



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

宋学朋,柯愈贤,魏美亮,等.基于多维云模型的充填管道堵塞风险评估[J].煤炭科学技术,2021,49(9):95-102. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.014

SONG Xuepeng, KE Yuxian, WEI Meiliang, et al. Risk assessment of filling pipeline blockage based on multidimensional cloud model [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 95 - 102. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.09.014

基于多维云模型的充填管道堵塞风险评估

宋学朋,柯愈贤,魏美亮,石海天,廖宝泉

(江西理工大学 资源与环境工程学院,江西 赣州 341000)

摘要:管道堵塞是充填系统主要失效事故之一,严重阻碍了充填作业的正常进行。为准确预测充填管道堵塞风险,基于充填管道堵塞不确定性与模糊性的特点,引进多维云模型对管道堵塞风险进行评估。选取充填倍线等 11 项指标因素作为多维云模型变量,根据云理论确定数字特征;考虑到管道堵塞是由多指标共同作用的结果,采用改进 CRITIC 法对指标值进行处理,与多维云模型耦合得到评估对象隶属于不同风险等级的综合确定度,以此判定充填管道堵塞风险等级。对国内 4 家采用充填采矿法矿山的充填管道堵塞风险进行评估,结果表明:金川龙首矿、河东金矿、大红山铜矿、新城金矿充填管道堵塞风险等级分别为Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅲ级。通过与模糊数学、未确知测度理论、一维云模型和 SPA-AHP 等评估方法进行对比,本文方法与其他方法获得的大红山铜矿的管道堵塞风险等级分别为Ⅱ、Ⅳ、Ⅲ、Ⅲ、Ⅱ级,该计算模型确定的风险等级在满足评估结果准确的前提下,对评估结果更加严格,实践中更能确保安全,也为充填管道堵塞风险预测提供了新方法。

关键词:管道堵塞;多维云模型;云发生器;确定度

中图分类号:TD803

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)09-0095-08

Risk assessment of filling pipeline blockage based on multidimensional cloud model

SONG Xuepeng, KE Yuxian, WEI Meiliang, SHI Haitian, LIAO Baoquan

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

Abstract: Pipeline blockage is one of the main failure accidents of filling pipeline which seriously hinders the normal operation of filling. To accurately predict the risk of blockage, which based on the uncertainty and fuzziness of filling pipeline blockage, a multi-dimensional cloud model was established. Eleven elements, including the stowing gradient, were selected as the variables of the cloud model. The certain degree of each indicator of different risk levels was calculated according to the cloud theory. Taking the multi-index interaction of pipeline blockage into consideration, we introduce the improved CRITIC method to process the index data, and obtained the comprehensive determinacy by combining the multi-dimensional cloud model, so as to determine the risk level of filling pipeline blockage. The paper studied the case of four domestic mining enterprises, the results showed that the wear risk grades of Pipeline blockage in Longshou Mine, Hedong Gold Mine, Dahongshan Copper Mine and Xincheng Gold Mine were Ⅱ, Ⅲ, Ⅱ and Ⅲ respectively. Compared with fuzzy mathematics, unascertained measure theory, one-dimensional cloud model and SPA-AHP, the pipeline blockage risk grades of Dahongshan Copper Mine obtained by this method and other methods are Ⅱ, Ⅳ, Ⅲ, Ⅲ and Ⅱ respectively, the calculation model is more rigorous to the assessment results and can ensure safety in practice on the premise of satisfying the accuracy of assessment results. It also provides a new method for the risk prediction of filling pipeline blockage.

Key words: pipeline blockage; multidimensional cloud mode; cloud generator; degree of certainty

0 引言

由于地表及浅部矿产资源逐步枯竭,深部开采

成为矿山未来发展的主要趋势^[1-2]。而高温、岩爆、高地应力将成为深井矿山生产的主要安全问题,充填采矿法具有能够控制地层压力、降低矿石损失贫

收稿日期:2021-01-22;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804135,51804134);江西省自然科学基金资助项目(20192BAB216017,20181BAB216013)

作者简介:宋学朋(1996—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生。E-mail: sxp9612@126.com

通讯作者:柯愈贤(1987—),男,重庆垫江人,讲师,博士。

化、减少地表尾砂堆存等特点,因此在深井矿山开采中具有不可替代的作用^[3-5]。随着充填技术的发展,充填采矿法针对不同的充填需求已经建立了相对完善的充填系统。充填系统包括材料采集、料浆制备、输送、采场充填等工艺。其中充填料浆的输送是充填工艺的关键技术之一,其决定着充填体采矿法能否正常实施。所谓充填体料浆的输送即将地表充填站制备的水泥砂浆以管道的形式在重力或泵压下运输到待充采空区^[5]。然而管道输送是充填工艺中比较薄弱的环节,其稳定性制约着充填系统的安全性及连续性。充填管道的失效方式主要有堵塞、磨损、爆管等,尤其以管道堵塞事故最为常见^[6],国内外均有类似事故发生。如作为澳大利亚最大矿山之一的芒特艾萨矿,2015—2018 年间因充填管道堵塞累计停工 9 个月,造成巨大的经济损失;在国内,金川二矿区平均每充填 5 000 m³ 因充填管道堵塞需要更换 1 次管道。针对充填管道堵塞问题,国内外学者进行了广泛的研究。LILE 等^[7]利用压力脉冲在管道中传播与堵塞的相互作用,作为堵塞监测和表征手段,并采用一维等温非组分单相欧拉模型对压力脉冲在堵塞中的变化进行描述。ADEWUMI 等^[8]采用振动测量的方法对圆管的堵塞进行了研究,利用加速度计对振动参数进行测量,结果表明,随着管道流动面积的减小,管道的振动也随之增大,并对管道堵塞程度做出了预测。王超超等^[9]将管道堵塞分为附着性堵塞、沉积型堵塞和综合型堵塞 3 种类型,揭示了 3 种类型堵塞的形成机理,提出了预防管道堵塞的方法。同时,学者们对充填管道的堵塞风险进行了预测评估,一些数学方法被引入到充填管道堵塞风险评估中,如模糊数学^[10]、未确知测度理论^[11-12]、一维云模型^[6]、SPA-AHP^[13]、事故树分析法^[14]等。虽取得了一定的研究成果,但是充填管道堵塞是多层次多因素综合影响的结果^[6],具有随机性与模糊性。传统的数学方法均未同时考虑到充填管道堵塞的模糊性与随机性,同时一维云模型相比于多维云模型不能反映充填管道堵塞受多个因素共同作用的特点,以及因素之间的相关性^[15]。随着矿山开采深度的增加,充填系统中管道堵塞问题愈发严重,对充填管道堵塞风险进行精准可靠地评估具有一定实用价值。此外,多因素的评估问题大多需事先确定指标权重^[16],充填管道堵塞受多种因素共同影响,需要考虑指标因素间的相关性。传统的赋权法,如 AHP、熵权法等并未考虑到指标间的相关性,存在一定弊端,且主观赋权法中主观性较强,容易受到人为因素的干扰,不

利于评估结果的准确性。鉴于此,在一维云模型的基础上,引进多维云模型,采用考虑指标间相关性的改进 CRITIC 法确定指标权重,建立改进 CRITIC-多维云模型风险评估体系。并将该风险评估体系应用于工程实际应用中,不仅验证了该计算模型的合理性,而且对降低充填管道堵塞风险具有一定的指导意义。

1 云模型理论

1.1 多维正态云模型定义

多维云模型是由一维云模型推广而来,以此反映多维定性概念。多维正态云模型定义如下^[17]:设 U 为一个 m 维论域 $U = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}$, $i \in [1, m]$, C 为 U 上的定性概念, U 中的元素 $\{x_m\}$ 对于 C 的隶属度 μ 是一个具有稳定倾向的随机数,即: $\mu: U \rightarrow [0, 1]$, $\forall x_i \in U$, $x_i \in \mu$, $i \in [1, m]$, 多维正态云隶属度函数可表示为

$$\mu_i = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^m \frac{[x_i - E(x)_i]^2}{2E(n)_i^2} \right\} \quad (1)$$

式中: $E(x)_i$ 、 $E(n)_i$ 分别为论域 U 中元素 x_i 对应的多维正态云数字特征的期望与熵; μ_i 为论域 U 中元素对应 C 的隶属度。

1.2 多维正态云模型数字特征

多维正态云模型数字特征定义与一维云模型相同,设论域内各维互不相关,则 m 维正态云可由 $3m$ 个数字特征(期望 $E(x)$ 、熵 $E(n)$ 、超熵 $H(e)$)来描述概念的整体特征^[18]。其中期望 $E(x)$ 是论域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^[19]。可根据下式确定多维云模型数字特征^[15,20-21]:

$$E(x) = (D_{\min} + D_{\max})/2 \quad (2)$$

$$E(n) = E(x)_{\max}/3 \quad (3)$$

$$H(e) = k \quad (4)$$

其中: D_{\min} 、 D_{\max} 分别为评估指标边界的上限与下限; k 为常数,是人为给定的经验值,可以根据变量本身的不确定程度进行调整,取 k 为 0.01; $E(x)_{\max}$ 为同一指标不同风险等级下期期望最大值。对于只有单边界限的变量,形如 $[D_{\min}, \infty]$ 或 $[-\infty, D_{\max}]$ 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。

1.3 多维正态正向云发生器

多维云模型发生器同一维云模型相同,包括正向云发生器与逆向云发生器。采用多维正态正向云发生器,其具体算法如下:

- 1) 生成一个期望为 $E(n)(E(n)_1, E(n)_2, \dots, E(n)_m)$, 方差为 $H(e)(H(e)_1, H(e)_2, \dots, H(e)_m)^2$ 的 m 维正态随机数 $E(n)'(E(n)'_1, E(n)'_2, \dots, E(n)'_m)$ 。
- 2) 生成一个期望为 $E(x)(E(x)_1, E(x)_2, \dots, E(x)_m)$, 方差为 $E(n)'(E(n)'_1, E(n)'_2, \dots, E(n)'_m)^2$ 的 m 维正态随机数 $x(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 。
- 3) 计算 $\mu_i = \exp\left\{-\sum_{i=1}^m \frac{[x_i - E(x)_i]^2}{2E(n)_i^2}\right\}$ 。
- 4) 令 $drop(x_1, x_2, \dots, x_i, \mu_i)$ 为一个云滴, 它是该云表示的语言值在数量上的一次具体体现。
- 5) 重复步骤 1~4, 直到产生 N 个云滴为止。

2 充填管道堵塞风险多维云模型评估方法

2.1 评估流程

充填管道堵塞风险评估流程:首先,对影响充填管道堵塞的指标进行选取,根据前人研究成果、矿山实际资料以及分级标准,确定指标范围与等级划分;进而利用多维正态云理论,确定各指标不同风险等级下的 3 个多维云数字特征,代入实测值,根据式(1)计算各指标隶属于不同风险等级的确定度,同时依据改进 CRITIC 法确定指标权重,结合式(5)得到综合确定度,进而判定充填管道堵塞风险等级,具体评估流程如图 1 所示。

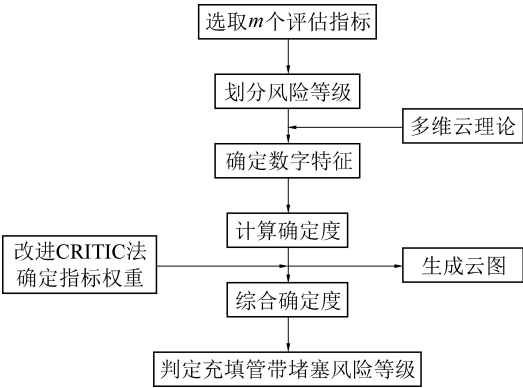


图 1 多维云模型评估充填管道堵塞风险流程
Fig.1 Flow chart of multi-dimensional cloud model to evaluate risk of filling pipeline blockage

2.2 充填管道堵塞风险评估多维云模型

为准确预测充填管道堵塞风险等级,需要科学合理地确定影响充填管道堵塞的指标。根据国内外专家学者的研究成果,参考文献[6,10-13],以及现行规范,矿山的实际情况,将充填管道堵塞风险等级划分为堵塞风险极大(I级)、堵塞风险较大(II级)、堵塞风险一般(III级)、堵塞风险很小(IV级),并选取 11 项指标因素作为充填管道堵塞的评估指标,同时

确定各指标对应不同风险等级的取值范围,见表 1—表 3。

表 1 影响充填管道堵塞的指标因素
Table 1 Indicator factors affecting blockage of filling pipes

指标	指标影响充填管道堵塞说明
充填料浆体积分数 I_1	充填料浆体积分数增大,料浆在管道中容易产生淤积,尤其是水平管道与弯管处,增加充填管道堵塞风险
充填倍线 I_2	充填倍线是衡量充填料浆能否实现自流输送的关键指标,充填倍线增大,水平管道越长,沿程阻力损失增加,增大管道堵塞风险
钻孔偏斜率 I_3	充填钻孔的质量决定着管道安装质量,管道安装中心线偏移,料浆竖直下落时与偏移的管道接触加大,易造成管道的磨穿或管道内衬脱落,造成管道堵塞
管壁的绝对粗糙度 I_4	料浆在管道输送过程中与管壁接触易黏结在管壁表面,而管壁的粗糙度决定了料浆黏结程度,随充填次数的增加,该部分停留的料浆增多,逐渐堵塞充填管道
管道内径 I_5	在其他条件相同的情况下,管道直径越小,堵塞风险越高
料浆流速与临界流速之比 I_6	在水平管道, I_6 越大于 1,管道的堵塞风险愈低
料浆密度 I_7	充填料浆密度的增加,意味着充填料浆浓度的加大,从而使沿程阻力损失增加,提高充填管道的堵塞风险
粗颗粒占比 I_8	粗颗粒在惯性力、自身重力、流体拖拽力等作随机作用下发生离析沉降,容易淤积在管壁处,逐渐引发管道堵塞
料浆瞬时流速 I_9	由于 I_9 的改变,料浆在管道中的紊流特性改变,尤其是相对粗糙的管壁,磨损增加,继而管道不平整度增加,固体颗粒的悬浮平衡打破,易发生沉降,造成管道堵塞
充填骨料形状 I_{10}	料浆在充填管道输送过程中易发生沉降,而骨料颗粒间的摩擦随形状的变化而变化,多边形的骨料颗粒间摩擦较大,更容易淤积在管壁处,加大管道堵塞风险
料浆的腐蚀性 I_{11}	料浆对管壁造成腐蚀,加剧管壁磨损,容易造成管壁磨穿,充填料浆淤积,使充填管道堵塞

