

# 自来水厂后臭氧接触池进水流量的在线软测量方法

蒋福春<sup>1</sup>, 王冬生<sup>2</sup>

(1. 苏州市自来水有限公司, 江苏 苏州 215002; 2. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023)

**摘 要:** 针对自来水厂后臭氧接触池进水流量无法在线测量的问题,提出了一种后臭氧接触池进水流量的在线软测量方法。首先,通过在线测试获得后臭氧接触池进水前提升泵房的各台提升泵运行在最大工作扬程和最小工作扬程下的频率-流量关系曲线;然后,计算生成当前工作扬程下的频率-流量关系曲线,并由此获得提升泵当前频率对应的实时流量;最后,计算提升泵房所有运转提升泵的出水流量之和,从而获得后臭氧接触池进水流量软测量值。实际应用结果表明,与先前的以活性炭滤池出水流量计的数值作为参考流量相比,提出的软测量方法能更准确地反映后臭氧接触池的实时进水流量,根据这一基准流量进行臭氧投加可使后臭氧接触池出水余臭氧浓度更加平稳,为后臭氧投加精确控制奠定了基础。

**关键词:** 自来水厂; 后臭氧接触池; 进水流量; 软测量

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)01-0043-05

## On-line Soft Measurement of Influent Flow Rate of Post-ozonation Contact Reactor in Water Treatment Plant

JIANG Fu-chun<sup>1</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>

(1. Suzhou Water Supply Co. Ltd., Suzhou 215002, China; 2. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** An on-line soft measurement method was proposed to measure the influent flow rate of the post-ozonation contact reactor. First, the relationship between frequency and flow rate under the maximum and minimum working head of each pump in the pumping station before the post-ozonation contact reactor was developed through on-line tests. Second, the relationship curve between frequency and flow rate under the current working head was calculated to determine the real-time flow rate of the pump under current frequency. Finally, the total effluent flow rate from the pumping station was calculated, and the real-time influent flow rate of the post-ozonation contact reactor was obtained. The results showed that, in comparison with existing method which used effluent flow rate of the biological activated carbon filter as a reference, the soft measurement method proposed was more accurate to quantify the real-time influent flow rate of the post-ozonation contact reactor. The ozone residual in the effluent of the post-ozonation contact reactor was more stable under this baseline flow rate, which provided a basis for the accurate control of ozone dosing.

**Key words:** water treatment plant; post-ozonation contact reactor; influent flow rate; soft measurement

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201001); 国家自然科学基金资助项目(51708299); 苏州市科技计划项目(SS201803); 苏州市水利水务科技项目(2018007)

臭氧/生物活性炭工艺是当前应用较为广泛的深度处理技术之一,由于臭氧的超强氧化性及生物活性炭的吸附和生物降解性,使该工艺能够有效去除难降解有机物。试验研究及水厂应用结果均表明,在常规工艺后增加臭氧/生物活性炭深度处理工艺,不仅能有效去除水源水中的难降解有机物,还能去除铁、锰、色度等,提高饮用水的安全性和生物稳定性<sup>[1-3]</sup>。

臭氧投加控制的准确性水平直接关系到臭氧/生物活性炭深度处理工艺的处理效果<sup>[4]</sup>。然而,自来水厂在常规工艺后增加臭氧/生物活性炭深度处理工艺的升级改造过程中,由于受现场条件的限制,经常无法在后臭氧接触池进水处安装在线流量计,从而无法测量后臭氧接触池的进水流量。笔者通过对后臭氧接触池前提升泵房的各台提升泵实时出水流量进行在线估计,间接获得后臭氧接触池的进水流量,有效提高了后臭氧投加量与水流量比例控制的精度,为后臭氧投加精确控制提供了基础。

## 1 水厂深度处理工艺流程及存在问题

苏州市某水厂臭氧/生物活性炭深度处理工艺基本流程如图1所示。砂滤出水经提升泵提升后自流进入后臭氧接触池,经后臭氧和生物活性炭作用后流入清水池。6台提升泵(变频泵)并联或者间歇轮流工作,其频率调节方式是通过PID控制使结合井的液位保持在设定值附近。后臭氧接触池由南、北两池构成,砂滤出水被平均分配到两个接触池,然后分别流入两个生物活性炭滤池,最终汇合流入清水池。

