



第6章 磁路与铁心线圈电路

电气工程学院 刘宇

Email: yuliu@seu.edu.cn



• 提纲

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



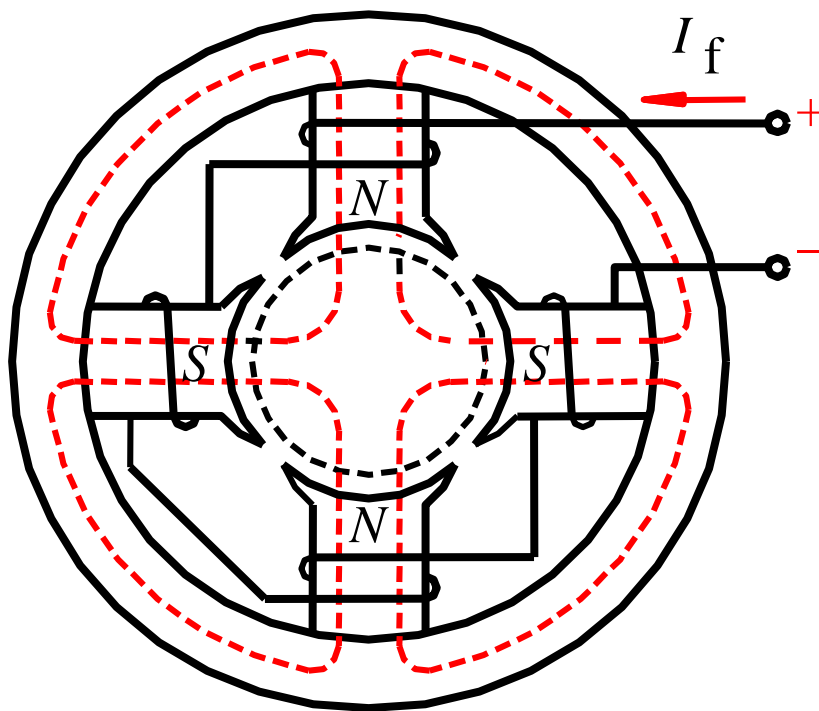
本章要求:

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. 了解三相电压的变换方法；
5. 了解电磁铁的基本工作原理及其应用知识。

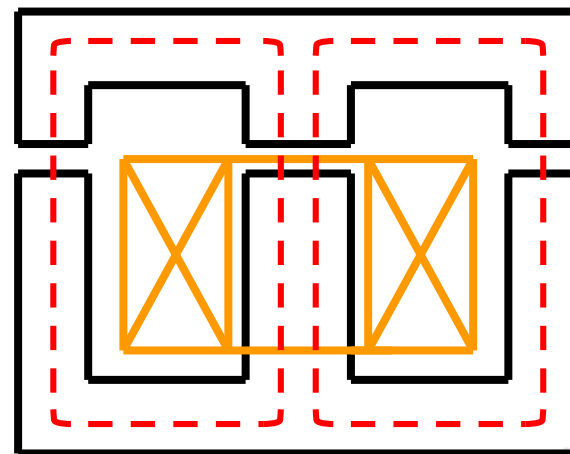


6.1 磁路及其分析方法

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 B ：

表示磁场内某点磁场强弱和方向的物理量。

磁感应强度 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 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**。



磁感应强度

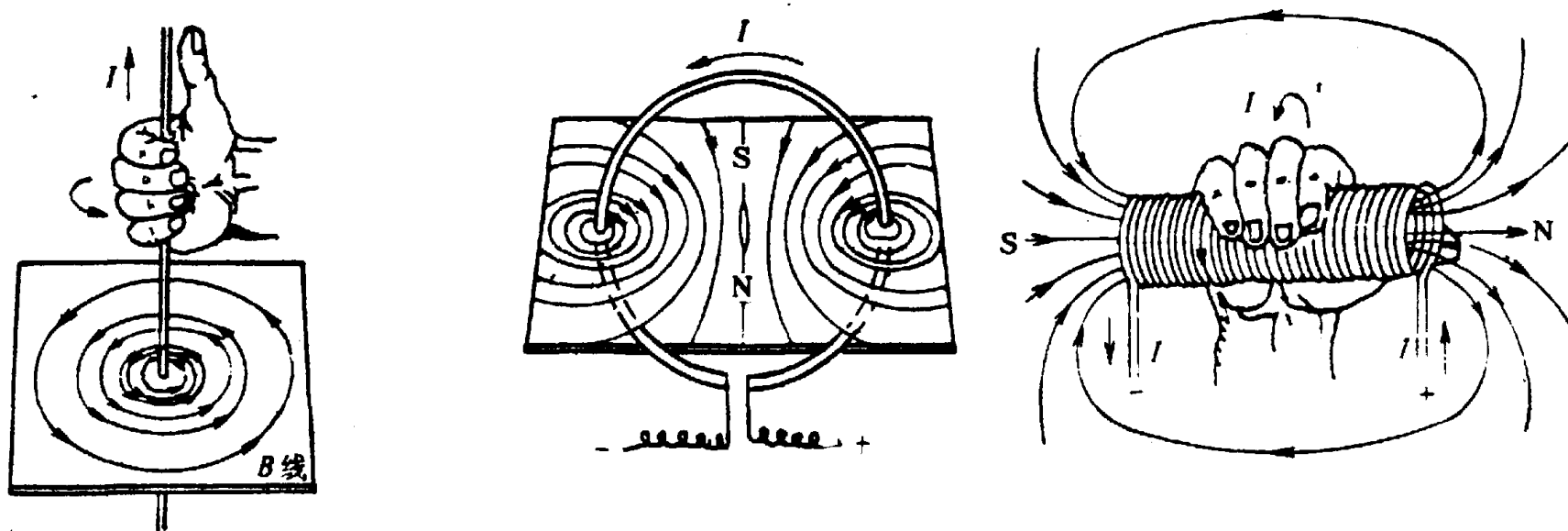


图 1-1 载流长导线、环形导线和螺线管的磁感应线

- (1)磁感应强度的回转方向和电流方向之间的关系遵守**右手螺旋法则**
- (2)磁场中的磁感应线不相交，每点的磁感应强度的方向确定唯一
- (3)载流导线周围的磁感应线都是围绕电流的闭合曲线



2. 磁通

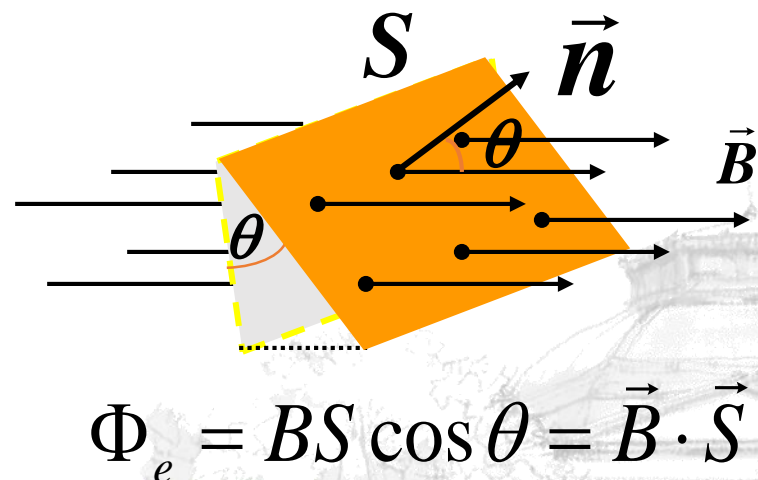
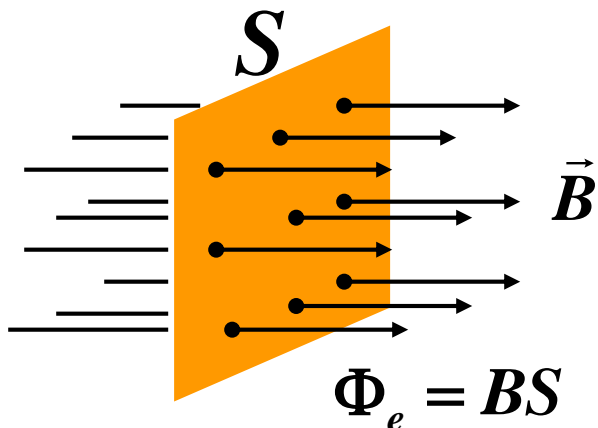
磁通 Φ ：穿过垂直于 B 方向的面积 S 中的磁感应线总数。

在均匀磁场中 $\Phi = B S$ 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 Φ 的单位: 韦[伯](Wb) $1\text{Wb} = 1\text{V}\cdot\text{s}$



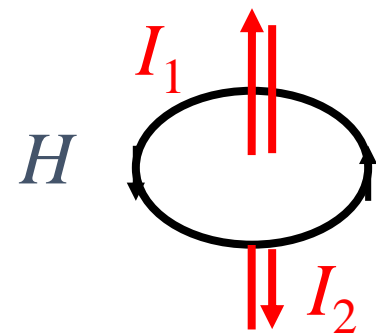
3. 磁场强度

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)

安培环路定律 (全电流定律)

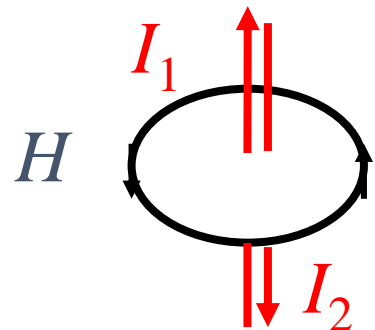
$$\oint H \, dl = \sum I$$



式中： $\oint H \, dl$ 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。



$$\oint H \, dl = \sum I$$



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 μ ：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： $B = \mu H$

磁导率 μ 的单位：亨/米 (H/m)

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

由实验可测得：**真空的磁导率**为： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

因为它是一个常数，将其它物质的磁导率和它比较是很方便的。



相对磁导率 μ_r :

任一种物质的磁导率 μ 和真空的磁导率 μ_0 的比值。

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

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 μ_r 可达 2×10^5)。

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。



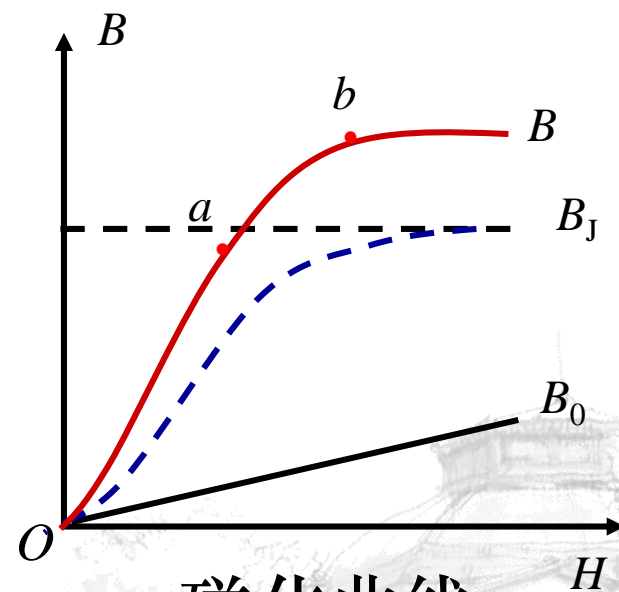
2.磁饱和性

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。



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;

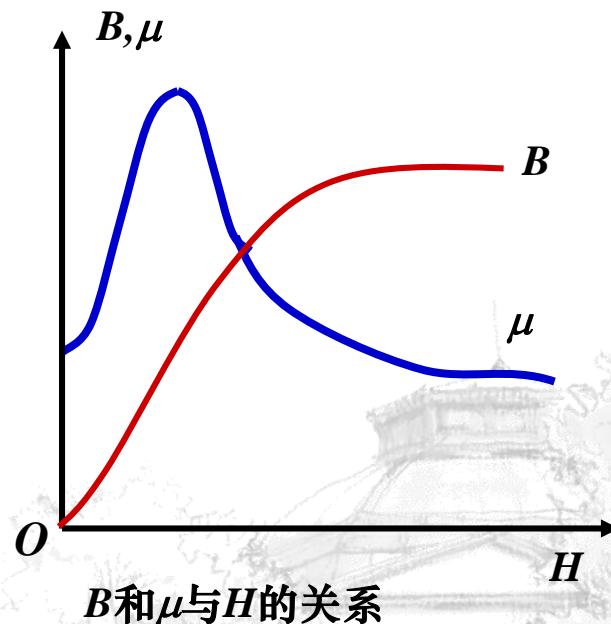
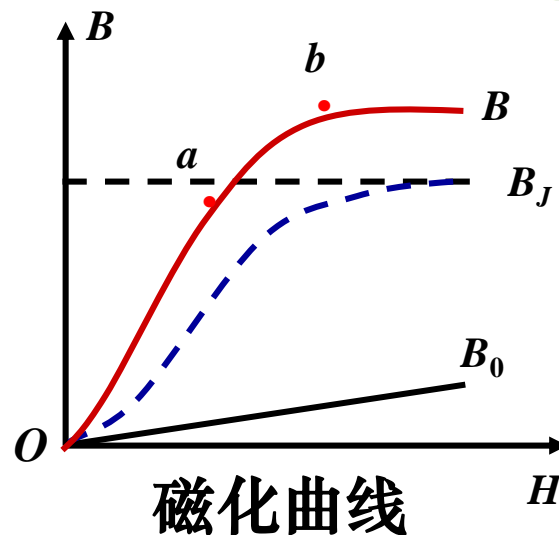
ab 段: B 的增加缓慢下来;

