

直流无刷电机高精度电流采样系统设计

李 峰<sup>1,2</sup>, 吴一辉<sup>1</sup>, 王俊峰<sup>1,2</sup>, 黎海文<sup>1</sup>

(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.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为及时、准确地采样直流无刷电机(BLDCM)绕组中的电流值,以实现电流闭环控制,针对常用的直流无刷电机电流采样方法中电路复杂,分立元件温漂严重,调整困难,可靠性低等问题,提出了一种高集成度、高精度的电流采样方案。该方案以 FPGA 为控制芯片,电流检测调理和 A/D 转换电路均采用精度高、温度稳定性好的集成芯片实现,消除了分立元件温漂大、抗干扰能力弱的缺陷。采用 PWM 周期中点采样法,克服了功率管开关噪声对电流采样精度的影响。实验结果表明,整个电流采样系统线性度好、精度高、实时性好,为高品质电流环控制提供了可靠保证。  
关键词:无刷直流电机; 电流采样; 电流闭环; 高精度  
中图分类号:TP202 文献标识码:A 文章编号:1000-100X(2010)05-0041-03

Research of High Precision Brushless DC Motor Current Sampling Method

LI Feng<sup>1,2</sup>, WU Yi-hui<sup>1</sup>, WU Jun-feng<sup>1,2</sup>, LI Hai-wen<sup>1</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;  
2.Graduate School of CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract:**In order to measure winding's current of brushless DC motor(BLDCM) real-time and accurately for current loop of the digital control system,a current sampling scheme for BLDCM of high integration and high accuracy is proposed based on the analysis of usual methods of current sampling.This scheme overcomes the effect of discrete component's temperature drift and power transistor's switching noise by using FPGA controller,integrated chips and PWM-midpoint sampling method.The experimental results show that the current sampling system has high linearity ,high accuracy and real-time performance.  
**Keywords:**brushless DC motor; current sampling; current loop; high accuracy  
**Foundation Project:**Supported by National Foundation of 863 B type (No.2006AA04Z367)

1 引言

在直流无刷电机(BLDCM)数字控制系统中引入电流环闭环控制可改善启动性能,最大限度地利用电机的过载能力,还可对电机进行过流保护。提出一种高集成度、高精度的电流采样方案;电流检测调理及 A/D 转换电路均采用精度高、温度稳定性好的集成芯片实现,消除了分立元件温漂大、抗干扰能力弱的缺陷;采用 PWM 中点采样法和数字滤波技术有效去除了测量噪声,保证了系统的采样精度。

2 硬件电路设计

2.1 基于电流传感器的电流检测电路

选用的电流传感器为隔离型电流霍尔传感器 ACS712 型集成芯片,该芯片体积小、价格低、便于安放。采用 5 V 单电源供电,低噪音模拟输入路径,阶跃响应只需 5 μs,可通过外部滤波引脚调整带宽,功耗低,隔离性能好,其输出精度为 185 mV/A,误差小于 1.5%。图 1 示出其内部结构。当通过引脚 1,2 到引脚 3,4 的电流不断上升时,引脚 7 输出正斜率的

电压信号,比例系数为 185 mV/A。该传感器输出电压  $U_o$  与其检测的电流  $I_{in}$  关系为  $U_o=2.5+0.185I_{in}$ 。

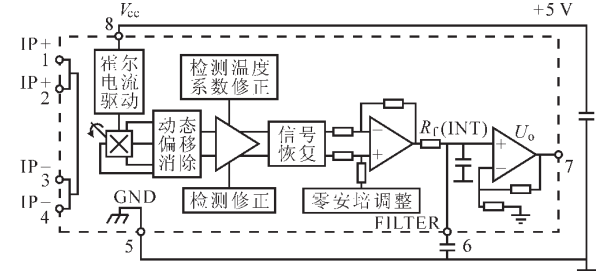


图 1 ACS712 内部结构图

ACS712 隔离性好,可有效防止主电路与控制电路的互相串扰,提高系统可靠性;另外引脚 6 可起到硬件滤波作用,并可抑制周期性高频或工频干扰。

2.2 电流信号调理放大电路

由于选用的 A/D 转换器 AD7472 要求输入 0~2.5 V 的单极信号,显然  $U_o$  与 A/D 转换器的输入  $U_{adm}$  不匹配,因此选用低价格、单电源、输出摆幅能达到电源电压的仪表放大器 AD623 集成芯片,对  $U_o$  信号进行调理放大处理。

