



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

# 电机与电力电子技术

主编 孙冠群



教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

# 电机与电力电子技术

主 编 孙冠群

参 编 张黎锁 吴 剑



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

为了适应电机(学)与拖动和电力电子技术之间的衔接,以及面向电机与电力电子技术基础,编写了本书。本书涵盖电机学及电机拖动、电力电子技术基础方面的知识,包含直流电机及其拖动、交流电机及三相异步电动机拖动、变压器、电力电子器件、整流电路、逆变电路、直流斩波电路、交-交交流电路、PWM控制技术、软开关技术等知识。

本书适应新形势下的电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程等专业的需求,可作为这些专业或相近专业中需讲授电机与电力电子技术或机电传动控制技术课程的教材或参考书;本书力求从实际应用及工程实践角度出发编写,因此也非常适合作为相关工程技术人员的培训或自学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机与电力电子技术/孙冠群主编. —北京:北京大学出版社, 2015. 5

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-25736-4

I. ①电… II. ①孙… III. ①电机—高等学校—教材②电力电子技术—高等学校—教材  
IV. ①TM3②TMI

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第044747号



书 名	电机与电力电子技术
著作责任者	孙冠群 主编
策划编辑	郑 双
责任编辑	黄红珍
标准书号	ISBN 978-7-301-25736-4
出版发行	北京大学出版社
地 址	北京市海淀区成府路 205 号 100871
网 址	http://www.pup.cn 新浪微博: @北京大学出版社
电子信箱	pup_6@163.com
电 话	邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667
印 刷 者	北京富生印刷厂
经 销 者	新华书店
定 价	787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.25 印张 518 千字 2015 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 1 次印刷 45.00 元

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

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

# 前 言

本书是作者结合电气工程及其自动化、自动化两个专业的电机与拖动、电力电子技术两门课程的讲授实践，以及机械电子工程专业的机电传动控制课程的讲授实践，进行近十年教学经验总结的结晶。根据近年来本科学生特点和教学改革需求，本书在强调基础的同时又简化部分理论推导过程，并且结合主要作者的电机及电力电子大型企业多年工作经历，从工程实践出发优化组合而成。

本书虽然分为电机与电力电子两大部分，但二者之间是非常相关的。随着现代电机工程和电力电子工程的发展，电机离不开控制，电机控制器就是电力电子技术的集成；电力电子技术又在很大应用面上是从事对电机的控制，即使是开关电源或其他特殊电源方向的电力电子技术应用，实际上和电机控制所用电力电子技术也是相通的，所以说，电机和电力电子技术之间已经密不可分。虽然很多高校至今依然将电机和电力电子作为先后的两门课讲授，但本质上已经存在合二为一的条件，加之部分高校因相关专业课程改革的需要，已将电机与电力电子技术作为一门课讲授。本书的编写，也鉴于作者多年的电气企业工作经历，以及对当前电机与电力电子技术应用发展的把握。本书强调专业基础的同时，具备相当的实用性，也非常适合于工程技术人员的培训或自学。

全书共分 13 章，其中孙冠群编写第 1、2、4、5、6、7、8、9、12 章并负责全书统稿，张黎锁编写第 3、11 章，吴剑编写第 10、13 章。

鉴于本书的新颖性，书中不足之处在所难免，非常希望读者提出宝贵意见。另外，本书还提供电子课件、课后习题解答、实验等资料，可供使用本书的教师、学生及工程技术人员参考，请需要者登录出版社网站或联系本书策划编辑免费索取。

