

龙虹池, 朱希望, 吴伟峰, 等. 某水厂双水源条件下流动电流技术的影响因素与对策[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 71-77, 88.

LONG H C, ZHU X W, WU W F, et al. Influencing factors and solutions of streaming current technology under dual-source water conditions in a WTP [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 71-77, 88.

某水厂双水源条件下流动电流技术的影响因素与对策

龙虹池¹, 朱希望², 吴伟峰¹, 方以晨², 高宏程¹, 沈 华¹, 俞云芳¹, 刘宏远^{2,*}

(1. 杭州余杭水务控股集团有限公司, 浙江杭州 311100; 2. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江杭州 310023)

摘 要 【目的】研究某水厂在双水源条件下流动电流值的变化情况及其影响因素, 解决在双水源条件下流动电流值波动范围大的问题, 从而弥补流动电流技术作为单因子控制技术的缺陷。【方法】文章从原理上分析了影响流动电流值的水质及工作条件这 2 个方面的影响因素, 通过小试研究了不同水中共存干扰离子、流动电流仪 (SCD) 采样时间及浑浊度对水处理过程中流动电流值的影响程度, 采用非线性回归技术对流动电流值进行数据处理。【结果】结果表明, 不同离子引起流动电流值的变化幅度存在差异, 同等浓度下 Zn^{2+} 流动电流值升高了 20, 高于 Mg^{2+} (流动电流值 = 5), K^+ 和 Na^+ 则升高了 1, 总体上二价离子引起流动电流值的变化幅度高于一价离子, 流动电流值与阳离子浓度呈正相关, 水中共存离子引起流动电流值变化幅度大小主要取决于电解质中阳离子的性质和化合价价态; 不同 SCD 采样时间下流动电流值仅有一个较小的变化 (2 个单位内), 表明水样与混凝剂在充分混合后, 水中流动电流值不随 SCD 采样时间的变化而变化; I 类水的流动电流值变化幅度约为 4 个单位, 混合水的流动电流值变化无规律。【结论】在以上试验结果基础上, 通过引入反向传播 (BP) 神经网络数据模型进行抗干扰滤波数据处理, 提出了某水厂在双水源条件下对流动电流技术的优化控制策略, 实现动态准确地自动调整混凝剂剂量, 扩大了流动电流技术的应用范围。

关键词 流动电流 双水源 共存干扰离子 流动电流仪 (SCD) 采样时间 控制策略

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)06-0071-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.009

Influencing Factors and Solutions of Streaming Current Technology under Dual-Source Water Conditions in a WTP

LONG Hongchi¹, ZHU Xiwang², WU Weifeng¹, FANG Yichen², GAO Hongcheng¹, SHEN Hua¹, YU Yunfang¹, LIU Hongyuan^{2,*}

(1. Hangzhou Yuhang Water Affairs Holding Group Co., Ltd., Hangzhou 311100, China;

2. Collage of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract [Objective] Changes of streaming current and its influencing factors under the condition of dual water sources in a water treatment plant (WTP) is studied. In addition, this paper solves the problem of a large fluctuation range of streaming current value under the condition of dual water sources, thereby making up for the defects of streaming current technology as a single factor control technology. [Methods] This study analyzed the influencing factors of both water quality and working conditions that affect the value of streaming current from the principle, studied the degree of influence of coexisting interference ions in different water, streaming current detector (SCD) sampling time, and turbidity on the value of streaming current in the process of water treatment through jar tests, and adopted nonlinear regression technology to process data on value of streaming current. [Results] The result showed that there were differences in the magnitude of changes in the streaming current values caused by different ions, with streaming current value of Zn^{2+} increasing by 20 under the same concentration, which was higher than that of Mg^{2+} (streaming current value was 5), and K^+ and Na^+ increasing by about 1. The magnitude of changes in the streaming current values caused by divalent ions was higher than that

[收稿日期] 2024-04-15

[基金项目] 水厂聚合氯化铝精细化投加方案 (ZSF12209285)

[作者简介] 龙虹池 (1982—), 男, 主要从事饮用水工程技术等工作, E-mail: xw1624254576@163.com。

[通信作者] 刘宏远 (1971—), 男, 教授, 主要从事膜分离技术、饮用水工程技术等工作; E-mail: lhyzyy@zjut.edu.cn。

caused by monovalent ions. There was a positive correlation between the streaming current and the concentration of cations. The magnitude mainly depended on the nature of the cations in the electrolyte and the valence of the valence; different SCD sampling times under the streaming current value only a small change (within 2 units), indicating that the water samples and coagulants in the full mixing of the water streaming current value did not change with the change of SCD sampling time; The variation amplitude of the streaming current value of class I water was about 4 units, and the variation of the streaming current value of mixed water was irregular.

