

基于驱动程序硬核化的永磁同步电机 双核控制方案*

尤钱亮, 朱保鹏, 魏海峰, 张 懿
(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 针对永磁同步电机(PMSM)驱动的开发门槛高以及开发难度大的问题, 提供了基于驱动程序硬核化的 PMSM 双核控制方案——FU68XX 系列 MCU。详细介绍了 PMSM 驱动程序硬核化模块——电机控制硬核(ME)以及事件处理模块——8051 内核。基于专用于 PMSM 控制的 FU6811 芯片, 搭建了 PMSM 控制试验平台。通过试验发现, 提出的方案相对于传统开发方案, 上手速度快, 开发难度低, 降低了开发门槛, 并且试验结果表明提出的方案控制精度高、性能稳定。

关键词: 永磁同步电机; FU6811; 硬核化方案; 双核控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)02-0025-03

Dual-Core Control Scheme for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Drive Program Solidifying*

YOU Qianliang, ZHU Baopeng, WEI Haifeng, ZHANG Yi

(School of Electrical and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Aiming at the problems of high development threshold and the difficulty in development of permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive, Dual-core control scheme for PMSM based on drive program solidifying——MCU of FU68XX series was provided. There was a detailed illustration of the solidifying module of the PMSM driver program——motor control core (ME) and event processing module——8051 kernel. Based on the FU6811 chip which was designed for PMSM control, this motor control experiment platform was built here. Through the experimental development, it was found that compared with the traditional development scheme, the scheme was relatively easy to learn and develop, which could reduce the development threshold. And the experimental results showed that the scheme has high control accuracy and stable performance.

Key words: permanent magnet synchronous motor; FU6811; solidifying scheme

0 引 言

目前, 各行各业中永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的需求量十分大, 因此对 PMSM 的控制方案的研究也很多。常见的控制方案有基于 ARM 控制、基于 DSP 控制、基于单片机控制、基于 FPGA 控制等。

文献[1]提供了一份基于单片机的 PMSM 控制方法研究, 试验结果表明系统运行稳定, 但其对于矢量控制算法处理太慢, 不适用于高速场合。针对运行速度低导致电机运行速度提不上去的问题, 文献[2]介绍了一种基于 DSP 的 PMSM 控制系统, 能够快速处理矢量变换, 但是 DSP 在控制方面存在劣势。针对控制的不足, 文献[3]给出

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61503161); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016073-01)

作者简介: 尤钱亮(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动控制。

魏海峰(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机驱动控制及复杂控制系统。

张 懿(1982—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机驱动控制及复杂控制系统。

了一个以 ARM 为核心的交流 PMSM 的控制系统设计方案。从试验运行来看,其较好地实现了对 PMSM 的伺服控制,并且具有快速响应性好、稳定性高等优点,但 ARM 的价格太高,导致成本太高。文献[4]介绍了一种利用 FPGA 实现的高性能 PMSM 矢量控制系统,试验结果显示该系统拥有良好的动态响应性能和实时性,但 FPGA 不能同时处理多事件,一定程度上降低了效率。上述 4 种方案的共同缺点是其控制程序都需要人工编写,这在一定程度上提高了开发门槛,增大了开发难度。

因此,本文提出了基于驱动程序硬核化的 PMSM 双核控制方案,详细介绍了一款 PMSM 驱动程序已经硬核化的 FU6811 芯片,芯片内置电机驱动核(ME)和任务处理核(8051 内核)。由于 8051 内核资料众多,使用广泛,所以该芯片上手快,并且由于开发人员无需编写 PMSM 驱动程序,故开发门槛与开发难度都大大降低。本文基于 FU6811 芯片,搭建了 PMSM 控制试验平台,试验结果证实了此方案的响应速度快、控制精度高、稳态性能好。

