



# 第六章 变压器



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

电工基础教研室

电工  
电子学

2020/12/14

# 本章内容及重点

1. 变压器的分类、基本结构、额定值
2. 变压器的工作原理
3. 变压器的外特性及效率
4. 三相变压器
5. 特殊变压器

## ➤ 重点、难点

- 变压器的构造
- 变压器的工作原理
- 变压器的运行性能及相应的变换关系



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 概述

- **变压器**：利用电磁感应原理将一种电压等级的交流电能转换成频率相同的另一种电压等级的交流电能的能量转换装置。

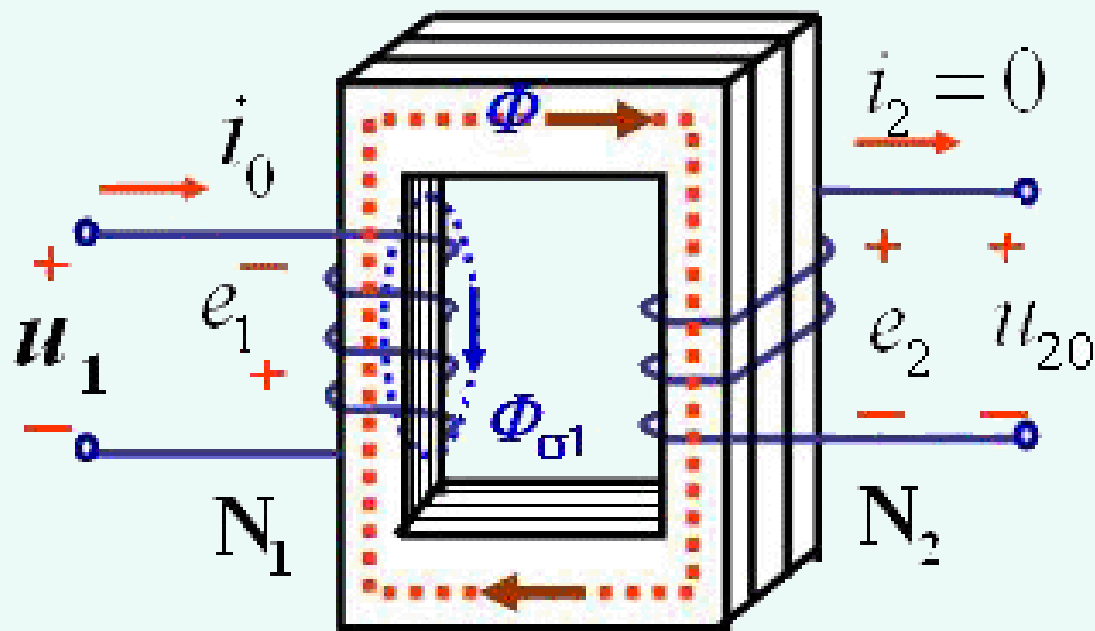


- **用途：**
  - 1、在电力系统中实现电能传输和分配的关键设备。
  - 2、在电子线路中用作电源变压器，实现阻抗匹配。
  - 3、在仪表测量电路中广泛使用电流、电压互感器。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 变压器的工作原理

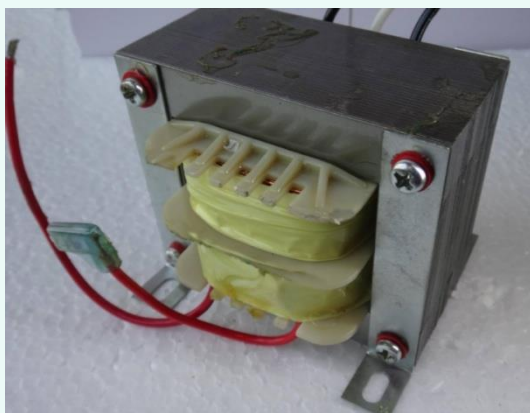
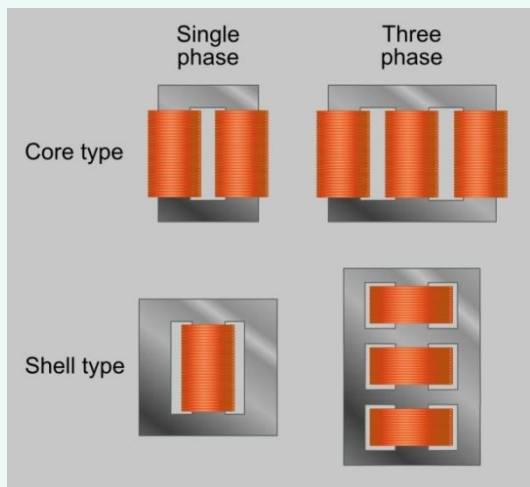


$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

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

# 一、变压器的结构

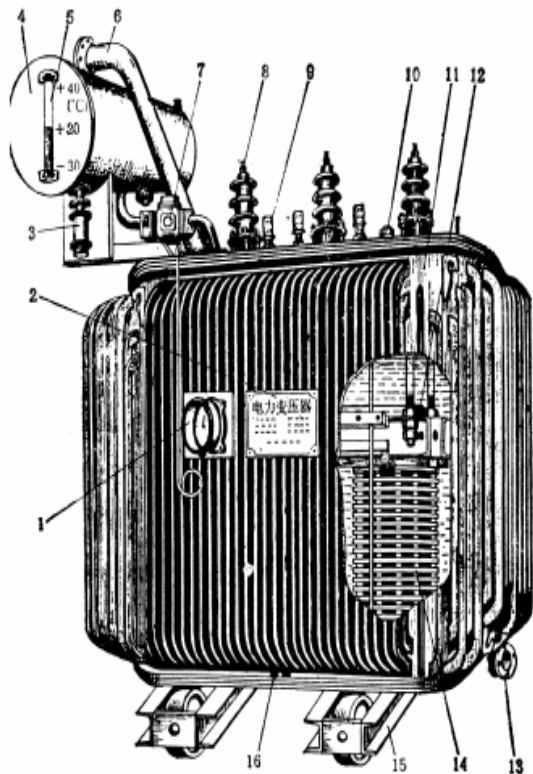
主要由**铁心**、**绕组**、**绝缘材料**等零部件构成



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



# 一、变压器的结构



- 1—信号式温度计 2—铭牌  
3—吸湿器 4—储油柜 5—油表  
6—安全气道 7—气体继电器  
8—高压套管 9—低压套管  
10—分接开关 11—油箱  
12—铁心 13—放油阀门  
14—线圈及绝缘 15—小车  
16—接地板

