

基于变权靶心贴近度的采空区稳定性评价

张振华

(招金有色金属业有限公司, 山东 招远市 265499)

摘要:为对采空区稳定性进行科学评价,建立了基于变权靶心贴近度的综合评价模型。首先,从采空区岩体质量、采空区参数和环境条件3个方面,选取了12个典型性影响因素,构建了采空区稳定性综合评价指标体系,并确定了指标分级标准;其次,应用变权重理论得到指标变权重,通过建立区间关联函数,计算区间关联函数值和综合贴近度,并基于最大隶属度原则综合评价采空区稳定性状况;最后,以某地下铜矿3个采空区为研究背景进行相关计算,并与云模型和物元可拓评价模型的评估结果进行对比。结果表明:3个采空区稳定性分别为Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅱ级,评估结果与实际情况相符,3种评价模型结果完全一致。研究表明,该模型在采空区稳定性评估方面具有适应性,计算过程相对简便、可操作性强,为采空区稳定性评估提供了新思路。

关键词:采空区;稳定性;变权;靶心贴近度

0 引言

地下矿山采场未经充填就会留有大量的采空区。当前,采空区是矿山主要危险源之一,随着时间的延长,容易诱发地表塌陷、顶板大面积冒落及透水事故等,造成重大人员伤亡和巨大经济损失^[1]。因此,科学合理地开展采空区稳定性综合评价,及时采取针对性预防措施,对矿山安全生产具有重大意义。目前,众多专家学者针对采空区稳定性评估做了大量研究工作,并取得了一系列成果。随着数学理论模型研究的不断深入,诸如云模型^[2]、物元可拓^[3]、突变级数法^[4]等逐渐应用到采空区稳定性评估中,极大地推动了采空区稳定性风险分析与预测工作的发展。但是,采空区稳定性受多方面因素共同影响,且各因素之间具有不相容性,为采空区稳定性评估增加了难度。对比发现,上述研究成果计算相对复杂,且在整个计算过程中,评价指标赋权均保持恒定,未充分考虑指标权重应随指标状态值的变化而变化的实际情况,可能导致最终评估结果与实际不符。考虑到靶心贴近度能较好解决多指标不确定性的问题,具有计算简便、可操作性强等优势,在岩

爆^[5]、泥石流灾害^[6]等风险评估中得到广泛应用,并取得了满意的应用效果。在权重计算方面,为避免常权重导致评估结果不可靠的问题,基于变权重理论,通过建立均衡函数计算指标变权重,实现权重计算结果的动态平衡。鉴于此,本文建立了基于变权靶心贴近度的采空区稳定性综合评价模型,并以某地下铜矿采空区为研究对象,验证模型的适用性。

1 综合评估指标体系构建

构建综合评价指标体系是进行采空区稳定性评估的基础。采空区稳定性影响因素众多,且指标之间关系相互交织,因此采空区稳定性评估是一项复杂的系统工程。本文遵循全面、客观、可测算等指标选取原则,在参考相关文献^[1-4]和咨询现场专家的基础上,结合采矿实践情况,从岩体质量、采空区参数及环境因素3个方面选取了包括岩石抗压强度在内的12个指标,构建了采空区稳定性综合评价指标体系。将采空区稳定性划分为稳定性极高(Ⅰ级)、较高(Ⅱ级)、一般(Ⅲ级)和差(Ⅳ级)4个等级,指标体系构建情况和指标分级标准见表1。

* 收稿日期:2022-12-21

作者简介:张振华(1986—),男,辽宁开原人,硕士,工程师,研究方向为矿山绿色智能开采技术及矿山压力与矿井动力灾害防治,E-mail:1204983781@qq.com。

