



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANJIXUE

电机学

(第二版)

赵君有 徐益敏 张 玲 李建兴 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electric Power Technology



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANJIXUE

电机学

(第二版)

赵君有 徐益敏 编
张 玲 李建兴
胡幸鸣 曾林锁 主审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Electric Power Technology

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

全书分四篇共十三章，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。本教材力争做到概念准确、重点突出、简洁、通俗易懂。

本书可作为高职高专学校发电厂及电力系统、继电保护、供用电技术、电气自动化等专业的教材，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. —2版. —北京：中国电力出版社，
2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5083-8136-7

I. 电… II. 赵… III. 电机学—高等学校：技术学校—
教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 188118 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.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

2009 年 1 月第二版 2009 年 1 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 341 千字

定价 22.80 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“其它变压器”,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相量分析、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;

对第十三章中第六节中的“功率和转矩平衡”内容作了简化;

对“部分习题与思考题参考答案”部分重新修正;

对各章的小结进行了修正,对各章的习题与思考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

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要求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

目 录

前言

第一版前言

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..... 11

思考题与习题..... 11

第二章 变压器的运行原理与运行分析..... 12

第一节 单相变压器的空载运行..... 12

第二节 单相变压器的负载运行..... 17

第三节 变压器的参数测定..... 21

第四节 标么值..... 25

第五节 变压器的运行特性..... 27

第六节 三相变压器的磁路系统和电路系统..... 30

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..... 34

第八节 变压器的并联运行..... 36

第九节 其它变压器..... 39

小结..... 47

思考题与习题..... 48

第三章 三相变压器的不对称运行和变压器的瞬变过程..... 51

第一节 三相变压器的不对称运行..... 51

第二节 变压器的瞬变过程..... 55

小结..... 59

思考题与习题..... 60

本篇自测题..... 60

第二篇 异 步 电 机

第四章 交流电机的绕组、电动势和磁动势..... 64

第一节 交流绕组简介..... 64

第二节 交流绕组的感应电动势..... 69

第三节 交流绕组的基波磁动势..... 75

小结..... 79

思考题与习题	80
第五章 三相异步电动机的基本结构和基本工作原理	81
第一节 三相异步电动机的基本结构	81
第二节 三相异步电动机的基本工作原理	83
第三节 三相异步电动机的型号和额定值	85
小结	86
思考题与习题	86
第六章 三相异步电动机的运行原理	88
第一节 三相异步电动机的空载运行	88
第二节 三相异步电动机的负载运行	90
第三节 三相异步电动机的等效电路	93
第四节 三相异步电动机的功率平衡和转矩特性	97
第五节 三相异步电动机的工作特性	102
小结	103
思考题与习题	104
第七章 三相异步电动机的起动和调速	106
第一节 三相异步电动机的起动	106
第二节 深槽式和双笼式异步电动机	110
第三节 三相异步电动机的调速方法简介	112
小结	114
思考题与习题	114
第八章 三相异步电动机在不对称电压下的运行	116
第一节 三相异步电动机在不对称电压下的运行分析	116
第二节 单相异步电动机	117
小结	119
思考题与习题	120
本篇自测题	120

第三篇 同 步 电 机

第九章 三相同步发电机的基本工作原理和结构	124
第一节 三相同步发电机的基本工作原理及其分类	124
第二节 汽轮发电机的基本结构	126
第三节 三相同步发电机转子励磁方式简介	128
第四节 三相同步发电机的型号和额定值	130
小结	131
思考题与习题	131
第十章 三相同步发电机的运行原理	132
第一节 三相同步发电机的电枢反应	132
第二节 三相同步发电机的电动势平衡方程和相量图	137
第三节 三相同步发电机的运行特性	141
第四节 三相同步发电机的并列	145
第五节 三相同步发电机的有功功率功角特性和静态稳定	148

