

张科学, 闫星辰, 何满潮, 等. 基于ANP-MEA模型的智能化开采工作面适应性评价研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(2): 023037

ZHANG Kexue, YAN Xingchen, HE Manchao, et al. Study on intelligent adaptability evaluation of intelligent coal mining working face based on ANP and matter-element extension model[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(2): 023037.

基于ANP-MEA模型的智能化开采工作面适应性评价研究

张科学^{1,2,3,4,5,6}, 闫星辰^{1,3,6}, 何满潮², 陈学习^{1,3,6}, 姜耀东⁴, 孙健东^{1,3,6}, 李 东^{1,3,6}, 王晓玲^{1,3,6}, 亢 磊^{1,3,6},
杨海江^{1,3,6}, 朱俊傲^{1,3,6}, 吴永伟^{1,3,6}, 李举然^{1,3,6}, 尹宇航^{1,3,6}

(1. 华北科技学院 河北省矿山智能化开采技术重点实验室, 北京 101601; 2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 3. 华北科技学院 智能化无人开采研究所, 北京 101601; 4. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 5. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 6. 华北科技学院 矿山安全学院, 北京 101601)

摘 要:为更好地解决煤矿智能化开采工作面适应性评价模型的关联性和模糊性问题,提出了由地质条件、开采技术条件、关键技术条件以及管理保障条件等4个一级影响因素及16个二级影响因素,构建的煤矿智能化开采工作面适应性评价指标体系,并建立了煤矿智能化开采工作面适应性ANP网络模型。将煤矿智能化开采工作面适应性评价等级划分为I级(好)、II级(较好)、III级(一般)和IV级(差)等4个等级。采用网络层次分析法(ANP)研究影响因素之间的相互联系,并使用YAANP软件计算得到煤矿智能化开采工作面适应性影响因素的权重。为有效降低个人因素对各影响因素评分的影响,将网络层次分析法与物元可拓模型相结合,对煤矿智能化开采工作面适应性影响因素进行评价,计算得到各影响因素的关联度及综合关联度,最后由综合关联度对煤矿智能化开采工作面适应性进行等级评定。将煤矿智能化开采工作面适应性ANP网络模型在陕西黄陵1号煤矿的810智能化工作面进行应用,得出该煤矿智能化开采工作面适应性综合关联度为 $K_1=0.06$, $K_2=-0.05$, $K_3=-0.61$, $K_4=-0.77$, 对应评价标准得到煤矿智能化开采工作面适应性评价等级为I级(好),分析结果与现场实际情况相吻合,说明构建的煤矿智能化开采工作面适应性ANP网络模型具有一定的可行性与科学性。

关键词:智能化开采;无人开采;智能化工作面;ANP;物元可拓模型;适应性

中图分类号:TD82

文献标志码:A

文章编号:2096-7187(2023)02-3037-10

Study on intelligent adaptability evaluation of intelligent coal mining working face based on ANP and matter-element extension model

ZHANG Kexue^{1,2,3,4,5,6}, YAN Xingchen^{1,3,6}, HE Manchao², CHEN Xuexi^{1,3,6}, JIANG Yaodong⁴,
SUN Jiandong^{1,3,6}, LI Dong^{1,3,6}, WANG Xiaoling^{1,3,6}, KANG Lei^{1,3,6}, YANG Haijiang^{1,3,6}, ZHU Jun'ao^{1,3,6},

收稿日期: 2022-06-27 修回日期: 2022-08-29 责任编辑: 许书阁

基金项目:中国科协科技智库青年人才计划资助项目(20220615ZZ07110397);深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(北京)开放基金资助项目(SKLGDEK1822);中央高校基本科研业务费资助项目(3142021007, 3142019009);国家自然科学基金资助项目(51804160);河北省自然科学基金资助项目(E2019508209);煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金资助项目(SKLCRSM16KFD08)

作者简介:张科学(1986—),男,河南永城人,教授,博士后,主要从事矿山智能化无人开采、冲击地压和巷道围岩控制等方面的研究工作。E-mail: zhkexue@163.com

通信作者:闫星辰(1997—),女,山西长治人,硕士研究生,主要从事矿山智能化无人开采等方面的研究工作。E-mail: yanxingchen0044@163.com

WU Yongwei^{1,3,6}, LI Juran^{1,3,6}, YIN Yuhang^{1,3,6}

(1. Hebei Key Laboratory of Mine Intelligent Unmanned Mining Technology, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Institute of Intelligent Unmanned Mining, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 4. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 5. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 6. School of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

Abstract : To better address the relevance and fuzzy problems in the adaptability evaluation model for intellectualized mining of coal mine working faces, this paper proposes an evaluation index system consisting of four primary influence factors (geological conditions, mining technical conditions, key technologies and security, and management conditions) and their corresponding 16 secondary influence factors. An adaptive ANP network model for intelligent mining face is established to evaluate the adaptability of coal mine working faces. The adaptability evaluation is divided into four grades: I (best), II (good), III (general), and IV (poor). The relationship between the influencing factors is studied using the network analytic hierarchy process (ANP) and the YAANP software is used to calculate the weight of the influencing factors. To reduce the influence of personal factors on the evaluation score, a combination of ANP and matter-element extension model is used to evaluate the factors affecting adaptability. The various influence factors are evaluated for correlation degree and relational grade, and the adaptability of intellectualized mining of coal mine working faces is rated through comprehensive correlation. The ANP network model is applied to analyze 810 intelligent working faces of Shaanxi Huangling No. 1 coal mine. The comprehensive correlation degree of adaptability of intelligent mining face is calculated as $K_1=0.06$, $K_2=-0.05$, $K_3=-0.61$, and $K_4=-0.77$. The evaluation grade of adaptability of intelligent coal mining working face is determined to be I (best) through comparison with the evaluation standard analysis. The analysis results are consistent with the actual situation on site, indicating the feasibility and scientific basis of the established ANP network model for adaptability of intellectualized mining of coal mine working faces.

