

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.008

# 二次供水余氯监测与水平控制智能系统开发与应用

李 雄<sup>1</sup>, 卢金锁<sup>1</sup>, 张志强<sup>1</sup>, 苏林东<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安益维普泰环保股份有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 城镇供水末端普遍存在水质变差、余氯不达标等问题。在二次供水处进行加氯消毒是改善末端水质、为用户龙头水提供安全保障的有效途径。基于此,开发了智能二次供水加氯消毒系统,以银川市某小区二次供水为研究对象,分析其用水特性,并采用相应的投加模式,检测系统运行的投加和用户龙头水余氯控制效果。基于增量式PID控制算法,采用开环控制前馈投加与闭环控制反馈调节相结合的复合环控制,将整个系统离散化控制以便达到适应水质、水量的变化,实现动态调整投加,从而精准控制水中余氯浓度。

**关键词:** 二次供水; 水质保障; 加氯消毒; 余氯; 复合环控制

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0051-05

## Development and Application of an Intelligent System for Residual Chlorine Detection and Control in Secondary Water Supply

LI Xiong<sup>1</sup>, LU Jin-suo<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>1</sup>, SU Lin-dong<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Yiwei Putai Environmental Protection Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** There are widespread problems at the end of urban water supply, such as poor water quality and insufficient residual chlorine. Chlorination in secondary water supply is an effective way to improve the end water quality and ensure the safety of user's tap water. This paper developed an intelligent secondary water supply chlorination system and applied it in a community in Yinchuan City. The water consumption characteristics were analyzed, and the corresponding dosing mode was adopted to investigate the operation of the dosing system and the control of residual chlorine in user's tap water. Based on the incremental PID control algorithm, the composite loop control integrated open loop feedforward control dosing and closed loop control feedback regulation was adopted to discretize the whole system to adapt to the changes in water quality and quantity, and realized the dynamic adjustment dosing, so as to accurately control the residual chlorine concentration in water.

**Key words:** secondary water supply; water quality assurance; chlorination; residual chlorine; composite loop control

随着城镇建设进程的快速推进,城镇建筑超高 化、普遍化不断发展,高层建筑的饮用水需求与市政

通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@163.com

供水工程之间的水量、水压矛盾日益突出。二次供水设施的应用可有效缓解高层建筑供水与用水矛盾,保障(超)高层建筑的供水水压及水量需求,因此二次供水已成为城镇供水输配过程的重要组成部分。然而,二次供水设施易产生二次污染问题,对用户的饮水健康造成严重威胁。如二次供水设施中水力停留时间较长(24~100 h<sup>[1]</sup>),余氯衰减导致水中消毒剂水平普遍较低,难以保障水中微生物的稳定性,可能引发水中微生物繁殖和管壁生物膜的形成。有研究表明,当水温>20℃、滞留时间超过24 h时,细菌、总大肠菌群等微生物指标明显增加<sup>[2]</sup>。与此同时,微生物产生的代谢产物会导致水质进一步恶化<sup>[3]</sup>。

对二次供水进行消毒是保障水中微生物安全、稳定的有效途径。国内外常用的技术包括臭氧消毒、紫外消毒、氯化消毒、二氧化氯消毒等<sup>[4]</sup>。常见的臭氧和紫外线消毒设备具有灭菌速度快、消毒效果好等优点,但是不能保证对水的持续消毒能力,不能有效解决二次供水水箱内停留时间长而导致二次污染的问题。液氯消毒会产生大量对人体健康有害的副产物。次氯酸钠(NaClO)消毒具有持续高效、广谱、安全及副产物少等优点,且药剂经济、无毒、便于运输,被广泛应用于管网水质生物安全保障方面,取得了良好的效果<sup>[5-6]</sup>。因此,次氯酸钠是二次供水系统消毒剂的最佳选择。

在物联网背景下,基于信息技术的二次供水智能管理模式已成为关注热点<sup>[7]</sup>。二次供水设施具有“现场无人值守”的特点,在进行加氯消毒处理时,智能化系统能够保证药剂的投加更加安全、方便、快捷。在二次供水设施特殊的供-用水模式下,智能化系统能够提高水中余氯控制的精度。采用智能的投加控制算法,可以使系统有效解决次氯酸钠溶液在存放过程中有效氯衰减导致投加不精准的问题。二次供水设施的运行以“现场无人值守、实时远程监控、突发情况快速处置”为智能化管理的目标,有助于提升二次供水的信息化和智能化管理水平。

笔者基于增量式PID控制算法,开发了智能次氯酸钠投加系统,该系统采用智能投加控制算法,分析水中余氯水平并自动调整投加量,从而将水中余氯控制在一定范围内,以提高末端水质的安全性,保证用户龙头水余氯达标。以某二次供水设施

为试验点,对二次供水的供-用水模式进行分析,并结合用户的用水特点设定不同的投加模式,分析用户龙头水的余氯控制效果。通过对系统的完善来适应水质、水量的变化,从而持续地为用户龙头水提供安全保障,以解决供水行业“最后一公里”的问题。

## 1 材料与方法

智能化系统开发方法:以自顶向下、逐步求精、模块化为基点,把一系列经过试验检验的论证作为技术支撑。首先,分析情况,提出反映当前物理模型的数据流程图(DFD);然后,推导出等价的逻辑模型DFD;最后,设计逻辑系统的算法流程,编程并组装系统。

二次供水设施的选取:银川市某小区的居民生活用水为未经加氯消毒的地下水,水温为16~18℃,浊度为0.05~0.20 NTU, pH为7.5~7.8,氨氮在0.02 mg/L以下,余氯为0。该小区的二次供水系统为变频恒压供水,包括中区和南区两个供水区域,系统配套6 m×7 m×3 m的供水箱。目前,该小区的入住率较低,实际用水量远低于设计用水量,导致水从管网到供水箱再输送至用户的过程中停留时间过长。由于原水未经过加氯消毒,在长时间的输送过程中水质变差。综上所述,该小区满足试验条件,适合作为二次供水加氯试验点。

供-用水模式分析方法:使用超声波流量计测量并记录小区的用水量,分析其用水模式。归纳该小区在不同工况下的用水特点,分析其用水特点所带来的影响,并确定相应的投加模式。

余氯检测设备及方法:采用余氯分析仪检测水箱出口水,用户龙头水的余氯采用抽样检测的方式。将水箱出口水余氯浓度控制在一定范围内,抽样检测用户龙头水的余氯水平。

## 2 智能化系统开发

### 2.1 智能的投加控制算法

智能反馈加氯系统模型如图1所示。系统采用多管路投加,包括水箱进水管处的前馈投加和水箱出口处的补加。其中,前馈投加为主要投加点,补加氯为辅助投加点。投加的药剂以有效氯为10%的次氯酸钠溶液为主,药剂在投加过程中需要低温、避光存放,以减少次氯酸钠溶液有效氯的衰减。

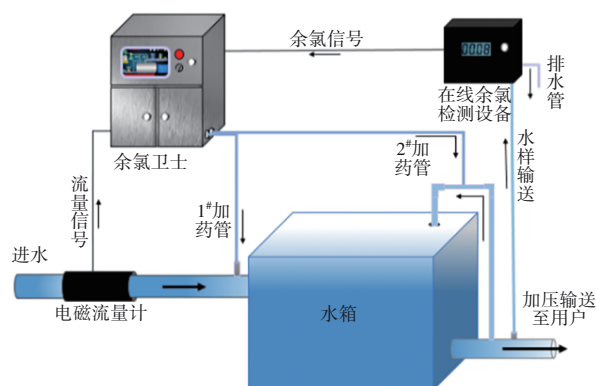


图1 智能反馈加氯系统模型

Fig.1 Intelligent feedback chlorination system model

前馈投加:药剂的投加以进水管处的前馈投加为主,系统根据进水量大小按比例控制次氯酸钠溶液投加量,进水量与投加量的关系见式(1)。

$$Q_1 = \alpha Q_2 \quad (1)$$

式中:  $Q_1$  为药剂投加量, mL/h;  $Q_2$  为水箱进水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\alpha$  为投加系数,初始投加系数通过现场加氯试验得出,投加系数与加氯量之间存在 10 倍关系,当  $\alpha=1$  时,加氯量为 0.1 mg/L。

反馈调节:系统根据水箱出口水的余氯浓度反馈调节水箱进水管处的前馈投加,形成闭环控制。反馈调节的闭环控制与前馈投加的开环控制相结合,形成了复合环控制的周期性反馈调节,使系统快速达到稳定运行状态。复合环控制原理如图 2 所示。

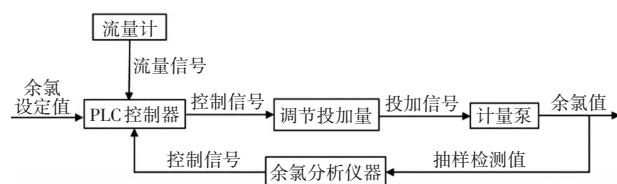


图2 复合环控制原理

Fig.2 Principle of composite loop control

补加氯:当反馈的水箱出口处余氯不足时,系统在上调前馈投加量的同时,对水箱出口处的辅助投加点补加氯,以确保水箱出口水的余氯达到控制要求。补加氯时,辅助投加点的药剂投加量为  $Q_3$ ,  $Q_3$  与水箱进水量的关系见式(2)。

$$Q_3 = \beta Q_2 \quad (2)$$

式中:  $Q_3$  为药剂补加量, mL/h;  $Q_2$  为水箱进水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\beta$  为补加系数,默认值为 0.5,一个投加周期后进行一次修正。

水箱进水口的浮球阀能够保持水箱内的水位稳定在设定值,水箱的出水量近似等于进水量,因此式(2)中可以用水箱进水量  $Q_2$  作为药剂补加量  $Q_3$  大小的参考对象。同时,为了提高系统运行的稳定性,把两个余氯检测周期定为一个补加周期,一个补加周期后对补加系数进行一次修正。

## 2.2 健全的监控系统

在目前物联网高速发展的时代,作为一套智能的末端水质保障设备,系统运行监控更能体现出智慧水务建设的重要性。通过云服务建立了一套完善的监控系统,包括现场就地控制和远程监控两部分,系统监控原理如图 3 所示。

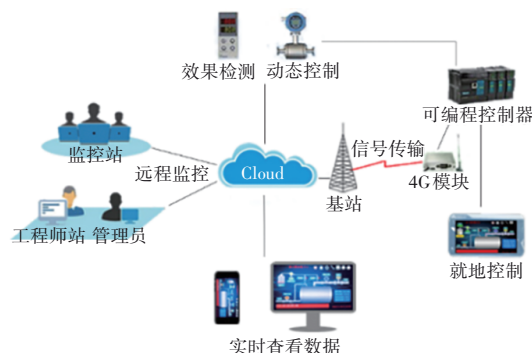


图3 系统监控原理

Fig.3 Monitor principle of the system

就地控制:运行参数的配置可以通过上位监控设备或现场 HMI 进行设定。系统常规参数的设置包括水箱出口水的余氯控制目标值、余氯控制范围、水样采集间隔、样本容量的大小等。

远程控制:系统在运行过程中,实时将运行数据传送至云端。监控平台和移动终端可以从云服务器获取系统运行的数据,同时管理员也可以通过远程控制来完成系统的快速控制。远程控制保证了系统的正常运行,并增加了系统维护的便捷性。

## 2.3 完备的报警系统

当运行过程中遇到异常情况时,系统在采取相应处理措施的同时会向多终端发送报警信息。例如,当系统检测到出水端余氯异常时,向移动终端发送余氯异常报警信号,同时停止运行直到余氯恢复正常。

## 3 结果与讨论

### 3.1 供-用水模式分析

对该小区的用水量进行分析发现,该小区的用水量在节假日和工作日存在较大的差异。因此,选



取节假日和工作日中某一天的用水曲线进行对比,如图4所示。

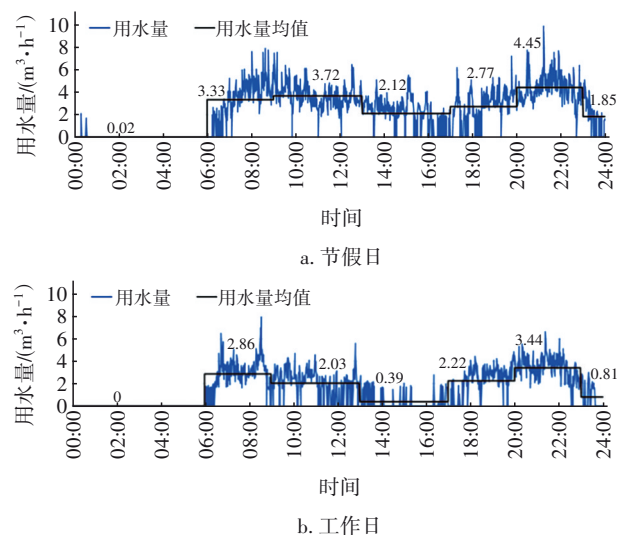


图4 节假日和工作日中某一天的用水曲线

Fig.4 Water consumption curve for a given day during holidays and workdays

对该小区的日用水量进行分析,归纳其节假日和工作日的用水特点。根据实际用水情况将用水时间大致分为7个用水时间段,见表1。可知,节假日除了在夜间用水量较小外,其他各个时间段用水量均较大,且用水不集中,受作息影响,23:00以后也有较大的用水量。工作日在工作日的用水量几乎为0,其他时间段用水相对集中。下午的用水量较小,每天的用水主要集中在早上和晚上两个时间段。导致节假日和工作日用水差异的主要原因是:在工作日,住户早起晚归,导致用水主要集中在早上和晚上两个时间段;在节假日,住户的日常生活用水导致用水量较大。

表1 不同时间段用水情况

Tab.1 Water consumption in different time periods  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

时间段	节假日用水均量				工作日用水均量			
00:00—05:59	0.02	0.04	0.08	0	0	0	0	0.01
06:00—08:59	3.33	3.04	2.97	2.64	2.86	2.54	2.26	2.68
09:00—12:59	3.72	4.04	4.56	4.84	2.10	1.91	2.14	2.43
13:00—16:59	2.12	1.32	3.34	2.15	0.39	2.14	0.28	0.59
17:00—19:59	2.77	2.90	3.40	3.34	2.22	2.82	2.36	2.18
20:00—22:59	4.45	4.49	4.34	4.84	3.44	2.47	3.10	3.33
23:00—23:59	1.85	2.62	1.67	1.14	0.81	0.38	0.71	0.66

小区的用水情况表明,节假日和工作日的日均用水量分别约为60、35  $\text{m}^3$ ,水箱的有效容积约为

100  $\text{m}^3$ ,在水箱内的停留时间分别约为40、68 h。可知,即使在用水量较大的节假日,水箱内的停留时间也较长,工作日的停留时间则超过48 h,工作日停留时间比节假日多70%,用水模式是导致这种差异最直接的原因。

### 3.2 投加模式的确定

分析该小区的用水特点发现,工作日水箱内的水力停留时间比节假日多70%,工作日用户龙头水的余氯水平远低于节假日。二次供水处进行加氯消毒,在保证工作日的水中余氯均能达标的同时节假日水中余氯有可能偏高;在保证节假日水中余氯均能达标的同时工作日水中余氯可能偏低而得不到有效保障。针对这种不同用水情况下停留时间差异大、用户龙头水余氯忽高忽低的问题,结合二次供水在节假日和工作日两种不同的运行工况,设定节假日和工作日两种药剂投加模式,使龙头水的余氯既能达到要求,又可以在较小的范围内波动。即在确保节假日水中余氯达标的基础上,通过增加工作日的加氯量来弥补工作日与节假日的水力停留时间差(包括水在水箱和管道内的停留时间)所导致的余氯消耗。

### 3.3 药剂投加量的确定

对该小区的生活用水进行耗氯量试验,可以获得出水耗氯量,再加上余氯控制量就可以确定药剂投加量。表2为不同加氯量时水中的余氯量。可以看出,当加氯量为0.40  $\text{mg/L}$ 时,水箱出口水中余氯能达到0.05  $\text{mg/L}$ 。因此,要确保用户龙头水余氯达到0.05  $\text{mg/L}$ 以上,水箱出口水中的余氯大于0.05  $\text{mg/L}$ ,系统加氯量应大于0.40  $\text{mg/L}$ 。由前馈投加的关系式可知,初始投加系数 $\alpha$ 宜设为4,待系统完成一个投加周期后,根据水箱出口水的余氯浓度对投加系数 $\alpha$ 进行修正。

表2 不同加氯量时水中的余氯量

Tab.2 Amount of residual chlorine in water at different chlorination dosages  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

