

# 基于未确知理论的巷道支护方案评价体系及应用

唐诗卉<sup>1,2</sup>

1. 中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083
2. 湖南有色金属研究院,长沙 410100

**摘要** 针对巷道支护方案评价中的众多不确定性影响因素,从实际工程状况出发,选取14项重要指标,分别进行定量和定性评价,采用熵计算各评价指标的权重,根据置信度判别准则进行优劣性评价,采用VC++语言建立基于未确知理论的巷道支护方案评价体系。将该评价体系应用于某金矿软破介质的巷道支护方案优选中,得出超前锚杆加U型钢拱架为最佳支护方案。结果表明,该评价体系科学合理,可为类似工程的支护设计和生产管理提供依据。

**关键词** 巷道支护;未确知理论;评价体系;置信度识别准则

**中图分类号** TD05

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.17.004

## An Unascertained Theory Based Evaluation System for Roadway Support Schemes and Its Application

TANG Shihui<sup>1,2</sup>

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. Hunan Research Institute for Nonferrous Metals, Changsha 410100, China

**Abstract** For many uncertainty factors in the roadway support schemes evaluation, considering the actual engineering status, 14 key indicators are selected and the uncertainty problems are solved by quantitative and qualitative evaluations, respectively. The entropy theory is used to calculate the weights of the indicators, and the advantages and disadvantages of a support scheme are evaluated according to the credible degree recognition criteria. An evaluation system for roadway support schemes is finally set up based on unascertained theory using VC++ language. Furthermore, this evaluation system is used to evaluate roadway support schemes of soft and fractured medium in a gold mine. The result shows that the optimized support scheme is the forepoling bolt and U-formed arched falsework. This study indicates that the evaluation system is reasonable and can provide a basis for the support design and production management of similar projects.

**Keywords** roadway support; unascertained theory; evaluation system; credible degree recognition

巷道支护方案的评价不仅要适应矿床地质赋存条件、满足技术可行,确保安全可靠,还应最大程度地提高经济和社会效益,巷道支护方案的选择与评价是一个复杂系统,需要考虑影响支护的多种指标,并对各指标进行合理的评价研究。国内外学者在巷道支护方案的评价和选择上进行了一些探索,引入了神经网络<sup>[1]</sup>、粗糙集理论<sup>[2]</sup>、模糊理论<sup>[3]</sup>等,上述评价方法在对各指标进行定量和定性评价时都带一定的主观性。巷道支护优选的难点在于评价指标的隐蔽性和

不确定性,如何对这些不确定信息进行合理评判和分析,是解决本问题的关键。1990年,王光远<sup>[4]</sup>提出的未确知测度理论已在军事、环境、岩土工程和采矿工程等领域应用广泛,都取得了良好的效果<sup>[5-10]</sup>。鉴于此,本文借鉴未确知理论的思想,选取影响巷道支护的14个指标,对其进行合理的评价,建立基于未确知理论的巷道支护方案评价体系,将该评价体系成功应用到某金矿软破介质中的巷道支护方案优选中。

收稿日期:2014-02-07;修回日期:2014-04-03

作者简介:唐诗卉,工程师,研究方向为安全科学方法学,电子信箱:417833253@qq.com

引用格式:唐诗卉.基于未确知理论的巷道支护方案评价体系及应用[J].科技导报,2014,32(17):29-34.

## 1 未确知测度理论

### 1.1 确定待优化对象的分类模式系统

设  $R_1, R_2, \dots, R_n$  为待优化的  $n$  个对象, 则优化对象空间  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 。对于每个对象  $R_i (i=1, 2, \dots, n)$  有  $m$  个单项评价指标, 则评价指标空间为  $X = \{x^1, x^2, \dots, x^m\}$ 。故  $R_i$  代表  $m$  维向量  $R_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m\}$ , 式中,  $x_i^j$  为  $R_i$  相对判别参数  $x^j$  的计算值。对于不同的  $x_i^j$ , 对其优化结果  $R_i$  的贡献各不相同, 分为  $A, B$  两类。  $A$  类  $x_i^j$  值越大, 对优越度  $Q$  的贡献越大;  $B$  类  $x_i^j$  值越小, 对优越度  $Q$  的贡献越大。对每个子项  $x_i^j (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ , 假设有  $p$  个评价等级  $C_1, C_2, \dots, C_p$ 。