[**Conclusion**] On the basis of the test result, the introduction of the back propagation (BP) neural network data model for anti-interference filtering data processing, which proposes a WTP in the dual water source conditions on the streaming current technology optimization control strategy, this strategy enables dynamic and accurate automatic adjustment of coagulant dosage, expanding the application scope of streaming current technology.

Keywords streaming current dual-source water coexisting interfering ions streaming current detector (SCD) sampling time control measure

混凝是给水处理中必不可少的关键环节,其主要作用使胶体和悬浮颗粒物脱稳,为下一阶段沉淀池中去除悬浮物提供良好的条件,其中混凝剂的投加量直接会影响混凝效果,进而影响后续沉淀与过滤的效果。因此,确定混凝剂的最佳投加量是十分有必要的。

流动电流技术是20世纪80年代国外发展出来的一种投药控制技术,其原理是通过流动电流仪(SCD)测定水中的流动电流,利用流动电流相对值的变化控制混凝剂的投加量,是一种单因子、在线连续投药控制技术^[1-2]。我国对于流动电流技术的研究始于1991年崔福义等^[3]发表了我国第一篇有关流动电流的论文,相关研究者^[4-6]进行了流动电流的基础理论及适用条件等方面的研究,都取得了明显的进展。但浑浊度、温度、pH、有机物、共存干扰离子等因素复杂且多变,直接影响流动电流法的稳定性和控制精度^[7-11],受多因素的影响限制了流动电流技术进一步的广泛应用,当前混凝投药控制研究方向主要集中在人工神经网络、模糊逻辑、絮体图像分析等计算机技术与水质数据相融合的混凝智能控制技术^[12]。

浙江省某水厂在应用SCD过程中遇到双水源条件下,连续监测过程中流动电流值出现振荡,导致无法应用流动电流技术控制混凝剂投加的问题。水中共存干扰离子、表面活性剂及油类物质、有机污染物及pH条件等因素的改变会使流动电流值发生变化。此外,SCD采样时间、探头污染、管路堵塞、传感器活塞磨损等因素的存在会使得流动电流值偏离真实值。

文章针对在双水源条件下应用SCD的情况,试验探究水中共存干扰离子、浑浊度、SCD采样时间对流动电流的影响,同时排查工作条件中活塞磨损、探

头磨损与管路堵塞等因素来消除其影响以提高检测器的稳定性和灵敏性。并对流动电流技术运行管理进行了分析和总结,提出优化解决措施。

1 水厂概况

浙江某水厂规模为10万 m^3/d ,制水最大规模可达12万 m^3/d 。采用“管道混合+折板平流沉淀池+滤池+消毒”常规处理工艺(工艺流程如图1所示)。2022年起,水厂水源水调整为2种水源,其中一种为湖泊水源(水质为Ⅰ类水源水),另外一种为Ⅰ类水源水和其他水源水的混合水。混合进水时,Ⅰ类水源水平均占比约为60%,其他水源水平均占比约为40%。

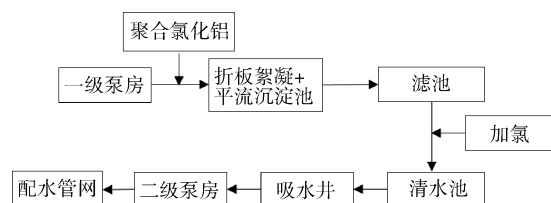


图1 水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of WTP

2023年该水厂Ⅰ类水与混合水相关水质指标统计如表1所示,Ⅰ类水源中pH、溶解氧(DO)2项指标上升,色度、铁、锰、总氮及溶解性总固体等指标下降显著,Ⅰ类水源水质整体优于混合水。混合水中浑浊度为3.3~138.5 NTU,波动范围较大,铁质量浓度可达到0.28 mg/L,锰质量浓度基本小于0.05 mg/L,pH值为7.0~8.0,DO相对良好平稳,总有机碳(TOC)变化范围在Ⅲ类水标准限值内,DO指标达到Ⅲ类水标准,也存在总氮超标的问题,最高时为2.36 mg/L。当采用两类水源水进水时,混凝后SCD变化幅度增大,相差最大值可达到200左右。

表 1 2023 年 I 类原水水质与混合水水质
Tab. 1 Class I Raw Water Quality and Mixed Water Quality in 2023

水质指标	I 类水	混合水	Ⅲ类标准 限值
pH 值	7.54~7.89	7.1~7.87	6~9
浑浊度/NTU	2.89~4.36	3.3~138.5	-
总氮/(mg·L ⁻¹)	0.73~1.34	0.86~2.36	≤1
DO/(mg·L ⁻¹)	8.67~9.83	6.84~9.68	≥5
TOC/(mg·L ⁻¹)	0.62~1.49	0.85~2.68	≤5
铁/(mg·L ⁻¹)	<0.05	0.06~0.28	≤0.3
锰/(mg·L ⁻¹)	<0.05	<0.05	≤0.1
溶解性总固体/(mg·L ⁻¹)	76~136	163~254	≤1 000

