

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 08. 012

自来水厂滤池智能反冲洗系统研究

何嘉莉, 方伟乐, 周沛良, 刘瑾科, 单秀兴, 廖树标
(东莞市水务环境投资控股集团供水有限公司, 广东 东莞 523112)

摘 要: 针对目前国内大部分自来水厂的滤池自动反冲洗控制主要通过人工设定滤池反冲洗周期的问题,以传统工艺水厂为例,不增加设备成本,利用原有自控条件,对过滤系统进行升级改造。根据试验水厂滤池的生产数据,利用神经网络的多层感知器(MLP)和多元回归算法建立数学模型,并将时间周期、水位、清水阀开度、压差等作为滤池反冲洗的触发条件,结合可编程逻辑控制器(PLC)技术,为滤池设定最优的反冲洗周期,保障滤池正常运行并起到节能降耗的作用。试验水厂运行数据显示,该系统在保证滤池反冲洗效果的同时,平均延长滤池运行时间约7 h,预计节省反冲洗清水约60 391 m³/a、反冲洗电耗约5 110 kW·h/a。

关键词: 自来水厂; 滤池; 升级改造; 智能反冲洗; 数学模型; 多层感知器; 多元回归算法

中图分类号: TU991 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2026)08-0088-07

Research on Intelligent Backwashing System of Filters in Waterworks

HE Jiali, FANG Weile, ZHOU Peiliang, LIU Jinke, SHAN Xiuxing,
LIAO Shubiao

(Dongguan Water and Environment Group Water Supply Co. Ltd., Dongguan 523112, China)

Abstract: The intelligent backwashing system for filters is an important part of the construction of a smart waterworks. At present, in most domestic waterworks, the automatic backwashing control of filters is mainly achieved through manually setting the backwashing cycle of the filter. This study takes a traditional process waterworks as an example. Considering not to increase the equipment cost, it upgrades and transforms the waterworks filtration system based on the existing automatic control conditions of the waterworks. According to the production data of the filter in the test waterworks, mathematical models were established using MLP neural networks and multiple regression algorithms. Time cycle, water level, clear water valve opening, and pressure difference are taken as the trigger conditions for filter backwashing. Combined with PLC control technology, the optimal backwashing cycle is set for the filter to ensure its normal operation and achieve energy saving and consumption reduction. The operation data of the test waterworks shows that the system can ensure the backwashing effect of the filter while extending its operating time by an average of about 7 hours. It is estimated that about 60 391 m³ of backwashing water and 5 110 kW·h of backwashing electricity can be saved each year.

Keywords: waterworks; filter; upgrading and transformation; intelligent backwashing; mathematical model; multilayer perceptron (MLP); multiple regression algorithm

在自来水厂滤池工作过程中,反冲洗效果直接影响滤池出水水质。反冲洗强度、时间与反冲洗周期均为影响反冲洗效果的重要参数。在确保反冲洗强度与时间参数满足设计要求的前提下,合理设定反冲洗周期尤为重要。若反冲洗周期过长,会影响过滤效果且降低出水水质的安全性,正常的反冲洗强度与时间设置也不能将滤料表面冲洗干净,并可能出现反冲洗废水无法排尽的问题,从而导致滤渣又回到滤池中,时间一长,滤层表面将形成泥膜;相反,若反冲洗周期过短,则会浪费清水和能耗。国内传统水厂多采用时间控制法^[1],依赖人工经验值,难以适应水质和季节变化,存在较大优化空间。

