

基于 GRA-AHP-云模型的矿山采掘设备选型评价

秦旭忠, 谢国森, 宋丽霞, 张德全, 张煜晖

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 矿山采掘设备的可购性评价是矿山企业设备选型决策中的关键问题。针对传统评价方法单一、系统性不足等问题,提出了一种基于 GRA-AHP-云模型的综合评价方法,先构建了包含生产平台、适配性、功能性和成本四个维度的评价指标体系;再利用层次分析(AHP)确定各评价指标的权重,并结合灰色关联分析(GRA)计算设备各指标与理想值间的综合关联度;最后,通过云模型形成设备的可购性评价数学模型,从而实现评价结果的模糊性量化表达。以某矿井采矿台车选型为例进行了实例验证,结果表明该方法能有效评估设备的综合价值。

关键词: 采掘设备; GRA; 云模型; AHP; 设备选型

中图分类号: TL212.1; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0086-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.04.04

采掘设备的性能直接影响矿山的生产效率、安全水平和经济效益^[1]。近几年,随着矿山开采规模的扩大和开采难度的增加,对采掘设备性能的要求也越来越高。面对市场上种类繁多、性能各异的采掘设备,科学、合理地评价其可购性,选择最适合矿山实际需求的设备,已成为矿山企业面临的重要课题之一。

设备选型需综合考虑矿山现状和实际需求,是一个复杂的系统性工程,近年来众多学者对此进行了大量研究,并取得了一定的成效。张莉清系统探讨了煤矿井下运输方式及设备选型的关键问题,为煤矿井下运输技术的提升和可持续发展提供了理论支持和实践指导^[2];李玉选等提出了一套金属矿山悬臂式掘进机及配套设备的选型方案,建立了岩石强度与截割力模型,并引入富裕系数实现设备的选型评价^[3];郭晓汇结合特定矿山环境参数和作业需求,构建了以效率优化和安全性提升为目的的设备选型模型,并运用多维度的评价指标体系实现了设备的选型评价^[4]。但上述研究存在不足:1)现有的评价方法基本上侧重于设备价格、性能等单一因素,缺乏系统性和综合性,难以全面反映设备的综合价值;2)对设备的评

价局限于定性表述,当多个设备相对于矿山的综合价值接近时,无法进一步比选出最优结果^[5-7]。

随着多属性决策理论不断发展,灰色关联分析法(GRA)、层次分析法(AHP)和云模型等评价方法逐渐被应用于设备选型领域^[8-9],为采掘设备的选型评价提供了新思路。笔者针对矿山采掘设备选型评价,提出了一种基于 GRA-AHP-云模型的综合评价方法,旨在为矿山科学选择采掘设备提供理论依据和决策支持。

1 设备选型评价体系构建

建立系统合理的评价体系是保证评价结果准确合理的重要前提。一般地,在矿山采购新型的采掘设备时主要考虑:1)设备的生产平台。技术先进且生产线成熟完整的生产平台能够保证设备的耐用性和先进性,生产平台主要体现在设备生产厂商的规模和其在行业内的认可度。2)设备与矿山现状的适配情况。为了使采掘设备使用效率最大化,更好地服务于矿山,要求设备与矿山的采矿工艺、设计产能和发展趋势保持高度契合。3)设备的功能性。为了实现资源的安全高效开采,要求设备在保证生产施工安全的前提下具有效率

收稿日期: 2025-04-08

基金项目: 核技术研发科研项目[HNKF202310(36)]。

第一作者简介: 秦旭忠(1995—),男,青海民和人,硕士,工程师,主要从事采矿工艺和地压控制研究。

通信作者简介: 宋丽霞(1983—),女,山西运城人,硕士,高级工程师,主要从事硬岩铀矿高效开采研究。

高和可操作性强的优势。4)设备的成本。在矿山的生产成本中,设备成本占比较高,是矿山购置设备时考虑的首要因素,设备成本主要包括设备的采购成本和后期的维护成本。

综合考虑各相关因素,建立设备选型评价体系(图1)。其中施工效率(I_{32})、设备的采购成本(I_{41})和设备的维护成本(I_{42})为定量指标,其余均为定性指标。

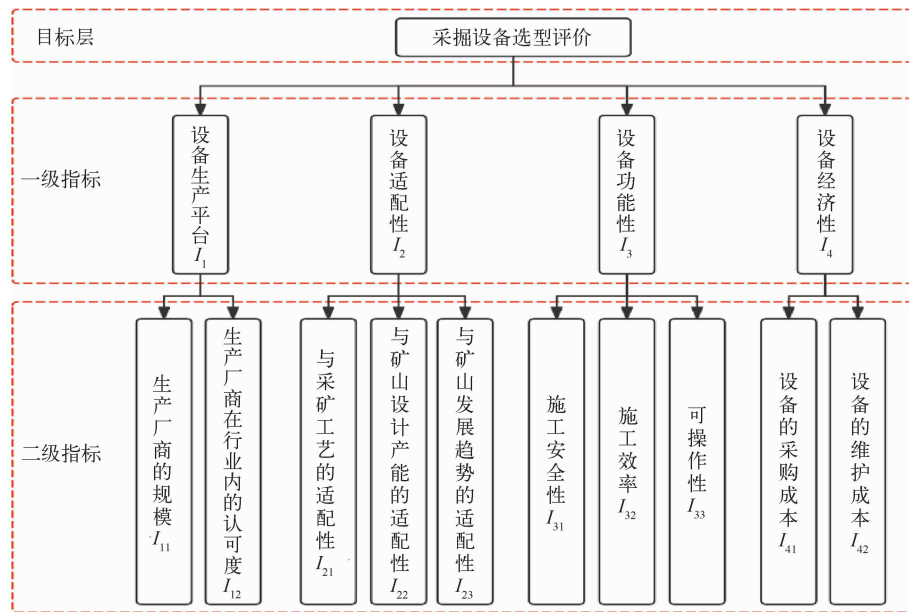


图1 设备选型评价体系

Fig. 1 Equipment evaluation system

2 设备选型评价模型构建

在设备的选型评价过程中,综合考虑多重因素的影响,依次运用层次分析(AHP)、灰色关联度分析(GRA)和云模型理论,实现设备的模糊性量化评价,具体流程:先通过层次分析法中的两两对比方法确定指标权重;再将指标权重代入灰色关联分析中,计算得出考虑权重的综合关联度;最后,运用云模型理论建立综合关联度和模糊性评价之间的数学模型,实现对设备的综合评价。计算流程见图2。

2.1 定性评价指标量化

云模型是一种基于模糊数学和随机理论的数学模型,可实现定性描述与定量表达间的相互转换^[10],其特征参数(图3)可表示为 $C(E_x, E_n, H_e)$ 。其中 E_x 为云滴在论域空间分布的期望值; E_n 为熵值,反映云滴的离散程度; H_e 为熵的不确定度,反映云滴的凝聚程度。

根据设备选型指标评价的分布特点,运用云模

型中的正态云对专家组得出的模糊性评价进行量化表征,将评分范围设为0~10分,且根据模糊评价的等级数目将得分划分为5个区间,并运用具有双边约束条件 $[C_{\min}, C_{\max}]$ ^[11]的计算方法(式1)得出云数字特征参数 $C(E_x, E_n, H_e)$,其汇总结果见表1。

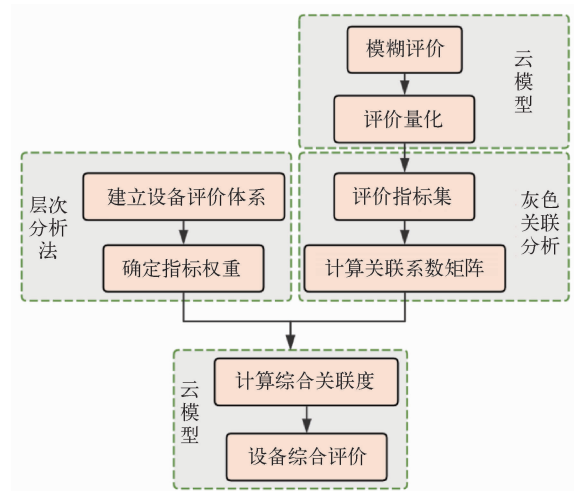


图2 设备评价计算流程

Fig. 2 Equipment evaluation calculation process

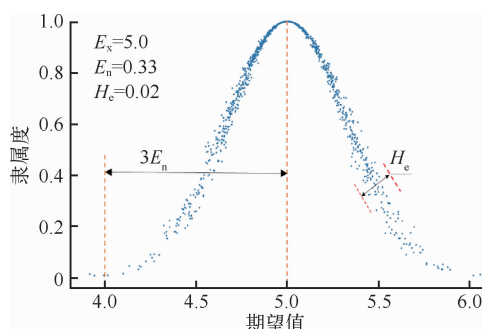


图3 云模型特征参数

Fig. 3 Characteristic parameters of cloud model

$$\left. \begin{aligned} E_x &= (C_{\max} + C_{\min})/2 \\ E_n &= (C_{\max} - C_{\min})/6 \\ H_e &= k \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中: $C_{\max}$ —评语取值范围的最大界限值; $C_{\min}$ —评语取值范围的最小界限值, k —根据变量模糊程度适当调整的常数, 根据评价数据的波动状况并经调整优化后 k 取 0.02^[12]。

