

PID 控制的泵供水系统仿真实验

李 红, 郑 翎, 秦武轩

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为了进行泵供水系统试验, 通过建立泵供水系统基本结构和各环节的传递函数, 组成系统动态结构图, 在 MATLAB Simulink 下进行仿真试验以观察系统输出响应。使用稳定边界法、根轨迹超前校正法和直接设置比例 - 积分 - 微分 (PID) 参数 3 种方法进行控制器设计。通过仿真观察泵供水系统的输出特性, 比较并找出合适的控制器设计方法。通过仿真观察输出响应得到稳定边界法和根轨迹超前校正法不适合调节泵供水系统。而采用直接设置 PID 参数的方法, 利用 MATLAB 的仿真集成环境 Simulink 设置修改 PID 参数, 选择其中一组较好的 PID 参数, 使泵供水系统得到了满意的输出响应。仿真结果为搭建试验平台提供了理论基础依据。

关键词: 泵供水系统; PID; MATLAB 仿真; 传递函数; 输出响应

中图分类号: TU991.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-6254(2008)04-0048-04

Simulation of water supply system based on PID control

LI Hong, ZHENG Ying, QIN Wu-xuan

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

Abstract: In order to implement water supply system experiments, the basic structure of water supply system and corresponding modules transfer functions were established to constitute dynamic block diagram. Output response in MATLAB simulation integrated environment Simulink was simulated. Stable boundary method, lead compensator based on root locus method and designing PID para-meters method were used to design the controller. Appropriate controller design method was found by observing system output characteristic. It was concluded that PID stable boundary method and lead compensator based on root locus method are not suitable to regulate water supply system; whereas the method of designing PID parameters can directly modify the parameters in Simulink to find a suitable set of PID parameters which give satisfying output response of the system. The simulation results provide theoretical basis for building experimental platform.

Key words: water supply system for pumps; PID; MATLAB simulation; transfer function; output response

研究泵供水系统优化节能问题是供水领域的热点。供水系统通过变频控制达到节能目的。泵供水系统进行恒压变频或变压变频控制时^[1,2], 都必须稳定运行并具有快速调节的能力, 使输出水压快速稳定地达到给定值。若系统输出响应曲线满足性能指

标并且系统的稳态性能良好, 则泵供水系统可以进行现场试验。

在泵供水系统试验之前进行仿真试验是很重要的环节。目前相关研究都注重于系统优化调度的建模求解方法上^[3,4], 关于泵供水系统的仿真相对较

收稿日期: 2008-03-03

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2007706)

作者简介: 李 红(1967—), 女, 江苏泰州人, 研究员(hli@ujs.edu.cn), 主要从事新型节水灌溉设备及纸浆泵设计的研究。

郑 翎(1984—), 女, 浙江丽水人, 硕士研究生(zhengyingzky@163.com), 主要从事泵站优化节能技术和控制的研究。

少。为此通过建立系统各环节传递函数和系统动态结构图，并设计控制器，对系统进行仿真。通过仿真选择合适的控制器，使泵供水系统可以快速调节、稳定运行，具有良好的稳态性能。

1 泵供水系统结构的确定

1.1 泵供水系统的结构

泵供水系统的基本结构如图 1 所示。水压传感器检测的泵出口水压与给定值比较产生偏差信号，经控制器调节后产生相应控制信号控制变频器的频率。变频器控制电机转速，使水压值位于泵供水系统给定值的允许误差范围内。

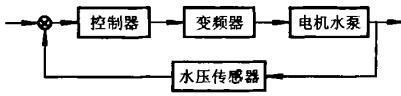


图 1 泵供水系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of water supply system

1.2 泵供水系统各环节的传递函数

变频器的传递函数在工程实践中可设定为一个小惯性环节^[5]，变频器环节可用以下传递函数描述^[5]

$$G(s) = \frac{\omega_1(s)}{U(s)} = \frac{k}{1 + Ts} \quad (1)$$

式中 ω_1 为变频器输出角频率； U 为变频器的输入电压； $\omega_1(s)$ ， $U(s)$ 分别为 ω_1 ， U 的拉普拉斯变换； s 为复变量； T 为常数，一般为几十至几百； k 为比例系数， $k = \omega_1/U$ 。

异步电机的传递函数可以描述为^[6]

$$\frac{\omega(s)}{\omega_1(s)} = \frac{K_d}{1 + T_d s} \quad (2)$$

式中 ω 为转子角速度； $\omega(s)$ 为 ω 的拉普拉斯变换； T_d 为常数，其中

$$K_d = \frac{iK_0}{J}$$

$$K_0 = \frac{i}{R_2} \times \left(\frac{U_{10}}{\omega_{10}} \right)^2$$

$$T_d = \frac{D + iK_0 + K_m}{J}$$

式中 i 为极对数； J 为转动惯量； U_{10}, ω_{10} 分别为定子电源的电压和角频率在静态工作点上的值； R_2 为折算到定子侧的转子电阻值； D 为摩擦系数； K_m 为常数。

水泵管道环节用下列传递函数描述^[6]

$$\frac{p(s)}{\omega(s)} = \frac{K_b - K_f s}{1 + T_b s} \quad (3)$$

式中 p 为水压； $p(s), \omega(s)$ 分别为 p, ω 的拉普拉斯变换； T_b 为表征水流惯性的时间常数； K_b 为常数； K_f 为表征水流“反调节”作用的微分系数。

2 控制器设计方法

2.1 未校正前系统的输出特性

对各环节传递函数参数给定具体数值进行仿真，本系统设置如下：

$$\frac{\omega_1(s)}{U(s)} = \frac{5}{1 + 0.5s}$$

$$\frac{\omega(s)}{\omega_1(s)} = \frac{0.3}{1 + 0.4s}$$

$$\frac{p(s)}{\omega(s)} = \frac{1 - s}{1 + 10s}$$

设定供水压力给定值为 1 MPa，输出是水压测量值。泵供水系统在没有控制器调节时的响应如图 2 所示。

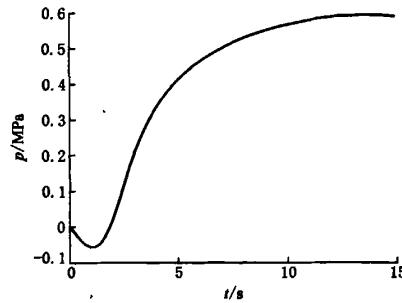


图 2 泵供水系统无控制器调节时的输出响应

Fig. 2 Step response of water supply system without PID

由图 2 可知，系统最终稳定，输出水压稳态值为 0.6 MPa，但是稳态误差 e_{ss} 为 0.4 MPa。这说明系统的稳态性能较差。要使系统具有良好的稳态性能，需增加一个控制器调节以满足要求。

2.2 稳定边界法和根轨迹超前校正法

实际控制系统中选用 PID(比例 - 积分 - 微分) 控制较多，一些商家供应 PID 软件包和硬件模块^[7,8]。泵供水系统可以选择 PID 控制。常用的基于经验公式的 PID 调节器设计方法有动态特性参数法 (Ziegler - Nichols 整定公式)，Cohen - Coon 整定公式法和稳定边界法等^[9]。控制法也可选择根轨迹超前校正法。稳定边界法设计 PID 调节器是利用系统稳定性理论，确定系统闭环根轨迹与复平面 $j\omega$ 轴的

交点,求出交点的振荡角频率 ω_m 和对应的系统增益 K_m ,PID 调节器参数的整定由经验公式得出^[9]:

$$\text{PID 调节: } K_p = 0.6 K_m \quad T_I = 0.50 \frac{2\pi}{\omega_m}$$

$$T_D = 0.125 \frac{2\pi}{\omega_m}$$

式中 K_p 为比例系数; T_I 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数.

PID 控制器的传递函数为

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

通过仿真得出图 3 所示的输出响应. 由图 3 可知, 虽然系统最终稳定, 但输出曲线开始时不光滑且超调量较大, 因此该方法不能很好调节此供水系统.

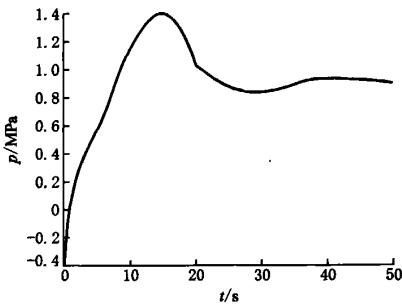


图 3 稳定边界法的输出响应

Fig. 3 Step response by stable boundary method

根轨迹超前校正法是确定系统的希望极点使校正后的系统根轨迹通过期望主导极点并满足该点的稳态增益. 设系统输出响应的超调量 $\sigma\% \leq 30\%$, 调节时间 $t_s \leq 0.8 s$, 可求得期望主导极点为 $-4 + 9.1652i$ 和 $-4 - 9.1652i$, 利用相关程序^[10] 可以得到校正器传递函数及加上超前校正设计环节的系统输出响应. 该输出响应曲线如图 4 所示.

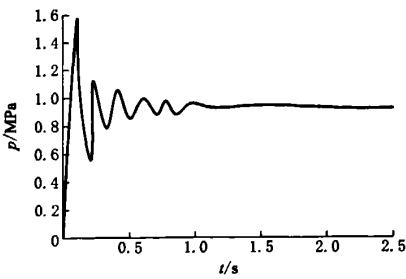


图 4 根轨迹超前校正法的输出响应

Fig. 4 Step response by lead compensator based on root locus method

输出响应曲线虽然最终达到稳定, 但在最初时

段振荡剧烈. 系统不能满足设计要求. 根轨迹超前校正法不能使系统具有良好的性能.

2.3 结果分析

由图 3、图 4 可见上述两种方法并不能使系统具有较好的输出响应, 这可能是由于泵供水系统为非最小相位系统, 传统方法不一定适用. 未校正前的系统是稳定的, 只是稳态性能不好, 稳态误差大, 不能跟踪输入信号. 稳定边界法和根轨迹超前校正法一般用于校正不稳定系统. 采取直接设置 PID 参数法进行仿真, 观察输出响应. 通过 Simulink 环境, 根据 PID 规律经验和仿真结果进行 PID 参数的修改, 使系统得到较满意的输出响应.

3 PID 参数设置及系统仿真

3.1 Simulink 环境仿真及 PID 参数设置

用 Simulink 创建系统模型并对系统线性化模型进行仿真, 在 Simulink 环境下改变 PID 参数, 通过仿真观察输出响应确定 PID 参数值. 增加比例控制器的比例系数可以减小系统稳态误差, 提高精度, 但系统相对稳定性降低; 积分控制器可提高系统的稳态性能, 但使系统相对稳定性变差; 微分控制器能改善系统瞬态特性并有助于增加系统稳定性^[10]. 为了提高泵供水系统的稳态性能, 加上比例-积分-微分 (PID) 控制器以减小稳态误差使系统稳定.

经过仿真试验观察系统输出响应得到以下结论: 改变比例环节 P, 积分微分 (ID) 环节不变, 系统在响应开始时会振荡, 但稳态性能较好, 随着比例系数的增大, 开始时段的振荡也增大. 比例系数继续增大到一定值时系统变得不稳定. 改变微分环节 D, 比例积分 (PI) 环节不变时, 系统在微分时间常数较小时有较好的稳态性能但响应曲线在开始时不光滑, 而且随着微分时间常数增大到一定值时系统变得不稳定. 当比例微分 (PD) 环节不变时, 改变积分环节 I, 积分时间常数越大, 超调量 $\sigma\%$ 越小, 调整时间 t_s 越长. 因此选取较小的比例系数, 较小的微分时间常数, 合适的积分时间常数作为系统的 PID 参数.

3.2 仿真结果

通过改变 PID 参数得到不同的输出响应, 选取其中具有典型输出响应的 PID 参数设置, 比较不同 PID 参数的输出响应如表 1 所示.

由仿真和表 1 得出较好的 PID 设置为 $1 + 1/(11s) + s$, 以此作为泵供水系统的 PID 参数设置. 则泵供水系统 Simulink 动态结构图如图 5 所示.

表 1 不同 PID 参数的输出响应比较

Tab. 1 Comparison of output responses with different PID parameters

比例环节	积分环节	微分环节	输出响应
1	$1/(5s)$	s	$\sigma = 14.5\%$, $t_s = 28.8$ s
1	$1/(10s)$	s	$\sigma = 0.516\%$, $t_s = 20.9$ s
1	$1/(11s)$	s	无超调, $t_s = 25.9$ s
1	$1/(12s)$	s	无超调, $t_s = 31.3$ s

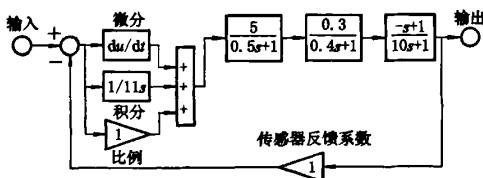


图 5 泵供水系统的 Simulink 动态结构图

Fig. 5 Water supply system simulink dynamic block diagram

设定供水压力给定值为 1 MPa. 输出是水压测量值. 通过仿真得到输出响应曲线如图 6 所示. 系统输出响应不存在超调, 稳态误差 e_{ss} 为 0. 仿真表明泵供水系统的瞬态和稳态特性都较好并且系统稳定.

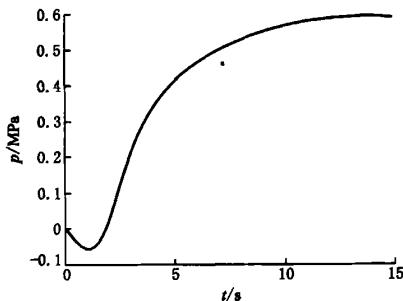


图 6 泵供水系统的输出响应

Fig. 6 Step response of water supply system

4 结 论

选择合适的 PID 控制器后系统输出响应曲线能满足性能指标, 系统具有较好的稳态性能. 泵供水系统是一个非最小相位系统, 用稳定边界法和根轨迹超前校正法设计控制器都不能使系统得到满意的输出响应. 通过直接设置 PID 参数进行仿真, 将比例系数和微分时间常数都置为 1 并调节积分时间常数, 以设置 PID 控制器, 能得到较理想的仿真结果.

参考文献(References)

- [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 Ya-bo, 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)
- [2] 汤 跃, 袁寿其, 李 红, 等. 自来水厂供水泵性能在线检测方法的研究 [J]. 排灌机械, 2005, 23(2): 42–44.
TANG Yue, YUAN Shou-qi, LI Hong, et al. The study of online measurement method for pump in waterworks [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(2): 42–44. (in Chinese)
- [3] Benjamín B, Christian V L, Aldo S. Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies [J]. *Advances in Engineering Software*, 2005, 36(1): 39–47.
- [4] Lopez I M, Devi P T, Paechter B. Multi-objective optimisation of the pump scheduling problem using SPEA2 [J]. *The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2005, 1: 435–442.
- [5] 彭鞍虹. 通用变频器异步电动机的传递函数 [J]. 鞍山钢铁学院学报, 2000, 23(6): 447–449.
PENG An-hong. Transmitting function of inverter induction motor [J]. *Journal of Anshan Institute of Iron and Steel Technology*, 2000, 23(6): 447–449. (in Chinese)
- [6] 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 Bo-lin, LI Xun-min. Analysis on variable-frequency variable-speed pumps in water supply system [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition*, 1995, 23(2): 104–106. (in Chinese)
- [7] Yun L, Kiam H A, Gregory C Y. Patents, software, and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art [J]. *Control Systems Magazine, IEEE*, 2006, 26(1): 42–54.
- [8] Stuart B. The past of pid controllers [J]. *Annual Reviews in Control*, 2001, 25: 43–53.
- [9] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 355–377.
- [10] 庞国仲. 自动控制原理 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998: 292–293.