

直接转矩控制 理论及应用

THE DIRECT TORQUE CONTROL THEORY
AND APPLICATION

◎ 韩如成 潘 峰 智泽英 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

直接转矩控制理论及应用

韩如成 潘 峰 智泽英 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了直接转矩控制技术的特点、研究现状以及部分工程应用；重点介绍了异步电动机的直接转矩控制原理及仿真实现，采用 DSP 的直接转矩控制的实现，并结合异步电动机直接转矩控制的一些特殊问题提出了改善系统性能的方法，包括磁链观测的改进、死区效应的补偿、低速转矩脉动的克服、启制动性能的提高和无速度传感器技术的应用等。并介绍了直接转矩控制技术应用用于无刷直流电动机、永磁同步电动机和开关磁阻电动机的原理及仿真实现。

本书适合于从事电力电子与电力传动、电机及其控制专业的科研人员阅读，也可以作为相关专业本科院校教师、研究生和本科生的教学参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

直接转矩控制理论及应用/韩如成, 潘峰, 智泽英著. —北京: 电子工业出版社, 2012.9
ISBN 978-7-121-18178-8

I. ①直… II. ①韩… ②潘… ③智… III. ①直接转矩控制—研究 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 207766 号

责任编辑: 赵 娜 特约编辑: 王 纲

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 18.5 字数: 415 千字

印 次: 2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

总序

2012年，太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际，我校的专家学者推出了这套学术丛书，以此献礼，共襄盛举。

六十年前，伴随着新中国的成立，伟业初创，百废待兴，以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起，太原科技大学应运而生。六十年来，几代科大人始终心系民族振兴大业，胸怀制造强国梦想，潜心教书育人，勇担科技难题，积极服务社会，为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场，涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一，今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主，“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明，多学科协调发展的教学研究型大学，成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围，众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘，硕果累累。这套丛书的编撰出版，定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我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 郭勇义

2012年6月

前言

时值太原科技大学六十华诞之际，学校举行各类学术活动，既为活跃学术气氛，也为校庆增添色彩。作为学校教师，写作本书之意，除与上述契合外，还为总结 2004 年以来，作者在直接转矩控制技术方面的研究，以及介绍该技术近年来的发展现状，更为今后学生学习借鉴提供便利。

作者曾于 2004 年写作编排了一本该方面的拙作，名为《直接转矩控制及 DSP 在其中的应用》，并由兵器工业出版社出版。该书所介绍的直接转矩控制技术，在异步电动机范畴内，重点在异步电动机直接转矩控制的原理、DSP 介绍及将其应用于异步电动机直接转矩控制中的一些问题研究，对直接转矩控制本身的一些特殊问题，诸如低速转矩脉动、启制动以及现代控制理论应用于直接转矩等问题，虽有涉及，但较肤浅。此次编撰，删减了直接转矩控制原理的大篇幅介绍，摒弃了 DSP 的结构原理等内容，加深了前书所涉及直接转矩控制特殊问题的研究。同时，对直接转矩控制在无刷直流电动机、永磁同步电动机、开关磁阻电动机中的应用也做了介绍，扩大了直接转矩控制技术的应用范围。书中所介绍的仿真实验及结果，多数为作者指导硕士研究生所做。该书的欠缺之处，一是实验结果较少，二是虽对直接转矩控制技术的工程应用做了介绍，但内容较少，范围偏窄，这也是今后研究工作之努力方向。

全书共分 6 章，内容安排如下：第 1 章主要介绍了交流电动机控制技术的发展现状，直接转矩控制技术的特点及研究现状，

以及直接转矩控制技术的部分工程应用。第 2 章重点介绍了异步电动机的直接转矩控制原理及仿真实现,采用 DSP 的直接转矩控制的实现。第 3 章介绍了异步电动机直接转矩控制的一些特殊问题,以及有效克服这些问题,改善系统性能的方法,包括磁链观测的改进、死区效应的补偿、低速转矩脉动的克服、启制动性能的改善和无速度传感器技术的应用。第 4~6 章,为直接转矩控制技术适用电动机范围的拓展,分别为无刷直流电动机、永磁同步电动机和开关磁阻电动机,其中第 5 章和第 6 章仿真内容参考了商蓓、袁安有、李自强等人的论文,虽然内容不尽周详,但也可作为进一步研究之参考。

