



李东印,孙凯旋,王伸,等.基于熵权-可拓理论智能化综采工作面安全评价[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(3):1-9. doi:10.16186/j.cnki.1673-9787.2020080096

LI D Y, SUN K X, WANG S, et al. Study on safety evaluation of intelligent working face based on extension theory with entropy weight approach[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(3):1-9. doi:10.16186/j.cnki.1673-9787.2020080096

基于熵权-可拓理论的智能化综采工作面安全评价

李东印¹,孙凯旋¹,王伸^{1,2},王祖洸¹,张旭和³

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000;2. 河南理工大学 安全科学与工程博士后科研流动站,河南 焦作 454000;3. 河南理工学院工业技术有限公司 技术研发部,河南 郑州 450000)

摘要:综采工作面智能化开采已成为当前我国煤炭开采的重要发展方向,传统综采工作面安全评价体系已经相对成熟,而智能化综采工作面安全评价体系亟需构建。通过对比传统和智能化综采工作面系统特征,系统分析综采工作面智能化背景下的安全要素和危险源,从人、机、环、管4个方面选取28项指标建立安全评价体系,基于熵权-可拓理论构建安全评价计算模型。以山西某煤矿智能化综采工作面为工程案例,采用MATLAB软件计算并评估安全等级,结果表明:选取的评价指标具有良好的独立性与全面性,符合工程实际;熵权法可合理分配指标权重,可拓理论能够逐级分析出各层指标与安全等级的相关性系数大小,从而准确计算智能化综采工作面的安全等级。熵权-可拓理论可为智能化综采工作面安全评价提供重要思路与方法。

关键词:智能化综采工作面;评价指标体系;熵权;可拓理论;安全评价

中图分类号:TD79

文献标志码:A

文章编号:1673-9787(2022)3-1-9

Study on safety evaluation of intelligent working face based on extension theory with entropy weight approach

LI Dongyin¹, SUN Kaixuan¹, WANG Shen^{1,2}, WANG Zuguang¹, ZHANG Xuhe³

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 2. Postdoctoral Station of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 3. Technology Research and Development Department, Henan Institute of Technology Industrial Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Intelligent construction of fully mechanized mining face has become an important development direction of coal mining in China. The traditional safety evaluation of fully mechanized mining face has been relatively mature, and the safety evaluation system of intelligent working face needs to be enriched. By comparing the system characteristics of traditional and intelligent working face, this paper systematically analyzed the safety factors and hazard sources under the background of intelligent working face, 28 indexes from four aspects of human, machine, environment and management were selected, the safety evaluation index system was established, and the safety evaluation calculation model based on entropy weight method and extension theory was

收稿日期:2020-08-31;修回日期:2020-11-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0604502);中国博士后科学基金资助项目(2020M672227)

第一作者简介:李东印(1970—),男,河南封丘人,博士,教授,博士生导师,主要从事煤矿智能开采、系统工程等方面的教学和研究工作。Email:lidongyin@126.com

通讯作者简介:王伸(1991—),男,河南修武人,博士,讲师,主要从事煤矿智能开采方面的教学和研究工作。Email:wangshen@hpu.edu.cn

constructed. Taking a mine in Shanxi as an engineering case, MATLAB was adopted to calculate and evaluate the safety level. The research results showed that the evaluation index selected in this paper had good independence and comprehensiveness, which was in line with the engineering practice; the entropy weight method could reasonably distribute the index weight, and the extension theory could analyze the correlation coefficient between each layer index and the safety level, so as to accurately calculate the safety level of intelligent working face. Extension theory of entropy weight could provide important ideas and means for safety evaluation of intelligent working face.

Key words: intelligent fully-mechanized working face; evaluation index system; entropy weight; extension theory; safety evaluation

0 引言

能源行业发展事关国家安全和经济稳定,能源是国家高速发展的物质保障^[1]。为确保煤矿科学、绿色、安全、高产和高效发展,煤矿智能化已成为煤矿发展必由之路。当前煤矿智能化发展尚处于初期阶段,智能化煤矿安全评价势在必行。

传统综采工作面依赖大量工人实时跟机操作完成采煤工序,井下工作环境复杂,管理难度大。智能化综采工作面在远程信息采集、局域网快速传输、人工智能判断与决策、电液控制等技术与装备的前提下,采用人工智能算法与程序判断决策技术,使综采工作面设备具有自感知、自判断、自决策、自运行、故障自诊断的能力^[2-3]。两种综采工作面在人、机、环、管4个方面都有很大差别:传统综采工作面工人数量多,劳动强度大,难以吸引高端人才,工人普遍学历低,而智能化综采工作面工人数量少,学历较高,学习能力强,实现人工干预为辅,无人跟机作业;传统综采工作面工人实时跟机操作,采煤机割煤,液压支架升、降、推、移都需工人实时跟机操作,而智能化工作面设备自动化作业,采煤机记忆截割、自动找直工作面,液压支架自动移架、升降等;传统综采工作面随着采深和开采强度加大,工作条件变得更加复杂,而智能化工作面配备各种传感器对矿压、瓦斯、通风等进行实时监测,并实时传输数据,生成可行性报告,为决策者提供决策依据和帮助;传统综采工作面管理制度单一,生产效率低,而智能化综采工作面借助数字化管理将人、设备、环境有机结合起来,使管理高效快捷^[4]。