编 者

2014 年 12 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1	3.1.1 变压器的工作原理 .....	41
1.1 电机的发展历史 .....	2	3.1.2 变压器的基本结构 .....	41
1.2 电机的分类 .....	3	3.1.3 变压器的主要种类 .....	43
1.3 电机有关的电磁基础知识 .....	4	3.1.4 变压器的额定值 .....	44
1.3.1 磁场的基本概念 .....	4	3.2 变压器的空载运行 .....	45
1.3.2 电磁定律 .....	5	3.2.1 空载运行时的电磁关系 .....	45
1.3.3 常用铁磁材料及其特性 .....	8	3.2.2 空载时的等效电路和 相量图 .....	49
1.4 电力电子技术的定义 .....	11	3.3 变压器的负载运行 .....	50
1.5 电力电子技术的发展历史 .....	12	3.3.1 负载运行时的电磁关系 .....	51
1.6 电机与电力技术的关系 .....	12	3.3.2 变压器绕组的折算 .....	52
<b>第 2 章 直流电机</b> .....	15	3.3.3 等效电路和相量图 .....	54
2.1 直流电机的工作原理与结构 .....	16	3.4 变压器的参数测定 .....	56
2.1.1 直流电机工作原理 .....	16	3.4.1 变压器空载实验 .....	56
2.1.2 直流电机基本结构 .....	18	3.4.2 变压器短路实验 .....	57
2.1.3 直流电机额定值 .....	20	3.4.3 变压器的标么值 .....	60
2.1.4 直流电机励磁方式 .....	21	3.5 变压器的运行特性 .....	61
2.2 直流电机电枢绕组与磁场 .....	22	3.5.1 变压器的外特性 .....	61
2.2.1 电枢绕组 .....	22	3.5.2 变压器的效率特性 .....	61
2.2.2 直流电机内的磁场 .....	24	3.6 三相变压器 .....	63
2.3 直流电机电枢电动势、电磁转矩及 电磁功率 .....	27	3.6.1 三相变压器磁路系统 .....	63
2.3.1 电枢电动势 .....	27	3.6.2 三相变压器的联结方式 .....	64
2.3.2 电磁转矩 .....	28	3.7 特殊变压器 .....	67
2.3.3 电磁功率 .....	28	3.7.1 自耦变压器 .....	67
2.4 直流电动机运行原理 .....	29	3.7.2 电压互感器 .....	68
2.4.1 直流电动机的平衡方程 .....	29	3.7.3 电流互感器 .....	68
2.4.2 直流电动机的工作特性 .....	31	<b>第 4 章 交流电机</b> .....	73
2.4.3 直流电机的可逆原理 .....	33	4.1 交流电机的定义和分类 .....	74
2.5 直流发电机运行原理 .....	35	4.2 交流电机的绕组 .....	74
2.5.1 直流发电机的平衡方程 .....	35	4.3 交流电机绕组的电动势 .....	77
2.5.2 直流发电机的工作特性 .....	36	4.4 交流电机绕组的磁动势 .....	80
<b>第 3 章 变压器</b> .....	40	4.5 异步电机的结构与原理 .....	84
3.1 变压器的工作原理与结构 .....	41	4.5.1 异步电机基本结构 .....	84
		4.5.2 异步电机的额定值 .....	87

4.5.3 异步电机的工作原理 .....	88	5.3.3 电枢回路串电阻起动 .....	124
4.6 三相异步电动机的电磁分析 .....	90	5.4 他励直流电动机的调速 .....	125
4.6.1 基本电磁关系 .....	90	5.4.1 调速指标 .....	125
4.6.2 转子静止时的电磁关系 .....	92	5.4.2 他励直流电动机的 调速方法 .....	126
4.6.3 转子旋转时的电磁关系 .....	94	5.4.3 调速方式与负载的配合 .....	129
4.7 三相异步电动机的功率和转矩 .....	98	5.5 他励直流电动机的制动 .....	130
4.7.1 功率关系 .....	98	5.5.1 能耗制动 .....	131
4.7.2 转矩平衡关系表达式 .....	99	5.5.2 反接制动 .....	133
4.8 三相异步电动机的运行特性与 参数测定 .....	100	5.5.3 回馈制动 .....	136
4.8.1 三相异步电动机的 工作特性 .....	100	<b>第6章 三相异步电动机的电力拖动</b> ..	141
4.8.2 三相异步电动机的 参数测定 .....	101	6.1 三相异步电动机的机械特性 .....	142
4.9 单相异步电动机 .....	104	6.1.1 三相异步电动机机械特性 表达式 .....	142
4.9.1 单相异步电动机的 工作原理 .....	104	6.1.2 三相异步电动机固有 机械特性 .....	146
4.9.2 单相异步电动机的 起动方法 .....	105	6.1.3 三相异步电动机人为 机械特性 .....	147
4.10 同步电机 .....	106	6.2 三相异步电动机的起动 .....	149
4.10.1 同步电动机工作原理 .....	107	6.2.1 鼠笼型三相异步电动机 起动 .....	150
4.10.2 同步发电机工作原理 .....	108	6.2.2 绕线型异步电动机的起动 ..	155
4.10.3 同步电机的结构 .....	108	6.3 三相异步电动机的调速 .....	157
4.10.4 同步电机的应用简介 .....	109	6.3.1 变频调速 .....	158
<b>第5章 直流电动机的电力拖动</b> .....	113	6.3.2 变极调速 .....	159
5.1 电力拖动基础知识 .....	114	6.3.3 变压调速 .....	160
5.1.1 电力拖动系统的运动方程 ..	114	6.3.4 三相绕线型异步电动机转子 串电阻调速 .....	161
5.1.2 负载的机械特性 .....	115	6.3.5 三相绕线型异步电动机的 串级调速 .....	162
5.2 他励直流电动机机械特性和稳定 运行条件 .....	118	6.4 三相异步电动机的制动 .....	163
5.2.1 机械特性的一般形式 .....	118	6.4.1 能耗制动 .....	163
5.2.2 固有机械特性 .....	118	6.4.2 反接制动 .....	165
5.2.3 人为机械特性 .....	120	6.4.3 回馈制动 .....	167
5.2.4 电力拖动系统稳定 运行条件 .....	121	<b>第7章 电力电子器件</b> .....	171
5.3 他励直流电动机的起动 .....	123	7.1 电力电子器件的分类 .....	172
5.3.1 直接起动 .....	123	7.2 电力二极管 .....	173
5.3.2 降压起动 .....	124		



