

吴歆悦, 施冀, 周明亮, 等. AAO 工艺传统节能减排与全流程自动化控制技术应用[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 104-116.

Wu X Y, Shi J, Zhou M L, et al. Application of traditional energy-saving and emission reduction and full-process automatic control technologies of AAO process[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 104-116.

## AAO 工艺传统节能减排与全流程自动化控制技术应用

吴歆悦\*, 施冀, 周明亮, 薛若雨

(北控水务<中国>投资有限公司, 四川成都 610000)

**摘要** 【目的】为实现“碳达峰碳中和”目标,亟需打破污水厂传统“以能耗能”的运行模式。【方法】通过对某公司下属 56 座市政污水处理厂运营数据的深入分析,发现间接碳排放中的高耗能环节为生化曝气(能耗平均值为  $0.107 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ )、进水提升(能耗平均值为  $0.049 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ )和厌氧缺氧区搅拌(能耗平均值为  $0.055 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ )。物耗主要来自除磷药剂(以 10% 质量分数  $\text{Al}_2\text{O}_3$  计,平均质量浓度为  $54.0 \text{ mg}/\text{L}$ )和阳离子聚丙烯酰胺(PAM)(以吨干污泥药耗计,平均值为  $2.49 \text{ kg}$ )。再以处理规模、进水类型、工艺类型及排放标准相同或相似为条件,筛选出 8 座市政污水厂并进一步分析,进水提升输送能耗为  $0.03\sim 0.05 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}\cdot\text{m}^3)$ ,搅拌混合电耗为  $0.01\sim 0.05 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,生化池曝气能耗为  $0.04\sim 0.14 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。【结果】传统节能技术,如设备适配性重置、间歇或变频运行、连续流间歇曝气或精确曝气、精确加药、序批式排泥等,在特定工艺环节具有较为显著的减排效果。在此基础上融合数字化技术实现全流程自动化控制,包括预测状态并进行调控的前反馈,实时监测及时纠偏的后反馈,通过混合模型优化工艺参数,借助工业自动化标准通信协议(OPC)传输至可编程逻辑控制器(PLC)再执行等步骤,不仅减少了现场人工重复作业,还进一步提升节能减排效果。【结论】以临沂某污水厂为例,实施全流程自控控制后,吨水曝气电耗下降 4.6%,总电单位能耗下降 9.7%,除磷药剂用量减少 10.6%,整体碳排放强度同比减少 18.6%。

**关键词** 污水厂 碳排放 厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺 传统节能减排技术 全流程自动控制技术

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)04-0104-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.012

## Application of Traditional Energy-Saving and Emission Reduction and Full-Process Automatic Control Technologies of AAO Process

Wu Xinyue\*, Shi Ji, Zhou Mingliang, Xue Ruoyu

(Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

**Abstract** [Objective] To achieve the goals of "carbon peak and carbon neutrality", there is an urgent need to break away from the traditional energy-intensive operational model of wastewater treatment plant. [Methods] Through in-depth analysis of operational data from 56 municipal wastewater treatment plants under a company, high energy-consuming processes in indirect carbon emissions were identified, including biochemical aeration (average energy consumption was  $0.107 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ), influent lifting (average energy consumption was  $0.049 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ), and anaerobic/anoxic zone mixing (average energy consumption was  $0.055 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ). Material consumption primarily stems from phosphorus removal chemicals (average mass concentration was  $54.0 \text{ mg}/\text{L}$ , based on a 10% mass fraction of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and cationic polyacrylamide (PAM) (average was  $2.49 \text{ kg}$ , calculated per ton of dry sludge). Further analysis was conducted on 8 municipal wastewater treatment plants with similar treatment scales, influent types, process types, and discharge standards. The energy consumption for lifting influent of transport ranged from  $0.03 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}\cdot\text{m}^3)$  to  $0.05 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}\cdot\text{m}^3)$ , mixing energy consumption of water ranged from  $0.01 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  to  $0.05 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ , and aeration energy consumption in biochemical tanks ranged from  $0.04 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  to  $0.14 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ . [Results] Traditional energy-saving technologies, such as equipment adaptability adjustments, intermittent or variable frequency operation, continuous flow intermittent aeration or precise aeration, precise dosing, and sequential batch sludge discharge, had significant emission reduction effects in specific process stages. By integrating digital technologies to achieve full-process automated control—including predictive state regulation (feedforward), real-

[收稿日期] 2025-01-02

[通信作者] 吴歆悦(1989—),男,主要从事市政水厂运行管理等工作,E-mail:arher-w@qq.com。

time monitoring and timely correction (feedback), optimizing process parameters through hybrid models, and transmitting data via OLE for process control (OPC) to programmable logic controller (PLC) for execution—not only reduced repetitive manual tasks on-site but also further enhanced energy-saving and emission reduction effects. [ **Conclusion** ] For example, at a wastewater treatment plant in Linyi, after implementing full-process automated control, the aeration energy consumption per ton of water decreases by 4.6%, total energy consumption decreases by 9.7%, phosphorus removal chemical usage decreases by 10.6%, and overall carbon emission intensity decreases by 18.6% year-on-year.

**Keywords** wastewater treatment plant carbon emission anaerobic-anoxic-oxic (AAO) process traditional energy-saving and emission reduction technology full-process automatic control technology

我国在 2020 年 9 月第七十五届联合国大会上提出应对全球气候变化的重要承诺,即“双碳”目标——力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和。自改革开放以来,我国经历了快速工业化和城镇化进程,目前已处于城镇化发展的中后期阶段,城镇人口占比从 1990 年的 26.41% 增长到 2022 年的 64.72%,城镇化率每增加 1%,相应碳排放增加 1.64%<sup>[1-3]</sup>,城镇污水处理量从 2011 年的 402.9 亿 t 增加到 2020 年的 791.0 亿 t<sup>[4]</sup>,同时,污水处理属于能源密集型行业,污水厂也是目前碳排放量最大的基础公共设施之一,其碳排放量占全社会总排放量的 1%~2%<sup>[5-6]</sup>。污水处理规模、负荷率、工艺选择、出水标准及进水化学需氧量(COD)都会对能耗产生影响<sup>[7]</sup>,随着地理式污水厂日益增多及各地方排放标准不断提高,污水厂能耗和药耗均呈上升趋势,面对复杂水质冲击和更高的排放标准,部分污水厂较为依赖大量投药或过度曝气来确保达标。污水厂碳排放分为直接碳排放和间接碳排放,张海亚等<sup>[8]</sup>对典型污水处理厂碳排放核算,间接碳排放量可占总碳排放量的 57%~74%,其中电耗为 43%~68%,药耗为 6%~28%。但实际运营中进水超标,水力负荷过低,工业废水偷排进入,工艺运行方式变化等问题,均不同程度影响碳排放的评估与控制,此外行业内部缺少运营能耗管理评价标准,也导致节能减排成果难以在行业内衡量<sup>[9]</sup>。

## 1 研究对象和方法

### 1.1 研究对象

#### 1.1.1 污水厂概况

调研某公司下属 56 座市政污水厂,分布在四川、重庆、贵州、云南、宁夏、新疆、西藏等多个省、自治区、直辖市,设计处理规模从 0.2 万 m<sup>3</sup>/d 到 30 万 m<sup>3</sup>/d 不等,以中小型污水厂居多;二级生化工艺包含厌氧-缺氧-好氧(AAO)、循环式活性污泥法

(CAST)、多级缺氧-好氧(AO)工艺,AAO 占主导;三级工艺多种多样,以高效沉淀池为主;脱水工艺以带式压滤为主;排放标准几乎全部等于或高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,基本概况如图 1 和图 2 所示。

