

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学 号: 22320051302433

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

# 基于 DSP 的永磁同步电机伺服控制系统设计 与实现

## The Design and Realization of DSP-Based Permanent Magnet Synchronous Motor Servo Control System

赵 阳

指导教师姓名: 彭 侠 夫 教授

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2 0 0 8 年 4 月

论文答辩时间: 2 0 0 8 年 月

学位授予日期: 2 0 0 8 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 04 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日



## 摘要

随着现代化工业生产的不断发展，伺服系统在工农业生产和航天技术等领域的应用越来越广泛，对其性能的要求也越来越高，要求伺服系统具有高速、高精度、高可靠性和较强的抗干扰能力及鲁棒性等。高性能微处理器 DSP、智能功率模块的出现及电子器件的发展则为伺服系统的全数字化实现创造了条件。本文以 TI 公司推出的电机控制专用芯片-- TMS320LF2407 型数字信号处理器作为核心控制器件，设计了一套永磁同步电机专用控制系统，其中包括以下内容：

本文首先研究了永磁同步电机数学模型，详细介绍了电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 的产生以及矢量控制原理，并简要阐述了 PMSM 转子磁场定向矢量控制伺服系统的三闭环结构及实现策略。

其次，详细介绍了基于 TMS320LF2407 永磁同步电机伺服控制系统的硬件结构。主要内容有主控芯片 TMS320LF2407 及其组成的最小系统，功率驱动模块 DR15A 及其接口电路（例如电流采集部分，PWM 输出部分等）。

最后，在 TI 公司 DSP C2000 系列集成开发环境 CCS3.1 开发平台下，分块设计了包括永磁同步电机矢量控制算法、SVPWM 波的产生、数模转换、中断采样等系统程序。并基于 Matlab/Simulink 对此伺服控制系统进行计算机仿真研究，给出仿真实验波形；而在实际系统调试中进行了一系列实验，对实验结果及在实验过程中出现的问题进行了分析和讨论。实验证明该系统可以满足伺服控制系统的基本要求，对永磁同步电机伺服控制系统的设计具有参考意义，并为后续研究奠定了基础。

**关键词：** 永磁同步电动机； 伺服控制系统； 数字信号处理器； 空间矢量脉宽调制

## Abstract

Servo system, used widely in various areas, is demanded by the development of modern industrialization. Higher performance of AC servo system is also required. And it is possible to realize the full digital control in AC servo system with the development of the Micro processor DSP with high performance, the intelligent power module(IPM) and the advanced power electronic devices. This paper aims to design a set of servo control system for PMSM by using TMS320LF2407 type of Digital Signal Processor(DSP) as the core. The job have been finished by following steps:

At first, the paper makes a study on the mathematical model of PMSM and analyzes rotor magnetic field-oriented vector control theory, then followed by a simple introduction on the SVPWM wave production principle and the structure of three closed-loop control system.

On the basis of the foregoing work, the paper emphatically analyses the whole hardware structure of DSP-Based PMSM Servo Control System. It mainly includes the smallest system of TMS320LF2407, Power drive module, and its interface circuit, for instance, Position examination circuit and PWM production circuit etc., which is the base of the whole system.

At last, the paper introuduces the details of software system which comprises the SVPWM wave subprogram and pi controller subprogram, etc. The program flow of servo system has been designed while the MATLAB/SIMULINK module has also been set up on the base of PMSM Servo Control System. Meanwhile, some conclusions involved in this paper have been proved. All the attempts in this Paper are of referenced significance for studying the PMSM Servo Control System and enhancing the system's performance henceforth.

