



# 第6章 磁路与铁心线圈电路

**6.1** 磁路及其分析方法

**6.2** 交流铁心线圈电路

**6.3** 变压器

**\*6.4** 电磁铁



# 第6章 磁路与铁心线圈电路

本章要求：

1. 理解磁场的基本物理量的意义，了解磁性材料的基本知识及磁路的基本定律，会分析计算交流铁心线圈电路；
2. 了解变压器的基本结构、工作原理、运行特性和绕组的同极性端，理解变压器额定值的意义；
3. 掌握变压器电压、电流和阻抗变换作用；
- \*4. 了解电磁铁的基本工作原理及其应用知识。



## 6.1 磁路及其分析方法

在很多电工设备（像变压器、电机、电磁铁电工测量仪器等）中，不仅有电路的问题，同时还有磁路的问题。只有同时掌握了电路和磁路的基本理论，才能对以上电工设备进行全面分析。

磁路和电路往往是相关的，因此在这里要研究磁路和电路的关系以及磁和电的关系。

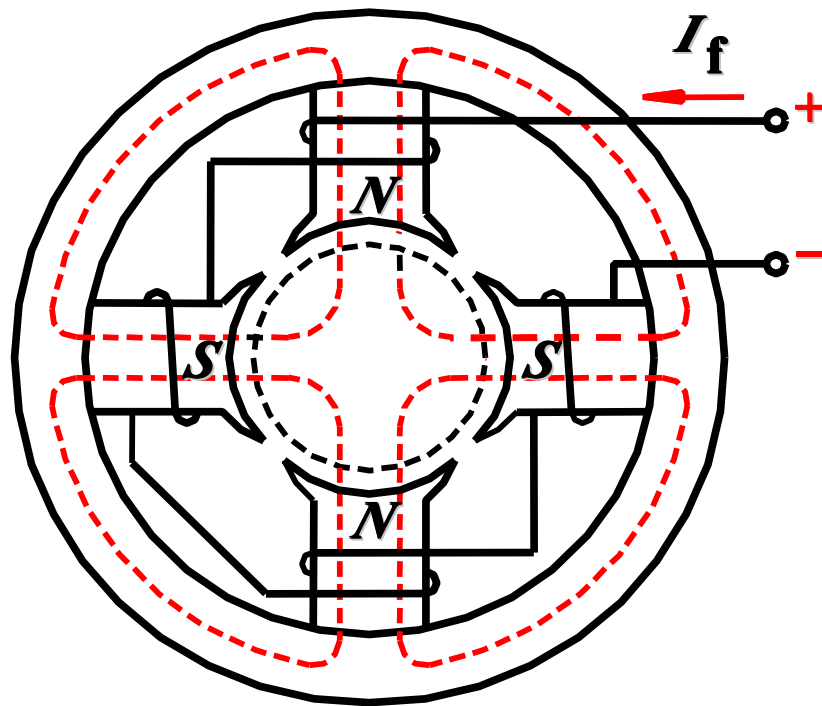
本章结合磁路和铁心线圈电路的分析，讨论变压器的工作原理，作为应用实例。

在电机、变压器及各种铁磁元件中常用磁性材料做成一定形状的铁心。铁心的磁导率比周围空气或其它物质的磁导率高的多，磁通的绝大部分经过铁心形成闭合通路，磁通的闭合路径称为磁路。

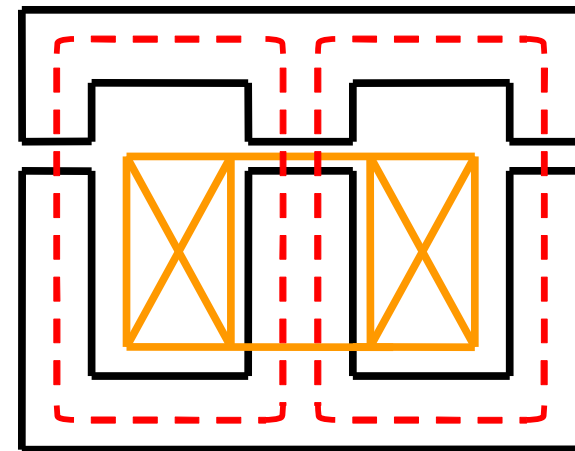


## 6.1 磁路及其分析方法

### 四极直流电机和交流接触器的磁路



直流电机的磁路



交流接触器的磁路



## 6.1.1 磁场的基本物理量

### 1. 磁感应强度

#### 磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的定义

表示磁场内某点磁场强弱和方向的物理量。

#### 磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的方向

与电流的方向之间符合右手螺旋定则。

#### 磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的大小

$$B = \frac{F}{Il}$$

磁感应强度  $\mathbf{B}$  的单位: 特斯拉(T),  $1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$

均匀磁场: 各点磁感应强度大小相等, 方向相同的  
磁场, 也称匀强磁场。



## 2. 磁通

**磁通 $\Phi$** ：表示磁场内某截面磁场强弱的物理量。  
大小等于穿过垂直于 **$B$** 方向的面积 **$S$** 中的磁力线总数。

在均匀磁场中  **$\Phi = BS$**  或  **$B = \Phi / S$**

**说明**：如果不是均匀磁场，则取 **$B$** 的平均值。

**磁感应强度 $B$** 在数值上可以看成为与磁场方向垂直的单位面积所通过的磁通，故又称**磁通密度**。

**磁通 $\Phi$ 的单位**：韦[伯](Wb)  **$1\text{Wb} = 1\text{T}\cdot\text{m}^2$**

## 3. 磁场强度

**磁场强度 $H$** ：是计算磁场时所引用的一个物理量，也是矢量，通过它来确定磁场与电流之间的关系。

**磁场强度 $H$ 的单位**：安培/米 (**A/m**)



即：安培环路定律（全电流定律）

$$\oint H \mathrm{d}l = \sum I$$

式中： $\oint H \mathrm{d}l$  是磁场强度矢量沿任意闭合  
线(常取磁通作为闭合回线)的线积分；

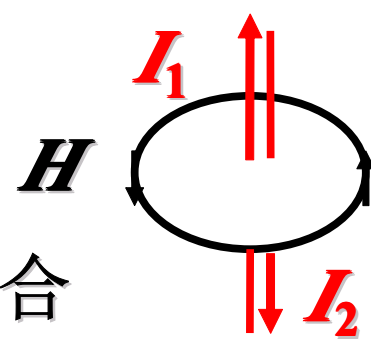
$\sum I$  是穿过闭合回线所围面积的电流的代数和。

**安培环路定律电流正负的规定：**

任意选定一个闭合回线的围绕方向，凡是电流方向与闭合回线围绕方向之间符合右螺旋定则的电流作为正、反之为负。

在均匀磁场中  $Hl = IN$  或  $H = \frac{IN}{l}$

所以安培环路定律将电流与磁场强度联系起来。



## 4. 磁导率

磁导率 $\mu$ 的定义：

表示磁场媒质磁性的物理量，衡量物质的导磁能力。它与磁场强度的乘积就等于磁感应强度，即：

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

磁导率 $\mu$ 的单位：亨/米（H/m）

$$\mu \text{ 的单位} = \frac{\text{Wb/m}^2}{\text{A/m}} = \frac{\text{H}\cdot\text{A}}{\text{A}\cdot\text{m}} = \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

由实验可测得：真空的磁导率为：

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

它是一个常数，将其它物质的磁导率和它比较很方便。







## 相对磁导率 $\mu_r$ :

任一种物质的磁导率 $\mu$ 和真空的磁导率 $\mu_0$ 的比值。

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu H}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}$$

也即当磁场媒质是某种物质时某点的磁感应强度 $B$ 与在同样电流下真空时该点的磁感应强度 $B_0$ 之比的倍数。

自然界的所有物质按磁导率的大小，大体上可分为磁性材料和非磁性材料。



## 6.1.2 磁性材料的磁性能

磁性材料主要指铁、镍、钴及其合金等。

### 1. 高导磁性

磁性材料的磁导率通常都很高，即  $\mu_r \gg 1$  (如坡莫合金，其  $\mu_r$  可达  $2 \times 10^5$ )。

磁性材料能被强烈的磁化，具有很高的导磁性能。

磁性物质的高导磁性被广泛地应用于电工设备中，如电机、变压器及各种铁磁元件的线圈中都放有铁心。在这种具有铁心的线圈中通入不太大的励磁电流，便可以产生较大的磁通和磁感应强度。



## 2.磁饱和性

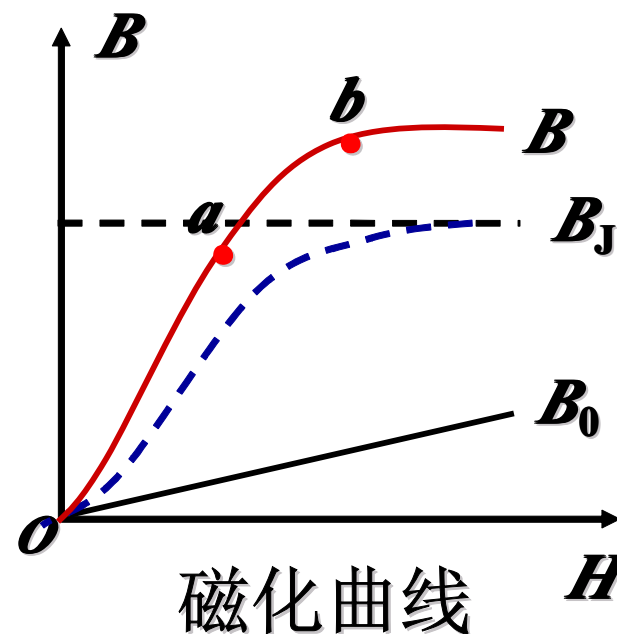
磁性物质由于磁化所产生的磁化磁场不会随着外磁场的增强而无限的增强。

当外磁场增大到一定程度时，磁性物质的全部磁畴的磁场方向都转向与外部磁场方向一致，磁化磁场的磁感应强度将趋向某一定值。如图。

**$B_J$**  磁场内磁性物质的磁化磁场的磁感应强度曲线；

**$B_0$**  磁场内不存在磁性物质时的磁感应强度直线；

**$B$**   $B_J$ 曲线和 $B_0$ 直线的纵坐标相加即磁场的  **$B-H$** 磁化曲线。



## **$B-H$ 磁化曲线的特征:**

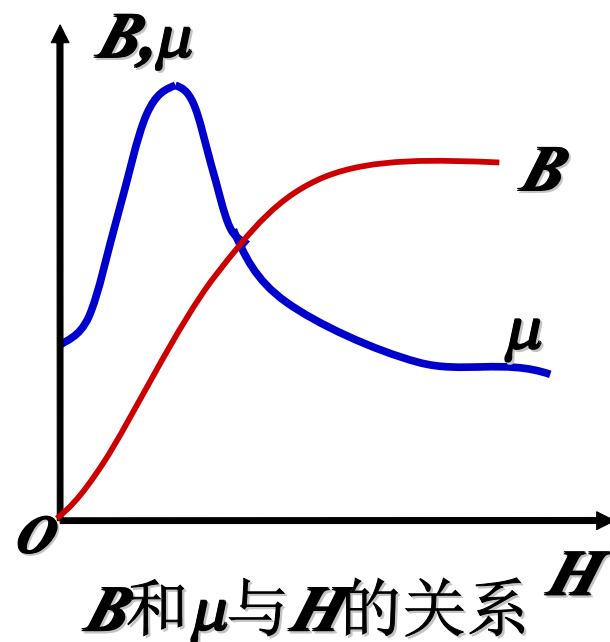
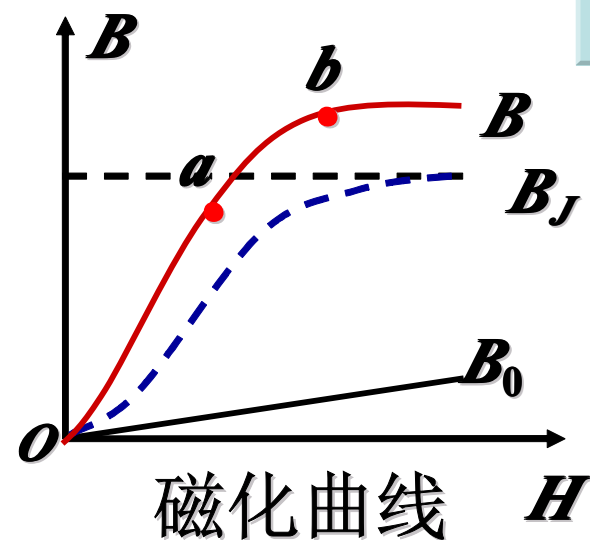
**$oa$ 段:**  $B$  与  $H$  几乎成正比地增加;

