

自动化改造对曝气沉砂池污泥抽吸效率及系统稳定性的提升研究

董 晶, 蔡志超

(西安净水处理有限责任公司, 陕西 西安 710086)

摘 要 曝气沉砂池作为污水处理厂预处理的核心单元, 其运行效率直接影响后续工艺的稳定性与能耗水平。传统曝气沉砂池桥式吸泥机多采用固定速度运行模式, 难以适应池内污泥浓度时空分布不均的复杂工况, 导致抽吸效率低下、能耗浪费及系统稳定性差等问题。本研究以西安市第六污水处理厂曝气沉砂池改造项目为依托, 通过部署实时污泥监测系统、引入变频调速技术及智能控制算法, 对传统吸泥机进行智能化升级。改造后运行数据表明, 污泥浓度波动幅度降低 56%, 标准偏差降低 62%, 抽吸效率提升 20% 以上, 节能效果超过 30%, 系统稳定性与运行经济性得到显著提升。本研究旨在为污水处理厂曝气沉砂池的智能化改造提供技术方案参考与工程实践范例。

关键词 曝气沉砂池; 桥式吸泥机; 自动化改造; 污泥抽吸效率

中图分类号: TU992.23

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.005

0 引言

城市污水处理厂是保障水环境质量的关键基础设施。曝气沉砂池作为污水处理预处理单元, 其稳定高效运行对后续处理工艺至关重要。曝气沉砂池作为去除污水中无机砂粒的核心设施, 通过曝气使污水产生螺旋状旋流, 利用重力与离心力分离砂粒与有机物, 具有沉砂有机物含量低、预曝气、脱臭等优点。然而, 传统曝气沉砂池配套的桥式吸泥机采用固定速度运行模式, 无法响应池内污泥浓度的动态变化。由于进水水质、流量波动及池内流体力学特性, 污泥在池底呈现时空分布不均现象, 传统固定速度运行模式导致高浓度污泥区抽吸不彻底、低浓度区无效空载运行, 造成能源浪费与设备磨损, 还影响砂粒去除率与系统稳定性^[1-2]。

随着智能传感技术和设备智能化技术的高效发展, 污水处理工艺向自动化及智能化发展, 逐渐成为该领域的发展动向^[3-4]。通过利用污泥浓度及界面传感器、变频调速技术及自动化控制策略对曝气沉砂池中桥式吸泥机运行效率进行提升, 进而实现能耗的降低以及高效污泥处理^[5]。与此同时, 为了确保西安市第六污水处理厂曝气沉砂池的桥式吸泥机在运行不间断过程中实施自动化改造, 需要基于不更改原先的 PLC 控制

系统, 在旁路增添新的控制柜, 实现污泥浓度、污泥界面的实时检测以及变速行进。对西安市第六污水处理厂曝气沉砂池的自动化改造不仅能降低运维成本, 还能够很大程度上实现污泥处理的可靠性, 进而使得污水处理工艺向智能化发展, 并为保障城市水环境可持续发展提供技术支撑。

1 曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造目的

传统曝气沉砂池桥式吸泥机采用匀速模式, 使曝气沉砂池中存在如下问题:

1. 曝气沉砂池内污泥时空分布不均匀, 引发少部分区域污泥量堆积较多, 而剩余区域污泥量堆积量较低, 致使桥式吸泥机工作效率较低。此外, 当污泥量堆积严重时, 若人工不能及时完成抽吸, 则需要进行后续污水处理。

2. 曝气沉砂池桥式吸泥机采用恒定速度运行, 无法依据污泥浓度和污泥界面变频调速, 使得在低污泥低浓度区和低污泥界面区常常处于空载运行, 致使能耗浪费。此外, 还引发设备磨损严重, 后期运维成本高昂。

3. 传统曝气沉砂池桥式吸泥机运行系统无法实现污泥浓度及污泥界面实时监测, 其主要依赖人工凭借自身经验判断, 导致系统响应速度比较迟缓, 难以在高污泥浓度及污泥界面实现精准调控目标。

作者简介: 董晶 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 污水处理运行。

2 曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造关键技术方案

2.1 曝气沉砂池中污泥浓度及污泥界面监测系统

对桥式吸泥机双侧采用对称布置污泥浓度传感器和污泥界面传感器。污泥浓度传感器采用荧光示踪法,测量范围 0 mg/L ~ 2 000 mg/L,精度 $\pm 2\%$;污泥界面传感器采用超声波原理,测量范围 0.4 m ~ 10 m,重复性 $\pm 0.5\%$ 。此外,通过设计安装耐腐蚀固定装置(304 不锈钢+耐腐蚀塑料),用于支持传感器深度调节,采用快拆结构便于维护。通过安装高度优化实验,确定污泥浓度传感器最佳安装深度为液面下 4.0 m,污泥界面传感器为液面下 1.5 m,以减少曝气扰动影响,确保数据稳定性。在桥式吸泥机单侧左右两边各安装 1 套传感器,形成双侧监测系统,覆盖沉砂池关键区域,重点监测污泥堆积区。采用耐腐蚀电缆连接传感器,数据实时传输至 PLC 控制系统。传感器信号采用移动平均滤波算法处理,根据池内不同区域扰动程度调整滤波窗口与采样周期,强曝气区采用 7 个~10 个数据点窗口、0.5 秒~1 秒采样周期,稳定沉淀区采用 3 个~7 个数据点窗口、1 秒~5 秒采样周期。

2.2 桥式吸泥机行进装置变频调速系统

对原有吸泥机行进电机通过加装变频器实现吸泥机行进电机无级调速(调节范围 0% ~ 100% 最大速率)。目的为优化电机驱动系统,提升输出稳定性和响应速度,适应智能调速需求。自动化控制策略,使设备在高浓度区域降低行进速度,延长吸泥时间,确保充分抽吸。设备在低浓度区域提高行进速度,减少无效停留,提升运行效率。

2.3 数据采集与分析系统

系统以 PLC 为核心,集成数据采集、处理与指令输出功能,通过控制柜实现人机交互与设备监控。控制柜采用 IP55 防护等级的不锈钢柜体,内置触摸屏操作界面,可实时显示污泥浓度、界面高度、设备速度等参数,并支持历史数据查询与参数设置。数据采集模块实时获取污泥浓度及吸泥机运行状态数据;数据处理模块分析浓度分布并生成调速指令;控制输出模块动态调节吸泥机行进速度,实现智能化运行。系统自动存储浓度及运行参数,支持离线趋势分析,可监测浓度异常或设备故障。

触摸屏监测界面以数字形式清晰地呈现污泥浓度、界面高度等运行参数,并设有单位标注,方便操作人

员准确掌握设备状况。通过触摸屏可进入参数设置界面,调整变频器频率、浓度阈值及运行周期等参数。全部运行参数均设有限定阈值,防止误操作引发设备异常;关键参数修改需管理人员权限验证,确保系统安全稳定。操作人员可查询历史数据,借助数据演化规律掌握设备运行状态,为运行优化提供依据。

2.4 智能控制算法

系统采用四层递阶框架:数据采集层经 RS485 总线每秒采集污泥浓度与界面高度;信号处理层完成预处理与特征提取;控制决策层利用数据融合与模糊控制应对复杂工况;执行层通过 Modbus-TCP 协议与变频器通信,实现电机精准控制,各层通过标准化接口闭环传递信息。污泥负荷指数(SLI)通过下式完成定义:

$$SLI = \alpha \cdot (C/C_{\max}) + \beta \cdot (L/L_{\max}) \quad (1)$$

式(1)中: C 为曝气沉砂池当前的污泥浓度(mg/L); L 为曝气沉砂池当前的污泥界面高度(m); $C_{\max}$ 为污泥浓度量程上限,取 2 000 mg/L; $L_{\max}$ 为曝气沉砂池有效深度; α 、 β 为权重系数分别选取 0.7 和 0.3。

针对高负荷、中负荷、低负荷工况,采用三段式变频调速控制策略:

1. 高负荷工况($SLI \geq 0.8$):

$$v = 0 \text{ m/min} \quad (2)$$

$$t_{\text{del}} = k \cdot SLI \cdot t_{\text{base}} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: v 为桥式吸泥机的运行速度; k 为控制系统的增益,一般选取 1.5 ~ 2.0; t_{base} 为停留时间。

2. 中负荷工况($0.3 \leq SLI < 0.8$):

$$v = v_{\max} \cdot (1 - 0.7 \cdot SLI) \quad (4)$$

式(4)中: $v_{\max}$ 为桥式吸泥机最大运行速度。

3. 低负荷工况($SLI < 0.3$):

$$v = v_{\max} \quad (5)$$

在低负荷工况下,桥式吸泥机需快速通过进而降低运行时间,并需将速度指令转换为电机频率:

$$f = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot v_{\max} v \quad (6)$$

式(6)中: $f_{\min} = 10 \text{ Hz}$ 为防堵转频率; $f_{\max} = 60 \text{ Hz}$ 。

该系统能够根据曝气沉砂池中污泥负荷自行转换运行速度:在高负荷工况以定点抽吸、中负荷工况以自适应调速、低负荷以快速通过。该系统不仅提升了污泥抽吸率,同时还降低了能耗。此外,整个控制系统利用信号处理技术能有效遏制由于曝气干扰所引发的处理误差,进而确保控制决策层的可靠性。

3 结果与分析

对比试验采用实时监测方式,在改造前后各进行 24 小时连续运行测试,两次测试时间相隔一周,确保进水条件和水质特征具有可比性。试验期间,利用新安装的污泥浓度传感器和污泥界面传感器完成数据采集,采样间隔设置为 1 分钟,共获得 2 880 组有效数据。传感器安装位置根据前期试验结果确定,污泥浓度传感器设置在液面下 4.0 m 处,污泥界面传感器设置在液面下 1.5 m 处,两个传感器均距离池壁 0.5 m 以上,以避免边界效应的影响。系统每分钟自动记录污泥浓度与界面高度数据,经移动平均滤波(窗口 10 点)实时处理,同时记录流量、曝气强度等参数。数据经 PLC 上传至中央系统,采用专用软件处理,并设有异常值自动检测与复核机制。

曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造前 24 小时的测量时,池内污泥浓度在 480 mg/L ~ 1 050 mg/L 出现显著的波动,使得整个池内平均污泥浓度 820 mg/L,且污泥浓度标准差高达 215 mg/L,如图 1 所示。这是由于整个池内污泥浓度和污水场进水量呈现正相关,然而时间滞后 0.75 小时。在凌晨三点到五点低负荷时段,整个池内污泥浓度波动幅度在 $\pm 15\%$,其波动范围较为平缓;然而,在上午十点至十二点的高负荷时段,整个池内污泥浓度波动在 $\pm 32\%$,其波动较为明显。此外,在该时段,整个池内污泥界面高度在 1.2 m ~ 2.8 m,波动也较为明显,使得池内界面平均高度为 2.1 m。

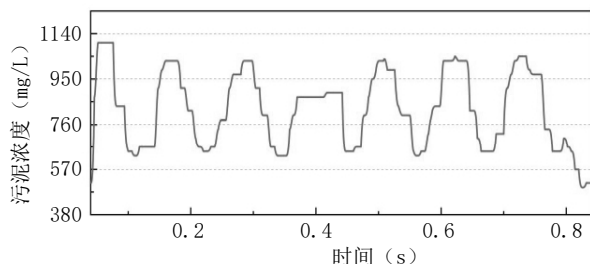


图 1 曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造前采样数据

由图 2 可知,曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造后整个系统运行较为平稳,池内污泥浓度波动范围为 40 mg/L ~ 295 mg/L,平均浓度为 520 mg/L,标准差降低至 95 mg/L。这是由于整个池内污泥浓度和污水场进水量的跟随性有了显著改变,其滞后时间缩短为 0.25 小时。在全天不同时段,整个池内污泥浓度波动能够被控制在 $\pm 10\%$ 以内,尤其是在高负荷时段,主要是因为系统能够通过变频调速桥式吸泥机实现污泥浓度的波动。与此同时,整个池内的污泥高度处于 1.8 m ~ 2.3 m 且平

均污泥界面高度为 2 m。与自动化改造前相比,整个池内的污泥浓度和污泥高度的时空分布有显著的改善。

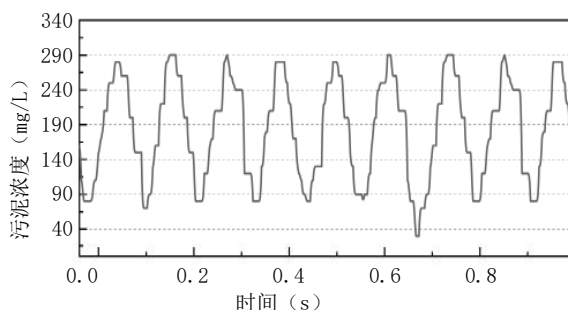


图 2 曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造后的采样数据

通过对比曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造前后采样数据表明,整个控制系统使得池内污泥浓度波动幅值降低了 56%,且标准偏差降低了 62%;整个系统对于污泥负荷响应时间缩短了 67%。整个池内平均污泥浓度提升了 7%,表明曝气沉砂池内污泥沉淀量得到了改善。曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造能显著提升曝气沉砂池运行稳定可靠性。建议后期在系统运维中还需优化控制参数,尤其在进水负荷较大时段,并适当地提高数据采集频率和控制鲁棒性。

4 结束语

本研究聚焦西安市第六污水处理厂的曝气沉砂池桥式吸泥机智能化改造,并有效解决了桥式吸泥机以传统固定速度运行模式所诱发的问题。在智能化改造完成后,曝气沉砂池中污泥浓度波动幅度降低了 56%,标准偏差降低了 62%,污泥抽吸率提高了 20%,且整个运行系统响应时间缩短到 15 分钟以内。研究结果表明,将实时监测、变频调速、智能控制技术用于曝气沉砂池桥式吸泥机改造效果显著,能够为污水处理厂智能化改造提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 张伟,李建国.城市污水处理厂曝气沉砂池运行优化研究[J].给水排水,2021,47(06):112-116.
- [2] 王磊,刘洋,陈曦.基于模糊控制的污水处理厂节能运行策略[J].环境工程学报,2020,14(08):2154-2161.
- [3] 刘海涛,王建华.污泥界面在线监测技术在污水处理中的应用[J].自动化与仪器仪表,2019,36(04):78-81.
- [4] 周敏,赵宇.变频调速技术在污水处理设备节能改造中的应用[J].电气应用,2022,41(02):56-60.
- [5] 陈志刚,李娜.污水处理厂智能化控制系统的设计与实现[J].环境科学与技术,2021,44(05):98-103.