

基于改进变权与云模型的煤矿安全状态评价及其应用

蔡俊杰¹, 李希建^{1*}, 徐昇泽², 郭隆鑫³

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 台州市特种设备检验检测研究院, 浙江 台州 317700;
3. 煤炭科学技术研究有限公司, 北京 100013)

摘要: 为了更加合理地评价煤矿安全状态, 构建基于改进变权和正态云理论的煤矿安全状态评价模型。由期望、熵、超熵构成的特定结构函数确定状态评判矩阵, 得出各评价指标的不同等级确定度。基于博弈论思想对变权理论进行改进, 确定指标权重, 利用置信度系数作为验证评判参量, 得出该模型在 2 种不同权重下的综合评判结果及其可靠程度信息。研究表明: 基于改进变权与云理论模型得出的综合确定度为 0.775, 状态等级为 II 级, 煤矿安全状态评判结果为较安全, 与其他方法的评判结果相吻合。该模型是一种简易可靠的煤矿安全风险预测方法。

关键词: 煤矿安全; 变权理论; 正态云模型; 云发生器; 确定度

中图分类号: X936 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2023)01-0059-06

Improved Variable Weight and Cloud Theory Model of Coal Mine Safety Status and Its Application

CAI Junjie¹, LI Xijian¹, XU Bize², GUO Longxin³

(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. Taizhou Special Equipment Inspection and Testing Institute, Taizhou 317700, China;
3. Coal Science and Technology Research Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In order to evaluate coal mine safety state more reasonably, a coal mine safety state evaluation model based on improved variable weight and normal cloud theory is constructed. The state evaluation matrix is determined by the specific structural function composed of expectation, entropy and superentropy, and the different levels of certainty of each evaluation index are obtained. Based on the game theory, the variable weight theory is improved, the index weight is determined, and the confidence coefficient is used as the validation evaluation parameter to obtain the comprehensive evaluation results and reliability information of the model under two different weights. The results show that the comprehensive certainty obtained based on the improved variable weight and cloud theory model is 0.775, the state level is II, and the evaluation result of coal mine safety state is relatively safe, which is consistent with the evaluation results of other methods. This model is a simple and reliable method for coal mine safety risk prediction.

Keywords: coal mine safety; variable weight theory; normal cloud model; cloud generator; certainty

随着开采煤层的深度不断增加, 以及复杂地质构造、高瓦斯、勘查开发技术及装备落后等原因, 造成煤矿各类安全生产事故时有发生^[1]。因此, 亟需建立一套客观科学的评价指标体系和评价方法对煤矿安全状态进行综合评估, 以促进煤矿企业了解自身安全系统的可靠性, 提高安全系统整体的运行水平。

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52164015); 贵州省省级科技计划资助项目(黔科合支撑[2022]一般 231)

* 通信作者, E-mail: 575914635@qq.com

目前,许多学者对煤矿安全状况评估进行了一定的研究.邓军等^[2]将层次分析法引入矿井煤自燃危险性评价中,建立了煤自燃危险性评价指标体系;兰建义等^[3]采用灰色关联理论分析了影响煤矿人为因素事故的主要指标因素,并得出人为因素事故与指标因素之间的定量关系;张淑玲等^[4]将 BP (Back Propagation) 神经网络模型应用于煤矿安全绩效评价,有效地提高了煤矿安全评价工作的效率;李创起等^[5]采用模糊理论建立模糊综合评判模型,能更为直观地掌握煤矿实时安全状态;杨力等^[6]应用熵权法改善了煤矿安全评价的客观性;李廷丰等^[7]在熵权法的基础上,提出采用变权模式相比于采用常权模式能更有效地反映关键指标参数对煤矿安全状态的影响,解决了指标间的均衡性问题.以上评价方法都存在一定的片面性和模糊性,且隶属度的确定性及隶属函数的选择问题没有得到有效解决.煤矿安全系统是由众多关联因素在时间和空间上互相耦合所构成的复杂系统,煤矿事故的发生具有动态、随机等特点^[8],在煤矿安全评估过程中只有综合考虑评价指标的模糊性和状态随机性,才能得出更可靠的评估结果^[9].

