

第二章 变压器

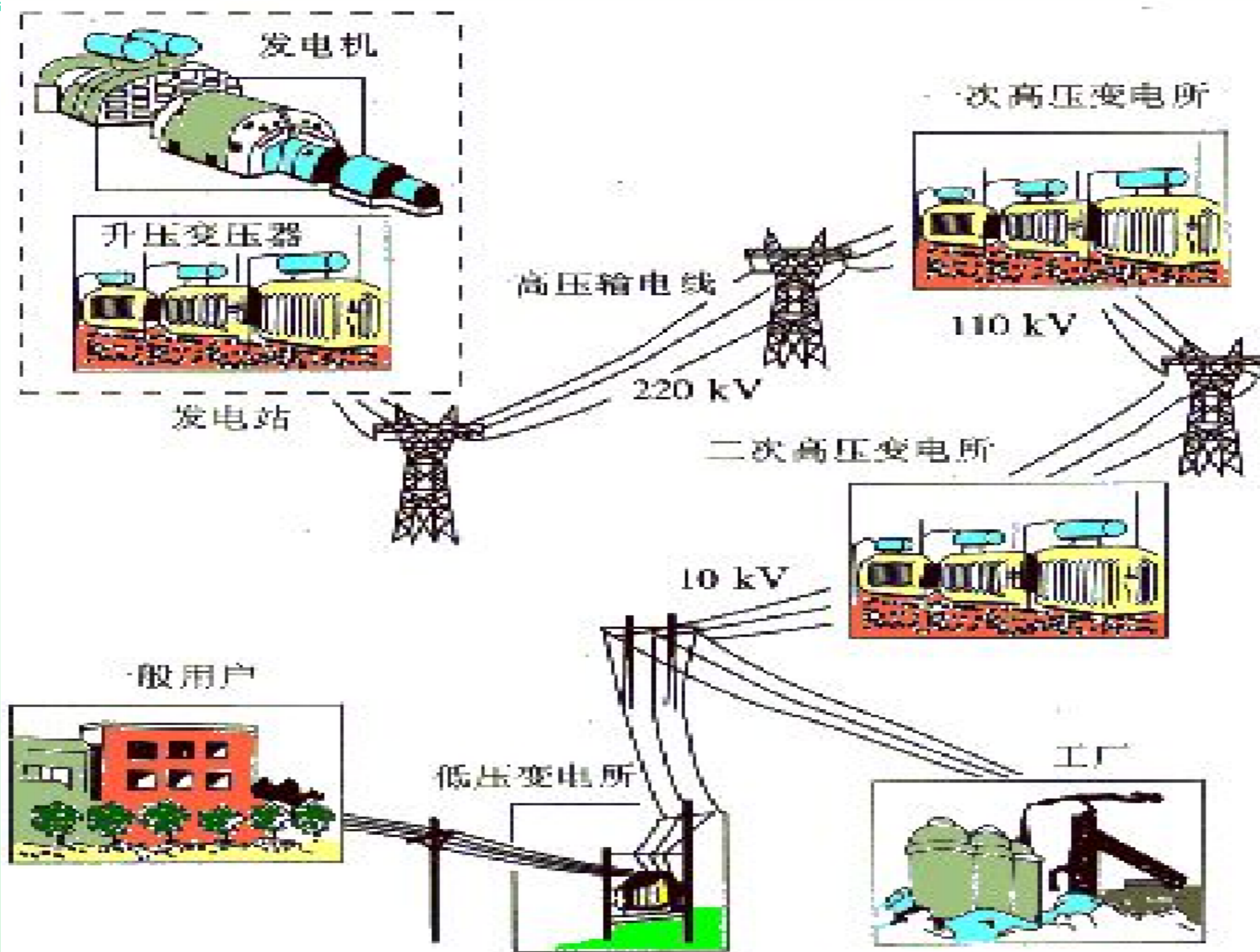
变压器是一种静止电器,它通过线圈间的电磁感应,主要用于改变交流电压等级,也可以用于改变电流和阻抗。在输电方面应用广泛,通过变压器可产生高压,高压输电既节省材料,又节省功率损耗。

特点：

输入输出间无电的联系；

能量的传输经过电——磁——电的变换；

改变输入输出线圈匝数比满足要求；



输电线路

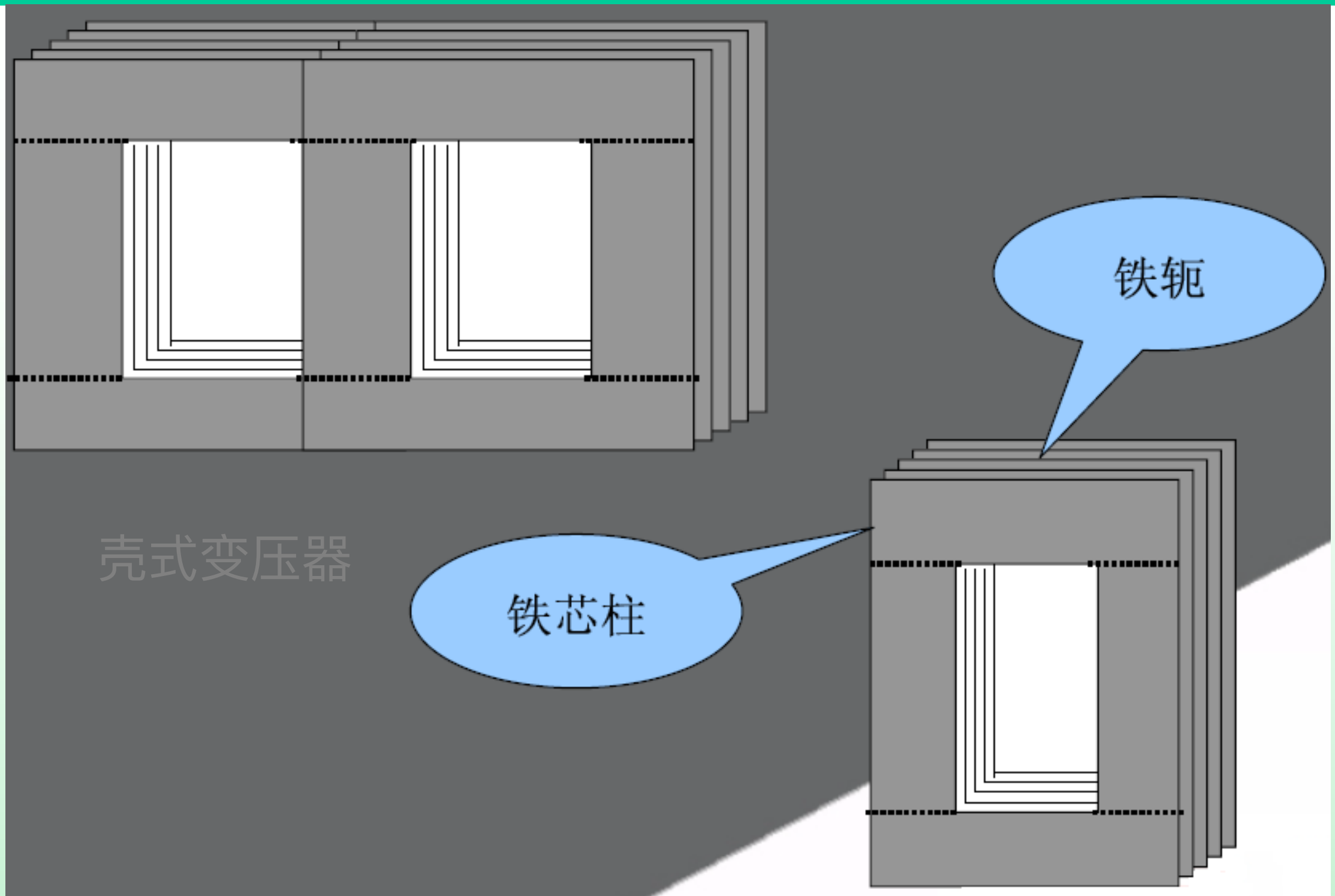
- 2.1 变压器的结构和基本工作原理
- 2.2 变压器的功能及外特性
- 2.3 三相变压器及特种变压器
- 2.4 变压器使用中的问题

