



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 电机学

主 编 吕宗枢  
副主编 张爱军 王 森



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 电机学

D i a n j i x u e

主 编 吕宗枢  
副主编 张爱军 王 森



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

全书分4篇共17章,主要介绍电气工程领域常用的变压器、异步电机、同步电机和直流电机的基本工作原理与主要结构、基本理论知识与基本性能、主要运行特性与应用等。

本书主要面向普通高等学校应用型本科教育,可作为电气工程及其自动化、农业电气化等电气类专业电机学课程的教材。也可供有关电气工程技术人员作为参考用书。

本教材有配套的授课PPT电子教案和思考题、习题、自测题的详细解答(电子版),可供读者无偿使用。主编的电子邮箱:lxzhongshu@126.com

## 图书在版编目(CIP)数据

电机学 / 吕宗枢主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2014.3

ISBN 978 - 7 - 04 - 038993 - 7

I. ①电… II. ①吕… III. ①电机学 - 教材 IV.

①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第289090号

策划编辑 王勇莉      责任编辑 王勇莉      封面设计 赵 阳      版式设计 王 莹  
插图绘制 邓 超      责任校对 刘 莉      责任印制 田 甜

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	北京铭传印刷有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
开 本	787mm×1092mm 1/16		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 张	20.75	版 次	2014年3月第1版
字 数	460千字	印 次	2014年3月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	35.20元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 38993-00

# 前 言

本书旨在满足普通高等学校应用型本科教育电气类专业的教学要求。本着为培养应用型人才提供一套精品教材的目的，编写时注重体现以下特点：

1. 教材内容选取注重实用性，注重理论联系实际，强调理论为实践服务。力求使学生“明基本概念、懂基本原理、强实际应用”。

2. 每章开头给出本章的“基本内容”和“基本要求”，以增强学生对知识的探索意识；每章结尾给出本章“小结”，对本章内容进行全面、系统的总结，包括基本概念、主要公式、重要结论等，为学生进行复习总结提供了极大方便。

3. 每节内容以提出问题为开始，以讨论问题为中心，以概括总结为结束。这种“提问 - 讨论 - 总结”三段式讲述方法，有利于启发式教学。

4. 内容阐述采用模块化，即每节内容分若干个知识单元加以叙述，每个单元的标题反映了内容的核心或结论，使知识结构层次更加分明，便于学生抓住知识点，形成知识链。

5. 内容精练、语言简洁、图表并用、通俗易懂、便于自学。

6. 每章末附有针对本章知识点而精选出的“思考题和习题”，可对学生进行针对性的训练，对学生掌握本章内容起到巩固、提高的作用。

7. 每章末的“本章自测题”是一套考试试卷。它覆盖了本章的主要知识点和重要内容。学生通过各章自测题的训练，对深入理解和掌握教材内容以及对考试都会有极大的帮助。如将各章自测题集中起来，便构成了本教材的考试试题库，为教师组成考试试卷提供了极大方便。

8. 本教材中符号和插图采用国家新标准。

9. 为了便于教师教学和学生自学，本教材有配套的授课 PPT 电子教案和思考题、习题、自测题的详细解答（电子版），可供读者无偿使用，需要者可与出版社或主编联系索取。

本书讲授学时约为 80 学时，书中带 \* 部分为选学内容。建议电力系统相关专业学习全部内容，其他专业可选学带 \* 部分。

全书分 4 篇共 17 章，其中绪论、第 1 章 ~ 第 6 章由沈阳工程学院吕宗枢教授编写，第 11 章 ~ 第 17 章由张爱军副教授编写，第 7 章 ~ 第 10 章由王森老师编写。全书由吕宗枢教授统稿并担任主编，张爱军、王森两位老师担任副主编。