目前,关于自来水厂滤池智能控制的研究主要集中在系统条件优化和模型开发方面。王恒兴^[2]针对北京第九水厂滤池夏季滤程短及反冲洗控制问题,提出变频调速替代主控阀、分步冲洗方案,设计高可靠性自控系统,保障供水安全。宋文霞^[3]在水厂自动化控制系统基本功能实现的基础上,在V型滤池引入智能全自动运行算法,提高了滤池的运行效率,节约成本并实现稳定控制。王国权^[4]通过实验分析和数学模型,研究了滤层水头损失和阀门阻力特性,提出调控阀门开度实现恒速过滤的方法,同时,综合考虑滤池液位、浊度、用水高峰和清水池储水量,优化反冲洗启动条件。严晋^[5]以某水厂滤池自动控制系统为研究对象,以Control Logix硬件系统和软件系统为基础,设计了一套滤池自动控制系统。Erfianto等^[6]开发了一种基于模糊逻辑控制器的过滤系统,可自动监测浊度和pH,并在浊度超标时自动反冲洗,pH异常时自动关闭进水。Kale等^[7]通过分析水厂数据,利用逻辑回归、支持向量回归、多元回归和决策树回归等机器学习算法建立模型,最终采用决策树回归预测滤床剩余反冲洗时间。Yi等^[8]基于运行参数和水质数据库构建,通过优化算法确定神经网络结构和参数。该模型用于混凝剂投加和过滤系统的预测与控制,并在Matlab环境中实现。

从国内外相关研究情况来看,专门针对滤池反冲洗周期预测结合可编辑逻辑控制器(PLC)控制的智能化研究较少,本研究利用水厂原有自控条件,对过滤系统进行升级改造,寻求一种更加科学合理的滤池反冲洗管理运行模式,使用数学模型预测滤池运行时间周期,将时间周期、水位、清水阀开度、

压差等作为滤池反冲洗的触发条件,结合PLC技术,为滤池设定最优的反冲洗周期,为自来水厂工艺优化运行提供技术支持。

1 数据收集与反冲洗参数

本次试验的自来水厂为G水厂,原水取自D江。该水厂采用常规处理工艺(混凝-沉淀-过滤-消毒),设计处理规模为9万m³/d,共有10座砂滤池,每座滤池处理能力相同,均为V型滤池,使用年限为19年,选用均匀级配粗砂滤料, $d_{10}=1.04$, $K_{60}=1.38$,正常滤速6~10 m/h,反冲洗效果正常。在常规水质条件下,反冲洗周期人工设定为48 h,反冲洗排水终点浊度低于3 NTU,反冲洗后距砂面15 cm处滤料含泥量小于0.2%,单池单次反冲洗清水用量约260 m³。该水厂供水区域固定,日供水量相对稳定,实际供水量约7万m³/d。2022年—2024年原水浊度约为10 NTU,夏季会出现原水浊度升高的情况;原水pH月均值为6.8~7.2,高锰酸盐指数的月均值为1.8~3.2 mg/L,氨氮的月均值为0.1~0.2 mg/L。选择1号滤池进行试验,收集近一年相关统计数据,数据读取频率为1次/min,每组数据含8个参数(原水流量、原水浊度、待滤水浊度、滤后水浊度、滤池水位、清水阀开度、滤层压差和过滤时间)。

V型砂滤池反冲洗分为气冲、气水混冲和水冲3个阶段,反冲洗参数如表1所示。

表1 V型滤池反冲洗参数

Tab.1 Backwashing parameters of V-type filter

参数	气冲	气水混冲	水冲
冲洗强度/[L/(m ² ·s)]	16.8	气:16.8;水:4.5	9.0
冲洗时间/min	2~3	4~5	4~5

2 数据处理与数学模型建立

2.1 数据预处理

正常水质情况下,大部分滤池运行数据相近,因此,筛选了多个具有代表性的滤池运行周期数据进行分析,覆盖了正常水质时期、排涝期(受上游来水影响,原水氨氮短时间内有所升高,最大值不超过0.7 mg/L)、高浊期(夏季暴雨影响)、高藻期。另外,考虑到高藻期水质对滤池的影响与藻类的数量、种类以及天气、持续时间密切相关,因此将原水pH纳入数据分析中,作为反冲洗周期的时间控制条件。

首先对数据进行预处理,剔除原水浊度仪、待

滤水浊度仪、滤后水浊度仪清洗导致的异常数据,剔除滤池停池清洗导致的水位、压差和清水阀开度异常数据,剔除仪表故障等导致的异常数据。对数据进行降噪、去跳处理。因为各参数定义标准不同,还需对数据进行标准化处理。

