

自动控制实践 变压器及其应用

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 伊国兴



变压器

电源变压器



电力变压器



环形变压器



接触调压器



控制变压器



三相干式变压器

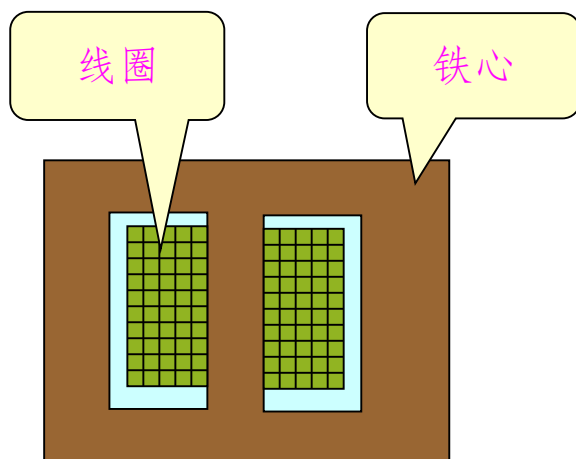


变压器的分类

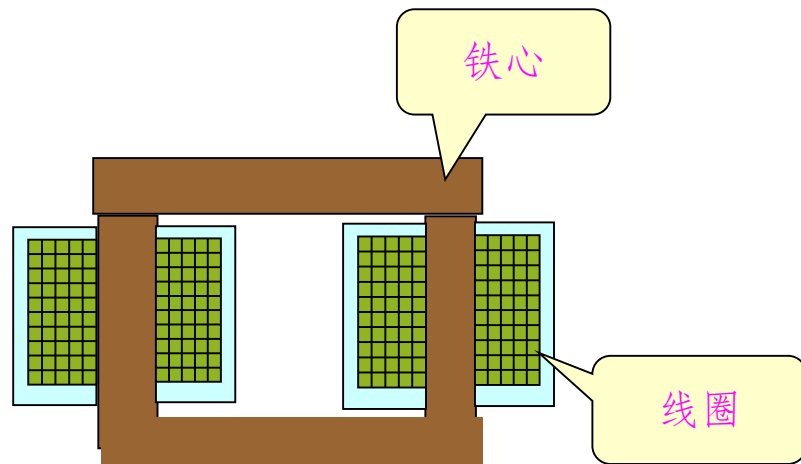
- ❖ 按用途分：电力变压器、电源变压器、整流变压器、电炉变压器、电焊变压器、矿用变压器、仪用变压器、电子变压器、电流互感器、电压互感器等；
- ❖ 按相数分：单相变压器、三相变压器；
- ❖ 按频率分：高频变压器（开关电源）、中频变压器（中频加热、淬火）、工频变压器；
- ❖ 按冷却介质分：油浸变压器、干式变压器（空气自冷）、水冷变压器；
- ❖ 按铁心形式分：心式变压器、壳式变压器；
- ❖ 按绕组数分：双绕组变压器、自耦变压器、三绕组变压器、多绕组变压器。

变压器结构

- ❖ 变压器铁心：硅钢片叠压而成。
- ❖ 变压器绕组：高强度漆包线绕制而成。
- ❖ 其他部件：油箱、冷却装置、保护装置等。



壳式变压器

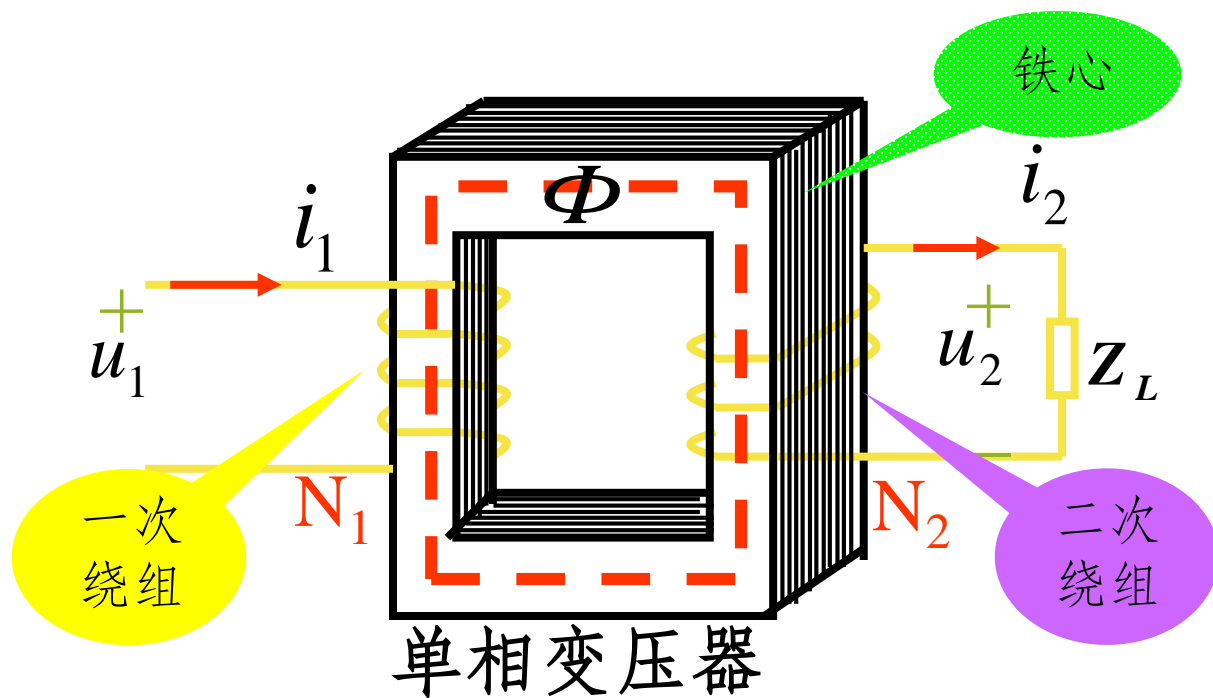


心式变压器

变压器的用途

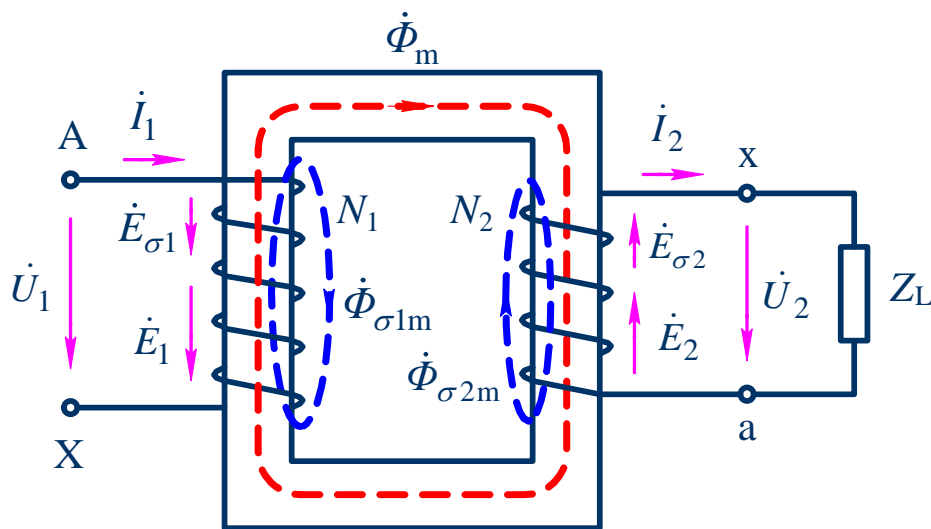
- ❖ 电力变压器主要用于电力系统升高或降低电压。
- ❖ 仪用变压器一般指电流互感器和电压互感器，可以将大电流变为小电流，高电压变为低电压后通过一般测量仪表进行测量。
- ❖ 调压变压器可用来调节电压，实验室常用。
- ❖ 电焊变压器具有陡降的输出特性，用于电弧焊接。
- ❖ 在电子电路中，变压器常用来变换阻抗。
- ❖ 在自动控制系统中，变压器还可用来变换极性、传输脉冲等，在电源子系统广泛使用。
- ❖ 隔离变压器用于抑止电控系统的传导干扰。

