

直接转矩控制及 DSP

在其中的应用

韩如成 等编著

兵器工业出版社

直接转矩控制及 DSP 在其中的应用

韩如成 潘峰 智泽英 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

直接转矩控制是近 20 年来得到广泛重视的一种高性能交流调速方法, DSP 是逐渐广泛应用的实时控制器。本书简要地介绍了直接转矩控制的基本原理、DSP 的原理、结构及 DSP 在直接转矩控制中的应用。重点阐述了直接转矩控制死区效应及其补偿、低速脉动及其抑制、全阶磁链观测器、无速度传感器技术在直接转矩控制中的应用、直接转矩控制的起制动方法等。

本书适宜于从事电力电子与电力传动、电机及其控制的科研人员阅读, 也可以作为本科院校的相关教师、研究生及高年级学生的教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

直接转矩控制及 DSP 在其中的应用 / 韩如成等编著. —
北京: 兵器工业出版社, 2004. 10
ISBN 7-80172-310-4

I. 直... II. 韩... III. 数字信号—信号处理—应
用—电力传动—控制系统 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 099944 号

出版发行: 兵器工业出版社

责任编辑: 常小虹

邮编社址: 100089 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 太原理工大学印刷厂

版 次: 2004 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

封面设计: 仇雨婷

责任校对: 郭 芳

责任印制: 魏丽华

开 本: 850 × 1168 1/32

印 张: 8

字 数: 210 千字

定 价: 16.80 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

贺 信

太原科技大学全体师生员工：

欣闻太原科技大学正式更名挂牌，我谨代表山西省人民政府，向你们表示热烈的祝贺！并向全体师生员工致以亲切的问候！

52年来，太原科技大学（原太原重型机械学院）为社会培养、输送了数以万计的高级专门人才，为我国的社会主义现代化建设事业做出了积极的贡献。

太原科技大学的正式更名挂牌，显示着太原科技大学的办学规模、办学水平和办学层次上了一个新台阶，是我省深化高等教育改革，坚持高等教育创新的又一硕果，必将对我省高等教育事业的改革与发展产生深远影响。希望太原科技大学以此为契机，积极贯彻落实科教兴省战略，继承和发扬优良传统，与时俱进，开拓创新，努力把学校建设成为一所特色鲜明的多科性大学，为全面建设小康社会做出新的更大的贡献！

山西省副省长：张少琴

2004年8月6日

总 序

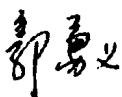
在国家教育部批准“太原重型机械学院”更名为“太原科技大学”的喜庆日子里,我校的专家学者出版这套学术丛书,让我们共同分享这些最新研究成果。

52年前,新中国刚刚成立不久,为了迎接国家经济建设高潮的到来,一所以培养机械工业高级专门技术人才为主的学校在华北大地诞生。从此,她伴随着祖国经济建设的蓬勃发展和时代前进的步伐,历经半个多世纪的风风雨雨,由小变大,由弱变强,现已发展成为一所以工为主,理、工、文、管、经、法、教育等门类较为齐全、协调发展的特色鲜明的多科性大学。过去50多年来,太原重型机械学院为国家培养了大批高素质的各类创新人才,他们正奋战在祖国建设的各条战线上。今天,为了适应市场经济和高等教育发展的需要,这所曾经为共和国重工业发展做出过重要贡献的知名学院,正式更名为太原科技大学。不言而喻,这是太原重型机械学院办学实力不断增强、水平不断提高的明证,也是太原科技大学走向美好明天的开始。

浓郁的学术氛围是母校保持的优良传统。众多同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘、硕果累累,为神圣的科技教育事业和祖国的社会主义现代化建设做出了新的贡献。这套丛书的编辑出版,定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享母校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长: 

2004年6月10日

前 言

作者从事交流调速教学工作多年,对各种调速方法的原理和应用都做过一些研究,在教学和研究过程中,经常思考这样两个问题:一是对调速原理和方法的改进;二是适合于交流调速实时控制要求的控制器件。对这些问题虽做过一些探讨性的研究,但所获甚微。

