



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

嵌入式与工业控制技术

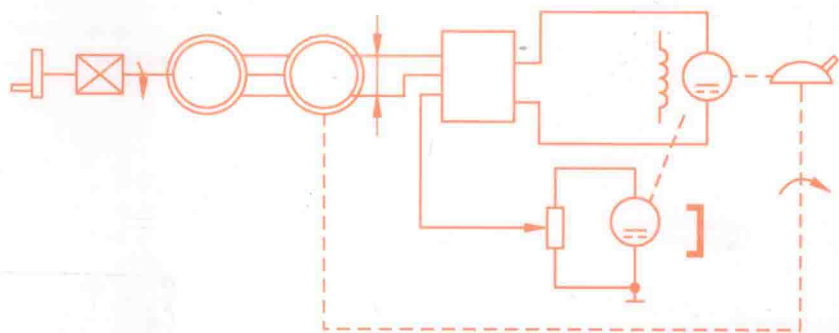
Control Motors and Special Motors

控制电机与 特种电机

(第2版)

孙冠群 李璟 蔡慧 编著

Sun Guanqun Li Jing Cai Hui



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会
高等学校电子信息类专业系列教材

Control Motors and Special Motors

控制电机与特种电机

(第2版)

孙冠群 李璟 蔡慧 编著

Sun Guanqun Li Jing Cai Hui

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统论述各种控制电机与特种电机的结构原理、特性、应用等,鉴于一些电机与其控制部分的不可分割性特点,本书对部分电机的控制系统也做了详细介绍。

全书共分 11 章,包括绪论、测速发电机、自整角机、旋转变压器、伺服电动机及其控制、步进电动机及其驱动、无刷直流电动机及其控制、开关磁阻电机及其控制、直线电动机、盘式电动机、超声波电动机及其控制;附录中给出了两个课程设计,以方便教学或实践训练。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、机械设计及其自动化等机电类专业的本科生教材或参考用书;也可作为相关科研院所及相关企业从事电气自动化技术行业的工程技术人员的培训教材或参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

控制电机与特种电机/孙冠群,李璟,蔡慧编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2016

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-43705-5

I. ①控… II. ①孙… ②李… ③蔡… III. ①微型控制电机—高等学校—教材 IV. ①TM383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084849 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:20.75

字 数:514千字

版 次:2012年12月第1版

2016年7月第2版

印 次:2016年7月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:069417-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

一 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

电力电子技术、控制技术、信号处理技术、微电子技术、材料技术以及计算机技术的飞速发展带动了现代电机技术的发展,推动了新型电机的产生,拓宽了电机的应用领域,并将电机技术与电力电子、控制理论、数字信号处理、计算机技术等融为一体。在传统电机之外的特殊电机,已不能仅用传统电机的概念来理解了。

本书在传统电机的结构、原理、电磁关系、特性与应用等基础知识之上,对控制电机与特种电机展开论述。一些控制电机和特种电机的本体与其控制系统已经密不可分,因此将电机与控制合二为一,突出这部分电机的控制系统知识。另外,本书也特别强调工程应用及实例,力求实现理论与实践充分结合,为读者在以后的实际工作中能够合理选择、灵活应用、研发设计电机及其控制系统打下良好基础。

全书共分 11 章,主要涵盖了 10 余种控制电机或特种电机的原理、电磁关系、特性、控制方法与设计、应用等内容。全书包括绪论、测速发电机、自整角机、旋转变压器、伺服电动机及其控制、步进电动机及其驱动、无刷直流电动机及其控制、开关磁阻电机及其控制、直线电动机、盘式电动机、超声波电动机及其控制等;附录提供了两个课程设计供参考,同时也提供了各章的思考题与习题的部分答案。全书各章均自成体系,读者完全可以根据实际情况有选择地阅读。

本书由孙冠群、李璟、蔡慧编著,其中孙冠群负责第 1、2、7、8、10、11 章和附录,李璟负责第 5、6 章,蔡慧负责第 3、4、9 章。本书的历次出版过程中,于少娟、曹金亮、左龙、智泽英、丁伟、孙丽宏、金英连、孟庆海等均做出过贡献,特致谢意。

由于作者水平所限,文中不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编著者

2016 年 5 月

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 控制电机、特种电机和传统电机的区别	1
1.2 控制电机与特种电机的种类	2
1.3 控制电机与特种电机的应用	2
1.4 控制电机、特种电机与其控制系统的关系	3
第 2 章 测速发电机	5
2.1 直流测速发电机	5
2.1.1 直流测速发电机的形式	5
2.1.2 直流测速发电机的输出特性	6
2.1.3 直流测速发电机误差原因及分析	7
2.2 交流异步测速发电机	12
2.2.1 交流异步测速发电机的结构与工作原理	12
2.2.2 交流异步测速发电机的输出特性	13
2.2.3 交流异步测速发电机的主要技术指标	14
2.3 测速发电机的应用	15
2.3.1 位置伺服控制系统的速度阻尼及校正	15
2.3.2 转速自动调节系统	16
2.3.3 自动控制系统的解算	17
本章小结	18
思考题与习题	19
第 3 章 自整角机	20
3.1 自整角机的分类和结构	20
3.1.1 自整角机的分类	20
3.1.2 自整角机的结构	22
3.2 控制式自整角机	24
3.2.1 控制式自整角机的工作原理	24
3.2.2 带有差动发送机的控制式自整角机的工作原理	29
3.3 力矩式自整角机	29
3.3.1 力矩式自整角机的工作原理	30
3.3.2 阻尼绕组	34
3.3.3 力矩式自整角机的应用	34
3.4 自整角机的选择与使用	35
3.4.1 自整角机的特点	35

3.4.2	自整机的选用	35
3.4.3	使用注意事项	36
3.5	自整角机测控系统应用举例	36
3.5.1	雷达方位角测量系统组成	36
3.5.2	自整角机的测角与控制	37
3.5.3	轴角/数字转换电路的硬件设计	37
3.5.4	软件设计	38
	本章小结	40
	思考题与习题	40
第4章	旋转变压器	41
4.1	旋转变压器的类型和用途	41
4.2	正余弦旋转变压器	43
4.2.1	正余弦旋转变压器的结构	43
4.2.2	正余弦旋转变压器的工作原理	45
4.2.3	正余弦旋转变压器补偿方法	49
4.3	线性旋转变压器	51
4.3.1	线性旋转变压器的结构	51
4.3.2	线性旋转变压器的工作原理	52
4.4	旋转变压器的使用	53
4.4.1	工作方式	53
4.4.2	旋转变压器的选择和使用	54
4.4.3	旋转变压器的误差	55
4.5	旋转变压器的应用举例	56
4.5.1	旋转变压器在角度测量系统中的应用	56
4.5.2	旋转变压器在解算装置中的应用	58
	本章小结	61
	思考题与习题	61
第5章	伺服电动机及其控制	63
5.1	直流伺服电动机及其控制	66
5.1.1	直流伺服电动机的结构和分类	66
5.1.2	直流伺服电动机的控制方式	67
5.1.3	直流伺服电动机的稳态特性	68
5.1.4	直流伺服控制技术	70
5.2	直流伺服电动机的应用	72
5.2.1	在位置控制系统中的应用	73
5.2.2	在速度控制系统中的应用	73
5.2.3	在张力控制系统中的应用	74
5.2.4	在自动检测装置中的应用	74
5.2.5	基于 DSP 的直流伺服电动机系统	74
5.3	异步伺服电动机及其控制	76
5.3.1	异步伺服电动机的结构与分类	76
5.3.2	异步伺服电动机的控制	78
5.3.3	异步伺服电动机的静态特性	79

5.3.4	异步伺服电动机和直流伺服电动机的性能比较	81
5.4	异步伺服电动机的应用	82
5.4.1	在位置控制系统中的作用	82
5.4.2	在检测装置中的应用	83
5.4.3	在计算装置中的应用	84
5.4.4	在增量运动的控制系统中的应用	84
5.5	永磁同步伺服电动机及其控制	85
5.5.1	永磁同步伺服电动机的结构与分类	85
5.5.2	永磁同步伺服电动机的工作原理	89
5.5.3	永磁同步伺服电动机的稳态性能	91
5.5.4	永磁同步伺服电动机的数学模型	94
5.5.5	永磁同步伺服电动机的矢量控制策略	101
5.6	永磁同步伺服电动机系统设计	106
5.6.1	永磁同步伺服电动机系统的理论设计	106
5.6.2	永磁同步伺服电动机的 DSP 控制设计	110
	本章小结	121
	思考题与习题	121
第 6 章	步进电动机及其驱动	123
6.1	步进电动机的分类及结构	124
6.1.1	步进电动机的分类	124
6.1.2	步进电动机的结构	125
6.2	反应式步进电动机的工作原理	126
6.2.1	通电方式分析	127
6.2.2	小步距角步进电动机	129
6.2.3	步进电动机的基本特点	130
6.3	反应式步进电动机的运行特性	132
6.3.1	静态运行特性	132
6.3.2	动态运行特性	138
6.3.3	主要性能指标	144
6.4	步进电动机的驱动控制	145
6.4.1	驱动控制器	145
6.4.2	功率驱动电路	146
6.5	步进电动机的应用	152
6.5.1	用于电子计算机的外部设备	152
6.5.2	用于数字程序控制系统	153
6.5.3	用于点位控制的闭环控制系统	154
	本章小结	154
	思考题与习题	155
第 7 章	无刷直流电动机及其控制	157
7.1	无刷直流电动机的基本结构和工作原理	157
7.1.1	无刷直流电动机的基本结构	157
7.1.2	无刷直流电动机的工作原理	159
7.2	无刷直流电动机的运行特性	160

7.2.1	无刷直流电动机的基本方程	160
7.2.2	无刷直流电动机特性分析	162
7.3	无刷直流电动机的控制方法	164
7.3.1	最简控制方式	164
7.3.2	调压控制方式	164
7.3.3	电流滞环 PWM 控制方式	165
7.3.4	无刷直流电动机的四象限运行控制过程	166
7.4	无刷直流电动机的无位置传感器控制	167
7.4.1	基于反电动势过零点的转子位置检测	167
7.4.2	续流二极管法	168
7.4.3	基于反电动势积分的转子位置检测	169
7.4.4	基于反电动势三次谐波的转子位置检测	169
7.4.5	状态观测器法	170
7.4.6	基于磁链函数的转子位置检测方法	170
7.5	无刷直流电动机专用驱动控制集成电路	171
7.5.1	MC33035	171
7.5.2	EC302	176
7.6	基于 TMS320F2812 DSP 的无刷直流电动机控制系统	182
7.6.1	控制器方案设计	182
7.6.2	控制器硬件设计	184
7.6.3	控制器软件设计	190
7.6.4	系统应用软件总体结构	193
7.6.5	控制器系统控制策略	195
7.7	无刷直流电动机转矩脉动抑制方法举例	202
7.7.1	无刷直流电机控制模型	203
7.7.2	非换相区转矩脉动形成原因分析	204
7.7.3	换相区转矩脉动形成原因分析	205
7.7.4	非换相区转矩脉动抑制方法	206
7.7.5	换相区转矩脉动抑制方法	207
7.7.6	实验结果	209
7.8	无刷直流电动机控制系统的应用与发展	211
	本章小结	212
	思考题与习题	212
第 8 章	开关磁阻电机及其控制	214
8.1	开关磁阻电动机驱动控制系统构成与工作原理	217
8.1.1	SRD 系统的基本构成	217
8.1.2	SR 电动机的运行原理	219
8.1.3	SRD 系统与其他系统的比较	220
8.2	开关磁阻电动机的控制方式	222
8.2.1	SR 电动机的数学模型	223
8.2.2	SRD 系统的调速控制方式	225
8.2.3	基于模糊控制算法的 SRD 系统控制方式	228
8.3	SRD 系统功率变换器	230

8.3.1	功率变换器主电路	231
8.3.2	SRD 功率变换器设计实例	233
8.4	开关磁阻电动机控制器	237
8.4.1	控制器硬件设计	238
8.4.2	SRD 系统软件设计	245
8.5	开关磁阻发电机	252
8.5.1	开关磁阻发电机的运行原理	252
8.5.2	开关磁阻发电机系统的构成	253
8.5.3	开关磁阻发电机的控制策略	254
8.6	开关磁阻电动机及其控制的发展	254
	本章小结	255
	思考题与习题	255
第 9 章	直线电动机	257
9.1	直线电动机的基本结构	259
9.2	直线感应电动机	262
9.2.1	旋转感应电机的基本工作原理	262
9.2.2	直线感应电动机的基本工作原理	262
9.3	直线直流电动机	264
9.3.1	永磁式直线直流电动机	264
9.3.2	电磁式直线直流电动机	265
9.4	直线同步电动机	265
9.5	直线步进电动机	266
9.6	直线电动机的应用	268
9.6.1	作为直线运动的执行元件	268
9.6.2	用于机械加工产品	268
9.6.3	用于信息自动化产品	269
9.6.4	用于长距离的直线传输装置	271
9.6.5	用于高速磁悬浮列车	272
	本章小结	274
	思考题与习题	274
第 10 章	盘式电动机	276
10.1	盘式电动机概况	276
10.2	盘式直流电动机	277
10.2.1	盘式直流电动机的结构特点	277
10.2.2	盘式直流电动机的基本电磁关系	279
10.3	盘式同步电动机	280
10.4	盘式电动机的发展	283
	本章小结	286
	思考题与习题	286
第 11 章	超声波电动机及其控制	287
11.1	超声波电动机概述	287
11.1.1	超声波电动机发展历史	288

11.1.2	超声波电动机的特点	289
11.1.3	超声波电动机的分类	291
11.2	行波型超声波电动机	291
11.2.1	行波型超声波电动机的结构特点	291
11.2.2	行波型超声波电动机的运行机理	292
11.2.3	行波型超声波电动机的驱动控制	295
11.3	超声波电动机的应用	298
11.4	超声波电动机的发展方向	301
	本章小结	302
	思考题与习题	302
附录 A	课程设计	303
A.1	步进电动机驱动系统设计	303
A.1.1	设计背景	303
A.1.2	设计要求	303
A.1.3	设计原理	303
A.1.4	分组说明	306
A.1.5	设计报告说明	306
A.2	永磁无刷直流电动机控制系统设计	306
A.2.1	设计背景	306
A.2.2	设计要求	306
A.2.3	设计原理	307
A.2.4	分组说明	309
A.2.5	设计报告说明	310
附录 B	部分思考题与习题参考答案	311
	参考文献	314

通过对“电机学”或“电机与拖动”课程的先期学习,我们掌握了传统电机的结构、原理、电磁关系、特性与应用等基础知识,本书将全面论述传统电机之外的控制电机、特种电机及其控制系统。

与传统感应电机、同步电机、直流电机和变压器相比,在工作原理、励磁方式、技术性能以及在结构上有较大特点的电机可以统称为特殊电机,这些特殊电机中相当一部分的电机本体与控制部分已经一体化,因此有必要在本书中讲授这些电机及其控制部分。

1.1 控制电机、特种电机和传统电机的区别

在各类自动化系统中,需要用到大量的各种各样的元件,控制电机就是其中的重要元件之一。它属于机电元件,在系统中具有执行、检测和解算的功能。虽然从基本原理来说,控制电机与普通传统旋转电机并没有本质上的差别,但后者着重于对电机的力能指标方面的要求,而前者着重于对特性、高精度和快速响应方面的要求。

一般来说,与传统电机相比,在工作原理、结构、性能或设计方法上有明显不同特点的电机都属于特殊电机的范畴,为了与现有习惯性的概念称呼衔接,一般把这些特殊电机称作控制电机与特种电机,当然,原有概念的控制电机之外的特殊电机,自然叫做特种电机。

(1) 从工作原理来看,有些特殊电机已经突破了传统电机理论的范畴。例如,超声波电机不是以磁场为媒介进行机电能量转换的电磁装置,而是利用驱动部分(压电陶瓷元件的超声波振动)和移动部分之间的动摩擦力而获得运转力的一种新原理电机。

(2) 不同于超声波电机,绝大部分特殊电机是在传统电机理论的范畴内,即属于电磁电机。不过,许多电机的工作原理也具有较大的特殊性。例如,步进电机是将数字脉冲信号转换为机械角位移和线性位移的电机,如果采用高性能永磁体后,可制成永磁混合式步进电动机,并采用先进的控制技术,其技术指标和动态特性将有明显的改进和提高。开关磁阻电机是一种机电一体化的新型电机,在电机发明之后的 100 多年里,磁阻电机的效率、功率因数 and 功率密度都很低,长期以来只能用作微型电动机,而磁阻电机与电力电子器件相结合构成的开关磁阻电机,其功率密度与普通异步电机相近,可在很宽的运行范围内保持高效率,系统总成本低于同功率的其他传动系统,目前国内最高已有 400kW 的产品出售。

(3) 从结构来看,除了传统的径向磁场旋转电机之外,还出现了许多特殊结构的电机。

例如,直线电机和横向磁场电机(盘式电机)等。

从以上的介绍可以看出,除了典型的通用直流电机、异步电机、同步电机和静止变压器等之外,其他类型的电机都可以归为特殊电机的行列,这意味着控制电机也可以列为特殊电机的序列。但是,由于控制电机的称呼历史较长,在我国高等教育自动化类专业的教学中,一直以来是一门不可或缺的课程。在这里,我们习惯上称控制电机之外的非传统电机为特种电机,控制电机则定义为自动化系统中常用的微型特殊电机。

1.2 控制电机与特种电机的种类

与传统电机相比,控制电机和特种电机的特点还表现在种类繁多(目前约有 5000 多个品种)和功能多样化上,而且还在不断产生功能特殊、性能优越的新颖电机,因此不论从原理和结构,还是从功能和使用等方面对其进行严格的分类都是比较困难的。通常情况下,根据上一节的定义,控制电机属于在自动化系统中具有执行、检测和解算功能的电机,一般包括直流测速发电机、直流伺服电动机、交流异步伺服电动机、旋转变压器、自整角机、步进电动机和直线电动机等;特种电机与多数传统电机一样,注重力能指标,包括开关磁阻电动机、永磁无刷直流电动机、交流永磁同步伺服电动机、盘式电动机和超声波电动机等。依用途而分,部分电机既可称为控制电机也可以称为特种电机,如永磁无刷直流电动机和交流永磁同步伺服电动机在从事检测功能时可划入控制电机的范畴,又如部分直线电动机进行大力矩的运动传递时,就属于特种电机范畴。

因此,特意区分控制电机和特种电机意义不大。本书在后续讲授过程中,将不再特别强调到底是属于控制电机还是特种电机的范畴,重要的是通过本书,将传统电机之外的常用的特殊电机及其控制系统逐一介绍给读者。

1.3 控制电机与特种电机的应用

控制电机已经成为现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装备中不可缺少的重要元件。它的应用范围非常广泛,例如,自动化生产线中的机械手、火炮和雷达的自动定位、船舶方向舵的自动操纵、飞机的自动驾驶、遥远目标位置的显示、机床加工过程的自动控制与自动显示、阀门的遥控以及电子计算机、自动记录仪表、医疗设备和录音录像设备等的自动控制系统。

很多特种电机则综合了电机、计算机、新材料和控制理论等多项高新技术,具有电机与控制一体化的趋势,其应用也遍及军事、航空航天、工农业生产和日常生活的各个领域。下面逐一介绍控制电机与特种电机的应用概况。

(1) 工业控制自动化领域。随着现代工业的自动化、信息化,各类控制电机与特种电机被越来越广泛地应用,尤其以数字化形式为控制方式的现代混合式步进电动机、交流伺服电动机和直线伺服电机等应用最为广泛。当前机器人产业异军突起,而机器人的绝大部分动作都要靠控制电机与特种电机来完成。

(2) 信息处理领域。没有信息化就没有现代文明社会。信息产业在国内外都受到高度重视并获得高速发展,信息技术设备中需要的微电机的全世界需求量每年约 15 亿台(套)。

这类电机绝大部分是精密永磁无刷电动机和精密步进电动机等,例如,智能手机的振动电机、电脑的存储器驱动电机以及各类信息化终端产品,等等。

(3) 交通运输领域。目前,在高级汽车中,出于控制燃料和改善乘车感觉以及显示有关装置状态的需要,要使用 40~50 台电动机,豪华轿车上的电机则可多达 80 台,汽车电器配套电机主要是永磁直流电机和无刷直流电机等。另外,作为 21 世纪的绿色交通工具,电动汽车在各国受到普遍的重视,电动车辆驱动用电机主要是无刷直流电动机、开关磁阻电动机和永磁同步电动机等,这类电机的发展趋势是高效率、高出力和智能化。此外,特种电机在高铁列车牵引和轮船电力推进中也得到了越来越广泛的应用,例如,直线电动机用于磁悬浮列车和地铁列车的驱动也已经在我国进入商业应用阶段。

(4) 家用电器领域。目前,工业化国家一般家庭中约用到 35 台以上特种电机。为了满足用户越来越高的要求并适应信息时代的发展,实现家电产品节能化、舒适化、网络化和智能化,甚至提出了网络家电(或信息家电)的概念,家电更新换代的周期很短,对为其配套的电机提出了高效率、低噪声、低振动、低价格、可调速和智能化的要求。无刷直流电动机和开关磁阻电动机等新兴的机电一体化产品正逐步替代传统的单相异步电动机并在家用电器领域中一展身手。

(5) 高档消费品领域。光驱、存储视盘等音响设备的配套电机主要为印刷绕组电机和绕线盘式电机等,摄像机和数码单反照相机等高档电子消费产品需要量大,产品更新换代快,这也是微特电机的主要应用领域之一,这类电机属于精密型电机,制造加工难度大,尤其进入数字化后,对电机提出了更苛刻的要求。

(6) 电气传动领域。工农业生产的各个部门都离不开电气传动系统,在要求速度控制与位置控制(伺服)的场合,特种电机的应用越来越广泛。例如,开关磁阻电机、无刷直流电机、功率步进电机、宽调速直流电机等在数控机床、自动生产线和风机水泵等在电气传动领域应用广泛。

(7) 特种用途,包括各种飞行器、探测器、自动化武器装备和医疗设备等。特种用途所需电机种类繁多,各自有不同要求,这些电机包括一些从原理上、结构上和运行方式上都不同于一般电磁原理的电机,例如,低速同步电动机、谐波电动机、有限转角电动机、超声波电动机、微波电动机、电容式电动机和静电电动机,等等。

1.4 控制电机、特种电机与其控制系统的关系

不管是控制电机还是特种电机,与普通圆柱式交直流电机相比,它们都有其特殊性,其中相当部分的电机需要借助于电机运行状态反馈信息后才能进行控制并继续运行。例如,开关磁阻电机如果没有转子位置信号的信息,电机将无法启动并运转;无刷直流电机和永磁交流同步电机等如果没有转子位置的信号将不能如期发挥其伺服作用;还有的电机需要给定特殊的可调控的信号,如步进电机若无脉冲信号则不能步进。因此,相当部分的控制电机、特种电机与其控制系统是密不可分的,因此单独认识电机本体而不能理解其控制原理是不可取的,换言之,脱离系统来单独谈这些电机是没有实际意义的。

在早期,由于用于电机控制的器件和控制理论等的滞后,严重影响了这些电机的性能、技术与推广应用。随着新型电力电子器件的不断涌现,电机控制技术飞速发展,微处理

器的应用促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化,数字化控制技术使得电机控制所需的复杂算法得以实现,极大地简化了硬件设计,降低了成本,提高了精度。特别是最近几年,工业控制的功能模块或专用芯片不断涌现,例如,美国的 AD 公司和 TI 公司都推出了用于电动机调速的数字信号处理器(DSP),它将一系列外围设备如模/数转换器(A/D)、脉宽调制发生器(PWM)和 DSP 集成在一起,为电机控制提供了一个理想的解决方案。以开关磁阻电机控制为例,其常用的控制方法是电流模拟滞环控制和电压 PWM 调速控制。过去这种电压 PWM 控制策略都是通过分散的模拟器件实现的,因此系统往往是电流开环,电流的大小和波形都缺乏相应的控制,最终影响整个系统的运行性能。数字信号处理技术的快速发展以及高速、高集成度的电机控制专用 DSP 芯片的出现,不仅为开关磁阻电机的数字电流控制提供了强有力的支持,而且在电压 PWM 控制的基础上引入电流闭环,实现了数字化,从而使得电流以最小的偏差逼近目标值,对提高电机出力和效率,降低电机噪声和转矩脉动有很大作用。

因此,无论是新型电机还是传统的控制电机或特种电机,控制系统俨然已经成为电机不可或缺的一部分。本书对部分电机的控制方法也进行了详细介绍。