$U$  表示评价空间, 则  $U = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 。设  $C_k (k=1, 2, \dots, p)$  为第  $k$  级评价级别, 且  $k$  级高于  $k+1$  级, 记作  $C_k > C_{k+1}$ 。若  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  满足  $C_1 > C_2 > \dots > C_p$  或  $C_1 < C_2 < \dots < C_p$ , 评价空间  $U$  的有序分割集合为  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 。

### 1.2 单指标测度

$\mu_k^j = \mu(x_i^j \in C_k)$  称为未确知测度表示测量值  $x_i^j$  属于第  $k$  个判别等级  $C_k$  的程度, 需满足公式

$$0 \leq \mu(x_i^j \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$\mu(x_i^j \in U) = 1 \quad (2)$$

$$\mu[x_i^j \in \bigcup_{i=1}^k C_i] = \sum_{i=1}^k \mu(x_i^j \in C_i) \quad k=1, 2, \dots, p \quad (3)$$

式(1)为非负有界性, 式(2)为归一性, 式(3)为可加性。满足式(1)~(3)的  $\mu$  为未确知测度。

### 1.3 指标权重的确定

设  $w_j$  为测量指标相对其他指标的重要程度,  $w_j$  满足  $0 \leq w_j \leq 1$ , 称  $w_j$  为  $x_i$  的权重,  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$  为指标权重向量。则有

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_i \quad (4)$$

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg k} \sum_{i=1}^k \mu_{ik}^j \lg \mu_{ik}^j \quad (5)$$

### 1.4 多指标综合测度评价向量

若  $\mu_k = \mu(x_i \in c)$  表示评价因素  $x_i$  属于第  $k$  等级的程度, 则

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ik}^j \quad i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, p \quad (6)$$

$$0 \leq \mu_{ik} \leq 1 \text{ 且 } \sum_{k=1}^p \mu_{ik} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ik}^j = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{k=1}^p \mu_{ik}^j \right) w_j = 1。$$

### 1.5 优化结果识别和排序

可采用置信度判别方法确定最终的评价结果: 假设  $\lambda$  为置信度 ( $\lambda \geq 0.5$ ), 若评价空间  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  有序, 设  $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ , 且令

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^k \mu_{i1} \geq \lambda, k=1, 2, \dots, p \right\} \quad (7)$$

则认为优化对象  $R_i$  属于第  $k_0$  个评价类  $C_{k_0}$ 。

令  $C_i$  的分值为  $I_i$ , 则  $I_1 > I_{i+1}$ , 令

$$Q_{R_i} = \sum_{i=1}^p I_i \cdot \mu_{ii} \quad (8)$$

则  $Q_{R_i}$  是评价因素  $R_i$  的未确知优劣度, 称  $Q = (Q_{R_1}, Q_{R_2}, \dots, Q_{R_n})$  为未确知重要度向量, 可按  $Q_{R_i}$  的大小对  $R_i$  的优劣性进行排序。

## 2 巷道支护方案综合评价体系

### 2.1 体系构建

巷道支护方案优选时需要考虑众多的评价指标, 主要包括经济性、工期、安全性及技术可行性 4 个主指标, 每个主指标又细分为众多分指标, 巷道支护方案评价体系影响指标如图 1 所示。