作为一种调速方法,直接转矩控制有其新颖独到之处和明显的优点;高速数字信号处理器(DSP)以其逐渐发展而得到广泛应用。把二者结合起来,近年虽有一些实验装置出现,但可见的参考资料极少。几届硕士研究生围绕这一问题进行了研究。总结这些研究,推动对这一问题研究的进一步深入,正是写作本书的初衷。

本书的编排内容主要围绕直接转矩控制和 DSP 的原理及应用进行阐述,第 2 章和第 4 章主要介绍直接转矩控制的原理和 DSP 的原理、结构等,虽为现成的成果编撰,但简洁明了,易于掌握;第 3 章中死区效应补偿的研究。低速转矩脉动的分析和改善措施的探讨,以及无速度传感器直接转矩控制系统的构成和直接转矩控制系统的启制动方法,结合了作者近年来所做的一些工作;第 5 章的内容均为作者在研究工作中所采用的方法。作者所做的工作虽不尽全面,也许有些微不足道,但只期起到抛砖引玉之作用。

本书第 1 章由韩如成编写,第 2 章和第 3 章由潘峰编写,第 4 章和第 5 章由智泽英编写,全书由韩如成统稿。

所用参考文献已在书中标出,在此向原作者表示感谢,同时也感谢兵器工业出版社同志们的帮助。在太原重型机械学院更名为太原科技大学之际出版此书,作者十分欣慰。

由于作者水平有限,书中定有不妥甚至谬误之处,恳请读者予以指正。

作 者
2004 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 电力电子器件的发展	(1)
1.2 交流调速控制技术的发展	(2)
1.3 DSP 的发展及其应用	(8)
1.4 交流调速控制系统全数字化的发展	(11)
第 2 章 交流异步电动机的直接转矩控制	(13)
2.1 直接转矩控制及其主要特点	(13)
2.2 直接转矩控制中异步电动机的数学模型	(15)
2.3 电压型逆变器的数学模型和电压空间矢量	(18)
2.4 电压空间矢量对异步电动机定子磁链的调节	(22)
2.5 电压空间矢量对异步电动机转矩的调节	(25)
2.6 直接转矩控制系统的数字化实现	(27)
2.6.1 直接转矩控制系统的基本结构	(27)
2.6.2 电压、电流与速度的检测	(27)
2.6.3 定子磁链和转矩的观测与计算	(29)
2.6.4 定子磁链和转矩给定值的计算	(32)
2.6.5 磁链调节器、转矩调节器及磁链位置判断	(34)
2.6.6 电压空间矢量的选择	(35)
第 3 章 直接转矩控制中的几个特殊问题研究	(38)
3.1 死区效应分析及其补偿方法研究	(38)

3.1.1	死区问题概述	(38)
3.1.2	死区效应分析	(40)
3.1.3	死区效应软件补偿方法一	(42)
3.1.4	死区效应软件补偿方法二	(44)
3.2	低速转矩脉动分析及其改善措施	(46)
3.2.1	直接转矩控制系统的低速转矩脉动问题	(46)
3.2.2	直接转矩控制系统的转矩变化规律	(49)
3.2.3	转矩脉动抑制措施之一——定子磁链和转矩 的双滞环控制	(52)
3.2.4	转矩脉动抑制措施之二——转矩脉动最小化 控制器	(55)
3.2.5	转矩脉动抑制措施之三——无死区逆变器 及三点式磁链调节器	(59)
3.2.6	转矩脉动抑制措施之四——转矩控制器	(62)
3.3	异步电动机定子磁链的高精度观测方法	(68)
3.3.1	异步电动机的全阶磁链观测器	(69)
3.3.2	磁链观测器的求解方法	(77)
3.4	无速度传感器技术在直接转矩控制中的应用	(83)
3.4.1	基于电机稳态模型的速度估计	(84)
3.4.2	基于李雅普诺夫理论的速度自适应观测器	(87)
3.4.3	基于模型参考自适应的速度自适应观测器	(93)
3.4.4	与磁链观测器相结合的速度估计器	(99)
3.4.5	基于神经网络的速度辨识原理	(101)
3.5	直接转矩控制的起制动方法研究	(106)
3.5.1	-120°电压空间矢量对电动机运行的作用	(106)

