

# 基于FCE-SPA的智能化煤矿人机交互作业人因失误风险评价

张振<sup>1</sup>, 贾真真<sup>1,2,3</sup>, 叶青<sup>1,2,3</sup>, 岳浩邦<sup>1</sup>, 刘翀瑞<sup>1</sup>, 黄文科<sup>1</sup>

<sup>1</sup>湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>地下空间防火防爆材料与装备湖南省工程研究中心, 湖南 湘潭

<sup>3</sup>火灾爆炸防控与应急技术湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年2月12日; 录用日期: 2026年3月5日; 发布日期: 2026年3月11日

## 摘要

人因失误作为煤矿事故的主要诱因,其科学评价与有效防控尤为关键。随着智能化煤矿建设的深入推进,作业人员失误模式呈现新特征。为客观评价智能化煤矿人机交互作业人因失误的风险,本文提出了一种融合组合赋权法、模糊综合评价法和集对分析的安全预防评价模型。该模型首先构建智能化煤矿人因失误行为影响因素的层次化结构;再基于博弈论思想,将改进层次分析法确定的主观权重与熵权法确定的客观权重进行组合赋权,并结合模糊综合评价法进行风险评级,接着引入集对分析对模糊评价结果进行态势解析;最后利用该模型对湖南省某市某一智能化煤矿的作业人员进行风险评价。研究表明:1) 智能化煤矿人机交互作业的主要风险源为安全责任制度、风险隐患管理和网安数据韧性等,其中安全责任制度最为关键;2) 实例应用显示,该煤矿风险得分为84.35分,属于低风险等级且综合联系度为0.6706呈强同势特征,揭示了系统低风险状态的内在稳健性;3) 评价结果与现场实况高度吻合,验证了该模型在智能化煤矿人因风险评估中的准确性与适用性。

## 关键词

智能化煤矿, 人因失误, 组合赋权, 模糊综合评价, 集对分析, 风险评价

## Risk Evaluation of Human Error in Intelligent Coal Mine Human-Machine Interaction Operations Based on FCE-SPA

Zhen Zhang<sup>1</sup>, Zhenzhen Jia<sup>1,2,3</sup>, Qing Ye<sup>1,2,3</sup>, Haobang Yue<sup>1</sup>, Chongrui Liu<sup>1</sup>, Wenke Huang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology,

文章引用: 张振, 贾真真, 叶青, 岳浩邦, 刘翀瑞, 黄文科. 基于 FCE-SPA 的智能化煤矿人机交互作业人因失误风险评价[J]. 安防技术, 2026, 14(1): 44-56. DOI: 10.12677/jsst.2026.141005

Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>Hunan Engineering Research Center for Fire and Explosion Prevention Materials and Equipment in Underground Spaces, Xiangtan Hunan

<sup>3</sup>Key Laboratory of Fire and Explosion Prevention and Emergency Technology in Hunan Province, Xiangtan Hunan

Received: February 12, 2026; accepted: March 5, 2026; published: March 11, 2026

## Abstract

Human error is a primary cause of coal mine accidents; thus, its scientific evaluation and effective prevention are critical. With the continuous advancement of intelligent coal mine construction, operator error patterns are presenting new characteristics. To objectively assess the human error risks in human-machine interaction (HMI) operations within intelligent coal mines, this paper proposes a safety evaluation model integrating the Combination Weighting Method, Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE), and Set Pair Analysis (SPA). First, a hierarchical structure of factors influencing human error behaviors is constructed. Based on game theory, the model combines subjective weights determined by the Improved Analytic Hierarchy Process (IAHP) with objective weights from the Entropy Weight Method (EWM). It then employs FCE for risk grading and introduces SPA to analyze the connection trends of the evaluation results. Finally, the model is applied to assess operator risks at an intelligent coal mine in Hunan Province. The results indicate that: 1) The primary risk sources in HMI operations include the safety responsibility system, hazard management, and cybersecurity and data resilience, with the safety responsibility system being the most critical; 2) The case application reveals a risk score of 84.35 (Low Risk), and the comprehensive connection degree is 0.6706, exhibiting a “strong identical trend”, which demonstrates the inherent robustness of the system’s low-risk state; 3) The evaluation results align closely with actual on-site conditions, verifying the accuracy and applicability of the proposed model for human factor risk assessment in intelligent coal mines.

## Keywords

Intelligent Coal Mine, Human Error, Combination Weighting, Fuzzy Comprehensive Evaluation, Set Pair Analysis, Risk Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

煤炭资源作为我国能源体系的重要支柱，其安全生产直接关系到国家能源安全与社会稳定。随着《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》《煤矿智能化建设指南(2021年)》《智能矿山建设规范》(DZ/T 0376-2021)、《煤矿智能化发展蓝皮书》等一系列文件和发展规划的发布，我国煤矿正加速向数字化、智能化转型[1]，“机械化换人、自动化减人”已成为煤矿行业主旋律，5G下井开启了智慧矿山新时代[2]。然而相关研究表明，95%左右的事故仍可归因于矿工的不安全行为[3]。以2023年山西黄家沟煤业“6·15”较大运输事故为例，调查显示该事故虽诱发于机械驱动装置故障，但直接致因在于操作人员违规修改系统基准速度参数，并人为屏蔽速度保护装置，导致设备在丧失安全监控的状态下强行运行，最终因制动失效引发事故。因此，合理地评价煤矿生产中的人因失误是控制煤矿事故发展的有效措施[4]-[6]。

