

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.009

基于云模型和改进 CRITIC 的深井垂直 充填管道磨损风险评估

王 石, 宋学朋, 石海天

(江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:为准确预测深井垂直充填管道磨损程度,建立了深井垂直充填管道磨损风险评估云模型。以金川龙首矿等国内 4 家深井矿山为例,选取料浆体积分数等 14 项因素作为风险评估指标。以指标作为云模型变量,根据云模型理论,选取适当的云模型数字特征;考虑指标之间的相关性以及指标内部变异程度对指标权重的影响,引入改进 CRITIC 法获取指标权重,计算评估对象隶属于风险等级的综合确定度,得到深井垂直充填管道磨损风险等级。研究表明,金川龙首矿、冬瓜山铜矿、孙村煤矿、广西高峰矿业垂直充填管道磨损风险等级分别为Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅲ级。与其他评估方法进行对比显示,该计算模型将模糊性与随机性转化为确定度这一定量值,实现了定性到定量的映射,为深井垂直充填管道磨损类似问题的研究提供了新方法。

关键词:深井;垂直充填管道;云模型;改进 CRITIC;云发生器

中图分类号:TD803

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)04-073-12

An improved CRITIC and cloud model evaluation method for predicting the wear risk of vertical filling pipes in deep well

WANG Shi, SONG Xuepeng, SHI Haitian

(School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology
Ganzhou 341000, Jiangxi, P. R. China)

Abstract: To accurately predict wear degree of vertical filling pipe in deep mine, a cloud model has been established to assess the risk involved. The paper has studied the case of four domestic enterprises, such as Longshou mining in Jinchuan. Fourteen elements, including the slurry volume fraction, were selected as risk assessment indexes. On the basis of to the cloud model theory, variable indicators were used to choose applicable digital characteristics. Taking the correlation between various indicators as well as internal variation of them into account, we introduced the improved CRITIC method to gain the index weight, and the pipeline wear risk grades were obtained by calculating the comprehensive determinacy of evaluation indicators. The results showed that the wear risk grades of vertical filling pipelines in Longshou Mine, Dongguashan Copper Mine, Suncun Mine and Gaofeng Mine in Guangxi were II, III, IV and III respectively. Compared with other assessment methods, the computational model transforms ambiguity and randomness

收稿日期:2019-05-28 **网络出版时间:**2019-09-25

基金项目:国家自然科学基金(51804134,51804135);江西省自然科学基金(20181BAB216013);博士启动基金(jxxjbs17011)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51804134, 51804135), Natural Science Foundation of Jianxi Province(20181BAB216013) and Doctoral Initial Foundation(jxxjbs17011).

作者简介:宋学朋(1996—),男,硕士研究生,主要从事充填技术研究。

通讯作者:王石(1987—),男,江西理工大学讲师,博士,主要从事采矿工艺与充填技术研究,(E-mail)stonersxx@126.com。

into a quantitative value of certainty, achieving a qualitative-to-quantitative mapping, providing an innovation for similar research of wear degree of vertical filling pipe in deep mine.

Keywords: deep well; vertical filling pipe; cloud model; improved CRITIC; cloud generator

随着中国浅部资源的枯竭,深部矿产资源的开发成为必然趋势,充填采矿法的特点决定其是深部资源开采的首选方法^[1-2]。建设完善可靠的充填系统是确保充填法矿山生产安全和产能的重要条件^[3],而充填料浆的管道输送是充填系统稳定运行的关键。在深井充填系统中,将充填料浆运送至深部采场的充填管道输送系统是核心环节,其中垂直管道深度远超普通浅部充填系统,垂直管道的安全有效运行是整个系统的枢纽。而管道磨损是垂直管道常见失效事故,深井条件加剧了事故发生的几率。如:金川矿区充填管道的使用寿命一般在 $4 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5 \text{ m}^3$,最大使用寿命有超过 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的个例,但最小使用寿命则不到 $2 \times 10^5 \text{ m}^3$,全矿区每年有大量充填管道因为磨损而报废,直接造成成本的增加^[3]。因此,加强对深井垂直充填管道磨损风险等级的研究具有重要意义。

针对充填管道磨损风险等级评估,许多专家已经进行了广泛研究。Hewitt 等^[4]对 8 种不同内衬材料的管道进行钢轮机磨损试验,得出定性与定量数据,认为单位质量损失的能量可更好的预测管道磨损情况。Gharib 等^[5]通过建立三维数学模型对 2 种不同尺寸的充填管道弯头和不同浓度的膏体料浆进行了评价,研究表明一倍直径弯头比 5 倍直径弯头产生更高的冲击损失,从而产生更高的二次流,导致磨损率增加。张钦礼等^[2]建立主成分分析法与改进 BP 神经网络相结合的评价模型,认为能够更加准确快速的得出充填管道磨损风险等级。冯巨恩等^[6]通过层次分析法与二级模糊综合评判法,确定了充填管道失效的可接受概率。薛希龙等^[7]将可变模糊集引入到充填管道磨损风险评估中,并结合主客观组合权重,得到了国内 5 家充填矿山充填管道磨损风险等级。上述研究通过物理实验、三维模型、数学方法,对充填管道失效磨损方面的研究取得了有益进展。但是,针对深井垂直充填管道磨损的相关研究较少,且传统数学方法很少同时考虑模糊性与随机性在充填管道磨损风险评估结果上的影响,实际应用中存在一定缺陷。如人工神经网络存在知识获取瓶颈问题和收敛速度慢等问题,模糊数学实际应用中存在隶属函数难以确定的问题^[8]。

