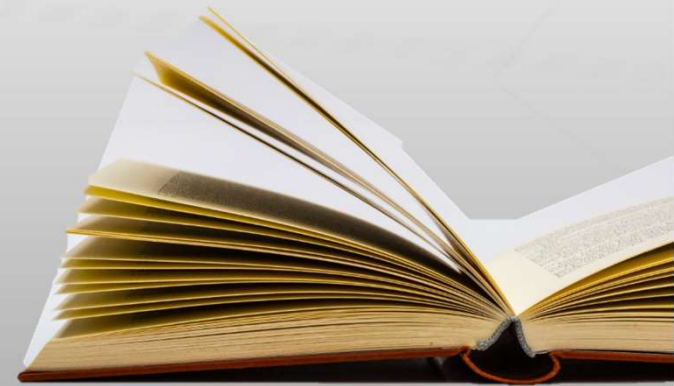


第三章 磁路和变压器



合肥工业大学
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

3.3 变压器



目录 / contents

01

变压器的工作原理

02

变压器的外特性

03

变压器的损耗与效率



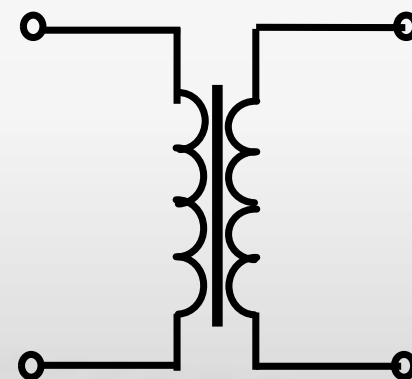
3.3 变压器

主要作用： 实现高压输电和低压配电

工作过程： 升压——降压

分类及符号： 按相数分

{ 三相变压器
单相变压器



变压器符号

主要功能：

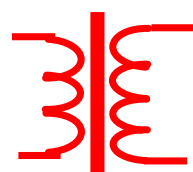
变电压、变电流、变阻抗

3.3 变压器

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：

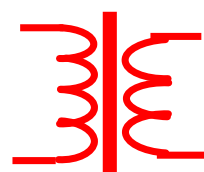
$$U \uparrow \rightarrow I \downarrow \begin{cases} \Delta P \downarrow = I^2 R_l & \text{电能损耗小} \\ I \downarrow \rightarrow S \downarrow & \text{节省金属材料 (经济)} \end{cases}$$

发电厂
10.5kV



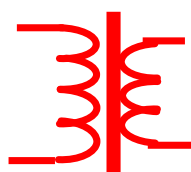
输电线
220kV

升压

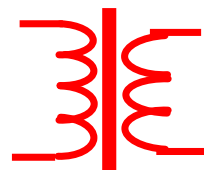


变电站
10kV

降压



降压



实验室

380 / 220V

降压



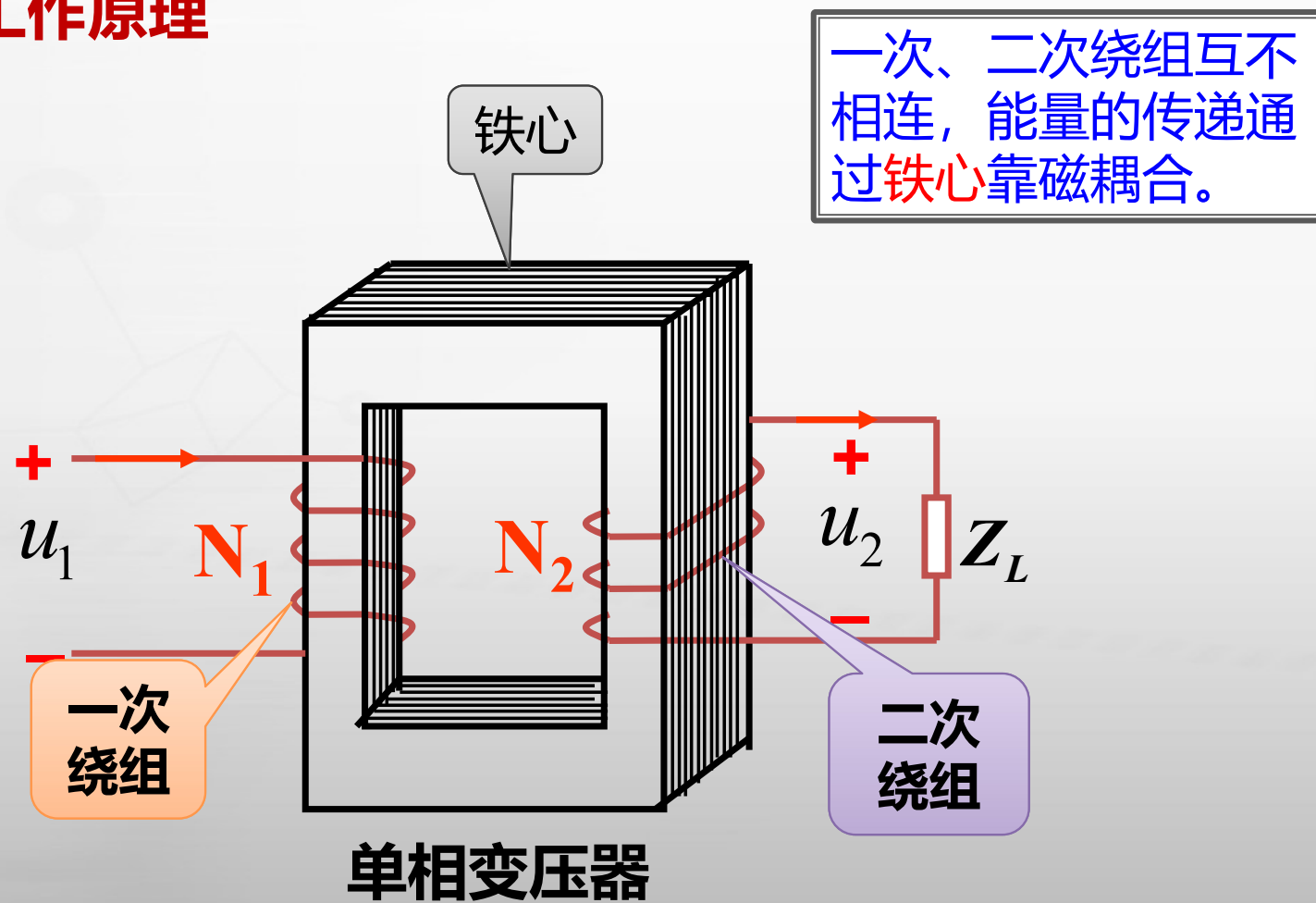
仪器

36V

降压

3.3 变压器

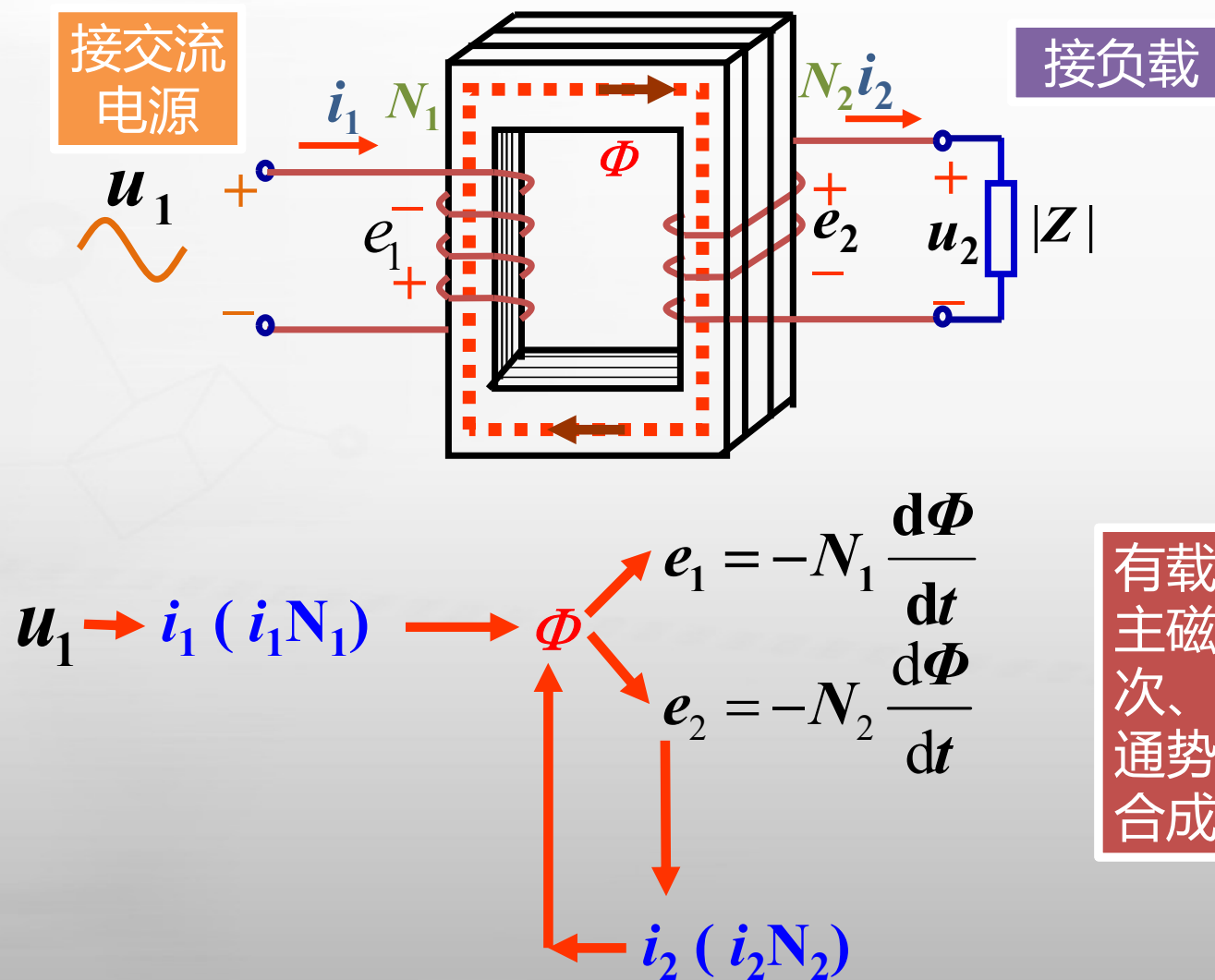
3.3.1 变压器的工作原理



3.3 变压器

1. 电磁关系

带负
载运
行情
况

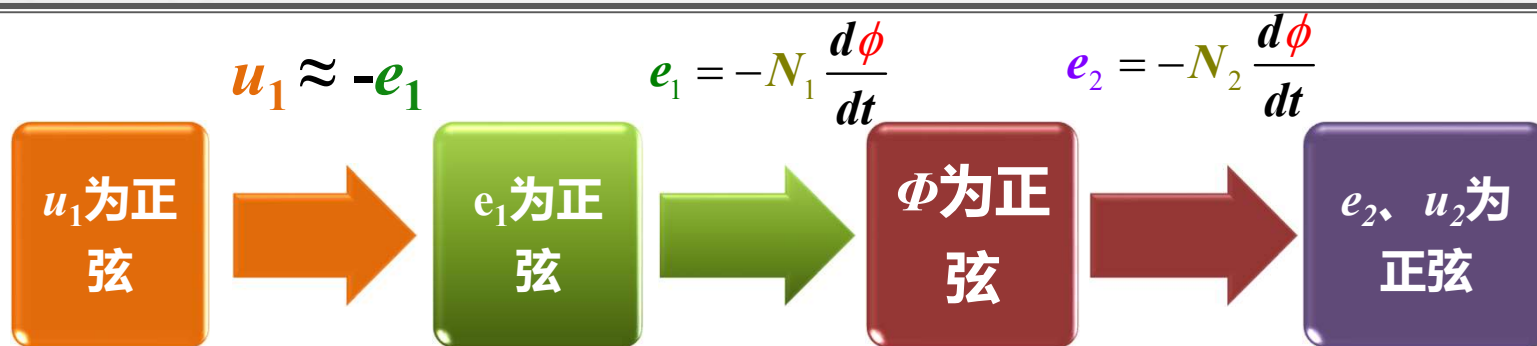
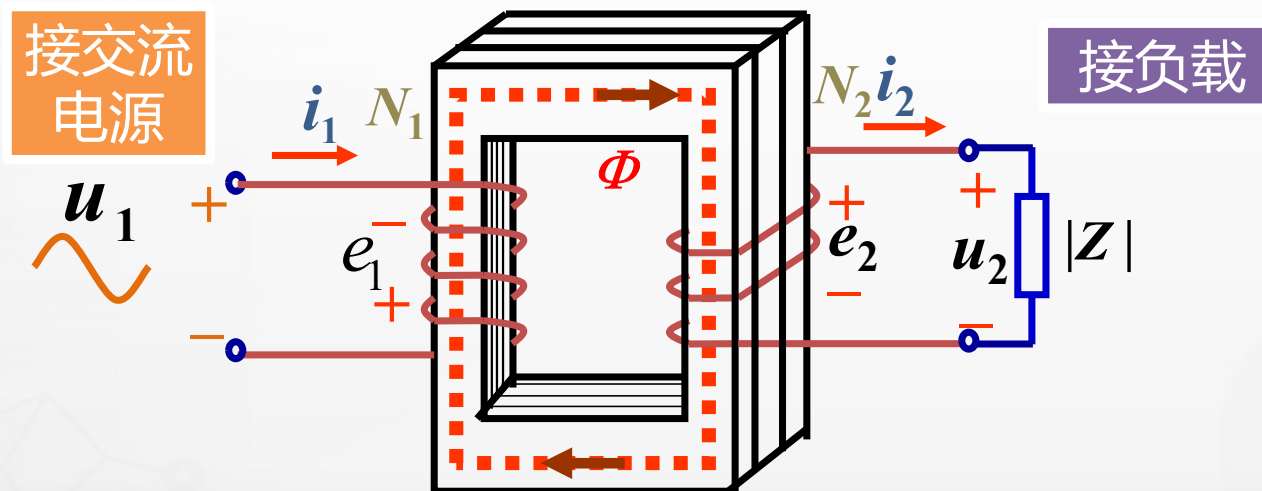


有载时，铁心中主磁通 Φ 是由一次、二次绕组磁通势共同产生的合成磁通。

3.3 变压器

1. 电磁关系

带负
载运
行情
况

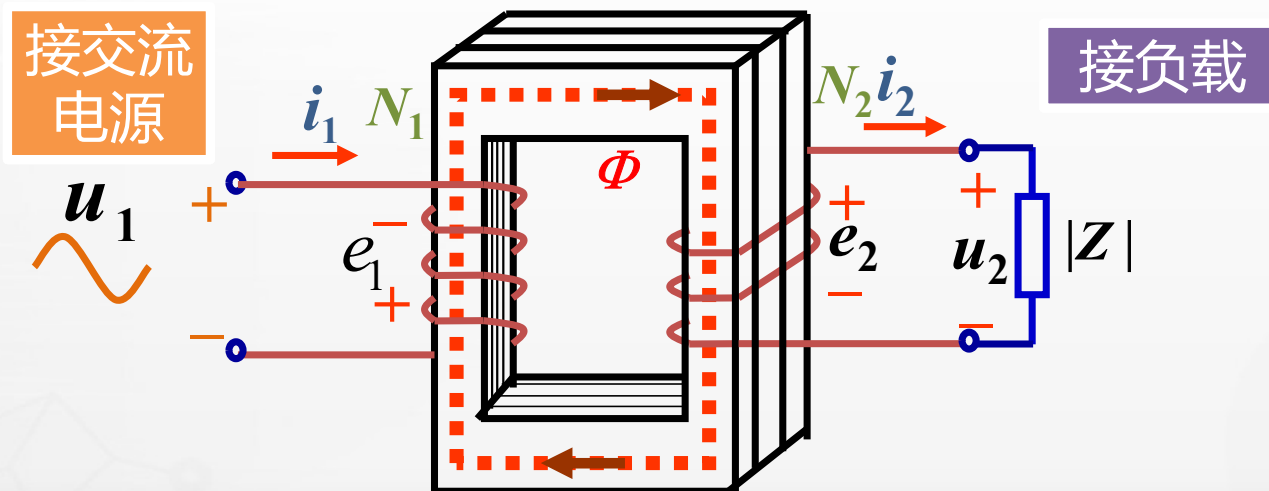


注意: i_1 并不是正弦。

3.3 变压器

1. 电磁关系

带负
载运
行情
况



$$\begin{aligned}
 e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\
 &= -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \\
 &= N_1 2\pi f \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore E_{1m} &= N_1 2\pi f \Phi_m \\
 \text{即 } E_1 &= \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_m \\
 &\approx 4.44 f N_1 \Phi_m
 \end{aligned}$$

Φ 为正弦, 假设
 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

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

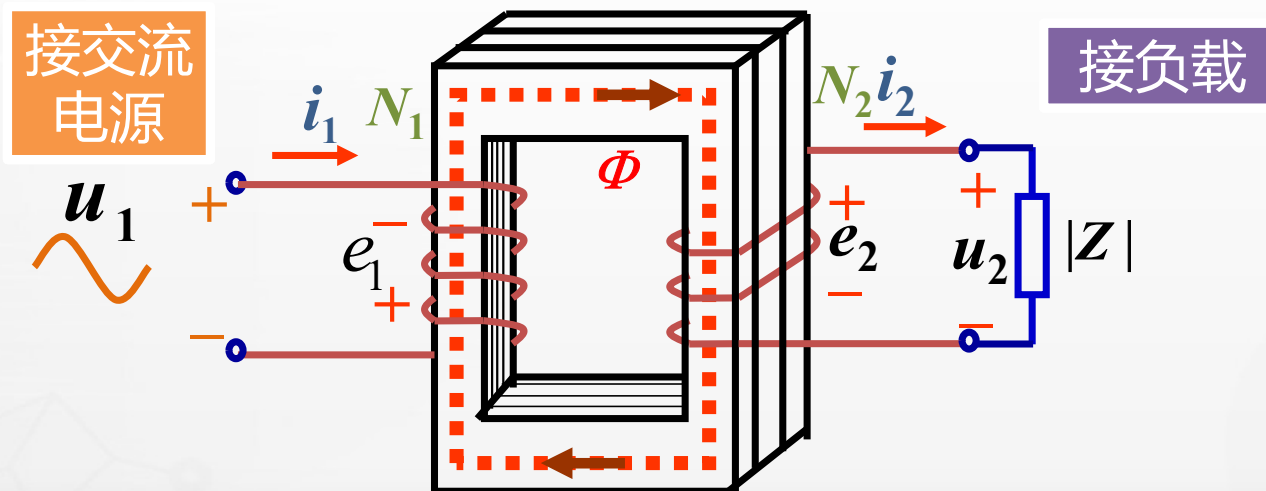


$$\begin{aligned}
 \text{即 } E_2 &= \sqrt{2} \pi f N_2 \Phi_m \\
 &\approx 4.44 f N_2 \Phi_m
 \end{aligned}$$

3.3 变压器

1. 电磁关系

带负
载运
行情
况



但是：

$$E_1 = U_1? \quad E_2 = U_2?$$

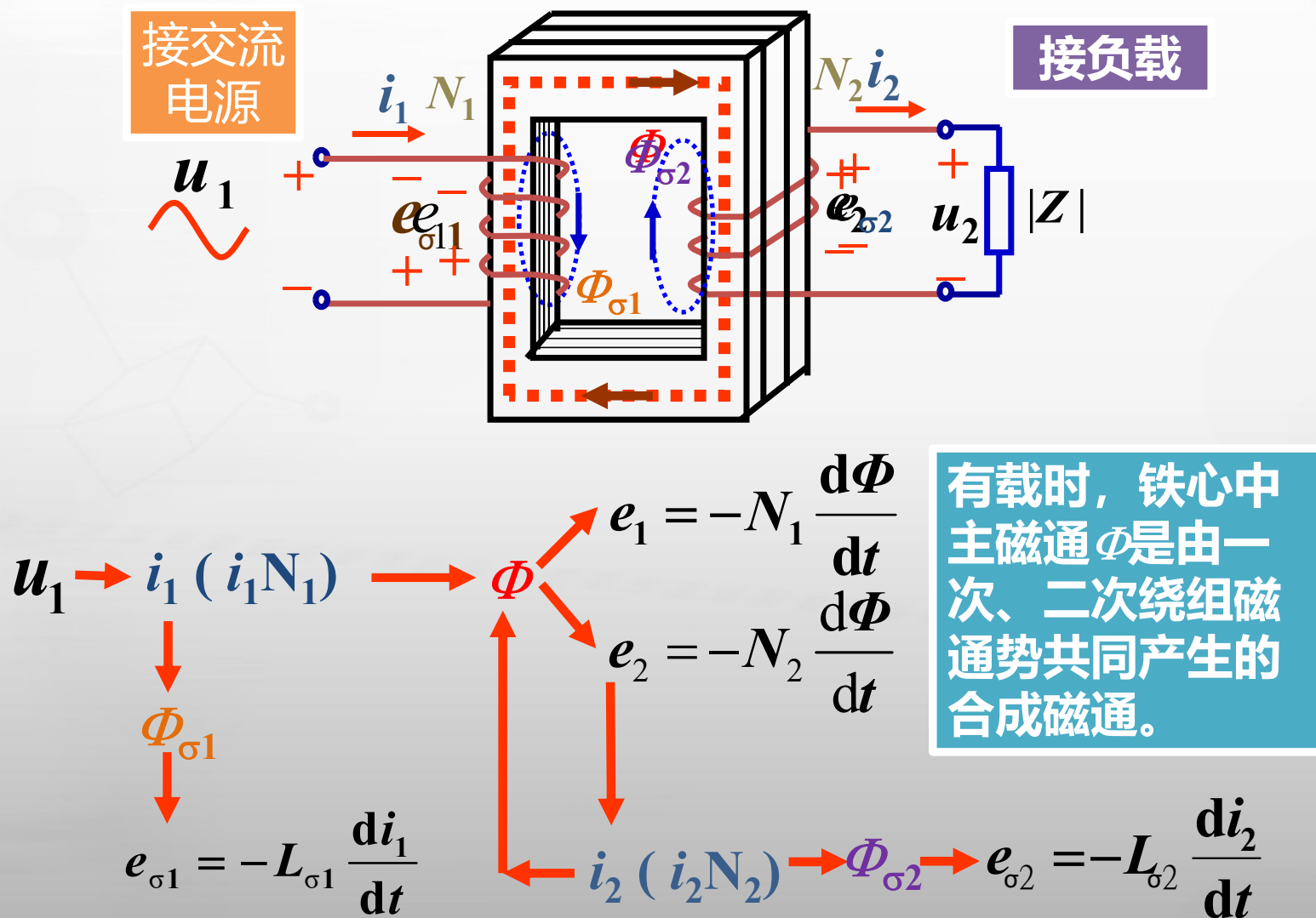
显然：

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

3.3 变压器

1. 电磁关系

带负载运行
情况



3.3 变压器

1. 电磁关系

2. 电压变换 (设加正弦交流电压)

R_1 为一次绕组的电阻

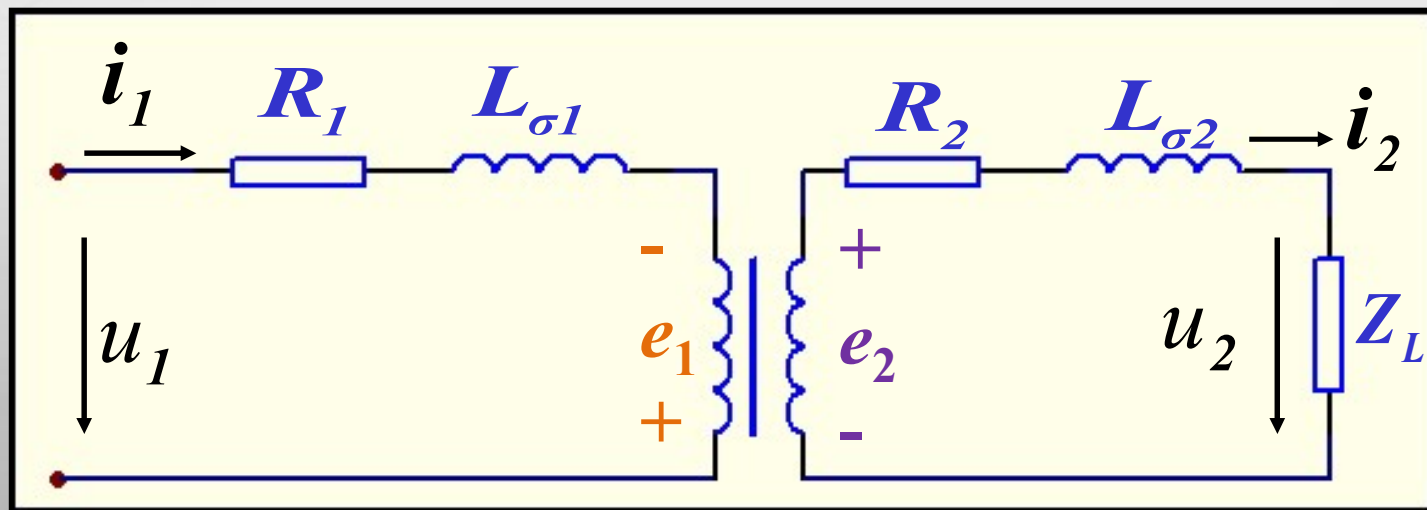
$L_{\sigma 1}$ 为一次绕组的漏磁电感

e_1 为主磁通在一次绕组的感生电动势。

R_2 为二次绕组的电阻

$L_{\sigma 2}$ 为二次绕组的漏磁电感

e_2 为主磁通在二次绕组的感生电动势



3.3 变压器

1. 电磁关系

2. 电压变换 (设加正弦交流电压)

很小, 可以忽略

$$\dot{U}_1 = (\underline{R_1} + j\omega L_{\sigma 1})\dot{I}_1 - \dot{E}_1$$

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

空载时,
 $I_2=0$

$$\dot{E}_2 = (\underline{R_2} + j\omega L_{\sigma 2})\dot{I}_2 + \dot{U}_2$$

$$\therefore U_2 = U_{20} = E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

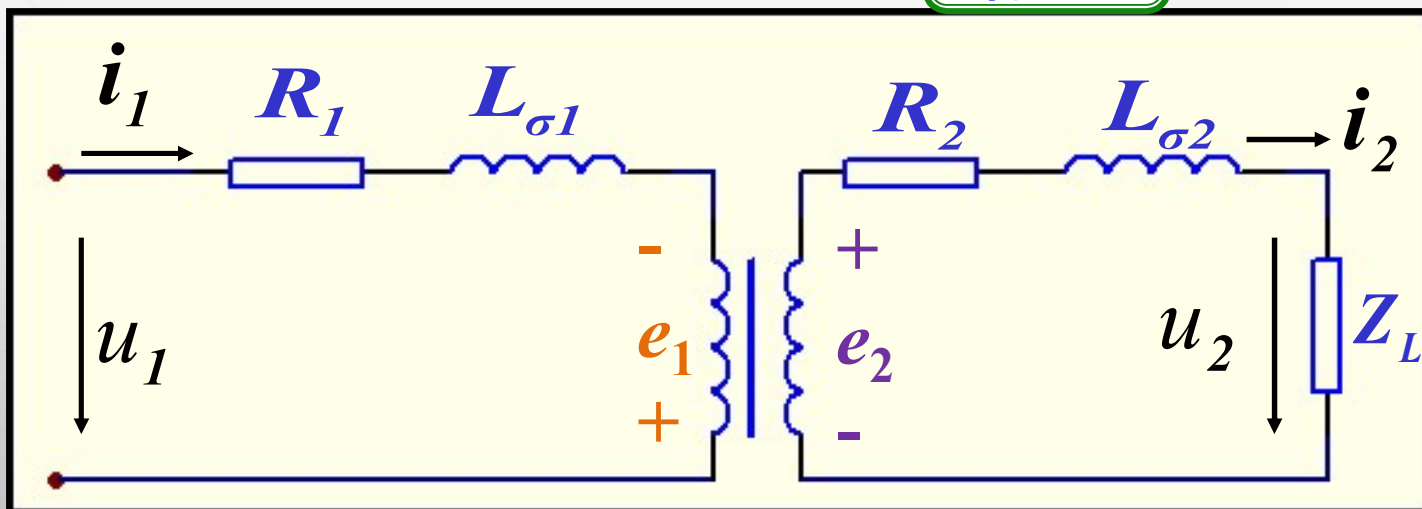
二次侧空载电压

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。



3.3 变压器

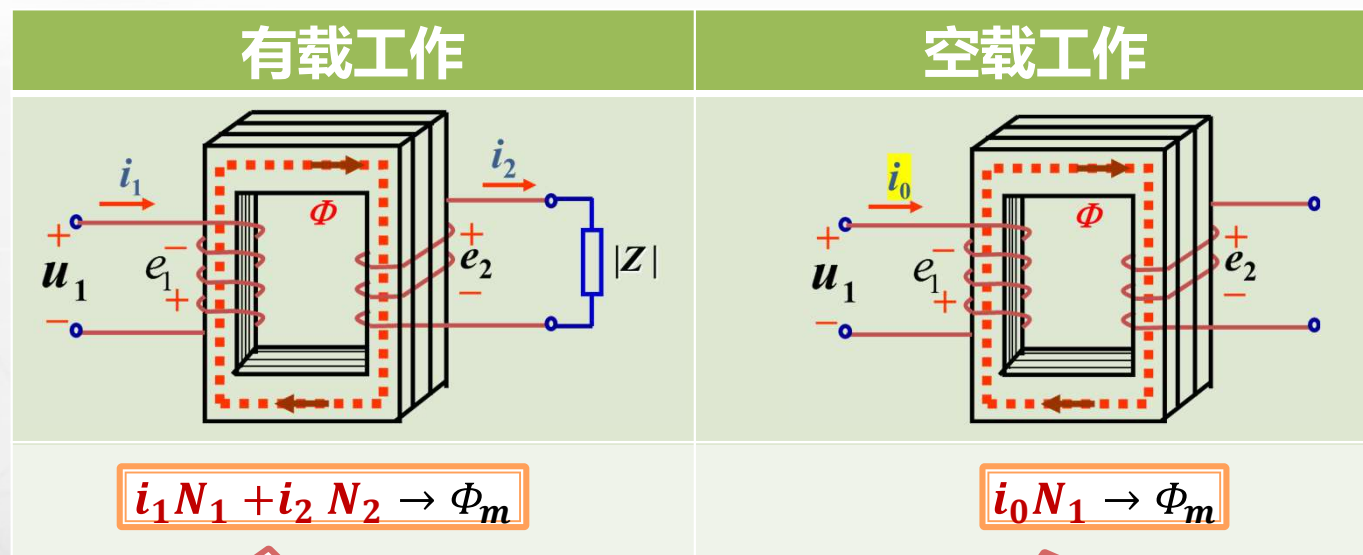
1. 电磁关系

2. 电压变换 (设加正弦交流电压)

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

3. 电流变换

(一次、二次侧电流关系)



有载磁势

空载磁势

$$\because \Phi_{m\text{有载}} \approx \Phi_{m\text{空载}}$$

$$\therefore i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$$

$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$
主磁通的最大值 Φ_m 在变压器空载和有载时近似保持不变。

$$\because I_0 \approx (2 \sim 3)\% I_{1N} \text{ 可忽略}$$

$$i_1 N_1 = -i_2 N_2$$

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

3.3 变压器

1. 电磁关系

2. 电压变换 (设加正弦交流电压)

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

3. 电流变换 (一次、二次侧电流关系)

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

结论：一次、二次侧电流与匝数成反比。

有载时 $i_1 N_1$ 的作用：

磁势平衡式：

$$i_1 N_1 = i_0 N_1 - i_2 N_2$$

- 1. 提供产生 Φ_m 的磁势
- 2. 提供用于补偿 $i_2 N_2$ 作用的磁势

3.3 变压器

1. 电磁关系

2. 电压变换 (设加正弦交流电压)

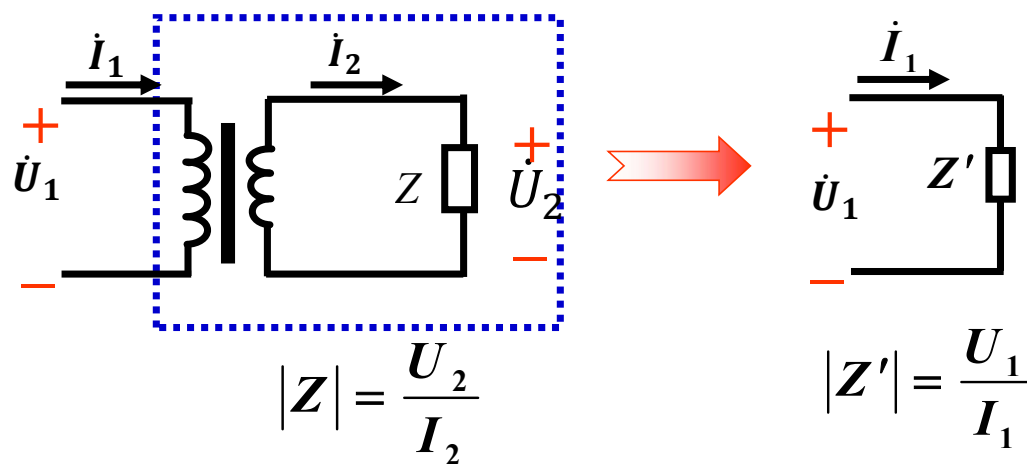
$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

3. 电流变换 (一次、二次侧电流关系)

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

4. 阻抗变换

$$|Z'| = K^2 |Z|$$



$$\begin{aligned} |Z'| &= \frac{U_1}{I_1} = \frac{KU_2}{I_2/K} \\ &= K^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 |Z| \end{aligned}$$

3.3 变压器

1. 电磁关系

2. 电压变换 (设加正弦交流电压)

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

3. 电流变换 (一次、二次侧电流关系)

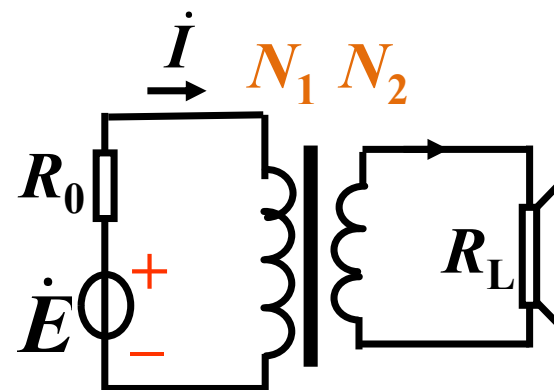
$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

4. 阻抗变换

$$|Z'| = K^2 |Z|$$

例 :如图, 交流信号源的电动势 $E=120\text{V}$,
内阻 $R_0=800\Omega$, 负载电阻 $R_L=8\Omega$ 。

- (1) 当 $R'_L=R_0$ 时, 求变压器的匝数比;
(设 R'_L 为 R_L 折算到原边的等效电阻)
- (2) 信号源通过变压器联接负载时的输出功率;
- (3) 信号源直接联接负载时的输出功率。



$$|Z'| = K^2 |Z|$$

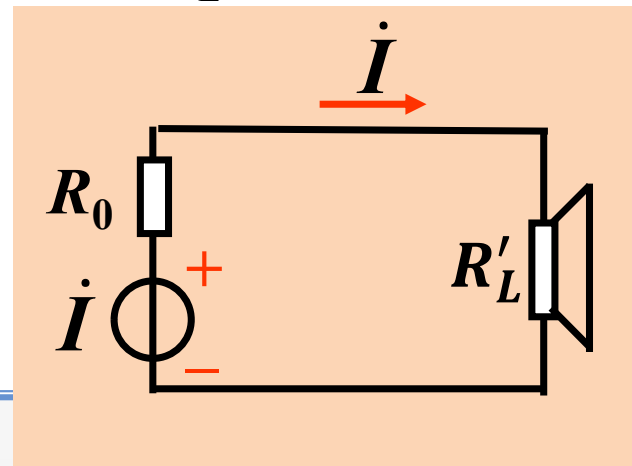
解:

(1) 变压器的匝数比为:

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

例 :如图, 交流信号源的电动势 $E=120\text{V}$, 内阻 $R_0=800\Omega$, 负载电阻 $R_L=8\Omega$ 。

- (1) 当 $R'_L=R_0$ 时, 求变压器的**匝数比**;
(设 R'_L 为 R_L 折算到原边的等效电阻)
- (2) 信号源**通过变压器**联接负载时的**输出功率**;
- (3) 信号源**直接**联接负载时的**输出功率**。



(2)输出功率:

(通过变压器
联接)

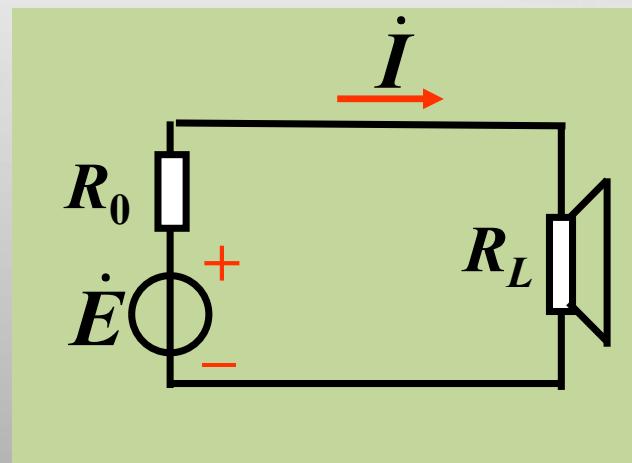
$$P = \left(\frac{E}{R_0 + R'_L} \right)^2 \times R'_L = \left(\frac{120}{800 + 800} \right)^2 \times 800 = 4.5 \text{ W}$$

(3)输出功率:

(直接联接)

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

结论: 接入变压器以后, 输出功率大大提高。

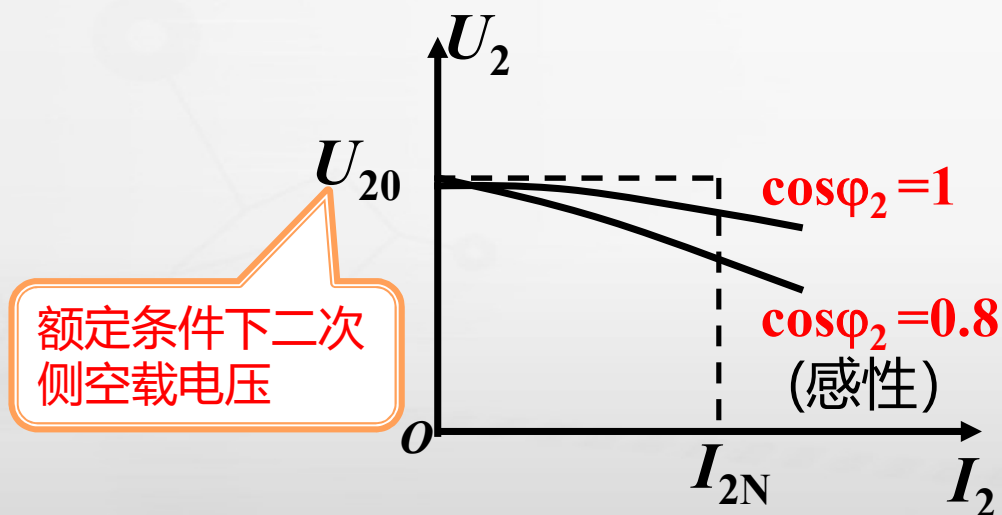


3.3 变压器

3.3.2 变压器的外特性

二次侧输出电压 U_2 和输出电流 I_2 的关系: $U_2 = f(I_2)$

前提: U_1 和 $\cos\varphi_2$ 保持不变



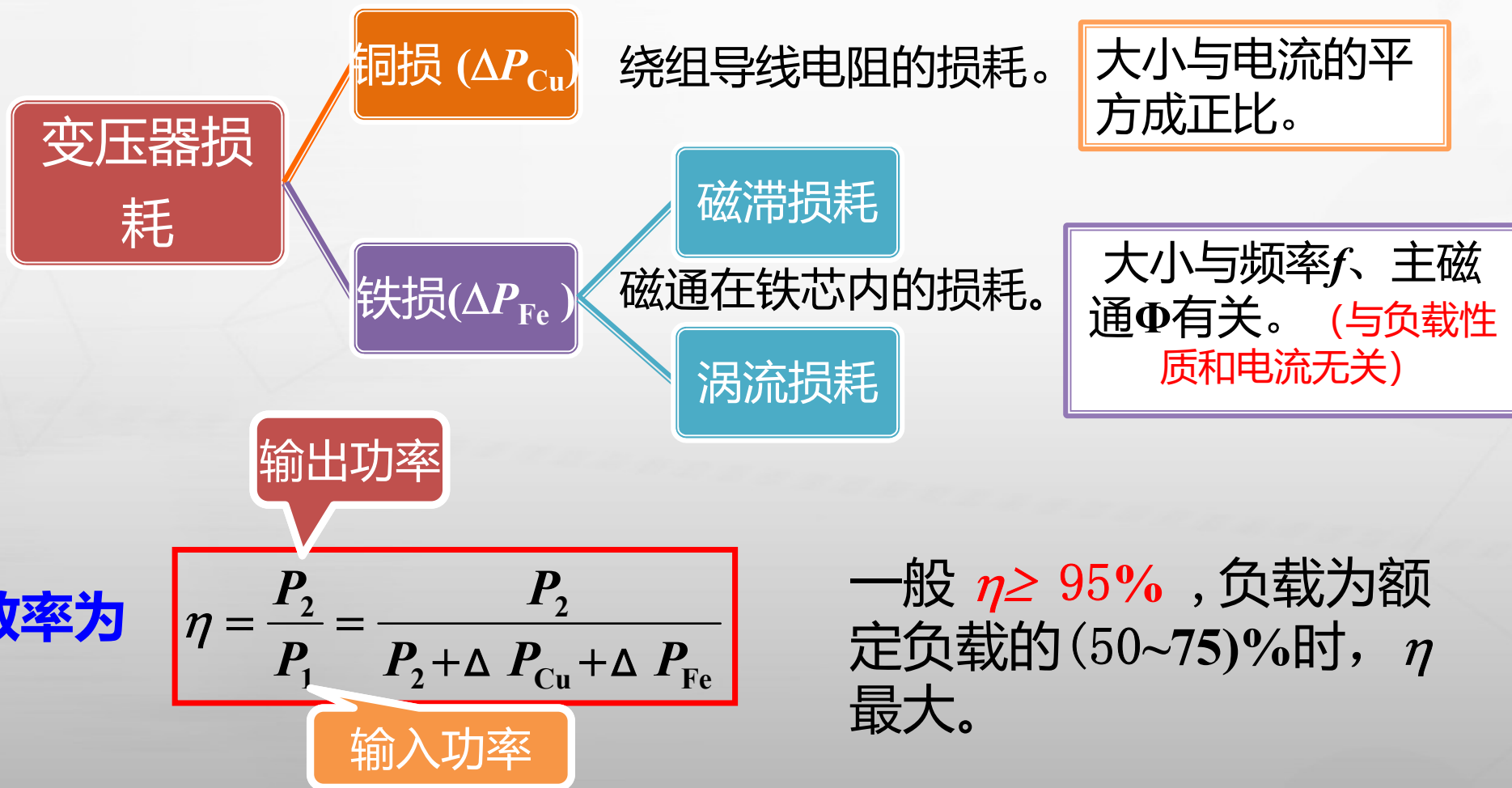
电压变化率:

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

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。

3.3 变压器

3.3.3 变压器的损耗与效率(η)



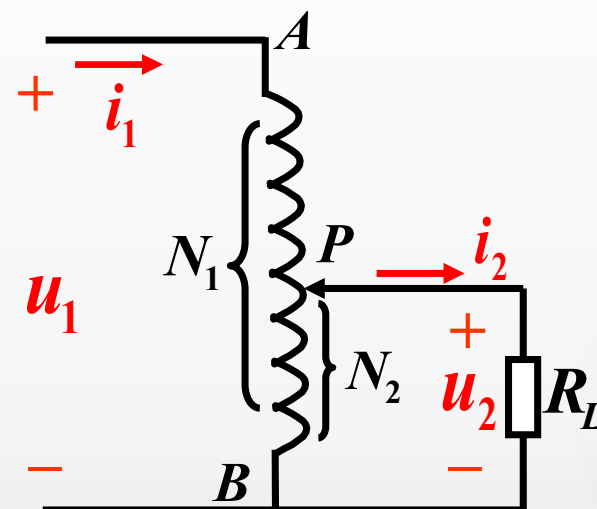
3.3 变压器

3.3.4 特殊变压器

• 1. 自耦变压器

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

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

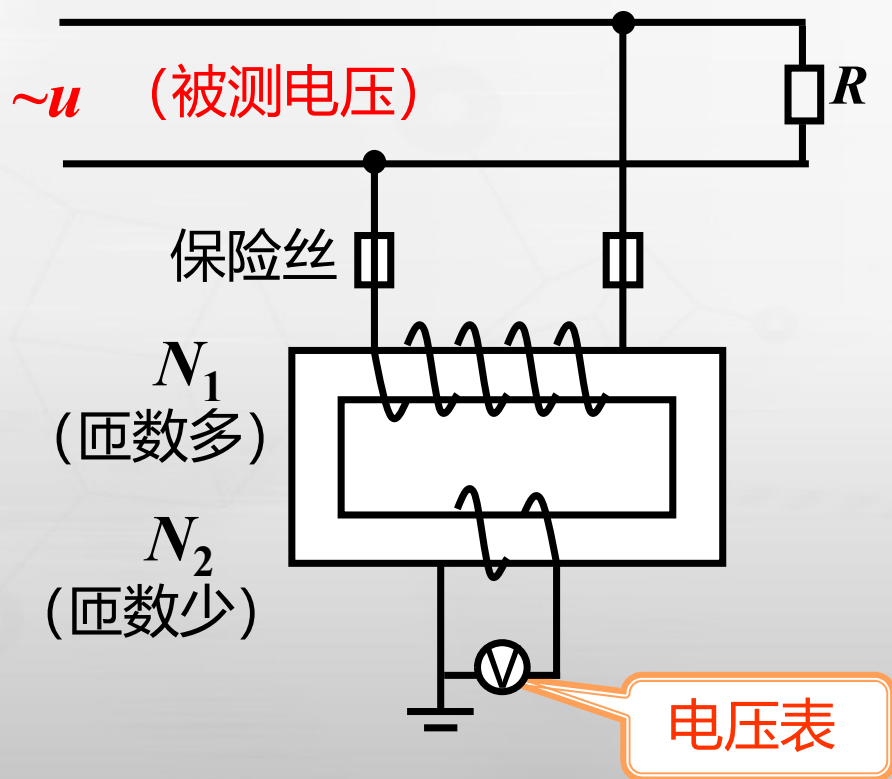


使用时，改变滑动端的位置，便可得到不同的输出电压。

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。

3.3 变压器

• 2. 电压互感器 (实现用低量程的电压表测量高电压)



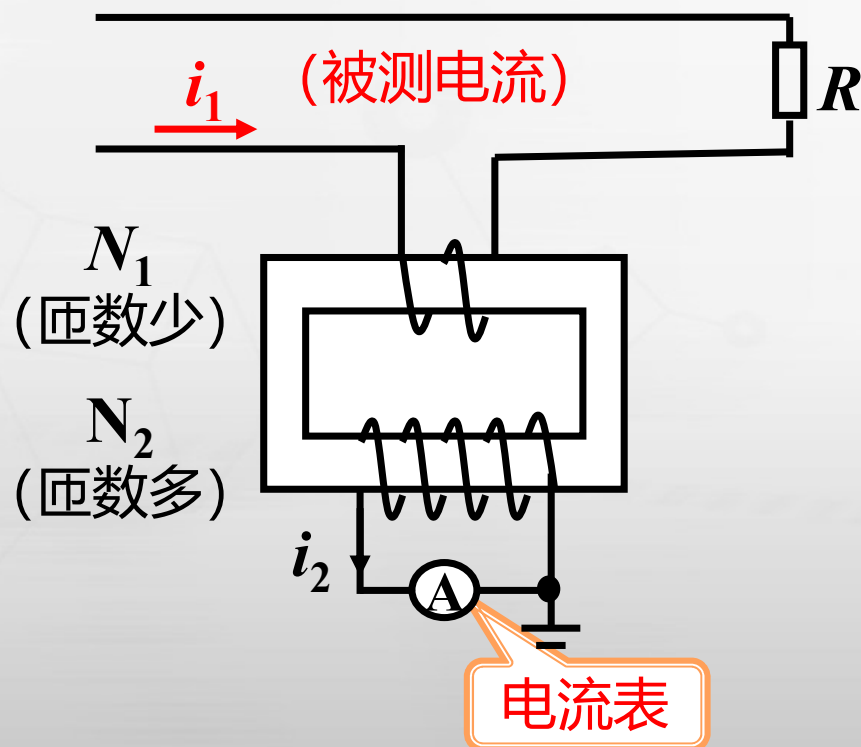
使用注意事项:

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。

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

3.3 变压器

• 3. 电流互感器 (实现用低量程的电流表测量大电流)



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, 在二次侧出现高压。

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

3.3 变压器

3.3.5 变压器绕组的极性

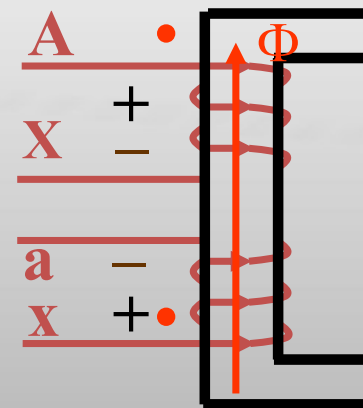
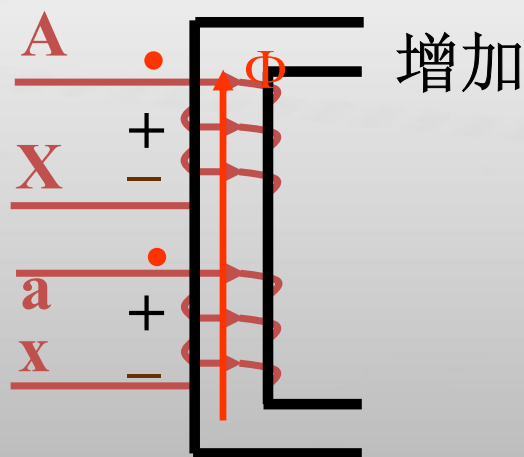
1. 同极性端 (同名端)

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。



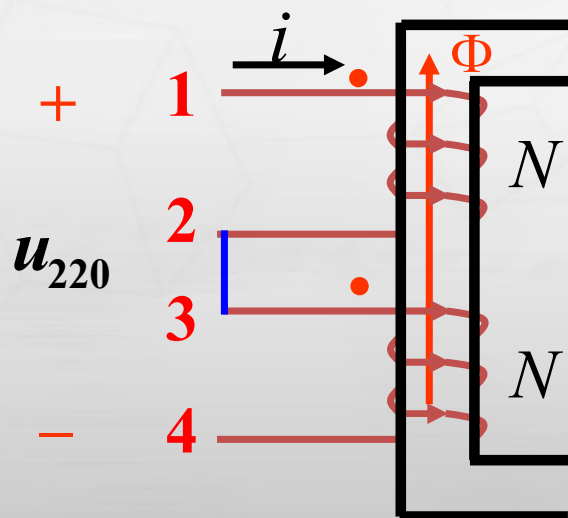
3.3 变压器

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：

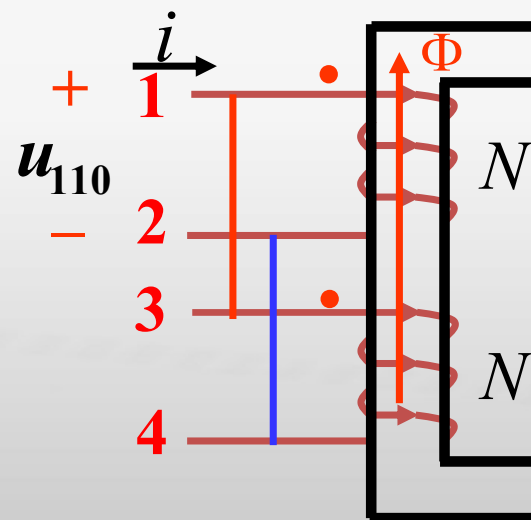
联接 2 - 3



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

电源电压为110V时：

联接 1 - 3, 2 - 4



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