

基于物联网实时监测系统的城市污水处理厂工艺参数动态优化研究

邹俊良

441622*****3719

摘要: 城市污水处理厂作为城市水环境治理的核心基础设施，其运行效率直接影响污水达标排放与水资源的循环利用能力。传统污水处理工艺参数（如溶解氧浓度、污泥龄、回流比等）的调控主要依赖人工经验与定期检测，存在响应滞后、精度不足及能耗偏高等问题，难以适应进水水质水量波动频繁、排放标准日益严格的需求。本文围绕基于物联网实时监测系统的城市污水处理厂工艺参数动态优化问题，系统分析了污水处理工艺的关键参数及其相互关联机制，研究了物联网监测系统的架构设计与数据采集方案，探讨了基于机器学习的动态优化算法与多目标协同控制策略，并从能耗降低、水质提升等维度评估了动态优化的综合效益。研究表明，通过“实时监测-数据驱动-智能调控”的闭环管理技术体系，可显著提升污水处理厂对复杂工况的适应能力，实现工艺运行的高效化、低碳化与智能化，为城市水环境质量的持续改善提供技术保障。

关键词: 物联网；实时监测；城市污水处理厂；工艺参数；动态优化；智能调控

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.031

引言

本文旨在系统研究物联网实时监测系统在城市污水处理厂工艺参数动态优化中的应用原理、技术路径与实施效果，为污水处理厂的智能化升级提供理论支撑与实践参考。

1 城市污水处理厂工艺参数的关键特征与关联机制

1.1 核心工艺参数的分类

城市污水处理厂的主流工艺以活性污泥法及其改进型（如 A/O 工艺、A²/O 工艺、氧化沟工艺等）为主，其运行效果依赖于一系列关键工艺参数的精准控制。这些参数可分为水质参数、反应条件参数及设备运行参数三大类：水质参数是反映进水与出水特性的基础指标，包括化学需氧量（COD）、生化需氧量（BOD₅）、悬浮物浓度（SS）、氨氮（NH₃-N）、总氮（TN）、总磷（TP）等。其中，COD 与 BOD₅ 反映有机物的含量，是活性污泥微生物的主要营养源；SS 影响后续沉淀与过滤单元的运行效率；氨氮与 TN 是衡量氮去除效果的关键指标，需通过硝化与反硝化过程实现转化；TP 则通过生物除磷或化学除磷工艺进行控制。反应条件参数直接决定微生物的代谢活性与污染物去除效率，主要包括溶解氧浓度（DO）、污泥龄（SRT）、水力停留时间（HRT）、污

泥回流比（R）、混合液回流比（r）等^[1]。

1.2 参数间的相互作用与动态平衡

污水处理工艺参数并非独立存在，而是通过微生物代谢过程与物理化学反应形成复杂的关联网络。例如，溶解氧浓度与污泥龄共同影响硝化菌的活性——硝化菌是一类好氧自养菌，其生长需要较高的溶解氧（通常 DO≥2mg/L）与较长的污泥龄（SRT≥15 天），若 DO 不足或 SRT 过短，硝化菌会被异养菌竞争淘汰，导致氨氮去除效率下降；反之，过高的 DO 与过长的 SRT 会增加曝气能耗与污泥产量，造成资源浪费。污泥回流比与混合液回流比是调控氮磷去除的关键联动参数。污泥回流（通常 R=50%~100%）将二沉池的活性污泥返回生物反应池，维持反应池内的微生物浓度；混合液回流（通常 r=100%~300%）则将二沉池底部的富含硝酸盐的混合液回流至缺氧段，为反硝化菌提供电子受体（NO₃⁻），实现反硝化脱氮。若污泥回流比过低，生物反应池的微生物浓度不足，有机物与氮磷去除效率下降；若混合液回流比不足，反硝化过程缺乏足够的硝酸盐，导致出水总氮超标。水质参数的波动会进一步影响反应条件参数的调控需求^[2]。

