

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.019

# 基于物联网的重力流、低通量超滤用于农村供水

沈玉东, 冯凌宇, 陈伟雄, 李路野

(广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

**摘要:** 介绍了基于物联网的重力流、低通量超滤工艺系统在广东省某村级水厂的应用情况。总结了工艺设计及物联网平台特点,分析了水厂的出水水质和运行成本,并对系统整体运行成效进行了评价。结果表明,采用重力流、低通量超滤工艺处理地表山溪水,能有效应对水源高浊度的冲击,出厂水水质可稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),出水浊度 $<0.1$  NTU,出水微生物指标远优于标准要求;物联网监管平台的运用可实现水厂的无人值守和远程运维,提高了运维水平;水厂长期运行效果稳定,膜污染速率较低,化学清洗周期可延长到3~5个月,降低了清洗频率和维护成本;采用无外加动力工艺设计,大幅降低了能耗,水厂的直接运行成本仅为 $0.058$ 元/ $m^3$ 。基于物联网的重力流、低通量超滤工艺系统可以有效保障水质安全,并实现净水系统的简化和优化,易于管理维护,对山地农村供水具有重要意义。

**关键词:** 超滤; 农村供水; 物联网; 重力流; 低通量; 重力反洗; 无人值守

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0111-04

## Application of Gravity Flow and Low Flux Ultrafiltration Based on IoT in Rural Water Supply

SHEN Yu-dong, FENG Ling-yu, CHEN Wei-xiong, LI Lu-ye

(Guangdong Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510010, China)

**Abstract:** The application of a village-level waterworks in Guangdong Province using gravity flow and low flux ultrafiltration process system based on Internet of Things (IoT) is introduced. The characteristics of process design and IoT platform are summarized, the effluent quality and operating cost of the waterworks are analyzed, and the overall operation effect of the system is evaluated. The results show that gravity flow and low flux ultrafiltration process could effectively cope with the high turbidity in water source when treating surface mountain stream water, and the effluent quality could meet the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022) steadily. The effluent turbidity is less than  $0.1$  NTU, and microbial indicators of the effluent are far superior to the standard requirements. The application of the IoT supervision platform could realize unattended operation and remote control of the waterworks, which improve the level of operation and maintenance. The long-term operation of the waterworks is steady, membrane fouling rate is relatively low, and the chemical cleaning cycle could be extended to 3-5 months, which reduce the cleaning frequency and maintenance costs. The process design with no external power greatly reduces the energy consumption, and the direct operating cost of the waterworks is only  $0.058$  yuan/ $m^3$ . The gravity flow and low flux ultrafiltration process system based on IoT

通信作者: 陈伟雄 E-mail: wwaterch@163.com

can effectively ensure water quality safety, and realize the simplification and optimization of water purification system for easy operation and maintenance, which is of great significance to the water supply in mountainous rural areas.

**Key words:** ultrafiltration; rural water supply; Internet of Things; gravity flow; low flux; gravity backwashing; unattended operation

近年来,我国农村饮水安全水平稳步提升,但对于部分地处山区的偏远村镇,受限于经济条件和管理水平,净水设施的稳定运行仍存在一定困难。由于村镇供水设施相对分散且规模小,采用传统“混凝—沉淀—过滤”工艺不仅投资和运营成本高,而且对技术管理水平要求较高,水厂难以保持出水水质稳定达标<sup>[1]</sup>。

