

# 液压三轴仿真转台计算机控制系统的设计

王本永<sup>1</sup>, 赵存友<sup>1</sup>, 董彦良<sup>2</sup>

(1. 黑龙江科技学院 机械工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 液压仿真转台是一种高技术半实物仿真设备, 根据其双十频宽和超低速等性能指标要求, 进行了计算机控制系统的硬件设计和软件设计。硬件设计包括工控机、电液伺服阀、数据处理板、光电码盘的选择和伺服阀驱动电路的设计, 软件设计以 Borland C++ 语言作支撑平台开发了系统的各控制功能模块。为了验证所设计的计算机控制系统, 采用了 PID 控制策略进行了试验, 结果表明, 控制系统性能指标达到了预期要求。

**关键词:** 液压仿真转台; 计算机控制系统; 双十频宽; 超低速; PID 控制策略

中图分类号: TP273.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)02-0086-04

## Design of Computer Control System for 3-Axis Hydraulic Simulator

WANG Benyong<sup>1</sup>, ZHAO Cunyou<sup>1</sup>, DONG Yanliang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150027, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** The hydraulic simulator is a kind of high-tech and semi-material object simulation device. According to the requirements of performance indices, such as double-ten frequency width and ultra-low speed, the design of hardware and software for computer control system was made. The hardware design included the selection of industrial control computer, electro-hydraulic servo valves, data processing boards, photoelectric encoders and the design of servo valve driving circuit. The software design was oriented to develop the control system function modules by using Borland C++ language as the supporting platform. In order to verify the designed computer control system, PID control strategy was used for experiments. The experimental results showed that the designed control system achieved the expected requirements.

**Key words:** hydraulic simulator; computer control system; double-ten frequency width; ultra-low speed; PID control strategy

液压三轴仿真转台是具有重大经济价值和国防战略意义的高技术半实物仿真设备,能够在实验室条件下复现飞行器在空中的各种飞行姿态,其性能直接关系到飞行器仿真结果的逼真度<sup>[1]</sup>。仿真转台最重要的性能指标可以概括为超低速、宽调速、高频响、高精度等,要满足这些性能指标要求,除液压马达、电液伺服阀等部件本身应具有良好的性能外,控制系统的设计也非常重要。从控制系统的信号传递形式来看,常用的控制系统有模拟控制和数字控制之分:模拟控制系统的各级控制运算同时进行,具有控制信号传递快的特点,较适合于宽频带的快速实时控制,但抗干扰能力较差,可靠性较差,控制精度不高且对于大型复杂系统实现起来非常困难;数字控制系统是以计算机作为数字控制器实现对连续对象(过程)的闭环控制,其控制规律由软件实现,控制器的结构参数变化灵活,抗干扰能力强,控制精度高,可靠性高,便于调试与维护。为提高系统的控制性能以及便于转台各框架之间的统一协调和总体控制,采用计算机控制系统是较合适的选择。本

收稿日期: 2010-12-07

基金项目: 黑龙江科技学院资助项目(JY10-19)。

作者简介: 王本永(1968—),男,辽宁丹东人,讲师,博士,主要从事流体伺服控制与矿山机械研究。

E-mail: wangbenyong2000@163.com.

研究根据双十指标(相移 $-10^\circ$ 和幅值误差 $\pm 10\%$ )和超低速性能等要求,对液压三轴仿真转台的计算机控制系统进行设计并进行试验。

## 1 计算机控制系统的硬件设计

### 1.1 工控机

工控机为研华工业控制计算机,其主要配件型号规格如下:CPU为P4 3.0 G,主板为PCA-6187VE,内存为DDR 512 MB,硬盘为80 GB,机箱为IPC-610。

### 1.2 电液伺服阀及其驱动电路

本试验转台外框用MOOG35型电液伺服阀作为电液位置伺服系统的控制阀,中框和内框分别选用YFW06A066AK型和FF102型电液伺服阀作为电液位置伺服系统的控制阀,其主要参数见表1。