2.2 数学模型的建立

过滤工艺涉及的影响因素较多,本研究选用神经网络多层感知器(MLP)分析相关统计数据,推断滤池过滤周期。MLP是一种通用的神经网络模型,包括输入层、若干个隐藏层和输出层,每个隐藏层和输出层均包含一个或多个神经元,每个神经元都与上一层的所有神经元相连,信息从输入层通过一系列隐藏层最终到输出层,是典型的前馈神经网络结构,可处理复杂的非线性关系,适用于多种机器学习任务,如分类、回归和模式识别,通过学习大量的训练数据,来建立输入和输出之间的映射关系。

数学建模举例:某周期滤池运行数据见图1。本周周期滤池运行数据属于原水浊度较高时期,原水浊度存在短时间波动情况。反冲洗周期为48 h,滤池运行周期内原水浊度均值为30.99 NTU,待滤水浊度均值为1.17 NTU,滤后水浊度均值为0.07 NTU,数据记录频率为1组/min,该周期共有2 880组数据,剔除异常数据264组,有效数据2 616组。

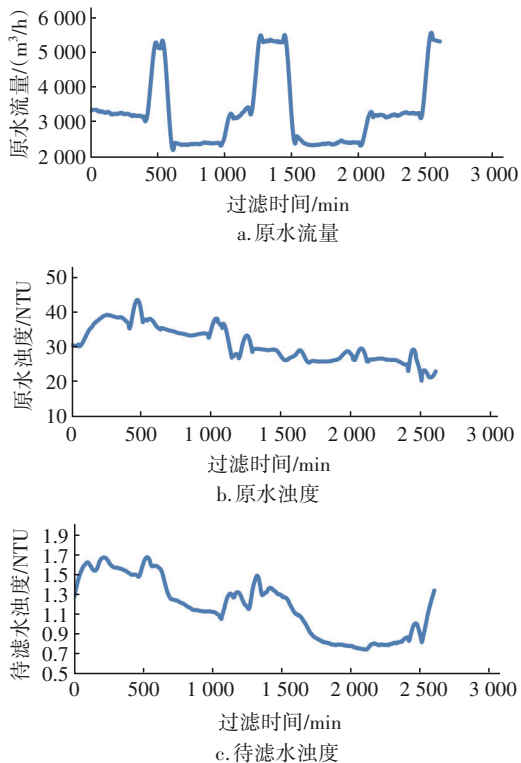


图1 某周期滤池运行数据

Fig.1 Filter operation data of a certain period

确定过滤时间为因变量,原水流量、原水浊度、待滤水浊度、滤后水浊度、水位、清水阀开度、压差为协变量,本模型不存在不同的类别或分组的问题,因此没有因子变量。将数据按照7:3的比例,分为训练集和测试集,训练集用于训练模型,测试集用于验证模型结果,反向优化模型参数。选用自动体系结构,隐藏层数中最小单位数为1,隐藏层数中最大单位数为50。模型培训类型为批处理,优化算法为调整的共轭梯度。培训选型选用默认参数:初始Lambda值为0.000 000 5,初始Sigma值为0.000 05,间隔中心点为0,间隔偏移量为 ± 0.5 。

输出结果显示:输入层由7个协变量和偏差组成,隐藏层1层,该层的单元数有4个;输出层单元数1个,为过滤时间。模型训练完成后的神经网络模型如图2所示。训练相对误差为7.7%,测试相对

