



“十三五”普通高等教育本科规划教材

DIANJIXUE

# 电机学

赵君有 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 电机学

主 编 赵君有  
副主编 王秀平  
编 写 谢冬梅 姜 旭  
主 审 陈世元



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。全书共七章，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，重点分析电机的基本结构、运行原理、工作特性、运行性能和参数测定等。

本书可作为应用型本科院校电气工程、电力工程与智能控制、电气自动化技术等专业“电机学”课程教材，也可以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/赵君有主编. —北京: 中国电力出版社, 2016. 3

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8799-7

I. ①电… II. ①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 012911 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 3 月第一版 2016 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 361 千字

定价 30.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
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“十三五”普通高等教育本科规划教材，是根据应用型本科教育电气类专业人才培养目标的特点和要求而编写的。作为专业基础课程的教材，本书可作为应用型本科院校电气工程、电力工程与智能控制、电气自动化技术等专业“电机学”课程教材，也可以作为工程技术人员的参考用书，还可作为职业资格和岗位技能培训教材。基于应用型本科院校电气工程专业“专业基础课程”的要求，教材在编写过程中注重体现以下特点：

1. 明确基本概念和基本理论，强化实际应用。本教材侧重于电机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，注重与工程实际的联系，让学生掌握分析电机的基本方法，建立牢固的物理概念，为后续课程的学习和今后解决遇到的工程问题做好准备。

2. 内容简洁精练、图表并用。每章首先介绍本章主要内容、提出重点要求，然后分析讨论本章教学内容，最后对内容进行小结和练习。基于应用型本科院校“电机学”课程教学改革的需求，以“够用为度”的原则，在分析讨论过程中删减较深的理论推算，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；利用图、表来描述教学内容使教学内容更精练，易于掌握。

3. 增加一些有关大型电机运行内容，习题和例题中选用实际电机的参数。增加新型电机内容，如双馈风力发电机。

4. 教学内容模块化。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，书中打“\*”的部分为选学内容，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，教材配有精选思考题与习题，还有自测题，读者可以自测自检。

6. 本教材有配套的《电机学学习指导与习题解答》和授课 PPT 教案可供选择参考。

本书共分七章，其中，第四章由沈阳工程学院王秀平老师编写，第七章由沈阳工程学院谢冬梅老师编写，第六章第二、三、四节由国电沈阳热电有限公司姜旭工程师编写，其余部分由沈阳工程学院赵君有老师编写。全书由赵君有老师主编和统稿，姜旭提供了部分电机的技术参数。

本书由华南理工大学电力学院陈世元教授担任主审。在审阅过程中陈教授提出了许多宝贵的意见和建议，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难免，殷切希望读者批评指正。

编者

2015.11

## 目 录

## 前言

绪论	1
第一章 变压器的工作原理和运行特性	9
第一节 变压器的基本工作原理和主要结构	9
第二节 单相变压器的空载运行	14
第三节 单相变压器的负载运行	20
第四节 变压器的参数测定及标么值	24
第五节 变压器的运行特性	30
第六节 三相变压器	33
第七节 变压器的并联运行	39
第八节 其他变压器	42
小结	51
思考题与习题	52
第二章 三相变压器不对称运行和变压器的瞬变过程	56
第一节 三相变压器的不对称运行	56
第二节 变压器的瞬变过程	60
小结	64
思考题与习题	65
第一章和第二章自测题	65
第三章 交流绕组及其电动势和基波磁动势	70
第一节 交流绕组简介	70
第二节 交流绕组的感应电动势	75
第三节 交流绕组的基波磁动势	82
小结	90
思考题与习题	90
第三章自测题	91
第四章 三相异步电动机的工作原理和运行特性	93
第一节 三相异步电动机的基本结构和基本工作原理	93
第二节 三相异步电动机的空载运行	98