图 6-3 油浸式电力变压器



黄页  
www.hua

变压器油的作用：**1.提高绝缘强度 2.加强散热。**

## 二、变压器的额定值

### (一) 额定电压 $U_{1N}$ 、 $U_{2N}$

原绕组的额定电压 $U_{1N}$ 是变压器正常运行时加在原绕组的电压。副绕组的额定电压 $U_{2N}$ 是当变压器的原绕组加额定电压时副绕组的空载电压。

三相变压器的额定电压都是指线电压。

### (二) 额定电流 $I_{1N}$ 、 $I_{2N}$

变压器的额定电流是指在额定容量和额定电压条件下运行时，原、副绕组中通过的电流，分别用字母 $I_{1N}$ 及 $I_{2N}$ 表示。

三相变压器的额定电流都是指线电流。

### (三) 额定容量 $S_N$

额定容量是变压器额定运行时的视在功率，单位为VA、kVA。

单相变压器的额定容量：
$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

三相变压器的额定容量：
$$S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

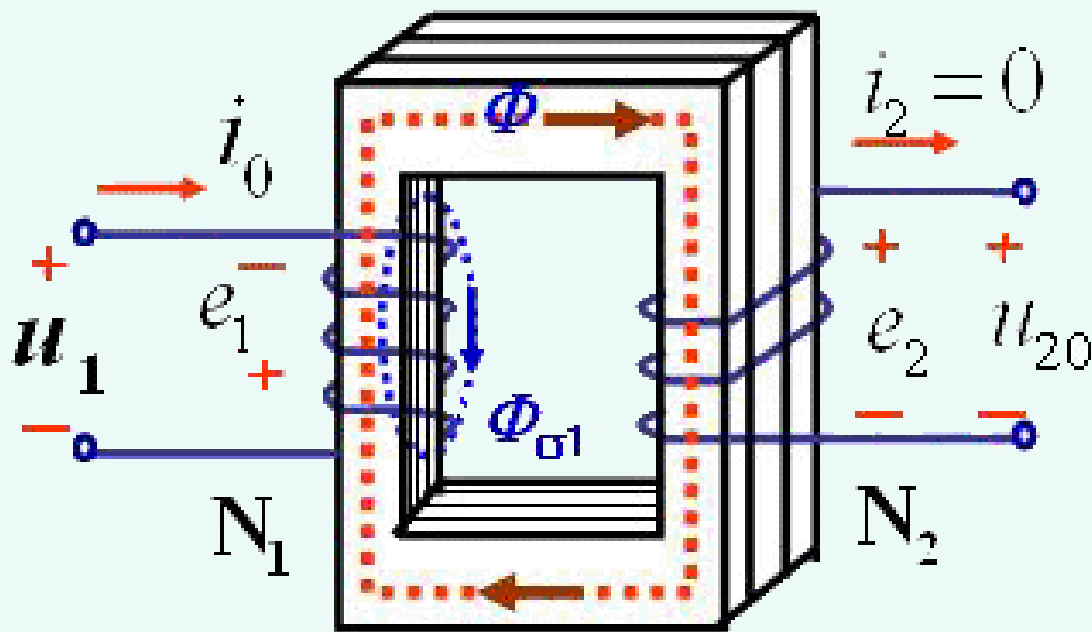
# 三、变压器的工作原理

## (一) 空载运行

### 1、定义：

变压器一次绕组加额定电压，二次绕组开路的运行方式。

磁动势  $F_1 = i_0 N_1$  产生主磁通



$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

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



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



### 三、变压器的工作原理

#### 2、 $e_1$ 、 $e_2$ 与 $\Phi$ 的大小相位关系

根据电磁感应定律可得，并设  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t$$

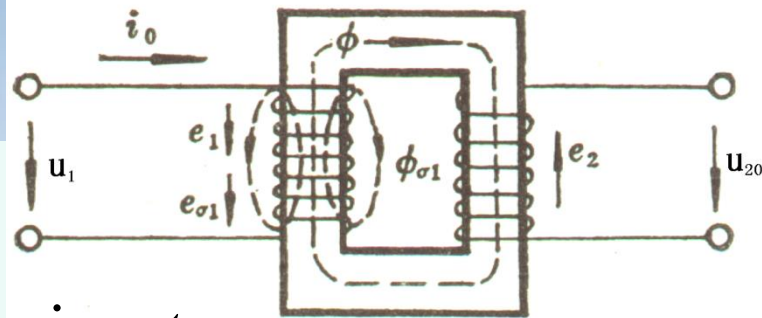
$$= 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t$$

$$= 2\pi f N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$e_1$ 和 $e_2$ 均比主磁通滞后 $90^\circ$ ，最大值

$$E_{1m} = 2\pi f N_1 \Phi_m \quad E_{2m} = 2\pi f N_2 \Phi_m$$



$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \Phi_m = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

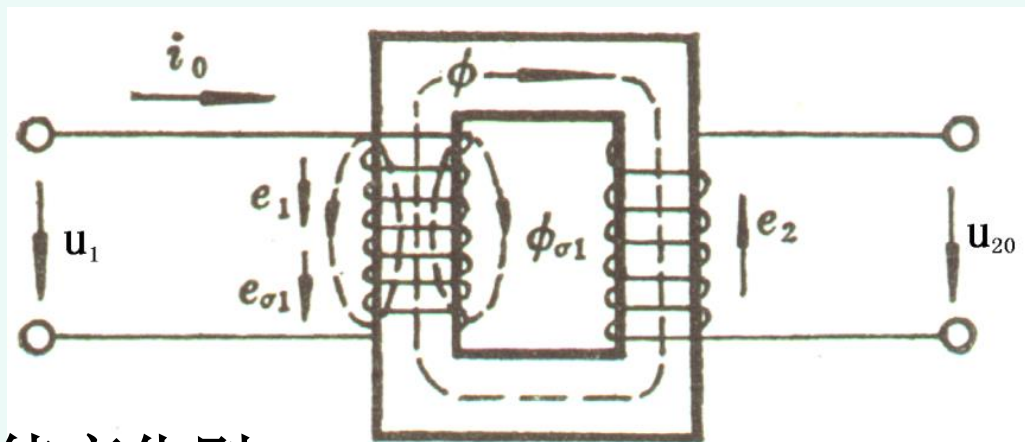


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 三、变压器的工作原理

### 3、漏磁感应电动势 $e_{\sigma 1}$ 与漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 的关系

$$e_{\sigma 1} = -N_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt} = -L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt}$$
$$L_{\sigma 1} = N_1 \frac{\Phi_{\sigma 1}}{i_0}$$



如果电流随时间按正弦规律变化则：

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{d(\sqrt{2}I_0 \sin \omega t)}{dt} = -\omega L_{\sigma 1} \sqrt{2}I_0 \cos \omega t = -\omega L_{\sigma 1} \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + 90^\circ)$$
$$E_{\sigma 1} = -jI_0 X_{\sigma 1}$$

式中  $X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1} = 2\pi f L_{\sigma 1}$  称为一次绕组的漏磁感抗。



