

基于模糊聚类及层次分析法的采矿方法综合评判优选

谭玉叶^{1,2)} 宋卫东^{1,2)} ✉ 雷远坤³⁾ 韩浩亮²⁾

1) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083 2) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

3) 武钢矿业公司程潮铁矿, 武汉 430080

✉ 通信作者, E-mail: songwd@ustb.edu.cn

摘 要 以程潮铁矿为工程背景, 将采矿方法初选视为分类问题来处理, 采用模糊聚类法从技术影响因素方面按照相似程度对采矿方法进行了分类初选, 避免了以往采用工程类比进行初选的主观随意性, 提高了采矿方法初选方法的科学性. 在此基础上, 运用层次分析法, 综合考虑经济、资源、效率、安全及环境等五大类因素, 构建了较为全面的采矿方法选择综合层次评价指标体系, 并得到了合理的权重矩阵, 较好地解决了多因素决策时各方案评判指标出现优越性交叉时的权重分配问题. 最后采用模糊综合评判方法确定最优采矿方法.

关键词 采矿方法; 优化; 模糊聚类; 层次分析法

分类号 TD 853.3

Synthetic judgment for mining method optimization based on fuzzy cluster analysis and analytic hierarchy process

TAN Yu-ye^{1,2)}, SONG Wei-dong^{1,2)} ✉, LEI Yuan-kun³⁾, HAN Hao-liang²⁾

1) Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines (Ministry of Education of China), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) Chengchao Iron Mine, Wuhan Iron & Steel Group Minerals Co. Ltd., Wuhan 430080, China

✉ Corresponding author, E-mail: songwd@ustb.edu.cn

ABSTRACT Primary selection of mining methods was handled as a classification problem with Chengchao Iron Mine as the engineering background. Fuzzy clustering was used to make primary classification in accordance with the similarity degree of technical factors. This can decrease the subjective arbitrariness of using the engineering analog method and improve the scientific accuracy of the primary selection. In consideration of economic benefit, resource utilization, labor productivity, safety and environment factors, a comprehensive hierarchy structure of evaluation indexes for mining method optimization was built to get a reasonable weight matrix. This provides a better solution for weight distribution in multi-factor decision-making when the judging indexes of mining programs show cross superiority. Finally, the optimal mining method was selected by fuzzy comprehensive judgment.

KEY WORDS mining methods; optimization; fuzzy clustering; analytic hierarchy process (AHP)

地下采矿方法的选择是地下金属矿床开采设计中最核心的内容, 其选择正确与否对矿床开采的经济技术指标, 如采场生产能力、贫化损失率、劳动生产率、生产安全性以及矿石成本起着决定性的影响, 也将直接影响着采矿生产对环境的破坏程度^[1-3]. 因而, 对采矿方法的选择涉及到技术、经济、资源、安全以及环境等多方面因素, 采矿方案的选择变成了

一个多层次、多因素和多目标决策的系统工程问题. 对于这样复杂的系统工程, 由于矿床地质资料的误差、某些指标的不确定性以及定性指标难以量化描述等因素的影响, 使得采矿方案的选择具有极大的模糊性、随机性和未知性, 从而采矿方法选择成为一个典型的模糊决策问题^[4].

近年来, 模糊数学已广泛地应用于系统工程的

方案选择中,为在复杂系统设计过程中把那些只能定性描述的模糊概念定量化提供了理论依据^[4]。许多学者也将模糊数学原理应用于采矿方案的优选中,但由于仅利用模糊数学理论无法确定复杂的指标体系的权重,权重仅通过专家的主观评审选取,带有一定的主观性。层次分析法能够把复杂问题中的各因素划分成相关联的有序层次,使之条理化,利用数学方法确定表达每一层次全部元素的相对重要次序,是一种较好的多目标、多准则决策问题权值确定方法^[5-10]。

采矿方法选择一般分两步进行,首先根据矿体形态与产状、矿床地质条件初选出几种技术上可行的采矿方案,再采用数值或者数学方法进行更为细化的优选。以往的采矿方法初选通常是采用工程类比法,由于矿体形态、产状和稳固性等指标本身具有一定的不确定性和模糊性,使得初选结果具有一定的主观性和随意性。模糊聚类分析作为一种对所研究的事物按相似程度或亲疏关系进行分类的方法,能够反应样本间的内在组合关系,在矿业在许多方面得到广泛应用并取得了良好的效果^[9-10]。

