

# 改进 TOPSIS 与 GA-BP 耦合的采空区 危险性辨析

谢承煜, 罗周全, 贾楠, 汪伟

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘 要:** 针对目前采空区危险性辨析过程繁冗且准确性低的问题, 提出了改进的 TOPSIS 与神经网络耦合的辨析方法。首先, 为提高训练样本采空区危险性辨析客观准确性, 将理想解方法 (TOPSIS) 进行改进, 分别利用绝对理想点以及 IFAHP 避免了由于理想解及权重变化引起的逆序现象, 并利用各辨析指标不同危险等级的区间临界值实现了 TOPSIS 对采空区危险性等级划分。将改进 TOPSIS 运用于某矿山 100 组采空区进行危险性辨析并验证结果。然后, 为简化辨析过程, 使改进 TOPSIS 与 GA-BP 神经网络有效结合, 以经过 TOPSIS 辨析的 100 组样本采空区对 GA-BP 训练得到神经网络模型并对 5 组样本进行危险等级输出, 结果与事实相符。研究结果不仅提高了采空区危险性辨析的客观性, 并为简化辨析过程提供了新的思路, 提高了工程应用性。

**关 键 词:** 采空区; 危险性辨析; 改进 TOPSIS; IFAHP; GA-BP 神经网络

**中图分类号:** X 936      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2016)03-0440-06

## Goafs' Risk Discrimination Based on Improved TOPSIS Coupled with GA-BP

XIE Cheng-yu, LUO Zhou-quan, JIA Nan, WANG Wei

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Corresponding author: XIE Cheng-Yu, E-mail: xiechengyu42@163.com)

**Abstract:** According to the complex process and low accuracy of goaf area risk discrimination, the improved TOPSIS coupled with neural network was proposed. Firstly, the TOPSIS method was improved and used on goaf area in order to enhance the objection and accuracy of sample goafs' risk discrimination. Absolute ideal point and improved fuzzy analytic hierarchy process (IFAHP) objective were respectively used to avoid the reverse phenomenon caused by the change of ideal point and weights. And risk grade division was realized through different instability degree interval threshold value of discrimination index. The improved TOPSIS method was used to risk discrimination of 100 groups goaf area samples in a certain mine and results were validated. Then, in order to simplify the discrimination process, the improved TOPSIS and GA-BP neural network were combined effectively. Calculating neural network model was trained by the 100 groups sample data which were discriminated by improved TOPSIS, the 5 groups were discriminated by the model, and the discrimination results agree with the facts. The study results not only enhance the objection of goaf area risk discrimination, but also provide a new thought for simplifying the discrimination process and expand the engineering application in field.

**Key words:** goaf; risk discrimination; improved TOPSIS; IFAHP (improved fuzzy analytic hierarchy process); GA-BP neural network

收稿日期: 2014-07-15

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2012BAK09B02-05); 国家自然科学基金资助项目 (51274250); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2013zzts057)。

作者简介: 谢承煜 (1984-), 男, 广西贺州人, 中南大学博士研究生; 罗周全 (1966-), 男, 湖南邵阳人, 中南大学教授, 博士生导师。

深部开采使地下留有大量采空区<sup>[1]</sup>,而采空区失稳带来地震、突水、地面塌陷等灾害是危害人员安全、阻碍开采安全进行的定时炸弹<sup>[2]</sup>.对采空区危险性的正确辨析预测是保障矿山安全生产的关键之一.随着国内外学者对于采空区评价研究的不断深入,有许多新的方法和思路用于采空区危险性辨析,如可拓理论、神经网络等<sup>[3]</sup>,但多数方法并不具有很好的工程实用性.所以仍需要新的准确简单且思路清晰的采空区辨析方法进行探索.

本文借鉴判别分析理论,通过引进理想点法(TOPSIS)<sup>[4-6]</sup>,对其在应用中表现出的逆序现象等缺陷进行改进,形成了适用于采空区危险性的改进 TOPSIS,提高了辨析结果的客观性.并且为简化辨析过程,提高工程适用性,采用遗传 BP(GA-BP)神经网络对已辨析的采空区进行训练和检验,研究结果表明该 GA-BP 模型可用于采空区危险性辨析,且有了该预测模型后,在加入新的待评价样本后直接输入样本数据便可获得很好的辨析结果.研究结果为采空区危险性辨析研究提供完整有序思路和简单实用的应用模型.

