

基于 GD32F450 的永磁同步电机滑模速度控制器设计

李绍军, 梁冬冬, 陈 力

(北方信息控制研究院集团有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 永磁同步电机(PMSM)控制系统在民用领域和军用领域如机器人、雷达控制、光电转台等方面均有着重要应用。GD32F450 作为国产化高性能处理器,具有丰富的电机控制外设,在国内芯片自主可控的背景下,十分适合应用于电机控制系统。针对一款低压 PMSM,设计了伺服驱动电路。针对常用的 PI 速度控制器容易出现超调现象的问题,使用滑模速度控制器替代,与 PI 控制相比,可实现速度控制更加平滑,试验结构证明了方案的合理性。

关键词: 永磁同步电机; GD32F450; 滑模速度控制器; 伺服驱动; PI 速度控制器

中图分类号: TM 383 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)07-0039-05

doi: 10.12177/emca.2020.050

Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Sliding Mode Speed Controller Based on GD32F450

LI Shaojun, LIANG Dongdong, CHEN Li

(Northern Information Control Research Institute Group Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) control system has important applications in civil and military fields such as robot, radar control and photoelectric turntable. GD32F450, as a domestic high-performance processor, has a wealth of motor control peripherals. It is very suitable for motor control system under the background of independent and controllable chip in China. A servo drive circuit is designed for a low-voltage PMSM. In view of the common PI speed controller prone to overshoot, the sliding mode speed controller is used instead. Compared with the PI control, the speed control can be smoother. The test structure proves the rationality of the scheme.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); GD32F450; sliding mode speed controller; servo drive; PI speed controller

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有体积小、质量轻、高效节能等优点,在中小功率电机应用领域得到了广泛的应用^[1]。随着电力电子技术、半导体开关器件和 DSP 技术性能不断完善,推动了 PMSM 控制系统数字化技术的不断发展,为新型控制理论和方法的应用提供了基础,使得系统的精度和可靠性不断提高^[2-3]。目前,PMSM 控制器一般

使用国外 TI、ST、NXP、Infineon 等公司的高性能数字信号处理器^[4],国内传统的 51 系列内核单片机无论是在性能还是在电机控制外设数量和种类方面均难以适应 PMSM 伺服控制越来越高的要求。GD32F450 是一款国产化高性能 ARM 核单片机,内部集成了完整的伺服电机控制外设资源。本文以 GD32F450 为核心,设计了一款通用型低压伺服电机驱动电路,在此基础上验证了低压 PMSM 速度电流 PI 双闭环控制速度调节效果。针对使

收稿日期: 2020-04-07; 收到修改稿日期: 2020-05-02

作者简介: 李绍军(1989—),男,硕士,工程师,研究方向为光电云台伺服。

用 PI 速度控制器出现的电机速度超调问题,使用滑模速度控制器进行替代,并基于硬件电路进行了试验验证。

1 控制策略

1.1 PMSM 数学模型

采用矢量控制算法,对于表贴式 PMSM,由电机的电流、电压、磁链等参数通过坐标变换,其数学模型可以等效为 d - q 旋转坐标系的数学模型:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\omega_m L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p\omega_m L_d i_d + p\omega_m \psi_f \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = 1.5p\psi_f i_q - T_L + (L_d - L_q) i_d i_q = \\ K_t i_q - T_L + (L_d - L_q) i_d i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 为等效后电机定子电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为定子电流的 d 、 q 轴分量; R 为定子电阻; L_d 、 L_q 分别为定子 d 、 q 轴电感; p 为电机极对数; ω_m 为电机机械角速度; ψ_f 为永磁体磁链; K_t 为转矩系数。

1.2 PMSM 矢量控制原理

通过矢量控制,可以实现 PMSM 励磁分量和转矩分量的解耦,将定子电流分解为励磁电流和转矩电流分别独立加以控制^[5]。根据 PMSM 结构特性和使用用途的不同,常用的控制方法包括: $i_d=0$ 控制、弱磁控制、最大转矩电流比控制、恒磁链控制等^[6]。因为使用表贴式 PMSM,所以采用 $i_d=0$ 控制,此时电机定子电流只有 i_q 分量,电机转矩只与 i_q 分量有关,可以近似等效为他励直流电机控制^[7]。

速度环输入误差经速度控制器解算后,输出量为 i_q 电流环给定值, PMSM 矢量控制系统结构框图如图 1 所示。

2 驱动电路硬件设计

驱动电路主要分为控制板电路和功率板电路。驱动电路硬件结构框图如图 2 所示。

控制板由 GD32F450 最小系统和外围通信电路组成,主要完成 PMSM 机械角度采集、电机相电流采集、功率板母线电压采集、电机转速解算,磁场定向控制(FOC)算法解算、更新功率板脉宽