2 SCD 原理

SCD 主要是由 2 部分组成:一部分是传感器;另一部分是信号处理器。传感器简化图如图 2 所示。传感器活塞作往复运动时,环形空间内的水也随之作相应的运动,胶体颗粒双电层受到扰动,水流携带胶体扩散层中电荷一起运动,从而形成流动电流^[13]。

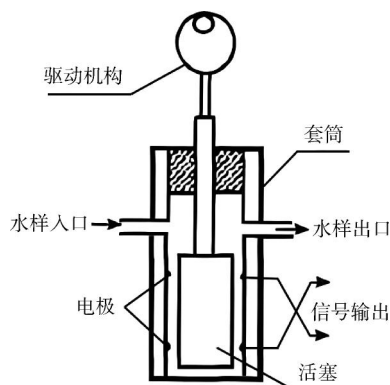


图 2 传感器结构

Fig. 2 Sensor Structure

流动电流系统控制流程如图 3 所示。传感器检测水中流动电流值传递到主线路,经信号处理器处理和放大后,以 4~20 mA 的信号传递到控制器,控制器对比系统中设定值下达相应指令。控制系统通过反馈值来调整加药泵的冲程值,来控制混凝剂的投加,混凝剂的加入可使流动电流值减少,且过量投加由于使颗粒带相反的电荷而使流动电流值增加,从而使得检测结果保持接近于设定值,进而控制混凝效果在最佳状态,实现混凝剂投加量的自动调节。在流动电流技术中,一般可通过烧杯试验或实际工作经验

选择最佳投药量下水中流动电流值作为设定值,以确保混凝后的水质合格,同时减少混凝剂的投加。

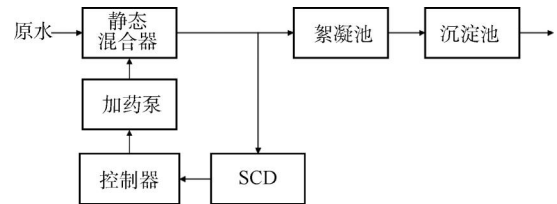


图 3 流动电流系统控制流程

Fig. 3 Control Process of Streaming Current System

3 材料与方法

本试验所采用的材料与方法如下。

(1) 试剂: ZnCl_2 (分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司), MgCl_2 (分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司), KCl (分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司), NaCl (分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司), 混凝剂:采用含有效铝质量分数为 10% 聚合氯化铝。

(2) 仪器:台式浊度仪(哈希, TL2300); SCD (Pi, StreamerSense); ZR4-6 型六联混凝试验搅拌机; PHS-2F 型实验室 pH 计; 马尔文 Zetasizer 纳米粒度分析仪。

(3) 试验方法

共存干扰离子试验:向原水水样中投加一定剂量某无机盐储备液,配成不同阳离子浓度的试验用水,依次测定不同离子浓度下水中流动电流值,以此分析水中共存干扰离子对流动电流值的影响。

SCD 采样时间试验:向原水水样中投加一定剂量混凝剂,依次测定不同闲置时间时水样的流动电流值,用以模拟不同 SCD 采样时间对混凝剂混合后水中流动电流值的影响。

浑浊度试验:取一定量不同浑浊度下原水的水样,测定水样的流动电流值。以此分析浑浊度对流动电流的影响。

反向(BP)神经网络模型:是一种非线性回归技术,适用于多干扰、多变量的系统环境,其通过训练识别历史数据中的关系输出预测值,由多个神经元组成数据处理模型,神经元之间采用不同权值和阈值进行数据处理。

4 结果与讨论

4.1 SCD 运行情况

(1) 实际运行情况

图 4 是某 I 类水流动电流特性曲线。由图 4 可

知,其流动电流变化情况平缓,沉淀池出水达到水厂内控标准,可用于 SCD 正常控制。图 5 是混合水源下流动电流特性曲线。由图 5 可知,混合水中流动电流值呈现无规律的变化,在不同时刻,流动电流值会出现突然上升和突然下降的情况,并且一天中流动电流变化幅度较大,会经常出现调节偏差较大,波动振荡等现象,从而使得 SCD 所反馈的投药量变化大。因此,在 I 类水源条件下,SCD 仪器可以正常工作,但混合水源情况下,SCD 无法正常工作。

