

# 基于 DSP 的永磁同步电动机控制系统设计

刘洋 张斌 吴庆林 王帅 孟浩然 李玉霞  
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘要:** 为提高永磁同步电动机(PMSM)伺服系统的控制精度和实时性,设计了基于数字信号处理器(DSP)的全数字 PMSM 控制系统。TMS320F28335 型 DSP 的片上资源丰富,有浮点运算单元,使系统硬件设计更方便,运算速度更快。在 PMSM 数学模型和矢量控制原理的基础上,设计了 PMSM 控制系统的硬件和软件。该控制系统具有完成控制算法、电流和转子位置检测、速度计算、SVPWM 产生等功能。在一台森创 1.5 kW 的 PMSM 上进行了实验,结果表明,控制系统调速准确,性能良好,运行稳定。

**关键词:** PMSM; 全数字; TMS320F28335; 矢量控制

**中图分类号:** TM301.2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Design of PMSM control system based on DSP

Liu Yang Zhang Bin Wu Qinglin Wang Shuai Meng Haoran Li Yuxia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

**Abstract:** All-digital permanent magnet synchronous motor (PMSM) control system based on digital signal processor (DSP) was designed to improve the control precision and instantaneity of PMSM servo system. The DSP (TMS320F28335) has rich on-chip resource and floating-point calculations unit, which makes hardware design simple and operation fast. On the basis of mathematical models and vector control theory of PMSM, the hardware and software for PMSM control system was designed. The control system has functions such as completion of control algorithms, current and rotor position acquisition, speed calculation and SVPWM generation. The experiment on 1.5 kW PMSM of Syntron corporation was conducted and the results show that the control system has accurate speed, good control performance and stable operation.

**Keywords:** PMSM; all-digital; TMS320F28335; vector control

## 1 引言

永磁同步电动机调速性能已经完全可与传统的直流电动机相媲美,并且永磁同步电动机具有功率密度高、效率高等感应电动机无法比拟的优点,在要求高精度、高可靠性、高效率的应用场合,如航空航天、数控机床、电动汽车、机器人等方面获得越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。因此,研究永磁同步电动机控制方法,设计 PMSM 控制系统,提高其控制精度和实时性具有重要的意义。

数字信号处理器(DSP)的高速运算能力为 PMSM 复杂的控制算法的实时性要求提供了硬件保障,同时 DSP 芯片内部集成了 A/D 转换、数字 I/O、UART、PWM、正交编码(QEP)等专为运动控制应用而设计的接口<sup>[2]</sup>,使电动机控制系统的硬件设计更加简易、灵活,减小了体积,提高了可靠性,节省了设计时间,对于批量化应用具有更显著的

优势。

本文设计了以 TMS320F28335 浮点型 DSP 为主控芯片的 PMSM 控制系统,控制方法采用 PMSM 的矢量控制。TMS320F28335 主频高达 150 MHz,有单精度浮点单元(FPU),可直接进行浮点运算,与定点 DSP 相比,编程更加方便,运算速度更快,可实现 PMSM 转速、电流的双闭环的全数字控制<sup>[2-3]</sup>。实验结果表明,设计的 PMSM 控制系统运行稳定可靠、运算速度快、实时性强、调速准确。

