

21

世纪

高等院校机械设计制造及其自动化专业系列教材

孙建忠 白凤仙 编著

特种电机 及其控制

(第二版)



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

2013

特种电机及其控制

(第二版)

孙建忠 白凤仙 编著

北方工业大学图书馆



C00339104



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

RFID

内 容 提 要

现代特种电机技术是一门集电机技术、材料科学、计算机技术、现代控制理论、微电子技术和电力电子技术等现代科学技术的进步于一体的新型交叉学科。本书主要介绍几种已经取得和正在兴起广泛应用的特种电机的原理、分析、设计及其控制方法。

全书共7章：绪论介绍了特种电机的分类、应用及发展趋势；第1章介绍无刷直流电动机的结构、原理、主要特性和驱动控制系统；第2章介绍开关磁阻电动机的工作原理、分析方法、设计方法、控制策略和驱动控制系统；第3章介绍步进电动机的工作原理、静态特性和驱动控制方法；第4、5章分别介绍直线电机和盘式电机的结构特点；第6章介绍超声波电机的原理、结构和控制及其发展概况。

本书可作为普通高等学校电气工程及其自动化专业和机电一体化专业的教材，也可作为相关领域的研究生和工程技术人员的参考书。

本书配有免费电子教案，读者可以从中国水利水电出版社网站以及万水书苑下载，网址为：<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>或 <http://www.wsbookshow.com>。

图书在版编目（CIP）数据

特种电机及其控制 / 孙建忠，白凤仙编著. — 2版
— 北京：中国水利水电出版社，2013.7
21世纪高等院校机械设计制造及其自动化专业系列规划教材
ISBN 978-7-5170-0906-1

I. ①特… II. ①孙… ②白… III. ①电机—控制系统
统一高等学校—教材 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第109744号

策划编辑：雷顺加 责任编辑：张玉玲 加工编辑：孙 丹 封面设计：李 佳

书 名	21世纪高等院校机械设计制造及其自动化专业系列规划教材 特种电机及其控制（第二版）
作 者	孙建忠 白凤仙 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市铭浩彩色印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18.75印张 432千字
版 次	2005年5月第1版 2005年5月第1次印刷 2013年7月第2版 2013年7月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	35.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

再版前言

微电子技术、电子计算机技术、电力电子技术和材料科学的飞速发展推动了特种电机的发展。电机技术所依托的理论和技術基础已远不限于电磁理论,还包括控制理论、系统理论、计算机技术、信号处理技术、电力电子技术和材料科学等,形成了各学科互相渗透、互相交叉甚至互相融合的现象。可以说,现代特种电机技术是集电机技术、材料科学、计算机技术、现代控制理论、微电子技术和电力电子技术等现代科学技术的进步于一体的新技术。

在编写《特种电机及其控制(第二版)》一书时,作者尝试将特种电机本体及其驱动控制系统作为一个整体来讲解,以适应其机电一体化和智能化的发展趋势;突出夯实基础、拓宽视野的特点,以适应新时期高水平研究型大学的教学要求;将启发式教学和探究型学习的教学思想融入教材中,采用提出问题、分析问题、解决问题的写作方式,希望学生能够从中领会各类知识的综合应用技巧,培养分析问题和解决问题的能力。

本书主要介绍了无刷直流电动机、开关磁阻电动机、步进电动机和超声波电机这些新型的机电一体化电机的原理、分析、设计与控制,并介绍了直线电机和盘式电机的原理及其结构特殊性。为了便于教学,在保持全书系统性和完整性的基础上,各章自成体系,各院校可以根据具体需要,有重点地选择其中一种或几种电机组织教学。

针对大部分学生对控制系统设计无从下手的现象,本书通过剖析电机控制系统开发实例,引导学生掌握电机控制系统的设计方法。从电机控制系统的设计原则和系统构成方法讲起,通过对基于单片机的无刷直流电动机控制系统、基于 DSP 的开关磁阻电机控制系统和基于单片机的步进电动机控制系统三个实例的分析,采用自上而下、由内到外、逐步细化的设计方法和实现过程,最后给出完整的软、硬件设计实例。给出的实例全部是作者多年从事相关研究的成果,学生不仅可以通过实例学习掌握电机控制系统的设计方法,还可以将其直接应用于工程实践。

本书由大连理工大学孙建忠教授和白凤仙副教授共同编写。综合了作者多年从事特种电机及其控制相关研究的成果,特别是本书第 2 章吸收了作者主持的自然科学基金项目“新型转子无齿槽开关磁阻电机伺服系统的研究”(项目编号:50977005)的部分成果。作者历年指导的研究生宋伟官、邵长久、盛瑞明、熊慧文、邹喜、韩笑、施飞、张淑兴、王莹、许伟、刘博强、罗亚琴、李默竹、姜伟、刘杰、鲁浩、何月飞、张凯等人在读期间均为本书做出了贡献。本书第一版出版后,许多读者来信、来电探讨特种电机的相关问题,并对本书提出了许多有益的建议,在此对热心的读者深表感谢。本书在编写中参考了国内外有关的研究成果和文献,对这些文献的作者也一并致谢。

由于作者学识有限,书中难免存在失误或不当之处,恳请广大读者批评指教。

编者

2013 年 4 月

目 录

再版前言

绪论	1	1.6.2 调节特性	39
1 特种电机的定义与类型	1	1.6.3 工作特性	39
2 特种电机的应用	2	1.7 无刷直流电动机的转矩脉动	39
3 特种电机的发展方向	3	1.7.1 转矩脉动的定义及引起转矩脉动的原因	39
4 本课程的内容简介和使用说明	5	1.7.2 换相与转矩脉动	41
参考文献	5	1.8 无刷直流电动机转子位置信号的检测	45
第1章 无刷直流电动机及其控制系统	6	1.8.1 转子位置传感器	45
学习指导	6	1.8.2 常用的无位置传感器位置检测方法	48
1.1 无刷直流电动机系统	6	1.8.3 利用反电动势检测转子位置	50
1.1.1 无刷直流电动机的组成	6	1.9 无刷直流电动机的控制原理及其实现	53
1.1.2 无刷直流电动机的基本工作原理	10	1.9.1 无刷直流电动机控制系统原理	53
1.1.3 无刷直流电动机与永磁同步电动机	12	1.9.2 PWM 调制方式	55
1.1.4 无刷直流电动机的特点	14	1.9.3 正反转运行控制	61
1.1.5 无刷直流电动机的发展概况	15	1.9.4 控制系统的实现	64
1.1.6 无刷直流电动机的应用与研究动向	15	1.10 无刷直流电动机控制专用集成电路及其应用	67
1.2 电机本体的基本问题	16	1.10.1 无刷直流电动机专用集成电路	67
1.2.1 永磁材料特性与转子结构	16	1.10.2 无刷直流电动机控制器 MC33033 的应用	69
1.2.2 定子绕组	23	1.10.3 无位置传感器无刷直流电动机控制器 ML4428 的应用	72
1.3 三相无刷直流电动机的主电路及其工作方式	26	1.11 无刷直流电动机的单片机控制	76
1.3.1 星形连接三相半桥主电路	27	1.11.1 电机控制用微控制器的选择	76
1.3.2 星形连接三相桥式主电路	28	1.11.2 基于 AVR 单片机的电动车用无刷直流电动机控制系统	77
1.3.3 角形连接三相桥式主电路	30	1.11.3 基于 AVR 单片机的电动车用无刷直流电动机控制软件设计	81
1.4 无刷直流电动机的电枢反应	32	1.11.4 基于 AVR 单片机的电动车用无刷直流电动机控制例程	88
1.5 无刷直流电动机的分析	33	1.12 基于 DSP 的无刷直流电动机无位置传感器控制	97
1.5.1 无刷直流电动机的数学模型	33	1.12.1 TMS320LF2407 的事件管理器简介	98
1.5.2 无刷直流电动机的反电动势	35		
1.5.3 无刷直流电动机稳态性能的动态模拟	35		
1.5.4 无刷直流电动机稳态性能的简化分析	37		
1.6 无刷直流电动机的运行特性	38		
1.6.1 机械特性	38		

1.12.2 反电动势过零点检测	99	2.5.3 电流检测	155
1.12.3 无位置传感器控制中无刷直流电动机 的起动	103	2.6 基于 TMS320LF2407 DSP 的开关磁阻 电动机控制器	158
1.12.4 IR2130 驱动器及其与 DSP 和 逆变器的接口	104	2.6.1 基于 TMS320LF2407 DSP 的 SRD 控制器硬件	158
1.12.5 电流信号的检测	105	2.6.2 基于 TMS320LF2407 DSP 的 SRD 控制策略及其实现	165
1.12.6 故障处理与保护电路	107	2.7 基于 TMS320LF2407 DSP 的开关磁阻 电动机控制软件	167
1.12.7 控制方法与软件	109	2.7.1 控制系统程序设计结构	167
本章小结	110	2.7.2 软件抗干扰措施	170
练习与思考	110	2.7.3 SRD 控制软件 C 语言例题	171
技能扩展	110	2.8 开关磁阻电机的电磁设计	198
参考文献	111	2.8.1 电磁负荷与主要尺寸的关系	198
第 2 章 开关磁阻电机及其控制系统	113	2.8.2 主要尺寸的确定	200
学习指导	113	2.8.3 平均转矩计算	202
2.1 开关磁阻电动机传动系统	113	2.8.4 绕组连接	203
2.1.1 开关磁阻电动机传动系统的组成	113	2.8.5 算例	204
2.1.2 开关磁阻电动机的工作原理	114	2.9 开关磁阻发电机	209
2.1.3 开关磁阻电动机的相数与结构	116	2.9.1 开关磁阻发电机系统的组成	209
2.1.4 开关磁阻电动机传动系统的特点	119	2.9.2 开关磁阻发电机的工作原理	211
2.1.5 开关磁阻电动机的发展概况	120	2.9.3 开关磁阻发电机的能量传递	212
2.1.6 开关磁阻电机的应用与研究动向	121	2.9.4 开关磁阻发电机的控制策略	213
2.2 开关磁阻电机的基本方程与性能分析	124	本章小结	214
2.2.1 SR 电机的基本方程	124	练习与思考	216
2.2.2 基于理想线性模型的 SR 电动机 分析	126	技能扩展	216
2.2.3 考虑磁路饱和时 SR 电动机的分析	130	参考文献	216
2.3 开关磁阻电动机的控制原理	132	第 3 章 步进电动机及其控制	219
2.3.1 SR 电动机的运行特性	132	学习指导	219
2.3.2 SR 电机的基本控制方式	133	3.1 步进电动机的结构与工作原理	219
2.3.3 SR 电动机的起动运行	136	3.1.1 步进电动机的工作原理	219
2.3.4 SR 电动机的四象限运行控制	137	3.1.2 反应式步进电动机	221
2.4 开关磁阻电动机的功率变换器	138	3.1.3 永磁式和混合式步进电动机	223
2.4.1 功率变换器常见的主电路形式	139	3.1.4 步进电机的特点	225
2.4.2 功率开关器件和续流二极管 的选用	142	3.2 反应式步进电机的特性	225
2.4.3 SR 电动机的功率变换器设计实例	143	3.2.1 步进电机的静态特性	225
2.5 开关磁阻电动机传动系统的信号检测	147	3.2.2 步进电机的单步运行	228
2.5.1 位置信号检测	147	3.2.3 步进电机的连续运行和 动态特性	229
2.5.2 速度检测	152		