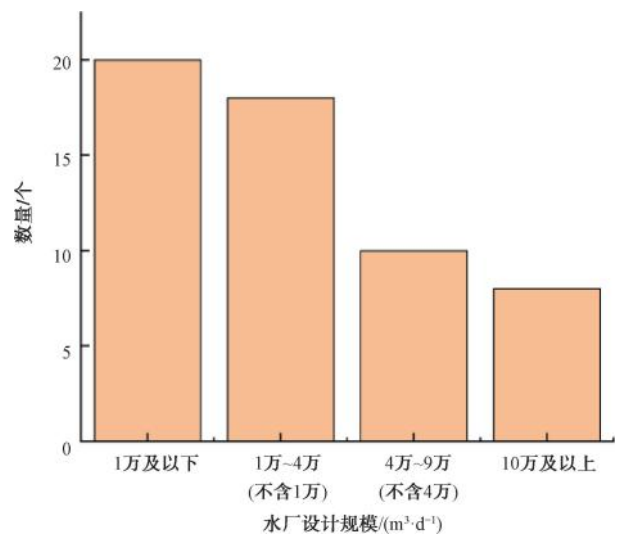


图 1 运营规模占比分布

Fig. 1 Proportion Distribution of Operation Capacity

#### 1.1.2 碳排放概况

间接碳排放包括电力、热力等能耗碳排放和化学药剂等物耗碳排放(碳源、除磷药剂、脱水药剂、消毒药剂等)<sup>[10]</sup>。调研发现,电耗占比最高的环节为生化曝气、进水提升和厌氧缺氧区搅拌,而药剂使用时产生的碳排放占比最高的为除磷药剂(以 10% 质量分数 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 计,平均质量浓度为 54.0 mg/L)和阳离子聚丙烯酰胺(PAM)(以吨干污泥药耗计,平均值为 2.49 kg),主要排放单元和占比如图 3 所示。调研发现,56 座污水厂曝气、提升和搅拌能耗平均值分别达到 0.107、0.049 kW·h/m<sup>3</sup> 和 0.055 kW·h/m<sup>3</sup>。

不同处理规模污水厂的数据差异最大,且部分

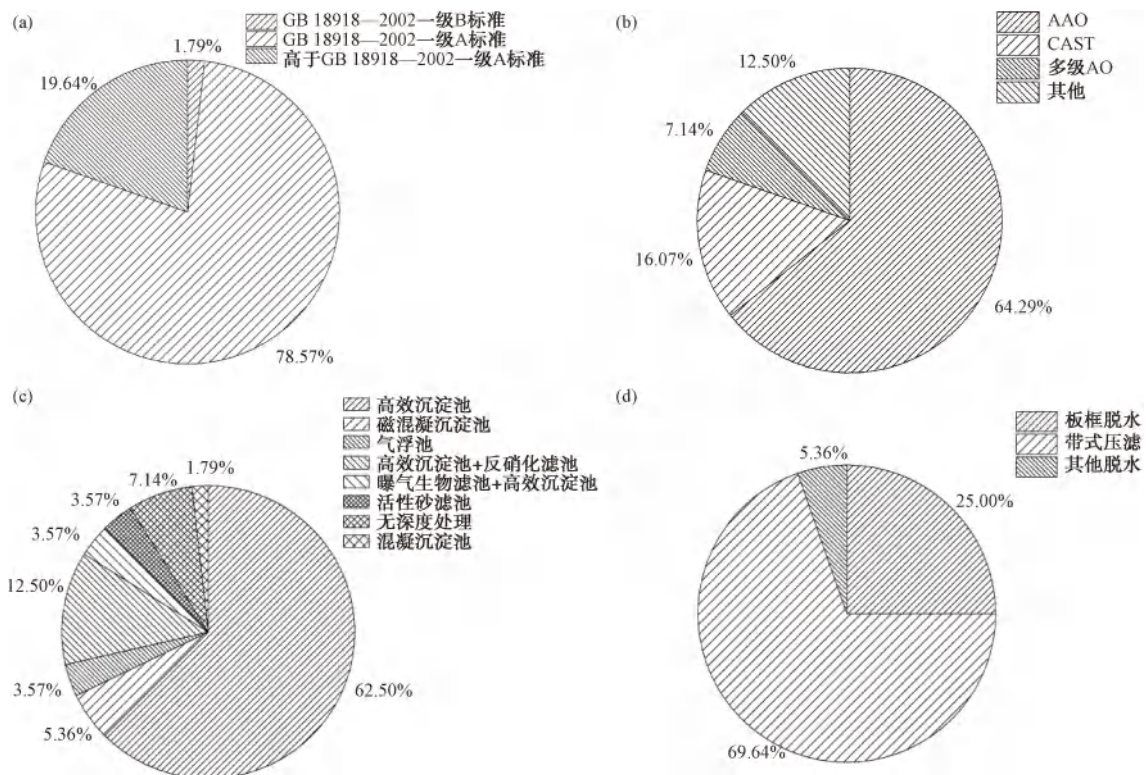


图 2 出水标准和工艺类型占比

Fig. 2 Proportion of Effluent Standards and Process Type

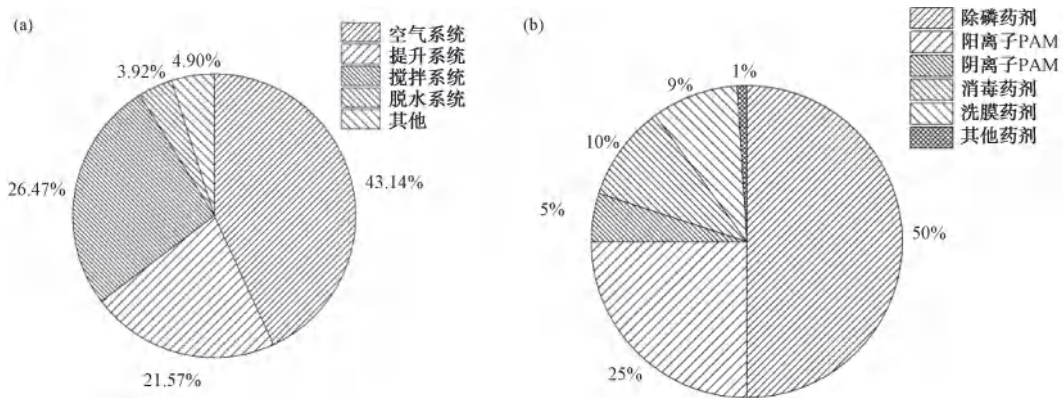


图 3 市政污水处理厂能耗药耗占比

Fig. 3 Energy and Chemical Consumption Proportions in Municipal WWTPs

污水厂未满载运行,故以实际处理水量划分吨水电耗统计数据,如表 1 所示。分析认为小规模污水厂进水突发异常概率更高,规模小不耐冲击,同时设备工况总在频繁变化,综合导致三大能耗系统吨水电单耗远高于大中型污水厂。

同样以实际水量划分药剂单耗,如表 2 所示。分析认为,小规模污水厂除耐冲击、负荷能力偏低外,厌氧缺氧区停留时间不足,更依赖化学药剂除磷,

但脱水比药耗受处理规模影响较小。

### 1.2 研究方法

由于城市污水管网建设滞后,建设规模和进水水质难以合理确定,投入运行后实际值与设计值往往相差较大<sup>[11]</sup>,部分污水厂虽已提标改造,但受限于外部因素和人员能力,改造效果不及预期,仍以“高能耗、高药耗”换取“高标准水质”<sup>[12]</sup>。本次调研的 56 座污水厂由于水质特点、运营规模及处理工

表 1 不同处理规模能耗系统电耗  
Tab. 1 Power Consumption of Different Treatment Capacities

| 项目                         | 生化曝气电耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> ) | 进水提升电耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> ) | 厌氧搅拌电耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> ) |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 万 m <sup>3</sup> /d 及以下  | 0.128                          | 0.062                          | 0.100                          |
| 1 万~4 万 m <sup>3</sup> /d  | 0.100                          | 0.048                          | 0.039                          |
| 4 万~10 万 m <sup>3</sup> /d | 0.094                          | 0.038                          | 0.027                          |
| 平均值                        | 0.107                          | 0.049                          | 0.055                          |

表 2 不同处理规模主要药剂单耗  
Tab. 2 Water Treatment Major Chemical Consumption across Different Processing Scales

| 项目                         | 除磷药剂/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 阳离子 PAM/[kg·(t DS) <sup>-1</sup> ] |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1 万 m <sup>3</sup> /d 及以下  | 78.3                       | 2.72                               |
| 1 万~4 万 m <sup>3</sup> /d  | 51.3                       | 2.36                               |
| 4 万~10 万 m <sup>3</sup> /d | 31.1                       | 2.40                               |
| 平均值                        | 54.0                       | 2.49                               |