变压器工作原理



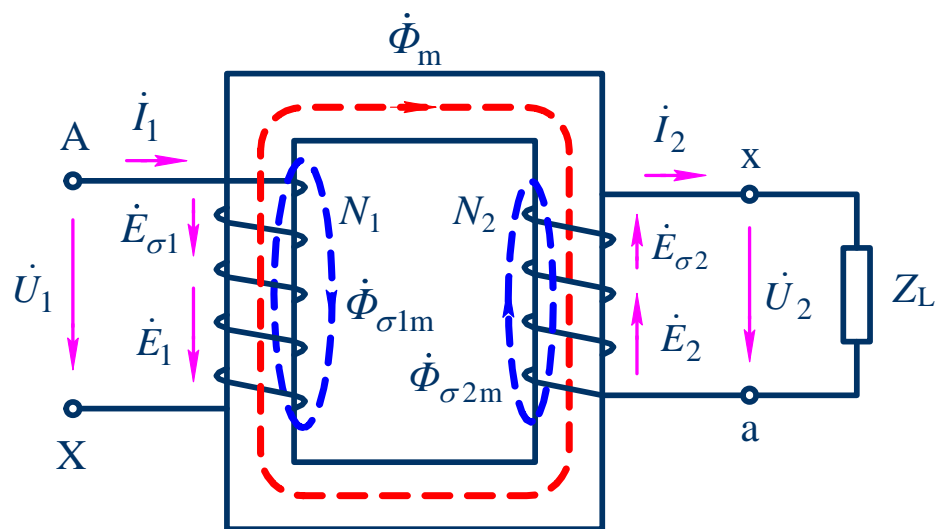
一次、二次绕组互不相连，能量的传递靠磁耦合。

变压器参考方向



- ◆参考方向与瞬时实际方向不一定同。
- ◆方程式中各物理量的符号是与参考方向对应的。
- ◆参考方向可以任意选取，只影响方程中有关各量的正号或负号。
- ◆电流、磁通、电动势、电压
- ◆电流与磁通的参考方向满足右手螺旋定则。
- ◆电动势与磁通的参考方向满足右手螺旋定则（注意电动势的参考方向）。

