



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践A-10

- 变压器及其应用



目 录

1. 变压器运行原理

- 变压器概述
- 变压器的空载/负载运行
- 变压器的等效电路
- 变压器的运行

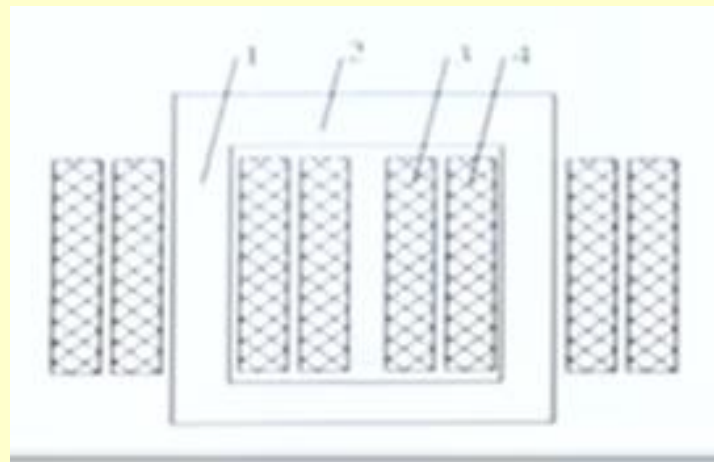
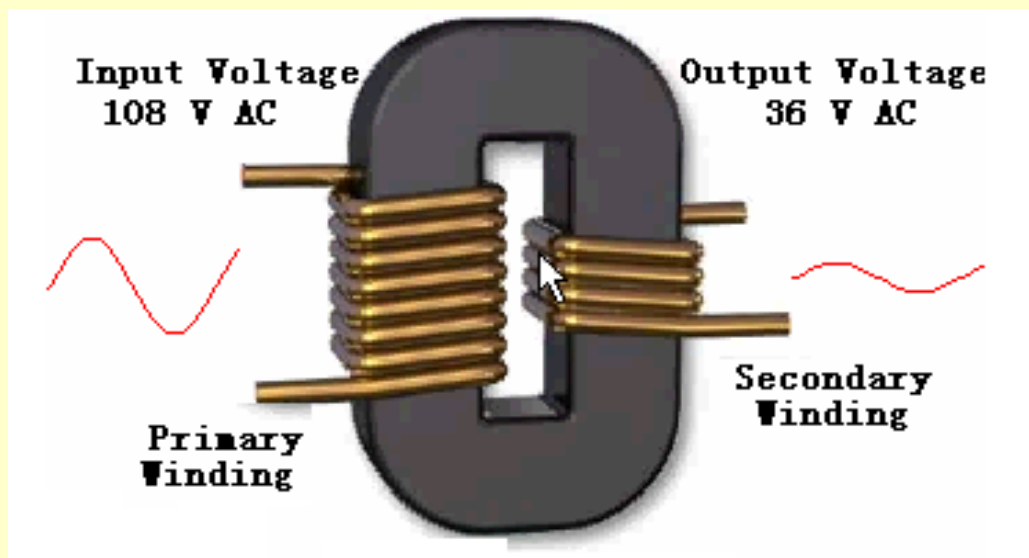


2. 变压器不同场合的应用

- 自耦变压器
- 电压/电流互感器
- 日常生活中的变压器
- 阻抗变换
- 隔离变压器



1. 变压器运行原理



- 将一种等级的**交流电**（ U 、 I ）变换为**另一种等级的同频交流电**。
- 变压器原、副绕组间虽然**没有导线连接**，但当原绕组接交流电、副绕组接负载后，副绕组便有电流和电功率输出；
- 根据能量守恒定律，变压器接负载后，原绕组比空载时会相应增加一定的功率输入，增加的部分等于副绕组输出的电功率；
- 因而，变压器能够改变电压、传递电功率。



1.1 变压器概述

电力变压器



三相干式变压器



电源变压器



开关电源变压器



接触调压器



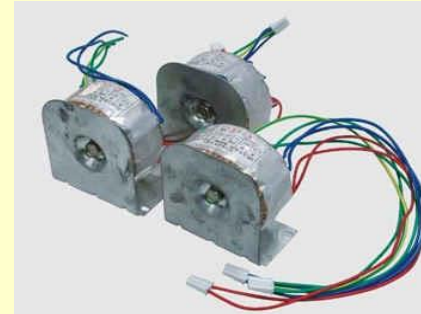
控制变压器



旋转变压器



电流互感器



1.1 变压器概述

变压器的用途

1. 电力变压器主要用于电力系统升高或降低电压。
2. 仪用变压器一般指电流互感器和电压互感器，将大电流变为小电流，将高电压变为低电压以便常规仪器测量。
3. 调压变压器可用来调节电压，实验室常用。
4. 在电子电路中，变压器常用来变换阻抗。
5. 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。
6. 隔离变压器（1: 1）用于抑止电控系统的传导干扰。



1.1 变压器概述

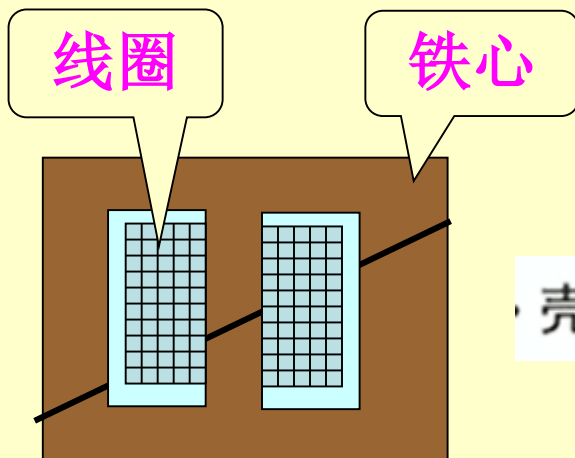
变压器的分类

- (1) 按用途：电力变压器、电源变压器、仪用变压器、电子变压器（用在电子线路中）、电流互感器、电压互感器等；
- (2) 按相数：单相变压器、三相变压器；
- (3) 按频率：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；
- (4) 按冷却介质：油浸变压器、干式变压器、水冷变压器；
- (5) 按铁心形式：心式变压器、壳式变压器；
- (6) 按绕组数：双绕组变压器、多绕组变压器、自耦变压器



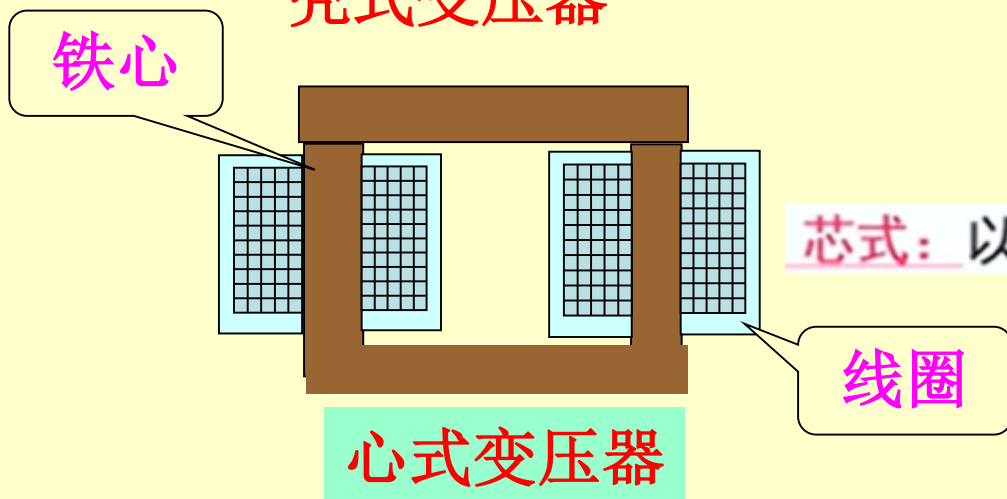
1.1 变压器概述

变压器的结构

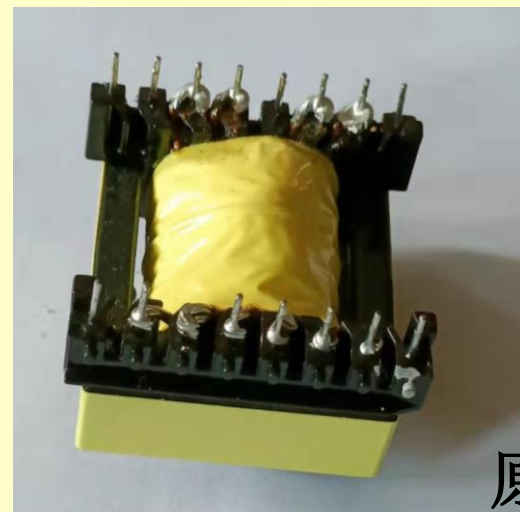
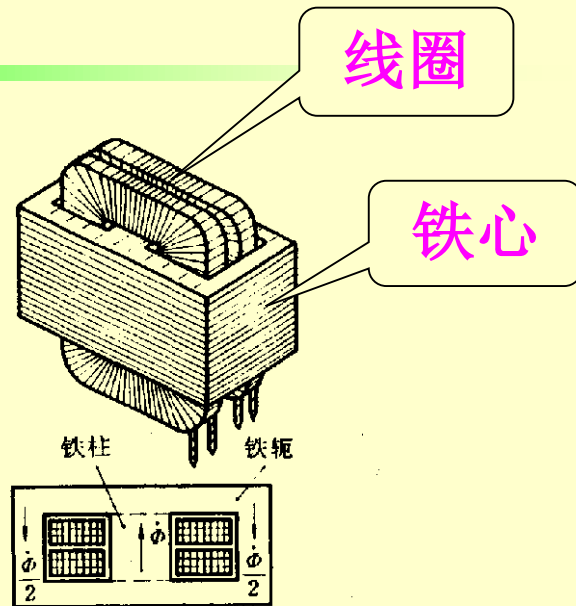


壳式：以铁心为壳

壳式变压器



心式变压器



1.1 变压器概述

变压器的结构

一、铁心

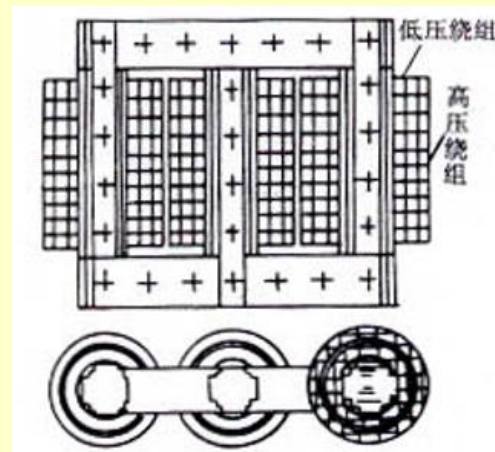
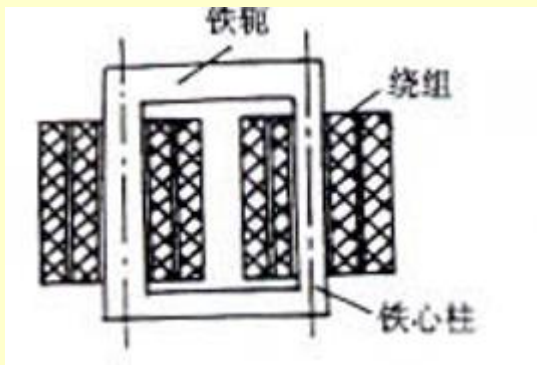
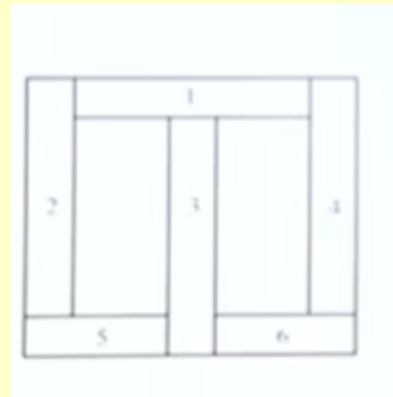
铁心构成主磁路，增加磁密和磁通。硅钢片**叠压**而成（减少涡流）。**铁心必须闭合**。