## 1 TOPSIS 缺陷分析及方法改进

### 1.1 TOPSIS 应用缺陷分析

TOPSIS 法通过计算待评价对象与最优状态(正理想解  $f^*(+)$ )和最劣状态(负理想解  $f^*(-)$ )的相对距离及贴近度,对研究对象的状况进行综合评价<sup>[7]</sup>.

TOPSIS 法在应用中存在如下缺陷:

1) 逆序现象.所谓逆序,是当辨析对象数量改变后导致辨析结果颠倒的现象.原因分析:

①原因一:理想解的改变.经典 TOPSIS 对指标同向化公式中最大最小值均取自  $n$  个研究对象实际测量值,因此不同待评对象就会存在不同的  $\max(a_{ij})$  和  $\min(a_{ij})$ ,若增加新的研究对象便要重新选定  $\max(a_{ij})$  和  $\min(a_{ij})$  并计算.

②原因二:属性权重改变.加权处理中,由于权系数的变化,使得原始数据间的关系结构发生变化,从而产生了逆序.

2) 定量等级划分的应用缺陷.经典 TOPSIS 方法是解决多属性问题的有效途径,对不同个体优劣排序的方法,即:“多中选一”、“众中择优”的思路,却无法实现对于采空区危险性定量的等级划分.

### 1.2 采空区危险性辨析 TOPSIS 方法改进

1) 逆序现象的消除.为解决理想解变化而导致的逆序问题,提出绝对理想解,即取研究对象各属性理论上所能出现的最优状态和最差状态的极限值.

$$\begin{cases} \text{绝对正理想解 } f(+)=\max c_{ij}; \\ \text{绝对负理想解 } f(-)=\min c_{ij}. \end{cases}$$

相对于经典 TOPSIS 方法的理想解,绝对理想解的选取不依附于具体的待辨析对象的具体属性值,具有绝对独立性,避免了当辨析对象变更时理想解的变化.

为避免由权重变化引发的逆序现象,对指标权重计算方法进行改进,引入改进模糊层次分析法(IFAHP),增加客观性<sup>[8]</sup>.步骤如下:

①建立优先判断矩阵  $F=(f_{ij})_{n \times n}$ .使用三标度法来表示该层指标对上层指标的重要程度<sup>[9]</sup>,

$$f_{ij} = \begin{cases} 0.5, & f_j \text{ 与 } f_i \text{ 同等重要;} \\ 1.0, & f_i \text{ 比 } f_j \text{ 重要;} \\ 0, & f_j \text{ 比 } f_i \text{ 重要.} \end{cases} \quad (1)$$

②将优先判断矩阵变换为模糊一致性判断矩阵  $p=(p_{ij})_{n \times n}$ <sup>[8]</sup>,

$$p_i = \sum_{j=1}^n f_{ij}, \quad i=1,2,\dots,n; \quad (2)$$

$$p_{ij} = \frac{(p_i - p_j)}{2n} + 0.5. \quad (3)$$

③单层次排序.求模糊一致矩阵每行不含对角因素的和,  $s_i$  表示指标  $i$  对于上层目标的重要程度.

$$s_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} - 0.5, \quad i=1,2,\dots,n; \quad (4)$$

$$\sum_i s_i = n(n-1)/2. \quad (5)$$

对  $i$  进行归一化处理,得到权重向量:

$$W^{(0)} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T; \quad (6)$$

$$w_i = s_i / \sum_i s_i = 2l_i / [m(m-1)]. \quad (7)$$

④各因素综合排序.把局部层次权重排列转化为各指标的综合排列,记为  $W$ .

2) TOPSIS 等级量化区间确定.依据采空区危险性辨析中各属性指标的一般分级数据,将采空区辨析指标不同危险性等级的区间临界值组成待辨析对象,形成基于 TOPSIS 方法的地下金属矿山采空区危险性辨析标准区间.