1 FU6811 芯片及特点

FU6811 是一款集成 8051 内核和电机控制引擎(ME)的“双核”电机驱动 MCU。8051 内核处理常规事务,ME 处理电机实时事务,芯片内部集成有高速运算放大器、高速 ADC、高压 LDO,只需简单的外围处理便可实现高效率的 FOC(磁场定向控制)电机驱动。FU6811 具有 32 个 GPIO,4 个通用带抓捕功能可编程定时器、1 个加强型高级定时器、1 个 RTC 定时器,I2C 接口、SPI 接口、UART 接口、8 通道 12 位 ADC 以及 4 路模拟比较器。

FOC 模块包含角度模块、PI 控制器、坐标转换模块、输出模块。可以采用内部角度估算模块实现无 HALL FOC 控制,也可以联合 MCU 处理 HALL 信号实现由 HALL FOC 控制。FOC 模块内部包含电流闭环,用户通过给定 ID、IQ 的参考值,就可以输出六路 PWM 驱动电机,同时 ADC 自动采集电流作电流闭环。传统方案中 PI、LPF、SVPWM、FOC 这些都是靠软件编写的,很大程度上占据着 CPU 资源。FU6811 将这些模块独立做成硬核,减小了 CPU 负担,故选用 8051 作为任务

内核就已经足够了,这样也大大降低了成本。

FU6811 具有如下特点:

(1) FOC 固化,运行速度快。FU6811 以硬件实现所有 FOC 运算,节约了软件运行时间,最高 PWM 频率可达 40 kHz,可应用于高速电机(>25 000 r/min)。

(2) 控制精度和效率高。FOC 采用 Q15 格式,电角度由 360°扩展到 2¹⁵,角度分辨率可达 0.01°,可对电机实现高精度控制;优化的位置估算算法可实现高效率控制。

(3) 静音效果好。FOC 算法可以精确控制驱动电流为光滑正弦波,转矩脉动小,同时实现超静音工作。

(4) 起动特性好。根据负载转矩变化调整起动力矩和起动方式,保证了起动的可靠性和平稳性;起动速度快,起动时间比常规起动方式短 50%。

(5) 硬件电路简单。内部集成高速运算放大器、高压 LDO,简化外围电路,降低产品成本,提高系统的可靠性。

2 PMSM 驱动程序硬核化方案

FU6811 中的 FOC 模块控制步骤如下:(1) 采集两相电流 i_a 、 i_b 。(2) 经过 Clarke 变换后得到两轴正交电流量。(3) 经过旋转变换后得到正交的电流量 i_d 、 i_q ,其中 i_q 与转矩有关, i_d 与磁通有关。在实际控制中,常将 i_d 置为零。得到的这两个量不是时变的,因此可以单独地对这两个量进行控制,类似直流量控制一样,而不需要知道的电压为多少。(4) 将第三步中得到的 i_q 、 i_d 量分别送进 PI 调节器,得到对应的输出 u_d 、 u_q 。(5) 通过估算器得到电机转过的角度。(6) 将 u_d 、 u_q 进行逆 Park 变换,得到二轴电压量 u_α 、 u_β 。(7) 将(6)中的 u_α 、 u_β 输送给 SVPWM 模块。(8) 通过给定电压 SV_US、角度 SV_ANG 和计数器重载值 SV_ARR,同时配置 SV_CR 寄存器的 SV5SEG 选择五段式还是七段式,启动 SVPWM 模块,算出 U、V、W 三相的电压比较值,同时将值自动分别存进 TIMER0 的 CCR1、CCR2 和 CCR3 寄存器,通过配置 TIMER0 输出三路 PWM。(9) 最后得到实际需要的三相电压输入给逆变电桥,驱动电机。

在 FU6811 中,整个 FOC 都是硬核,以上 9 个步骤都是自动完成,无需用软件编写计算过程程序,开发者所需要的只是获取两相电流值,以及输入给定的 i_d 、 i_q 量,并且配置好这些硬件的寄存器参数即可,这种模式大大减小了开发难度。实际控制图如图 1 所示。51 内核只负责一些状态量的处理,不涉及计算以及控制,同时将一些必要参数量,如给定的 i_d 、 i_q 量,PID 参数等传输给 ME 核,ME 核中的 FOC 模块会完成如图 2 所示中的

过程,并生成三路 PWM 信号输送给驱动电路,驱动三相电机。

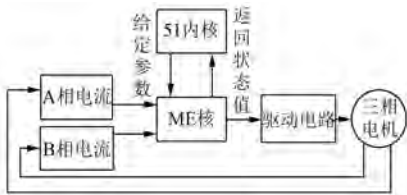


图 1 FU6811 简要控制原理图

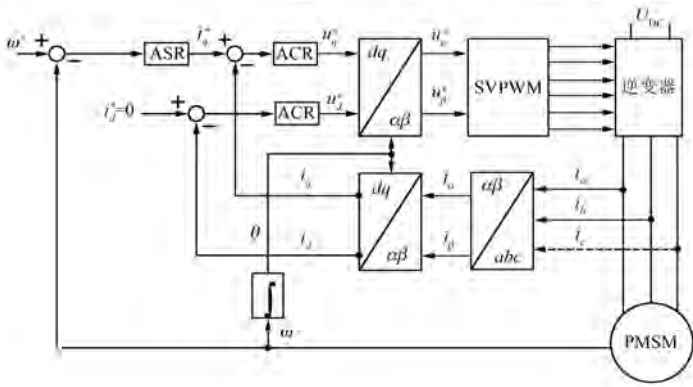


图 2 FOC 原理框图

3 基于 FU6811 PMSM 试验平台

基于 FU6811 芯片无传感器 PMSM 控制试验平台主要由三个部分组成:PMSM、6 个 MOS 管构成的三相逆变器以及 FU6811 控制板。其中,三相逆变器直接与主控制板集中在一起,使得控制平台更为简化。试验平台另带有 60 V 和 15 V 稳压电源:15 V 电压会被降至 5 V 用于芯片供电;60 V 是电机的母线电压。另附有 0~5 V 用于调速的稳压电源。试验电机参数如表 1 所示。

表 1 试验电机参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.2
额定电压/V	310
额定电流/A	4.2
额定转矩/(N·m)	7.2
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 500
定子电阻/Ω	1.2
d、q 轴电感/mH	5.22
极对数/个	4
转子永磁磁链 ψ _f /Wb	0.162

4 试验分析

试验中通过 FOC 观测器将实际测得的转速、给定转速、转矩和电机测得的三相相电流以及 i_d 、 i_q 电流量等数据通过串口传输给上位机,上位机保存完数据,通过 MATLAB 绘制。本次试验所选 PMSM 为 4 对极,设定由转台所构成的负载为 7.5 N·m。由于数据量大,只选取前 0.4 s 的数据绘制波形。

图 3 为 PMSM dq 轴的 i_d 、 i_q 电流量及电机的三相电流 i_a 、 i_b 和 i_c 。根据矢量控制 i_q 应该为 0,图 3 中所示确实为 0。图 4 是实际测得的转矩,

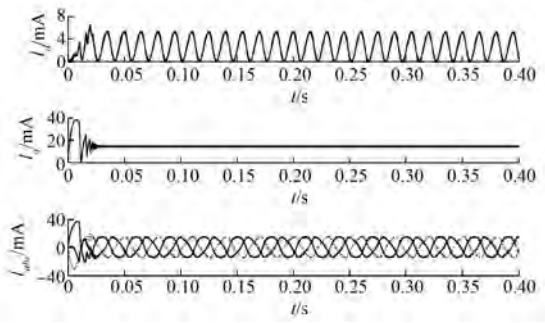


图 3 i_d 、 i_q 和 i_{abc}

(下转第 33 页)

- [6] XU L, ZHANG Y, GUVEN M K. A new method to optimize q -axis voltage for deep flux weakening control of IPM machines based on single current regulator[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE, 2008: 2750-2754.
- [7] 方晓春, 胡太元, 林飞, 等. 基于交直流电流耦合的单电流调节器永磁同步电机弱磁控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 140-147.
- [8] 盛义发, 喻寿益, 桂卫华, 等. 轨道车辆用永磁同步电机系统弱磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 74-79.
- [9] 华新强, 李红梅等. 基于双梯度下降法的内置式永磁同步电动机精确转矩控制[J]. 微特电机, 2014, 42(8): 59-63.
- [10] UDDIN M N, REBEIRO R S. Online efficiency optimization of a fuzzy-logic-controller-based IPMSM drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2): 1043-1050.
- [11] MIYAJIMA T, FUJIMOTO H, FUJITSUNA M. A precise model-based design of voltage phase controller for IPMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5655-5664.
- [12] 陈坤华, 孙玉坤, 吉敬华, 等. 内嵌式永磁同步电动机弱磁控制分段线性化研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 17-22.
- [13] HOLTZ J, LOTZKAT W, KHAMBADKONE A M. On continuous control of PWM inverters in the overmodulation range including the six-step mode [J]. IEEE Trans Power Electronics, 1993, 8(4): 546-553.
- [14] BOLOGNANI S, ZOGLIOTTO M. Novel digital continuous control of SVM inverters in the overmodulation range [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(2): 525-530.
- [15] 樊扬, 瞿文龙, 陆海峰, 等. 基于叠加原理的 SVPWM 过调制算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(4): 461-464.
- [16] 吴芳, 万山明, 黄声华. 一种过调制算法及其在永磁同步电动机弱磁控制中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 58-63.
- [17] 杨澜倩, 唐校, 万频, 等. SVPWM 过调制算法磁链分析及在永磁同步电机驱动中的应用[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(7): 6-9.

收稿日期: 2017-06-09

(上接第 27 页)

可以看出稳态性能十分优秀。图 5 是给定速度与实际测得的速度, 给定的速度是 1 000 r/min, 可以看出, 响应速度快, 超调小, 稳态精度高。

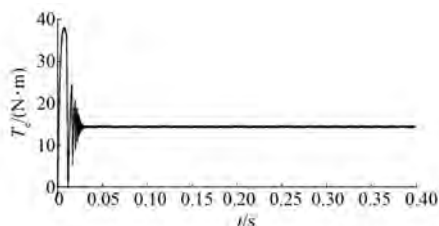


图 4 转矩 T_e

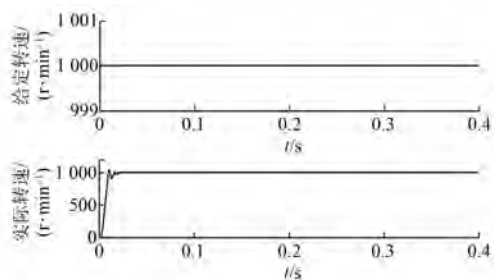


图 5 给定转速与实际转速

5 结 语

本文针对 PMSM 驱动的开发门槛高及开发难度大的问题, 提供了基于驱动程序硬核化的 PMSM 双核控制方案。基于专用于 PMSM 控制的 FU6811 芯片, 搭建了 PMSM 控制试验平台, 完成 PMSM 无传感器控制试验并对试验结果进行了分析, 结果证明了此方案用于 PMSM 的优越性和稳定性。

【参考文献】

- [1] 李瑜. 基于单片机的永磁同步电机控制方法研究[J]. 电气应用, 2015(3): 74-76, 81.
- [2] 扈宏杰, 尔联洁, 吴森堂. 基于 DSP 的永磁同步电动机控制系统[J]. 电工技术杂志, 2003, 18(11): 69-71.
- [3] 张巍, 陈今润, 王琛. 基于 ARM 的 PMSM 控制系统设计[J]. 微计算机信息, 2010(32): 70-71.
- [4] 谷爱昱, 徐茂盛. 永磁同步电动机控制系统的 FPGA 设计实现[J]. 微特电机, 2014, 42(10): 52-54.

收稿日期: 2017-05-27