


十五 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电力拖动与 运动控制系统

---

李宁 白晶 陈桂 编著

 高等教育出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电力拖动与运动控制系统

Dianli Tuodong yu Yundong Kongzhi Xitong

李 宁 白 晶 陈 桂 编著  
王洪希 刘德召 主审



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书定位明确、突出应用、内容充实新颖，与 MATLAB 紧密结合，增加了各种调速器在工程实际中的应用实例。

本书主要内容包括：直流电动机速度控制系统，交流调压调速系统，基于异步电动机稳态数学模型的变压变频调速系统，高性能的异步电动机变频调速系统，三相永磁同步伺服电动机控制系统，三相永磁无刷直流电动机控制系统，位置控制系统，永磁同步电动机控制系统的 DSP 解决方案，伺服系统动力学特性在机床加工工艺中的应用。

本书将基础理论与应用实例相结合，着重加强工程应用能力的培养，适合作为高等院校自动化、电气工程及其自动化专业本科生教材，也可供有关技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力拖动与运动控制系统 / 李宁, 白晶, 陈桂编著. 北京: 高等教育出版社, 2009.12  
ISBN 978-7-04-028314-3

I. 电… II. ①李…②白…③陈… III. ①电力传动-控制系统-高等学校-教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 221375 号

策划编辑 李 慧 责任编辑 许海平 封面设计 赵 阳 责任绘图 尹 莉  
版式设计 范晓红 责任校对 姜国萍 责任印制 陈伟光

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landraco.com
印 刷	北京奥鑫印刷厂		http://www.landraco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2009 年 12 月第 1 版
印 张	14.25	印 次	2009 年 12 月第 1 次印刷
字 数	300 000	定 价	19.50 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28314-00

# 总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要，满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求，探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系，全国高等学校教学研究中心（以下简称“教研中心”）在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上，组织全国100余所培养应用型人才为主的高等院校，进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索，在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果，并在高等教育出版社的支持和配合下，推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材，冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月，教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项，为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台，整体设计立项研究计划，明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式，分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现，组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组（亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组）。会后，教研中心组织了首批课题立项申报，有63所高校申报了近450项课题。2003年1月，在黑龙江工程学院进行了项目评审，经过课题领导小组严格的把关，确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月，各子课题相继召开了工作会议，交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题，确定了项目分工，并全面开始研究工作。计划先集中力量，用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是，“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上，紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要，努力实践，大胆创新，采取边研究、边探索、边实践的方式，推进高校应用型人才培养工作，突出重点目标，并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础，作为体现教学内容和教学方法的知识载体，在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才培养体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面

临的十分重要的任务。因此，在课题研究过程中，各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果，并和教学实际结合起来，认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革，组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师，编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案，以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信，随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入，特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施，具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

# 前 言

电气传动控制技术是高等工科大学自动化类专业的主要专业方向之一。长期以来，“电力拖动自动控制系统”一直是自动化类专业的主要专业课。近年来，随着技术的进步，课程的内容在相应地变化，课程名称也发生了变化，部分学校的专业方向侧重于位置随动控制，因而课程名称倾向于“运动控制系统”。本书作为应用型本科专业的“十一五”国家级规划教材，对2004年高教版的《运动控制系统》一书进行了较大幅度的修订，包括了各种交/直流调速控制、位置控制、DSP在电机控制系统中的应用、伺服系统特性对数控加工的影响等内容，书名定为《电力拖动与运动控制系统》。

现代电机运动控制技术是电机技术、电力电子技术、微电子技术、计算机控制技术、自动控制理论等多种学科的有机结合和应用。电机运动控制技术的内容非常丰富，随着技术的发展，新的内容还在不断地补充进来，如何在有限的教学时间里把如此丰富的内容组织起来，易于学生理解，并真正做到“学以致用”，是一个值得认真研究的问题，本书是我们在这方面教改研究工作的一个总结。

本书共十章，第1章是绪论，第2章介绍直流电动机速度控制系统；第3章介绍交流调压调速系统；第4章介绍异步电动机变压变频调速系统；第5章介绍异步电动机矢量控制和直接转矩控制变频调速系统；第6章介绍三相永磁同步伺服电动机控制系统；第7章介绍三相永磁无刷直流电动机控制系统；第8章介绍位置控制系统；第9章介绍DSP在电动机控制系统中的应用；第10章介绍伺服系统特性对数控加工的影响。

本书的内容充实、新颖，理论联系实际，具有前沿性和先进性。

由于篇幅所限，不能将与本书内容相关的一些资料，如电子文档、程序、电路图、仿真模型、数据、表格等都收入书中，这些资料将放入高等教育出版社的网站，读者如需要，可自行参考。

本书第1、6、7、8、9、10章由李宁完成，第3、4、5章由白晶完成，第2章由陈桂完成，全书由李宁统稿。

本书可作为高等工科院校自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等专业的教材。也可供从事电机、电力拖动自动控制及机电一体化产品开发、设计、研究的工程技术人员参考。

由于编者学识有限，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者指正。

编者

2009年11月

# 目 录

第 1 章 绪论	1	系统的稳态分析	26
1.1 微处理器引起的巨大变革	3	2.5.2 单闭环直流电动机速度控制系统的动态分析和设计	31
1.2 研究方向	3	2.5.3 PI 调节器设计	39
1.3 本书主要内容	5	2.6 转速、电流双闭环直流电动机控制系统的组成和结构	42
第 2 章 直流电动机速度控制系统	8	2.6.1 单闭环调速系统存在的问题	42
2.1 直流电动机控制基础	8	2.6.2 转速、电流双闭环调速系统组成	43
2.1.1 直流电动机的工作原理	8	2.7 转速、电流双闭环直流电动机控制系统的性能分析	43
2.1.2 感应电动势和电磁转矩	9	2.7.1 稳态结构图和静特性	43
2.1.3 他励直流电动机的机械特性	9	2.7.2 动态性能	45
2.1.4 调速原理与调速特性	11	2.7.3 调节器的设计	48
2.1.5 速度控制的要求和调速指标	12	2.8 微机控制的双闭环直流电动机调速系统	49
2.2 直流电动机的 PWM 调速原理	15	2.8.1 微机控制双闭环直流电动机调速系统的硬件结构	49
2.2.1 脉宽调制的基本原理	16	2.8.2 微机控制双闭环直流电动机调速系统的软件框图	51
2.2.2 不可逆 PWM 变换器	16	2.9 用 MATLAB 对直流电动机速度控制系统进行仿真分析	52
2.2.3 可逆 PWM 变换器	18	2.9.1 单闭环速度控制系统的仿真分析	52
2.3 H 形 PWM 变换器控制方法	21	2.9.2 双闭环速度控制系统的仿真分析	54
2.3.1 三角波脉宽调制器	21	第 3 章 交流调压调速系统	55
2.3.2 单极性倍频式脉宽调制器	22	3.1 调压调速工作原理及机械特性	55
2.3.3 微机控制的脉宽调制器	23	3.1.1 调压调速工作原理	55
2.4 单闭环直流电动机速度控制系统的组成和结构	23		
2.4.1 开环调速系统的性能和存在的问题	23		
2.4.2 单闭环速度控制系统组成	24		
2.5 单闭环直流电动机速度控制系统的性能分析	26		
2.5.1 单闭环直流电动机速度控制			

3.1.2 调压调速机械特性 .....	56	控制的异步电动机变压变频调速系统 .....	99
3.2 转速负反馈闭环的交流调压调速系统 .....	57	4.4.3 转速闭环转差频率控制的变压变频调速系统 .....	101
3.2.1 转速负反馈闭环的交流调压调速系统组成 .....	57	<b>第5章 高性能的异步电动机变频调速系统 .....</b>	<b>106</b>
3.2.2 系统的静特性 .....	58	5.1 异步电动机矢量控制变频调速系统 .....	106
3.3 晶闸管三相交流调压电路 .....	59	5.1.1 异步电动机的数学模型 .....	106
3.3.1 三相全波 Y 联结调压电路电阻性负载的工作特点 .....	59	5.1.2 矢量控制的基本概念 .....	112
3.3.2 电感性负载电路的工作特点 .....	62	5.1.3 矢量控制的基本思想 .....	115
3.4 转差功率损耗分析 .....	64	5.1.4 坐标变换及变换矩阵 .....	117
3.5 变压控制在软起动器中的应用 .....	65	5.1.5 三相异步电动机在两相坐标系上的数学模型 .....	120
<b>第4章 基于异步电动机稳态数学模型的变压变频调速系统 .....</b>	<b>67</b>	5.1.6 转子磁场定向的异步电动机矢量控制系统 .....	125
4.1 变频调速概述 .....	67	5.2 异步电动机直接转矩控制变频调速系统 .....	131
4.1.1 基频以下调速 .....	67	5.2.1 逆变器开关元件的八种状态和逆变器电压状态 .....	131
4.1.2 基频以上调速 .....	68	5.2.2 电压空间矢量的概念 .....	133
4.1.3 异步电动机电压-频率协调控制 .....	68	5.2.3 电压空间矢量与磁链空间矢量的关系 .....	135
4.2 电力电子变频调速装置及其电源特性 .....	68	5.2.4 电压空间矢量对电动机转矩的影响 .....	136
4.2.1 电压源型变频器 .....	69	5.2.5 电压空间矢量的正确选择 .....	136
4.2.2 电流源型变频器 .....	71	5.2.6 异步电动机直接转矩控制系统的基本组成及工作原理 .....	138
4.2.3 电压源型变频器和电流源型变频器的比较 .....	72	5.2.7 直接转矩控制系统的特点 .....	141
4.3 脉宽调制 (PWM) 控制技术 .....	73	<b>第6章 三相永磁同步伺服电动机控制系统 .....</b>	<b>142</b>
4.3.1 电压正弦 PWM 技术 .....	73	6.1 三相永磁同步伺服电动机及其数学模型 .....	142
4.3.2 PWM 模式的优化 .....	82	6.2 三相永磁同步伺服电动机的控制策略 .....	143
4.3.3 电流正弦 PWM 技术 .....	86		
4.3.4 电压空间矢量 PWM 技术 (SVPWM) .....	88		
4.4 基于异步电动机稳态数学模型的变压变频调速系统 .....	96		
4.4.1 基频以下电压-频率协调控制时的机械特性 .....	96		
4.4.2 电压源型转速开环恒压频比			



6.2.1 控制 $i_d=0$ 以实现最大转矩输出 .....	144	控制 .....	174
6.2.2 控制 $i_d<0$ 以达到弱磁升速的目的 .....	144	7.4.1 开环型无刷直流电动机驱动器 .....	174
6.3 三相永磁同步伺服电动机控制系统的结构 .....	144	7.4.2 速度闭环的无刷直流电动机驱动器 .....	177
6.4 速度反馈信号的检测和处理 .....	149	7.4.3 速度电流双闭环的无刷直流电动机驱动器 .....	179
6.4.1 M 法测速 .....	149	7.5 无位置传感器的无刷直流电动机的驱动控制 .....	182
6.4.2 T 法测速 .....	150	7.5.1 无位置传感器的无刷直流电动机转子位置估计方法 .....	183
6.4.3 M/T 法测速 .....	150	7.5.2 无位置传感器的无刷直流电动机控制系统的构成 .....	183
6.4.4 锁相测速方法 .....	150	7.6 无刷直流电动机驱动控制的专用芯片介绍 .....	184
6.5 伺服电动机转子初始位置的检测 .....	153	<b>第 8 章 位置控制系统</b> .....	187
6.6 交流伺服系统的电子齿轮功能 .....	155	8.1 位置控制系统的基本结构 .....	187
6.7 三相永磁同步电动机控制系统的仿真研究 .....	158	8.2 位置控制的基本性能指标 .....	188
6.7.1 三相永磁同步电动机控制系统仿真模型 .....	158	8.2.1 稳态位置跟随误差 .....	189
6.7.2 三相永磁同步电动机控制系统的仿真研究 .....	160	8.2.2 定位精度与速度控制范围 .....	189
<b>第 7 章 三相永磁无刷直流电动机控制系统</b> .....	162	8.2.3 最大快移速度 .....	190
7.1 三相永磁无刷直流电动机的组成结构和工作原理 .....	162	8.2.4 伺服刚度 .....	190
7.1.1 三相永磁无刷直流电动机的结构特点 .....	162	8.3 位置伺服系统的数学模型和控制方法 .....	190
7.1.2 三相永磁无刷直流电动机的转子位置传感器 .....	164	8.3.1 位置伺服系统的数学模型 .....	190
7.1.3 三相直流无刷电动机的换向原理 .....	166	8.3.2 位置指令信号的形式 .....	191
7.2 三相永磁无刷直流电动机的基本公式和数学模型 .....	170	8.3.3 位置跟随误差和伺服滞后时间 .....	192
7.2.1 电枢绕组的反电动势 .....	170	8.3.4 位置调节器 .....	193
7.2.2 电磁转矩 .....	171	8.3.5 变比例系数的位置控制 .....	194
7.3 三相永磁无刷直流电动机转矩的波动 .....	172	8.3.6 前馈补偿和复合控制 .....	194
7.4 三相永磁无刷直流电动机的驱动		8.4 位置伺服系统的软硬件设计 .....	195
		8.4.1 电脉冲编码器及其信号处理电路 .....	195
		8.4.2 位置反馈接口电路 .....	198
		8.4.3 位置指令信号的输入 .....	198
		8.4.4 微处理器位置控制流程 .....	199

<b>第 9 章 永磁同步电动机控制系统的 DSP 解决方案</b> .....	201	<b>第 10 章 伺服系统动力学特性在机床 加工工艺中的应用</b> .....	208
9.1 永磁同步电动机 DSP 实时控制 软件的工作时序 .....	201	10.1 数控加工中线段速度衔接 过程分析 .....	208
9.2 永磁同步电动机 DSP 实时控制 软件的基本模块 .....	202	10.2 线段衔接速度的约束条件 .....	209
9.2.1 电流检测模块 .....	202	10.2.1 伺服电动机的最大输出转矩 限制与小线段衔接速度 的关系 .....	209
9.2.2 光电编码器脉冲计数模块 .....	202	10.2.2 速度环带宽与小线段衔接 速度的关系 .....	210
9.2.3 3/2 变换模块 .....	203	10.3 伺服系统动力学约束条件的 应用 .....	212
9.2.4 旋转变换模块 .....	203	<b>参考文献</b> .....	213
9.2.5 旋转逆变换模块 .....	204		
9.2.6 旋转角度正、余弦函数表 .....	204		
9.2.7 电流环的 PI 控制模块 .....	204		
9.2.8 速度环的 PI 控制模块 .....	205		
9.2.9 空间电压矢量产生模块 .....	205		

# 第 1 章 绪 论

一百多年前，在第二次工业革命刚刚开始的时候，人类发明了电动机，一百多年来，电动机作为重要的动力机械，对社会的发展和文明的进步起到了巨大的推动作用。在新科技革命时代已经到来的今天，简单回顾电动机控制技术的发展历程，有助于加深对这项技术内涵的理解。

1821 年英国科学家法拉第发现可以把电力转变为旋转运动。在这之后，德国人雅可比于 1834 年前后制成了一种简单的装置，这个装置用 320 个电池供电，能带动轮轴转动。雅可比把这种装置安装在小艇上，于 1838 年进行了首次航行，时速 2.2 km。在此后几年中，又有其他人制成了电动装置，这些电动装置也和雅可比的装置一样，采用电池作电源。这些采用电池作电源的电动装置就是早期的直流电动机。但是由于电池成本太高，容量有限，使得早期的直流电动机离实用还有较大的距离。

1870 年，工程师格拉姆发明了直流发电机，在设计上，直流发电机和电动机很相似。后来，格拉姆发现向直流发电机输入电流，其转子会像电动机一样旋转，这就成了格拉姆电动机，这种格拉姆电动机被大量制造出来，效率也不断提高，直流电动机从此走向实用。应当指出，以直流发电机给直流电动机供电的方式，在以后的很长的时间里成了直流电动机的主要驱动方式，这种装置称为 F-D 机组。后来的人们通过控制直流发电机的励磁电流来控制其输出电压，从而解决了直流电动机调速的问题。直到 20 世纪七八十年代，在有些设备上还在使用这种 F-D 机组。

1888 年美国发明家特斯拉发明了感应电动机，也就是今天所说的异步电动机，这种电动机结构简单，使用交流电，无需整流，无换向火花，很快获得了广泛的应用。

1902 年瑞典工程师丹尼尔森根据旋转磁场的概念，提出同步电机构想。同步电动机工作原理同感应电动机虽有相似之处，但在本质上是不同的。无论同步电动机还是感应电动机，都是由定子产生旋转磁场，与转子磁场作用，从而产生电磁转矩。但是感应电动机转子的磁场是通过电磁感应而产生的，而同步电动机转子的磁场需要励磁产生。早期的同步电动机的转子都需要外加励磁电流，后来人们将永磁材料用于同步电动机的转子，从而出现了永磁同步电动机（PMSM）。今天在工业自动化领域和人们的社会生活中起到越来越重要作用的交流伺服电动机和无刷直流电动机，其本质都属于永磁同步电动机。前者的磁场沿空气隙呈正弦波分布，而后者的磁场呈梯形波分布。

真正意义上的电机传动控制系统是在 20 世纪 30 年代出现的，开始是闸流管、引燃管，而后是磁放大器、磁饱和电抗器作为静止变流器，形成了第一代电机传动控制系统。在第二次世界大战中，自动控制理论得到了发展，这有力地促进了电机传动控制系统理论

体系的建立。人们开始在电动机驱动系统中使用闭环反馈控制技术,以获得更高的控制性能。

但是,在很长的一段时间里,在较高控制性能的传动系统中,直流电动机一直占据主导地位,主要原因在于其控制简单、调速平滑、性能良好。然而,直流电动机结构上存在的机械换向器和电刷,使它具有一些难以克服的固有缺点,那就是维护困难,寿命短,单机容量和最高电压都受到一定限制。而交流电动机,主要是异步电动机,正好与直流电动机相反,它没有电刷,结构简单、维护容易,但是在当时的技术条件下,很难实现高性能的调速控制。在当时,交流电动机虽然在数量上占绝对的多数,但一般是电源直接供电,直接拖动负载,没有任何控制。

20世纪70年代初席卷全球的石油危机促进了交流调速技术的发展,因为当时人们发现占电动机用电量一半以上的风机、泵类负载的拖动电动机工作在恒速状态,是靠阀门和挡板来调节流量或压力的,因而造成了大量的电能浪费。通过改变电动机转速的方法调节风量或流量,一般可节电20%~30%,于是在工业化国家,变频器出现了。可以说,交流传动控制的真正的发展和应用是从使用变频调速技术来改造风机、泵类负载开始的。

1957年,美国通用电气公司的A. R. 约克制成了世界上第一只晶闸管(SCR),这标志着电力电子时代的开始。从技术角度来说,正是晶闸管的应用才使得交流电动机变频调速成为可能。继晶闸管(SCR)出现以后,又陆续推出了其他种类的器件,诸如控制极可关断晶闸管(GTO),双极型大功率晶体管(GTR),功率MOS场效应晶体管(MOS-FET),绝缘栅极双极型晶体管(IGBT),静态感应晶体管(SIT),静态感应晶闸管(SITH),MOS控制的晶闸管(MCT)等。在这个不断的发展过程中,器件的电压、电流定额以及其他电气特性均得到很大的改善。现代电机传动控制技术的发展是以电力电子器件的发展和应用为基础的。

1964年,A. Schonung和H. Stemmler提出把通信系统中的调制技术应用到电机控制当中,于是产生了脉冲宽度调制(PWM)技术,这是电机传动控制技术发展史上的又一座里程碑。到目前,PWM技术已经发展演变出了许多不同的分支。当今绝大部分电机传动控制系统都采用了PWM技术。

20世纪70年代初期,德国西门子公司F. Blaschke等人提出了“感应电机定子电压的坐标变换原理”,这标志着矢量控制技术的诞生。如今在高性能的电机控制系统中,不仅是感应电机,也包括同步电机和永磁同步电机,都普遍采用了矢量控制技术。但是矢量控制系统的性能较多地依赖于控制对象参数的准确性。

1985年,鲁尔大学的Depenbrock教授首次提出了“直接转矩控制”的理论,接着在1987年又推广到弱磁调速范围。直接转矩控制在很大程度上解决了矢量控制中计算复杂、易受电动机参数变化影响的问题。从一开始,直接转矩控制技术就以自己新颖的控制思想,简单的控制系统结构,优良的控制性能得到了普遍的注意和迅速的发展,目前已经成功地应用到兆瓦级的电力机车的牵引中。

