

城镇污水处理设施“智能化”远程联网管理 监控及维护控制系统研究与应用

江祖嘉, 孙义刚

广西环投水务集团有限公司, 广西 南宁

收稿日期: 2025年12月7日; 录用日期: 2025年12月30日; 发布日期: 2026年1月7日

摘要

城市化进程加快, 环保要求提高, 污水处理设施的运行效率与管理水平面临着更高标准的挑战。文章聚焦污水处理设施智能化远程管理监控系统的研究, 目的是借助现代信息技术, 提高污水处理系统的运行效率与智能化水平。依据系统架构设计, 构建了智能化管理系统, 其中包含数据采集与传输模块、实时监控功能、数据分析与预警机制, 还细致叙述了系统的硬件设计与软件开发过程。硬件部分涵盖核心设备的选型, 还有传感器和执行器的设计以及应用。软件方面包括数据库结构设计、用户界面展示以及数据可视化处理等内容。在实际的污水处理设施中部署系统后, 经稳定性测试以及运行数据分析, 验证了系统在提高管理效率、降低运维成本上是有效的。

关键词

污水处理设施, 智能化, 远程连接网络, 管理与监控, 维护与控制, 应用

Research and Application of “Intelligent” Remote Networked Management, Monitoring, and Maintenance Control System for Urban Sewage Treatment Facilities

Zujia Jiang, Yigang Sun

Guangxi Huantou Water Group Co., Ltd., Nanning Guangxi

Received: December 7, 2025; accepted: December 30, 2025; published: January 7, 2026

文章引用: 江祖嘉, 孙义刚. 城镇污水处理设施“智能化”远程联网管理监控及维护控制系统研究与应用[J]. 水污染及处理, 2026, 14(1): 11-19. DOI: 10.12677/wpt.2026.141002

Abstract

Urbanization is accelerating, environmental protection requirements are enhancing, so wastewater treatment facilities' operational efficiency and management level face higher standards. This paper investigates the research of intelligent remote management and monitoring systems for wastewater treatment facilities, to enhance the operational efficiency and intelligence level of wastewater treatment systems via modern information technology. According to the system architecture design, an intelligent management system is built, which includes a data acquisition and transmission module, a real-time monitoring function, data analysis, and an early warning mechanism. The hardware design and software development process of this system are also elaborated. The hardware section encompasses the selection of core components, the design and implementation of sensors and actuators, as well as the software aspects that involve the design of databases, user interface display, and data visualization processing. After the system has been deployed in actual wastewater treatment facilities, its effectiveness in enhancing management efficiency and lowering operational and maintenance costs has been validated through stability testing and operational data analysis.

Keywords

Sewage Treatment Facility, Intelligent System, Remote Networking, Management and Monitoring, Maintenance and Control, Application

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当下污水处理设施运行管理过程中, 智能化远程联网监控系统的应用, 已然成为行业发展的必然走向。传统监控手段靠人工巡检和采集局部数据, 难以满足现代污水处理系统高效、实时、全面的需求。而引入智能化管理技术, 不仅能提高污水处理设施的整体运维效率, 还可减少人为操作产生的误差与风险。在此背景下, 计算机网络监控系统应运而生, 其依靠集成传感器网络、数据采集与分析模块, 还有自动控制技术, 构建“感知-传输-分析-决策”的智能化远程监控体系, 用以全方位监控污水处理过程并动态调节, 保障系统运行的稳定性与安全性[1]。从国内技术发展来看, 当前国内智慧水务技术多聚焦于集中式大型污水处理厂, 侧重规模化运营与复杂工艺的自动化管控, 但其理论框架与技术方案未充分考虑乡镇污水处理厂“规模小、水质波动大、成本敏感”的特点。因此, 本研究以乡镇污水处理厂为研究对象, 针对污水处理厂工艺过程中各类仪表设备产生的多时标、多模态的动态数据, 进行数据的收集、处理、储存、分析, 通过人工智能与数据融合的深度结合, 实现污水处理厂“智能化”运行。引入智能化控制策略和网络化管理架构, 不仅能提高污水处理厂的运行效率, 也为未来智慧水务的发展打下了技术基础。

2. 智能化远程管理监控系统的架构设计及其功能特性概述

2.1. 系统整体架构

本系统整体架构以工业以太网和 GPRS 传输技术为基础, 构建起一个分布式、集散控制相结合的远程监控平台, 目的是实现污水处理设施运行的智能化管理。系统运用三级管理体系, 即省级监控管理中

心、区域管理分中心以及现场监控管理节点, 构建起从数据采集、传输、分析到管理控制的完整闭环[2]。在感知层, 部署多参数传感器网络, 包含 pH 值、溶解氧(DO)、浊度、电导率等关键水质指标[3], 对污水处理全过程实时采集数据并感知状态。在网络传输方面, 系统把有线光纤通信和无线 GPRS 技术融合起来, 以此保证数据在复杂地理环境中能稳定传输, 且响应低延迟。数据层把关系型数据库和实时数据库整合在一起, 前者用来存储历史运行数据与设备档案, 后者则支持实时数据的访问以及快速响应控制指令。在应用层, 系统以组态王软件平台进行开发, 再结合数学分析模型, 对异常运行状态予以智能识别与预警[4]。另外, 系统还集成有自动控制模块, 会根据采集到的数据动态调整曝气量、投药量等关键运行参数, 提高处理效率, 减少能耗。

2.2. 数据采集与传输模块

数据采集与传输模块是智能化污水处理远程监控系统的重要部分, 它的核心功能就是实时监测污水处理设施的运行状态, 高效传输数据。这个模块主要由多类传感器节点构成, 像水质传感器、流量计、压力传感器之类, 用以采集如 pH 值、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、浊度这样的关键水质参数, 以及设备的运行状态信息[5]。采集的数据经由无线传感器网络(Wireles Sensor Network, WSN)传输, 其具有低功耗、自组织、广覆盖的特点, 是远程监控系统中数据通信的最优选择[6]。在系统架构中, 传感器节点凭借自适应组网技术构建起分布式网络, 以此保证数据在复杂工况下稳定传输, 并借助多跳路由机制提升网络的鲁棒性与扩展性[5]。另外, 参考广播电视台发射台在远程集中控制方面的实践经验, 系统引入远程终端单元(RTU)和可编程逻辑控制器(PLC), 这样就能对现场设备进行分布式采集与集中式管理, 提高系统的智能化水平[7]。为提升数据传输的实时性与完整性, 系统会采用像 Modbus TCP/IP、MQT 这样的工业通信协议, 再加上 4G/5G 的移动通信技术, 这样就能把数据上传到中央监控平台, 为后面的数据分析与决策提供可靠的依据。

2.3. 实时监控功能

实时监控功能是智能化污水处理系统的关键组成部分, 它是实现远程联网管理监控及维护控制的核心环节。该功能依靠工业以太网和 GPRS 传输技术, 构建起多层次的分布式监控架构, 从而对污水处理设施的运行状态进行全天候、高精度的监测。部署在关键节点的传感器网络, 系统就能实时采集水流量、pH 值、溶解氧浓度、浊度以及设备运行参数等多维度数据, 再通过数据采集与分析模块对信息做预处理和特征提取, 为后续控制决策提供可靠依据[2]。在系统架构方面, 运用集散控制理念, 将省监控中心、区域监控分中心还有现场设备终端形成三级联动, 这不仅增强了系统响应效率, 还显著提高了整体稳定性及扩展性。相比于传统依靠人工巡检和本地报警装置(像异常状态由控制盘上的帕特灯指示, 再由人工上报)的管理模式[8], 智能化远程监控系统在很大程度上减少了人为干预带来的滞后和不确定性, 给小规模污水处理设施高效运营提供了技术保障。

2.4. 数据分析与预警功能

在智能化污水处理系统中, 数据分析与预警功能是核心模块之一, 这对系统的运行效率和故障响应能力有着直接的影响。构建基于传感器网络的数据采集系统, 就能实时得到污水处理时的各类关键参数, 像 pH 值、溶解氧(DO)、浊度、电导率以及液位等指标, 再通过 PLC 和工控机进行数据融合与趋势分析, 这样就能快速识别和预警异常工况[9]。这类系统一般会用时序分析和统计过程控制(SPC)的方法, 把历史数据作为基准模型, 如果监测值偏离设定阈值了, 系统就会自动开启报警机制, 然后通过远程通信模块把预警信息传给运维终端。比如, 用贝叶斯估计或者卡尔曼滤波算法来提高数据预测的精度, 其数学表达式如下:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H\hat{x}_{k|k-1})$$