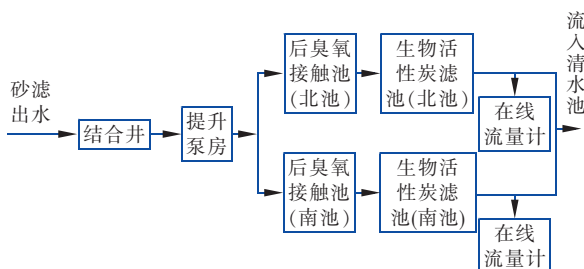


图1 臭氧/生物活性炭深度处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of ozone/biological activated carbon advanced treatment process

由于受工艺结构限制,该水厂后臭氧接触池前无法安装在线流量计,因而无法直接测量后臭氧接触池进水流量,只能将生物活性炭滤池出口的在线

流量计读数代替后臭氧接触池进水流量。由于生物活性炭滤池液位变化对出水流量产生影响,尤其在工况变化(如提升泵房开停水泵、沉淀池排泥和生物活性炭滤池反冲洗)时,生物活性炭滤池出水流量与后臭氧接触池进水流量会有很大偏差。

## 2 后臭氧接触池进水流量软测量方法

虽然水泵生产厂商提供了水泵额定性能曲线,但水泵在自来水厂长年运转必然存在涡轮叶片磨损、主轴松动等问题,势必导致额定性能曲线偏移;又由于自来水厂制水生产不允许中断,不能对水泵进行拆卸或离线测试其性能曲线。因此,设计一种提升泵工作条件下允许的频率-流量关系曲线的在线测试方法尤为必要。

### 2.1 提升泵性能曲线的在线测试

提升泵频率-流量关系曲线在线测试方法如图2所示。

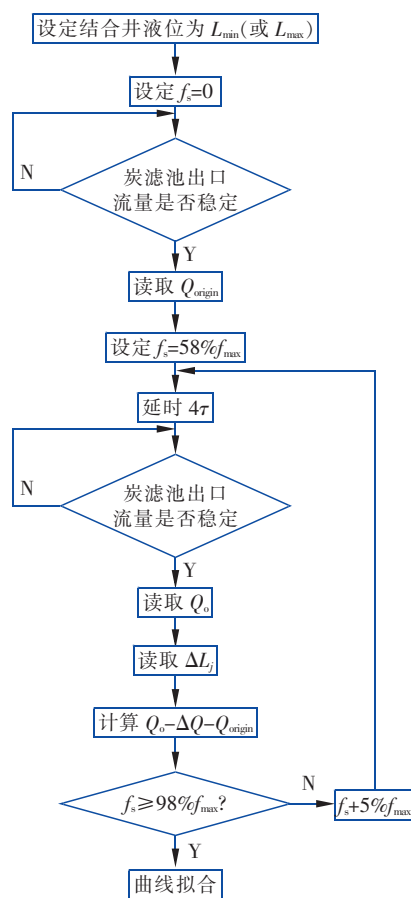


图2 提升泵的在线测试方法

Fig.2 On-line test method for frequency-flow rate curve of promotion pump

其中: $L_{\min}$ 、 $L_{\max}$ 分别为结合井最低液位和最高液

位;  $f_s$  为被测提升泵的运转频率;  $f_{\max}$  为提升泵的最大运转频率;  $\tau$  为惯性时间常数;  $Q_{\text{origin}}$  为关停被测提升泵时的生物活性炭滤池出水流量;  $Q_0$  为生物活性炭滤池出水流量;  $\Delta L_j$  为生物活性炭滤池分格液位变化量;  $\Delta Q$  为由生物活性炭滤池液位变化引起的流量变化。

水厂的提升泵房有6台提升泵,其中4台运转、2台备用,每台运转的提升泵工作满48h后切换成备用状态,然后处于备用状态最长水泵开始运转。结合井设计标高为7m,液位范围为1~1.4m,提升泵工作扬程范围为5.6~6m。

对某台提升泵在线测试的方法具体如下:

① 最小工作扬程为5.6m

a. 将结合井的液位设定在1.4m。

b. 关停当前被测提升泵,将其他3台运转提升泵的运转频率设定为92%  $f_{\max}$ ,等生物活性炭滤池出水流量稳定时,读取  $Q_{\text{origin}}$ 。

c. 开启当前被测提升泵并将其运转频率调至58%  $f_{\max}$ ,等生物活性炭滤池出水流量达到稳定时,读取  $Q_0$  和  $\Delta L_j$ ,则生物活性炭滤池分格液位变化引起的生物活性炭滤池总出水流量变化量可由式(1)计算得出。