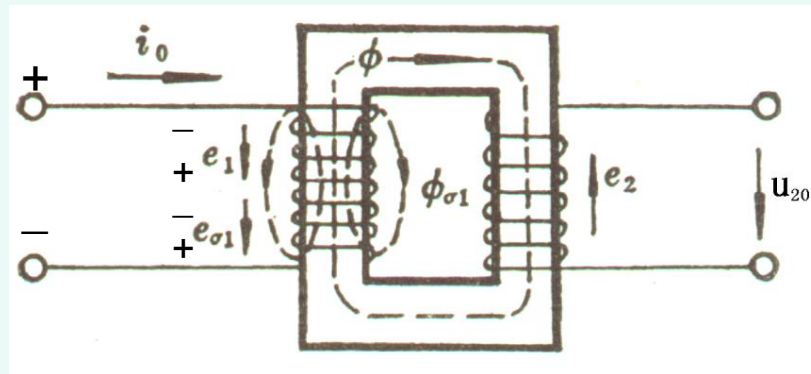
石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

### 三、变压器的工作原理

#### 4、电压平衡方程式

根据KVL可以列出一、二次侧的电压平衡方程式

$$\begin{aligned}\text{一次侧: } \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1 \\ &= -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_{\sigma 1}) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_{\sigma 1}\end{aligned}$$



一次绕组的空载电流和阻抗 $Z_{\sigma 1}$ 较小，故

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$\text{二次侧: } \dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad U_{20} = E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

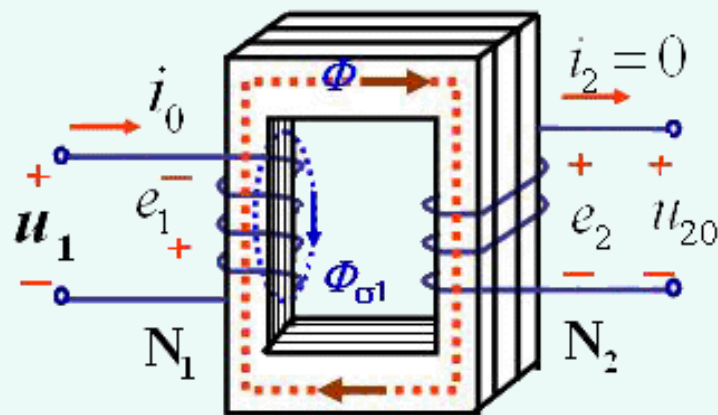
### 三、变压器的工作原理

#### 5、变压器的变比

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 N_1 f \Phi_m}{4.44 N_2 f \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

$K$  称为变压器的变比，亦即一次、二次绕组的匝数比。

- $N_1 > N_2$ ，为降压变压器；
- $N_1 < N_2$ ，为升压变压器；



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

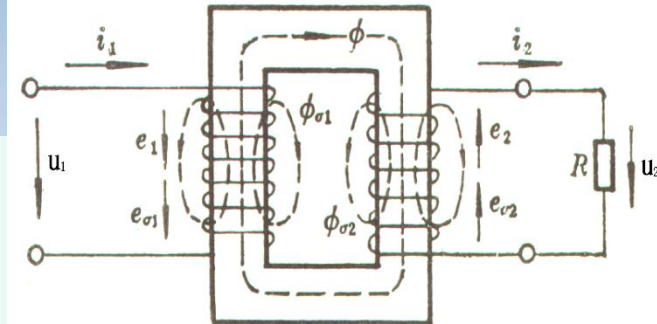
# 三、变压器的工作原理

## (二) 负载运行

### 1、定义

变压器一次绕组接电源，二次绕组接负载的运行方式。

➤  $U_1$  保持不变，输入能量增加，原边电流增大，即从  $i_0$  增加到  $i_1$ 。



### 2、磁势平衡方程

➤ 由  $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ ，可知  $\Phi_m$  大小近似常数。

➤ 有负载时一次、二次绕组的合成磁动势 ( $i_1N_1 + i_2N_2$ ) 和空载时产生主磁通的一次绕组的磁动势  $i_0N_1$  近似相等，即

$$i_1N_1 + i_2N_2 \approx i_0N_1$$

用相量表示，则为

$$\boxed{I_1 N_1 + I_2 N_2 \approx I_0 N_1}$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



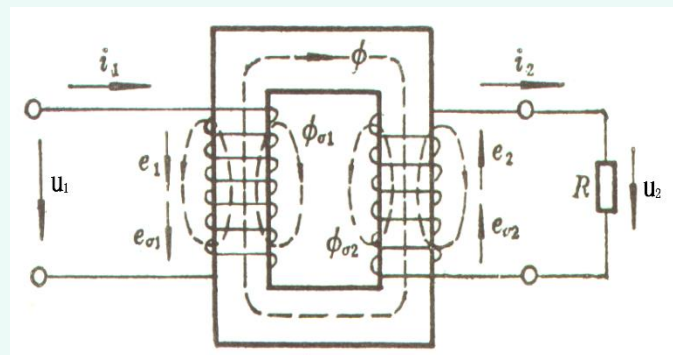
### 三、变压器的工作原理

变压器的空载电流 $i_0$ 是励磁用的。由于铁心的磁导率高，空载电流是很小的，可忽略。

$$\overset{\square}{I_1} \overset{\square}{N_1} + \overset{\square}{I_2} \overset{\square}{N_2} \approx \overset{\square}{I_0} \overset{\square}{N_1} \quad \longrightarrow \quad \overset{\square}{I_1} \overset{\square}{N_1} \approx - \overset{\square}{I_2} \overset{\square}{N_2}$$

一次、二次绕组的电流关系为

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



- 一次、二次绕组的电流之比近似等于它们的匝数比的倒数
- 变压器有变换电流的作用

## 三、变压器的工作原理

### 3、二次侧电势平衡方程

副绕组中有电流通过时也会产生漏磁通 $\Phi_{\sigma 2}$ ，同样会在副绕组中产生漏磁感应电动势 $E_{\sigma 2}$ ；另外，副绕组中也有电阻 $R_2$ ，也会产生电阻压降 $U_2$ 。

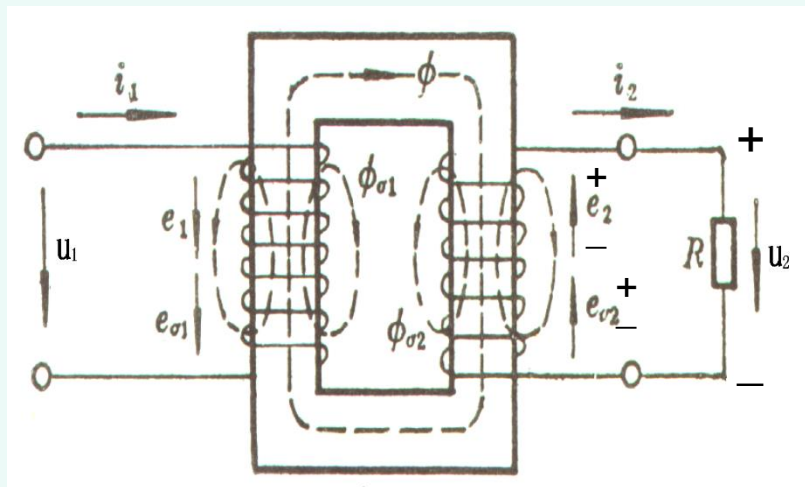
$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 - \dot{E}_{\sigma 2}$$

$$= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j \dot{I}_2 X_{\sigma 2}$$

$$= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 (R_2 + jX_{\sigma 2})$$

$$= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_{\sigma 2}$$



$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_{\sigma 2}$$

# 变压器的外特性和电压调整率

变压器二次侧接入负载后，绕组中有电流 $I_2$ 通过，内阻抗上产生电压降，使二次侧输出电压 $U_2$ 随输出电流 $I_2$ 的变化而变化，即 $U_2 = f(I_2)$ 关系称为变压器的外特性。