本文尝试将采矿方法初选视为模糊分类问题来处理,以期得到更为科学的采矿方法初选结果,在此基础上,采用层次分析法建立采矿方案综合评价指标体系,客观确定各因素的权重,再通过模糊综合评判确定最优的采矿方案。

1 工程地质概况

程潮铁矿属于热液交代矽卡岩型铁矿床,范围东起 E15 线,西至 W16 线,全长约 800 m。矿体形态变化比较大,矿体厚度在沿矿体的走向和倾向方向均有一定的变化。在走向方向上,从 E15 线至 W1 线,矿体的厚度东西两端较薄,中间较厚, E2 线至 E4 线为矿体肥厚部位,至 E14 线以东矿体尖灭;从 W1 至 W16 线,矿体厚度总的变化不大,但东西两端仍较中部薄, W6 线至 W8 线为矿体较厚部位。从 E15 线至 W16 线总的勘探范围看, W1 线至 W0 线间,在沿倾斜方向上,矿体厚度变化的总趋势是上大下小。在研究区域东区 -358 m ~ -430 m 阶段,矿体最小厚度为 6 m,最大厚度为 93 m,平均厚度为 45 m 左右。从总的范围看,倾角由东往西呈现由缓变陡的趋势,矿体平均走向为 288° ~ 306°,平均倾向 193° ~ 212°,倾角在 20° ~ 65° 间,平均倾角为 50°。

矿山一直沿用无底柱分段崩落法,东区已形成大面积地表塌陷并严重影响到地表建筑及村庄的安全,西区为维持选厂地表的稳定,预留了保安矿柱,

造成约 50% 的矿量不能回采。从矿山生产安全、资源回收利用及保护生态环境等多方面出发,现考虑改用充填法进行后续矿石的回采。

2 采矿方法模糊聚类初选

采用模糊聚类方法初选采矿方法首先要建立一个技术可行待选方案集,然后对其集进行数据标准化和数据标定,最后进行聚类分析及检验。

2.1 建立待选方案集

由于矿石与围岩的稳定性较好,采矿方法可选范围较大,在此初步确定适合程潮铁矿的充填采矿法主要为进路充填采矿法、分层充填采矿法、阶段空场嗣后充填法、分段空场嗣后充填法和浅孔留矿嗣后充填法。研究国内采用以上采矿方法的典型矿山的开采技术条件,建立技术可行待选方案集如表 1。考虑进路充填法与分层充填法的适用地质条件相对较广,故分别列出了两组不同的数据以便更好地进行分类。

表 1 采矿方法初选待选方案集

Table 1 Mining programs for primary election

编号	采矿方法	倾角/ (°)	厚度/ m	稳固性		
				上盘	矿体	下盘
x_1	分段空场嗣后充填法	58	18	0.8	0.8	0.5
x_2	进路充填采矿法	70	26	0.2	0.5	0.2
x_3	进路充填采矿法	72	95	0.2	0.2	0.2
x_4	分层充填采矿法	55	40	0.8	0.5	0.8
x_5	浅孔留矿嗣后充填法	67	8	0.2	0.5	0.2
x_6	分层充填采矿法	45	8	0.2	0.2	0.2
x_7	阶段空场嗣后充填法	25	34	0.5	0.5	0.5
x_8	待选采矿方法	50	45	0.8	0.5	0.5

注:矿岩稳定性分为极稳固、稳固、中等稳固、不稳固和极不稳固五个级别,采用数据标定法,分别用 1、0.8、0.5、0.2 和 0 表示。

2.2 数据标准化及标定

设论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为 n 个待分类的对象,每个对象有 m 个指标表示其性状,即 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$, $i = 1, 2, \dots, n$,可得到原始数据矩阵。本文中, $n = 8$, $m = 5$,相应的原始数据矩阵如表 1 所示。不同的数据一般有不同的量纲,必须对原始数据进行标准化处理。采用平标准差—极差变换,公式如下:

$$x'_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{s_k}, \quad (1)$$

$$x''_{ik} = \frac{x'_{ik} - \min\{x'_{ik}\}}{\max\{x'_{ik}\} - \min\{x'_{ik}\}}. \quad (2)$$

式中, $\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik}$, $s_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}$, $i = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, m$. 标准化后的数据 $x''_{ik} \in [0, 1]$, 为方便起见, 仍采用 x_{ik} 表示 x''_{ik} .