2.3 确定多维云数字特征

影响充填管道堵塞的指标多维云模型数字特征见表 4。云模型数字特征是云模型的精髓,由于选取评估指标众多,其中部分指标为单边边界,因此对

表 2 各定量指标的取值
Table 2 Values for each quantitative indicator

风险等级	$I_1/\%$	I_2	$I_3/\%$	$I_4/\mu\text{m}$	I_5/mm	I_6	$I_7/(t\cdot\text{m}^{-3})$	$I_8/\%$	$I_9/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
I	[50,+∞)	[7,+∞)	[5,+∞)	[500,+∞)	[0,100)	[0,1)	[1.9,+∞)	[75,100)	[4.30,+∞)
II	[40,50)	[5,7)	[3,5)	[300,500)	[100,150)	[1,1.2)	[1.7,1.9)	[50,75)	[3.91,4.30)
III	[30,40)	[3,5)	[1,3)	[100,300)	[150,200)	[1.2,1.5)	[1.5,1.7)	[25,50)	[3.51,3.91)
IV	[0,30)	[1,3)	[0,1)	[0,100)	[200,+∞)	[1.5,+∞)	[0,1.5)	[0,25)	[3.21,3.51)

表 3 各定性指标的取值
Table 3 Values for each qualitative indicator

风险等级	赋值	充填骨料形状 I_{10}	料浆的腐蚀性 I_{11}
I	[6,8]	极不规则	强酸、强碱或含有易与充填管道发生反应的组分
II	[4,6)	方形或多棱角形	弱酸、弱碱或含有能与充填管道发生轻微反应的组分
III	[2,4)	多角形	pH 值偶尔会发生变化或含有在某种特定环境下与充填管道发生反应的组分
IV	[0,2)	圆形或椭圆形	中性且不含能与充填管道发生反应的组分

于指标多维云数字特征的确定需要考虑 2 种情况。针对双边边界指标,在考虑期望 $E(x)$ 定义的同时兼顾矿山充填的实际情况,并结合公式确定指标的多维云数字特征,如指标 I_8 ,在风险等级为 IV 级时 $E(x)=0$ 是因为粗颗粒尾砂在管道输送中沉降速率快,易造成管壁堵塞,在粗颗粒中加入细颗粒形成絮团能够有效减小粗颗粒沉降速率,全部为细颗粒时能够降低管道的堵塞风险,而随着充填工艺的发展,细颗粒亦可以作为矿山充填的骨料;指标 I_2 ,在风险等级为 IV 级时 $E(x)\neq 0$ 是因为根据实际情况,充填

料浆通过管道运输到待充填采空区,充填倍线总是不小于 1。单边边界指标与双边边界指标不同之处在于需要根据实际情况确定指标的上限以满足 $E(x)$ 能够代表所对应的风险等级,如指标 I_2 风险等级为 I 级时 $E(x)=11$,是因为当矿山充填倍线过大时,管道输送过程中自然压头与沿程阻力损失比远小于 1,难以实现自流输送,且易发生堵塞,因此结合矿山实际情况,选取 $I_{2,\max}=15$ (不包含泵压输送),依据式(2)一式(4)确定了多位云模型数字特征,其中 $I_{2,\max}$ 为指标 I_2 的最大取值。

表 4 各指标多维云模型数字特征
Table 4 Digital characteristics of multi-dimensional cloud models of various indicators

风险等级	数字特征	$I_1/\%$	I_2	$I_3/\%$	$I_4/\mu\text{m}$	I_5/mm	I_6	$I_7/(t\cdot\text{m}^{-3})$	$I_8/\%$	$I_9/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	I_{10}	I_{11}
I	$E(x)$	52.50	11.00	7.50	600.00	50.00	0.50	2.45	87.50	4.65	7.00	7.00
	$E(n)$	17.50	3.68	2.50	200.00	91.67	0.75	0.82	29.17	1.55	2.33	2.33
	$H(e)$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
II	$E(x)$	45.00	6.00	4.00	400.00	125.00	1.10	1.80	62.50	4.11	5.00	5.00
	$E(n)$	17.50	3.67	2.50	200.00	91.67	0.75	0.82	29.17	1.55	2.33	2.33
	$H(e)$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
III	$E(x)$	35.00	4.00	2.00	200.00	175.00	1.35	1.60	37.50	3.71	3.00	3.00
	$E(n)$	17.50	3.67	2.50	200.00	91.67	0.75	0.82	29.17	1.55	2.33	2.33
	$H(e)$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
IV	$E(x)$	15.00	2.00	0	50.00	275.00	2.25	1.25	0.00	3.36	1.00	1.00
	$E(n)$	17.50	3.67	2.50	200.00	91.67	0.75	0.82	29.17	1.55	2.33	2.33
	$H(e)$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

2.4 综合确定度

依据多维云理论,分别得到多维云模型数字特征、各指标相对应风险等级的确定度,并通过 python 软件根据多维正向正态云发生器算法编写程序生成云图,由于篇幅所限,仅给出了 $N=3\ 000$ 时的部分

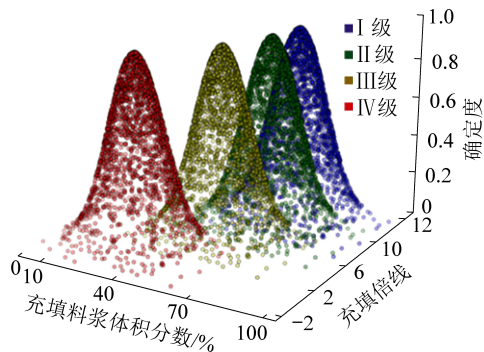
云图,如图 2 所示。图 2b 为指标 I_1 (充填料浆体积分数)与指标 I_7 (料浆密度)共同作用下生成的风险云图,由图 2 可得当 I_1 较小时,随着 I_7 的增加,风险等级从 IV 级变为 I 级,充填管道堵塞由风险很小瞬间转换为风险极大。图 2c 所示为 I_5 (管道内径)与

I_6 (料浆流速与临界流速之比), 当 I_5 位于 40~160 mm, I_6 逐渐增加时, 充填管道堵塞风险等级从 I 级 (风险极大) 降至 III 级 (风险一般); 而指标 I_6 趋近 2.5 时, 随着 I_5 的增加, 充填管道堵塞风险等级由 III 级降至 IV 级。多维云模型风险云图能够清楚地描述指标之间对评估对象风险等级的影响, 能够显示出最佳指标值。根据式 (5), 确定评估中 4 家矿山隶

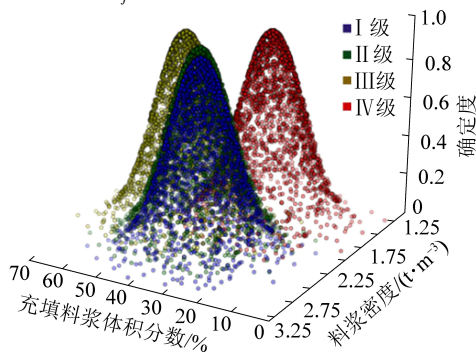
属于不同风险等级的综合确定度, 以综合确定度最大值所对应的风险等级判定充填管道堵塞风险等级。计算方法如下:

$$p = \exp \left\{ - \sum_{i=j=1}^m \frac{W_j [x_i - E(x)_i]^2}{2E(n)_i^2} \right\} \quad (5)$$

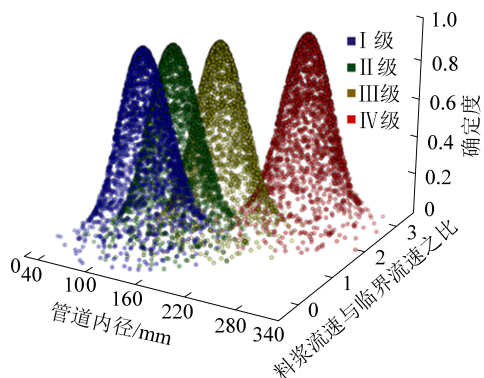
式中: i, j 为指标数量; p 为指标隶属于风险等级的确定度; W_j 为指标权重。



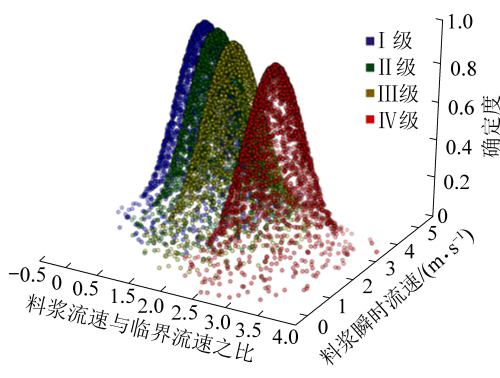
(a) 充填料浆体积分数与充填倍数



(b) 充填料浆体积分数与料浆密度



(c) 管道内径与料浆流速与临界流速之比



(d) 料浆流速与临界流速之比与料浆瞬时流速

图 2 二维云模型

Fig.2 Two-dimensional cloud model

3 改进 CRITIC 法

CRITIC 法^[22] 是 DIAKOULAKI 于 1995 年提出的一种客观赋权法。与熵权法^[23]、主成分分析法^[24]不同, CRITIC 法是通过结合指标的相关性以及信息量的大小来赋予权重, 指标的相关性用指标间的冲突性来反映, 指标的信息量则用辨别力来反应, 同时引进相关系数来衡量指标间冲突性的方向和大小, 即相关系数越大, 指标间的相关性越强, 冲突性越低, 则指标所占权重越小; 引入标准差来度量指标辨别力, 标准差越大, 反映的指标信息量越大, 占据权重越大^[25]。