由以上分析可知,两种综采工作面都具有系统性的特点,即由人、机、环、管4个子系统组成。在这4个方面两者既有相同又有差别,通过对比,可在传统综采工作面安全评价的指标体系基础上删减或增加相应指标,建立与智能化综采工作面

相匹配的评价指标体系。

目前,传统综采工作面安全评价已经相对成熟。国内外大量学者利用神经网络法^[5]、灰色关联法^[6]、层次分析法^[7]、事故树法^[8]等对传统综采工作面进行安全评价研究,并取得良好效果,但各种方法都存在一定局限性:神经网络法和灰色关联法在确定指标权重时,无法避免主观因素影响;层次分析法和事故树法在样本较多时计算步骤繁杂。为避免主观因素影响和简化计算步骤,本文采用熵权法^[9]确定指标权重。因智能化综采工作面与传统综采工作面环境都具有动态性与复杂性,故本文引用可拓理论^[10-12]提高评价对象隶属集合的程度,可精确掌握其所属安全等级。运用熵权-可拓理论可在评价体系层次过低、因素较多时使评价结果更加客观准确,从而避免评价结果的片面性和模糊性,以期对智能化综采工作面安全状况进行科学评估并提出针对性建议。

1 熵权-物元可拓模型建立

1.1 评价指标物元

可拓学理论引入物元概念作为描述事物的基本因素。 N 为待评事物, c 为事物的特征, v 为事物关于该特征的量值,组成有序三元组,记为 $\mathbf{R} = (N, c, v)$ 。假设事物 N 有 n 个评价指标,并且将评价指标分为 m 个等级,则经典域表示为

$$\mathbf{R}_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & v_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & [a_{j1}, b_{j1}] \\ & c_2 & [a_{j2}, b_{j2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & [a_{ji}, b_{ji}] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: N_j 为安全等级, $j = 1, 2, 3, \dots, m$; c_i 为评价指标, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; v_{ji} 为 j 等级中第 i 个评价指标的量值区间; a_{ji} 和 b_{ji} 分别为评价指标在安全等级量值区间内的最小值和最大值。

安全评价指标的允许取值范围确定节域为

$$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & v_{pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & [a_{p1}, b_{p1}] \\ & c_2 & [a_{p2}, b_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & [a_{pi}, b_{pi}] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: N_p 为安全评价等级 P 的评价对象; v_{pi} 为 P 关于指标 c_i 的量值范围; a_{pi} 和 b_{pi} 分别为安全评价等级全体对应评价指标量值区间内的最小值和最大值。

将待评价的智能综采工作面假设为评价对象 P , 收集到的指标数据为

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & v_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: P 为评价对象; c_i 为评价对象 P 的评价指标; v_i 为关于指标 c_i 的实际测量值。

1.2 原始数据矩阵归一化处理

不同指标有不同的量纲, 对节域 \mathbf{R}_p 和待评物元 \mathbf{R}_0 进行归一化处理, 即

$$\mathbf{R}_p' = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & \left[\frac{a_{j1}}{b_{p1}}, \frac{b_{j1}}{b_{p1}} \right] \\ & c_2 & \left[\frac{a_{j2}}{b_{p2}}, \frac{b_{j2}}{b_{p2}} \right] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & \left[\frac{a_{ji}}{b_{pi}}, \frac{b_{ji}}{b_{pi}} \right] \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_0' = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & \frac{v_1}{b_{p1}} \\ & c_2 & \frac{v_2}{b_{p2}} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & \frac{v_i}{b_{pi}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

1.3 安全评价指标关联计算

安全评价指标关联计算式为

$$D_j(V_i) = \begin{cases} \frac{\rho(V_i, V_{ji})}{\rho(V_i, V_{pi}) - \rho(V_i, V_{ji})}, & V_k \notin V_{0jk} \\ \frac{-\rho(V_i, V_{ji})}{|V_{ji}|}, & V_k \in V_{0jk} \end{cases}, \quad (5)$$