## 1.1 微处理器引起的巨大变革

微处理器使电机传动控制技术发生巨大变革,使用微处理器实现数字化控制不仅可以简化控制硬件,更重要的是,由于微处理器的应用,使得复杂的智能控制算法在电机控制系统中得以成功实现,这不仅对电机控制系统的发展产生了深远的影响,反过来也促进了智能控制理论和应用技术的研究。如今包括模糊控制、人工神经网络、遗传速算法、免疫算法等,都已经成功地应用于电机控制系统中,应用的范围还在不断地扩大。如今应用于电机控制系统的微处理器的类型有多种,主要有:

### 1. 单片机

这是应用于电机传动控制系统的最基本的微处理器。就其组成而言,可以说一片单片机芯片就是一台计算机,大大缩小了控制器的体积,降低了成本,增强了功能。然而单片机对于大量的数据处理和浮点运算的能力有限,一般只能运用在比较简单的控制场合。

### 2. 数字信号处理器

为了提高运算速度,在20世纪80年代出现了数字信号处理器(DSP),其中采取了一系列措施,包括集成硬件乘法器、利用锁相技术提高时钟频率、支持浮点运算等,以提高运算速度。近年来,DSP器件已经把PWM发生器、A/D转换器等都集成于一个芯片上,成为一种高速的单片机,特别适合于电机传动控制系统的嵌入式控制。

### 3. 现场可编程门阵列

现场可编程门阵列(FPGA)是一种半制成的集成电路,用户可对FPGA内部的逻辑模块和I/O模块重新配置,以实现用户的逻辑,因而也被用于对CPU的模拟。用户可使用硬件描述语言(如VHDL、verilog等)对FPGA进行编成、配置和重构。采用FPGA最大的好处是能够实现真正个性化的控制器,易于实现控制算法的并行运算,提高运算速度,即所谓的“软件硬化”。

### 4. 可编程片上系统

可编程片上系统(Programmable System-on-Chip, PSoC)通常集成了一个微控制器内核以及可配置和选择的多达近百种的外设单元。这些外设单元包括数字单元和模拟单元,如放大器、ADC、DAC、滤波器、比较器等模拟功能以及定时器、计数器、PWM、SPI和UART等数字功能都可以在一块芯片中得以实现。采用PSoC不仅使电机控制系统的硬件结构变得十分紧凑,而且可靠性也大为提高。

## 1.2 研究方向

尽管人们在电机传动控制技术上已经取得了巨大的成就,但技术是永无止境的,在人们已经取得的技术成就的平台上,新的研究工作正在进行着,主要包括下面几个方面:

### 1. 采用新型电力电子器件和新型的逆变器电路拓扑结构

电力电子器件的不断进步,为交流电机控制系统的完善提供了物质保证,新的电力电

子器件正向高电压、大功率、高频化、组合化和智能化方向发展。智能功率模块 (IPM) 的广泛应用, 使得新型电机传动控制系统的体积更小, 可靠性更高。

传统电力电子逆变装置有电流型、电压型和交-交型三种。PWM 电压型变频器在中小功率电机控制系统中占主导地位。传统的逆变装置都是二电平输出的, 但经过长期研究, 现在具有中性点箝位拓扑结构的三电平逆变器, 已经进入了实用阶段。另外, 人们对软开关变频器的研究已经进行了多年, 已经成功地应用于各类电源电路中, 下一步的工作, 就是要把这项技术应用于电机驱动系统中。

## 2. 应用现代控制理论和智能控制方法

在过去, 人们感到现代控制理论的研究已经走到了很远, 但是在应用方面的却远远地落到了后面。但近年来, 现代控制理论在电机控制系统的应用研究方面却出现了蓬勃发展的兴旺景象, 这要归功于两方面原因, 第一是高性能处理器的应用, 使得复杂的运算得以实时完成; 第二是在辨识、参数估值以及控制算法鲁棒性方面的理论和方法的成熟, 使得应用现代控制理论能够取得更好的控制效果。

20 世纪后期发展起来的智能控制技术应用于电机控制系统中, 可以解决在以往看来似乎难以克服的诸多问题。这方面的研究, 已经引起了人们的极大关注, 其中最为集中的是对人工神经网络技术和模糊控制技术的研究, 包括控制和系统模型辨识两个方面。

可以将智能算法直接用于控制器中, 但更为有效的是将模糊神经网络和传统的 PID 控制相结合, 形成基于模糊神经网络的控制参数自整定的 PID 控制器。这类控制器可以应用于电机控制系统中。

异步电动机矢量控制系统已经成功应用多年, 然而由于参数估计的不准确和参数变化的影响造成的转子磁场坐标偏移的问题, 至今并没有真正解决, 参数辨识以及针对参数变化的自适应控制是当今研究的一个热点。其中基于逆动态模型的间接模型参考自适应控制方案引人注目, 其原理是由前向神经网络完成对变化的电机和负载模型的跟踪辨识, 然后, 由经过训练的神经网络辨识器和参考模型组合去完成控制。

从本质上说, 无论是异步电动机还是永磁同步电动机, 都是强耦合的非线性系统, 设计交流电机控制系统, 首先要研究电机数学模型解耦的问题。随着非线性控制理论应用的日益深入, 在这个研究领域也出现了许多新的成果, 新研究的共同特征是将控制和解耦过程结合在一起考虑。

现代控制理论和智能控制方法在电机控制系统中应用的研究, 是一个广阔的研究领域, 新的研究方向和研究成果正如雨后春笋, 不断涌现。

## 3. 高精度高动态品质的伺服控制技术

伺服系统亦属于电机传动控制系统, 但是更加强调系统的位置跟随性能, 要求系统有更高的动、静态性能指标, 一般在进行轮廓控制的场合, 不允许伺服系统有跟随超调, 伺服系统的功率一般都不太大。这些特点决定了伺服系统有完全不同于一般电机控制系统的控制方法策略。“零跟随误差控制”是这个技术领域里近年来一个热点, 这方面研究工作多集中在观测、补偿、滤波、前馈等技术的应用上面, 看似很具体, 但高品质伺服跟踪性能的获得, 正是靠这些技术细节来保证的。

#### 4. 无速度、位置传感器控制技术

在很久以前，人们就有“在高性能的调速控制领域里，只用三条线控制电动机”的设想。这个设想的核心是省掉位置和速度传感器，通过检测电量（电压、电流等）来间接地得到位置和速度的信息。现在这个设想已经成功地变成了现实，但研究工作并没有停滞。目前的研究工作主要集中在“无速度传感器矢量型异步电动机控制”和“无霍尔位置检测器无刷直流电动机控制”。研究的目的是要进一步提高无速度、位置传感器电机控制系统的性能，以扩大这类控制系统的应用领域。新的研究工作的思路仍大体有两条，一是以检测到的电量信号为基本输入信号，通过对控制系统模型重构、自适应观测器等方法，间接得到速度、位置信息；二是通过对检测到的电量信号中含有的转子槽谐波，通过自适应滤波等方法进行识别，从而得到速度、位置信息。

#### 5. 采用总线技术

总线技术在电机控制系统中的应用包括两个方面，一是控制系统的接口已经普遍采用了工业现场总线技术，如 RS485 总线接口、CAN 总线接口、以太网接口等；二是在控制系统内部的硬件结构上也在朝总线化的方向发展，总线化使得控制系统内的各个单元，如控制单元、接口单元、传感器单元等均标准化，均可挂于总线上，使得各种电机控制系统有可能采用相同的硬件结构。

当今是网络时代，信息化的电机传动控制系统正在悄然出现。这种控制系统具有网络接口，其软件有万维网服务器的功能，在远程可以通过普通的浏览器访问，这样就为远程监控和远程故障诊断及维护提供了方便。

#### 6. 在实时操作系统的基础上构筑控制软件

当今的电机控制系统的软件已经相当复杂，包括各种软件模块，如控制模块、检测模块、诊断模块，等等，这些模块有些需要实时运行，有些则不需要。有效地管理和调度这些软件模块的最好的办法，就是采用多任务的实时操作系统。当今的微处理器的硬件资源已经足以支持操作系统的运行。采用多任务实时操作系统作为底层软件支撑的电机控制系统已经出现。

采用实时操作系统的好处不仅在于提高了软件的实时工作性能，而且促进了控制软件的规范化和标准化，提高了软件的可维护性。

### 1.3 本书主要内容

长期以来，“电力拖动自动控制系统”一直是自动化类专业的主要专业课，其主要内容是电机传动控制理论和技术。近年来，随着技术的进步，课程的内容在相应地变化，课程名称也发生了变化，有一部分人倾向于称为“运动控制系统”，但也有人的意见认为“运动控制系统”主要指偏重于位置跟随控制的伺服系统，而“电力拖动控制系统”则主要指通常的交流、直流调速系统。本书采用了后面的一种意见，书名定为《电力拖动与运动控制系统》，包括如下的主要内容：

#### 1. 直流电机传动控制系统

虽然近年来各种交流电动机及其控制系统在很多领域里已经取代了直流电动机及其控制系统,但是也应该看到,交流电动机的控制理论和方法是在直流电动机的控制理论和方法的基础上发展起来的,例如,异步电动机矢量控制理论的实质就是把异步电动机模拟成为直流电动机,用直流电动机的控制思路去控制异步电动机。从理论的上来说,速度闭环反馈控制理论、无静差调速理论、转速电流双闭环控制理论和控制方法是所有电动机传动控制技术重要的理论基础。从教学的角度来看,这是不可或缺的。

## 2. 三相异步电机控制系统

三相异步电动机是使用最广泛的一类电动机,其控制技术也是整个电机传动控制技术中一个最活跃的分支,内容十分广泛。

在过去,调压调速是异步电动机的重要控制方式,即使在变频调速技术早已成熟的今天,大部分的异步电动机软起动器仍然是基于调压原理工作的。

异步电动机的控制方法,包括开环VVVF控制、基于电动机静态数学模型的转差频率闭环控制、基于矢量控制理论的转子磁场定向控制、转差频率矢量控制、直接转矩控制等。从广义上来说,上述各种控制方法都属于变频控制的范畴,脉宽调制(PWM)技术是基础。人们提出的并且已经得到了应用的PWM方案有很多种,主要的有正弦波PWM、三次谐波注入PWM、空间矢量PWM、最优PWM、预测PWM、随机PWM等,其中应用最为广泛和最为成熟的是正弦波PWM(SPWM)和空间矢量PWM(SVPWM)。

矢量控制技术和直接转矩控制技术出现后,都是首先应用于异步电动机控制系统中。对异步电动机工作模型的深入分析,是理解并掌握矢量控制技术和直接转矩控制技术的必要前提。

## 3. 无刷直流电机控制系统

无刷直流电动机属于永磁同步电动机,相对与有刷直流电动机而言,相当于把有刷直流电动机中定子和转子互换了位置,从而可以去除了机械的电刷和换向器,代之以电子换向器。对于三相无刷直流电动机来说,电子换向器的主电路就是三相逆变器,在电动机的定子上装有转子位置传感器,以检测转子的位置,电子换向器在其控制下工作。

由于一般无刷直流电动机的气隙磁场呈现方波形状,所以也把无刷直流电动机称为方波电动机。

当前,无刷直流电动机最主要的应用领域包括各种电动车辆的驱动、自动控制门和窗的驱动、小型一体化水泵的驱动、自动武器的驱动等。

## 4. 永磁正弦波同步电机控制系统

全数字交流伺服系统正在广泛应用于运动控制上,包括数控机床、机器人等各类精密机械的驱动等。从技术角度来看,当今主要的全数字交流伺服系统产品基本上都属于永磁正弦波同步电机控制系统,从本质上说也属于自控式变频系统。这类系统一般采用数字信号处理器(DSP)完成矢量控制运算和PWM波形的相关运算。采用光电脉冲编码器或者旋转变压器作为位置和速度检测元件,能够实现对电动机的高精度的位置、速度和转矩的控制。

## 5. 位置控制系统



位置的控制是以速度控制为基础的，调速单元通常作为位置控制环路中的一个放大环节出现。对位置传感器信号的检测和处理也是在设计位置控制系统时必须详尽考虑的问题。用于轮廓跟踪控制的系统一般不允许出现超调和过冲，这样就对位置控制算法提出了一些特殊的要求，比例+前馈的复合控制是普遍采用的算法，基于这个原因，位置跟随误差必须详细讨论，这涉及位置环的增益、伺服刚度、伺服跟随滞后等问题。

当今，电机运动控制技术已经进入了一个崭新的发展阶段，它以电力半导体变流器件的应用为基础，以电动机为控制对象，以自动控制理论为指导，以电子技术和微处理器技术及计算机辅助设计为手段，并且与检测技术和数据通信技术相结合，构成了一门具有相对独立的科学技术，其应用已经渗透到了工业和社会生活领域的方方面面。