

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.011

# 智慧控制在水厂协同消毒中的应用

高建宏, 曲莹, 孙弘

(山东山大华特科技股份有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 针对协同消毒工艺在水厂实际应用中存在的问题和难点,通过对水厂协同消毒工艺的控制进行升级改造及模拟实验,研究了传统控制与智慧控制协同消毒在多种因素影响下的实验结果。相较传统控制,智慧控制协同消毒可将消毒剂控制指标精度提高72%左右、消毒剂投加量减少16%左右、消毒副产物的生成量减少22%左右。在水厂协同消毒应用中智慧控制较传统控制具有更好的控制效果及推广价值。

**关键词:** 智慧控制; 协同消毒; 前馈; 反馈; 智慧投加

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0064-05

## Application of Intelligent Control in Collaborative Disinfection of Waterworks

GAO Jian-hong, QU Ying, SUN Hong

(Shandong Shanda Wit Science and Technology Co. Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** In view of the problems and difficulties existing in practical application of collaborative disinfection process in waterworks, the control of collaborative disinfection process in waterworks was upgraded and simulated, and the experimental results of traditional control and intelligent control collaborative disinfection under the influence of various factors were explored. Compared with traditional control collaborative disinfection, intelligent control collaborative disinfection could improve the accuracy of disinfectant control index by about 72%, reduce the disinfectant dosage by about 16%, and reduce the production of disinfection by-products by about 22%. Therefore, intelligent control has better control effect and popularization value than the traditional control in collaborative disinfection of waterworks.

**Key words:** intelligent control; collaborative disinfection; feedforward; feedback; intelligent addition

协同消毒技术主要是将单一的消毒方式改为采用两种及两种以上的消毒剂或消毒方法以便加速和强化消毒效果,在不同工艺段、不同投加点充分发挥每种消毒剂的优势,最终使出厂水水质达标<sup>[1]</sup>。协同消毒技术虽然有助于提高水厂的处理能力,但是多种消毒技术的使用会使得出水水质稳定性变差、运行成本增加、消毒副产物增多。因此,如何通过自动控制实现精确控制、减少各消毒剂投加量及消毒

副产物生成量,成为协同消毒技术亟待攻克的一大难题。通过对某水厂的协同消毒进行智慧控制升级改造及模拟实验,对改造前后的传统控制与智慧控制数据进行分析,对比两种方式在控制指标精度、消毒剂投加量及消毒副产物生成量等方面的效果,旨在找出解决协同消毒技术控制难题的有效方法。

### 1 实验方案

山东某水厂总制水规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用

二氧化氯和次氯酸钠协同消毒工艺,控制方式采用传统控制技术,即单一信号输入控制,在初始数据发生变化后,探测器测定值高(低)于设定值,将该信号反馈给控制器,输出信号调节控制对象,从而使测定值接近设定值。投产运行后发现,在季节性流量和水质发生变化时系统无法及时改变消毒剂加量,而且两种消毒剂联合消毒只能单独控制而不具备协同控制的能力,最终导致消毒剂控制精度差、出水水质不稳定。

该水厂协同消毒工艺如图1所示。

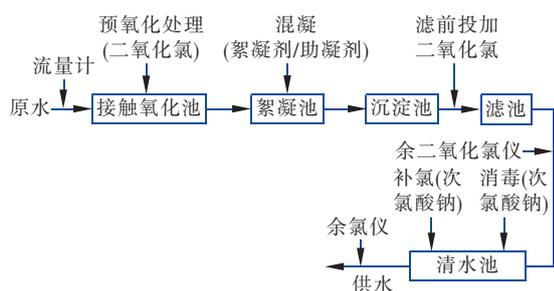


图1 山东某水厂协同消毒工艺

Fig.1 Collaborative disinfection process of a waterworks in Shandong Province

智慧控制即多信号输入控制,在单一反馈控制的基础上引入前馈控制<sup>[2]</sup>,当初始数据发生变化时,智慧控制器会自动做出补偿,在反馈信号未出现前即可提前消除大部分干扰的影响,小部分干扰则通过反馈信号修正而消除。上述技术特征与水厂协同消毒技术实际需求能够较好地匹配<sup>[3-6]</sup>,因此引入智慧控制并对原有传统控制系统进行升级改造,通过模拟实验分析对比传统控制与智慧控制的运行效果。