表1 定性指标评分与云模型描述转换

Table 1 Conversion between qualitative index scores and cloud model descriptions

指标评价	评分区间	云模型描述
很低	[0, 2)	(1, 0.333, 0.02)
较低	[2, 4)	(3, 0.333, 0.02)
一般	[4, 6)	(5, 0.333, 0.02)
较高	[6, 8)	(7, 0.333, 0.02)
很高	[8, 10]	(9, 0.333, 0.02)

云发生器一般分为正向云发生器和逆向云发生器。根据表1的云模型描述, 依次使用正向云发生器和逆向云发生器实现模糊性评价的量化表征, 具体步骤如下。

1) 根据特征参数 $C(E_x, E_n, H_e)$, 运用正向云发生器生成云滴, 为了兼顾准确度和计算量, 本研究中云滴数(N)取 3 000^[13]。

2) 依次利用正态分布得出一个期望为 E_n 、方差为 H_e^2 的随机数 E_r 和一个期望为 E_x 、方差为 H_r^2 的随机数 x_i , 并由式(2)计算确定度 u_i , 则 (x_i, u_i) 为数域的一个云滴。

$$u_i = \exp[-(x_i - E_x)^2 / 2E_r^2]. \quad (2)$$

3) 依次循环(1)和(2)步骤, 直至生成 N 个云滴, 并求出所有云滴 x_i 的均值 x_0 ; 再以 $x = x_0$ 为条

件带入 X 条件云发生器, 得到相应的隶属度 u_0 ; 最后以 $Y = u_0$ 为条件带入 Y 条件云发生器, 得到云滴 (y_0, u_0) , y_0 即为在隶属度 u_0 下的指标评价价值。

2.2 评价指标权重求解

层次分析(AHP)是一种可将定性问题进行量化处理的决策方法, 其核心思路是判断各级指标相对于上级指标的重要性, 并按指定规则以数值方式表示出来, 即为指标权重^[14-15]。对于多级评价指标, 则需要将各级权重进行叠加相乘, 最终结果即为总指标权重。

2.2.1 判断矩阵构建

在层次分析(AHP)中, 需要将评价体系中的各指标按照表2的规定进行两两对比, 根据对比结果确定相应的标度值, 最终由全体标度值组成判断矩阵 A , 见式(3)。其中, 判断矩阵数量为 5 个, 分别为一级指标的 A_1 和二级指标的 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 , 其阶数分别为 4、2、3、3、2。

表2 层次分析法指标权重赋值标准

Table 2 AHP index weight evaluation criteria

标准度	定义	含义
1	同样重要	指标 x_i 和 x_j 同样重要
3	稍微重要	指标 x_i 的重要性稍微高于 x_j 的重要性
5	明显重要	指标 x_i 的重要性明显高于 x_j 的重要性
7	强烈重要	指标 x_i 的重要性强烈高于 x_j 的重要性
9	绝对重要	指标 x_i 的重要性绝对高于 x_j 的重要性
2、4、6、8		上述两相邻判断的中值
倒数	指标 x_i 与 x_j 比较得标度 x_{ij} , 则指标 x_j 与 x_i 比较的标度 $x_{ji} = x_{ij}^{-1}$	

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在各指标进行对比时, 需根据矿山的实际现状分析对购置设备的需求。例如: 一些准备向智能化、无人化转型的大型矿山, 在购置采掘设备时, 会更看重与矿山发展趋势的适配性, 即指标 I_{23} 的标度值明显高于其他指标; 而一些工人整体操作水平明显偏低的小型矿山, 则会更关注设备的可操作性, 即指标 I_{33} 的标度值明显高于其他指标。此外, 随着矿山的发展, 对设备性能的需求会不断演变, 相应评价指标的权重也需随之调整, 体现其动态性特征。

2.2.2 判断矩阵一致性检验

为了保证指标标度值的合理性,在层次分析(AHP)中,需要根据式(4)~式(5)对判断矩阵进行一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{A}) - n}{n - 1}, \quad (4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (5)$$

式中: CI —判断矩阵 $\mathbf{A}$ 偏离一致性指标; $\lambda_{\max}(\mathbf{A})$ —判断矩阵 $\mathbf{A}$ 的最大特征值; n —判断矩阵 $\mathbf{A}$ 的阶数; RI —平均随机一致性指标,当判断矩阵阶数分别为 2、3、4 时, RI 分别为 0、0.58、0.90^[16-17]; CR —判断矩阵 $\mathbf{A}$ 的一致性比率。

当 CR 值小于 0.1 时,认为判断矩阵 $\mathbf{A}$ 具有较好的一致性,否则需要将判断矩阵 $\mathbf{A}$ 调整至其 CR 值小于 0.1 为止^[18]。

2.2.3 指标权重计算

指标权重的求解实质上是计算判断矩阵 $\mathbf{A}$ 最大特征值对应的特征向量,采用“方根法”依次计算判断矩阵 $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$ 、 $\mathbf{A}_3$ 、 $\mathbf{A}_4$ 和 $\mathbf{A}_5$ 最大特征值对应的特征向量,分别记为 $\mathbf{M}_1$ 、 $\mathbf{M}_2$ 、 $\mathbf{M}_3$ 、 $\mathbf{M}_4$ 和 $\mathbf{M}_5$,其计算式为

$$\mathbf{M}_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}), \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_2 = (a_{21}, a_{22}), \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_3 = (a_{31}, a_{32}, a_{33}), \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_4 = (a_{41}, a_{42}, a_{43}), \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_5 = (a_{51}, a_{52}). \quad (10)$$

则评价指标 $I_{11} \sim I_{42}$ 的总权重可表示为向量 $\mathbf{M}$,其计算式为

$$\mathbf{M} = (a_{11}a_{11}, a_{11}a_{12}, a_{21}a_{21}, a_{21}a_{22}, a_{21}a_{23}, a_{31}a_{31}, a_{31}a_{32}, a_{31}a_{33}, a_{41}a_{41}, a_{41}a_{42}). \quad (11)$$

2.3 关联系数矩阵计算

灰色关联分析(GRA)是一种基于灰色系统理论的分析方法,在贫信息背景下可实现系统因素间关联度的定量表征^[19]。可通过各指标实际评价值与最优值间的关联程度,反映设备对于矿山的综合价值,从而完成对设备的准确合理评价,其具体步骤如下。

1)根据矿山对采掘设备的需求,对预选设备的各评价指标进行模糊性评价,并通过上述的云模型对其量化处理,记为 $S_n(1) \sim S_n(10)$,以此形成设备群的评价数据集($\mathbf{S}$)见式(12)。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1(1) & \cdots & S_1(10) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_n(1) & \cdots & S_n(10) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: n —评价设备数量,台。

2)设定灰色关联分析的参考数据,完成对评价数据集的关联性分析。在本文中,参考数据为设备各评价指标的最优值,一般可分为 2 种情况:(a)根据矿山对设备的实际需求设定各评价指标的最优值;(b)以预选设备群中各参数的最优值为参考数列^[20],将参考数列记为 S_0 。

$$S_0 = [S_0(1), S_0(2), \dots, S_0(10)]. \quad (13)$$

3)由于各评价指标间的量纲存在差异,可能会影响最后的评价结果。常见的无量纲化方法有初值化法、均值化法和标准化法等。根据上述各方法的特点,并结合设备评价的具体情况,在本文中,采用“初值化”法按式(14)完成对原始数据的无量纲化。

$$S'_n(i) = \frac{S_0(i)}{S_n(i)}, \quad (14)$$

式中: $i=1, 2, \dots, 10$; n —评价设备数量,台。

4)根据式(15)~式(16)计算灰色关联系数 $\gamma(S_n(k), S_0(k))$,并以此组成关联系数矩阵 γ ;最后,结合各评价指标的综合权重,根据式(17)计算各设备的综合关联度 R 。

$$\Delta_i(k) = |S'_0(k) - S'_n(k)|, \quad (15)$$

$$\gamma(S_n(k), S_0(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_i(k)}, \quad (16)$$

式中: ξ 为分辨系数,取 $\xi=0.5$ ^[21]。

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma(S_1(1), S_0(1)) & \cdots & \gamma(S_1(10), S_0(10)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(S_n(1), S_0(1)) & \cdots & \gamma(S_n(10), S_0(10)) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$R = \gamma \times \mathbf{M}. \quad (18)$$

2.4 设备选型综合评价

为了把综合关联度转化为更加直观、形象的模糊性评价,将其值范围划分为 5 个区间,分别为 $[0, 0.2)$ 、 $[0.2, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.6)$ 、 $[0.6, 0.8)$ 和 $[0.8, 1.0]$,其分别表示设备的可购性很低、较低、一般、较高和很高,可见设备可购性与综合关联度值之间呈正相关。

在模糊性评价中,综合关联度越接近区间上限值,则在该评价等级下的隶属度越高,因此运用

半正态云模型, E_x 为各区间上限值, 即 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0, 同时规定综合关联度在各模糊性评价等级下的隶属度大于 0.5^[22]。综上, 建立式 (18) 的设备选型评价数学模型, 其等级云模型见图 4。需要注意的是, 当 $E_x=0.2$ 且 $u_i<0.5$ 时, 视为设备不具备可购性。

$E_x = 0.2, u_i > 0.5$ 或 $E_x = 0.4, u_i < 0.5$, 很低
 $E_x = 0.4, u_i > 0.5$ 或 $E_x = 0.6, u_i < 0.5$, 较低
 $E_x = 0.6, u_i > 0.5$ 或 $E_x = 0.8, u_i < 0.5$, 一般
 $E_x = 0.8, u_i > 0.5$ 或 $E_x = 1.0, u_i < 0.5$, 较高
 $E_x = 1.0, u_i > 0.5$, 很高

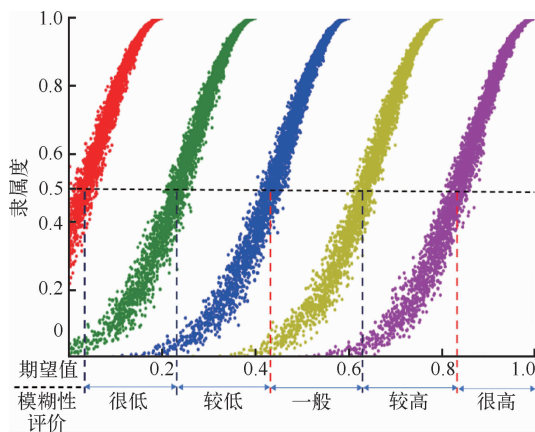


图 4 设备可购性评价云模型

Fig. 4 Device adequacy evaluation cloud model

3 实例计算

为验证模型的准确性和合理性, 以某矿井采矿台车购置为实例进行相关计算。该矿井矿体倾角为 $72^{\circ}\sim 90^{\circ}$, 矿体平均厚度为 2.94 m, 属急倾斜薄矿体, 主要以上向水平分层干式充填法和多分段深孔爆破连续采矿法开采。为提高生产效率, 目前矿井正加速向智能化和无人化发展。

3.1 指标权重求解

根据该矿井的现状和对采矿台车的实际需求, 按表 2 构建判断矩阵 $A_1\sim A_5$ 。计算判断矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 的 RI 值分别为 0.06、0、0.07、0.07、0, RI 值均小于 0.1, 通过一致性检验。采用“方根法”得出判断矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 最大特征值对应的特征向量分别为 $M_1=(0.143, 0.286, 0.286, 0.286)$; $M_2=(0.67, 0.33)$; $M_3=(0.413,$

$0.260, 0.327)$; $M_4=(0.493, 0.311, 0.196)$; $M_5=(0.50, 0.50)$ 。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

综上, 由式 (11) 得出各评价指标的权重向量 $M=(0.095\ 8, 0.047\ 2, 0.118\ 1, 0.074\ 4, 0.093\ 5, 0.141\ 0, 0.088\ 9, 0.056\ 1, 0.143\ 0, 0.143\ 0)$ 。

3.2 关联系数矩阵计算

根据该矿井的实际需求, 经调研预选出 3 台符合要求的采矿台车, 分别记为设备 A、设备 B 和设备 C, 其主要性能参数见表 3。

表 3 采矿台车主要性能参数

Table 3 Main performance parameters of mining trolley

性能参数	设备 A	设备 B	设备 C
最小适应断面/(m×m)	3.0×3.0	2.9×2.8	3.5×3.5
最大适应断面/(m×m)	4.3×4.3	4.0×4.5	4.0×4.0
整机宽度/mm	1 580	1 600	1 650
转弯半径/m	4.5	5.1	5.0
钻孔深度/m	25	35	30
钻孔孔径/mm	64~89	64~115	64~89
爬坡能力/(°)	≤14	≤14	≤14
钻杆长度/mm	1 525	1 000	915
凿岩机功率/kW	25/18	24	18
能否远程操作	能	能	否
采购成本/万	300	280	210
维护成本/(万/年)	13	11	10
施工效率/(m/h)	50	45	40

根据预选设备的性能参数,结合矿井的实际需求,由专家组对各定性评价指标进行模糊性评价,结果见表4。根据2.1所述内容完成定性评价指标的量化,结果见表5。

表4 定性评价指标模糊性评价

Table 4 Fuzzy evaluation of qualitative evaluation index

评价指标	设备 A	设备 B	设备 C
I_{11}	较高	较高	较高
I_{12}	较高	一般	较高
I_{21}	很高	较高	一般
I_{22}	较高	较高	较高
I_{23}	较高	较高	一般
I_{31}	很高	较高	较低
I_{33}	一般	一般	较高

表5 定性评价指标量化值

Table 5 Quantitative value of qualitative evaluation index

评价指标	设备 A	设备 B	设备 C
I_{11}	7.11	7.08	6.96
I_{12}	6.96	5.32	7.02
I_{21}	9.08	7.14	4.86
I_{22}	7.03	6.86	7.13
I_{23}	7.19	7.10	5.08
I_{31}	8.95	7.06	3.22
I_{33}	4.97	5.41	7.06

综上所述得出预选设备群的评价数据集 S 。本例中,以预选设备群中各参数的最优值为参考数列,并经无量纲化处理后,得出评价数据集 S' 。最终由式(15)~式(16)计算得出灰色关联系数 $\gamma(S_n(k), S_0(k))$,并以此组成关联系数矩阵 γ 。

$$S = \begin{bmatrix} 7.11 & 6.96 & 9.08 & 7.03 & 7.19 & 8.95 & 50 & 4.97 & 300 & 13 \\ 7.08 & 5.32 & 7.14 & 6.86 & 7.10 & 7.06 & 45 & 5.41 & 280 & 11 \\ 6.96 & 7.02 & 4.86 & 7.13 & 5.08 & 3.22 & 40 & 7.06 & 210 & 10 \end{bmatrix},$$

$$S' = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.99 & 1.00 & 0.99 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.70 & 1.43 & 1.30 \\ 1.00 & 0.76 & 0.79 & 0.96 & 0.99 & 0.79 & 0.90 & 0.77 & 1.33 & 1.10 \\ 0.98 & 1.00 & 0.54 & 1.00 & 0.71 & 0.36 & 0.80 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix},$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.97 & 1.00 & 0.97 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.53 & 0.44 & 0.53 \\ 1.00 & 0.58 & 0.61 & 0.89 & 0.97 & 0.61 & 0.60 & 0.59 & 0.50 & 0.77 \\ 0.94 & 1.00 & 0.42 & 1.00 & 0.54 & 0.34 & 0.33 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix}.$$

3.3 设备综合评价

将各评价指标的权重和关联系数矩阵相结合,由式(17)计算得出设备 A、设备 B 和设备 C 的综合关联度分别为 0.823、0.709 和 0.732。设备 A 的综合关联度在期望值为 1.0 时,隶属度为 0.46;在期望值为 0.8 时,隶属度为 0.99。根据评价模型,可将设备 A 的可购性评价为较高。设备 B 的综合关联度在期望值为 0.8 时,隶属度为 0.79;在期望值为 1.0 时,隶属度为 0.12。根据评价模型,可将设备 B 的可购性评价为较高。设备 C 的综合关联度在期望值为 0.8 时,隶属度为 0.89;在期望值为 1.0 时,隶属度为 0.16。根据评价模型,可将设备 C 的可购性评价为较高。

综上,设备 A、设备 B 和设备 C 的可购性评价均为较高,说明在同批设备中,各设备在评价体系中的优势相对均衡。此外,设备 A、设备 B 和设备 C 的综合关联度在期望值为 0.8 时的隶属度分别为 0.99、0.79 和 0.89,因此其可购性优先级由高到低依次为设备 A、设备 C 和设备 B。

4 结论

1)根据矿山采掘设备选型的特点和影响因素,从生产平台、适配性、功能性和成本等维度建立评价指标体系,其中包括 7 个定性指标和 3 个定量指标。运用云模型理论实现了评价指标在定性评价、定量计算分析和模糊性定量评价之间的相互转换,从而最大限度地保证了评价结果的准确性和合理性。