鉴于此,针对传统数学方法存在的缺陷,基于不确定性人工智能^[9]理论,引进云模型来解决深井垂直充填管道磨损风险评估问题。云模型能够将模糊性和随机性有机的结合起来,运行正向正态云发生器,将模糊性与随机性转化为确定度这一定量值,从而克服了传统数学方法在模糊性与随机性、定性与定量之间存在的局限^[10-11]。结合改进 CRITIC 法,确定指标权重,得到不同风险等级的综合确定度,以此判定深井垂直充填管道的磨损风险等级,并以工程实例对该方法的合理性和有效性进行验证。

1 云模型理论

1.1 云模型概念及数字特征

设 U 是一个精确数值表示的精确论域, C 为 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机出现, x 对 C 的确定度 $u(x) \in [0, 1]$ 是具有稳定倾向的随机数,则称 x 在论域 U 上的分布为云, $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 称为云滴^[12]。 $u: \rightarrow [0, 1], x \in U, x \rightarrow u(x)$ 。

云模型通过期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 来表示一个定性概念,其中期望 E_x 是云滴中最能够代表定性概念的点;熵 E_n 是定性概念不确定性的度量,由概念的随机性和模糊性共同决定;超熵 H_e 是熵的不确定性度量,即熵的熵^[13]。

1.2 正向正态云发生器

正向云发生器^[14]是从定性到定量的映射,其输入是云模型数字特征 (E_x, E_n, H_e) 和云滴数 N ,输出是 N 个云滴在数域空间的位置以及每个云滴代表概念的确定度, N 个云滴构成了整个云。选择正向正态云发生器,因正态云模型是在正态分布和模糊数学概念二者基础上发展起来的全新模型,以此为基础从定性概念到定量的正态云模型具有普遍适用性^[15-16]。正向正态云发生器实现定性到定量映射的算法如下^[9]:

- 1) 生成以 E_n 为期望值, H_e^2 为方差的正态随机数 $E'_n = \text{NORM}(E_n, H_e^2)$;
- 2) 生成以 E_x 为期望值, $E_n'^2$ 为方差的正态随机数 $x_i = \text{NORM}(E_x, E_n'^2)$;

3) 计算 $u_i = e^{-\frac{(x_i - E_x)^2}{2(E_n)^2}}$, u_i 为 x_i 的确定度, 及深井垂直充填管道磨损风险评估指标隶属于各风险等级的确定度。

4) 形成某个区间内的一个云滴 (x_i, u_i) ;

5) 重复上述步骤, 直至形成 N 个云滴。

2 深井垂直充填管道磨损风险云模型评估方法

2.1 评估流程

基于改进 CRITIC 法-云模型的深井垂直充填管道磨损风险评估: 首先, 在前人对充填管道磨损风险研究的基础上, 选取深井条件下影响垂直充填管道磨损的指标因素, 划分风险等级; 进而利用云模型理论确定数字特征 (E_x, E_n, H_c) , 运行正向正态云发生器生成各指标对应的云模型; 读取各指标实测值, 计算各指标相对应不同风险等级的确定度, 结合指标权重, 得出待评估对象隶属于不同磨损风险等级下的综合确定度, 其最大值所对应风险等级即为本次评估深井垂直充填管道磨损风险等级。具体操作流程如图 1 所示。

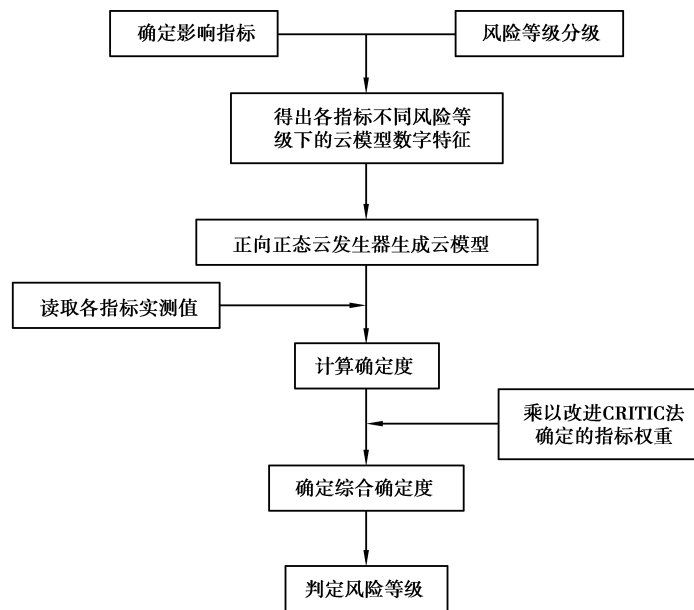


图 1 云模型评估充填管道磨损风险流程图

Fig. 1 Flow chart of cloud model to evaluate the risk of filling pipeline wear

2.2 云模型参数选取

矿山充填管道磨损主要因素包括料浆的特性、管材参数、钻孔质量与管道安装质量等。针对深井垂直充填管道, 参考文献[5-7, 17-20], 根据国内外现行规范, 选取 14 项影响深井垂直充填管道磨损指标, 并对深井垂直充填管道磨损风险划分风险等级, 分别为 I 级(不易磨损)、II 级(较易磨损)、III 级(容易磨损)、IV 级(极易磨损), 指标选取与各指标取值范围见表 1~4。

表 1 影响深井垂直充填管道磨损指标

Table 1 Indicator that affects wear of vertical filling pipes in deep wells

指标名称	影响深井垂直充填管道磨损的指标说明
粗颗粒占比 (I_1)	随着骨料粒径增大, 管道磨损增加(粒径较大的棒磨砂料浆要比尾砂充填料浆对管道磨损的速率快)
料浆的体积分数 (I_2)	料浆的体积分数越大, 料浆与管壁接触磨损越严重
骨料硬度系数 (I_3)	骨料在垂直充填管道中下落时与管壁有接触, 形成划痕, 硬度系数较大的骨料对管壁划痕愈深, 管壁磨损愈严重

