

学校编码: 10384
学 号: 200331002

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

无速度传感器异步电机直接转矩控制
系统的设计与实现

The Design and Realization of Direct Torque Control System
for Asynchronous Motor

作者姓名: 付胜杰

指导教师姓名: 叶瑰昀 教授

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期:

论文答辩时间:

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2006 年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

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

兹提交的学位论文，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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

直接转矩控制技术(简称 DTC) 是继矢量控制之后又一高性能的交流变频调速技术。与矢量控制技术相比,它具有转矩响应快、控制结构简单、易于实现全数字化等优点。

直接转矩控制摒弃了矢量控制中繁琐的电流解耦的控制思想,去掉了 PWM 脉宽调制器和电流反馈环节,省掉了复杂的矢量变换与电动机数学模型的简化处理,通过检测母线电压和定子电流,直接计算出电机的磁链和转矩,并利用两个滞环比较器,直接实现对定子磁链和转矩的解耦控制。这使得系统具有了控制结构简单、控制手段直接、信号处理的物理概念明确等优点。然而,直接转矩控制在低速时调速系统存在转矩脉动等一定的缺陷。文中深入的分析了直接转矩控制方法的特点及其存在的问题,通过研究异步电机的数学模型,并根据直接转矩控制系统的特点以及对电机调速性能的要求,改变对定子磁链的调节方式,使定子磁链轨迹近似为一圆形;在常规控制的方法上改进了转矩跟踪控制的方案以提高系统转矩动态响应。

为满足交流调速系统结构的简单化,在降低成本的同时,提高系统的整体可靠性,无速度传感器调速系统的研究成为交流传动中一个重要的研究课题。本文着重分析了基于模型参考自适应的速度辨识算法,设计了基于转子磁链方程的速度辨识方法。

最后,在理论分析的基础上,完成系统算法的C语言实现,并完成以 TMS320LF2407为控制核心、以EXB841为驱动的硬件电路的设计,实现了采用改进算法的无速度传感器直接转矩控制系统,验证了系统方案的有效性。

关键词: 直接转矩控制, 无速度传感器, 转矩跟踪, 模型参考自适应

Abstract

Direct Torque Control(DTC) of asynchronous motors, which has been developed in the recent decades, is a powerful control method for motor drives after vector control. Following the vector control technique, the quick development of DTC makes itself a new high-powered Alternating Current(AC) driving technique paralleling to the vector control. The DTC is good at its robust characteristics, simple realization and excellent dynamic response.

In this paper, DTC discards the control method of fussy current decoupling in vector control, removes PWM and current feedback part, cuts down complex vector transform and simplifies the process of motor's mathematic model. Moreover, through detecting generatrix's voltage and stator's current, DTC can compute motor's flux and torque directly and implement the decoupling control to stator's flux and torque by two lag comparers. It makes the system's structure more simple, the control method more direct and the concept of signal process clearer. However, DTC has some shortcomings about torque pulse when in low speed. Furthermore, the features and problems of DTC method are analyzed in this paper, and through researching asynchronous motor's mathematic model and according to features of DTC system and requires of timing performance of motor, the adjusting method to stator's flux is changed and the flux track of stator becomes a ring, moreover, the scheme of torque tracking control is advanced in order to improve the dynamic response of system torque.

In order to simplify the structure of alternating current speed adjusting of system, reduce the cost, and improve the system performance, the speed estimation without speed sensor is an important trend of modern AC drive. This thesis has discussed several primary algorithm of speed estimation and emphasized on the algorithm of speed estimate based on model reference adaptive system(MRAS).

Finally, the direct torque system without speed sensor is designed and implemented in C language with TMS320LF2407 as its core and EXB841 as its hardware driving circuit based on theory analyse, which proves the validity of system scheme.

Key words: Direct Torque Control, Speedless Sensor, Torque tracking, MRAS

目 录

第一章 概 述	1
1.1. 现代交流调速技术的发展.....	1
1.2. 直接转矩控制的发展及其前景.....	2
1.2.1. 直接转矩控制的发展	2
1.2.2. 直接转矩控制发展的前景	3
1.3. 本课题研究的意义.....	3
1.4. 课题主要任务.....	4
第二章 异步电机直接转矩控制的基本原理	5
2.1 异步电机动态数学模型.....	5
2.2 逆变器的数学模型与空间电压矢量控制.....	8
2.3 磁通控制原理与空间电压矢量选择.....	11
2.3.1. 磁通控制原理	11
2.3.2. 定子磁链轨迹控制方法	12
2.4 电磁转矩控制原理与空间电压矢量选择.....	13
2.5 定子磁链与转矩观测.....	13
2.5.1. 传统定子磁链观测模型	14
2.5.2. 基于低通滤波器的定子磁链观测模型的改进	15
2.6 电磁转矩观测.....	17
第三章 直接转矩控制系统的组成	18
3.1 直接转矩控制系统的组成.....	18
3.2 磁链自控制.....	19
3.3 磁链调节环节.....	19
3.4 转矩调节环节.....	20
3.5 状态选择器.....	21
第四章 无速度传感器直接转矩控制系统研究	23
4.1 直接算法.....	23
4.1.1 转差计算的基本原理.....	24
4.1.2 转差计算存在的问题.....	24