式中, $D_j(V_i)$ 为安全值下的关联度, 点 V_i 与经典域之间“距离”为

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

其中, $|V_{ji}| = |b_{ji} - a_{ji}|$, 点 V_i 与节域之间的“距离”为

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

1.4 熵权法确定各指标权重

根据智能化综采工作面安全评价指标的关联系数 $D_j(V_i)$ 构建判断矩阵, 将其归一化后得 $\mathbf{R} = (r_{ji})_{m \times n}$, 其中, $j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n$ 。得到各指标的均值后, 计算信息熵, 其式为

$$H_i = -\frac{\sum_{j=1}^m (f_{ji} \ln f_{ji})}{\ln n}, \quad (6)$$

$$w_i = \frac{(\ln m - H_i)}{\sum_{k=1}^m (\ln m - H_k)}, \quad (7)$$

式中: H_i 为第 i 个指标的信息熵; $1/\ln n$ 为熵的系数; f_{ji} 为第 j 个评价对象的第 i 个指标均值与其全部指标均值之和的比。当 $f_{ji} \leq 0$ 时, $\ln f_{ji}$ 无意义, 所以利用式 $f_{ji} = \frac{(1 + r_{ji})}{\sum_{j=1}^m (1 + r_{ji})}$ 对 f_{ji} 进行修正。

1.5 确定智能化综采工作面安全等级

计算智能化综采工作面安全物元 N 关于等级 j 的关联度,

$$k_j(P) = \sum_{i=1}^n w_i D_j(v_i). \quad (8)$$

关联度表征两个事物之间关联程度, 关联值越接近 1, 说明关联度越高。遵循关联度最大原则, 由式(9)可知, 智能化综采工作面安全物元 N 所属的安全等级

$$K_j(P_0) = \max K_j(P). \quad (9)$$

由式(10)~(11)可得待评物元 \mathbf{R}_0 的等级变量特征值 j^* ,

$$\bar{K}_j(P_0) = \frac{K_j(P) - \min K_j(P)}{\max K_j(P) - \min K_j(P)}, \quad (10)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \cdot \bar{K}_j(P_0)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(P_0)}. \quad (11)$$

式中, j^* 为物元 P 的级别变量特征值, 即离散程度, 可判断 \mathbf{R}_0 偏向相邻安全等级的程度, 使评价结果更准确合理。

2 安全评价案例分析

2.1 指标体系建立

以山西某煤矿智能化综采工作面 8222 为案例分析对象, 该工作面总长 2 644.5 m, 煤层厚度 8.17~29.21 m, 倾角 2°, 赋存稳定; 煤层自然发火期约为 3 个月; 粉尘具有爆炸危险性, 低瓦斯, 无地压, 无高温热害区, 煤炭总储量 11 480 381 t。

此工作面在单机设备自动化和综合自动化的基础上,建立一套以监控中心为核心,以工作面视频、以太网、音频、远程控制为基础的智能化集中控制系统,可在监控中心对液压支架、采煤机、刮板输送机综采设备实时远程控制,使工人从采煤工作面转移到安全的运输巷监控中心^[13-14]。其智能化控制系统、可视远程监控系统分别如图1和2所示。

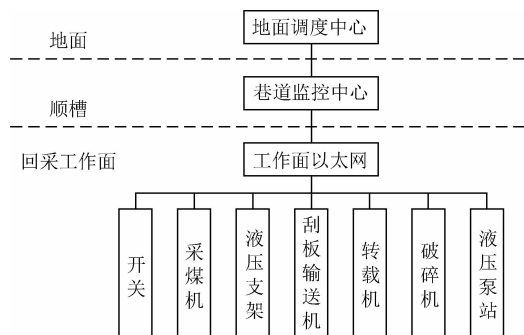


图1 智能化控制系统

Fig. 1 Intelligent control system

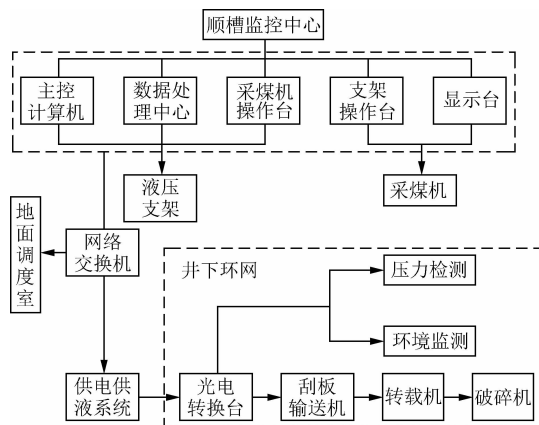


图2 可视远程监控系统

Fig. 2 Visual remote monitoring system

智能化综采工作面安全评价指标体系如表1所示,具体分析如下。

人:由传统综采工作面到智能化综采工作面的升级,需要根据智能化综采工作面的特点与需求录用专业对口和学历较高的应聘者,并培训相关工作人员的技能,提高工作人员的安全意识与作业能力^[15]。

