

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.12.024

时间维度多变量分析智能曝气系统开发及工程应用

刘彦旭¹, 袁 飞¹, 卫鸣志²

(1. 上海环保<集团>有限公司, 上海 200433; 2. 上海奉锦环境建设管理有限公司, 上海 201422)

摘 要: 针对污水处理厂传统曝气过度、能耗偏高、水质调控精度低的问题,以上海某污水处理生产线为例,开发了基于时间维度多变量分析的智能曝气系统,通过软硬件一体化改造实现曝气量的动态精准调控。该智能曝气系统上线后,生物反应池好氧区末廊道氨氮控制在目标值(1 mg/L)以下的比例高达98.2%(优于上线前的84.2%),有效降低了出水氨氮超标的风险;生物反应池好氧区末廊道溶解氧实际值与目标值偏差在 ± 0.3 mg/L以内的数值占83.3%(优于上线前的50.9%),偏差为 ± 0.5 mg/L的数值占93.3%(优于上线前的64.5%);生物反应池曝气系统电耗节约17%。该系统实现连续稳定运行,抗进水水质波动能力强,改造成本低、投资回报周期短,在处理规模为20万 m³/d以上的污水处理厂推广后节约电费超过100万元/a。

关键词: 智能曝气; 溶解氧; 电耗; 氨氮; 时间维度多变量分析

中图分类号: X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0156-07

Development and Application of an Intelligent Aeration System for Wastewater Treatment Plants Based on Time-dimension Multivariate Analysis

LIU Yanxu¹, YUAN Fei¹, WEI Mingzhi²

(1. Shanghai Environmental Protection Group Co. Ltd., Shanghai 200433, China; 2. Shanghai Fengjin Environmental Construction Management Co. Ltd., Shanghai 201422, China)

Abstract: Aiming at the problems of excessive aeration, high energy consumption and low precision of water quality regulation in the traditional aeration control of wastewater treatment plants, an intelligent aeration system based on time-dimension multivariate analysis was developed by taking a wastewater treatment production line in Shanghai as the engineering object, and the dynamic and precise regulation of aeration volume was realized through the integrated transformation of software and hardware. After the intelligent aeration system was put into operation, the proportion of ammonia nitrogen concentration in the final corridor of the aerobic zone in the biological reaction tank that was controlled below the total value (1 mg/L) reached as high as 98.2% (surpassing the 84.2% before the system was put into operation), which effectively reduced the risk of effluent ammonia nitrogen exceeding the standard. After the system was commissioned, 83.3% of the total values of the actual dissolved oxygen concentration in the final aerobic zone corridor deviated from the target value within ± 0.3 mg/L (exceeding the 50.9% before commissioning), and 93.3% of the total values deviated within ± 0.5 mg/L (exceeding the 64.5% before commissioning). In addition, the intelligent aeration system achieved a 17% reduction in electricity consumption of the aeration system in the biological reaction tank after the system was put into operation.

通信作者: 袁飞 E-mail: yuanfei66@foxmail.com

The system features excellent stability in continuous operation and strong resistance to influent quality fluctuations, with low renovation costs and a short investment payback period. When scaled up and applied to wastewater treatment plants with a treatment capacity of 200 000 m³/d and above, it can achieve an annual electricity cost saving of over 1 million CNY.

Keywords: intelligent aeration; dissolved oxygen; electricity consumption; ammonia nitrogen; time-dimension multivariate analysis

目前,大多数污水处理厂仍采用人工调控生物反应池好氧段的曝气,少量采用比例-积分-微分(PID)控制即时调整曝气量。为保证水质波动情况下出水氨氮达标排放,污水处理厂往往采用过量曝气的控制方式。然而,过量曝气不仅能耗过高,也会因为内回流造成缺氧池溶解氧(DO)过高而浪费碳源,同时造成反硝化能力的降低^[1-3]。在节能减排、绿色低碳的大环境下,智能曝气系统的推广应用,可以解决污水处理厂(尤其是进水水质波动大的污水处理厂)普遍存在的过度曝气问题,进而降低污水处理厂的能耗以及人工成本,在提质增效的同时提高污水处理厂精细化、自动化、智能化管理水平。

