

基于五元联系数的通风系统风险态势分析*

王国强¹, 王亚军^{2,3}, 豆龙^{2,3}, 张海云^{2,3}, 林卫星^{2,3}, 张云韦¹, 刘金海¹

(1.新疆喀拉通克矿业有限责任公司, 新疆 富蕴县 836107;

2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;

3.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:为更科学合理地确定地下金属矿山通风系统风险态势,在构建通风系统可靠性评估指标体系基础上,利用区间层次分析法(IAHP)确定指标权重,建立了基于五元联系数集对分析法的矿井通风系统风险评价模型,并以某铜镍矿进行实例分析。结果表明:该矿山通风系统可靠性为“较好”等级,评估结果与矿山实际情况相符,验证了五元联系数集对分析法在矿井通风系统可靠性评估方面具有适应性;该模型能够客观全面反映通风系统可靠性评估过程中的确定性和不确定性,实现通风系统静态和动态评估相结合,可为类似矿山评估工作提供新思路。

关键词:通风系统;五元联系数;集对分析法;区间层次分析法;态势分析

中图分类号:TD724 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)11-0204-09

0 引言

随着矿山开采逐渐向深部发展,通风系统设计更加复杂,系统紊乱、供需不足、作业环境恶化等问题不断凸显,严重影响了地下金属矿山正常开采,难以有效保障井下作业人员生命安全^[1-2]。因此,有必要开展通风系统风险态势评估,深入分析通风系统潜在风险因素,并采取针对性的改进措施,切实提升通风系统可靠性。

在通风系统风险评估方面,朱必勇等^[3]针对通风系统风险评估存在定性指标数据处理难的问题,建立了二元联系数改进传统投影灰靶决策理论的综合评价模型,为通风系统定性评估提供了新思路;YAN等^[4]建立了基于云聚类分析的高寒高海拔地下金属矿山通风系统可靠性评估模型,可为通风系统日常维护和安全监管提供理论指导;温廷新等^[5]

将属性区间识别理论引入到矿井通风系统评估中,为评估工作提供了量化新方法;毕娟等^[6]基于因子分析法识别了通风系统可靠性影响因素,建立了通风系统可拓聚类风险评估模型;李潭、BI等^[7-8]基于TOPSIS理论建立了通风系统可靠性综合评价模型,并结合评估结果和工程实际提出了系统优化方案;CAI等^[9]针对矿井通风系统评估具有随机性和模糊性的特点,建立了通风系统安全决策 ANP-fuzzy 模型。矿井通风系统可靠性评估属于复杂的多属性定性评估,各因素之间相互作用、相互依存,具有随机性和灰性等不确定性特征,且通风系统风险态势始终是一个动态的变化过程,而上述研究成果均未进行风险态势发展趋势分析。集对分析法能够有效映射和分析系统中确定和不确定因素的内在相互作用,与云模型和模糊综合等方法相比,集对分析法评估结果更科学合理,近年来在瓦斯爆炸风险评估^[10]、矿井突水水源识别^[11]、充填管道失效评估^[12]等采矿领域得到了有效应用。多元联系数集对分析法可进行趋势动态分析,袁海平等^[13]应用组合赋权-多元联系数理论对地压风险预评估;郑侨宏等^[14]基于多元联系数分析了矿工不安全行为风险态势。但在通风系统可靠性静态和动态评估方面研究较少。

鉴于此,本文将五元联系数集对分析理论引入到矿井通风系统可靠性评估中,在构建通风系统可靠性评估体系基础上,利用区间层次分析法计算指标权重,对矿井通风系统可靠性态势及发展趋势进行量化分析,实现静态评估与动态评估相结合,进一步拓宽通风系统风险评估思路。

* 收稿日期:2023-12-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907404)

作者简介:王国强(1984—),男,甘肃天水人,高级工程师,主要从事金属矿山采矿工艺和生产管理研究。E-mail:405796381@qq.com

通信作者:王亚军(1991—),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿山地下开采方法及工艺研发等方面的工作。E-mail:

648324460@qq.com

1 五元联系数理论

1.1 集对分析与联系度

集对分析法基本原理:假设集合 A 和集合 B 均有 N 个属性特征,将集合 A 和集合 B 构造一组集对 $H=(A,B)$ 。在 N 个属性特征中,假设集合 A 和集合 B 共有属性特性个数为 S 个,对立属性特性个数为 P 个,不共有也不对立属性特性个数为 F 个($F=N-S-P$),定义 $a=S/N$,表征集合 A 和集合 B 的同一度;定义 $b=F/N$,表征集合 A 和集合 B 的差异度;定义 $c=P/N$,表征集合 A 和集合 B 的对立度。那么,同异反模型(三元联系数)可以表示为:

$$\mu=a+bi+cj \tag{1}$$

式中: μ 表示集合联系度; a 为同一度; b 为差异度; c 为对立度;对于 $\forall a,b,c \in [0,1]$,满足 $a+b+c=1$; i 为差异度系数, $i \in [-1,1]$; j 为对立度系数, $j=-1$ 。

1.2 五元联系数与集对势

在实际应用过程中,往往需要对差异度 b 进行扩展,建立多元联系数,以更好地体现和描述系统中的确定性和一般情况下不确定性。多元联系数函数可以表示为 $\mu=a+b_1i_1+b_2i_2+\cdots+b_ni_n+cj$,当 $n=3$ 时,表示为五元联系数函数,可简化为:

$$\mu=a+bi+cj+dk+el \tag{2}$$

式中:对于 $\forall a,b,c,d,e \in [0,1]$,且有 $a+b+c+d+e=1$; i,j,k 均表示为差异度系数, $i,j,k \in [-1,1]$; l 为对立度系数, $l=-1$ 。

