

文章编号:1671-6833(2017)06-0054-05

基于 FPGA 的直流电机伺服控制系统设计与实现

常怡萍, 刘 琴, 杨 蕾

(中原工学院 电子信息学院 河南 郑州 450007)

摘 要: 为了满足直流电机伺服控制系统实时控制的要求,提高电机跟踪控制的精度,设计了基于单片 FPGA 的直流电机伺服控制系统.该控制系统采用 Nios II 内核实现位置环和速度环控制策略,系统的电流环通过并行硬件电路实现.为了减小电机的力矩波动,设计了基于 Anti-Windup 策略的 PI 速度控制器;为了减小系统的超调量和调节时间,位置环采用了超前滞后校正器.仿真和实验结果表明,设计的伺服控制系统具有较好的稳态精度和动态性能,满足系统的设计要求.

关键词: FPGA; Anti-Windup; Biss; 伺服控制

中图分类号: TP 273 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2017.03.006

0 引言

直流电机以其优异的性能在航空航天、数控机床、汽车电子等领域得到了广泛的应用.传统的直流电机伺服控制系统通常采用基于 DSP 和 FPGA 架构的控制器,此类控制器电路结构复杂、灵活性较差,不利于系统的升级和维护.为了简化外围硬件电路设计,近年来基于单片 FPGA 的伺服控制器成为研究的热点,并且在工业控制领域得到了成功的应用^[1-3].文献[4]采用 FPGA 完成了基于 Anti-Windup 策略的永磁同步电机速度控制,实现了永磁同步力矩电机转速的快速无超调控制;文献[5]在 FPGA 中实现了感应电机的神经网络控制,实现了感应电机的集成伺服控制;文献[6]通过硬件语言在 FPGA 中完成了永磁同步直线电机的自适应模糊控制^[6].上述控制算法的实现均采用并行硬件电路实现,调试周期较长,对编程能力要求较强.由于 FPGA 支持基于 C 语言的 Nios II 内核,该内核具有快速的运算性能和灵活的外围接口设计,因此,Nios II 内核在伺服控制系统中得到了较多的应用^[7].

传统的 PI 控制器受控制器输出限幅的影响,电机的力矩和转速输出容易出现超调和振荡,文献[8]采用基于 Anti-Windup 策略的 PI 控制器,实现了望远镜伺服控制系统的快速、无超调控制.文献[9]通过新型的 Anti-Windup 策略

完成控制器从 P 到 PI 的平稳切换,实现了大阶跃信号的无超调控制.

为了提高直流电机伺服控制系统的集成度和系统的实时性,笔者将采用 Altera 公司的 FPGA-EP4C22E22 对直流电机伺服控制系统进行设计,在 FPGA 中实现了速度环和位置环控制策略、电流环策略、电机电流采集、脉宽调制(PWM)、Biss 编码器数据采集.相比于传统基于 DSP 的伺服控制系统,提出的方案在精简硬件电路设计的同时,具有更好的灵活性.针对速度环阶跃响应超调的问题,采用了具有 Anti-Windup 策略的 PI 控制器,最后通过仿真和实验对上述设计进行了验证.

1 伺服系统的硬件设计方案

直流电机伺服控制系统的总体硬件设计方案如图 1 所示,其中电机的位置环和速度环在 Nios II 内核中实现,电流环 PI 控制器采用并行电路实现,PWM 由比较器产生,电机电流数据和 Biss 编码器数据的采集通过有限状态机实现.在 FPGA 中采用有限状态机可以更有效地按照芯片 AD7656 数据手册要求的时序进行 AD 数据的采样和读取.上述模块的时钟统一由倍频/分频模块产生.硬件设计的难点是电流 PI 控制器、电流 AD 采集的有限状态机实现和 Biss 编码器数据采集,因此,下面重点介绍这两部分的设计.