误差为6.7%,预测准确率较高。自变量的重要性结果显示,待滤水浊度和原水浊度的标准化重要性较高,接近100%。该滤池运行周期预测结果如图3

所示,滤池运行48 h,预测结果与实际值相符。预测值的残差均匀分布在0线周围,说明模型拟合较好。

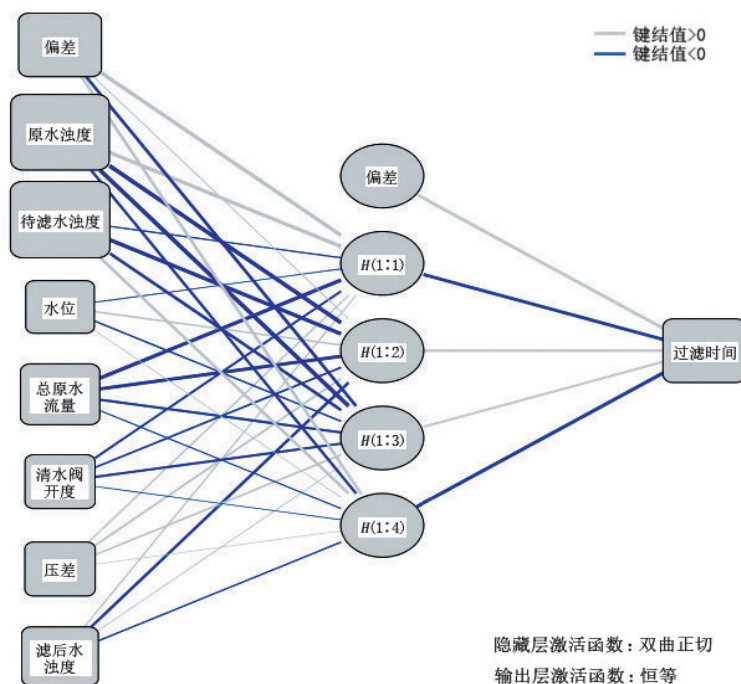


图2 神经网络模型

Fig.2 Neural network model

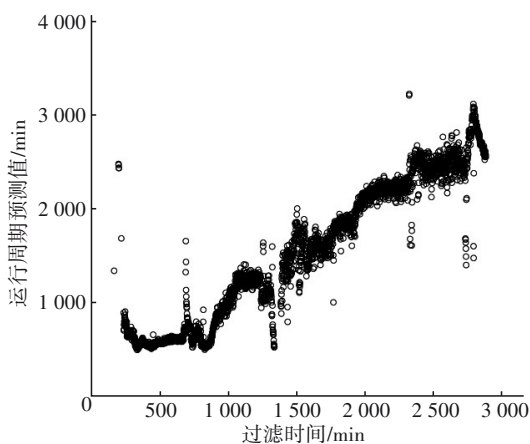


图3 滤池运行周期预测结果

Fig.3 Predicted results of filter operation period

多组预测结果数据综合分析:因滤池采用恒液位控制,压差计和清水阀开度传感器读数存在较多波动,而浊度仪、流量计读数相对稳定,尝试总结多组滤池运行周期内的原水浊度均值、待滤水浊度均值、处理水量与预测的反冲洗周期建立多元回归模型,但结果显示,原水浊度均值为排除变量,其Sigma值显著性水平 >0.05 ,表示差异性不显著。因

此,考虑建立待滤水浊度均值、处理水量对应的预测反冲洗周期数据的数学关系,并针对高藻期对滤池反冲洗周期的影响,增加pH调整系数,作为反冲洗周期的时间控制条件;同时,设定水位、压差和清水阀开度触发反冲洗的条件,制定反冲洗控制程序。滤池数据监测期间,在试验滤池滤后水出水处安装浊度仪(哈希1720-E型在线浊度仪,检测精度为0.0001 NTU),读取数据主要用于数学模型分析,考虑到在每座滤池安装滤后水浊度仪,其设备成本和维护成本较高,因此,单座滤池的滤后水浊度不参与触发反冲洗程序,安装的滤后水浊度仪后续可以挪至其他水厂用于数据监测。

根据近一年的生产运行数据,利用滤池运行周期内待滤水浊度均值、处理水量与反冲洗周期建立数学模型:

$$M_{\text{base}} = -14.05x - 0.426Q + 66.891 \quad R^2 = 0.990 \quad (1)$$

$$y = M_{\text{base}} k_{\text{pH}} \quad (2)$$

式中: M_{base} 为滤池反冲洗周期, h; x 为滤池运行周期待滤水浊度均值, NTU; Q 为滤池运行时间内处理水量累计求和, 万 m^3 ; y 为预测反冲洗周期, h; k_{pH}

