

微特电机

WEITE DIANJI

莫会成 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

微特电机

WEITE DIANJI

莫会成 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统地介绍了各种微特电机运行原理、性能特点和设计方法等内容。全书共分三篇：上篇介绍通用基础理论，分别从电磁理论基础、磁路分析与永磁磁路、交流绕组基础、损耗与发热、振动、噪声与电磁兼容、电机常用分析方法等方面进行详细讲述；中篇介绍伺服与控制电机，从电气伺服驱动系统的共性问题出发，主要讲述了永磁直流电动机、永磁交流伺服电动机、感应伺服电动机、开关磁阻电机、步进电动机和传感器等；下篇介绍驱动与特种电机，主要讲述同步电机、单相电机、交直流两用电动机、直线电机、磁滞电动机、超声波电机等。

本书内容新颖丰富，涵盖面广，水平较高，实用性强，对从事微特电机设计、研发、管理和销售等相关人员在理论和实践上都有一定指导作用，还可作为电气工程师和相关领域工程技术人员以及高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

微特电机/莫会成等编著. —北京：中国电力出版社，2015.9

ISBN 978-7-5123-8008-0

I. ①微… II. ①莫… III. ①微电机 IV. ①TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 154316 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：周 娟 杨淑玲 责任印制：蔺义舟 责任校对：郝军燕

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2015 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·42.5 印张·1116 千字

定价：118.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

我国微特电机行业经过五十多年的发展,其生产规模已跃居世界第一。和我国制造业一样,微特电机行业也正经历着由大变强的转变。可以预计,今后 10~20 年将是我国微特电机行业非常重要的发展变革时期,特别是《中国制造 2025》的发布和实施,一定会激励我国制造业大步前行。而作为高端装备制造业中的核心零部件,微特电机在其中起着技术引领、支撑与保障作用;同时随着家庭平均拥有微特电机数量的不断增加,其性能、质量的优劣直接影响着人们的生活品质。我们坚信,中国微特电机的盛世即将来临。

乙未仲夏,恰逢西安微电机研究所成立 50 周年。对西微所而言,可谓风雨兼程半世纪。曾经历辉煌,也曾经受磨砺,在风浪中前行。作为西微所的一员,更作为微电机行业的老兵,不禁浮想联翩,夜不能寐,总想为西微所、乃至为微特电机行业留下点纪念,于是便有了写书的念头,了却一份情结!

想好了便做,于是边工作,边构思,历经数月,之后又拉了几个同事一起,前后一年有余。中间也有过徘徊,然而这本《微特电机》终于还是与读者见面了。

微特电机具有鲜明的技术特征,并非传统意义上大、中、小电机向下的自然延伸,已经成为电机技术领域中最具发展潜力和最活跃的分支,它不仅广泛使用于经济建设和人民生活的各个领域,而且已经成为运控装置和智能化装备中的关键核心部件。本书坚持全面、实用和新颖的原则,比较系统地介绍了各类微特电机的原理和结构、性能和参数、设计和制造以及控制方法和特点等,力求使读者对微特电机有比较全面和详细的了解。

全书分为上、中、下三篇。上篇为通用基础理论,力求从新的视角,用新的思路对电机的基础理论和常用技术进行简明的分析讨论,内容涉及电磁理论基础、磁路、绕组、损耗与发热、振动与噪声、电磁兼容以及常用的电机分析方法等。中篇讨论的是伺服与控制电机,主要介绍永磁直流电动机、永磁交流伺服电动机、磁阻类伺服电动机以及伺服系统用传感器等内容,这部分是今后相当长时间微特电机主要技术发展趋势。下篇为驱动与特种电机,内容包括永磁同步电机、单相电机、直线电机、串激电机、低速同步电机、磁滞电机和超声波电机。除了超声波电机是新品种、磁滞电动机较少应用外,其他品种电机已获得广泛使用。对于某些微特电机如测速发电机等,现在已很少使用,但为了保证成书的完整性,仍然予以保留;而对于有些非电磁原理的特种电机,如磁滞伸缩驱动器、记忆合金电机及光热电机等,因尚处于探索和实验阶段,则未收入本书中。

本书第 1~7 章、第 9 章和第 10 章由莫会成编写;第 8 章、第 14 章、第 17 章、第 19 章和第 22 章由闵琳编写;第 11 章由吴玉新和鄢家财编写;第 12 章、第 13 章、第 15 章、第 16 章、第 20 章和第 21 章由李中军编写;第 18 章由黄大绪编写。全书由莫会成统稿并审定;张朴和牒正文负责总校订。西安交通大学拾以厚和西安科技大学莫为两位研究生也参与了其中部分内容的编写工作。

