

Study on the improvement of environmental performance of sewage treatment plant by electrification

Yangkuan Wang Rui Yang

Qingdao Guolin Technology Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266100, China

Abstract

As the “dual carbon” strategy advances, wastewater treatment plants, as high-energy-consuming units, are facing dual pressures of emission reduction and efficiency improvement. Electrification transformation, as a core pathway to promote green and low-carbon development, has become an important technical means to enhance the environmental performance of wastewater treatment. By replacing traditional energy structures with electricity and integrating efficient electrical equipment with intelligent scheduling systems, not only is the energy consumption structure optimized, but also the capacity for pollutant reduction and carbon emission control is significantly enhanced. This paper starts from the system composition of electrification transformation, systematically reviews its synergistic effects in various stages of water treatment, and explores its improvements in environmental performance, resource recovery, and intelligent operation and maintenance, providing theoretical support and technical pathways for the green transformation of the wastewater treatment industry.

Keywords

sewage treatment plant; electrification transformation; environmental performance; energy structure; pollution control

电气化改造对污水处理厂环保性能的提升研究

王仰宽 杨瑞

青岛国林科技集团股份有限公司, 中国 · 山东 青岛 266100

摘 要

随着“双碳”战略的推进,污水处理厂作为高能耗单位,正面临减排与提效双重压力。电气化改造作为推动绿色低碳发展的核心路径,已成为提升污水处理环保性能的重要技术手段。通过对传统能源结构进行电力替代,结合高效用电设备与智能化调度系统,不仅优化了能耗结构,也显著增强了污染物削减能力与碳排控制水平。本文从电气化改造的系统构成入手,系统梳理其在水处理各环节的协同作用,探讨其在环境绩效、资源回收以及运维智能化等方面的提升效果,为污水处理行业绿色转型提供理论支持与技术路径。

关键词

污水处理厂; 电气化改造; 环保性能; 能源结构; 污染控制

1 引言

污水处理厂作为城市基础设施的重要组成部分,其运行效率与环境影响日益成为资源与环保领域关注的焦点。在传统模式下,污水处理高度依赖化石能源供给,能源利用效率偏低,污染物削减能力有限,制约了整体环保绩效的提升。为应对能源转型与生态环保的双重要求,推动电气化改造成为行业发展的必然选择。电气化不仅体现为用电设备对传统动力系统的替代,更在于通过智能化控制实现运行状态的动态调节,从而在提升污染控制精度的同时,改善能耗结构与碳排放水平。本文围绕电气化改造对污水处理厂环保性能的具体影响展开系统分析,聚焦技术机制、节能成效与生态协

同等关键议题,旨在为环保基础设施的低碳化发展提供可操作的技术参考。

2 电气化改造的技术路径与系统架构分析

2.1 污水处理厂传统能源系统的运行模式与问题梳理

污水处理厂传统运行模式依赖化石能源为主的动力系统,动力源构成以燃气锅炉、柴油发电机等为核心,能效转换率低且污染物排放高。在高负荷运转状态下,动力系统维护频繁、运行稳定性不足,导致关键处理单元时常面临供能波动。能源供应与污水处理各环节的联动性差,难以实现动态匹配,造成能耗冗余和过程效率下滑。传统模式下,自动化水平有限,能耗数据监控手段滞后,能源管理高度依赖人工经验,难以精确控制负载分配与设备协同。此外,分布式供能布局缺乏统一规划,资源利用率偏低,碳排放控制缺乏系统性手段,对环境绩效构成长期制约。

【作者简介】王仰宽(1990-),男,中国山东菏泽人,本科,助理级工程师,从事臭氧技术-电气自动化研究。

2.2 电气化改造的关键技术体系与设备构成

电气化改造以清洁能源驱动为基础,通过构建集中化电力供能系统与智能控制平台,提升整体处理系统的能源利用效率与环境友好水平。核心技术体系涵盖高效电动机、变频驱动装置、电控阀门、PLC 自动化模块与 SCADA 远程集控系统,各类设备在协同控制中实现精准负载调节与运行状态实时反馈。曝气、搅拌、提升等能耗环节采用高转速低能耗电机与负载自适应调速系统,实现运行效率最大化。电气架构强化模块化配置,提升系统扩展与维护便捷性,通过电力总线统一调度,提升能源响应速度。平台层引入边缘计算技术,增强本地处理能力,保障控制系统运行实时性与稳定性,为污水处理厂迈向高效、智能、低碳运行提供有力支撑^[1]。

2.3 电气系统在污水处理流程中的耦合方式与配置优化

在电气化改造过程中,系统配置需依据污水处理各阶段能耗特性进行差异化耦合设计,实现最优资源分配与能效提升。进水泵站环节采用高功率密度电机与智能变频控制,保障来水流量恒定与能耗曲线平稳。生化反应池配置精密曝气控制系统与电磁阀组联动装置,依据在线监测数据调节氧供强度,实现气能与处理效果同步优化。污泥脱水及资源化环节引入电加热式干化设备与电控输送系统,控制过程均匀性与能量回收效率。在系统集成层面,电气架构以模块化、分布式设计为主,减少能量损耗路径,提升冗余响应能力与运行稳定性。所有控制节点通过通信协议互联,实现跨系统能效协同与污染物削减目标对接,支撑处理厂整体环保性能持续提升。

