工业污水处理厂效能诊断与全流程运营优化体系构建研究

李婴婴　许家杰　徐程炎
宁波市城市排水有限公司　浙江　宁波　315000

摘　要：工业污水处理厂作为水污染防治的关键环节，其运行效能直接关系到区域环境质量与工业可持续发展。本文针对当前工业污水处理厂普遍存在的运行效率不高、能耗物耗偏大、稳定性不足等问题，系统构建了涵盖工艺诊断、设备评估、运维管理及运营优化的全流程效能提升体系。研究提出了多层次效能诊断方法，建立了关键设备评估指标体系，设计了精细化运维管理方案，并形成了闭环优化的运营策略，旨在为工业污水处理厂实现提质增效提供系统性的理论指导与实践路径。

关键词：工业污水处理；效能诊断；运营优化；设备评估；全流程管理

引言

工业污水处理厂是工业废水末端治理的核心设施，其运行效能直接影响区域水环境质量和工业企业正常生产。近年来，随着环保标准日趋严格，工业污水处理厂面临的运行压力持续增大。然而，由于工业废水水质水量波动大、成分复杂、可生化性差异显著，许多污水处理厂长期处于低效运行状态，表现为能耗药耗偏高、出水稳定性不足、设备故障频发等问题。效能诊断与运营优化是提升污水处理厂综合性能的关键手段。当前，多数污水处理厂仍采用经验性管理模式，缺乏系统化的诊断方法与科学的优化体系。构建一套涵盖工艺、设备、运维、管理等多维度的全流程运营优化体系，对于提升工业污水处理厂运行效能具有重要意义。本文从系统工程视角出发，围绕工艺诊断、设备评估、运维管理、运营优化四个维度，系统构建工业污水处理厂效能诊断与全流程运营优化体系。研究内容涵盖诊断方法设计、评估指标体系构建、优化策略制定等核心环节，旨在为工业污水处理厂提供可操作的效能提升方案。

1 工业污水处理厂效能诊断方法体系

1.1 效能诊断的框架设计

效能诊断是全流程优化的基础环节。本文设计的诊断框架采用“三级递进”模式：第一级为宏观效能筛查，通过关键指标快速识别运行异常；第二级为单元效能分析，针对预处理、生化处理、深度处理等单元进行逐项评估；第三级为微观机理诊断，深入分析特定问题的成因机理。三级诊断逐层深入，兼顾诊断效率与准确性。诊断维度涵盖四个方面：工艺运行效能、设备设施状态、能耗物耗水平、出水达标稳定性。每个维度设置定性与定量相结合的评价指标，形成多维度的诊断矩阵。诊断周期采用日常巡检、月度评估、季度全面诊断相结合的方式，确保问题及时发现与响应。

1.2 工艺运行效能诊断

工艺运行诊断聚焦于生化系统、物化系统及泥水分离系统三大核心模块。生化系统重点诊断活性污泥性状、微生物活性、溶解氧分布、污泥龄控制等参数。通过分析污泥容积指数、污泥沉降比、比耗氧速率等指标，判断污泥系统健康状态。物化系统诊断关注混凝、絮凝、沉淀等单元的运行参数优化空间，评估药剂投加精度与反应条件的匹配程度。泥水分离系统诊断包括二沉池表面负荷、污泥层高度、出水悬浮物浓度等参数分析[1]。通过工艺模拟与物料平衡核算，识别工艺瓶颈与参数偏离问题。关键诊断指标包括：有机负荷率、污泥负荷、容积负荷、水力停留时间、污泥龄、回流比、产泥率等。结合进水水质特征与设计参数的对比分析，判断工艺适配性。

1.3 设备设施状态评估

设备评估采用基于状态监测的可靠性分析方法。评估对象涵盖水泵、风机、搅拌器、脱水机、加药系统、仪表自控系统等关键设备。评估指标体系包括设备完好率、运行效率、故障频次、维修时长、能耗效率等维度。设备健康状态评估分为四个等级：良好、注意、异常、严重。采用振动分析、油液分析、温度监测、电流监测等检测手段获取设备状态数据。建立设备全生命周期档案，记录设备选型、安装、运行、维护、报废全过程信息，为状态评估提供数据支撑。重点评估设备能耗效率，通过单位处理量电耗、单位能耗去除污染物量等

