表明, 爆破方案 III 为最优方案。

总之, 通过灰色关联分析对各指标进行有机合并, 结合指标权值建立的综合评价模型, 使以往对爆破方案的定性分析转变为定量分析, 克服了权重

赋值主观性较强的局限以及单靠实践经验的盲目性,不仅是定量确定各评价指标相对重要性的有效手段,同时也为爆破方案的综合评价提供了科学的依据。

参考文献

- [1] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
 - [2] 刘思峰, 党耀国, 方天耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 - [3] 高树友. 张集矿井建设方案的灰关联综合评价法[J]. 河北煤炭建筑工程学院学报, 1995, (3): 60—65.
 - [4] 许民利, 陈晓红. 灰色关联分析法在铁矿技术经济评价中的应用[J]. 金属矿山, 2004, (11): 30—33.
 - [5] 孟中泽, 刘付林, 段新立. 基于灰色关联度分析的快速掘进方案优化[J]. 煤炭科学技术, 2003, (9): 35—37.
 - [6] 王洪强, 贾宏俊, 吴秀山. 鲍店煤矿快速掘进方案优化[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2003, (2): 57—59.
 - [7] 舒航, 汪光顺. 用 AHP 确定矿山经营参数优化多目标决策的权系数[J]. 有色金属, 1994, (4): 8—12.
 - [8] 蒲传金, 肖正学, 郭学彬. 爆破效果综合评价的模糊层次分析法模型[J]. 矿业快报, 2004, (11): 11—15.
 - [9] 曹庆奎, 蔡振禹, 段晓惠. 煤层顶板稳定性的加权灰关联评价模型[J]. 河北建筑科技学院学报, 2004, 21(2): 65—68.
 - [10] 汪明武, 吴大国, 张薇薇. 基于 RAGA 的模糊层次分析方法在爆破方案优选中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(3): 225—228.
-
- 上接第 205 页
- horizontal load-displacement curves of pile groups based on the results of single pile tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(5): 951—962.
 - [6] HAMOUCHE, K.K., S. Leroueil, Roy M. Tension tests on wedge-piles in sensitive clays[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(4): 918—925.
 - [7] HESHAM M, El Naggat, JIN Qi-wei. Uplift behaviour of tapered piles established from model tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(1): 56—74.
 - [8] CURELALL, P A, SDRAOK O D L.A. Discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Geotechnique**, 1979, 29: 47—65.
 - [9] CUNDALL P A. Particle flow code in 2 Dimensions[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 1996.
 - [10] CUNDALL P A. Particle flow code in 2-Dimensions fish in pfc[M]. [S. l.]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 1999.
 - [11] CUNDALL P A. PFC^{2D} Users' manual[M](version 2.0). Minnesota: Itasca Consulting Group, 1999.
 - [12] JANG Deh-jeng, FROST David J. Use of image analysis to study the microstructure of a failed sand specimen[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(5): 1141—1149.
 - [13] WAN R G, GUO P J. Effect of microstructure on undrained behaviour of sands[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2001, 38(1): 16—28.
 - [14] 叶建忠, 周健, 韩冰. 考虑不同成桩方式单桩特性的颗粒流数值模拟[J]. 岩土工程学报. 2007, 29(6): 105—111.
 - [15] 孙其诚, 王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. 力学进展, 2008, 38(1): 89—102.
 - [16] 许宏发, 罗国煜, 廖铁平, 等. 等截面桩的抗拔机理研究[J]. 工程勘察, 2003, (3): 4—6.
 - [17] 蔡正银, 李相崧. 无黏性土中剪切带的形成过程[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 129—134.
 - [18] AHMED Shlash Alawneh, ABDALLAH I. et al. Tension tests on smooth and rough model piles in dry sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1999, 36: 746—753.
 - [19] 黄锋, 李广信, 吕禾. 砂土中抗拔桩位移变形的分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(1): 31—36.