机:与传统综采工作面的工人跟机操作不同,智能化综采工作面的智能感知系统、集中控制系统、工业视频监控系统、网络通信系统等子系统基于互联网相互联系共同运作,实现了工作面智能控制与安全监测稳定运行,同时保证设备和安全防护设施的完好率^[16]。

环:工作面环境分为作业环境和地质环境。粉尘、温度、湿度、照明度等为作业环境,作业环境

表1 智能化综采工作面安全评价指标体系

Tab.1 Safety evaluation index system of intelligent working face

目标层	准则层	指标层
人员因素 P_1		专业知识水平 c_1
		受教育年限 c_2
		从事智能化工作平均工龄 c_3
		月平均培训时间 c_4
		智能化设备操作水平 c_5
机器因素 P_2		感知系统稳定性 c_6
		工业环网通信系统稳定性 c_7
		工业视频监控系统稳定性 c_8
		集中控制系统稳定性 c_9
		设备完好率 c_{10}
		安全防护设施完善率 c_{11}
		电磁环境复杂度 c_{12}
		年度风量超限时间 c_{13}
		年度湿度超限时间 c_{14}
		年度温度超限时间 c_{15}
环境因素 P_3		照明度 c_{16}
		粉尘最大质量浓度 c_{17}
		瓦斯体积分数 c_{18}
		煤层倾角 c_{19}
		煤层最短发火期 c_{20}
		煤层稳定性 c_{21}
		顶底板可靠性 c_{22}
		吨煤安全投入资金 c_{23}
		每班次工人数 c_{24}
		员工考核与测评合格率 c_{25}
管理因素 P_4		信息系统运行管理规程完善率 c_{26}
		三违率 c_{27}
		安全规章制度完善率 c_{28}

恶劣,会增加工人不适感,危害身心健康,从设备角度看会影响系统的有效运行。地质环境中煤层倾角、煤层最短发火期、煤层稳定性等都存在安全隐患,威胁工人与设备的安全^[17-18]。

管:一是工人管理,由于人具有不确定性,故须制定与智能化综采工作面相匹配的安全规章制度和管理条例,对工作人员进行约束,降低三违率;二是设备管理,严格按照生产厂家规定的维修与维护标准对设备进行检修与维护,提高设备可靠性;三是软件与数据信息管理,制定信息系统运行管理规程,保护软件和数据信息的安全;四是环境管理,地质环境和作业环境的管理必须符合煤矿安全生产标准,提高生产安全系数^[19-20]。

基于科学性、系统性和可操作性原则,在传统综采工作面安全评价指标体系和以往开展评价工作的基础上,参照煤矿安全评价的相关文献^[9,12,21-23],根据智能化综采工作面特征,确定智能化综采工作面安全评价指标体系,见表1。

