

基于 MCF5235 和 FPGA 的控制系统的研究与开发^{*}

贾 辉, 何 勇^{*}

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:多电机同步控制往往由于硬件系统资源不够或者处理速度不够而使控制系统精度不高。为了解决这一问题,使用 32 位嵌入式单片机 MCF5235 和现场可编程门阵列(FPGA)设计了一种控制系统,该系统采用位置环、速度环和电流环三闭环实现位置控制。3 个闭环控制任务在不同的芯片中进行处理,降低了对主控 CPU 资源的占用,提高了数据的并行处理能力。同时,将实时操作系统 VxWorks 嵌入到 MCF5235 中,对系统任务进行调度和分配,保证了系统的实时性和稳定性,降低了开发难度。在多电机、高转速的情况下,整个硬件控制系统提高了系统的精度和数据处理能力。仿真和实验结果均表明,在高转速的情况下,整个控制系统的动态响应快、超调小、转速波动较小,具有良好的动静态性能。

关键词:MCF5235; 现场可编程门阵列; 多电机; 同步控制; 模糊 PID 控制器

中图分类号:TH166; TP273.5

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)07-0009-06

Research and development of the control system based on MCF5235 and FPGA

JIA Hui, HE Yong

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: For the insufficient system resources or slow processing speed of the hardware, the precision of the multi-motor synchronous control is not accurate when the motors' speed is high. A hardware control system based on MCF5235 and field programmable gate array(FPGA) was designed. Three closed-loop control of the position, speed and current was used to achieve the position control. The task of three closed-loop control was processed in different modules, the appropriation of the CPU resources was reduced and the ability of parallel data processing was improved. In order to improve the real-time property, VxWorks was used in the MCF5235. It greatly simplifies the design process and makes better use of the system resources. The hardware control system makes the calculations faster and enhances the system's stability. The results of simulation and experiment show that the adaptive fuzzy PID controller has a good dynamic and static performance as well as quick dynamic response and small overshoot.

Key words: MCF5235; field programmable gate array(FPGA); synchronous control; multi-motor; fuzzy PID controller

0 引 言

多电机协调同步控制在工业生产中被越来越多地研究和应用^[1]。近年来,国内的一些研究单位将 PIC 单片机^[2]、FPGA^[3]、PLC^[4]、DSP^[5]等控制器成功地应用于多电机同步控制。但是,在高转速、高动态响应的情况下,多电机协调同步控制对于硬件系统 CPU 的系

统资源、处理速度、响应能力和稳定性都有非常高的要求。由于多电机在高转速情况下的数据量很大,实时响应也很快,单个 CPU 往往无法满足要求,只能通过降低系统的精度来实现多电机的同步控制。

为了解决这一问题,本研究使用 32 位嵌入式单片机 MCF5235 和 FPGA 设计一种硬件控制系统。主控芯片 MCF5235 的 CPU 包含有一个协处理器 eTPU。

收稿日期:2010-03-05

基金项目:国家科技支撑计划重点资助项目(2007BAF24B02-2)

作者简介:贾 辉(1980-),男,江苏常州人,硕士研究生,主要从事控制系统与硬件电路设计方面的研究. E-mail: huij2007@live.cn

通信联系人:何 勇,男,教授,博士生导师. E-mail: heyong@dhu.edu.cn

CPU 用于调度整个系统的控制和对速度环进行 PI 调节, eTPU 用于电机的 PWM 控制和电流环调节。而在 FPGA 中加入了自适应模糊 PID 控制器对电机的实时位置信号进行控制, 而自适应模糊控制兼有自适应控制和模糊逻辑控制的优点, 在电机控制中有广泛地应用^[6-10]。并且使用嵌入式实时操作系统 VxWorks 进行整个任务的调度, 不同的功能模块在不同的微处理器中完成各自的工作, 保证其实时性, 提高系统处理数据的能力。

同时, 实验平台采用永磁同步电机做为实验电机, 在电机转速达到 5 000 r/min 时, 本硬件系统依然可以对电机的实时位置进行精确控制, 实现模糊控制器参数的在线调节, 克服传统 PID 控制器在线调节效果不佳的弱点, 大大改善了控制器的性能。系统具有控制灵活、适应性强的优点, 而且具有较好的静态和动态性能。

1 控制系统结构和工作原理

整个控制系统的框图如图 1 所示, 三闭环调节分别在 3 个不同的微处理器中完成, 并使用 eTPU 的电机控制模块对多个电机进行 PWM 控制。

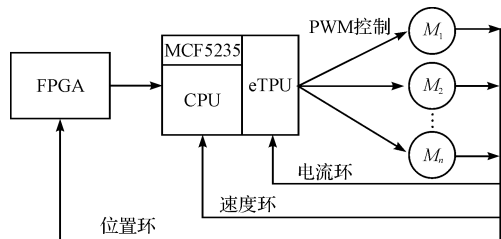


图 1 多电机系统结构框图

电机控制结构框图如图 2 所示。在图 2 中, 采用位置环、速度环和电流环三闭环实现位置伺服控制。其中 FPGA 主要是采集电机运转的实时位置数据, 并对位置数据进行 PID 调节^[11-12]。特别是在多电机、高转速的情况下可以大量节省 MCF5235 的系统资源。且硬件的响应速度更快, 也更稳定。而 MCF5235 采用 PI 调节的方式, 主要进行速度调节和电流调节, 由 MCF5235 的 eTPU 模块进行电机控制。

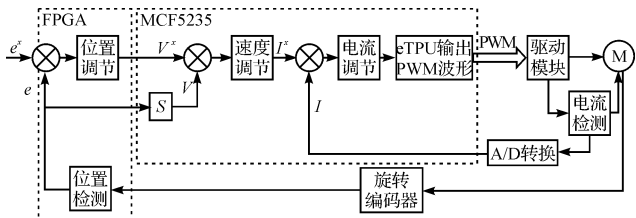


图 2 电机控制结构框图

2 系统硬件设计

该系统的硬件设计主要包括主控模块、驱动模块、解码模块和光耦隔离模块。主控模块是以 MCF5235 与 FPGA 做为控制系统的核心, 包括 FLASH、SDRAM、SRAM、A/D 转换和通讯单元等; 驱动模块是对电机进行 PWM 驱动; 解码模块是对旋转编码器输出的正弦波电压信号进行解码, 输出 16 位的数据, 其中 1 位是标志位, 3 位是地址位, 12 位是位置数据; 并由光耦隔离模块隔离, 以保护主控系统。其硬件框图如图 3 所示。

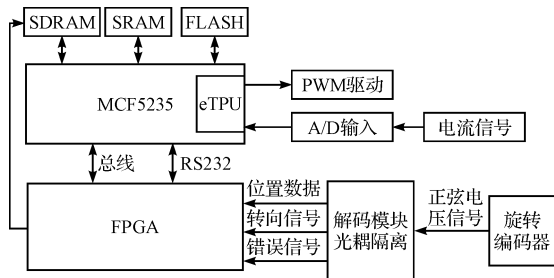


图 3 系统硬件框图

2.1 芯片的选择

本系统采用的是飞思卡尔公司的 MCF5235, 它在 150 MHz 的时钟频率下提供 144 MIPS 的处理能力 (Dhrystone2.1)。整个 CPU 吞吐量大, 在工业控制、设备制造和机器人等方面有广泛的用途。

FPGA 采用 Altera 公司的 Cyclone II 系列芯片 EP2C20F256C8, 其性能比使用软件或通用 CPU 更加稳定, 而且开发周期短、投入少^[13]。

2.2 MCF5235 与 FPGA 的接口设计

在该系统中, MCF5235 主要是负责系统功能的实现和总体控制, 而 FPGA 是用于对外部实时信号的检测, 包括电机的实时位置和速度信号以及其他执行机构的运动情况。通常, MCF5235 与 FPGA 之间的通讯通过总线方式实现, 使得主控芯片可以准确地知道整个系统的运动状态。此外, FPGA 还可以通过串口给 MCF5235 发送数据, 实现分时控制和读取。在编程过程中可以根据不同的需要选择通讯的模式。MCF5235 与 FPGA 的引脚连接图如图 4 所示。

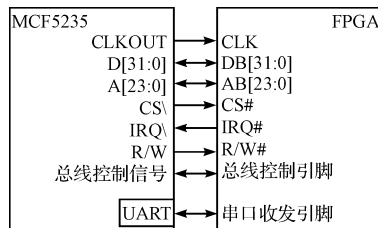


图 4 MCF5235 与 FPGA 的连接图

2.3 解码模块与光耦隔离模块

在电机转速是 5 000 r/min 的时候,解码模块的 A/D 模块采用的是 16 位的数据输出。其中 12 位是位置数据,测角精度可以到 4 096 线/转,分辨率约等于 0.088°,数据传输率约为 5.5 Mbit/s。为了满足这一要求,A/D 芯片采用 AD7928,输出数据时钟可以达到 20 MHz;光耦选择高速光耦 6N137,其传输速率为 10 Mbit/s,完全可以满足设计的需要。同时,对于多电机而言,由于 FPGA 丰富的 I/O 口和数据的并行采集能力,可以同时满足大数据量的实时位置数据接收。而 eTPU 也有 32 个通道,每台电机占用 8 个通道,则可以保证对 4 台电机的同步控制。

2.4 自适应模糊 PID 控制器

随着微电子技术的发展,FPGA 的性能越来越强大,它最明显的优势在于实时响应快、集成度高、体积小、功耗低、可靠性高和电路设计比较灵活。在高速情况下,为了更好地保证实时信号的处理,节省 MCF5235 的系统资源,在本系统中使用 FPGA 进行位置 PID 控制。这里主要介绍单个电机的自适应模糊 PID 控制器。对于多电机实时位置数据的采集,其原理是相同的。

自适应模糊 PID 控制器以误差 $e(t)$ 和误差变化 $ec(t)$ 作为输入,可以满足不同时刻的 $e(t)$ 和 $ec(t)$ 对 PID 参数自整定的要求。利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改,便构成了自适应模糊 PID 控制器,其结构如图 5 所示。

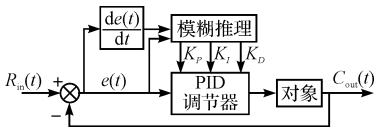


图 5 自适应模糊 PID 控制器结构

自适应模糊 PID 控制器是一种线性控制器,它根据给定位置值 $R_{in}(t)$ 与电机实际位置输出值 $C_{out}(t)$ 构成控制偏差:

$$e(t) = R_{in}(t) - C_{out}(t) \tag{1}$$

其中误差变化 $ec(t)$ 为:

$$\frac{dec(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \tag{2}$$

PID 算法的表达式为:

$$Q(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \tag{3}$$

式中 K_p —比例系数; T_i —积分时间常数; T_d —微分时间常数。

对式(3)进行离散化处理,用数字形式的差分方

程代替连续系统的微分方程:

$$Q(k) = K_p\{E(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k E(j) + \frac{T_d}{T} [E(k) - E(k-1)]\} \tag{4}$$

式中 T —采样周期; $E(k)$ —第 k 次采样时的偏差值; $E(k-1)$ —第 $k-1$ 次采样时的偏差值; $Q(k)$ —第 k 次采样时调节器的输出。

为了进一步方便和简化运算,将式(4)整理得:

$$Q(k) = Q(k-1) + (K_p + K_i + K_D)E(k) + (-K_p - 2K_D)E(k-1) + K_De(k-2) \tag{5}$$

式中, $K_i = K_p(T/T_i)$; $K_D = K_pT_d$ 。

在工业生产过程中,许多被控对象随着负荷变化或干扰因素影响,其对象特性参数或结构发生改变。这就需要实时改变其控制策略使控制系统品质指标保持在最佳范围内,根据不同的误差选择合适的 K_p 、 K_i 、 K_D 。其模糊规则表分别如表 1~表 3 所示。

表 1 ΔK_p 的模糊规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
NM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 的模糊规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_D 的模糊规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

将系统误差 e 和误差变化率 ec 变化范围定义为

模糊集上的论域:

$$e, ec = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\} \quad (6)$$

其模糊子集为 $e, ec = \{NB, NM, NS, ZO, PM, PB\}$, 子集中元素分别代表负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。设 e, ec 和 K_p, K_i, K_d 均服从正态分布, 参数 K_p 的范围是 $[-0.6, 0.6]$, K_i 的范围是 $[-0.06, 0.06]$, K_d 的范围是 $[-1.2, 1.2]$ 。因此可得出各模糊子集的隶属度, 根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型, 应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表, 查出修正参数代入下式计算:

$$\begin{aligned} K_p &= K'_p + \Delta K_p \\ K_i &= K'_i + \Delta K_i \\ K_d &= K'_d + \Delta K_d \end{aligned} \quad (7)$$

在线运行过程中, 控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算, 完成 PID 参数的在线自校正。其工作流程图如图 6 所示。

自适应模糊 PID 控制器的结构框图如图 7 所示, 采用统一的全局时钟, 控制偏差 $E(k)$ 做为输入信号。其中的乘法器、加减法器、计数器都可以由 Quartus II 9.0 的 MegaWizard Plug-In Manager 自动生成。QK_1 是电机控制曲线的实时位置数据表。Control_sheet 是模糊控制参数输出模块, 在 control_sheet 模块中直接对计算所得的 K_p, K_i , 图 6 在线自校正工作 K_d 进行计算, 设参数 $A = K_p +$

$$Q(k) = Q(k-1) + AE(k) - BE(k-1) + K_d E(k-2) \quad (8)$$

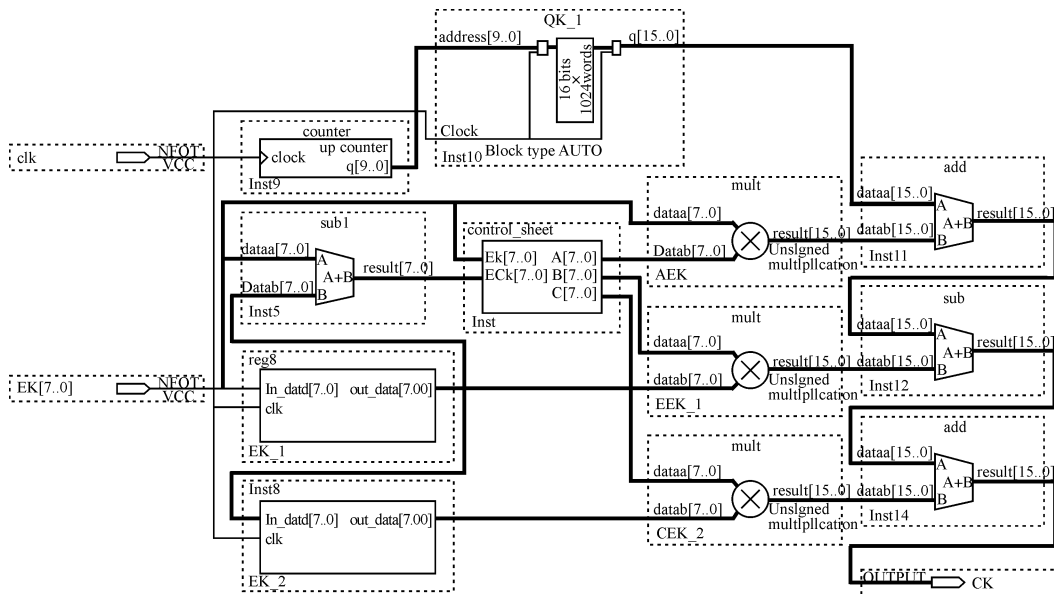
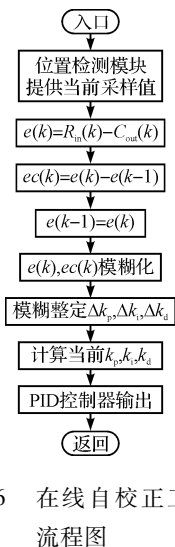


图 7 自适应模糊 PID 控制器顶层结构图

由于 FPGA 功能强大, 完全可以满足计算和存储的需要, 在这里笔者采用并行的方法, 这样的计算速度最快, 实时性最好, 而且整个结构更加简单。但是最后的输出 $Q(k)$ 由于乘法器、加减法器逐级传递产生的误差累积, 会在时钟跳变沿产生毛刺, 有可能会影响数据的准确性。如果在各级对毛刺进行处理, 相当繁琐, 由于毛刺只是集中在时钟跳变之后的几纳秒内, 所以可以对最后输出的 $Q(k)$ 进行处理, 利用 D 触发器对毛刺信号不敏感的特点, 使数据延时输出, 就可以消除毛刺。由于所设的延迟时间相对 $Q(k)$ 的周期极短, 可以忽略不计, 完全不会影响实时数据的准确性。其仿真波形如图 8 所示。从图 8 中可以看到对于电机

实时位置的数据处理完全可以保证其实时性的要求。又由于 FPGA 对于多个电机的实时位置可以进行并行处理, 也就保证了大量的数据可以同时处理, 从而在电机高转速的情况下保证了它的精度。

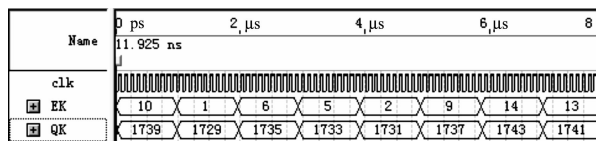


图 8 自适应模糊 PID 控制器信号仿真

3 系统主程序

在该系统中, MCF5235 做为系统的主控芯片, 主

要负责速度环和电流环的PI调节以及PWM驱动信号的输出。为了更好地协调各个模块,使得整个系统资源得到更有效地利用,在MCF5235上嵌入了VxWorks实时操作系统。它以其良好的可靠性、卓越的实时性以及任务的可裁剪性为整个系统的设计开发提供了良好的设计平台。特别是VxWorks提供的多任务机制对任务的控制采用了优先级抢占和轮换调度机制,使同样的硬件配置能满足更强的实时性要求,使整个应用开发更加高效。

整个系统的主程序如图9所示。MCF5235的CPU控制器完成实时任务的调度和速度的PI调节。电流环的调节以及PWM信号的输出在eTPU中完成。eTPU是MCF5235中自带处理器内核和单独存储器的可编程I/O端口控制器,可以独立地实现复杂时序处理和I/O端口管理功能,而无需CPU的干预。eTPU本身作为完整的微控制系统,特别适合于电机控制,包括电机电流数据的分析处理以及PWM调制等。在本系统中,eTPU通过自带的电流函数对电流进行PI调节,同时调用SPWM函数实现PWM波形的输出。各单元相互配合,保证了系统的稳定性。

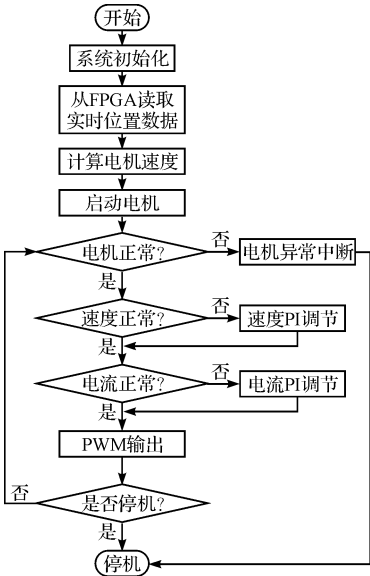


图9 主程序流程图

4 仿真研究和实验结果

本研究使用Matlab的模糊工具箱所提供的S-Function,并用C语言编写自适应模糊PID控制器,最后将该控制器结合专业电机仿真软件VisSim对永磁同步电机转速进行仿真^[14]。电机的参数如下:

- 额定转速 $n_N = 6\,000\text{ r/min}$;
- 额定电压 $U_N = 190\text{ V}$;
- 额定转矩 $M_{dN} = 2.3\text{ N}\cdot\text{m}$;

堵转转矩 $M_{d0} = 2.6\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

在高转速情况下,对于单个电机的传统PID控制器与自适应模糊PID控制器的转速仿真曲线的比较如图10所示。可以看出模糊PID控制器的响应更快,而对于多个电机其原理是相同的。

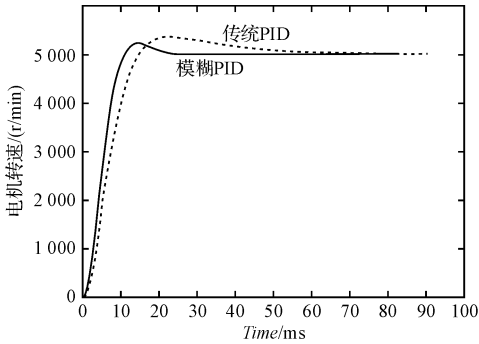


图10 传统PID控制器与自适应模糊PID控制器转速仿真曲线比较

为了验证这个控制系统的性能,笔者在实验室搭建了一个电机控制的平台。该控制平台包括PC机、主控电路板、旋转编码器解码板、光电隔离板、传动轴和4个永磁同步电动机等。实验数据通过传动轴的旋转编码器采集。

一台电机的实测转速曲线如图11所示,其他3台电机曲线图也是类似的。由图可以看出自适应模糊PID控制器的动态响应快,超调小而且转速波动较小,具有较好的静态性能。

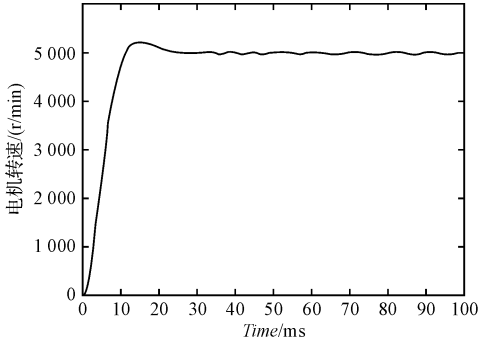


图11 采用自适应模糊PID控制器的实测转速曲线

5 结束语

本研究提出了一种基于MCF5235和FPGA的硬件控制系统,采用电流环、速度环和位置环的三闭环控制方案对电机进行实时控制,并采用VxWorks嵌入式实时操作系统对系统整个控制过程进行调度。其仿真和试验结果表明,整个硬件控制系统完全可以满足多电机同步控制的要求。在转速达到5000 r/min的情况下,整个控制系统仍然可以保证系统的稳定性、实时

(下转第25页)

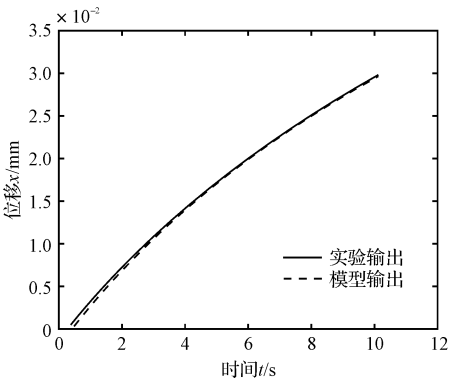


图3 实验结果和仿真结果比较图

6 结束语

本研究通过对一种新型力矩马达的工作原理的分析,建立了该新型力矩马达磁路模型和电路模型,然后建立了该力矩马达的传递函数,最后通过实验和仿真图的对比确定了模型的正确性。该新型力矩马达模型的建立对整个执行器系统的控制研究提供了很大的助益。

(上接第13页)

性以及系统的精度。同时,该控制系统还可以满足高动态响应的要求,而且超调小、转速波动较小,具有良好的动静态性能,对于高速多电机的协调同步控制有比较积极的指导意义。

参考文献 (References) :

[1] 王小明,朱森茂,熊国良. 铁路客车地毯清洗干燥机多电机同步控制的研究[J]. 机电工程技术,2008,37(10):47-49.

[2] 张丹红,刘波. 基于 RS-485 总线的多电机同步控制系统研究[J]. 计算机技术与发展,2009,19(9):228-231.

[3] 刘爱华,房立金,王洪光,等. 一种 FPGA 的嵌入式可重构机器人控制系统[J]. 小型微型计算机系统,2009,30(3):573-576.

[4] 周俊峰,寇 凯. 基于现场总线的多电机同步控制[J]. 机械与电子,2006(11):38-40.

[5] 高晓丁,左 贺,任高阳,等. 基于智能 PI 控制的多电机同步传动系统[J]. 电气传动,2007,37(11):39-41.

[6] HA J, TOSHIHIRO S, SUL S. Sensorless rotor position estimation of an interior permanent-magnet motor from initial

参考文献 (References) :

[1] 王春行. 液压伺服系统[M]. 北京:机械工业出版社,1990.

[2] 长坂文雄,本田善郎,赤野信一. 智能式阀门定位器 SVP300Alphaplus 的开发[EB/OL]. [日期不详]. <http://www.cqvip.com>.

[3] 陈其瑞. 电磁学[M]. 成都:四川教育出版社,1987:42.

[4] 张莉松,胡佑德,徐立新. 伺服系统原理与设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006.

[5] 陈渭民. 雷-大气电学[M]. 北京:气象出版社,2006:115.

[6] 宋志安. 基于 MATLAB 的液压伺服控制系统分析与设计[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[7] WATTON J. Fluid Power Systems-modeling, Analogue and Microcomputer Control[M]. Prentice Hall,1989:986-989.

[8] KONUK H. Fault simulation of inte-rconnect opens in digital circuits[C]//IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design,1997:548-554.

[编辑:张 翔]

states[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003,39(3):761-767.

[7] 纪志成,沈艳霞,薛 花. 无刷直流电机自适应模糊控制的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):104-109.

[8] 李兵强,林 辉. 新型永磁同步电机高精度调速系统[J]. 中国电机工程学报,2009,29(15):61-66.

[9] 马宝萍,徐志皋. 在线自调整比例因子的模糊控制器[J]. 自动化仪表,2002,21(8):20-22.

[10] 李鸿儒,顾树生. 基于神经网络的 PMSM 速度和位置自适应观测器的设计[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12):32-35.

[11] 周 媛,杨贵杰. FPGA 在增量式光电编码器测角系统中的应用设计[J]. 机床与液压,2007,35(7):182-184.

[12] 吴永芝,余容红,李兴红,等. 光电信号参数的动态提取方法[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(5):69-73.

[13] 华清远见嵌入式培训中心. FPGA 应用开发入门与典型实例[M]. 1 版. 北京:人民邮电出版社,2008.

[14] 王正林,王胜开,陈国顺,等. Matlab/Simulink 与控制系统仿真[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2005.

[编辑:张 翔]