

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.024

# 广州北部水厂大型超滤膜项目节能降耗实践

敬东明<sup>1</sup>, 鲁显位<sup>2</sup>, 刘建林<sup>2</sup>, 杜梅梅<sup>2</sup>

(1. 广州市自来水公司, 广东 广州 510160; 2. 中信环境技术有限公司, 广东 广州 510660)

**摘要:** 针对广州北部水厂  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  压力式超滤膜车间节能降耗的需求, 开展了对超滤净水工艺运行能耗控制的研究。结果表明, 北部水厂超滤膜工艺配套的提升泵在整个超滤单元设备中的运行能耗较高, 占比 76.02%。通过对工艺控制程序的优化, 将超滤膜堆进水母管压力和提升泵运行流量的设定控制模式改为实时自动调节控制模式后, 提升泵的运行能耗下降 18.75%, 超滤膜工艺的运行总能耗同步下降了 19.00%, 平均能耗从  $0.046\ 79 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  降至  $0.037\ 9 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ , 实现了超滤膜工艺更经济、智能化和精细化的运行。

**关键词:** 广州北部水厂; 超滤膜工艺; 节能降耗; 智能化; 精细化

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0127-07

## Energy Saving Practice of Large-scale Ultrafiltration Project in Beibu Waterworks of Guangzhou

JING Dong-ming<sup>1</sup>, LU Xian-wei<sup>2</sup>, LIU Jian-lin<sup>2</sup>, DU Mei-mei<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Waterworks Company, Guangzhou 510160, China; 2. CITIC Envirotech Co. Ltd., Guangzhou 510660, China)

**Abstract:** In order to save energy of the  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  pressurized ultrafiltration membrane system in Beibu Waterworks of Guangzhou, the energy consumption control was researched. The results showed that the lifting pumps to feed the ultrafiltration membrane process have the highest operating energy consumption among all the equipments in the system, accounting for 76.02% of the total energy consumption. By optimizing the process control program, the setting operation mode of the inlet main header pressure of the ultrafiltration membrane stack and the instantaneous flow of the lift pump were changed into the automatic adjustment operation mode, which resulted in the operating energy consumption of the lift pump to drop by 18.75%, the total energy consumption of the ultrafiltration membrane system to drop by 19.00% simultaneously, and the average specific energy consumption to drop from  $0.046\ 79 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  to  $0.037\ 9 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ , realizing a more economical, intelligent and refined operation of the ultrafiltration membrane process.

**Key words:** Beibu Waterworks of Guangzhou; ultrafiltration membrane process; energy saving; intelligent; refined

近年来,随着人们生活水平的不断提高,对饮用水的供水品质及生物安全性也提出了更高的要求。以超滤技术为核心的饮用水净化工艺因其出水水质优良(几乎可完全去除水中的 SS、藻类及病原微生物等)而快速发展成为第三代城市饮用水净化工

艺<sup>[1-3]</sup>,在当前多座新建水厂和升级改造水厂得到较广泛应用<sup>[4]</sup>,如无锡中桥水厂<sup>[5]</sup>、佛山市新城区饮用水厂<sup>[6]</sup>及洋山深水港水厂<sup>[7]</sup>等。在大规模的净水厂中,超滤膜工艺更受青睐。据报道,2018 年—2019 年初国内有 3 座超过  $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的大

型超滤膜水厂公开招标<sup>[8]</sup>。

然而,在实际应用中发现,超滤膜工艺运行能耗偏高仍是业界面临的重难点课题<sup>[9]</sup>。无锡中桥超滤系统( $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )平均电耗约  $0.071 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ <sup>[5]</sup>,杭州清泰水厂( $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )超滤系统单位电耗为  $0.0715 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ <sup>[10]</sup>,这些超滤水厂运行电耗均高于传统工艺运行电耗,因此使得超滤工艺更广泛地应用受到极大限制。鉴于此,以保证膜的长期稳定运行为基础,以节能降耗为目标,中信环境技术有限公司利用其专有的膜系统智能控制技术,联合广州北部水厂以2019年新建的  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的超滤净水工程为对象,积极开展超滤工艺运行节能降耗的课题研究。通过优化超滤进水母管压力值的控制模式和提升泵的运行流量的控制模式,促进了超滤工艺更智能化地运行,实现了运行能耗的大幅下降,该实践研究可为同类水厂提供借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 水厂简介