b 点以后: B 增加很少, 达到饱和。

有磁性物质存在时, B 与 H 不成正比,
磁性物质的磁导率 μ 不是常数, 随 H 而变。

有磁性物质存在时, Φ 与 I 不成正比。

磁性物质的磁化曲线在磁路计算上
极为重要, 其为非线性曲线, 实际中
通过实验得出。



3.磁滞性

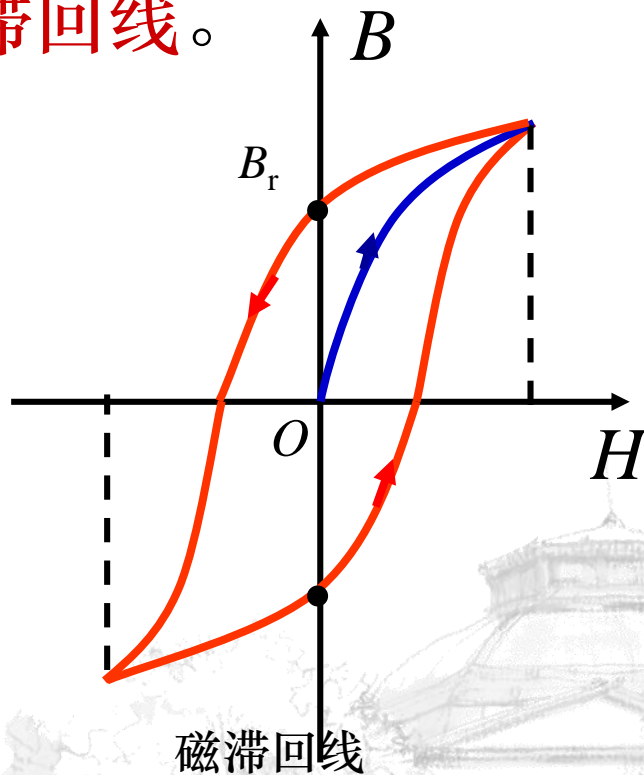
磁滞性：磁性材料中磁感应强度 B 的变化总是滞后于外磁场变化的性质。

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。



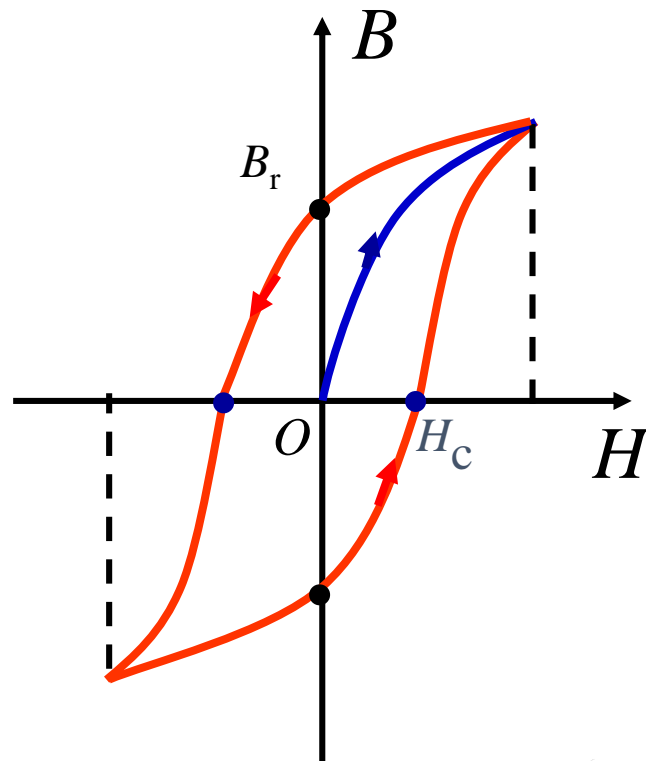
3. 磁滞性

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。

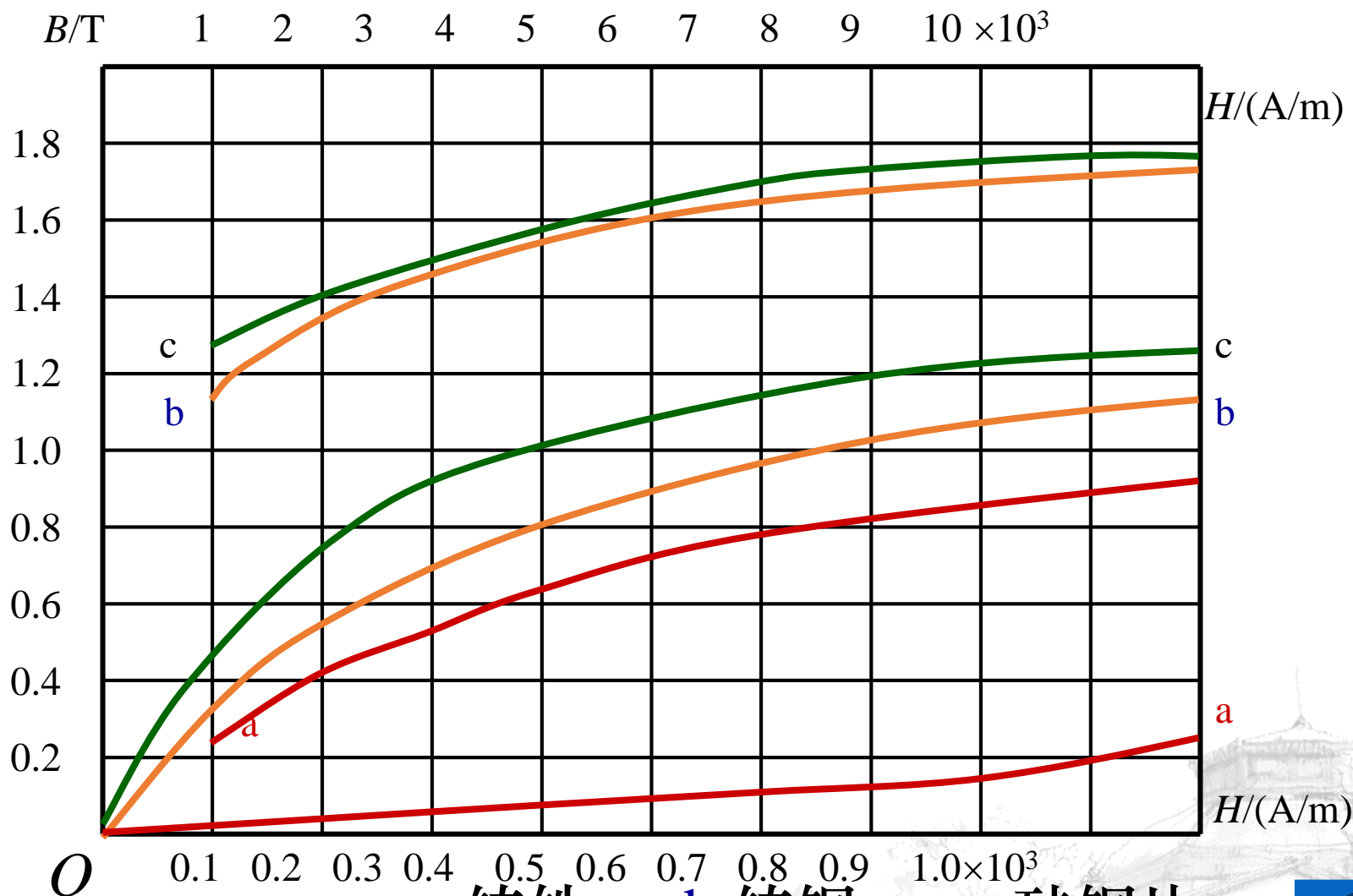
磁性物质不同，其磁滞回线和磁化曲线也不同。



磁滞回线



几种常见磁性物质的磁化曲线



a 铸铁

b 铸钢

c 硅钢片

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

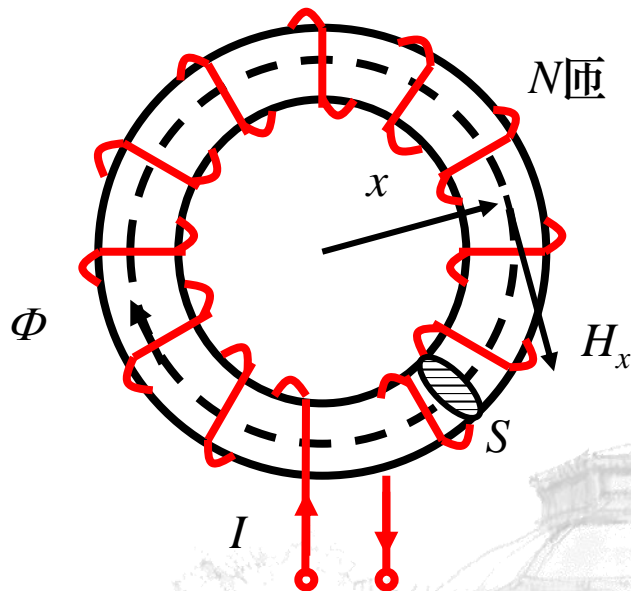
环形线圈如图，其中媒质是均匀的，磁导率为 μ ，试计算线圈内部的磁通 Φ 。

解：根据安培环路定律，有

$$\oint H \, dl = \sum I$$

设磁路的平均长度为 l ，则有

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



即有：

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

式中： $F=NI$ 为磁通势，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。

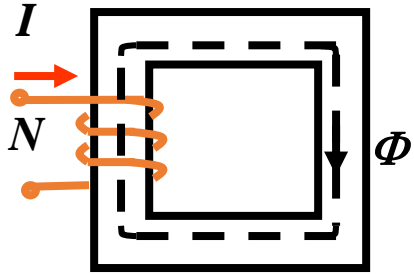
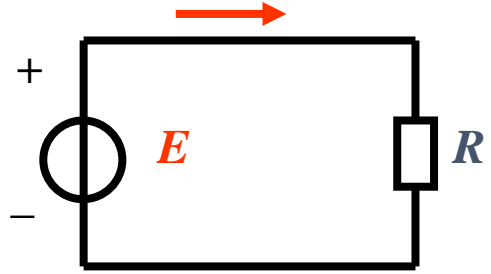
2. 磁路的欧姆定律

若某磁路的磁通为 Φ ，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. 磁路与电路的比较

磁路	电路
<p>磁通势 F</p> <p>磁通 Φ</p> <p>磁感应强度 B</p> <p>磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$</p>  <p>$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S}}$</p>	<p>电动势 E</p> <p>电流 I</p> <p>电流密度 J</p> <p>电阻 $R = \frac{l}{\gamma S}$</p>  <p>$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{\frac{l}{\gamma S}}$</p>



4. 磁路分析的特点

- (1) 在处理电路时不涉及电场问题，在处理磁路时离不开磁场的概念；例如在讨论电机时，常常要分析电机磁路的气隙中磁感应强度的分布情况。
- (2) 在处理电路时一般可以不考虑漏电流，在处理磁路时一般都要考虑漏磁通；
- (3) 磁路欧姆定律和电路欧姆定律只是在形式上相似。由于 μ 不是常数，其随励磁电流而变，磁路欧姆定律不能直接用来计算，只能用于定性分析；
- (4) 在电路中，当 $E=0$ 时， $I=0$ ；但在磁路中，由于有剩磁，当 $F=0$ 时， Φ 不为零；



5. 磁路的分析计算

主要任务: 预先选定磁性材料中的磁通 ϕ (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 Φ 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 Φ ，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)

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



例1:一个具有闭合的均匀的铁心线圈，其匝数为300，铁心中的磁感应强度为 0.9T，磁路的平均长度为45cm，试求：(1)铁心材料为铸铁时线圈中的电流；(2)铁心材料为硅钢片时线圈中的电流。

解：(1) 查铸铁材料的磁化曲线，

当 $B=0.9\text{ T}$ 时， 磁场强度 $H=9000\text{ A/m}$ ， 则

$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{9000 \times 0.45}{300} = 13.5\text{ A}$$

(2)查硅钢片材料的磁化曲线，

当 $B=0.9\text{ T}$ 时， 磁场强度 $H=260\text{ A/m}$ ， 则

$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{260 \times 0.45}{300} = 0.39\text{ A}$$

结论：如果要得到相等的磁感应强度，采用磁导率高的铁心材料，可以降低线圈电流，减少用铜量。



例2: 有一环形铁心线圈，其内径为10cm，外径为15cm，铁心材料为铸钢。磁路中含有一空气隙，其长度等于 0.2cm。设线圈中通有 1A 的电流，如要得到 0.9T 的磁感应强度，试求线圈匝数。

解: 空气隙的磁场强度

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.9}{4\pi \times 10^{-7}} = 7.2 \times 10^5 \text{ A/m}$$

