

Energy consumption analysis and energy saving technology research in sewage treatment process

Junjie Xu Rui Yang

Qingdao Guolin Technology Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

Abstract

Wastewater treatment, as a critical component of urban infrastructure, heavily relies on electric power for its operation, leading to high energy consumption and significant efficiency fluctuations, which have become major constraints on its sustainable development. This paper systematically analyzes the energy consumption structure in the wastewater treatment process, identifies key energy-consuming units, and focuses on the composition and operational characteristics of electrical systems in wastewater treatment. Based on typical wastewater treatment processes, it examines the energy efficiency levels and operating modes of major electrical load equipment, and combines energy-saving technologies such as high-efficiency motors, variable frequency control, and intelligent scheduling to propose energy-saving optimization paths suitable for different treatment scales and process types. Through practical case studies, the application effects of energy-saving technologies are evaluated, providing feasible technical support and reference for the green transformation of wastewater treatment facilities, with significant practical significance and promotion value.

Keywords

sewage treatment; energy consumption analysis; electrical system; energy saving technology; operation optimization

污水处理过程中能耗分析与节能技术研究

徐俊杰 杨瑞

青岛国林科技集团股份有限公司, 中国·山东 青岛 266000

摘要

污水处理作为城市基础设施中的关键环节,其运行过程中大量依赖电力驱动设备,能耗占比高且效率波动显著,已成为制约其可持续发展的重要因素。本文围绕污水处理过程中的能耗结构展开系统分析,识别关键耗能单元,重点探讨电气系统在污水处理中的构成与运行特性。基于典型污水处理工艺流程,分析主要电气负载设备的能效水平与运行模式,结合高效电机、变频控制、智能调度等节能技术,提出适用于不同处理规模与工艺类型的节能优化路径。通过实践案例对节能技术的应用效果进行评估,为污水处理设施的绿色转型提供可行性技术支撑与参考依据,具有良好的现实意义与推广价值。

关键词

污水处理; 能耗分析; 电气系统; 节能技术; 运行优化

1 引言

随着城市化进程不断加快,污水排放总量持续上升,污水处理厂的运行压力显著增强。与此同时,能源成本占污水处理总运行成本的比例居高不下,特别是在以电力驱动为主的工艺单元中,能耗问题日益突出。污水处理行业已逐步从单一的污染削减目标转向“高效、低碳、智能”的系统运行方向,这对其电气系统的设计、运行与管理提出了更高要求。当前主流研究虽涵盖生化工艺优化、污泥减量与新材料应用等方面,但针对电气负载能耗的系统研究仍相对薄弱。本文以污水处理过程中电气系统为切入点,深入分析能耗分布特征与节能潜力,探索面向实践的电气节能技术路径,以

期推动污水处理行业的能效升级与绿色发展。

2 污水处理工艺流程与能耗结构解析

2.1 典型污水处理系统中的能耗分布特点

污水处理系统中的能耗主要集中在动力驱动设备与辅助运行系统之中,曝气系统约占总能耗的50%至70%,水泵系统与污泥脱水设备也分别贡献较高能耗比例。各处理阶段中,生化反应池、提升泵站与污泥处理构成能耗高峰区域,不同工艺配置对能耗分布具有显著影响。进水泵房与粗格栅等预处理设备能耗相对稳定,而生化阶段因曝气强度和溶解氧控制策略差异呈现能耗波动。部分设施采用传统控制方式,缺乏智能负载调节机制,导致能耗与负荷不匹配。高耗能环节的识别为节能技术部署提供了基础,能耗集中度较高的工艺单元成为优化重点,合理分配能量消耗比例是提升系统运行效率的重要抓手。

【作者简介】徐俊杰(1997-),中国山东青岛人,本科,助理工程师,从事臭氧设备集成设计与设备研究。

2.2 主要电气设备运行能耗特征与负载评估

电气设备在污水处理中的运行呈现出高功率、连续性与周期性并存的特点，风机、水泵、电动机构成主要耗能主体。风机系统通常运行于高负荷状态以保障充氧效率，其负载特性随进水水质与反应需求变化而调整。水泵则根据液位与流量控制策略进行启停与变频调节，对峰值负载响应敏感，容易引发短时高耗能。电动机配置方式直接影响设备启动力矩与稳态运行效率，功率选型偏大或长期轻载运行均会导致效率损失。部分老旧设备效率低下，存在明显能耗冗余。运行周期的变化和外界环境影响使负载波动加剧，精准负荷评估与匹配成为降低运行能耗的关键基础。

3 电气系统在污水处理中的构成与运行特性

3.1 电动机、风机、水泵等主要设备的电气配置

污水处理厂中的电气设备配置结构直接关系到运行能效与系统稳定性。电动机为核心驱动单元，广泛应用于风机、水泵、搅拌机等负载中，常采用三相异步电机或高效永磁同步电机，需配套软启动器或变频器以适应工况变化。风机系统通常具备压力调节功能，通过变频控制实现供氧量按需调整。水泵设备根据扬程和流量需求选用多级离心泵或潜污泵，其运行效率依赖于负载匹配精度与启停频率。设备选型过程需结合系统负荷波动与能效等级评估，避免功率冗余与频繁启停对系统造成冲击。不同区域配电回路应分设独立保护与运行状态监测模块，保障关键设备持续高效运行。