北部水厂位于广州市白云区石井镇鸦岗村,工程总处理规模为  $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。目前已建成一期工程  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,并于2019年1月14日实现正式通水。

北部水厂以西江水为取水水源,采用混凝沉淀+砂滤+臭氧活性炭+超滤的先进膜净水工艺(其中臭氧活性炭待二阶段实施),为白云区北部150万居民提供了优质饮用水,解决了长期困扰该地区居民的饮用水水量不足、品质不高的难题。

### 1.2 超滤膜工艺

北部水厂超滤膜工艺流程如图1所示。

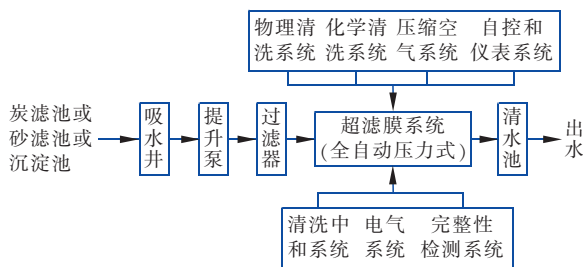


图1 北部水厂超滤膜工艺流程

Fig.1 Process flow of ultrafiltration membrane in Beibu

Waterworks

根据实际水质情况可实现多种净水流程灵活切换。超滤系统设计3种进水,包括炭滤池出水(二阶段实施,浊度 $\leq 1 \text{ NTU}$ )、砂滤池出水(浊度 $\leq 1$

$\text{NTU}$ )及沉淀池出水(浊度 $\leq 3 \text{ NTU}$ ,极端情况 $\leq 5 \text{ NTU}$ )。核心超滤工艺路线:来水 $\rightarrow$ 吸水井 $\rightarrow$ 提升泵 $\rightarrow$ 自清洗过滤器 $\rightarrow$ 压力式超滤膜装置 $\rightarrow$ 清水池。整个超滤系统配套有物理清洗系统、化学清洗系统、在线完整性检测系统、压缩空气系统、化学清洗液中和系统、电气控制系统和自控仪表系统,这些工程配套系统确保了超滤工艺的长期自动化稳定运行。超滤膜设计分A、B、C、D四个系列,每个系列包含10个膜堆,共40个膜堆,每个膜堆设计272支膜柱,共包含10880支膜柱(膜组件品牌美能MEMSTAR,型号:UF-0615ED,过滤孔径 $0.04 \mu\text{m}$ ,膜材质为PVDF)。设计采用外压式超滤膜,设计跨膜压差为 $30 \sim 100 \text{ kPa}$ 。

经过超滤工艺处理后,北部水厂出水水质可达到以下标准:

- ① 浊度 $\leq 0.1 \text{ NTU}$ (100%);
- ② 出水颗粒(粒径 $\geq 2 \mu\text{m}$ )计数检测值 $\leq 20$ 个/mL;
- ③ 细菌(大肠杆菌)去除率 $\geq 6\text{-lg}$ ;
- ④ 病毒去除率 $\geq 4\text{-lg}$ ;
- ⑤ 贾第鞭毛虫和隐孢子虫不得检出。

整体出水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

## 2 研究内容与方法

### 2.1 优化前运行能耗测试

本次工艺运行能耗测试分析选取C、D系列膜堆(共20个膜堆,满负荷产水能力 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )为试验对象,测试膜堆运行时各设备设施的耗电量。试验开展时间为2020年6月21日—24日,历时96 h。测试条件:①保持超滤工艺系统恒压变流量产水;②维持C和D系列膜堆满负荷运行,保证膜产水量为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

在本次能耗测试过程中,C、D系列膜堆的运行控制方案:

- ① 设置膜堆进水母管压力单值设定值,在提升泵的运行频率与膜堆进水母管压力设定值之间建立联锁控制,维持系统稳定恒压供水;
- ② 设置提升泵的运行流量单值设定值,在提升泵的运行数量与膜堆总产水量之间建立联锁控制,实现提升泵的运行数量随产水总量的变化而自动调整。

测试能耗设备的组成及规格参数如表1所示。

表 1 超滤工艺主要能耗设备组成及设备规格(60×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)

Tab. 1 Main process equipment and specifications of the ultrafiltration process (60×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)

设备、设施	设计参数	设备品牌	数量/台
提升水泵	$Q=3\,500\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=200\text{ kPa}$ , $P=250\text{ kW}$ , 变频控制(5~50 Hz)	安德里茨(ANDRITZ)	12(8 用 4 备)
自清洗过滤器	$Q=1\,800\text{ m}^3/\text{h}$ , 进水压力 0.07~0.2 MPa	阿速德(AZUD)	28(20 用 8 备)
反洗泵	$Q=750\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=300\text{ kPa}$ , $P=90\text{ kW}$ , 变频控制(5~50 Hz)	安德里茨(ANDRITZ)	8(4 用 4 备)
鼓风机	$Q=2\,000\text{ m}^3/\text{h}$ , $P=50\text{ kPa}$ , 成套机组; 西门子变频电机 $P=45\text{ kW}$	格南登福(Gardner Denver)	8(4 用 4 备)
空压机	出风量 $2.9\text{ m}^3/\text{min}$ , $P=0.75\text{ MPa}$ , $N=18.5\text{ kW}$	阿特拉斯(ATLAS)	2(1 用 1 备)
加药泵	流量: 0~1 500 L/h, 出口最高压力 0.3 MPa	米顿罗(Milton Roy)	20(16 用 4 备)
公用设施	主要包括厂区配套的通风和照明设施		

注: 本次节能降耗优化试验测试能耗设备数量采用表中设备数量的 1/2。

北部水厂配置有先进的膜智能化控制数据平台,本次试验各设备的运行能耗以水厂实际导出的电表电量计算。其中,提升泵、反洗泵、鼓风机、清洗泵配有独立的计量电表;其他设备包括空压机、加药泵、卸药泵和化料器等用统一电表计量;共用设施如厂区通风、照明等也采用统一电表计量。设备电耗计算公式如下:

$$W_{\text{电耗}} = W_{\text{电量终}} - W_{\text{电量始}} \tag{1}$$

式中: $W_{\text{电耗}}$  为各设备/设施在试验开展时间内产生的电耗, kW·h;  $W_{\text{电量始}}$  和  $W_{\text{电量终}}$  分别为各设备在试验开展前后的电表累计电量统计值, kW·h。

平均单位电耗计算如下:

$$E_{\text{电耗}} = W_{\text{电耗}} / Q_{\text{产水量}} \tag{2}$$

式中: $E_{\text{电耗}}$  为试验开展时间内超滤工艺的平均电耗, kW·h/m<sup>3</sup>;  $Q_{\text{产水量}}$  为试验开展时间内超滤膜的产水量, m<sup>3</sup>/d。

2.2 节能降耗优化试验

基于能耗测试结果,节能降耗试验从以下 2 个方面展开:①优化膜堆进水母管压力值的控制程序;②优化提升泵运行流量的控制程序。

2.2.1 优化膜堆进水母管压力值控制模式

当膜堆进水母管压力设定为经验单值时,会导致提升泵在单个膜堆产水量较少时运行存在能耗浪费、运行不经济的现象,故优化试验首先对膜堆进水母管压力值的运行控制程序进行修正。在原有提升泵频率与膜堆进水母管压力连锁控制的基础上,增加单个膜堆进水管道的调节阀的开度与单个膜堆产水量之间的连锁控制,实现进水母管压力值的自动调节运行,其详细运行控制原理如图 2 所示。

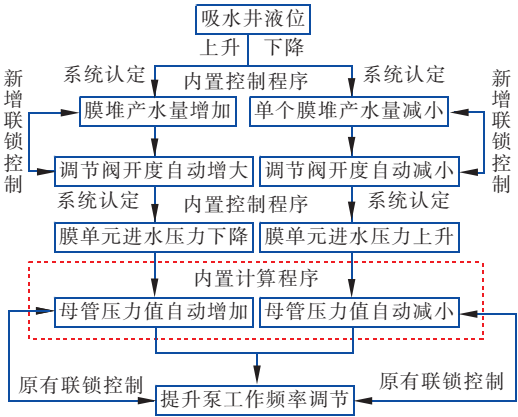


图 2 膜堆进水母管压力值的自动调节控制运行原理

Fig. 2 Automatic adjustment operation principle of the influent manifold's pressure of the membrane stack

