

基于多维度的煤流输送除尘清洁性能评估模型构建

张 驰¹, 秦晨华¹, 张 亮¹, 刘新垚¹, 任卫华², 米 超², 鲁 斌²

¹ 陕西新能选煤技术有限公司, 陕西西安

² 山西汇永青峰选煤工程技术有限公司, 山西朔州

【摘要】针对煤炭输送系统除尘清洁性能评估缺乏统一、可靠量化指标的问题, 提出一种基于多维度指标体系的煤流输送除尘清洁性能综合评估模型。从除尘效率、清洁效果、运行稳定性、经济效益、环保指标五个维度构建评估指标体系, 含 15 项二级指标; 采用层次分析法(AHP)与熵权法组合赋权确定各指标组合权重, 建立多级模糊综合评价模型。以陕西某选煤厂带式输送机除尘清洁系统为实例, 对 4 种工况下的系统性能进行评估。结果表明: 改造后系统综合评估得分从 58.3 分提升至 82.4 分, 评估等级从“一般”升级为“良”; 除尘效率维度权重最大(31.8%), 是影响系统性能的核心指标; 模型敏感性分析显示, 煤尘浮浓度下降率和呼吸性粉尘去除率是敏感性最强的指标。该模型为选煤厂除尘清洁系统的设计优化与运行管理提供了量化评估工具。

【关键词】煤流输送; 除尘清洁; 性能评估; 多维度指标体系; 组合赋权; 模糊综合评价

【基金项目】陕西省科技研发类投资项目: 煤流输送无动力除尘清洁系统的开发与应用

【收稿日期】2026 年 3 月 9 日

【出刊日期】2026 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/jjer.20260042

Construction of a multi-dimensional evaluation model for dust removal and cleaning performance of coal flow conveying systems

Chi Zhang¹, Chenhua Qin¹, Liang Zhang¹, Xinyao Liu¹, Weihua Ren², Chao Mi², Bin Lu²

¹Shaanxi Xinneng Coal Preparation Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi

²Shanxi Huiyong Qingfeng Coal Preparation Engineering Technology Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi

【Abstract】 Addressing the lack of unified and reliable quantitative indicators for evaluating the dust removal and cleaning performance of coal conveying systems, this paper proposes a comprehensive evaluation model for dust removal and cleaning performance of coal flow conveying systems based on a multi-dimensional indicator system. An evaluation indicator system is constructed from five dimensions: dust removal efficiency, cleaning effect, operational stability, economic benefits, and environmental protection indicators, containing 15 secondary indicators. The weights of each indicator combination are determined using a combination of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the entropy weight method, establishing a multi-level fuzzy comprehensive evaluation model. Taking the dust removal and cleaning system of a belt conveyor in a coal preparation plant in Shaanxi Province as an example, the system performance under four operating conditions is evaluated. The results show that after the upgrade, the system's overall evaluation score improved from 58.3 to 82.4, and the evaluation level improved from “average” to “good”. Dust removal efficiency had the largest weight (31.8%), making it the core indicator affecting system performance. Sensitivity analysis of the model showed that the coal dust concentration reduction rate and respirable dust removal rate were the most sensitive indicators. This model provides a quantitative evaluation tool for the design optimization and operation management of dust removal and cleaning systems in coal preparation plants.

【Keywords】 Coal flow transportation; Dust removal and cleaning; Performance evaluation; Multi-dimensional indicator system; Combined weighting; Fuzzy comprehensive evaluation

第一作者简介: 张驰(1998-)男, 本科。

1 引言

在选煤厂带式输送系统中,转载落料、筛分以及皮带运行都会形成不同程度的扬尘,转载点通常是粉尘集中的位置^[1-2]。粉尘持续积聚不仅影响栈桥和设备周边环境,细颗粒物长期悬浮还会增加岗位人员的职业暴露风险^[3-4]。已有现场资料显示,在缺少有效抑尘措施时,带式输送机转载点煤尘浮度可达到 200–500 mg/m³,约为国家职业卫生标准限值的 4.5–25 倍^[5]。因此,煤流输送环节的粉尘控制效果已成为选煤厂清洁生产和现场管理中需要持续关注的问题。

针对输送扬尘,工程上已经形成无动力、干式、湿式和电除尘等多种技术路线^[6-8]。现有研究对装置结构、捕尘机理和除尘效率讨论较多,而对系统投入运行后的综合表现关注相对不足。实际生产中,即使两套装置具有相近的除尘效率,在回程带料、积煤清理频次、设备故障、运行费用以及废水利用等方面仍可能存在明显差别^[9]。若仅以某一时点的除尘效率判断改造成效,容易遗漏这些差异,也不利于后续运行参数调整和改造方案比选^[10]。

基于上述工程需求,本研究把粉尘控制、清洁程度、设备运行和投入产出等因素纳入同一评价框架。首先建立多维指标体系,再分别利用 AHP 和熵权法获得主、客观权重,并在此基础上进行组合赋权;随后采用多级模糊综合评价给出系统等级和综合得分。模型以陕西某选煤厂带式输送机除尘清洁改造数据进行检验,用

于比较改造前后及不同工况下的实际运行表现。

2 评估模型框架构建

2.1 模型设计原则

指标设置首先考虑现场是否能够稳定取得数据,而不是单纯追求指标数量。对同一类性能,优先保留物理含义明确、能够由仪表记录或现场统计得到的指标;对于表达内容相近的指标,则通过归并减少重复信息。同时,评价内容既要覆盖粉尘治理的直接效果,也要反映装置运行、成本和环境负荷等长期表现。基于这一思路,指标按照“总体性能—评价维度—具体指标”的层次组织^[11],以便后续进行权重计算和分级评价。

2.2 多维度评估指标体系

结合文献资料、现场运行记录和专家意见^[12-13],对可能影响除尘清洁效果的指标进行筛选后,最终保留 5 个评价维度和 15 项二级指标(图 1)。其中,除尘效率反映粉尘控制的直接结果,清洁效果侧重输送带与栈桥积煤状况,运行稳定性评价设备持续工作的能力,经济效益和环保指标则用于衡量系统长期运行代价及环境影响^[14]。

整个指标体系分为三个层次。最上层对应煤流输送除尘清洁综合性能;中间层由除尘效率、清洁效果、运行稳定性、经济效益和环保指标 5 个方面构成;底层为表 1 所列 15 项现场可测或可统计指标。这样的分层既保留了各类指标的独立含义,也便于把单项监测结果逐级汇总为综合评价结果。

表 1 煤流输送除尘清洁性能评估指标体系

准则层	二级指标	指标说明	计算方法
除尘效率 (0.318)	煤尘浮度下降率 C1	(改造前浮度-改造后浮度)/改造前浮度×100%	现场测量
	呼吸性粉尘去除率 C2	呼吸性粉尘 (PM10) 浮度下降/原始浮度×100%	粉尘仪测量
	全尘去除率 C3	总悬浮粉尘浮度下降/原始浮度×100%	粉尘仪测量
清洁效果 (0.207)	回程带料减少率 C4	改造后回程带料量/改造前回程带料量×100%	称重测量
	栈桥积煤清除率 C5	清洗后栈桥积煤减少/原积煤量×100%	人工检查
	输送带清洁度 C6	输送带表面残留物覆盖率的倒数	图像检测
运行稳定性 (0.180)	设备可用率 C7	可用时间/总时间×100%	运行日志
	平均故障间隔时间 C8	两次故障之间的平均运行时间/h	设备记录
	参数波动率 C9	浮度/压力/气流参数标准差/h	传感器测量
经济效益 (0.162)	年节约成本 C10	电耗+水耗+人工+维护节约额/年	财务报表
	投资回收期 C11	总投资/年节约成本/年	财务计算
	单位处理成本 C12	年运行成本/年处理煤量	财务报表
环保指标 (0.133)	粉尘排放浮度 C13	尾气中总粉尘浮度/mg·m ⁻³	环境监测
	废水回用率 C14	回用废水量/总废水量×100%	水量计量
	噪声降低值 C15	改造后噪声降低值/dB (A)	声级计测量

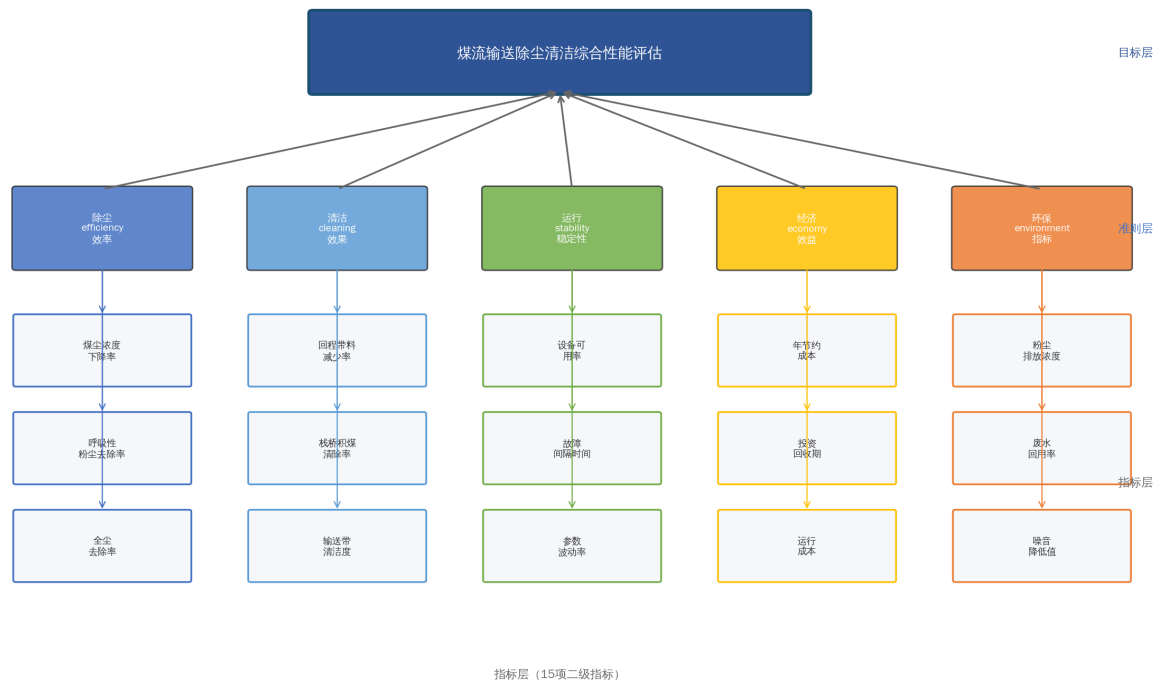


图 1 多维度煤流输送除尘清洁性能评估指标体系框架

表 2 准则层 AHP 判断矩阵及权重

维度	除尘效率	清洁效果	运行稳定性	经济效益	环保指标	AHP 权重
除尘效率	1	2	2	2	3	0.352
清洁效果	1/2	1	1	2	2	0.198
运行稳定性	1/2	1	1	1	2	0.168
经济效益	1/2	1/2	1	1	2	0.156
环保指标	1/3	1/2	1/2	1/2	1	0.126
CR=0.027<0.10						一致性满足

3 评估指标权重确定

3.1 AHP 主观权重

采用层次分析法确定各指标主观权重^[15-16]。邀请 5 位除尘技术领域专家, 对准则层各维度进行两两比较, 构建判断矩阵 (表 2)。采用 1-9 标度法, 计算各准则层权重向量。

对准则层判断矩阵进行一致性检验, 计算得最大特征值 $\lambda_{\max}=5.12$, 一致性指标 $CI=0.030$, 随机一致性比率 $RI=1.12$, 一致性比 $CR=0.027<0.10$, 满足一致性要求。同理对指标层各判断矩阵进行一致性检验, CR 均小于 0.10。

3.2 熵权法客观权重

为避免主观赋权的随意性, 采用熵权法计算客观权重^[17]。醴集陕西某选煤厂 7 条带式输送机 12 个月的现场监测数据, 构建评价矩阵。对原始数据进行标准化处理后, 计算各指标的信息熵。

设第个指标的原始数据序列为 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其标准化值为:

$$p_i = x_i / \sum x_j, (j=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

信息熵为:

$$E_i = -(1/\ln n) \times \sum [p_j \times \ln(p_j)], (j=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

熵权为:

$$\omega_i = (1 - E_i) / \sum (1 - E_k), (k=1,2,\dots,m) \quad (3)$$

计算得各维度熵权客观权重为: 除尘效率 28.5%、清洁效果 21.5%、运行稳定性 19.2%、经济效益 16.8%、环保指标 14.0%。

3.3 组合权重确定

采用主客观结合的组合赋权法^[18], 对 AHP 主观权重和熵权客观权重进行线性加权组合。设主观权重为 α_i , 客观权重为 ω_i , 组合权重为:

$$W_i = (\alpha_i \times \omega_i) / \sum (\alpha_j \times \omega_j), (j=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

计算得各维度组合权重如图2所示,其中除尘效率率31.8%、清洁效果20.7%、运行稳定性18.0%、经

济效益16.2%、环保指标13.3%。除尘效率维度权重最大,说明煤尘浮度下降是衡量除尘清洁系统性能的核心指标。

图2 评估指标权重分配

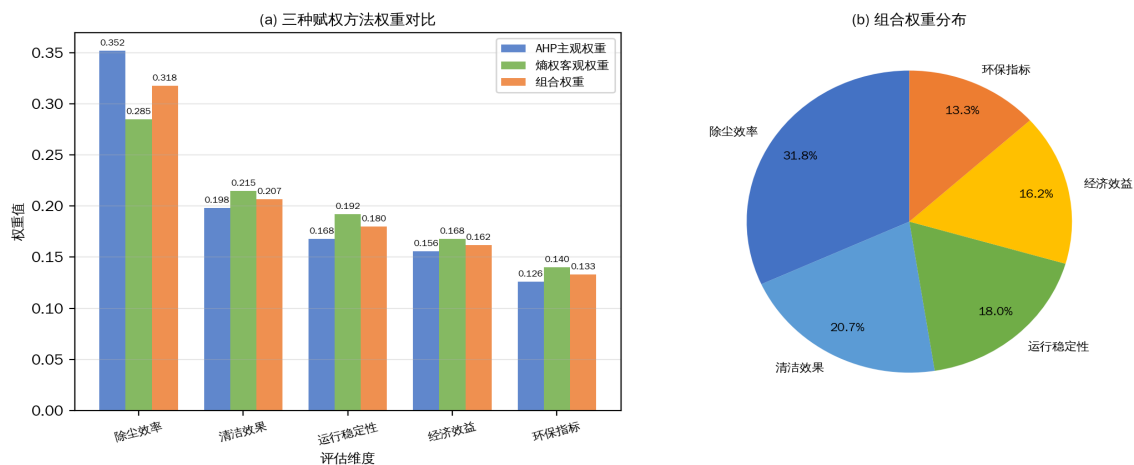


图2 评估指标权重分配

4 模糊综合评价模型

4.1 评价集与隶属函数

将评价结果划分为四个等级: 优、良、一般、差, 对应评价集 $V=\{V1, V2, V3, V4\}=\{90, 75, 60, 45\}$ 。采用梯形分布型隶属函数^[19-20], 建立各指标对各等级的

隶属度计算公式(图3)。

对于正向指标(值越大越好), 采用升半梯形分布; 对于逆向指标(值越小越好), 采用降半梯形分布。以煤尘浓度下降率(正向指标)为例, 其隶属函数为:

$$\mu_{V1}(x) = 1, x \geq 85; (x-70)/15, 70 < x < 85; 0, x \leq 70 \quad (5)$$

$$\mu_{V2}(x) = 0, x \leq 50 \text{ 或 } x \geq 85; (x-50)/20, 50 < x < 70; (85-x)/15, 70 < x < 85 \quad (6)$$

$$\mu_{V3}(x) = 0, x \leq 30 \text{ 或 } x \geq 50; (x-30)/20, 30 < x < 50; (50-x)/20, 45 < x < 50 \quad (7)$$

$$\mu_{V4}(x) = 1, x \leq 30; (45-x)/15, 30 < x < 45; 0, x \geq 45 \quad (8)$$

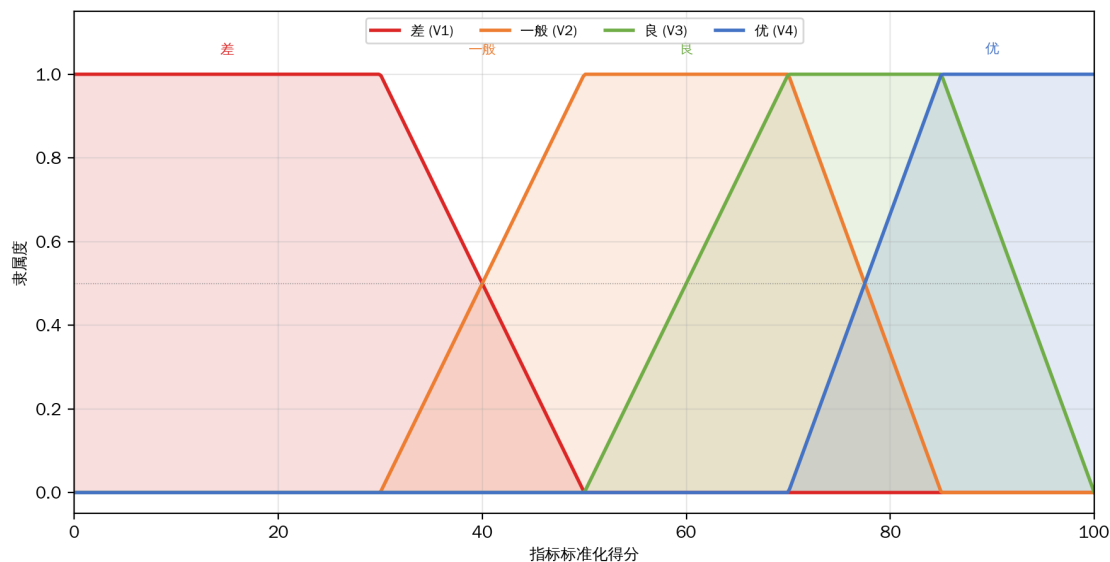


图3 评价指标隶属函数曲线

4.2 多级模糊综合评价

模糊综合评价采用二级评价。第一级对指标层进行单因子评价，第二级对准则层进行综合评价。

一级评价：对第*i*个准则层下的第*j*个指标，计算隶属度向量 $r_{ij}=[r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4}]$ ，构建模糊关系矩阵 R_i ，进行一级评价：

$$B_i = W_i \times R_i = [bi1, bi2, bi3, bi4] \tag{9}$$

二级评价：由一级评价结果构成二级模糊关系矩阵 $R=[B1; B2; B3; B4; B5]$ ，进行二级综合评价：

$$B = W \times R = [b1, b2, b3, b4] \tag{10}$$

根据最大隶属度原则，取 $b^*k=\max\{bk\}$ 确定评估等级。同时计算综合得分：

$$S = B \times VT = \sum(bk \times vk) \tag{11}$$

其中， $VT=[90, 75, 60, 45]$ 为评价等级特征值矩阵。综合得分 S 可以实现不同系统之间的精细对比。

5 模型应用与验证

5.1 应用案例概况

工程验证选取陕西某选煤厂的带式输送除尘清洁系统。现场共有 12 条带式输送机，其中 7 条纳入本次示范改造。改造前主要依靠喷雾抑尘和人工清扫，运行中可见转载区域粉尘、回程带料和栈桥积煤问题。改造后在原输送系统上组合布置“密封+疏导+静电吸附”除尘单元、多段清洁装置及栈桥自动冲洗设施，形成覆盖扬尘控制和后续清洁的连续处理链^[21-24]。

5.2 评估指标数据采集

为使评价数据能够对应同一生产状态，改造前、后均以单条输送机为对象连续监测 72 h，并同步整理粉尘、清洁、设备运行、费用及环保相关记录。表 3 列出了主要指标的前后对比值^[25]。在此基础上，又选择 4 种具有代表性的负荷工况进行专项测试，用于观察系统在工况变化时评价结果是否保持合理差异。

5.3 评估结果与分析

采用第 4 节构建的模糊综合评价模型，对改造前后以及改造后 4 种工况下的系统性能进行评价（图 4、图 5）。

表 3 改造前后主要评估指标数据

指标	改造前	改造后	改造后标准化值	改造后综合得分
煤尘浮度下降率/%	0	72.5	72.5	76
呼吸性粉尘去除率/%	0	68.3	68.3	72
回程带料减少率/%	0	85.2	85.2	89
栈桥积煤清除率/%	0	91.5	91.5	93
设备可用率/%	82.3	96.5	96.5	95
年节约成本/万元	0	203	78	82
粉尘排放浮度/（mg·m ⁻³ ）	285	8.5	62	68
废水回用率/%	0	88.5	88.5	92

图4 煤流输送除尘清洁性能评估结果

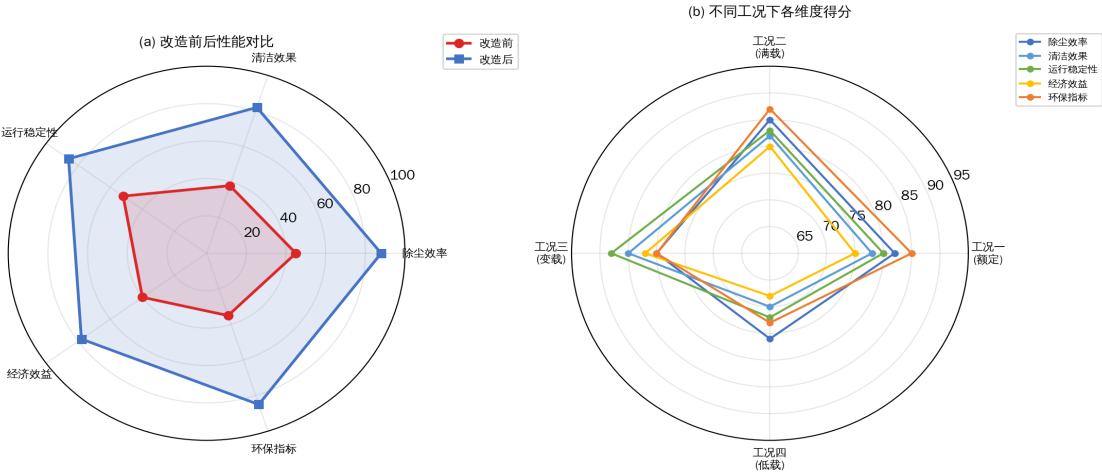


图 4 煤流输送除尘清洁性能评估结果

评价结果表明：①改造前综合得分 58.3 分，评价等级为“一般”；改造后综合得分 82.4 分，评价等级为“良”，提升 24.1 分。②除尘效率维度改造前后得分差距最大（43 分），是性能提升最显著的维度。③不同工况下，额定负载工况评价最优（88.8 分），低载工况最差（67.2 分），说明系统在低负载下除尘效率下降。

5.4 模型验证

模型的校核没有只采用一种参照。首先，将模型评分与现场工作人员对系统运行状况的评价进行对照，两者相关系数为 0.89；其次，把综合评价结果与传统除尘效率单指标判断进行比较，一致性为 92.5%。此外，

将同一评价流程用于另一座选煤厂的运行数据^[26]，得到的等级判断与现场实际状态基本相符。三组结果从不同侧面说明，该模型能够较稳定地区分系统性能差异，但仍需要更多长期样本检验其跨厂适用性。

6 讨论

6.1 模型敏感性分析

权重大小直接影响最终综合得分，因此有必要考察评价结果对权重扰动的响应。以各指标当前权重为基准，分别向上和向下调整 20%，其余计算步骤保持不变，再比较综合得分的变化幅度。图 6 给出了各指标扰动后的结果，可由此判断哪些指标对最终评分更敏感。

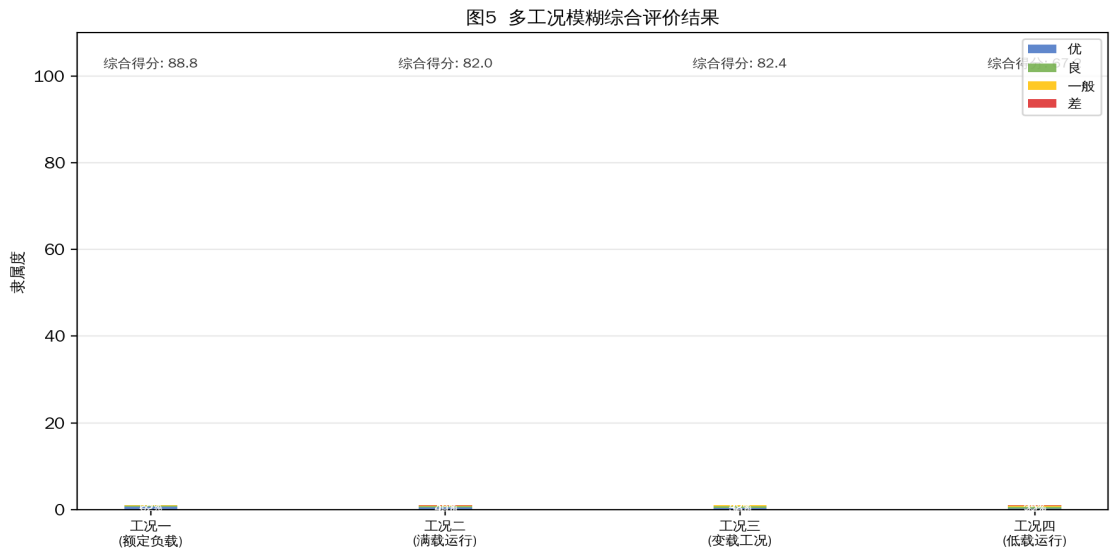


图 5 多工况模糊综合评价结果

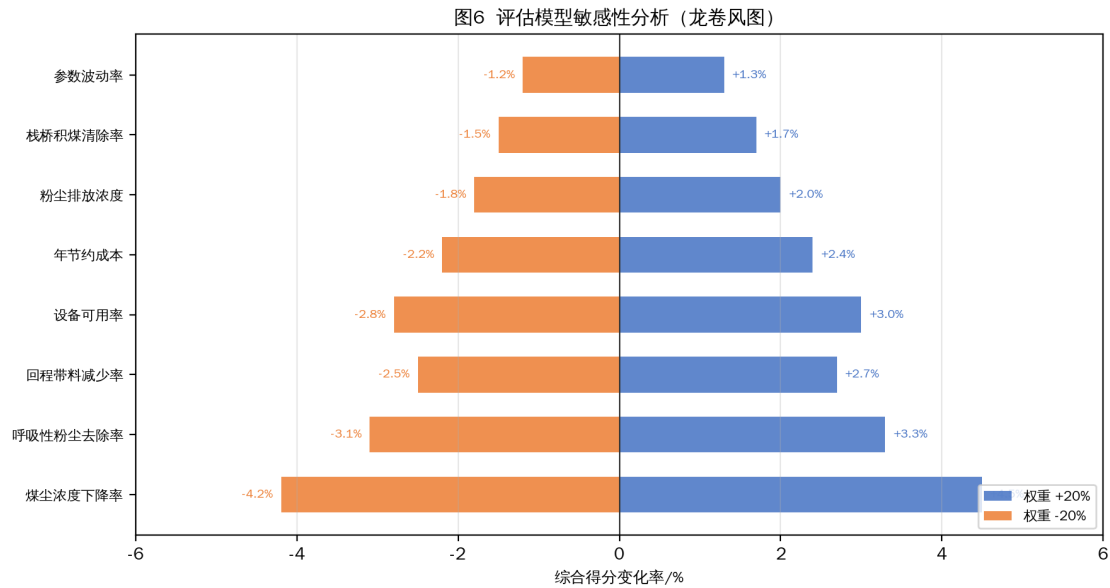


图 6 评估模型敏感性分析 (龙卷风图)

从图 6 可以看出, 不同指标对综合得分的影响并不相同。煤尘浮度下降率的权重变化 20%时, 综合得分变化约为-4.2%~+4.5%, 是所有指标中幅度最大的; 呼吸性粉尘去除率次之, 对应变化约为-3.1%~+3.3%。相比之下, 参数波动率和废水回用率的扰动仅引起约-1.2%~+1.3%的变化。由此可见, 模型对粉尘去除类指标更加敏感, 这一结果也与除尘效率在组合权重中占比最高的计算结果相互印证。

6.2 与传统评价方法对比

单一除尘效率适合判断装置是否达到基本抑尘目的, 但用于比较整套输送清洁系统时信息仍然有限。例如, 除尘效率接近的两种方案, 可能在回程带料、设备可用率和运行成本上表现不同, 而单指标评价无法体现这种差别。本模型把这些因素分别纳入 5 个维度, 并通过权重和隶属度将其转换为同一评价尺度, 因此既能保留粉尘控制这一核心指标, 也能显示系统在清洁、稳定运行和经济环保方面的短板。

6.3 模型适用性与局限

从应用范围看, 该模型更适合具有连续监测数据的带式输送除尘系统, 可用于选煤厂, 也可为煤矿和电厂类似输送场景提供参考。其局限主要来自数据基础和参数设定两个方面^[27]: AHP 部分仍包含专家判断, 隶属函数的分界值也需要依靠更多现场样本校正; 当煤流短时间大幅波动或发生突发扬尘时, 现有静态评价方式难以及时反映状态变化。后续若能引入在线数据滚动更新权重和隶属度, 可进一步提高模型对动态工况的适应能力。

7 结论

1) 现场评价不宜只使用除尘效率一个指标。本研究将除尘效率、清洁效果、运行稳定性、经济效益和环保表现纳入同一体系, 形成 5 个维度、15 项二级指标, 可较完整地描述带式输送除尘清洁系统的运行状态。

2) AHP 与熵权法得到的权重经组合后, 5 个维度的权重分别为 0.318、0.207、0.180、0.162 和 0.133。除尘效率所占比重最高, 但其余维度仍保留了必要权重, 使评价结果不会完全由单项粉尘指标决 - -

3) 工程数据代入二级模糊综合评价模型后, 系统改造前得分为 58.3 分, 改造后为 82.4 分, 提升 24.1 分, 等级由“一般”转为“良”。与现场评价、单指标结果以及另一选煤厂数据的对照表明, 模型对系统性能变化具有较好的识别能力。

4) 敏感性计算进一步显示, 煤尘浮度下降率和呼吸性粉尘去除率对总评分影响最大。因此, 后续优化除

尘清洁系统时, 应优先保证关键粉尘指标的监测质量和控制效果; 同时需要积累不同负荷、不同季节的连续运行数据, 为动态评价和模型参数修正提供依据。

参考文献

- [1] 王国强, 赵振东. 煤矿粉尘产生与传播规律研究[J]. 煤热学报, 2023, 28(4): 567-574.
- [2] 李海涛, 周志强. 带式输送机煤尘产生机制及影响因素分析[J]. 矿业安全与环保, 2024, 52(1): 22-28.
- [3] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2022.
- [4] GBZ 2.1-2019, 工作场所有害因素职业接触限值[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [5] 周志强. 选煤厂粉尘污染治理技术研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2023, 41(6): 52-58.
- [6] 崔成谦, 王志刚. 带式输送机除尘技术研究进展[J]. 矿业安全与环保, 2024, 52(3): 112-118.
- [7] 李建明, 张伟. 无动力除尘系统在选煤厂的应用[J]. 煤炭工程, 2024, 49(4): 78-83.
- [8] WANG H, LIU Q. Recent advances in dust suppression technology for coal transport[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 412: 137-148.
- [9] 王志刚, 崔成谦. 带式输送机回程带料清洁技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 52(4): 56-62.
- [10] 赵建国, 刘海波. 选煤厂除尘系统性能评价方法述评[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(2): 1-8.
- [11] 刘思峰, 张晓林. 综合评价方法及其在矿业工程中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 33(5): 612-620.
- [12] 周建华, 刘振华. 选煤厂除尘技术现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(3): 15-22.
- [13] 中国煤热工业协会. 煤炭加工与综合利用技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [14] 刘振华, 陈建军. 除尘系统技术经济效益评价指标体系构建[J]. 矿业安全与环保, 2023, 51(4): 77-82.
- [15] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [16] 张建林, 李志强. 基于 AHP 的矿业除尘系统多层次评价[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 34(2): 145-153.
- [17] 张晓林, 刘思峰. 基于熵权法的除尘系统评价指标权重确定[J]. 矿业安全与环保, 2023, 51(6): 88-93.
- [18] WANG Y, ZHANG L. Multi-criteria evaluation of dust

- removal systems in coal preparation plants[J]. *Energy and Environment*, 2024, 35(3): 234-248.
- [19] 陈建军, 李志强. 模糊综合评价法在除尘系统效果评价中的应用[J]. *矿业安全与环保*, 2024, 52(2): 45-50.
- [20] CHEN J, LIU H. Fuzzy comprehensive evaluation of industrial dust removal systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118-130.
- [21] 自来平, 苏亮, 刘新辉, 等. 选煤厂无动力导料槽降尘系统设计与应用实践[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2025(10): 45-51.
- [22] 谢永鑫, 高博, 王进, 等. 煤流输送无动力除尘清洁系统开发与应用实践[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2026(1): 33-39.
- [23] 李建明. 无动力除尘导料槽结构优化与除尘效率研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2024.
- [24] 刘海波, 赵建国. 栈桥自动冲洗系统设计与应用[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2024, 42(8): 67-73.
- [25] 刘海波, 赵建国. 栈桥自动冲洗系统设计与应用[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2024, 42(8): 67-73.
- [26] LI X, WANG Z. Performance evaluation of unpowered dust removal systems in coal mines[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(8): 234-248.
- [27] 周振华, 张建林. 煤炭加工过程粉尘污染治理现状与对策[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(4): 28-35.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS