

文章编号: 1673-3363(2009)01-0041-04

# AHP-FCE 法在采矿方法优选中的应用

龚声武<sup>1,2</sup>, 蔡明悦<sup>1</sup>, 李夕兵<sup>1</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 湖南安全技术职业学院 安全技术系, 湖南 长沙 410151)

**摘要:** 为了能够更好地保证评价结果的客观性, 文章将层次分析法和模糊综合评价法相结合, 将这种新方法应用于地下采矿方法的选择中. 利用层次分析法确定评价指标的权重, 采用模糊综合评价方法对其进行评估, 具有较强的逻辑性、实用性和系统性, 能准确地得出各评价指标的权重系数, 使计算结果更客观和稳定. 实例计算结果表明: 评估结果与实际评估结果相一致. AHP-FCE 方法简便和通用, 不仅能指导生产实际, 而且为类似的方案优化工作提供了一种新的思路和方法.

**关键词:** 层次分析; 判断矩阵; 模糊综合评价; 采矿方法; 优选

**中图分类号:** TD 214.2 **文献标识码:** A

## Application of AHP-FCE in Optimizing Mining Method

GONG Sheng-wu<sup>1,2</sup>, CAI Ming-yue<sup>1</sup>, LI Xi-bing<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Department of Safety Technology, Hunan Vocational Institute of Safety & Technology, Changsha, Hunan 410151, China)

**Abstract:** In order to guarantee the objectivity of the evaluation result, we proposed a method of analytic hierarchy in combination with fuzzy comprehensive evaluation to optimize the underground mining method. Determining the weight of indexes by using AHP and evaluating it by using the fuzzy comprehensive evaluation are highly logical, practical and systemic, making the weight of evaluation indexes obtained much accurate and the results more objective and stable. Exemplified calculation result shows that the evaluating result is in good accordance with the practical situation. In addition, the AHP-FCE method is simple, convenient, and universal. It not only can be used as a guide in practical production but also provides a new way for optimizing similar mining schemes.

**Key words:** analytic hierarchy process (AHP); judgment matrix; fuzzy comprehensive evaluation; mining method; optimal selection

采矿方法决定着回采工艺、技术装备、生产安全、生产能力等. 因此选择的采矿方法是否正确合理将直接关系到矿山生产的前途, 对矿山经济效益产生极大的影响. 在传统的采矿方法选择中, 主要采用经验类比法和盈利分析法<sup>[1]</sup>. 实践证明, 这样确定的采矿方法有较大的片面性和主观性, 它的不足之处在于: 依赖于设计人员的经验与判断, 科学

性的成分少于经验性的成分, 受限于人的能力, 主观随意性很大, 令人难以信服.

采矿方法的优劣又由多项技术经济指标来衡量, 例如地下采矿方法常用的指标有: 矿房生产能力、采矿工效、损失率、贫化率、采切工程量、炸药单耗<sup>[2]</sup>等. 由于采矿方法选择的影响因素很多, 需解决的问题又十分复杂, 它们之间的相互关系也不明

收稿日期: 2008-03-24

基金项目: 湖南省科技计划项目(2006GK3034)

作者简介: 龚声武(1965), 男, 湖南省桂阳市人, 副教授, 博士, 从事采矿工程和安全技术管理方面的研究.

E-mail: gsw650202@163.com Tel: 13974954369

确,因而采矿方法选择的优化,还需要进行完善和研究.近几年,人们试用层次分析法<sup>[2]</sup>、灰色关联法<sup>[3]</sup>、模糊综合评价法<sup>[4]</sup>、双基点法<sup>[5]</sup>、密切值法<sup>[6]</sup>、价值工程法<sup>[7-8]</sup>和优序法<sup>[8]</sup>等诸多方法进行决策,取得了一定成效.

为了全面考虑影响采矿方法优劣的各种因素,体现评价过程的模糊性,减少个人主观臆断带来的弊端,使优选的方案更符合实际,评价结果更可靠,本文将层次分析法和模糊综合评价法结合起来,并将这两种方法应用于实际的采矿方法选择中,确定权重,准确地得出各评价指标的权系数,使计算结果更客观和稳定,结果表明了该决策方法的科学性和实用性.