随着智能化建设的深入推进,人因失误的内涵与诱因已深刻变革。人机交互关键作业岗位的工作重心逐渐从高强度的体力作业转向对智能系统的监控与决策,其失误模式也随之演变:在保留传统生理疲劳风险的同时,衍生出算法决策过度依赖、异常信息误判及交互响应滞后等新型认知风险。这种人机关系的重构使得作业人员的认知偏差极易转化为系统性故障,因此,传统的评价指标体系已难以精准覆盖这种由“体能型”向“认知型”转化的复杂风险特征,亟需构建针对性的评价模型以提升管控灵敏度。

风险评价是预防煤矿事故的前置屏障。然而面对智能化煤矿“人-机-环-管”系统的高度耦合性与风险模糊性,传统的定性分析或单一赋权模型例如层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和熵权法(Entropy Weight Method, EWM)常面临指标赋权主观片面、评价结果分辨率低且缺乏动态演化视角的局限。为提升评价的科学性与灵敏度,融合多种数学理论的集成评价模型已成为当前研究的主流趋势。在风险评价方法上,模糊综合评价(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)因其能有效处理人因系统中信息的模糊性,在人因研究方面得到了广泛应用,例如:李红霞[7]利用 AHP 和模糊综合评价法查找出心理承受能力、责任心、组织管理能力和管理知识 4 个因素在煤矿管理人员评价时占据很大的比重。徐友良[8]利用 AHP 和模糊综合评价指出工作能力因素对高速铁路行车人因可靠性的影响最大。刘浩浩[9]通过模糊综合评价法对 A 冶金企业进行实证分析,研究结果表明 A 冶金企业的总体安全风险等级偏向“中”。集对分析(Set Pair Analysis, SPA)的应用也很广泛,李博杨[10]等运用熵权法和集对分析理论,将定量与定性指标相结合作为一个整体来研究从而建立人因失误的评价体系,分析人因失误对 8 大类事故的影响。雒钰晨[11]利用人因分析与分类系统和 SPA 理论对铁路公务人员人身安全进行评价,发现现场监督管理因素是风险管控的关键。陈晓勇[12]通过人因分析与分类系统和集对分析对某建筑工地施工安全人因的实例分析,得到该建筑施工安全人因处于“较安全”的状态。但以上学者多是将两者分别与其它方法如层次分析法、熵权法、人因分析与分类系统等两两结合,为兼顾模糊综合评价的宏观定级功能与集对分析的微观势态解析优势,本文基于博弈论思想,构建了组合赋权-模糊综合评价-集对分析智能化煤矿人机交互作业人因失误风险评价模型,并对湖南省某市某一智能化煤矿企业的关键作业岗位人员为实例进行应用验证,以期智能化煤矿的安全管理提供新的方法论支持和决策依据。

## 2. 组合赋权-FCE-SPA 评价模型构建

本文模型遵循“组合赋权优化→FCE 评价→SPA 势态解析”的递进逻辑(见图 1 所示)。首先基于博弈论融合改进 IAHP 与 EWM 获取组合权重,再利用 FCE 进行宏观定级,最后引入 SPA 解析演化势态。

### 2.1. 组合赋权

#### 2.1.1. 改进层次分析法

美国运筹学家 Saaty 教授在 20 世纪 80 年代提出的层次分析法是一种实用的多目标或多方案的决策方法[13]。为克服传统 AHP 一致性检验繁琐及需反复调整矩阵的局限,本文采用基于三标度(0, 1, 2)的改进层次分析法。相较于传统(-1, 0, 1)体系,(0, 1, 2)标度具有非负性,不仅符合心理认知直觉,更能避免后续拟优传递矩阵计算中的负数运算问题,确保了计算过程的天然衔接性与稳健性。具体构建步骤如下:

##### 1) 建立层次结构模型

基于层次分析法分解研究问题并构建层次结构模型,在参考《生产过程危险和有害因素分类与代码》(GB/T 13861-2022)、《煤矿安全风险预控管理体系规范》(AQ/T 1093-2011)、《职业健康安全管理体系要求及使用指南》(GB/T 45001-2020)等标准规范,结合专家咨询、案例分析、文献研究[14]-[22],针对智能化煤矿中从事智能化相关工作的煤矿人员,本着全面、系统的原则,共筛选出准则层的 4 项指标和因素层的 18 项指标,构建了智能化煤矿作业人员人因失误风险评价指标体系,见图 2 所示。

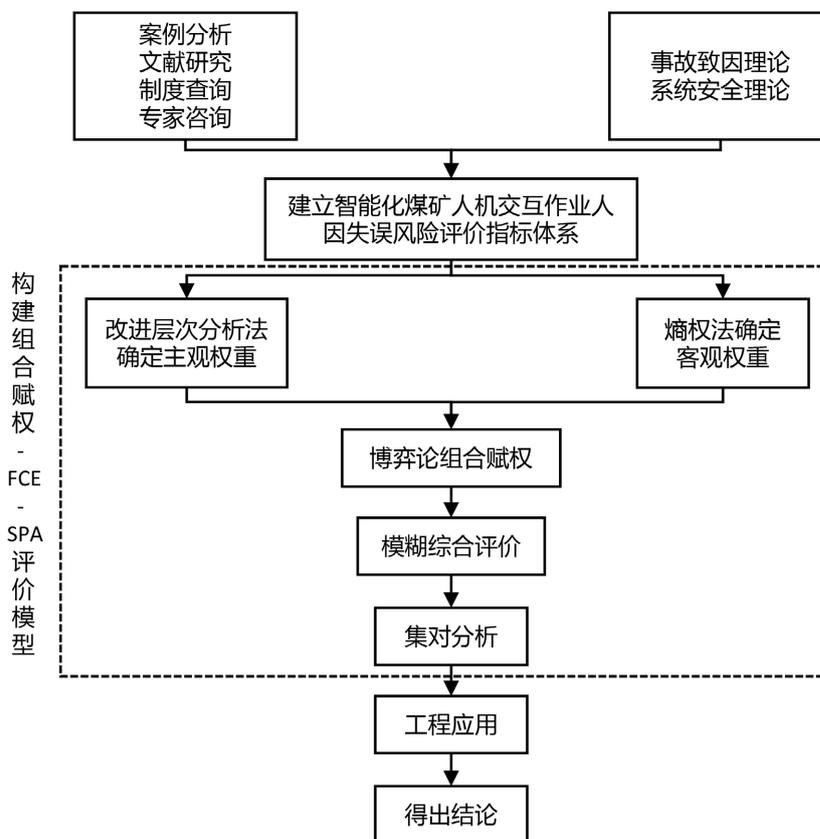


Figure 1. Evaluation flowchart

图 1. 评价流程图

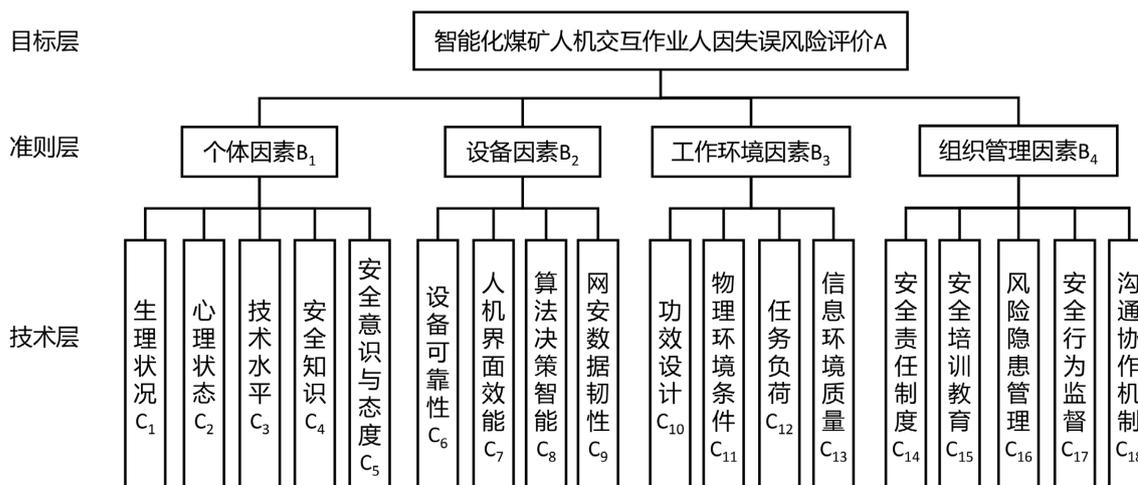


Figure 2. Evaluation index system chart

图 2. 评价指标体系图

2) 构造比较矩阵与计算重要度排序指数。基于评价指标体系，利用(0, 1, 2)标度构造比较矩阵  $A' = (a'_{ij})_{n \times n}$ 。其中  $a'_{ij} = 2$  表示  $i$  比  $j$  重要， $a'_{ij} = 1$  表示同等重要， $a'_{ij} = 0$  表示不如  $j$  重要。计算各指标的重要程度排序指数  $r_i$ ：

$$r_i = \sum_{j=1}^n a'_{ij} \quad (1)$$

式中,  $r_i$  越大, 表明该指标在体系中的相对重要性越高。

3) 构造判断矩阵  $A$ 。

$$a_{ij} = \begin{cases} \left[ \frac{(r_i - r_j)(k_m - 1)}{r_{\max} - r_{\min}} + 1 \right], & r_i \geq r_j \\ \left[ \frac{(r_j - r_i)(k_m - 1)}{r_{\max} - r_{\min}} + 1 \right]^{-1}, & r_i < r_j \end{cases} \quad (2)$$