鉴于此,为了更加合理地评价煤矿安全状态,构建基于改进变权和正态云理论的综合评估模型,提出经博弈论组合赋权对变权理论进行改进的方法确定指标权重,优化权重系数,确定关键指标;运用云理论综合考虑煤矿安全状态评估过程中指标的模糊性和状态随机性,转换定性定量概念;在此基础上,利用置信度系数作为评判参量,进一步验证评判结果的可靠程度,最后通过算例验证该方法的合理性.

1 煤矿安全状态评价指标体系

遵循评价方法科学性原则,并依据长期的煤矿生产经验及文献[10-11],从人员、设备、环境、管理这4个方面选取20项主要指标,构建煤矿安全状态评价体系,如图1所示.

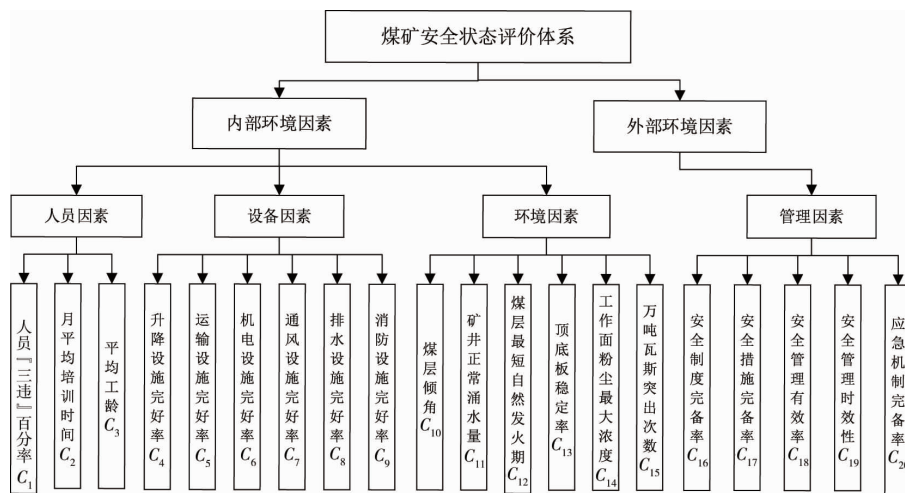


图1 煤矿安全状态评价体系

其中,结合事故致因理论的观点,将人员、设备、环境归于内部环境因素,把管理归于外部环境因素.充分考虑各评价指标对煤矿安全状态的影响程度,将煤矿安全状态确定为5个等级:I级(安全)、II级(较安全)、III级(一般安全)、IV级(较不安全)、V级(不安全),参照文献[11]确定各指标安全级别边界值,如表1所示.

表1 煤矿安全状态评价指标等级划分标准

指标因素	I级	II级	III级	IV级	V级	指标因素	I级	II级	III级	IV级	V级
$C_1 / \%$	<4	<8	<12	<16	≥ 16	$C_{11} / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	<20	<180	<600	<1 200	$\geq 1 200$
C_2 / h	>9	>7	>5	>3	≤ 3	$C_{12} / \text{月}$	>9	>7	>5	>3	≤ 3
C_3 / a	>10	>6	>4	>2	≤ 2	$C_{13} / \%$	>95	>90	>85	>80	≤ 80
$C_4 / \%$	>95	>90	>85	>80	≤ 80	$C_{14} / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	<4	<6	<8	<10	≥ 10
$C_5 / \%$	>95	>90	>85	>80	≤ 80	$C_{15} / 10^{-2}$	<0.5	<1	<2	<3	≥ 3
$C_6 / \%$	>95	>90	>85	>80	≤ 80	$C_{16} / \%$	>90	>80	>70	>60	≤ 60
$C_7 / \%$	>95	>90	>85	>80	≤ 80	$C_{17} / \%$	>90	>80	>70	>60	≤ 60
$C_8 / \%$	>95	>90	>85	>80	≤ 80	$C_{18} / \%$	>90	>80	>70	>60	≤ 60
$C_9 / \%$	>95	>90	>85	>80	≤ 80	$C_{19} / \%$	>90	>80	>70	>60	≤ 60
$C_{10} / (^\circ)$	<8	<25	<45	<75	≥ 75	$C_{20} / \%$	>90	>80	>70	>60	≤ 60

2 改进变权法确定指标权重

2.1 博弈论确定组合权重

通过博弈论思想^[12]将不同方法确定的权重值进行组合优化,得到最优后的权重值.

