

文章编号: 1000-5862(2019)03-0221-04

# 基于 Flowmaster 软件的 恒压泵系统流量调控的能耗分析

黄思<sup>1</sup> 徐征南<sup>1</sup> 张聪<sup>1</sup> 王立<sup>2</sup> 陈丕辉<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省流体机械技术学会, 广东 广州 510430;  
3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 供水泵站通常采用阀门或变速(变频)调控来实现恒压供水, 2种方式都涉及管路特性曲线或泵性能曲线的变化, 这使得实际应用中能耗的定量计算比较繁琐。为此, 借助 Flowmaster 流动系统仿真软件, 以某恒压供水站为例, 分别计算阀门调控和变速调控方式下泵系统性能的变化, 并进行能耗对比分析, 研究了恒压泵系统的转速和流量调节范围, 为工程应用提供切实可行的计算方法。

关键词: 恒压泵系统; 流量调节; 能耗分析; Flowmaster

中图分类号: TH 3 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.03.01

## 0 引言

泵站根据用途大致可分为供水泵站和排水泵站2类。在许多场合, 供水泵站以保证恒压供水为主要目标。针对泵站恒压供水问题, 国内外有关学者相继开展了研究。在20世纪70年代, P. Lefferson<sup>[1]</sup>提出了恒定输出压力自适应控制的泵系统概念。随后 G. D. Gevigney 等<sup>[2]</sup>开发了适合定位灌溉的具有恒定压力工况的泵系统。为实现恒压供水, 若使用常规的调控阀门手段, 因阀门关小后的阻力增大, 使得泵系统运行效率降低、能耗较大, 而利用变频技术调控泵转速则基本没有额外能耗, 节能效果十分明显<sup>[3]</sup>。齐学义等<sup>[4]</sup>对于恒压供水系统给出了单片机控制的硬件与软件设计方案。赵勇飞等<sup>[5]</sup>对工业恒压供水泵组采用 PLC 与变频调速技术进行控制, 并引进了双重滤波和数字 PID 在线控制技术。李福顺<sup>[6]</sup>设计了一种基于模糊 PID 控制的变频恒压供水系统。谭宝等<sup>[7]</sup>对比了驱动一体控制器配置同步电机与 PLC 配置变频器和 3 相异步电机供水系统的节能效果。汤跃等<sup>[8]</sup>研究了恒压和变压 2 种供水方式的能耗, 发现恒压供水调速、调流范围较小, 变压供水调

速、调流范围则较宽。

无论采用阀门调控还是变频调控来实现恒压供水, 它们都涉及到管路特性曲线或泵性能曲线的变化, 这使得实际应用中工况改变和能耗的定量计算比较繁琐。为此, 借助 Flowmaster 流动系统仿真软件, 以某供水站为例, 分别计算阀门和变频 2 种恒压供水调控方式下泵系统性能差异并进行能耗对比分析, 为工程应用提供切实可行的计算方法。

## 1 恒压供水调控的能耗原理

### 1.1 阀门控制法

阀门控制是最简单常用的流量调控方法, 其实质是通过不改变泵特性曲线而改变管路特性曲线来改变供水流量, 以适应用户的需求。

如图 1 所示, 设用户所需流量从  $Q_A$  减到  $Q_B$ , 当关小阀门时, 管道阻力增大, 使得管路特性曲线变陡, 即由曲线②变为③, 扬程特性  $Q-H$  仍为  $n = n_0$  的曲线①, 扬程从  $H_A$  增大到  $H_B$ , 而实际管网此时只需在 C 点工作, 因此多出 BC 段扬程, 供水功率与面积  $S_{OEBF}$  成正比。由此可见流量调得越小, 多出的扬程和功耗越大。

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(21776095)资助项目。

作者简介: 黄思(1962-), 男, 广西南宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械的教学与科研工作。E-mail: huangsi@scut.edu.cn

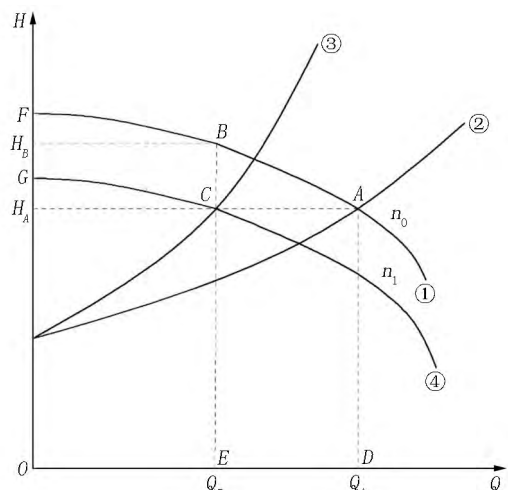


图1 恒压泵系统流量调控对比

## 1.2 转速控制法

恒压泵变频调速是近年来采用的一种流量调控方式,其实质是通过泵转速变化达到改变泵特性曲线来调节供水流量。目前水泵系统中绝大部分使用3相交流异步电机,根据交流电机的转速特性,电机转速 $n$ 可用如下公式<sup>[9-10]</sup>表示:

$$n = 60f(1-s)/p,$$

其中 $n$ 为电机转速,单位为 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f$ 为电源频率,单位为 $\text{Hz}$ ;  $s$ 为转差率,取值范围 $0.01 \sim 0.02$ ,单位为 $\text{Hz}$ ;  $p$ 为电机极对数。因此转速 $n$ 正比于电源频率 $f$ 。现实中变频调速就是通过调节电源频率实现电机转速的改变。此外,按水泵性能的相似定律,泵流量 $Q$ 、扬程 $H$ 和轴功率 $N$ 与转速 $n$ 分别有如下关系<sup>[11]</sup>:

$$Q \propto n, H \propto n^2, N \propto n^3.$$

在图1中仍以供水流量从 $Q_A$ 减到 $Q_B$ 为例,此时水泵转速从 $n_0$ 下调到 $n_1$ ,工况点只能在恒压线 $H = H_A$ 上平移,但扬程 $Q-H$ 曲线①向下移到曲线④,管路特性则由曲线②变为曲线③,故工况点移至点C,可见在流量减为 $Q_B$ 的同时,供水功率与面积 $S_{OECC}$ 成正比。显然该面积比 $S_{OEBF}$ 要小,同时也比阀门调控的情况减少了BC段扬程的浪费。

## 2 恒压供水 Flowmaster 计算

### 2.1 Flowmaster 计算原理

Flowmaster 是面向工程的1维流体传热系统仿真软件,广泛用于能源<sup>[12-13]</sup>、交通<sup>[14]</sup>、消防<sup>[15]</sup>和水利<sup>[16-17]</sup>等领域。与一般关注单体设备流动与换热特性的3维CFD软件不同,Flowmaster主要用于研究由泵、阀、管路、散热器等各种元件组成的整个系统性能,对系统中的各个环节进行压力、流量、温度、流

速等参数的计算,预测和分析系统的稳态或瞬态工作性能。由于该软件数据库中的各种模型数据已经过多次反复实验验证,故其仿真可靠性得到保证。

Flowmaster 采用线性化计算方法求解系统中的流动问题。在所建立的系统模型中,不同的元件有不同的端口节点数。Flowmaster 在各个元件相连的节点上建立质量流量的线性方程。以图2中3个端口的元件为例,各节点的质量流量方程组为

$$\begin{cases} \dot{m}_1 = A_1 p_1 + A_2 p_2 + A_3 p_3 + B_1, \\ \dot{m}_2 = A_4 p_1 + A_5 p_2 + A_6 p_3 + B_2, \\ \dot{m}_3 = A_7 p_1 + A_8 p_2 + A_9 p_3 + B_3, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\dot{m}_i$ 和 $p_i$ 为节点 $i$  ( $i=1, 2, 3$ )的流量和压力, $A_i$ 和 $B_i$ 为由单元几何输入参数计算得到的方程组系数。Flowmaster 根据已知的边界条件和初始条件求解方程组(1),得到各个节点的压力、流量、温度、流速等参数。

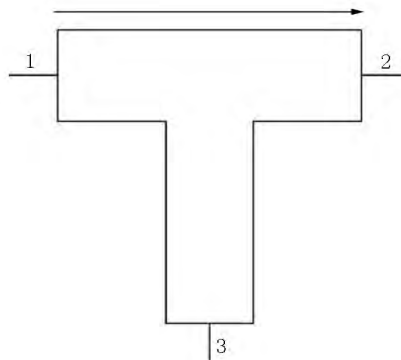
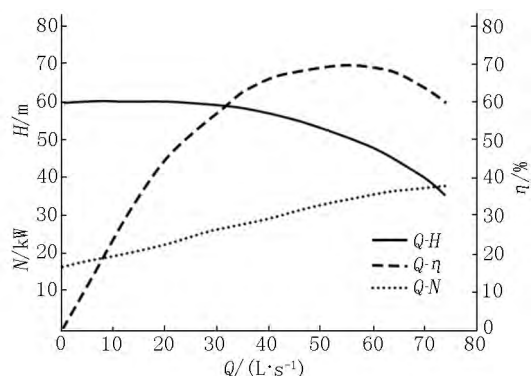
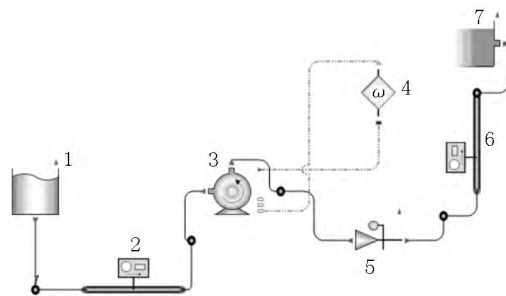


图2 Flowmaster 的单元计算原理图

### 2.2 Flowmaster 建模计算及分析

上述恒压供水调控方法在实际操作中做定量计算时比较繁琐,需要借助Flowmaster流动系统软件建模计算。现以某恒压供水泵站(泵出口压力 $0.35 \text{ MPa}$ )为例进行系统性能和能耗的计算,泵设计参数为:流量 $Q_d = 54 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,扬程 $H_d = 51 \text{ m}$ ,转速 $n_d = 2950 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,配套功率 $40 \text{ kW}$ ,其实测的性能曲线如图3所示。将图3的 $Q-H$ 和 $Q-N$ 性能曲线输入到Flowmaster泵数据库中,在Flowmaster中建立如图4所示的恒压泵系统计算模型,包括上游水源、下游蓄水池、离心泵、管路、阀门和调速控制器等元件。图5是使用Flowmaster计算得到的调速前后的泵性能曲线 $Q-H$ 和 $Q-\eta$ 。由图5可见,调速后的泵性能曲线 $Q-H$ 向左下方移动, $Q-\eta$ 曲线则向小流量平移,且高效区变窄。

图3 离心泵性能曲线 ( $n_d = 2950 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )

1. 上游水源; 2. 上游管路; 3. 离心泵; 4. 调速控制器; 5. 阀门;  
6. 下游管路; 7. 下游蓄水池。

图4 恒压泵系统的 Flowmaster 建模

此外, 当  $n = 2270 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  (变频器频率约为  $38.5 \text{ Hz}$ ) 时, 泵  $Q-H$  曲线与恒压线交点的流量值  $Q = 27 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当转速  $n < 2270 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 水泵的  $Q-H$  曲线与恒压线不再相交, 这表明恒压值 ( $0.35 \text{ MPa}$ ) 所对应的泵转速下限  $n_{\min} = 2270 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 流量下限  $Q_{\min} = 27 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。恒压供水的流量调控范围限于  $Q_{\min} < Q < Q_d$ , 调速范围限于  $n_{\min} < n < n_d$ 。

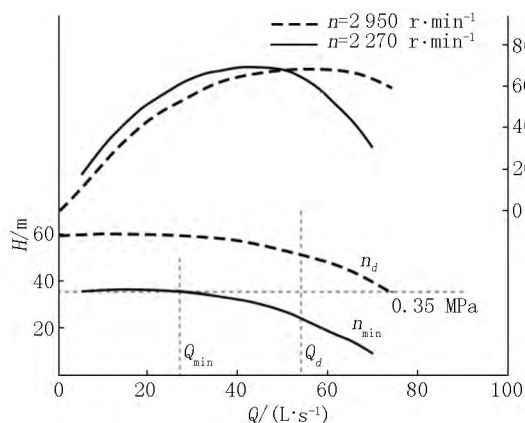


图5 恒压供水泵的转速和流量调控范围

图6给出2种流量调控方式下恒压供水泵的扬程  $H$  对比。由图6可见, 各个流量  $Q$  工况下的  $\Delta H$  是采用阀门调控法比转速调控法多出的扬程,  $Q$  越小  $\Delta H$  越大。

图7给出2种流量调控方式下恒压供水泵的效率  $\eta$  对比。由图7可见, 当  $Q$  越小时, 采用阀门调控

法使泵系统损失的效率  $\Delta\eta$  越多。

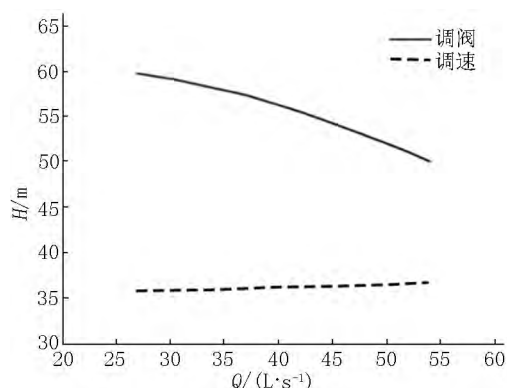


图6 2种调控方式下恒压供水泵的扬程对比

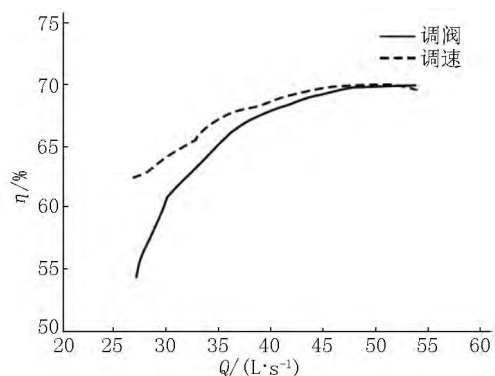


图7 2种调控方式下恒压供水泵的效率对比

图8给出2种流量调控方式下恒压供水泵的轴功率  $N$  对比。由图8可见, 采用转速调控法在各个流量  $Q$  工况下节省的功率  $\Delta N$  十分显著, 且2种调控方式的  $N$  曲线几乎平行, 这说明2种调控方式下恒压泵的轴功率差  $\Delta N$  基本不变。

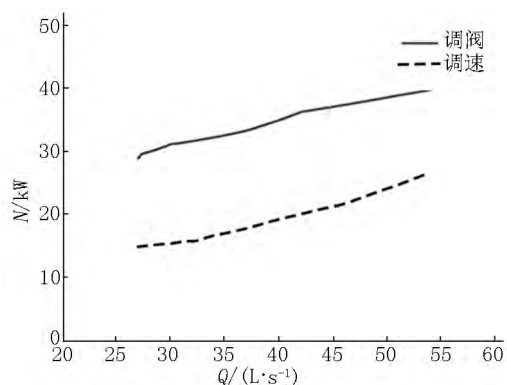


图8 2种调控方式下恒压供水泵的轴功率对比

### 3 结论

1) 应用 Flowmaster 流动系统仿真软件, 可定量预测计算恒压泵系统使用调阀或调速方式的供水性能和能耗, 为工程应用提供了一种切实可行的计算方法;

2) 对于任一恒压泵系统, 存在相应的泵转速下

限  $n_{\min}$  和流量下限  $Q_{\min}$ , 恒压供水系统的流量和泵转速调控范围分别为  $Q_{\min} < Q < Q_d$  及  $n_{\min} < n < n_d$ ;

3) 转速调控法在可调速范围内所节省的能耗十分显著. 随着流量工况调小, 采用阀门调控法比转速调控法多出的扬程  $\Delta H$  增大, 损失的效率  $\Delta \eta$  增多, 但轴功率差  $\Delta N$  基本不变.

## 4 参考文献

- [1] Lefferson P. Constant pressure fluid pump adaptive control system [J]. Industrial Electronics and Control Instrumentation IEEE Transactions on, 1977, 24(4): 313-316.
- [2] Gevigney G D, Forrat F. Constant pressure and flow solar pumping system [C]//Proceedings of the Ninth Biennial Congress of the International Solar Energy Society, 1986: 1690-1692.
- [3] Shashimenon E, Menon P. 泵和泵站实用技术指南 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- [4] 齐学义, 李铁, 冯俊豪, 等. 变频调速在泵站控制系统中的应用 [J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(4): 56-59.
- [5] 赵勇飞, 陈启卷. PLC 及变频调速技术在泵站恒压供水中的应用 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2004(4): 51-53.
- [6] 李福顺. 基于模糊 PID 控制策略的变频恒压供水系统的仿真研究 [J]. 机械与电子, 2016, 34(6): 52-55.
- [7] 谭宝, 刘建群. 智能楼宇中变频恒压供水控制系统的设计与实现 [J]. 自动化与仪表, 2017, 32(7): 45-48.
- [8] 汤跃, 尚亚波, 吴徐, 等. 变频调速恒压与变压供水的能耗分析 [J]. 排灌机械, 2007, 25(1): 45-49.
- [9] 屈维谦. 异步机调速原理及转速公式探讨 [J]. 电气传动自动化, 2005, 27(4): 9-13.
- [10] 时凤菊. 感应电动机的几种调速方法 [J]. 工业技术经济, 1996, 15(5): 137-139, 142.
- [11] 关醒凡. 现代泵理论与设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [12] Piyue Yupei. Study on improvement of capacity expansion of spent fuel pit cooling system in PWR nuclear power plants [C]//Proceedings of the 20th Pacific Basin Nuclear Conference, 2016: 267-274.
- [13] 张正楼, 张献娟, 刘玉璐. 基于 Flowmaster 的核电站循环冷却水系统泵出口阀关闭规律优化研究 [J]. 给水排水, 2015, 51(2): 121-124.
- [14] Kim K B, Choi K W, Lee K H, et al. Active coolant control strategies in automotive engines [J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(6): 767-772.
- [15] 黄思, 舒亚蓝, 何婧, 等. 基于 Flowmaster 的消防泵供水系统的模拟计算 [J]. 消防科学与技术, 2016, 35(12): 1711-1713.
- [16] 王福军, 白绵绵, 肖若富. Flowmaster 在泵站过渡过程分析中的应用 [J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(2): 144-148.
- [17] 牛月, 景浩, 成一雄, 等. 基于 Flowmaster 平台供水泵站稳态运行仿真模拟 [J]. 给水排水, 2014, 50(S1): 402-405.

## The Energy Consumption Analysis of Flow Control of Constant Pressure Pump System Based on Flowmaster Software

HUANG Si<sup>1</sup>, XU Zhengnan<sup>1</sup>, ZHANG Cong<sup>1</sup>, WANG Li<sup>2</sup>, CHEN Pihui<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Guangdong Province Fluid Mechanical Technical Institute, Guangzhou Guangdong 510430, China;

3. CCCC-FHDI Engineering Company Limited, Guangzhou Guangdong 510230, China)

**Abstract:** To achieve constant-pressure water supply, water stations usually adopt valve or variable-speed (frequency conversion) controls. Such kinds of operations involve changes in the pipe characteristic curves or the pump performance curves, and make the quantitative calculation of energy consumption in practical applications more complicated. In this study, a constant-pressure water-supply station is selected as the analysis object. By means of Flowmaster software, the performance changes of the pump system under the valve control and rotational speed control are calculated respectively and the comparison analysis of energy consumption is conducted. The adjustment ranges of rotational speeds and flows for the constant-pressure pump system are also studied, which provides a practical method for engineering applications.

**Key words:** constant-pressure pump system; flow control; energy consumption analysis; Flowmaster

(责任编辑: 王金莲)