2 系统总体架构与功能模块

基于物联网的污水处理厂实时监测系统采用“感知

层-网络层-平台层-应用层”的四层架构设计，各层协同工作实现数据的采集、传输、存储与分析。感知层是系统的“神经末梢”，由部署于污水处理厂各工艺单元的高精度传感器组成，覆盖水质、设备状态及环境变量三大类监测对象。水质监测传感器包括溶解氧探头（测量范围0~20mg/L，精度±0.1mg/L）、污泥浓度计（测量范围0~20000mg/L，精度±5%）、COD在线分析仪（测量范围0~500mg/L，精度±5mg/L）、氨氮传感器（测量范围0~100mg/L，精度±1mg/L）、SS传感器（测量范围0~1000mg/L，精度±10mg/L）等，用于实时获取进水与各反应池的关键水质参数；设备状态传感器包括曝气风机电流与压力传感器（监测曝气量与设备运行负荷）、污泥回流泵与混合液回流泵的流量与扬程传感器（监测污泥循环量）、搅拌器转速传感器（监测混合效果）等，用于掌握设备运行状态；环境变量传感器包括温度传感器（监测微生物适宜温度范围15~35℃）、pH计（测量范围6~9，精度±0.1）等，为工艺参数调控提供环境背景信息。网络层是数据的“传输通道”，采用低功耗广域网络（LPWAN）技术（如LoRa、NB-IoT）与工业以太网相结合的混合组网方式。对于分布广泛的传感器节点（如曝气池、二沉池等偏远区域），利用LoRa/NB-IoT技术实现低速率、长距离（单跳通信距离可达几公里）、低功耗的数据传输（电池供电传感器寿命可达数年）；对于集中控制区域（如中控室附近的设备），通过工业以太网（传输速率≥100Mbps）实现高速、稳定的数据汇聚。网络层支持数据加密与冗余传输，确保监测数据的完整性与安全性。平台层是系统的“数据处理中心”，基于云计算平台构建数据存储与分析模块。数据存储模块采用分布式数据库（如HBase）与关系型数据库（如MySQL）相结合的方式，存储海量的历史监测数据（包括分钟级、小时级与日级数据）与设备元数据（如传感器型号、安装位置）；数据分析模块集成数据清洗（去除异常值与噪声）、特征提取（如计算日均COD浓度、溶解氧波动率）与实时计算（如动态计算污泥负荷F/M值）功能，为上层应用提供高质量的数据支撑。应用层是系统的“决策界面”，面向污水处理厂的运行管理人员提供可视化监控与智能调控功能。通过地理信息系统（GIS）与三维工艺流程图，实时展示各工艺单元的运行状态（如曝气池溶解氧分布、二沉

池泥位高度）；基于数据看板呈现关键指标的趋势分析（如近一周氨氮去除率变化、曝气能耗占比）、报警信息（如溶解氧浓度低于1mg/L或高于5mg/L的异常工况）及设备故障预警（如曝气风机电流异常波动提示设备磨损）；同时，为后续的动态优化算法提供数据接口，支撑工艺参数的智能调控决策。

3 基于物联网数据的工艺参数动态优化策略

3.1 动态优化模型的构建方法

工艺参数动态优化模型的核心目标是：在满足出水水质达标（如COD≤50mg/L、氨氮≤5mg/L、TN≤15mg/L、TP≤0.5mg/L）的前提下，实现能耗最低、污泥产量最小及设备运行稳定性最高的多目标协同控制。模型的构建需基于物联网实时监测数据，结合污水处理工艺的机理模型与数据驱动的机器学习算法，形成“机理引导+数据优化”的混合建模方法。机理模型基于微生物反应动力学与质量守恒原理，描述水质参数与工艺条件之间的定量关系。例如，活性污泥法的好氧反应可用Monod方程描述微生物对有机物的降解速率（与溶解氧浓度、底物浓度相关），硝化过程遵循氨氧化菌与亚硝酸盐氧化菌的生长动力学方程（依赖DO与pH条件），反硝化过程则与硝酸盐浓度、碳源供给及缺氧环境相关。这些机理模型为优化目标函数（如最小化曝气能耗=曝气量×单位能耗）与约束条件（如出水氨氮≤5mg/L）提供了理论基础。数据驱动的机器学习算法（如随机森林、支持向量机、神经网络）则用于挖掘监测数据中的非线性关联规律。

3.2 多目标协同控制策略的实施路径

多目标协同控制需平衡水质达标、能耗经济性与系统稳定性三大目标，通过权重分配与约束优化实现综合效益最大化。具体实施路径包括：（1）实时监测与数据预处理：物联网系统每分钟采集一次关键参数（如溶解氧、污泥浓度、进水COD），经数据清洗与特征提取后，输入动态优化模型。例如，计算实时污泥负荷F/M值（=进水COD浓度×流量/活性污泥浓度），判断当前微生物的代谢负荷状态（F/M过高可能导致污泥膨胀，过低则降低处理效率）。（2）优化目标函数定义：根据污水处理厂的管理需求，设定多目标函数——首要目标是出水水质达标（如氨氮≤5mg/L、总氮≤15mg/L），

采用惩罚函数形式（如出水超标时目标函数值急剧增大）；次要目标是能耗最低（=曝气风机制耗+污泥回流泵能耗+搅拌器能耗），通过实时监测各设备的功率与运行时间计算；第三目标是污泥产量最小化（=剩余污泥排放量，与污泥龄相关），通过控制污泥龄间接调控。

(3) 约束条件设置：基于排放标准与工艺安全要求，设定刚性约束（如出水 COD $\leqslant 50\text{mg/L}$ 、溶解氧浓度 1~5mg/L、污泥龄 SRT $\geqslant 10$ 天）与柔性约束（如曝气量调整幅度每小时不超过 20%，避免微生物因环境突变失活）。(4) 动态优化算法求解：采用多目标遗传算法（NSGA-II）、粒子群优化算法（PSO）等智能算法，在满足约束条件的前提下搜索最优参数组合。例如，算法可能输出“溶解氧浓度调整为 2.5mg/L（原 3.0mg/L）、污泥回流比提高至 80%（原 70%）、混合液回流比降低至 200%（原 250%）”的调控方案，该方案在保证出水氨氮 $\leqslant 5\text{mg/L}$ 的同时，曝气能耗降低 15%，污泥产量减少 8%。(5) 调控指令下发与反馈调节：优化结果通过工业以太网传输至现场 PLC 控制器，自动调整曝气风机的风量阀门、污泥回流泵的变频器及混合液回流泵的启停状态。同时，物联网系统持续监测调整后的水质与设备运行状态（如调整后 15 分钟的溶解氧浓度、出水氨氮浓度），若未达到预期效果（如氨氮仍高于 5mg/L），则触发二次优化循环，直至系统稳定在最优运行状态。

4 动态优化的综合效益评估

4.1 水质提升与排放标准适应性增强

动态优化通过实时调整工艺参数，增强了污水处理厂对复杂进水水质的适应能力。例如，当雨季进水有机物浓度降低时，系统自动降低污泥负荷（通过延长水力停留时间或减少曝气量），避免微生物因“饥饿”导致活性下降；当工业废水冲击（如突然增加的难降解有机物）发生时，系统快速提高溶解氧浓度（增强好氧微生物的代谢活性）并延长水力停留时间，确保有机物与氮磷的去除效率。监测数据表明，动态优化可使出水 COD、氨氮及总氮的达标率从传统的 90%~95% 提升至 98% 以上，甚至在部分时段达到地表水 IV 类标准（如 TN $\leqslant 10\text{mg/L}$ 、

TP $\leqslant 0.3\text{mg/L}$ ），更好地满足日益严格的环境监管要求^[3]。

4.2 运维效率与设备管理水平提高

传统污水处理厂的运维依赖人工巡检（每日数次）与定期设备维护（每周或每月），难以及时发现潜在问题（如曝气风机轴承磨损导致的风量下降）。物联网实时监测系统通过设备状态传感器（如电流、振动、温度）的持续采集，可提前预警设备故障（如曝气风机电流异常波动提示叶轮磨损），将设备维修从“事后抢修”转变为“事前预防”，减少非计划停机时间（年停机时间可缩短 30%~50%）。同时，动态优化减少了人工经验调控的依赖（如溶解氧浓度调整不再依赖操作人员的目测判断），降低了运维人员的技术门槛与工作强度，使运维团队能够更专注于工艺改进与应急管理，整体运维效率提升 40% 以上。

5 结论

本文围绕基于物联网实时监测系统的城市污水处理厂工艺参数动态优化问题，系统分析了污水处理工艺的关键参数及其相互作用机制，研究了物联网监测系统的架构设计与数据采集方案，探讨了基于机器学习的动态优化算法与多目标协同控制策略，并从能耗、水质及运维等维度评估了动态优化的综合效益。研究表明，通过“实时监测-数据驱动-智能调控”的闭环管理技术体系，可显著提升污水处理厂对复杂工况的适应能力，实现工艺运行的高效化、低碳化与智能化，为城市水环境质量的持续改善提供了可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 束慧. 基于物联网技术的污水处理过程动态监控系统[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(8): 2441~2443.
- [2] 胡兴福, 李睿, 王鹏. 建筑机电安装工程绿色施工评价指标体系构建研究[J]. 施工技术, 2019, 48(17): 117~120.
- [3] 张修建, 靳硕, 赵茜, 关新平, 梁振虎. 基于 Web 的工业污水处理远程监控系统[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(5): 1104~1108.