表1 采空区稳定性评价指标及分级标准

准则层	指标层	等级划分标准			
		I级(稳定性极高)	II级(稳定性较高)	III级(稳定性一般)	IV级(稳定性差)
岩体质量因素 (X_1)	岩石抗压强度(X_{11})/MPa	(300, 180)	(180, 120)	(120, 60)	(60, 0)
	RQD值(X_{12})	(100, 80)	(80, 60)	(60, 40)	(40, 0)
	地下水状况(X_{13})	(100, 80)	(80, 60)	(60, 40)	(40, 0)
	结构面特征(X_{14})	(100, 80)	(80, 60)	(60, 40)	(40, 0)
采空区参数因素 (X_2)	暴露面积(X_{21})/m ²	(0, 120)	(120, 360)	(360, 720)	(720, 1500)
	采场埋深(X_{22})/m	(0, 150)	(150, 300)	(300, 600)	(600, 900)
	采矿跨度(X_{23})/m	(0, 30)	(30, 75)	(75, 150)	(150, 240)
	采场高跨比(X_{24})	(0, 1.2)	(1.2, 2.4)	(2.4, 4.2)	(4.2, 6)
	矿柱比值(X_{25})	(1, 0.55)	(0.55, 0.25)	(0.25, 0.1)	(0.1, 0)
环境因素 (X_3)	环境扰动(X_{31})	(100, 80)	(80, 60)	(60, 40)	(40, 0)
	暴露时间(X_{32})/a	(0, 6)	(6, 30)	(30, 60)	(60, 120)
	支护情况(X_{33})	(100, 80)	(80, 60)	(60, 40)	(40, 0)

2 变权靶心贴近度理论

2.1 基于变权理论计算指标权重

传统的指标权重计算方法大致可以分为主观赋权法和客观赋权法两类,两种方法计算的指标权重均为固定权重,不会随待评对象状态值的变化而变化,因此,不能有效反映复杂对象的系统非线性等特征,最终评估结果可能不可靠,甚至出现与实际情况差别较大的现象。基于此,在常权理论的基础上提出了变权理论,以避免常权理论带来的评估失效问题。通过引入均衡函数,对层次分析法获得的指标权重进行调整,得到指标变权权重。

设基于层次分析法计算指标权重为:

$$w_j^0 = [\omega_1^0, \omega_2^0, \dots, \omega_n^0] \quad (1)$$

依据参考文献[5],选取均衡函数形式为:

$$\sum_a(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^m x_j^\alpha (0 < \alpha \leq 1) \quad (2)$$

由此得到变权公式为:

$$w_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = w_j^0 x_j^{\alpha-1} / \sum_{k=1}^n w_k^0 x_k^{\alpha-1} \quad (3)$$

式中, α 为变权参数,取值范围为 $[0, 1]$ 。当评价者对各指标均衡问题考虑较多,评估结果要求相对保守时,建议取值 $0 < \alpha < 1/2$;当评价者能容忍各因素之间的差异性,对评估结果要求相对较低时,建议取值 $1/2 < \alpha < 1$;当 $\alpha = 1$ 时,为常权模式,在处理过程中,基于折中的思想,一般取 $\alpha = 1/2$ 。

2.2 靶心贴近度理论

靶心贴近度的基本原理是在构造一种单指标区间关联函数的基础上,求取区间函数最大值,并作为各待评对象的靶心坐标。通过计算各待评对象与靶心贴近度进行等级分类,实现对待评对象优劣划分。具体计算过程如下。

2.2.1 区间关联函数

依据参考文献[7],选取区间关联函数为:

$$Y_{mnl} = \frac{(h_{nl} - h_{n(l-1)}) - |2x_{mn} - (h_{n(l-1)} + h_{nl})|}{(h_{nl} - h_{n(l-1)})(h_{nd} - h_{n0})} \quad (4)$$

式中, Y_{mnl} 为第 m 个待评对象第 n 个评价指标关于第 l 个分级区间关联函数值; x_{mn} 为待评对象各指标赋值; d 为指标分级个数,如本文将采空区稳定性划分为4个等级,此时 d 取值为4; h_{nd} 、 h_{n0} 分别为各指标分级区间最大值和最小值; $h_{nl} - h_{n(l-1)}$ 为指标状态值落入所在分级区间的差值。