$$\Delta Q = \frac{(\sum_{j=1}^n \Delta L_j) \times S}{\Delta t} \quad (1)$$

其中:  $n$  为生物活性炭滤池分格数;  $S$  为每个生物活性炭滤池分格截面积;  $\Delta t$  为统计时间。

由于提升泵房出水流量、后臭氧接触池进水流量、后臭氧接触池出水流量、生物活性炭滤池进水流量和生物活性炭滤池出水流量在工况不变且液位平稳时近似相等,因而  $Q_0$  可近似为  $Q_i$  (后臭氧接触池进水流量)与  $\Delta Q$  之和,即  $Q_0 = Q_i + \Delta Q$ 。又  $Q_i = Q_{\text{origin}} + Q_t$ ,则  $f_s$  为58%  $f_{\max}$  时的出水流量可由式(2)计算得出。

$$Q_t = Q_0 - Q_{\text{origin}} - \frac{(\sum_{j=1}^n \Delta L_j) \times S}{\Delta t} \quad (2)$$

d. 判断当前被测提升泵的运转频率是否小于98%  $f_{\max}$ ,若小于98%  $f_{\max}$  则将其运转频率增加5%  $f_{\max}$ ,等生物活性炭滤池出水流量达到稳定时,转至步骤c;若大于98%  $f_{\max}$  则结束。

通过上述在线测试得到(58%~98%)  $f_{\max}$  的9组频率-流量值,对频率-流量值进行最小二乘曲线拟合,得到被测提升泵在最小工作扬程为5.6m

时的频率-流量关系曲线,如图3所示。

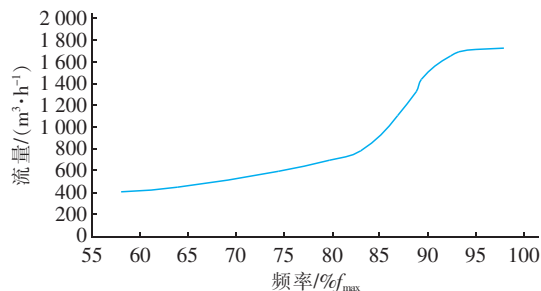


图3 提升泵在最小工作扬程为5.6m时的频率-流量关系曲线

Fig. 3 Frequency-flow rate curve of promotion pump at minimum working head of 5.6 m

② 最大工作扬程为6m

将结合井的液位设定在1m,重复①中的步骤b~d,得到被测提升泵在最大工作扬程为6m时的频率-流量关系曲线,如图4所示。

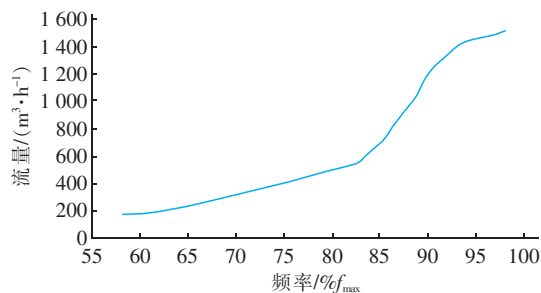


图4 提升泵在最大工作扬程为6m时的频率-流量关系曲线

Fig. 4 Frequency-flow rate curve of promotion pump at maximum working head of 6 m

采用相同的方法可以获得所有6台提升泵在最小工作扬程(5.6m)和最大工作扬程(6m)时的频率-流量关系曲线。

## 2.2 后臭氧接触池进水流量在线软测量

根据以上在线测试方法可获得被测提升泵在最小工作扬程(5.6m)和最大工作扬程(6m)下的频率-流量关系曲线,以及在正常工作下测得结合井液位(以1.15m为例,对应扬程为5.85m),对被测提升泵的实时出水流量进行计算,计算步骤为:曲线采样→线性插值→曲线拟合→查询曲线(获得提升泵实时流量)。具体如下:

① 分别对被测提升泵在最小工作扬程(5.6m)和最大工作扬程(6m)下的频率-流量关系曲线进行采样,如表1所示。

表1 提升泵最小工作扬程和最大工作扬程下  
频率-流量关系曲线的采样结果

Tab.1 Sampling result for frequency-flow rate curve of  
promotion pump at minimum and maximum working head

$f_s$	$Q_{5.6}/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	$Q_6/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
$58\%f_{\max}$	408	170
$63\%f_{\max}$	436	216
$68\%f_{\max}$	510	290
$73\%f_{\max}$	572	370
$78\%f_{\max}$	670	462
$83\%f_{\max}$	781	581
$88\%f_{\max}$	1 212	952
$93\%f_{\max}$	1 676	1 396
$98\%f_{\max}$	1 725	1 505