铸钢铁心的磁场强度，查铸钢的磁化曲线，
 $B=0.9 \text{ T}$ 时，磁场强度 $H_1=500 \text{ A/m}$

磁路的平均总长度为 $l = \frac{10+15}{2} \pi = 39.2 \text{ cm}$

铁心的平均长度 $l_1 = l - \delta = 39.2 - 0.2 = 39 \text{ cm}$



对各段有 $H_0\delta = 7.2 \times 10^5 \times 0.2 \times 10^{-2} = 1440 \text{ A}$

$$H_1 l_1 = 500 \times 39 \times 10^{-2} = 195 \text{ A}$$

总磁通势为 $NI = H_0\delta + H_1 l_1 = 1440 + 195 = 1635 \text{ A}$

线圈匝数为 $N = \frac{NI}{I} = \frac{1635}{1} = 1635$

磁路中含有空气隙时，由于其磁阻较大，磁通势几乎都降在空气隙上面。

结论：当磁路中含有空气隙时，由于其磁阻较大，要得到相等的磁感应强度，必须增大励磁电流（设线圈匝数一定）。



通过上述例题，可以得出如下结论：

(1) 如果要得到相等的磁感应强度，采用高磁导率的铁心材料，可使线圈的用铜量大大降低。

(2) 如果线圈中同有同样大小的励磁电流，要得到相等的磁通，采用磁导率高的铁心材料，可使铁心的用铁量大大降低。

(3) 当磁路中含有空气隙时，由于其磁阻较大，要得到相等的磁感应强度，必须增大励磁电流（线圈匝数一定时）。



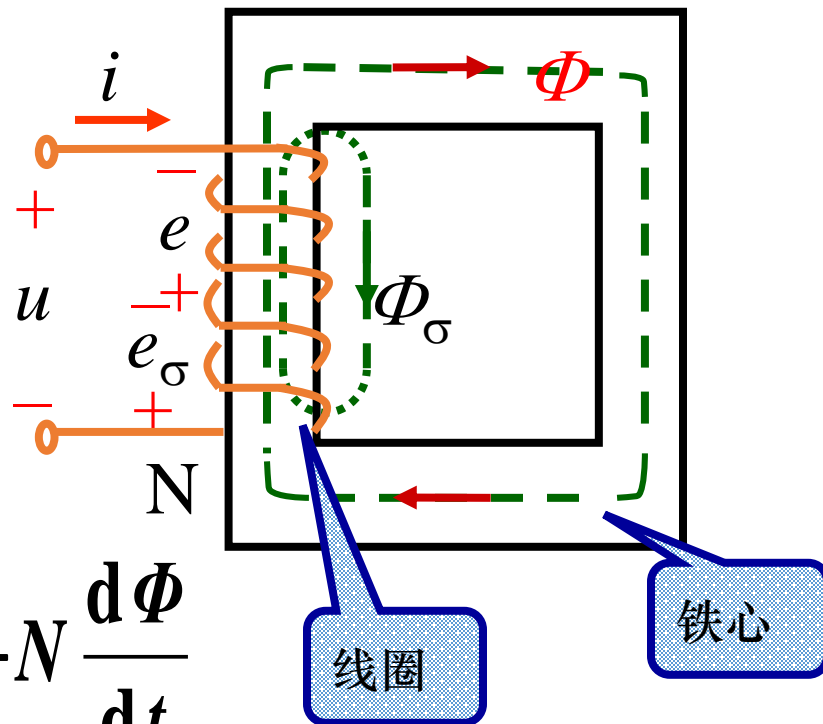
6.2 交流铁心线圈电路

6.2.1 电磁关系

主磁通 Φ ：通过铁心闭合的磁通。

Φ 与 i 不是线性关系。

漏磁通 Φ_σ ：经过空气或其它非导磁媒质闭合的磁通。



$$\begin{aligned}
 u \rightarrow i(Ni) & \rightarrow \Phi \rightarrow e = -N \frac{d\Phi}{dt} \\
 (\text{磁通势}) & \rightarrow \Phi_\sigma \rightarrow e_\sigma = -N \frac{d\Phi_\sigma}{dt} = -L_\sigma \frac{di}{dt}
 \end{aligned}$$

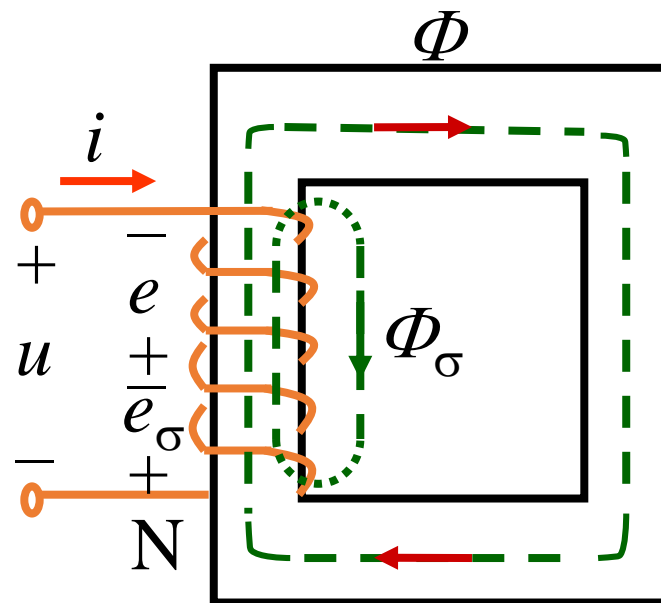
$$\Phi_\sigma \propto i, \quad \text{铁心线圈的漏磁电感} \quad L_\sigma = \frac{N\Phi_\sigma}{i} = \text{常数}$$

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_{σ} 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:

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



$\dot{U} = RI + jX_{\sigma}I + (-\dot{E})$ 设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 则

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) = -N \omega \Phi_m \cos \omega t$$

$$= 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

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_{σ} (或漏磁通 Φ_{σ}) 较小, 其电压降也较小, 与主磁电动势 E 相比可忽略, 故有

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

式中: B_m 是铁心中磁感应强度的最大值, 单位[T];

S 是铁心截面积, 单位[m²].



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(ΔP_{cu})

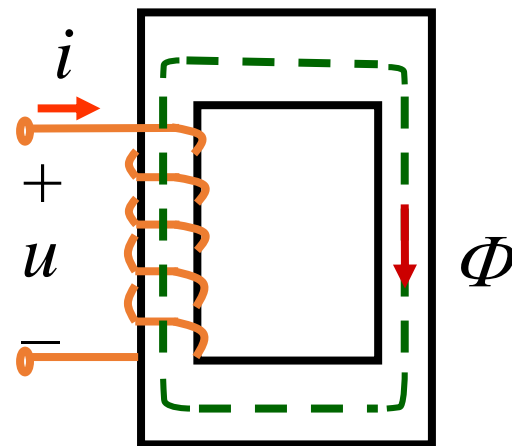
在交流铁心线圈中, 线圈电阻 R 上的功率损耗称铜损, 用 ΔP_{cu} 表示。

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

式中: R 是线圈的电阻; I 是线圈中电流的有效值。

2. 铁损(ΔP_{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 ΔP_{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 (ΔP_h)

由磁滞所产生的能量损耗称为**磁滞损耗**(ΔP_h)。

磁滞损耗的大小：

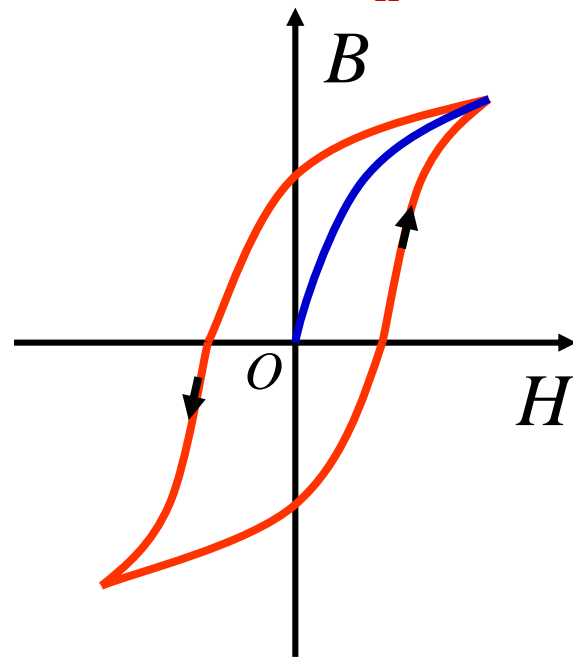
单位体积内的磁滞损耗正比
与磁滞回线的面积和磁场交变的
频率 f 。

磁滞损耗转化为热能，引起
铁心发热。

减少磁滞损耗的措施：

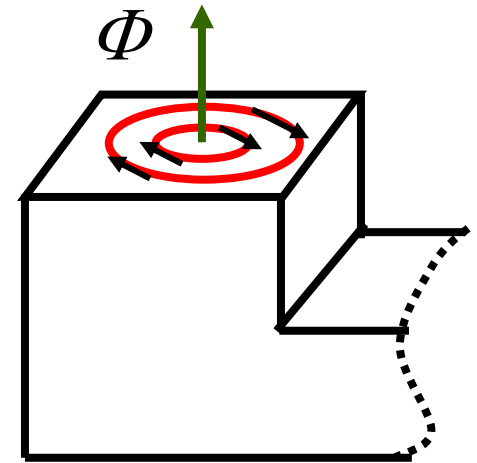
选用磁滞回线狭小的磁性材料制作铁心。变压器
和电机中使用的硅钢等材料的磁滞损耗较低。

设计时应适当选择值以减小铁心饱和程度。



(2) 涡流损耗 (ΔP_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。

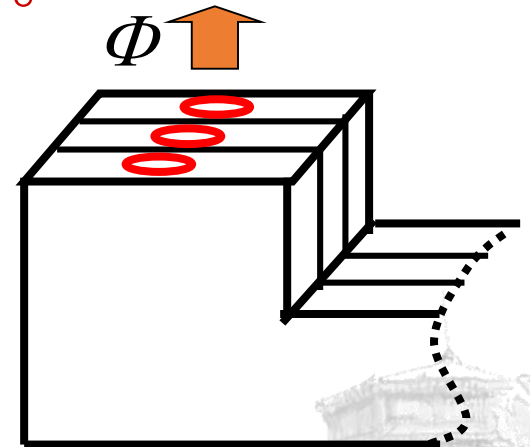


涡流损耗：由涡流所产生的功率损耗。

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：

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

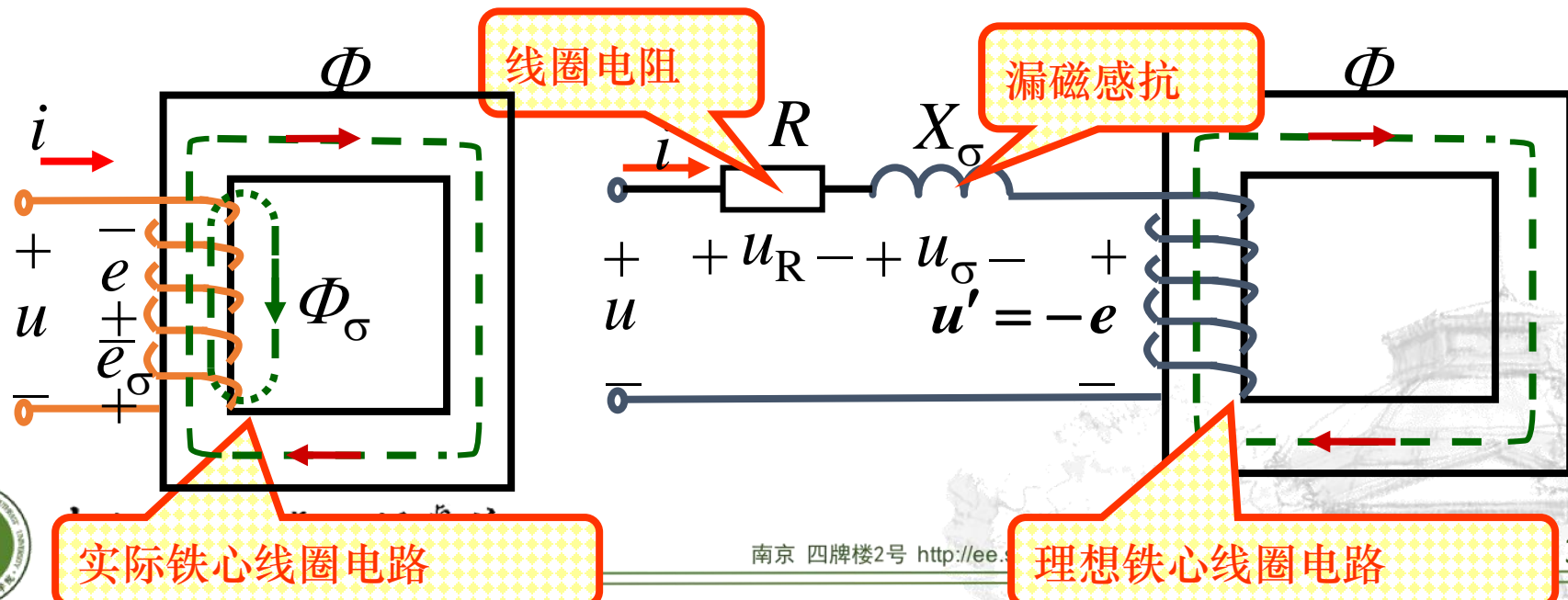


6.2.4 等效电路

用一个不含铁心的交流电路来等效替代铁心线圈交流电路。

等效条件：在同样电压作用下，功率、电流及各量之间的相位关系保持不变。

先将实际铁心线圈的线圈电阻 R 、漏磁感抗 X_σ 分出，得到用理想铁心线圈表示的电路；



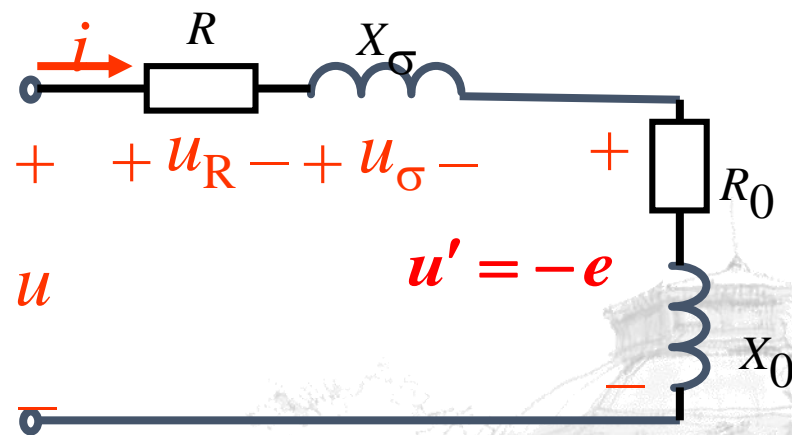
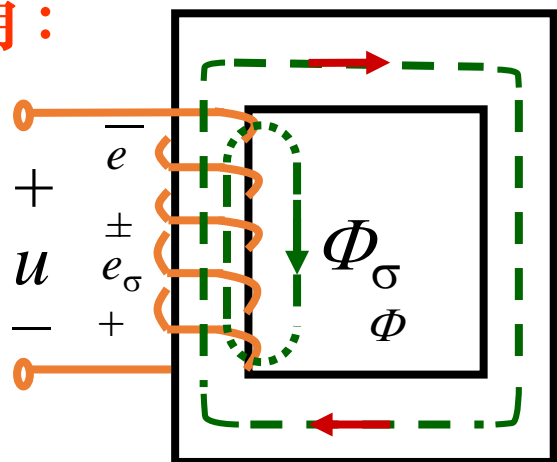
理想铁心线圈的等效电路