主磁通与漏磁通



◆作用

◆主磁通：交链一次和二次绕组，起着将电能从一次绕组传递到二次绕组的媒介作用。

◆漏磁通：只交链自身绕组。

◆磁路

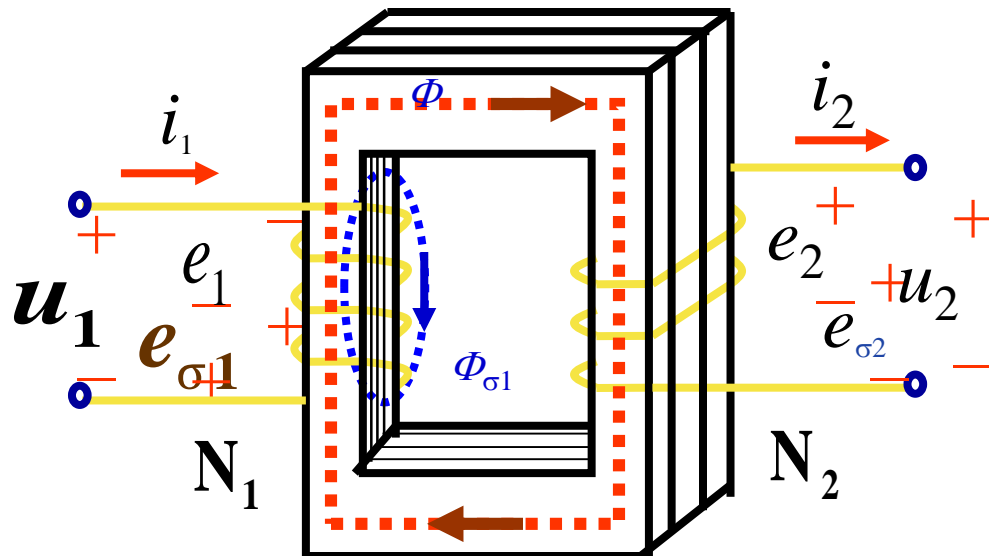
◆主磁通：铁心。

◆漏磁通：空气、油等非磁性材料，占总磁通的0.1%～0.2%。

变压器的空载与负载运行

1. 电磁关系

(1) 空载运行情况



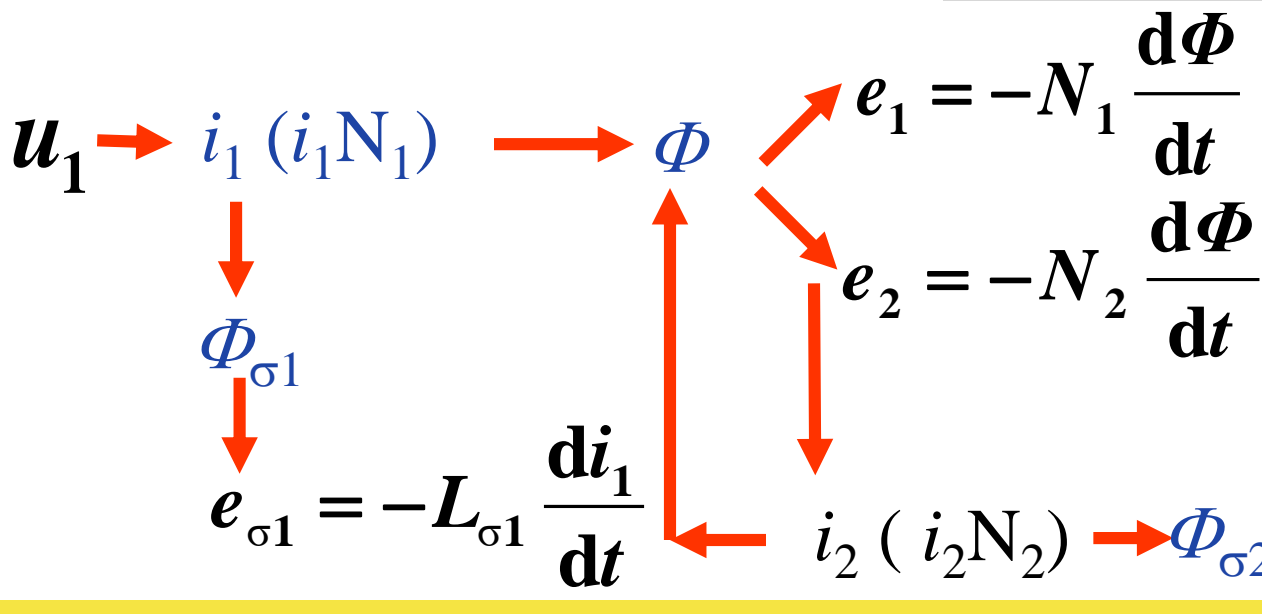
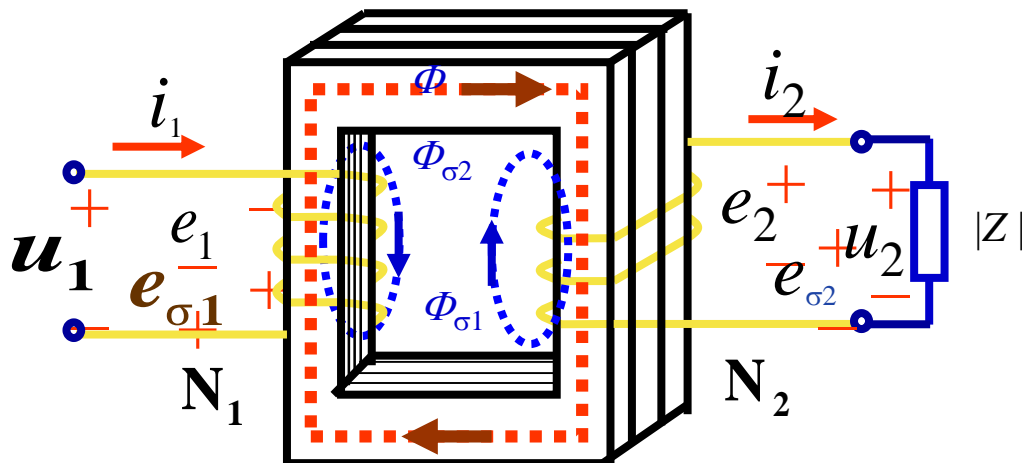
$$\begin{aligned} u_1 &\rightarrow i_0 (i_0 N_1) \rightarrow \Phi \\ &\downarrow \Phi_{\sigma 1} \\ e_{\sigma 1} &= -L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt} \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned}$$

空载时，铁心中主磁通 Φ 是由一次绕组磁通势产生的。

变压器的空载与负载运行

(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 Φ 是由一次、二次绕组磁通势共同产生的合成磁通。

变压器的空载与负载运行

2. 电压关系

(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: $E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}}$ $e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$

$$E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

$$E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2$$

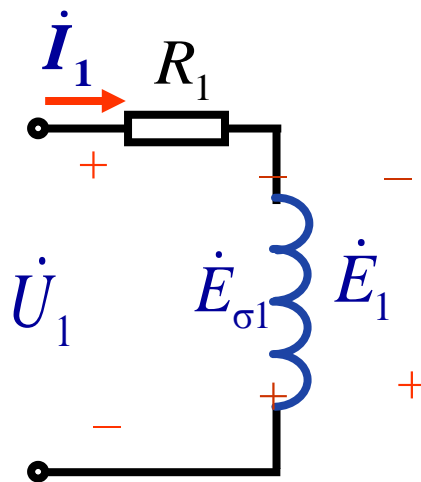
变压器的空载与负载运行

(2) 一次、二次侧电压

变压器一次侧等效电路如图

根据KVL:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{E}_1 \\ &= R_1 \dot{I}_1 + \mathrm{j} X_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_1\end{aligned}$$



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

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

变压器的空载与负载运行

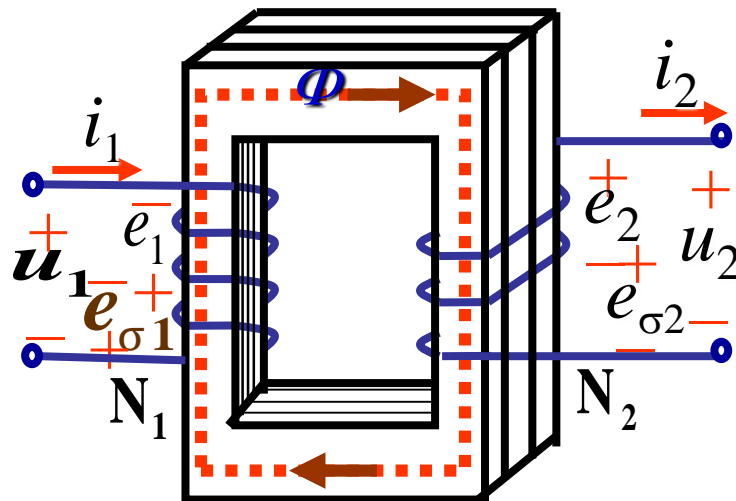
对二次侧，根据KVL：

$$\begin{aligned}\dot{E}_2 &= R_2 \dot{I}_2 - \dot{E}_{\sigma 2} + \dot{U}_2 \\ &= R_2 \dot{I}_2 + \mathrm{j} X_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2\end{aligned}$$

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。

变压器的空载与负载运行

3. 电流关系

有载运行 $Z_2 \rightarrow i_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}$

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

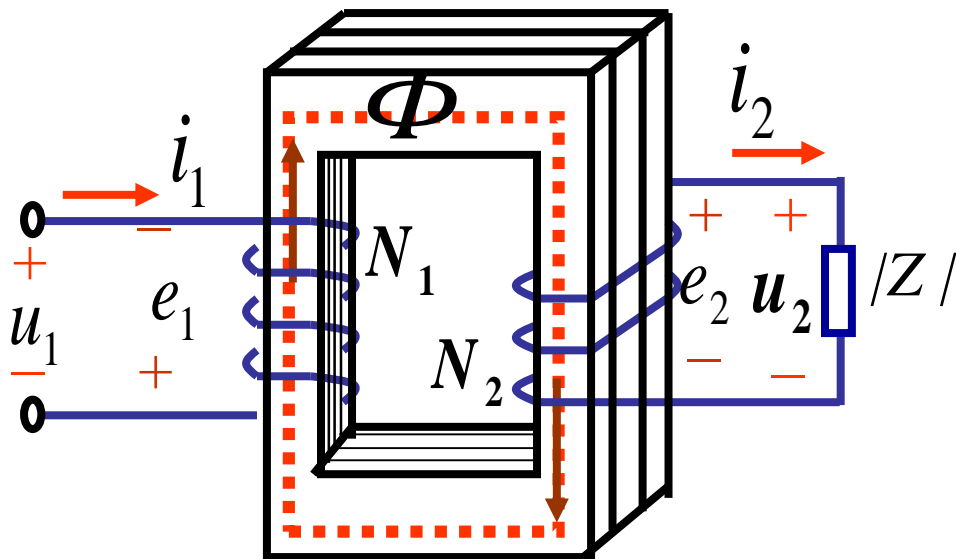
$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

由上式，若 U_1 、 f 不变，则 Φ_m 基本不变，近于常数。

可见，铁心中主磁通的最大值 Φ_m 在变压器空载和有载时近似保持不变。即有

空载： $i_0 N_1 \rightarrow \Phi_m$

有载： $i_1 N_1 + i_2 N_2 \rightarrow \Phi_m$



变压器的空载与负载运行

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： $I_0 \approx (2 \sim 3)\% I_{1N}$ 很小可忽略。

所以 $I_1 N_1 \approx I_2 N_2$

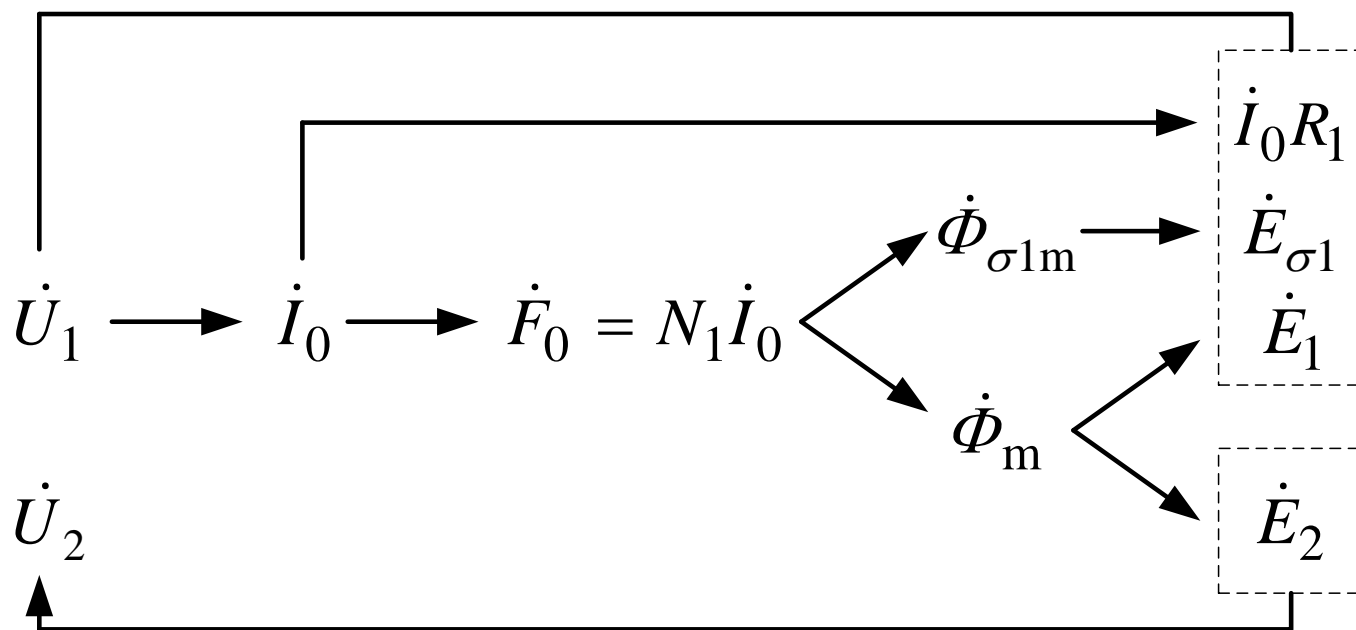
$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

结论：一次、二次侧电流与匝数成反比。

变压器的空载与负载运行

空载运行时的电磁关系

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$$

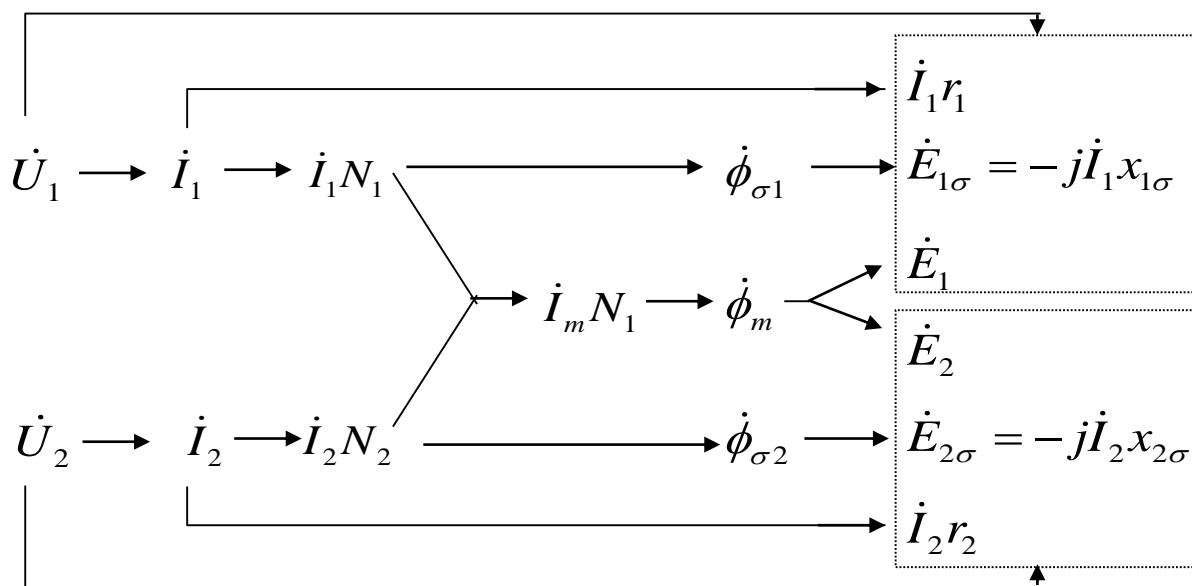


$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = k$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2$$

变压器的空载与负载运行

变压器负载运行时的物理过程和方程式：



变压器的基本方程式： $\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m$$

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

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = k$$

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_m$$

变压器的主要铭牌数据

- ❖ 额定容量 S_N 额定状态下变压器输出能力（视在功率）的保证值，称为变压器的额定容量。对三相变压器，额定容量是指三相容量之和。
- ❖ 额定电压 U_N 变压器各绕组在空载额定分接下端电压的保证值，对三相变压器，额定电压是指线电压。
- ❖ 额定电流 I_N 根据额定容量和额定电压计算出的线电流称为额定电流。
- ❖ 额定频率 f_N 我国规定标准工业用电的频率为50Hz。
- ❖ 此外，额定运行时变压器的效率、温升等数据均作为额定值。除额定值外，铭牌上还标有变压器的相数，连接方式与组别，运行方式及冷却方式等。