② 对表1中的采样值进行线性插值得到工作扬程为5.85 m时的频率-流量值,其线性插值方法见式(3)。

$$Q_t = Q_{\max} + \frac{(H_t - H_{\min}) \times (Q_{\min} - Q_{\max})}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (3)$$

其中: $H_t$ 为被测提升泵当前工作扬程; $H_{\min}$ 为被测提升泵最小工作扬程; $H_{\max}$ 为被测提升泵最大工作扬程; $Q_t$ 为插值得到的被测提升泵在当前工作扬程 $H_t$ 下的出水流量; $Q_{\min}$ 为被测提升泵在最小工作扬程 $H_{\min}$ 下的出水流量; $Q_{\max}$ 为被测提升泵在最大工作扬程 $H_{\max}$ 下的出水流量。

插值结果如下:当 $f_s$ 分别为 $58\%f_{\max}$ 、 $63\%f_{\max}$ 、 $68\%f_{\max}$ 、 $73\%f_{\max}$ 、 $78\%f_{\max}$ 、 $83\%f_{\max}$ 、 $88\%f_{\max}$ 、 $93\%f_{\max}$ 、 $98\%f_{\max}$ 时, $Q_{5.85}$ 分别为319、354、428、496、592、706、1 115、1 571、1 643  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

③ 采用最小二乘法对插值结果进行拟合,得到被测提升泵在工作扬程为5.85 m时的频率-流量对应关系曲线,如图5所示。

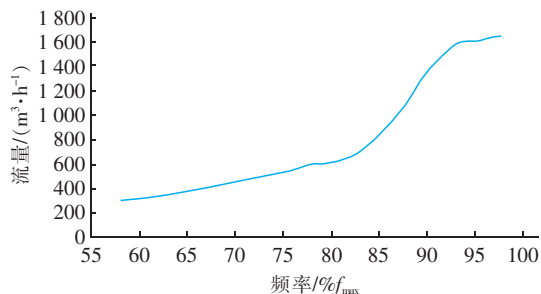


图5 提升泵在工作扬程为5.85 m时的频率-流量  
关系曲线

Fig.5 Frequency-flow rate curve of promotion pump at  
working head of 5.85 m

④ 由图5即可获得被测提升泵当前频率对应的流量值。同理可获得4台运转提升泵的实时流量,4台运转提升泵的实时流量之和即为后臭氧接触池的实时进水流量。

## 2.3 软测量模型的校正

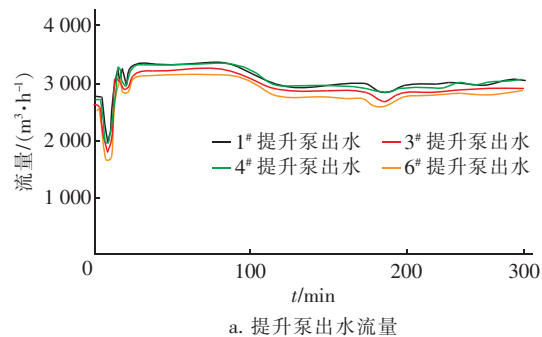
提升泵在线测试受到测量误差、采样误差和非线性等因素影响,需要对软测量模型进行校正:

① 提升泵长期连续运行一段时间后,因为涡轮叶片磨损、主轴松动等原因使其频率-流量关系曲线发生偏移,需重新在线测试,获取新的频率-流量关系曲线。

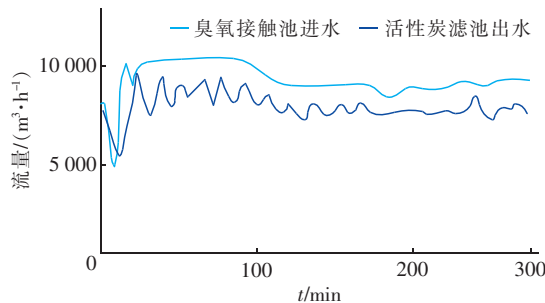
② 在水流量较平稳、没有生物炭滤池反冲洗的情况下,后臭氧接触池的进水流量与炭滤池的出水流量应近似相等。因此,在夜间供水稳定的一段时间内,可以将一段时间内后臭氧接触池进水流量软测量值和炭滤池出水流量计读数的标准差作为下一次校正前的软测量补偿值。