2 基于多元联系数的通风系统可靠性集对分析模型

2.1 指标体系

矿井通风系统评估具有复杂性和不确定性,构建系统、合理的综合评价指标体系,是准确客观评估通风系统可靠性的基础。文献[15]从通风系统技术性、经济性和可靠性 3 个方面量化通风系统可靠性;文献[16]基于通风系统实际情况,从通风动力、通风网络、通风质量、通风设施 4 个角度,构建了通风系统评价体系;文献[17]将作业环境、现场安全管理及救灾系统建设、人员素质等列为可靠性指标因素。本文结合通风系统工程实际,在参考文献[3]、文献[15]、文献[16]、文献[17]、相关行业部门规程和现场专家咨询结果的基础上,构建了多层次通风系统可靠性评价指标体系,如图 1 所示。参考《金属非金属地下矿山通风技术规范通风管理》等权威管理规定,将通风系统可靠性划分为 5 个等级,即 I 级(好)、II 级(较好)、III 级(一般)、IV 级(较差)、V 级(差)。

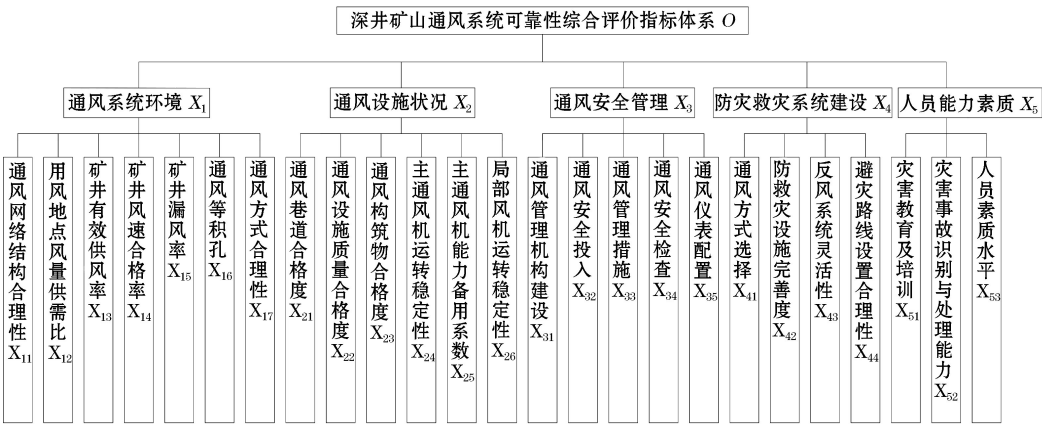


图 1 评价指标体系

Fig.1 Evaluation indicator system

2.2 IAHP 计算指标权重

传统的层次分析法(AHP)是基于固定的、具体的数值量化所有指标的相对重要性,但是专家对待评对象认知不完整或者面对信息数据匮乏等问题时,往往无法精准判别待评对象重要性程度,导致指标权重主观性较强。而区间层次分析法(IAHP)应

用区间数表征指标相对重要性程度,有效克服了专家在评估过程中的模糊性和不确定性^[18]。

2.2.1 构造区间数判断矩阵

假设选取了 n 个指标因素($a_1,a_2,\cdots,a_n$),对待评对象 R 进行整体评价,基于 1~9 标度法,得出量化指标因素 a_i 相较于指标因素 a_j 的相对重要性比

值的上限值 a_{ij}^+ 和下限值 a_{ij}^- , 记作 $a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$ 。根据区间数 a_{ij} 判别结果, 构造区间数判断矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n} = [\mathbf{A}^-, \mathbf{A}^+]$ 。相对重要性比值量化标准见表 1。

表 1 9 标度量化标准

Table 1 9 scale quantification standards

标度	含义
1	两个指标相比, 重要性相同。
3	两个指标相比, 前者比后者稍微重要。
5	两个指标相比, 前者比后者明显重要。
7	两个指标相比, 前者比后者特别重要。
9	两个指标相比, 前者比后者极端重要。
2, 4, 6, 8	两个指标相比, 重要性程度处于相邻标度的中间值。
1/1, 1/2, ..., 1/9	$A_{ji} = 1/a_{ij}$

注: 在实际判定重要性程度时, 可依据主观经验对标度进行再次细化。

2.2.2 一致性检验

区间数判断矩阵 $\mathbf{A}$ 需要经过一致性检验才能计算指标权重。分别计算区间判断矩阵 $\mathbf{A}^-$ 、 $\mathbf{A}^+$ 的最大特征值 $\lambda_{i\max}$ 和基础权重向量 $\mathbf{w}^- = (w_1^-, w_2^-, \dots, w_n^-)$ 和 $\mathbf{w}^+ = (w_1^+, w_2^+, \dots, w_n^+)$, 当 $k \leq 1$ 且 $\beta \geq 1$ 时符合一致性检验要求。具体计算公式为:

$$w_1 = k w^-, w_2 = \beta w^+ \tag{3}$$

$$\lambda_{i\max} = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{n w_i} \tag{4}$$

$$k = \sqrt[n]{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}} \tag{5}$$

$$\beta = \sqrt[n]{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}} \tag{6}$$

2.2.3 计算指标主权重

按照式(7)和式(8), 计算指标权重 $\mathbf{W}$ 。

$$m(A_i) = \frac{1}{2}(k w^- + \beta w^+) \tag{7}$$

$$\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \tag{8}$$

2.3 通风系统可靠性同异反评估模型

建立地下金属矿山通风系统可靠性 5 级风险评估语义集合, 表示为 $U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$, 分别对可靠性“好、较好、一般、较差、差”5 个等级。组织 m 个专家, 根据通风系统实际情况, 确定各指标可靠性等级。将评估结果记为 $\mu_{jk} = n_{jk}/m$, 其中, n_{jk} 表示将第 j 个指标因素判定为第 m 个等级的专家数。构造通风系统可靠性同异反评估模型, 见式(9)。

$$\mu^* = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{E}^T =$$

$$(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} & \mu_{15} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} & \mu_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \mu_{n3} & \mu_{n4} & \mu_{n5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ j \\ k \\ l \end{bmatrix} =$$

$$\sum_{r=1}^n \omega_r \mu_{r1} + \sum_{r=1}^n \omega_r \mu_{r2} i + \sum_{r=1}^n \omega_r \mu_{r3} j + \sum_{r=1}^n \omega_r \mu_{r3} k + \sum_{r=1}^n \omega_r \mu_{r5} l \tag{9}$$