指标衡量设备运行经济性。对低效设备提出更新或改造建议。同时评估自控系统覆盖率和仪表准确度，为自动化优化奠定基础。

表1 主要设备评估指标及评分标准（建议）

设备类型	评估指标	权重	优秀(＞90分)	合格(70～90分)	不合格(＜70分)	监测周期
曝气风机	单位风量电耗(kWh/万m³)	35%	≤180	180～220	＞220	每月
提升泵	泵效(%)	30%	≥75	60～75	＜60	每季度
脱水机	泥饼含固率(%)	25%	≥20	15～20	＜15	每周
加药系统	计量精度误差(%)	20%	≤3	3～8	＞8	每月
在线仪表	数据准确率(%)	30%	≥98	90～98	＜90	每周

1.4 运维管理质量诊断

运维管理质量诊断聚焦于人员配置、制度建设、数据管理、安全管控等方面。人员效能评估包括岗位设置合理性、技能匹配度、培训覆盖度等指标。制度建设评估涵盖操作规程、巡检制度、维护保养计划、应急预案等文件的完整性及执行情况。数据管理诊断重点关注数据采集完整性、记录规范性、分析利用深度。评估运行报表、化验数据、设备台账等信息的准确性及时效性。安全管控诊断包括危险源识别、防护措施、应急演练、职业健康管理等要素[2]。通过运维质量评分表进行量化评估，识别管理短板。特别关注交接班制度执行情况、异常响应时效、备品备件管理等直接影响运行连续性的环节。

2 全流程运营优化体系构建

2.1 工艺运行优化策略

工艺运行优化以提升处理效率和降低运行成本为核心目标。优化内容主要包括：生化系统参数优化、药剂投加智能控制、运行模式动态调整三个方面。生化系统参数优化基于进水水质波动特征，建立动态调控机制。关键控制参数包括溶解氧、污泥浓度、回流比、排泥量等。采用前馈-反馈复合控制策略，根据进水负荷变化提前调整运行参数。溶解氧控制采用分区供气与变频调节相结合的方式，在保障硝化效果的前提下降低曝气能耗。药剂投加优化通过烧杯试验与在线监测相结合，确定最佳投加区间。针对混凝剂、碳源、除磷剂等主要药剂，建立投加量与去除效率的响应模型，实现按需投加。引入流动电流检测仪等在线监测设备，实现混凝剂的闭环自动控制。运行模式优化根据来水季节性变化和生产周期特征，制定差异化的运行方案。在低负荷时段采用间歇曝气、污泥减量等节能模式；在高负荷时段启动应急调控预案，保障出水稳定。建立工艺调控知识库，积累优化调控经验。

2.2 设备系统优化管理

设备优化管理以可靠性为中心，构建预防性维护与预测性维护相结合的设备管理体系。预防性维护依据设备运行时长和维护手册要求，制定标准化保养计划。预测性维护基于状态监测数据，利用趋势分析和故障预警模型，实现设备故障的早期识别。设备更新改造决策基于全生命周期成本分析。对能耗高、故障频发、维修成本大的设备，进行技术经济比选，确定最佳改造时机[3]。重点推进高耗能设备的节能改造，如高效电机替代、变频调速改造、曝气系统优化等。备品备件管理建立分级储备制度，关键设备核心备件保持安全库存，通用备件采用联合储备或供应商直供模式。设备档案实现数字化管理，记录设备全生命周期的运行数据、维修记录、更换信息，为后续优化提供数据基础。

2.3 运维管理体系优化

运维管理体系优化从标准化、精细化、数字化三个维度展开。标准化建设包括完善操作规程、制定作业指导书、统一记录表单。编制《工艺调控作业指导书》覆盖多种典型工况；制定《设备巡检标准化清单》，明确每台设备的巡检点位、标准值及异常处置流程；统一运行记录表格。推行岗位标准化作业流程，减少操作差异带来的运行波动。精细化管理通过建立绩效指标体系驱动，设置单位处理成本、吨水电耗、药剂单耗、设备综合完好率、出水达标率等KPI。结合污水厂实际，采用网格化与工艺段精细化管控，制定年度降本增效目标值及可落地的精细化操作手册，将指标分解至工艺段和班组。数字化转型建设涵盖工艺监控、设备管理、化验分析、报表统计的运维管理平台。实现数据自动采集、实时监控、智能预警：对DO异常、MLSS突变、设备超限设置三级报警(黄色预警、橙色警示、红色紧急)。利用数据分析工具挖掘运行规律，如分析进水COD与曝气量的相关性辅助优化前馈系数。建立运维知识库，积累故障案例、处置方案、优化经验，新员工可快速学习。

