

文章编号:1673-0062(2016)03-0044-05

基于中心点三角白化权函数的地表沉降模糊综合评价模型及应用

汪 弘¹,李向阳¹,余修武¹,洪昌寿²

(1.南华大学 环境保护与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;
2.中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要:根据金属矿山地下开采对地面沉降影响的因素构建了影响地面沉降评价指标体系,分别借助 Fuzzy AHP 法和中心点三角白化权函数确定各指标权重和隶属度,建立了金属矿山地表沉降模糊综合评价模型.运用此模糊综合评价模型对江西某矿地下开采引发地表沉降进行了评价.

关键词:金属矿山地下开采;模糊综合评价模型;中心点三角白化权函数;地表沉降
中图分类号:TD853 文献标识码:B

Surface Subsidence Fuzzy Comprehensive Evaluation Model and Application Based on Center Point Triangle Whiten Weight Function

WANG Hong¹, LI Xiang-yang¹, YU Xiu-wu¹, HONG Chang-shou²

(1.School of Environmental Protection and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: According to the factors which affect surface subsidence caused by underground mining of metal ores, evaluation index system of land subsidence is established. A fuzzy comprehensive evaluation model of surface subsidence for metal mine, based on the AHP Fuzzy method and the center point triangle whiten weight function to determine the weight and membership degree of each index, is established. The model has been proved valid by using in an underground mine in Jiangxi Province.

key words: underground metal mine; fuzzy comprehensive evaluation model; center point triangle whiten weight function; land subsidence

收稿日期:2016-05-31

作者简介:汪 弘(1988-),男,湖南益阳人,南华大学环境保护与安全工程学院助理实验师,硕士.主要研究方向:矿山安全技术和安全监测.

随着金属矿山地下开采规模日趋增大,开采引发岩层移动与地表沉降风险也随之增加。地面沉降而导致的建筑物毁坏、水面倒灌、不稳定地层等灾害早已屡见不鲜,近年因地下开采而引起的天坑事件也频频出现,这对人们生产生活和周边环境都产生了巨大的安全威胁。国内外对地下开采引起的地表沉降及其预测研究主要集中在观测经验法、影响函数法、理论模型法、模拟法和其他方法(模糊数学理论、灰色系统理论、人工神经网络等)^[1-5]。本研究运用模糊层次分析法和三角白化权函数建立了金属矿山地表沉降模糊综合评价模型,对金属矿山地下开采造成的地表沉降进行评价,为矿山安全生产提供理论依据。

1 影响地表沉降的评价指标体系

国内外对在金属矿山地下开采中引发地面沉降的影响因素做了大量研究,这些因素可以根据人类行为的参与程度分为两大类:自然地质因素和采矿技术因素^[5-7]。本文从这两大类着手确定了一级指标4个,二级指标20个,见表1。

1) 自然地质因素。在矿山实际开采过程中,复

杂多样的矿山自然地质条件对地面沉降影响显著,此次一级指标选择了3个自然地质因素:地质构造、水文地质条件和岩体的物理力学性质。地质构造主要指断裂构造情况、岩层软硬组合数、岩层厚度和矿体倾角程度;水文条件主要指地下水和地表水的水量和渗透性,以及年降雨状况;岩体物理力学性质主要指岩体的硬度、抗压强度和碎胀性。

2) 采矿技术因素。矿山开采中人类行为活动对地面沉降也起着决定性的作用,此次一级指标的构建选取了3个采矿技术因素:采区系统几何因素、技术因素和采动因素。采区几何因素主要指采区的跨度、高度、宽深比以及矿柱尺寸与布置;技术因素主要指选用的采矿方法、开采时的爆破强度和工作面推进速度;技术因素主要指重复采动的次数、老空区的选置层数和处理方法选取。