AD623 是在传统的三运放结构基础上改进的一种新型仪表放大器,用来将差动电压转化为单端电压,具有优良的共模抑制比,线性度好,温度稳定性高,体积小,可靠实用。图 2 示出其单电源供电模式。

基金项目:国家 863 计划 B 类项目(2006AA04Z367)  
定稿日期:2009-11-26  
作者简介:李 峰(1984-),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为直流无刷电机控制。

AD623 的增益  $G$  是用一个精密电阻  $R_G$  设置的,电阻选择计算公式为:

$$R_G=\frac{100}{G-1} \text{ (k}\Omega\text{)}$$

(1)

输出  $U_o$  与输入  $U_{in}$  的关系为:

$$U_o=GU_{in}$$

(2)

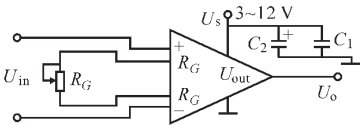


图 2 AD623 单电源供电模式

图 3 示出所设计的电流检测及采样信号调理放大电路。电路中 2.5 V 电压可由 2.5 V 电压基准芯片获得,由上述可知,电路输出信号即  $U_{adin}$  为:

$$U_{adin}=0.185GI$$

(3)

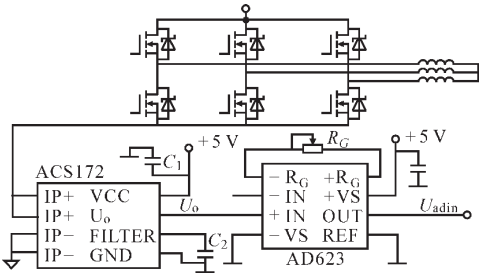


图 3 电流检测及信号调理放大电路

该电路突出优点为:①电流传感器检测功率桥母线电流,结构简单,调整方便;② $U_{adin}$  取值在 0~2.5 V 之间,且正比于  $I_{in}$ ,可通过改变  $R_G$  调节电流检测范围;③ACS712 和 AD623 均是贴片小封装集成芯片,集成度很高,占用空间小,有利于 PCB 布板;④分立元件少,克服了模拟器件温漂给测量精度带来的影响,具有很好的抗干扰能力,测量噪声小,精度高。

2.3 基于 FPGA 的 A/D 转换电路

FPGA 对 A/D 芯片的控制电路硬件简单,关键在于 A/D 芯片本身的控制逻辑,而 VHDL 硬件编程语言可方便地实现 A/D 转换控制。FPGA 控制的 AD7472 为 12 位高速高精度、低功耗、具有并行接口的逐次逼近型 A/D 采样芯片,采样电路如图 4 所示。AD7472 为单电源 2.7~5.25 V 供电,采样频率可达 1.5 Msps,其低噪声、宽带宽的采样-保持放大电路可处理超过 1 MHz 的信号。转换过程和数据采集完全取决于外部输入,FPGA 可对其进行方便控制。

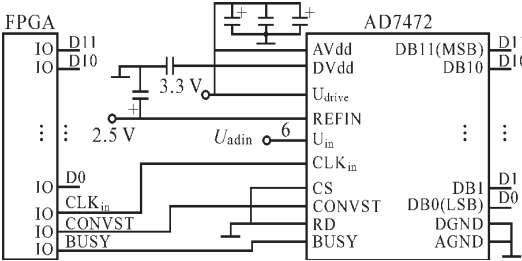


图 4 FPGA 控制的 AD7472 采样电路

AD7472 主要控制引脚为 CONVST,CS,RD 和

时钟输入端 CLK<sub>in</sub>,工作时钟频率为 25 MHz,可由 FPGA 分频获得。BUSY 标志 A/D 转换是否完成,引脚 6 为采样信号输入端(0~2.5 V),接图 3 电路中的输出信号  $U_{adin}$ 。CONVST 下降沿表示启动一次 A/D 转换,即开始对信号进行采样,同时 BUSY 引脚拉高,当 BUSY 引脚信号为低电平,即一次转换结束。一次转换仅需 14 个时钟周期,约为 560 ns。CS 为片选信号,RD 为读允许信号,图 4 中 CS,RD 始终有效。