本书由哈尔滨理工大学戈宝军教授主审，提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

主编的电子邮箱：Lvzhongshu@126.com。

编者

2013 年 5 月

# 目 录

绪论	1	磁特性	2
0.1 电机及电机学概述	1	0.3 电机理论中常用的基本电磁定律	4
0.2 电机中所用的材料和铁磁材料的		小结	7

## 第 1 篇 变 压 器

第 1 章 变压器的基本工作原理和结构	11	* 3.3 绕组联结组别和磁路结构对相电动势波形的影响	55
1.1 变压器的基本工作原理和分类	11	小结	58
1.2 变压器的基本结构	13	思考题与习题	60
1.3 变压器的型号和额定值	18	本章自测题	61
小结	20	第 4 章 变压器的运行	64
思考题与习题	21	4.1 变压器的运行特性	64
本章自测题	21	4.2 变压器的并联运行	68
第 2 章 变压器的基本理论	23	* 4.3 变压器空载合闸电流	74
2.1 单相变压器的空载运行	23	* 4.4 变压器的突然短路	75
2.2 单相变压器的负载运行	29	小结	77
2.3 变压器的参数测定	36	思考题与习题	80
2.4 标么值及其应用	40	本章自测题	81
小结	42	* 第 5 章 三相变压器的不对称运行	84
思考题与习题	44	5.1 对称分量法	84
本章自测题	45	5.2 三相变压器的各序等效电路及参数	86
第 3 章 三相变压器	48	5.3 Y/yn 三相变压器带单相负载运行	89
3.1 三相变压器的磁路结构	48	小结	93
3.2 三相变压器的联结组别	50	思考题与习题	95

本章自测题 .....	95	* 6.3 分裂变压器 .....	105
第 6 章 特殊变压器 .....	98	6.4 互感器 .....	109
* 6.1 三绕组变压器 .....	98	小结 .....	111
6.2 自耦变压器 .....	102	思考题与习题 .....	114
		本章自测题 .....	114

## 第 2 篇 异步电机

第 7 章 三相交流绕组、感应电动势及磁动势 .....	119	9.2 三相异步电动机的负载运行 .....	160
7.1 三相交流绕组 .....	119	9.3 三相异步电动机的折算、等效电路和相量图 .....	165
7.2 交流绕组的感应电动势 .....	126	9.4 三相异步电动机的功率和转矩平衡方程式 .....	170
7.3 交流绕组产生的磁动势 .....	132	9.5 三相异步电动机的电磁转矩 .....	174
小结 .....	140	9.6 三相异步电动机的参数测定 .....	178
思考题与习题 .....	141	小结 .....	181
本章自测题 .....	142	思考题与习题 .....	184
第 8 章 三相异步电动机的基本工作原理和结构 .....	145	本章自测题 .....	185
8.1 三相异步电动机的基本结构 .....	145	第 10 章 三相异步电动机的基本性能 .....	188
8.2 三相异步电动机的基本工作原理 .....	148	10.1 三相异步电动机的性能指标与工作特性 .....	188
8.3 三相异步电动机的铭牌和主要系列 .....	151	10.2 三相异步电动机的起动 .....	190
小结 .....	154	10.3 三相异步电动机的调速 .....	195
思考题与习题 .....	155	* 10.4 三相异步电动机在不对称电压下运行及单相异步电动机 .....	201
本章自测题 .....	155	小结 .....	206
第 9 章 三相异步电动机的基本理论 .....	157	思考题与习题 .....	207
9.1 三相异步电动机的空载运行 .....	157	本章自测题 .....	208

## 第 3 篇 同步电机

第 11 章 同步发电机的基本工作原理和结构 .....	213	11.1 同步发电机的工作原理、分类与额定值 .....	213
------------------------------	-----	------------------------------	-----