简记作: $\mu^* = a + bi + cj + dk + el$

式中: μ^* 表示为综合联系度; $\mathbf{E}$ 为联系数向量矩阵;

$$a = \sum_{r=1}^n \omega_r u_{r1}, b = \sum_{r=1}^n \omega_r u_{r2}, c = \sum_{r=1}^n \omega_r u_{r3}, d = \sum_{r=1}^n \omega_r u_{r4}, e = \sum_{r=1}^n \omega_r u_{r5}$$

分别表示通风系统可靠性为“好”“较好”“一般”“较差”和“差”的联系度。

基于置信度识别准则, 确定矿井通风系统可靠性等级, 具体计算公式为:

$$r_k = \sum_{i=1}^n \omega_i u_{r1} + \sum_{i=1}^n \omega_i u_{r2} + \dots + \sum_{i=1}^n \omega_i u_{rk} \geq \theta \tag{10}$$

式中, θ 为置信度系数, 一般取 0.5 ~ 0.7。需同时满足 $r_{k-1} < \theta$ 和 $r_k > \theta$, 则判断可靠性等级为第 k 级。

2.4 通风系统可靠性风险态势分析

将同一度 a 除以对立度 e 得到的值称为集对势, 记作 $shi(H) = a/e$ 。 $shi(H) > 1$ 时, 表示所研究的两集合趋势为“同势”; $shi(H) = 1$ 时, 表示所研究的两集合趋势为“均势”; $shi(H) < 1$ 时, 表示所研究的两集合趋势为“反势”。限于文章篇幅, 仅列出分析所需的集对势等级, 具体见表 2。

在本文中, 当系统态势 $shi(H)$ 为“同势”时, 表示通风系统可靠性与理想标准状态具有同一趋势, 系统可靠性为“好”, 需要重点关注“反势”指标因素, 必要时采用针对性措施优化系统建设, 确保整个系统处于可靠性高的状态; 当系统态势 $shi(H)$ 为“均势”时, 表示通风系统可靠性与理想标准状态正处于“势均相当”状态, 可靠性“一般”, 需要采用有效措施加强管控“反势”趋势的各指标因素, 促进通风系统可靠性稳固提升, 降低风险性; 当系统态势 $shi(H)$ 为“反势”时, 表示通风系统可靠性与理想标准状态处于对立态势, 通风系统可靠性“差”, 需要

采取强有力措施整改通风系统中存在的各类问题,实现系统可靠性先转化为“均势”,然后过渡到“同势”。

表 2 态势查询

Table 2 Situation query

势级	五元联系数 $a、b、c、d、e$ 相互关系	势区
1	$a>e,a>b,b>c,c>d,d>e$	同势
2	$a>e,a>b,b>c,c>d,d=e$	同势
3	$a>e,a>b,b>c,c>d,d<e$	同势
4	$a>e,a>b,b>c,c=d,d>e$	同势
7	$a>e,a>b,b>c,c<d,d>e$	同势
21	$a>e,a>b,b<c,c>d,d<e$	同势
25	$a>e,a>b,b<c,c<d,d>e$	同势
49	$a>e,a<b,b>c,c>d,d<e$	同势
53	$a>e,a<b,b>c,c<d,d>e$	同势
114	$a=e,a<b,b<c,c>d,d<e$	均势
129	$a<e,a>b,b<c,c>d,d<e$	反势
148	$a<e,a=b,b<c,c>d,d<e$	反势
157	$a<e,a<b,b>c,c>d,d<e$	反势

为确定通风系统可靠性变化趋势,需要计算各阶偏联系数。

一阶偏联系数:

$$\partial\mu=\partial a+\partial bi+\partial cj+\partial dk$$
(11)

式中, $\partial a=\frac{a}{a+b},\partial b=\frac{b}{b+c},\partial c=\frac{c}{c+d},\partial d=\frac{d}{d+e}$ 。

二阶偏联系数:

$$\partial^2\mu=\partial(\partial\mu)=\partial^2a+\partial^2bi+\partial^2cj$$
(12)

式中, $\partial^2a=\frac{\partial a}{\partial a+\partial b},\partial^2b=\frac{\partial b}{\partial b+\partial c},\partial^2c=\frac{\partial c}{\partial c+\partial d}$ 。

三阶偏联系数:

$$\partial^3\mu=\partial^2(\partial\mu)=\partial^3a+\partial^3bi$$
(13)

式中, $\partial^3a=\frac{\partial^2a}{\partial^2a+\partial^2b},\partial^3b=\frac{\partial^2b}{\partial^2b+\partial^2c}$ 。

四阶偏联系数:

$$\partial^4\mu=\partial^3(\partial\mu)=\partial^4a$$
(14)

式中, $\partial^4a=\frac{\partial^3a}{\partial^3a+\partial^3b}$ 。

按照阶次,对联系数符号进行赋值,并计算偏联系数值,确定可靠性态势变化趋势。根据文献[19]和文献[20],计算一阶偏联系数值时,差异度符号赋值分别为 $i=0,j=0,k=-1$;计算二阶偏联系数值时,差异度符号赋值分别为 $i=-1,j=-1$;计算三阶偏联系数值时,差异度符号赋值 $i=-1$ 。规定:当偏联系数值计算结果为正数时,表示系统可靠性呈现提高趋势,风险降低;当偏联系数值计算结果为负数时,表示系统可靠性呈现降低趋势,风险增大;当偏联系数值计算结果为 0 时,表明系统正处于过渡趋势。

3 应用分析

为验证本文所建立的基于集对分析的五元联系数综合评价模型在地下金属矿山通风系统可靠性评估方面的有效性,以某铜镍矿为研究背景,进行相关计算,确定通风系统可靠性状态及发展趋势。该矿山采用嗣后充填采矿法回采,通风系统采用主混合井进风,南、北两翼回风井回风。向 40 位通风系统设计人员、现场管理人员及高校教授发放调查问卷,专家结合调查问卷结果及通风系统实际情况,对可靠性等级进行判定,统计结果见表 3。

