

DOI: 10.13606/j.cnki.37-1205/td.2025.03.015.

放顶煤工作面生产系统安全评价模型设计应用

彭 湃

(晋能控股煤业集团 朔州朔煤王坪煤业有限公司, 山西 怀仁 038300)

摘要:为解决目前智能化放顶煤生产系统由于安全评价方法体系的不完善导致存在安全隐患的问题,本文以王坪煤业智能化放顶煤生产系统为研究对象,通过构建智能化放顶煤生产系统安全评价指标体系,使用 AHP 以及熵权-可拓理论对定性指标以及定量指标的关联度等参数进行计算,构建智能化放顶煤工作面生产系统安全评价体系模型。经过验证分析,将模型应用到放顶煤工作面生产系统中,经过分析确认目前生产系统安全等级为“较安全”,经计算得出各个指标相关性系数关系 $K(\text{人}) > K(\text{管}) > K(\text{机}) > K(\text{环})$,其中环境对于安全等级的影响较大,为王坪煤业后续提高安全等级的发展提供了对策,旨在真正实现高产高效,安全生产。

关键词:放顶煤;安全评价体系;AHP;熵权-可拓理论

中图分类号:TD79 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-0797(2025)03-0074-05

Design and application of safety evaluation model of top coal working face

PENG Pai

(Shuozhou Shuo Coal Coal Industry Group Wangping Coal Industry Co., LTD., Huairan 038300, China)

Abstract: In order to solve the current intelligent top coal production system due to the imperfection of safety evaluation system, this paper to wang ping coal intelligent top coal production system as the research object, through the construction of intelligent top coal production system safety evaluation index system, using AHP and entropy right-extension theory of the qualitative index and quantitative index correlation parameter calculation, build intelligent top coal face production system safety evaluation system model. After verification analysis, the model is applied to the top coal face production system, after analysis confirm the current production system safety level is "safe", calculated the various index correlation coefficient $K(\text{person}) > K(\text{tube}) > K(\text{machine}) > K(\text{ring})$, the environment for the safety level, for the wang ping coal subsequent improve the development of safety level provides countermeasures, aims to truly achieve high yield and high efficiency, safe production.

Key words: top coal; safety evaluation system; AHP; entropy weight-extension theory

0 引言

信息化与智能化,已经成为目前煤矿发展的主要方向。在其中智能化放顶煤工作面系统已经取得了很大的进步,工作面设备具有自感知、自判断的能力,不仅能够提高矿井产量也可以提升矿井安全性^[1-3]。即便如此还是存在很多的安全问题,根据现场调查以及资料查阅,得出导致安全问题频发的主要原因分为两个方面:一是硬件配套,二是安全评价方法体系的不完善^[4,5]。目前的生产系统安全评价方法存在的问题有:评价方法受主观因素影响大,导致结果偏向主观化;安全评价体系不适用于现在智能化的需求。基于此,本文以生产系统安全评价

方法体系的构建为研究方向,分别从安全评价指标体系的建设以及安全评价模型的建设 2 个方面进行研究。

1 工作面概况

王坪煤业某工作面为上山回采,煤层走向从南到北,平均倾角 20° ,采区煤的硬度 $f \approx 3$,煤层厚度 $8.28 \sim 28.12 \text{ m}$,工作面最大的粉尘浓度为 5.8 mg/m^3 ,瓦斯浓度为 0.03 mg/m^3 ,现场工作人员受教育程度较高,平均年限 14 年,智能化工作平均工龄为 1.8 年,工作面设备 90% 为新购入,总体完好率达 96%,设备的信息采集保存时间为 1 个月,传感器以及摄像仪覆盖率为 87.8% 以及 92.3%。

收稿日期:2024-05-17

作者简介:彭湃(1995-),男,山西怀仁人,助理工程师,从事生产技术工作。Email: 1054728727@qq.com

2 构建智能化放顶煤生产系统安全评价指标体系

2.1 安全评价指标初选

智能化生产系统由多个环节、多种因素构成，按照主体可将系统分为人、机器、环境、管理四大系统。智能化生产系统与传统生产系统之间存在一些差异，其中人系统：智能化生产系统相比传统系统只需要少量的人，但是对于人员专业性方面要求较高；机器系统：使用电液控制系统不仅能够提升开采量，还能提高安全性；环境系统：通过使用各种监测手段，实现了井下水压、瓦斯等智能监测；管理系统：智能化生产系统相较传统系统来讲，它是传感器、通信、自动化技术等集合，能实现复杂环境下的精细化管理^[6,7]。在进行生产系统安全评价指标体系构建时，可以参照传统系统的指标构建来完成评价指标的初步选择，分别从 4 个子系统中进行选择，初步选定的安全评价指标见表 1。