目前已有的智能曝气系统主要以国际水协活性污泥模型(ASM)为基础,根据污水处理厂的历史运行数据和在线仪表监测的水质水量变化,计算出污水处理过程中所需的曝气量,再结合曝气池中实际DO、水温、污泥浓度(MLSS)及水压等指标,调节空气流量分配和风机风量,从而实现精确控制^[4-6]。然而,这种控制方法一方面是需要拟合的动力学参数多,增加了建模的难度;另一方面,针对我国综合性污水处理厂占比大、进水水质具有不确定性和强时变特性的现状,ASM模型往往无法进行有效处理,从而导致调控不及时。因此,基于ASM模型的城市污水处理过程控制方法在应用上仍存在较多局限性。

近年来,人工智能(AI)技术的快速发展推动了污水处理领域从ASM模型向数据驱动模型的转型。数据驱动模型具有对复杂现实情况的强适应性、良好的泛化能力、构建的高效性以及实时控制方面的优势,可直接从海量实时数据(如水质、水量、MLSS、DO、温度、风量、阀门开度等)中挖掘非线性关联,实现自主学习与动态优化。此外,数据驱动模型可收集异常数据进入数据库,强化系统对水质

水量突变的应对能力,提高系统处理效率与稳定性^[7]。

本研究依托上海某污水处理厂其中一条生产线,通过曝气管路优化、新增电动空气调节阀门以及工艺过程仪表完善硬件配置;通过对历史运行数据进行整理、筛选,确定具有时间维度的主要影响因素并建立数据驱动模型,经测试、验证优化后形成软件系统;通过可编程逻辑控制器(PLC)的连接实现信号的输入与输出,形成软硬件结合的智能曝气系统。该系统能够根据输入的实时进水水质水量及过程仪表数据输出DO值及总空气流量,再将好氧池出水氨氮数据作为反馈控制值,进一步优化空气总/分量及DO输出值,从而实现精准控制。将以上改造结合,形成一套“前馈+AI算法+反馈”的控制策略。

1 研究对象及方法

1.1 污水处理厂概况

上海市奉贤区某污水处理厂分为一期和二期两次建设,设计水量共12万m³/d。一期设计处理能力为5万m³/d,2007年建成通水;二期设计处理能力为7万m³/d,2010年建成通水。一期和二期出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,除臭执行上海市《城镇污水处理厂大气污染物排放标准》(DB31/982—2016)。该污水处理厂工艺流程如图1所示。本研究对该厂二期其中1座生物反应池进行智能曝气系统的改造。该厂二期2024年的进、出水水质平均值如表1所示。

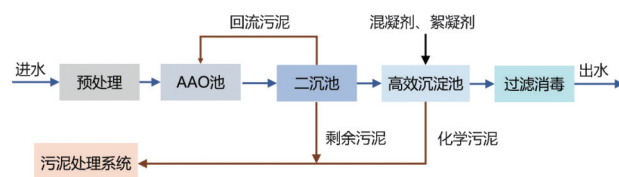


图1 污水处理厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of the wastewater treatment plant

表 1 污水处理厂二期进、出水水质

Tab.1 Influent and effluent quality of the wastewater treatment plant phase II

mg/L

项目	COD		BOD ₅		SS		氨氮		总氮		总磷	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
数值	268	17.5	109	2.3	205	2.3	26.9	0.3	34.7	7.80	4.7	0.1

1.2 硬件配置和控制架构

为利于精确控制,对试验条线曝气管路进行优化,由原环形结构调整为树形结构,将原2根风管对应好氧池4条廊道调整为4根风管对应好氧池4条廊道。4根风管分别设置调节阀和流量计,有利于管道风压风量的监控,便于调整DO值。好氧区第1廊道的水力停留时间(HRT)为1.25 h,其余3条廊道的HRT均为2.49 h。

污水处理厂进口原有COD、氨氮、总磷、总氮等在线监测仪表,生物反应池好氧区末廊道配置DO仪表,作为调节曝气量和阀门开度的主要指标数据。生物反应池好氧区末廊道配置氨氮监测仪表用于反馈调节,且仪表后仍留有部分好氧区,以增加反馈调节的安全性。为检测支管流量、监控各分区空气量分配情况,已在原有仪表的基础上增设空气支管流量计、压力传感器。在线监测仪表数据及设备运行参数通过各PLC子站进行数据采集和自控,同时配备数据库服务器进行数据的实时存储。智能曝气系统依托自控系统通过PLC子站分别向鼓风机主控制程序(MCP)柜和电动调节阀发送曝气风量值和阀门开度值信号,实现远程鼓风机风量和支管阀门的自动控制。模型对数据质量的要求体现在数据之间的关系可以正确反映,并不严格要求精度。因此建模时,获得足够多的数据可以反映沿程某些位置、指标的趋势变化。使用这些并不那么精确的数据经过融合处理后,也可以让最终的控制模型达到较高的精度和稳定性。除了某些核心位置的核心仪表,如末廊道DO、氨氮等仪表,其他仪表可不必具备非常高的精度。