2)在评价体系基础上,依次运用灰色关联分析法(GRA)、层次分析法(AHP)和云模型理论,构建了设备选型评价模型,并结合实例验证了该模型的准确性和合理性。该模型可为矿山企业提供可靠的决策支持。

参考文献:

- [1] 杨贵军.金属矿山悬臂式掘进机采掘配套设备选型分析[J].工程技术研究,2024,9(2):121-123.
YANG Guijun. Analysis on the selection of mining supporting equipment for boom-type roadheader in

- metal mine[J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9(2):121-123(in Chinese).
- [2] 张莉清. 煤矿井下运输方式及设备选型[J]. 能源与节能, 2025(2):247-250.
ZHANG Liqing. Underground transportation methods and equipment selection in coal mines[J]. Energy and Energy Conservation, 2025(2):247-250(in Chinese).
- [3] 李玉选, 黄丹, 杨小聪, 等. 金属矿山悬臂式掘进机采掘配套设备选型研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(6):166-171.
LI Yuxuan, HUANG Dan, YANG Xiaocong, et al. Study on supporting equipment selection for cantilever roadheader in metal mine[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(6):166-171(in Chinese).
- [4] 郭晓汇. 浅析矿山自动化的设备选型与集成方案[J]. 中国设备工程, 2025(4):96-98.
GUO Xiaohui. A brief analysis of equipment selection and integration schemes for mine automation[J]. China Plant Engineering, 2025(4):96-98(in Chinese).
- [5] WU Y, SANG W L, CAO X G, et al. Research on the parameter prediction model for fully mechanized mining equipment selection base on RF-WOA-XG-Boost[J]. Applied Sciences, 2025, 15(2):732-732.
- [6] 杨静. 基于 CSPSO 优化 MESM 的煤矿综采设备选型配套研究[J]. 中国设备工程, 2024(11):19-22.
YANG Jing. Optimize MESM based on CSPSO research on the selection and matching of comprehensive mining equipment in coal mines[J]. China Plant Engineering, 2024(11):19-22(in Chinese).
- [7] 田小平, 吴学民, 刘伟涛. 矿山充填料浆搅拌技术与设备选型的应用研究[J]. 有色设备, 2024, 38(6):98-104.
TIAN Xiaoping, WU Xuemin, LIU Weitao. Application of mine filling slurry mixing technology and equipment selection[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(6):98-104(in Chinese).
- [8] 胡玉东, 王文涛, 朱慧君. 基于灰色关联分析的固体全绝缘开关设备优势评估[J]. 自动化应用, 2025, 66(1):178-181.
HU Yudong, WANG Wentao, ZHU Huijun. Advantage evaluation of solid fully insulated switchgear based on grey correlation analysis[J]. Automation Application, 2025, 66(1):178-181(in Chinese).
- [9] 钱杰, 徐云华, 王杰, 等. 基于德尔菲法和层次分析法的数字减影血管造影设备评价指标体系构建[J]. 中国医学装备, 2024, 21(9):124-129.
QIAN Jie, XU Yunhua, WANG Jie, et al. Construction of evaluation index system of digital subtraction angiography equipment based on Delphi method and analytic hierarchy process[J]. China Medical Equipment, 2024, 21(9):124-129(in Chinese).
- [10] 汤明润, 李若旻, 程晓钰, 等. 基于博弈论-改进云模型的新能源电力系统适应性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7):40-51.
TANG Mingrun, LI Ruoyang, CHENG Xiaoyu, et al. Adaptability evaluation of new energy power systems based on game theory and improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7):40-51(in Chinese).
- [11] WANG X T, LI S C, XU Z H, et al. Risk assessment of water inrush in Karst tunnels excavation based on normal cloud model[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5):3783-3798.
- [12] 侯公羽, 马骁赟, 孙晓荣, 等. 基于组合赋权-云模型的抽水蓄能电站综合效益评价[J/OL]. 工程科学与技术, 1-15[2025-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20250513.0946.002.html>.
HOU Gongyu, MA Xiaoyun, SUN Xiaorong, et al. Comprehensive benefit evaluation of pumped storage power plant based on combined weighting and cloud model[J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 1-15[2025-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20250513.0946.002.html>(in Chinese).
- [13] 田赓, 王沉, 刘雪岭, 等. 基于博弈论组合赋权-云模型的煤与瓦斯突出危险性评价[J]. 煤炭技术, 2025, 44(4):180-185.
TIAN Yi, WANG Chen, LIU Xueling, et al. Evaluation of coal and gas outburst risk based on game theory combination weighting method and cloud model[J]. Coal Technology, 2025, 44(4):180-185(in Chinese).
- [14] 赵洪宝, 戈海宾, 程辉, 等. 基于 PSO-AHP 算法的三向应力条件下巷道布置优化及应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(6):21-32.
ZHAO Hongbao, GE Haibin, CHENG Hui, et al. Roadway layout optimization method and its application under threedimensional stress based on PSO-AHP algorithm[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(6):21-32(in Chinese).
- [15] 贾策, 范超军, 李胜, 等. 基于 AHP-熵权组合赋权的

- 开拓巷道过陷落柱围岩支护参数优化[J/OL].煤炭科学技术,1-15[2025-02-26].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20241223.1045.001.html>.
- JIA Ce, FAN Chaojun, LI Sheng, et al. Optimization of surrounding rock supporting parameters of overfall columns in opening roadway based on the combination of AHP-entropy weights[J/OL]. Coal Science and Technology, 1-15 [2025-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20241223.1045.001.html>(in Chinese).
- [16] AYUB Y, MOKTADIR M A, REN J. Sustainable waste valorization process selection through AHP and advanced interval valued fermatean fuzzy with integrated CODAS[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185:408-422.
- [17] ABDEL-HADY M M, BARRANIA A A, ABDEL-KHALEK M Z, et al. A comprehensive approach to strategic planning for marine aquaculture in Egypt:SWOT-AHP analysis[J]. Marine Policy, 2024, 162:1.1-1.9.
- [18] 钱虹,严庆云,王海心,等.基于层次分析法和深度学习的凝汽器健康状况趋势[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(12):2391-2399.
- QIAN Hong, YAN Qingyun, WANG Haixin, et al. Condenser health condition trend prediction using analytic hierarchy process and deep learning [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45 (12):2391-2399(in Chinese).
- [19] 张鹏飞,袁永,何运华,等.基于 GRA-EPSS-SVM模型的露天矿山爆破振动速度预测研究[J].煤炭科学技术,2025,53(7):105-115.
- ZHANG Pengfei, YUAN Yong, HE Yunhua, et al. Blasting vibration velocity prediction of open pit mine based on GRA-EPSS-SVM model [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(7):105-115(in Chinese).
- [20] JAMSHAD H, KHAN A A, MISHRA K R, et al. Taguchi grey relational analysis (GRA) based multi response optimization of flammability, comfort and mechanical properties in station suits[J]. Heliyon, 2025, 11(4):e42508.
- [21] 赵仁山,苏贵平,朱家意,等.基于数值模拟-组合赋权-GRA综合评价模型的巷道支护优化研究[J].采矿技术,2025, 25(1):90-96.
- ZHAO Renshan, SU Guiping, ZHU Jiayi, et al. Roadway support based on the GRA comprehensive evaluation model of numerical simulation combined weighting optimization research [J]. Mining Technology, 2025, 25(1):90-96(in Chinese).
- [22] 黄震,曹琛,张薇,等.基于二维云模型的深基坑施工风险评价方法[J].东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(10):1504-1512.
- HUANG Zhen, CAO Chen, ZHANG Wei, et al. Risk assessment method of deep foundation pit construction based on two-dimensional cloud model [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024, 45(10):1504-1512(in Chinese).

Evaluation of Mining Equipment Selection Based on GRA-AHP-Cloud Model

QIN Xuzhong, XIE Guosen, SONG Lixia, ZHANG Dequan, ZHANG Yuhui
(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: The evaluation of the purchasability of mining equipment is a critical issue in the decision-making process for equipment selection in mining enterprises. To address the limitations of traditional evaluation methods, such as the simplicity and lack of systematicity, a comprehensive evaluation method based on the GRA-AHP-Cloud Model was proposed. Firstly, an evaluation index system was constructed, encompassing four dimensions: production platform, adaptability, functionality, and cost. Secondly, the analytic hierarchy process (AHP) was utilized to determine the weights of each evaluation index, and the grey relational analysis (GRA) was employed to calculate the comprehensive correlation degree between each index of the equipment and the ideal value. Finally, a mathematical model for evaluating equipment purchasability was established through the cloud model, enabling the fuzzy quantitative expression of evaluation results. The method is validated through a case study of mining trolley selection in a mine, demonstrating its effectiveness in assessing the comprehensive performance of equipment.

Key words: mining equipment; GRA; Cloud Model; AHP; equipment selection