当吸水井的液位上升时,根据系统内置程序,系统认定此时单个膜堆的产水量需要增加,膜堆进水管道的调节阀的开度自动调大,当开度调节至最大设定值(本系统优化调节阀最大开度为 70%)时,此时系统认定膜产水单元进水压力值偏低,根据其内部控制程序,计算并自动增加膜堆进水母管压力值;当吸水井液位下降时,则运行过程相反,其阀门开度的优化值为 50%。通过以上控制原理,实现超滤产水过程中膜堆进水母管压力值的自动调节运行。

2.2.2 优化提升泵的运行流量控制模式

优化试验进行前,提升泵流量控制模式主要为经验值设定模式,优化试验旨在实现提升泵的运行流量随产水量的变化而自动调整。

由泵的特性曲线可知,在一定的工作扬程下,泵在一定的流量范围内均可实现高效运行。基于此,优化提升泵的流量单值设定模式为流量自动调节模

式,使提升泵在高效率区的流量范围内自动调节运行以适应工艺工况的改变,促进其运行能耗的节约。

具体实施步骤包括:

① 确定提升泵的运行效率控制边界。以提升泵的特性曲线为依据,提升泵的运行控制效率切换点选择如图3所示。分别选取泵流量逐渐减小时的最低效率控制切换点(86.9%)、泵的最高运行效率切换点(88.2%)以及泵流量逐渐增加时的最低效率控制切换点(84.1%)对应的效率曲线(a)、(b)和(c)为泵的运行效率控制边界。

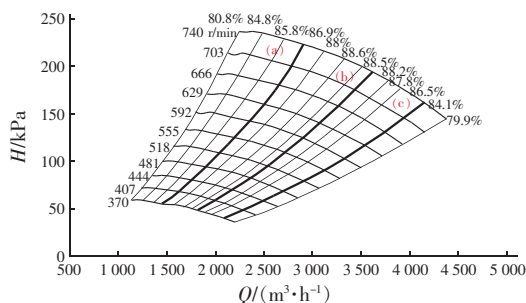


图3 提升泵的运行控制效率切换点选择

Fig.3 Selection of lift pump's switching point of operation control efficiency

② 建立泵的相似工况等效率  $Q-H$  拟合曲线。在泵的运行效率控制边界范围内,读取提升泵的运行流量和其对应该扬程的数据,建立不同的等效率  $Q-H$  拟合曲线,如图4所示。

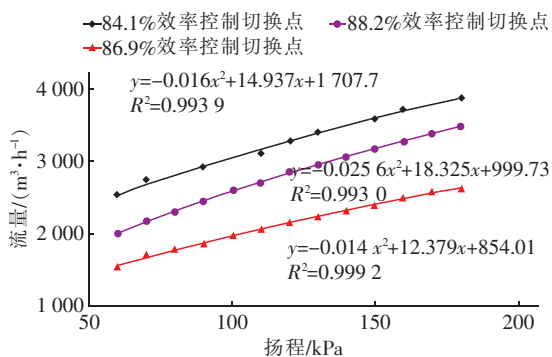


图4 提升泵的  $Q-H$  拟合曲线

Fig.4  $Q-H$  fitting curve of lift pump

③ 确定单台泵的运行流量范围。根据图4分别计算泵在不同工况下单台泵的不同流量控制切换点,包括:a.当泵的运行流量增加时,泵的最小运行流量  $Q_1$ ;b.当泵的运行流量减小时,泵的最高运行流量  $Q_2$ ;c.最高效率点时泵的运行流量  $Q_3$ 。根据这些运行流量切换点可确定单台泵流量逐渐增加时,