其中, $\hat{x}_{k|k}$ 表示更新后的状态估计, K_k 为卡尔曼增益, z_k 为观测值, H 为观测矩阵。另外, 结合基于 BLE 的无线传感技术, 就能实现低功耗、分布式数据采集和远程可视化监控[10], 这样一来, 系统的扩展性和灵活性就被提升了, 也为构建智能化运维体系提供了可靠的技术支持。

3. 高效远程系统控制设备的智能化硬件设计

3.1. 核心硬件设备选型

在智能化污水处理设施的远程联网管理监控与维护控制系统中, 如何选择核心硬件设备, 这对系统整体性能和稳定性有着决定性作用。要达成高效的数据采集、传输和分析, 系统就需要将高精度传感器、稳定可靠的通信模块以及有边缘计算能力的控制单元集成起来。在构建传感器网络时, 选用 pH 值、溶解氧(DO)、浊度、电导率、温度及氧化还原电位(ORP)等多参数水质监测传感器, 从而实现对污水处理关键指标的实时监测[4]。另外, 要保证数据采集和分析的准确, 就需要选用带有自校准功能的智能传感器, 这样能减少长期运行时因环境变化产生的测量误差。

在通信模块层, 系统采用能支持多种无线通信协议(如 LoRa、NB-IoT、4G/5G 等)的网关设备, 以此来保证在不同网络环境中数据能稳定传输。要提升异构网络环境里的互操作性, 参考无线体域网(WBAN)架构中的网关设计方法, 构建出支持多种传感器接入且有协议转换能力的边缘网关[11]。该类网关具备两大功能: 一是能实现传感器数据的本地预处理, 二是可通过 SOAP 协议与远程服务器高效通信, 进而增强系统响应速度及数据处理效率。所运用的部分核心硬件设备的技术参数可参见表 1。

Table 1. Comparison of technical parameters of some core hardware devices used in the system
表 1. 系统所采用部分核心硬件设备的技术参数对比

设备类型	型号	测量范围	精度等级	通信协议	功耗(W)
pH 传感器	YSI ProDSS	0~14 pH	±0.01 pH	SDI-12	0.5
溶解氧传感器	Hach LDO II	0~20 mg/L	±0.2 mg/L	Modbus RTU	0.8
浊度传感器	E H Liquiline CM82	0~1000 NTU	±1 NTU	HART	1.0
边缘计算网关	Advantech ECU-1200	-	-	LoRa/NB-IoT	3.5
4G 通信模块	Huawei ME909s-821	-	-	PPPoE/HTTP	2.2

3.2. 硬件连接与布局

在污水处理设施的智能化远程监控系统里, 硬件连接与布局是整个系统架构的基础, 这对高效、稳定地采集和传输数据起着决定性作用。该部分由传感器网络、数据采集终端、通信模块及远程控制单元四大组件构成。设计时需全面考量设备的分布特征、环境适应性以及系统的可扩展性能。传感器节点是前端感知单元, 广泛地部署在污水处理的关键工艺段上, 像进水口、曝气池、二沉池以及出水口等, 用来实时监测水流量、pH 值、溶解氧(DO)、浊度和电导率等重要参数[12]。这些传感器借助 RS485 总线或者无线 ZigBee 协议跟本地数据采集器通信, 以此达成对多源异构数据的整合与预处理。要提升系统的稳定性与可维护性, 硬件布局就得遵循模块化设计原则, 保证各子系统接口兼容性佳, 配置冗余。另外, 远程监控中心借助 4G/5G 网络或光纤接入现场数据采集终端, 构建双向通信链路, 既能远程上传数据, 又能下发控制指令, 这样一来, 就能自动化控制泵站启停、阀门调节、药剂投加等关键操作[13]。系统中