假设使用 L 种方法计算煤矿安全状态指标的组合权重, w_k 为第 k 种方法权重向量($k = 1, 2, \dots, L$), a_1, a_2, \dots, a_L 为线性组合系数,则 L 种方法权重向量的线性组合为

$$W = \sum_{k=1}^L a_k w_k^T, a_k > 0. \quad (1)$$

式中: W 为综合权重向量.

以综合权重向量 W 与所有 w_k 的偏差最小为目标,建立 W 最优解的集结模型为

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L a_k w_k^T - w_p^T \right\|_2, p = 1, 2, \dots, L. \quad (2)$$

式中: w_p 为 w_k 的最小偏差.

式(2)由矩阵微分性质 $\sum_{k=1}^L a_k w_p w_k^T = w_p w_p^T$ 得到的线性方程组形式为

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & \cdots & w_1 w_L^T \\ w_2 w_1^T & \cdots & w_2 w_L^T \\ \vdots & & \vdots \\ w_L w_1^T & & w_L w_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \\ \vdots \\ w_L w_L^T \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对式(3)计算所得的 a_1, a_2, \dots, a_L 进行归一化处理:

$$a'_k = a_k / \sum_{k=1}^L a_k. \quad (4)$$

则通过 L 种方法确定的最理想权重向量为

$$W' = \sum_{k=1}^L a'_k w_k^T. \quad (5)$$

2.2 均衡函数确定变权权重

在权重确定方法中,一般将权重分为常权权重和变权权重.当常权在评判过程中发生部分指标数值偏离时,就不能较好地反映评判对象的真实状态,因此提出博弈论组合赋权对变权理论进行改进,引用含均衡函数的变权公式^[13]:

$$w_q = w'_q x_q^{\alpha-1} / \sum_{q=1}^{20} w'_q x_q^{\alpha-1}, q = 1, 2, \dots, 20. \quad (6)$$

式中: w_q 为第 q 个指标的变权重; w'_q 为博弈论组合赋权确定的第 q 个指标权重; x_q 为第 q 个指标归一化的值; α 为指标均衡性修正系数,此处取 0.2.

3 基于云模型的安全状态综合评判

3.1 云模型理论

煤矿安全综合评价的基础是评价指标与各个状态等级的隶属度.在模糊数学中,采用精确的隶属度很难描述不确定问题,且存在脱离模糊属性的特征.为了避免以上缺陷,将云模型理论引入煤矿安全状态评价中^[14].

假设 U 是由精确数值构成的定量论域, A 是 U 上的模糊集合,任意元素 x 都存在一个具有稳定倾向的随机数 $\mu(x) \in [0, 1]$ 与之对应, $\mu(x)$ 称为 x 对 A 的确定度. $\mu(x)$ 在 U 上的分布称为隶属云,记为云 $A(x)$, $(x, \mu(x))$ 称为云滴.当云滴分布满足: $x \sim N(E_x, E'_x{}^2)$, $E'_x \sim N(E_n, H_e)$, 且确定度 $\mu(x)$ 如果满足:

$$\mu(x) = \exp \frac{-(x - E_x)^2}{2 E'_x{}^2}. \quad (7)$$

则称 $\mu(x)$ 为论域 U 上的正态云.其中 E_x, E_n, H_e 分别为期望、熵、超熵, E'_n 是以 E_n 为期望、 H_e 为标准差生成的一个正态随机数.依据正态云的3个特征量,求得云模型的结构特征值为

$$\begin{cases} E_x = (C_{\max} + C_{\min})/2; \\ E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6; \\ H_e = s. \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_{\min} 和 C_{\max} 分别为评价等级区间对应的最小及最大边界值; s 为常数,取0.01.对于单约束区间,根据区间边界值的不确定性进行适度选取,并按式(7)和式(8)计算正态云的特征参数.

