



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



# 电机学

吕宗枢 主编



高等教育出版社  
Higher Education Press

TM3/95

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电 机 学

吕宗枢 主编



高等教育出版社

## 内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书分4篇共17章，主要内容有变压器、三相异步电动机、同步电机和直流电机等。

本书面向应用性、技能型各类院校，可作为发电厂及电力系统、电厂设备运行与维护、电力系统继电保护与自动化、高压输配电线路施工运行与维护、电机与电器、电气自动化技术、机电一体化技术、农业电气化技术等专业“电机学”课程的教材，也可供有关工程技术人员作为参考用书。

## 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, 2008. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 022569 - 3

I. 电… II. 吕… III. 电机学 - 高等学校 - 教材  
IV. TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第179184号

策划编辑 刘洋      责任编辑 王莉莉      封面设计 李卫青      责任绘图 尹莉  
版式设计 陆瑞红      责任校对 杨雪莲      责任印制 朱学忠

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010 - 58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京泽明印刷有限责任公司		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787 × 1092 1/16	版 次	2008年1月第1版
印 张	19.25	印 次	2008年1月第1次印刷
字 数	460 000	定 价	24.20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 22569 - 00

# 前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。主要内容有变压器、三相异步电动机、同步电机和直流电机等。

本着为培养应用型人才提供一套精品教材的目的，本书编写时注重体现以下特点：

1. 注重理论联系实际，强调理论为实践服务。知识内容以够用为度，以应用为目的。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”；每章结尾给出本章“小结”，对本章内容进行全面、系统地总结，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。

4. 内容阐述采用模块化结构，即每节内容分若干个问题单元加以叙述，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“思考题与习题”，供学生课后练习使用，对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”是一套模拟考试试卷。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. 本书中符号和插图采用国家新标准。

全书讲授学时为75学时，其中必学内容60学时，选学内容(书中带\*部分)15学时。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。学时分配(参考)见教材后面的附录。

全书分4篇共17章，其中第11章~第15章由沈阳工程学院张爱军编写，其余部分由沈阳工程学院吕宗枢编写。全书由吕宗枢任主编并负责统稿。

本书由山西大学工程学院王广惠和北京工商大学郭兴朴主审。主审审阅全书并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。

编 者

2007年7月

# 目 录

绪论 .....	1	0.3 电机理论中常用的基本 电磁定律 .....	3
0.1 电机及电机学概念 .....	1	小结 .....	5
0.2 电机中所用的材料和铁磁材料 的磁特性 .....	2		

## 第1篇 变 压 器

第1章 变压器的基本工作原理 和结构 .....	8	本章自测题 .....	54
1.1 变压器的基本工作原理和分类 .....	8	第4章 变压器的运行 .....	57
1.2 变压器的基本结构 .....	9	4.1 变压器的运行特性 .....	57
1.3 变压器的型号和额定值 .....	14	4.2 变压器的并联运行 .....	61
小结 .....	16	* 4.3 变压器空载合闸电流 .....	66
思考题与习题 .....	17	* 4.4 变压器的突然短路 .....	68
本章自测题 .....	17	小结 .....	69
		思考题与习题 .....	72
第2章 变压器的基本理论 .....	19	本章自测题 .....	73
2.1 单相变压器的空载运行 .....	19	* 第5章 三相变压器的不对称 运行 .....	76
2.2 单相变压器的负载运行 .....	24	5.1 对称分量法 .....	76
2.3 变压器的参数测定 .....	31	5.2 三相变压器的各序等效电路 及参数 .....	77
2.4 标么值及其应用 .....	34	5.3 Y, yn 三相变压器带单相 负载运行 .....	80
小结 .....	37	小结 .....	84
思考题与习题 .....	39	思考题与习题 .....	85
本章自测题 .....	40	本章自测题 .....	86
第3章 三相变压器 .....	42	第6章 特殊变压器 .....	88
3.1 三相变压器的磁路结构 .....	42	* 6.1 三绕组变压器 .....	88
3.2 三相变压器的联结组别 .....	43	6.2 自耦变压器 .....	92
* 3.3 绕组联结组别和磁路结构对 相电动势波形的影响 .....	48		
小结 .....	51		
思考题与习题 .....	53		

* 6.3 分裂变压器 .....	94	思考题与习题 .....	102
6.4 互感器 .....	98	本章自测题 .....	103
小结 .....	100		

