



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）



普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）



DIANJIXUE

电机学

（第三版）

赵君有 王东瑞 谢冬梅 编
徐益敏 张 玲 李建兴



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）



普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）

DIANJIXUE

电机学

（第三版）

赵君有 王东瑞 谢冬梅 编
徐益敏 张 玲 李建兴
胡幸鸣 曾林锁 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育），普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

全书分四篇共十二章，主要内容包括变压器、异步电机、同步电机和直流电机四大部分，其中以变压器、异步电机和同步电机为重点，侧重讨论分析电机的基本结构、运行原理、参数及运行性能，并根据需要增加一些电力系统中常见的电机运行内容。本书在编写中力争概念准确、重点突出、简洁、通俗易懂。

本书可作为高职高专院校发电厂及电力系统、电力系统继电保护与自动化、供用电技术、电气自动化技术等专业的教材，也可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/赵君有等编. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2011. 11

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5123-2297-4

I. ①电… II. ①赵… III. ①电机学—高等职业教育—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 226812 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 6 月第一版

2012 年 1 月第三版 2012 年 1 月北京第八次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 358 千字

定价 26.50 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育），普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育），是为高职高专学校发电厂及电力系统、电力系统继电保护、供用电技术及电气自动化技术等电力工程类专业编写的。

本书继承了前两版“突出重点、内容简洁、理论联系实际、内容模块化和便于自学”的特点。根据高职高专学校培养高层次应用型、技术型专业人才的目标要求，以“够用为度”的原则，结合高职高专“电机学”课程基础性和专业性的特点，本书不追求电机理论的系统性和完整性，注重电机知识的应用，摒弃了较深的数学推导过程，注重从物理过程和现象中分析电机的电磁关系，从应用、运行的角度重点分析电机的运行特性和工作特性。

在第二版的基础上，编者对全书的章节重新进行编排，使全书结构更紧凑、简练；更换了部分插图及一些物理量符号和设备字母符号，充实、修改和编排了各章的习题、自测题以及部分习题解答；在各章的开头，增加了“主要内容”和“重点要求”，对各章小结部分根据本章“重点要求”重新编写。

本书第三版对变压器运行、交流磁动势、三相异步电动机的工作特性、同步发电机的并联运行、三相突然短路及直流电动机的工作特性部分重新编写，其余部分也做了增、减和调整。与本书第二版相比，第三版的结构更加紧凑，内容更加简洁、难度下降，重点更加突出，实用性和应用性增强，更加适合高职高专学生使用，更有利于学生的自学。

第三版的编写工作由赵君有主持。其中，王东瑞老师编写了第二章、第四章，谢冬梅老师编写了第十章、第十一章，其余部分由赵君有老师编写。

本书由胡幸鸣、曾林锁担任主审，提出了许多宝贵的建议和意见，在此表示衷心感谢。

本教材配有由王东瑞和赵君有老师编写的《电机学思考题与习题解答》，并有电子教案可供选择使用。

由于编者学识水平有限，书中难免有不足和错误，真诚希望读者批评指正。

编 者

2011年4月

第一版前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004～2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和电力出版社组织专家评审，又列入全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本教材的编写注重突出以下特点：

(1) 突出重点。本教材侧重于稳态部分基本原理和基本概念的阐述，力争做到概念准确，同时强调基本理论的应用，让学生掌握分析电机的基本方法，建立牢固的物理概念，为学习后续课程和今后解决日常遇到的工程问题做好准备。

(2) 力求简洁。本教材简化了一些复杂的数学推导过程，追求基本理论及其应用的表述，不去刻意追求理论的系统性。

(3) 理论联系实际。本教材的编写注重与工程实际的联系，编入了一些电力系统中常见的电机运行内容。

(4) 内容模块化。各模块教学目标明确，针对性强，具有相对而言的独立性，既可以组合学习，又可以选择学习，有利于不同专业选学各自所需内容。

(5) 便于自学。为了便于巩固所学内容及应用所学内容，教材每章末有思考题与习题（附有部分习题答案，以便于参考），每篇末还有自测题，学生可以自测自检。

本书共分四篇十三章。第一、二、三章由郑州电力高等专科学校张玲老师编写，第四、五、六、七、八章由西安电力高等专科学校徐益敏老师编写，第十二、十三章由西安电力高等专科学校李建兴老师编写，其余部分由沈阳工程学院赵君有老师编写。全书由赵君有统稿。