超滤被称为“第三代城镇饮用水净化工艺”,能够有效去除水中的悬浮物和胶体,并去除大部分微生物,极大地提高饮用水的生物安全性,具有出水水质好、抗冲击负荷能力强的特点<sup>[2]</sup>。同时,超滤工艺系统易实现标准化、模块化安装和自动化运行,有利于降低后期运营成本,解决制约农村供水安全的管理瓶颈问题。随着膜技术的成熟发展,超滤已在发达地区的城镇给水厂得到应用<sup>[3]</sup>,并逐步推广到农村地区<sup>[4]</sup>。然而,在农村的工程实践中,现有的超滤工艺系统也显示了不足:一是常规的市政给水超滤反冲洗系统相对复杂,难以适应农村地区的经济和管理水平;二是采用原水直接超滤的方式,难以应对雨季农村地表水源水的高浊度问题,导致严重的膜污染。可见,对工艺系统进行简化和运行优化成为超滤技术工程应用的关键。

针对超滤在农村供水应用中存在的瓶颈问题,前期开展了实验室及工程试验研究,取得了良好成效。结合前期研究成果与工程实际,开发了基于物联网的重力流、低通量超滤工艺系统。以广东某村级水厂的设计和运行为例,介绍该工艺系统在农村供水中的应用情况,主要总结工艺设计及物联网平台特点,分析水厂的出水水质和运行成本,可为超滤在农村供水中的推广应用提供参考。

## 1 工程概况

该村级水厂位于广东省西部,地处粤西山丘地区,水源为地表山溪水,汛期浊度变化大。水厂建设前该村仅有取水设施,原水未经过净化消毒,水质常有明显浑浊,影响村民的用水安全。该

水厂设计服务人口为3 300人,设计规模为400 m<sup>3</sup>/d,供水范围包含沿线多个自然村。设计出水水质执行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。

## 2 工艺设计及特点

### 2.1 工艺流程

该水厂采用“预过滤+超滤+消毒”的工艺,以超滤为核心,工艺流程见图1。

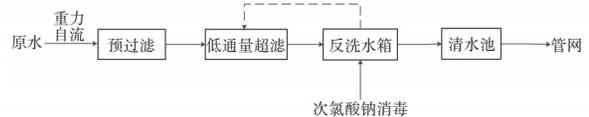


图1 水厂净水工艺流程

Fig.1 Flow chart of water purification process of the waterworks

### 2.2 工艺特点

该水厂原水为山溪水,浊度变化大,雨季原水浊度高,时常超过200 NTU,采用传统的一体化净水工艺设备很难保证出水水质达标。因此,该水厂采用“预过滤+超滤”作为主要处理工艺。

预过滤工艺能够拦截原水中的悬浮物颗粒,且具有滤速高、滤层易清洗的特点。后端采用低通量外压式超滤,利用低通量条件下膜不可逆污染程度低的特性,保证超滤单元能承受原水的高浊度负荷,维持产水流量和出水水质稳定。该工艺采用无外加动力设计,利用取水点与水厂的高差,通过重力流完成净水过程。预过滤和超滤单元均采用重力反洗,通过设置高位反洗水箱实现超滤膜的反冲洗,有利于减少电耗和实现系统的简化。主体净水单元均采用物理过滤,整个工艺路线中尽量减少药剂投加和耗材更换等环节,仅需投加少量次氯酸钠消毒剂以满足余氯指标要求,能够更好地适应农村地区的经济条件和管理水平。

### 2.3 超滤工艺参数

超滤单元采用国产柱式膜组件,膜材质为聚偏氟乙烯(PVDF),操作方式为全流过滤,膜运行通量为12~16 L/(m<sup>2</sup>·h),单水反洗,反洗周期4~12 h(根

据进水浊度调整),反洗时间5 min,反洗强度46 L/(m<sup>2</sup>·h)。

### 3 物联网监管平台架构

为降低后期运行管理的成本,该水厂利用物联网及自动化技术,设计搭建了农村供水远程监管平台系统,具有运行状态实时监控、工艺系统自动控制和远程控制、数据分析评估及故障报警等功能,以达到无人值守、远程运维的目标。系统的总体架构分为设备感知层、网络传输层、数据服务层及系统应用层4个部分。设备感知层主要包括流量、压力、水质等运行数据的有效采集;网络传输层利用4G移动通信网络、有线网络等通信方式,实现采集数据的传输与设备的远程控制;数据服务层利用云平台资源,负责数据的储存、处理与整合,为系统应用提供可靠的数据支持;系统应用层开发PC网页端和移动端的监管平台页面,提供综合展示与服务窗口,是平台系统与用户操作交互和信息交换的媒介。

## 4 运行效果和成本分析

### 4.1 出水水质

该水厂自2021年10月通水运行以来,出水水质一直保持稳定达标。业主方定期委托第三方检测机构对出厂水水质进行检测,部分指标检测结果见表1。

表1 水厂部分出水指标检测结果

Tab.1 Test results of some effluent indexes of the waterworks

项目	检测结果	GB 5749—2022 标准表1限值
pH	7.4	6.5~8.5
色度/度	<5	15
浑浊度/NTU	<1	1
氟化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.3	1.0
硫酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.32	250
氯化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.46	250
硝酸盐(以N计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.51	10
溶解性总固体/(mg·L <sup>-1</sup> )	81	1 000
总硬度(以CaCO <sub>3</sub> 计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	40.6	450
高锰酸盐指数(以O <sub>2</sub> 计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.98	3
菌落总数/(CFU·mL <sup>-1</sup> )	未检出	100
砷/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.001	0.01
铁/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.004 5	0.3
锰/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.000 5	0.1

注:“<”表示检测结果数据小于仪器方法检测下限。

由表1可知,各项水质指标均优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中对小型集中式供水的要求,且满足标准中的一般限值,微生物指标远优于标准要求,可见超滤工艺有效保障了出水的微生物安全性。

地表水源的雨季高浊度容易对净水工艺造成冲击,是影响农村供水设施稳定运行的重要因素。为了监测水厂的运行情况,在原水进水处和超滤出水处分别设置了在线浊度仪。2022年雨季原水浊度为5~400 NTU,变化非常大,曾出现长时间浊度>150 NTU的情况,且进水浊度负荷高;出水浊度则稳定保持在0.1 NTU以下的水平,表明出水浊度没有受到进水高浊度负荷的影响,超滤膜的性能保持稳定,也体现了该净水工艺的运行可靠性。

### 4.2 远程监管平台运行情况

水厂利用物联网管控手段,实现对生产运行过程的实时监控,并将水厂日常运行维护工作程序化。基于物联网的农村供水远程监管平台采用通用、开放的操作系统和开放平台,保证了软件的通用性和可扩充性。平台实现了以下的功能:①运行监控,实时显示监控净水设备的各段工艺参数及进、出水水质参数,实现对水厂整体运行状态的远程监控;②运行数据分析和评估,可存储历史运行数据并以图表等可视化形式整合、呈现,为运行优化提供支撑;③远程故障报警,能及时发现设备故障并提供信息,指导运维人员现场排除故障;④实现运维人员的操作管理和绩效考核。

在水厂运行实践中,借助远程监管平台,运维人员可以实现远程管理、无人值守。技术工程师通过物联网平台可以实时获取设备的运行情况和调整运行参数,一般情况下无需前往现场;当地管理人员只需定期对水厂进行巡检,或在出现故障时到场检修。这在很大程度上解决了农村供水设施管理人员,尤其是专业人员匮乏、长效管理困难的问题,适合在村镇小型水厂推广应用。

### 4.3 长期运行成效

该水厂自调试通水已有一年多,总体运行保持稳定,出水量和出水水质均优于设计水平。由于出水氯消毒剂投加量小,水质口感好,得到了当地群众的肯定和支持。在运行周期内,膜污染会引起产水流量下降,通过在出水管路上安装流量调节阀,可使产水流量基本保持恒定。若膜污染达到一定

