

离心泵变压供水系统控制模型辨识的试验研究

汤 跃, 张新鹏^{*}, 黄志攀, 成 军

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘 要: 离心泵变压供水被认为是一种节能供水模式, 但由于对其控制模型的研究不够深入, 在水泵变工况运行时常常造成用户端水压不稳, 推广应用受到很大限制。为提高变压运行控制系统性能, 利用变频器、虚拟仪器搭建离心泵供水系统试验台, 编制 LabView 测控程序, 进行变工况下的变压和恒压模型辨识试验。根据各响应过程, 通过 MATLAB 系统辨识工具箱建立过程模型与理论模型比较, 并对分析相同阀门开度下和不同阀门开度下变压与恒压过程控制模型的参数和结构变化。结果表明随着离心泵工况改变, 变压供水控制模型是定结构的带延迟二阶模型, 参数具有较大幅度的变化, 其惯性、时变和时滞特性比恒压供水更大, 建议针对系统暂态性能改善设计具有 PID 特性的变参数控制器。

关键词: 离心泵, 控制, 模型, 阶跃响应, 系统辨识, 变压供水

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.032

中图分类号: TK05

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-07-0189-05

汤 跃, 张新鹏, 黄志攀, 等. 离心泵变压供水系统控制模型辨识的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 189-193.

Tang Yue, Zhang Xinpeng, Huang Zhipan, et al. Experimental study on control model of centrifugal pump variable-pressure water supply system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 189-193. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

国内对于变频变压供水运行机理的研究日益成熟, 节能效果明显^[1-5], 但由于系统控制无法满足运行要求, 在工程中却还很少应用。原因是水泵系统运行中的不确定性、非线性、大时滞等特性, 导致了其控制模型的复杂性, 给控制器的设计带来很大的困难^[6-8]。针对这一特性, 国内外专家学者利用理论分析法、阶跃辨识分析法等建立泵系统运行的控制模型^[9-10], 包括以供水流量为控制目标的自适应控制模型, 针对时变和非线性系统的神经网络模型以及鲁棒控制优化运行模型等^[11-15], 将扰动和负载的随机特性考虑进控制器设计中。这些建模方法都是建立在理论分析的基础上, 通过系统仿真具有较好的效果, 但是, 泵的实际运行往往产生较大的偏差, 根据这些模型设计的控制器无法满足控制系统性能要求, 对变压供水的实际应用产生很大的限制。

本文以阶跃响应系统辨识为基本原理, 对单泵供水系统在不同装置需求下进行阶跃响应试验, 并通过 MATLAB 系统辨识工具箱建立供水模型。比较分析各个

工况段的模型, 找出结构和参数的变化规律, 确定最优控制模型, 为供水系统控制器的设计提供依据, 促进供水系统节能技术的推广应用。

1 供水系统模型分析

国内提出的变压供水就是管网最不利点的恒压, 其机理是从恒压供水扩展而来^[16], 可分为压力上升过程和恒压过程。前者是一个惯性环节, 后者是一个纯滞后过程, 那么供水系统的模型可表示为^[17-18]:

$$G_1(s) = \frac{k_1}{T_1s+1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中, T_1 为供水系统的惯性时间常数, s ; k_1 为供水系统的增益; τ 为供水系统的时滞常数, s 。 s 为时间, s 。

变频器和电机可近似等效为时间常数为 T_2 的一阶惯性环节。可表示为

$$G_2(s) = \frac{k_2}{T_2s+1} \quad (2)$$

式中, T_2 为调速系统的惯性时间常数, s ; k_2 为调速系统的增益。

系统中其他控制和检测环节, 包括继电器控制转换、压力检测等环节的惯性时间和滞后时间与供水系统的时间常数相比可以忽略, 那么均可等效为比例环节, 其传递函数为

$$G_3(s) = k_3 \quad (3)$$

根据以上分析, 整个供水系统的模型为上述 3 个环节的串联模型

$$G(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-\tau s} \quad (4)$$

收稿日期: 2011-09-26 修订日期: 2012-02-14

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (50825902); 国家科技支撑计划 (2011BAF14B02)

作者简介: 汤 跃 (1959—), 男, 江苏镇江人, 研究员, 中国机械工程学高级会员, 主要从事农业节水设备及智能化和泵系统运行优化与节能策略研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。

