

学校编码: 10384
学 号: 200431014

分类号_____密级_____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

交流伺服控制系统设计与实现

The Design and Realization on AC Servo Controlling System

陈 涛

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 7 年 4 月

论文答辩时间: 2 0 0 7 年 月

学位授予日期: 2 0 0 7 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2007 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

当前交流传动已成为传动领域的主要方式, 伺服技术正在迅速地由直流伺服系统转向交流伺服系统, 交流伺服技术的应用越来越广, 人们对其要求也越来越高, 研究高性能的交流伺服系统, 具有重要的现实意义。

本文首先建立了交流永磁同步电机系统的数学模型, 分析了磁场定向矢量控制的工作原理及控制方法, 对永磁同步电动机的转子磁场定向控制原理进行了阐述, 并且用 MATLAB/SIMULINK 对该控制方法进行仿真研究, 验证了控制策略的可行性, 为实际系统的实现和调试提供了理论依据。

其次结合 TMS320LF2407 硬件特点, 阐述了在 DSP 中实现 SVPWM 信号实时调制的具体方法。该方法具有物理概念清晰、算法简单、直流电压利用率高, 易于实现数字化等优点。

最后本文按照系统设计的硬件和软件要求展开了系统设计与实现。在硬件方面, 分析和设计了系统的主电路、通讯电路、信号处理电路; 在软件方面, 针对由 TI 公司的 DSP TMS320LF2407A 控制芯片构成的数字控制器编写了全部的实时控制程序, 程序采用模块化编程思想, 由 C 语言和汇编语言混合编程的方法实现。

在分析设计的基础上, 搭建了交流伺服控制系统硬件平台。设计实现了相应的接口电路和信号处理电路, 进行了系统调试和参数整定, 实现了交流同步电机的可控制运行。

关键词: 永磁同步电动机; 伺服系统; 数字信号处理器(DSP); SVPWM

Abstract

Servo technology have rapidly changed from DC Servo system to AC servo system, AC Drive have become main mode in drive field, research high performance AC servo system have important realistic meaning.

The mathematical models of AC PMSM is founded at first, analyzing rotor magnetic field-oriented vector control theory and method, then the simulation research based on MATLAB/SIMULINK is completed, validates the feasibility of control theory and provides the theory basis for the realization and debugging of real system.

Aiming at the digital controller using TMS320LF2407A as control chip, particularly introduce how to realize SVPWM signal. This method have advantages ,for example ,a clear physics idea, simple arithmetic, high efficiency of DC voltage, easily realized numeric.

At last, the paper introduces the system design and realize according to the request of hardware and software. In terms of the hardware, analyzing and designing the system main circuit, communication circuit , signal manage circuit; In terms of the software, real time control program which adopts the modularization idea is compiled based on C and assemble language.

At the base of analysis and design, the paper develops a AC servo controlling hardware platform, realizes the corresponding interface and signal manage circuit, and performs system debugging and adjust parameter, the experiment results realizes PMSM controllable running.

Keywords: PMSM; Servo System; DSP; SVPWM

目录

第一章 绪论	1
1.1 伺服系统的定义	1
1.2 伺服系统的控制性能指标	2
1.3 伺服系统发展的历史	6
1.4 交流永磁同步伺服系统国内外研究概况	6
1.5 交流永磁同步伺服系统的最新研究动向	8
1.6 本课题研究的主要内容	12
第二章 永磁同步电动机的矢量控制原理	13
2.1 永磁同步电动机的结构	13
2.2 永磁同步电动机的数学模型	14
2.3 永磁同步电动机矢量变换控制原理	19
2.3.1 矢量控制的基本思路	19
2.3.2 永磁同步电动机控制策略	21
第三章 电压空间矢量 SVPWM 技术	24
3.1 空间电压矢量 SVPWM 技术的基本理论	24
3.1.1 矢量与磁链矢量的关系	24
3.1.2 基本电压空间矢量	25
3.1.3 磁链轨迹的控制	27
3.1.4 矢量作用时间的计算	29
3.1.5 扇区号的确定	30
3.2 电压空间矢量 SVPWM 技术的 DSP 实现方法	32
3.2.1 通过软件实现电压空间矢量 PWM 的编程方法	32
3.2.2 利用硬件 SVPWM 功能的编程方法	34
第四章 基于 DSP 的永磁同步电动机伺服系统的硬件平台设计 ...	36
4.1 系统硬件构成	36
4.2 DSP TMS320LF2407 的介绍	36
4.3 主功率电路	38
4.4 电路扩展板	41
4.4.1 电流检测	41
4.4.2 通讯电路	41
4.4.3 电机转速与位置检测电路	43
第五章 永磁同步电动机矢量控制系统的软件设计	45
5.1 参数确定	45
5.2 控制系统软件总体结构	46
5.3 位置和速度环设计与计算	49

