

污水处理设备在生产运营中的性能评价及优化

郑义蕃

身份证号: 440981199304285659

DOI:10.61369/ME.2025010016

摘要: 针对化工行业污水处理设备效率低、稳定性不足等问题,本研究构建“评价-优化-验证”闭环管理体系,融合工艺机理与数据驱动方法,提出多维度性能评价指标、多目标参数优化策略及智能化调控技术。案例验证表明,优化后COD去除率提升18%,能耗降低23%,智能化改造投资回报周期缩短至2.5年。研究为化工废水处理提供系统性解决方案,支撑“双碳”目标下减污降碳协同治理需求,未来将拓展绿色工艺与区块链技术的集成应用。

关键词: 化工污水处理; 性能评价; 数据驱动优化

Performance Evaluation and Optimization of Sewage Treatment Equipment in Production and Operation

Zheng Yifan

ID: 440981199304285659

Abstract: In view of the low efficiency and insufficient stability of wastewater treatment equipment in the chemical industry, this study constructed an "evaluation-optimization-verification" closed-loop management system, integrated process mechanism and data-driven method, and proposed multidimensional performance evaluation indicators, multi-objective parameter optimization strategy and intelligent regulation technology. Case verification shows that after optimization, COD removal rate is increased by 18%, energy consumption is reduced by 23%, and the return on investment of intelligent transformation is shortened to 2.5 years. The research provides systematic solutions for chemical wastewater treatment, supports the collaborative governance needs for pollution reduction and carbon reduction under the "dual carbon" goal, and will expand the integrated application of green technology and blockchain technology in the future.

Keywords: chemical wastewater treatment; performance evaluation; data-driven optimization

引言

随着“双碳”目标推进与《“十四五”节能减排综合工作方案》(2021年)的实施,化工行业面临绿色转型与污染治理的双重压力,污水处理设备的高效运行成为实现清洁生产的关键环节。当前,多数化工企业污水处理系统存在评价指标单一、工艺参数耦合性弱、抗冲击负荷能力不足等问题,导致能耗偏高与稳定性不足。尽管现有研究在单一工艺优化或智能控制方面取得进展,但缺乏融合工艺机理与数据驱动的系统性解决方案,难以适应复杂多变的化工废水特性。本研究针对上述瓶颈,提出以“评价-优化-验证”闭环管理为核心的全流程优化框架,通过多维度性能评价体系构建、多目标参数协同优化及数字孪生技术集成,推动污水处理设备从经验运维向智慧化管控升级,为化工行业落实减污降碳政策提供技术支持与实践路径。

一、污水处理设备的工艺特性分析

(一) 典型污水处理工艺分类

污水处理工艺根据作用机理可分为物理、化学与生物处理三大类。物理处理工艺以机械分离为核心,通过重力沉降、筛网过滤或离心分离等手段去除悬浮物及大颗粒污染物,典型技术包括沉淀池与多介质过滤系统,其优势在于操作简便且能耗较低,但对溶解性污染物去除效率有限^[1]。化学处理工艺依托化学反应实

现污染物转化或去除,例如通过投加絮凝剂促进胶体颗粒聚集沉降,或利用氧化剂(如臭氧、过氧化氢)降解有毒有机物,此类工艺适用于难生物降解物质处理,但易产生化学污泥并增加运行成本^[2]。生物处理工艺依赖微生物代谢作用分解有机污染物,活性污泥法通过曝气池与二沉池组合实现高效脱碳除氮,生物膜法则利用固定载体表面附着的微生物群落处理污水,具有抗冲击能力强、污泥产量低的特点,但需严格控制溶解氧、温度等环境参数以维持微生物活性;研究表明,不同生物工艺对抗性基因

的分布及削减效果存在显著差异^[3]，其技术选择需结合水质特征与处理目标。

（二）化工生产场景下的特殊需求

化工废水处理面临高浓度有机污染物、复杂介质腐蚀性与多参数耦合三大核心挑战。高浓度有机废水（如含苯系物、酚类物质）因COD值常超万mg/L，需采用厌氧-好氧联合工艺或高级氧化技术强化处理效率，同时防范有毒物质抑制微生物活性^[4]。腐蚀性介质（如酸性废水、含氯离子溶液）对设备材料耐受性提出严苛要求，需选用耐蚀合金（如哈氏合金）、工程塑料或陶瓷内衬材料以延长设备寿命，并通过表面涂层技术降低维护成本。工艺参数耦合性体现为pH波动影响化学反应速率与微生物群落结构，温度变化改变反应动力学与溶解氧饱和度，流量波动则干扰水力停留时间与处理效率，需建立动态模型分析参数交互作用，采用实时监测与反馈控制系统实现多变量协同优化，例如通过pH-ORP联控技术精准调节氧化还原条件，提升处理过程稳定性与适应性。

二、性能评价指标体系构建

（一）关键性能参数选取

污水处理设备的性能评价需围绕处理效率、能耗与稳定性三大维度构建指标体系。处理效率指标涵盖COD/BOD去除率、脱氮除磷效率等核心参数，直接反映污染物削减能力；其中COD/BOD去除率量化有机污染物降解效果，脱氮除磷效率则针对富营养化控制需求，需结合排放标准动态调整阈值^[5]。能耗指标包括单位处理量能耗与药剂消耗量，前者通过电耗、气耗等数据评估能源利用效率，后者反映化学处理工艺的经济性与环境影响，例如絮凝剂投加量与污泥产量的相关性需纳入核算范围。稳定性指标通过运行故障率、水质波动范围等参数表征系统可靠性，故障率统计设备停机频率与维修周期，水质波动范围则量化出水水质偏离设计值的幅度，需结合在线监测数据建立动态评价模型，以识别工艺薄弱环节并优化运维策略；基于类脑模块化神经网络的软测量技术可提升关键出水参数的实时预测精度^[6]。

（二）多维度评价方法

层次分析法（AHP）通过构建递阶层次结构模型，结合专家经验量化各性能参数的权重分配，解决指标间重要性差异的定性-定量转换问题，其在水处理技术综合性能评价中的实践已验证了方法的可靠性^[7]。数据包络分析（DEA）基于非参数统计方法评估设备综合效率，通过输入（能耗、药剂消耗）与输出（污染物去除率）的比值分析，识别低效单元并优化资源配置，该方法在技术评估中的普适性为多目标决策提供支撑^[8]。基于模糊综合评价的动态性能诊断引入隶属度函数处理评价中的不确定性，例如将水质波动范围映射为模糊语言变量，结合实时监测数据动态修正评价结果，实现工艺状态的连续跟踪与异常预警；多属性群决策方法的融合可进一步增强复杂场景下的评价鲁棒性^[9]。三种方法分别从权重分配、效率评估与动态诊断角度构建多维度评价体系，形成覆盖静态指标分析与动态过程优化的完整框架。

三、化工工艺视角下的优化策略

（一）工艺参数优化

响应面法（RSM）通过多因子实验设计与多项式回归模型建立工艺参数（如pH、温度、反应时间）与污染物去除效率的数学关系，解析参数交互作用并定位最优操作区间，例如在化学氧化工艺中平衡氧化剂投加量与反应时间以最小化副产物生成。基于遗传算法的多目标参数寻优以处理效率、能耗及经济性为优化目标，通过模拟生物进化机制（选择、交叉、变异）生成非劣解集，解决多约束条件下的工艺参数冲突问题，如在活性污泥法中同步优化曝气量、污泥回流比与碳氮比，实现脱氮除磷效率与能耗的协同提升。

（二）设备运行管理改进

预防性维护策略基于故障模式与影响分析（FMEA）系统识别设备潜在失效模式（如泵体气蚀、膜组件堵塞），通过严重度、发生频度与可探测度评分计算风险优先级指数（RPN），制定分级维护计划以降低非计划停机风险。能源梯级利用与余热回收系统设计通过热能耦合优化工艺链能效，例如将厌氧消化产生的沼气余热用于预热进水或维持中温发酵条件，或利用换热器回收出水余热供给其他生产单元，减少蒸汽外购需求，降低整体碳足迹^[10]。

（三）智能化技术集成

数字孪生技术通过高保真仿真模型与实时传感器数据融合构建虚拟设备镜像，动态映射物理实体的运行状态（如生物反应器内溶解氧分布、污泥沉降性能），模拟极端工况下的设备响应并预演调控方案，为故障诊断与工艺调整提供决策依据。机器学习模型基于历史运行数据训练时序预测算法（如LSTM、随机森林），预测进水负荷波动趋势并联动调控加药系统与曝气强度，形成“感知-预测-优化”闭环控制机制，增强系统对水质突变与工艺扰动的自适应能力，实现稳定达标与节能降耗的双重目标。

四、案例分析与实践验证

（一）化工园区污水处理系统优化案例

某石化企业污水处理系统原工艺采用传统活性污泥法处理高浓度有机废水（COD平均3000mg/L），因曝气池溶解氧分布不均、污泥沉降性能差等问题，出水COD长期波动在80-120mg/L，未能稳定达到《石油化学工业污染物排放标准》（GB 31571-2015）的50mg/L限值，且单位处理能耗高达1.8kWh/m³。通过引入基于遗传算法的多目标优化模型，对污泥回流比、曝气强度与水力停留时间进行协同寻优，确定污泥回流比由20%提升至30%、曝气量从0.35m³/(m³·min)降至0.25m³/(m³·min)，并结合臭氧催化氧化单元（TiO₂/γ-Al₂O₃催化剂）强化苯系物与多环芳烃的降解。改造后系统运行数据显示，COD平均去除率从85%提升至93%，出水COD稳定在35-45mg/L区间；吨水能耗降低23%至1.38kWh/m³，年节约电耗成本约320万元；污泥产量因氧化单元矿化率提高而减少15%，污泥处置费用同比下降

28%。同步安装在线 ORP 检测仪与自适应曝气控制系统，实现溶解氧精准调控，避免过度曝气导致的能源浪费，验证了工艺优化与智能控制协同增效的可行性。

(二) 特种废水处理设备改造项目

某电子企业含氟废水处理系统进水氟离子浓度达 1800-2200 mg/L，pH 波动范围宽 (2.5-11.0)，原 316L 不锈钢中和反应器因氟离子侵蚀与结晶结垢双重作用，内壁出现深度点蚀 (最大蚀坑深度 1.2 mm)，年泄漏故障频次超 8 次，设备更换与停产损失成本累计超 50 万元/年。改造方案采用哈氏合金 C-276 内衬反应器 (耐蚀速率 < 0.01 mm/a)，结合 pH-ORP 联控系统 (精度 ± 0.1) 动态调节石灰乳投加量，通过 PID 算法将中和反应 pH 稳定在 10.5-11.0 最佳沉淀区间，氟化钙沉淀效率从 94.5% 提升至 99.2%。同步部署数字孪生系统，集成计算流体力学 (CFD) 模型与在线浊度传感器数据，实时优化搅拌器转速 (由 120 rpm 调整至 80-150 rpm 动态范围) 与水力停留时间 (从 45 分钟延长至 60 分钟)，使出水氟离子浓度稳定低于 8 mg/L，满足《电子工业水污染物排放标准》(GB 39731-2020) 的 10 mg/L 限值。改造后设备运行周期从 8 个月延长至 3 年，年维护成本由 65 万元降至 39 万元，污泥含水率由 92% 降低至 88%，污泥处置费用同步减少 25%，实现高腐蚀性废水处理的高效化与长效化运行。

(三) 智能化改造的经济性分析

某化工企业引入自动化控制系统 (含智能加药、曝气调控模

块) 的初始投资为 580 万元，通过能耗优化与药剂精准投加，年运营成本由 920 万元降至 650 万元，静态投资回报周期测算为 2.5 年。长期运营成本节约量化评估表明，机器学习模型预测水质波动使曝气能耗减少 18%，药剂浪费降低 22%，设备故障率下降 35%，年维护费用节约超 150 万元。数字孪生技术通过预维护策略减少非计划停机时长 60%，五年期综合成本收益比达 1:3.8，验证了智能化改造在可持续运营中的经济可行性。

五、总结

本研究提出化工导向的“评价-优化-验证”闭环管理体系，通过构建多维度性能评价体系、工艺参数优化策略及智能化技术集成，系统性提升污水处理设备的运行效率与经济性。创新点在于融合工艺机理模型与数据驱动算法，形成复合优化方法，例如响应面法与遗传算法协同解决多目标冲突，数字孪生与机器学习实现动态调控，突破传统经验主导的局限性。未来研究需聚焦绿色化学工艺与污水处理的协同路径，开发低毒药剂与高效催化材料以减少二次污染；探索基于区块链的分布式污水处理系统，通过智能合约实现跨节点数据共享与资源调度；强化极端工况 (如高盐、高毒性冲击负荷) 下设备的抗冲击能力，结合自适应控制算法与耐极端环境材料研发，推动污水处理技术向低碳化、智慧化与高鲁棒性方向演进。

参考文献

- [1] 范军. 污水处理中各种工艺的应用 [J]. 中国新技术新产品, 2017(16):2.
- [2] 蓝梅, 应媛媛, 罗海慧, 等. 典型污水处理工艺的污泥调理机制研究 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(15):94-100.
- [3] 孙少静. 北方典型污水处理工艺中抗性基因的分布和丰度削减 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [4] 林青. 我国城市污水处理的主要工艺及发展趋势 [J]. 环境, 2012(S1):2.
- [5] 李彩霞, 杨宗璞, 饶辉凯, 等. 基于关键参数测定的石化污水处理厂模拟研究 [J]. 环境科技, 2023, 36(3):1-5.
- [6] 蒙西, 乔俊飞, 韩红桂. 基于类脑模块化神经网络的污水处理过程关键出水参数软测量 [J]. 自动化学报, 2019, 45(5):14.
- [7] 郝晓伟, 干钢, 裴瑶, 等. 基于层次分析法的水源地上游农村生活污水处理技术综合性能评价 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4):6.
- [8] 李娇, 宋永会, 蒋进元, 等. 水污染治理技术综合评估方法研究 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(2):7.
- [9] 卢智琪. 基于多属性群决策方法的污水处理项目融资模式选择研究 [D]. 辽宁: 东北财经大学, 2016.
- [10] 王娟, 陈贵军. 蒸汽梯级利用及余热回收 [J]. 节能, 2014, 33(8):4.