Email: tomt@ujs.edu.cn

*通信作者: 张新鹏 (1984—), 男, 主要从事水泵系统运行优化与节能策略研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。

Email: zhang_xinpeng@163.com

式中, k 为系统的总增益, $k = k_1 \times k_2 \times k_3$ 。

T_1 由用户规模决定, 一般用户的数量越大, 即供水系统的所需水压值越大, 系统的惯性时间常数越大; T_2 与变频器加速时间常数和电机自身特性相关。系统的滞后时间 τ 由供水系统的最不利点决定, 它是由最不利点和用户的距离和供水系统的平均流速决定。当用户规模发生变化时, 模型参数也会发生改变。

控制模型是控制器设计的前提, 参数的变化规律对控制器的设计具有重要作用。供水系统的理论模型是阶跃响应试验模型辨识的根据, 对试验起到一定指导作用。

2 阶跃响应试验

2.1 试验装置

设计如图 1 的模拟供水系统水泵试验装置, P_1 为水泵的出口压力, 阀前压力 P_2 模拟供水系统中用户端的最不利点压力, 闸阀调节流量模拟改变用户的需水量。整个装置利用阀门调节泵的工况, 通过变频器输出频率控制电动机转速, 利用虚拟仪器作为数据采集系统的核心。

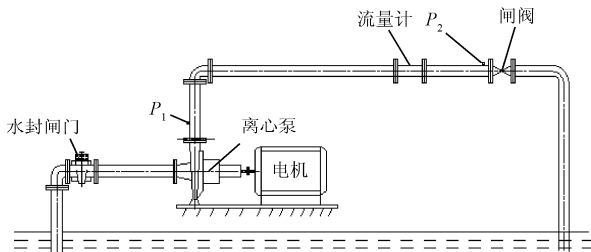
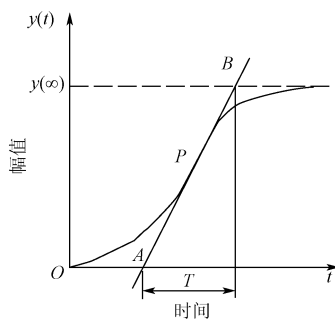


图 1 水泵试验装置图
Fig.1 Experimental setup of pump system

试验用泵额定流量 $15 \text{ m}^3/\text{h}$, 额定扬程 35 m ; 采用涡轮流量计测量流量, 压力传感器测量泵的进出口及模拟用户端 (阀前) 的压力, 数据采集利用 LabView 的 DAQ Assistant 通过 PXI-6251 数据采集卡完成各个信号物理通道的配置。

2.2 试验原理

阶跃响应是常用的模型辨识方法, 其原理是通过系统的阶跃响应曲线获得模型的结构和参数^[19-20], 如图 2 所示。



注: $y(\infty)$ 为响应终值, P 为响应曲线拐点, AB 为过 P 的响应曲线的切线, T 为等效惯性时间常数。

图 2 阶跃响应曲线图
Fig.2 Curve of step response

基本步骤是: 首先通过手动操作使过程工作在所需测试的稳定条件下, 稳定运行一段时间后, 快速改变过程的输入量, 并用记录仪或数据采集系统同时记录过程输入和输出的变化曲线; 经过一段时间后, 过程进入新的稳态, 试验结束后所得到的记录曲线就是过程的阶跃响应曲线。利用 MATLAB 系统辨识工具箱建立各个响应过程的模型。

2.3 试验方案

通过供水系统节能机理的分析, 为满足供水需求, 变压运行时变频器输出频率最低约为 30 Hz , 因此试验时的响应过程是 $30 \sim 50 \text{ Hz}$ 的频率范围。

试验步骤为:

- 1) 首先使阀门全开, 调节变频器的加减速时间均为 5 s , 输出频率为 50 Hz , 待管道充满水;
- 2) 泵的运行工况稳定一段时间后, 开始采集数据, 同时快速改变变频器的输出频率为 30 Hz , 待泵运行稳定后一段时间后停止记录并保存;
- 3) 再分别调节阀门开度 k 约为 80% 、 50% 、 40% , 重复步骤 1 和 2;
- 4) 调节变频器的加减速时间均为 10 s , 再重复步骤 1)、2)、3) 的试验过程。

3 试验结果分析

3.1 模型辨识

将试验所得数据预处理加载到 MATLAB 的 workspace, 再导入系统辨识工具箱, 选择过程模型进行建模得到如表 1、2 的模型传递函数。

表 1 恒压供水模型

Table 1 Control model of constant-pressure water supply			
阀门开度 $k/\%$	响应过程/Hz	传递函数	拟合度
100	30~50	$G(s) = \frac{3.38(1+4.42s)e^{-0.23s}}{(1+1.25s)(1+1.26s)}$	90.31
80	30~50	$G(s) = \frac{4.19(1+8.78s)e^{-0.28s}}{(1+1.05s)(1+3.11s)}$	93.12
50	30~50	$G(s) = \frac{4.79(1+7.3s)e^{-0.33s}}{(1+1.12s)(1+2.54s)}$	93.31
40	30~50	$G(s) = \frac{6.96(1+7.81s)e^{-0.17s}}{(1+2.0s)(1+1.99s)}$	93.22

表 2 变压供水模型

Table 2 Control model of variable-pressure water supply			
阀门开度 $k/\%$	响应过程/Hz	传递函数	拟合度
100	30~50	$G(s) = \frac{20.34(1+4.81s)e^{-0.29s}}{(1+1.27s)(1+1.27s)}$	93.09
80	30~50	$G(s) = \frac{33.33(1+10.87s)e^{-0.33s}}{(1+1.07s)(1+3.78s)}$	91.56
50	30~50	$G(s) = \frac{44.04(1+7.62s)e^{-0.3s}}{(1+1.18s)(1+2.56s)}$	93.16
40	30~50	$G(s) = \frac{61.96(1+7.38s)e^{-0.19s}}{(1+1.85s)(1+1.87s)}$	92.96

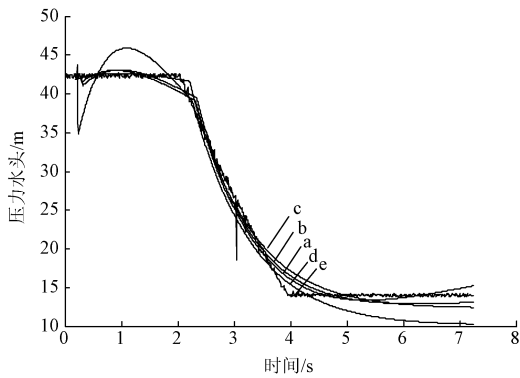
从辨识得到的变压供水和恒压供水各阀门开度下的传递函数看, 供水模型结构是不变的, 都是一个二阶带延迟的模型, 包括比例环节、2 个惯性环节、微分环节和延迟环节。同理论分析模型相比, 阶跃响应试验得到的

数据所建立的数学模型多了一个微分环节。由于微分环节在物理系统中不能单独存在，因此该环节没有实际的物理意义，只是对模型的修正，但是对系统的稳定性产生一定的影响。

而传递函数各环节的参数表明，恒压供水与变压供水具有相似的变化规律。比例系数随着用水量的增大而减小，模型的 2 个极点在大流量和小流量下接近甚至相同，而在 2 者之间呈现极点分离的趋势，因而模型稳态特性相似，但是，参数变化幅度有较大差别。如果利用实现恒压供水的 PID(proportion integration differentiation) 控制设计变压供水控制系统，只能满足个别工况段的要求，显然不符合供水系统工况变化大的实际情况。

3.2 模型的拟合度分析

不同的需求流量下，辨识得到不同参数的模型。将这些模型同时与相同的试验过程数据比较，如图 3、4。



注：图中 e 表示试验原始数据模型，a、b、c、d 分别表示阀门开度为 40%、50%、80%、100% 时试验辨识模型，下同。

图 3 恒压模型适应性比较图
Fig.3 Adaptability of constant-pressure models

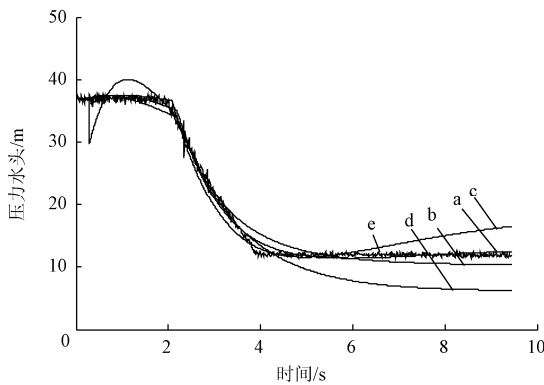


图 4 变压模型适应性比较图
Fig.4 Adaptability of variable-pressure models

从不同的模型对同一调节过程的适应性来看，恒压和变压供水模型拟合度都有一定的降低，但是变压供水的降幅更大。恒压供水其中 3 组模型对相同过程的拟合度都超过 90，最低为 80.47；而变压供水模型只与其对应的过程拟合度超过 90，对其他过程的适应性很差。

3.3 恒压和变压的最优模型

将辨识得到每个模型与各个过程进行比较，通过拟

合度的计算结果判断，适应性最好的模型是在阀门开度为 80%，即流量约为 15 m³/h 时调节过程所得模型。恒压供水和变压供水的最优模型对不同调节过程的拟合结果如图 5、6 所示。

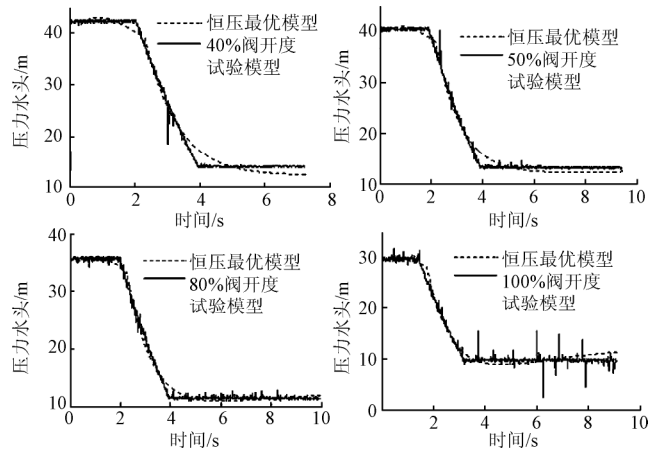


图 5 恒压供水最优模型拟合度
Fig.5 Best fits of constant-pressure optimum model

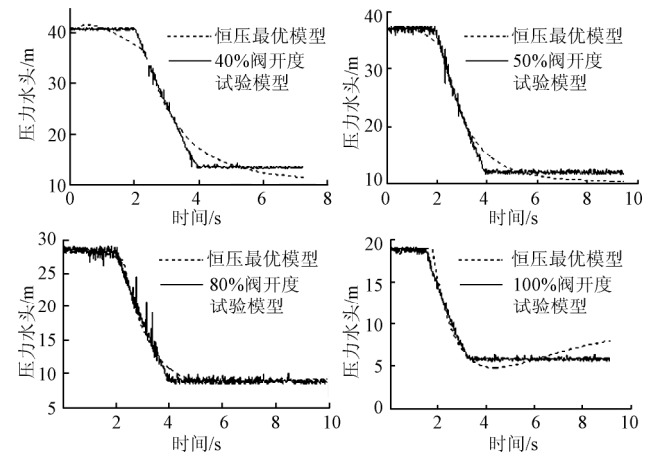


图 6 变压供水最优模型拟合度
Fig.6 Best fits of variable-pressure optimum model

从恒压供水最优模型对各个调节过程的适应性来看，拟合度最低的为 87.42，因此该最优模型可以代替其他调节过程的模型，即对于恒压供水调节过程可认为是不变模型的，那么在控制器设计时针对最优模型就能满足控制要求。

根据变压供水模型辨识的结果判断，对各个调节过程适应性最好的模型仍然是在阀门开度为 80% 时所得模型。但对各个调节过程的适应性远不及恒压供水，拟合度最低为 80.68，因此模型参数变化较大，不能用最优模型代替其他调节过程的模型。

3.4 模型应用分析

根据上述模型分析结果，利用最优模型进行单泵机组恒压供水的 PID 控制器参数设计，并在上述各个阀门开度下进行试验，运行结果如图 7 所示。同时根据变压分析结果为变压供水设计不同阀门开度下 PID 参数，试验运行结果如图 8 所示。

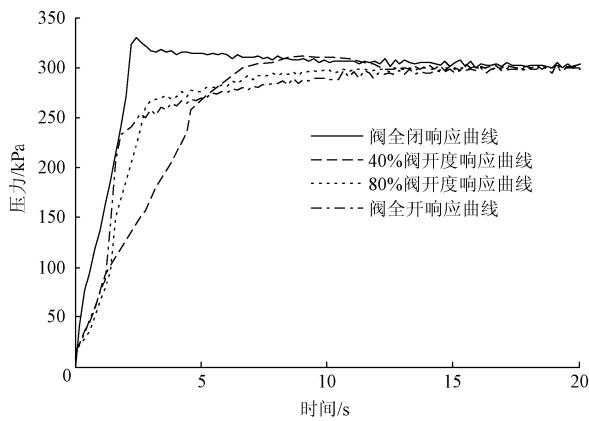


图 7 恒压闭环控制试验响应曲线

Fig.7 Experiment response curve of constant pressure closed-loop control

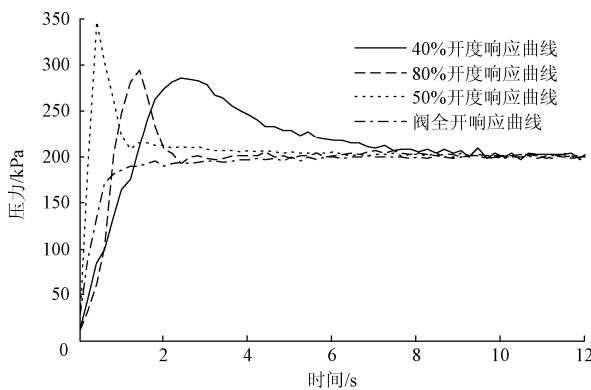


图 8 变参数 PID 变压控制响应曲线

Fig.8 Response curve of variable-pressure control with variable-parameter PID

恒压运行响应曲线表明, 在小流量下最大超调量为 13.3%, 调节时间约为 10 s, 稳态误差在 1%以内。整体控制性能优良, 控制过程是在定参数下实现。而对于变压供水控制, 根据阀门开度设计相应的不同 PID 参数, 从响应曲线可以看出, 系统最大超调量为 75%, 明显偏高, 稳态性能良好, 因此针对系统超调量过大的问题进行控制器设计是进一步的研究。

4 结 论

1) 随着离心泵工况的改变, 恒压供水可根据最优线性模型设计控制器, 而变压供水模型参数的变化比起恒压更大, 其系统惯性、时变和时滞特性更明显。不同的模型对同一响应过程的适应性及最优模型对不同响应过程的适应性都较差, 针对最优模型设计固定参数的 PID 控制已不能满足变压供水系统的控制要求。

2) 变压供水模型结构是定结构的带延迟二阶模型, 参数变化趋势与恒压供水具有一定的相似性。根据恒变压供水模型的异同分析, 建议变压供水控制利用 PID 良好的稳态控制性能, 针对系统暂态性能的改善设计具有 PID 特性的变参数控制器。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
Tang Yue, Shang Yabo, Wu Xu, et al. Energy consumption analysis on constant-pressure variable-frequency water supply and variable-pressure variable-frequency water supply[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(1): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王乐勤, 吴大转, 李江云. 大型中开式离心泵变频调速节能研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(3): 49—51, 75.
Wang Leqin, Wu Dazhuan, Li Jiangyun. Study on frequency control of large-scale centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(3): 49—51, 75. (in Chinese with English abstract)
- [3] 汤跃, 秦武轩, 袁寿其. 基于变工况运行的泵能耗指标计算方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 46—49.
Tang Yue, Qin Wuxuan, Yuan Shouqi. Method to calculate the energy consumption index of pump operation under variable working conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 46—49. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陆晓烽, 王建中, 鲁仁泉. 城市排水泵站系统节能技术研究[J]. 中国水运, 2007, 7(10): 130—131.
Lu Xiaofeng, Wang Jianzhong, Lu Renquan. The research of energy-saving in urban drainage pumping system[J]. China Water Transport, 2007, 7(10): 130—131. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马志毅. 变频泵供水系统的运行效率探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(6): 79—83.
Ma Zhiyi. Discussion on the operating efficiency of water supply system for frequency conversion pumps[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2006, 17(6): 79—83. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郎朗, 崔祎, 陈跃东. 用模糊控制和变频调速实现恒压供水[J]. 电子科技大学学报: 社会科学版, 2004, 33(1): 79—82.
Lang Lang, Cui Yi, Chen Yuedong. Implement of water supply with constant pressure by fuzzy controller and variable frequency variable speed drive system[J]. Journal of UEST of China, 2004, 33(1): 79—82. (in Chinese with English abstract)
- [7] Peric N, Petrovic I, Magzan A. Modelling and control of water supply systems[C]//IFAC Large Scale Systems, 1998(3): 543—548.
- [8] 闫军, 康会峰, 张伟, 等. 模糊控制在变频调速恒压供水系统中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2009(12): 43—45.
Yan Jun, Kang Huifeng, Zhang Wei, et al. The application research of the fuzzy control technology in the variable speed-frequency water supply system with constant pressure [J]. Machinery Design and Manufacture, 2009(12): 43—45. (in Chinese with English abstract)
- [9] Chang Weider. Nonlinear system identification and control using a real-coded genetic algorithm[J]. Applied Mathematical

- Modelling, 2007, 31(3): 541—550.
- [10] 王乐勤, 王循明. 离心泵变频调速变压供水系统设计模型及求解[J]. 流体机械, 2003, 31(9): 15—17.
Wang Leqin, Wang Xunming. Design of variable-pressure and frequency-conversion for centrifugal-pump water supply system and the calculation for optimized model[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(9): 15—17. (in Chinese with English abstract)
- [11] Rojek I. Neural Networks as Prediction Models for Water Intake in Water Supply System[C]//ICAISC 2008: 1109—1119.
- [12] Lima J, Ruano A. Neuro-genetic PID autotuning: time invariant case[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2000, 51(3): 287—300.
- [13] Elbelkacemi M, Lachhab A, Limouri M, et al. Adaptive control of a water supply system[J]. Control Engineering Practice, 2001(9): 343—349.
- [14] 马佐群, 赵娥君, 陆培庆. 冷却泵站节能控制系统的研究试验[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 187—190.
Ma Junzuo, Zhao Ejun, Lu Peiqing. Test study on energy-saving control system of cooling pump station[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(3): 187—190. (in Chinese with English abstract)
- [15] 魏道联, 魏乐安. 末端控制分时变压变量供水技术[J]. 中国给水排水, 2009, 25(10): 87—89.
Wei Daolian, Wei Lean. Water supply technology with time-sharing variable pressure and variable flow in terminal control[J]. China Water and Wastewater, 2009, 25(10): 87—89. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王柏林, 李训铭. 变频调速泵供水系统分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1995, 23(2): 104—106.
Wang Bolin, Li Xunming. Analysis of water supply of variable-frequency pump[J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 1995, 23(2): 104—106. (in Chinese with English abstract)
- [17] Eker I, Kara T. Operation and control of a water supply system[J]. ISA Transactions, 2003, 42(3): 461—473.
- [18] 丁周伟. 泵站恒压供水系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 6—8.
Ding Zhouwei. Design and Implement of the Constant Pressure Water Supply Systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 6—8. (in Chinese with English abstract)
- [19] 骆寅. 水泵系统变压节能运行机理及其控策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009: 46—48.
Luo Yin. Study on Mechanism of the Variable Pressure Operation and the Energy-Saving Control Strategy in Pump System[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009: 46—48. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李亚峰, 李清雪, 吴永强. 水泵及水泵站[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 58—77.

Experimental study on control model of centrifugal pump variable-pressure water supply system

Tang Yue, Zhang Xinpeng*, Huang Zhipan, Cheng Jun

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Variable-pressure water supply is considered to be a good operation mode to save energy. But lacking enough study on the control model results in pressure fluctuation at user side, which will restrict variable-pressure water supply for application and popularization. To improve the control quality, a step response experiment rig of water-supply system was set up based on virtual instrument and frequency converter. A LabVIEW test program was compiled to carry out the step response experiment at different openings of valve. And then process models were constructed with system identification toolbox of Matlab according to experiment data. Contrasting the theoretical and experimental models, variations among different processes were analyzed from vertical and horizontal aspects. The results showed that the variable-pressure operation had a similar variation trend in structure and parameters, and it also had more obvious inertia, time varying and hysteretic nature. So the transient state performance of the variable-pressure water supply system should be considered for design of variable-parameter controller with PID.

Key words: centrifugal pump, control, models, system identification, step response, variable-pressure water supply