变压器的主要铭牌数据

➤ 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

变压器的主要铭牌数据

➤ 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）

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

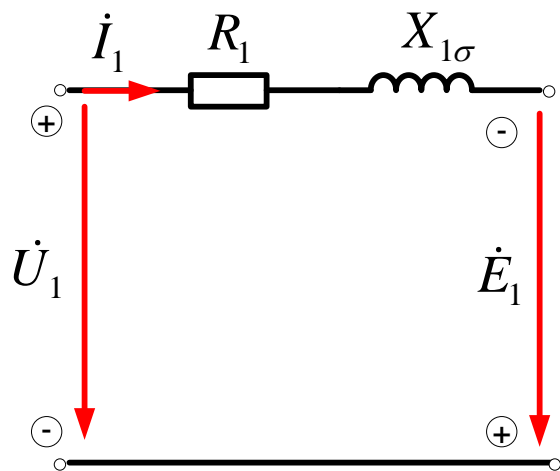
容量 $S_N \neq$ 输入功率 P_1

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

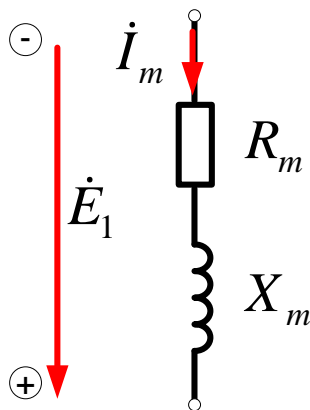
效率

变压器等效电路



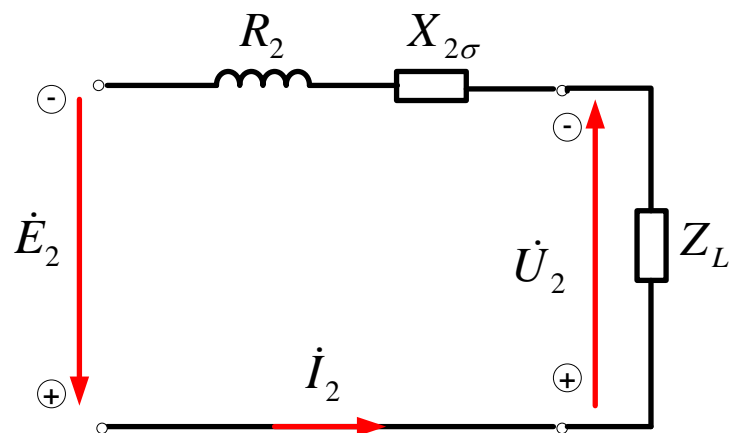
$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

一次侧绕组等效电路



$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m$$

激磁电路



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

二次侧绕组等效电路

绕组归算

- ❖ 假设一个新的二次绕组替代原二次绕组，新的二次绕组的匝数等于一次绕组的匝数，同时一次和二次绕组的原有电磁关系不变。这叫做“归算”。
- ❖ 具体反映在两个“不变”的原则上：
 - 归算后二次绕组的磁动势保持不变。
 - 归算后功率、能量不变。

绕组归算

由磁动势不变可以得到：

$$N_1 I'_2 = N_2 I_2 \quad I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{1}{k} I_2$$

由于主磁通不变，因而：

$$\frac{\dot{E}'_2}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad \dot{E}'_2 = k \dot{E}_2$$

现在看方程式的变化：

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

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

$$= \frac{\dot{I}_2}{k} (k^2 R_2 + jk^2 X_{2\sigma}) + k \dot{U}_2$$

$$= \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_{2\sigma}) + \dot{U}'_2$$

