

工程实例

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.016

水厂絮凝沉淀池精准排泥控制系统的研发

张良纯^{1,2}, 文玉坤², 邓家伟², 张锡辉¹

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 珠海九通水务股份有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要: 针对水平管絮凝沉淀池难以精准排泥的问题, 研制了一种多参数精准排泥控制系统, 以泥位检测传感器、控制器和执行器为系统核心, 对沉淀工艺过程参数进行优化, 形成闭环控制系统, 实现沉淀池排泥的智能控制。该控制系统在某中水回用工程的水平管絮凝沉淀池进行了系统测试分析和应用, 取得了较好的排泥效果, 沉淀池出水浊度能长期稳定在2.0 NTU以下。与传统排泥方式相比, 节省水耗47.4%; 单个排泥阀月动作次数减少29次, 避免了沉淀池积泥现象, 具有提升沉淀出水水质、降低能耗、减轻人工操作强度等优点。

关键词: 水平管絮凝沉淀池; 泥位检测传感器; 泥位追踪; 控制系统

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0098-07

Research and Development of Precise Sludge Discharge Control System for Flocculation & Sedimentation in Waterworks

ZHANG Liang-chun^{1,2}, WEN Yu-kun², DENG Jia-wei², ZHANG Xi-hui¹

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. Zhuhai 9 TONE Water Service Inc., Zhuhai 519000, China)

Abstract: A multi-parameter precise sludge discharge control system was developed, aiming at the difficulty of precise sludge discharge control in a horizontal tube flocculation sedimentation tank. With the sludge level detection sensor, controller and actuator as the core of the system, parameters of the sedimentation process were optimized to develop a closed-loop control system and realize intelligent control of sludge discharge in sedimentation tank. The control system has been tested, analyzed and applied in the horizontal tube flocculation sedimentation tank of a reclaimed water project and achieved good sludge discharge effect. The effluent turbidity in sedimentation tank can be stabilized below 2.0 NTU for a long time. The water consumption can be saved by 47.4%, compared with the traditional sludge discharge method. And the monthly operation times of single sludge discharge valve were reduced by 29 times, which avoids sludge accumulation in the sedimentation tank, and has the advantages of improving effluent quality, saving energy and reducing manual operation.

Key words: horizontal tube flocculation sedimentation tank; sludge level detection sensor; sludge level tracking; control system

絮凝沉淀池是水厂去除悬浮物的关键环节,沉淀出水水质会直接影响出厂水的安全性和卫生指标。絮凝沉淀池排泥系统的高效运行可以提升沉淀出水水质、降低出水浊度、减少排泥水量、降低自用水消耗量和电耗等^[1-2]。通常,絮凝沉淀池的排泥方式包括重力排泥、虹吸排泥和机械排泥等,其中重力排泥应用最广。然而,现有絮凝沉淀池的重力排泥控制系统主要依赖人工经验进行定时定量排泥,无法根据原水水质自动进行参数修正和调整,导致排水量大、污泥处理费高。为解决以上问题,通过研究水平管絮凝沉淀池的絮凝特征、固液分离过程以及原水水质、污泥沉降、污泥分界面等工艺参数,构建了以传感器、控制器和执行器为核心的精准排泥控制系统,对沉淀过程的工艺参数进行优化,建立了闭环控制系统,从而实现了水平管絮凝沉淀池全自动排泥,提高了出厂水水质。

1 控制系统结构

絮凝沉淀池污泥具有非线性、时变性、联动性、模糊性的特点,这使得仅依靠单一参数或规律难以准确判断排泥周期和排泥持续时间。为了确保水平管絮凝沉淀池中污泥定期排放,提出了一种精准排泥控制系统——基于可编程控制器(PLC),以原位污泥堆积高度为核心,采用多参数模型控制。该控制系统结构包括4个层次,分别是感知检测层、协调控制层、通信层、数据分析层,如图1所示。