3.5.2	-120°电压空间矢量在启动过程中的应用	(106)
3.5.3	异步电动机直接转矩控制启动方法	(108)
3.5.4	异步电动机直接转矩控制的制动方法	(110)
第4章	TMS320F2X 系列 DSP	(112)
4.1	DSP 及其应用和发展	(112)
4.1.1	DSP 芯片的产生、现状和发展方向	(112)
4.1.2	可编程 DSP 芯片	(115)
4.1.3	DSP 的应用	(116)
4.2	TMS320F240 系列 DSP 的结构	(118)
4.2.1	TMS320F240 的内核 CPU	(118)
4.2.2	TMS320F240 的存储器	(133)
4.2.3	TMS320F240 指令控制器开发环境	(144)
4.3	TMS320F240 的外设模块	(162)
4.3.1	A/D 转换模块	(163)
4.3.2	SCI 串行通信接口模块	(166)
4.3.3	SPI 串行外设接口模块	(168)
4.3.4	TMS320F240 的事件管理器	(175)
4.4	TMS320F2X 系列 DSP 的应用	(194)
第5章	DSP 在直接转矩控制中的应用	(201)
5.1	控制系统的组成和工作原理	(201)
5.1.1	功率电路	(201)
5.1.2	检测电路	(204)
5.1.3	PWM 信号发生电路	(207)
5.1.4	DSP 控制板	(208)
5.1.5	多路模拟开关	(210)

5.2 控制系统的软件设计	(211)
5.2.1 数据格式的选择	(212)
5.2.2 定子电流的检测	(215)
5.2.3 转子速度的检测	(217)
5.2.4 控制系统模块化设计	(218)
5.3 控制系统的实现	(230)
5.3.1 试验设备和试验对象	(230)
5.3.2 试验测试结果	(230)
参考文献	(234)

第 1 章 结 论

长期以来,在调速领域大多采用磁场电流和电枢电流可以独立控制的直流电动机传动系统,它的调速性能和转矩控制特性比较理想,可以获得良好的动态响应,然而由于直流电动机的结构等存在缺点,不能适应大容量化的发展方向^[1]。交流电动机以其结构简单、制造方便、运行可靠,可以以更高的转速运转、可用于恶劣环境等优点得到了广泛的应用,但是交流电动机是一个高阶、非线性、强耦合的多变量复杂系统,要实现对其调速比较困难。于是,从 20 世纪 30 年代开始,人们就致力于交流调速技术的研究,然而进展缓慢。在相当长的时间内,直流调速一直以性能优良而领先于交流调速。20 世纪 60 年代以后,特别是 70 年代以来,现代电子技术(包括大规模集成电路技术、电力电子技术和计算机技术)的飞速发展、电动机控制理论的不完善以及计算机仿真技术的应用,极大地推动了交流电动机调速技术的发展,其中发展最快的是变频调速技术,其调速系统的性能指标已可与直流调速系统相媲美^[2]。目前,交流调速逐步代替直流调速的时代已经到来^[3]。

1.1 电力电子器件的发展

交流调速的重大变革是以电力电子器件的发展为先导的^[4]。电力半导体器件是以美国 1956 年生产硅整流管(SR)、1958 年生产晶闸管开始逐渐发展起来的。经过了 40 多年的发展,在器件制造技术上不断提高。已经历了以晶闸管(SCR)为代表的分立器件,以可关断晶闸管(GTO)、巨型晶体管(GTR)、功率 MOSFET、绝缘栅双极

晶体管(IGBT)为代表的功率集成器件(PID),以智能化功率集成电路(SPIC)、高压功率集成电路(HVIC)为代表的功率集成电路(PIC)等三个发展时期。从晶闸管靠换相电流过零关断的半控器件发展到 PID、PIC 通过门极或栅极控制脉冲可实现器件导通与关断的全控器件。在器件的控制模式上,从电流型控制模式发展到电压型控制模式,不仅大大降低了门极(栅极)的控制功率,而且大大提高了器件导通与关断的转换速度,从而使器件的工作频率从工频、中频到高频不断提高。GTR 的工作频率一般在 2kHz 以下,而 IGBT 可以工作在 10 ~ 20kHz 之间。

在器件结构上,从分立器件发展到由分立器件组合成功率变换电路的初级模块,继而将功率变换电路与触发控制电路、缓冲电路、检测电路等组合在一起的复杂模块。近年来,功率器件的发展更趋于智能化和集成化,集驱动、保护、逻辑等单元为一体的智能功率模块(IPM)也已经进入实用化阶段。可以说,这些新型电力电子器件的发展给高性能交流调速技术的发展奠定了坚实的基础。

1.2 交流调速控制技术的发展

交流传动系统在今天有如此大的进步,主要是由于电力电子学、微电子学和控制理论的飞速发展,尤其是先进控制策略的成功应用。具有代表性的交流电机的控制策略有:转速开环恒压频比($U/f = \text{const}$)控制、转差频率控制、磁场定向控制(矢量控制)、直接转矩控制、自适应控制与智能控制等等。此外,无速度传感器的交流传动控制技术也已成为近年来研究的热点。这些控制策略各有优缺点,在实际应用中需根据具体要求恰当选择,以便达到最佳控制效果。下面对各个控制策略分别进行简要的介绍。

1. 恒压频比控制与转差频率控制

要使电机的转速得到快速响应,必须有效地控制转矩。开环恒压频比控制根据异步电机等效电路确定的 $U/f = \text{const}$ 进行变频调速。其优点是:控制线路结构简单、成本较低。但其缺点是:改变 U/f 的值只能调节电机的稳态磁通和转矩,而不能进行动态控制;控制曲线会随负载的变化而变化,转矩响应慢、电机转矩利用率不高;转差频率控制是检测电动机转速,然后把电动机速度与转差频率的和作为给定逆变器的输出控制^[37],它能够在一定程度上控制电机转矩,但它依据的只是稳态模型,并不能真正控制动态过程中的转矩,从而得不到很理想的动态控制性能^[6]。

2. 矢量控制

交流传动控制理论及实践终于在 20 世纪 70 年代取得了突破性的进展,即出现了矢量控制技术。其实质是将交流电机等效为直流电机,分别对转矩、磁场两个分量进行独立控制。通过控制转子磁链,以转子磁场定向,然后分解定子电流而获得转矩和磁场两个分量,经坐标变换,实现正交或解耦控制。这样,通过坐标变换重建的电机模型就可以等效为一台直流电机。矢量控制的方法实现了异步电机磁通和转矩的解耦控制,使交流传动系统的动态特性得到了显著的改善,但也带来一些问题,即理论色彩太浓,实现时要进行复杂的坐标变换,并需准确观测转子磁链,而且对电机的参数依赖性很大,难以保证完全解耦,从而使转矩的控制达不到预期的效果。从电机本身来看,其参数具有一定的时变性,特别是转子时间常数,它随温度和励磁电感的饱和而变化。矢量控制系统对参数变化的敏感性使得实际控制效果难以达到理论分析的结果。即使精确地获得电机参数和转子磁链,也只有稳态的情况下才能实现解耦,弱磁时耦合仍然存在^[7],而这正是矢量控制的缺陷所在。针对这些缺陷,交流传

动领域的专家和学者做过许多研究,诸如进行参数辨识以及使用状态观测器等现代控制理论方法,但是这些策略的引入使系统更加复杂化,控制的实时性和可靠性也随之降低了。

3. 直接转矩控制(DTC)