注:DS 为绝干污泥。

表 3 重点分析项目清单  
Tab. 3 List of Key Analysis Items

| 污水厂编号 | 设计规模/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 水力负荷率  | 生化工艺  | 深度工艺  | 脱水工艺 | 执行排放标准                                 |
|-------|---|--------|-------|-------|------|--|
| 厂 1   | 5.0 万                                   | 100.7% | AAO   | 高效沉淀  | 带式压滤 | 《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)   |
| 厂 2   | 5.0 万                                   | 87.0%  | AAO   | 高效沉淀  | 带式压滤 | 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准 |
| 厂 3   | 10.0 万                                  | 85.6%  | 多级 AO | 磁混凝沉淀 | 板框脱水 | 《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)   |
| 厂 4   | 10.0 万                                  | 93.1%  | AAO   | 磁混凝沉淀 | 离心脱水 | 《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)   |
| 厂 5   | 10.0 万                                  | 91.4%  | AAO   | 高效沉淀  | 带式压滤 | 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准 |
| 厂 6   | 11.0 万                                  | 96.2%  | AAO   | 高效沉淀  | 板框脱水 | 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准 |
| 厂 7   | 5.5 万                                   | 82.7%  | AAO   | 高效沉淀  | 带式压滤 | 《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)   |
| 厂 8   | 10.0 万                                  | 75.1%  | AAO   | 高效沉淀  | 带式压滤 | 《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)   |

电耗来衡量不同扬程、提升高度、输送流量的提升泵能耗利用水平,且设计院为保障污水厂出水稳定达标,提升泵和管路会按最大流量选择,用户和供应商在此基础上还会增加安全裕量,上述原因导致传统进水提升,即使以恒流量或恒液位模式运行,依然可能因实际扬程或流量的偏差而低效运行。考虑到上游管网具备一定调蓄能力,虽然低液位运行效率更高,但高液位运行更节能,各污水厂以大小泵搭配或变频器运行适应水量变化,并将泵后多管并联改为单泵单管出水,可以提高效率。重点调研的 8 座污水厂提升系统电耗普遍低于 56 座污水厂调研平均值(0.049 kW·h/m<sup>3</sup>),大部分污水厂提升泵运行效

率各不相同,一定程度上干扰了统计数据维度一致性,故选择 8 座污水厂重点分析,筛选条件包括进水水力负荷为 70%~120%;进水工业水占比低于 30%;二级生化系统连续进水;深度处理使用混凝沉淀;排放标准等于或高于 GB 18918—2002 一级 A 标准。重点项目基础信息如表 3 所示。

## 2 调研结果和减排措施

### 2.1 进水提升系统

#### 2.1.1 调研结果

根据黄文佳等<sup>[13]</sup>介绍,提升泵通常以吨水每米

率均处于高效运行区间(>60%),进水提升系统输送能耗为 0.003~0.005 kW·h/(m<sup>3</sup>·m),调研数据如表 4 所示。

分析认为上述污水厂多为中等规模,耐冲击且水量调控能力更强,设备也能获得更好的维护保养,因此提升设备普遍维持在较高运行效率区间。

#### 2.1.2 减排案例

自动启停,变频器控制,电容补偿和高液位运行等措施已广泛用于污水厂<sup>[14]</sup>,但选择与实际扬程和水量匹配的设备,才能本质上降低能耗。乌鲁木齐某污水厂将原 2 台提升泵(功率为 55 kW,流量为 1 200 m<sup>3</sup>/h,扬程为 12 m)技改重置为一大一小 2

表 4 进水提升系统能耗

Tab. 4 Energy Consumption of Influent Lifting System

| 污水厂<br>编号 | 进水提升输<br>送系统效率 | 进水提升系统电<br>耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> ) | 进水提升系统输送能耗/<br>[kW·h·(m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ] |
|-----------|----------------|--------------------------------------|--|
| 厂 1       | 65.2%          | 0.04                                 | 0.004  |
| 厂 2       | 55.7%          | 0.04                                 | 0.005  |
| 厂 3       | 87.2%          | 0.02                                 | 0.003  |
| 厂 4       | 71.6%          | 0.07                                 | 0.004  |
| 厂 5       | 69.7%          | 0.02                                 | 0.004  |
| 厂 6       | 60.0%          | 0.04                                 | 0.003  |
| 厂 7       | 67.4%          | 0.03                                 | 0.005  |
| 厂 8       | —              | —                                    | —  |

注:厂 8 采用自重力进水。

台提升泵(大台流量为 1 200 m<sup>3</sup>/h,功率为 40 kW;小台流量为 600 m<sup>3</sup>/h,功率为 15 kW,扬程均为 7~8 m),设备效率从 47%大幅提高至 68%,年节约电费 5.8 万元。贵阳某污水厂将原提升泵(功率为 45 kW,流量为 800 m<sup>3</sup>/h,扬程为 12 m)技改重置为新泵(功率为 30 kW,流量为 800 m<sup>3</sup>/h,扬程为 10 m),电耗从 0.047 kW·h/m<sup>3</sup>降低至 0.024 kW·h/m<sup>3</sup>,年节约电费 3.6 万元。

## 2.2 厌缺氧搅拌系统

### 2.2.1 调研结果

厌缺氧区搅拌设备选型、设备数量,设备布局以及池型和池容直接决定单位容积能耗大小。本次重点调研的 8 座污水厂提升系统电耗均低于 56 座污水厂平均值(0.055 kW·h/m<sup>3</sup>),但大部分污水厂厌缺氧区能耗超过 2~8 W/m<sup>3</sup> 的设计推荐值<sup>[15]</sup>,如表 5 所示。分析认为设计阶段设备选型不当,是导致搅拌系统能耗过高的主要原因,同时技术进步带来搅拌传质效率提高,又凸显老旧设备的高能耗。

### 2.2.2 减排案例

有研究<sup>[16]</sup>指出,用减速电机和永磁电机代替传统异步电机可有效降低能耗,但新型设备例如立轴搅拌器,其对池体形状或安装位置有要求<sup>[17]</sup>,并不一定完全适合存量污水厂改造。加之水力搅拌一定程度上可以代替机械搅拌,故采用间歇运行或降频运行,是一种更简单有效的节能措施,但间歇期间可能导致传质效果下降,需定期检测生化系统出水总磷(TP)和总氮(TN),防止传质效果不佳导致出水超标。黎平某污水厂搅拌设备选型较大(功率为

表 5 厌、缺氧区搅拌系统能耗

Tab. 5 Energy Consumption of Mixing System in Anoxic/Anaerobic Zones

| 污水厂编号 | 厌缺氧区能耗/<br>(W·m <sup>-3</sup> ) | 搅拌混合电耗/<br>(kW·h·m <sup>-3</sup> ) |
|-------|---------------------------------|------------------------------------|
| 厂 1   | 16.24                           | 0.03                               |
| 厂 2   | 21.12                           | 0.05                               |
| 厂 3   | 10.45                           | 0.02                               |
| 厂 4   | 23.75                           | 0.03                               |
| 厂 5   | 1.72                            | 0.03                               |
| 厂 6   | 1.66                            | 0.01                               |
| 厂 7   | 6.60                            | 0.02                               |
| 厂 8   | 14.35                           | 0.04                               |

5.5 kW),能耗高达 14 W/m<sup>3</sup>,对同池多组搅拌器进行间歇运行,单台设备每天只运行 6 h,年节约电费 4.8 万元。成都某污水厂通过安装时间继电器,对单台搅拌器间歇运行(运行 1 h 停 2 h),能耗从 9.6 W/m<sup>3</sup> 降至 4.5 W/m<sup>3</sup>,年节约电费 6.3 万元。

