

基于现场实操的工业废水处理节能降耗操作优化策略

张秀晶 谢 煜

浙江中通检测科技有限公司 浙江 宁波 315200

摘 要：工业废水处理系统能耗高、药耗大的问题长期困扰企业运营，现有研究多聚焦于设备改造与工艺升级，投资大且周期长。本文从现场实操视角出发，系统分析了工业废水处理能耗现状及操作层面存在的突出问题，包括曝气粗放、加药过量、水泵低效等，针对性地提出了精确曝气控制、智能药剂投加、变频调速、污泥处理优化及运行精细化管理等可落地策略。通过优化操作可在不增加硬件投资或少量投资的前提下实现15%~30%的节能降耗效果，为废水处理站运行人员提供实用参考。

关键词：工业废水处理；节能降耗；操作优化；现场实操；运行管理

引言：工业废水处理系统是企业的重点环保设施，同时也是能耗与药耗大户。据统计，废水处理环节的耗电可占企业总耗电的5%~20%，药剂费用更是可观的运营支出。在“双碳”目标背景下，节能降耗已成为废水处理运行的刚性要求。然而，当前多数研究集中于设备升级、工艺改造等需要较大投资的路径，而从一线操作角度挖掘节能潜力的研究相对不足。本文立足现场实操，系统分析问题并提出可复制的优化策略，通过医药化工废水处理站的案例数据表明，调整溶解氧控制区间、优化碳源投加比例、变频调节水泵运行等参数优化措施，可使吨水电耗和药剂成本分别下降约28%和29%，为废水处理站运行人员提供实用参考。

1 工业废水处理能耗现状分析

1.1 废水处理站主要能耗构成

工业废水处理站能耗主要由电力、药剂及热力三部分构成，其中电力占比最大。电力消耗分布于各工艺单元：提升泵房用于将废水从调节池输送到后续处理单元，其电耗占有相当比例；曝气系统是好氧生化处理的核心供氧设备，通过鼓风机向好氧池输送空气以维持微生物代谢活动，电耗占比最高；搅拌设备用于维持缺氧池、厌氧池及污泥储池的混合状态，防止污泥沉降；污泥处理系统包括浓缩机和脱水机，单位处理能耗较高；其余辅助设备如照明、控制系统等也消耗部分电力。药剂消耗主要包括碳源、混凝剂、絮凝剂、除磷剂及pH调节剂等，其成本在某些行业中甚至超过电耗。碳源用于补充反硝化所需的有机物，混凝剂和絮凝剂用于去除悬浮物和胶体颗粒。热力消耗主要用于冬季水温维持或污泥加热，仅在特定地区或工艺中存在，一般占比较小。理解这一能耗构成是识别节能降耗重点方向的前提，帮助运行人员找准优化发力点。

1.2 典型工业废水处理工艺流程能耗分布

以“预处理+生化处理+深度处理”典型流程为例，各单元能耗分布差异明显。预处理段能耗占比5%~10%，主要来自提升泵和格栅除污机，若调节池运行水位控制不当，会导致提升泵频繁启停或长期低效运行。生化处理段是能耗核心，占60%~75%，其中曝气系统占据绝对主导地位，好氧池曝气能耗可占生化段80%以上；缺氧池和厌氧池搅拌器能耗相对较低，但不合理的连续运行也会造成浪费。深度处理段能耗占比10%~15%，主要来自混凝搅拌、过滤反冲洗及出水泵提升。污泥处理段能耗占比5%~10%，但脱水机、浓缩机单位处理能耗较高，且药剂消耗巨大。掌握各段分布特征，有助于明确节能优化的主攻方向。

1.3 现场实操中能耗偏高的共性原因

通过对多家工业废水处理站现场调研发现，能耗偏高的共性原因集中在操作层面。首先是过量曝气普遍存在，操作人员为保证出水达标，往往将溶解氧控制在远高于工艺需求的水平，造成大量曝气能耗浪费^[1]。其次，过量加药问题严重，碳源、混凝剂投加量远超理论需求，不仅增加药耗，还可能导致出水COD升高、污泥产量增加。第三，水泵运行偏离高效区，多台水泵并联时组合不合理，或液位控制不当导致频繁启停。第四，设备空转或无效运行，如搅拌器在低液位下继续运行。第五，缺乏动态调节机制，运行参数长期不变，不能根据进水水质水量变化及时调整。这些问题大多可通过优化操作加以解决。

