

Process Analysis Model Based on Multi-parameter Trend Lines

Chunhua Wang^{1,2,3}

1. Zhejiang Youkong Cloud Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

2. Jimo Environmental Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 200050, China

3. Shanghai Hongying Hengyuan Industrial Co., Ltd., Shanghai, 200050, China

Abstract

To address the problems of traditional sewage treatment processes relying on empirical regulation and delayed parameter response, and to improve the accuracy and efficiency of process analysis in smart water systems, this study takes a sewage treatment plant in Hangzhou as the research object and constructs a process analysis model based on multi-parameter trend lines. Firstly, a dual-source data collection system of “PLC online monitoring + laboratory offline supplementation” is designed, real-time data transmission is realized through the Modbus-RTU protocol, and data quality is guaranteed by the logic of “threshold judgment + fluctuation detection”. Secondly, a three-level biological treatment parameter model of “basic data → intermediate parameters → target indicators” is built based on process principles to automatically calculate core process indicators such as sludge retention time (SRT) and food-to-microorganism ratio (F/M). Finally, a multi-parameter optional trend line analysis system is established to realize the collaborative analysis of “water quality-flow-load” and full-chain fault diagnosis. Case application shows that the model can accurately identify process abnormalities such as organic load shock and sludge bulking, with a diagnosis accuracy of 92%. After the model is put into use, the effluent compliance rate of the sewage treatment plant is increased to 100%, the operation and maintenance (O&M) abnormal response time is shortened from 24 hours to 1 hour, and the O&M cost is reduced by 10%. The research results provide an engineering solution for the process optimization of smart water systems and can be promoted to the O&M management of sewage treatment plants with different process types.

Keywords

smart water; multi-parameter trend line; process analysis model; sewage treatment; operation optimization

基于多参数趋势线分析的智慧水务工艺优化策略研究

王春华^{1,2,3}

1. 浙江优控云科技有限公司, 中国·浙江杭州 310000

2. 极膜环境科技(上海)有限公司, 中国·上海 200050

3. 上海鸿影衡源实业有限公司, 中国·上海 200050

摘要

为解决传统污水处理工艺依赖经验调控、参数响应滞后的问题, 提升智慧水务系统工艺分析的精准性与高效性, 本研究以杭州某污水厂为研究对象, 构建基于多参数趋势线的工艺分析模型。首先设计“PLC在线监测+化验室离线补充”双源数据采集体系, 通过Modbus-RTU协议实现实时数据传输, 并采用“阈值判断+波动检测”逻辑保障数据质量; 其次基于工艺原理构建“基础数据→中间参数→目标指标”三级生物处理参数模型, 自动计算污泥龄(SRT)、有机负荷(F/M)等核心工艺指标; 最终搭建多参数可选趋势线分析体系, 实现“水质-流量-负荷”协同分析与全链条故障诊断。案例应用表明, 该模型可精准识别有机负荷冲击、污泥膨胀等工艺异常, 诊断准确率达92%; 模型投用后, 污水厂出水达标率提升至100%, 运维异常响应时间从24h缩短至1h, 运维成本降低10%。研究成果为智慧水务工艺优化提供了工程化解方案, 可推广至不同工艺类型污水厂的运维管理中。

关键词

智慧水务; 多参数趋势线; 工艺分析模型; 污水处理; 运行优化

【作者简介】王春华(1977—), 男, 中国四川安岳人,

本科, 环境工程工程师, 一级建造师, 从事污水处理、给水、海水淡化研究。

1 引言

1.1 研究背景与意义

全球城市化加速与人口增长加剧了水资源供需矛盾,

智慧水务融合物联网、大数据、人工智能等技术，成为水资源高效管理的核心路径。国家及地方政策持续加码智慧水务建设，推动技术落地与模式创新。工艺分析模块作为智慧水务的核心环节，通过整合污水处理全流程数据、挖掘参数关联规律，可为精细化运维、工艺优化提供决策支撑，直接影响水务系统运行稳定性与资源利用效率。

1.2 研究目标

本研究旨在构建多参数可选趋势线工艺分析模型，实现污水处理工艺的精准优化与高效运维。

1.3 研究方法

案例研究法：以杭州某倒置 A²O 工艺污水厂为研究对象，获取连续运行数据，支撑模型验证；

数据驱动法：融合统计学与数据挖掘技术，开展数据清洗、相关性分析及趋势预测。

2 数据采集与整理分析

作为项目总负责人，牵头设计“在线监测+离线化验”双源数据体系，构建全流程数据管理机制，为模型提供高质量数据支撑。

2.1 双源数据采集体系设计与实施

2.1.1 PLC 在线仪表数据采集

采集范围：依托水厂现有的进出水在线监测仪表、工艺段过程仪表。

数据传输与集成：采用 PLC 作为数据采集核心，通过 Modbus-RTU 协议实现仪表与 PLC 的实时通讯。

数据质量初控：在 PLC 采集环节，设计“阈值判断+波动检测”双重初控逻辑，编写 PLC 程序实现：①当仪表数据超出合理范围时，自动标记为可疑数据并触发设备状态自检；②当数据短时间内波动幅度 > 20% 时，自动调取相邻仪表数据进行交叉验证，初步剔除传感器故障或干扰导致的异常值，为后续预处理奠定基础。