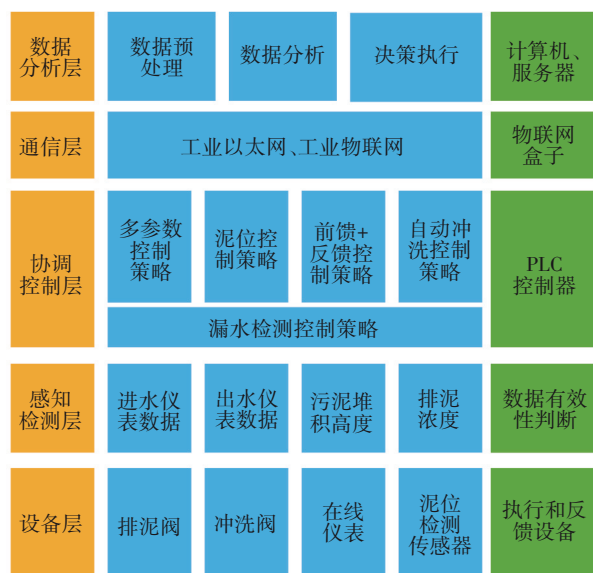


图1 控制系统总架构

Fig.1 Control system general architecture

① 感知检测层。感知检测层是控制系统中数据采集和处理的关键组成部分,旨在实时监测和分析水平管絮凝沉淀池中污泥的生成过程。除采用常规在线监测仪器外,首次引入光电传感器,将其浸入沉淀池,通过特定光波段照射判断沉淀池内污泥的堆积高度,并对其进行实时采集和处理。考虑到污泥的性质和环境因素的影响,系统还配备了温度、加药量、浑浊度、液位、流量等工艺和环境参数传感器,以实现系统数据的有效补偿和校正。这些传感器的数据将传输到数据中心进一步处理。

② 协调控制层。协调控制层主要由控制器和执行器组成,用于实现系统的控制功能和输出动作。采用PLC并配备高速I/O接口,以便将控制系统生成的控制命令转换为执行操作,并确保系统能够高效可靠地运行。在此层面上,实现了对排泥阀门或排泥泵的控制。在保证排泥效果的前提下,尽可能缩短排泥时间,延长排泥周期,以降低能耗、减少设备工作时间、提高设备使用寿命。

③ 通信层。通信层是连接协调控制层和数据分析层的关键通道,对于实现准确和及时的数据交互至关重要。该层在系统设计中兼容了工业以太网和工业物联网,并能根据信号强度自动选择合适的通信方式,从而保证数据的及时、准确传输。

④ 数据分析层。数据分析层是对传感器采集的数据进行深度处理、分析和决策的核心部分。此层还包括对控制层的反馈、执行和故障检测等功能。采用数据模型技术,对传感器采集的数据进行分块处理和统一管理,并建立相应的控制模型,实现系统的即时控制和反馈。比如浊度变化率、沉淀池污泥堆积速率、流量波动率等。为提高系统的可靠性和稳定性,还使用了多路径冗余控制和错误容忍算法等措施,这些结果能够为精准排泥提供更为准确实时的控制策略。此外,还可以利用云计算技术,在云服务器储存所有数据,实现数据共享,从而实现多个类似项目的同时控制。

精准排泥控制系统组成见图2。该控制系统由沉淀分离区的泥位检测传感器、各排泥支管上的排泥效果检测装置、沉淀池的液位传感器、在线仪表(进水流量、进水浊度)、排泥阀门、PLC、云平台等组成。在系统开发过程中,充分考虑了兼容接口的设计,以满足各种仪器仪表和外部系统接入需求。通过融合工业物联网技术,充分利用云服务器的数据

