

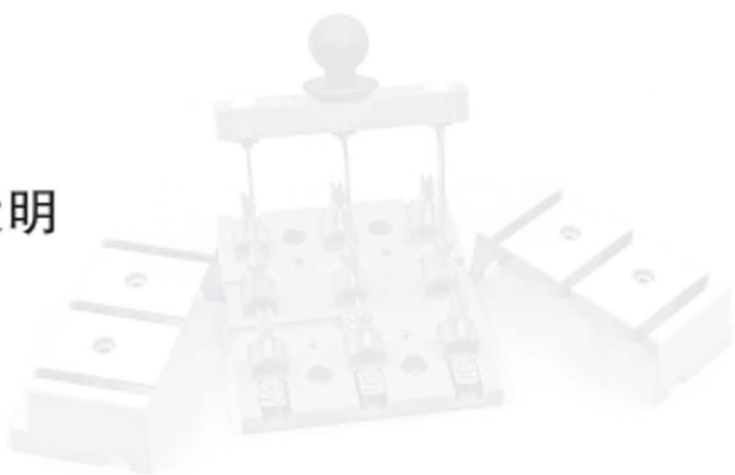


国家示范性高等职业教育新形态“一体化”系列精品教材
高职高专机电一体化及电气自动化专业“十三五”规划教材

电机与电气控制技术

主编 ◎ 邹建华 李大明

DIANJI YU DIANQI
KONGZHI JISHU



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

目 录

第 0 章 学习本课程的预备知识 (1)

0.1 电机与电力拖动系统概述 (2)

0.2 电机与电气控制常用基本定律和定则 (3)

第 1 章 变压器 (6)

1.1 磁路的基本概念 (7)

1.2 变压器 (10)

实验 1 单相变压器实验 (21)

习题 1 (24)

第 2 章 直流电动机 (27)

2.1 直流电动机的结构与工作原理 (28)

2.2 直流电动机的电力拖动 (33)

习题 2 (43)

第 3 章 交流异步电动机 (45)

3.1 三相异步电动机的结构与工作原理 (46)

3.2 三相异步电动机的运行 (51)

3.3 三相异步电动机的使用 (55)

3.4 三相异步电动机的电力拖动 (58)

3.5 单相异步电动机 (71)

习题 3 (81)

第 4 章 三相异步电动机的控制 (85)

4.1 常用低压电器 (86)

4.2 电气控制系统图的绘制 (113)

4.3 三相异步电动机启动控制电路 (115)

4.4 三相异步电动机制动控制电路 (132)

4.5 三相异步电动机调速控制电路 (135)

实训 1 三相异步电动机点动控制 (136)

实训 2 三相异步电动机自锁启停控制 (137)

实训 3 电气和机械双重连锁控制三相异步电动机正、反转(138)

实训 4 三相异步电动机 Y/ Δ 启动自动控制 (140)

习题 4 (142)

第 5 章 其他电动机 (144)

5.1 步进电动机 (145)

5.2 伺服电动机 (151)

5.3 直线电动机 (157)

5.4 同步电动机 (159)

习题 5 (167)

第 6 章 常用生产机械的电气控制 (169)

6.1 电气控制电路分析基础 (170)

6.2 CA6140 型普通车床电气控制 (171)

6.3 Z3040 型摇臂钻床电气控制 (175)

6.4 M7130 型平面磨床电气控制 (181)

6.5 X62W 型卧式万能铣床电气控制 (186)

6.6 桥式起重机电气控制 (193)

习题 6 (200)

第 7 章 安全用电及电气控制系统的保养与检修 (202)

7.1 安全用电 (203)

7.2 电气控制系统的维护保养 (207)

7.3 电气控制系统的检修 (210)

实训 1 CA6140 型车床电气控制电路的检修 (214)

附录 A 常用电气图形与文字符号新旧标准对照 (218)

附录 B 中级维修电工考试大纲 (222)

附录 C 中级维修电工鉴定要求 (225)

参考文献 (228)