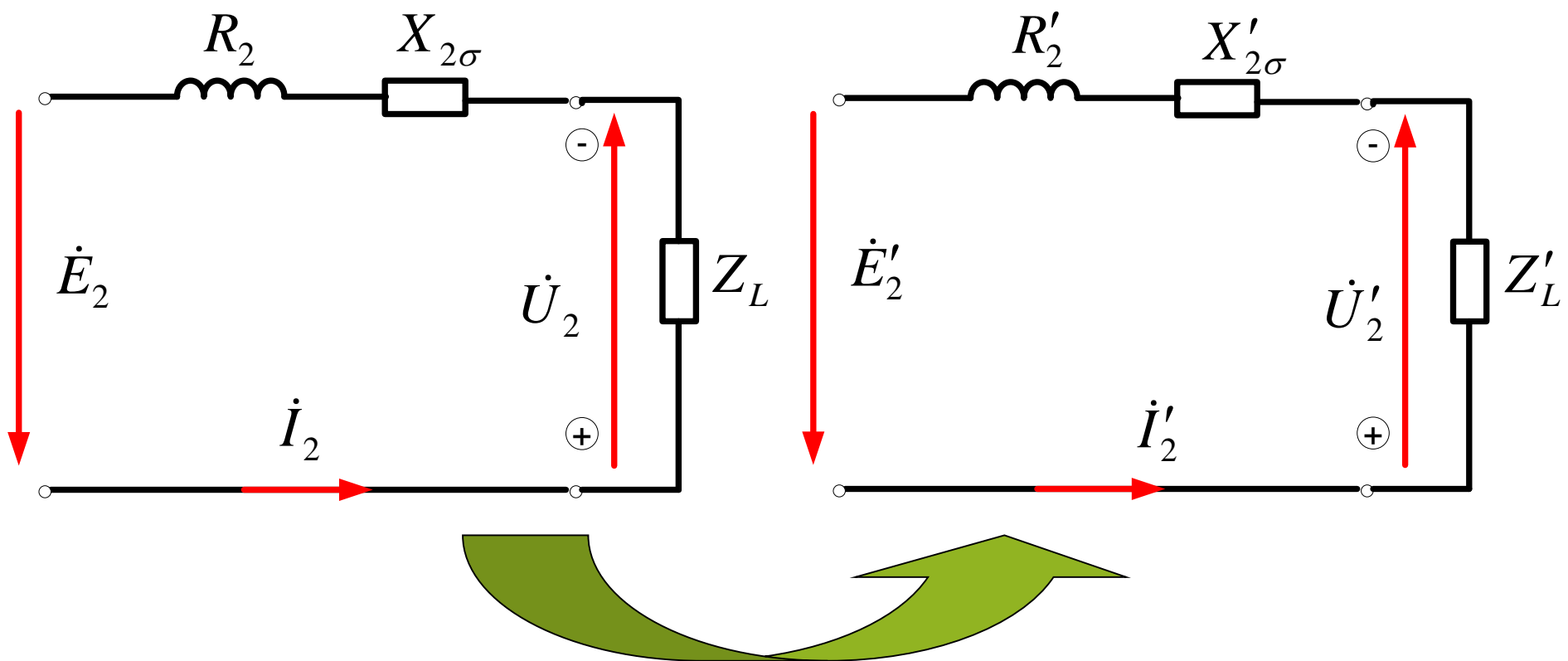
$$R'_2 = k^2 R_2$$

$$X'_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma}$$

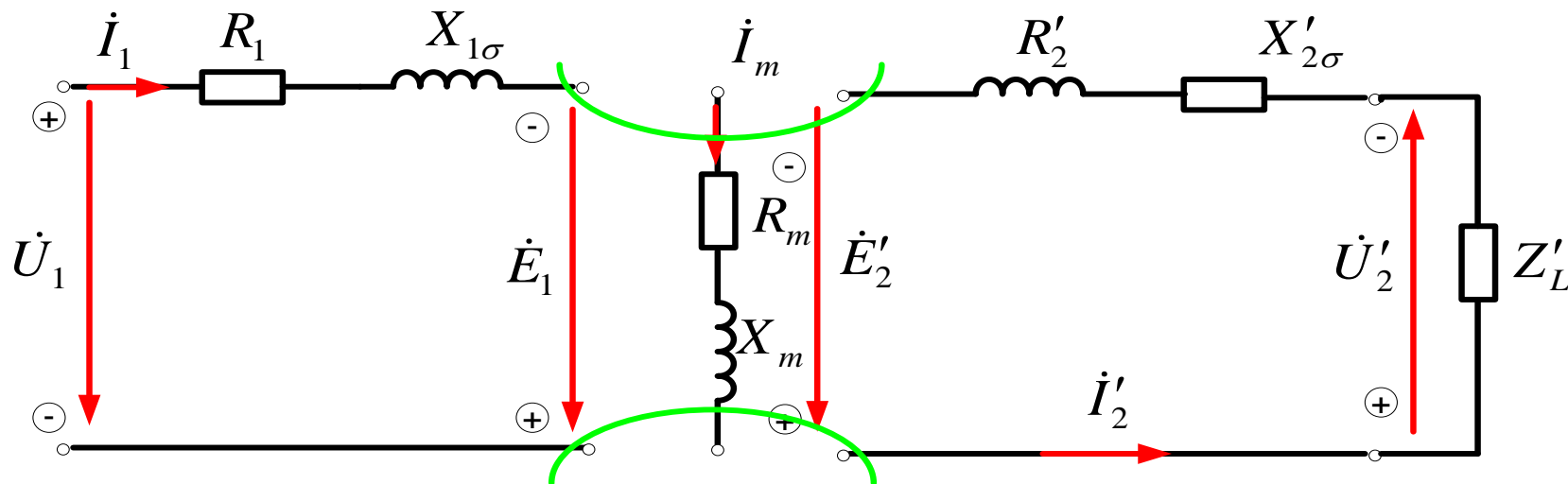
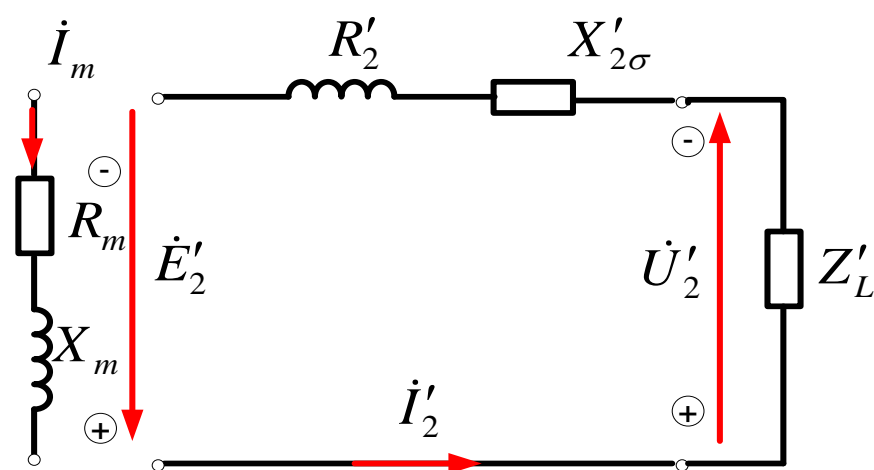
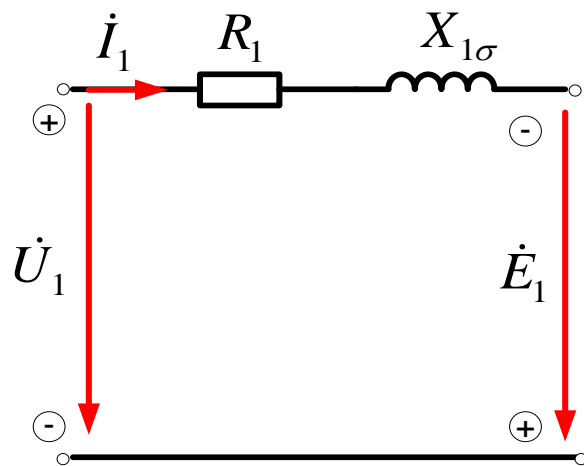
绕组归算

得到：

$$E'_2 = k\dot{E}_2 = \dot{I}'_2(R'_2 + jX'_{2\sigma}) + \dot{U}'_2 = E_1$$



绕组归算



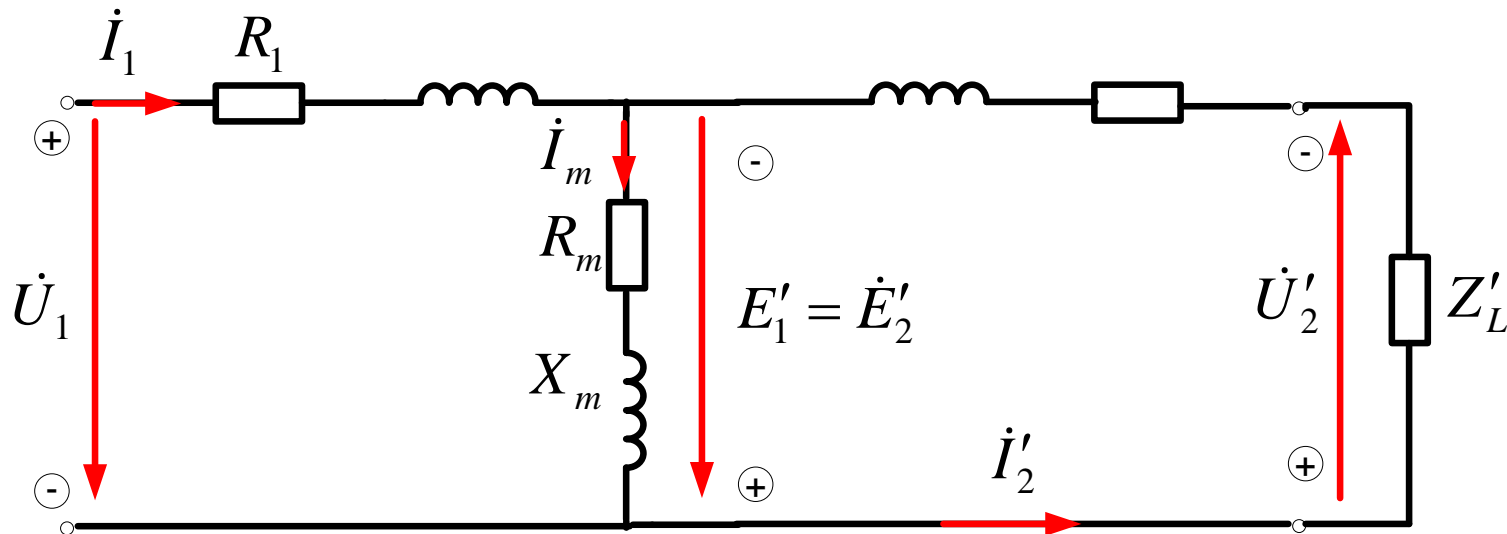
绕组归算

四、归算后，变压器的基本方程为：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1 \qquad \dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_{2\sigma}) + \dot{U}'_2 \qquad \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m$$