程度,则需要进行化学清洗。由于设计采用低通量运行,膜污染速率低<sup>[5]</sup>,应用自动化和物联网系统对产水周期和反洗参数进行动态调整,超滤膜组的化学清洗周期可以控制在3~5个月,相比于其他的外压式超滤工艺,清洗频率大幅降低,节约了维护的人工和药剂成本。

#### 4.4 运行成本

该水厂日常运行的直接成本主要包括电费和药剂费。由于净水工艺完全利用原水的重力势能作为动力,该水厂的主要电耗仅有计量泵、自控阀门、PLC系统及照明用电等,装机容量约150 W;药剂的使用主要包括次氯酸钠和氢氧化钠。根据该水厂投产以来的实际电耗及药耗情况,得出具体的成本构成,如表2所示。直接运行成本合计0.058元/m<sup>3</sup>,其中药剂成本占88%。

表2 水厂的运行成本计算

Tab.2 Operating cost calculation of the waterworks

项目	单价	月消耗量	单位成本/(元·m <sup>-3</sup> )	
电	0.8元/(kW·h)	108 kW·h	0.007 2	
药剂	次氯酸钠	4.5元/kg	135 kg	0.050 6
	氢氧化钠	10元/kg	0.5 kg	0.000 4

#### 5 结论

① 低通量超滤工艺的膜污染速率慢,实际生产运行的膜化学清洗周期可以延长至3~5个月,运行周期长且效果稳定。

② 净水工艺采用重力流超滤,无外加动力,既简化了工艺系统,又大幅降低了能耗,直接运行成本合计0.058元/m<sup>3</sup>。

③ 水厂制水工艺系统应用物联网平台技术,有效提高了运行管理水平,降低了运营成本。基于物联网的重力流、低通量超滤工艺系统可以有效实现净水系统的简化和优化,易于管理维护,在山地农村供水工程中具有一定优势。

#### 参考文献:

[1] 雷晓玲,陈麟,杨程,等. 直接超滤在重庆村镇安全供水中的工程实践[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 76-82.

LEI Xiaoling, CHEN Lin, YANG Cheng, *et al.* Engineering practice of direct ultrafiltration in safe water supply of villages and towns in Chongqing [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (22): 76-82 (in Chinese).

[2] 李圭白,田家宇,齐鲁. 第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水, 2010, 46(8): 11-15.

LI Guibai, TIAN Jiayu, QI Lu. The third generation of urban drinking water treatment process and zero-membrane fouling flux of ultrafiltration [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 46 (8): 11-15 (in Chinese).

[3] 罗丁,王洋,高雷,等. 大型水厂分期实施超滤膜系统工艺设计[J]. 给水排水, 2022, 48(5): 17-22.

LUO Ding, WANG Yang, GAO Lei, *et al.* Process design of ultrafiltration membrane system in large water treatment plant by stages [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(5): 17-22 (in Chinese).

[4] 阮清波,肖飞鹏,耿安朝,等. 旋转错流式超滤净水工艺在农村饮水中的应用[J]. 中国水利, 2018(5): 47-49.

RUAN Qingbo, XIAO Feipeng, GENG Anchao, *et al.* Application of rotating cross-flow type of ultrafiltration water purification for drinking water of rural areas [J]. *China Water Resources*, 2018(5): 47-49 (in Chinese).

[5] 李丽,于海宽,吕谋,等. 集成式单阀重力反洗超滤工艺处理引黄水库原水[J]. 中国给水排水, 2019, 35(5): 12-18.

LI Li, YU Haikuan, LÜ Mou, *et al.* Purification effect and membrane fouling control of integrated single-valve gravity backwashing ultrafiltration membrane process treating raw water from the Yellow River reservoir [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (5): 12-18 (in Chinese).

作者简介:沈玉东(1987-),男,河南鹿邑人,硕士,高级工程师,主要从事市政给排水、固废污染控制的设计和工程研究工作。

E-mail: shendondon@126.com

收稿日期: 2022-09-14

修回日期: 2022-09-27

(编辑:衣春敏)