表 3 可靠性等级判别结果

Table 3 Results of reliability level discrimination

指标	原始评估数据					评估数据归一化处理				
	好	较好	一般	较差	差	好	较好	一般	较差	差
X_{11}	23	8	4	2	3	0.575	0.200	0.100	0.050	0.075
X_{12}	18	11	6	3	2	0.450	0.275	0.150	0.075	0.050
X_{13}	11	18	5	2	4	0.275	0.450	0.125	0.050	0.100
X_{14}	16	13	3	5	3	0.400	0.325	0.075	0.125	0.075
X_{15}	16	8	5	4	7	0.400	0.200	0.125	0.100	0.175
X_{16}	22	8	4	5	1	0.550	0.200	0.100	0.125	0.025
X_{17}	17	11	6	5	1	0.425	0.275	0.150	0.125	0.025
X_{21}	19	6	9	2	4	0.475	0.150	0.225	0.050	0.100
X_{22}	23	12	2	1	2	0.575	0.300	0.050	0.025	0.050
X_{23}	20	13	4	2	1	0.500	0.325	0.100	0.050	0.025
X_{24}	26	6	4	3	1	0.650	0.150	0.100	0.075	0.025
X_{25}	23	11	4	1	1	0.575	0.275	0.100	0.025	0.025
X_{26}	20	12	5	1	2	0.500	0.300	0.125	0.025	0.050

续表										
指标	原始评估数据					评估数据归一化处理				
	好	较好	一般	较差	差	好	较好	一般	较差	差
X_{31}	15	7	8	4	6	0.375	0.175	0.200	0.100	0.150
X_{32}	8	8	10	5	9	0.200	0.200	0.250	0.125	0.225
X_{33}	7	12	13	1	7	0.175	0.300	0.325	0.025	0.175
X_{34}	12	14	6	7	1	0.300	0.350	0.150	0.175	0.025
X_{35}	22	9	4	3	2	0.550	0.225	0.100	0.075	0.050
X_{41}	25	8	4	2	1	0.625	0.200	0.100	0.050	0.025
X_{42}	9	7	8	6	10	0.225	0.175	0.200	0.150	0.250
X_{43}	18	9	6	5	2	0.450	0.225	0.150	0.125	0.050
X_{44}	21	11	3	3	2	0.525	0.275	0.075	0.075	0.050
X_{51}	15	9	6	7	3	0.375	0.225	0.150	0.175	0.075
X_{52}	6	12	9	6	7	0.150	0.300	0.225	0.150	0.175
X_{53}	6	15	6	4	9	0.150	0.375	0.150	0.100	0.225

3.1 计算指标权重

以通风系统环境(X_1)、通风设施状况(X_2)、通风安全管理(X_3)、防灾救灾系统建设(X_4)及人员能力素质(X_5)5个一级指标为例,经过专家讨论后,构建区间数判断矩阵 $\mathbf{A}$ 和正、负判断矩阵,具体见表4。根据式(3)至式(8),分别计算判断矩阵 $\mathbf{A}^+$ 和 $\mathbf{A}^-$ 的权重向量,具体计算结果为 $\mathbf{x}^-(0.272\ 7, 0.180\ 8, 0.239\ 4, 0.126\ 3, 0.180\ 8), \mathbf{x}^+(0.258\ 7, 0.181\ 6, 0.238\ 7, 0.139\ 4, 0.181\ 6)$,相应的一致性系数分别为 $k=0.898\ 9<1, \beta=1.094\ 1>1$,满足一致性检验要求。归一化处理后,得到5个一级指标权重为 $\mathbf{W}_1=(0.265\ 1, 0.181\ 2, 0.239\ 1, 0.133\ 4, 0.181\ 2)$ 。

同理,可得通风系统环境(X_1)下的7个二级指标权重为 $\mathbf{W}_{X_1}=(0.168\ 1, 0.092\ 4, 0.298\ 3, 0.087\ 5, 0.073\ 2, 0.106\ 3, 0.174\ 2)$;通风设施状况(X_2)下6个二级指标权重为 $\mathbf{W}_{X_2}=(0.218\ 3, 0.232\ 8, 0.220\ 2, 0.162\ 1, 0.094\ 2, 0.072\ 4)$;通风安全管理(X_3)下5个二级指标权重为 $\mathbf{W}_{X_3}=(0.316\ 5, 0.134\ 7, 0.142\ 3, 0.210\ 1, 0.196\ 4)$;防灾救灾系统建设(X_4)下4个二级指标权重为 $\mathbf{W}_{X_4}=(0.381\ 6, 0.248\ 5, 0.133\ 8, 0.236\ 1)$;人员能力素质(X_5)下3个二级指标权重为 $\mathbf{W}_{X_5}=(0.327\ 8, 0.422\ 7, 0.249\ 5)$ 。

表 5 风险联系数计算结果

Table 5 Calculation results of risk linkage number

一级评价指标	二级评价指标	权重	联系数值	
			五元联系数	态势分析
通风系统环境 X_1 (0.265 1)	通风网络结构合理性 X_{11}	0.168 1	$0.575+0.200i+0.100j+0.050k+0.075l$	同势 3 级
	用风地点风量供需比 X_{12}	0.092 4	$0.450+0.275i+0.150j+0.075k+0.050l$	同势 1 级
	矿井有效供风率 X_{13}	0.298 3	$0.275+0.450i+0.125j+0.050k+0.100l$	同势 49 级
	矿井风速合格率 X_{14}	0.087 5	$0.400+0.325i+0.075j+0.125k+0.075l$	同势 25 级
	矿井漏风率 X_{15}	0.073 2	$0.400+0.200i+0.100j+0.125k+0.025l$	同势 7 级
	通风等积孔 X_{16}	0.106 3	$0.550+0.200i+0.100j+0.125k+0.025l$	同势 7 级
	通风方式合理性 X_{17}	0.174 2	$0.425+0.275i+0.150j+0.125k+0.025l$	同势 1 级
小计		1	$0.417+0.306i+0.120j+0.084k+0.073l$	同势 19 级

表 4 一级指标重要性判断结果

Table 4 Results of importance judgment for primary indicators

判断矩阵	指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
判断矩阵 $\mathbf{A}$	X_1	[1,1]	[1,2]	[1,1]	[2,3]	[1,2]
	X_2	0.5,1	[1,1]	[1/2,1]	[1,2]	[1,1]
	X_3	[1,1]	[1,2]	[1,1]	[1,2]	[1,2]
	X_4	[1/3,1/2]	[1/2,1]	[1/2,1]	[1,1]	[0.5,1]
	X_5	[1/2,1]	[1,1]	[1/2,1]	[1,2]	[1,1]
判断矩阵 $\mathbf{A}^+$	X_1	1	2	1	3	2
	X_2	1	1	1	2	1
	X_3	1	2	1	2	2
	X_4	1/2	1	1	1	1
	X_5	1	1	1	2	1
判断矩阵 $\mathbf{A}^-$	X_1	1	1	1	2	1
	X_2	1/2	1	1/2	1	1
	X_3	1	1	1	1	1
	X_4	1/3	1/2	1/2	1	1/2
	X_5	1/2	1	1/2	1	1