**$ab$ 段:**  $B$  的增加缓慢下来;

**$b$ 点以后:**  $B$  增加很少, 达到饱和。

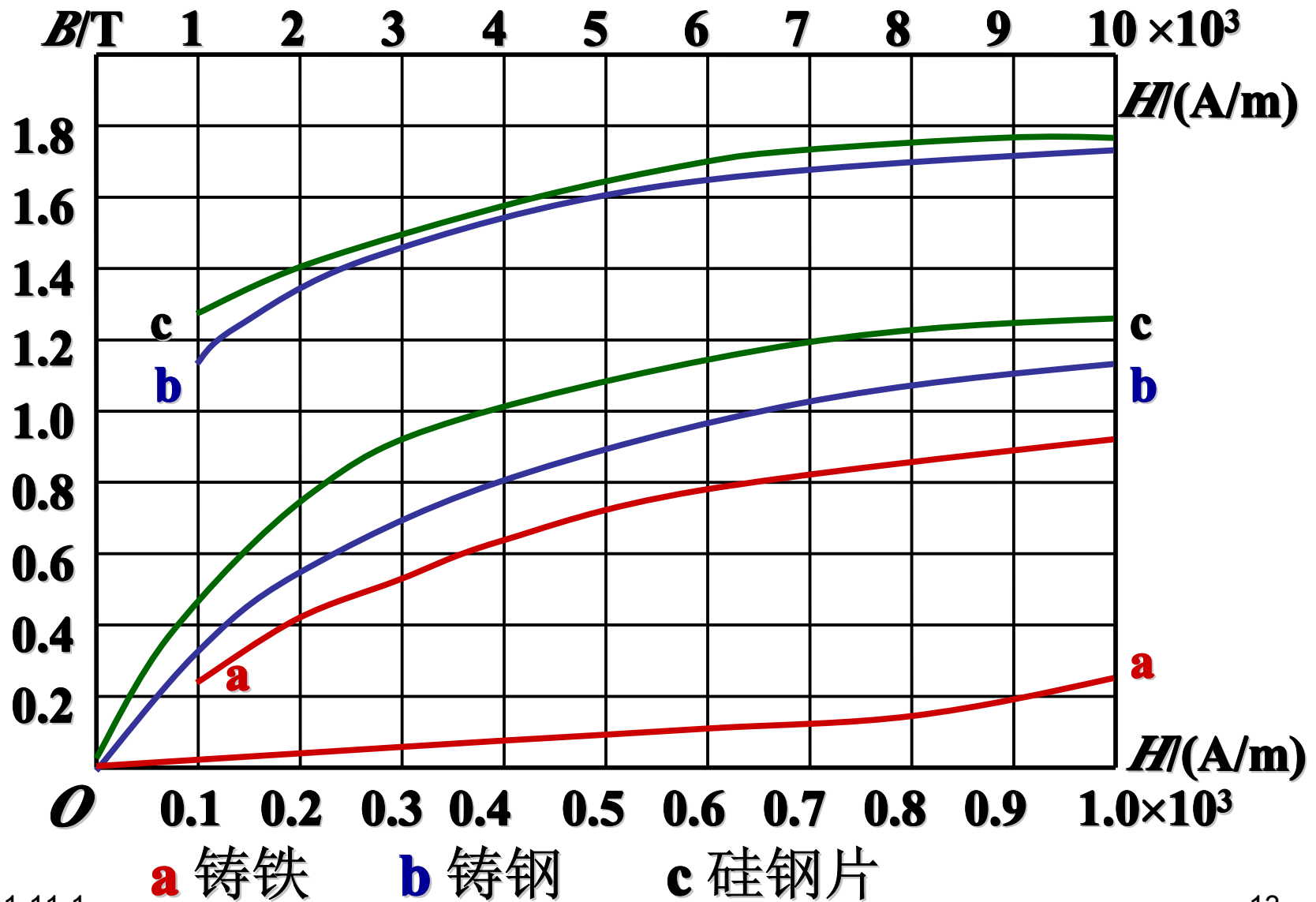
有磁性物质存在时,  $B(\Phi)$  与  $H$   
( $I$ ) 不成正比, 磁性物质的磁导率  
 $\mu$  不是常数, 随  $H$  而变。

磁性物质的磁化曲线在磁路计算  
上极为重要, 实际中通过实验得  
出。





## 几种常见磁性物质的磁化曲线





### 3. 磁滞性

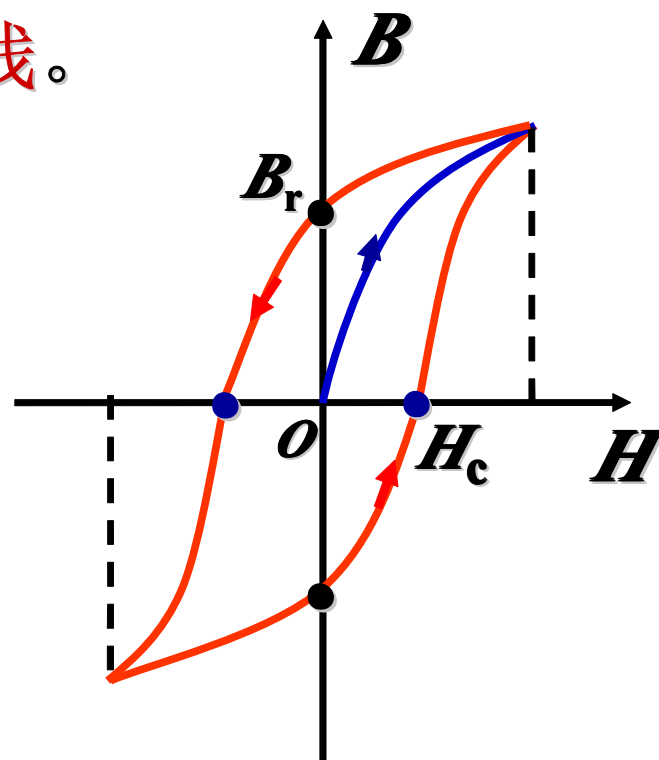
磁性材料中磁感应强度 $B$ 的变化总是滞后于外磁场变化的性质。

磁性材料在交变磁场中反复磁化，其 $B-H$ 关系曲线是一条回形闭合曲线，称为**磁滞回线**。

**剩磁感应强度 $B_r$  (剩磁)：**

当线圈中电流减小到零( $H=0$ )时，铁心中的磁感应强度。

例如：永久磁铁的磁性就是由剩磁产生的；自励直流发电机的磁极，为了使电压能建立，也必须具有剩磁。



磁滞回线

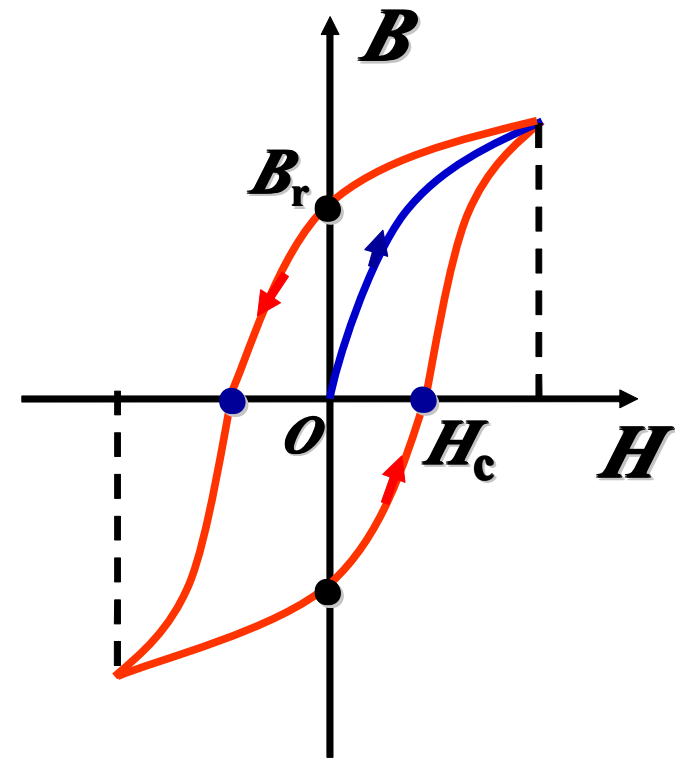
### 3. 磁滞性

但剩磁也存在着有害的一面，例如，当工件在平面磨床上加工完毕后，由于电磁吸盘有剩磁，还将工件吸住。为此要通入反向去磁电流，去掉剩磁，才能取下工件。

矫顽磁力 $H_c$ ：

使 $B=0$ 所需的 $H$ 值。

磁性物质不同，其磁滞回线和磁化曲线也不同。



磁滞回线



按磁性物质的磁性能，磁性材料分为三种类型：

### (1)软磁材料

具有较小的矫顽磁力，磁滞回线较窄。一般用来制造电机、电器及变压器等的铁心。常用的有铸铁、硅钢、坡莫合金即铁氧体等。

### (2)永磁材料

具有较大的矫顽磁力，磁滞回线较宽。一般用来制造永久磁铁。常用的有碳钢及铁镍铝钴合金等。

### (3)矩磁材料

具有较小的矫顽磁力和较大的剩磁，磁滞回线接近矩形，稳定性良好。在计算机和控制系统中用作记忆元件、开关元件和逻辑元件。常用的有镁锰铁氧体等。





## 6.1.3 磁路的分析方法

磁路的欧姆定律是分析磁路的基本定律

### 1. 引例

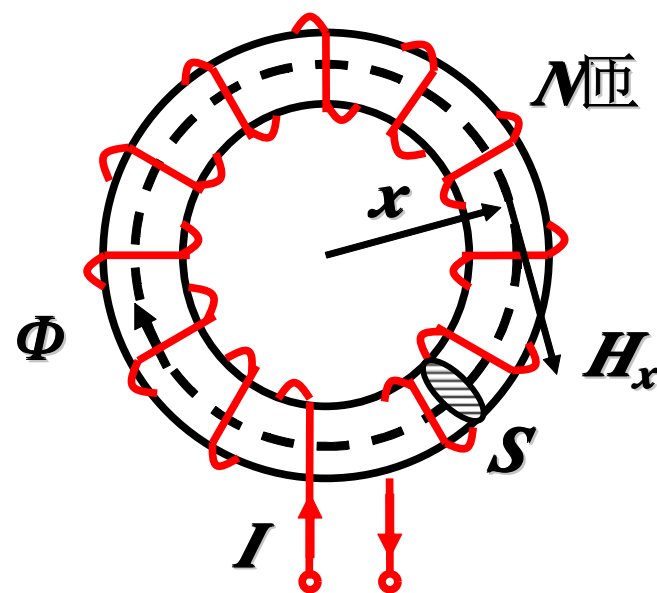
环形线圈如图，其中媒质是均匀的，磁导率为 $\mu$ ，试计算线圈内部的磁通 $\Phi$ 。

解：根据安培环路定律，有

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$$

设磁路的平均长度为 $l$ ，则有

$$NI = Hl = \frac{\mathbf{B}}{\mu} l = \frac{\Phi}{\mu S} l$$





$$\text{即有: } \Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m}$$

式中： $F=NI$ 为磁势，由其产生磁通；

$R_m$ 称为磁阻，表示磁路对磁通的阻碍作用；

$l$ 为磁路的平均长度； $S$ 为磁路的截面积。

## 2. 磁路的欧姆定律

若某磁路的磁通为 $\Phi$ ，磁通势为 $F$ ，磁阻为 $R_m$ ，则

$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$

此即磁路的欧姆定律。



### 3. 磁路的分析计算

**主要任务：**预先选定磁性材料中的磁通 $\Phi$  (或磁感应强度)，按照所定的磁通、磁路各段的尺寸和材料，求产生预定的磁通所需要的磁通势 $F=NI$ ，确定线圈匝数和励磁电流。

#### 基本公式：

设磁路由不同材料或不同长度和截面积的  $n$  段组成，则基本公式为：

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \cdots + H_n l_n$$

即

$$NI = \sum_{i=1}^n H_i l_i$$

$H_1 l_1, H_2 l_2, \cdots$  称为磁路个段的磁压降



**基本步骤：**（由磁通 $\Phi$ 求磁通势 $F=NI$ ）

**(1)** 求各段磁感应强度  $B_i$

各段磁路截面积不同，通过同一磁通 $\Phi$ ，故有：

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}, \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}, \quad \dots, \quad B_n = \frac{\Phi}{S_n}$$

**(2)** 求各段磁场强度  $H_i$

根据各段磁路材料的磁化曲线  $B_i=f(H_i)$ ，求 $B_1$ ， $B_2$ ，……相对应的  $H_1$ ， $H_2$ ，……。

**(3)** 计算各段磁路的磁压降（ $H_i l_i$ ）

**(4)** 根据下式求出磁通势（ $NI$ ）

$$NI = \sum_{i=1}^n H_i l_i$$

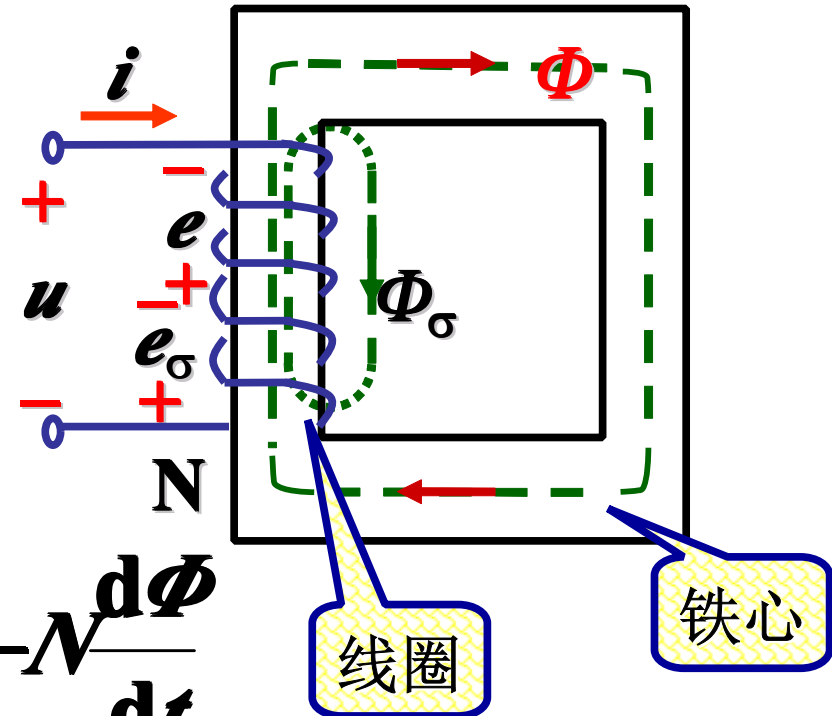
## 6.2 交流铁心线圈电路



### 6.2.1 电磁关系

**主磁通  $\Phi$** ：通过铁心闭合的磁通。 $\Phi$  与  $i$  不是线性关系。

**漏磁通  $\Phi_\sigma$** ：经过空气或其它非导磁媒质闭合的磁通。



$$\begin{array}{l}
 \mathbf{u} \longrightarrow \mathbf{i} (Ni) \begin{cases} \longrightarrow \Phi \longrightarrow \mathbf{e} = -N \frac{d\Phi}{dt} \\ \longrightarrow \Phi_\sigma \longrightarrow \mathbf{e}_\sigma = -N \frac{d\Phi_\sigma}{dt} = -L_\sigma \frac{di}{dt} \end{cases} \\
 \text{(磁通势)}
 \end{array}$$

$\Phi_\sigma \propto i$ , 铁心线圈的漏磁电感  $L_\sigma = \frac{N\Phi_\sigma}{i} = \text{常数}$

## 6.2.2 电压电流关系

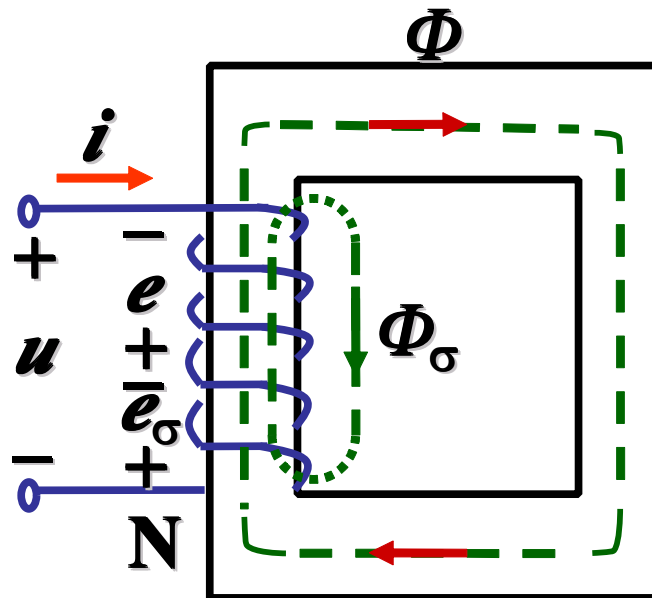
根据KVL:

$$\begin{aligned} u &= Ri - e_{\sigma} - e \\ &= Ri + L_{\sigma} \frac{di}{dt} + (-e) \end{aligned}$$

式中： $R$ 是线圈导线的电阻  
 $L_{\sigma}$ 是漏磁电感

当  $u$  是正弦电压时，其它各电压、电流、电动势可视作正弦量，则电压、电流关系的相量式为：

$$\begin{aligned} \dot{U} &= RI + (-\dot{E}_{\sigma}) + (-\dot{E}) \\ &= RI + jX_{\sigma} \dot{I} + (-\dot{E}) \end{aligned}$$





$$\dot{U} = RI + jX_{\sigma}I + (-\dot{E})$$

设主磁通  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , 则

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) = -N \omega \Phi_m \cos \omega t \\ &= 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

$$\text{有效值 } E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \Phi_m$$

由于线圈电阻  $R$  和感抗  $X_{\sigma}$  (或漏磁通  $\Phi_{\sigma}$ ) 较小, 其电压降也较小, 与主磁电动势  $E$  相比可忽略,

故有  $\dot{U} \approx -\dot{E}$

$$U \approx E = 4.44 f N \Phi_m = 4.44 f N B_m S \text{ (V)}$$

式中:  $B_m$  是铁心中磁感应强度的最大值, 单位[T];

2011-11-1  $S$  是铁心截面积, 单位[m<sup>2</sup>].



## 6.2.3 功率损耗

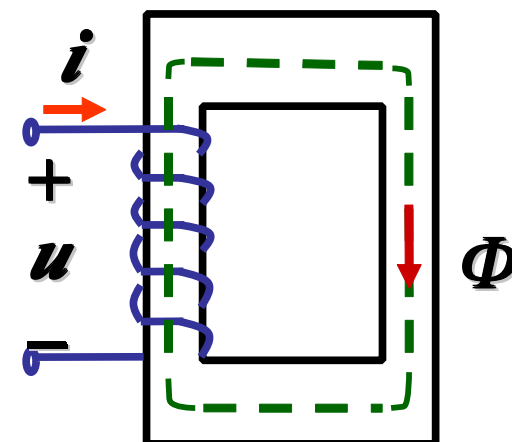
交流铁心线圈的功率损耗主要有铜损和铁损两种。

### 1. 铜损( $\Delta P_{\text{cu}}$ )

在交流铁心线圈中, 线圈电阻 $R$ 上的功率损耗称铜损, 用 $\Delta P_{\text{cu}}$ 表示。

$$\Delta P_{\text{cu}} = RI^2$$

式中:  $R$ 是线圈的电阻;  $I$ 是线圈中电流的有效值。



### 2. 铁损( $\Delta P_{\text{Fe}}$ )

在交流铁心线圈中, 处于交变磁通下的铁心内的功率损耗称铁损, 用 $\Delta P_{\text{Fe}}$ 表示。它与铁心内磁感应强度的最大值 $B_m$ 的平方成正比。

铁损由磁滞和涡流产生。





## (1) 磁滞损耗 ( $\Delta P_h$ )

由磁滞所产生的能量损耗称为**磁滞损耗( $\Delta P_h$ )**。

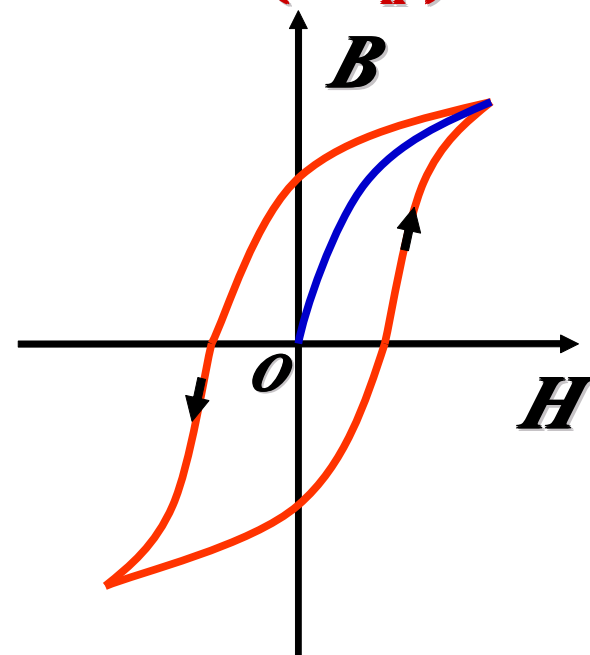
磁滞损耗的大小:

单位体积内的磁滞损耗正比  
与磁滞回线的面积和磁场交变的  
频率  $f$ 。

磁滞损耗转化为热能，引  
起铁心发热。

减少磁滞损耗的措施:

选用磁滞回线狭小的磁性材料制作铁心。变压器  
和电机中使用的硅钢等材料的磁滞损耗较低。  
设计时应适当选择值以减小铁心饱和程度。



## (2) 涡流损耗 ( $\Delta P_e$ )

**涡流:** 交变磁通在铁心内产生感应电动势和电流, 称为涡流。涡流在垂直于磁通的平面内环流。

**涡流损耗:** 由涡流所产生的功率损耗。

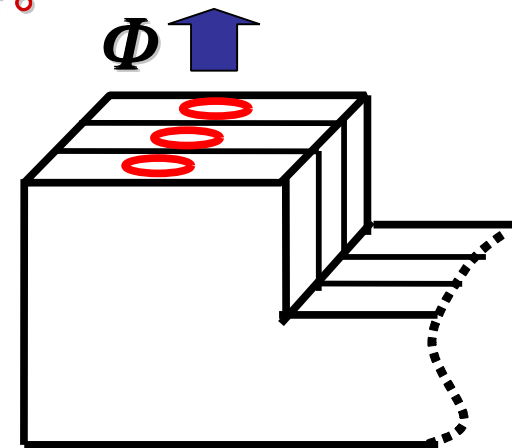
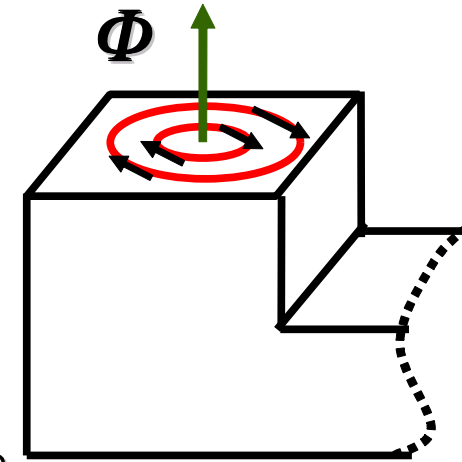
**涡流损耗转化为热能, 引起铁心发热。**