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_{\sigma 2}$$

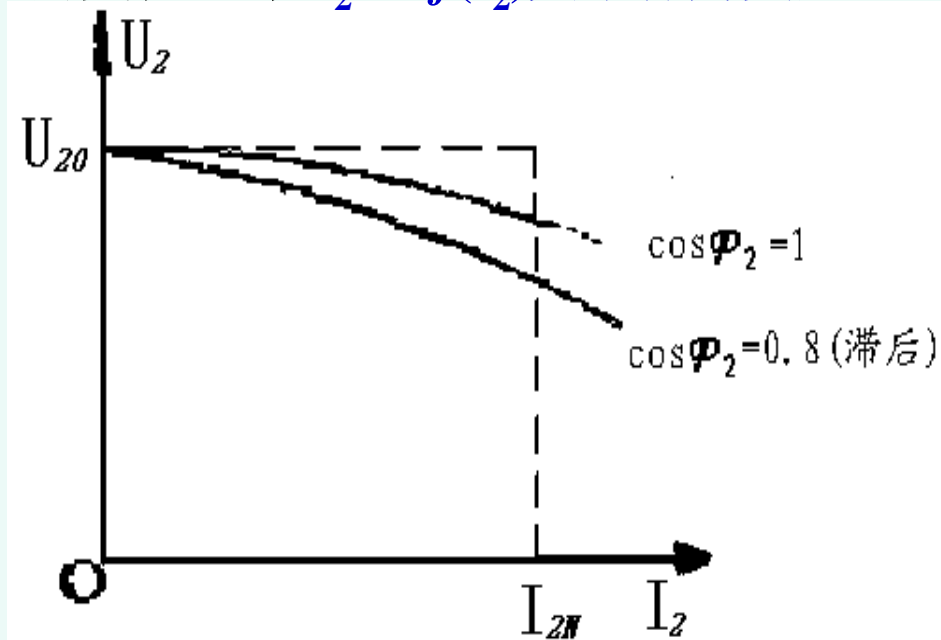
$$U_{20} = E_2$$

➤ 电压调整率：

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100 \%$$

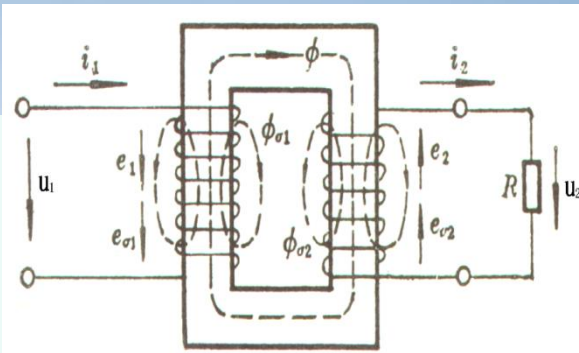
$U_{20}$  —— 空载时二次侧输出电压  
 $U_2$  —— 负载时二次侧输出电压

电力变压器的电压调整率约为5%左右。



# 变压器的损耗与效率

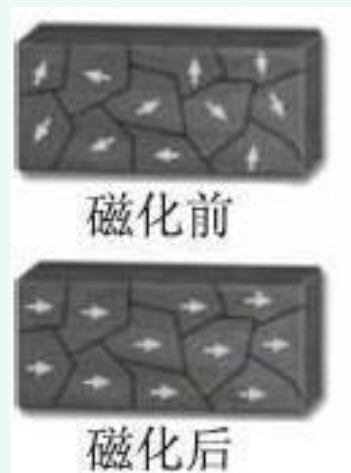
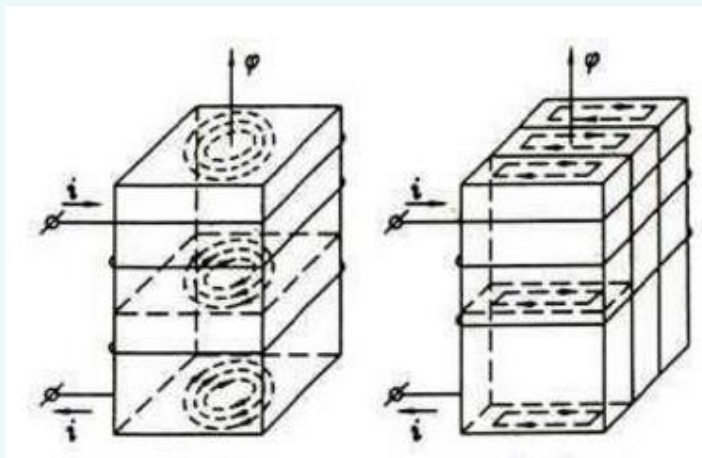
1. 变压器在运行时存在两种损耗：**铁损**  $P_{Fe}$  和 **铜损**  $P_{cu}$ 。



## (1) 铁耗

铁损是交变的磁通在铁心中产生的**涡流损耗**  $P_w$  和 **磁滞损耗**  $P_h$

$$P_{Fe} = P_w + P_h$$



## (2) 铜耗

变压器负载运行时，电流在一次和二次侧绕组电阻  $R_1$ 、 $R_2$  上产生的损耗

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 变压器的损耗与效率

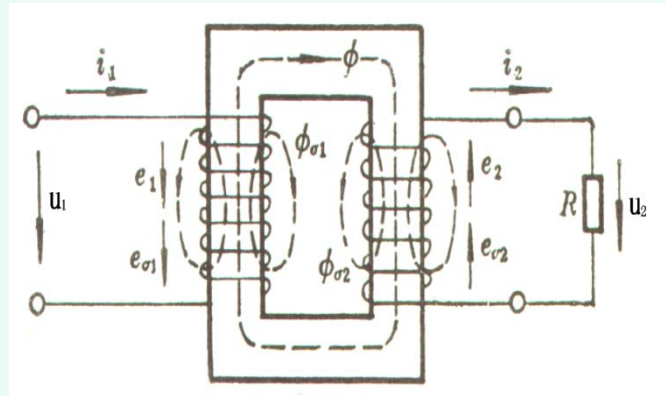
## 2. 变压器的效率 $\eta$

变压器效率是指变压器输出有功功率 $P_2$ 与输入有功功率 $P_1$ 的比值

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

功率平衡方程

$$P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}$$



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

一般变压器功率损耗很小，故效率很高。电力变压器满载时效率在**95%**以上,大型变压器效率可达**99%**以上。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



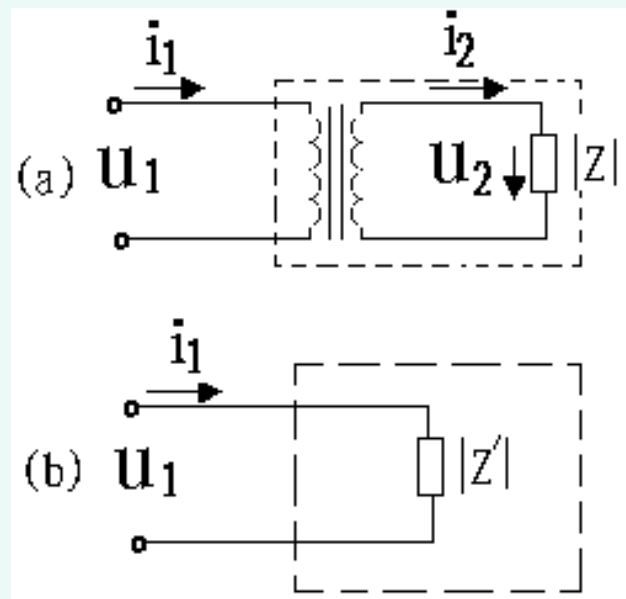
# 变压器的应用

## 阻抗变换

负载阻抗  $|Z|$  接在变压器副边，而图中的虚线框部分可用一个阻抗  $|Z'|$  来等效代替。所谓等效，就是输入电路的电压、电流和功率不变。

$$|Z| = \frac{U_2}{I_2} \quad |Z'| = \frac{U_1}{I_1}$$

$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{KU_2}{I_2/K} = K^2 |Z|$$



变压器二次侧阻抗为  $|Z|$  时，一次侧的等效阻抗为  $K^2 |Z|$ ，因此只要改变变压器的变比，就可以使负载与电源进行匹配获得较高的功率输出。这种做法通常称为阻抗匹配。

## 例题

例6—2] 信号源电压 $U_s = 10\text{ V}$ ，内阻 $R_s = 0.4\text{ k}\Omega$ ，负载电阻 $R_L = 8\text{ }\Omega$ ，为使负载能够获得最大功率，在信号源与 $R_L$ 负载之间接入一个变压器，如图6—7所示，求变压器的变比及一次、二次侧的电压、电流有效值和负载 $R_L$ 的功率。

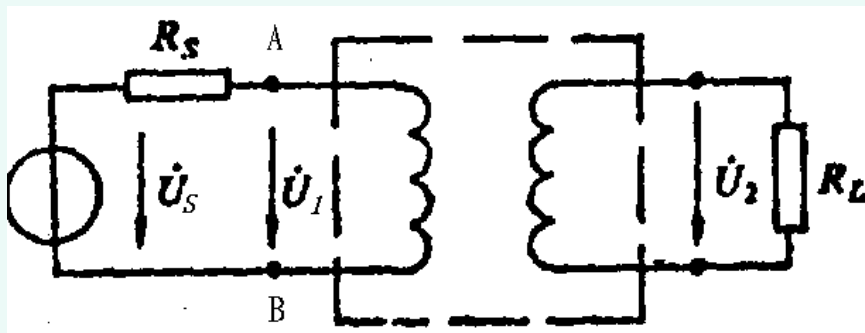


图6—7



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

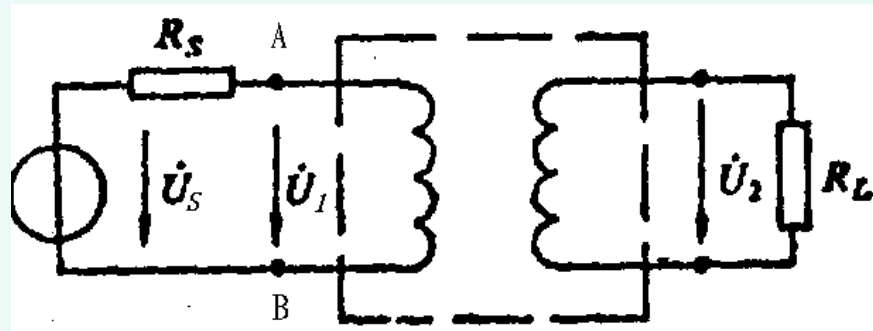
# 例题

【解】 (1) 求变比

负载获得最大功率的条件是

$$R_L' = R_S$$

$$R_L' = K^2 R_L$$



$$K = \sqrt{\frac{R_L'}{R_L}} = \sqrt{\frac{R_S}{R_L}} = \sqrt{\frac{0.4 \times 10^3}{8}} = 7.1$$

(2) 变压器变比  $K = 7.1$  时, A、B间的等效电阻

$$R_L' = K^2 R_L = 7.1^2 \times 8 = 0.4 \text{ k} \Omega$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 例题

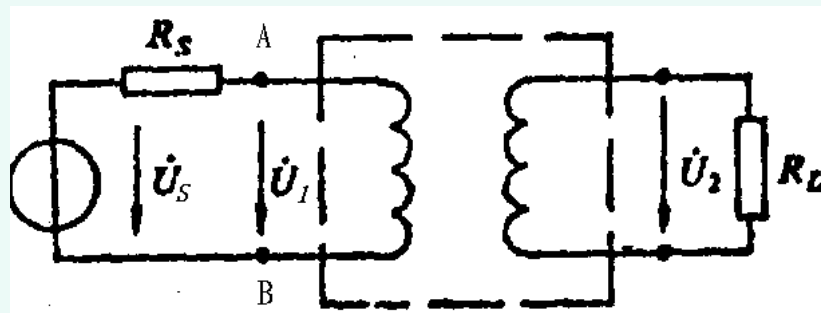
所以得 
$$U_1 = \frac{U_s}{R_s + R_L} R_L' = \frac{1}{2} U_s = \frac{10}{2} = 5 \text{ V}$$

二次侧电压 
$$U_2 = \frac{U_1}{K} = \frac{5}{7.1} = 0.7 \text{ V}$$

二次侧电流 
$$I_2 = \frac{U_2}{R_L} = \frac{0.7}{8} = 88 \text{ mA}$$

一次侧电流 
$$I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{88}{7.1} = 12.5 \text{ mA}$$

负载功率 
$$P_2 = U_2 I_2 = 0.7 \times 88 = 62 \text{ mW}$$



## 四、三相变压器

### (一) 三相变压器的结构

三相变压器按磁路结构可分为**三相组式变压器**和**三相心式变压器**两类。

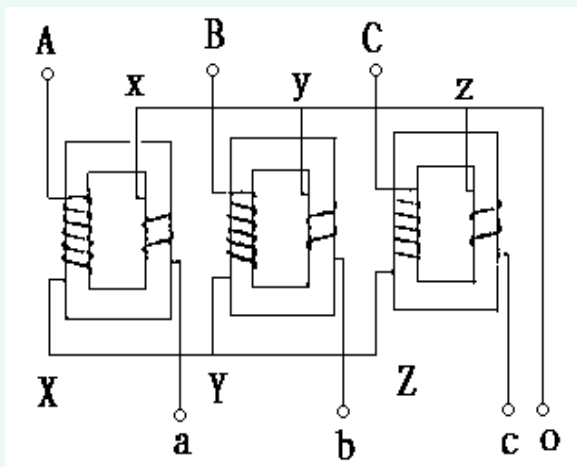
**三相组式变压器：**由三个单相变压器构成。

特点：三个磁路单独分开，互不关联；三相之间只有电联系无磁耦合。

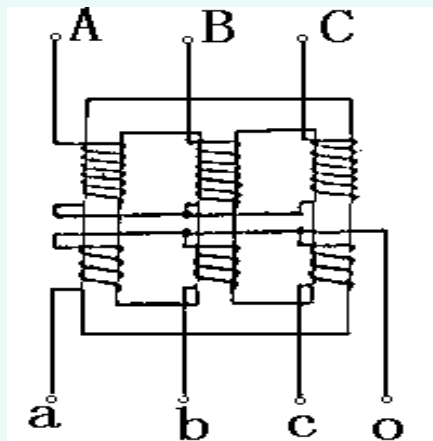
**三相心式变压器：**

特点：三相共用同一铁心，既有电的联系又有磁的关联。

三相心式变压器的优点，所用材料少、重量轻、价格便宜。



(a) 三相组式变压器



(b) 三相心式变压器

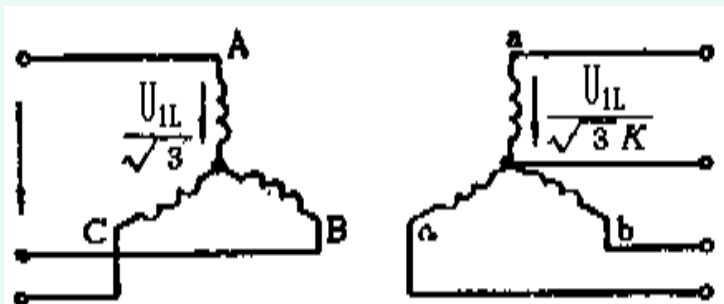


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

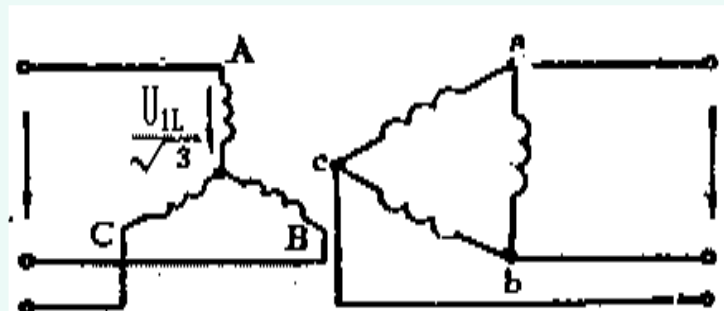


## (二) 三相变压器中原、副边线电压与相电压之间的变换关系

对于三相变压器，不论是一次绕组还是二次绕组，广泛采用的是星形连接和三角形连接，采用星形联接时用符号Y（低压侧用y）表示，如果有中线引出用YN（yn）表示；采用三角形时用D（低压侧用d）表示。



(a) Yyn连接



(b) Yd连接

不论三相变压器作何种联接，其一次、二次侧相电压的比值仍等于一次、二次侧绕组的匝数比（变压器的变比）。

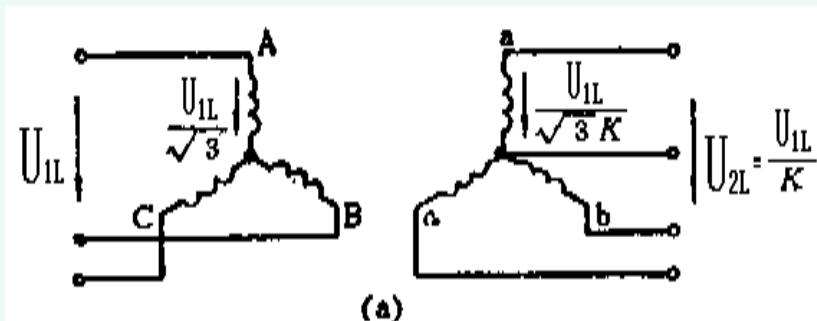
$$\frac{U_{1P}}{U_{2P}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

