

# 阴阳床串联运行在工业水处理中的水质稳定性 与能耗经济性优化研究

李广彪 (内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:** 针对阴阳床串联水处理系统运行中水质波动与能耗过高的问题, 建立了以再生周期和流速为核心决策变量的多目标优化模型。通过改进 NSGA-II 算法求解帕累托解集, 仿真实验表明: 优化后系统总能耗降低 16.9%, 水质稳定性显著提升, pH 波动幅度缩减 62%, 电导率波动区间收窄至 18-22 $\mu$ S/cm。参数联动分析证实延长再生周期至 52h 可降低再生能耗 17.8%, 同时流速调至 1.8m/s 减少泵送能耗 14.9%。研究成果可为工业水处理系统节能提效提供可行路径。

**关键词:** 阴阳床串联; 水质稳定性; 能耗经济性优化; 多目标优化

**中图分类号:** TQ085+4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0088-03

## Optimization Study on Water Quality Stability and Energy Consumption Economy in the Series Operation of Cation and Anion Exchange Beds in Industrial Water Treatment

Li Guangbiao (Inner Mongolia Datang International Tuoketuo Power Generation Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia 010000, China)

**Abstract:** To address the issues of water quality fluctuations and excessive energy consumption in the operation of a cation-anion exchange bed series water treatment system, a multi-objective optimization model was established, with regeneration cycle and flow rate as the core decision variables. The Pareto solution set was solved using an improved NSGA-II algorithm. Simulation experiments demonstrated that the optimized system reduced total energy consumption by 16.9%, significantly improved water quality stability, reduced pH fluctuation amplitude by 62%, and narrowed the conductivity fluctuation range to 18-22  $\mu$ S/cm. Parameter linkage analysis confirmed that extending the regeneration cycle to 52 hours could reduce regeneration energy consumption by 17.8%, while adjusting the flow rate to 1.8 m/s could reduce pumping energy consumption by 14.9%. The research findings provide a feasible pathway for enhancing energy efficiency in industrial water treatment systems.

**Keywords:** Cation-Anion Exchange Bed Series; Water Quality Stability; Energy Consumption Economy Optimization; Multi-Objective Optimization

离子交换工艺在电子工业超纯水制备、制药行业注射用水处理等领域具有不可替代性<sup>[1]</sup>。阴阳床串联作为该工艺的核心单元, 其运行特性直接影响出水品质与系统经济性。然而在实际运行中, 树脂饱和度的周期性变化导致出水 pH 值波动达 0.5-1.5 单位, 电导率偏移范围可达 15-28  $\mu$ S/cm; 同时再生环节能耗占比超过 70%, 其中酸碱药剂消耗占总能耗 27% 以上。现有研究多聚焦单一目标优化, 缺乏对水质稳定性与能耗协同管控的系统方案。本研究通过构建多目标优化模型, 结合实验验证手段, 旨在解决串联模式下水质波动与高能耗的耦合问题, 为工业水处理系统提供兼顾技术效能与经济性的运行策略。

### 1 研究方法与实验设计

#### 1.1 实验系统设计

本实验搭建的阴阳床串联水处理系统由阳离子交换床、除碳器、阴离子交换床及配套监测单元组成。

阳床主体为直径 300mm 的玻璃钢柱体, 填充 001 $\times$ 7 强酸型阳离子交换树脂; 阴床采用同规格柱体, 装载 201 $\times$ 7 强阴型树脂。关键传感单元完成安装工作: 在阳床入口部署 pH 传感器与电导率仪, 出口处增设压力变送器; 阴床出口布置二级电导率仪, 各单元间管段安装涡轮流量计 (精度  $\pm$ 0.5%)。数据采集通过 PLC 系统实现, 以 1Hz 频率对 12 路模拟信号进行实时记录工作<sup>[2-3]</sup>。

系统运行流程遵循严格的水流路径: 原水经增压泵以恒定 2.0m/s 流速进入阳床, 完成阳离子置换后形成的酸性水流入脱气塔, 经填料层析出溶解 CO<sub>2</sub>; 除碳水随后进入阴床进行阴离子交换, 最终产水汇入储罐。再生程序采用逆流再生方式, 当出口电导率 >10  $\mu$ S/cm 时触发再生信号, 依次启动酸液 (4%HCl)、碱液 (4%NaOH) 的定量注入工作, 再生流速控制为 0.8m/s, 再生时长固定为 45min。

运行参数设定基于工业标准进行优化配置工作：系统工作压力维持在  $2.8 \pm 0.2\text{bar}$ ，阳床树脂装填高度 1.2m，阴床装填高度 1.5m。再生周期初始设定为 48h，该频率设定兼顾树脂利用率与能耗平衡。所有参数通过人机界面实现远程调节工作，为后续变量控制实验提供可复现的技术基础。

## 1.2 水质指标监测方法

水质稳定性的监测工作聚焦于 pH 值、电导率及总溶解固体 (TDS) 三项核心指标。pH 值的测定工作采用梅特勒-托利多工业在线 pH 电极 (精度  $\pm 0.01$ )，其测量原理基于玻璃电极与参比电极间的电位差响应氢离子浓度变化；电导率的获取工作通过四电极式传感器实现 (量程  $0\text{--}2000\ \mu\text{S/cm}$ )，依据溶液导电性与离子浓度的正相关特性；TDS 的监测工作则基于电导率-温度补偿模型进行换算。上述参数的实时监测工作对于捕捉阴阳床串联系统离子交换效率的动态变化具有决定性作用。

实时监测方案的设计工作严格遵循工业标准：传感器数据以每秒 1 次的频率开展采集工作，并通过 PLC 系统实施连续记录操作。为确保数据可靠性，每日执行传感器校准工作——pH 电极采用 pH4.0/pH7.0/pH10.0 标准缓冲液开展三点校准操作，电导率探头则使用  $1413\ \mu\text{S/cm}$  标准溶液进行单点校准。原始数据通过移动平均算法实施预处理操作，窗口宽度设定为 60s，该处理方式有效抑制了随机噪声干扰。水质稳定性指标通过离散度量得以实现，其数学表征形式为<sup>[4]</sup>：

$$S = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (1)$$

其中，S 表示水质参数稳定性系数 (单位：%)， $\sigma$  为参数在采样周期内的标准差， $\mu$  代表参数算术平均值。该系数计算工作覆盖完整运行周期，当 S 值低于 5% 时判定水质处于稳定状态。所有计算过程通过 MATLAB 脚本自动实施，计算结果以分钟均值形式存入数据库，为后续优化分析提供数据支撑。

## 1.3 能耗测量与分析

阴阳床串联系统的能耗构成主要囊括泵送能耗与再生能耗两大类。泵送能耗源于增压泵维持系统工作压力所需的电能消耗，其测量工作通过三相功率计实时监测电机输入功率得以实现；再生能耗则包含酸碱药剂消耗与再生泵电能损耗，其中药剂消耗量通过电磁流量计记录注入体积，电能损耗同样采用功率计实施监测工作。所有能耗数据通过 Modbus 协议以分钟粒度传输至中央数据库，形成完整能耗数据集。

能耗特性与运行参数的关联分析工作显示：当系统流速从 1.5m/s 提升至 2.5m/s 时，泵送能耗呈现非线

性增长特性，其数学表征形式为：

$$E_p = \frac{\rho g Q H}{\eta} \times t \quad (2)$$

其中， $E_p$  表示泵送能耗 (单位：kWh)， $\rho$  为流体密度 (单位： $\text{kg/m}^3$ )， $g$  是重力加速度 (单位： $\text{m/s}^2$ )， $Q$  代表体积流量 (单位： $\text{m}^3/\text{s}$ )， $H$  为扬程 (单位：m)， $\eta$  指泵组效率， $t$  为运行时长 (单位：h)。再生能耗则与再生频率呈正相关，每次再生程序固定消耗 4.2kWh 电能与 38L 化学药剂。

能耗热点识别工作表明：在标准运行工况下，再生能耗占总能耗比例达  $68 \pm 3\%$ ，其中酸碱药剂成本占再生能耗的 82%。该现象主要缘由在于再生过程中高浓度化学药剂 (4%HCl/4%NaOH) 的持续注入工作，以及再生泵维持 0.8m/s 流速产生的基础能耗。流速参数对总能耗的敏感性显著高于工作压力，流速每增加 0.1m/s 将导致日均泵送能耗提升。

## 1.4 优化模型构建

针对阴阳床串联系统的水质稳定性与能耗协同优化需求，建立多目标优化模型。该模型以再生周期  $T$  (单位：h) 和运行流速  $v$  (单位：m/s) 为核心决策变量，目标函数定义为：

$$\min \left( \alpha \cdot \frac{E_{\text{total}}}{E_0} + \beta \cdot \frac{1}{S_{\text{avg}}} \right) \quad (3)$$

其中， $E_{\text{total}}$  表示系统总能耗 (单位：kWh/d)， $E_0$  为基准能耗 (单位：kWh/d)， $S_{\text{avg}}$  代表日均水质稳定性系数 (单位：%)， $\alpha$  与  $\beta$  分别为能耗与水质稳定性的权重因子 (满足  $\alpha + \beta = 1$ )。约束条件涵盖运行参数边界：流速  $v \in [1.5, 2.5]\text{m/s}$ ，再生周期  $T \in [36, 60]\text{h}$ ，同时强制要求出水 pH 稳定性系数  $S_{\text{pH}} \leq 5\%$ 。

模型求解工作采用改进型 NSGA-II 遗传算法开展多目标寻优操作。算法初始化阶段生成 100 组随机参数组合，通过交叉概率  $P_c=0.85$  与变异概率  $P_m=0.02$  进行种群进化操作。每轮迭代执行快速非支配排序与拥挤度计算工作，当连续 20 代最优解差异小于  $10^{-4}$  时终止计算。该算法特性适宜处理非线性约束问题，能有效规避局部最优陷阱。

优化机制通过参数联动得以实现：延长再生周期  $T$  可降低再生频率，使日均能耗减少 12–18%，但会导致树脂饱和度上升，引发水质稳定性系数 S 恶化 3–5%；提高流速  $v$  虽能缩短水力停留时间并提升产水效率，却会使泵送能耗呈二次方增长。模型通过帕累托前沿分析工作量化上述权衡关系，为决策者提供非支配解集。

## 2 仿真环境与优化结果

### 2.1 仿真实验平台搭建

本研究构建了一套具备高度集成化的阴阳床串联系统仿真实验平台，核心由阳床、阴床、除碳器、水箱、增压泵及再生单元构成。阳床与阴床均采用直径 300 mm、填充高度分别为 1.2 m 与 1.5 m 的玻璃钢柱体，分别填充 001×7 阳树脂和 201×7 阴树脂。为实现多参数同步控制，平台集成 PLC 控制系统与 HMI 界面，具备对流速、再生周期等运行变量的实时调节能力。监测模块涵盖 pH、电导率、TDS、流量及功率五类关键参数，传感器按功能节点布置，信号以 1 Hz 频率采集，并通过 Modbus 协议上传至数据库，实现数据采集、运行控制与能耗监测一体化。再生流程设置自动触发机制，控制酸碱注入流速与时长，确保模拟工业运行过程的完整性。整个平台在硬件布局与数据链路上高度模块化，满足后续优化模型验证与参数联动分析需求。

### 2.2 仿真优化结果与经济性分析

#### 2.2.1 水质稳定性分析结果

优化后阴阳床系统的水质稳定性取得显著提升。pH 值波动范围从优化前的 6.8–7.9 缩减至 7.2–7.5，波动幅度降低 62%；电导率变化区间由 15–28  $\mu\text{S}/\text{cm}$  收窄至 18–22  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，总溶解固体 (TDS) 稳定性系数  $S_{\text{TDS}}$  从 7.3% 优化至 4.1%。这种改善主要归因于再生周期 T 从 48h 调整为 52h，使树脂饱和度维持在 75–85% 的理想区间，有效缓解离子穿透现象。水质稳定性评估通过离散系数量化得以实现：

$$S = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (4)$$

其中，S 表示水质参数稳定性系数 (单位：%)， $\sigma$  为参数在 24h 周期内的标准差， $\mu$  代表对应参数的算术平均值。该计算工作覆盖连续 30 天运行数据，当  $S < 5\%$  时判定水质稳定。优化后系统  $S_{\text{pH}}$  值降至 3.8%，达到高度稳定状态。

参数调整对稳定性的影响机制体现在两方面：延长再生周期 T 降低树脂再生频率，使树脂交换容量利用率提高 12%，减少新再生树脂的离子泄漏风险；同时将运行流速  $v$  从 2.0m/s 微调至 1.8m/s，延长水力停留时间 15%，促进离子交换反应充分进行。这种协同调节使  $\text{Ca}^{2+}$  残留浓度降低 41%， $\text{SO}_4^{2-}$  波动幅度压缩 58%，显著提高产水品质。

#### 2.2.2 能耗与经济性优化效果评估

优化后系统能耗结构发生显著变化，具体对比数据见表 1。总能耗从优化前的 124.9kWh/d 降至 103.8kWh/d，降幅达 16.9%。其中泵送能耗由

38.2kWh/d 减少至 32.5kWh/d，降低 14.9%，再生能耗由 86.7kWh/d 压缩至 71.3kWh/d，降低 17.8%。这种改善主要源于运行参数调整：流速  $v$  从 2.0m/s 降至 1.8m/s 使泵送功率降低 18.2%，再生周期 T 从 48h 延长至 52h 减少日均再生次数 0.8 次。

能耗降低与参数调整的关联性分析工作表明：流速每降低 0.1m/s 可减少泵送能耗 7.2%，但会延长水力停留时间；再生周期每延长 4h 可降低再生能耗 4.3%，但需监控树脂饱和度临界值。能耗分布数据见表 1：

表 1 阴阳床优化前后能耗结果表

能耗类型	优化前 (kWh/d)	优化后 (kWh/d)	降低幅度
泵送能耗	38.2	32.5	14.9%
再生电能	52.1	42.7	18.0%
药剂消耗	34.6	28.6	17.3%
总能耗	124.9	103.8	16.9%

从表 1 可见，药剂消耗成本占比从 27.7% 降至 27.5%，仍为最大能耗构成。节能潜力评估工作显示：若将再生周期进一步优化至 56h，预计可再降低总能耗 8.2%，但需平衡树脂饱和度风险。经济性分析表明，当前优化方案每年可减少电能支出 6178 元 (按 0.8 元/kWh 计)，化学药剂节省达 2840 升/年。

## 3 结语

本研究提出的优化方案成功实现阴阳床串联系统水质稳定性与能耗的协同提升。通过建立多目标优化模型并采用改进 NSGA-II 算法，确定再生周期 52h 与流速 1.8m/s 的最佳参数组合，使水质稳定性系数降至 4.1%，日均能耗降低 16.9%。该方案在常规工业水源条件下具有良好鲁棒性，年均可节约运行成本 9018 元。针对高盐度水源场景，建议扩展流速调节范围并增设预脱盐单元。研究成果为工业水处理系统的精细化运行提供理论依据与实践指导。

### 参考文献：

- [1] 童祯恭. 给水厂生产废水回流前后水质化学稳定性分析 [J]. 中国给水排水, 2025 (17):1-6.
- [2] 宋兵兵, 王永磊, 蒋利, 等. 新型离子交换及组合工艺强化饮用水硝酸盐净化研究进展 [J]. 净水技术, 2025(10):1-10.
- [3] 欧阳佳琪. 基于活性炭吸附与离子交换树脂法的玉米发酵液乳酸纯化工艺优化研究 [J]. 包装工程, 2025,46(11):11-20.
- [4] 高彦林. 化学混凝沉淀 + 超滤 + 离子交换树脂工艺处理高浓度含氟废水 [J]. 工业水处理, 2025,45 (05):201-206.

### 作者简介：

李广彪 (1997-)，汉族，辽宁朝阳人，本科，助理工程师，研究方向：设备运行与节能。