考虑指标间的相关性与信息量的大小, CRITIC 赋权法符合充填管道堵塞是由多因素共同作用结果的特点。但是本次评估指标众多, 指标间的量纲、数

量级存在差异, 标准差在反映指标辨别力时存在不足, 因此, 采用变异系数对 CRITIC 法进行改进, 改进后的 CRITIC 计算步骤如下^[26]:

建立评估指标矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} x_1(k_1) & x_2(k_1) & \cdots & x_n(k_1) \\ x_1(k_2) & x_2(k_2) & \cdots & x_n(k_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1(k_y) & x_2(k_y) & \cdots & x_n(k_y) \end{bmatrix}$$

$$j=1, 2, \dots, n; \quad i=1, 2, \dots, y$$

对矩阵进行标准化处理得到 X^* , 其中的元素为

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

式中: $x_j^*(k_i)$ 为矩阵 X^* 的元素; \bar{x}_j 为矩阵 X 中元素平均值, $\bar{x}_j = \frac{1}{y} \sum_{i=1}^y x_j(k_i)$; s_j 为矩阵 X 中元素标准差,

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{y} \sum_{i=1}^y (x_j(k_i) - \bar{x}_j)^2}.$$

计算指标的变异系数 v_j :

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

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

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

式中: ρ_{ql} 对应于标准化矩阵 X^* 中的向量。

计算指标所包含信息的综合度量 h_j 以及指标权重 W_j :

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

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

4 工程实例

为验证多维云模型用于充填管道堵塞风险评估的准确性与合理性, 对金川龙首矿、河东金矿、大红山铜矿、新城金矿, 4 家矿山的充填管道堵塞风险进行评估, 并与模糊数学^[10]、未确知测度理论^[11-12]、一维云模型^[6]、SPA-AHP^[13] 等评估方法进行对比。表 5 为 4 家矿山影响充填管道堵塞指标的实测值。

表 5 各矿山指标实测值

Table 5 Actual measured value of each mine

矿井	$I_1/\%$	I_2	$I_3/\%$	$I_4/\mu\text{m}$	I_5/mm	I_6	$I_7/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	I_8/mm	$I_9/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	I_{10}	I_{11}
金川龙首矿	56	3.8	2.72	300	219	0.8	1.98	38	3.24	1	2
河东金矿	24	5.2	0.56	100	90	1.6	1.68	46	3.43	3	4
大红山铜矿	33	9.6	0.98	500	150	3.0	1.69	31	3.38	3	3
新城金矿	52	5.8	1.27	200	107	3.5	1.94	29	3.40	4	3

4.1 指标权重

评估指标矩阵 X 。

根据改进 CRITIC 法确定指标权重步骤, 建立

$$X = \begin{bmatrix} 56 & 3.8 & 2.72 & 300 & 219 & 0.8 & 1.98 & 38 & 3.24 & 1 & 2 \\ 24 & 5.2 & 0.56 & 100 & 90 & 1.6 & 1.68 & 46 & 3.43 & 3 & 4 \\ 33 & 9.6 & 0.98 & 500 & 150 & 3.0 & 1.69 & 31 & 3.38 & 3 & 3 \\ 52 & 5.8 & 1.27 & 200 & 107 & 3.5 & 1.94 & 29 & 3.40 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$

得到标准化矩阵 X^* 。

$$X^* = \begin{bmatrix} 1.116 & 0 & -1.071 & 2 & 1.646 & 3 & 0.169 & 0 & 1.556 & 2 & -1.322 & 0 & 1.139 & 1 & \dots & -1.605 & 9 & -1.414 & 2 \\ -1.305 & 1 & -0.419 & 2 & -1.012 & 4 & -1.183 & 2 & -1.034 & 1 & -0.579 & 8 & -1.030 & 6 & \dots & 0.229 & 4 & 1.414 & 2 \\ -0.624 & 2 & 1.630 & 1 & -0.495 & 4 & 1.521 & 3 & 0.170 & 7 & 0.719 & 0 & -0.958 & 3 & \dots & 0.229 & 4 & 0 \\ 0.813 & 4 & -0.139 & 7 & -0.138 & 5 & -0.507 & 1 & -0.692 & 7 & 1.182 & 9 & 0.849 & 8 & \dots & 1.147 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

确定指标权重 W_j , 见表 6。

表 6 指标权重

Table 6 Indicator weight

评估指标	$I_1/\%$	I_2	$I_3/\%$	$I_4/\mu\text{m}$	I_5/mm	I_6	$I_7/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	$I_8/\%$	$I_9/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	I_{10}	I_{11}
指标权重	0.110 6	0.121 5	0.202 8	0.185 6	0.121 5	0.167 2	0.026 2	0.063 9	0.007 5	0.136 7	0.081 3

4.2 评估结果与分析

基于多维云模型的充填管道堵塞风险评估, 各矿山隶属于风险等级的综合确定度最大值所对应的风险等级即为最终评估结果。根据表 5—表 6 确定的 4 家矿山各指标实测值, 以及指标多维云数字特征、指标权重, 并结合式(10)得到各矿山充填管道堵塞风险的综合确定度, 获得了矿山充填管道磨损风险等级, 见表 7 与图 3。