## (二) 三相变压器中原、副边线电压与相电压之间的变换关系

当三相绕组接法不同时，一次、二次侧线电压的比值是不同的，即

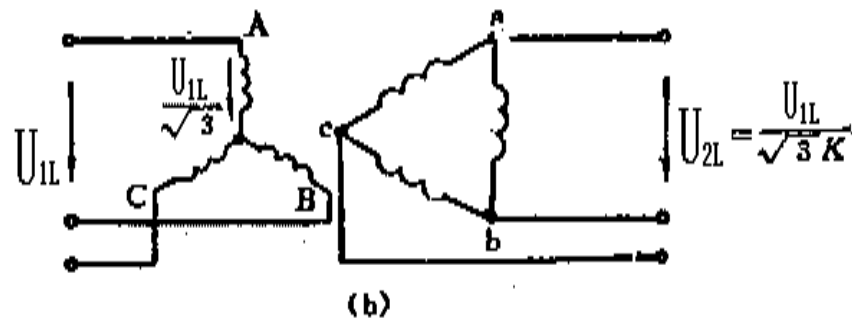
当作 **Yyn** 联接时

$$\frac{U_{1L}}{U_{2L}} = K$$



当作 **Yd** 联接时

$$\frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \sqrt{3}K$$



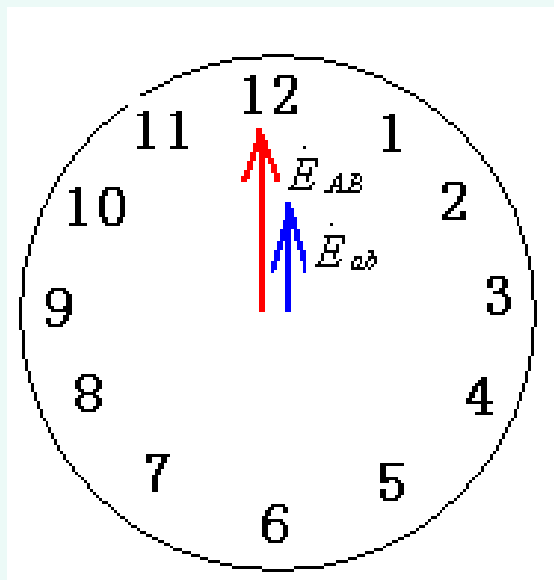
当作 **Dy** 联接时

$$\frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{1}{\sqrt{3}} K$$

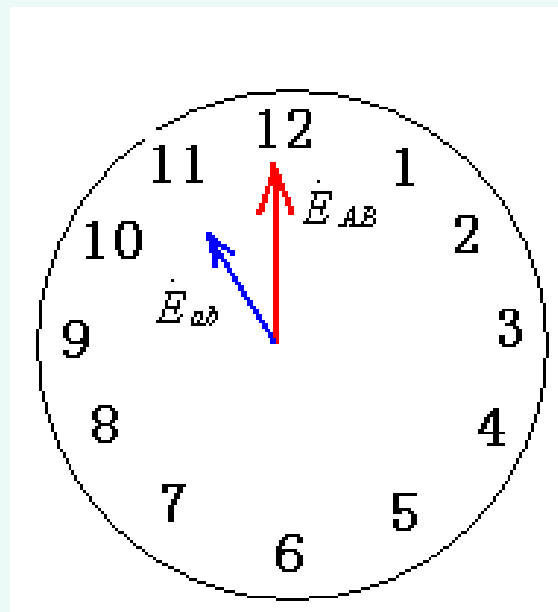
### (三) 三相变压器的联接组别

三相变压器的联接组别是其一次绕组和二次绕组接线形式的一种表示方法。为了制造和并联运行方便，我国主要生产Yyn0、Yd11、YNd11 三种联接组别的电力变压器。

数字采用时钟表示法，用来表示一、二次侧线电压的相位关系，一次侧线电压相量作为分针，固定指在12点的位置，二次侧的线电压相量作为时针。



Yyn0



Yd11



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

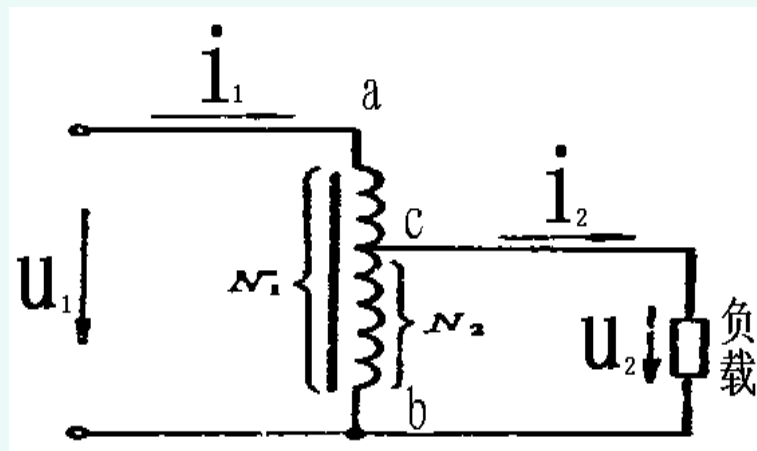
# 五、特殊变压器

## (一) 自耦变压器

变压器中**只有一个绕组**，在绕组中引出一个抽头C，使 $N_{ab}=N_1$ ， $N_{cb}=N_2$ ，由于感应电动势正比于匝数，当铁心中的磁通交变时，在这两部分绕组中的感应电动势应该分别为：

$$E_{ab} = 4.44 f N_1 \Phi_m = E_1$$

$$E_{cb} = 4.44 f N_2 \Phi_m = E_2$$



**自耦变压器**的原、副绕组电压、电流之间同样存在如下关系：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

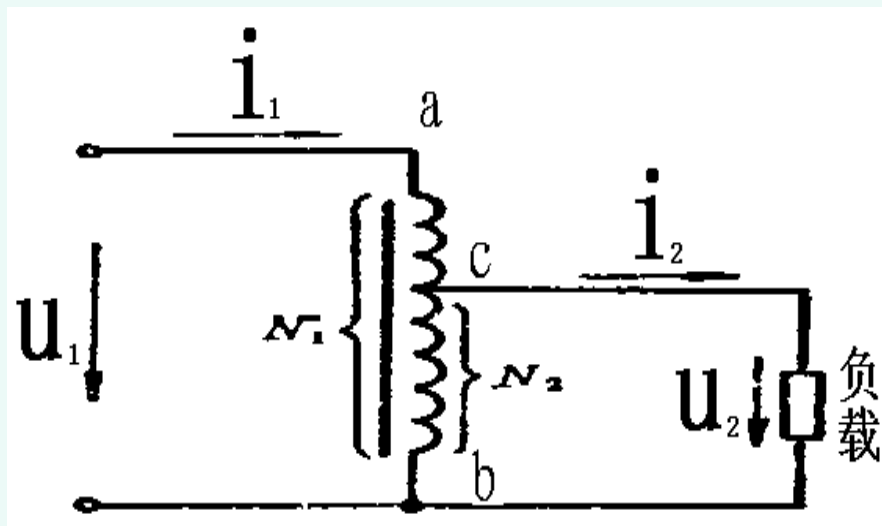
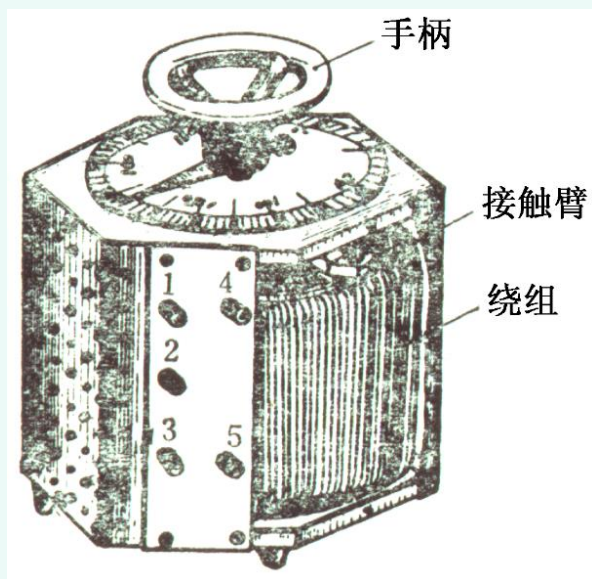
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## (一) 自耦变压器

**调压器**就是一种可改变二次侧绕组匝数的自耦变压器，  
平滑地调节输出电压



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

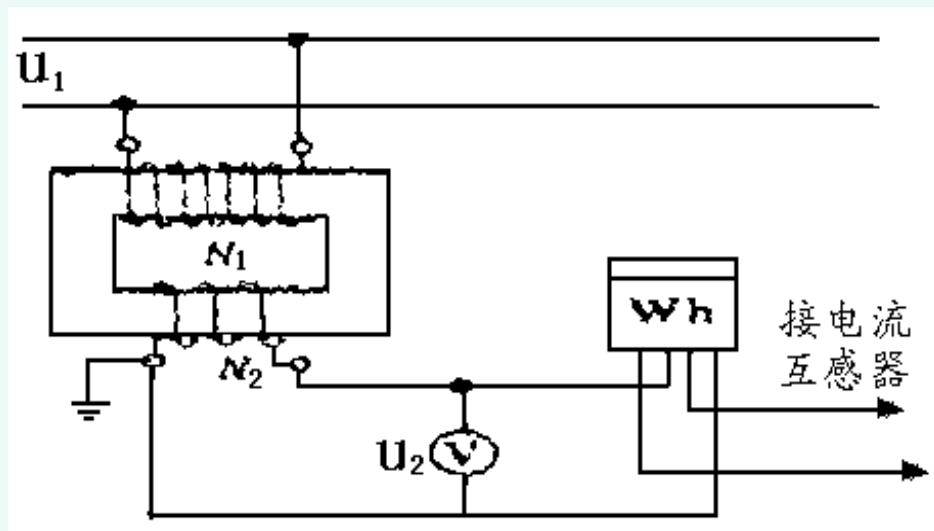


## (二) 互感器

互感器是一种测量用的设备，有电压互感器和电流互感器两种。

### 1、电压互感器

电压互感器的一次侧绕组匝数较多，与被测电路并联，二次侧绕组的匝数较少，接入的是电压表（或功率表的电压线圈）。电压互感器正常工作时相当于一台降压变压器的空载运行。



$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

适当地选择变比，就能从接在二次侧的电压表上间接地读出一次侧的电压。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## (二) 互感器

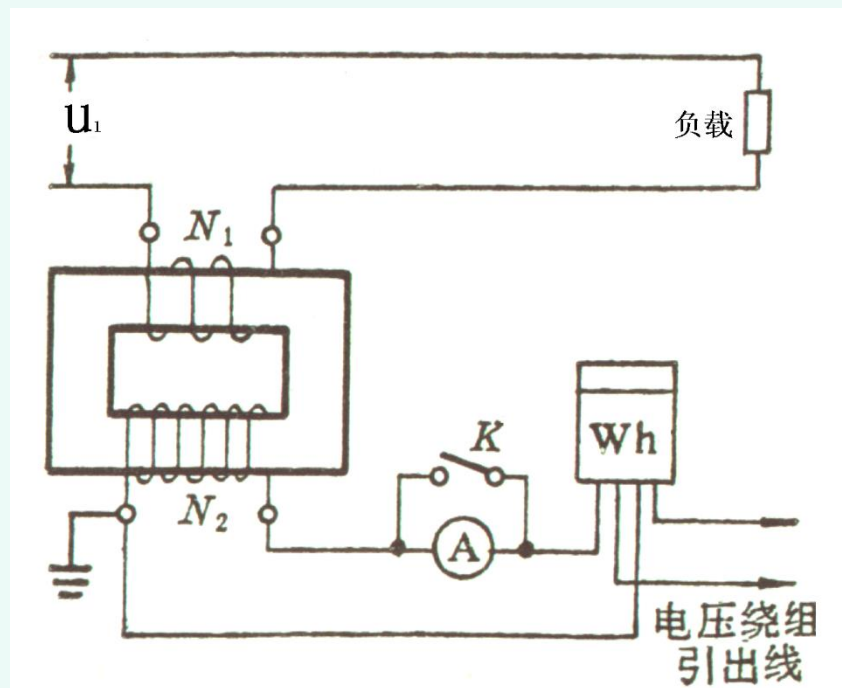
### 2、电流互感器

电流互感器一次侧绕组的匝数少（只有一、两匝），导线粗，工作时串接在待测量电流的电路中；二次侧的匝数比一次侧的匝数多，导线细，与电流表（或其它仪表及继电器的电流线圈）相连接。

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

$$\text{或} \quad I_1 = K_i I_2$$

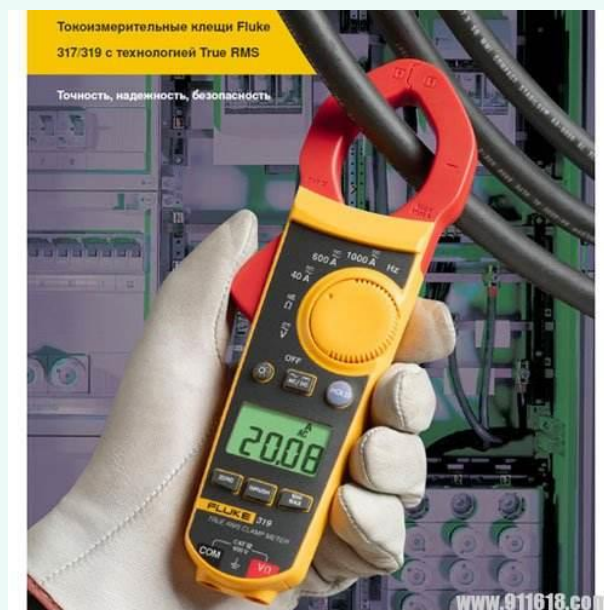
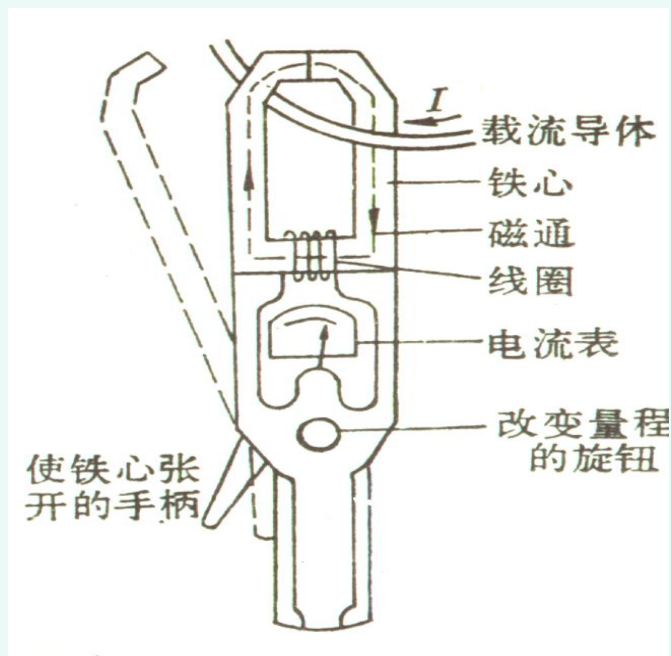
式中 $K_i$ 是电流互感器的变换系数。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## (二) 互感器

钳形电流表，把互感器和电流表组装在一起的仪表。电流互感器的铁心象把钳子，在测量时可用手柄将铁心张开，把被测电流的导线套进钳形铁心内，被测电流的导线就是电流互感器的一次绕组（只有一匝），二次绕组绕在铁心上并与电流表接通。利用钳形电流表可以很方便地测量线路中的电流，而不用断开被测电路。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 总结

1. 变压器的结构：铁芯、绕组、冷却和绝缘等装置。

变压器容量：单相

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

三相

$$S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N}$$

2. 变压器的工作原理：

空载→

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 N_1 f \Phi_m}{4.44 N_2 f \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

负载→

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

阻抗变换→

$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{K U_2}{I_2 / K} = K^2 |Z|$$

3. 变压器的外特性：

$$U_2 = U_{20} - I_2 Z_{\sigma 2}$$

电压调整率：

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100 \%$$

4. 变压器的效率：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \% = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \times 100 \%$$

5. 三相变压器：

$$\frac{U_{1P}}{U_{2P}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

$$Y_{yn} : \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = K$$

$$Y_d : \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \sqrt{3} K$$

$$Dy : \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{1}{\sqrt{3}} K$$

6. 特殊变压器：自耦变压器、电压互感器、电流互感器



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 第六章

# 结 束