智能曝气系统硬件和控制架构见图2,其中控制架构包括曝气池本体、阀门、风机、控制器和上位机。其中,曝气池本体划分为4个曝气单元,每个曝气单元对应1个阀门。控制器分别与风机和阀门通信连接,用于控制风机和阀门的动作,程序编写和自动控制系统内置于控制器中。上位机内置曝气池分区调控系统,与控制器通信连接,用于向控制器发送控制信号,不同时间维度的大数据采集在曝

气池分区调控系统中实现。

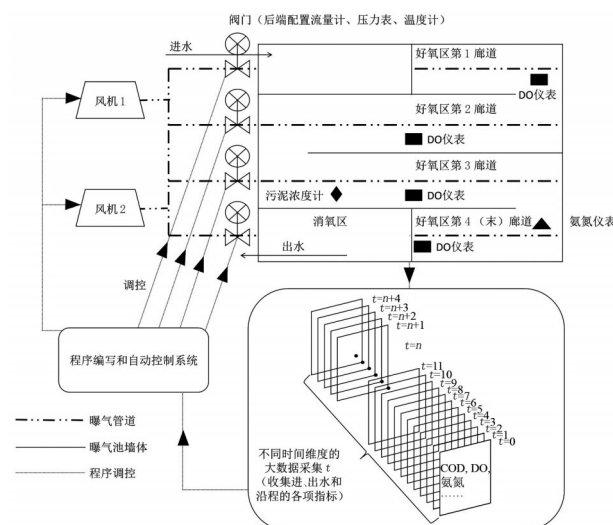


图2 智能曝气系统硬件和控制架构示意

Fig.2 Schematic diagram of hardware and architecture for the intelligent aeration system

1.3 算法架构和模型运行方式

智能曝气系统的算法架构包含数据采集、数据预处理、特征提取、特征选择、特征融合、性能测试等环节。系统的整个开发和部署又可分为建模、测试、模型更新等流程。

1.3.1 算法架构

曝气系统为大滞后、非线性时变系统。本研究在模型构建过程中,将不同时间点的曝气池关键指标(如DO、进水水质参数、温度等)以及控制量(如风量、阀门开度)与目标时间点的DO关联,显著提升了模型对动态过程的预测与控制精度。不同于一般的回归模型,本系统需同时考虑内部(进水及过程仪表)和外部变量(风机风量和阀门开度),建立时序预测模型。

① 数据采集

本系统采集的数据包括进水指标(水量、COD、氨氮、总磷、总氮)、过程仪表[生化池MLSS、缺氧区氧化还原电位(ORP)、好氧区ORP、生化池4个廊道的DO、生化池末廊道氨氮、内回流量]、出水总氮以及控制参数(各台风机的风量,各廊道的空气流量、

空气压力、空气温度、阀门开度)。所有数据通过 PLC 和数采仪实时采集,采集间隔为 1 min。

② 数据清洗与预处理

由于氨氮、总氮、COD 等仪表的数据生产间隔较长,需要定时标定,以及在运行当中可能出现故障,因此原始数据需要进行清洗和处理。为解决不同仪表采样频率不一致的问题,采用同步重采样技术。周期超过 1 min 的数据,以 1 min 为基本时间粒度,通过线性插值将低频数据采样升至高频时间轴,确保所有变量具有统一的时间戳。异常值检测与缺失值修复采用三级清洗机制。异常值检测基于 3σ 原则结合局部离群因子(LOF)算法。

③ 特征提取

根据相关生化理论,确定各个因素之间的因果关系,除机理层面的因果关系外,还会有不同序列之间实际存在的真实关系。基于层次聚类,对所有采集到的数据进行特征分析和提取,发现以下 5 组指标之间具有相关关系:a. 与风机相关的指标(温度、风量、压力)相互之间具有关联关系;b. 曝气池内末廊道氨氮、进水氨氮、进水总氮、MLSS、各廊道 DO 等指标具有相关关系;c. 总磷和反应池 ORP 具有关联关系,但关联性并不显著;d. 进水 COD 和进水氨氮具有关联关系,关联性显著;e. 进水瞬时流量和内回流量具有关联关系。由于不同数据的量纲和中心值不尽相同,绘制每簇的原始数据不够直观,因此对数据进行了归一化处理,提取上述分组且归一化后序列的均值,可得 5 种序列模式,作为系统固有的内在模式。

