

参数在线可调的直流伺服控制系统设计

万 宏^{1,2}, 李洪文¹, 张 超^{1,2}, 吴庆林¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要: 针对多数伺服系统控制器参数都是固化在控制器内部这一问题, 以 ARM7 LPC2478 芯片和 ALTERA EPM570T144 为硬件平台, 结合 MFC 框架编写可视化界面设计了 PID 参数可在线修改的直流伺服控制系统。详细介绍了系统的实现流程, 包括 CPLD 程序设计、ARM 程序设计和上位机程序设计。测试结果表明, 系统能够快速响应控制命令, 对 PID 参数的在线修改有利于提高系统的控制精度。

关键词: 复杂可编程逻辑器件; 伺服控制; 微功能电路; 参数在线可调

中图分类号: TP 273 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2014)02-0014-05

Design of PID DC Servo Control System with Parameters Setting Online

WAN Hong^{1,2}, LI Hongwen¹, ZHANG Chao^{1,2}, WU Qinglin¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For most servo system controller recently, the parameters were cured within the controller and it was difficult to change when the environment changed. A kind of DC servo system with PID parameter edited online was designed. Details about the implementation of the system include CPLD program design, ARM program design and host computer program design was given. The experimental results showed that the system was able to respond the control command quickly, and the modification of PID parameters online was helpful to improve the control precision.

Key words: complex programable logic device (CPLD); servo control; micro function circuit; parameters setting online

0 引 言

现代光电伺服控制系统对稳定性、快速性和准确性都提出了较高的要求。直流伺服系统包括被控对象、驱动器、控制器等诸多环节, 当被控对象负载改变或者电路内部元件参数变化都会影响系统的传递函数, 从而要求 PID 参数也随之做出调整以重新满足系统对稳定性、快速性和准确性的要求。在研究中, 一般采用基于被控对象数学模型的先进控制策略。在被控对象模型发生改变时, 需要重新测定传递函数, 测量传递函数的方法一般采用频域测量法^[1]或时域测量法^[2]重新测得系统的传递函数在 MATLAB 中根据传递函数模型仿真确定 PID 参数。在工程应用中, 伺服系统的模型往往是未知的, 其控制系统参数整定的

方法根据经验采用试凑法^[3]。此方法的缺点是参数调整过程步骤繁琐、工作量大。C++ 语言在工程上得到广泛应用, 微软提供的 MFC 框架大大方便了图形界面应用程序的开发。ARM 处理器以其体积小、功耗低、性能优越的特点而得到广泛应用。CPLD 芯片可进行复杂的逻辑处理并能进行精准的时序控制设计。因此, 本文基于上述背景设计了速度位置双闭环、PID 参数在线可调的直流电机伺服控制系统。

1 硬件设计

系统原理框图如图 1 所示。系统以 LPC2478 作为主控芯片, 通过 C 语言编程在 LPC2478 内部实现控制算法, 与 CPLD 之间的数据交互以及与上位机的通信。系统中选用 CPLD 芯片是

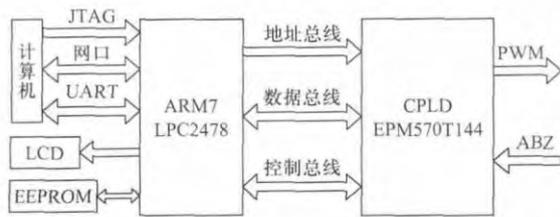


图1 系统原理框图

ALTERA 公司的 LPC2478 通过 Verilog HDL 语言编程完成 PWM 波的产生和 ABZ 码的计数功能。LPC2478 与 EPM570T144 之间数据交换通过 LPC2478 读写片外存储器的方式。LPC2478 与 EPM570T144 通过 16 根地址数据总线和 20 根地址总线相连,控制总线包括片选 CS0、CS2、读写使能信号和 GPIO。EPM570T144 相当于 LPC2478 的外部存储器,存储器地址空间为 0x80000000 ~ 0x80FFFFFF 和 0x82000000 ~ 0x82FFFFFF,因为互联地址线和数据线只有 16 根和 20 根,实际应用中能够实用的独立数据空间只有 4 MB。GPIO 可用作给 CPLD 程序提供外部复位信号以及 CPLD 程序给 LPC2478 提供中断信号等功能。