伺服阀驱动模块(伺服放大器)采用电流并联负反馈工作原理<sup>[2]</sup>,单板可提供四通道 $\pm 10\text{V} \rightarrow \pm X \text{ mA}$ 的线性输出。板内提供了对输入限幅、放大击穿以及三极管3种击穿模式所产生的过流保护。提供给每一通道3种( $\pm 12 \text{ V}$ ;  $\pm 15 \text{ V}$ ;  $\pm X \text{ V}$ ,使用OP07时,最大为 $\pm 18 \text{ V}$ )供电电压规范选择。提供3种I/O形式用于电路板和外设接口。各通道之间相互独立,其中一个通道的电路原理如图1所示,其余通道情况相同。由于该伺服放大器采用的是电流负反馈原理,因此该放大器对系统的影响可以忽略不计。伺服放大器的输出级采用共轭推挽功率输出方式,根据输入电压和供电电压的规范以及伺服阀的电流要求,可以通过选择反馈电流取样电阻R5的阻值和调节保护电阻R10的阻值来限制其最大输出电流。

### 1.3 研华数据处理板

D/A转换元件采用台湾研华自动化系统公司生产的PCL-726数据采集板,该板主要性能及技术参数如下:

- 1)具有6路模拟输出通道;
- 2)D/A转换器的分辨率为12 bit,建立时间 $5 \mu\text{s}$ ,输出电压范围可以选择 $0 \sim 5 \text{ V}$ 、 $\pm 5 \text{ V}$ 、 $0 \sim 10 \text{ V}$ 和 $\pm 10 \text{ V}$ ;
- 3)线性度为 $\pm 0.5 \text{ bit}$ ,精度为满量程的 $\pm 0.012\%$ 。

A/D转换元件采用台湾研华自动化系统公司生产的PCL-1800数据采集板,该板主要性能及技术参数如下:

- 1)具有16路单端模拟输入或8路差动模拟输入通道;
- 2)A/D转换器的分辨率为12 bit,建立时间 $3 \mu\text{s}$ ,单端模拟输入电压范围可以选择 $0 \sim 5 \text{ V}$ 、 $0 \sim 2.5 \text{ V}$ 、 $0 \sim 10 \text{ V}$ 和 $0 \sim 1.25 \text{ V}$ ;
- 3)精度为满量程的 $\pm 0.01\%$ 。

### 1.4 光电码盘

光电码盘属于数字式角度传感器,与模拟式角度传感器相比,具有分辨率高、抑制噪声能力强、低速性能极佳等优点。试验所用的是光栅增量式光电码盘,是委托中科院长春光学精密机械研究所研制的。该光电码盘的角度分辨率为 $0.39''$ ,本身带有信号调理电路板,可直接与计算机总线连接,以实现计算机对马达转

表1 电液伺服阀的主要参数表

Tab.1 The primary parameters of electro-hydraulic servo valves

	MOOG35	YFW06A066AK	FF102
额定流量/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	170	66	30
供油压力/MPa	21	21	21
-3dB幅频宽/Hz	60	$>60$	$\geq 100$
$-90^\circ$ 相频宽/Hz	80	$>80$	$\geq 100$
线圈电阻/ $\Omega$	40	80	50
额定电流/mA	40	20	40
零偏范围/%	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 3$
非线性范围/%	$\pm 7$	$\pm 7$	$\pm 7.5$

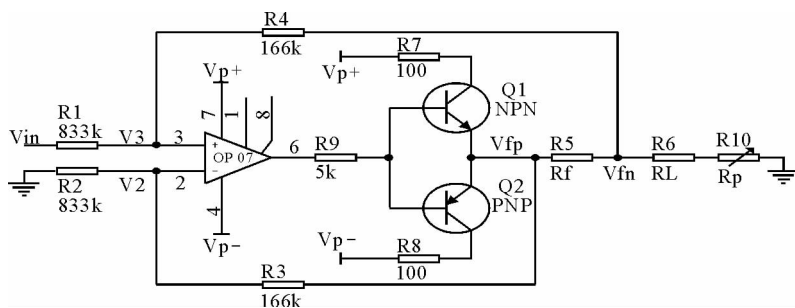


图1 伺服放大器电路原理图

Fig.1 Circuit diagram of servo amplifier

动角度的实时读取。

## 2 计算机控制系统的软件设计

计算机控制系统所采用的具体控制方案与它所控制的过程的复杂程度是密切相关的,不同的控制对象和不同的要求,应有不同的控制方案。对仿真系统而言,通常有两种控制方案,即直接数字控制系统(direct digital control,DDC)和分散型控制系统(distributed control system,DCS)<sup>[3]</sup>。在实际仿真系统中,控制计算机不但要完成仿真转台的实时运动控制,还要完成与主控计算机、目标系统等之间的大量通信工作,因此,通常使用 DCS 结构方案,上位机负责外部通信等工作,并给下位机发送控制信号,而下位机仅负责各通道的闭环控制,这样使得控制功能得到分散,系统既能进行控制又能实现管理,且由于计算机控制和管理范围的缩小,使其应用灵活方便,可靠性增高。但该液压三轴仿真转台仅为试验样机,并不存在与外界通信等问题,因此,控制系统采用了 DDC 的控制方案,即用一台工控机作为整个试验系统的控制计算机,这样可使控制系统的硬件结构得到简化,缩短研制周期,降低经济成本,同时又可满足仿真系统的要求。液压三轴仿真转台直接数字式控制系统的原理如图 2 所示。

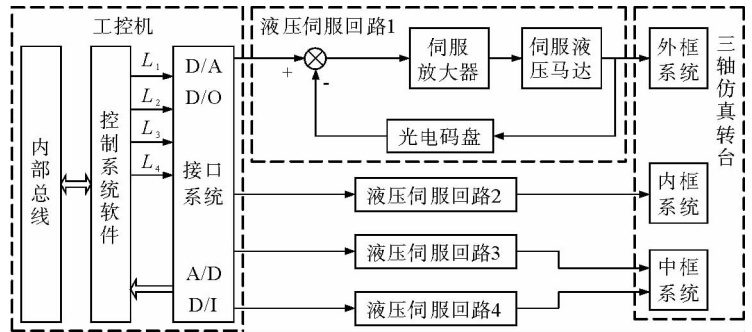


图 2 液压三轴仿真转台控制原理框图

Fig. 2 The control block diagram of 3-axis hydraulic simulator

仿真转台的使用特点决定了控制系统软件必须具有控制实时性好、可靠性高和适应性强等特点,又要具有实时显示输入输出信号、人机对话等功能。为了满足这些要求,用基于 DOS 系统的 Borland C++ 语言作支撑平台开发了系统的控制软件。

图 3 为控制系统的软件功能模块图,包括初始化程序模块、控制角度初始化模块和主控制程序模块。

初始化程序模块主要完成控制参数的初始化、屏幕实时显示初始化以及定时计数器的初始化等功能。控制参数初始化包括采样周期的设定、全局变量和子函数的定义等。采样周期则通过控制计算机 8253 计数器 0 通道的定时中断严格保证。

主控制程序模块包含 8 部分。中断服务子程序通过调用其它子程序以完成相应的控制任务,是整个控制系统的核心。由于码盘是增量式,开机时所显示的零位并非实际零位,因此需要用寻零子程序寻找其零位。信号发生子程序可以产生所要求的不同类型的控制信号。角度读取子程序通过对光电码盘接口板地址进行读操作完成二进制码的转换,将所测量的液压马达轴的转动角度实时传递给计算机。数据存储子程序完成给定信号、实际响应信号、计算偏差量等相关数据的实时存储功能。数据曲线显示子程序将给定信号、实际响应信号、计算偏差量等相关数据实时显示在计算机屏幕上。控制算法子程序根据所设计的控制策略对相应信号进行运算,同时将运算结果通过 PCL-726 数据处理板进行 D/A 转换输出给伺服放大器。系统运行结束时调用系统归零子程序可安全停止。

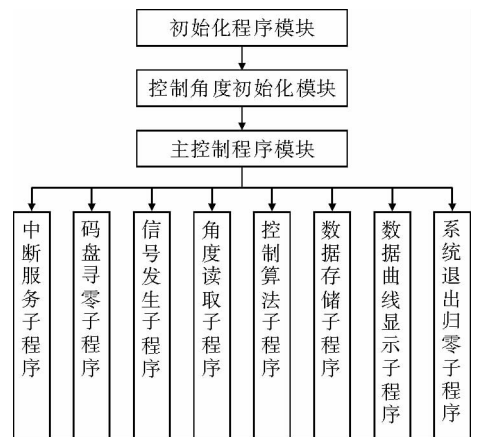


图 3 液压三轴仿真转台控制软件模块原理图

Fig. 3 Control software sketch of 3-axis hydraulic simulator

## 3 试验结果

为了检验所设计的计算机控制系统,仅对转台外框单通道系统进行试验,试验指标由用户提出,即双十指标频宽为 7 Hz、最低平稳跟踪速度为 0.001°/s。采用 PID 反馈控制、输入信号前馈补偿和颤振信号的控制

制策略进行调试。

试验条件:油源压力为 12 MPa,油源温度为 25~35 ℃。

频率特性试验方法:用 BT1250 频率特性分析仪给转台外框单通道电液位置伺服系统输入幅值为 1°、频率逐渐增加的正弦信号,并测量系统闭环频率响应。

低速性能试验方法:对外框单通道系统输入典型的斜坡信号,记录系统的响应曲线。

试验结果:经过检测,外框单通道系统满足用户提出的双十频宽和超低速跟踪的指标要求,说明该计算机控制系统的设计是成功的,试验曲线分别如图 4 和图 5 所示,图中的曲线 1 表示给定信号,曲线 2 表示系统响应,曲线 3、曲线 4 表示设定的位置误差带,其大小为 ±0.002°。

在该计算机控制系统的基础上,可以采用各种先进的控制技术<sup>[4-7]</sup>进一步提高控制性能。

作为比较,这里也给出不加颤振信号时的超低速跟踪试验结果,如图 6 所示,图中曲线含义同图 5。可见,不加颤振信号时,出现严重的爬行现象,不满足性能指标要求。通过比较,说明应深入理解系统的特点和性能指标要求,才能正确设计控制策略来发挥系统的潜能。

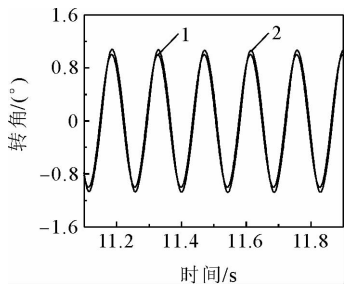


图 4 外框正弦响应试验曲线图(7 Hz)

Fig. 4 The curve of outer sine response experiment (7 Hz)

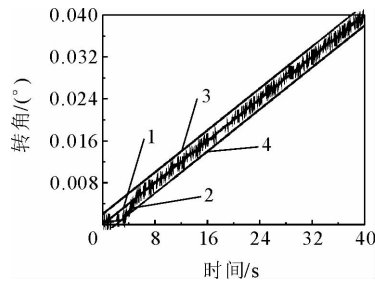


图 5 外框斜坡响应试验曲线图  
(0.001°/s)

Fig. 5 The curve of outer ramp response experiment (0.001°/s)

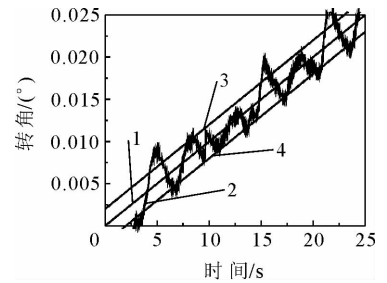


图 6 外框斜坡响应试验曲线图  
(0.001°/s, 不加颤振)

Fig. 6 The curve of outer ramp response experiment (0.001°/s, without dither)

## 4 结论

液压仿真转台计算机控制系统设计包括硬件设计和软件设计两个方面,为了实现用户提出的高性能指标要求,硬件设计应主要考虑电液伺服阀的频宽,A/D、D/A 板的分辨率和建立时间,光电码盘的分辨率和采样时间,伺服阀驱动电路的过流保护和对系统的影响等,而软件设计应主要考虑控制实时性好、可靠性高和适应性强,以及要具有实时显示输入输出信号、人机对话等功能。另外,控制策略的设计也至关重要。

## 参考文献:

[1]王本永.基于  $H_\infty$  控制理论的液压三轴仿真转台控制系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

[2]侯俊钦,杨一军.电流并联负反馈的仿真分析与计算[J].淮北煤炭师范学院学报,2008,29(3):15-18.

HOU Junqin, YANG Yijun. Simulation analysis and calculations of parallel negative current feedback amplifier circuit[J]. Journal of Huaibei Coal Industry Teachers College, 2008, 29(3): 15-18.

[3]王锦标.计算机控制系统[M].北京:清华大学出版社,2008.

[4]ALEXANDER L, PANAGIOTIS T. A combined application of  $H_\infty$  loop shaping and  $\mu$ -synthesis to control high-speed flywheels[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(5): 766-777.

[5]GUAN C, PAN S. Nonlinear adaptive robust control of single-rod electro-hydraulic actuator with unknown nonlinear parameters[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(3): 434-445.

[6]LIU J, HE Y. Fuzzy global sliding mode control based on genetic algorithm and its application for flight simulator servo system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(3): 13-17.

[7]ORTEGA M G, VARGAS M, CASTANO F, et al. Improved design of the weighting matrices for the S/KS/T mixed sensitivity problem-application to a multivariable thermodynamic system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(1): 82-90.