



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十三五”规划教材

Electric Machinery

电机学

第2版

◎ 曾成碧 赵莉华 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十三五”规划教材

电 机 学

第 2 版

曾成碧 赵莉华 编

机械工业出版社

本书根据国家对工程应用型人才培养的要求,以培养电气工程类、自动化类高级应用型人才为目标,结合编者多年从事电机学教学及与电机相关的科研、实践经验编写而成。

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,着重定性分析,强调与应用相关的知识。为了便于理解和自学,每篇结束部分增加了模拟测试题及答案。

本书可作为高等学校、高等职业学校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.—2版.—北京:机械工业出版社,2016.8
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-54348-0

I. ①电… II. ①曾… ②赵… 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(2016)第167290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 路乙达

责任校对:刘秀芝 封面设计:张静

责任印制:常天培

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2016年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·435千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54348-0

定价:39.00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

服务咨询热线:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649 机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书第1版自2009年出版以来，被数十所学校选作教材，在此表示衷心的感谢。

对工科学生解决实际问题的实践能力和动手能力的培养是工程教育的重点和关键，根据教育部高等教育教学评估中心发布的《中国工程教育质量报告（2013年度）》，目前我国工科毕业生的实际动手能力还需要加强，工科毕业生在国际竞争力等诸多方面有待进一步提高，这些都要求工程教育人才培养应适时做出相应的调整和变革。与之相对应的是，工科课程的教材也应该有所调整，需要增加更多与实际应用相关的内容。鉴于此，本书在第1版的基础上进行了修订，更加注重教材的系统性、完整性和应用性，增加了更多关于电机和变压器实际应用方面的内容，比如变压器、电机的最新发展情况，电机、变压器中常用铁心材料，变压器运行及试验，变压器、电机的冷却等，与实际联系更加紧密，力求让读者在学习掌握变压器、电机相关理论知识的基础上，更多地了解变压器、电机运行、维护及检修等方面的知识。本书还增加了常用专业词汇的英文，以方便大家阅读相关英文文献。

本书可作为培养电气工程及其自动化专业应用型人才的“电机学”课程教材，也可作为非电气专业学生学习电机学的教材。

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，章节中带*号的内容为选学。本书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，全书由赵莉华负责统稿。

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，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

绪 论	1
第一章 磁路	6
第一节 磁场的几个基本物理量	6
第二节 常用铁磁材料及其特性	7

第三节 基本电磁定律	10
第四节 磁路基本定律	13
第五节 能量守恒定律	15
本章小结	16
思考题及习题	16

变压器篇

第二章 变压器的类型和基本结构	17
第一节 变压器的用途和分类	17
第二节 变压器的基本结构	18
第三节 变压器的发热与冷却	22
第四节 变压器的额定值	24
思考题及习题	25

第三章 变压器基本运行原理	26
第一节 变压器的空载运行	26
第二节 变压器的负载运行	33
第三节 标么值	38
第四节 变压器等效电路参数测定	39
第五节 变压器的运行特性	43
思考题及习题	47

第四章 三相变压器	48
第一节 三相变压器的磁路系统	48
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	49

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	52
第四节 变压器的并联运行	54
*第五节 三相变压器的不对称运行	58
*第六节 变压器的空载合闸	62
*第七节 变压器的突然短路	64
*第八节 变压器试验技术	65
思考题及习题	67

第五章 三绕组变压器和其他用途

变压器	68
第一节 三绕组变压器	68
第二节 自耦变压器	69
第三节 分裂绕组变压器	71
第四节 互感器	74
思考题及习题	75
变压器部分小结	75
变压器部分模拟测试题及答案	76

异步电机篇

第六章 交流绕组及其电动势和 磁动势	81
第一节 交流电机的工作原理	81
第二节 交流绕组的构成原则和分类	82
第三节 几个基本概念	83

第四节 三相双层绕组	85
第五节 正弦磁场时交流绕组的感应 电动势	88
第六节 正弦电流时交流绕组的磁动势	91
思考题及习题	97

第七章 异步电机的基本结构与运行状态	98
第一节 异步电机的用途和分类	98
第二节 三相异步电动机的结构	98
第三节 三相异步电动机的运行状态	101
第四节 三相异步电动机的技术要求及额定值	103
思考题及习题	105

第八章 三相异步电动机的运行原理及工作特性	106
第一节 转子不动时的异步电动机	106
第二节 转子旋转时的异步电动机	109
第三节 异步电动机的电磁转矩及机械特性	113
第四节 三相异步电动机试验技术	118
思考题及习题	123

