

基于FPGA + DSP的直流电动机调速系统设计

设计了一种基于FPGA + DSP的直流电动机调速系统，详细介绍了调速系统的软/硬件结构及控制方法的设计和实现。在直流电动机数学模型的基础上，采用锁相环技术实现了快速准确调速。仿真实验表明，在低速、中速和高速情况下，该系统都可以表现出良好性能。

化明松/台州职业技术学院电气信息学院



化明松/讲师

直流电动机具有结构简单、稳定性强、调速范围宽和输出力矩大等特点，被广泛地应用于钻井勘探、冶金加工、医疗器械和智能机器人等多种领域，并取得了较好的效果。

对于直流电动机来说，准确调节速度尤为重要。早期的直流电动机调速系统一般都通过模拟器件搭建的电路实现，调速范围有限，且准确度不高。微控制器诞生以后，出现了许多以单片机作为控制核心的直流电动机调速系统，这些系统以电动机的速度作为被控对象，同时将电动机的速度和电流作为系统反馈，采用PID等常规控制方法实现了对直流电动机的准确调速。但是，随着工业生产过程复杂性的提高，常规控制方法已无法适应，必须采用更为复杂的控制算法，而单片机由于自身主频、存储空间等限制，无法运行这些高级算法，因此出现了以ARM、DSP和FPGA等作为控制核心的直流电动机调速系统。很多应用领域需要电动机调速系统能够提供更高的控制准确度和更宽的调速范围。锁相环技术的出现，很好地解决了这一问题，为直流电动机的准确调速提供了一条新的思路，但是传统的锁相环电路基本都是模数混合电路，虽然稳态

性能较好，但是动态性能和抗干扰能力较差。

基于上述分析，为了保证直流电动机调速系统能够提供更好的调速性能，同时保证系统可以运行较为复杂的控制算法，本文设计一种基于FPGA + DSP双核架构的直流电动机调速系统。利用FPGA实现高准确度全数字锁相环技术，同时实现高准确度的PWM电动机驱动信号，而DSP则用来产生高准确度的速度参考信号，配合H桥驱动电路，即可构成一套性能优良的直流电动机调速系统。

直流电动机的数学模型

直流电动机调速系统中通常所说的电动机多为他励式直流电动机，其等效电路如图1所示。

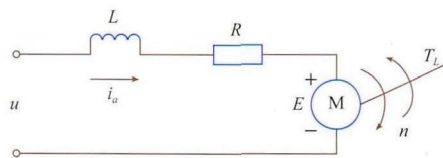


图1 直流电动机等效控制电路

大多数情况下，调速系统都是采用变压方式实现对直流电动机的调速，因此系统的输入即为电枢电压 u ，系统输出为电动机转速 n 。从图1可知，电枢电压 u 等于电动机电枢反电动势 e 、电阻 R 电压以及电感 L 电压这三部分之和，即

$$e + i_a R + L \frac{di_a}{dt} = u \quad (1)$$

其中，电动机电枢反电动势 e 可由下式计算

$$e = C_e n \quad (2)$$

式中， C_e 为电动机电势常数。

将式(2)代入式(1)就可以得到

关键词/Keywords

直流电动机 ·
现场可编程门阵列 ·
数字信号处理器 ·
锁相环 ·

电动机的物理学方程为

$$C_e n + i_a R + L \frac{di_a}{dt} = u \quad (3)$$

此外,在理想的无负载情况下,已知电动机的机械运动方程为

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (4)$$

式中, $T_e = C_m i_a$ 为电磁转矩; T_L 为电动机转矩; GD^2 为飞轮惯量。

通过式(3)和式(4)可以得到电动机关于转速的微分方程为

$$T_i T_m \frac{d^2 n}{dt^2} + T_m \frac{dn}{dt} + n = \frac{u}{C_e} \quad (5)$$

式中, $T_i = \frac{L}{R}$ 和 $T_m = \frac{GD^2}{375} \frac{R_d}{C_m C_e}$ 分别为电动机的电磁时间常数和机电时间常数。