### 1.1 控制升级改造方案

对该水厂的二氧化氯与次氯酸钠协同消毒工艺进行智慧控制设计,充分利用现有检测仪表和加氯装置,并在滤池出口增设余二氧化氯在线分析仪表,将智慧控制器(智慧控制)安装在原有的控制柜内,通过网络连接与二氧化氯/次氯酸钠控制器(传统控制)实现通讯,采用开关切换二氧化氯/次氯酸钠控制器与智慧控制器的控制模式。

### 1.2 模拟控制实验方案

在该水厂开展协同消毒传统及智慧控制模拟实验,对实际运行过程中出现的季节性流量变化、水质变化等情况进行模拟,采用传统和智慧方式分别控

制协同消毒。在满足消毒效果(即满足国标中出厂水余氯值 $\geq 0.3$  mg/L的要求)的前提下,从控制指标精度、消毒剂投加量及消毒副产物生成量等方面进行系统分析、对比。

① 方案一:采取降低水厂进水流量的方式模拟水量变化,考察协同消毒中不同控制模式下对二氧化氯投加量及控制指标精度的影响。

传统控制:以滤池出口余二氧化氯值为被控对象,同时作为二氧化氯投加的反馈信号,以二氧化氯原料投加量为调节手段,实现二氧化氯投加。

智慧控制:以滤池出口余二氧化氯值为被控对象,同时作为二氧化氯投加的反馈信号,以进水流量作为二氧化氯的前馈信号,以二氧化氯原料投加量为调节手段,实现二氧化氯投加。

② 方案二:在协同消毒工艺进水流量及水质不变的情况下,采取降低二氧化氯原料投加量使清水池进水水质变差的方式模拟水质变化,考察协同消毒中不同控制模式下对次氯酸钠投加量及控制指标精度的影响。

传统控制:以清水池出口余氯值为被控对象,同时作为次氯酸钠投加的反馈信号,以次氯酸钠投加量为调节手段,实现次氯酸钠投加。

智慧控制:以清水池出口余氯值为被控对象,同时作为次氯酸钠投加的反馈信号,以二氧化氯原料投加量作为次氯酸钠的前馈信号,以次氯酸钠投加量为调节手段,实现次氯酸钠投加。

③ 方案三:采取降低水厂进水流量的方式模拟水量变化,考察协同消毒中智慧控制与传统控制模式下对二氧化氯和次氯酸钠投加量以及控制指标精度的影响,同时在出口取水样,检测消毒副产物的生成量。

传统控制:以余二氧化氯值/余氯值为被控对象,同时作为二氧化氯/次氯酸钠投加的反馈信号,以二氧化氯/次氯酸钠投加量为调节手段,消毒剂和控制器一一对应,独立控制。

智慧控制:以余二氧化氯值/余氯值为被控对象,同时作为二氧化氯/次氯酸钠投加的反馈信号,以进水流量作为二氧化氯的前馈信号,以进水流量及二氧化氯原料投加量作为次氯酸钠的双前馈信号,以二氧化氯/次氯酸钠协同消毒投加量为调节手段,实现二氧化氯与次氯酸钠协同投加。

协同消毒系统控制如图2所示。

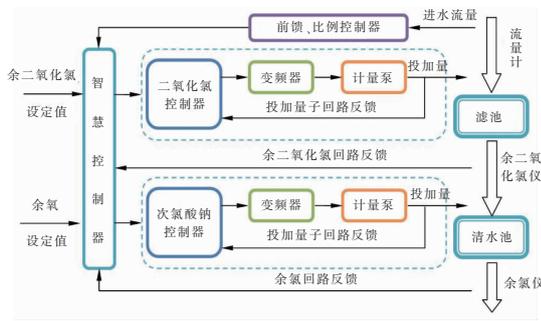


图2 协同消毒系统控制

Fig. 2 Control chart of collaborative disinfection system

### 1.3 测定方法

#### ① 控制指标精度的测定

模拟调整流量、水质等影响因素,考察余二氧化氯及余氯运行数据,分析比对。

#### ② 消毒剂投加量的测定

模拟调整流量、水质等影响因素,程序自动计算出控制调整过程中二氧化氯及次氯酸钠的平均投加量,分析结果。

#### ③ 消毒副产物生成量的测定

采用离子色谱仪测定出水中的亚氯酸根离子含量;采用气相色谱仪测定出水中的三氯甲烷含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 方案一结果

由于季节更替,水厂进水量会相应调整,因此模拟减少系统进水量对二氧化氯控制的影响,分析对比传统与智慧控制的二氧化氯数据曲线。余二氧化氯的控制设定值为0.05 mg/L。

#### ① 传统控制

将进水流量由4 167 m<sup>3</sup>/h调整为3 000 m<sup>3</sup>/h,系统每5 min自动记录1次,由1 000 min的数据可以看出,改变进水流量,余二氧化氯反馈信号滞后调节计量泵的投加量,经过2~3个完整调整周期之后趋于平稳。余二氧化氯曲线波动较大,余二氧化氯值偏差范围为-0.02~0.06 mg/L,系统自动计算出调整过程中二氧化氯原料平均投加量为27.5 L/h,即二氧化氯的平均投加量为0.78 mg/L。

#### ② 智慧控制

流量前馈+余二氧化氯反馈控制实验情况如图3所示。将进水流量由4 167 m<sup>3</sup>/h调整为3 000 m<sup>3</sup>/h,系统每5 min自动记录1次,由1 000 min的数据可以看出,进水流量变化的前馈信号输入智慧控制器,使得二氧化氯原料的投加量能够及时进行

调整,再加上余二氧化氯值的反馈信号修正,整体控制比较平稳。余二氧化氯值的偏差范围为±0.02 mg/L,系统自动计算出调整过程中二氧化氯原料的平均投加量为23.8 L/h,即二氧化氯的平均投加量为0.67 mg/L。

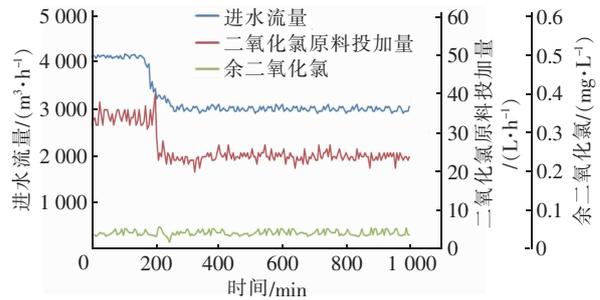


图3 流量干扰下前馈+反馈控制运行曲线

Fig. 3 Operating curve of feedforward + feedback control under flow disturbance

### 2.2 方案二结果

采取调低二氧化氯设备产量进而降低其原料投加量的方式使清水池进水水质变差,分析对比传统与智慧控制的次氯酸钠数据曲线。余氯的控制设定值为0.40 mg/L。

#### ① 传统控制

余氯反馈控制实验情况如图4所示。将二氧化氯设备投加量由0.75 mg/L调整为0.50 mg/L,即二氧化氯原料投加量由36.7 L/h调整为26.7 L/h,系统每5 min自动记录1次,由1 000 min的数据可以看出,改变清水池进水水质,余氯反馈信号滞后调节次氯酸钠计量泵的投加量。余氯曲线在大幅度波动,余氯值偏差范围达±0.1 mg/L,系统自动计算出调整过程中次氯酸钠的平均投加量为64.2 L/h,即1.79 mg/L。

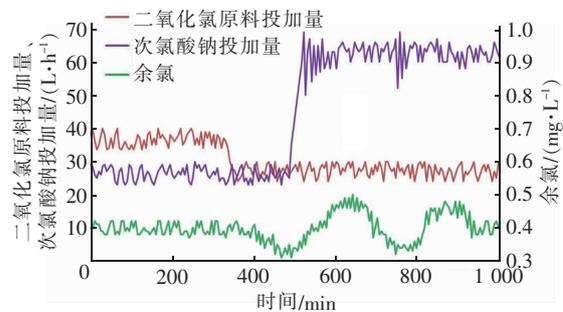


图4 水质干扰下反馈控制运行曲线

Fig. 4 Operating curve of feedback control under water quality disturbance

## ② 智慧控制

二氧化氯原料投加量前馈 + 余氯反馈控制情况如图5所示。将二氧化氯设备投加量由0.75 mg/L调整为0.50 mg/L,即二氧化氯原料投加量由36.7 L/h调整为26.7 L/h,系统每5 min自动记录1次,由1 000 min的数据可以看出,改变清水池进水水质,二氧化氯原料投加量变化的前馈信号输入智慧控制器,使得次氯酸钠的投加量能够及时调整,并在余氯值的反馈信号修正下,运行曲线经过短暂振荡后,余氯值的偏差恢复到 $\pm 0.02$  mg/L,系统自动计算出调整过程中次氯酸钠平均投加量为52.3 L/h,即1.46 mg/L。

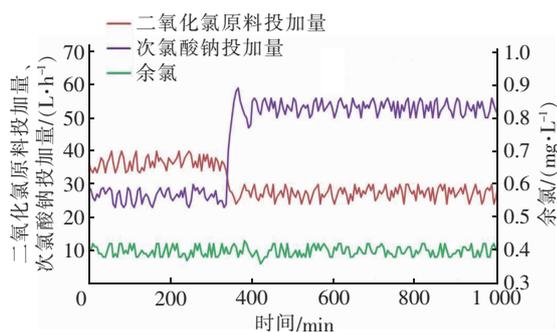


图5 水质干扰下前馈 + 反馈控制运行曲线

Fig. 5 Operating curve of feedforward + feedback control under water quality disturbance

## 2.3 方案三结果

采取降低水厂进水流量的方式模拟水量变化对二氧化氯及次氯酸钠协同消毒投加量及控制指标精度的影响,同时在出口取水样,对消毒副产物生成量进行对比分析。余二氧化氯的控制设定值为0.06 mg/L,余氯的控制设定值为0.35 mg/L。

### ① 传统控制

余二氧化氯反馈控制 + 余氯反馈控制情况如图6所示。将进水流量由4 167 m<sup>3</sup>/h调整为3 000 m<sup>3</sup>/h,系统每5 min自动记录1次,由1 000 min的数据可以看出,改变进水流量,余二氧化氯反馈信号滞后调节计量泵投加量,余二氧化氯曲线波动较大。余二氧化氯值偏差范围达-0.02 ~ 0.05 mg/L,系统自动计算出调整过程中二氧化氯原料平均投加量为32.5 L/h,即二氧化氯的平均投加量为0.92 mg/L。余氯反馈信号滞后调节计量泵的投加量,余氯曲线大幅度波动且在实验时间内无法稳定至设定值范围内。余氯值偏差范围达 $\pm 0.2$  mg/L,部分时间段内

余氯值小于国标要求的0.3 mg/L,系统自动计算出调整过程中次氯酸钠的平均投加量为24.4 L/h,即0.94 mg/L。

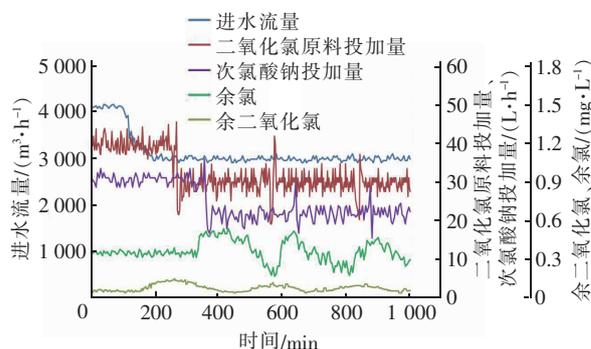


图6 流量干扰下反馈 + 反馈控制运行曲线

Fig. 6 Operating curve of feedback + feedback control under flow disturbance

实验时间内每隔300 min在出水口取水样1次,共取3次,检测消毒副产物生成量,测得亚氯酸根平均含量为0.65 mg/L(国标限值为0.7 mg/L),三氯甲烷平均含量为0.053 mg/L(国标限值为0.06 mg/L)。

### ② 智慧控制

流量/二氧化氯原料投加量双前馈 + 余二氧化氯/余氯双反馈控制情况如图7所示。

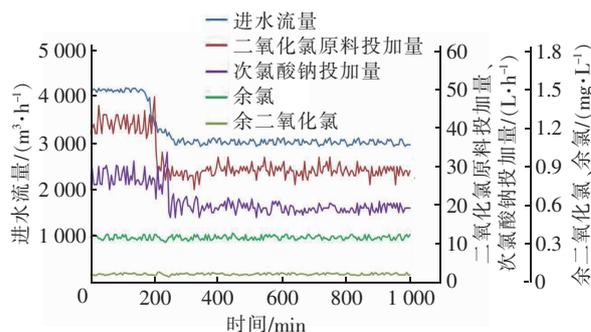


图7 流量干扰下双前馈 + 双反馈控制运行曲线

Fig. 7 Operating curve of double feedforward + double feedback control under flow disturbance

将进水流量由4 167 m<sup>3</sup>/h调整为3 000 m<sup>3</sup>/h,系统每5 min自动记录1次,由1 000 min的数据可以看出,将进水流量变化的前馈信号输入智慧控制器,使得二氧化氯的原料投加量能够及时调整,再加上余二氧化氯值的反馈信号修正,整体控制较为平稳。余二氧化氯值的偏差范围为 $\pm 0.02$  mg/L,系统自动计算出调整过程中二氧化氯原料的平均投加量为29.3 L/h,即二氧化氯平均投加量为0.83 mg/L。

进水流量和二氧化氯原料投加量的双前馈信号输入智慧控制器,使得次氯酸钠的投加量能够及时调整且在余氯值的反馈信号修正下,经过短时间调整后余氯值的偏差控制在 $\pm 0.04$  mg/L范围内,余氯值未出现小于国标要求的0.3 mg/L的情况,系统自动计算出调整过程中次氯酸钠的平均投加量为19.5 L/h,即0.75 mg/L。

实验时间内每隔300 min在出水口取水样1次,共取3次,检测消毒副产物生成量,测得亚氯酸根平均含量为0.56 mg/L、三氯甲烷平均含量为0.037 mg/L。

计算上述数据,智慧控制相较传统控制的优势如下:

二氧化氯:控制余二氧化氯精度平均提高63%;二氧化氯平均投加量减少12%。

次氯酸钠:控制余氯精度平均提高80%;次氯酸钠平均投加量减少19.3%。

消毒副产物生成量:亚氯酸根平均减少13.8%;三氯甲烷平均减少30.2%。

汇总结果计算平均值:在协同消毒投加上智慧控制较传统控制,消毒剂控制指标精度提高72%左右、消毒剂投加量减少16%左右、消毒副产物的生成量减少22%左右。

### 3 结论

城市自来水厂协同消毒的出水水质难以控制的主要原因是影响因素多、被控对象多、控制时滞长等,传统控制只能对单控制对象、单因素输入的情况进行控制,而且只有在收到反馈信号后才开始调节,而反馈信号往往是滞后的、不及时的,导致控制对象在设定值范围内长时间上下波动,控制精度变差。智慧控制技术具有较强的鲁棒性,在输入因素变化较大的情况下仍然可以保持输出的稳定性,对于多控制对象、多因素输入、大时滞的控制过程能够取得良好的控制效果,因此智慧控制可以有效解决协同消毒的难题。

智慧控制可以使水厂实现协同消毒投加精确控制、减少消毒剂的投加量、减少消毒副产物的生成量等控制目标,从实际运行效果来看,处理系统的出水水质稳定、运行成本明显降低,消毒副产物得到了有效控制。

### 参考文献:

- [1] 唐非,谷康定,丁建东,等. 二氧化氯与氯联合消毒减少消毒副产物[J]. 中国给水排水,2003,19(11):55-58.  
TANG Fei, GU Kangding, DING Jiandong, et al. Combined disinfection with chlorine dioxide and chlorine for reducing disinfection byproducts[J]. China Water & Wastewater,2003,19(11):55-58(in Chinese).
- [2] 孙达智,江智军. 专家系统控制自来水生产的自动加药工艺[J]. 中国给水排水,2003,19(3):63-65.  
SUN Dazhi, JIANG Zhijun. Automatic chemical feeding process controlled by expert system in waterworks[J]. China Water & Wastewater,2003,19(3):63-65(in Chinese).
- [3] 白桦,李圭白. 混凝投药的神经网络控制方法[J]. 给水排水,2001,27(11):83-86.  
BAI Hua, LI Guibai. Neural networks control method for coagulant dosage[J]. Water & Wastewater Engineering,2001,27(11):83-86(in Chinese).
- [4] 薛荆岩,巫红,韩志刚. 无模型控制方法在复杂大时滞系统控制中的应用研究[J]. 自动化技术与应用,2004,23(4):1-6.  
XUE Jingyan, WU Hong, HAN Zhigang. On study of model free control system applied to complex large scale time delay systems[J]. Techniques of Automation and Applications,2004,23(4):1-6(in Chinese).
- [5] 罗真. 无模型控制器在生产上的应用[J]. 化工自动化及仪表,2001,28(4):44-49.  
LUO Zhen. Application of non-model controller in production[J]. Control and Instruments in Chemical Industry,2001,28(4):44-49(in Chinese).
- [6] 张中炜,丁永生. 净水厂混凝投药的无模型自适应控制系统[J]. 计算机仿真,2007,24(4):176-179.  
ZHANG Zhongwei, DING Yongsheng. Model-free adaptive control system for coagulant dosage in water treatment process[J]. Computer Simulation,2007,24(4):176-179(in Chinese).

作者简介:高建宏(1986-),男,山东济南人,学士,工程师,主要从事给水排水技术研究及环保设备研发工作。

E-mail:329181712@qq.com

收稿日期:2019-11-19

修回日期:2019-12-13

(编辑:刘贵春)