**Keywords:** PMSM; Servo control System; DSP; SVPWM

## 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 本课题研究的背景</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 交流永磁同步伺服系统的基本结构和特点</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 交流永磁同步伺服系统的基本结构 .....	2
1.2.2 交流永磁同步伺服系统的主要特点 .....	3
<b>1.3 交流永磁同步伺服系统国内外研究与发展概况</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4 本课题的主要工作</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5 本章小结</b> .....	<b>8</b>
<b>第二章 永磁同步电机的结构及数学模型</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 PMSM 的结构和种类</b> .....	<b>9</b>
2.1.1 PMSM 的结构 .....	9
2.1.2 PMSM 的分类 .....	9
<b>2.2 永磁同步电机的数学模型</b> .....	<b>11</b>
2.2.1 永磁同步电机的基本方程 .....	11
2.2.2 坐标变换 .....	13
2.2.3 dq 坐标系下的永磁同步电机数学模型 .....	17
<b>2.3 本章小结</b> .....	<b>18</b>
<b>第三章 永磁同步电机矢量控制及电压空间矢量脉宽调制</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1 永磁同步电机的矢量控制</b> .....	<b>19</b>
3.1.1 矢量控制的基本概念 .....	19
3.1.2 永磁同步电机转子磁场定向矢量控制原理 .....	20
<b>3.2 电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 的实现</b> .....	<b>21</b>
3.2.1 电压空间矢量脉宽调制基本原理 .....	21
3.2.2 电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 实现算法 .....	23
<b>3.3 本章小结</b> .....	<b>26</b>
<b>第四章 基于 DSP 的永磁同步电动机伺服系统硬件设计</b> .....	<b>27</b>

<b>4.1 系统硬件电路整体介绍 .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 主电路单元 .....</b>	<b>28</b>
4.2.1 整流电路 .....	28
4.2.2 软启动电路 .....	29
4.2.3 逆变电路 .....	29
<b>4.3 系统控制电路单元 .....</b>	<b>32</b>
4.3.1 TMS320LF2407 概述 .....	32
4.3.2 TMS320LF2407 最小系统简介 .....	34
<b>4.4 辅助电路单元 .....</b>	<b>39</b>
4.4.1 电流信号采样电路 .....	39
4.4.2 直流母线电压检测电路 .....	40
4.4.3 速度与位置检测电路 .....	40
4.4.4 驱动隔离电路 .....	42
4.4.5 通讯接口电路 .....	43
4.4.6 故障检测保护电路 .....	44
<b>4.5 抗干扰和电磁兼容问题 .....</b>	<b>45</b>
<b>4.6 系统主控板硬件实现 .....</b>	<b>46</b>
<b>4.7 本章小结 .....</b>	<b>46</b>
<b>第五章 基于 DSP 的永磁同步电机伺服系统软件设计 .....</b>	<b>47</b>
5.1 系统主程序及流程图 .....	47
5.2 SVPWM 的 DSP 编程方法 .....	48
5.3 数字调节器的 DSP 编程算法 .....	50
5.4 数模转换程序设计 .....	51
5.5 定时中断程序设计 .....	52
5.6 中断保护程序设计 .....	52
5.7 本章小结 .....	54
<b>第六章 系统的 MATLAB 仿真及实验结果分析 .....</b>	<b>55</b>
6.1 主要控件介绍及参数设定 .....	55
6.2 系统仿真模型介绍 .....	56



6.3 系统仿真结果分析 .....	60
6.4 系统运行环境及试验结果 .....	63
6.5 本章小结 .....	66
结论与展望 .....	67
参考文献.....	69
作者在攻读硕士学位期间发表的论文 .....	73
致谢.....	75

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Background of Research</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Basal Structure and Character of Servo System Based on PMSM</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Basal Structure of Servo System Based on PMSM.....	2
1.2.2 Primary Character of Servo System Based on PMSM.....	3
<b>1.3 Research and Development of Servo System on PMSM in the World</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4 Primary Task of the Paper</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5. Conclusion</b> .....	<b>8</b>
<b>Chapter 2 Structure and Mathematical Model of PMSM</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Structure and Category of PMSM</b> .....	<b>9</b>
2.1.1 Structure of PMSM.....	9
2.1.2 Category of PMSM.....	9
<b>2.2 Mathematical model of PMSM</b> .....	<b>11</b>
2.2.1 Equation of PMSM .....	<b>11</b>
2.2.2 Coordinate Switch .....	<b>13</b>
2.2.3 Mathematical Model of PMSM Based on dq Reference Frame .....	<b>17</b>
<b>2.3 Conclusion</b> .....	<b>18</b>
<b>Chapter 3 Vector Control and SVPWM Theory of PMSM</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1 Vector Control Theory of PMSM</b> .....	<b>19</b>
3.1.1 Conception of Vector Control Theory.....	<b>19</b>
3.1.2 Principle of FOC-PMSM Vector Control .....	<b>20</b>
<b>3.2 Realization of SVPWM</b> .....	<b>21</b>
3.2.1 Basic Theory of SVPWM .....	<b>21</b>
3.2.2 Realization of SVPWM Used DSP.....	<b>23</b>
<b>3.3 Conclusion</b> .....	<b>26</b>
<b>Chapter 4 Hardware Design of PMSM Servo System Based on DSP27</b>	

