



普通高等教育“十二五”规划教材

电机与拖动基础 (第二版)

主 编 赵君有
副主编 张爱军 王秀平
主 审 张凤阁



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十二五”规划教材

电机与拖动基础 (第二版)

主 编 赵君有

副主编 张爱军 王秀平

主 审 张凤阁



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,是在2007年9月第一版的基础上修订而成的。本书主要内容包括变压器、直流电机、交流电机、异步电机、同步电机、控制电机及电力拖动基础,重点分析电机的基本结构、运行原理、工作特性、运行性能以及电力拖动系统的起动、调速、制动的原理、方法和应用。

本书为应用型高等学校自动化、工业电气自动化、生产过程自动化、农业电气自动化、供用电技术等本科专业(专业方向)的“电机学”、“电机及拖动基础”、“电机及电力拖动”等课程的通用教材,也可作为相关专业的函授教材,还可作为有关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础 / 赵君有主编. — 2版. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2012.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-9196-7

I. ①电… II. ①赵… III. ①电机—高等学校—教材
②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第003072号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 电机与拖动基础 (第二版)
作 者	主编 赵君有 副主编 张爱军 王秀平 主审 张凤阁
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 17.25印张 409千字
版 次	2007年9月第1版第1次印刷 2012年1月第2版 2012年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	35.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

绪 论

一、电机及电力拖动的概念

电机是指以电磁感应定律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，按照运行原理和运行方式分为变压器、直流电机、同步电机、异步电机等。

按照电机在应用中的能量转换职能来分，电机可分为以下四种：

(1) 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。

(2) 发电机——将机械能转换成电能输出。

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

(4) 控制电机——完成控制信号的转换和传递，通常用于控制系统中，作为检测、校正及执行元件使用，主要包括伺服电动机、测速发电机、自整角机、旋转变压器和步进电动机等。

从基本原理上看，发电机和电动机仅是电机的两种不同运行方式，从能量转换角度看，二者是可逆的。

电能的生产集中在火力、水力和原子能发电厂进行，由厂内的发电机组完成。为了减少输电中的电能损耗，远距离输电均采用高电压，然后经过降压再供给用户，电压的升高和降低都是由变压器完成的。

电能转化为机械能主要由电动机完成，电动机拖动生产机械称为电力拖动。电力拖动系统由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源五部分组成。

电力拖动系统主要有直流拖动系统和交流拖动系统两大类：直流电动机具有良好的启动、制动性能，适合于在宽广范围内平滑调速，在需要高性能可控电力拖动的领域中广泛应用；交流电力拖动系统近年来发展很快，技术日趋成熟，处于扩大应用、系列化的新阶段，在各工业部门中有取代直流拖动的趋势。

“电机及拖动”课程包括“电机学”与“拖动基础”两部分，本课程是一门既有基础性又有专业性的课程，研究电机这一特定机械中电和磁之间的关系，讨论电机的主要结构、工作原理和工作性能、运行特性等，主要是分析电、磁、机械方面的问题，为后续课程的学习准备必要的理论基础。

二、磁路的几个物理量

1. 磁感应强度 B

当一定大小的电流流过时，就会产生一定的磁场。磁场的强弱以及磁场的方向一般使用磁感应强度 B 来表示， B 的单位为特斯拉 (T)。磁力线越密，磁感应强度越大。磁感

应强度又称磁通密度，这是源于它和磁通的关系，实际应用中也常常简称为磁密。

2. 磁通 Φ

磁通也称磁通量，单位为韦伯 (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

$$\Phi = BS$$

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

3. 磁导率 μ

衡量各种材料对于磁的传导能力大小的物理量，称为磁导率 μ ，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 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，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，例如电机定子铁芯的相对磁导率在 6000~7000 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，关系为