3.2 态势分析

3.2.1 风险态势

根据表3,结合指标权重,按照式(9)至式(10),构造通风系统可靠性同异反评估模型,确定各指标态势及势区。具体计算和分析结果见表5。

续表				
一级评价指标	二级评价指标	权重	联系数值	
			五元联系数	态势分析
通风设施状况 X_2 (0.181 2)	通风巷道的合格度 X_{21}	0.218 3	$0.475+0.150i+0.225j+0.050k+0.100l$	同势 21 级
	通风设施质量合格度 X_{22}	0.232 8	$0.575+0.300i+0.050j+0.025k+0.050l$	同势 3 级
	通风构筑物合格度 X_{23}	0.220 2	$0.500+0.325i+0.100j+0.050k+0.025l$	同势 1 级
	主要通风机的运转稳定性 X_{24}	0.162 1	$0.650+0.150i+0.100j+0.075k+0.025l$	同势 1 级
	主要通风机能力备用系数 X_{25}	0.094 2	$0.575+0.275i+0.100j+0.025k+0.025l$	同势 2 级
	局部风机运转稳定性 X_{26}	0.072 4	$0.500+0.300i+0.125j+0.025k+0.050l$	同势 3 级
	小计	1	$0.543+0.246i+0.117j+0.045k+0.049l$	同势 3 级
通风安全管理 X_3 (0.239 1)	矿井通风管理机构建设情况 X_{31}	0.316 5	$0.375+0.175i+0.200j+0.100k+0.150l$	同势 21 级
	矿井通风安全投入情况 X_{32}	0.134 7	$0.200+0.200i+0.250j+0.125k+0.225l$	反势 148 级
	矿井通风安全管理措施 X_{33}	0.142 3	$0.175+0.300i+0.325j+0.025k+0.175l$	均势 114 级
	矿井通风安全监察到位情况 X_{34}	0.210 1	$0.300+0.350i+0.150j+0.175k+0.025l$	同势 53 级
	通风仪表的配置 X_{35}	0.196 4	$0.550+0.225i+0.100j+0.075k+0.050l$	同势 1 级
	小计	1	$0.342+0.243i+0.193j+0.104k+0.118l$	同势 3 级
防灾救灾系统建设 X_4 (0.133 4)	通风方式的选择 X_{41}	0.381 6	$0.625+0.200i+0.100j+0.050k+0.025l$	同势 1 级
	防救灾设施的完善度 X_{42}	0.248 5	$0.225+0.175i+0.200j+0.150k+0.250l$	反势 129 级
	反风系统的灵活性 X_{43}	0.133 8	$0.450+0.225i+0.150j+0.125k+0.050l$	同势 1 级
	避灾路线设置的合理性 X_{44}	0.236 1	$0.525+0.275i+0.075j+0.075k+0.050l$	同势 4 级
	小计	1	$0.479+0.215i+0.126j+0.091k+0.091l$	同势 2 级
人员能力素质 X_5 (0.181 2)	灾害事故教育与培训 X_{51}	0.327 8	$0.375+0.225i+0.150j+0.175k+0.075l$	同势 27 级
	灾害事故的识别与处理能力 X_{52}	0.422 7	$0.150+0.300i+0.225j+0.150k+0.175l$	反势 157 级
	人员素质水平 X_{53}	0.249 5	$0.150+0.375i+0.150j+0.100k+0.225l$	反势 157 级
	小计	1	$0.224+0.294i+0.182j+0.146k+0.154l$	同势 49 级
合计		1	$0.395+0.266i+0.149j+0.093k+0.097l$	同势 3 级

根据五元联系数联系度 $a、b、c、d、e$ 的相互关系,结合表 2,确定通风系统环境(X_1)、通风设施状况(X_2)、通风安全管理(X_3)、防灾救灾系统建设(X_4)及人员能力素质(X_5) 5 个一级指标及系统总体可靠性态势。

(1) 通风系统环境(X_1)五元联系数计算结果为 $u^*(X_1)=0.417+0.306i+0.120j+0.084k+0.073l$,五元联系数大小关系为: $a>e,a>b,b<c,c>d,d>e$,查表可知态势为同势 19 级,集对势 $shi(H_1)=a/e=5.712\ 3$,表明该矿山在通风系统环境方面可靠性较高,风险较低。通风系统环境(X_1)下 7 个二级指标的态势均为同势,其中矿井有效供风率 X_{13} 为同势 49 级,属于“微同势”,其余指标均为“强同势”,因此,矿山企业需要重点关注有效供风率对通风系统可靠性的影响。

(2) 通风设施状况(X_2)五元联系数计算结果为 $u^*(X_2)=0.543+0.246i+0.117j+0.045k+0.049l$,五元联系数大小关系为: $a>e,a>b,b>c,c>d,d<e$,查表可知态势为同势 3 级, $shi(H_2)=a/e=11.081\ 6$,表明该矿山在通风设施状况方面可靠性较高,风险较低,且通风设施状况(X_2)下 6 个二级指标均为“强同势”,因此保持现有状态即可。

(3) 通风安全管理(X_3)五元联系数计算结果

为 $u^*(X_3)=0.342+0.243i+0.193j+0.104k+0.118l$,五元联系数大小关系为: $a>e,a>b,b>c,c>d,d<e$,查表可知态势为同势 3 级, $shi(H_3)=a/e=2.898\ 3$,表明该矿山在安全管理方面可靠性较高,风险较低。但是,通风安全管理(X_3)下 5 个二级指标中,矿井通风安全投入情况 X_{32} 为反势 148 级,属于较高风险,需要重点关注安全投入不足带来的风险影响;矿井通风安全管理措施 X_{33} 为均势 114 级,需要关注安全管理措施不到位而导致通风系统可靠性降低的风险,制定详细合理的安全管理措施,促进态势由“均势”向“同势”尽快转化。