本书由山西大学的王广慧老师和太原理工大学的张爱玲老师担任主审，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，编写时间紧迫，书中难免有缺点和错误，殷切希望读者批评指正。

编者

第二版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在2005年6月第一版的基础上修订而成的。

为了更好地满足高职高专《电机学》教学的要求，本书保留了第一版的突出重点、内容简洁、理论联系实际、内容模块化和便于自学的特点，在第一版的基础上，由赵君有老师对全书作了较大幅度的充实、修正和删减。

在绪论中增添“磁路的基本概念”内容，让学生在学习《电机学》之前，了解或复习磁路的一些基本概念，便于后面正课的学习；

在第二章“变压器的运行原理与运行分析”一章中，增添了第九节“其他变压器”，让学生能对特种变压器有个基本了解；

对第三章“三相变压器的不对称运行和变压器的瞬变过程”作了修正；

对第四章“交流绕组的基波磁动势”一节中删减了大量的数学理论推导过程，改成以物理意义分析为主，利用图示形式阐述旋转磁动势的性质；

对第八章“单相异步电动机”内容作了修改和补充；

在第九章中，增添了“三相同步发电机转子励磁方式简介”一节；

对第十章第六节删减了“同步发电机六条轨迹线”，对第七节同步电动机部分增添了大量分析、V形曲线和起动等内容；

对第十一章“同步发电机的三相突然短路”一节中删减了大量磁链的数学推导过程，简要地从短路的物理过程及磁路变化分析同步电抗的改变及短路电流大的原因，充实了“三相突然短路对电机影响”内容；

重新编写第十三章“直流电机的电枢反应”一节；

对第十三章中的第二节“电枢电动势”、第五节“直流发电机”中的部分内容作了大量的删减；

对第十三章第六节中的“功率和转矩平衡”内容作了简化；

对“部分思考题与习题参考答案”部分重新修正；

对各章的小结进行了修正，对各章的思考题与习题及各篇的自测题进行了充实和修改、更换了部分插图及一些字母符号等。

与第一版相比，修改后的第二版内容更加简练和实用，难度下降，重点更加突出，更适合高职高专学生使用。

本教材配有由王东瑞和赵君有老师编写的《电机学思考题与习题解答》，并有电子教案可供选择使用。

本书第二版由浙江机电职业技术学院胡幸鸣教授、沈阳工业大学曾林锁教授担任主审，并提出了许多宝贵的建议和意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误，真诚希望读者批评指正。

编者

2008年8月于沈阳

目 录

前言	
第一版前言	
第二版前言	
绪论	1

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本知识	7
第一节 变压器的基本工作原理及分类	7
第二节 变压器的基本结构	8
第三节 变压器的型号和额定值	10
小结	12
思考题与习题	12
第二章 变压器的运行原理与运行分析	13
第一节 单相变压器的空载运行	13
第二节 单相变压器的负载运行	18
第三节 变压器的参数测定	23
第四节 标么值	26
第五节 变压器的运行特性	28
第六节 三相变压器的磁路系统和电路系统	31
第七节 三相变压器磁路系统和电路系统对电动势波形的影响	35
第八节 变压器的并联运行	37
第九节 其他变压器	40
小结	48
思考题与习题	49
第三章 三相变压器的不对称运行和变压器的瞬变过程	52
第一节 三相变压器的不对称运行	52
第二节 变压器的瞬变过程	56
小结	60
思考题与习题	61
本篇自测题	62

第二篇 异步电机

第四章 交流电机的绕组、电动势和磁动势	66
第一节 交流绕组简介	66
第二节 交流绕组的感应电动势	71
第三节 交流绕组的基波磁动势	77
小结	84
思考题与习题	84
第五章 三相异步电动机的基本结构和基本工作原理	86
第一节 三相异步电动机的基本结构	86
第二节 三相异步电动机的基本工作原理	88
第三节 三相异步电动机的型号和额定值	90
小结	91
思考题与习题	92
第六章 三相异步电动机的运行原理	93
第一节 三相异步电动机的空载运行	93
第二节 三相异步电动机的负载运行	95
第三节 三相异步电动机的等效电路	98
第四节 三相异步电动机的功率平衡和转矩特性	102
第五节 三相异步电动机的工作特性	105
第六节 三相异步电动机在不对称电压下的运行分析	109
第七节 单相异步电动机	110
小结	112
思考题与习题	113
第七章 三相异步电动机的起动和调速	116
第一节 三相异步电动机的起动	116
第二节 深槽式和双笼式异步电动机	120
第三节 三相异步电动机的调速方法简介	122
小结	124
思考题与习题	124
本篇自测题	126

第三篇 同步电机

第八章 三相同步发电机的基本工作原理和结构	130
第一节 三相同步发电机的基本工作原理及其分类	130

第二节	汽轮发电机的基本结构	132
第三节	三相同步发电机转子励磁方式简介	134
第四节	三相同步发电机的型号和额定值	136
小结		137
思考题与习题		137
第九章	三相同步发电机的运行原理	139
第一节	三相同步发电机的电枢反应	139
第二节	三相同步发电机的电动势平衡方程和相量图	144
第三节	三相同步发电机的运行特性	148
第四节	三相同步发电机的并列	152
第五节	三相同步发电机的有功功率功角特性和静态稳定	155
第六节	三相同步发电机的无功功率功角特性及 V 形曲线	161
第七节	同步调相机及同步电动机	165
小结		171
思考题与习题		171
第十章	同步发电机的三相突然短路和异常运行	175
第一节	同步发电机的三相突然短路	175
第二节	三相同步发电机的不对称运行	182
第三节	同步发电机的失磁运行	185
第四节	同步发电机的振荡	187
小结		189
思考题与习题		189
本篇自测题		191

第四篇 直 流 电 机

第十一章	直流电机的基本工作原理和结构	194
第一节	直流电机的基本工作原理	194
第二节	直流电机的基本结构	195
第三节	直流电机的励磁方式	196
第四节	直流电机的型号和额定值	197
小结		198
思考题与习题		198
第十二章	直流电机的运行原理及运行特性	199
第一节	直流电枢绕组简介	199
第二节	直流电机的电枢电动势和电磁转矩	203
第三节	直流电机的电枢反应	204

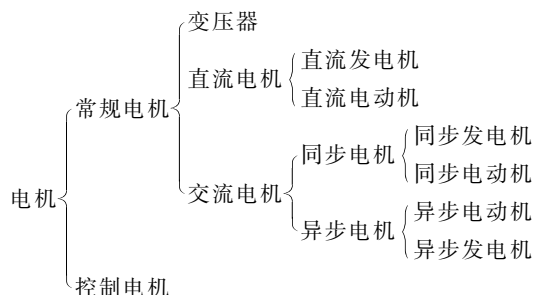
第四节	直流电机的换向简介·····	207
第五节	直流发电机的运行原理·····	209
第六节	直流电动机的运行原理·····	212
小结	·····	220
思考题与习题	·····	221
本篇自测题	·····	223
部分思考题与习题参考答案	·····	225
参考文献	·····	227

绪 论

一、电机概念

电机是指以电磁感应为理论基础进行机电能量转换或信号转换的一种电磁机械装置。

电机的种类很多，可分为以下几种：



本书主要分析同步发电机、变压器、异步电动机和直流电机。

变压器——将一种电压等级的交流电能变换成另一种电压等级的交流电能的电气设备。

发电机——将机械能转换成电能输出的电气设备。

电动机——将电能转换成机械能输出的电气设备，主要应用于电力拖动系统中，带动生产机械运转。

电机学主要研究电机这一特定机械中电和磁之间错综复杂的关系，讨论电机的主要结构、工作原理和工作性能、实验方法等，重点分析电机内部的电磁关系。

电机学课程是一门理论性很强的课程，是一门既有基础性又有专业性的课程。为了学好这门课程，首先，要抓住主要矛盾，有条件地略去一些次要因素，找出问题的本质，要着重理解物理意义，进行定性分析，适当进行定量计算，不能只满足于公式中的数学关系。其次，要注重理论联系实际，要重视实验和工程实践，善于用理论分析生产实践中的问题。第三，要善于运用对比的方法，分析各种电机之间密切的内在联系，比较它们的共同点和不同点，加强对各种电机运行原理和运行性能的理解。

二、磁路中基本物理量

1. 磁感应强度 B

当一定大小的电流流过导体时，就会产生一定的磁场。磁场的强弱和方向用磁感应强度 B 来表示， B 的单位名称为特 [斯拉]、单位符号为 T。磁力线越密，磁感应强度越大。

2. 磁通 Φ

磁通也称磁通量，单位名称为韦 [伯]、单位符号为 Wb，是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

$$\Phi = \int_S B dS \quad (0-1)$$

式中 S ——磁力线所穿过区域的面积， m^2 。

对均匀磁场，若磁力线与截面垂直，则式 (0-1) 的积分形式可以写成代数形式，即

$$\Phi = BS$$

或

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (0-2)$$

根据磁感应强度和磁通的关系，又称磁感应强度为磁通密度，实际应用中也常常简称为磁密。

3. 磁导率 μ

衡量材料对于磁的传导能力大小的物理量，称为磁导率，用 μ 表示，单位名称为亨 [利]/米、单位符号为 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，其磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 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 $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 。一般来说，铁磁材料的相对磁导率很大，例如电机定子、转子铁心的相对磁导率在 6000~7000。

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，单位名称为安/米、单位符号为 A/m。其方向与磁感应强度 B 相同，大小关系为

$$B = \mu H \quad (0-3)$$

三、电机学中常用的基本电磁定理

1. 全电流定律（安培环流定律）

全电流定律指的是磁场强度 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

$$\oint_l \bar{H} d\bar{l} = \sum i \quad (0-4)$$

式 (0-4) 中，当电流 i 的方向与闭合路径中 \bar{H} 的方向（即闭合路径 l 的方向）符合“右手螺旋”时 i 取正值，否则取负值。

在工程中，式 (0-4) 可写为

$$\sum Hl = \sum i \quad (0-5)$$

图 0-1 (a)，应用全电流定律可写成

$$\oint H dl = I_1 + I_2 - I_3$$

图 0-1 (b)，应用全电流定律可写成

$$\oint H dl = Ni \quad (0-6)$$

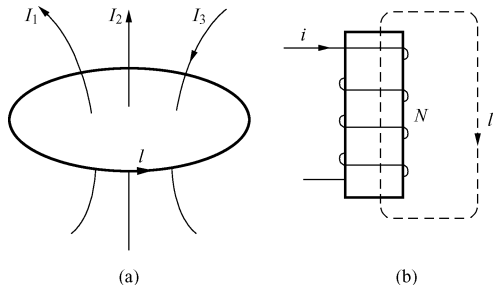


图 0-1 全电流定律

(a) 全电流定律示意图；(b) 全电流定律
在线圈中的应用

2. 磁路的基尔霍夫第一定律（磁通的连续性定律）

磁路的基尔霍夫第一定律（见图 0-2）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

$$\sum \phi = 0 \quad (0-7)$$

如图 0-2 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

$$\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 = 0$$

3. 磁路的基尔霍夫第二定律

由全电流定律的演变得

$$\sum Hl = \sum iN \quad (0-8)$$

式中 Hl ——磁路的磁压降；

iN ——作用在磁路上的安匝数，用 $F=iN$ 表示，称为磁动势。

式 (0-8) 表明，沿任何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

磁路的欧姆定律为

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{iN}{R_m} \quad (0-9)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S} = \frac{1}{\Lambda_m} \quad (0-10)$$

式中 F ——作用在磁路上的磁动势， $F=iN$ ；

R_m 、 Λ_m ——磁路的磁阻和磁导， $\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$ ；

l ——磁路的平均长度；

μ ——磁路材料的磁导率；

S ——磁路的截面积。

5. 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。

(1) 导体切割磁力线感应电动势。导体在磁场中作切割磁力线运动时会感应电动势，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)，当磁力线、导体的运动方向及导体本身三者相互垂直时，感应电动势为

$$e = Blv \quad (0-11)$$

感应电动势的方向由右手定则来确定，如图 0-3 所示。

(2) 线圈中磁通变化感应电动势。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

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (0-12)$$

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，在式 (0-12) 中用负号表示。

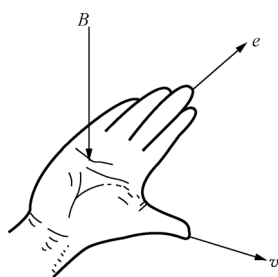


图 0-3 右手定则

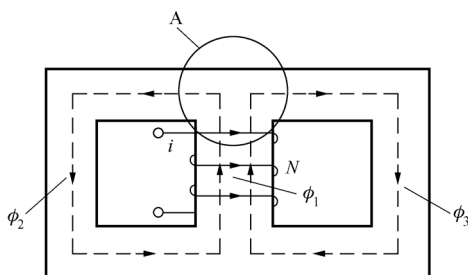


图 0-2 磁路的基尔霍夫第一定律

6. 电磁力定律

载流体放置在磁场中时，载流体会受到电磁力的作用。如果

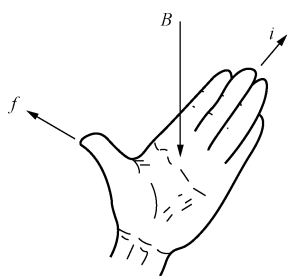


图 0-4 左手定则

磁力线方向与导体相互垂直，导体中的电流为 i ，且导体有效长度为 l ，则导体所受电磁力的大小为

$$f = Bil \quad (0-13)$$

电磁力的方向由左手定则确定，如图 0-4 所示。

四、常用的铁磁材料及其特性

在一定的励磁磁动势作用下为了能激励较强的磁场，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，这种现象称为铁磁材料的磁化。

由式 (0-9) 和式 (0-10) 得

$$\frac{\Phi}{S} = \mu \frac{iN}{l} = \mu \frac{F}{l} = \mu H \quad (0-14)$$

式中 H ——磁场强度， $H = \frac{F}{l}$ ，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。

由式 (0-2)、式 (0-14) 可以写成

$$B = \mu H \quad (0-15)$$

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，如图 0-5 铁磁材料磁化曲线中的那条虚线所示，直线的斜率为 μ_0 ，很小。

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 0-5 所示。在 $0ab$ 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，曲线基本上是与 $B = \mu_0 H$ 平行的直线， B 几乎不随着 H 的增大而增大。可见，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。

铁磁材料的磁化现象可以解释如下：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 0-6 所示。图中，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 0-6 (a) 所示。将铁磁物质放入磁场，在外磁场作用下，磁畴的极性将趋于同一方向，如图 0-6 (b) 所示。它形成一个附加磁场，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激励的磁场强得多，使铁磁材料内磁场大为增强。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。

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。

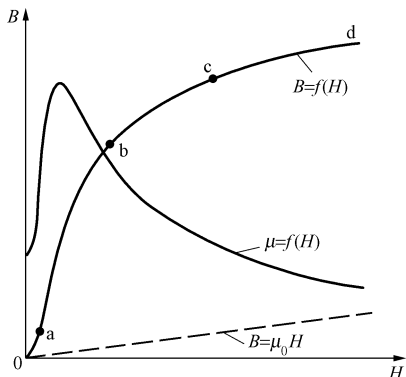


图 0-5 铁磁材料的磁化曲线

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 0-7 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

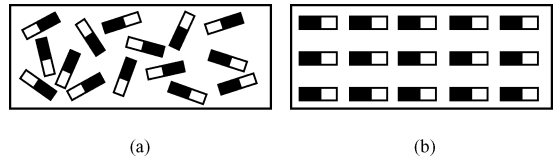


图 0-6 磁畴

(a) 铁磁材料未放入磁场; (b) 铁磁材料放入磁场

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, 叫做磁滞。呈现磁滞现象的 $B-H$ 闭合回线, 称为磁滞回线, 如图 0-7 中 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, 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, 如图 0-8 所示。

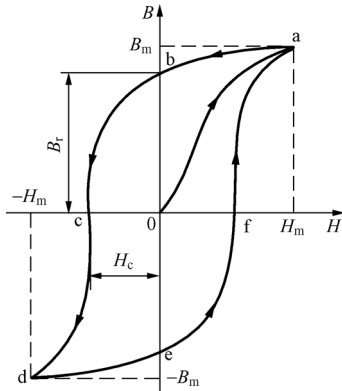


图 0-7 铁磁材料的磁滞回线

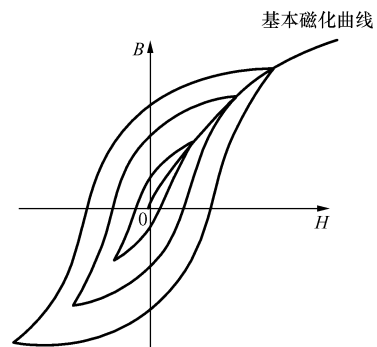


图 0-8 基本磁化曲线

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、剩磁 B_r 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。

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。

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

$$p_h = fV \oint HdB \quad (0-16)$$

实验证明, 磁滞回线的面积 $\oint HdB$ 与 B_m 的 n 次方成正比, 所以磁滞损耗可以改写成

$$p_h = k_h f V B_m^n \quad (0-17)$$

式中 k_h ——磁滞损耗系数，大小取决于材料的性质。

电机中的铁心之所以采用软磁材料——硅钢片，是由于硅钢片的磁滞回线的面积小，能够降低磁滞损耗。

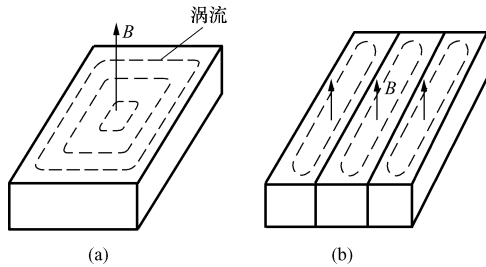


图 0 - 9 涡流路径

(a) 整块铁心；(b) 硅钢片叠成的铁心

由于铁心是导体的，所以交变的磁通也能在铁心中感应电动势，并引起环流。这些环流在铁心内部围绕磁通作涡流状流动，称为涡流，如图 0 - 9 (a) 所示。涡流在铁心中引起的损耗，称为涡流损耗。分析表明：磁通变化的频率越高，磁通密度越大，感应电动势就越大，涡流损耗就越大；铁心的电阻率越大，涡流所流过的路径越长，涡流损耗就越小。涡流损耗的经验公式为

$$p_e = C_e d^2 f^2 B_m^2 V \quad (0 - 18)$$

式中 C_e ——涡流损耗系数，与材料的电阻率成反比；

d ——钢片的厚度。

为了减小涡流损耗，电机的铁心均采用 0.35~0.5mm 厚、两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成，如图 0 - 9 (b) 所示。由于硅的加入，铁心材料的电阻率增大，硅钢片的片间有绝缘层，叠片越薄，损耗越低。

磁滞损耗和涡流损耗，总称为铁心损耗。对于一般的电工钢片，在正常的工作磁通密度范围内 ($1\text{T} < B_m < 1.8\text{T}$)，铁心损耗可近似为

$$p_{Fe} \approx C_{Fe} B_m^2 f^{1.3} G \quad (0 - 19)$$

式中 C_{Fe} ——铁心损耗系数；

G ——铁心质量，kg。

式 (0 - 19) 表明，铁心损耗与磁通密度最大值 B_m 、交变频率 f 有关。

第一篇 变 压 器

变压器是利用电磁感应原理，把一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能的电气设备。

本篇主要分析一般用途的电力变压器。首先简要地介绍变压器的结构，然后着重分析变压器的运行原理与特性、三相变压器的连接组、变压器的并联运行及特种变压器，最后简要介绍变压器的不对称运行和瞬变过程。

第一章 变压器的基本知识

主要内容

本章首先分析变压器的基本工作原理和分类，然后介绍变压器的基本结构及主要部件的作用，最后介绍变压器的型号和额定值。

重点要求

- (1) 掌握变压器的基本工作原理。
- (2) 掌握变压器的主要结构和各部件的作用。
- (3) 掌握变压器的额定值。



第一节 变压器的基本工作原理及分类

一、变压器的基本工作原理

变压器工作原理的基础是电磁感应定律。变压器有套在同一个铁心上的两个互相绝缘的绕组，绕组之间只有磁的耦合而没有电的联系，如图 1-1 所示。其中：绕组 1 接交流电源，称为一次绕组；绕组 2 接负载，称为二次绕组。

当一次绕组接到交流电源时，绕组中有交流电流流过，在铁心中产生与外加电压频率相同的交变磁通 ϕ 。交变磁通 ϕ 同时交链一、二次绕组，根据电磁感应定律，交变磁通 ϕ 在一、二次绕组中感应出相同频率的电动势 e_1 、 e_2 。其计算式分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

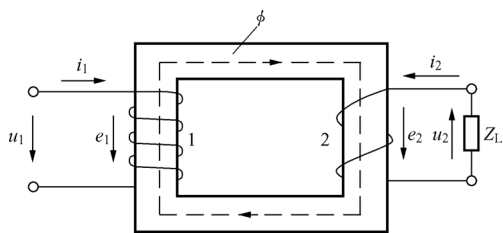


图 1-1 变压器工作原理示意图