2.1 变压器的结构和基本工作原理

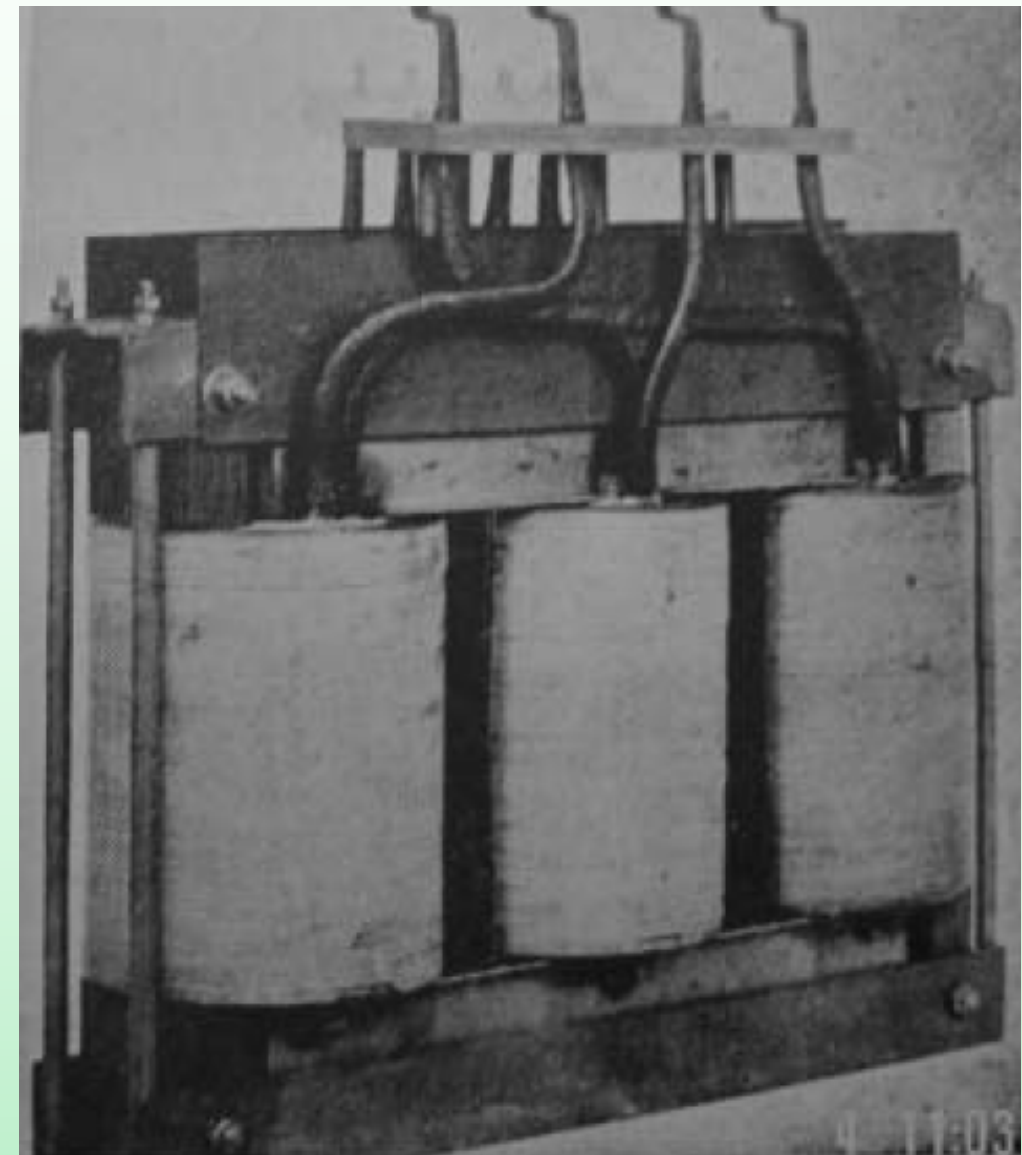
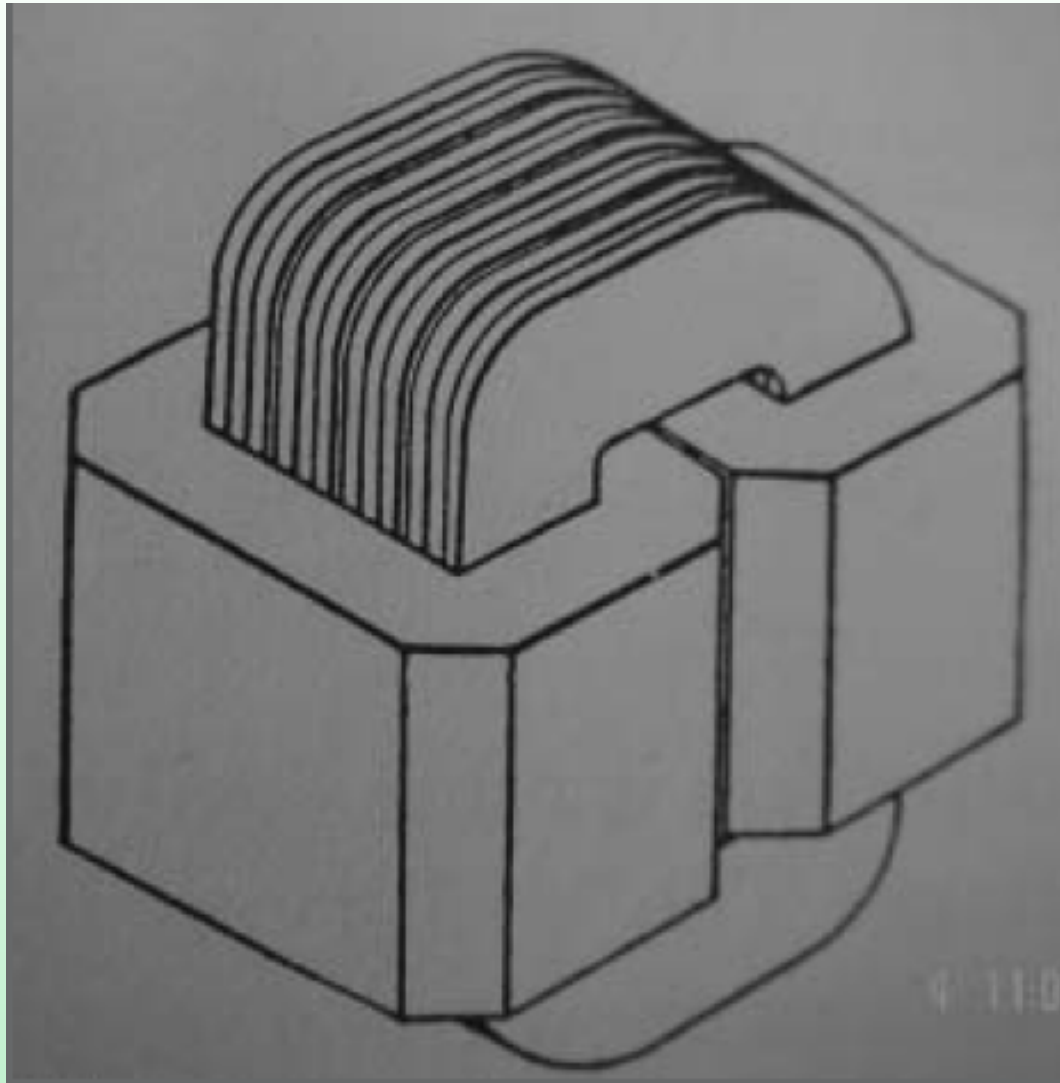
2.1.1 基本结构和分类

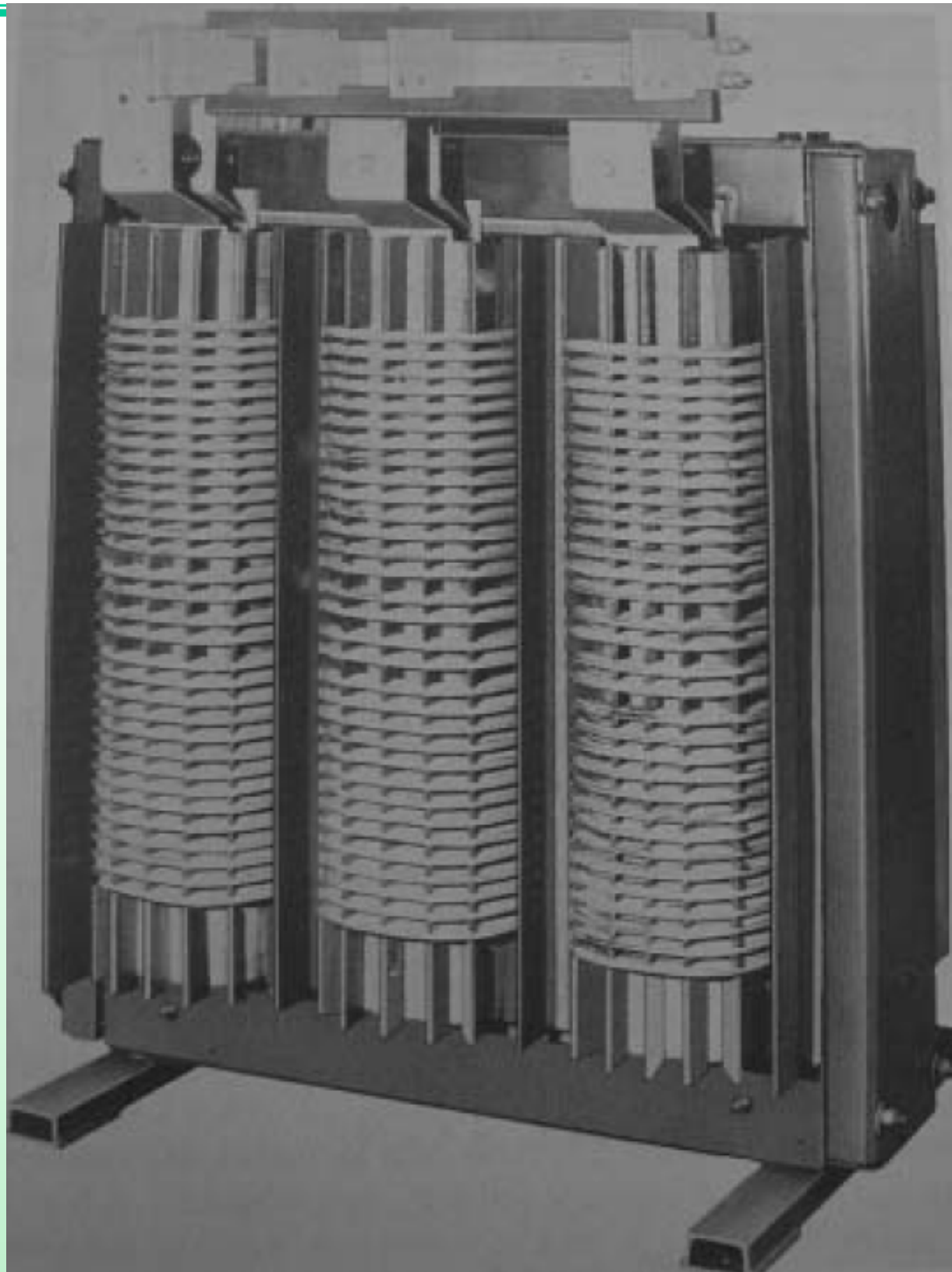
一、铁心

变压器的主磁路，为了提高导磁性能和减少铁损，用0.35mm或0.5mm厚、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠成。铁心带有绝缘的绕组、变压器油、油箱、绝缘套管等部件，分为心式和壳式两种。



