



普通高等教育 电气工程
自动化 系列规划教材

Electric Machinery

电机学

第2版

◎ 赵莉华 曾成碧 苗虹 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育 $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$ 系列规划教材

电 机 学

第 2 版

赵莉华 曾成碧 苗虹 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据近几年电气类专业整合为引导性宽口径专业的特点,针对强弱电结合的电气类专业编写的教材,在内容上可满足各专业的共同需求,并为学习相关专业知识和从事相关领域工作奠定坚实的理论基础。

全书内容共分5篇:变压器、异步电机、同步电机、直流电机及交流电机瞬态过程。本书以三相对称稳态运行为主进行分析,重点阐述了各类电机的基本概念、基本理论和基本分析方法,对新技术和应用以及电机的异常运行作了介绍,并精选了典型的例题和难易程度不同的思考题及习题,加深对重要知识的理解。

本书和配套的《电机学学习指导》可作为普通高等学校电气类、水动与热类专业电机学课程的本科教材或参考书,也可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/赵莉华,曾成碧,苗虹编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2014.8

普通高等教育电气工程自动化系列规划教材

ISBN 978-7-111-46960-5

I. ①电… II. ①赵…②曾…③苗… 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(2014)第120756号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 韩 静

版式设计:常天培 责任校对:程俊巧

封面设计:张 静 责任印制:刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2014年8月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·25.5印张·621千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46960-5

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书第1版自2009年6月出版以来,得到兄弟高校及同行们的认可,目前已发行近2万册。随着技术的不断进步,特别是近年来新能源发电技术的迅猛发展,第1版教材中关于电机的瞬变知识显得较薄弱,不利于同学们后续专业课程及研究生阶段的学习。针对这些情况,第2版教材在内容上有所增加,添加了交流电机瞬态过程内容及发电厂、变电站近年来大量使用的分裂变压器内容,各学校可根据自身教学计划进行选讲,也方便同学们自学。

本书第2版共分为5篇26章,包括变压器、异步电机、同步电机、直流电机及交流电机瞬态过程几部分。本书的总教学时数为80~90学时,如果学时数较少,可以根据需要选学。

本书由赵莉华、曾成碧、苗虹编写。其中,第一章至第十二章由赵莉华编写,第十三章至第十七章由曾成碧编写,第十八章至第二十六章由苗虹编写。各章节中,带有“*”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,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编 者

第1版前言

电机学课程是高等学校电气信息类专业的一门核心基础课，也是一门承上启下的平台课，课程的特点是理论性强、概念抽象、专业性特征明显。它是从基础理论、技术理论课走向专业课学习和工程应用研究的基础与纽带，在整个电气信息类专业教学中占有十分重要的地位。

本书是为适应宽口径培养模式和充实教学新内容的需要，针对强弱电结合的电气信息类专业编写的教材。本书以“内容新颖、全面、注重理论与应用”为原则编写。在编写过程中，简化了传统电机学课程中关于电机的结构、材料和工艺等方面内容，重点阐述了基本概念、基本理论和基本分析方法，突出新技术和应用的特点。精选了典型的例题和难易程度不同的思考题及习题，以便读者及时检查学习情况，加深对重要知识的理解。与本书配套出版的还有《电机学学习指导》，对思考题及习题作了解答。本书和《电机学学习指导》一起，可作为普通高等学校电气信息类、水动与热工类专业电机学课程的本科教材或参考书，也可供相关工程技术人员参考使用。

本书共有4篇24章，包括变压器、异步电机、同步电机和直流电机几部分。本书的总教学时数为80~90学时，如果学时数较少，可以根据需要选学。

本书由赵莉华、曾成碧编写，其中，第一章至第十二章由赵莉华编写，第十三章至第二十四章由曾成碧编写。各章节中，带有“*”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，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编者

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	

绪论	1
----	---

第一章 磁路	5
--------	---

变 压 器 篇

第二章 变压器的类型和基本结构	22
第一节 变压器的用途和分类	22
第二节 变压器的基本结构	23
第三节 变压器的发热与冷却	26
第四节 变压器的型号及额定值	27
思考题及习题	28

第三章 变压器的基本运行原理	29
第一节 变压器的空载运行	29
第二节 变压器的负载运行	36
第三节 标么值	41
第四节 变压器的等效电路及参数测定	42
第五节 变压器的运行特性	47
思考题及习题	51

第四章 三相变压器	54
第一节 三相变压器的磁路系统	54
第二节 三相变压器的电路系统——绕组的连接方式和联结组	55

第一节 磁场的几个基本物理量	5
第二节 常用铁磁材料及其特性	6
第三节 基本电磁定律	9
第四节 磁路基本定律及磁路计算	13
第五节 能量守恒定律	19
思考题及习题	19

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	59
第四节 变压器的并联运行	60
思考题及习题	65

第五章 三相变压器的异常运行	67
第一节 三相变压器的不对称运行	67
* 第二节 变压器的空载合闸	74
* 第三节 变压器的突然短路	76
思考题及习题	78

第六章 三绕组变压器和其他用途变压器	80
第一节 三绕组变压器	80
第二节 分裂绕组变压器	84
第三节 自耦变压器	86
第四节 互感器	91
思考题及习题	94

变压器部分小结	95
---------	----

异步电机篇

第七章 交流绕组及其电动势和磁动势	98
第一节 交流电机的基本工作原理	98
第二节 交流绕组的构成原则和分类	99
第三节 几个基本概念	100
第四节 三相单层绕组	102

第五节 三相双层绕组	104
* 第六节 分数槽绕组	107
第七节 正弦磁场下交流绕组的感应电动势	108
第八节 非正弦磁场下交流绕组的谐波电动势及减小谐波电动势的方法	114

第九节 正弦电流时交流绕组的磁动势	118	第十一章 三相异步电动机的起动、	
思考题及习题	132	调速和制动	172
第八章 异步电机的基本结构与		第一节 三相异步电动机的起动	172
运行状态	134	第二节 三相异步电动机的调速	179
第一节 异步电机的用途和分类	134	第三节 三相异步电动机的制动	183
第二节 三相异步电动机的结构	134	思考题及习题	184
第三节 笼型转子的极数和相数	137	第十二章 三相异步电动机的	
第四节 三相异步电动机的运行状态	139	异常运行	186
第五节 三相异步电动机的型号及		第一节 三相异步电动机在非额定	
额定值	140	电压下的运行	186
思考题及习题	142	第二节 三相异步电动机在非额定	
第九章 三相异步电动机的运行		频率下的运行	187
原理	144	第三节 三相异步电动机在不对称	
第一节 转子不动时的异步电动机	144	电源电压下的运行	187
第二节 转子旋转时的异步电动机	149	第四节 三相异步电动机在电源缺相	
思考题及习题	155	时的运行	189
第十章 三相异步电动机的功率、		思考题及习题	190
转矩与运行性能	157	第十三章 单相异步电动机、异步	
第一节 三相异步电动机的功率与		发电机及特殊异步电机	191
转矩平衡关系	157	* 第一节 单相异步发电机	191
第二节 三相异步电动机的电磁转矩		* 第二节 异步发电机	194
及机械特性	160	* 第三节 交流测速发电机	196
第三节 三相异步电动机的工作特性	165	思考题及习题	197
第四节 三相异步电动机的参数测定	166	异步电机部分小结	198
思考题及习题	170		

同步电机篇

第十四章 三相同步发电机的基本		第二节 同步发电机带对称负载时	
工作原理与结构	202	的电枢反应	218
第一节 同步发电机的基本工作		第三节 隐极同步发电机的负载	
原理及分类	202	运行	221
第二节 同步发电机的基本结构	203	第四节 凸极同步发电机的负载	
第三节 大型同步发电机的基本系统	209	运行	226
第四节 同步电机的型号与额定值	213	思考题及习题	230
思考题及习题	214	第十六章 同步发电机的稳态运行特性	
第十五章 三相同步发电机的		及参数的测定	231
运行原理	215	第一节 空载特性、短路特性、不饱和同步	
第一节 同步发电机的空载运行	215	电抗和短路比的求取	231

第二节 零功率因数负载特性及 漏电抗的求取	235	思考题及习题	259
第三节 稳态参数的实验测定	237	第十八章 同步发电机的异常运行	261
第四节 同步发电机的运行特性	238	第一节 同步发电机的不对称运行	261
第五节 同步发电机电压调整率及 额定励磁电流的求取	239	第二节 同步发电机突然短路时的 暂态电抗	268
思考题及习题	242	第三节 同步发电机的失磁运行	270
第十七章 同步发电机并联运行	243	第四节 同步发电机的进相运行	273
第一节 投入并联运行的条件和 方法	243	思考题及习题	275
第二节 并网运行的同步发电机 的电磁功率与功角特性	246	第十九章 同步电动机	276
第三节 并网运行时有功功率的 调节与静态稳定	250	第一节 同步电动机的基本电磁关系、 方程式和相量图	276
第四节 并网运行时无功功率的 调节与 V 形曲线	254	第二节 同步电动机的无功功率调节	279
* 第五节 同步发电机并网后正常 运行分析	256	第三节 同步调相机	281
* 第六节 同步发电机的振荡	258	第四节 同步电动机的起动	282
		* 第五节 特殊同步电机	284
		思考题及习题	287
		同步电机部分小结	288
直流电机篇			
第二十章 直流电机的基本工作 原理与结构	292	第一节 他励直流发电机的运行特性	317
第一节 直流电机的基本工作原理	292	第二节 并励直流发电机的运行特性	319
第二节 直流电机的基本结构	294	第三节 复励直流发电机的运行特性	320
第三节 直流电机的额定值与型号	298	思考题及习题	323
第四节 直流电机的电枢绕组	299	第二十三章 直流电动机	324
思考题及习题	305	第一节 直流电动机的运行 特性	324
第二十一章 直流电机的运行原理	307	第二节 直流电动机的起动	328
第一节 直流电机空载运行时的磁场	307	第三节 直流电动机的调速	330
第二节 直流电机负载运行时的 电枢磁场	308	第四节 直流电动机的制动	332
第三节 直流电机的电枢反应	310	思考题及习题	334
第四节 电枢绕组的感应电动势和 直流电机的电磁转矩	312	第二十四章 直流电机的换向	335
第五节 稳态运行时直流电机的 基本方程式	314	* 第一节 换向过程的概念	335
思考题及习题	316	* 第二节 产生火花的原因	337
		* 第三节 改善换向的方法	337
		思考题及习题	338
第二十二章 直流发电机	317	直流电机部分小结	338

交流电机瞬态过程篇

第二十五章 同步电机的瞬态过程	342	第二十六章 异步电机的瞬态过程及控制策略	373
第一节 同步电机的电压方程及磁链方程	342	第一节 异步电机的基本方程式	373
第二节 电机中常用的几种坐标变换	345	第二节 异步电动机在重投入过程中的过渡过程	380
第三节 同步电机在 $dq0$ 坐标中的基本方程	350	第三节 异步电机的控制策略	386
第四节 同步电机的标么值系统	353	思考题及习题	394
第五节 同步电机三相突然短路	357	交流电机瞬态过程部分小结	395
第六节 同步电机的暂态电动势	369	参考文献	397
思考题及习题	371		

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的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个行业的重要设备，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——具有能作相对旋转运动的部件，运行时其转动部分作旋转运动。

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。本教材按照变压器、异步电机、同步电机和直流电机的顺序分别进行阐述。

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一次能源转化为机械能，再通过发电机把机械能转变为电能。

由于发电厂和用户之间一般都有较大的距离，也就是说，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，目前电力系统输电都采用高压输电方式。输电电压一般取 110kV、220kV、330kV、500kV，我国现已有 750kV 输电线路，更高电压等级的超高压 1000kV 输电技术正在积极研究和试运行之中。

图 0-1 给出了电力传输的过程。发电机发出的电能首先经升压变压器升高到输电电压，进行高压远距离输电，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。在电能的生产、输送、分配和消费中，发电机、变压器、电力线路、负载和开关设备等连接在一起，构成了统一整体，即电力系统。在电力系统中，作为与电能的生产、输送、分配及使用有关的能量转换装置——发电机和变压器，是电力系统中最重要设备。



图 0-1 电力传输的过程

电动机可将电能转换为机械能，带动各种用途的生产机械，在机械制造业、冶金工业、煤炭工业、石油工业、轻纺工业、化学工业及其他各工矿企业中，广泛应用着各种电动机。例如，用电动机拖动机床、轧钢机、电铲、卷扬机、纺织机、造纸机、搅拌机等。据不完全统计，60% 以上的电能是由电动机消耗的。

三、电机的发展简史

1821 年，法拉第（Faraday）发现了载流导体在磁场中受力的现象，即电动机作用原理，原始电动机便产生了。1831 年，他又发现了电磁感应定律，在这一定律指导下，很快便出现了直流发电机。之后，直流电机得到迅速发展。随着直流电机的广泛应用，其缺点也日益明显。首先，远距离输电时，为了减小线路损耗，需要提高发电机电压，但高压直流发电机的制造有许多难以克服的困难；其次，单机容量增大后，直流电机的换向也越来越困难。19 世纪 80 年代后，人们的注意力逐渐转向交流电机。

1832 年，人们就知道了单相交流发电机，但一直到 1889 年，才由多利夫-多布罗夫斯基（Doliv-Dobrovsky）提出了三相制的概念，并设计和制造了三相感应电动机。与单相和两相系统比较，三相系统效率高，用铜省，电机性价比、容量体积比和材料利用率都有明显改善，其优越性在 1891 年建成的从劳芬到法兰克福的三相电力系统中得到了充分体现。从那以后一直到现在，交流三相制在电力工业中都占据了绝对统治地位。

随着交流电能需求的不断增加，交流发电站的建设迅速发展，至 19 世纪 80 年代末期，能直接与发电机连接的高速原动机代替蒸汽机的要求被提了出来，在 19 世纪 90 年代，许多电站就装上了单机容量为 1000kW 的汽轮发电机组。此后，三相同步电机的结构逐渐分为高速和低速两类，高速的以汽轮发电机为代表，低速的以水轮发电机为代表。同时，由于大容量和可靠性等原因，几乎所有的制造厂商都采用了励磁绕组旋转（磁极安装在转子上）、电枢绕组静止（线圈嵌放在定子槽中）的结构形式。随着电力系统的逐渐扩大，频率也趋于

标准化,但不同地区不同国家标准不同,如欧洲为 50Hz,美国为 60Hz,日本 50Hz 和 60Hz 都有,我国统一标准频率为 50Hz 等。

此外,由于工业应用和交通运输等方面的需要,19 世纪 90 年代前后还发明了将交流变换为直流的旋转变流机,以及具有调速和调频等调节功能的交流换向器电机。

在交流电机理论方面,1893 年左右,肯涅利 (Kennelly) 和斯泰因梅茨 (Steinmetz) 开始使用复数和相量来分析交流电路。1894 年,海兰 (Heyland) 提出的“多相感应电动机和变压器性能的图解确定法”,是感应电机理论研究的第一篇经典性论文。同年,费拉里斯采用将一个脉振磁场分解为两个大小相等、方向相反的旋转磁场的方法来分析单相感应电动机,这种方法后来被称为双旋转磁场理论。1894 年前后,保梯 (Potier) 和乔治又建立了交轴磁场理论。1899 年,勃朗德 (Bondel) 在研究同步电动机电枢反应过程中提出了双反应理论,这在后来被发展为研究所有凸极电机的基础。总的说来,到 19 世纪末,各种交、直流电机的基本类型及基本理论和设计方法,大体上都已经建立起来了。

20 世纪是电机发展史上的一个新时期,这个时期工业的高速发展对电机提出了各种新的、更高的要求,而自动化方面的特殊需要又使控制电机和新型、特种电机的发展更为迅速。这个时期,由于对电机内部电磁过程、发热过程及其他物理过程的研究越来越深入,加上材料和冷却技术的不断改进,交、直流电机的单机容量、功率密度和材料利用率都有显著提高,性能日趋完善。

汽轮发电机方面,1900 年,单机容量不超过 5MW,到 1920 年,转速为 3000r/min 的汽轮发电机容量已达 25MW,转速为 1000r/min 的汽轮发电机容量则达到 60MW。到 1937 年,用空气冷却的汽轮发电机容量达到 100MW。1928 年氢气冷却方式首次被用于同步补偿机,1937 年推广应用于汽轮发电机后,转速为 3000r/min 的发电机容量上升为 150MW。20 世纪下半叶,电机冷却技术有了更大的发展,主要表现为直接将气体或液体通入导体内部进行冷却。于是,电机温升不再是限制电机容量的主要因素,单机容量有了更大幅度的提高。1956 年,定子导体水内冷、转子导体氢内冷的汽轮发电机容量达到 208MW,1960 年上升为 320MW。目前,汽轮发电机的冷却方式还有全水冷(定、转子都采用水内冷,简称双水内冷)、全氢冷以及在定、转子表面辅以氢外冷等多种方式,单机容量已达 1200~1500MW。

水轮发电机和电力变压器的发展与此类似。我国在 1949 年以前自制的水轮发电机单机容量不超过 200kW,现向家坝电站单机容量已达 800000kW (80 万 kW)。

电机功率密度和材料利用率的提高也可以从下面电机重量的减轻和尺寸的减小数据看出:小型异步电动机 19 世纪时每千瓦大于 60kg,第一次世界大战后降至每千瓦 20kg 左右,到 20 世纪 70 年代降为每千瓦 10kg,电机体积也减小了 50% 以上,技术进步的作用是显而易见的。

控制电机方面,20 世纪 30 年代末期出现了各种形式的电磁式放大机,如交磁放大机和自励放大机等,就是生产过程自动化和遥控技术发展需要的产物。现今多种形式的伺服电动机、步进电动机、测速发电机、自整角机和旋转变压器等,更是各类自动控制系统和武器装备以及航天器中不可缺少的执行元件、检测元件。

四、我国电机工业发展概况

解放前,我国电机工业极端落后,全国只有少数几个城市有电机制造厂,而且规模小,

设备差,生产能力低下。1947年时,我国发电机年产量只有2万kW,电动机产量为5.1万kW,交流发电机的单机容量不超过200kW,交流电动机单机容量不超过230kW。

建国以后,我国电机制造工业得到迅速发展,经过几十年的努力,在大型交直流电机方面,已经研制成功 $2 \times 5000\text{kW}$ 的直流电动机、4700kW的直流发电机和42MW的同步电动机。在大型发电设备方面,已研制出300MW和600MW水氢氢冷汽轮发电机,300MW双水内冷和全氢冷汽轮发电机以及1150MW的半转速核能发电机;水轮发电机方面,已研制出125MW、250MW、300MW、400MW、550MW的水轮发电机,而目前世界上容量最大的水轮发电机——800MW的水轮发电机也由国内两家最大的电机制造厂——东方电气集团东方电机有限公司和哈尔滨电机厂生产出来。电力变压器的最大容量也已做到440MV·A,电压等级最高为110kV。

截至2008年底,我国发电设备装机容量达到79253万kW,年总发电量34334亿kW·h。预计到2020年,我国电力装机容量将突破12亿kW,全社会用电量将超过6万亿kW·h。我国发电装机容量和发电量都已进入世界前列。

在中、小型电机和微型电机方面,已开发研制出上百个系列、上千个品种的各种电机。特殊电机方面,由于永磁材料的出现,制成了许多高效、节能、维护简单的永磁电机。

五、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,担负着为后续相关专业课程打下坚实基础的任务。

本书系统地阐述变压器和旋转电机(异步电机、同步电机和直流电机)的基本工作原理、结构特点、基本电磁关系、基本分析方法和运行特性,并进行定性和定量分析。通过对本课程的学习,要求学生逐步建立并牢固掌握电机学的基本概念,熟悉和掌握电机基本理论和基本分析方法,学习分析工程实际问题的思路和方法,培养与提高分析和解决实际问题的能力,并为后续专业课程学习做好准备,打好基础。

电机学在内容上既有较强的理论知识,又必须联系工程实际。在分析电机电磁理论时,有些情况下可能略去某些次要因素,抓住主要矛盾解决问题;而另一些情况下,某些次要因素可能又成为主要因素。因此,分析问题时必须以生产实际为依据,分清矛盾的主次,抓住主要因素讨论问题。另外,电机学也是一门涉及学科知识面很广的课程,如发热与冷却、机械、高压与绝缘、导电与导磁材料等方面的知识,学习中要求同学具有较宽的知识面和较强的综合分析问题能力。

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,学习时应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

电机是一种机电能量转换装置，它以电场或磁场作为耦合场，由于磁场在空气中储能密度较电场大，所以绝大多数电机以磁场为耦合场，以电磁感应作用实现能量转换。所以，电机中磁场的强弱和分布，不仅关系到电机的性能，还决定了电机的体积和重量。因此，掌握磁场的分析和计算对认识电机是非常重要的。本章首先复习磁场的几个基本物理量，然后介绍常用的铁磁材料及其特性、基本电磁定律和磁路的基本定律，在此基础上，讨论磁路的计算，最后，简单介绍能量守恒定律。

第一节 磁场的几个基本物理量

一、磁感应强度

磁感应强度 (magnetic induction intensity) 又叫磁通密度 (magnetic flux density)，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。磁感应强度的大小表示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 在国际单位制 (SI) 中的单位是特斯拉，简称特，符号为 T，在电磁单位制 (CGS) 中的单位为高斯，简称高，符号为 Gs。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 (magnetic flux)，简称磁通，符号为 Φ 。

在均匀磁场中，磁通等于磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的面积 A 的乘积

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

磁通是一个标量，它在 SI 制中的单位为韦伯，简称韦，符号为 Wb，在 CGS 单位制中的单位为麦克斯韦，简称麦，符号为 Mx， $1\text{Mx} = 1\text{Wb}$ 。

在均匀磁场中，磁感应强度可以表示为单位面积上的磁通，由式 (1-1) 可得

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

所以磁感应强度也称为磁通密度。

三、磁导率

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

真空中的磁导率 (permeability of free space) 一般用 μ_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 μ_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 (relative permeability), 用符号 μ_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。非铁磁物质的相对磁导率 μ_r 接近于1, 而铁磁物质的 μ_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 (magnetic field intensity), 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。铁磁材料磁导率较真空磁导率大很多。

在电机和变压器中, 要求在一定的励磁电流下产生较强的气隙磁场, 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高的硅钢片制成, 磁路的其他部分常采用导磁性能较高的钢板和铸钢制成。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 (ferromagnetic material) 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。在不受外磁场作用时, 这些磁畴杂乱无章地排列, 其磁效应相互抵消, 对外不显示磁性。当受到外磁场作用时, 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, 叫做铁磁材料的磁化 (magnetization)。

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。

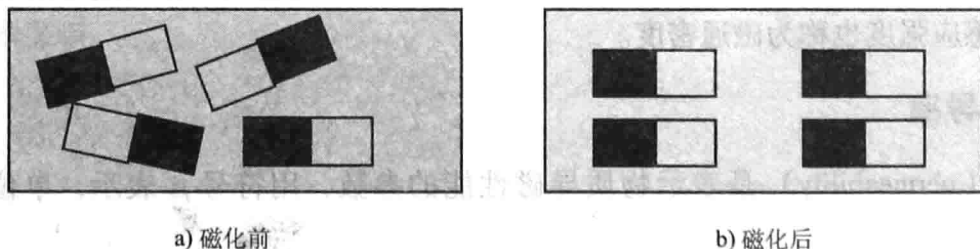


图 1-1 铁磁材料的磁化

二、磁化曲线和磁滞回线

材料的磁化特性可用磁化曲线（magnetization curve）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。

对于空气等非铁磁物质，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，直线的斜率就等于 μ_0 。下面讨论铁磁材料的磁化曲线。

1. 起始磁化曲线

对尚未磁化的完全去磁的铁磁材料进行磁化，磁场强度 H 从 0 开始逐渐增大，磁通密度 B 也从 0 开始逐渐增加，得到的曲线 $B = f(H)$ 就称为起始磁化曲线（initial magnetization curve），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 B 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，这种随着磁场强度 H 增加，而磁通密度 B 增加很小的现象称为磁饱和现象（magnetic saturation），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。

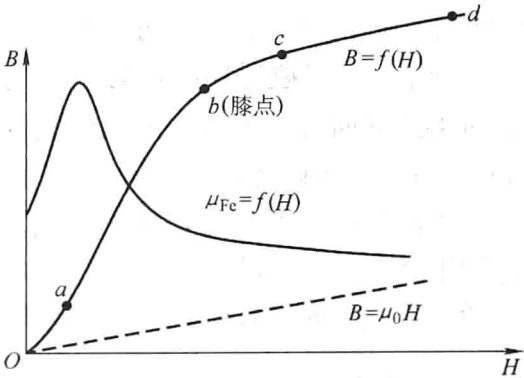


图 1-2 铁磁材料的起始磁化曲线

所以，铁磁材料的起始磁化曲线与非铁磁材料的不同，由于其具有饱和性，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 μ_{Fe} 曲线所示。铁磁材料的饱和性，也是其重要特性之一。

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 时，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

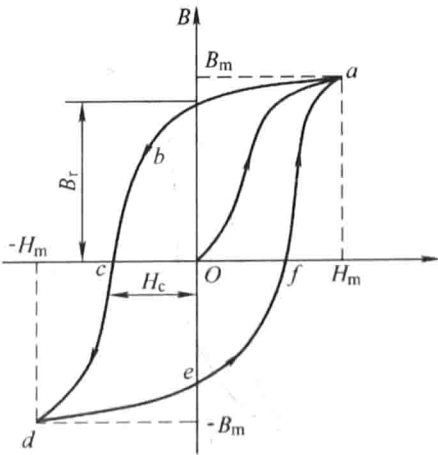


图 1-3 铁磁材料的磁滞回线

度, 简称剩磁 (residual magnetism)。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 (magnetic hysteresis)。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 降为 $-H_c$ 时, 磁通密度 B 降为零, 此时对应的磁场强度 H_c 称为矫顽力 (coercive force)。剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 是铁磁材料的两个重要参数。

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 (hysteresis loop)。

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 (normal magnetization curve)。基本磁化曲线一般只使用第 1 象限。

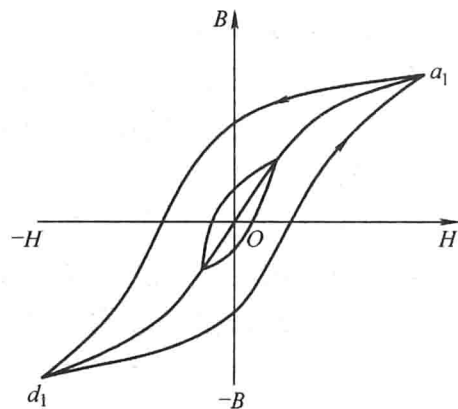


图 1-4 基本磁化曲线

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。对一定的磁性材料, 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 (soft magnetic material), 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 (hard magnetic material), 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 (permanent magnet), 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 (permanent magnetic machine), 近年来众多的专家学者在永磁电机发展方向方面做了许多工作。

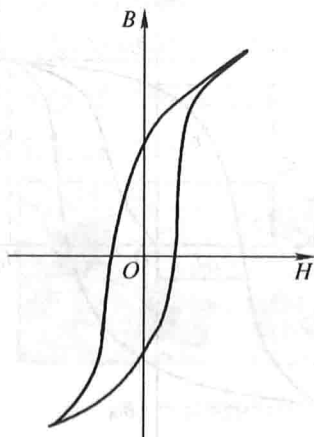


图 1-5 软磁材料的磁滞回线

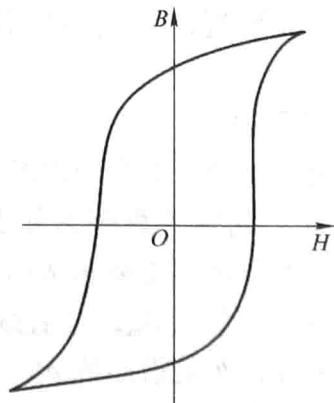


图 1-6 硬磁材料的磁滞回线