硬件设备的拓扑结构以及通信路径可参见图 1。

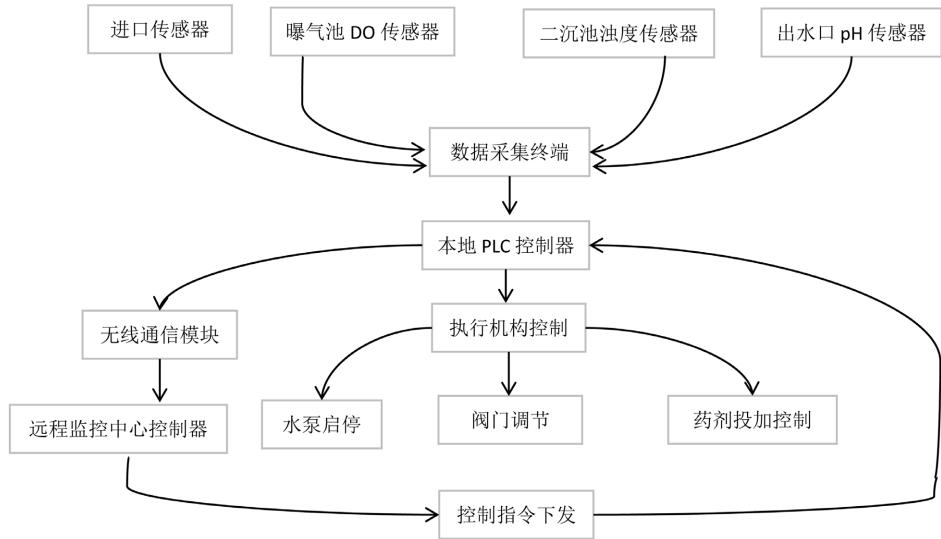


Figure 1. Topology of hardware devices and their communication paths in the system
图 1. 系统中硬件设备的拓扑结构及其通信路径

3.3. 关键传感器的选型

在智能化的污水处理系统中, 传感器作为数据采集的关键组件, 它的选型对系统监测的精准度和运行的效率有着直接的影响。要达成远程联网管理监控与维护控制的目标, 系统需部署多种传感器, 这样就能实时获得水质参数、设备运行状态以及环境条件等关键信息。所以, 在传感器选型时, 要综合考量测量范围、精度、稳定性、抗干扰能力以及通信接口兼容性这些因素[9]。

监测溶解氧(DO)、pH 值、浊度、电导率这些水质参数时, 要选用高精度、耐腐蚀的智能传感器, 这是保证数据可靠性的前提。比如说, 光学溶解氧传感器响应快, 长期稳定性佳, 所以被广泛应用在污水处理过程中[5]。另外, 在监测液位、流量、压力这些物理参数时, 要选用带数字信号输出功能的压力式或者超声波传感器, 这样就能和 PLC 控制系统高效地进行数据交互[9]。在无线传感器网络(WSN)架构下, 传感器节点既要有低功耗、自组网能力, 还要有良好的通信稳定性, 这样才能满足远程监控系统对数据传输实时性和完整性的要求[5]。

3.4. 执行器的设计与应用

在智能化污水处理系统, 执行器是自动控制技术中核心的组件之一, 它要做的就是把控制信号变成物理动作。一般而言, 执行器会接收来自中央控制系统或者现场 PLC (可编程逻辑控制器)的指令, 然后驱动像阀门、泵机、搅拌装置这类关键设备, 以此实现对污水处理流程的精准调节与动态响应。传感器网络采集的实时数据, 像 pH 值、溶解氧(DO)、浊度、液位等参数[14], 经数据采集与分析系统处理后, 反馈给执行机构, 达成闭环控制, 保证处理过程稳定、高效[13]。

远程监控系统中的执行器设计需兼顾可靠性与智能化特性, 一般会采用工业级的电动或者气动执行机构, 再加上通信模块, 用来支持 Modbus、Profibus 或者以太网这类工业总线协议。这种设计既提高了执行器和上位监控平台的数据交互能力, 又给远程故障诊断和预防性维护提供了技术支持[12]。比如, 以 ZigBee 或 LoRa 技术为基础的无线执行终端, 能和传感器节点构成自组织网络, 这样一来, 系统的灵活性和可扩展性就能进一步提升。

4. 智能化远程监控管理系统的软件设计

4.1. 数据库设计

在智能化污水处理设施的远程联网管理与维护控制系统中, 数据库设计是整个系统核心的一部分, 它对存储、管理、分析海量监测数据十分关键。该数据库既要满足实时数据高效写入的要求, 又要支持多维度数据快速查询和复杂分析, 这样才能支撑远程监控与决策优化。系统采用混合架构, 把关系型数据库与时序数据库相结合, 关系型数据库用来存储设备参数、用户权限、系统配置等结构化信息, 时序数据库专门处理传感器网络持续采集的温度、压力、流量、水质指标等动态监测数据[4]。这种分层存储的策略, 既提高了数据访问的效率, 又让系统更可扩展、更稳定。