对式(5)进行拉普拉斯变换(零初始条件)以后,就可以得到电动机数学模型的传递函数

$$W(s) = \frac{X_c}{X_r} = \frac{1/C_e}{T_d T_m s^2 + T_m s + 1} \quad (6)$$

直流电动机调速系统设计

1. 系统总体结构

本文设计的系统主要由控制和驱动两大部分组成。控制部分主要采用全数字锁相环技术实现对电动机的准确调速,因此控制部分主要包括锁相环、控制器、PWM信号生成模块以及高精度参考信号生成模块。其中,锁相环结构中的鉴频鉴相器和环路滤波器通过在FPGA内部搭建模块来实现,鉴频鉴相器通过对反馈信号和参考信号进行对比,产生相应的有效输出给控制器;但是鉴频鉴相器输出的信号中往往混有高频噪声,因此需要使用环路滤波器进行滤波;控制器的作用主要是提高锁相环系统的稳定性,进而提高整体性能;而PWM模块则主要用来产生电动机控制驱动信号;参考信号对于整个调试系统至关重要,必须保证参考信号具有高精度和高稳定性,因此本文采用一块单独的DSP来生产参考信号。驱动部分主要由H桥驱动电路、保护电路以及电动机转

速反馈电路组成。其中,H桥驱动电路的功能主要是替代锁相环中的压控振荡器,它接收PWM模块输出的信号直接驱动电动机;保护电路主要实现过电压保护、过电流保护和限位保护;电动机转速通过码盘输出方波信号反馈给控制部分的鉴频鉴相器。整个电动机调速系统的结构如图2所示。

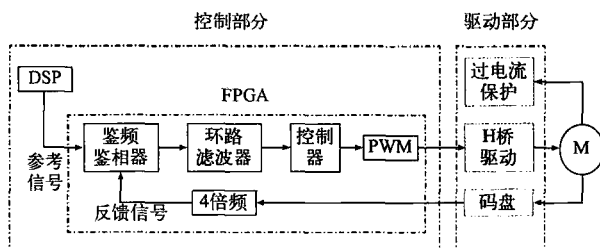


图2 电动机调速系统结构

2. 控制器选型

FPGA结合DSP的双核架构是目前许多应用场合普遍采用的一种方式。DSP最大的一个特点就是内置硬件乘法器,可以在非常短的时间内完成高精度乘法运算,在处理大量数据方面比其他微控制器具有明显的优势。本文采用DSP主要是用来产生高精度的稳定参考信号,因此需要其具有较高的计算准确度、较低的功耗和较大的存储空间,此外还需考虑它与FPGA以及其他外设之间的通信。因此本文选择TI公司TMS320F28335型号的DSP,它是一款专用的浮点控制器,可完成32位浮点运算,工作主频高达150 MHz,并且具有丰富的外围接口,完全满足本文设计的需求。

FPGA是一种灵活性非常高的微控制器,可以根据需求将其内部的逻辑门阵列变成所需的专用功能电路。本文所设计的电动机调速系统锁相环和控制器等模块均需在FPGA中实现。此外,FPGA还需要接收保护电路和码盘的反馈信号,输出PWM驱动信号,与计算机等设备进行实时通信,还需要存储程序和一些重要参数。综合考虑上述要求,本文选择了Altera公司的EP1C12Q240型号FPGA,其片上包含多达184个I/O接口,其中还有许多是复用接口,非常适合本文的设计要求。

3. 控制器模块设计

控制器模块主要用来实现电动机调速的控制算法,但是由于鉴频鉴相器的输出范围与PWM模块不匹配,其输出不能直接应用,因此所设计的控制器模块必须能够使鉴频鉴相器的输出控制PWM信号的生成。考虑到经过环路滤波器处理以后,鉴频鉴相器的输出仍然可能存在一部分低频噪声,因此首选有源PI控制器,进一步实现滤波处理,同时其积分环节还可以有效降低系统的稳态误差。此外,有源PI控制器由一个比例环节和一个积分环节构成,其计算的流水线过程可在FPGA中由两个加法器和两个乘法器轻松实现。