## 1 层次分析-模糊综合评价法原理

### 1.1 确定评价集 $V$ 和因素集 $U$

评价集是评价对象的集合,若评价对象有  $m$  个,可表示为

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} .$$

因素集是评价对象的评价因素的集合,若因素有  $n$  个,则可表示为

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} .$$

### 1.2 确定权重分配

由于因素集中各因素重要性不同,需要采用一定的方法对各因素权重评定.层次分析法(AHP)作为一种定量与定性结合的系统分析方法<sup>[9]</sup>,适合于因素权重的计算,主要步骤为:构建层次结构模型,构造判断矩阵,层次单排序,一致性检验,层次总排序.由于评价方法优劣的评价集  $V$  已确定,因此不需要构建层次模型和进行层次总排序.

1) 构造判断矩阵  $C$ .采用(1~9)9个标度和它们的倒数表示因素之间的影响强弱(见表1),对因素集中各评价因素相对重要性一一进行比较标定.

表 1 1~9 标度的意义

Table 1 The meaning of mark degree from 1 to 9

标度 $a_{ij}$	意义
1	两要素对某个性质的优劣相同
3	从经验判断,要素 $p_i$ 稍微优于 $p_j$
5	从经验判断,要素 $p_i$ 较强优于 $p_j$
7	从经验判断,要素 $p_i$ 强烈优于 $p_j$
9	从经验判断,要素 $p_i$ 绝对优于 $p_j$
2, 4, 6, 8	为上述两判断级的中间值
1, 1/2, 1/3, ..., 1/9	$p_i$ 较 $p_j$ 的优劣之比与上述说明相反

2) 层次单排序.可以通过 MATLAB 软件求正规化特征向量  $W$  而得到各评价因素的权重.

3) 一致性检验.一般来说,由于客观事物的

复杂性和人们认识上的多样性以及主观上的片面性和不稳定性,专家填写的判断矩阵不可能满足完全一致性条件,需要检验判断矩阵前后思维是否保持连贯性、一致性<sup>[10]</sup>.判断矩阵的一致性,需要计算它的一致性比例  $CR$ .当  $CR < 0.1$  时,则认为判断矩阵具有满意的一致性,否则需要把判断矩阵表反馈到专家手中重新调整.

定义<sup>[11]</sup>

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

式中:  $CI$  为判断矩阵的一致性指标;  $RI$  为平均随机一致性指标,可查表 2<sup>[12]</sup>;  $\lambda_{\max}$  为矩阵的最大特征根;  $n$  为成对比较因子的个数.

表 2 随机一致性指标  $RI$  值

Table 2 Values of the random consistency index  $RI$

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$RI$	0	0	0.58	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

通过层次分析法计算出的权重值为

$$\underline{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n) .$$

### 1.3 构建模糊关系

模糊综合评价方法是运用模糊数学知识,对系统中多个相互影响的因素进行的综合评价.它能综合考虑影响评价对象的各种因素,权重各因素之间的量化关系,将其量化,较全面地把握它们之间的关系,进而对某事物进行等级或类别评价,结果直观.

建立一个从因素集  $U$  到评价集  $V$  的模糊映射<sup>[13]</sup>

$$\underline{f}: u \rightarrow F(v) ,$$

$$u_{i1} \rightarrow r_{i1}/v_1 + r_{i2}/v_2 \dots + r_{im}/v_m ,$$

$$(0 \leq r_{ij} \leq 1; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) .$$

由  $\underline{f}$  可诱导出模糊关系  $\underline{R}$ ,用矩阵的形式表示

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} .$$

称  $\underline{R}$  为单因素评价矩阵.必要时对各因素指标进行无量纲化处理<sup>[14]</sup>,使单位不同、不具备可比度的因素指标变得可比.

### 1.4 综合性评价及结果

有了单因素评价矩阵  $\underline{R}$  和诸因素的权数  $\underline{W}$ ,就可做出综合性评价,其公式为

$$\underline{B} = \underline{W}\underline{R} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m) .$$

即  $\underline{B} = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_m) \cdot$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m).$$

由  $\tilde{W} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m)$  中的各个值可以得出相对应的的评价对象的等级或类别。

## 2 运用举例

湖北某矿为国家重点建设项目<sup>[15]</sup>, 矿体走向北北西—南南东 20°左右, 矿体倾向 240°~ 280°, 矿体倾角 30°左右, 平均厚度 8 m, 为一缓倾斜至倾斜中厚矿体. 根据矿床地质条件及开采技术条件, 提出可能适用的采矿方法 6 种, 其中 3 种明显优于其它方法, 选取以下主要指标作为选择方案的目标: 矿块生产能力、工作面工人劳动生产率、损失率、贫化率、采切比、炸药消耗量. 各方案的指标如表 3. 显然, 1, 2, 3 项指标值要求越大越好, 而 4, 5, 6 项指标值则要求越小越好.

表 3 各方案主要技术经济指标值

Table 3 The main values of technology & economy

指标名称	采矿方法方案		
	分段法 (方案 1)	单上山 房柱法 (方案 2)	双上山 房柱法 (方案 3)
生产能力/(t·d <sup>-1</sup> )	238.00	202.46	248.00
采矿工效/(t·(工班) <sup>-1</sup> )	10.42	9.33	12.56
矿石损失率/%	33.23	31.46	26.37
矿石贫化率/%	6.83	5.42	6.54
采切比/(m·g <sup>-1</sup> ·t <sup>-1</sup> )	6.80	5.87	8.27
炸药单耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	0.41	0.42	0.45

### 2.1 确定评价集和因素集

评价集  $V$  为

$$V = \left\{ \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 \\ \text{方案 1} & \text{方案 2} & \text{方案 3} \end{matrix} \right\}.$$

因素集  $U$  为

$$U = \begin{bmatrix} u_1(\text{生产能力}) \\ u_2(\text{采矿工效}) \\ u_3(\text{矿石损失率}) \\ u_4(\text{矿石贫化率}) \\ u_5(\text{采切比}) \\ u_6(\text{炸药单耗}) \end{bmatrix}.$$

### 2.2 确定各因素权重分配

通过专家评定得各评价因素相对重要性判断矩阵  $C$  如表 4. 通过 MATLAB 软件求正规化特征向量  $W$ , 从而得到各评价因素的权重, 并通过了一致性检验.

表 4 指标权重计算及检验结果

Table 4 The index weight calculation and test result

$C$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$W$
$u_1$	1	2	4	2	3	2	0.307
$u_2$	1/2	1	3	1	2	1	0.172
$u_3$	1/4	1/3	1	1/3	1/2	1/3	0.059
$u_4$	1/2	1	3	1	2	1	0.172
$u_5$	1/3	1/2	2	1	1	1/2	0.108
$u_6$	1/2	1	3	2	1	1	0.182
一致性检验	$\lambda_{\max} = 6.2377, RI = 1.26, CR = 0.038 < 0.1$ , 通过一致性检验						

因此各因素指标的权数分配为  $\tilde{W} = (0.307, 0.172, 0.059, 0.172, 0.108, 0.182)$ .

### 2.3 构造模糊关系

列出单因素评价矩阵:

已知

$$V = \{v_1, v_2, v_3\},$$

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}.$$

从模糊关系可以得出下表为直积空间  $V \times U$  的模糊关系  $R$

$$R(V \cdot U) = \begin{matrix} R & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_1 \\ u_1 \\ u_1 \\ u_1 \\ u_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

模糊矩阵

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 238 & 202.46 & 248 \\ 10.42 & 9.33 & 12.56 \\ 33.23 & 31.46 & 26.37 \\ 6.83 & 5.42 & 6.54 \\ 6.8 & 5.87 & 8.27 \\ 0.41 & 0.42 & 0.45 \end{bmatrix}.$$

因为各因素指标单位不同, 不具备可比度, 这里将其进行无量纲化处理得出

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 0.960 & 0.816 & 1.000 \\ 0.830 & 1.743 & 1.000 \\ 0.794 & 0.838 & 1.000 \\ 0.794 & 1.000 & 0.829 \\ 0.863 & 1.000 & 0.710 \\ 1.000 & 0.976 & 0.911 \end{bmatrix}.$$

### 2.4 综合性评价及结果

模糊(矩阵)运算

$$\tilde{B} = \tilde{W} \cdot \tilde{R} = (b_1, b_2, b_3),$$

即

$$B = (0.307, 0.172, 0.059, 0.172, 0.108, 0.182) \cdot \begin{bmatrix} 0.960 & 0.816 & 1.000 \\ 0.830 & 1.743 & 1.000 \\ 0.794 & 0.838 & 1.000 \\ 0.794 & 1.000 & 0.829 \\ 0.863 & 1.000 & 0.710 \\ 1.000 & 0.976 & 0.911 \end{bmatrix} = (0.8961, 0.8854, 0.9231).$$

因为  $b_3 > b_1 > b_2$ , 所以各方案的优劣顺序为: 方案 3 > 方案 1 > 方案 2. 即第 3 种方案双上山房柱法为最优方案, 通过本例的计算, 方法简单快捷的优越性显而易见.

如利用灰色多目标决策也可以计出各方案与理想最优方案的比较中, 双上山房柱法较另外两种采矿方法更接近理想方案. 只是该方法的计算量较 AHP-FCE 方法大.

### 3 结 论

1) 该方法能够全面考虑影响采矿方法优劣的各种因素, 较好地确定各评价因素权重.

2) 通过模糊综合评价得出定量结果, 为科学决策提供依据.

3) 该方法简单快捷、十分直观, 且容易掌握, 利用它对采矿方法进行优选可达到事半功倍的效果, 具有较强的逻辑性、实用性和系统性. 此方法在矿业系统中的应用有着广阔的前景, 是一种值得研究和推广应用的新方法.

值得提出的是, 采矿方法优选本身在理论意义上不是很精细, 如备选方案各指标的选取易受资料和时间限制; 对定性指标采用专家评分制、对权重值的评估易受主观因素影响等<sup>[6]</sup>. 此外, 通过数学优选法算出的结果只能作为决策时重要的参考依据, 而不能作为唯一的决定因素.

#### 参考文献:

[1] 邓 建. 多目标决策密切值法在采矿方法优选中的应用[J]. 黄金, 1996, 17(9): 26-29.  
DENG Jian. Application of close value method of multi objective decision to optimal selection of mining method[J]. Gold, 1996, 17(9): 26-29.

[2] 李学全. 采矿方案优选的层次分析决策方法[J]. 有色金属, 1998(1): 3-6.  
LI Xue-quan. Analytic hierarchy process decision making method in optimization of mining methods [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 1998(1):

[3] 谢贤平. 灰色关联分析法在采矿技术经济分析中的应用[J]. 矿山设计研究, 1990(5): 23-27.  
XIE Xian-ping. The application of grey relational analysis on mining technology and economy analysis [J]. Mining Design and Research, 1990(5): 23-27.

[4] 肖有鼎, 廖世金. 应用模糊数学对采矿方法选择进行综合评判[J]. 有色金属: 矿山部分, 1993(1): 1-6.  
XIAO You-ding, LIAO Shi-jin. Applying fuzzy math in synthetic evaluation for selection of mining methods[J]. Nonferrous Metals: Mining, 1993(1): 1-6.

[5] 谢贤平, 杨 鹏. 采矿方法设计方案的评价与选择[J]. 黄金, 1996, 17(6): 15-18.  
XIE Xian-ping, YANG Peng. Evaluation and selection of design schemes of mining methods[J]. Gold, 1996, 17(6): 15-18.

[6] 王 亮. 基于密切值法的采矿方法选择与优化[J]. 有色金属: 矿山部分, 1999(4): 12-14.  
WANG Liang. Optimization of mining methods based on osculating value method [J]. Nonferrous Metals: Mining, 1999(4): 12-14.

[7] 白广熙. 试用价值工程 FD 法选择采矿方法[J]. 金属矿山, 1987(5): 14-17.  
BAI Guang-xi. Slection of mining methods by using the value engineering method [J]. Metal Mine, 1987(5): 14-17.

[8] 黄志伟. 我国采矿方法的数值优化选择[J]. 矿业研究与开发, 1990, 10(3): 57-62.  
HUANG Zhi-wei. Selection of mining methods through numerical optimization[J]. Mining Research and Development, 1990, 10(3): 57-62.

[9] 谭跃进. 定量分析方法[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.

[10] 颜 扬, 杜 纲. 企业柔性指标体系及 AHP-模糊综合评价方法研究[J]. 甘肃科学学报, 2004(4): 15-17.  
YAN Yang, DU Gang. The index system of the enterprise flexibility and its AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Gansu Sciences, 2004(4): 15-17.

[11] 华 瑶, 刘春波, 朱林生. 层次分析法在科技资源配置能力综合评价中的应用[J]. 东北电力学院学报, 2004, 24(2): 42-44.  
HU A Yao, LIU Chun-bo, ZHU Lin-sheng. The application of analytic hierarch process on the synthetic judgment about the capability of science & technology allocation[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2004, 24(2): 42-44.

(下转第 49 页)

高应力巷道围岩卸荷破坏影响因素中, 裂纹是一个重要的影响因素, 对于更复杂的情况以及其它的情况, 有很大的借鉴意义, 对现场具有一定指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 张黎明, 王在泉, 贺俊征. 岩石卸荷破坏与岩爆效应 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(1): 110-113.  
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, HE Jun-zheng. Analysis of failure characteristics of rock under unloading conditions and their effects on rock burst [J]. Journal Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(1): 110-113.
- [2] 康勇, 李晓红, 杨春和. 深埋隧道围岩损伤破坏模式的数值试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增): 3578-3583.  
KANG Yong, LI Xiaohong, YANG Chunhe. Research on numerical tests on damage-failure mode of surrounding rock in deep-buried tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp): 3578-3583.
- [3] 黄明利, 黄凯珠. 三维表面裂纹相互作用扩展贯通机制试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1794-1799.  
HUANG Ming-li, HUANG Kai-zhu. Experimental study on propagation and coalescence mechanisms of 3D surface cracks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1794-1799.
- [4] 黄明利, 冯夏庭, 王水林. 多裂纹在不同岩石介质中的扩展贯通机制分析 [J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 142-146.  
HUANG Ming-li, FENG Xia-ting, WANG Shu-lin. Numerical simulation of propagation and coalescence processes of multi-crack in different rock media [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 142-146.
- [5] 黄明利, 唐春安, 朱万成. 非均质岩桥对裂纹扩展贯通机制影响的数值分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2000, 19(1): 468-471.  
HUANG Ming-li, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng. Numerical simulation of the influence of heterogeneous rock bridge on the propagation and coalescence mechanism of cracks [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2000, 19(1): 468-471.
- [6] 黄明利, 唐春安. 非均匀因素对 I 型裂纹扩展、相互作用影响的数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1111-1114.  
HUANG Ming-li, TANG Chun-an. Effect of heterogeneity on propagation and interaction of type I cracks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1111-1114.
- [7] 唐春安, 刘红元, 秦四清, 等. 非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 116-121.  
TANG Chun-an, LIU Hong-Yuan, QIN Si-Qing, et al. Influence of propagation heterogeneity on modes in brittle crack rock [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 116-121.
- [8] 冯增朝, 赵阳升. 岩体裂隙尺度对其变形与破坏的控制作用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 78-83.  
FENG Zeng-chao, ZHAO Yang-sheng. Control effect of fissure scale on deformation and failure of rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 78-83.
- [9] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] 刘长武, 翟才旺. 地层空间应力场的开采扰动与模拟 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [12] 荆全忠, 姜秀慧, 杨鉴淞, 等. 基于层次分析法 (AHP) 的煤矿安全生产能力指标体系研究 [J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(9): 74-79.  
JING Quan-zhong, JINAG Xiu-hui, YANG Jian-song, et al. Study on index system of capability of production safety in coal mine based on AHP [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(9): 74-79.
- [13] 何学秋. 安全工程学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [14] 姚香. 采矿方法研究与数学优选 [J]. 黄金, 1997, 18(2): 15-21.  
YAO Xiang. Study of mining method and mathematic optimization [J]. Gold, 1997, 18(2): 15-21.
- [15] 周麟. 采矿方法优选的灰色多目标决策方法及其应用 [J]. 江西铜业工程, 1998(2): 28-31.  
ZHOU Lin. Multi-tragets decision making for gray system adopted in selection of mining methodology and its prospects [J]. Jiangxi Copper Engineering, 1998(2): 28-31.
- [16] 吴爱祥, 张卫锋. 对若干采矿方法数值优选法的评价与优选 [J]. 湘潭矿业学院学报, 2000, 15(3): 7-9.  
WU Ai-xiang, ZHANG Wei-feng. Evaluation and optimization of some numerical optimization methods of mining method [J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2000, 15(3): 7-9.