第三节	三相异步电动机的负载运行	100
第四节	三相异步电动机的等效电路	104
第五节	三相异步电动机的功率平衡和转矩平衡	108
第六节	三相异步电动机的机械特性和工作特性	111
第七节	三相异步电动机的参数测定	115
第八节	三相异步电动机的起动和调速	117
第九节	三相异步电动机在不对称电压下运行	125
第十节	其他异步电机	126
	小结	133
	思考题与习题	134
	第四章自测题	136
<b>第五章</b>	<b>三相同步发电机工作原理和运行特性</b>	<b>140</b>
第一节	三相同步发电机的基本结构和基本工作原理	140
第二节	三相同步发电机对称负载时的电枢反应	145
第三节	三相同步发电机的电动势平衡方程和相量图	150
第四节	三相同步发电机的稳态运行特性	153
第五节	三相同步发电机投入并联的方法和条件	157
第六节	三相同步发电机的有功功率功角特性和静态稳定	161
第七节	三相同步发电机的无功功率调节及 V 形曲线	166
第八节	同步调相机及同步电动机	171
	小结	176
	思考题与习题	177
<b>第六章</b>	<b>同步发电机的三相突然短路和异常运行</b>	<b>181</b>
第一节	同步发电机的三相突然短路	181
第二节	三相同步发电机的不对称运行*	188
第三节	三相同步发电机的失磁运行*	191
第四节	三相同步发电机的振荡*	193
	小结	195
	思考题与习题	196
	第五章和第六章自测题	196
<b>第七章</b>	<b>直流电机</b>	<b>200</b>
第一节	直流电机的基本工作原理和结构	200
第二节	直流电枢绕组简介	204
第三节	直流电机的电枢电动势和电磁转矩	209
第四节	直流电机的磁场和电枢反应	210
第五节	直流电机的换向简介	213
第六节	直流发电机的运行原理	215

第七节 直流电动机的运行原理.....	218
小结.....	227
思考题与习题.....	227
第七章自测题.....	229
参考文献.....	231

## 绪 论

### 一、电机的概念

电机是指以电磁感应定律和电磁力定律为理论基础进行机电能量转换或信号传递与转换的一种电磁机械装置。

电机的种类很多,按照运行方式来分类,可分为以下各类:

- (1) 将机械能转换为电能——发电机;
- (2) 将电能转换为机械能——电动机;
- (3) 将电能转换为另一种形式电能,又可分为:①输入和输出有不同的电压——变压器;②输入和输出有不同的频率——变频机;③输入和输出有不同的波形,如交流变为直流——变流机;④输入和输出有不同的相位——移相机。
- (4) 在自动控制系统中起调节、控制作用——控制电机。

按照电流的性质,电机又可分为两大类:

- (1) 应用于直流电系统的电机——直流电机;
- (2) 应用于交流电系统的电机——交流电机。在交流电机中两个主要的类型为同步电机和异步电机。

本书主要分析变压器、异步电机、同步电机和直流电机四大类电机。

电机学是研究电机这一特定机械中电和磁之间错综复杂的关系,主要分析讨论常规电机的主要结构、工作原理和工作性能、运行特性、实验方法等,为专业课程的学习准备必要的理论基础。

### 二、磁场的主要物理量和磁路定律

#### (一) 磁场的主要物理量

##### 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,磁场的基本特性是对场域中的载流导体有力的作用,磁场的强弱和方向用磁感应强度  $B$  来表示。当载流导线段  $\Delta l$  在磁场中与磁力线相垂直时,作用在导线段上的电磁力为

$$\Delta F = BI\Delta l \quad (0-1)$$

即

$$B = \frac{\Delta F}{I\Delta l} \quad (0-2)$$

式中  $F$ ——电磁力,单位为牛顿(N);

$I$ ——导体电流;

$B$ ——磁感应强度,单位为特斯拉(T)。

磁感应强度的方向可用小磁针 N 极在磁场中某点 P 的指向确定。

在电机中,气隙处的磁感应强度约为 0.4~0.8T;铁心的磁感应强度约为 1~1.8T。

在磁场中,磁力线越密,磁感应强度越大。磁感应强度又称磁通密度。



## 2. 磁通 $\Phi$

磁感应强度  $B$  描述的只是空间每一点的磁场, 如果要描述一个给定面上的磁场, 就要引入另一物理量——磁通, 磁通也称磁通量, 单位为韦伯 (Wb), 表示穿过某个特定截面  $S$  的磁感应强度的通量, 它与磁感应强度  $B$  之间的关系为

$$\Phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (0-3)$$

式中,  $\Phi$  和  $B$  均为矢量。

对均匀磁场, 若磁力线与截面垂直, 则式 (0-3) 的积分形式可以写成代数形式, 即

$$\Phi = BS$$

或

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (0-4)$$

根据磁感应强度和磁通的关系, 实际应用中又常常称磁感应强度为磁通密度或磁密。

## 3. 磁导率 $\mu$

衡量材料对于磁的传导能力大小的物理量, 称为磁导率  $\mu$ , 单位为亨利/米 (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相对磁导率  $\mu_r$  在 6000~8000 左右。

## 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, 单位为安/米 (A/m), 其方向与磁感应强度  $B$  相同, 大小关系为

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (0-5)$$

### (二) 磁路的定律

#### 1. 全电流定律 (安培环路定律)

全电流定律: 沿空间任意闭合回路  $l$ , 磁场强度  $\mathbf{H}$  的线积分  $\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$  等于该闭合回路所包围的总电流代数和, 其数学表达式为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum i \quad (0-6)$$

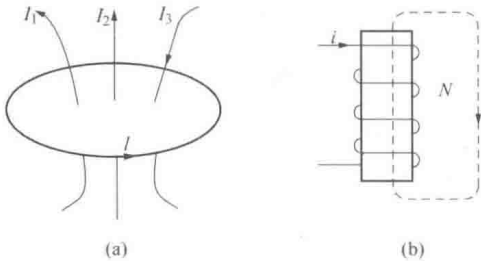


图 0-1 全电流定律的应用

(a) 全电流定律示意图;

(b) 全电流定律在线圈中的应用

当电流  $i$  的方向与闭合回路中  $\mathbf{H}$  的方向 (即闭合回路  $l$  的方向) 符合“右手螺旋”时  $i$  取正值, 否则取负值。

对于图 0-1 (a), 应用全电流定律可写成

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_1 + I_2 - I_3 \quad (0-7)$$

对于图 0-1 (b), 应用全电流定律可写成

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni \quad (0-8)$$

式中  $Hl$ ——每段磁路的磁压降；

$Ni$ ——作用在磁路上的安匝数。

铁心的匝数与通过的励磁电流乘积是磁路中磁通的来源，用  $F=iN$  表示，称为磁动势（磁通势）。

如果沿着回路  $l$ ，磁场强度  $H$  的方向总是在切线方向，其大小处处相等，且闭合回路所包围的总电流是由通过电流  $i$  的  $N$  匝线圈提供，则式 (0-8) 可以简写为

$$Hl = Ni \quad (0-9)$$

## 2. 磁路的基尔霍夫第一定律（磁通的连续性定律）

对于磁路中任意一个闭合面，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，这就是磁路的基尔霍夫第一定律，其表达式为

$$\sum \phi = 0 \quad (0-10)$$

如图 0-2 所示，任意取一个闭合面  $A$ ，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

如果把整个磁路分成若干段，每段为同一材料、相同截面相同磁场强度，则由全电流定律的演变得

$$\sum Hl = \sum iN \quad (0-11)$$

式 (0-11) 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

若  $\phi$  为磁路中的磁通， $R_m$  为磁路的磁阻， $l$  为磁路的长度， $\mu$  为磁路材料的磁导率， $S$  为磁路的截面积， $F=iN$  为作用在磁路上的磁动势，则磁路的欧姆定律为

$$\phi = \frac{F}{R_m} = \frac{iN}{R_m} \quad (0-12)$$

且

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (0-13)$$

磁阻的倒数称为磁导

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l} \quad (0-14)$$

空气的磁导率为常量，所以气隙的磁阻是常量。铁磁物质的磁导率不是常数，使得铁磁物质的磁阻是非线性的，因此一般情况下不能应用磁路的欧姆定律进行计算。对磁路作定性分析时，则可利用磁阻及磁导的概念。

## 5. 电磁感应定律

变化的磁场能够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。电磁感应现象有以下两种：

(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

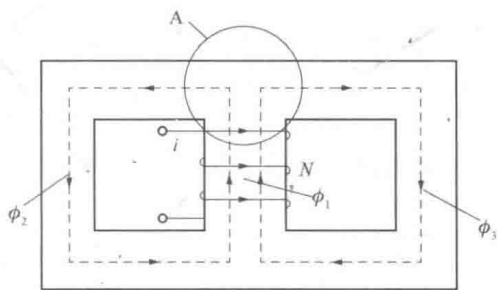


图 0-2 磁路的基尔霍夫第一定律

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，感应电动势的大小为

$$e = Blv \quad (0-15)$$

感应电动势的方向由右手定则来确定，如图所示 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，当线圈所交链的磁链  $\psi = N\phi$  (或磁通  $\phi$ ) 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

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (0-16)$$

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链（或磁通）变化的方向相反，如式中的负号所表示。

### 6. 电磁力定律

载流体放置在磁场中时，会受到电磁力的作用。如果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一

$$f = Bil \quad (0-17)$$

电磁力的方向由左手定则确定，如图 0-4 所示。

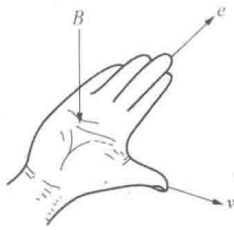


图 0-3 右手定则

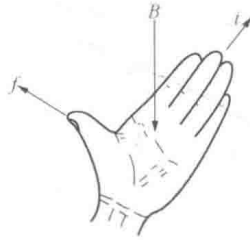


图 0-4 左手定则

## 三、常用的铁磁材料及其特性

材料按其磁化效应大体上可分为铁磁材料和非铁磁材料两类。非铁磁材料的磁导率在工程上近似认为与真空的磁导率相同，即  $\mu \approx \mu_0$ ，这类材料有空气、铜、木材、橡胶等。铁磁材料的磁导率不仅比真空的磁导率大得多，而且常常与所在磁场的强弱以及材料磁状态有关，所以铁磁材料的磁导率不是常数。铁、镍、钴及其合金以及铁氧体都是电工设备中构成磁路的主要铁磁性材料。

为了在一定的励磁磁动势作用下能激励较强的磁场，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

铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性，这种现象称为铁磁物质的磁化特性。铁磁材料的磁化性质一般由磁化曲线即  $B-H$  曲线表示。

由式 (0-9) 和式 (0-10) 得

$$\frac{\Phi}{S} = \mu \frac{iN}{l} = \mu \frac{F}{l} = \mu H$$

即

$$B = \mu H \quad (0-18)$$

式中  $H$ ——磁场强度,  $H = \frac{F}{l}$ , 它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。

在非铁磁材料中, 由于  $\mu_0$  为常数, 所以磁通密度  $B$  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  $\mu_0$  很小, 如图 0-5 中虚线所示。

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  $oab$  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, 曲线基本是与  $B = \mu_0 H$  平行的直线,  $B$  几乎不随着  $H$  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。

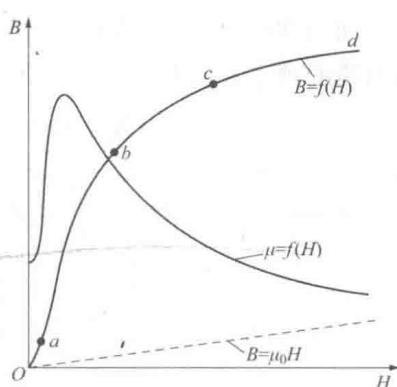


图 0-5 铁磁材料的磁化曲线

铁磁材料的这种现象可以解释如下: 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, 称之为磁畴。在图 0-6 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。

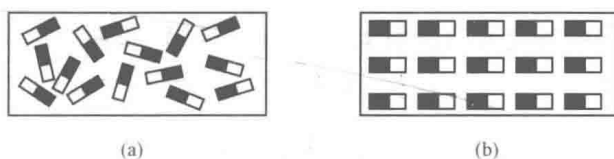


图 0-6 磁畴

(a) 磁化前; (b) 磁化后

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。

## 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  $ab$  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第二个特性。

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、矫顽力  $H_c$  大的材料，称为硬磁材料，如铝镍钴合金等，它们磁导率较小，不容易磁化，也不容易去磁，常用来制造永久磁铁。

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或平均磁化曲线。

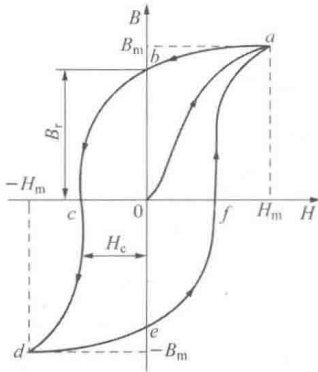


图 0-7 铁磁材料的磁滞回线

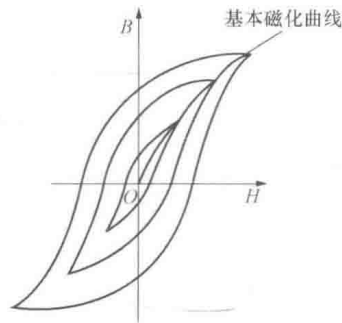


图 0-8 基本磁化曲线

### 3. 磁滞损耗和涡流损耗

铁磁材料置于交变磁场中时，由于铁磁材料磁化方向随着磁场强度的大小和方向反复变化，磁畴方向也不断变化，相互摩擦，消耗能量，造成损耗。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

$$p_h = fV \oint HdB$$

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

$$p_h = k_h f V B_m^n \quad (0-19)$$

式中  $k_h$ ——磁滞损耗系数，大小取决于导磁材料的性质。

式 (0-15) 中指数  $n$  与导磁材料的性质有关，一般电工钢片， $n=1.6\sim 2.3$ ，作估算时可取  $n=2$ 。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。

因为铁心是导电的，所以当通过铁心的磁通随时间变化时，根据电磁感应定律，铁心中将感应电动势，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。

涡流损耗的经验公式为

$$p_e = k_e d^2 f^2 B_m^2 V \quad (0-20)$$

式中  $k_e$ ——涡流损耗系数，与材料的电阻率成反比；

$d$ ——钢片的厚度。

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。

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，硅钢片沿磁力线方向排列，片间有绝缘层，叠片越薄，损耗越低。

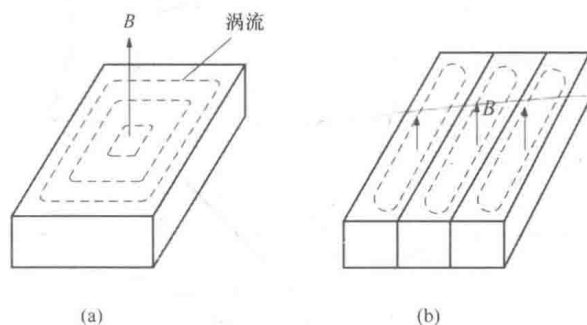


图 0-9 涡流路径

(a) 整块铁心；(b) 硅钢片叠成的铁心

磁滞损耗与涡流损耗之和，总称为铁心损耗，用  $p_{Fe}$  表示。对于一般的电工钢片，在正常的工作磁密范围内 ( $1T < B_m < 1.8T$ )，铁心损耗可近似为

$$p_{Fe} \approx C_{Fe} B_m^2 f^{1.3} G \quad (0-21)$$

式中  $C_{Fe}$ ——铁心损耗系数；

$G$ ——铁心重量。

式 (0-17) 表明，铁心中有恒定磁通时并不消耗功率，只有交变磁通才会在铁心中产生铁心损耗。铁心损耗与磁通密度最大值  $B_m$ 、交变频率  $f$  有关。

工程应用时，由实验测出并以曲线或表格表示各种铁磁材料在不同频率、不同工作磁密下的比损耗  $p$  (W/kg) (包括磁滞损耗和涡流损耗) 来计算铁损耗  $p_{Fe}$ 。

铁心损耗均转化为热能使铁心温度升高，为了防止电机过热，一方面采用硅钢片以减小铁心损耗，另一方面则应采取散热降温措施。

表 0-1 电路和磁路的比较

序号	电路			磁路		
	基本物理量 或基本定律	符号或定义	单位	基本物理量 或基本定律	符号或定义	单位
1	电流	$I$	A	磁通	$\Phi$	Wb
2	电动势	$E$	V	磁动势	$F$	A
3	电压	$U$	V	磁压降	$U_m = Hl$	A
4	电阻	$R = l/(\rho S)$	$\Omega$	磁阻	$R_m = l/(\mu S)$	1/H
5	电导	$G = 1/R$	S	磁导	$\Lambda = 1/R_m$	H

续表

序号	电路			磁路		
	基本物理量 或基本定律	符号或定义	单位	基本物理量 或基本定律	符号或定义	单位
6	电导率	$\rho$	S/m	磁导率	$\mu$	H/m
7	电流密度	$J=I/S$	A/m <sup>2</sup>	磁通密度	$B=\Phi/S$	T
8	电流定律	$\sum I = 0$		磁通连续性原理	$\sum \Phi = 0$	
9	电压定律	$\sum U = \sum E$		安培环流定律	$\sum Hl = \sum NI$	
10	欧姆定律	$U=RI$		磁路欧姆定律	$F=R_m\Phi$	

## 第一章 变压器的工作原理和运行特性

变压器是一种静止电器，它利用电磁感应原理，把一种电压、电流的交流电能转换成相同频率的另一种电压、电流的交流电能，具有变压、变流和变阻抗的功能。

### [主要内容]

本章首先分析变压器的基本工作原理、主要结构、额定值，然后以单相双绕组电力变压器为例，分析变压器稳定运行时的基本电磁关系，导出基本方程、等效电路和相量图、参数测定方法、运行特性，然后分析三相变压器磁路系统、电路系统及影响电动势波形的因素、变压器并联运行条件，最后简要介绍几种特殊变压器。

### [重点要求]

1. 掌握变压器的基本工作原理、主要结构、额定值。
2. 掌握变压器运行时的电磁过程、主磁通和漏磁通的区别。
3. 掌握变压器电动势和磁动势平衡方程、等效电路和相量图。
4. 掌握变压器参数的实验测定方法、标么值的概念及应用。
5. 掌握变压器电压变化率及效率的概念及计算。
6. 掌握三相变压器的磁路特点、联结组标号的判定方法和改善电动势波形的的方法。
7. 掌握变压器并联运行的条件。
8. 了解其他变压器的特点。

### 第一节 变压器的基本工作原理和主要结构

#### 一、变压器的基本工作原理

变压器的基本结构如图 1-1 所示，两个互相绝缘的绕组（或称线圈）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，其中接交流电源的绕组 1，称为一次绕组（或称原绕组）；接负载的绕组 2，称为二次绕组（或称副绕组）。

当一次绕组接交流电源时，流过绕组的交流电流在铁心中产生与外加电压频率相同的交变磁通  $\phi$ ，该磁通同时交链一、二次绕组，根据电磁感应定律，交变磁通将在一、二次绕组中分别感应出相同频率的电动势  $e_1$ 、 $e_2$ 。

若  $N_1$ 、 $N_2$  分别为一、二次绕组的匝数，则电动势为

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{cases} \quad (1-1)$$

当满足  $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$  和  $N_1 \neq N_2$  两个条件时， $e_1$  与  $e_2$  的大小不相同，由于一、二

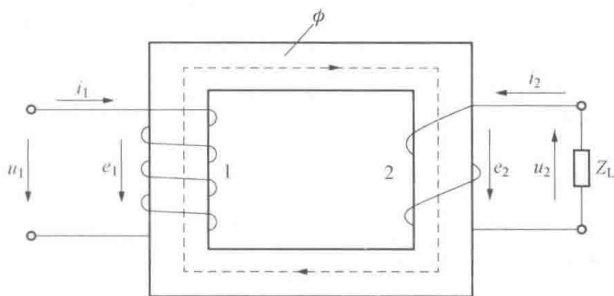


图 1-1 变压器工作原理示意图



次绕组的感应电动势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。若把负载接到二次绕组，在电动势  $e_2$  的作用下，变压器就能向负载输出电能，实现不同电压等级电能的传递。

## 二、变压器的分类

变压器的种类很多，按相数可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器；按绕组数目可分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器；按冷却介质和冷却方式可分为油浸式变压器、干式变压器；按用途可分为电力变压器（升压变压器、降压变压器、联络变压器和厂用变压器）、仪用互感器（电压互感器和电流互感器）、特种变压器（如调压变压器、试验变压器、电炉变压器、整流变压器、电焊变压器等）；按磁路结构可分为芯式变压器和组式变压器等。

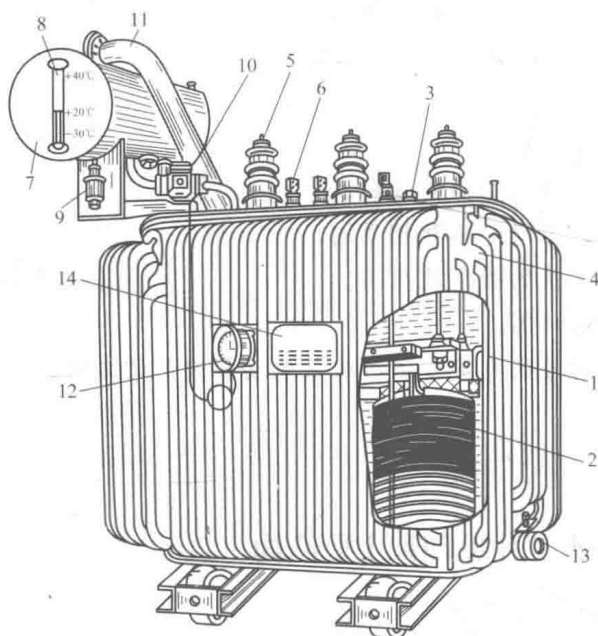


图 1-2 油浸式电力变压器结构图

- 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

一般做成阶梯形，以充分利用绕组的内圆空间。容量较大的变压器，铁心中常设有油道，以改善铁心内部的冷却条件。

### 2. 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，如图 1-3 所示。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。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

## 三、变压器的主要结构

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构成器身。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 所示是油浸式变压器的结构图。

### 1. 铁心

在变压器中，铁心既是耦合磁通的主要通路，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铁磁性材料制成。目前，变压器铁心大部分采用 0.35~0.5mm 厚、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠装而成。为了减小接缝间隙以减小励磁电流，一般采用交错式叠装，使相邻的接缝错开。铁心柱的截面一