

# 基于 DSP 的直流伺服电机的双闭环控制系统

胡 玮, 阮 健\*, 李 胜, 汪晓文, 邵汉卿  
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 作为数字阀的电-转换器, 电机的频率响应对数字阀的性能有非常直接的影响。为提高数字阀的动态响应, 设计了直流伺服电机双闭环系统。该系统采用 TMS320LF2812 为控制核心, 在脉宽调制(PWM)方法的基础上, 加入了超前补偿网络提高电流环的带宽; 采用 PI 控制算法实现了电机转子的精确定位。简述了实现该控制系统的硬件设计方案和软件控制策略。实验结果表明, 该系统能够实现直流伺服电机的电流和位置控制, 显著提高了电流环的频率响应。

**关键词:** 直流电机; 脉宽调制; 频率响应

中图分类号: TH137.52; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)01-0070-04

## Dual-loop control system of DC servo motor based on DSP

HU Wei, RUAN Jian, LI Sheng, WANG Xiao-wen, SHAO Han-qing

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** As the electro-mechanical converter of digital valve, performance of the digital valve had been great impacted by frequency response of motor. Aiming at the improvement on dynamic response of digital valve, a dual-loop control system of DC motor was designed. TMS320LF2812 was selected as the core control element in this system. Based on pulse width modulation(PWM) control, by adding lead compensation network, the bandwidth of current loop was increased, position rotor precisely with PI control algorithm was realized. The hardware and software design solutions for this system were introduced. The experimental results show that DC servo motor system can achieve the current and position control, frequency response of current loop has been significantly increased.

**Key words:** DC motor; pulse width modulation(PWM); frequency response

## 0 引 言

电机既可以用来提供功率(提供动力),也可以用来提供控制(如转速、转角、位置等控制)。现代电机领域已经不仅仅局限于传统电机的范畴,它涵盖了电机本体、计算机与电子控制器、功率变换器、传感器与控制技术等多个方面,而且在电机的设计、制造时,必须与后级的执行机构与负载(如各种机械、液压、气动装置)整合起来<sup>[1]</sup>。此时电机不仅仅作为一个零件级的执行器,而是完整的机电一体化系统中的重要桥梁<sup>[2]</sup>。

本研究中的电机作为数字伺服阀的电-机械转换器,将电气信号转换为小范围转动的机械量,通过传动

机构控制伺服阀阀芯角位移。由于数字阀的动态性能除了受阀体本身结构的频率响应影响之外,很大程度上受电-机械转换器频响的制约,电-机械转换器必须满足重复精度高、频率响应速度快、抗干扰能力强的要求。

本研究设计一种数字运动控制系统,采用硬件和软件相结合的控制方式,其中软件控制是利用微机实现的<sup>[3]</sup>。

## 1 控制系统硬件设计

直流空心杯伺服电机位置控制系统电气部分硬件主要由电源模块、DSP 控制模块、电机驱动模块、位置检测模块及电流检测模块等组成。

收稿日期:2011-08-22

作者简介:胡玮(1986-),女,浙江杭州人,主要从事电液直接控制方面的研究. E-mail: hwzz1029@163.com

通信联系人:阮 健,男,教授,博士生导师. E-mail: wxmin@mail.hz.zj.cn

### 1.1 数字信号处理器

数字信号控制器是整个系统的核心。本研究芯片采用 TI 公司的 DSP2812 芯片,该芯片最高能达到 150 M 的处理速度,能实时快速对控制信号进行处理;其内部事件管理器用于产生用于控制电机转动的 PWM 信号。该控制芯片本身带有 A/D 转换器, SPI 通信接口,也带有故障保护和 PWM 生成功能,从而使数字控制系统的硬件电路变得简单。控制器硬件结构图如图 1 所示。

### 1.2 驱动电路

本研究通过事件管理器 EVA 模块产生 PWM 信号,

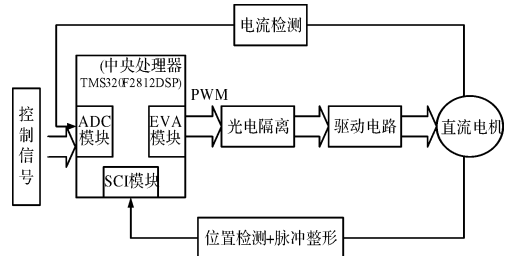


图 1 控制器硬件结构图

对 H 桥电路的开关元件进行控制。开关元件采用功率 MOSFET 管。PWM 信号经驱动芯片 IR2110 控制 MOSFET 管的通断,驱动电路图如图 2 所示。

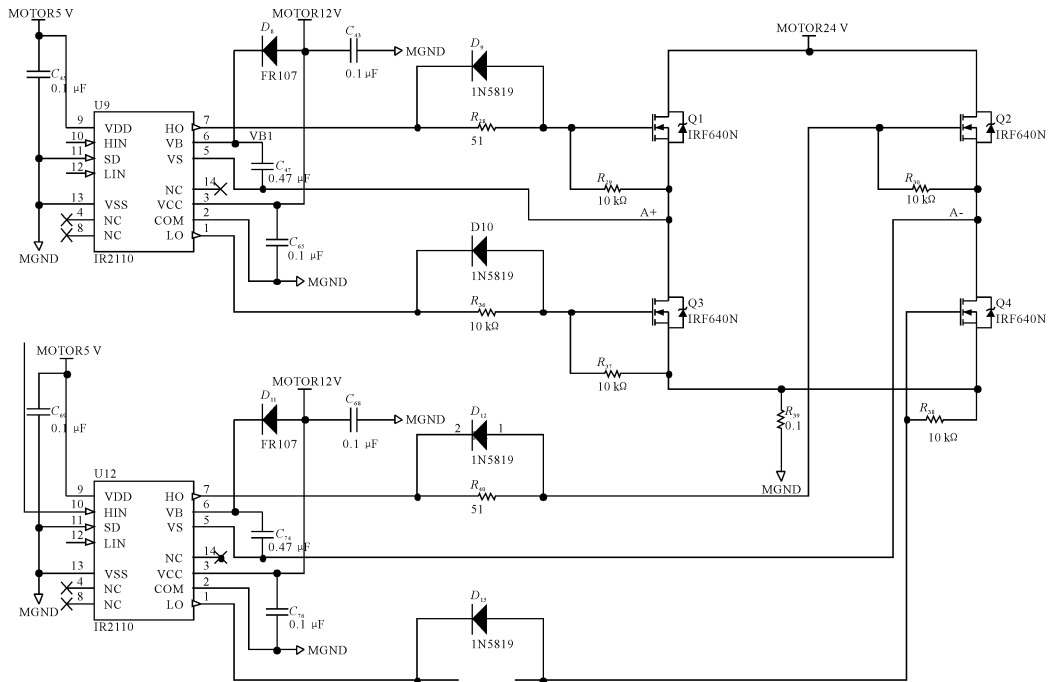


图 2 驱动电路原理图

### 1.3 检测电路

检测电路包括电流和位置检测。电流检测技术主要有串联电阻、并联检测管及对电感的电流积分等方法。并联检测管具有较高的精度、较低的功耗,但是它一般用于集成芯片内。滤波器检测技术检测的是平均电流,而不是实时的电感电流,所以难以完成保护功能。本研究利用外挂电阻进行电流检测,即电机绕组上串联检测电阻,电流的大小可由电阻两端的电压计算得到,实时测得的电压值采集到的数据由 A/D 转换通道变为数字量送入 DSP 控制器。

位置检测传感器选用无接触式磁旋转编码器 AS5045 为主控芯片,分辨率为 0.087 9°。传感器固定在电机上,实时检测电机转子角位移,并把检测到的数据通过 SPI 通信接口传输给 DSP 控制器。

## 2 控制策略

本研究采用电流位置双闭环控制。电流内环在伺服驱动器内进行,通过电流检测模块实时检测电机的输出电流,负反馈给电流的设定进行 PID 调节。位置外环在驱动器和磁旋转编码器之间构建,环内 PID 的输出作为电流环的设定,从而保证电机电流和转子位置能够很好地跟踪输入信号。

控制框图如图 3 所示。

### 2.1 位置控制环节设计

在工作过程中,本研究输入变化的正弦控制信号,电机转子能够快速响应并准确转动到该位置。控制算法采用增量式 PID 控制算法,公式如下:

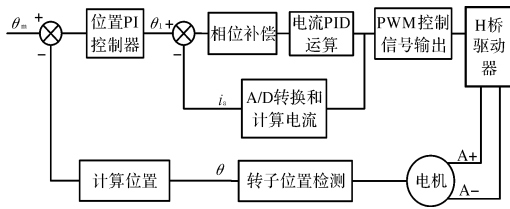


图 3 双闭环算法功能框图

$$u_i = u_{i-1} + K_p [e_i - e_{i-1} + \frac{T}{T_i} e_i + \frac{T_d}{T} (e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})] \quad (1)$$

式中： $u_i$ —PID 控制器的输出。

加大比例系数  $K_p$  能减小系统的稳态误差,提高控制精度,但是  $K_p$  取值过大会引起系统振荡,甚至导致闭环系统不稳定。积分时间常数  $T_i$  增大,可减小超调,提高稳定性,但会降低系统的快速性。加强微分作用有助于减小超调,克服振荡,使系统趋于稳定<sup>[4]</sup>。

采样周期  $T$  的大小根据实际情况确定,每隔时间  $T$  读取一次旋转编码器的输出信号,将转子的绝对角位置值换算成  $u_i$ ,使电机的位置和 PWM 的占空比相对应。即根据  $u_i$  进行转换,转子位置处于正向行程时,电机按给定方向作正弦运动;转子位置处于回程时,电机做反向正弦运动。在电机运动过程中,通过调整输入正弦控制信号的频率能够调整电机的转速。

### 2.2 电流校正环节的设计

位置控制模式下系统的动态响应速度较慢,在位置控制的同时加入电流控制,以改善扭矩的反应速度,使系统快速平稳的工作。本研究中的电流控制采用简单的 PI 控制算法,公式如式(1)所示。由于在实际系统中电磁时间常数  $T_l$  远小于机电时间常数  $T_m$ ,电流的调节过程比位置的调节过程快的多<sup>[5-8]</sup>,不考虑反电动势产生的交叉反馈作用,也可以认为反电动势  $E$  基本不变,设计电流环时,不考虑反电动势的变化。

为保证在高频输入信号下电流的准确跟踪,在电流环中加入串联超前校正补偿环节。其传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{aT_s + 1}{T_s + 1} = \frac{(1/\omega_1)s + 1}{(1/\omega_2)s + 1} \quad (a > 1, \omega_1 < \omega_2) \quad (2)$$

式中： $\omega_1 = \frac{1}{aT}, \omega_2 = \frac{1}{T}$ 。

相位角为:

$$\angle G_c(j\omega) = \arctan\left(\frac{aT\omega - T\omega}{1 + aT^2\omega^2}\right) \quad (3)$$

串联补偿环节 Bode 图如图 4 所示。

相位超前角取决于补偿环节的参数  $a$ ,随着  $a$  的

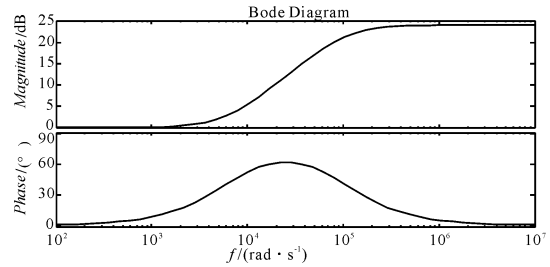


图 4 串联补偿环节波特图

增大而增大。然而系统要求较小的超调量和较好的跟随性,选择参数必须在满足要求的情况下使相位超前角尽可能大,实验中  $a$  选择 9,截止频率选择 2 000 Hz。此时补偿环节的相位超前角为 50°。

### 3 实验结果

本研究搭建了实验平台,选用的电动机的基本参数是:电动机最大功率 303 W,电枢电阻 7.2 Ω,转矩常数为 68.72 mNm/A,速度常数为 7.19 V/1 000 r/min,控制器输入电压为 24 V。

控制器对电机绕组上的电流进行检测,选取不同频率测得的电流数据绘制的波形如图 5、图 6 所示(图

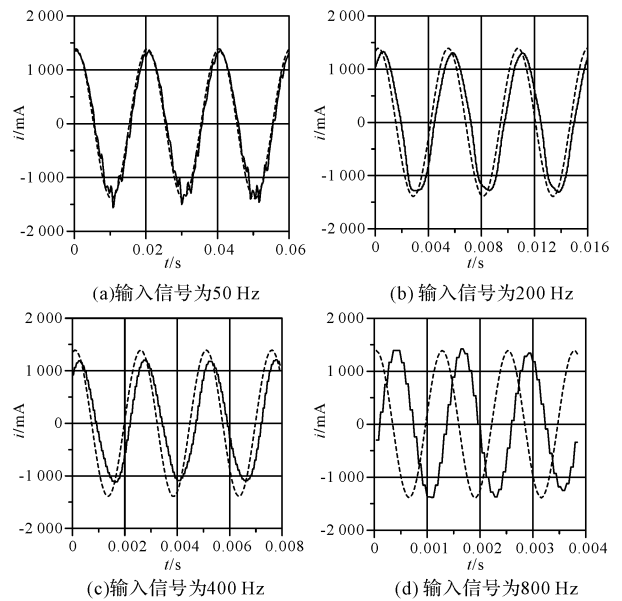


图 5 不同频率下的电流跟踪波形

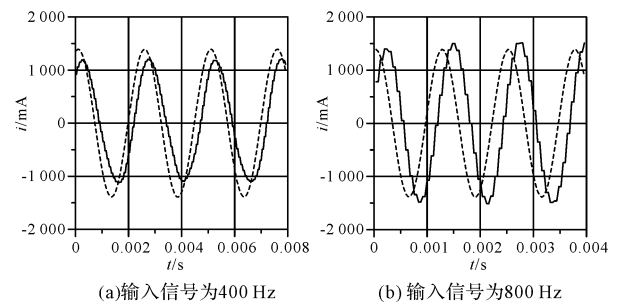


图 6 加入校正环节同频率下的电流跟踪波形

5 为未加入电流校正环节时检测,图 6 为加入电流校正环节后检测),可以看出,在越高的输入频率下,控制信号和电流信号之间的幅值衰减和相位滞后越明显。

电流控制模块的幅频特性和相频特性如图 7 所示。

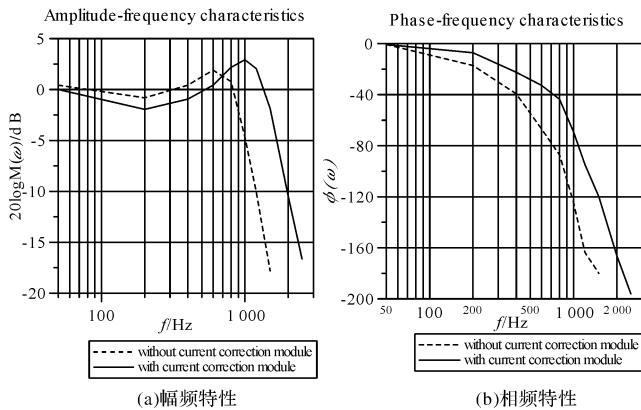


图 7 电流控制模块相频特性图

控制器通过角位移传感器能够直接读出转子的绝对角位置值  $\theta$ ,并通过专门的仿真软件将控制信号和电机转子角度保存在工控机中。转子角度  $\theta$  的波形如图 8 所示。

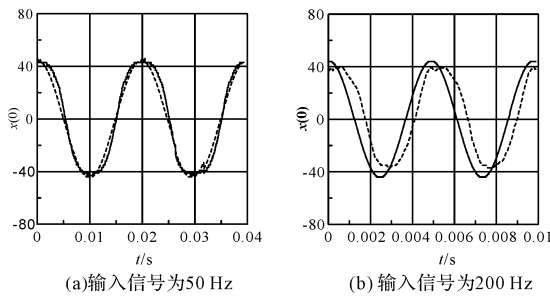


图 8 转子角度波形

## 4 结束语

本研究中选用的直流伺服电机是数字伺服阀的动力执行机构,利用文中介绍的控制系统对电机进行位置控制和电流控制,能够使其实现精确定位和更快速响应控制。实验结果表明加入校正模块后电流环的频响能从 600 Hz 达到 1 000 Hz,相位滞后小于  $65^\circ$ 。控制系统在 200 Hz 的输入信号下,转子能对输入信号进行实时跟踪,幅值衰减为  $-0.5$  dB,相位滞后为  $-30^\circ$ 。本研究的实验结论为进一步提高数字伺服阀的频响研究打下基础。

### 参考文献 (References):

- [1] 沈建新,方宗喜. 现代电机发展方向与关键技术[J]. 微特电机,2008,38(6):55-56.
- [2] 阮健,李胜,裴翔,等. 数字阀的分级控制及非线性[J]. 机械工程学报,2005,41(11):91-97.
- [3] 蔡卓剑,赵荣祥,程方斌. 电机转速和转子位置数字测量方法的研究[J]. 电气传动,2007,37(8):12-14.
- [4] 梅晓榕,庄显义. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [5] 郑舒. PWM 驱动电机的电流环设计[J]. 华东地质学院学报,2002,25(2):571-572.
- [6] FAN Qi-fu, SHI Song-jiao. On the well-posedness of the PWM control system[J]. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, 2006,5(1):105-110.
- [7] RUAN Jian, BURTON R. A new approach of direct digital control for spool valves[J]. *ASME, The Fluid Power and Systems Technology Division*, 2002, 9(6):146-147.
- [8] 阮健. 电液(气)直接数字控制技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2000.

[编辑:张翔]

(上接第 52 页)

### 参考文献 (References):

- [1] 于硕君. 无刷直流电机调速控制系统[D]. 沈阳:沈阳大学信息工程学院,2011.
- [2] WANG L B, LI H, SUN Y K F. Fuzzy Control Based on Self-adjusted Parameter for Brushless DC Motor[C]//International Conference on Mechatronics and Automation, 2007: 2352-2356.
- [3] 左旭坤. 基于 DSP 的无刷直流电机伺服调速控制系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学电气与自动化工程学院,2006.
- [4] YU J S. Wavelet Neural Networks in Nonlinear System Mod-

eling and Motor Drives[D]. USA: University of South Carolina, 2005.

- [5] 刘鼎. 基于 DSP 的永磁无刷直流电机模糊控制系统的研究与实现[D]. 长沙:湖南大学电气与信息工程学院,2010.
- [6] 张文栋. 基于 DSP 的无刷直流电机智能控制器的研究与设计[D]. 南京:河海大学电气工程学院,2007.
- [7] 宋受俊,刘景林. 无刷直流电机建模及其现代化调速方法的仿真[J]. 微特电机,2004(9):21-24.
- [8] 付磊. 基于 DSP 的无刷直流电机模糊控制系统设计和仿真研究[D]. 南昌:南昌大学信息与工程学院,2008.

[编辑:张翔]