5.4 转子初始位置检测	55
5.5 数字调节器的 DSP 实现	59
5.6 电流的检测和计算	61
第六章 试验与结论	63
6.1 试验场所及设备	63
6.2 永磁同步电动机的 MATLAB 仿真	64
6.3 SVPWM 试验波形	67
结论与展望	69
参考文献	71
作者在攻读硕士学位期间发表的论文	74
致谢	75

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Definition of Servo System	1
1.2 Control Capability of Servo System	2
1.3 Development History of Servo System	6
1.4 Research of Servo System Based on PMSM in the World	6
1.5 New Research direction of Servo System Based on PMSM	8
1.6 Contents of This paper	12
Chapter 2 Vector Control Theory of PMSM	13
2.1 Structure of PMSM	13
2.2 Modeling of Permanent-Magnet Synchronous Motor	14
2.3 Theory of Vector Transform Control	19
2.3.1 Basic Idea of vector control.....	19
2.3.2 Control Strategy of PMSM.....	21
Chapter 3 Technology of SVPWM	24
3.1 Basic Theory of Space Vector Modulation PWM	24
3.1.1 Relationship between Vector and Magnetic Flux.....	24
3.1.2 Basic Space Voltage Vector.....	25
3.1.3 Controlling of Magnetic Flux.....	27
3.1.4 Time of Vector Running.....	29
3.1.5 Confirmation of Sector Number.....	30
3.2 Realization of SVPWM Used DSP	32
3.2.1 Realization by the Software.....	32
3.2.2 Realization by the Hardware.....	34
Chapter 4 Systematic Hardware Design of PMSM Servo System Based on DSP	36
4.1 Systematic Hardware Structure	36
4.2 Introduction of DSP TMS320LF2407	36
4.3 Main Power Circuit	38
4.4 Extended Circuit	41
4.4.1 Current Detection.....	41
4.4.2 Communication Circuit.....	41
4.4.3 Velocity and Position Detection Circuit.....	43
Chapter 5 Software Design of PMSM Vector Control System	45
5.1 Confirm the Parameter	45

5.2 General Software Structure of Control System	46
5.3 Arithmetic of Position and Velocity	49
5.4 Rotor Initialized Position Detection	55
5.5 Realization of Numeric controller Based on DSP	59
5.6 Calculate the Current	61
Chapter 6 System Experiment Results	63
6.1 System Running Environment	63
6.2 Matlab Simulation of PMSM	64
6.3 Experiment Wave of SVPWM	67
Conclusion and Prospect	69
Bibliography	71
Published Papers of Author	74
Thanks	75

第一章 绪论

1.1 伺服系统的定义

“伺服(Servo)”控制是一种目的性很强的活动。Servo 这一术语源于拉丁语 Servus(仆人,雇工,佣人),具有忠实执行主人命令之意,因此伺服系统又叫随动系统^[1]。伺服系统控制的目的是使伺服系统在可变的外部条件下仍然完成所期望的行为。广义来讲,所期望的行为可分为两种:

- 1) 使系统保持原来的状态。
- 2) 使系统沿着所希望的状态轨迹变化。

伺服系统是以一定精度复现输入量变化的自动控制系统,若被控量是位置,则称位置伺服系统。位置指令与被控量可以是直线位移或角位移。伺服系统可以定义为:以物体的方位、位置、姿态等作为被控量,使之跟踪目标值任意变化的控制系统^[2]。伺服系统的根本任务就是使系统按照给定的速度和运动轨迹实现准确的跟踪和定位,完成功率放大的职能,并在保证系统有足够的能量推动负载按输入指令的规律运动的同时,使输入和输出之间的偏差不超出允许的范围。一个简单的交流伺服系统,通常是由位置检测反馈构成的闭环位置控制伺服系统,其组成框图如图 1-1 所示。

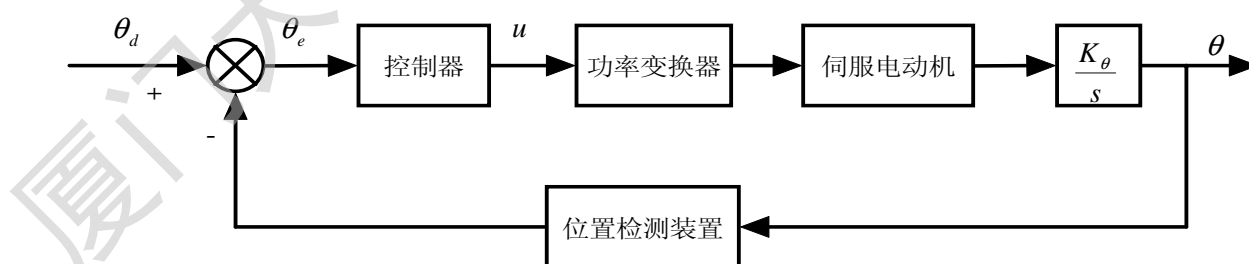


图 1-1 交流伺服系统的组成

该伺服系统的基本工作原理是:首先输入与所需要到达的目标位置相对应的给定信号 θ_d , 由此信号与位置检测装置测量到的实际位置信号 θ 相比较, 其偏差为 $\theta_e = \theta_d - \theta$, 通过控制器的算法运算, 求出为消除该偏差所需施加于功率变换

器输入端的控制量 u ，经过信号转换与功率放大，驱动伺服机构，使误差 θ_e 逐渐减少。

1、 控制器。它通常是由微处理芯片，如微处理器和数字信号处理器（DSP）构成。随着微电子技术进步和众多的高级控制策略研究成果，使其可以做到体积小、功能强、成本低、控制性能好。

2、 功率变换器。是伺服系统中实现高性能伺服电动机调速的关键设备。除具有一定输出功率和调频调压精度外，还要求频带宽，热稳定性好，抗干扰能力强，有过流保护和限流功能。功率器件有用大功率晶体管（GTR）、大功率可关断晶闸管（GTO）和场控型开关器件（IGBT）等。特别是 IGBT 功率器件，具有功耗小、耐压高、工作频率高、动态性能好、可靠性高、成本低、所需控制功率小等特点。

3、 伺服电动机。它是构成伺服系统的主要部件。系统要具有高的伺服精度和定位精度，则伺服电动机必须要有良好的低速特性，伺服系统的快速性还要求伺服电动机必须具有转子转动惯量小、加速转矩大（即大的过载转矩）、工作稳定性好等性能。

4、 位置检测装置。是伺服系统的主要组成部件，位置检测传感器的合理选择及其精度，对于一个伺服系统的静态及动态特性能否达到要求起着重要作用。目前常用的位置检测传感器有感应同步器、光栅、磁尺、光电脉冲发生器与编码盘等。

伺服系统是构成自动化体系的基本环节，它是由若干元件和部件组成的、具有功率放大作用的一种自动控制系统，它的输出量跟随输入量的变化而变化，这样便可以用设计的输入量来实现需要的输出量及变化，以满足实际工程的需要。伺服系统在工农业生产、国防与科学技术各个部门获得越来越广泛的应用，例如，数控铣床的光电跟踪系统，自动车床的定位与进给系统，各种自动化仪表中的一些测量与记录系统，雷达天线控制系统，高射火炮自动跟踪系统，卫星与宇航工具的自动驾驶系统等等。

1.2 伺服系统的控制性能指标

对伺服系统来说，对其控制品质的要求主要有以下三个方面^[3]：

1) 控制精度：输出量是否控制在目标值所允许的误差范围内。

- 2) 快速性：输出量是否快速而准确地响应控制命令。
- 3) 稳定性：稳定是控制系统正常工作的前提。

下面就此进行较为详细的讨论。

1. 控制精度

输出量跟踪控制指令的过渡过程结束后进入稳态，在输出量和控制量指令间所存在的恒定偏差，就是所谓的静态控制精度。用这个偏差的大小来衡量系统进入稳态后的控制能力，如图 1-2 所示。

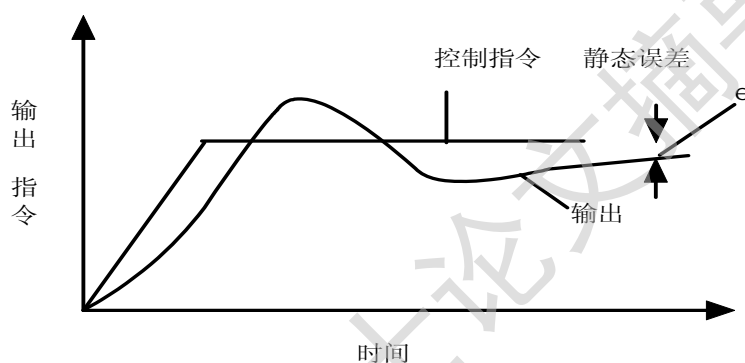


图 1-2 控制精度

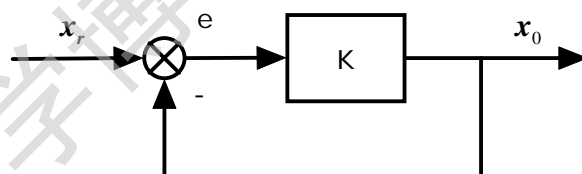


图 1-3 闭环偏差控制框图

x_r -指令信号 x_0 -输出信号

e -控制误差 K -放大增益

在图 1-3 所示的闭环偏差控制框图中，表明静态控制精度高与低的控制误差 e 可由下式求得：

$$e = x_r - x_0 \quad (1-1)$$

式中， x_r 为变量 x_0 的指令信号； x_0 为变量 x_r 的输出信号。

输出信号为：

$$x_0 = Ke = K(x_r - x_0) = \frac{K}{1+K} x_r \quad (1-2)$$

式中， K 为放大器增益。

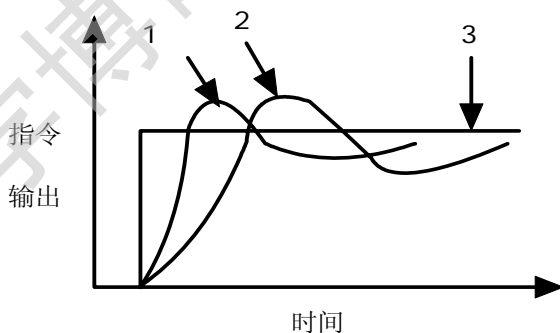
因此，控制误差为：

$$e = x_r - \frac{K}{1+K} x_r = \frac{1}{1+K} x_r \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知，随着增益 K 的增大，误差 e 不断减小。为了使控制误差为 0，通常是在控制回路中设置积分控制因素^[4]。虽然利用放大器的增益可以解决控制误差问题，但由于机械部分的耦合存在间隙和摩擦阻力，在半闭环控制结构时，没有包括在闭环之内，故也将产生输出误差，所以，半闭环外的机械部件应当具有相当高的精度，才能保证终端的输出误差控制在所允许的范围之内。

2. 响应特性

系统在输入单位阶跃信号时，输出量的响应过程如图 1-4 所示。动态响应随系统的阻尼情况不同而变化。曲线 1 表示系统的响应较快，曲线 2 表示系统的响应较慢。一般地说，当系统的响应很快时，系统的稳定性将变坏，甚至可能产生振荡。



1-响应较快 2-响应较慢 3-控制指令

图 1-4 输出响应过程

3. 稳定性

系统稳定是一个系统正常工作的前提。当一个闭环控制系统施加阶跃指令时，系统产生的输出响应可能有如图 1-5 所示的几种情况。输出响应的状态由控制系统的结构和参数所决定。当增益高、控制延迟大时，系统的输出响应就容易发生振荡。在最坏的情况下，振荡将发展到发散状态，如图 1-5e 所示。一般要

求输出响应如图 1-5c 曲线那样，经过短暂的小幅度振荡很快就衰减下来，并准确地跟踪目标值进入稳态运行。

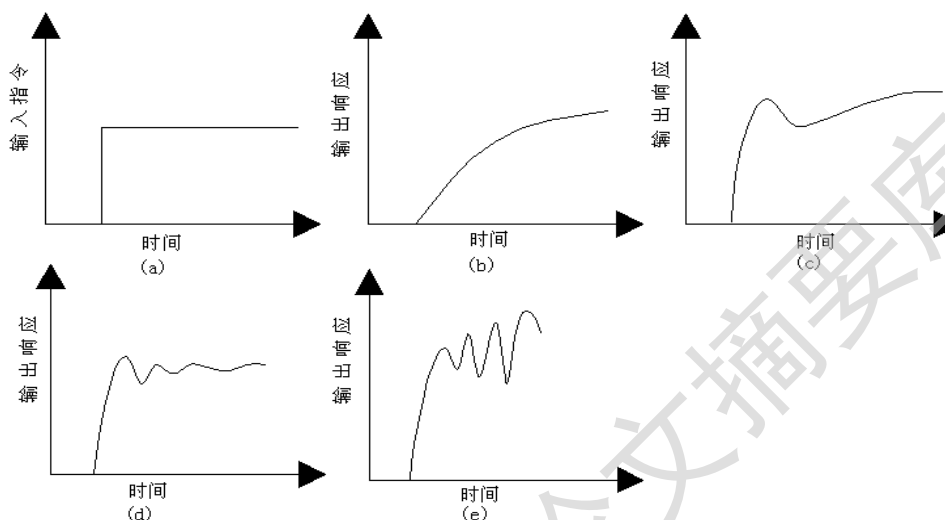


图 1-5 在阶跃输入指令作用下输出响应可能发生的几种情况

上面讨论了 AC 伺服电动机速度控制系统在阶跃输入指令地作用下系统的输出响应。当 AC 伺服电动机速度控制系统加入单一频率的正弦波控制指令时，按照输出响应跟踪输入指令的原理，其输出响应也同样应该是正弦波，如图 1-6 所示。由图可见，相对系统的输入正弦波来说，输出响应的正弦波在幅值和相位方面都发生了变化，而两者的频率相等。输出响应和输入指令的这种关系可以用频率特性来描述，它是由系统的参数决定的。

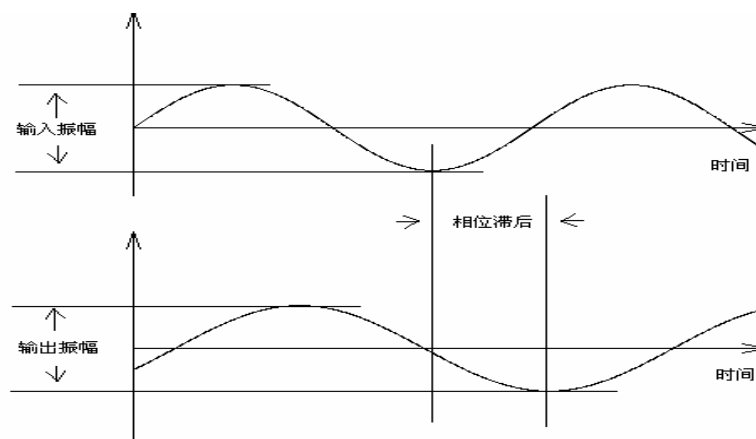


图 1-6 正弦波输入时系统的输出响应

1.3 伺服系统发展的历史

伺服系统的发展与伺服电动机的发展紧密地联系在一起,在 20 世纪 60 年代以前,伺服驱动是以步进电动机驱动的液压伺服电动机,或者以功率步进电动机直接驱动为特征,伺服系统的位置控制为开环控制。六七十年代是直流伺服电动机诞生和全盛发展的时代^[5],由于直流伺服电动机具有比交流伺服电动机易于控制、调速性能好等优点,相关理论及技术都比较成熟,因此,直流伺服在工业及相关领域获得了广泛的应用。在数控机床应用领域,永磁式直流电动机占据统治地位,其控制电路简单,无励磁损耗,低速性能好。随着现代工业的快速发展,其相应设备如精密数控机床、工业机器人等对电伺服驱动系统提出了越来越高的要求,尤其是精度、可靠性等性能。传统直流电动机采用的是机械式换向器,在应用过程中存在以下问题^[6]:

- 1) 维护工作量大,成本高。
- 2) 使用寿命短,可靠性低。
- 3) 结构复杂,体积大,转动惯量大,响应速度慢。
- 4) 对其他设备产生干扰,现场环境适应能力差。

这些问题限制了直流伺服驱动在高精度、高性能要求伺服驱动场合的应用。因此,多年来,人们一直在努力寻求以交流伺服电动机取代具有机械换向器和电刷的直流伺服电动机,以满足各种应用领域的需要。80 年代以来,随着电动机技术、现代电力电子技术、微电子技术、控制技术及计算机技术的快速发展,大大推进了交流伺服驱动技术,先前一直困扰着交流伺服电动机的控制复杂、调速性能差等问题均取得了突破性的进展,使交流伺服系统性能日渐提高,尤其是在高精度、高性能要求的伺服驱动领域。与其相应的伺服传动装置也经历了模拟式、数模混合式和全数字化的发展历程。

1.4 交流永磁同步伺服系统国内外研究概况

20 世纪 80 年代以后,电动机调速技术不断发展,高性能永磁同步调速系统的出现,引起了人们对永磁同步伺服系统研究的高度重视,其研究工作主要是针对由逆变器供电的永磁同步电动机性能研究和对永磁同步伺服系统控制的研究。

在逆变器供电的情况下,永磁同步电动机原有的特性将受到一定的影响,其稳态特性及暂态特性与恒定频率供电情况下的永磁同步电动机相比有着不同

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 for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库