2.2 确定经典域与节域及待评物元

由表1并结合参考文献和工作面实际情况,

$$R = \begin{matrix} N \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \\ c_9 \\ c_{10} \\ c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{14} \\ c_{15} \\ c_{16} \\ c_{17} \\ c_{18} \\ c_{19} \\ c_{20} \\ c_{21} \\ c_{22} \\ c_{23} \\ c_{24} \\ c_{25} \\ c_{26} \\ c_{27} \\ c_{28} \end{matrix} \begin{matrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.84,1.00) & (0.63,0.84) & (0.47,0.63) & (0.32,0.47) & (0.00,0.32) \\ (0.75,1.00) & (0.50,0.75) & (0.25,0.50) & (0.05,0.25) & (0.00,0.05) \\ (0.82,1.00) & (0.64,0.82) & (0.45,0.64) & (0.27,0.45) & (0.09,0.27) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.00,0.15) & (0.15,0.35) & (0.35,0.65) & (0.65,0.85) & (0.85,1.00) \\ (0.00,0.20) & (0.20,0.40) & (0.40,0.60) & (0.60,0.80) & (0.80,1.00) \\ (0.00,0.20) & (0.20,0.40) & (0.40,0.60) & (0.60,0.80) & (0.80,1.00) \\ (0.00,0.20) & (0.20,0.40) & (0.40,0.60) & (0.60,0.80) & (0.80,1.00) \\ (0.83,1.00) & (0.67,0.83) & (0.60,0.67) & (0.50,0.60) & (0.33,0.50) \\ (0.17,0.33) & (0.33,0.50) & (0.50,0.67) & (0.67,0.83) & (0.83,1.00) \\ (0.00,0.20) & (0.20,0.40) & (0.40,0.60) & (0.60,0.80) & (0.80,1.00) \\ (0.01,0.09) & (0.09,0.28) & (0.28,0.50) & (0.50,0.83) & (0.83,1.00) \\ (0.75,1.00) & (0.58,0.75) & (0.42,0.58) & (0.25,0.42) & (0.08,0.25) \\ (0.00,0.20) & (0.20,0.40) & (0.40,0.60) & (0.60,0.80) & (0.80,1.00) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.85,0.90) & (0.80,0.85) & (0.70,0.80) \\ (0.80,1.00) & (0.60,0.80) & (0.47,0.60) & (0.33,0.47) & (0.00,0.33) \\ (0.33,0.47) & (0.47,0.60) & (0.60,0.73) & (0.73,0.87) & (0.87,1.00) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \\ (0.10,0.20) & (0.20,0.40) & (0.40,0.60) & (0.60,0.80) & (0.80,1.00) \\ (0.95,1.00) & (0.90,0.95) & (0.80,0.90) & (0.70,0.80) & (0.60,0.70) \end{matrix}, \quad (12); R_0 = \begin{matrix} N & B \\ c_1 & 0.910 \\ c_2 & 0.864 \\ c_3 & 0.435 \\ c_4 & 0.864 \\ c_5 & 0.917 \\ c_6 & 0.910 \\ c_7 & 0.970 \\ c_8 & 0.950 \\ c_9 & 0.960 \\ c_{10} & 0.980 \\ c_{11} & 0.970 \\ c_{12} & 0.220 \\ c_{13} & 0.885 \\ c_{14} & 0.041 \\ c_{15} & 0.003 \\ c_{16} & 0.400 \\ c_{17} & 0.250 \\ c_{18} & 0.300 \\ c_{19} & 0.022 \\ c_{20} & 0.250 \\ c_{21} & 0.300 \\ c_{22} & 0.910 \\ c_{23} & 0.667 \\ c_{24} & 0.433 \\ c_{25} & 0.900 \\ c_{26} & 0.950 \\ c_{27} & 0.185 \\ c_{28} & 0.930 \end{matrix}, \quad (13)$$

2.3 确定每个指标与各安全等级的关联度

由式(5)求出各指标关于各安全等级的关联度,关联度为各指标和各安全等级的相关程度,关联度越大说明相关性越大,关联度越小,说明相关性越小。其中 $D_j(V_i)$ ($j=1,2,\dots,5, i=1,2,\dots,28$) 为第 i 个指标关于等级 j 的关联度,根据最大值原则,选取关联度最大值。以样本中的指标 c_1 为例,指标 c_1 关于 5 个安全等级的关联度分别为 $D_1(V_1) = -0.308$, $D_2(V_1) = 0.200$, $D_3(V_1) = -0.100$, $D_4(V_1) = -0.550$, $D_5(V_1) = -0.700$ 。由指标大小可以看出,该指标关于 5 个

根据综合评判法,将采矿安全分为 5 个等级^[9-12],即 I (安全)、II (较安全)、III (中等安全)、IV (较不安全)、V (不安全)。工作面安全评价指标实测值及分类标准如表 2 所示,并根据式(4)将表 2 中的数据进行归一化处理,建立经典域 R_j 和待评物元 R_0 ,如式(12)~(13)所示。

安全等级的关联度最大值 $D_2(V_1) = 0.200$,属于等级 II,较安全,其余各指标与安全等级关联度详见表 3。

2.4 确定评价指标权重

由式(6)~(7)求得各指标层指标权重,如表 3 所示。下层权重相加得上层权重,人员因素权重 $W_1 = 0.012 + 0.025 + 0.006 + 0.027 + 0.015 = 0.085$;同理机器因素的权重 $W_2 = 0.222$,环境因素权重 $W_3 = 0.572$,管理因素权重 $W_4 = 0.123$ 。由此可见环境因素对安全影响最为显著,人员因素对安全影响最小。

表2 智能化综采工作面安全评价指标数据及分类

Tab.2 Safety evaluation index data and its classification of the intelligent working face