4.2 模型参考自适应法 (MRAS)	25
4.2.1 模型参考自适应法基本理论思想.....	25
4.2.2 模型参考自适应法的改进.....	27
第五章 直接转矩控制系统硬件设计	28
5.1 直接转矩系统硬件框图.....	28
5.2 整流及滤波电路分析.....	30
5.3 逆变器及其性能分析.....	31
5.3.1 功率器件 IGBT	31
5.3.2 吸收缓冲电路设计.....	35
5.4 控制电路设计与分析.....	37
5.4.1 主控制芯片 TMS320LF2407A.....	37
5.4.2 TMS320LF2407A 外围应用电路设计.....	39
5.5 IGBT 门极驱动电路设计.....	45
5.5.1 EXB841 原理及性能分析.....	45
5.5.2 EXB841 性能改进及其外围应用电路设计.....	46
第六章 CCS 环境下直接转矩控制系统软件的实现	50
6.1 面向 DSP 的软件系统概述.....	50
6.1.1 集成开发环境 CCS 概述.....	50
6.1.2 DSP 的编程语言.....	50
6.2 控制系统软件设计.....	51
6.2.1 软件系统主要的任务.....	51
6.2.2 主程序设计.....	51
6.2.3 中断子程序.....	52
第七章 试验结果分析	54
7.1 系统硬件电路部分.....	54
7.2 系统工作波形测试.....	57
第八章 总结与展望	62
致谢.....	64
在校期间发表论文情况	65
参考文献	66

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1. 1. Development of Modern AC Speed-adjusting Technology.....	1
1. 2. Development and Foreground of DTC.....	2
1. 2. 1. Development of DTC.....	2
1. 2. 2. Foreground of DTC.....	3
1. 3. Purpose of Paper.....	3
1. 4. Tasks of Paper.....	4
Chapter 2 Mechanism of DTC for Induction Motor	5
2. 1 Dynamic Mathematic Model of Induction Motor	5
2. 2 Mathematic Model of Inverter and Spacial Voltage Vector Control	8
2. 3 Principle of Flux Control and Selection of Spacial Voltage Vector	11
2. 3. 1. Principle of Flux Control.....	11
2. 3. 2. Control Method of Stator's Flux Track	12
2. 4 Control Principle of EM Torque and Selection of Spacial Voltage Vector.....	13
2. 5 Observation of Stator Flux and Torque.....	13
2. 5. 1. Traditional Observation Model of Stator Flux	14
2. 5. 2. Improvement of Observation Model of Stator Flux Based on Lowpass	15
2. 6 Observation of EM Torque.....	17
Chapter 3 Structure of DTC System	18
3.1 Structure of DTC System.....	18
3.2 Self-Control of Flux.....	19
3.3 Part of Flux Adjustment.....	19
3.4 Part of Torque Adjustment.....	20
3.5 State Selector.....	21
Chapter 4 Research of DTC System with Nonspeed Sensors	23
4.1 Direct Computing Method.....	23
4.1.1 Basic Principle of Rotation Error Computation.....	24
4.1.2 Existing Problems of Rotation Error Computation.....	24
4.2 MRAS.....	25

4.2.1 Basic Theory of MRAS.....	25
4.2.2 Improvement of MRAS.....	27
Chapter 5 Hardware Design of DTC System	28
5.1 Hardware Frame of DTC System.....	28
5.2 Analyse of Commuting and Filtering Circuits.....	30
5.3 Inverter and Performance Analyse.....	31
5.3.1 Power Electron IGBT	31
5.3.2 Design of Absorbing Circuits.....	35
5.4 Design and Analyse of Control Circuit.....	37
5.4.1 CPU TMS320LF2407A.....	37
5.4.2 Perpheral Circuit Design of TMS320LF2407A.....	39
5.5 Gate Driver Circuits Design for IGBT.....	45
5.5.1 Principle and Performance Analyse of EXB841.....	45
5.5.2 Improvement of EXB841 and Perpheral Circuit Design	46
Chapter 6 Implement of DTC System in CCS	50
6.1 Introduction of DSP Oriented Software System.....	50
6.1.1 Introduction of IDE: CCS.....	50
6.1.2 Programming Language of DSP.....	50
6.2 Software Design of Control System.....	51
6.2.1 Main tasks of Software System.....	51
6.2.2 Design of Main Program.....	51
6.2.3 Subprogram of Interruption.....	52
Chapter 7 Analyse of Experiment Results	54
7.1 Hardware Circuit of System.....	54
7.2 Wave Test of System.....	57
Chapter 8 Conclusion and Future	62
Thanks.....	64
Published Papers of Author	65
Bibliography	66

第一章 概 述

电动机作为机电能量变换的电气传动装置在国民经济各部门中起着重要的作用。它实现转矩、加速度、转速和位置等各种控制。从工业、农业、交通运输、航空航天、军事系统到办公自动化、家用电器等领域都有它的应用。

1.1. 现代交流调速技术的发展

电机分为直流电机和交流电机两大类。交流电机，特别是笼型异步电机，由于其结构简单牢固、制造成本低廉、运行方便可靠、环境适应能力强以及易于向高电压、高转速和大容量方向发展等优点，在工农业生产中得到了极其广泛的应用，但交流电机的调速比较困难，其原因在于它具有多变量、非线性、强耦合的特征，控制起来较直流电机复杂如何使交流电机具有与直流电机一样的控制特性，一直是人们不断探索和追求的目标。

现代交流电机调速技术的发展，一方面要求提高性能、降低损耗、降低成本，另一方面又不断地要求技术指标的提高。随着微电子技术和计算机技术的飞速发展，以及控制理论的完善、各种工具的日渐成熟，尤其是专用集成电路、DSP 和 FPGA 近年来令人瞩目的发展，给交流电机控制系统带来了很多新的发展契机。目前交流电机控制已经成为一门集电机、电力电子、自动化、计算机控制和数字仿真为一体的新兴学科。

纵观交流调速发展的过程，大致是沿着三个方向发展的：一个是取代直流调速实现少维修、省力化为目的的高性能交流调速；另一个是以节能为目的，改恒速为调速，适用于风机、水泵、压缩机等通用机械的交流调速；第三个是直流调速难以实现的特大容量、高电压、极高转速领域的交流调速。

交流电机是一个多变量、非线性的被研究对象，过去的电压、频率恒定控制都是从电机稳态方程出发研究其控制特性，动态控制效果均不理想。1971 年德国的 F. Blaschke 等提出了“感应电机磁场定向的控制原理”；此外，美国的 P. C. Custma 和 A. A. Clark 申请了专利“感应电机定子电压的坐标变换控制”；以后在实践中经过不断的改进，形成了现在应用的矢量控制变频调速系统。用矢量

变换的方法研究电机的动态控制过程,利用状态重构和估计的现代控制概念,实现了交流电机磁通和转矩的重构和解耦控制,从而促进了交流电机控制系统实用化。目前,这种控制方法已较成熟且已产品化。但这种方法采用了坐标变换,所以对控制器的运算速度、处理能力等性能要求较高。近年来,围绕着矢量变换控制的缺陷,如系统结构复杂、非线性和电机参数变化影响系统性能等等问题,国内外学者进行了大量的研究。

1.2. 直接转矩控制的发展及其前景

1.2.1. 直接转矩控制的发展

交流电机高性能传动的关键在于动态力矩控制。1985年,德国鲁尔大学 Depenbrock 教授提出异步机直接转矩控制法(DTC),它不需要解耦电机数学模型,强调对电机转矩进行直接控制,在很大程度上克服了矢量控制计算复杂和易受参数变化影响的特点,成为交流调速控制理论第二次质的飞跃。和矢量控制不同,直接转矩控制直接在定子坐标系下分析交流电机的数学模型,控制电机的磁链和转矩。它不需要交流电机与直流电机做比较、等效和转化;不需要为解耦而简化交流电机数学模型,省掉了矢量旋转变换等复杂的计算。其次,直接转矩控制磁通估算所用的是定子磁链,因此只要知道定子电阻就可以把它观测出来,而磁场定向矢量控制所用的是转子磁链,观测转子磁链需要知道电机转子电阻和电感,因此直接转矩控制大大减少了矢量控制技术中控制性能易受参数变化影响的问题。最后,直接转矩控制对转矩实行直接控制,其控制方式是,通过转矩两点式调节器把转矩检测值与转矩给定值进行滞环比较,把转矩波动限制在一定的容差范围内,使得系统性能更加优越。

然而直接转矩控制还有些问题尚未解决,如低速时转矩观测器和转速波动等仍未得到很好的解决。目前大多是采用了将磁场定向与直接转矩控制相结合的方法,低速时采用磁链定向矢量变换控制,高速时采用直接转矩控制。或者同时观测转子磁链,作为直接转矩控制系统的校正。这种方法一来平稳切换的时机较难确定;二来如果低速时采用磁链定向矢量控制,或采用观测转子磁链的方法,还是要依赖转子参数,也就是说只要有转子磁链的成分在里面,还是对转子参数较敏感,无法体现直接转矩控制的优势。

1.2.2. 直接转矩控制发展的前景

(1) 现代控制技术的实用化;现代控制理论中各种控制方案的应用使得系统的动态性能和鲁棒性得以提高。功能强大的数字处理芯片(DSP)的推出,许多以前无法实时实现的算法都可以应用到实时控制系统中,如最近研究十分活跃的模糊控制、神经网络控制、模糊神经网络控制、非线性控制等。

(2) 控制手段的全数字化;直接转矩控制在结构上特别适合于全数字化,对处理的实时性、快速性要求很高,DSP正是能满足这种需求的芯片,它快速高效地实现复杂的控制规律,同时便于故障监视、诊断和保护,增强系统的可靠性,确保系统的高速响应性。

(3) 无速度传感器的控制系统;无速度传感器用于矢量控制、直接转矩控制已有产品,但调速范围较小,有待于进一步改善。该领域今后研究的努力方向仍是提高转速估计的精度及动态响应,增强对参数变化的鲁棒性以及获得更高的调速范围。

(4) 应用于同步电机的控制;直接转矩控制技术主要的应用领域是异步电机,现在人们开始把它用在同步电机控制中。现代控制理论与经典控制算法的进一步结合成为交流电机控制算法发展的一种趋势。现在人们正致力于改善低速性能、发展鲁棒控制策略。

1.3. 本课题研究的意义

直接转矩控制经过二十年的发展和完善,无论是在控制手段、响应速度,还是在静、动态调速性能方面,直接转矩控制都较其它交流调速控制策略有着明显的优势。目前德国、日本和美国已成功将其应用于电力牵引中的大功率交流传动系统。然而,我国在交流调速传动方面起步较晚,无论从调速理论的深度还是理论应用于实际变频器都与国外相比相差甚远,尤其在高性能的交流传动方面,国内基本上还没有形成批量生产能力。而随着对交流调速和变频节能认识的不断加深,国内对变频调速装置的需求量会越来越大,同时对性能的要求也会越来越高。目前国产的变频调速装置还不能满足性能要求,致使大量国外品牌的产品占有绝大部分市场份额量。因此,研究和开发高性能的交流变频装置并使其国产化、商品化,对于发展我国经济具有重要意义。

本课题将立足于将直接转矩控制技术由理论研究转变为实际应用，主要任务将侧重于直接转矩控制系统的设计与实现。

1.4. 课题主要任务

本论文结合国内在直接转矩控制技术实际情况，将侧重于直接转矩控制应用于实际系统的工作上，开发设计出一套能够实现直接转矩控制理论的完整的软硬件系统。

论文主要内容如下：

1. 分析异步电动机的数学模型，在电机数学模型的基础上对直接转矩控制理论进行介绍，在逐层推导下得到转矩以及定子磁链和电压矢量之间的关系。接下来阐述电压空间矢量的概念，以及与其相关的一系列内容，进而得到六边形磁链控制和圆形磁链控制方法。

2. 研究了电机转速的辨识方法，选用模型参考自适应法辨识电机转速，构成无速度传感器的电机直接转矩控制系统。

3. 完成主电路与控制电路的设计。其中，主电路以日本三菱的 IGBT CM75TF-12H 及整流桥 RM30TA-H 为核心，完成整流、逆变及高频吸收缓冲电路的设计；控制电路部分，以 TMS320LF2407 为主控制芯片，完成 CPU 外围电路设计，以 EXB841 为驱动核心，完成 IGBT 驱动电路、过流、过温等保护电路的设计。

4. 分析了 IGBT 驱动信号对整个系统的影响以及针对 EXB841 本身特点推导出了适合本系统的驱动方案。

5. 在 CCS 编程环境下，完成直接转矩控制系统的 C 语言程序的编制，并应用于实际系统。

6. 对系统实际试验结果进行了分析与总结。

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