4) 构造拟优传递矩阵  $A^*$ 。为消除主观判断的逻辑矛盾, 对矩阵  $A$  进行传递性改造。通过对矩阵进行线性变换与均值优化。进而利用指数还原法得到天然满足一致性要求的拟优传递矩阵  $A^*$ :

$$a_{ij}^* = 10^{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\lg a_{ik} - \lg a_{jk})} \quad (3)$$

5) 计算主观权重  $W'_i$ 。基于拟优矩阵  $A^*$ , 利用方根法直接求取各指标的主观权重  $W'_i$ 。

$$W'_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}^*}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}^*}} \quad (4)$$

### 2.1.2. 熵权法

熵权法是一种利用客观信息进行赋值的方法[23]。某项评价指标的指标值变异程度越大, 信息熵越小, 该指标提供的参考价值越大, 权重越大; 反之, 评价指标的指标值变异程度越小, 信息熵越大, 说明该指标提供的信息越小, 权重也就越小[24]。

1) 数据标准化处理。建立初始判断矩阵  $E' = (e'_{kt})_{r \times s}$ , 其中  $r$  为评价样本数,  $s$  为指标数。按式(5)对数据进行标准化处理得到矩阵  $E = (e_{kt})_{r \times s}$ 。

$$e_{kt} = \begin{cases} \frac{e'_{kt} - e'_{\min}}{e'_{\max} - e'_{\min}}, & \text{效益型指标} \\ \frac{e'_{\max} - e'_{kt}}{e'_{\max} - e'_{\min}}, & \text{成本型指标} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $e'_{\min}$  为同一指标下不同样本中的最小值;  $e'_{\max}$  为同一指标下不同样本中的最大值。

2) 计算第  $t$  个指标的熵值和熵权, 如式(6)~(7)所示。

$$f_t = -\frac{1}{\ln r} \sum_{k=1}^r g_{kt} \cdot \ln g_{kt} \quad (6)$$

$$W'_t = \frac{h_t}{\sum_{t=1}^s h_t} \quad (7)$$

式(6)中  $g_{kt} = e_{kt} / \sum_{k=1}^r e_{kt}$  为计算第  $t$  个指标第  $k$  个项目的数值比重。式(7)中  $h_t = 1 - f_t$  ( $t = 1, 2, \dots, s$ ),  $h_t$  为第  $t$  个指标的变异指数。  $W'_t$  为第  $t$  个指标的权重。

### 2.1.3. 基于博弈论组合赋权

为兼顾主客观权重的优势,克服单一赋权法的缺陷,本文引入博弈论思想,将层次分析法得到的主观权重  $W_1$  与熵权法得到的客观权重  $W_2$  进行优化组合,求得最终用于模糊评价的综合权重  $W$ 。

1) 解线性组合系数  $\alpha'_p$ 。

$$W = \sum_{p=1}^L \alpha'_p \cdot W_p'^T \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} W'_1 \cdot W_1'^T & W'_1 \cdot W_2'^T & \cdots & W'_1 \cdot W_L'^T \\ W'_2 \cdot W_1'^T & W'_2 \cdot W_2'^T & \cdots & W'_2 \cdot W_L'^T \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W'_L \cdot W_1'^T & W'_L \cdot W_2'^T & \cdots & W'_L \cdot W_L'^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha'_1 \\ \alpha'_2 \\ \vdots \\ \alpha'_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W'_1 \cdot W_1'^T \\ W'_2 \cdot W_2'^T \\ \vdots \\ W'_L \cdot W_L'^T \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中,  $\alpha'_p$  为线性组合系数,且  $\alpha'_p > 0$ 。

2) 解综合权重  $W$ 。

将由式(9)求得的线性组合系数  $\alpha'_p$  作归一化处理再带回式(8)中求解,则可得出综合权重  $W$ 。

## 2.2. 模糊综合评价法

模糊综合评价基于模糊集合理论,通过加权运算将定性评价转化为定量结果,有效解决了人因失误分析中的边界模糊性问题。使用模糊综合评判来处理有一定不确定性的数据具有很强的科学依据[25]。

1) 构建评价集与模糊关系矩阵。设影响因素集为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ , 评价等级集为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。通过专家打分或隶属度函数确定第  $i$  个因素对第  $j$  个评价等级的隶属度  $r_{ij}$ , 构建模糊关系矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中  $r_{ij}$  表示第  $i$  个影响因素对  $j$  个评语等级的隶属度。

2) 模糊综合评价数学模型。利用组合权重向量  $W$  与模糊关系矩阵  $R$  进行模糊合成运算,得到模糊综合评价结果向量  $B$ 。

$$B = W \circ R \quad (11)$$

式中:  $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  是评价论域  $V$  上的一个模糊子集。如果  $\sum b_i \neq 1$  将其归一化。

$$S = B \cdot V' \quad (12)$$

式中:  $V'$  为根据隶属函数和专家确定的评价标准。通过各因素的权重对比,结合确定的评价标准即可得到行为失误安全的综合评价结果。

### 2.3. 安全风险等级判据

在参考行业规范标准、专家建议及相关文献[26] [27]的基础上,对各因素影响安全评价选取 5 个等级,即 V 级(低风险)、IV 级(较低风险)、III 级(一般风险)、II 级(较高风险)、I 级(高风险),安全风险等级评分标准见表 1。