续表 1

指标名称	影响深井垂直充填管道磨损的指标说明
管壁厚度(I_4)	相同的磨损程度下,厚管壁管道使用寿命更长
管道直径(I_5)	在相同流量下,管道直径越大,料浆与管壁的接触越小,对管壁的磨损越小;当管壁逐渐减小,管道趋于满管流,对管壁的磨损较弱,但是很难满足矿山充填能力的需要,一般不予采取
管道安装同心度(I_6)	由于钻孔偏斜率和相邻管道连接处安装质量所带来的影响,导致 $I_6 > 0$,使得料浆在下落时与局部管壁的接触面增大,加大垂直充填管道磨损
自由下落带料浆最终流速(I_7)	随着 I_8 的增大,料浆在到达空气与料浆的接触面时, I_7 随之加大,冲击磨损增加
交界面高度(I_8)	料浆在入料口处到达料浆与空气交界面时近似的认为做自由落体运动,而深井充填矿山中 I_8 较浅部充填矿山明显增大
管壁的粗糙度(I_9)	管壁粗糙度决定料浆下落时与管壁摩擦力大小
满管率(I_{10})	通常深井垂直充填管道为非满管状态, I_{10} 为 100% 即满管状态时对垂直充填管道的磨损最轻,非满管流时,料浆与管壁的局部接触部位磨损严重
管道的耐磨性(I_{11})	充填管道材料质量对其磨损有一定影响,通过管道磨蚀量(mg/h)来反映 I_{11} ,磨蚀量越小则 I_{11} 越好
骨料颗粒形状(I_{12})	骨料形状以球形对管壁的磨损最小,形状棱角越多越尖锐,对充填管道的磨损越大
料浆的腐蚀性(I_{13})	充填管道的破坏除了磨损因素外还存在充填料浆对管道的腐蚀作用,充填料浆多呈碱性,随着氧的溶解,腐蚀加剧;但随着氧溶解过剩,会使管壁表面钝化,抑制腐蚀作用,然而随着其余料浆的摩擦,钝化表面被磨掉,加快腐蚀磨损。
管道减压技术应用情况(I_{14})	随着垂直充填管道长度的增加,管压增大,而管道减压技术能够降低垂直充填管道的压强,使静压头与沿程阻力损失比尽可能接近 1

云模型的研究与发展已逐渐成熟,尤其是一维云模型,其数字特征的确定虽无理论指导,但已有相应计算的公式^[11,21]。笔者根据文献[22-23],确定深井垂直充填管道磨损风险评估云模型数字特征,按下式计算:

$$E_x = (C_{\min} + C_{\max})/2, \quad (1)$$

$$E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6, \quad (2)$$

$$H_e = k, \quad (3)$$

式中: C_{\min} 与 C_{\max} 为评估指标边界的上限与下限, k 为常数,是人为给定的一个经验值,可以根据变量本身的不确定程度进行调整^[24]。对于只有单边界限的变量,形如 $[C_{\min}, \infty]$ 或 $[-\infty, C_{\max}]$ 可先根据测试数据的最大上限或下限确定其缺省边界参数或期望值。选取的深井垂直充填管道磨损指标众多,在参考公式的前提下,考虑数字特征 E_x 定义,选取最佳期望值;结合深井充填矿山实际应用情况,选取符合充填领域、以及能够在矿山充填上实现的指标边界值。针对双边界限,如:指标 I_1 中,风险等级为 I 级时 $E_x = 0$,是因为充填料浆为细颗粒时对管道的磨损最小,并且细粒级尾砂很难再次利用,因此随着外加剂的应用,可采用细粒级尾砂进行矿山不同目的充填;指标 I_3 中,风险等级为 I 级时 $E_x = 0.215$,而并非 0 是因为,矿山充填所采用的骨料多为尾砂、河沙、棒磨砂、戈壁集料等, $I_3 > 0$ 。对于单边界限,如:指标 I_7 中,根据肖卫国^[17]对深井充填技术的研究,南非千米深井矿山充填料浆自由下落阶段最高流速可能达到 80 m/s,鉴于此, I_7 上边界值选为 80,依据式(1)确定 $E_x = 70$ 。

深井垂直充填管道磨损指标云模型数字特征如表 5~6 所示。运行正向正态云发生器,生成指标隶属于磨损风险等级的云模型,如图 2 所示。云模型中横坐标表示指标的取值,纵坐标表示指标隶属于风险等级的确定度,图 2(a)(b)(c)(d)(f)(g)(h)(i)(k)展示的云图中风险等级顺序相同,正如图中的标注所示,从左至右依次为 I 级、II 级、III 级、IV 级。从图 2 中可以明确指标的取值隶属于风险等级的情况,图 2(i)(k)(l)(m)(n)中数据点有交叉现象,不仅仅反映了云滴(指标取值)的离散程度较大,也说明了将指标取值转换为隶属

于风险等级确定度时存在的亦此亦彼的模糊性与不确定性。

表 2 各指标评估等级取值范围

Table 2 Range of values for each indicator evaluation level

磨损等级	$I_1/\%$	$I_2/\%$	I_3	I_4/mm	I_5/mm	I_6/mm
I	$0 < I_1 < 25$	$0 < I_2 < 30$	$0 < I_3 < 0.43$	$I_4 \geq 15$	$I_5 \geq 200$	$0 < I_6 < 0.5$
II	$25 \leq I_1 < 50$	$30 \leq I_2 < 40$	$0.43 \leq I_3 < 0.50$	$10 < I_4 \leq 15$	$150 \leq I_5 < 200$	$0.5 \leq I_6 < 1.0$
III	$50 \leq I_1 < 75$	$40 \leq I_2 < 50$	$0.50 \leq I_3 < 0.57$	$5 < I_4 \leq 10$	$100 \leq I_5 < 150$	$1.0 \leq I_6 < 1.5$
IV	$75 \leq I_1 < 100$	$50 \leq I_2$	$0.57 \leq I_3 < 0.80$	$I_4 \leq 5$	$I_5 < 100$	$1.5 \leq I_6$