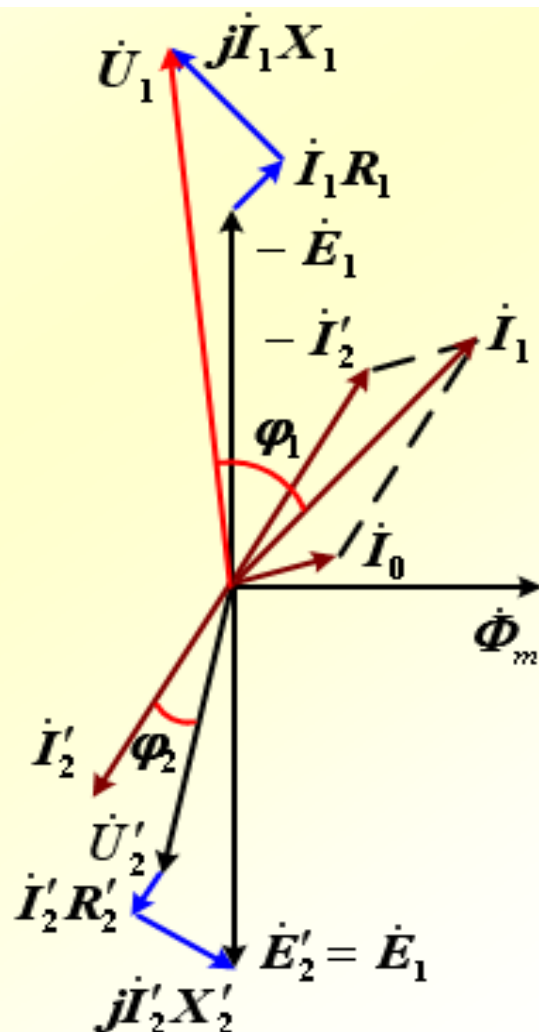
五、归算后，T型等效电路



绕组归算

假定给定 U_2 、 I_2 、 $\cos\varphi_2$ 及各个参数

- (1) 画出 \dot{U}'_2 、 \dot{I}'_2 ；
- (2) 在 \dot{U}'_2 相量上加 $\dot{I}'_2 R'_2 + j\dot{I}'_2 X'_2$ 得到 \dot{E}'_2 ；
- (3) $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$
- (4) 画出领先 \dot{E}_1 90° 的主磁通 $\dot{\Phi}_m$ ；
- (5) 根据 $\dot{I}_0 = -\dot{E}_1 / Z_m$ 画出 \dot{I}_0 ，
 \dot{I}_0 领先 $\dot{\Phi}_m$ 一个铁耗角；
- (6) 画出 $-\dot{I}'_2$ 与 \dot{I}_0 的相量和 \dot{I}_1 ；
- (7) 画出 $-\dot{E}_1$ ，加 $\dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1$ 得到 \dot{U}_1 。



变压器应用

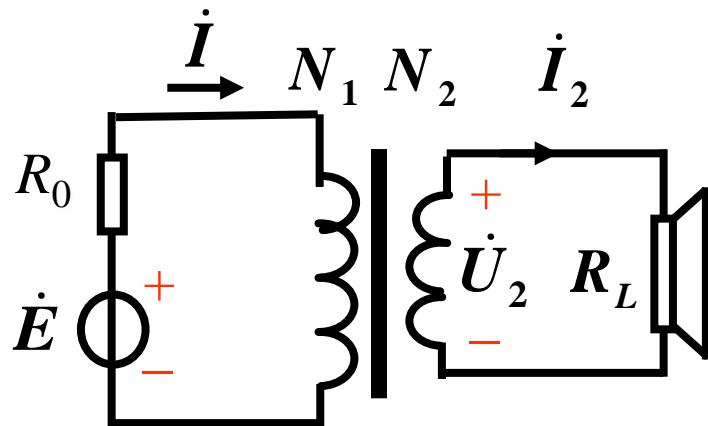
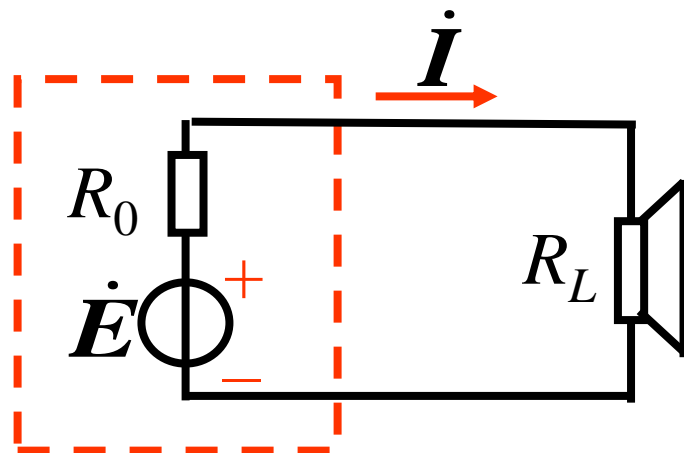
例：交流信号电源 $E=120\text{V}$ ，内阻 $R_0=800\Omega$ ，负载为扬声器，其等效电阻为 $R_L=8\Omega$ 。要求：

(1) 当 R_L 折算到原边，与信号源内阻相等时，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：

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



变压器应用

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。

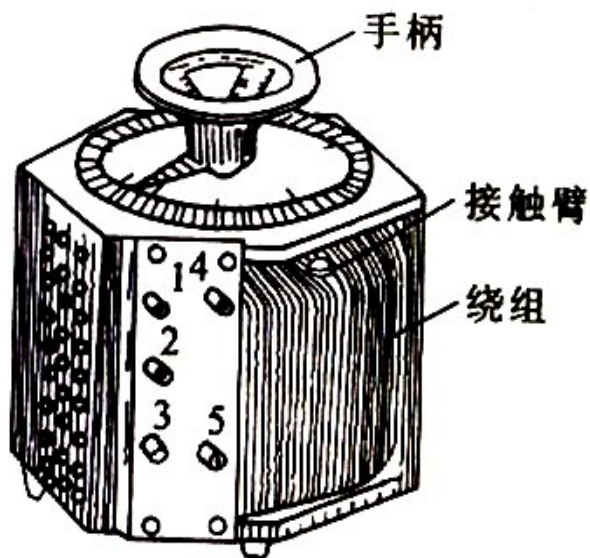
原因：满足了最大功率输出的条件： $R'_L = R_0$

电子线路中，常利用阻抗匹配实现最大输出功率。

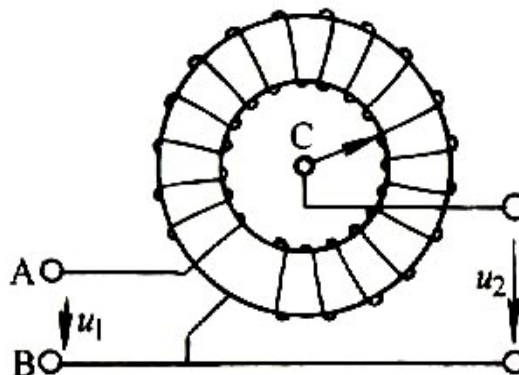
变压器不同场合的应用

1、自耦调压器

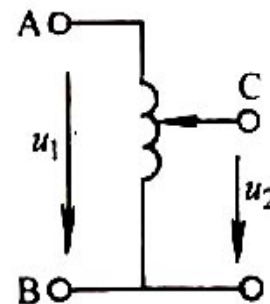
低压小容量的自耦变压器，其二次绕组的接头C常做成沿线圈自由滑动的触头，它可以平滑地调节自耦变压器的二次绕组电压，这种自耦变压器称为自耦调压器。