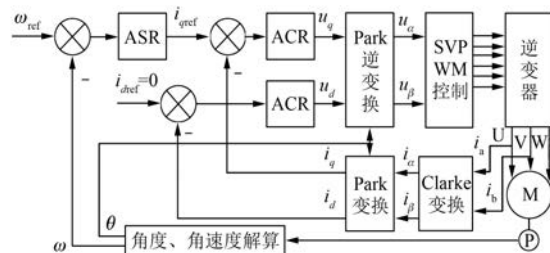


图 1 PMSM 矢量控制系统结构框图

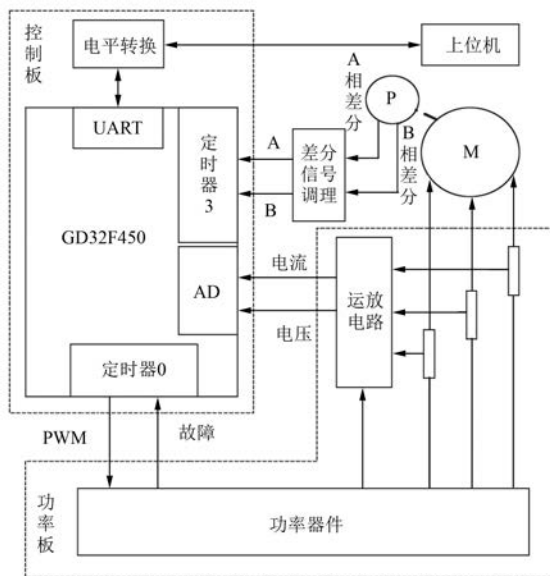


图 2 驱动电路硬件结构框图

调制(PWM)输入信号、响应功率板故障报警信息、与上位机进行信息交互等;驱动电路包括功率器件和电压电流调理电路。功率器件包括 6 个 MOSFET 构成的三相桥和 1 个三相门极驱动器,主要完成功率逆变转换。电压电流调理电路主要完成对电机相电流和母线电压进行信号调理等。同时电机编码器输出的差分正交信号需要经过差分转单端和电平转换后才能传输至控制板进行读取。

2.1 主控制器

作为控制板乃至整个电机驱动电路的核心主控制器, GD32F450 是一款集成浮点运算单元的 32 位 ARM 框架微处理器,主频高达 200 MHz,电机控制外设方面具有 2 个支持三相电机矢量控制的高级定时器和多个支持增量式旋转编码器接口的通用定时器, 3 个多通道 12 位 ADC, 8 个 UART 和 2 个 CAN2.0B 通信接口,可同时支持驱动两路

三相 PMSM^[8]。本文使用 GD32F450 的高级定时器 0 作为三相电机驱动 PWM 输出定时器,使用通用定时器 3 作为旋转编码器接口定时器,使用 ADC 同步采样电机 AB 相相电流和母线电压,使用 UART2 作为与上位机的通信接口。

2.2 功率电路

使用 6ED003L06-F2 作为门极驱动器,驱动 6 个 BSC016N06 构成的三相 MOSFET 桥电路,根据控制板输出的 PWM 信号完成功率逆变转换,驱动电机稳定运转。功率电路硬件连接图如图 3 所示。

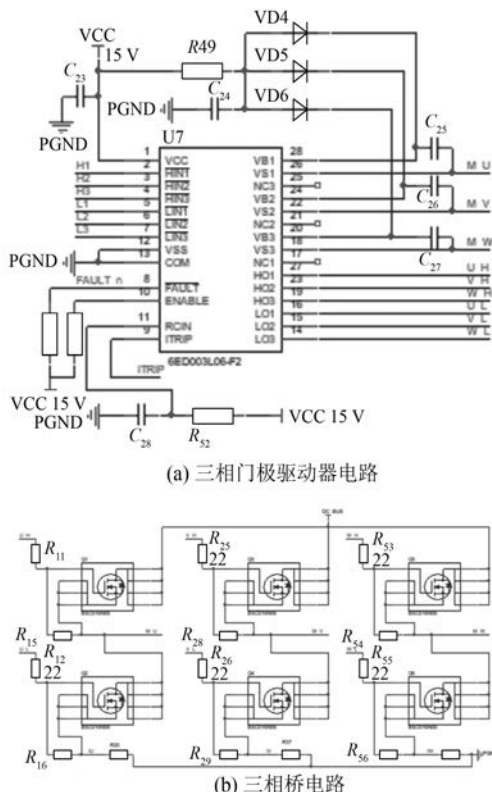


图 3 功率电路硬件连接图

2.3 电流电压运放电路

受限于采样电阻阻值,电机每相采样电阻端电压均很小,功率板母线电压通常约为 24 V 范围。这两者与单片机 AD 模块通道输入范围相比,一个过小,另一个过大。为此,对于电机电流需要按比例运算放大电路进行处理,对于母线电压需要经过分压电路将其转换为单片机 AD 通道所能涵盖的合理电压范围以合理利用 AD 通道的量程。电流电压运放电路如图 4 所示。