该 A/D 采样电路的特点为:①电路连接非常简单,3.3 V 供电可由 FPGA 相关引脚提供,2.5 V 可由精密分压电阻或者 2.5 V 电压基准芯片提供;②时钟输入可由 FPGA 内部时钟分频得到,对采样频率的选择与控制非常方便,用户可以在很大范围内自己决定采样频率;③A/D 转换无通道延迟,只需要对 CONVST 引脚进行控制,即可自动完成转换,可以利用该特点非常方便地选择采样时间。

3 系统软件设计

3.1 采样频率的选择

数字控制器中,信号采样频率的选择对系统动态性能有重要影响,甚至直接影响控制器功能的实现。采样频率的选择受多方面因素影响,从信号失真、PI 调节品质以及系统抗干扰性能等角度考虑,一般要求高采样频率。而从执行元件响应速度、控制器运算工作量及其本身精度等方面考虑,则要求低采样频率,以保证控制器或执行元件有充分处理时间。总之,必须根据具体情况和要求综合做出选择。

文中采用 MOSFET 驱动电机,MOSFET 导通时脉冲电流较大,其中含有丰富的谐波分量,这就要求采样频率远高于开关频率,电流信号才能不失真的还原;MOSFET 开关频率选用 24 kHz,选用更高的采样频率较为困难,而选用低频率会产生频谱重叠。因此,采样频率选择与开关频率同步,即在一个 MOSFET 开关周期中只采样一个数据,这样开关纹波就成为隐性振荡,不会在还原信号中出现。

3.2 PWM 中点采样法

受 MOSFET 驱动电路限制,直流无刷电机控制系统采用 PWM 下桥臂单斩方式,该斩波方式在 MOSFET 关断时,电流将通过一个上桥臂 MOSFET 和一个上桥臂续流二极管形成续流回路,电感储能不反馈到电源,而是通过绕组转化为热能。这个续流回路并没有流经电流传感器,传感器检测到的功率桥母线电流为零。对于 PWM 单斩方式,电流传感器只有在 PWM 开通期间才能检测到电流信号<sup>[1]</sup>。因此,在设计 A/D 采样控制程序时,必须选择合理的采样点,而且必须在 PWM 开通期间选择。

MOSFET 开通关闭瞬间会产生尖峰电流,所以采样点应避开开关时刻,否则系统不能正常工作。为

保证在每次开关周期中确定一个固定采样点,且远离开关点,采用了在 PWM 开通期间中点时刻采样,即采样平均电流的方法,这样很好地避开了开关噪声的影响,保证了采样准确度。图 5 示出采样时序。

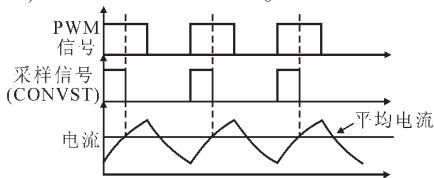


图 5 A/D 采样控制时序图

AD7472 控制逻辑非常简单,CONVST 引脚检测到下降沿信号就启动转换,因此,利用 VHDL 语言强大的控制逻辑设计能力,可以容易地编写控制时序程序以获得需要的采样信号,将该采样信号直接连到 CONVST 引脚,即可实现 A/D 采样控制。

### 3.3 数字滤波程序设计

实际中,电机的电流采样值常混有干扰噪声,例如,功率管的导通和截止过程的电流突变就会产生谐波干扰和尖峰干扰,PCB 板走线的随意性以及元器件安装放置的不合理性还会产生电磁干扰。用含有干扰噪声的电流值作为控制信号将引起系统振荡,甚至误动作。为了合理正确地反映电流采样值,必须进行滤波处理以减弱或消除干扰。对周期性的工频或高频干扰,可通过在电路中加入 RC 低通滤波器硬件来加以抑制。对于低频周期性干扰和随机性干扰,必须采用数字滤波解决<sup>[2]</sup>。