2.1.2 化验室离线数据采集

化验参数：考虑到在线仪表对部分关键参数（如 BOD₅、总氮、总磷、污泥沉降比 SV30、MLSS）的测量精度不足，采用化验室进行数据分析。

数据上传与整合流程：为解决传统化验数据“纸质记录”问题，开发“化验数据在线上报系统”，设计 Excel 报表模板，要求化验人员完成检测后 1 小时内填写报表并上传至系统。

2.2 生物处理参数建模

采用“基础数据→中间参数→目标指标”三级逻辑，编写程序实现关键参数自动计算，核心模型如下：

2.2.1 污泥龄（SRT）计算

基于 MLSS 在线数据与污泥排放量在线数据，采用“质量平衡法”构建模型。

2.2.2 负荷参数计算

针对有机负荷（F/M）、硝化负荷、反硝化负荷，分别

构建基于在线与离线数据的计算模型：

1) 有机负荷（F/M）：以在线 COD 数据与离线 BOD₅ 数据作为进水有机物浓度，结合在线及化验室的 MLSS 数据，计算有机负荷。

2) 硝化负荷：以在线进水 TN 数据、进水流量、出水氨氮数据，模拟系统硝化负荷。

3) 反硝化负荷：以在线进水 TN 数据、进水流量、出水 TN 数据、污泥排放量，模拟系统反硝化负荷。

上述模型设置每小时自动计算并存储负荷数据，形成负荷参数趋势序列，用于后续工艺负荷匹配分析。

4) 指标去除率计算：基于“进水在线数据+出水在线、离线数据”，构建 COD、BOD、氨氮、总氮、SS 等指标的去除率计算模型。去除率的实时计算与历史回溯，当去除率低于设定阈值（如 COD 去除率 < 85%）时，自动关联对应时段的 DO、MLSS、出水水质趋势数据，辅助工艺问题诊断。

5) 碳氮比：基于 COD、BOD 及 TN，计算污水进水碳氮比。

2.3 数据存储架构

采用“InfluxDB+MySQL”混合存储：时序数据库存储实时数据与计算结果，按“时间戳+点位”双索引支持毫秒级查询；关系数据库存储仪表校准记录、模型参数等溯源信息，1h 定时同步确保数据一致性。

3 多参数趋势线分析

3.1 案例污水处理厂概况

杭州市某污水处理厂，采用“水解池+多点进水倒置 A²O + 纤维滤池”工艺，设计处理能力 8 万吨/日（一期 4 万吨/日），出水水质优于浙江省地方排放标准。具备完善的在线监测与运维基础。

3.2 多参数趋势线绘制与分析

3.2.1 进水水质与负荷波动分析

多参数曲线关联分析逻辑：进水水质与负荷波动分析的核心是“水质-流量-负荷”三者曲线的协同验证，通过建立参数间的定量关系，实现负荷波动的动态追踪与风险预警。

有机负荷波动分析：进水 COD - 进水流量 - 有机负荷（F/M）曲线关联逻辑：有机负荷 F/M, kgBOD₅/kgMLSS · d 由进水有机物总量（COD 浓度 × 进水流量，需通过 COD 与 BOD₅ 的换算系数（如 0.6）修正）与生物系统 MLSS 总量决定，三者曲线需满足“进水 COD 或流量升高时，有机负荷同步升高，且不超过生物系统耐受上限（0.12kg/(kg MLSS · d)）”。

典型正常曲线特征：进水 COD 曲线稳定在 110-300mg/L，进水流量曲线维持在 1500-1666m³/h（对应日处理量 4 万吨），有机负荷曲线小于 0.1kg/(kg MLSS · d)。出水 COD 曲线同步稳定在 5-27mg/L（低于限值 40mg/L），无明显偏移。

异常曲线特征：有机负荷超出设定上限值 0.12kg/kg

MLSS · d (超耐受上限, 根据运行经验可调整), 可诊断为“有机负荷冲击”, 减少进水量。查看有机负荷与 MLSS 曲线, 污泥浓度是否骤降, 减少排泥, 增加 MLSS。

硝化负荷波动分析: 进水总氮 - 进水流量 - 硝化负荷曲线关联逻辑: 硝化负荷 $\text{kgNH}_4^+ \cdot \text{N}/\text{kgMLSS} \cdot \text{d}$ 由进水总氮总量 (总氮浓度 × 进水流量) 与 MLSS 总量决定, DO 直接影响好氧区硝化反应效率, 三者曲线需满足进水氨氮或流量升高时, 硝化负荷同步升高, 且不超过硝化菌耐受上限 (阈值 $0.05 \text{kg/kg MLSS} \cdot \text{d}$)。

典型正常曲线特征: 进水总氮曲线稳定在 $15\sim50 \text{mg/L}$, 进水流量曲线维持在 $1500\sim1666 \text{m}^3/\text{h}$, 硝化负荷曲线稳定在 $0.03\sim0.05 \text{kg/(kg MLSS} \cdot \text{d})$ 。

出水氨氮曲线同步稳定在 $0.04\sim1.5 \text{mg/L}$ (低于限值 2.0mg/L), 无明显偏移。

异常波动诊断场景: 若进水总氮曲线上升、进水流量增长, 硝化负荷曲线升至 $0.05 \text{kg/(kg} \cdot \text{d)}$ (超耐受上限), 同时好氧区 DO 曲线维持在 2.0mg/L (未同步升高), 可诊断为“硝化负荷过高导致硝化效率下降风险”, 需提前调控曝气量, 避免出水氨氮超标。

反硝化负荷波动分析: 进水总氮 - 出水总氮 - 出水硝态氮 - 进水流量 - 反硝化负荷曲线关联逻辑: 反硝化负荷 ($\text{kgNO}_3^- \cdot \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$) 由去除总氮总量 (去除总氮浓度 × 进水流量)、排泥量与 MLSS 总量决定, 直接影响缺氧区反硝化反应效率。

典型正常曲线特征: 进水总氮曲线稳定在 $15\sim50 \text{mg/L}$, 进水流量曲线维持在 $1500\sim1666 \text{m}^3/\text{h}$, 反硝化负荷曲线稳定在 $0.045\sim0.07 \text{kg/kg MLSS} \cdot \text{d}$, 温度低于 20°C 稳定在 $0.045 \text{kg/kg MLSS} \cdot \text{d}$ 以内, 温度高于 20°C 稳定在 $0.07 \text{kg/kg MLSS} \cdot \text{d}$ 以内。出水总氮曲线同步稳定在 $2\sim10 \text{mg/L}$ (低于限值 10mg/L), 无明显偏移。

异常波动诊断场景: 若进水总氮曲线上升、进水流量增长, 出水总氮曲线上升, 出水硝态氮曲线上升, 可诊断为“反硝化负荷过低”, 需要查看缺氧池 DO 及进水碳氮比。应对策略为调整好氧池 DO, 使回流至缺氧区 DO 降低, 加大缺氧池碳源投入, 减少排泥量从而增大 MLSS。

3.2.2 生物池多参数分析

针对生物池运行状态诊断需覆盖泥龄、SV30、DO、ORP、MLSS、硝态氮、温度、有机负荷、硝化负荷、反硝化负荷、各指标去除率的需求, 本方案在原有基础上新增 4 项核心参数, 建立“参数联动 - 状态判定 - 故障溯源 - 调控优化”的全链条诊断体系, 既符合规范要求 (有机负荷 $0.05\sim0.1 \text{kgBODs}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 、总氮 $\leq 10 \text{mg/L}$ 、总磷 $\leq 0.3 \text{mg/L}$), 又能更全面捕捉生物池运行异常。

生物池运行状态诊断 10 参数体系与监测标准: 结合 AAO 工艺功能分区特性, 明确 10 项核心参数的监测要求、规范适配标准及功能定位, 为多参数协同分析奠定基础。

生物池正常运行状态的 10 参数协同特征: 10 项参数需呈现“环境 - 污泥 - 负荷 - 反应”的协同稳定特征, 具体关联逻辑如下:

a) 环境 - 污泥参数协同: 保障微生物生存基础

温度 - 泥龄联动: 温度稳定在 $20\sim30^\circ\text{C}$ 时, 泥龄 (SRT) 维持 $11\sim15 \text{d}$, MLSS $2.7\sim3.0 \text{g/L}$; 温度降至 $15\sim20^\circ\text{C}$ 时, SRT 需延长至 $16\sim25 \text{d}$, MLSS 提升至 $3.0\sim4.0 \text{g/L}$, 补偿低温导致的微生物活性下降。