## 第2篇 三相异步电动机

第7章 三相异步电动机的基本 工作原理和结构 .....	106	9.2 三相异步电动机的负载运行 ...	144
7.1 三相异步电动机的基本结构 ...	106	9.3 三相异步电动机的折算、等效 电路和相量图 .....	148
7.2 三相异步电动机的基本 工作原理 .....	109	9.4 三相异步电动机的功率和转矩 平衡方程式 .....	153
7.3 三相异步电动机的铭牌和 主要系列 .....	111	9.5 三相异步电动机的电磁转矩 ...	157
小结 .....	114	9.6 三相异步电动机的参数测定 ...	160
思考题与习题 .....	115	小结 .....	163
本章自测题 .....	115	思考题与习题 .....	166
		本章自测题 .....	167
第8章 三相交流绕组、感应电 动势及磁动势 .....	117	第10章 三相异步电动机的 基本性能 .....	170
8.1 三相交流绕组 .....	117	10.1 三相异步电动机的性能指标 与工作特性 .....	170
8.2 交流绕组的感应电动势 .....	123	10.2 三相异步电动机的起动 .....	171
8.3 交流绕组产生的磁动势 .....	128	10.3 三相异步电动机的调速 .....	177
小结 .....	136	* 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 ...	182
思考题与习题 .....	137	小结 .....	187
本章自测题 .....	138	思考题与习题 .....	188
第9章 三相异步电动机的基本 理论 .....	141	本章自测题 .....	189
9.1 三相异步电动机的空载运行 ...	141		

## 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 .....	192	小结 .....	200
11.1 同步发电机的工作原理、 分类与额定值 .....	192	思考题与习题 .....	200
11.2 同步发电机的基本结构 .....	195	本章自测题 .....	201
* 11.3 同步发电机的励磁系统 .....	197	第12章 同步发电机的基本理论 ...	203
		12.1 同步发电机的空载运行 .....	203

12.2	同步发电机的电枢反应 .....	204		
12.3	隐极同步发电机的电动势 方程式和相量图 .....	208		
12.4	凸极同步发电机的电动势 方程式和相量图 .....	211		
12.5	同步发电机的运行特性 .....	214		
	小结 .....	217		
	思考题与习题 .....	218		
	本章自测题 .....	219		
第 13 章 同步发电机的 并联运行 .....				
13.1	同步发电机的并联条件 与方法 .....	222		
13.2	同步发电机的功角特性 .....	226		
13.3	同步发电机有功功率的调节 和静态稳定 .....	229		
13.4	同步发电机无功功率的调节 和 V 形曲线 .....	232		
	小结 .....	236		
	思考题与习题 .....	238		
	本章自测题 .....	239		
			* 第 14 章 同步发电机的异常 运行和瞬态短路 .....	242
			14.1 同步发电机的不对称运行 .....	242
			14.2 同步发电机的失磁运行 .....	247
			14.3 同步发电机的振荡 .....	248
			14.4 同步发电机的三相突然短路 ..	250
			小结 .....	254
			思考题与习题 .....	255
			本章自测题 .....	256
			第 15 章 同步电动机和同步 调相机 .....	258
			15.1 同步电动机的工作原理 .....	258
			15.2 同步电动机的功角特性与 磁阻电动机 .....	261
			15.3 同步电动机的起动 .....	262
			15.4 同步调相机 .....	263
			小结 .....	264
			思考题与习题 .....	264
			本章自测题 .....	265
<b>第 4 篇 直 流 电 机</b>				
第 16 章 直流电机的基本工作 原理和结构 .....				
16.1	直流电机的基本工作原理 .....	268		
16.2	直流电机的基本结构 .....	271		
16.3	直流电机的励磁方式和 额定值 .....	274		
	小结 .....	275		
	思考题与习题 .....	276		
	本章自测题 .....	276		
第 17 章 直流电机的运行 .....				
	17.1 直流电机的基本方程式 .....	278		
	17.2 直流发电机的运行特性 .....	281		
	17.3 直流电动机的机械特性 .....	283		
	17.4 直流电动机的起动、调速 和反转 .....	285		
	小结 .....	288		
	思考题与习题 .....	290		
	本章自测题 .....	291		
附录 .....				
参考文献 .....				

# 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。

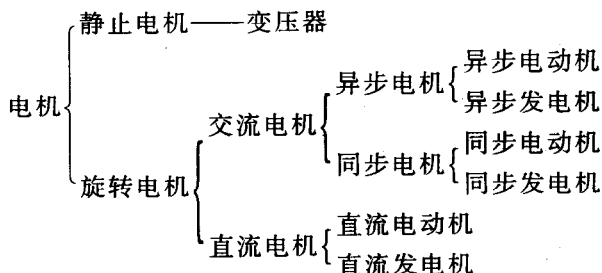
## 0.1 电机及电机学概述

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。所以，对于强电类专业的学生，深刻理解和掌握电机的原理和性能，全面了解电机的结构特点，重点学会分析电机运行中



的问题，是非常必要的。

电机学是强电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、同步电机、直流电机的基本结构、工作原理、运行特性和试验方法。为学习后续专业课程和今后的工作打下基础。

## 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，用此把各导体之间、导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/℃	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以前，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。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，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。

## 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 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}^2$ ,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,即 $B=f(H)$ 曲线称为磁化曲线。对于非铁磁材料, $\mu_0 = \text{常数}$ , $B = \mu_0 H$ 是一条直线,即磁感应强度 $B$ 与磁场强度 $H$ 成正比。铁磁材料则不同, $B$ 与 $H$ 不是线性关系,即 $B=f(H)$ 为一条曲线,如图0.2.1所示。这说明铁磁材料的磁导率 $\mu_{Fe}$ 不是常数。由 $\mu_{Fe} = B/H$ ,可得 $\mu_{Fe} = f(H)$ 曲线,如图0.2.1所示。由图可见,当 $H$ 增加到一定值时, $\mu_{Fe}$ 变小, $B$ 值增加缓慢,这一现象称为磁饱和。

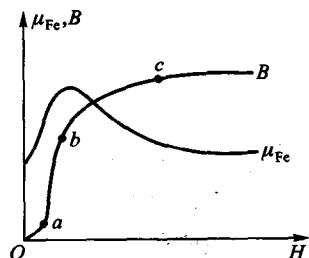


图 0.2.1 铁磁材料的磁化曲线

## 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。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

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

# 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  $v$  三量互相垂直时，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。

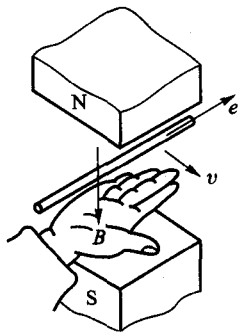


图 0.3.1 右手定则

### 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，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，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。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。

## 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

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

式中， $f$  为载流导体所受的电磁力； $B$  为载流导体所在处的磁感应强度； $l$  为载流导体处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 0.3.2 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。

## 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。

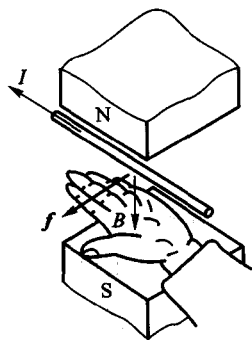


图 0.3.2 左手定则

表 0.3.1 电量与磁量、电路定律与磁路定律的对比

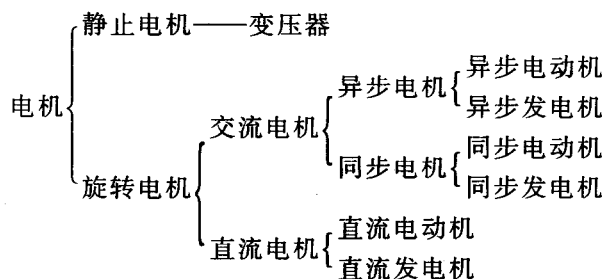
电 路		磁 路	
电量、电路定律	说 明	磁量、磁路定律	说 明
电动势 $E$	产生电流的源。如发电机, 电池等	磁动势 $F = NI$	产生磁通的源, 即载流线圈。 $I$ 为电流, $N$ 为匝数
电流 $I$	由电动势产生, 在导体中流通	磁通 $\Phi$	由磁动势产生, 在磁路中流通
电流密度 $J = I/A$	单位导体截面积中流过的电流	磁通密度 $B = \Phi/A$	单位磁路截面积中流过的磁通
电场强度 $E$	表示电场的强弱	磁场强度 $H$	表示磁场的强弱
电阻率 $\rho$	反映导体对电流阻力大小的系数	磁阻率 $\rho_m$	反映磁体对磁通阻力大小的系数
电导率 $\gamma = 1/\rho$	反映导体对电流传导能力的系数	磁导率 $\mu = 1/\rho_m$	反映磁体对磁通传导能力的系数
电阻 $R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\gamma A}$	反映电路对电流阻力的大小	磁阻 $R_m = \rho_m \frac{l}{A} = \frac{l}{\mu A}$	反映磁路对磁通阻力的大小
电导 $G = 1/R$	电阻的倒数	磁导 $\Lambda_m = 1/R_m$	磁阻的倒数
电压降 $U$	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 $F = HI$	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
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；导磁材料采用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚硅钢片；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 ~ 27 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 kV、220 kV 或 500 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 kV 或 10 kV，小型动力设备和照明则为 380 V 或 220 V。