2.2.2 靶心贴近度

通过比较各待评对象区间关联函数值,将最大值作为靶心坐标,建立靶心坐标集 Y_{mn} ,则靶心贴近度计算公式为:

$$U_{ml} = 1 - \sum_{n=1}^r [\omega |Y_{mnl} - Y_{mn}|] \quad (5)$$

式中, U_{ml} 为贴近度; ω 为指标权重,基于变权理论确定。

最后,基于最大隶属度原则,根据贴近度大小

实现待评对象等级划分,确定优劣性。

2.3 综合评价模型实现步骤

如前所述,本文建立了基于变权靶心贴近度的采空区稳定性综合评价模型,具体实现过程如下。

(1) 考虑采矿工程实际,选取影响采空区稳定性的典型性因素,构建综合评价指标体系,并确定指标分级标准。

(2) 在层次分析法计算指标权重的基础上,基于变权理论,通过选取均衡函数,计算指标变权权重。

(3) 根据待评对象赋值情况,计算区间关联函数值,确定靶心坐标,结合指标变权权重得到综合贴近度,并基于最大隶属度原则对各待评对象稳定性等级进行判定。

3 工程应用

为验证变权靶心贴近度综合评价模型在采空

区稳定性评估方面的适用性,以某地下铜矿 3 个采空区为研究背景进行相关计算。该铜矿山采用空场法回采矿石,已开采近 30 a,留下了大量采空区,在一定程度上威胁着矿山安全生产。为进行采空区稳定性评估,对于定量指标赋值,主要根据矿山提供的地质报告和工程实际来确定;对于定性指标,则由 5 位长期从事采矿安全评估的专家根据指标分级标准进行现场打分,并对各指标平均值进行现场统计。3 个采空区指标取值情况见表 2。

3.1 指标权重计算

根据层次分析法原理,计算各指标常权权重分别为(0.068, 0.146, 0.041, 0.085, 0.087, 0.041, 0.112, 0.168, 0.102, 0.032, 0.066, 0.052)。根据式(1)、式(2)、式(3),对常权权重进行修正,得到 3 个采空区评价指标变权权重,具体计算结果见表 3。以采空区参数因素(X_2)为例,各指标常权和变权对比情况如图 1 所示。

表 2 指标参数取值

样本	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{32}	X_{33}
P_1	115	72	45	56	320	360	60	1.6	0.52	40	24	90
P_2	76	46	49	72	300	540	120	3.2	0.3	72	35	72
P_3	112	76	50	72	240	540	36	0.6	0.52	74	24	68

表 3 3 个采空区各指标常权权重和变权权重对比

指标权重	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{32}	X_{33}
常权	0.068	0.146	0.041	0.085	0.087	0.041	0.112	0.168	0.102	0.032	0.066	0.052
P_1 变权	0.061	0.126	0.041	0.084	0.082	0.043	0.131	0.192	0.085	0.035	0.077	0.043
P_2 变权	0.081	0.168	0.041	0.078	0.091	0.037	0.098	0.144	0.118	0.028	0.068	0.051
P_3 变权	0.054	0.107	0.034	0.064	0.083	0.031	0.148	0.273	0.074	0.023	0.067	0.042

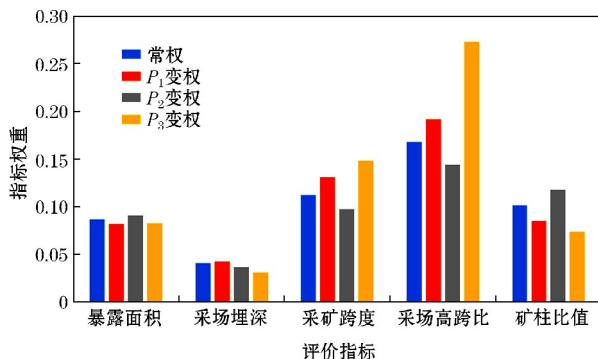


图 1 评价指标常权和变权权重对比

由表 3 和图 1 可以看出,对于单个采空区,指标赋值较大的指标,对应的变权权重会小幅降低,而对于指标赋值较小的指标,对应的变权权重会略有

增大。这说明变权理论能够有效实现指标权重均衡化,避免了较差指标在整体评估时被忽略,突出了较差指标对评估结果的影响^[8]。对于不同采空区,在统一的评价指标体系中,由于各采空区评价指标赋值不同,其指标权重值也存在一定的差异,即随着指标状态值的变化,其权重也发生了变化,体现了不同的指标状态值对采空区稳定性影响的差异性,与实际情况相符。

由此可见,变权权重在充分体现评价指标本身相对重要性的同时,也能较好地反映对常权权重的修正作用。

3.2 采空区稳定性综合评价过程

以 P_1 采空区为例,根据式(4)计算得到各采空

区不同等级下的区间关联函数值,以区间关联函数值的最大值作为靶心坐标值,具体计算结果见表4。根据式(5)结合变权权重计算结果,计算各采空区综合贴近度,并基于最大隶属度原则对采空区稳定