理想铁心线圈有能量的损耗和储放，可用具有电阻 R_0 和感抗 X_0 串联的电路等效。其中：电阻 R_0 是和铁心能量损耗(铁损)相应的等效电阻，感抗 X_0 是和铁心能量储放相应的等效感抗。其参数为：

$$R_0 = \frac{\Delta P_{\text{Fe}}}{I^2} \quad X_0 = \frac{Q_{\text{Fe}}}{I^2} \quad |Z_0| = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = \frac{U'}{I} \approx \frac{U}{I}$$

式中： ΔP_{Fe} 为铁损， Q_{Fe} 为铁心储放能量的无功功率。

故有：



等效电路

例1: 有一交流铁心线圈，电源电压 $U=220\text{ V}$ 电路中电流 $I=4\text{ A}$ ，功率表读数 $P=100\text{ W}$ ，频率 $f=50\text{ Hz}$ ，漏磁通和线圈电阻上的电压降可忽略不计，试求：(1) 铁心线圈的功率因数； (2) 铁心线圈的等效电阻和感抗。

解：(1) $\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{100}{220 \times 4} = 0.114$

(2) 铁心线圈的等效阻抗模为

$$|Z'| = \frac{U}{I} = \frac{220}{4} = 55\ \Omega$$

等效电阻为 $R' = R + R_0 = \frac{P}{I^2} = \frac{100}{4^2} = 6.25\ \Omega \approx R_0$

等效感抗为 $X' = X_\sigma + X_0 = \sqrt{|Z'|^2 - R'^2} = \sqrt{55^2 - 6.25^2}$

$= 54.6\ \Omega \approx X_0$



例2: 要绕制一个铁心线圈，已知电源电压 $U=220\text{ V}$ ，频率 $f=50\text{Hz}$ ，今量得铁心截面为 30.2 cm^2 ，铁心由硅钢片叠成，设叠片间隙系数为 0.91 (一般取 $0.9\sim 0.93$)。

(1) 如取 $B_m=1.2\text{T}$ ，问线圈匝数应为多少？(2) 如磁路平均长度为 60cm ，问励磁电流应多大？

解: 铁心的有效面积为 $S = 30.2 \times 0.91 = 27.5\text{ cm}^2$

(1) 线圈匝数为

$$N = \frac{U}{4.44 f B_m S} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 1.2 \times 27.5 \times 10^{-4}} = 300$$

(2) 查磁化曲线图， $B_m=1.2\text{T}$ 时， $H_m=700\text{ A/m}$ ，则

$$I = \frac{H_m l}{\sqrt{2} N} = \frac{700 \times 60 \times 10^{-2}}{\sqrt{2} \times 300} = 1\text{ A}$$



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

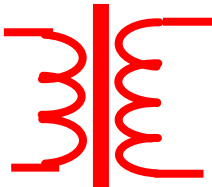
在能量传输过程中，当输送功率 $P = UI \cos \varphi$ 及负载功率因数 $\cos \varphi$ 一定时：

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



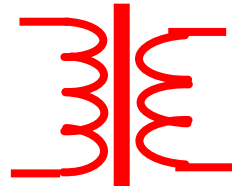
电力工业中常采用高压输电低压配电，实现节能并保证用电安全。具体如下：

发电厂
10.5kV



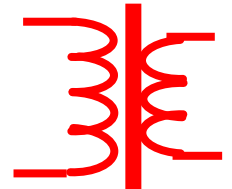
输电线
220kV

升压



变电站
10kV

降压



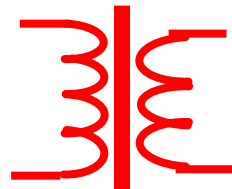
降压

...



实验室
380 / 220V

降压

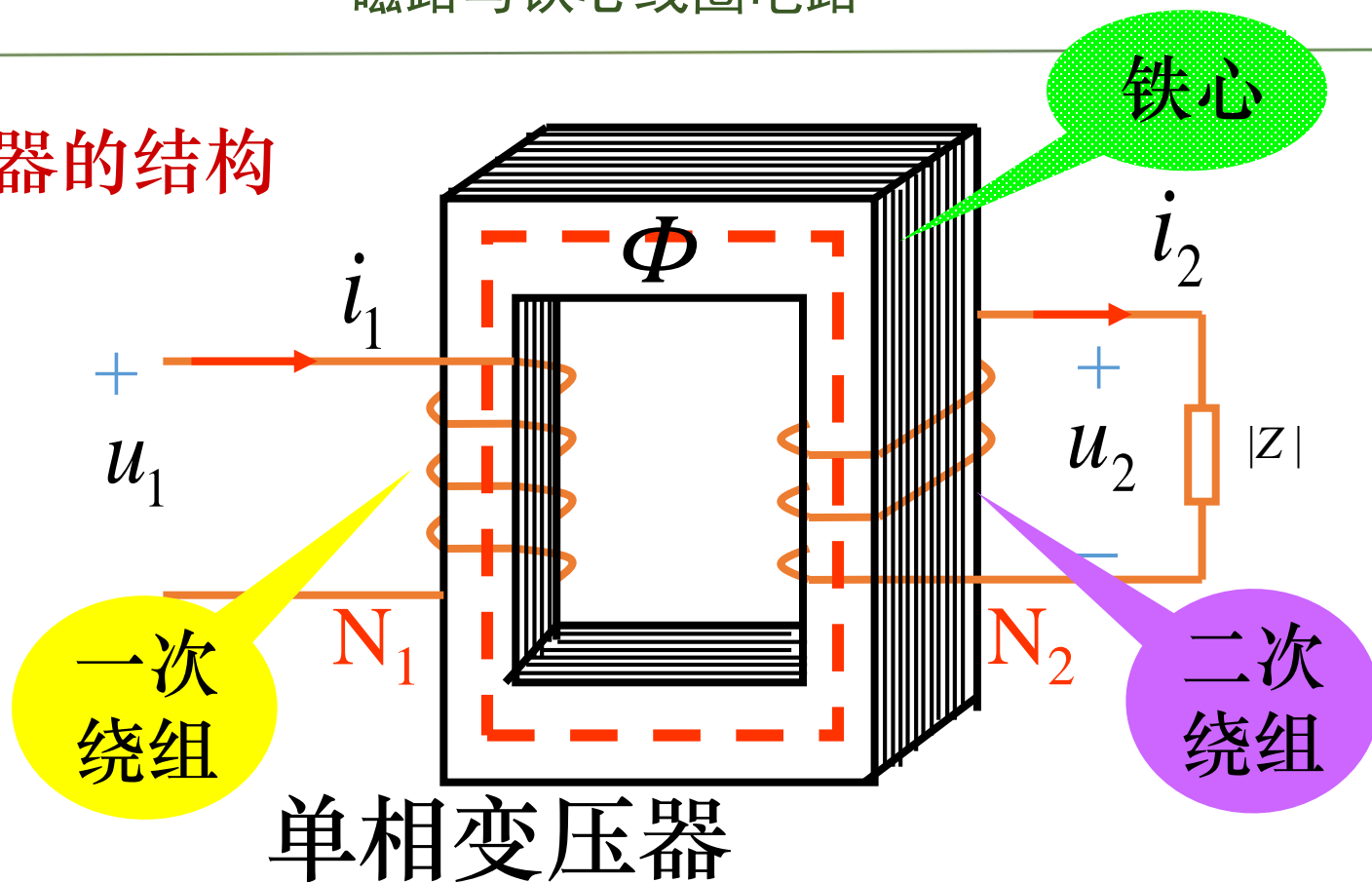


仪器
36V

降压



变压器的结构



绕组：{ 一次绕组
二次绕组

铁心 { 由高导磁硅钢片叠成
厚0.35mm 或 0.5mm
变压器的磁路

变压器的电路

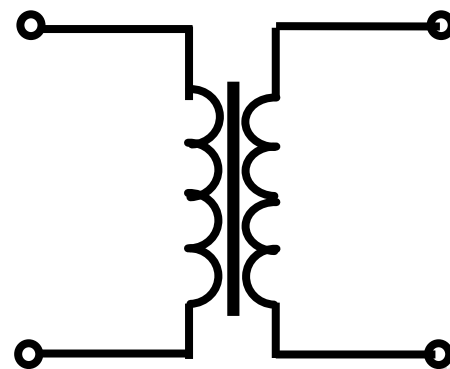


变压器的分类

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



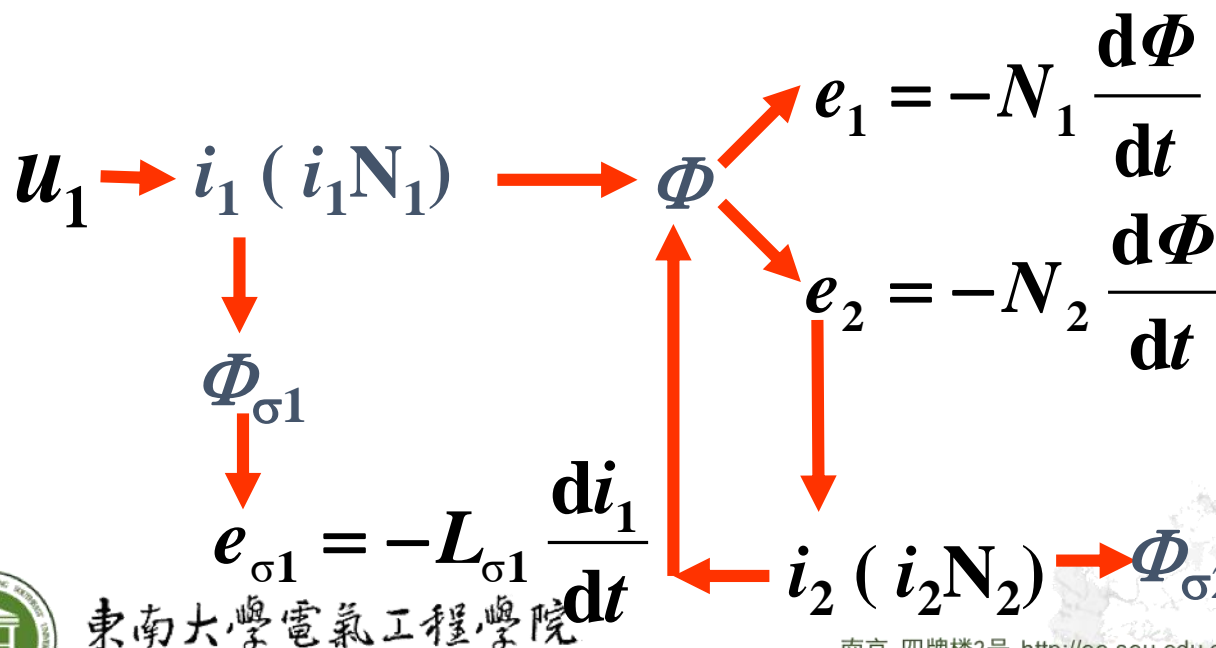
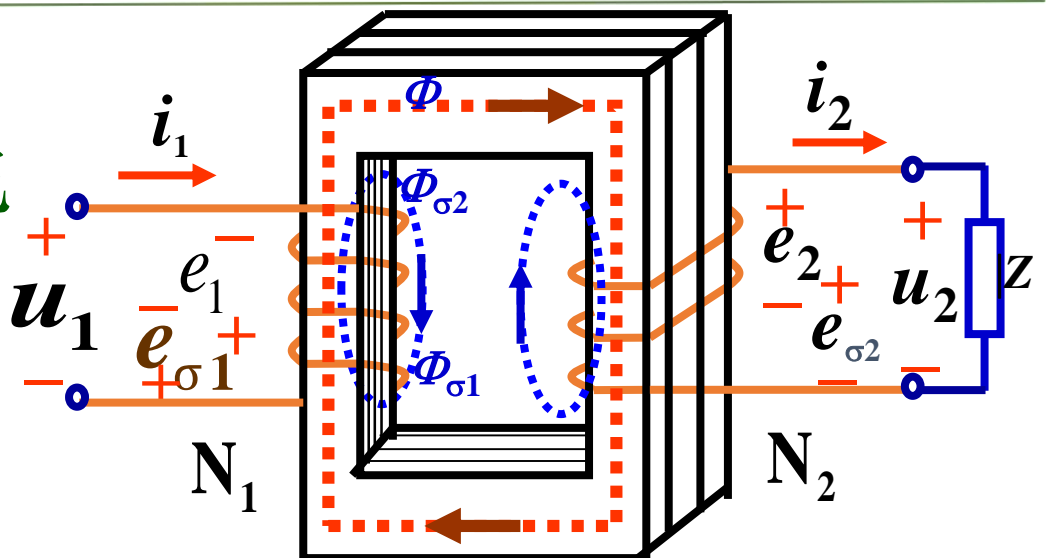
变压器符号



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 Φ 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: $E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}}$

$$\underline{E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1}$$

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

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



(2) 一次、二次侧电压

变压器一次侧等效电路如图

根据KVL:

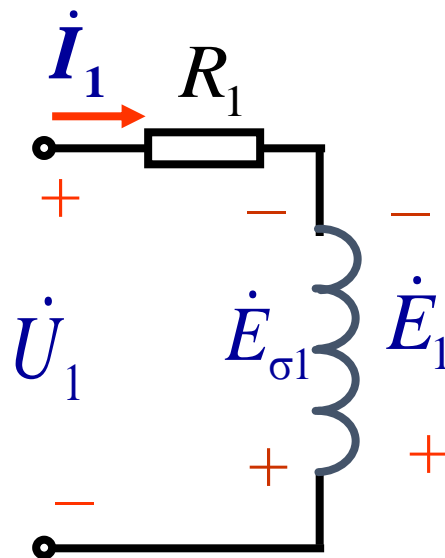
$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{E}_1 \\ &= R_1 \dot{I}_1 + \mathrm{j} X_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_1\end{aligned}$$