## 2 PMSM 数学模型及矢量控制方法

### 2.1 PMSM 数学模型

通过一定的理想化假设,可建立 PMSM 同步旋转坐标系下的数学模型<sup>[4-5]</sup>。



型智能功率模块,其驱动保护电路框图如图 3 所示。该型 IPM 共含有 7 个 IGBT,图 3 中管 7 用于制动,1~6 号 IGBT 组成三相逆变器。

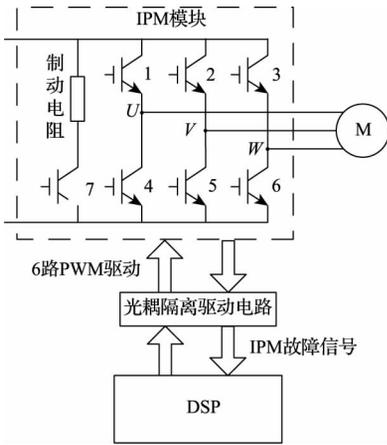


图 3 IPM 驱动保护电路框图

管 1 的驱动和故障输出电路如图 4 所示,其余开关管的驱动和保护类似,这里不再赘述。图 4 中 1UP 接 DSP 输出的 3.3 V 电平的 PWM 信号,经光耦隔离驱动,转换为 15 V 电平 PWM 信号,用以驱动 IPM 开关管 1。图 4 中 UFO 为 IPM 管 1 的故障信号,IPM 一共可产生 4 路故障信号,经过光耦隔离低电平有效,线与合成一路故障信号 Fault,连接到 DSP 任意一个错误信号引脚(TZ1-TZ6 均可),一旦有故障产生,该引脚跳变为低电平,就会触发一个中断,软件立即执行故障处理服务子程序,封锁 PWM 输出,关断全部开关管<sup>[10]</sup>。

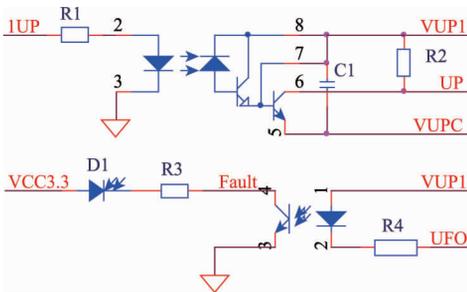


图 4 驱动和故障输出电路

### 3.2 电流检测电路

PMSM 矢量控制需要采样两相相电流,本文选用 LEM 公司 LTS25-NP 隔离型霍尔电流传感器采样 A、B 两相电流,其额定电流为 25 A,采样电流±25 A(RMS)时对应输出电压为 2.5±0.625 V,在 A/D 允许接收的电压范围以内,经过低通滤波和轨对轨运放电压跟随,输入到 DSP 的 A/D 端口,A 相电流检测电路如图 5 所示。

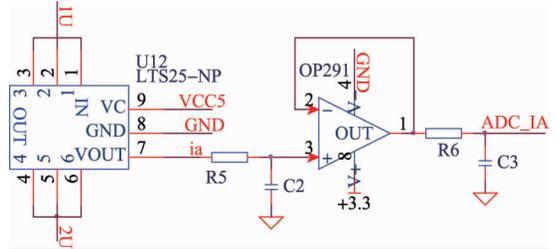


图 5 A 相电流检测电路

### 3.3 转子位置检测电路

森创 120MB150A 型伺服电机带有 2500P/R 的增量式编码器,输出接口是差分形式的,需要设计差分接收器将编码器信号转换成单端信号,然后将 5 V 电平信号经过磁耦隔离转换成 3.3 V 电平信号,才可输入到 DSP 的增强型正交编码模块(EQEP),编码器接口电路如图 6 所示。

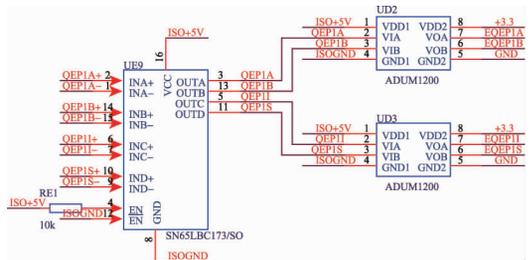


图 6 编码器接口电路

一般将增量式的光电编码器输出的 A、B、Z 信号接到 EQEP 模块上,A、B 信号经过 EQEP 可以产生 4 倍频的正交编码脉,EQEP 的位置计数器在遇到零位信号 Z 时清零,A、B 信号的相位关系可用来确定电机转子旋转方向。经过 DSP 的 EQEP 模块处理,可以进行电动机位置和转向的检测,位置测量分辨率可达 1/10000 转,即 0.036°。另外,可利用 TMS320F28335 的单位位置事件、单位时间事件,经过简单编程,很容易实现电动机的 M 法、T 法、M/T 法测速。

## 4 软件设计

PMSM 控制系统的主要功能是由 DSP 软件编程实现的,软件设计主要包括主程序和中断服务程序的设计。主程序主要完成系统及各个模块寄存器的初始化、变量初始化、转子位置初始定位、参数设定和故障处理以及系统通讯。DSP 主程序流程如图 7 所示,将控制参数设定和故障处理放在主循环中,确保了响应指令的快速性和故障保护的及时性。主中断采用 EPWM1 下溢中断,主要完成位置检测、转速计算、电流检测、速度环和电流环调节、矢量变换以及 SVPWM 产生等,EPWM1 下溢中断程序流程如图 8 所示。

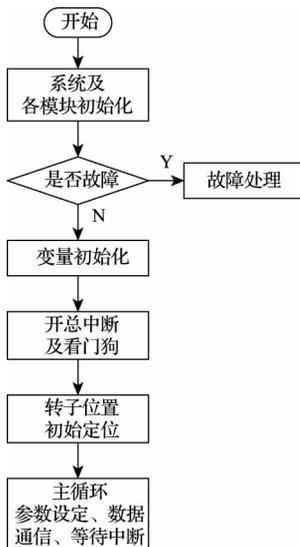


图 7 DSP 主程序流程

120 MB 150 A 伺服电机,其具体参数为:额定功率 1.5 kW,额定转速为 1 000 rpm,额定转矩为 14.3 N·m,额定相电流为 7.14 A,极对数为 4,编码器线数为 2500 P/R。

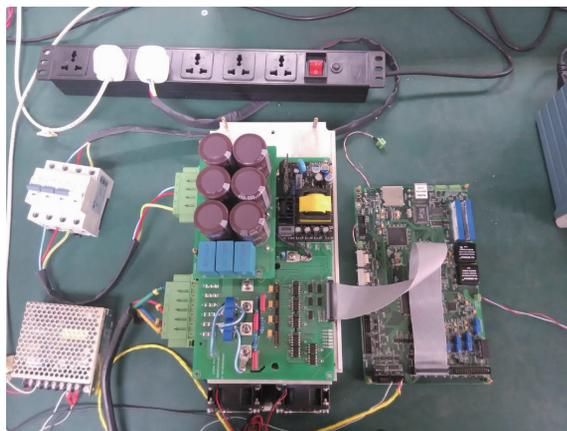


图 9 PMSM 控制系统实验平台

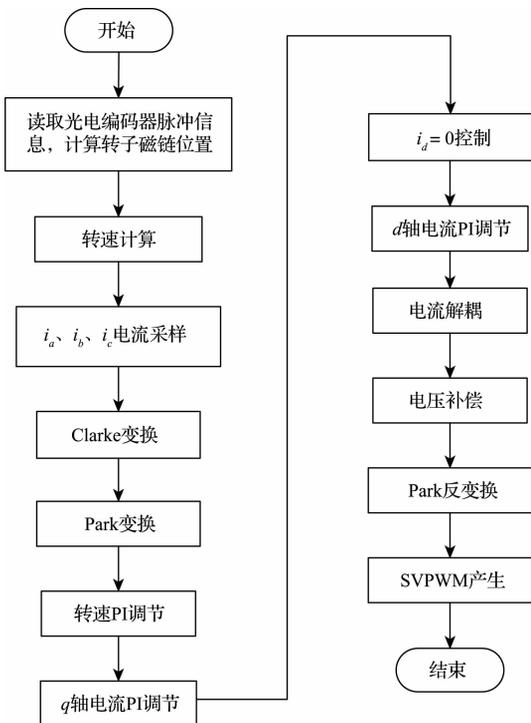


图 8 EPWM1 下溢中断程序流程

PMSM 空载时,起动升速至额定转速 1 000 rpm 的转速波形如图 10 所示,图 10 中转速与电压对应关系为 120 rpm/V,最大值 8.72 V 对应 1 046.4 rpm,稳定值 8.40 V 对应 1 008 rpm,PMSM 加速时间可调,图 10 中设置为 1.5 s,可知在额定转速 1 000 rpm 下转速超调为 4.64%,稳态精度为 0.8%;转速稳定在 1 000 rpm 时,A 相电流波形如图 11 所示,图中电流与电压对应关系为 5 A/V,最大值 188 mV 对应 0.94 A,最小值 -196 mV 对应 0.98 A,可见 PMSM 电流波形比较稳定、对称,并且波形良好,表明 PMSM 调速准确、控制性能良好。

