

# 未确知聚类理论在顶板沉降量预测中的应用

李启月, 张瑞华, 马少维, 吴志波, 马春德

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 从距离判别的思想出发,对未确知聚类理论中的置信度准则进行优化,并将该理论应用于顶板沉降量预测中。选取岩体抗拉强度、埋藏深度、暴露面积等9个影响因子,构建顶板沉降量预测的未确知聚类预测模型。根据收集的15组样本数据确定了未确知测度函数,并利用熵权法计算指标权重,预测得出顶板沉降的分类等级及顶板沉降量。经计算验证,该方法的平均预测误差为7.38%,较模糊数学、灰色关联及神经网络3种方法有更高的预测精度。为进一步验证其实用性,以辰州矿业沃溪矿区为例,采用该方法对4142采场进行顶板沉降量预测。结果表明,预测结果与实际监测结果相吻合,证明该方法用于采场顶板沉降量预测是客观合理的,可为矿山安全生产提供决策依据。

**关键词** 顶板沉降量;未确知聚类预测;置信度准则;距离判别;熵权

**中图分类号** TD325

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.14.007

## Application Research of Unascertained Clustering Theory in Prediction of Roof Settlement

LI Qiyue, ZHANG Ruihua, MA Shaowei, WU Zhibo, MA Chunde

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** The confidence criterion of the unascertained clustering theory is optimized on the basis of distance discriminant method, then this theory is applied to the prediction of roof settlement. Firstly, nine factors of roof settlement, such as the tensile strength of rock mass, stope depth, and exposed area, are selected to establish the model for unascertained clustering prediction. Then the unascertained measurement function is obtained based on fifteen groups of sample data, and the index weights of each factor are calculated by entropy theory. Finally, the results of the classification grade and prediction of roof settlement are obtained. According to the computing validation, the average prediction error of this method is controlled within 7.38%, which is improved greatly compared with other three methods including the fuzzy mathematics method, the grey relation method and the neural network method. Taking Woxi mining area of Chenzhou mine for example, this optimized method is applied to the prediction of roof settlement of No.4142 stope in order to further inspect its practicability. The results show that the prediction results are consistent with the actual situation, and that the optimized method of roof settlement prediction is objective and reasonable and can provide a decision-making basis for the safety production on mine.

**Keywords** roof settlement; unascertained clustering prediction; confidence criterion; distance discriminant; entropy weight

在采场回采过程中,顶板处于悬空状态,在覆岩自重和地应力场的联合作用下,顶板岩层会发生弯曲沉降<sup>[1]</sup>。如锡矿山锑矿1965—1971年先后发生3次大面积的地压活

动,致使295个采场冒落<sup>[2]</sup>。凡口铅锌矿因采场覆岩体中岩溶发育,开采造成地表塌陷坑1400个,面积约490万m<sup>2</sup>,建筑受损面积7万m<sup>2</sup>,农田受损面积6.67 km<sup>2</sup>,4 km长的铁路

收稿日期:2013-11-12;修回日期:2014-03-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51374243,4137227)

作者简介:李启月,教授,研究方向为采矿方法与工程爆破,电子信箱:qyli@csu.edu.cn

引用格式:李启月,张瑞华,马少维,等.未确知聚类理论在顶板沉降量预测中的应用[J].科技导报,2014,32(14):48-53.

和 1.5 km 长公路受到破坏而停止运行<sup>[3]</sup>。2004 年 5 月 20 日, 峰城石膏矿区发生顶板塌陷事故, 矿区塌陷面积 14.47 万 m<sup>2</sup>、总质量超过 230 万 t, 冒落的体积约 100 万 m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>。为保证采矿作业的安全进行, 有必要对采场顶板沉降规律进行研究, 以便合理安排循环作业进度, 并及时采取有效的支护措施。目前, 国内外诸多学者针对顶板沉降预测发展出多种方法, 如数学形态法<sup>[5]</sup>、遗传规划法<sup>[6]</sup>、模糊数学法<sup>[7]</sup>、灰色关联法<sup>[2,8]</sup>及神经网络法<sup>[9]</sup>等。但由于顶板沉降受到矿岩性质、地质条件、人为扰动等诸多不确定因素影响, 且前述预测方法主观性较强, 难以保证预测精度, 而未确知聚类理论则可以更客观地将这些不确定因素综合考虑在内, 在这方面, 未确知聚类理论具有无可比拟的优势<sup>[10]</sup>。