## 2.3 生化系统

### 2.3.1 调研结果

郭泓利等<sup>[18]</sup>研究发现,污水处理厂进水 COD、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)浓度普遍偏低,且更多污水厂存在反硝化碳源不足的问题。崔丹丹等<sup>[19]</sup>提出低进水负荷污水厂即使通过风机变频来避免过度曝气,但设备工况偏离也会导致能源浪费。郑琬琳等<sup>[20]</sup>介绍将连续曝气调整为间歇曝气,不仅活性污泥微生物群落无明显变化,还可节约单位水量处理电耗。20 世纪 90 年代,我国就有学者<sup>[21]</sup>开展连续流间歇曝气研究,并证明其是一种简便易行、低能耗、有较高脱氮能力的工艺,但因风机频繁启停,曝气期污泥易沉降,出水氨氮瞬时超标等问题限制,连续流间歇曝气并未成为一种主流生化处理工艺。本次重点调研污水厂年均进水 COD 质量浓度为 208 mg/L,BOD<sub>5</sub> 质量浓度为 103 mg/L,生化曝气电耗大部分低于 56 座污水厂平均值(0.107 kW·h/m<sup>3</sup>),其中使用间歇曝气的污水厂曝气单位电耗明显更低,如表 6 所示。

分析认为,进水浓度越高,曝气电耗越高,膜片浸没水深越深,曝气电耗越高,生化池水温对曝气电耗影响较小,曝气方式对曝气电耗影响较大。可使用连续流间歇曝气或精确曝气进行优化,前者硬

表 6 生化池曝气系统能耗  
Tab. 6 Energy Consumption of Aeration System of Biochemical Tank

| 污水厂编号 | 年均进水 COD/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 年均进水 BOD <sub>5</sub> /<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 膜片水深/m | 生化池水温/ $^{\circ}\text{C}$ | 实施间歇曝气 | 生化曝气电耗/<br>( $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |
|-------|--|--|--------|---------------------------|--------|---|
| 厂 1   | 186  | 100  | 5.3    | 20                        | 否      | 0.08  |
| 厂 2   | 290  | 139  | 5.1    | 19                        | 否      | 0.09  |
| 厂 3   | 272  | 112  | 7.4    | 21                        | 否      | 0.14  |
| 厂 4   | 254  | 132  | 6.3    | 21                        | 否      | 0.09  |
| 厂 5   | 206  | 109  | 6.0    | 22                        | 否      | 0.09  |
| 厂 6   | 85   | 49   | 6.0    | 18                        | 是      | 0.04  |
| 厂 7   | 138  | 66   | 7.0    | 23                        | 是      | 0.04  |
| 厂 8   | 234  | 117  | 7.0    | 21                        | 是      | 0.06  |

件投入改造较少,但需克服工艺的诸多缺陷,尤其是氨氮瞬时超标,后者使用自动化控制,省时省力,但对硬件需求较高。

### 2.3.2 减排案例

#### (1) 连续流间歇曝气

连续流间歇曝气主要面临风机频繁启停、停曝时污泥沉降以及氨氮瞬时超标等问题,前 2 种可通过选择新型高效设备及探索最优运行工况解决,而针对氨氮瞬时超标的风险则可在生化池末端设计氨氮防穿透区,划定一小范围水域,配置低功率风机连续曝气,既降低能耗又控制出水氨氮标。

昆明某污水厂水力负荷严重不足,日均处理水量仅为  $0.4 \text{ 万 m}^3$ ,改连续曝气为间歇曝气,生化池曝气电耗从  $0.219 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  降低至  $0.101 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,年节约电费 6.2 万元。成都某污水厂由于近年进水浓度降低,也从连续曝气改为间歇曝气,生化池曝气电耗由  $0.04 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  降低至  $0.03 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,年节约电费 17.2 万元。喀什某污水厂通过沿程分析寻找氨氮达标点位,主动调整为间歇曝气,电耗从  $0.180 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  降低至  $0.121 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,年节约电费约 12 万元。

#### (2) 精确曝气

精确曝气同样具有节能减排效果,且自动化控制调控精度更高,反应速度也更快,但硬件配置有一定要求,需要前期较大资金的投入。银川某污水厂<sup>[22]</sup>使用基于活性污泥模型的多目标曝气控制 5 步法,对污水曝气环节进行智能控制,实现精确曝气,以氨氮达标位置、出水水质达标及能耗低为 3 个优化目标,基于历史数据对模型进行校正,根据进水

污染负荷,利用差分进化和自然断点法相结合的方式计算分区溶解氧(DO)和所需气量,然后调整好氧池菱形阀门开度和风机风量,进行分区气量精确控制。

### 2.4 除磷药剂(以 10%质量分数 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 商品药剂计)

#### 2.4.1 调研结果

传统加药方式药耗高浪费大,对加药泵增加变频器,并升级可编程逻辑控制器(PLC)程序采用比例-积分-微分控制(PID)控制可实现精确加药。重点调研污水厂均已上线精确加药装置,除磷药剂投加量大幅低于本次调研 56 座污水厂平均值( $54 \text{ mg/L}$ ),少数污水厂日常生产不投加或只应急投加除磷药剂(例如厂 2、厂 4),但也存在因排放要求需极限除磷项目(例如厂 7、厂 8),如表 7 所示。

#### 2.4.2 减排案例

贵阳某污水厂把传统连续加药方式改为变频投加,以水量反馈分析自动调整加药频率,加药质量浓度从  $43 \text{ mg/L}$  降低到  $30 \text{ mg/L}$  以下,年节约除磷药剂费约 21 万元。银川某污水厂采用预设摩尔比控制除磷药剂投加,根据高效池出水正磷酸盐变化调整除磷药剂投加量,加药质量浓度从  $29 \text{ mg/L}$  降至  $22 \text{ mg/L}$ ,年节约除磷药剂费 19.2 万元。

### 2.5 脱泥能耗和药耗(以阳离子 PAM 计)

#### 2.5.1 调研结果

污泥从储泥池直接进脱水机,不能充分发挥脱水设备产能,但若使用机械浓缩,药剂消耗量又大幅提高,应利用储泥池容积并借助重力浓缩,提高脱水机进泥浓度,实现脱水设备高效运行。重点调研污

表 7 除磷药剂单耗

Tab. 7 Unit Chemical Consumption of Phosphorus Removal

| 污水厂编号 | 二沉池出水 TP/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 出水 TP/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 吨水药耗/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |
|-------|--|---|--|
| 厂 1   | 0.24   | 0.11  | 20.7                                       |
| 厂 2   | 0.39   | 0.19  | 11.2                                       |
| 厂 3   | 0.44   | 0.11  | 30.1                                       |
| 厂 4   | 0.29   | 0.18  | —  |
| 厂 5   | 0.64   | 0.26  | 23.9                                       |
| 厂 6   | 1.01   | 0.26  | 36.9                                       |
| 厂 7   | 0.31   | 0.08  | 30.0                                       |
| 厂 8   | 0.29   | 0.04  | 60.9                                       |

注:厂 7、厂 8 位于四川宜宾,当地政府要求参考昆明市地方标准《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)执行 TP 出水质量浓度为 0.2  $\text{mg}/\text{L}$  排放标准。

水厂药耗普遍低于 56 座污水厂平均值[2.49  $\text{kg}/(\text{t DS})$ ],且使用序批式排泥污水厂吨干泥比能耗和比药耗也更低,如表 8 所示。

### 2.5.2 减排案例

彭州某污水厂采用浮筒滗水器对原储泥池进行改造,将进泥质量浓度从 10 000  $\text{mg}/\text{L}$  提高到 20 000  $\text{mg}/\text{L}$ ,带式脱水机产泥率从 160  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$  提高到 175  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$ ,脱水机比能耗从 65  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$  降低至 60  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。单池序批排泥改造如图 4 所示。成都某污水厂采用自制浮船泵抽排上清液,并利用脱水滤液加速污泥沉降,可将脱水机进泥质量浓度维持在 35 000  $\text{mg}/\text{L}$  以上,药耗为 2.75  $\text{kg}/(\text{t DS})$ ,能耗为 42.32  $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{t DS})$ 。宜宾某污水厂储泥池有效容积仅为 28.8  $\text{m}^3$ ,遂将闲置的水解酸化池改

