

基于 ARM+FPGA 的数字交流伺服驱动器设计

支萌辉^{1,2}, 尹泉¹, 吕松垒², 华强²

(1. 华中科技大学 人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074;

2. 博能传动(苏州)有限公司 设计中心驱动器组, 江苏 苏州 215131)

摘要:为缓解模拟伺服驱动器分散性大、零漂高、可靠性低等问题,提出了一种高性能数字交流伺服驱动器的设计方案。在传统的模拟式伺服驱动器基础上,方案采用了 ARM+FPGA 的硬件架构,并结合集中控制模块化的思想对新型驱动器的功能、控制算法进行设计。该方案不仅能够充分发挥数字控制在控制精度和控制方法上的优势,还能够保证伺服驱动器的稳定性。测试结果表明,基于 ARM+FPGA 的交流伺服驱动器具有动态响应快、可靠性高、实时性好、抗干扰能力强等特点。

关键词:伺服驱动器;数字化;矢量控制;操作系统;位置控制

中图分类号:TP275 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed20409

Design of Digital AC Servo Driver Based on ARM and FPGA

ZHI Menghui^{1,2}, YIN Quan¹, LÜ Songlei², HUA Qiang²

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Drive Department of Design Center, Boneng Transmission (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215131, Jiangsu, China)

Abstract: To alleviate the problems of large dispersion, high zero drift and low reliability of analog servo driver, a design scheme of high-performance digital AC servo driver was proposed. In the scheme, the hardware architecture of ARM and FPGA was adopted based on the traditional analog servo driver, and the function and control algorithm of the novel driver were designed combined with the idea of centralized control modularization. This scheme can not only exploit the advantages of digital control in control accuracy and control method to the full, but also ensure the stability of servo driver. The test results show that the AC servo driver based on ARM and FPGA has the characteristics of fast dynamic response, high reliability, good real-time performance and strong anti-interference ability.

Key words: servo driver; digitalization; vector control; operating system; position control

近几年来,大规模集成电路和计算机自动控制技术飞速发展,促使伺服驱动技术快速更新。伺服驱动器在经历了模拟式^[1]、模数混合式阶段之后,现在已进入了全数字的时代。数字交流伺服驱动器不仅克服了模拟式伺服的分散性大、零漂高、可靠性低等缺点,还充分发挥了数字控制在控制精度上的优势和控制方法的灵活性,使伺服驱动器性能更加可靠^[2-3]。目前,数字交流伺服驱动器已经广泛应用于数控加工、工业机器人、包装加工等领域,这些领域对交流伺服驱动器的定位精度、速度稳定度、动态响应性、指令响应性等指标提出了更高的要求。

常规伺服驱动器的核心芯片大多采用低成本的数字信号处理器(digital signal processor, DSP)或进阶精简指令集机器(advanced RSIC machine, ARM)处理器^[4-5],但有限的芯片资源严重影响了伺服驱动器的动态响应、指令响应等性能。本文设计了一款基于 ARM+FPGA 的高性能数字交流伺服驱动器^[6-8],ARM 处理器采用了 TI 公司的 AM3356 芯片,并在外围配备了第二代双倍速率同步动态随机存储器(double data rate 2 synchronous dynamic random-access memory, DDR2 SDRAM)和 FLASH 作为主芯片的随机存取存储器(random access memory, RAM)和

FLASH资源;同时,伺服驱动器还采用现场可编程逻辑阵列(field-programmable gate array, FPGA)作为辅助控制芯片,用以处理高速的指令信息和编码器反馈信息。文章从伺服驱动器的基本原理出发,分别介绍了系统的硬件和软件设计,在此基础上,运用实验论证了该系统的良好性能,特别是高定位精度性能和动态响应性能。