**Table 1.** Criteria for assessing safety risk levels  
**表 1.** 安全风险等级评分标准

评价等级	等级描述	分值区间
V 级	低风险	(80, 95]
IV 级	较低风险	(60, 80]
III 级	一般风险	(40, 60]
II 级	较高风险	(15, 40]
I 级	高风险	(0, 15]

## 2.4. 集对分析

集对分析理论是赵克勤在 1989 年提出的,其基本原理是将需要解决的问题看作是一个确定、不确定系统。确定性与不确定之间互相影响,互相转化[28]。本文将集对分析作为后续分析工具,对经由组合赋权与模糊综合评价后得到的综合评级结果进行势态解析。

1) 确定联系度。采用五元联系度,联系度表示为

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + b_3i_3 + cj \quad (13)$$

式中,  $a$  为同一度;  $b_1, b_2, b_3$  分别为偏同差异度、中立差异度、偏反差异度;  $c$  为对立度;  $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$ ;  $i_1, i_2, i_3$  为差异度系数,用于表征不同差异等级的倾向性;  $j = -1$ 。

2) 计算综合联系度  $\mu$ 。确定  $i$  值以及  $a, b_1, b_2, b_3, c$  值后代入公式(13)计算。

## 3. 工程应用

为验证本模型的有效性,本文以湖南省某典型智能化煤矿的关键作业人员为工程实例进行风险评估。为确保权重的普适性与评价的针对性, AHP 主观权重基于 15 位行业专家构建的比较矩阵计算得出,而熵权法与模糊综合评价所需的基础评分数据,则由 5 位熟悉该矿的现场专家打分获取。

### 3.1. 指标权重确定

1) 计算主观权重

以准则层( $B_1 \sim B_4$ )为例,按照改进层次分析法的步骤进行计算。准则层相当于目标层的判断矩阵  $A-B_i$  及其得出的权重详见表 2。

**Table 2.** Judgment matrix A-B<sub>i</sub>  
**表 2.** 判断矩阵 A-B<sub>i</sub>

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	W <sub>A-B<sub>i</sub></sub>
B <sub>1</sub>	1	0	2	0	0.118
B <sub>2</sub>	2	1	2	0	0.263
B <sub>3</sub>	0	0	1	0	0.055
B <sub>4</sub>	2	2	2	1	0.564

可以计算出因素层 18 项指标的主观权重结果为  $W_1 = (0.004, 0.008, 0.031, 0.015, 0.060, 0.031, 0.014, 0.069, 0.149, 0.003, 0.006, 0.014, 0.032, 0.238, 0.043, 0.149, 0.043, 0.091)$ 。

## 2) 计算客观权重

通过相关调研和邀请 5 位专家结合该煤矿现状对智能化煤矿人机交互作业人因失误风险因素层的 18 项指标进行评分, 5 位专家打分的情况详见表 3。

**Table 3.** The rating situation

**表 3.** 评分情况

因素层	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
生理状况	90	82	85	84	89
心理状态	79	88	83	85	80
技术水平	88	84	80	82	80
安全知识	80	81	87	81	80
安全意识与态度	82	89	83	88	82
设备可靠性	82	84	89	88	82
人机界面效能	79	86	79	80	79
算法决策智能	83	89	85	90	83
网安数据韧性	89	79	90	80	91
功效设计	80	83	88	81	88
物理环境条件	77	79	84	77	84
任务负荷	80	87	80	81	87
信息环境质量	83	85	90	89	83
安全责任制度	83	90	85	90	83
安全培训教育	82	84	89	82	88
风险隐患管理	84	89	88	84	91
安全行为监督	82	89	84	88	82
沟通协作机制	89	90	91	90	89

按照熵权法的步骤处理表 3 的数据, 先应用式(5)得到标准判断矩阵, 再利用式(6)和式(7)计算熵值熵权, 计算得到评价指标的客观权重结果为  $W_2 = (0.032, 0.037, 0.057, 0.080, 0.063, 0.055, 0.105, 0.055, 0.037, 0.040, 0.056, 0.064, 0.055, 0.056, 0.055, 0.048, 0.055, 0.050)$ 。

## 3) 计算组合权重

分别得出主客观权重  $W_1$ 、 $W_2$  后, 再利用基于博弈论的组合赋权方法计算组合权重, 计算得出组合权重  $W = (0.009, 0.013, 0.036, 0.027, 0.061, 0.035, 0.031, 0.066, 0.129, 0.009, 0.015, 0.023, 0.036, 0.205, 0.045, 0.131, 0.045, 0.084)$ , 具体组合权重结果见表 4。