### 1.3 改进 TOPSIS 步骤

通过经典 TOPSIS 方法缺陷及改进思路的分析,对 TOPSIS 在采空区危险性辨析中的应用做出改善,步骤如下:

步骤 1 建立初始评价矩阵  $A_{mn} = (a_{ij})_{mn}^{[9]}$ ,

$$T_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) . \tag{14}$$

$$A_{mn} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} . \tag{8}$$

步骤 2 同向化处理,得到  $B_{mn} = (b_{ij})_{mn}$ .

收益型指标:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j(a_{ij})}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})} ; \tag{9}$$

成本型指标:

$$b_{ij} = \frac{\max_j(a_{ij}) - a_{ij}}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})} . \tag{10}$$

步骤 3 应用 IFAHP 计算权重  $W$ ,对矩阵  $B_{mn} = (b_{ij})_{mn}$  加权处理,获得加权评价矩阵  $C_{mn} = (c_{ij})_{mn}$ .

$$C_{mn} = (c_{ij})_{mn} = B_{mn} \times W . \tag{11}$$

步骤 4 确定绝对理想解.

步骤 5 计算研究对象与正、负理想解的距离  $D^+, D^-$  及贴近度  $T^{[10]}$ :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2} , \tag{12}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2} , \tag{13}$$

2 采空区危险性辨析模型建立

2.1 建立辨析体系

根据辨析指标选取原则并结合相关文献从工程应用的角度出发,建立地下金属矿山采空区危险性辨析体系,见图 1.

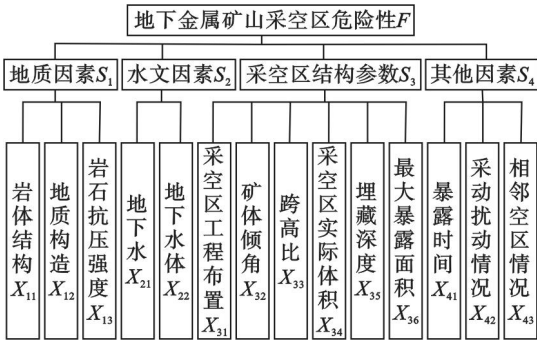


图 1 采空区危险性辨析指标体系

Fig. 1 Risk discrimination index system about goaf area

2.2 确定正、负理想解

对采空区危险性辨析指标分级数据进行整理,见表 1,各指标标准区间同向化结果见表 2.

表 1 采空区危险性等级与辨析指标分级标准  
Table 1 Goaf area risk degree and indexes grading standards

危险性等级	采空区危险性辨析指标													
	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{34}/10^3$	$X_{35}$	$X_{36}$	$X_{41}$	$X_{42}$	$X_{43}$
I	15~40	0~3	0~40	85~70	4	9~7	0~3	0~0.33	150~81	600~300	8 000~2 700	120~50	1.0~0.8	1~0.75
II	40~65	3~5	40~50	70~55	3	7~5	3~30	40~65	81~24	300~200	2 700~1 200	50~40	0.8~0.55	0.75~0.5
III	65~85	5~8	50~60	55~35	2	5~3	30~50	0.29	24~6.4	200~100	1 200~800	40~20	0.55~0.3	0.5~0.25
IV	85~100	8~10	60~150	35~0	1	3~1	50~120	0.41	6.4~0	100~0	800~0	20~0	0.3~0.1	0.25~0

表 2 指标标准区间值同向化列表  
Table 2 Dimensionless form of the indexes' standard interval values

危险性等级	采空区危险性辨析指标							
	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{31}$	$X_{32}$	
I	0~0.294 1	0~0.3	0~0.266 7	0~0.176 5	0~0.25	0~0.25	0~0.025	
II	0.294 1~0.588 2	0.3~0.5	0.266 7~0.333 3	0.176 5~0.352 9	0.25~0.5	0.25~0.5	0.025~0.25	
III	0.588 2~0.823 5	0.5~0.8	0.333 3~0.4	0.352 9~0.588 2	0.5~0.75	0.5~0.75	0.25~0.416 7	
IV	0.823 5~1	0.8~1	0.4~1	0.588 2~1	0.75~1	0.75~1	0.416 7~1	
	$X_{33}$	$X_{34}/10^3$	$X_{35}$	$X_{36}$	$X_{41}$	$X_{42}$	$X_{43}$	
I	0~0.066	0~0.46	0~0.5	0~0.662 5	0~0.583 3	0~0.222 2	0~0.25	
II	0.066~0.1	0.46~0.84	0.5~0.666 7	0.662 5~0.85	0.583 3~0.666 7	0.222 2~0.5	0.25~0.5	
III	0.1~0.2	0.84~0.957 3	0.666 7~0.833 3	0.85~0.9	0.666 7~0.833 3	0.5~0.777 8	0.5~0.75	
IV	0.2~1	1	0.833 3~1	0.9~1	0.833 3~1	0.777 8~1	0.75~1	

根据换算后的指标区间,确定 I 级区间上限值和 IV 级区间下限值为绝对正理想解和绝对负理想解.

$$f(+)= (0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \text{ ,}$$

$$f(-) = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) \text{ .}$$

### 2.3 确定辨析指标权重及 TOPSIS 等级量化区间

在建立辨析体系基础上,按照式(1)构建优先判断矩阵.  $F-S$  为目标层与中间层判断矩阵,  $S_1-X, S_2-X, S_3-X, S_4-X$  分别为各中间层因素对第三层指标的判断矩阵.

$F - S$					$S_1 - X$				$S_2 - X$		
$F$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_1$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$S_2$	$X_{21}$	$X_{22}$
$S_1$	0.5	1	0	1	$X_{11}$	0.5	0	1	$X_{21}$	0.5	1
$S_2$	0	0.5	0	0	$X_{12}$	1	0.5	1	$X_{22}$	0	0.5
$S_3$	1	1	0.5	1	$X_{13}$	0	0	0.5			
$S_4$	0	1	0	0.5							

$S_3 - X$							$S_4 - X$			
$S_3$	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{34}$	$X_{35}$	$X_{36}$	$S_4$	$X_{41}$	$X_{42}$	$X_{43}$
$X_{31}$	0.5	1	0	1	1	0	$X_{41}$	0.5	1	1
$X_{32}$	0	0.5	0	0	0	0	$X_{42}$	0	0.5	1
$X_{33}$	1	1	0.5	1	1	1	$X_{43}$	0	0	0.5
$X_{34}$	0	1	0	0.5	1	0				
$X_{35}$	0	1	0	0	0.5	0				
$X_{36}$	1	1	0	1	1	0.5				

获得采空区危险性各辨析指标综合权重:

$$W = (0.097\ 2, 0.145\ 8, 0.048\ 6, 0.093\ 8, 0.031\ 3, 0.068\ 8, 0.031\ 3, 0.093\ 8, 0.056\ 3, 0.043\ 8, 0.081\ 3, 0.104\ 2, 0.069\ 4, 0.034\ 7)^T.$$

在计算出辨析指标权重后,将采空区辨析指标不同危险性等级的区间临界值组成待辨析对象,建立基于改进 TOPSIS 方法的地下金属矿山采空区危险性辨析标准区间.5 组待辨析对象的形式表示为

$$X_{>1} = (15, 0, 0, 85, 4, 9, 0, 0, 150, 600, 8\,000, 120, 1, 1);$$

$$X_{I, II} = (40, 3, 40, 70, 3, 7, 3, 0.33, 81, 300, 2\,700, 50, 0.8, 0.75);$$

$$X_{II, III} = (65, 5, 50, 55, 2, 5, 30, 0.5, 24, 200, 1200, 40, 0.55, 0.5);$$

$$X_{III, V} = (85, 8, 60, 35, 2, 3, 50, 1, 6.4, 100, 800, 20, 0.3, 0.25);$$

$$X <_V = (100, 10, 150, 0, 1, 1, 120, 5, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0).$$

形成了地下金属矿山采空区危险性辨析等级量化

指标,如表3所示.

表3 采空区危险性等级量化标准  
Table 3 Grading quantitative standards of goaf area risk

危险性等级	I	II	III	IV
数值范围	0 ~ 0.357 1	0.357 1 ~ 0.528	0.528 ~ 0.685	0.685 ~ 1

### 3 基于改进 TOPSIS 的 GA - BP 采空区危险性辨析模型建立及检验

### 3.1 采空区危险性辨析

将改进采空区危险性 TOPSIS 辨析模型应用于某地下金属矿山 100 组采空区. 矿段处于泥盆系中统东岗岭阶上亚群 ( $D_2d_b$ ) 由层纹状粉砂岩、白云质灰岩、灰黑色页岩组成, 采场沿垂直矿体走向分布, 矿体为缓倾斜中厚矿体, 呈自东向西倾斜趋势, 采空区高度较高, 矿柱的宽高比较小, 岩体稳固性较高, 矿房采场相对稳定, 采空区失稳现象多在矿柱采场出现. 部分采空区调查统计数据及其危险性辨析结果见表 4, 其中定性指标由专家打分获取, 定量指标取顶板及两帮测点均值.

经计算,100 组数据仅第 10 组及第 48 组 TOPSIS 辨析结果与实际结果均相差一个危险度等级,误差为 2%。因此,改进 TOPSIS 方法可以很好地应用于采空区危险性辨析,为进一步与 GA-BP 神经网络有机结合奠定基础。

### 3.2 GA-BP 网络训练及检验

训练样本的准确客观性是网络输出结果正确的基本前提。为了保持采空区危险性辨析的客观准确并提高工程实用性,以改进 TOPSIS 为初始辨析工具对样本采空区进行危险性辨析,以 100 组采空区数据作为样本,应用 Matlab 软件进行遗传 BP 网络学习训练。

神经网络初始权值和阈值优化过程如图 2 所示. 可以看出, 最佳适应度与平均适应度在约 60 代后已较好地拟合并保持稳定. 图 3 为网络训练收敛过程, 模型经 17 275 步迭代后收敛, 曲线平稳无明显振荡.

在此基础上,对 101~105 号采空区应用训练好的 GA- BP 网络进行危险等级输出,并对结果进行验证. GA- BP 网络辨析结果如表 5 所示.



表 4 采空区危险性辨析指标统计表  
Table 4 Statistical table of risk discrimination indexes of goaf area

采空区 编号	采空区危险性指标实测值															TOPSIS 结果	实际 结果
	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}/\text{MPa}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{31}$	$X_{32}/(^{\circ})$	$X_{33}$	$X_{34}\times 10^{-3}/\text{m}^3$	$X_{35}/\text{m}$	$X_{36}/\text{m}^2$	$X_{41}/\text{a}$	$X_{42}$	$X_{43}$			
1	76	6	59.6	83	1	7	22	0.25	496.7	143	298	76	0.78	0.43	II	II	
2	78	9	93.6	42	3	3	70	0.56	85	129	51	35	0.43	0.75	III	III	
3	45	5	56.7	76	4	4	23	0.35	518.3	224	271	105	0.76	0.72	II	II	
4	75	9	93.6	47	3	2	70	0.71	88.3	120	53	40	0.48	0.86	III	III	
5	86	9	142	31	1	1	62	0.66	446.3	176	46	15	0.33	0.23	IV	IV	
6	86	9	142	31	1	1	62	0.66	446.3	176	46	15	0.33	0.23	IV	IV	
7	54	8	93.5	37	2	3	21	0.57	842.7	136	178	52	0.25	0.48	III	III	
8	68	6	98.4	38	3	7	30	0.54	107.4	172	57	43	0.34	0.64	III	III	
9	81	7	129	60	3	4	42	0.55	235.8	165	84	28	0.55	0.53	III	III	
10	44	5	50.7	58	3	6	33	0.34	279.1	105	78	26	0.43	0.64	II	III *	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
100	83	7	92.8	64	2	4	25	0.4	153.5	124	175	23	0.38	0.77	III	III	

注：\* 表示 TOPSIS 结果与实际的结果不符合。

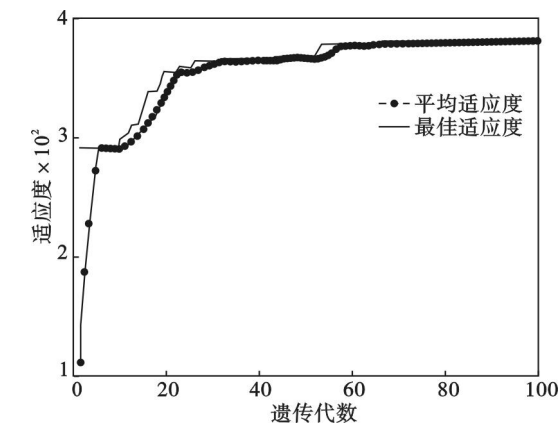


图 2 遗传算法的适应度寻优曲线

Fig. 2 Fitness curves of genetics optimization

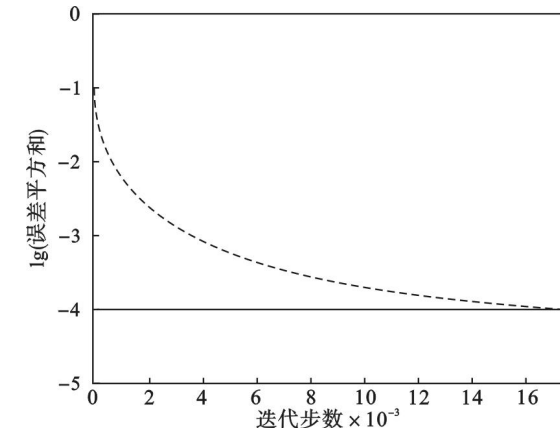


图 3 遗传神经网络训练收敛过程

Fig. 3 Convergence process of GA-BP neural network

在实际工程中由于人力、物力资源的限制,很多情况下不能对所有采空区实行全面处理,因此使用改进 TOPSIS 与 GA - BP 网络耦合辨析方法对采空区危险性进行快速准确辨析以保证对危险

采空区进行及时处理,且在处理空区数据时只要把归一化的数据输入网络模型,便可得到可信的采空区危险性数据,简单实用,可以很好地运用于工程实践.

表 5 GA - BP 输出与改进 TOPSIS 辨析结果比较  
Table 5 Result of GA-BP in contrast with improved TOPSIS

采空区 序号	TOPSIS 结果	GA - BP 期望 输出结果	GA - BP 实际 输出结果
101	IV	(0,0,0,1)	(0.012 5, -0.009 7, 0.365 4, 0.978 5)
102	III	(0,0,1,0)	(0.003 2, -0.063 9, 0.995 3, -0.048 7)
103	II	(0,1,0,0)	(0.005 7, 0.988 4, 0.314 5, -0.045 2)
104	III	(0,0,1,0)	(-0.019 0, 0.018 0, 0.995 3, -0.007 3)
105	III	(0,0,1,0)	(0.000 4, -0.019 3, 0.993 9, 0.074 4)

4 结 论

1) 将 TOPSIS 方法引入采空区危险性辨析,在分析该方法应用缺陷的基础上,分别利用绝对理想点以及 IFAHP 避免了由于理想解及权重的改变引起的逆序现象,并提高权重的客观准确性.

2) 根据采空区辨析指标不同危险性等级的区间临界值组成 5 组待辨析对象计算获得的贴近度,形成了地下金属矿山采空区危险性辨析等级量化指标,实现了 TOPSIS 方法对采空区危险性

的等级划分,并对某金属矿山 100 组采空区进行危险性辨析及验证。

3) 以 GA-BP 神经网络为简化手段,用 100 组经过改进 TOPSIS 方法准确辨析的采空区数据为学习样本对网络进行训练,得到稳定收敛拟合曲线,在此基础上,应用 GA-BP 网络对 5 组采空区危险性进行辨析,结果与改进 TOPSIS 辨析结果相同。

4) 不仅运用改进 TOPSIS 方法进行准确的采空区危险性辨析,且将该法与 GA-BP 神经网络有机结合,形成一个可信度高、操作方便、计算简便的采空区危险性辨析方法,为采空区危险性辨析提供新颖清晰的思路。

#### 参考文献:

- [1] 熊立新,罗周全,罗贞焱,等.深部复杂环境下采空区激光扫描异常点云数据修正[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(3):438-442.  
(Xiong Li-xin, Luo Zhou-quan, Luo Zhen-yan, et al. Data amendment of abnormal point cloud of goaf by laser scan in deep complex environment [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2014, 35(3): 438-442.)
- [2] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835-840.
- [3] 李琨,高宪文,仇治学,等.有杆泵抽油系统井下工况诊断的物元分析方法[J].东北大学学报(自然科学版),2013, 34(5): 613-615.



(上接第 434 页)

- [2] 李勇,余锡平.基于两相紊流模型的悬移质泥沙运动数值模拟[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(6): 805-808.  
(Li Yong, Yu Xi-ping. Two-phase turbulent flow model for suspended sediment motion [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2007, 47(6): 805-808.)
- [3] 刘诚,沈永明.曲线坐标系下的三维  $k-\varepsilon-A_p$  固液两相湍流总沙输运模型[J].水力发电学报,2009,28(3):164-170.  
(Liu Cheng, Shen Yong-ming. A three-dimensional  $k-\varepsilon-A_p$  two-phase turbulence overall sediment transport model in non-orthogonal curvilinear coordinates [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(3): 164-170.)
- [4] 赵东森,唐军,吴修广.基于 Youngs-VOF 方法的垂向二维悬沙数值模拟[J].水力发电学报,2013,32(6):99-103.  
(Zhao Dong-miao, Tang Jun, Wu Xiu-guang. Vertical 2-D numerical model of suspended sediment transport based on Youngs-VOF method [J]. *Journal of Hydroelectric*

(Li Kun, Gao Xian-wen, Qiu Zhi-xue, et al. Matter-element analysis method of downhole condition diagnosis for suck rod pumping system [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(5): 613-615.)

- [4] Bhupinder S, Sudhir D, Sandeep J, et al. Use of fuzzy synthetic evaluation for assessment of groundwater quality for drinking usage; a case study of southern Haryana, India [J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(2): 249-255.
- [5] Quesada G M, Castillo D E. A dual response approach to the multivariate robust parameter design problem [J]. *Technometrics*, 2004, 46(2): 176-187.
- [6] Kim K J, Lin D K J. Simultaneous optimization of mechanical properties of steel by maximizing exponential desirability functions [J]. *Journal of Royal Statistical Society: Series C*, 2000, 49(3): 311-325.
- [7] Yang T, Hung C C. Multiple-attribute decision making methods for plant layout design problem [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2007, 23(1): 126-137.
- [8] Wu F C. Optimization of correlated multiple quality characteristics using desirability function [J]. *Quality Engineering*, 2005, 17(1): 119-126.
- [9] Wu F C. Optimisation of multiple quality characteristics based on percentage reduction of Taguchi's quality loss [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, 20(10): 749-753.
- [10] Behzadian M, Otaghsara S K, Yazdani M. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39: 13051-13069.

*Engineering*, 2013, 32(6): 99-103.)

- [5] Wu W, Rodi W, Wenka T. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 2000, 126(1): 4-15.
- [6] Van Rijn L C. Sediment transport, part II: suspended load transport [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1984, 110(11): 1613-1641.
- [7] Krishnappan B G, Lau Y L. Turbulence modeling of flood plain flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1986, 112(4): 251-266.
- [8] Patankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, 15: 1797-1806.
- [9] Van Rijn L C. Mathematical modeling of suspended sediment in non-uniform flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1986, 112(6): 433-455.
- [10] Wang Z B, Ribberink J S. The validity of a depth-integrated model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1990, 116(10): 1270-1288.