煤矿安全状态综合预测中的云模型利用正态云发生器生成具体算法,实现定性与定量的转换,具体步骤^[14]:

- 1) 依据分级标准,由式(8)计算云模型的期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e ;
- 2) 由熵 E_n 、超熵 H_e ,生成正态分布的随机数 $E'_n = \text{NORM}(E_n, H_e)$;
- 3) 由期望 E_x 、随机数 E'_n ,生成正态分布的随机数 $x_i = \text{NORM}(E_x, E_n'^2)$;
- 4) 令 $(x, \mu(x))$ 为云滴,依据输入值 x 和期望 E_x ,计算确定度;
- 5) 重复步骤(2)~步骤(4),直到生成 h 个云滴为止.

3.2 综合确定度计算

结合变权法确定的指标权重,求出煤矿安全状态等级综合确定度 $r(x)$,根据最大关联原则,确定煤矿综合安全状态结果.

$$r(x) = \sum_{q=1}^{20} \mu(x) w'_q. \quad (9)$$

3.3 确定置信度信息

根据云理论可知,正态云发生器在具体运算过程中生成正态分布随机数,经多次运算后可求出综合确定度结果的期望 E_{rx} 和熵 E_{rn} .

$$E_{rx} = \frac{r_1(x) + r_2(x) + \cdots + r_h(x)}{h}; \quad (10)$$

$$E_{rn} = \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{i=1}^h [r_i(x) - E_{rx}]^2}. \quad (11)$$

式中: $r_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, h$)为第 i 次运算得出的综合确定度; h 为生成云滴个数,设定 $h=100$,即生成100个云滴.

为进一步反映评判结果的可靠程度,在云理论上引入置信度系数^[15]作为验证评判参量,置信度系数 θ 为

$$\theta = \frac{E_{rn}}{E_{rx}}. \quad (12)$$

θ 值越大,则以 E_{rx} 表示的评判结果的不确定性越大,可靠程度就越小;反之,则评判结果的可靠程度越大.

4 实例应用

为了说明云模型理论在煤矿安全综合评价中的具体应用,采用文献[11]中的煤矿案例进行验证分析,求得2种赋权方法下的权重向量 w_1 和 w_2 .根据式(3)计算出权重组合系数 $a_1 = 0.7649, a_2 = 0.4337$,将 a_1, a_2 归一化处理得到 $a'_1 = 0.6382, a'_2 = 0.3618$;根据式(5)和式(6)分别得出各评价指标的组合权重和变权权重,结果如图2所示.

根据煤矿评价指标等级划分标准和式(8)得到云模型结构特征值的数对 (E_x, E_n, H_e) ,如表2所示.

