

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.08.005

带位置反馈的数字式比例方向阀放大器研究*

陈飞飞¹, 徐 辉², 王世杰², 金 波², 张璐璐²

(1. 宁波华液机器制造有限公司, 浙江 宁波 315131;

2. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对比例控制放大器的发展现状以及比例方向阀的控制需求,对数字式比例方向阀放大器控制原理进行了分析,建立了比例方向阀控制系统的数学模型,提出了一种基于 ARM7 微控制器和反接卸荷式功率驱动电路的数字式比例放大器。借助 Visual C++ 和 ADS1.2 集成开发环境,对比例放大器软件系统进行了开发,设计了上位机人机界面,实现了对比例方向阀的程序控制和闭环控制。对比例放大器各环 PID 参数进行了整定,利用电液比例实验与调试平台对比例方向阀系统阶跃响应和正弦波信号响应进行了测试实验。实验结果表明,系统阶跃响应调整时间较短,响应频宽较大,表现出了良好的稳定性和动态性能。

关键词:数字式比例放大器;比例方向阀系统数学模型;ARM;反接卸荷式功率驱动电路;人机界面

中图分类号:TH138.52⁺3;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)08-0939-06

Digital amplifier for proportional directional valve with position feedback

CHEN Fei-fei¹, XU Hui², WANG Shi-jie², JIN Bo², ZHANG Lu-lu²

(1. Ningbo HOYEA Machinery Manufacture Co., Ltd., Ningbo 315131, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the development status of the amplifier for proportional valve and the control requirement of proportional directional valve, the control principle of digital amplifier for proportional directional valve(DAPDV) was analyzed and the system model of proportional directional valve was established. After the theoretical analysis, a DAPDV based on ARM7 micro-controller and the technology of the inverse-relief power driver circuit was implemented. With the aid of Visual C++ and ADS1.2 integrated development environment, the software system of the proportional amplifier was developed. The human-machine interface of host computer was designed, and the program control and close loop control of the proportional valve was realized. After determining the PID parameters of the proportional amplifier, the step response and sine wave signal response of the proportional directional valve system were tested on the electro-hydraulic proportional experiment rig. The results indicate that the system setting time for step response is short, the frequency response bandwidth is enough, and the designed proportional amplifier has good stability and dynamic performance.

Key words: digital proportional amplifier; mathematical model of proportional directional valve system; ARM; inverse-relief power driver circuit; human-machine interface

0 引 言

电液比例控制技术(EHPCT)尽管研究起步较晚,

但发展迅速并得到广泛应用。比例放大器是电液比例控制系统(EHPCS)的重要组成部分^[1]。比例阀放大器通过为电-机械转换器提供特定性能电流,来实现对比例阀流量的连续控制。

收稿日期:2016-01-08

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51521064)

作者简介:陈飞飞(1978-),男,浙江湖州人,硕士,工程师,主要从事液压元件的设计与开发方面的研究。E-mail: cffei@21cn.com

早期设计的比例阀放大器多采用模拟恒压控制结构,开环控制性能较差^[2]。随着电子器件和电液比例控制技术的发展,利用微处理器实现恒流控制的数字式比例放大器,已成为比例放大器新的研究方向。数字式比例控制器(DPC)的优点,一是利用软件对数据进行处理,数据处理能力良好;二是提供诸如 RS232、RS485、CAN 等总线接口,方便了与上位机系统的通信。虽然不易获得较高的稳定性,但能通过合理设计来降低故障率。因此,比例控制器的数字化是必然趋势。

国外对比例控制放大器的研究工作开展较早,Rexroth, Vickers, 油研等公司均已研发出系列齐全的比例放大器^[3]。而国内的研究起步较晚,技术较国外落后。在数字式比例放大器研究方面,Rexroth 开发的 VT-VRPD 系列放大器是典型代表。而国内能自主生产的厂商还不多,杭州励贝电液科技有限公司是典型代表之一,其生产的 RT-PVDA-0X-D1 系列比例放大器即采用数字式结构,但其性能稳定性与功能完备性仍大有可提高之处。

本研究提出一种稳定性好、控制精度较高的带位置反馈的数字式比例放大器,设计基于 ARM7 微控制器的硬件系统,并利用 Microsoft Visual C++ 和 ADS1.2 集成开发环境,分别完成上位机软件和下位机控制程序的开发。最后,采用正交试验法有效地整定 PID 参数,并对放大器进行性能测试实验。