7.2.1 电力二极管的结构和 工作原理 .....	173	7.9.2 电流驱动型全控器件的 驱动电路 .....	198
7.2.2 电力二极管的基本特性 .....	173	7.9.3 电压驱动型全控器件的 驱动电路 .....	200
7.2.3 电力二极管的主要参数 .....	175	7.10 电力电子器件的保护 .....	202
7.2.4 电力二极管的主要类型 .....	176	7.10.1 过电压保护 .....	202
7.3 晶闸管 .....	177	7.10.2 过电流保护 .....	204
7.3.1 晶闸管的结构和工作原理 .....	177	7.10.3 缓冲电路 .....	205
7.3.2 晶闸管的基本特性 .....	178	7.10.4 电力电子器件的散热 .....	206
7.3.3 晶闸管的主要参数 .....	180	<b>第 8 章 相控整流电路</b> .....	<b>210</b>
7.4 可关断晶闸管 .....	182	8.1 单相整流电路 .....	211
7.4.1 GTO 的结构和工作原理 .....	182	8.1.1 相控整流的基本概念 .....	211
7.4.2 GTO 的特性 .....	183	8.1.2 单相桥式全控整流电路 .....	212
7.4.3 GTO 的主要参数 .....	184	8.1.3 单相全波可控整流电路 .....	218
7.5 电力晶体管 .....	184	8.1.4 单相桥式半控整流电路 .....	218
7.5.1 GTR 的结构和工作原理 .....	184	8.2 三相整流电路 .....	220
7.5.2 GTR 的基本特性 .....	185	8.2.1 三相半波可控整流电路 .....	220
7.5.3 GTR 的主要参数 .....	186	8.2.2 三相桥式全控整流电路 .....	225
7.6 电力场效应晶体管 .....	187	8.3 输入侧变压器漏抗对整流电路的 影响 .....	232
7.6.1 电力 MOSFET 的结构和 工作原理 .....	187	8.4 大功率相控整流电路 .....	234
7.6.2 电力 MOSFET 的 基本特性 .....	188	8.4.1 带平衡电抗器的双反星形 可控整流电路 .....	234
7.6.3 电力 MOSFET 的 主要参数 .....	190	8.4.2 多重化整流电路 .....	238
7.7 绝缘栅双极晶体管 .....	191	8.5 相控整流电路的谐波和功率因数 .....	240
7.7.1 IGBT 的结构和工作原理 .....	191	8.5.1 谐波和无功功率 .....	241
7.7.2 IGBT 的基本特性 .....	192	8.5.2 直流侧电压和电流的 谐波分析 .....	242
7.7.3 IGBT 的主要参数 .....	193	8.5.3 交流侧的谐波和功率因数 分析 .....	244
7.8 其他电力电子器件 .....	194	8.6 相控整流电路的有源逆变 .....	245
7.8.1 静电感应晶体管 .....	194	8.6.1 有源逆变的工作原理 .....	245
7.8.2 集成门极换流 晶闸管 .....	194	8.6.2 三相半波有源逆变电路 .....	247
7.8.3 碳化硅器件 .....	194	8.6.3 三相桥式有源逆变电路 .....	248
7.8.4 砷化镓器件 .....	196	8.6.4 有源逆变最小逆变角 $\beta_{\min}$ 的 限制 .....	248
7.8.5 磷化铟器件 .....	196	<b>第 9 章 逆变电路</b> .....	<b>253</b>
7.8.6 模块化与集成化的电力电子 器件 .....	196	9.1 逆变原理 .....	254
7.9 电力电子器件的驱动 .....	197		
7.9.1 晶闸管的触发电路 .....	197		



9.2 电压型逆变电路 .....	254	12.2.2 异步调制和同步调制 .....	315
9.2.1 单相电压型逆变电路 .....	254	12.2.3 规则采样法 .....	318
9.2.2 三相电压型逆变电路 .....	257	12.2.4 PWM 逆变电路的 谐波分析 .....	319
9.3 电流型逆变电路 .....	261	12.3 PWM 追踪控制技术 .....	321
9.3.1 单相电流型逆变电路 .....	261	12.3.1 电流追踪型 PWM 控制技术 .....	321
9.3.2 三相电流型逆变电路 .....	264	12.3.2 电压追踪型 PWM 控制技术 .....	322
9.4 多重和多电平逆变电路 .....	268	12.3.3 磁通追踪型 PWM 控制技术 .....	322
9.4.1 多重逆变电路 .....	269	12.4 PWM 整流电路 .....	324
9.4.2 多电平逆变电路 .....	272	12.4.1 单相电压型桥式 PWM 整流电路 .....	324
<b>第 10 章 直流斩波电路</b> .....	279	12.4.2 三相桥式 PWM 整流电路 结构 .....	325
10.1 降压斩波电路 .....	280	<b>第 13 章 软开关技术</b> .....	329
10.2 升压斩波电路 .....	283	13.1 软开关原理 .....	330
10.3 升降压斩波电路 .....	284	13.2 软开关技术简介 .....	332
10.4 多象限斩波电路及多相多重 斩波电路 .....	285	13.2.1 软开关的基本电路 .....	332
10.4.1 多象限斩波电路 .....	285	13.2.2 ZCS 型准谐振变流器 .....	333
10.4.2 多相多重斩波电路 .....	288	13.2.3 ZVS 型准谐振变流器 .....	334
<b>第 11 章 交流变流电路</b> .....	291	13.2.4 软开关注意的问题 .....	335
11.1 交流调压电路 .....	292	13.3 软开关典型应用 .....	335
11.1.1 单相交流调压电路 .....	292	13.3.1 DC-DC 变换 .....	335
11.1.2 三相交流调压电路 .....	297	13.3.2 AC-DC 变换 .....	338
11.2 交-交变频电路 .....	300	13.3.3 DC-AC 变换 .....	340
11.2.1 单相交-交变频电路 .....	300	<b>参考文献</b> .....	344
11.2.2 三相交-交变频电路 .....	306		
<b>第 12 章 PWM 控制技术</b> .....	309		
12.1 PWM 基本原理 .....	310		
12.2 PWM 逆变电路及其控制 .....	312		
12.2.1 调制法 .....	312		



# 第1章

## 绪论

**关键词语：**电机发展史，电机分类，电磁基本概念和定律，铁磁材料特性，电力电子定义和组成，电力电子发展史，电机与电力电子关系。

**学过本章后，读者将能够：**

了解百年来电机与电力电子技术发展历史；

掌握与电机有关的电磁概念和电磁定律；

描述铁磁材料的特性和铁磁材料的损耗；

获知电力电子技术的定义和组成；

解释为何电机与电力电子之间具有密不可分的关系。

**引例：**

利用电能产生动力，或者利用动力产生电能，就会用到电机，如若调节电机的转速，或需要控制电机以迎合负载所需（如调速），就会用到基于电力电子技术的电机控制器，图 1.1 所示为电机及其控制器。

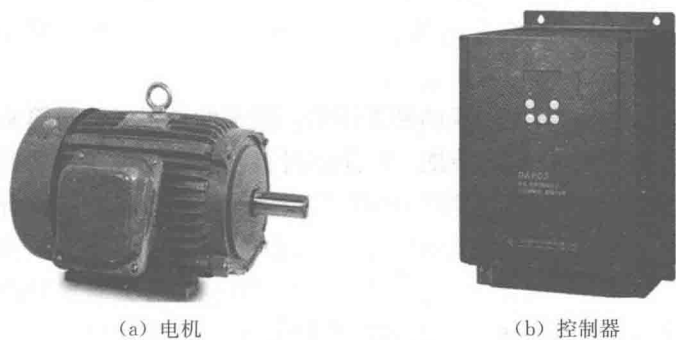


图 1.1 电机及其控制器

本章首先回顾电机的历史，然后针对本书各类电机原理的讲授需求，介绍相关的磁场、电磁定律、铁磁材料等基础知识。

电力电子技术方面，首先给出电力电子技术的定义，同样地，回顾电力电子技术的简短历史，最后对电机与电力电子技术的关系，即电力电子技术的应用进行扼要阐述。



## 1.1 电机的发展历史

1821年,英国科学家法拉第首先证明了可以把电力转变为旋转运动,1831年,他提出了电磁感应现象,这便为随后电机的发明提供了理论依据。1834年,德国人雅可比制成了一种简单的装置,在两个U型电磁铁中间,装一个六臂轮,每臂带两根棒型磁铁,通电后,棒型磁铁与U型磁铁之间产生相互吸引和排斥作用,带动轮轴转动。后来,雅可比做了一具更大型的装置,安在小艇上,用320个电池供电。1838年该小艇在易北河上首次航行,不过时速最高只有2.2km。与此同时,美国的达文波特也成功地制出了驱动印刷机的电动机,印刷过美国电学期刊《电磁和机械情报》。但这两种电动机都没有多大商业价值,用电池作电源,成本太大、不实用。

直到后来第一台实用直流发电机问世,代替价格昂贵的电池向直流电动机供电,电动机才获得广泛应用。这是1870年由比利时工程师格拉姆发明的直流发电机,在设计上,直流发电机和电动机很相似,后来,格拉姆还证明向直流发电机输入电流,其转子会像电动机一样旋转,于是,这种两用的格拉姆型电动机被大量制造,效率也不断提高。与此同时,德国的西门子公司接着制造出了更好的发电机,并着手研究由电动机驱动的车辆,于是西门子公司制成了电机车。

1879年,在柏林工业展览会上,西门子公司不冒烟的电车赢得了观众的一片喝彩。西门子电机车当时只有3马力(1马力=735.499W),后来美国发明大王爱迪生试验的电机车已达12~15马力,但这些电动机全是直流电机,只限于驱动电车。