(4) 防灾救灾系统建设(X_4)五元联系数计算结果为 $u^*(X_4)=0.479+0.215i+0.126j+0.091k+0.091l$,五元联系数大小关系为: $a>e,a>b,b>c,c>d,d=e$,查表可知态势为同势 2 级, $shi(H_4)=a/e=5.263\ 7$,表明该矿山在防灾救灾系统建设方面可靠性极高,风险极低。但是在防灾救灾系统建设(X_4)下 4 个二级指标中,防救灾设施的完善度 X_{42} 为反势 129 级,属于较高风险因素,需要重点关注防救灾设施完整度不高导致的风险影响。其他指标均为“强同势”,风险极低。

(5) 人员能力素质(X_5)五元联系数计算结果为 $u^*(X_5)=0.224+0.294i+0.182j+0.146k+$

0.154*l*, 五元联系数大小关系为: $a > e, a < b, b > c, c > d, d < e$, 查表可知态势为同势 49 级, $shi(H_5) = a/e = 1.454\ 5$, 在人员能力素质方面为“微同势”, 属于低风险, 可靠性一般, 但是灾害事故的识别与处理能力 X_{52} 和人员素质水平 X_{53} 两个指标均为反势 157 级, 需要重点关注由此引发的风险问题。

系统五元联系数函数为 $u^*(X) = 0.395 + 0.266i + 0.149j + 0.093k + 0.097l$, 五元联系数相互关系为: $a > e, a > b, b > c, c > d, d < e$, 查表可知整体态势为同势 3 级, $shi(H) = a/e = 4.072\ 2$, 整体来看, 通风系统可靠性较高, 风险较低。5 个一级指标均处于同势, 二级指标中, 20 个指标因素态势为“同势”, 1 个指标因素态势为“均势”, 4 个指标因素态势为“反势”, “同势”指标因素占比为 80%, 占据主导地位, 表明该矿山通风系统总体风险位于同势区, 风险较低。结合分析比较可知, $u^*(X_2)$ 与 $u^*(X_3)$ 集对态势均为同势 3 级, 但集对势 $shi(H_2) > shi(H_3)$, 表明通风设施状况(X_2)可靠性贡献率高于安全管理(X_3)。由此可得到 5 个一级指标可靠性优劣排序为: 防灾救灾系统建设(X_4) > 通风设施状况(X_2) > 通风安全管理(X_3) > 通风系统环境(X_1) > 人员能力素质(X_5)。

根据式(10), 取置信度系数为 0.6, 结合整体五元联系数计算结果, $r_{k-1} = 0.396 < 0.6$, 而 $r_k = 0.662 >$

0.6, 表明该通风系统风险态势为“较好”等级, 与专家现场调研结论一致。

3.2.2 发展趋势分析

根据式(11)至式(14), 计算各阶偏联系数, 从而分析该矿山通风系统可靠性发展趋势, 具体计算结果见表 6。

从矿山通风系统可靠性总体发展趋势看, 一阶偏联系数、二阶偏联系数和三阶偏联系数呈现下降趋势, 表明通风系统可靠性降低; 四阶偏联系数呈现提高趋势, 表明通风系统可靠性提升。这体现了通风系统可靠性客观上存在同反相互、波动前行的发展趋势。

将二级指标各阶偏联系数按照变化趋势进行分类统计, 总共可以分为 3 类, 各指标归类情况见表 7。从二级指标因素发展趋势来看, 矿山企业应该要重点关注一阶、二阶、三阶偏联系数中呈持续下降趋势的指标因素。由表 7 可知, 矿井风速合格率 X_{14} 、矿井通风安全检察到位情况 X_{34} 、灾害事故教育及培训 X_{51} 、灾害事故的识别与处理能力 X_{52} 、人员素质水平 X_{53} 等均属于此类指标因素, 后续要建立安全培训制度, 严格开展定期培训, 坚持以考促学, 提高员工安全意识, 提升员工操作能力和应急处置水平; 要健全一系列安全生产管理制度, 完善风速、风量监测系统, 定期开展通风基础设施设备安全检查, 加强设备维修保养等。