**Table 4.** Composite weighting results  
**表 4.** 组合权重结果

准则层	准则层组合权重	因素层	因素层组合赋权
个体因素 B <sub>1</sub>	0.146	生理状况 C <sub>1</sub>	0.009
		心理状态 C <sub>2</sub>	0.013
		技术水平 C <sub>3</sub>	0.036
		安全知识 C <sub>4</sub>	0.027
		安全意识与态度 C <sub>5</sub>	0.061
设备因素 B <sub>2</sub>	0.261	设备可靠性 C <sub>6</sub>	0.035
		人机界面效能 C <sub>7</sub>	0.031
		算法决策智能 C <sub>8</sub>	0.066
		网安数据韧性 C <sub>9</sub>	0.129
工作环境因素 B <sub>3</sub>	0.083	功效设计 C <sub>10</sub>	0.009
		物理环境条件 C <sub>11</sub>	0.015
		任务负荷 C <sub>12</sub>	0.023
		信息环境质量 C <sub>13</sub>	0.036
组织管理因素 B <sub>4</sub>	0.510	安全责任制度 C <sub>14</sub>	0.205
		安全培训教育 C <sub>15</sub>	0.045
		风险隐患管理 C <sub>16</sub>	0.131
		安全行为监督 C <sub>17</sub>	0.045
		沟通协作机制 C <sub>18</sub>	0.084

### 3.2. 模糊综合评价

1) 影响智能化煤矿人因失误风险评价的 18 个因素可组成安全评价因素集  $U$ 。在参考行业规范标准、专家建议及相关文献[27][28]的基础上, 对各因素影响安全评价选取 5 个等级, 即低风险、较低风险、一般风险、较高风险、高风险, 组成评价集  $V$ 。其对应的分数集为  $V' = [95, 80, 60, 40, 15]$ 。

2) 构建模糊关系矩阵  $R$ 。为保证认知同源, 邀请参与熵权法评分的 5 名专家直接评价确定影响智能化煤矿人因失误的 18 个因素的隶属度。对多位专家的评判结果进行算术平均, 即可得到最终的模糊关系矩阵  $R$ 。根据公式(10), 模糊关系矩阵  $R^T$  具体数值见表 5。

3) 本研究采用 3.1 节所述基于博弈论的组合赋权法得出的权重向量  $W$ 。通过式(11)进行模糊合成运算, 得到模糊评价结果向量  $B$ , 将其归一化后得  $B = (0.4953, 0.3556, 0.1441, 0.0050, 0.0000)$ 。

4) 利用式(12)计算模糊综合得分为 84.35 分, 参考表 1, 该智能化煤矿人机交互作业人因失误风险等级属于低风险, 整体可控, 安全状况良好。

**Table 5.** Risk level membership matrix  $R^T$   
**表 5.** 风险等级隶属度矩阵  $R^T$

因素层指标	低风险	较低风险	一般风险	较高风险	高风险
生理状况 $C_1$	0.52	0.36	0.12	0	0
心理状态 $C_2$	0.38	0.38	0.22	0.02	0
技术水平 $C_3$	0.38	0.40	0.22	0	0
安全知识 $C_4$	0.34	0.36	0.30	0	0
安全意识与态度 $C_5$	0.42	0.38	0.20	0	0
设备可靠性 $C_6$	0.44	0.38	0.18	0	0
人机界面效能 $C_7$	0.26	0.34	0.34	0.06	0
算法决策智能 $C_8$	0.52	0.36	0.12	0	0
网安数据韧性 $C_9$	0.50	0.32	0.16	0.02	0
功效设计 $C_{10}$	0.40	0.38	0.22	0	0
物理环境条件 $C_{11}$	0.32	0.38	0.28	0.02	0
任务负荷 $C_{12}$	0.38	0.38	0.24	0	0
信息环境质量 $C_{13}$	0.52	0.36	0.12	0	0
安全责任制度 $C_{14}$	0.54	0.36	0.10	0	0
安全培训教育 $C_{15}$	0.44	0.38	0.18	0	0
风险隐患管理 $C_{16}$	0.56	0.36	0.08	0	0
安全行为监督 $C_{17}$	0.44	0.38	0.18	0	0
沟通协作机制 $C_{18}$	0.66	0.30	0.04	0	0

### 3.3. 集对分析

模糊综合评价得出的结果向量  $B = (0.4953, 0.3556, 0.1441, 0.0050, 0.0000)$  仅给出了风险等级的静态概率分布, 却无法体现系统安全状态的演变方向。引入集对分析的目的在于对模糊评价结果进行势态解析。通过将评价向量  $B$  转化为五元联系数, 定量测算同一度、差异度与对立度的相互转化关系, 从而精准研判系统当前是处于稳固的“强同势”还是潜在的“弱同势”, 弥补了单一模糊评价缺乏动态预警视角的不足。

1) 构建联系度映射关系。依据评价集  $V$  的等级梯度, 将模糊综合评价结果向量  $B$  的五个分量与五元联系度中的同、异、反分量建立一一映射关系。具体赋值如下:  $a, b_1, b_2, b_3, c$  依次对应低风险、较低风险、一般风险、较高风险和高风险, 其隶属度分别为 0.4953、0.3556、0.1441、0.0050 和 0.0000。