变压器的主磁路，为了提高导磁性能和减少铁损，表面**涂有绝缘漆的硅钢片**叠成。

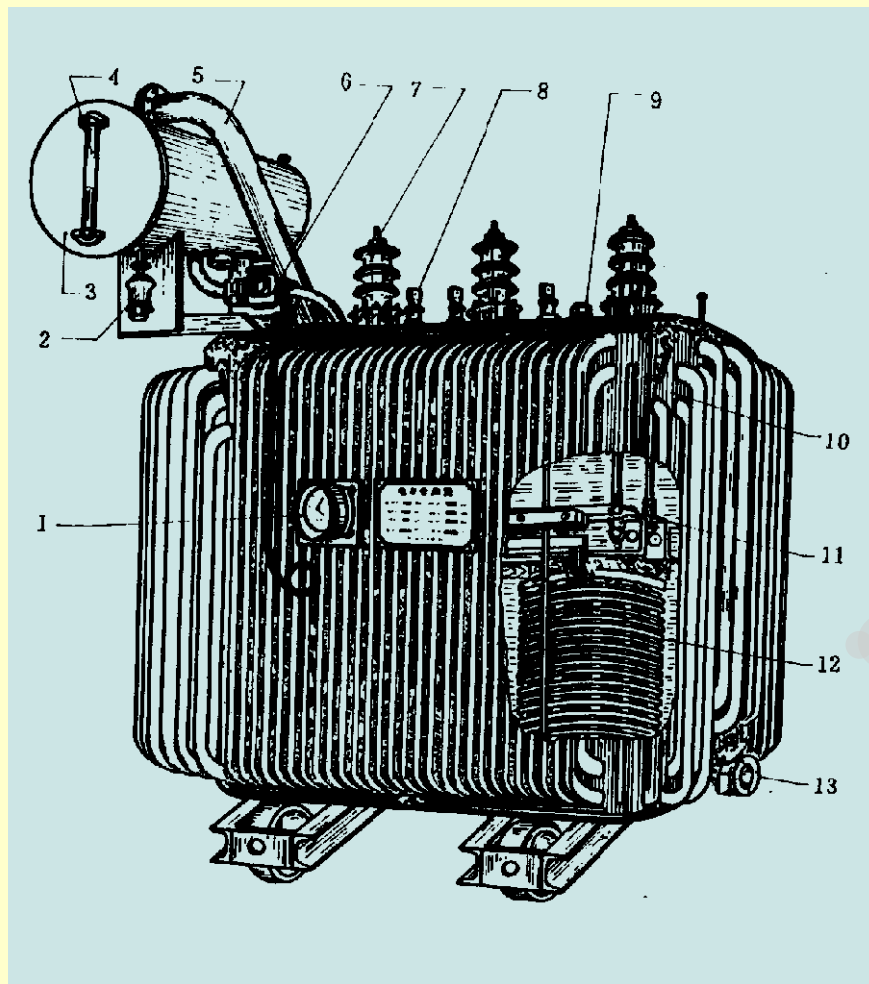
二、绕组

绕组是变压器的电路部分，一般为绝缘扁**铜线**或绝缘圆铜线在绕线模上绕制而成。

E, U, C型



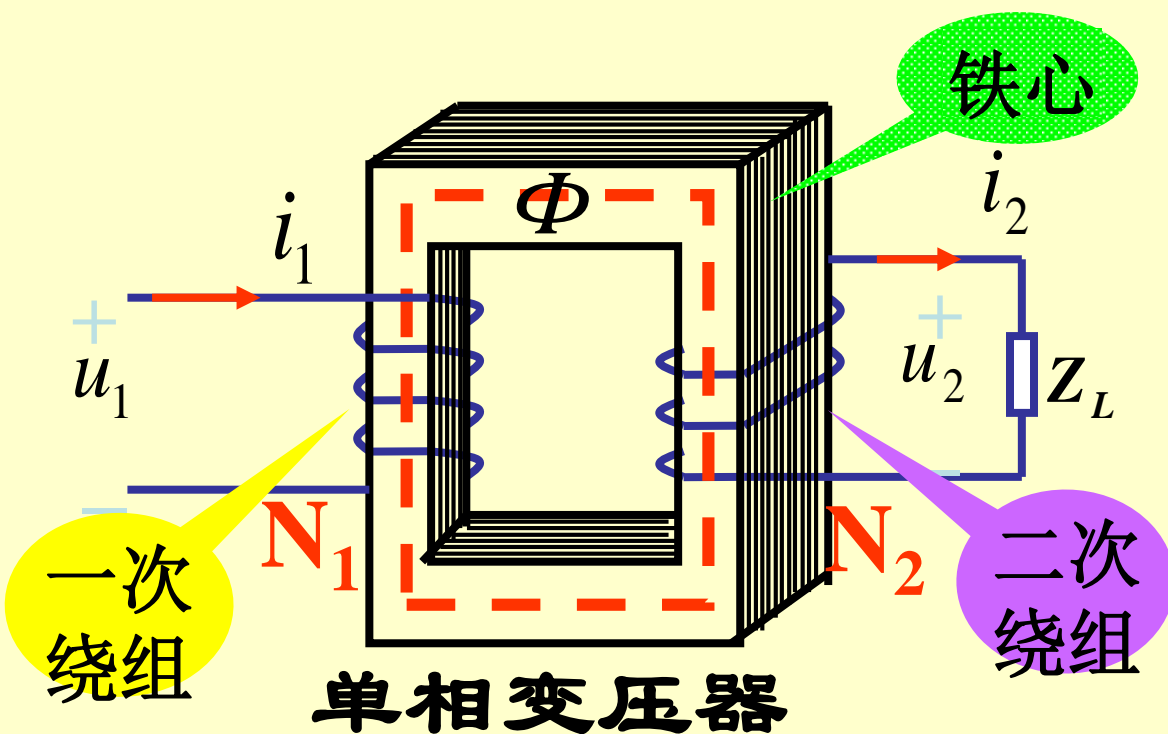
三、变压器其它附件



温度计；吸湿器，储油柜；油表；安全气道；气体继电器；高压套管；低压套管；分接开关；油箱等等



1.2 变压器的空载与负载运行



- 变压器的主要部件是铁心和套在铁心上的两个绕组。
- 两绕组只有磁耦合没有电联系。在一次绕组中加上交变电压，产生交链一、二次绕组的交变磁通，在两绕组中分别感应电动势。

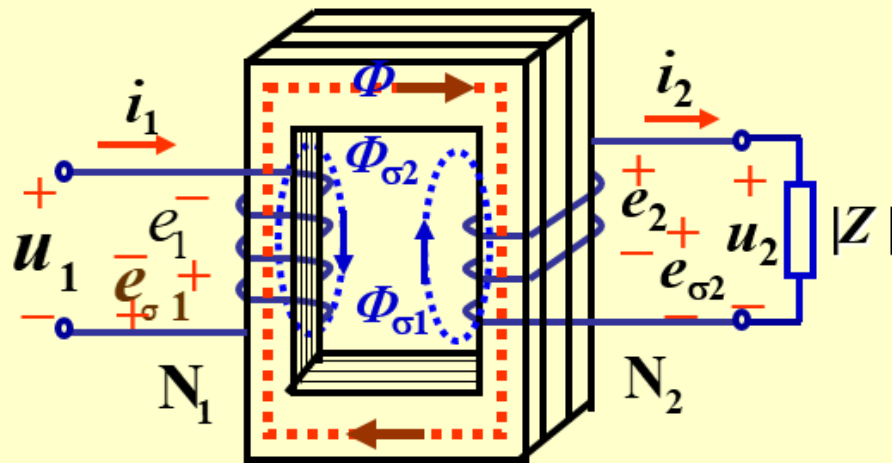
一次(原边)、二次(副边)绕组互不相连，能量的传递靠磁耦合。



电磁关系

原绕组（一次绕组或初级绕组）：
两个线圈中接交流电源的线圈，其匝数为 N_1

副绕组（二次绕组或次级绕组）：
接到用电设备上的线圈，其匝数为 N_2



$$u_1 \approx e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt};$$

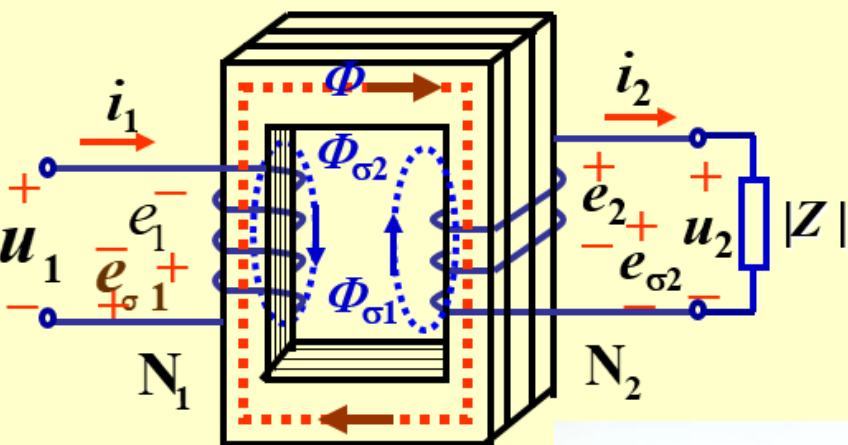
$$u_2 \approx e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

变压器原、副边电势之比及电压之比等于原、副边匝数之比。

磁通不能为常数，因此需要交流电。



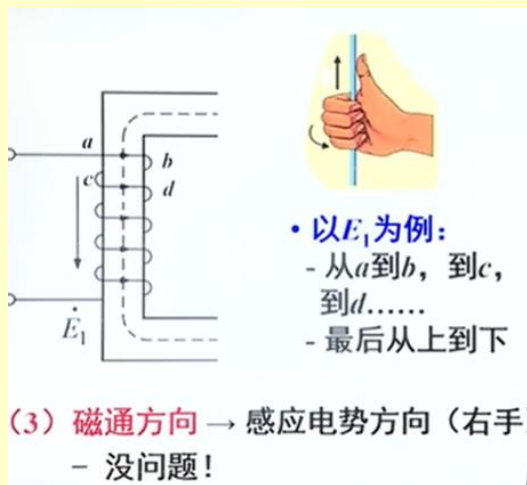
方向问题



$$u_1 \longrightarrow i_1 \longrightarrow \Phi$$

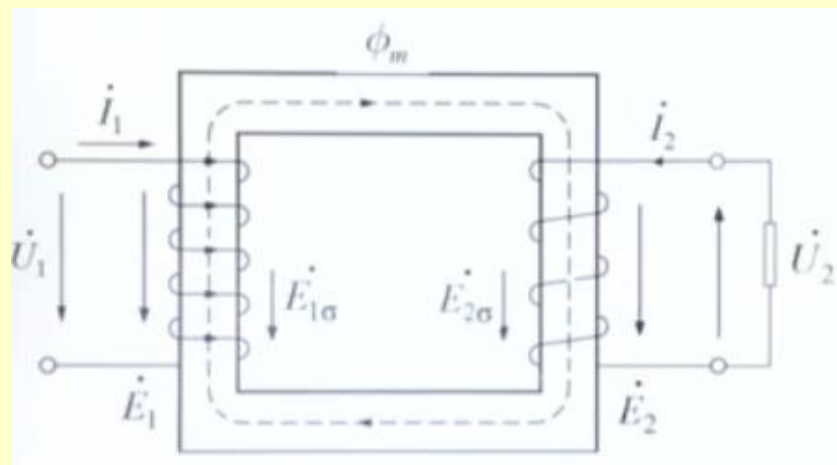
e_1 : 由 Φ 决定, 向下, 其电流与 i_1 反向, 上+下-

e_2 与 i_2 : 由 Φ 决定, 向下, 电源, 上+下-

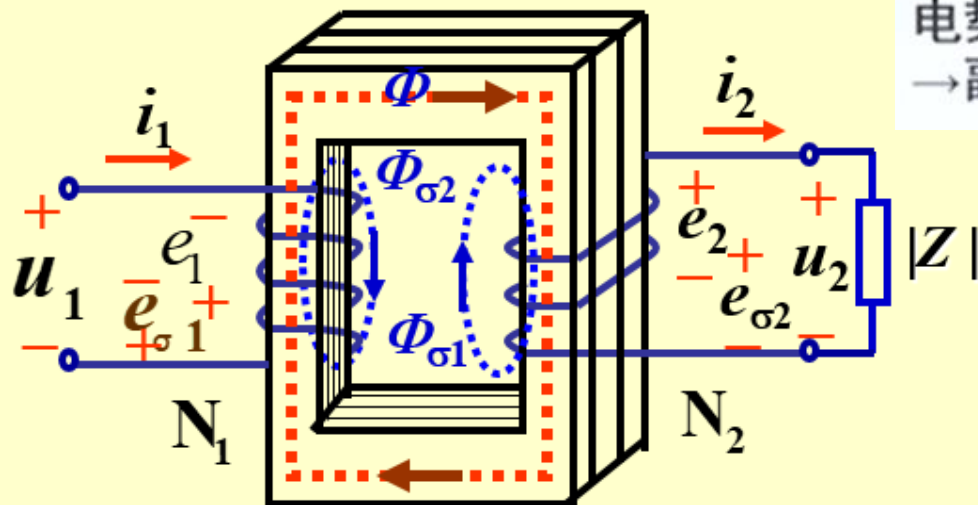


惯例正方向

- (1) 电压方向 \rightarrow 电流方向
- (2) 电流方向 \rightarrow 磁通方向 (右手)
- (3) 磁通方向 \rightarrow 电势方向 (右手)



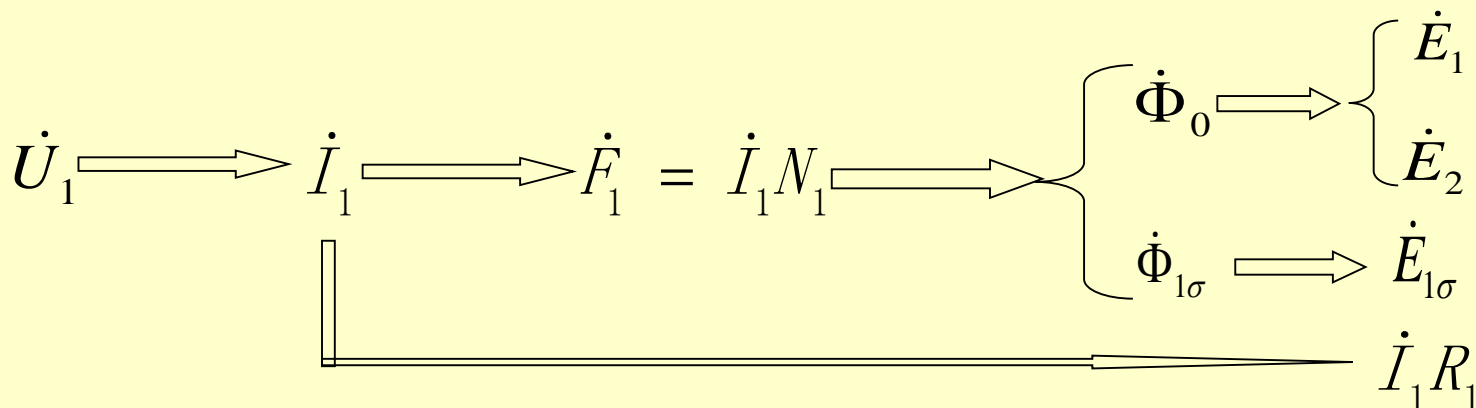
电磁关系



原端线圈加电压 → 电流 i_1 (**电阻上铜损**)
 → 磁势 F_1 → 磁场、磁通 (主、**漏磁通**) →
 电势 (原端、副端, 必须交变, **铁芯铁损**)
 → 副端电流 i_2 (**电阻上铜损**) → 电磁平衡

无用的因素

- (1) **铜损**--原因: 有电流, 绕组有电阻
- (2) **铁损**--原因: 有磁通, 铁心有磁阻
- (3) **漏磁**--原因: 有磁通, 耦合度不够



运行时的物理情况

主磁通与漏磁通的区别

主磁通和电流非线性关系
(介质是**铁芯**)
漏磁通和电流线性关系
(介质是**空气**)

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad e_1: \text{主磁通}\Phi \text{在原绕组内感应电动势的瞬时值;}$$
$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad e_2: \text{主磁通}\Phi \text{在副绕组内感应电动势的瞬时值;}$$
$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} \quad e_{1\sigma}: \text{漏磁通}\Phi_{1\sigma} \text{在原绕组内感应电动势的瞬时值;}$$

- 1) 性质上: Φ 与 I_1 成非线性关系 (饱和); I_1 与 $\Phi_{1\sigma}$ 成线性关系;
- 2) 数量上: Φ_0 占80%以上, $\Phi_{1\sigma}$ 仅占20%以下;
- 3) 作用上: Φ_0 起传递能量的作用, $\Phi_{1\sigma}$ 起**漏抗**压降作用 (坏作用)。

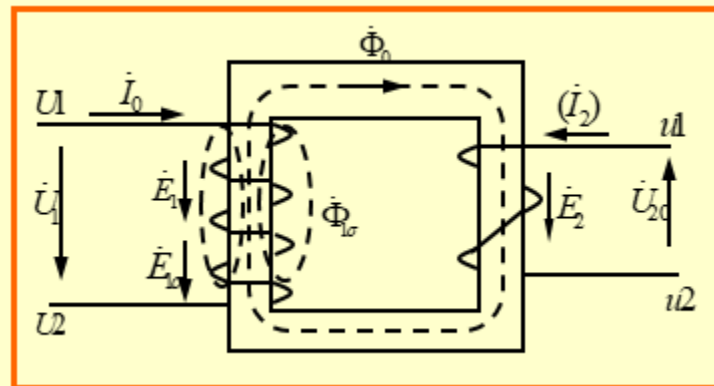


1.2 单相变压器的空载运行

感应电 动势分析

所有的电势:

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \\ e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} \end{cases}$$



1、主磁通感应的电动势——主电动势

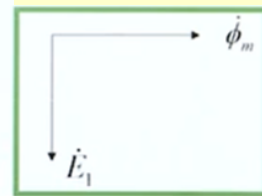
设 $\Phi_0 = \Phi_m \sin \omega t$

则 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = 2\pi f_1 N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$

有效值 $E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m$

相量 $\dot{E}_1 = -j4.44 f_1 N_1 \dot{\Phi}_m$

注意: 有个负号!
主磁通是峰值!
方向: 滞后于主磁通90度



$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$$

主电动势: 当主磁通按正弦规律变化时, 原边主电动势也按正弦变化, 时间相位滞后90度。主电动势的大小与电源频率、绕组匝数及主磁通的**最大值**成正比。

主磁通: 取决于电网电压、频率与匝数, 与负载大小基本无关, 是“**恒磁通**”。



1.2 单相变压器的空载运行

同理，二次主电动势也有同样的结论。

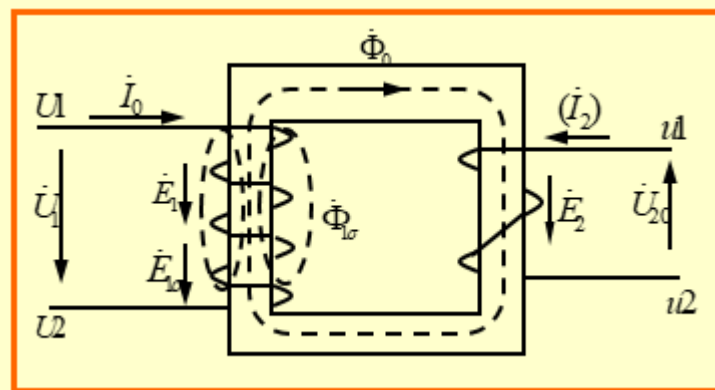
副边绕组链接同一磁链，副边电动势幅值：

$$E_{2m} = N_2 \omega \phi_m$$

有效值：
$$E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = 4.44 f_1 N_2 \phi_m$$

相量表示：
$$\dot{E}_2 = -j4.44 f_1 N_2 \dot{\phi}_m$$

注意：有个负号！
主磁通是峰值！
方向：滞后于主磁通90度



1.2 单相变压器的空载运行

感应电动势分析

2、漏磁通感应的电动势——漏电动势

根据主电动势的分析方法，同样有

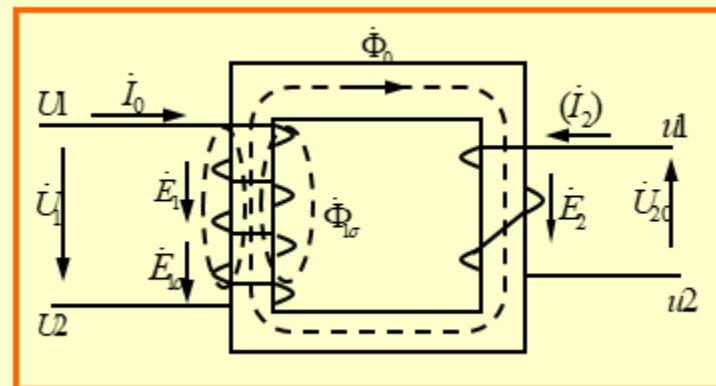
$$E_{1\sigma} = 4.44 f N_1 \Phi_{1\sigma m}$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m}$$

漏电动势也可以用漏抗压降来表示，即

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -j \dot{I}_0 X_{1\sigma}, \quad X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma} \quad \text{漏电抗}$$

由于漏磁通主要经过非铁磁路径，磁路不饱和，故磁阻很大且为常数，所以漏电抗 $X_{1\sigma}$ 很小且为常数，它不随电源电压负载情况而变。



重要结论1:

- 原方绕组的漏电抗表征的是漏磁通对电流的关系，与匝数和几何尺寸有关，对一个做好了的变压器，是定值，不变的!



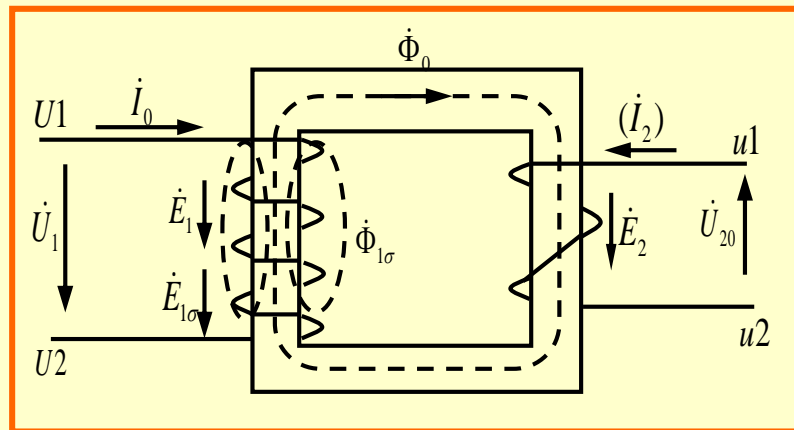
1.2 单相变压器的空载运行

空载时的电动势方程、等效电路和相量图

一、电动势平衡方程和变比

1、电动势平衡方程

(1) 一次侧电动势平衡方程



$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_{1\sigma} = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_0$$

其中 $Z_1 = r_1 + jx_1$ 原端绕组漏阻抗

r_1 : 原端绕组电阻

x_1 : 原端绕组漏电抗

稳态以后表示为相量:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1$$

主电动势

漏抗电势

空载电流

忽略很小的漏阻抗压降，并写成有效值形式，有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad \Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$$

(2) 二次侧电动势平衡方程 $\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$

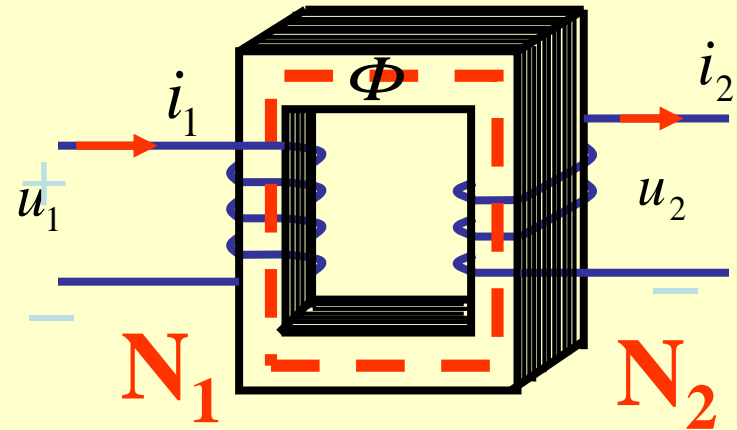


1.2 单相变压器的空载运行

2、变比

$$U_{1N} \approx E_1$$
$$U_{2N} \approx E_2$$
$$\frac{U_{1N}}{U_{2N}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 N_1 f_1 \phi_m}{4.44 N_2 f_1 \phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

- k : 变比, 匝数之比



重要结论2:

- 只要两边匝数不同, 对应的电压就不同, 就能变压!

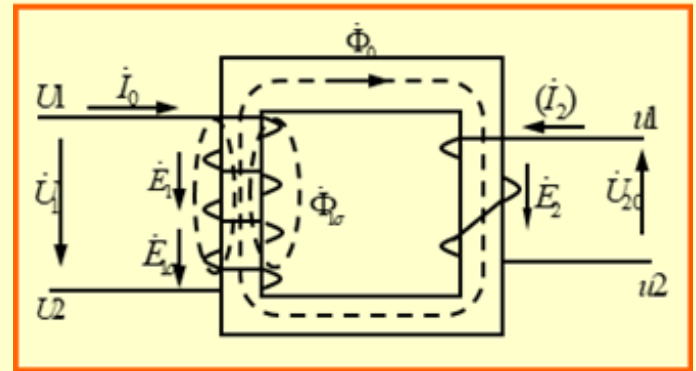


1.2 单相变压器的空载运行

空载电流 I_0

空载运行时原边绕组中流过的电流

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_{1\sigma} = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_0\end{aligned}$$



大小

- $I_0 = (2 \sim 10\%) I_N$
空载不太费电

相位

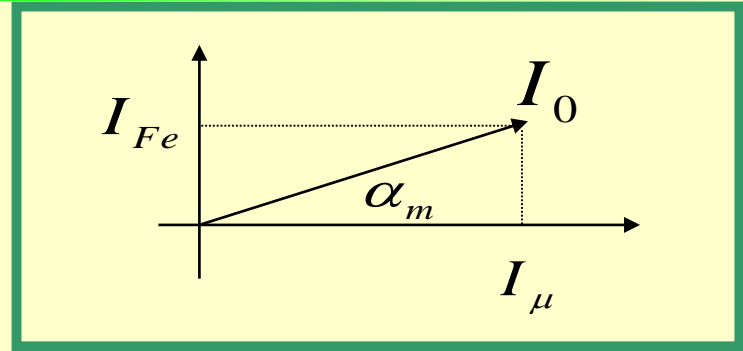
- 近似与主磁通同相，超前一个 α 角
- “铁损角”



1.2 单相变压器的空载运行

空载电流

1、作用与组成



空载电流 i_0 包含两个分量，一个是励磁分量，作用是建立磁场，产生主磁通——分量 i_μ ；另一个是铁损耗分量，作用是供变压器铁心损耗——分量 i_{Fe} 。

2、性质和大小

性质： 由于空载电流的 i_μ 分量远大于 i_{Fe} 分量，所以空载电流主要是感性性质——也称励磁电流；

大小： 与电源电压和频率、线圈匝数、磁路材质及几何尺寸有关



1.2 单相变压器的空载运行

空载电流

3、波形

由于磁路饱和，空载电流 i_0 与由它产生的主磁通 Φ_0 呈非线性关系。

- 当磁通按正弦规律变化时，空载电流呈尖顶波形。
- 当空载电流按正弦规律变化时，主磁通呈平顶波形。

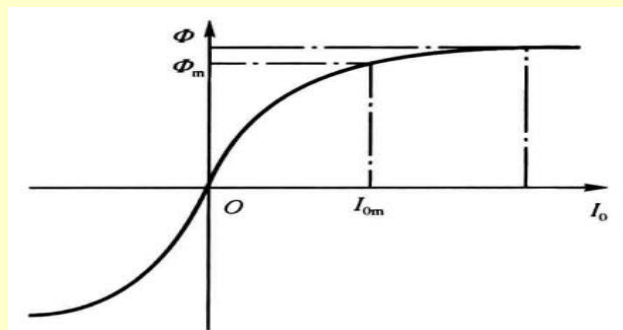
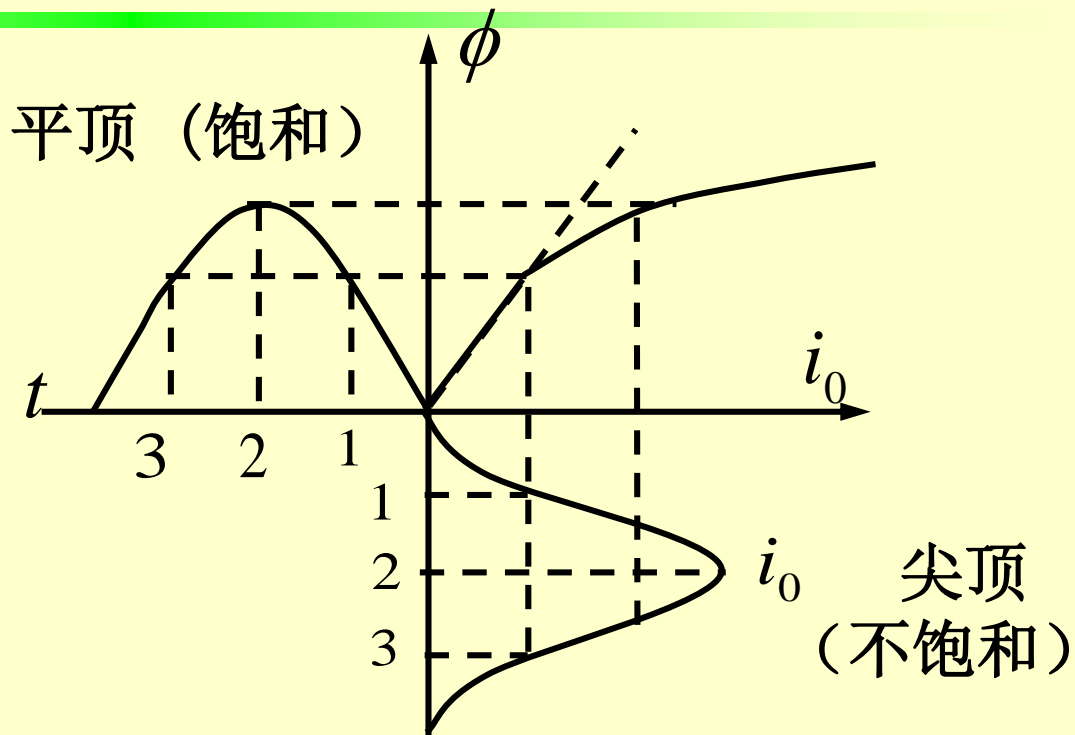


图 2-3 变压器的磁化曲线



1.2 单相变压器的空载运行

二、空载时的等效电路和相量图

1、等效电路

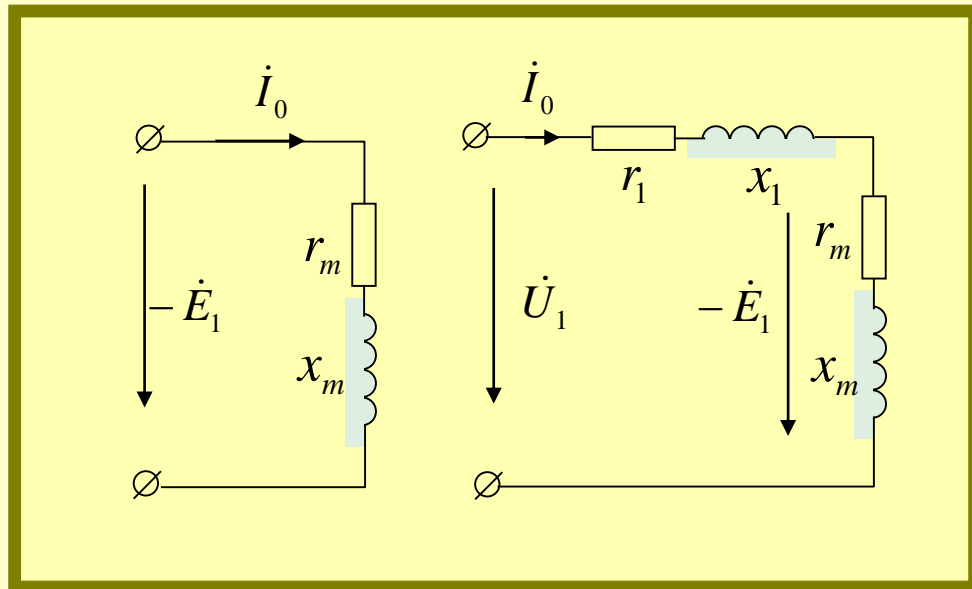
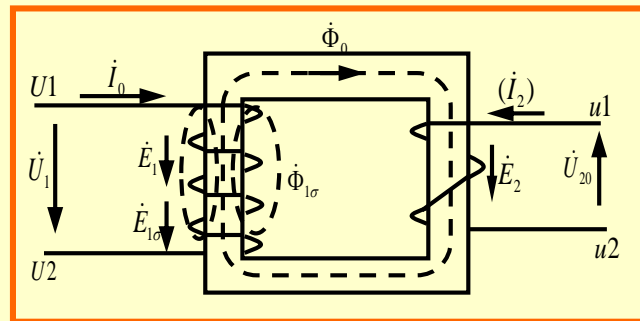
主磁通 $\dot{\Phi}$ 感应的 \dot{E}_1 用电抗压降表示，由于 $\dot{\Phi}$ 在铁心中引起电抗 X_m 与电阻 R_m ，铁心阻抗为 $R_m + jX_m$ ，可等效为：

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m) = -\dot{I}_0 Z_m$$

一次侧的电动势平衡方程为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \\ &= (R_m + jX_m)\dot{I}_0 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_0 \end{aligned}$$

空载时等效电路为

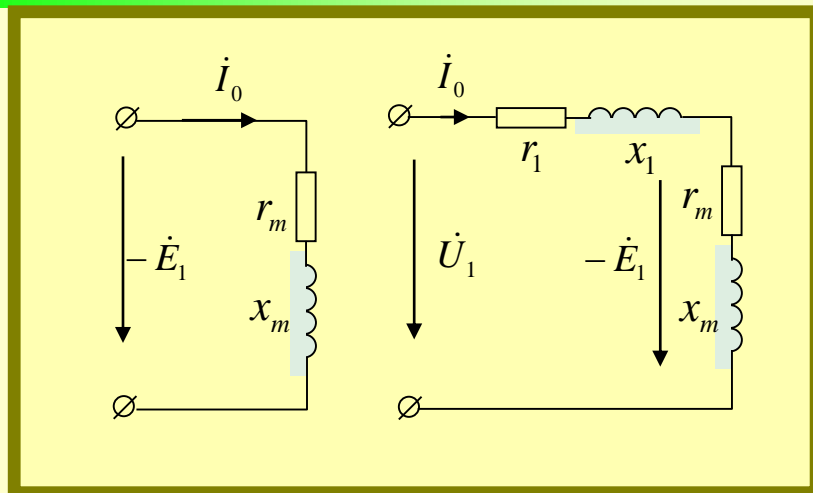


1.2 单相变压器的空载运行

二、空载时的等效电路和相量图

1、等效电路

一点说明



R_m, X_m, Z_m - 励磁电阻、励磁电抗、励磁阻抗。由于磁路具有饱和特性，所以 $Z_m = R_m + jX_m$ 不是常数，随磁路饱和程度增大而减小。

由于 $R_m \gg R_1, X_m \gg X_1$ ，所以有时忽略漏阻抗，空载等效电路只是一个 Z_m 元件的电路。在 U_1 一定的情况下， I_0 大小取决于 Z_m 的大小。从运行角度讲，希望 I_0 越小越好，所以变压器常采用高导磁材料，增大 Z_m ，减小 I_0 ，提高运行效率和功率因数。



1.2 单相变压器的空载运行

二、空载时的等效电路和相量图

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_0$$

2、相量图

根据前面所学的方程，可作出变压器空载时的相量图：

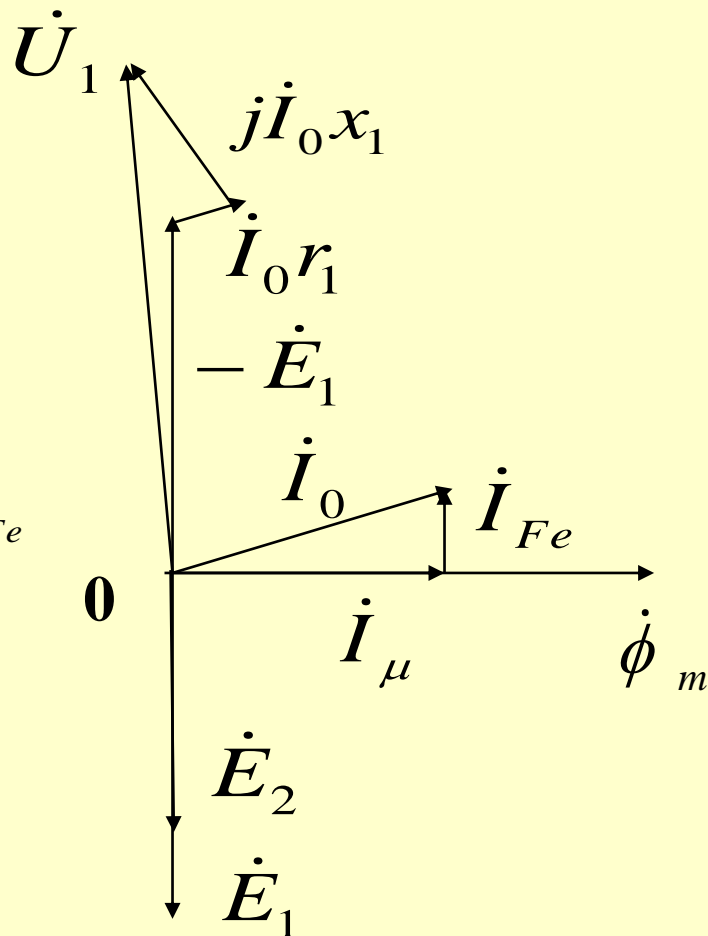
(1) 以 $\dot{\Phi}_m$ 为参考相量

(2) \dot{I}_μ 与 $\dot{\Phi}_m$ 同相， \dot{I}_{Fe} 滞后 90° ， $\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$

(3) \dot{E}_1, \dot{E}_2 滞后 $\dot{\Phi}_m$ 90° ， $-\dot{E}_1$ ；

(4) $R_1 \dot{I}_0, j\dot{I}_0 X_1$

(5) \dot{U}_1



1.2 单相变压器的空载运行

小结

(1) 一次侧主电动势与漏阻抗压降总是与外施电压平衡, 若忽略漏阻抗压降, 则一次主电势的大小由外施电压决定。

(2) 主磁通大小由电源电压、电源频率和一次线圈匝数决定, 与磁路所用的材质及几何尺寸基本无关。

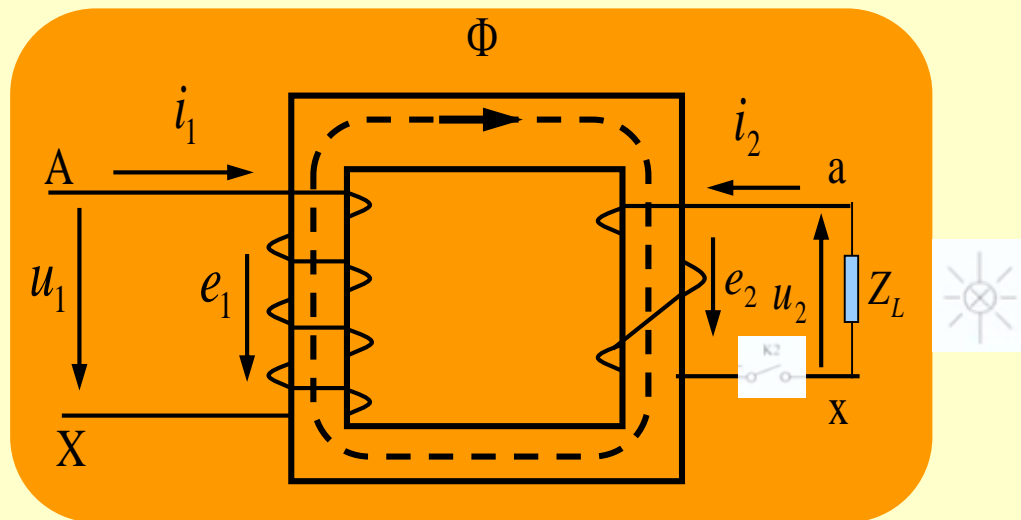
(3) 空载电流大小与主磁通、线圈匝数及磁路的磁阻有关, 铁心所用材料的导磁性能越好, 空载电流越小。

(4) 电抗是交变磁通所感应的电动势与产生该磁通的电流的比值, 线性磁路中, 电抗为常数。



1.3 单相变压器的负载运行

变压器一次侧接在额定频率、额定电压的交流电源上，二次接上负载的运行状态，称为负载运行。



- 原端空载运行稳态后合K₂
- 副端灯亮，得到能量

变化过程

- $i_2 \uparrow$ ($F_2 \neq 0$)，总的磁势变化
- 磁通、电势、电流变化
- 最后：电磁平衡
- 原端： $i_0 \rightarrow i_1$

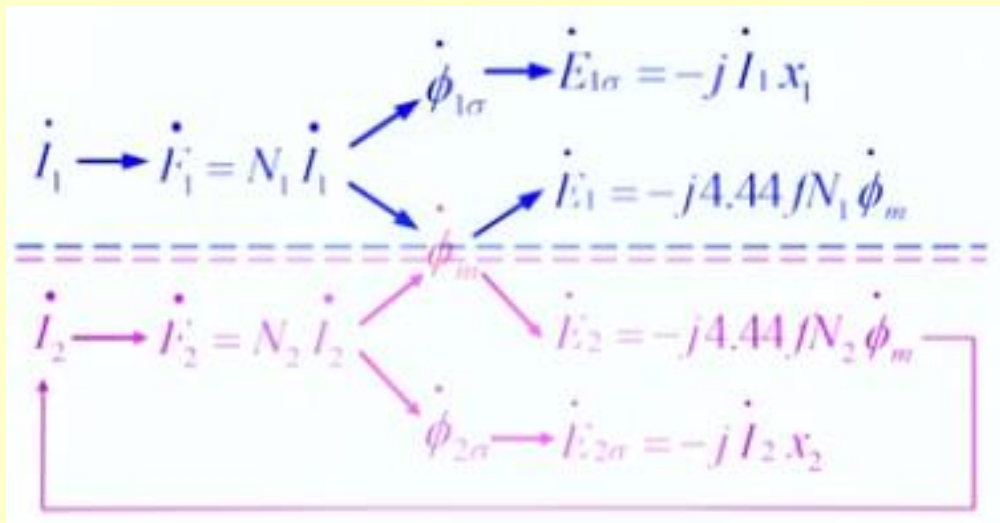
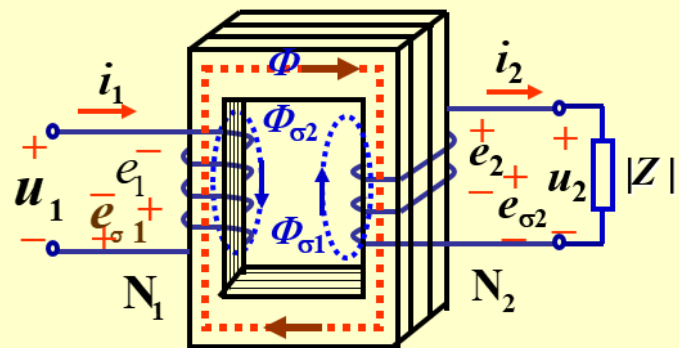
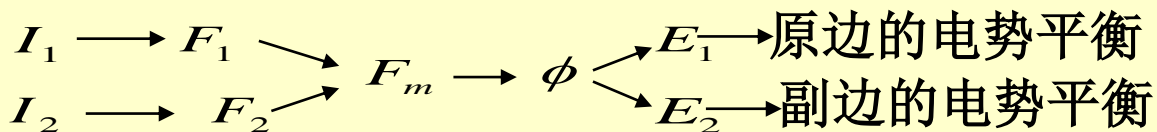
i_1 变大？变小？



1.3 单相变压器的负载运行

一、负载运行的电磁关系

负载运行时，电路、磁路的工作情况



副端参数的变化

我们关心的问题:

- (1) $i_2 = ?$
- (2) $u_2 = ?$
- (3) $p_2 = ?$ 如何传递的?



1.3 单相变压器的负载运行

电磁关系

(1) $i_2 = ?$

忽略了漏阻抗压降，主磁通不变

$$E_1 \approx U_1 = const$$

$$\Rightarrow \phi_m \approx const$$

--恒磁通的概念

• 闭合磁路上

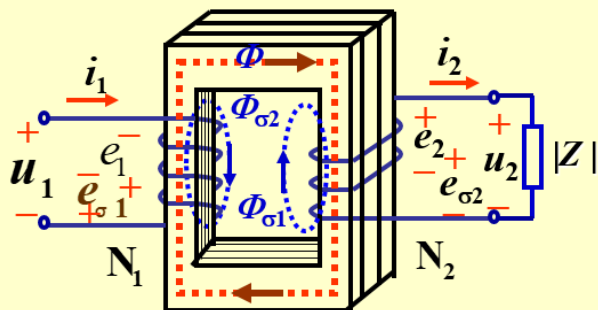
$$\sum \Phi_m R_m = \sum F \Rightarrow \sum F = 常数$$

$$F_1 + F_2 = F_0 \quad \text{负载=空载}$$

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

$$i_1 + \frac{1}{k} i_2 = i_0$$

当 $I_0=0$ 时，可推导得到 $I_1 / I_2 = N_2 / N_1 = 1/k$



• 假设原端电流中增加一个负载分量：

$$i_1 = i_0 + i_{1L} \Rightarrow \begin{cases} i_{1L} N_1 + i_2 N_2 = 0 \\ i_2 = -k i_{1L} \end{cases}$$

• 注意： I_1 中 I_{1L} 占绝对大的比例！

• 结论：

(1) 原副端电流是有联系的！

(2) 负载以后，原端电流上升很多！

- 符合能量守恒定律的

从空载到负载，原边绕组电流 i_1 增加一个分量 i_{1L} 以平衡副边绕组的作用，

$$i_{1L} \neq i_2$$

I_0 : 空载时原边电流;
 I_1 : 负载时原边电流;
 I_{1L} : 负载时副边在原边的电流部分。

原边绕组从电网吸收的功率传递给副边绕组。副边绕组电流增加或减小的同时，引起原边电流的增加或减小，吸收的功率也增大或减小。



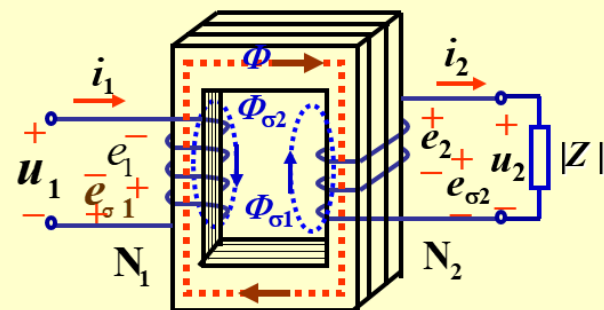
1.3 单相变压器的负载运行

电压平衡式

原边: $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_1 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 x_{1\sigma} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$

副边: $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2\sigma} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 x_{2\sigma} = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$

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



(2) $u_2 = ?$

- 副端电压方程式:

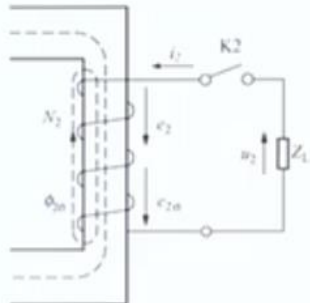
$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 + \dot{E}_{2\sigma} - \dot{I}_2 r_2 \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \end{aligned}$$

- 其中 $Z_2 = r_2 + jx_2$

副端绕组漏阻抗, 固有参数
性质和原端的一样

- 电压数值大小:

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



(3) $p_2 = ?$ 如何传递的?

$$p_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2 \approx \dot{E}_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_2 (-k \dot{I}_{1L})$$

$$= (-\dot{E}_1) (\dot{I}_{1L}) \approx \dot{U}_1 \dot{I}_{1L} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1L}$$

$$= \dot{U}_1 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_0$$

- 结论:

副边绕组的能量是原边绕组从电网吸收来的, 再传递过去的

- 问题: 能量是谁传递过去的?

✓ 无名英雄是主磁通, 最辛苦!!



1.3 单相变压器的负载运行

二、负载运行时的方程式

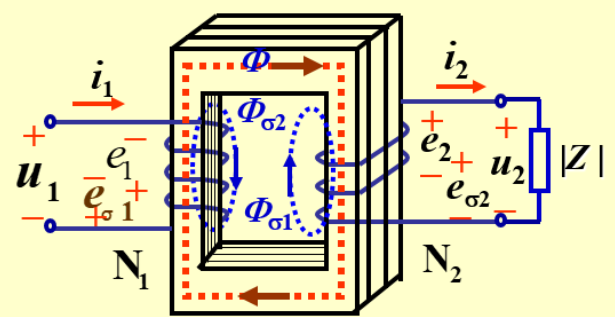
- “基本方程式组”
- 按照方程的类别列
 - 6个方程

- | | | |
|---------|---|----|
| 原端电压方程式 | } | 基本 |
| 副端电压方程式 | | |
| 原副端电势联系 | } | 联系 |
| 原副端磁势联系 | | |
| 激磁方程 | } | 特殊 |
| 负载方程 | | |

变压器负载运行的基本方程组:

$$\begin{cases}
 \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\
 \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\
 \dot{E}_1 = k \dot{E}_2 \\
 \dot{I}_1 + \frac{1}{k} \dot{I}_2 = \dot{I}_m \\
 -\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m \\
 \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L
 \end{cases}$$

- I_0 用 I_m 表示!
 - 已知的:
 $U_1, Z_1, Z_2, k, Z_m, Z_L$
 - 要求的:
 $I_1, I_2, E_1, E_2, I_m, U_2$
 - 正好可以求出唯一解



六元一次常系数线性的代数方程组。



1.4 变压器的等效电路

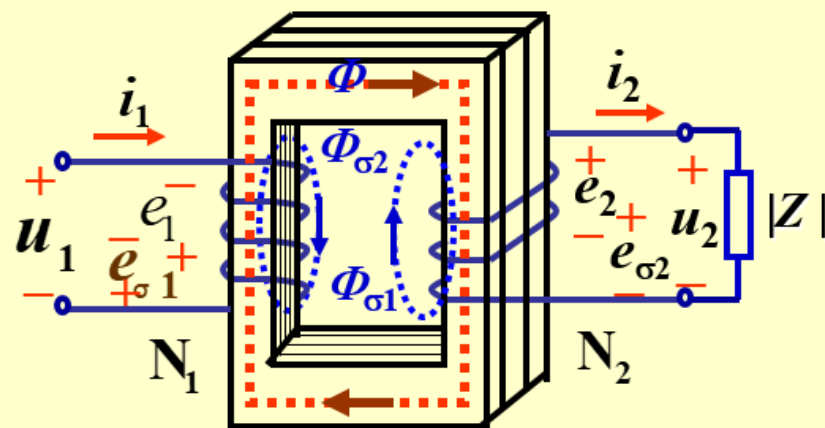
变压器的基本方程（有载时）：

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

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

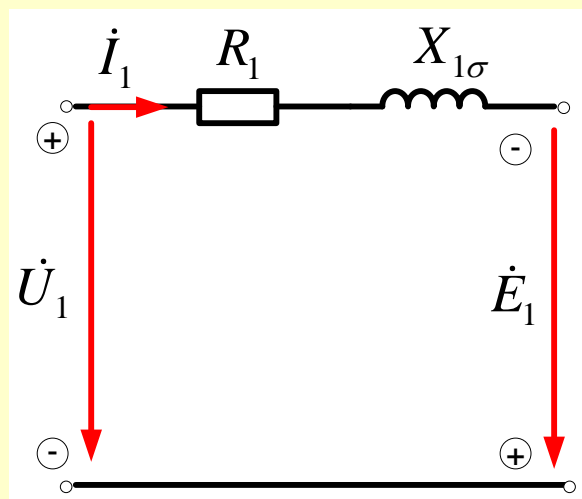
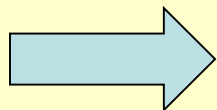
$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = k$$

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



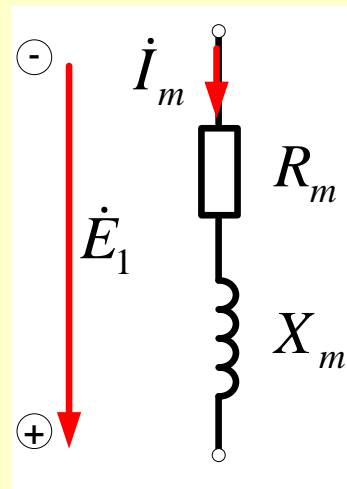
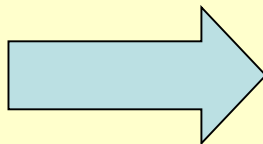
1.4 变压器的等效电路

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



一次侧
绕组等
效电路

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



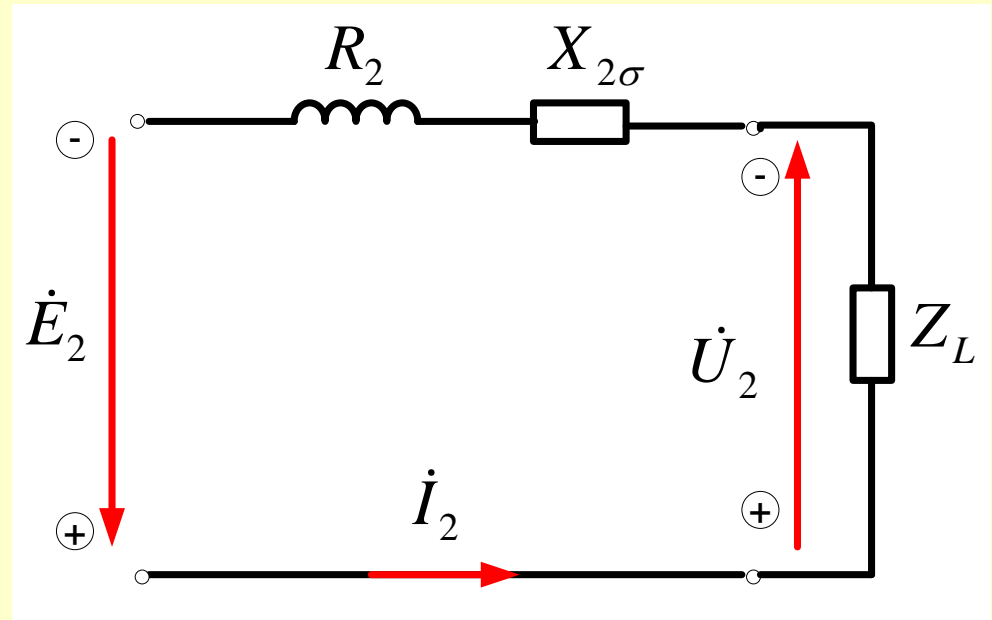
激磁电路



1.4 变压器的等效电路

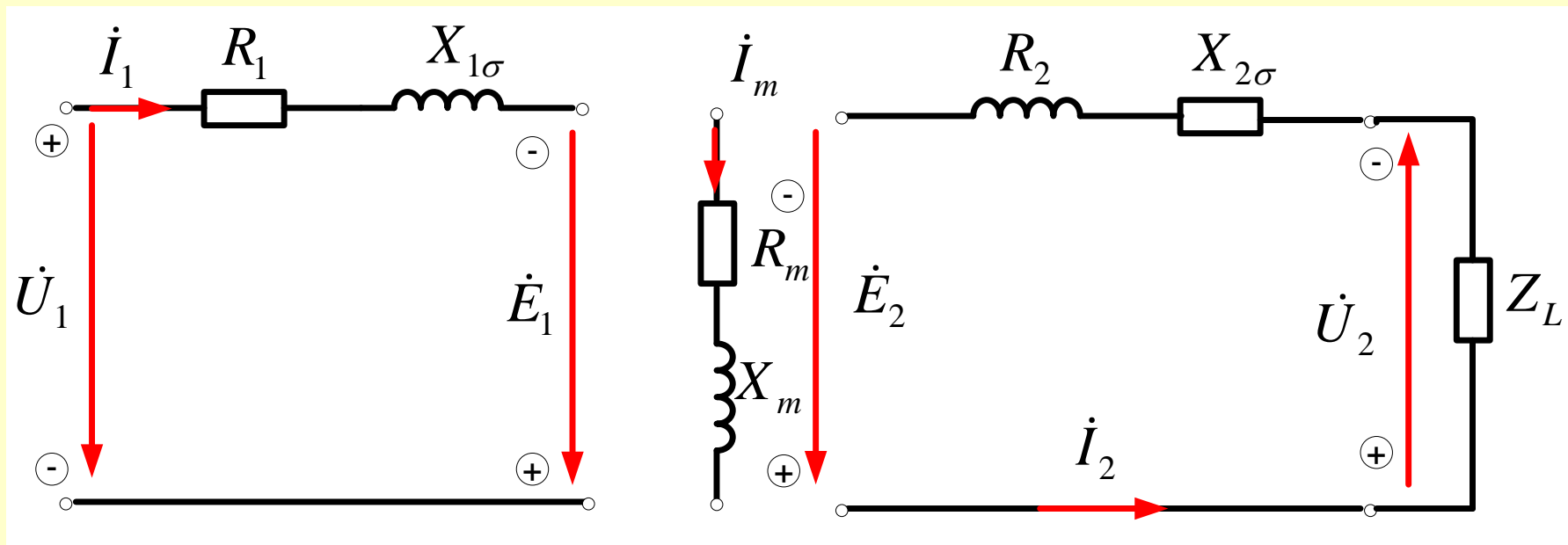
二次侧绕组等效电路

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



1.4 变压器的等效电路

三、绕组归算



一次侧绕组等效电路

激磁电路

二次侧绕组等效电路

使新的二次绕组的电势等于一次绕组的电势，即

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$



1.4 变压器的等效电路

什么是绕组归算？

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。



1.4 变压器的等效电路

由于主磁通不变，因而：

$$\text{令 } \dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

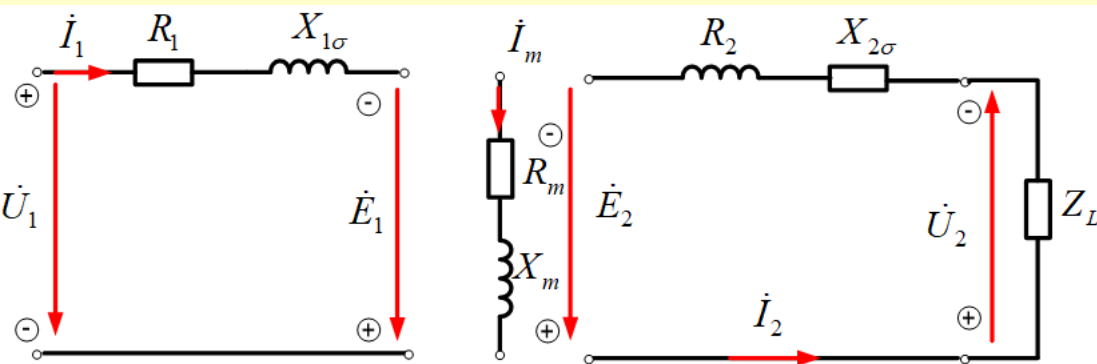
$$\frac{\dot{E}'_2}{\dot{E}_2} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

$$\dot{E}'_2 = k\dot{E}_2$$

由磁动势不变可以得到：

$$N_1 \dot{I}'_2 = N_2 \dot{I}_2$$

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



1.4 变压器的等效电路

现在看（副边）方程式的变化：

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

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

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

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

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

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

$$\dot{U}'_2 = k\dot{U}_2$$

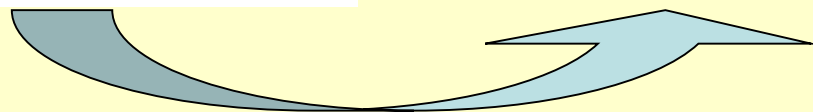
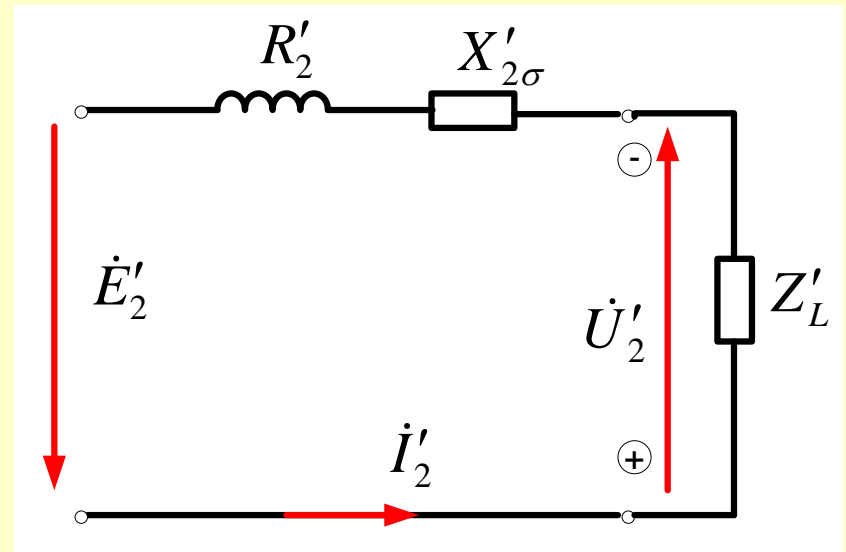
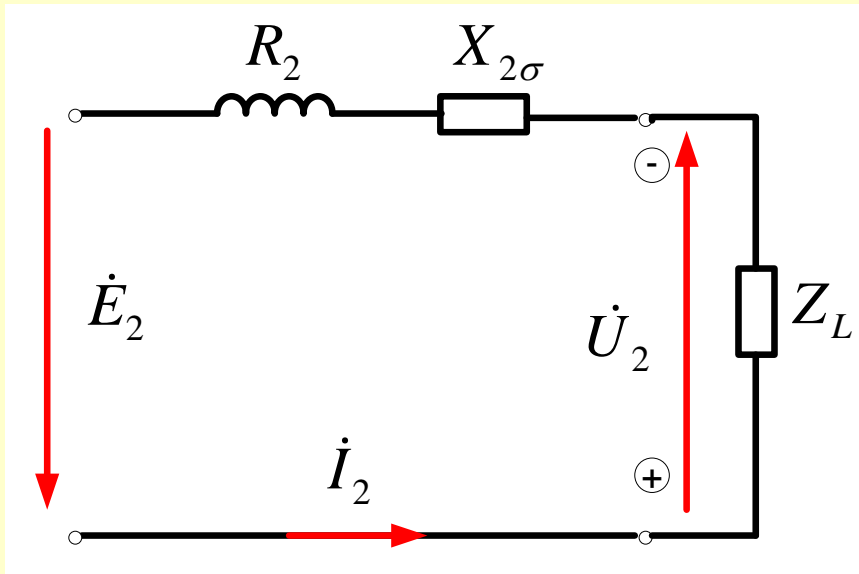
$$\dot{i}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{i}_2 = \frac{1}{k} \dot{i}_2$$



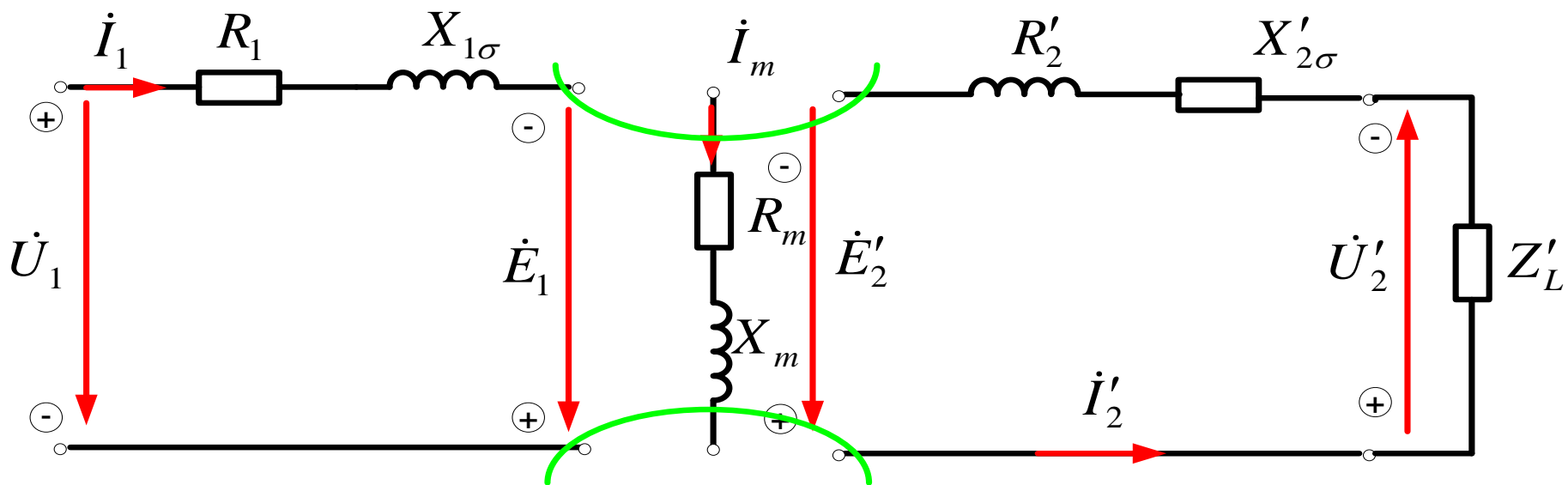
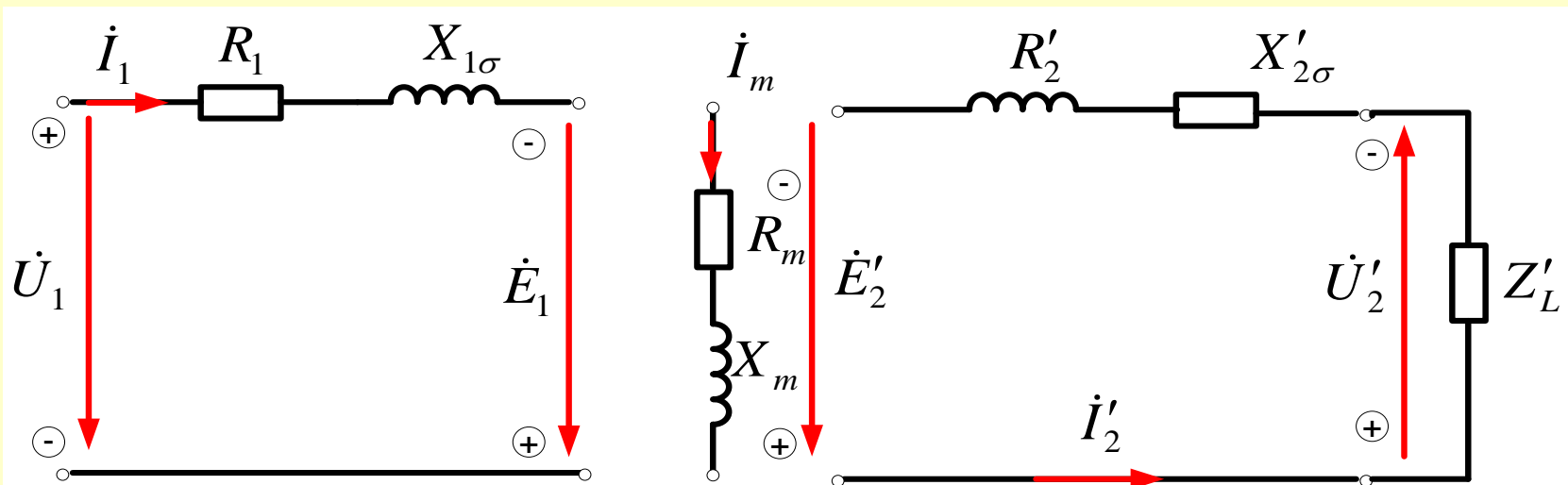
1.4 变压器的等效电路

得到:

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



1.4 变压器的等效电路



1.4 变压器的等效电路

四、归算后，变压器的基本方程为：

副边绕组经折算后，原来的基本方程成为：
(无变比k)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

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

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L$$

1. 副边电流的折算值

$$\dot{i}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{i}_2 = \frac{1}{k} \dot{i}_2$$

2. 副边电动势的折算值

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

3. 副边漏电抗的折算值

$$x'_{2\sigma} = k^2 x_{2\sigma}$$

4. 副边电阻的折算值

$$r'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2$$

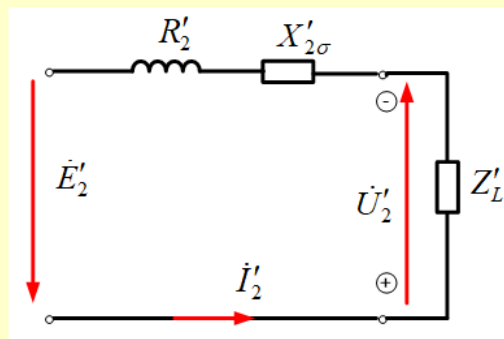
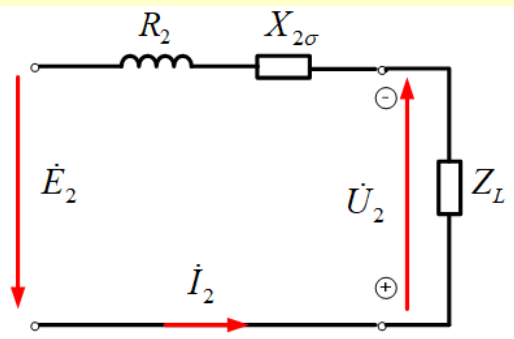
$$Z'_{2\sigma} = r'_2 + jx'_{2\sigma} = k^2 Z_{2\sigma}$$

5. 副边电压的折算值

$$\dot{U}'_2 = k \dot{U}_2$$

6. 副边阻抗的折算值

$$Z'_L = k^2 Z_L$$



1.4 变压器的等效电路

五、归算后，T型等效电路

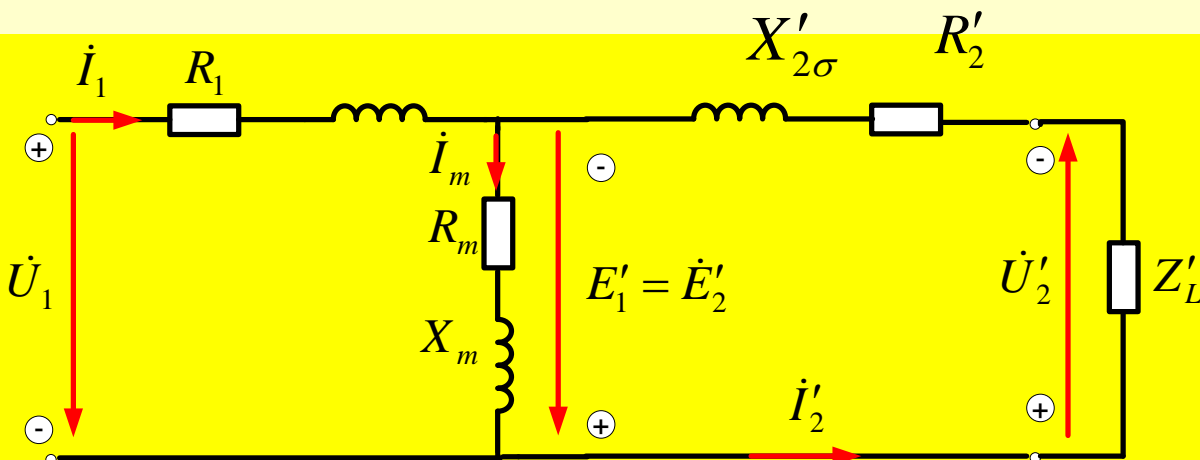
(1) 电路中全部的量 and 参数都是每一相的值。原边为实际值，副边为折算值。

(2) 等效的是稳态对称运行状态。

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

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

$$\dot{U}'_2 = k \dot{U}_2$$



折算法只是一种分析的方法。凡是单位为伏的物理量（电动势、电压）的折算值等于原来数值乘k；单位为欧的物理量（电阻、电抗、阻抗）的折算值等于原来数值乘k²；电流的折算值等于原来的数值乘以1/k。

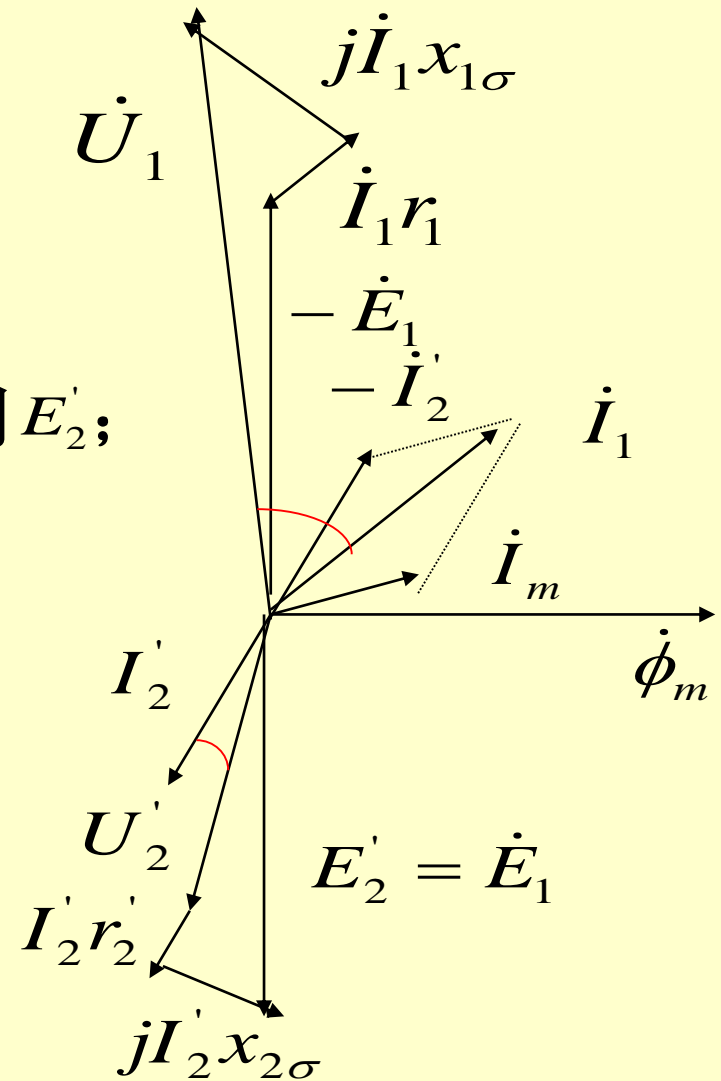


1.4 变压器的等效电路

负载下相量图的画法

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

- (1) 画出 U_2' 、 I_2' ；
- (2) 在 U_2' 相量上加上 $I_2'r_2' + jI_2'x_2'$ 得到 E_2' ；
- (3) $E_2' = \dot{E}_1$
- (4) 画出领先 \dot{E}_1 90° 的主磁通 $\dot{\phi}_m$ ；
- (5) 根据 $\dot{i}_m = -\dot{E}_1 / Z_m$ 画出 \dot{i}_m ，
领先 $\dot{\phi}_m$ 一个铁耗角了；
- (6) 画出 $-\dot{i}_2'$ 与 \dot{i}_m 的相量和 \dot{i}_1 ；
- (7) 画出 $-\dot{E}_1$ ，加 $\dot{i}_1 r_1 + j\dot{i}_1 x_{1\sigma}$ 得到 \dot{U}_1



1.4 变压器的等效电路

功率因数

变压器原边电压 U_1 与电流 I_1 的夹角为 φ_1 ，称为变压器负载运行的功率因数角， $\cos \varphi_1$ 称为变压器的功率因数。

对于运行的变压器，负载的性质和大小直接影响了变压器功率因数的性质。



单相变压器基本方法总结

分析计算变压器负载运行方法有：

基本公式、等值电路和相量图。

基本方程式：是变压器的电磁关系的数学表达式；

等值电路：是基本方程式的模拟电路；

相量图：是基本方程的图示表示；

三者是统一的，一般定量计算用等效电路，讨论各物理量之间的相位关系用相量图。



1.5 变压器的运行

三、变压器的额定值（铭牌值）

- 是指使用变压器时，必须满足的一些条件，**如电压**
- 也是设计的依据
- 最主要的：
 - **额定容量**
 - **额定电压**
 - **额定电流**
 - **联接组号**



1.5 变压器的运行

- **额定容量 S_N** : 额定工作状态下的视在功率, 用伏安 (VA) 等表示。
- **额定电压 U_{1N}/U_{2N}** : U_{1N} 是电源加到一次绕组上的额定电压, U_{2N} 是一次绕组加上额定电压后二次绕组开路, 即空载时二次绕组的端电压。
- **额定电流 I_{1N} 、 I_{2N}** : 变压器额定容量分别除以原、副边额定电压所计算出来的线电流值。是变压器满载运行时, 一次、二次侧绕组允许的电流值。
- **额定频率**: 按我国规定, 工业用电 50Hz。



注意2个问题：

1. 额定电压对电器最重要！！！！

- 否则会烧毁设备！






✓ 要求：一定按照额定值使用变压器！
否则后果很严重！






2. 各国电源标准不同

- 注意尺寸大小转换
- 注意接线形式转换

国家	中国	韩国	日本	美国/ 加拿大	欧洲
电压 标准	220V 50Hz	220V 60Hz	100V 50/60Hz	120V 60Hz	230V 50Hz

各国电源插座简图

代号	A	B	C	D	E
简图					
主要采用国家	中国 美国 日本	美国	欧洲 意大利	欧洲	欧洲

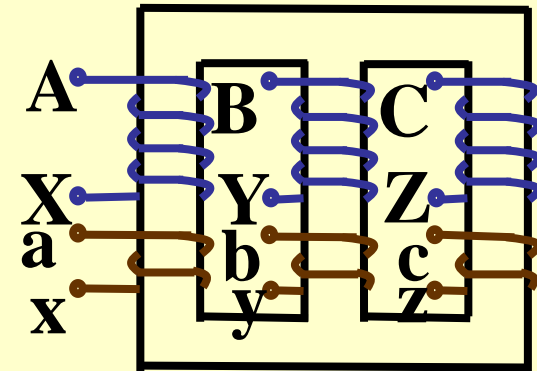
代号	F	G	H	I	J
简图					
主要采用国家	丹麦	瑞士	意大利	美国 南非	英国



1.5 变压器的运行

- 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）

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{一次侧输入功率: } P_1 = U_1 I_1 \cos \phi_1 \\ \text{输出功率: } P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi \\ P_1 = \frac{P_2}{\eta} \end{array} \right.$$

效率

容量 $S_N \neq$ 输入功率 P_1

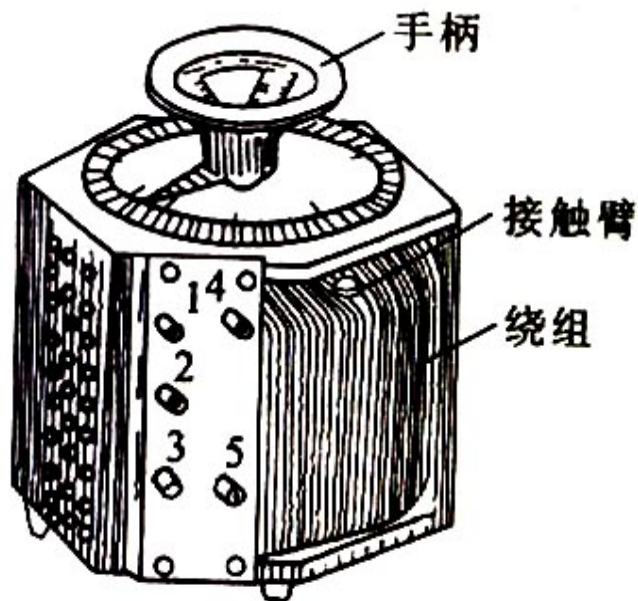
一次侧输入功率 $P_1 \neq$ 输出功率 P_2



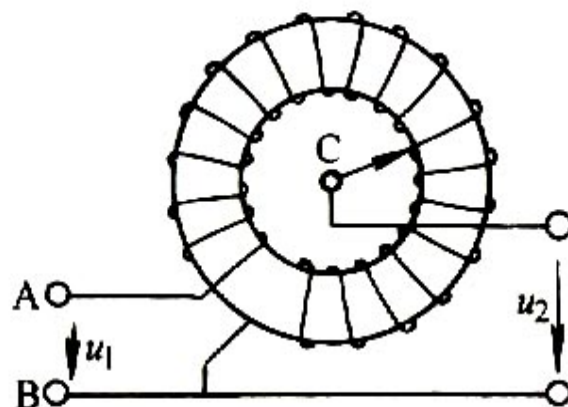
2. 变压器不同场合的应用

自耦调压器

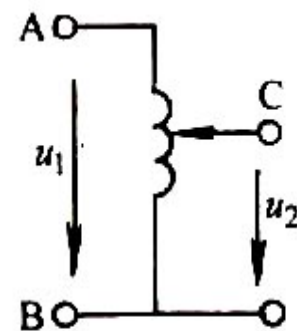
低压小容量的自耦变压器，其二次绕组的接头C常做成沿线圈自由滑动的触头，它可以平滑地调节自耦变压器的二次绕组电压，这种自耦变压器称为自耦调压器。



a) 外形图



b) 电路原理图

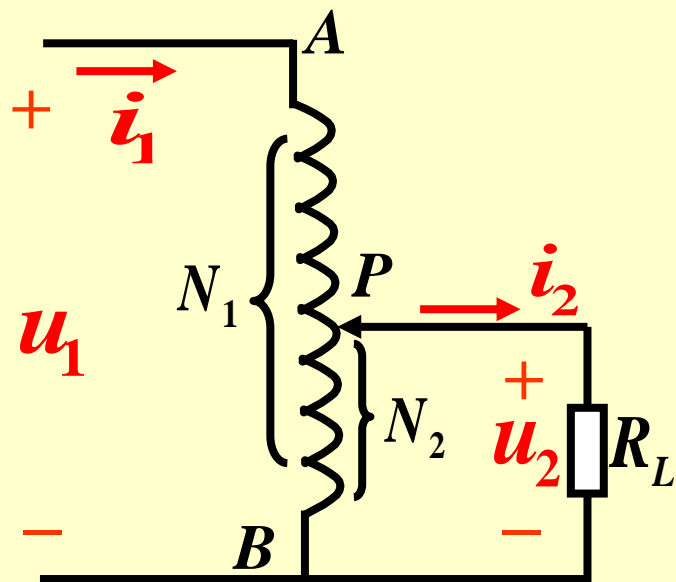


2. 变压器不同场合的应用

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。**



2. 变压器不同场合的应用

自耦变压器的特点

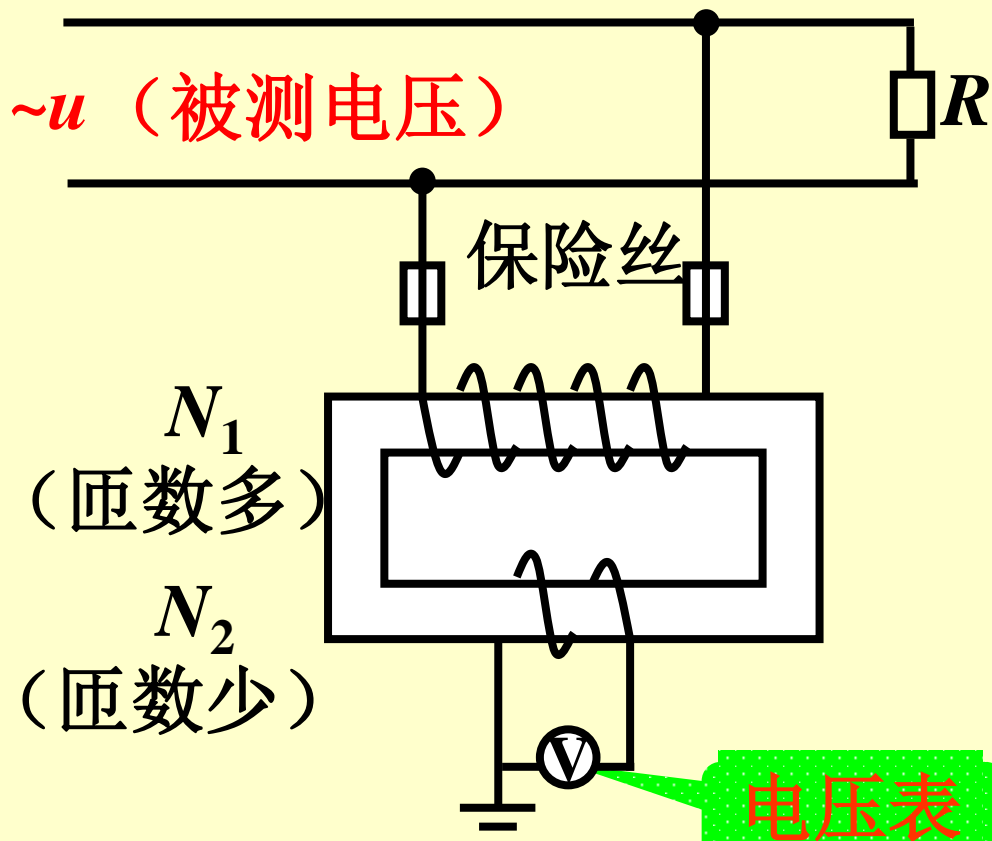
自耦变压器具有结构简单、节省用铜量、其效率比一般变压器高等优点。

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。



2. 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:

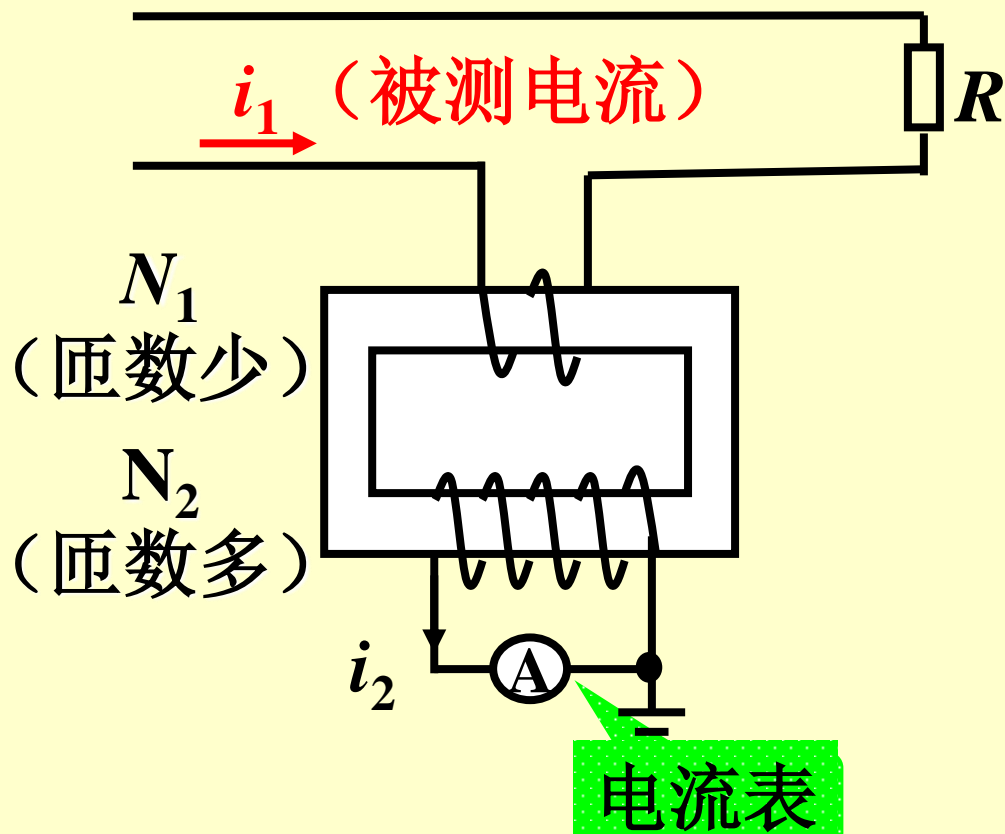
1. 二次侧不能短路，以防产生过流；
2. 铁心、低压绕组的一端接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现高压。

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



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。

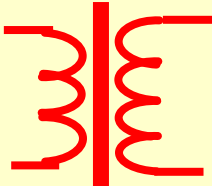
$$\text{被测电流} = \text{电流表读数} \times N_2 / N_1$$



2. 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



输电线
220kV

升压



变电站
10kV



降压

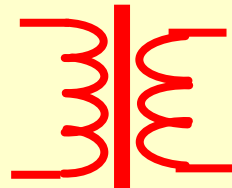
降压

...



实验室
380 / 220V

降压



仪器
36V

降压



2. 变压器不同场合的应用

日常生活中使用的变压器

生活中需要各种电压的交流或直流电

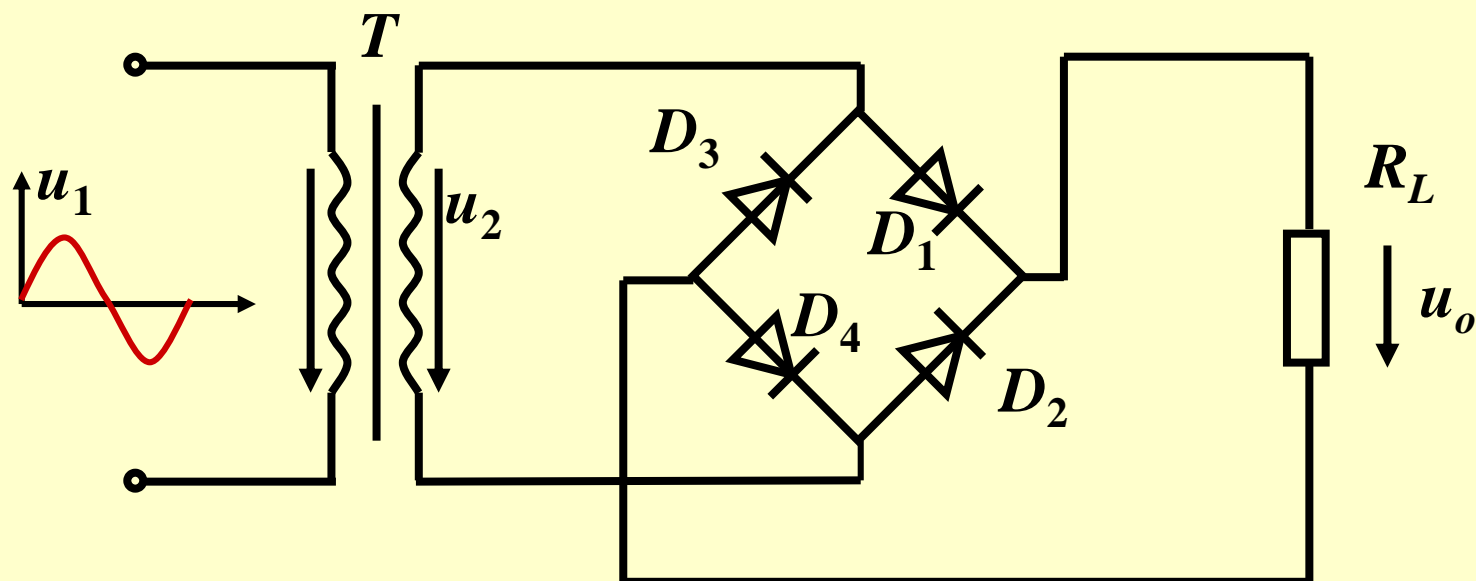
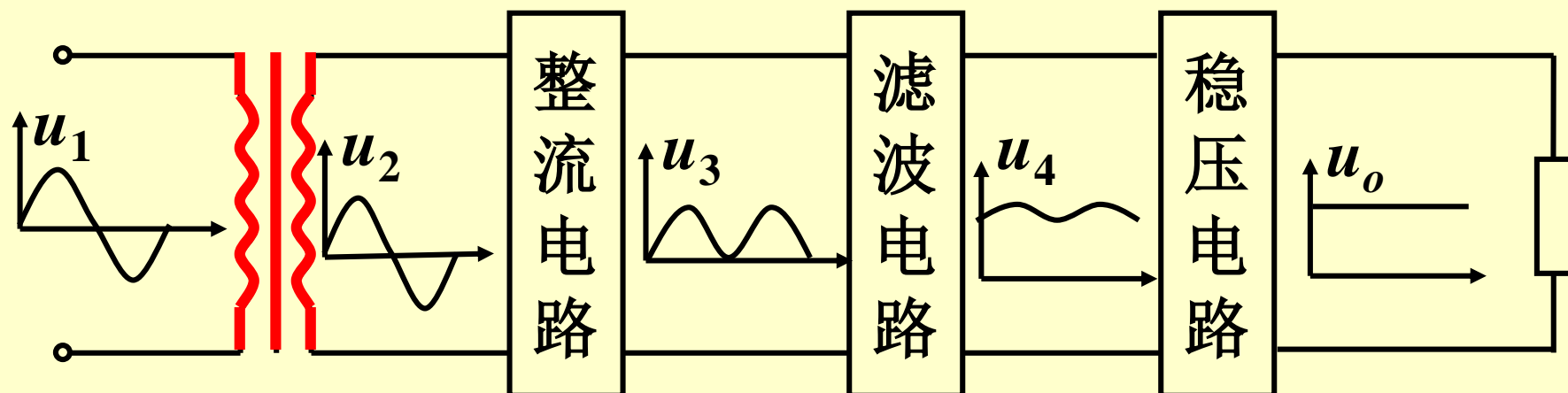
用电器	额定工作电压	用电器	额定工作电压
随身听	3V	机床上的照明灯	36V
扫描仪	12V	防身器	3000V
手机充电器	5 V	黑白电视机显像管	几万伏
录音机	6V 9V 12V	彩色电视机显像管	十几万伏



2. 变压器不同场合的应用



2. 变压器不同场合的应用

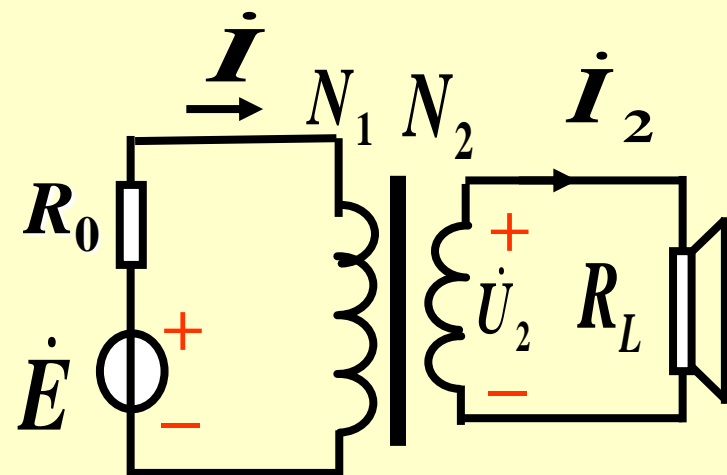
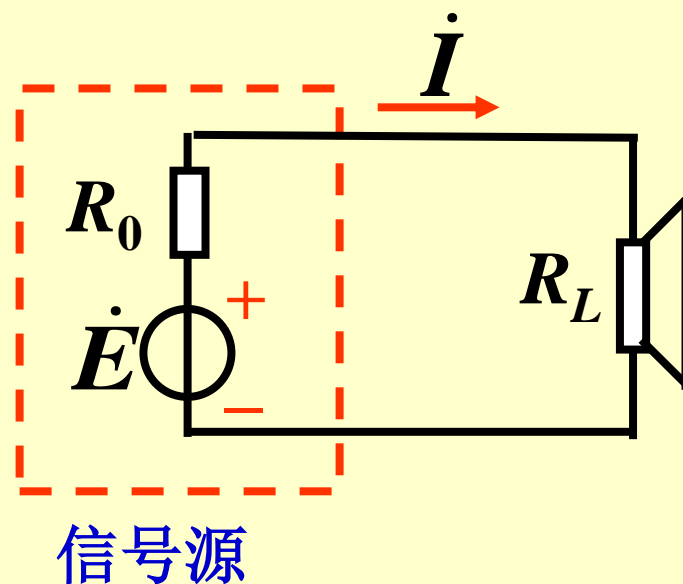


2. 变压器不同场合的应用

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：

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



2. 变压器不同场合的应用

信号源的输出功率:

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

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

(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: $R'_L = R_0$

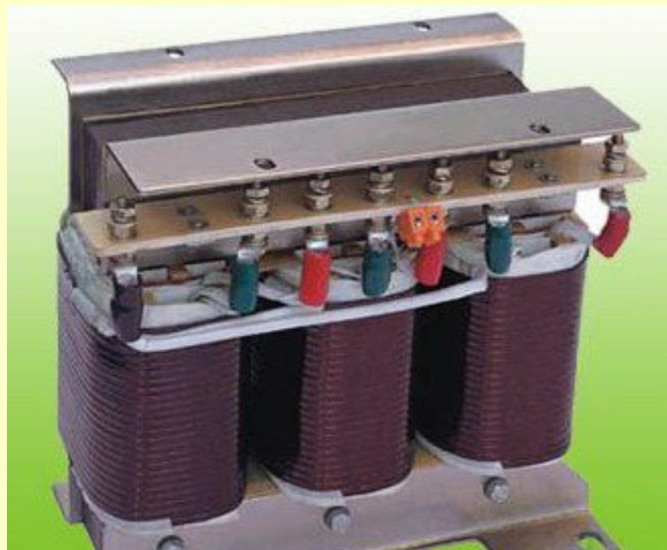
电子线路中, 常利用阻抗匹配实现最大输出功率。



2. 变压器不同场合的应用

隔离变压器：

- 1) 使一次侧与二次侧的电气完全绝缘，一般使二次侧回路隔离浮地，**实现了强、弱电隔离或用电载荷与电网的隔离。**
- 2) 利用变压器输入输出寄生电容耦合小，和铁芯高频损耗大的特点，抑制高频杂波传入电网与其它控制回路。





祝愿中秋国庆愉快



若您：

- 深爱**硬核**（DSP/FPGA/STM32）技术；
- 喜欢**应用型**的科研项目；
- 善于自动检测、识别与控制**算法**；
- 对**微纳米控制**的半导体领域感兴趣。

欢迎了解本课题组，
共同挑战技术高峰。



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