尽管如此,并不能保证有源PI控制器处理以后的输出范围与PWM模块要求的输入范围一致;另外,比例P和积分I这两个参数不能使用固定值,在调节过程中,应该根据具体情况对它们进行自适应整定。针对第一个问题,本文设计了一个门限模块放置在加法器的后方,对控制器的输出进行限制,当其小于0时,输出为0;当加法器溢出时,输出为1 024,这样就可以实现控制器输出与PWM模块输入之间的匹配。对于第二个问题,本文在PI控制器中添加一个模糊自适应模块,这样就可以实现不同情况下的参数自适应整定。但是FPGA这类的微控制器不易构造一个复杂的非线性函数,本文采用查表法来实现,即将模糊规则表和参数表分别存放在两个区域,系统工作时,根据之前设定的规则,在不同阶段从表中读取不同的参数,然后再进行相应的计算。最终本文设计模糊自适应PI控制器模块仿真波形如图3所示。

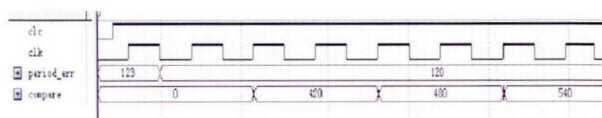


图3 控制器模块仿真波形

仿真分析

本文选用的仿真对象为Maxon公司的RE-30型永磁直流有刷电动机,功率为60 W,完全符合前文分析的电动机数学模型。根据该电动机的参数,可以得到其开环传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{s} \times \frac{77.09}{1.255 \times 10^{-14} + 2.575 \times 10^{-9} s^2 + 1.281 \times 10^{-5} s + 0.004 215} \quad (7)$$

本文所设计的电动机调速系统的调速范围为[200, 8 000] (r/min),为了验证系统的可靠性和有效性,分别在低速(400 r/min)、中速(1 200 r/min)和高速(3 500 r/min)三种情况下考察系统的阶跃输出,并与传统PI控制算法的输出效果进行对比,结果如图4所示。

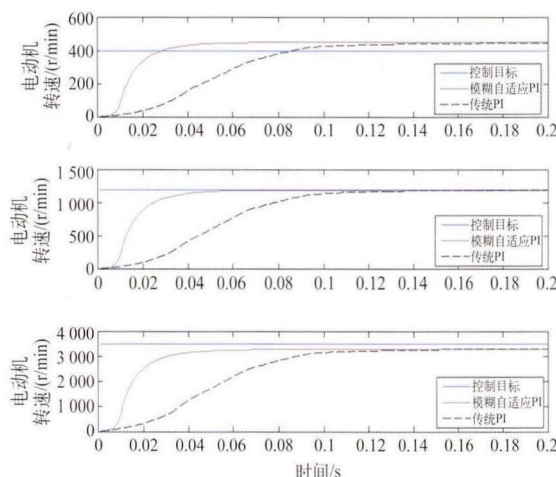


图4 系统阶跃输出效果对比

从图4可看出,本文所设计的电动机调速系统控制效果较好,无论是在低速、中速还是高速情况下,都可以在很短时间内接近控制目标,响应速度和稳态误差明显好于传统PI算法。

结束语

本文设计了一种基于FPGA+DSP的电动机调速系统。主要采用锁相环技术,并结合模糊自适应PI控制算法。系统主要由控制和驱动两部分构成,锁相环和控制器等模块在FPGA中实现,并利用DSP生成高精度参考信号,详细介绍了系统的设计过程。仿真表明,本文所设计的电动机调速系统具有较好的性能,可以较快地跟踪控制目标。

(收稿日期:2014-11-07) EA