第 0 章

学习本课程的预备知识

0

本章介绍学习本课程的预备知识,主要包括电机与电力拖动系统的概念、发展历程,电机与电气控制常用的定律、定则等。



0.1 电机与电力拖动系统概述

0.1.1 电机概述

1. 电机的概念

电机是以电磁感应和电磁力定律为基本工作原理进行电能的传递或机电能量转换的机械。

电机在国民经济中的作用主要表现为：①电能的生产、传输和分配中的主要设备，如发电机；②各种生产机械和装备的动力设备，如电动机；③自动控制系统中的重要元件，如各种控制电机。

2. 电机的发展历程

始于19世纪60—70年代的第二次工业技术革命，是以电力的广泛应用为显著特点的，从此人类社会由蒸汽机时代步入了电气化时代。在法拉第电磁感应定律的基础上，一系列电气发明相继出现：1866年，德国工程师西门子制造出发电机；1870年，比利时人格拉姆发明了电动机，电动机开始成为取代蒸汽机来拖动机器的新动力。随后，各种用电设备相继出现。1882年，法国学者德普勒发明了远距离送电的方法；同年，美国发明家爱迪生创建了美国第一个火力发电站，把输电线结成网络，从此电力作为一种新能源而广泛应用。那时，电机刚刚在工业上初步应用，各种电机初步定型，电机设计理论和电机设计计算初步建立。

随着社会生产的发展和科技的进步，对电机也提出了更高的要求，例如，性能良好、运行可靠、单位容量的重量轻、体积小等。随着自动控制系统的发展要求，在旋转电机的理论上，又派生出多种精度高、响应快的控制电机，成为电机学的一个独立分支。如今，古老的电机学已经和电力电子学、计算机、控制论结合起来，发展成了一门新的学科。

3. 电机的分类

电机的分类方法有很多，常用的分类方法有：按功能用途分，可分为发电机、电动机和控制电机四大类；按电机的结构、转速和运动方式分，可分为变压器、旋转电机和直线电机等。变压器是一种静止电机。旋转电机根据电源电流种类的不同，又可分为直流电机和交流电机两大类。交流电机还可分为同步电机和异步电机两类。综合以上两种分类方法可归纳如下，如图0.1所示。

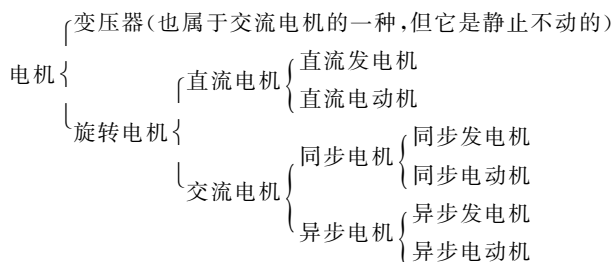


图 0.1 电机的分类

基尔霍夫电流定律的相量形式:对于电路中的任一节点,在任一时刻有

$$\sum \dot{i} = 0 \quad (0.2)$$

2. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律又称为基尔霍夫电压定律(KVL)。它指出:对于电路中的任一回路,任一瞬时沿该回路绕行一周,则组成该回路元件上电压的代数和恒等于零。可任意选择顺时针或逆时针的回路绕行方向,各段电压的正、负与绕行方向有关。一般规定,当元件电压的方向与所选的回路绕行方向一致时为正,反之为负。

KVL用公式表示为

$$\sum u = 0 \quad (0.3)$$

基尔霍夫电压定律的相量形式:在电路中,任一时刻沿任一闭合回路有

$$\sum \dot{U} = 0 \quad (0.4)$$

0.2.2 电磁感应定律和定则

变化的磁场会产生电场,使导体中产生感应电动势,这就是电磁感应现象。在电机中,电磁感应现象主要表现为切割电动势和变压器电动势两种形式。

1. 切割电动势和右手定则

导体或线圈切割磁感线而感应的电动势,称为切割电动势。当 B 、 l 、 v 三量互相垂直,其表达式为

$$e = Blv \quad (0.5)$$

式中: B 为磁感应强度; l 为导体有效长度; v 为导体相对于磁场运动的线速度。

切割电动势的方向可由右手定则确定:如图 0.3 所示,把右手手掌伸开,大拇指与其他四指呈 90° ,如果让磁感线指向手心,大拇指指向运动方向,则其他四指的指向就是导体感应电动势的方向。

