

设计经验

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 16. 010

# “小米模式”的新型超滤膜水厂设计理念及应用

张东波<sup>1</sup>, 闫静<sup>2</sup>, 郝齐波<sup>3</sup>

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 上海超清源工程设计有限公司, 上海 200000; 3. 洛阳城市建设勘察设计院有限公司, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 近10年来以超滤膜为核心的净水处理工艺在自来水厂建设中得到了广泛应用,然而其建设和运营成本较高的问题限制了该技术的进一步推广。借鉴小米产品极致性价比的模式,采用“短平流+超滤膜”的短流程净水工艺降低水厂整体建设成本、利用零污染通量来解决长期运行的膜污染问题以及构建有效的智慧水厂决策模型来降低水厂运营成本设计理念,打造成本较低的绿色低碳水厂,并以具体工程案例进行验证。

**关键词:** 小米模式; 绿色低碳; 短流程净水工艺; 零污染通量; 智慧水厂

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)16-0060-05

## Design and Application of New Ultrafiltration Membrane Waterworks Based on “Xiaomi Model”

ZHANG Dong-bo<sup>1</sup>, YAN Jing<sup>2</sup>, HAO Qi-bo<sup>3</sup>

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 2. Shanghai Super Qingyuan Engineering Design Co. Ltd., Shanghai 200000, China; 3. Luoyang Urban Construction Investigation & Design Institute Co. Ltd., Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Over the past decade, water purification processes centered around ultrafiltration membranes have seen widespread use in waterworks construction. However, due to high construction and operating costs, the further promotion of the technology has been limited. Drawing inspiration from Xiaomi's extreme cost-effectiveness model (Xiaomi Model), this article proposes a design concept utilizing “short horizontal flow+ultrafiltration membrane” to lower overall construction cost of waterworks, using “zero pollution flux” to address long-term membrane pollution issues and developing an effective smart waterworks decision-making model to reduce operational costs. The goal is to create a low-cost, green and low-carbon waterworks, and demonstrates this conclusion through specific engineering case.

**Key words:** Xiaomi model; green and low-carbon; short process water purification process; zero pollution flux; smart waterworks

新时代背景下,供水行业的主要矛盾之一是人民对高品质饮用水的需求和供水系统建设不完善不充分的矛盾。以超滤膜为核心的第三代饮用水

净水工艺<sup>[1]</sup>的发展前景受到越来越多的关注,超滤膜工艺在水处理过程中减少了化学药剂投加量,是绿色低碳的物理净化技术<sup>[2]</sup>。近年来,膜材料技术

的发展和超滤膜组合工艺的相关研究成果也在一定程度上推动了超滤膜在供水厂的规模化应用<sup>[3-4]</sup>。截止到目前,全国已有近100家大规模超滤膜水厂投产运行,供水总规模约为 $1\,200\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

目前,我国公共供水系统中超滤膜技术的应用已经达到一定的规模,但受其建设和运营成本较高的限制,该技术的应用仅集中在北上广深以及其他一些省会城市,对于国内的中小型企业、广大县城以及农村地区,该技术还未普及。借鉴小米产品极致性价比的模式(以下简称“小米模式”),通过设计优化的手段,从水厂整体建设和运营的角度统筹考虑,降低成本,打造极致性价比的绿色低碳水厂,以期将超滤膜技术在广大经济欠发达地区进行推广。

## 1 “小米模式”的水厂设计分析

小米手机、充电器、手环等系列产品以高性价比而闻名,其产品在硬件配置、性能、价格以及生态圈之间达到了一个良好的平衡。小米产品做到极致性价比的主要原因有高效的供应链管理和生产成本控制、互联网销售模式、创新的技术和设计这三个方面。其中在创新设计方面,小米产品的理念是在不影响使用体验的前提下,去除一切非必要功能,将产品做到极致。

水厂整个工艺流程设计中最关键的环节是除浊和消毒,其中除浊主要靠滤池,消毒主要靠加氯。在传统水处理工艺中,为保证后续砂滤池的良性运行,沉淀池出水浊度需控制在 $1\sim 2\text{ NTU}$ 左右,因此平流沉淀池的设计沉淀时间一般为 $120\text{ min}$ 。若水厂采用浸没式超滤膜工艺,一方面,超滤膜可耐受较高的原水浊度负荷,从应用实践来看,当原水浊度控制在 $10\text{ NTU}$ 之内时,超滤膜池的运行不会受到影响;另一方面,超滤膜可以拦截细菌病毒,有助于简化水厂消毒工艺环节。因此,参照小米产品模式,水厂设计专注于最终出水水质,利用超滤膜除浊和拦截细菌及病毒,进一步优化沉淀和消毒单元。