3 电气化改造对污染物削减效率的影响机制

3.1 生化处理环节中电控技术对去除效率的支撑作用

生化处理作为污水净化的核心阶段,对氧气供给、混合效率与反应时间具有高度依赖性。电气化系统通过精准控制曝气设备、搅拌器与药剂投加泵,实现氧转移率、反应速率与能耗的平衡优化。电控系统能够依据水质波动实时调整曝气强度与反应时间,通过 DO (溶解氧) 自动调节机制提升反硝化与硝化效率。电磁阀组与变频电机联动控制,增强系统对负荷变化的响应能力,减少过度曝气与能源浪费。生物处理过程中溶解氧维持在最优区间,促进微生物活性最大化,加快有机物分解速率。电控精度提升减少人为干预导致的误操作,保障系统连续稳定运行,从而显著提升对氨氮、COD 等污染物的去除效率,为水质达标排放提供坚实支撑。

3.2 污泥处理与资源回收过程的电气优化路径

污泥处理涉及浓缩、脱水、干化及再利用多个阶段,电气化系统通过设备替代与能量耦合优化提升处理效率与资源化水平。采用变频控制的离心脱水设备,能够根据污泥含水率自适应调整转速与处理时间,确保泥饼含水率稳定可控。电热干化装置通过实时温控技术维持均匀热分布,减少

能源浪费,提高蒸发效率。配套电控压滤机系统以闭环反馈模式实现自动启停与故障预警,有效降低人工干预频率。对于资源回收环节,电气系统支持磷回收、电解消毒与热值提取等功能模块的精准运行,推动污泥向可再利用能源或肥料转化^[2]。整体流程中,电能驱动与过程参数的高度耦合构建起智能运行机制,提升污染物的脱附与转化效率,强化资源回收与环境保护的双重效益,图 1 为污水处理厂电气改造流程。

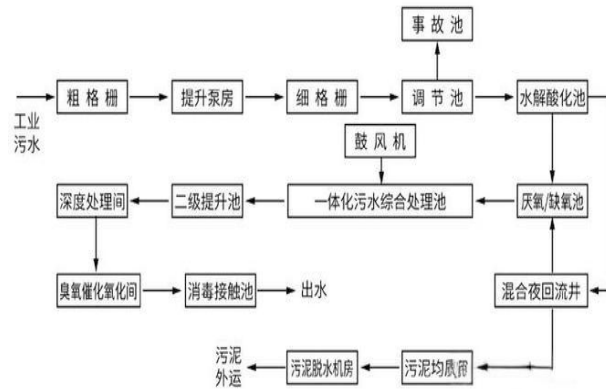


图 1 污水处理厂电气改造流程

3.3 对 COD、氨氮、总磷等核心指标的改进效果

电气化改造通过精密控制技术与智能调节机制,全面提升对典型污染物的去除率。COD 去除方面,曝气系统的气水比调控精度提高至 ± 0.01 ,实现有机物高效氧化反应速率稳定提升 10% 以上。氨氮处理效率依赖于硝化菌活性维持与氧气供给稳定性,电控系统调节反应池 DO 浓度维持在 1.5 ~ 2.0 mg/L 波动范围内,有效促进硝化反应全过程。总磷控制环节引入精密电控药剂投加系统,确保 FeCl_3 或 PAC 投加量与磷含量动态匹配,结合低电压混凝辅助装置提高沉降速率。数据表明,经电气化系统调节后,出水总磷浓度稳定控制在 0.3 mg/L 以下,远低于常规标准。以上技术路径显著改善了处理厂在复杂负荷条件下的运行可靠性与污染物削减一致性,彰显电气化改造的环保增效能力。

4 电气化改造在能耗结构与碳排控制中的应用表现

4.1 电力替代传统化石能源的路径分析与实践效益

电气化改造以清洁电力替代污水处理厂传统的燃煤、燃油等化石能源供能系统,实现低碳化转型的核心突破。通过集中布设电力主站与分布式供电节点,将热力驱动系统转换为高效发电机组运行,削减一次能源消耗比重。电加热、压缩、输送等原本依赖化石燃料的工艺段通过电动设备重构,能量转换路径简洁高效。厂区内燃料储运系统与燃烧设备逐步淘汰,燃烧烟气与油气泄漏隐患大幅降低。电力调度平台可实现对用电负荷的实时控制与调峰操作,配合可再生能源接入,提高厂区整体碳排放系数控制能力。系统投运后数据

显示,化石能源使用比例下降至10%以下,单位处理能耗降低约18%,年碳排放总量削减达2500吨左右。

4.2 高效用电设备对整体能耗强度的抑制效果

在电气化改造过程中,大规模替换高能耗设备为高效电动机与智能控制装置成为能耗强度下降的关键措施。核心运行单元如曝气风机、输送泵、脱水机等普遍采用IE3以上能效等级设备,结合变频驱动系统与负载感应模块实现精准匹配与动态调节。设备启动与运行功率曲线被压缩至最优运行区间,有效抑制浪涌负荷与冗余运转问题。能耗实时采集系统对设备运行状态持续监控,出现偏离预设能耗阈值即刻反馈调整控制策略,确保整体能效维持在高位区间。经实测数据对比,电气化改造后同等规模处理单元每日电耗降低约1900千瓦时,单位吨污水处理能耗下降至0.25千瓦时以下,能耗强度水平显著优于国家三级节能标准。

4.3 温室气体排放因子的变化趋势与控制潜力

污水处理厂在传统运行条件下产生大量CO₂、CH₄与N₂O等温室气体,其排放水平与能源结构、处理效率紧密相关。电气化改造通过电力替代与精准控制技术优化反应过程,有效削减间接碳排放与生物反应中逸散性排放。曝气过程实现氧供控制精度提升至±0.1 mg/L范围,降低硝化过程中N₂O生成量,反应池温控稳定性提升减少CH₄瞬时释放。配套的能耗碳排监测平台实现对电力用量与碳排因子动态修正,实时生成碳足迹数据用于运行调优。数据显示改造前后单位处理碳排放因子由0.61 kgCO₂-e/m³降至0.42 kgCO₂-e/m³,年温室气体总量下降幅度接近32%。该结果表明电气化具备稳定控制温室气体排放路径的现实潜力,为达成减碳目标提供可行支撑^[3-4]。

5 电气化改造驱动下的智能化与环保运维融合发展

5.1 智能监控系统在污染物超标预警中的应用

在电气化改造背景下,污水处理厂构建了以PLC控制系统与SCADA平台为核心的智能监控体系,覆盖进水水质、出水达标、设备运行、电能消耗等多个维度。各个处理环节布设传感器节点,采集水质参数如pH、COD、NH₃-N、TP等,形成实时数据流经由数据总线传输至中央服务器。系统内嵌超标判别算法与分区警戒模型,一旦监测值偏离控制界限即触发多级预警机制,并联动相关设备进行自动调节或启停。警报信息通过图形界面直观展示并向运维人员同步推送,有

效提升响应速度与处置效率。该系统运行稳定性高,误报率控制在2%以内,确保污染物控制的连续性与稳定性,为环保绩效提供可靠技术保障。

5.2 数据驱动的节能调度策略与动态调整机制

在全面电气化基础上,污水处理厂能源管理转向数据驱动的调度模型,通过负荷预测算法、能耗模拟与实时优化实现动态能效提升。系统采集设备运行负载、水量变化、气象条件等多源数据,构建调度优化模型,根据实时需求进行设备启停、负载分配与电能峰谷调节^[5]。该机制可在高负荷时段优先调入低能耗设备,并避开电价高峰段运行,显著降低运行成本。动态调整逻辑可依据历史运行数据不断修正模型参数,增强调度策略的精准性与自适应能力。实践应用表明,该系统在满负荷运行时能耗降低达12%,年运行电费节约幅度超过80万元,节能调度与污染控制实现双重优化。

5.3 运维系统对环保绩效的量化反馈与闭环管理

电气化系统集成运维平台支持对设备状态、能耗指标与污染控制效果的全过程监测与量化评估。各单元运行数据汇总后,平台自动生成周期性环保绩效报告,涵盖污染物削减率、碳排总量、能效指标与设备完好率等核心参数。平台构建起绩效评价与运行调整的反馈闭环机制,一旦某项指标偏离目标区间,即推送整改建议与预设响应策略,确保运行方向持续对标环保目标。管理人员可依据平台提供的数据进行能效分析与故障诊断,快速定位能耗异常或运行偏差点。通过持续数据积累与模型训练,系统具备趋势预测与策略优化能力,实现由“事后处理”向“前置预警”转变,推动污水处理厂迈向数字化、智能化的绿色管理新阶段。

参考文献

- [1] 刘纯非.污水处理厂电气及自控系统设计[J].清洗世界,2024,40(11):193-195.
- [2] 周传,黄鹤,魏欣,皮家悦,刘艳涛.重庆市某城镇污水处理厂CASS工艺优化研究[J].科技与创新,2024,(22):116-118.
- [3] 陈奇勇,陆芳.污水处理厂机电工程项目管理要点初探[A].2024新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(二)[C].《中国建筑金属结构》杂志社有限公司:2024:82-83.
- [4] 杨丁弘.基于PLC的电气自动化控制污水处理系统设计[J].信息记录材料,2024,25(11):142-144+147.
- [5] 吴昊雨.城镇污水处理厂提标改扩建工程设计研究[J].建材发展导向,2024,22(19):123-125.