

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.04.007

## 全变频控制恒压供水设备技术探讨

王彤<sup>1</sup>, 刘力嘉<sup>1</sup>, 曹仙桃<sup>2</sup>, 连松<sup>3</sup>, 王峰林<sup>3</sup>, 沈月生<sup>4</sup>,  
何皎洁<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安市二次供水管理中心, 陕西 西安 710016; 3. 西安市自来水有限公司, 陕西 西安 710082; 4. 上海中韩杜科泵业制造有限公司, 上海 201715)

**摘要:** 目前全变频供水设备是一种较新的供水设备,为了分析全变频供水设备的优势,采用数解法建立了水泵出口恒压时全变频供水控制与单变频控制的主泵累计能耗模型,计算了理想情况下的吨水百米扬程能耗。以西安某高校住宅小区最高日用水规律为背景,绘制了2台泵与3台泵并联运行时全变频与单变频控制的能耗与流量的关系曲线,分析了两种控制方式下水泵的调速比与节能原理。模拟结果显示,全变频控制能消除并联运行低效区,与单变频控制相比,2台泵与3台泵并联运行更节能,节能率随着流量的增大而减小,该小区全变频控制全天累计节能率达4.8%。

**关键词:** 二次供水; 用水量变化; 全变频; 传统单变频

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0042-05

## Technical Discussion on Full Frequency Conversion Water Supply Equipment

WANG Tong<sup>1</sup>, LIU Li-jia<sup>1</sup>, CAO Xian-tao<sup>2</sup>, LIAN Song<sup>3</sup>, WANG Feng-lin<sup>3</sup>,  
SHEN Yue-sheng<sup>4</sup>, HE Jiao-jie<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Xi'an Domestic Water Secondary Distribution Center, Xi'an 710016, China; 3. Xi'an Water Supply Co. Ltd., Xi'an 710082, China; 4. Shanghai Sino-Korea Dooch Pump Manufacture Co. Ltd., Shanghai 201715, China)

**Abstract:** The full frequency conversion water supply equipment is a new type of water supply equipment at present. To analyze the advantages of the full frequency conversion water supply equipment, this paper established the cumulative energy consumption model of full frequency and single frequency conversion control on the main pump at constant pump outlet pressure with the numerical solution method. The energy consumption of 100 meters head per ton of water under ideal conditions was calculated. Taking the highest daily water consumption rule in a university residential area in Xi'an as the background, the full frequency and single frequency conversion control relation curve of energy consumption and flow were plotted when two pumps and three pumps were operated in parallel. The pump speed regulation ratio and energy saving mechanism under the two control modes were analyzed. The simulation results showed that the parallel inefficiency zone was eliminated by the full frequency

基金项目: 国家重点研发计划专项(2018YFC0406200)

通信作者: 王彤 E-mail: wangt@chd.edu.cn

conversion control. The running of two pumps and three pumps both saved more energy than single frequency conversion control and the energy saving rate decreased with the flow increasing. The full frequency conversion control of this district saved more energy than single frequency conversion control throughout the day with an energy saving rate of 4.8%.

**Key words:** secondary water supply; changes in water consumption; full frequency conversion; traditional single frequency conversion

全变频是指两台及以上工作泵实现同时、同步、同频率的变频运行方式。2019年8月发布的《数字集成全变频控制恒压供水设备》(GB/T 37892—2019)对全变频控制恒压供水设备组成、要求、供水能力等作了详细规定,为其在城镇供水、建筑二次供水系统的推广应用提供了技术保障。

2021年国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》,要求全面提高建筑节能标准。二次供水设备的节能运行是提升建筑设备能效水平的重要组成部分。沈亚辉<sup>[1]</sup>根据10年积累的泵站运行经验,得出全变频供水具有节能、管理方便、调度更加灵活、供水安全可靠的优点。为此,针对居民小区二次供水系统实际用水量规律,对全变频恒压供水设备的能效进行分析,同时与传统单变频对比,以期二次供水设备控制方式的选择提供参考。