未确知信息是由王光远于 1990 年提出的不同于灰色信息、随机信息和模糊信息的一种新的不确定信息<sup>[11]</sup>。刘开第等<sup>[12]</sup>根据未确知数学理论建立了未确知测度模型, 官凤强等<sup>[4]</sup>、史秀志等<sup>[4,13]</sup>成功将该理论引入矿业领域, 并取得不错的效果。在前人研究基础上, 万玉成<sup>[14]</sup>提出了未确知聚类理论, 成功将该方法应用于空军航材消耗的预测, 随后该方法被董陇军等<sup>[5]</sup>、赵国彦等<sup>[10]</sup>分别应用于开采地面沉降及巷道围岩松动圈的预测中。本文借鉴未确知聚类理论的思想, 将该理论应用于采场顶板沉降的预测中。本文暂不考虑沉降速度, 仅对顶板的最大沉降量预测做出分析, 并从距离判别的角度出发, 对置信度准则进行优化, 预测得出采场顶板沉降所属分类等级及沉降量, 并将该方法应用于辰州矿业沃溪矿区 4142 采场顶板沉降量预测中, 与实际监测结果进行比较。

## 1 未确知聚类理论的优化

### 1.1 构建待测对象的分类模式系统

研究对象空间  $Q$  中包含  $m$  个元素, 记作  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ ,  $Q$  中任一元素  $X$  与  $n$  个影响因子有关, 记作  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ , 且各元素按取值范围可划分为  $C_1, C_2, \dots, C_k$ , 它们组成的分类集  $C$  称为分类空间, 并满足  $\bigcup_{i=1}^K C_i = C$ , 且  $\forall C_i, C_j \in C, C_i \cap C_j = \emptyset$ 。其中  $i, j = 1, 2, \dots, K$ 。已知  $X_1, X_2, \dots, X_m$  为待分类的  $m$  个对象, 对象集  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$  称为分类对象空间, 样本  $X_i \in X$ ,  $X_{ij}$  表示第  $i$  个样本  $X_i$  的  $j$  个指标的测量值, 第  $i$  个样本的分类为  $C_k$ , 则记作  $X_i \in C_k$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。根据预测对象的特性划分为  $K$  类:  $C_1, C_2, \dots, C_k$ , 以各类样本平均值为分类中心, 将  $n$  个影响因子范围也划分为  $K$  类。同时定义预测对象的  $K$  个分类的未确知测度分别为  $P_1 = (1, 0, \dots, 0), P_2 = (0, 1, 0, \dots, 0), \dots, P_k = (0, 0, \dots, 0, 1)$ 。

### 1.2 单指标测度

将测量值  $X_{ij}$  属于第  $k$  个分类  $C_k$  的程度记作  $P_{ik}$ , 并且满足条件

$$\begin{cases} 0 \leq P(X_{ij} \in C_k) \leq 1 \\ P(X_{ij} \in C) = 1 \\ P\left(X_{ij} \in \bigcup_{i=1}^k C_i\right) = \sum_{i=1}^k P(X_{ij} \in C_i) \end{cases} \quad (1)$$

则称式(1)中的  $P$  为未确知测度。矩阵  $[P_{ik}]_{n \times K}$  为待测对象的单指标测度矩阵:

$$[P_{ik}]_{n \times K} = \begin{bmatrix} P_{i1}^1 & P_{i1}^2 & \dots & P_{i1}^K \\ P_{i2}^1 & P_{i2}^2 & \dots & P_{i2}^K \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{in}^1 & P_{in}^2 & \dots & P_{in}^K \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.3 权重及多指标加权综合测度向量的确定

设  $W_j$  表示影响因子  $Y_j$  与其他影响因子相比具有的相对重要程度, 且满足  $0 \leq W_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n$ ; 且  $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ , 则称  $W_j$  为影响因子  $Y_j$  的权重。

目前确定权重的方法很多, 其中准确性最高的是熵权法, 即

$$\begin{cases} V_j = 1 + \frac{1}{\lg K} \sum_{k=1}^K P_{ik} \lg P_{ik} \\ W_j = V_j / \sum_{j=1}^n V_j \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, 令  $0 \lg 0 = 0$ 。设  $P_{ik}$  表示样本测量值  $X_{ij}$  属于第  $K$  个分类的概率。令

$$\begin{cases} P_{ik} = \sum_{j=1}^n W_j P_{ijk} \\ 0 \leq P_{ik} \leq 1 \\ \sum_{k=1}^K P_{ik} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, K$ , 则称  $P_{ik} = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iK}\}$  为样本  $X_{ij}$  的多指标加权综合测度向量。