为 pH 调整系数。

$$k_{\text{pH}} = -0.5U_{\text{pH}} + 4.5 \quad (3)$$

式中: U_{pH} 为滤池运行周期内原水 pH 均值, pH 为 7.5~8.5 范围内适用, pH<7.5 时 k_{pH} 取 1, pH>8.5 时 U_{pH} 取 8.5。

原水 pH 均值低于 7.5 时, 预测结果见表 2。

表 2 原水 pH 均值低于 7.5 时的预测结果

Tab.2 Prediction results when the average pH of raw water is lower than 7.5

处理水量/万 m ³	待滤水浊度均值/NTU	预测反冲洗周期/h
7	0.40	58
12	0.40	56
16	0.40	54
7	1.00	50
12	1.00	48
16	1.00	46
7	2.00	36
12	2.00	34
16	2.00	32
7	3.00	22
12	3.00	20
16	3.00	18

3 系统架构设计

自来水厂智能反冲洗系统包括数学模型、在线监测系统、PLC 控制系统、生产中控系统和反冲洗系统。其中, 在线监测装置包括原水 pH 计、原水流量计、原水浊度仪、待滤水浊度仪、滤后水浊度仪、液位计、压差计和清水阀开度传感器; PLC 控制系统接收在线监测装置数据, 根据预设的反冲洗控制程序自动计算反冲洗时间条件, 并结合水位、压差和清水阀开度条件判断是否具备反冲洗条件, 发送禁止/启动反冲洗指令; 生产中控系统用于接收 PLC 控制系统发送的控制信号, 通过可视化界面展示在线监测数据和预测的滤池反冲洗周期, 并允许用户切换至自动或手动模式设定反冲洗周期; 反冲洗系统主要包括鼓风机、反冲洗水泵、电动阀门等关键组件。

自来水厂智能反冲洗系统架构如图 4 所示。

原水 pH 计、原水浊度仪和原水流量计安装在原水管道上, 混凝沉淀出水进滤池前管道安装待滤水浊度仪, 滤池安装液位计、压差计, 滤池出水管上的清水阀安装清水阀开度传感器, 滤池出水管上安装滤后水浊度仪。上述仪表和反冲洗系统均与 PLC 控制系统连接, 数学模型写入 PLC 控制系统, 生产

中控系统与 PLC 控制系统连接, 组成自来水厂滤池智能反冲洗系统。

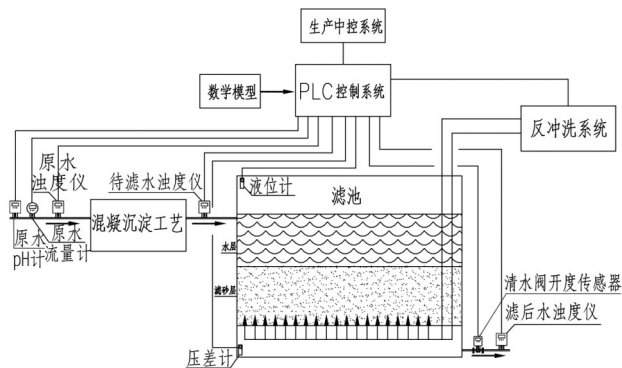


图 4 系统架构

Fig.4 System architecture diagram

4 反冲洗控制程序结构

反冲洗控制程序结构如图 5 所示, 触发反冲洗条件分为 3 种: 时间、水位+清水阀开度、压差+清水阀开度。

① 时间条件: 基于 MLP 的多因素分析结果, 结合多元回归数学模型计算输出, 如果实际运行时间>模型计算输出时间, 则具备反冲洗条件。

② 水位+清水阀开度条件: 根据试验滤池实际运行情况, 试验水厂采用 1.4 m 恒水位控制, 当水位升高、清水阀开度增大, 设置水位≥1.6 m、清水阀开度≥80% 超过 10 min 时, 具备反冲洗条件。

③ 压差+清水阀开度条件: 根据试验滤池实际运行情况, 当压差升高、清水阀开度增大, 设置压差≥180 MPa、清水阀开度≥80% 超过 10 min, 具备反冲洗条件。

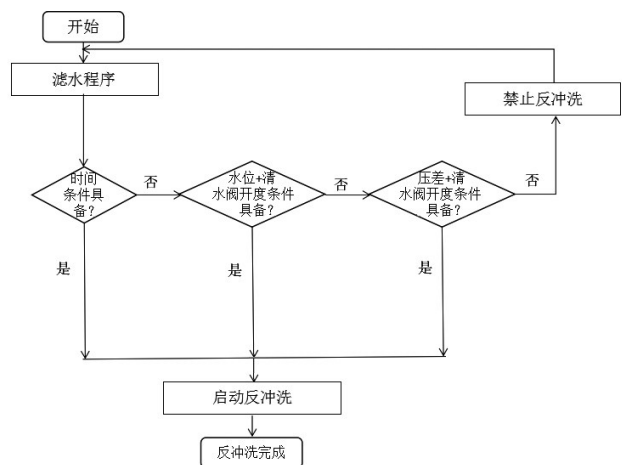


图 5 反冲洗控制程序结构

Fig.5 Backwash control program structure diagram

5 PLC控制系统编程设置

① 处理水量累计应排除水厂滤池晒池或停池等情况,如遇上述情况则其他滤池平均分配处理水量。

② 避开待滤水浊度仪异常数据,若正常情况下待滤浊度短时间(5 min)波动超过 $\pm 200\%$ 且超过6 NTU,则屏蔽该类数据。

③ 根据生产统计数据设定自动投加系统待滤水浊度均值的适用范围,PLC控制系统在待滤水浊度适用范围内计算更新反冲洗周期;若读取数据超出适用范围,则保持适用范围内计算的反冲洗周期。试验水厂待滤水浊度适用范围设为0.3~3.0 NTU。

④ 考虑水厂反冲洗回用蓄水池容积限值问题,设置好相邻两座滤池冲洗的间隔时间,若有滤池处于反冲洗或手动设置状态,则不允许触发反冲洗。

⑤ 每分钟输出反冲洗周期结果,反冲洗周期输出保留一位小数,当实际运行时间 $\geq$ 输出结果时,则触发反冲洗。

⑥ 设置好滤池排班程序。在PLC控制系统上位机程序界面增加滤池反冲洗自动控制操作的界面,显示预测反冲洗周期时间、正在反冲洗的滤池,以及最近3座待反冲洗的滤池距离开始反冲洗的时间。

⑦ 可切换自动或手动设定反冲洗周期,每座滤池可以勾选是否允许自动反冲洗。

⑧ 增加周期调节系数功能,考虑模型偏离时可做整体调整。

⑨ 报警系统设置。系统设置原水pH计、待滤水浊度仪、水位计、清水阀、压差计异常报警。

6 运行情况与能耗分析

目前,该系统已在G水厂运行超过半年,试验滤池试运行2个月,试运行结束后该系统在全厂滤池运行。滤池运行情况见图6。近半年,G水厂原水浊度均值为5.43~13.04 NTU,最高为29.60 NTU,出现在9月;原水pH多在6.8~7.2之间,最高为7.5,出现在1月底至2月初,原水pH升高期间未对过滤造成影响,未见滤池堵塞情况。G水厂改造前滤池按照人工设为48 h反冲洗,改造后按模型输出值设置反冲洗周期,均值为53.7~56.5 h。监测期间滤池