3.3 步进电动机驱动控制器的构成	233	第5章 盘式电机	271
3.4 步进电动机的功率驱动电路	234	学习指导	271
3.4.1 单极性驱动电路	234	5.1 盘式电机概况	271
3.4.2 双极性驱动电路	237	5.2 盘式直流电机	272
3.5 步进电动机的角度细分控制	240	5.2.1 盘式直流电机的结构特点	272
3.5.1 角度细分控制原理	240	5.2.2 盘式直流电机的基本电磁关系	274
3.5.2 角度细分控制的电路实现	241	5.3 盘式永磁同步电机的结构和特点	275
3.5.3 细分控制专用集成电路	243	5.3.1 盘式永磁同步电机的常见结构	275
3.6 步进电动机的单片机控制	244	5.3.2 盘式无刷直流电动机	277
3.6.1 脉冲分配	244	本章小结	277
3.6.2 步进电动机的速度控制	248	练习与思考	278
3.6.3 步进电动机的加减速与定位控制	248	技能扩展	278
3.7 基于 AVR 单片机的两相混合式步进电动机控制实例	250	参考文献	278
3.7.1 控制系统硬件	250	第6章 超声波电动机	279
3.7.2 控制软件例程	253	学习指导	279
本章小结	261	6.1 超声波电动机概况	279
练习与思考	261	6.1.1 超声波电动机的基本原理	279
参考文献	262	6.1.2 超声波电动机的发展	280
第4章 直线电动机	263	6.1.3 超声波电动机的优点及其应用	281
学习指导	263	6.1.4 超声波电机存在的问题及研究重点	282
4.1 直线电动机概述	263	6.2 超声波电动机的常见结构与分类	283
4.1.1 直线电动机的原理与分类	263	6.2.1 超声波电动机的常见结构	283
4.1.2 直线电动机传动的特点	265	6.2.2 超声波电动机的分类	286
4.1.3 直线电动机的发展	265	6.3 行波型超声波电动机的运行机理	287
4.2 直线感应电动机	266	6.3.1 行波的形成	287
4.2.1 直线感应电动机的基本原理	266	6.3.2 超声波电动机的调速机理	288
4.2.2 直线感应电动机的结构特点	267	6.4 行波型超声波电动机的驱动控制	290
4.3 直线直流电动机	268	6.4.1 行波型超声波电动机的调速控制方法	290
4.3.1 永磁式	268	6.4.2 逆变器主回路	291
4.3.2 电磁式	269	6.4.3 频率跟踪技术	291
本章小结	269	本章小结	292
练习与思考	270	练习与思考	293
技能扩展	270	技能扩展	293
参考文献	270	参考文献	293

绪 论

特种电机有哪些类型?目前主要应用在哪些领域?它们的前景和发展趋势如何?对这些问题的初步说明将使读者对特种电机及其控制技术有一个大致的了解。对本教材编写的指导思想和基本内容的说明将有助于读者更好地学习这门课程。

1 特种电机的定义与类型

随着现代科学技术的迅猛发展,特别是微电子技术、电子计算机技术、电力电子技术和材料科学的飞速发展,近年来国内外出现了许多性能优越的新颖电机。习惯上,我们把这些新型电机都归入特种电机。然而,迄今为止,国内外都未对特种电机给出明确的定义和分类。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较大的特点的电机都属于特种电机的范畴。按照这种划分方法,特种电机有许多种类。

从工作原理来看,有些特种电机已经突破了传统电机理论的范畴。众所周知,电机是以磁场为媒介进行机电能量转换的电磁装置。而随着现代科学技术的飞速发展,近年人们借助微电子技术、精密机械技术、新材料技术、生物技术以及计算机技术等,开发研究出不少新原理的特种电机。例如,超声波电机是利用驱动部分(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;微波电动机是一种能够接受并将微波转换为机械能的新型电机;静电电机则是利用电场和电荷之间的动力制成的一种超微电机;此外还有光热电机、仿生电机、记忆合金电机等。其中超声波电机已经进入实用化阶段。

即使是在传统电机理论的范畴内,许多电机的工作原理也具有较大的特殊性,可以称之为特种电机。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,采用高性能永磁体后制成永磁步进电动机或混合式步进电动机,并采用先进的控制技术,其技术指标和动态特性具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多年来,磁阻电机的效率、功率因素和功率密度都很低,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,其功率密度与普通感应电机相近,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,目前国内已有功率为几十至上百千瓦的产品出售。无刷直流电动机也是一种机电一体化的新型电机,最初是由电子换向线路代替机械换向器发展起来的,但之后的发展使其无论是在电机结构上,还是在运行和控制原理上都更接近于同步电动机。

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电机,如直线电机、平面电机、盘式电机(轴向磁场)、横向磁场电机、螺旋电机等。在工农业生产和交通运输中,有一部分机械是作直线运动的,例如高速磁悬浮列车、传送带、电磁锤、电动门等。过去使用旋转电动机,再通过机械传动装置将旋转运动变为直线运动,使得整个装置体积庞大、成本较高而效率较低。近几十年来,直线电动机发展很快,在许多领域获得应用并取得了良好效果。如永磁直线直流电动机在计算机外围设备中获得极广泛的应用(用于此用途的



永磁直线直流电动机也叫音圈电机), 并且促进了计算机外围设备的小型化。其次, 在一些特殊场合, 盘式电机由于其外形扁平、轴向尺寸短而特别适用于安装空间有严格限制的设备上, 如汽车空调器与散热器、电动车辆、计算机软盘驱动装置以及各种家用电器等。盘式电机以其具有高效率、高功率密度、高转矩密度以及低转子损耗等优点得到了广泛关注。与普通电机不同, 盘式电机为轴向磁场结构, 其电枢既可以采用无铁芯结构, 也可以为有铁芯结构, 但其铁芯一般采用卷绕工艺制造, 材料利用率高。另外, 近年来还出现了横向磁场电机, 它是用 U 形定子冲片叠装而成的, 通过 U 形铁芯模块的不同组合可达到不同的功率等级, 而无须重新进行冲片模具的再加工。横向磁场电机转矩密度高, 适于低速直接驱动场合, 在船舶直接推进系统中获得了较好的应用。

特种电机的种类很多, 而且仍在不断创新和发展之中。一般来说, 新工艺、新材料的采用, 必然带来电机设计方法的改变和电机运行性能的变化。而即使采用同样的工艺和材料, 特殊的设计也必然导致特殊的电机性能。如稀土永磁电机、超导电机从设计到运行都与普通电机有很大的差别。而稀土永磁同步电机可以设计为宽调速电机——解决恒功率弱磁运行速度范围窄的难题; 也可以设计为高效电机——我国开发的超高效稀土永磁同步电机的效率比美国预计 2007 年推出的最高效电动机的效率高 2~4 个百分点, 而且小一个机座号。为了概念清晰起见, 我们可以按照其工作原理将特种电机分为两大类: 根据电磁原理工作的传统原理特种电机和新原理特种电机。其中, 对于根据电磁原理工作的特种电机, 我们可以沿用电机学惯用的分类方法, 按功能分类, 将它们划入变压器、发电机、电动机或控制电机的范畴; 也可以按照电机的特点和电源性质分类, 将它们划入变压器、直流电机、同步电机或感应电机的范畴。

但是, 我们也应看到, 特种电机的机电一体化趋势使各类电机的固有特性得到改善, 甚至出现了新的人工特性。在这种情况下, 我们甚至无法说清一个新的机电一体化产品究竟应该称为什么类型的电机。如无刷直流伺服电动机既可以看成是采用电子换向器的直流电动机, 也可以看成是使用直流电源、带有逆变器供电的交流电动机。但是无论如何分类, 并不妨碍这类电机的应用和飞速发展。因此, 在本课程的学习中, 我们不必过多地去争论某种电机的称呼和分类, 不必拘泥于传统学科的框框。

本教材在编写时, 也没有按照电机学的分类方法进行编排, 而是结合特种电机的最新发展趋势, 向读者介绍已经取得或即将取得广泛应用的特种电机和特殊结构电机: 无刷直流电动机、开关磁阻电机、步进电动机、盘式电机、直线电机和超声波电机。

2 特种电机的应用

特种电机技术综合了电机、计算机、控制理论、新材料等多项高新技术, 其应用遍及军事、航空航天、工农业生产、日常生活的各个领域。

(1) 信息处理领域。信息产业在国内外都受到高度重视并获得高速发展, 信息领域配套微电机全世界年需求量约 15 亿台(套), 这类电机绝大部分是精密永磁无刷电动机、精密步进电动机。

(2) 交通运输领域。目前, 在高级汽车中, 为了控制燃料、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, 而未来豪华轿车上的电机可多达 80 台, 汽车电



器配套电机主要为永磁直流电机、无刷直流电机等。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、永磁同步电动机等,这类电机的发展趋势是高效率、高出力、智能化。此外,特种电机在机车驱动、轮船推进中也取得了广泛应用,如直线电机用于磁悬浮列车、地铁的驱动。

(3) 家用电器领域。目前,工业化国家一般家庭中用到 35 台以上特种电机。为了满足用户越来越高的要求和适应信息时代发展的需要,实现家电产品节能化、舒适化、网络化、智能化,甚至提出了网络家电(或信息家电)的概念,家电的更新换代很快,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、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感应电动机。

(4) 高档消费品领域。电唱机、录音机、VCD 视盘和 DVD 视盘等音响设备配套电机主要为印制绕组电机、绕线盘式电机等。录像机、摄像机、数字式照相机等高档电子消费产品需求量大,产品更新换代快,亦是微特电机主要应用领域之一,这类电机属精密型,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。

(5) 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,在要求速度控制和位置控制(伺服)的场合,特种电机的应用越来越广泛。如开关磁阻电机、无刷直流电机、功率步进电机、宽调速直流电机用于数控机床、机械手、机器人等。

(6) 特种用途。包括各种飞行器、探测器、自动化武器装备、医疗设备等。这类电机多为特殊电机或新型电机,包括从原理上、结构上和运行方式上都不同于一般电磁原理的电机,主要为低速同步电动机、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、静电电动机等。

3 特种电机的发展方向

现代特种电机技术是集电机技术、材料科学、计算机技术、现代控制理论、微电子技术和电力电子技术等现代科学技术的进步于一体的新技术,其发展呈现以下趋势:

(1) 机电一体化。机电一体化就是将传统电机与和电子技术有机结合,最终实现智能化。目前,电机在其实际应用中已由过去简单的以提供动力为目的发展到对其速度、位置和转矩等物理量进行精确控制,特种电机需要也必然与微电子技术、计算机技术和电力电子技术等相结合,构成新颖的机电一体化产品。从军事和航空航天到工农业生产、信息、医疗以及家庭自动化,几乎所有领域都在越来越多地采用机电一体化伺服传动系统。永磁无刷直流电动机、开关磁阻电动机等耗电少、效率高、运行成本低、控制性能好的新型机电一体化传动系统正在迅速普及。

(2) 高性能化。工农业生产的发展、科学技术的进步和人民生活水平的提高,对电机及其传统系统的性能提出了越来越高的要求。新型材料的应用为提高电机产品性能、降低成本创造了有利条件;而微电子技术、现代控制技术、计算机技术和电力电子技术的发展使特种电机控制性能的提高成为可能。新材料、新技术的应用促使现代特种电机向高性能化不断迈进。

在 20 世纪 60 年代和 80 年代,稀土钴永磁和钕铁硼永磁(二者统称稀土永磁)相继问世,它们的高剩磁密度、高矫顽力、高磁能积和线性退磁曲线等优异的磁性能特别适合于电机。



新型永磁材料在电机中的应用引起了电机结构、设计方法、工艺等方面的变革,稀土永磁电机也因而具有一系列的独特优点:结构简单、运行可靠、体积小、重量轻、损耗小、效率高,电机的形状和尺寸可以灵活多样。如我国开发的抽油机用永磁同步电机具有高起动转矩,在实际应用中可替代比它大2个功率等级的感应电动机,节电率大于20%。

除永磁材料之外,还有许多新材料在特种电机领域得到应用,如耐磨性能极高的陶瓷是制造高速电机轴承的理想材料,压电陶瓷和摩擦材料是制造超声电机的关键,新型良好导磁性能和导电性能材料亦在研究之中。

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;而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,大大简化了硬件、降低了成本、提高了精度。特别是最近几年来,工业控制的功能模块或专用芯片不断涌现,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),将一系列外围设备如模数转换器(A/D)、脉宽调制发生器(PWM)和数字信号处理器(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控制,最终影响到整个系统的运行性能。随着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数字信号处理芯片DSP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基础,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。

(3) 小型化与微型化。随着信息产品和消费类电子产品向微、轻、薄方向发展,对其配套的电机提出了小型化的要求;而空间技术、国防产品、医疗设备等对电机进一步提出了短、小、薄、低噪声、无电磁干扰等要求。小型化、甚至微型化是特种电机发展呈现的又一趋势。例如,小型扁平存储驱动器、微型摄像机、数码相机、微型立体声耳机、微型收录机、移动通讯手机、BP机等产品几乎都使用小型化、片状永磁无刷直流电机。这种电机的定子为扁平扇形绕组,采用精密光刻或切片技术制作,也有用导线绕制的;转子是旋转磁极结构,大多选用高性能的钕铁硼永磁材料。手机、BP机使用的振动电机,其圆柱形电机的外形尺寸为 $\phi 4 \times 10\text{mm}$,片状振动电机外形尺寸为 $\phi 12 \times 3\text{mm}$,更小型的振动电机也在研制中。小型存储驱动器用的主轴无刷电动机外形尺寸为 $\phi 16 \times 1.37\text{mm}$ 。

(4) 大功率化。在工业传动和交通运输等领域,特种电机呈现大功率化趋势。我国开发的1120 kW永磁同步电动机是目前世界上功率最大的异步起动高效稀土永磁电机,其效率高于96.5%(同规格电机效率为95%),功率因数0.94,可以替代比它大1~2个功率等级的普通电动机。目前,开关磁阻电机传动系统最大功率为5 MW,最大转矩 $10^6\text{N} \cdot \text{m}$ 转速可达100000 r/min,我国也已有上百千瓦的开关磁阻电机产品。

(5) 非电磁化。随着特种电机应用领域的扩大和应用环境的变化,传统电磁原理电机已不能完全满足要求。用相关学科的新成果,包括新原理、新材料,开发具有非电磁原理的特种电机已成为电机发展的一个重要方向。世界各国都在探索其他新型电机,如静电电机、超声电机、仿生电机、光热电机、形状记忆合金电机和微波电机等。其中,超声电机已在航空航天、机器人、汽车、精密定位仪、微型机械等领域得到成功的应用。美国NASA的Coddar

Space Flight Center 将超声电机应用于空间机器人技术。其中微型机械手 MicroArm I 使用了扭矩 $0.105 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的超声电机, 火星机械手 MarsArm II 使用了三个扭矩为 $0.168 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和一个扭矩为 $0.111 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的超声电机, 它们比使用同等功能的传统电机轻 40%。

4 本课程的内容简介和使用说明

特种电机及其控制是一门涉及面广、综合性强、与工程实际结合紧密的课程。特种电机的内容涉及到较多先修课程的中所学的知识, 如电机学(电机与拖动)、电力电子技术、自动控制理论、电子技术基础、单片机原理与接口技术、检测技术等。通过本课程的学习, 应学会如何灵活应用所学知识解决工程实际中遇到的问题。

本教材共 6 章, 绪论介绍了特种电机的分类、应用及发展趋势。第 1 章介绍了无刷直流电动机传动系统, 包括无刷直流电动机的原理、结构和主要特性, 及其运行状态、控制方式和驱动控制系统。第 2 章介绍开关磁阻电动机传动系统, 重点介绍其工作原理、分析方法、控制策略和驱动控制系统。第 3 章介绍步进电动机的结构、分类、工作原理、静态特性、驱动控制方法。第 4、5 章分别介绍直线电动机和盘式电动机的结构特点、工作原理及其应用与发展概况。第 6 章介绍超声波电机的原理、结构和控制及其应用与发展概况。

为了便于组织教学, 本书在编写中既考虑到全书的系统性和完整性, 又保持每种电机的相对独立性。各院校可根据具体需要, 有重点地选择其中一种或几种电机。

由于特种电机及其控制是一门实践性很强的课程。要求学生尽量争取参与一切可能的实验和科研课题等实践环节, 以培养动手能力。同时, 特种电机及其控制技术的发展很快, 学生在掌握基础知识和基本方法的基础上, 还应积极查阅最新文献资料, 了解特种电机发展的最新动向。

参考文献

- [1] 唐任远. 特种电机. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] 唐任远. 稀土永磁电机的现状与未来. 电器工业. 2003 (1).
- [3] 陈忠. 面向二十一世纪的微特电机. 微特电机. 1998 (6).
- [4] 赵淳生. 面向 21 世纪的超声电机技术. 中国工程科学. 2002, 4 (2).
- [5] 许青, 叶永伟. 微特电机及其发展趋势. 机电工程. 2003, 20 (3).
- [6] 袁海林, 施进浩. 我国微特电机产业现状和发展探讨. 微特电机. 2000 (5).

第1章 无刷直流电动机及其控制系统



学习指导

无刷直流电动机是一种由电动机本体、位置检测器、逆变器和控制器组成的自同步电动机系统或自控式变频同步电动机,其特点是电机中气隙磁密分布为方波(或梯形波),因而电枢绕组的反电动势和电流波形均为方波(梯形波)。通过本章的学习,读者应当掌握以下知识:

- 了解无刷直流电动机的结构、特点和发展趋势;
- 掌握无刷直流电动机的各种主电路及其工作方式,学会主电路的设计;
- 掌握无刷直流电动机的运行特性及其分析方法;
- 了解无刷直流电动机的转矩脉动产生的原因及其抑制转矩脉动的对策;
- 掌握无刷直流电动机的位置检测方法,包括位置传感器的构成和无位置传感器位置检测方法(主要是反电动势过零检测法);
- 了解无刷直流电动机中电枢反应的特点及其对电机性能的影响;
- 了解无刷直流电动机控制专用集成电路及其使用;
- 掌握无刷直流电动机微机(主要是单片机和 DSP)控制系统的设计方法,从制定控制策略、确定控制方法入手,设计微机与各部分功能电路(如反馈信号检测电路、故障检测与保护电路和逆变器驱动电路)的接口,编写控制软件,最终完成整个控制系统。

1.1 无刷直流电动机系统

1.1.1 无刷直流电动机的组成

与交流电动机相比,直流电动机具有运行效率高和调速性能好等优点,但传统的直流电动机采用电刷—换向器结构,以机械方式进行换向,不可避免地存在噪声、火花、无线电干扰以及寿命短等致命弱点,再加上制造成本高及维修困难等缺点,大大地限制了它的应用范围,致使目前工农业生产中大多采用三相感应电动机。

那么,能不能既保持直流电动机的优良特性,又去掉机械式换向装置呢?无刷直流电动机正是在直流电动机的基础上发展起来的一种新型电机。

无刷直流电动机(Brushless DC Motor, BLDCM)是一种典型的机电一体化产品,它是由电动机本体、位置检测器、逆变器和控制器组成的自同步电动机系统或自控式变频同步电动机,如图 1-1 所示。位置检测器检测转子磁极的位置信号,控制器对转子位置信号进行逻辑处理,产生相应的开关信号,开关信号以一定的顺序触发逆变器中的功率开关器件,将电源

功率以一定的逻辑关系分配给电动机定子各相绕组,使电动机产生持续不断的转矩。

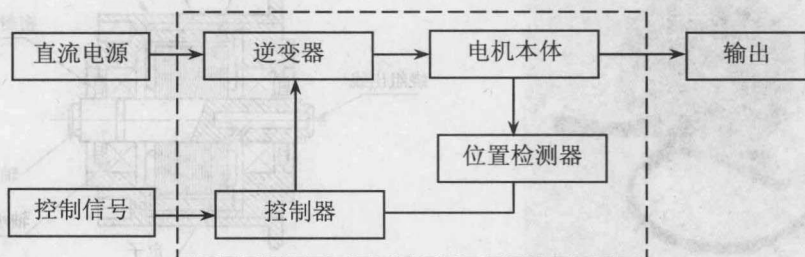


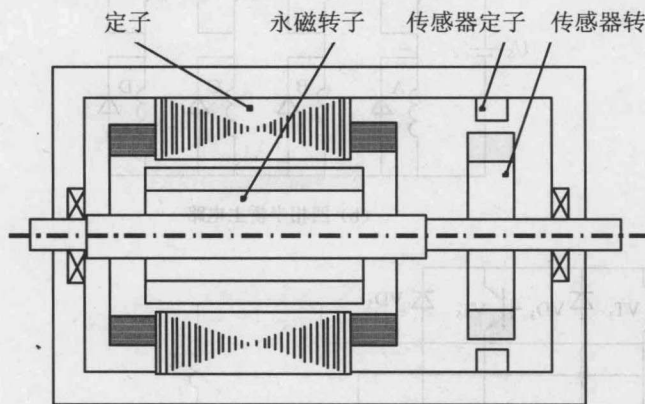
图 1-1 无刷直流电动机系统的组成

应该指出,对于无刷直流电动机的组成,还存在另一种定义。由于无刷直流电动机最初是从用电子换向取代直流电动机的机械换向发展起来的,从广义电机的角度看,位置检测器和逆变器对应于原直流电动机的机械换向装置,而控制器与原直流电机的部件无法对应,因此,人们习惯上将控制器归到广义电机之外,而认为无刷直流电动机是由电机本体、位置检测器和逆变器三部分组成的。但无刷直流电动机的工作离不开控制系统,控制器已成为无刷直流电动机不可分割的一部分,从这个意义上讲,控制器更应该划入广义电机之中。

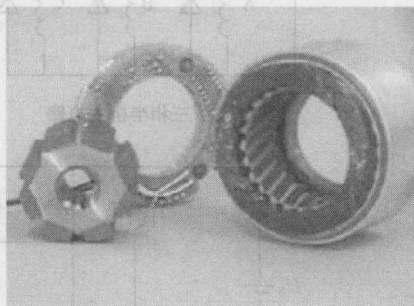
下面我们介绍无刷直流电动机各部分的基本结构。

1. 电机本体

无刷直流电动机最初的设计思想来自普通的有刷直流电动机,不同的是将直流电动机的定、转子位置进行了互换,其转子为永磁结构,产生气隙磁通;定子为电枢,有多相对称绕组。原直流电动机的电刷和机械换向器已被逆变器和转子位置检测器所代替。所以无刷直流电动机的电机本体实际上是一种永磁同步电机,如图 1-2 所示。由于无刷直流电动机的电机本体为永磁电机,所以无刷直流电动机也称为永磁无刷直流电动机。