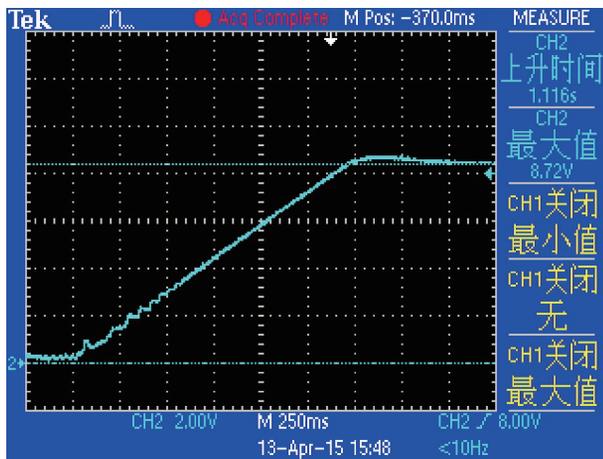


图 10 起动升速至 1 000 rpm 的转速波形

## 5 实验结果

控制系统实验平台如图 9 所示,被控电机型号为森创

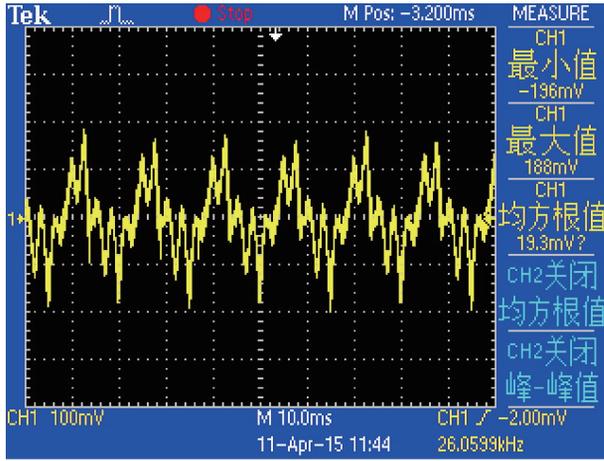


图 11 1 000 rpm 时 A 相电流波形

## 6 结 论

在 PMSM 的数学模型和矢量控制原理基础之上,进行了 PMSM 的控制系统的硬件和软件设计,采用 TMS320F28335 型浮点型 DSP 为主控芯片,其外设资源丰富,使 PMSM 控制系统硬件设计更加灵活,带有浮点单元,运算速度快、精度高,软件编程方便。在森创 1.5 kW 的 PMSM 伺服电动机上进行了控制实验,实验结果表明,设计的 PMSM 控制器运行稳定,调速准确,性能良好,表明了设计的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] 朱俊杰,素梅,陈成,等. 无刷直流电机反电动势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 441-447.
- [2] 徐龙威,杨帆,徐令令,等. 基于 TMS320F28335 无刷直流电机控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(9):79-83.

- [3] 彭宇,姜红兰,杨智明,等. 基于 DSP 和 FPGA 的通用数字信号处理系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1):17-21.
- [4] 卢铁斌,李春江,章跃进,等. 基于 DSP 的永磁同步电机伺服系统矢量控制研究[J]. 微电机, 2010, 43(12): 34-38.
- [5] 林连东. 基于无差拍控制的 PMSM 电流预测控制算法[J]. 电子测量技术, 2013, 36(10):38-42.
- [6] 赵凯辉,陈特放,张昌凡,等. 永磁同步牵引电机无速度传感器转矩精确控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1):38-47.
- [7] 姚长青,刘秉安. 基于 DSP 无速度传感器直接转矩控制的实现[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(5):68-71.
- [8] 黄腾云,姜淑忠,李小海. 波轮洗衣机用永磁同步电机控制系统[J]. 微特电机, 2012, 40(8):46-48.
- [9] 王帅,阴玉梅,杨晓霞,等. 直流电机力矩促动器的控制系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(1): 48-55.
- [10] 丁文,高琳,梁得亮,等. 基于 DSP 的永磁同步电机矢量控制系统设计与实现[J]. 微电机, 2010, 43(12): 72-77.

## 作 者 简 介

刘洋(通讯作者),1988 年出生,工学硕士,研究实习员,主要研究方向为大型望远镜伺服控制及精密跟踪技术。

E-mail: ly\_nwpu2007@163.com

张斌,1981 年出生,工学博士,副研究员,主要研究方向为伺服控制及主动光学技术。

E-mail: 8989062@qq.com

吴庆林,1980 年出生,工学博士,副研究员,主要研究方向为精密跟踪及数字通信技术。

E-mail: wuql@qq.com