11.2 同步发电机的基本结构 .....	216	小结 .....	261
*11.3 同步发电机的励磁系统 .....	219	思考题与习题 .....	263
小结 .....	221	本章自测题 .....	264
思考题与习题 .....	222		
本章自测题 .....	223		
<b>第 12 章 同步发电机的基本理论 .....</b>	<b>225</b>	<b>* 第 14 章 同步发电机的异常运行和</b>	<b>突然短路 .....</b>
12.1 同步发电机的空载运行 .....	225	14.1 同步发电机的不对称运行 .....	267
12.2 同步发电机的电枢反应 .....	226	14.2 同步发电机的失磁运行 .....	272
12.3 隐极同步发电机的电动势方程式		14.3 同步发电机的振荡 .....	274
和相量图 .....	231	14.4 同步发电机的三相突然	
12.4 凸极同步发电机的电动势方程式和		短路 .....	276
相量图 .....	234	小结 .....	280
12.5 同步发电机的运行特性 .....	237	思考题与习题 .....	282
小结 .....	240	本章自测题 .....	282
思考题与习题 .....	243		
本章自测题 .....	244	<b>第 15 章 同步电动机的基本理论 .....</b>	<b>284</b>
<b>第 13 章 同步发电机的并联运行 .....</b>	<b>246</b>	15.1 同步电动机的工作原理 .....	284
13.1 同步发电机的并联条件与方法 .....	246	15.2 同步电动机的功角特性与磁阻	
13.2 同步发电机的功角特性 .....	250	电动机 .....	287
13.3 同步发电机有功功率的调节和		15.3 同步电动机的起动 .....	288
静态稳定 .....	253	15.4 同步调相机 .....	289
13.4 同步发电机无功功率的调节和 V 形		小结 .....	290
曲线 .....	257	思考题与习题 .....	291
		本章自测题 .....	291

## 第 4 篇 直流电机

<b>第 16 章 直流电机的基本工作原理和</b>		思考题与习题 .....	303
<b>结构 .....</b>	<b>295</b>	本章自测题 .....	304
16.1 直流电机的基本工作原理 .....	295	<b>第 17 章 直流电机的基本理论 .....</b>	<b>306</b>
16.2 直流电机的基本结构 .....	298	17.1 直流电机的基本方程式 .....	306
16.3 直流电机的励磁方式和额定值 .....	301	17.2 直流发电机的运行特性 .....	310
小结 .....	303		

17.3 直流电动机的转速特性与机械特性 .....	312	小结 .....	317
17.4 直流电动机的起动、调速和反转 .....	314	思考题与习题 .....	319
		本章自测题 .....	320
参考文献 .....			323



# 绪论

## 内容

简要介绍电机及电机学的有关概念,电机中所用的导电材料和导磁材料,复习铁磁材料的磁特性,电机理论中常用的基本电磁定律。

## 要求

- 了解电机的功能与用途、电机的分类、本课程的性质与内容。
- 掌握铁磁材料的磁化特性、导磁特性、饱和特性以及产生铁心损耗的原因。
- 掌握电磁感应定律、电磁力定律、电路和磁路的基本定律。
- 理解电量与磁量、电路定律与磁路定律的对应关系。

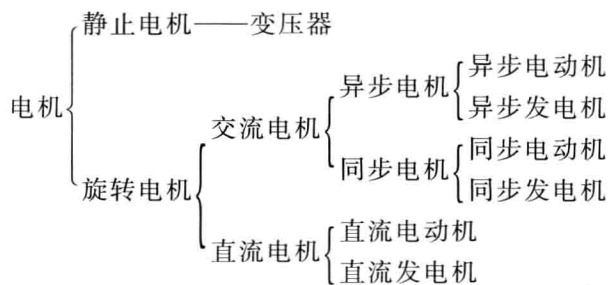
## 0.1 电机及电机学概述

电能在现代化工农业生产、交通运输、科学技术、信息传输、国防建设以及日常生活等各个领域获得了极为广泛的应用。而电机是生产、传输、分配及应用电能的主要设备。

电机是利用电磁感应原理工作的机械,它应用广泛、种类繁多、性能各异,分类方法也很多。

按功能分,可将电机分为发电机、电动机和变压器。发电机的功能是将机械能转换为电能;电动机的功能是将电能转换为机械能;变压器的主要功能是改变交流电压的大小,即将一种电压等级的交流电能转换为同频率另一种电压等级的交流电能。

除变压器为静止电机外,其他电机均为旋转电机。根据电源性质的不同,旋转电机又分为交流电机和直流电机两大类。交流电机又分为同步电机和异步电机。同步电机主要作发电机运行,异步电机主要作电动机使用。电机分类可归纳如下:



电机在电力系统中占有相当重要的地位,电能的生产、传输和使用都离不开电机。同步发电机是发电厂生产电能的主要设备;变压器是传输电能和分配电能的关键设备;异步电动机和直流电动机是消耗电能并驱动各种生产机械工作的主要动力设备。

电机在电力系统中的作用可用图 0.1.1 示意。在发电厂,发电机发出的电压一般为 6.3 ~ 27 kV,为了减少远距离输电线路中的能量损失,应采用高压输电,输电电压为 110 kV、220 kV、500 kV 或更高,把发电机发出的电压升高到输电电压需要由升压变压器来完成。而在用电区,各种用电设备,如电动机、电炉、电灯等所需要的供电电压为低电压,如 380V、220V 等,这就需要通过降压变压器把输电电压降低到各种用电设备所需要的低电压。

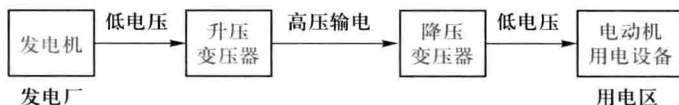


图 0.1.1 电机在电力系统中的作用示意图

电机学是电气类专业的一门专业基础课,是一门既有基础性又有专业性的课程。本课程以电磁理论为根据,重点分析变压器、异步电动机、同步发电机和直流电机的基本结构、工作原理、运行性能和试验方法,为学习后续专业课程和今后的工作打下基础。对于电气类专业的学生,全面了解电机的结构特点、深刻理解和掌握电机的原理和性能、重点学会分析电机运行中的问题,是非常必要的。

## 0.2 电机中所用的材料和铁磁材料的磁特性

### 一、电机中所用的材料

电机是根据电磁感应原理进行工作的,电机内部必须有电路和磁路两部分,因此制造电机的材料主要是导电材料和导磁材料。此外,还需要绝缘材料和结构材料。

导电材料,用来构成电路。常采用紫铜线或铝线,它的导电性能好,电阻损耗小。将导线制成电机绕组,电流在其中流通,就构成了电机内部的电路系统。

导磁材料,也称为铁磁材料,用来构成磁路。电机中的磁通多是交变的,会在铁心中产生涡流损耗和磁滞损耗(统称为铁心损耗)。为了减小铁心损耗,导磁材料都选用含有少量硅成分的、具有高电阻率、导磁性能好的薄片钢,又称电工钢片或硅钢片。电机的铁心常采用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚的两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成。

绝缘材料,用此把各导电体之间、导电体与铁磁体之间绝缘开来。绝缘材料按其耐热程度分为 A、E、B、F、H 五种等级,不同等级的绝缘材料,其最高允许温度如表 0.2.1 所示。目前,我国生产的变压器和电机多采用 A 级、E 级或 B 级绝缘,发展趋势是采用 F 级和 H 级绝缘。

表 0.2.1 绝缘材料的等级与最高允许温度

绝缘等级	A	E	B	F	H
最高允许温度/°C	105	120	130	155	180

结构材料,是指制造电机所必需的其他金属材料,用钢铁或铝合金等制成。

## 二、铁磁材料的磁特性

处于磁场中的铁磁材料会表现出非铁磁材料所不具有的一些特性,如磁化特性、高导磁性、饱和特性、产生磁滞损耗和涡流损耗等特性。

### 1. 磁化特性

当把铁磁材料放入磁场中时,铁磁材料就会被磁场所磁化而呈现出很强的磁性,从而使磁场显著增强。铁磁材料之所以能被磁化,是因为在铁磁物质内部存在着许多很小的天然磁化区,相当于一块块小磁极,称为磁畴。在铁磁物质未放入磁场时,这些小磁极杂乱无章地排列着,每个小磁极的轴线方向不一致,磁效应互相抵消,故对外不呈现磁性,如图 0.2.1(a)所示。当铁磁物质放入磁场后,在外磁场的作用下,每个小磁极的方向渐趋一致,形成一个附加磁场,如图 0.2.1(b)所示,这个附加磁场与外磁场方向一致并叠加,从而使磁场大为增强。铁磁材料的这一特性称为磁化特性。

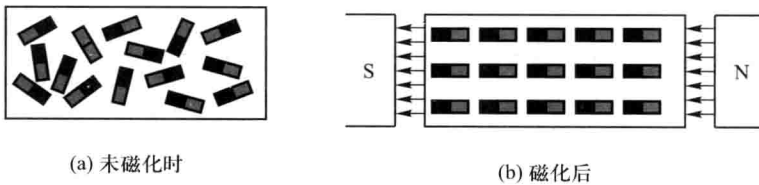


图 0.2.1 磁畴

### 2. 高导磁性

由于铁磁材料具有磁化特性,使得它的导磁性能特别好,其导磁系数(磁导率) $\mu_{Fe}$ 非常高。实验表明,所有非铁磁材料(如铜、铝和木材等)的磁导率都接近于真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ,而铁磁材料的磁导率 $\mu_{Fe}$ 比 $\mu_0$ 大成百上千倍。对于电机中常用的铁磁材料, $\mu_{Fe} = (2000 \sim 6000)\mu_0$ 。

### 3. 饱和特性

磁感应强度(磁通密度) $B$ 与磁场强度 $H$ 之间的关系为 $B = \mu H$ 或 $\mu = B/H$ 。在空气中,磁导率 $\mu_0 = \text{常数}$ , $B$ 与 $H$ 成正比关系,即 $B = \mu_0 H$ 是一条直线,如图 0.2.2 中虚线所示。铁磁材料则不同,磁导率 $\mu_{Fe} \neq \text{常数}$ , $B = \mu_{Fe} H$ 不是线性关系, $B = f(H)$ 为一条曲线,如图 0.2.2 所示,这条曲线称为铁磁材料的磁化曲线,其形状与铁磁材料的磁化过程有关,可分为四段,在 $oa$ 段,外磁场 $H$ 较弱,只有

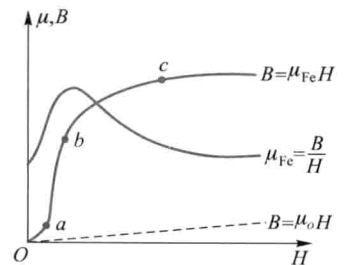


图 0.2.2 铁磁材料的磁化曲线

少量磁畴发生偏转,  $B$  增加缓慢, 此时磁导率  $\mu_{Fe}$  较小; 在  $ab$  段,  $H$  较强, 且不断增加, 大部分磁畴发生偏转,  $B$  迅速增加,  $\mu_{Fe}$  迅速增大至最大值; 在  $bc$  段, 虽然  $H$  继续增加, 但只有少量剩余的磁畴偏转,  $B$  增加缓慢下来, 开始出现所谓“磁饱和”现象, 此时  $\mu_{Fe}$  开始变小; 至  $c$  点以后, 几乎所有磁畴都转到与外磁场方向一致了,  $H$  再增加,  $B$  的增加也有限, 出现了“深度饱和”, 此时  $\mu_{Fe}$  趋近于  $\mu_0$ ,  $B$  和  $H$  的关系类似于真空中的情况。

#### 4. 磁滞损耗和涡流损耗

如果铁磁材料处在交变的磁场中, 则将产生反复磁化过程。这时反复改变方向的磁畴之间不停地相互摩擦, 就会消耗能量而引起损耗, 这种损耗称为磁滞损耗  $p_h$ 。磁滞损耗  $p_h$  与磁通的交变频率  $f$  及磁通密度的幅值  $B_m$  的关系为

$$p_h \propto f \cdot B_m^2 \quad (0.2.1)$$

当铁心中通过交变的磁通时, 根据电磁感应定律, 铁心内将感应电动势并产生电流, 这些电流在铁心内围绕磁通呈旋涡状流动, 故称为涡流, 如图 0.2.3 所示。涡流在铁心中引起的损耗称为涡流损耗  $p_e$ 。涡流损耗  $p_e$  与磁通的交变频率  $f$ 、磁通密度幅值  $B_m$ 、硅钢片的电阻  $R_e$  及硅钢片厚度  $d$  有关, 其关系为

$$p_e \propto f^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 / R_e \quad (0.2.2)$$

由此可知, 电机之所以采用电阻率高且很薄的硅钢片, 就是为了减少铁心中的涡流损耗。

通常把磁滞损耗和涡流损耗合在一起称为铁心损耗, 用  $p_{Fe}$  表示。当硅钢片厚度及材料一定时, 铁心损耗与磁通的交变频率及磁通密度幅值的关系为

$$p_{Fe} \propto f^{1.3} \cdot B_m^2 \quad (0.2.3)$$

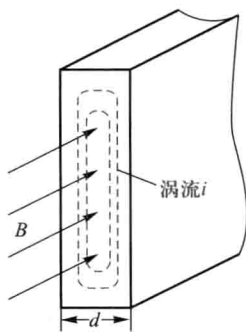


图 0.2.3 一片硅钢片中的涡流

### 0.3 电机理论中常用的基本电磁定律

电机的工作原理是以电磁感应定律、电磁力定律、电路和磁路基本定律为理论基础。电磁感应定律和电磁力定律是描述电与磁之间关系的两个定律, 它们把电与磁联系起来。电路和磁路基本定律是分别描述电路和磁路本身各物理量之间关系的定律。熟练地掌握这些基本电磁定律, 是学好电机学这门课程的基础。

#### 一、电磁感应定律

电磁感应定律有两种表达形式, 分别为切割电动势和变压器电动势。

##### 1. 切割电动势

当导体做切割磁感线(即磁通)运动时, 导体中将感应电动势, 这种电动势称为切割(或运动)电动势。当磁感应强度  $B$ 、导体长度  $l$  和导体切割磁感线的线速度  $v$  三个量的方向互相垂直

时,其感应电动势表达式为

$$e = Blv \quad (0.3.1)$$

感应电动势的方向可由“右手定则”确定,如图 0.3.1 所示。即把右手掌伸开,大拇指与其他四指成  $90^\circ$  角,让磁感线指向手心,大拇指指向导体运动方向,其他四指的指向就是导体中感应电动势的方向。

## 2. 变压器电动势

当穿过线圈的磁通交变时,将在线圈中感应电动势,这种电动势称为变压器电动势。变压器电动势的方向由楞次定律决定,楞次定律指出:感应电动势及其所产生的电流总是企图阻碍线圈磁通的变化。若感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系时,如图 0.3.2 所示,则感应电动势的表达式为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0.3.2)$$

式中,  $\Phi$  为穿过线圈的磁通;  $N$  为线圈的匝数; “-”号是楞次定律的体现。上式表明,变压器电动势的大小与线圈匝数和磁通的变化率成正比。

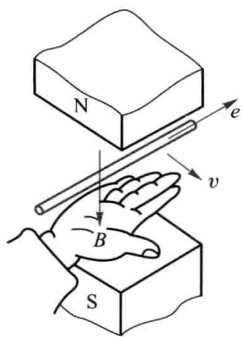


图 0.3.1 右手定则

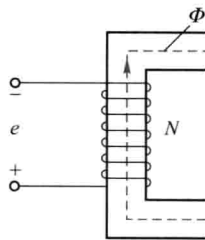


图 0.3.2 变压器电动势

## 二、电磁力定律

载流导体在磁场中会受到电磁力的作用,当磁感线和导体方向互相垂直时,载流导体所受到的电磁力为

$$f = BIl \quad (0.3.3)$$

式中,  $B$  为载流导体所在处的磁感应强度;  $l$  为载流导体在磁场中的有效长度;  $I$  为载流导体中的电流。

电磁力的方向由“左手定则”确定,如图 0.3.3 所示。即把左手掌伸开,大拇指与其他四指成  $90^\circ$  角,让磁感线指向手心,其他四指指向导体中电流的方向,大拇指的指向就是导体受力的方向。

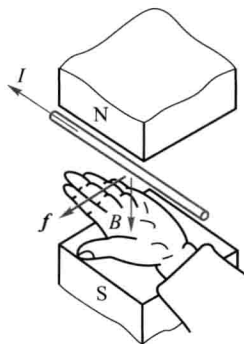
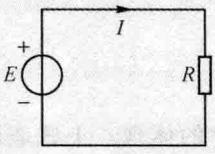
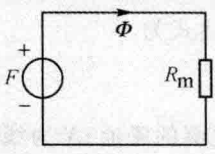


图 0.3.3 左手定则

### 三、电量与磁量、电路定律与磁路定律

电量与电路定律,往往容易被理解和掌握,而磁量与磁路定律显得不易被理解和掌握。事实上,磁路与电路有许多相似之处,二者的各物理量之间、各定律之间都有着十分类似的对应关系。采用对比的方法进行学习,对理解和掌握磁路的有关知识十分有益。电量与磁量、电路定律与磁路定律的对应关系可归纳如表 0.3.1 所示。

表 0.3.1 电量与磁量、电路定律与磁路定律的对比

电 路		磁 路	
 <p>电路图</p>		 <p>等效磁路图</p>	
电量、电路定律	说 明	磁量、磁路定律	说 明
电动势 $E(\text{V})$	产生电流的源。如发电机,电池等	磁动势 $F = IN(\text{A})$	产生磁通的源,即载流线圈。 $I$ 为电流, $N$ 为线圈匝数
电流 $I(\text{A})$	由电动势产生,在导体中流通	磁通 $\Phi(\text{Wb})$	由磁动势产生,在磁路中流通
电流密度 $J = I/A(\text{A}/\text{m}^2)$	单位导体截面积中流过的电流	磁通密度(磁感应强度) $B = \Phi/A(\text{T})$	单位磁路截面积中流过的磁通
电场强度 $E(\text{V}/\text{m})$	表示电场的强弱	磁场强度 $H(\text{A}/\text{m})$	表示磁场的强弱
电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{m})$	反映导体对电流阻力大小的系数	磁阻率 $\rho_m(\text{m}/\text{H})$	反映导体对磁通阻力大小的系数
电导率 $\gamma = 1/\rho(\text{S}/\text{m})$	电阻率的倒数	磁导率 $\mu = 1/\rho_m(\text{H}/\text{m})$	磁阻率的倒数
电阻 $R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\gamma A}(\Omega)$	反映电路对电流阻力的大小	磁阻 $R_m = \rho_m \frac{l}{A} = \frac{l}{\mu A}(\text{H}^{-1})$	反映磁路对磁通阻力的大小
电导 $G = 1/R(\text{S})$	电阻的倒数	磁导 $\Lambda_m = 1/R_m(\text{H})$	磁阻的倒数
电压降 $U(\text{V})$	电流在电阻上产生的压降。电压降用 $U$ 表示,而电动势用 $E$ 表示	磁压降 $F = HI(\text{A})$	磁通在磁阻上产生的压降。磁压降等于磁场强度与磁路长度的乘积。磁压降与磁动势都用 $F$ 表示

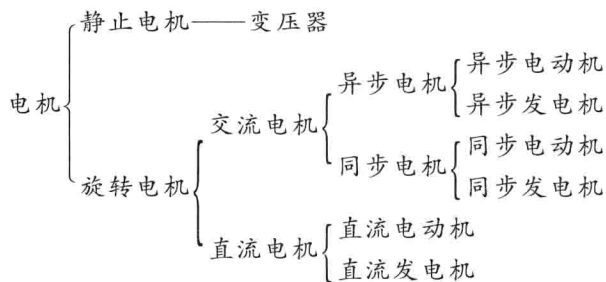
续表

电量、电路定律	说 明	磁量、磁路定律	说 明
电路欧姆定律 $U = IR$	电阻两端电压等于其电流乘以电阻	磁路欧姆定律 $F = \Phi R_m$	一段磁路上的磁压降等于其磁通乘以该段磁路的磁阻
电路基尔霍夫第一定律 $\sum I_i = \sum I_o$	在一节点处,流入的电流等于流出的电流	磁路基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi_i = \sum \Phi_o$	在一闭合面上,流入的磁通等于流出的磁通
电路基尔霍夫第二定律 $\sum E = \sum U$	闭合电路中的电动势等于电压降	磁路基尔霍夫第二定律 $\sum NI = \sum HI$	闭合磁路中的磁动势等于磁压降

