

基于 CAN 总线的数字智能伺服控制器开发

Design of Digital Servo Controller Based on CAN Bus

北京航空制造工程研究所 刘 斌 周万勇 张 杨

[摘要] 介绍了一种基于 CAN 总线的数字智能伺服控制器。围绕控制器的硬件设计、电机控制策略和软件设计 3 项关键技术展开研究,重点描述控制器的硬件设计。试验结果表明了该控制器的正确性和有效性。

关键词: CAN 总线 DSP 控制器 电机控制

[ABSTRACT] A digital servo controller based on CAN bus is introduced. Three pivotal techniques of the servo, including the hardware design, the motor control arithmetic and the software design are mainly studied, the hardware design is described particularly. The results show the correctness and effectiveness of the digital servo controller.

Keywords: CAN bus DSP chip Motor control

在航空领域中,随着航空专用设备的不断发展,出现了诸如蒙皮拉形柔性多点模具、大型蒙皮柔性铣削工装等一系列航空专用设备,它们共同特点是都会用到大量精准的点位轴控制,而且这些轴相互独立,不需要数控机床一类的复杂数控系统。针对这个特点,可以使用智能数字伺服控制器和现场总线技术组成分布式轴控系统来实现。因此,依托航空基金课题开发了一种基于 CAN 总线的智能数字伺服控制器。

国外对这种智能数字伺服控制器的研究起步较早且目前已经较为成熟,如以色列 ELMO、美国丹纳赫、瑞士 Technosoft S.A. 等公司的产品已在国内销售,但是价格非常昂贵。国内在这方面研究起步较晚,数控厂商产品领域多接近传统数控系统,部分大学及科研机构从事过此方面的研究,但由于应用对象等方面的原因并未成熟并形成产业。

1 系统组成

基于现场总线的数字智能伺服控制器利用现场总线通信,可以进行高速数学运算,并且对电机进行各种方式的精确控制,它由控制器硬件系统加载控制软件组成。

在控制器系统中,硬件系统是控制器的基础,选择可编程高速 DSP 微控制器为核心芯片,根据功能需求设

计满足电机控制、系统通信等所需外围电路组成硬件系统。控制软件是控制器的灵魂,整个软件围绕控制算法展开,使用编程语言编程,通过程序控制系统硬件,最终实现控制器各项功能,系统组成如图 1 所示。

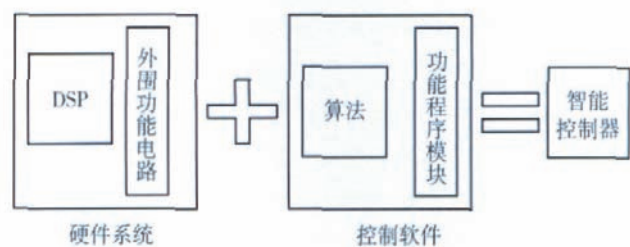


图1 控制器系统组成

Fig.1 Composition of controller system

2 硬件设计

本数字智能伺服控制器硬件设计具有一机多用的特点,可以满足小功率直流伺服电机、直流无刷伺服电机、永磁同步交流伺服电机的控制需求,使用直流伺服电机作为验证对象。在硬件系统设计中,选择了 TI 公司的 TMS320LF2407A 芯片作为核心微控制器,它不仅具有高速运算和处理大量数据的能力,而且片上集成了大容量的片上存储器和专用运动控制外设,使电路设计更加简洁、高效。

2.1 电机控制原理

电机控制最常用的方法是电枢电压控制法,即使用半导体开关元器件搭建桥式驱动电路(两相或三相),通过微控制器产生脉宽调制(PWM)波形来控制电动机电枢电压,实现电机调节。以直流电机为例,H型受限单极性可逆 PWM 驱动系统,通过产生 PWM 波形分别控制图 2 中开关器件 V1、V2、V3、V4 的通断,实现电机的正反转,同时控制一个 PWM 周期内开关管导通时间与周期时间比值(即占空比),从而改变电枢电压平均值,达到调节电机的目的^[1]。