## 2 新型超滤膜水厂的特点及设计理念

新型超滤膜水厂应具有以下两大特点:①水厂整体建设成本与传统砂过滤水厂持平<sup>[3]</sup>;②水厂整体运行成本低于传统砂过滤水厂。

为实现上述两个目的,参照小米产品的理念,在稳定保证水厂出水水质的前提下,去除或简化一切非必要单元,采用短流程净水工艺打造建设成本

较低的超滤膜水厂,采用零污染通量和智慧水厂的理念降低超滤膜水厂的运营成本。

### 2.1 短流程净水工艺

短流程工艺<sup>[1]</sup>就是相对传统净水处理工艺而言,其处理流程明显缩短。

对于浊度较低的原水,超滤可直接取代传统混凝/沉淀/砂过滤工艺,工艺流程为原水-浸没式超滤膜-出水。对于浊度较高但不存在季节性铁锰超标、突发性重金属污染等问题的原水,在膜前增设混凝、短沉淀单元,即将平流沉淀池的停留时间缩短至 $50\sim 60\text{ min}$ ,工艺流程为原水-混凝沉淀( $50\sim 60\text{ min}$ )-浸没式超滤膜-出水。

与传统水处理工艺相比,短流程净水工艺弱化了沉淀功能,处理工艺明显缩短,占地面积明显减小。同时,由于超滤膜工艺去除了水中的细菌和病毒,厂区加氯消毒系统规格降低。此外,超滤膜工艺药剂投加量的减少降低了厂区污泥系统的规模,使得污泥系统的建设费用也大幅减少。从水厂总体投资来看,短流程净水工艺的工程费用与常规处理工艺相近,但处理水质得到显著提升。

### 2.2 零污染通量

1995年Field等在处理酵母细胞等模型物质的基础上提出膜的临界通量(Critical flux)概念<sup>[1]</sup>,即在此通量下长期运行,跨膜压差不会增大。换言之,膜污染极轻或膜污染为零,也可称为零污染通量。

超滤在零污染通量下工作,可以极少或基本不对膜进行化学清洗,因此膜装置的运行大为简化,膜的运行寿命得到延长,其工程实际应用价值较高。李圭白等<sup>[1]</sup>通过试验指出,采用气洗,零污染通量约为 $15\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;若采用混凝和气洗,可使零污染通量增加至 $20\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。《城镇给水膜处理技术规程》(CJJ/T 251—2017)规定,浸没式超滤膜设计通量宜为 $20\sim 45\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。综上,短流程净水工艺中浸没式超滤膜的设计通量取规程的下限,即 $20\sim 22\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,可最大限度地减轻长期运行的膜污染问题。

### 2.3 智慧水厂

智慧水厂指以应用新一代信息技术为手段,实现生产、运行、维护、调度和服务的全方位、全过程信息互通的高效节能、绿色环保、环境舒适的水厂<sup>[5]</sup>。智慧水厂的实现不是传统的自动化控制,而

是构建水厂的大脑,让水厂的运营数据像水一样成为一种资源。数据管理是生产管理信息系统的核心,智能化阶段主要表现在物联网设备数据采集、数据存储、数据分析、知识库建立、复杂算法应用、自我学习等方面<sup>[5]</sup>。通过智慧水厂平台的搭建,可将水厂运营数据进行集中管理,将运行人员的主观经验和不确定记忆变成更精准的数据化管理模式,降低人为因素的影响。因此,智慧水厂是水厂信息化和数字化应用的高级阶段。

超滤膜过滤出水水质不受进水水质的影响,人为干预的因素少,自动化运行程度更高,管理更加方便。通过智慧水厂的智慧生产系统,可以实现加药量、超滤膜反冲洗时间、排泥时间以及水泵启停等设备运行工况的自动调整,降低整个水厂的运行成本。

### 3 设计案例

#### 3.1 闽侯县某水厂概况

闽侯县某水厂规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水源为三溪口水库和溪兜水库。作为具有富营养化风险的水库水,藻类暴发一直是以水库为水源的常规处理水厂面临的运行难题,而传统常规处理工艺对藻类处理效果有限。此外,常规消毒方法无法完全杀灭水中的微生物,给传统常规处理工艺带来极大挑战。基于技术经济分析及未来发展考虑,该水厂采用了短流程工艺、零污染通量和智慧水厂的设计理念。

#### 3.2 净水处理工艺的选择

该水厂采用以超滤膜为核心的第三代净水处理工艺,原水经过短平流沉淀池后直接进入超滤膜车间,超滤出水经重力流,进入叠合在沉淀池下部的清水池,超滤膜反冲洗废水回用至沉淀池前端,减少废水排放率。整个水厂的净水单元仅2座池体,极大减少了水厂构筑物数量,制水流程更为简单。具体流程如图1所示。