表 1 初步选定的安全评价指标

评价目标	一级指标	二级指标
智能化放顶煤工作面生产系统安全等级	人	安全意识、责任意识、员工意识、紧急情况处理能力、健康状况、教育水平、工龄
	机器	感知系统、数据保护系统、以太网系统、视频监控系统等、信息管理系统、数据存储系统等、稳定性
	环境	作业空间及通道、煤层倾角、煤层厚度、稳定性、瓦斯浓度、粉尘浓度等
	管理	应急管理、安全责任制、考核标准、监督机制、培训合格率、检修维护时间、数据保存时间等

2.2 筛选确定安全评价指标

科学有效的评价指标体系是评价结果精确度的保证，因此在构建安全评价体系前就需要对安全评价指标体系进行筛选。指标的相关系数可以表征指标的互相影响作用，对指标进行筛选时，主要基于指标相关性，相关性大的 2 个指标可以进行约简^[8]。基于此，首先构建相关性系数计算模型。步骤见下：

1) 原始评价矩阵 $X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ M & \cdots & M \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$ ，求出矩阵中

行平均值，即为 $\bar{X}_j = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}$ ；

2) 确定矩阵行方差值，即 $D_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}{m} -$

$$\left(\sum_{j=1}^m x_{ij} \right)^2 ;$$

3) 计算矩阵 X 的协方差 $Cov(X_i, X_j)$ ，即为

$$C_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ik} - \bar{X}_i)(x_{jk} - \bar{X}_j) ;$$

4) 确定相关性系数矩阵 R，即 $R_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{D_i D_j}}$ ，

表 2 为相关性系数分布意义表，根据相关性系数的大小，区分相关程度。

5) 根据矩阵 R 对安全评价指标的相关性进行分析。

表 2 相关性系数分布意义表

相关系数数值	相关程度
0 ~ 0.3	相关性低
0.3 ~ 0.5	存在相关性
0.5 ~ 0.9	相关性明显
0.9 ~ 1.0	相关性强烈

确定好相关性系数模型后，按照相关性系数分布意义表对安全评价指标进行筛选，对于环境类等不可改变因素，不需要相关性分析的指标进行剔除，删除关联性大的指标只留下一项。将剩下指标中可以量化的指标称为定量指标，不能量化的指标称为定性指标，定性指标只能通过专家打分的方式，基于实际情况对指标打分，构建定性指标评价表。对于可量化的指标，按照量化的方式对指标数据进行收集，构建定量指标评价表。分别将定性以及定量评价表指标信息导入相关性系数模型中，计算得出相关性系数，根据相关性系数分布意义，需要将 $R_{ij} > 0.9$ ，即相关性强烈的指标进行约简，最终确定了评价指标。确定的评价指标详见表 3。

表 3 生产系统安全评价指标

评价目标	一级指标	二级指标	
		定性指标	定量指标
智能化放顶煤工作面生产系统安全等级	人	安全意识、责任意识、员工素质、身心健康状况	专业知识水平、教育水平、工龄、月培训时间
	机器	感知系统、数据保护系统、以太网系统、视频监控系统、信息管理系统、设备选型合理性	设备完好率、视频监控覆盖率、传感器覆盖率、信息延迟时间
	环境	作业空间及通道、煤层倾角、煤层稳定性、煤层厚度	瓦斯浓度、硬度、粉尘浓度、噪声
	管理	技术管理、事故报告分析、安全管理台账、顶板管理	培训合格率、检修维护时间、数据保存时间、参与放顶煤生产人数

3 构建工作面生产系统安全评价模型

为了更加准确客观对生产系统指标进行评价, 根据定性指标与定量指标特性, 分别使用层次分析法、熵权-可拓理论来对 2 种指标进行评价, 在结合专家意见的基础上, 合理处理定量指标, 提升安全评价系统的可靠性^[9,10]。安全评价模型的工作流程图见图 1。

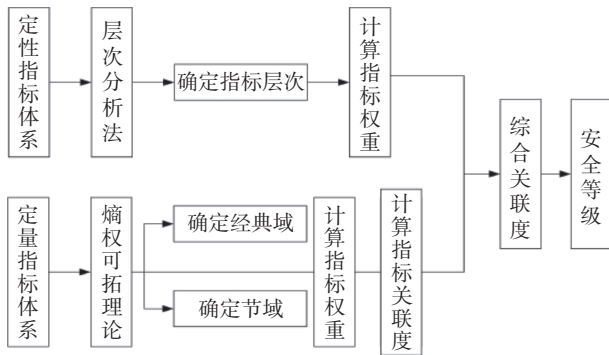


图 1 安全评价模型的工作流程图

3.1 基于层次分析法确定定性评价指标权重

层次分析法 (AHP) 原理: 不同专家对同一子指标对于上一级指标的重要性进行相互比较, 同时将比较的评分组成判断矩阵后, 再对指标进行综合处理, 最终确定各个指标的权重^[11,12]。

使用 AHP 分析法计算定性评价指标权重过程分为 4 步: ①分析指标的层次关系, 建立递阶层次结构; ②同一阶次指标相对于上一阶次重要程度进行互相对比, 构建判断矩阵, 检验一致性; ③计算比较出两两比较要素之间的相对权重; ④计算评价系统目标层的总权重。

判断矩阵的表示形式为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

式中: 矩阵 A 为一致性矩阵, 因此矩阵 A 中的元素需要满足 $a_{ij} = 1/a_{ji}$, $a_{ij} = 1$, $a_{ij} = a_{ik} \times a_{kj}$ 。

判断矩阵确定之后, 接下来对矩阵指标进行一致性的检验, 计算式为:

$$C.R = \frac{C.I}{R.I}$$

$$C.I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

式中: λ_{\max} 是矩阵最大特征值, n 为判断矩阵的阶数, $R.I$ 为平均一致性的指标标准, 与判断矩阵标度一一对应, 其取值规则见表 4。

表 4 定性评价指标取值

标度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R.I	0	0	0.41	0.91	1.09	1.28	1.38	1.42	1.47

评价指标满足一致性条件的要求是 $C.R < 0.1$, 计算的权重系数才可用, 假设不满足, 需要重新计算。

计算各个安全指标相对于总目标的总权重, 假定存在 X/Y/Z 3 层安全层, 其中 Y 层由 n 个指标组成, 分别是 Y_1, Y_2, \dots, Y_n , 其中按照层次进行排序为 y_1, y_2, \dots, y_n , 下一层 Z 由 m 个指标组成, 分别是 Z_1, Z_2, \dots, Z_m , 这一层的指标相对于 Y_i 的层次单排序权重值为 $z_{1i}, z_{2i}, \dots, z_{mi}$, 因此第 3 层的 Z 层的总权重 YZ_i 计算公式为:

$$YZ_i = \sum_{j=1}^m y_j z_{ij}$$

基于此, 通过层层递推, 便可以求得在 AHP 结构中最下层对于总目标的总权重值。

3.2 基于熵权-可拓理论确定定量评价指标权重

熵权法的基本原理是按照既定指标的变化大小来确定权重占比, 假设 A 指标的信息熵小, 则指标的变化程度就大, 信息量越丰富, 其综合评价中发挥的作用就越大, 权重也较大。基于此, 熵权法成为定量指标权重计算的有效方式。而可拓学则是用来研究事物拓展的可能性以及创新的规律。

使用熵权-可拓理论计算定量评价指标时, 步骤如下:

1) 首先在可拓学中加入物元概念, 根据安全评价指标的最值范围构建节域, 其公式为:

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & V_{p1} \\ & C_2 & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & [a_{p1}, b_{p1}] \\ & C_2 & [a_{p2}, b_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & [a_{pn}, b_{pn}] \end{bmatrix}$$

其中, N_p 表示安全等级 p 的评价对象, $C_1 \dots C_n$ 为评价指标, V_{p1} 为 p 关于指标 C_1 的最大值最小值的范围, 其中 a_{p1} 为最小值, b_{p1} 为最大值。

2) 对节域以及待评物元进行归一化处理, 公式为:

$$R'_p = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & \left[\frac{a_{j1}}{b_{p1}}, \frac{b_{j1}}{b_{p1}} \right] \\ & C_2 & \left[\frac{a_{j2}}{b_{p2}}, \frac{b_{j2}}{b_{p2}} \right] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \left[\frac{a_{jn}}{b_{pn}}, \frac{b_{jn}}{b_{pn}} \right] \end{bmatrix}$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} p_0 & C_1 & \frac{V_1}{b_{p1}} \\ & C_2 & \frac{V_2}{b_{p2}} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \frac{V_n}{b_{pn}} \end{bmatrix}$$

3) 确定指标的关联度, 其评价指标与安全等级的关联度的关系式见下:

$$D_j(V_i) = \begin{cases} \frac{\rho(V_i, V_{ji})}{\rho(V_i, V_{pi}) - \rho(V_i, V_{ji})} \\ -\frac{\rho(V_i, V_{ji})}{|V_{ji}|} \end{cases}$$

$$\rho(V_i, V_{ji}) = \left| V_i - \frac{1}{2}(a_{ji} + b_{ji}) \right| + \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji})$$

$$|V_{ji}| = |b_{ji} - a_{ji}|$$

$$\rho(V_i, V_{pi}) = \left| V_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| + \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi})$$

式中: $D_j(V_i)$ 表示安全指标的关联度; $\rho(V_i, V_{ji})$ 表示点 V_i 与经典域的距; $|V_{ji}|$ 为 p 关于指标 C_i 的最大值最小值的绝对值; $\rho(V_i, V_{pi})$ 表示点 V_i 与节域的距。

4) 利用熵权法确定各指标的权重, 利用指标关联系数构成判断矩阵, 再将矩阵进行归一化计算, 计算出指标的均值, 确定信息熵:

$$H_i = -\frac{\sum_{j=1}^m (f_{ji} \ln f_{ji})}{\ln m}$$

各指标权重的计算公式:

$$w_i = -\frac{\ln m - H_i}{\sum_{k=1}^n (\ln m - H_k)}$$

式中: H_i 为第 i 个指标的信息熵, f_{ji} 为第 j 个评价对象的第 i 个指标平均值除以全部指标的均值。

3.3 可拓理论确定评价对象安全等级

在定量化指标以及定性指标的关联度以及权重计算完成后, 还需要将两者进行合并, 计算出生产系统的安全等级。首先对待评物元 N 关于等级 j 的关联度 $k_j(p)$ 进行计算, 在通过关联度计算安全等级 $\bar{k}_j(p)$, 其计算公式见下:

$$k_j(p) = \sum_{i=1}^n w_i D_j(V_i)$$

$$\bar{k}_j(p) = \frac{k_j(p) - \min k_j(p)}{\max k_j(p) - \min k_j(p)}$$

$$j^* = \frac{\sum_{i=1}^m j^* \bar{k}_j(p)}{\sum_{i=1}^m \bar{k}_j(p)}$$

上式中: j^* 表示物元 P 的等级变量特征值, 表征离散程度, 被用来对待评物元偏离相邻安全等级的程度, 使得评价更加准确。

4 安全评价模型应用分析

根据工作面实际情况, 按照综合评判法, 将智能化放顶煤工作面生产系统分为 I (安全)、II (较安全)、III (中等安全)、IV (较不安全)、V (不安全) 5 个等级^[13], 本节根据工作面评价指标的实测值, 将分别列举不同一级指标有代表性的定性指标与定量指标安全等级关联度进行合并, 见表 5。