由表 7 可知: 基于多维云模型得到 4 家矿山充填管道堵塞风险等级为金川龙首矿 II 级、河东金矿 III 级、大红山铜矿 II 级、新城金矿 III 级。且能够发现, 与其他评估方法相比, 所用方法能够满足准确性的要求。此外, 多维云模型在充填管道堵塞风险评估中更加严格, 如对大红山铜矿的评估中, 多维云模型与 SPA-AHP 评估的风险等级均为 II 级, 充填管道堵塞风险较大, 而另外 3 种方法评估结果风险等

表 7 基于多维云模型的充填管道堵塞风险评估结果

Table 7 Risk assessment results of filling pipeline blockage based on multi-dimensional cloud model

矿井	不同风险等级综合确定度				风险等级				
	I	II	III	IV	本文方法	模糊数学	未确知测度理论	一维云模型	SPA-AHP
金川龙首矿	0.308	0.777	0.643	0.198	II	I ~ II	II	II	II
河东金矿	0.115	0.578	0.813	0.480	III	IV	IV	IV	III
大红山铜矿	0.122	0.434	0.424	0.256	II	IV	III	III	II
新城金矿	0.056	0.321	0.430	0.333	III	III	III	III	III

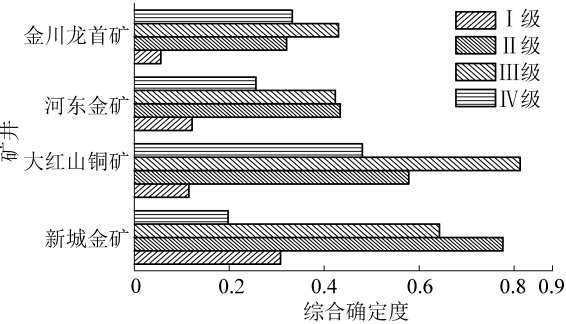


图 3 风险等级对比

Fig.3 Risk grade comparison

级均低于Ⅱ级,充填管道堵塞风险一般、较小。严格谨慎的评估结果有利于矿山提前采取措施,通过调节可改进指标降低堵塞风险,将堵塞降低到最小。图 3 为各矿山充填管道堵塞风险对比结果。由图 3 可知,在金川龙首矿、河东金矿、新城金矿 3 家矿山中,综合确定度远高于其他风险等级,该现象表明,处于该等级下的充填管道堵塞风险较稳定,不易改变。由此可见,河东金矿、新城金矿充填管道堵塞风险一般,且运行更稳定。然而金川龙首矿则需进行充填参数的大部分改变才能保证降低充填管道堵塞风险。基于评估结果,所用改进 CRITIC 法,考虑指标间的相关性与变异性确定指标权重提高了模型的精度。

5 结 论

1) 选取充填料将体积分数、充填倍线、钻孔倾斜率等 11 项指标作为充填管道堵塞风险评估指标,将充填管道堵塞风险等级划分为堵塞风险极大、较大、一般、很小 4 个等级。对 4 家矿山充填管道堵塞风险进行评估,评估结果分别为:金川龙首矿Ⅱ级、河东金矿Ⅲ级、大红山铜矿Ⅱ级、新城金矿Ⅲ级。

2) 在一维云模型的基础上引进多维云模型,实现定性与定量的转变,克服传统数学方法在模糊性与随机性共存问题上的缺陷;针对管道磨损风险评估指标的多样性与相互性,改进 CRITIC 法确定指标权重,提高模型精度,相比于一维云模型,多维云模型能够反应指标间共同作用的特点,并通过云图的方式表现出来。

3) 多维云模型属于人工智能领域,将其运用到充填管道堵塞风险评估中,与其他评估方法对比表明,多维云模型的应用是合理准确的,且该计算方法在充填管道堵塞风险评估方面更加严格,为充填管道堵塞风险评估提供了新方法。

参考文献 (References):

[1] 张钦礼,刘 奇,赵建文,等.深井似膏体充填管道的输送特性[J].中国有色金属学报,2015(11):3191-3195.
ZHANG Qinli, LIU Qi, ZHAO Jianwen, et al. Pipeline transportation characteristics of filling paste-like slurry pipeline in deep mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015 (11): 3191-3195.

[2] 陈顺满,吴爱祥,王贻明,等.深部回采矿柱稳定性影响因素分析及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(8):2050-2057.
CHEN Shunman, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Analysis of influencing factors of pillar stability and its application in deep mining[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(8): 2050-2057.

[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,2010:10-100.

[4] XUE G L, YILMAZ E, SONG W D, et al. Influence of fiber reinforcement on mechanical behavior and microstructural properties of cemented tailings backfill [J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 275-285.

[5] CAO S, YILMAZ E, SONG W D, et al. Loading rate effect on uniaxial compressive strength behavior and acoustic emission properties of cemented tailings backfill[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 313-324.

[6] 关贤欢,郑相悦,荣 帅.地下矿山充填管道堵塞风险评估模型研究[J].化工矿物与加工,2018,13(7):51-56.
GUAN Xianhuan, ZHENG Xiangyue, RONG Shuai. Study on risk assessment model of filling pipeline blockage in underground metal mine[J]. Industrial Minerals & Processing, 2018, 13(7): 51-56.

[7] LILE N L T, JAAFAR M H M, ROSLAN M R, et al. Blockage detection in circular pipe using vibration analysis[J]. Advanced Science Engineering Information Technology, 2012, 2(3): 54-57.

[8] ADEWUMI M A, ELTOHAMI E, SOLAJA A. Possible detection of multiple blockages using transients [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2003, 125(2): 154-158.

[9] 王超超,许家林,轩大洋.覆岩隔离注浆充填地面输浆管路堵

- 塞机理研究[J].煤炭学报,2018,43(10):47-52.
- WANG Chaochao, XU Jialin, XUAN Dayang. Blockage mechanism of ground transport pipeline for isolated overburden grout injection [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 47-52.
- [10] 张钦礼, 曹瑞锋, 王 石, 等. 基于熵权和模糊数学的充填管道堵塞风险评价[J]. 科技导报, 2013, 31(S2): 30-34.
- ZAHNG Qinli, CAO Ruifeng, WANG Shi, *et al.* Risk assessment on blocking of filling pipeline based on the entropy and fuzzy mathematics[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(S2): 30-34.
- [11] 王新民, 王 石, 鄢德波, 等. 基于未确知测度理论的充填管道堵塞风险性评价[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4): 151-156.
- WANG Xinmin, WANG Shi, YAN Debo, *et al.* Risk assessment on blocking of filling pipeline based on uncertainty measurement theory[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(4): 151-156.
- [12] 王新民, 高瑞文, 胡 威, 等. 充填管道堵塞风险预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013(11): 4604-4610.
- WANG Xinmin, GAO Ruiwen, HU Wei, *et al.* Risk prediction model of filling pipeline blockage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013(11): 4604-4610.
- [13] 赵丽军. 充填管道堵塞风险性的 SPA-AHP 综合评价[J]. 采矿技术, 2017(2): 65-67.
- ZHAO Lijun. Comprehensive evaluation of SPA-AHP for risk of filling pipeline blockage[J]. Mining Technology, 2017, 17(2): 65-67.
- [14] 张钦礼, 吴立宏, 卞继伟. 充填管道堵塞的事故树分析[J]. 金属矿山, 2015(1): 145-148.
- ZHANG Qinli, WU Lihong, BIAN Jiwei. Fault tree analysis of filling pipeline blockage[J]. Metal Mine, 2015(1): 145-148.
- [15] 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.
- [16] 张国英, 沙 云, 刘旭红, 等. 高维云模型及其在多维属性评价中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(12): 1066-1069.
- ZHANG Guoying, SHA Yun, LIU Xuhong, *et al.* High dimensional cloud model and its application in multiple attribute evaluation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(12): 1066-1069.
- [17] 郭戎潇, 夏靖波, 董淑福, 等. 一种基于多维云模型的多属性综合评估方法[J]. 计算机科学, 2010, 37(11): 75-77.
- GUO Rongxiao, XIA Jingbo, DONG Shufu, *et al.* Multiple attribute evaluation method based on multidimensional cloud model[J]. Computer Science, 2010, 37(11): 75-77.
- [18] 张启伦, 韩 建. 不确定性系统中基于相似云的多维多属性综合评价方法[J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(3): 282-286.
- ZHANG Qilun, HAN Jian. Multidimensional multiple attribute comprehensive evaluation system based on similar uncertainty cloud [J]. Computers and Applied Chemistry, 2016, 33(3): 282-286.
- [19] 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 (Natural Science Edition), 2018, 46(4): 30-34.
- [20] 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): 860-874.
- 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): 860-874.
- [21] 李德毅, 杜 鹂. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014, 35-145.
- [22] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problem: The critic method[J]. Computers and Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [23] 熊卫红, 张宏志, 谢志成, 等. 基于云理论级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.
- XIONG Weihong, ZHANG Hongzhi, XIE Zhicheng, *et al.* Optimal management system of hybrid AC/DC microgrid based on consensus protocols[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 125-130.
- [24] 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): 1471-1480.
- 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): 1471-1480.
- [25] 祝志川, 张国超, 张君妍. 基于改进 CRITIC 的修正 G2 赋权方法及实证[J]. 统计与决策, 2018(18): 33-38.
- ZHU Zhichuan, ZHANG Guochao, ZHANG Junyan. Modified-G2 weighting method based on improved CRITIC and Its solid evidence[J]. Statistics & Decision, 2018(18): 33-38.
- [26] 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 technology awards based On improved CRITIC method and cloud model[J]. Journal of Hunan University (Nature Sciences), 2014, 41(4): 118-124.