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



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；

为二次 \dot{U}_2 绕组的端电压。

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

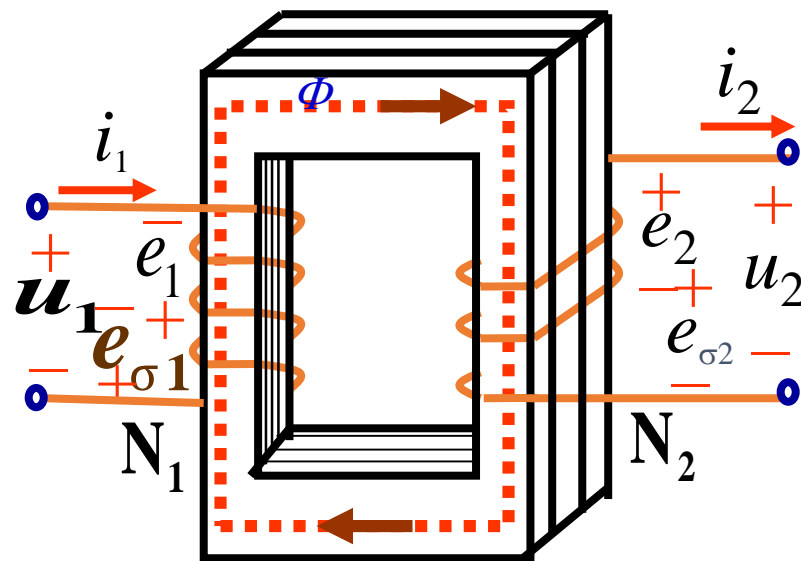
式中 U_{20} 为变压器空载电压。

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。



三相电压的变换

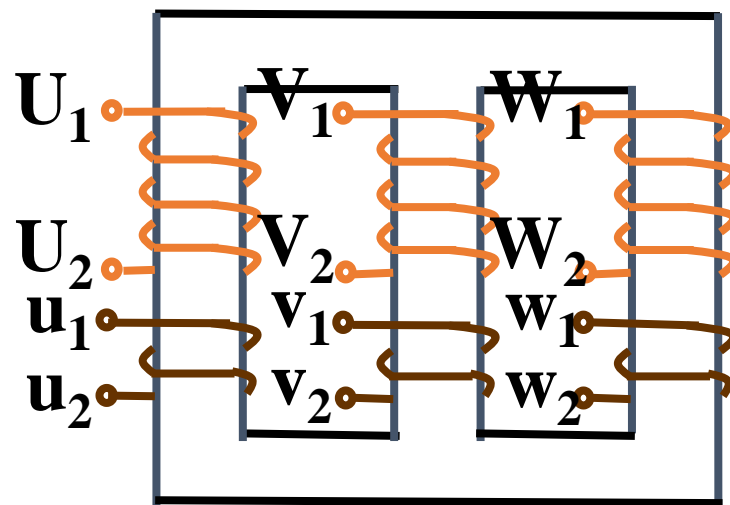
(1) 三相变压器的结构

高压绕组: U_1 、 V_1 、 W_1 : 首端

U_2 、 V_2 、 W_2 : 尾端

低压绕组: u_1 、 v_1 、 w_1 : 首端

u_2 、 v_2 、 w_2 : 尾端



(2) 三相变压器的联结方式

高压绕组接法

联结方式: Y/Y 、 Y/Y_0 、 Y_0/Y 、 Y/Δ 、 Y_0/Δ

常用接法: Y/Y_0 : 三相配电变压器

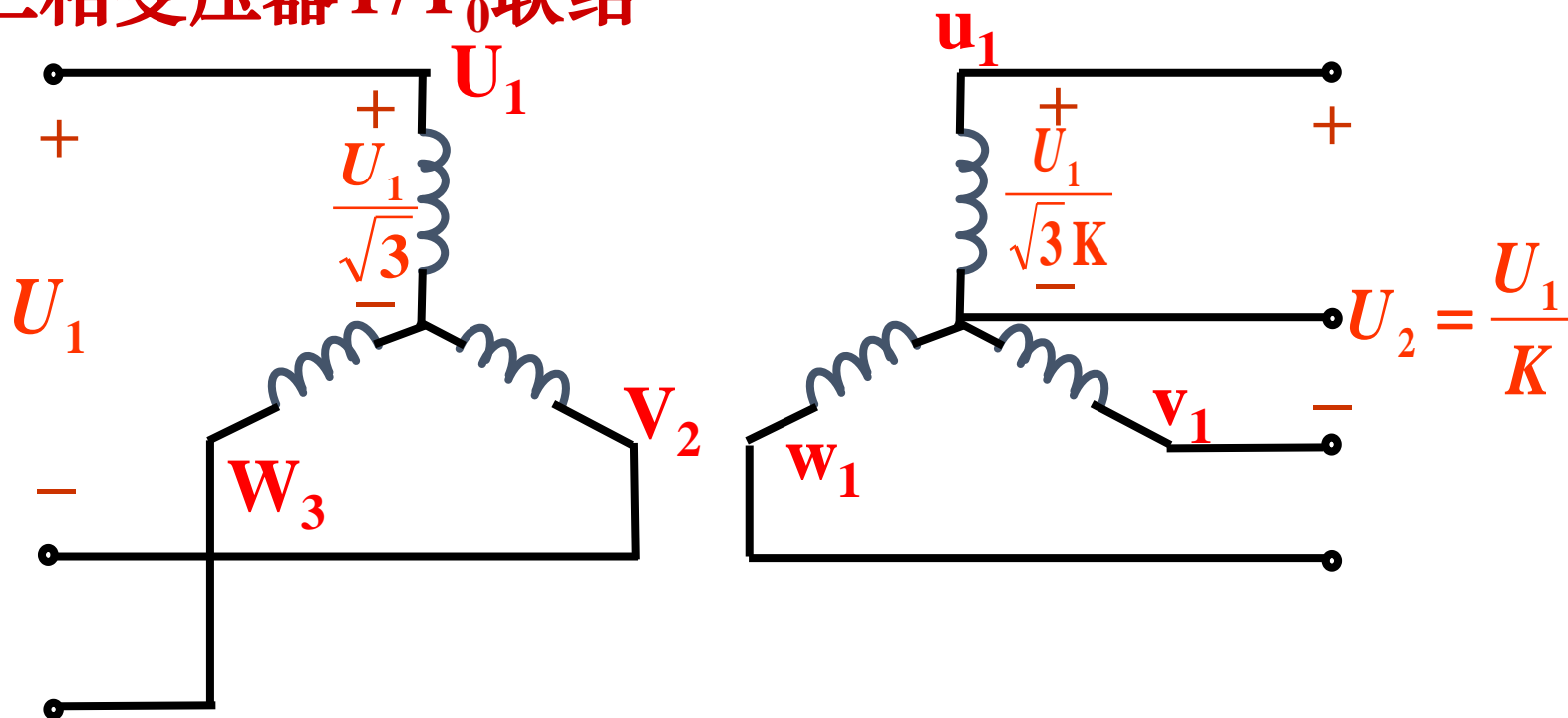
Y/Δ : 动力供电系统 (井下照明)

Y_0/Δ : 高压、超高压供电系统

低压绕组接法



1) 三相变压器Y/Y₀联结

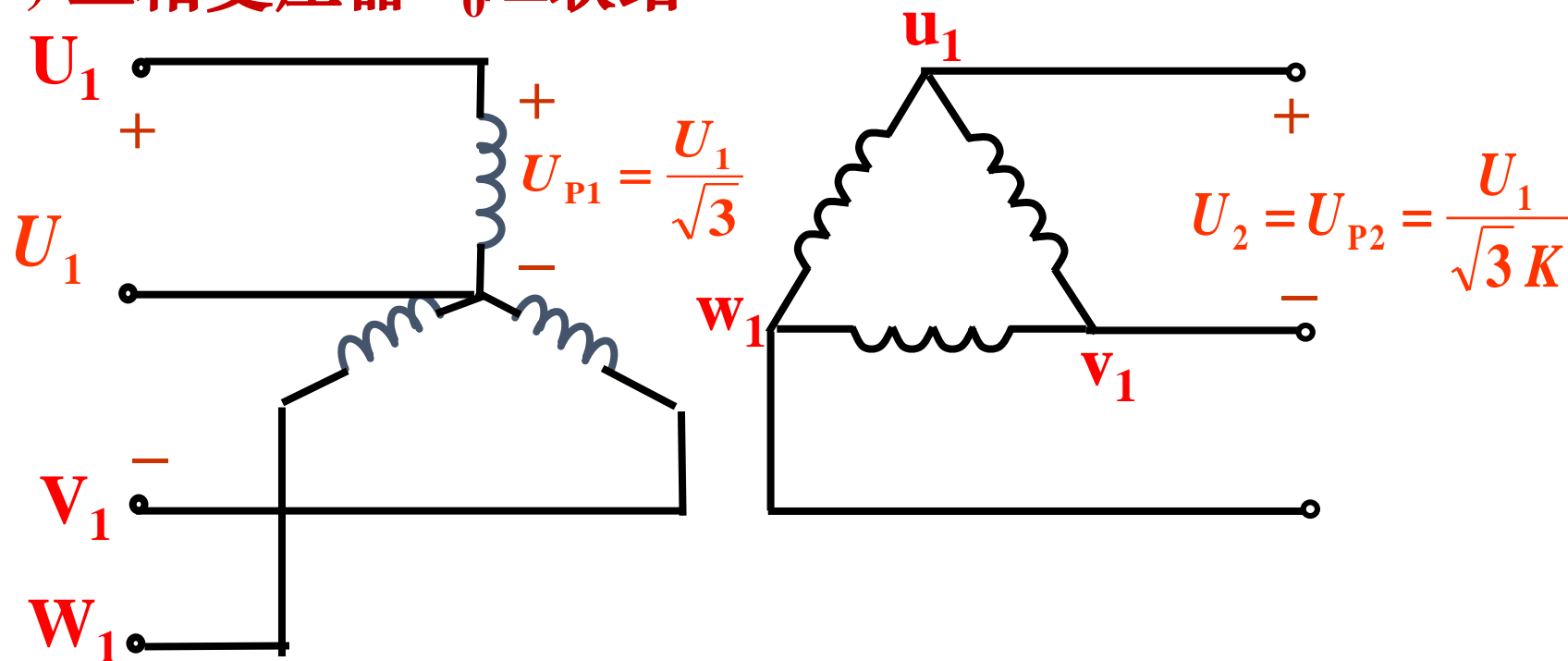


线电压之比:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} U_{P1}}{\sqrt{3} U_{P2}} = \frac{U_{P1}}{U_{P2}} = K$$



2) 三相变压器Y₀/Δ联结



线电压之比:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U_{P1}}{U_{P2}} = \sqrt{3} \frac{U_{P1}}{U_{P2}} = \sqrt{3}K$$

3. 电流变换 (一次、二次侧电流关系)

有载运行

$$Z_2 \rightarrow \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}$$

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

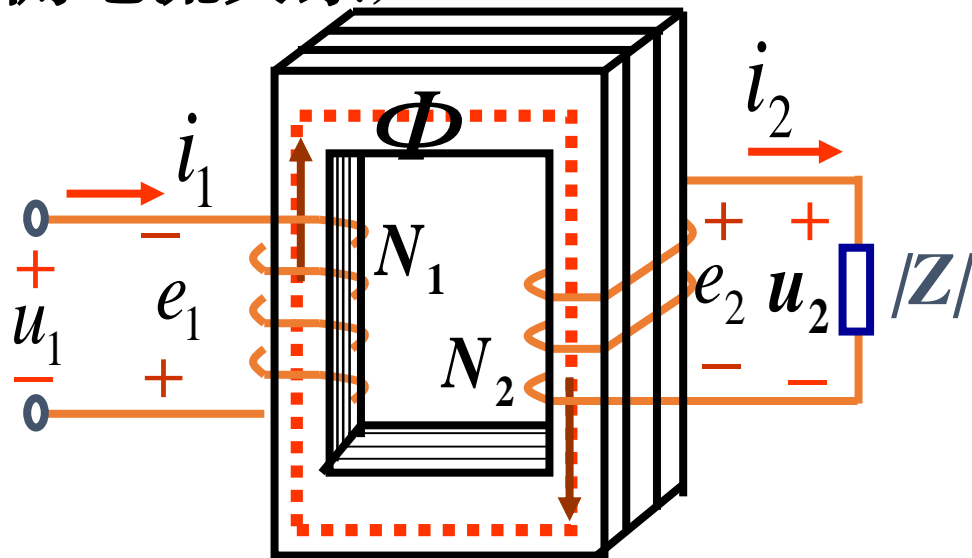
$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

当 U_1 、 f 不变，则 Φ_m 基本不变，近于常数。

即：铁心中主磁通的最大值 Φ_m 在变压器空载和有载时基本是恒定的。

$$\text{空载: } i_0 N_1 \rightarrow \Phi_m$$

$$\text{有载: } i_1 N_1 + i_2 N_2 \rightarrow \Phi_m$$



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

一般情况下: $I_0 \approx (2 \sim 3)\% I_{1N}$ 很小可忽略。

所以 $i_1 N_1 \approx -i_2 N_2$ 或 $\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2$

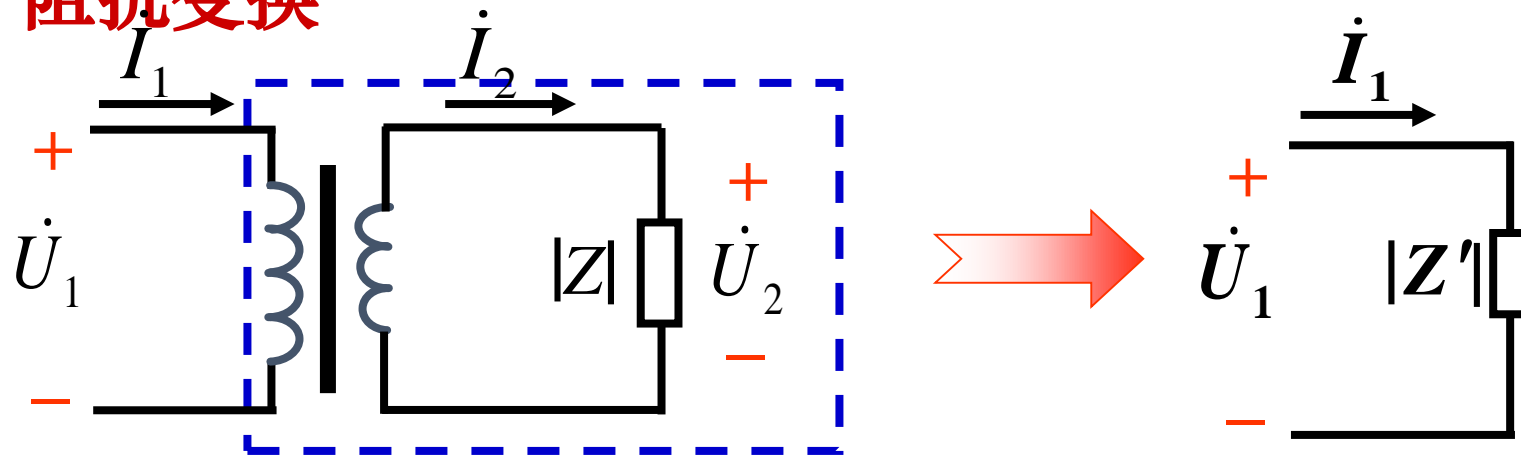
所以 $I_1 N_1 \approx I_2 N_2$

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

结论: 一次、二次侧电流与匝数成反比。



4. 阻抗变换



由图可知： $|Z| = \frac{U_2}{I_2}$

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

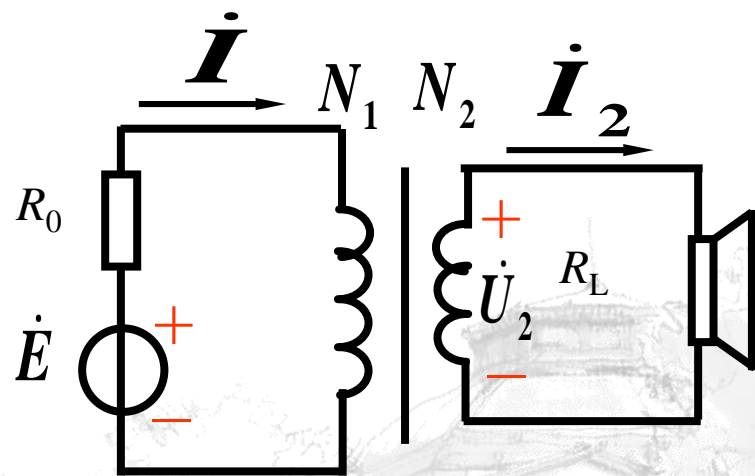
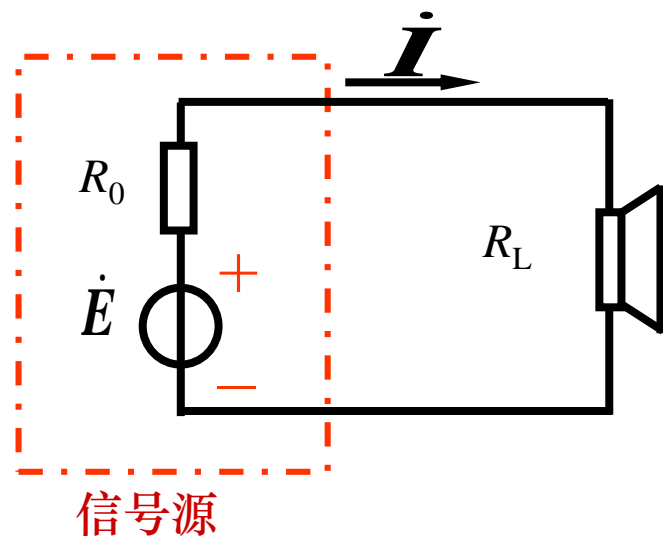
$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{KU_2}{\frac{I_2}{K}} = K^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 |Z| \quad \boxed{|Z'| = K^2 |Z|}$$

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。



例2: 有一机床照明变压器, 50VA, $U_1=380\text{ V}$, $U_2=36\text{ V}$, 其绕组已烧毁, 要拆去重绕。今测得其铁心截面积为 $22\text{mm} \times 41\text{mm}$ (如图)。铁心材料是 0.35mm 厚的硅钢片。试计算一次、二次绕组匝数及导线线径。

解: 铁心的有效截面积为

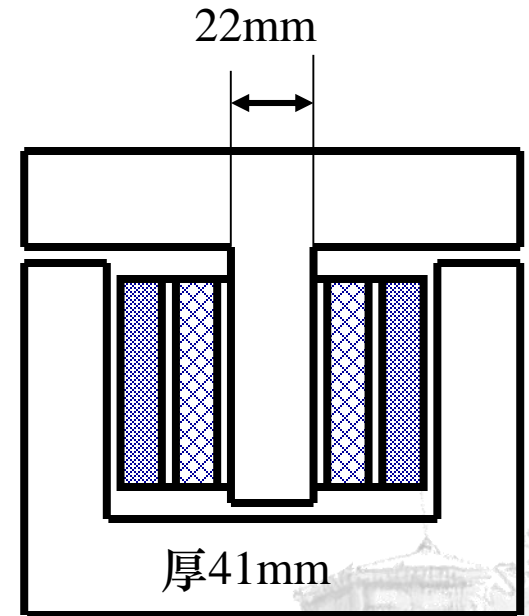
$$S = 2.2 \times 4.1 \times 0.9 = 8.1 \text{ cm}^2$$

式中 0.9 为铁心叠片间隙系数。

对 0.35mm 的硅钢片, 可取 $B_m = 1.1\text{ T}$

一次绕组匝数为

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44 f B_m S} = \frac{380}{4.44 \times 50 \times 1.1 \times 8.1 \times 10^{-4}} = 1920$$



二次绕组匝数为

$$N_2 = N_1 \frac{U_{20}}{U_1} = N_1 \frac{1.05 U_2}{U_1} = 1920 \times \frac{1.05 \times 36}{380} = 190$$

(设 $U_{20}=1.05U_2$)

二次绕组电流为

$$I_2 = \frac{S_N}{U_2} = \frac{50}{36} = 1.39 \text{ A}$$

一次绕组电流为

$$I_1 = \frac{S_N}{U_1} = \frac{50}{380} = 0.13 \text{ A}$$

导线直径计算公式

$$I = J \left(\frac{\pi d^2}{4} \right), \quad d = \sqrt{\frac{4I}{\pi J}}$$

式中， J 是电流密度，一般取 $J = 2.5 \text{ A/mm}^2$ 。

一次绕组线径为

$$d_1 = \sqrt{\frac{4I_1}{\pi J}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.13}{3.14 \times 2.5}} = 0.256 \text{ mm (取0.25mm)}$$

二次绕组线径为

$$d_2 = \sqrt{\frac{4I_2}{\pi J}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.39}{3.14 \times 2.5}} = 0.84 \text{ mm (取0.9mm)}$$



5. 变压器的铭牌和技术数据

1) 变压器的型号

S J L —1000/10

高压绕组的额定电压(KV)

变压器额定容量(KVA)

铝线圈

冷却方式 { J:油浸自冷式
F:风冷式

相数 { S:三相
D:单相



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

变压器运行时的功率取决于负载的性质

效率

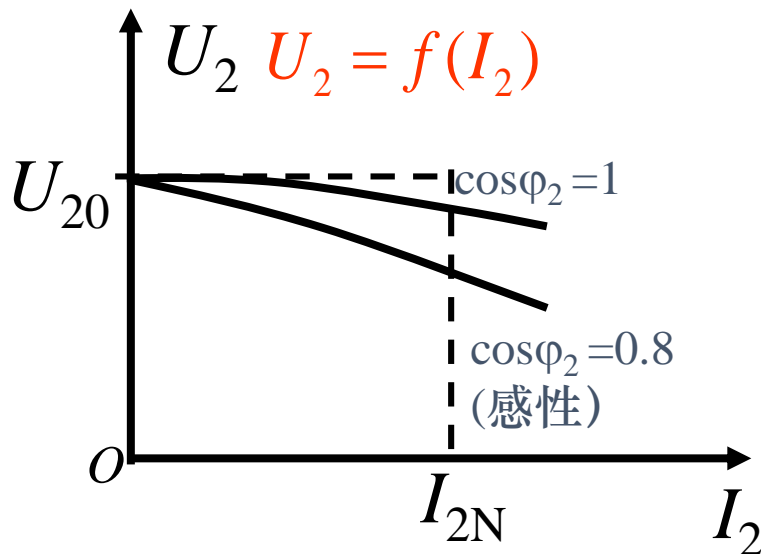
一次侧输入功率 $P_1 \neq$ 输出功率 P_2



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(η)

变压器的损耗包括两部分：

铜损 (ΔP_{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 (ΔP_{Fe})：

- 磁滞损耗：它与铁心内磁感应强度的最大值 B_m 的平方成正比。
- 涡流损耗：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， η 最大。

例 3: 有一带电阻负载的三相变压器，其额定数据如下： $S_N=100\text{kVA}$ ， $U_{1N}=6000\text{V}$ ， $f=50\text{Hz}$ 。

$U_{2N}=U_{20}=400\text{V}$ ，绕组连接成 Y/Y_0 。由试验测得： $\Delta P_{Fe}=600\text{ W}$ ，额定负载时的 $\Delta P_{Cu}=2400\text{W}$ 。

试求 (1) 变压器的额定电流；
(2) 满载和半载时的效率。

解: (1) 额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 144 \text{ A}$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} = 9.62 \text{ A}$$



(2) 满载和半载时的效率

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cu}}} = \frac{100 \times 10^3}{100 \times 10^3 + 600 + 2400} = 97.1\%$$

$$\eta_{\frac{1}{2}} = \frac{\frac{1}{2} \times 100 \times 10^3}{\frac{1}{2} \times 100 \times 10^3 + 600 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 2400} = 97.6\%$$