④ 特征选择

基于偏自相关性分析、互相关性分析和格兰杰因果关系检验,对上述数据和 DO 之间的互相关性和因果关系进行计算和检验。选取互相关性显著或格兰杰因果关系显著的序列作为特征序列。

⑤ 特征融合

基于一种复合时间序列分析算法(模型缩写为 regSVARIMA-GARCH)建立多维时间序列模型,并基于支持向量机回归(SVR)算法和提升(boost)算法,提高预测精度。特征融合过程如图 3 所示。

特征融合步骤:a. 建立时序预测模型;b. 以进水和过程仪表序列及 5 种固有序列模式作为内生变量;c. 以风机风量和阀门开度作为外生变量;d. 基于傅里叶变换检测数据的多维周期性;e. 结合

GARCH 算法获取条件方差,拟合序列振荡的聚簇性。

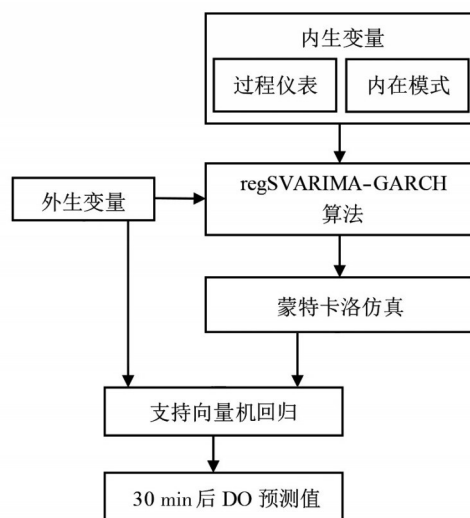


图 3 智能曝气系统特征融合过程示意

Fig.3 Feature fusion process schematic diagram of intelligent aeration system

时序预测模型的核心是耦合矩阵“既蕴含了序列间的当期耦合关系,又蕴含了滞后叠加关系”。建模时同时考虑众多内生变量与外生变量在多时间步上的相互影响,进而准确刻画系统动态。基于蒙特卡洛方法,通过施加不同的随机扰动、风机风量、阀门开度等,进行 10 万次仿真,获得未来不同风量和阀门开度下,DO 的变化趋势和置信区间。基于样本中真实的未来 30 min 的 DO、上一步蒙特卡洛仿真的结果以及外生变量数据,建立 SVR 模型。

⑥ 性能测试

建模和测试数据的划分如下:使用一年前至当前 15 d 之前的数据进行建模;使用最近 15 d 的数据进行测试。计算模型在测试数据上的误差平方和(SSE)和均方误差(MSE),如误差较大,则需对算法生产中的各个环节进行调整和优化。

1.3.2 模型的运行方式

系统在运行中实时采集所需的数据,并依次执行相应的数据清洗、数据预处理、特征提取、特征选择等步骤,获取特征数据集。

智能曝气系统建模过程如图 4 所示。将上述特征数据集和未来不同风量和阀门开度组合代入预先训练得到的时序预测模型,并进行蒙特卡洛仿真,模拟未来不同风量和阀门开度组合下的 DO 变化趋势和置信区间。