第六节 三相同步发电机的无功功率功角特性及 V 形曲线	154
第七节 同步调相机及同步电动机	158
小结	163
思考题与习题	164
第十一章 同步发电机的三相突然短路和异常运行	168
第一节 同步发电机的三相突然短路	168
第二节 三相同步发电机的不对称运行	173
第三节 同步发电机的失磁运行	177
第四节 同步发电机的振荡	179
小结	181
思考题与习题	181
本篇自测题	182

第四篇 直 流 电 机

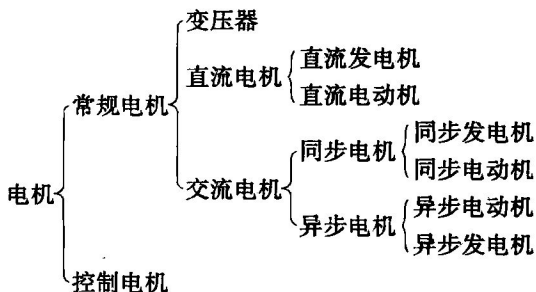
第十二章 直流电机的基本工作原理和结构	186
第一节 直流电机的基本工作原理	186
第二节 直流电机的基本结构	187
第三节 直流电机的励磁方式	188
第四节 直流电机的型号和额定值	189
小结	189
思考题与习题	190
第十三章 直流电机的运行原理及运行特性	191
第一节 直流电枢绕组简介	191
第二节 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	195
第三节 直流电机的电枢反应	197
第四节 直流电机的换向简介	200
第五节 直流发电机	201
第六节 直流电动机	204
小结	211
思考题与习题	212
本篇自测题	213
部分习题与思考题参考答案	215
参考文献	217

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,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，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 $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 。一般说来，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

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

式 (0-4) 中，当电流 i 的方向与闭合路径中 $\vec{H}$ 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

$$\oint Hdl = I_1 + I_2 - I_3$$

图 0-1 (b)，应用全电流定律可写成

$$\oint Hdl = Ni \quad (0-6)$$

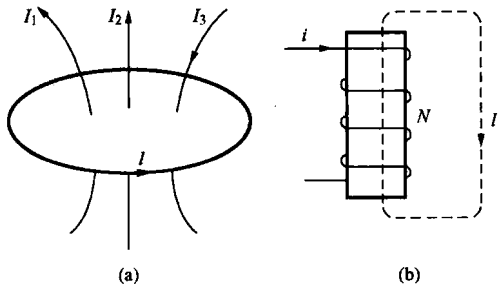


图 0-1 全电流定律

(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, 如式 (0-12) 中的负号所表示。

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

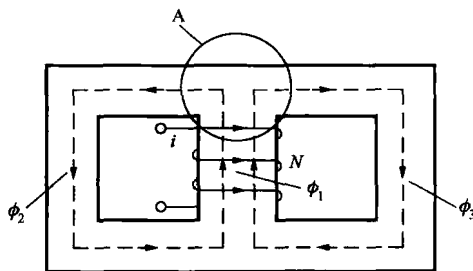


图 0-2 磁路的基尔霍夫第一定律

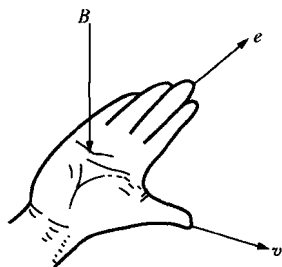


图 0-3 右手定则

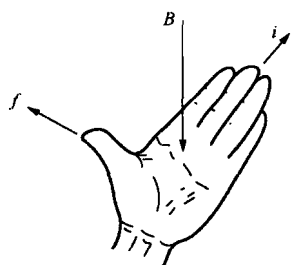


图 0-4 左手定则

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 , 则导体的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。

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

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, 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。

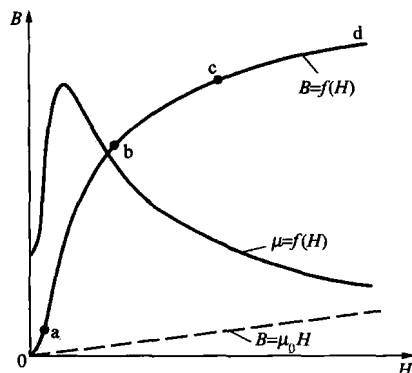


图 0-5 铁磁材料的磁化曲线

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 中曲线中 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

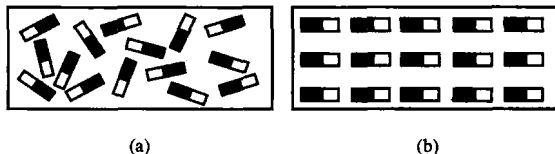


图 0-6 磁畴

(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, 如图 0-8 所示。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。

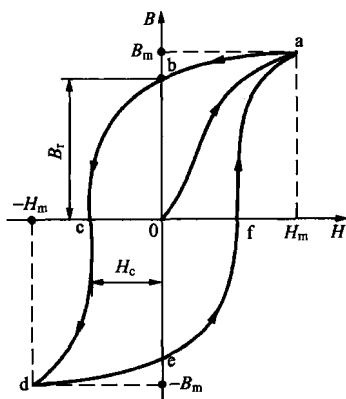


图 0-7 铁磁材料的磁滞回线

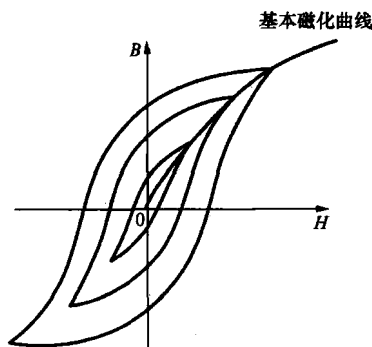


图 0-8 基本磁化曲线

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 $\oint H dB$ 成正比, 即

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

实验证明, 磁滞回线的面积 $\oint H dB$ 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。

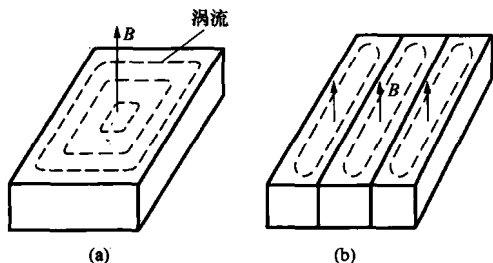


图 0-9 涡流路径

(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

变压器是电力系统中的重要设备，它利用电磁感应原理，把一种电压等级的交流电能转换成频率不变的另一种电压等级的交流电能。利用升压变压器将电能经济地输送到用电地区，再用降压变压器把电压降低，供用户使用。

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

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。两个互相绝缘的绕组套在同一个铁心上，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

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

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

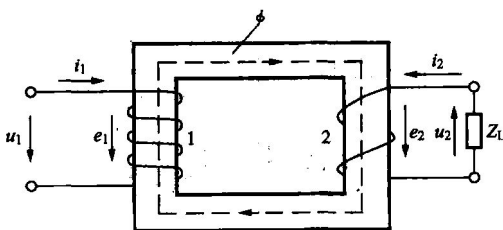


图 1-1 变压器工作原理示意图

式中 N_1 、 N_2 ——一、二次绕组的匝数。

由于感应电动势的大小与绕组的匝数成正比，由后面的分析可知，一、二次绕组的感应电动势又近似等于各自的电压，因此，改变一、二次绕组的匝数比即可改变变压器的二次电压，这就是变压器的变压原理。若把负载接于二次绕组，在电动势 e_2 的作用下，变压器就能向负载输出电能，实现了不同电压等级电能的传递。

尽管 $e_1 \neq e_2$ ，但是 $\frac{e_1}{N_1} = \frac{e_2}{N_2} = -\frac{d\phi}{dt}$ ，由此表明，变压器一、二次绕组每匝感应电动势相等，这是因为它们交链相同的交变磁通 ϕ 的缘故。

二、变压器的分类

变压器的种类很多，可按其用途、结构、相数、冷却方式等不同来进行分类。

按用途可分为：电力变压器，主要用在输配电系统中，它又分为升压变器、降压变器、联络变器和厂用变器；仪用互感器，又分为电压互感器和电流互感器；特种变器，如调压变器、试验变器、电炉变器、整流变器、电焊变器等。

按绕组数目可分为：双绕组变器，三绕组变器，多绕组变器和自耦变器。

按磁路系统可分为：心变器，组式变器。

按相数可分为：单相变器，三相变器和多相变器；

按冷却介质和冷却方式可分为：油浸式变器，包括油浸自冷式、油浸风冷式、油浸强迫油循环式变器；干式变器和充气式变器等。

第二节 变压器的基本结构

变压器中最主要的部件是铁心和绕组，铁心和绕组装配在一起称为器身。油浸式变压器的器身放在油箱里，油箱中注满了变压器油。油箱外装有散热器，油箱上部还装有储油柜、安全气道、绝缘套管等。图 1-2 所示是油浸式电力变压器的结构图。

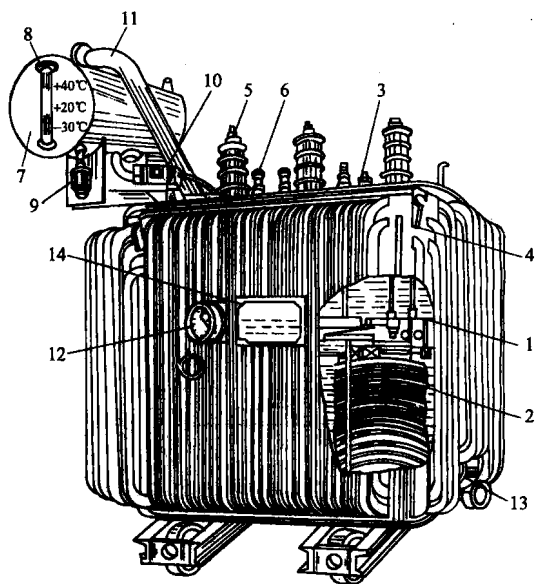


图 1-2 油浸式电力变压器结构图

- 1—铁心；2—绕组及绝缘；3—分接开关；4—油箱；5—高压套管；6—低压套管；7—储油柜；8—油位计；9—呼吸器；10—气体继电器；11—安全气道；12—信号式温度计；13—放油阀门；14—铭牌

为圆筒形状，高压绕组的匝数多、导体细，低压绕组的匝数少、导体粗，绕组套在铁心柱上。变压器的绕组可分为同心式和交叠式两类。同心式绕组的高、低压绕组同心地套在铁心柱上，如图 1-4 所示。为了便于绝缘和高压绕组易于与分接开关连接，低压绕组靠近铁心柱，高压绕组套在低压绕组外面，两个绕组之间留有油道以利于冷却。同心式绕组尚有多种不同的结构形式，如圆筒式、螺旋式、连续式、纠结式等。同心式绕组结构简单、制造方便，电力变压器大部分采用这种结构。交叠式绕组的高、低压绕组沿铁心柱高度方向交替放

一、铁心

铁心是变压器中耦合磁通的主磁路，又是机械骨架。铁心由铁心柱和铁轭两部分构成，铁轭将铁心柱连接起来形成闭合磁路。

为了提高磁路的导磁性能，减少铁心中的磁滞、涡流损耗，铁心一般用高磁导率的磁性材料制成。目前变压器铁心大部分用单片厚为 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ ，其表面涂有绝缘漆的硅钢片剪成一定形状叠装而成。为了减小接缝间隙以减小励磁电流，叠片式铁心一般采用交错式叠装，使相邻的接缝错开，如图 1-3 所示。铁心柱的截面一般作成阶梯形，以充分利用绕组内圆空间。

容量较大的变压器，铁心中常设有油道，以改善铁心内部的散热条件。

二、绕组

绕组是变压器传递交流电能的电路部分，常用包有绝缘材料的铜线绕制而成。为了使绕组具有良好的机械性能，其外形一般

置,如图1-5所示。为减小绝缘距离,通常低压绕组靠近铁轭。交叠式绕组机械强度好,引出线布置方便,多用于低电压大电流的电焊、电炉变压器及壳式变压器中。

三、绝缘套管

变压器的引出线从油箱内部引到箱外时必须经过绝缘套管,使带电的引线与接地的油箱绝缘。为了增大外表面放电距离,套管外形成多级伞形裙边。电压愈高,级数愈多。绝缘套管一般是瓷质的,其结构取决于电压等级。1kV以下采用实心瓷套管;10~35kV采用空心充气或充油式套管;110kV及以上采用电容式套管。

四、油箱及其他附件

油浸式变压器的器身浸在充满变压器油的油箱中,变压器油既是绝缘介质,又是冷却介质。它通过受热后的对流,将铁心和绕组中热量带到箱壁及冷却装置,再散发到周围空气中。

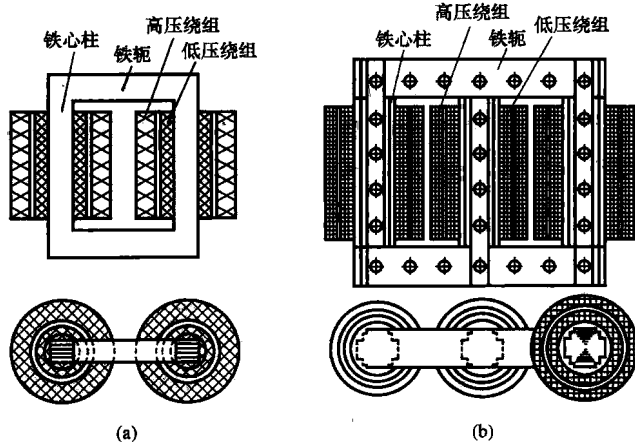


图1-4 同心式变压器绕组和铁心的装配示意图

(a) 单相; (b) 三相

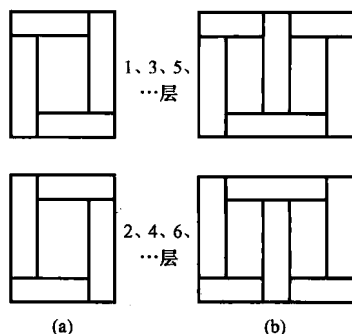


图1-3 叠片式铁心采用

交错式叠装

(a) 单相; (b) 三相

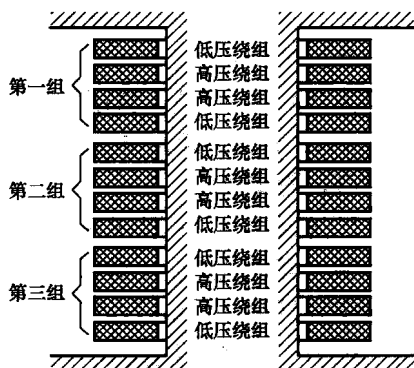


图1-5 交叠式绕组

变压器的油箱一般做成椭圆形,油箱有较高的机械强度,而且需油量较少。油箱用钢板焊成。容量很小的变压器采用平板式油箱;中、小型变压器为增加散热表面采用管式油箱;大容量变压器采用散热器式油箱。

在油箱盖上安装有储油柜(亦称膨胀器或油枕),储油柜通过管道与油箱接通,使变压器油面的升降限制在储油柜中。

在储油柜与油箱的连接管道中装有气体继电器。当变压器内部发生故障产生气体或油箱漏油使油面下降过多时,它可以发出报警信号或自动切断变压器电源。

在油箱的顶盖上装有安全气道,它是一个长的钢管,下面与油箱相通,上部出口处盖以玻璃或酚醛纸板。当变压器内部发生严重故障而产生大量气体时,油箱内压力迅速增大,油流和气体将冲破气道上端的玻璃板向外喷出,以免油箱受到强大压力而爆裂。最近生产的变压器已采用压力释放阀代替安全气道。当变压器内部发生故障,压力升高时,压力释放阀动