

# 基于 AHP-熵权法的金属非金属矿山 智能化水平评估体系研究

Research on the Evaluation System of Intelligentization Level in Metal and Non-metal  
Mines Based on AHP-Entropy Weight Method

郭 帅 (中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 本文围绕金属非金属矿山智能化建设需求, 构建了一套涵盖生产工艺全流程的智能化水平动态评估体系。通过文献研究、行业调研, 并参考相关行业智能化建设经验, 提出基于“生产流程智能化”“安全管控效能”“数据融合能力”“管理创新水平”四大维度的评估模型, 指标层细化至 18 项量化指标, 采用层次分析法 (AHP) 与熵权法组合赋权, 通过线性加权法计算综合权重实现量化评估。研究结果表明, 该体系可有效反映矿山智能化建设的薄弱环节, 能够全面、客观反映矿山智能化建设水平, 为矿山企业提供分级改进建议, 助力行业智能化高质量发展, 并为行业政策制定提供参考。

**关键词:** 金属非金属矿山; 智能化评估; 层次分析法; 熵权法

**中图分类号:** TP311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)04-0034-06

**Abstract:** This paper constructs a dynamic evaluation system for the intelligent level of metal and non-metal mines, covering the whole production process, in response to the needs of intelligent mine construction. Through literature review, industry research, and referencing intelligent construction practices in related sectors, an evaluation model is proposed based on four dimensions: “intelligent production processes,” “effectiveness of safety management and control,” “data integration capability,” and “management innovation level.” The indicator layer refines these into 18 quantifiable metrics. A combined weighting method—integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) and entropy weight method—is adopted, with comprehensive weights calculated via linear weighting to achieve quantitative assessment. Results demonstrate that this system effectively identifies weaknesses in mine intelligentization, comprehensively and objectively reflects construction progress, provides tiered improvement recommendations for mining enterprises, supports high-quality industry development, and offers references for policy formulation.

**Key words:** metal and non-metal mines; evaluation system for intelligent level; analytic hierarchy process (AHP); entropy weight method

## 1 前言

在全球矿业数字化转型浪潮驱动下, 金属非金属矿山作为矿产资源开发的核心载体, 其智能化转型不仅是落实《“十四五”规划纲要》中“数字化转型、智能化升级”战略的关键举措, 更是应对资源品位下降、矿区分布分散等结构性挑战的必然选择。当前, 我国金属非金属矿山智能化建设面临双重瓶

颈: 一方面, 政策落地缺乏差异化实施方案, 难以适配非煤矿山多金属选别、岩爆频发、矿体赋存复杂等特有工况; 另一方面, 技术标准体系存在系统性缺失, 尤其在数据融合共享、异构系统协同等方面尚未形成统一规范, 严重制约智能化技术从单点应用向全流程集成的演进。

本研究构建的评估体系兼具理论创新与实践价值: 一方面, 针对非煤矿山多金属选别、岩爆频发等特性, 突破煤矿评估框架的局限性, 填补行业理论空白; 另一方面, 利用融合熵权 - AHP 组合赋权法, 通过主客观权重耦合机制攻克传统评估中指标权重失衡的缺陷, 形成了一套指标全面、可操作性强的矿山智能化建设水平评估体系。

[作者简介] 郭帅 (1992—), 男, 陕西渭南人, 硕士, 工程师, 主要从事智能矿山相关工作。

[引用格式] 郭帅. 基于 AHP-熵权法的金属非金属矿山智能化水平评估体系研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(4): 34-39.

## 2 研究现状

### 2.1 国内外研究进展

近年来,金属非金属矿山智能化评估体系研究逐步从单一安全评价向多维度综合评估发展。国家层面已构建了标准框架,如《矿山智能化标准体系框架》将评价分为基础通用、数据与模型、生产系统与技术装备、决策与应用四大模块,涵盖术语定义、数据安全、智能装备、应急救援等细分领域。地方层面,黑龙江省等地通过三维可视化管控平台实现露天/地下矿山集中监控,并强调人才储备和制度建设。安徽省则针对不同规模矿山提出差异化转型路径,构建了中型露天矿山通过感知层至应用层的五级架构。露天矿山方面,付恩三等<sup>[1]</sup>构建了包含智能技术应用、安全治理、环境体系、基础设施及应急体系 5 个一级指标、30 个三级指标的体系,并通过对 45 座露天煤矿的实证分析,指出智能应急与基础设施是当前建设短板。地下矿山研究则侧重安全评价,王中亚<sup>[2]</sup>通过模糊数学方法建立安全评价模型,集成知识库与推理机,实现安全等级的智能化判定。此外,郭捷楠等<sup>[3]</sup>提出基础设施层、生产作业层、管理运维层和信息服务层的四层模型,采用熵值法与模糊综合评价法量化评估。主流方法包括层次分析法(AHP)、模糊综合评价及数据驱动模型。侯铤等<sup>[4]</sup>通过 AHP 确定 35 个子系统的权重,结合模糊评价实现动态监测。孙彬彬等<sup>[5]</sup>进一步引入熵值法优化权重分配,对安徽省矿山的评估显示,仅少数企业达到智慧矿山阶段。部分研究尝试融合机器学习技术,赵江泽等<sup>[6]</sup>利用九类影响因素构建分类指标,结合聚类算法实现矿山智能化条件的动态分级。国外方面,Armas Aguirre 等研究提出四级矿井自动化分级模型。Spisak&Zelko 提出的智能矿井演进模型强调从 Level1 到 Level3 需约 10 年技术积累,且依赖信息网络与机器自主性的协同升级。Shibanov 等研究聚焦采矿挖掘机智能化,提出设备级四阶段分级,强调从被动监测到主动决策的跃迁,为设备智能化评估提供微观标准。

### 2.2 现存问题分析

当前研究在评价体系构建、方法创新及技术融合方面取得显著进展,但仍存在诸多挑战。

(1)标准统一性不足、评估体系碎片化:现有指标体系分散,金属与非金属矿山、露天与地下场景的评价标准尚未完全兼容。现有模型多聚焦单一环节

缺乏对全流程的贯通性评估,金属与非金属矿山特性差异未充分体现。

(2)动态评估与适应性不足:现有评估多基于静态指标,未考虑矿山生命周期及技术迭代对智能化需求的影响。未能引入动态权重调整机制,结合矿山阶段特征及技术成熟度,采用自适应算法优化评估模型。

(3)数据治理与系统协同性短板:金属矿山存在“七国八制”信息孤岛问题,导致数据采集碎片化,评估时难以实现多源数据融合,影响风险评估准确性。未能将“数据互通率”“系统联动响应时效”纳入评估体系,量化数据整合能力。

另外,在技术应用深度与创新性评估、人才与组织能力评估、评估结果的应用指导性等方面也存在部分欠缺情况。

## 3 智能化水平评估体系构建

### 3.1 设计原则

(1)系统性原则。评估体系需覆盖矿山生产全流程及全生命周期,包括地质、开采、选矿、安全、环保、管理等环节,形成层次化、多维度的综合评估框架。例如,同时体系需涵盖设计、建设、运行全生命周期,并统筹煤矿与非煤矿山的智能化需求。

(2)科学性与可操作性原则。科学性原则要求评估体系基于理论依据与实践验证,指标设计需逻辑严谨、覆盖核心要素,并采用主客观结合的方法。可操作性原则强调指标数据应易于采集、量化及分析,避免冗余复杂,二者需平衡方面科学性确保评估的客观性与前瞻性,可操作性则保障落地可行性。

(3)动态适应性原则。动态适应性原则强调评估体系需具备技术迭代响应能力和全生命周期调整机制,既要支持大数据、数字孪生等新技术的快速融合,也要根据矿山勘探、生产到闭坑阶段的实际需求动态更新地质模型、风险管控策略及生态修复方案。同时,通过集成监控平台实现生产数据与安全预警的实时反馈闭环,结合行业标准的演进,分阶段优化智能装备协同路径,并借助系统动力学模型动态优化资源配置。

(4)数据驱动与标准化原则。数据驱动与标准化原则是智能化矿山建设中的核心指导思想,旨在通过统一的数据管理规范 and 标准化流程,提升数据的可用性、一致性和共享能力,从而推动矿山智能化的高效发展。通过建立统一的数据分类、编码和存储规范,实现跨系统数据整合与共享,提升数据资产

的价值。通过参考国家及行业标准,确保评估指标与行业政策、技术规范的衔接,从而提升数据治理的规范性和有效性。

### 3.2 指标体系设计

本指标体系设计遵循《矿山智能化标准体系框架》与 ISO 22400 关键绩效指标标准,以“全流程贯

通、动态可扩展、行业差异化”为原则,结合金属与非金属矿山特性,基于 FDEMATEL-ANP 模型对指标关联性的分析,同时根据对相关文献、政策<sup>[7]</sup>分析及专家咨询,构建评估指标体系,即目标层→准则层→指标层。构建包含 4 个一级指标、18 个二级指标,图 1 所示为具体指标构建情况。

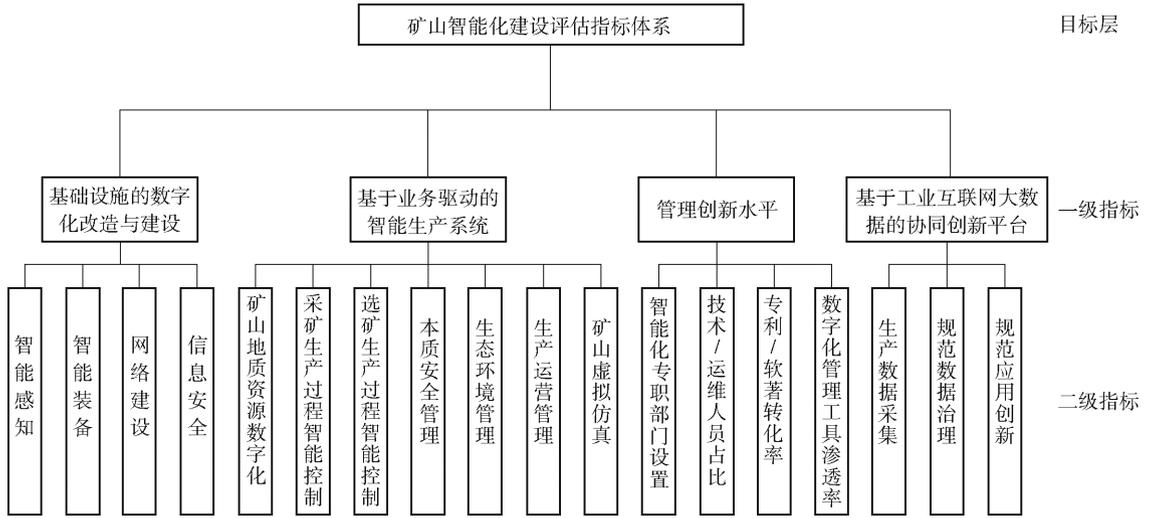


图 1 智能矿山评估指标体系

### 3.3 AHP 与熵权法组合赋权

AHP 与熵权法组合赋权方法是一种融合主客观权重的多准则决策技术,旨在克服单一赋权方法的局限性。

#### 3.3.1 AHP 即层次分析法

AHP 即层次分析法,由美国学者 T. L. 萨迪在 20 世纪 70 年代提出的一种系统分析的方法。该方法适用于复杂问题通过构建层次化结构模型,采用标度法建立判断矩阵,并基于特征向量法计算主观权重,需通过一致性检验确保逻辑合理性。其计算步骤如下。

##### 1) 构建判断矩阵

对同一层次内的元素,通过两两比较确定相对重要性,使用 1-9 标度量判断结果。判断矩阵 C 如式(1)。

$$C = [a_{jk}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{1n} \\ a_{n1} & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

##### 2) 标准化处理及权重向量计算

对形成的比较矩阵进行标准化处理,得到向量  $\bar{a}_{ij}$ ,如式(2)。

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{jk}}{\sum k a_{jk}} \quad (2)$$

对标准化后的矩阵  $\bar{C}$ ,计算每一行的和,得到权重向量  $\bar{\omega}_j$ ,如式(3)。

$$\bar{\omega}_j = \sum k \bar{a}_{jk} \quad (3)$$

##### 3) 归一化处理

将权重向量  $\bar{\omega}_j$  进行归一化,得到最终 AHP 的权重:

$$\bar{\omega}_j = \frac{\bar{\omega}_j}{\sum j \bar{\omega}_j} \quad (4)$$

##### 4) 一致性检验

计算最大特征值  $\lambda_{max}$  及一致性比率 CR 如式(5)。

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(C\omega)_i}{\omega_i} \quad (5)$$

式中, n 为矩阵阶数;  $(C\omega)_i$  为加权和向量第 i 个元素。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

式中,  $\lambda_{max}$  为最大特征值, n 为矩阵阶数。

若  $CI \neq 0$ , 则计算一致性比率 CR。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

若  $CR < 0.1$  时,认为判断矩阵一致性可接受,

否则需重新调整矩阵。其中  $RI$  的值见表 1。

表 1  $RI$  值与矩阵阶数对照表

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI$ 值	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

### 3.3.2 熵权法

熵权法基于信息熵理论,利用数据离散度计算客观权重。该方法在矿山安全评价、资源开发等领域广泛应用。其优势在于既规避了 AHP 的主观偏差,又弥补了熵权法对数据质量的过度依赖,通过 K-means 聚类或 TOPSIS 模型实现综合评价,为复杂系统决策提供了兼具稳健性与适应性的解决方案<sup>[8-9]</sup>。其基本计算步骤如下:

#### 1) 计算特征比重

通过对原始数据矩阵  $Z = [z_{jk}]_{n \times m}$  中的每个样本进行特征比重计算,衡量每个样本在某一指标下的相对重要性,公式如式(8)。

$$P_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^m z_{ij}} \quad (i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

其中,  $m$  为样本数,  $n$  为指标数。

#### 2) 计算信息熵

目的为量化指标数据的无序程度,熵值越小表示该指标提供的信息量越大。公式如式(9)。

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

式中,  $k$  为归一化因子,其计算由  $k = \frac{1}{\ln m}$  给出。

#### 3) 计算差异系数

该系数为衡量指标的有效信息量,差异系数越大,权重越高,其中  $g_j$  越大,表明该指标在不同样本间的差异越显著,对评价结果的影响越大,公式如式(10)。

$$g_j = 1 - e_j \quad (10)$$

#### 4) 确定客观权重

将差异系数归一化,得到各指标的最终权重。公式如式(11)

$$\mu_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (11)$$

### 3.3.3 复合权重计算

AHP 是一种主观随意性大的赋予权重值的方法,熵权法是一种以客观为主的赋权重值的方法,在实际情况中,仅单一地采用一种方法,就会使评价结

果偏向主观或客观,有可能出现偏离实际情况。为了反映属性权重主客观两方面的影响,运用 AHP 获取的主观权重  $\omega_j$ ,结合熵权法获取的客观权重  $\mu_j$  进行复合指标的主客观权重,最终计算得出各指标相对于最高层的复合权重  $\lambda_j$ ,可以采用多种复合方法,如加权平均法、几何平均法、主客观融合法等。

### 3.4 评估模型构建

本研究结合层次分析法(AHP)的主观赋权与熵权法的客观赋权,通过线性加权法计算综合权重,是一种兼顾专家经验与数据驱动的多准则决策方法。其核心思想是通过乘法运算放大主客观权重的协同效应,再归一化消除量纲差异,最终形成更均衡的权重分配。具有指标间独立性较强、平衡主客观信息、规避单一赋权法的局限性的优势,具体计算步骤为:

#### 1) 获得主客观权重

通过专家打分构建判断矩阵,计算特征向量并进行一致性检验,得到各指标的 AHP 权重向量  $\omega_{G_j}$ ;对原始数据标准化后,计算信息熵与差异系数,归一化得到权重向量  $\mu_{Z_j}$ 。

#### 2) 线性加权

通过对得到的 AHP 及熵权法的两个归一化向量进行线性加权,平衡主客观权重的贡献,计算公式见式(12)。

$$W_j = \lambda \cdot \omega_{G_j} \times (1 - \lambda) \cdot \mu_{Z_j} \quad (12)$$

根据 AHP 和熵权法各指标权重差距大小,权衡取舍  $\lambda$  值,一般情况下,如果 AHP 法各指标权重差距不大时,  $\lambda$  取小一些;如果 AHP 法各指标权重差距较大时,  $\lambda$  取大一些;如果两种方法计算结果差别不大,默认取 0.5,本研究根据调研以及获得的专家打分数据综合考虑,计算采用  $\lambda = 0.5$ 。

#### 3) 归一化处理

将乘积结果归一化处理,确保各二级指标综合权重之和为 1。

$$W'_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (13)$$

矿山智能化评估体系构建模型如图 2 所示。

#### 4) 矿山评估分级制度

参考国家现行智能工厂、智能制造成熟度及数字化转型标准,一般将数字化及智能化能力进行分级,智能矿山行业同理根据综合评估得分,进行智能化建设程度进行分级。具体分级见表 2。

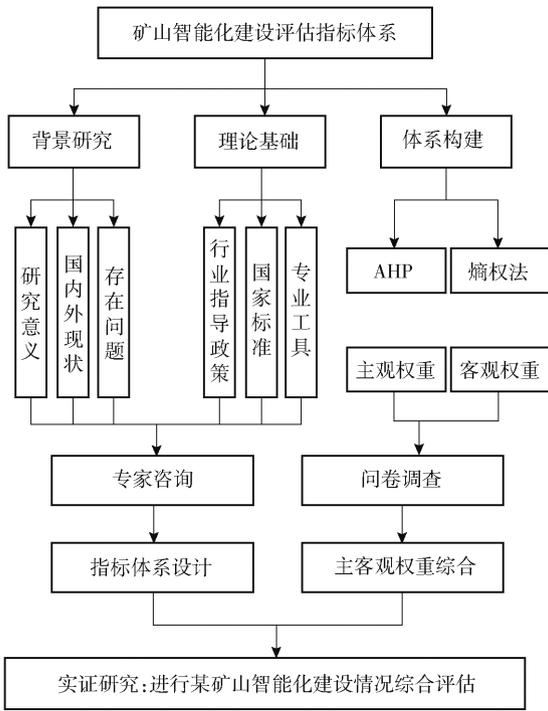


图 2 智能矿山评估指标体系构建模型

表 2 矿山智能化建设程度进行分级

等级	名称	得分区间	核心特征
L1	基础自动化 (未建设)	< 60 分	单机设备自动化,无系统 联动
L2	局部智能化 (初级)	60 ~ 74 分	单系统闭环控制,数据可 视化
L3	集成智能化 (中级)	75 ~ 84 分	跨系统数据贯通,部分智能 决策
L4	自主决策 (高级)	85 ~ 94 分	AI 驱动生产优化,少人化 运行
L5	生态协同 (引领级)	≥95 分	产业链协同创新,商业模式 重构

## 4 实证研究及分析

### 4.1 实证研究评估

本文以某大型铁矿为例,进行智能化建设评估研究。该铁矿进行了智慧矿山建设,智慧矿山建设依托“一中心、一网络、一系统、一平台 + N 智能应用”的框架体系,以 5G、融合 IP 工业网、Wi-Fi 6 构建矿山多元融合网络,实现矿山网络全覆盖;将积累的生产、安全、管理经验与全球领先的 ICT 技术相融合,突破井下生产制约瓶颈,建立智能控制、智能认知、智能决策三大技术体系,通过建立智能采矿控制体系,实现采矿设备运行集中操控突破,推进作业

现场少人、无人化。通过建立智能感知体系,实现系统状态综合判断突破,增强灾害风险预警精准化。通过建立智能决策体系,实现管理决策大数据支撑突破,提升安全保障数智化水平。通过以上系统建设,提升了一定的企业效益以及融合管控能力。

本研究首先通过专家打分法,其中综合指标测度方式的优劣性,AHP 采用两两比较法,熵值法采用排队打分法,邀请智能矿山领域专家对各层次指标的重要性进行打分,打分采用九标度法(1 ~ 9 分)进行评分,比较尺度见表 3。

表 3 九标度法打分表

标度 $a_{ij}$	定义	解释
1	同等重要	目标 $i$ 比 $j$ 同样重要
3	略微重要	目标 $i$ 比 $j$ 略微重要
5	相当重要	目标 $i$ 比 $j$ 重要
7	明显重要	目标 $i$ 比 $j$ 明显重要
9	绝对重要	目标 $i$ 比 $j$ 绝对重要
2,4,6,8	介于两重要程度之间	上述相邻判断的中间值
1,1/2,1/3……1/9	上述标度的倒数	

构建判断矩阵,遵循 AHP 的自底向上、分层计算、逐级加权原则,进而得到各级指标 AHP 权重,使用熵权法对 18 个指标进行打分并计算权重,最终通过线性加权获得综合权重,计算结果见表 4。

通过邀请智能矿山领域专家,采用表 4 中的权重,对该大型铁矿进行智能化建设情况打分评估,得到该矿山最终得分为 80.05 分,对照表 3 得出该矿山处于 L3 级别,实现了跨系统数据贯通,部分智能决策。

### 4.2 分析及不足

#### 1) 二级指标未进行评价标准

量化专家需要针对二级指标进行尽量准确的打分,要求二级指标的设定需要有较为准确的量化标准。同时,对于技术非金属矿山的不同场景,需要建立差异化指标库,使得评分更为客观、公正。

#### 2) 综合权重的选取方式

对于 AHP 和熵权法本研究采用的线性加权组合法,该方法通过系数  $\lambda$  调节主客观权重比例,存在主观干预点单一、忽略权重间的相关性、无法自动优化权重结构等局限性,更进一步的研究可以采用非线性组合法、博弈论纳什均衡法、引入动态模型代替固定值  $\lambda$  等方式,结合敏感性分析,可显著提升权重融合的科学性与适应性。

表 4 矿山智能化建设评估指标权重计算结果

一级指标	最终权重	AHP	二级指标	AHP	信息熵	综合权重
基础设施的数字化改造与建设	0.202 661 5	0.260 965	智能感知	0.043 398 219	0.024 603	0.034 000 609
			智能装备	0.091 501 114	0.012 976	0.052 238 557
			网络建设	0.109 957 603	0.005 583	0.057 770 301
			信息安全	0.016 108 065	0.101 196	0.058 652 032
基于业务驱动的智能生产系统	0.370 438	0.318 531	矿山地质资源数字化	0.027 049 971	0.135 163	0.081 106 486
			采矿生产过程智能控制	0.093 852 929	0.012 333	0.053 092 965
			选矿生产过程智能控制	0.093 852 929	0.014 272	0.054 062 465
			本质安全管理	0.043 760 426	0.031 089	0.037 424 713
			生态环境管理	0.016 627 318	0.076 591	0.046 609 159
			生产运营管理	0.033 542 907	0.031 273	0.032 407 953
			矿山虚拟仿真	0.009 844 519	0.121 624	0.065 734 26
管理创新水平	0.224 062 5	0.174 89	智能化专职部门设置	0.037 220 614	0.041 753	0.039 486 807
			技术/运维人员占比	0.088 041 725	0.048 317	0.068 179 362
			专利/软著转化率	0.013 914 598	0.083 995	0.048 954 799
			数字化管理工具渗透率	0.035 713 063	0.099 17	0.067 441 531
基于工业互联网大数据的协同创新平台	0.202 838	0.245 614	生产数据采集	0.049 122 8	0.049 825	0.049 473 9
			规范数据治理	0.098 245 6	0.056 982	0.077 613 8
			数据应用创新	0.098 245 6	0.053 255	0.075 750 3

## 5 结论

本研究构建了首套覆盖金属非金属矿山全流程的评估体系,填补非煤场景理论空白;融合 AHP-熵权法与动态监测技术,为企业 提供量化改进工具。提出四大维度(基础设施、生产系统、管理创新、协同平台)及 18 项量化指标;实证验证具备可操作性,体系可客观反映智能化水平。

### [参考文献]

- [1] 付恩三,刘光伟,白润才,等.智能露天矿山评价体系研究[J].煤炭工程,2022,54(5):1-8.
- [2] 王中亚.金属非金属地下矿山安全评价专家系统的研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [3] 郭捷楠,韩冬阳,沈雪,等.建材行业智能矿山评价指标体系研究[J].石材,2022(2):1-7.
- [4] 侯钺,李保飞,许会星,等.煤矿智能化系统运行的多层次模糊综合评价方法[J].内蒙古煤炭经济,2025(1):70-72.
- [5] 孙彬彬,聂闻,曾学敏.非煤矿山企业智慧化建设评价系统构建[J].现代矿业,2024,40(5):49-53+57.
- [6] 赵红泽,陆俊宇,李亚松,等.智能化露天煤矿分类分级评价体系研究[J].中国煤炭,2023,49(9):66-76.
- [7] 吴光源,陆洲杰,李俊波,等.基于改进 AHP 熵权法的综合能源配电网指标评估[J].电工材料,2022(2):56-60.
- [8] 叶海旺,雷丙响,周汉红,等.基于 K-Means 聚类与熵权 TOPSIS 法的岩石可爆性评价研究[J].爆破,2024,41(2):112-119.
- [9] 金菊良,魏一鸣.复杂系统广义智能评价方法与应用(第一版)[M].北京:科学出版社,2008.