第九章 三相异步电动机的起动、调速和制动	124
第一节 异步电动机的起动	124
第二节 异步电动机的调速	128
第三节 异步电动机的制动	130

思考题及习题	131
--------------	-----

第十章 三相异步电动机的异常运行	132
第一节 异步电动机在非额定电压下的运行	132
第二节 异步电动机在非额定频率下的运行	133
* 第三节 异步电动机在不对称电源电压下的运行	133
* 第四节 异步电动机电源缺相时的运行	134
思考题及习题	134

第十一章 单相异步电动机、异步发电机及特殊异步电机	135
* 第一节 单相异步电动机	135
* 第二节 异步发电机	137
* 第三节 交流测速发电机	140
思考题及习题	141
异步电机部分小结	141
异步电机部分模拟测试题及答案	142

同步电机篇

第十二章 三相同步电机的基本工作	
原理与结构	147
第一节 三相同步电机的基本工作原理及分类	147
第二节 同步发电机的基本构造	149
第三节 大型同步发电机的基本系统	155
第四节 同步发电机的型号与额定值	158
思考题及习题	159

第十三章 三相同步发电机的电磁关系及分析方法	160
第一节 三相同步发电机空载时的电磁关系	160
第二节 三相同步发电机负载后的电磁关系	161
第三节 隐极同步发电机的分析方法	164
第四节 凸极同步发电机的分析方法	167

思考题及习题	170
第十四章 同步发电机的稳态运行特性及参数的测定	171
第一节 空载特性、短路特性及不饱和电抗的求取	171
第二节 零功率负载特性及漏电抗的求取	175
第三节 稳态参数的实验测定	177
第四节 外特性与调整特性	178
思考题及习题	179

第十五章 同步发电机并联运行	181
第一节 投入并联运行的条件与方法	181
第二节 并联运行的同步发电机电磁功率与功率特性	183
第三节 并联运行时有功功率的调节与静态稳定	187

第四节 并联运行时无功功率的调节与 V形曲线	191	*第五节 同步发电机常见故障	211
*第五节 同步发电机并网后正常运行 分析	193	*第六节 同步发电机试验技术	215
*第六节 同步发电机的振荡	195	思考题及习题	220
思考题及习题	197		
第十六章 同步发电机的异常运行分析 及处理	199	第十七章 同步电动机	221
*第一节 同步发电机的不对称运行	199	第一节 同步电动机的基本电磁关系、 方程式和相量图	221
*第二节 同步发电机的突然短路	203	第二节 同步电动机的无功功率调节	224
*第三节 同步发电机的失磁运行	206	第三节 同步调相机	225
*第四节 同步发电机的进相运行	209	*第四节 特殊同步电动机	226
		思考题及习题	230
		同步电机部分小结	230
		同步电机部分模拟测试题及答案	232
		直流电机篇	
第十八章 直流电机的基本工作原理与 结构	236	第二十章 直流发电机	254
第一节 直流电机的基本工作原理	236	第一节 他励直流发电机的运行特性	254
第二节 直流电机的基本结构与励磁 方式	239	第二节 并励直流发电机的运行特性	255
第三节 直流电机的额定值与型号	242	第三节 复励直流发电机的运行特性	257
第四节 直流电机的电枢绕组	243	思考题及习题	259
思考题及习题	244		
第十九章 直流电机的电磁关系及分析 方法	245	第二十一章 直流电动机	260
第一节 直流电机空载时电机内部的电磁 关系	245	第一节 直流电动机的运行特性	260
第二节 直流电机负载时电机内部的电磁 关系	246	第二节 直流电动机的起动	263
第三节 直流电机的电枢反应	248	第三节 直流电动机的调速	265
第四节 电枢绕组的感应电动势和直流电机 的电磁转矩	249	第四节 直流电动机的制动	267
第五节 稳态运行时直流电机的基本 方程式	250	思考题及习题	268
思考题及习题	252	第二十二章 直流电机的换向	269
		*第一节 换向过程的概念	269
		*第二节 产生火花的原因	271
		*第三节 改善换向的方法	271
		思考题及习题	272
		直流电机部分小结	272
		直流电机部分模拟测试题及答案	273
		参考文献	277

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、传输和分配、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，电机和电池等电源不同，它本身不是能源，只能转换或传递能量。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主要有两种，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。

发电厂和用户之间一般有一定的距离，尤其是水电厂与用电户之间的距离更长，所以发电机发出的电能大多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,经过高压输电将电能传输到用户所在地,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,最初的电动机便产生了。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。与单相和两相系统相比,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进,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。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1000kV·A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,几乎所有的制造厂家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)的结构型式。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。

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转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,肯内利(Kennelly)和斯坦梅茨(Steinmetz)开始使用复数和相量来分析交流电路。1894年,海兰德(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(Ferraris)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(George)又建立了交轴磁场理论。1899年,布隆代尔(Blondel)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了显著提高,性能日趋完善。

汽轮发电机方面,1900年,其单机容量不超过 $5\text{MV}\cdot\text{A}$ 。到了1920年,转速为 $3000\text{r}/\text{min}$ 的汽轮发电机容量已达 $25\text{MV}\cdot\text{A}$,转速为 $1000\text{r}/\text{min}$ 的汽轮发电机容量则达到 $60\text{MV}\cdot\text{A}$ 。到1937年,用空气冷却的汽轮发电机容量达到 $100\text{MV}\cdot\text{A}$ 。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 $3000\text{r}/\text{min}$ 的发电机容量上升到 $150\text{MV}\cdot\text{A}$ 。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 $208\text{MV}\cdot\text{A}$,1960年上升到 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,单机容量可达 $1200\sim 1700\text{MW}$ 。

水轮发电机和电力变压器的发展与此类似。水轮发电机单机容量从20世纪初的不超过 1000kW 增加到目前的 1200MW ,电力变压器单台容量也完全能够与最大单机容量的汽轮发电机或水轮发电机匹配,电压等级最高已经达到 1200kV 。

电机功率密度和材料利用率的提高也可以从电机质量的减轻和尺寸的减小数据体现: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型式的电磁式放大机,如交磁放大机和自激放大机等,是生产过程自动化和遥控技术发展需要的产物。现今多种型式的伺服电机、步进电机、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

新中国成立前,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家,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 。

新中国成立后,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。2008年,上海电气集团上海电机厂自主研发了 2.5万kW 的四极异步电动机,提供给广西柳州钢铁公司,填补了国内绿色环保产品的空白。在大型发电设备方面,先后研制出 300MW 、 600MW 水氢氢冷汽轮发电机, 300MW 双水内冷和全氢冷汽轮发电机, 1150MW 的半转速核能发电机,2013年东方电气集团东方电机有限公司制造了目前世界上单机容量最大的发电机——台山1号 1750MW 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最大的两家电机制造厂家——东方电气集团东方电机有限公司和哈尔滨电气股份有限公司生产出来。图0-1为东方电机有限公司生产的 1000MW 汽轮发电机内定子和外机座在厂内套装的情形。

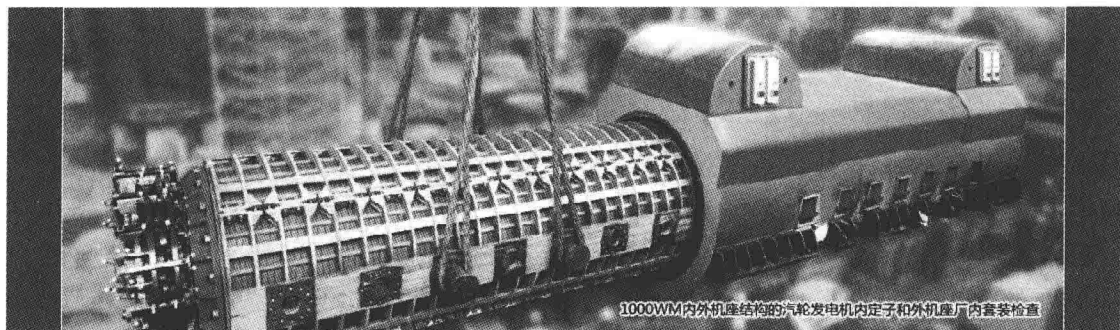


图 0-1 东方电机有限公司 1000MW 汽轮发电机内定子和外机座厂内套装

据《2015-2020 年中国火力发电市场评估及投资前景预测报告》，截至 2015 年底，我国发电设备装机容量达到 149000 万 kW，2014 年我国年总发电量为 56495.83 亿 kW·h。预计到 2020 年，中国电力装机容量将突破 20 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。

随着我国交直流特高压输电技术的发展，电力变压器制造技术得到了飞速发展。特变电工股份有限公司、天威保变电气股份有限公司、西安西电变压器有限公司、山东电力设备制造有限公司等为我国目前最大的几家大型变压器生产企业，均有能力生产电压等级达 1000kV 的电力变压器，四家公司基本平分了国内特高压变压器市场。图 0-2 为天威保变生产的世界首台特高压大容量变压器，变压器容量达 $1500\text{MV}\cdot\text{A}/1000\text{kV}$ 。图 0-3 为西安西电变压器有限公司生产的国内容量最大的 $720\text{MV}\cdot\text{A}/750\text{kV}$ 三相一体发电机变压器。

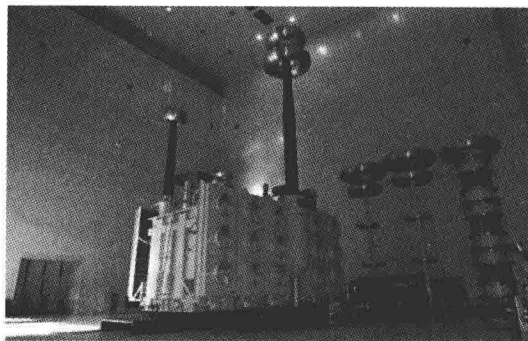


图 0-2 $1500\text{MV}\cdot\text{A}/1000\text{kV}$ 变压器

图 0-4 为山东电力设备制造有限公司生产的 1000kV 单相三绕组强油风冷无励磁调压自耦变压器，单相单体容量 $1000\text{MV}\cdot\text{A}$ ，单柱容量 $500\text{MV}\cdot\text{A}$ ，是目前世界上单柱容量最大、电压等级最高的可用于商业运行的特高压交流联络变压器。

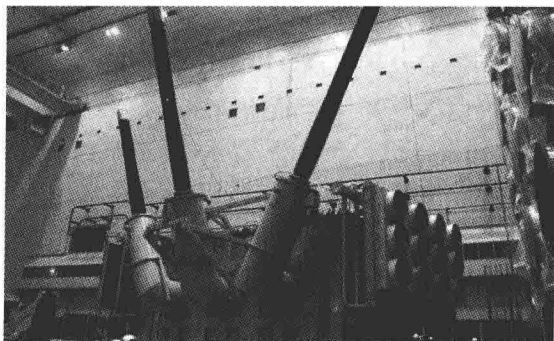


图 0-3 $720\text{MV}\cdot\text{A}/750\text{kV}$ 三相一体发电机变压器

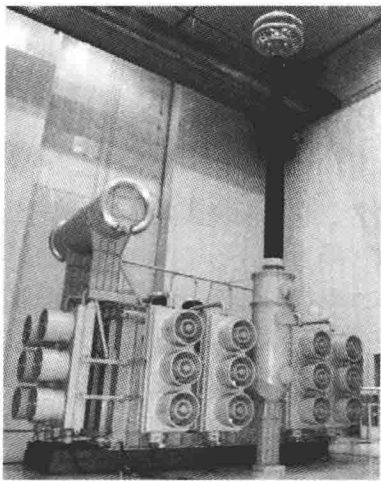


图 0-4 1000kV 单相三绕组强油风冷无励磁调压自耦变压器

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、特点及学习方法

“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。“电机学”课程的特点是理论性强、概念抽象、专业性特征明显，同时它也是一门涉及学科知识面很广的课程，涉及电路、磁路、发热与冷却、机械、高压与绝缘等方面的知识，学习中要求学生具有较宽的知识面和较强的综合分析问题的能力。

“电机学”课程主要特点有：①电和磁的结合：由于电机是电磁机械转换装置，既涉及电路理论，又涉及磁路理论，因此要求既要有较好的电路理论基础，又要有较扎实的电磁场知识；②非线性系统与运动系统结合：电机、变压器中的主磁路是非线性的，随着磁路饱和程度变化，与之相关的参数都将发生变化，而且电机中的磁场——旋转磁场是运动的，是非线性系统与运动系统结合；③时间和空间结合：不仅有时间相量，还有空间矢量，时空、相矢结合；④相量和复数结合：涉及的数学运算是相量和复数运算。

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，尤其是加强了电机及变压器应用相关的知识，使读者更容易理解和阅读，并且与实际联系更加紧密。

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

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，以电磁感应作用来实现机电能量的转换。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非常重要。本章首先复习磁场中的几个基本物理量，然后介绍常用的铁磁材料及性质、基本电磁定律和磁路的基本定律，最后，简单介绍了能量守恒定律。

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。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（teslas），简称特，符号为 T，在电磁单位制（CGS）中为高斯（gauss），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（magnetic flux），符号为 Φ 。

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（weber），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（magnetic 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（nonferromagnetic material）的磁导率和真空磁导率大

致相同，而铁、镍、钴等铁磁材料（ferromagnetic material）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。非铁磁材料的相对磁导率 μ_r 接近于 1，而铁磁材料的 μ_r 远远大于 1。电机和变压器中所使用的铁磁材料相对磁导率一般在 2000 ~ 80000。

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。铁磁材料的磁导率比真空大很多。

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（magnetic domain）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，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。

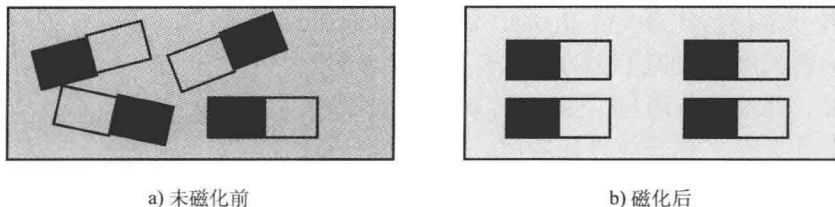


图 1-1 铁磁材料的磁化

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。

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 (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 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。

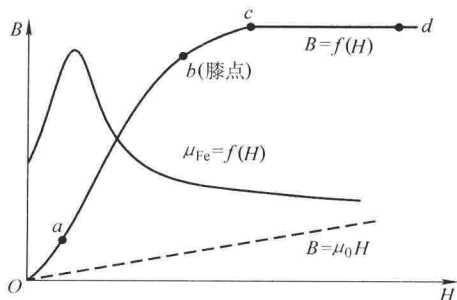


图 1-2 铁磁材料的起始磁化曲线

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 (magnetic saturation) 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。

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 中的曲线 μ_{Fe} 。

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 (magnetic hysteresis) 现象。要想使剩磁为零, 必须对材料进行反向

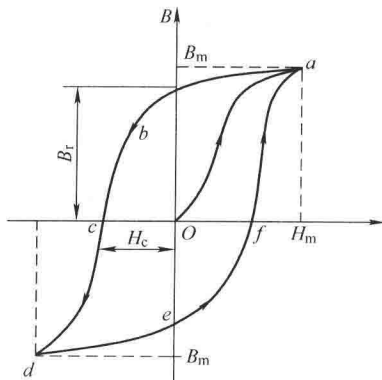


图 1-3 铁磁材料的磁滞回线

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 (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。

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 I、III 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 I 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。

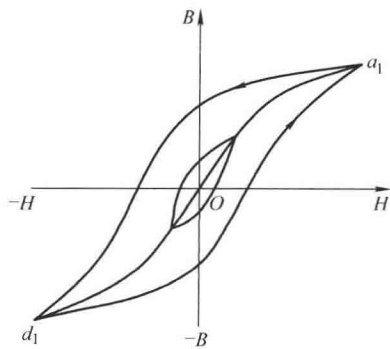


图 1-4 基本磁化曲线

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),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 (hard magnetic material),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 (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。

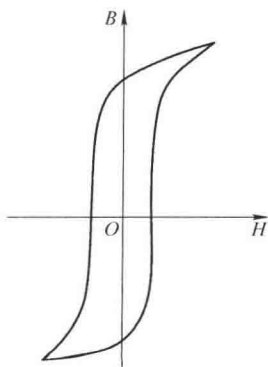


图 1-5 软磁材料的磁滞回线

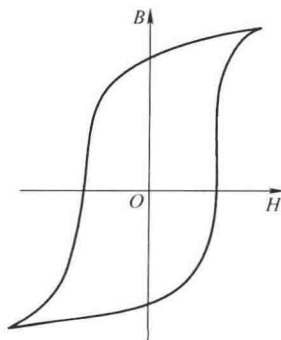


图 1-6 硬磁材料的磁滞回线

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(iron loss)。

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(hysteresis loss)。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(eddy current)。涡流在其流经路径的等效电阻上产生损耗,叫涡流损耗(eddy current loss)。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; Δ 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(0.35~0.5mm)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

金属导线通过绕在卷轴等物体上而形成的螺旋形或圆环物体,用于产生电磁效应或供电抗,称为线圈(coil),如果卷轴等物体为铁磁材料,则为铁心线圈,导线绕的圈数称