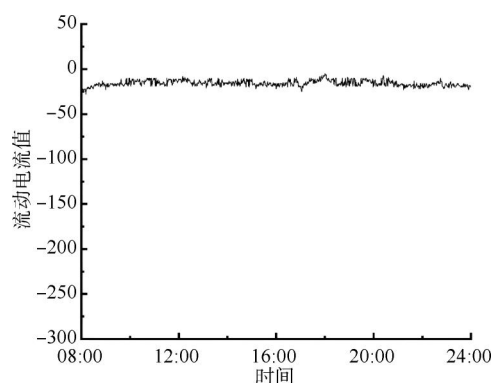


图 4 I 类水源的水中流动电流特性

Fig. 4 Streaming Current Characteristics in Class I Water Source

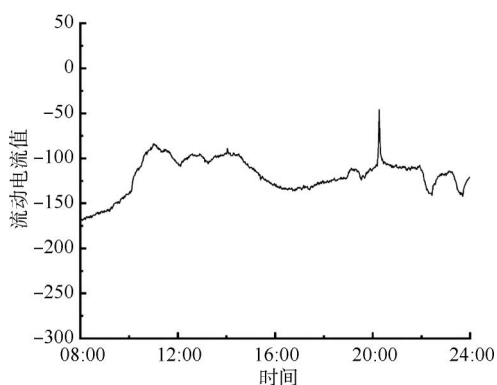


图 5 混合水源下水中流动电流特性

Fig. 5 Streaming Current Characteristics in Mixed Water Sources

(2) SCD 采样时间

不同 SCD 采样时间对流动电流特性的影响如图 6 所示。由图 6 可知,在 3 种投药量下,原水中的流动电流值随着 SCD 采样时间的变化而变化(56 NTU 水样下混凝剂投加量分别为 72、74、76 mg/L)。不同混凝剂投加量下 3 条流动电流值曲线中,经过 1 min 快速混合后水中初始流动电流值迅速变化,增长至某一值附近并且在之后不同 SCD 采样时间

下流动电流值仅有一个较小的变化(2 个单位内),3 条流动电流值曲线呈现出相似的变化趋势。

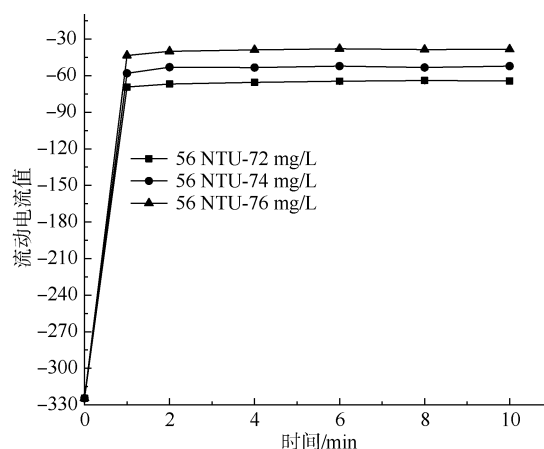


图 6 不同 SCD 采样时间下水中流动电流特性

Fig. 6 Streaming Current Characteristics in Water at Different SCD Sampling Times

在 56 NTU 下水中流动电流值的初始值为 -324.5,在 72、74、76 mg/L 混凝剂投加量下,快速混合后水中流动电流值分别升至 -69.3、-58.1、-43.5,在 2 min 时分别稳定在 -64.3、-52.6、-38.3,在 3 种混凝剂投加量下,水中流动电流值随着投药量的增加而增大。在本试验条件下,当混凝剂投加量变动 2 mg/L 情况下,水中流动电流值升高了约 13。以上试验结果表明,在实际运行过程中,水样与混凝剂在充分混合后,水中流动电流值不随 SCD 采样时间的变化而变化。

在流动电流技术中 SCD 采样时间主要影响的是整个投药控制系统的滞后时间,然而取样点位置的选择直接会影响到 SCD 采样时间。并且取样点所取得的水样要能代表混凝效果,这就要求混凝剂要与原水充分混合均匀,同时要考虑长时间运行絮体将造成取样管堵塞的问题。因此,选择合适的取样点位置至关重要。另外,对于滞后时间的影响可通过调整积分时间常数来与之匹配,进而消除滞后时间的影响,提高了投药控制系统的灵敏性。

4.2 SCD 影响因素

(1) 共存干扰离子

4 种无机盐(ZnCl 、 MgSO_4 、 NaCl 、 KCl)的流动电流特性如图 7 所示。由图 7 可知, Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 4 种阳离子在浊度为 16.3 NTU 水中的流动电流值结果表明,浊度为 16.3 NTU 水中初始流

动电流值为-324.8,在水中离子浓度相同的情况下,由于不同离子的性质和它们所带电荷量不同,其所引起流动电流值的变化幅度有很大区别。其中二价阳离子对流动电流的改变幅度远大于同样浓度下的一价阳离子,投加 2 mg/L 的 Mg^{2+} 使流动电流值上升至-319.7,而 2 mg/L 的 Zn^{2+} 变化幅度更大,流动电流值为-305.8,但水中一价离子的增加, K^+ 和 Na^+ 在 20 mg/L 下仅使流动电流值分别升至-317.5 和-316.5, KCl 与 NaCl 在低投加量下并未引起明显的流动电流值变化。结果表明,投加药剂中电解质的性质及阳离子化合价状态会影响水中流动电流值变化幅度,高价态的离子在水中电动化学体系中具有较大优势。