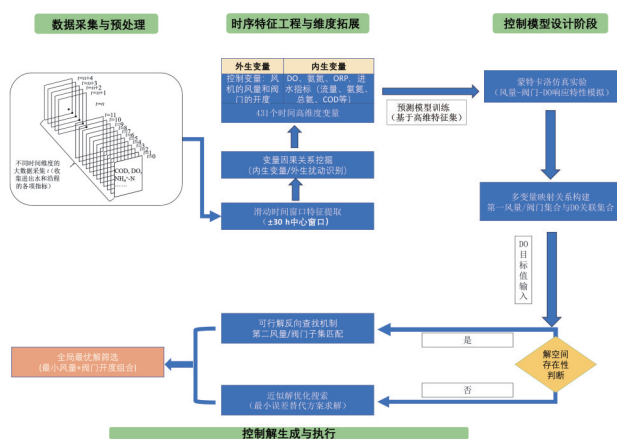


图4 智能曝气系统建模过程框架

Fig.4 Framework diagram of the modeling process of intelligent aeration system

将上面得到的结果再次代入SVR模型,生成包含多组“风量-阀门-DO”组合的仿真输出。

根据仿真结果建立3个具有映射关系的候选集合:风量候选集(第1风量集合)、阀门开度候选集(第1阀门集合)与DO集合。此映射结构支持后续控制策略中对目标DO的反向查找。当需要实现某一预设的目标DO时,系统会根据仿真数据确定包含该目标浓度区间的DO候选子集,并通过映射关系反推得到相应的风量候选子集(第2风量集合)和阀门开度候选子集(第2阀门集合)。为达到节能目标,在可行解中选取最小风量方案作为最优调控输出,并据此通过映射关系确定4个曝气单元的最优阀门开度组合。若目标DO值在仿真中无对应解,系统将进入“近似解模式”,即从第1风量集合与第1阀门集合中选取能够逼近目标DO值且误差最小的解,作为替代控制方案。最终,系统将计算所得的风量和阀门开度控制信号发送至执行单元,完成风机与曝气阀门调节,实现闭环控制。

2 结果与讨论

2.1 生物反应池好氧区末廊道氨氮

出水氨氮仪表放置在生物反应池好氧区末廊道,对该处的氨氮数据进行统计分析更有利于系统的稳定。图5(a)、(b)分别为2024年5月1日—10月1日(智能曝气系统上线前)和2024年10月1日—2025年3月1日(智能曝气系统上线后)的生物反应池好氧区末廊道氨氮变化。对手动运行过程数据进行分析,发现提高曝气量后,DO升高到目标值存在30 min以上的时间延迟,因此通常在手动控制过

程中将1 mg/L作为生物反应池好氧区末廊道氨氮的内控值,当该值超过1 mg/L后再进行调控容易导致总出水氨氮超标(5 mg/L)。据统计,智能曝气系统上线前生物反应池好氧区末廊道氨氮<1 mg/L的比例为84.2%,上线后该值提高至98.2%。主要原因是系统可以提前预判出水氨氮超标的风险,从而提前作出曝气量的调整。此外,智能曝气系统上线前氨氮平均值为0.47 mg/L,上线后氨氮平均值为0.18 mg/L,说明该系统对生物反应池好氧区末廊道氨氮的控制优于人工控制,可确保出水氨氮达标。智能曝气系统上线后,氨氮标准差从上线前的0.699 mg/L降至0.256 mg/L,波动幅度降低63.4%,系统控制的稳定性进一步提高。

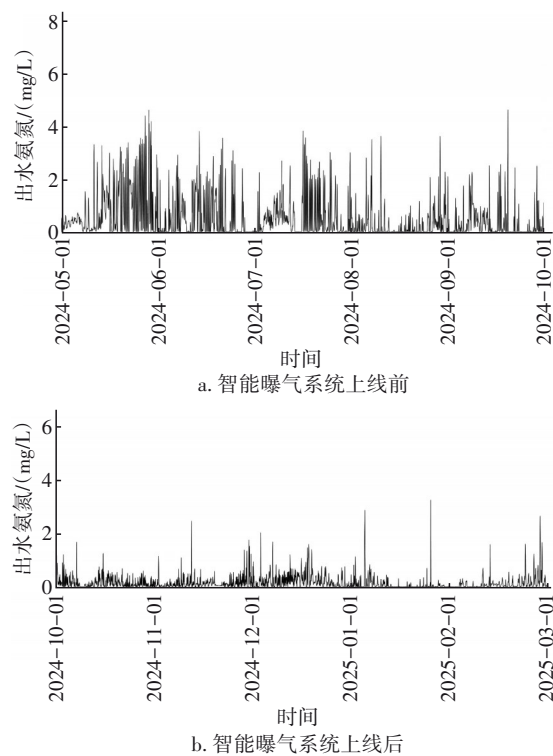


图5 智能曝气系统上线前后生物反应池好氧区末廊道氨氮

Fig.5 Ammonia nitrogen of the last corridor in the aerobic zone of the biological reaction tank before and after the operation of intelligent aeration system