2) 计算综合联系度。采用等间距赋值法确定各级联系数的系数: 令同一度系数为 1, 偏同系数  $i_1 = 0.5$ , 中立系数  $i_2 = 0$ , 偏反系数  $i_3 = -0.5$ , 对立系数  $j = -1$ 。

利用式(13)计算  $\mu = 0.4953 + 0.3556 \times 0.5 + 0.1441 \times 0 + 0.0050 \times (-0.5) + 0 \times (-1)$ , 得出综合联系度  $\mu$

= 0.6706。该值远大于 0 且趋近于 1，表明系统处于显著的“强同势”，即安全状况优良。

### 3.4. 评价结果分析

表 4 的组合权重结果揭示了智能化背景下人因失误风险驱动力的延续与演变。安全责任制度、风险隐患管理、网安数据韧性、沟通协作机制和算法决策智能组合权重较大，均在 0.06 以上，印证了严密的组织管理是安全绩效的“压舱石”，特别是网安数据韧性的高权重，揭示了人机隔离下数据流成为感知的唯一载体的风险传导新机制，一旦出现数据漂移、传输时延或丢包等韧性失效问题，必将导致信息映射失真，这种信息不对称会诱导作业人员产生非主观性认知偏差，即在错误数据的引导下做出错误的逻辑判断，如因监测数据滞后而误判现场瓦斯或设备状态，因此保障数据的实时准确性已成为阻断认知型失误的关键防线；而其他的生理状况、心理状态、功效设计、物理环境条件组合权重较小，均在 0.015 以下，这种权重分布与该煤矿硬件设施完备、但人机交互磨合期风险突出的实际工况高度吻合，说明该组合赋权模型能够准确剔除干扰信息，精准锁定智能化场景下的核心风险源。

根据模糊综合评价计算模糊评价得出的 84.35 分及五元联系度  $\mu=0.6706$ ，均判定系统处于“低风险”及“强同势”状态。这与现场调研中该矿因严格落实责任制度且长期保持安全运行的现实一致，验证了模型在宏观评判上的可靠性。系统虽以确定的安全势  $a$  为基石，且不确定性演化趋势也以偏向安全的偏同差异度  $b_1$  为主，但仍检出 14.41% 的中立差异度  $b_2$ 。这一微观数据特征，映射了现场实际运行中存在的“磨合期”特征：即部分老员工对智能终端适应性波动，以及对新型网络风险识别滞后等不稳定因素。模型不仅准确评判了整体安全等级，更成功捕捉了隐藏在安全常态下的结构性“脆性”，这种诊断结果与现场实况的高度吻合，充分证明了本文模型在智能化煤矿人因风险评估中具有极高的准确性与适用性。此外，针对不同安全水平下的风险管控需求，应实施差异化管理。在实际应用场景中，一旦评价势态呈现“弱同势”或“微同势”（表现为  $\mu$  值偏低而差异度系数  $b$  偏高），即表明系统已进入不稳定的临界状态。此时应充分利用博弈论组合权重的导向功能，重点排查那些权重较高但得分较低的关键薄弱环节。这种基于权重 - 得分的动态诊断方式，有效弥补了传统评价仅关注总分而忽视局部短板的不足。基于此逻辑，针对本研究识别的关键风险源建议：1) 针对算法决策智能，建立高风险指令“人机双重确认机制”及“降级运行”演练机制，防范操作技能退化和盲目依赖；2) 针对安全责任制度，推行数字化责任溯源，将抽象制度解构为系统可记录的操作行为；3) 针对网安数据韧性，构建多源数据交叉验证协议与置信度标识，防止单一数据偏差诱发人员误判，从而实现从防范人失误向系统高容错的本质安全跨越。

## 4. 结论

1) 构建了面向智能化煤矿关键岗位操作人员的人因失误风险评价指标体系，包含准则层的个体因素、设备因素、工作环境因素和组织管理因素 4 个指标，以及因素层的安全意识与态度、网安数据韧性、信息环境质量、安全责任制度在内的 18 个指标。

2) 提出了基于博弈论组合赋权-FCE-SPA 的风险评价模型。该模型利用博弈论思想实现了主客观权重的科学融合，通过 FCE 宏观定级与 SPA 微观势态解析的互补机制，有效克服了单一评价方法分辨率低、缺乏动态演化视角的局限，实现了对风险确定性与不确定性信息的深度挖掘。

3) 应用该模型对湖南省某智能化煤矿作业人员进行人因失误风险评价。最终得出结论：该智能化煤矿人机交互作业人因失误风险等级为 V 级(低风险)，且该低风险状态具有极高的内在稳健性。准则层中组织管理因素占比最大，其次为设备因素、个体因素和工作环境因素。因素层中安全责任制度、风险隐患管理、网安数据韧性、沟通协作机制和算法决策智能组合权重较大，均在 0.06 以上；而生理状况、心理状态、功效设计、物理环境条件组合权重较小，均在 0.015 以下。