## 1 变频恒压功耗的数学模型

### 1.1 调速比

将调速泵额定转速与下限转速分别设为 $n_0$ 和 $n_1$ ,任意转速 $n_i$ ( $n_i \in [n_1, n_0]$ )与额定转速 $n_0$ 的比值为调速比 $\alpha$ ,即 $\alpha = n_i/n_0$ ,则在任意转速 $n_i$ 时,水泵 $Q-H$ 曲线拟合式为:

$$H = \alpha^2 H_0 + \alpha A_1 Q + A_2 Q^2 \quad (1)$$

式中: $H$ 为水泵扬程, m;  $Q$ 为水泵流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $H_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 均为拟合常数。

水泵出口采用恒压控制时,系统设定供水压力为恒定值 $H_{\text{恒}}$ 。设任意时刻单泵出水量为 $Q_i$ ,则有:

$$\alpha_i^2 H_0 + \alpha_i A_1 Q_i + A_2 Q_i^2 = H_{\text{恒}} \quad (2)$$

即:

$$\alpha_i = \frac{-A_1 Q_i + \sqrt{A_1^2 Q_i^2 - 4H_0(A_2 Q_i^2 - H_{\text{恒}})}}{2H_0} \quad (3)$$

式中: $\alpha_i$ 为任意时刻单泵出水量 $Q_i$ 对应的单泵调速比。

恒压供水时宜采用同型号主泵,主泵宜设置2~

4台。以设置4台同型号主泵(3用1备)为例,分析单台调速泵的出水量 $Q_i$ 。若单泵恒压供水时最大出水量为 $Q_B$ ,当任意时刻用户用水量为 $Q_j$ 时,有:

① 系统采用传统单变频控制时,调速泵(仅1台)出水量 $Q_i$ 为:

$$Q_i = \begin{cases} Q_j, & 0 < Q_j \leq Q_B \\ Q_j - Q_B, & Q_B < Q_j \leq 2Q_B \\ Q_j - 2Q_B, & 2Q_B < Q_j \leq 3Q_B \end{cases} \quad (4)$$

② 系统采用全变频控制时,各泵等量同步(同步变频、出水量均等),单泵流量 $Q_i$ 为:

$$Q_i = \begin{cases} Q_j, & 0 < Q_j \leq Q_B \\ Q_j/2, & Q_B < Q_j \leq 2Q_B \\ Q_j/3, & 2Q_B < Q_j \leq 3Q_B \end{cases} \quad (5)$$

即,当需水量为 $0 \sim Q_B$ 时,由一台泵运行,当需水量为 $Q_B$ 时,单泵为工频运行;同理,当需水量为 $Q_B \sim 2Q_B$ 时,由2台泵运行,当需水量为 $2Q_B$ 时,2台泵均为工频运行;当需水量为 $2Q_B \sim 3Q_B$ 时,由3台泵运行,当需水量为 $3Q_B$ 时,3台泵均为工频运行<sup>[2]</sup>。

### 1.2 累计功耗

水泵在任意转速 $n_i$ 时,其 $Q-N$ 曲线拟合式为:

$$N = \alpha^3 N_0 + \alpha^2 B_1 Q + \alpha B_2 Q^2 \quad (6)$$

式中: $N$ 为水泵轴功率, kW;  $N_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 均为拟合常数。

结合式(4)~(6),当调速泵单泵出水量为 $Q_i$ 、调速比为 $\alpha_i$ 时,其轴功率为:

$$N_i = \alpha_i^3 N_0 + \alpha_i^2 B_1 Q_i + \alpha_i B_2 Q_i^2 \quad (7)$$

则各时段并联泵组累计运行电耗 $P$ 为:

① 系统采用传统单变频控制时,有:

$$P = P_{\text{工}} + \sum N_i \quad (8)$$

式中: $P_{\text{工}}$ 为工频泵累计运行总电耗, kW·h;  $\sum N_i$ 为调速泵累计运行电耗, kW·h。

② 系统采用全变频控制时,有:

$$P = m \sum N_i \quad (9)$$

式中: $m$ 为并联运行工作泵台数, $m=1,2,3$ 。

## 2 吨水百米扬程耗电量

用电量与功的关系为: $1\text{ kW}\cdot\text{h}=1\text{ kJ/s}\cdot 3\,600\text{ s}=3\,600\text{ kJ}=3\,600\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;水的容重为 $9.8\text{ kN/m}^3$ ,则有: $\frac{1\text{ kW}\cdot\text{h}}{9.8\text{ kN/m}^3}=\frac{3\,600}{9.8}\text{ m}^3\cdot\text{m}=367.35\text{ m}^3\cdot\text{m}$ ,其物理意义:在效率为100%时, $1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的电可将 $1\text{ m}^3$ 水垂直提升 $367.35\text{ m}^{[3]}$ 。因此,在效率为100%时, $0.272\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的电可将 $1\text{ m}^3$ 水垂直提升 $100\text{ m}$ ,即吨水百米扬程耗电量为 $0.272\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