## 3 软测量方法的实施

将上述软测量方法通过计算机编程实现后,用于实时估计后臭氧接触池的进水流量,实施结果如图6所示。



a. 提升泵出水流量



b. 臭氧接触池进水、活性炭滤池出水流量

图6 后臭氧接触池进水流量在线软测量实施结果

Fig.6 Implementation results of on-line soft measurement for  
influent flow rate of post-ozone contact reactor



由图6可以看出,通过软测量方法获得的后臭氧接触池实时进水流量与活性炭滤池出口的流量计读数基本一致,但仍然存在着一一定的偏差,这主要是由于生物活性炭滤池液位变化引起的。

分别以生物活性炭滤池出水流量和后臭氧接触池进水软测量值作为后臭氧投加的基准流量,控制结果如图7所示。可以看出,后臭氧接触池出水余臭氧浓度在以软测量值作为基准流量时更加平稳。

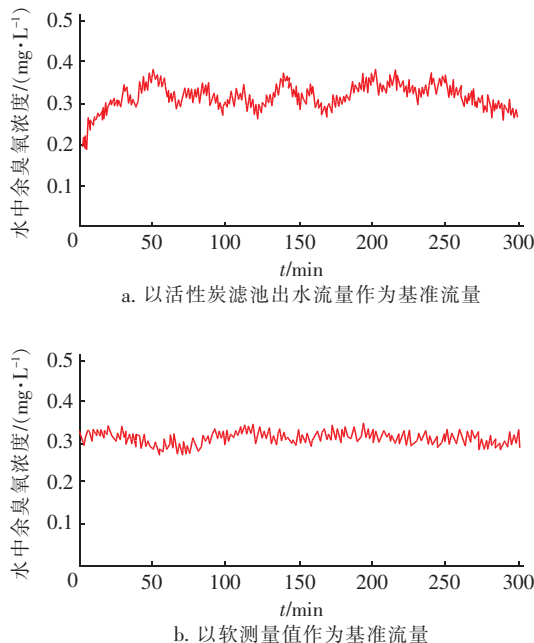


图7 后臭氧投加比例控制结果

Fig.7 Control results of post-ozone dosing ratio

#### 4 结论

针对后臭氧接触池进水流量无法在线直接测量的问题,提出了一种在线软测量方法。首先,提出了一种工作条件下允许的在线测试方法对提升泵的频率-流量关系曲线进行在线测试;然后,根据测试结果确定的水泵特性曲线对提升泵的出水实时流量进行在线估计,从而实现了后臭氧接触池进水流量软测量;最后,将软测量结果作为后臭氧投加的基准流量,取得了比较好的控制效果。该方法不需要增加任何硬件成本,在自来水厂臭氧/生物活性炭深度处理工艺运行中具有广泛的适用性。

#### 参考文献:

- [1] 张晓娜,何嘉莉,刘清华,等. 前置臭氧/活性炭与常规工艺处理微污染水的对比[J]. 中国给水排水,2018,

34(3):48-51.

Zhang Xiaona, He Jiali, Liu Qinghua, *et al.* Comparative analysis on treatment of micro-polluted source water by pre-ozonation/BAC process and conventional process[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(3): 48-51 (in Chinese).

- [2] 笪跃武,顾新春,胡侃,等. 水厂O<sub>3</sub>-BAC深度处理工艺系统的运行管理[J]. 中国给水排水,2013,29(18): 48-55.

Da Yuewu, Gu Xinchun, Hu Kan, *et al.* Discussion on management of O<sub>3</sub>/BAC advanced treatment process in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(18): 48-55 (in Chinese).

- [3] 安东,乐林生. 太湖流域安全饮用水保障技术示范工程——上海杨树浦水厂新建深度处理与污泥处置部分[J]. 给水排水,2006,32(8): 5-8.

An Dong, Le Linsheng. Demonstration engineering for safe drinking water ensuring technology in the Tai Lake Valley—Advanced water and sludge treatment part of Yangshupu Waterworks in Shanghai [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(8): 5-8 (in Chinese).

- [4] 王海亮,郑永菊,朱洁,等. 水厂深度处理工艺中臭氧投加量探讨[J]. 净水技术,2010,29(5): 73-79.

Wang Hailiang, Zheng Yongju, Zhu Jie, *et al.* Ozone dosage of advanced treatment processes for raw water from Huangpu River [J]. Water Purification Technology, 2010, 29(5): 73-79 (in Chinese).



作者简介:蒋福春(1979-),男,黑龙江绥化人,硕士,高级工程师,总工程师,主要从事城市供水技术研究及饮用水安全保障工作。

E-mail: chinajfc@163.com

收稿日期:2018-06-12