

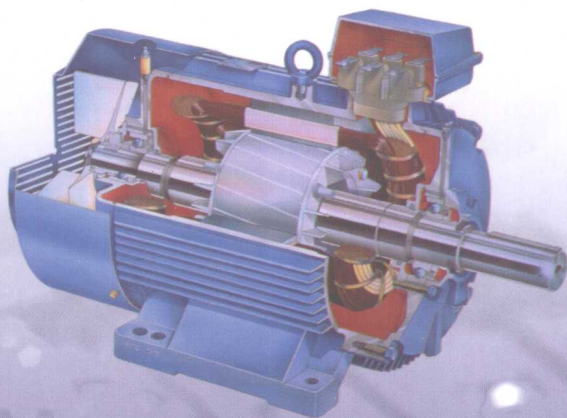


普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

DIANQI  
XINXILEI

# 电机学

■ 曾成碧 赵莉华 编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



免费  
电子课件

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

# 电 机 学

曾成碧 赵莉华 编



机械工业出版社

本书是为高等学校及高等职业学校网络教育和成人教育电气类专业编写的教材, 根据网络教育及成人教育本专科人才培养所需知识、能力和素质结构的要求, 以培养高级应用型人才为目标, 结合编者多年的电机学教学经验编写而成。

全书共分4篇: 变压器篇、异步电机篇、同步电机篇和直流电机篇。在编写过程中, 简化了传统电机学教材的电机电磁场理论分析, 注重基本概念和理论应用, 着重定性分析。为了便于理解和自学, 每篇结束部分增加了模拟测试题和答案。

本书可作为高等学校及高等职业学校网络教育和成人教育电气工程学科及相关专业电机学课程的教材或参考书, 也可供相关工程技术人员学习参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/曾成碧, 赵莉华编. —北京: 机械工业出版社,  
2008. 10

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 25251 - 1

I. 电… II. ①曾…②赵… III. 电机学 - 高等学校 - 教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 154569 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑: 于苏华 版式设计: 张世琴 责任校对: 魏俊云  
封面设计: 张 静 责任印制: 邓 博  
北京京丰印刷厂印刷

2009 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16 印张 · 396 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 25251 - 1

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
销售服务热线电话: (010) 68326294  
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话: (010) 88379711  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

电机学是电工学科的重要组成部分，是基础研究及应用基础研究的重要应用领域，是电工领域科技发展的强大推动力。电机学课程是电气信息类专业的核心基础课，是从基础理论课、技术理论课走向专业课学习和工程应用研究的基础和纽带，在整个电气信息类专业学生教学中占有十分重要的地位。

本书以“内容新颖、全面、浅显易懂、注重应用”为原则编写。在编写过程中，简化了电机电磁场理论，突出新技术和应用的特点，改传统电机学中大量的定量分析为定性分析，更加注重基本概念和理论的应用，增加了便于学生复习的自测部分和考试大纲内容。本书可作为电气工程学科及相关专业网络教育及成人教育的教材，也可作为非电气类专业电机学课程教材。

全书共分为4篇22章，包括变压器、异步电机、同步电机和直流电机几部分。第一至十章由赵莉华编写，第十一至二十二章由曾成碧编写。章节中，带\*号的内容为选学。

本书在编写过程中，参考了很多同类教材，一部分在参考文献中列出，还有很多不能一一列出的，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中可能存在不少缺点和错误，欢迎读者评批指正。

编 者

赵莉华

曾成碧

王 明 祥

王 正 荣

温 廷 英

章 三 弟

章 四 弟

章 一 弟

章 二 弟

章 三 弟

章 四 弟

章 五 弟

章 六 弟

章 七 弟

章 八 弟

章 九 弟

章 十 弟

# 目 录

前言		第二节 常用铁磁材料及其特性	4
绪论	1	第三节 基本电磁定律	7
第一章 磁路	3	第四节 磁路基本定律	8
第一节 磁场的几个基本物理量	3	第五节 能量守恒定律	10
		思考题及习题	11
<b>变 压 器 篇</b>			
第二章 变压器的类型和基本结构	12	第三节 三相变压器绕组连接方式及磁路系统对电动势波形的影响	41
第一节 变压器的用途和分类	12	第四节 变压器的并联运行	43
第二节 变压器的基本结构	13	*第五节 三相变压器的不对称运行	47
第三节 变压器的额定值	15	*第六节 变压器的空载合闸	51
思考题及习题	16	*第七节 变压器的突然短路	53
		思考题及习题	54
第三章 变压器基本运行原理	17	第五章 三绕组变压器和其他用途变压器	56
第一节 变压器的空载运行	17	第一节 三绕组变压器	56
第二节 变压器的负载运行	24	第二节 自耦变压器	57
第三节 标么值	28	第三节 互感器	59
第四节 变压器等效电路参数测定	29	思考题及习题	61
第五节 变压器的运行特性	33	变压器部分小结	61
思考题及习题	35	变压器部分模拟测试题及答案	62
第四章 三相变压器	37	<b>异步电机篇</b>	
第一节 三相变压器的磁路系统	37	第六章 交流绕组及其电动势和磁动势	67
第二节 三相变压器的电路系统——绕组的连接方式和联结组标号	38	第一节 交流绕组的构成原则和分类	67
		第二节 几个基本概念	68
		第三节 三相双层绕组	69
		第四节 正弦磁场时交流绕组的感应电动势	72
		第五节 正弦电流时交流绕组的磁动势	76
		思考题及习题	79
		第七章 异步电机的基本结构与运行状态	81

第一节 异步电机的用途和分类 .....	81	第十章 三相异步电动机的	
第二节 三相异步电动机的结构 .....	81	<b>异常运行</b> .....	109
第三节 三相异步电动机的运行状态 .....	84	第一节 异步电动机在非额定	
第四节 三相异步电动机的铭牌及		电压下的运行 .....	109
额定值 .....	86	第二节 异步电动机在非额定	
思考题及习题 .....	87	频率下的运行 .....	110
<b>第八章 三相异步电动机的运行</b>		*第三节 异步电动机在不对称电源	
<b>原理及工作特性</b> .....	88	电压下的运行 .....	110
第一节 转子不动时的异步电动机 .....	88	*第四节 异步电动机电源缺相时的运行 .....	111
第二节 转子旋转时的异步电动机 .....	91	思考题及习题 .....	111
第三节 异步电动机的电磁转矩及		<b>第十一章 单相异步电动机、异步</b>	
机械特性 .....	95	<b>发电机及特殊异步电机</b> .....	112
思考题及习题 .....	99	*第一节 单相异步电动机 .....	112
<b>第九章 三相异步电动机的起动、</b>		*第二节 异步发电机 .....	114
<b>调速和制动</b> .....	101	*第三节 交流测速发电机 .....	117
第一节 异步电动机的起动 .....	101	思考题及习题 .....	118
第二节 异步电动机的调速 .....	104	<b>异步电机部分小结</b> .....	118
第三节 异步电动机的制动 .....	107	<b>异步电机部分模拟测试题及答案</b> .....	119
思考题及习题 .....	108		
		<b>同步电机篇</b>	
		思考题及习题 .....	147
<b>第十二章 三相同步电机的基本</b>		<b>第十四章 同步发电机的稳态运行</b>	
<b>工作原理与结构</b> .....	124	<b>特性及参数的测定</b> .....	148
第一节 三相同步电机的基本工作原理、		第一节 空载特性、短路特性及不饱和	
分类与结构 .....	124	电抗的求取 .....	148
第二节 同步发电机的基本构造 .....	126	第二节 零功率负载特性及漏电抗	
第三节 大型同步发电机的基本系统 .....	132	的求取 .....	152
第四节 同步电机的型号与额定值 .....	135	第三节 稳态参数的实验测定 .....	154
思考题及习题 .....	136	第四节 外特性与调整特性 .....	155
		思考题及习题 .....	157
<b>第十三章 三相同步发电机的电磁</b>		<b>第十五章 同步发电机并联运行</b> .....	158
<b>关系及分析方法</b> .....	137	第一节 投入并联运行的条件与方法 .....	158
第一节 三相同步发电机空载时的		第二节 并联运行的同步发电机电磁	
电磁关系 .....	137	功率与功率特性 .....	160
第二节 三相同步发电机负载后的		第三节 并联运行时有功功率的调节 .....	160
电磁关系 .....	138		
第三节 隐极同步发电机的分析方法 .....	141		
第四节 凸极同步发电机的分析方法 .....	144		

与静态稳定 .....	164	*第五节 同步发电机常见故障 .....	188
04 第四节 并联运行时无功功率的调节 与 V 形曲线 .....	168	思考题及习题 .....	191
*第五节 同步发电机并网后正常 运行分析 .....	170	<b>第十七章 同步电动机</b> .....	193
04 *第六节 同步发电机的振荡 .....	172	第一节 同步电动机的基本电磁关系、 方程式和相量图 .....	193
思考题及习题 .....	174	第二节 同步电动机的无功功率调节 .....	196
<b>第十六章 同步发电机的异常 运行分析及处理</b> .....	176	第三节 同步调相机 .....	197
*第一节 同步发电机的不对称运行 .....	176	*第四节 特殊同步电动机 .....	198
*第二节 同步发电机的突然短路 .....	180	思考题及习题 .....	202
*第三节 同步发电机的失磁运行 .....	183	<b>同步电机部分小结</b> .....	202
*第四节 同步发电机的进相运行 .....	186	<b>同步电机部分模拟测试题及答案</b> .....	204
<b>第十八章 直流电机的基本 工作原理与结构</b> .....	208	<b>直流电机篇</b>	
第一节 直流电机的基本工作原理 .....	208	第一节 他励直流发电机的运行特性 .....	226
第二节 直流电机的基本结构 与励磁方式 .....	211	第二节 并励直流发电机的运行特性 .....	227
第三节 直流电机的额定值与型号 .....	214	第三节 复励直流发电机的运行特性 .....	229
第四节 直流电机的电枢绕组 .....	215	思考题及习题 .....	231
思考题及习题 .....	216	<b>第二十一章 直流电动机</b> .....	232
<b>第十九章 直流电机的电磁关系及 分析方法</b> .....	217	第一节 直流电动机的运行特性 .....	232
第一节 直流电机空载时电机内部的 电磁关系 .....	217	第二节 直流电动机的起动 .....	236
第二节 直流电机负载时电机内部的 电磁关系 .....	218	第三节 直流电动机的调速 .....	238
第三节 直流电机的电枢反应 .....	220	第四节 直流电动机的制动 .....	239
第四节 电枢绕组的感应电动势和 直流电机的电磁转矩 .....	221	思考题及习题 .....	240
第五节 稳态运行时直流电机的基本 方程式 .....	222	<b>第二十二章 直流电机的换向</b> .....	242
思考题及习题 .....	224	*第一节 换向过程的概念 .....	242
<b>第二十章 直流发电机</b> .....	226	*第二节 产生火花的原因 .....	244
		*第三节 改善换向的方法 .....	244
		思考题及习题 .....	245
		<b>直流电机部分小结</b> .....	245
		<b>直流电机部分模拟测试题及答案</b> .....	246
		<b>参考文献</b> .....	250

# 绪 论

## 一、电机的定义和分类

### 1. 电机的定义

电机是一种进行机械能与电能的转换或信号传递和转换的电磁机械装置，它依靠电磁感应定律和电磁力定律运行，具有产生、传输和使用电能或作为电量之间、电量与机械量之间的变换器功能，是工业、农业、交通运输业和家用电器等各行业的重要设备，对国民经济发展起着重要作用。

值得注意的是，电机只能转换或传递能量，它本身不是能源。所以，电机在能量转换过程中，遵守能量守恒原则，也就是说，要想从电机输出能量一定是先给电机输入能量，它不能自行产生能量。

### 2. 电机的分类

电机的型号和类型很多，结构和性能各异，有多种分类方法。在电机学中常用的分类方法有两种，一种是按照功能进行分类，另一种是按照结构特点及电源种类进行分类。

按照功能分类，电机可分为：

发电机——将机械能转换为电能的电机；

电动机——将电能转换为机械能的电机；

变压器——将一种电压等级的交流电能改变为另一种电压等级的交流电能的静止电气设备；

控制电机——用于控制系统中，进行信号的传递和转换的电机。

按照结构特点及电源种类，电机可分为：

变压器——一种静止电气装置；

旋转电机——具有能做相对旋转运动的部件，运行时其转动部分做旋转运动。

旋转电机根据其电源种类不同，又可分为交流电机和直流电机，交流电机中又有同步电机和异步电机之分。本课程将分别对这些电机进行介绍。

## 二、电机的应用

电能是现代生产和人们生活中最主要的能源，而电能的生产、输送、转换及使用过程中的核心设备就是电机，所以电机在国民经济各行各业以及人们的日常生活中的应用都非常广泛。

众所周知，在发电厂中，汽轮机(火力发电厂、核电厂)、水轮机(水电厂)、风力机(风电厂)等分别将热能、核能、水流的势能及风能等自然界中各种形式的能量转化为机械能，再通过发电机把机械能转变为电能。

发电机发出的电能要通过长距离的输电线路才能送到不同距离的用户端，为了减小远距离输电线路中的能量损失，降低输送成本，需采用高压输电方式。即将发电机发出的电能通



过升压变压器升高到输电电压,通过高压输电,到了用户端,再通过降压变压器将电压降低到用户所需电压,供用户使用。在用户端,电动机作为原动机广泛应用于各行各业,把电能转换为机械能带动各种机械设备。在各类原动机中,电动机容量已超过总容量的60%。所以,作为与电能的生产、输送、分配及使用有关的能量转换装置——电机和变压器,在电力工业、工矿企业、农业、交通运输业、国防及日常生活等各方面都是十分重要的设备。

### 三、电机学课程的性质和学习方法

电机学是电气工程及其自动化专业学生的必修课程,是一门由基础课向专业课过渡的专业基础课程,也是比较难学习的一门课程。本书主要结合电机的基本结构,系统阐述各类电机的基本工作原理、电机的运行特性、电机的内部电磁关系和规律,并做定性或定量分析。本书的特点是,内容全面,浅显易懂,简化电机电磁理论,突出新技术和应用,改变传统电机学中大量的定量分析为定性分析,更加注重基本概念和理论的应用,使读者更容易理解和阅读。

通过对本课程学习,学生应建立并牢固掌握相关的基本概念,熟悉和掌握电机基本理论和基本分析方法,学习分析实际工程问题的思路和方法,并为后续专业课程学习做好准备,打好基础。

总之,电机学课程是理论性、实践性和综合性较强的一门课程,只有重视基本物理概念的理解和掌握,联系工程实际,熟悉数学计算方法,掌握实验技能,理论和实际结合,才能学好本课程。

# 第一章 磁 路

## 第一节 磁场的几个基本物理量

### 一、磁感应强度

磁感应强度又叫磁通密度，它是表示磁场内某点磁场强弱的物理量，是表征磁场特性的基本场量。其大小是通过垂直于磁场方向单位面积的磁力线数目，符号为  $B$ 。

磁感应强度  $B$  的单位在国际单位制(SI)中是特斯拉，简称特，符号为 T，在电磁单位制(CGS)中为高斯，简称高，符号为 Gs(系非法定计量单位)。两者的关系为  $1\text{T} = 10^4\text{Gs}$ 。

### 二、磁通

在磁场中，穿过任一面积的磁力线总量称为该截面的磁通量，简称磁通，符号为  $\Phi$ 。

均匀磁场中，磁通等于磁感应强度  $B$  与垂直于磁场方向的面积  $S$  的乘积

$$\Phi = BS \quad (1-1)$$

磁通是一个标量，它的单位在国际单位制中为韦伯，简称韦，符号为 Wb，在电磁单位制中磁通的单位为麦克斯韦，简称麦，符号为 Mx(系非法定计量单位)。  $1\text{Mx} = 1\text{Wb}$ 。

均匀磁场中，磁感应强度可以表示为单位面积上的磁通，由式(1-1)可得

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

所以磁感应强度也称为磁通密度。

### 三、磁导率

磁导率是表示物质导磁性能的参数，用符号  $\mu$  表示，单位是亨每米(H/m)。

真空中的磁导率一般用  $\mu_0$  表示，  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ 。空气、铜、铝和绝缘材料等非铁磁材料的磁导率和真空磁导率大致相同。而铁、镍、钴等铁磁材料及其合金的磁导率比真空磁导率  $\mu_0$  大很多，为  $10 \sim 10^5$  倍。

把物质磁导率与真空磁导率的比值定义为相对磁导率，用符号  $\mu_r$  表示，则铁磁材料的磁导率可表示为

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-3)$$

相对磁导率是一个无量纲的参数。非铁磁材料的相对磁导率  $\mu_r$  接近于 1，而铁磁材料的  $\mu_r$  远远大于 1。

### 四、磁场强度

在各向同性的媒质中，磁场中某点的磁感应强度与该点磁导率的比值定义为该点的磁场

强度，用符号  $H$  表示，即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-4)$$

磁场强度只与产生磁场的电流及电流的分布有关，与磁介质的磁导率无关，单位为安每米(A/m)。磁场强度概念的引入只是为了简化计算，没有物理意义。

## 第二节 常用铁磁材料及其特性

物质按其磁化效应可分为铁磁材料和非铁磁材料两大类。非铁磁材料，如空气、铜、铝、橡胶等，它们的磁导率与真空磁导率接近，工程计算时近似认为相等。铁磁材料是由铁磁物质构成，主要有铁、镍、钴及其合金等。铁磁材料的磁导率较真空大很多。

在电机和变压器中，要求在一定的励磁电流下产生较强的磁场，以减小其体积和重量，所以电机和变压器铁心都采用磁导率较高的铁磁材料制成。下面对铁磁材料的性能和特性进行简单介绍。

### 一、铁磁材料的磁化

铁磁材料可看做由无数小的磁畴组成，如图 1-1a 所示，图中，磁畴用一些小的磁铁表示出来。铁磁材料在不受外磁场作用时，这些磁畴杂乱无章排列，其磁效应相互抵消，对外不显示磁性。当铁磁材料受到外磁场作用时，磁畴在外磁场作用下，轴线趋于一致，如图 1-1b 所示，由此内部形成一附加磁场，叠加在外磁场上，使合成磁场大为增强。铁磁材料这种在外磁场作用下呈现很强的磁性的现象，叫铁磁材料的磁化。

正是由于铁磁材料具有磁化特性，才使其磁导率较非铁磁材料大得多。所以，磁化是铁磁材料的重要特性之一。

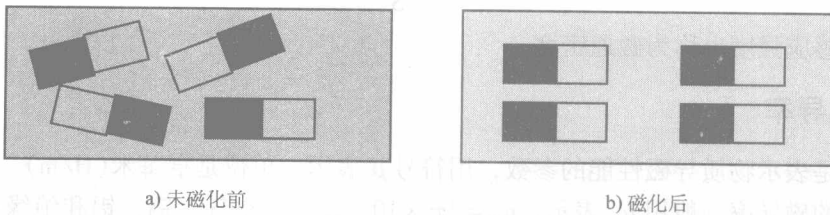


图 1-1 铁磁材料的磁化

### 二、磁化曲线和磁滞回线

铁磁材料的磁化特性可用磁化曲线来表示。所谓磁化曲线，它是表示磁场强度  $H$  与磁通密度  $B$  之间关系的特性曲线。

对于空气等非铁磁材料，磁通密度  $B$  与磁场强度  $H$  之间呈线性关系，即磁化曲线为一直线，如图 1-2 中虚线所示，直线的斜率就等于  $\mu_0$ 。下面讨论铁磁材料的磁化曲线。

#### 1. 起始磁化曲线

对尚未磁化的铁磁材料进行磁化，磁场强度  $H$  从零开始逐渐增大，磁通密度  $B$  也从 0 开始逐渐增加，曲线  $B = f(H)$  就称为铁磁材料的起始磁化曲线，如图 1-2 所示。

从图 1-2 可见, 起始磁化曲线大致可分为 4 段。第 1 段: 图中  $Oa$  段, 这一段  $H$  从 0 开始增加, 值较小, 即外磁场较弱, 磁通密度增加得不快, 此阶段材料磁导率较小。第 2 段: 图中  $ab$  段, 这一段中随着外磁场的增强, 材料内部大量磁畴开始转向, 趋向于与外磁场方向一致, 所以磁通密度  $B$  增加很快,  $B$  与  $H$  近似为线性关系, 磁导率很大且基本不变。第 3 段: 图中  $bc$  段, 随着外磁场继续增强, 大部分磁畴已趋向外磁场方向, 可转向的磁畴越来越少, 磁通密度  $B$  增加越来越少, 磁导率随  $H$  的增大反而减小, 这种现象称为磁饱和现象, 通常称为饱和。第 4 段: 图中  $cd$  段, 在这一段中, 虽然外磁场继续增强, 但磁通密度改变很小, 其磁化曲线基本上与非铁磁材料的  $B = \mu_0 H$  特性曲线平行。

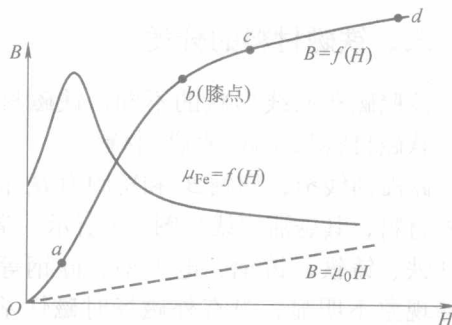


图 1-2 铁磁材料的起始磁化曲线

所以, 铁磁材料的起始磁化曲线与非铁磁材料的不同, 它是非线性的, 在不同的磁通密度下有不同的磁导率, 即  $\mu_{Fe} = B/H$  随  $H$  大小变化而变化, 如图 1-2 中的  $\mu_{Fe}$  曲线。

在电机和变压器设计中, 为了产生较强的磁场, 希望铁磁材料有较高的磁导率, 而励磁磁动势又不能太大, 所以设计时通常把磁通密度选在图 1-2 中的  $b$  点附近, 该点为磁化曲线的拐弯处, 称为膝点。

## 2. 磁滞回线

若铁磁材料处于交变的磁场中, 将进行周期性磁化, 此时  $B$  和  $H$  之间的关系变为如图 1-3 所示的磁滞回线。当磁场强度  $H$  从零增加到最大值  $H_m$ , 铁磁材料饱和, 磁通密度也为最大值  $B_m$ ; 之后减小  $H$ ,  $B$  不是沿着起始磁化曲线下下降, 而是沿曲线  $ab$  下降; 当  $H$  减小到零时,  $B$  不是零, 而等于  $B_r$ 。在去掉外磁场后, 铁磁材料内还保留磁通密度  $B_r$ , 把这时的磁通密度叫做剩余磁通密度, 简称剩磁。而这种磁通密度  $B$  的变化落后于磁场强度  $H$  的变化的现象, 叫磁滞现象。要想使剩磁为零, 必须对材料反向磁化, 即加上相应的反向磁场。当反向磁场  $H$  为  $-H_c$  时, 磁通密度  $B$  降为零, 此时的磁场强度  $H_c$  称为矫顽力。剩磁  $B_r$  和矫顽力  $H_c$  是铁磁材料的两个重要参数。

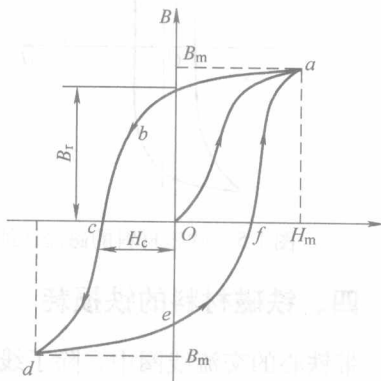


图 1-3 铁磁材料的磁滞回线

磁滞现象是铁磁材料的又一个重要特性。由于存在磁滞现象, 当对称交变的磁场强度在  $+H_m$  和  $-H_m$  之间变化, 对铁磁材料反复磁化时, 得到如图 1-3 所示的近似对称于原点的  $B-H$  闭合曲线  $a-b-c-d-e-f-a$ , 称为磁滞回线。

## 3. 基本磁化曲线

对同一铁磁材料, 选择不同的磁场强度  $H_m$  值的对称交变磁场进行反复磁化, 可得到一系列磁滞回线, 如图 1-4 所示, 将各磁滞回线在第 1、3 象限的顶点连接起来, 所得到的曲线称为基本磁化曲线, 基本磁化曲线一般只使用第 1 象限。

基本磁化曲线不是起始磁化曲线, 但与起始磁化曲线差别不大。对一定的铁磁材

料,基本磁化曲线是比较固定的。直流磁路计算时,所用的磁化曲线都是基本磁化曲线。

### 三、铁磁材料的分类

按照磁滞回线形状的不同,铁磁材料可分为两大类:软磁材料和硬磁(永磁)材料。

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,其磁滞回线如图1-5所示。常用的软磁材料有纯铁、铸铁、铸钢、电工钢、硅钢等。这类材料的磁滞现象不明显,没有外磁场时磁性基本消失,磁导率高,常用于电机和变压器铁心制造。

磁滞回线宽,剩磁 $B_r$ 和矫顽力 $H_c$ 都大的材料称为硬磁材料,其磁滞回线如图1-6所示。常用的硬磁材料有铁氧体、铝镍钴、稀土合金等。这类材料在被磁化后,剩磁较大且不容易消失,适合于制作永磁体,因此又称为永磁材料。有的电机采用永磁体来产生磁场,这类电机称为永磁电机,近年来众多的专家学者在永磁电机发展方向做了许多工作。

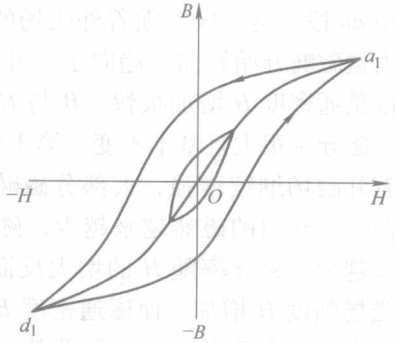


图1-4 基本磁化曲线

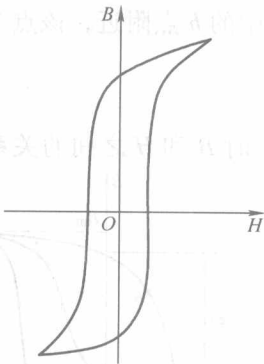


图1-5 软磁材料的磁滞回线

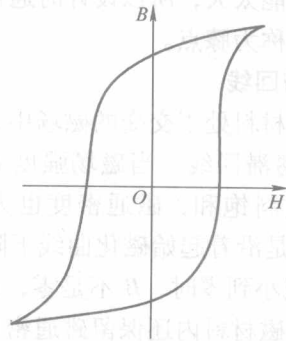


图1-6 硬磁材料的磁滞回线

### 四、铁磁材料的铁损耗

带铁心的交流线圈中,除了线圈电阻上的功率损耗(铜损耗,简称铜耗)外,由于其铁心处于反复磁化下,铁心中也将产生功率损耗,以发热的方式表现出来,称为铁磁损耗,简称铁耗。

铁耗有磁滞损耗和涡流损耗两部分。

#### 1. 磁滞损耗

铁磁材料在交变磁场作用下,正反方向反复磁化,材料内部磁畴在不断运动过程中相互摩擦,消耗能量,引起材料发热,消耗功率,这种损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗的大小与磁滞回线的面积、磁场交变的频率 $f$ 和铁磁材料的体积 $V$ 有关。而磁滞回线的面积又由铁磁材料决定,磁滞回线面积越大, $B_m$ 也越大,磁滞损耗越大。交变磁场频率越高,损耗也越大。

工程计算时,计算磁滞损耗常用如下经验公式:

$$p_h = C_h f B_m^n V \quad (1-5)$$

式中,  $C_h$  为材料的磁滞损耗系数, 与材料有关;  $n$  由试验确定, 对一般电工钢片取  $n = 1.6 \sim 2.3$ ;  $V$  为铁磁材料的体积。

由于硅钢片磁滞回线面积较小, 所以电机和变压器铁心常用硅钢片叠成, 可以减小磁滞损耗。

## 2. 涡流损耗

由于铁磁材料也是导体, 在交变的磁场作用下, 变化的磁通在铁心中感应电动势并产生电流, 这些电流在铁心内部环绕磁通呈旋涡状流动, 称为涡流。涡流在其流经路径的等效电阻上产生损耗, 叫涡流损耗。涡流损耗的大小与磁通密度、磁场变化频率、垂直于磁场方向上材料的厚度及材料电阻率有关。

工程计算时, 对于硅钢片叠成的铁心, 常用如下经验公式计算:

$$p_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V \quad (1-6)$$

式中,  $C_e$  为材料的涡流损耗系数, 其大小决定于材料的电阻率;  $\Delta$  为硅钢片的厚度。

为了减小材料的涡流损耗, 应尽量减小材料的厚度和增加涡流回路的电阻。所以, 电机和变压器铁心大都采用含硅量较高的薄硅钢片 ( $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$ ) 叠成。因为硅钢导磁性能好, 磁滞回线面积小, 磁滞损耗小; 而掺入硅后, 材料电导率增大, 回路电阻减小, 加之厚度很小, 可以有效地减小涡流损耗。

铁磁材料中, 磁滞损耗和涡流损耗总是同时存在的, 计算铁耗时, 必须同时考虑两种损耗。

## 第三节 基本电磁定律

### 一、电磁感应定律

#### 1. 电磁感应定律

大量的实验证实: 当穿过某一闭合导体回路的磁通发生变化(无论是何种原因变化)时, 在导体回路中就会产生电流, 这种现象称为电磁感应现象, 产生的电流称为感应电流。如果是穿过线圈的磁通发生变化, 线圈的匝数为  $N$ , 则线圈中感应电动势的大小与线圈匝数成正比, 与单位时间内磁通量的变化率成正比, 可用下式表示:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-7)$$

式中,  $\Psi$  为穿过整个线圈的磁链,  $\Psi = N\Phi$ 。

感应电动势的方向决定于感应电动势在线圈中产生的电流方向, 该电流所产生的磁场总是阻碍原来产生感应电动势的磁场的变化。

#### 2. 变压器电动势

若线圈与磁场处于相对静止, 线圈中的感应电动势是由于与线圈相交链的磁通量本身随时间变化而产生的, 这种感应电动势称为变压器电动势。变压器电动势可表示为

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-8)$$

### 3. 运动电动势

如果磁场是恒定(如直流励磁),线圈与恒定磁场之间在正交方向上发生相对运动,或是线圈不动,磁场沿线圈垂直方向运动,或是磁场不动,线圈沿磁场垂直方向运动;引起和线圈相交链的磁通量发生变化,也会产生感应电动势,这样的电动势称为运动电动势。运动电动势可表示为

$$e = Blv \quad (1-9)$$

式中,  $l$  为线圈边在磁场中的有效长度;  $v$  为线圈导体沿磁场垂直方向的运动速度(m/s)。

运动电动势的方向由右手定则确定,如图 1-7 所示。

## 二、电磁力定律

实验表明,载流导体在磁场中将要受到力的作用,由于这种力是磁场和载流导体相互作用产生的,所以称为电磁力。若磁场与导体垂直,则作用在导体上的电磁力为

$$f = Bli \quad (1-10)$$

式中,  $l$  为导体在磁场中的长度;  $i$  为导体中的电流。

电磁力的方向通过左手定则确定,如图 1-8 所示。

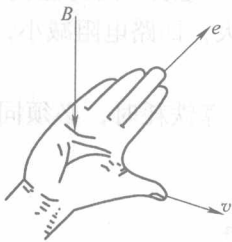


图 1-7 右手定则



图 1-8 左手定则

## 第四节 磁路基本定律

电机和变压器都是利用磁场作为介质来实现能量变换的装置,在电机学和一般的工程分析中,通常将电机和变压器中复杂的电磁场问题进行简化,用磁路和等效电路的方法来分析。

### 一、磁路的概念

磁通所通过的路径称为磁路。图 1-9 所示为两种常见的磁路,其中,图 1-9a 为变压器磁路,图 1-9b 为两极直流电机磁路。

电机和变压器中,常把线圈套装在铁心上。当线圈内有电流流过时,线圈周围(包括铁心内外)形成磁场。由于铁心导磁性能比空气好得多,因此,大部分磁通在铁心内部通过,称为主磁通,相应的路径为主磁路;少量的磁通经过部分铁心和空气而闭合,这部分磁通称为漏磁通,漏磁通经过的路径为漏磁路。

用来产生磁通的电流叫励磁电流(也称激磁电流)。根据励磁电流的性质不同,磁路又可分为直流磁路和交流磁路。图 1-9 中 a 为交流磁路, b 为直流磁路。

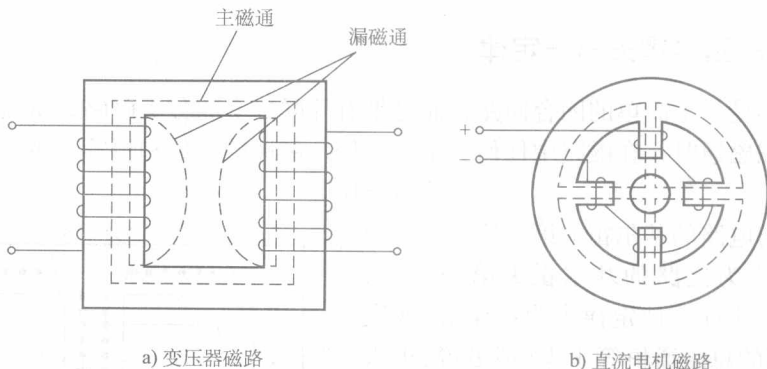


图 1-9 两种常见的磁路

## 二、安培环路定律

安培环路定律又称为全电流定律，即在磁路中，沿任一闭合路径，磁场强度矢量的线积分  $\oint_L H \cdot dl$ ，等于该闭合回路所包围电流的代数和，用公式表示为

$$\oint_L H \cdot dl = \sum i = Ni \quad (1-11)$$

式中， $N$  为闭合路径所交链的线圈匝数。

当电流的方向与闭合路径的环形方向符合右手螺旋定则时，电流  $i$  取正号，否则取负号。若沿着闭合回路，磁场强度  $H$  的方向总在切线方向，且大小处处相等，则式(1-11)可表示为

$$Hl = Ni \quad (1-12)$$

## 三、磁路的欧姆定律

由于磁场强度等于磁通密度除以磁导率，即  $H = B/\mu$ ，且在均匀磁场中有磁通密度  $B = \Phi/S$ ，所以式(1-12)可表示为

$$Hl = \frac{B}{\mu} l = \frac{\Phi}{\mu S} l = \Phi \frac{l}{\mu S} = \Phi R_m \quad (1-13)$$

或

$$F = Ni = Hl = \Phi R_m = \frac{\Phi}{\Lambda} \quad (1-14)$$

式中， $F$  为作用在铁心磁路上的安匝数， $F = Ni$ ，称为磁路的磁动势，它是造成磁路中有磁通的根源； $R_m$  为磁路的磁阻， $R_m = l/(\mu S)$  (A/Wb)； $\Lambda$  为磁路的磁导， $\Lambda = 1/R_m$ 。

式(1-14)表明，作用在磁路上的总磁动势  $F$  等于磁路内磁通量  $\Phi$  与磁路磁阻  $R_m$  的乘积，它与电路中的欧姆定律在形式上十分相似，称为磁路的欧姆定律。其中，磁动势  $F$  与电路中电动势  $E$  对应，磁通量  $\Phi$  与电路中电流对应，则磁阻与电路中电阻对应。

磁阻  $R_m$  与磁路的平均长度  $l$  成正比，与磁路的截面积  $S$  及构成磁路材料的磁导率  $\mu$  成反比。值得注意的是，铁磁材料的磁导率  $\mu$  不是常数，所以由铁磁材料构成的磁路，其磁阻也不是常数，而是随着磁路中磁通密度的大小而变化，即铁磁材料的磁路具有非线性。



#### 四、磁路的基尔霍夫第一定律

如果铁心不是一个简单的闭合回路，而是带有并联分支的分支磁路，从而形成了磁路的节点。当忽略漏磁通时，在磁路中任何一个节点处，磁通的代数和恒等于零，即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-15)$$

式(1-15)与电路的基尔霍夫第一定律  $\sum i = 0$  形式上相似，称为磁路的基尔霍夫第一定律，也叫磁通连续性定律。此定律表明：穿出(或进入)任一闭合面的总磁通恒等于零(或者说，进入任一闭合面的磁通量恒等于穿出该闭合面的磁通量)。

如图 1-10 所示，当中间铁心柱上加有磁动势  $F$  时，磁通的路径如图所示。如令进入闭合面  $A$  的磁通为负，穿出闭合面的磁通为正，则有

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

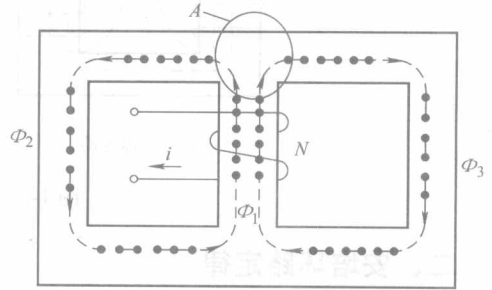


图 1-10 磁路的基尔霍夫第一定律

#### 五、磁路的基尔霍夫第二定律

工程上遇到的磁路并不都是采用同一种铁磁材料构成，可能含有气隙，各处的截面积也不一定相同，比如电机和变压器的磁路总是由数段不同截面和不同铁磁材料的铁心组成。磁路计算时，总是把整个磁路分成若干段，每段为同一材料和相同截面积，且各段内磁通密度处处相等，从而磁场强度也处处相等。如图 1-11 所示，磁路由 3 段组成，其中两段为截面积不同的铁磁材料，第三段为气隙。若铁心上的磁动势  $F = Ni$ ，根据安培环路定律，有

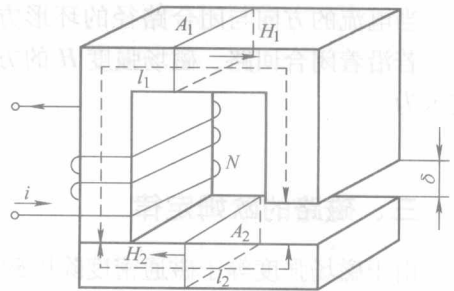


图 1-11 磁路的基尔霍夫第二定律

$$Ni = \sum_{k=1}^3 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta \delta \quad (1-16)$$

或

$$\sum Ni = \sum HI \quad (1-17)$$

式(1-17)表明：在磁场中的任何一个闭合回路中，磁压降的代数和等于磁动势的代数和，磁场的方向与回路环行方向一致时， $HI$  符号为正，否则为负；电流的方向与回路环行方向符合右手螺旋定则时， $Ni$  符号为正，否则为负。可以看出，此公式与电路的  $\sum E = \sum U$  形式上相似，所以式(1-17)称为磁路的基尔霍夫第二定律。

值得注意的是，磁路定律和电路定律只是在形式上的相似，它们的物理本质是不同的。

### 第五节 能量守恒定律

电机和变压器在进行机电能量转换或不同形式电能变换过程中，都遵守能量守恒定律，