由此可见,在电机的发展史上,首先得到应用的是直流电机。

在直流电机风靡的同时,用电量不断增加,而当时的直流电压又无法提高,因而在远距离输电方面遇到了困难,人们开始认识到交流电的优越性,此后便开始了对交流电的研究。

在对交流电的研究中,首先出现的是变压器,领头的是巨人法拉第和亨利。早在1831年就出现了变压器的雏形——感应线圈,后来经过英国、德国、美国等国家数十位工程师和科学家的努力,在19世纪中后期陆续出现了各种结构的变压器并投入使用。

对于交流电机,其实早在直流电动机开始使用的1870年代,凡·麦尔准就提出了交流发电机的雏形。1878年,亚布罗切科夫运用麦尔准发明的交流发电机和变压器,发明了简单的照明供电装置。1885年,意大利物理学家费拉利斯发现了两相电流可产生旋转磁场,一年后,他与远在美国的恒斯拉几乎同时制成了两相异步电动机模型,它根据电磁感应原理制成,又称感应电动机。1888年,多里沃·多勃罗沃尔斯基提出了三相电制。当年,美国发明家特斯拉发明了三相异步电动机。异步电动机结构简单,使用交流电,无需整流,无火花,因此逐步被广泛应用于工业和家庭电器中。由于三相异步电动机的出现,奠定了现代三相电路和三相电机的基础,随后,三相交流电便迅速发展起来。这时,除电车外,电灯、电钻、电焊等电气产品如雨后春笋般地涌现。

1902年,瑞典工程师丹尼尔森首先提出同步电动机的构想。同步电动机工作原理同



异步电动机类似，由定子绕组产生旋转磁场，但其转子绕组用直流电供电，其转速固定不变，不受负载影响，因此同步电动机特别适用于钟表、电唱机和磁带录音机。后来基于同步电动机，出现了同步发电机。同步电机基于当时三相异步电动机的风靡，也多使用三相交流电供电，即三相同步电机。

到20世纪初期，各种主要的现代电机均已设计制造成功。

但是，要将电能应用于生产，应用于更广泛的场合，还必须解决远距离输送的问题。1882年，法国人德普勒发明了远距离送电的方法。美国大发明家爱迪生随后建立了美国第一个火力发电站，并将输电线接成网络，这便是现代电网的雏形。后来，电力这种优质而廉价的新能源，在工业化国家电网建设的支撑下，有力地促进了电动机在各个行业的应用，也是基于此，人类历史从“蒸汽时代”跨入了“电气时代”。

自20世纪以来，可以说，人类至今的“电气时代”是伴随着电机应用的发展而发展的，虽然直流电机、交流电机如异步和同步电机等基本电机在一百多年前就已成型，但在电机结构革新上一直处于发展当中，后来出现了应用更广的鼠笼式异步电动机，并且随着新材料新工艺的发展，各种电机的结构获得了大发展，出现了无电刷的直流电机、根据“磁阻最小原理”制成的步进电机和开关磁阻电机等新品种电机。更为重要的是，电机的应用领域一直以来就处在不断扩展中，进入21世纪，诸如现代电动汽车、轨道交通牵引、全电飞机，以及更广泛的工业自动化、农业电气化、信息化等等领域的发展，更有力地促进了电机的应用。

通过回顾电机的发展历史，可见电机在国民经济中的重要地位，可见对学习电机知识的重要意义，均不言而喻。

## 1.2 电机的分类

从以上电机的发展史介绍中，可以总结得出电机的定义：电机是指以电磁感应定律为理论基础进行机电能量转换或信号转换的一种电磁机器。

从能量转换角度，电机包括电动机、发电机和变压器。其中，发电机是将非电能形式的机械能转换为电能的装置；而电动机则是将电能转换为机械能的装置；变压器是改变交流电压的电磁装置。

由于电机是驱动负载装置运动的主要动力源，它应用广泛、种类繁多、性能各异，分类方法也很多，电机可以根据不同的分类原则或方法进行分类，图1.2所示为典型的分类方式。

下面对上述分类作一归纳。

按输入或输出的电压、电流的特点来分，可分为直流电机和交流电机。

按能量转换的方向来分，可分为发电机和电动机。因此，也就有了直流发电机和直流电动机、交流发电机和交流电动机。

按工作方式来分，交流电机又可分为异步（或称感应）电机、同步电机、变压器，相应的交流发电机分为异步发电机和同步发电机，交流电动机分为异步电动机和同步电动机。

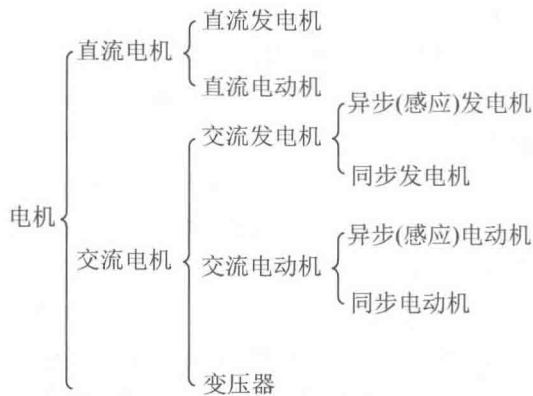


图 1.2 电机的分类

机。变压器作为唯一静止的电机，因其理论基础与交流电机类似，归入交流电机范畴。除变压器之外，其余电机均为做旋转运动的电机。

需要说明的是，图 1.1 对电机的分类方法，仅仅是常规电机的分类，涉及信号传递或转换的控制电机，以及其他特种电机大多由常规电机衍生而来，控制电机与特种电机内容并非本书重点，所以涉及它们的分类在此略去。

## 1.3 电机有关的电磁基础知识

### 1.3.1 磁场的基本概念

#### 1. 磁感应强度 $B$

电流产生磁场，磁场的强弱以及磁场的方向一般使用磁感应强度  $B$  来表示，单位为特斯拉 (T)。磁场中磁感线密度越大，磁感应强度越大。磁感应强度又称为磁通密度，这是源于它和磁通的关系，实际应用中常常简称为磁密。

#### 2. 磁通 $\Phi$

磁通也称为磁通量，单位为韦伯 (Wb)，表示穿过某个特定截面的磁感应强度的通量，它与磁感应强度  $B$  之间的关系为

$$\Phi = \int_S B dS \quad (1-1)$$

式中， $S$  为磁感线所穿过区域的面积 ( $\text{m}^2$ )。

如果磁场中磁感线分布均匀，并且磁感线与截面垂直，则式 (1-1) 的积分形式可以写成

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-2)$$

#### 3. 磁导率 $\mu$

磁导率是衡量各种材料 (介质) 对于磁的传导能力大小的物理量，常用  $\mu$  表示，单位



为亨利/米 (H/m)。从传导磁的能力来分,可把材料分为非铁磁材料和铁磁材料。对于非铁磁材料,如真空,磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ,为一常数,把这个磁导率作为基准,其余材料的磁导率与之相比,得到相对的磁导率  $\mu_r = \mu/\mu_0$ 。一般来说,铁磁材料的相对磁导率很大,例如,电机定子铁心的相对磁导率在 6000~7000 倍。

#### 4. 磁场强度 $H$

磁场强度  $H$  是为了建立电流与其产生的磁场之间的数量关系而引入的物理量,单位为安/米 (A/m),其方向与磁感应强度  $B$  相同,关系为

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

### 1.3.2 电磁定律

#### 1. 电产生磁的基本定律——全电流定律

全电流定律 (安培环路定律): 磁场强度  $H$  沿空间任意闭合路径  $l$  的线积分等于该闭合回路所包围的全部电流的代数和,其数学表达式为

$$\oint_l H \cdot dl = \sum i \quad (1-4)$$

式中,  $l$  为与电流垂直的平面中的任意闭合路径;  $i$  为被闭合路径所包围的  $N$  根导体中的电流,其正负值代表不同的电流方向。

全电流定律又称为安培环路定律,是研究电生磁的基本定律,电流的正方向和所产生磁场的正方向符合右手螺旋关系。

如果闭合磁力线是由  $N$  匝线圈中的电流  $i$  产生,且沿闭合磁力线  $l$  上的磁场强度  $H$  处处相等,则上式变为

$$Hl = iN \quad (1-5)$$

如图 1.3 (a) 所示,应用全电流定律可写成

$$\oint H \cdot dl = I_1 + I_2 - I_3 \quad (1-6)$$

如图 1.3 (b) 所示,应用全电流定律可写成

$$\oint H \cdot dl = Ni \quad (1-7)$$

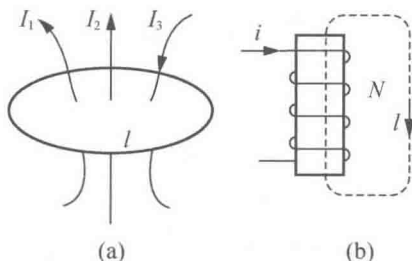


图 1.3 全电流定律的应用

## 2. 磁路的基尔霍夫第一定律

磁场的分布常用一些闭合线（磁力线）来描述，磁力线所经的路径称为磁路。磁动势（磁通势）可以看作磁路中的电动势，磁力线可视为是由磁动势产生的。

磁路的基尔霍夫第一定律（磁通的连续性定律）指的是磁路中任一闭合面，在任一瞬间穿过该闭合面的各支路磁通的代数和恒等于零，表达式为

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-8)$$

如图 1.4 所示，任取一闭合面  $A$ ，令进入  $A$  面的磁通为正，穿出的为负，则有

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0 \quad (1-9)$$

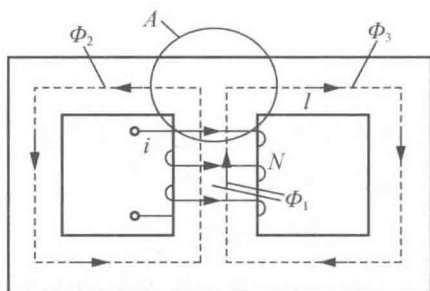


图 1.4 磁路的基尔霍夫第一定律

## 3. 磁路的基尔霍夫第二定律

根据全电流定律演变可得

$$\sum Hl = \sum iN \quad (1-10)$$

式中， $Hl$  表示磁压降； $iN$  表示作用在磁路上的安匝数，用  $F = iN$  表示，称为磁动势。

式 (1-10) 表明：沿任意闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁压降的代数和，这就是磁路的基尔霍夫第二定律。