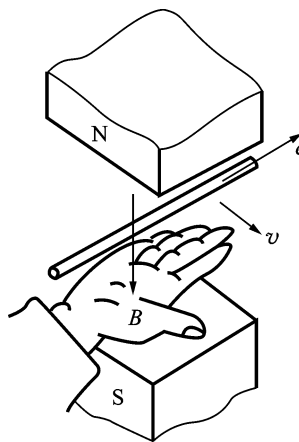


图 0.3 右手定则

2. 变压器电动势

与线圈交链的磁通发生变化时,线圈将感应出电动势,其方向由楞次定律判定。若感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则时,则感应电动势的表达式为

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0.6)$$

式中: Ψ 为磁链; Φ 为磁通; N 为线圈匝数。这一公式也称为法拉第电磁感应定律。

3. 楞次定律

当通达线圈中的磁通发生变化时,在线圈内部产生感应电动势 e ,而感应电动势 e 的方向总是企图使它所产生的感应电流所产生的磁通阻止原磁通的变化。图 0.4(a)、(b)分别表示当线圈中磁通增加时及减少时,在线圈内产生的感应电动势 e 的方向。

第 1 章

变压器

1

变压器是利用电磁感应原理将某一电压的交流电变换成频率相同的另一电压的交流电的静止电机。本章先介绍磁路的基本概念,在此基础上重点讨论单相变压器的结构、工作原理及其使用,对三相变压器亦作简单的介绍。



1.1 磁路的基本概念

变压器、电动机以及继电器、接触器等控制电器的内部结构都有铁芯和线圈,作用是当通以较小电流时,能在铁芯内部产生较强的磁场,使线圈上感应出电动势或对线圈产生电磁力。线圈通电属于电路问题,而产生的磁场大部分局限于铁芯内部,这种人为地使磁通集中通过的路径称为磁路。因此铁芯线圈的磁场就属于磁路问题。

1.1.1 磁路的基本物理量

1. 磁通 Φ

磁通 Φ 表示垂直穿过某一截面积 S 的磁力线总数,单位为 Wb (韦伯)。

2. 磁感应强度 B

磁感应强度(也称磁通密度) B 是一个用来表示磁场内某点的磁场强弱和方向的物理量。磁感应强度是矢量,其值等于垂直于矢量 B 的单位面积的磁力线数,即

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1.1)$$

对于电流产生的磁场,磁感应强度的方向和电流方向满足右手螺旋定则。在国际单位制中,磁感应强度的单位是 T (特斯拉),即 Wb/m^2 , $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2$ 。

3. 磁导率 μ

磁导率 μ 是一个用来表示磁场中介质导磁能力的物理量,单位为 H/m (亨利/米)。

真空中的磁导率为常数,通常采用 μ_0 表示,其数值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ 。一般材料的磁导率 μ 和真空磁导率 μ_0 的比值,称为该材料的相对磁导率 μ_r , 即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.2)$$

相对磁导率 μ_r 越大,介质的导磁性能就越好。表 1.1 所示为常用磁性材料的相对磁导率。

表 1.1 常用磁性材料的相对磁导率

材料名称	铸铁	硅钢片	镍锌铁氧体	锰锌铁氧体	坡莫合金
相对磁导率 μ_r	200~100	7 000~10 000	10~1 000	300~5 000	$2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$

4. 磁场强度 H

磁场强度是一个用来计算磁场的物理量,反映的是电流的磁场,其强弱和方向均取决于电流,与介质无关。磁场强度的大小为磁感应强度与磁导率之比,即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1.3)$$

在国际单位制中,磁场强度的单位为 A/m (安/米)。

1.1.2 铁磁材料的磁性能

1. 高导磁性和磁化性

高导磁性是指铁磁材料的磁导率很高($\mu_r \gg 1$),具有被强烈磁化的特性。铁磁材料之所以具有良好的导磁性能,是因为材料内部具有磁畴结构。铁磁材料内部存在许多体积很小的磁性区域,这些天然的小磁性区域称为磁畴。每个磁畴在无外磁场作用时,排列杂乱无章,极性任意取向,磁性相互抵消,对外不呈磁性。当受到外磁场的作用时,排列无序的磁畴将顺着外磁场的方向转向,形成一个与外磁场方向一致的附加磁场,使铁磁物质内部的磁感应强度大大增加,这种原来没有磁性,在外磁场的作用下产生磁性的性质称为磁化性。非磁性材料内部由于没有磁畴结构,所以不能被磁化。

2. 磁饱和性

当外磁场(或励磁电流)增大到一定值时,磁性材料的全部磁畴的磁场方向都转向与磁场的方向一致,磁化磁场的磁感应强度达到饱和值,这一特性称为磁饱和性。磁饱和性也可从铁磁材料的磁化曲线上看出,如图 1.1 所示。当外磁场逐渐增大时,铁磁材料中的磁畴将随之逐渐转向,首先随外磁场的增加,磁感应强度 B 随之成正比增大(Oa 段);其次磁感应强度 B 几乎呈直线上升(ab 段);最后,由于铁磁材料内部的磁畴几乎全部转向完毕,所以再增加外磁场,磁感应强度 B 几乎不能再增加,此时称为磁饱和(cs 段)。

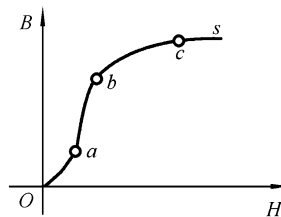


图 1.1 铁磁材料的磁化曲线

3. 磁滞性和剩磁性

当铁芯线圈中通有交变电流(大小和方向都变化)时,铁芯就会受到交变磁化。电流变化时,磁感应强度 B 随磁场强度 H 的变化而变化,当 H 已减到零时,但 B 未回到零,这种磁感应强度滞后于磁场强度变化的性质称为磁性物质的磁滞性。当线圈中电流减到零($H=0$)时,铁芯因磁化所获得的磁性还未完全消失,这时铁芯中所保留的磁感应强度称为剩磁感应强度 B_r 。

1.1.3 磁路的欧姆定律

如图 1.2 所示,设磁路由单一的铁磁材料构成,其横截面面积为 S ,磁路的平均长度为 l 。将磁路与电路相比较可以知道,磁路中的磁通 Φ 相当于电路中的电流 I ,电路中激发电流的因素是电压源电动势 U_s 。那么磁路中激发磁通的因素是什么呢?通过实验发现,励磁电流 I 越大,产生的磁通就越多;线圈的匝数越多,产生的磁通也越多,把励磁电流 I 和线圈匝数 N 的乘积 NI 看做是磁路中产生磁通的源泉,称为磁动势 F 。因此,磁路的欧姆定律可表述为

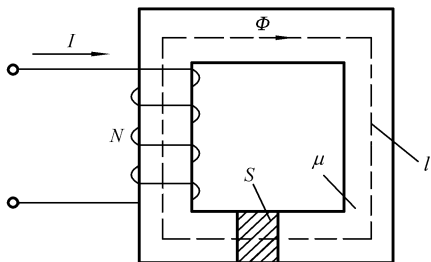


图 1.2 磁路中的各参数

因素是电压源电动势 U_s 。那么磁路中激发磁通的因素是什么呢?通过实验发现,励磁电流 I 越大,产生的磁通就越多;线圈的匝数越多,产生的磁通也越多,把励磁电流 I 和线圈匝数 N 的乘积 NI 看做是磁路中产生磁通的源泉,称为磁动势 F 。因此,磁路的欧姆定律可表述为

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{IN}{R_m} \quad (1.4)$$

式中: R_m 为磁阻,反映了磁路中阻碍磁通的作用。

因线圈漏阻抗压降很小,可忽略不计,于是有

$$U = -E \tag{1.10}$$

或者

$$U \approx E = 4.44fN\Phi_m = 4.44fNB_mS \tag{1.11}$$

式中: B_m 为铁芯磁感应强度最大值; S 为铁芯截面积。

式(1.11)表明,当线圈匝数 N 及电源频率 f 一定时,铁芯中工作磁通幅值的大小取决于励磁线圈外加电压的有效值,而与铁芯材料的尺寸无关。

交流铁芯线圈的功率损耗有两个方面:一方面是线圈电阻上的功率损耗 I^2R ,又称为铜损 ΔP_{Cu} ;另一方面是处于交变磁化下的铁芯中的功率损耗,又称为铁损 ΔP_{Fe} ,铁损是由磁滞和涡流产生的。

铁芯在反复交变的磁化过程中,内部磁畴的极性取向随着外磁场的交变而翻转,在翻转过程中,磁畴间相互摩擦而引起的能量损耗称为磁滞损耗。

铁芯材料不仅是导磁材料,也是导电材料,当穿过铁芯中的磁通发生变化时,在铁芯中将产生感应电流。这种感应电流在垂直于磁力线的平面内呈旋涡状,故称为涡流。涡流在铁芯电阻上引起的功率损耗称为涡流损耗。

为了提高磁路的导磁性能和减少铁芯的损耗,铁芯通常用厚度为 0.35 mm 或 0.5 mm,且表面涂有绝缘漆的硅钢片叠制而成。采用这样的办法可将涡流限制在较小的截面内流通,加上硅钢的电阻率较大,可大大减小涡流及涡流损耗。

1.2 变 压 器

1.2.1 变压器的用途与结构

1. 变压器的用途

在输电方面,变压器用来升压,这样可以减小输电线的横截面积,减小线路上的电压降以及线路上的功率损耗。在用电方面,变压器用来降压,以保证用电安全和满足用电设备的电压要求。在电子线路上,除电源变压器外,变压器还用来耦合电路、传递信号,并实现阻抗匹配。此外,变压器还有许多特殊的用途。

2. 变压器的基本结构

变压器虽然种类很多,有电力变压器、控制变压器、电源变压器、焊接变压器、自耦变压器等,但其基本结构是相同的,都是由铁磁材料构成铁芯和绕在铁芯上的线圈(也称绕组)两部分组成的。变压器常见的结构形式有心式变压器和壳式变压器两类。心式变压器如图 1.4(a)所示,它的特点是用绕组包围铁芯,用铁量少,构造简单,绕组的安装和绝缘处理比较容易,因此多用于容量较大的变压器。壳式变压器如图 1.4(b)所示,它的特点是用铁芯包围绕组,用铜量较少,多用于小容量的变压器。

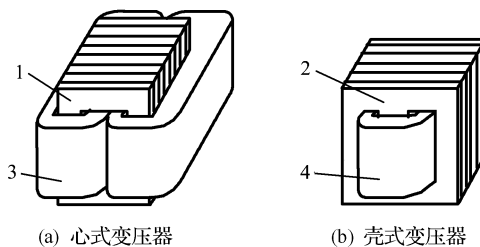


图 1.4 变压器的结构
1、2—铁芯;3、4—绕组

铁芯是变压器的磁路部分,并作为变压器的机械骨架。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成。单相变压器的铁芯可分为叠片式和卷制式两种,如图 1.5(a)、(b)所示。铁芯柱上套装变压器绕组,铁轭起到连接铁芯柱使磁路闭合的作用。对铁芯的要求是导磁性能要好,磁滞损耗及涡流损耗要尽量小,因此均采用 0.3~0.35 mm 规格的硅钢片制作。

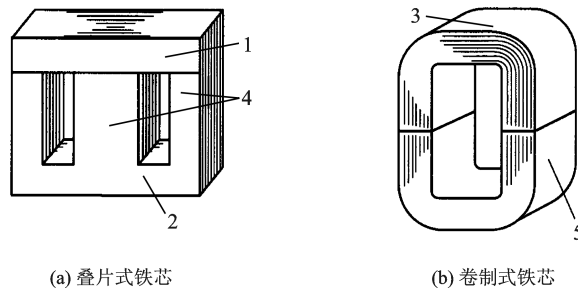


图 1.5 单相变压器的铁芯
1、2、3—铁轭;4、5—铁芯柱

绕组是变压器的电路部分,小型变压器一般用具有绝缘的漆包圆铜线绕制而成。对容量稍大的变压器则用扁铜线或扁铝线绕制。电压高的绕组称为高压绕组,电压低的绕组称为低压绕组,低压绕组一般靠近铁芯放置,而高压绕组则置于外层。

为了便于分析,把与电源连接的一侧称为原绕组(或称初级绕组、一次绕组、原边),原绕组各量均用下脚标“1”表示,如 N_1 、 u_1 、 i_1 等;与负载连接的一侧称为副绕组(或称次级绕组、二次绕组、副边),副绕组各量均用下脚标“2”表示,如 N_2 、 u_2 、 i_2 等。

1.2.2 变压器的工作原理

1. 变压器的空载运行与变换电压

如图 1.6 所示,变压器原绕组接交流电源,副绕组不接负载,这种情况称为变压器空载运行。

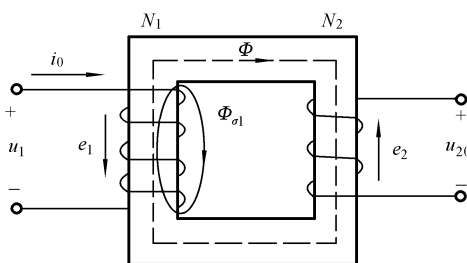


图 1.6 变压器空载运行工作原理图

在外加正弦交流电压 u_1 作用下,原绕组内便有交变电流 i_0 通过,由于副绕组开路,副绕组内没有电流通过,此时原绕组内的电流 i_0 称为空载电流。 i_0 通过原绕组产生磁动势 $i_0 N_1$,该磁动势产生的磁通绝大部分经过铁芯而闭合,并与原、副绕组交链,这部分磁通称为主磁通,用 Φ 表示。主磁通 Φ 穿过原绕组和副绕组,而在其中产生感应电动势 e_1 和 e_2 ,另有一小部分漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 不经过铁芯仅与原绕组本身交链而闭合,漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 在变压器中产生的感应电动势

仅起电压降的作用,而且作用较小,故一般略去漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 及其产生的电压降的作用。上述的电磁关系可表示为

$$u_1 \rightarrow i_0 \rightarrow i_0 N_1 \rightarrow \begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \rightarrow u_{20} \end{cases}$$

式中： u_{20} 为副绕组的空载端电压。

根据基尔霍夫电压定律，按图 1.6 所规定的电压、电流和电动势的参考方向，可得

$$u_1 = i_0 R_1 - e_1 = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$u_{20} = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

式中： R_1 为原绕组的电阻。

用向量形式可写成

$$U_1 = I_0 R_1 + (-E_1)$$

$$U_{20} = E_2$$

在一般的变压器中， i_0 很小，因而原绕组的电阻压降 $i_0 R_1$ 很小，故可近似认为

$$u_1 \approx -e_1 \quad \text{或} \quad U_1 \approx -E_1$$

因此有

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx -\frac{E_1}{E_{20}}$$

其有效值之比为

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1.12)$$

式中： K 为变压器的变比。当 $K > 1$ 时为降压变压器；当 $K < 1$ 时为升压变压器。

【例 1.1】 一台 $S_N = 600 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的单相变压器，接在 $U_1 = 10 \text{ kV}$ 的交流电源上，空载运行时，它的副绕组电压 $U_{20} = 100 \text{ V}$ ，试求变比 K ；若已知 $N_2 = 32$ 匝，试求 N_1 。

解 由式(1.12)可得

$$K \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{10\,000}{100} = 100$$

$$N_1 = KN_2 = 100 \times 32 \text{ 匝} = 3200 \text{ 匝}$$

2. 变压器的负载运行与变换电流

变压器的原绕组接上电源，副绕组接有负载，这种情况称为变压器的负载运行。变压器负载运行的工作原理如图 1.7 所示。

变压器未接负载前，其原绕组电流为 i_0 ，它在原绕组产生磁动势 $i_0 N_1$ ，在铁芯中产生磁通 Φ 。变压器接上负载后，副绕组电流 i_2 产生磁动势 $i_2 N_2$ ，它将阻碍主磁通 Φ 的变化，企图改变主磁通的最大值 Φ_m 。但是，当电源 U_1 和 f 一定时，由式(1.11)可知， E_1 和 Φ_m 近似恒定。或者说，阻止负载电流 i_2 的出现，通过原绕组电流 i_0 及其产生的磁动势， $i_0 N_1$ 必然随之增至 $i_1 N_1$ ，以维持主磁通的最大值 Φ_m 基本不变，即与空载时的 Φ_m 大小几乎一样。因此，有负载时产生主磁通的原、副绕组的合成磁动势 $i_1 N_1 + i_2 N_2$ 应该与空载时产生主磁通的原绕组的磁动势 $i_0 N_1$ 差不多相等，即

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 \approx i_0 N_1$$

用向量表示，有

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 \approx I_0 N_1 \quad (1.13)$$

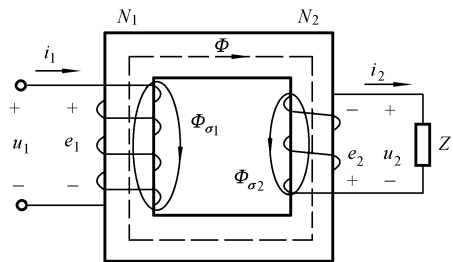


图 1.7 变压器负载运行的工作原理

变压器的空载电流 I_0 主要用来励磁。由于铁芯的磁导率 μ 很大,故空载电流 I_0 很小,常可忽略不计,于是式(1.13)可变为

$$I_1 \approx -\frac{N_2}{N_1} I_2$$

由上式可知,原、副绕组的电流关系为

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (1.14)$$

式(1.14)表明变压器原、副绕组的电流之比近似与它们的匝数成反比。

3. 变压器变换阻抗

如图 1.8 所示,设变压器副绕组接一阻抗为 $|Z|$ 的负载,有

$$|Z| = \frac{U_2}{I_2}$$

这时从原绕组看进去的阻抗为反映到原绕组的阻抗 $|Z'|$,即

$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} U_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 |Z| \quad (1.15)$$

式(1.15)表明,在忽略漏磁阻抗的影响下,只需调整匝数比,就可把负载阻抗变换为所需的、比较合适的数值,且负载的性质不变,这种做法通常称为阻抗匹配。

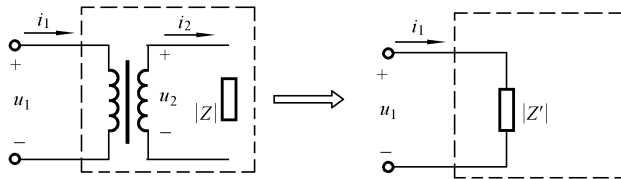


图 1.8 负载阻抗的等效变换

【例 1.2】 已知某收音机输出变压器的原绕组匝数 $N_1 = 600$ 匝,副绕组匝数 $N_2 = 30$ 匝,原绕组接阻抗为 16Ω 的扬声器,现要改接成 4Ω 的扬声器,求副绕组匝数应为多少?

解 原变比为

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{600}{30} = 20$$

原绕组阻抗为

$$|Z'| = K^2 |Z_1| = 20^2 \times 16 \Omega = 6400 \Omega$$

扬声器改为 4Ω 时,有

$$|Z'| = K^2 |Z_2| = \left(\frac{600}{N'_2}\right)^2 \times 4 \Omega = 6400 \Omega$$

所以

$$N'_2 = \sqrt{\frac{600^2 \times 4}{6400}} = \frac{600 \times 2}{80} = 15$$