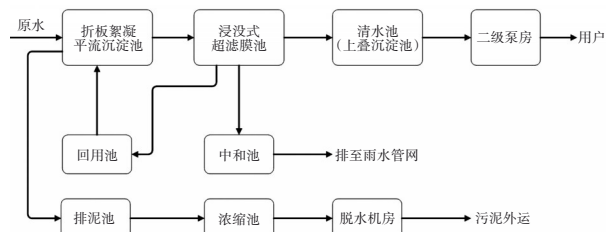


图1 水厂工艺流程

Fig.1 Process flow diagram of a waterworks

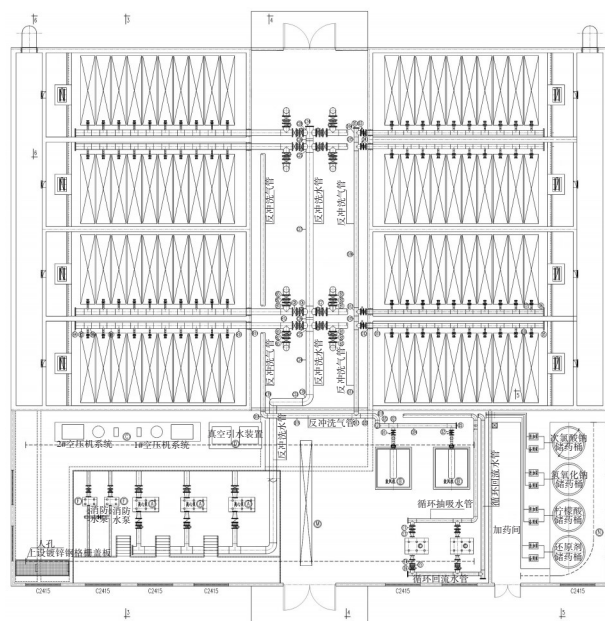
#### 3.3 设计优化参数

① 平流沉淀池停留时间 60 min,总体占地面积比常规沉淀池减少了 50%。

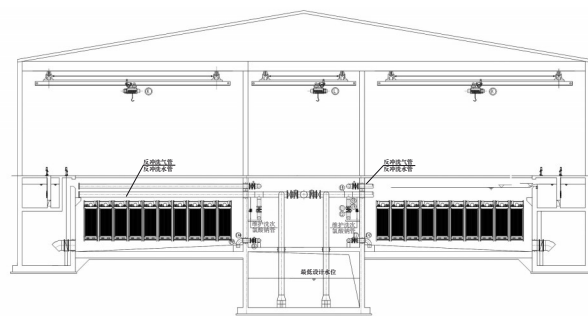
② 采用次氯酸钠消毒系统,厂区总加药量为 2 mg/L,较常规水厂加氯量减少 50%。

③ 浸没式超滤膜设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,膜通量 $21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,当1格离线清洗、1格反冲洗时,2格膜池停用,最大设计通量为 $28 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。水冲洗强度 $80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (由冲洗水泵提供冲洗用水,冲洗水量为 $1680 \text{ m}^3/\text{h}$ );气冲洗强度 $130 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (由冲洗风机提供冲洗用气,冲洗气量为 $2730 \text{ m}^3/\text{h}$ )。膜滤池建设2排,共8座,采用双排布置,单格平面尺寸 $12.0 \text{ m} \times 5.8 \text{ m}$ ,池深5.45 m,地上式钢筋混凝土结构。

超滤膜车间设计形式如图2所示。



a. 平面



b. 剖面

图2 超滤膜车间布置形式

Fig.2 Layout of the ultrafiltration membrane workshop



### 3.4 智慧水厂设计

首先,在保证系统安全性的基础上,通过优化水厂自控系统、在线仪表、视频监控系统、安全防范系统的配置,达到智慧水厂建设要求,构建数据感知层。其中,通过集约化、国产化的手段优化自控系统的配置,按照新工艺流程,合理、全面地配置在

线仪表,按需增加视频监控点位等。

其次,通过建设统一的智慧水厂运营平台,对各个子系统的数据进行整合、分析、综合利用,全面提升水厂在生产运行、设备管理、巡检管理方面的信息化水平。智慧水厂通过统一的平台进行综合展示,真正做到“一屏统管”,其架构如图3所示。



图3 智慧水厂架构

Fig.3 Architecture of smart waterworks

随着水厂运行数据的不断积累,通过大数据挖掘,构建提升水厂运维水平的决策模型,可实现水厂的低能耗运行和智慧管控。根据整个工艺运行环节,水厂运维模型主要有需水量预测模型、反应沉淀池模型、超滤膜池模型、节能模型、加药模型五个。

#### ① 需水量预测模型

通过对历史水量、人口、天气、节假日等影响供水条件的分析,利用LSTM神经网络建设需水量预测模型,实现对未来3d需水量的预测分析。

#### ② 反应沉淀池模型

通过实时监测原水浊度、反应沉淀池进出水浊度、絮凝阶段实时污泥浓度以及沉淀阶段的实时污泥界面仪测量值,利用事先设计好的模型算法和经

验智能学习,准确推算各阶段的最佳排泥周期、刮泥机运行周期并将其输出到SCADA系统,在保证出水水质达标的前提下,达到降低排泥/刮泥频率和排泥水量的目的。

#### ③ 超滤膜池模型

通过实时监测超滤膜池出水浊度及跨膜压差,利用设计好的模型算法和经验智能学习,推算出各膜池最佳过滤水位、反冲洗周期、反冲洗强度及反冲洗时间;在保证出水水质达标的前提下,将水位控制在合理的范围内,实现降低反冲频率、反冲废水量和反冲设备电耗的目的。另外,反冲洗时间需根据水厂供水情况合理安排,避免在供水高峰时段或清水池蓄水不足的情况下洗池,不与絮凝池排泥及桁车排泥在同一时间下洗池。

#### ④ 节能模型

对具体构筑物内液位、泵出口流量、进出口压力、运行时间进行实时监测,同时将泵体功效性能曲线等参数输入智能功耗平衡模块,得出机组最佳工变频组合及变频频率的指导运行数据,避免大功率设备频繁启停和在较低有效功率输出工况下运行,实现降低设备电耗和延长设备寿命的目的。

#### ⑤ 加药模型

对原水流量、浊度和反应池出水浊度进行实时监测,并将监测值输入模型算法模块,在高精度的计量仪表和投加设备的支撑下,采用模糊控制方式,达到精确加药、节省药剂投加量的目标。

### 3.5 处理效果及成本分析

该工程建设完成后,出水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),出水浊度稳定在0.1 NTU以内,出水中未检出细菌(包括大肠杆菌),保证了饮用水的生物安全性,并达到了设计规模。水厂进、出水浊度检测结果如表1所示。

表1 水厂进、出水浊度

Tab.1 Turbidity of influent and effluent in the waterworks NTU

原水进水	沉淀出水	超滤膜出水
5.4	1.1	0.02
10.5	1.2	0.03
2.8	0.9	0.01
6.8	1.5	0.04

改造完成后水厂水量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,工程概算投资为12 221.21万元,吨水投资为1 222元/ $\text{m}^3$ ,与常规处理工艺成本(1 200~1 500元/ $\text{m}^3$ )持平。运行过程中,超滤膜的直接运行成本为0.12元/ $\text{m}^3$ ,包括电费、药剂费、固定资产折旧费等,与常规砂过滤工艺成本(0.10元/ $\text{m}^3$ )基本持平。

## 4 结语

相对于已经超过百年应用历史的传统过滤,超滤膜过滤于20世纪80年代中期才开始在公共供水系统中进行应用,随着我国饮用水水质标准的提高和人民群众对高品质供水的需求,绿色低碳的超滤膜净水处理技术必将得到进一步的广泛应用。借鉴“小米模式”,利用短流程、零污染通量和智慧水

厂的设计理念,打造较低工程投资和运营成本的新型超滤膜水厂,以期在国内的中小型企业、广大县城以及农村地区进行应用,实现城乡供水一体化。

### 参考文献:

- [1] 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, 36(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, 36 (8) : 11-15 (in Chinese).
- [2] HOU Li'an. Creating smart waterworks to produce healthy drinking water [J]. Engineering, 2019 (5) : 826-827.
- [3] 王秀芳. 超滤膜技术在宁波市江东水厂升级改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2016, 32(18): 77-79.  
WANG Xiufang. Application of UF membrane technology to upgrading of Ningbo Jiangdong waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (18) : 77-79 (in Chinese).
- [4] 王如华. 公共供水水处理中膜过滤替代传统过滤的应用与思考[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 1-6, 114.  
WANG Ruhua. Application and consideration of membrane filtration in replacement of traditional filtration in water treatment of public water supply [J]. Water Purification Technology, 2022, 41 (10) : 1-6, 114 (in Chinese).
- [5] 徐伟忠,于红涛,宋鑫峰,等. 水厂生产管理智慧化建设实践[J]. 净水技术, 2019, 38(s2): 126-129.  
XU Weizhong, YU Hongtao, SONG Xinfeng, et al. Practice of intelligent construction and management in waterworks [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s2): 126-129 (in Chinese).

作者简介:张东波(1985—),男,上海人,硕士,高级工程师,主要从事市政给排水处理技术研究和工程设计工作。

E-mail: zdb0772@163.com

收稿日期:2024-01-12

修回日期:2024-03-06

(编辑:丁彩娟)