

项目三 变压器使用与维护

一、学习目标

知识目标

- 1 了解磁场，理解描述磁场的磁感应强度、磁通量、磁导率和磁场强度这几个物理量。
- 2 掌握磁场对电流的作用——安培力的大小和方向，了解其应用。
- 3 了解电磁感应现象，理解自感与互感及感应电动势，会计算感应电动势的大小及判断它的方向，会判断互感线圈的同名端，能用实验的方法测出同名端，掌握互感线圈的串并联及等效互感系数。
- 4 理解磁动势和磁阻，掌握磁路欧姆定律。
- 5 了解交直流电磁铁的区别及交流电磁铁的应用，了解电磁式和电动式仪表的结构与工作原理。
- 6 掌握单相变压器的结构和工作原理，理解变压器的运行特性，了解三相变压器。

技能目标。

- 1、学会确定互感线圈同名端、互感系数以及耦合系数的测定方法。
- 2、测量单相变压器的电压比和空载阻抗，测量单相变压器的阻抗比，测量单相变压器的外特性。

二、工作任务单

序号	任务名称
1	电磁铁分析
2	变压器的结构和工作原理

任务一 电磁铁分析

知识链接一 磁场及其基本物理量

磁场是一种既看不见又摸不着的特殊的物质，主要来自于磁体、载流导体或通电线圈。磁场不仅有方向，且有力的效应，即磁场和磁场之间存在着相互作用，对处于磁场中的载流导体有力的作用。下面简单介绍有关描述磁场的一些基本物理量。

一 磁感应强度与磁通量

(一) 磁感应强度 B ：描述磁场中某一点磁场的强弱和方向的物理量，用矢量 B 表示，定义式为：

$$B=F/IL \quad (3-1)$$

它的大小可用磁力线的疏密来表示，它的方向可用通过该点磁场的方向来表示。它只与磁场本身的性质有关，国际单位是特斯拉(T)。

(二) 磁通量 Φ ：在磁场中，磁感应强度和它垂直方向的某一横截面面积的乘积称为磁通。在国际单位制中，磁通的单位是韦伯 (Wb)，即

$$\phi=BS \quad (3-2)$$

$$1\text{Wb}=1\text{T} \cdot \text{m}^2$$

由上式可以看出，磁感应强度可看成是通过单位面积的磁通，所以磁感应强度 B 又叫磁通密度。

$$1\text{T}=1\text{Wb}/\text{m}^2$$

上式只适用于匀强磁场

二、磁导率(μ)和磁场强度(H)

(一) 磁导率

研究物质的磁性时，通常把物质称为磁介质。

磁导率是表示磁场中磁介质导磁性能的物理量。单位是亨每米(H/m)。实验测得，真空的磁导率为常数，即

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

其他介质的磁导率一般用与真空的的倍数来表示，记为 μ_r ，称为相对磁导率，它没有单位

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (3-3)$$

相对磁导率越大，介质的导磁性能越好。据相对磁导率的大小不同，可以将物质分为磁性材料和非磁性材料两大类，前者相对磁导率很大，如铁及它的合金，广泛应用在电力技术中，像变压器、各种电工仪表设备中，国防技术中有磁性水雷、电磁炮等；后者相对磁导率很小，如空气、铜等，表3—1给出了几种常见材料的相对磁导率。

表3—1 几种常见材料的相对磁导率

物质名称	相对磁导率 μ_r	物质名称	相对磁导率 μ_r
镍	1120	软铁	2180
硅钢片	7000-10000	镍铁合金	60000
空气	1.000	钴	174

(二)、**磁场强度H**：在任何磁介质中，磁场中某点的磁感应强度与同一点的磁导率的比值称为该点的磁场强度，即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (3-4)$$

在国际单位制中，磁场强度的单位是安每米(A/m)

知识链接二 磁场对电流的作用及其应用

电流可以产生磁场，磁场的基本性质是对处在其里面的磁极或通电导体有力的作用。这种作用力称为安培力。在很多的电工设备中都有应用，如电动机的旋转、电工仪表指针的偏转等。

一 磁场对通电直导线的作用

通有电流的直导线位于均匀磁场中，并与磁场方向垂直，如图3—1所示。这里的磁场方向用“ \otimes ”表示，即表示垂直纸面向里。通过实验表明，直导线将受到安培力的作用，从而向左运动。该力的大小与直导线的长度、通过的电流及该处的磁感应强度成正比。

$$F = BIl \quad (3-5)$$

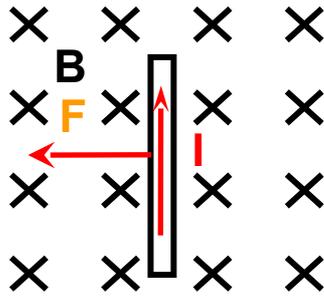


图 3—1 通电导线在磁场中的受力

如果通电导线与磁场的方向平行放置，那么导线将不受力的作用如图 3—2 (a) .如果通电导线的位置与磁场方向有一定的夹角，如图 3—2(b)所示，那么它受到的作用力将变为：

$$F = BIl \sin \alpha \quad (3—6)$$

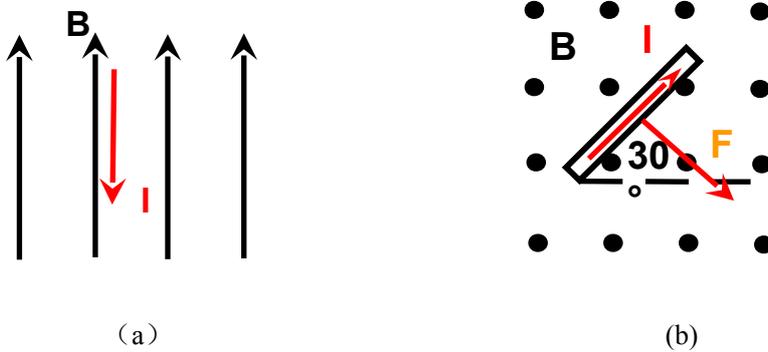


图 3—2 通电导线与磁场有一定的夹角

上式说明只有与导线垂直的磁场部分对导线有力的作用，而与导线平行的磁场部分对导线不产生力的作用。

通电导线在磁场中受力的方向可以用左手定则判断。左手定则的内容是，伸开左手，大拇指与四指垂直，让磁感线垂直穿过手心，四指指向导线中的电流方向，那么大拇指所指的方向为导线的受力方向。由左手定则可知，磁感线的方向、通电导线的电流方向、导线的受力方向三者是互相垂直的。

二、磁场对通电线圈的作用

如果把导线换成线圈呢？磁场对通电线圈也有力的作用。如图 3—3 所示磁场中的矩形通电线圈。线圈可以看作四根导线，据左手定则，矩形的两条短边与磁场方向平行不受力的作用，两条长边受到两个相反的作用力，以矩形的中心线为轴，线圈受到一个力矩的作用，可以转动。电工仪表和电动机就是应用这个原理制成的。

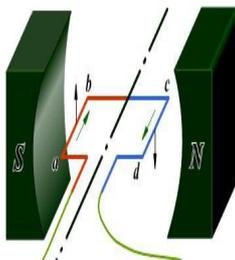


图 3—3 通电线圈在磁场中的受力

三、磁场对电流的作用的应用

电磁炮是利用安培力推动通电导体平动的例子，电动机、电流表则是利用安培力使通电线圈转动的实例。

(一) 电磁炮

根据磁场对电流会产生作用力的原理，人们研制出一种新型的发射炮弹的装置——电磁炮，它主要由电源、高速开关、加速装置和炮弹四部分组成。目前，国外所研制的电磁炮，根据结构和原理的不同，可分为四种类型：线圈炮、轨道炮、电热炮和重接炮。电磁炮的结构和原理如图3—4所示，轨道炮是利用轨道电流间相互作用的安培力把弹丸发射出去。它由两条平行的长直导轨组成，导轨间放置一质量较小的滑块作为弹丸。当两轨接入电源时，强大的电流从一导轨流入，经滑块从另一导轨流回时，在两导轨平面间产生强磁场，通电流的滑块在安培力的作用下，弹丸会以很大的速度射出，这就是轨道炮的发射原理。

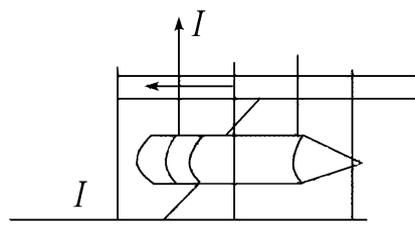


图 3—4 电磁炮结构原理图

(二) 磁电式电表

电流表是测量电流的电学仪器，实验时经常使用的电流表是磁电式电流表。磁电式电流表的构造如图3—5所示



图 3—5 磁电式电表结构原理图

在蹄形磁铁的两极间有一个固定的圆柱形铁芯，铁芯外面套有一个可以转动的铝框，在铝框的转轴上装有两个螺旋弹簧和一个指针，线圈的两端分别接在这两个螺旋弹簧上，被测电流经过这两个弹簧流入线圈。蹄形磁铁和铁芯间的磁场是均匀辐射分布的，通电线圈不管转到什么角度，线圈的平面都跟磁感线平行。当电流通过线圈的时候，线圈上跟铁芯轴线平行的两边受到的安培力产生力矩，使线圈发生转动。同时，螺旋弹簧被扭转，产生一个阻碍线圈转动的力矩，其大小随线圈转动角度的增大而增大，直至上述两个力矩相平衡时，线圈才会停下来。磁场对电流的作用力跟电流成正比，因而线圈中的电流越大，安培力产生的力矩也越大，线圈和指针偏转的角度也就越大。因此，根据指针

偏转角度的大小，可以知道被测电流的强弱，且指针偏转的角度与电流成正比，故电流表的刻度是均匀的。

磁电式电流表的优点：灵敏度高，常作检流计使用。缺点：量程较小（允许通过的电流较小）。因而只能用来测量很小的电流

知识链接三：电磁感应现象

一、电磁感应现象

当导体在磁场中切割磁力线或穿过线圈的磁通发生变化时，产生感应电动势，这种现象称为电磁感应现象；当感应电动势与电路连接形成闭合回路时，电路中就有电流，这种电流称感应电流。感应电动势的大小由法拉第电磁感应定律可计算：

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} \quad (3-7)$$

式中“ ϕ ”表示感应电流所产生的磁通，总是阻碍引起感应电流磁通的变化。“ ψ ”叫磁链，为线圈的匝数 N 与磁通 ϕ 的乘积。即

$$\psi = N\phi \quad (3-8)$$

二、感应电动势的方向及楞次定律

感应电动势的方向由右手定则和楞次定律来确定。右手定则用来判断导体切割磁感应线产生的感应电动势方向，楞次定律用来判定线圈上产生的感应电动势的方向。感应电动势在电路中的作用与电源相同，其方向与电源电动势的方向相同，即由负极指向正极。

（一）右手定则：伸开右手，让四指与大拇指垂直，磁力线垂直穿过手心，大拇指指向导体切割磁力线的方向，四指所指的方向即为导体中感应电流的方向。

需要注意的是，电动势的方向由负极指向正极，如果导体通过导线与电路连接，导体中的感应电流的方向由负极流向正极。这时的导体相当于一个电源，因此可先假定电路是闭合的，利用右手判断电路中感应电流的方向，再根据电源内部电流的方向由负极流向正极的方法来确定感应电动势的方向。

（二）楞次定律：感应电流产生的磁场总是阻碍引起感应电流的磁场的变化，这就是楞次定律。

电流周围存在磁场，同样感应电流周围也存在磁场。感应电流产生的磁场总是阻碍引起感应电流的磁场的变化，也就是说，当引起感应电流的磁场减弱时，感应电流产生的磁场方向与引起感应电流的磁场方向相同；当引起感应电流的磁场增强时，感应电流产生的磁场方向与引起感应电流的磁场方向相反。

用楞次定律判断感应电动势的方法和步骤是：

- （1）先确定引起感应电流的磁场方向和强弱怎样变化
 - （2）根据楞次定律确定感应电流产生的磁场方向，再用右手定则判断感应电流的方向
 - （3）根据在导体或线圈中，感应电流是由负极流向正极的原则确定感应电动势的方向
- 楞次定律适用于一切电磁感应现象，楞次定律是能量守恒定律在电磁现象中的具体体现。

链接四：.自感与互感

在电磁感应现象中有两种，即自感与互感。 ，

一自感

(一) . 自感现象与自感电动势

自感现象是电磁感应现象中的一种特殊情形。这种由于流过线圈本身电流变化引起感应电动势的现象，称为自感现象。这个感应电动势称为自感电动势。

当电流流过回路时，在回路内要产生磁通，此磁通称为自感磁通，用符号 ϕ_L 表示。当电流流过匝数为 N 的线圈时，线圈的每一匝都有自感磁通穿过，如果穿过线圈每一匝的磁通都一样，那么，这个线圈的自感磁链为

$$\psi_L = N\phi_L$$

为了表明各个线圈产生自感磁链的能力，将线圈的自感磁链与电流的比值叫做线圈（或回路）的自感系数（或叫自感量），简称电感，用符号 L 表示，即；

$$L = \frac{\psi_L}{I} \quad (3-9)$$

根据法拉第电磁感应定律，可以写出自感电动势的表达式为

$$e_L = \frac{d\psi}{dt}$$

将 $\psi_L = LI$ 代入上式得

$$e_L = L \frac{dI}{dt} \quad (3-10)$$

(二) . 自感现象的应用与危害

自感现象在各种电器设备和无线电技术中有广泛的应用，日光灯的镇流器就是利用线圈自感现象的一个例子。自感现象的危害：如在大型电动机的定子绕组中，定子绕组的自感系数很大，而且定子绕组中流过的电流又很强，当电路被切断的瞬间，由于电流在很短的时间内发生很大的变化，会产生很高的自感电动势，在断开处形成电弧，这不仅会烧坏开关，甚至危及工作人员的安全。因此，切断这类电路时必须采用特制的安全开关。

二. 互感

(一)、互感现象和互感电动势

线圈中由于自身电流变化而产生感应电动势的现象称为自感现象，产生的电压称为自感电压。如果一个线圈中交变电流产生的磁通同时还穿过相邻的另一个线圈，那么在另一个线圈中也会产生感应电动势，这种由于一个线圈中的电流变化而在另一个线圈中产生互感电动势的现象称为互感现象。具有互感现象的电路称为互感电路。在图 3—6 (a) 中，当线圈 I 中的电流变化时，在线圈 II 中产生变化的互感磁链 ψ_{21} ，而 ψ_{21} 的变化将在线圈 II 中产生互感电动势 e_{M2} 。如果选择电流 i_1 与 ψ_{21} 的参考方向以及 e_{M2} 与 ψ_{21} 的参考方向都符合右手螺旋定则时，根据电磁感应定律，得

$$e_{M2} = \frac{d\psi_{21}}{dt} = M \frac{di_1}{dt} \quad (3-11)$$

同理，在图 3—6 (b) 中，当线圈 II 中的电流 i_2 变化时，在线圈 I 中也会产生互感电动势 e_{M1} ，当 i_2 与 ψ_{12} 以及 ψ_{12} 与 e_{M1} 的参考方向均符合右手螺旋定则，则有

$$e_{M1} = \frac{d\Psi_{21}}{dt} = M \frac{di_2}{dt} \quad (3-12)$$

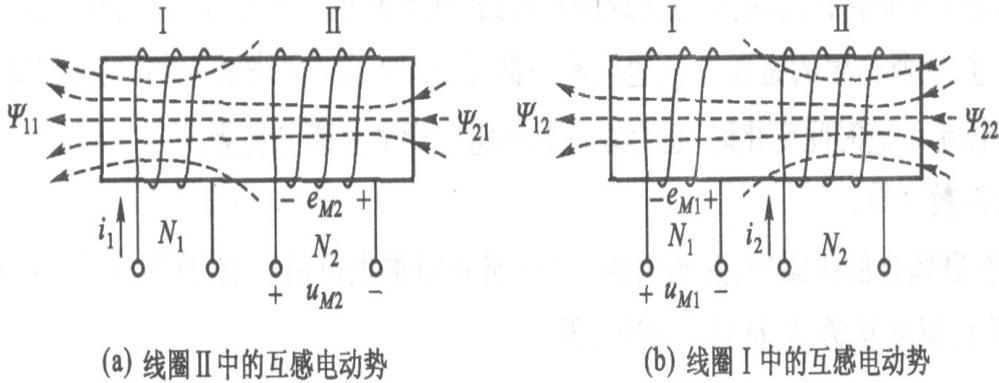


图 3—6 线圈中的互感电动势

(二) 互感系数

彼此间具有互感应的线圈称为互感耦合线圈，简称耦合线圈。对于两个线圈，它们除了互感以外，每个线圈还有自感。耦合线圈中，若选择互感磁链与产生它的电流方向符合右手螺旋定则，则它们的比值称为耦合线圈的互感系数，简称互感，用 M 表示。两线圈间的互感系数 M 和各自的自感系数 L_1 、

L_2 之间的关系为：

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3-13)$$

k 为两线圈的耦合系数，它反映了两个线圈之间的耦合程度，由于互感磁通是自感磁通的一部分，所以 $0 \leq k \leq 1$ 。显然，当 k 近似为 1 时，为强耦合，当 k 接近于零时，为弱耦合，当 $k=1$ 时，称两个线圈为全耦合，此时自感磁通全部为互感磁通。

(三)、同名端的意义及其测定

1 互感线圈的同名端

在工程中，两个或两个以上的有磁耦合的线圈，常常需要知道互感电动势的极性，才能选择正确的连接方式。互感电动势的极性不仅与原磁通及其变化方向有关，还与线圈的绕向有关。尽管可以利用楞次定律来判断互感电动势的极性，但不方便，在实际中常利用标记同名端的方式来说明互感电动势的极性。当两个线圈通入电流，所产生的磁通方向相同时，两个线圈的电流流入端称为同名端（又称同极性端），反之为异名端。用符号 “·”、“*”、“V” 标记。同名端总是成对出现的，如是有两个以上的线圈彼此间都存在此耦合时，同名端应一对一对地加以标记，每一对须用不同的符号标出。

例 3.1 电路如图 3—7 所示，试判断同名端

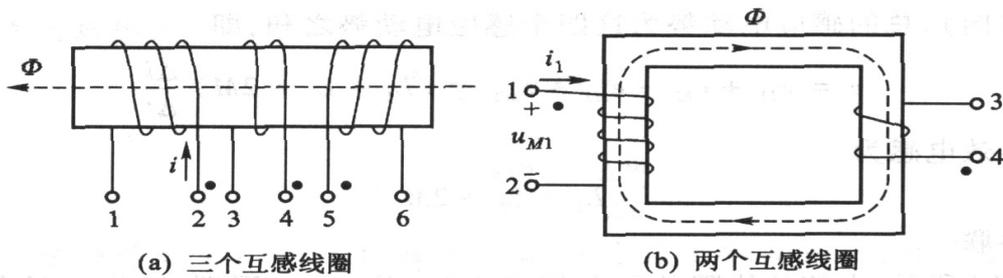


图 3—7 同名端的标记

解：根据同名端的定义，图 3—7 (a) 中，从左边线圈的端点“2”通入电流，由右手螺旋定则判定磁通方向指向左边；右边两个线圈中通过的电流要产生相同方向的磁通，则电流必须从端点“4”、端点“5”流入，因此判定 2, 4, 5 为同名端，1, 3, 6 也为同名端。同理图 3—7 (b) 中 1, 4 为同名端，2, 3 也为同名端。

2. 同名端的实验测定

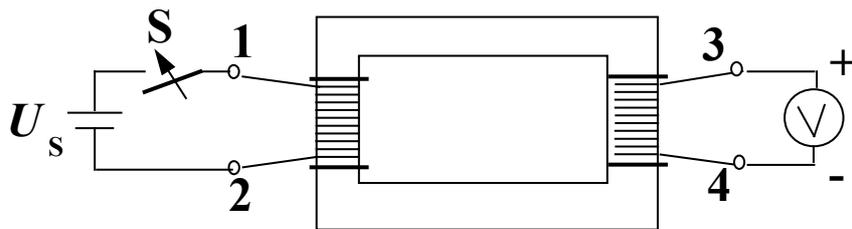
如果给定一对不知绕向的互感线圈，可以采用以下两种实验方法来判断出它们的同名端。

直流判别法：依据同名端定义以及互感电动势参考方向标注原则来判定。如图 3—8 (a) 所示，两个耦合线圈的绕向未知把一个线圈通过开关 S 接到一直流电源上，再将一个直流电压表（或电流表）接到另一线圈上，当开关闭合瞬间，就有随时间增大的电流从电源的正极流入线圈端组 1，这时 $\frac{di}{dt}$ 大于零。若电压表指针正偏转，而且电压表正极接端组 3，这说明 3 端电压为正极性，因此 1、3 端为同名端；若电压表指针反偏，说明 4 端电压正极性，则 1, 4 端为同名端。

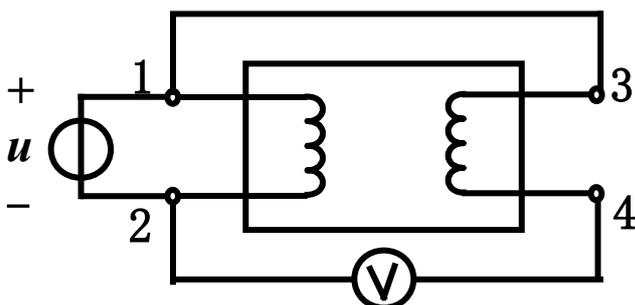
交流判别法：如图 3—8 (b) 所示，将两个线圈各取一个接线端联接在一起，如图中的 2 和 4。并在一个线圈上（图中为线圈）加一个较低的交流电压，再用交流电压表分别测量 1 与 2、3 与 4 各值，

·若 U_{24} 约等于 U_{12} 和 U_{34} 之差，则 1、3 为同名端；

·若 U_{24} 约等于 U_{12} 和 U_{34} 之和，则 1、3 为异名端。



(a) 同名端的直流判别法



(b) 同名端的交流判别法

图 3—8 同名端的两种判别法

(四) . 具有互感的线圈串联

将两个有互感的线圈串联起来有两种不同的连接方式。

1 顺向串联：将两个线圈的异名端相连接；

2 反向串联：将两个线圈的同名端相连接。

(1) 顺向串联 如图 3—9(a)所示，设电流从端点 1 经过 2、3 流向端点 4，并且电流是减小的，则在两个线圈中出现四个感应电动势，两个自感电动势 e_{L1} 、 e_{L2} （与电流同方向）和两个互感电动势 e_{M1} 、 e_{M2} （与自感电动势同方向），总的感应电动势为这四个感应电动势之和，即

$$e = e_{L1} + e_{L2} + e_{M1} + e_{M2} = (L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt}$$

故顺向串联的等效电感为

$$L_z = L_1 + L_2 + 2M \tag{3—14}$$

(2) 反向串联 如图 3—9 (b) 所示，电流从线圈的异名端流入（或流出）。同理，可推出反向串联的两个线圈的等效电感为

$$L_f = L_1 + L_2 - 2M \tag{3—15}$$

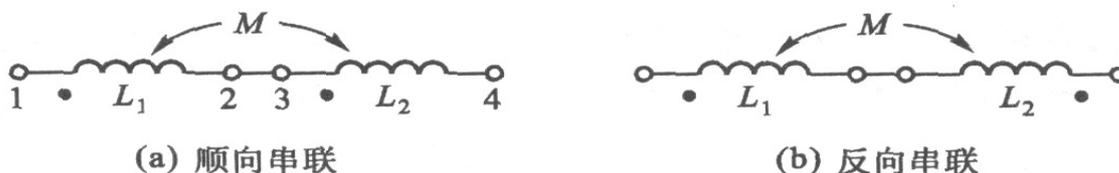


图 3—9 互感线圈的串联

由上述分析可见，当互感线圈顺向串联时，等效电感增加；反向串联时，等效电感减少，有削弱电感的作用。

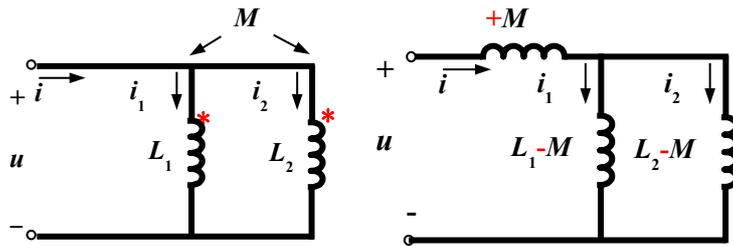
比较式 (3—14) 和 (3—15) 两式可知，顺接串联的等效电感比反接串联的等效电感大 4M。

$$M = \frac{1}{4}(L_z - L_f) \tag{3—16}$$

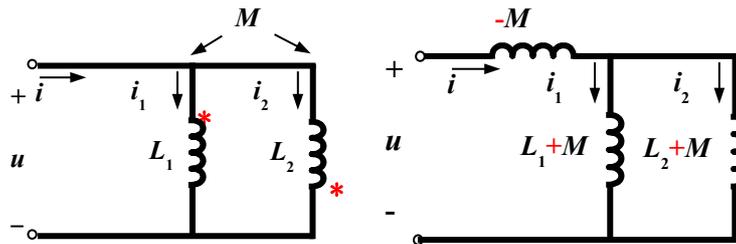
此结论可以用交流实验方法判断同名端和进行 M 值的测定。

(五) 、具有互感的线圈并联

互感线圈的并联也有两种接法，一种是两个线圈的同名端相连，称为同侧并联，如图 3—10 (a)；另一种是两个线圈的异名端相连，称为异侧并联，如图 3—10 (b) 所示。



(a) 同侧并联



(b) 异侧并联

图 3—10 互感线圈的并联

按照等效的概念和等效电路图，可以求出两个互感线圈同侧和异侧并联时的等效电感为

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

$$L_Y = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} \quad (3-17)$$

显然，同名端连接时，耦合电感并联的等效电感较大。因此，将耦合电感并联时，必须注意同名端。

链接五：磁路欧姆定律

一磁路的基本概念

在电工技术中不仅要讨论电路问题，还将讨论磁路问题。因为很多电工设备与电路和磁路都有关系，如电动机、变压器、电磁铁及电工测量仪表等。而磁路问题与磁场有关，与磁介质有关，磁场又往往与电流和电路相关联，所以下面我们研究磁路和电路的关系。

在电气设备中为了得到较强的磁场，通常利用磁导率很高的铁磁材料把电流产生的磁通集中在铁心这个限定的空间内。这种集中的磁通所经过的路径称为磁路。如图 3—11 所示为几种电气设备的磁路。其中图 3—11 (a) 中变压器的磁路是双回路方形磁路；图 3—11 (b) 中电磁铁的磁路是单回路磁路，回路中有一小段空气隙；而图 3—11 (c) 中是磁电式仪表的磁路，回路中有两小段空气隙。

线圈绕在由铁磁材料制成的铁心上，线圈通以电流，便产生磁通，故此线圈称为励磁线圈。线圈中的电流称为励磁电流。磁路的几何形状决定于铁心的形状和励磁线圈在铁心上安置位置。

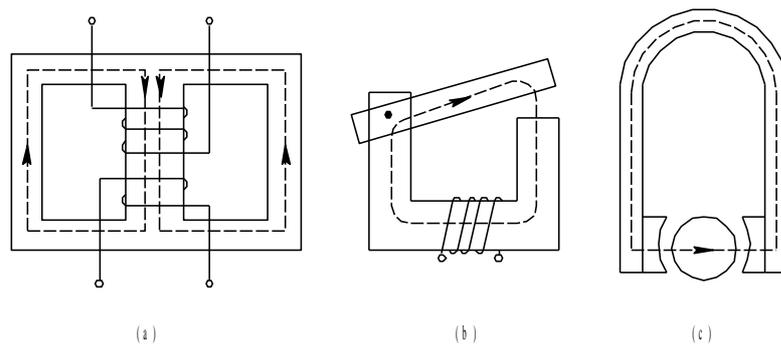


图 3—11 几种电气设备的磁路

励磁线圈通过励磁电流会产生磁通，通过实验发现，线圈匝数越多，励磁电流越大，产生的磁通也就越多。我们把励磁电流 I 和线圈匝数 N 的乘积称为磁动势，单位是安 (A)，用 F 表示，即

$$F = NI \quad (3-18)$$

磁阻 R_m 表示磁介质对磁通的阻碍作用的大小。磁介质的磁导率 μ 越大，横截面 S 越大，则对磁通量 ϕ 的阻碍作用越小；而磁路 L 越长，对磁路的阻碍作用越大。

$$R_m = \frac{L}{\mu S} \quad (3-19)$$

二 磁路欧姆定律

为了使励磁电流产生尽可能大的磁通，在电磁设备中要放置一定形状的铁心。绝大部分磁通将通过铁心形成闭合路径——磁路。磁路和电路在分析思路上基本一致，所以我们在分析磁路时，可以将全电路欧姆定律应用到磁路中来。

一个磁路中的磁阻等于磁动势与磁通量的比值。这个定义可以表示为：

$$\phi = \frac{F}{R_m} \quad (3-20)$$

即磁路中的磁通 Φ 等于作用在该磁路上的磁动势 F 除以磁路的磁阻 R_m ，这就是磁路的欧姆定律。

比较上两式可得

$$\phi = \frac{F}{R_m} = \frac{\mu FS}{LR_m} \quad (3-21)$$

磁通量总是形成一个闭合回路，但路径与周围物质的磁阻有关。它总是集中于磁阻最小的路径。空气和真空的磁阻较大，而容易磁化的物质，例如软铁，则磁阻较低。如图 3—12 所示

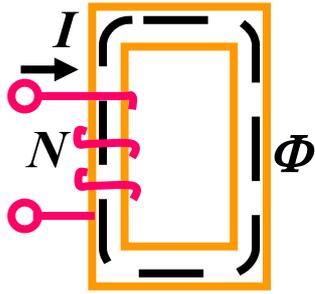


图 3—12 直流磁路

磁路和电路有很多相似之处：如磁路中的磁通由磁动势产生，而电路中的电流由电动势产生；磁路中有磁阻，它使磁路对磁通起阻碍作用，而电路中有电阻，它使电路对电流起阻碍作用；磁阻与磁导率、磁路截面成反比，与磁路长度成正比，而电阻也与电导率导线截面成反比，与电路长度成正比。它们之间的对应关系如表 3—2

表 3—2 电路欧姆定律与磁路欧姆定律比较如下：

磁路	电路	磁路	电路
磁动势 F	电动势 E	磁阻 $R = l / \mu S$	电阻 $R = E / I$
磁通 Φ	电流 I	磁通 $\Phi = \frac{F}{R_m}$	电流 $I = \frac{E}{R}$

链接六：交直流电磁铁

电磁铁是利用通电的铁心线圈吸引衔铁或保持某种机械零件、工件于固定位置的一种电器。工作原理是用电磁铁衔铁的动作带动其他机械装置运动，产生机械连动，实现控制要求。根据使用电源类型分为直流电磁铁和交流电磁铁。直流电磁铁用直流电源励磁；交流电磁铁用交流电源励磁。直流电磁铁的磁通不变，无铁损，铁心用整块软钢制成；交流电磁铁中，为了减少铁耗，铁心由钢片叠成。常见电磁铁的结构型式如图 3—13 所示

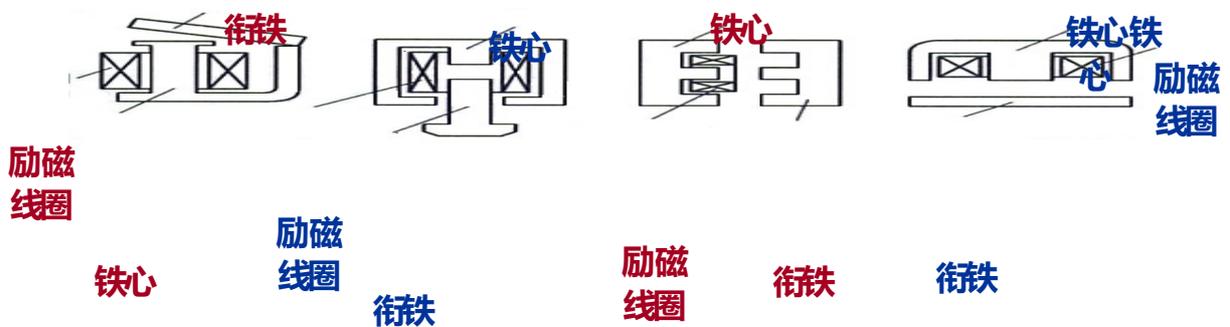


图 3—13 电磁铁的结构

线圈可分为空心线圈和铁芯线圈，由于空气的磁导率较小，所以空心线圈是一种电感量不大的线性

电感元件。在电气工程上，为了获得较大的电感量，常在线圈中插入铁芯，这种线圈称为铁芯线圈。铁芯线圈可分为直流铁芯线圈和交流铁芯线圈。

一、直流电磁铁

(一) 直流铁芯线圈电路

直流铁芯线圈较为简单，因为直流铁芯线圈中通过直流电来励磁，产生的磁通是恒定的，在铁芯中不会产生感应电动势，因此，励磁电流的大小仅由线圈两端电压及线圈电阻所决定。功率损耗也只与电流和电阻有关。

(二) 直流电磁铁的优点

直流电磁铁有许多优点，它的磁性有无可以由通断电来控制，磁性强弱可以由电流的大小来控制，磁极的极性由电流的方向控制，在线圈中插入铁心，使电磁铁的磁性大大增强。在电流一定时，线圈的匝数越多，磁性越强。

直流电磁铁的铁心由整块软铁制成，电磁吸力为

$$F = \frac{10^7}{8\pi} \frac{\Phi^2}{S} \quad (3-22)$$

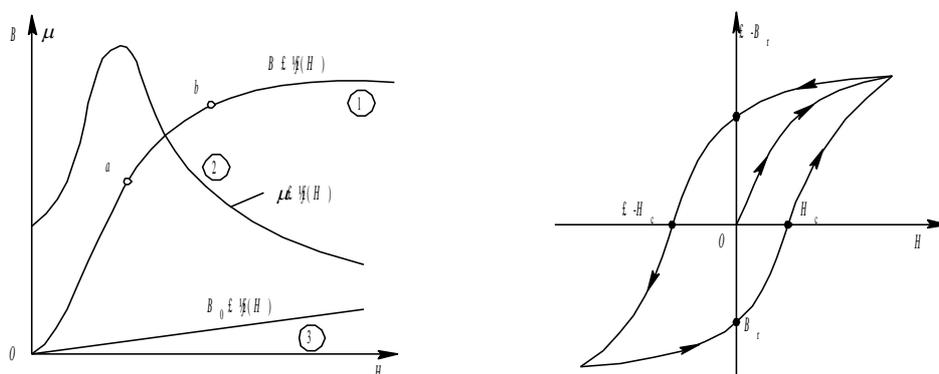
吸合过程中电流不变，磁通增大，吸力也增大。

二、交流电磁铁

在交流铁芯线圈中，线圈中通过交流电来励磁的，由于磁通是交变的，除了线圈内阻的功率损耗外，还有在铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗，这些损耗是通过电磁耦合关系从线圈的电路中转换来的，它会影响线圈中的电流。下面我们简单介绍交流线圈中的这两种损耗。

(一) 磁滞损耗

在铁磁材料的内部存在许多磁化小区，称为磁畴，每个磁畴就像一块小磁铁。在无外磁场作用时，各个磁畴排列混乱，对外不显示磁性。在外磁场的作用下，磁畴逐渐转向外磁场的方向，呈有规则的排列，显示出很强的磁性，这就是铁磁材料的磁化现象。非铁磁材料没有磁畴结构，所以不具有磁化特性。当外磁场（或励磁电流）增大到一定值时，其内部所有的磁畴已基本均转向与外磁场方向一致的方向上，因而再增大励磁电流其磁性也不能继续增强，这就是铁磁材料的磁饱和性。铁磁材料的磁化特性可用磁化曲线即 $B=f(H)$ 曲线来表示，如图 3—14(a) 中的曲线所示。①它不是直线，在 Oa 段，B 随 H 线性增大；在 ab 段，B 增大缓慢，开始进入饱和；b 点以后，B 基本不变，为饱和状态。铁磁性材料的 μ 不是常数，如图 3—14(a) 中的曲线②所示。非磁性材料的磁化曲线是通过坐标原点的直线，如图 3—14(a) 中的曲线③所示。



(a) 磁化曲线

(b) 铁磁材料磁滞回线

图 3—14 磁化曲线和磁滞回线

实际工作时，如果铁磁材料在交变的磁场中反复磁化，则磁感应强度 B 的变化总是滞后于磁场强度 H 的变化，这种现象称为铁磁材料的磁滞现象，磁滞回线如图 3—14(b) 所示。由图可见，当 H 减小

时， B 也随之减小，但当 $H=0$ 时， B 并未回到零值，而是 $B=B_r$ ， B_r 称为剩磁感应强度，简称剩磁。若

要使 $B=0$ ，则应使铁磁材料反向磁化，即使磁场强度为 $-H_c$ 。 H_c 称为矫顽磁力，它表示铁磁材料反抗退磁的能力。在交流磁场中，铁芯被反复磁化，磁性材料内部的磁畴反复取向排列产生功率损耗，并使铁芯发热，这种损耗就是磁滞损耗。可以证明，在交流电的频率一定时，磁滞损耗与铁心磁感应强度最大值的平方成正比，即磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。用硅钢片叠成的铁芯，磁滞回线所包围的面积越小，磁滞损耗就越小。

(二)、涡流损耗

磁性材料的铁芯既能导磁又能导电，当铁芯中有交变的磁通穿过时，在铁芯中也会产生绕着铁心中心线呈漩涡状流动的感应电流，称之为涡流。如图 3—15 (a) 所示，涡流的存在使铁心发热，造成功率损耗，这种损耗称为涡流损耗。

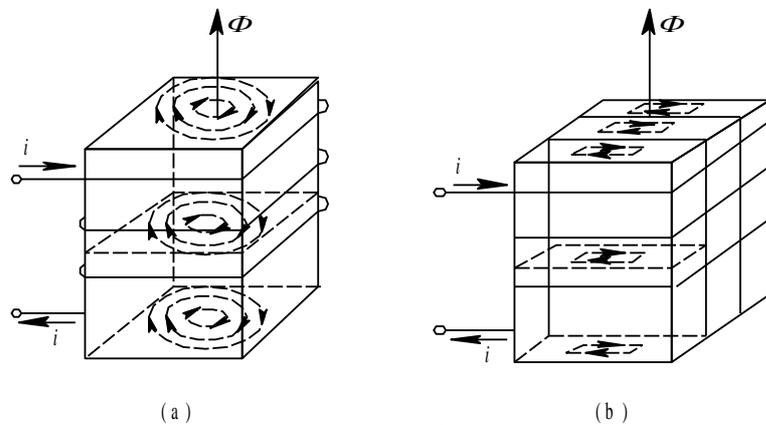


图 3—15 涡流

为了减小涡流损耗，交流磁路的铁心用很薄的（约 0.35mm 左右）涂有绝缘叠压而成如图 3—15 (b) 所示，使涡流只能在每片很小的截面内流动，加长了流电路径，再加上铁心的电阻很大，从而大大减小了涡流和涡流损耗。交流电磁铁的铁心由硅钢片叠成，并装有短路环以减弱振动，交流电磁铁的励磁电流是交变的，它所产生的磁场也是交变的，因此电磁力的大小也是交变的。

设 电磁铁空气隙处的磁通为 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，交流电磁铁的电磁吸力为

$$f = \frac{1}{2} F_m - \frac{1}{2} F_m \cos 2\omega t$$

式中 $F_m = \frac{10^7 \Phi_m^2}{8\pi S}$ 为电磁吸力的最大值。

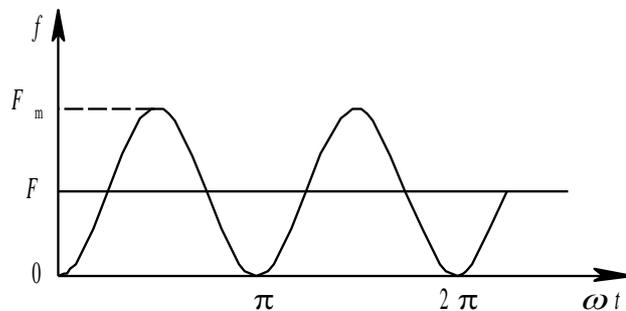


图 3—16 脉动的电磁吸力

由上式可知，交流电磁铁的电磁吸力是脉动的，图 3—16 为电磁吸力的瞬时值曲线，其平均值为

$$F = \frac{1}{2} F_m = \frac{10^7}{16\pi} \frac{\Phi_m^2}{S} \quad (3-23)$$

根据前面的分析，在外加电源电压一定的条件下，交流磁路中磁通的最大值基本不变，且因此，交流电磁铁在吸合衔铁的过程中，电磁吸力的平均值也基本不变。但随着气隙的减小以至消失，磁路的磁阻显著减小，磁动势 IN 也必然减小，所以吸合后的励磁电流要比吸合前显著减小。也就是说，交流电磁铁吸合前的励磁电流要比吸合后的励磁电流大得多。因此，交流电磁铁在工作时衔铁和铁心之间一定要吸合好，否则线圈中会因长期通过较大的电流而过热烧毁。另外，交流电磁铁也不宜过分频繁操作。

(三)、知识拓展※

拓展一：电磁系与电动系仪表的结构与简单工作原理。

电磁系仪表的结构与简单工作原理

电磁式仪表是测量交流电流与电压最常见的一种仪表。它具有结构简单、过载能力强、造价低廉以及可交直流两用等一系列优点，在电力工程中得到广泛的应用。电磁式仪表的测量机构主要有吸引式和排斥式两种类型。下面我们以扁线圈吸引型电磁式仪表为例来说明电磁式仪表的结构与简单工作原理。

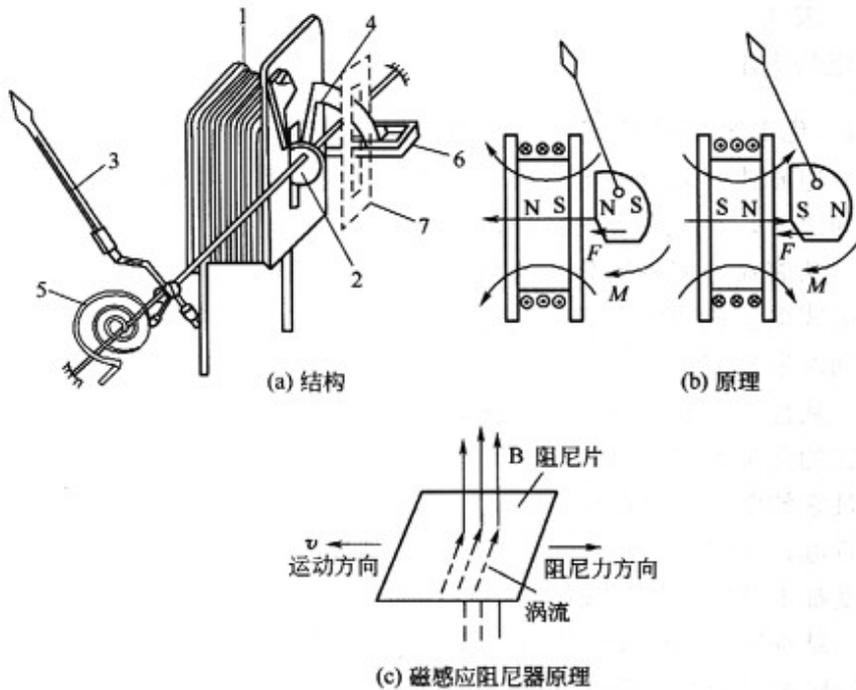


图 5-1 扁线圈吸引型电磁式仪表结构

1—固定线圈；2—可动铁片；3—指针；4—阻尼片；5—游丝；
6—永久磁铁；7—钢质磁屏蔽

图 3—17 扁线圈吸引型电磁式仪表结构

理。

吸引型电磁式仪表的结构如图 3—17 (a) 所示，它是由固定线圈 I 和偏心装在转轴上的可动铁

片 2 构成的一个电磁系统。转轴上还装有指针 3、阻尼片 4 及游丝 5。游丝的作用是产生反作用力矩。

图 3—17 (b) (C) 为它的原理图。测量时，被测电流通入线圈产生磁场，使定动铁片被同时磁化，且同一侧的磁化极性一样，于是定动铁片互相排斥，使可动部分发生偏转。因转动部分的惯性，转动部分在力矩作用下转动，游丝变形产生反转矩，当转矩与反转矩相等时，转动部分停止转动。阻尼片产生空气阻尼使指针在平衡位置处不摆动，此时指针所指为待测量的数值。

(讲述要清楚，分别电磁系仪表结构、工作原理。然后电动系结构工作原理，要分开断落，不要所有内容都搅在一起。重新修改这一段)

电动系仪表的结构与简单工作原理。

由前面介绍的磁电式仪表的结构可知，它的磁场是由永久磁铁产生的，当用通有电流的固定线圈来代替永久磁铁时，便构成了“电动式仪表”。电动式仪表的固定线圈不仅可以通直流，而且还可以通过交流，因此，电动式仪表的主要优点是能交直流两用，并能达到 0.1~0.05 级的准确度。使电动式仪表的准确度得到了提高。电动式仪表不但能精确地测量电流、电压和功率，而且还可以测量功率因数、相位及频率等。它可使用的频率范围较宽，可用在 45~2500Hz 的交流电路中。所以，电动式仪表用途广泛，在精密指示仪表中占有重要地位。电动式仪表正朝着提高灵敏度、扩大量程和频率范围，以及降低功耗、缩小外形、减小质量、降低成本和提高使用寿命的方向发展。

电动式仪表的测量机构主要由建立磁场的固定线圈 1 和在此磁场中偏转的可动线圈 2 组成，其结构如图 3—18 所示。固定线圈 1 分为平行排列，互相对称的两部分，中间留有空隙，以便穿过转轴。这种结构的特点是能获得均匀的工作磁场，并可借助改变两个固定线圈之间的串、并联关系而得到不同的电流量程。可动线圈与转轴固接在一起，转轴上装有指针 3 和空气阻尼器的阻尼片 4，游丝 5 用来产生反作用力矩，并起引导电流的作用。可动线圈比固定线圈小些、轻些，常见的线圈形状有圆形、椭圆形及矩形等。

电动系仪表的工作原理是利用固定线圈对放置在其中的可以转动的载流线圈的磁场相互作用，使运动线圈带动转轴转动的仪表。当电磁矩与游丝产生的反力矩相等时，动线圈不再转动，即指示待测电参量的数值。由于线圈工作磁场很弱，通常只有磁电式仪表磁场的 1%~5%，故易受外磁场影响。为此电动式仪表的测量机构应置于磁屏蔽罩内，以减少对测量机构的干扰。

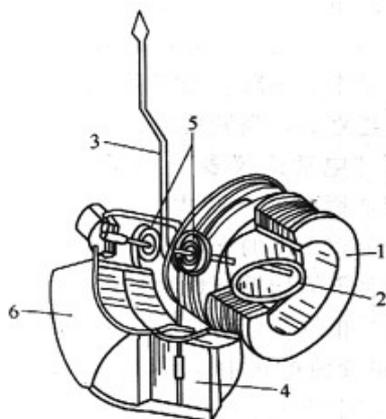


图 6-1 电动式仪表的结构
1—固定线圈；2—可动线圈；3—指针；
4—阻尼片；5—游丝；6—阻尼盒

图 3—18 电动式仪表的结构

、练习与思考

电磁系与电动系仪表有什么区别。它们的各有什么优点。

（四）任务实施

交直流电磁铁性能分析

一、实验目的

- 1 了解电铃的结构，掌握电铃的工作原理
- 2 理解磁悬浮列车的工作原理
- 3 自己动手制作直流电磁铁，用制好的电磁铁验证它的性能

二、原理说明

电磁铁在实际中的应用很多，最常见的像电铃、电话、电动玩具车、继电器、磁悬浮列车等等，下面介绍电铃及磁悬浮列车的工作原理。

（一）电铃的结构和原理

电铃主要由电磁铁、弹簧片、小锤和铃碗组成，它的电路图如图 3—19 所示。

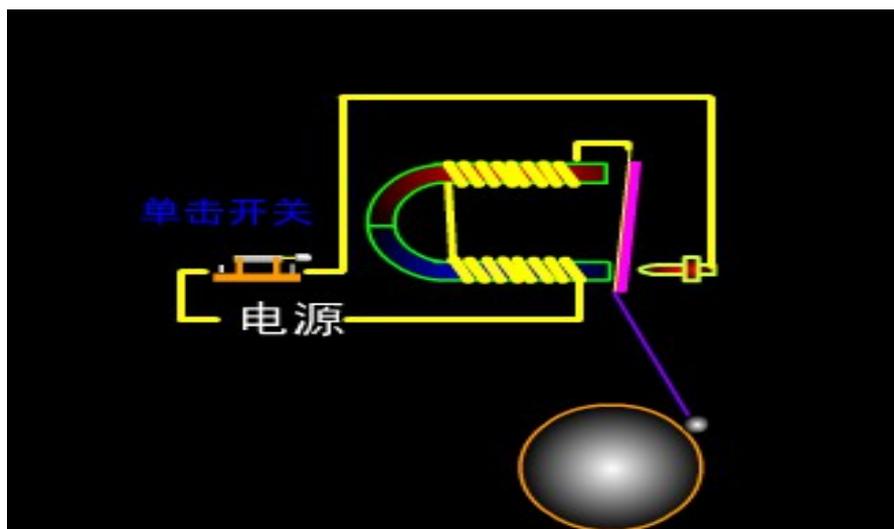


图 3—19 电铃的电路图

当开关闭合，电路被接通，电磁铁有了电流，把衔铁吸过来，在弹簧片下端的小锤就在铃上敲一下。当衔铁被吸过来后，它跟螺钉的尖端分开，电路断开，电磁铁失去磁性，弹簧片便弹了回去，衔铁刚触到螺钉，使电路又接通，又把衔铁吸引过来，小锤又敲一下。只要开关闭合，电流就这样一通一断地循环下去，铃声就一直响个不停。

（二）磁悬浮列车工作原理

磁悬浮列车是一种靠磁悬浮力（即磁的吸力和排斥力）来推动的列车。由于其轨道的磁力使之悬浮在空中，行走时不需接触地面，因此其阻力只有空气的阻力。70年代以后，随着世界工业化国家经济实力的不断加强，为提高交通运输能力以适应其经济发展的需要，德国、日本等发达国家相继开始筹划进行磁悬浮运输系统的开发。

磁悬浮列车利用“同名磁极相斥，异名磁极相吸”的原理，让磁铁具有抗拒地心引力的能力使车体完全脱离轨道，悬浮在距离轨道约 1 厘米处，腾空行驶，创造了近乎“零高度”空间飞行的奇迹。磁悬浮列车的原理图如图 3—20 所示，由于磁铁有同性相斥和异性相吸两种形式，故磁悬浮列车也有两种相应的形式：一种是利用磁铁同性相斥原理而设计的电磁运行系统的磁悬浮列车它利用车上超导体电磁铁形成的磁场与轨道上线圈形成的磁场之间所产生的相斥力，使车体悬浮运行的铁路；另一种则是利用磁铁异性相吸原理而设计的电力运行系统的磁悬浮列车，它是在车体底部及两侧倒转向上的顶部安装磁铁，在 T 形导轨的上方和伸臂部分下方分别设反作用板和感应钢板，控制电磁铁的电流，使电磁铁和导轨间保持 10—15 毫米的间隙，并使导轨钢板的排斥力与车辆的重力平衡，从而使车体悬浮于车道的导轨面上运行。通俗的讲就是，在位于轨道两侧的线圈里流动的交流电，能将线圈变为电磁体。由于它与列车上的超导电磁体的相互作用，就使列车开动起来。列车前进是因为列车头部的电磁体（N 极）被安装在靠前一点的轨道上的电磁体（S 极）所吸引，并且同时又被安装在轨道上稍后一点的电磁体（N 极）所排斥。当列车前进时，在线圈里流动的电流流向就反转过来了。其结果就是原来那个 S 极线圈，现在变为 N 极线圈了，反之亦然。这样，列车由于电磁极性的转换而得以持续向前奔驰。根据车速，通过电能转换器调整在线圈里流动的交流电的频率和电压。

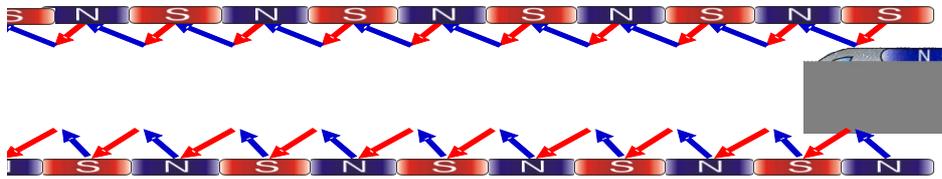


图 3—20 悬浮列车前进示意图

磁悬浮列车的优点是速度快，没有噪音。采用电力驱动，其发展不受能源结构，特别是燃油供应的限制，不排放有害气体。

（三）、直流电磁铁的工作原理

电流通过线圈时会产生磁场，直流电产生的磁场是恒定的。它的磁性有无可以由通断电来控制，磁性强弱可以由电流的大小来控制，磁极的极性由电流的方向控制，在线圈中插入铁心，使电磁铁的磁性大大增强。在电流一定时，线圈的匝数越多，磁性越强。

三、实验设备

材料有：漆包线，电线，胶带，电池盒，砂纸，螺丝钉或铁钉，电池，大头针。

四、实验内容

电磁铁的制作

- 1 用胶带把铁钉包起来，只留下尾端约 1.5 公分。
- 2 漆包线预留约 10~20 公分，然后小心整齐的缠绕在铁钉上有胶带隔绝的地方。
- 3 将漆包线均匀的缠绕在铁钉上约 200~300 圈左右，并且用胶带将漆包线包起来，多余的漆包线剪断，留下 10~20 公分。
- 4 将漆包线两端预留的部分用砂纸把这层漆磨掉 1~2 公分，，两端都要磨干净，电磁铁才能使用。这样电磁铁就做好了。看一看你做的电磁铁究竟怎样，下面测试一下电磁铁。

- 1 将制作好的电磁铁通电，看能不能吸引大头针。
- 2 中断电流，看会不会吸引大头针。
- 3 制作线圈匝数不同，粗细不同，电流强弱不同的电磁铁，看看吸引力会不会有所不同。

五、实验注意事项

遇异常情况，应立即断开电源，待处理好故障后，再继续实验。

六、预习思考题

为什么把铁钉用胶带包起来？两端为什么用砂纸磨干净？

七、实验报告

根据实验内容总结直流电磁铁的性能

任务二 变压器测试与分析

知识链接

为了把发电厂发出的电科学合理的传输到各个用户并安全使用，我们必须使用变压器。变压器是利用电磁感应原理制成的电气设备。变压器除了可以变换电压外，还可以变换电流、阻抗，虽然不同类型的变压器在结构上各有特点，但它们的基本结构和工作原理却大致相同。下面我们介绍单相变压器的结构和工作原理。

链接一：单相变压器的结构和工作原理

一、单相变压器的结构

变压器是一种静止的电气设备，结构如图 3—21 所示：

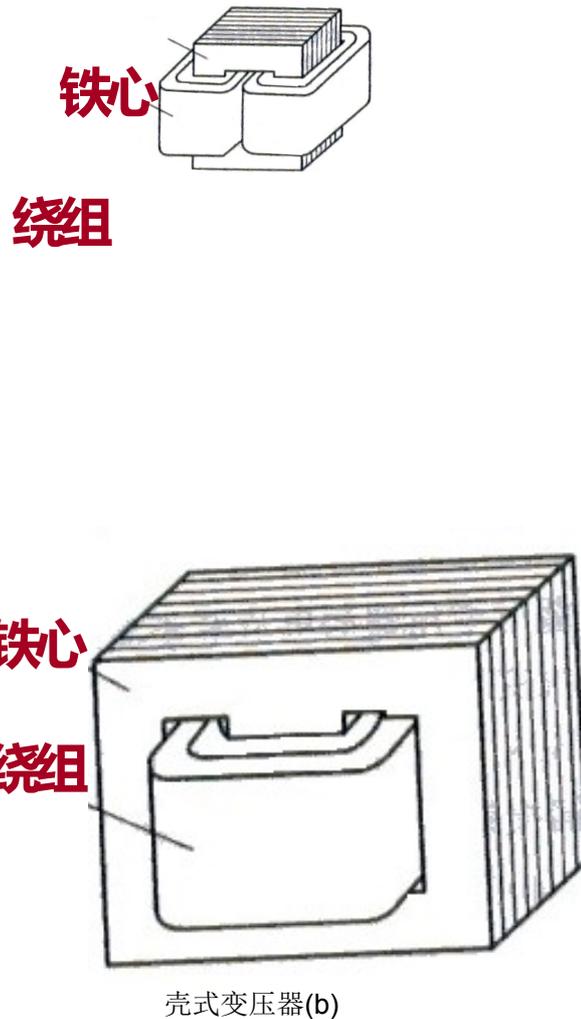


图 3—21 变压器结构

变压器有升压和降压变压器，它主要由铁心和绕组两部分组成。铁心的作用是构成变压器的磁路，为了减小涡流和磁滞损耗，铁心用表面涂有绝缘漆的硅钢片交错叠压而成，厚度为 0.35—0.5mm。根据铁心结构形式的不同，变压器分为心式图 3—21 (a) 和壳式图 3—21 (b) 两种，心式变压器特点是线圈包围铁心，功率大的变压器多采用心式结构，以减小铁心体积，节省材料。壳式变压器是铁心包围线圈，其特点是可省去专门的保护包装外壳，小型变压器采用壳式变压器。

变压器的绕组有两个或多个线圈组成。与电源相连的线圈称为原绕组或一次绕组或初级绕组；与负载相连的线圈称为副绕组或二次绕组或次级绕组。绕组是变压器的电路部分。为了防止短路，绕组与绕组、绕组与铁心之间要有良好的绝缘。

除了铁心和绕组外，变压器还有其他一些部件，例如电力变压器的铁心和绕组通常浸在油箱中，

变压器油有绝缘和散热作用，为增强散热作用，油箱外还装有散热油管；此外，油箱上还装有为引出高低压绕组而使用的高低压绝缘套管，以及防爆管、油枕、调压开关、温度计等附属部件。

二、变压器的工作原理

如图 3—22 所示为一个双绕组变压器的原理图。在一个闭合的铁心上，绕两个线圈。原绕组的物理量均以 U_1, I_1, N_1 表示，副绕组的物理量均以 U_2, I_2, N_2 表示。

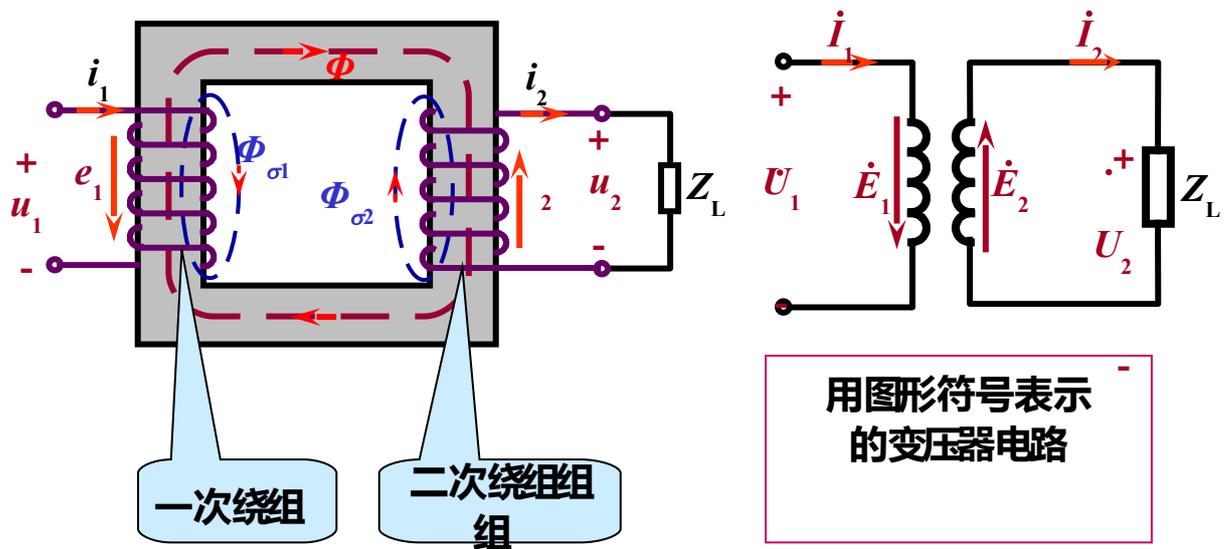


图 3—22 变压器的工作原理

当在原绕组通入交流电源电压 u_1 ，绕组中通过的交流电流为 i_1 时，在铁心磁路中产生交变磁通。

在不计原副绕组的电阻，无漏磁通的情况下，可看作理想变压器。据电磁感应定律，在原副绕组中产生的感应电动势和电压的瞬时值分别为

$$\begin{aligned} u_1 &= -e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ u_2 &= -e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (3-24)$$

在理想的变压器下，原副绕组的电压、电动势和匝数之间的关系为

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K \quad (3-25)$$

上式表明，改变原副绕组的匝数，就可以改变输出电压的大小。当 $K > 1$ ， $N_1 > N_2$ 时，称为降压变压器；当 $K < 1$ ， $N_1 < N_2$ 时，称为升压变压器。

三、变压器的铭牌

为了使变压器能正常运行，制造厂在变压器外壳上的铭牌上标出额定值和型号。它是选择和使用变压器的依据。

(一)、变压器的型号

型号用来表示变压器的特征和性能。一般有两部分组成：前一部分用汉语拼音字母表示，后一部分用数字组成。前者表示特性和性能，后者表示额定值。如 S—200/10，S 表示三相，200 表示额定容量为 200kVA，10 表示高压绕组的额定电压为 10kv。

(二)、额定电压

原绕组额定电压 U_{1N} ：指保证长时间安全可靠工作时应加的电压有效值，三相变压器指线电压有效值。

副绕组额定电压 U_{2N} ：指变压器空载、原绕组加上额定电压时，副绕组两端的电压有效值。三相变压器指线电压有效值。

(三)、额定电流

原绕组额定电流 I_{1N} ：指在容许发热条件下，原绕组中长期通过的最大电流有效值。

副绕组额定电流 I_{2N} ：指满载时长期允许通过的电流有效值。在三相变压器中均指线电流有效值。

(四)、额定容量 S_N

变压器在额定电压、电流工作状态下的视在功率。单位千伏安 (kVA)

(五)、额定频率

额定频率 f 指在原绕组上电压允许频率。我国规定工频频率为 50Hz

(六)、效率

效率指变压器输出有功功率 P_2 与输入有功功率 P_1 之比，一般用百分数表示。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

例 3.2 一台单相变压器，额定容量 $S_N=180$ kVA，额定电压为 $\frac{U_{1N}}{U_{2N}}=6000/220V$ ，求：原副

绕组的额定电流 I_{1N} ， I_{2N} ？这台变压器能否接入 150KW 功率因数 $\cos\phi=0.75$ 的感性负载？

解：原副绕组额定电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{180 \cdot 10^3}{6000} A = 30A$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{180 \cdot 10^3}{220} A = 818A$$

当副边绕组接入 150KW 功率因数 $\cos\phi=0.75$ 的感性负载，副边电流为

$$I_2 = \frac{P}{U_2 \cos\phi} = \frac{150 \cdot 10^3}{220 \cdot 0.75} A = 909A$$

由于 $I_{2N} < I_2$ ，所以该负载不能长期投入运行。

链接二： 变压器的运行特性

一、变压器的空载运行

空载运行是指变压器原绕组外加交流电压，副绕组开路的情况。如图 3—23 所示。变压器空载状态下，副绕组中电流 $i_2 = 0$ ，此时原绕组中电流称空载电流，用 i_0 表示。主磁通 ϕ 沿铁心闭合，

分别在原副绕组中产生感应电动势 e_1 和 e_2 即

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (3-26)$$

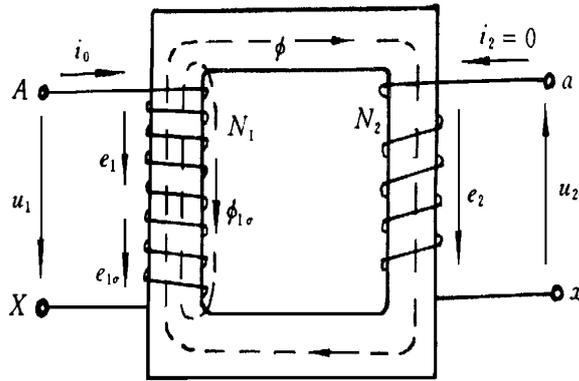


图 3—23 变压器的空载运行状态

假设 u_1 为正弦量，忽略绕组的电阻及漏磁通的影响，可得

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \omega \phi_m \cos \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - 90^\circ) \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \omega \phi_m \cos \omega t = \sqrt{2} E_2 \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (3-27)$$

它们的有效值 E_1, E_2 分别为

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_m = 4.44 f N_1 \phi_m$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \phi_m = 4.44 f N_2 \phi_m$$

$$u_1 \diamond e_1 \quad U_1 \diamond E_1$$

$$\therefore U_1 \diamond E_1 \quad 4.44 f N_1 \phi_m$$

$$\text{同理可得 } U_2 \diamond E_2 \quad 4.44 f N_2 \phi_m \quad (3-28)$$

由上式可得出，原副绕组的匝数 N_1, N_2 不同，感应电动势 E_1, E_2 就不相等，因而输出电压 U_{20} 和电源电压 U_1 也不相等，它们的电压比为：

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (3-29)$$

式中 K 是原副绕组的匝数比，称变压器的变比。它是变压器的重要参数之一。由上式得出，电源电压 U_1 一定时，只要改变原副绕组的匝数 N_1 和 N_2 ，就可以得到不同数值的输出电压 U_2 ，达到变换电压的目的。

二、变压器的负载运行

变压器的负载运行是指原绕组接上电源，副绕组加上负载，给负载供电，这种情况称为变压器负载运行。电路如图 3—24。

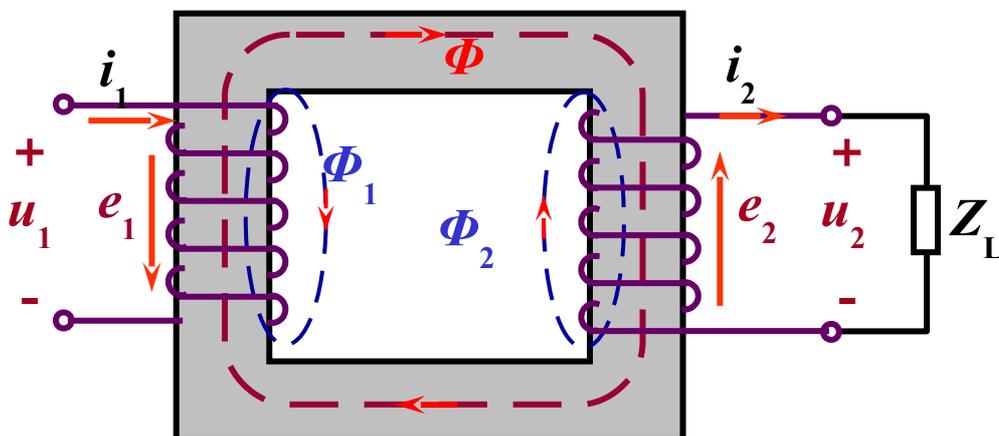


图 3—24 变压器的负载运行状态

(一) 变换电流作用

变压器从空载到负载运行时，原绕组的电流由 i_0 变化为 i_1 。副绕组接入负载后，变压器向负载输出电功率，必然要求原绕组从电源输入更大的电功率。因此原绕组电流从 i_0 增大到 i_1 。副绕组的磁通势 $N_2 i_2$ 作用在磁路上，这时的工作磁通是由原副绕组的磁通势共同产生的。据 (3—28) 式，在电源电压 U_1 频率 f 和原绕组匝数 N_1 不变的条件下，工作磁通最大值 ϕ_m 保持不变，所以空载时的磁通势 $N_1 i_0$ 和负载运行状态下的合成磁通势 ($N_1 i_1 + N_2 i_2$) 应该近似相等。即

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 \approx N_1 i_0 \quad (3-30)$$

由此可见，变压器的原副绕组虽然是两个电路，但原绕组中的电流 I_1 将随着副绕组的电流 I_2 变化。因为空载时 I_0 很小，若将其忽略，则 (3—30) 可近似为

$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$

即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (3-31)$$

可见，在额定工作状态下，原副绕组的额定电流之比等于其变比的倒数，或与原副绕组的匝数成反比。变压器具有变换电流的作用。

(二) 变压器变换阻抗的作用

变压器除了具有变换电压电流的作用，还有变换阻抗的作用。

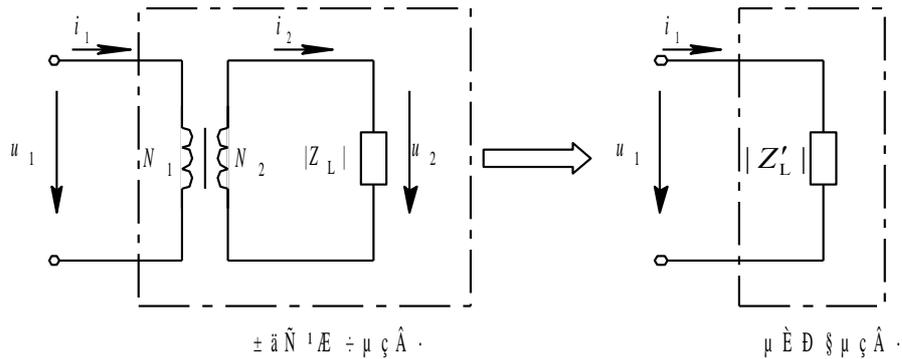


图 3—25 变压器变换阻抗的作用

变压器接入负载 Z_L 后，电功率从原绕组通过工作磁通传送到副绕组。按照等效的原理，当原绕组交流电源直接接入一个负载 Z_L' 与变压器的副绕组接入负载 Z_L 两种情况下，原绕组的电压、电流和电功率完全一样。如图 3—25 所示，对于交流电源来说， Z_L' 与副绕组接上负载 Z_L 是等效的。两者用下式计算得出

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

$$|Z_L'| = \frac{U_1}{I_1}$$

由 (3—25) 和 (3—31) 代入上式，并化简得：(准确应用表达式)

(改)

$$|Z_L'| = \frac{(N_1/N_2)U_2}{(N_2/N_1)I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{U_2}{I_2} = k^2 |Z_L| \quad (3-32)$$

上式表明，变压器副绕组接入负载后，等效于原绕组直接接入 k^2 倍负载阻抗。所以我们可以采用不同的匝数比把负载变换成所需要的合适的数值，通常称之为阻抗匹配。在电子电路中，为了使负载获

得最大功率输出，要求负载的阻抗与信号源的阻抗满足阻抗匹配，但实际上两者数值往往不满足阻抗匹配的要求，因此，通常在它们之间加入一个变压器以达到要求。

三 变压器参数的测定

(一)、空载测试

从空载实验中测定变压器的变比 K 、铁耗 P_{Fe} 和励磁阻抗 Z_m 。

如图 3—26 为单相变压器的空载试验电路图，在工频正弦额定电压下，测出 U_1 、空载电流 I_0 、空载输入功率 P_0 和副边开路电压 U_2 。

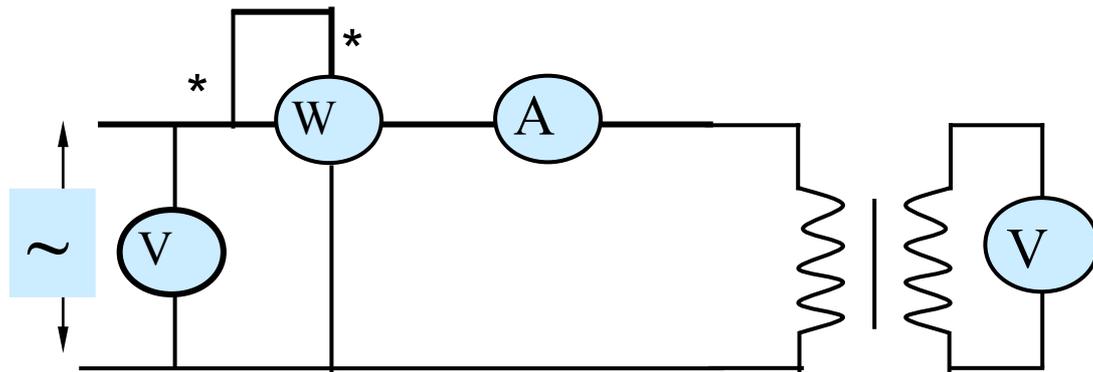


图 3—26 变压器空载试验图

变压器空载运行时，空载电流 I_0 产生的铜耗可忽略不计。这样从电源输入的功率 P_0 主要变成了铁耗 P_{Fe} ，从空载运行时的等值电路图 3—26 可得出：

$$\text{励磁阻抗} \quad Z_m \approx Z_0 = \frac{U_1}{I_0} \quad (3-33)$$

$$\text{励磁电阻} \quad r_m \approx r_0 = \frac{P_0}{I_0^2} \quad (3-34)$$

$$\text{励磁电抗} \quad x_m \approx x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \quad (3-35)$$

$$\text{变比} \quad K = \frac{U_1}{U_2} \quad (3-36)$$

空载测试在高低压两边都能进行，为了方便与安全一般在低压边进行。低压边所测得的 Z_m 要标在高压边的等值电路中时，还必须乘以变压比 k^2 。

(二) . 短路测试

短路测试时，因为副边短路，在原边不允许加额定电压，否则会导致电流过大烧坏绕组。所以要求所加电压为额定电压的5%~10%，一般在高压边加电压，低压边短路。通过测试，可以求出短路参数 P_{Cu} 和短路阻抗 Z_k 。

如图3—27所示，测试时电压很低，铁心中的主磁通也很小，故可以忽略励磁电流和铁损。所以输入功率 P_k 完全消耗在原副绕组的铜耗上，即

$$P_k \approx P_{Cu} = I_{1N}^2 r_k \quad (3-37)$$

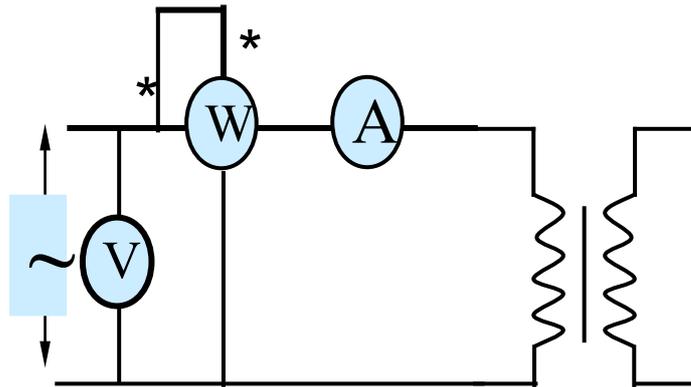


图3—27 变压器的短路测试电路图

在进行短路测试时，副边短路，使原绕组的电流达到额定值 I_1 ，然后读取短路电流 I_{1N} ，短路电压 U_k 及输入功率 P_k 。按图3—27 求出短路参数如下：

$$\text{短路电阻} \quad r_k = r_1 + r_2' = \frac{P_k}{I_{1N}^2} \quad (3-38)$$

$$\text{短路阻抗} \quad Z_k = \frac{U_k}{I_{1N}} \quad (3-39)$$

$$\text{短路电抗} \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (3-40)$$

四、变压器的运行特性

变压器的运行特性，主要有外特性和效率特性。外特性反映变压器副边端电压随负载电流而变动的规律。效率特性表示变压器效率随负载而变化的关系。

(一)、电压调整率和外特性

变压器负载运行时，一方面电流增大，致使副边输出电压降低；另一方面绕组铜耗增大，效率降低。所以变压器的运行特性的主要指标有两个：一是副边端电压的变化，二是效率。

1. 变压器的外特性和电压变化率

(1) 变压器的外特性

由于变压器原、副绕组有电阻和漏抗，负载运行时必然会产生内部电压降，其副边端电压则随负载的变化而变化。这种变化用外特性来表示。在描述其外特性时，还需规定负载功率因数。在保持 U_1 、 $\cos\phi_2$ 一定时，副边端电压 U_2 随负载电流 I_2 变化的关系曲线，称为变压器的外特性，即 $U_2 = f(I_2)$ ，如图3—28所示。变压器在纯电阻和感性负载时，外特性是下降的；容性负载时，端电压变化较小，随着负载感性或容性程度增加，端电压变化会增大。

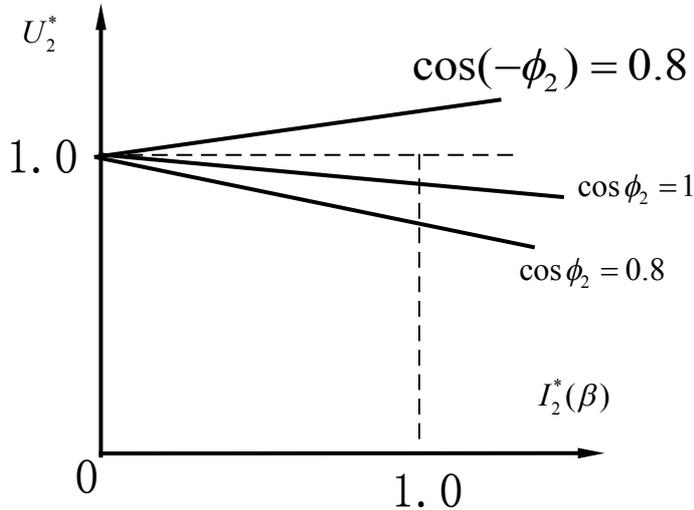


图3—28 变压器的外特性

(2) . 电压变化率

为了衡量副边电压随负载变化的程度，可用电压变化率 $\Delta U\%$ 来表示。当变压器的原绕组的额定电压、负载功率因数一定时，变压器空载与负载时端电压之差 $U_{2N} - U_2$ 与额定电压 U_{2N} 的比值称之为电压变化率 $\Delta U\%$ ，即

$$\Delta U = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} 100\% \quad (3-41)$$

变压器的变化率表征了电网电压的稳定性，是反映变压器的重要指标之一。一般情况下，当负载为额定值（ $\cos\Phi=0.8$ 感性）时，其 ΔU 约等于4%~8%。

(二) . 变压器的效率特性

变压器的效率特性是指变压器的输出有功功率 P_2 与输入的有功功率 P_1 之比，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% \quad (3-42)$$

因变压器负载运行时，存在铁损和铜损，据能量守恒定律上式可写成

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \quad 100\%$$

变压器的功率损耗很小，所以效率很高，通常在 95% 以上。在一般电力变压器中，当负载为额定负载的 50%~70% 时，效率达到最大值。

（三）. 变压器维护

为保证变压器安全运行和可靠的供电，使当变压器发生异常情况时能及时发现、及时处理，将故障排除在萌芽状态，使用单位对运行中的变压器必须进行定期的巡回检查，严格监察其运行状况，并做好运行记录。

1 运行标准

（1）. 允许温度：变压器中的绝缘材料，受温度影响而逐渐老化。温度越高，绝缘材料的绝缘性能越差，并加速老化以至失去了绝缘层的保护作用，容易被高电压击穿造成故障。因此，变压器在正常运行时，不准超过绝缘材料所允许的温度。

（2）. 负载运行：变压器负载运行时，因铜耗和铁耗而发热，负载越大，发热越多，温升也越高，变压器不应超过允许的温升。因此变压器运行时，有一许可连续稳定运行的额定负载，即变压器的额定容量。

2 变压器运行中的检查

（1）. 监视仪表：变压器控制盘上的仪表，如电压表、电流表和功率表等指示着变压器运行情况、电压质量等，因此必须经常监察并记录数据。

（2）. 现场检查：变压器应定期进行外部检查。检查内容有看油温是否正常，变压器有无异常的响声，箱壳有无渗透漏油现象，外壳接地是否良好等等。

（3）. 变压器油的检验：为了确保变压器安全可靠运行，必须定期取油样试验，如果油老化变质，要及时更换。

（4）. 变压器运行故障的排除：在定期的巡回检查过程中，如果发现有异常情况，要及时排除故障，使变压器能安全正常运行。

（二）、任务实施

小型单相变压器测试。

一、实验目的

- 1、测量单相变压器的同名端。
- 2、测量单相变压器的电压比和空载阻抗。
- 3、测量单相变压器的阻抗比。
- 4、测量单相变压器的外特性。

二、原理说明

- 1、图 3—29 为测试变压器参数的电路。由各仪表读得变压器原边（AX，高压侧）的 U_1 、 I_1 、 P_1 及付

边 (ax, 低压侧) 的 U_2 、 I_2 ，并用万用表 R×1 档测出原、副绕组的电阻 R_1 和 R_2 ，即可算得变压器的

以下各项参数值：

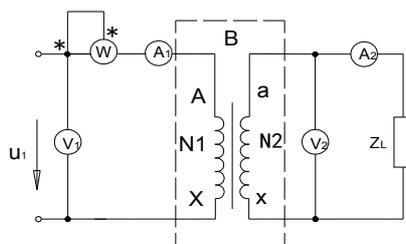


图 3—29 变压器参数的测定

(1) 变压器匝数比 $K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$

(2) 电压变换：变压器电压比 $K_u = \frac{U_1}{U_2} = K$ ，

(3) 电流变换：电流比 $K_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{K}$

(4) 阻抗变换：原边阻抗 $Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$ ，副边阻抗 $Z_2 = \frac{U_2}{I_2}$ ，阻抗比 $\frac{Z_1}{Z_2} = K^2$

(5) 功率计算：负载功率 $P_2 = U_2 I_2 \cos \phi_2$ ，损耗功率 $P_0 = P_1 - P_2$ ，

功率因数 $\cos \phi = \frac{P_1}{U_1 I_1}$

(6) 损耗：原边线圈铜耗 $P_{Cu1} = I_1^2 R_1$ ，副边铜耗 $P_{Cu2} = I_2^2 R_2$ ，铁耗 $P_{Fe} = P_0 - (P_{Cu1} + P_{Cu2})$

2、铁芯变压器是一个非线性元件，铁芯中的磁感应强度 B 决定于外加电压的有效值 U 。当副边开路（即空载）时，原边的励磁电流 I_{10} 与磁场强度 H 成正比。在变压器中，副边空载时，原边电压与电流的关系称为变压器的空载特性，这与铁芯的磁化曲线（ $B-H$ 曲线）是一致的。

空载实验通常是将低压侧开路，由高压侧通电进行测量，又因空载时功率因数很低，故测量功率时应采用低功率因数瓦特表。此外因变压器空载时阻抗很大，故电压表应接在电流表外侧。

3、变压器外特性测试。由于变压器的原副绕组均存在内阻与漏磁感抗，所以，当电源电压 U_1 不变时，随着副绕组电流 I_2 的增加(负载增加)，原副绕组阻抗上的电压降也随之增加，这将使副绕组的端电压发生变动。当 U_1 和负载功率因数 $\cos\phi$ 不变时，付边端电压 U_2 与负载电流 I_2 的变化关系 $U_2 = f(I_2)$ 就是变压器的外特性曲线。如图 3—28 所示，对电阻性和电感性负载而言， U_2 都随 I_2 的增加而减小。

4、变压器的损耗与效率。与交流铁芯线圈一样，变压器的功率损耗包括铁芯中的铁耗 ΔP_{Fe} 和绕组上的铜耗 ΔP_{Cu} 两部分，铁耗的大小与铁芯内磁感应强度的最大值 B_m 有关，与负载的大小无关。而铜耗与负载的大小(正比于电流平方)有关。

变压器的效率为：
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$$

式中， P_1 为输入功率， P_2 为输出功率。变压器的功耗很小，所以效率很高，通常在 95% 以上。一般电力变压器中，当负载为额定负载的 50%~75%时，效率达最大值。

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	交流电压表	0~450V	2	
2	交流电流表	0~5A	2	
3	单相功率表		1	
4	试验变压器	220V/110V/55v	1	XKDG05 挂箱
5	白炽灯	220V, 15W	9	XKDG05 挂箱

四、实验内容

1、变压器空载实验：利用实验挂箱 XKDG05 的“铁芯变压器”及其中的灯组负载，按图 [3-26](#) 线

路接线。其中A、X为变压器的高压绕组，接220V。a、x为变压器的低压绕组，选110V的那一组。高压绕组220V，低压绕组不接负载（即变压器处在空载状态），经指导教师检查后方可进行实验。

测出 U_1 、 U_2 、P，填入表3—3，计算K值。此时，功率表测量出的数据为变压器的铁耗。

表3—3

U1/V	U2/V	P/W	K(计算)

2、变压器负载实验：在图3—26的基础上，保持原边加220V不变，在负载端分别加1、2、3只灯泡（每只25W, 220V），每次均测量出 U_1 、 U_2 、 I_1 、 I_2 ，计算出阻抗比，记入表3—4中。并根据阻抗比和副

边的负载阻抗计算出等效到原边的阻抗值。绘制变压器的外特性曲线 $U_2 = f(I_2)$ 。

表3—4

项目	U_1 /V	U_2 /V	I_1 /A	I_2 /A	(计算)	R_L (计算)	阻抗比(计算)
1只灯							
2只灯							
3只灯							

五、实验注意事项

- 1、高压实验，注意安全，以防高压触电。
- 2、遇异常情况，应立即断开电源，待处理好故障后，再继续实验。

六、预习思考题

为什么变压器的励磁参数一定是在空载实验加额定电压的情况下求出？

七、实验报告

- 1、根据实验内容，绘出变压器的外特性和空载特性曲线。
- 2、根据额定负载时测得的数据，计算变压器的各项参数。

（三）、知识拓展※

三相变压器简介

三相变压器主要作用是变换三相电压。它主要用于输电、配电系统中，也用于三相整流电路等场合。

三相变压器的工作原理和单相变压器是相同的也是根据电磁感应原理。当交流电压加到一次侧绕组后交流电流流入该绕组就产生励磁作用，在铁芯中产生交变的磁通，这个交变磁通不仅穿过一次侧绕组，同时也穿过二次侧绕组，它分别在两个绕组中引起感应电动势。这时如果二次侧与外电路的负载接通，便有交流电流流出，于是输出电能用三只单相变压器或如图 3—30 所示的三相变压器来完成。

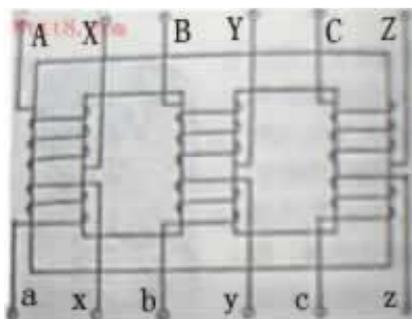


图 3—30 三相变压器的结构。

在三相变压器中，每一芯柱均绕有原绕组和副绕组，相当于一只单相变压器。三相变压器高压绕组的始端常用 A, B, C，末端用 X, Y, Z 来表示。低压绕组则用 a, b, c 和 x, y, z 来表示。高低压绕组分别可以接成星形或三角形。在低压绕组输出为低电压，大电流的三相变压器中（例如电镀变压器）为了减少低压绕组的导线面积，低压绕组亦有采用六相星形或六相反星形接法

我国生产的电力配电变压器均采用 Y/Y₀-12 或 Y/三角形-11 这两种标准接线方法。数字 12 和 11 表示原绕组和副绕组线电压的相位差，也就是所谓变压器的结线组别。在单相变压器运行时，结线问题往往不为人们所重视，然而，在变压器的并联运行中，结线问题却具有重要意义

三相变压器原、付绕组的判别

a. 用万用表测绕组电阻值的方法，判别出实验所用三相变压器的原绕组和付绕组。

b 在某相原绕组施加 110V 电压，测定三个付绕组中感应电动势，感应电势最大的一组付绕组就是该项绕组的付绕组

(四)、练习与思考

简述三相变压器的结构和工作原理。并通过查资料了解它的连接方法。

项目三小结

一、磁路是磁通集中通过的路径，由于磁性物质具有高导磁性，所以许多电气设备都用铁磁材料构成磁路。磁路与电路有相似性。磁通—电流、磁通势—电动势、磁阻—电阻——对应，而且磁路欧姆定律—电路欧姆定律也相对应。是分析磁路的基础。

$$\Phi = \frac{IN}{l / \mu S} = \frac{F}{R_m}$$

二、交流铁心线圈主磁通与电源电压、频率及线圈匝数有关，只要电压、频率不变，其主磁通大小也基

本不变。这关系适用于一切交流励磁的磁路，如变压器、异步电动机等。

三、变压器是根据电磁感应原理工作的电气设备，它主要由铁心和绕组组成。原绕组与电源、副绕组与负载构成两个电路，铁心构成的磁路把两个电路联系起来，容量较大的变压器还有其他的一些附属部件。变压器有变换电压、电流、阻抗的作用，如果忽略变压器的损耗，它们与匝数的关系为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

$$|Z_L'| = \frac{N_1^2}{N_2^2} |Z_L| = K^2 |Z_L|$$

变压器带负载后，副边电压降随负载变化而变化，有时用电压的变化率来表示，即

$$\Delta U = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \cdot 100\%$$

变压器的铭牌是工作人员运行的依据，因此必须掌握各额定值的含义。

习题

1 电磁铁和一般的磁铁有什么异同？哪些因素会影响磁力的大小？日常生活中哪些是利用电磁铁制成的？

2 变压器由哪几部分组成？各部分的作用是什么？

3 变压器的铁芯为什么要用硅钢片叠装？

4 变压器能否用于直流电压的变换？

5 有一台单相照明变压器，容量为 10KVA ，电压为 $380/220\text{V}$ 。

(1) 欲在副绕组接上 $220\text{V} \cdot 40\text{W}$ 的白炽灯。最多可以接多少盏？计算此时的原副绕组工作电流；

(2) 欲接功率因数为 0.44、电压为 220V 、功率为 40W 的日光灯（每盏灯附有功率损耗为 8W 的镇流器），最多可以接多少盏？

6. 单相变压器的电源电压 $U_1 = 220\text{V}$ ，二次绕组的开路电压 $U_{20} = 12\text{V}$ ，一次绕组的匝数 $N_1 = 1760$ 。

计算二次绕组的匝数 N_2 。若要改制成二次绕组的开路电压 $U_{2N}' = 18\text{V}$ ，二次绕组的匝数 N_2' 应为多少？

7. 单相变压器的容量 $S_N = 40\text{KVA}$ ，额定电压是 $3300\text{V} / 230\text{V}$ 。计算

(1) 变压器的变比 K

(2) 一二次绕组的额定电流 I_{1N}, I_{2N}

(3) 该变压器在额定状态下运行时，电压 $U_2 = 220V$ ，这时的电压调整率是多少？

8. 铁损与哪些因素有关？为什么直流铁心线圈的磁路中没有铁损？用哪些方法可以减小铁损？