

严泽, 徐少童, 王鹏, 等. 多反馈智能控制在水厂滤后加氯控制中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 196-201.

YAN Z, XU S T, WANG P, et al. Application of multi-feedback intelligent control in chlorination control after filtration in WTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 196-201.

多反馈智能控制在水厂滤后加氯控制中的应用

严泽*, 徐少童, 王鹏, 张金灿

(南通水务集团有限公司, 江苏南通 226000)

摘要 余氯是生活饮用水厂出厂水的重要指标之一。南通某水厂为进一步有效控制出厂水余氯, 提高次氯酸钠溶液利用率, 结合水厂次氯酸钠投加系统滤后加氯部分建立多反馈控制结构。基于该结构设计了连续+离散模糊 PID 控制算法。改进的系统可实现 ± 0.1 mg/L 滤后水余氯高精度控制, 且运算负荷较小、可移植性高。通过应用对比表明, 改进的系统相较于原系统无论是正常还是特殊情况下, 具有运行灵敏度高、鲁棒性强、不需要人为干预、次氯酸钠溶液利用效率高等优点。

关键词 多反馈控制 模糊 PID 次氯酸钠投加系统 水厂 后加氯

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)10-0196-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.10.024

Application of Multi-Feedback Intelligent Control in Chlorination Control after Filtration in WTP

YAN Ze*, XU Shaotong, WANG Peng, ZHANG Jincan

(Nantong Water Group Co., Ltd., Nantong 226000, China)

Abstract Residual chlorine is one of the important indices of the finished water from water treatment plant (WTP). In order to further effectively control residual chlorine in WTP and improve the utilization rate of sodium hypochlorite solution, a multi-feedback control structure had been established in the chlorination after filtration of the sodium hypochlorite dosing system of a WTP in Nantong. A continuous+discrete fuzzy PID control algorithm was designed based on this structure. The improved system could achieve high-precision control of residual chlorine in filtered water of ± 0.1 mg/L, with low computational load and high portability. Through application comparison, it was shown that the improved system had the advantages of higher operating sensitivity, stronger robustness, no need for human intervention, and higher utilization efficiency of solution compared to the original system, whether under normal or special circumstances.

Keywords multi-feedback control fuzzy PID NaClO dosing system water treatment plants (WTPs) post-chlorination

自来水厂次氯酸钠投加系统一般分为前加氯、滤前加氯、滤后加氯和补氯 4 个部分, 南通某水厂(后称“该水厂”)制水工艺如图 1 所示。由于有生物膜参与水厂生产, 余氯偏高会破坏生物膜, 这使得生产过程位于生物膜之后的滤后加氯起到最主要、最关键的杀菌消毒作用。目前滤后加氯一般采用流量或余氯反馈的控制方式^[1-2], 然而流量反馈的控制方式无法精确控制余氯值, 常常需要人工进行干预; 余氯反馈的控制方式无法解决水量波动大、无法

预测导致的次氯酸钠投加量无法实时跟上水量变化的问题。以上两种方案不仅增加了水厂的用氯量和能耗, 还增加了出厂水余氯超标的风险。因此设计一种控制算法稳定滤后加氯出水余氯具有重要意义。

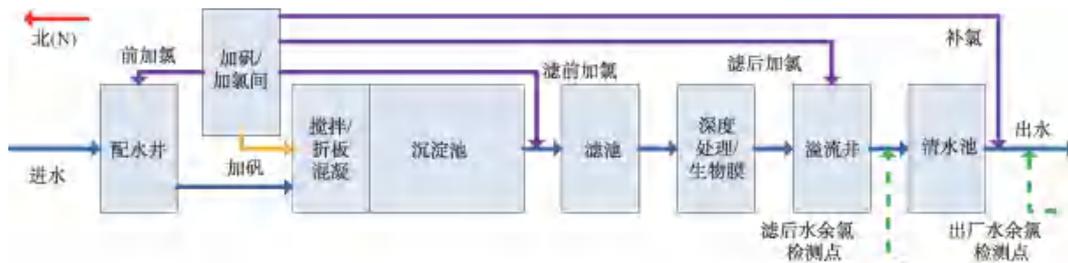
目前国内外对应用于水厂混凝投加的控制算法研究较多^[3-7], 滤后加氯控制算法的设计研究仍较少。导致该现象的原因有两点。一是滤后加氯工艺流程后面还有清水池缓冲和补氯辅助, 控制精度可以不高。但这会导致次氯酸钠溶液、能源和人工的浪费, 与当前节能减排的双碳背景不符。同时虽然出厂水余氯偏低可以补氯, 但若是余氯偏高, 则一段时间内将无计可施。二是滤后加氯混合时间短, 难

[收稿日期] 2023-08-16

[通信作者] 严泽(1995—), 男, 研究方向为故障诊断、水厂自控、工业系统大数据, E-mail: 28630883@qq.com。

以控制。以该水厂为例,水流从投加搅拌点经折板混凝至出穿孔花墙大约为 15 min,而滤后加氯混合至检测时间不到 0.5 min 可操作的空间较小。更具挑战性的是,加氯间泵流量投加的变化反应至现场投加点有时滞,大概需要 2 min。加氯间、投加点和检测点的相对位置如图 1 所示。上面引用的混凝投加控制算法为本文提供了大量参考,一些滤后加氯的相关研究也为本文中的算法提供了大量的借鉴。俞红光^[1]针对水厂加氯系统设计了基于专家判断

的智能比例积分微分(PID)控制算法并实际应用,进一步提高了出厂水余氯浓度的稳定性。丛孙丽等^[2]设计了基于专家规则控制算法,稳定了出厂水质,减少了人为误操作。Javier 等^[8]设计一种在比例积分(PI)控制与增益调度相结合的控制算法。通过仿真预先验证了控制系统的设计,并将其应用于实际的饮用水厂,提高了出厂水余氯的稳定性。Godo-Pla 等^[9]设计基于模糊推理系统的控制算法,取得了良好的效果。



注:不含进水出水泵房和应急投加。

图 1 水厂制水工艺

Fig. 1 Process of Water Production of WTP

然而绝大部分研究只针对出厂水余氯做效果对比^[2,8-9]。滤后水余氯和出厂水余氯测量点之间可以有缓冲中和的清水池,如图 1 所示。即使补氯不启动,出厂水余氯依旧会比滤后加氯出水余氯稳定得多。更重要的是,出厂水余氯值是反馈给补氯控制的,而不是滤后加氯,以出厂水余氯来验证滤后加氯控制是否先进有一定的局限性。除此之外,滤后加氯控制算法仍有较大的拓展研究的空间,比如:理论仿真的论文较多,实际应用的极少;现有大部分实际应用的研究追踪检测时间仅为几分钟或几小时,没有涵盖全天供水的波峰波谷,亦或是数据采集时间间隔较长,导致一些问题无法显现^[1-2,8-9];未见引入特殊情况从多方面来验证所提出的控制方案性能的论文。

尽管该水厂在改造前已使用了参考文献^[2]的自控系统框架,以及 PID 和基于专家规则的控制算法,但在实际应用中还是需要人为干预,这主要原因是单反馈控制结构考虑的因素不全面。多反馈控制结构可有效解决该问题。本文提出的水厂多反馈控制结构与传统的多维控制信号结构不同^[10],多反馈的情况下控制信号仅一维,这为新控制结构的应用提出了新的挑战。针对该挑战,结合水厂实际情况,本文提出了连续+离散的模糊 PID 控制算法,并将

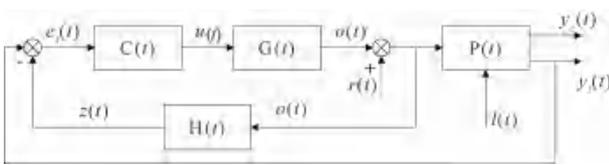
其运用于生产实践上。由于实际控制效果优秀,不仅出水余氯稳定,还相较原来减少了次氯酸钠的投加,节省了成本。

本文主要有如下 3 方面的贡献:(1)将多反馈控制结构引入水厂加氯系统;(2)结合水厂实际情况,设计了应用于水厂多反馈控制结构的连续+离散的模糊 PID 控制算法,同时该结构和算法具有可推广性;(3)将多反馈控制结构和连续+离散的模糊 PID 控制算法应用于水厂生产实践,效果显著。

1 基于水厂加氯系统的多反馈控制结构

原先的加氯方式为根据出水流量等比例投加次氯酸钠溶液,依据实际加氯系统绘制的加氯控制结构如图 2 所示。

该投加方式能大体上保证出水余氯不超标,但单位水量的氯耗改变时,如水质、次氯酸钠浓度或矾液浓度变化等情况,依据出水流量等比例投加的方式无法自动调整投加比例,出水余氯会忽高忽低,以至于值班人员需要紧盯着各项余氯数值并及时调整次氯酸钠溶液相对出水流量的比例。这不仅对值班人员工作状态提出了较高的要求,还增加了出厂水余氯值超标的风险。尤其是对后半夜值班人员来说,困倦状态下很难相对及时且准确地做出调整判断。



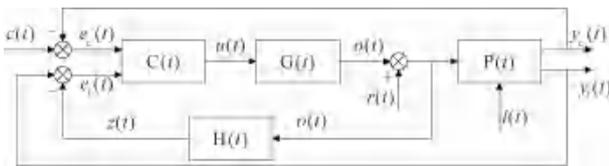
注:图中 $P(t)$ 为被控系统,表示次氯酸钠溶液与水混合的地方,实际为溢流井,其位于清水池前端; $G(t)$ 为执行器,实际为次氯酸钠溶液投加泵; $C(t)$ 为计算输出控制信号的算法; $H(t)$ 为投加泵输出与实际流量做差前经过换算的算法; $o(t)$ 表示投加泵输出的次氯酸钠溶液流量; $z(t)$ 表示 $o(t)$ 经 $H(t)$ 换算后的值; $e_c(t)$ 表示 $l(t)$ 与 $z(t)$ 的差值; $u(t)$ 表示算法给泵的控制信号; $y_c(t)$ 溢流井出水余氯值; $l(t)$ 表示传感器检测到的溢流井进水流量,该值与溢流井出水流量几乎相等,大体上由用户用水量决定; $y_l(t)$ 表示溢流井出水流量,忽略误差的情况下, $y_l(t) = l(t)$ 。

图2 原先的后加氯控制结构

Fig. 2 Original Structure of Post-Chlorination Dosing Control

作为对比,曾尝试过溢流井出水余氯作为反馈值的方案,但由用户所决定的水量不可预测性强、波动幅值较大,导致这种不跟踪流量的控制方案实际控制效果并不理想,因此舍弃此投加方式,使用依据出水流量等比投加溶液的方式。

针对上述情况,为了降低余氯超标的风险、提升出厂水质、解放劳动生产力,改进为如图3所示的滤后加氯控制结构图。



注:图中 $c(t)$ 表示设定的余氯值; $e_c(t)$ 表示 $c(t)$ 与 $y_c(t)$ 的差值。

图3 改进的滤后加氯控制结构

Fig. 3 Improved Structure of Post-Chlorination Dosing Control

对比图2和图3可知,改进的控制系统新增加一条回路,现在将出水流量和出水余氯同时作为反馈值,输入泵的控制信号由溢流井出水流量和设定的余氯值同时决定,为多反馈控制。两个反馈在控制信号处交汇,控制信号的输出由两个输入同时决定。

2 连续和离散相结合的模糊PID控制算法

连续PID算法如式(1)。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

其中: K_p ——比例系数;

K_i ——积分系数;

K_d ——微分系数;

$e(t)$ ——实时变化的偏差信号,在该项目中为图3中的 $e_c(t)$ 和 $e_l(t)$;

$u(t)$ ——实时变化的控制信号。

离散PID算法如式(2)。

$$u(k) = K_{pd} e(k) + K_{id} \sum_{i=k-n}^k e(i) + K_{dd} [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

其中: K_{pd} ——离散公式比例系数;

K_{id} ——离散公式积分系数;

K_{dd} ——离散公式微分系数; n 与累加的周期相关;

$u(k)$ ——每隔一段时间变化的控制信号;

$e(k)$ ——每隔一段时间变化的偏差信号。

连续PID算法灵敏性较高,这也代表其精度高、反应快。用户用水量变化频率高、幅值大、不可预测性强,这便需要连续PID算法对其进行跟踪并反馈控制。

离散PID算法运算时间间隔相对较长,对算力要求较低。依据出水流量等比例投加次氯酸钠的控制方式虽然会导致氯浓度偏高或偏低,但不会出现大幅阶跃的情况。以该水厂为例,浓度不断上升或降低的过程持续10 min以上可能才会超标,这对控制的实时性没有过高的要求。这种情况让1 min调整一次的离散PID算法适用于控氯调整。同时整个加氯系统仅使用一个可编程逻辑控制器(PLC)中央处理器(CPU),系统中包括19台投加泵,引入离散算法能在达到控制效果的同时尽量减少占用PLC算力,以加快程序运行速度、防止CPU模块超负荷。

由出水流量和设定的余氯值同时决定的控制信号,其具体算法可以概括为:由溢流井出水流量决定控制信号加上由设定的余氯值与实际余氯值之间的数值关系决定的控制信号调整值。将式(1)和式(2)相结合, $e(t)$ 结合控制流程图,如式(3)。

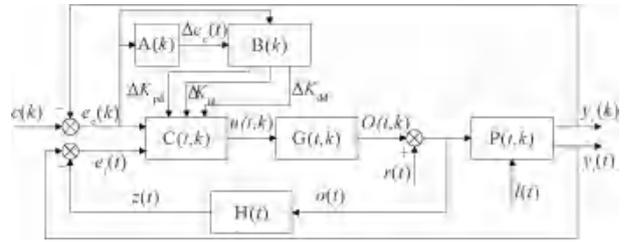
$$\begin{aligned}
 u(t, k) = & K_p [l(t) - o(t)H(t)] + K_i \int_0^t [l(t) - \\
 & o(t)H(t)] dt + K_d \frac{d[l(t) - o(t)H(t)]}{dt} + \\
 & \beta \left\{ K_{pd} [c(k) - y_c(k)] + K_{id} \sum_{i=k-n}^k [c(i) - y_c(i)] + \right. \\
 & \left. K_{dd} \{ [c(k) - y_c(k)] - [c(k-1) - y_c(k-1)] \} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

其中： β ——控制信号的调整值相对控制信号的影响系数。

该水厂运用模糊控制整定式(3)中的参数,移植本文的结构和算法时可简化。 K_p 、 K_i 、 K_d 使用原先的参数; K_{pd} 可与 K_p 一样; K_{id} 可依据投加泵开启后到现场有流量的时间差设定; K_{dd} 可设成 K_{id} 的1/3;运行时间间隔为1 min; β 可为0.05。上述参数应根据实际情况再进行相应的调整。

模糊控制是一种智能控制方法,其本质是模拟人工控制过程,针对不同的情况对控制参数进行微调。该水厂利用模糊控制来调整离散PID的参数。模糊PID的输入为余氯的误差 $e_c(t)$ 和误差变化率 $\Delta e_c(t)$,输出为离散PID的参数修正 ΔK_{pd} 、 ΔK_{id} 、

ΔK_{dd} 。实际的离散PID参数为设定参数加上修正的值。引入模糊PID后控制结构如图4所示。



注:其中 $A(t)$ 为对 $e_c(t)$ 求偏差变化率, $B(t)$ 为模糊控制算法。

图4 引入模糊PID后控制结构

Fig. 4 Control Structure after Introducing Fuzzy PID

目前模糊控制算法参数整定原则过于冗长^[11],且为了提高系统稳态精度,将常见输出的7个分类中的“零”,拆分成“负零”和“正零”,为8个分类。这种做法的优势为在误差接近零时增加分辨率,以便参数更好地接近设定值。输出模糊量为{负大,负中,负小,负零,正零,正小,正中,正大},英文简记为{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB};相应地,输入模糊量调整为{很低,低,微低,微高,高,很高},英文简记为{LL, L, ML, MH, H, HH}。3个参数 ΔK_{pd} 、 ΔK_{id} 、 ΔK_{dd} 的调整规则如表1所示。

表1 ΔK_{pd} 、 ΔK_{id} 、 ΔK_{dd} 模糊控制规则

Tab. 1 ΔK_{pd} 、 ΔK_{id} 、 ΔK_{dd} Fuzzy Control Rule

$e/\Delta e$	LL	L	ML	MH	H	HH
LL	NB, NS, PB	NM, NS, PM	NS, NM, PS	NO, NM, PO	PO, NB, NO	PS, NB, NS
L	NB, NO, PB	NM, NO, PM	NO, NS, PO	PO, NS, NO	PO, NM, NO	PS, NM, NS
ML	NM, PO, PM	NS, NO, PS	NO, NO, PO	PO, NO, NO	PS, NO, NS	PM, NS, NM
MH	NM, PS, PM	NS, PO, PS	NO, PO, PO	PO, PO, NO	PS, PO, NS	PM, NO, NM
H	NS, PM, PS	NO, PM, PO	NO, PS, PO	PO, PS, NO	PM, PO, NM	PB, PO, NB
HH	NS, PB, PS	NO, PB, PO	PO, PM, NO	PS, PM, NS	PM, PS, NM	PB, PS, NB

3 应用效果

该投加方式于2023年3月使用后,还未遇到需要值班人员调整加氯比例的情况。无论是清水池水的余氯还是出厂水的余氯,都较原投加方式稳定。随机抽取同一台泵,追踪检测时间跨度为1590 min(约26 h)且控制系统设置余氯质量浓度在0.9 mg/L的原先和改进的余氯数据进行对比,其中数据采集周期为30 s,如图5和图6所示。值得注意的是,原先的系统是有人工进行干预的,而改进的系统没有人工干预。

为了方便对比,图中红色虚线为人为划定的余

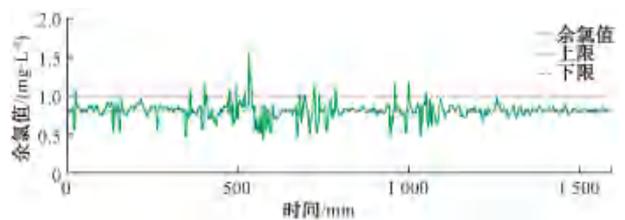


图5 随机选取原先的26 h数据

Fig. 5 Original Random Selection of 26 h Data

氯上限1.0 mg/L,蓝色虚线代表下限0.8 mg/L。由于设定的控制值为0.9 mg/L,改进的系统可以将余氯稳定在 ± 0.1 mg/L。对比两图可以看出,改进的

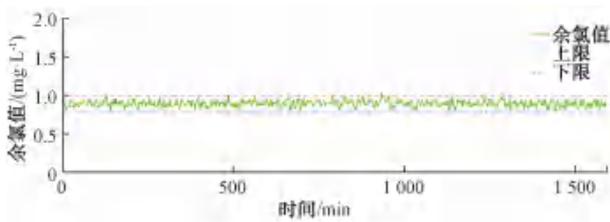


图6 随机选取改进的26 h数据

Fig. 6 Random Selection of 26 h Data after Improvement

系统在正常状态下更稳定。消除了原先时有发生的大起大落的现象,实现了滤后加氯的稳定控制。

2023年4月12日,该水厂按计划进行翻电,即换一路35 kV电源给整个厂区供电。翻电会导致整个水厂停电一段时间。投加泵恢复运行至运行稳定期间,不同的控制方法会产生不同的控制结果。因此当天随机选取一台投加泵运行原先程序与运行改进程序的泵做对比实验,如图7和图8所示。同样,运行原先程序的泵是有人工进行干预的,而运行改进程序的泵没有人工干预。

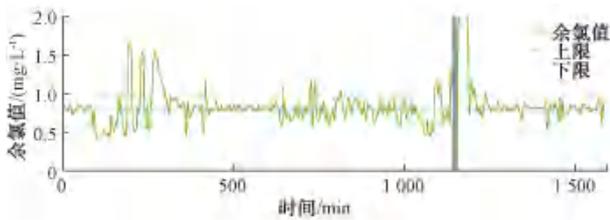


图7 运行原先程序的投加泵对应的滤后水余氯

Fig. 7 Residual Chlorine in Filtered Water Corresponding to Original Dosing Pump Running Program

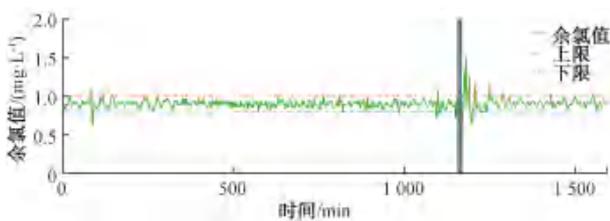


图8 运行改进程序的投加泵对应的滤后水余氯

Fig. 8 Residual Chlorine in Filtered Water Corresponding to Improved Dosing Pump Running Program

图中灰色的区域为断电期间缺失的数据。恢复运行后,两图中的余氯数值皆从0大幅飙升。对比图7和图8可知,虽然原先的系统在人工的干预下可以做到恢复稳定的速度与改进的相当,但其余氯振荡幅度是明显大于改进的。改进的系统具有更强的鲁棒性。

由于上述2 d数据具有随机性,图9增长了数据时间跨度,为随机选取的夏天某一周(10 080 min)的数据。夏制下,后加氯设定的值比春制高,为1.0 mg/L。同样,图中红色、蓝色虚线也为人为划定的,分别为余氯上限1.1 mg/L、余氯下限0.9 mg/L。为方便观察,图中紫色T标用以指示余氯达到或超过上下限的情况,T标越粗说明超过的时间越长。总计达到或超限16次,达到或超限时间约为26 min 30 s,占一周时间的0.002 6%。未见余氯与设定值差值超过 ± 0.15 mg/L的情况,应用效果较好。

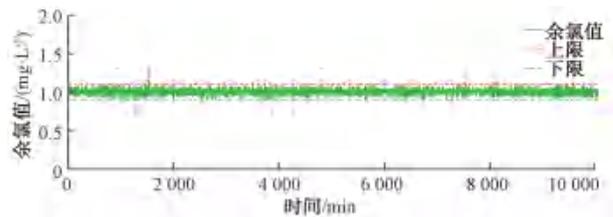


图9 随机选取改进的一周数据

Fig. 9 Random Selection of 1 Week Data after Improvement

4 结论

(1)在现有的智能控制方法基础上,本文针对滤后加氯系统提出了多反馈智能控制算法。相较于现有研究,正常状态下拥有更好的控制效果,特殊状态下的控制效果也得到验证。通过对比正常和特殊状态下,原先与改进的加氯系统运行效果可以得出,多反馈智能控制加氯系统具有稳定性高、鲁棒性强、不需要人为干预的特点。

(2)从2023年3月开始使用至2023年8月,除翻电之类极其特殊的情况,后加氯余氯值从未超过相关指标,这其中包括非常严格的水厂内控值。改进的系统几乎不会出现投加过多次氯酸钠溶液导致余氯浓度偏高的情况,提高了次氯酸钠溶液利用效率,实测以往2.7 d的溶液用量,现在可以使用3 d,年用药量预计节省240 t,总计节省约为160 800元。伴随着次氯酸钠溶液消耗量和投加泵能耗的减少,相关设备的经济寿命得到提高,进一步实现降本增效。

(3)改进的系统仅在程序算法方面做调整,移植成本低,可用于国内绝大部分自动化水厂。

参考文献

[1] 俞红光. 水厂加氯的智能PID控制方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(7): 58-60.

- YU H G. Intelligent PID control method for chlorination at water treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(7): 58-60.
- [2] 丛孙丽, 姜哲宇. 基于 PLC 和 Intouch 的次氯酸钠加氯系统设计[J]. *给水排水*, 2021, 47(5): 135-139.
- CONG S L, JIANG Z Y. Design of sodium hypochlorite chlorination system based on PLC and Intouch[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(5): 135-139.
- [3] 郭晓, 范建伟. 多变量模糊加权控制在水厂自动加药系统中的应用[J]. *城镇供水*, 2017, 2017(1): 26-30.
- GUO X, FAN J W. Application of multivariable fuzzy weighted control in the automatic dosing system of drinking water treatment plants[J]. *City and Town Water Supply*, 2017, 2017(1): 26-30.
- [4] 李成. 智能控制在净水厂混凝投药过程中的应用研究[J]. *新型工业化*, 2022, 12(8): 217-220.
- LI C. Research on the application of intelligent control in the coagulation dosing process of water treatment plants[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2022, 12(8): 217-220.
- [5] 韩梅, 李玉宝, 邹放, 等. 基于水厂大数据的混凝投药系统智能模型的构建[J]. *净水技术*, 2021, 40(9): 40-47.
- HAN M, LI Y B, ZOU F, et al. Modeling of big data-based intelligent model for coagulation dosing system in WTP[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(9): 40-47.
- [6] 魏琪, 刘保超. 两种混凝剂智能投加系统在自来水厂中的应用[J]. *供水技术*, 2023, 17(2): 1-5.
- WEI Q, LIU B C. Application of two intelligent coagulant dosing systems in waterworks[J]. *Water Technology*, 2023, 17(2): 1-5.
- [7] REN B, WEITZEL K A, DUAN X, et al. A comprehensive review on algae removal and control by coagulation-based processes: Mechanism, material, and application [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 293: 1-26.
- [8] JAVIER G, RAMON V, HERMINIO M G, et al. Fuzzy gain scheduling and feed-forward control for drinking water treatment plants (DWTP) chlorination process[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 110018-110032. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3002156.
- [9] GODO-PLA L, RODRIGUEZ L J, SUQUET J, et al. Control of primary disinfection in a drinking water treatment plant based on a fuzzy inference system[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 145: 63 - 70. DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.037.
- [10] 唐冰松, 周志鹏, 唐健. 串联系统多参数广义不确定度传递模式与多反馈控制[J]. *数学的实践与认识*, 2021, 51(7): 195-205.
- TANG B S, ZHOU Z P, TANG J. Transfer mode of generalized uncertainty with multiple parameters and multiple feedback control for series systems [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(7): 195-205.
- [11] 袁卓异. 制水混凝加药控制的模糊 PID 算法研究[J]. *计算技术与自动化*, 2022, 41(3): 27-31.
- YUAN Z Y. Fuzzy PID algorithm for coagulant dosing control of water production[J]. *Computing Technology and Automation*, 2022, 41(3): 27-31.

(上接第 166 页)

- [8] 刘亦凡, 陈涛, 李军. 中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(16): 36-41.
- LIU Y F, CHEN T, LI J. Process analysis of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(16): 36-41.
- [9] 姚亮, 张强, 李鹏. 多级 AO+MBR 工艺在污水处理厂高排放标准提标改造中的应用[J]. *净水技术*, 2023, 42(3): 164-173.
- YAO L, ZHANG Q, LI P. Application of multi-stage AO+MBR processes in upgrading and reconstruction of stricter discharge standard of WWTP[J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(3): 164-173.
- [10] 吴越, 卢俊平, 王怡, 等. MBBR+曝气生物滤池工艺在北方地区污水处理厂提标改造中的应用[J]. *净水技术*, 2023, 42(2): 162-168.
- WU Y, LU J P, WANG Y, et al. Application of MBBR+BAF processes in upgrading and reconstruction of WWTP in northern region[J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(2): 162-168.
- [11] 徐世峰. 西北地区某城市污水处理厂提标改造的实践研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- XU S F. Practical research on upgrading and reconstruction of municipal sewage treatment plant in northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [12] 汪寅莹. 西北地区城市污水处理厂升级改造工艺研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- WANG Y Y. Municipal sewage treatment plant upgrading of technology in northwest area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.