本书由韩如成统稿,第 1 章由韩如成编写,第 2 章和第 4 章由潘峰编写,第 3 章、第 5 章和第 6 章由智泽英编写,书中的文字录入和图形处理主要由研究生郑勇、衣志强等完成。

本书所用参考文献及其贡献已在书中标注,在此向原作者表示感谢,同时也感谢电子工业出版社赵娜编辑和相关同志的帮助及对出版该书所付出的劳动。

由于作者水平所限,加之对直接转矩控制技术的研究尚浅薄,书中难免存在不足之处,望各位学者专家给予指正。

作者

2012 年 7 月

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子元器件的发展	1
1.2 交流调速控制技术的发展	2
1.3 直接转矩控制的特点及研究现状	7
1.3.1 直接转矩控制系统的主要特点	7
1.3.2 直接转矩控制的研究现状	8
1.3.3 直接转矩控制技术展望	11
1.4 直接转矩控制技术的应用	12
1.4.1 直接转矩控制在挖掘机行业中的应用	12
1.4.2 步进电动机直接转矩控制在芯片显微自动拍照系统中的应用	16
本章参考文献	18
第 2 章 异步电动机的直接转矩控制	21
2.1 电压空间矢量	21
2.1.1 逆变器的开关状态	21
2.1.2 电压空间矢量的定义	24
2.1.3 电压空间矢量对定子磁链及电磁转矩的影响	25
2.2 直接转矩控制异步电动机的数学模型	27
2.3 传统直接转矩控制系统的控制方式	29
2.3.1 转矩直接自控制 (DSC) 系统	29
2.3.2 近似圆形磁链 DTC 系统	31
2.4 异步电动机直接转矩控制系统的建模与仿真	35
2.4.1 系统仿真环境	36
2.4.2 DTC 中的通用单元	36

2.4.3	转矩直接自控制系统仿真	39
2.4.4	近似圆形磁链控制系统仿真	53
2.5	DSP 在异步电动机直接转矩控制中的应用	68
2.5.1	控制系统的组成	68
2.5.2	控制系统的软件设计	78
2.5.3	控制系统的实现	91
	本章参考文献	94
第 3 章	改善直接转矩控制系统性能的措施	97
3.1	定子磁链的观测	97
3.1.1	异步电动机的全阶磁链观测器	98
3.1.2	磁链观测器的求解方法	104
3.2	死区效应分析及其补偿方法	108
3.2.1	死区问题概述	108
3.2.2	死区效应分析	110
3.2.3	死区效应软件补偿方法一	112
3.2.4	死区效应软件补偿方法二	113
3.3	低速转矩脉动分析及其改善措施	115
3.3.1	直接转矩控制系统的低速转矩脉动问题	115
3.3.2	直接转矩控制系统的转矩变化规律	117
3.3.3	定子磁链和转矩的双滞环控制	120
3.3.4	转矩脉动最小化控制器	122
3.3.5	无死区逆变器及三点式磁链调节器	126
3.3.6	转矩控制器	128
3.4	直接转矩控制的启制动方法	133
3.4.1	-120° 电压空间矢量对电动机运行的作用	133
3.4.2	-120° 电压空间矢量在启动过程中的应用	133
3.4.3	异步电动机直接转矩控制启动方法	134
3.4.4	异步电动机直接转矩控制的制动方法	136
3.5	无速度传感器技术在直接转矩控制中的应用	137
3.5.1	基于电动机模型的速度估计	138

3.5.2	基于李雅普诺夫理论的速度自适应观测器	140
3.5.3	与磁链观测器相结合的速度估计器	148
3.5.4	基于神经网络的速度辨识原理	149
3.5.5	无速度传感器直接转矩控制系统的仿真实现	153
3.6	统一磁链误差矢量控制器	161
3.6.1	异步电动机模型的简化	162
3.6.2	运行模式及统一磁链误差矢量	164
3.6.3	统一磁链误差矢量控制方式	167
3.6.4	系统仿真结构图	170
3.6.5	仿真结果及分析	170
	本章参考文献	174
第 4 章	无刷直流电动机的直接转矩控制	178
4.1	无刷直流电动机直接转矩控制原理	178
4.1.1	无刷直流电动机的工作原理	178
4.1.2	无刷直流电动机的数学模型	185
4.1.3	无刷直流电动机的直接转矩控制实现	188
4.2	改进的无刷直流电动机直接转矩控制	199
4.2.1	改进型无刷直流电动机直接转矩控制的空间电压矢量选择方法	199
4.2.2	无刷直流电动机位置信号和单位反电势的关系	200
4.3	无刷直流电动机直接转矩控制系统的建模与仿真	202
4.3.1	无刷直流电动机本体的建模仿真	202
4.3.2	无刷直流电动机直接转矩控制的仿真实现	205
4.3.3	无刷直流电动机直接转矩控制的仿真结果及分析	208
4.4	无刷直流电动机直接转矩控制系统的设计	220
4.4.1	系统硬件概述	220
4.4.2	系统软件实现	225
	本章参考文献	229
第 5 章	永磁同步电动机直接转矩控制原理	232
5.1	永磁同步电动机概述	232
5.1.1	研究背景及意义	232

5.1.2	永磁同步电动机的结构及特点	233
5.2	永磁同步电动机直接转矩控制原理	235
5.2.1	永磁同步电动机的数学模型	235
5.2.2	永磁同步电动机的直接转矩控制实现	239
5.3	最大转矩电流比控制的实现	243
5.4	PMSM DTC 滑模变结构控制	248
5.5	永磁同步电动机直接转矩控制系统的建模与仿真	253
5.5.1	永磁同步电动机直接转矩控制系统的仿真	253
5.5.2	永磁同步电动机滑模变结构直接转矩控制系统的仿真	256
	本章参考文献	259
第 6 章	开关磁阻电动机的直接转矩控制	261
6.1	开关磁阻电动机的结构与基本原理	261
6.1.1	开关磁阻电动机简介	261
6.1.2	开关磁阻电动机的基本工作原理	263
6.1.3	开关磁阻电动机的基本方程式	266
6.1.4	开关磁阻电动机在不同转速下的运行特性	267
6.1.5	开关磁阻电动机的基本控制方法	270
6.2	开关磁阻电动机直接转矩控制的策略	272
6.2.1	空间电压矢量的产生	272
6.2.2	开关磁阻电动机直接转矩控制的优化	276
6.2.3	SR 电动机直接转矩控制系统仿真	277
	本章参考文献	285



绪 论

长期以来,在高性能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存在换向问题,导致其应用范围受到了限制^[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。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 20 世纪 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了^[3]。

1.1 电力电子元器件的发展

交流调速的重大变革是以电力电子元器件的发展为先导的^[4]。电力半导体元器件是以美国 1956 年生产硅整流管(SR)、1958 年生产晶闸管(SCR)开始逐渐发展起来的。经过了 40 多年的发展,在元器件制造技术上不断提

高。已经经历了以晶闸管为代表的分立元器件，以可关断晶闸管（GTO）、巨型晶体管（GTR）、功率 MOSFET、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）为代表的功率集成元器件（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）三个发展时期。从晶闸管靠换相电流过零关断的半控元器件发展到 PID、PIC 通过门极或栅极控制脉冲可实现元器件导通与关断的全控元器件。在元器件的控制模式上，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，而且大大提高了元器件导通与关断的转换速度，从而使元器件的工作频率从工频、中频到高频不断提高。GTR 目前其额定值已达 1800 V/800 A/2 kHz、1400 V/600 A/5 kHz、600 V/3 A/100 kHz。IGBT 的频率一般不会超过 100 kHz，但高频性能比 GTR 好。

在元器件结构上，从分立元器件发展到由分立元器件组合成功率变换电路的初级模块，继而发展到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，功率元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）已经得到了广泛的应用。可以说，这些新型电力电子元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动机的控制策略有：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。此外，无速度传感器的交流传动控制技术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

要使电动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动机等效电路确定的 $U/f = \text{const}$ 进行变频调速。其优点

是控制线路结构简单、成本较低，但其缺点是只能调节电动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、电动机转矩利用率不高，转速开环动静态性能不佳，仅适用于对调速性能要求不高的节能控制等场合^[5]。