发电厂发出的电能在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 ~ 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。

# 第1章 变压器的基本工作原理和结构

## 🔑 [内容]

本章首先讨论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各主要部件的作用，最后介绍变压器的铭牌。

## 🔧 [要求]

- 掌握变压器的基本工作原理，了解变压器的分类。
- 掌握变压器的基本结构和各结构部件的作用。
- 掌握变压器的额定值。

## 1.1 变压器的基本工作原理和分类

### 一、变压器的基本工作原理

变压器的基本工作原理可用最简单的单相双绕组变压器来说明，如图 1.1.1 所示。

变压器的主要部件是铁心和绕组，铁心既是变压器的磁路，又是固定绕组的部件。实际变压器的每个铁心柱上都套装有内、外两层相互绝缘的两个绕组，为了分析问题方便，将两个绕组分画在左右两个铁心柱上，其中接电源的绕组称为一次绕组（或原绕组），匝数为  $N_1$ ；接负载的绕组称为二次绕组（或副绕组），匝数为  $N_2$ 。

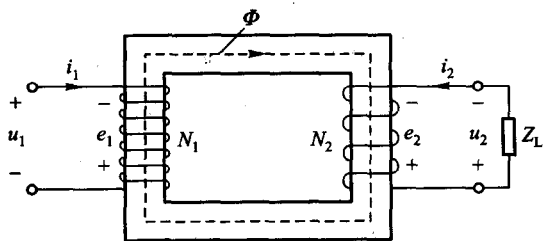


图 1.1.1 变压器工作原理示意图

当一次绕组接到电压为  $u_1$  的交流电源上时，绕组中便有交流电流  $i_1$  流过，因而在铁心中产生与  $u_1$  同频率的交变磁通  $\Phi$ 。交变磁通  $\Phi$  沿铁心闭合，同时交链一次、二次绕组。根据电磁感应原理，一次、二次绕组中将分别产生与  $u_1$  同频率的感应电动势  $e_1$  和  $e_2$ 。按图 1.1.1 中标出的各物理量正方向，可得  $e_1$  和  $e_2$  表达式为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1.1)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1.2)$$

可见，一次、二次绕组感应电动势的大小与各自绕组的匝数成正比。实际上，各绕组的端电压大小与其感应电动势大小近似相等，即  $U_1 \approx E_1$ ， $U_2 \approx E_2$ ，故

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.1.3)$$

显然，只要改变一次、二次绕组的匝数比，就能达到改变电压的目的。如果将负载  $Z_L$  接到二次绕组上，在电动势  $e_2$  作用下，负载将流过电流  $i_2$ ，这就实现了电能的传递。

可见，变压器是通过电磁感应作用，即一次、二次绕组的电磁耦合关系，实现了把一次侧的交流电能传递到二次侧；由于一次、二次绕组具有不同的匝数，实现了改变电压的目的。

## 二、变压器的分类

变压器的分类方法很多，通常可按用途、绕组数、相数、调压方式、冷却方式和容量大小等进行分类。

### 1. 按用途分类

电力变压器：用于输配电系统中，有升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器等。

特种变压器：用于特殊用途，如试验用变压器、仪用变压器（电流互感器、电压互感器）、电炉变压器、电焊变压器、整流变压器等。

### 2. 按绕组数分类

单绕组变压器：即自耦变压器，仅有一个绕组，全部绕组为高压绕组，通过抽头引出部分绕组作为低压绕组。

双绕组变压器：每相有两个相互绝缘的高、低压绕组。

三绕组变压器：每相有三个相互绝缘的高、中、低压绕组。

### 3. 按相数分类

按电源相数不同，变压器可分为单相变压器、三相变压器。

### 4. 按调压方式分类

变压器的调压方式分为无励磁调压（即断电进行调压）和有载调压（即带电进行调压）两种。

### 5. 按冷却方式分类

干式变压器：变压器的器身（绕组和铁心）借助空气直接冷却，冷却介质为空气。通常小型变压器都做成干式。

油浸式变压器：变压器的器身浸泡在变压器油中，冷却介质为变压器油。多数电力变压器都采用这种冷却方式。

充气式变压器：变压器的器身放在充满特种气体的密封箱体中，借助气体流动进行冷却，冷却介质为特种气体，如六氟化硫充气式变压器。

### 6. 按容量大小分类

小型变压器：容量在  $630 \text{ kV} \cdot \text{A}$  以下；中型变压器：容量在  $800 \sim 6300 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ；大型变压器：容量在  $8000 \sim 63000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ；特大型变压器：容量在  $90000 \text{ kV} \cdot \text{A}$  以上。

## 1.2 变压器的基本结构

变压器最主要的结构部件是铁心和绕组，二者构成的整体称为变压器的器身，变压器的功



能是通过器身实现的。变压器的结构大同小异，本节主要介绍电力系统中常用的油浸式变压器的结构。它由铁心、绕组、油箱和冷却装置、调压装置、绝缘套管及各种保护装置等构成。图 1.2.1 为油浸式电力变压器的结构示意图。

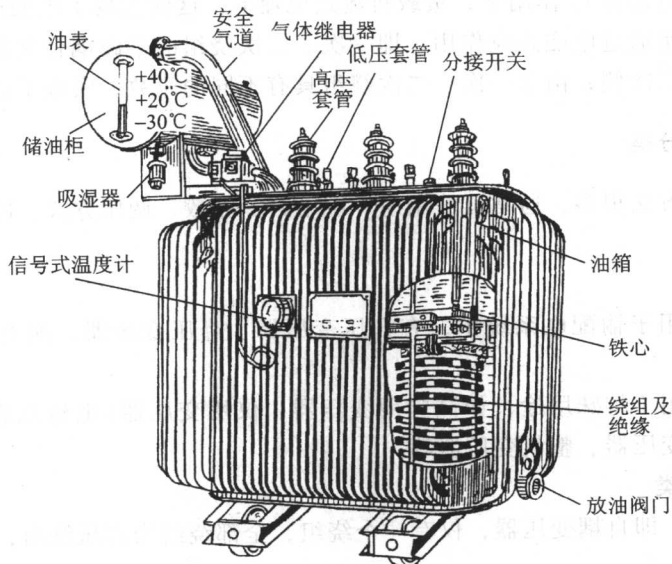


图 1.2.1 油浸式电力变压器

## 一、铁心

### 1. 铁心材料

铁心构成了变压器的磁路，也是绕组的机械骨架。为了提高磁路的导磁性能和减小铁心中的磁滞和涡流损耗，铁心采用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠成。硅钢片分冷轧和热轧两种，冷轧硅钢片又分为有取向和无取向两类。通常变压器铁心采用有取向的冷轧硅钢片，这种硅钢片沿碾压方向有较高的导磁性能和较小的损耗。

### 2. 铁心结构

叠装成形后的铁心由两部分组成，其中套装绕组的部分称为铁心柱，其余部分称为铁轭。铁轭将铁心柱连接起来构成闭合的磁路。

铁心结构有心式和壳式两种形式。心式变压器的铁心被绕组包围着，即铁心处在绕组的内(心)部，如图 1.2.2 所示。壳式变压器的铁心包围着绕组，即铁心形成了绕组的外壳，如图 1.2.3 所示。由于心式变压器的制造工艺简单，散热条件好，因此国产电力变压器主要采用心式结构。壳式变压器的机械强度较高，但制造工艺复杂，散热不好，铁心材料消耗多，只在特殊变压器(如电炉变压器)中采用。

小型变压器的铁心柱截面多为矩形，大型变压器的铁心柱截面常采用阶梯形，以充分利用绕组的内圆空间。铁心柱的截面如图 1.2.4 所示。

近年来，出现了一种渐开线铁心变压器，它是把一定尺寸的硅钢片卷成渐开线形状，然后