原始数据标准化后需要按照某个准则或方法, 对被分类对象 x_i 与 x_j 间相似程度的相似系数 r_{ij} 进行标定, 从而确定论域 U 上的模糊关系矩阵 R . 标定方法很多, 线性的相似关系通常可采用海明距离标定法, 公式如下:

$$r_{ij} = 1 - C \sum_{k=1}^5 |x_{ik} - x_{jk}|. \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为 x_i 与 x_j 间的相似系数, $i, j = 1, 2, \dots, 8$; C 选取 $1/5$. 所得的相似模糊矩阵 R 如下所示:

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.531 & 0.263 & 0.737 & 0.539 & 0.422 & 0.623 & 0.804 \\ 0.531 & 1.000 & 0.733 & 0.504 & 0.946 & 0.752 & 0.590 & 0.571 \\ 0.263 & 0.733 & 1.000 & 0.301 & 0.679 & 0.685 & 0.360 & 0.391 \\ 0.737 & 0.504 & 0.301 & 1.000 & 0.474 & 0.384 & 0.659 & 0.867 \\ 0.539 & 0.946 & 0.679 & 0.474 & 1.000 & 0.806 & 0.562 & 0.543 \\ 0.422 & 0.752 & 0.685 & 0.384 & 0.806 & 1.000 & 0.555 & 0.494 \\ 0.623 & 0.590 & 0.360 & 0.659 & 0.562 & 0.555 & 1.000 & 0.768 \\ 0.804 & 0.571 & 0.391 & 0.867 & 0.543 & 0.494 & 0.768 & 1.000 \end{bmatrix}$$

2.3 模糊聚类分析

聚类的方法很多, 其中最为经典的, 也是应用最为广泛的是基于模糊等价关系的动态聚类法. 一般步骤是, 首先采用传递闭包法对标定所得的模糊相似矩阵 R 进行改造得到模糊等价矩阵 $t(R)$, 再让阈值 λ 由大变小, 形成动态聚类图, 从而得到论域 U 的不同分类^[1]. 所得的 $t(R)$ 如下式, 得到的动态聚类图如图1所示.

$$t(R) = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.590 & 0.590 & 0.804 & 0.590 & 0.590 & 0.768 & 0.804 \\ 0.590 & 1.000 & 0.733 & 0.590 & 0.946 & 0.806 & 0.590 & 0.590 \\ 0.590 & 0.733 & 1.000 & 0.590 & 0.733 & 0.733 & 0.590 & 0.590 \\ 0.804 & 0.590 & 0.590 & 1.000 & 0.590 & 0.590 & 0.768 & 0.867 \\ 0.590 & 0.946 & 0.733 & 0.590 & 1.000 & 0.806 & 0.590 & 0.590 \\ 0.590 & 0.806 & 0.733 & 0.590 & 0.806 & 1.000 & 0.590 & 0.590 \\ 0.768 & 0.590 & 0.590 & 0.768 & 0.590 & 0.590 & 1.000 & 0.768 \\ 0.804 & 0.590 & 0.590 & 0.867 & 0.590 & 0.590 & 0.768 & 1.000 \end{bmatrix}$$

2.4 确定最佳分类结果

对以上分类结果, 需要取合适的阈值 λ 以确定最佳分类. 通常使用 F 统计量对分类结果进行显著性检验, 对给定的信度 α , 如果 $F > F_\alpha$, 说明分类效果显著, 并在分类效果显著的结果中选择差值 $F - F_\alpha$ 最大所对应的分类为最佳分类^[1]. 取 $\alpha = 0.05$, 检验结果如表2所示.

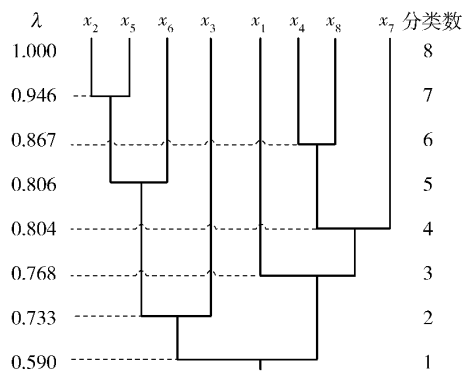


图1 采矿方法初选动态聚类图

Fig. 1 Dynamic clustering graph for primarily selection of mining methods

由检验结果可知, x_1 、 x_4 、 x_7 及 x_8 为一类, 且分类效果显著, x_2 为待选采矿方法, 其他三种为初选采矿方案集 $A = \{ \text{分层充填采矿法 } A_1, \text{分段空场嗣后充填法 } A_2, \text{阶段空场嗣后充填法 } A_3 \}$.

表2 采矿方法初选分类结果 F 检验表

Table 2 F test table for primary classification of mining methods

分类数	λ	F	F_α	$F - F_\alpha$
2	0.733	7.398	5.987	1.411
3	0.768	4.616	5.786	-1.170
4	0.804	3.623	6.591	-2.968
5	0.806	2.896	9.117	-6.221
6	0.867	3.328	19.296	-15.968
7	0.946	4.730	233.986	-229.256

3 综合评价指标体系及权重向量

3.1 构建层次综合评价指标体系

采矿方案评价是一个系统工程, 建立评价指标体系是进行评价的基础工作, 其科学性和合理性直接影响着评估结果的准确性. 在评价指标体系中, 既有定量化因素, 又有定性化因素, 且相互影响、相互制约. 评价指标选取原则是以尽量少的指标, 反映最主要和最全面的信息^[2]. 利用层次分析法基本原理, 从经济、安全、劳动生产率、资源利用、环境保护等方面出发, 构建采矿方法层次综合评价指标体系如图2所示.

3.2 确定模糊权重矩阵

采用层次分析法解决决策中指标体系各层次因素的权重分配问题.

3.2.1 比较标准度

采用二元对比法对同层次的相关因素进行比较, 比较标准度如表3所示.

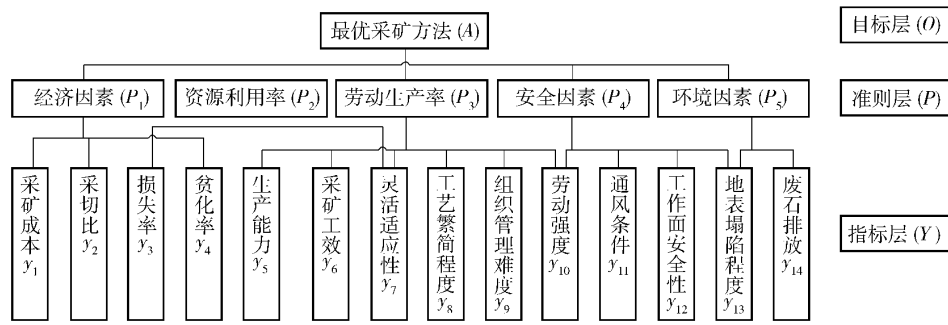


图2 采矿方法优选综合评价指标层次结构图

Fig.2 Hierarchy structure of comprehensive evaluation indexes for mining method optimization

表3 指标重要程度分级赋值标准

Table 3 Grade assignment standard for the importance of evaluation indexes

标准值	定义	说明
1	同样重要	因素 y_i 与 y_j 的重要性相同
3	稍微重要	因素 y_i 的重要性稍微高于 y_j
5	明显重要	因素 y_i 的重要性明显高于 y_j
7	强烈重要	因素 y_i 的重要性强烈高于 y_j
9	绝对重要	因素 y_i 的重要性绝对高于 y_j

注: 标准值2、4、6和8分别表示标准值1与3、3与5、5与7、7与9之间的值; 若 $W_{ij} = y_i/y_j$, 则 $1/W_{ij} = y_j/y_i$.

3.2.2 确定比较判断矩阵

通过专家对指标进行重要度评价,构造准则层(P)及指标层(Y)各因素的判断矩阵,其中A-P、 P_1 -Y判断矩阵如表4、表5所示.

根据判断矩阵D,采用方根法求出其最大特征根 $\lambda_{\max}$ 所对应的特征向量W,并对W归一化,可得各评价因素的相对权重^[4]. 公式如下:

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n W_{ij}} / \sum_{j=1}^n W_j, \quad (4)$$

表6 权重计算结果

Table 6 Weight calculation results

准则	A-P	指标	P_1 -Y	指标	P_2 -Y	指标	P_3 -Y	指标	P_4 -Y	指标	P_5 -Y
P_1	0.309	y_1	0.500	y_3	0.570	y_5	0.364	y_{10}	0.071	y_{13}	0.667
P_2	0.177	y_2	0.079	y_4	0.333	y_6	0.136	y_{11}	0.154	y_{14}	0.333
P_3	0.139	y_3	0.281	y_7	0.097	y_7	0.080	y_{12}	0.496	—	—
P_4	0.309	y_4	0.140	—	—	y_8	0.232	y_{13}	0.279	—	—
P_5	0.066	—	—	—	—	y_9	0.051	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	y_{10}	0.136	—	—	—	—

3.2.3 一致性检验

以上得到的权重分配是否合理,还需要对判断矩阵进行一致性检验. 一致性检验公式为 $C_R = C_1/R_1$. 其中: C_1 为一致性检验指标, $C_1 = (\lambda_{\max} - n)/(n -$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(DW)_i}{nW_i}. \quad (5)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$. 所得的权重矩阵如表6所示.

表4 A-P判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of A-P

重要程度	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
P_1	1	2	3	1	4
P_2	1/2	1	2	1/2	3
P_3	1/3	2	1	1/3	2
P_4	1	2	3	1	4
P_5	1/4	1/3	1/2	1/4	1

表5 P_1 -Y判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of P_1 -Y

重要程度	y_1	y_2	y_3	y_4
y_1	1	5	2	4
y_2	1/5	1	1/4	1/2
y_3	1/2	4	1	2
y_4	1/4	2	1/2	1

1), n 为判断矩阵的阶数; R_1 为平均随机一致性指标. 当判断矩阵D的 $C_R < 0.1$ 时认为D具有满意的一致性, 否则需调整D中的元素以使其具有满意的一致性^[5]. 检验结果如表7所示, 判断矩阵均通

过一致性检验。整理可得权重矩阵:

$$W = (0.154, 0.024, 0.188, 0.102, 0.051, 0.019, 0.028, 0.032, 0.007, 0.041, 0.048, 0.153, 0.130, 0.022).$$

表 7 一致性检验结果

Table 7 Consistency test results

判断矩阵	$\lambda_{\max}$	C_1	R_1	C_R
$A-P$	5.481	0.110	1.12	0.099
P_1-Y	4.028	0.009	0.90	0.010
P_2-Y	3.025	0.012	0.58	0.021
P_3-Y	6.073	0.015	1.24	0.012
P_4-Y	4.073	0.024	0.94	0.026
P_5-Y	2.000	0	0	0

4 采矿方法模糊综合评判

模糊综合评判可分为一级模糊评价和多级模糊评价,考虑到综合评价指标体系的层次结构,本次采矿方法优选为二级模糊综合评判。结合程潮铁矿的开采技术条件,并参照国内外矿山采用上述三种采矿方法开采所取得的效果,确定相关技术经济指标如表 8 所示。

表 8 初选采矿方案技术经济指标

Table 8 Technical and economic indicators for primary selection of mining methods

指标	A_1	A_2	A_3
充填成本/(元·t ⁻¹)	27.88	22.18	17.21
采切比/(m·万 t ⁻¹)	23.32	48.30	34.71
损失率/%	7	10	10
贫化率/%	7	10	11
矿块生产能力/(万 t·a ⁻¹)	21	30	35
采矿工效	较低	较高	高
灵活适应性	好	差	差
工艺繁简程度	复杂	较复杂	较简单
组织管理难度	难	较难	较难
劳动强度	大	较低	低
通风条件	较好	较好	好
工作面安全性	较安全	安全	较安全
地表塌陷程度	轻	轻	轻
废石排放	少	少	较少

4.1 隶属矩阵的确定

定量指标的隶属度由隶属函数法确定,非定量指标采用相对二元比较法确定。

4.1.1 定量指标隶属度计算

定量指标可以分为收益性指标与消耗性指标。

对于收益性指标,值越大越好,如矿石生产能力;对于消耗性指标,值越小越好,如生产成本和贫化率。分别采用公式 $r_{ij} = y_{ij}/\max(y_{ij})$ 及 $r_{ij} = 1 - y_{ij}/\max(y_{ij})$,对收益性及消耗性指标进行量纲为 1 化处理^[3],可得定量指标相对隶属度矩阵 R_1 :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.504 & 0.383 \\ 0.517 & 0.000 & 0.281 \\ 0.300 & 0.000 & 0.000 \\ 0.364 & 0.091 & 0.000 \\ 0.600 & 0.857 & 1.000 \end{bmatrix}.$$

4.1.2 定性指标隶属度计算

对那些无法定量描述的指标,如安全性和劳动强度,需要采用二元对比排序法确定其隶属函数。本研究采用优先关系法,方法如下^[4]。

设论域 $U = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,以 c_{ij} 表示 y_i 与 y_j 相比时 y_i 的优越程度,则有 $0 \leq c_{ij} \leq 1$;如果 y_i 比 y_j 绝对优越则 $c_{ij} = 1$,反之 $c_{ij} = 0$;且 $c_{ij} + c_{ji} = 1$ 。由此可得到模糊优选关系矩阵 $C = [c_{ij}]_{n \times n}$,再用平均法计算隶属度,计算公式为

$$R(y_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}. \quad (6)$$

按照非常好、好、较好、较差、差和非常差六个级别分别为 10、8、6、4、2 和 0,邀请 10 位专家分别对上述三种采矿方法的定性指标进行打分,计算得到隶属度矩阵如下

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.425 & 0.717 & 0.993 \\ 0.813 & 0.713 & 0.512 \\ 0.556 & 0.821 & 0.849 \\ 0.373 & 0.819 & 0.892 \\ 0.413 & 0.833 & 0.920 \\ 0.804 & 0.843 & 0.899 \\ 0.987 & 0.932 & 0.899 \\ 0.822 & 0.822 & 0.822 \\ 0.845 & 0.886 & 0.798 \end{bmatrix}.$$

4.2 模糊综合评判

根据上述得到的权重矩阵 W 及隶属度矩阵 R ,采用加权平均算法,按普通矩阵乘法计算权重向量与隶属度矩阵的乘积,计算公式如下:

$$B_j = \sum_{i=1}^n W_i R_{ij} = (b_1, b_2, \dots, b_n). \quad (7)$$

式中, b_j 表示方案 A_j 综合隶属度。在方案评选中,可以根据方案的综合隶属度对方案集 A 进行排序,以综合隶属度最大的采矿方法为最适合待选矿山的采矿方法。

通过计算可得得到 $B_j = (0.520, 0.540,$

0.526)。根据最大隶属度原则,确定方案 A_2 分段空场嗣后充填法为最优采矿方法。

5 结 论

(1) 采用模糊聚类的方法从技术影响因素方面按照相似程度及亲疏关系对采矿方法进行了分类初选,并对分类结果进行了 F 检验,确定了最佳分类结果,提高了采矿方法初选方法的科学性。

(2) 运用层次分析法,综合考虑经济效益、资源利用程度、劳动生产率、安全及环境等五大类因素,构建了较为全面的采矿方法选择综合层次评价指标体系,确定了各评判准则的判断矩阵并对其进行了一致性检验,得到了合理的权重矩阵。该方法较好地解决了多因素决策时评判指标权重的分配问题,尤其在各方方案评判指标出现优越性交叉时,能够做出更为科学准确的决策。

(3) 通过二级模糊综合评判进行采矿方法最优方案决策,根据最大隶属度原则,确定方案分段空场嗣后充填法为最优采矿方法。

(4) 将模糊数学理论和层次分析法应用到采矿方法选择中,能够较为科学地分配影响因素权重,具有一定的理论意义和实际应用价值,也可推广应用于其他系统工程的决策问题之中。然而如何认识各影响因素之间的内在联系,进一步提高采矿方法选择的科学性,还有待进一步研究和探索。

参 考 文 献

- [1] Wang Y G. Important impact caused by mining method choice onto mining engineering design and ore production. *Nonferrous Mines*, 1995(3): 4
(王玉国. 采矿方法选择对工程设计和矿山生产的重要影响. 有色矿山, 1995(3): 4)
- [2] Huang D C, Hu Y Q, Chen X H, et al. Intelligent decision support system of mining method based on fuzzy expert system and neural net. *Nonferrous Met*, 2002, 54(2): 104
(黄德锺, 胡运权, 陈孝华, 等. 基于模糊推理和神经网络的采矿方法智能决策系统. 有色金属, 2002, 54(2): 104)
- [3] Xie J J, Liu C P. *Fuzzy Mathematics and its Applications*. 3rd Ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006
(谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用. 3版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006)
- [4] Fang S C, Wang D W. *Fuzzy Mathematics and Fuzzy Optimization*. Beijing: Science Press, 1997
(方述成, 汪定伟. 模糊数学与模糊优化. 北京: 科学出版社, 1997)
- [5] Chang J E, Jiang T L. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process. *J Wuhan Univ Technol Inf Manage Eng*, 2007, 29(1): 153
(常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2007, 29(1): 153)
- [6] Zhang J Y. Fuzzy comprehensive evaluation method of the foundation stability of new buildings above worked out areas. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(11): 1360
(张俊英. 采空区地表建筑地基稳定性模糊综合评价方法. 北京科技大学学报, 2009, 31(11): 1360)
- [7] Wang X M, Zhao B, Zhang Q L. Mining method choice based on AHP and fuzzy mathematics. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2008, 39(5): 875
(王新民, 赵彬, 张钦礼. 基于层次分析和模糊数学的采矿方法选择. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(5): 875)
- [8] Ren H G, Tan Z Y, Cai X F, et al. AHP-Fuzzy optimization of structural parameters in sublevel openstope succedent filling method. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2010, 32(11): 1383
(任岗岗, 谭卓英, 蔡学峰, 等. 分段空场嗣后充填法采场结构参数 AHP-Fuzzy 优化. 北京科技大学学报, 2010, 32(11): 1383)
- [9] Li H, Jiang J Q, Zhang K Z. Fuzzy clustering analysis of tunnel surrounding rock classification. *J Xi'an Univ Sci Technol*, 2005, 25(1): 12
(李洪, 蒋金泉, 张开智. 回采巷道围岩分类的模糊聚类分析方法. 西安科技大学学报, 2005, 25(1): 12)
- [10] Guo W B, Liu Y X, Li X S. Fuzzy clustering analysis of mining induced damages of building. *J Min Saf Eng*, 2007, 24(3): 288
(郭文兵, 刘义新, 李小双. 采动影响下建筑物损害程度的模糊聚类分析. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 288)
- [11] Liang B S, Cao D L. *Fuzzy Mathematics and Its Applications*. Beijing: Science Press, 2007
(梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用. 北京: 科学出版社, 2007)
- [12] Li J F, Wu X P. Synthetic evaluation for urban rail transit line network planning scheme based on AHP-Fuzzy method. *J Wuhan Univ Technol Transp Sci Eng*, 2007, 31(2): 205
(李俊芳, 吴小萍. 基于 AHP-FUZZY 多层次评判的城市轨道交通线网规划方案综合评价. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2007, 31(2): 205)
- [13] Ye H W, Chang J. Choosing mining method based on fuzzy decision and analytic hierarchy process. *J Wuhan Univ Technol*, 2009, 31(8): 145
(叶海旺, 常剑. 基于模糊决策和层次分析法的采矿方法选择. 武汉理工大学学报, 2009, 31(8): 145)
- [14] Li H J. *Practical Algorithm Based on Fuzzy Mathematics*. Beijing: Science Press, 2005
(李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法. 北京: 科学出版社, 2005)