2 评价指标权重确定

根据 Fuzzy AHP 理论^[8-9]基本原理构建模糊一致性判断矩阵,并计算得到各指标权重,结果见表1。

表1 评价指标体系及权重
Table 1 Evaluation index system and weight

总目标	一级指标	权重值	二级指标	权重值
金属矿山地下 开采引发的 地表沉降 评价 U	地质构造 A ₁	0.141 7	地质构造 A ₁₁	0.375 0
			岩层软硬组合 A ₁₂	0.312 5
			岩层厚度 A ₁₃	0.212 5
			矿体倾角 A ₁₄	0.100 0
	水文地质条件 A ₂	0.075 0	地下水状况 A ₂₁	0.533 3
			地表水状况 A ₂₂	0.350 0
			降雨状况 A ₂₃	0.116 7
	岩体物理力学性质 A ₃	0.125 0	岩体硬度 A ₃₁	0.416 7
			岩体抗压强度 A ₃₂	0.333 3
			岩体碎胀性 A ₃₃	0.250 0
	采区几何因素 A ₄	0.266 7	采区跨度 A ₄₁	0.325 0
			采区高度 A ₄₂	0.225 0
			采区宽深比 A ₄₃	0.150 0
			矿柱尺寸与布置 A ₄₄	0.300 0
	技术因素 A ₅	0.216 6	开采方法 A ₅₁	0.500 0
			爆破振动强度 A ₅₂	0.200 0
			工作面的推进速 A ₅₃	0.300 0
	采动程度 A ₆	0.175 0	重复采动次数 A ₆₁	0.466 7
			空区选置层数 A ₆₂	0.300 0
			老空区的处理 A ₆₃	0.233 3

3 基于中心点三角白化权函数的模糊综合评价模型

3.1 建立评语集

根据各指标对上一层的影响程度将指标评语分成三个灰类,建立评语集: I (不强烈)、II (较强烈)、III (很强烈).

3.2 建立评价数值指标体系

根据各指标的影响程度运用标度法对各指标

进行量化,对 I、II、III 三个灰度赋予一区间量,即设评价指标值的区间量为 $[X_i^1, X_i^4]$, 则指标在 3 个评语集中对应的区间量分别为 $[X_i^1, X_i^2]$ 、 $[X_i^2, X_i^3]$ 、 $[X_i^3, X_i^4]$, 其中 $10 \leq X_i^1 < X_i^2 < X_i^3 < X_i^4 \leq 0$. 根据专家打分和资料文献查询等途径,得到了地面沉降评价指标值的区间量,见表 2.

表 2 地面沉降评价指标值区间

Table 2 Evaluation index value of surface subsidence

指标	指标值区间			指标	指标值区间		
	I	II	III		I	II	III
A ₁₁	(0, 3.5]	(3.5, 7.5]	(7.5, 10]	A ₄₁	(0.5, 3.0]	(3.0, 7.0]	(7.0, 10]
A ₁₂	(0.5, 4.0]	(4.0, 7.0]	(7.0, 9.5]	A ₄₂	(0.5, 3.0]	(3.0, 7.0]	(7.0, 10]
A ₁₃	(0, 3.0]	(3.0, 7.0]	(7.0, 9.5]	A ₄₃	(0.5, 3.5]	(3.5, 6.0]	(6.0, 9.5]
A ₁₄	(0, 3.0]	(3.0, 7.5]	(7.5, 10]	A ₄₄	(0, 3.0]	(3.0, 7.0]	(7.0, 10]
A ₂₁	(0.5, 3.0]	(3.0, 6.0]	(6.0, 9.5]	A ₅₁	(0.5, 3.5]	(3.5, 6.5]	(6.5, 10]
A ₂₂	(0, 3.5]	(3.5, 7.0]	(7.0, 10]	A ₅₂	(1.5, 5.0]	(5.0, 8.0]	(8.0, 9.5]
A ₂₃	(0, 3.5]	(3.5, 6.5]	(6.5, 10]	A ₅₃	(0, 3.0]	(3.0, 6.0]	(6.0, 9.0]
A ₃₁	(0.5, 3]	(3.0, 7.0]	(7.0, 10]	A ₆₁	(1.5, 5.0]	(5.0, 8.0]	(8.0, 9.5]
A ₃₂	(0, 3.5]	(3.5, 6.5]	(6.5, 10]	A ₆₂	(0.5, 4.0]	(4.0, 6.0]	(6.0, 10]
A ₃₃	(0.5, 4.5]	(4.5, 7.5]	(7.5, 9.5]	A ₆₃	(0, 4.0]	(4.0, 7.0]	(7.0, 10]

3.3 中心点三角白化权函数求解隶属度

在运用中心点三角白化权函数进行评估时,根据评估要求划分 3 个灰类,灰类中心点一般选取灰类程度最大的点^[10].根据指标值区间的划分

可得到 5 个中心点分别为: $Y_0 = X_i^1, Y_1 = \frac{X_i^2 + X_i^1}{2}$,

$Y_2 = \frac{X_i^3 + X_i^2}{2}, Y_3 = \frac{X_i^4 + X_i^3}{2}, Y_4 = X_i^4$, 如图 1 所示.

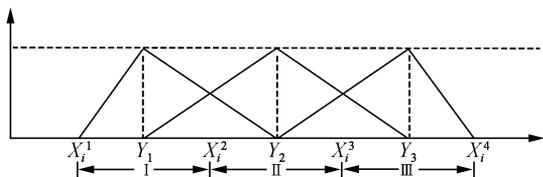


图 1 三角白化权函数示意图

Fig.1 Schematic diagram of the center triangle whitening weight function

X 值为指标 i 的一个现实值,由式(1)可计算出指标 i 在各评价等级的聚类系数

$$F_i^k(X) = \begin{cases} 0, X \notin [Y_i^{k-1}, Y_i^{k+1}] \\ \frac{X - Y_{k-1}}{Y_k - Y_{k-1}}, X \in [Y_i^{k-1}, Y_i^k], (k = 1, 2, 3) \\ \frac{Y_{k+1} - X}{Y_{k+1} - Y_k}, X \in [Y_i^k, Y_i^{k+1}] \end{cases} \quad (1)$$

对聚类系数进行归一化:

$$f_i^k(X) = \frac{F_i^k(X)}{\sum_{k=1}^n F_i^k(X)}, (k = 1, 2, 3) \quad (2)$$

则求得指标 i 在 I、II、III 三个评价等级的隶属度: $f_i^1(x), f_i^2(x), f_i^3(x)$.

3.4 模糊综合评判

综合评判是运用合成算子将各级指标的权重向量 W 和指标的模糊综合评价隶属度矩阵 R 进行合成,即:

$$C = W \circ R = (w_1, w_2, \dots, w_j) \circ \begin{bmatrix} f_{x_1}^1(x_1) & f_{x_1}^2(x_1) & f_{x_1}^3(x_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{x_j}^1(x_j) & f_{x_j}^2(x_j) & f_{x_j}^3(x_j) \end{bmatrix}$$

其中合成算子(◦)选用的是不均平衡平均型合

成算子, $c_k = \min\{1, \sum_{j=1}^m \min(w_j, x_{jk})\}$, (\wedge 表示取小、 \vee 表示取大、 \cdot 表示相乘、 \oplus 示求和)。

4 模糊综合评价实例

1) 评价指标现实值.通过对江西某矿实际地质条件和采矿情况的调查,结合地面沉降评价指标值区间,确定了各指标的现实值,见表3。

2) 隶属度的确定.将现实值代入式1和式2中,进行指标隶属度的求解.以采区跨度(A_{41})为例求解白化权函数值, A_{41} 指标的现实值为7.3,其标评价集区间量为 $[0,2.5]$, $[2.5,6.5]$, $[6.5,10]$,则有

$$F_{A_{41}}^1(2) = \begin{cases} 0, X \notin [0, 5] \\ \frac{X - 0}{1.75 - 0}, X \in [0, 1.75] \\ \frac{5 - X}{5 - 1.75}, X \in [1.75, 5] \end{cases}$$

$$F_{A_{41}}^2(2) = \begin{cases} 0, X \notin [1.75, 8.5] \\ \frac{X - 1.75}{5 - 1.75}, X \in [1.75, 5] \\ \frac{8.5 - X}{8.5 - 5}, X \in [5, 8.5] \end{cases}$$

$$F_{A_{41}}^3(2) = \begin{cases} 0, X \notin [5, 10] \\ \frac{X - 5}{8.5 - 5}, X \in [5, 8.5] \\ \frac{10 - X}{10 - 8.5}, X \in [8.5, 10] \end{cases}$$

对其求解并归一化,得到 $f_{A_{41}}^1 = 0.9231, f_{A_{41}}^2 = 0.0769, f_{A_{41}}^3 = 0$.则指标对应评价等级的隶属度为:

$$X_{A_{41}} = (0.9231, 0.0769, 0)$$

同理求得二级指标评价等级的隶属度,求解值见表3。

表3 评价指标隶属度及现实值

Table 3 The membership degree and the actual value of the evaluation index

指标	现实值	隶属度			指标	现实值	隶属度		
		I	II	III			I	II	III
A_{11}	7.3	0	0.446 2	0.553 8	A_{41}	2	0.923 1	0.076 9	0
A_{12}	8	0	0.090 9	0.909 1	A_{42}	7.5	0.923 1	0.076 9	0
A_{13}	6.1	0	0.661 5	0.338 5	A_{43}	1.5	0	0.285 7	0.714 3
A_{14}	5.7	0	0.871 4	0.128 6	A_{44}	2.2	0.800 0	0.200 0	0
A_{21}	5.2	0	0.791 3	0.208 7	A_{51}	4.1	0.800 0	0.200 0	0
A_{22}	2.4	0.800 0	0.200 0	0	A_{52}	6.6	0.300 0	0.700 0	0
A_{23}	7.4	0	0.261 5	0.738 5	A_{53}	2.9	0.533 3	0.466 7	0
A_{31}	5.7	0	0.800 0	0.200 0	A_{61}	8.6	0	0.066 7	0.933 3
A_{32}	3.7	0.400 0	0.600 0	0	A_{62}	5.2	0	0.933 3	0.066 7
A_{33}	2.3	1.000 0	0	0	A_{63}	6.1	0	0.800 0	0.200 0

3) 二级模糊综合评价

运用 $C = W \circ R$ 对低一级指标进行综合评判,再利用其评判结果进行第二次模糊综合评价。

进行二级模糊综合评价,得到:

$$C_u = W_u \circ R_u = (0.4026, 0.3740, 0.2234)$$

由表4可知矿体开采过程中对地表影响最大的是地质构造和重复采动因素,其次水为文条件

和岩体的物理力学性质,最后为采区因素和采矿技术因素.通过二级模糊综合评价得到了矿体开采对地表沉降的影响程度,其中不强烈占40.26%,较强烈占37.40%,很强烈占22.34%.该结果与矿山实际监测结果相符,存在引发地表沉降的风险需采取必要防范措施。

表4 第一次模糊综合评价结果

Table 4 Results of the first fuzzy comprehensive evaluation

	地质构造 G1	水文条件 G2	物理力学性质 G3	采区因素 S1	技术因素 S2	重复采动程度 S3
I (优)	0	0.280 0	0.383 2	0.747 7	0.620 0	0
II (中)	0.423 4	0.522 5	0.533 4	0.145 2	0.380 0	0.497 8
III (差)	0.576 5	0.197 5	0.083 4	0.107 1	0	0.402 2

5 结 论

将金属矿山地下开采引发地面沉降过程视作一模糊而复杂的系统,建立了金属矿山地下开采引发地表沉降的模糊综合评价模型.基于金属矿山地下开采自然地质和采矿技术因素建立了引发地表沉降的二级评价指标体系;运用 Fuzzy AHP 法确定评价指标权重,并借助中心点三角白化权函数和指标现实值确定指标隶属度;最后运用不均平衡平均型合成算子进行模糊综合评价.

运用该模型对江西某矿进行了模糊综合评价,结果表明该模型能定量反应矿体的开采对地表沉降的影响状况,可以指导地下矿山企业进行风险预判和薄弱环节的查找,降低生产风险程度提高安全水平,对矿山安全生产有着很强的现实指导意义.

参考文献:

- [1] 蔡怀恩.开采沉陷预计的方法及发展趋势[J].露天采矿技术,2007(4):43-44.
- [2] 汪弘.东同 V 号矿体深部开采引发地表沉降研究[D].赣州:江西理工大学,2014.
- [3] Deng Jian, Bian Li, Li Xibing, et al. Analysis of factors and countermeasures of mining subsidence in Kaiyang Phosphorus Mine[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(6): 733-737.
- [4] Thongprapha T, Fuenkajorn K, Daemen J J K. Study of surface subsidence above an underground opening using a trap door apparatus [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2015, 46: 94-103.
- [5] 尹土兵,王品,张鸣鲁.基于 AHP 及模糊综合评判的地下金属矿山安全分析与评价[J].黄金科学技术, 2015, 23(3): 60-66.
- [6] 付华,陈从新,夏开宗,等.金属矿山地下开采引起岩体变形规律浅析[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1859-1868.
- [7] 刘钦,刘志祥,李地元,等.金属矿开采岩层移动角预测知识库模型及其工程应用[J].中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2446-2452.
- [8] Chen Jiqiang, Ma Litao, Wang Chao, et al. Comprehensive evaluation model for coal mine safety based on uncertain random variables[J]. Safety Science, 2014, 68: 146-152.
- [9] Cai Wu, Dou Linming, Si Guangyao, et al. A principal component analysis/fuzzy comprehensive evaluation model for coal burst liability assessment[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 81: 62-69.
- [10] 刘思峰,方志耕,杨英杰.两阶段灰色综合测度决策模型与三角白化权函数的改进[J].控制与决策, 2014, 29(7): 1232-1238.