基于G1-FDEMATEL-区间逼近的煤矿机电系统安全评价模型研究*

褚新胜[1]，盛高永[1]，孟磊[1]，吕现波[1]，张海云[2,3]

（1.临沂会宝岭铁矿有限公司， 山东 临沂市 277712；
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：针对煤矿机电系统安全评估的复杂性和模糊性，为提高评估结果的客观性和可靠性，引入区间逼近理论，建立基于G1-FDEMATEL-区间逼近的煤矿机电系统安全综合评价模型。首先，根据事故致因交叉理论，从“人、机、管、环”4个维度，筛选17项指标构建评价体系；其次，耦合G1-FDEMATEL法获取指标综合权重，基于区间逼近原理，以区间估计法确定指标评估数据，弥补传统模型点估计值不连续、信息缺失的局限性，通过计算综合距离，判定煤矿机电系统安全等级；最后，以5座煤矿为例，应用G1-FDEMATEL-区间逼近模型分析机电系统安全状态。结果表明：5座煤矿机电系统安全等级均为“较安全”，与专家结论一致，较传统VIKOR、TOPSIS模型更能有效反映机电系统安全真实状态，验证了该模型的适应性和科学性，可为防范和处理机电系统安全事故提供理论支撑。

关键词：煤矿机电系统；安全等级；区间逼近；G1法；模糊DEMATEL法

中图分类号：TD77+1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)09-0104-11

Research on Safety Evaluation Model of Coal Mine Electromechanical Systems Based on G1-FDEMATEL-Interval Approximation

CHU Xinsheng[1], *SHENG Gaoyong*[1], *MENG Lei*[1], *LYU Xianbo*[1], *ZHANG Haiyun*[2,3]

(1.Linyi Huibaoling Iron Mine Co., Ltd., Linyi, Shandong 277712, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In response to the complexity and ambiguity of safety evaluation for coal mine electromechanical systems, interval approximation theory was introduced to improve the objectivity and reliability of evaluated results, and a comprehensive safety evaluation model for coal mine electromechanical systems based on G1-FDEMATEL-interval approximation was established. Firstly, according to the theory of accident causation intersection, 17 indicators were filtered from the four dimensions of human, machine, management, and environment to construct an evaluation system. Secondly, the G1-FDEMATEL method was coupled to obtain the comprehensive weights of indicators. Based on the principle of interval approximation, the interval estimation method was used to determine the evaluation data of indicators, which compensated for the limitation of discontinuous point estimation values and information missing in traditional models. By calculating the comprehensive distance, the safety level of coal mine electromechanical systems was determined. Finally, taking 5 coal mines as examples, the G1-FDEMATEL-interval approximation model was applied to analyze the safety status of the electromechanical systems. The results show that the safety levels of the electromechanical systems in all five coal mines were relatively safe, consistent with the expert conclusions. Compared with traditional VIKOR and TOPSIS models, it can effectively reflect the true safety status of the electromechanical systems, verify the adaptability and scientificity of the models, and provide a theoretical support for preventing and handling electrical system safety accidents.

Key words: Coal mine electromechanical system, Safety level, Interval approximation, G1 method, Fuzzy DEMATEL method

---

* **收稿日期**：2024-12-01
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2905102)
作者简介：褚新胜(1983—)，男，山东烟台人，高级工程师，主要从事矿山自动化、智能化控制研究。E-mail：hbltkxx@163.com

0 引言

随着科技的不断进步和先进制造业的持续发展,越来越多的智能化、自动化、高压大功率机电设备应用到现代化深井煤矿生产,进一步提高了煤炭开采效率。但是,由于煤矿机电设备种类和数量增多,功率增大,且长期处于高温、高湿、高粉尘的恶劣环境,容易发生机电安全事故,机电系统安全事故成为煤炭产业高质量发展的重要影响因素[1]。因此,科学合理地开展煤矿机电系统安全评价,分析机电系统安全薄弱环节,进一步防范机电安全事故,对于煤矿安全生产具有重要的现实意义。

在煤矿机电安全分析与评价方面,李明轩[2]系统总结了煤矿机电事故发生的类型、特点,并根据事故致因提出了针对性举措,可为提高煤矿机电安全提供理论参考;CHEN Yunqi 等[3]设计研发了煤矿机电设备监管系统,实现了主要机电设备的在线监测和故障分析,为机电设备安全评估提供了智能化手段;邵良杉等[4]基于人因视角,提出人因分析和分类系统融合的方法,研究了煤矿机电事故的内在关键因素和关键致因链;李哲等[5]综合运用四组元本体模型和机器学习方法,理清煤矿机电设备、机电事故和处置措施之间的复杂关系,构建了机电设备事故知识图谱,为快速锁定事故原因和制定维修方案提供了便捷方法;邢志刚[6]考虑了煤矿机电安全影响因素多、关系复杂的特点,建立了基于 AHP-TOPSIS 的机电安全综合评估模型;王中锋[7]针对煤矿综采设备安全评估的模糊性特点,将三角模糊数理论应用到综采系统运行安全状况评估中。随着数学模型理论研究的不断深入,诸如层次分析法-模糊数学[8]、灰色关联 GRA[9]、云物元模型[10]等逐步被引用到煤矿机电系统安全评价中,并取得了较好的效果。煤矿机电系统安全属于典型的多属性定性评估范畴,具有随机性、动态变化特点。现有的研究成果还存在以下不足:一是评价理论体系还不健全完善,煤矿机电事故致因分析仍是当前研究的重点内容,专门针对煤矿机电系统安全评价模型的研究相对较少,尚未形成理论体系,难以有效指导煤矿企业合理判别机电系统安全状态,指导预防和处理机电事故;二是指标权重计算还不科学合理,煤矿机电系统安全评估指标因素之间存在交互影响,当前,主要采用层次分析法或熵权法等单一赋权法确定指标权重,没有充分考虑指标因素之间的相互作用对指标权重结果的影响,可能导致最终评估结果失效;三是指标数据赋值还不完全客观,在不确定性的多指标综合决策分析评估时,主要由专家结合自身经验,基于点估计法来确定指标数据,难以客观全面反映评价对象的真实状态,容易造成评价信息丢失[11],在煤矿机电系统安全评估等方面不能完全适用。

区间逼近法是以区间估计理论为基础,通过构建区间数评价矩阵,计算等级偏差距离和综合距离确定安全等级的理论,能够有效克服点估计法指标数据不连续、决策评估信息扭曲丢失等缺点,使评估结果更科学客观。张众等[12]建立了层次分析法与区间逼近理论相结合的机场混凝土道路面性能多指标综合评价模型;廖俊文等[13]将区间逼近理论应用到装配式建筑施工风险评价中,通过分析比较,验证了区间数评估方法更符合实际;彭勃波[14]建立了地下煤矿智能化建设需求分级的区间数模型,为地下煤矿的智能化建设降本增效提供了新思路。模糊 DEMATEL 法是当前确定指标因素重要程度与划分层级关系的主要分析方法。

鉴于此,针对煤矿机电系统安全评估模糊学特点,引入了区间逼近法,建立基于 G1-FDEMATEL-区间逼近的综合评价模型。在构建煤矿机电系统安全评价指标体系的基础上,运用 G1-FDEMATEL 法获取指标综合权重,基于区间逼近理论,通过计算综合距离,判定煤矿机电系统安全状态,以期为防范和处理煤矿机电系统安全事故提供理论支撑。

1 指标体系

煤矿机电系统安全评价需要统筹考虑诸多因素,且因素之间具有一定关联性。参考煤矿机电相关管理办法和技术规范,并在中国知网中检索“煤矿机电安全”等关键词,收集已有的相关文献研究成果,对指标体系进行分类汇总;组织相关行业专家和现场技术人员,结合煤矿开采技术特点和生产要求,对指标体系进行论证;最后,基于事故致因交叉理论,从“人、机、管、环”4 个方面,选取了 17 个重要影响因素,构建评价指标体系,具体见图 1。根据工程实际,借鉴现有的煤矿机电系统安全分级研究成果,划分为 5 个等级,即Ⅰ级(安全)、Ⅱ级(较安全)、Ⅲ级(中等安全)、Ⅳ级(较危险)和Ⅴ级(危险)。指标分级标准为[90,100)、[80,90)、[70,80)、[60,70)和[0,60)。

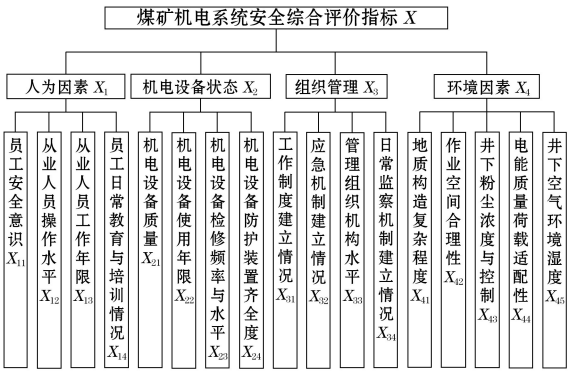


图 1 评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system

2 理论基础

2.1 指标赋权

2.1.1 G1 法获取指标初始权重

考虑到煤矿机电系统安全评价指标体系相对复杂,而传统 AHP 法计算指标权重具有较强的主观性,且在权重计算过程中需要多次调整判断矩阵,以满足一致性检验需求,计算过程偏复杂,为此,本文采用 G1 法获取指标初始权重。G1 法是由专家结合自身经验,对指标相对重要性进行排序,构建蕴含指标相对重要性的序列集合,然后,给定指标相对重要性比值 r_i,表示指标之间相对重要性程度,最后,通过简单运算可以获得较为可靠、合理的指标权重。具体计算过程见文献[15]。

2.1.2 模糊 DEMATEL 法计算指标中心度

决策实验室分析法(DEMATEL)是基于矩阵工具和运用图论思想,分析研究指标因素在系统中的地位和识别关键影响因素的理论。由于决策者认知的局限性,在确定指标因素间影响程度时,往往存在盲目性,导致最终评估结果与实际不符。因此,本文引入三角模糊数理论,运用模糊语言对初始直接影响矩阵进行转换,避免信息表达不完整,然后对三角模糊影响矩阵进行解模处理,建立模糊 DEMATEL 法(FDEMATEL),通过计算指标影响度、被影响度、中心度、原因度,分析指标因素的因果关系。具体计算过程[16]如下。

(1) 建立初始直接影响矩阵 $\boldsymbol{O}$。根据建立的煤矿机电系统安全评价指标体系,组织相关专家,以现场讨论形式,基于 4 标度法,对各指标因素间的相关影响程度进行赋值打分,由此建立初始直接影响矩阵 $\boldsymbol{O}$,记为 $\boldsymbol{O}=[o_{ij}]_{n\times n}$。

(2) 模糊语言转换。基于三角模糊数原理,根据三角模糊数与标度取值对应法则,对初始直接影响矩阵 $\boldsymbol{O}$ 进行三角模糊数语义转换,表示为 $o_{ij}=(l_{ij},m_{ij},r_{ij})$,其中,$l_{ij}$ 代表悲观值,m_{ij} 表示一般值,r_{ij} 代表乐观值。标度取值与三角模糊数转换对应法则见表 1。

表 1 标度与三角模糊数语义转换对应法则

Table 1 Correspondence between semantic information and triangular fuzzy number conversion

语义信息	语义值	三角模糊数
无影响	0	(0,0,0.25)
影响非常低	1	(0,0.25,0.50)
低影响	2	(0.25,0.50,0.75)
高影响	3	(0.50,0.75,1.00)
影响非常高	4	(0.75,1.00,1.00)

(3) 三角模糊数语义信息解模。首先对三角模糊数边界归一化处理,然后对指标值进行解模处理,获取具体数值,建立清晰化影响矩阵 $\boldsymbol{Z}$。三角模糊数边界值处理公式为:

$$\begin{cases} x_{rj}=(r_{ij}-r_i^{\min})/\Delta_{\min}^{\max} \\ x_{mj}=(m_{ij}-m_i^{\min})/\Delta_{\min}^{\max} \\ x_{lj}=(l_{ij}-l_i^{\min})/\Delta_{\min}^{\max} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \Delta_{\min}^{\max}=r_i^{\max}-l_i^{\min} \\ l_i^{\min}=\min\limits_j l_{ij} \\ r_i^{\max}=\max\limits_j r_{ij} \end{cases} \tag{2}$$

式中:x_{ij}、x_{mj} 和 x_{lj} 分别为第 j 个因素评价打分的模糊语义右侧值、中间值和左侧值;r_{ij}、m_{ij} 和 l_{ij} 分别为标准化后的模糊语义右侧值、中间值和左侧值;$r_i^{\min}$、$m_i^{\min}$ 和 $l_i^{\min}$ 分别为最小右侧值、中间值和左侧值;$\Delta_{\min}^{\max}$ 为最大右侧值和最小左侧值的差值。

左右边界归一化处理公式为:

$$\begin{cases} x_j^{\mathrm{ls}}=x_{mj}/(1+x_{mj}-x_{lj}) \\ x_j^{\mathrm{rs}}=x_{rj}/(1+x_{rj}-x_{mj}) \end{cases} \tag{3}$$

式中:x_j^{ls} 和 x_j^{rs} 分别为归一化后的左侧值和右侧值。

指标值解模计算公式为:

$$x_j^{\mathrm{crisp}}=[x_j^{\mathrm{ls}}(1-x_j^{\mathrm{ls}})+x_j^{\mathrm{rs}}x_j^{\mathrm{rs}}]/[1-x_j^{\mathrm{ls}}+x_j^{\mathrm{rs}}] \tag{4}$$

式中:x_j^{crisp} 为指标解模值。

指标清晰化值 x_{ij} 的计算公式为:

$$x_{ij}=l_i^{\min}+x_j^{\mathrm{crisp}}\Delta_{\min}^{\max} \tag{5}$$

(4) 建立规范化影响矩阵 $\boldsymbol{B}$。取清晰化影响矩

阵 $\boldsymbol{Z}=[x_{ij}]_{n\times n}$ 行和最大值,对清晰化影响矩阵 $\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{Z}=[x_{ij}]_{n\times n})$ 规范化处理,建立规范化影响矩阵 $\boldsymbol{B}$。

$$\boldsymbol{B}=\frac{1}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant n}\sum\limits_{j=1}^{n}x_{ij}} \tag{6}$$

式中,max 表示清晰化影响矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 行和的最大值。

(5) 计算综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$。综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}(\boldsymbol{T}=[t_{ij}]_{n\times n})$ 的计算公式为:

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{B}\frac{\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B}^{n-1}}{\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B}}=\boldsymbol{B}(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B})^{-1} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{E}$ 为单位矩阵。

(6) 风险因素“四度”。根据模糊 DEMATEL 法原理,通过计算指标影响度、被影响度、中心度和原因度,识别关键影响因素,其中,指标影响度 F_i 为综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}(\boldsymbol{T}=[t_{ij}]_{n\times n})$ 的行和,表示第 i 个指标因素对其他 $n-1$ 个指标因素的影响程度;指标被影响程度 H_i 为综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}(\boldsymbol{T}=[t_{ij}]_{n\times n})$ 的列和,表示第 i 个指标因素受其他 $n-1$ 个指标因素的影响程度;中心度 M_i 为影响度 F_i 与被影响程度 H_i 的和值,体现第 i 个指标因素在整个评价指标体系中的地位,中心度 M_i 越大,表示该指标因素综合影响程度越大,即在评价体系中处于核心位置;原因度 N_i 为影响度 F_i 与被影响程度 H_i 的差值,表示第 i 个风险因素在评价体系中的净影响程度。根据原因度 N_i 大小,将指标因素分为原因因素($N_i>0$)和结果因素($N_i<0$)两大类。

(7) 综合权重。为获取符合实际的指标权重,综合考虑指标因素之间的相互影响关系,在应用 G1 法计算指标初始权重基础上,将指标初始权重与模糊 DEMATEL 指标中心度耦合,确定指标综合权重,实现权重优化。

$$W=\alpha_i\cdot M_i/\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\cdot M_i \tag{8}$$

式中:W 为指标因素综合权重;α_i 为指标因素初始权重;M_i 为指标因素中心度。

2.2 区间逼近模型

煤矿机电系统安全评价指标均为定性指标,在传统评价模型中,一般由专家结合工程实际,依据指标分级标准,基于点估计法进行指标打分,即以一个不连续的确定数作为指标评价值。实际上,煤矿机电系统安全指标数据是不断波动变化,同时,因为专家对系统认识不全面、了解不深入,采用点估计法确定的指标值具有模糊性,不能全面客观反映煤矿机电系统实际状态。区间逼近法利用区间估计法,以区间数反映指标数值变化特征,弥补了传统模型点估计法数据不连续、易造成指标信息丢失的缺陷[17]。研究表明,基于区间估计数的整体逼近思想,能够为定性评价提供更为合理、客观的决策方法[18],具体计算过程如下。

2.2.1 构建评价指标分级标准集合

假设选取了 n 个评价指标对煤矿机电系统安全进行综合评价,并将煤矿机电系统安全划分为 s 个等级,根据指标分级标准的上、下边界值,构建评价指标分级标准集合 $\boldsymbol{U}$。

$$\boldsymbol{U}=\begin{bmatrix}[u_{11}^{\mathrm{L}},u_{11}^{\mathrm{R}}] & [u_{12}^{\mathrm{L}},u_{12}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [u_{1n}^{\mathrm{L}},u_{1n}^{\mathrm{R}}]\\ [u_{21}^{\mathrm{L}},u_{21}^{\mathrm{R}}] & [u_{22}^{\mathrm{L}},u_{22}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [u_{2n}^{\mathrm{L}},u_{2n}^{\mathrm{R}}]\\ \cdots & \cdots & & \cdots\\ [u_{s1}^{\mathrm{L}},u_{s1}^{\mathrm{R}}] & [u_{s2}^{\mathrm{L}},u_{s2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [u_{sn}^{\mathrm{L}},u_{sn}^{\mathrm{R}}]\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中,u_{sn}^{L}、u_{sn}^{R} 分别表示第 n 个评价指标第 s 个等级的分级下限值和上限值。

2.2.2 构建区间数评价矩阵

假设对 k 个煤矿机电系统进行安全评价,组织相关专家,根据系统实际状态,结合指标分级标准,确定 k 个煤矿机电系统各评价指标的区间数,构建指标区间数集合 $\boldsymbol{A}$,表示为:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}[a_{11}^{\mathrm{L}},a_{11}^{\mathrm{R}}] & [a_{12}^{\mathrm{L}},a_{12}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [a_{1n}^{\mathrm{L}},a_{1n}^{\mathrm{R}}]\\ [a_{21}^{\mathrm{L}},a_{21}^{\mathrm{R}}] & [a_{22}^{\mathrm{L}},a_{22}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [a_{2n}^{\mathrm{L}},a_{2n}^{\mathrm{R}}]\\ \cdots & \cdots & & \cdots\\ [a_{k1}^{\mathrm{L}},a_{k1}^{\mathrm{R}}] & [a_{k2}^{\mathrm{L}},a_{k2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [a_{kn}^{\mathrm{L}},a_{kn}^{\mathrm{R}}]\end{bmatrix} \tag{10}$$

式中,$[a_{kn}^{\mathrm{L}},a_{kn}^{\mathrm{R}}]$ 表示第 n 个评价指标第 k 个煤矿机电系统的区间数评价界限值。

将指标区间数集合 $\boldsymbol{A}$ 与评价指标分级标准集合 $\boldsymbol{U}$ 组合,构建区间数评价矩阵 $\boldsymbol{D}$。

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}[a_{k1}^{\mathrm{L}},a_{k1}^{\mathrm{R}}] & [a_{k2}^{\mathrm{L}},a_{k2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [a_{kn}^{\mathrm{L}},a_{kn}^{\mathrm{R}}]\\ [u_{11}^{\mathrm{L}},u_{11}^{\mathrm{R}}] & [u_{12}^{\mathrm{L}},u_{12}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [u_{1n}^{\mathrm{L}},u_{1n}^{\mathrm{R}}]\\ [u_{21}^{\mathrm{L}},u_{21}^{\mathrm{R}}] & [u_{22}^{\mathrm{L}},u_{22}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [u_{2n}^{\mathrm{L}},u_{2n}^{\mathrm{R}}]\\ \cdots & \cdots & & \cdots\\ [u_{s1}^{\mathrm{L}},u_{s1}^{\mathrm{R}}] & [u_{s2}^{\mathrm{L}},u_{s2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [u_{sn}^{\mathrm{L}},u_{sn}^{\mathrm{R}}]\end{bmatrix} \tag{11}$$

2.2.3 评价矩阵同向化、归一化处理

由于评价指标属性和量纲存在差异,无法直接进行比较和分析,需要对区间数集合 $\boldsymbol{A}$ 进行同向

化、归一化处理。其中,效益型指标和成本型指标分别按照式(12)和式(13)同向化处理,经过处理后,所有的指标评价数据趋势和类型均为效益型。

$$\begin{cases} b_{pq}^{\mathrm{L}} = a_{pq}^{\mathrm{L}} \\ b_{pq}^{\mathrm{R}} = a_{pq}^{\mathrm{R}} \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} b_{pq}^{\mathrm{L}} = \max\limits_{q}\{a_{pq}^{\mathrm{R}}\} - a_{pq}^{\mathrm{R}} \\ b_{pq}^{\mathrm{R}} = \max\limits_{q}\{a_{pq}^{\mathrm{R}}\} - a_{pq}^{\mathrm{L}} \end{cases} \tag{13}$$

式中:a_{pq}^{L} 表示第 p 个评价对象第 q 个指标区间数下限值;a_{pq}^{R} 表示第 p 个评价对象第 q 个指标区间数上限值;b_{pq}^{L} 表示第 p 个评价对象第 q 个指标区间数同向处理后的下限值;b_{pq}^{R} 表示第 p 个评价对象第 q 个指标区间数同向处理后的上限值。

对经过同向化处理的评价区间数集合 A 进行归一化处理,构建最终区间数评价矩阵 $\boldsymbol{X}$,具体计算公式为:

$$\begin{cases} x_{pq}^{\mathrm{L}} = \dfrac{b_{pq}^{\mathrm{L}} - \min\limits_{q}\{b_{pq}^{\mathrm{L}}\}}{\max\limits_{q}\{b_{pq}^{\mathrm{R}}\} - \min\limits_{q}\{b_{pq}^{\mathrm{L}}\}} \\ x_{pq}^{\mathrm{L}} = \dfrac{b_{pq}^{\mathrm{R}} - \min\limits_{q}\{b_{pq}^{\mathrm{L}}\}}{\max\limits_{q}\{b_{pq}^{\mathrm{R}}\} - \min\limits_{q}\{b_{pq}^{\mathrm{L}}\}} \end{cases} \tag{14}$$

式中:x_{pq}^{L} 和 x_{pq}^{R} 分别表示第 p 个评价对象第 q 个指标区间数归一化下限值和上限值。

2.2.4 安全等级评价

将区间数评价矩阵 $\boldsymbol{X}$ 与指标权重相耦合,构建加权区间数评价矩阵 $\boldsymbol{Z}$。

根据加权区间数评价矩阵 $\boldsymbol{Z}$,计算单指标不同等级偏离距离,具体计算公式为:

$$d_{rp} = \max(|z_{ip}^{\mathrm{L}} - z_{rp}^{\mathrm{L}}|, |z_{ip}^{\mathrm{R}} - z_{rp}^{\mathrm{R}}|) \tag{15}$$

式中:d_{rp} 表示等级偏离距离;z_{iq}^{L}、z_{iq}^{R} 表示第 i 个评价对象第 q 个指标加权区间数下限值、上限值;z_{rq}^{L}、z_{rq}^{R} 表示第 r 个等级第 q 个指标加权分级区间数下限值、上限值。

由于煤矿机电系统安全评价需要统筹考虑多个指标因素,因此,在计算单指标不同等级偏离距离基础上,需要确定综合距离 d_r。选取与等级标准距离最近的等级确定为最终安全等级,具体计算公式为:

$$d_r = d(H_0, H_r) = \sqrt{\sum_{p=1}^{n} (d_{rp})^2} \tag{16}$$

2.3 实现过程

基于 G1-FDEMATEL 的煤矿机电系统安全区间逼近模型实现过程如图 2 所示。

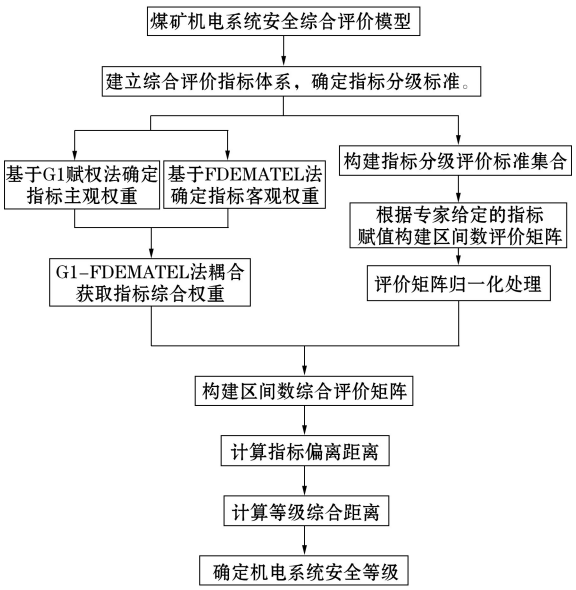


图 2 G1-FDEMATEL-区间逼近模型实现流程

Fig.2 G1-FDEMATEL-interval approximation model implementation process

3 模型应用

为验证基于 G1-FDEMATEL-区间逼近模型在煤矿机电系统安全评价中的适应性和有效性,以山东省临沂市内 5 座煤矿为研究对象,通过相关计算,确定煤矿机电系统安全等级。组织了 5 位长期从事煤矿机电系统设计、安全评估的专家成立评价小组,通过收集各个矿山机电系统资料,结合现场调研情况和指标分级标准,确定 5 座矿山的指标评价区间数。具体结果见表 2。5 座煤矿机电系统评价指标数据分布如图 3 所示。

表 2 5 座煤矿机电系统指标评价区间数

Table 2 Number of evaluation intervals for the electromechanical system indicators of five coal mines

指标	矿山 K_1	矿山 K_2	矿山 K_3	矿山 K_4	矿山 K_5
X_{11}	(74~83)	(82~91)	(80~93)	(78~84)	(82~93)
X_{12}	(79~88)	(78~89)	(68~79)	(77~82)	(91~95)
X_{13}	(78~84)	(82~85)	(65~73)	(72~86)	(93~96)
X_{14}	(74~81)	(77~85)	(83~93)	(79~84)	(89~94)
X_{21}	(82~93)	(82~91)	(82~95)	(84~93)	(83~89)
X_{22}	(77~83)	(79~86)	(83~89)	(75~82)	(84~95)
X_{23}	(82~88)	(84~93)	(79~83)	(79~88)	(84~89)
X_{24}	(85~94)	(85~89)	(73~88)	(84~91)	(87~93)
X_{31}	(80~93)	(78~87)	(82~92)	(87~90)	(87~94)
X_{32}	(76~84)	(83~88)	(85~94)	(79~82)	(85~93)
X_{33}	(82~88)	(85~94)	(92~96)	(76~82)	(85~92)
X_{34}	(83~95)	(88~93)	(75~83)	(84~90)	(82~93)
X_{41}	(78~83)	(83~88)	(82~92)	(85~92)	(88~94)
X_{42}	(79~86)	(75~82)	(76~84)	(82~89)	(83~88)
X_{43}	(74~89)	(82~93)	(77~84)	(73~88)	(79~82)
X_{44}	(82~91)	(82~89)	(73~86)	(77~86)	(82~91)
X_{45}	(77~88)	(82~93)	(79~81)	(65~74)	(81~89)

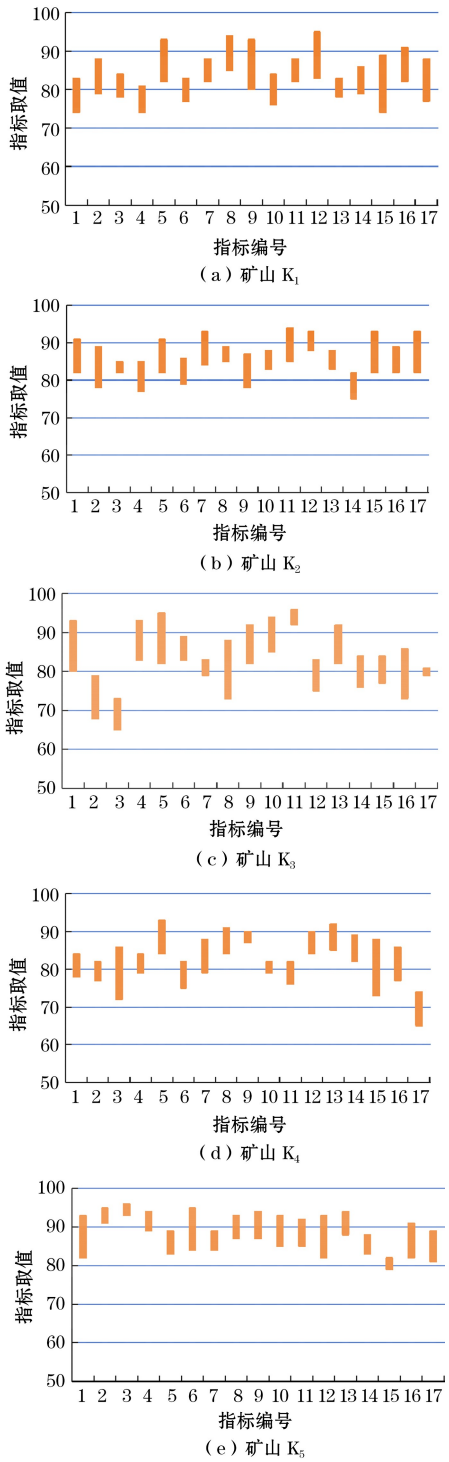


图 3　评价指标数据区间分布情况

Fig.3　Distribution of evaluation index data interval

由图 3 可知，5 座煤矿机电系统安全指标评价数据呈现跨区间分布的特征，符合工程实际。与采用点估计法相比，指标赋值更加合理。

3.1　计算指标综合权重

根据煤矿机电系统安全评价指标体系构建情况，采用 G1 法计算指标初始权重，然后基于 FDEMATEL 法计算指标“四度”，将初始权重与指标中心度相结合，计算综合影响度，确定指标综合权重。

3.1.1　G1 法赋权

结合 G1 法原理，首先计算人为因素(X_1)、机电设备状态(X_2)、组织管理(X_3)、环境因素(X_4)4 个一级指标权重，然后计算二级指标局部权重，最终获取全局权重。以一级指标为例，根据文献[15]，由评价小组成员讨论确定指标相对重要性顺序，并给定两两指标间的相对重要性比值 r_i。其中，一级指标相对重要性排序为：环境因素(X_4)＞机电设备状态(X_2)＞组织管理(X_3)＞人为因素(X_1)，相应的指标相对重要性比值分别为 $r_1=1.2$、$r_2=1.1$、$r_3=1.1$，由此确定 4 个指标初始权重分别为 $w_1=0.315\ 1$、$w_2=0.262\ 6$、$w_3=0.238\ 7$、$w_4=0.183\ 6$。整理可得，4 个指标权重依次为：0.183 6，0.262 6，0.238 7，0.315 1。同理，确定二级指标局部权重，其中，人为因素(X_1)4 个二级指标局部权重为 $W_{X1}=(0.298\ 1, 0.225\ 7, 0.205\ 3, 0.270\ 9)$，机电设备状态($X_2$)4 个二级指标局部权重为 $W_{X2}=(0.339\ 6, 0.217\ 7, 0.261\ 3, 0.181\ 4)$，组织管理($X_3$)4 个二级指标局部权重为 $W_{X3}=(0.219\ 9, 0.263\ 7, 0.316\ 6, 0.1998)$，环境因素($X_4$)5 个二级指标局部权重为 $W_{X4}=(0.122\ 3, 0.159\ 2, 0.191\ 1, 0.229\ 3, 0.298\ 1)$。最终，可得指标全局权重，按照权重大小，对指标重要性进行综合排序，具体计算结果见表 3。

表 3　指标初始权重

Table 3　Initial weight of indexes

准则层指标	准则层指标权重	目标层指标	局部权重	全局权重	排序
X_1	0.183 6	X_{11}	0.298 1	0.054 7	9
		X_{12}	0.225 7	0.041 4	15
		X_{13}	0.205 3	0.037 7	17
		X_{14}	0.270 9	0.049 7	12
X_2	0.262 6	X_{21}	0.339 6	0.089 2	2
		X_{22}	0.217 7	0.057 2	8
		X_{23}	0.261 3	0.068 6	5
		X_{24}	0.181 4	0.047 6	14
X_3	0.2387	X_{31}	0.219 9	0.052 5	10
		X_{32}	0.263 7	0.062 9	6
		X_{33}	0.316 6	0.075 6	3
		X_{34}	0.199 8	0.047 7	13
X_4	0.315 1	X_{41}	0.122 3	0.038 5	16
		X_{42}	0.159 2	0.050 2	11
		X_{43}	0.191 1	0.060 2	7
		X_{44}	0.229 3	0.072 3	4
		X_{45}	0.298 1	0.093 9	1

3.1.2 模糊 DEMATEL 法权重结果

根据模糊 DEMATEL 法原理,基于四标度法,由专家讨论确定各指标之间影响程度,建立初始直接影响矩阵。结合表 1 中标度取值与三角模糊数对应法则,进行直接影响矩阵转化;根据式(1)至式(7),对三角模糊影响矩阵解模处理,构建清晰化影响矩阵和综合影响矩阵,并计算指标四度。具体计算结果见表 4。将 G1 法获取的指标初始权重与模糊 DEMATEL 法计算的指标中心度相结合,确定指标综合权重,并根据综合权重值进行综合排序,具体计算结果见表 5。指标权重排序变动情况如图 4 所示。

表 4 综合影响矩阵

Table 4 Comprehensive impact matrix

T	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	X_{45}
X_{11}	0.053	0.104	0.029	0.083	0.029	0.030	0.110	0.085	0.084	0.086	0.109	0.103	0.035	0.037	0.048	0.045	0.058
X_{12}	0.079	0.037	0.023	0.054	0.022	0.023	0.079	0.056	0.073	0.075	0.079	0.074	0.028	0.029	0.037	0.035	0.044
X_{13}	0.095	0.114	0.016	0.052	0.020	0.021	0.077	0.053	0.053	0.055	0.058	0.054	0.023	0.024	0.031	0.030	0.038
X_{14}	0.071	0.086	0.018	0.026	0.019	0.019	0.072	0.049	0.049	0.050	0.053	0.050	0.021	0.022	0.029	0.027	0.035
X_{21}	0.095	0.087	0.051	0.077	0.056	0.116	0.133	0.125	0.117	0.141	0.147	0.116	0.124	0.110	0.143	0.140	0.159
X_{22}	0.126	0.136	0.063	0.091	0.091	0.055	0.129	0.119	0.095	0.119	0.125	0.096	0.099	0.101	0.133	0.131	0.148
X_{23}	0.122	0.099	0.062	0.124	0.107	0.111	0.087	0.117	0.092	0.117	0.124	0.111	0.063	0.063	0.131	0.111	0.162
X_{24}	0.144	0.135	0.073	0.123	0.119	0.122	0.147	0.096	0.146	0.136	0.161	0.128	0.112	0.115	0.150	0.147	0.185
X_{31}	0.138	0.114	0.079	0.104	0.047	0.048	0.121	0.094	0.067	0.128	0.117	0.108	0.091	0.094	0.106	0.104	0.137
X_{32}	0.127	0.119	0.065	0.093	0.053	0.055	0.128	0.119	0.113	0.078	0.142	0.131	0.098	0.101	0.132	0.129	0.147
X_{33}	0.143	0.136	0.081	0.126	0.050	0.051	0.127	0.115	0.129	0.116	0.083	0.112	0.076	0.114	0.110	0.107	0.142
X_{34}	0.158	0.131	0.089	0.121	0.062	0.064	0.159	0.148	0.123	0.129	0.154	0.084	0.122	0.109	0.142	0.138	0.177
X_{41}	0.157	0.133	0.088	0.120	0.099	0.100	0.143	0.148	0.124	0.130	0.138	0.107	0.068	0.145	0.144	0.141	0.161
X_{42}	0.133	0.142	0.067	0.116	0.095	0.063	0.154	0.126	0.119	0.126	0.133	0.120	0.103	0.066	0.139	0.136	0.172
X_{43}	0.159	0.150	0.071	0.122	0.100	0.120	0.162	0.151	0.126	0.133	0.141	0.126	0.126	0.112	0.090	0.143	0.164
X_{44}	0.153	0.129	0.068	0.135	0.096	0.116	0.156	0.145	0.121	0.127	0.135	0.122	0.104	0.107	0.124	0.081	0.158
X_{45}	0.184	0.158	0.103	0.142	0.149	0.153	0.206	0.192	0.166	0.192	0.202	0.166	0.146	0.149	0.173	0.151	0.138

表 5 指标综合权重

Table 5 Comprehensive weight of indicators

指标	影响度 F_i	被影响度 H_i	中心度 M_i	中心度排序	原因度 N_i	因素属性	初始权重 α_i	$M_i\times\alpha_i$	综合权重 W_i	权重排序
X_{11}	1.127 3	2.136 0	3.263 3	12	−1.008 7	结果因素	0.054 7	0.178 6	0.049 2	11
X_{12}	0.845 1	2.009 7	2.854 8	15	−1.164 6	结果因素	0.041 4	0.118 3	0.032 6	16
X_{13}	0.813 0	1.046 1	1.859 1	17	−0.233 0	结果因素	0.037 7	0.070 1	0.019 3	17
X_{14}	0.696 6	1.708 5	2.405 2	16	−1.011 9	结果因素	0.049 7	0.119 6	0.033 0	15
X_{21}	1.935 8	1.213 8	3.149 6	13	0.722 0	原因因素	0.089 2	0.280 9	0.077 4	3
X_{22}	1.855 8	1.266 6	3.122 4	14	0.589 2	原因因素	0.057 2	0.178 5	0.049 2	12
X_{23}	1.802 7	2.189 4	3.992 2	4	−0.386 7	结果因素	0.068 6	0.273 9	0.075 5	5
X_{24}	2.238 3	1.936 5	4.174 8	3	0.301 8	原因因素	0.047 6	0.198 9	0.054 8	8
X_{31}	1.697 5	1.794 0	3.491 6	11	−0.096 5	结果因素	0.052 5	0.183 3	0.050 5	10
X_{32}	1.825 9	1.934 8	3.760 6	8	−0.108 9	结果因素	0.062 9	0.236 7	0.065 2	7
X_{33}	1.816 1	2.100 7	3.916 8	5	−0.284 6	结果因素	0.075 6	0.296 0	0.081 6	2
X_{34}	2.110 6	1.808 4	3.919 1	6	0.302 2	原因因素	0.047 7	0.186 9	0.051 5	9
X_{41}	2.146 6	1.440 5	3.587 1	9	0.706 1	原因因素	0.038 5	0.138 2	0.038 1	14
X_{42}	2.009 6	1.499 4	3.509 0	10	0.510 3	原因因素	0.050 2	0.176 0	0.048 5	13
X_{43}	2.195 6	1.861 4	4.057 0	2	0.334 2	原因因素	0.060 2	0.244 3	0.067 3	6
X_{44}	2.079 6	1.796 1	3.875 7	7	0.283 6	原因因素	0.072 3	0.280 0	0.077 2	4
X_{45}	2.770 4	2.224 8	4.995 2	1	0.545 5	原因因素	0.093 9	0.469 2	0.129 3	1

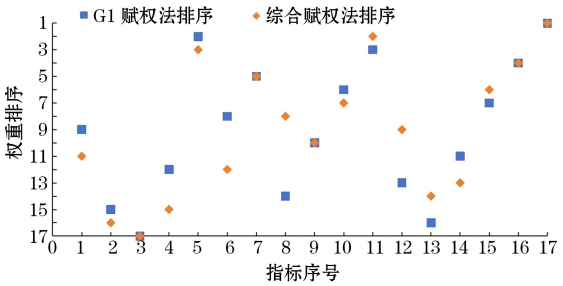


图 4 指标权重排序变化对比

Fig.4 Comparison of changes in the ranking of indicator weights

根据表 5 可知,综合权重排序前五的指标因素分别是:湿度(X_{45})、管理机构水平(X_{33})、机电设备质量(X_{21})、载荷能力适配性(X_{44})、设备检修水平(X_{23}),表示上述 5 个指标是煤矿机电系统的主要安全影响因素。根据图 4 可知,经过模糊 DEMATEL 法优化后,指标综合权重排序发生了较大变动。其中,指标重要性排序明显提高的有:防护设施齐全度(X_{24})、监察机制状况(X_{34})、地质构造复杂程度(X_{41})。分析认为上述 3 个因素指标影响度较大,容易对其他因素产生影响,在复杂状况和多重耦合机制影响下,会导致机电系统安全性降低,需要在日常工作中重点关注,因此,在进行煤矿机电系统安全评估中,需要进一步突出强调其关键性。指标重要性排序出现明显下降的是机电设备使用年限(X_{22}),分析认为机电设备使用年限是固定性的,在符合规定的年限内机电设备安全性是稳定的,在日常使用中只需要关注运行状态,从而规避风险。

3.2 安全等级评价

3.2.1 指标区间数处理

结合指标分级标准,煤矿机电系统安全评价指标均为效益型指标,具有一致的正向同向性,因此,根据式(9)至式(14),直接对指标区间数进行归一化处理,得到规范化指标区间数评价集合。具体计算结果见表 6。

3.2.2 构建加权指标区间数矩阵

以矿山 K_1 为例,将指标评价区间数集合与指标分级标准集合进行组合,构建区间数评价矩阵;将区间数评价矩阵与指标权重相乘,建立加权区间数评价矩阵。具体计算结果见表 7。

表 6 评价指标区间数归一化处理结果

Table 6 Normalization results of interval numbers of evaluation indicators

指标	矿山 K_1	矿山 K_2	矿山 K_3	矿山 K_4	矿山 K_5
X_{11}	(0.74～0.83)	(0.82～0.91)	(0.80～0.93)	(0.78～0.84)	(0.82～0.93)
X_{12}	(0.79～0.88)	(0.78～0.89)	(0.68～0.79)	(0.77～0.82)	(0.91～0.95)
X_{13}	(0.78～0.84)	(0.82～0.85)	(0.65～0.73)	(0.72～0.86)	(0.93～0.96)
X_{14}	(0.74～0.81)	(0.77～0.85)	(0.83～0.93)	(0.79～0.84)	(0.89～0.94)
X_{21}	(0.82～0.93)	(0.82～0.91)	(0.82～0.95)	(0.84～0.93)	(0.83～0.89)
X_{22}	(0.77～0.83)	(0.79～0.86)	(0.83～0.89)	(0.75～0.82)	(0.84～0.95)
X_{23}	(0.82～0.88)	(0.84～0.93)	(0.79～0.83)	(0.79～0.88)	(0.84～0.89)
X_{24}	(0.85～0.94)	(0.85～0.89)	(0.73～0.88)	(0.84～0.91)	(0.87～0.93)
X_{31}	(0.80～0.93)	(0.78～0.87)	(0.82～0.92)	(0.87～0.90)	(0.87～0.94)
X_{32}	(0.76～0.84)	(0.83～0.88)	(0.85～0.94)	(0.79～0.82)	(0.85～0.93)
X_{33}	(0.82～0.88)	(0.85～0.94)	(0.92～0.96)	(0.76～0.82)	(0.85～0.92)
X_{34}	(0.83～0.95)	(0.88～0.93)	(0.75～0.83)	(0.84～0.90)	(0.82～0.93)
X_{41}	(0.78～0.83)	(0.83～0.88)	(0.82～0.92)	(0.85～0.92)	(0.88～0.94)
X_{42}	(0.79～0.86)	(0.75～0.82)	(0.76～0.84)	(0.82～0.89)	(0.83～0.88)
X_{43}	(0.74～0.89)	(0.82～0.93)	(0.77～0.84)	(0.73～0.88)	(0.79～0.82)
X_{44}	(0.82～0.91)	(0.82～0.89)	(0.73～0.86)	(0.77～0.86)	(0.82～0.91)
X_{45}	(0.77～0.88)	(0.82～0.93)	(0.79～0.81)	(0.65～0.74)	(0.81～0.89)

表 7 矿山 K_1 加权区间数评价矩阵计算结果

Table 7 Calculation results of weighted interval number evaluation matrix for mine K_1

指标	加权区间数评价矩阵					
X_{11}	(0.036 4～0.040 8)	(0.000 0～0.029 5)	(0.029 5～0.034 4)	(0.034 4～0.039 4)	(0.039 4～0.044 3)	(0.044 3～0.049 2)
X_{12}	(0.025 8～0.028 7)	(0.000 0～0.019 6)	(0.019 6～0.022 8)	(0.022 8～0.026 1)	(0.026 1～0.029 3)	(0.029 3～0.032 6)
X_{13}	(0.015 1～0.016 2)	(0.000 0～0.011 6)	(0.011 6～0.013 5)	(0.013 5～0.015 4)	(0.015 4～0.017 4)	(0.017 4～0.019 3)
X_{14}	(0.024 3～0.026 6)	(0.000 0～0.019 7)	(0.019 7～0.023 0)	(0.023 0～0.026 3)	(0.026 3～0.029 6)	(0.029 6～0.032 9)

续表

指标	加权区间数评价矩阵					
X_{21}	(0.063 5～0.072 0)	(0.000 0～0.046 4)	(0.046 4～0.054 2)	(0.054 2～0.061 9)	(0.061 9～0.069 7)	(0.069 7～0.077 4)
X_{22}	(0.037 9～0.040 8)	(0.000 0～0.029 5)	(0.029 5～0.034 4)	(0.034 4～0.039 4)	(0.039 4～0.044 3)	(0.044 3～0.049 2)
X_{23}	(0.061 9～0.066 4)	(0.000 0～0.045 3)	(0.045 3～0.052 9)	(0.052 9～0.060 4)	(0.060 4～0.068 0)	(0.068 0～0.075 5)
X_{24}	(0.046 6～0.051 5)	(0.000 0～0.032 9)	(0.032 9～0.038 4)	(0.038 4～0.043 8)	(0.043 8～0.049 3)	(0.049 3～0.054 8)
X_{31}	(0.040 4～0.047 0)	(0.000 0～0.030 3)	(0.030 3～0.035 4)	(0.035 4～0.040 4)	(0.040 4～0.045 5)	(0.045 5～0.050 5)
X_{32}	(0.049 6～0.054 8)	(0.000 0～0.039 1)	(0.039 1～0.045 6)	(0.045 6～0.052 2)	(0.052 2～0.058 7)	(0.058 7～0.065 2)
X_{33}	(0.066 9～0.071 8)	(0.000 0～0.049 0)	(0.049 0～0.057 1)	(0.057 1～0.065 3)	(0.065 3～0.073 4)	(0.073 4～0.081 6)
X_{34}	(0.042 7～0.048 9)	(0.000 0～0.030 9)	(0.030 9～0.036 1)	(0.036 1～0.041 2)	(0.041 2～0.046 4)	(0.046 4～0.051 5)
X_{41}	(0.029 7～0.031 6)	(0.000 0～0.022 9)	(0.022 9～0.026 7)	(0.026 7～0.030 5)	(0.030 5～0.034 3)	(0.034 3～0.038 1)
X_{42}	(0.038 3～0.041 7)	(0.000 0～0.029 1)	(0.029 1～0.034 0)	(0.034 0～0.038 8)	(0.038 8～0.043 7)	(0.043 7～0.048 5)
X_{43}	(0.049 8～0.059 9)	(0.000 0～0.040 4)	(0.040 4～0.047 1)	(0.047 1～0.053 8)	(0.053 8～0.060 6)	(0.060 6～0.067 3)
X_{44}	(0.063 3～0.070 3)	(0.000 0～0.046 3)	(0.046 3～0.054 0)	(0.054 0～0.061 8)	(0.061 8～0.069 5)	(0.069 5～0.077 2)
X_{45}	(0.099 6～0.113 8)	(0.000 0～0.077 6)	(0.077 6～0.090 5)	(0.090 5～0.103 4)	(0.103 4～0.116 4)	(0.116 4～0.129 3)

3.2.3 确定安全等级

根据式(15),计算各指标区间评价数上限值、下限值与不同等级分级标准的上限值、下限值的距离,取距离最大值作为该指标与不同等级标准的偏离距离。根据式(16),结合指标不同等级偏离距离,计算综合距离,以综合距离最小值,确定最终隶属等级。以矿山 K_1 为例,综合距离计算结果分别为:到“危险”等级 Ⅴ 级为 0.206 6,到“较危险”等级Ⅳ级为 0.053 2,到“中等安全”等级Ⅲ级为 0.027 4,到“较安全”等级Ⅱ级为 0.011 0,到“安全”等级Ⅰ级为 0.033 4。通过比较综合距离值大小,可以确定矿山 K_1 机电系统安全等级隶属于Ⅱ级,即处于“较安全”状态。

同理,可得其他 4 座煤矿系统安全等级偏离距离和综合距离,并确定机电系统安全等级。为进一步验证基于 G1-FDEMATEL-区间逼近模型在煤矿机电系统安全评估结果的可靠性,与加权 VIKOR 模型和加权 TOPSIS 模型评估结果进行比较。为提高评估结果可比性,采用相同指标权重值,指标数值以区间数均值进行处理,具体结果见表 8。

表 8 5 座煤矿机电系统安全评估结果

Table 8 Safety evaluation results of electromechanical system for five coal mines

矿山名称	到“危险”等级距离	到“较危险”等级距离	到“中等安全”等级距离	到“较安全”等级距离	到“安全”等级距离	评估结果		
						本文	VIKOR[19]	TOPSIS[20]
矿山 K_1	0.206 6	0.053 2	0.027 4	0.011 0	0.033 4	较安全	中等安全	较安全
矿山 K_2	0.216 5	0.059 8	0.033 7	0.010 3	0.026 0	较安全	较安全	较安全
矿山 K_3	0.210 6	0.056 1	0.031 2	0.020 0	0.038 8	较安全	较安全	较安全
矿山 K_4	0.200 4	0.046 5	0.025 1	0.024 6	0.046 6	较安全	较安全	较安全
矿山 K_5	0.219 0	0.061 7	0.035 7	0.012 3	0.026 6	较安全	较安全	安全

根据表 8 可知,基于 G1-FDEMATEL-区间逼近理论模型评价 5 座煤矿机电系统安全等级均为“较安全”,与专家现场调研结果完全一致:5 座煤矿机电系统整体安全性较高,均未发生较大安全事故,表明该模型在煤矿机电系统安全评估方面具有良好的适应性。

3.3 模型结果可靠性分析

根据表 8 可知,从评估结果来看,三种综合模型评价结果基本一致,仅矿山 K_1 和矿山 K_5 评估的评价结果存在一定差异。矿山 K_1 建立了较为完善的机电系统安全工作责任制度,严格按照要求开展机电设备检修,机电设备质量稳定性较高,为了保证机电设备安全使用,设备安装了保护装置,一定程度上能够有效规避安全事故,因此,将该矿山机电系统安全确定为“较安全”等级更为合理;但是,该矿山员工安全意识相对薄弱,需要进一步加强安全培训,组织开展安全警示教育,提高员工安全意识,可以合理增加安全措施的投入,保障员工生命安全。矿山 K_5 的工人从业时间普遍较长,机电设备操作水平较高,安全生产制度比较完善,机电系统整体安全性在 5 座矿山之中最高,但是该矿山还需要进一步强化措施,加强井下粉尘浓度控制,注重高压保护器的安全监测,因此,该矿山机电系统安全确定为“较安全”等级更加合理。

综合来看,与传统模型相比,基于 G1-FDEMATEL-区间逼近理论的综合模型运用区间估计数确定指标数据,能够有效反映煤矿机电系统安全真实状态,同时,由于煤矿机电系统安全评估属于定性评估范畴,采用区间估计形式能够避免信息扭曲、丢失,判别结果更加科学、精准。

4 结论

(1) 综合考虑煤矿机电系统事故发生特点和类型,从"人、机、管、环"等 4 个方面,选取了 17 项重要影响因素,构建了较为系统完善的多层次煤矿机电系统安全评价指标体系,为煤矿机电系统安全评估提供了基础。

(2) 耦合 G1-FDEMATEL 法优化权重,提升评估科学性,基于 G1 法获取指标初始权重,利用 FDEMATEL 法计算指标中心度,将两者耦合,确定指标综合权重,既尊重了决策者的主观性,又考虑了指标因素的内在相互作用关系,指标权重蕴含信息更加丰富,能够保证评估结果的可靠性。

(3) 针对煤矿机电系统安全评估的复杂性、模糊性特点,引入了区间逼近理论,建立了基于 G1-FDEMATEL-区间逼近的煤矿机电系统安全评价模型,以 5 座矿山为研究背景,通过计算综合距离,评价 5 座煤矿机电系统均为"较安全"等级,与实际情况相符,验证了本文模型的适应性,可为事故防控提供理论支撑。

参考文献(References):

[1] 张培森,李复兴,朱慧聪,等.2008—2020 年煤矿事故统计分析及防范对策[J].矿业安全与环保,2022,49(1):128-134.
ZHANG Peisen, LI Fuxing, ZHU Huisong, et al. Statistical analysis and prevention countermeasures of coal mine accidents from 2008 to 2020[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2022,49(1):128-134.

[2] 李明轩.我国煤矿机电事故现状及应对措施[J].煤矿安全,2019,50(4):245-247.
LI Mingxuan. Present situation and countermeasures of electromechanical accidents in coal mine[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(4):245-247.

[3] CHEN Yunqi, XU Jin. Research and design of remote online supervision system of coal mine electromechanical equipment [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2218 (1):247789762.

[4] 邵良杉,杨金辉,赵津.人因视角下煤矿机电事故致因分析[J].煤矿安全,2024,55(1):250-256.
SHAO Liangshan, YANG Jinhui, ZHAO Jin. Cause analysis of coal mine mechanical and electrical accidents from the perspective of human factors[J]. Safety in Coal Mines, 2024,55(1):250-256.

[5] 李哲,周斌,李文慧,等.煤矿机电设备事故知识图谱构建及应用[J].工矿自动化,2022,48(1):109-112.
LI Zhe, ZHOU Bin, LI Wenhui, et al. Construction and application of mine electromechanical equipment accident knowledge graph[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48 (1):109-112.

[6] 邢志刚.基于 AHP-TOPSIS 的煤矿机电安全评价模型及应用[J].煤炭技术,2021,40(4):142-145.
XING Zhigang. Safety evaluation model and application of electromechanical equipment in coal mine based on AHP-TOPSIS method[J]. Coal Technology, 2021, 40(4):142-145.

[7] 王中锋.基于三角模糊数的综采设备系统安全评价及应用研究[D].西安:西安科技大学,2021.
WANG Zhongfeng. Research on safety evaluation and application of fully mechanized mining equipment system based on triangular fuzzy number[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.

[8] 谢雪.煤矿机电安全评价及管理信息系统研究[D].淮南:安徽理工大学,2010.
XIE Xue. Study on coal mine electrical safety assessment and management information system [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2010.

[9] 张盈盈,杨云,张景,等.2021—2023 年我国煤矿事故统计分析及致因研究[J].矿业研究与开发,2024,44(11):224-231.
ZHANG Yingying, YANG Yun, ZHANG Jing, et al. Statistic analysis and causal research on coal mine accidents in China from 2021 to 2023 [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(11):224-231.

[10] 贾丰华.基于博弈论-云物元模型的煤矿机电系统安全状态评价研究[J].能源与环保,2023,45(9):232-236.
JIA Fenghua. Research on safety state evaluation of coal mine electromechanical system based on game theory and cloud matter element theory [J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(9):232-236.

[11] 向韫.基于 PPRR 理论的岩爆应急管理能力评估模型研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):185-194.
XIANG Yun. Evalusation model of rockburst emergency management capability based on PPRR theory[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(4):185-194.

[12] 张众,夏磊,张浩,等.基于多指标区间逼近的机场水泥混凝土道面使用性能综合评价[J].中国民航飞行学院学报,2018,29(3):25-29.
ZHANG Zhong, XIA Lei, ZHANG Hao, et al. Based on multi-index interval number approximation of comprehensive evaluation of airport cement concrete pavement performance[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2018, 29(3):25-29.

[13] 廖俊文,蒋贤勇,刘京铄.基于组合赋权及区间逼近的装配式建筑施工风险评价[J].铁道科学与工程学报,2024,21(10):4311-4320.

LIAO Junwen, JIANG Xianyong, LIU Jingshuo. Risk assessment of prefabricated buildings based on combination weighting and interval approximation construction [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(10): 4311-4320.

[14] 彭勃波.基于区间决策的地下煤矿智能化建设需求分级[J].煤炭科技,2023,44(4):23-27.
PENG Jingbo. Classification of intelligent construction demand for underground coal mines based on interval decision-making[J].Coal Science and Technology Magazine, 2023,44(4):23-27.

[15] 褚新胜,盛高永,张海云.基于博弈论的煤矿生产系统智能化GRA-KL-TOPSIS评价模型[J].矿业研究与开发,2024,44(9):194-203.
CHU Xinsheng, SHENG Gaoyong, ZHANG Haiyun. GRA-KL-TOPSIS evaluation model for intelligence of coal mine production system based on game theory [J]. Mining Research and Development, 2024, 44 (9): 194-203.

[16] 杨玉胜,王紫武.基于模糊DEMATEL-ISM装配式建筑设计阶段成本影响因素研究[J].工程管理学报,2023,37(6):132-137.
YANG Yusheng, WANG Ziwu. Research on cost influencing factors in the design phase of prefabricated buildings based on fuzzy DEMATEL-ISM [J]. Journal of Engineering Management, 2023, 37(6): 132-137.

[17] 王昌衡,张贤育,戴群力.基于熵权-区间逼近的高速公路路段安全评价[J].公路工程,2017,42(2):217-222.
WANG Changheng, ZHANG Xianyu, DAI Qunli. Safety evaluation of expressway based on entropy weight-Interval approximation method [J]. Highway Engineering, 2017, 42 (2): 217-222.

[18] 朱继双.铁路施工阶段节能与能源利用效果综合评价[D].兰州:兰州交通大学,2018.
ZHU Jishuang. Comprehensive evaluation of energy saving and energy utilization effect in railway construction stage [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.

[19] 赵梦洁,杨玉中.基于组合赋权-灰色VIKOR的煤矿隐患排查治理能力评估研究[J].矿业安全与环保,2023,50(6):141-146.
ZHAO Mengjie, YANG Yunzhong. Study on evaluation of coal mine hidden danger investigation and management capability based on combination weight-gray VIKOR [J]. Mining Safety and Environment Protection, 2023, 50 (6): 141-146.

[20] 姜福川,杨浩,王昊,等.基于组合赋权和SPA-TOPSIS的煤矿安全投入决策模型[J].中国安全科学学报,2024,34(8):86-92.
JIANG Fuchuan, YANG Hao, WANG Hao, et al. Coal mine safety investment decision model based on combination empowerment and SPA-TOPSIS [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 86-92.