

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.08.015

# 市政污水处理厂智能控制系统设计及应用效果

马汐帆<sup>1</sup>, 黄继会<sup>1</sup>, 丁春<sup>1</sup>, 翁佳樑<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 陈敏芳<sup>2</sup>,  
林守民<sup>2</sup>

(1. 苏州市排水有限公司, 江苏 苏州 215006; 2. 美尚生化环境技术<上海>有限公司,  
上海 201106)

**摘要:** 苏州某污水处理厂采用生物池智能控制系统加强生物反应池精细化控制。该控制系统基于ASM模型定制开发,利用安装于生物反应池的过程仪表,可实时计算出生物反应池不同区域的最佳溶解氧、内回流量和碳源投加设定值,并联动鼓风机、回流泵和加药泵等设备,实现曝气、内回流和碳源投加的自动控制。通过自动化控制,可确保出水水质达标。其中,鼓风机的可调控范围是影响溶解氧控制效果的关键因素。

**关键词:** 智能控制; 精确曝气; 溶解氧控制; 鼓风机控制; 阀门控制

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)08-0091-06

## Design and Application Effect of Intelligent Control Systems in a Municipal WWTP

MA Xi-fan<sup>1</sup>, HUANG Ji-hui<sup>1</sup>, DING Chun<sup>1</sup>, WENG Jia-liang<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>,  
CHEN Min-fang<sup>2</sup>, LIN Shou-min<sup>2</sup>

(1. Suzhou Drainage Co. Ltd., Suzhou 215006, China; 2. BioChem Technology <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 201106, China)

**Abstract:** A wastewater treatment plant (WWTP) in Suzhou adopts bioprocess intelligent control system to enhance the precision control of the biological reaction tank. The control system is customized based on ASM model, which can calculate real-time optimal setpoints for dissolved oxygen, internal recycle rates, and carbon source dosages in different zones by instruments installed in the biological reaction tanks. It coordinates the control of equipment such as the blower, return pump, and dosing pump to automate aeration, internal recirculation, and carbon source dosing. Through automated control, it's possible to ensure compliant treated water effluent. The adjustable range of the blower emerges as a critical factor affecting the efficacy of dissolved oxygen control.

**Key words:** intelligent control; precision aeration; dissolved oxygen control; blower control; valve control

苏州某污水处理厂总处理规模为 $14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,工程分4期建设,其中第4期处理规模为 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用Bardenpho工艺,于2022年6月通水试运行,出水水质执行苏州市特别排放限值,即 $\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$ , $\text{NH}_3\text{-N} \leq 1.5(3) \text{ mg/L}$ , $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ , $\text{TP} \leq 0.3 \text{ mg/L}$ ,同

时满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准及《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)标准。

为强化生物处理段的精细化管理,使其达到严

格的出水排放标准,采用智能控制系统对生物池工艺运行参数进行实时精细化控制<sup>[1-2]</sup>。

## 1 智能控制系统

该智能控制系统基于国际水协ASM系列模型进行定制化开发<sup>[3]</sup>,在总氮平衡的控制逻辑基础上,结合进出水水质仪表、流量计、生物池过程仪表(氨氮、硝态氮、溶解氧、污泥浓度)等实时数据进行计算,给出最适合当前生物池运行所需的动态溶解氧值、内回流量、碳源投加量等参数,并对鼓风机、阀门、回流泵、碳源泵等设备进行自动控制,以满足出

水氨氮、总氮达标的需求。

在每根曝气支管上安装电动阀门及气体流量计,在每个阀门控制区安装溶解氧仪表,并在生物池缺氧段末端和好氧段末端安装氨氮、硝酸盐氮仪表,如图1所示。同时根据生物池实际尺寸和进水特性构建数字模型,通过模型自学习功能模拟生物池的运行情况,再输入出水氨氮、硝酸盐设定指标,便可周期性地输出生物池所需动态溶解氧值、内回流量、碳源投加量,并预测出水氨氮及硝酸盐指标<sup>[4-5]</sup>。

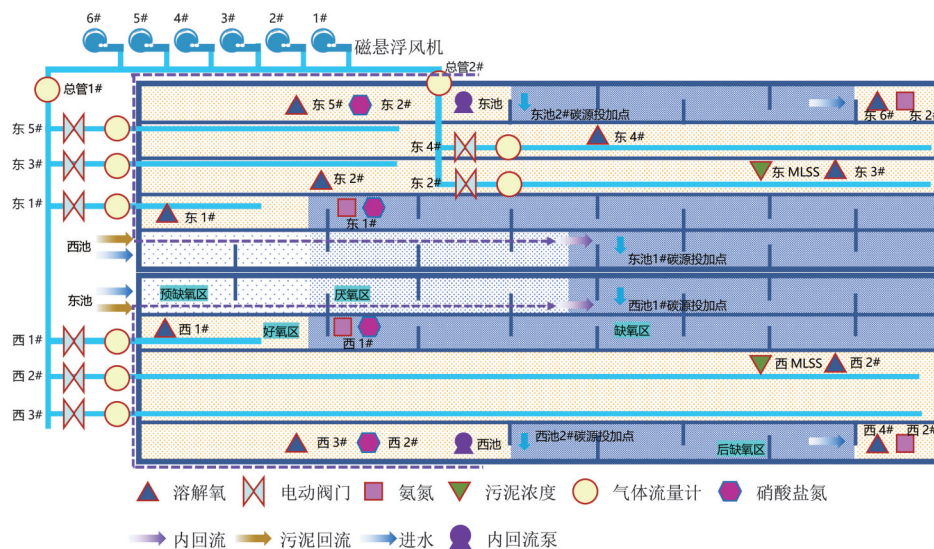


图1 生物池设备配置

Fig.1 Diagram of bioreactor equipment configuration

曝气管路采用枝状布置,将好氧段分成3个控制区域(由于用地有限,鼓风机房设在东组生物池好氧段上,将东组生物池好氧段分成5个控制区域),每个控制区域分别由1根曝气支管控制,实行单独供气,从而确保提供精确稳定的气量。同时,由于好氧段前端污染物浓度较高,微生物新陈代谢速率较快,所需空气量较高;而在好氧段中后端污染物浓度逐渐变低,所需空气量相应降低,整个好氧段所需空气量应呈递减分布。因此布置曝气管时,在好氧段前端对其加密后逐步递减。

## 2 实际运行效果及分析

### 2.1 鼓风机控制效果

鼓风机控制逻辑:①智能控制系统根据各个生物池不同控制区的溶解氧值来计算所需风量设定值;②将所有风量设定值汇总至总风量设定值发送至鼓风机MCP系统;③MCP系统通过自身的理论总

风量值作为总风量设定值的控制及反馈信号来调节鼓风机开启台数及开度大小,最终使总风量实际值趋近于系统发送的总风量设定值。

在调试初期观察鼓风机的运行情况并进行测试,确定鼓风机风量区间。表1为4台鼓风机调节开度为40%~100%时的风量区间。

表1 鼓风机风量区间(调节开度为40%~100%)

Tab.1 Range of airflow for the blower (adjusting opening is 40%~100%)

鼓风机运行数量/台	最小风量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	最大风量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
1	4 700	7 100
2	9 300	13 000
3	13 800	19 500
4	18 600	25 500

由表1可以看出,当开启1台鼓风机达到最大风量7 100  $\text{m}^3/\text{h}$ 但仍不能满足实际需求时,需要开

启2台鼓风机,此时2台鼓风机最小风量为9 300 m<sup>3</sup>/h。可以发现,开启1台鼓风机最大风量到2台鼓风机最小风量之间存在2 200 m<sup>3</sup>/h的风量死区。同样,在2台最大风量和3台最小风量之间也存在800 m<sup>3</sup>/h的风量死区,从而影响系统运行的连贯性及溶解氧控制精度。图2为总风量和西侧生物池控制区溶解氧曲线。

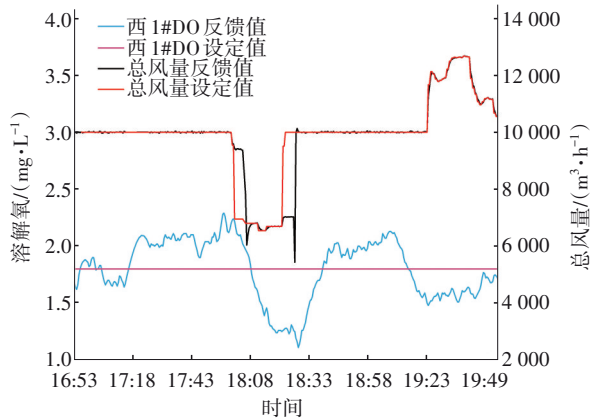


图2 溶解氧与风量调节效果

Fig.2 Dissolved oxygen and effects of airflow regulation

由图2可以发现风量存在断档的情况,当生物池溶解氧高于设定值需要下调鼓风机开度时,总风量不能满足平滑下调的需求,关闭其中1台鼓风机,而另1台鼓风机开到最大,此时风量又小于设定值的需求,溶解氧持续下降。为了维持溶解氧控制精度,需要增加风量,系统再次开启1台鼓风机,2台鼓风机的总风量高于实际风量需求,因此在实际需风量为7 100~9 300 m<sup>3</sup>/h范围内长时间运行时,会导致2个不良后果:①为维持溶解氧控制的精度,鼓风机频繁启停;②鼓风机启停引起的风量振荡,导致溶解氧波动,会降低控制精度。

由此可见,智能控制系统与鼓风机之间的联动逻辑可行,但鼓风机风量调节范围需进一步优化。通过对鼓风机 MCP 系统进行调整,下调鼓风机最小调节范围至30%后,风量死区基本消除(见表2)。

表2 鼓风机的风量区间(调节开度为30%~100%)

Tab.2 Range of airflow for the blowers (adjusting opening is 30%~100%)

鼓风机运行数量/台	最小风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	最大风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	3 600	7 100
2	7 300	13 000
3	10 500	19 500
4	13 500	25 500

风量调节趋于平缓,控制精度提高,如图3所示。

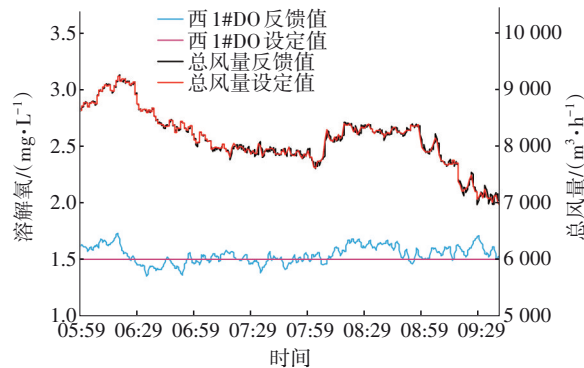


图3 溶解氧及风量调节效果(优化后)

Fig.3 Dissolved oxygen and airflow regulation effects (after optimized)

2.2 阀门控制效果

阀门控制逻辑:①智能控制系统根据各个生物池不同控制区的溶解氧值来计算所需风量设定值;②根据各个控制区的风量设定值计算阀门开度设定值;③以百分比形式发送至各个阀门执行机构,由其负责将开度调整至设定值。

阀门的控制精度会直接影响溶解氧的控制效果,首先表现在风量控制方面。西侧生物池控制区通过阀门开度的调节所达成的风量追踪效果见图4。

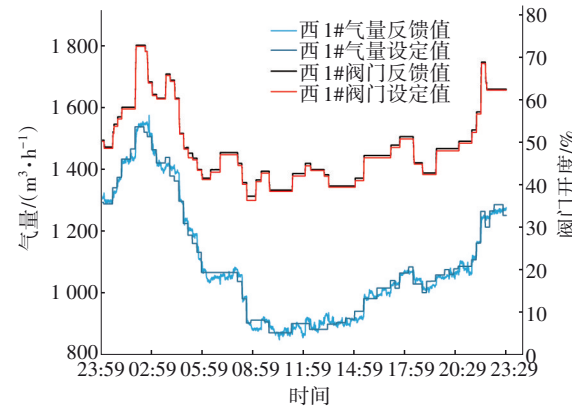


图4 阀门调节(40%~100%)与风量追踪效果

Fig.4 Effect of valve control(40%~100%) on airflow

由图4可知,系统根据风量设定值的变化实时调节阀门开度,使实际值趋向设定值。

考虑到阀门频繁动作会缩短其使用寿命,故对阀门开度计算进行优化。经统计,当气量设定周期为15 min时,5月3日阀门开度变化89次。实际运行过程1 h,共计4个控制周期,阀门开度变化与此时的风量追踪效果如图5所示。可以发现,阀门在



每个周期开始阶段经过2~3次的调节,维持风量实际值在风量设定值附近。

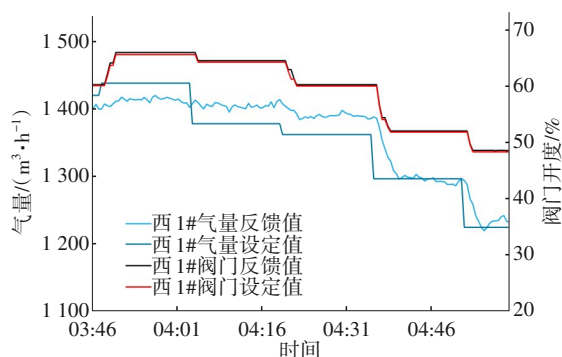


图5 阀门调节(30%~100%)与风量追踪效果

Fig.5 Effect of valve control(30%~100%)on airflow

### 2.3 溶解氧控制效果

溶解氧是智能控制系统的主要控制目标。对溶解氧的精确控制,一方面为微生物创造稳定的生化环境,提高其代谢营养物的效率;另一方面,对好氧段不同区域实施按需曝气,满足生化系统对曝气量的需求,从而降低不必要的曝气能耗。在实际应用中,系统根据进水负荷与设置的出水氨氮标准对溶解氧值进行实时前馈计算,通过后馈及时修正,并自动周期性地计算出实时的溶解氧设定值,完成溶解氧的自动调节,如图6所示。

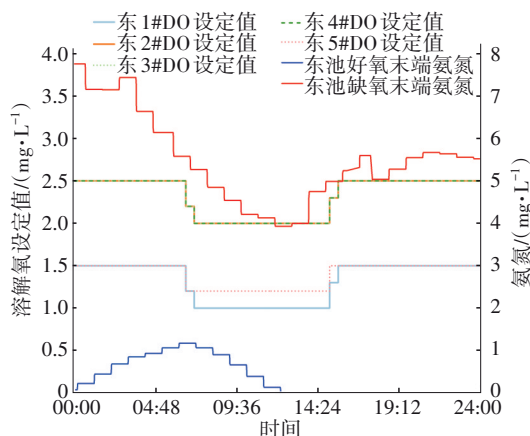


图6 溶解氧随进水氨氮变化曲线

Fig.6 Variation curve of dissolved oxygen with influent ammonia nitrogen

由图6可以发现,进水负荷提高时,提高溶解氧设定值,进而增大生物池总风量,确保适度的硝化反应,保证出水氨氮达标;进水负荷降低时,降低溶解氧设定值,进而降低生物池总风量,确保在出水氨氮达标的基础上节省曝气量。

在智能控制系统的控制下,统计溶解氧实际值在设定值 $\pm 0.3$  mg/L和 $\pm 0.5$  mg/L范围内出现的概率,代表最终的溶解氧控制效果。表3为系统连续运行72 h的数据记录,共获取数据8 251个,并对比溶解氧设定值与追踪的实际值数据。由此可以看出,西组生物池第1#~3#控制区的溶解氧实际值在设定值 $\pm 0.3$  mg/L范围内的控制精度分别为100%、88%、68%;在设定值 $\pm 0.5$  mg/L范围内的控制精度分别为100%、98%、98%。溶解氧设定值 $\pm 0.3$  mg/L范围内的第3#控制区精度偏低的主要原因:此控制区为好氧段末端,为了维持最低搅拌风量,在设定风量区间的下限值运行,导致溶解氧值正偏离较多。

表3 溶解氧设定值与实际值对比

Tab.3 Dissolved oxygen comparison between set and actual values

控制区	溶解氧 设定值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	溶解氧实际值: 设定值 $\pm 0.3$ mg/L		溶解氧实际值: 设定值 $\pm 0.5$ mg/L	
		数量/个	占比/%	数量/个	占比/%
西-1#DO	1.5	8 227	100	8 250	100
西-2#DO	2.0	7 261	88	8 095	98
西-3#DO	0.8	5 597	68	8 083	98

### 2.4 内回流控制效果

智能控制系统通过实时获取缺氧段和好氧段末端的硝酸盐氮实际值,以及设定的出水硝酸盐氮目标值,周期性地输出生物池所需动态内回流量,及时调节回流泵的频率、启停等参数,并通过内回流量计实时追踪内回流量设定值,如图7所示。

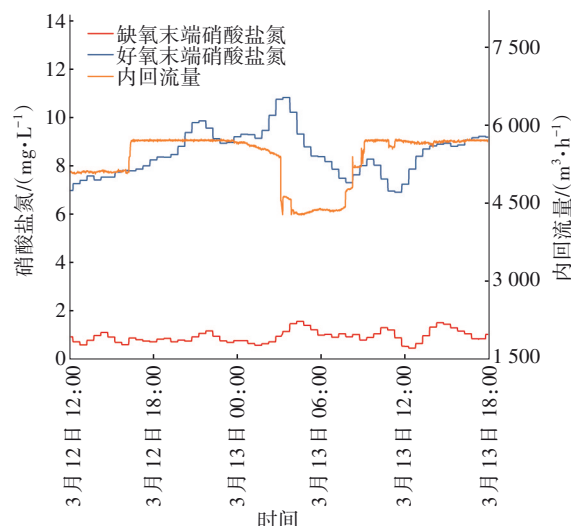


图7 硝酸盐氮浓度与内回流量关系曲线

Fig.7 Curve of nitrate nitrogen concentration and internal recirculation flow rate

从图7可知,系统根据内回流设定值的变化实时调节回流泵,使实际值趋向于设定值。当缺氧段硝酸盐氮浓度降低时,系统提高内回流设定值,提高缺氧段反硝化能力;当缺氧段硝酸盐氮浓度提高时,系统降低内回流设定值,增加缺氧段水力停留时间,提高处理效率。

## 2.5 碳源控制效果

智能控制系统根据生物池进水流量、进水总氮、进水氨氮、生物池硝酸盐氮浓度、内回流量等实时计算碳源投加量设定值。

1#碳源投加点的进、出水硝酸盐氮及碳源投加量的变化曲线如图8所示。

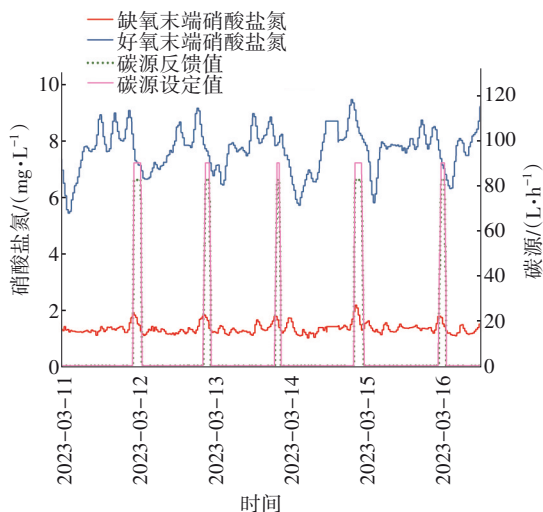


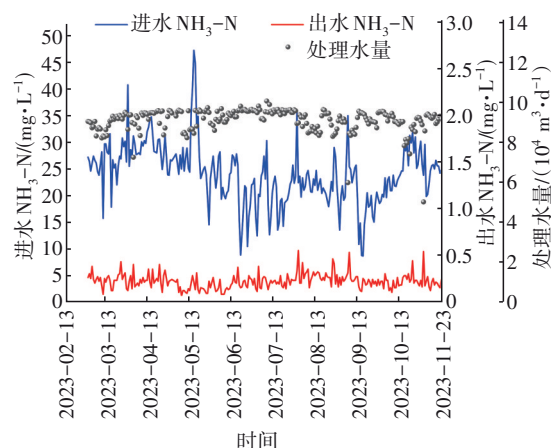
图8 1#碳源投加点的硝酸盐氮浓度与碳源投加量的关系曲线

Fig.8 Relation curve of nitrate nitrogen concentration and carbon source dosage at No.1 carbon source dosing point

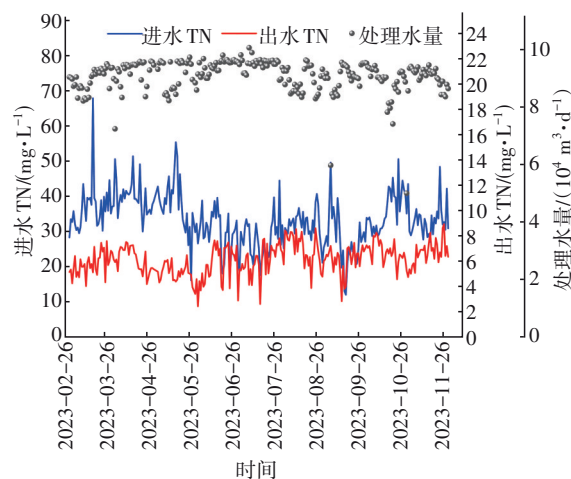
由图8可知,碳源投加量与硝酸盐氮浓度大致成正比关系。当系统计算出当前缺氧段反硝化速率过低且调整内回流后仍不能满足出水要求时,增大碳源投加量;当硝酸盐氮浓度呈下降趋势之后,系统会迅速降低碳源投加量。

## 3 实际水质分析

智能控制系统自调试运行完成以来,在处理水量超设计负荷1.3倍的情况下,生物池出水氨氮浓度 $<1\text{ mg/L}$ ,月平均浓度为 $0.34\text{ mg/L}$ ;总氮浓度 $<9\text{ mg/L}$ ,月平均浓度为 $6.94\text{ mg/L}$ ,出水水质稳定达标,如图9所示。



a. 处理水量与进、出水氨氮浓度关系曲线



b. 处理水量与进、出水 TN 浓度关系曲线

图9 处理水量与进出水氨氮、总氮浓度变化曲线

Fig.9 Change curve of water quantity and concentration of ammonia nitrogen and total nitrogen in influent and effluent

## 4 结论

苏州某污水处理厂采用智能控制系统之后,可以实现生物池的全自动运行,保证出水水质稳定达标。实践经验可总结为3点:①在设计阶段,应充分考虑设备仪表布置、曝气分布等因素,尽可能规避设计缺憾,如为精确控制曝气量,建议曝气管路采用枝状布置,并在每根空气支管安装电动调节阀门和空气流量计;②在设备选型阶段,应充分考虑设备性能,满足系统的使用要求,如鼓风机选型的考虑,总出风量需连续可调整以避免死区,其调整范围要覆盖高负荷和低负荷下的运行工况;③在运行阶段,应加强对生物池等仪表的运行维护,因为数据的稳定性与准确性对系统起着至关重要的作用。

## 参考文献:

- [1] 虞正平,孙林忠,史维忻,等. 苏州福星污水厂生物池工艺控制系统设计及分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(1): 104-108.  
YU Zhengping, SUN Linzhong, SHI Weixin, *et al.* Design and analysis of bioprocess intelligent optimization system in Suzhou Fuxing wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(1): 104-108 (in Chinese).
- [2] 魏彬,杨慧敏,张晓正,等. 污水处理厂曝气总量精确控制方法的研究与应用[J]. 中国给水排水, 2016, 32(6): 94-98.  
WEI Bin, YANG Huimin, ZHANG Xiaozheng, *et al.* Research and application of precise control method of total aeration rate in sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6): 94-98 (in Chinese).
- [3] HENZE M, GUJER W, MINO T, *et al.* Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 [M]. London: IWA Publishing, 2000.
- [4] 郭亚萍,顾国维. ASM2d在污水处理中的研究与应用[J]. 中国给水排水, 2006, 22(6): 8-10.  
GUO Yaping, GU Guowei. Study and application of ASM2d in wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(6): 8-10 (in Chinese).
- [5] 李升,胡晓东,许飞飞,等. 马头岗污水厂精确曝气系统的实施及应用效果[J]. 中国给水排水, 2016, 32(15): 26-31.  
LI Sheng, HU Xiaodong, XU Feifei, *et al.* Implementation and application efficiency of aeration volume control system in Matougang wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(15): 26-31 (in Chinese).

作者简介:马汐帆(1991-),男,江苏苏州人,本科,工程师,主要研究方向为污水处理。

E-mail:444945388@qq.com

收稿日期:2024-01-09

修回日期:2024-04-03

(编辑:衣春敏)

## ·信息·

## 住房和城乡建设部科技计划项目《排水管网运行效能智慧化诊断评估技术研究》顺利验收

近日,由住房和城乡建设部科技与产业化发展中心牵头组织,中国市政工程华北设计研究总院有限公司、长江生态环保集团有限公司、天津大学、中国城市规划设计研究院、武汉中仪物联技术股份有限公司共同承担的住房和城乡建设部科技计划项目《排水管网运行效能智慧化诊断评估技术研究》验收评审会于中国市政工程华北设计研究总院成功举行。

会议邀请了北京市政工程设计研究总院有限公司全国工程勘察设计大师李艺、天津市政工程设计研究总院有限公司总工程师赵乐军、天津工业大学教授王亮、南开大学教授卢学强、天津市城市规划设计研究总院有限公司工程院总工程师刘星、北京北排建设有限公司总工办主任陆学兴、天津市水利科学研究院常素云七位专家参会。中国市政工程华北设计研究总院有限公司总工程师刘智晓、第十七设计研究院副总工程师罗婷作为项目完成单位代表分别致辞。项目负责人崔诺就研究内容及成果作了专题汇报。该项目取得了一系列突破性成果:首次系统揭示了影响污水管网收集传输效能的内在机理,构建了符合我国排水管道现状的运行效能评估指标体系。在技术创新方面,攻克了排水管网运行效能诊断与问题快速识别关键技术,自主研发了新一代污水管道无损排查装备和精准定位系统,并创新性地开发了基于人工智能的管网运行效能智慧诊断评估模型。这些成果的推广应用,将显著提升我国排水管网改造更新的技术水平,为污水收集效能的持续优化提供强有力的技术支撑。与会专家对于项目成果的创新性、成效性给予了充分肯定,认为该成果可进一步支撑行业政策标准的制定实施及排水管网智慧运维水平的提升,助力行业高质量发展。

(根据“中国市政华北院”公众号内容编辑整理)