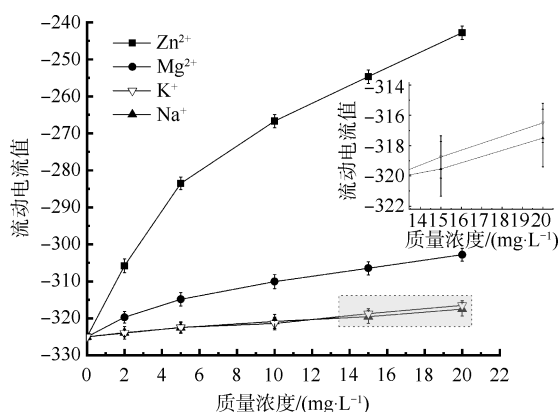


图7 4种阳离子浓度下水中流动电流特性

Fig. 7 Streaming Current Characteristics of Four Cations Concentrations in Water

不同无机盐浓度下试验用水的 pH 如图 8 所示。图中 4 种无机盐在不同浓度下水中 pH 结果表明,加入 KCl 与 NaCl 无机盐溶液后水中 pH 随无机盐浓度的增加而产生的变化量很小,加入 $MgSO_4$ 与 $ZnCl_2$ 无机盐溶液后水中 pH 随无机盐浓度的增加而产生的变化量越大,其中 $ZnCl_2$ 随无机盐浓度的增加在水中的 pH 下降最快;从离子的性质出发,是由于 $ZnCl_2$ 在水中会有弱电解质的生成,破坏了水的电离,促进水的电荷平衡产生移动,进而发生水解反应,水中氢离子浓度增加,使得 pH 下降同时使其水中流动电流变化幅度增大。

(2) 浊度

不同浊度下 I 类水中流动电流如图 9 所示,由图 9 可知,初始流动电流值为-324.5,随着浊度的升高,其流动电流值改变很小,在浊度为 82.6 NTU 下,流动电流值变化幅度达到最大,此

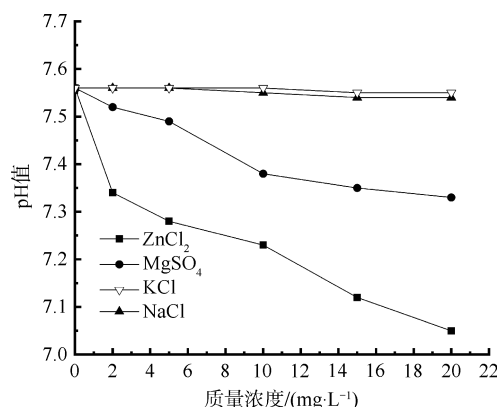


图8 水中4种无机盐的 pH 值

Fig. 8 pH values of Four Inorganic Salts in Water

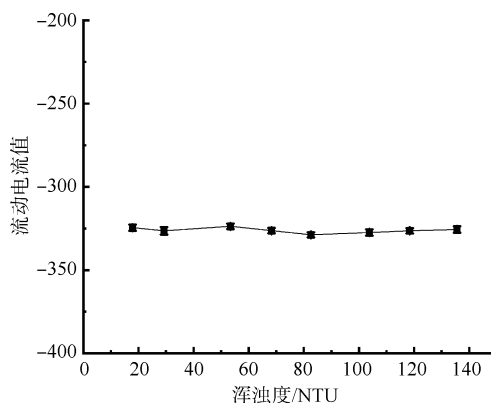


图9 不同浊度下 I 类水中流动电流特性

Fig. 9 Streaming Current Characteristics in Class I Water with Different Turbidity

时流动电流值为-328.8,总体变化趋势上流动电流值变化幅度约为 4 个单位;由此可推出,不同浊度下 I 类水中流动电流值不随浊度升高而升高,应为某一定值,是不变的。出现微小波动的现象,从流动电流原理出发,推测可能是:流动电流中一部分流动电流是由吸附于探头表面的胶体粒子所贡献,在实际过程中,无法保证每次探头表面所吸附的胶体量是一样的,致使流动电流出现略微变化。

不同浊度下混合水的流动电流如图 10 所示,由图 10 可知,浊度为 7.7 NTU 时,流动电流值为-230,随着浊度的升高,浊度为 16.3 NTU 时,流动电流值下降至-326,浊度为 21.9 NTU 时,流动电流则上升至-233,随着浊度上升水中流动电流值变化无规律,出现剧烈变化的原因,推测可能是:溶解性固体与有机污染物浓度发生了改变(表 1)。