1 数字式比例方向阀放大器控制原理

本研究针对的控制对象为电液比例方向阀,其机械结构如图 1 所示。

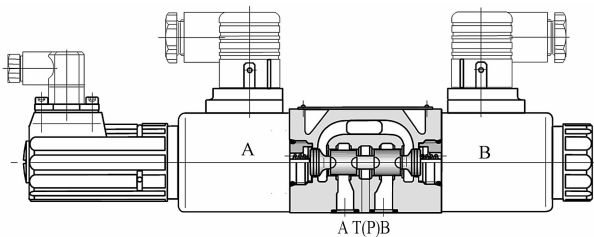


图 1 比例方向阀结构图

该阀为直动式比例方向阀,比例放大器通过控制比例电磁铁直接驱动阀芯。当两侧电磁铁均断电时,阀芯在弹簧的作用下处于中位。当放大器接入输入信号时,一侧电磁铁得电并推动阀芯做相应运动,阀芯位移与输入信号成比例。线性可变差动式位移传感器(LVDT)将阀芯位移信号转换为电信号,并作为位移

反馈输入到比例放大器,实现位移反馈闭环控制^[4-7]。

本研究中采用 PID 控制器、PI 控制器分别实现阀芯位移的反馈闭环控制和电流反馈的闭环控制,提高了阀的动、静态性能。同时设置颤振信号发生器,将颤振信号与控制信号叠加,来降低电磁铁的磁滞,显著提高了阀的性能。

本研究在建立系统模型时,出于简化的考虑,忽略了阀的泄露、油液的压缩性以及电磁铁线圈的反电动势系数。

比例电磁铁是线圈结构,可以看作是一个电感 L 和一个电阻 R 的串联模型^[8-9]。控制电压 $u(t)$ 与线圈电流 $i(t)$ 之间的关系可以表达为:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R \quad (1)$$

参考文献[10],比例电磁铁的电磁力为 F_m 与线圈电流 $i(t)$ 、阀芯位置 $x(t)$ 的关系式可表示为:

$$F_m(t) = f(i(t), x(t)) \quad (2)$$

对于本研究中的比例阀而言,其阀芯组件主要受到电磁力 F_m 、弹簧弹力 F_k 、粘性阻尼力 F_v 、稳态液动力 F_s 、瞬态液动力 F_t 和惯性力 F_{ine} 的作用。稳态液动力较小,分析时忽略。对阀芯组件受力分析,可得到关系式:

$$F_m = m_v \frac{d^2x(t)}{dt^2} + B_v \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) + F_s \quad (3)$$

式中: m_v —阀芯组件质量,kg; B_v —粘性阻尼系数, $N \cdot s/m$; K —弹簧刚度, N/m ; F_s —阀芯所受稳态液动力, N 。

阀芯受到的稳态液动力为:

$$F_s = \rho q v \cos\theta = 2C_v C_d W \Delta p x(t) \cos\theta = K_f x(t) \quad (4)$$

式中: K_f —稳态液动力刚度, N/m , $K_f = 2C_v C_d W \Delta p \cos\theta$ 。

比例方向阀有两个电磁铁,任一时刻采用单电磁铁供电方式,电磁力 F_m 可表示为 A、B 电磁铁电磁力之差。即:

$$F_m = F_{mA} - F_{mB} \quad (5)$$

由式(1~4)可得:

线圈电流传递函数为:

$$I(s) = \frac{U(s)}{Ls + R} \quad (6)$$

阀心位移与电磁力之间的传递函数为:

$$\frac{X(s)}{F_m(s)} = \frac{1}{m_v s^2 + B_v s + K + K_f} \quad (7)$$

比例方向阀控制系统的模型框图如图 2 所示。

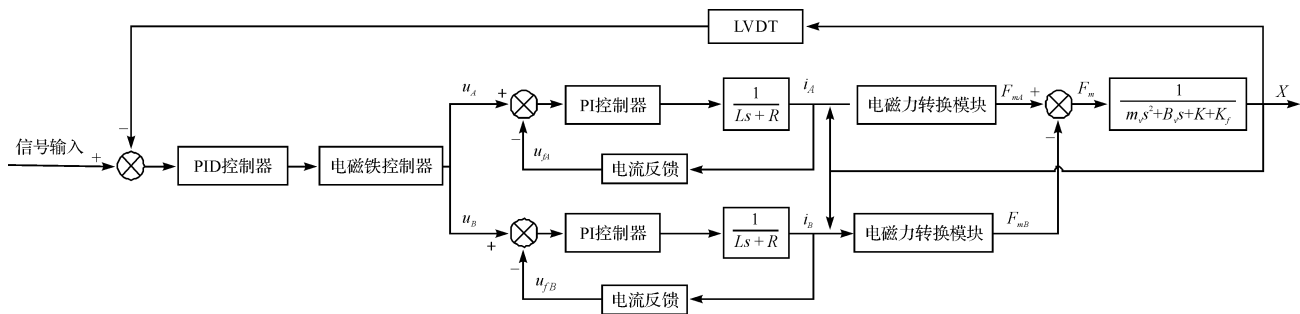


图 2 比例方向阀控制系统模型框图

2 数字式比例放大器硬件系统设计

本研究所设计的放大器选用 NXP(恩智浦半导体)公司的 LPC2368 芯片作为主控制器。放大器硬件系统包括电源转换电路、A/D 输入模块、功率放大电路、外部存储电路、通讯模块(串口和 CAN 总线)、测

量放大器等部分。

电压或电流模拟信号经过 A/D 转换为数字信号,转换后的信号和数字量输入信号依次经过斜坡、线性度、位移 PID 控制闭环、颤振、电流反馈 PI 控制闭环等处理过程,这些过程由软件系统实现。

数字式比例阀放大器总体功能框图如图 3 所示。

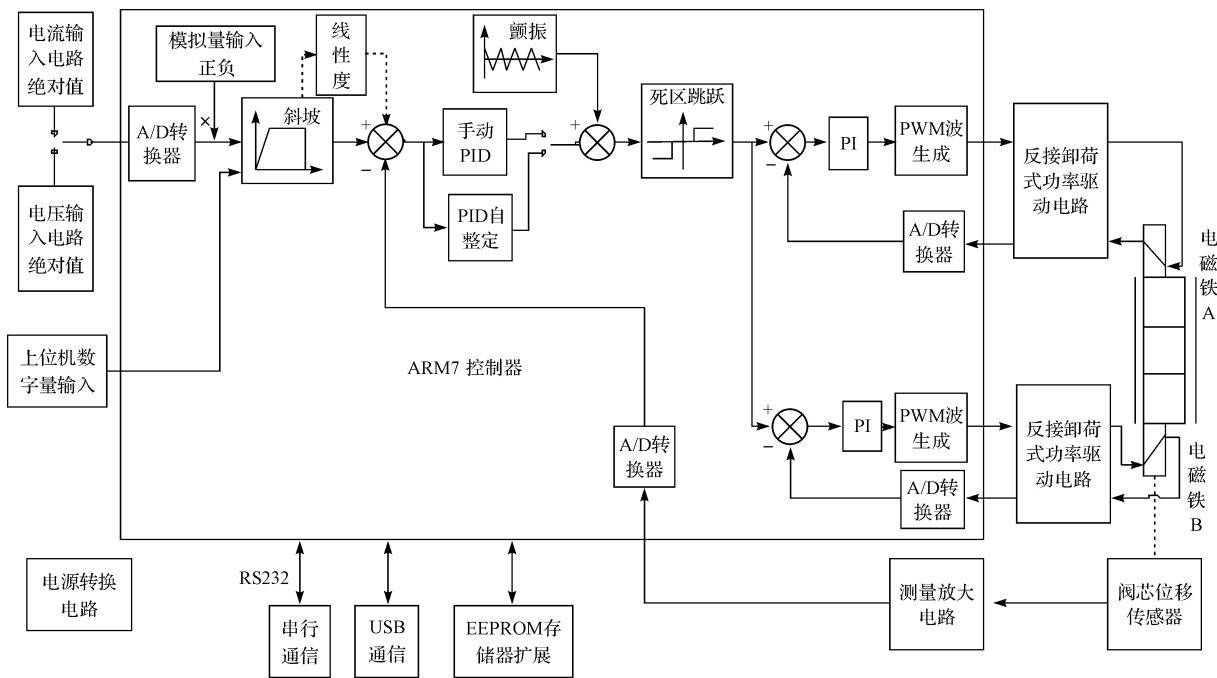


图 3 数字式比例阀放大器总体功能框图

功率放大级作为比例放大器核心单元之一,其功能是将 PWM 电压信号转换为与输入信号成比例的电流信号,来驱动比例电磁铁。和传统功率驱动电路不同,本研究设计的数字式比例阀放大器采用了反接卸荷式功率驱动电路。反接卸荷式功率驱动电路利用改变电磁铁供电电源方向的原理,加快电磁铁线圈电流衰减速度,显著提高了比例电磁铁的动态频宽^[11]。

本研究所设计的比例放大器通过驱动比例电磁铁来控制比例阀的压力和流量。ARM7 主控制器产生两路 PWM 信号,分别提供给电磁铁 A 和 B。电磁体 B 的功率放大级电路原理与电磁铁 A 相同,故只需对电

磁铁 A 的功率放大级电路原理进行分析。

反接卸荷式功率驱动电路如图 4 所示。该功率驱动电路由电源、光耦合器、MOS 管、比例电磁铁、采样电阻等构成。当 ARM7 控制器输出的 PWM 波为高电平时,一方面,光耦 2 的输出为高电平,N 沟道 MOS 管栅极电压为高电平,N 沟道 MOS 管导通,电磁铁和采样电阻相通;另一方面,PWM 波高电平信号经过反相器转变为低电平,光耦 1 的输出为低电平,P 沟道 MOS 管栅极电压也为低电平,N 沟道 MOS 管也导通,电压源与电磁铁相通。反之,当 ARM7 控制器输出 PWM 波为低电平时,P 沟道 MOS 管和 N 沟道 MOS 管均截

止,比例电磁铁反接在电源两端,线圈电流迅速衰减,满足系统较高动态频宽的需求。

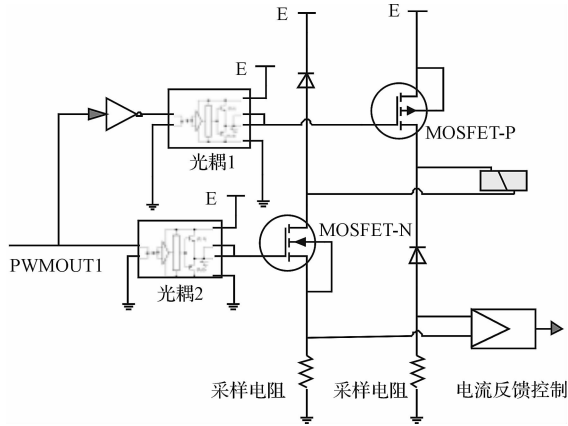


图 4 反接卸荷式功率驱动电路

本研究使用 0.1 Ω 精密采样电阻,对流过线圈的电流信号进行采样。采样信号经放大倍数为 10 倍的运算放大器放大后,输入到 LPC2368 芯片中,形成电流闭环控制。

输入电压与输出电流之间的拟合关系如图 5 所示。曲线上各点表示输入电压正向(从 -10 V 逐渐增加到 +10 V),与反向(从 +10 V 逐渐减小到 -10 V)状态下对应输出电流的平均值。输入电压与输出电流间的线性拟合方程为 $y = 0.24892x + 0.00048$,其线性拟合度为 $R^2 = 0.99995$ 。可以看出,输出电流稳定,线性度良好,证明了本研究设计的比例放大器对电磁铁有良好的稳态控制特性。

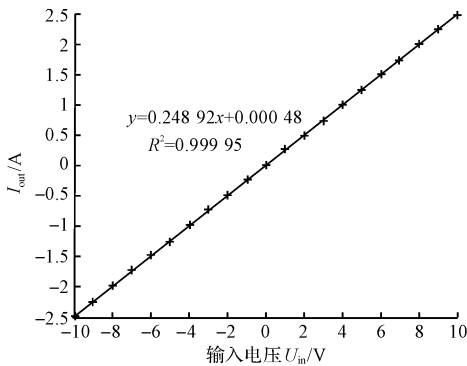


图 5 输入电压信号与输出电流信号的线性度关系图

3 数字式比例放大器软件系统设计

数字式比例放大器软件系统包括上位机软件和下位机控制程序。上位机软件一方面实现人机交互功能,另一方面实现与下位机控制器的通信功能。上位机人机界面如图 6 所示,该界面是基于 Microsoft Visual C++ 开发环境,借助 MFC 基础类库开发的。上位机与下位机

ARM 控制器之间采用 RS232 通信接口进行通信。利用上位机能很方便地将放大器各项控制参数输入到 ARM 控制器中,如模拟/数字输入选择、颤振信号的频率和幅值、斜坡和阶跃信号设置和 PID 参数设置等。这样的设计满足了不同条件下的使用需求,在简化硬件结构的同时,提高了放大器的可靠性。

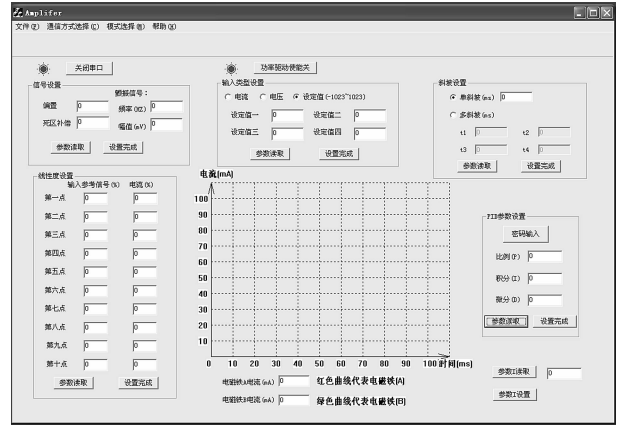


图 6 上位机人机界面

下位机控制程序是基于 ADS1.2 集成开发环境编译的。下位机程序开始运行后,依次进行数据初始化、设备初始化、定时器初始化,然后执行主循环程序。主循环程序又包括中断控制模块、PWM 模块、信号处理模块、串口通讯模块等。

串口通讯子程序是在 MFC 中使用多线程串口编程工具 CSerialPort 类编写。其流程为:打开串口监视线程,如检测到未设置串口参数提示先进行串口参数设置;当串口监测工作线程接收到数据或事件时,将信息发送给主程序,同时激活信息处理程序,进行数据处理。

为了满足不同控制对象和条件的需求,比例放大器设置了多种信号处理模块。该设计中,信号处理模块由 ARM 控制器软件部分实现。信号处理模块由斜坡信号处理、线性度、位移 PID 控制、颤振信号处理、电流阶跃和电流反馈闭环 PI 控制等模块组成。位移 PID 控制器采用增量式 PID 控制算法,定义系统偏差 $e(k)$ 为输入信号 U_i 和阀芯位移信号反馈信号 U_o 之间的差值。增量式 PID 控制算法表达为下式^[12]:

$$\Delta u(k) = K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] + K_i \cdot e(k) + K_d \cdot [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (8)$$

由此,仅在上述固件和结构的基础上,通过软件功能便可实现位置闭环增量式 PID 控制。

4 实验与结果分析

数字式比例放大器实验与调试平台原理图如图 7

所示,实物图如图 8 所示。

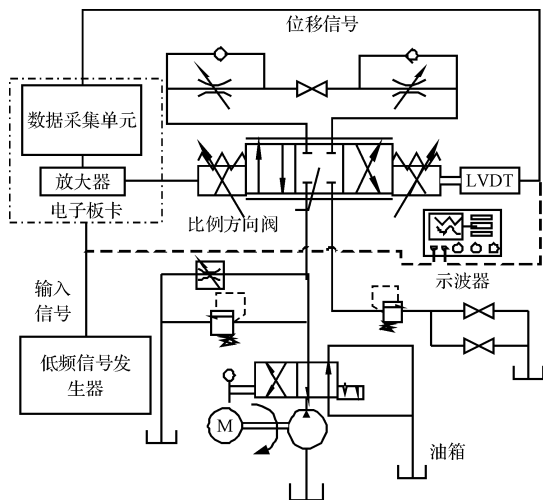


图 7 实验平台原理图

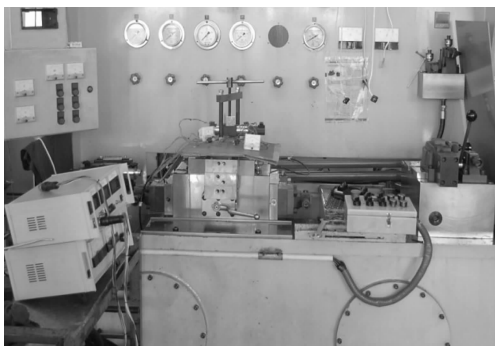


图 8 实验平台实物图

实验台系统包括如下几个部分:内啮合齿轮泵,由电机驱动,最大输出流量 160 L/min ;两个溢流阀,分别用于限制系统最高压力和回油压力;手动换向阀,实验台总开关;两个单向节流阀,用于模拟负载压力。该实验装置中,低频信号发生器(LFSG)产生连续可调的控制信号,通过放大器控制比例方向阀。LVDT 将阀芯位移信号转换为电压信号,并输入至放大器板卡中的数据采集单元形成位置闭环^[13]。同时,笔者使用示波器显示输入信号和阀芯位移信号。

该实验采用文献[14-15]中提到的正交试验法来整定 PID 参数。利用溢流阀和单向节流阀将进油口和出油口之间的压力差调节为公称阀压降 1 MPa 。在 $100\% (7.5 \text{ V})$ 阶跃电压信号输入下,系统阶跃响应如图 9 所示;在 $100\% (7.5 \text{ V})$ 正弦波电压信号输入情况下,系统伯德图如图 10 所示。

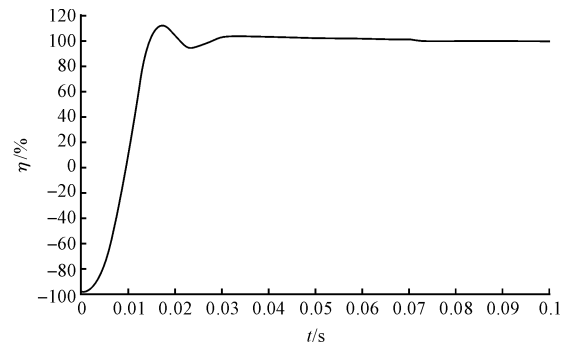


图 9 $100\% (7.5 \text{ V})$ 阶跃电压输入下的系统阶跃响应图

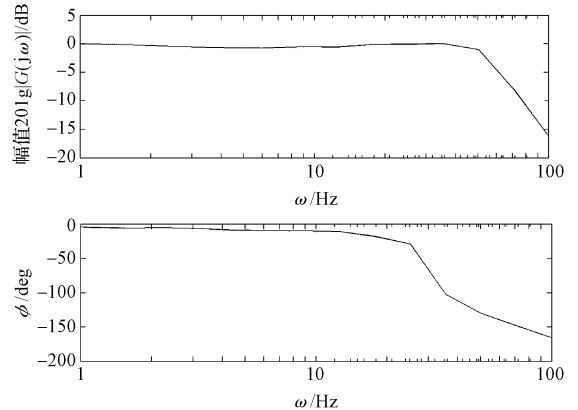


图 10 $100\% (7.5 \text{ V})$ 正弦波电压输入下的系统伯德图

从图 9、图 10 中可以看出,系统阶跃响应调节时间较短(约 30 ms),阀芯位移值能迅速稳定在控制值上,并且系统幅频宽和相频宽均超过 30 Hz ,系统表现出良好的响应特性。

5 结束语

笔者研究并设计了一种带位置反馈的数字式比例方向阀放大器。采用反接卸荷式功率驱动电路替代了传统的模拟式和开关式驱动电路,显著提高了比例电磁铁的动态频宽。通过软件编程实现对各个信号处理环节的控制,相比于硬件电路控制,仅通过修改程序代码便可实现不同的控制策略,具有更强的条件适应能力。利用上位人机界面对下位机进行参数读取和设置,大大提高了系统的灵活性。比例放大器性能测试实验结果表明,本研究设计的数字式比例放大器具有稳定性好,可靠性高和控制特性良好等优点。在后期对数字式比例放大器软、硬件系统不断改进与测试后,能够对工业产品的形成提供一定的指导。

(下转第 949 页)

本文引用格式:

陈飞飞,徐辉,王世杰,等.带位置反馈的数字式比例方向阀放大器研究[J].机电工程,2016,33(8):939-943,949.

CHEN Fei-fei, XU Hui, WANG Shi-jie, et al. Digital amplifier for proportional directional valve with position feedback[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(8): 939-943, 949.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>