表 3 各指标评估等级取值范围

Table 3 Range of values for each indicator evaluation level

磨损等级	$I_7/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	I_8/m	$I_9/\mu\text{m}$	$I_{10}/\%$	$I_{11}/(\text{磨蚀量 mg/h})$
I	$0 < I_7 < 20$	$0 < I_8 < 50$	$0 < I_9 \leq 100$	$75 < I_{10} < 100$	$0 < I_{12} < 0.21$
II	$20 \leq I_7 < 40$	$50 \leq I_8 < 150$	$100 \leq I_9 < 300$	$50 \leq I_{10} < 75$	$0.21 \leq I_{12} < 0.34$
III	$40 \leq I_7 < 60$	$150 \leq I_8 < 200$	$300 \leq I_9 < 500$	$25 \leq I_{10} < 50$	$0.34 \leq I_{12} < 0.86$
IV	$60 \leq I_7$	$200 \leq I_8 < 400$	$500 \leq I_9$	$0 \leq I_{10} < 25$	$0.86 \leq I_{12}$

表 4 各指标评估等级取值范围

Table 4 Range of values for each indicator evaluation level

风险等级	赋值	I_{12}	I_{13}	I_{14}
I	[6,8]	表面光滑的椭圆形或球形	酸碱性为中性,且骨料中的物质很难对管道产生化学腐蚀	该技术在深井垂直管道中应用成熟,并取得很好效果
II	[4,6)	表面基本光滑的多面体或近似椭圆形	溶解氧含量小,pH 偶尔发生变化引起的管道腐蚀	该技术已经运用在深井垂直管道中,效果良好
III	[2,4)	表面钝化的方形或多棱角形	弱酸或弱碱性,溶解氧含量小,含轻微腐蚀管道的化学物	该技术应用在深井垂直管道中尚不成熟
IV	[0,2)	表面锋利的极不规则形	偏酸或偏碱性,溶解氧含量大,含易腐蚀管道的化学物	该技术还没有具体实施

表 5 指标云模型数字特征

Table 5 Digital characteristics of the indicator cloud model

风险等级	数字特征	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
I	E_x	0.000	0.000	0.215	17.500	300.000	0.000	10.000
	E_n	4.170	5.000	0.072	0.833	16.667	0.083	3.333
	H_e	0.010	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010	0.010

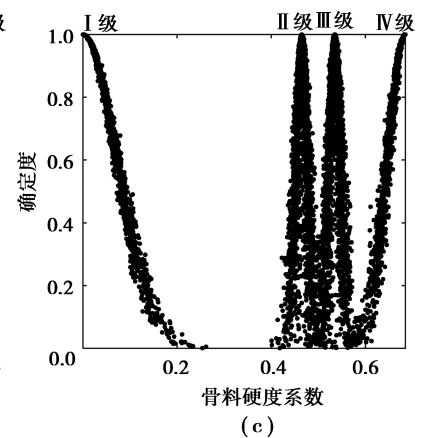
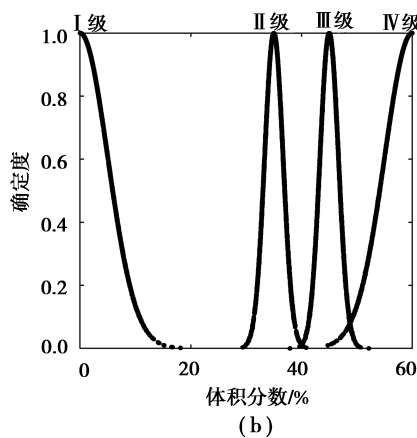
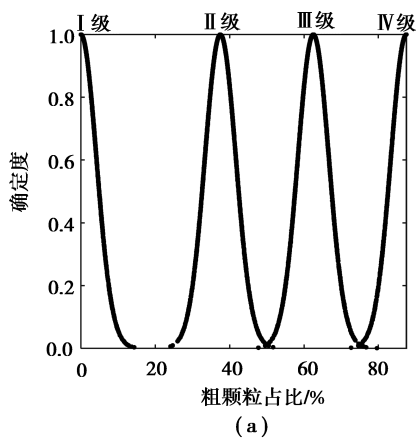
续表5

风险等级	数字特征	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
II	E_x	37.500	35.000	0.465	12.500	175.000	0.750	37.500
	E_n	4.170	1.670	0.012	0.833	8.333	0.083	3.333
	H_e	0.010	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010	0.010
III	E_x	62.500	45.000	0.535	7.500	125.000	1.250	50.000
	E_n	4.170	1.670	0.012	0.833	8.333	0.083	3.333
	H_e	0.010	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010	0.010
IV	E_x	87.500	60.000	0.685	0.000	50.000	1.750	70.000
	E_n	4.170	5.000	0.038	0.833	16.667	0.083	3.333
	H_e	0.010	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010	0.010

表 6 指标云模型数字特征

Table 6 Digital characteristics of the indicator cloud model

风险等级	数字特征	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}
I	E_x	25.000	50.000	87.500	0.105	7.000	7.000	7.000
	E_n	8.333	16.667	4.167	0.035	0.333	0.333	0.333
	H_e	0.010	0.010	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010
II	E_x	100.000	200.000	62.500	0.275	3.333	3.333	3.333
	E_n	16.667	33.333	4.167	0.022	0.333	0.333	0.333
	H_e	0.010	0.010	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010
III	E_x	175.000	400.000	37.500	0.600	3.000	3.000	3.000
	E_n	8.333	33.333	4.167	0.087	0.333	0.333	0.333
	H_e	0.010	0.010	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010
IV	E_x	300.000	500.000	12.500	0.930	0.000	0.000	0.000
	E_n	33.333	83.333	4.167	0.167	0.333	0.333	0.333
	H_e	0.010	0.010	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010