书中部分内容体现了作者多年来的研究成果和西微所同事们的经验体会,在编写过程中参阅了大量技术文献,其主要部分已列在参考文献目录中。这里谨对参加本书编写的作者表示诚

挚感谢，同时对家人以及所有参与、关心和支持编写工作的同事和朋友们深表谢意。

本书对从事微特电机设计、研发、管理和销售等相关人员在理论和实践上都有一定指导作用，还可作为电气工程师和相关领域工程技术人员以及高等院校相关专业师生的参考书。

尽管目标明确，愿望良好，但由于作者能力和水平所限，内容仍有诸多不如意之处，敬请读者见谅。加之时间匆忙，成稿仓促，错疏之处恳请读者指正。

莫会成

乙未年仲夏于长安

目 录

前言

上篇 通用基础理论

第1章 电磁理论基础..... 3

1.1 磁场中的几个基本物理量 3

1.1.1 磁感应强度 3

1.1.2 磁通量 3

1.1.3 磁导率 3

1.1.4 磁场强度 4

1.2 麦克斯韦方程组 4

1.3 电磁感应定律 5

1.3.1 电磁感应定律 5

1.3.2 正弦感应电动势 6

1.3.3 运动电动势 6

1.3.4 自感电动势与自感 7

1.3.5 互感电动势与互感 8

1.4 洛伦兹力与电磁转矩 8

第2章 磁路分析与永磁磁路 10

2.1 铁磁材料..... 10

2.1.1 铁磁材料的磁化 10

2.1.2 磁化曲线与磁滞曲线 10

2.1.3 铁磁材料 11

2.2 永磁材料..... 12

2.2.1 永磁材料的退磁曲线 12

2.2.2 永磁材料的主要性能参数 13

2.2.3 永磁材料的稳定性及稳定性 处理 15

2.2.3.1 热稳定性 15

2.2.3.2 磁稳定性 16

2.2.3.3 化学稳定性 16

2.2.3.4 时间稳定性 16

2.2.3.5 稳定性处理方法 17

2.2.4 永磁材料的主要种类 17

2.2.4.1 铝镍钴永磁材料 17

2.2.4.2 铁氧体永磁材料 19

2.2.4.3 稀土钴永磁材料 20

2.2.4.4 钕铁硼永磁材料 21

2.2.4.5 粘结永磁材料 23

2.3 磁路基本定律..... 25

2.3.1 磁路的概念 25

2.3.2 全电流定律 25

2.3.3 磁路的欧姆定律 26

2.3.4 磁路的基尔霍夫第一定律 26

2.3.5 磁路的基尔霍夫第二定律 26

2.3.6 电路与磁路的比较 27

2.4 永磁磁路的分析与计算..... 28

2.4.1 永磁体的等效处理 28

2.4.2 外磁路的等效与合成磁路 29

2.4.3 漏磁系数和空载漏磁系数 30

2.4.4 等效磁路的解析法 30

2.4.4.1 标么值 31

2.4.4.2 磁路的解析计算 32

2.4.5 等效磁路的图解法 33

2.4.6 永磁体的最佳工作点 34

2.4.6.1 最大磁能的永磁体最佳工作点 ... 34

2.4.6.2 最大有效磁能的永磁体最佳 工作点 34

第3章 交流绕组基础 36

3.1 交流绕组的分类、要求及基本 术语..... 36

3.1.1 交流绕组的分类 36

3.1.2 交流绕组的构成原则 36

3.1.3 基本术语 36

3.2 几种常见的交流绕组..... 38

3.2.1 三相单层绕组..... 38

3.2.2 三相双层绕组..... 39

3.2.2.1 叠绕组 39

3.2.2.2 波绕组 40

3.2.2.3 分数槽绕组 41

3.3 正弦磁场下交流绕组的感应 电动势..... 42

3.3.1 一根导体的感应电动势	42	4.2.2 空载时铁心中的附加损耗	60
3.3.2 线圈中的感应电动势和短距系数	43	4.2.3 电气损耗	60
3.3.2.1 整距线圈的感应电动势	43	4.2.3.1 绕组中的电气损耗	61
3.3.2.2 短距线圈的感应电动势和短距系数	43	4.2.3.2 电刷接触损耗	61
3.3.2.3 线圈组的感应电动势和分布系数	44	4.2.4 负载时的附加损耗	61
3.3.2.4 绕组的相电动势与线电动势	44	4.2.5 机械损耗	61
3.4 谐波电动势及其削弱方法	45	4.3 电力电子供电下损耗的修正	62
3.4.1 谐波电动势	45	4.3.1 电气损耗的修正	62
3.4.2 削弱谐波电动势的方法	46	4.3.2 铁心损耗的修正	62
3.4.2.1 合理设计气隙磁场	46	4.3.3 附加损耗	63
3.4.2.2 绕组采用星形接法	46	4.3.4 电力电子供电下的电机效率	63
3.4.2.3 利用电机绕组减小电动势中的谐波	46	4.4 电机的发热	64
3.4.2.4 齿谐波电动势及削弱方法	47	4.4.1 电机的温升和温升限值	64
3.5 正弦电流时交流绕组的磁动势	48	4.4.2 传热的基本定律	65
3.5.1 单相绕组的脉振磁动势	48	4.4.2.1 热传导定律	65
3.5.1.1 整距线圈的磁动势	48	4.4.2.2 热传导方程	67
3.5.1.2 单层整距线圈组的磁动势	49	4.4.2.3 对流散热与牛顿定律	68
3.5.1.3 双层短距绕组磁动势和一相绕组磁动势	50	4.4.2.4 辐射散热与斯忒藩-玻耳兹曼定律	70
3.5.1.4 脉振磁动势的分解	51	4.4.3 电机稳定温升	72
3.5.2 三相绕组的旋转磁动势	52	4.4.3.1 热路法	72
3.5.2.1 三相绕组的基波合成磁动势	52	4.4.3.2 简化计算法	72
3.5.2.2 三相绕组的谐波合成磁动势	53	4.4.3.3 网络法	73
3.5.2.3 机械旋转磁动势	53	4.4.4 不稳定温升与热时间常数	73
3.5.3 两相及多相绕组的旋转磁动势	54	4.5 微特电机的冷却与工作制	75
3.5.3.1 两相对称绕组的圆形旋转磁动势	54	4.5.1 冷却方式	75
3.5.3.2 两相不对称绕组的椭圆形旋转磁动势	54	4.5.1.1 小型封闭自冷式一般用途微特电机	75
3.5.3.3 多相绕组的旋转磁动势	55	4.5.1.2 全封闭驱动用微特电机	75
第4章 电机的损耗与发热	57	4.5.1.3 分装式微特电机	75
4.1 能量守恒原理	57	4.5.1.4 冷却用微特电机	75
4.2 损耗分析	57	4.5.1.5 微特电机组件及系统	75
4.2.1 基本铁耗	58	4.5.1.6 高功率密度电机	76
4.2.1.1 磁滞损耗	58	4.5.2 工作制	76
4.2.1.2 涡流损耗	58	第5章 电机的振动、噪声与电磁兼容	78
4.2.1.3 轭部(齿联轭)及齿部的基本铁耗	59	5.1 电机振动	78
		5.1.1 产生振动的主要原因	78
		5.1.2 电机振动的测试方法	78
		5.1.3 振动强度的限值	80
		5.2 电机噪声	80
		5.2.1 电机的主要噪声源及产生机理	80