另外, 要达成异构传感器数据的统一管理与互操作性, 数据库设计加入了基于 XML 的数据交换中间层, 这一机制参考了无线体域网(WBAN)中异构传感器网络互联的设计思想, 用以定义统一的数据模型与接口规范, 保证不同厂商、不同通信协议的传感器数据得以有效整合[11]。同时, 数据库也把数据清洗和异常检测模块加进去了, 这一模块借助统计分析与机器学习算法, 对原始数据做预处理, 这样就能提高后续数据分析的准确性与可靠性。经上述设计, 数据库可对远程监控平台运行予以支撑, 且为智能诊断与预测性维护构建起坚实的数据基础。

4.2. 用户界面设计

在智能化污水处理系统的用户界面设计中, 人机交互体验好、信息可视化能力强, 这对系统高效运行来说是个关键因素。远程监控系统要集成多种异构数据源, 比如传感器网络里的实时水质参数(pH 值、溶解氧、浊度、电导率等)、设备运行状态、能耗数据和环境参数, 还要借助图形化界面来进行统一展示和操作控制[8]。用户能凭借 Web 端或移动端来访问系统, 可通过它对污水处理设施进行远程监测与控制[2], 这是基于工业以太网与 GPRS 传输技术构建的通信架构实现的。

要提高操作效率与系统可维护性, 用户界面得采用模块化设计理念, 像数据监控模块、设备控制模块、报警管理模块、历史数据查询模块以及权限管理模块这些都要包含在内。数据监控模块借助动态仪表盘来展示关键运行指标, 还能支持多图层叠加显示, 如把水位、流量和设备状态放在同一时间轴上联动分析。设备控制模块具备远程启停、参数设置以及自动控制策略切换功能, 如此一来, 操作人员在无现场干预的情况下, 就能完成设备调节, 这也就是设备控制模块所提供的功能。报警管理模块拥有多级预警机制, 传感器一旦检测到异常信号, 系统就会通知相关人员, 通知方式包括弹窗提示、短信推送、声光报警等, 还会记录报警发生时间、持续时长和处理结果, 从而形成完整的故障闭环管理流程[8]。

另外, 用户界面要具有良好的可扩展性与自适应性, 既要支持多语言切换, 也要适配多终端。系统后台运用数据库技术以及信息数字化处理的手段, 达成数据的高效存储与快速检索, 而且通过权限分级机制来确保数据的安全以及操作的合规性[2]。用户界面的功能模块架构及其信息交互流程如图 2 所示。

4.3. 数据处理与可视化

在智能化污水处理系统中, 数据处理和可视化是远程监控系统的关键部分, 直接决定了系统运行的稳定性和管理效率。对传感器网络所采集到的原始数据进行初步处理、特征提取以及构建分析, 从而对污水处理的关键参数(如 pH 值、溶解氧浓度、浊度、电导率等)进行实时监控, 还能提示异常情况。在这个过程中, 要借助 PLC 与工控机的控制系统构建模块化数据处理架构, 来实现多源异构数据的有效集成与清洗, 进而提高数据的准确性与可用性[9]。并且, 借助现代物联网技术, 像低功耗蓝牙(BLE)和云平台相结合, 就能实现数据远程传输与集中存储, 提升系统可扩展性, 部署也更灵活[10]。

