

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.016

基于 MC56F84789 的 PMSM 伺服控制系统设计

姜伟,倪顺华,裘信国,周见行

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学),浙江杭州 310014)

摘要:目前,在数控机床、自动化生产线、工业机器人等应用场合,以永磁同步电机(PMSM)为控制对象的全数字交流伺服系统正逐步取代直流伺服系统。为了提高永磁同步电机控制器的控制性能,设计开发了基于飞思卡尔 32 位的 MC56F84789 型 DSP 的永磁同步电机数字化矢量控制器。MC56F8479 包含各种先进的高速、高精度外设。文中介绍了 PMSM 的数学模型和磁场定向矢量控制原理,设计了一套功能完善、实时性好的 PMSM 交流伺服系统。实验结果表明电流环响应迅速、速度和位置闭环控制无稳态误差,所设计的系统工作可靠,控制速度快。

关键词:永磁同步电机;矢量控制;PMSM 交流伺服系统;空间矢量脉宽调制(SVPWM)

中图分类号:TP271

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)01-0065-05

Design of a PMSM Servo System Based on MC56F84789 Device

JIANG Wei, NI Shunhua, QIU Xinguo, ZHOU Jianxing

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: At present, the digital AC servo system with permanent magnet synchronous motor (PMSM) is gradually replacing the DC servo system in the CNC machine tools, automatic production lines, industrial robots and other applications. In order to improve the performance of PMSM vector controller, a digital vector controller for PMSM based on Freescale 32-bit DSP MC56F84789 was designed. MC56F84789 contains a variety of advanced high-speed, high-precision peripherals. The mathematical model of PMSM and field-oriented control principle were described. A PMSM servo system was designed with multi-functions and good real-time performance. The experimental results show that the current loop responds quickly, and there is no steady-state error for speed and position closed-loop control. The system is verified to be reliable and has fast control speed.

Key words: permanent magnet synchronous motor; vector control; PMSM AC servo system; Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)

伺服控制系统通常应用于需要快速瞬时转矩响应、较低转矩波动、宽广调速范围等场合。比如数控机床、工业机器人和其他自动设备(印刷、包装、食品和纺织品等)。在诸多类型 AC(交流)电机中,永磁同步电机(PMSM)被认为最适合应用于伺服控制系统,因其具有以下优点:结构简单、重量轻、体积小、效率和功率因数高、转动惯量小、易于散热及维护保养。并且, PMSM 在节能降耗方面效果显著,中小型永磁同步电动机的效率可提高 5%,节电率 10%,某些专用永磁同步电机节能达 15%~20%^[1-4]。因此对永磁同步电机伺服控制系统的研究具有重要的实用价值。

文中以飞思卡尔 MC56F84789 器件为基础开发永磁交流同步电机数字伺服系统,分析了伺服控制系统的基本原理,给出了硬件实施、软件设计以及实验结果。

1 PMSM 伺服控制系统的基本原理^[5]

三相永磁同步电机矢量控制伺服系统的原理框图如图 1 所示。其主要由下面几部分组成:①转子磁极位置检测和速度计算模块;②位置、速度、电流调节器;③坐标变换模块;④SVPWM 模块;⑤整流和逆变模块;⑥电流采样模块。

收稿日期:2013-07-23;修回日期:2013-09-20

作者简介:倪顺华(1989),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事电机的伺服控制方面研究。E-mail:ni.shun.hua@163.com

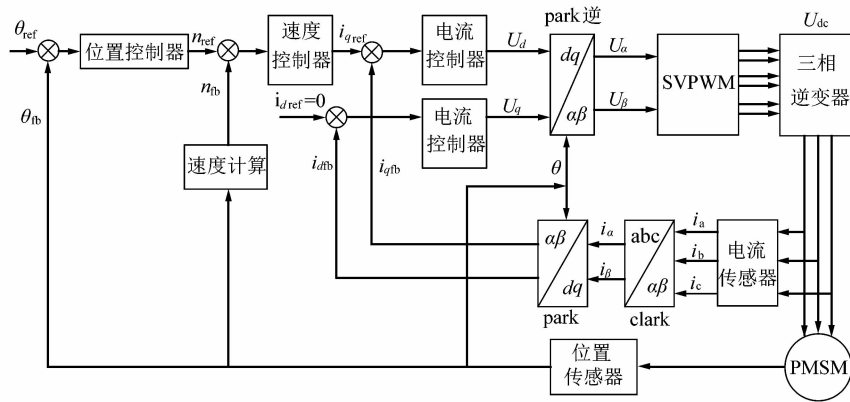


图1 矢量控制PMSM伺服控制系统原理框图

Figure 1 Principle diagram of PMSM servo control system based on vector control

1.1 PMSM 数学模型^[6-7]

永磁同步电机定子通入三相交流电时,根据电机学中电磁感应定律和基尔霍夫第二定律,可以得到永磁同步电机定子电压、磁链、电磁转矩方程,各方程的空间矢量表示方法为

$$\begin{cases} U_s = R_s \cdot i_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \\ \Psi_s = L_s \cdot i_s + \Psi_M \\ T_e = |i_s| \cdot |\Psi_s| \cdot \sin(\angle i_s, \angle \Psi_s) \end{cases} \quad (1)$$

U_s, i_s 分别为定子电压空间矢量,定子电流空间矢量; Ψ_s, Ψ_M 分别为定子磁链空间矢量,永磁体转子产生的磁链矢量; T_e 为永磁同步电机的电磁转矩, R_s 为定子绕组电阻。在忽略铁芯饱和效应,气隙磁场呈正弦分布等条件下,转子磁场定向矢量控制坐标分析如图2所示,在 $d-q$ 旋转坐标系下 PMSM 数学模型为

1) 定子电压方程

$$\begin{cases} U_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \Psi_q \\ U_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_e \Psi_d \end{cases} \quad (2)$$

2) 定子磁链方程

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d \cdot i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q \cdot i_q \end{cases} \quad (3)$$

3) 电磁转矩方程

$$T_e = \frac{3}{2}P[\Psi_f \cdot i_q + (L_d - L_q)i_d \cdot i_q] \quad (4)$$

式中, U_d, U_q — $d-q$ 轴上定子电压分量; i_d, i_q — $d-q$ 轴上定子电流分量; L_d, L_q — $d-q$ 轴上的定子绕组的等效自感; ω_e —转子电角速度; Ψ_d, Ψ_q — $d-q$ 轴上定子磁链分量; T_e, P —电磁转矩、电机极对数; Ψ_f —永磁体磁链; R_s —绕组等效电阻。

1.2 $i_d = 0$ 的磁场定向矢量控制

系统采用了 $i_d = 0$ 的矢量控制方式。转子磁场定向控制实际上是将 $d-q$ 同步旋转坐标系放在转子上,随转子同步旋转,如图2中所示。转子磁场定向的矢量控制方式其基本原理是在转子磁场定向的同步坐标系上对电机的磁场电流(i_d)和转矩电流(i_q)进行解耦控制,使其具有和传统直流电动机相同的运行性能。当 i_d

$= 0$ 时,公式(4)变为

$$T_e = \frac{3}{2}P\Psi_f \cdot i_q \quad (5)$$

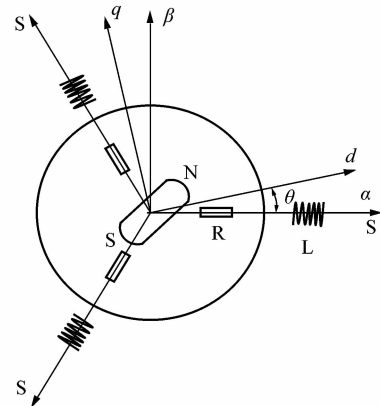
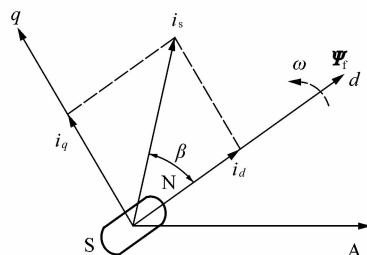


图2 转子磁场定向矢量控制坐标分析图

Figure 2 Coordinate analysis diagram of rotor field oriented vector control

此时电磁转矩与 i_q 成正比,实现矢量解耦控制。由图3可知此时转矩角 β 为 90° ,定子空间电流矢量 $i_s = i_q$,且和永磁体磁场空间矢量 Ψ_f 正交,可以获得最大有效转矩,铜耗下降,效率提高。

图3 $d-q$ 坐标系下永磁同步电机矢量图Figure 3 PMSM vector diagram on $d-q$ coordinate

1.3 空间矢量脉宽调制(SVPWM)

三相逆变器的8种开关状态可得到8个基本电压空间矢量 $U_0, U_{60}, U_{120}, U_{180}, U_{240}, U_{300}, O_{000}, O_{111}$, 图4给出了8个基本电压空间矢量的大小与位置, 其中非零矢量的幅值相同, 相邻两矢量间隔 60° , 两个零矢量幅值为零, 位于中心。6个非零基本电压空间矢量将电压空间分成6个扇区。

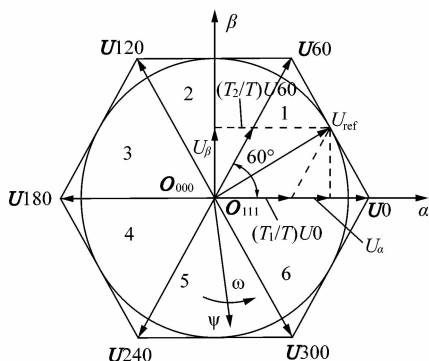


图4 SVPWM原理分析图

Figure 4 Diagram of Space Vector Pulse Width Modulation theory

对于任意电压空间矢量 U_{ref} , 可由相邻的2个电压矢量以及零矢量, 按照伏秒平衡的原则来合成

$$\int_0^T U_{ref} dt = \int_0^{T_1} U_x dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} U_{x+60} dt + \int_{T_1+T_2}^T O_0 dt \quad (6)$$

方程可等效为

$$U_{ref} \cdot T = U_x \cdot T_1 + U_{x+60} \cdot T_2 + O_0 \cdot T_0 \quad (7)$$

因为零矢量幅值为0, 所以

$$\begin{cases} U_{ref} \cdot T = U_x \cdot T_1 + U_{x+60} \cdot T_2 \\ T = T_1 + T_2 + T_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中 T 是产生 SVPWM 波形的周期, T_1, T_2, T_0 分别对应为2个相邻非零电压矢量 U_x, U_{x+60} 和零电压矢量在一个采样周期中的作用时间。以 U_{ref} 在第一扇区为例, 如图4按上述方程计算可得

$$\begin{cases} T_0 = \frac{3U_\alpha T}{2U_d} - \frac{\sqrt{3}U_\beta}{2U_d} = \frac{\sqrt{3}T}{U_d} \left(\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{1}{2}U_\beta \right) \\ T_{60} = \frac{\sqrt{3}U_\beta T}{U_d} \end{cases} \quad (9)$$

U_α, U_β 为电压空间矢量 U_{ref} 在 α, β 坐标系下的分量。其他扇区同理计算, 从而产生驱动逆变器的 PWM 信号, 实现电压空间矢量调制。

2 伺服系统硬件结构

永磁同步电机伺服控制系统以 Freescale MC56F84789 为核心。结合了多种外围模块, 构成一

套功能完善、驱动简单的 PMSM 控制系统, 其硬件结构图如图5所示^[8]。主要包括2个部分:

1) DSP 控制器部分(TWR-56F8400 控制板)。

2) 控制板电路: 包括主回路电路, 检测电路(电流、电压、转子位置), 保护电路, 驱动电路, 电源设计等。

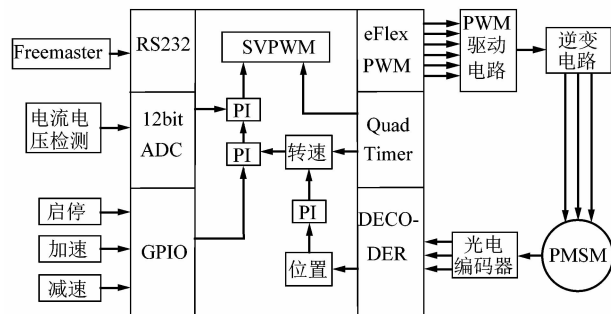


图5 伺服控制系统结构图

Figure 5 PMSM servo system control structure

①MC56F84789 是飞思卡尔最新推出的一款 DSP 控制器, 基于 32 位 DSP 内核。其优异的精度、感应和控制能力满足高级电机控制应用的要求。包含各种先进的高速、高精度外设: 分辨率达 312 ps 的高分辨率脉宽调制(PWM), 2 个内置 PGA 采样功能的 12 位高速模数转换器(ADC), 采样高达 330 Msps, 以及 1 个 16 位 ADC(1 Msps) 等等, 运算速度高达 100 MIPS^[9]。主要用于完成各种控制的算法有磁场定向的矢量控制、电压空间矢量调制、遇限削弱积分 PI 控制算法等。

②系统供电电源主要包括 +3.3 V 和 +5 V, 主回路采用 24 V 直流电供电。+5 V 电源由 LM2594HVM 开关降压稳压器通过母线电压产生, 供应 MC33269D 线性稳压器, 编码器和整个系统, 该转换器最大能够提供 500 mA 电流。+3.3 V 由 MC33269D 得到, 模拟电源则通过 LC 滤波器得到。

③直流母线电压是通过电压传感器 LEM(LV28-P)感应的, 通过 1 个电压跟随电路和 1 个简单的分压电路, 电压信号被发送到 MC56F84789 的 ADC 端口。相电流的检测是由电流传感器 LEM(LV28-NP)得到, 信号经过电平提升和滤波后送入 ADC 端口。检测得到的电压和电流信号也将作为硬件和软件保护信号, 比如欠压、过压和过流保护。检测流程如图6所示。

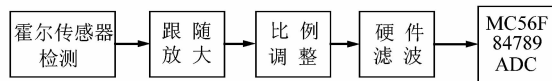


图6 电流电压测量流程图

Figure 6 Current and voltage measurement flowchart

④电机旋转时,内置的光电编码器产生的 $A+$, $A-$, $B+$, $B-$, $Z+$, $Z-$ 差分信号先经过 26LS32 差分电路转换芯片转换后,经快速光耦 TLP559 再反向后送到 MC56F8357 正交编码器接口,然后对电机转子的位置和速度进行计算。

⑤PWM 驱动由 MC33937A 完成,MC33937A 是一款场效应晶体管 (FET) 前置驱动器,专为三相电机控制和类似应用而设计。这款集成电路 (IC) 采用 SMARTMOS™ (智能功率) 技术。该 IC 包括 3 个高边 FET 前置驱动器和 3 个低边 FET 前置驱动器。3 个外部引导电容器可为高边 FET 提供栅极电荷。IC 通过 6 个直接输入控制信号 MCU 相连接。

⑥通过 RS232 与 PC 机连接,用飞思卡尔的 FreeMaster 软件对电机进行实时控制。

3 伺服系统软件设计

控制系统的软件开发环境是 Freescale Codewarrior v10.3。系统控制程序流程图见图 7,主要包括主程序、ADC 中断控制程序和位置中断程序。利用 FreeMaster 软件通过 RS232 与 DSP 进行串口通讯。该软件采用 VBScript 编写完成,FreeMaster 是一个实时调试和可视化工具,可以实时查看各个参数波形,高速记录数据,而且可以实现参数的在线修改^[10-12]。

主程序模块包括 DSP 初始化和循环程序 2 部分,循环程序又由错误控制程序、应用控制程序和刹车控制程序 3 部分组成。初始化操作主要包括时钟模块、看门狗模块、外设、中断以及一些系统变量等的初始化,并打开所有中断,循环等待中断的发生。

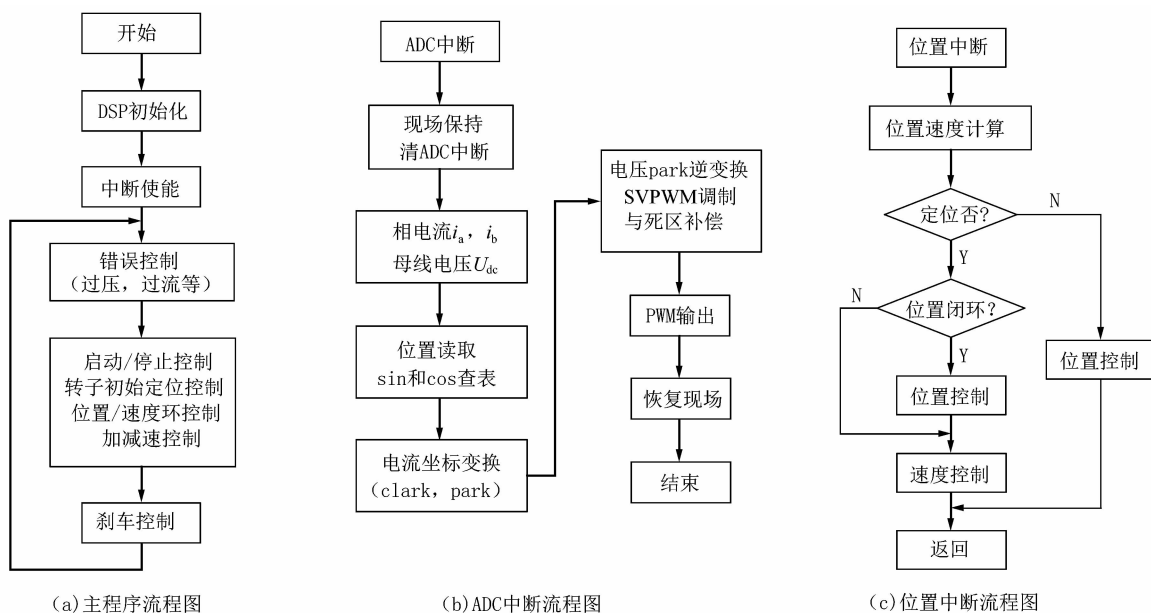


图 7 伺服控制程序流程图

Figure 7 Flowchart of servo control

ADC 中断执行整个磁场定向矢量控制算法。该中断主要任务包括两相电流和直流母线电压的检测,坐标变换,SVPWM 实现和 PWM 输出等。位置中断主要任务包括位置和速度的检测与计算、定位控制等。

4 实验结果

PMSM 的伺服控制系统主要实验装置图如图 8 所示,直流母线电压为 24 V,电流电压采样周期为 125 μ s,脉宽调制频率为 8 kHz,FreeMaster 数据采样周期 50 μ s。三相永磁同步电机功率为 300 W,额定转速 1 500 r/min。增量式光电编码器 (1 024 p/r)。对控制系统进行了速度位置闭环试验。利用 CodeWarrior 本身

自带的控制和监视软件 FreeMaster 得到实验波形图。

速度从 210 r/min 到 1 000 r/min 时系统速度响应波形如图 9 所示。转速响应迅速,基本无超调和震荡,达到给定速度后保持稳定运行;转速上升到给定速度值时间约为 50 ms,经计算平均速度误差为 0.5% 左右,能满足伺服系统对速度要求。

给定 18 432 个脉冲 (4.5 转) 的位置响应波形如图 10,给定 18 432 个脉冲时,定位误差为 11 个脉冲,约 0.97° (机械角度),定位误差约 0.06%。可知系统定位精度较好,位置控制性良好。能满足伺服系统对位置控制的需求。

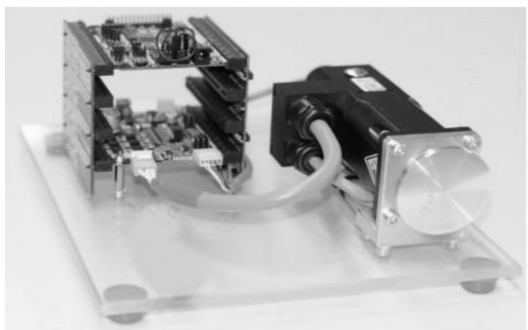


图 8 实验平台主要硬件实物图

Figure 8 Photo of main hardware of the experiment platform

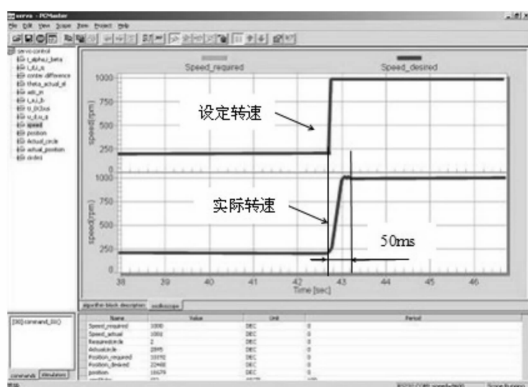


图 9 速度给定 210 r/min 到 1 000 r/min 响应波形

Figure 9 Speed response waveform from 210 r/min to 1 000 r/min

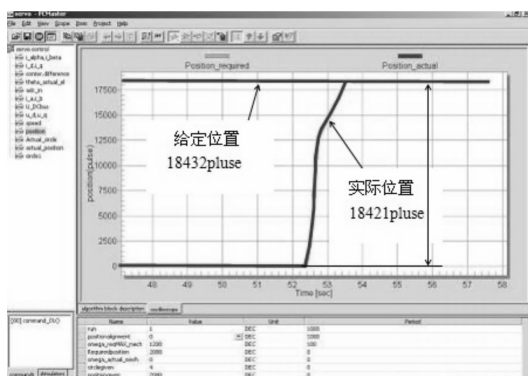


图 10 给定 18 432 个脉冲时位置响应波形

Figure 10 Given 18 432 pulses position control response waveform

5 结语

以 MC56F84789 为核心,结合 PMSM 伺服控制特点,设计了一套永磁同步电动机数字化矢量控制系统,该控制器充分利用了 MC56F84789 片内的丰富资源和高速运算能力,有效简化了控制器电路结构。实验结果表明:速度和位置闭环控制无稳态误差,响应快速,有较高位置控制精度。所设计系统工作速度快,且工作可靠。

参考文献:

- [1] 宝泉,程树康. 交流伺服电机及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 冬雷. DSP 原理及电机控制系统应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.
- [3] 潘剑. 基于滑模变结构控制的永磁同步电机伺服系统[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [4] 舒鑫东. 基于 DSP 的交流永磁同步伺服控制系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [5] 姜飞荣,章玮. 基于 MC56F8357 的永磁同步电机伺服控制系统[J]. 电气自动化,2007,29(2):3-5.
- [6] 王宏佳. 永磁交流伺服系统速度控制器优化设计方法[J]. 电机与控制学报,2012,16(2):25-31.
- [7] 陈高,杨家强. 基于 TMS320F28335 的永磁同步电机数字化矢量控制器设计[J]. 机电工程,2011,28(9):1090-1094.
- [8] 张运芳,陈荣,赵永建. 交流永磁同步伺服系统矢量控制设计[J]. 微特电机,2009,37(12):42-44.
- [9] Freescale Semiconductor, Inc.. MC56F847xx Reference Manual [Z]. Rev. ed. Austin, Texas, USA: Freescale Semiconductor, Inc., 2012.
- [10] 张彦召. 永磁同步电机交流伺服系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [11] JUNG J W, CHOI Y S, LEU V Q, et al. Fuzzy PI-type current controllers for permanent magnet synchronous motors[J]. Electric Power Applications, IET, 2011, 5(1):143-152.
- [12] BAI Lei. The design and research of permanent magnet synchronization electric machine vector control system [J]. Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 2011, 7(2):62-64.