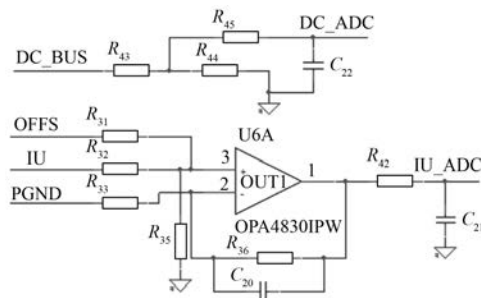


图 4 电流电压运放电路图

2.4 编码器信号调理电路

电机自带增量式旋转编码器输出的 AB 相位信号为差分信号,首先需要利用差分驱动器转换为单端信号,转换后的 AB 相单端信号电平为 5 V,需要经 5 V 转 3.3 V 后才能接至 GD32F450 定时器 3 处理。编码器信号调理电路如图 5 所示。

3 软件设计

3.1 软件设计框架

程序分为主程序和中断服务程序 2 部分进行设计。主程序主要完成各模块初始化、接收上位机指令、状态信息上报等任务,监测是否出现影响正常工作的过压、欠压、过流等故障状态并根据故障状态作出保护响应;中断服务程序主要完成采集电机电流和角位置等信息、速度电流双闭环计算、FOC 算法解算、更新功率板输入 PWM 信号等任务^[9]。定时器中断服务程序流程图如图 6 所示。

3.2 滑模速度控制器设计

PI 控制器设计简单、参数整定方便,但当电机内部参数发生变化或受到外部扰动时,将不能满足实际使用需求^[10]。滑模控制与 PI 控制相比,具有对扰动和参数不敏感、响应速度快等优点,且鲁棒性较好^[11]。

为了使电机控制具有较好的动态品质,采用指数趋近律设计滑模控制器。

定义滑模面函数为

$$\begin{cases} s = cx_1 + x_2 \\ \dot{s} = -qs - \varepsilon \text{sign}(s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: c, q, ε 为大于零的待整定参数。

假设外部扰动和速度给定量变化缓慢,定义:

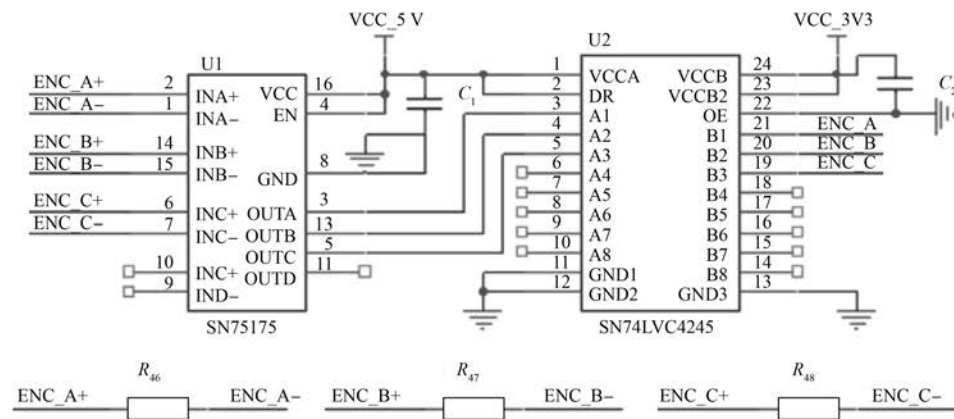


图5 编码器信号调理电路图

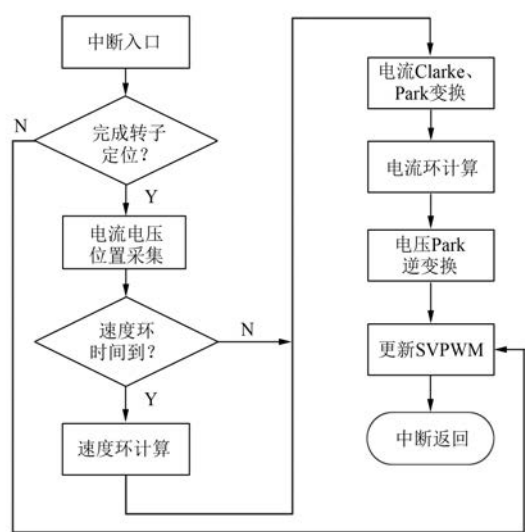


图6 定时器中断服务程序流程图

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega} \end{cases} \quad (3)$$

滑模控制要求只有满足 $\dot{s}s < 0$ 滑动模态可达性条件的系统才可以在有限时间内到达滑模面实现收敛^[12]。由式(2)可知显然在指数趋近律下系统满足可达性条件。

由式(1)~式(3)联合可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= -qs - \varepsilon \text{sign}(s) = \\ &cx_2 - \frac{1.5p\psi_f}{J}i_q \end{aligned} \quad (4)$$

取 $\dot{i}_q$ 为 u , $\frac{1.5p\psi_f}{J}$ 为 A , 则:

$$\begin{cases} u = \frac{1}{A}[qs + \varepsilon \text{sign}(s) + cx_2] \\ i_{q\text{ref}} = \int_0^t u d\tau \end{cases} \quad (5)$$

由于积分项的存在,可以在一定程度上消除系统的超调和减小稳态误差^[13]。

4 试验验证

为了验证驱动电路和控制算法的合理性,搭建实物验证平台进行试验验证,如图7所示。



图7 实物验证平台

试验电机为安川公司的 SGMM-A2C312 型低压 PMSM, 参数如表1所示。

表1 PMSM 参数	
参数名称	参数值
额定功率/W	20
额定转矩/(N·m)	0.063 8
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
相电感/mH	0.33
相电阻/Ω	1
转矩系数/(N·m·A ⁻¹)	0.035 8
极对数	3
编码器线数/(线/周)	2 048

为了保证系统能正常运行, GD32F450 定时器 3 需要能够正常读取电机编码器值, 试验情况如图 8 所示。电机增量式编码器线数 4 倍为 8 192, 可见电机编码器值可以被正常读取。

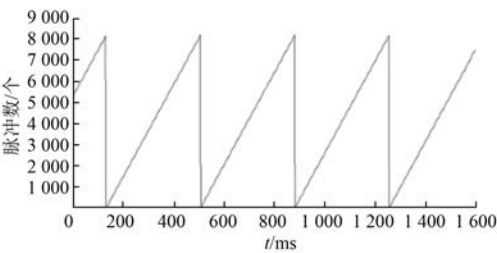


图 8 电机编码器读取值

电机设定转速为 750 r/min 时, 测试反馈相电流曲线, 如图 9 所示。图 9 中, 相邻峰值点 1 和峰值点 2 间对应周期为 26.9 ms, 峰值点 2 和峰值点 3 间对应周期为 26.5 ms, 由转速公式 $n=60f/p$ (式中 n 为电机转速, f 为供电频率) 可分别得到此时电机转速为 743.5 和 754.7 r/min, 与给定值相比误差较小。

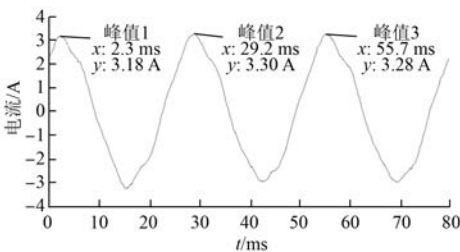


图 9 电机相电流读取值

分别使用 PI 速度控制器和滑模速度控制器进行调速试验, 电机给定转速由 750 r/min 到 1 050 r/min 再到 600 r/min 变化, 试验结果如图 10 所示。

由图 10 可以得出 2 种速度控制器性能指标如表 2 所示。表 2 中误差指稳态速度误差。

表 2 速度控制器性能参数

调节方式	转速/(r·min ⁻¹)	超调/%	调节时间/ms	误差/%
PI 控制器	750	25	710	4.5
滑模控制器	750	0	490	5.0
PI 控制器	1 050	3	330	3.0
滑模控制器	1 050	0	350	3.4
PI 控制器	600	16.7	560	3.5
滑模控制器	600	0	520	4.2

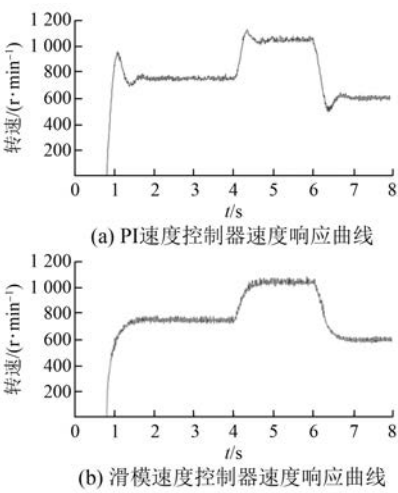


图 10 速度响应曲线

可见滑模速度控制器具有较快的响应速度, 可以克服 PI 速度控制器出现的超调现象, 具有较好的动态品质。

5 结 语

本文针对 PI 速度控制器的超调问题, 使用滑模速度控制器进行代替, 并基于硬件电路进行了试验验证。由试验结果可知, GD32F450 能够满足 PMSM 控制应用要求, 且具有较高的性能, 验证了基于 GD32F450 的 PMSM 速度滑模控制器的合理性。

【参考文献】

[1] 任志斌, 林元璋, 钟灼仔. 交流伺服控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 10.

[2] 邓艳艳, 林旭梅. 永磁同步电机滑模自适应控制[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 337.

[3] 孙彦超. 基于 XMC4500 的 PMSM 控制系统的设计[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.

[4] 袁登科, 徐延东, 李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 8.

[5] 薛鹏飞. 无速度传感器直接磁场定向矢量控制系统控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

[6] 陈荣. 面装式永磁同步电机伺服系统电流控制方法研究[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(4): 14.

[7] 柳光耀. 基于 XMC4500 永磁同步电机交流伺服系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

(下转第 52 页)

4 结 语

碳刷和换向器间的摩擦系数影响碳刷系统的振动模态,当摩擦系数达到临界值时,系统由于模态耦合导致振动不稳定,将产生尖叫噪声。在新产品开发时,可以通过本文所提方法进行复特征值 FEA 仿真预测系统的振动稳定性,理解摩擦系数对系统稳定性的影响程度,必要时采取设计优化碳刷系统结构来提前避免尖叫噪声的发生。

【参 考 文 献】

- [1] HOFFMAN N, GAUL L. Friction induced vibrations of brakes research fields and activities [C] // SAE Technical Paper, 2008. doi: 10. 4271/2008-01-2579.
 - [2] CHEN F, QUAGLIA R L, TAN C A. On automotive disc brake squeal part I: mechanisms and causes [C] // SAE Technical Paper. 2003. doi: 10. 4271/2003-01-0683.
 - [3] NORTH M R. Disc brake squeal [C] // Braking of Road Vehicles, Automotive Division of the Institution of Mechanical Engineers. London: Mechanical Engineering Publications Limited, 1976: 169-176.
 - [4] KINKAID N M, O'REILLY O M, PAPADOPOULOS P. Review of automotive disc brake squeal [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267: 105.
 - [5] 管迪华, 黄锦春. 盘式制动器尖叫的馈入能量分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(8): 97.
 - [6] 张立军, 刁坤, 孟德建, 等. 摩擦引起的振动和噪声的研究现状与展望 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 765.
 - [7] 张立军, 吴军, 孟德建. 模态耦合与能量馈入两种摩擦尖叫机理关系 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 1562.
 - [8] 张立军, 吴军, 孟德建. 摩擦引起的模态耦合不稳定性分析 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 65.
 - [9] HOFFMANN N, FISCHER M, ALLGAIER R, et al. A minimal model for studying properties of the mode coupling type instability in friction induced oscillations [J]. Mechanics Research Communications, 2002, 29(4): 197.
 - [10] LÜ H, YU D. Brake squeal reduction of vehicle disc brake system with interval parameters by uncertain optimization [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(26): 7313.
- ~~~~~
- (上接第 21 页)
- [10] 曾令全, 魏辉, 李华. PWM 型逆变器输出谐波对异步电机损耗的影响分析 [J]. 微电机, 2011, 44(4): 68.
 - [11] 洪乃刚. 电力电子技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
 - [12] 周润景. 单片机技术及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- ~~~~~
- (上接第 43 页)
- [8] Giga Device Semiconductor Inc. GD32F450xx ARM Cortex-M4 32-bit MCU datasheet [EB/OL]. <https://www.gigadevice.com>.
 - [9] 符晓, 朱洪顺. TMS320F28335 DSP 原理、开发及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
 - [10] 张富成, 杨光. 直接面向驱动电路的 PMSM 多滑模面变结构控制 [J]. 微电机, 2018, 51(10): 47.
 - [11] 李运德, 杨张森. 无刷直流电机的指数趋近律滑模变结构控制 [J]. 电机与控制应用, 2011, 38(3): 32.
 - [12] 肖仁鑫, 王泽林, 申江卫. 车用永磁同步电机变指数滑模控制研究 [J]. 微电机, 2018, 51(5): 43.
 - [13] 李政, 胡广大, 崔家瑞, 等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 431.