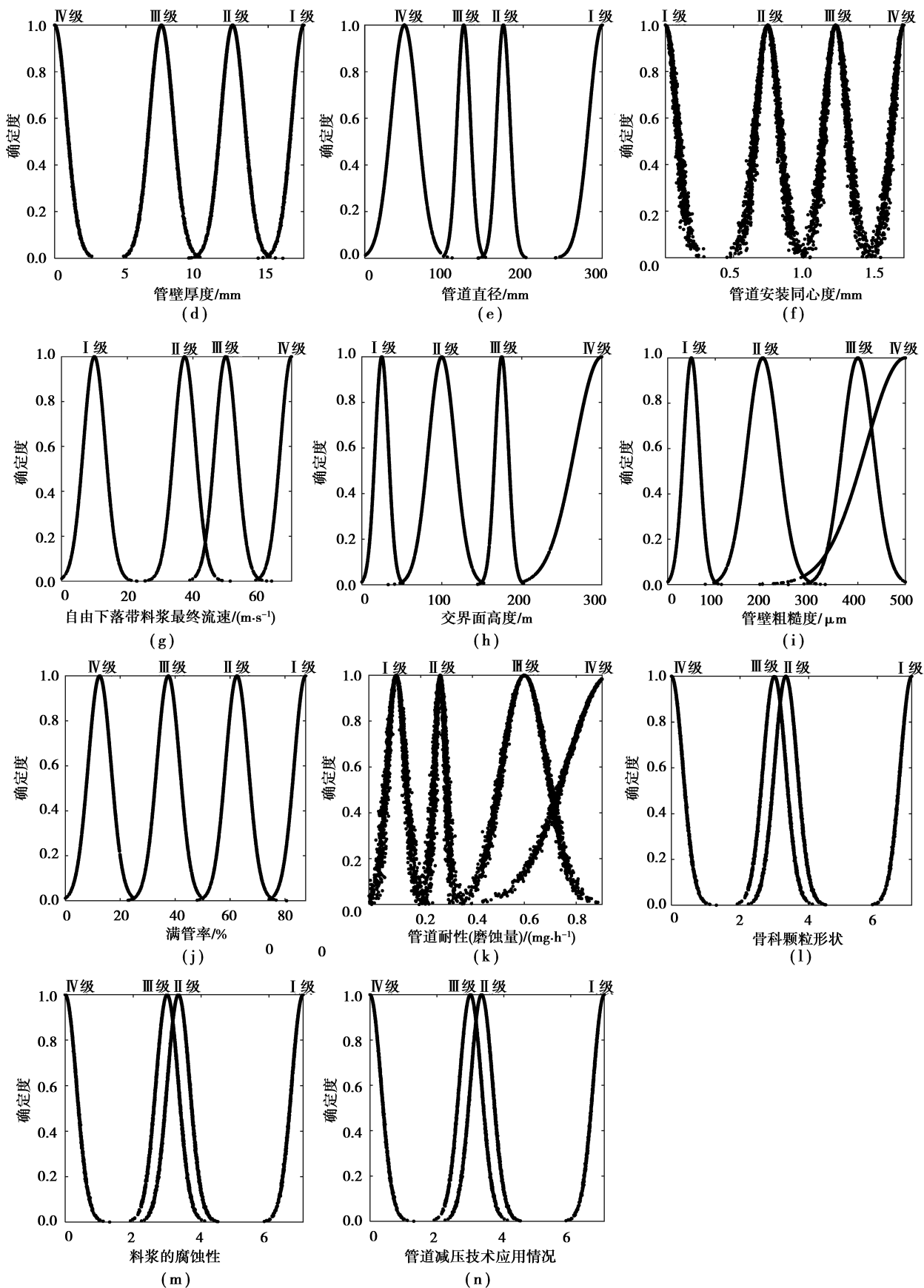


图 2 指标云模型

Fig. 2 Indicator cloud model

2.3 风险等级确定

依据云模型理论得到不同风险等级下云模型数字特征,读取指标实测值,得到各矿山指标隶属于风险等级的确定度,根据式(4),乘以指标权重得到综合确定度,以综合确定度最大值判定 4 家矿山垂直充填管道磨损风险等级。

$$P = \sum_{i=1}^n u_i W_j, \quad (4)$$

式中: P 为指标综合确定度; W_j 为指标权重; i, j 为指标数。

3 改进 CRITIC 法确定指标权重

目前指标属性权重的确定包括主观赋权法和客观赋权法^[11]。主观赋权法主要是根据专家在主观上对各指标属性重视程度来确定指标权重,具有较大的不确定性,同时深井垂直充填管道磨损风险指标为实测值,因此本文中采用客观赋权法。常用的客观赋权法有主成分分析法、熵权法等。主成分分析法是求出少数几个主成分(变量),使它们尽可能多地保留原始变量的信息,且彼此不相关^[25];熵权法在赋权时只考虑了指标信息量的大小,未考虑指标间的相关性^[26]。深井垂直充填管道磨损是多指标共同作用的结果,需要考虑指标之间的相关性,因此本文中选用改进 CRITIC 法确定指标权重。

改进 CRITIC 法结合指标的相关性和信息量的大小来赋予指标权重,指标的相关性和信息量分别用指标的冲突性和辨别力两方面来反映^[27]。指标的冲突性用相关系数衡量其大小和方向,指标的辨别力用变异系数大小来度量,弥补了 CRITIC 法中用标准差来度量辨别力时存在的指标间数量级、量纲有差异所造成的缺陷^[28]。改进 CRITIC 法具体步骤如下^[28]。

建立评估指标矩阵 \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1(k_1) & x_2(k_1) & \cdots & x_n(k_1) \\ x_1(k_2) & x_2(k_2) & \cdots & x_n(k_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1(k_m) & x_2(k_m) & \cdots & x_n(k_m) \end{bmatrix} = (x_j(k_i))_{n \times m} (j = 1, 2, \dots, n, \quad i = 1, 2, \dots, m)。 \quad (5)$$

对矩阵进行标准化处理得到 $\mathbf{X}^* = (x_{ij}^*)_{n \times m}$:

$$x_j^*(k_i) = \frac{x_j(k_i) - \bar{x}_j}{s_j}, \quad (6)$$

式中: $\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_j(k_i)$; $s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_j(k_i) - \bar{x}_j)^2}$ 。

计算改进 CRITIC 法指标变异系数:

$$v_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j}。 \quad (7)$$

将式(6)得到的标准化矩阵 \mathbf{X}^* ,利用式(8)得到 \mathbf{X}^* 的相关系数矩阵 $\mathbf{C} = (\rho_{ql}) (q = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m)$,计算每列中的 $(1 - \rho_{ql})$ 值,得到度量指标间信息独立性的行向量为:

$$\sum_{q=1}^n (1 - \rho_{q1}), \sum_{q=1}^n (1 - \rho_{q2}), \dots, \sum_{q=1}^n (1 - \rho_{qm})。 \quad (8)$$

计算指标所包含信息的综合度量 h_j 以及指标权重 W_j :

$$h_j = v_j \sum_{q=1}^n (1 - \rho_{qm}), \quad (9)$$

$$W_j = \frac{h_j}{\sum_{q=1}^n h_j}。 \quad (10)$$

4 工程实例

为验证笔者提出的云模型的合理性与有效性,选取金川龙首矿、冬瓜山铜矿、孙村煤矿、广西高峰矿业国内 4 家采用充填采矿法的深井矿山,利用云模型与改进 CRITIC 法对垂直充填管道的磨损风险进行评估,并将评估结果与组合权重和可变模糊模型、熵权与综合指数模型对比。根据以往对充填管道的研究^[2,7,17,29]和矿山的实际资料得到各指标实测值,如表 7 所示。

表 7 各矿山垂直充填管道磨损指标样本
Table 7 Wear indicator samples of vertical filling pipe in each mine

矿山名称	深井垂直充填管道磨损指标													
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}
金川龙首矿	38	56.3	0.40	13	180	0.4	23	40	300	36	0.24	1.20	6	5
冬瓜山铜矿	12	53.4	0.50	8	122	0.1	30	70	214	23	0.33	6.20	3	3
孙村煤矿	85	47.1	0.80	12	116	0.3	28	67	203	22	0.42	1.60	5	5
广西高峰矿业	13	43.0	0.48	7	104	0.6	19	28	350	56	0.53	6.40	5	2

4.1 确定指标权重

依照 CRITIC 法赋权步骤,建立评估指标矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} 38 & 56.3 & 0.40 & 13 & 180 & 0.4 & 23 & 40 & 300 & 36 & 0.24 & 1.20 & 6 & 5 \\ 12 & 53.4 & 0.50 & 8 & 122 & 0.1 & 30 & 70 & 214 & 23 & 0.33 & 6.20 & 3 & 3 \\ 85 & 47.1 & 0.80 & 12 & 116 & 0.3 & 28 & 67 & 203 & 22 & 0.42 & 1.60 & 5 & 5 \\ 13 & 43.0 & 0.48 & 7 & 104 & 0.6 & 19 & 28 & 350 & 56 & 0.53 & 6.40 & 5 & 2 \end{bmatrix},$$

对 X 进行标准化处理得到 X^* :

$$X^* = \begin{bmatrix} 0.067 6 & 2.436 8 & 1.909 1 & 2.353 4 & 3.378 3 & 0.554 7 & 0.930 0 & 1.264 3 & \cdots & 1.924 5 \\ 1.688 9 & 1.323 9 & 0.592 5 & 1.568 9 & 0.580 1 & 2.773 5 & 2.320 5 & 2.107 2 & \cdots & 1.154 7 \\ 3.242 6 & 1.093 7 & 3.357 4 & 1.568 9 & 0.989 6 & 0.554 7 & 1.395 0 & 1.770 1 & \cdots & 1.924 5 \\ 1.621 3 & 2.667 0 & 0.855 8 & 2.353 4 & 1.808 6 & 2.773 5 & 2.789 9 & 2.613 0 & \cdots & 2.694 3 \end{bmatrix}。$$

结合式(7)~(10),求出指标权重,如表 8,9 所示。

表 8 指标权重
Table 8 Indicator weight

评价指标	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
改进 CRITIC 法	0.163 2	0.019 3	0.055 9	0.051 5	0.042 7	0.120 1	0.032 4

表 9 指标权重
Table 9 Indicator weight

评价指标	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}
改进 CRITIC 法	0.068 5	0.043 7	0.091 4	0.055 3	0.133 4	0.055 3	0.067 3

4.2 评估结果及分析

根据表 2~5 得到各指标边界界限,代入式(12)~(14)获取云模型数字特征,进而得到各指标在风险等级下的确定度,结合指标权重确定 4 家深井矿山垂直充填管道的磨损在不同风险等级下的综合确定度,确定垂直充填管道磨损风险等级,并与组合权重和可变模糊模型、熵权与综合指数模评估结果对比,结果见表 10。

表 10 深井垂直充填管道磨损风险等级评估结果及对比

Table 10 Evaluation results and comparison of wear risk grade of vertical filling pipe in deep well

评估对象	综合确定度				云模型评估结果	组合权重与可变模糊模型	熵权与综合指数模型
	$P(I)$	$P(II)$	$P(III)$	$P(IV)$			
金川龙首矿	0.016 3	0.256 9	0.086 2	0.017 3	II	II	II
冬瓜山铜矿	0.068 2	0.134 3	0.207 0	0.012 0	III	III	III
孙村煤矿	0.000 2	0.096 7	0.040 1	0.144 6	IV	IV	IV
广西高峰矿业	0.092 8	0.075 1	0.110 0	0.008 9	III	III	III

由表 10 可知:4 家深井矿山垂直充填管道磨损风险等级分别为金川龙首矿 II 级、冬瓜山铜矿 III 级、孙村煤矿 IV 级、广西高峰矿业 III 级。以金川龙首矿与孙村煤矿为例:金川龙首矿 $P(II)$ 远大于其他风险等级确定度,表明该矿山垂直充填管道磨损风险等级比较稳定,能够使指标参数在一定范围内进行变化;孙村煤矿经改进 CRITIC-云模型对其垂直管道磨损风险评估后,综合确定度分别为: $P(I)=0.000 2$, $P(II)=0.096 7$, $P(III)=0.040 1$, $P(IV)=0.144 6$,垂直充填管道磨损最严重,孙村煤矿采用煤矸石进行充填,煤矸石形状、尺寸大小对管道磨损影响较大;且风险等级隶属于 II 级的确定度大于隶属于 III 级的确定度,这表明孙村煤矿可通过调节影响磨损的指标因素,很容易将风险等级控制在 II 级,如:可通过增大管道直径、增强管道减压技术应用、提高满管率、减小煤矸石粒径等来降低垂直充填管道磨损程度,同时这一现象也反映了管道磨损的模糊性与随机性。通过与其他评估方法进行对比,结果基本吻合,说明云模型在深井垂直充填管道磨损风险等级评估中是合理有效的。虽然这 3 种方法都取得了良好的评估结果,但是相比于组合权重和可变模糊模型、熵权与综合指数,该计算模型在深井垂直充填管道磨损风险评估中,利用确定度表征管道磨损、指标取值的不确定性与模糊性,通过云模型图反应指标取值隶属于风险等级的确定度,克服了其他两种数学方法在模糊性与不确定性共同作用下的缺陷;且改进 CRITIC 法赋权时能够考虑指标间的相关性,更符合实际情况。

5 结 论

1) 选取满管率、交界面高度、管道减压技术应用情况等 14 项定量与定性指标,将深井垂直充填管道磨损划分不易磨损、较易磨损、容易磨损、极易磨损 4 个等级,基于云模型理论,生成了各指标所对应云模型,计算得到金川龙首矿、冬瓜山铜矿、孙村煤矿、广西高峰矿业隶属于垂直充填管道磨损风险等级的最大综合确定度分别为 0.253 1,0.207 0,0.137 7,0.110 0。

2) 针对深井垂直充填管道磨损的模糊性与随机性、以及多因素共同作用的复杂性,将人工智能领域的云模型引入到深井垂直充填管道磨损风险评估中,实现了定性定量之间的转换,弥补了传统数学方法对于随机性与模糊性问题分类的不足。

3) 工程实例运用表明,改进 CRITIC 法-云模型是有效的,与其他评估方法进行对比,云模型计算步骤简单,能够通过编程实现,为类似深井垂直充填管道磨损问题的研究提供了新思路。将云模型引入到充填管道磨损风险评估问题中,云模型数字特征的选取目前尚无理论指导,对数字特征的研究有利于提高模型精度。

参考文献:

- [1] 古德生,周科平. 现代金属矿业的发展主题[J]. 金属矿山, 2012(7): 1-8.
GU Desheng, ZHOU Keping. Development theme of the modern metal mining[J]. Metal Mine, 2012(7): 1-8. (in Chinese)
- [2] 张钦礼,周碧辉,王新民,等. 充填管道失效风险性预测精度研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2805-2811.
ZHANG Qinli, ZHOU Bihui, WANG Xinmin, et al. Invalidation prediction precision of filling pipeline[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, 45(8): 2805-2811. (in Chinese)
- [3] 王新民,古德生,张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙:中南大学出版社, 2010.