6.3.4 变压器绕组的极性

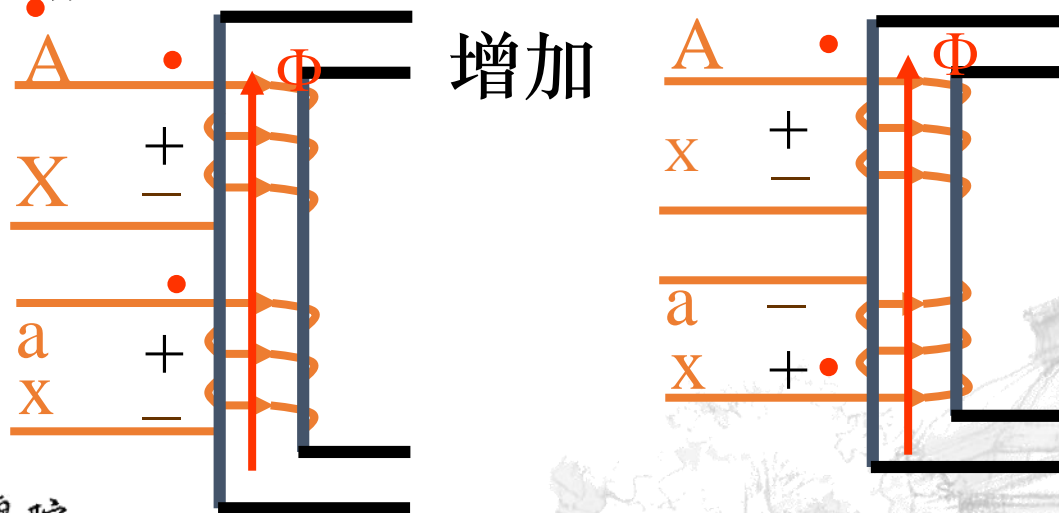
1. 同极性端（同名端）

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“ \bullet ”表示。

同极性端和绕组的绕向有关。

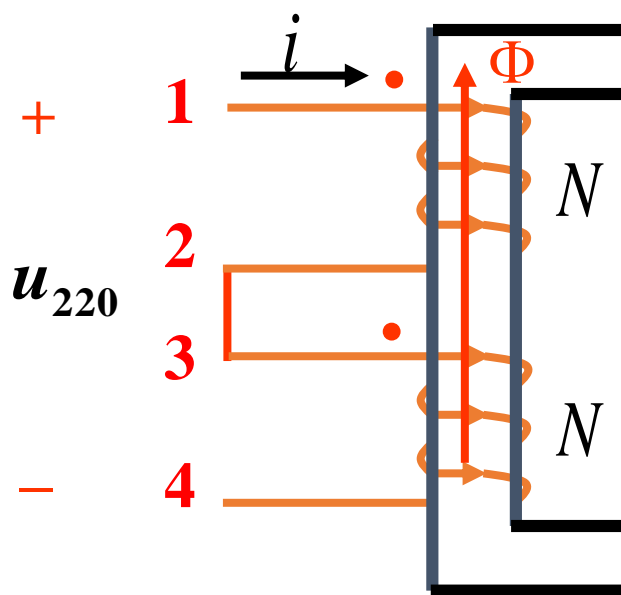


2. 线圈的接法

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：

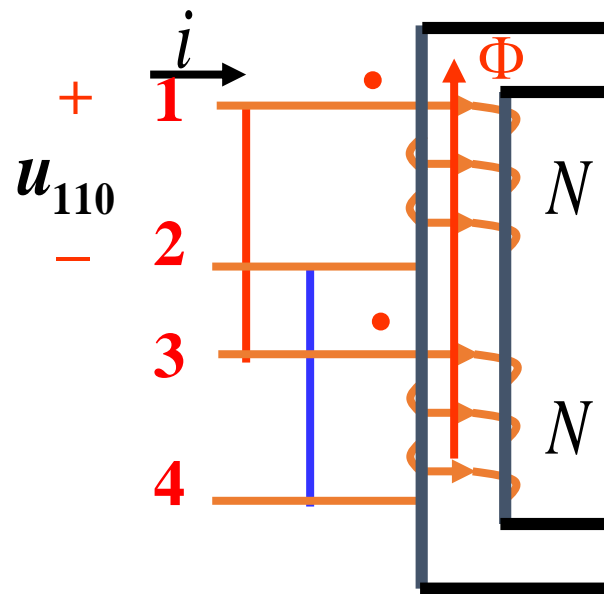
联接 2—3



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

电源电压为 110V 时：

联接 1—3, 2—4



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



问题：如果两绕组的极性端接错，结果如何？

答：有可能烧毁变压器

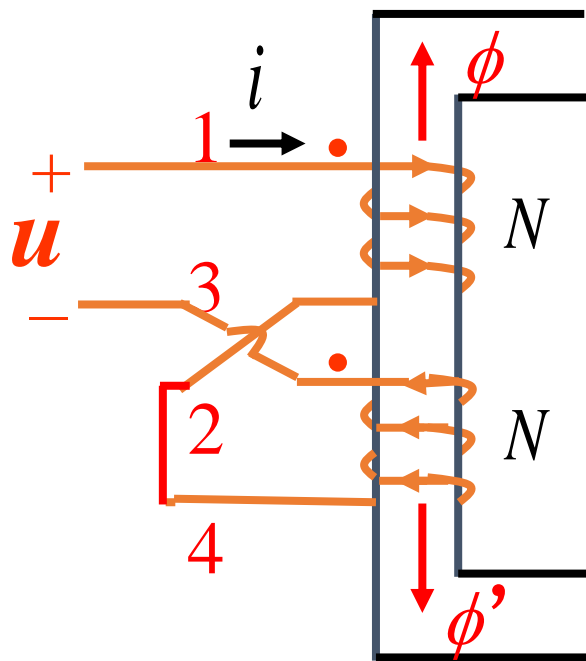
原因：

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} 。

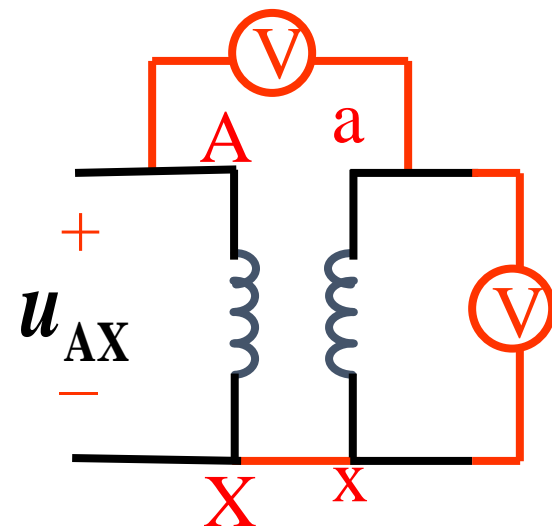
测量： U_{AX} 、 U_{Aa} 、 U_{ax}

结论：若 $U_{Aa} = |U_{AX} - U_{ax}|$

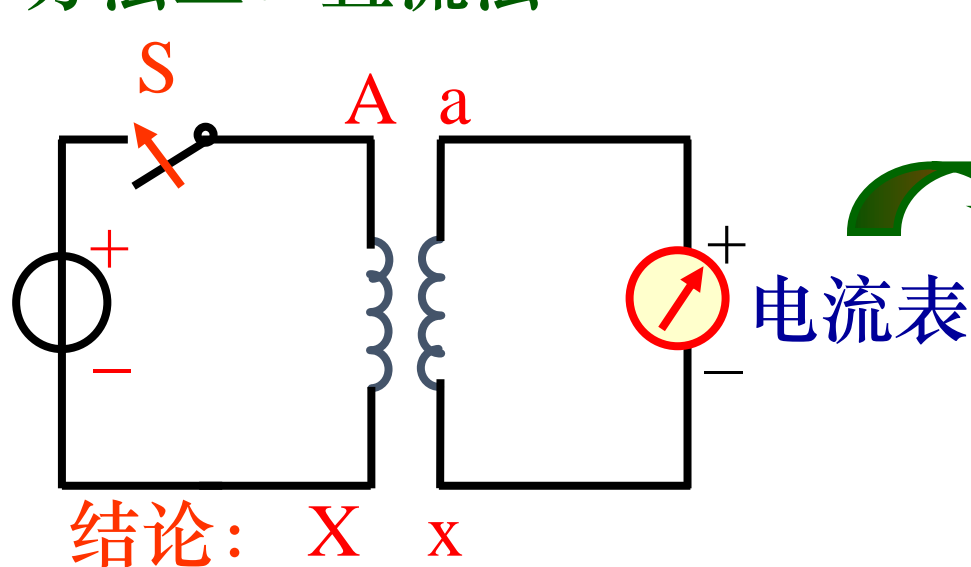
说明 A 与 a 或 X 与 x 为同极性端。

若 $U_{Aa} = |U_{AX} + U_{ax}|$

说明 A 与 x 或 X 与 a 是同极性端。



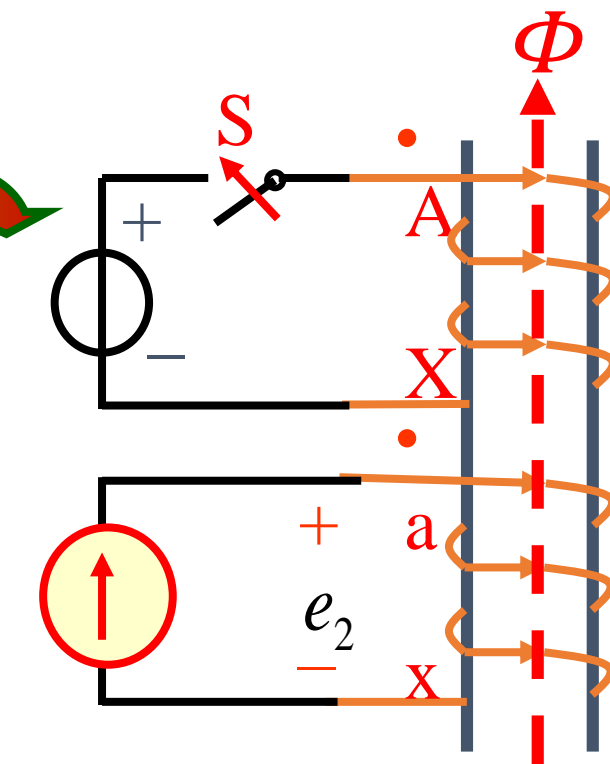
方法二：直流法



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。

东南大学电气工程学院



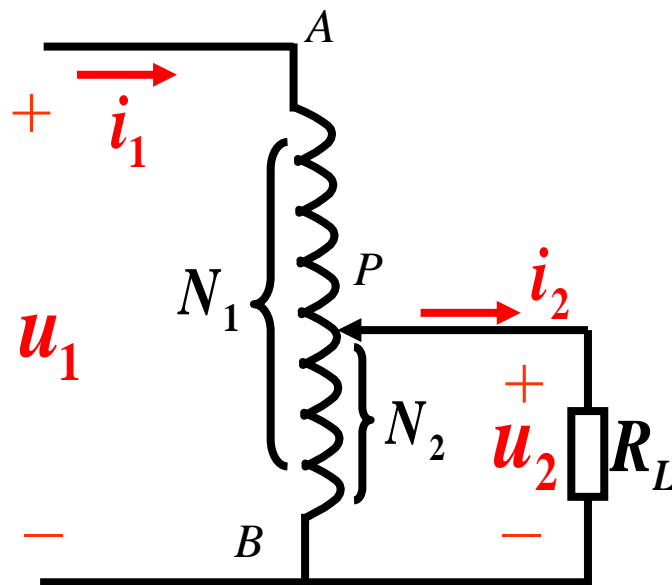
设S闭合时 Φ 增加。
感应电动势的方向，
阻止 Φ 的增加。

6.3.5 特殊变压器

1. 自耦变压器

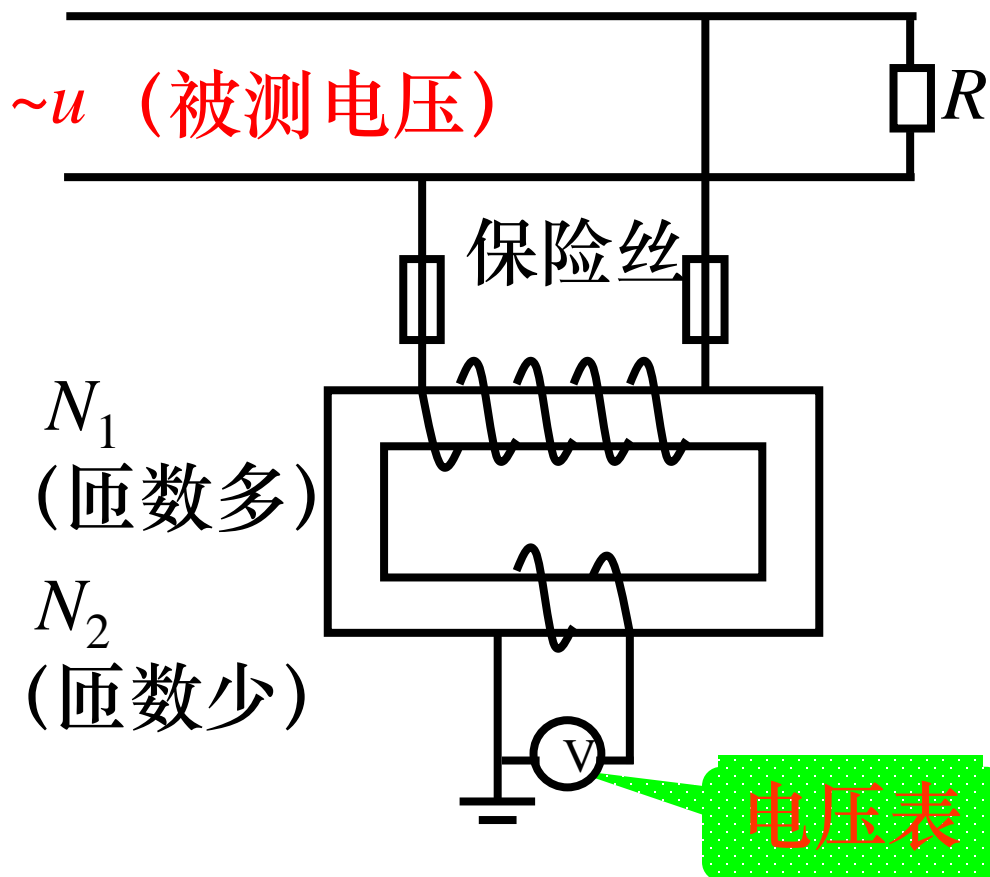
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

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



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



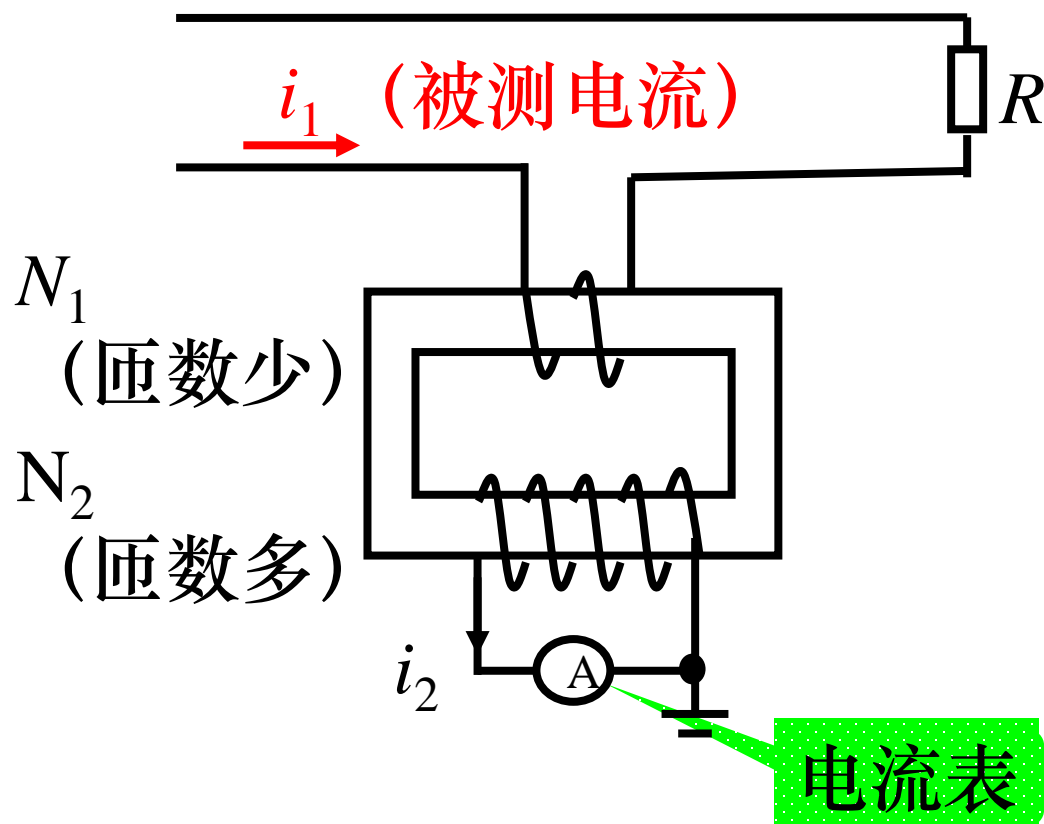
使用注意事项:

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. 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。

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



6.4 电磁铁

1. 概述

电磁铁是利用通电的铁心线圈吸引衔铁或保持某种机械零件、工件于固定位置的一种电器。当电源断开时电磁铁的磁性消失，衔铁或其它零件即被释放。电磁铁衔铁的动作可使其它机械装置发生联动。

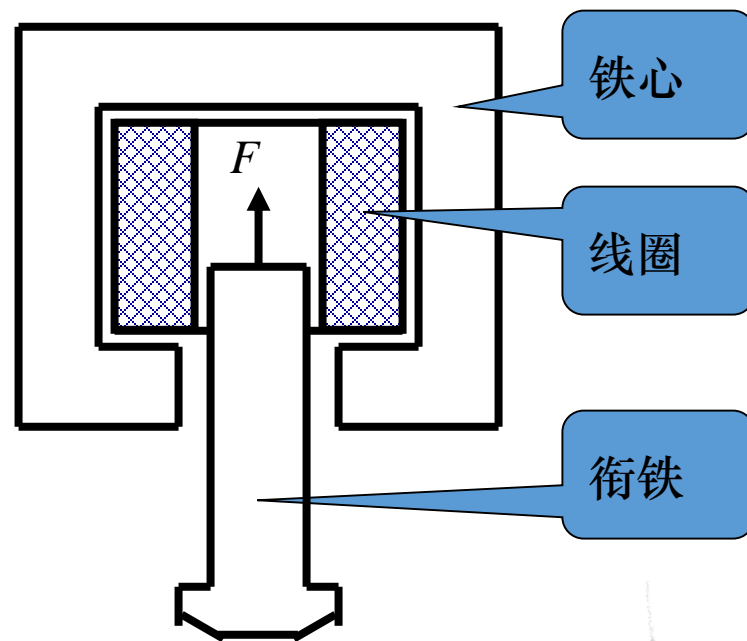
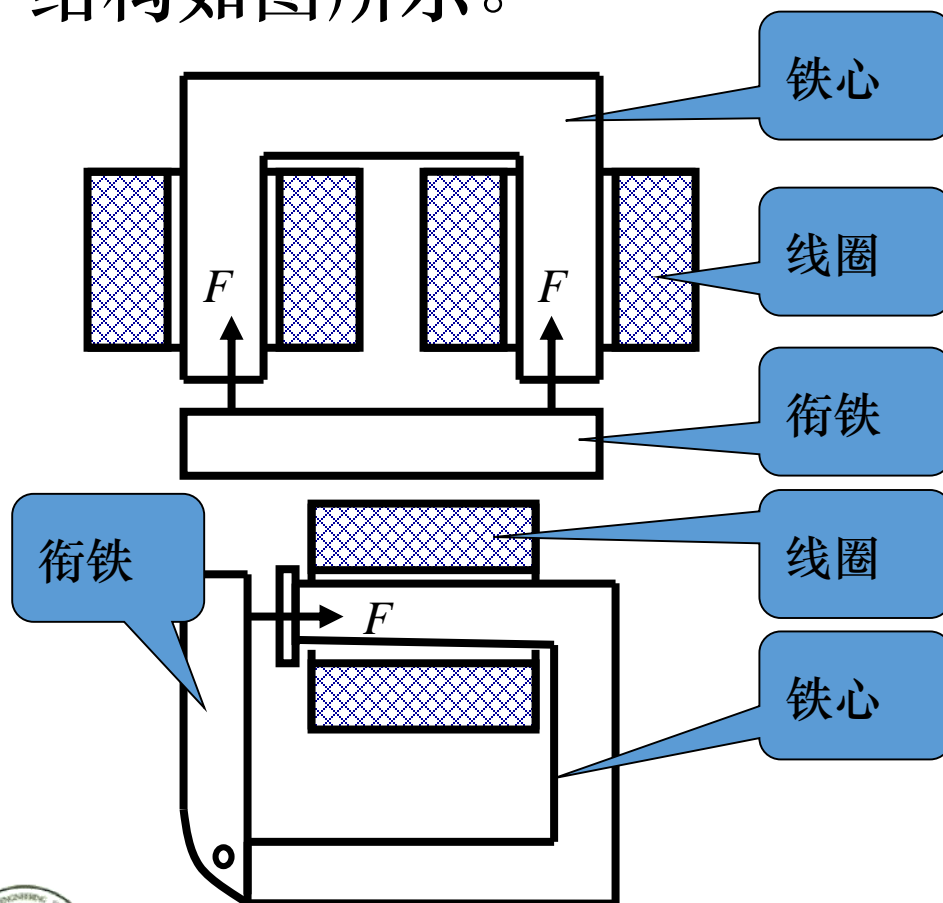
根据使用电源类型分为：

- 直流电磁铁：用直流电源励磁；
- 交流电磁铁：用交流电源励磁。



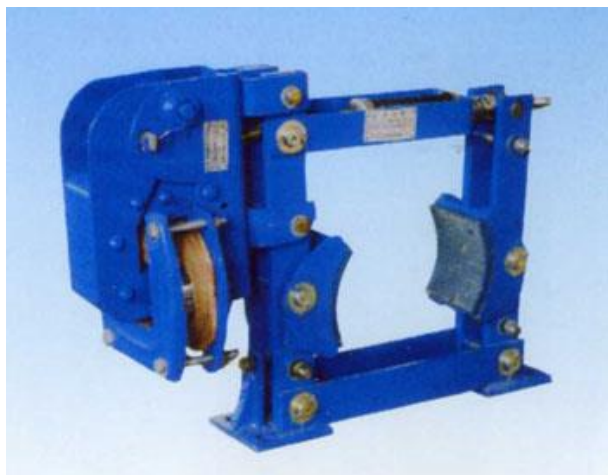
2. 基本结构

电磁铁由线圈、铁心及衔铁三部分组成，常见的结构如图所示。



有时是机械零件、
工件充当衔铁

电磁铁在生产中获得广泛应用。其主要应用原理是：**用电磁铁衔铁的动作带动其他机械装置运动，产生机械连动，实现控制要求。**



3.电磁铁吸力的计算

电磁铁吸力的大小与气隙的截面积 S_0 及气隙中的磁感应强度 B_0 的平方成正比。基本公式如下：

$$F = \frac{10^7}{8\pi} B_0^2 S_0 [N]$$

式中： B_0 的单位是特[斯拉]；

S_0 的单位是平方米；

F 的单位是牛[顿] (N) 。

直流电磁铁的吸力

直流电磁铁的吸力依据上述基本公式直接求取。



交流电磁铁的吸力

交流电磁铁中磁场是交变的，设

$$B_0 = B_m \sin \omega t$$

则吸力瞬时值为：

$$f = \frac{10^7}{8\pi} B_0^2 S_0 = \frac{10^7}{8\pi} B_m^2 S_0 \sin^2 \omega t$$

$$= F_m \sin^2 \omega t$$

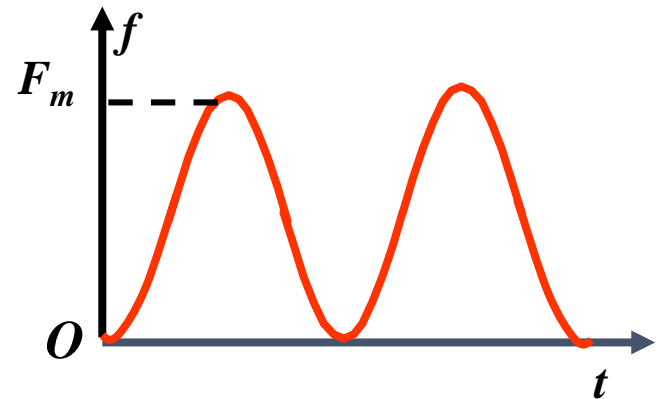
$$= \frac{1}{2} F_m - \frac{1}{2} F_m \cos 2\omega t$$

吸力平均值为：

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T f dt = \frac{1}{2} F_m = \frac{10^7}{16\pi} B_m^2 S_0 \text{ [N]}$$

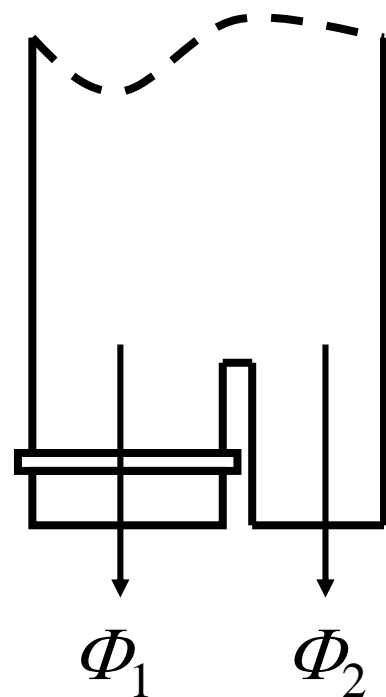
式中： $F_m = \frac{10^7}{8\pi} B_m^2 S_0$ 为吸力的最大值。

吸力的波形：



综合上述：

(1) 交流电磁铁的吸力在零与最大值之间脉动。衔铁以两倍电源频率在颤动，引起噪音，同时触点容易损坏。为了消除这种现象，在磁极的部分端面上套一个分磁环（或称短路环），工作时，在分磁环中产生感应电流，其阻碍磁通的变化，在磁极端面两部分中的磁通 Φ_1 和 Φ_2 之间产生相位差，使得两部分的吸力不同时为零，实现消除振动和噪音，如图所示；而直流电磁铁吸力恒定不变；

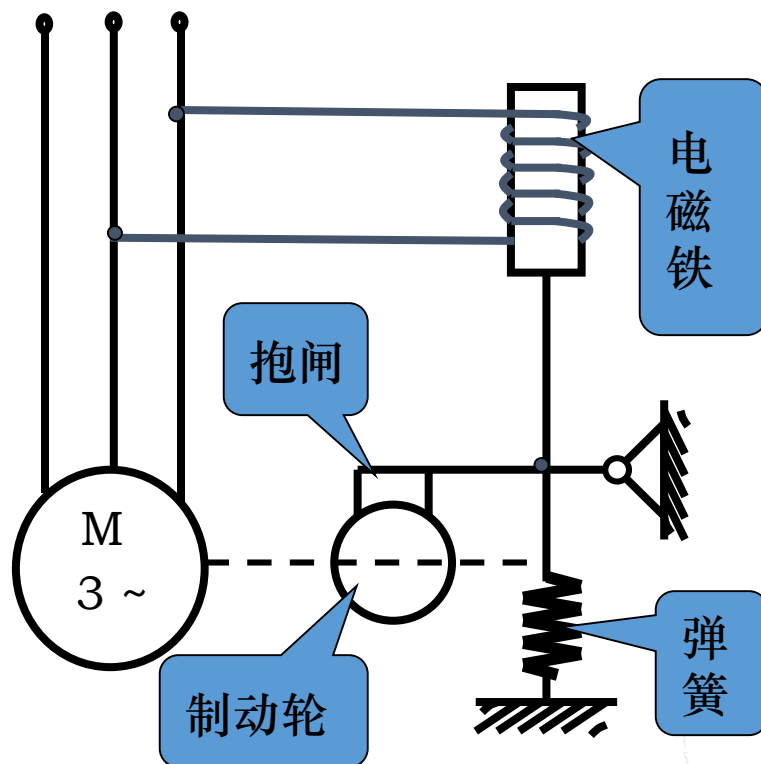
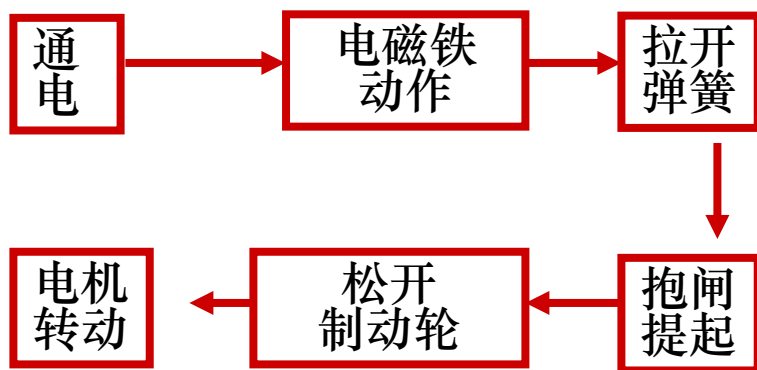


(2) 交流电磁铁中,为了减少铁损,铁心由钢片叠成;直流电磁铁的磁通不变,无铁损,铁心用整块软钢制成;

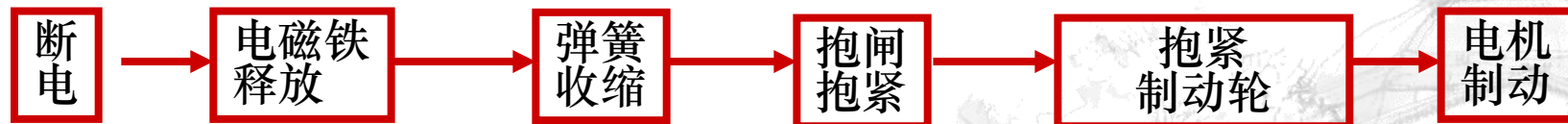


应用实例 图示为应用电磁铁实现制动机床或起重机电动机的基本结构，其中电动机和制动轮同轴。原理如下：

启动过程：



制动过程：



作业

P212: 6.1.2

P213: 6.2.6

P214: 6.3.4, 6.3.6

P215: 6.3.11



第六章-结束

Thank You!