2.2 控制器硬件结构

控制器硬件主要包括以 DSP 为核心展开的主控制

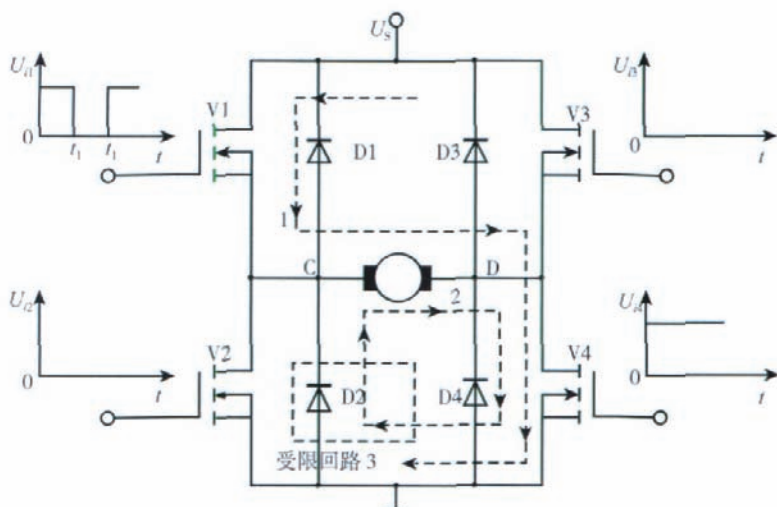


图2 H型受限单极性可逆PWM驱动系统

Fig.2 H-shaped limited single polarity reversible PWM drive system

电路板和以功率主回路为主的驱动电路板。核心控制板包括CAN总线驱动模块、RS232驱动模块、存储器扩展模块、I/O数字量处理模块等,主要完成电机控制计算、通信交互、数据处理等工作;驱动板主要完成电机功率驱动,包括功率驱动电路、电流反馈采样电路、编码器反馈电路模块、母线电流监控模块。控制器硬件结构如图3所示。

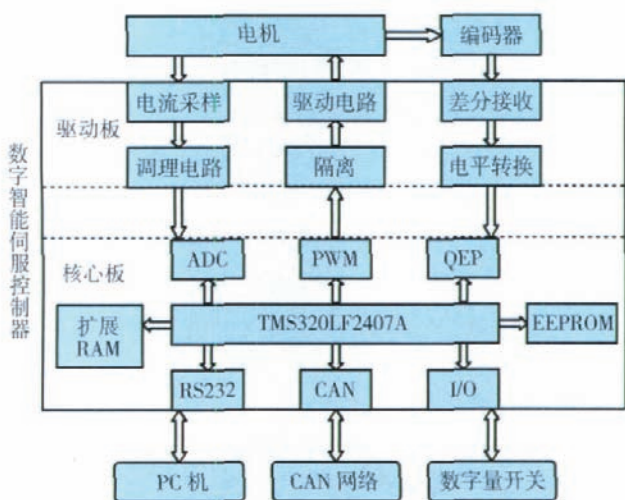


图3 控制器硬件结构

Fig.3 Hardware structure of controller

2.3 主控制核心板设计

TMS320LF2407A芯片具有丰富的片上资源,集成了CAN控制器、SCI接口模块、A/D转换模块、大量的I/O口等模块^[2]。在实现CAN通信、RS232串口通信、数字量开关处理功能时,只需要在DSP外围设计电平匹配驱动电路即可。本控制器选择3.3V供电的

SN65HVD230作为收发器来实现CAN总线的差分发送和接收功能;使用符合RS-232标准的芯片MAX3232来实现RS232串口通信功能;使用总线驱动器芯片SN74LS245连接I/O口实现开关量信号的电平转换;0~3.3V的电压信号则可以直接接入A/D转换模块。下文重点介绍DSP事件管理器的使用和存储器的设计。

2.3.1 事件管理器

TMS320LF2407A片上有2个专用于电机控制的事件管理器(EV),每个事件管理器有2个通用定时器、8个脉宽调制(PWM)通道、3个捕获单元。本控制器利用通用定时器配合比较单元产生6路两两对称的PWM波形,编程控制PWM产生死区以防止上下桥臂同时导通,利用QEP单元编程处理编码器

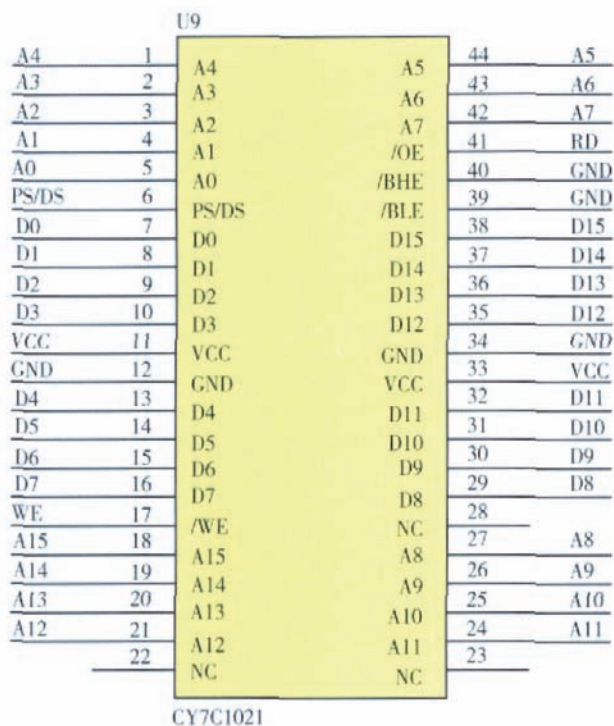
反馈信号,软件编程控制PWM的占空比实现电机控制。

2.3.2 存储器设计

TMS320LF2407A片内集成了32kB的Flash程序存储器、2kB的单口RAM、544B的双口RAM且具有外扩展最大64kB程序存储器、64kB数据存储器的功能。尽管存储器类型和容量都已经非常丰富,但是仍然不能满足使用要求。

程序在存储器中的运行分为2种,一种是在开发初期需要通过仿真器与电脑连接调试程序,此时程序在内存RAM中运行,而DSP片内只有256kB的RAM可分配为程序存储器使用,无法进行程序的仿真调试;另一种是程序开发完成后脱离仿真器运行,此时需要将程序烧写到片内Flash程序存储器中,DSP自带的32kB片内Flash程序存储器足够满足使用。因此,需要对外扩展RAM以用作程序存储器。此外,控制器使用过程中需要具有数据断电保存功能,DSP并未自带片内数据存储ROM,因此需要扩展片外ROM作为数据断电保存使用。

本控制器根据需要扩展了2种存储器:通过数据和地址总线与DSP连接的64kB的RAM存储器CY7C1021,通过I2C总线连接的256kb的EEPROM存储器AT24C256。其中,64B的外扩RAM既可以在仿真运行时作为程序存储器使用,又可以在脱离仿真器运行时作为数据存储器来使用,两者之间的切换通过跳线使得存储芯片的引脚PS/DS分别连接DSP芯片的PS或者DS引脚来实现,如图4所示。256kb的EEPROM存储器通过I²C总线方式扩展,因此需要与RAM配合使用,在控制器上电初始状态下要首先调用I²C总线通信



CY7C1021

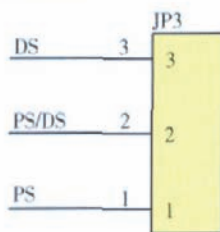


图4 RAM扩展

Fig.4 RAM extension

程序,将EEPROM存储器中的数据导入RAM中,同时在DSP运行过程中产生的需要断电保存的数据也要通过调用I²C总线通信程序存储到EEPROM存储器中,如图5所示。

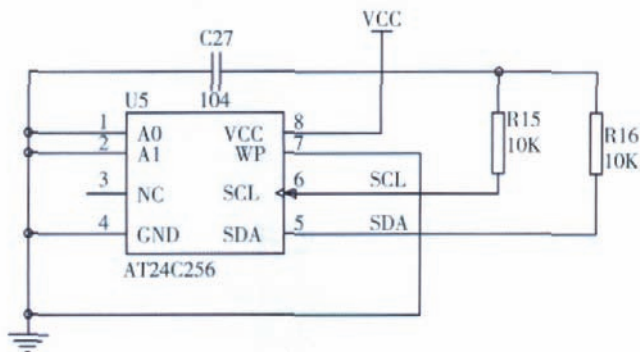


图5 EEPROM扩展

Fig.5 EEPROM extension

2.4 驱动板设计

驱动板主要将核心板产生的PWM波形隔离后送

入电机功率驱动电路来驱动电机,同时将电机电枢电流和母线电流采样送回核心板AD模块,将电机编码器反馈回来的信号进行差分接收和电平转换,然后送入核心板。本控制器选用二极管对PWM信号进行隔离,同时加载电平钳位电路对DSP芯片进行保护。选择芯片26LS32对编码器信号进行差分接收,使用74HC14进行电平转换。

2.4.1 功率驱动电路

使用芯片IR2132和MOSFET功率开关管IRF2807组成功率驱动电路。IR2132是一款高电压、高速度,驱动MOSFET和IGBT的功率驱动模块,具有3个独立的高、低电平输出通道,可以对三相整流桥进行有效驱动。由6个IRF2807组成的三相整流桥可以满足各种交流电机的驱动,如图6所示。

IR2132的正常工作依靠图4中电容C和二极管D组成的自举电路。要使自举电路正常工作,二极管D和电容C的选择是关键。要选择快速恢复二极管,其反向关断时间必须足够短,且反向耐压大于驱动功率管的母线电压,否则就形成了VB引脚和电源正极导通,无法保持电容C两端的压差。电容C的选择与频率有关,频率大时电容C应当减小,同时由于功率管的导通过程实际上是电容C的放电过程,电容C不能太小,其能量应足够驱动后端的功率管。此外,C最好为无感电容。

2.4.2 电流反馈模块

电流反馈包括电枢电流反馈和母线电流反馈,其测量方法相同,均使用微小电阻加电压调理电路来实现。本控制器选用0.01Ω、3W的微小电阻作为采样电阻,然后使用双通道运算放大芯片LM358中的一路产生稳定的1.65V电压,另外一路用于对母线电流采样进行放大,该运算放大电路为加法运算电路,通过改变电阻比值来调节放大倍数,并与基准电压相加。同时,使用运算放大芯片TLE2142对桥式驱动电路中的两相进行电流采样和调理电压,如图7所示。

3 控制策略

为保证电机控制系统平稳、快速、准确运行,通常要构建闭环系统,根据不同需求,电机控制最多可包括电流环、速度环、位置环3环控制^[3]。电流环主要具有启动和大范围加、减速时的电流调节和限幅作用,增强系统的抗电源扰动和负载扰动功能。速度环主要对给定速度和反馈速度进行运算,并通过运算结果进行电机调速控制。位置环主要实现电机位置的准确跟随和定位^[4]。

PID控制器是控制系统中技术比较成熟而且应用最广泛的一种控制器^[5]。比例调节的作用是对偏差在

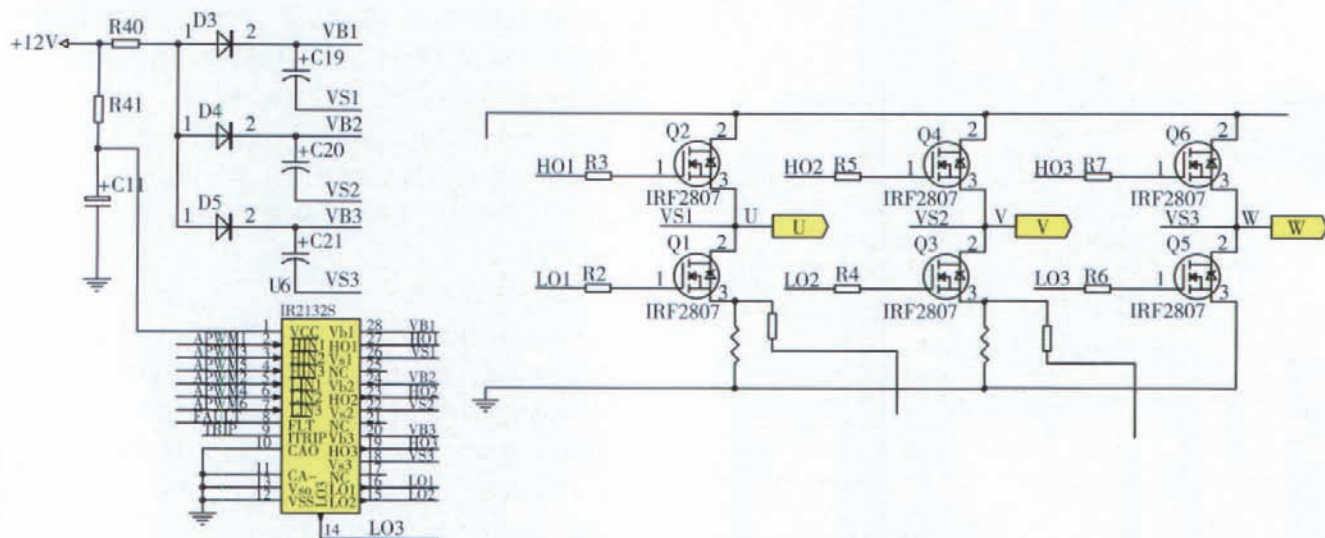


图6 电机功率驱动模块
Fig.6 Drive module of motor power

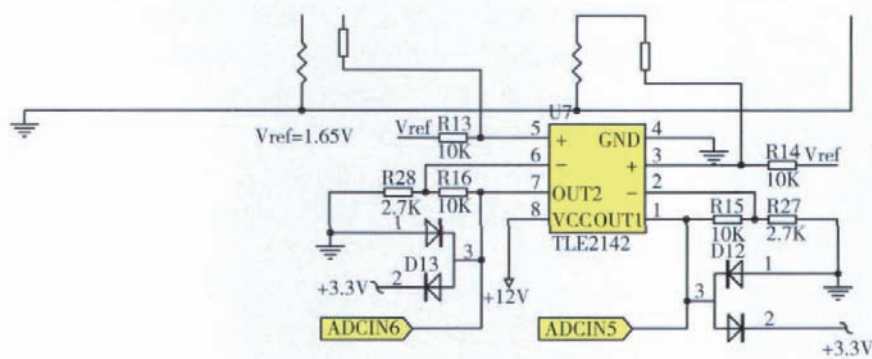


图7 电流反馈模块
Fig.7 Current feedback module

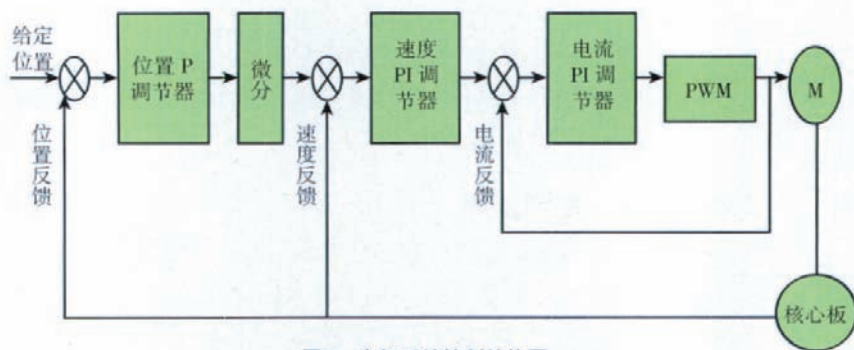


图8 电机系统控制结构图
Fig.8 Structure of motor control system

瞬间作出快速反应,积分调节的作用则是消除静差。在电动机3环的闭环控制中,电流环和速度环均采用PI(比例积分)调解器,位置环采用比例调解器。各PID调解器均通过编程实现,如图8所示。

在控制中极为重要的一点是参数整定,参数的好坏直接影响电机调节的品质。需要整定的参数包括比例系数 K_P 、积分系数 K_I 、采样周期 T 。在数字控制中采样周期需要满足香农定理,但由于没有精确的计算公式,因此只能根据工程经验选取。本控制器电流环采样周期选取 $60\mu s$,速度环采样周期为 $120\mu s$,位置环采样周期为 $240\mu s$ 。对PI调节器参数的整定,本控制器采用的方法是给定电机一个阶跃输入,绘制出电机响应曲线,然后可以采用扩充临界比例系数法、扩充响应曲线法、PID归一参数整定法等方法进行电机参数规划。在整定多闭环电机控制系统时有多级PI参数,因此应按照先内环后外环,先比例后积分的顺序整定。

4 软件设计

DSP控制软件是整个控制器的核心,它主要完成电机计算控制、数据处理、指令解析、信号处理等功能。整个控制器系统是一个实时控制系统,其结构是基于中断来实现的,其主循环是一个空循环,配合电机控制中断子程序、CAN通信中断子程序、串口通信中断子程序、I/O信号处理子程序等实现控制器各项功能。各

中断根据预先设定的中断优先级由 DSP 进行协调。软件流程如图 9 所示。

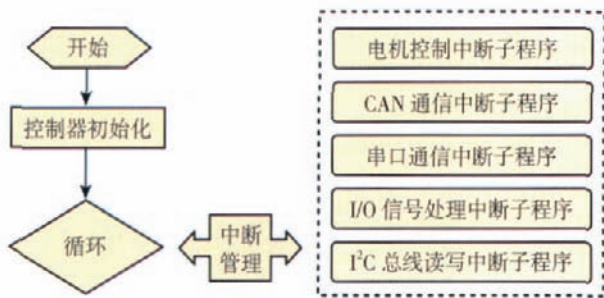


图9 软件流程
Fig.9 Software flowchart

电机控制中断子程序、CAN 通信中断子程序是本控制器的 2 大核心,分别实现电机的精确控制计算和 CAN 报文的收发以及指令的解释。电机控制中断设置由 DSP 时间管理器定时器定时触发,根据采样周期触发电机控制中断子程序。以电流环为例,定时器每 $60\mu\text{s}$ 触发中断子程序,首先保存现场,然后读取电流反馈值、进行电流 PI 调节、实现 PWM 控制,流程如图 10 所示。

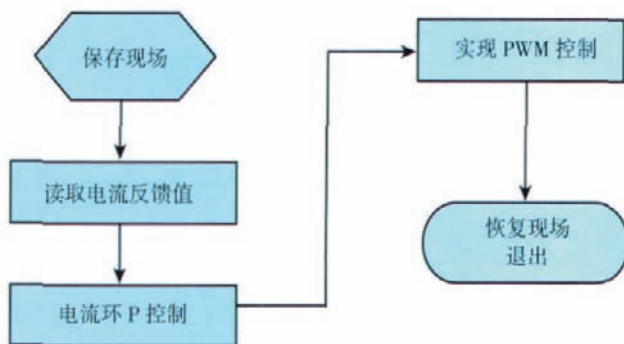


图10 电流环控制程序流程
Fig.10 Flowchart of current loop control program

DSP 的 CAN 控制器对报文收发流程有严格限制,不需要规划。为了实现 CAN 总线上多个节点的协调通信,进行了 CAN 总线通信协议规划。协议规划是对 CAN 通信报文的数据格式和内容进行规划统一,由于数字通信底层均为二进制方式操作,因此规划协议需要细化到各位数据。由于 DSP 的 CAN 总线控制器有 6 个邮箱,其中有 4 个邮箱可以设置为收件箱,每个邮箱有 A、B、C、D 4 个 16 位寄存器。对这 4 个寄存器进行规划,选择 A 寄存器作为指令寄存器,B、C、D 为参数寄存器。系统软件在接收到 CAN 报文后对邮箱数据按照查询方式进行解释并执行,完成通信功能。

5 结束语

本课题详细论述了基于现场总线的智能数字伺服控制器设计结构和实现方法。此设计目前已进入实验验证阶段,取得了较好的控制性能和通信性能,不仅为复杂控制理论的应用与研究提供了可靠平台,还为解决柔性多点模具、壁板柔性铣削工装等专用航空设备控制问题奠定了良好的基础。控制器实物图和速度跟踪曲线如图 11 和图 12 所示。

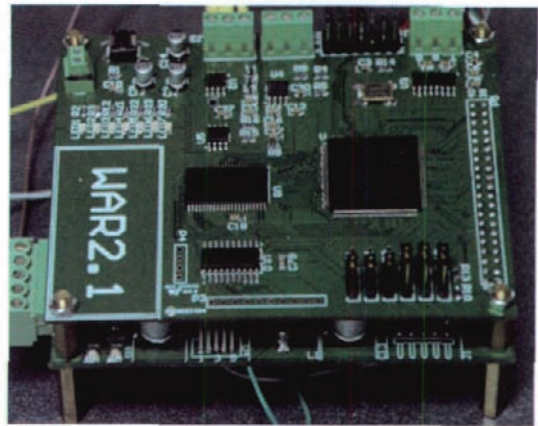


图11 控制器实物图
Fig.11 Controller sample

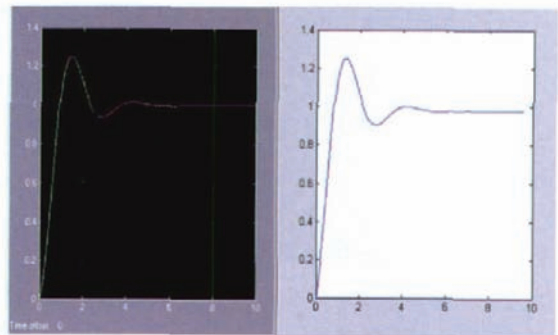


图12 电机速度跟踪曲线
Fig.12 Tracking curve of motor speed

参考文献

- [1] 李洪果. 飞机全电防滑系统设计与硬件实现 [D]. 北京: 北京航空航天大学机器人研究所, 2004.
- [2] 刘和平, 严利平, 张学锋, 等. TMS320LF24x DSP 结构、原理及应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [3] 张崇巍, 李汉强. 运动控制系统. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2001.
- [4] 王晓明, 王玲编. 电动机的 DSP 控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [5] 蔡春伟, 张东亮, 王风云, 等. 基于 DSP 的永磁电机数字交流伺服系统的硬件设计. 中小型电机, 2004, 31(4):36-39.

(责编 良辰)