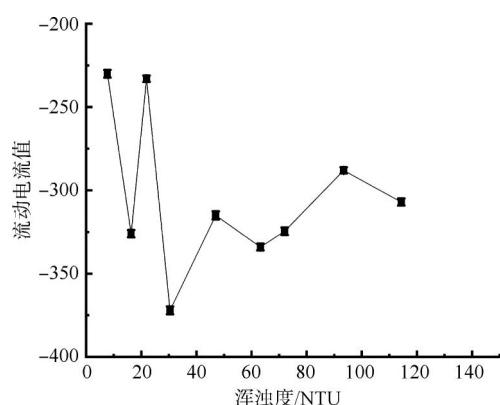


图 10 不同浑浊度下混合水的流动电流特性

Fig. 10 Streaming Current Characteristics in Mixed Water with Different Turbidity

4.3 双水源条件下 SCD 控制方法优化

(1) 控制优化

SCD 控制系统具有惯性大的特点,受到充分反应时间周期、原水流量、pH、浑浊度、共存干扰离子等因素影响,干扰因素多而复杂^[14-16]。如果采用常规运算控制方式,实际控制效果不理想、无法实现自动控制。为了解决双水源条件下流动电流特性曲线出现振荡的问题,引入 BP 神经网络数据处理模型,对数据库中采集的长期历史监测数据(加药前后流动电流值、原水浑浊度、流量、pH、絮凝反应综合评判值)进行抗干扰滤波归一化处理^[17],从而弥补了流动电流技术作为单因子控制技术的缺陷。采用 3 层 BP 神经网络,即输入层、隐层和输出层,输入层神经元(x_n)个数为 6 个,分别为原水流量、浑浊度、加药前后流动电流值、电导率(用以表征水中离子浓度)以及 pH 等参数,根据神经网络计算理论的方法(如交叉验证或留一法)将隐层神经元个数定为 16(w_n),输出层神经元(y)为流动电流值,网络结构为 $6 \times 16 \times 1$ 。网络结构如图 11 所示。

通过设计 BP 神经网络数据模型,对仪器中采集的运行监测数据进行数据处理,并输入到数据模型中进行训练迭代,同时引入比例-积分-微分(PID)控制器,实现对混凝剂投加量的动态控制,稳定出水质量^[18-19]。将基于 BP 神经网络数据模型输出的流动电流值与设定值进行比较处理,将信号输入至 PID 自动控制策略计算出投药量,通过可编程逻辑控制器(PLC)对混凝剂进行调整加注,实现混凝剂自动投加,具体控制策略如图 12 所示。

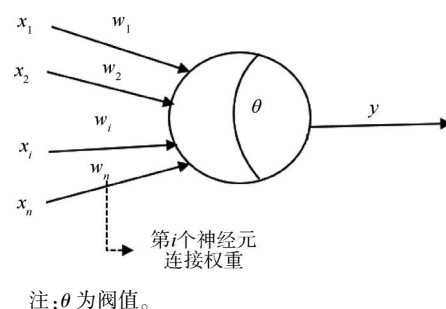


图 11 BP 神经网络结构

Fig. 11 BP Neural Network Structure

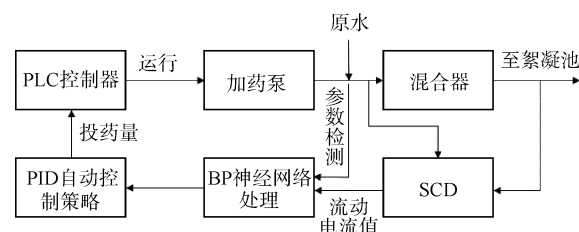


图 12 混合水的控制策略

Fig. 12 Control Strategy under Mixed Water

从改造前后的流动电流特性曲线可明显看出,流动电流控制系统通过技术升级改造后,减小控制系统的波动性,实现混凝剂的自动投加。改造前后流动电流特性曲线如图 13 所示,在试验期间流动电流控制系统的流动电流值由 103 降低至 17 左右,有效提高了投药的准确性。

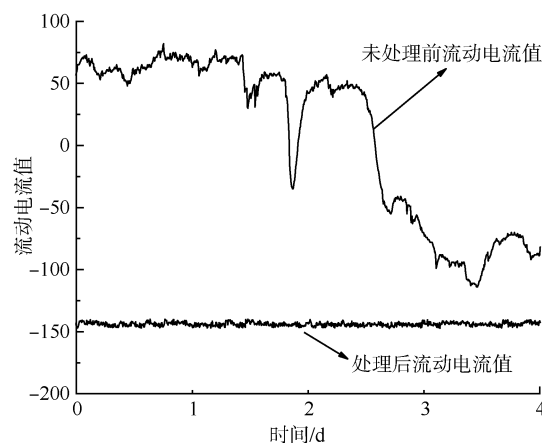


图 13 改造前后流动电流特性

Fig. 13 Streaming Current Characteristic before and after Reconstruction

(2) 双水源条件下控制策略

依据该水厂实际生产情况,针对水源的情况,制定不同的控制策略,如图 14 所示。当原水为 I 类水时,采用常规控制模式,SCD 传感器检测水中流动电

流值,将信号传递到控制器,对比系统中设定值与实际值下达相应投药调整命令指定。当原水为混合水时,采用 BP 神经网络数据模型结合 PID 控制策略,对采集的运行监测数据进行处理,将 BP 神经网络数据模型输出的流动电流值与设定值进行比较处理,计算出投药量,输出剂量调整命令投加。

