

充填智能控制系统成熟度量化评价模型研究*

褚新胜¹, 盛高永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:为科学合理评估充填智能控制系统运行状态,建立了基于博弈论-后悔理论的充填智能控制系统成熟度综合评价模型。首先,基于成熟度理论,从料浆制备、管路输送、强度监测和系统可视化4个方面选取了16个评价指标,构建了矿山充填智能控制系统成熟度综合评价体系;其次,运用博弈论思想确定指标综合权重,通过计算总评价值,对待评对象进行评价;最后,以某铁矿为例,确定充填智能控制系统成熟度等级,并与模糊综合评价模型和物元可拓评价模型得到的评价结果比较。结果显示,该矿山充填智能控制系统成熟度等级为IV级,三种评估模型的评价结果完全一致,验证了本文模型在充填智能控制系统成熟度评估方面具有适用性和可靠性,可以为系统评估和改进提供理论参考。

关键词: 矿山充填; 智能控制系统; 博弈论; 后悔理论; 成熟度
中图分类号: TD853.34 **文献标识码:** A

文章编号: 1005-2763(2024)06-0189-09

近年来,随着科技迅速发展,云计算、5G、互联网等信息技术逐渐被应用于采矿业,越来越多的矿山探索建立了充填智能控制系统,极大地推动了采矿业的高质量发展^[1-2]。充填智能控制系统能够显著提高矿山充填的工作效率,极大减轻充填作业的劳动强度,有效提升企业经济效益。因此,科学合理地进行充填智能控制系统评估,及时发现系统潜在问题,采取针对性措施优化升级系统建设,对于矿山企业发展具有重要意义。

在智能充填理论研究方面,吉坤、QI等^[3-4]分别基于人工神经网络-粒子群算法和机器学习-遗传规划法理论,对充填体强度进行预测,为地下充填采场支护设计提供理论支撑。李立涛等^[5]通过设计均匀试验,研究了充填体抗压强度影响因素,并利用遗传算法寻优功能,构建了胶凝材料配比优化模型,能够有效降低充填成本。肖崇春^[6]采用理论分析与

动、静态沉降试验相结合的方法,对浓密机底流浓度和屈服应力影响因素进行了研究,提出了基于PSO-GBM的全尾砂深度浓密智能预测模型,为浓密机工程设计提供了理论依据。王南南、丁亮亮、石其征等^[7-9]分别介绍了充填智能系统的建设和应用,为类似矿山充填智能系统建设提供借鉴经验。黄永刚等^[10]提出了基于三角图法的充填系统稳定性在线监测与评估模型,为矿山智能充填系统的改进与优化提供思路。总体来看,现有的关于智能充填理论的研究重点是充填体强度预测、料浆配比优化、浓密机底流浓度预测等,对充填智能控制系统应用效果评估的研究相对较少,相关的评价理论体系还不完善。充填智能控制系统成熟度评估的影响因素多,具有复杂性和模糊性,再加上人的主观认知的局限性,导致决策信息伴有较大灰性。后悔理论是基于有限理性的数学模型,可以有效反映决策者的决策行为,具有运算简便高效、适应性强等优势,已被引用到绿色矿山评价^[11]、避险系统安全评估^[12]、矿山事故应急响应风险决策^[13]等方面,取得了良好的应用效果。

为科学合理地评估地下金属矿山充填智能控制系统的应用效果,并为系统优化和改造提供理论依据,在构建充填智能控制系统综合评价指标体系的基础上,基于成熟度理论,定义了充填智能控制系统成熟度等级标准,引入了有限理性的后悔理论,并运用博弈论思想确定指标综合权重,最终建立了基于博弈论-后悔理论的充填智能控制系统成熟度综合评价模型,以期丰富充填智能控制系统评估理论体系。

* 收稿日期:2023-09-05

基金项目:国家重点研发项目(2022YFC2905102)。

作者简介:褚新胜(1983—),男,山东烟台人,工程师,主要从事矿山自动化、智能化控制研究,E-mail:hbltkxx@163.com。

1 充填智能控制系统成熟度模型构建

1.1 成熟度模型架构

能力成熟度最初是用于评估软件行业发展的理论模型^[14],目前,成熟度模型已经被广泛应用到智能建造能力等级^[15]、应急管理^[16]、施工风险等级^[17]等各类评估中。本文结合地下金属矿山充填智能控制系统工程实际,提出将充填智能控制系统成熟度划分为5个等级,如图1所示。系统成熟度分级标准及等级特征描述见表1。

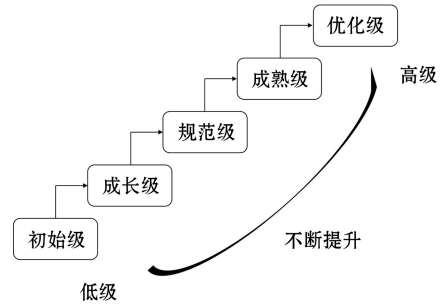


图1 成熟度理论示意

Fig.1 Schematic diagram of maturity theory

表1 充填智能控制系统成熟度分级标准及赋值区间

Table 1 Maturity grading standards and assignment intervals of intelligent filling control system

成熟度等级	等级描述	赋值区间
初始级	在此阶段,虽然建立了充填智能控制系统,但系统集成度低,没有依托智能算法对系统进行优化和升级,难以有效保证智能化充填系统长期运行的可靠性和稳定性,特别是在复杂矿体赋存条件下,智能化控制系统的适应性较差,子系统协同控制不够理想,充填目标和应用效益无法显现。	[0,2)
成长级	在此阶段,根据智能化控制系统实际运营情况,结合工程经验,矿山企业在原有基础上,自主开展系统优化和改造,各子系统运行稳定性提升,系统整体运行相对合理,基本实现了相关数据整合分析的功能,智能化控制系统实施效果、充填效率及质量和企业经济效益逐步提升。	[2,4)
规范级	在此阶段,应用大数据等先进技术,智能化控制系统运行更加高效,多元性数据融合功能进一步提升,基于优化算法,系统能够自适应井下特殊环境,系统决策有效精准,各子系统协同性增强,形成了模块化、系统化、标准化的智能化充填控制模式。	[4,6)
成熟级	在此阶段,充填控制系统整体智能化能力得到有效发挥,智能化短板得到不断补齐,集成度增强,充填效能已显现,运维安全性和可靠性提高,并结合实际,建立了充填智能控制系统量化与评估标准,定期对系统智能化水平开展评估,并及时改进存在的缺陷,智能化水平不断提高。	[6,8)
优化级	在此阶段,智能化控制系统成熟度最高,系统先进智能,设备高度集成,系统对充填过程中各类数据信息进行汇总和科学决策分析,并不断引进高新技术,系统网络安全性和科技含量大大提升,移动端便捷性显著提升,智能安全反馈功能齐全,能够有效应对各类复杂条件和潜在风险,充填成本大大降低,企业收益显著提高,整个充填控制系统智能化水平处于不断优化和升级中。	[8,10]

1.2 构建评估体系

基于全过程理论,综合考虑充填智能控制系统特点、应用实际以及充填效能的总体目标,在咨询现场专家的基础上,从料浆制备、管道输送、强度监测及可视化管理等4个方面选取16个指标,构建充填智能控制系统成熟度综合评价指标体系,具体见表2。

表2 指标体系

Table 2 Indicatorsystem

准则层指标	目标层指标
充填料浆制备系统 X_1	供砂系统智能化 X_{11}
	浓密造浆可靠性 X_{12}
	配灰系统精准性 X_{13}
	搅拌桶液位稳控度 X_{14}
	管路压力分布监测 X_{21}
充填料浆输送系统 X_2	充填管网故障预警 X_{22}
	管路流态分析 X_{23}
	管路冲洗控制 X_{24}
	充填过程自诊断自调整功能 X_{25}
	充填体强度变化监测 X_{31}
充填体强度监测系统 X_3	充填体稳定性 X_{32}
	充填挡墙稳定性 X_{33}
	系统网络安全性 X_{41}
系统可视化管理 X_4	大数据采集分析融合度 X_{42}
	移动端便捷性 X_{43}
	智能安全反馈功能 X_{44}

2 理论基础

2.1 博弈论确定指标权重

2.1.1 区间层次分析法(IAHP)计算主观权重

吴育华教授用区间数代替固定数表征指标之间相对重要性程度,改进了传统层次分析法的赋权方式,提出了区间层次分析法的概念。该方法在应对指标体系结构庞杂,处理待评对象的模糊性、随机性和不确定性等问题方面具有更高的可靠性,具体计算过程如下^[18]。

(1) 构建区间数判断矩阵。区间层次分析法采用区间数 $a = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$ 体现指标相对重要性程度,其中, a_{ij}^- 、 a_{ij}^+ 分别代表相对重要性下限和上限,区间数取值量化规则见表3,在实际判定重要性程度时,可依据主观经验对表3中的标度进行再次细化。根据区间数量化结果建立区间判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 一致性检验。区间判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 要满足检验。将区间判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 拆分为

正判断矩阵 \mathbf{A}^+ 和负判断矩阵 \mathbf{A}^- , 分别计算两个判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{i\max}$ 及基础权重向量 $\mathbf{w}^-=(w_1^-, w_2^-, \dots, w_n^-)$ 和 $\mathbf{w}^+=(w_1^+, w_2^+, \dots, w_n^+)$ 。约定当 $k \leq 1$ 且 $\beta \geq 1$ 时满足一致性要求。具体计算公式为:

$$w_1 = k w^-, w_2 = \beta w^+ \quad (1)$$

$$\lambda_{i\max} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij} w_i}{n w_i} \quad (2)$$

$$k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}} \quad (4)$$

(3) 计算指标权重。经过对两个基础向量归一化处理, 得到主观权重。

$$w = \frac{1}{2}(k w^- + \beta w^+) \quad (5)$$

$$\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (6)$$

表 3 9 标度量化的判据

Table 3 9 scaling quantification criteria

标度	含义
1	两指标重要性相同
3	与后者相比, 前者稍重要
5	与后者相比, 前者相对重要
7	与后者相比, 前者特别重要
9	与后者相比, 前者极其重要
2, 4, 6, 8	重要性程度位于相邻标度中间
1/1, 1/2, ..., 1/9	$A_{ji} = 1/a_{ij}$

2.1.2 熵权法计算指标客观权重

熵权法是依据指标变异性和反映整体信息量多少进行指标权重分配的客观赋权法, 基于信息熵理论, 通过计算指标熵值, 确定指标权重。具体计算过程如下^[19]。

(1) 建立原始评估矩阵。根据工程实际, 由专家组结合指标分级标准, 对各指标进行赋值, 构建原始评分矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$, 其中 m 表示专家组人员数, n 表示待评对象指标数量。将原始评分矩阵 \mathbf{X} 归一化处理, 得到标准化矩阵 $\mathbf{Y}=(y_{ij})_{m \times n}$ 。归一化公式为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \text{效益型指标} \quad (7)$$

$$y_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \text{成本型指标} \quad (8)$$

(2) 计算指标熵值 E_j 。按照式(9)和式(10)计

算指标熵值 E_j :

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(1 - P_{ij}) \quad (9)$$

$$P_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (10)$$

(3) 根据指标熵值 E_j 计算结果, 确定指标客观权重 w_j 。

$$w_j = E_j / \sum_{j=1}^n E_j \quad (11)$$

2.1.3 博弈论确定综合权重

将区间层次分析法计算指标权重记为 $\mathbf{W}_1=(w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n})$, 将熵权法计算指标权重记为 $\mathbf{W}_2=(w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2n})$ 。基于博弈论思想, 将 2 组权重向量组成一组博弈策略集合 $\mathbf{W}=(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2)=(w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n}), (w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2n})$, 对这 2 组权重向量任意线性组合, 进行离差极小化处理, 以便满足指标权重结果均衡性要求。具体计算步骤如下。

(1) 将 2 组权重向量线性组合, 得到综合向量 \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{21} \\ w_{12} & w_{22} \\ \vdots & \vdots \\ w_{1n} & w_{2n} \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1^2 \\ W_2^2 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

(2) 通过建立目标函数, 以 2 组权重向量离差之和最小为目标, 寻优权重线性组合系数, 目标函数及约束条件为:

$$\min(\|\mathbf{W} - \mathbf{W}_1\|_2 + \|\mathbf{W} - \mathbf{W}_2\|_2) = \min(\|a\mathbf{W}_1 + b\mathbf{W}_2 - \mathbf{W}_1\|_2 + \|a\mathbf{W}_1 + b\mathbf{W}_2 - \mathbf{W}_2\|_2) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } a + b = 1, a, b \geq 0 \quad (14)$$

(3) 根据微分原理, 对目标函数求取一阶导数, 需满足的条件为:

$$\begin{cases} a\mathbf{W}_1\mathbf{W}_1^T + b\mathbf{W}_1\mathbf{W}_2^T = \mathbf{W}_1\mathbf{W}_1^T \\ a\mathbf{W}_2\mathbf{W}_1^T + b\mathbf{W}_2\mathbf{W}_2^T = \mathbf{W}_2\mathbf{W}_2^T \end{cases} \quad (15)$$

(4) 线性组合权重系数需满足归一性条件, 得到最优线性权重系数:

$$\begin{cases} a^* = \frac{|a|}{|a| + |b|} \\ b^* = \frac{|b|}{|a| + |b|} \end{cases} \quad (16)$$

基于组合赋权博弈论思想的指标综合权重计算公式为:

$$\mathbf{W}^* = a^* \mathbf{W}_1 + b^* \mathbf{W}_2 \quad (17)$$

2.2 后悔理论

地下金属矿山充填智能控制系统成熟度评估属

于典型的多属性综合决策过程。在进行充填智能控制系统成熟度定性评估时,决策者容易受到各种心理因素影响,表现出刻意风险规避或厌恶损失等有限理性行为,从而影响评估结果的可靠性。后悔理论模型能够有效规避决策者有限理性行为,最大限度地客观反映待评对象的真实状态。具体计算过程如下^[20]。

(1) 建立评价矩阵 Q :

$$Q = (q_{mn}) = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \cdots & q_{2n} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \cdots & q_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & q_{m3} & \cdots & q_{mn} \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中, q_{mn} 为第 m 个专家对第 n 个指标打分值, ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)。

(2) 根据评价矩阵 Q 确定各指标理想值, 构建理想点矩阵 P :

$$P = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n) \quad (19)$$

式中, p_n 表示为各指标的理想值, 为减少评估者在评估过程中的后悔程度, 约定理想值取各指标最小值。

(3) 建立效用值矩阵。后悔理论通过选取合理的效用函数, 计算各指标效用值, 进一步规避评估者回避风险的有限理性行为。本文选取幂函数型效用函数。计算公式为:

$$h(q_{mn}) = (q_{mn})^\alpha \quad (20)$$

式中, α 为效用函数的参数, 取值 $0 < \alpha < 1$ 。

根据效用函数, 结合指标赋值, 计算指标效用值, 建立效用值矩阵 H :

$$H = (q_{mn})^\alpha \quad (21)$$

(4) 建立感知效用矩阵。构建后悔-欣喜函数值矩阵 R :

$$R(a_{mp})_{ij} = 1 - e^{-\beta(a_{mp})^{ij}} \quad (22)$$

式中, β 为后悔-欣喜函数的参数, $\beta > 0$, 取值越小, 表明决策者规避后悔风险程度越不明显; a_{mp} 表示评分值与理想值效用差。

将效用值与后悔-欣喜函数值累加求和, 得到指标感知效用值, 具体计算公式为:

$$D = d_{mn} = H + R = (q_{mn})^\alpha + (1 - e^{-\beta(a_{mp})^{ij}}) \quad (23)$$

(5) 确定风险评估结果。根据指标打分值, 耦合准则层指标权重, 计算各准则层指标的综合评估值, 并确定各准则层充填智能控制系统成熟度等级, 具体计算公式为:

$$S_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij} d_{ij} \quad (24)$$

式中, S_k 为第 k 个准则层的综合评估值; ω_{ij} 为第 j 个准则层下各指标权重。

充填智能控制系统成熟度评估需要统筹考虑料浆制备、管道输送、强度监测和可视化管理 4 个方面, 因此, 为确定充填智能控制系统整体成熟度等级, 需要计算总综合评估值。具体计算公式为:

$$S = \sum_{k=1}^4 S_k \omega_j \quad (25)$$

式中, S 为总综合评估值; ω_j 为第 j 个准则层的指标权重。

2.3 实现过程

如前所述, 本文建立了基于博弈论-后悔理论的充填智能控制系统成熟度综合评价模型, 具体实现过程如图 2 所示。

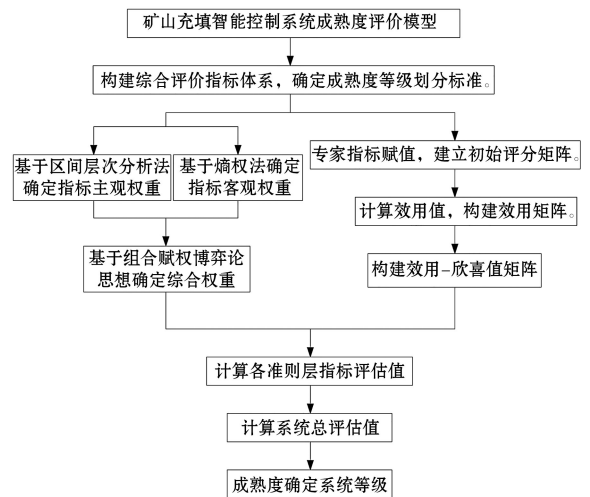


图 2 评价流程

Fig.2 Evaluation process

3 模型应用与分析

为验证所提出的基于后悔理论的充填智能控制系统成熟度评估模型的适用性, 以某铁矿为例, 通过相关计算, 评估系统应用效果和确定成熟度等级。该铁矿于 2007 年建矿, 采用充填法回采矿石, 年产量为 300 万/t, 为实现连续高效充填生产, 进一步节约人力成本, 于 2018 年对原有充填系统进行改造, 升级为充填智能控制系统。

为作好充填智能控制系统成熟度评估, 组建了包括了 2 名高校教授和 4 名现场高级工程师的临时专家评估组。专家组通过实地调研, 结合充填系统设计报告, 按照成熟度评估标准, 对各指标进行打分。指标打分情况见表 4。

表 4 专家打分情况
Table 4 Expert scoring situation

专家 编号	评价指标															
	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄
Z ₁	7.3	6.9	7.7	7.4	7.7	7.5	6.6	7.4	7.1	7.2	9.1	7.7	8.1	7.5	6.7	6.4
Z ₂	8.4	7.2	7.2	8.2	7.9	7.7	7.2	7.5	6.8	7.6	8.6	7.9	8.3	7.7	7.3	6.7
Z ₃	7.7	7.4	7.8	8.5	8.2	8.5	8.1	7.2	7.4	8.1	8.4	8.3	8.6	8.3	7.6	7.2
Z ₄	8.6	7.5	7.3	7.9	8.5	8.3	7.9	7.3	8.1	8.8	9.3	8.6	9.1	8.1	7.7	7.4
Z ₅	7.9	6.8	7.6	8.4	8.1	8.4	7.4	7.1	7.5	8.5	8.6	8.8	9.4	7.7	6.4	6.9
Z ₆	7.5	7.2	6.8	7.7	7.4	8.1	7.9	6.8	8.3	7.9	9.3	7.9	8.8	8.4	7.5	6.6

3.1 计算指标权重

3.1.1 计算指标权重

专家组经过充分讨论形成统一意见后,确定指标 X₁ 至 X₄ 相对重要性程度区间数,具体见表 5。根据式(1)至式(6),将区间判断矩阵拆分为正、负两个判断矩阵,利用 MTALAB 软件,计算各判断矩阵特征向量。其中, $\mathbf{x}^+ = (0.2465, 0.3883, 0.1591, 0.2059)$, $\mathbf{x}^- = (0.2465, 0.3852, 0.1590, 0.2093)$, 一致性检验系数分别为 $k = 0.9515 < 1$, $p = 1.0396 > 1$,符合一致性检验要求。计算正、负判断矩阵主观权重分别为 (0.2346, 0.3695, 0.1514, 0.1960)、(0.2563, 0.4004, 0.1653, 0.2176),通过对两组主观权重归一化处理,得到准则层相对于目标层指标的主观权重为(0.246, 0.387, 0.159, 0.208)。

按照相同步骤,确定充填料浆制备系统(X₁)、充填料浆输送系统(X₂)、充填体强度监测系统(X₃)、系统可视化管理(X₄)4个准则层下各指标目标权重。其中“充填料浆制备系统(X₁)”下的4个目标层指标主观权重为(0.202, 0.263, 0.367, 0.168),“充填料浆输送系统(X₂)”下的5个目标层指标主观权重为(0.177, 0.345, 0.229, 0.113, 0.136),“充填体强度监测系统(X₃)”下的3个目标层指标主观权重为(0.306, 0.458, 0.236),“系统可视化管理(X₄)”下的4个目标层指标主观权重为(0.411, 0.172, 0.143, 0.274)。

表 5 准则层指标区间判断矩阵

Table 5 Interval judgment matrix of criteria layer indicator

指标	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
X ₁	[1.000, 1.000]	[0.500, 0.700]	[1.400, 1.800]	[1.100, 1.400]
X ₂	[1.428, 2.000]	[1.000, 1.000]	[2.100, 2.500]	[1.600, 2.100]
X ₃	[0.556, 0.714]	[0.400, 0.476]	[1.000, 1.000]	[0.600, 0.900]
X ₄	[0.714, 0.909]	[0.476, 0.625]	[1.111, 1.666]	[1.000, 1.000]

3.1.2 客观权重

根据熵权法赋权原理,按照式(7)和式(8)对专

家打分数据进行归一化处理,具体计算结果见表 6。根据式(9)、式(10)和式(11),计算 16 个目标层指标熵值 E_j 为(0.463, 0.477, 0.503, 0.495, 0.455, 0.511, 0.509, 0.484, 0.467, 0.462, 0.537, 0.462, 0.455, 0.483, 0.534, 0.456),相应的指标客观权重 w_j 为(0.060, 0.062, 0.065, 0.064, 0.059, 0.066, 0.066, 0.062, 0.060, 0.060, 0.069, 0.060, 0.059, 0.062, 0.069, 0.059)。由此可得,充填料浆制备系统(X₁)、充填料浆输送系统(X₂)、充填体强度监测系统(X₃)、系统可视化管理(X₄)4个准则层指标客观权重为(0.249, 0.313, 0.189, 0.249)。

按同样步骤,可得“充填料浆制备系统(X₁)”下的4个目标层指标客观权重为(0.239, 0.246, 0.259, 0.256),“充填料浆输送系统(X₂)”下的5个目标层指标客观权重为(0.188, 0.211, 0.209, 0.199, 0.193),“充填体强度监测系统(X₃)”下的3个目标层指标客观权重为(0.316, 0.367, 0.317),“系统可视化管理(X₄)”下的4个目标层指标客观权重为(0.236, 0.251, 0.277, 0.236)。

表 6 指标标准化结果

Table 6 Normalization results of indicators

专家 编号	评价指标							
	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄
Z ₁	1.000	0.857	0.100	1.000	0.727	1.000	1.000	0.143
Z ₂	0.154	0.429	0.600	0.273	0.545	0.800	0.600	0.000
Z ₃	0.692	0.143	0.000	0.000	0.273	0.000	0.000	0.429
Z ₄	0.000	0.000	0.500	0.545	0.000	0.200	0.133	0.286
Z ₅	0.538	1.000	0.200	0.091	0.364	0.100	0.467	0.571
Z ₆	0.846	0.429	1.000	0.727	1.000	0.400	0.133	1.000
专家 编号	评价指标							
	X ₂₅	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄
Z ₁	1.000	1.000	0.222	1.000	1.000	1.000	0.769	1.000
Z ₂	1.250	0.750	0.778	0.818	0.846	0.778	0.308	0.700
Z ₃	0.750	0.438	1.000	0.455	0.615	0.111	0.077	0.200
Z ₄	0.167	0.000	0.000	0.182	0.231	0.333	0.000	0.000
Z ₅	0.667	0.188	0.778	0.000	0.000	0.778	1.000	0.500
Z ₆	0.000	0.563	0.000	0.818	0.462	0.000	0.154	0.800

3.1.3 综合权重

将区间层次分析法计算指标主观权重记为 $\mathbf{W}_1 = (0.246, 0.387, 0.159, 0.208)$, 将熵权法计算指标客观权重记为 $\mathbf{W}_2 = (0.249, 0.313, 0.189, 0.249)$, 基于组合赋权博弈论思想, 根据式(12)至式(16), 计算权重均衡系数分别为: $a = 1.631, b = -0.667$, 归一化处理后, 可得 $a^* = 0.7097, b^* = 0.2903$. 最终, 充填料浆制备系统(X_1)、充填料浆输送系统(X_2)、充填体强度监测系统(X_3)、系统可视化管理(X_4) 4个准则层的综合权重 \mathbf{W}^* 为 $(0.247, 0.366, 0.168, 0.219)$.

按同样步骤, 可得“充填料浆制备系统(X_1)”下的4个目标层指标综合权重为 $\mathbf{W}_{X_1}^*$ $(0.204, 0.262, 0.362, 0.172)$, “充填料浆输送系统(X_2)”下的5个目标层指标综合权重为 $\mathbf{W}_{X_2}^*$ $(0.178, 0.331, 0.227, 0.122, 0.142)$, “充填体强度监测系统(X_3)”下的3个目标层指标综合权重为 $\mathbf{W}_{X_3}^*$ $(0.309, 0.424, 0.267)$, “系统可视化管理(X_4)”下的4个目标层指标综合权重为 $\mathbf{W}_{X_4}^*$ $(0.391, 0.181, 0.159, 0.269)$.

3.2 充填智能控制系统成熟度综合评估

根据后悔理论计算原理, 结合专家指标赋值情况, 构建初始评分矩阵 \mathbf{Q} , 并确定理想点矩阵 \mathbf{P} , 通过计算指标效用值、后悔-欣喜值和感知效用值, 结合指标权重, 确定各准则层综合评估值和系统总综合评估值, 最后基于系统总综合评估值, 分析确定充填智能控制系统成熟度等级。限于篇幅, 以下以“充填料浆制备系统(X_1)”为例, 说明评估过程。

(1) 根据表4专家组指标赋值, 构建“充填料浆制备系统(X_1)”原始评分矩阵 \mathbf{Q}_{X_1} :

$$\mathbf{Q}_{X_1} = \begin{bmatrix} 7.3 & 8.4 & 7.7 & 8.6 & 7.9 & 7.5 \\ 6.9 & 7.2 & 7.4 & 7.5 & 6.8 & 7.2 \\ 7.7 & 7.2 & 7.8 & 7.3 & 7.6 & 6.8 \\ 7.4 & 8.2 & 8.5 & 7.9 & 8.4 & 7.7 \end{bmatrix}$$

(2) 根据式(19), 选取各位专家打分值最小值, 建立理想点矩阵 \mathbf{P}_{X_1} :

$$\mathbf{P}_{X_1} = [7.3 \quad 6.8 \quad 6.8 \quad 7.4]^T$$

(3) 根据式(20)和式(21), 建立“充填料浆制备系统(X_1)”准则层指标效用矩阵 \mathbf{H}_{X_1} :

$$\mathbf{H}_{X_1} = \begin{bmatrix} 5.984 & 6.791 & 6.278 & 6.935 & 6.425 & 6.131 \\ 5.688 & 5.911 & 6.058 & 6.131 & 5.614 & 5.911 \\ 6.278 & 5.911 & 6.352 & 5.984 & 6.205 & 5.614 \\ 6.058 & 6.644 & 6.862 & 6.425 & 6.791 & 6.278 \end{bmatrix}$$

(4) 根据式(22), 建立“充填料浆制备系统

(X_1)”准则层指标的后悔-欣喜值矩阵 \mathbf{R}_{X_1} 为:

$$\mathbf{R}_{X_1} = \begin{bmatrix} 0.000 & -0.011 & -0.004 & -0.013 & -0.006 & -0.002 \\ -0.001 & -0.004 & -0.006 & -0.007 & 0.000 & -0.004 \\ -0.009 & -0.004 & -0.011 & -0.005 & -0.008 & 0.000 \\ 0.000 & -0.008 & -0.011 & -0.005 & -0.010 & -0.003 \end{bmatrix}$$

(5) 根据式(23), 将效用矩阵与后悔-欣喜矩阵叠加, 确定“充填料浆制备系统(X_1)”准则层指标的感知效用矩阵 \mathbf{D}_{X_1} 为:

$$\mathbf{D}_{X_1} = \begin{bmatrix} 5.984 & 6.779 & 6.274 & 6.922 & 6.419 & 6.129 \\ 5.687 & 5.906 & 6.052 & 6.124 & 5.614 & 5.906 \\ 6.269 & 5.906 & 6.342 & 5.979 & 6.197 & 5.614 \\ 6.058 & 6.636 & 6.852 & 6.420 & 6.780 & 6.275 \end{bmatrix}$$

(6) 按照同样步骤, 计算充填料浆输送系统(X_2)、充填体强度监测系统(X_3)、系统可视化管理(X_4) 3个准则层指标的感知效用矩阵 ($\mathbf{D}_{X_2} \sim \mathbf{D}_{X_4}$), 具体计算结果为:

$$\mathbf{D}_{X_2} = \begin{bmatrix} 6.275 & 6.420 & 6.636 & 6.852 & 6.564 & 6.058 \\ 6.131 & 6.276 & 6.853 & 6.709 & 6.781 & 6.565 \\ 5.465 & 5.904 & 6.556 & 6.412 & 6.050 & 6.412 \\ 6.052 & 6.124 & 5.906 & 5.979 & 5.833 & 5.614 \\ 5.833 & 5.614 & 6.052 & 6.558 & 6.124 & 6.702 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{X_3} = \begin{bmatrix} 5.910 & 6.201 & 6.562 & 7.064 & 6.850 & 6.418 \\ 7.290 & 6.933 & 6.790 & 7.432 & 6.933 & 7.432 \\ 6.278 & 6.423 & 6.711 & 6.926 & 7.069 & 6.423 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{X_4} = \begin{bmatrix} 6.571 & 6.715 & 6.930 & 7.287 & 7.500 & 7.073 \\ 6.131 & 6.276 & 6.709 & 6.565 & 6.276 & 6.781 \\ 5.536 & 5.975 & 6.193 & 6.265 & 5.316 & 6.120 \\ 5.316 & 5.536 & 5.902 & 6.048 & 5.683 & 5.463 \end{bmatrix}$$

根据式(24), 可求得“充填料浆制备系统(X_1)”各项指标加权求和评估值 S_{X_1} 为 6.1594, “充填料浆输送系统(X_2)”各项指标加权求和评估值 S_{X_2} 为 6.3073, “充填体强度监测系统(X_3)”各项指标加权求和评估值 S_{X_3} 为 6.8065, “系统可视化管理(X_4)”各项指标加权求和评估值 S_{X_4} 为 6.3709. 根据式(25), 可求得该矿山充填智能控制系统成熟度风险评估值 S 为 6.3686. 根据表1可知, 该矿山充填智能控制系统成熟度等级为IV级, 即综合级。

3.3 评估结果分析

为进一步验证后悔理论应用于地下金属矿山充填智能控制系统成熟度评估方面的可行性和准确性, 将本文评估结果与模糊综合评价法及物元可拓模型评估结果进行对比. 3种评估模型的评价结果及对比情况见表7.

表7 评估结果及对比情况

Table 7 Evaluation results and comparison

理论模型	评估结果	成熟度等级
后悔理论评价模型	6.3686	Ⅳ级
模糊综合评价模型	6.9873	Ⅳ级
物元可拓模型	(-0.3587, -0.2873, -0.1829, 0.1236, -0.2537)	Ⅳ级

根据表7可知,由本文评价方法得到的评价结果与其他两种评价法的评估结果一致,且与专家现场调研结论相符合,表明了后悔理论用于地下金属矿山充填智能控制系统成熟度评估方面具有适用性和可行性,能够较为真实、全面反映充填智能控制系统成熟度状态。同时,基于模糊综合评价模型计算综合评估值为6.9873,而后悔理论评价模型综合评估值为6.3686,基于后悔理论的总综合评估值比模糊综合评价模型综合评估值偏小,表明后悔理论在综合评估时较为保守。同时,由于构建了多层次的综合评价指标体系,与物元可拓模型相比,基于博弈论-后悔理论的评价模型不仅考虑了充填智能控制系统成熟度评估的模糊性特点,实现了定性概念的量化计算,且评估过程更加简便高效,易于操作。

基于后悔理论不仅可以整体反映充填智能控制系统成熟度状态,还能得到各子系统真实状态,可以深入分析各子系统存在的问题,并采取针对性措施优化系统建设,进一步提升系统整体成熟度。前文中计算得到4个子系统的各项指标加权求和评估值分别为: $S_{X_1}=6.1594$, $S_{X_2}=6.3073$, $S_{X_3}=6.8065$, $S_{X_4}=6.3709$ 。因此,可以确定该矿山充填智能控制系统按成熟度从高到低的排序为:充填体强度监测系统(X_3),系统可视化管管理(X_4),充填料浆输送系统(X_2),充填料浆制备系统(X_1),说明后续需持续优化和改进料浆制备及管道输送两个子系统。该矿山依托视频监控系统对设备、管路实际状况进行实时监控,当充填过程存在工艺偏差时,程序自动发出相应报警,提醒工作人员及时干预处理;该矿山通过预埋多个数据采集箱,对充填体的温度、湿度、形变等情况进行实时监控,并将采集数据及时回传至数据平台,平台可以依据数据信息对充填体强度进行分析评估,提升了充填的效率,保证了充填的质量和安全性。但是,针对目前系统运行状况,还需应用智能算法,在满足充填体强度要求下,建立不同类型矿山充填材料配比大数据库,实现精准配灰配料,进一步提升企业生产经济效益。

4 结论

(1) 为获得均衡合理的评价指标权重,借助区间层次分析法和熵权法分别计算指标主观权重和客观权重,并基于组合赋权博弈论思想,确定指标综合权重,兼顾了决策者在评估过程中的主观能动性,又体现了系统客观实际,有助于提升评估结果的可靠性。

(2) 考虑到矿山充填智能控制系统成熟度评估属于多属性定性评价过程,具有模糊性、不确定性特点,引入了基于有限理性的后悔理论,建立了充填智能控制系统成熟度综合评价模型。以甘肃省某铁矿为例,进行相关计算,并与模糊综合分析法和物元可拓模型评价结果进行对比,结果显示,该矿山充填智能控制系统成熟度等级为Ⅳ级,即综合级,且3种评估模型的评价结果完全一致,验证了本评估模型在充填智能控制系统成熟度评估方面的适用性。分析了充填子系统的成熟度,并简要提出了改进措施。

(3) 矿山充填智能控制系统成熟度评估的影响因素较多,在今后研究中,还需要结合矿山充填智能控制系统应用实际,进一步完善指标评价体系,以提高评估模型的可操作性,满足个性化需求。

参考文献(References):

- [1] 王增加,齐兆军,寇云鹏,等.智慧充填系统赋能矿山新发展[J].矿业研究与开发,2022,42(1):156-161.
WANG Zengjia, QI Zhaojun, KOU Yunpeng, et al. Intelligent filling system enabling new development of mine [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(1): 156-161.
- [2] 陈鑫政,杨小聪,郭利杰,等.矿山充填智能控制系统设计及工程应用[J].有色金属工程,2022,12(2):114-120.
CHEN Xinzhen, YANG Xiaocong, GUO Lijie, et al. Intelligent control system design on mine filling and engineering applications[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(2): 114-120.
- [3] 吉坤,韩斌,胡亚飞,等.基于强度折减与智能算法的井下充填体强度预测[J].中国有色金属学报,2021,31(3):796-805.
JI Kun, HAN Bin, HU Yafei, et al. Prediction of backfill strength in underground stope based on strength reduction and intelligent algorithm [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(3): 796-805.
- [4] QI Chongchong, TANG Xiaolin, DONG Xiangjian, et al. Towards intelligent mining for backfill: a genetic programming-based method for strength forecasting of cemented paste backfill [J]. Minerals Engineering, 2019, 133: 69-79.

- [5] 李立涛,杨晓炳,高谦,等.基于均匀试验与智能算法的全固废充填胶凝材料制备[J].矿冶工程,2019,39(6):15-19.
LI Litao, YANG Xiaobing, GAO Qian, et al. Preparation of cementitious backfill material with full solid waste based on uniform test and intelligent algorithms [J]. Mining and metallurgical Engineering, 2019, 39(6): 15-19.
- [6] 肖崇春.基于全尾砂深度浓密演绎机理的智能预测模型研究[D].长沙:中南大学,2022.
XIAO Chongchun. Research on intelligent prediction model based on depth thickening deductive mechanism of unclassified tailings[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [7] 王南南,余剑,王玉富,等.一键智能充填系统在张庄矿的应用[J].现代矿业,2021,37(2):137-140.
WANG Nannan, YU Jian, WANG Yufu, et al. Application of one-key intelligent filling system in Zhangzhuang mine [J]. Modern Mining, 2021, 37(2): 137-140.
- [8] 丁亮亮,冯建,高大林,等.白象山铁矿一键充填智能化系统研究与应用[J].现代矿业,2022,38(12):18-21.
DING Liangliang, FENG Jian, GAO Dalin, et al. Research and application of one-key filling intelligent system in Baixiangshan iron mine [J]. Modern Mining, 2022, 38(12): 18-21.
- [9] 石其征,李延振.梁家煤矿膏体充填开采智能控制系统设计方案[J].山东煤炭科技,2021,39(9):205-207.
SHI Qizheng, LI Yanzhen. Design scheme of intelligent control system for paste filling mining in Liangjia coal mine [J]. Shandong Coal Technology, 2021, 39(9): 205-207.
- [10] 黄永刚,饶运章,李勇.充填系统稳定性的在线监测及评价[J].有色金属科学与工程,2016,7(4):121-126.
HUANG Yonggang, RAO Yunzhang, LI Yong. On line monitoring and evaluation of filling system stability [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2016, 7(4): 121-126.
- [11] 廖思磊.基于 ELECTRE III 法的绿色矿山评价研究[D].成都:成都理工大学,2021.
LIAO Silei. Evaluation of green mines based on ELECTRE III [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [12] 郭隆鑫,李希建,刘柱.基于后悔理论-集对势分析的矿山紧急避险系统安全评价[J].矿业研究与开发,2020,40(4):85-90.
GUO Longxin, LI Xijian, LIU Zhu. Safety evaluation of mine emergency system based on regret theory and set pair potential analysis [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(4): 85-90.
- [13] 王娟,戴凤威,方博.煤矿事故应急响应的风险决策研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):21-26.
WANG Juan, DAI Fengwei, FANG Bo. Research on risk decision-making of emergency response to coal mine accidents [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6): 21-26.
- [14] SAIEDIAN H, KUZARA R. SEI capability maturity model's impact on contractors[J]. Computer, 1995, 28(1): 16-26.
- [15] 赵思成,李晓军,徐博,等.钻爆法施工隧道智能建造能力成熟度评价模型[J].土木工程学报,2022,55(增刊2):20-28.
ZHAO Sicheng, LI Xiaojun, XU Bo, et al. Capability maturity evaluation model for intelligent tunnel construction by drill and blast method [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(S2): 20-28.
- [16] 成连华,周瑞雪,严瑾,等.煤矿应急救援能力成熟度评价模型构建及应用[J].中国安全科学学报,2021,31(7):180-186.
CHENG Lianhua, ZHOU Ruixue, YAN Jin, et al. Construction and application of maturity evaluation model of coal mine emergency rescue ability [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(7): 180-186.
- [17] 张鹏,江逸帆,詹钰鑫.基于改进未确知测度的地铁突发事件应急能力成熟度模型研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(5):116-123.
ZHANG Peng, JIANG Yifan, ZHAN Yuxin. Maturity model of metro emergency response capability based on improved unascertained measure [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(5): 116-123.
- [18] 陈述,郁钟铭,李春良,等.基于灰色聚类-IAHP 的顶板事故风险评估[J].采矿技术,2018,18(6):102-104.
CHEN Shu, YU Zhongming, Li Chunliang, et al. Risk assessment of roof accidents based on grey clustering IAHP [J]. Mining Technology, 2018, 18(6): 102-104.
- [19] 周航,陈仕阔,刘彤,等.挤压性围岩大变形危险性评价的组合赋权-理想点模型[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(10):3647-3658.
ZHOU Hang, CHEN Shikuo, LIU Tong, et al. Combination weight and ideal point method model for risk evaluation on squeezing large deformation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(10): 3647-3658.
- [20] 涂圣文,赵振华,邓梦雪,等.基于组合赋权-后悔理论的城市综合管廊运维总体风险评估[J].安全与环境工程,2020,27(6):160-167.
TU Shengwen, ZHAO Zhenhua, DENG Mengxue, et al. Overall risk assessment for urban utility tunnel during operation and maintenance based on combination weighting and regret theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(6): 160-167.

Research on Quantitative Evaluation Model for Maturity of Filling Intelligent Control System

CHU Xinsheng¹, SHENG Gaoyong¹, ZHANG Haiyun^{2,3}

(1.Linyi Huibaoling Iron Mine Co., Ltd., Linyi, Shandong 277712, China;

2.Changsha Mining Research Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;

3.Research Center for National Metal Mining Engineering Technology, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: To scientifically and reasonably evaluate the operational status of the filling intelligent control system, a comprehensive evaluation model for the maturity of the filling intelligent control system based on game theory and regret theory was established. Firstly, based on the maturity theory, 16 influencing factors were selected from four aspects, including slurry preparation, pipeline transportation, strength monitoring, and system visualization, and a comprehensive evaluation system for the maturity of the filling intelligent control system was constructed. Secondly, game theory was used to determine the comprehensive weights of indicators, the evaluation of the target was carried out by calculating the total evaluation value. Finally, taking a certain iron mine as an example, the maturity level of the filling intelligent control system was determined and compared with the results of fuzzy synthesis and matter element extension. The results show that the maturity level of the filling intelligent control system in the mine is level IV, and the conclusions of the three evaluation models are completely consistent. The results have verified the applicability and reliability of this model in the maturity evaluation of the filling intelligent control system, and can provide a theoretical reference for system evaluation and improvement.

Key words: Mine filling, Intelligent control system, Game theory, Regret theory, Maturity