3.2 自动化控制系统对能耗的影响机制

自动化控制系统通过对污水处理各阶段运行参数的实时感知与反馈调节，显著影响设备启停逻辑与能耗表现。控制系统主要包括 PLC、变频器、传感器网络与远程监控平台，依据水质指标与负载需求设定运行策略，实现能耗与处理效率的动态平衡。在生化阶段，溶解氧控制策略与曝气时间的精准匹配可有效减少风机运行冗余。污泥脱水环节中脱水强度与时间调控影响脱水机负载率及能耗水平。自动化系统响应速度与精度决定调节频率与幅度，进而作用于电气系统的能效表现。系统运行逻辑优化程度直接影响单位污水处理的电耗水平，是构建节能型污水处理系统的关键支撑技术之一^[2]。

3.3 配电系统能耗损耗分析与效率评估

配电系统承担着电能的分配、转换与安全保障功能，其内部能耗虽相较于主体设备较小，但长期运行下的累计损耗不容忽视。主要能耗源包括变压器空载与负载损耗、线路传输损耗、无功功率造成的无效电流波动等。变压器运行效率受容量利用率与功率因数影响显著，低负荷运行时效率大幅下降。线路压降与热损耗在电缆敷设过长或布线不合理时表现突出，需通过优化配电路径与选用低阻电缆材料加以控制。功率因数补偿装置的配置与投切策略亦关系到系统的电能质量与经济性。通过对配电系统各节点功耗进行分布监测与数据分析，可为系统节能诊断提供基础依据，并辅助制订精准的能耗控制与设备更新策略，图 1 为配电系统能耗损耗分析与效率评估流程。

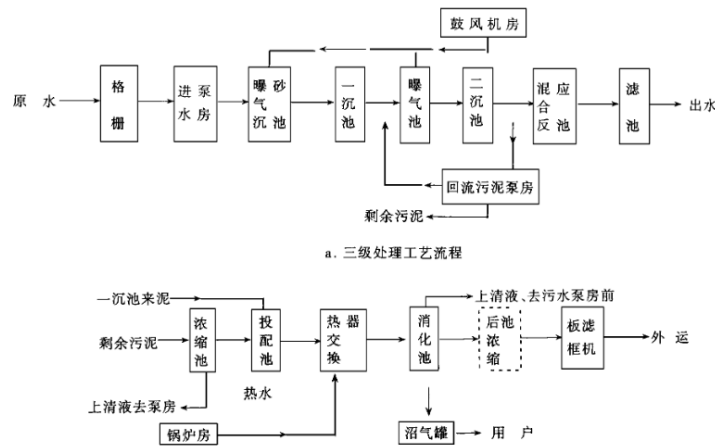


图 1 配电系统能耗损耗分析与效率评估流程

4 能耗关键环节诊断与节能潜力识别

4.1 曝气系统的能耗集中性与优化空间

曝气系统是污水处理过程中能耗最为集中的单元，其运行电耗可占总能耗的六成以上，直接影响全厂能效水平。系统需维持适宜的溶解氧浓度以支持微生物代谢，对风机供氧能力与调控机制依赖较强。部分设施曝气控制策略粗放，无法精准响应水质波动，导致能量使用冗余。鼓风机运行模式未实现按负载动态调整，频繁处于高能耗状态。曝气设备

布气方式与池体构造匹配不合理，亦会造成局部溶解氧过饱和现象，增加无效供氧能耗。通过优化风机变频控制策略、升级微孔曝气头与引入溶氧反馈闭环调节系统，可显著降低单位风量电耗并提升曝气效率，为全系统节能提供重要突破口^[2-3]。

4.2 污泥处理阶段的能耗特性与控制要点

污泥处理属于能耗高度集中但常被忽视的处理阶段，其主要能耗来源包括浓缩、脱水、加药与输送等环节。脱水

设备通常依赖高功率电机驱动长时间连续运行,药剂投加系统电控装置亦存在较多负载冗余现象。不同污泥性质和水分含量对设备运行效率影响显著,控制策略若未能及时响应参数变化,容易导致能耗水平过高。操作过程中脱水时间与压力未能根据污泥负载灵活调整,会产生能耗浪费与设备磨损双重问题。可通过优化设备启停时机、实现与含水率传感器联动调节、配置节能型离心脱水机等手段,实现电耗与处理效能双优化,提高污泥处理环节整体运行经济性。

4.3 电气控制策略对系统整体能效的调节作用

电气控制策略在污水处理运行管理中扮演着能效协调器的核心角色,其设计优劣直接影响系统负载响应能力与能源分配效率。传统控制方式以时间程序为主,难以根据实时负荷变化灵活调整运行状态,导致设备高耗运行现象频发。现代控制系统通过引入变量反馈、多级联动逻辑与能效参数监测,构建数据驱动的运行模型,具备更高的能效适配能力。控制策略在风机、水泵等核心设备上的应用体现出明显的节能优势,例如变频调速控制可实现按需供能,减少不必要的峰值输出。控制逻辑对负荷识别的精细度与响应精度决定其节能成效,构建以实时数据为基础的动态控制体系成为提升全流程电气能效的重要路径。