5.2.1.1 通风噪声	80	6.3.1 电流、电压和阻抗的变换 规律	109
5.2.1.2 电磁噪声	80	6.3.2 新、旧坐标系中功率的关系	111
5.2.1.3 机械噪声	82	6.4 常用的坐标系和坐标变换	112
5.2.2 电机噪声测定方法	82	6.4.1 常用坐标系	112
5.2.2.1 声音的量度	82	6.4.2 常用坐标变换	112
5.2.2.2 电机噪声声压级的测量方法	83	6.5 电机的电磁场	117
5.2.2.3 对试验环境影响因素的校正	84	6.5.1 电机电磁场分析	117
5.2.2.4 试验结果的确定方法	84	6.5.1.1 电机电磁场概述	117
5.2.2.5 声源识别与频谱分析	85	6.5.1.2 电机电磁场研究方法	118
5.2.3 微特电机的噪声限值	86	6.5.2 磁场的边值问题	120
5.2.4 降低电机噪声的方法	87	6.5.2.1 位函数满足的偏微分方程	120
5.2.4.1 降低电磁噪声的措施	87	6.5.2.2 边界条件	121
5.2.4.2 降低机械噪声的措施	89	6.5.2.3 边值问题	122
5.2.4.3 降低通风噪声的措施	89	6.5.3 有限元法的基本原理与步骤	122
5.3 电机的电磁兼容	89	6.5.3.1 条件变分问题	122
5.3.1 电磁兼容的基本概念	89	6.5.3.2 剖分插值	122
5.3.1.1 电磁兼容认证的必要性	89	6.5.3.3 单元分析	123
5.3.1.2 常用名词术语	90	6.5.3.4 总体合成与边界条件的处理	124
5.3.2 电磁干扰三要素	90	6.5.3.5 方程组求解	125
5.3.2.1 干扰源	91	6.5.4 永磁体的等效	125
5.3.2.2 干扰传播的途径	97	6.5.4.1 磁化矢量法	125
5.3.2.3 敏感设备敏感度的度量	99	6.5.4.2 等效面电流法	126
5.3.3 电磁兼容的标准与测量	100	6.5.4.3 瓦形磁极的等效	127
5.3.3.1 电磁兼容标准	100	6.5.5 磁场与路结合分析法	127
5.3.3.2 电磁兼容的测量方法	101	6.6 电机中的物理“场”和电机中的 多种“路”	128
5.3.4 提高产品电磁兼容性 EMC 措施	102	6.6.1 电机中的物理“场”	128
5.3.4.1 接地	102	6.6.2 电机中的“路”	129
5.3.4.2 滤波	103	6.6.3 电机中的“场”与“路”	130
5.3.4.3 屏蔽	103		
第 6 章 电机常用分析方法简述	104		
6.1 电机分析的一般过程	104	中篇 伺服与控制电机	
6.1.1 动态与稳态分析	104	第 7 章 电气伺服系统概述	135
6.1.2 电机分析的步骤	104	7.1 概念与分类	135
6.1.3 电机分析时常用的基本假设 条件	105	7.1.1 定义	135
6.2 电机常用动态分析方法	106	7.1.2 发展历史	135
6.2.1 叠加原理	106	7.1.3 分类和特点	135
6.2.2 拉普拉斯变换	106	7.1.3.1 两相交流伺服电动机控制 系统	136
6.2.3 状态方程及其解法	107	7.1.3.2 直流电动机控制系统	136
6.3 坐标变换	109		