4) 验证了评价模型的准确性与工程应用价值, 本文构建的博弈论组合赋权-FCE-SPA 风险评价模型, 有效整合了主客观赋权科学性与 FCE 宏观定级-SPA 微观势态解析的双重评价优势。实证表明, 该模型不仅准确判定了系统低风险等级, 更通过集对分析精准揭示了安全表象下的结构稳健性与局部演化趋势, 诊断结果与现场实况高度吻合。研究成果为智能化煤矿人因风险的精准防控提供了科学依据, 也为同类作业场景提供了一种可推广的量化分析范式。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“瓦斯爆炸冲击-地应力动静载荷下巷道壁面煤岩体损伤破坏特性及能量耗散研究”(编号: 52574242)、“煤矿采空区垮落煤岩体堆积体区域瓦斯爆炸热冲击动力演化机制及作用模型研究”(编号: 52574241)。

## 参考文献

- [1] 李爽, 贺超, 鹿乘, 等. 煤矿智能双重预防机制与智能安全管控平台研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 464-473.
- [2] 任志青. 5G 赋能, 拥抱智慧矿山时代[J]. 中国煤炭工业, 2020(8): 12-15.
- [3] 李霞. 基于危险源的煤矿员工不安全行为管理模型研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(10): 248-252.
- [4] 李红霞, 张倩, 田水承, 等. 改进离散 Hopfield 神经网络在煤矿人因评估中的应用[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(6): 1978-1984.
- [5] 王未来, 张文清. 煤矿安全管理制度有效性评价指标体系构建[J]. 煤炭技术, 2025, 44(2): 264-267.
- [6] 景建立. 煤矿安全风险综合评价与预警管理模式的研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(17): 92-94.
- [7] 李红霞, 陈磊. 基于 AHP-fuzzy 的煤矿管理人员素质测评体系实证研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(3): 244-248.
- [8] 徐友良, 陈梁, 郎茂祥. 高速铁路行人人因可靠性评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(11): 87-91, 97.
- [9] 刘浩浩. 冶金企业人因安全风险评估体系及改善模型研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中钢集团武汉安全环保研究院, 2025.
- [10] 李博杨, 李贤功, 吴利高, 等. 基于熵权法和集对分析的煤矿安全事故人因失误分析[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(1): 111-114.
- [11] 雒钰晨. 基于改进的 HFACS-SPA 铁路工务人员人身安全风险评价[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2021.
- [12] 陈晓勇, 施式亮, 李润求, 等. 基于修正的 HFACS 与 SPA 的建筑施工安全人因分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(3): 63-69.
- [13] 姜洋. 基于层次分析法和主成分分析法对电梯的人因失误分析[J]. 中国电梯, 2020, 31(7): 29-34, 37.
- [14] 唐俊熙, 何迪, 郭创新. 基于模糊综合评估的电网人因可靠性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 63-68.
- [15] 赵天亮, 王冰山, 台发强, 等. 基于改进 DEMATEL-ISM-BN 的人因视角下煤矿事故致因研究[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(1): 91-99, 117.
- [16] 李红霞, 樊恒子, 张嘉琦, 等. 智慧矿山工人人因失误影响因素研究[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(6): 1090-1097.
- [17] 兰保荣. 基于 CREAM 的煤矿事故人因失误分析[J]. 能源与环保, 2018, 40(8): 86-88, 93.
- [18] 尹波, 欧阳欣怡, 张景钢. 智能化煤矿人因失误发生机理及防范措施研究[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(8): 172-177.
- [19] 郑占彬, 杨金辉, 赵津. 智能化煤矿监控作业人因失误影响因素研究[J]. 山西焦煤科技, 2024, 48(1): 50-54.
- [20] Liu, R., Cheng, W., Yu, Y. and Xu, Q. (2018) Human Factors Analysis of Major Coal Mine Accidents in China Based on the HFACS-CM Model and AHP Method. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 68, 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.08.009>
- [21] Zhu, J. and Ma, X.P. (2009) Safety Evaluation of Human Accidents in Coal Mine Based on Ant Colony Optimization and SVM. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 1418-1424. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.219>
- [22] Fa, Z., Li, X., Qiu, Z., Liu, Q. and Zhai, Z. (2021) From Correlation to Causality: Path Analysis of Accident-Causing

Factors in Coal Mines from the Perspective of Human, Machinery, Environment and Management. *Resources Policy*, **73**, Article ID: 102157. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102157>

- [23] 李红霞, 张大卫. AHP-熵权法在煤矿生产安全评价中的应用[J]. 煤炭技术, 2018, 37(10): 369-371.
- [24] 肖俊. 基于 AHP-熵权法的工控系统人机界面综合评价[J]. 工业设计, 2017(6): 186-187, 189.
- [25] 段军, 岳洪辉, 张伟, 等. 基于粗糙集条件信息熵的煤矿人因失误安全评价[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(12): 93-96.
- [26] 兰建义, 周英. 基于层次分析-模糊综合评价的煤矿人因失误安全评价[J]. 煤矿安全, 2013, 44(10): 222-225.
- [27] 史向前. 基于煤矿标准化管理体系的煤矿人员人因可靠性评价模型研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2023.
- [28] 黄莺, 杜树, 郭俊浩, 等. 基于组合权重和集对分析法的煤矿生产安全评价研究[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(11): 9-13.