2.4 全流程协同优化机制

全流程协同优化机制是实现整体效能最优的关键保

障，包括信息协同、决策协同、行动协同三个层面。信息协同层面，打通工艺、设备、化验、运维等环节的数据壁垒，建立统一数据平台。接入PLC/SCADA实时点位(约500～1000点)、化验结果(约30项/日)、设备状态及维修记录、巡检异常上报。实现进水水质、工艺参数、设备状态、出水指标的全流程关联分析，例如将出水氨氮升高与DO波动、进水负荷变化、曝气设备故障进行关联追溯。决策协同层面，建立多专业联合诊断机制[4]。出现运行异常时，1小时内响应、4小时内联合分析：工艺工程师评估生化系统，设备工程师检查设备数据，化验人员复核检测。三方形成诊断结论和处置方案，避免单专业局限。制定优化方案时统筹处理效果、运行成本、设备寿命等约束。行动协同层面，建立快速响应与闭环管理机制，实行问题分级处置（一般/重要/紧急），对应班组、主管、厂部级响应。一般问题当班处置记录；重要问题主管分析调整并跟踪；紧急问题先应急处置，事后24小时内完成处置单归档。措施验证后修订规程。每周生产短会通报异常，每月全面分析会评估效率与改进点，形成月度清单跟踪闭环。

3 工业污水厂业务模型优化及关键岗位职责细分

3.1 业务模型优化思路

工业污水厂业务模型应围绕“安全稳定运行、达标排放、成本可控”三大核心目标，将原有9个一级业务板块整合为三大业务群：生产运行群（工作准备、日常巡检、工艺调控、设备操作）、技术保障群（水质监测、日常维保、故障及应急处置）和管理支持群（安全管理、报表记录）。通过业务群的划分，明晰各岗位的职责边界，强化横向协同，提升整体运营效率。

3.2 关键岗位设置

基于优化后的业务模型，设立以下关键岗位：运行值班长、工艺技术员、设备维保专员、安全环保专员、化验员、中控操作员。

3.3 岗位职责细分优化

运行值班长统筹全厂生产调度，负责班前准备、工艺调控协调、故障现场指挥及数据审核；工艺技术员聚焦工艺优化与水质达标，制定调控方案、分析监测数据并指导规范操作；中控操作员执行远程设备操作与参数监控，确保系统稳定运行；设备维保专员落实日常维护计划、建立设备档案并参与故障处置与验收；化验员严格执行水质采样检测流程，确保数据准确可追溯并及时上报异常；安全环保专员构建双重预防机制，组织安全培训演练，管理应急物资并监督作业规程执行，协同保障应急处置的安全可控。各岗位各司其职又紧密协同，共同保障水厂高效、安全、合规运行。

3.4 职责协同机制

建立“日沟通、周例会、月总结”的协同机制。各岗位每日交接班时互通生产信息；每周召开生产分析会，各岗位汇报板块运行情况，共同研判问题；每月开展综合绩效评估，以水质达标率、设备完好率、安全事故数为核心指标，形成闭环管理，持续优化业务运行质量。

4 结语

本文围绕工业污水处理厂效能提升，构建了涵盖工艺诊断、设备评估、运维管理、运营优化的全流程运营优化体系。主要结论：第一，效能诊断采用“宏观筛查-单元分析-微观机理”三级递进模式，从工艺、设备、运维三方面系统识别问题。第二，工艺优化聚焦生化参数调控、药剂智能投加及运行模式动态调整；设备管理以可靠性为中心，构建预防与预测相结合的维护体系；运维管理实现标准化、精细化、数字化升级。第三，全流程协同机制通过信息、决策、行动三层面协同，打破专业壁垒，实现整体效能最优。该体系为工业污水处理厂提供了系统化理论框架与方法支撑，实际应用中需结合水质特征、工艺类型等条件进行适配，并建立持续改进机制。随着水质变化与环保要求提升，效能诊断与优化策略需与时俱进，在技术与管理的创新中不断演进。

参考文献

[1]王凯军,刘建国,李振东.工业废水处理厂运行效能评价与智能优化策略研究[J].环境工程,2023,41(6):45-52.

[2]张伟,陈思,刘洋.基于数据驱动的污水处理工艺故障诊断方法及应用[J].中国给水排水,2022,38(15):78-84.

[3]李敏,赵磊,孙丽丽.城镇污水处理厂设备健康状态评估与预测性维护体系构建[J].给水排水,2024,50(2):112-118.

[4]陈志强,王浩,刘婷婷.工业污水处理厂全流程节能降耗优化运行技术研究[J].水处理技术,2023,49(8):97-102.