## 4. 磁路的欧姆定律

若  $\Phi$  为磁路的磁通， $R_m$  为磁路的磁阻， $l$  为磁路的平均长度， $\mu$  为磁路的磁导率， $S$  为磁路的截面积， $F = iN$  为作用在磁路上的磁动势，则磁路的欧姆定律为

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{iN}{R_m} \quad (1-11)$$

式中，磁阻为

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1-12)$$

## 5. 磁产生电的基本定律——电磁感应定律

变化的磁场能够产生电场，在导体中感应电动势，如果是一个闭合回路，还会产生感应电流，这种现象称为电磁感应现象。电磁感应现象有以下两种。

(1) 表征发电机原理的电磁感应定律——运动电动势。导体在磁场中作切割磁力线运动时会产生感应电动势，这种电动势称为运动电动势。设导体有效长度为  $l$  (m)，切割磁



力线的运动速度为  $v$  (m/s), 而且磁力线、导体的运动方向及导体本身, 三者互相垂直时, 感应电动势的大小为

$$e = Blv \quad (1-13)$$

感应电动势的方向由右手定则来确定, 如图 1.5 所示。

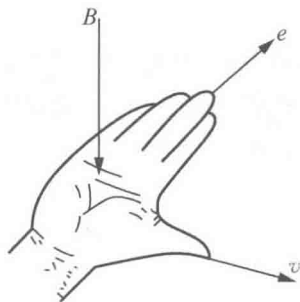


图 1.5 右手定则

(2) 表征变压器原理的电磁感应定律——变压器电动势。一个线圈位于磁场中, 当线圈所交链的磁通发生变化时, 线圈中将产生感应电动势, 这种电动势称为变压器电动势。若线圈匝数为  $N$ , 则感应电动势为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-14)$$

感应电动势的方向由楞次定律决定: 感应电动势的方向始终与磁通变化的方向相反, 如式 (1-14) 中的负号所表示。

#### 6. 表征电动机运行原理的基本定律——电磁力定律

载流导体放置在磁场中时, 载流导体会受到电磁力的作用。如果磁力线方向与导体相互垂直, 导体中的电流为  $i$ , 导体有效长度为  $l$ , 则导体所受电磁力的大小为

$$f = Bil \quad (1-15)$$

电磁力的方向由左手定则确定, 如图 1.6 所示。

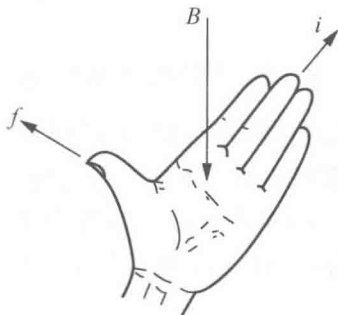


图 1.6 左手定则



### 1.3.3 常用铁磁材料及其特性

为了在一定的励磁磁动势作用下能激励产生较强的磁场，电机的铁心常用磁导率较高的铁磁材料制成。

#### 1. 铁磁材料的磁化特性

铁磁材料包括铁、镍、钴等以及它们的合金。将这些材料作为磁路的介质，磁场会显著增强。铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性，这种现象称为铁磁物质的磁化。

由式 (1-11) 和式 (1-12) 可得

$$\frac{\Phi}{S} = \mu \frac{iN}{l} = \mu \frac{F}{l}$$

即

$$B = \mu H \quad (1-16)$$

式中， $H = F/l$ ； $H$  为磁场强度，它是进行磁场分析时引用的一个辅助物理量，仅与磁动势和磁路的长度有关，与磁路的介质无关。

在非铁磁材料中，磁通密度  $B$  和磁场强度  $H$  之间关系  $B = \mu_0 H$  为线性关系，即为一 条直线，直线的斜率为  $\mu_0$ ，如前所述  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，很小，如图 1.7 中虚线所示。

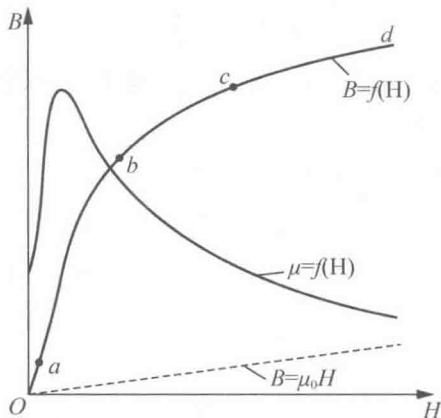


图 1.7 铁磁材料的磁化曲线

铁磁材料的磁通密度  $B$  和磁场强度  $H$  之间的关系  $B = \mu H$  为非线性关系。将一块尚未磁化的铁磁材料进行磁化，磁场强度  $H$  由零逐渐增大时，磁通密度  $B$  将随之增大，如图 1.7 所示。在  $Oab$  段， $B$  随着  $H$  的增大而增加， $b$  点称为膝点；在  $bc$  段， $B$  随着  $H$  的增加速率变慢，这种现象称为磁路饱和； $c$  点以后，曲线基本是与  $B = \mu_0 H$  平行的直线， $B$  几乎不随着  $H$  增大。