DO-ORP-SV30 联动: 好氧池 DO $2.0\sim4.0 \text{mg/L}$, 厌氧池 ORP $-200\sim-300 \text{mV}$, 缺氧池 DO $< 0.5 \text{mg/L}$, SV30 稳定在 $28\%\sim32\%$, 污泥无膨胀风险, 微生物代谢环境最优。

有机负荷 - COD 去除率联动: 有机负荷 $0.05\sim0.1 \text{kg/(kg} \cdot \text{d)}$ 时, COD 去除率稳定在 $87\%\sim96\%$ 。

硝化负荷 - 氨氮去除率联动: 硝化负荷 $0.02\sim0.05 \text{kg/(kg} \cdot \text{d)}$, 氨氮去除率 $\geq 92\%$, 出水氨氮 $< 1.5 \text{mg/L}$ 。

3.2.3 低温导致硝化效率下降 (氨氮、总氮超标)

异常参数特征:

单参数异常: 温度曲线降至 $12\sim13^\circ\text{C}$, 出水氨氮、总氮升高。

多参数关联验证: 泥龄 (SRT) 未调整;

连锁反应: 出水氨氮、硝态氮升高, 出水氨氮、TN 超标。

异常调整: 低温时 MLSS 低浓度报警, 建议调整 MLSS 浓度, 出水硝态氮呈上升趋势报警, 建议投加碳源。

3.2.4 污泥膨胀导致除磷脱氮双重失衡

异常参数特征:

单参数异常: SV30 呈上升趋势, MLSS 曲线呈下降趋势;

多参数关联验证: 好氧池 DO 曲线降至 $1.0\sim1.2 \text{mg/L}$ (DO 曲线呈下降趋势, 丝状菌耗氧增加), 有机负荷升至 $0.12 \text{kg/(kg} \cdot \text{d)}$ (超规范基准区), 总磷去除率降低, 二沉池出水总磷呈升高趋势;

连锁反应: COD 去除率下降。

故障定位: 有机负荷超标引发丝状菌大量繁殖, 导致污泥膨胀, DO 被过度消耗, 同时 PAOs 碳源不足, 除磷脱氮效率同步下降。

3.2.5 泥龄过短导致硝化菌流失

异常参数特征:

单参数异常: 泥龄 (SRT) 缩短至 $10\sim12 \text{d}$;

多参数关联验证: 硝化负荷 $0.05 \text{kg/(kg} \cdot \text{d)}$ (正常), 但氨氮去除率降低, 出水氨氮升至 $4.5\sim5.0 \text{mg/L}$, 好氧池 MLSS 降至 $2.0\sim2.7 \text{g/L}$ 。

连锁反应: 缺氧池硝态氮降低, 总氮去除率降低。

故障定位: 泥龄短于硝化菌世代周期 ($15\sim20 \text{d}$), 导致硝化菌无法稳定增殖, 大量随排泥流失, 硝化效率骤降。

3.3 多参数模型运行效果

模型自 2022 年 10 月投用以来, 实现三大成效: ①全流程可视化, 整合 23 类核心参数, 打破数据孤岛; ②运维

成本降低 10%，线上巡检替代人工踏看，异常响应时间从 24h 缩至 1h；③出水达标率提升至 100%，COD、TN 等指标波动幅度减少，有效抵御水质冲击。

4 结论与展望

4.1 研究结论

1) 构建了“在线 + 离线”双源数据体系与生物系统参数计算模型，数据有效率提升至 95%，为趋势线分析提供可靠支撑。

2) 开发的多参数可选趋势线模型，实现“水质 - 流量 - 负荷”协同分析，精准诊断污泥膨胀、硝化效率下降等问题，诊断准确率达 92%。

3) 案例应用表明，模型可使污水厂出水稳定达标，运维效率显著提升，为智慧水务工艺优化提供工程化解决

方案。

4.2 研究不足与展望

当前模型依赖人工设定阈值，智能化程度有待提升。下一步将融合机器学习算法，基于历史数据构建负荷预测模型，实现曝气量、排泥量等参数的自动调控；同时拓展模型适用场景，适配不同工艺类型污水厂的个性化需求。

参考文献

- [1] 两部委发布“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划到2025年县城污水处理率达到95%以上[J].城市道桥与防洪, 2021,(08):351.
- [2] 张芸蓓, 马民, 宫玲, 等. A/A/O污水处理工艺脱氮效果模拟及优化[J]. 给水排水, 2022, 58(1): 88-94.
- [3] 倪杰. 基于深度学习的污水处理故障诊断方法[D]. 沈阳化工大学, 2023. DOI:10.27905/d.cnki.gsghy.2023.000566.