

污水处理厂进水水质波动的工艺动态调控方法

刘家伟

中工武大设计集团有限公司 湖北 武汉 430074

摘要: 污水处理厂进水水质波动源于自然降雨、工业偷排及管网老化等多因素, 导致生化系统失衡与处理效率下降。本文提出基于实时监测网络、智能算法与多单元协同的动态调控方法, 通过曝气量优化、污泥回流比调整、应急单元切换等策略, 实现水质波动的快速响应与主动预测, 保障出水稳定达标并降低运行能耗, 推动污水处理向智能化、精准化升级。

关键词: 污水处理厂; 进水水质波动; 工艺动态调控

引言: 城市化进程中, 污水处理厂进水水质波动问题凸显且愈发复杂。季节性降雨、工业废水混排及管网渗漏等因素导致有机物浓度、pH值等参数频繁波动, 影响生化处理效果与系统稳定性。传统经验主导的调控方式存在响应滞后、预测能力不足等局限, 亟需构建智能化动态调控体系以应对复杂水质变化, 提升处理效率与出水稳定性。

1 污水处理厂进水水质波动及工艺动态调控概述

污水处理厂进水水质波动, 主要源于工业废水偷排、雨季径流变化及管道老化渗漏因素。此类波动会改变生化池内微生物群落结构, 导致硝化菌活性降低, 引发污泥膨胀、泡沫, 影响污泥沉降性能, 需通过工艺动态调控实现稳定运行与微生物生态平衡, 维持污泥龄与污泥负荷的平衡。(1) 实时监测网络构建: 通过部署多参数水质传感器阵列, 实现COD(化学需氧量)、氨氮、pH值等关键指标的分钟级连续监测, 结合边缘计算数据预处理与异常值预警, 为后续调控提供数据支撑。(2) 智能曝气系统优化: 基于溶解氧在线监测数据, 采用PID(比例-积分-微分)控制算法动态调节曝气量, 在保证硝化反应效率的同时降低能耗。当进水碳源不足时, 可自动触发外加碳源投加装置, 维持反硝化所需碳氮比。(3) 应急处理单元切换: 设置备用活性污泥池与处理模块, 当进水污染物浓度超标时, 通过阀门切换系统将高负荷污水引入应急单元, 采用粉末活性炭吸附或化学氧化等短流程工艺进行预处理, 避免冲击主工艺系统^[1]。通过机器学习模型分析历史数据, 可提前预测水质波动趋势, 实现曝气量、碳源投加量的前瞻性调节, 提升系统自适应能力与运行效率, 形成从实时监测到智能决策的闭环调控体系, 最终实现污水处理厂的稳定高效运行。

2 污水处理厂进水水质波动的特征与影响机制

2.1 进水水质波动的主要诱因

污水处理厂进水水质波动受多重因素影响, 其动态调控需精准识别诱因并针对性调整工艺参数。(1) 自然环境变化: 季节性降雨量差异导致地表径流携带泥沙、有机物浓度升高, 夏季高温加速微生物代谢活动, 使水中溶解氧、氨氮指标出现周期性波动, 影响生化处理单元稳定性。(2) 人类活动干扰: 工业园区排水管网混接、居民生活污水混入工业废水等现象普遍存在, 餐饮、洗涤等行业排放的油脂、表面活性剂会降低生化池活性污泥沉降性能, 工业废水中的重金属、有毒有害物质则可能抑制微生物活性, 造成处理效率下降。(3) 基础设施缺陷: 老旧管网渗漏、雨污合流制系统在暴雨期易引发污水溢流, 管道淤积导致进水流量分布不均, 局部区域污染物浓度激增, 同时泵站调度不当可能加剧水质波动幅度, 影响后续处理单元负荷平衡。针对这些诱因, 工艺调控需结合实时监测数据动态调整曝气量、污泥回流比等参数, 通过增设调节池、强化预处理单元功能等方式缓冲水质冲击, 保障出水水质稳定达标。

2.2 水质波动对处理工艺的作用规律

污水处理厂进水水质波动具有随机性、周期性及突发性, 主要表现为有机物浓度、悬浮物含量、pH值、温度等参数变化。这些波动通过影响微生物活性、化学反应速率, 对生物处理、化学沉淀、过滤等环节产生连锁作用, 需通过动态调控优化处理效果。(1) 有机物浓度波动: 高浓度进水可能引发污泥膨胀, 低浓度则导致微生物营养不足, 需通过调整曝气量、污泥回流量维持菌群平衡。(2) 悬浮物含量变化: 高悬浮物易堵塞滤池、增加沉淀池负荷, 需通过预处理强化、调整排泥周期保障设备稳定运行。(3) pH值与温度波动: 酸性或碱性进水影响微生物酶活性, 低温降低生化反应速率, 需通过投加中和剂、保温措施补偿环境变化。水质波动的作用规律还体现在协同影响上, 如高氨氮与低溶解氧叠加会

加剧硝化菌抑制,需通过实时监测与智能算法联动调整参数^[2]。通过建立水质波动特征库与工艺响应模型,可实现从被动应对到主动预测的调控升级,最终提升系统抗冲击能力与出水稳定性,确保处理工艺高效运行。

2.3 传统调控方式的局限性

传统调控方式在应对污水处理厂进水水质波动时存在显著局限性,主要体现为依赖人工经验、响应速度慢及缺乏预测能力,导致处理系统难以适应动态变化的水质条件,影响出水稳定性与运行效率。(1) 经验主导的被动调整:操作人员多基于历史经验判断水质波动类型,如有机物浓度升高时增加曝气量,但经验难以覆盖复杂多变的波动场景,易出现过调或调整不足,造成能耗浪费或处理效果下降。(2) 监测与响应滞后:传统水质监测多采用人工采样或固定时间间隔的在线监测,数据更新频率低,从水质波动发生到调控措施实施存在时间差,难以应对突发性水质冲击,如工业废水偷排导致的有毒物质浓度骤升。(3) 缺乏动态预测能力:传统调控未建立水质波动预测模型,无法根据历史数据与实时参数预判未来水质变化趋势,导致工艺参数调整滞后于水质波动,难以实现主动调控与预防性优化。为突破这些局限,需结合智能算法与实时监测技术,构建动态调控模型,提升系统对水质波动的快速响应与主动适应能力,最终实现处理工艺的高效稳定运行。

2.4 动态调控的核心需求解析

动态调控的核心需求源于水质波动的复杂性与适应性要求,需通过技术手段实现从被动应对到主动预测的转变,保障系统稳定高效运行。(1) 实时感知与快速响应:需构建高精度在线监测网络,覆盖有机物浓度、悬浮物、pH值等关键参数,结合边缘计算实现实时分析,确保在波动发生时能迅速触发调控指令,如调整曝气量或污泥回流量,避免处理效果波动。(2) 智能决策与动态优化:需集成机器学习算法,基于历史水质数据与工艺运行日志训练预测模型,预判未来波动趋势,自动生成最优调控策略,如调整水力停留时间或药剂投加量,实现参数的动态优化。(3) 多环节协同与弹性设计:需考虑生物处理、化学沉淀、过滤等工艺环节的相互作用,通过动态调整各环节参数实现系统协同优化,同时设计冗余容量与弹性运行区间,增强系统对极端波动的抗冲击能力^[3]。这些需求共同指向构建智能化、自适应的调控体系,通过实时数据驱动、算法决策支持与多环节协同优化,提升污水处理系统对波动的动态适应能力,最终实现出水水质稳定达标与运行成本的有效控制。

3 污水处理工艺动态调控的实施方法与路径

3.1 水质实时感知与预判调控方法

污水处理厂进水水质波动需通过实时感知与预判实现精准调控,保障处理工艺稳定运行。此环节强调从数据采集到决策执行的全流程动态管理,以应对水质参数的快速变化。(1) 多参数在线监测网络构建:需部署高灵敏度传感器,实时采集有机物浓度、悬浮物含量、pH值、温度等关键指标,结合物联网技术实现数据无线传输与云端存储,确保监测数据的时效性与完整性,为后续分析提供基础。(2) 数据驱动的波动预判模型:需运用机器学习算法,基于历史水质数据训练预测模型,识别波动模式与趋势,如通过时间序列分析预判未来2-4小时的水质变化,提前生成调控指令,避免滞后调整导致的处理效果波动。(3) 智能决策与执行系统集成:需将预判模型与自动控制系统联动,实现从数据感知、分析到执行的全流程自动化,如根据预判结果自动调整曝气量、污泥回流量或药剂投加量,确保调控措施及时生效,维持系统稳定运行。通过这些方法的协同应用,可实现水质波动的实时感知、精准预判与动态调控,提升污水处理系统对复杂水质条件的适应能力,最终保障出水水质稳定达标。