a) 外形图



b) 电路原理图

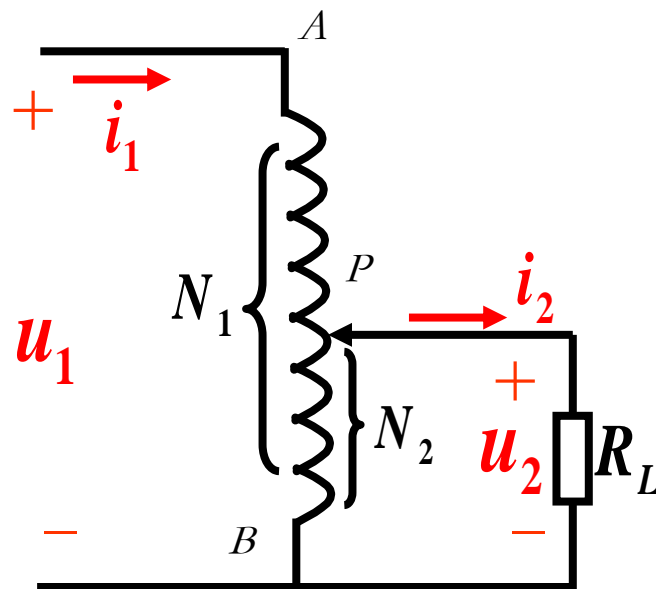


变压器不同场合的应用

自耦变压器原理

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

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



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。

变压器不同场合的应用

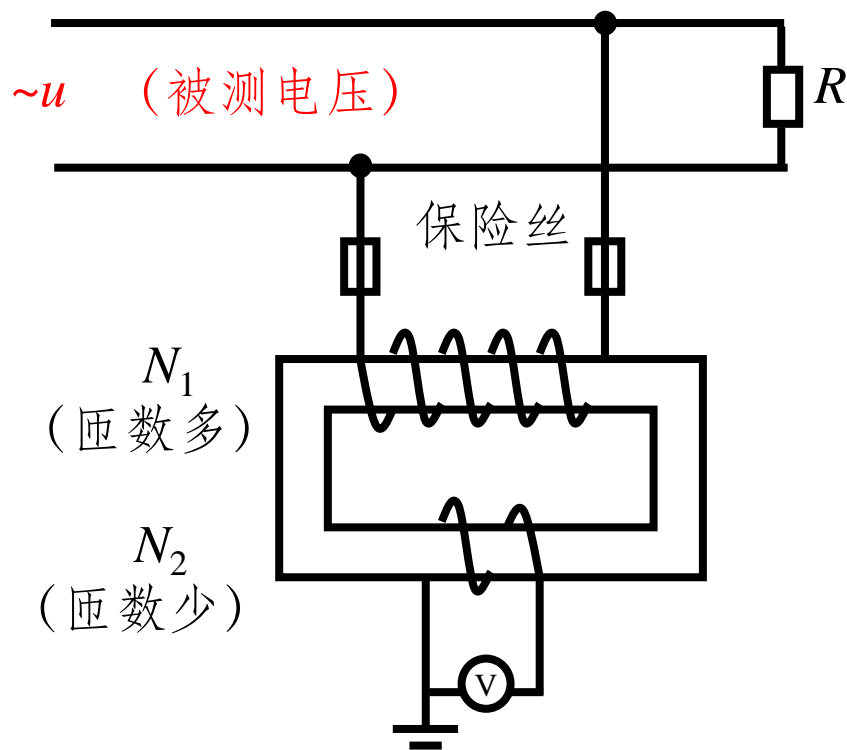


自耦变压器的特点

- 自耦变压器具有结构简单、节省用铜量、其效率比一般变压器高等优点。
- 其缺点是一次侧、二次侧电路中有电的联系，可能发生把高电压引入低压绕组的危险事故，很不安全，因此要求自耦变压器在使用时必须正确接线，且外壳必须接地，并规定安全照明变压器不允许采用自耦变压器结构形式。

变压器不同场合的应用

2、电压互感器--实现用低量程的电压表测量高电压



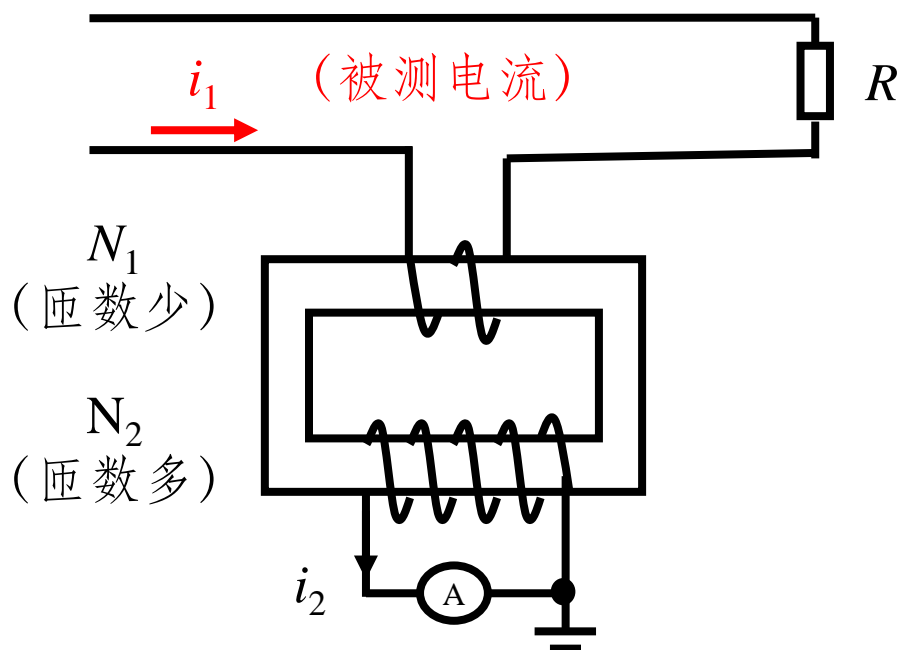
使用注意事项:

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。

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

变压器不同场合的应用

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:

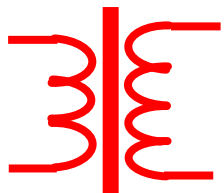
1. 二次侧不能开路，以防产生高电压；
2. 铁心、低压绕组的一端接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现过压。

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

变压器不同场合的应用

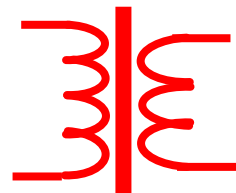
电力工业中常采用高压输电低压配电，实现节能并保证用电安全。具体如下：

发电厂
10.5kV



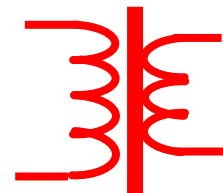
升压

输电线
220kV



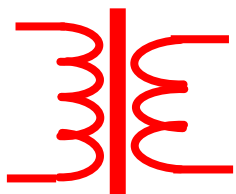
降压

变电站
10kV



降压

...



降压

实验室
380 / 220V



降压

仪器
36V

Thank You!

伊国兴

ygx@hit.edu.cn



哈爾濱工業大學

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY