

朱礼鑫, 张士涛, 何苗, 等. 基于 Modbus TCP 的临时水质在线监测系统于供水管网上的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(8): 167-174.

ZHU L X, ZHANG S T, HE M, et al. Application of temporary water quality online monitoring system based on Modbus TCP in water supply network [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(8): 167-174.

基于 Modbus TCP 的临时水质在线监测系统于供水管网上的应用

朱礼鑫^{1,2}, 张士涛^{1,2}, 何苗², 汤峰^{1,2}, 王海虹^{1,2,*}

(1. 国家城市供水水质监测网合肥监测站, 安徽合肥 230011; 2. 合肥供水集团有限公司, 安徽合肥 230011)

摘要 供水管网作为城市发展生命线, 对其进行水质监测是保障供水安全的重要措施。其中, 利用水质在线仪表监测供水水质已成为智慧水务中的重要一环。目前受安装条件的限制, 管网水质在线仪表大多都固定安装于二次供水泵房, 无法监测到主管网水质, 监测不全面, 代表性不强; 同时在供水管道迁改和抢修施工过程中难以实时全面掌握受影响区域的水质波动情况。文章设计了一套集水样采集、UPS 供电、水质仪表为一体的 Modbus TCP 的临时水质在线监测系统, 该系统各环节设计自成一体, 可分开可联用, 安装简单, 移动方便, 可临时安装于供水主管道、消防栓、二次供水泵房等, 有针对性实时监测多种场景下管网的水质变化情况, 有效保障管网水质安全。

关键词 供水管网 水质监测 智慧水务 二次供水泵房 水质在线仪表

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)08-0167-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.08.023

Application of Temporary Water Quality Online Monitoring System Based on Modbus TCP in Water Supply Network

ZHU Lixin^{1,2}, ZHANG Shitao^{1,2}, HE Miao², TANG Feng^{1,2}, WANG Haihong^{1,2,*}

(1. Hefei Monitoring Station of National Urban Water Quality Monitoring Network, Hefei 230011, China;

2. Hefei Water Supply Group Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract As the lifeline of urban development, water quality monitoring of the water supply network is an important measure to ensure water supply safety. Among them, using online water quality instruments to monitor water supply quality has become an important part of smart water management. Currently, due to installation limitations, most online water quality instruments in the pipeline network are fixed and installed in the secondary water supply pumping station, making it impossible to monitor the water quality of the main pipeline network. The monitoring is not comprehensive, and the representativeness is not strong. At the same time, it is difficult to comprehensively grasp the water quality fluctuations in the affected areas in real time during the relocation and repair of water supply pipelines. This paper designed a temporary water quality online monitoring system based on Modbus TCP, which integrated water sample collection, UPS power supply, and water quality instruments. The system was designed as a separate and interconnected system, with simple installation and convenient movement. It can be temporarily installed in the main water supply pipeline, fire hydrants, secondary water supply pumping stations, etc. It can monitor the water quality changes in various scenarios in a targeted and real-time manner, effectively ensuring the water quality safety of the pipeline network.

Keywords water supply network water quality monitoring smart water management secondary water supply pumping station online water quality instruments

[收稿日期] 2024-05-14

[作者简介] 朱礼鑫(1997—), 男, 工程师, 研究方向为水质在线仪表于供水工艺流程上的管理以及水质管控, E-mail: 1441810127@qq.com。

[通信作者] 王海虹, 女, 高级工程师, 研究方向为水质管控与水质检测, E-mail: 1299589658@qq.com。

随着国民生活水平与健康意识的日益提高,以及对饮用水水质安全认识的不断加深^[1],水质安全成为用户关心的首要问题。现阶段水质在线仪表检测技术作为水质监测的重要手段,被广泛运用于监测供水管网水质。

供水管道施工现场通常安排专人对水质风险点进行人工监测,以保障施工过程中水质安全。然而人工监测不能实现对水质的连续监控,且无法及时发现水质的异常变化,此外施工现场的复杂取水环境与简陋的设施,也会对水质检测人员的安全带来潜在的威胁。针对上述存在的弊端,通过将自动取水系统、水样采集系统、水质在线仪表组合设计,并运用 Modbus TCP 传输技术,可以更加灵活、准确地实时监控供水施工现场水质情况。

H 市供水公司设计基于 Modbus TCP 的临时水质在线监测系统,研制临时在线监测车,针对供水管路施工影响范围内水质的持续性监测难、用电需求复杂多变等特点,实现了在供水管网施工对水质全面监测并创新性地应用于供水管网下的多种水质监测场景。该系统具有通信稳定、部署灵活、简单易用、监测准确等特点。

为此,本文从基于 Modbus TCP 的临时水质在线监测系统的设计与在供水管网实际工作中的应用进行介绍。

1 监测系统的设计

1.1 总体设计

基于 Modbus TCP 的临时水质在线监测系统由电力单元、数据传输单元、在线检测单元以及采样单元组成,系统总体结构如图 1 所示。

其中,电力单元、采样单元单独设计,电力单元由太阳能和电池组组合供电,在小区或二次供水泵房能够直接取电时可不用配置电力单元,在主管网上、野外应用时,电力单元可采用“一用一备”配制,采样单元亦是如此,根据不同场景选择合适的采样接口或采样装置。

通过采样单元将在线检测单元安装在供水管路施工现场或者影响范围内水质风险点,运行在线检测单元中浑浊度、余氯传感器监测供水管网的水质,并将监测的水质数据直接通过数据传输单元上传到网关;网关将接收到的各在线检测单元的数据上传到数据库和监控计算机。

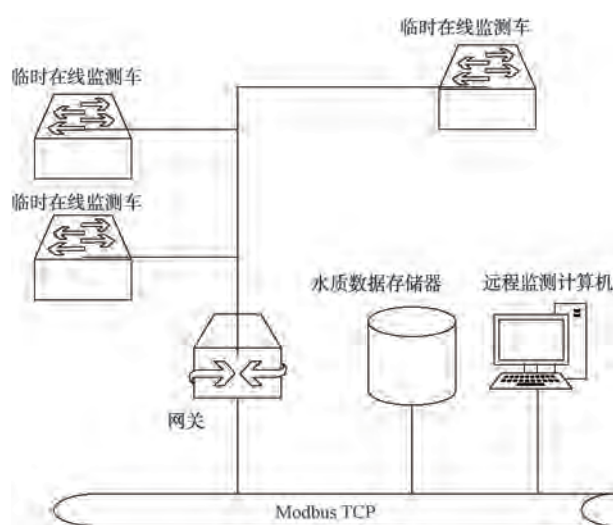


图 1 临时监测系统总体结构

Fig. 1 Overall Structure of Temporary Monitoring System

1.2 临时水质在线监测车设计

数据传输单元为 MOXA 2500-HSPA 系列交换机,该款交换机支持多种协议,收集现场数据时,可通过 Modbus TCP 和 Modbus RTU 可以连接多台设备。便捷的蜂窝网络配置可以应用于供水管网施工现场,实现水质数据访问与传输。

在线检测单元主要为在线浊度仪与在线余氯仪组成,通过采样管路与阀门组合,搭建并联管路,实现浑浊度、余氯两项指标同时监测。临时监测车整体布局如图 2 所示。

1.3 采样模块设计

采样模块可根据施工现场采样对象的不同,设计成相匹配的采样单元,主要分为:消火栓采样与窨井采样两种。若现场需连接消火栓采样,对应为消火栓取水装置如图 3 所示。此装置由消防栓管牙接口、进样转接开关构成。消防栓管牙接口是由本体、密封圈座、橡胶密封圈和旋转牙线组成,连接时无需旋钮螺纹,快速、省力、密封性好;进样转接开关由异径接头和压力调节阀组成,可将水样压力调节为合适范围输送至检测单元,保障仪表进样流量、流速稳定,监测结果可靠。

若现场需进行窨井排水采样,对应的采样单位为窨井取样套件如图 4 所示,该套件由采样泵、三角卡箍、采样杆、采样罐和稳流除气泡装置构成。采样杆通过三角卡箍固定于窨井锁扣,保证水样由底部采样罐经采样泵稳定输送至临时水质在线监测车,解决了人工采样繁琐及安全性问题。同时考虑到窨

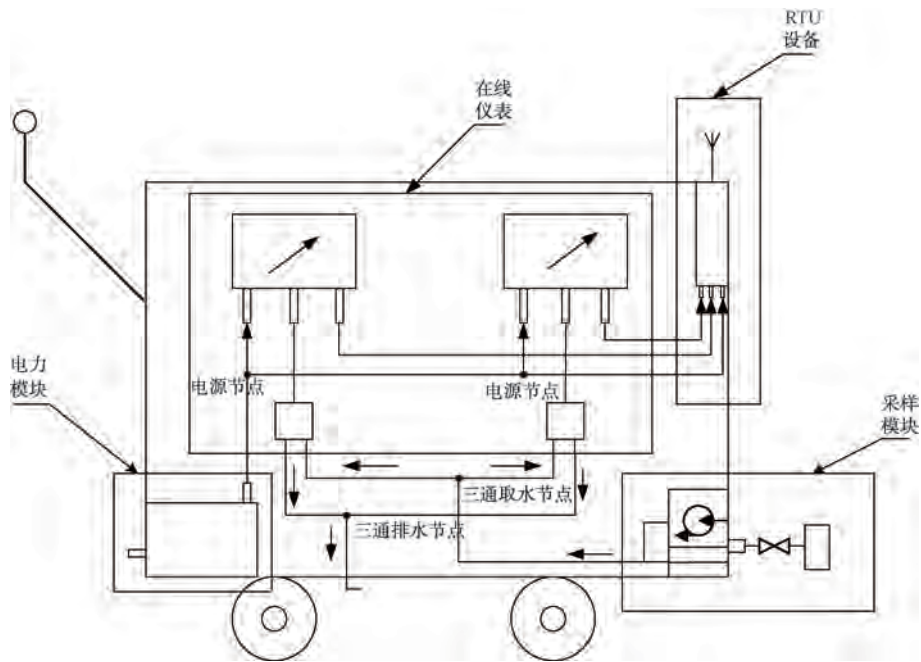


图 2 临时监测车

Fig. 2 Temporary Monitoring Vehicle



图 3 消防栓排水取样套件

Fig. 3 Fire Hydrant Drainage Sampling Kit

井排水压力、流速大,易产生气泡,在检测单元前加装了稳流除气泡装置,用于稳定控制进样压力及流速,消除了水样中气泡对监测结果的影响。

2 临时水质在线监测系统应用实例与分析

依托 Modbus TCP 的临时水质在线监测系统, H 市供水公司围绕供水管网开展一系列水质管控相关

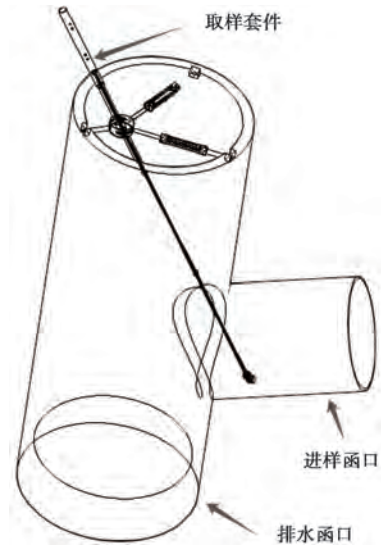


图 4 地下排水管排水取样套件

Fig. 4 Underground Drainage Pipe Sampling Kit

性试验,并取得一定成果。

2.1 供水管网余氯衰减试验

2.1.1 试验背景

消毒剂添加后,必须确保管网水中存在足够的余氯浓度来抑制微生物的再生^[2],故而研究并控制供水管网余氯衰减规律,能有效保障水质安全。供水管网中余氯衰减由多种复杂的因素引起,按成因可分为主体水的余氯衰减和管壁处的余氯衰减^[3]。

主体水衰减是指氯与存在于自来水中的微生物、有机物和无机物等相互反应而造成的衰减;管壁衰减是指氯与附着在管道上的微生物、沉淀物等相互反应而引起的衰减,分别由水中有机物、无机物、微生物等氯反应物和管壁上的生物膜、电化学腐蚀引起。准确性高的水力模型是保障水质模型具备较好模拟效果的基础,主体水氯衰减参数的校核需要借助实验室烧杯试验的结果,而管壁处的氯衰减校核需要依靠供水管网监测点氯浓度的实测数据和主体水氯衰减模型^[4]。

以 H 市某水厂出厂水为试验用水,研究了主体水余氯以及管网余氯的衰减变化情况。根据试验结果,对供水管网产生水黄风险进行评价,为今后的管道冲洗排放工作提供可靠依据,进而改善管网水质情况。

2.1.2 试验方案设计

1) 试验管段及监测点的选取

选取 H 市某水厂一、二号出厂水供水主管网的相应管段作为试验管段(表 1),其供水来源单一,管道材质及安装方式一致,管径、流速相仿。在试验管段选取 1~6 号消防栓作为监测点,安装临时水质在线监测系统,安装位置如图 5 所示,直观监测主管网水质,数据更具代表性,同时也能够持续观测到余氯指标在试验阶段的变化全过程。

表 1 试验水厂出厂水管参数

Tab. 1 Parameters for Finished Water Pipe of Experimental Setup

出水管	管龄/年	口径	管材	流速/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	送水压 力/MPa
一号	30	DN1400	球墨铸铁	6 000	0.35
二号	30	DN1200	球墨铸铁	2 000	0.30

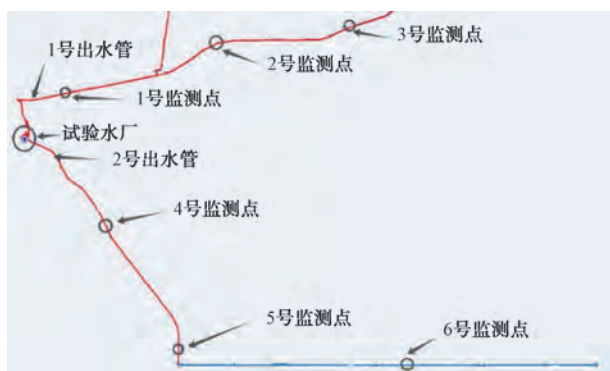


图 5 供水管网余氯衰减试验 GIS

Fig. 5 GIS of Residual Chlorine Attenuation Test in Water Supply Network

2) 监测点水龄及耗氯量计算

首先短时调整水厂次氯酸钠投加量,记录出厂水余氯监测曲线达到峰值的时间(T_0)和监测值(C_0);接着记录 1~6 号监测点余氯监测曲线达到峰值的时间($T_{\text{监测点}}$)及监测值($C_{\text{监测点}}$);最后计算出监测点水龄,如式(1)。

$$T_{\text{水龄}} = T_{\text{监测点}} - T_0 \quad (1)$$

$$C_{\text{耗}} = C_0 - C_{\text{监测点}} \quad (2)$$

其中: $T_{\text{水龄}}$ ——监测点水龄, min;

T_0 ——余氯监测曲线达到峰值的时间, min;

$C_{\text{耗}}$ ——耗氯量, mg/L;

C_0 ——出厂水余氯峰值, mg/L;

$C_{\text{监测点}}$ ——监测点余氯峰值, mg/L。

3) 主体水余氯衰减试验

以某水厂一、二号出厂水为试验水样,用便携式余氯计检测初始余氯值($C_{\text{初始}}$),取样分装于 6 个彻底清洗干净、自然风干的棕色带塞采样瓶,全部放置于恒温箱中,恒温箱设置成水样的温度,记录采样时间;以 1~6 号监测点水龄为时间间隔,检测棕色玻璃瓶中水样的余氯含量,记录结果为 $C_1 \sim C_6$;各监测点主体水余耗氯量($C_{\text{主体}}$)为相邻两次检测余氯的衰减量。

4) 监测点的管壁耗氯量计算

各监测点的管壁耗氯量($C_{\text{管壁}}$),对应的计算公式如式(3)。监测点平均余氯消耗量($C_{\text{平均耗氯量}}$)计算如式(4)。

$$C_{\text{管壁}} = C_{\text{总}} - C_{\text{主体}} \quad (3)$$

$$C_{\text{平均耗氯量}} = C_{\text{管壁}} / L_{\text{监测点}} \quad (4)$$

其中: $C_{\text{总}}$ ——监测点余氯消耗量, mg/L;

$C_{\text{管壁}}$ ——监测点的管壁耗氯量, mg/L;

$L_{\text{监测点}}$ ——监测点管段长度, km;

$C_{\text{平均耗氯量}}$ ——监测点平均耗氯量, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{km})$ 。

2.1.3 试验结果分析与应用

通过临时监测车记录余氯监测数据,计算出各监测点 $T_{\text{水龄}}$ 、 $C_{\text{管壁}}$ 、 $C_{\text{平均耗氯量}}$ 指标,如表 2 所示,对比平均余氯消耗量, $C_{\text{平均耗氯量}}$ 越大,表明从该管段的管道内环境越差。供水管段平均余氯消耗量低于 $0.05 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{km})$,产生水黄风险较低,平均余氯消

耗量为 0.05~0.1 mg/(L·km) 的管段产生水黄风险稍高,平均余氯消耗大于 0.1 mg/(L·km) 的管段产生水黄风险较高。

表 2 供水管网余氯衰减试验数据

Tab. 2 Experimental Data for Residual Chlorine Attenuation in Water Supply Network

出厂水管	监测点	$T_{\text{水龄}} / \text{min}$	$C_{\text{管壁}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$L_{\text{监测点}} / \text{km}$	$C_{\text{平均耗氯量}} / [\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}]$
一号管	1号	64	0.05	1.4	0.04
	2号	210	0.42	5.2	0.08
	3号	258	0.60	6.6	0.09
二号管	4号	131	0.29	2.6	0.11
	5号	266	0.35	8.6	0.04
	6号	345	0.63	10.5	0.06

结合试验结果,进行水质管理供水管网安全性评价如表 3 所示,后期将对水黄风险管段按计划开展冲洗排放,进而改善管网水质情况。

表 3 供水管网水黄风险评价

Tab. 3 Yellow Water Risk Assessment for Water Supply Network

序号	管段	风险分类	应对措施
1	1号	无	无
2	5号		
3	2号	I类	“三定排放”(定时、定点、定水质)
4	3号		
5	6号		
6	4号	II类	错峰冲洗

表 4 H 市某水厂三期投产临时监测系统布局位置

Tab. 4 Layout and Location of Temporary Monitoring System for Phase III Project of a WTP in H City

监测点位	监测指标	监测管路	设置目的
1号位	浑浊度、余氯	LSL 1600	监测低区 1#管供水前端水质变化
2号位	浑浊度	LSL 1200	监测低区 2#管供水前端水质变化
3号位	浑浊度、余氯	FYBL 1200 WYL 以南	通过耗氯量判断 THL 后端管网内环境
4号位	浑浊度、余氯	FYBL 1200 WYL 以北	通过耗氯量判断后端管网内环境
5号位	浑浊度、余氯	FYBL 1200 WYL 以北	监测逆向区域水质变化
6号位	浑浊度	TSL 1200	监测逆向区域 TSL 段水质变化
7号位	浑浊度、余氯	XBBL 1000	监测 XBBL 段加压供水区域水质变化

特别地,2号位因位于 LSL 与 MCL 交口,且该段管路后端有一处 DN500 排水口,用于排空 2# DN1200 内存水;在其下游还有一处在线管网点,监测指标配置为浑浊度、余氯以及 pH,因此 2号位仅设置浑浊度指标。6号位因其上、下游均有在线管

2.2 某一区域供水管网勾点工程中的水质监测

2.2.1 试验背景

现代城市供水系统离不开科学合理的调度,优化调度方式,不仅可以减少能源消耗,而且能保障管网在相对稳态下运行,满足水压、水质两大供水基本要求。特别是供水管网勾点工程中以浑浊度为主要参考指标的调度方式,能够降低管网风险,减少水质事故发生。管网阀门开启速度与管网水质有密切关系,因而管网开启必须满足水质要求,根据管网水浑浊度情况调整阀门开启速度^[5]。为此,H市供水公司提出基于水压与水质的管网调度模型的研究课题,并开展相关性试验。

在 H 市某水厂三期投产项目中,新建出厂水管通过勾点施工,连接供水管网。在勾点施工过程中,制水厂须暂时停产,外部供水压力缺失,易带来供水管网水质波动,严重影响用户用水体验。

2.2.2 试验方案设计

在前期准备当中,对照该水厂供水主管道以及阀门调整,找出潜在水质风险不利点。施工前,梳理该水厂供水主管道走向及施工过程中管道阀门调整情况,找出潜在水质不利点,在流速变化较大、水流方向改变、过铁路顶管后端等管段临时安装 7 套临时在线监测车,其具体安装位置如表 4 所示,GIS 位置如图 6 所示,实时监测停水和恢复供水过程中可能造成的水质波动情况,配合供水调度调整阀门开度。

网点,可以监测浑浊度、余氯水质指标,因此,6号位仅设置浑浊度指标。

安装临时水质在线监测系统,配合供水调度中停、送水调度。观察水质风险点临时在线监测系统水质变化,进行以水质为主的优化调度活动。



图6 供水管网勾点工程临时监测点 GIS

Fig. 6 GIS of Temporary Monitoring Points for Water Supply Network Hooking Project

2.2.3 试验结果分析

送水阶段的水质管控主要分为3个阶段。

第一阶段:制水厂缓慢开启低区1#DN1600出水管阀门,借助1号点观察MCL与LSL西北角DN500排水水质;伴随着送水压力变化,借助2号点观察低区2#DN1600出水管水质情况。

第二阶段:待水质合格后,缓慢关闭DN500排水阀。管网压力稳定后,缓慢开启MCL与LSL东南角DN1400主控阀门。

第三阶段:借助3号点、4号点和5号点监测来自MCL与LSL东南角DN1400主控阀门开启后水质情况;待水质合格后,缓慢开启BEH和THL交口西北角DN1200主控阀门。

在整个送水过程中,借助6号位实时监测FYL东西两侧,借助7号位实时监测BEH两侧。

从临时监测点实时监测数据图7可知,借助临

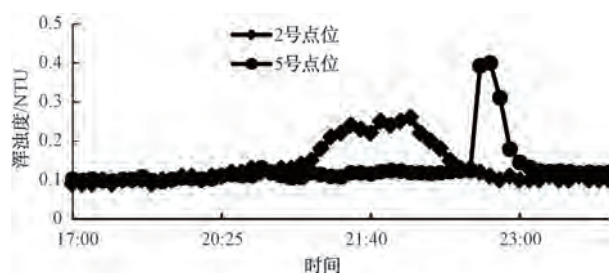


图7 供水管网勾点工程临时监测点实时监测数据

Fig. 7 Real Time Monitoring Data of Temporary Monitoring Points for Water Supply Network Hooking Project

时水质在线监测系统在供水管网勾点工程中,可以借助水质数据变化来动态优化调度思路,同时现场操作人员也可在水质数据的指导下,实现“缓开阀,紧排气”,能够有效避免停、送水期间因阀门调整导致水质异常,减少水质事故发生。

2.3 供水区域内小区水质投诉与庭院供水管网冲洗中的水质监测

2.3.1 试验背景

自来水水质问题已经成为城镇居民关注的要点,特别是感官指标,例如水黄、水浑、有杂质等。“黄水”问题是供水管网铁不稳定的最直接表现,是管垢、颗粒物和水质等多方面综合作用的结果^[6]。特别是在供水管网抢修后,重新恢复供水过程中,管道的泥沙在水压变动扰动下,将原本稳定管道内环境破坏,管道内环境截面如图8所示,管垢、铁锈、泥沙等多因素综合作用下,造成水质问题。

在H市供水公司一处供水区域曾出现水质投诉,经水质管理部门梳理该供水小区管网基础信息

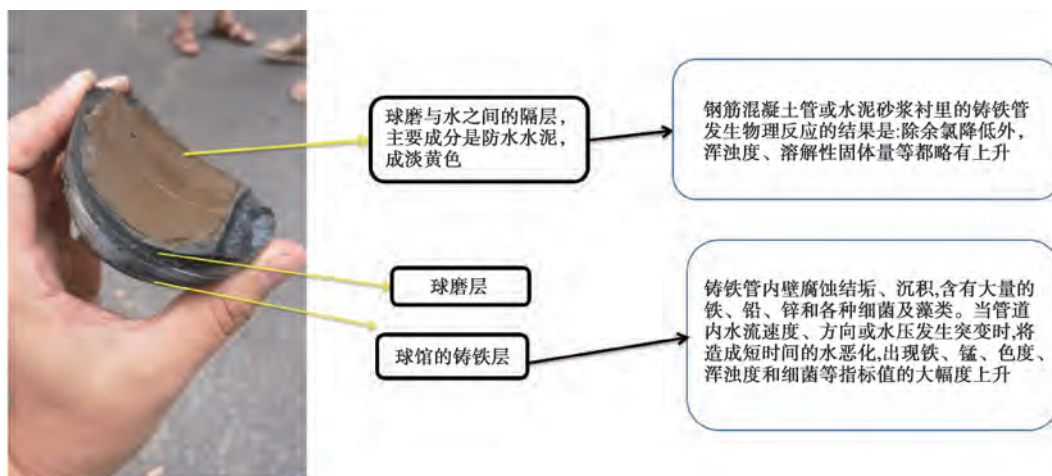


图8 某小区供水管网现场实拍

Fig. 8 On-Site Shooting of a Water Supply Pipeline Network in a Residential Area

如表 5 所示,分析后,判断主要原因为该区域建成年限较长,原庭院供水管网老化严重,在长期复杂作用下供水管网形成生长环^[7],供水压力变化较大时,管道内环境严重失衡,导致水质事故。对此,水质管理部门对水黄区域内进行采样,进行金属离子检测,其检测记录如表 6 所示,分析水黄原因。

表 5 某发生水黄小区供水管网基础信息

Tab. 5 Basic Information of Water Supply Network in a Yellow Water Event Community

基础信息	内容
管网使用年限	20 年
管材	球墨铸铁
管网分布形式	树状管网
用户用水类型	直供水
用水规模	约 800 m ³ /d

表 6 某发生水黄区域金属离子检测记录

Tab. 6 Record of Metal Ion Detection in a Yellow Water Area

项目	铁/(mg·L ⁻¹)	锰/(mg·L ⁻¹)	浊度度/NTU
国标限值	0.30	0.10	1
黄水水样	0.33	1.02	59
用户水样 1	0.030	0.052	0.15
用户水样 2	0.019	0.011	0.12
用户水样 3	0.017	0.002	0.09

2.3.2 试验方案设计

通常各地水司根据供水管网的运行情况及用户反馈,定期对供水管网进行冲洗,以浊度度作为确定冲洗是否合格的重要指标^[8],H 市供水集团在浊度度单一指标的基础上,引入余氯指标,对比冲洗前后浊度度和余氯指标监测曲线来评价冲洗效果。

借鉴双指标,水质管理部门对该小区庭院管网

进行气水混冲,临时水质在线监测车对庭院管网冲洗水样持续性监测,以可视化趋势线呈现庭院管道冲洗过程中的水质变化特征,并确定合理的庭院管道冲洗时间。

本次冲洗的技术思路为:先主后次,先大后小;作业操作安装“水冲-气水联合冲-水冲”开展,管道进水,庭院主管道排气,待管道满水后关闭排水阀,按原先冲洗参数与配齐方案进气,通过安装在庭院排水节点临时水质在线监测车查看浑浊度曲线,并调整后续进水量、进气量等冲洗参数;排水点临时水质在线监测浑浊度满足 H 市供水集团水质标准后,停止进气,利用水力冲洗管道。

2.3.3 试验结果分析

水质监测曲线如图 9 所示,庭院供水管网冲洗过程中,由于管道冲洗过程中,附着在供水管壁上松软层沉积物和生物膜在气流、气水混合流和水流多次且正反逆向冲击下,逐渐被带入冲洗水中,浑浊度曲线呈现先升高后下降趋势,最终水质数据趋于稳定。

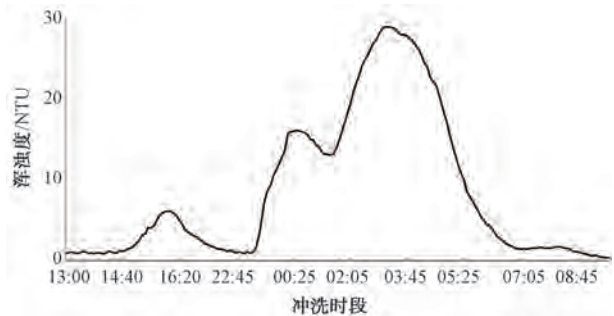


图 9 某小区庭院冲洗水质监测曲线

Fig. 9 Monitoring Curve of Water Quality for Courtyard Flushing in a Certain Residential Area

冲洗前后浊度度监测曲线如图 10 所示,表明冲

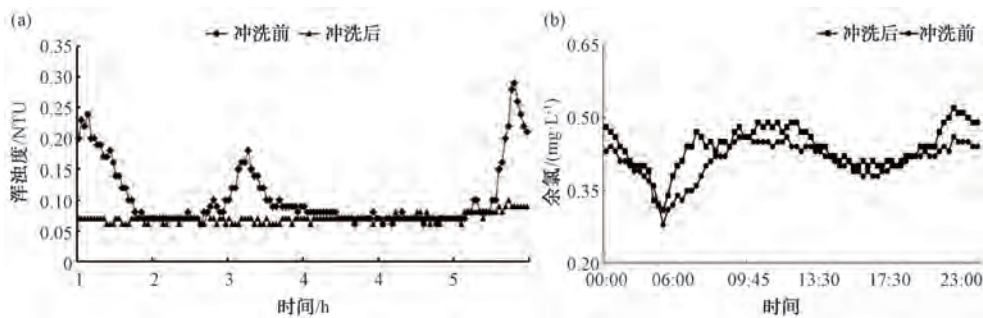


图 10 某小区庭院冲洗前后水质监测曲线

Fig. 10 Water Quality Monitoring Curve before and after Courtyard Flushing in a Certain Residential Area

洗后管网压力及流量变化对小区浑浊度影响程度大大减轻,同时冲洗后余氯较冲洗前略有上升。借助便携式在线监测系统现场监测水质指标,不仅可以实时掌握管网冲洗全过程水质变化,对冲洗水量精细化把控,而且可直观评价冲洗效果,从而进一步降低老旧管网的水头损耗,改善用户末梢水水质情况。

3 结论

面对供水管网复杂内环境、施工频繁等影响水质管控的多种因素,提出了基于 Modbus TCP 的临时在线监测系统,并打造多台临时水质在线监测车,改变管网水质在线仪表固定安装模式,突破传统水质监测范围的局限,实现在不同场景下的应用。

(1)应用于供水管网余氯衰减试验,能够连续监测供水管网中余氯变化,并为供水管网水质安全保障提供了科学依据,为搭建基于供水管网下余氯衰减模型提供数据支撑与试验论证。

(2)应用于供水管网勾点工程下水质监测试验,配合供水调度,在停、送水期间采用“缓开阀,紧排气”,通过可视化水质平台,时刻关注高风险管段水质,避免因压力波动较大对供水管网内壁的冲击而引发水质投诉。

(3)应用于小区管网冲洗水质监测试验中,面对用户对水质的需求,既能掌握管网冲洗全过程水质变化,对冲洗水量精细化把控,又可直观评价冲洗效果,从而进一步降低老旧管网的水头损耗,改善用户末梢水水质情况。

参考文献

- [1] 张晓维. 基于余氯衰减规律的供水管网日常水质维护研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG X W. Research on water supply system daily quality maintain based on chlorine decay [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [2] 钱勇, 王子炜. 基于衰减模型的小口径供水管道余氯衰减分析 [J]. 净水技术, 2023, 42(8): 180-189.
QIAN Y, WANG Z Y. Analysis of residual chlorine attenuation in small-diameter pipelines based on attenuation model [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(8): 180-189.
- [3] FISHER I, KASTL G, SATHASIVAN A. New model of chlorine-wall reaction for simulating chlorine concentration in drinking water distribution systems [J]. Water Research, 2017, 125: 427-437. DOI: 10.1016/j.watres.2017.08.066.
- [4] 冯炜南. 余氯衰减单参数变反应速率模型研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
FENG W N. Research on a single parameter mathematical model for variable chlorine decay rates in water distribution systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [5] 陈国光. 加强管网水质管理, 进一步提高供水水质 [J]. 给水排水, 2020, 56(8): 11-14.
CHEN G G. Strengthen water quality management of pipe network and improve water quality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(8): 11-14.
- [6] 刘东坡. 基于生产数据的供水管网“黄水”控制技术研究 [D]. 广州: 广州大学, 2018.
LIU D P. Research on water supply pipeline "red water" control technology based on production data [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.
- [7] 钟丹. 供水管网余氯衰减规律及影响因素研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
ZHONG D. Chlorine decay variation and influential factors in water distribution network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [8] 任瑛, 石宏志, 王峰慧, 等. 城市供水管网冲洗水水质变化特征与控制 [J]. 供水技术, 2012, 6(2): 30-33.
REN Y, SHI H Z, WANG F H, et al. Control of washing water quality and variation characteristics of water supply network [J]. Water Technology, 2012, 6(2): 30-33.
- [12] MCKNIGHT D M, BOYER E W, WESTERHOFF P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. Limnology & Oceanography, 2001, 46(1): 38-48.
- [13] 陈国亮, 李蓉, 李华儒. 利用尺寸排阻色谱法研究蛋白质的变性 [J]. 高等学校化学学报, 1997, 18(5): 701-705.
CHEN G L, LI R, LI H R. Studies on protein denaturation by size-exclusion chromatography [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 1997, 18(5): 701-705.
- [14] YAN M Q, KORSHIN G V, CHANG H S. Examination of disinfection by-product (DBP) formation in source waters: A study using log-transformed differential spectra [J]. Water Research, 2014, 50: 179-188. DOI: 10.1016/j.watres.2013.11.028.

(上接第 139 页)