3.2 工艺参数自适应调节技术

工艺参数自适应调节技术以实时水质数据为驱动,通过智能算法实现动态匹配,提升系统应对水质波动的能力。该技术强调“自感知、自决策、自执行”的闭环控制逻辑,减少人工干预依赖,增强运行稳定性。(1) 曝气强度动态校准:基于溶解氧浓度实时反馈,自动调整曝气机转速或开启台数,在保障微生物需氧量的同时避免过度曝气导致的能耗浪费,维持生物处理单元的高效生化反应环境。(2) 污泥回流比例优化:结合进水悬浮物浓度、污泥沉降指数等参数,通过模糊控制算法动态调整污泥回流比,平衡沉淀池固液分离效果与生物池污泥浓度需求,防止污泥膨胀或沉降性能恶化。(3) 药剂投加智能控制:针对pH值、营养盐比例等关键指标,采用PID控制器或神经网络模型自动调节中和剂、絮凝剂投加量,确保化学处理环节精准高效,避免投加过量引发二次污染或投加不足导致处理效果不达标^[4]。该技术通过自适应调节,实现水质波动与处理工艺的动态协同,在保障出水水质稳定达标的基础上,降低能耗与药剂消耗,提升污水处理系统的经济性,为可持续运行提供支撑。

3.3 多单元协同动态调控策略

污水处理厂多单元协同动态调控需突破单一环节限制,通过跨单元信息共享与策略联动实现系统级优化,增强对复杂水质波动的整体应对能力。(1) 预处理-生物

处理联动：预处理单元通过实时监测悬浮物、油脂等指标，动态调整格栅间隙、沉砂池排泥频率，为生物处理单元提供稳定进水条件，避免高负荷冲击导致污泥系统紊乱。（2）生物处理-深度处理协同：生物处理单元根据出水氨氮、总磷浓度变化，自动调整曝气量与污泥回流比，同时深度处理单元通过实时监测滤池压差、消毒剂余量，动态调整反冲洗周期与消毒剂投加量，确保最终出水水质稳定。（3）应急单元快速响应：设置应急池与旁路处理系统，当进水水质突发恶化时，自动切换至应急处理流程，通过投加专用药剂或强化氧化工艺，快速降低有毒有害物质浓度，保障主工艺系统不受冲击。该策略通过多单元间的信息互通与策略协同，实现从“单点优化”到“系统优化”的升级，在应对进水水质波动时，既能保障各单元高效运行，又能维持整体系统稳定，最终提升污水处理厂的抗冲击能力与运行可靠性。

3.4 调控效果的闭环优化方式

调控效果的闭环优化依托动态反馈机制实现持续进化，通过多维度数据融合与智能算法迭代，推动系统向最优状态逼近。（1）多维监测网络构建：整合在线仪表、边缘计算节点与云端平台，实时采集进水水质、过程参数及出水指标，形成数据链，例如通过溶解氧、污泥浓度传感器捕捉生物池运行状态，结合出水氨氮、总磷数据评估处理效果，为优化提供依据。（2）模型自适应学习：基于实时数据流更新预测模型参数，通过强化学习算法识别工艺运行规律，修正传统模型的静态偏差，例如根据季节性水质变化调整曝气量预测模型，提升对温度、pH值波动的适应性。（3）策略验证与迭代升级：将模型预测结果与实际运行数据对比，通过A/B（对比两组

不同调控策略的实际运行效果）测试验证优化策略的有效性，逐步淘汰低效方案，形成“预测-验证-优化”的螺旋上升路径，例如通过对比不同污泥回流比下的出水水质，确定最佳控制区间^[5]。该方式通过数据驱动与算法优化融合，使系统具备自我修正能力，在应对水质波动时既能快速响应又能持续进化，最终实现运行效率与稳定性的双重提升，构建起智能调控生态。

结束语：未来，需深化物联网、大数据的融合应用，构建数字孪生模型，实现水质波动的精准预测与主动调控。通过智能传感器网络采集数据，结合机器学习算法优化曝气、污泥回流等参数，推动多单元协同优化。同时，设计弹性运行区间与冗余容量，提升系统抗冲击能力，最终实现污水处理厂智能化升级与可持续运行，为城市水环境治理提供技术支撑。

参考文献：

- [1]赵强,王泽鑫,吕臣凯,等.EEMD-LSTM-SVR混合模型驱动的污水处理厂进水水质波动预测与异常诊断[J].环境科学学报,2025,45(11):109-119.
- [2]吕臣凯,蒋云鹏,刘煜,等.少样本场景下基于迁移学习的污水厂进水氨氮预测[J].长江科学院院报,2025,42(12):180-187+226.
- [3]施汉昌,汪秋婉,张明凯,等.精确曝气实现污水处理厂节能减排:计算方法与控制策略[J].中国给水排水,2024,40(20):1-6.
- [4]程雷鸣,张磊,张辛平等.基于LSTM神经网络的智能曝气研究与应用[J].给水排水,2024,50(9):154-159.
- [5]武梦瑶,郭江涛.冬季低负荷低水温下污水处理厂工艺调控分析[J].环境保护与循环经济,2025,45(10):25-29.