指标	样本数据	工作面安全状态等级				
		I	II	III	IV	V
c_1	91.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_2	16.4	(16,19]	(12,16]	(9,12]	(6,9]	[0,6]
c_3	8.7	(15,20]	(10,15]	(5,10]	(1,5]	[0,1]
c_4	9.5	[9,11)	[7,9)	[5,7)	[3,5)	[1,3)
c_5	91.7	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_6	91.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_7	97.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_8	95.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_9	96.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_{10}	98.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_{11}	97.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_{12}	0.2	(0,0.15]	(0.15,0.35]	(0.35,0.65]	(0.65,0.85]	(0.85,1]
c_{13}	177.0	[0,200)	[200,400)	[400,600)	[600,800)	[800,1000)
c_{14}	41.0	[0,200)	[200,400)	[400,600)	[600,800)	[800,1000)
c_{15}	3.0	[0,200)	[200,400)	[400,600)	[600,800)	[800,1000)
c_{16}	120.0	(250,300]	(200,250]	(180,200]	(150,180]	[100,150]
c_{17}	3.0	[2,4)	[4,6)	[6,8)	[8,10)	[10,12)
c_{18}	0.03	[0,0.02)	[0.02,0.04)	[0.04,0.06)	[0.06,0.08)	[0.08,0.1)
c_{19}	2.0	[1,8)	[8,25)	[25,45)	[45,75)	[75,90)
c_{20}	3.0	[9,12)	[7,9)	[5,7)	[3,5)	[1,3)
c_{21}	0.3	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0)
c_{22}	91.0	(95,1]	(90,95]	(85,90]	(80,85]	(70,80]
c_{23}	10.0	(12,15]	(9,12]	(7,9]	(5,7]	[0,5]
c_{24}	6.5	[5,7]	[7,9]	[9,11]	[11,13]	[13,15]
c_{25}	90.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_{26}	95.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]
c_{27}	3.7	[2,4]	[4,8)	[8,12)	[12,16)	[16,20]
c_{28}	93.0	(95,100]	(90,95]	(80,90]	(70,80]	[60,70]

注:样本由研究团队自行取得,不代表官方数据,仅用于验证本文所研究的评价方法

2.5 智能化综采面综合关联度及特征值

借助 MATLAB 软件由式(8)求出加权后的关联度,由式(10)~(11)计算出样本的等级变量特征值 j^* ,如表4所示。

由最大关联度原则可得样本的安全等级为等级 I “安全”。样本的等级变量特征值 $j^* = 1.495$,可知样本安全等级介于 I “安全”与 II “较安全”之间,但偏向 I “安全”状态。在确定物元安全评价等级为 I “安全”后,由指标层向目标层逐级逆向分析。由表3可知,人员因素关联度值为 -0.619 ;同理机器因素关联度为“1.092”;环

境因素关联度为“ -2.634 ”;管理因素关联度为“ -0.426 ”,可知环境因素关联度最小,则环境因素是影响安全等级的关键,故应加强环境管理。其中环境因素中“风量超限时间(-0.856)”、“照明度(-0.860)”等关联度相对较小,而风量与温度、瓦斯等指标具有重要的影响作用,照明度对工人的工作效率和安全影响极大,同时影响视频监控系统等的有效运行,故应加强这两方面的维修与管控,提高煤矿安全等级。

采用熵权-可拓模型评价方法对智能化综采工作面8222进行安全评价,得到结论:该工作面

表 3 智能化综采工作面安全评价各指标与安全等级的关联度及权重

Tab. 3 Correlation degree and weight of each index and safety grade of safety evaluation of intelligent working face

准则层	指标层	关联度					权重 W
		I	II	III	IV	V	
人员因素	专业知识水平 c_1	-0.308	0.200	-0.100	-0.550	-0.700	0.012
	受教育年限 c_2	0.150	-0.150	-0.632	-0.743	-0.800	0.025
	从事智能化工作平均工龄 c_3	-0.420	-0.130	0.260	-0.298	-0.470	0.006
	月平均培训时间 c_4	0.244	-0.244	-0.622	-0.753	-0.814	0.027
	智能化设备操作水平 c_5	-0.285	0.340	-0.170	-0.585	-0.723	0.015
机器因素	感知系统稳定性 c_6	-0.308	0.200	-0.100	-0.550	-0.700	0.012
	工业环网通信系统稳定性 c_7	0.400	-0.400	-0.700	-0.850	-0.900	0.046
	工业视频监控系統稳定性 c_8	0.000	0.100	-0.500	-0.750	-0.833	0.023
	集中控制系统稳定性 c_9	0.200	-0.200	-0.600	-0.800	-0.867	0.031
	设备完好率 c_{10}	0.400	-0.600	-0.800	-0.900	-0.933	0.064
	安全防护设施完备率 c_{11}	0.400	-0.400	-0.700	-0.850	-0.900	0.046
	电磁环境复杂度 c_{12}	-0.241	0.350	-0.371	-0.662	-0.741	0.019
	年度风量超限时间 c_{13}	-0.856	-0.808	-0.713	-0.425	0.425	0.041
	年度湿度超限时间 c_{14}	0.205	-0.795	-0.898	-0.932	-0.949	0.083
	年度温度超限时间 c_{15}	0.015	-0.985	-0.993	-0.995	-0.996	0.168
环境因素	照明度 c_{16}	-0.860	-0.794	-0.741	-0.588	0.412	0.044
	粉尘最大质量浓度 c_{17}	0.500	-0.500	-0.758	-0.840	-0.879	0.051
	瓦斯体积分数 c_{18}	-0.250	0.500	-0.250	-0.500	-0.625	0.014
	煤层倾角 c_{19}	0.150	-0.850	-0.956	-0.976	-0.985	0.115
	煤层最短发火期 c_{20}	-0.746	-0.660	-0.500	0.000	0.000	0.016
	煤层稳定性 c_{21}	-0.250	0.500	-0.250	-0.500	-0.625	0.014
	顶底板可靠性 c_{22}	-0.301	0.200	-0.100	-0.400	-0.550	0.007
管理因素	吨煤安全投入资金 c_{23}	-0.285	0.335	-0.168	-0.372	-0.503	0.007
	每班次工人数 c_{24}	0.264	-0.264	-0.619	-0.743	-0.809	0.027
	员工考核与测评合格率 c_{25}	-0.333	0.000	0.000	-0.500	-0.667	0.009
	信息系统运行管理规程完善率 c_{26}	0.000	0.000	-0.500	-0.750	-0.833	0.023
	三违率 c_{27}	0.150	-0.150	-0.717	-0.830	-0.879	0.037
	安全规章制度完善率 c_{28}	-0.222	0.400	-0.300	-0.650	-0.767	0.020

