

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.026

自来水厂混凝剂自动精准投加系统建设与运行

何嘉莉, 袁耀芬, 周沛良, 何孙胃, 陈伟钟, 李欢跃, 巢 猛
(东莞市水务集团供水有限公司, 广东 东莞 523112)

摘 要: 收集 W 水厂近一年的原水浊度、待滤水浊度和混凝剂投加量数据, 建立混凝剂投加量数学模型, 编制 PLC 控制系统程序, 设定待滤水浊度的目标值, 通过 PLC 控制系统读取原水浊度数据, 自动计算出混凝剂的投加量, 指令混凝剂投加泵工作, 将待滤水浊度作为效果反馈。通过建立自来水厂混凝剂自动精准投加系统, 能更加准确地控制混凝剂的投加, 稳定出水水质且减少人为主观判断失误, 为水厂将要实施的优化运行提供了可能。

关键词: 自来水厂; 混凝剂; 自动投加; 浊度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0139-05

Construction and Operation of Automatic and Accurate Coagulant Dosing System in Waterworks

HE Jia-li, YUAN Yao-fen, ZHOU Pei-liang, HE Sun-wei, CHEN Wei-zhong,
LI Huan-yue, CHAO Meng

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

Abstract: The data including the turbidity of the raw water, the turbidity of the water to be filtered, and the coagulant dosage are collected from W waterworks in the past year to establish a mathematical model of coagulant dosage and compile a PLC system program, which automatically calculates the coagulant dosage and instruct the coagulant dosage pump to work by setting the target turbidity of the water to be filtered and reading the raw water turbidity data through the PLC system, and taking the turbidity of water to be filtered as effect feedback. By establishing an automatic and accurate coagulant dosing system in the waterworks, the coagulant dosing can be controlled more accurately, the effluent quality can be stabilized, and subjective judgment errors can be reduced, which provides the possibility for the optimized operation of the waterworks to be implemented.

Key words: waterworks; coagulant; automatic dosing; turbidity

1 研究背景

供水企业处理工艺的优化运行,是提高水厂运行与管理水平的重要内容。实现系统的优化运行,关键在于:①合理选定系统优化运行的相关变量;②准确模拟系统运行的状态;③寻优调控系统的运行。其中,①和②是实现系统优化运行的先决条件^[1]。

混凝是水处理工艺的关键环节,混凝剂投加量的准确与否将直接影响出水水质^[2],混凝剂投加量

不足则出水浊度不达标,增加后续处理工艺的负荷;反之,混凝剂投加量过大不仅增加制水成本,还会导致出水铝离子有超标风险^[3]。混凝剂投加量的确定主要有经验目测法、烧杯实验法、模拟滤池法和数学模型法等^[4]。

目前,大部分传统的自来水厂采用烧杯实验法和经验目测法相结合,实施对混凝剂投加量的控制。水厂化验室采用烧杯实验法确定混凝剂投加量与原

水浊度之间的关系,并结合观察平流沉淀池中矾花的密实情况,确定混凝剂投加量。烧杯实验法是在实验室相对理想的状态下进行的,模拟结果与实际生产存在一些差异,实际混凝剂投加量与当班操作工人的经验密切相关,会出现投药量随操作工人的不同而变化的现象,继而使待滤水浊度也产生一些变化。为了更加准确地控制混凝剂投加,稳定出水水质且减少人为主观判断失误,通过对来自生产实际的大量数据进行处理和分析,建立混凝剂投加量数学模型,结合自动投加 PLC 控制系统,实现混凝剂的自动投加,可为水厂将要实施的优化运行提供可能。

目前,关于水厂基于生产实际大数据处理和分析实施混凝剂精准投加已有研究案例,但在水厂实际应用的并不多。邹振裕等^[2]通过分析沙口水厂往年不同季节的原水浊度,以及原水浊度与混凝剂投加量的关系,建立了原水浊度与混凝剂投加量的数学关系式,实现了混凝剂精准投加。王大志等^[5]根据哈尔滨市供水三厂两年多实际生产的混凝剂投加量数据,建立投加量数学模型,并应用于 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的供水系统微机控制。赵英等^[6]应用数学方法和 BP 神经网络技术为哈尔滨市绍和水厂建立了原水水质、投药量与沉后水浊度之间的模型关系。王艳等^[7]建立了西洲水厂的混凝剂投量数学模型,对确定模型中的待定系数进行了分析计算,并对线性回归效果进行了检验。詹咏等^[8]根据水厂的进水量及原水水质等情况,建立了流量、原水浊度、出水浊度、助凝剂用量与混凝剂用量的数学模型。唐德翠等^[9]通过对某水厂投药量控制以及生产数据的分析和处理,建立了混凝剂投加量数学模型,预测值作为操作的参考值,解决了在不同人员操作时混凝剂的准确投加问题。

2 数据的收集与分析

在自来水厂实际生产运行中,絮凝反应、沉淀等工艺参数以及混凝剂投加量、待滤水浊度的变化,与原水水质和处理水量密切相关,它们之间存在相互制约的动态关系,可通过建立数学模型来确定这种内在的动态关系。与混凝剂投加量相关的因素,首先,原水水质是关键,特别是原水浊度;不同的季节、气温是直接影响混凝剂水解、混凝效果的重要因素,由于东莞地区常年气温较高,不同季节混凝效果差异不大,因此本研究未考虑水温因素。其次,待滤水

浊度是主要的效果反馈变量。再次,处理水量的变化也会引起工艺设备参数随之改变,对混凝剂投加量也有一定影响,尤其是处理水量的改变对沉淀工艺的影响较为突出,故应将处理水量作为混凝剂投加量的相关因素。本研究由于在计算混凝剂投加量时,处理水量已经参与了计算,因此,收集的相关数据包括:原水浊度、待滤水浊度以及混凝剂投加量。

试验在 W 水厂进行,该厂采用常规处理工艺,选用第三期工艺开展试验。设计处理规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,混凝沉淀采用网格絮凝池 + 平流沉淀池。收集 W 水厂第三期工艺近一年的相关统计数据(原水浊度、待滤水浊度、混凝剂投加量),记录每天 14:00 的数据,剔除 15 组仪表故障、数据读取异常等导致的异常数据,收集的有效数据共 350 组,具体如图 1~3 所示。

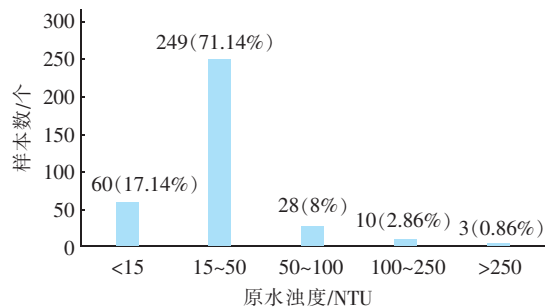


图1 原水浊度数据

Fig.1 Turbidity data of raw water

由图1可知,原水浊度 < 50 NTU 的样本数占 88% 以上,原水浊度 < 100 NTU 的样本数占 96% 以上,原水浊度 > 100 NTU 的样本数不到 4%。

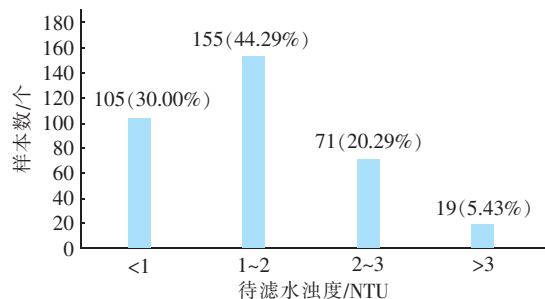


图2 待滤水浊度数据

Fig.2 Turbidity data of water to be filtered

W 水厂的待滤水浊度内控标准为 3 NTU,待滤水浊度 < 3 NTU 的样本数约占 95%,待滤水浊度 < 2 NTU 的约占 74%,待滤水浊度 < 1 NTU 的占 30%,这说明 W 水厂的待滤水浊度控制得比较好。

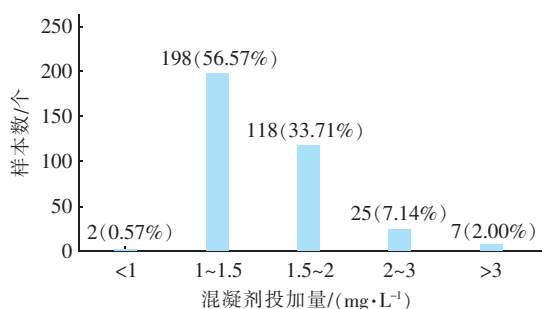


图3 混凝剂投加量数据

Fig. 3 Data of coagulant dosage

从混凝剂投加量数据来看,混凝剂投加量为1~2 mg/L的样本数占90%以上,混凝剂投加量<1 mg/L的仅占0.57%,混凝剂投加量>2 mg/L的不到10%。

3 数学模型的建立

由于混凝工艺涉及的影响因素多、反应过程复杂,因此难以建立其机理模型,而需要定量描述混凝工艺,可以通过一些相关的变量参数来加以量化,从而建立起处理过程的半机理模型。根据混凝工艺的相关因素建立起原则关系,对混凝工艺的大量运行数据进行回归分析,最终确定待定模型的相关系数。

收集W水厂近一年的原水浊度、待滤水浊度和混凝剂投加量数据进行回归分析,建立回归分析模型。先用350组数据建立初步的回归分析模型,然后通过计算回归分析模型中因变量的标准化残差,选取标准化残差落在(-2,2)区间以外的点作为离群点,剔除离群点后重新建立回归分析模型,重复该步骤直至回归模型复相关系数达到期望值。该方法剔除离散数据69组,剩余281组数据参与建立回归分析模型。

拟合模型结果如下:

$$y = \left(\frac{x_1 - 10.242 - 1.506x_2^3}{2.125} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: y 为混凝剂投加量; x_1 为原水浊度; x_2 为待滤水浊度。

该拟合模型复相关系数 $R^2 = 0.95$,在回归系数的显著性检验(t 检验)以及回归方程的显著性检验(F 检验)中,显著性水平均小于0.05,可以认为建立的模型有效。

因变量的标准化残差直方图和标准化残差正态P-P图分别见图4、5。由图4、5可知,残差具有正态分布的趋势,该回归分析模型是合理的。

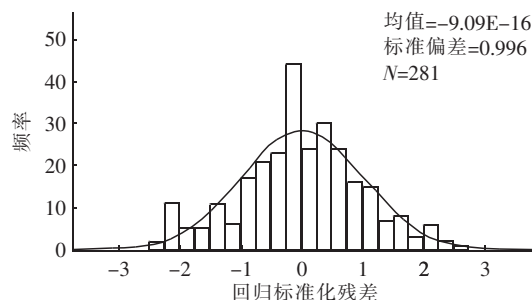


图4 因变量标准化残差直方图

Fig. 4 Dependent variable standardized residual histogram

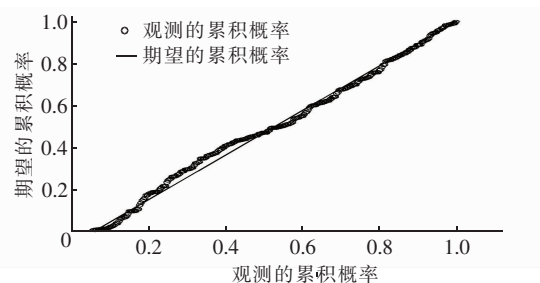


图5 标准化残差的标准P-P图

Fig. 5 Standard P-P plot of standardized residuals

有研究^[2,9]通过对原水浊度分段后建立数学模型,W水厂的原水浊度分布不均,浊度<20 NTU的样本数尤为密集,大部分集中在50 NTU以下,浊度>50 NTU的样本数较少,如按照原水浊度分段建立模型会出现低浊度样本离散程度高、高浊度样本数不足、模型不具代表性等问题。根据W水厂的实际情况,通过整体数据建模,剔除离散数据修正模型,分段设定待滤水目标值的方法,相比于根据原水浊度分段建立模型更为合理。

数学模型建立完成后,根据水质情况确定待滤水浊度的目标值。原水浊度<15 NTU的样本数约占17%,该段对应的待滤水数据中浊度最低可以控制至0.5 NTU,因此,该段的待滤水目标值设为0.5 NTU。15 NTU≤原水浊度<50 NTU的样本数约占71%,从提升水质的角度出发,该段待滤水浊度按照1 NTU来控制。50 NTU≤原水浊度<100 NTU的样本数占8%左右,根据实际待滤水的控制情况,该段浊度的目标值设为2 NTU。100 NTU≤原水浊度<250 NTU的样本数仅占2.86%,该段浊度按照W水厂的内控标准3 NTU设定。原水浊度>250 NTU的样本数占2%,该段为高浊度特殊水质,浊度按照W水厂的内控标准3 NTU设定。模型的混凝剂投加量预测值见表1。W水厂的混凝剂采用液体聚合氯

化铝,其有效成分为 10%,混凝剂投加量均以有效铝计。经对比,表 1 中的数据与实际相符,数学模型与待滤水目标值分段合理。

表 1 模型的混凝剂投加量

Tab. 1 Coagulant dosage of the model

原水浊度/NTU	待滤水浊度目标值/NTU	混凝剂投加量预测值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
< 15	0.5	
15	1	1.15
50	2	2.35
100	3	2.85
150	3	3.60
250	3	4.54
300	3	4.89

4 自动投加系统的搭建

自来水厂的混凝剂自动投加系统,包括数学模型、原水监测系统、混凝剂投加系统、待滤水监测系统和 PLC 控制系统。其中原水监控系统包括原水流量计和原水浊度仪;混凝剂投加系统包括混凝剂储药罐、液位计、投加计量泵、流量计、压力变送器和 SCD 电流测试仪;待滤水监控系统包括待滤水浊度仪。自来水厂混凝剂自动投加系统如图 6 所示。

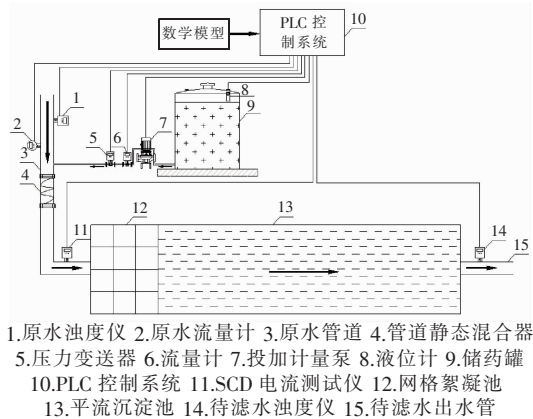


图 6 自来水厂混凝剂自动投加系统

Fig. 6 Schematic diagram of automatic coagulant dosing system for waterworks

原水浊度仪和原水流量计安装在原水管道上,向原水管道投加混凝剂后,原水经管道静态混合器混合;在进入网格絮凝池前的原水管道上安装 SCD 电流测试仪,原水经过网格絮凝池和平流沉淀池处理后,出水汇集到待滤水出水管;待滤水出水管安装有待滤水浊度仪。混凝剂投加系统的储药罐上安装有液位计,储药罐出液管与投加计量泵连接,投加计量泵出口与原水管道连接管上安装有流量计和压力

变送器。以上所提及的仪表以及投加计量泵均与 PLC 控制系统连接,数学模型写入 PLC 控制系统,组成自来水厂混凝剂自动精准投加系统。

5 试运行情况

对混凝剂自动精准投加系统开展了为期 20 d 的试运行,在试运行前对投药岗位员工进行了操作与应急的培训。试运行时间为每天 09:00—17:00,安排专门的水质监测人员开展水质监测工作。设置试验组和对照组,处理规模与工艺均相同,试验组运行混凝剂自动投加系统,对照组使用人工手动设定混凝剂投加量。

收集每天 14:00 的数据进行分析,试运行数据如图 7、8 所示。

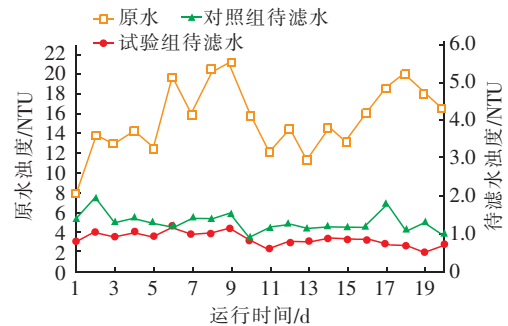


图 7 待滤水浊度对比

Fig. 7 Comparison of turbidity of water to be filtered

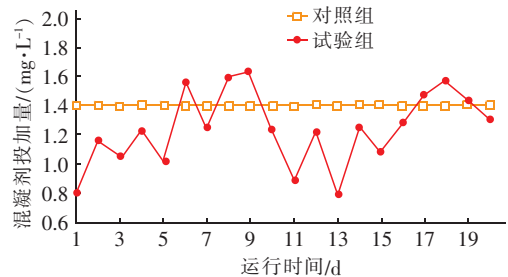


图 8 混凝剂投加量对比

Fig. 8 Comparison of coagulant dosage

试运行期间,原水浊度为 7.94 ~ 21.13 NTU,平均为 15.43 NTU,试验组待滤水浊度明显低于对照组待滤水浊度,试验组待滤水浊度均值为 0.86 NTU,对照组待滤水浊度均值为 1.30 NTU。试验组的处理效果明显优于对照组。

试运行期间,试验组的混凝剂投加量为 0.8 ~ 1.64 mg/L ,平均为 1.24 mg/L ,对照组的混凝剂投加量设定为 1.4 mg/L ,试验组比对照组节省混凝剂用量。

试运行期间,混凝剂自动投加系统运行稳定,供

水高峰期和低峰期均能稳定运行,原水泵增减开机台数、原水浊度仪清洗等情况均对系统无影响。

6 长期运行效果

在连续监测的5个月中,自动精准投加系统共运行3 089 h(80%以上的时间均自动运行);原水平均浊度为25.03 NTU,最高值为237.12 NTU;试验组待滤水平均浊度为1.32 NTU;对照组待滤水平均浊度为1.46 NTU;自动投药总耗量为12 290.52 kg,手动投药总耗量为12 915.42 kg;自动投药均值为1.45 mg/L,手动投药均值为1.53 mg/L,可见自动投药比手动投药节省约5%的药剂量。

7 结语

根据W水厂的实际情况建立了混凝剂投加数学模型,搭建了混凝剂自动投加系统,使用的设备多为自来水厂常规配置,基本无需另行增加,不增加自来水厂的运营成本,适合我国自来水厂的自动化系统升级改造;该系统能根据原水和待滤水的浊度变化,实时地调整药剂的投加量,实现混凝剂的精准投加,有效稳定出水水质。试运行表明,该系统运行稳定,处理效果好,节省混凝剂用量;且该系统自动化程度高,能减少工人劳动强度和人为主观判断失误,在自来水厂具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 田一梅,张宏伟,齐庚中,等. 水处理系统运行状态数学模拟的研究[J]. 中国给水排水, 1998,14(4):10-13.
TIAN Yimei, ZHANG Hongwei, QI Gengzhong, *et al.* Research on mathematical simulation of water treatment system operation state[J]. China Water & Wastewater, 1998,14(4):10-13(in Chinese).
- [2] 邹振裕,罗永恒,李展峰,等. 沙口水厂混凝剂优化投加的研究及实践[J]. 中国给水排水,2009,25(17):51-53.
ZOU Zhenyu, LUO Yongheng, LI Zhanfeng, *et al.* Optimized dosing of coagulant in Shakou waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2009,25(17):51-53(in Chinese).
- [3] 杨开明,张建强,杨小林. 混凝沉淀过程中最佳混凝剂投量的研究[J]. 工业水处理,2005,25(9):49-51.
YANG Kaiming, ZHANG Jianqiang, YANG Xiaolin. Research on optimal dosage of coagulant in the process of coagulating sedimentation [J]. Industrial Water Treatment,2005,25(9):49-51(in Chinese).
- [4] 崔福义,彭永臻,南军. 给排水工程仪表与控制[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
CUI Fuyi, PENG Yongzhen, NAN Jun. Water Supply and Drainage Engineering Instrumentation and Control[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006(in Chinese).
- [5] 王立志,柳秉洁. 混凝剂最优投加量数学模型[J]. 中国给水排水,1988,4(4):16-20.
WANG Dazhi, LIU Bingjie. Mathematical model of optimal dosage of coagulant [J]. China Water & Wastewater,1988,4(4):16-20(in Chinese).
- [6] 赵英,南军,崔福义,等. 神经网络技术在水处理工艺建模中的应用[J]. 给水排水,2007,33(10):110-114.
ZHAO Ying, NAN Jun, CUI Fuyi, *et al.* Application of neural network simulator for modeling of water treatment process[J]. Water & Wastewater Engineering,2007,33(10):110-114(in Chinese).
- [7] 王艳,吴学伟,龙志宏. 西洲水厂混凝剂投量数学模型的建立[J]. 山西建筑,2007,33(3):167-168.
WANG Yan, WU Xuewei, LONG Zhihong. Establishment of mathematical model for coagulant dosage in Xizhou waterworks[J]. Shanxi Architecture,2007,33(3):167-168(in Chinese).
- [8] 詹咏,徐国勋,吴文权,等. 最佳混凝条件下混凝剂投量数学模型[J]. 中国给水排水,2004,20(1):55-57.
ZHAN Yong, XU Guoxun, WU Wenquan, *et al.* Mathematical model of coagulant dosage under optimal coagulation conditions[J]. China Water & Wastewater, 2004,20(1):55-57(in Chinese).
- [9] 唐德翠,邓晓燕,朱学峰,等. 水厂混凝剂投加量建模研究[J]. 水处理技术,2010,36(6):54-56,89.
TANG Decui, DENG Xiaoyan, ZHU Xuefeng, *et al.* Study on modeling of the coagulant dosing process of water plant [J]. Technology of Water Treatment,2010,36(6):54-56,89(in Chinese).

作者简介:何嘉莉(1988-),女,广东东莞人,硕士,工程师,主要研究方向为给水处理技术。

E-mail:lily_mk88@126.com

收稿日期:2020-12-08

修回日期:2021-03-12

(编辑:衣春敏)