2.2 生物反应池好氧区末廊道DO

图6(a)、(b)分别为2024年5月1日—10月1日(智能曝气系统上线前)和2024年10月1日—2025年3月1日(智能曝气系统上线后)的生物反应池好氧区末廊道DO变化。DO目标值会根据进水水质、水量和出水氨氮进行预测并自动生成。智能曝气

系统上线前生物反应池好氧区末廊道DO实际值与目标值偏差 ± 0.3 mg/L以内的数值占50.9%,偏差为 ± 0.5 mg/L的数值占64.5%。根据图6(b)智能曝气系统上线后的数据(已删除该阶段由于设备问题切换手动控制的数据),生物反应池好氧区末廊道DO实际值与目标值偏差 ± 0.3 mg/L以内的数值占83.3%,偏差 ± 0.5 mg/L的数值占93.3%。对比图6(a)、(b)可知,与手动控制相比,智能控制可使生物反应池好氧区末廊道DO更接近目标值。智能曝气系统上线后实现精确控制的主要原因:软硬件合理搭配,较高的控制频率(5 min可输出一风量及阀门开度)和算法模型引入时间维度。

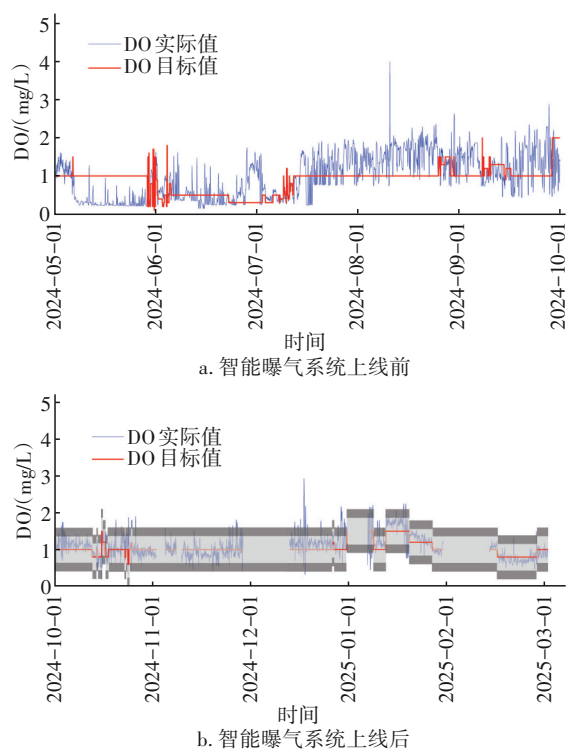


图6 智能曝气系统上线前后生物反应池好氧区末廊道DO
Fig.6 DO of the last corridor in the aerobic zone of the biological reaction tank before and after the operation of intelligent aeration system

2.3 经济效益

本项目对于风机风量和阀门开度的精准调控,减少了曝气量的浪费,从而减少了电耗。由于外部原因,2024年8月—10月污泥无法正常排出,曝气量偏高,无法准确反映电耗的变化规律,因此在计算电耗过程中不作考虑。核算电耗参照《城镇污水处理厂运营质量评价标准》(CJJ/T 228—2014)。

根据该污水处理厂最新的数据(见图7),2024

年11月1日—2025年3月1日的曝气电耗平均值为 $0.39 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$,而2024年5月—7月的曝气电耗平均值为 $0.47 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$,相较于上线前可节约电耗17%。经分析出水氨氮、DO目标值与标准值的偏差幅度和曝气电耗的相关关系可知,曝气电耗与氨氮呈显著负相关,与DO偏差幅度呈显著正相关,验证了水质精准控制是电耗降低的核心原因,而非单纯减少曝气量。2024年该生产线实际处理水量近 $3 \text{万 m}^3/\text{d}$,曝气总耗电量为130万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,电价以 $0.7 \text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计,则仅该试验条线曝气所需电费为91万元,若采用智能曝气系统,每年可节约15.4万元。若将其应用在 $20 \text{万 m}^3/\text{d}$ 以上级别的污水处理厂,每年节约电费可达100万元。除具有良好的经济效益外,智能曝气系统不仅可实现氨氮和碳排放量的进一步削减,更有利于COD、总氮、总磷等污染物指标的稳定达标排放。