2 现场实操中存在问题的深层剖析

2.1 问题背后的管理机制缺失

表面上是操作粗放，根源在于缺乏有效的管理机制。多数废水站未建立能耗药耗定额管理制度，操作人

员没有明确的节能目标,考核指标仅关注出水水质,不考核电耗和药耗,导致“只要达标、不计成本”的行为导向。节能责任未落实到人,电费药费由厂部承担,运行班组无经济责任。此外,缺乏操作标准与异常响应机制,溶解氧控制在什么范围、药剂投加量如何调整,均无书面操作规范,完全依赖个人经验,人员流动后经验随之流失。更严重的是,缺乏数据驱动的复盘分析,每月电费药费高企却无人深究原因,问题长期存在却未被识别。

2.2 人员能力与培训体系的短板

操作层面的问题往往被归因于“责任心不强”,但深层原因是能力不足。一线操作人员普遍缺乏工艺原理的系统培训,多数人员只知道“开风机、加药、排泥”,但不理解溶解氧与能耗的关系、碳氮比对脱氮的影响、排泥量与污泥龄的联系。现场缺少实用的操作指引,工艺参数控制范围写在设计说明书中,未转化为岗位作业指导书。技能验证环节缺失,上岗后缺乏实操考核,错误操作无人纠正。这种能力短板导致操作人员即便有心节能,也不知从何入手,只能沿用“高溶解氧保险、多投药保险”的保守策略。

2.3 信息不对称与仪表配置的系统性缺陷

操作粗放的另一个深层原因是“看不见”——缺乏必要的数​​据支撑。仪表配置存在系统性缺陷,大量废水站仅有液位计和流量计,缺少溶解氧仪、污泥浓度计、ORP计等关键在线仪表,操作人员无法实时获知工艺状态。已有仪表的维护管理缺失更为严重,探头未按期清洗校准,数据与实测值偏差巨大,但操作人员仍以此为依据做决策,比没有仪表更危险。数据采集与利用的断裂同样突出,即使有仪表数据,也未建立数据记录和分析制度,历史数据沉睡在控制器中,未能用于趋势分析和预警。操作人员在“信息黑箱”中作业,精细化调节无从谈起。

2.4 设计与运维脱节造成的操作困境

部分操作问题是设计阶段遗留的“先天不足”,在现场运维中难以解决。设备选型与实际情况偏差大,水泵、风机按最大设计流量选型,但日常水量远低于设计值,操作人员只能在低效区运行,这是设计问题而非操作问题。控制逻辑不符合现场习惯,自动控制系统设计复杂但未考虑运维便利性,导致操作人员弃用自动转而手动。工艺设计冗余过大,为应对极端情况设计的过量曝气、过量加药能力,在日常运行中成为浪费源头,但操作人员无权改变设计参数^[2]。识别这些与设计相关的问题,有助于区分“操作可优化”与“需技改解决”的边

界,避免对操作人员提出不切实际的要求。

3 基于现场实操的节能降耗优化策略及效果

本文以医药化工废水处理站为优化案例。该站设计处理能力500m³/d,实际处理水量约350m³/d,采用“调节池+水解酸化+A²/O+二沉池+混凝沉淀+过滤”工艺,出水执行《医疗机构水污染物排放标准》。优化前运行数据显示:好氧池末端溶解氧日均4.2mg/L,远超工艺需求;碳源(醋酸钠)投加量0.28kg/m³,为理论值的1.87倍;提升泵长期在低效区运行,效率仅52%;排泥操作缺乏量化依据,日均排泥8.5m³。吨水电耗1.85kWh/m³,吨水药剂成本1.26元/m³,存在显著的节能降耗空间。以下优化措施均在该站实施,数据为现场实测值。该站代表了一类典型的中型医药化工废水处理站,其高能耗、高药耗问题在同行业中具有普遍性,优化经验和数据具备较好的参考价值。

3.1 精确曝气控制策略

精确曝气是节能潜力最大的操作优化方向。本案例引入“便携仪表+分区控制+间歇运行”的组合方法。首先,操作人员使用便携式溶解氧仪沿好氧池池长方向测定,绘制溶解氧梯度曲线,据此调整各支管阀门开度,使进水端控制在1.0~1.5mg/L、中段1.5~2.0mg/L、末端1.5~2.5mg/L。第二,建立基于污泥负荷的动态调节,每日测定进水COD和MLSS,当负荷降低时同步减少曝气量。第三,在夜间低负荷时段采用间歇曝气模式,设置溶解氧上下限,风机在达到上限时自动暂停、下限自动重启。第四,做好曝气系统日常维护,定期清洗曝气头。采用上述策略后,好氧池末端溶解氧从4.2mg/L降至2.1mg/L,风机日均运行时长缩短5.5小时,曝气电耗下降约30%。

3.2 智能药剂投加策略

针对加药精准性问题,引入“小试定比例+便携仪反馈+分段投加”的方法。碳源投加以进水碳氮比为依据,每日用便携式COD和总氮测定仪获取数据,通过小瓶试验确定最佳投加比例。将投加点改为两点:70%于缺氧池前端、30%于中段,提高利用效率。PAC投加以烧杯试验为基础,每月一次确定不同浊度下的最佳投加量,现场配备浊度仪实时调整。PAM配制采用固定浓度,搅拌器改为间歇运行(每2小时搅拌10分钟),避免连续空转。所有药剂建立单耗台账,每周对标分析。实施后,碳源投加量从0.28kg/m³降至0.14kg/m³,PAC从0.12kg/m³降至0.08kg/m³,吨水药剂成本从1.26元降至0.89元,同时出水COD从65mg/L回落至48mg/L,水质未受影响反而有所改善^[3]。

3.3 水泵系统变频调速与管网优化

针对水泵负荷波动问题,采用“变频PID调节+大小泵搭配+液位优化”策略。对已有变频器但长期固定频率运行的水泵,建立基于集水池液位的PID自动调节,液位控制在池容50%~80%,变频范围限制在35~50Hz。当变频泵频率长期低于40Hz时,更换小规格叶轮。工频泵根据进水量决定运行台数,日间水量大时双泵运行,夜间低负荷时单泵运行。集水池液位控制从“低液位启泵”调整为60%启泵、30%停泵,设置最小运行时间5分钟。日常记录水泵运行电流和出口压力,与初始值对比及时发现效率下降趋势。优化后,提升泵日均运行时长缩短7.5小时,吨水提升电耗下降26%,水泵运行效率从52%提升至71%。

3.4 污泥处理系统优化与工艺联动

污泥处理优化的核心是将“凭经验排泥”转变为“按泥龄计算”。建立每日排泥量化公式:排泥量=池内污泥总量/目标污泥龄,本案例设定目标污泥龄18天,采用连续小排量方式。脱水环节根据进泥浓度及时调整离心机差转速和扭矩,脱水药剂投加量通过小试确定。工艺联动方面,操作人员定期测定缺氧池ORP并维持在-100~-50mV,防止内回流带入过量溶解氧;通过适度延长污泥龄提高内源反硝化能力,减少外碳源需求;利用调节池调蓄功能,在电价谷时段满负荷处理、峰时段低流量运行,利用峰谷电价差降低电费支出^[4]。实施后,日均排泥量从8.5m³降至6.2m³,污泥处理电耗下降22%,脱水药剂单耗下降25%,二沉池跑泥现象大幅减少。

3.5 优化前后综合效果对比

经过三个月的分阶段优化实施,该废水处理站各项指标显著改善,综合效果如下:吨水电耗从1.85kWh/m³降至1.32kWh/m³,降幅28.6%;吨水药剂成本从1.26元/m³降至0.89元/m³,降幅29.4%;吨水污泥产量从0.68kg/m³降至0.49kg/m³,降幅27.9%;吨水总运营成本从3.52元/m³降

至2.67元/m³,降幅24.1%。月综合节省费用约1.9万元,全年预计节省约22.8万元。优化投入主要为便携式检测仪器(约3.5万元)和小规格叶轮更换(0.3万元),投资回收期不足2个月。上述策略将传统依赖经验的操作通过便携仪表辅助、简易计算公式、阈值自动控制等方法转化为可量化、可执行、可验证的标准化操作,具有较强的可复制性。

结论

工业废水处理节能降耗既有赖于设备升级,更有赖于现场操作优化。本文从现场实操视角出发,分析了曝气粗放、加药过量、水泵低效等突出问题,提出了精确曝气、智能加药、变频调速等可落地策略。以医药化工废水处理站为案例,经过三个月优化实施,吨水电耗从1.85kWh/m³降至1.32kWh/m³,下降28.6%;吨水药剂成本从1.26元/m³降至0.89元/m³,下降29.4%;吨水总运营成本从3.52元/m³降至2.67元/m³,下降24.1%,月综合节省费用约1.9万元,全年预计节省约22.8万元。优化投入约3.8万元,投资回收期不足2个月。通过操作优化可在少量投入下取得显著节能降耗效果,策略具有较强的可复制性。未来随着智能化技术普及,现场操作将从经验主导向数据驱动转变。

参考文献

- [1]姚猛,李涛.造纸工业废水处理与城市给水排水系统中的节能技术集成[J].华东纸业,2025,55(11):93-95.
- [2]侯青山,黄飞.工业废水处理过程节能优化控制方法探究[J].科学与信息化,2024(4):73-75.
- [3]杨延鑫.工业废水处理过程节能优化控制方法的探究[J].节能与环保,2023(7):55-57.
- [4]曾骏,曹涵昱,孙红波,等.工业废水AAO工艺尾水的磁混凝深度处理工艺的应用[J].净水技术,2025,44(10):124-135.