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

三、几个基本电磁定律

1. 全电流定律

全电流定律 (安培环流定律)：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

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

式中，当电流的方向与闭合路径中 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

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

如图 0-1 (a) 所示，应用全电流定律可写成

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

如图 0-1 (b) 所示，应用全电流定律可写成

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

2. 磁路的基尔霍夫第一定律

磁路的基尔霍夫第一定律 (磁通的连续性定律) 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

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

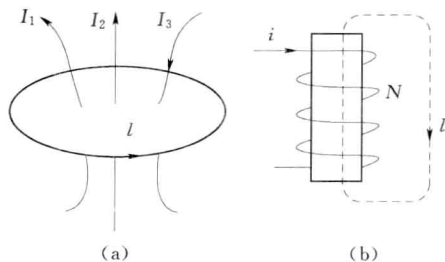


图 0-1 全电流定律的应用

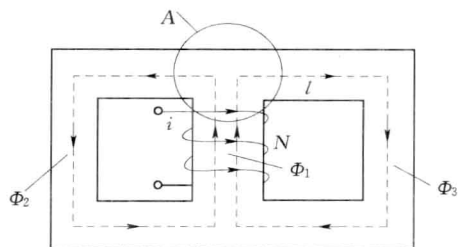


图 0-2 磁路的基尔霍夫第一定律

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

若 Φ 为磁路中的磁通, R_m 为磁路的磁阻, l 为磁路的平均长度, μ 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

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

其中, 磁阻

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

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。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), 而且磁力线、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

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

感应电动势的方向由右手定则来确定, 如图 0-3 所示。

(2) 线圈中磁通变化所产生的电动势。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

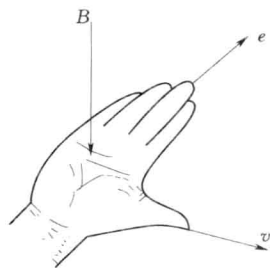


图 0-3 右手定则

势为

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

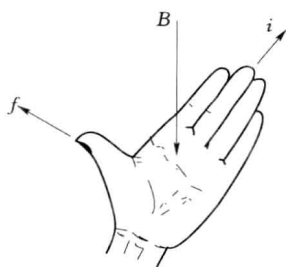


图 0-4 左手定则

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

为了在一定的励磁磁动势作用下能激励较强的磁场，电机的铁芯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，这种现象称为铁磁物质的磁化。

由式 (0-9) 和式 (0-10) 得

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

即

$$B = \mu H \quad (0-14)$$

其中

$$H = \frac{F}{l}$$

式中 H ——磁场强度，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，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 中虚线所示。

铁磁材料的磁通密度 B 和磁场强度 H 之间的关系 $B = \mu_0 H$ 为非线性关系。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。

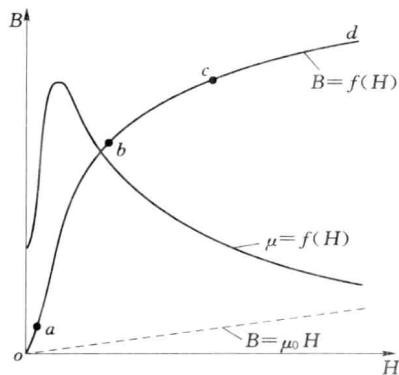


图 0-5 铁磁材料的磁化曲线

铁磁材料的这种现象可以解释为：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。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，由此形成一个附加磁场，叠加在外磁场上，磁畴所产生的附加磁场将比非铁磁物质

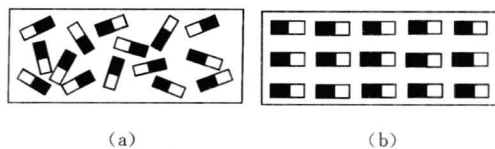


图 0-6 磁畴
(a) 磁化前；(b) 磁化后

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，通常把铁芯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 $abcdefa$ 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另一个特性。

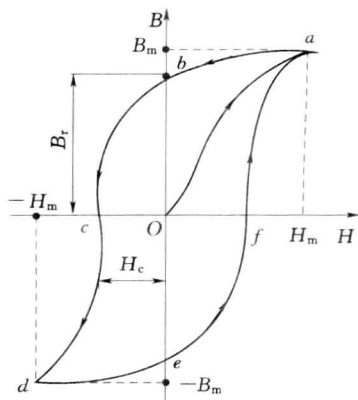


图 0-7 铁磁材料的磁滞回线

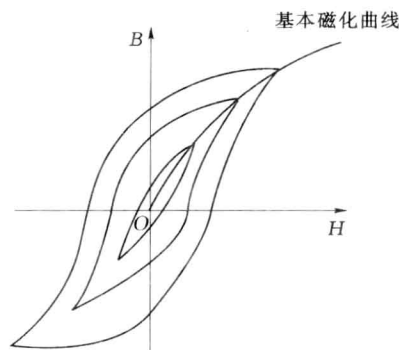


图 0-8 基本磁化曲线

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。

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芯。磁滞回线宽、最大磁能积 $(BH)_m$ 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，用 p_h 表示。

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 、铁芯的体积 V 和磁滞回线的面积 $\oint HdB$ 成正比，即

$$p_h = fV\oint HdB \quad (0-15)$$

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

$$p_h = k_h f V B_m^n \quad (0-16)$$

式中 k_h ——磁滞损耗系数，大小取决于材料的性质。

一般电工钢片， $n=1.6\sim 2.3$ 。电机中的铁芯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，用 p_c 表示。

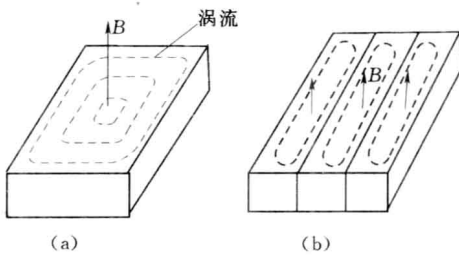


图 0-9 涡流路径
(a) 整块铁芯；(b) 硅钢片叠成的铁芯

因为铁芯是导电的，所以交变的磁通也能在铁芯中感应电动势，并引起环流。这些环流在铁芯内部围绕磁通作涡流状流动，称为涡流，如图 0-9 (a) 所示。涡流在铁芯中引起的损耗，称为涡流损耗，用 p_e 表示。

涡流损耗的经验公式为

$$p_e = k_e d^2 f^2 B_m^2 V$$

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。

为了减小涡流，电机的铁芯均采用厚度为 $0.35\sim 0.5\text{mm}$ 、两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成，如图 0-9 (b) 所示。

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

$$p_{Fe} \approx C_{Fe} B_m^2 f^{1.3} G \quad (0-17)$$

式中 C_{Fe} ——铁耗系数；

G ——铁芯重量；

式 (0-17) 表明，铁耗与磁通密度 B_m 的平方、交变频率 f 的 1.3 次方及铁芯重量成正比。

第一章 变 压 器

变压器是一种静止电机，它是利用电磁感应原理、把一种电压等级的交流电能转换成相同频率的另一种电压等级的交流电能的电磁装置。在电力系统中，通过升压变压器将电能经济地输送到用电地区，再通过降压变压器把电压降低以供用户使用。

本章主要分析一般用途的电力变压器，简要地介绍变压器的工作原理和结构，着重分析变压器的运行与特性、三相变压器的连接组和变压器的并联运行，最后介绍其他变压器。

第一节 变压器的基本工作原理和结构

一、变压器的工作原理

变压器的基本组成如图 1-1 所示：两个互相绝缘的绕组套在同一个铁芯上，绕组之间只有磁的耦合而没有电的联系，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。

当一次绕组接交流电源时，流过绕组的交流电流在铁芯中产生与外加电压频率相同的交变磁通 ϕ ，该磁通同时交链一次绕组和二次绕组，根据电磁感应定律，将在一次绕组和二次绕组中分别感应出相同频率的电动势 e_1 、 e_2 。

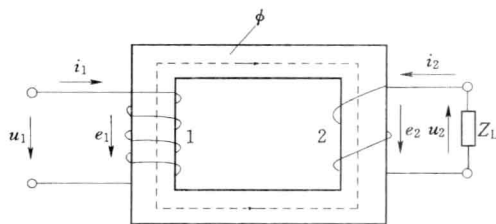


图 1-1 变压器工作原理示意图

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

式中 N_1 、 N_2 ——一次绕组和二次绕组的匝数。

以后分析可知，一次绕组和二次绕组的感应电动势又近似等于各自的电压，因此当一次绕组和二次绕组的匝数不同时，就可将一次侧电压改变成二次侧电压，这就是变压器的变压原理。变压器变压的条件，一是 $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$ ，二是 $N_1 \neq N_2$ 。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。

二、变压器的分类

变压器的种类很多，可以按其用途、结构、相数、冷却方式等不同来进行分类。

变压器按用途分可分为电力变压器（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)。

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。

变压器按磁路结构可分为芯式变压器和组式变压器。

变压器按相数可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

变压器按冷却介质和冷却方式可分为油浸式变压器(包括油浸自冷式、油浸风冷式、强迫油循环水冷却)、干式变压器和充气式变压器。

三、变压器的基本结构

变压器中最主要的部件是铁芯和绕组,铁芯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。

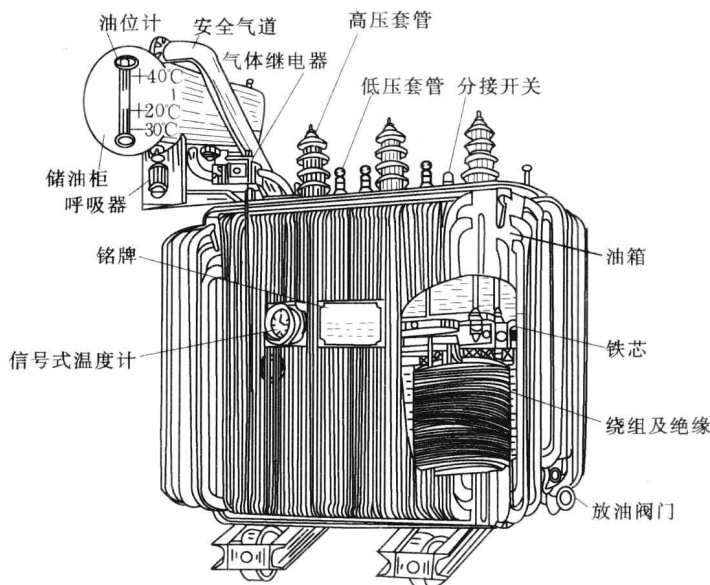


图 1-2 油浸式电力变压器结构图

1. 铁芯

在变压器中,铁芯既是耦合磁通的主要通路,又是机械骨架。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分构成,铁轭将铁芯柱连接起来形成闭合磁路。

为了提高磁路的导磁性能,减少铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗,铁芯一般用高磁导率的铁磁性材料制成。目前,变压器铁芯大部分采用厚度为 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ 、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,如图 1-3 所示。铁芯柱的截面一般做成阶梯形,以充分利用绕组的内圆空间。

容量较大的变压器，铁芯中常设有油道，以改善铁芯内部的散热条件。

2. 绕组

绕组是变压器传递电能的电路部分，常用包有绝缘材料的铜线或铝线绕制而成。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，绕组套在铁芯柱上，如图 1-4 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芯柱上。为了便于绝缘、同时使高压绕组易于与分接开关连接，通常低压绕组靠近铁芯柱，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。

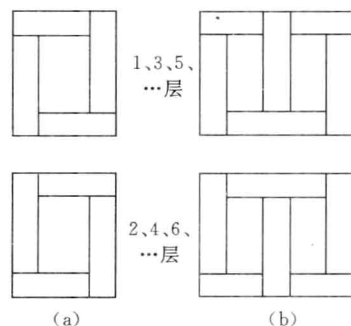


图 1-3 叠片式铁芯交错的叠装方式
(a) 单相；(b) 三相

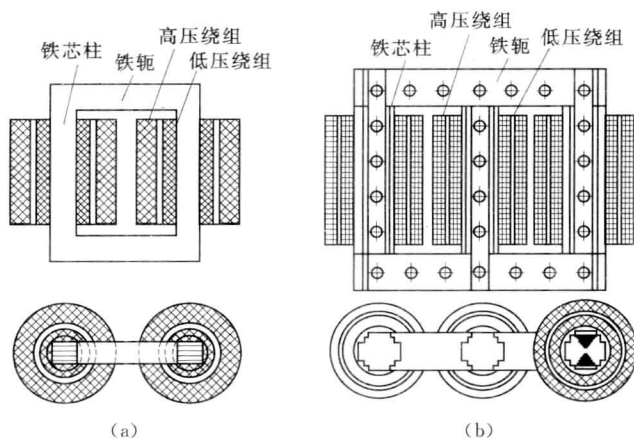


图 1-4 心式变压器绕组和铁芯的装配示意图
(a) 单相；(b) 三相

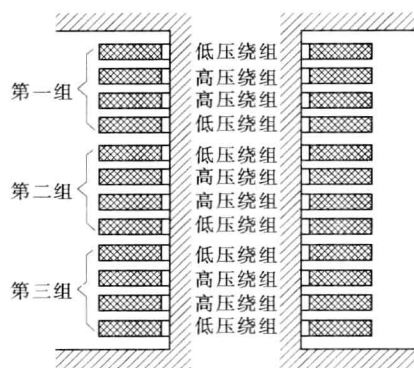


图 1-5 交叠式绕组

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、低压绕组沿铁芯柱高度方向交替放置，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。

3. 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，套管外形采用多级伞

形裙边。电压越高，级数越多。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。

4. 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。变压器油将铁芯和绕组中的热量带到箱壁及冷却装置，再散发到周围空气中。

变压器的油箱用钢板焊成，一般做成椭圆形，有较高的机械强度，而且需油量较少。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，使变压器中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纸板向外喷出，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，压力释放阀动作并接通触点报警。

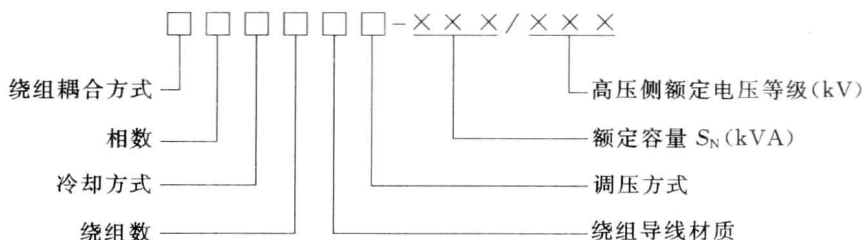
此外，油箱盖上还装有分接开关，用来改变高压绕组的匝数以调节变压器的输出电压。

四、变压器的型号和额定值

制造厂根据国家标准和设计、试验数据所规定的变压器的正常运行状态，称为额定运行情况。额定运行情况下各物理量的数值称为额定值，额定值通常标注在变压器的铭牌上。

1. 型号

变压器的型号反映一台变压器的耦合方式、额定容量、电压等级、冷却方式等内容，表示方法如下：



例如，OSFPSZ-250000/220 为三相自耦强迫油循环风冷三绕组铜线有载调压、额定容量为 250000kVA、高压侧额定电压为 220kV 的电力变压器；S11-500/10 为额定容量为 500kVA、高压侧额定电压为 10kV 级的低损耗三相油浸式自冷电力变压器。

2. 额定值

(1) 额定容量 S_N (VA 或 kVA)。额定容量是指变压器额定运行时所能传递的最大视

在功率。由于变压器的效率很高，通常一次侧、二次侧的额定容量设计成相等。对于三相变压器，额定容量指的是三相的总功率。电力变压器按容量大小通常分为小型变压器（容量为 $10 \sim 630 \text{kVA}$ ）、中型变压器（容量为 $800 \sim 6300 \text{kVA}$ ）、大型变压器（容量为 $8000 \sim 63000 \text{kVA}$ ）和特大型变压器（容量在 90000kVA 及以上）。

(2) 额定电压 U_{1N}/U_{2N} (V 或 kV)。变压器一次侧的额定电压 U_{1N} 是制造厂规定的一次侧外加端电压的允许值；二次侧的额定电压 U_{2N} 是指变压器一次侧加额定电压时二次侧的空载电压。对于三相变压器，额定电压指的是线电压。

(3) 额定电流 I_{1N}/I_{2N} (A)。变压器一次侧、二次侧的额定电流是变压器正常运行时一次侧、二次侧允许长期流过的电流。对于三相变压器，额定电流指的是线电流。

S_N 、 U_N 、 I_N 三者之间的关系：

$$\text{对单相变压器} \quad S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N} \quad (1-2)$$

$$\text{对三相变压器} \quad S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \quad (1-3)$$

(4) 额定频率 f_N (Hz)。我国的标准规定工业频率 $f_N = 50 \text{Hz}$ 。

此外，额定运行时的效率、温升等数据也是额定值。

除额定值外，变压器的相数、绕组连接方式及连接组标号、短路电压、运行方式和冷却方式等均标注在铭牌上。

第二节 单相变压器的空载运行

空载运行是指变压器一次绕组接到额定电压、额定频率的电源上，二次绕组开路时的运行状态。

一、空载运行时的电磁关系

1. 电磁过程

图 1-6 所示是单相变压器空载运行的示意图。当一次绕组接交流电源后，绕组中有电流 $\dot{I}_0$ 流过，称为空载电流。 $\dot{I}_0$ 流过一次绕组建立交变磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ ，在 $\dot{F}_0$ 作用下产生交变磁通。根据所经过的路径不同，可把磁通分为主磁通 $\dot{\Phi}$ 和漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 。

主磁通同时交链一次绕组和二次绕组，主要沿铁芯闭合，在一次绕组和二次绕组中感应电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ ，称作主电动势，当二次侧接负载时就有电功率向负载输出，故主磁通起传递能量的作用。由于铁磁性材料有饱和现象，所以主磁路的磁阻不是常数，主磁通与建立它的电流之间呈非线性关系。

漏磁通通过一次绕组附近的空气或变压器油等非铁磁性介质构成磁通回路，仅在一次绕组中感应电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ ，不能传递能量，仅起电抗压降作用。由于漏磁通的磁路大部分由

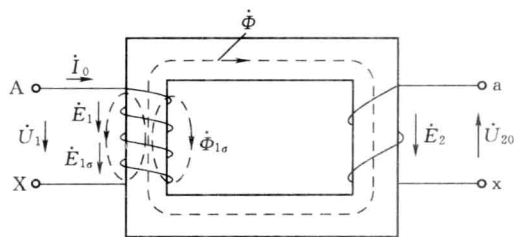


图 1-6 变压器空载运行示意图

非铁磁性材料组成，所以漏磁路的磁阻基本上是常数，漏磁通与产生它的电流呈线性关系。

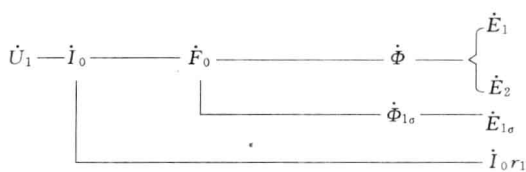


图 1-7 变压器空载运行时的电磁过程

由于铁芯的磁导率远比铁芯外非铁磁性材料的磁导率大，所以磁通中的绝大部分是主磁通，而漏磁通只占总磁通的一小部分（约 0.1%~0.2%）。一次侧电流在一次绕组中产生电阻压降。以上的变压器空载运行时的电磁过程可简单表示如图 1-7 所示。

2. 正方向规定

变压器中各电磁量都是交流量，要建立它们之间的相互关系，必须先规定各物理量的正方向。从原理上讲，正方向可以任意选择，但正方向规定不同，列出的电磁方程和相量图也不同，通常具体规定正方向如下：

(1) 在电源支路，电流的正方向与电动势的正方向一致；在负载支路，电流的正方向与电压降的正方向一致。

(2) 电流的正方向与由它产生的磁通的正方向符合右手螺旋定则。

(3) 磁通的正方向与由它感应电动势的正方向符合右手螺旋定则。

根据这些规定，变压器各物理量的正方向如图 1-6 所示。图中电压 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 的正方向表示电位降低，电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 的正方向表示电位升高。在一次侧， $\dot{U}_1$ 由首端指向末端， $\dot{I}_0$ ($\dot{I}_1$) 从首端流入，当 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{I}_0$ ($\dot{I}_1$) 同时为正或同时为负时，表示电功率从一次侧输入。在二次侧， $\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_2$ 的正方向是由 $\dot{E}_2$ 的正方向决定的。当 $\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_2$ 同时为正或同时为负时，电功率从二次侧输出。

3. 电动势与磁通的关系

在变压器中，绕组的电阻压降和漏电动势相对很小，电源电压基本上由主电动势来平衡，即 $U_1 \approx E_1$ ，由于 u_1 是正弦量，因此 e_1 也是正弦量，根据 $e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$ 可知，主磁通 ϕ 按正弦规律变化。

设

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

则根据电磁感应定律和图 1-6 规定的正方向，一次绕组和二次绕组中感应电动势的瞬时值为

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - 90^\circ) \\ e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = \sqrt{2} E_2 \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (1-4)$$

可见，当主磁通按正弦规律变化时，感应电动势也按正弦规律变化，且频率不变、相位滞后磁通 90° 。有效值为