- WANG Xinmin, GU Desheng, ZHANG Qinli. Theory of backfilling activity and pipeline transportation technology of backfill in deep mines[M]. Changsha: Central South University Press, 2010.(in Chinese)
- [4] Hewitt D, Allard S, Radziszewski P. Pipe lining abrasion testing for paste backfill operations[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(12): 1088-1090.
- [5] Gharib N, Bharathan B, Amiri L, et al. Flow characteristics and wear prediction of Herschel-Bulkley non-Newtonian paste backfill in pipe elbows[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017, 95(6): 1181-1191.
- [6] 冯巨恩, 吴超. 深井充填管道失效概率准则的模糊综合评判[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(6): 1079-1083. FENG Juen, WU Chao. Fuzzy comprehensive evaluation on probability failure criteria of the deep level pipelines filling system[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2005, 36(6): 1079-1083.(in Chinese)
- [7] 薛希龙, 王新民, 张钦礼, 等. 充填管道磨损风险评估的组合权重与可变模糊耦合模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3752-3758. XUE Xilong, WANG Xinmin, ZHANG Qinli, et al. An integrated model of combination weights and variable fuzzy on evaluating backfill pipeline wear risk[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(11): 3752-3758.(in Chinese)
- [8] 李健, 汪明武, 徐鹏, 等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 83-87. LI Jian, WANG Mingwu, XU Peng, et al. Classification of stability of surrounding rock using cloud model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 83-87.(in Chinese)
- [9] 李德毅, 杜鹤. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014. LI Deyi, DU Yu. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.(in Chinese)
- [10] 魏博文, 黄海鹏, 徐镇凯. 基于云模型和组合赋权的岩体质量二维评价模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3092-3099. WEI Bowen, HUANG Haipeng, XU Zhenkai. Two-dimensional evaluation model of rock mass based on combination weighting and cloud model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3092-3099.(in Chinese)
- [11] 过江, 张为星, 赵岩. 岩爆预测的多维云模型综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1199-1206. GUO Jiang, ZHANG Weixing, ZHAO Yan. A multidimensional cloud model for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1199-1206.(in Chinese)
- [12] 周科平, 林允, 胡建华, 等. 基于熵权-正态云模型的岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 596-602. ZHOU Keping, LIN Yun, HU Jianhua, et al. Grading prediction of rockburst intensity based on entropy and normal cloud model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 596-602.(in Chinese)
- [13] 杨文东, 杨栋, 谢全敏. 基于云模型的边坡风险评估方法及其应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 30-34. YANG Wendong, YANG Dong, XIE Quanmin. Study on slope risk assessment method based on cloud model and its application[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2018, 46(4): 30-34.(in Chinese)
- [14] 傅鹤林, 黄震, 黄宏伟, 等. 基于云理论的隧道结构健康诊断方法[J]. 工程科学学报, 2017, 39(5): 794-801. FU Helin, HUANG Zhen, HUANG Hongwei, et al. Health diagnosis method of shield tunnel structure based on cloud theory[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2017, 39(5): 794-801.(in Chinese)
- [15] 王迎超, 靖洪文, 张强, 等. 基于正态云模型的深埋地下工程岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1189-1194. WANG Yingchao, JING Hongwen, ZHANG Qiang, et al. A normal cloud model-based study of grading prediction of rockburst intensity in deep underground engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1189-1194.(in Chinese)
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34. LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.(in Chinese)
- [17] 肖卫国. 深井充填技术的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003. XIAO Weiguo. Deep well filling technology research[D]. Changsha: Central South University, 2013.(in Chinese)
- [18] 刘志双. 充填料浆流变特性及其输送管道磨损研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.

- LIU Zhishuang. Study on rheological properties of filling slurry and wear of conveying pipeline [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2018.(in Chinese)
- [19] 毛明发, 王炳文, 朱家锐, 等. 充填料浆自流输送管道磨损机理研究[J]. 金属矿山, 2018(4): 178-184.
MAO Mingfa, WANG Bingwen, ZHU Jiarui, et al. Study on wear mechanism of gravity transportation pipeline for backfilling slurry[J]. Metal Mine, 2018(4): 178-184.(in Chinese)
- [20] 张德明, 王新民, 郑晶晶, 等. 深井充填钻孔内管道磨损机理及成因分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(13): 100-105.
ZHANG Deming, WANG Xinmin, ZHENG Jingjing, et al. Wear mechanism and causes of backfilling drill-holes pipelines in deep Mine[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(13): 100-105.(in Chinese)
- [21] 杨洁, 王国胤, 刘群, 等. 正态云模型研究回顾与展望[J]. 计算机学报, 2018, 41(3): 724-744.
YANG Jie, WANG Guoyin, LIU Qun, et al. Retrospect and prospect of research of normal cloud model[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(3): 724-744.(in Chinese)
- [22] 郝杰, 侍克斌, 王显丽, 等. 基于模糊 C-均值算法粗糙集理论的云模型在岩爆等级评价中的应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 859-866,874.
HAO Jie, SHI Kebin, WANG Xianli, et al. Application of cloud model to rating of rockburst based on rough set of FCM algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 859-866,874.(in Chinese)
- [23] 宋远骏, 李德毅, 杨孝宗, 等. 电子产品可靠性的云模型评价方法[J]. 电子学报, 2000, 28(12): 74-76,68.
SONG Yuanjun, LI Deyi, YANG Xiaozong, et al. Reliability evaluation of electronic products based on cloud models[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 74-76,68.(in Chinese)
- [24] 帅青燕, 何亚伯. 基于云模型的坝基岩体质量综合评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(S1): 54-58.
SHUAI Qingyan, HE Yabo. Comprehensive evaluation on rock quality of dam foundation based on cloud model[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(S1): 54-58.(in Chinese)
- [25] 胡嘉蕊, 吕震宙. 基于核主成分分析的多输出模型确认方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(7): 1470-1480.
HU Jiarui, LYU Zhenzhou. Model validation method with multivariate output based on kernel principal component analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(7): 1470-1480.(in Chinese)
- [26] 熊卫红, 张宏志, 谢志成, 等. 基于云理论及熵权法的变压器潜在故障风险评估方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 125-130,146.
XIONG Weihong, ZHANG Hongzhi, XIE Zhicheng, et al. Risk assessment of power transformer potential fault based on cloud theory and entropy weight method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 125-130,146.(in Chinese)
- [27] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems; the critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [28] 王瑛, 蒋晓东, 张璐. 基于改进的 CRITIC 法和云模型的科技奖励评价研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 118-124.
WANG Ying, JIANG Xiaodong, ZHANG Lu. Research on the evaluation of science and technological awards based on improved CRITIC method and cloud model[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2014, 41(4): 118-124.(in Chinese)
- [29] 张钦礼, 曹瑞锋, 王石, 等. 基于熵权和综合指数模型的充填管道堵塞风险性评价[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(4): 1021-1025.
ZHANG Qinli, CAO Ruifeng, WANG Shi, et al. Risk assessment on blocking of filling pipeline based on comprehensive index and entropy[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2013, 38(4): 1021-1025.(in Chinese)