表 4 加权后的关联度及变量特征值

Tab. 4 Weighted correlation degree and characteristic value of variables

加权后的 关联度	安全等级					变量特征值 j^*
	I	II	III	IV	V	
$K_j(p)$	0.03	-0.50	-0.72	-0.80	-0.76	1.495

存在环境管理不善的问题,即风量超限和照明度不足等。为验证评价结果的准确性,后期进行了问卷调查,对在工作面和运输巷的 50 名工人进行“工作面风量满意度”的问卷调查,有 47 人对风量不满。对工作面、运输巷和地面调度室的 50 名工作人员进行“工作面光照满意度”的问卷调查,

有 49 人对照明度不满。工人反映由于风量过大造成粉尘质量浓度过大,影响工人呼吸及眼部不适;由于光照度不足,后部刮板输送机的视频监控不够清晰,工人在照明度较低环境中工作身体不适或工作效率低等。智能化综采工作面 8222 在改善这两方面不足后,工作面环境状况得到明显改善,提高了工作面安全等级及生产效率,使工作面安全和效益得以保障。

3 结 论

(1)通过对比传统和智能化综采工作面系统特征,系统分析了综采工作面智能化背景下的安

全要素及危险源,从人、机、环、管4个方面选取28项指标建立安全评价指标体系。其中,相比于传统综采工作面,智能化综采工作面应着重考虑智能设备、环境管理等指标。

(2)基于熵权-可拓理论构建了安全评价计算模型。熵权法可合理分配指标权重,避免指标权重确定的主观性;物元可拓分析法能够逐级分析出各层指标与安全等级的相关性系数大小,从而准确计算智能化综采工作面的安全等级。

(3)采用MATLAB软件计算并评估了山西某矿智能化综采工作面8222的安全等级,根据关联度大小可知,环境因素对此工作面安全影响最为突出,与实际调研结果相符。

参考文献:

- [1] 林柏泉,常建华,翟成.我国煤矿安全现状及应当采取的对策分析[J].中国安全科学学报,2006,16(5):42-46.
LIN B Q, CHANG J H, ZHAI C. Analysis on coal mine safety situation in China and its countermeasures[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(5): 42-46.
- [2] 范京道,王国法,张金虎,等.黄陵智能化无人工作面开采系统集成设计与实践[J].煤炭工程,2016,48(1):84-87.
FAN J D, WANG G F, ZHANG J H, et al. Integrated design and practice of mining system in Huangling intelligent unmanned working face[J]. Coal Engineering, 2016, 48(1): 84-87.
- [3] 王国法,王虹,任怀伟,等.智慧煤矿2025情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295-305.
WANG G F, WANG H, REN H W, et al. Scenario goal and development path of smart coal mine in 2025[J]. Acta Coal Sinica, 2018, 43(2): 295-305.
- [4] 何宁,杨昆.煤矿安全生产管理体系智能化研究[J].中国矿业,2020,29(8):82-85.
HE N, YANG K. Intelligent research on coal mine safety production management system[J]. China Mining, 2020, 29(8): 82-85.
- [5] HE R J, DU Y H. Application of improved particle-swarm-optimization neural network in coal mine safety evaluation[J]. Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 423(1): 25-27.
- [6] 陈兆波,雷煜斌,曾建潮,等.煤矿安全事故人因的灰色关联分析[J].煤炭工程,2015,47(4):145-148.
CHEN Z B, LEI Y B, ZENG J C, et al. Grey correlation analysis of human factors in coal mine safety accidents[J]. Coal Engineering, 2015, 47(4): 145-148.
- [7] 董四辉,宿博.层次分析法的改进方法在煤矿安全评价中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(5):690-694.
DONG S H, SU B. Application of improved analytic hierarchy process in coal mine safety evaluation[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, 31(5): 690-694.
- [8] 王长申,孙亚军,杭远.基于事故树分析的煤矿潜在突水危险评价研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):298-305.
WANG C S, SUN Y J, HANG Y. Study on potential water inrush risk assessment of coal mine based on fault tree analysis[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 298-305.
- [9] 李希建,华攸金,陈刘瑜.基于熵权物元可拓模型的煤矿安全评价及其应用[J].矿业研究与开发,2019,39(9):93-99.
LI X J, HUA Y J, CHEN L Y. Coal mine safety evaluation and its application based on entropy weight matter-element extension model[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(9): 93-99.
- [10] 蔡文.可拓论及其应用[J].科学通报,1999,44(7):673-682.
CAI W. Extension theory and its application[J]. Science Bulletin, 1999, 44(7): 673-682.
- [11] 李东印.科学采矿评价指标体系与量化评价方法[D].焦作:河南理工大学,2012.
LI D Y. Evaluation index system and quantitative evaluation method of scientific mining[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.
- [12] 杨玉中,吴立云,景国勋.基于可拓理论的综采工作面安全性评价[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(2):180-183.
YANG Y Z, WU L Y, JING G X. Safety evaluation of fully mechanized mining face based on extension theory[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(2): 180-183.
- [13] 王强.同忻煤矿8202特厚煤层智能化综放工作面探究[J].能源与节能,2018(9):39-41.
WANG Q. Research on intelligent fully mechanized caving face of 8202 extra thick coal seam in Tongxin coal mine[J]. Energy and Energy Saving, 2018(9): 39-41.
- [14] 王国法,庞义辉.综采技术与装备集成配套设计创新与实践[J].煤炭工程,2018,50(5):1-5.
WANG G F, PANG Y H. Design innovation and practice of comprehensive mining technology and equipment integration and matching[J]. Coal Engineering, 2018, 50(5): 1-5.
- [15] 雷照源,姚一龙,肖曲.智能化工作面“人的安全行

- 为”管理[J]. 陕西煤炭,2019,38(2):179-182.
- LEI Z Y, YAO Y L, XIAO Q. The management of human safety behavior in intelligent mining face [J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(2):179-182.
- [16] 任毅. 放顶煤综采工作面人-机-环境系统可靠性分析实例[J]. 技术与市场, 2015, 22(7):132-133.
- REN Y. Example of reliability analysis of man-machine-environment system in fully mechanized caving face [J]. Technology and Market, 2015, 22(7):132-133.
- [17] 郭林生. 基于监测参数分析的无人化综采工作面安全评价[D]. 西安:西安科技大学, 2016.
- GUO L S. Safety evaluation of unmanned fully mechanized mining face based on monitoring parameter analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [18] 景国勋, 柴艺, 阚中阳. 基于生理信号的照度水平对矿工影响研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9):309-312.
- JING G X, CHAI Y, KAI Z Y. Study on the influence of illumination level on miners based on physiological signal [J]. Coal Mine Safety, 2018, 49(9):309-312.
- [19] 邢呈呈. 煤矿智能化综采工作面管理平台设计[J]. 煤矿机电, 2019, 40(06):44-46.
- XING C C. Design of intelligent fully mechanized coal mining face management platform [J]. Coal Mine Electromechanical, 2019, 40(6):44-46.
- [20] 张鑫. 关于煤矿企业计算机智能化管理的模式探析[J]. 科技创业家, 2013(12):74.
- ZHANG X. Analysis on the mode of computer intelligent management in coal mining enterprises [J]. Science and Technology Entrepreneur, 2013(12):74.
- [21] 华攸金, 李希建. 基于可拓理论的煤矿安全风险预警与评估[J]. 煤炭工程, 2020, 52(1):163-168.
- HUA Y J, LI X J. Early warning and assessment of coal mine safety risk based on extension theory [J]. Coal Engineering, 2020, 52(1):163-168.
- [22] 周颖. 大倾角煤层长壁综采工作面安全评价研究[D]. 西安:西安科技大学, 2010.
- ZHOU Y. Study on safety evaluation of longwall fully mechanized mining face in large inclined seam [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [23] 廖和平, 邓洪中, 周志强, 等. 基于 Fuzzy AHP 的煤矿企业安全危机评估与预警[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(1):17-22.
- LIAO H P, DENG Q Z, ZHOU Z Q, et al. Security-crisis assessment and early warning for coal mining enterprise based on Fuzzy AHP [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2013, 28(1):17-22.

(责任编辑 李文清)