心式变压器

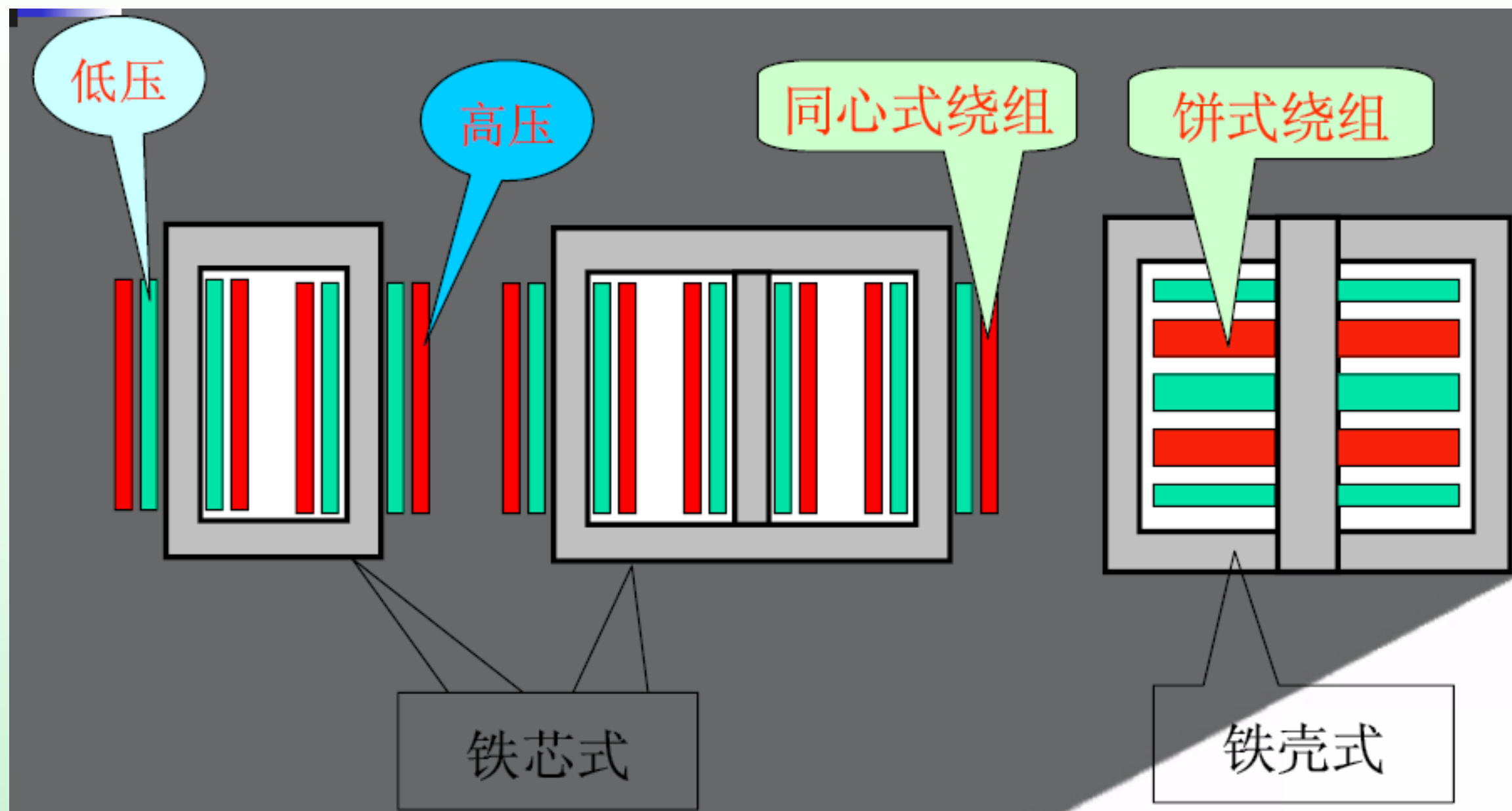




二、绕组

变压器的绕组一般用绝缘铜线或铝线绕制而成。

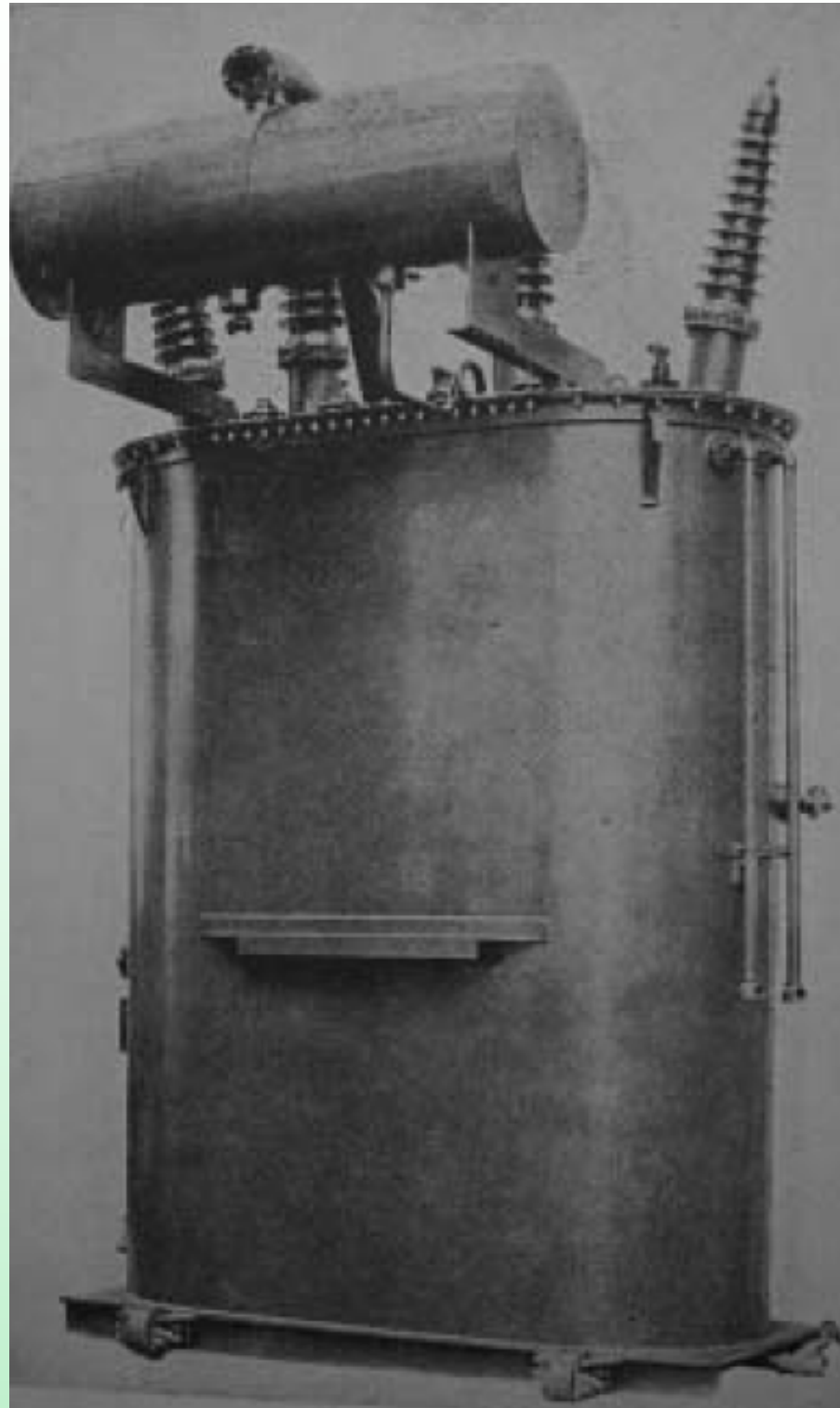
- 铁芯式和铁壳式，电力系统用铁芯式
- 单相：高低压绕组分成两部分分别套在两边的铁芯柱上
- 三相：每个柱上有一相高低压绕组
- 低压绕组靠近铁芯，高压绕组套在低压外面



三、油箱

小容量，自然冷却，大容量一般采用油浸式，变压器的器身浸在变压器油的油箱中。油是冷却介质，又是绝缘介质，油箱常为椭圆形，底部有沉淀器，用于排污物，油有热胀冷缩作用，油箱上装有通气管道。

- 增强绝缘：介电常数大
- 散热：比空气导热系数大
- 防潮：水分的存在使绝缘性能降低
- 排气管：保护变压器油箱
- 气体继电器：故障是报警或自动切断变压器电源
- 形状：容量很小...平滑
- 容量很大...状散热器



四、绝缘套管

将线圈的高、低压引线引到箱外，担负着绝缘、固定的作用。

中心导电杆+瓷套

低电压等级...瓷质套管

较高电压...充油瓷套

高电压...导电杆上包表面附有铝箔的绝缘纸筒

此外，还有吸湿器、安全气道、净油器等。

分类

按用途分： 电力变压器和特种变压器。其中电力变压器频率为50HZ，容量可达几十万KVA，电压可达几十万V。

按电压分： 升压变压器和降压变压器

按绕组分：

双绕组变压器——一个初级绕组，一个次级绕组；

三绕组变压器——容量较大，三种不同的电压；

自耦变压器——初次级绕组合二为一。

按相数分：

单相变压器、三相变压器和多相变压器。

按铁心结构分：心式变压器和壳式变压器。

按冷却介质和冷却方式分：

干式变压器、油浸式变压器和充气式变压器。

干式变压器：在不允许用油处使用，容量相对较小。

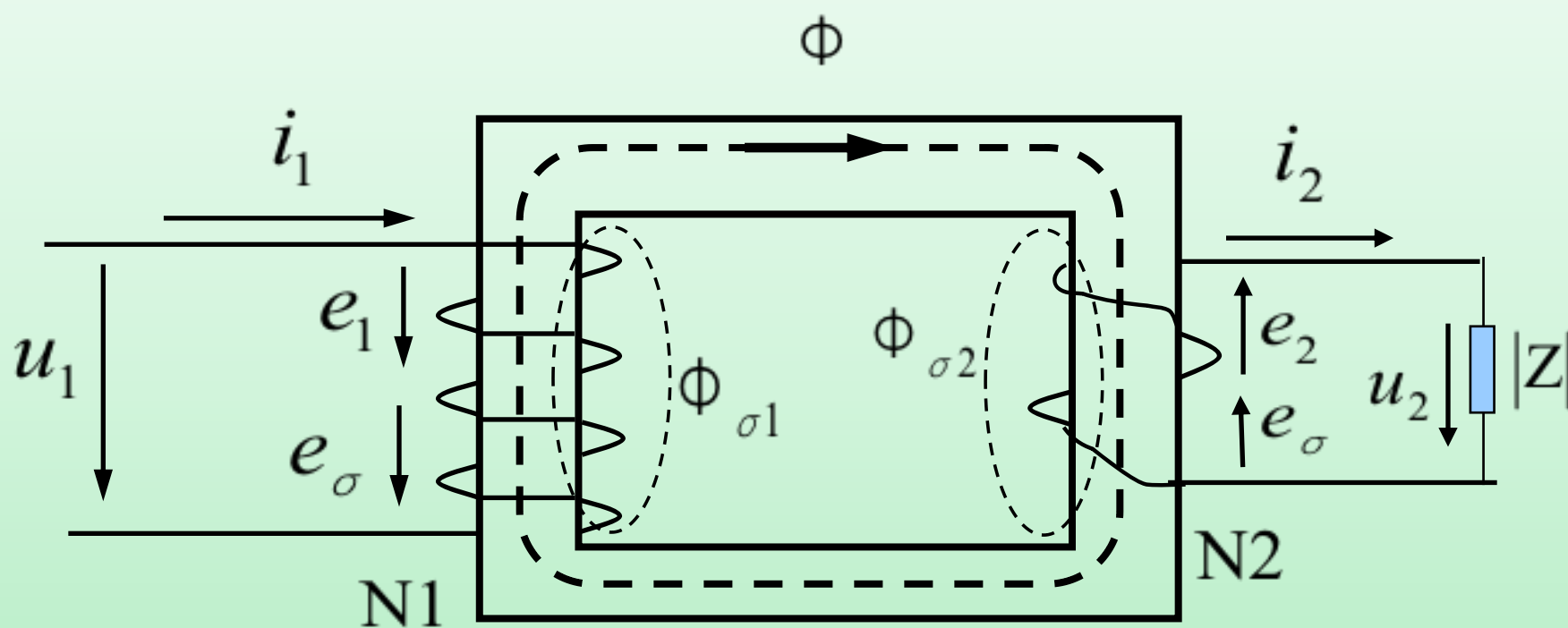
油浸式变压器：采用变压器油加强绝缘和散热。

所有变压器的基本原理都相同

2.1.2 变压器的工作原理

基本工作原理

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电联系。在原边绕组中加上交变电压，产生交链原、副边绕组的交变磁通，在两绕组中分别感应电动势。