其流量控制范围为  $Q_1 \rightarrow Q_2$ ;当运行流量逐渐减小时,其流量控制范围为  $Q_2 \rightarrow Q_3$ 。

④ 确定膜堆产水总量变化范围与其对应的泵的运行数量,并建立联锁控制。根据不同工作扬程下单台泵的运行流量范围,计算出在不同扬程下泵的运行数量与膜堆产水总量变化范围的对应关系,并据此建立提升泵的运行数量与膜堆产水总量之间的联锁控制程序。图5是在泵的运行扬程为60 kPa时,泵的运行数量与膜堆产水总量之间的对应关系。

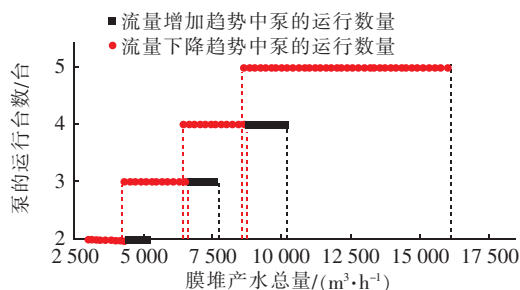


图5 提升泵的运行数量与膜堆产水总量之间的对应关系

Fig.5 Correlation between number of the operating lift pumps and the total amount of water produced by the membrane stacks

由图5可知,当泵的运行流量在一定范围内增加或减少时,流量增加趋势中泵的运行数量和流量减小趋势中泵的运行数量产生了重叠区域,即在该范围内膜堆总产水量增加或减小时,其提升泵的运行数量可保持不变,表明该控制程序也有利于避免提升泵的反复启停,可延长泵的使用寿命。

通过以上计算,确定膜堆产水总量变化范围与其对应的泵的运行数量,并建立联锁控制。同时,增加吸水井液位与膜堆产水总量之间的联锁控制。具体控制程序如图6所示。

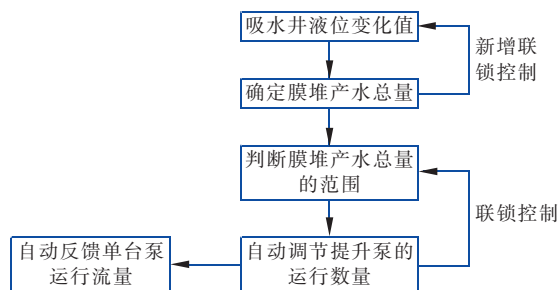


图6 提升泵流量自动调节运行模式下泵运行数量的控制程序

Fig.6 Control program of the lift pump running quantity under the automatic adjustment operation mode of the lift pump flow



当吸水井液位发生变化时,系统根据吸水井液位与膜堆产水总量之间的联锁控制,反馈膜堆产水总量并判断该产水总量所处的数值区间,同时依据膜堆产水总量与泵的运行数量之间的联锁控制,反馈系统应启动的提升泵台数,间接实现提升泵运行流量的自动调节。

### 2.2.3 优化后运行能耗测试

优化后能耗测试试验同样采用 C、D 系列膜堆开展,优化能耗测试开展时间为 2020 年 8 月 7 日—12 日。试验在保证 C、D 系列膜堆超滤产水量为  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的情况下进行。测试与计算方法同上。

## 3 结果与讨论

### 3.1 优化前能耗测试结果分析

在本次能耗测试中,C、D 系列膜堆的平均总能耗为  $0.046\ 79 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,相对偏高。其中,提升泵、反洗泵、鼓风机、其他设备及共用设施的平均单位能耗值见表 2。

由表 2 可知,提升泵的平均单位能耗值最大( $0.035\ 57 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ),占总能耗的 76.02%。这说明提升泵的运行能耗是整个超滤工艺运行能耗的主要来源。一方面,这与本系统配套的提升泵自身功率高且运行数量多有关;另一方面,综合分析工艺运行控制方案可知,在所有的联锁控制程序中,膜堆进

水母管压力值和提升泵的运行流量均为单值经验设定值,这两个参数值的大小直接影响提升泵运行扬程的高低和运行数量的多少,是决定提升泵运行能耗大小的关键因素。而当这两个值为手动经验设定值时,其不能随超滤工艺工况的变化而进行灵活调整,导致提升泵在产水量发生改变时始终存在不经济、不合理的运行现象,最终也将导致提升泵的运行能耗始终偏高。综上考虑,优化膜堆进水母管压力值的自控程序和提升泵流量调节的自控程序是实现提升泵运行节能降耗的有效途径。

表 2 优化前 C、D 系列膜堆配套的设备设施的耗电

Tab. 2 Power consumption of C, D series membrane stack supporting equipment and facilities before optimization

项 目	$W_{\text{平均耗电}}/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1})$	$E_{\text{耗电}}/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$	能耗占比/%
提升泵	11 070.629	0.035 57	76.02
反洗泵	141.950	0.000 46	0.983
鼓风机	57.025	0.000 18	0.385
其他设备	258.325	0.000 83	1.774
共用设施	3 035.625	0.009 75	20.838

### 3.2 提升泵运行能耗优化前后的变化

优化试验包含 2 个过程(见表 3),优化 1 表示膜堆进水母管压力的控制方式的优化;优化 2 表示提升泵的运行流量模式的优化。

表 3 C、D 系列提升泵运行控制模式优化前后运行条件及参数

Tab. 3 Condition and operation parameters of C, D series lifting pumps before optimization

项目	超滤系统平均产水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	提升泵运行数/台	提升泵运行扬程/kPa	提升泵电机变频频率/Hz	提升泵运行平均耗电/ $(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1})$
优化前	311 235	5	100 ~ 120	0 ~ 50	11 070.629
优化试验(1+2)	309 898	4	70 ~ 90	35 ~ 45	8 956.052

如表 3 所示,本次优化试验进行前后 C、D 系列超滤膜平均产水量分别为  $311\ 235 \text{ m}^3/\text{d}$  和  $309\ 898 \text{ m}^3/\text{d}$ 。优化试验前后的能耗变化如图 7 所示。

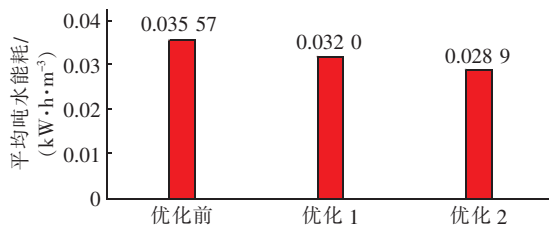


图 7 优化试验前后提升泵的能耗变化

Fig. 7 Energy consumption change of the lift pump before and after the optimization test

经过优化 1 后,即当膜堆进水母管压力设定模式优化为自动调节模式时,提升泵的运行平均单位

耗电从  $0.035\ 57 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  降为  $0.032\ 0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,运行能耗下降为原来的 89.96%,能耗下降 10.04%,该优化过程主要避免了当产水量减少时,其提升泵能耗在膜堆进水母管调节阀上的损失和浪费。这是因为当膜堆进水母管压力控制程序优化为自动调节控制模式时,提升泵的工作扬程可随母管压力值的改变而进行自动调节,避免了其扬程一直处在较高设定值。然后,在膜堆母管压力自动调节控制的基础上,继续进行优化 2 的过程,即优化提升泵的设定流量模式为自动调节模式。经该优化过程后,当吸水井液位发生变化时,超滤产水总量随之发生改变,此时不仅膜堆母管压力值会出现自动调整,提升泵的运行台数也会依据产水总量所处的范围而

发生变动,使提升泵的运行流量出现相应的自动调整,最终使提升泵一直保持在高效区的流量范围内运行。经该优化过程,提升泵变频电机的频率变化范围由原来的0~50 Hz变为35~45 Hz,运行扬程从原来的10~12 m下降至7~9 m,运行台数也由原来的5台减少到4台。同时,优化后吸水井的液位变化由原来的1.50~2.0 m稳定维持在 $\leq 50$  cm(吸水池设计有效水深6.50 m),液位始终保持在高液位运行,这不仅有利于降低提升泵的运行扬程,也有利于规避吸水井液位变化对提升泵的运行效率的影响(本工程配套的提升泵以峰值流量设计选型,其完全可适应水量设计规模内的不同水量波动引起的各种工况)。经优化1和优化2后,提升泵的运行能耗从未优化前的 $11\,070.629\text{ kW}\cdot\text{h/d}$ 下降至优化后的 $8\,956.052\text{ kW}\cdot\text{h/d}$ 。当完成提升泵的运行流量模式自动调整控制运行时,提升泵的运行平均单位电耗继续下降至 $0.028\,9\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ ,运行能耗下降为原来的81.25%,总计下降率达18.75%。该过程的优化促进了提升泵运行流量随工况变化的智能化调节,以及提升泵运行台数的合理化配置,保证了工艺的稳定运行,从而达到了降低能耗的效果。与超滤膜初始控制程序相比,母管压力自动调节控制程序和提升泵的运行流量的自动调节控制程序具有更强的适用性。

### 3.3 超滤工艺优化前后总能耗的变化

图8是优化试验开展前后超滤工艺产水平均总能耗的对比。

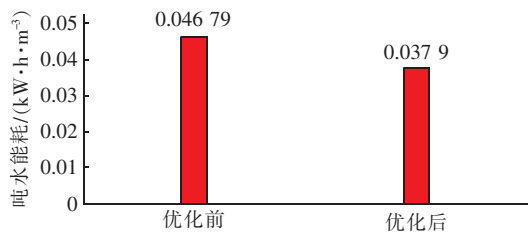


图8 优化前后工艺运行总吨水能耗的变化

Fig. 8 Change of total water energy consumption before and after optimization

由图8可知,在优化试验后整个超滤工艺系统运行总能耗出现了大幅下降,运行平均单位总能耗从 $0.046\,79\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ 下降至 $0.037\,9\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ ,总运行能耗下降至原来的81.00%,运行总能耗总计下降19.00%。结合提升泵运行能耗的下降率18.75%可知,超滤工艺运行总能耗的下降主要源于

提升泵运行能耗的降低,而提升泵运行能耗的降低则主要源于膜堆进水母管压力控制程序和提升泵运行流量控制程序的优化。这表明在超滤工艺运行过程中,配套设备的运行控制模式以及运行控制参数是影响工艺运行总能耗的关键因素,合理、科学的设备运行控制模式可有效地促进超滤工艺运行总能耗的大幅下降。

### 3.4 超滤工艺节能降耗的经济效益分析

北部水厂超滤膜工艺经过节能降耗试验优化后,超滤工艺运行总能耗降至 $0.037\,9\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ ,总能耗下降 $0.008\,89\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ 。按照设计规模 $60\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 计算,本优化试验可促进北部水厂节省运行能耗 $5\,334\text{ kW}\cdot\text{h/d}$ 。若以运行电价 $0.65\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计,优化试验进行后预计可为水厂节省运行能耗费用约 $3\,467\text{ 元/d}$ ,吨水能耗费可下降至 $0.024\,6\text{ 元}/\text{m}^3$ (吨水设备运行能耗费,不包含其他费用)。该运行能耗费远低于同类水厂——无锡中桥水厂( $15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ )的超滤膜的运行能耗费 $0.046\text{ 元}/\text{m}^3$ ,其运行能耗为 $0.071\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ ,电价 $0.65\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ <sup>[5]</sup>,表明北部水厂超滤膜工艺运行能耗处于同类水厂较低水平。因此其优化试验和优化思路对同类水厂的低能耗运行具有借鉴作用。

## 4 结语

① 超滤系统配套提升泵、反洗泵、鼓风机、其他设备(空压机系统、加/卸药泵和化料器等)和共用设施(厂区照明和通风等配套设施)的运行能耗分别为 $0.035\,57$ 、 $0.000\,46$ 、 $0.000\,18$ 、 $0.000\,83$ 、 $0.009\,75\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ 。其中提升泵的运行能耗最高,占超滤工艺运行能耗的76.02%。

② 优化超滤膜堆进水母管压力控制模式后,即通过增加单个膜堆进水管道路调节阀的开度(优化阀门开度范围:50%~70%)与单个膜堆产水量之间的联锁控制,优化膜堆进水母管压力值设定模式为自动调节模式。通过该优化,实现了当膜堆产水量发生变化时进水母管压力值的自动调节运行,使提升泵的运行能耗从 $0.035\,57\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ 降至 $0.032\,0\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ 。

③ 优化提升泵的运行流量控制模式后,即在膜堆进水母管压力控制模式优化的基础上,通过提升泵特性曲线的拟合计算,确定膜堆产水总量变化范围与其对应的提升泵运行数量,并建立联锁控制,同时增加吸水井液位变化与膜堆产水总量之间的联

锁控制,实现提升泵运行流量的自动调节控制模式。经过优化试验后,吸水井液位变化稳定维持在 $\leq 50$  cm,提升泵的运行扬程下降至 $70 \sim 90$  kPa,提升泵变频电机的频率变化稳定在 $35 \sim 45$  Hz,因而促进提升泵的运行能耗从 $0.032 0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 继续降至 $0.028 9 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

④ 通过优化试验,促进了超滤工艺运行能耗从 $0.046 79 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 降至 $0.037 9 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,预计可为北部水厂节省运行能耗 $5 334 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{d}$ ,可实现超滤工艺更经济、智能化和精细化的稳定运行。

#### 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] 李照杰. 环境工程水处理中超滤膜技术的应用[J]. 环境与发展,2020,32(8):108-109.  
LI Zhaojie. Application of ultrafiltration membrane technology in environmental engineering water treatment[J]. Environment & Development, 2020, 32(8): 108-109 (in Chinese).
- [3] 郑晨,马晓力. 超滤技术在给水处理中的应用及发展状况[J]. 环境工程,2013,31(增刊1):163-165, 195.  
ZHENG Chen, MA Xiaoli. The applications and development of ultrafiltration technology in the water supply treatment[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1): 163-165, 195 (in Chinese).
- [4] 范小江,张锡辉,苏子杰,等. 超滤技术在我国饮用水厂中的应用进展[J]. 中国给水排水,2013,29(22): 64-70.  
FAN Xiaojang, ZHANG Xihui, SU Zijie, et al. Application of ultrafiltration technology in drinking water treatment plants in China[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(22): 64-70 (in Chinese).
- [5] 笪跃武,殷之雄,李廷英,等. 超滤技术在无锡中桥水厂深度处理工程中的应用[J]. 中国给水排水,2012, 28(8):79-83.  
DA Yuewu, YIN Zhixiong, LI Tingying, et al. Application of ultrafiltration technology in advanced treatment project at Wuxi Zhongqiao waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(8): 79-83 (in Chinese).
- [6] 黄明珠,曹国栋,李冬梅,等. 佛山新城区优质水厂设计与运行分析[J]. 给水排水,2008,34(3):12-16.  
HUANG Mingzhu, CAO Guodong, LI Dongmei, et al. Discussion on design and operation of Foshan New Urban Waterworks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(3): 12-16 (in Chinese).
- [7] 芮旻. 洋山深水港饮用水超滤膜处理的系统选择与设计[J]. 给水排水,2010,36(3):7-11.  
RUI Min. Selection and design of ultrafiltration membrane drinking water treatment system in Yangshan deepwater sea port[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(3): 7-11 (in Chinese).
- [8] 芮旻. 给水厂大型超滤膜系统招标技术细节对比与总结[J]. 给水排水,2019,45(5):31-36.  
RUI Min. Bidding technical specification comparison and summarization of major ultrafiltration system in waterworks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(5): 31-36 (in Chinese).
- [9] 于海宽,李星,周志伟,等. 大型超滤水厂PVC和PVDF膜运行特性差异与优化[J]. 中国给水排水, 2021,37(1):28-33.  
YU Haikuan, LI Xing, ZHOU Zhiwei, et al. Operation characteristics and optimization of PVC and PVDF membranes in full-scale ultrafiltration drinking water treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 28-33 (in Chinese).
- [10] 代荣,王鑫,许阳,等. 杭州清泰水厂膜滤系统调试及试运行[J]. 给水排水,2014,40(6):21-24.  
DAI Rong, WANG Xin, XU Yang, et al. Configuration and operation of the membrane filter system in the Qingtai Water Treatment Plant in Hangzhou[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(6): 21-24 (in Chinese).

作者简介:敬东明(1972-),男,湖南邵东人,本科,给排水工程师,主要从事自来水生产管理、工程建设管理工作。

E-mail:1960406284@qq.com

收稿日期:2021-04-07

修回日期:2021-06-02

(编辑:衣春敏)