7.1.3.3 永磁交流伺服电动机控制系统	136	7.4 伺服电动机转矩波动	160
7.1.3.4 感应电动机控制系统	137	7.4.1 磁阻变化引起的转矩波动	160
7.1.3.5 步进电动机控制系统	137	7.4.2 制造精度及工艺	161
7.1.3.6 开关磁阻电动机控制系统	137	7.4.2.1 磁路不对称	161
7.1.4 基本要求和发展趋势	138	7.4.2.2 定、转子不同轴	161
7.1.4.1 基本要求	138	7.4.2.3 铁心扣片槽、焊接槽等工艺	162
7.1.4.2 伺服系统的发展趋势	138	7.4.2.4 转子旋转体不光滑	162
7.2 基本特性参数	138	7.4.3 电机运行时电磁转矩的波动	162
7.2.1 工作区	138	7.4.3.1 方波驱动	163
7.2.2 特征参数	139	7.4.3.2 正弦波驱动	163
7.2.2.1 反电动势常数和转矩常数	139	7.4.3.3 电流换向	164
7.2.2.2 时间常数	139	7.4.3.4 电枢反应	164
7.2.3 稳态性能	142	7.4.4 控制器引起的转矩波动	164
7.2.3.1 转速调整率	142	7.5 伺服系统常用的控制策略	165
7.2.3.2 调速比	142	7.5.1 2 自由度控制	165
7.2.3.3 静态刚度	142	7.5.2 含滞回单元的有限时间整定	166
7.2.3.4 定位精度和稳态跟踪误差	142	7.5.3 H_∞ 控制	167
7.2.4 动态性能	142	7.5.4 自适应控制	168
7.2.4.1 转矩波动系数	142	7.5.5 滑模变结构控制	169
7.2.4.2 频带宽度	142	7.5.6 智能控制	169
7.2.4.3 超调量	142	7.5.6.1 模糊控制	169
7.2.4.4 阶跃输入的转速响应时间	143	7.5.6.2 专家系统	170
7.2.4.5 转矩变化的时间响应	143	7.5.6.3 预测控制	170
7.2.4.6 建立时间	143	7.5.6.4 学习控制	170
7.3 交流伺服系统的 PWM 控制技术	143	7.5.6.5 神经网络控制	170
7.3.1 PWM 控制基本原理	143	第 8 章 永磁直流电动机	171
7.3.2 正弦波 PWM 技术	145	8.1 概述	171
7.3.3 电流跟踪 PWM 技术	147	8.2 工作原理和结构	171
7.3.4 电压空间矢量 PWM 控制技术	149	8.2.1 工作原理	171
7.3.4.1 SVPWM 的基本概念	149	8.2.2 结构	172
7.3.4.2 基本电压空间矢量	150	8.2.2.1 磁极	172
7.3.4.3 磁链轨迹的控制	152	8.2.2.2 电枢	174
7.3.4.4 t_1 、 t_2 和 t_0 的计算	153	8.2.2.3 换向器	176
7.3.4.5 扇区号的确定	154	8.2.2.4 电刷	177
7.3.5 几种 PWM 控制技术比较	155	8.3 基本方程和运行特性	178
7.3.5.1 谐波分析	155	8.3.1 基本方程	178
7.3.5.2 电压利用率与过调制	158	8.3.2 稳态工作特性	179
7.3.5.3 三种 PWM 控制技术小结	159	8.3.2.1 机械特性	179
		8.3.2.2 调节特性	180
		8.3.2.3 转速-电流特性	180
		8.3.2.4 电流-转矩特性	180

8.3.2.5 效率特性	181	8.8.2.1 性能特点	200
8.3.3 永磁直流伺服电动机的特性	181	8.8.2.2 指标体系及参数	201
8.3.3.1 转矩-转速特性曲线及 工作区	181	8.8.3 力矩波动的产生及其降低 措施	202
8.3.3.2 动态特性	182	8.8.4 设计特点	203
8.4 电枢反应	183	8.9 几种无铁心永磁直流伺服 电动机	205
8.4.1 交轴电枢反应	183	8.9.1 空心杯电枢永磁直流伺服 电动机	205
8.4.2 直轴电枢反应	183	8.9.1.1 定子磁路结构	205
8.4.3 最大去磁工作点校核	183	8.9.1.2 空心杯电枢结构及绕组型式	205
8.5 调速及控制方法	184	8.9.1.3 换向器及电刷	206
8.5.1 调节主磁通调速	184	8.9.1.4 特点及其应用	206
8.5.2 电枢回路串电阻调速	184	8.9.2 线绕盘式永磁直流电动机	207
8.5.3 控制电枢电压调速	185	8.9.2.1 结构特点	207
8.6 换向分析	186	8.9.2.2 电枢结构及绕组型式	208
8.6.1 换向的电磁理论	187	8.9.2.3 特点及其应用	208
8.6.1.1 换向元件中的电动势	187	8.9.3 印制绕组永磁直流电动机	208
8.6.1.2 换向元件中的电流	188	第9章 永磁交流伺服电动机	210
8.6.2 电刷及其选择	190	9.1 电机基本结构	210
8.6.3 换向火花	191	9.1.1 电机结构	210
8.6.3.1 火花产生原因	191	9.1.2 电枢绕组型式	210
8.6.3.2 火花等级及火花评定	192	9.1.3 转子结构	211
8.6.4 改善换向的方法	192	9.1.3.1 表贴式转子结构	211
8.6.4.1 移刷	192	9.1.3.2 内置式转子结构	212
8.6.4.2 换向极	192	9.1.3.3 混合式转子结构	213
8.6.4.3 补偿绕组	193	9.2 永磁无刷直流电动机	214
8.6.4.4 优选电刷并保持电刷与换向器 滑动接触	193	9.2.1 系统构成	214
8.7 设计概要	193	9.2.2 工作原理	215
8.7.1 额定数据和指标体系	193	9.2.3 性能分析	218
8.7.2 设计要点	194	9.2.3.1 参数与稳态特性	218
8.7.2.1 主要尺寸的确定及参数的 选取	194	9.2.3.2 动态模型与动态模拟	220
8.7.2.2 磁极结构及极数选择	194	9.2.3.3 电枢反应	221
8.7.2.3 磁路设计及工作点确定	194	9.2.4 转矩波动	222
8.7.2.4 电枢冲片设计及绕组参数	196	9.2.4.1 定义与原因	222
8.7.2.5 换向性能设计	197	9.2.4.2 换相与转矩脉动	223
8.7.2.6 温升对永磁直流电动机性能的 影响	199	9.2.5 无刷电机的运行模式	226
8.8 永磁直流力矩电动机	199	9.2.5.1 开环运行	227
8.8.1 结构特点	199	9.2.5.2 转矩控制模式	227
8.8.2 运行性能	200	9.2.5.3 速度控制模式	227
		9.2.5.4 位置控制模式	228

9.2.5.5 常用无传感器位置检测方法 简介	228	9.7.1 确定任务目标	260
9.3 方波驱动与正弦波驱动比较	229	9.7.2 方案与设计特点	261
9.3.1 基本概念	229	9.7.2.1 方案选择	261
9.3.2 转矩与反电动势常数	230	9.7.2.2 电机设计特点	262
9.3.3 转矩密度与功率密度	232	第 10 章 分数槽集中绕组伺服电动机 ...	266
9.3.4 转矩波动	233	10.1 概述	266
9.4 永磁交流伺服电动机的动态 模型	233	10.1.1 定义	266
9.4.1 三相系统下的数学模型	233	10.1.2 分数槽电机的优点	266
9.4.1.1 电压与磁链方程	234	10.2 分数槽电机的约束条件和极槽 配合	267
9.4.1.2 绕组电感参数	234	10.2.1 分数槽电机极槽约束条件	267
9.4.1.3 感应电动势	237	10.2.2 分数槽电机极槽配合的选择 ...	268
9.4.2 两相坐标系下的动态模型	237	10.3 绕组系数和绕组磁动势分析	272
9.4.2.1 $\alpha\beta 0$ 坐标系中的动态模型	237	10.3.1 绕组系数分析	272
9.4.2.2 $dq 0$ 坐标系中的动态模型	239	10.3.1.1 基波绕组系数	272
9.4.3 电磁功率和电磁转矩	241	10.3.1.2 谐波绕组系数	272
9.4.3.1 输入电功率	241	10.3.2 绕组磁动势分析	276
9.4.3.2 电磁转矩	242	10.3.2.1 单个线圈的磁动势	276
9.4.3.3 无功功率	243	10.3.2.2 相绕组磁动势	277
9.5 永磁交流伺服电机的矢量控制 ...	244	10.3.2.3 三相绕组合成磁动势	278
9.5.1 电压极限圆与电流极限圆	244	10.3.3 绕组系数验证	281
9.5.2 恒转矩轨迹与最大转矩/电流 轨迹	245	10.4 齿槽转矩分析	282
9.5.3 $i_d=0$ 控制	246	10.4.1 齿槽转矩的性质及其产生 规律	282
9.5.4 $\cos\varphi=1$ 控制	246	10.4.2 齿槽转矩分析及削弱方法	282
9.5.5 最大转矩/电流比控制	247	10.4.2.1 齿槽转矩分析	282
9.5.6 弱磁控制	248	10.4.2.2 齿槽转矩的削弱方法	284
9.5.7 不同控制策略下的机械特性	250	10.5 不平衡磁拉力分析	288
9.5.8 永磁交流伺服系统基本构成	250	10.5.1 不平衡磁拉力产生的原因	288
9.6 永磁交流伺服电机直接转矩 控制	252	10.5.2 静态(空载)UMP	289
9.6.1 转矩生成与控制	252	10.5.3 动态(负载)UMP	291
9.6.2 电压矢量与磁链轨迹	253	10.5.4 产生UMP的规律	294
9.6.3 滞环控制与系统	255	10.6 需要进一步分析讨论的问题	294
9.6.3.1 滞环比较器控制	255	第 11 章 感应电动机伺服控制系统	296
9.6.3.2 控制系统	257	11.1 伺服控制方法概述	296
9.6.4 磁链和转矩估计	257	11.1.1 控制方法简介	296
9.6.5 直接转矩控制与矢量控制	259	11.1.2 控制方法分析比较	297
9.7 永磁交流伺服电机实践与设计 特点	260	11.2 标量控制技术	299
		11.2.1 变压变频控制技术	299
		11.2.1.1 控制原理	299
		11.2.1.2 机械特性	300

11.2.1.3 基频以下补偿控制	301	11.4.2 圆形磁链轨迹 DTC 控制 技术	338
11.2.2 转速开环恒压频比控制技术 ...	302	11.4.3 六边形磁链轨迹 DSC 控制 技术	340
11.2.3 转速闭环转差频率控制技术 ...	304	11.4.3.1 DSC 基本原理	340
11.2.3.1 基本原理及特点	304	11.4.3.2 DSC 系统基本结构	343
11.2.3.2 转差频率控制的结构及 性能	306	11.4.3.3 DSC 系统基本组成	344
11.2.3.3 最大转差频率的计算方法	307	11.4.3.4 DSC 低速范围内的调节 方案	345
11.2.3.4 转差频率控制系统的 优缺点	308	11.4.4 直接转矩控制转矩脉动的解决 方法	346
11.3 矢量控制技术	308	11.4.4.1 基于表查询方式	346
11.3.1 基本理论	308	11.4.4.2 基于连续调制方式	346
11.3.1.1 空间矢量	308	11.4.4.3 基于现代控制理论	347
11.3.1.2 坐标变换	314	第 12 章 步进电动机及驱动系统	348
11.3.1.3 任意同步旋转 MT 坐标下的矢量 变换	316	12.1 概述	348
11.3.1.4 MT 坐标系下转子磁场定向矢量 方程	318	12.1.1 分类	348
11.3.2 转子磁场定向矢量控制技术 ...	323	12.1.2 特点	348
11.3.2.1 直接磁场定向与间接磁场定向 控制	323	12.1.3 应用与发展	348
11.3.2.2 直接磁场定向控制技术	324	12.2 基本工作原理、电磁转矩和 结构	349
11.3.2.3 间接磁场定向控制技术	326	12.2.1 基本工作原理和电磁转矩	349
11.3.2.4 电压源型逆变器馈电控制 技术	327	12.2.1.1 三相磁阻式步进电动机工作原理和 电磁转矩	349
11.3.2.5 电流可控的馈电控制技术	330	12.2.1.2 混合式步进电动机工作原理和 电磁转矩	351
11.3.2.6 影响转子磁场定向控制性能的 因素	332	12.2.1.3 永磁式步进电动机工作 原理	354
11.3.3 气隙磁场定向矢量控制技术 ...	334	12.2.2 结构型式	354
11.3.3.1 气隙磁场定向下的转矩 方程	334	12.2.2.1 磁阻式步进电动机	354
11.3.3.2 气隙磁场定向下的矢量 方程	334	12.2.2.2 永磁式步进电动机	355
11.3.4 定子磁场定向矢量控制技术 ...	335	12.2.2.3 混合式步进电动机	356
11.3.4.1 定子磁场定向下的转矩 方程	335	12.2.2.4 单相步进电动机	356
11.3.4.2 定子磁场定向下的矢量 方程	336	12.3 特性	358
11.4 直接转矩控制技术	336	12.3.1 步进电动机的单步运行	358
11.4.1 特点、类型及原理	337	12.3.2 步进电动机的连续脉冲运行及运行 矩频特性	358
11.4.1.1 特点	337	12.3.3 步进电动机的起动矩频特性和起动 惯频特性	359
11.4.1.2 类型	337	12.4 主要技术指标和参数	359
11.4.1.3 基本原理	337	12.4.1 主要参数	359
		12.4.2 主要性能指标	360

12.5 驱动与控制	361	13.2.2 工作原理	381
12.5.1 基本原理	361	13.2.3 相数与定、转子齿极数的关系	382
12.5.2 脉冲分配器	362	13.2.4 绕组连接方式与磁极分布	382
12.5.3 恒压驱动方式	363	13.2.4.1 绕组连接方式	382
12.5.4 高低压驱动方式	364	13.2.4.2 极性分布(以四相为例)	382
12.5.5 恒流斩波驱动方式	365	13.3 基本电磁关系与特性	383
12.5.6 调频调压驱动方式	366	13.3.1 基本电磁方程	383
12.5.7 微步驱动方式	367	13.3.2 相绕组电流	384
12.5.8 控制与驱动芯片	369	13.3.3 电磁转矩与能量转换	385
12.5.9 步进电动机的控制	370	13.3.4 数学模型	386
12.5.9.1 加减速控制	370	13.3.5 机械特性	387
12.5.9.2 闭环控制	371	13.4 电磁设计基本原则	387
12.5.9.3 控制器	371	13.4.1 设计特点	387
12.6 设计要点	372	13.4.2 主要技术参数	388
12.6.1 基本结构	372	13.4.3 输出方程	388
12.6.2 转子外径	372	13.4.4 电磁负荷	389
12.6.3 定子主要数据和气隙长度	372	13.4.5 主要尺寸和主要参数选择	389
12.6.4 冲片设计	372	13.4.5.1 主要尺寸	389
12.6.5 气隙磁导计算	373	13.4.5.2 第一气隙长度 g_1 和第二气隙长度 g_2	390
12.6.6 磁通密度和磁动势	373	13.4.5.3 相数 q	390
12.6.7 绕组设计	374	13.4.5.4 定子、转子极弧宽度	390
12.6.8 最大静转矩验算	374	13.4.5.5 每相绕组串联匝数 N_{ph}	391
12.6.8.1 磁阻式步进电动机最大静转矩	374	13.4.6 转矩计算	391
12.6.8.2 混合式步进电动机最大静转矩	374	13.4.7 损耗计算	392
12.7 选型	374	13.4.7.1 绕组铜损耗	392
12.7.1 步距角的选择	374	13.4.7.2 铁心损耗	393
12.7.2 系统的定位精度	374	13.5 功率变换器	393
12.7.3 转矩的选择	375	13.5.1 主电路设计	393
12.7.4 阻尼方法的选择	375	13.5.2 功率变换器的容量	394
第13章 开关磁阻电机系统	377	13.5.3 开关器件的选择	394
13.1 概述	377	13.5.4 辅助电路	395
13.1.1 系统组成及原理	377	13.5.4.1 驱动电路	395
13.1.1.1 系统组成	377	13.5.4.2 缓冲(吸收)电路	395
13.1.1.2 系统基本工作原理	378	13.6 控制系统	395
13.1.1.3 系统特点	378	13.6.1 设计原则	396
13.1.2 研究现状与发展趋势	379	13.6.2 控制原理	396
13.2 开关磁阻电机的基本结构和工作原理	381	13.6.2.1 电流斩波控制(CCC)	396
13.2.1 基本结构	381	13.6.2.2 角度位置控制(APC)	396
		13.6.3 控制器设计概述	397

13.7 检测与反馈	398	14.2.4.2 线性旋转变压器设计特点	411
13.7.1 位置检测	398	14.2.4.3 无刷旋转变压器设计特点	411
13.7.2 电流检测	398	14.2.5 多极和双通道旋转变压器	412
13.7.3 转速检测	399	14.2.5.1 分类与结构	412
13.8 制动和发电运行	399	14.2.5.2 工作原理	413
13.8.1 制动运行原理	399	14.2.5.3 多极旋变绕组特点	414
13.8.2 发电运行	400	14.2.5.4 主要技术指标和参数	415
13.8.2.1 工作原理	400	14.2.5.5 设计特点	416
13.8.2.2 发电运行时的控制	400	14.2.6 磁阻式旋转变压器	417
13.9 特种开关磁阻电机	401	14.2.6.1 结构及特点	417
13.9.1 全距绕组排列的开关磁阻电机	401	14.2.6.2 工作原理	418
13.9.1.1 概述	401	14.2.6.3 误差分析及补偿	418
13.9.1.2 全距绕组开关磁阻电机工作原理	401	14.2.6.4 设计特点	418
13.9.1.3 全距绕组的开关磁阻电机自感、互感及电磁转矩分析	402	14.2.7 可变差动变压器 (RVDT、LVDT)	420
13.9.2 加辅助绕组的开关磁阻电机	402	14.2.7.1 旋转可变差动变压器 (RVDT)	420
13.10 单边双励磁的双凸极电动机	403	14.2.7.2 直线可变差动变压器 (LVDT)	420
13.10.1 永磁式双凸极电动机	403	14.2.8 旋转变压器解码	420
13.10.2 具有直流励磁的双凸极电动机	403	14.2.8.1 采用专用解码芯片的解码器	420
13.11 应用	404	14.2.8.2 软件解码	421
第14章 伺服系统常用传感器装置	405	14.2.8.3 旋变解码电路的设计特点及旋变使用注意事项	423
14.1 概述	405	14.3 自整角机	424
14.2 旋转变压器	405	14.3.1 分类	425
14.2.1 结构和分类	406	14.3.1.1 力矩式自整角机	425
14.2.1.1 结构	406	14.3.1.2 控制式自整角机	425
14.2.1.2 分类	406	14.3.2 结构	425
14.2.2 工作原理	407	14.3.3 工作原理	426
14.2.2.1 正余弦旋转变压器工作原理	407	14.3.3.1 力矩式自整角机工作原理	426
14.2.2.2 线性旋转变压器工作原理	407	14.3.3.2 控制式自整角机工作原理	426
14.2.2.3 比例式旋转变压器工作原理	408	14.3.4 主要技术指标和参数	427
14.2.2.4 无刷旋转变压器工作原理	408	14.4 测速发电机	430
14.2.2.5 单绕组线性旋转变压器工作原理	408	14.4.1 分类与特点	430
14.2.3 主要技术指标和参数	409	14.4.2 永磁直流测速发电机	430
14.2.4 设计特点	410	14.4.2.1 基本原理和结构	431
14.2.4.1 正余弦旋转变压器设计特点	410	14.4.2.2 输出特性	431
		14.4.2.3 主要技术指标及设计制造特点	431
		14.4.3 交流异步测速发电机	432

14.4.3.1 基本原理和结构	432	15.2.2 转子磁极结构	451
14.4.3.2 输出特性	433	15.2.2.1 表面式转子磁极结构	452
14.4.3.3 主要技术指标、误差及其 补偿	433	15.2.2.2 内置式转子磁极结构	453
14.4.4 其他测速发电机	433	15.2.2.3 爪极式转子磁极结构	455
14.4.4.1 低速永磁直流测速发电机	433	15.2.3 转子隔磁措施	455
14.4.4.2 永磁直流直线测速发电机	433	15.3 稳态运行性能	455
14.4.4.3 无刷直流测速发电机	433	15.3.1 稳态运行方程和相量图	455
14.4.4.4 脉冲测速发电机	434	15.3.2 稳态运行性能	457
14.5 光电编码器	435	15.3.2.1 电磁转矩和矩角特性	457
14.5.1 增量式光电编码器	435	15.3.2.2 工作特性曲线	457
14.5.1.1 原理及结构	435	15.4 磁路分析与计算	458
14.5.1.2 编码器输出信号	436	15.4.1 磁路计算特点	458
14.5.1.3 主要技术指标及参数	436	15.4.1.1 计算极弧系数	458
14.5.1.4 测速方法	437	15.4.1.2 气隙磁场波形系数	460
14.5.2 绝对式光电编码器	439	15.4.1.3 磁位差计算	461
14.5.3 混合式光电编码器	440	15.4.2 空载漏磁系数	461
14.6 磁编码器	440	15.4.3 永磁体工作点的设计与计算 ...	462
14.6.1 磁电式编码器	441	15.4.3.1 空载和负载工作点的计算 特点	463
14.6.2 磁阻式编码器	441	15.4.3.2 最大去磁时永磁体工作点校核 计算	463
14.7 霍尔位置传感器	442	15.5 主要参数计算和分析	464
14.7.1 开关型霍尔传感器	442	15.5.1 空载反电动势	464
14.7.2 线性型霍尔传感器	443	15.5.2 交、直流电枢反应电抗	465
14.8 温度传感器	444	15.5.3 交、直流电枢磁动势折算 系数	467
14.8.1 热敏电阻	444	15.6 异步起动永磁同步电动机	467
14.8.2 热电阻传感器	445	15.6.1 结构	467
14.8.3 热电偶传感器	445	15.6.2 起动过程	467
14.9 电流传感器	445	15.6.2.1 起动过程中的电磁转矩	467
14.9.1 霍尔电流传感器	445	15.6.2.2 起动过程中的定子电流	470
14.9.1.1 直放式(开环)电流 传感器	445	15.6.2.3 牵入同步过程	471
14.9.1.2 磁场平衡式电流传感器	446	15.6.3 设计特点与原则	473
14.9.2 利用分流电阻检测电流	448	15.6.3.1 主要尺寸和气隙长度选择	473
14.9.3 电流检测 IC	448	15.6.3.2 定、转子槽数的选择	473
		15.6.3.3 定、转子槽形的选择	473
		15.6.3.4 转子磁极结构设计	473
		15.6.3.5 永磁体设计	474
		15.6.3.6 电枢绕组设计	475
		15.6.3.7 提高功率密度和起动性能的 措施	475