表 8 脱泥比能耗和比药耗

Tab. 8 Specific Energy Consumption and Specific Chemical Consumption of Sludge Dewatering

| 污水厂编号 | 生化池污泥/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 序批排泥 | 脱水机进泥/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 比能耗/<br>( $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ ) | 药耗/<br>( $\text{kg}\cdot(\text{t DS})^{-1}$ ) |
|-------|---|------|---|--|---|
| 厂 1   | 5 286                                       | 是    | 18 029                                      | 53.93  | 2.77  |
| 厂 2   | 7 847                                       | 否    | 16 303                                      | 33.09  | 1.62  |
| 厂 3   | 4 830                                       | 否    | 10 435                                      | 104.57   | 4.73  |
| 厂 4   | 4 768                                       | 否    | 11 265                                      | 138.57   | 5.71  |
| 厂 5   | 5 540                                       | 是    | 16 909                                      | 43.80  | 1.99  |
| 厂 6   | 3 350                                       | 是    | 18 822                                      | 38.61  | 1.64  |
| 厂 7   | 5 277                                       | 是    | 30 715                                      | 38.08  | 2.19  |
| 厂 8   | 4 925                                       | 是    | 20 892                                      | 49.49  | 1.29  |

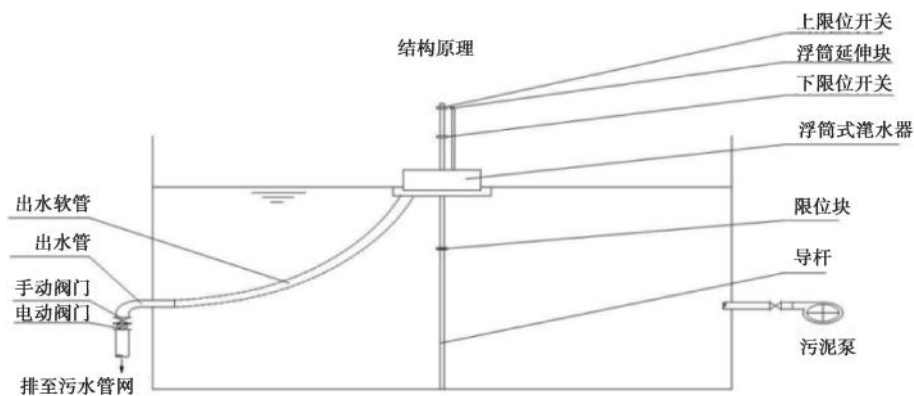


图 4 序批式浓缩结构原理

Fig. 4 Principle of Sequential Batch Thickening Structure

造为储泥池进行序批式排泥,脱水机进泥质量浓度从 10 000  $\text{mg}/\text{L}$  提高至 25 000  $\text{mg}/\text{L}$ ,药耗从 3.7  $\text{kg}/(\text{t DS})$  降低至 2.7  $\text{kg}/(\text{t DS})$ ,年节约脱水药剂费 4.38 万元。

## 3 全流程自动化控制

传统节能减排技术多侧重硬件改造或人工调控,虽使用灵活且投资较少,但使用局限性也较为明显。一方面,针对特定工艺段,难以实现全流程优化

控制;另一方面,调控时也容易受到操作误差和调控滞后影响。随着智慧水务技术蓬勃发展,自控、程控技术在生产管理系统中的应用日益广泛,全流程自动化控制逐步成为现实,不仅能有效降低污水厂整体能耗,更是数字化运营的必然趋势。污水智慧运营的核心在于将基于数字化技术的分析决策与基于智能化技术的控制执行相结合,数字化技术的应用使污水处理过程中的数据感知、传输、分析与决策成为可能,为精准调控提供了有力支撑;而智能化控制技术则在减少分析错误、提高决策准确性方面展现出显著优势,相较于传统控制方法,其能够更高效地实现污水处理的精细化管理,推动污水处理行业向智能化、高效化方向发展。

### 3.1 模型介绍

某公司依托自主开发的 BEThink 模拟软件,通过精准调控工艺参数,提升运行决策的科学性和精准度。建立全流程工艺参数优化混合模型:在保证机理模型工艺出水达标及直接运行成本(药耗、电耗)最低条件下,精确计算并输出最优工艺参数值。

#### 3.1.1 运行成本模型

污水运行成本主要考虑电耗、药耗、污泥脱水和运输成本。电耗又包括曝气能耗和泵送能耗,泵送能耗主要指进水泵、内回流泵、外回流泵、排泥泵所产生的能耗;药耗包含碳源、化学除磷药剂。成本以式(1)计算。

$$O_{Cl} = E_C + D_C + S_C \quad (1)$$

其中: $O_{Cl}$ ——污水运行成本,元·d/m<sup>3</sup>;

$E_C$ ——电耗,元·d/m<sup>3</sup>;

$D_C$ ——药耗,元·d/m<sup>3</sup>;

$S_C$ ——污水脱水和运输成本,元·d/m<sup>3</sup>。

用电设备的瞬时功率能够从机理模型中直接获取,电耗成本以式(2)计算。

$$E_C = (W_a + W_p) \times y_e \times 24 / Q \quad (2)$$

其中: $W_a$ ——鼓风机的瞬时功率,kW;

$W_p$ ——进水泵、内外回流泵、排泥泵瞬时功率之和,kW;

$Q$ ——处理污水量,m<sup>3</sup>/d;

$y_e$ ——污水处理厂电费,元/(kW·h)。

药耗成本以式(3)计算。

$$D_C = Q_c y_c + Q_p y_p \quad (3)$$

其中: $Q_c$ ——碳源投加量,kg/m<sup>3</sup>;

$y_c$ ——碳源药剂单价,元/kg;

$Q_p$ ——除磷药剂投加量,kg/m<sup>3</sup>;

$y_p$ ——除磷药剂单价,元/kg。

因模型对污泥脱水成本计算有偏差,污泥脱水和运输成本在本模型中单独计算,污泥脱水和运输成本以式(4)计算。

$$S_C = \frac{Q_{was} M_{MLSS} \times [(y_{pam} + f y_e) \times (1-p) + y_{tran}]}{(1-p) \times 10^6 \times Q} \quad (4)$$

其中: $Q_{was}$ ——二沉池排泥流量,m<sup>3</sup>/d;

$M_{MLSS}$ ——回流污泥质量浓度,mg/L;

$y_{pam}$ ——PAM 阳离子投加费用,元/(t DS);

$f$ ——每吨绝干污泥脱水所消耗电量,kW·h/(t DS);

$p$ ——污泥含水率;

$y_{tran}$ ——污泥外运费用,元/(t DS)。

在实际应用过程中将需要控制的变量最大值加载到活性污泥模型中,得到以上电设备、碳源投加量以及污泥脱水和运输成本的最大值,以式(5)计算。

$$O_{Cl-max} = E_{C-max} + D_{C-max} + S_{C-max} \quad (5)$$

其中: $O_{Cl-max}$ ——污水运行成本最大值,元·d/m<sup>3</sup>;

$E_{C-max}$ ——电耗最大值,元·d/m<sup>3</sup>;

$D_{C-max}$ ——药耗最大值,元·d/m<sup>3</sup>;

$S_{C-max}$ ——污水脱水和运输成本最大值,元·d/m<sup>3</sup>。

为了便于综合其他目标奖励,将各个目标归一化到单位区间,对运行成本而言,归一化后的奖励值,以式(6)计算。

$$O_{Cl-reward} = 1 - \frac{O_{Cl}}{O_{Cl-max}} \quad (6)$$

其中: $O_{Cl-reward}$ ——归一化后的奖励值。

#### 3.1.2 出水水质模型

出水水质奖励值以式(7)计算。

$$E_{QI-reward} = \sum 2 \left( \frac{O}{O_b} + \frac{O_b}{O} \right)^{-1} \quad (7)$$

其中: $E_{QI-reward}$ ——出水水质奖励值;

$O$  ——COD、TN、TP、氨氮、SS 出水质量浓度,mg/L;

$O_b$  ——COD、TN、TP、氨氮、SS 的出水内控质量浓度,mg/L。

### 3.1.3 总体优化目标

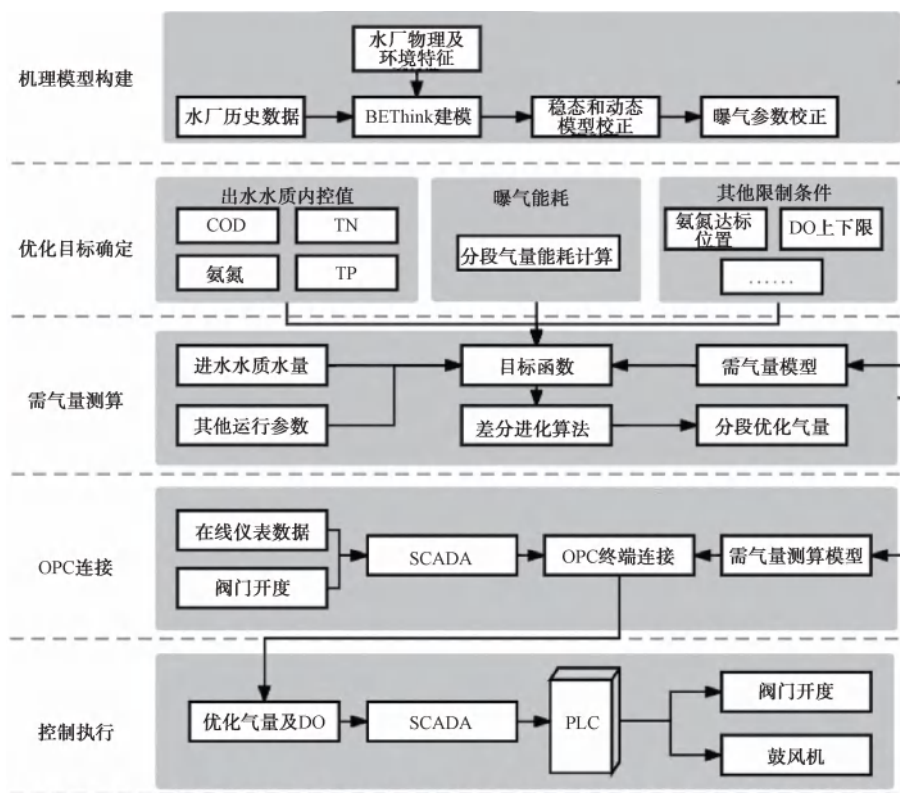
考虑总体目标与运行状态变量之间的动态关系,将以上各部分综合考虑得到总的奖励值以式(8)计算。

$$R = O_{Cl-reward} + E_{Ql-reward} \quad (8)$$

其中: $R$ ——总的奖励值。

式(1)~式(8)为理论基础,开发一套针对 AAO

及其衍生工艺的智能控制逻辑。该系统融合了前、后反馈策略,并构建工艺模拟平台。前反馈控制根据来水水质、水量等关键指标预测系统状态,并提前实施调控措施;后反馈则实时监测系统状态,一旦发现偏离预定目标,立即采取纠偏措施(例如调节曝气量),确保整个处理流程的稳定性和高效性。最终经过优化的参数,通过工业自动化标准通信协议(OPC)协议实时传输至智能控制系统中的 PLC 执行器,与内置智能控制算法深度融合后生成最终指令,从而实现对整个污水处理过程的精准、高效管理。以曝气控制为例,控制逻辑如图 5 所示。



注:SCADA 为工业自动化以及工业过程实时控制和监控的软件。

图 5 基于活性污泥模型的多目标曝气控制 5 步法

Fig. 5 Five-Step Method for Multi-Objective Aeration Control Based on Activated Sludge Model

## 3.2 应用案例

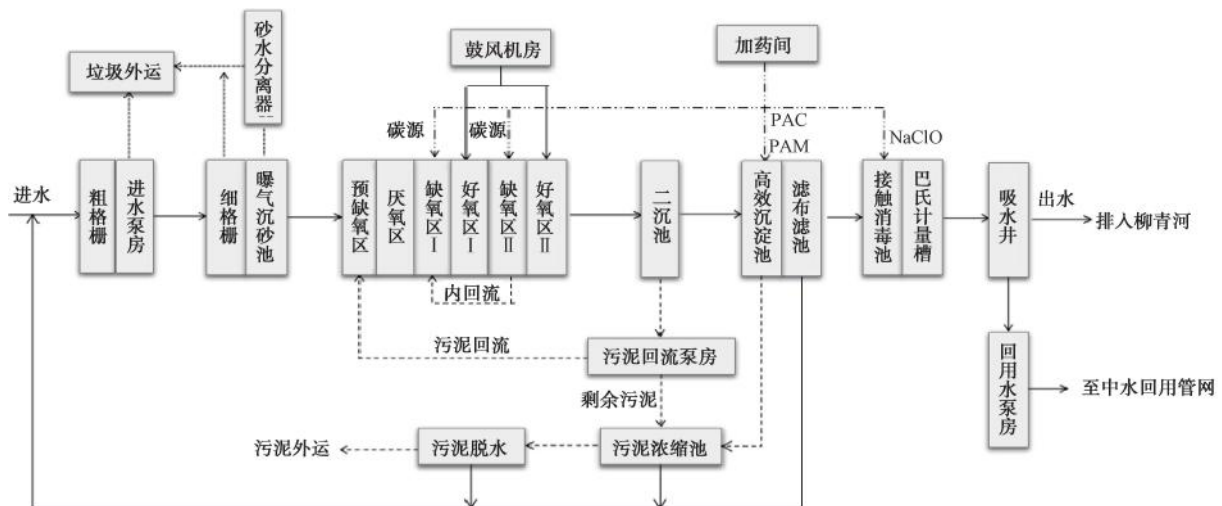
### 3.2.1 项目概况

临沂某污水处理厂设计规模为 8 万  $m^3/d$ ,以 AAO 为主体工艺,出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,工艺流程和实际水质分别如图 6 和表 9 所示。全流程自动化控制的构建步骤如下:1)搭建目标水厂机理模型,对工艺过程定量描述;2)模型参数校正,实现模

拟和实际出水水质的吻合;3)描述运行与优化目标,构建多目标奖励函数;4)利用数据优化算法计算目标条件下的工艺运行参数。

利用近一年历史数据构建机理模型并以沿程及出水水质、各单元能耗等关键边界作为约束条件,再通过敏感性分析或强化学习,筛选优化工况,最终生成全年的最优工况,详细的技术路线如图 7 所示。

将主要工艺单元转化为模型中的构筑物及数



注: PAC 为聚合氯化铝, NaClO 为次氯酸钠。

图 6 污水厂工艺流程

Fig. 6 Process Flow of WWTTP

表 9 进、出水水质

Tab. 9 Influent and Effluent Quality

| 项目                               | COD  | BOD <sub>5</sub> | SS  | 氨氮   | TN  | TP  |
|----------------------------------|------|------------------|-----|------|-----|-----|
| 设计进水/(mg·L <sup>-1</sup> )       | 450  | 200              | 300 | 60   | 70  | 7   |
| 设计出水/(mg·L <sup>-1</sup> )       | 50   | 10               | 10  | 5(8) | 15  | 0.5 |
| 2023 年进水均值/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 155  | 70               | 127 | 35   | 42  | 4.5 |
| 2023 年出水均值/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 11.5 | 2.1              | 6.0 | 0.3  | 9.5 | 0.3 |

注: 括号中的数据是指冬季出水标准。



图 7 优化工况技术路线

Fig. 7 Technology Roadmap of Optimized Process

据,为便于系统运算,模型的结构较实际单位划分更加细致,例如实际中缺氧 1 池由 2 个完全混合池组成,模型中则对应缺氧池 1 和缺氧池 2;实际中好氧 1 池也由 2 个完全混合池构成,模型中则对应好氧池 1 和好氧池 2;实际中两段缺氧 2 池合并为模型中的一个二段缺氧池,而实际好氧 2 池对应模型中二段好氧,如图 8 所示。

### 3.2.2 控制方式

1) 提升系统:采用变液位的恒流量模式控制,先调整频率再启停泵,触发启停泵的条件会单独设置液位值,防止泵的频繁启停。

2) 曝气系统:采用“经验+模型+前反馈+后反

馈”的设计思路。

(1)“经验+模型”优化工艺参数。通过对污水厂的运行数据和化验数据进行分析处理,建立机理模型和数据模型,通过混合模型确定污水厂工艺运行参数;从而获得氨氮合适位置的设定值、DO 设定值或需气量随进水负荷变化的对应值。

(2)“前反馈+模型+后反馈”控制过程。通过控制模型计算各控制区气量或阀门调节开度进行智能控制;再对鼓风机总气量进行控制;最后通过反馈数据或模糊控制再调整控制变量,达到稳定控制效果。