2 CPLD 程序设计

CPLD 程序框图如图 2 所示。CPLD 程序由 PWM 波产生模块、控制寄存器模块、数据 IO 模块和编码器反馈计数模块 4 个功能模块组成。

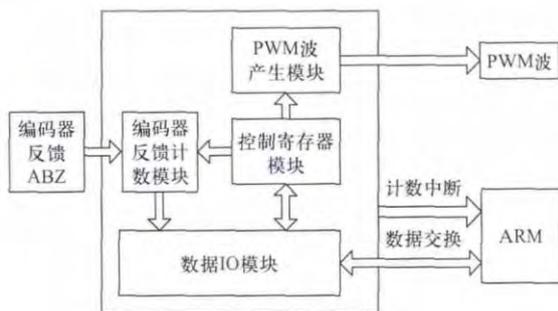


图2 CPLD 程序框图

数据 IO 模块主要完成与 LPC2478 之间的数据交换。值得注意的是 ARM 处理器的所有与存储器相关的外设和内部存储器共用地址总线和数据总线,在 CPLD 与 ARM 之间无数据交换的时刻,数据 IO 模块需要将 CPLD 与 ARM 数据总线相连的引脚设置为高阻状态,以保证 ARM 的内部存储和其他外设能够正常工作。

控制寄存器模块主要用来接收和保持 LPC2478

发送来的控制命令,主要包括 PWM 占空比寄存器、编码器反馈计数器计数时间设置寄存器和 PWM 波死区时间设置寄存器等。

PWM 波产生模块完成带死区的两路反相 PWM 波产生。

编码器反馈模块包括四倍频、辨向和计数功能,倍频 AB 码提高编码器码值分辨率^[4],辨向识别电机正反转,计数功能按照设定的计数时间记录 AB 码个数,并在一个计数周期结束之后产生一个上升沿中断信号,中断信号与 LPC2478 的外部中断引脚相连。

3 ARM 程序设计

3.1 PID 控制算法介绍^[5]

PID 控制器是一种线性控制器,将给定值与实际输出值偏差的比例、积分和微分进行线性组合形成控制量,在连续时间域中控制量的表达式如下:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

式中: K_p ——比例系数;

T_i ——积分时间常数;

T_d ——微分时间常数。

现代伺服系统中,控制器基本采用数字元件实现,在数字控制系统中进行的是一种采样控制,只能根据采样时刻的偏差值计算控制量,用数值逼近的方法,以一系列采样点时刻 nT 代替连续时间 t ,以求和代替积分,以后向差分代替微分可得到位置式数字 PID 算法,控制量表达式如下:

$$u(kT) = k_p e(kT) + k_i \sum_{j=0}^k e(jT) T + k_d \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T}$$

式中: k_i ——积分系数 $k_i = k_p / T_i$;

k_d ——微分系数 $k_d = k_p T_d$ 。

此算法存在的缺点是容易出现较大的累计误差、计算繁琐、需要占用较多的内存空间,因此产生了增量式 PID 算法。增量式 PID 算法是将控制量的增量作为数字控制器的输出量,其表达式如下:

$$\Delta u(kT) = (k_p + k_i + k_d) e(kT) - (k_p + 2k_d) e(kT - T) + k_d e(kT - 2T)$$

增量式 PID 算法的优点在于算法中无需累

加,控制增量仅有最近三次采样值有关,控制量的输出与初始值无关,易于实现手动到自动的无冲击切换。

3.2 程序设计

为了实现对伺服电机的精密控制,需要采用位置速度双闭环控制,达到调节时间短、超调小的要求^[6]。控制器的程序设计流程图如图3所示。

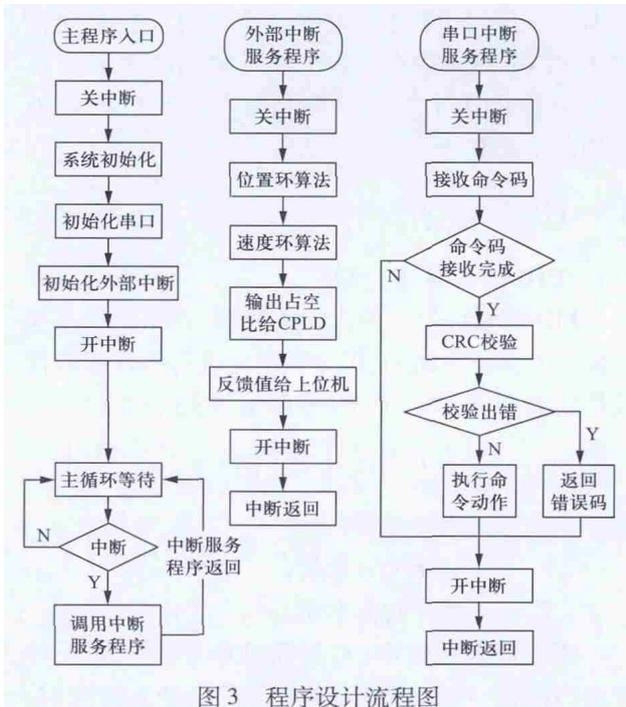


图3 程序设计流程图

整个软件系统主要包括一个主程序和两个中断服务程序。主程序在上电之后完成一系列初始化工作,打开中断,最后进入主循环等待系统中断信号产生。

外部中断服务程序执行的中断触发信号由CPLD编码器计数模块产生,假如上位机设定采样时间为2ms,则CPLD编码器计数模块每2ms产生一个外部中断。为保证控制系统的快速性和精度,外部中断服务程序在执行时应当不受其他系统中断打扰。在进入外部中断服务程序之后,首先屏蔽所有系统中断,接着执行位置增量PI算法和速度增量PID算法。位置环输出值为速度环的引导值,速度环的输出值为PWM波占空比。将位置增量对采样时间求导获得速度信息^[7],将位置增量累加得到位置信息,并将速度信息和位置信息发送给上位机。整个中断服务程序控制在采样时间间隔内执行完成。

串口中断服务程序负责接收上位机发送的下

行命令,并根据命令改变系统运行状态。

4 上位机程序设计

4.1 软件结构设计

上位机程序基于MFC框架设计实现,图4是上位机软件结构框图。图形界面负责人机交互,MFC提供基于文档/视图的单文档和多文档框架以及基于对话框的窗体程序框架。基于对话框的MFC程序开发相对简单,且在VS2010下有大量的图形化控件可调用,所以图形界面选择基于对话框的窗体应用程序框架开发。通信模块负责与下位机的通信功能,控制器硬件支持串口通信和网口通信两种方式。网口通信方式比较复杂,为方便实现系统设计时选择串口通信方式,在进行系统功能扩展时可添加网口通信方式以实现远程控制。数据处理模块对从串口接收到的伺服数据做适当的处理后显示在图形界面上,在需要时将数据存储到磁盘上以备后续分析。

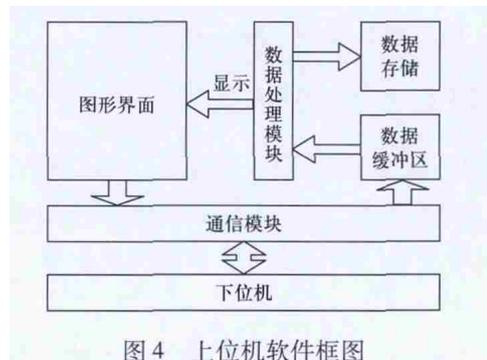


图4 上位机软件框图

4.2 通信模块设计

通信模块是整个系统的关键模块,MFC提供两种串口编程方式:MSComm控件和API函数^[8]。MSComm控件使用方便但灵活性不强,所以程序选用32位API编程的方式,将对串口的操作封装成MySerialPort类。

MFC中实用32位API函数对串口编程可以分为如下个步骤。

(1) 初始化串口。调用CreateFile打开串口,调用SetCommMask、SetupComm、PurgeComm、SetCommTimeouts、SetCommState等函数设置串口属性。

(2) 调用CreateThread创建一个辅助线程,用于监听串口上发生的事件,编写辅助线程全局函数,在函数中调用ReadFile完成串口数据接收。

(3) 在主线程中调用WriteFile发送下行命

令。在 MySerialPort 类中定义了一个用户自定义消息 WM_COM_RXCHAR,当串口接收缓冲区有数据到来,产生 EV_RXCHAR 事件,辅助线程全局函数读取接收数据,并调用 SendMessage (hWnd,WM_COM_RXCHAR,rxBuff,portN)向父窗口发送消息,在父窗口中实现 WM_COM_RXCHAR 消息响应函数完成串口数据接收。

4.3 数据处理模块

数据处理模块主要对从串口接收到的数据做适当处理。串口接收到的数据主要是下位机反馈的速度信息、位置信息、系统状态信息和错误码及下位机回送参数。对错误码、状态信息及回送的下位机参数不需要做处理直接给界面显示模块显示即可。对反馈的速度信息和位置信息根据需要作进一步处理。数据缓冲区是公共资源,需要考虑线程同步^[9],定义临界区 CRITICAL_SECTION m_csBufferDataSync,并在访问数据缓冲区开始和结束时调用 EnterCriticalSection 和 LeaveCriticalSection 同步线程。当有用户需求时,数据处理模块还负责将反馈的各种信息按照一定的规则写入到 txt 文件中。

4.4 图形界面显示模块

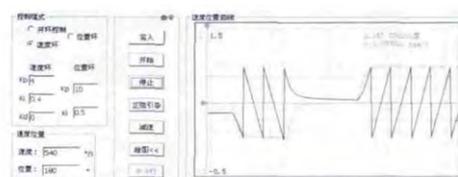
图形界面显示模块负责人机交互,包括控制参数的设置,实时曲线的绘制等。程序的设计基于 MFC 提供的对话框窗体应用程序框架,对控制参数的设置可方便调用 Button、Check Box、Edit Control 等控件实现,程序中通过调用 UpdateData 实现控件和控件关联变量之间的数据同步。对于曲线的绘制功能,程序中定义了 GraphWnd 类,派生自 CWnd,为 GraphWnd 类实现 OnPaint 函数完成绘图操作。为了实现曲线的实时显示,在 GraphWnd 类中重载了基类 CWnd 的 PreSubClassWindow 函数完成一些绘图的初始化工作以及定时器的设置,定时器的触发时间为40 ms(人眼将大于 24 帧/s 的连续图像视作动画),在 OnTimer 中调用 Invalidate 和 Update Window 重绘串口,从而实现了曲线的实时显示功能。在对话框中拖入一个静态文本控件,并在对话框初始化时子类化静态文本控件,指定自定义的 GraphWnd 类。

程序中的绘图操作在 OnPaint 函数中执行,在 MFC 的绘图机制下,当窗口因任何原因需重绘

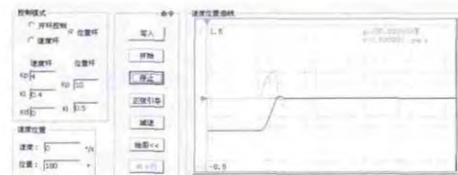
时,首先用背景色将显示区域清除,然后调用 OnPaint,当背景色与绘图内容反差较大时,背景与图形在短时间内交替出现,形成人眼可辨的闪烁现象。为了解决在绘制实时曲线时产生的屏幕闪烁问题,程序在图形绘制时使用了双缓冲技术^[10]。双缓冲技术的原理是将要显示的图形首先在内存中绘制完成,然后将内存中绘制的图形拷贝到屏幕上去,这样绘制过程隐藏在内存中进行,拷贝过程属于规整的内存拷贝速度非常快,内存中的图形与屏幕上显示的图形差别不大,从而解决了屏幕的闪烁问题。

5 系统测试

在系统软件设计基础上,以单轴伺服电机为被控对象搭建测试系统。测试系统由单轴伺服电机、增量式脉冲编码器、PWM 伺服驱动器、控制器和上位机控制软件组成。单轴伺服电机在电机转轴上安装增量式编码器构成半闭环控制系统^[11],编码器转一圈返回 20 000 个码值。电机转速由采样时间内位移对 t 求导获得,电机位置由编码器返回位置增量累加获得。因为伺服控制系统采用位置和速度双闭环可选控制方式,在对控制参数调节时,需要遵循先速度环后位置环的顺序原则。用上位机软件调节速度环 PID 参数,做阶跃响应实验,如图 5(a) 所示, $K_p = 4, K_i = 0.4, K_d = 0$,引导速度从 $0^\circ/s$ 阶跃变化到 $-540^\circ/s$ 到 $0^\circ/s$ 再到 $540^\circ/s$ 。在速度环调节好的基础上做位置环参数调节,位置环采用 PI 控制,如图 5(b) 所示,位置环 $K_p = 10, K_i = 0.5$,位置从 20° 到 180° 。



(a) 速度环阶跃响应



(b) 位置环阶跃响应

图 5 上位机控制界面

6 结 语

基于 ARM + CPLD 的伺服控制器并结合 MFC 编程设计了速度环 PID 控制、位置环 PI 控制、PID 参数在线可调的位置速度双闭环控制系统。

通过测试试验表明,系统响应速度快,速度环无超调,稳态误差在正负 1~2 个码值,位置环的稳态误差为零,且响应速度也较快。系统具有良好的人机交互界面,在系统某个环节参数改变,比如被控对象改变或者 PWM 伺服驱动器改变导致整个系统传递函数改变时,可方便地通过上位机软件更改驱动器参数,为工程应用省掉了反复编译、下载程序做 PID 参数调节的繁琐过程,并能直观对控制系统性能做出评价。

【参 考 文 献】

- [1] 王帅,陈涛,李洪文,等. 光电跟踪伺服系统的频率特性测试与模型辨识[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 78-83.
- [2] 袁震东. 传递函数的时域估计及其应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1984(3): 21-28.
- [3] 张彬,周军,高智刚. 电动伺服系统模型构建与辨识方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(11): 76-79.
- [4] 钞靖,王小椿,姜虹. 基于 FPGA 的光电编码器四倍频电路设计[J]. 仪表技术, 2007(6): 17-21.
- [5] 黄友锐,曲立国. PID 控制器参数整定与实现[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 邓永停,李洪文. 基于 ARM 与 CPLD 的伺服控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 16-19.
- [7] 王建立,陈娟,陈涛,等. 位置差分数字测速传递函数的推导[J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 74-76.
- [8] 杨锋,桂卫华,陈锋,等. Win32 环境下基于 VC++6.0 串口通信编程方法[J]. 计算机技术与自动化, 2004, 23(2): 70-73.
- [9] 王险峰,刘宝宏. Windows 环境下的多线程编程原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [10] 江建国,温少营,张瑞楠. 基于双缓冲技术的 GDI+ 无闪烁绘图[J]. 计算机应用, 2012, 32(S2): 136-139.
- [11] 敖荣庆,袁坤. 伺服系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006: 2-3.

收稿日期: 2013-06-25

(上接第 13 页)

降低了对于小功率直流力矩电机伺服控制系统的开发成本。在功率允许的条件下驱动多路电机时,基于 A3988 的伺服系统的优势更加明显。例如采用同样的 DSP 作为控制器,基于 IPM 的驱动器只能驱动一路电机,基于 A3988 的驱动器最多能驱动 4 路电机,提高了 DSP 控制器的利用率。

4 结 语

通过试验验证和不同伺服系统的对比,对于小功率直流力矩电机伺服控制系统的设计,相比传统的 DSP + IPM 的设计方案,基于 A3988 + MCU 的设计方案在软、硬件方面均能在保证控制效果的前提下节约成本,硬件成本下降了 75%~80%。在功率允许的条件下,驱动多路电机时,基于 A3988 的伺服系统相比基于 IPM 的伺服系统

节约成本的优势更明显。

【参 考 文 献】

- [1] 王烁,田书林,戴志坚. 基于 A3988 电机驱动芯片的电机控制电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(7): 65-67.
- [2] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [3] 新华龙电子有限公司. C8051F12X 与 C8051F13X 系列混合信号 ISP FLASH 微控制器数据手册[G]. 2004.
- [4] 王显军. 基于 SOC 单片机的高集成度光电编码器电路设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1082-1086.

收稿日期: 2013-07-29