加氯量	水中自由性余氯					
	$t=2 \text{ h}$	$t=4 \text{ h}$	$t=6 \text{ h}$	$t=12 \text{ h}$	$t=24 \text{ h}$	$t=48 \text{ h}$
0.40	0.15	0.12	0.11	0.09	0.07	0.05
0.60	0.37	0.35	0.32	0.30	0.28	0.25
0.80	0.62	0.59	0.58	0.56	0.55	0.50
1.20	1.03	1.01	0.96	0.89	0.80	0.57

### 3.4 龙头水余氯水平分析

水中余氯的控制主要包括水箱出口水的余氯控制和用户龙头水的余氯控制两部分。通过控制水箱出口水余氯浓度,将用户龙头水余氯控制在 $0.05\text{ mg/L}$ 以上。对该小区二次供水进行加氯消毒,不断提高水箱出口水余氯浓度,同时抽样检测用户龙头水的余氯浓度。结果表明,当水箱出口水余氯浓度控制在 $0.15\sim 0.20\text{ mg/L}$ 时,用户龙头水余氯达标率在80%以上。图5为用户龙头水余氯分布情况。可以看出,入住率较低的55号楼、56号楼、57号楼、58号楼用水量较小,龙头水余氯浓度难以达到 $0.05\text{ mg/L}$ 以上。随着住户数量的增加,这种情况会得到改善。

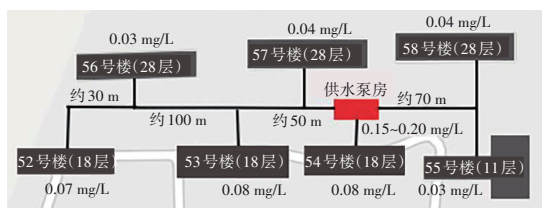


图5 用户龙头水余氯分布情况

Fig.5 Distribution of residual chlorine in user's tap water

### 4 结论

系统采用智能的投加模式并结合二次供水的供-用水模式,将用户龙头水余氯浓度稳定在小范围内波动,具有重要意义。智能控制算法将开环控制的前馈投加与闭环控制的反馈调节相结合,组成了复合环控制,将整个系统离散化控制以适应水质、水量的变化,从而实现动态调整投加,精准控制水中余氯浓度。对于“现场无人值守”的二次供水水泵房来说,智能的投加系统和健全的监控系统对于二次供水加氯消毒有着十分重要的意义,有助于提升二次供水的信息化和智能化管理水平,推动我国水系统智能化技术可持续发展和创新应用。

### 参考文献:

- [1] 李戴伟. N 新区供水管网水质分析与改善方案研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
LI Daiwei. Study on Water Quality Analysis and

Improving Program of Water Distribution Network in N District [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).

- [2] 郑立刚. 二次供水造成水质污染的原因分析及管理对策[J]. 山西建筑,2007,33(35):209-210.  
ZHENG Ligang. Study on the reasons caused the water pollution in secondary water supply and management measures[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(35): 209-210(in Chinese).
- [3] SEIDEL C J, MCGUIRE M J, SUMMERS R S, *et al.* Have utilities switched to chloramines? [J]. Journal American Water Works Association, 2005, 97(10): 87-97.
- [4] SHAH A D, DOTSON A D, LINDEN K G. Impact of UV disinfection combined with chlorination/chloramination on the formation of halonitromethanes and haloacetanitriles in drinking water [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(8):3657-3664.
- [5] NDIONGUE S, HUCK P M, SLAWSON R M. Effects of temperature and biodegradable organic matter on control of biofilms by free chlorine in a model drinking water distribution system[J]. Water Research, 2005, 39(6): 953-964.
- [6] XIN K L, ZHOU X, QIAN H, *et al.* Chlorine-age based booster chlorination optimization in water distribution network considering the uncertainty of residuals [J]. Water Science & Technology, 2018, 19(3): 796-807.
- [7] 刘辛悦,杨坤,张薇薇,等. 上海二次供水智能管理应用与实践[J]. 净水技术,2019,38(S1):350-352,395.  
LIU Xinyue, YANG Kun, ZHANG Weiwei, *et al.* Application practices of intelligent management for secondary water supply in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(S1): 350-352, 395 (in Chinese).

作者简介:李雄(1992- ),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要研究方向为饮用水安全保障与健康风险控制。

E-mail:931859384@qq.com

收稿日期:2019-10-27

修回日期:2020-01-28

(编辑:任莹莹)