处理能力,并通过人机界面(HMI)与云服务器进行数据连接。同时,在HMI上进行二次开发,实现直观的数字化展示和人机交互界面。

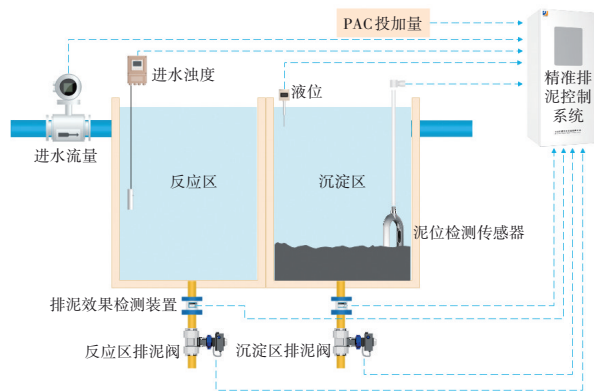


图2 排泥控制系统的组成

Fig.2 Composition of sludge discharge control system

2 控制策略

水平管絮凝沉淀池从进水至出水分为几个不同的区段,每个区段底部会形成不同深度的积泥,但每个区段各区域内横向断面的积泥高度基本一致^[1]。水平管絮凝沉淀池从进水端依次划分为高效絮核塔、筛板絮凝区、整流区、布水区、沉淀分离区、集水区、出水区,每个区段都具备相对独立的排泥功能,且每一个区段都设置排泥支管,通过控制排泥支管的排泥阀开关来实现污泥排放。水平管絮凝沉淀池工艺结构^[3]见图3。

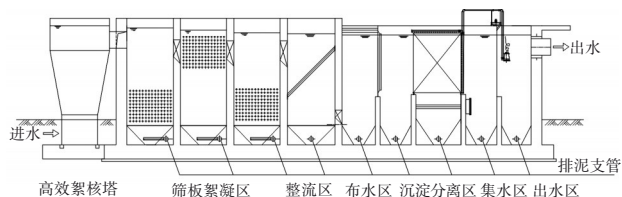


图3 絮凝沉淀池工艺结构

Fig.3 Process structure of flocculation sedimentation tank

2.1 污泥堆积高度检测

在生产水的过程中,随着进水水质和进水流量变化,在相同时间内沉淀池底部污泥堆积高度是不同的,因此准确地判断污泥堆积高度对精准控制排泥周期至关重要。沉淀池底部的污泥主要由胶体、黏土杂质和水空隙组成。泥位检测传感器能穿透水空隙形成回路,实现对污泥堆积高度的检测;在沉淀过程中,污泥底部会形成一个渐变、模糊的水分界面(见图4)。

随着污泥的沉淀堆积,分界面逐渐上移。分界

面以下污泥的水空隙逐渐减小,密度增大,使得污泥趋于静止态。当污泥堆积高度超过设置的检测高度,分界面上移至传感器之上,沉淀污泥中的水空隙几乎消失,使传感器对射光无法穿透至接收端。通过检测接收端光强度的变化,可以准确检测污泥堆积高度,将检测泥位与设定泥位阈值进行比较,可以输出排泥请求,实现对排泥周期的自动判断。

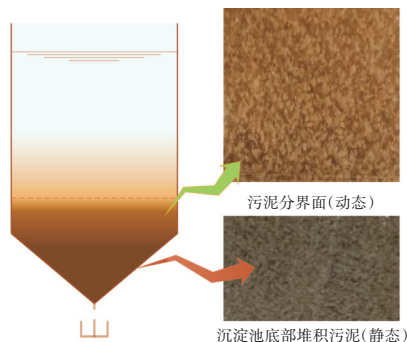


图4 污泥沉淀特征

Fig.4 Characteristic of sludge precipitation

2.2 多参数模型控制

絮凝沉淀池的产泥量与进水流量、进水浊度、PAC投加量、运行时间等因素密切相关。通过建立数据分析模型,可以简单地估算一定时间内絮凝沉淀池产生的总泥量,将总泥量作为控制变量,建立模型,可以推算出排泥周期和排泥持续时间。

对于絮凝区,由于尚未形成颗粒絮体核,底部污泥较为浑浊,直接检测底部污泥量相对困难。因此,系统采用数据模型,通过计算絮凝沉淀池运行过程中产生的干泥量来估算所需的排泥周期。絮凝沉淀池干泥量采用日本水道协会《水道设施设计指南》(2000)的公式进行计算:

$$TDS = Q(T \times E_1 + A \times E_2) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中:TDS为总干泥量,t/h;Q为进水量,m³/h;T为原水浊度,NTU;E₁为浊度与SS的换算系数,0.7~2.2;A为铝盐混凝剂加注率,mg/L;E₂为Al₂O₃与Al(OH)₃的换算系数,取1.53。

通过式(1)可以估算出絮凝沉淀池每小时产生的干泥量,而絮凝沉淀池中污泥含水率P₁较高,根据经验,P₁一般按99.5%计,即沉淀池污泥含固率为0.5%,则池底产泥量Q₁可通过下式计算得出:

$$Q_1 = \frac{TDS}{\rho(1 - P_1)} \quad (2)$$

式中: ρ 为污泥密度, g/m^3 。

根据上述计算,可以获得一个相对准确的絮凝沉淀池每小时产泥量,再通过沉淀池污泥堆积高度计算沉淀池污泥量,并结合絮凝沉淀池各区段的积泥曲线规律,可以推算出各支管阀门的排泥周期和排泥持续时间。将产泥量输入模型,通过多参数模型控制系统(见图5)实现对排泥周期和排泥持续时间的计算。

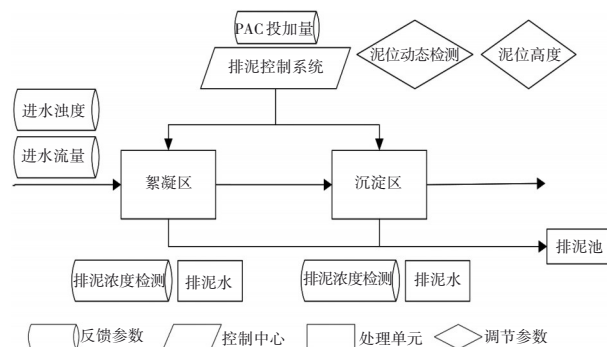


图5 多参数模型控制系统

Fig.5 Multi-parameter model control system

2.3 泥位自动追踪控制

泥位自动追踪控制流程见图6。

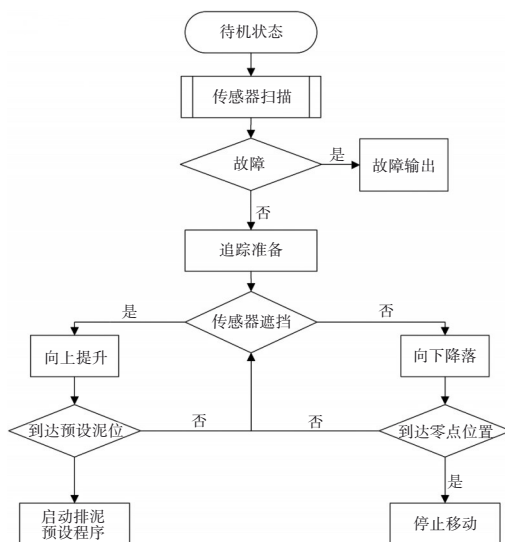


图6 泥位自动追踪控制流程

Fig.6 Automatic tracking control flow of sludge level

通过污泥堆积高度检测,可以确定沉淀池的排泥周期,但不能确定排泥的持续时间。为此,将泥位检测传感器与伺服定位技术相结合,实现泥位检测传感器与污泥堆积高度同步,跟踪沉淀池中积泥的实时高度。设定积泥高度上限和积泥零位,当传感器随污泥堆积上移至积泥上限时,则输出排泥请

求,开始排泥;传感器跟随污泥高度下降而下降,当下降至积泥零位时,则停止排泥请求。泥位自动追踪控制技术通过泥位检测传感器的移动行程来判断排泥的动作条件和停止条件。该泥位自动追踪控制技术为准确判断排泥持续时间提供了一种可靠的方法。

将泥位检测传感器浸入沉淀池泥斗,通过传感器检测的逻辑值进行提升或下降的追踪控制。提升的累计高度即可反映实际的污泥堆积高度。

实际污泥堆积高度可以通过下式进行理论换算得出:

$$H = H_1 - H_2 \times K_i \quad (3)$$

式中: H 为沉淀池的实际污泥堆积高度, mm ; H_1 为泥位检测传感器提升的累计高度, mm ; H_2 为泥位检测传感器的修正高度,一般取值 $30 \sim 60 \text{ mm}$; K_i 为修正系数。

2.4 序批排泥控制

在水厂建设中,由于占地等多种原因,大多数絮凝沉淀池后的储泥池容积被保守考虑。如果多个排泥阀门同时开启,可能导致储泥池溢流或满水等问题。此外,近年来环境要求越来越高,许多絮凝沉淀池排泥系统设计中采用排泥支管并入排泥总管的方式,而放弃了敞开式的排泥渠,以防止排泥污水的气体散发到环境中。然而,如果同时有多组阀门开启,会导致总管中形成壅水现象,从而影响排泥效果。为了避免这些问题,精准排泥控制系统采用先进先出的阀门开启排序控制。通过该方式,可以有效解决排泥过程中的问题,并提高排泥效果。

2.5 自动冲洗

泥位检测传感器在精准排泥控制系统中扮演着重要的角色,用于准确和稳定地检测污泥的堆积高度。为确保检测回路不受影响,需要考虑保持透镜表面清洁。为了实现方便,传感器采用压缩空气或压力水进行射流冲洗,并且推荐将冲洗压力控制在 $0.3 \sim 0.8 \text{ MPa}$,压力太小冲洗效果不理想。

传感器外观结构见图7(a)。

系统通过控制冲洗管路上电磁阀通断来实现冲洗功能调用。这些措施能够保证泥位检测传感器的准确性和稳定性,从而提高精准排泥控制系统的性能和效果。

自动冲洗流程见图7(b)。

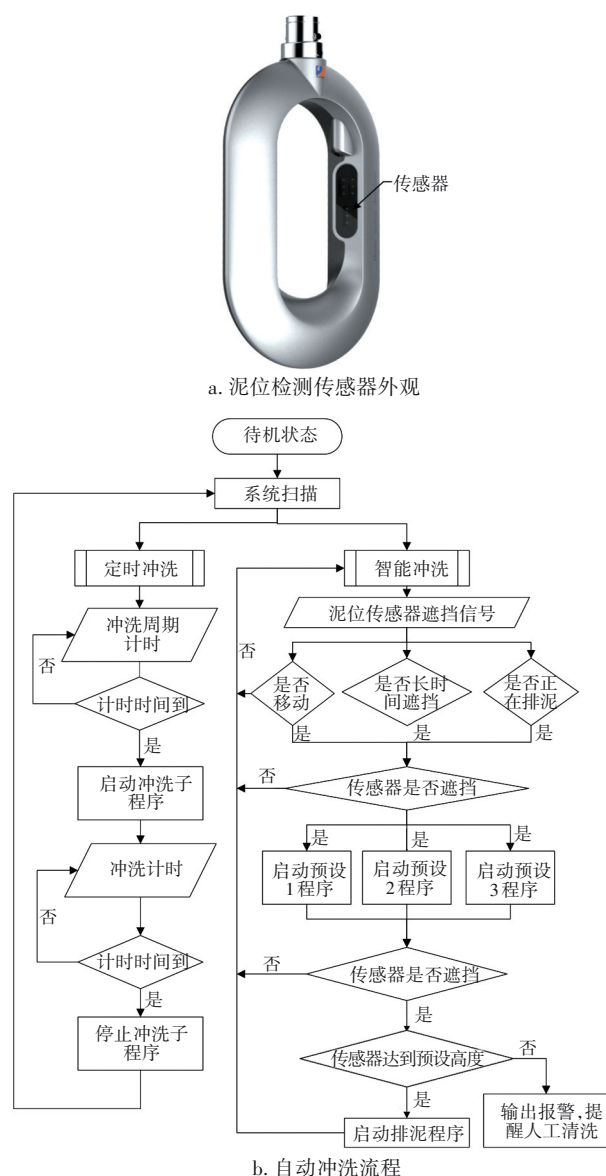


图7 泥位检测传感器外观结构及自动冲洗流程

Fig.7 Appearance structure and automatic washing flow chart of sludge level detection sensor

3 控制参数

精准排泥控制系统的控制参数是指影响排泥效果的关键因素,主要包括以下几项:

① 积泥高度。指沉淀池底部堆积泥层的高度,是判断排泥需求的重要指标。一般而言,泥层高度越大,排泥需求越强。本系统采用泥位检测传感器测量泥层高度,并将其作为数据模型的重要输入变量。

② 沉淀池液位。指沉淀池内水面的高度,是判断沉淀效率和水量损失的关键指标。一般来说,

在进水流量恒定的情况下,液位越高,沉淀效率越低,水量损失越大。本系统采用超声波液位计检测液位,并作为数据模型的另外一个输入变量。

③ 进水流量。进水流量是影响絮凝沉淀池处理效果的重要因素之一,直接影响絮凝沉淀池的停留时间、沉淀效果和产泥量等。进水流量增加时,絮凝沉淀池产泥量也会增加,因此排泥周期相应缩短。本系统采用电磁流量计监测进水流量,并将其作为数据模型的前馈变量。

④ 排泥周期。指控制排泥管道出口阀门的开启间隔时间,是影响排泥效果和排泥量的重要参数。排泥周期越长,排泥耗水量越低,但也可能造成絮凝沉淀池积泥堵塞。控制系统通过检测沉淀池内污泥堆积高度判断排泥高度阈值,采用自适应控制策略,实现排泥周期的自动调整,是排泥控制的关键中间变量。

⑤ 排泥量。指絮凝沉淀池处理水的过程中,对絮凝池和沉淀池中的杂质和污泥的总排除量,排泥量过高会造成水资源的浪费,一般通过排泥水污泥浓度和持续时间进行计算。通过实时监测排泥支管的排泥效果,在排出污泥的浓度降到设定阈值范围后,通过反馈关阀信号值控制系统,实现排泥量的柔性控制。排泥量可以利用多种传感器进行检测和计算,包括支管安装微波传感器、光电传感器、浊度传感器和泥位检测传感器追踪等。这些传感器提供了关键的检测数据,通过对测量数据进行计算,可以确定排泥量。排泥量在系统中作为反馈变量之一,确保了定量排放和自耗水的节约。

4 应用分析

4.1 应用背景

内蒙古某中水回用厂采用水平管絮凝沉淀池,设计规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分两座设置,处理后水质达到《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)标准,于2022年1月16日开始单机调试,1月28日开始通水试运行。每座絮凝沉淀池配置18个气动排泥阀、1套泥位检测传感器及控制系统,2座沉淀池仪表检测系统统一设置。控制系统见图8。感知层的药剂投加量和进出水浊度检测仪表、沉淀池液位计、泥位检测传感器等数据通过工业以太网(Profinet)总线反馈给精准排泥控制系统;协调控制层采用西门子S7-1200 CPU+Smart I/O进

行协调控制,控制指令通过总线系统传输至各现场沉淀池阀门控制箱对气动阀进行控制。将沉淀池的泥位检测高度作为基准,通过模型策略的分析计算出其余区域排泥阀门的排泥周期,实现柔性调整。

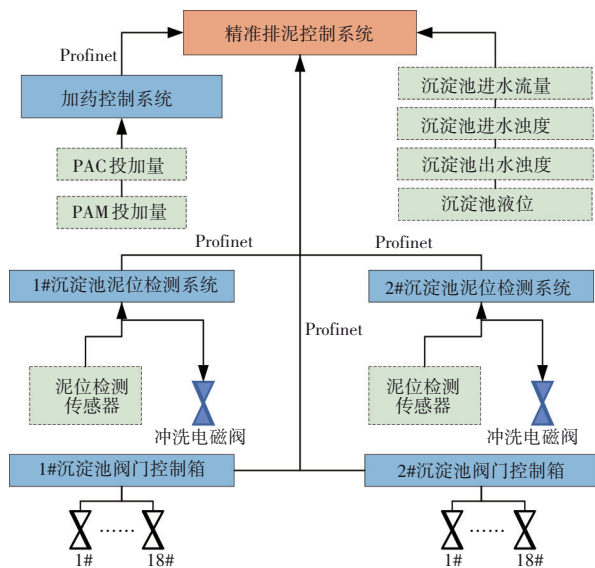


图8 沉淀池精准排泥控制系统
Fig.8 Precise sludge discharge control system of sedimentation tank

4.2 应用效果及经济效益分析

该厂水平管絮凝沉淀池采用精准排泥控制系统后,固定排泥持续时间,系统自动计算排泥周期,实现了排泥周期的自动修正。排泥过程自动化控制,无需人为干预。

定时排泥控制系统与精准排泥控制系统的浊度变化对比见图9。

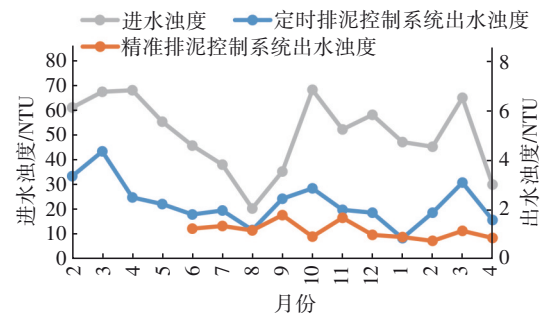


图9 定时排泥控制系统与精准排泥控制系统的浊度变化比较
Fig.9 Comparison of turbidity variation between timing and precision sludge discharge control system

数据来自该厂在线监控历史数据库,储存周期为60 min,通过取月平均值绘制。可以看出,沉淀池定时排泥的出水浊度波动明显高于精准排泥控制系统。精准排泥控制系统自2022年6月投入运行以来,沉淀池出水浊度均稳定在2.0 NTU以下。

考虑到水平管絮凝沉淀池中沉淀管的正下方通常是积泥最多的区域,排泥周期也相对较短,因此具有代表性。在统计排泥自耗水量时,选择沉淀池正下方的排泥支管作为统计对象,能更准确地反映排泥过程中的最大自耗水量情况,排泥支管管径DN200,排泥管中心标高与沉淀池液位为4.35 m。每次排泥开启一组排泥阀(2台),持续120 s。通过与传统的固定周期排泥方式进行比较(见表1),沉淀池正下方排泥支管在2022年7月的统计周期内节约自耗水量1 270.08 m³,与传统固定周期定时排泥相比,节水约47.4%;减少单个排泥阀动作次数29次/月,有效地降低了运行能耗、提高了设备寿命,实现了较好的节能降耗效果。

表1 2022年7月定时排泥控制系统与精准排泥控制系统的对比

Tab.1 Comparison between timing and precision sludge discharge control system in July 2022

项目	固定周期排泥控制系统				精准排泥控制系统			
	运行周期/ min	单次排泥自 耗水/m ³	排泥次数	累计排泥自 耗水/m ³	运行周期/ min	单次排泥自 耗水/m ³	排泥次数	累计排泥 自耗水/m ³
7月1日—8日	720	43.2	16	691.2	1 480	43.2	7.8	336.96
7月9日—16日	720	43.2	16	691.2	1 460	43.2	7.9	341.28
7月17日—24日	720	43.2	16	691.2	1 320	43.2	8.7	375.84
7月25日—31日	720	43.2	14	604.8	1 410	43.2	8.2	354.24
合计			62	2 678.4			32.6	1 408.32

从制水成本角度,采用排泥周期自动控制,仅一组排泥阀可节约自耗水量约15 240 m³/a,沉淀池系统共有18组排泥阀,因此预计可节约自耗水达到

27.4×10⁴ m³/a,极大减轻了污泥处理系统负担,从而降低污泥处理费等支出。

根据数据分析,制水成本为0.8元/m³,按节约

自耗水 $27.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 计, 预计可产生经济效益 21.92 万元/a。同时, 由于精准排泥控制系统提高了出水水质的稳定性, 这将进一步提高售水质量和市场竞争力, 有望回用到工业区更多企业, 从而增加售水收益。

目前, 沉淀池排泥系统常用的泥位检测方式包括超声波泥位计和污泥浓度计。然而, 这些方法在精准度和稳定性方面均受到限制^[4-5]。采用的泥位检测传感器虽实现了原位精准的污泥堆积高度检测, 但检测效果受光源制造和处理工艺限制, 目前仅在自来水沉淀池和中水回用处理沉淀池中可靠应用并验证。未来随着实时检测技术的进步, 可引入更先进的光电器件、图像识别技术等, 以更好地对污泥产生过程和沉淀过程的动态进行监测, 也可加入微波传感器进行密度判断, 进一步提高光线强度和测量精度^[6]。基于这些监测数据, 控制系统可以提供更及时的反馈和调整排泥策略, 确保排泥控制更加精准和可靠, 为推广到更多的应用场景提供技术支持。

5 结论

采用精准排泥控制系统的絮凝沉淀池可实现对污泥堆积高度的准确检测, 并结合进水和出水多参数建立污泥分析数学模型, 从而自动调整排泥周期, 降低总排泥次数。该系统通过实时监测排泥过程, 确定排泥持续时间, 有效避免了过量排放污泥。应用精准排泥控制系统的项目具有维护简单、使用成本低、性能稳定可靠的优势, 基本实现了排泥的全自动运行。该控制系统在重力排泥水平管絮凝沉淀池中进行测试分析, 并成功应用于多个工程项目, 取得良好效果, 节约了沉淀池排泥自耗水量, 提高了排泥设备运行寿命, 出水浊度能长期稳定在 2.0 NTU 以下, 且未出现沉淀池积泥现象。

参考文献:

- [1] 赵颖伟, 李婷, 黄婷婷, 等. 红外反射技术在中小水厂排泥系统改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 102-106.
- ZHAO Yingwei, LI Ting, HUANG Tingting, *et al.* Application of infrared reflection technology in the reform of sludge discharge system in medium and small waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(6): 102-106 (in Chinese).
- [2] 伍新政. 平流沉淀池排泥系统的优化改造[J]. 给水排水, 2011, 37(2): 19-21.
- WU Xinzhen. Optimal modification of horizontal settling tank sludge drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(2): 19-21 (in Chinese).
- [3] 张建国, 张良纯, 刘玲云. 水平管沉淀分离装置的开发研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9): 47-51.
- ZHANG Jianguo, ZHANG Liangchun, LIU Lingyun. Development of horizontal tube sedimentation and separation device [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(9): 47-51 (in Chinese).
- [4] 赵延广, 雷斌. 超声波泥位计应用问题及解决措施[J]. 分析仪器, 2022(3): 40-43.
- ZHAO Yanguang, LEI Bin. The application issues of ultrasonic interface analyzer [J]. Analytical Instrumentation, 2022(3): 40-43 (in Chinese).
- [5] 叶治安, 慕时荣, 常建军, 等. 石灰混凝工艺自动排泥控制方式的研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(10): 109-112.
- YE Zhi'an, MU Shirong, CHANG Jianjun, *et al.* Research on the automatic control method of sludge discharge by lime coagulation process [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(10): 109-112 (in Chinese).
- [6] 刘国欢, 董兴震, 侯华俊. 基于微波变送器实时监测的沉淀池排泥运行优化[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 120-126.
- LIU Guohuan, DONG Xingzhen, HOU Huajun. Optimization of sludge discharge in sedimentation tank based on real-time monitoring of microwave transmitter [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 120-126 (in Chinese).

作者简介: 张良纯(1964—), 男, 湖北洪湖人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水处理技术。

E-mail: manage9@9tone.com

收稿日期: 2023-06-12

修回日期: 2023-07-27

(编辑: 衣春敏)