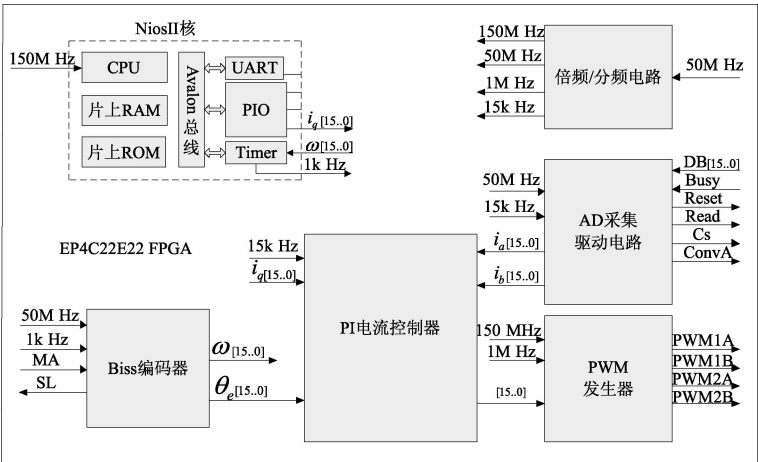


图 1 系统的硬件设计方案

Fig.1 Scheme of hardware design

1.1 电流 PI 控制器模块

电流控制器采用传统的增量式 PI 控制器,其表达式如下:

$$e_x(k) = i_x^*(k) - i_x(k); \quad (1)$$
$$\Delta u_x(k) = k_p(e_x(k) - e_x(k-1)) + k_i e_x(k); \quad (2)$$
$$u_x(k) = u_x(k-1) + \Delta u_x(k), \quad (3)$$

式中: x 代表 d 轴和 q 轴; $e_x(k)$ 为电流误差; $\Delta u_x(k)$ 为 PI 控制器增量输出; $u_x(k)$ 为 PI 控制器输出. 具体实现过程如图 2 所示,电流环 PI 控制器中包括采样序列 $u(k)$ 、 $u(k-1)$ 以及 $e(k)$ 、 $e(k-1)$,在 FPGA 硬件控制器中采用 D 触发器实现采样保持和数据的缓存. 为了实现浮点算法并且保证运算的精度,采用 Q12 算法进行数据的处理. Q 算法解决的是 FPGA 数字电路无法直接进行浮点运算的问题,Q12 是用 12 位二进制定点数来表示浮点数(浮点数范围是 $-8 \leq x \leq 7.999\ 755\ 9$). 电流环即电机的力矩控制回路,将其采用并行硬件电路实现,优点是:(1)并行硬件电路运算速度更快,有利于电机力矩波动的及时调节;(2)减小 Nios II 内核运算负担,从而将先进的控制策略嵌入到内核中.

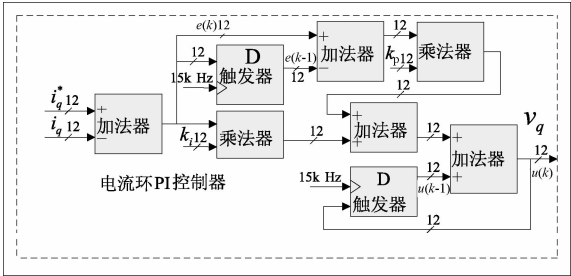


图 2 电流控制器的硬件实现

Fig.2 Hardware implementation of current controller

1.2 电流采集模块

电流的采集是通过 AD 采样芯片 AD7656 实现的,FPGA 对 AD7656 进行数据的读取需要通过

有限状态机实现. 状态机根据 16 位模数转换芯片 AD7656 的时序进行编写,如图 3 所示. 在 FPGA 上电完成复位后,在采样信号 15kHz 的上升沿完成采样触发,等待触发结束;然后 AD7656 芯片进行电流数据的采样保持,芯片的 Busy 信号有效,当 FPGA 时钟扫描到忙信号无效时等待转换结束;最后 FPGA 读取 AD7656 数据寄存器中的通道 1 和通道 2 内部的 16 位电流数据,同时输出转换结束信号,完成一次数据采样. 在完成电流的采集后,有限状态机输出转换结束信号给电流环,进行电流环控制器的计算.

1.3 Biss 编码器数据采集

针对 Renishaw 公司的 32 位绝对式编码器进行数据读取实验研究,该编码器是基于 Biss-C 模式的串行协议,该协议是一种主-从接口模式^[10-11]. 主接口控制位置获取时序和数据传输速度,而绝对式旋转编码器为从接口,接口由两个单向差分线耦组成. MA 将位置采集请求和时序信息(时钟)传输到从主接口,SLO 将位置数据从编码器传输到与 MA 同步的主接口,数据传输格式如图 4 所示. 根据图 4 所示的请求循环进程,在 FPGA 中设计如图 5 所示的有限状态机,进行编码器数据的读取.

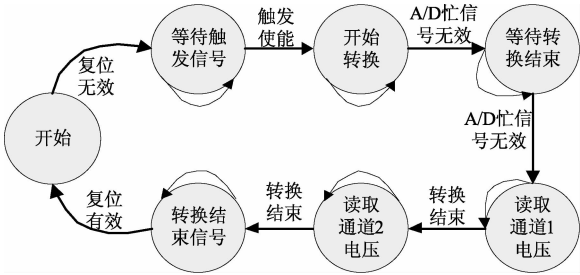


图 3 电机电流采集的有限状态机

Fig.3 Finite state machine sampled by motor current

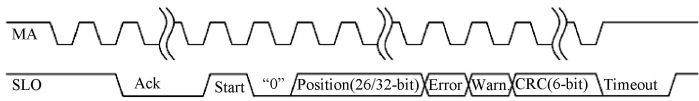


图 4 32 位绝对式编码器数据格式
Fig. 4 Data mode of 32 bits absolute encoder

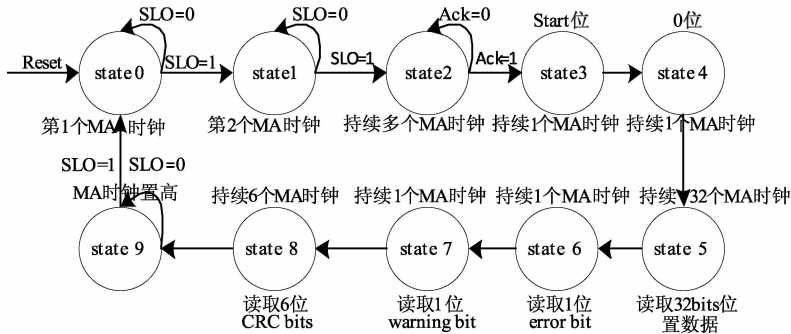


图 5 32 位编码器读取状态机

Fig. 5 FSM of 32 bits absolute encoder data reading

图中 Ack 为应答信号,其持续时间为读数头计算绝对位置的时间;“start”位和“0”位均为 1 位,“start”位始终是高电平,“0”位始终是低电平;绝对位置数据为二进制格式,首先发送给高位.对于旋转编码器来说,每转正好有 $2n$ 个脉冲,之后脉冲数溢出绕回到零.“error”位低电平有效:“1”表示传输的位置信息已被读数头的内置安全校验算法校验,结果正确;“0”表示内部检查失败,位置信息不可信.“warning”位低电平有效:“0”表示应对编码器(及/或读数窗口)进行清洁.“CRC”位为校验位,位置、错误及警告数据的 CRC 多项式为: $x^6 + x^1 + x^0$, 它先被传输为最高位,然后转换.起始位和“0”位从 CRC 计算中忽略.

2 位置和速度控制器设计

伺服控制系统采用如图 6 所示的控制结构,由位置控制器、速度控制器、结构滤波器、速度检测和控制模型组成.其中控制模型包括了电流环和系统的结构模态.为了增加系统的带宽和响应速度,需要设计位置控制器、速度控制器和结构滤波器,位置控制器采用超前滞后补偿的形式,速度控制器采用具有 Anti-Windup 策略的 PI 控制器.结构滤波器的应用目的是抑制在谐振频率处的驱动力矩成分,提高控制系统的增益,进而提高系统的带宽和动态性能.结构滤波器的表达式为

$$W_{SF}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_z \omega_{NF} s + \omega_{NF}^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_{NF} s + \omega_{NF}^2}, \tag{4}$$

式中: ω_{NF} 为弹簧质量模型的谐振频率,称为陷波频率; ζ_z 、 ζ_p 分别为结构滤波器的零点和极点阻尼

系数.

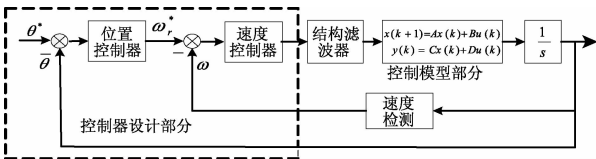


图 6 直流电机伺服控制系统结构图
Fig. 6 Dc motor servo control system structure
位置超前滞后补偿控制器形式为

$$G_{pc}(s) = \frac{k_p (T_1 s + 1) (T_3 s + 1)}{(T_2 s + 1) (T_4 s + 1)}, \tag{5}$$

式中: k_p 为控制器增益系数; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为控制器时间常数. 具有 Anti-Windup 策略的速度 PI 控制器的输出 i_q 为

$$i_q = k_p \cdot \Delta\omega + q, \tag{6}$$

式中: q 表示 PI 控制器的积分输出; $\Delta\omega = \omega_r^* - \omega$. 控制器输出工作在线性区时,速度环采用 PI 控制形式;当速度阶跃信号较大时,PI 控制器输出会达到饱和,基于反馈计算的积分输出值将以一定的速率复位为零,此时,控制器为纯比例控制.

积分输出 q 的表达式为

$$q = k_p \cdot \Delta\omega + \frac{k_i}{s} (\Delta\omega - k_a \cdot \Delta i_q), \tag{7}$$

式中: $\Delta i_q = i_q - i_q^*$; k_p 、 k_i 分别为 PI 控制器的比例时间常数和积分时间常数; k_a 为 PI 控制器反馈计算常数. 控制算法由电流环、速度环和位置环组成. 电流环需要实时、快速、准确地跟踪电流指令信号,因此电流控制器采用 PI 控制器,以使系统快速响应,消除静态误差. 速度环的作用是增强系统的抗负载扰动的能力,抑制速度波动,实现稳态

无静差. 位置环的作用是实现电机角位置的精确定位,为了保证系统的稳定,位置控制器采用超前-滞后补偿控制器.

3 实验结果分析

基于上述设计对直流电机驱动的小型转台进行了伺服控制实验,电机参数如下:电阻 $R = 1.6\ \Omega$,电感 $L = 6.0\ \text{mH}$,负载转动惯量为 $J = 13\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$;编码器采用 32 位 Biss 绝对式编码器,分辨率为 $0.000\ 3''$. 位置环设计参数: $k_p = 150, T_1 = 1.5, T_2 = 0.039, T_3 = 0.29, T_4 = 2.9$;速度环设计参数: $k_p = 600, k_i = 1\ 500, k_a = 0.5$. 位置环和速度环采样周期均为 $1\ 000\ \text{Hz}$. 实验测得伺服系统的速度、位置阶跃响应曲线如图 7、8 所示.

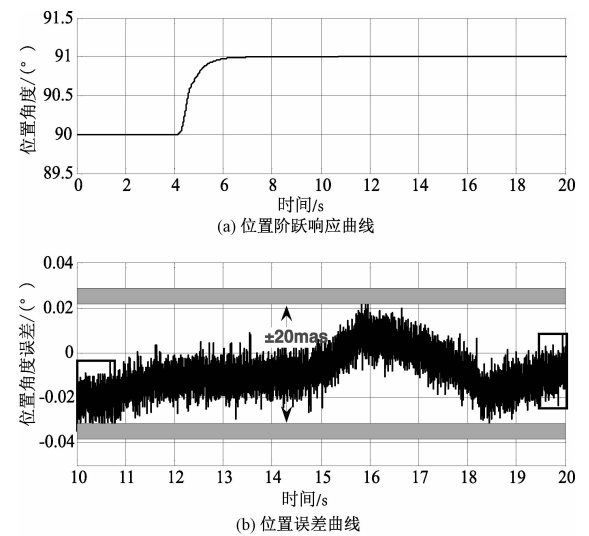


图 7 伺服系统的位置阶跃响应曲线

Fig. 7 Position step response curve of the servo system

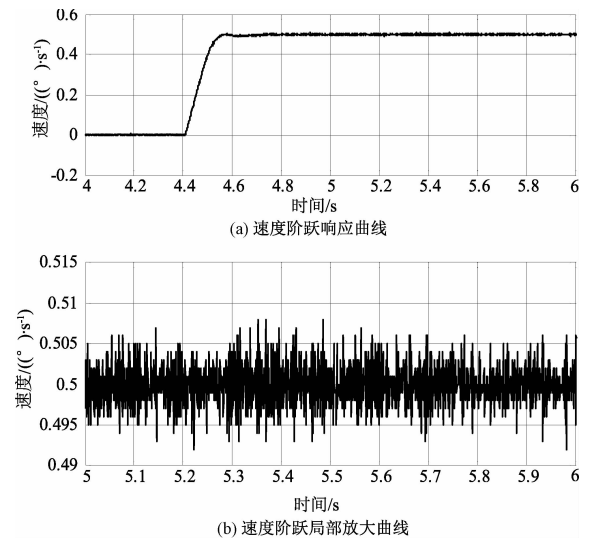


图 8 伺服系统的速度阶跃响应曲线

Fig. 8 Speed step response curve of the servo system

由图 7 可以看出,位置阶跃具有较快的动态响应能力,位置定位时快速、无超调,稳态时位置误差为 $\pm 0.02''$ (20 毫角秒),满足伺服系统精确定位的要求. 伺服系统在 $0.5^\circ/\text{s}$ 时的速度阶跃响应曲线如图 8 所示,速度阶跃响应调节时间 $t_s < 0.2\ \text{s}$,稳态速度波动百分比为 0.54% ,伺服系统的速度阶跃响应曲线说明系统的速度环在采用具有 Anti-Windup 策略的控制器后,具有较好的动态响应能力和较高的稳态精度.

4 结论

设计了基于单片 FPGA 的直流电机伺服控制系统,简化了外围硬件设计,在 Nios II 内核中实现了位置超前滞后控制器;设计了具有 Anti-Windup 策略的速度控制器和结构滤波器,减小了系统的速度超调量和调节时间. 最后,通过实验验证了设计的伺服控制系统的良好性能,为直流电机伺服控制系统的集成化设计提供了较好的设计参考.

参考文献:

[1] ZHANG D, LI H. A stochastic-based FPGA controller for an induction motor drive with integrated neural network algorithms [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2008, 55(2): 551 – 561.

[2] KUNG Y S, HUANG C C, TSAI M H. FPGA realization of an adaptive fuzzy controller for PMLSM drive [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2009, 56(8): 2923 – 2935.

[3] JEZERNIK K, KORELIC J, HORVAT R. PMSM Sliding mode FPGA-based control for torque ripple reduction [J]. IEEE Trans Power Electron, 2013, 28(7): 3549 – 3556.

[4] HANUS R, KINNAERT M, HENROTTE J L. Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method [J]. Automatica, 1987(23): 729 – 739.

[5] JEZERNIK K, KORELI J, HORVAT R. PMSM sliding mode FPGA-based control for torque ripple reduction [J]. IEEE Trans Power Electron. , 2013, 28(7): 3549 – 3556.

[6] LIN F J, TENG L T, CHANG C K. Adaptive backstepping control for linear-induction-motor drive using FPGA [J]. Electr Power Appl, 2006(153): 484 – 492.

[7] KUNG Y S, TSAI M H. FPGA-based speed control IC for PMSM drive with adaptive fuzzy control [J]. IEEE Trans Power Electron, 2007(22): 2476 – 2486.

[8] 李洪文. 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 328 – 332.

[9] CHOI J W, LEE S C. Antiwindup strategy for PI-Type

speed controller[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2009
(56):2039 – 2046.

[10] 霍海龙. 基于 BiSS 协议的编码器及其在伺服驱动系
统中的应用[J]. 电气自动化,2011,33(3):12 – 15.

[11] 肖鲲,王莉娜. 基于 FPGA 的 BiSS 协议光电编码器通
信模块设计[J]. 电子测量技术 2008,31(7):188 – 191.

Design and Implementation of Motor Servo Control System Based on FPGA

CHANG Yiping, LIU Qin, YANG Lei

(School of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to meet the real-time control requirement of servo system, a dc motor control system based on FPGA was designed. The position and speed controller were realized in the Nios II, and the current loop was executed in FPGA. In order to reduce the torque ripple, an Anti-Windup PI controller was designed. The lead-lag controller was adopted for the position controller. The simulation and experiment result showed that the servo control system had better steady and dynamic performance, which met the requirement of the servo control system.

Key words: FPGA; Anti-Windup; biss; servo control

(上接第 53 页)

Circular Arc Representation Based on Möbius Transformation

REN Liangpin, XUE Junxiao, ZHANG Chaoyang, WANG Dingbiao

(School of Software, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In CNC machinery, the industrial products and machinery parts are often represented by circular arcs. A new method for representing circular arc based on Möbius transformation was presented in the paper. By constructing the Möbius transformation between a straight line segment and a circular curve segment, the arc curve was expressed as a form of complex rational function, and a complex rational arc spline function was also constructed based on the smooth constraints and the Möbius transformation. The representation had no weight factors or control parameters, and it was geometric and affine invariant. Compared with the classical method for representing circular arc, such as NURBS or C-curves, the presented method was much simpler.

Key words: CNC; circular arc; Möbius transformation