表 6 四阶偏联系数及趋势变化

Table 6 The partial connection number and trend change of each order

指标	一阶偏联系数	趋势	二阶偏联系数	趋势	三阶偏联系数	趋势	四阶偏联系数	趋势
X_{11}	$0.742+0.667i+0.667j+0.400k$	提高	$0.527+0.500i+0.625j$	下降	$0.513+0.444i$	提高	0.536	提高
X_{12}	$0.621+0.647i+0.667j+0.600k$	提高	$0.490+0.493i+0.526j$	下降	$0.499+0.483i$	提高	0.508	提高
X_{13}	$0.379+0.783i+0.714j+0.333k$	提高	$0.326+0.523i+0.682j$	下降	$0.384+0.434i$	下降	0.470	提高
X_{14}	$0.552+0.813i+0.375j+0.625k$	下降	$0.404+0.683i+0.375j$	下降	$0.371+0.646i$	下降	0.365	提高
X_{15}	$0.667+0.615i+0.556j+0.364k$	提高	$0.520+0.526i+0.604j$	下降	$0.497+0.465i$	提高	0.517	提高
X_{16}	$0.733+0.667i+0.444j+0.833k$	下降	$0.524+0.600i+0.348j$	下降	$0.466+0.633i$	下降	0.424	提高
X_{17}	$0.607+0.647i+0.545j+0.833k$	下降	$0.484+0.543i+0.396j$	下降	$0.472+0.578i$	下降	0.449	提高
小计	$0.576+0.705i+0.602j+0.537k$	提高	$0.445+0.542i+0.540j$	下降	$0.448+0.507i$	提高	0.470	提高
X_{21}	$0.760+0.400i+0.818j+0.333k$	提高	$0.655+0.328i+0.711j$	下降	$0.666+0.316i$	提高	0.678	提高
X_{22}	$0.657+0.857i+0.667j+0.333k$	提高	$0.434+0.563i+0.667j$	下降	$0.436+0.458i$	下降	0.488	提高
X_{23}	$0.606+0.765i+0.667j+0.667k$	下降	$0.442+0.534i+0.500j$	下降	$0.453+0.517i$	下降	0.467	提高
X_{24}	$0.813+0.600i+0.571j+0.750k$	提高	$0.575+0.512i+0.432j$	下降	$0.529+0.542i$	下降	0.494	提高
X_{25}	$0.676+0.733i+0.800j+0.500k$	提高	$0.480+0.478i+0.615j$	下降	$0.501+0.437i$	提高	0.534	提高
X_{26}	$0.625+0.706i+0.833j+0.333k$	提高	$0.470+0.459i+0.714j$	下降	$0.506+0.391i$	提高	0.564	提高
小计	$0.693+0.673i+0.709j+0.489k$	提高	$0.514+0.482i+0.600j$	下降	$0.516+0.447i$	提高	0.536	提高
X_{31}	$0.682+0.467i+0.667j+0.400k$	提高	$0.594+0.412i+0.625j$	下降	$0.590+0.397i$	提高	0.598	提高
X_{32}	$0.500+0.444i+0.667j+0.357k$	提高	$0.529+0.400i+0.651j$	下降	$0.570+0.381i$	提高	0.600	提高
X_{33}	$0.368+0.480i+0.929j+0.125k$	提高	$0.434+0.341i+0.881j$	下降	$0.560+0.279i$	提高	0.668	提高
X_{34}	$0.462+0.700i+0.462j+0.875k$	下降	$0.397+0.603i+0.345j$	下降	$0.397+0.636i$	下降	0.385	提高
X_{35}	$0.710+0.692i+0.571j+0.600k$	提高	$0.506+0.548i+0.488j$	下降	$0.480+0.529i$	下降	0.476	提高
小计	$0.572+0.559i+0.642j+0.494k$	提高	$0.504+0.467i+0.579j$	下降	$0.521+0.454i$	提高	0.539	提高

续表												
指标	一阶偏联系数		趋势	二阶偏联系数		趋势	三阶偏联系数		趋势	四阶偏联系数		趋势
X_{41}	$0.758+0.667i+0.667j+0.667k$		提高	$0.532+0.500i+0.500j$		下降	$0.515+0.500i$		提高	0.508		提高
X_{42}	$0.563+0.467i+0.571j+0.375k$		提高	$0.547+0.450i+0.604j$		下降	$0.549+0.427i$		提高	0.562		提高
X_{43}	$0.667+0.600i+0.545j+0.714k$		下降	$0.526+0.524i+0.433j$		下降	$0.501+0.547i$		下降	0.478		提高
X_{44}	$0.656+0.786i+0.500j+0.600k$		提高	$0.455+0.611i+0.455j$		下降	$0.427+0.573i$		下降	0.427		提高
小计	$0.673+0.636i+0.587j+0.585k$		提高	$0.517+0.517i+0.506j$		下降	$0.501+0.506i$		下降	0.498		提高
X_{51}	$0.625+0.600i+0.462j+0.700k$		下降	$0.510+0.565i+0.397j$		下降	$0.474+0.587i$		下降	0.447		提高
X_{52}	$0.333+0.571i+0.600j+0.462k$		下降	$0.368+0.488i+0.565j$		下降	$0.430+0.463i$		下降	0.482		提高
X_{53}	$0.286+0.714i+0.600j+0.308k$		下降	$0.286+0.543i+0.661j$		下降	$0.345+0.451i$		下降	0.433		提高
小计	$0.417+0.616i+0.555j+0.501k$		下降	$0.394+0.527i+0.534j$		下降	$0.423+0.501i$		下降	0.458		提高
合计	$0.580+0.639i+0.621j+0.518k$		下降	$0.472+0.507i+0.555j$		下降	$0.480+0.482i$		下降	0.500		提高

表 7 二级指标变化趋势

Table 7 Trend ofchanges in secondary indicators

类别	指标因素	各阶偏联系数变化趋势			
		一阶偏联系数	二阶偏联系数	三阶偏联系数	四阶偏联系数
1	$X_{11}, X_{12}, X_{15}, X_{21}, X_{25}, X_{26}, X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{41}, X_{42}$	提高	下降	提高	提高
2	$X_{13}, X_{22}, X_{24}, X_{35}, X_{44}$	提高	下降	下降	提高
3	$X_{14}, X_{16}, X_{17}, X_{23}, X_{34}, X_{43}, X_{51}, X_{52}, X_{53}$	下降	下降	下降	提高

4 结论

(1) 应用区间层次分析法计算指标权重,克服了传统层次分析法判断矩阵构建任意性和指标权重确定困难的问题,指标赋权结果更科学高效。

(2) 将五元联系数集对分析法引入到地下金属矿山通风系统可靠性评估中,以某铜镍矿为例,通过相关计算,确定了该矿山通风系统可靠性为“较好”等级,且评估结果与实际调查结果相符;基于五元偏联系数对矿井通风系统可靠性状态及发展态势进行研究,结果表明,通风系统可靠性呈现同反相互、波动前行的客观发展趋势,研究结果可为类似矿山评估工作提供新思路。

(3) 通风系统可靠性评价指标影响因素众多,虽然已经建立了较为全面、系统的评估体系,但还要结合工程实际,进一步优化体系建设,以提高模型的适用性。

参考文献(References):

[1] 藏英涵,李先福,吝曼卿,等.磷矿井下通风系统风险评估与监测预警研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):115-121.
ZANG Yinghan, LI Xianfu, LIN Manqing, et al. Research on risk assessment and monitoring and early warning of underground ventilation system in phosphate mine [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(11): 115-121.

[2] 章俊龙.基于AHP-FCE的金属矿山通风系统可靠性评价研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2013.
ZHANG Junlong. Study on reliability evaluation of metal mine ventilation system based on AHP-FCE [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2013.

[3] 朱必勇,费汉强,史键波.地下金属矿山通风系统可靠性评价模型研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):122-128.

[4] YAN Fang, LI Zijun, DONG Longjun, et al. Cloud model-clustering analysis based evaluation for ventilation system of underground metal mine in alpine region [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(3): 796-815.