性进行综合评判。为进一步验证本文所建立的变权靶心贴近度在采空区稳定性评估方面的准确性,与云模型和物元可拓两大评估模型评价结果进行比较,具体计算结果见表5。

表4 P_1 样本区间函数值及靶心坐标计算结果

等级	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{32}	X_{33}
I级	-0.004	-0.008	-0.035	-0.024	-0.002	-0.003	-0.008	-0.111	-0.133	-0.040	-0.050	0.010
II级	-0.001	0.008	-0.015	-0.004	0.000	-0.001	0.002	0.111	0.200	-0.020	0.003	-0.010
III级	0.001	-0.008	0.010	0.003	0.000	0.000	-0.002	-0.148	-3.600	0.007	-0.003	-0.020
IV级	-0.006	-0.028	-0.010	-0.017	-0.000	-0.002	-0.008	-0.481	-8.400	-0.007	-0.010	-0.040
靶心坐标	0.001	0.008	0.010	0.003	0.000	0.000	0.002	0.111	0.200	0.007	0.003	0.010

表5 模型评估计算结果

样本	综合靶心贴近度				等级判断		
	I级	II级	III级	IV级	本文	云模型 ^[2]	物元可拓 ^[3]
P_1	0.9152	0.9965	0.6229	0.1426	II级	II级	II级
P_2	0.7072	0.8793	0.9393	0.4290	III级	III级	III级
P_3	0.9082	0.9664	0.5774	0.1241	II级	II级	II级

由表5可知,3个采空区基于变权靶心贴近度的评估结果分别为II级、III级、II级,与实际情况相符合。尽管该矿山留有大量采空区,但目前尚未有大规模坍塌现象。3种评价模型评估结果完全一致,表明本文所建立的综合评价模型在采空区稳定性评估方面可靠性较高,进一步丰富了采空区稳定性评估理论方法。

与云模型和物元可拓评价模型相比,本文所提出的评价模型计算过程相对简便,不需要通过辅助软件进行计算,在满足评估结果精度要求的同时可操作性更强。

4 结论

(1) 为避免传统指标赋权法在计算过程中,权重保持恒定容易导致评估结果与实际不符的情况,基于变权重理论,在层次分析法计算指标权重的基础上,结合采空区实际状态计算变权权重,提高了评估结果的可靠性。

(2) 考虑到采空区稳定性具有随机性和模糊性的特点,且各指标的不相容性,引入了靶心贴近度理论,建立了基于变权靶心贴近度的采空区稳定性

综合评价模型,以3个采空区为研究背景,并与云模型和物元可拓评价模型评估结果进行对比,验证了该模型在采空区稳定性评估方面的适用性。

(3) 由于采空区稳定性受多方面因素共同影响,在后续研究中还需要进一步完善指标评价体系 and 分级标准,以提升评价模型的应用效果。

参考文献:

- [1] 欧阳斌,陈艳红,邓传军.基于云物元模型的采空区稳定性评估研究[J].有色金属(矿山部分),2020,72(6):52-55.
- [2] 高峰,高宇旭,周科平.基于RES-云模型的采空区稳定性评价研究[J].灾害学,2019,34(1):17-21+26.
- [3] 王正帅,刘冰晶,邓喀中.老采空区稳定性的模糊可拓评价模型[J].地下空间与工程学报,2016,12(2):553-559.
- [4] 黄慎.突变理论在采空区稳定性中的应用研究[D].福州:福州大学,2019.
- [5] 刘磊磊,张绍和,王晓密,等.变权靶心贴近度在岩爆烈度预测中的应用[J].爆炸与冲击,2015,35(1):43-50.
- [6] 蔺娅,李爱春,温海燕.基于变权-靶心贴近度模型的泥石流灾害影响下桥梁工程易损性评价[J].安全与环境工程,2022,29(2):95-101+110.
- [7] 孙鹏.基于IAHP-靶心贴近度法的充填管道可靠性评估[J].有色冶金设计与研究,2021,42(2):1-3+12.
- [8] 刘高磊,戴冉,王滔,等.变权云物元模型在船舶定线制后评估中的应用[J].上海海事大学学报,2019,40(4):66-71+88.