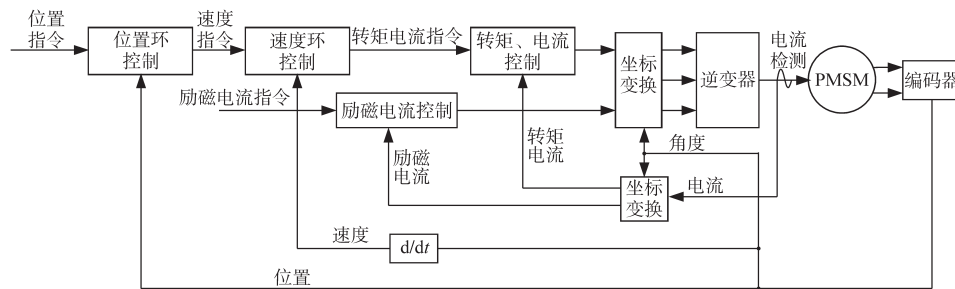


图1 伺服驱动器控制系统结构图

Fig.1 Structure diagram for control system of servo driver

响应性,并有效抑制电流环内的干扰。速度环主要控制电机的最终输出转速,它可以提高整个系统的抗负载扰动能力。位置环用于实现伺服驱动器的位置定位功能,它能够完成电机位置和角度的低误差跟随控制^[9]。三环控制策略是高性能交流伺服驱动器研究的重要组成部分。

1.2 伺服驱动器的算法控制基本原理

伺服驱动器驱动的伺服电机通常为永磁同步电机,与异步电机的矢量控制算法相比,同步电机的转子为永磁体,因此在矢量控制算法中不需要转子磁链观测器和励磁磁链发生器。

伺服电机采用矢量控制时, $d-q$ 坐标系下伺服电机的状态方程为

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_c \\ \omega_c & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - \frac{\omega_c}{L_s} \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: P 为微分算子; i_d, i_q 为 d, q 轴定子电流; R_s 为定子电阻; L_s 为定子电感; ω_c 为转子机械角速度; U_d, U_q 为 d, q 轴定子电压; Ψ_f 为转子磁极与 d 轴绕组之间的磁链。

电机对应的转矩方程为

$$T_e = p \Psi_f i_q \quad (2)$$

式中: T_e 为电机转矩; p 为电机极对数; Ψ_f 为转子磁极与 d 轴绕组之间的磁链; i_q 为 q 轴定子电流。

在电机转矩方程中,由于 Ψ_f 受永磁体温度和磁路饱和等因素影响很小,即基本保持不变,伺服电机转矩控制实质为对转矩电流 i_q 的控制。在

1 伺服驱动器的基本原理

1.1 伺服驱动器的基本思路

交流伺服驱动器是典型的三环控制系统,包括电流环、速度环和位置环3部分,如图1所示。电流环主要控制电机的输出转矩,通过调整电流控制环的相关参数,可以显著地提高系统的动态

没有弱磁控制的情况下,通常采用励磁电流 $i_d = 0$ 的控制策略。此时,只要精确地控制转矩电流 i_q ,就能够准确地控制伺服电机的输出转矩^[9]。

伺服驱动器控制算法框图^[10]如图2所示,主要包括电流环控制器、速度环控制器和位置环控制器3部分。

1.2.1 电流环控制器设计

电流环控制器要求电机具有较高的转矩响应速度,从而可根据电机的实际输出转矩进行快速反馈控制。本文采用了经典的PI控制器,其中比例增益 K_p 可以提高控制器对转矩误差的快速响应性,并提高开关穿越角频率;积分时间 T_i 可以减小PI控制器的稳态误差。

1.2.2 速度环控制器设计

速度环控制器通常采用PI控制器,其中比例增益 K_p 可以提高电机的响应速度,积分时间 T_i 可以减小控制的稳态误差,它对整个速度环的稳定性也有一定的作用,但PI控制器难以同时兼顾系统的响应速度和刚度。为了稳定整个系统的刚度,提高系统的响应频率和抗偏差能力,速度环采用了具有前馈的伪微分前馈反馈(pseudo-derivative feedforward feedback, PDFF)控制器^[11],它能够有效地提高系统的刚度,使速度阶跃响应更加平稳。

1.2.3 位置环控制器设计

位置环控制器通常采用P控制器,增大比例增益 K_p 可以有效地减小位置滞后量,但比例增益过大又会导致位置定位过冲。因此,本文在位置

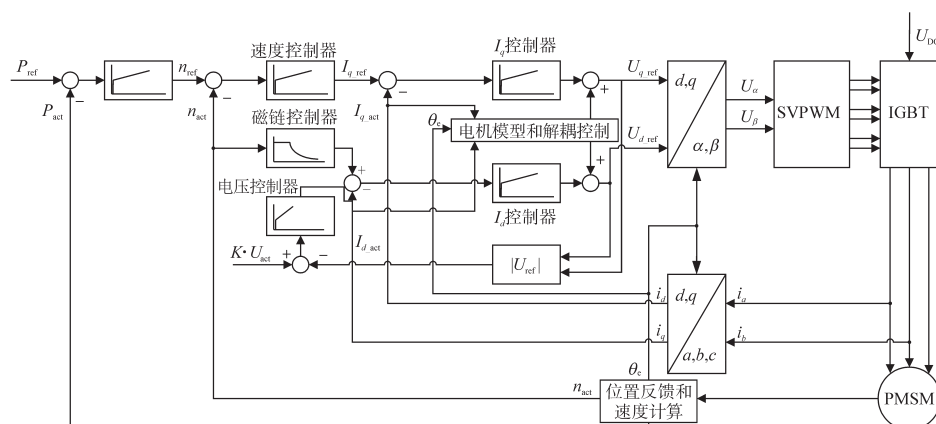


图2 伺服驱动器控制算法框图

Fig.2 Block diagram of control algorithm for servo driver

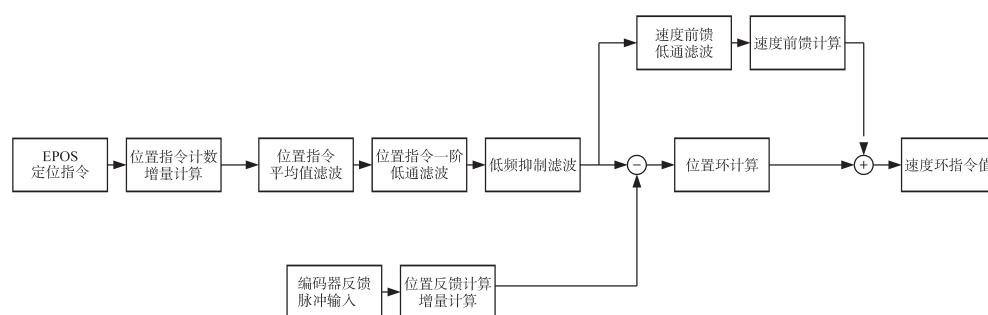


图3 位置环控制器结构图

Fig.3 Structure diagram of position loop controller

环控制器中增加了速度前馈控制,具体结构如图3所示,这样可以在不增加位置环增益的前提下减小系统的跟随误差。此外,由于速度前馈控制器的给定值为位置指令,存在一定的不稳定性,故在位置指令侧增加了低通滤波器,这样不仅能提高位置的响应性,还能减小系统振荡的几率。

2 伺服驱动器硬件设计

基于模块化设计理念,将所设计的数字交流伺服驱动器分为控制模块、功率模块和操作面板3部分。

1) 控制模块设计。伺服驱动器的控制模块采用了TI公司的AM3356BZCZD30作为主控芯片、ALTERA公司的10M02SCU169I7G作为辅助控制芯片,2者共同完成整个驱动器的控制工作。其中,AM3356是TI公司推出的一款基于Cortex-A8内核的32位ARM处理器,最高工作频率可以达到300 MHz,它具有功耗低、执行效率高等特点。同时,主控芯片外围配置了512 MB容量、266 MHz主频的DDR2芯片和64 MB容量的FLASH芯片用于辅助其工作。在控制模块中,AM3356

主要完成位置环控制、速度环控制、上位机通信等功能,FPGA主要完成编码器解析、电流环控制、控制模块与功率模块的高速通信、高速脉冲的输入输出等功能。

2) 功率模块设计。伺服驱动器的功率模块主要分为功率板、驱动板和EMI板,如图4所示。其中,功率板主要包括整流电路、制动电路和逆变电路,所设计的伺服驱动器的功率器件采用了赛米控公司的绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)模块,该模块整合了整流和逆变电路,具有损耗低、短时输出电流高、噪声抑制能力强等特点。驱动板用于实现脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)发波输出、风扇控制、短路保护、温升保护、制动电路驱动等电机控制相关功能。而EMI板则用于滤波和保护电路等功能。

3) 操作面板设计。操作面板主要由1个128×64点阵的LCD屏、9个按键等组成,用于实现伺服驱动器参数设置、故障显示、工作状态显示、参数上传下载等功能,它能为用户提供一个与伺服驱动器交互的界面。

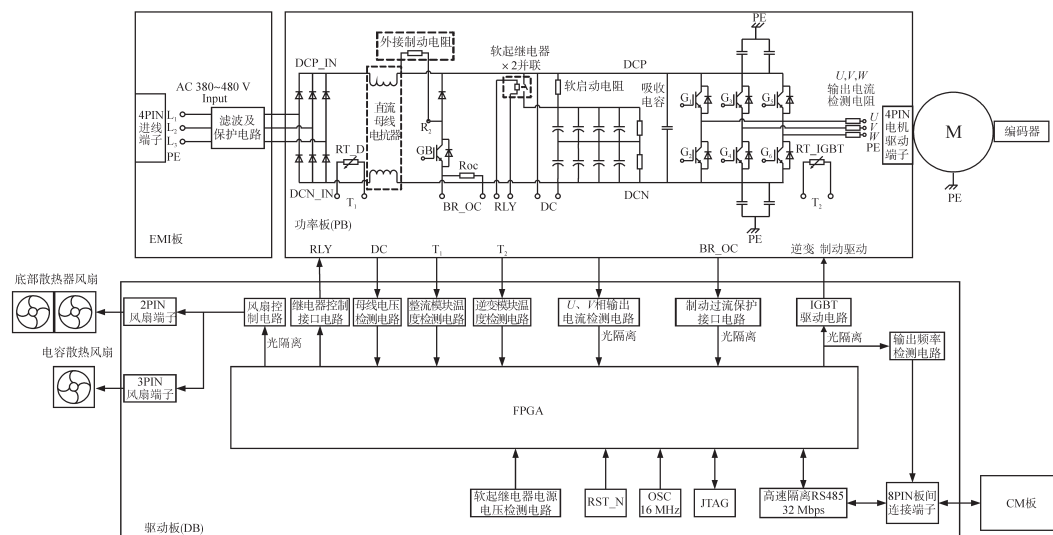


图4 功率模块结构图

Fig.4 Structure diagram of power module

3 伺服驱动器软件设计

伺服驱动器软件采用了TI公司的sys/bios操作系统、基于模块化的层次结构设计。每一层的实现均采用模块化设计理念,一个模块对应一个独立的功能,模块对外接口除了自身的成员变量和成员函数外,不存在跨模块的全局或静态变量。具体的软件设计模型如图5所示,最底层为硬件平台,由下至上依次为操作系统层、芯片外设层、算法驱动层以及应用层。

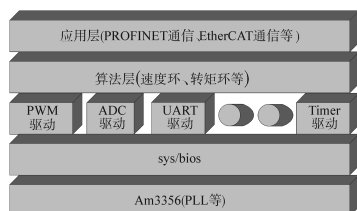


图5 伺服驱动器软件设计模型

Fig.5 Software design model of servo driver

当系统上电后,主程序优先进行芯片时钟外设初始化,然后进入BootLoader引导程序,对DDR2通信外设配置进行初始化,进而将程序从FLASH中引导到DDR2中,执行APP主应用程序。APP主应用程序流程图如图6所示,它完整地展示了伺服驱动器软件的工作过程。伺服驱动器的软件控制过程实质由硬件定时中断完成,具体的中断服务程序流程如图7所示。

图7中,控制内容包括位置环控制、速度环控制、电流环控制等主要的电机控制函数,和低频振荡抑制、PDFF处理、自适应陷波滤波器处理、

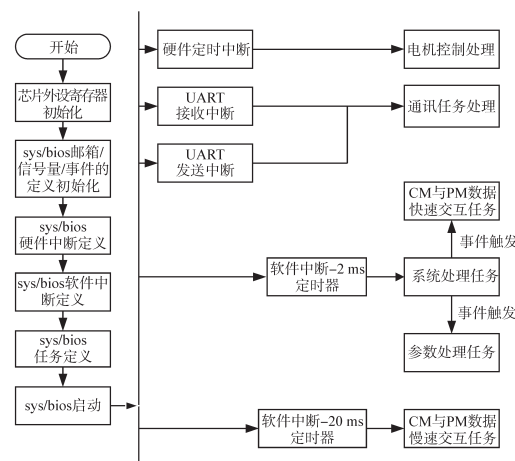


图6 APP主应用程序流程图

Fig.6 Flow chart of master APP

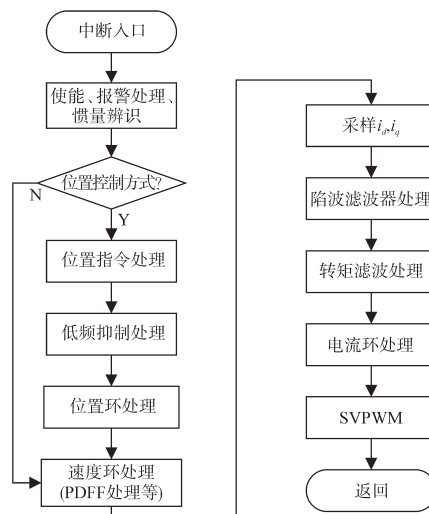


图7 中断服务程序流程图

Fig.7 Flow chart of interrupt service program

惯量辨识等伺服驱动器的高级功能。其中,惯量

辨识和自适应陷波滤波器是伺服驱动器的重要功能。惯量辨识主要是让伺服驱动器识别当前系统的负载惯量,以便更好地满足系统的动态响应性要求。伺服系统在实际应用中经常会遇到高频机械振动,而陷波滤波器则是解决高频机械振动的一种有效方法,由于机械振动的频率通常未知,设计中增加了FFT傅里叶变换模块,用于实现自适应的陷波滤波功能。

在 Matlab/Simulink 软件上搭建如图8所示交流伺服系统仿真模型,主要包括激励模型、位置指令滤波模型、位置环模型、速度环模型、电流环模型、伺服电机和负载模型、编码器模型。其中,位置指令滤波模型包含尖端抑制滤波、滑动平均滤波和低通滤波,如图9所示,图中 N_1 为尖端抑制频率系数, N_2 为滑动平均滤波时间,该模型能够避免伺服驱动器在接收位置指令后因负载过大

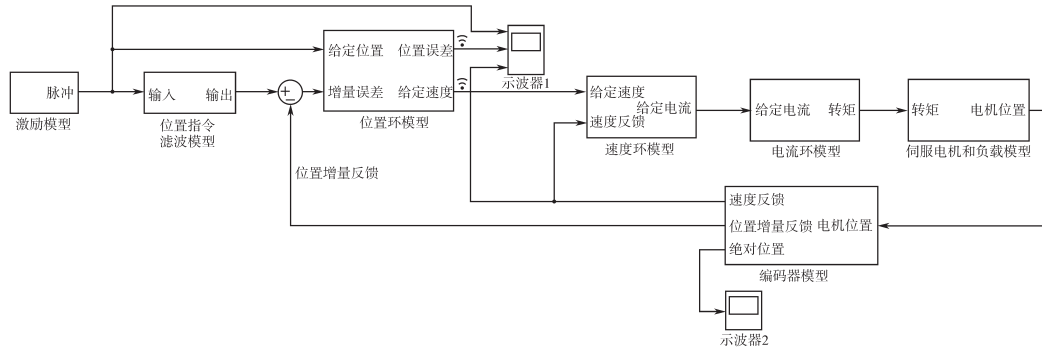


图8 交流伺服系统仿真模型

Fig.8 Simulation model of AC servo system

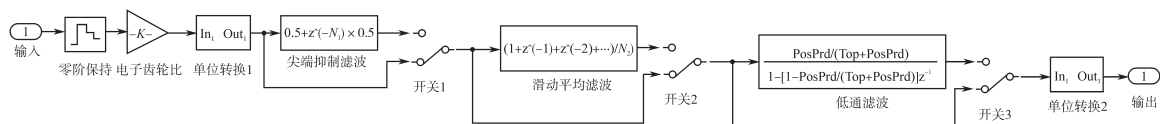


图9 位置指令滤波模型

Fig.9 Model of position command filtering

而出现输出转矩过大的情况。位置环模型包括速度前馈和P控制器,如图10所示。速度环模型包括PDF处理、PI控制器、积分退饱和处理、转矩指令的低通滤波和两组陷波滤波处理,如图11所示。位置环模型和速度环模型能够保证伺服电机在极短的时间内准确地到达给定位置,且对

转速的抖动也有很大的抑制作用。

伺服控制系统主要考虑位置环增益、速度环增益、速度环积分时间和转矩指令滤波时间4个参数,下面以速度环增益为例进行深入讨论。度环增益单位除rad/s外,还有Hz(即1/s),两者之间是弧度的换算关系。从量纲的角度推算速度环增益 K_p ,由下式:

$$\text{增益} \times \text{速度差} = (1/s) \times (\text{rad/s}) = \text{rad/s}^2 \quad (3)$$

而 rad/s^2 恰好是角加速度的国际单位。可以想到,将速度环的输出视为角加速度,也许可以参数标准化。因角加速度与电机的特定参数(电流、转矩等)无关,是一个直接表明加速特性的参数。而角加速度的计算公式为

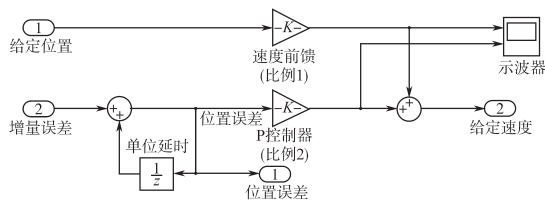


图10 位置环模型

Fig.10 Model of position loop

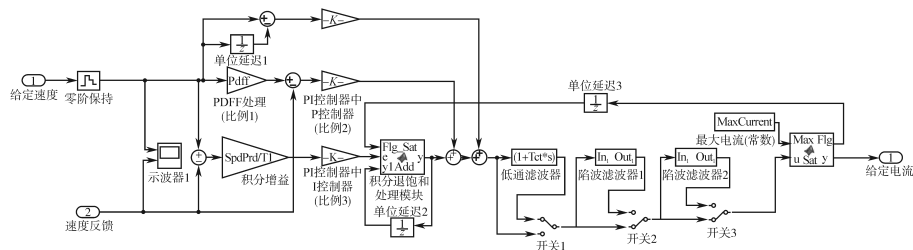


图11 速度环模型

Fig.11 Model of speed loop

$$T = J \times \alpha = b \times T_N \quad (4)$$

式中: T 为转矩; J 为转矩惯量; α 为角加速度; T_N 为额定转矩, b 为实际转矩指令百分比,且系数 b 无量纲。

式(3)可以改写为

$$K_p = \frac{\text{角加速度}}{\text{速度差}} = \frac{b \times T_N}{J \times n} \frac{60}{2\pi} \quad (5)$$

式中: n 为指令偏差。

通常情况下,速度环增益也称作速度环带宽,当带宽为 f_{bw} ,速度指令为 $A \sin(2\pi f_{bw} t)$,此时的加速度为 $2\pi f_{bw} A \cos(2\pi f_{bw} t)$,由式(3),有下式:

$$K_p [A \sin(2\pi f_{bw} t) - A \sin(2\pi f_{bw} t - \pi/2)] = 2\pi f_{bw} A \cos(2\pi f_{bw} t) \quad (6)$$

假设速度反馈的增益没有衰减,相位滞后 90° ,选择正弦指令的零相位点进行分析,此时速度指令约等于零。式(6)可以简化为

$$K_p = 2\pi f_{bw} \quad (7)$$

即速度环带宽 f_{bw} 等于增益除以 2π ,或者说 K_p 等于弧度表示的速度环带宽。类似的,位置环增益实际上就是弧度表示的位置环带宽。由式(5)和式(7),得到速度环带宽的表达式为

$$f_{bw} = \frac{b \times T_N}{J \times n} \cdot \frac{60}{2\pi \times 2\pi} \quad (8)$$

假设指令偏差 $3\,000\text{ r/min}$ 时转矩指令为 200% ,则速度环带宽为

$$f_{bw} = \frac{2 \times 2.39}{0.87 \times 10^{-4} \times 3\,000} \cdot \frac{60}{2 \times 3.14 \times 2 \times 3.14} = 27.86\text{ Hz} \quad (9)$$

即速度环增益设定为 27.86 Hz 。

4 伺服驱动器性能测试

为了测试所设计的伺服驱动器的性能,本文采用伺服对拖测试台和位置控制测试台进行实验论证。

如图12所示,伺服对拖测试台主要由支撑架、固定台、博能伺服电机、西门子伺服电机、联轴器、转矩转速传感器等组成。所设计的伺服驱动器和博能自主研发的 0.85 kW 伺服电机配合使用,负载则采用西门子S120变频器和西门子 5.65 kW 的伺服电机,2台伺服电机通过联轴器刚性连接。选用的转矩转速传感器最大检测转矩为 $100\text{ N}\cdot\text{m}$,最高检测转速为 $6\,000\text{ r/min}$,精度为 0.1 级。

如图13所示,在不使能对拖机组的前提下,

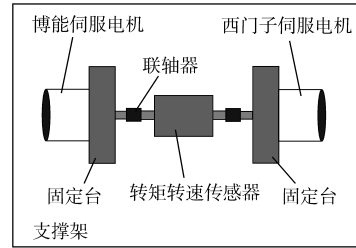


图12 伺服对拖测试台示意图

Fig.12 Diagrammatic sketch of servo towing test bench

首先让博能伺服电机保持 $+3\,000\text{ r/min}$ 的转速,当伺服驱动器突加反向 $3\,000\text{ r/min}$ 转速指令时,编码器得到的电机反馈转速迅速从 $+3\,000\text{ r/min}$ 变为 $-3\,000\text{ r/min}$,且速度响应时间约为 40 ms 。也就是说,所设计的伺服驱动器的速度响应时间约为 20 ms ,加减速响应快且运行平稳,几乎没有超调。

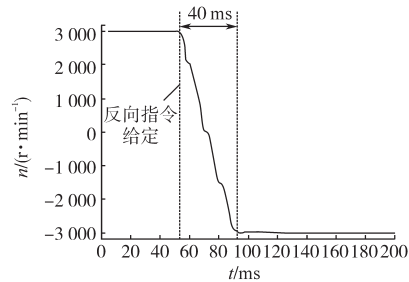


图13 电机转速响应曲线

Fig.13 Curve of motor speed response

让博能伺服电机保持 $-3\,000\text{ r/min}$ 的转速,稳定运行后通过对拖机组突加反向 100% 力矩,得到如图14所示的输出转矩和电机转速曲线。由图14可知,所设计的伺服驱动器的输出转矩响应迅速,突加负载时速度波动小,且波动很快消失。

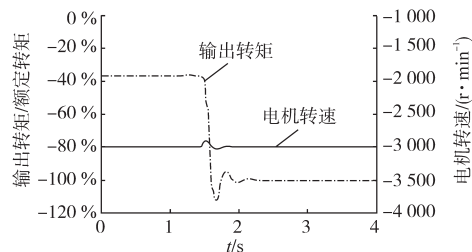


图14 输出转矩和电机转速曲线

Fig.14 Curves of output torque and motor speed

为了验证所设计的伺服驱动器的位置定位性能,采用了如图15所示的位置控制测试台。测试台主要由支撑架、固定台、博能伺服电机、博能减速机(减速比为 $5:1$)、滚珠丝杠、滑块、光栅尺探头、直线光栅尺、原点开关、限位开关和其它机械安装夹具组成。

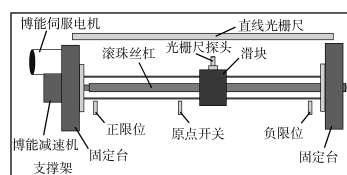


图15 位置控制测试台示意图

Fig.15 Diagrammatic sketch of position control test bench

如图16所示,在电机静止状态下,上位机给定某一位置指令时,伺服电机迅速做出响应,最终推动滑块行进一段距离,经伺服电机编码器真实反馈和光栅尺进一步论证后,发现伺服驱动器设定位置和编码器真实反馈位置偏差仅为11个编码器脉冲宽度。由于伺服系统设置的电子齿轮比为 $2^{20}:10\,000$,即上位机发送10 000个位置脉冲,对应的电机旋转1圈,编码器产生 2^{20} 个脉冲。而位置偏差11仅对应0.1个上位机位置脉冲,即伺服驱动器设定位置和编码器反馈位置偏差非常小。也就是说,本文所设计的伺服驱动器位置定位响应迅速且定位偏差很小。

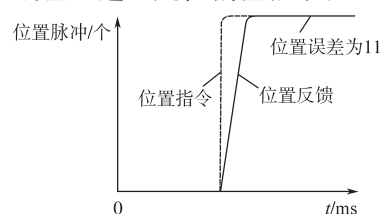


图16 电机高精度定位控制曲线

Fig.16 Curves of high-precision position control of motor

5 结论

本文提出了一种基于ARM+FPGA架构的高性能数字交流伺服驱动器设计方案,采用模块化的思想对功能、控制算法进行设计。

实验结果表明,该伺服驱动器具有良好的动

态响应能力,能够迅速准确地追踪接收的速度指令和位置指令。它不仅达到了行业内高性能伺服驱动器的性能指标,还兼容了各种工业以太网通信,顺应了国家“工业4.0”的大潮,对实际工业应用具有很高的参考价值。

参考文献

- [1] 杨敬曾,杜际五.模拟伺服系统的数字定位方法[J].仪器仪表学报,1988,9(1):102-107.
- [2] 沈阳,舒志兵,吴晨军,等.基于ARM+CPLD全数字伺服驱动器的设计与实现[J].机床与液压,2015,43(22):125-127.
- [3] 姚松坡,陈机林,刘超,等.基于DSP+FPGA的电动伺服加载系统设计[J].电气传动,2017,47(6):7-13.
- [4] 彭辉.基于DSP的全数字交流伺服驱动器设计与实现[J].南昌工程学院学报,2008,27(4):36-40.
- [5] 林森,王广龙,乔中海,等.基于ARM的微型化智能伺服驱动器设计[J].传感器与微系统,2018,37(9):101-104.
- [6] 郭永新,蔡建军,曲晓伟,等.基于多CPU架构伺服驱动控制器的研究[J].电气传动,2018,48(1):47-50.
- [7] Cui N Z, Yang G J, Liu Y J, et al. Development of an FPGA-based High-performance Servo Drive System for PMSM[C]// 2016 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, IEEE, 2006.
- [8] 杨洋,赵春璋.基于ARM与FPGA的伺服控制电路设计[J].电子测量技术,2017,40(7):16-19.
- [9] 王苏洲,舒志兵,李照.基于STM32+CPLD全数字同步伺服驱动器的设计与实现[J].电机与控制应用,2017,44(4):74-79.
- [10] 冯兆冰,吴孔圣,王声文,等.通用型交流伺服驱动器设计技术探讨[J].制造技术与机床,2012,55(4):60-65.
- [11] 李敏,陈典丽.PDFF调节在矢量控制的PMSM中的应用[J].信息技术,2010,17(1):104-107.

收稿日期:2019-06-17

修改稿日期:2019-08-25