下篇 驱动与特种电机

第15章 永磁同步电动机	451
15.1 概述	451
15.2 结构	451
15.2.1 基本结构	451

15.6.3.8 提高效率 and 功率因数的措施	475	16.4.2.1 空载永磁电动势的确定	500
15.7 盘式永磁同步电动机	476	16.4.2.2 磁极形状的优化设计	500
15.7.1 概述	476	16.4.2.3 电励磁绕组槽尺寸确定	501
15.7.2 结构和特点	476	16.5 永磁风力发电机设计特点	501
15.7.3 磁场分布和计算	477	16.5.1 电磁负荷选择	501
15.7.3.1 主磁路结构	477	16.5.2 定子齿槽的确定	501
15.7.3.2 空载工作点确定	478	16.5.3 最大起动阻力矩的计算及减小措施	501
15.7.3.3 三维磁场分析	479	第 17 章 单相感应电动机	503
15.7.3.4 空载漏磁系数计算	480	17.1 概述	503
15.7.3.5 气隙磁通密度分布系数	480	17.2 单相感应电动机工作原理	504
15.7.4 主要尺寸	480	17.2.1 单绕组单相感应电动机	504
15.7.5 磁极设计	482	17.2.2 两相绕组单相感应电动机	505
15.8 横向磁通永磁同步电动机	482	17.2.3 罩极式单相感应电动机	505
15.8.1 原理与特点	482	17.3 单相感应电动机的主要类型及用途	506
15.8.2 基本类型及结构特点	483	17.3.1 主要类型	506
15.8.3 磁场分布和计算	484	17.3.1.1 单相电阻起动感应电动机	506
15.8.4 功率因数问题	485	17.3.1.2 单相电容起动感应电动机	507
15.8.5 工艺特点	485	17.3.1.3 单相电容运转感应电动机	508
15.9 爪极式永磁同步电动机	486	17.3.1.4 单相电容起动与运转感应电动机	508
15.9.1 转子结构	486	17.3.1.5 单相罩极式感应电动机	509
15.9.2 定子结构	486	17.3.2 基本系列功率等级和机座号	509
15.9.3 定向装置	488	17.3.3 特征及典型用途	510
第 16 章 永磁同步发电机	490	17.4 单相感应电动机的气隙磁场	511
16.1 概述	490	17.4.1 基波磁动势	511
16.2 转子磁极结构	490	17.4.1.1 单相绕组的脉振磁动势	511
16.2.1 切向式转子磁极结构	490	17.4.1.2 两相绕组的椭圆形磁动势	512
16.2.2 径向式转子磁极结构	491	17.4.2 谐波磁动势	513
16.2.3 混合式转子磁极结构	492	17.4.2.1 整距线圈和短距线圈的谐波磁动势	513
16.2.4 爪极式转子磁极结构	492	17.4.2.2 同心式绕组 (包括正弦绕组) 的谐波磁动势	514
16.3 运行性能、参数和特性	494	17.4.3 气隙磁场	516
16.3.1 励磁电动势和气隙合成电动势	494	17.5 单相感应电动机的绕组	517
16.3.2 交、直轴电枢反应和电枢反应电抗	495	17.5.1 单层同心式绕组	517
16.3.3 固有电压调整率和降低措施	496	17.5.2 双层链式绕组	517
16.3.4 短路电流倍数计算	497	17.5.3 单相正弦绕组	518
16.3.5 电动势波形	498	17.6 单相感应电动机运行分析	521
16.4 混合励磁同步发电机	498	17.6.1 单相单绕组感应电动机运行	
16.4.1 结构和特点	498		
16.4.2 设计特点	500		

分析	521	18.2.3 工作特性和主要技术数据	546
17.6.2 相轴正交的双绕组单相感应电动机		18.3 基本电磁关系	547
运行分析	524	18.3.1 电压平衡方程式和矢量图	547
17.6.3 相轴非正交的双绕组单相感应电动机		18.3.2 电磁转矩	549
运行分析	528	18.3.3 损耗及能量流程图	550
17.6.4 Y接法三绕组的单相电容运转感应		18.4 设计特点	551
电动机运行分析	530	18.4.1 一般要求	551
17.6.5 抽头调速的单相电容运转感应电动机		18.4.2 设计特点	551
运行分析	531	18.4.3 主要参数	551
17.6.5.1 主、副相绕组双抽头，		18.4.4 安全防护	552
L型接法	532	18.5 电磁兼容性(EMC)与噪声	553
17.6.5.2 副相绕组抽头、T型接法	534	18.5.1 电磁兼容特性	553
17.6.6 单相感应电动机的普遍性结论及		18.5.2 噪声	553
运行分析步骤	536	18.6 改善换向的措施	554
17.7 单相感应电动机设计要点	536	第19章 直线电机	556
17.7.1 单相感应电动机设计的基本		19.1 概述	556
要点	536	19.1.1 直线电机的分类	556
17.7.2 罩极电动机设计要点	537	19.1.2 功能与特点	556
17.7.3 电磁负荷的选择	537	19.1.2.1 力电机	556
17.7.4 主要尺寸的确定	539	19.1.2.2 功电机	556
17.7.4.1 气隙 δ 的选择	539	19.1.2.3 能电机	556
17.7.4.2 定子铁心外径与内径的		19.1.2.4 直线电机的特点	557
选择	539	19.2 直线电机的基本结构和工作	
17.7.4.3 定子铁心长度的确定	539	原理	557
17.7.5 定子绕组的设计	540	19.2.1 基本结构	557
17.7.6 转子导条截面积及导条材料的		19.2.2 工作原理	559
选择	540	19.2.3 边端效应	560
17.8 单相感应电动机调速方法	540	19.3 主要指标和参数及设计、工艺	
17.8.1 L型接法调速和T型接法		特点	561
调速	540	19.3.1 主要指标和参数	561
17.8.1.1 L型接法调速	540	19.3.2 设计准则	561
17.8.1.2 T型接法调速	541	19.3.3 设计要点	562
17.8.1.3 扩大调速范围的措施	542	19.3.4 优化设计	562
17.8.2 并联电容调速	542	19.3.5 工艺特点	563
17.8.3 变极调速	543	19.4 驱动与控制	563
17.8.4 串电抗器调速及晶闸管调压		19.4.1 非伺服驱动控制系统	563
调速	543	19.4.2 伺服驱动控制系统	563
第18章 单相串激电动机	544	19.4.2.1 直线伺服电机	563
18.1 概述	544	19.4.2.2 直线伺服电机的控制	564
18.2 运行原理与基本结构	544	19.5 直线电机的应用与选用原则	565
18.2.1 运行原理	544	19.5.1 直线电机的应用与发展	565
18.2.2 电机结构	545		