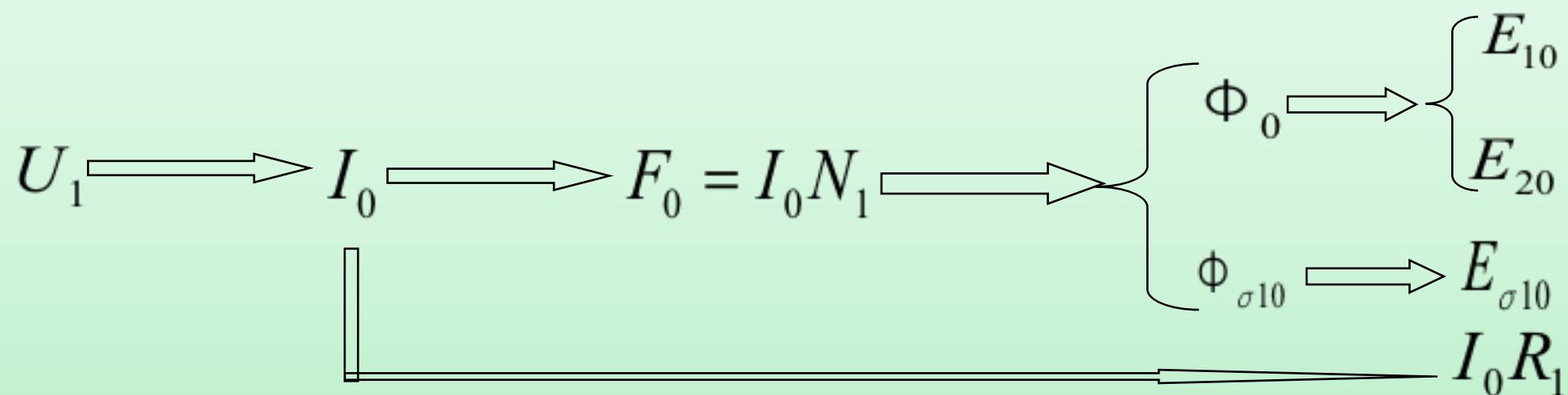
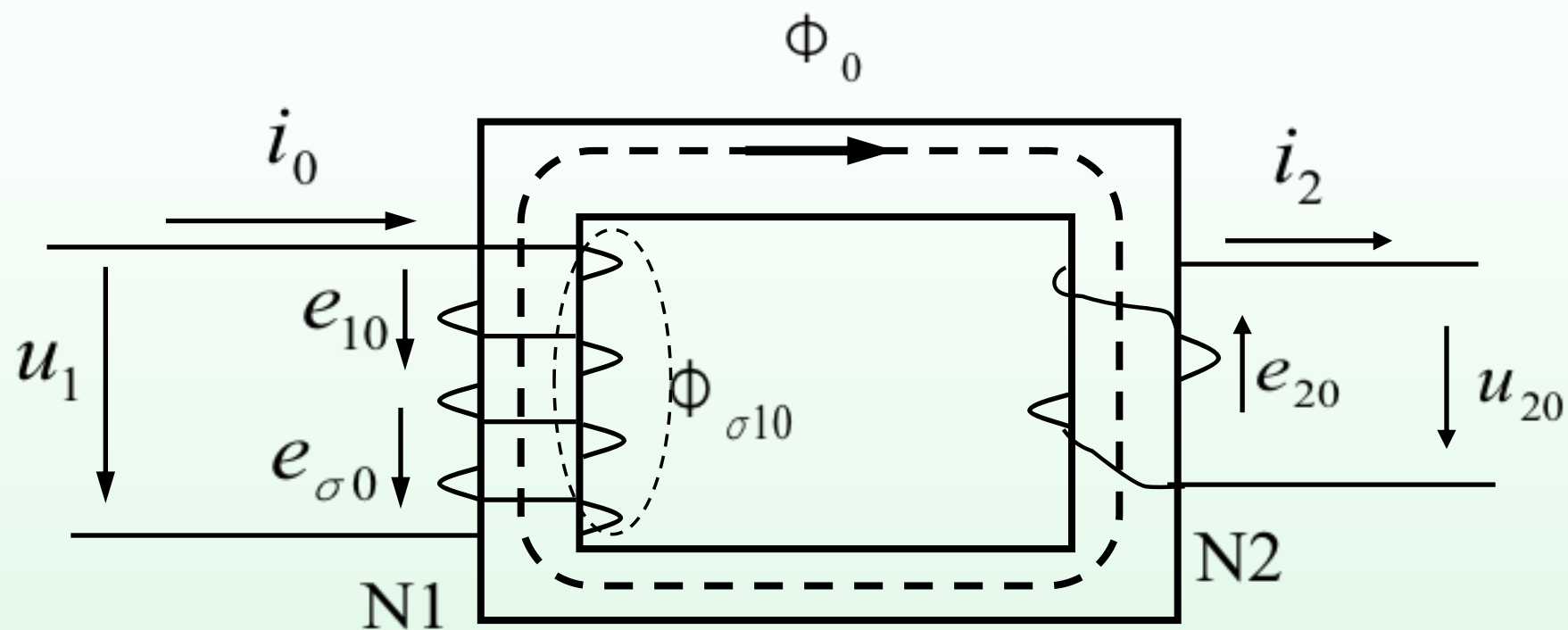


$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

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

只要原、副边绕组的匝数不同，就能达到改变电压的目的。

1、变压器的空载运行



主磁通与漏磁通的区别

- 1) 性质上： Φ_0 与 I_0 成非线性关系； $\Phi_{\sigma 10}$ 与 I_0 成线性关系；
- 2) 数量上： Φ_0 占99%以上， $\Phi_{\sigma 10}$ 仅占1%以下；
- 3) 作用上： Φ_0 起传递能量的作用， $\Phi_{\sigma 10}$ 起漏抗压降作用。

磁通与产生它的电流之间符合右手螺旋定则；电动势与感应它的磁通之间符合右手螺旋定则。

a、主磁通感应的电动势——主电动势

设 $\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t$ 根据法拉第电磁感应定律

$$\text{则 } e_{10} = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = 2\pi f N_1 \Phi_{0m} \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{10m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$\text{有效值 } E_{10} = 4.44 f N_1 \Phi_{0m}$$

可见，当主磁通按正弦规律变化时，所产生的原边主电动势也按正弦规律变化，时间相位上滞后主磁通 90° 。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。

同理，副边主电动势也有同样的结论。

$$\text{则 } e_{20} = -N_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = 2\pi f N_2 \Phi_{0m} \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{20m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$\text{有效值 } E_{20} = 4.44 f N_2 \Phi_{0m}$$

b、漏磁通感应的电动势——漏电动势

$$e_{\sigma 10} = -N_1 \frac{d\Phi_{\sigma 10}}{dt} = -L_{\sigma 10} \frac{di_0}{dt}$$

若 $i_0 = I_{0m} \sin \omega t$ $e_{\sigma 10} = \omega L_{\sigma 1} I_{0m} \sin(\omega t - 90^\circ)$, $L_{\sigma 1} = \Phi_{\sigma 10} N_1 / i_0$ 漏磁电感

$$E_{\sigma 10} = -j\omega L_{\sigma 1} I_0 = -jI_0 X_{\sigma 1}$$

作为 I_0 的电抗压降, $X_{\sigma 1} = 2\pi f L_{\sigma 1}$ 为漏磁电抗

C、原绕组回路的电压方程:

$$u_1 + e_{10} + e_{\sigma 10} = i_0 R_1$$

$$U_1 = I_0 R_1 + (-E_{\sigma 10}) + (-E_{10}) = I_0 (R_1 + jX_{\sigma 1}) + (-E_{10}) \approx -E_{10}$$

$$U_1 \approx E_{10} = 4.44 f N_1 \Phi_{0m}$$

d、副绕组回路的电压方程:

$$U_{20} = E_{20}$$

e、电压变换 空载时：

$$\begin{aligned} U_1 \approx E_{10} &= 4.44fN_1\Phi_{0m} \\ U_{20} \approx E_{20} &= 4.44fN_2\Phi_{0m} \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

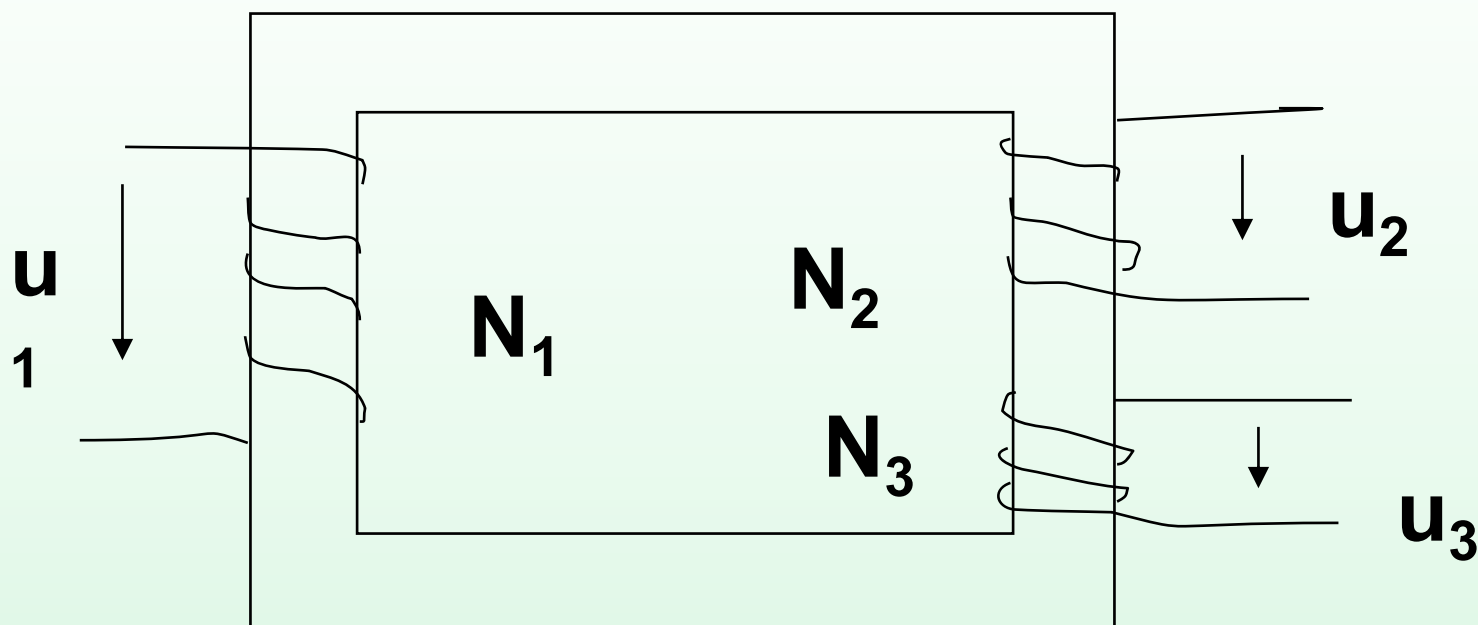
K称为变压器的变比，它等于原副绕组的匝数比，也等于原副绕组的额定电压之比，如果铭牌上写着“6000/400（K=15）”表明原绕组的额定电压为6000v时副绕组的空载电压是400v。

当电源电压不变时，改变变比即改变匝数比，就可以得到不同的输出电压。

K>1，副边电压小于原边电压，降压变压器

K<1，副边电压大于原边电压，升压变压器

例2.2.1: $U_1 = 380\text{V}$, $U_2 = 127\text{V}$, $U_3 = 36\text{V}$, $N_1 = 760$ 匝
求 N_2 , N_3

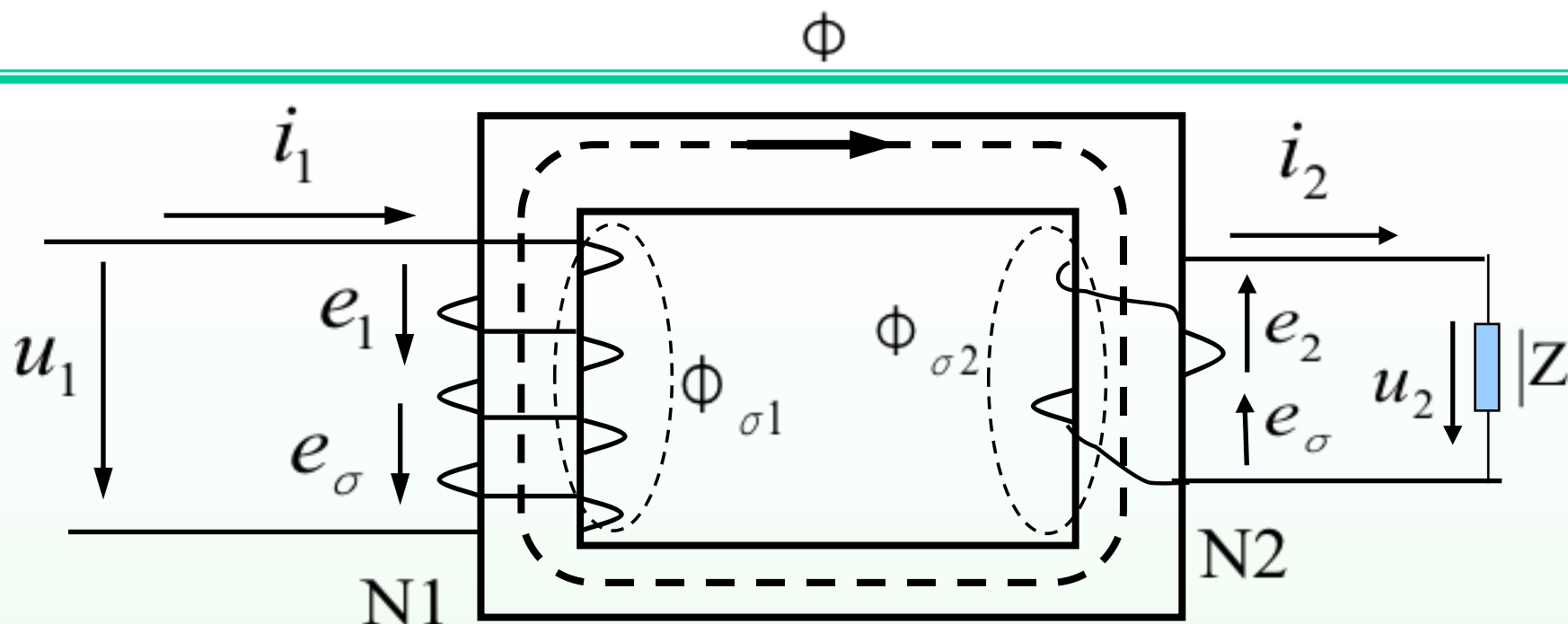


$$\text{解: } \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow \frac{380}{127} = \frac{760}{N_2} \Rightarrow N_2 = 254 \text{匝}$$

$$\frac{N_1}{N_3} = \frac{U_1}{U_3} \Rightarrow \frac{380}{36} = \frac{760}{N_3} \Rightarrow N_3 = 72 \text{匝}$$

2 单相变压器的负载运行

变压器原边接在额定频率、额定电压的交流电源上，副边接上负载的运行状态，称为负载运行。



原边的电压方程: $u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_1 R_1$

副边的电压方程: $e_2 + e_{\sigma 2} = i_2 R_2 + u_2$

设 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

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

$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$

有效值 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$

有效值 $E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$

$$E_{\sigma 1} = -jI_1 X_{\sigma 1}$$

$$E_{\sigma 2} = -jI_2 X_{\sigma 2}$$

原边的电压方程：

$$U_1 = I_1 R_1 + (-E_{\sigma 1}) + (-E_1) = I_1 (R_1 + jX_{\sigma 1}) + (-E_1) \approx -E_1$$

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1 \Phi_m$$

副边的电压方程：

$$e_2 + e_{\sigma 2} = i_2 R_2 + u_2$$

$$e_2 = i_2 R_2 - e_{\sigma 2} + u_2 = i_2 R_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + u_2$$

$$E_2 = I_2 (R_2 + jx_{\sigma 2}) + U_2$$

3、磁动势的平衡关系

空载时: $U_1 = I_0(R_1 + jX_{\sigma 1}) + (-E_{10}) \approx -E_{10} = 4.44fN_1\Phi_{0m}$

负载时: $U_1 = I_1(R_1 + jX_{\sigma 1}) + (-E_1) \approx -E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$

U_1 为外加电源，空载与负载均相同，所以

$$4.44fN_1\Phi_{0m} \approx 4.44fN_1\Phi_m$$

$$\Phi_{0m} \approx \Phi_m$$

由于磁通近似相等，磁阻不变，所以空载与负载磁动势近似相等。

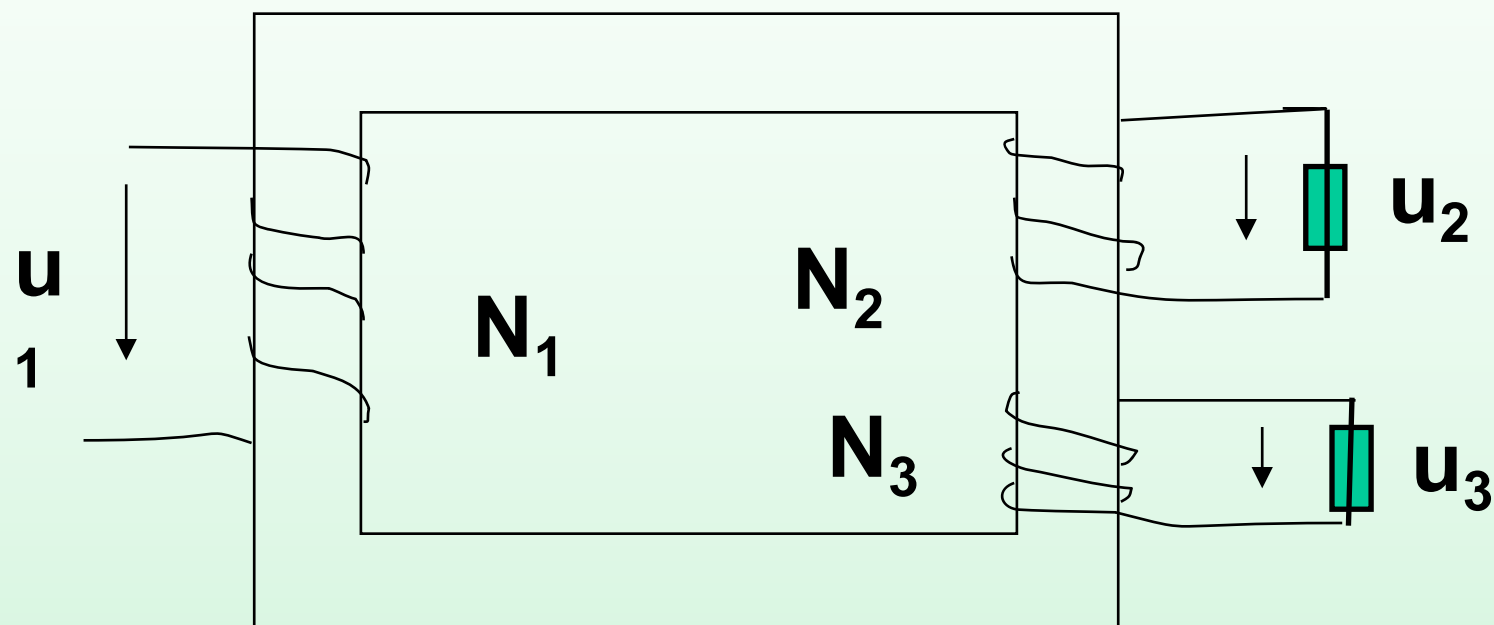
$$i_0N_1 = R_m\Phi_0 = i_1N_1 + i_2N_2 = R_m\Phi$$

磁动势平衡方程: $i_0N_1 = i_1N_1 + i_2N_2$

实践证明空载电流 I_0 很小，一般小于额定电流的10%，有的只有1%，若 I_0N_1 忽略不计，则

电流变换: $I_1N_1 \approx -I_2N_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$

例2.2.2：已知 $U_1=380\text{V}$ ， $N_1=760$ ， $N_2=254$ ， $N_3=72$ ， $I_2=2.14$ ， $I_3=3$ ，求 I_1 ， P_1 ， P_2 ， P_3 。



解：略去空载磁动势。

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 + I_3 N_3 \approx 0 \Rightarrow I_1 = \frac{I_2 N_2 + I_3 N_3}{N_1} = 1 \text{ A}$$

$$\text{原边功率: } P_1 = U_1 I_1 = 380 \times 1 = 380 \text{ W}$$

$$\text{副边功率1: } P_2 = U_2 I_2 = \frac{U_1 N_2}{N_1} I_2 = 127 \times 2.14 = 272 \text{ W}$$

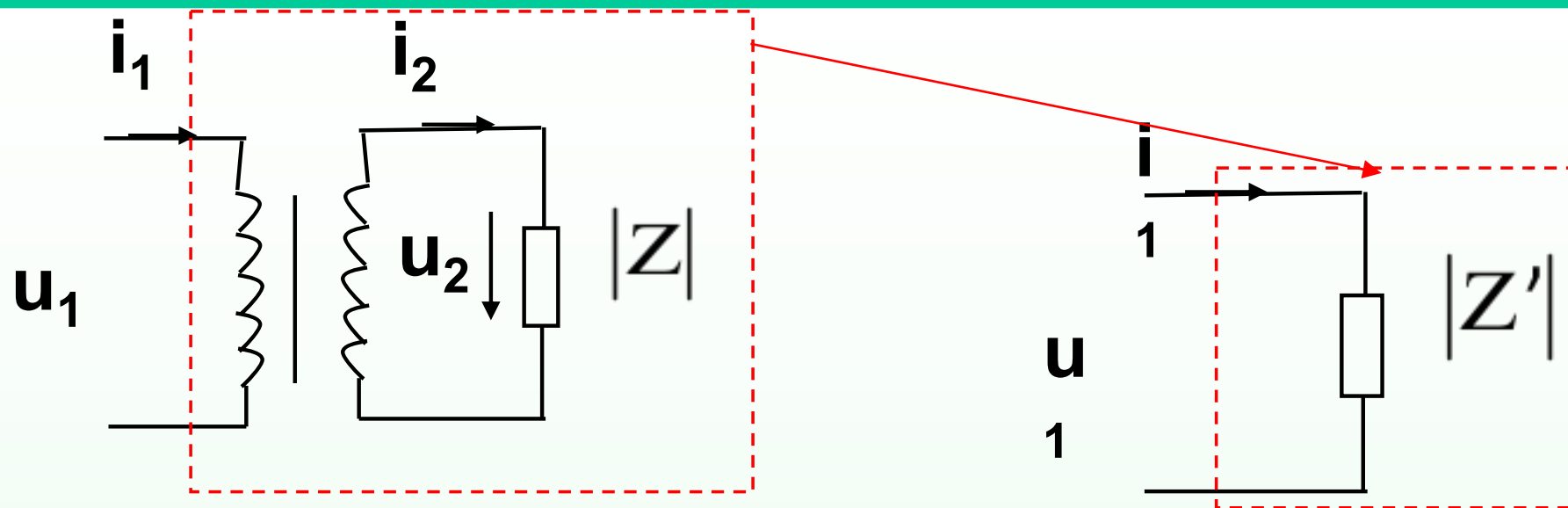
$$\text{副边功率2: } P_3 = U_3 I_3 = \frac{U_1 N_3}{N_1} I_3 = 36 \times 3 = 108 \text{ W}$$

2.2 变压器的功能及外特性

1、电压变换：
$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

2、电流变换：
$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

3、阻抗变换：
$$|Z'| = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 |Z| = K^2 |Z|$$

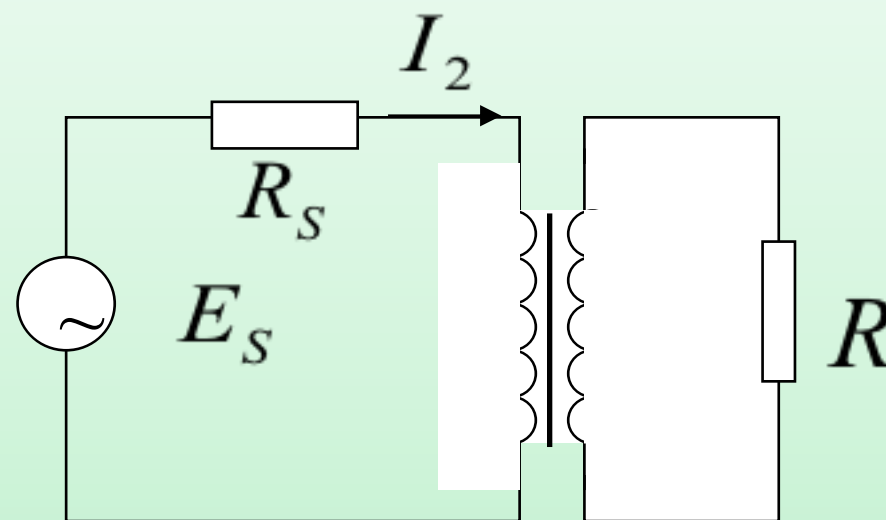
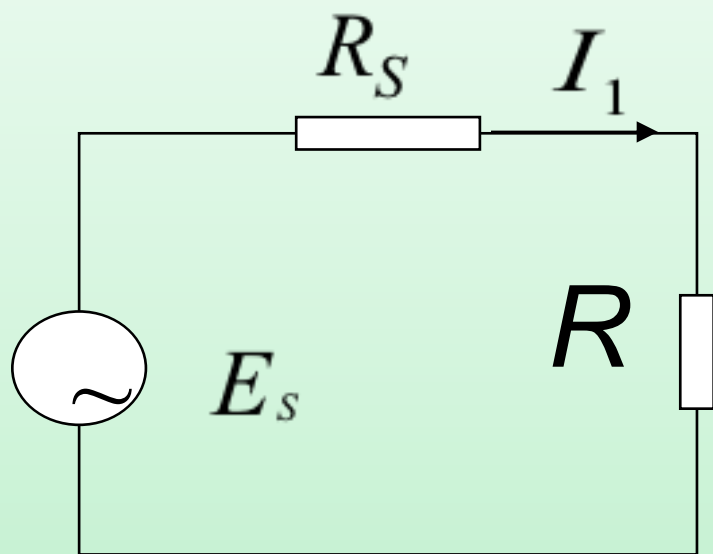


$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1}; |Z| = \frac{U_2}{I_2}$$

$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} U_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 |Z| = K^2 |Z|$$

当负载阻抗等于电源内阻抗时，电源输出给负载的功率最大，利用变压器**阻抗匹配**将副边负载阻抗等效成原边等效阻抗，然后令其与内阻抗相等，即可获得最大功率。

例：有一交流电源 $E_s=8.5\text{V}$ ，内阻 $R_s=72\Omega$ ，阻抗 $R=8\Omega$ 的扬声器，先采用两种接法把 R 作负载，一直接接入，二经过变比 $k=3$ 的变压器接入，忽略变压器的漏阻抗和励磁电流，求（1）两种接法时扬声器获得的功率；（2）要使信号源输出功率最大，变压器变比应为多少？（3）变压器在电路中的作用是什么？



解：(1) a. 直接接入：

$$I_1 = \frac{E_s}{R_s + R} = \frac{8.5}{72 + 8} = 0.10625 \text{ (A)}$$

$$R \text{ 获得的功率: } P_1 = I_1^2 R = 0.10625^2 * 8 = 0.0903 \text{ (W)}$$

b. 通过变压器接入：

$$I_2 = \frac{E_s}{R_s + R'} = \frac{E_s}{R_s + k^2 R} = \frac{8.5}{72 + 3^2 \times 8} = 0.059027 \text{ A}$$

$$R \text{ 的功率: } P_2 = I_2^2 R' = 0.059027^2 \times 72 = 0.25 \text{ W}$$

(2) 要使R获得最大功率，要求电源外阻等于其内阻。

$$R_s = R' = k^2 R \Rightarrow k = \sqrt{\frac{R_s}{R}} = \sqrt{\frac{72}{8}} = 3$$

(3) 变压器在电路中的作用是变阻抗。

2.2.4 变压器的外特性

电压变化率

随着副边电流的增加原副绕组的阻抗压降增加导致输出电压发生一定的变化。

定义：是指原边加额定电压、副边空载电压与额定负载电压的变化率，用下式表示：

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

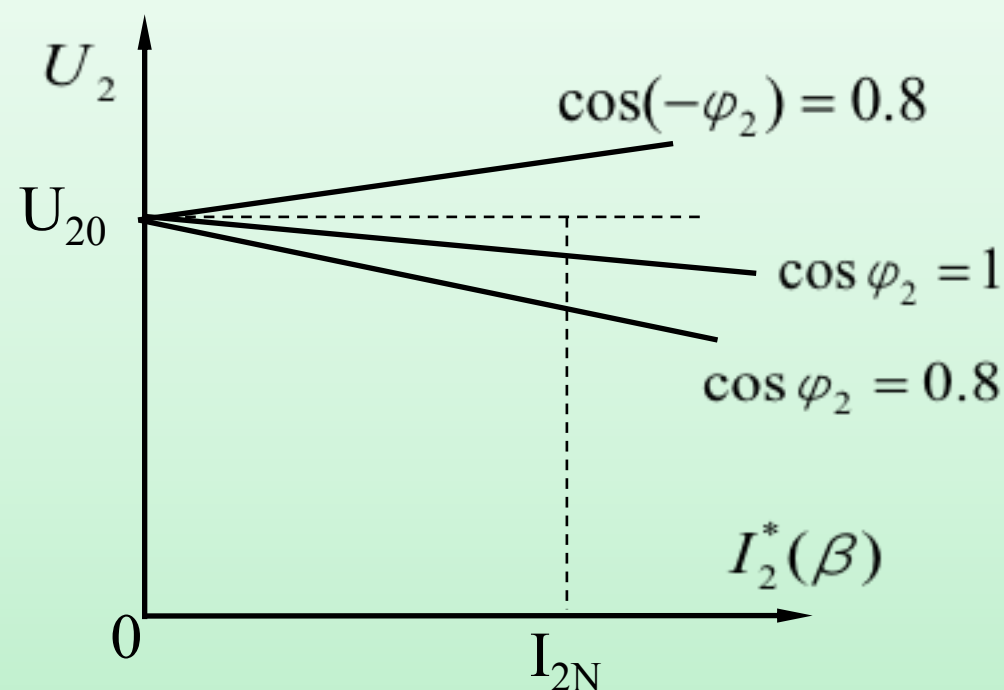
电压变化率是表征变压器运行性能的重要指标之一,它大小反映了供电电压的稳定性。

电压变化率的大小与负载大小、性质及变压器的本身参数有关。

一般变压器当中，由于电阻和漏磁感抗均较小，电压变化率在5%左右。

当原边电压和负载功率因数一定时,副边电压随负载电流的变化关系曲线,即 $U_2 = f(I_2)$,称为为变压器的外特性.

当变压器带阻性负载($\varphi_2 = 0$)和阻感性负载($\varphi_2 > 0$)时, ΔU 为正值,这时副边电压比空载时低,带阻容性负载($\varphi_2 < 0$)时, ΔU 可能为正,也可能为负值.



2.2.5 变压器的损耗和效率

一、变压器的损耗

变压器的损耗主要是铁损耗和铜损耗两种。

铁损耗包括基本铁损耗和附加铁损耗。基本铁损耗为磁滞损耗和涡流损耗。附加损耗包括由铁心叠片间绝缘损伤引起的局部涡流损耗、主磁通在结构部件中引起的涡流损耗等。

铁损耗与外加电压大小有关，而与负载大小基本无关，故也称为**不变损耗**。

铜损耗也分基本铜损耗和附加铜损耗。基本铜损耗是在电流在原、副边绕组直流电阻上的损耗；附加铜损耗是漏磁场在结构部件中引起的涡流损耗等。

铜损耗大小与负载电流平方成正比，故也称为**可变损耗**。

二、效率及效率特性

效率是指变压器的输出功率与输入功率的比值。

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

效率大小反映变压器运行的经济性能的好坏，是表征变压器运行性能的重要指标之一。

$$\eta = 1 - \frac{\sum p}{P_1} = 1 - \frac{\Delta p_{Fe} + \Delta p_{Cu}}{P_2 + \Delta p_{Fe} + \Delta p_{Cu}}$$

变压器的效率很高，一般为95%以上，负载为额定负载的50%~75%时效率最大。

说明:

(1) 原边主电动势与漏电动势总是与外施电压平衡,若忽略漏电动势,则原边主电势的大小由外施电压决定.

(2) 主磁通大小由电源电压、电源频率和原边线圈匝数决定。

$$U_1 = I_1(R_1 + jX_{\sigma 1}) + (-E_1) \approx -E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$$

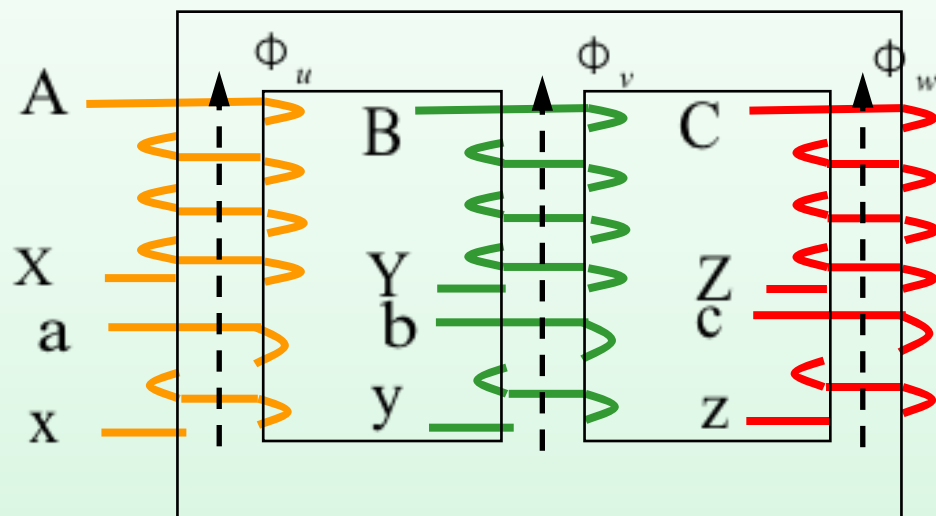
(3) 空载电流大小与主磁通、线圈匝数及磁路的磁阻有关,铁心所用材料的导磁性能越好,空载电流越小。

$$i_0 N_1 = R_m \Phi_0$$

2.3 三相变压器及特种变压器

2.3.1 三相变压器

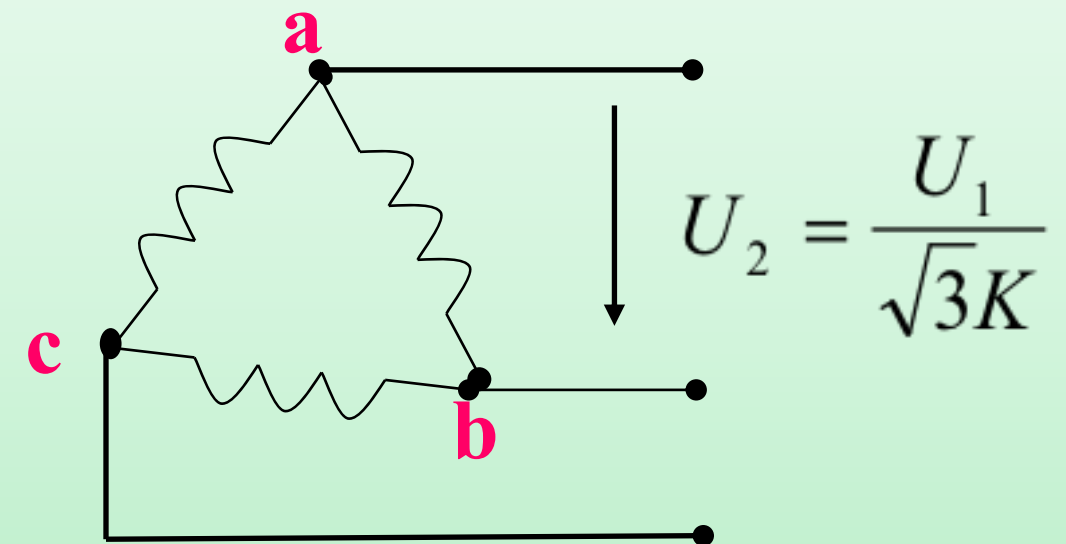
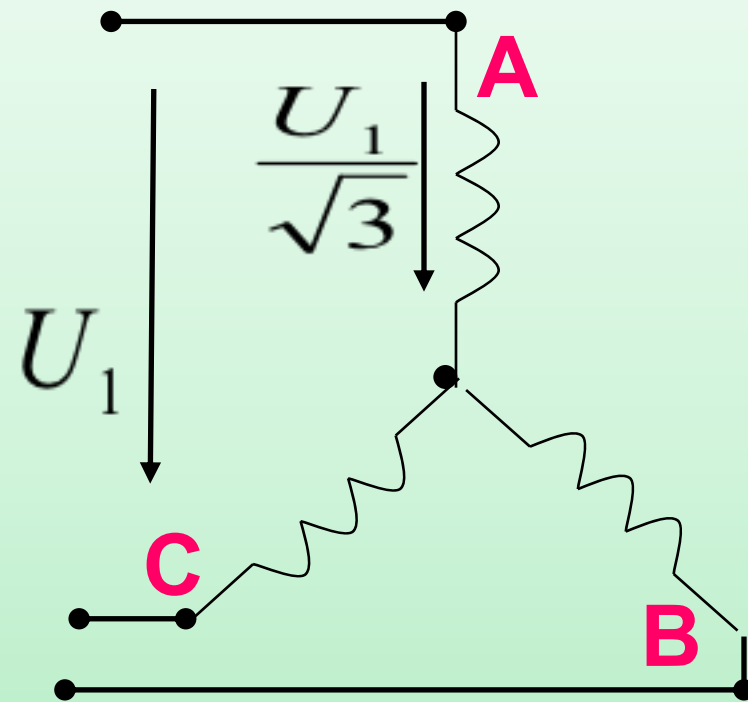
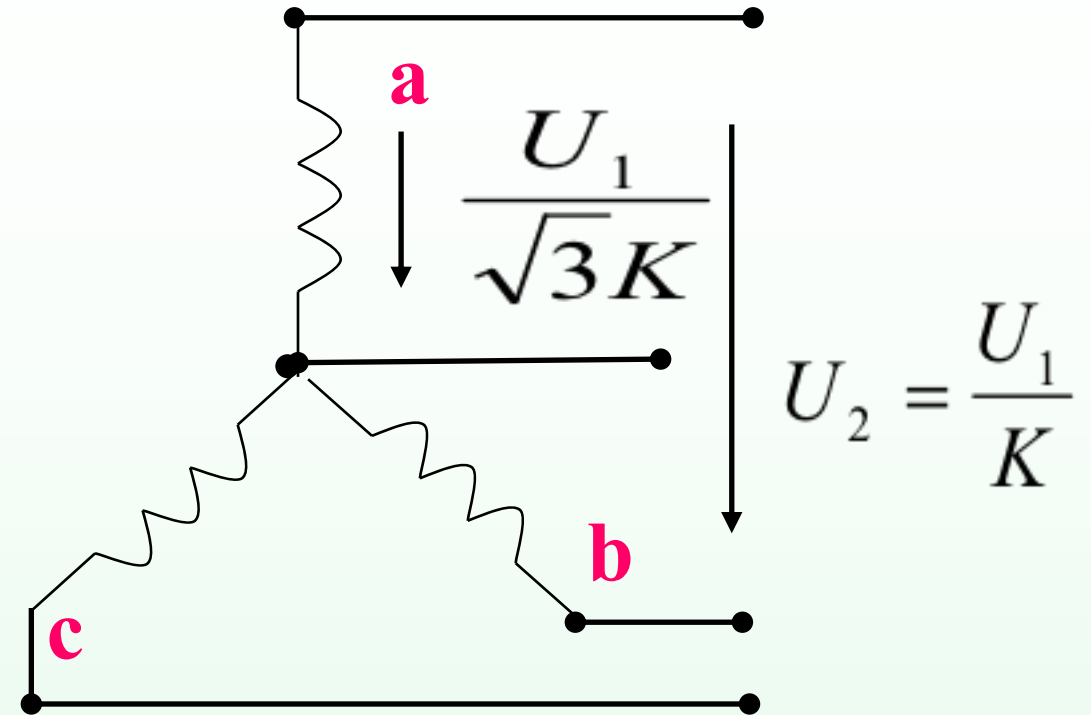
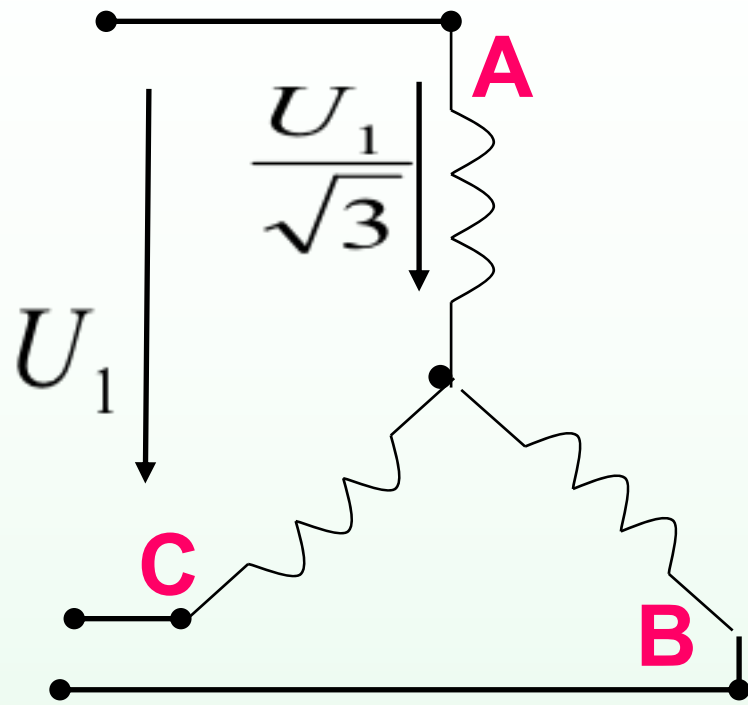
一、磁路系统



二、电路系统

一、变压器的端头标号

绕组名称	三相变压器		连接方式
	首端	末端	
高压绕组	A、B、C	X、Y、Z	Y型
低压绕组	a、b、c	x、y、z	
连接组	Y/Δ, Y/ Y ₀ , Y ₀ /Δ		Δ型



当Y联接时相电压为线电压的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ；

当 Δ 联接时相电压与线电压相等，相电流为线电流的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。

不管何种联接两者相电压比为绕组匝数比。

令 $U_{1\varphi}$ ， $U_{2\varphi}$ 分别为原副绕组的相电压，

U_{1l} ， U_{2l} 分别为原副绕组的线电压

$$\text{则} \frac{U_{1\varphi}}{U_{2\varphi}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

$$Y / Y_0: \frac{U_{11}}{U_{21}} = \frac{\sqrt{3}U_{1\varphi}}{\sqrt{3}U_{2\varphi}} = \frac{U_{1\varphi}}{U_{2\varphi}} = K$$

$$Y / \Delta: \frac{U_{11}}{U_{21}} = \frac{\sqrt{3}U_{1\varphi}}{U_{2\varphi}} = \sqrt{3}K$$

$$\Delta / Y: \frac{U_{11}}{U_{21}} = \frac{U_{1\varphi}}{\sqrt{3}U_{2\varphi}} = \frac{K}{\sqrt{3}}$$

例2.3.1 三相变压器每相的 $K=N_1/N_2$ ，问：Y/Y₀，Y/Δ，Δ/Y连接时高压侧线电压和低压侧线电压之比为多少？当变比为25时又为多少？

$$\text{解： } Y/Y_0: \frac{U_{11}}{U_{21}} = \frac{\sqrt{3}U_{1\varphi}}{\sqrt{3}U_{2\varphi}} = K = 25$$

$$Y/\Delta: \frac{U_{11}}{U_{21}} = \frac{\sqrt{3}U_{1\varphi}}{U_{2\varphi}} = \sqrt{3}K = \sqrt{3} \times 25 = 43.25$$

$$\Delta/Y: \frac{U_{11}}{U_{21}} = \frac{U_{1\varphi}}{\sqrt{3}U_{2\varphi}} = \frac{K}{\sqrt{3}} = \frac{25}{\sqrt{3}} = 14.45$$

2.3.2 仪用互感器

1、电压互感器

作用：把高压变成100伏以内的低压，以适应测量仪表与继电器的电压定额。（p36，图2.3.3）

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

特点：1原绕组匝数较多，副绕组匝数较少，起降压作用。

2、与电压表配用时，电压表刻度可直接根据高压端来分，可直接读出高压电压。

3、额定电流较小，不允许短路，以防止烧坏电压互感器。

4、副边接地，保证安全。

2、电流互感器

作用：将大电流变换成小电流，以适应电流表、功率表、电度表等仪表的电流使用，可用小量程的电流表来测大电流。

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

特点：

- 1、原边匝数较少，导线粗，副边匝数多，导线细，这样才能将大电流变成小电流。
- 2、原绕组由被测线路组成，副绕组与电流表串联，与电流表配用时电流表刻度可直接根据原边电流分度，可直接读出原边电流大小。
- 3、副边接地，保证安全。
- 4、副边不允许开路，否则有可能造成副边电压急剧升高。

2.3.3 自耦互感器

用来均匀地调节电压，实验室常用。原绕组和副绕组共用，靠滑动抽头分开。

注意：

- 1、单相自耦变压器有220V和110V两个电压输入，输出0~250V
- 2、由于高压和低压共用线圈，为防止电流过高烧坏线圈，一般取 K 不超过2.5。
- 3、副边电压虽可调低，但与原边线圈共用，所以电位有可能高，注意安全使用。

2.3.4 脉冲变压器

作用：用来传输脉冲信号的变压器。

脉冲信号一般频率较高，用普通的变压器容易导致波形畸变。

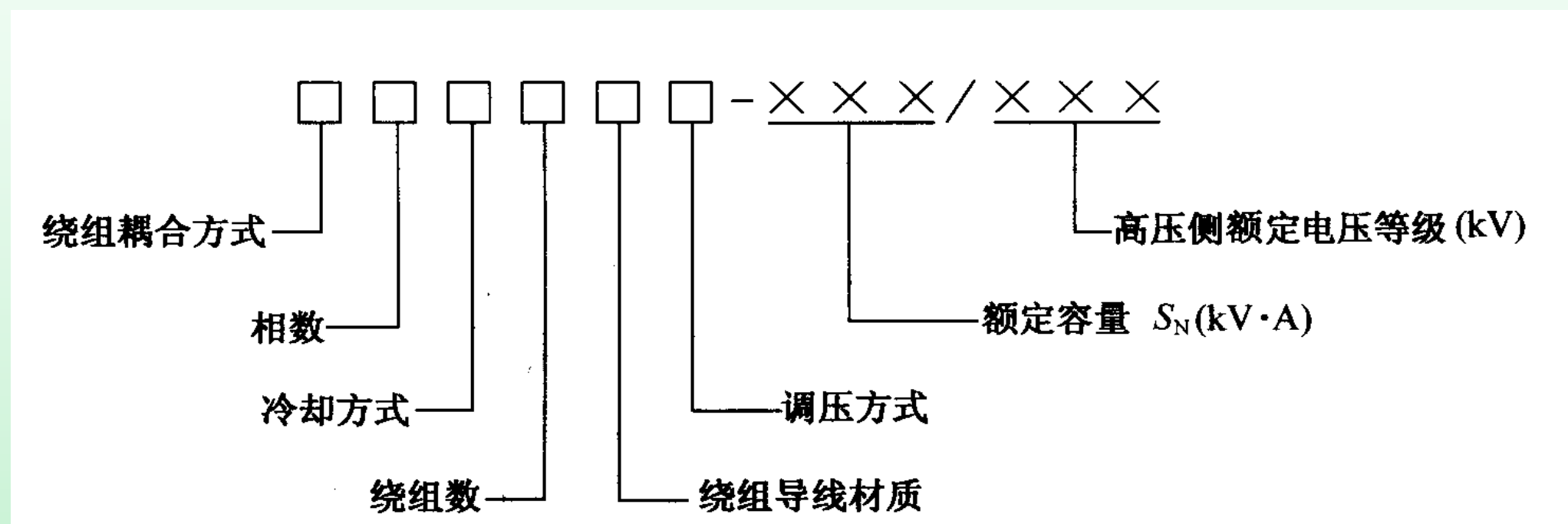
脉冲变压器采用：高导磁材料做铁心，铁心一般为环形封闭的；尽可能减少线圈电阻和漏电感和分布电容，故一般波形畸变很小。

2.4变压器使用中的问题

一、变压器的铭牌：主要记载变压器的型号，额定容量，额定电流，额定电压，额定频率，相数，接线方式，阻抗电压和冷却方式。

(1) 变压器的型号

说明了变压器的系列型式和产品规格，其组成由国家技术文件规定。



如OSFPSZ-250000/220表明自耦三相强迫油循环风冷三绕组铜线有载调压，额定容量250000kVA，高压额定电压220kV电力变压器。

(2) 额定值

额定容量 $S_N (kVA)$

指铭牌规定的副边额定电压和额定电流的乘积。

$$\text{单相: } S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N} \quad U_{1N}, I_{1N}, U_{2N}, I_{2N}$$

$$\text{三相: } S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \quad \text{均指线电压, 线电流}$$

额定电流 I_{1N} 和 $I_{2N} (A)$

指在原边加额定电压, 副边加额定负载条件下变压器长期正常运行时原副绕组通过的电流。在三相变压器中指的是线电流。

额定电压 U_{1N} 和 $U_{2N} (kV)$ 指长期运行时所能承受的工作电压

U_{1N} 是指加在原边的额定电压,

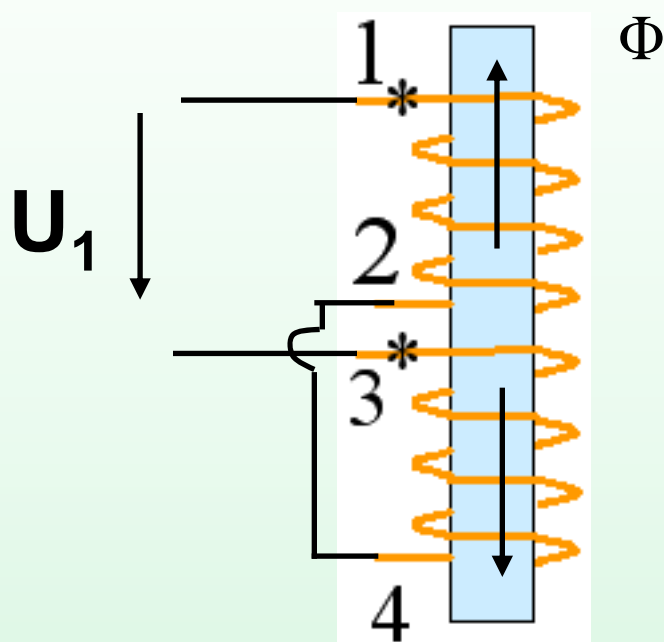
U_{2N} 是指原边加 U_{1N} , 副边的开路电压,

对三相变压器指的是线电压。

此外, 额定值还有**额定频率**、效率、温升等。

2.4.2 变压器绕组的测定

1. 正确使用变压器首先要正确的连接，否则易产生故障。

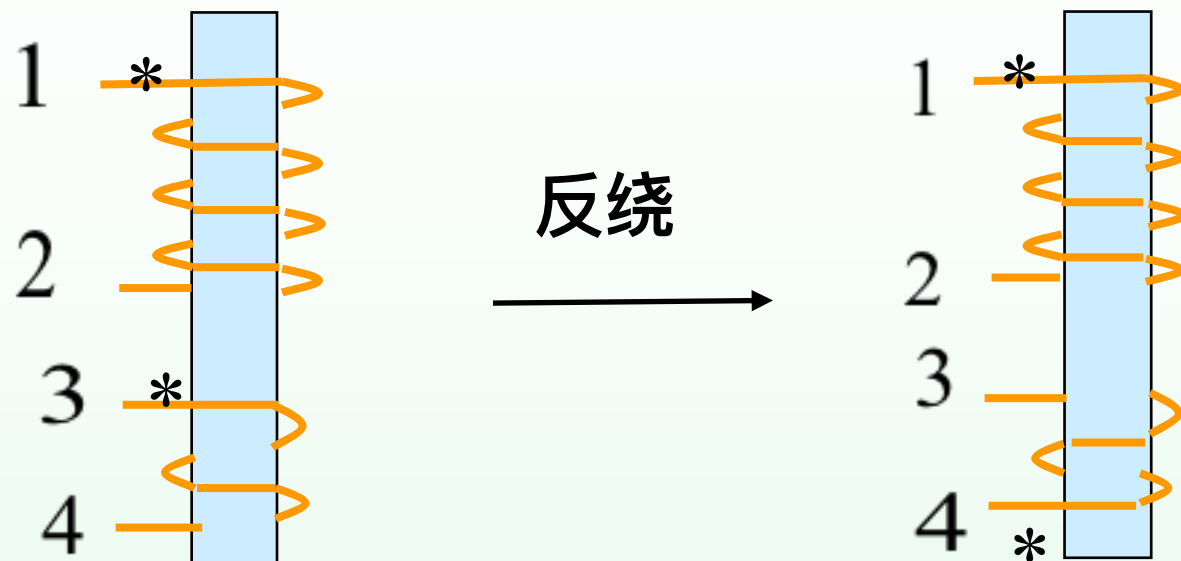


将1、3两端接电源，2、4两端连接，则两者产生的磁通 Φ_1 与 Φ_2 相互抵消不产生感应电动势来抵消 U_1 ，则在线路当中产生很大的电流会把变压器烧毁。

若2、3相连，1、4接电源，则两绕组串联；1、3两端相连，2、4两端相连，相连后分别接电源的正负，则为并联。

同极性端：当电流从两线圈的同极性端流入或流出时产生的磁通方向相同，或者当磁通变化时同极性端感应电动势的极性也相同，同极性端用“•”或“*”表示。

2. 正确连接前要进行同极性测定



3. 成品变压器用两种方法测定极性

a 交流法

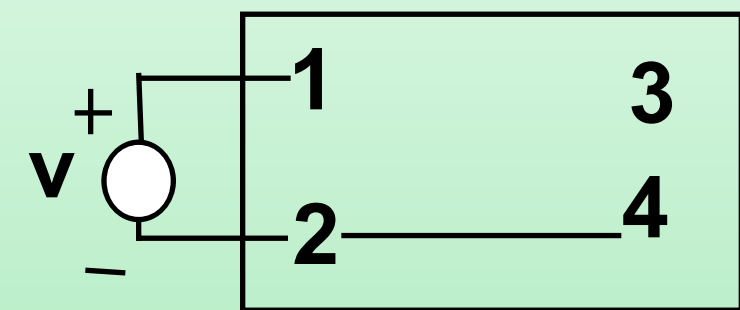
① 2、4相联；

② 1、2端加一个比较低的电压；

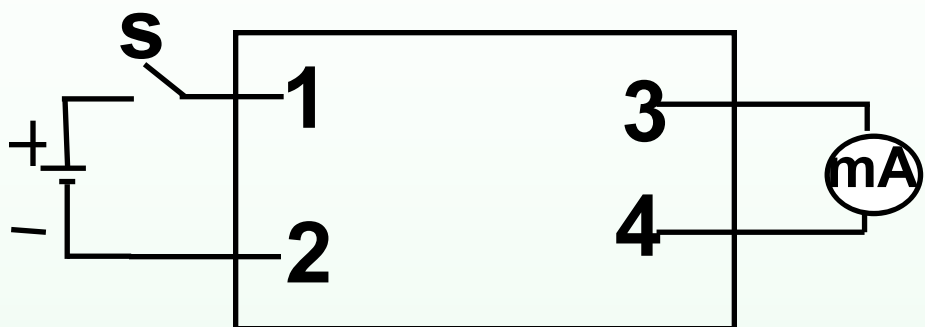
③ 用电压表测 U_{13} , U_{12} , U_{34}

若 $U_{13} = U_{12} + U_{34}$ 则 1、4 为同极性端

若 $U_{13} = U_{12} - U_{34}$ 则 1、3 为同极性端



b 直流法



S合上瞬间

毫安表正偏，1、3同极性端

毫安表反偏，1、4同极性端

作业 2.1、2.2、2.6、 2.7、2.8