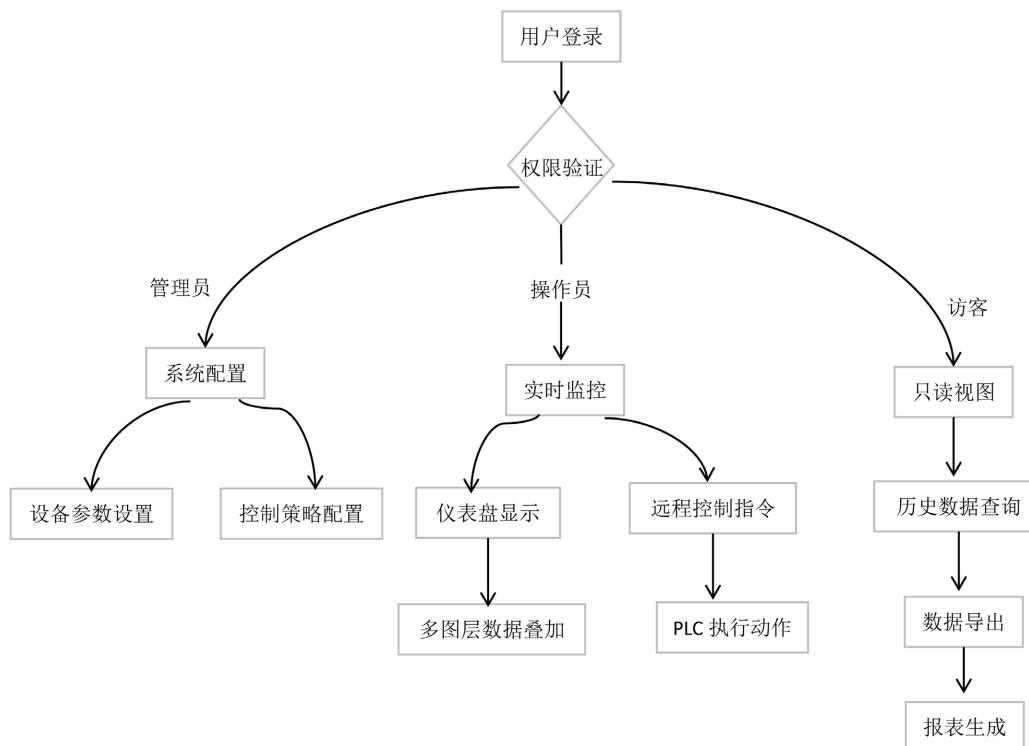


Figure 2. Functional module structure and information interaction process of the user interface
图 2. 用户界面的功能模块结构与信息交互流程

5. 智能化远程管理监控系统的应用

本研究以广西某水务集团有限公司采用智能化远程管理监控系统平台来管理广西 6 市 14 县(市、区)共 56 座污水厂为案例。智能化远程管理监控系统平台见图 3。



Figure 3. Intelligent remote management and monitoring system application platform
图 3. 智能化远程管理监控系统平台

在污水处理厂的智能化改造工作中, 进行了全面的数据采集、实时监控以及自动调节控制的系统整合。系统在污水处理的关键节点(初沉池、好氧池、沉淀池等)都设置了传感器, 传感器包含水质监测、流量监控以及设备状态感知等多方面的数据采集内容。这些传感器采集的关键数据有 pH 值、溶解氧浓度、浑浊度、流量、温度等指标, 数据采集频率是每分钟一次。所有实时监测数据经现场 PLC 初步处理后, 再由工业以太网传输至中央控制系统。中央控制系统借助 SCADA 平台对数据予以可视化展示, 同时把处理结果反馈给现场操作员。在这个过程中, 数据分析系统会筛选和处理收集来的实时数据, 用卡尔曼滤波等算法把噪声去掉, 保证数据准确。在处理过程中, 要是溶解氧浓度低于设定范围(一般为 4.0 mg/L), 系统就会自动调整曝气设备运行速度, 以增加曝气量, 从而提高水中的溶解氧浓度, 这是实现智能化调节的方式。当溶解氧浓度超过 10.0 mg/L 时, 曝气量就会自动降低。而且, 污水处理厂借助大数据预测模型来分析水质变化趋势, 特别是在负荷高峰时段(早高峰和晚高峰), 凭借历史数据训练出的模型自动预测污水量变化, 以此提前调整设备运行, 防止高负荷运行。在这个过程中, 系统不仅能依据实时数据及时做出反应, 还能借助预测分析, 在负荷波动时进行预调节, 保障系统运行高效且稳定[15]。

污水处理系统经过智能化改造之后, 运行效果显著提升。首先, 从处理效率方面来讲, 系统会进行自动调节、智能化控制, 使得污水处理过程更加稳定、高效。由实际数据可知, 经智能化改造后, 在污水处理时, 关键参数的波动幅度明显减小, 像溶解氧和水质 pH 值的波动就显著减小, 能保持稳定范围。改造前溶解氧浓度的范围为 2.0~12.0 mg/L, 改造后范围缩小为 4.0~10.0 mg/L, 水质控制精度显著提升, 处理效果更符合环保标准。再者, 从能效方面加以分析, 智能化系统大大减少了能源消耗。借助智能预测和调节, 特别是在负荷波动大的时段(像暴雨时), 系统能提前对设备运行参数进行调整, 防止过度运行, 减少不必要的能源消耗[16]。依据系统运行的数据来看, 智能化改造之后, 整个污水处理厂的电力消耗减少了 15%, 设备运行效率提高了 10%。最后, 在设备维护上, 智能化监控系统能给出实时的故障预警与状态监测功能。经由传感器的实时数据采集与分析[17], 系统可及时察觉潜在的设备故障, 进而提前预警[18]。根据实际数据, 设备故障率降低 15%, 设备平均故障修复时间从 16 小时缩短到 8 小时[15]。