表 5 定性指标与定量指标合并后的安全等级关联度

目标	一级指标	二级指标	安全等级					
			I	II	III	IV	V	
王坪煤业智能化放顶煤工作面生产系统安全等级	人	定性指标	安全意识	-0.370	-0.177	0.298	-0.348	-0.556
		定量指标	专业知识水平	-0.302	0.273	-0.125	-0.676	-0.723
	机器	定性指标	感知系统稳定性	-0.173	0.25	-0.375	-0.685	-0.782
		定量指标	设备完好率	-0.324	0.002	0.002	-0.495	-0.671
	环境	定性指标	作业空间及通道	-0.241	0.439	-0.278	-0.638	-0.757
		定量指标	瓦斯浓度	-0.231	0.395	-0.295	-0.529	-0.644
	管理	定性指标	技术管理	0.001	0.001	-0.498	-0.748	-0.827
		定量指标	检修维护时间	-0.445	-0.237	0.235	-0.083	-0.352

由第3.3节可拓理论确定评价对象安全等级中计算公式,可计算得出王坪煤业智能放顶煤工作面生产系统安全等级,计算结果见表6。

表6 王坪煤业智能放顶煤工作面生产系统安全等级

关联度	安全等级					等级变量特征值
	I	II	III	IV	V	j^*
$k_j(p)$	-0.541	-0.271	-0.489	-1.028	-1.041	2.2825

根据表6计算得出的安全等级关联度,其中II级的关联度数值最大,证明王坪煤业放顶煤生产系统的安全等级为较安全, j^* 数值也说明安全等级更接近较安全,因此说明工作面的安全等级较高。根据等级结果逆向分析和指标的相关性系数计算出各个指标的相关性系数,经计算得出 $K(\text{人}) > K(\text{管}) > K(\text{机}) > K(\text{环})$,证明人的关联性最大,因此证明人对安全等级的影响最小,环境对于安全等级的影响最大。因此,王坪煤业提高安全等级要从环境指标入手,解决系统稳定性差的问题,进一步的提高工作面的安全等级

5 结论

本文通过构建智能化放顶煤生产系统安全评价指标体系确定定量指标以及定性指标,再进行构建智能化放顶煤工作面生产系统安全评价模型,通过对定量指标以及定性指标的关联度、权重等的数值的计算,最后确定了生产系统的安全等级,将模型应用到工作面生产系统中,经过分析确认目前生产系统安全等级为“较安全”,经计算得出各个指标相关性系数关系,其中环境对于安全等级的影响较大,因此需要从环境系统稳定性入手,进一步提升工作面的安全等级,真正的实现高产高效,安全生产。

参考文献:

- [1] 王利新,姚志强,王晓欢,等.特厚高放顶煤开采注氮煤自燃危险抑制特性研究[J].煤矿安全,2023,54(10):72-81.
- [2] 李金龙.浅谈综采放顶煤采煤法高效安全应用的问题[J].矿业装备,2023(9):34-36.
- [3] 关书方,杨长益,师皓宇,等.大倾角放顶煤上覆岩层结构失稳力学机理研究[J].华北科技学院学报,2023,20(4):29-34.
- [4] 杨晓光,陈今.范各庄煤矿岩巷快速掘进多次支护技术研究与应用[J].煤炭技术,2023,42(10):91-95.
- [5] 王博翰,郭俊.煤矿安全监控系统技术及智能化发展趋势[J].陕西煤炭,2024,43(3):109-112,148.
- [6] 李峰鸽,刘小开.煤矿生产系统安全评价体系的构建及其应用[J].黑龙江科学,2023,14(18):83-85,89.
- [7] 张亮.煤矿安全监控系统与“一通三防”管理的预警联动研究分析[J].西部探矿工程,2022,34(10):188-190.
- [8] 王克军,项宗文,田素超,等.基于t-SEN数据降维的煤矿安全风险评价模型[J].能源技术与管理,2024,49(2):146-149.
- [9] 任江朋.基于AHP-TOPSIS的煤矿安全风险评价探讨[J].山西焦煤科技,2023,47(5):49-53.
- [10] 贾世有,田虎军,薛勇,等.隐患视角下煤矿系统韧性安全及其评估框架研究[J].能源技术与管理,2022,47(4):130-133.
- [11] 韩中杰.煤矿安全生产标准化建设实效评价指标体系研究[J].矿业装备,2022(2):126-127.
- [12] 张晓旭,范超男,马国良.层次分析法在煤矿安全体系中的应用研究[J].能源与环保,2022,44(12):307-311.
- [13] 许剑波.煤矿用机电设备安全管理系统分析[J].机电工程技术,2021,50(7):184-186.