20 世纪 80 年代中期,德国学者 M. Depenbrock 教授首次提出直接转矩控制理论^[8],并在 1987 年把它推广到弱磁调速范围。不同于矢量控制技术,它无需将交流电动机与直流电动机做比较、等效、转化,不需要模仿直流电动机的数学模型,也不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型。它只是在定子坐标系下分析交流电机的数学模型,强调对电机的转矩进行直接控制,省掉了矢量旋转变换等复杂的变换与计算。该方法通过检测得到的定子电压和电流,采用定子磁场定向,直接控制电机的磁链和转矩,着眼于转矩的快速响应,以获得高效的控制性能。它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,很大程度上克服了矢量控制的缺点。

直接转矩控制技术从一诞生,就以新颖的控制思想,简洁明了的系统结构,优良的动、静态性能受到了人们普遍的关注,各国学者在理论探讨和实验研究上都做了大量的工作,出现了各种各样的控制方案。德国作为直接转矩控制的发源地,采用的是六边形磁链控制方案,着眼于大功率领域的实际应用。日本学者 I. Takahashi 教授提出的是近似圆形磁链的控制方案,侧重于中小功率高性能调速领域的研究^[9]。从控制效果来看,六边形方案在每六分之一周期仅使用一种非零电压矢量,这相当于六阶梯波形逆变器供电的情况(无零矢量作用时),转矩脉动、噪声都比较大,与气隙磁场为圆形的理想情况相差甚远。近似圆形方案则比较接近理想情况,电机损耗、转矩脉动及噪声均较小。但是从另一方面看,六边形方案有利于减小功率器件的开关频率,适用于大功率领域,而近似圆形方案则相反,一般用于中小功率高性能场合。美国进行直接转矩控制研究的主要有

T. G. Habetler 等人,其目的是把直接转矩控制技术应用到电动汽车的牵引当中,因此研究的重点并不是如何精确调速,而是在全速度范围内有效地控制转矩,他们提出的无差拍预测控制法,克服了“Bang—Bang”控制开关频率可变的缺点。

直接转矩控制的研究虽然已经取得了很大进展,但是它在理论和实践上均还不够成熟,还有很多问题亟待解决。由于其对实时性要求高,计算量大,直至新一代高速数字信号处理器(DSP)出现后,才使它的实现真正成为可能。

4. 自适应控制在交流传动领域的应用

自适应控制与常规反馈控制一样,也是一种基于数学模型的控制方法,所不同的只是自适应控制所依据的关于模型和扰动的先验知识比较少,需要在系统运行过程中不断提取有关模型的信息,使模型逐渐完善,所以是克服参数变化影响的有利方法。应用于电机控制的自适应方法有模型参考自适应控制、参数辨识自校正控制以及新发展的各种非线性自适应控制^[10,11]。但所有这些方法都存在的问题是:①过分依赖数学模型和运算繁琐,使控制系统的实现复杂化;②辨识和校正都需要一个过程,对于较慢的参数变化尚可以起到校正作用,如校正因温度变化而影响的电阻参数变化,但是对于较快的参数变化,如因集肤效应引起的电阻变化、因饱和作用产生的电感变化等等,就因来不及校正而难以产生很好的效果。

5. 智能控制在交流传动领域的应用

智能控制是自动控制学科发展历程中一个崭新的阶段,与传统的经典、现代控制方法相比,具有许多独特之处。首先,它突破了传统控制理论中必须基于数学模型的框架,不依赖或不完全依赖于被控对象的数学模型,只按实际效果进行控制。其次,它继承了人脑思维的非线性,智能控制器也具有非线性特性;同时,利用计算机控制

的便利,可以根据当前状态切换控制器的结构,用变结构的方法改善系统的性能。在交流传动中,上述提到的控制策略都涉及到一个共同的问题,就是控制算法依赖于电机的数学模型,而智能控制由于能摆脱对控制对象模型的依赖,能够在处理具有不精确性和不确定性的问题中获得可处理性、鲁棒性,因此许多学者进行了将智能控制引入交流传动控制中的研究。