均按时间条件触发反冲洗,水位+清水阀开度条件、压差+清水阀开度条件因实际运行情况暂未达该条件故未触发,系统搭建时通过人为设定相关条件测试该条件的执行情况。

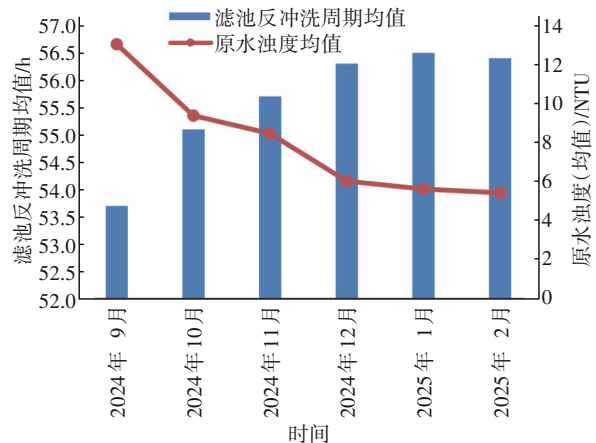


图6 滤池系统运行情况

Fig.6 Operating status of filter system

该系统运行稳定,滤池正常反冲洗能达到预期效果。反冲洗强度与时间按照水厂日常设置,系统运行期间,对试验滤池反冲洗结束时排水浊度和反冲洗后的滤砂含泥量每周抽检2次。检测结果显示:反冲洗结束时排水浊度均 ≤ 10 NTU,且反冲洗后的含泥量均 $\leq 0.2\%$,可判断滤池冲洗合格^[1]。

目前,G水厂单座滤池反冲洗清水用量约260 m³/次,反冲洗用电约22 kW·h/次。根据近一年的生产数据,按照全厂10座滤池计算,该系统平均延长滤池运行时间约7 h,预计可节省反冲洗清水量约60 391 m³/a、反冲洗电耗约5 110 kW·h/a。

7 结论

① 根据自来水厂的实际情况建立滤池反冲洗周期数学模型,结合PLC控制技术,搭建滤池智能反冲洗系统,该系统使用的设备均为自来水厂滤池原有的常规仪表,基本无需另行增加,未增加自来水厂的运营成本。

② 该系统能根据水质、水量变化,自动调整滤池反冲洗周期,并采用多因素条件控制触发滤池反冲洗。运行数据显示,该系统运行稳定,滤池正常运行,并起到节水节电的作用;自动化程度高,无需人工干预。

③ 目前该系统已经推广至设计处理规模为50万m³/d的大型自来水厂应用,计划继续推广至下

属其他水厂应用。

参考文献:

- [1] 徐勇鹏,王在刚,崔福义. 滤池反冲洗时间控制模式的分析与优化[J]. 中国给水排水, 2006, 22(1): 66-69.
XU Y P, WANG Z G, CUI F Y. Discussion about time control modes of filter backwashing in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(1): 66-69 (in Chinese).
- [2] 王恒兴. 北京第九水厂滤池自动反冲洗技术研究[D]. 北京:北京工业大学, 2019.
WANG H X. Research on Automatic Backwashing Technology of Filters at Beijing Ninth Water Plant [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [3] 宋文霞. 地表水厂V型滤池智能控制系统[D]. 北京:北京化工大学, 2019.
SONG W X. Intelligent Control System of V-type Filter in Surface Water Plant [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019 (in Chinese).
- [4] 王国权. 基于PLC的智能滤池控制系统研究[D]. 长沙:湖南大学, 2019.
WANG G Q. Research on Intelligent Filter Control System Based on PLC [D]. Changsha: Hunan University, 2019 (in Chinese).
- [5] 严晋. 基于Control Logix的水厂滤池改造和设计[D].

上海:上海交通大学, 2018.

YAN J. Renovation and Design of Water Plant Filter Based on Control Logix [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018 (in Chinese).

- [6] ERFIANTO B, PUTRADA A G. Water filter automation system using fuzzy logic controller [C]//IEEE. 2019 7th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT). Malaysia: IEEE, 2019: 1-6.
- [7] KALE S J, KHANDEKAR M A, AGASHE S D. Prediction of water filter bed backwash time for water treatment plant using machine learning algorithm [C]//IEEE. 2021 IEEE 6th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). Romania: IEEE, 2021: 113-116.
- [8] YI X, WEI Q, LI C. The BP network model for the control of the coagulation and the filter backwashing system [C]//IEEE. 2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. China: IEEE, 2008: 1518-1521.

作者简介:何嘉莉(1988—),女,广东东莞人,硕士,高级工程师,主要研究方向为给水处理与智能化控制技术。

E-mail: lily_mk88@126.com

收稿日期: 2025-02-13

修回日期: 2025-04-02

(编辑:衣春敏)

精打细算用好水资源,从严从细管好水资源