具体操作为:采用分区恒 DO 控制模式,第一区采用 DO(质量浓度为 0.3 mg/L)和风量联合控制,

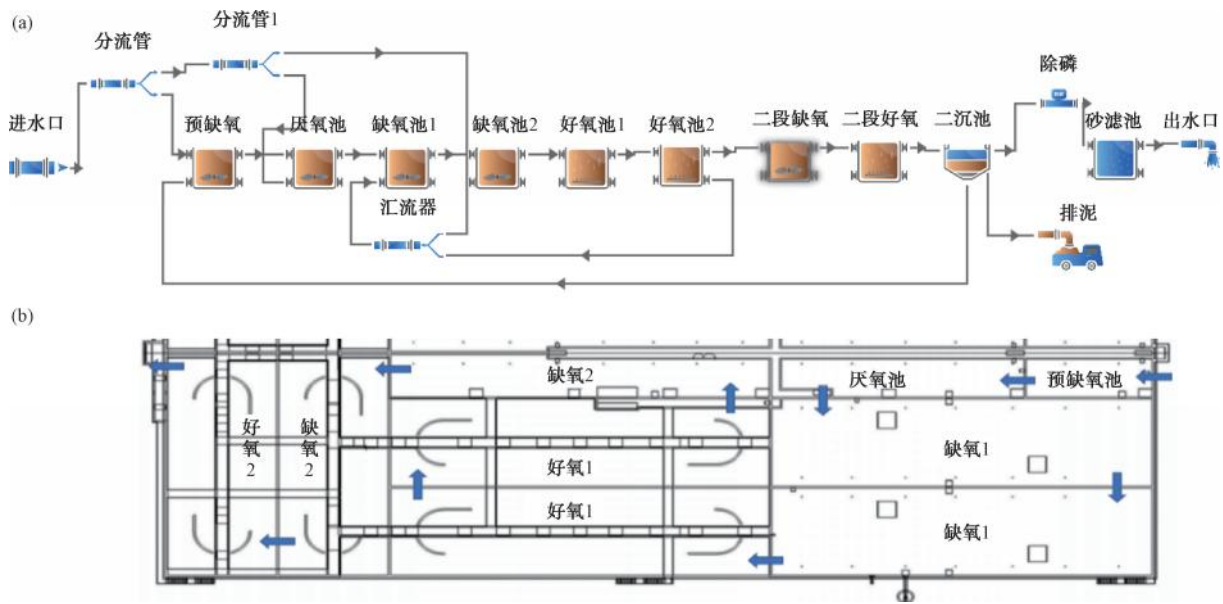


图 8 (a) 模型工艺流程; (b) 实际的生化池结构

Fig. 8 (a) Process Flow of the Model; (b) Actual Biochemical Tank Structures

设定气量为 800~1 000 m<sup>3</sup>/h;第二区和第三区单纯采用 DO 控制(质量浓度为 0.8 mg/L)。根据实际进水水质水量模拟需风量,再根据后反馈及模型模拟风量大小自动调整阀门的开度和风机频率。其中前反馈频率为 30~60 min/次,DO 后反馈频率为 15 min/次,反馈控制主要依赖于安装在各曝气廊道的 DO 仪表数据,通过计算系统实际 DO 值与预设目标值的偏差,控制鼓风机系统的输出气量以及各支管阀门开度来调节步长增加或者减少曝气量,使 DO 稳定在目标值附近。

3) 回流系统:根据预先设定的回流比自动调节回流泵频率。

4) 加药系统:根据预先设定的加药浓度自动调节加药泵频率,同时以系统出水 TP 作为后反馈,当其高于内控值时自动调大加药量。

### 3.2.3 运行效果

2022 年 12 月该污水厂完成全流程自动化控制调试,对比前后一年同期数据,发现主要耗能环节进水提升能耗从 0.006 kW·h/(m<sup>3</sup>·m) 下降至 0.005 kW·h/(m<sup>3</sup>·m),搅拌混合电耗从 0.05 kW·h/m<sup>3</sup> 下降至 0.03 kW·h/m<sup>3</sup>,生化池曝气电耗从 0.087 kW·h/m<sup>3</sup> 下降至 0.083 kW·h/m<sup>3</sup>,总电耗从 0.320 kW·h/m<sup>3</sup> 降低至 0.289 kW·h/m<sup>3</sup>。主要物耗环节除磷药剂单耗(以 10% 质量分数 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 计)从 82.92 mg/L 下降至 74.11 mg/L,阳离子 PAM 单耗从 3.75

kg/(t DS) 下降至 3.52 kg/(t DS)。曝气电耗和总电耗分别下降 4.60% 和 9.69%,单位 COD 当量曝气电耗减少约 11.64%;TP 单耗升高 25.65%,但除磷药剂单耗减少 10.62%。

虽然临沂某污水厂调试期平均水力负荷较 8 家典型市政污水厂更少,但各能耗指标仍位于上游水平(仅除磷药剂单耗指标无明显下降)。同期数据对比如表 10 所示。

表 10 同期数据对比

Tab. 10 Data Comparison for the Same Period

| 指标                                      | 2022 年  | 2023 年  | 同比<br>增长率 |
|---|---------|---------|-----------|
|   | 1 月—6 月 | 1 月—6 月 |           |
| 处理水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 58 926  | 65 887  | 11.81%    |
| 进水 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )            | 159.8   | 184.1   | 15.21%    |
| 进水氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )              | 40.0    | 39.4    | -1.50%    |
| 进水 TN/(mg·L <sup>-1</sup> )             | 47.2    | 48.5    | 2.75%     |
| 进水 TP/(mg·L <sup>-1</sup> )             | 3.82    | 4.80    | 25.65%    |
| 出水 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )            | 13.7    | 11.7    | -0.15%    |
| 出水氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )              | 0.710   | 0.286   | -0.60%    |
| 出水 TN/(mg·L <sup>-1</sup> )             | 10.0    | 9.2     | -0.08%    |
| 出水 TP/(mg·L <sup>-1</sup> )             | 0.190   | 0.273   | 0.44%     |
| 曝气电耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> )            | 0.087   | 0.083   | -4.60%    |
| 总电耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> )             | 0.320   | 0.289   | -9.69%    |
| 除磷药剂加药量/(mg·L <sup>-1</sup> )           | 82.92   | 74.11   | -10.62%   |
| COD 当量曝气电耗/<br>(kW·h·kg <sup>-1</sup> ) | 0.232   | 0.205   | -11.64%   |

### 3.2.4 碳排放量测算

参照《污水处理厂低碳运行评价技术规范》

(T/CAEPI 49—2022)<sup>[23]</sup>, 智能控制实施前后, 碳排放各项指标均有明显下降, 具体数据如表 11 所示。

表 11 智能控制实施前后碳排放强度变化

Tab. 11 Changes in Carbon Emission Intensity before and after the Implementation of Intelligent Control

| 时间             | 直接碳排放修正强度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 间接碳排放修正强度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 评价碳排放强度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 评价碳排放<br>强度分数 | 评价碳排放<br>强度同比下降 |
|----------------|---|---|---|---------------|-----------------|
| 2022 年 1 月—6 月 | 0.11  | 0.32  | 0.43  | 59.24         | —               |
| 2023 年 1 月—6 月 | 0.08  | 0.26  | 0.35  | 72.06         | 18.6%           |

## 4 结论

(1) 通过调研 56 座污水厂, 发现间接碳排放占比较高的环节为生化曝气、进水提升和厌氧区搅拌, 电耗分别达到  $0.107$ 、 $0.049$   $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  和  $0.055$   $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。药剂消耗占比较高环节为除磷药剂和阳离子 PAM, 前者以 10% 质量分数  $\text{Al}_2\text{O}_3$  计, 达到  $54.0$   $\text{mg}/\text{L}$ , 后者达  $2.49$   $\text{kg}/(\text{t DS})$ 。

(2) 不同处理规模、生化工艺、进水水质和排放标准的污水厂, 吨水能耗差异较大, 各因素中处理规模影响最大。小规模污水厂进水异常率高, 耐冲击能力弱, 设备工况频繁变化, 导致三大能耗系统吨水电耗远高于大中型污水厂。