在智能化污水处理系统中, 运维人员操作能力是确保系统长期稳定运行的关键环节。为了提高运维人员技术能力, 制定了操作手册和安全操作规程, 主要包括系统操作、数据分析、故障排查等方面。通过定期培训, 确保运维人员能够熟练掌握各项技能, 提升其对智能化系统的操作能力和故障处理能力。同时, 建立健全的管理制度, 明确各岗位职责, 形成有效的工作流程, 提高团队的协作效率, 确保各项工作有序进行。

6. 结语

综上所述, 物联网技术与现代智能算法提高了城市污水处理效率, 其能很好地分配和调度水量, 工艺控制更精准, 水质效果也更好, 使得设备维护效果得以提升, 为黑臭水体处理、环境保护提供了解决办法。结合污水处理工艺, 运用现代智能设备处理水与污染物, 采用物联网技术、现代智能算法的综合污水处理站, 将是未来城市污水处理发展的走向, 在区域污水处理运营和成本优化方面有一定的优势, 具有很高的工程应用价值[19]。

参考文献

- [1] 金磊. 计算机智能化网络监控系统设计与实现分析[J]. 文渊(中学版), 2019(9): 78-79.
- [2] 朱日荣, 曹兵, 覃友坚. 广西广播电视台发射台远程网络智能化监控系统[J]. 广播与电视技术, 2008, 35(4): 83-90.
- [3] 吴婧, 周秋霞. 物联网技术在环保产业的应用研究综述[J]. 价值工程, 2015, 34(10): 274-277.
- [4] 广播电视发射台远程网络智能化监控系统[J]. 中国科技奖励, 2008(5): 31-32.

-
- [5] Onyema, E.M., Balasubaramanian, S., Suguna S.K., Iwendi, C., Siva Prasad, B.V.V. and Edeh, C.D. (2023) Remote Monitoring System Using Slow-Fast Deep Convolution Neural Network Model for Identifying Anti-Social Activities in Surveillance Applications. *Measurement: Sensors*, **27**, Article 100718. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100718>
 - [6] 刘卓. 基于无线传感器网络的实验室设备运行状态监测系统[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
 - [7] 戴渭川. 虚拟专用网络在污水处理厂远程监控系统中的应用[J]. 电世界, 2018, 59(1): 40-43.
 - [8] 陈卫卫. 基于智能化技术下的计算机网络监控系统设计分析[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(10): 155-158.
 - [9] 单文豪. 换热器智能化分析的远程监控系统设计[J]. 区域供, 2020(1): 117-120, 143.
 - [10] Thekkil, T.M. and Prabakaran, N. (2021) Optimization Based Multi-Objective Weighted Clustering for Remote Monitoring System in Wsn. *Wireless Personal Communications*, **117**, 387-404. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07874-2>
 - [11] Saban, M., Medus, L.D., Casans, S., Aghzout, O. and Rosado, A. (2021) Sensor Node Network for Remote Moisture Measurement in Timber Based on Bluetooth Low Energy and Web-Based Monitoring System. *Sensors*, **21**, Article 491. <https://doi.org/10.3390/s21020491>
 - [12] 横道弘始. DoPa 網パケット通信を活用した上下水道設備遠隔監視システム[J]. 計装, 2003(15): 46-47.
 - [13] 刘琪. 污水处理厂远程监控系统的构建分析[J]. 居舍, 2018(25): 230.
 - [14] 杨永军. 污水处理厂自动化控制系统的建立与应用[J]. 中国高新技术企业, 2013(34): 91-92.
 - [15] 侯永涛, 郭楠. 智能化技术在污水处理系统中的应用与效果评估[J]. 河南科技, 2025, 52(11): 4-7.
 - [16] 左劲. 生活智慧泵房应用于建筑给排水设计中的价值探讨[J]. 中国地名, 2024(12): 157-159.
 - [17] 包昂. 电力系统智能化设备状态监测与故障诊断研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(19): 85-87.
 - [18] 申麦成. 智能化技术对煤矿机电运输的影响分析[J/OL]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(11). <https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228815171716610>, 2025-11-15.
 - [19] 张长强. 基于物联网技术的污水处理站远程智能控制系统设计[J]. 机电工程技术, 2023, 52(12): 124-127.