

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.22.018

基于时序控制原理的污水提升泵组运行优化实践

程天石^{1,2}, 齐尧乐^{1,3}, 董鹏辉^{1,3}, 黄涛¹, 李强^{1,3}, 程昊¹

(1. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 芜湖市三峡智慧水管家有限责任公司, 安徽 芜湖 241000; 3. 六安市三峡智慧水管家有限责任公司, 安徽 六安 237000)

摘要: 针对某城市污水处理厂进水泵房液位波动大、动力提升能耗高等问题,通过优化污水提升泵组的水量调节范围,基于历史运行数据和参数率定合理设置时序控制边界条件,有效降低泵组运行能耗。在此基础上,将时序控制逻辑接入自动控制系统,有效减少了人工干预。结果表明,实施优化措施后泵组的平均电耗为 $0.047\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,较实施前平均电耗($0.054\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$)同比下降12.96%,处于最佳液位区间的时段由实施前的54.47%提升至86.31%。此外,采用时序控制后能够更好地适应阶梯电价政策,有利于可持续发展。

关键词: 污水处理厂; 时序控制; 污水提升泵组; 运行优化; 节能降耗

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)22-0111-06

Operational Optimization Practice of Sewage Lifting Pump Unit Based on Sequential Control Principle

CHENG Tian-shi^{1,2}, QI Yao-le^{1,3}, DONG Peng-hui^{1,3}, HUANG Tao¹, LI Qiang^{1,3},
CHENG Hao¹

(1. Yangtze Ecology & Environment Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 2. Wuhu Three Gorges Smart Water Manager Co. Ltd., Wuhu 241000, China; 3. Lu'an Three Gorges Smart Water Manager Co. Ltd., Lu'an 237000, China)

Abstract: There are some problems in the inlet pump room of a municipal sewage treatment plant, such as large fluctuation of water level and high energy consumption. Based on historical operating data and parameter calibration, this study significantly reduces the energy consumption of the pump unit by optimizing the water volume adjustment range of the lifting pump unit and setting reasonable sequential control boundary conditions. On this basis, the sequential control logic was integrated into the automatic control system, effectively reducing manual intervention. The results showed that after the implementation of optimization measures, the average electricity consumption of the pump unit was reduced to $0.047\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, a year-on-year decrease of 12.96% compared to the average electricity consumption of $0.054\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ before implementation. The period in the optimal liquid level range increased from 54.47% before implementation to 86.31%. In addition, the sequential control can better adapt to the tiered electricity pricing policy and achieve sustainable development.

Key words: sewage treatment plant; sequential control; sewage lifting pump unit; operational

基金项目: 长江生态环保集团有限公司科技创新团队项目

通信作者: 齐尧乐 E-mail: 13283717137@163.com

optimization; energy conservation and consumption reduction

污水处理是一个能耗密集型行业,城市污水处理电耗占全社会总电耗的 1% 左右^[1]。工艺设备作为污水处理厂主要的能耗源头,耗电量占比最高可达 97%^[2]。2023 年 12 月,国家多部委联合印发《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》(发改环资〔2023〕1714 号),明确提出要开展节能降耗工作。污水处理厂进水通常位于管网系统末端,其高程相对较低,因此需要利用水泵将污水提升至各工艺单元。污水提升既是工艺处理的必要环节,同时也是高耗能环节,其耗电量占污水处理厂总能耗的 10%~20%^[3]。另一方面,不同的运行工况如启停液位、水量波动等,都将影响泵组的运行效率^[4-5],仅依靠人工控制水泵启停无法满足精细化运行需求。因此,亟须对污水处理厂提升泵组开展能耗评估及运行优化研究。

针对某城市污水处理厂进水泵房液位波动大、动力提升能耗高等问题,通过优化泵组水量调节范围,基于历史运行数据和参数率定合理设置时序控制边界条件,有效改善泵组运行环境,降低泵组运行能耗。在此基础上,将提升泵运行控制接入数字化系统,可有效减少人工干预,降低劳动强度。

1 工程概况与研究方法

1.1 污水处理厂概况

该城市污水处理厂设计处理规模共计 16×10⁴ m³/d,分两期建设。二期处理规模为 8×10⁴ m³/d,采用“预处理+AAO+高效沉淀池+反硝化深床滤池”工艺,工艺流程如图 1 所示。

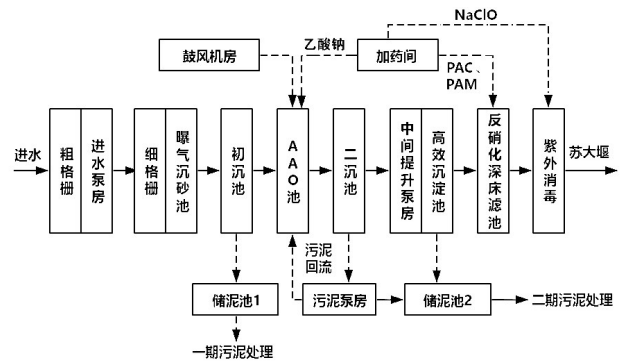


图 1 污水处理厂工艺流程

Fig.1 Process flow of the sewage treatment plant

运行数据显示,2023 年该污水处理厂(二期)日均负荷率为 85.3%,吨水电耗为 0.25 kW·h/m³,其

中泵组耗电量占厂区总耗电量的 19.87%,占比较高^[3]。出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准以及《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB34/2710—2016)。设计进、出水水质见表 1。

表 1 污水处理厂设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of the sewage treatment plant mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
设计进水	330	180	35	45	8	250
设计出水	40	10	2(3)	10(12)	0.3	10

注: 括号外数值为水温>12℃的控制指标,括号内数值为水温≤12℃的控制指标。

粗格栅与进水泵房合建,尺寸为长×宽×高=14.4 m×7.8 m×10.8 m。进水泵房设置 6 台污水提升泵,其中 1#泵为变频泵,泵组相关参数见表 2。

表 2 污水提升泵组参数

Tab.2 Parameters of sewage lifting pump unit

泵组	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	扬程/m	功率/kW	控制方式
1#~3#	755	15	45	手动/自动控制
4#~6#	1 411	15	75	手动/自动控制

1.2 存在问题

① 进水流量可调节范围不连续。仅 1#泵为变频泵,流量调节范围受限且不连续,易对后续处理工艺造成较大冲击负荷。

② 液位控制不合理导致能耗升高。该污水处理厂为保证排水安全,将泵坑长期保持较低液位;运行过程中仅考虑峰、谷、平电价,夜间提高进水量,导致进水泵房液位波动较大。

③ 人工干预频繁,劳动强度大。现场计量设备不完善,未接入自动控制系统,流量调节多依靠运行人员干预。

1.3 思路与方法

污水提升泵的电耗计算方式^[6]如下:

$$W = \frac{\rho g Q H}{102 \eta_1 \eta_2} t \quad (1)$$

式中:W 为电机实际电耗,kW·h;ρ 为污水的密度,kg/m³;g 为重力加速度,m/s²;Q 为污水提升泵的实际流量,m³/s;H 为污水提升泵的实际工作扬程,

m ; η_1 为水泵的效率; η_2 为电机的效率; t 为水泵的运行时间, h 。

由式(1)可知,在水泵型号确定的情况下,电耗主要取决于水泵的实际工作扬程 H 、提升流量 Q 以及运行时间 t 。拟采取的泵组优化措施主要包括:①优化泵组可调节流量范围,结合水泵性能曲线及运行要求确定进水泵房最佳液位区间;②基于阶梯电价和降水影响,通过参数率定确定晴天不同泵组开启组合以及液位控制条件,在确保不发生冒溢的前提下,利用 PLC 自控系统将液位保持在稳定的范围内,尽可能将泵房液位维持在最佳液位区间,减小水泵扬程,降低泵组能耗;③完善水泵耗电量、出水流量、运行时间等关键指标的监测,进而实时掌握每台水泵的单耗,为平衡水泵的工作时间和能效以及预测性维护提供依据。

为准确评估泵组运行优化效果,按照“运行条件相似、处理水量相近”的原则,将历史运行数据划分为两个阶段:2023 年 4 月—7 月为优化策略实施前的对照组,2024 年 4 月—7 月为优化策略实施后的试验组。

2 结果与讨论

2.1 泵组流量调节范围优化

水泵在实际应用中大部分时间并非工作于满负荷状态,采用变频器直接控制泵负载是一种科学合理的控制方法,利用变频调节电动机的转速保持恒定的水压,从而满足系统的压力要求^[7-8]。水泵采用调速可使运行工况与要求的工况相符,达到节能目的,且保持水泵运行在较高效率区间。增设 1 台与 75 kW 水泵配套使用的变频器,增设变频器前后不同水泵组合及流量可调节范围如表 3 所示。由表 3 可知,增设变频器后泵组可调节流量范围明显扩大,基本实现 1 250~4 500 m³/h 范围内的任意调配。

表 3 水泵组合及流量调节范围

Tab.3 Water pump combination and flow adjustment range

水泵组合	流量调节范围	
	优化前	优化后
2 台 75 kW+2 台 45 kW	4 250~4 500	3 800~4 500
1 台 75 kW+3 台 45 kW	3 500~3 750	3 000~3 750
1 台 75 kW+2 台 45 kW	2 750~3 000	2 300~3 000
3 台 45 kW	2 000~2 250	2 000~2 250
2 台 45 kW	1 250~1 500	1 250~1 500

水泵的能效区间可结合水泵性能曲线确定,包括流量-扬程($Q-H$)曲线、流量-功率($Q-P$)曲线、流量-效率($Q-\eta$)曲线等。若水泵的工作点在最优能效点的右侧表示水泵超流量低扬程运行,在最优能效点的左侧表示水泵高扬程小流量运行。水泵不同频率下的流量与扬程变化示意如图 2 所示。通过查阅水泵性能曲线,得到水泵处于高效运行时对应的流量及扬程范围。此外,根据该污水处理厂历史运行数据,进水泵房液位的设置须确保收水范围内不会发生冒溢,最终确定进水泵房最佳液位区间为 4.0~6.5 m。

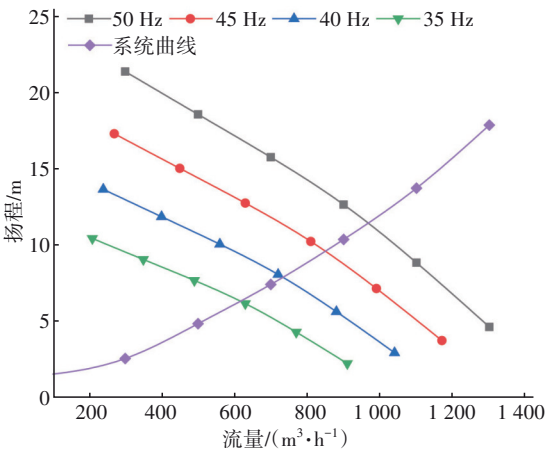


图 2 不同频率流量与扬程变化曲线

Fig.2 Change curve of flow rate and head at different frequencies

2.2 泵组时序控制策略优化

非汛期泵组运行综合考虑液位、流量以及电价等因素,制定相应的运行策略,时序控制参数设置见表 4。

表 4 晴天液位与流量时序设置

Tab.4 Liquid level and flow sequential setting in sunny days

时段	液位/m			流量/(m ³ ·h ⁻¹)	
	最低	中间	最高	下限	上限
00:00—08:00 (谷)	4.2	4.7	6.5	2 800	3 000
08:00—09:00 (平)	4.5	5.0	6.0	3 000	3 000
09:00—12:00 (峰)	4.5	5.0	6.0	3 000	3 000
12:00—17:00 (平)	4.5	5.5	6.0	3 000	3 500
17:00—22:00 (峰)	4.5	5.5	6.0	3 000	3 500
22:00—23:00 (平)	4.5	5.5	6.5	3 000	3 500
23:00—24:00 (谷)	4.2	5.2	6.5	3 000	3 500

在确保泵组处于最佳液位区间前提下,在电价谷平时段,若液位低于设置的中间液位,通过自控

系统逐步减少水泵运行数量,最后稳定在设置的最小流量并保持低水量运行;在电价高峰时段,若液位高于设置的中间液位,通过自控系统逐步增加水泵运行数量,直至其设定的流量上限。

汛期主要考虑片区排水安全,时序控制参数设置见表5。

表5 雨天液位与流量时序设置

Tab.5 Liquid level and flow sequential setting in rainy days

时段	液位/m			流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	
	最低	中间	最高	下限	上限
00:00—08:00(谷)	3.5	4.0	4.5	3 500	3 750
08:00—09:00(平)	3.5	4.0	4.5	3 500	3 750
09:00—12:00(峰)	4.5	5.0	6.0	3 000	3 000
12:00—17:00(平)	4.5	5.5	6.0	3 000	3 500
17:00—22:00(峰)	4.5	5.5	6.0	3 000	3 500
22:00—23:00(平)	4.5	5.5	6.5	3 000	3 500
23:00—24:00(谷)	4.2	5.2	6.5	3 000	3 500

在汛期进水泵房液位上涨较快且进水水质较好的情况下,应优先考虑安全因素,通过自动化控制系统和工艺调整等措施,保障污水处理厂的安全运行。通过合理设置泵组的控制策略,在保证排水安全的前提下将进水泵房液位控制在设定区间内,进而达到高效节能的目的,利用自控系统有效减少人为干预,降低工人工作强度。

2.3 实施前后液位对比

实际处理水量与泵房平均液位的关系如表6所示。

表6 实际处理水量与泵房平均液位

Tab.6 Treatment water volume and average liquid level of pump room

时间	月处理水量/ m^3	日均处理水量/ m^3	平均液位/m
2023年4月	2 174 400	72 480	5.18
2023年5月	2 387 350	77 011	5.22
2023年6月	2 165 196	72 173	5.41
2023年7月	2 267 450	73 144	5.16
2024年4月	2 173 462	72 449	5.16
2024年5月	2 234 628	72 085	5.32
2024年6月	2 287 920	76 264	5.21
2024年7月	2 426 173	78 263	5.62

2023年4月—7月的月均处理水量为2 248 599 m^3 ,日均处理水量为73 725 m^3 ,负荷率为92.2%,进水泵房平均液位为5.24 m;2024年4月—7月的月均处理水量为2 280 546 m^3 ,日均处理水量为74 772 m^3 ,负荷率为93.5%,进水泵房平均液位为5.33 m,

总体运行条件接近。

为进一步分析液位波动情况,分别选取优化措施实施前后连续7 d无降雨且日处理水量相近的情况进行对比(每30 min采集一个数据,共计336个),结果见图3。

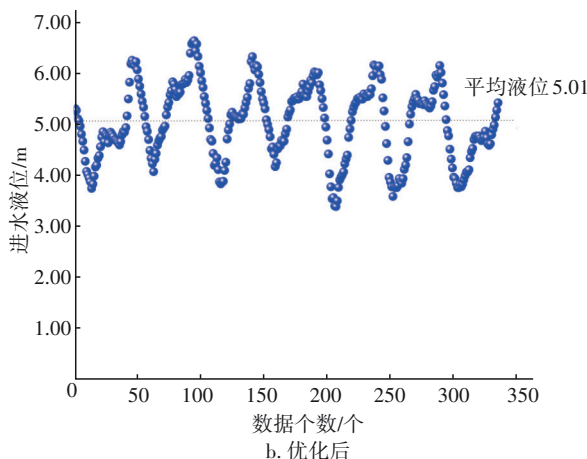
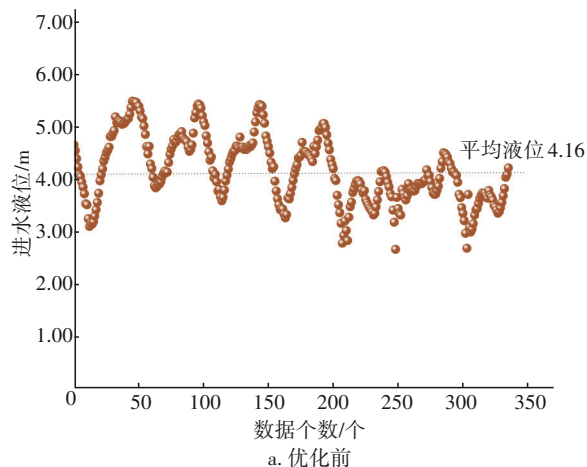


图3 优化策略实施前后进水泵房液位变化

Fig.3 Changes in liquid level of inlet pump room before and after implementation of optimization strategy

从图3可以看出,采取措施前进水泵房的平均液位为4.16 m,最高液位为5.49 m,最低液位为2.67 m,已接近保护液位,处于最佳液位区间的时间仅占54.47%。此外,有3 d的最低液位甚至达到3.00 m以下。这种情况不仅导致厂区耗能大幅增加,还对泵组的使用寿命产生了负面影响。在实施优化措施后,运行情况明显改善,进水泵房的平均液位提高到5.01 m,最高液位为6.64 m,最低液位为3.36 m,处于最佳液位区间的时间占比显著提升至86.31%,并且没有出现液位低于3.00 m的情况。结果表明,优化后的自控系统能够更好地控制进水

泵房的液位,进一步保障泵组在实际运行过程中的安全性和稳定性。

2.4 实施前后电单耗对比

图4为污水处理厂月处理水量和泵组的月均电单耗的变化。由图4可知,采取措施前后月处理水量变化幅度仅为1.4%,但从月均电单耗可以看出,实施优化措施前(2023年4月—7月),月平均电单耗为 $0.054 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,最大值高达 $0.056 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。实施优化措施后,2024年4月—7月的月均电单耗为 $0.047 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,最大值为 $0.048 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。在处理水量变化不大的前提下,泵组的月均电单耗值降低12.96%^[9-10]。进水泵房泵组为污水处理厂的主要耗电设备,在处理水量稳定的前提下,降低泵组的电单耗,能够有效地降低污水处理厂总耗电量,进而降低运营成本,具有良好的经济效益。

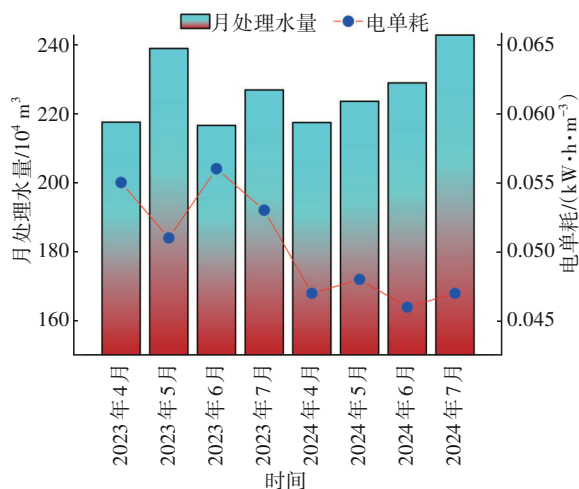


图4 处理水量与泵组电单耗

Fig.4 Treatment water volume and power consumption of pump unit

2023年6月和2024年6月阶梯电价时段平均处理水量及泵耗电量占比见图5。可以看出,2023年6月在电价的峰、平、谷时段,日均处理水量分别为26 062、20 418和25 693 m^3 ,分别占日均总水量的36.1%、28.3%和35.6%。同时,3个时段所消耗的电量占泵组日均总电耗的比例分别为37.4%、27.7%和34.9%。电价处于谷、平时段时,其处理水量占日均处理水量的63.9%,能耗则占泵组日均总能耗的62.6%。2024年6月在电价的峰、平、谷时段,日均处理水量分别为24 837、23 049和28 378 m^3 ,分别占日均总水量的32.6%、30.2%和37.2%。同时,这3个时段所消耗的电量占泵组日均总电耗

的比例分别为33.0%、30.3%和36.7%。电价处于谷、平时段时,其处理水量达到日均处理水量的67.2%,而能耗则占泵组日均总能耗的67.0%。与实施优化措施前相比,2024年6月在谷、平时段日均提升水量提高3.3%,即在确保电单耗降低的前提下,充分考虑阶梯电价的影响,进一步实现运营成本的降低,既有助于提高污水处理厂的经济效益,还能更好地利用电价政策,有利于可持续发展。

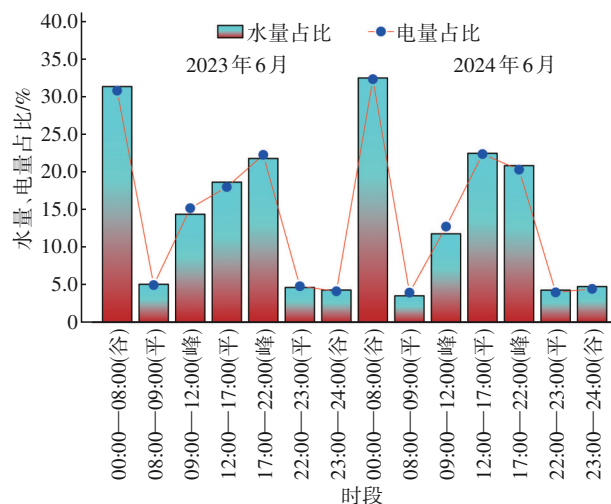


图5 阶梯电价时段内处理水量与耗电量占比

Fig.5 Proportion of water treatment and power consumption during the tiered electricity pricing period

3 结论

① 通过合理设置泵组时序控制边界条件,实施优化措施后泵组平均电单耗为 $0.047 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,较优化前平均电单耗($0.054 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$)同比下降12.96%,有效降低了污水处理厂运营成本。

② 在水量变化不大和保证出水安全的前提下,研究时段内实施优化措施后进水泵房最低液位均处于保证液位以上,处于最佳液位区间的时段由实施前的54.47%提升至86.31%,进一步提高了水泵运行的安全性和高效性。

③ 在确保泵组电单耗降低的同时,充分考虑阶梯电价的影响,时序控制后谷、平时段内提升水量同比提高约3.3%,表明时序控制后能够更好地利用阶梯电价政策,有利于可持续发展。

参考文献:

- [1] 沈耀良. 城市污水处理技术:走向低碳绿色[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2021, 34(3):1-16.
SHEN Yaoliang. Municipal wastewater treatment

- technology: towards low carbon and green [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology Edition), 2021, 34(3): 1-16(in Chinese).
- [2] 郭昉, 吴毅晖, 李波, 等. 我国城镇污水处理厂节能降耗研究现状及发展趋势[J]. 水处理技术, 2017, 43(6):1-4,10.
- GUO Fang, WU Yihui, LI Bo, *et al.* Research status and development trend for energy saving in municipal wastewater treatment plants in China [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(6):1-4,10(in Chinese).
- [3] 匡科, 卢伟, 潘南全, 等. 污水处理厂泵组设备效率评估及运行优化措施分析[J]. 给水排水, 2023, 49(12):49-52.
- KUANG Ke, LU Wei, PAN Nanquan, *et al.* Efficiency evaluation and operation optimization measures analysis of pump units in wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(12): 49-52 (in Chinese).
- [4] 曾思城, 冯国良, 徐辅萍. 污水厂提升泵控制策略的改进措施[J]. 中国给水排水, 2016, 22(20):115-118.
- ZENG Sicheng, FENG Guoliang, XU Fuping. Improvement measures of lift pump control strategy for sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 22(20):115-118(in Chinese).
- [5] 卢伟, 朱曜曜, 魏彬, 等. 华中地区某污水处理厂低碳运行措施及效果[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 2813-2819.
- LU Wei, ZHU Yaoyao, WEI Bin, *et al.* Low-carbon operation measures and analysis of the effects in a sewage treatment plant in central China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 2813-2819(in Chinese).
- [6] 牛住元, 张雅君, 王文海. 污水处理厂污水提升节能措施研究[J]. 给水排水, 2009, 35(5):155-158.
- NIU Zhuyuan, ZHANG Yajun, WANG Wenhai. Research on energy-saving measures for lifting sewage in sewage treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(5):155-158(in Chinese).
- [7] 许光泞, 周林荣, 文欣秀. 污水处理厂的优化节能控制措施与应用[J]. 中国给水排水, 2010, 26(18): 139-143.
- XU Guangning, ZHOU Linrong, WEN Xinxiu. Control methods for optimized energy-saving of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(18):139-143(in Chinese).
- [8] 沈晓铃, 薛敏, 李大成, 等. 无锡惠山污水厂的优化运行与节能降耗[J]. 中国给水排水, 2011, 27(22): 45-47.
- SHEN Xiaoling, XUE Min, LI Dacheng, *et al.* Optimization operation, energy saving and consumption reduction in Wuxi Huishan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(22):45-47(in Chinese).
- [9] 郭思元, 王浩昌, 赵冬泉, 等. 基于稳流节能的污水处理厂进水泵站智能控制方法[J]. 中国给水排水, 2010, 26(20):135-138.
- GUO Siyuan, WANG Haochang, ZHAO Dongquan, *et al.* Intelligent control method of influent pumping station of WWTP based on stable flow energy saving [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(20): 135-138 (in Chinese).
- [10] 李鹏峰, 郑兴灿, 孙永利, 等. A²O工艺污水处理厂的主要能耗点识别及节能途径[J]. 中国给水排水, 2012, 28(8):6-10.
- LI Pengfeng, ZHENG Xingcan, SUN Yongli, *et al.* Study on identification of main energy consumption points and energy-saving methods for WWTP using A²O process [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(8): 6-10(in Chinese).

作者简介:程天石(1996-),男,安徽合肥人,学士,主要研究方向为污水处理与资源化。

E-mail:cheng_tianshi2@ctg.com.cn

收稿日期:2024-06-30

修回日期:2024-09-09

(编辑:衣春敏)