<b>4.1 Ensemble Structure of Hardware Design .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Design of Main Circuit .....</b>	<b>28</b>
4.2.1 Rectifier Circuit .....	28
4.2.2 Soft Start-up Circuit .....	29
4.2.3 Contradictory Switch Circuit. ....	29
<b>4.3 Design of Control Circuit .....</b>	<b>32</b>
4.3.1 Introduction of TMS320LF2407 DSP .....	32
4.3.2 Introduction of the Smallest System on TMS320LF2407 DSP .....	34
<b>4.4 Design of Assistant Circuit .....</b>	<b>39</b>
4.4.1 Current Sampling Circuit .....	39
4.4.2 VDC Detection Circuit .....	40
4.4.3 Velocity and Position Detection Circuit .....	40
4.4.4 Drive and Isolation Circuit .....	42
4.4.5 Communication Interface Circuit .....	43
4.4.6 Malfunction Detection and Protection Circuit .....	44
<b>4.5 The Problem of Disturbance and Electromagnetism Compatibility .....</b>	<b>45</b>
<b>4.6 Hardware Realization of Control Circuit Board .....</b>	<b>46</b>
<b>4.7 Conclusion .....</b>	<b>46</b>
<b>Chapter 5 Software Design of PMSM Servo System Based on DSP..</b>	<b>47</b>
5.1 Software Desgin and Main Program Flow of Servo System .....	47
5.2 Software Realization of SVPWM .....	48
5.3 Software Realization of Numeric controller .....	50
5.4 Design of Program on Analog and Digital Signals Switch.....	51
5.5 Program Design of Interruption on Timing .....	52
5.6 Program Design of Interruption on Protection.....	52
5.7 Conclusion .....	54
<b>Chapter 6 Emulation of System and analysis of experiment result...</b>	<b>55</b>
6.1 Introduction of Main Implement and Parameters Adjustment .....	55
6.2 Introduction of Emulation Model .....	56

<b>6.3 Analysis of Emulation Result.....</b>	<b>60</b>
<b>6.4 System Running Environment and Experiment Results.....</b>	<b>63</b>
<b>6.5 Conclusion.....</b>	<b>66</b>
<b>Conclusion and Prospect.....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliography .....</b>	<b>69</b>
<b>Published Papers of Author.....</b>	<b>73</b>
<b>Thanks.....</b>	<b>75</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

随着电力电子学、传感技术、电力半导体、电机制造技术、永磁技术和控制理论的快速发展,交流伺服系统的研究和应用,在短短二十几年间,取得了举世瞩目的发展,使得位置伺服这样一种扮演重要技术角色的自动控制系统,在许多高科技领域得到了非常广泛的应用,如激光加工、机器人、数控机床、大规模集成电路制造、办公自动化设备、雷达和各种军工控制随动系统等等。已具备了宽调速范围、高稳速精度、快速动态响应及四象限运行等良好的技术性能,以交流伺服电动机为执行元件的交流伺服系统具有了可与直流伺服系统相比拟的特性,其动、静态特性已完全可与直流伺服系统相媲美。交流伺服系统的研究将继续成为电气传动领域的一个研究热点,并将带动相关产业的迅猛发展,因此有必要对交流伺服系统有一个全面了解。本章正是基于此目的,对交流伺服系统进行了较为全面的综述和比较,力图反映其在近些年的最新发展状况<sup>[1][2]</sup>。

### 1.1 本课题研究的背景

伺服系统(Servo system)是自动控制系统中的一类,通常应用闭环控制结构来控制被控对象的某种状态,使其能够自动、连续、精确地复现输入信号的变化规律,常用于快速、精密的位置控制和速度控制场合。伺服控制技术是伴随着现代日益发展的电力电子技术、计算机技术和先进的控制理论的发展而发展起来的,它最早出现于二十世纪初<sup>[3]</sup>。1934年首次提出了伺服机构(Servo mechanism)这个概念,其中电机控制技术是伺服驱动系统的核心。过去,由于直流电机调速控制简单,具有良好的调速性能和起、制动性能,变流装置容量小,能方便、经济地在大范围内平滑调速,因而直流电机广泛应用于各种伺服驱动系统,高性能电机伺服系统绝大多数采用直流伺服技术。但由于直流电机结构复杂,成本高,存在电刷和机械换向器,维护困难,可靠性差,环境适应性差,限制了直流电机向高转速、高电压、大容量方向发展。而交流电机相对而言结构简单,坚固耐用,运行可靠,便于维修,价格便宜,于是人们就开始进行大量的交流调速技术的研究。20世纪70年代末期进入了伺服技术的交流化时代,相继开发出各种类型的交流伺服系统,广泛应用于工业生产的各个领域,出现了交流伺服系统逐步取代

直流伺服系统的发展趋势<sup>[4]</sup>。1971 年,德国学者 Blaschke 提出了对交流电机进行矢量控制的思想,它的出现对交流电机控制技术的研究具有划时代的意义,在理论上解决了交流电机的转矩控制问题。通过按转子磁场定向构成的矢量变换控制系统,实现了定子电流的励磁分量与转矩分量间的解耦,从而达到对交流电机的磁链和电流分别控制的目的,这样就可将一台三相交流电机等效为直流电机来控制,因而可使交流电机的动、静态控制性能完全可以和直流系统相媲美。可以预见,交流伺服驱动将成为现代伺服驱动发展的方向。

在交流伺服领域,绝大多数中小功率(千瓦级及千瓦以下级)伺服系统已采用永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,以下简称 PMSM)。与此同时,近些年来,很多公司都为永磁同步电机设计专用控制芯片,IRMCK203 就是 IR 公司最新推出的一款高性能无传感器永磁同步电机单片控制 IC。TI 公司也为电机控制方面的要求设计了 TMS320LF2000 系列的特殊功能 DSP 为电机的发展添砖加瓦。该系列 DSP 采用哈佛结构,具有 DSP 固有的运算速度快的特点为复杂算法提供可能;又为电机控制的特殊要求提供了特殊功能模块,为电机控制系统的开发者提供了极大的便利。从今后的扩展来看,本次设计选取了 TI 公司的 TMS320LF2407 作为主控芯片,DSP 的发展也将大大的推动 PMSM 伺服控制系统的发展和应用。

## 1.2 交流永磁同步伺服系统的基本结构和特点

### 1.2.1 交流永磁同步伺服系统的基本结构

交流永磁同步伺服系统由控制系统、变频器和电机组成,它与其它交流伺服系统的区别主要体现在电机上。由于交流永磁同步电机运行时转矩平稳,故在高精度、宽调速范围伺服驱动中,伺服系统执行元件基本选取这种类型电机。永磁同步电机伺服系统基本框图如图 1.1 所示。交流伺服系统一般采用位置控制、速度控制和电流控制的三环结构。

#### 1. 电流环

由电流控制器和逆变器组成,其作用是使电机绕组电流实时、准确地跟踪电流参考信号。

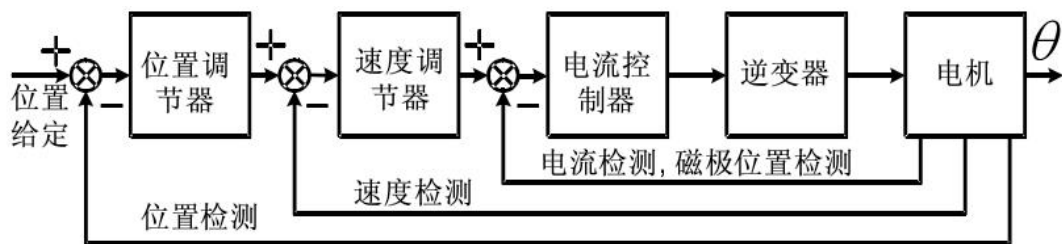


图 1.1 永磁同步电动机伺服系统

## 2. 速度环

它保证电机的转速与指令值相一致、消除负载转矩扰动等因素对电机转速的影响。速度指令与反馈的电机实际转速相比较，其差值通过速度调节器直接产生指令电流，力矩电流信号控制电机加速、减速或匀速，从而使电机的实际转速与指令值保持一致。速度调节器通常采用的是 PI 控制方式，对于动态响应、速度恢复能力要求特别高的系统，可以考虑其它的控制方式。

## 3. 位置环

它能产生电机的速度指令并使电机准确定位和跟踪。通过设定的目标位置与电机的实际位置相比较，利用其偏差通过位置调节器来产生电机的速度指令，当电机初始启动后(大偏差区域)，应产生最大速度指令，使电机加速并以最大速度恒速运行，在小偏差区域，产生逐次递减的速度指令，使电机减速运行直至最终定位。

### 1.2.2 交流永磁同步伺服系统的主要特点

目前，永磁电机的输出功率可以做到小至几毫瓦、大至几千千瓦，不仅覆盖了微、小及中型电机的功率范围，且延伸至大功率领域。此外，永磁材料的高能积、小尺寸、轻量化等特点，给交流永磁同步伺服系统带来一系列突出优点：

- 1) 电机电磁转矩波动小、转速平稳、动态响应快、过载能力强；
- 2) 低损耗、高功因数、高效率、节约能源；
- 3) 整个系统体积小、结构简单、重量轻、可靠性高。

因而，交流永磁同步伺服系统应用范围非常广泛，遍及航空航天、国防、工农业生产和日常生活等各个领域。长期以来，在对伺服系统要求较高的场合，直流电动机一直占主导地位。但他存在一些固有的缺点，例如换向器、电刷易磨损，

需要经常维护, 换向器会产生火花, 限制了电动机的最高转速和过载能力, 且无法直接应用在易燃易爆的工作环境中。交流伺服系统则没有上述缺点和限制, 且采用永磁材料的电机转子惯量较小, 动态响应更好。一般说来, 在同样的体积下, 交流电动机的输出功率比直流电动机提高 10%-70%<sup>[8]</sup>, 此外, 交流电动机容量可以制造的更大, 达到更高的电压和转速。

综上所述, 交流永磁同步伺服系统的主要特点有:

- 1) 精确的检测装置: 以组成速度和位置闭环控制<sup>[5]</sup>;
- 2) 有多种反馈比较原理和方法: 根据检测装置实现信息反馈的原理不同, 伺服系统反馈比较的方法也不相同。目前常用的有脉冲比较、相位比较和幅值比较三种;
- 3) 高性能的伺服电动机(简称伺服电机): 用于高效和复杂型面加工的数控机床, 伺服系统将经常处于频繁的启动和制动过程中。要求电机的输出力矩与转动惯量的比值大, 以产生足够大的加速或制动力矩。要求伺服电机在低速时有足够大的输出力矩且运转平稳, 以便在机械运动部分连接中尽量减少中间环节;
- 4) 宽调速范围的速度调节系统(即速度伺服系统): 从系统的控制结构看, 雷达伺服系统的位置闭环系统可以看作是位置控制、速度控制和电流控制的三闭环自动控制系统, 其内部的实际工作过程是把位置控制输入转换成相应的速度给定信号后, 再通过电流调节器驱动伺服电机, 实现实际位移。雷达系统的主运动要求调速性能也比较高, 因此要求伺服系统为高性能的宽调速系统。

### 1.3 交流永磁同步伺服系统国内外研究与发展概况

伺服系统的发展与伺服电动机的发展紧密地联系在一起, 至今已有五十多年的发展历史, 经历了三个主要阶段<sup>[2][13][15][16]</sup>:

第一阶段(20 世纪 60 年代以前), 此阶段是以步进电动机驱动的液压伺服马达或以功率步进电机直接驱动为中心的时代, 伺服系统的位置控制为开环系统。

第二阶段(20 世纪 60—70 年代), 这一阶段是直流伺服电动机的诞生和全盛发展的时代, 由于直流电动机具有优良的调速性能, 很多高性能驱动装置采用了直流动机, 伺服系统的位置控制也由开环系统发展成为闭环系统。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库