### 1.4 置信度准则优化

目前未确知理论对于待测对象属性识别均采用置信度准则, 即设定一个置信度  $\lambda (\lambda \geq 0.6)$ , 且分类集中  $C_1 > C_2 > \dots > C_k$ 。令

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^m P_{ik} \geq \lambda; k = 1, 2, \dots, K \right\} \quad (5)$$

则认为待测对象属于第  $k_0$  个分类。然而, 置信度的选取受主观因素影响较大, 为保证待测对象属性识别的准确性, 本文从距离判别的思想出发对置信度准则进行优化, 采用未确知距离判别的方式来识别待测对象所属分类。即设定  $D_k$  为多指标综合测度向量  $P_{ik}$  与  $P_k$  的距离

$$D_k = \sqrt{(P_{i1} - 0)^2 + (P_{i2} - 0)^2 + \dots + (P_{ik} - 0)^2 + \dots + (P_{iK} - 0)^2} \quad (6)$$

通过比较各未确知测度距离的大小, 选定距离最小的那个分类为待测对象所属的分类。

### 1.5 预测值的计算

将各分类模式的样本平均值记作  $\bar{X}_k$ , 则待测对象的预测值  $Z$  可以表示为

$$Z = P_{i1} \bar{X}_1 + P_{i2} \bar{X}_2 + \dots + P_{ik} \bar{X}_k = \sum_{k=1}^K P_{ik} \bar{X}_k \quad (7)$$

## 2 未确知聚类理论在顶板沉降量预测中的应用

矿山实践及相关研究表明,影响采场顶板沉降的因素主要为矿岩性质、地质条件、人为扰动3个方面,本文在综合考虑以上因素的前提下选取9个影响因子作为顶板沉降量预测的评价指标,分别为岩体结构、岩石抗拉强度、矿体倾角、地

下水影响、爆破扰动、采场高度、埋藏深度、暴露面积、相邻采空区情况(分别用 $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 、 $Y_4$ 、 $Y_5$ 、 $Y_6$ 、 $Y_7$ 、 $Y_8$ 、 $Y_9$ 表示)。

本文共收集整理15个采场的参数资料作为顶板沉降量预测的样本数据(表1)。参照国内外学者关于采场顶板沉降的研究成果,结合矿山实际情况,将顶板沉降划分为4个等级:轻微沉降、一般沉降、较大沉降、严重沉降(分别用 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 表示)。顶板沉降量预测的定性指标分类标准见表2,定量指标分类标准见表3。

表1 顶板沉降量预测初始数据

Table 1 Sample data of stoperoof settlement prediction

样本	评价指标									沉降实测值/mm
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$	$Y_9$	
$X_1$	3	0.8	59	4	3	22.0	175	450	3	17.5
$X_2$	3	0.1	58	2	3	26.0	350	694	4	18.8
$X_3$	4	0.9	30	2	4	2.5	365	623	3	30.4
$X_4$	3	0.1	66	4	2	21.2	310	577	4	23.5
$X_5$	4	0.1	50	4	3	17.8	360	955	3	34.5
$X_6$	2	0.9	65	4	3	50.4	185	362	4	6.2
$X_7$	4	2.2	60	4	4	5.3	130	368	3	6.8
$X_8$	4	0.1	69	4	4	10.1	250	483	3	16.1
$X_9$	3	1.5	14	4	3	6.0	545	790	4	28.7
$X_{10}$	4	1.1	64	4	4	31.0	325	376	4	17.6
$X_{11}$	3	0.8	7	4	3	6.0	700	800	4	23.9
$X_{12}$	2	0.1	70	4	4	19.8	430	563	3	29.6
$X_{13}$	4	1.8	45	2	2	32.0	245	355	3	14.7
$X_{14}$	4	1.6	16	3	2	2.5	165	236	4	20.4
$X_{15}$	4	1.1	65	4	4	41.8	200	337	4	7.8

表2 顶板沉降量预测的定性指标分类标准

Table 2 Classification criterion of qualitative indexes in stoperoof settlement prediction