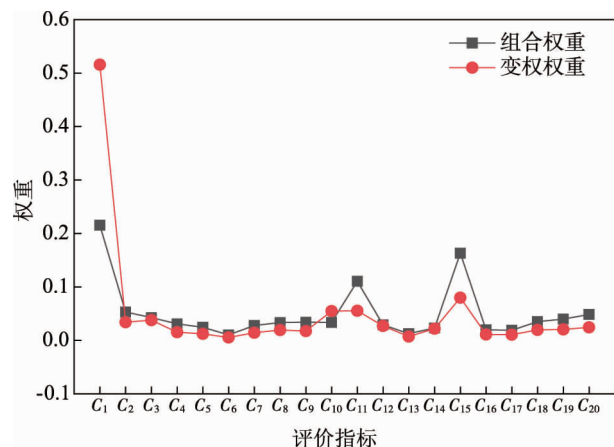


图2 煤矿安全状态各评价指标的组合权重及变权权重

表 2 煤矿安全状态评价指标的正态云模型结构特征值等级划分

评价指标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
C_1	(3.00,0.333,0.01)	(6.00,0.667,0.01)	(10.00,0.667,0.01)	(14.00,0.667,0.01)	(18.00,0.667,0.01)
C_2	(10.00,0.333,0.01)	(8.00,0.333,0.01)	(6.00,0.333,0.01)	(4.00,0.333,0.01)	(2.00,0.333,0.01)
C_3	(11.00,0.333,0.01)	(8.00,0.667,0.01)	(5.00,0.333,0.01)	(3.00,0.333,0.01)	(1.50,0.167,0.01)
$C_4 \sim C_9$	(97.50,0.833,0.01)	(92.50,0.833,0.01)	(87.50,0.833,0.01)	(82.50,0.833,0.01)	(70.00,3.333,0.01)
C_{10}	(6.00,0.667,0.01)	(16.50,2.833,0.01)	(35.00,3.333,0.01)	(60.00,5.000,0.01)	(82.50,2.500,0.01)
C_{11}	(15.00,1.667,0.01)	(100.00,26.667,0.01)	(390.00,70.000,0.01)	(900.00,100.000,0.01)	(1 600.00,133.333,0.01)
C_{12}	(10.50,0.500,0.01)	(8.00,0.333,0.01)	(6.00,0.333,0.01)	(4.00,0.333,0.01)	(2.00,0.333,0.01)
C_{13}	(97.50,0.833,0.01)	(92.50,0.833,0.01)	(87.50,0.833,0.01)	(82.50,0.833,0.01)	(70.00,3.333,0.01)
C_{14}	(3.00,0.333,0.01)	(5.00,0.333,0.01)	(7.00,0.333,0.01)	(9.00,0.333,0.01)	(11.00,0.333,0.01)
C_{15}	(0.35,0.050,0.01)	(0.75,0.083,0.01)	(1.50,0.167,0.01)	(2.50,0.167,0.01)	(6.50,1.167,0.01)
$C_{16} \sim C_{20}$	(95.00,1.667,0.01)	(85.00,1.667,0.01)	(75.00,1.667,0.01)	(65.00,1.667,0.01)	(55.00,1.667,0.01)

以人员“三违”百分率指标为例,综合以上算法及 3 个特征量 E_x, E_n, H_e , 生成一个云滴数为 500 的正态云模型,如图 3 所示.图 3 直观地表示了评价指标、状态等级及确定度三者之间的隶属程度.

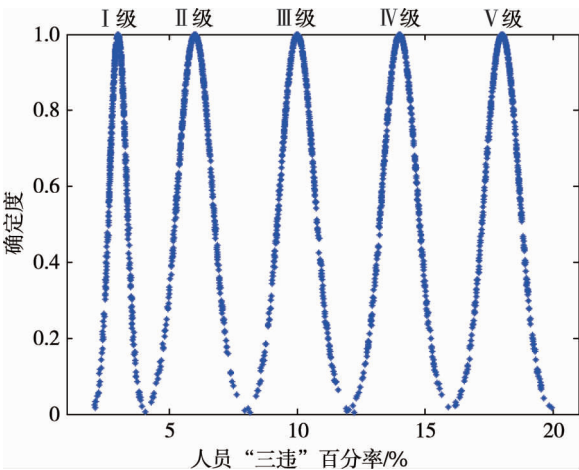


图 3 人员“三违”百分率各状态等级的云模型

基于云模型在实现定性与定量的转换过程中,煤矿安全状态综合确定度会随着正态云发生器算法生成的随机数值而发生变化.分别采用变权权重和组合权重计算的安全状态综合确定度及状态等级如图 4 所示.

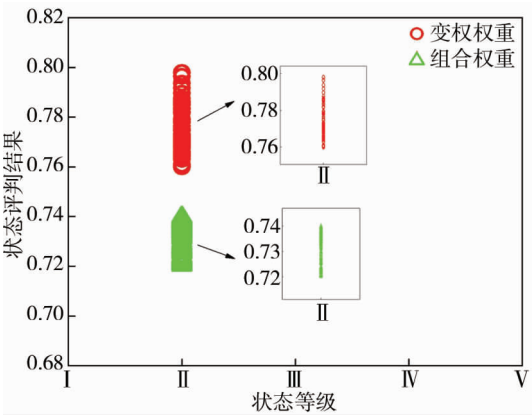


图 4 2 种权重下的煤矿安全状态综合评判结果

由图 4 可知:综合评判结果位于第 II 个等级,即煤矿安全状态为较安全,此时需优化个别指标提高煤矿安全状态.分析综合状态评判结果,发现变权权重计算的综合评判确定度均比组合权重的数值大,反映了基于变权理论修正的关键指标对煤矿综合评判结果的影响,提高了煤矿安全状态评价过程的合理性.

依据式(7)~式(9)可求出人员、设备、环境、管理准则层及目标层的综合确定度.表3给出了 AHP-TOPSIS 法^[11]、博弈论-TOPSIS 法^[15]与本研究方法的综合评判结果,对比分析,基于改进变权和正态云理论方法得出的综合确定度为 0.775,状态等级为Ⅱ级,属于较安全状态.3 种方法的评判结果一致,验证了该模型评判方法的可靠性.