5 电气化节能技术在污水处理中的应用路径

5.1 高效电机与变频调速技术的协同应用

高效电机与变频调速技术作为污水处理系统节能的基础支撑,其组合应用可在保障系统稳定运行的同时显著降低能耗水平。高效电机在结构优化、导电材料与绕组技术方面具备优势,空载损耗与铁耗显著低于传统异步电机,适用于长周期运行场景。变频器可实现输出频率与电压的连续调节,使电机转速与负载精确匹配,避免能耗过剩。在风机、水泵等流量型负载中,该技术组合可将电耗降低15%以上。通过调整运行频率,设备启动电流被有效抑制,减少冲击负载与能耗峰值,延长设备寿命。系统应依据运行负荷特性与能效需求设定调速曲线与最优运行区间,确保在动态负载条件下维持高效率工作状态^[4]。

5.2 基于负载特性的智能化运行调度机制

智能化运行调度机制基于实时数据采集与负载动态分析,通过算法模型对各类电气设备进行精细化启停控制与运行策略优化,从而实现全过程能耗管理。系统依托传感器网络监测水量、水质、电流等关键参数,结合处理需求进行能效优先级排序与动态分配。在处理负荷波动频繁的场景中,智能调度可实现按需调度与能效优先模式,降低冗余设备参与率。结合机器学习算法,可预测负载趋势,提前调整系统功率匹配,保障设备在最优效率区间运行。系统通过图形化界面呈现各节点能耗与状态信息,便于管理人员实时干预与策略调整。调度机制兼具预测性与适应性,推动污水处理系统从经验式管理向数据驱动运营转型,图2为污水负载特性的智能化运行过程分析。

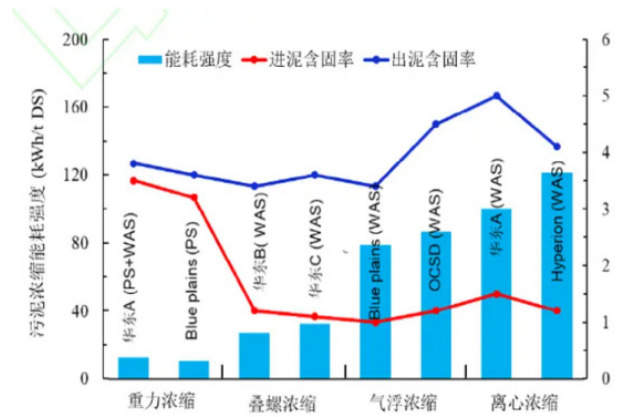


图2 污水负载特性的智能化运行过程分析

5.3 分布式能源与污水处理的电力耦合利用

分布式能源系统与污水处理过程可在电力与热能层面实现有效耦合,增强系统能源利用率并降低外部电网依赖。光伏发电系统可布设于处理厂房屋顶与空置区域,构建清洁能源供能平台,实现白天运行负载的部分自给。沼气发电系统利用厌氧消化产生的甲烷气体驱动发电机组,为脱水、加热与控制系统供电,同时废热可回用于温控系统,形成热电联产结构。分布式储能设备如锂电池组可吸纳低谷电力,在高峰时段释放,参与负荷调节与电价套利。系统需建立能量流监测平台与负荷平衡控制单元,实现各能源形式间的动态协同与切换,提高整体用能弹性。耦合模式的构建需依据污水处理工艺特性与地域资源禀赋设计,确保能源互补性与经济可行性。

6 结语

污水处理系统中电气能耗的高密度与连续性运行特点,决定了其节能优化的复杂性与多维度协同需求。通过对关键耗能单元的系统诊断,结合高效电气设备配置、智能化调度机制及分布式能源的深度融合,可在保障处理效能的基础上实现能耗结构的根本性优化。节能技术的实施不应仅停留于设备更新层面,更应建立在全过程能耗监测与动态控制策略之上,形成响应快速、调节灵活、效率优先的运行模式。未来污水处理行业的绿色转型,将更加依赖于以电气系统为核心的智能节能体系支撑,推动其向低碳、高效、智慧型方向稳步迈进。

参考文献

- [1] 傅成新. 高效低能耗污水处理技术及评估分析[J]. 农村科学实验, 2025, (03): 75-77.
- [2] 薛武丹. 基于模糊层次分析法的污水处理厂能耗评估与节能改进[J]. 节能, 2024, 43(11): 95-97.
- [3] 高超. 城市污水处理工艺优化与能耗分析[J]. 资源节约与环保, 2024, (10): 17-20.
- [4] 董佳. 污水处理厂电气能耗路径分析与节能措施探讨[J]. 节能与环保, 2024, (06): 65-71.