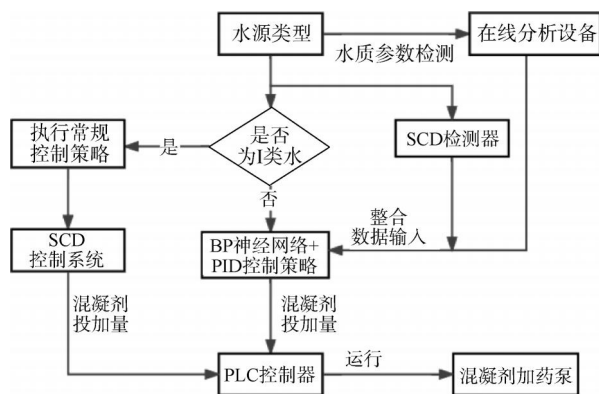


图 14 不同类型原水下控制策略

Fig. 14 Control Solutions under Different Types of Raw Water

5 结论

在该水厂中,当采用单一 I 类水源水进水时,SCD 运行正常,可进行正常投药控制;当采用 I 类水和 II ~ III 类水混合进水时,流动电流值会出现无规律波动,引入 BP 神经网络预测模型进行抗干扰滤波归一化处理流动电流值,输出的流动电流值与设定值进行比较处理,信号输出至 PID 计算出投药量,通过 PLC 控制器对絮凝剂剂量加注进行调整,可实现动态准确地自动投加运行。

基于监测水质和试验数据,在 2 种水源条件下引入 BP 神经网络数据模型进行抗干扰滤波数据处理,提出了某水厂在 2 水源 3 工况(单一类原水,单河网水,一类水原水+河网水,)条件下对流动电流技术的优化控制策略,以原水流量、浑浊度、加药前后流动电流值、电导率(用以表征水中离子浓度)以及 pH 等参数经神经网络计算理论的方法进行运算,从而弥补了流动电流技术作为单因子控制技术的缺陷。

参考文献

[1] 韩梅, 邹放, 苑蕊, 等. 基于机器学习的混凝智能投药模型应用效果及路径探讨[J]. 给水排水, 2022, 48(10): 180-184.
HAN M, ZOU F, YUAN R, et al. Discussion on application

effect and application path of machine learning-based coagulation intelligent dosing model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(10): 180-184.
[2] KHEDHER M, AWAD J, DONNER E, et al. Using the flocculation index to optimise coagulant dosing during drinking water treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 51: 103394. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103394.
[3] 崔福义, 李圭白. 流动电流法混凝控制技术[J]. 中国给水排水, 1991, 7(6): 36-40.
CUI F Y, LI G B. Streaming current method coagulation control technology[J]. China Water & Wastewater, 1991, 7(6): 36-40.
[4] BRESSANE A, GOULART A P G, MELO C P, et al. A non-hybrid data-driven fuzzy inference system for coagulant dosage in drinking water treatment plant: Machine-learning for accurate real-time prediction[J]. Water, 2023, 15(6): 1126.
[5] WADKAR D V, KARALE R S, WAGH M P. Application of cascade feed forward neural network to predict coagulant dose [J]. Journal of Applied Water Engineering and Research, 2022, 10(2): 87-100.
[6] 余峰, 王珂佳, 张文龙, 等. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的水生态修复原位控浊混凝投药预测[J]. 环境工程, 2023, 41(4): 154-163.
YU F, WANG K J, ZHANG W L, et al. Prediction of coagulant dosage for in-situ turbidity control in water ecological restoration based on BP neural network optimized by genetic algorithm[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(4): 154-163.
[7] SHI Z N, CHOW C W K, FABRIS R, et al. Determination of coagulant dosages for process control using online UV-Vis spectra of raw water[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 45: 102526. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102526.
[8] 张燕, 崔福义. 有机污染物对流动电流控制系统给定值的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(1): 98-101.
ZHANG Y, CUI F Y. Effect of organic pollutants on the set point of streaming current control system[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2002, 28(1): 98-101.
[9] 宗栋良, 张锡辉, 张光明. 水温对混凝过程流动电流的影响[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(6): 73-75.
ZONG D L, ZHANG X H, ZHANG G M. Influence of temperature on streaming current in coagulation [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 27(6): 73-75.
[10] SIBIYA S M. Evaluation of the streaming current detector (SCD) for coagulation control [J]. Procedia Engineering, 2014, 70: 1211-1220. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.134.
[11] RATNAWEERA H, FETTIG J. State of the art of online monitoring and control of the coagulation process [J]. Water, 2015, 7(11): 6574-6597.

(下转第 88 页)

- 的作用机理及研究现状[J]. 环境化学, 2023, 42(4): 1196-1208.
- WANG W H, JI W X, ZHAO J, et al. Iron-carbon micro-electrolysis substrate for constructed wetland: Interaction mechanisms, performance and ecological effects [J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(4): 1196-1208.
- [16] CHEN L, QUAN X, GAO Z, et al. A composite Fe-C/layered double oxides (Fe-C/LDO) carrier fabrication and application for enhanced removal of nitrate and phosphate from polluted water with a low carbon/nitrogen ratio [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 352: 131628. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131628.
- [17] LI X, ZHOU L, ZHUANG L, et al. High-efficient nitrogen and phosphorus removal and its mechanism in a partially unsaturated constructed wetland with Fe-C micro-electrolysis substrate [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431: 133252. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133252.
- [18] ODEDISHEMI A F, WANG H C, GUADIE A, et al. Total nitrogen removal in biochar amended non-aerated vertical flow constructed wetlands for secondary wastewater effluent with low C/N ratio: Microbial community structure and dissolved organic carbon release conditions [J]. Bioresource Technology, 2021, 322: 124430. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124430.
- [19] 张之逸. 海绵铁耦合生物炭强化人工湿地脱氮除磷效能及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- ZHANG Z Y. Study on the nitrogen and phosphorus removal efficiency and mechanism of constructed wetlands enhanced by sponge iron coupled with biochar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [20] NAVARRO-NOYA Y E, SUAREZ-ARRIAGA M C, ROJAS-VALDES A, et al. Pyrosequencing analysis of the bacterial community in drinking water wells [J]. Microbial technology, 2013, 66: 19-29. DOI: 10.1007/s00248-013-0222-3.
- [21] ZHANG B, XU X, ZHU L. Structure and function of the microbial consortia of activated sludge in typical municipal wastewater treatment plants in winter [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 17930.
- [22] XIONG J, ZHENG Z, YANG X, et al. Mature landfill leachate treatment by the MBBR inoculated with biocarriers from a municipal wastewater treatment plant [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119: 304 - 310. DOI: 10.1016/j.psep.2018.08.019.
- [23] LI X, ZHOU L, ZHUANG L, et al. High-efficient nitrogen and phosphorus removal and its mechanism in a partially unsaturated constructed wetland with Fe-C micro-electrolysis substrate [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431: 133252. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133252.
- [24] LAI J T, CHENG M S, HUANG R, et al. Mechanism of ammonium sharp increase during sediments odor control by calcium nitrate addition and an alternative control approach by subsurface injection [J]. Environmental Research, 2020, 190: 109979. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109979.
- [25] SHI Y J, YANG L, LIAO S F, et al. Responses of aerobic granular sludge to fluoroquinolones: Microbial community variations, and antibiotic resistance genes [J]. Journal of Hazard Material, 2021, 414: 125527. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125527.

(上接第 77 页)

- [12] WANG K J, WANG P S, NGUYEN H P. A data-driven optimization model for coagulant dosage decision in industrial wastewater treatment [J]. Computers & Chemical Engineering, 2021, 152: 107383. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2021.107383.
- [13] 刘畅, 韩梅, 赵志伟, 等. 混凝投药控制系统的发展现状与趋势 [J]. 给水排水, 2021, 57(s1): 524-530.
- LIU C, HAN M, ZHAO Z W, et al. Development status and trend of coagulant dosing control system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(s1): 524-530.
- [14] SHENG D P W, BILAD M R, SHAMSUDDIN N. Assessment and optimization of coagulation process in water treatment plant: A review [J]. ASEAN Journal of Science and Engineering, 2023, 3(1): 79-100.
- [15] MANAMPERUMA L, WEI L, RATNAWEERA H. Multi-parameter based coagulant dosing control [J]. Water Science and Technology, 2017, 75(9): 2157-2162.
- [16] 李拓. 基于 BP 神经网络的水厂混凝投药控制系统研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- LI T. Study on coagulation dosage control system for water treatment plants based on BP neural network [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [17] MANAMPERUMA L, WEI L, RATNAWEERA H. Multi-parameter based coagulant dosing control [J]. Water Science and Technology, 2017, 75(9/10): 2157-2162. DOI: 10.2166/wst.2017.058.
- [18] KIM J, HUA C B, KIM K, et al. Optimizing coagulant dosage using deep learning models with large-scale data [J]. Chemosphere, 2024, 350: 140989. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140989.
- [19] LIN S, KIM J, HUA C B, et al. Coagulant dosage determination using deep learning-based graph attention multivariate time series forecasting model [J]. Water Research, 2023, 232: 119665. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119665.