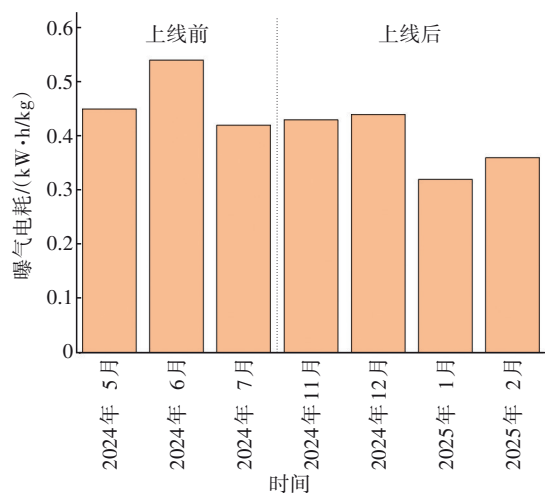


图7 智能曝气系统上线前后的电耗对比

Fig.7 Electricity consumption of the intelligent aeration system before and after the operation of intelligent aeration system

3 结论

本项目成功开发了1套基于大数据模型的智能曝气系统,建立了基于时间维度多变量指标与曝气量的关系,从样本构造、时序预测、变量提升、时序仿真和求解优化等5个方面构造可靠的算法架构。通过对风机风量和阀门开度的精准调控实现极小的实际DO和目标浓度的偏差,减少了曝气量的浪费,从而减少了曝气电耗,并在污水处理厂生产线上实现工程应用。

① 智能曝气系统上线后,生物反应池好氧区

末廊道氨氮控制在目标值(1 mg/L)以下的比例高达98.2%(优于上线前的84.2%)。

② DO目标值会根据进水水质、水量和出水氨氮进行预测并自动生成。智能曝气系统上线后生物反应池好氧区末廊道DO实际值与目标值偏差在 ± 0.3 mg/L以内的数值占83.3%(优于上线前的50.9%),偏差为 ± 0.5 mg/L的数值占93.3%(优于上线前的64.5%)。

③ 本研究对于风机风量和阀门开度的精准调控,减少了曝气量的浪费,从而减少了曝气电耗。经核算,智能曝气系统上线后可节约17%的生物反应池曝气系统电耗。

参考文献:

- [1] 李学瑞,贾建伟,康鹏亮,等. 多段多级AO工艺碳排放分析及设计优化探讨[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 182-187, 195.
- LI X R, JIA J W, KANG P L, et al. Analysis of carbon emission and optimized design of multi-stage and multi-level AO process [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 182-187, 195 (in Chinese).
- [2] 王拓,严冰. 多级A/O工艺协同精确控制系统用于低C/N进水污水厂[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 65-69.
- WANG T, YAN B. Application of multi-stage A/O process collaborative precise control system in wastewater treatment plant with low C/N influent [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 65-69 (in Chinese).
- [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.
- SHI H C, WANG Q W, ZHANG M K, et al. Precise aeration for the energy conservation and carbon reduction of wastewater treatment plant: optimization algorithm

and control strategy [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(20): 1-6 (in Chinese).

- [4] 张翔宇,范业弘,朱晗彬,等. 城镇中小规模污水处理厂碳排放分析及碳削减对策[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 107-117.
- ZHANG X Y, FAN Y H, ZHU H B, et al. Carbon emission analysis and carbon reduction strategy of small and medium-scale municipal wastewater treatment plants in cities and towns [J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 107-117 (in Chinese).
- [5] 黄继会,马汐帆,丁春,等. 智能优化控制系统在市政污水处理厂溶解氧控制中的应用[J]. 给水排水, 2025, 51(4): 50-54.
- HUANG J H, MA X F, DING C, et al. The application of bioprocess intelligent optimization control systems in dissolved oxygen control at municipal wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(4): 50-54 (in Chinese).
- [6] 马汐帆,黄继会,丁春,等. 市政污水处理厂智能控制系统设计及应用效果[J]. 中国给水排水, 2025, 41(8): 91-96.
- MA X F, HUANG J H, DING C, et al. Design and application effect of intelligent control systems in a municipal WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(8): 91-96 (in Chinese).
- [7] WANG T B, WANG C Y, XU Z H, et al. Precise control of water and wastewater treatment systems with non-ideal heterogeneous mixing models and high-fidelity sensing [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430(3): 132819.

作者简介:刘彦旭(1995—),男,黑龙江大庆人,博士,中级工程师,研究方向为污水生物处理。

E-mail:liuyanxu_uvic@163.com

收稿日期:2025-09-09

修回日期:2026-03-10

(编辑:衣春敏)