表 3 3 种模型评判方法的评判结果对比

方法	确定度					等级
	人员	设备	环境	管理	综合	
改进变权-云模型	0.439	0.077	0.189	0.070	0.775	Ⅱ级
AHP-TOPSIS	0.395	0.131	0.096	0.167	0.789	Ⅱ级
博弈论-TOPSIS	0.384	0.145	0.131	0.179	0.839	Ⅱ级

置信度信息的确定需进行多次运算并求取平均值,在云模型中设定生成 100 个云滴.首先根据正态云发生器算法,重复式(7)~式(9)的运算步骤,计算煤矿安全状态综合确定度,得出综合评判的判断矩阵;再根据式(10)~式(12)计算 2 种不同权重下的综合确定度结果的期望和该值对应的置信度系数.经计算,变权权重下评判结果的期望 $E_{rx} = 0.759$,熵 $E_m = 0.031$,置信度系数 $\theta = 0.041$;组合权重下评判结果的期望 $E_{rx} = 0.711$,熵 $E_m = 0.027$,置信度系数 $\theta = 0.038$.因此,基于这 2 种不同权重下的置信度系数 θ 均较小,表明该评判结果的可靠程度较高.

5 结论

- 1) 变权理论能修正关键指标对煤矿安全状态评价的影响,优化置信度系数,提高评价过程的可靠性.
- 2) 基于改进变权与云理论模型评判案例煤矿为较安全状态.该煤矿安全状态主要受人员因素影响,可通过增加员工培训时间、提高人员管理水平以及减少员工违章次数等措施,提升煤矿安全状态.
- 3) 基于改进变权与云理论模型计算过程简单,编程方便,可为煤矿安全风险预测提供一种简易可靠的方法.

参考文献:

- [1] 谢和平,王金华,姜鹏飞,等.煤炭科学开采新理念与技术变革研究[J].中国工程科学,2015,17(9):36-41.
- [2] 邓军,杨一帆,翟小伟.基于层次分析法的矿井煤自燃危险性模糊评价[J].中国安全生产科学技术,2014,10(4):120-125.
- [3] 兰建义,乔美英,周英.基于灰色系统理论的煤矿人因事故关键因素分析[J].中国安全生产科学技术,2015,11(2):178-185.
- [4] 张淑玲,王文卿.基于 BP 神经网络的煤矿安全绩效评价模型[J].煤炭技术,2017,36(10):321-323.
- [5] 李创起,景国勋,张永强.模糊评价方法在煤矿安全管理中的应用[J].安全与环境工程,2012,19(1):87-89.
- [6] 杨力,刘程程,宋利,等.基于熵权法的煤矿应急救援能力评价[J].中国软科学,2013(11):185-192.
- [7] 李廷丰,龚国强,罗汝平,等.基于局部变权理论的煤矿安全综合评价研究[J].矿业安全与环保,2015,42(1):44-47.
- [8] 赵宝福,张超,贾宝山,等. IIFLNs-AHP 及其在煤矿安全状况评价中的应用[J].中国安全生产科学技术,2016,12(12):59-63.
- [9] 方前程,商丽.基于变权重理论-正态云模型的边坡稳定性研究[J].安全与环境学报,2018,18(5):1681-1685.
- [10] 李文俊.煤矿与非煤矿山安全评价指导手册(下)[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [11] 贾宝山,尹彬,王翰钊,等. AHP 耦合 TOPSIS 的煤矿安全评价模型及其应用[J].中国安全科学学报,2015,25(8):99-105.
- [12] 路遥,徐林荣,陈舒阳,等.基于博弈论组合赋权的泥石流危险度评价[J].灾害学,2014,29(1):194-200.
- [13] 宋人杰,丁江林,白丽,等.基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):1-8.
- [14] 许翔,黄侨,任远.局部变权和云理论在悬索桥综合评估中的应用[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(8):1544-1550.
- [15] 田水承,张德桃,杨兴波,等.基于博弈论组合赋权 TOPSIS 模型对煤矿安全现状的综合评价[J].煤矿安全,2018,49(6):242-245.