**减少涡流损耗措施:**

提高铁心的电阻率 (通常由于硅钢片)。铁心用彼此绝缘的钢片叠成, 把涡流限制在较小的截面内。

**铁心线圈交流电路的有功功率为:**

$$P = UI \cos \varphi = RI^2 + \Delta P_{Fe}$$





## 6.3 变压器

### 6.3.1 概述

变压器是一种常见的电气设备，在电力系统和电子线路中应用广泛。

变压器的主要功能有：

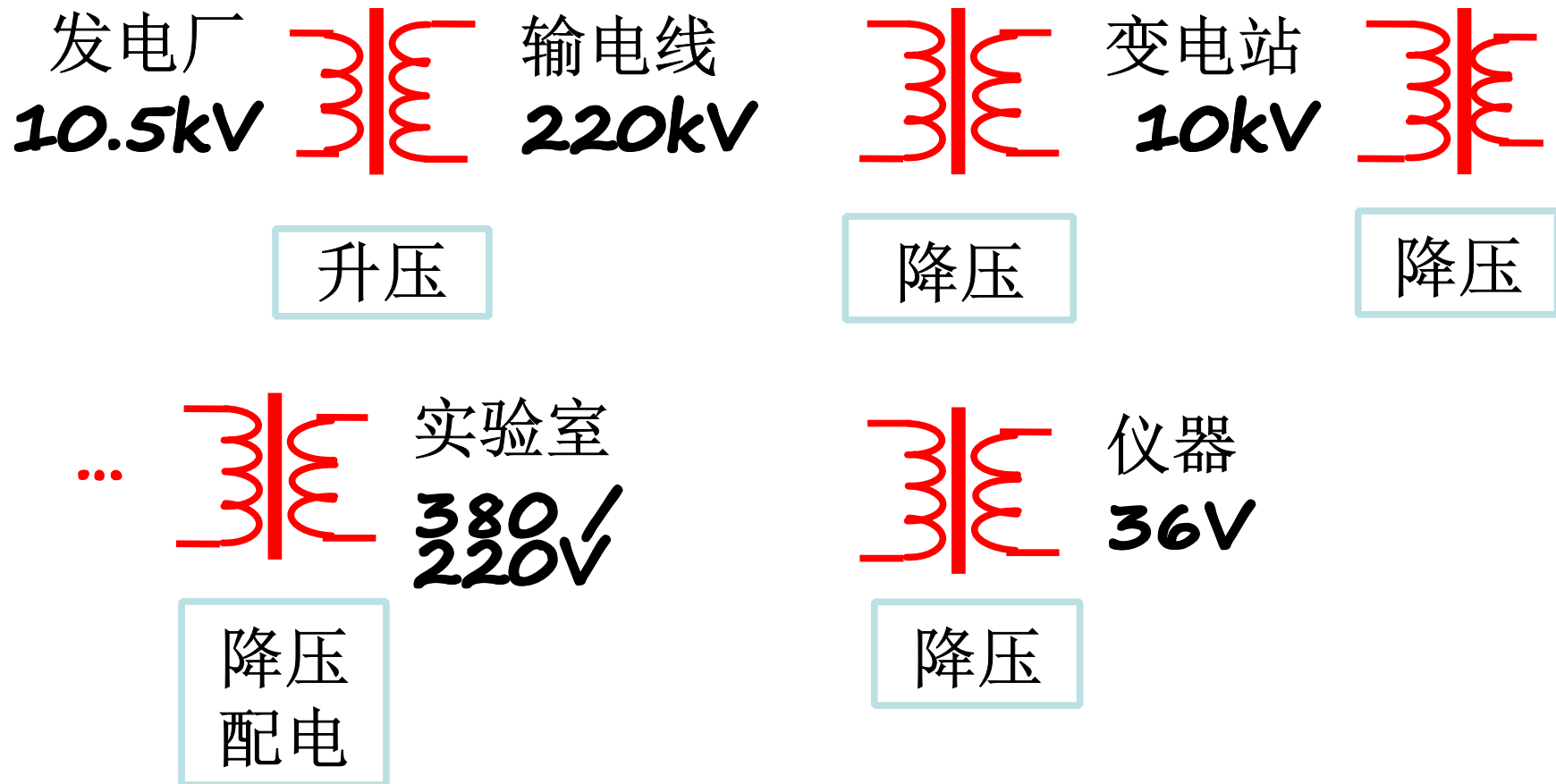
- 变电压：电力系统
- 变电流：电流互感器
- 变阻抗：电子线路中的阻抗匹配

在能量传输过程中，当输送功率  $P=UI \cos\varphi$  及负载功率因数  $\cos\varphi$  一定时：

$$U \uparrow \rightarrow I \downarrow \begin{cases} \Delta P \downarrow = P \downarrow R_l & \text{电能损耗小} \\ I \downarrow \rightarrow S \downarrow & \text{节省金属材料（经济）} \end{cases}$$



电力工业中常采用高压输电低压配电，实现节能并保证用电安全。具体如下：



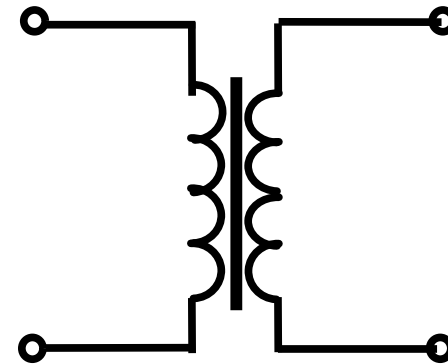


# 1. 变压器的分类

按用途分 { 电力变压器 (输配电用)  
仪用变压器 { 电压互感器  
电流互感器  
整流变压器

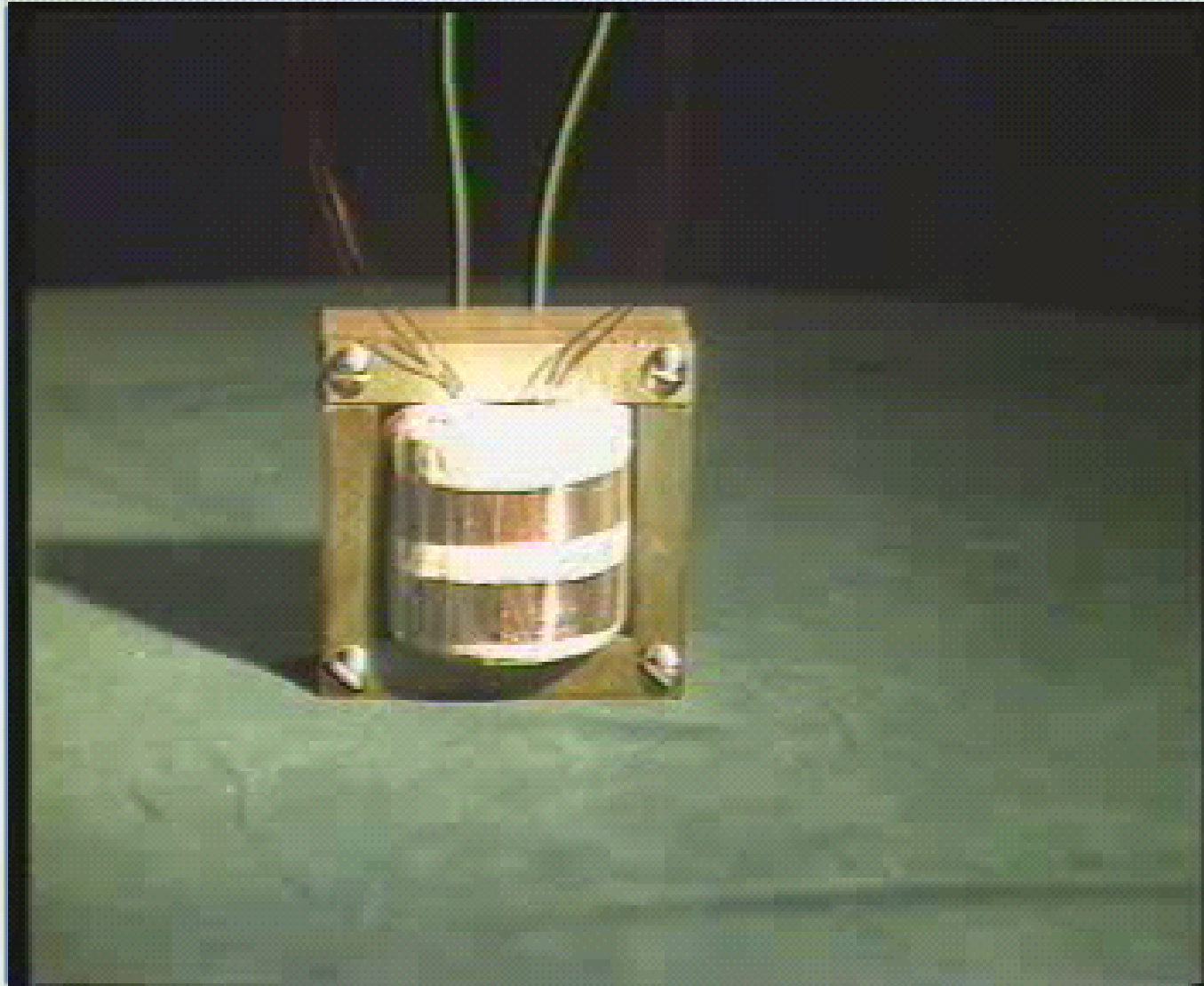
按相数分 { 三相变压器  
单相变压器

按制造方式 { 壳式  
心式

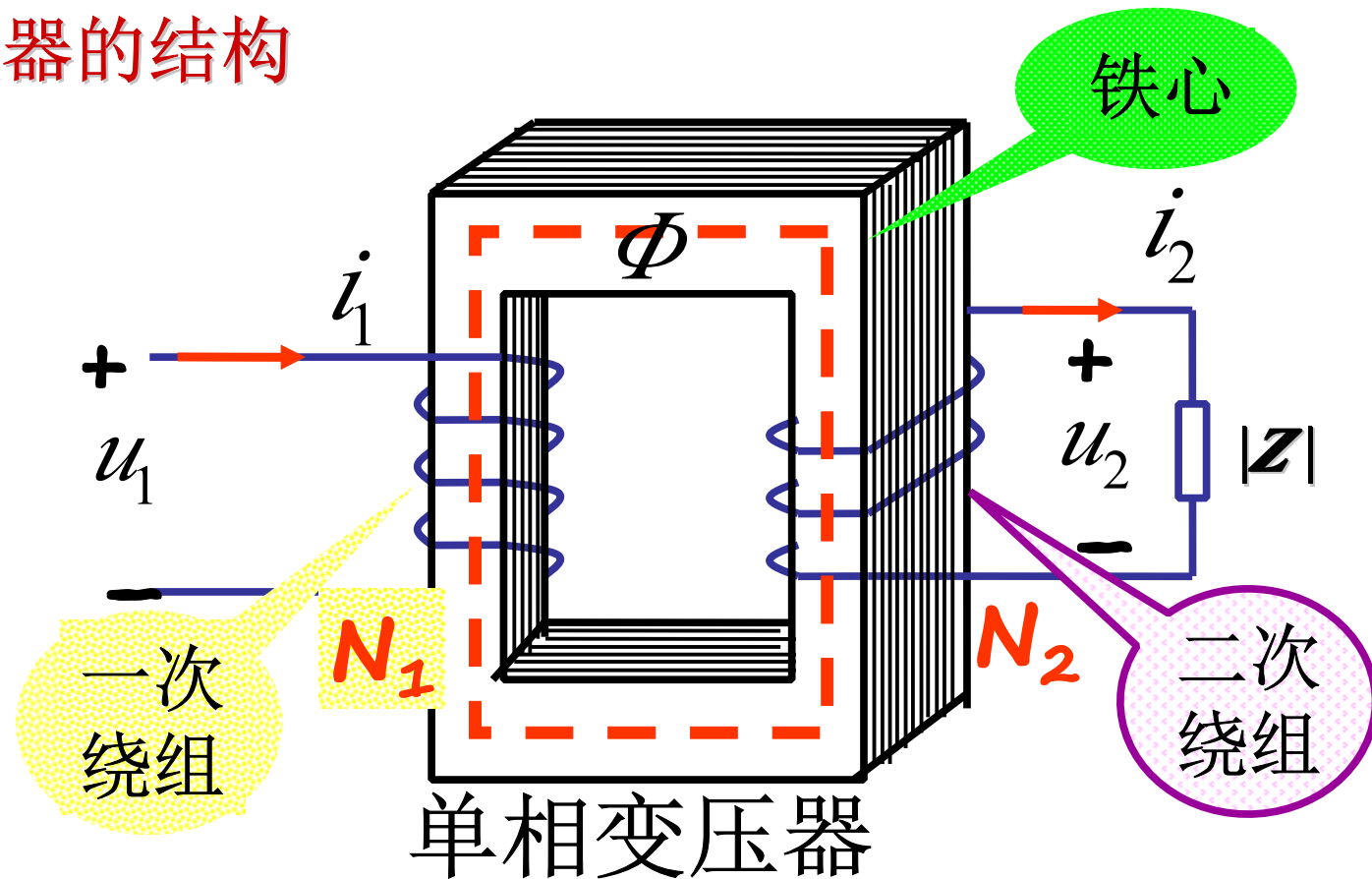


变压器符号

# 变压器的结构



## 2. 变压器的结构



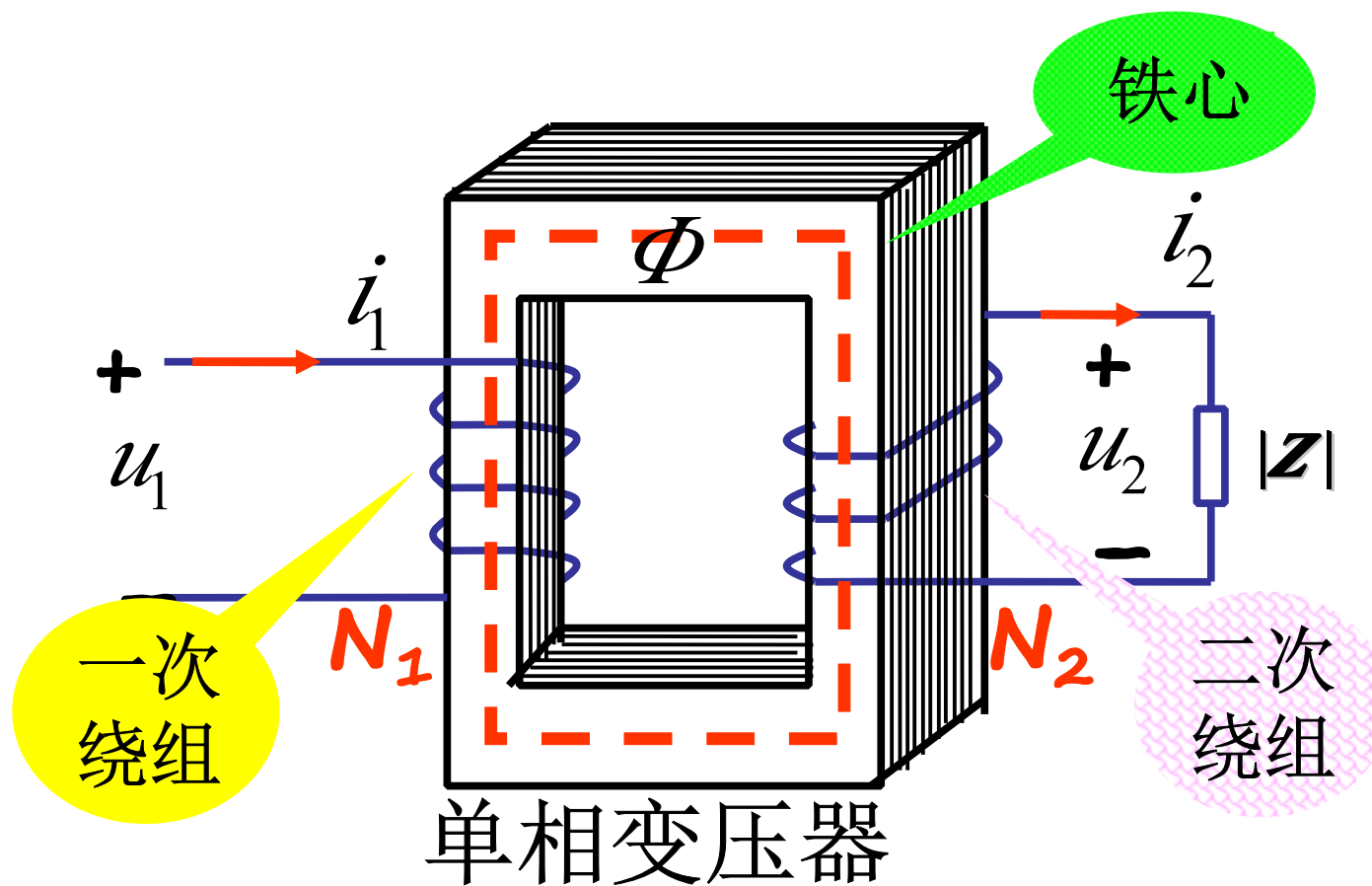
绕组：{ 一次绕组  
二次绕组

变压器的电路

铁心 { 由高导磁硅钢片叠成  
厚  $0.35\text{mm}$  或  $0.5\text{mm}$

变压器的磁路

## 6.3.2 变压器的工作原理



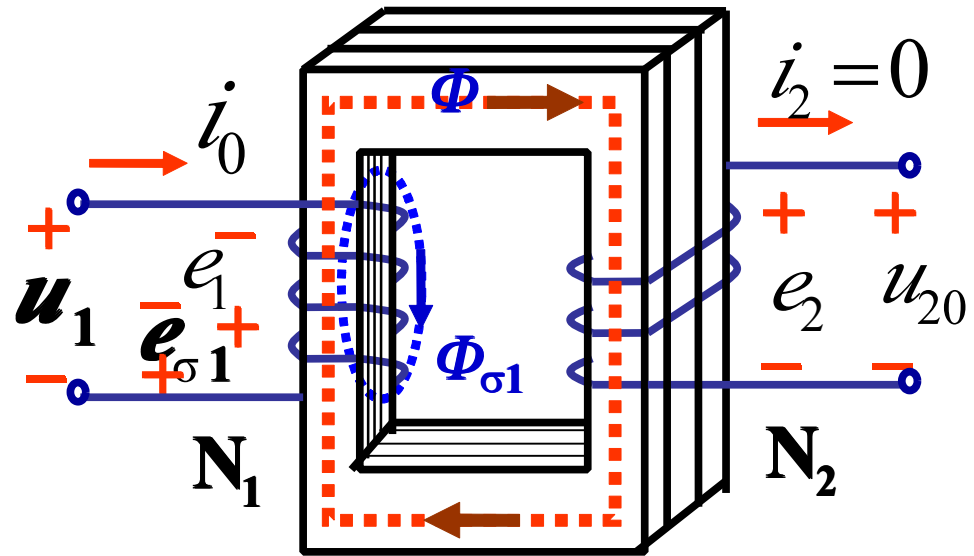
一次、二次绕组互不相连，能量的传递靠磁耦合。



# 1. 电磁关系

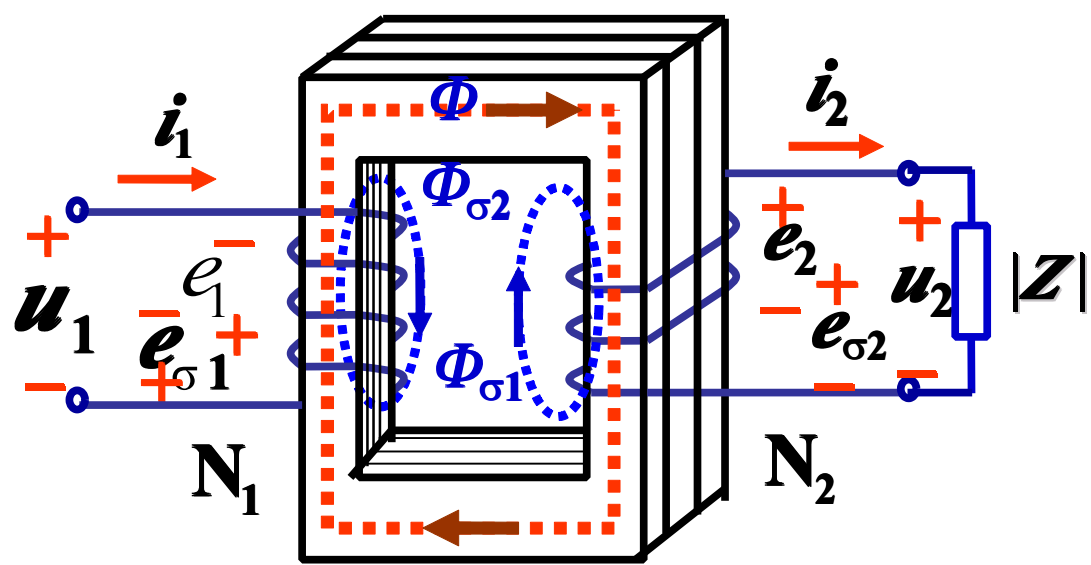
## (1) 空载运行情况

一次侧接交流电源，二次侧开路。



$$\begin{aligned}
 u_1 &\rightarrow i_0 (i_0 N_1) \rightarrow \Phi \\
 &\downarrow \\
 &\Phi_{\sigma 1} \\
 &\downarrow \\
 e_{\sigma 1} &= -L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt}
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\
 e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt}
 \end{aligned}$$

空载时，铁心中主磁通 $\Phi$ 是由一次绕组磁通势产生的。

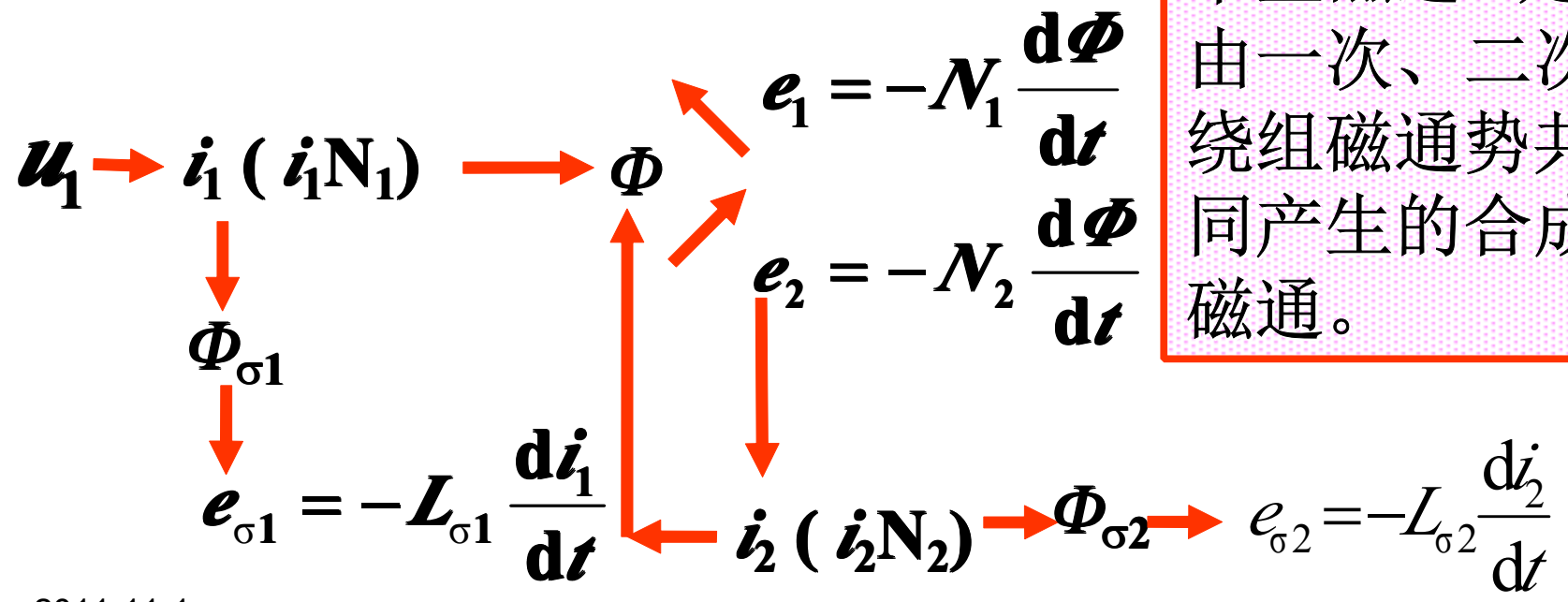


# 1. 电磁关系

## (2) 带负载运行情况

一次侧接交流电源，二次侧接负载。

有载时，铁心中主磁通 \$\Phi\$ 是由一次、二次绕组磁通势共同产生的合成磁通。





## 2. 电压变换（设加正弦交流电压）

### (1) 一次、二次侧主磁通感应电动势

主磁通按正弦规律变化，设为  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$  则

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) \\ &= -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \\ &= E_{1m} \sin (\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

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

同理：
$$e_2 = E_{2m} \sin (\omega t - 90^\circ)$$

$$E_2 = \underline{4.44 f \Phi_m N_2}$$

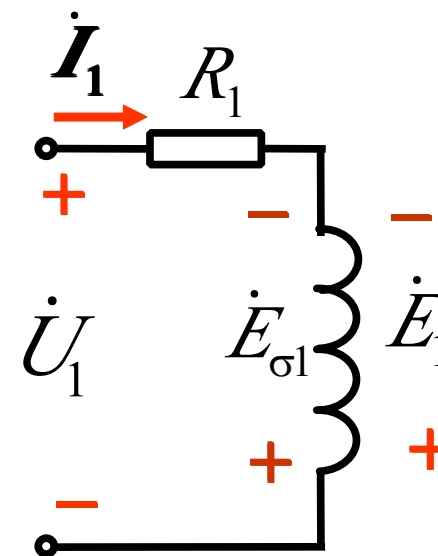


## (2) 一次、二次侧电压

变压器一次侧等效电路如图

根据KVL:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{E}_1 \\ &= R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_1\end{aligned}$$



式中  $R_1$  为一次侧绕组的电阻;

$X_1 = \omega L_{\sigma 1}$  为一次侧绕组的感抗(漏磁感抗, 由漏磁产生)。

由于电阻  $R_1$  和感抗  $X_1$  (或漏磁通) 较小, 其两端的电压也较小, 与主磁电动势  $E_1$  比较可忽略不计,

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

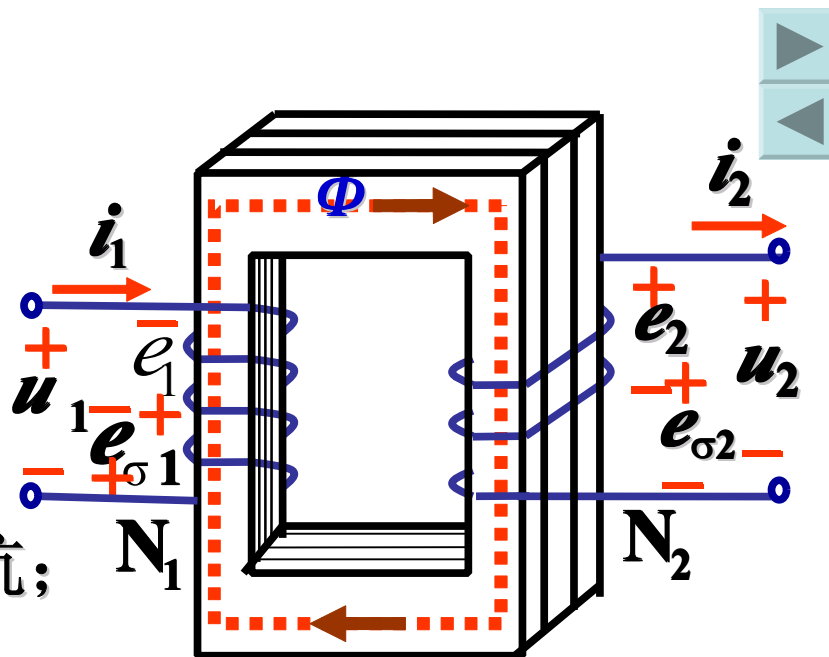
对二次侧，根据KVL:

$$\begin{aligned}\dot{E}_2 &= R_2 \dot{I}_2 - \dot{E}_{\sigma 2} + \dot{U}_2 \\ &= R_2 \dot{I}_2 + jX_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2\end{aligned}$$

式中  $R_2$  为二次绕组的电阻;

$X_2 = \omega L_{\sigma 2}$  为二次绕组的感抗;

$\dot{U}_2$  为二次绕组的端电压。



变压器空载时:  $I_2 = 0$ ,  $U_2 = U_{20} = E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2$

式中  $U_{20}$  为变压器空载电压。

故有

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

$k$  为变比 (匝比)

结论: 改变匝数比, 就能改变输出电压。



### 3. 电流变换 (一次、二次侧电流关系)

有载运行

$$Z_L \rightarrow \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_L}$$

不论变压器空载还是有载，一次绕组上的阻抗压降均可忽略，故有

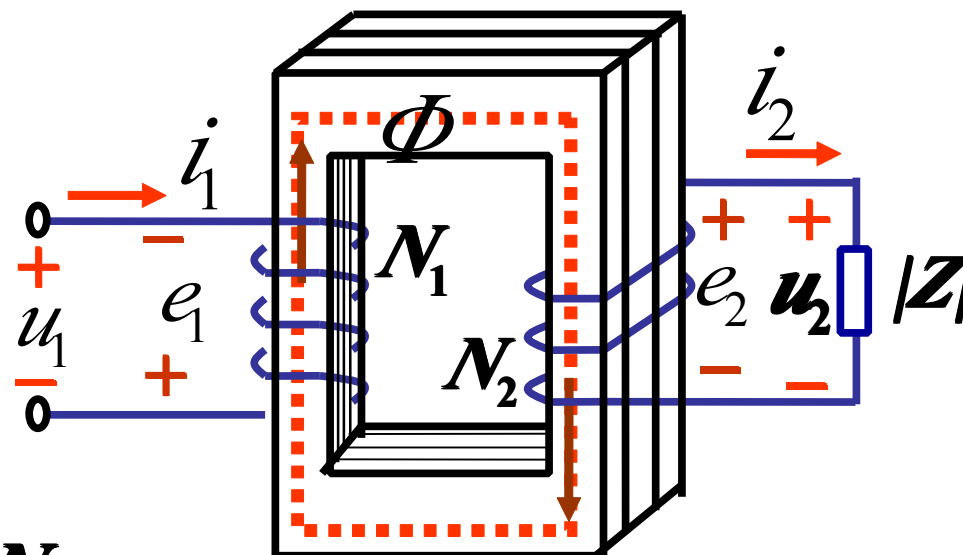
$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

当  $U_1$ 、 $f$  不变，则  $\Phi_m$  基本不变，近于常数。

即：铁心中主磁通的最大值  $\Phi_m$  在变压器空载和有载时基本是恒定的。

$$\text{空载: } \dot{i}_0 N_1 \rightarrow \Phi_m$$

$$\text{有载: } \dot{i}_1 N_1 + \dot{i}_2 N_2 \rightarrow \Phi_m$$





可得磁势平衡式： $i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$

有载磁势

空载磁势

或： $i_1 N_1 = i_0 N_1 - i_2 N_2$   $\left\{ \begin{array}{l} 1. \text{提供产生 } \Phi_m \text{ 的磁势} \\ 2. \text{提供用于补偿 } i_2 N_2 \text{ 作用的磁势} \end{array} \right.$

一般情况下： $I_0 \approx (2\sim3)\% I_{1N}$  很小可忽略。

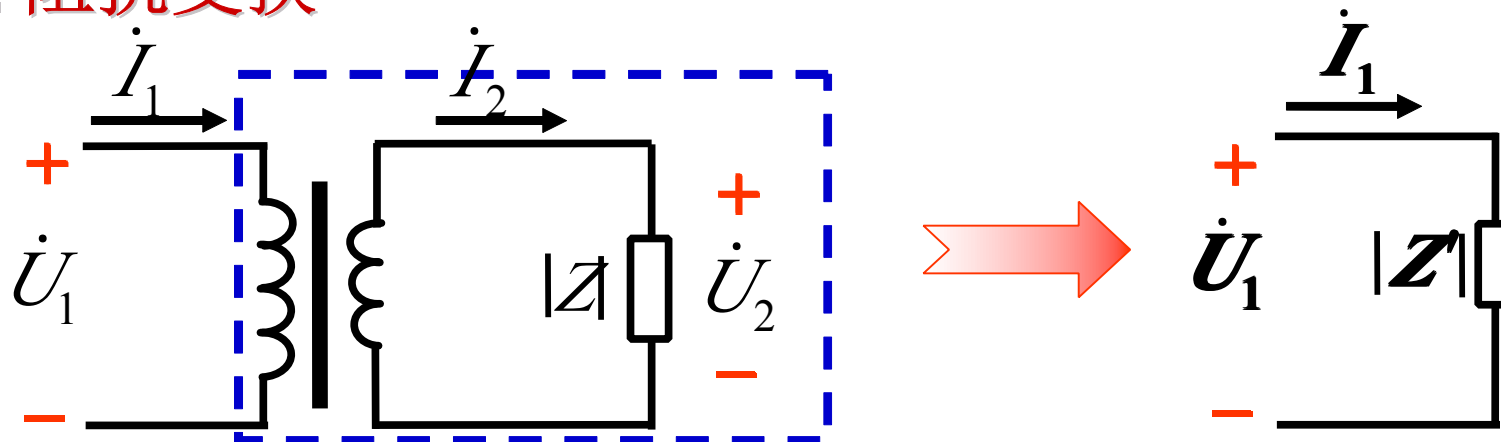
所以  $i_1 N_1 \approx -i_2 N_2$  或  $I_1 N_1 \approx -I_2 N_2$

所以  $I_1 N_1 \approx I_2 N_2$

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

结论：一次、二次侧电流与匝数成反比。

## 4. 阻抗变换



由图可知：

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

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

$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{kU_2}{I_2/k} = k^2 \frac{U_2}{I_2} = k^2 |Z|$$

$$|Z'| = k^2 |Z|$$

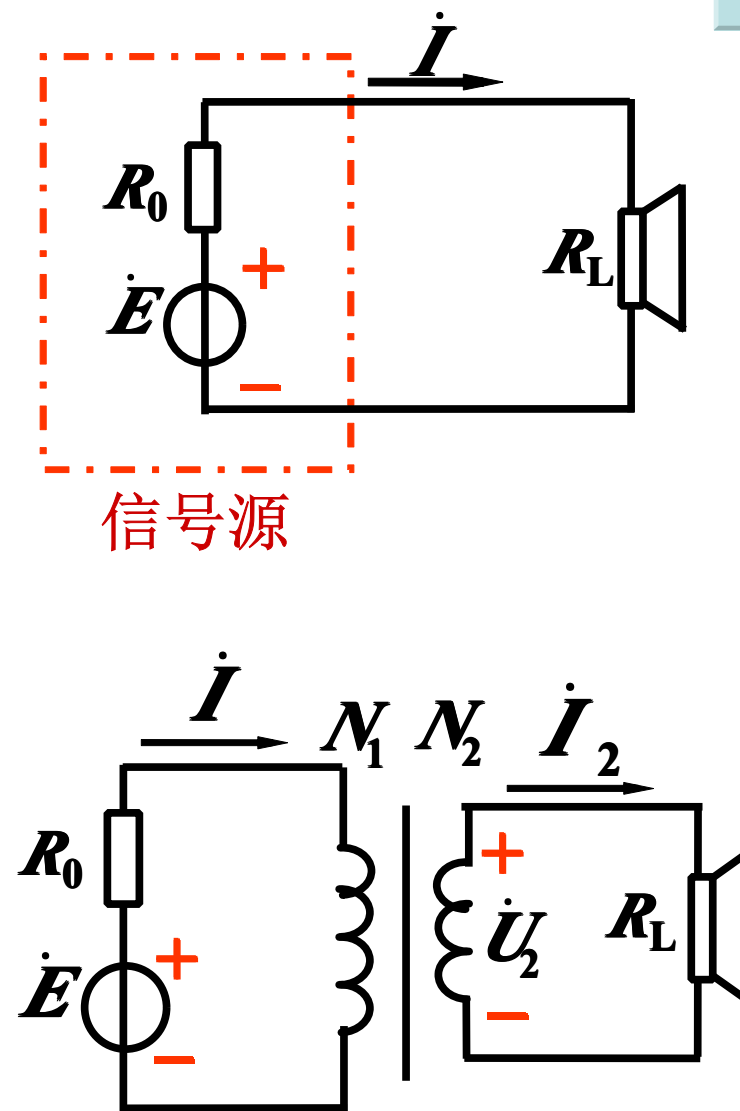
结论： 变压器一次侧的等效阻抗模，为二次侧所带负载的阻抗模的  $k^2$  倍。



**例1:** 如图，交流信号源的电动势  $E=120\text{V}$ ，内阻  $R_0=800\ \Omega$ ，负载为扬声器，其等效电阻为  $R_L=8\ \Omega$ 。要求：**(1)**当  $R_L$  折算到原边的等效电阻  $R'_L=R_0$  时，求变压器的匝数比和信号源输出的功率； **(2)** 当将负载直接与信号源联接时，信号源输出多大功率？

**解:** **(1)** 变压器的匝数比应为：

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R'_L}{R_L}} = \sqrt{\frac{800}{8}} = 10$$





信号源的输出功率:

$$P = \left( \frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 \times R_L = \left( \frac{120}{800 + 800} \right)^2 \times 800 = 4.5 \text{ W}$$

(2) 将负载直接接到信号源上时, 输出功率为:

$$P = \left( \frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L = \left( \frac{120}{800 + 8} \right)^2 \times 8 = 0.176 \text{ W}$$

结论: 接入变压器以后, 输出功率大大提高。

原因: 满足了最大输出功率的条件:  $R_L = R_0$

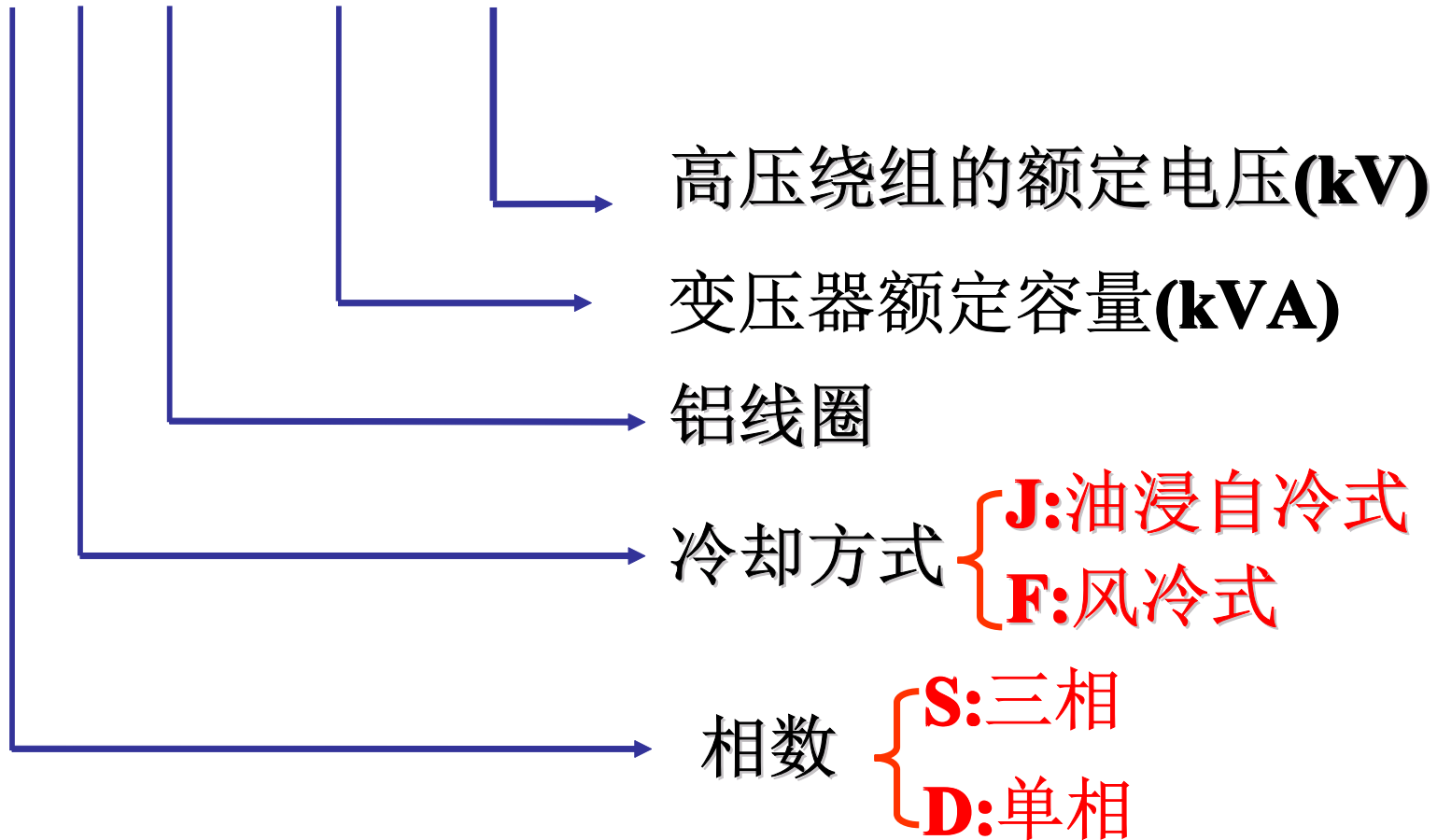
电子线路中, 常利用阻抗匹配实现最大输出功率。



## 5. 变压器的铭牌和技术数据

### 1) 变压器的型号

**S J L —1000/10**





## 2) 额定值

### 额定电压 $U_{1N}$ 、 $U_{2N}$

变压器二次侧开路（空载）时，一次、二次侧绕组允许的电压值

{ 单相：  $U_{1N}$ ，一次侧电压，  
 $U_{2N}$ ，二次侧空载时的电压  
三相：  $U_{1N}$ 、 $U_{2N}$ ，一次、二次侧的线电压

### 额定电流 $I_{1N}$ 、 $I_{2N}$

变压器满载运行时，一次、二次侧绕组允许的电流值。

{ 单相：一次、二次侧绕组允许的电流值  
三相：一次、二次侧绕组线电流



## 2) 额定值

### 额定容量 $S_N$

传送功率的最大能力。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{单相: } S_N = U_{2N} I_{2N} \approx U_{1N} I_{1N} \\ \text{三相: } S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \approx \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \end{array} \right.$$

注意：变压器几个功率的关系(单相)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{容量: } S_N = U_{1N} \times I_{1N} \\ \text{输出功率: } P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi \\ \text{一次侧输入功率: } P_1 = \frac{P_2}{\eta} \end{array} \right.$$

容量  $S_N \neq$  输出功率  $P_2$

一次侧输入功率  $P_1 \neq$  输出功率  $P_2$

变压器运行时的功率取决于负载的性质

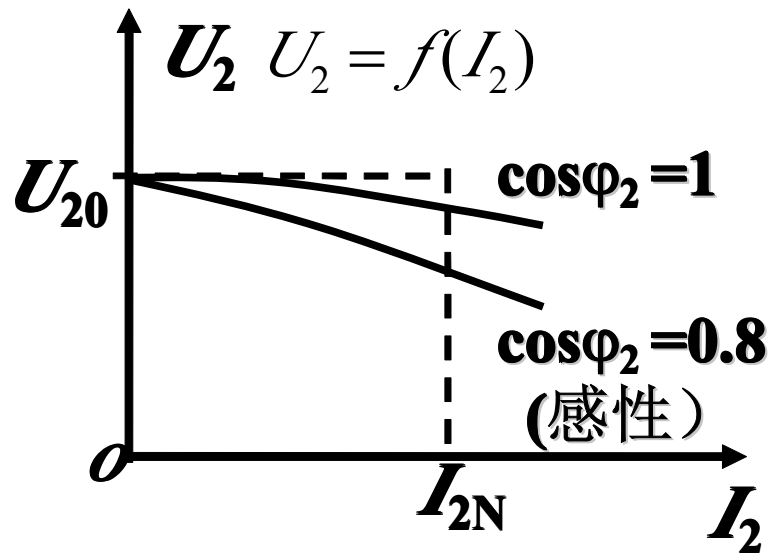
效率



### 6.3.3 变压器的外特性与效率

#### 1. 变压器的外特性

当一次侧电压  $U_1$  和负载功率因数  $\cos\varphi_2$  保持不变时，二次侧输出电压  $U_2$  和输出电流  $I_2$  的关系， $U_2 = f(I_2)$ 。



$U_{20}$ : 一次侧加额定电压、二次侧开路时，二次侧的输出电压。

电压变化率:

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

一般供电系统希望要硬特性（随  $I_2$  的变化， $U_2$  变化不大），电压变化率约在 **5%** 左右。



## 2. 变压器的效率 ( $\eta$ )

变压器的损耗包括两部分:

**铜损 ( $\Delta P_{Cu}$ )**: 绕组导线电阻的损耗。与负载大小 (正比于电流平方) 有关。

**铁损 ( $\Delta P_{Fe}$ )**:

它与铁心内磁感应强度的最大值  $B_m$  的平方成正比。与负载大小无关。

变压器的效率为

输出功率

输入功率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}}$$

一般  $\eta \geq 95\%$ , 负载为额定负载的 (50~75)% 时,  $\eta$  最大。



## 6.3.4 变压器绕组的极性

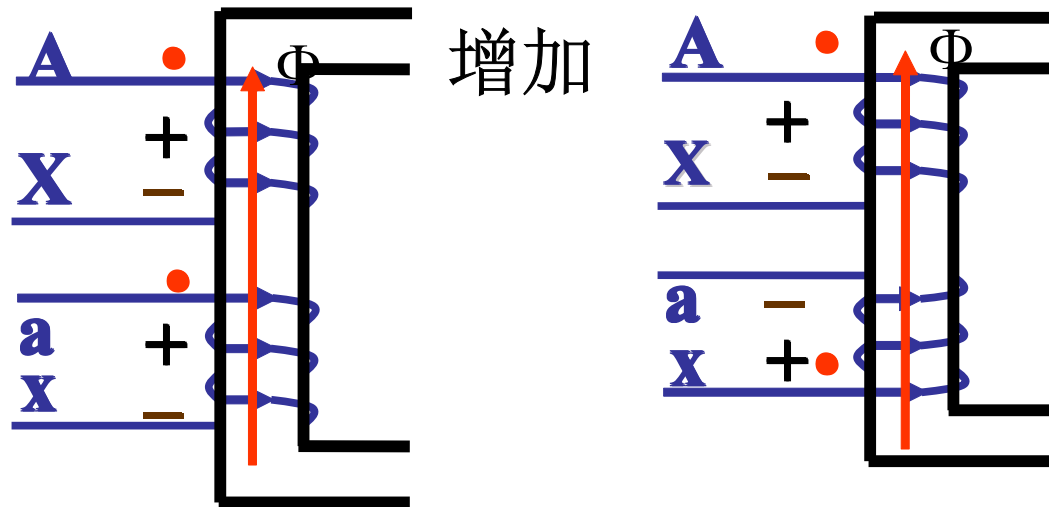
### 1. 同极性端 (同名端)

当电流流入(或流出)两个线圈时,若产生的磁通方向相同,则两个流入(或流出)端称为同极性端。

或者说,当铁心中磁通变化时,在两线圈中产生的感应电动势极性相同的两端为同极性端。

同极性端用“●”表示。

同极性端和绕组的绕向有关。





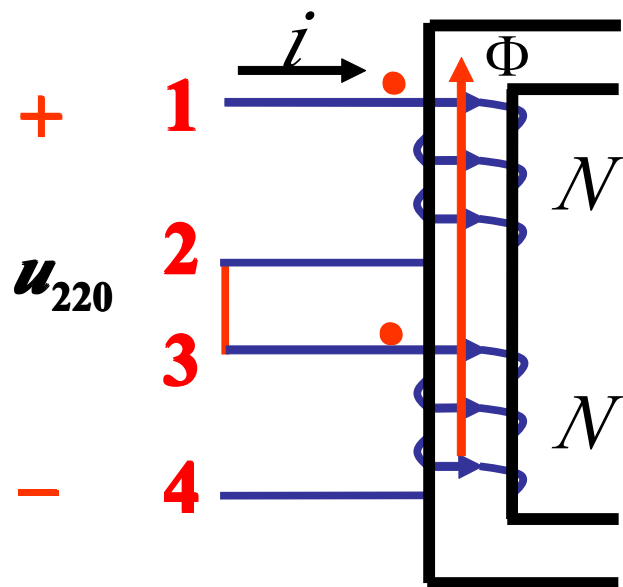


## 2. 线圈的接法

变压器原一次侧有两个额定电压为 **110V** 的绕组:

当电源电压为**220V**时:

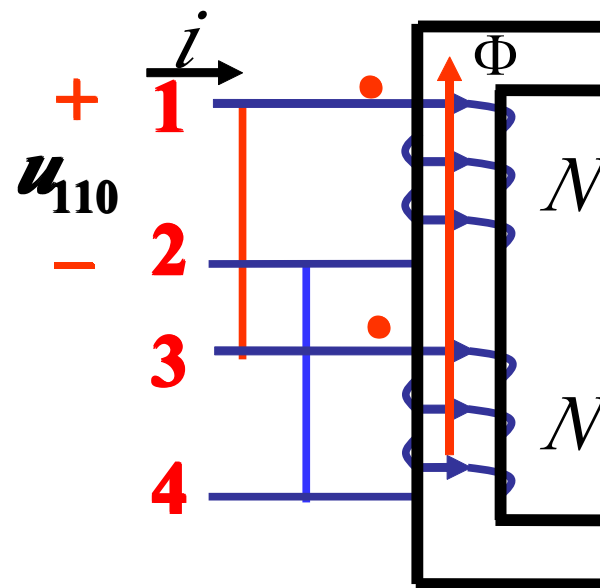
联接 **2-3**



$$\Phi_m = \frac{U_{220}}{4.44 f(2N)}$$

电源电压为**110V**时:

联接 **1-3, 2-4**



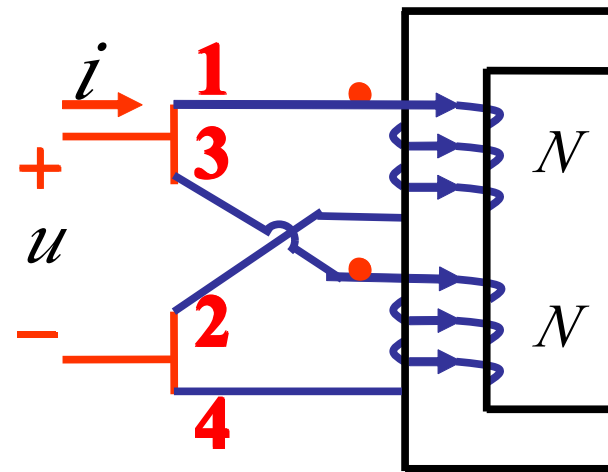
$$\Phi_m = \frac{U_{110}}{4.44 f(N)}$$



一次侧有两个相同绕组的电源变压器(220/110),  
使用中应注意的问题:

**问题1:** 在**110V** 情况下, 如果只用一个绕组  
( $N$ ), 行不行?

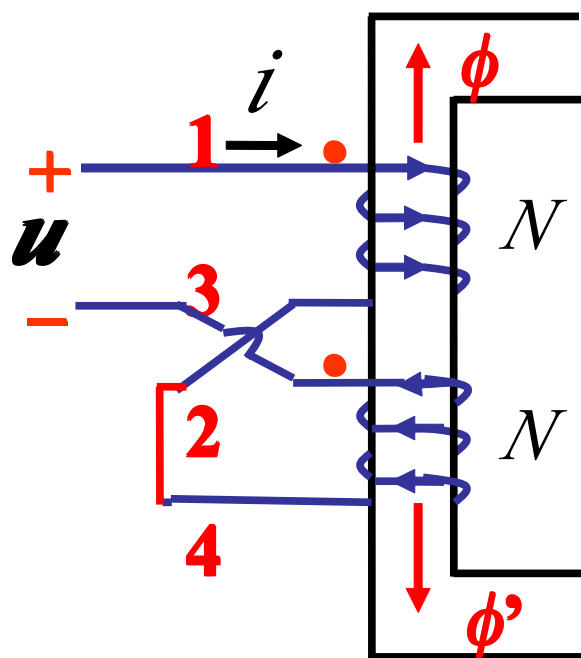
**答:** 不行 (两绕组必须并接)





**问题2:** 如果两绕组的极性端接错, 结果如何?

答: 有可能烧毁变压器



原因:

两个线圈中的磁通抵消

→ 感应电势  $e=0$

$u_1 = i_1 R_1 - e_1$   
→ 电流  $i_1 = \frac{u}{R_1}$  很大

→ 烧毁变压器

**结论:** 在同极性端不明确时, 一定要先测定同极性端再通电。



### 3. 同极性端的测定方法

#### 方法一：交流法

把两个线圈的任意两端 (**X - x**) 连接，然后在 **AX** 上加一低电压  $u_{AX}$ 。

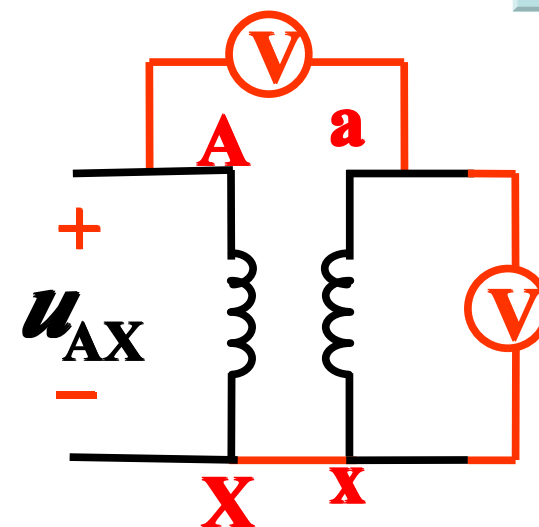
测量： $U_{AX}$ 、 $U_{Aa}$ 、 $U_{ax}$

结论：若  $U_{Aa} = |U_{AX} - U_{ax}|$

说明 **A** 与 **a** 或 **X** 与 **x** 为同极性端。

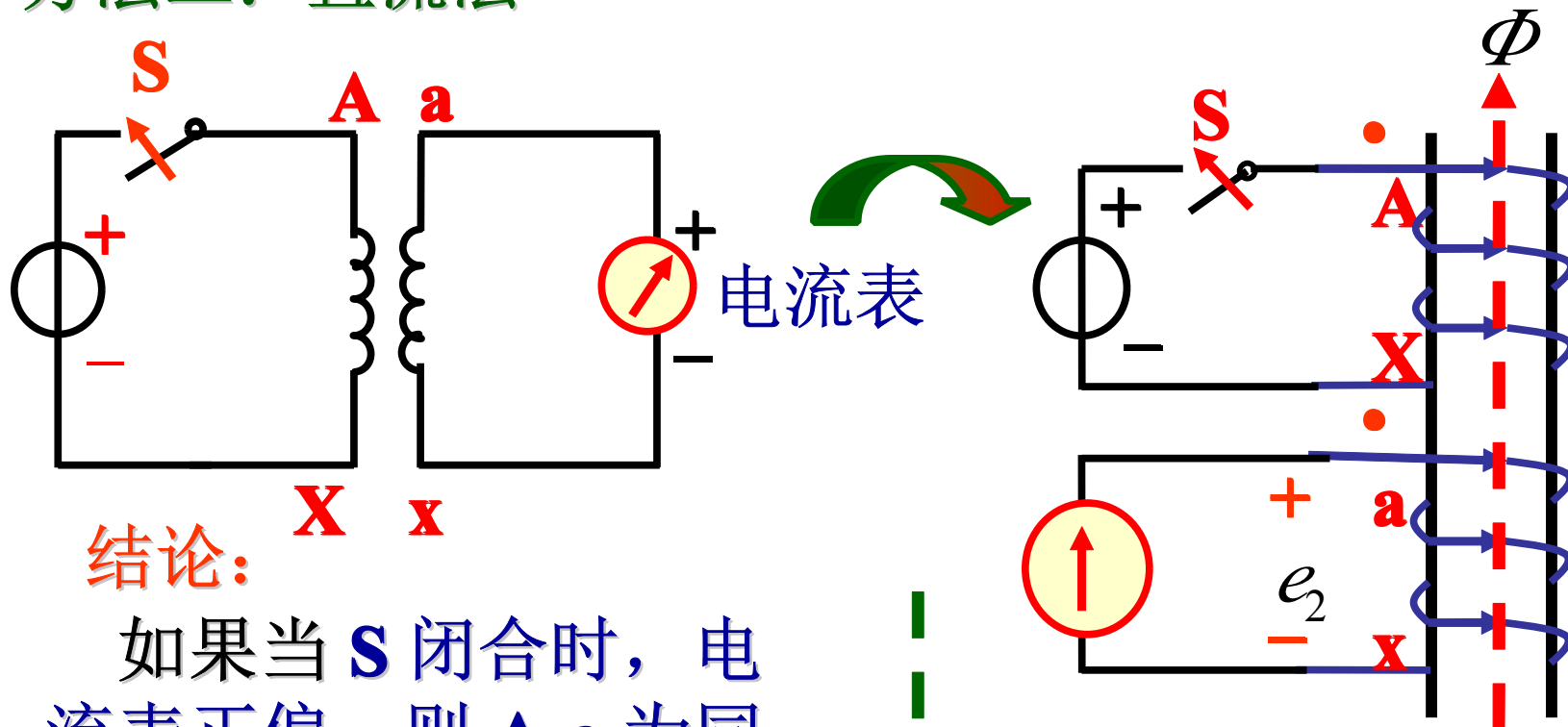
若  $U_{Aa} = |U_{AX} + U_{ax}|$

说明 **A** 与 **x** 或 **X** 与 **a** 是同极性端。





## 方法二：直流法



结论：**X x**

如果当 **S** 闭合时，电流表正偏，则 **A-a** 为同极性端；

如果当 **S** 闭合时，电流表反偏，则 **A-x** 为同极性端。

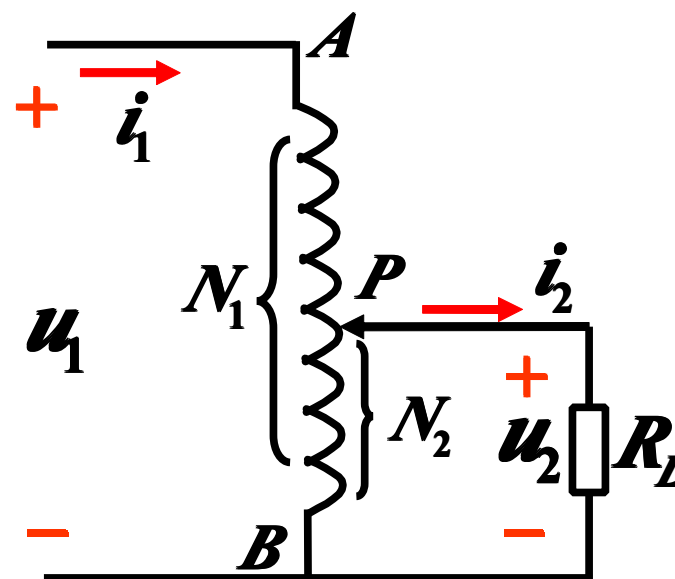
**S** 闭合时  $\Phi$  增加。  
感应电动势的方向，  
阻止  $\Phi$  的增加。

## 6.3.5 特殊变压器

### 1. 自耦变压器

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

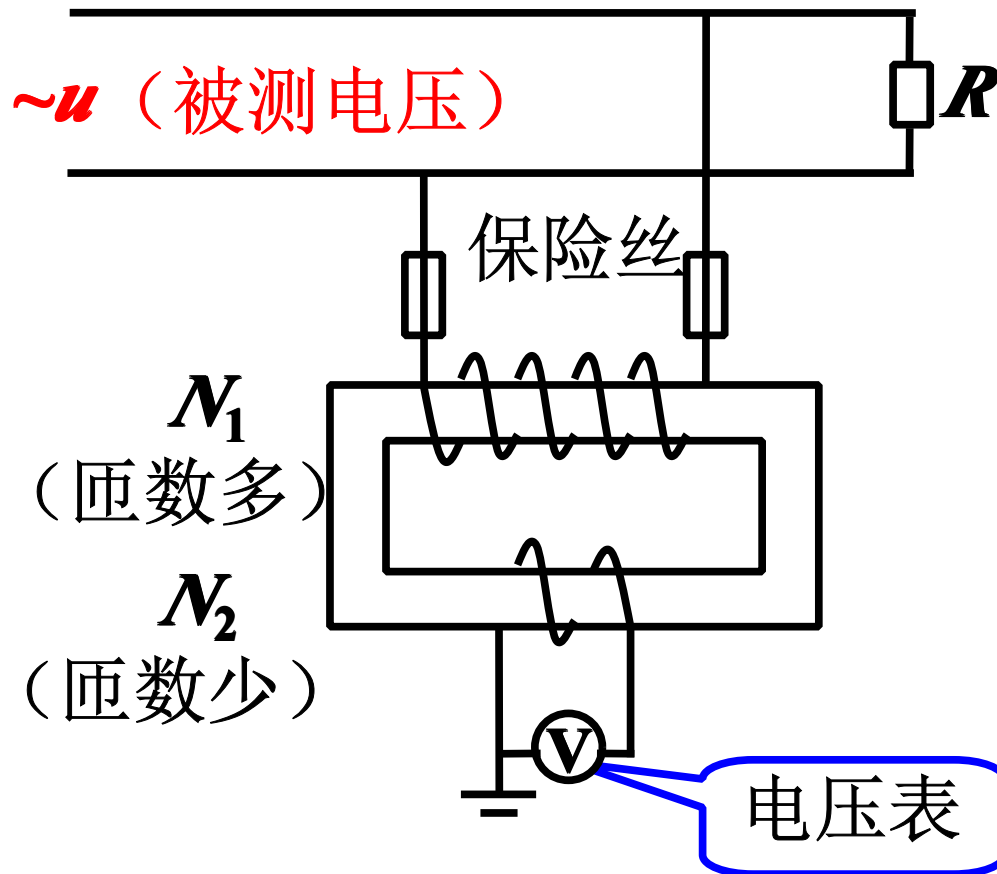
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$



使用时，改变滑动端的位置，便可得到不同的输出电压。实验室中用的调压器就是根据此原理制作的。**注意：一次、二次侧千万不能对调使用，以防变压器损坏。因为 $N$ 变小时，磁通增大，电流会迅速增加。**

## 2.电压互感器

### 实现用低量程的电压表测量高电压



$$\text{被测电压} = \text{电压表读数} \times N_1 / N_2$$

相当于变压器的空载运行

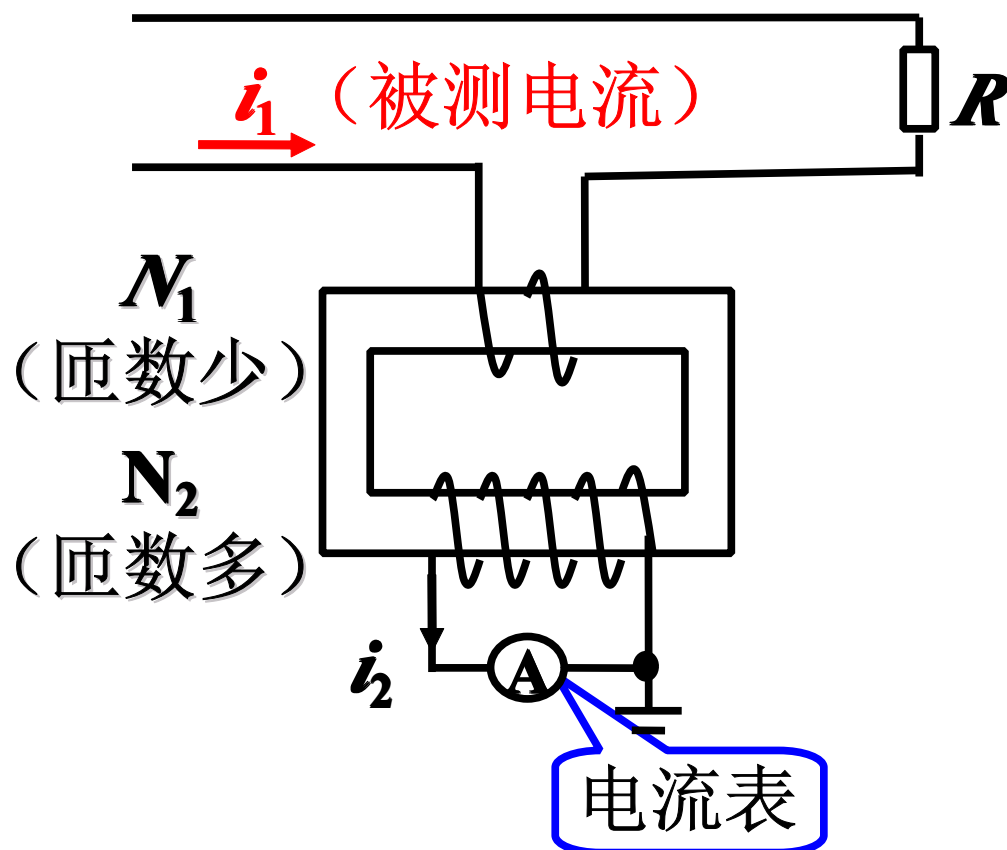
使用注意事项:

1. 二次侧不能短路，以防产生过流；
2. 铁心、低压绕组的一端接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现高压。



### 3. 电流互感器

实现用低量程的电流表测量大电流



相当于变压器的  
短路运行

使用注意事项:

1. 二次侧不能开路，以防产生高电压；
2. 铁心、低压绕组的一端接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现过压。

$$\text{被测电流} = \text{电流表读数} \times N_2 / N_1$$





# 本章结束