Key words : intelligent mining ; unmanned mining ; intelligent working face ; ANP ; extension model of matter element ; adaptive

煤炭行业是我国的支柱性产业之一,其为我国的社会发展提供能源保障。近年来煤炭行业的智能化建设突飞猛进,2014年全国只有1个智能化采掘工作面,2015年增加到3个,到2021年末全国已经有687个智能化工作面(全国智能化采掘工作面数据如图1所示),其中,智能化采煤工作面431个,智能化掘进工作面256个。在智能化采掘工作面不断增加的同时,关于建设智能化煤矿的指南也陆续出台,2020年由八部委联合印发的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》开启了煤矿智能化发展的序幕;2021-06-05,在国家能源局等印发的《煤矿智能化建设指南(2021年版)》通知中指出:建成一批多种类型、不同模式的智能化煤矿,提升煤矿安全水平;2021-12-07,国家能源局印发《智能化示范煤矿验收管理办法(试行)》;2022-01-20,国家能源局编制的《2022年能源行业标准计划立项指南》

明确了能源行业高质量发展的规范和要求。煤炭行业必须要加速智能化发展,进行转型升级,这对我国煤炭产业整体升级具有重要意义。煤矿智能化是煤炭行业发展的必由之路。

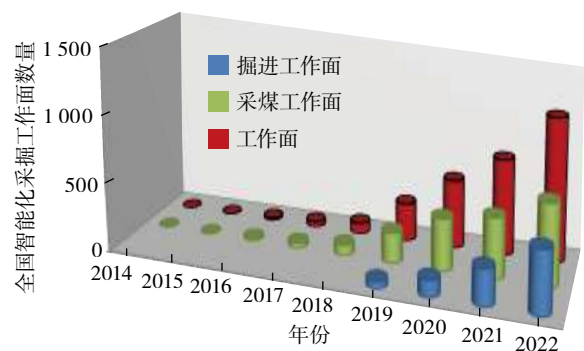


图1 全国智能化采掘工作面数据

Fig. 1 General data of intelligent mining face in China

我国学者针对煤矿智能化的研究已经取得诸多成果:王国法^[1-3]等详细阐述了煤矿智能化发展的

相关理论体系,分析了煤矿智能化相关技术的发展现状,并研究创建了智能化工作面的分类、分级评价指标体系;李首滨^[4]等归纳并分析了我国煤矿智能化开采的发展历程,将智能化开采分为4个阶段,并详细阐释了每一个阶段的内容;庞义辉^[5]等为智能综合保障系统构建了主体架构,对智慧煤矿建设的关键技术分别从基础理论、信息感知、数据处理、高效传输以及精准控制等方面进行了展望;葛世荣^[6]等回顾了智能化采煤技术的发展历程,系统地分析了智能采煤技术相关的研究与应用,并对未来有望突破的关键技术进行了展望;范京道^[7]等重点研究了复杂地质条件下薄、中厚和厚煤层的智能化无人综采的关键技术;丁恩杰^[8]等研究了智慧矿山的数字孪生、智能装备、智能感知等关键技术;王家臣^[9]等提出了2种去粉尘算法及基于AI等技术的智能图像采集系统,推动了图像识别在智能放煤相关领域的发展;杨春雨^[10]等研究了煤矿机器人环境感知及路径规划的相关技术;王学文^[11]等研究了综采工作面以VR及AR为基础的智能监控技术;马宏伟^[12]等研究了煤矿掘进类机器人的智能化协同技术;王鹏江^[13]等研究了针对悬臂式掘进机智能化截割煤矸的控制技术。在煤矿智能化评价方面也有诸多文献,张科学^[14-15]等提出了通过层次分析法、模糊综合评价法和灰色关联分析法等进一步对智能化无人开采工作面的适用性及智能化程度进行科学合理的评价;李东印^[16]等提出通过基于熵权与可拓理论相结合的方法构建针对安全评价的计算模型,为智能化综采工作面的安全评价提供了一种行之有效的思路;伍小沙^[17]等运用改进G1法和CRITIC法确定各个指标的主客观权重,并综合主客观的权重得到组合权重,再引入VIKOR评价模型对煤矿智能化程度进行了综合评价;郑功勋^[18]等提出通过AHP与Fuzzy相结合的评价方法,构造针对辅助系统智能化可靠性的评价模型对贵州煤矿进行了评价;于健浩^[19]等通过模糊综合评价法和层次分析法构建智能综采适应性评价模型,针对开采效能及安全性方面进行了评价。

由于我国煤矿智能化研究起步较晚,煤矿智能化评价标准体系还未完善,目前鲜有学者进行煤矿智能化开采工作面适应性方面的评价研究,亟需一种较为可靠的评价模型解决煤矿智能化适应性问题。目前综合评价法主要有层次分析法、模糊分析

法、灰色关联度分析法等,其中层次分析法应用最为广泛,得到较多学者的认可。层次分析法(AHP)是把所研究的问题按一定顺序分成不一样的层次结构,再算出各层次各元素的权重,最后通过加权求和的方法求得研究问题的权重^[20]。网络层次分析法(ANP)是在层次分析法的基础上增加不同层次的相互影响的分析而得出的一种新的系统决策方法。网络层次分析法运用“超矩阵”对这些因素综合分析得出他们的权重。笔者采用网络层次分析法与物元可拓模型相结合的方法,其可以有效减少个人因素对评价指标权重的影响,可为煤矿智能化适应性评价提供一种新的评价方法。

1 评价指标体系构建

在煤矿智能化评价指标体系的大框架下,参考已有的煤矿智能化评价文献^[21-24],学习并研究相关的政策文件,以及咨询相关专家后,笔者最终筛选、归纳出4个一级影响因素和16个二级影响因素作为评价指标。

(1) 地质条件 A_1 。主要包括煤层埋深 A_{11} ,煤层厚度 A_{12} ,煤层倾角 A_{13} ,煤层顶底板稳定性 A_{14} ,构造复杂度 A_{15} 。

(2) 开采技术条件 A_2 。主要包括巷道布置体系 A_{21} ,开采参数 A_{22} ,开采工艺 A_{23} 。

(3) 关键技术条件 A_3 ^[25-26]。其对煤矿智能化系统有较大影响,主要包括装备配套技术 A_{31} ,工作面调斜控制技术 A_{32} ,工作面调直控制技术 A_{33} ,工作面俯仰采控制技术 A_{34} ,工作面连续推进控制技术 A_{35} 。

(4) 管理保障条件 A_4 。其为煤矿智能化系统的关键一环,主要包括信息保障体系 A_{41} ,安全保障体系 A_{42} ,组织管理 A_{43} 。

2 评价模型构建

2.1 指标权重确定

针对影响因素间的相互依赖和反馈关系,选择使用网络层次分析法(ANP)研究煤矿智能化开采工作面适应性影响因素之间的相互联系并计算影响因素的权重。网络层次分析法是将待评目标的各个影响因素之间的相互联系用网络的方法来表示,网络层中的各个影响因素之间均有可能相互影响、支配。因此,用此方法可以更准确地表达客观事物之间的相互联系。ANP的典型结构是相互影响的网

络结构,由问题目标层、控制层及网络层组成^[27-28]。

笔者利用YAANP软件对评价指标的权重进行

计算,首先对上述评价指标体系建立煤矿智能化开采工作面适应性ANP网络模型,如图2所示。

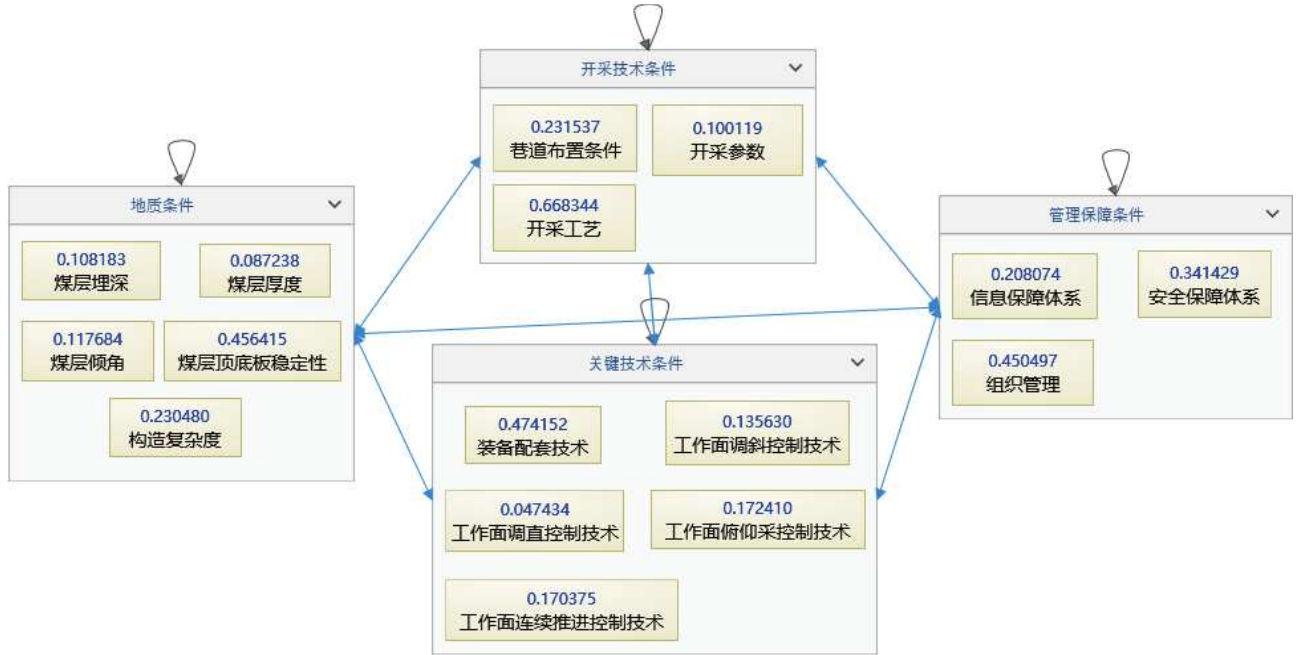


图2 YAANP软件构建的煤矿智能化开采工作面适应性ANP网络模型及其权重

Fig. 2 Adaptive ANP network model and its weight of intelligent coal mining face constructed by YAANP software

然后依据专家经验判断通过1-9标度法(1表示两个因素相比,具有相同重要性;3表示两个因素相比,前者比后者稍重要;5表示两个因素相比,前者比后者明显重要;7表示两个因素相比,前者比后者强烈重要;9表示两个因素相比,前者比后者极端重要;2,4,6,8表示上述相邻判断的中间值)对建立的模型中的二级影响因素进行两两比较,将比较结果在YAANP软件中进行选择,通过软件计算得出评价指标的权重如图2所示。

2.2 物元可拓模型

物元分析法是将一个事物记为 N ,事物的特征记为 C ,对于这个事物特征的量值记作 V ^[29]。物元分析法的基本单元(物元)就是将上述3个元素组合,构成有序三元组 $R=(N, C, V)$ 。如果事物 N 可以用 n 个特征 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 及对应的量值 $V_1, V_2, \dots, V_n$ 描述,则它的物元为

$$R=(N, C, V)=\begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_i & V_i \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$ 。

物元可拓模型就是将物元分析法和可拓学结

合起来,通过构造经典域及节域,再根据测得的数据计算出评价物元各指标的等级关联度,从而判断出待评目标的等级^[30-31]。

2.2.1 经典域、节域

假设用 N_j 表示待评事物 N 的第 j 个评价等级; C_i 表示评价等级 N_j 对应的评价指标(特征); V_{ji} 表示评价指标 C_i 所对应的等级取值范围 (a_{ji}, b_{ji}) ,即等级 N_j 关于对应的评价指标 C_i 所取的数据范围称为经典域 R_j :

$$R_j=\begin{bmatrix} N_j & C_1 & V_{j1} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_i & V_{ji} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{jn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_j & C_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_i & (a_{ji}, b_{ji}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设用 N_N 表示待评事物 N 的评价等级的全体, V_{Ni} 表示待评目标等级 N_N 关于指标 C_i 的取值范围。由此可得节域为

$$R_N=\begin{bmatrix} N_N & C_1 & V_{N1} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_i & V_{Ni} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{Nn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_N & C_1 & (a_{N1}, b_{N1}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_i & (a_{Ni}, b_{Ni}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{Nn}, b_{Nn}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2.2 待评物元

用 N_o 表示待评事物的评分,它所对应的指标及数值用物元表示为

$$R_o = \begin{bmatrix} N_o & C_1 & V_{o1} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_i & V_{oi} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{on} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, R_o 表示待评物元; V_{oi} 表示事物 N_o 关于指标 C_i 的量值,也即待评目标所对应指标的值。

2.2.3 待评事物各指标等级关联度的确定

$$K_j(V_{oi}) = \begin{cases} \frac{-\rho(V_{oi}, V_{ji})}{|V_{ji}|} & (V_{oi} \in V_{ji}) \\ \frac{\rho(V_{oi}, V_{ji})}{\rho(V_{oi}, V_{Ni}) - \rho(V_{oi}, V_{ji})} & (V_{oi} \notin V_{ji}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \rho(V_{oi}, V_{ji}) = \left| V_{oi} - \frac{1}{2}(a_{ji} + b_{ji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji}) \\ \rho(V_{oi}, V_{Ni}) = \left| V_{oi} - \frac{1}{2}(a_{Ni} + b_{Ni}) \right| - \frac{1}{2}(b_{Ni} - a_{Ni}) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中, $\rho(V_{oi}, V_{ji})$ 表示点与经典域区间的距离; $\rho(V_{oi}, V_{Ni})$ 表示点与节域区间的距离; V_{ji} 表示评价指标 C_i 所对应的量值范围, $|V_{ji}| = |a_{ji} - b_{ji}|$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

再利用网络层次分析法确定各个特征指标 C_i 的权重系数 λ_i ,则待评事物属于等级 N_o 的程度为

$$K_j(R_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i K_j(V_{oi}) \quad (7)$$

2.2.4 评级标准的确立

(1) 如果 $0 \leq K_j(R_o) < 1$,说明被评价指标属于某个等级,数值的大小表示符合等级的程度,数值越大,越接近该级标准。

(2) 如果 $-1 \leq K_j(R_o) < 0$,说明被评价指标不属于某个等级,但具有可转化为该级标准的条件。

(3) 如果 $K_j(R_o) < -1$,说明被评价指标不属于某个等级,且不具备转化为该级标准的条件。其数值越小,距离该级标准越远。

(4) 如果 $1 \leq K_j(R_o)$,说明被评价指标超过等级上限,且数值越大,开发潜力越大。

根据此评级标准,将煤矿智能化开采工作面适应性划分为4个等级:I级(好),II级(较好),III级(一般),IV级(差)。

3 实例分析

现对陕西黄陵1号煤矿的810智能化开采工作面适应性进行评价,并组织专家进行实地考察和调研。陕西黄陵1号煤矿810工作面位于井田八盘区西翼,北接掘进中的812工作面进风巷;西侧紧邻八盘区辅助运输巷;南侧为808工作面采空区;东侧为井田边界。810工作面的上覆地表是沟壑纵横的低山林区,可采长度1 950 m,宽度261 m。煤层厚度1.3 ~ 3.0 m,平均厚度约2.72 m,可采储量167万t。810工作面布置如图3所示。

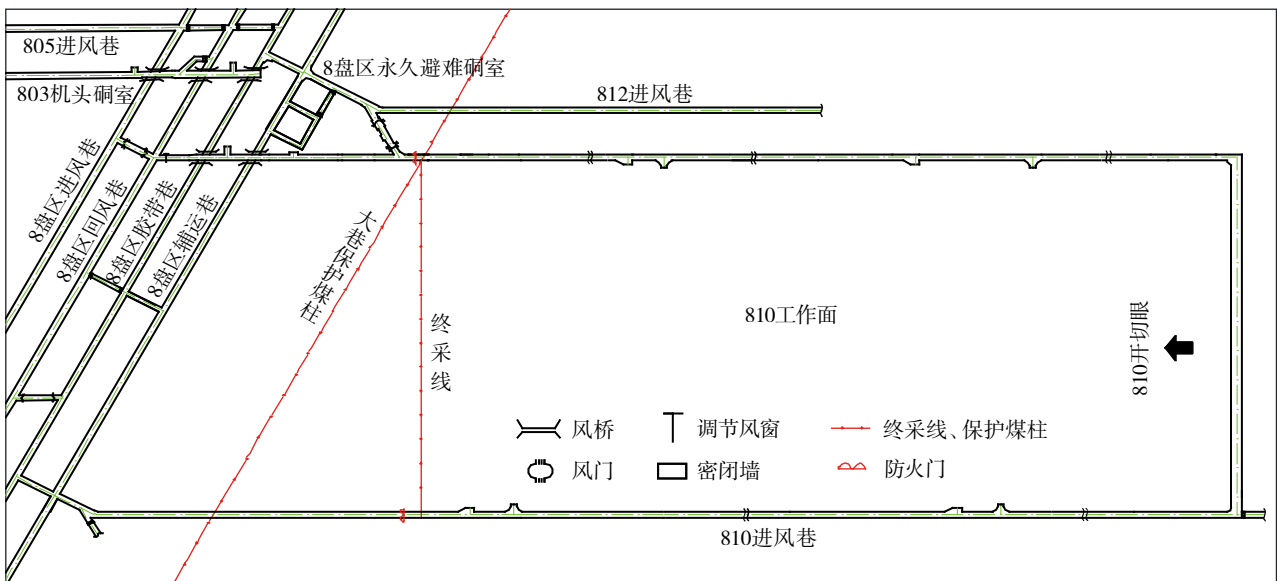


图3 810工作面布置

Fig. 3 810 face layout

对810工作面的相关指标逐一进行打分,再通过YAANP软件计算权重,进行归一化处理,智能化开采工作面适应性影响因素评价结果见表1。

3.1 经典域、节域及待评价物元的确定

以地质条件 A_1 的等级判定为例,根据表1的数据,确定经典域 R_j 、节域 R_N 及待评价物元 R_o 。

表1 智能化开采工作面适应性影响因素评价

Table 1 Evaluation table of influencing factors of intelligent adaptability of working face

一级因素	权重 ω_1	二级因素	权重 ω_2	好	较好	一般	差	评分
A_1	0.390 531	A_{11}	0.108 183	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	87
		A_{12}	0.087 238	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	85
		A_{13}	0.117 684	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	83
		A_{14}	0.456 415	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	93
		A_{15}	0.230 480	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	91
A_2	0.273 096	A_{21}	0.231 537	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	87
		A_{22}	0.100 119	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	89
		A_{23}	0.668 344	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	92
A_3	0.278 212	A_{31}	0.474 151	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	89
		A_{32}	0.135 630	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	91
		A_{33}	0.047 434	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	93
		A_{34}	0.172 410	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	92
		A_{35}	0.170 375	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	93
A_4	0.058 161	A_{41}	0.208 074	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	78
		A_{42}	0.341 429	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	89
		A_{43}	0.450 497	[90, 100]	[75, 90]	[60, 75]	[0, 60]	85

注:评价等级的取值范围在计算过程中存在交叉,若评分正好取在交叉取值上,在计算关联度时会存在与两个等级关联度一致的情况,结合智能化评价和现场对智能化评价打分情况,规定在确定评价等级时将其评定为两个交叉等级中较低一级。

具体如下:

$$\begin{aligned} R_1 &= \begin{bmatrix} N_1 & C_{11} & [90,100] \\ & C_{12} & [90,100] \\ & C_{13} & [90,100] \\ & C_{14} & [90,100] \\ & C_{15} & [90,100] \end{bmatrix} & R_N &= \begin{bmatrix} N_N & C_{11} & [0,100] \\ & C_{12} & [0,100] \\ & C_{13} & [0,100] \\ & C_{14} & [0,100] \\ & C_{15} & [0,100] \end{bmatrix} \\ R_2 &= \begin{bmatrix} N_2 & C_{11} & [75,90] \\ & C_{12} & [75,90] \\ & C_{13} & [75,90] \\ & C_{14} & [75,90] \\ & C_{15} & [75,90] \end{bmatrix} & R_o &= \begin{bmatrix} N_o & C_{11} & 87 \\ & C_{12} & 85 \\ & C_{13} & 83 \\ & C_{14} & 93 \\ & C_{15} & 91 \end{bmatrix} \\ R_3 &= \begin{bmatrix} N_3 & C_{11} & [60,75] \\ & C_{12} & [60,75] \\ & C_{13} & [60,75] \\ & C_{14} & [60,75] \\ & C_{15} & [60,75] \end{bmatrix} \\ R_4 &= \begin{bmatrix} N_4 & C_{11} & [0,60] \\ & C_{12} & [0,60] \\ & C_{13} & [0,60] \\ & C_{14} & [0,60] \\ & C_{15} & [0,60] \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3.2. 关联度的计算

由式(5)~(7),计算出地质条件 A_1 的关联度,并判断出评价等级,结果见表2。

同理,可以求得开采技术条件 A_2 、关键技术条件 A_3 以及管理保障条件 A_4 的综合关联度并得出相应的评价等级,结果见表2。

由二级影响因素关联度得出一级影响因素的关联度及评价等级,从而计算得到煤矿智能化开采工作面适应性评价的综合关联度,最终判定煤矿智能化开采工作面适应性的评价等级,结果见表3。

表2 二级影响因素关联度及评价等级
Table 2 Correlation degree and evaluation grade of second-order influencing factors

特征指标	权重	关联度 K_1	关联度 K_2	关联度 K_3	关联度 K_4	评价等级
A_{11}	0.108 183	-0.19	0.20	-0.48	-0.68	II
A_{12}	0.087 238	-0.25	0.33	-0.40	-0.63	II
A_{13}	0.117 684	-0.29	0.47	-0.32	-0.58	II
A_{14}	0.456 415	0.30	-0.30	-0.72	-0.83	I
A_{15}	0.230 480	0.10	-0.10	-0.64	-0.78	I
综合关联度		0.08	-0.05	-0.60	-0.76	I
A_{21}	0.231 537	-0.19	0.20	-0.48	-0.08	II
A_{22}	0.100 119	-0.08	0.07	-0.56	-0.73	II
A_{23}	0.668 344	0.20	-0.20	-0.68	-0.80	I
综合关联度		0.06	-0.06	-0.66	-0.83	I
A_{31}	0.474 151	-0.08	0.07	-0.56	-0.73	II
A_{32}	0.135 630	0.10	-0.10	-0.64	-0.78	I
A_{33}	0.047 434	0.30	-0.30	-0.72	-0.83	I
A_{34}	0.172 410	0.20	-0.20	-0.68	-0.80	I
A_{35}	0.170 375	0.30	-0.30	-0.72	-0.83	I
综合关联度		0.08	-0.08	-0.63	-0.77	I
A_{41}	0.208 074	-0.35	0.20	-0.12	-0.45	II
A_{42}	0.341 429	-0.08	0.07	-0.56	-0.73	II
A_{43}	0.450 497	-0.25	0.33	-0.40	-0.63	II
综合关联度		-0.21	0.21	-0.40	-0.63	II

表3 一级影响因素的关联度及评价等级
Table 3 Correlation degree and evaluation grade of the first-order influencing factors

特征指标	权重	关联度 K_1	关联度 K_2	关联度 K_3	关联度 K_4	评价等级
A_1	0.390 531	0.08	-0.05	-0.60	-0.76	I
A_2	0.273 096	0.06	-0.06	-0.66	-0.83	I
A_3	0.278 212	0.08	-0.08	-0.63	-0.77	I
A_4	0.058 161	-0.21	0.21	-0.40	-0.63	II
综合关联度		0.06	-0.05	-0.61	-0.77	I

根据煤矿智能化开采工作面适应性ANP网络评价模型计算得到810智能化开采工作面适应性的一级影响因素的关联度和综合关联度,综合关联度指数评价图如图4所示。

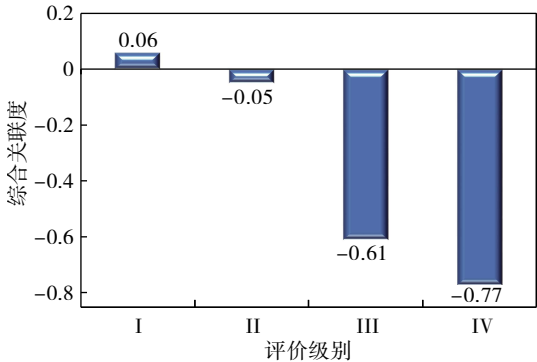


图4 810工作面智能化开采工作面适应性综合关联度
Fig. 4 Comprehensive correlation index of adaptability of 810 working face in intelligent mining

由于综合关联度 $K_1=0.06$, $-1 \leq K_3 < 0$, $-1 \leq K_4 < 0$, 最终判定煤矿810智能化开 $0 \leq K_1 < 1$, 且关联度 K_2, K_3, K_4 均符合 $-1 \leq K_2 < 0$, 采工作面适应性的等级为I级, 即810工作面的智能化适应性很好, 与煤矿智能化开采工作面实际情况相一致。810工作面的煤矿智能化开采工作面现场应用效果如图5所示。



采煤机运行状况



采煤机、刮板输送机运行状况



液压支架运行状况



工作面整体运行状况

图5 810工作面智能化开采工作面现场应用效果

Fig. 5 Field application effect of 810 working face intelligent mining

4 结 论

(1) 建立了由地质条件、开采技术条件、关键技术条件、管理保障条件等4个一级影响因素和16个二级影响因素组成的煤矿智能化开采工作面适应性评价指标体系,计算结果表明在煤矿智能化开采工作面适应性的影响因素中,地质条件占比较大。

(2) 运用ANP方法确定了影响因素权重,应用物元可拓法计算得到各影响因素的关联度,构建了基于ANP与物元可拓模型的煤矿智能化开采工作面适应性综合评价模型。通过实例分析,结果为好,与该工作面实际情况相一致,为煤矿智能化开采工作面适应性的评价提供了一种可行有效的新方法。

(3) 采用ANP方法结合物元可拓法进行煤矿工作面智能化适应性的评价,很好地解决了各评价指标之间存在的模糊性与关联性问题。

参考文献(References):

- [1] 王国法,刘峰,孟祥军,等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice of coal mine intelligence (primary stage)[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36.
- [2] 王国法,庞义辉,刘峰,等. 智能化煤矿分类、分级评价指标体系[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 1-13.
WANG Guofa, PANG Yihui, LIU Feng, et al. Intelligent coal mine classification and classification evaluation index system[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 1-13.
- [3] 王国法,徐亚军,孟祥军,等. 智能化采煤工作面分类、分级评价指标体系[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3033-3044.
WANG Guofa, XU Yajun, MENG Xiangjun, et al. Classification and classification evaluation index system of intelligent coal mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3033-3044.
- [4] 李首滨. 智能化开采研究进展与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 102-110.
LI Shoubin. Present situation and prospect on intelligent unmanned mining at work face[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 102-110.
- [5] 庞义辉,王国法,任怀伟. 智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 35-42.
PANG Yihui, WANG Guofa, REN Huaiwei. The key technology of smart coal mine main architecture design and system platform construction[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 35-42.
- [6] 葛世荣,郝尚清,张世洪,等. 我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 28-46.
GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Current status of my country's intelligent coal mining technology and key technologies to be broken through[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 28-46.
- [7] 范京道,徐建军,张玉良,等. 不同煤层地质条件下智能化无人综采技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 43-52.
FAN Jingdao, XU Jianjun, ZHANG Yuliang, et al. Intelligent unmanned fully-mechanized mining technology under conditions of different seams geology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 43-52.
- [8] 丁恩杰,俞啸,夏冰,等. 矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J/OL]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 564-578.
DING Enjie, YU Xiao, XIA Bing, et al. Development of mine informatization and key technologies of intelligent mines[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 564-578.
- [9] 王家臣,潘卫东,张国英,等. 图像识别智能放煤技术原理与应用[J/OL]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 87-101.

- WANG Jiachen, PAN Weidong, ZHANG Guoying, et al. Principles and applications of image-based recognition of withdrawn coal and intelligent control of drawing opening in longwall top coal caving face[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 87–101.
- [10] 杨春雨, 张鑫. 煤矿机器人环境感知与路径规划关键技术[J/OL]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2844–2872.
- YANG Chunyu, ZHANG Xin. A review: Key technologies of coal mine robots for environment perception and path planning[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2844–2872.
- [11] 王学文, 刘曙光, 王雪松, 等. AR/VR融合驱动的综采工作面智能监控关键技术研究及试验[J/OL]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 969–985.
- WANG Xuewen, LIU Shuguang, WANG Xuesong, et al. Key technologies research and test of intelligent monitoring and control driven by AR/VR for fully mechanized coal-mining face[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 969–985.
- [12] 马宏伟, 王鹏, 王世斌, 等. 煤矿掘进机器人系统智能并行协同控制方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2057–2067.
- MA Hongwei, WANG Peng, WANG Shibin, et al. Intelligent parallel cooperative control method of coal mine excavation robot system[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2057–2067.
- [13] 王鹏江, 杨阳, 王东杰, 等. 悬臂式掘进机煤矸智能截割控制系统与方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 1124–1134.
- WANG Pengjiang, YANG Yang, WANG Dongjie, et al. Intelligent cutting control system and method of coal and gangue in robotic roadheader[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 1124–1134.
- [14] 张科学, 王晓玲, 何满潮, 等. 智能化无人开采工作面适用性多层次模糊综合评价研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1): 013532.
- ZHANG Kexue, WANG Xiaoling, HE Manchao, et al. Research on multi-level fuzzy comprehensive evaluation of suitability of intelligent unmanned mining face[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 013532.
- [15] 张科学, 杨海江, 何满潮, 等. 基于灰色关联分析的工作面智能化程度综合评价[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 69–79.
- ZHANG Kexue, YANG Haijiang, HE Manchao, et al. Comprehensive evaluation of intelligent fully mechanized mining face based on grey relational analysis[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 69–79.
- [16] 李东印, 孙凯旋, 王伸, 等. 基于熵权-可拓理论的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.
- LI Dongyin, SUN Kaixuan, WANG Shen, et al. Study on safety evaluation of intelligent working face based on entropy weight approach[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2022, 41(3): 1–9.
- [17] 伍小沙, 田世祥, 袁梅, 等. 基于主客观赋权VIKOR法的煤矿智能化评价研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(4): 165–169.
- WU Xiaosha, TIAN Shixiang, YUAN Mei, et al. Research on coal mine intelligent evaluation based on subjective and objective weighting VIKOR method[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(4): 165–169.
- [18] 郑功勋, 李绍泉, 王建楠, 等. 基于AHP-Fuzzy的贵州煤矿辅助系统智能化可靠性评价[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(11): 121–129.
- ZHENG Gongxun, LI Shaoquan, WANG Jiannan, et al. Reliability evaluation of intelligent upgrading of auxiliary system in Guizhou coal mine[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(11): 121–129.
- [19] 于健浩, 祝凌甫, 徐刚. 煤矿智能综采工作面安全高效开采适应性评价[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 60–65.
- YU Jianhao, ZHU Lingfu, XU Gang. Safety and high efficiency adaptability evaluation of coal mine intelligent fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 60–65.
- [20] 张官进, 权玲, 李新伟, 等. 基于组合赋权和云化物元模型的公路穿越采空区场地稳定性评价[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(2): 023013.
- ZHANG Guanjin, QUAN Ling, LI Xinwei, et al. Evaluation of site stability of highway passing through goaf based on combined weighting and the cloud matter-element model[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(2): 023013.
- [21] 张科学, 李首滨, 何满潮, 等. 智能化无人开采系列关键技术之一——综采智能化工作面调斜控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 139–149.
- ZHANG Kexue, LI Shoubin, HE Manchao, et al. Study on key technologies of intelligent unmanned coal mining series I: study on diagonal adjustment control technology of intelligent fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 139–149.
- [22] 张科学. 综掘工作面智能化开采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 106–111.
- ZHANG Kexue. Study on intelligent mining technology of fullymechanized heading face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 106–111.
- [23] 黄曾华, 南柄飞, 张科学, 等. 基于Ethernet/IP综采机器人一体化智能控制平台设计[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 9–15.
- HUANG Zenghua, NAN Bingfei, ZHANG Kexue, et al. Design on intelligent control platform of mechanized mining robot based on Ethernet/IP[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 9–15.
- [24] 黄乐亭, 黄曾华, 张科学. 大采高综采智能化工作面开采关键技术研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(1): 1–6.
- HUANG Leting, HUANG Zenghua, ZHANG Kexue. Key technology of mining intelligent fully mechanized coal mining face with large mining height[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(1): 1–6.
- [25] 王国法, 庞义辉, 任怀伟. 煤矿智能化开采模式与技术路径[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 013501.
- WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Intelligent coal mining pattern and technological path[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 013501.
- [26] 侯刚, 王国法, 薛忠新, 等. 煤矿辅助运输自动驾驶关键技术与装

- 备[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(3): 033515.
- HOU Gang, WANG Guofa, XUE Zhongxin, et al. Key technologies and equipment for automatic driving of coal mine auxiliary transportation[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(3): 033515.
- [27] 安景文, 赵嘉丽, 王金鹤, 等. 基于ANP-MEA模型的煤矿工人不安全行为评价[J]. 煤矿安全, 2018, 49(8): 303–306, 309.
- AN Jingwen, ZHAO Jiali, WANG Jinhe, et al. Evaluation of unsafe behavior of coal mine workers based on ANP-MEA model[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(8): 303–306, 309.
- [28] 王永刚, 耿浩. 基于ANP和物元可拓模型的航空公司安全水平评价[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 53–57.
- WANG Yonggang, GENG Hao. An improved method for evaluating the safety levels of air aviation based on the ANP and the matter-element extension model[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 53–57.
- [29] 吴都, 唐德善, 鹿情情. 基于ANP-MEA模型的城市防洪系统综合评价[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5): 37–41.
- WU Du, TANG Deshan, LU Qingqing. Comprehensive evaluation of urban flood control system based on ANP-MEA model[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(5): 37–41.
- [30] 彭先艳, 沈斐敏, 王巧莉, 等. 基于ANP-MEA的电梯运行系统安全评价[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 881–885, 890.
- PENG Xianyan, SHEN Feimin, WANG Qiaoli, et al. Safety assessment of elevator operating system based on ANP and MEA[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2016, 44(6): 881–885, 890.
- [31] 孔峰, 毛艺婷. 基于ANP-物元理论的综合评价方法及应用[J]. 科技通报, 2012, 28(8): 1–4.
- KONG Feng, MAO Yiting. A comprehensive evaluation method based on ANP and matter-element theory and its application[J]. Bulletin of Science and Technology, 2012, 28(8): 1–4.