常用的数字滤波方法有算术平均值法、移动平均滤波法、防脉冲干扰平均值法、中值滤波法等。文中采用滑动平均滤波法对 A/D 采样值进行滤波,可有效地抑制周期性干扰,提高电流采样值的平滑性。滑动平均滤波法程序框图和算法原理如图 6 所示。

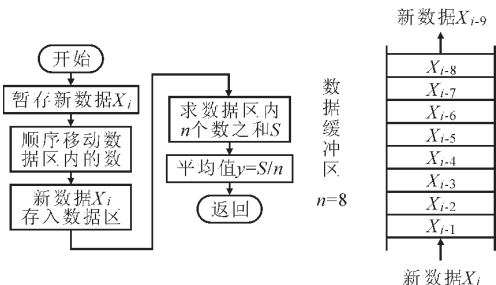


图 6 滑动平均滤波程序框图与算法原理

将采样后的数据按采样时刻先后顺序置于 FIFO 寄存器中,每次计算前先顺序移动数据,将队列前面最先采样的数据移出,然后将最新采样的数据补充至队尾,保证寄存器队列中总有  $n$  个数据,然后计算队列中数据的算术平均值,该平均值就是所求值。与普通算术平均值法相比,该方法每次计算平均值,只需采样一次,非常适合用于实时控制。

## 4 实验结果与分析

实验中直流无刷电机参数为:三相 4 对极,额定电

压 24 V,电流 0.2 A,力矩系数为  $0.042\text{ N}\cdot\text{m/A}$ ,系统转动惯量  $3.2\times10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ;根据式(3),调节  $R_G$ ,即可调节电流检测范围,实验电流检测范围为  $0\sim0.9\text{ A}$ ,对应的 A/D 转换值为 000H~FFFH,即  $0\sim4095$ 。

为验证提出的电流采样系统的有效性和实用性,实验测量了一系列电机电流值  $I$  对应的 A/D 转换值。图 7 示出采样频率  $24\text{ kHz}$ , $I=0.2\text{ A}$  时对应的 A/D 转换值波动图,其相对误差小于  $5\%$ ,采样系统具有较高的精度。

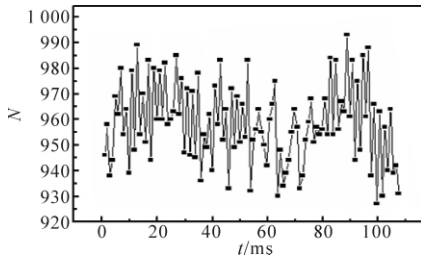


图 7  $I=0.2\text{ A}$  的 A/D 转换值波动曲线

表 1 示出  $I$  对应的  $N$ 。用数据处理软件处理后,得到如图 8 所示的直线拟合图,其线性度为  $0.1\%$ 。可见设计的电流采样系统具有很好的线性度。

表 1 A/D 采样结果

$I/\text{mA}$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$N$	228	302	372	443	524	606	691	778	856	959

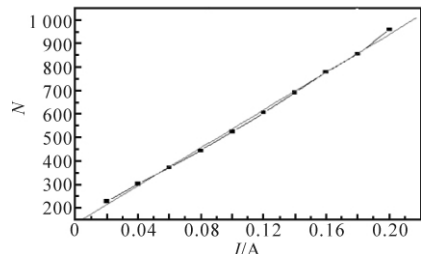


图 8  $N-I$  直线拟合图

## 5 结束语

设计的直流无刷电机电流采样电路仅使用 ACS712,AD623 和 AD7472 3 个集成芯片就实现了电流检测、调理放大以及模数转换功能,电路集成度高,占用空间小,抗干扰能力强,方便可靠,而且利用 FPGA 强大控制逻辑设计能力可以较容易地实现 A/D 转换控制逻辑和滤波算法。PWM 中点采样法有效地保证了采样信号不受尖峰脉冲的干扰,滑动平均滤波法则对周期性干扰有很好的抑制作用,去除了测量噪声。整个采样系统结构简单,使用方便,电流检测范围可调,并且拥有较好的精度和线性度,为实现电流环控制提供了可靠保证。

## 参考文献

- [1] 章昊秋.轮式驱动电动汽车驱动系统的研究[D].杭州:浙江大学,2006:52~53.
- [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.