## 3 居民小区二次供水泵房算例

### 3.1 算例背景

以西安某高校住宅区二次供水为例,该小区共有多层住宅建筑15栋,建筑最高为7层,居民734户,泵房按水池+变频调速(传统单变频)恒压供水。供水系统未进行分区,由一套供水系统直接加压后供给小区用户,小区基本信息如图1所示。

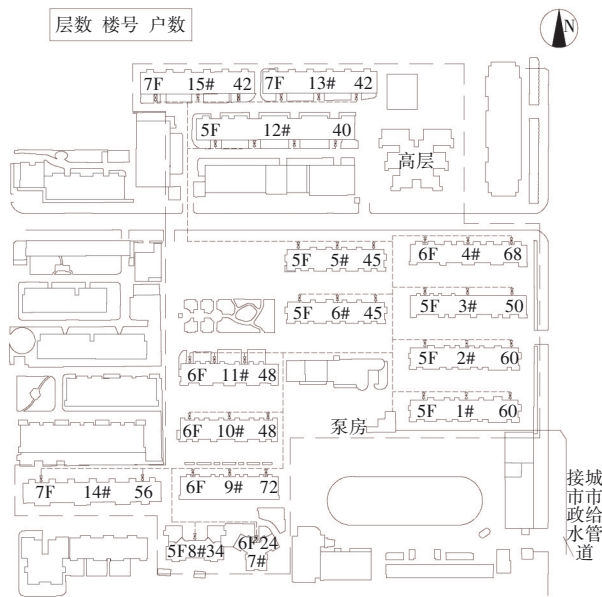


图1 小区供水平面

Fig.1 Plot of water supply

该小区装有物联网水表监测系统,安装于泵组出水管上的水表实时监测小区总用水量并反馈至小区节能监管平台。水表用水量数据反馈时间间隔为 $15\text{ min}$ ,根据监测数据,以最高日用水量变化为例进行统计分析。该小区日总用水量为 $323.76\text{ m}^3/\text{d}$ ,平均时用水量为 $13.49\text{ m}^3/\text{h}$ ,最高日 $15\text{ min}$ 用水量数据折算至小时用水量最大值为 $40.12\text{ m}^3/\text{h}$ 。

### 3.2 设备参数及选型合理性判断

该小区现采用4台CR15-6主泵(3用1备),水泵出口设定恒压 $63\text{ m}$ 供水。水泵性能参数见表1,单泵 $Q-H$ 曲线见图2。

表1 CR15-6水泵性能参数

Tab.1 CR15-6 pump performance parameters

| 水泵型号                                | 额定转速下 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ | 额定转速下 $H/\text{m}$ | 最高效率/% |
|-------------------------------------|--|--------------------|--------|
| CR15-6                              | 10                                       | 79                 | 72     |
|                                     | 17                                       | 66                 |        |
|                                     | 23                                       | 57                 |        |
| 注： 高效区采用水泵 $Q-H$ 特性曲线最高效率点的 10% 范围。 |  |                    |        |

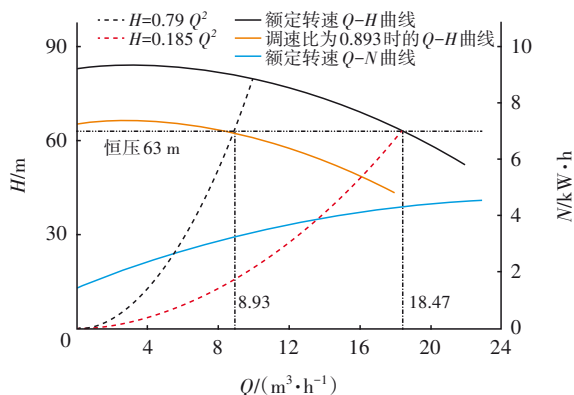


图2 CR15-6单泵  $Q-H$  曲线

Fig.2 CR15-6 single pump  $Q-H$  curve

如图2所示,CR15-6单泵在高效区的流量调节范围为 $8.93\sim 18.47\text{ m}^3/\text{h}$ 。通过点 $(8.93, 63)$ 和点 $(18.47, 63)$ 的等效率曲线其 $k$ 值分别为 $0.79(k_1)$ 、 $0.185(k_2)$ , $k_1/k_2 > 4$ ,满足水泵全变频控制条件<sup>[2]</sup>。

根据《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019),小区每户用水人数按3人计算,最高日用水量定额 $q_L$ 为 $140\text{ L}/(\text{人}\cdot\text{d})$ 时,变化系数 $K_b$ 取2.5,每户卫生器具用水当量数 $N_G$ 为4,用水时数 $T$ 为 $24\text{ h}$ ,则设计秒流量 $q_g$ 为 $52.91\text{ m}^3/\text{h}$ 。根据设备参数,当3台泵并联运行时流量范围为 $0\sim 55.41\text{ m}^3/\text{h}$ ,因此水泵选型符合设计秒流量。

小区最不利配水点为7层淋浴器,淋浴花洒距地面 $2.2\text{ m}$ ,楼层层高按 $3\text{ m}$ 计,则最不利配水点所需静水压 $H_1=3\times 6+2.2-(-3)=23.2\text{ m}$ ,所需最低工作压力 $H_2$ 取 $10\text{ m}$ ,住宅入户管上的水表水头损失 $H_3$ 取 $1\text{ m}$ ,计算管路的沿程与局部水头损失之和 $\Sigma h=1.3\times 22=28.6\text{ m}$ 。因此,给水系统所需水压 $H=H_1+H_2+H_3+\Sigma h=62.8\text{ m}$ ,水泵出口设定

压力值符合实际压力要求。综上计算,该小区泵选型合理。

### 3.3 泵组实际运行调度

根据 CR15-6 主泵参数,以 63 m 为恒压值,则 3 台主泵设计流量为 55.41 m<sup>3</sup>/h,以设计流量的 2% 为间隔取值并将其作为设备运行流量,采用式(3)~(9)计算泵组运行电耗并换算为吨水百米扬程能耗,绘制出该泵组实际流量与设计流量之比与吨水百米扬程能耗的关系曲线,如图 3 所示。

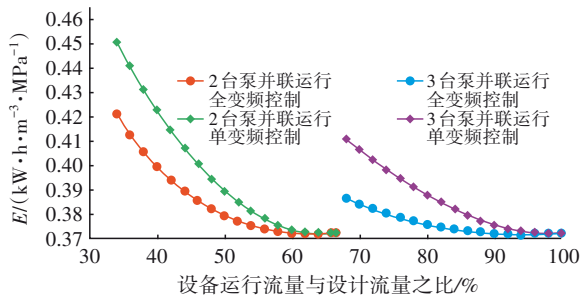


图 3 CR15-6 吨水百米扬程能耗计算曲线

Fig.3 CR15-6 energy consumption calculation curve of 100 m head per ton of water

由图 3 可知,当实际流量与设计流量之比 < 33.3% 时,单台泵运行,两种控制方式能耗无差别;当流量比为 33.3% ~ 66.6% 时,2 台泵运行,传统单变频能耗大于全变频能耗,随着流量比的增大,能耗差逐渐减小;当流量比为 66.6% 时,2 台水泵均为工频运行,两种控制方式能耗相等;当流量比为 66.6% ~ 100% 时,3 台泵并联运行,能耗变化规律与 2 台泵运行相似。

根据图 2,1 台泵、2 台泵、3 台泵的最大运行流量分别为 18.47、36.94、55.41 m<sup>3</sup>/h,结合小区实测用水规律,得出水泵实际运行调度情况,见图 4。

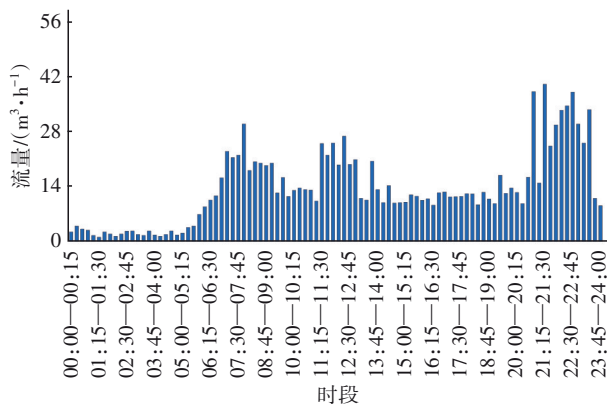


图 4 CR15-6 水泵并联运行调度情况

Fig.4 CR15-6 pump parallel operation scheduling

### 3.4 两种控制方式下主泵累计功耗对比

结合 CR15-6 水泵样本和式(1)、(6),当调速比为 1 时,其  $Q-H$  和  $Q-N$  曲线拟合表达式分别为:

$$H = -0.0856Q^2 + 0.4996Q + 82.974 \quad (10)$$

$$N = -0.0048Q^2 + 0.2449Q + 1.4452 \quad (11)$$

因单台泵运行(70 个 15 min 时段)二者无差别,故对 2 台泵和 3 台泵并联运行时的 26 个时段的全变频与传统单变频的功率进行重点分析,根据式(1)~(11),结合实际用水量曲线计算传统单变频和全变频控制下的调速泵调速比  $\alpha$ 、各时段并联泵组的运行电耗  $P$  和吨水百米扬程耗电量,然后计算出主泵运行累计能耗。传统单变频和全变频调速比与用水量变化趋势如图 5 所示。

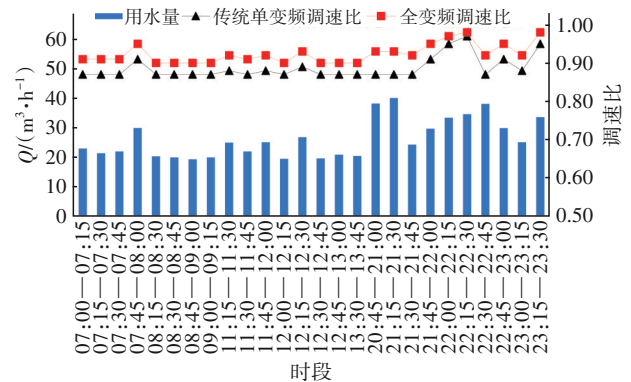


图 5 传统单变频和全变频调速比与用水量变化

Fig.5 Change of water consumption and speed regulation ratio of traditional single frequency and full frequency conversion

由图 5 可知,全变频调速比高于传统单变频。在未考虑电机功率因数与联轴器机械能转化效率时,传统单变频和全变频 2 台泵及 3 台泵并联运行的 26 个时段累计运行总电耗  $P$  分别为 43.81 和 41.97 kW·h,全变频比传统单变频节能 4.2%,吨水百米扬程耗电量分别为 0.4 和 0.39 kW·h。

### 3.5 全变频主泵节能率分析

以 21:15—21:30 时段流量(用水量为 40.12 m<sup>3</sup>/h)为例,根据式(3)~(9)可得传统单变频与全变频泵组运行工况,如图 6 所示。

在单变频控制方式下,该时段 3 台泵的泵效率分别为 71.7%、71.7%、41.89%,传统单变频耗电量 = 4.33 + 4.33 + 1.49 = 10.15 kW·h;在全变频控制方式下,3 台泵的泵效率均为 70.12%,全变频耗电量 = 3.22 × 3 = 9.66 kW·h。该时段内全变频比传统单变



变频节能4.83%。其他时段分析过程与该时段类似。

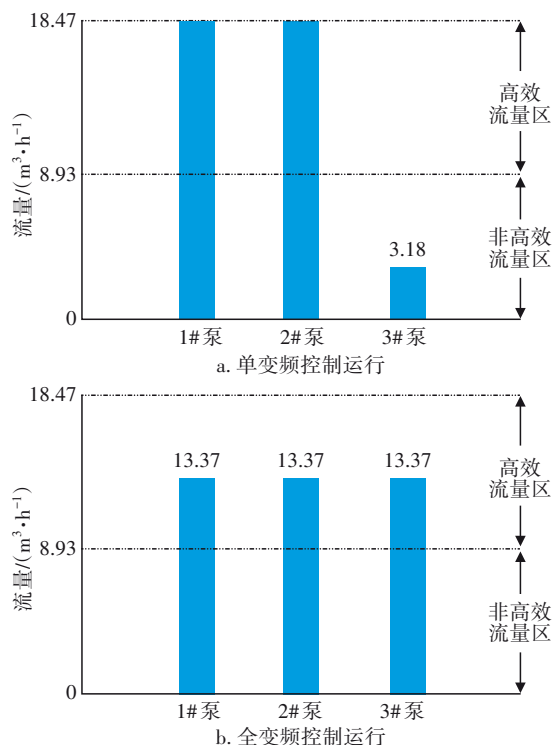


图6 泵组运行工况

Fig.6 Pump set operating conditions

研究算例中,当2台泵和3台泵并联运行时,传统单变频高效区流量分别为27.4~36.94 m³/h和45.87~55.41 m³/h,全变频高效区流量为8.93~55.41 m³/h。将图4中2台泵运行时的单变频调速泵的出水量数据进行排序,根据式(1)~(9)计算出全变频的节能率(见图7)。

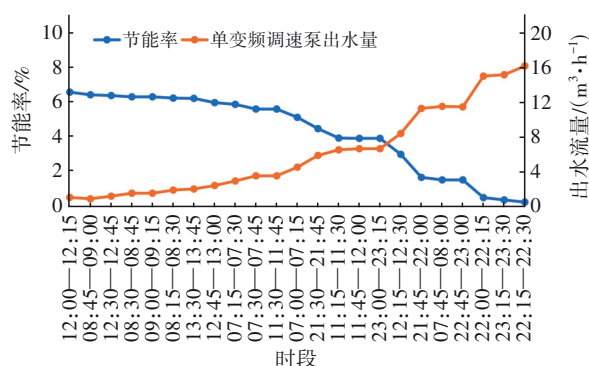


图7 全变频的节能率

Fig.7 Energy saving rate of full frequency conversion

由图7可知,全变频节能率随着单变频调速泵出水量的增加而减小,当传统单变频调速泵流量范为0~8.93 m³/h时,节能效果明显。当传统单变频与全变频都处在高效区时,全变频控制仍比传统单

变频节能,随着流量的增加,节能率逐渐减小,直到并联泵组全部工频运行时能耗重合。

#### 4 结论

① 针对GB/T 37892—2019提出的全变频恒压供水设备,结合实际算例,在理论计算工况条件下,对现有供水设备不同控制方式的能耗进行模拟分析,结果显示全变频比传统单变频节能4.8%。

② 2台泵和3台泵并联运行时,全变频控制比传统单变频的节能率随着流量的增加逐渐减小,在传统单变频低效区内,全变频节能明显,单变频处于高效区时,二者能耗相差较小。

③ 为使能耗分析更为精准,后续研究可采用时间间隔(步长)更小的水量数据,并计入电机效率、变频器效率和联轴器效率的影响。

致谢:本文得到了华南理工大学建筑设计研究院王峰教授级高工的指导。

#### 参考文献:

- [1] 沈亚辉. 全变频节能泵站运行经验总结[J]. 中国给水排水, 2014, 30(4): 77-79.  
SHEN Yahui. Summary on operation experience of pumping station with variable frequency speed control [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(4): 77-79 (in Chinese).
- [2] 柯圣华. 变频供水技术的优化研究[D]. 西安:长安大学, 2016.  
KE Shenghua. Research on Optimization of Frequency Conversion Water Supply Technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016 (in Chinese).
- [3] 王峰. 给水系统节能设计的判别方法——系统效率系数 $\eta_s$ 的提出[J]. 给水排水, 2011, 37(5): 109-111.  
WANG Feng. A discrimination method of water supply system energy-saving design: put forward the water supply system efficiency coefficient  $\eta_s$  [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(5): 109-111 (in Chinese).

作者简介:王彤(1965—),男,陕西汉中,人,硕士,教授,主要从事给水系统优化、长距离输水水锤防护等研究工作。

E-mail: wangt@chd.edu.cn

收稿日期:2020-12-23

修回日期:2021-02-23

(编辑:丁彩娟)