等级分类	赋值	岩体结构	地下水影响	爆破扰动	相邻采空区情况
$C_1$	1	松散结构	长期有淋水,影响较大	很大	采空区群
$C_2$	2	碎裂结构	雨季有淋水,围岩受水体影响	较大	空区面积大但分散
$C_3$	3	层状结构	可见水迹,围岩受水体影响小	较小	空区面积小数量少
$C_4$	4	完整块状结构	无淋水水迹,围岩周围无水迹	无影响	无其他空区

表3 顶板沉降量预测的定量指标分类标准

Table 3 Classification criterion of quantitative indexes in stoperoof settlement prediction

等级分类	样本	沉降范围/mm	沉降平均值/mm	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$	$Y_9$
$C_1$	$X_6, X_7, X_{15}$	6~10	6.933	3.3	1.38	63.3	4.0	3.7	32.50	171.7	355.7	3.7
$C_2$	$X_1, X_2, X_8, X_{10}, X_{13}$	10~20	16.690	3.6	0.78	59.0	3.2	3.2	24.22	269.0	471.6	3.4
$C_3$	$X_4, X_9, X_{11}, X_{12}, X_{14}$	20~30	25.206	3.0	0.82	34.6	3.8	2.8	11.10	430.0	593.2	3.8
$C_4$	$X_3, X_5$	30~35	32.450	4.0	0.51	40.0	3.0	3.5	10.15	362.5	789.0	3.0

### 2.1 单指标测度矩阵

根据表2、表3中各评价指标的分类标准,分别建立各指标未确知测度函数(图1)。由表1中各样本的取值,再根据测度函数即可求得各样本单指标测度矩阵。以样本 $X_1$ 为例,分别通过9个影响因子的单指标测度函数可以得出该样本 $X_1$ 的单指标测度矩阵为

$$[P_{ik}]_{9 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0 & 0.400 & 0.600 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.500 & 0.500 & 0 \\ 0 & 0.830 & 0.170 & 0 \\ 0.966 & 0.034 & 0 & 0 \\ 0.186 & 0.814 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

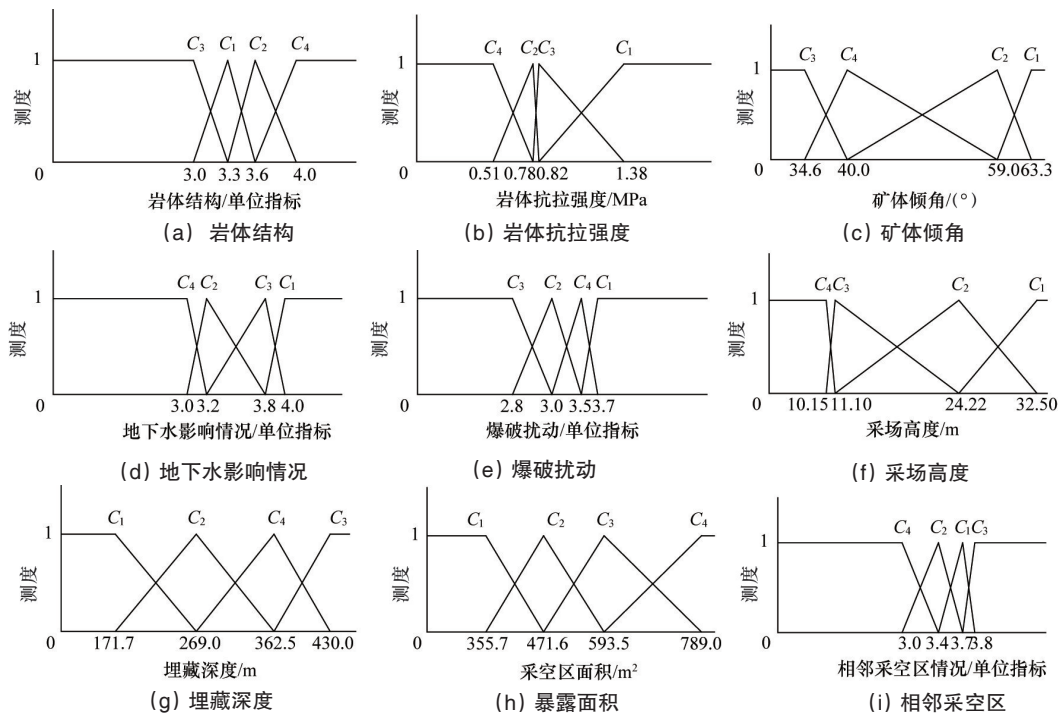


图1 各指标未确知测度函数

Fig. 1 Uncertainty measurement function of each single index

2.2 多指标加权综合测度矩阵

基于熵权理论,由式(3)可以求得各样本中各影响因子的权重,对于样本  $X_1$  的各指标权重向量为  $\mathbf{a}=(0.1383, 0.0711, 0.1383, 0.1383, 0.0691, 0.0928, 0.1235, 0.0904, 0.1383)$ ,根据式(4)可以计算出多指标加权综合测度向量为  $P_{ik}=(0.2744, 0.3561, 0.2313, 0.13827)$ 。

2.3 预测结果与分析

根据上述得到的多指标综合测度矩阵,由式(6)可以计

算出未确知测度距离,进而确定待测样本所属分类等级,由式(7)则可以计算出各样本顶板沉降量的预测值。为检验置信度准则优化的有效性,根据式(5)分别选取不同置信度对各样本的分类等级进行判别,并与本文优化方法的判别结果做出比较,得到预测结果。另外,为验证本文优化理论在采场顶板沉降量预测中的优越性,分别采用模糊数学理论、灰色关联分析及神经网络方法对各样本进行预测,并将预测结果与本文方法的预测值进行对比,预测结果见表4。

表4 顶板沉降量预测结果

Table 4 List for evaluation and predicted results of each sample

样本	预测值/mm				实测值/mm
	未确知聚类	模糊数学	灰色关联	神经网络	
$X_1$	18.25	18.35	18.41	18.21	17.5
$X_2$	20.32	21.45	21.09	20.66	18.8
$X_3$	27.57	27.23	28.10	26.17	30.4
$X_4$	21.37	21.74	20.94	21.23	23.5
$X_5$	31.53	29.69	30.45	30.49	34.5
$X_6$	8.24	6.97	9.01	8.77	6.2
$X_7$	8.67	7.98	9.46	8.23	6.8
$X_8$	17.36	15.14	17.49	17.75	16.1
$X_9$	27.22	29.12	27.88	26.99	28.7
$X_{10}$	17.44	16.14	16.03	19.36	17.6
$X_{11}$	26.13	27.44	26.81	28.08	23.9
$X_{12}$	27.28	31.69	25.14	23.42	29.6
$X_{13}$	15.63	16.84	15.11	14.91	14.7
$X_{14}$	22.61	22.65	22.78	22.64	20.4
$X_{15}$	8.45	8.93	8.54	7.69	7.8

由表4的预测结果可以看出,采用本文优化方法进行预测时,只有样本6、7预测误差较大,其余样本的预测误差均控制在10%以内,平均误差为7.38%,而采用其他3种方法的平均预测误差分别为10.57%,13.20%,12.67%,这充分验证了本文优化方法在顶板沉降量预测中的优越性。

由表5顶板沉降分类等级预测结果可以看出,置信度选取的不同会导致预测结果的较大摆动,而采用本文优化方法时只有样本10出现判别错误,整个样本集预测准确率高达93.3%,这相比原有方法在预测精度上有了明显的提高,可见本文优化方法是有效的。

表5 顶板沉降分类等级预测结果

Table 5 List for evaluation and predicted results of each sample

样本	多指标加权 综合测度 $P_{ik}$	未确知测度距离判别				本文 预测 分类	置信度准则判别			实际 分类
		$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$		$\lambda=0.6$	$\lambda=0.7$	$\lambda=0.8$	
$X_1$	(0.2744, 0.3561, 0.2313, 0.1383)	0.8520	0.7500	0.9012	0.9991	$C_2$	$C_2$	$C_3$	$C_3$	$C_2$
$X_2$	(0.1596, 0.3553, 0.3508, 0.1343)	0.9867	0.7630	0.7689	1.0121	$C_2$	$C_3$	$C_3$	$C_3$	$C_2$
$X_3$	(0.1323, 0.0032, 0.2004, 0.6640)	1.1109	1.2215	1.0477	0.4130	$C_4$	$C_4$	$C_4$	$C_4$	$C_4$
$X_4$	(0.2538, 0.0527, 0.5226, 0.1709)	0.9284	1.1243	0.5695	1.0138	$C_3$	$C_3$	$C_3$	$C_3$	$C_3$
$X_5$	(0, 0.0392, 0.0426, 0.9182)	1.3588	1.3296	1.3271	0.1003	$C_4$	$C_4$	$C_4$	$C_4$	$C_4$
$X_6$	(0.9140, 0.0360, 0.0447, 0.0054)	0.1035	1.3292	1.3226	1.5320	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$
$X_7$	(0.8614, 0.1160, 0, 0.0227)	0.1821	1.2345	1.3251	1.3079	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$
$X_8$	(0.1908, 0.6340, 0.0404, 0.1288)	1.0405	0.4292	1.1761	1.0985	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$C_2$
$X_9$	(0.0118, 0.0294, 0.6176, 0.3412)	1.2146	1.2000	0.5134	0.9036	$C_3$	$C_3$	$C_4$	$C_4$	$C_3$
$X_{10}$	(0.4278, 0.1613, 0.2191, 0.1918)	0.6619	0.9855	0.9250	0.9541	$C_1$	$C_3$	$C_3$	$C_3$	$C_2$
$X_{11}$	(0, 0.1026, 0.6534, 0.2440)	1.2235	1.1366	0.4362	1.0044	$C_3$	$C_3$	$C_3$	$C_4$	$C_3$
$X_{12}$	(0.0081, 0.0629, 0.5512, 0.3779)	1.1977	1.1510	0.5901	0.8336	$C_3$	$C_3$	$C_4$	$C_4$	$C_3$
$X_{13}$	(0.2647, 0.5904, 0.1257, 0.0192)	0.9516	0.5040	1.0878	1.1847	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$C_2$
$X_{14}$	(0.2454, 0.0151, 0.4609, 0.2786)	0.9272	1.1490	0.6548	0.8906	$C_3$	$C_3$	$C_3$	$C_4$	$C_3$
$X_{15}$	(0.8611, 0.1263, 0.0093, 0.0033)	0.1880	1.2268	1.3187	1.3233	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$

### 3 工程实例

辰州矿业沃溪矿区已有100余年的开采历史,是一个金、锑、钨共生的多金属石英脉矿床,顶底板围岩均为紫红色板岩,矿区有6条工业矿体平行展布,东西走向长50~300 m,倾斜延伸1100~2000 m,倾角 $26^\circ\sim 35^\circ$ ,平均脉幅0.2~2.0 m,局部较厚,达4 m以上。随着向下延伸,矿体产状变化较大,表现在倾角上由缓倾斜到倾斜进而变化到急倾斜,脉幅渐薄,

但品位渐高。目前矿山最大开采深度已超千米,进入深部开采后,采矿作业环境发生极大变化,地应力显现突出,采场内顶板稳固性变差,严重威胁作业面人员及设备安全。为此,有必要对采场顶板沉降量做出分析,以便合理安排作业循环,并及时采取有效支护措施。本文利用优化的未确知聚类理论针对该矿4142采场顶板沉降量进行预测,并将预测结果与激光测距仪所监测的实际值进行比较。该采场顶板沉降

的各影响因子参数见表6。

根据未确知测度函数确定各影响因子的未确知测度后,基于熵权理论,求得各指标加权综合测度向量为(0.2482, 0.0518, 0.5273, 0.1727),未确知测度距离分别为0.9358、

1.1263、0.5635、1.0133。最终可以确定该采场顶板沉降属于 $C_3$ 分类,顶板沉降量预测值为21.49 mm,明显可以看出预测结果与实际值是吻合的,这充分表明未确知聚类预测优化理论对于顶板沉降量预测是合理可行的。

表6 沃溪矿区顶板沉降影响因子参数

Table 6 Influential parameters of roof settlement in Woxi mining area

$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$	$Y_9$	所属分类	沉降量/mm
3.0	0.7	26.0	4.0	3.0	1.8	1010.0	228.0	4.0	$C_3$	21.06

#### 4 结论

1) 从距离判别的思想出发,对未确知聚类理论中的置信度准则进行优化,并将该优化理论运用于顶板沉降量的预测中。经计算验证,采用本文优化方法的平均预测误差为7.38%,这不仅在预测精度上较优化前有了明显的提高,而且相对于模糊数学、灰色关联、神经网络3种方法也有更高的预测精度,这充分表明了本文优化方法在顶板沉降量预测上无可比拟的优越性。

2) 以辰州矿业沃溪矿区为例,采用优化的未确知聚类理论对4142采场顶板沉降量进行预测,预测结果与实际监测结果相吻合,证明该方法是合理可行的,可为矿山安全生产提供决策依据。

