



普通高等教育“十三五”规划教材  
电气工程、自动化专业规划教材

# 电机学

◆ 刘颖慧 主编



 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材  
电气工程、自动化专业规划教材

内容简介

本书以电机学的基本原理为基础，重点介绍交流电机、直流电机、同步电机、异步电机、特种电机、电机拖动、电机控制、电机测试、电机应用等方面的知识。本书可作为电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电机工作的工程技术人员参考。

# 电机学

刘颖慧 主编

周凌 罗朝旭 王兵 杨丽 参编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

地址：北京市西城区百万庄大街24号  
邮编：100037  
电话：(010) 88379616  
网址：www.eip.com.cn

## 内 容 简 介

本书在继承传统电机学教材的基础上,从工程应用的角度出发,在突出基本理论、基本分析方法和基本运行控制规律的同时,注重电机作为系统中控制执行元件的功能。本书共7章,内容包括:绪论、直流电机基本理论、直流电动机的电力拖动基础、变压器、三相异步电动机的结构及基本理论、三相异步电动机的电力拖动、同步电机。书中附有大量例题、习题,内容完整、主次分明,便于教学和自学。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、机电一体化、电气技术等专业的本科生教材,也可供从事电机运行和制造的工程技术人员参考。

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。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机学 / 刘颖慧主编. — 北京:电子工业出版社,2019.8

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-36622-2

I. ①电… II. ①刘… III. ①电机学—高等学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 098549 号

责任编辑:凌毅

印刷:北京捷迅佳彩印刷有限公司

装订:北京捷迅佳彩印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开本:787×1 092 1/16 印张:14.75 字数:400 千字

版次:2019 年 8 月第 1 版

印次:2019 年 8 月第 1 次印刷

定价:45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254528,lingyi@phei.com.cn。

# 前 言

“电机学”历来是电气类专业的必修课程,实施新的专业目录后,依然是电气工程及其自动化专业的专业基础课,但要求涵盖的范围更宽。然而,由于大多数电机学教材主要是为电机及强电类专业编写的,内容侧重于电机本体,较少涉及电机作为系统中执行元件的作用和行为特点,不能适应宽口径打通培养模式对教材的需求。因此,迫切需要编写与新的专业设置接轨的教材。

本书共7章,内容包括:绪论、直流电机基本理论、直流电动机的电力拖动基础、变压器、三相交流异步电机的结构及基本理论、三相异步电动机的电力拖动、同步电机。本书在总体编排上尽可能淡化结构,突出基本原理、基本方法和基本运行规律的介绍,并特别突出了电机在电力拖动系统中作为执行元件的工作特性与控制原理及方法,增加了反映电机发展新成就的内容。此外,在章节安排、习题选配和插图设置等方面都做了较大改进,力图方便教学,有利于学生能力的培养。在编写时主要体现出下列特色:

(1) 重在介绍基本概念、基本运行原理与基本运行特性,并强调实用性;

(2) 为适应当前工业的发展需要,增加了电机与系统结合以及新型电机的内容,例如交/直流电机的机械特性分析、永磁直流电机、同步发电机的控制等;

(3) 对教学内容进行模块化设计,主要包括电机结构、工作原理、拖动原理等模块,各模块教学内容明确,具有针对性、可组合性和可选择性,便于不同专业选修。对不同的专业方向,教学内容的突出重点也不相同,教师可以自行选择。本书附录A给出了电机结构实训指导书,使本书集理论教学与实践教学于一体,使学生的工程能力的培养环节得以全面化和系统化,最终使学生具有较强的工程分析和工程应用能力。

本书由刘颖慧担任主编,负责策划、统稿和定稿工作。具体编写分工如下:第1章由湖南工业大学杨丽编写,第2章由湖南工业大学周凌编写,第3章由湖南工业大学王兵编写,第4章由湖南工业大学罗朝旭编写,其余章节由湖南工业大学刘颖慧编写。

本书提供配套的免费电子课件,可登录华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn),注册后下载。

本书的顺利出版,要感谢湖南工业大学电气与信息工程学院的领导、电机学课程组的老师们给予的大力支持和帮助。在本书编写过程中,作者参考了大量的优秀教材,受益匪浅,在此致以诚挚的谢意。

由于时间仓促,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正,并提出宝贵意见。

编者  
2019年7月  
于湖南工业大学

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1	2.5.3 改善换向的方法.....	30
1.1 电机及电力拖动的发展现状.....	1	<b>2.6 直流电动机</b> .....	31
1.2 电机及电力拖动系统分类.....	2	2.6.1 直流电动机的基本方程.....	31
1.3 本课程涉及的基本电磁学理论.....	2	2.6.2 直流电动机的工作特性.....	32
1.3.1 电磁感应的基本概念.....	2	<b>2.7 永磁直流电动机</b> .....	34
1.3.2 磁通.....	3	2.7.1 工作原理和磁极结构.....	34
1.3.3 磁场强度.....	3	2.7.2 永磁直流电动机基本方程.....	38
1.3.4 磁路的基本定律.....	3	2.7.3 稳态运行特性.....	39
1.3.5 电磁力定律.....	5	2.7.4 永磁直流电动机运行特性的 温度敏感性.....	40
1.3.6 电磁感应定律.....	6	<b>本章小结</b> .....	40
1.3.7 铁磁材料的特性及其 相关损耗.....	6	<b>思考题与习题</b> .....	41
<b>思考题与习题</b> .....	8	<b>第 3 章 直流电动机的电力拖动基础</b> .....	42
<b>第 2 章 直流电机基本理论</b> .....	9	3.1 电力拖动系统的运动方程和 负载转矩特性.....	42
2.1 直流电机的基本原理与结构.....	9	3.1.1 电力拖动系统的运动方程.....	42
2.1.1 电机的分类.....	9	3.1.2 负载转矩特性.....	43
2.1.2 直流发电机的工作原理.....	9	<b>3.2 他励直流电动机的机械特性</b> .....	45
2.1.3 直流电动机的工作原理.....	11	3.2.1 机械特性的表达式.....	45
2.1.4 电机的可逆性.....	12	3.2.2 固有机械特性和人为 机械特性.....	46
2.1.5 直流电机的结构.....	12	3.2.3 机械特性的求取.....	48
2.2 直流电机的电枢绕组简介.....	15	3.2.4 电力拖动系统稳定运行条件.....	49
2.2.1 电枢绕组的基本知识.....	15	<b>3.3 他励直流电动机的启动</b> .....	50
2.2.2 单叠绕组展开图.....	17	3.3.1 电枢回路串电阻启动.....	51
2.2.3 单波绕组.....	19	3.3.2 降压启动.....	53
2.3 直流电机的电枢反应.....	20	<b>3.4 他励直流电动机的调速</b> .....	53
2.3.1 直流电机的励磁方式.....	21	3.4.1 评价调速的指标.....	54
2.3.2 直流电机空载运行时的 气隙磁场.....	22	3.4.2 调速方法.....	55
2.3.3 直流电机负载磁场.....	23	3.4.3 调速方式与负载类型的配合.....	59
2.3.4 直流电机的电枢反应.....	25	<b>3.5 他励直流电动机的制动</b> .....	60
2.4 直流电机的电枢电动势和电磁转矩.....	27	3.5.1 能耗制动.....	60
2.4.1 直流电机的电枢电动势.....	27	3.5.2 反接制动.....	62
2.4.2 直流电机的电磁转矩.....	27	3.5.3 回馈制动.....	64
2.5 直流电机的换向.....	28	3.5.4 直流电动机的反转.....	65
2.5.1 换向概述.....	28	<b>3.6 串励及复励直流电动机的电力拖动</b> .....	65
2.5.2 产生火花的电磁原因.....	29		

3.6.1 串励直流电动机的机械特性	65	<b>第5章 三相异步电动机的结构及基本理论</b>	108
3.6.2 串励直流电动机的启动、调速与制动	67	5.1 三相异步电动机的基本原理与结构	108
3.6.3 复励直流电动机的特点	69	5.1.1 三相异步电动机的基本结构	108
本章小结	70	5.1.2 三相异步电动机的基本工作原理	110
思考题与习题	71	5.1.3 异步电动机的铭牌和主要系列	112
<b>第4章 变压器</b>	73	5.2 交流电机的绕组	115
4.1 变压器的基本工作原理、用途与结构	73	5.2.1 交流绕组的基本知识	115
4.1.1 变压器的基本工作原理及用途	73	5.2.2 三相单层绕组	116
4.1.2 变压器的分类与结构	74	5.2.3 三相双层绕组	119
4.1.3 变压器的铭牌与额定值	77	5.3 交流电机绕组的感应电动势	121
4.2 单相变压器的空载运行	78	5.3.1 线圈的感应电动势及短距系数	121
4.2.1 空载运行的物理状况	78	5.3.2 线圈组的感应电动势及分布系数	122
4.2.2 变压器空载运行时各量之间的关系	79	5.3.3 一相绕组中的基波感应电动势	123
4.3 单相变压器的负载运行	82	5.4 交流电机绕组的磁动势	125
4.3.1 变压器负载运行时的电磁关系	82	5.4.1 单相绕组的基波磁动势	125
4.3.2 基本方程	83	5.4.2 三相绕组基波合成磁动势——旋转磁动势	129
4.3.3 变压器的折算	84	5.5 三相异步电动机的空载运行	131
4.4 变压器的运行特性	87	5.5.1 空载运行时的电磁关系	132
4.4.1 变压器的外特性和电压变化率	87	5.5.2 空载运行时的电压平衡方程	133
4.4.2 变压器的效率	88	5.6 三相异步电动机的负载运行	134
4.5 三相变压器	90	5.6.1 负载运行时的电磁关系	134
4.5.1 三相变压器的磁路系统	90	5.6.2 转子绕组各电磁量	134
4.5.2 三相变压器的电路系统——连接组别	91	5.6.3 磁动势平衡方程	137
4.5.3 磁路系统和绕组连接方式对电动势波形的影响	94	5.6.4 电动势平衡方程	137
4.6 变压器的并联运行	97	5.7 三相异步电动机的等效电路	138
4.6.1 并联运行的理想条件	97	5.7.1 折算	138
4.6.2 并联条件不满足时的运行分析	98	5.7.2 等效电路	140
* 4.7 其他用途的变压器	99	5.8 三相异步电动机的功率平衡、转矩平衡和工作特性	141
4.7.1 自耦变压器	99	5.8.1 功率平衡和转矩平衡	141
4.7.2 仪用互感器	101	5.8.2 三相异步电动机的工作特性	143
4.7.3 电焊变压器	103		
本章小结	104		
思考题与习题	106		

本章小结 .....	144	7.2.4 凸极同步发电机的 负载运行 .....	188
思考题与习题 .....	145	7.3 同步发电机的运行特性 .....	191
<b>第6章 三相异步电动机的电力拖动</b> .....	147	7.3.1 同步发电机的运行特性 .....	191
6.1 三相异步电动机的机械特性 .....	147	7.3.2 特性曲线在参数计算中的 应用 .....	195
6.1.1 三相异步电动机机械特性 表达式 .....	147	7.3.3 同步发电机稳态参数测定 .....	199
6.1.2 三相异步电动机人为 机械特性 .....	150	7.4 同步发电机的并联运行 .....	200
6.2 三相异步电动机的启动 .....	151	7.4.1 投入并联的条件和方法 .....	200
6.2.1 直接启动 .....	152	7.4.2 功率和转矩平衡方程 .....	203
6.2.2 降压启动 .....	152	7.4.3 功角特性 .....	204
6.2.3 绕线型异步电动机启动 .....	154	7.4.4 有功功率调节与静态稳定 .....	206
6.2.4 深槽式及双笼型异步 电动机 .....	155	7.4.5 无功功率调节和 V 形曲线 .....	208
6.3 三相异步电动机的制动 .....	157	本章小结 .....	210
6.3.1 能耗制动 .....	157	思考题与习题 .....	210
6.3.2 反接制动 .....	158	<b>附录 A 电机结构实训指导书</b> .....	212
6.3.3 回馈制动 .....	159	A.1 实训的常用工具 .....	212
6.4 三相异步电动机的调速 .....	160	A.1.1 手工工具 .....	212
6.4.1 变极调速 .....	161	A.1.2 电机修理的常用量具 .....	214
6.4.2 变频调速 .....	163	A.2 实训常用仪表和仪器 .....	216
6.4.3 变转差率调速 .....	165	A.2.1 DT-92 型数字万用表 .....	216
6.5 单相异步电动机 .....	167	A.2.2 兆欧表 .....	217
6.5.1 单相异步电动机的 工作原理 .....	167	A.2.3 钳形表 .....	219
6.5.2 常用单相异步电动机的 类型 .....	169	A.2.4 转速表 .....	220
本章小结 .....	170	A.3 电机修理的常用材料 .....	220
思考题与习题 .....	171	A.3.1 绝缘材料 .....	220
<b>第7章 同步电机</b> .....	173	A.3.2 导电材料 .....	221
7.1 概述 .....	173	A.4 电动机的拆装 .....	222
7.1.1 同步电机的基本结构形式 .....	173	A.4.1 电动机拆卸前的准备工作 .....	222
7.1.2 同步电机的励磁方式 .....	177	A.4.2 三相异步电动机的 拆卸步骤 .....	222
7.1.3 同步电机的冷却方式 .....	178	A.4.3 三相异步电动机的装配 .....	223
7.1.4 同步电机的额定值 .....	178	A.5 线圈的绕制 .....	224
7.2 同步电机的运行原理 .....	179	A.6 电动机的嵌线 .....	225
7.2.1 同步发电机的空载运行 .....	179	A.6.1 手工嵌线 .....	225
7.2.2 同步电机的电枢反应 .....	181	A.6.2 接线 .....	225
7.2.3 隐极同步发电机的 负载运行 .....	184	A.6.3 绕组浸漆、烘干工艺 .....	226
		A.6.4 检查试验 .....	226
		<b>参考文献</b> .....	228

# 第1章 绪论

## 1.1 电机及电力拖动的发展历史与发展现状

1820年奥斯特发现了电流在磁场受力的物理现象,随后由安培对这种现象进行了科学的总结,发现了磁路定律及全电流定律。在此基础上,人们在实验室制成了直流电动机的模型。1834年雅可比制成了第一台直流电动机,人们用它来拖动轮船,轮船运载了11人,以4km/h的速度在涅瓦河上顺流和逆流而行,获得了成功。当时还没有可以实用的直流电源,为电动机供电的是昂贵的化学电池。

1831年法拉第发现了电磁感应定律,为生产制造各种发电机提供了依据。随后制成了直流发电机,替换了原来的化学电池,为直流电动机的广泛应用提供了电源。可见,在电机与电力拖动发展史上首先得到应用的是直流电动机。直到19世纪70年代,直流电一直占据统治地位。随着电动机应用范围的扩大,用电量不断增加,由于当时直流电压无法升高,所以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点。

1871年凡·麦尔准发明了交流电动机。1878年亚布洛契可夫用他发明的交流发电机和变压器为照明装置供电。1888年多利沃·多勃罗夫斯基制成了三相感应电动机,奠定了三相电路和三相电机的基础。此后,三相交流电迅速地发展起来。到20世纪初,各种三相交流电动机均已制造成功。

进入20世纪后,人们在降低电机成本、减小电机尺寸、提高电机性能、选用新型电磁材料、改进电机生产工艺等方面进行了大量的研究,所以现代电机与20世纪初的电机已有很大的区别。

我国的电机制造业是在新中国成立后才发展起来的。20世纪50年代末,生产出5万千瓦汽轮发电机、7.25万千瓦水轮发电机和12万千伏安的变压器;1958年,浙江大学与上海电机厂等合作研发了世界上第一台1.2万千瓦双水内冷汽轮发电机。目前,已能制造出单机容量为2000MW的汽轮发电机,容量为1000kV·A的高温超导变压器已试制成功。水轮发电机的容量也达到了1200MW,电力变压器的电压等级最高已达到1200kV。但我国的电机制造业与国际先进水平相比,尚有一定的差距。

纵观电力拖动的发展过程,交、直流两种拖动方式并存于各个生产领域。随着工业技术的不断发展,两种拖动方式在相互竞争、相互促进中发生着深刻的变革。在交流电机出现以前,直流电力拖动是唯一的拖动方式。19世纪末,由于研制出了经济实用的交流电机,使得交流电力拖动在工业中得到了广泛的应用。但是随着生产技术的发展,特别是精密机械加工与冶金工业生产过程的进步,对电力拖动在启动、制动、正反转以及调速精度与范围等静态特性和动态特性响应方面提出了更新、更高的要求。由于交流电力拖动比直流电力拖动在技术上难以实现这些要求,所以20世纪以来,在可逆、可调速与高精度的拖动领域中,在相当长的一段时期内几乎都是采用直流电力拖动,而交流电力拖动则主要用于恒转速系统。

虽然直流电力拖动具有调速性能优异这一突出优点,但是由于它具有电刷和换向器,使得它的故障率较高,电动机的使用环境受到限制,其电压等级、额定转速、单机容量的发展也受到限制。所以在20世纪60年代以后,随着电力电子技术的发展,交流调速不断进步和完善,在调速



性能方面由落后状态直到可以与直流调速相媲美。今天,交流调速在很多场合已经取代了直流调速。在不久的将来,交流调速将完全取代直流调速,这也是一种必然的发展趋势。

电力拖动的发展大致可以分为这样几个阶段:第一阶段是单一电机的拖动控制阶段。很多工作机械都由一台主电机来作为动力,通过转轴和机械传动的方式进行,往往在一个车间就只有一台电机,对电机的控制采用继电-接触器,这种工作方式的噪声大、效率低、指针精度差;第二阶段,电力拖动走向了单机拖动的时代,一台电机拖动一台机械设备,采用模拟电路与晶闸管等电力电子器件进行控制,与前一阶段相比,电机的利用率、加工精度都有了很大的提高;第三阶段,电机的拖动控制向单独的器件发展,即一个旋转部件由一台电机拖动,采用计算机等数字控制设备进行控制,先进的控制方法也逐渐在电力拖动领域得到日益广泛的应用。

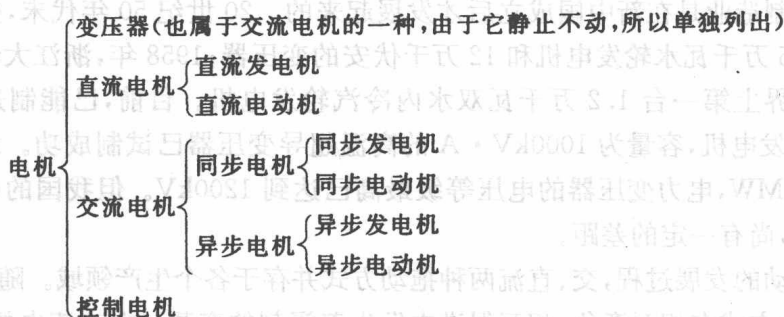
在法拉第刚刚发明第一台发电机时,这台小小的装置只能使电流表的指针轻微偏转。有人问他,耗费那么多心血发明这东西有什么用,法拉第反问道,新生的婴儿又有有什么用呢?正是这个新生的婴儿推进了以电气化革新为代表的第二次技术革命,使人类的生产力水平提高了一大步,同时也造就了一大批电机理论学者和发明家。

目前随着计算机技术、控制理论和技术以及电力电子技术的不断发展和完善,电机与电力拖动技术正如虎添翼地向着更高的层次不断发展,相信在不远的将来,电机与电力拖动技术将向数字化、高智能化的方向迈进,其发展前景是非常可观的。

## 1.2 电机及电力拖动系统分类

电机应用广泛,种类繁多,性能各异,分类方法也很多。目前主要有两种常用的分类方法:一种是按功能用途分,可分为发电机、电动机、变压器和控制电机四大类;另一种是按照电机的结构或转速来分,可分为变压器和旋转电机。根据电源的不同,旋转电机又分为直流电机和交流电机两大类。交流电机又分为同步电机和异步电机两类。

综合以上两种分类方法,可归纳如下:



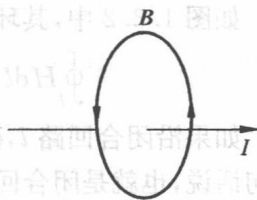
## 1.3 本课程涉及的基本电磁学理论

从能量转换的角度来看,电机是一种能量转换装置。其能量转换的基本原理主要来自于电磁感应的基本理论。要研究电机及拖动的理论和技术必须掌握这些电磁学的基本理论,我们认为有必要将本课程中所用到的一些电磁理论简单介绍如下。

### 1.3.1 电磁感应的基本概念

当一定大小的电流流过导体时,就会产生一定的磁场。磁场的强弱及磁场的方向一般用磁

感应强度来表示。在实际分析过程中,也常常使用磁力线来形象地表示磁场的强弱和方向:磁力线越密,磁场就越强;磁力线越疏,磁场就越弱。磁场的方向与产生这个磁场的电流的方向符合右手螺旋定则:当我们紧握拳头、竖起大拇指时,大拇指所指的方向就是电流的方向,弯曲的四指所指的方向就是磁场的方向。如图 1.3.1 所示。



磁感应强度用来描述磁场的大小和方向,用  $B$  来表示,在国际单位制中,其单位是特斯拉(T)。磁感应强度又称为磁通密度,简称为“磁密”。

### 1.3.2 磁通

磁通是电磁理论中另一个非常重要的物理量,它表示在某个特定的截面内穿过这个截面的磁感应强度的通量,用  $\Phi$  表示。它和磁感应强度之间的关系用数学语言描述为

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1.3.1)$$

式中, $\Phi$  为磁通,单位为韦伯(Wb);  $B$  为磁感应强度,单位为特斯拉(T);  $S$  为磁力线所穿过区域的面积,单位为平方米( $m^2$ )。

假如通过一定截面的磁场是均匀的,而且所有磁力线的走向均与此截面正交,则式(1.3.1)的积分形式就可以写成代数形式,即

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1.3.2)$$

从式(1.3.2)可以看出,磁感应强度是单位面积上的磁通,是磁通的面密度,因此磁感应强度又称为磁通密度。

### 1.3.3 磁场强度

在处理近似线性磁场时,还有一个很重要的物理量经常用到——磁场强度  $H$ 。一般而言,在线性磁性材料的一定范围内,磁场强度和磁感应强度之间成线性关系,即

$$B = \mu H \quad (1.3.3)$$

磁场强度用来衡量在单位长度上的电流大小,在国际单位制中,其单位是安培/米(A/m)。式(1.3.3)中, $\mu$  是衡量各种物质对于磁的传导能力大小的物理量,称为磁导率,单位是亨利/米(H/m)。真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m。将真空磁导率作为基准,其余物质的磁导率与之相比得到的系数称为相对磁导率,用  $\mu_r$  来表示。一般而言,铁磁物质的相对磁导率比较大,例如电机转子铁芯的硅钢片的相对磁导率在 6000~7000 左右,导磁性能优越,而非磁物质的相对磁导率则比较小,导磁性能差。

### 1.3.4 磁路的基本定律

#### 1. 安培环路定律

在物理学中,我们知道磁场强度沿闭合曲线  $l$  的线积分等于此回路所包围的导体电流的代数和。即

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (1.3.4)$$

式(1.3.4)中,对电流方向的定义按右手定则来判断其正负符号。大拇指指向电流方向,弯曲的四指所指方向和环路积分方向一致的,电流取正号,反之取负号。

如图 1.3.2 中,其环路积分就可以写为

$$\oint_l H dl = \sum I = -i_1 + i_2 - i_3 + i_4$$

如果沿闭合回路  $l$ , 磁场强度的方向总与  $l$  的切线方向处处相同, 换句话说, 也就是闭合回路所形成的曲面与其所包围的电流处处正交, 式(1.3.4)就可以简化为

$$\sum Hl = \sum I = Ni \quad (1.3.5)$$

式中,第二个等号为螺线管的情况,  $N$  为线圈的匝数。

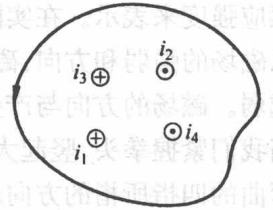


图 1.3.2 安培环路定律示意图

## 2. 磁路中的欧姆定律

在电路中有一个非常基本和重要的定律,就是欧姆定律,它反映了电流、电阻和电压之间的约束关系。在磁路中对应地也有非常相似的关系,我们把它称为磁路中的欧姆定律。与电源中的电动势类似,在磁路中将式(1.3.5)中的物理量称为磁动势,用  $F$  来表示,即

$$F = \sum Hl = \sum I = Ni \quad (1.3.6)$$

将式(1.3.2)和式(1.3.3)代入式(1.3.6),可得

$$F = Ni = Hl = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu S} \quad (1.3.7)$$

式中,  $\Phi$  为磁路的磁通;  $l$  为磁力线所经过的长度;  $\mu$  为磁路中所经过的磁介质的磁导率;  $S$  为磁力线所穿过的截面积。将  $\Phi \frac{l}{\mu S}$  用磁路的磁阻  $R_m$  表示,即

$$R_m = \Phi \frac{l}{\mu S} \quad (1.3.8)$$

这样式(1.3.7)就可以写成

$$F = \Phi R_m \quad (1.3.9)$$

它表示在磁路中,磁路的磁动势等于磁路的磁通与磁路磁阻的乘积。而由式(1.3.8)可知,磁阻在一个确定的磁路中只与磁介质材料本身的性质有关,与其他参数均无关系,因此可以说磁路的磁动势与磁路的磁通之间成线性关系。

与电路中的欧姆定律非常相似。

## 3. 磁路中的基尔霍夫定律

在电路分析中还有一个很重要的定律就是基尔霍夫定律,在磁路的基本理论中也有相应的磁路基尔霍夫定律。在电路分析中,基尔霍夫定律有两种形式,第一种是基尔霍夫电流定律(KCL),它说明了在一个电路的节点上其电流的代数和等于零。即

$$\sum I = 0$$

与之相应,在磁路中,如果磁力线所经过的路径是一个多分支回路,例如三相变压器的铁芯,如图 1.3.3 所示。

取如图 1.3.3 所示的闭合曲面,且流出闭合面的磁通取正号、流入闭合面的磁通取负号,对于曲面  $\Sigma$ ,有

$$-\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1.3.10)$$

这个公式说明,对于一个闭合面而言,流入(流出)这个面的磁通代数和等于零。形式与电路中的基尔霍夫电流定律非常相似,因此也将这个表达式称为磁路基尔霍夫第一定律,也叫磁通连续性定律。

在电路分析中,基尔霍夫定律还有另一种形式,就是基尔霍夫电压定律(KVL)。对任意回路而言,电路的总电动势等于回路中各个元件的电压降之和,或者表述为回路中所有元件的电压代数和等于零,即

$$\sum U = 0$$

在电机和变压器中,其磁路是连续闭合的,但是磁力线经过的磁介质却并不是处处相同的,这时计算整个磁路的磁动势时,需要分段计算,然后将各段的磁压相加,如图 1.3.4 所示的磁路中就有

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum I = NI = F$$

式中,  $H_k$  为各段磁介质的磁场强度;  $l_k$  为各段磁介质的长度;  $I$  为产生磁场的电流强度;  $N$  为线圈的匝数。

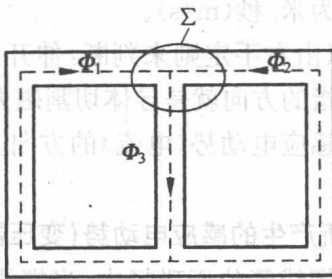


图 1.3.3 磁路基尔霍夫第一定律

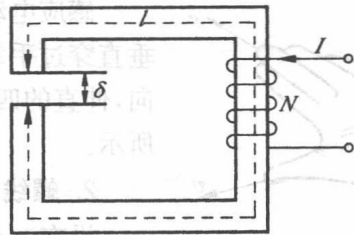


图 1.3.4 磁路基尔霍夫第二定律

根据磁路欧姆定律,式(1.3.9)可以写为

$$F = Hl + H_0 \delta = \Phi_1 R_m + \Phi_2 R_{m_0} \quad (1.3.11)$$

式中,  $\delta$  为气隙长度;  $l$  为磁力线经过的磁路的总长度;  $R_m$  为均匀磁路的磁阻;  $R_{m_0}$  为气隙的磁阻。

这说明了在闭合磁路中,总的磁动势等于在磁路上的各段磁路磁压的代数和。对照电路中的基尔霍夫电压定律,一个闭合磁路就相当于电路中的闭合回路,而磁通就相当于电流,磁阻相当于电阻,两个定律在形式上非常相似,因此将此表达式称为磁路基尔霍夫第二定律。

需要说明的是,将磁路与电路这样对照只是为了使已经具有一些电路基本知识的读者更容易记住和了解磁路中的常用定律及参数。实际上,电路与磁路的物理意义是不同的。

### 1.3.5 电磁力定律

载流导体置于磁场中时,会受到电磁力(安培力)的作用,如果磁力线的方向与导体相互垂直,则导体所受到的安培力的大小为

$$f = BIl \quad (1.3.12)$$

式中,  $f$  为安培力,单位为牛[顿](N);  $l$  为载流导体的长度,单位为米(m);  $B$  为磁场的磁感应强度,单位为特斯拉(T);  $I$  为导体中的电流,单位为安培(A)。

安培力的方向可以使用左手定则来判断:伸开左手,磁力线垂直穿过手掌心,伸直的四指指向电流方向,大拇指所指的方向就是导体所受的安培力的方向。如图 1.3.5 所示。

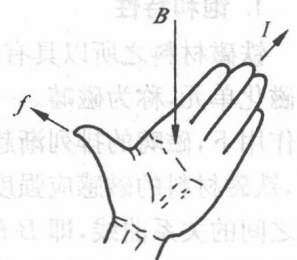


图 1.3.5 电磁力定律  
(左手定则)

### 1.3.6 电磁感应定律

变化的磁场在导体中会产生感应电动势,如果导体闭合的话,还会产生感应电流,这种现象就是电磁感应现象。电磁感应现象表现在两个方面:一是导体在磁场中做切割磁力线的运动会产生感应电动势;二是在螺线管中,如果磁通发生变化,就会在螺线管中产生感应电动势。

#### 1. 导体切割磁力线所产生的感应电动势(切割电动势)

设有一根导体在磁场中做切割磁力线的运动,其长度为 $l$ ,切割磁力线的速度为 $v$ ,而且磁场的磁力线、导体的运动方向以及导体的走向三者相互垂直时,所产生的感应电动势可以用下列公式来计算,即

$$e = Blv \quad (1.3.13)$$

式中, $e$ 为感应电动势,单位为伏[特](V); $l$ 为导体的长度,单位为米(m); $B$ 为磁场的磁感应强度,单位为特斯拉(T); $v$ 为导体切割磁力线的速度,单位为米/秒(m/s)。

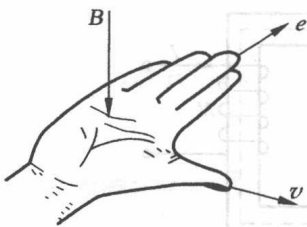


图 1.3.6 导体切割磁力线所产生的电动势(右手定则)

感应电动势的方向可以由右手定则来判断:伸开右手,磁力线垂直穿过手掌心,大拇指所指的方向就是导体切割磁力线的运动方向,伸直的四指的指向就是感应电动势(电流)的方向。如图 1.3.6 所示。

#### 2. 螺线管中磁通变化所产生的感应电动势(变压器电动势)

设有一个匝数为 $N$ 的螺线管位于磁场中,当螺线管线圈所交链的磁通发生变化时,在线圈中就会产生感应电动势,电动势的大小为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.3.14)$$

式中, $e$ 为感应电动势,单位为伏[特](V); $\Phi$ 为螺线管线圈所交链的磁通,单位为韦[伯](Wb); $N$ 为螺线管线圈的匝数。

这种情况下,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原磁通的变化相反,如式(1.3.14)中的负号。

### 1.3.7 铁磁材料的特性及其相关损耗

在电机和变压器中,为了能够使磁场比较强,一般使用铁磁材料作为磁路的导磁材料,下面讨论一下这些材料的基本特性。

铁磁材料一般包括铁、钴、镍及这些材料的合金,它们都具有良好的导电性。在磁的方面,铁磁材料主要有两个非线性特性:一是饱和特性,二是磁滞特性。

#### 1. 饱和特性

铁磁材料之所以具有较强的导磁性能,从微观角度讲,是因为在这些材料的内部有很多自发的磁化单元,称为磁畴。一般情况下,磁畴的排列是杂乱无章的,铁磁材料呈中性。在外界磁场的作用下,磁畴的排列渐趋规律,形成一个磁场,使铁磁材料呈现磁性。在不同励磁电流的作用下,铁磁材料的磁感应强度会随励磁电流不断变化,对其进行测量就会得到磁感应强度和磁场强度之间的关系曲线,即 $B-H$ 曲线,也叫铁磁材料的磁化特性曲线,如图 1.3.7 所示。图中曲线 1 为铁磁材料的磁化曲线,曲线 2 为铁磁材料的磁导率随磁场强度变化的曲线。

从铁磁材料的磁化特性曲线上可以看出,在一定的范围内( $a, b$ ),尽管磁场强度不断增大,但是磁感应强度的变化却并不大。这就是铁磁材料的饱和特性。这种特性说明,在铁磁材料的磁

感应强度达到一定值后,再靠加强励磁电流的方法是不能使铁磁材料的磁感应强度继续增大的。另外,铁磁材料的磁导率也会随励磁电流的变化而不同。

## 2. 磁滞回线和磁滞损耗

在测量铁磁材料的磁化曲线时,如果改变励磁电流的大小和方向,就会发现在励磁电流增大或减小的不同路径上,铁磁材料的磁化曲线会出现不重合的现象,导致磁感应强度滞后于磁场强度的变化,如图 1.3.8 所示。这种现象称为铁磁材料的滞回现象,这种曲线就称为铁磁材料的磁滞曲线。

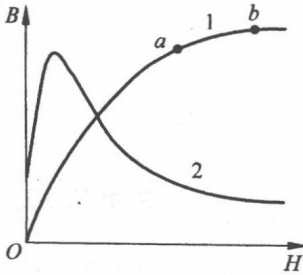


图 1.3.7 铁磁材料的磁化特性曲线

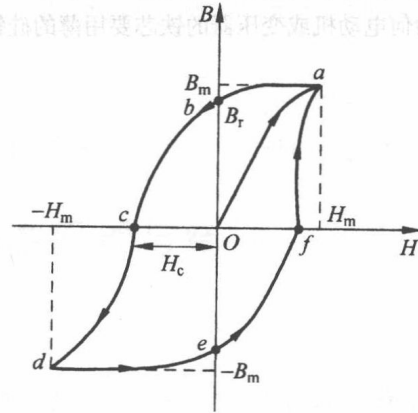


图 1.3.8 铁磁材料的磁滞曲线

从图 1.3.8 中可以看到,磁场强度从 0 开始增大到  $H_m$  时,其磁化特性曲线沿  $Oa$  段上升,达到最大值  $B_m$ ;此后如果减小磁场强度,磁感应强度不会沿着原来的  $Oa$  曲线下降,而是沿着  $ab$  段曲线下降,当磁场强度减到 0 时,磁感应强度并不为 0,而是等于  $B_r$ ,称为剩磁;同样,当磁感应强度为 0 时,磁场强度也不为 0,而是等于  $-H_c$ ,这个反向的磁场强度称为矫顽力;当磁场强度和磁感应强度降到最小,又开始增大时,将沿  $defa$  的方向增大。

不同材料的磁滞回线是各不相同的。磁滞回线较窄的材料为软磁材料,如铸铁、硅钢片等,磁导率比较高,可以用来制作各种电机的定、转子铁芯;磁滞回线较宽的材料为硬磁材料,可以制作成永久磁铁,用来制作永磁电机。

在对铁磁材料进行反复的磁化时,铁磁材料内部的磁畴不断被改变方向,相互之间产生摩擦,从而引起一定程度的能量损耗,这种能量损耗称为磁滞损耗。试验证明,铁磁材料磁滞损耗的大小与磁化磁场的磁感应强度和交变磁场的频率成正比。

## 3. 涡流损耗

除铁磁材料的磁滞损耗外,在电机或变压器铁芯中的磁通发生变化时,铁芯会产生感应电动势,进而产生电流,这种电流形状呈旋涡状,故称其为涡流。涡流在铁芯中会产生热量,造成一定的能量损耗,这种能量损耗称为涡流损耗。试验证明,涡流损耗的大小与铁芯的厚度平方成正比。因此,为了减小涡流损耗,一般采用薄的硅钢片来制作电机或变压器的铁芯。

铁芯中的磁滞损耗与涡流损耗合称为铁芯损耗(铁损)。

## 思考题与习题

- 1.1 简述电机及电力拖动的历史发展进程。
- 1.2 磁路的磁阻如何计算？磁阻的单位是什么？
- 1.3 磁感应强度为何又称为磁通密度？它与磁通的关系如何？
- 1.4 电机或变压器铁芯中的损耗包括哪些损耗？它们都是如何产生的？
- 1.5 设有两个线圈的匝数相同，一个缠绕在软磁材料上，而另一个缠绕在非磁性物质上，若两个线圈通以相同频率的交流电流，此时自感电动势如果相等，那么哪个线圈上的电流大？
- 1.6 为何电动机或变压器的铁芯要用薄的硅钢片叠压而成？

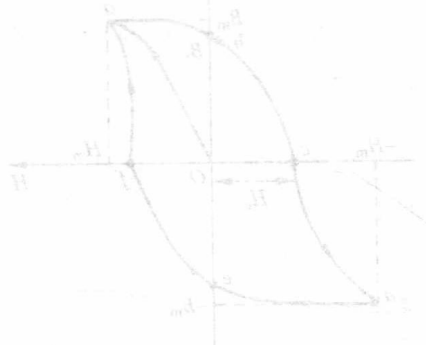


图 4-2 铁磁材料的磁滞回线

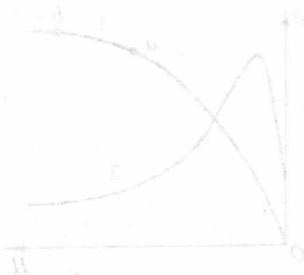


图 4-3 非磁性材料的磁滞回线

去，在图 4-3 中，铁磁材料的磁滞回线比非磁性材料的磁滞回线大得多，说明铁磁材料的磁滞损耗比非磁性材料的大得多。图 4-2 和图 4-3 中的磁滞回线，实际上就是磁通密度 B 与磁场强度 H 之间的关系曲线。在图 4-2 中，磁滞回线是一个闭合的曲线，其面积代表了磁滞损耗。在图 4-3 中，磁滞回线是一个非常窄的曲线，其面积代表了磁滞损耗。从图 4-2 和图 4-3 可以看出，铁磁材料的磁滞损耗比非磁性材料的磁滞损耗大得多。这是因为铁磁材料具有较高的磁导率，其磁通密度 B 与磁场强度 H 之间的关系是非线性的。而非磁性材料的磁导率较低，其磁通密度 B 与磁场强度 H 之间的关系是线性的。因此，铁磁材料的磁滞损耗比非磁性材料的磁滞损耗大得多。在电机和变压器的铁芯中，磁滞损耗是造成能量损失的主要原因之一。为了减小磁滞损耗，通常采用硅钢片叠压而成铁芯。这是因为硅钢片的磁滞损耗比普通的铁芯材料要小得多。此外，硅钢片还具有较高的电阻率，可以有效地减小涡流损耗。因此，硅钢片叠压而成的铁芯具有较低的磁滞损耗和涡流损耗，能够提高电机和变压器的效率。

## 第2章 直流电机基本理论

直流电机是指能输出直流电流的发电机或通入直流电流而产生机械运动的电动机。

直流电动机具有良好的启动性能和宽广平滑的调速特性,因而被广泛应用于电力机车、无轨电车、轧钢机、机床和启动设备等需要经常启动并调速的电气传动装置中。直流发电机主要做直流电源。此外,小容量直流电机大多在控制系统中以伺服电动机、测速发电机等形式作为测量、执行元件使用。

目前,虽然由晶闸管等整流元件组成的静止固态直流电源设备基本上已经取代了直流发电机,但直流电动机以其良好的调速性能在许多传动性能要求较高的场合占据一定的地位。

### 2.1 直流电机的基本原理与结构

#### 2.1.1 电机的分类

应用电磁原理实现电能与机械能互换的旋转机械,统称为电机。把机械能转换为电能的电机,称为发电机;把电能转换为机械能的电机,称为电动机。

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称,它们的能量转换过程是可逆的。

直流电动机是人类最早发明和应用的一种电机,虽然目前不如交流电动机应用普遍,但是,直流电动机具有比交流电动机较为优越的调速和启动性能。它的调速范围广,平滑性、经济性较好,采用晶闸管调速系统更为方便,启动转矩较大。这些性能对有些机械的拖动是十分重要的,如大型机床、电力机车、大型轧钢机、大型起重设备等。

直流电动机也有它显著的缺点:一是制造工艺复杂,生产成本低;二是运行时由于电刷与换向器之间容易产生火花,可靠性较差,维护量大且较麻烦。人们虽做过很多研究工作来改善交流电动机的性能,但还不能全部用交流拖动来代替直流拖动。因而,在某些机械的拖动中,仍需用直流电动机。

直流发电机过去是直流电的主要电源之一,广泛地用在电解、电镀、充电等设备中,也用作同步电动机的励磁和直流电动机的电源。由于电力电子技术的日益发展,由晶闸管等整流元件组成的直流电源设备在某些场合已经取代了直流发电机。

电动机除较多用作动力外,随着生产自动化的需要,在自动控制系统和计算装置中还用到一些控制电机和特殊用途的电机。例如测速发电机、步进电动机等。

从理论上讲,电机既可作为发电机又可作为电动机,即具有可逆性。但实际应用中是专用的。

本书主要介绍电动机,对于各种电动机,我们应该了解以下几个方面的问题:基本工作原理,基本构造,表示转速与转矩之间关系的机械特性,启动、反转、调速及制动的基本原理和基本方法,适用场所和正确使用方法。

#### 2.1.2 直流发电机的工作原理

在电工课程中,我们已经知道在磁场中运动的导体内,将产生感应电动势——电磁感应定



律。发电机就是运用这个定律工作的。

如图 2.1.1 所示为一台两磁极直流发电机的工作原理图。图中 N 和 S 是一对静止的磁极，用以产生磁场，其磁感应强度沿圆周为正弦分布。容量较小的发电机用永久磁铁做磁极。容量较大的发电机的磁场是由直流电流通过绕在磁极铁芯上的绕组产生的。用来形成 N 极和 S 极的绕组称为励磁绕组，励磁绕组中的电流称为励磁电流  $I_f$ 。

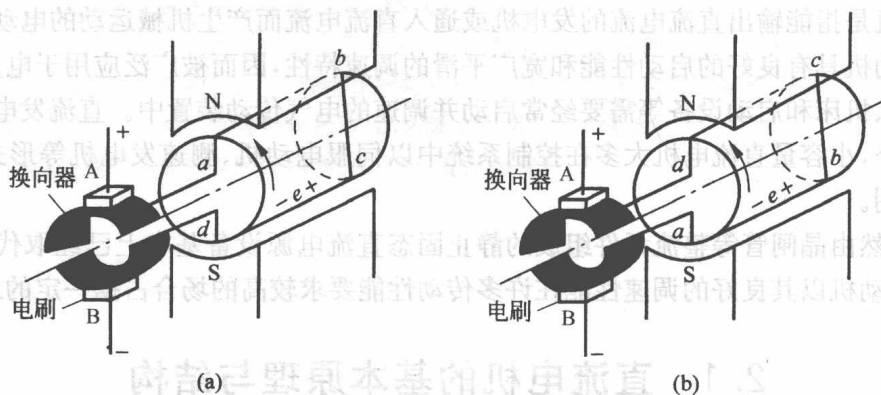


图 2.1.1 直流发电机的模型

在 N 极和 S 极之间，有一个能绕轴旋转的圆柱形铁芯，其上紧绕着一个线圈称为电枢绕组（图中只画出一匝线圈），电枢绕组中的电流称为电枢电流  $I_a$ 。

电枢绕组两端分别接在两个相互绝缘而和绕组同轴旋转的半圆形铜片——换向片上，组成一个换向器。换向器上压着固定不动的碳质电刷。铁芯、电枢绕组和换向器所组成的旋转部分称为电枢。

当电枢被原动机以恒速驱动，按逆时针方向转动时，用右手定则可以判定，线圈  $ab$  和  $cd$  边切割磁力线产生的感应电动势  $e$  的方向，如图 2.1.1(a) 所示，在负载与线圈构成的回路中产生电流  $I_a$ ，其方向与感应电动势方向相同。电流由电刷 A 流出，由电刷 B 流回。

当电枢转到图 2.1.1(b) 所示位置时， $ab$  边转到了 S 极下， $cd$  边转到了 N 极下。这时线圈中感应电动势的方向发生了改变，但由于换向器随同一起旋转，使得电刷 A 总是接触 N 极下的导线，而电刷 B 总是接触 S 极下的导线，故电流  $I_a$  仍由电刷 A 流出，由电刷 B 流回，方向不变。

虽然有换向器的作用，将线圈内的交变电动势在两电刷间变换为方向不变的电动势，但它的大小仍然是脉动的。欲获得在方向和量值上均为恒定的电动势，则应使电枢铁芯上的槽数和线圈匝数增多，同时换向器上的换向片数目也要相应地增加。

直流发电机的电动势因切割磁力线而产生，故两电刷间电动势  $E$  的大小，与发电机电枢的转速  $n$  和磁极磁通  $\Phi$  乘积成正比，其表达式为

$$E = C_e \Phi n \quad (2.1.1)$$

式中， $C_e$  为电机常数，与电机的构造有关； $\Phi$  的单位是 Wb； $n$  的单位是 r/min； $E$  的单位是 V。

在这种情况下，直流电机便相当于一个直流电源，向负载输出直流电功率。

与此同时，电枢电流  $I_a$  与磁场相互作用而产生的电磁力形成了电磁转矩  $T_{em}$ ，且

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \quad (2.1.2)$$

式中， $C_T$  是与电动机结构有关的常数； $\Phi$  的单位是 Wb； $I_a$  的单位是 A， $T$  的单位是 N·m。

用左手定则可以判别，电磁转矩  $T_{em}$  的方向与电枢旋转方向相反。因此，在电枢等速旋转时，原动机的驱动转矩  $T_1$  必须与发电机的电磁转矩  $T_{em}$  和空载转矩  $T_0$  相平衡（ $T_0$  是发电机轴上的转矩），表达式为  $T_1 = T_{em} + T_0$ 。