[5] 温廷新,王冉,李印超,等.基于属性数学理论的矿井通风系统评价[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(6):581-585.
WEN Tingxin, WANG Ran, LI Yinchao, et al. Evaluation of mine ventilation system based on attribute mathematics theory[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2017, 36(6): 581-585.

[6] 毕娟,李希建.因子分析耦合可拓聚类在矿井通风可靠性评价中的应用[J].矿业研究与开发,2020,40(4):100-104.
BI Juan, LI Xijian. Application of factor analysis coupled extension clustering in reliability evaluation of mine ventilation[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(4): 100-104.

[7] 李潭.复杂矿井通风系统网络拓扑结构优化及评估应用[D].廊坊:华北科技学院,2023.
LI Tan. Application of topology optimization and evaluation for complex mine ventilation system network[D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2023.

[8] BI Qiuping, LI Yucheng, SHEN Cheng. Screening of evaluation index and construction of evaluation index system for mine ventilation system [J]. Sustainability, 2021, 13(21): 11810.

[9] CAI Hongjun, GAO Hengqiang. Research on a safety evaluation method based on ANP-fuzzy decision for coal mine ventilation system [J]. International Journal of Wireless and Mobile Computing, 2022, 23(3/4): 318-328.

[10] 景国勋,陈纪宏.基于 SPA-VFS 耦合模型的瓦斯爆炸风险评价[J].安全与环境学报,2023,23(7):2151-2158.
JING Guoxun, CHEN Jihong. Risk assessment of gas explosion based on SPA-VFS coupling model[J].Journal of Safety and Environment,2023,23(7):2151-2158.

[11] 苏玮,姜春露,查君珍,等.基于客观组合权-改进集对分析模型的矿井突水水源识别[J].煤炭科学技术,2022,50(4):156-164.
SU Wei, JIANG Chunlu, ZHA Junzhen, et al. Identification of mine water inrush source based on objective combined weights-improved set pair analysis model[J].Coal Science and Technology,2022,50(4):156-164.

[12] 姚剑辉,康度,荣帅.基于组合赋权的充填管道失效集对;可拓模型研究与应用[J].金属矿山,2021(12):183-189.
YAO Jianhui, KANG Qian, RONG Shuai. Failure set pair extension model of filling pipeline based on combination weighting and its application[J].Metal Mine, 2021(12):183-189.

[13] 袁海平,张羽,熊礼军,等.基于组合权重-集对分析的地压风险预评估[J].矿业安全与环保,2022,49(1):71-76.
YUAN Haiping, ZHANG Yu, XIONG Lijun, et al. Prediction assessment of ground pressure risk based on combination weight and set pair analysis[J].Mining Safety & Environmental Protection,2022,49(1):71-76.

[14] 郑侨宏,韩勇.基于多元联系数的矿工不安全行为风险态势评估[J].中国安全生产科学技术,2018,14(2):186-192.
ZHENG Qiaohong, HAN Yong. Risk state assessment on unsafe behavior of miners based on multivariate connection number[J].Journal of Safety Science and Technology,2018,14(2):186-192.

[15] 陈圆超,戴剑勇,谢东.矿井通风系统的组合赋权云模型综合评价[J].系统工程,2020,38(6):35-42.
CHEN Yuanchao, DAI Jianyong, XIE Dong. Comprehensive evaluation of mine ventilation system based on combination weighting cloud model[J].Systems Engineering,2020,38(6):35-42.

[16] 邵良杉,张佳琦,白璐.基于改进合成规则的通风系统可靠性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(2):136-142.
SHAO Liangshan, ZHANG Jiaqi, BAI Lu. Reliability of ventilation system based on improved synthesis rules[J].Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023,42(2):136-142.

[17] 陈泽彭.基于模糊变权理论的矿井通风系统健康评价研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
CHEN Zepeng. Research on health evaluation of mine ventilation system based on fuzzy variable weight theory[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2022.

[18] 辛酉阳,杨德磊,方前程.改进 GRA-TOPSIS 模型在装配式建筑施工风险评估中的应用[J].安全与环境学报,2023,23(7):2212-2222.
XIN Youyang, YANG Delei, FANG Qiancheng. Application of improved GRA-TOPSIS model in risk assessment of prefabricated building construction[J].Journal of Safety and Environment,2023,23(7):2212-2222.

[19] 施志坚,王华伟,王祥.基于多元联系数集对分析的航空维修风险态势评估[J].系统工程与电子技术,2016,38(3):588-594.
SHI Zhijian, WANG Huawei, WANG Xiang. Risk state evaluation of aviation maintenance based on multiple connection number set pair analysis[J].Systems Engineering and Electronics,2016,38(3):588-594.

[20] HUANG Dongmei, WANG Xinzhaoh, CHANG Xikun, et al. A safety assessment model of filling mining based on comprehensive weighting-set pair analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023,30(21):60746-60759.

Risk Situation Analysis on Ventilation System Based on Five-Element Connection Number

WANG Guoqiang¹, WANG Yajun^{2,3}, DOU Long^{2,3}, ZHANG Haiyun^{2,3},
LIN Weixing^{2,3}, ZHANG Yunwei¹, LIU Jinhai¹

(1.Xinjiang Karatongke Mining Co., Ltd., Xinjiang, Fuyun 836107, China;
2.Changsha Mining Research Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Metal Mining Engineering Technology Research Center, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract:In order to determine the risk situation of ventilation system in underground metal mines more scientifically and reasonably, on the basis of constructing the reliability evaluation index system of ventilation system, the interval analytic hierarchy process (IAHP) was used to determine the weights of indexes, and the risk evaluation model of mine ventilation system based on the five-element connection number set pair analysis method was established. A copper-nickel mine was taken as an example for analysis. The results show that the reliability of the mine ventilation system is good, and the evaluation results are consistent with the actual situation of the mine, which verifies the adaptability of the five-element connection number set pair analysis method in the reliability evaluation of the mine ventilation system. The model can objectively and comprehensively reflect the certainty and uncertainty in the reliability evaluation process of ventilation system, and realize the combination of static and dynamic evaluation of ventilation system, which can provide new ideas for similar mine evaluation work.

Key words: Ventilation system, Five-element connection number, Set pair analysis method, Interval analytic hierarchy process, Situation analysis