转差频率控制采用了转速闭环结构，它将检测到的转速信号与按照电动机稳态数学模型得出的转差频率给定信号相加，其输出作为逆变器的输出频率。它的加减速过程比转速开环的恒压频比控制系统更为平滑，系统也更容易稳定，但是，它是基于电动机稳态数学模型推出的一种控制方案，动态过程中的参数无法控制。所以其静动态性能难以达到直流双闭环调速系统的水平^[6]。

2. 矢量控制

20世纪70年代出现的矢量控制技术是交流传动控制理论上一个质的飞跃。其实质是根据交流电动机的动态数学模型、利用坐标变换的手段，将交流电动机的定子电流分解成磁场分量电流和转矩分量电流，并分别加以控制，即模仿自然解耦的直流电动机的控制方式，以获得类似于直流调速系统的动态性能。在矢量控制方式中，磁场电流与和转矩电流可以根据可测的电动机定子电压、电流的实际值计算出来。磁场电流和转矩电流再与相应的设定值相比较并根据需要进行必要的校正，高性能速度调节器的输出信号可以作为转矩电流的设定值。其该方法的优点是：实现了电动机磁通和转矩的解耦控制，使交流传动系统的动态性能得到了显著的改善。缺点是矢量控制系统对电动机的参数依赖性很大，即使精确地获得电动机参数和转子磁链，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]。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.Dепенbrock 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，它无须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动机的数学模型, 强调对电动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, 直接控制电动机的磁链和转矩, 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, 电动机损耗、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元器件的开关频率, 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都还不够成熟, 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。应用于电动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烦琐,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、因饱和和作用产生的电感变化等,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一个共同的问题,就是控制算法依赖于电动机的数学模型,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动机传动系统,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 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动机的转差增益,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)用于异步电动机的位置控制,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,将神经网络用于电动机参数的辨识、跟踪,并对磁通及转速控制器进行自适应调整^[17,18,19];
- (3) 异步电动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做自适应速度控制器^[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 等控制专用电子元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。在交流电动机控制中,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动机的

实际转速值^[24]。1975年, A. Abbord 等人根据异步电动机数学模型及控制原理, 推导出电动机的滑差表达式, 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。

从20世纪70年代至今, 国内外学者提出了诸多方法对转速进行估算。例如, 采用扩展卡尔曼滤波器估算电动机转速, 建立以定子电流和转子磁链为状态变量, 以转速为参数的电动机状态方程, 将状态方程线性化, 根据卡尔曼滤波器的递推公式估算转矩。另外还有模型参考自适应法, 它的主要思想是将不含未知参数的方程作为参考模型, 将含有待估计参数的方程作为可调模型, 并且两模型具有相同物理意义的输出量, 利用两模型输出量的误差构造合适的自适应律来实时调节可调模型的参数, 以达到控制对象的输出跟踪参数模型的目的^[25]。由于转速可以看成是定子电压和电流的函数, 而人工神经网络具有逼近任意非线性函数的能力, 并且神经网络具有自学习和自适应能力以及较强的抗干扰性, 所以也可以采用人工神经网络进行转速的估计。利用神经网络进行辨识, 一般都是预先规定网络的结构, 通过学习系统的输入、输出, 使要求的误差函数达到最小, 进而归纳出隐含的系统输入和输出的关系。目前, 基于神经网络的转速估计方法尚处于起步阶段, 其理论研究和应用尚不成熟, 各种方法仍处于不断探索与完善之中。

尽管目前已经有很多方法可以实现速度辨识, 但仍有许多问题亟待解决, 如控制精度、复杂性和可靠性之间的矛盾, 低速性能的提高等。今后, 无速度传感器控制技术的研究方向应为: 在提高转速估计精度的同时改进控制性能, 增强系统抗参数变化、抗噪声干扰的鲁棒性, 降低系统的复杂性, 追求简单性和可靠性。

1.3 直接转矩控制的特点及研究现状

► 1.3.1 直接转矩控制系统的主要特点

直接转矩控制的出现主要在于克服矢量控制所存在的缺点, 因此, 与矢量控制相比, 直接转矩控制具有如下几个特点。