电磁感应定律:①切割电动势  $e = Blv$ ;②变压器电动势  $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ ,电磁力定律:  $f = Bli$

## 小 结

1. 电机是利用电磁感应原理工作的机械,电机分类如下:



2. 电机学是强电类专业的一门专业基础课,主要讲授变压器、异步电动机、同步发电机、直流电机的基本结构、工作原理、运行特性和试验方法。

3. 电机使用的材料主要是导电材料和导磁材料。导电材料常采用紫铜线或铝线;导磁材料常采用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚的硅钢片;另外还需要绝缘材料和结构材料。

4. 铁磁材料具有良好的导磁特性,磁化曲线是一条具有饱和特性的非线性曲线,铁磁材料在交变的磁场中存在磁滞损耗和涡流损耗,统称为铁心损耗。铁心损耗与磁场交变频率和磁通密度的关系为  $p_{Fe} \propto f^{1.3} \cdot B_m^2$ 。

5. 电磁感应定律有两种表达形式,分别为切割电动势和变压器电动势。切割电动势公式为  $e = Blv$ ;变压器电动势公式为  $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 。这两种表达形式都定量描述了“磁生电”现象。

6. 电磁力定律定量地描述了载流导体在磁场中受力的大小,其公式为  $f = BIl$ 。

7. 电量与磁量、电路定律与磁路定律之间有着可比的对应关系,采用对比的方法进行学习,对理解和掌握磁路的有关知识十分有益。





# 第 1 篇

## 变 压 器

变压器是一种静止的电机。它通过线圈间的电磁感应作用,可以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。

变压器是电力系统中重要的电气设备。要把发电厂发出的电能进行经济地传输、合理地分配及安全地使用,就要使用变压器。发电厂发出的电压受发电机绝缘条件的限制不可能很高(一般为  $6.3 \sim 27 \text{ kV}$ ),要将发出的大功率电能直接输送到很远的用电区域,几乎不可能。这是因为输送一定功率的电能时,输电线路的电压越低,线路中的电流和相应的线路损耗就越大,线路用铜量也剧增。为此必须采用高电压(小电流)输电,即通过升压变压器把发电厂发出的电压升高到输电电压,例如  $110 \text{ kV}$ 、 $220 \text{ kV}$  或  $500 \text{ kV}$  等,这样才能比较经济地输送电能。一般来说,输电距离越远,输送功率越大,要求的输电电压越高。

对于用户来说,由于用电设备绝缘与安全的限制,需把高压输电电压通过降压变压器和配电变压器降低到用户所需的电压等级。通常大型动力设备采用  $6 \text{ kV}$  或  $10 \text{ kV}$ ,小型动力设备和照明则为  $380 \text{ V}$  或  $220 \text{ V}$ 。

发电厂发出的电能输送到用户的整个过程中,通常需要多次升压及多次降压,因此变压器的安装容量远大于发电机总装机容量,通常可达  $5 \sim 8$  倍。可见,变压器对电力系统有着极其重要的意义。用于电力系统升、降电压的变压器称为电力变压器。

在电力拖动系统或自动控制系统中,变压器作为能量传递或信号传递的元件,也应用得十分广泛。在其他各部门,同样也广泛使用各种类型的变压器,以提供特种电源或满足特殊的需要,如冶炼用的电炉变压器,焊接用的电焊变压器,船用变压器以及试验用的调压变压器等。

本篇主要研究双绕组电力变压器的基本结构、工作原理和运行特性,并对三绕组变压器、自耦变压器、分裂变压器和互感器等特殊变压器进行简要介绍。