以上铁磁材料的这种现象可以解释为铁磁物质能被磁化，是因为在它内部存在着许多很小的天然磁化区，称为磁畴，如图 1.8 所示，磁畴用一些小磁铁示意。铁磁物质未放入磁场之前，磁畴杂乱无章地排列着，磁效应互相抵消，对外部不呈磁性，如图 1.8 (a) 所示。将铁磁物质放入一个磁场中，在这个外磁场的作用下，磁畴的极性将趋于同一方向，





如图 1.8 (b) 所示, 由此形成一个附加磁场, 叠加在外磁场上, 磁畴所产生的附加磁场将比非铁磁物质在同一磁场强度下所励磁的磁场强得多 (譬如空气、木材等), 更胜于真空介质的情况。铁磁材料的加入使得总磁场大为增强, 铁磁材料的磁导率, 如前所述, 自然要大得多。当磁畴全部沿外磁场方向排列后, 即使外磁场再增加, 铁磁材料内磁场几乎不再增加, 即进入磁饱和状态。

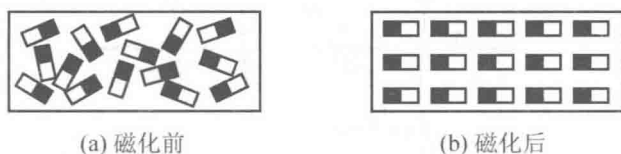


图 1.8 磁畴

一般在设计电机时, 为使主磁路的磁通密度较大而又不过分增大励磁磁动势, 通常把铁心内的工作磁通密度选择在膝点附近。因为过分增大励磁磁动势, 对电机来说, 意味着要增大电机励磁绕组电流。磁化曲线膝点以后的特性, 表现为励磁电流及励磁磁动势的相应增加并不能换来如膝点之前的那种近似线性的增长特性, 所以, 过分的增加励磁磁动势会带给电机更低的效率, 这是电机设计中非常要注意的问题。

## 2. 磁滞回线和基本磁化曲线

若将铁磁材料进行周期性磁化,  $B$  和  $H$  之间的变化关系就会变成如图 1.9 中曲线  $abcdefa$  所示。当  $H$  从零开始增加到  $H_m$  时,  $B$  相应地从零增加到  $B_m$ 。以后如果逐渐减小磁场强度  $H$ ,  $B$  值将沿曲线  $ab$  下降。当  $H=0$  时,  $B=B_r \neq 0$ ,  $B_r$  称为剩余磁通密度, 简称剩磁。要使  $B$  值从  $B_r$  减小到零, 必须加上相应的反向外磁场, 此反向磁场强度称为矫顽力, 用  $H_c$  表示。铁磁材料所具有的这种磁通密度  $B$  的变化滞后于磁场强度  $H$  变化的现象, 叫作磁滞。呈现磁滞现象的  $B-H$  闭合回线, 称为磁滞回线, 如图 1.9 中曲线  $abcdefa$  所示。磁滞现象是铁磁材料的另一个特性。

同一铁磁材料在不同的磁场强度  $H_m$  值下有不同的磁滞回线, 如图 1.10 所示。将各磁滞回线的顶点连接起来, 所得的  $B-H$  曲线称为基本磁化曲线。

磁滞回线窄、剩磁  $B_r$  和矫顽力  $H_c$  都小的材料, 称为软磁材料, 如铸钢、硅钢、铸铁等。它们容易被磁化, 常用来制造电机的铁心。磁滞回线宽、最大磁能积  $(BH)_m$  和矫顽力  $H_c$  都大的材料, 称为硬磁材料, 如铝镍钴合金等, 常用来制造永久磁铁, 如利用稀土矿物提炼制造的钕铁硼、稀土钴等永久磁铁, 具有相当高的永磁性能。

## 3. 磁滞损耗和涡流损耗

在交流磁路中, 磁场强度的大小和方向不断变化, 铁磁材料磁化方向反复变化, 使磁畴方向也不断来回排列。磁畴彼此之间摩擦引起的损耗, 称为磁滞损耗, 用  $p_h$  表示。

分析表明, 磁性材料反复磁化一个周期时单位体积所消耗的能量与磁滞回线的面积成正比。所以磁滞损耗  $p_h$  与磁场交变的频率  $f$ 、铁心的体积  $V$  和磁滞回线的面积  $\oint HdB$  成正比, 即