3) 采场顶板沉降量是分析顶板沉降规律的重要指标之一,若要更加全面科学的研究采场顶板沉降规律,必须将沉降速度考虑在内;同时,本文还存在定性因子数据获取困难、评价指标细化不足等问题,在今后的研究中,需要通过权衡影响因子选择、细化评价指标、增大样本数据等方式,不断增强未确知聚类理论在顶板沉降量预测中的普遍适用性。

#### 参考文献(References)

- [1] 凌标灿,彭苏萍,张慎河,等. 采场顶板稳定性动态工程分类[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1474-1477.  
Ling Biaocan, Peng Suping, Zhang Shenhe, et al. Dynamic engineering classification of stope roof stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1474-1477.
- [2] 周科平. 采场顶板稳定性及其沉降规律的灰色预测[J]. 矿业研究与开发, 1994, 14(4): 44-49.  
Zhou Keping. An analysis of stability and prediction of settlement of regularity for stope roof[J]. Mining Research and Development, 1994, 14(4): 44-49.
- [3] 樊明玉. 采场顶板稳定性与采场顶板监测技术研究[J]. 有色金属: 矿山部分, 2007, 59(1): 1-11.  
Fan Mingyu. Research on the stability and monitoring technology of stope roof[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2007, 59(1): 1-11.
- [4] 宫凤强,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.
- [5] 李启月,许杰,王卫华,等. 基于数学形态学多尺度分析的顶板下沉量预测[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 433-438.  
Li Qiyue, Xu Jie, Wang Weihua, et al. Roof settlement predicting based on multi-scale mathematical morphological analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 433-438.
- [6] 翟淑花,高谦. 遗传规划在最大下沉值预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(3): 239-240.

- Zhai Shuhua, Gao Qian. Application of genetic programming on predicting maximum surface subsidence due to mining[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 239-240.
- [7] 连增增,谭志祥,李培现,等. 模糊关系方程法在矿山开采沉降最大下沉值预测中的应用[J]. 金属矿山, 2010(7): 132-135.  
Lian Zengzeng, Tan Zhixiang, Li Peixian, et al. Application of fuzzy relational equation to the prediction of surface maximum vertical subsidence in mining subsidence[J]. Metal Mine, 2010(7): 132-135.
- [8] 肖诚,陈建宏,胡敏,等. 基于改进灰色关联粗糙集的巷道顶板破坏分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2011, 36(4): 556-561.  
Xiao Cheng, Chen Jianhong, Hu Min, et al. Analysis of the failure mechanism of soft rock roof based on improved grey relation and rough set[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2011, 36(4): 556-561.
- [9] 曹丽文,姜振泉. 神经网络在煤矿开采沉降预计中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(1): 23-26.  
Cao Liwen, Jiang Zhenquan. Research on application of artificial neural network in prediction mining subsidence[J]. Journal of China University of Mining & Rechnology, 2002, 31(1): 23-26.
- [10] 赵国彦,吴浩. 未确知聚类方法及其在松动圈厚度预测中的应用[J]. 科技导报, 2013, 31(2): 50-55.  
Zhao Guoyan, Wu Hao. Application of unascertained clustering method in the thickness prediction of excavation damaged zone [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(2): 50-55.
- [11] 王光远. 论未确知信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4): 52-58.  
Wang Guangyuan. Unascertained information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52-58.
- [12] 刘开第,庞彦军,孙光勇,等. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(12): 52-58.  
Liu Kaidi, Pang Yanjun, Sun Guangyong, et al. The unascertained measurement evaluation on a city's environmental quality[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1999, 19(12): 52-58.
- [13] 史秀志,周健,董蕾,等. 未确知测度模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2720-2726.  
Shi Xiuzhi, Zhou Jian, Dong Lei, et al. Application of unascertained measurement model to prediction of classification of rockburst intensity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2720-2726.
- [14] 万玉成. 未确知性在预测与决策问题中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2004.  
Wan Yucheng. Research on the methods and applications of forecasting and decision making based on unascertainty[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [15] 董陇军,李夕兵,宫凤强,等. 地下开采引发地面沉降的未确知聚类预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 95-99.  
Dong Longjun, Li Xibing, Gong Fengqiang, et al. Predicting surface subsidence induced by mining based on unascertained clustering method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 95-99.

(责任编辑 赵业玲)