(a) 结构示意图



(b) 定转子实际结构

图 1-2 无刷直流电动机结构

除了普通的内转子无刷直流电动机之外,在电动车驱动中还常常采用外转子结构,将无刷直流电动机装在轮毂之内,直接驱动电动车辆。外转子无刷直流电动机的结构如图 1-3 所示,其定子绕组出线和位置传感器引线都从电机的轴引出。

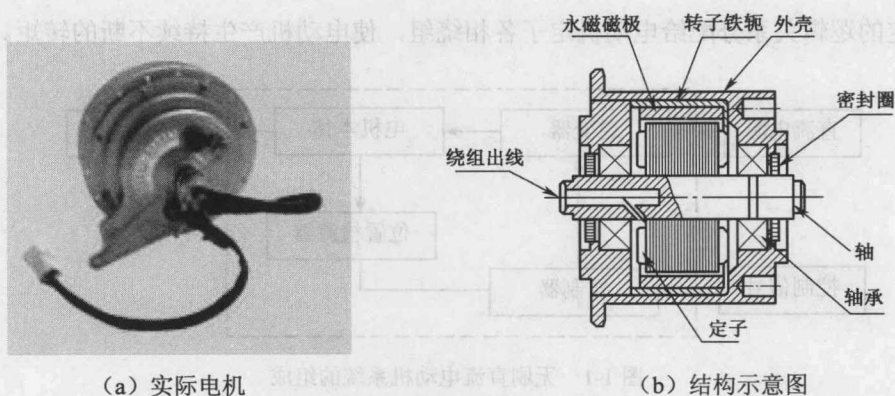


图 1-3 外转子无刷直流电动机

2. 逆变器

逆变器将直流电转换成交流电向电机供电，与一般逆变器不同，它的输出频率不是独立调节的，而是受控于转子位置信号，是一个“自控式逆变器”。由于采用自控式逆变器，无刷直流电动机输入电流的频率和电机转速始终保持同步，电机和逆变器不会产生振荡和失步，这也是无刷直流电动机的重要优点之一。

逆变器主电路有桥式和非桥式两种，而电枢绕组既可以接成星形也可以接成角形（封闭形），因此电枢绕组与逆变器主电路的连接可以有多种不同的组合，图 1-4 给出了几种常用的连接方式。其中，图 1-4 (a) 和图 1-4 (b) 是非桥式（或称为半桥式）主电路，电枢绕组只允许单方向通电，属于半控型主电路；其余为桥式主电路，电枢绕组允许双向通电，属于全控型主电路。

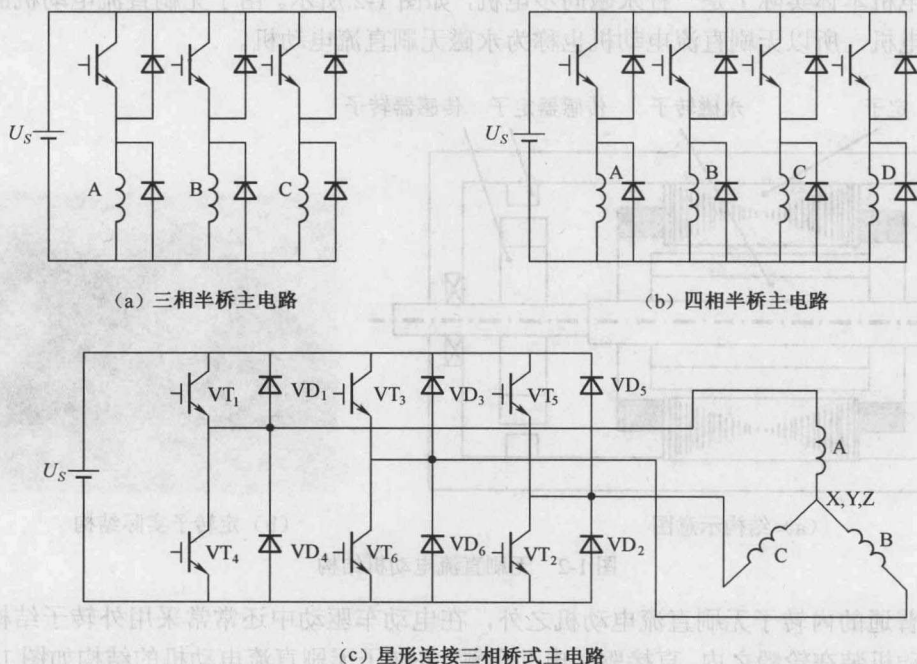
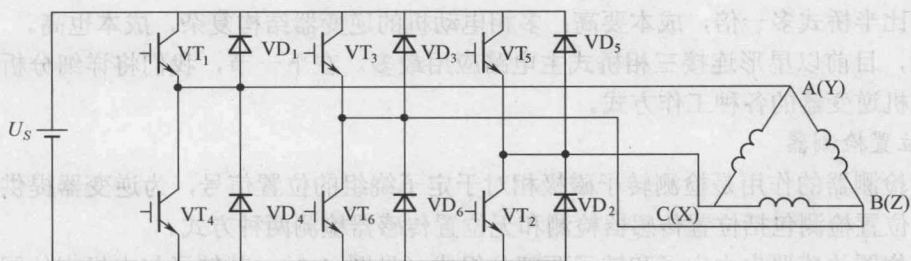
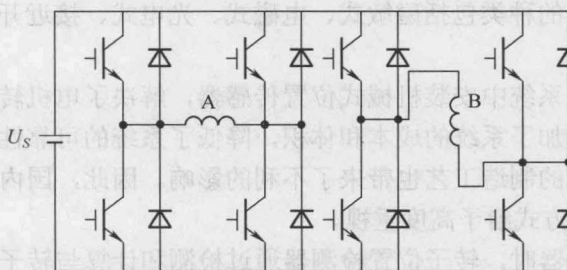


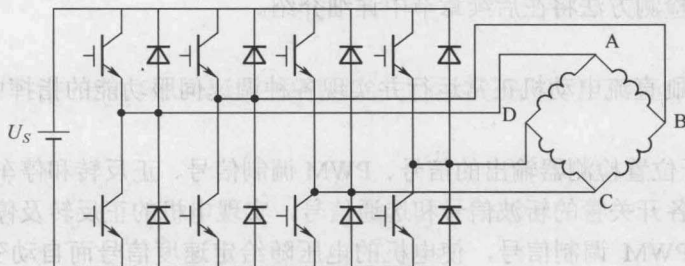
图 1-4 无刷直流电动机电枢绕组与逆变器的连接



(d) 三角形连接三相桥式主电路



(e) 正交两相全控型主电路



(f) 封闭形连接四相桥式主电路

图 1-4 无刷直流电动机定子绕组与逆变器的连接 (续图)

目前，无刷直流电动机的逆变器主开关一般采用 IGBT 或功率 MOSFET 等全控型器件，有些主电路已有集成的功率模块（PIC）和智能功率模块（IPM），选用这些模块可以提高系统的可靠性。为了避免重复，本书大部分电路都是以 IGBT 为例绘制的。

无刷直流电动机定子绕组的相数可以有不同的选择，绕组的连接方式也有星形和角形之分，而逆变器又有半桥型和全桥型两种。不同的组合会使电动机产生不同的性能和成本，这是每一个应用系统设计者都要考虑的问题。综合以下三个指标，有助于我们做出正确的选择。

(1) 绕组利用率。与普通直流电动机不同，无刷直流电动机的绕组是断续通电的。适当地提高绕组利用率将可以使同时通电的导体数增加，电阻下降，提高效率。从这个角度来看，三相绕组优于四相和五相绕组。

(2) 转矩脉动。无刷直流电动机的输出转矩脉动比普通直流电动机的转矩脉动大。一般相数越多，转矩的脉动越小；采用桥式主电路比采用非桥式主电路时的转矩脉动小。

(3) 电路成本。相数越多，逆变器电路使用的开关管越多，成本越高。桥式主电路所用

的开关管比半桥式多一倍,成本要高;多相电动机的逆变器结构复杂,成本也高。

因此,目前以星形连接三相桥式主电路应用最多。在下一节,我们将详细分析三相无刷直流电动机逆变器的各种工作方式。

3. 位置检测器

位置检测器的作用是检测转子磁极相对于定子绕组的位置信号,为逆变器提供正确的换相信息。位置检测包括位置传感器检测和无位置传感器检测两种方式。

转子位置传感器也由定子和转子两部分组成(见图 1-2),其转子与电机本体同轴,以跟踪电机本体转子磁极的位置;其定子固定在电机本体定子或端盖上,以检测和输出转子位置信号。转子位置传感器的种类包括磁敏式、电磁式、光电式、接近开关式、正余弦旋转变压器式以及光电编码器等。

在无刷直流电动机系统中安装机械式位置传感器,解决了电机转子位置的检测问题。但是位置传感器的存在增加了系统的成本和体积,降低了系统的可靠性,限制了无刷直流电动机的应用范围,对电机的制造工艺也带来了不利的影响。因此,国内外对无刷直流电动机的无转子位置传感器运行方式给予高度重视。

无机械式位置传感器时,转子位置检测器通过检测和计算与转子位置有关的物理量间接地获得转子位置信息,主要有反电动势检测法、续流二极管工作状态检测法、定子三次谐波检测法和瞬时电压方程法等。

位置信号的检测方法将在后续章节中详细介绍。

4. 控制器

控制器是无刷直流电动机正常运行并实现各种调速伺服功能的指挥中心,它主要完成以下功能:

(1) 对转子位置检测器输出的信号、PWM 调制信号、正反转和停车信号进行逻辑综合,为驱动电路提供各开关管的斩波信号和选通信号,实现电机的正反转及停车控制。

(2) 产生 PWM 调制信号,使电机的电压随给定速度信号而自动变化,实现电机开环调速。

(3) 对电动机进行速度闭环调节和电流闭环调节,使系统具有良好的动态和静态性能。

(4) 实现短路、过电流、过电压和欠电压等故障保护功能。

控制器主要有以下几种形式:分立元件加少量集成电路构成的模拟控制系统、基于专用集成电路的控制系统、数模混合控制系统和全数字控制系统。我们将在后续章节中详细介绍控制器的设计。

1.1.2 无刷直流电动机的工作原理

我们以图 1-5 所示的无刷直流电动机系统来说明无刷直流电动机的工作原理。电机本体的电枢绕组为三相星形连接,位置传感器与电机本体同轴,控制电路对位置信号进行逻辑变换后产生驱动信号,驱动信号经驱动电路隔离放大后,控制逆变器的功率开关管,使电机的各相绕组按一定的顺序工作。

当转子旋转到图 1-6 (a) 所示的位置时,转子位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器,使 VT_1 、 VT_6 导通,即 A、B 两相绕组通电,电流从电源的正极流出,经 VT_1 流入 A 相绕组,再从 B 相绕组流出,经 VT_6 回到电源的负极。电枢绕组在空间产生的磁