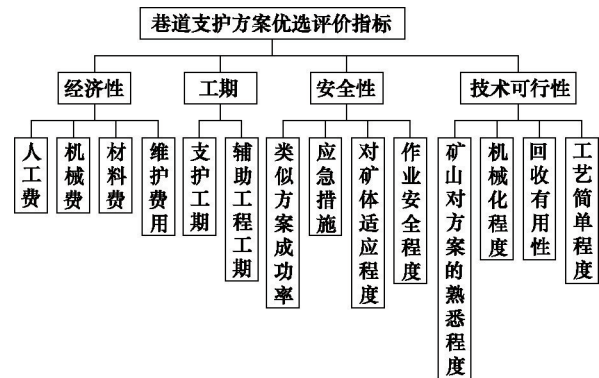


图1 巷道支护方案评价体系影响指标

Fig. 1 Influencing indexes of the roadway support scheme evaluation system

由图 1 可知, 本文选取影响巷道支护的 14 项因素作为评价指标, 即人工费、机械费、材料费、维护费用、支护工期、辅助工程工期、类似方案成功率、应急措施、对矿体的适应程度、作业安全程度、矿山对方案的熟悉程度、机械化程度、回收有用性、工艺简单程度, 分别用  $X_1, X_2, \dots, X_{14}$  表示。参考国内外同类巷道支护的分级标准以及相关研究, 其中对人工费  $X_1$ 、机械费  $X_2$ 、材料费  $X_3$ 、维护费用  $X_4$ 、支护工期  $X_5$ 、辅助工程工期  $X_6$ 、类似方案成功率  $X_7$  采用实测值进行评价, 如表 1 所示。对应急措施  $X_8$ 、矿体的适应程度  $X_9$ 、作业安全程度  $X_{10}$ 、矿山对方案的熟悉程度  $X_{11}$ 、机械化程度  $X_{12}$ 、回收有用性  $X_{13}$ 、工艺简单程度  $X_{14}$  等 7 个定性指标, 则按专家评估打分的方法进行取值, 其赋值情况与分级标准如表 2 所示。

评判集为  $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ , 即  $C_1, C_2, C_3, C_4$  级, 分别表示优越度为优、良、中、差 4 个等级。表 1 和表 2 中的具体量值有些误差, 但因都为相对取值, 故不影响巷道支护方案优劣度等级的划分, 不会影响巷道支护方案优选结果。

### 2.2 构造单指标测度函数

根据前文对单指标测度函数的定义和表 1、表 2 的各评价指标分级标准, 可得各评价指标的单指标测度函数, 如图 2 所示。

表1 巷道支护方案评价的定量指标分级标准

Table 1 Classification criteria of quantitative indexes in the roadway support scheme evaluation

分级标准	评价指标						
	$X_1/(\text{元}\cdot\text{m}^{-1})$	$X_2/(\text{元}\cdot\text{m}^{-1})$	$X_3/(\text{元}\cdot\text{m}^{-1})$	$X_4/(\text{元}\cdot\text{m}^{-1})$	$X_5/(\text{h}\cdot\text{m}^{-1})$	$X_6/(\text{h}\cdot\text{m}^{-1})$	$X_7$
$C_1$	<200	<300	<1200	<100	<3	<1	<0.70
$C_2$	200~400	300~600	1200~1600	100~200	3~6	1~2	0.70~0.80
$C_3$	400~600	600~900	1600~2000	200~300	6~9	2~3	0.80~0.90
$C_4$	>600	>900	>2000	>300	>9	>3	>0.90

表2 巷道支护方案评价的定性指标分级标准

Table 2 Classification criteria of qualitative indexes in the roadway support scheme evaluation

分级标准	评价指标						
	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$
$C_1$	好	好	好	熟悉	高	好	简单
$C_2$	较好	较好	较好	较熟悉	较高	较好	较简单
$C_3$	较差	较差	较差	较生疏	较低	较差	较复杂
$C_4$	差	差	差	生疏	低	差	复杂

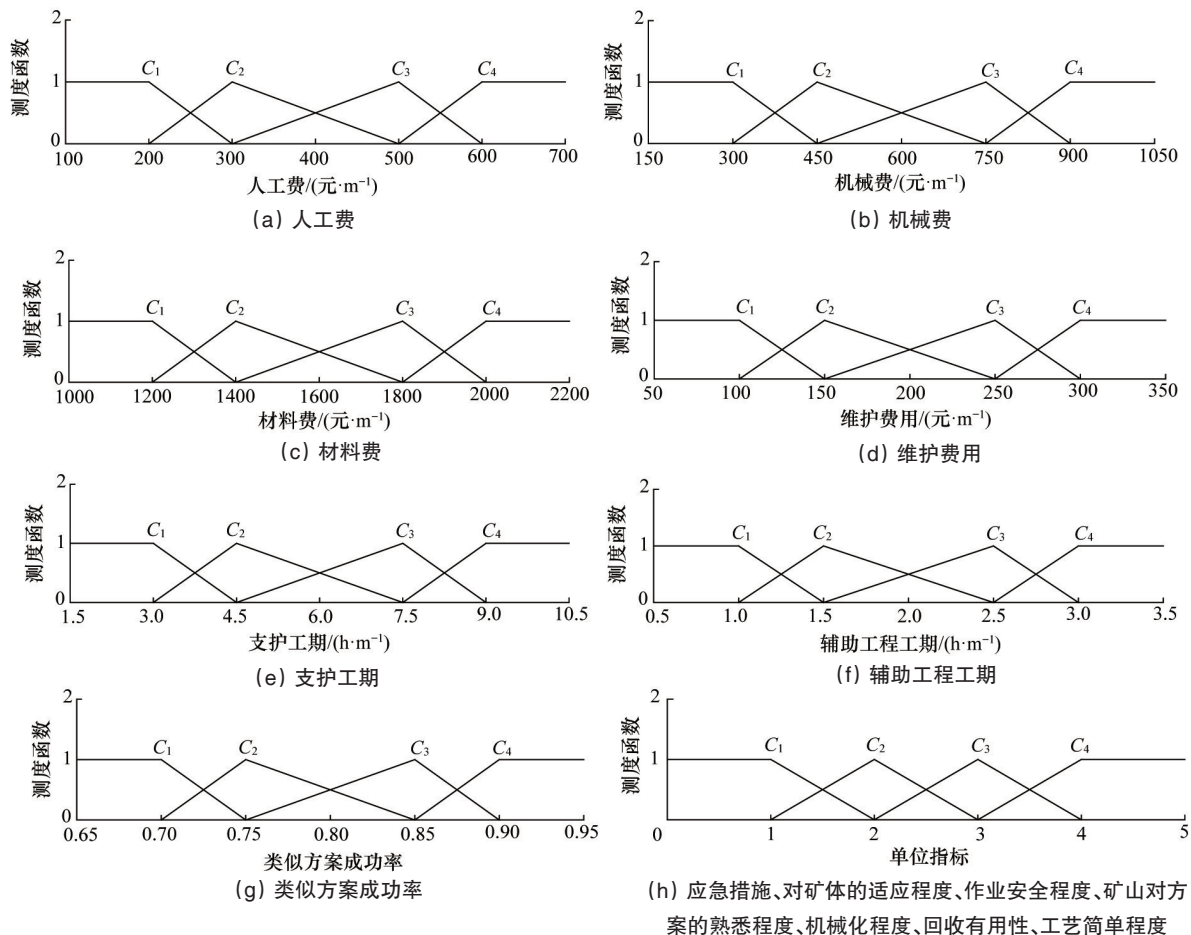


图2 14个评价指标的单指标测度函数

Fig. 2 Uncertainty measurement functions of the 14 evaluation indexes

2.3 综合评价系统界面

在巷道支护方案未明确测度理论的综合评价过程中,单

指标测度、评价指标权重和多指标测度向量计算过程较为复杂,为便于未明确测度模型的应用,本文中运用VC++语言开

发了基于未确知测度理论的巷道支护方案综合评价系统。该系统可以实现基于未确知测度函数的单指标测度计算,基于信息熵理论的权重计算和多指标测度计算以及置信度识别,最终评判出巷道支护方案等级。

未确知测度综合评价系统包括3个功能模块,分别为测度向量计算、权重计算和综合评价。

### 3 实例验证

#### 3.1 巷道支护方案评价指标值的确定

某金矿在过去20多年的开采历史中,由于先前采矿方法的缺陷,在浅部软破介质中残留了大量的二次资源。在回采该类资源前,必须先软破介质内掘进巷道。充填体是浅部最主要的软破介质,由于其松散软弱的特点,在施工中极易垮冒,在该软破介质中进行巷道施工,必须预先进行支护,以保证施工顺利进行与作业安全。充填体的试验力学参数:配比,1:8;弹性模量,231.10 MPa;泊松比0.19;内摩擦角38.7°;黏结力,171 kPa;单向抗压强度,1.71 MPa;单向抗拉强度,0.17 MPa。根据此基本条件,初选出的5种巷道预支护基本方案:1)超前锚杆与U型钢拱架联合支护;2)U型钢拱架插板法;3)超前喷注混凝土拱;4)超前钢管与U型钢拱架联合支护;5)超前锚杆与梯形可缩性支架联合支护<sup>[11-13]</sup>。

参考国内外类似条件的巷道预支护方案,结合本矿的巷道支护条件,针对初选出的5种方案,确定各方案的评价指标值 $R_1 \sim R_5$ 如表3所示。

表3 巷道支护方案评价指标值

Table 3 Evaluation indexes of roadway support scheme

指标	方案评价				
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$
$X_1$	288.8	512.4	497.5	321.1	344.7
$X_2$	294.4	452.1	469.1	333.6	314.5
$X_3$	1187.5	1650.7	1573.4	1374.8	1424.1
$X_4$	120.7	238.9	247.1	164.9	204.1
$X_5$	2.95	7.8	8.2	3.6	4.2
$X_6$	0.92	2.9	2.7	1.7	2.1
$X_7$	0.91	0.71	0.73	0.87	0.83
$X_8$	1.5	2.4	2.8	1.8	1.9
$X_9$	3.8	1.9	3.1	3.2	2.5
$X_{10}$	3.5	2.5	2.6	3.2	3.0
$X_{11}$	3.6	1.7	2.9	2.8	2.4
$X_{12}$	3.7	2.1	2.2	3.4	3.1
$X_{13}$	3.3	1.8	1.3	3.1	2.9
$X_{14}$	3.8	1.6	2.1	3.4	3.4

#### 3.2 单指标测度向量计算

测度向量计算是通过输入各评价指标的真实评价价值,采用前文建立的单指标测度函数计算求出各评价指标的单指标测度向量,如图3所示。



图3 单指标测度向量计算

Fig. 3 Calculation of singleindex measured vector

根据表4中14个评价指标的取值,分别代入用VC++语言所编的“基于未确知测度理论的巷道支护方案评价体系”的单指标测度矩阵的计算界面中,可计算出单指标评价矩阵,方案1~5的单指标测度矩阵分别为

$$(\mu_{1jk})_{14 \times 4} = \begin{bmatrix} 0.112 & 0.888 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 \\ 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.414 & 0.586 \\ 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 \\ 0 & 0 & 0.500 & 0.500 \\ 0.800 & 0.200 & 0 & 0 \\ 0.500 & 0.500 & 0 & 0 \\ 0.600 & 0.400 & 0 & 0 \\ 0.700 & 0.300 & 0 & 0 \\ 0.300 & 0.700 & 0 & 0 \\ 0.800 & 0.200 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$(\mu_{2jk})_{14 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.876 & 0.124 \\ 0 & 0.007 & 0.993 & 0 \\ 0 & 0.373 & 0.627 & 0 \\ 0 & 0.889 & 0.111 & 0 \\ 0 & 0 & 0.800 & 0.200 \\ 0 & 0 & 0.200 & 0.800 \\ 0.800 & 0.200 & 0 & 0 \\ 0 & 0.400 & 0.600 & 0 \\ 0 & 0 & 0.900 & 0.100 \\ 0 & 0.500 & 0.500 & 0 \\ 0 & 0 & 0.700 & 0.300 \\ 0 & 0.100 & 0.900 & 0 \\ 0 & 0 & 0.800 & 0.200 \\ 0 & 0 & 0.600 & 0.400 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$(\mu_{3jk})_{14 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.013 & 0.987 & 0 \\ 0 & 0.064 & 0.936 & 0 \\ 0 & 0.566 & 0.434 & 0 \\ 0 & 0.971 & 0.029 & 0 \\ 0 & 0 & 0.533 & 0.467 \\ 0 & 0 & 0.600 & 0.400 \\ 0.400 & 0.600 & 0 & 0 \\ 0 & 0.800 & 0.200 & 0 \\ 0.100 & 0.900 & 0 & 0 \\ 0 & 0.600 & 0.400 & 0 \\ 0 & 0.900 & 0.100 & 0 \\ 0 & 0.200 & 0.800 & 0 \\ 0 & 0 & 0.300 & 0.700 \\ 0 & 0.100 & 0.900 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$(\mu_{sjk})_{14 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.895 & 0.105 & 0 \\ 0 & 0 & 0.224 & 0.776 \\ 0.126 & 0.874 & 0 & 0 \\ 0 & 0.149 & 0.851 & 0 \\ 0.600 & 0.400 & 0 & 1.000 \\ 0 & 0.800 & 0.200 & 0 \\ 0 & 0 & 0.600 & 0.400 \\ 0 & 0 & 0.800 & 0.200 \\ 0.200 & 0.800 & 0 & 0 \\ 0.200 & 0.800 & 0 & 0 \\ 0 & 0.800 & 0.200 & 0 \\ 0.400 & 0.600 & 0 & 0 \\ 0.100 & 0.900 & 0 & 0 \\ 0.400 & 0.600 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$(\mu_{sjk})_{14 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.776 & 0.224 & 0 \\ 0 & 0 & 0.097 & 0.903 \\ 0 & 0.940 & 0.060 & 0 \\ 0 & 0.541 & 0.459 & 0 \\ 0.200 & 0.800 & 0 & 0 \\ 0 & 0.400 & 0.600 & 1.000 \\ 0 & 0.200 & 0.800 & 0 \\ 0 & 0.000 & 0.900 & 0.100 \\ 0 & 0.500 & 0.500 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 0 & 0.400 & 0.600 & 0 \\ 0.100 & 0.900 & 0 & 0 \\ 0 & 0.900 & 0.100 & 0 \\ 0.400 & 0.600 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

表4 不同支护方案的评价指标权重值

Table 4 Evaluation index weight and mean of different support schemes

指标	方案权重				
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>
X <sub>1</sub>	0.081	0.079	0.084	0.097	0.071
X <sub>2</sub>	0.103	0.100	0.090	0.062	0.085
X <sub>3</sub>	0.103	0.061	0.061	0.093	0.091
X <sub>4</sub>	0.060	0.081	0.097	0.067	0.039
X <sub>5</sub>	0.103	0.071	0.060	0.071	0.073
X <sub>6</sub>	0.103	0.060	0.037	0.084	0.062
X <sub>7</sub>	0.103	0.071	0.061	0.071	0.073
X <sub>8</sub>	0.047	0.060	0.058	0.060	0.085
X <sub>9</sub>	0.049	0.082	0.084	0.060	0.060
X <sub>10</sub>	0.039	0.059	0.061	0.084	0.106
X <sub>11</sub>	0.044	0.064	0.084	0.056	0.047
X <sub>12</sub>	0.041	0.082	0.073	0.054	0.085
X <sub>13</sub>	0.053	0.071	0.065	0.070	0.061
X <sub>14</sub>	0.071	0.060	0.084	0.071	0.062

3.3 计算多指标测度评价矩阵

权重计算是基于信息熵理论和计算所得的单指标测度向量分别计算各评价指标的权重,通过巷道支护方案未确知测度综合评价系统中权重计算模块得出各评价指标权重值,并计算平均值进行比较。5种支护方案的评价指标权重S<sub>1</sub>~S<sub>5</sub>见表4。图4为计算各评价指标权重的计算界面。



图4 基于信息熵理论的权重计算

Fig. 4 Weight calculation based on information entropy theory

3.4 综合评价结果

因为评定等级  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\} (i=1, 2, \dots, p)$  的有序性,故可采用置信度判别准则对评价对象支护方案优劣程度做出最后的评价结果。

设λ为置信度(λ≥0.5),若  $C_1 > C_2 > \dots > C_4$ ,且令

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^k u_{ii} \geq \lambda, k=1, 2, 3, 4 \right\} \quad (14)$$

则认为该支护方案的优劣度  $R_i$  属于第  $k_0$  个评价类  $C_{k_0}$ 。相比于模糊综合评价方法,未确知测度综合评价可以对评价空间进行有序划分,而且采用的置信度识别准则也优于模糊综合评判的最大隶属度判别准则。

综合评价是根据前文建立的未确知测度模型,利用测度向量计算模块和权重计算模块求出的单指标测度向量和指标权重计算多指标测度矩阵,进而计算多指标测度向量,然后采用置信度识别方法综合评判巷道支护方案等级。如图5所示。

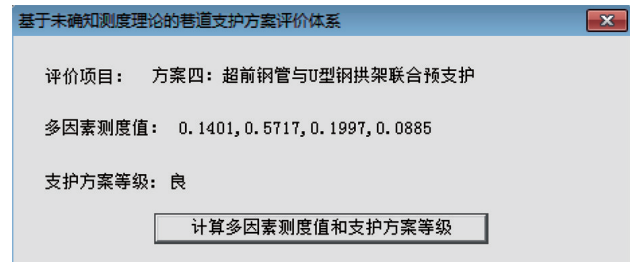


图5 巷道支护方案的未确知测度综合评价结果

Fig. 5 Comprehensive evaluation results of roadway support schemes using unascertained theory

未确知测度模型评价结果见表5。分析方案1(R<sub>1</sub>),从左到右,且  $k_0 = 0.5048 > \lambda$ ,即R<sub>1</sub>的优劣度为优;从右到左  $k_0 = 1 > \lambda$ ,R<sub>1</sub>的优劣度级别也为优。通过计算发现两次判定的结果一样,可以确定支护方案1的优劣度级别为优。同样对支护方案2~5分别进行计算判定,可知方案2和方案3优劣度级别为中,方案4和方案5优劣度级别为良。

因为  $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$ ,对C<sub>1</sub>赋值4,C<sub>2</sub>赋值3,C<sub>3</sub>赋值2,C<sub>4</sub>赋值1,可求得5个方案的优劣度量值。

从表5中可以直观得出各方案的优越度,方案1为最佳

方案,其优越度最高,为2.9267,方案4、方案5、方案3、方案2相对次之。综合矿山实际要求和评价结果,方案的优越次序为方案1、方案4、方案5、方案3、方案2。

表5 未确知测度模型评价结果

Table 5 Evaluation results of unascertained model

支护方案	综合未确知测度				识别结果	优劣度
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$		
方案1	0.5048	0.1818	0.0484	0.2650	优	2.9267
方案2	0.0568	0.1708	0.6352	0.1372	中	2.1472
方案3	0.0330	0.4293	0.4489	0.0993	中	2.4170
方案4	0.1401	0.5717	0.1997	0.0885	良	2.7634
方案5	0.0478	0.5829	0.2838	0.0854	良	2.5929

#### 4 结论

软破介质中巷道预支护方案的选择受多种因素的影响。针对这些因素的隐蔽性和不确定性,综合考虑软破介质的基本条件,引入未确知测度理论,建立了巷道支护方案的未确知均值聚类评价体系。

该体系选用了14项评价指标对某金矿软破介质中的巷道预支护方案进行优选,得出超前锚杆与U型钢拱架联合预支护为最佳支护方案,超前钢管与U型钢拱架联合预支护、超前锚杆与梯形可缩性支架联合预支护、超前喷注混凝土拱预支护法、U型钢拱架插板预支护法相对次之。该评价方法为巷道支护方案优选提供了一种新思路,具有重要的指导意义。

#### 参考文献(References)

[1] 朱川曲,王卫军,陈良棚. 基于神经网络的放煤巷道支护方案优选[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1483-1486.  
Zhu Chuanqu, Wang Weijun, Chen Liangpeng. Optimal selection of support patterns for caving roadway based on neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1483-1486.

[2] 陈建宏,郑海力,刘振肖,等. 基于优势关系的粗糙集的巷道支护方案评价体系[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(6): 698-1703.  
Chen Jianhong, Zheng Haili, Liu Zhenxiao, et al. Rough sets of laneway supporting schemes evaluation system based on dominance relation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2011, 42(6): 1698-1703.

[3] 勾攀峰,汪成兵,张道福. 巷道支护效果模糊综合评判[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003(4): 4-8.  
Gou Panfeng, Wang Chengbing, Zhang Daofu. Effect of fuzzy comprehensive evaluation in laneway supporting[J]. Journal of Mine Pressure and Roof Management, 2003(4): 4-8.

[4] 王光远. 论未确知性信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学

报, 1990, 23(4): 52-58.

Wang Guangyuan. Uncertainty information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52-58.

[5] 姚金蕊,罗曼,李文成,等. 开阳磷矿采矿方法的未确知测度优化选择[J]. 科技导报, 2012, 30(15): 45-48.

Yao Jinrui, Luo Man, Li Wencheng, et al. Optimal selection for unascertained measurement for the milling method of kaiyangphosphorite [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(15): 45-48.

[6] 宫风强,李夕兵,董陇军,等. 基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 323-330.

Gong Fengqiang, Li Xibing, Dong Longjun, et al. Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measurement theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 323-330.

[7] 王飞跃. 基于不确定性理论的尾矿坝稳定性分析及综合评价研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.

Wang Feiyue. Based on the uncertainty theory of tailings dam stability analysis and comprehensive evaluation[D]. Changsha: Central South University, 2009.

[8] 李树刚,马超,王国旗. 基于未确知测度理论的矿井通风安全评价[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(2): 101-103.

Li Shugang, Ma Chao, Wang Guoqi. Colliery ventilation safety evaluation on the basis of uncertainty measurement[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(2): 101-103.

[9] 曹庆奎,刘开展,张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40-42.

Cao Qingkui, Liu Kaizhan, Zhang Bowen. Calculation method of objective index weight by entropy[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2000, 17(3): 40-42.

[10] Dong Longjun, Hu Datao, Bai Yunfei. Unascertained average grade model for surrounding rock classification on hydraulic tunnels[M]// 2008 International Symposium on Safety Science and Technology: Progress in Safety Science and Technology (Vol VII). New York: Science Press, 2008: 2227-2231.

[11] 柏建彪,王襄禹,贾明魁,等. 深部软岩巷道支护原理及应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 28-30.

Bai Jianbiao, Wang Xiangyu, Jia Mingkui, et al. Theory and application of supporting in deep soft roadways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 28-30.

[12] 姜耀东,刘文岗,赵毅鑫,等. 开滦矿区深部开采中巷道围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1857-1862.

Jiang Yaodong, Liu Wengang, Zhao Yixin, et al. Study on surrounding rock stability of deep mining in Kailuan mining group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1857-1862.

[13] 孙晓明,何满潮. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 166-169.

Sun Xiaoming, He Manchao. Numerical simulation research on coupling support theory of roadway within soft rock at depth[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(2): 166-169.

(责任编辑 赵业玲)