虽然智能控制出现的初衷是为了对付那些难以建立模型的复杂对象,但是由于交流传动系统相对而言具有较明确的数学模型,所以在交流传动中引入智能控制方法,并非像许多控制对象那样是出于建模的困难,而是充分利用智能控制非线性、自寻优等功能来克服交流传动系统变参数与非线性等不利因素,从而提高系统的鲁棒性。目前智能控制技术在交流传动系统中应用较为成熟的是模糊控制和神经网络控制^[12,13,14],而且大多数是在模型控制的基础上增加一定的智能控制手段,以消除参数变化和扰动的影响。其中模糊控制是利用模糊集合来描述人们日常所使用概念中的模糊性,使控制器能更逼真地模仿熟练操作人员和控制专家的控制经验与方法,它包括精确量的模糊化、模糊推理、模糊判断三部分。早期的模糊控制器只是以取代传统 PID 控制器为目的,鲁棒性虽有所加强,但一般模糊控制器没有积分作用。在交流传动系统有负载扰动时会出现静差^[13]。而增加了积分效应的模糊控制器,虽然相当于变系数的 PID 调节器,但是可以实现无静差控制。单纯地将一个简单的模糊控制器用于高精度的电机传动系统,还不能得到令人十分满意的性能。例如,系统的动态响应轨迹不能被定量地控制,只能得到模糊控制特性等^[14]。因此,只有与其他控制方法相结合,模糊控制系统才能取得优良性能,如 Bose Bimal. K 和 Sousa Gilberto. C. D 等提出采用模型参考自适应控制技术(MRAC)模糊在线调节异步电机的转差增益,使系统具有高性能特性^[15]; Won. C. Y 和 Kim. D. H 等将模糊滑模控制器(Fuzzy sliding mode controller)用于异步电机的位置控制,使得系统性能大

大优于传统的模糊控制和滑模控制等。

神经网络控制在交流传动中的应用主要有以下几个方面:①代替传统的 PID 控制^[16];②由于实际的矢量控制效果对系统参数很敏感,将神经网络用于电机参数的辨识、跟踪,并对磁通及转速控制器进行自适应调整^[17,18,19];③异步电机矢量控制需要确定的转子磁通的瞬时幅值与位置,无速度传感器矢量控制所需确定的转速,均由神经网络来完成^[20,21];④结合模型参考自适应控制,将神经网络控制器用作自适应速度控制器^[22]。

虽然将智能控制用于交流传动系统的研究已经取得了一些成果,但是还有许多问题尚待解决,如智能控制器主要凭经验设计,对系统性能(如稳定性和鲁棒性)缺少客观的理论预见性,而且设计一个系统需要获取大量实验数据,设计出的系统容易产生振荡,因此在交流传动中智能控制只不过是一种方法,并不能成为理论;另外,交流传动智能控制系统非常复杂,它的实现必须依赖于 DSP、FPGA 等控制专用电子器件的高速数据处理能力。

6. 基于无速度传感器的交流传动控制技术

一般来说,高性能的交流调速系统离不开速度的闭环控制。在交流电机控制中,速度传感器的安装不仅增加了控制系统的成本,还存在安装和维护上的困难,降低了系统的可靠性,并且不适应恶劣的工作环境,从而限制了它的使用范围。因此无速度传感器传动控制技术不仅是现代交流传动控制的一个重要研究方向,而且它已成为当前研究的热点^[23]。无速度传感器技术,就是通过已知的调速系统参数快速而准确地估算出电机的实际转速值^[24]。1975 年, A. Abbond 等人根据异步电机数学模型及控制原理,推导出电机的滑差表达式,在无速度传感器领域做出了首次尝试。1982 年, K. Joetten 首次将无速度传感器技术应用于矢量控制,使得交流传动技术又上了一个新台阶。