(3) 8 座市政污水厂的进水提升输送能耗在  $0.03\sim 0.05$   $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}\cdot\text{m}^3)$ , 选择与实际扬程及水量匹配的设备, 能有效降低能耗; 各污水厂单位容积能耗差异较大, 但普遍高于  $2\sim 8$   $\text{W}/\text{m}^3$  的设计推荐值, 搅拌混合电耗在  $0.01\sim 0.05$   $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ; 影响生化曝气单耗的因素包括进水浓度, 膜片浸没水深, 以及曝气方式等, 核心因素是曝气方式的选择, 使用连续流间歇曝气能明显降低能耗。

(4) 8 座市政污水厂均采用精确加药, 可明显降低除磷药剂单耗, 不考核极限除磷等特殊情况下, 生化池出水 TP 质量浓度为  $0.24\sim 1.01$   $\text{mg}/\text{L}$ , 10% 质量分数  $\text{Al}_2\text{O}_3$  商品药耗为  $11.2\sim 60.9$   $\text{mg}/\text{L}$ 。

(5) 脱水药剂电耗受处理水量影响较小, 受生化池污泥浓度影响较大, 若使用序批式排泥进一步提高脱水机进泥浓度, 可大幅降低吨干污泥比能耗和比药耗。

(6) 临沂某污水厂应用全流程自动化控制生产运行前后, 曝气电耗下降 4.60%, 总电耗下降 9.69%, 除磷药剂用量减少 10.62%, 整体碳排放强度下降 18.6%。

### 参考文献

[1] 戚伟, 樊杰, 李佳洺, 等. “十五五”期间我国城市化地区发

展的战略重点[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(4): 651-662.

Qi W, Fan J, Li J M, et al. Strategic priorities of China's urbanized areas during 15th Five-Year Plan period[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(4): 651-662.

[2] 陈超, 熊文浩, 高文郑, 等. 城镇生活污水处理技术创新与节能降耗研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(13): 207-209.

Chen C, Xiong W H, Gao W Z, et al. Research on technological innovation and energy conservation and consumption reduction of urban domestic sewage treatment [J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(13): 207-209.

[3] 关海玲, 陈建成, 曹文. 碳排放与城市化关系的实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(4): 111-116.

Guan H L, Chen J C, Cao W. Empirical study on the relationship between carbon emission and urbanization[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(4): 111-116.

[4] 中国建筑节能协会, 重庆大学城乡建设与发展研究院. 2022 中国城镇污水处理碳排放研究报告[J]. 城乡建设, 2023(4): 60-67.

China Association of Building Energy Efficiency, Institute of Urban-Rural Construction and Development, Chongqing University. 2022 China urban wastewater treatment carbon emission research report [J]. Urban and Rural Construction, 2023(4): 60-67.

[5] 郭怡. 高标准出水对污水厂实现双碳目标的影响及减排对策分析[J]. 净水技术, 2022, 41(S2): 111-114, 126.

Guo Q. Impact of high standard effluent on the realization of carbon peak and carbon neutrality target of WWTP and analysis of emission reduction measures [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(S2): 111-114, 126.

[6] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力[J]. 给水排水, 2017, 53(3): 1-3, 73.

Wang H C. Carbon reduction pathways and potential in China's urban wastewater treatment industry [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(3): 1-3, 73.

[7] 张羽就, 席佳锐, 陈玲, 等. 中国城镇污水处理厂能耗统计与基准分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 8-17.

Zhang Y J, Xi J R, Chen L, et al. Energy consumption statistics and benchmarking analysis of urban wastewater treatment plants

- (WWTPs) in China[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(8): 8-17.
- [ 8 ] 张海亚,李思琦,黎明月,等. 城镇污水处理厂碳排放现状及减污降碳协同增效路径探讨[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6): 2053-2062.  
Zhang H Y, Li S Q, Li M Y, et al. Carbon emission analysis of municipal wastewater treatment plants and discussion on synergistic path of pollution and carbon reduction[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(6): 2053-2062.
- [ 9 ] 常纪文,井媛媛,耿瑜,等. 推进市政污水处理行业低碳转型,助力碳达峰、碳中和[J]. *中国环保产业*, 2021(6): 9-17.  
Chang J W, Jing Y Y, Geng Y, et al. Promote the low-carbon transformation of municipal sewage treatment industry and facilitate the realization of emission peak and carbon neutrality [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2021(6): 9-17.
- [10] 王洪臣,陈加波,张景炳,等. 《污水处理厂低碳运行评价技术规范》标准解读及案例展示[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(3): 705-712.  
Wang H C, Chen J B, Zhang J B, et al. Standard interpretation and case presentation *Technical Specification for Low-Carbon Operation Evaluation of Sewage Treatment Plant* [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(3): 705-712.
- [11] 夏加华,罗江明. 南京市城市污水厂运行中存在的问题及对策[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(24): 12-15.  
Xia J H, Luo J M. Operation status of Nanjing MSTPs and countermeasures to existing problems [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(24): 12-15.
- [12] 宋新新,林甲,刘杰,等. 面向未来污水处理技术应用研究现状及工程实践[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(1): 39-53.  
Song X X, Lin J, Liu J, et al. The current situation and engineering practice of sewage treatment technology facing the future[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1): 39-53.
- [13] 黄文佳,赵国清,张荣兵,等. 大型污水处理厂重点设备节能研究和实践[J]. *给水排水*, 2024, 50(9): 50-56.  
Huang W J, Zhao G Q, Zhang R B, et al. Research and practice on energy saving evaluation of key equipment in large-scale WWTPs[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50(9): 50-56.
- [14] 温志军. 水处理提升泵频率控制方法分析与创新[J]. *设备管理与维修*, 2022(12): 134-135.  
Wen Z J. Analysis and innovation of frequency control methods for water treatment lift pumps [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2022(12): 134-135.
- [15] GB 50014—2021 室外排水设计标准[S].  
GB 50014—2021 Standard for design of outdoor wastewater engineering[S].
- [16] 刘玉永,汪文生,卢雪飞,等. 污水处理工艺中搅拌能耗及节能途径[J]. *中国环保产业*, 2022(1): 35-38.  
Liu Y Y, Wang W S, Lu X F, et al. Energy consumption and energy-saving ways of mixing in sewage treatment process [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022(1): 35-38.
- [17] 程晶. A2O 工艺搅拌机节能改造研究[J]. *化工管理*, 2013(14): 226-228.  
Cheng J. Research on energy-saving retrofit of A2O process agitators[J]. *Chemical Engineering Management*, 2013(14): 226-228.
- [18] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅,等. 全国典型城市污水处理厂进 水水质特征分析[J]. *给水排水*, 2018, 54(6): 12-15.  
Guo H L, Li X W, Ren Q Y, et al. Analysis on characteristics of influent water quality of typical municipal sewage treatment plants in China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(6): 12-15.
- [19] 崔丹丹,尹华升,熊海涛. 污水处理厂曝气系统节能降碳综述[J]. *中国资源综合利用*, 2024, 42(6): 257-260, 268.  
Cui D D, Yin H S, Xiong H T. Review of energy conservation and carbon reduction in aeration systems of sewage treatment plants[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2024, 42(6): 257-260, 268.
- [20] 郑琬琳,史彦伟,高放,等. 改良 AAO 工艺间歇曝气对微生物群落特征及运行效果影响[J]. *给水排水*, 2021, 47(5): 34-39, 44.  
Zheng W L, Shi Y W, Gao F, et al. The influence of intermittent aeration in modified AAO process on the characteristics of microbial community and operational performance[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(5): 34-39, 44.
- [21] 喻文熙,高廷耀. 连续流间歇曝气工艺研究[J]. *中国给水排水*, 1997(4): 13-16.  
Yu W X, Gao T Y. A study on bench scale test of continuous flow intermittent aeration process (CFIA) [J]. *China Water & Wastewater*, 1997(4): 13-16.
- [22] 吴宇涵,刘帅,李鑫玮,等. 基于活性污泥模型的多目标曝气控制系统及应用[J]. *给水排水*, 2024, 50(2): 146-152.  
Wu Y H, Liu S, Li X W, et al. A multi-objective aeration control system based on activated sludge model and its application [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50(2): 146-152.
- [23] T/CAEPI 49—2022 污水处理厂低碳运行评价技术规范[S].  
T/CAEPI 49—2022 Technical specification for low-carbon operation evaluation of sewage treatment plant[S].