

二、磁路与变压器

第六章 磁路与铁心线圈

第七章 交流电动机

第六章 磁路与铁心线圈

§ 6.1 磁场的基本物理量

§ 6.2 磁性材料的磁性能

§ 6.3 磁路及其基本定律

§ 6.4 交流铁心线圈电路

§ 6.5 变压器

§ 6.6 电磁铁

§ 6.1 磁场的基本物理量

一、磁感应强度 B

磁感应强度 (B) 是表达磁场内某点磁场强弱和方向的物理量。
单位：特 (斯拉) T 也即 Wb/m^2 为矢量，其大小 $B = F / l * I$ ；与电流的方向用右螺旋定则来拟定，磁场内各点 B 大小相等，方向相同称为均匀磁场。

二、磁通 Φ

磁感应强度 B (若非均匀磁场，取平均值) 与垂直于磁场方向的面积 S 的乘积，称为经过该面积的磁通 Φ ，即 $\Phi = BS$ 或 $B = \Phi / S$ 。由上式可见，磁感应强度在数值上可看成为与磁场方向相垂直的单位面积所经过的磁通。故又称为磁通密度。

磁通的单位：韦 (伯) Wb 或伏·秒

三、 磁场强度 H

磁场强度H是计算磁场的一种物理量，也是矢量。
单位：安/米，它与电流的大小关系可经过安培环路定律来表达：即 $\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \Sigma \mathbf{I}$ 即磁场强度矢量H沿任意闭合回线的线积分等于穿过该闭合回线所围面积的电流的代数和。

图示环形铁心线圈应用上式计算线圈内部各点磁场强度（各量方向如图）

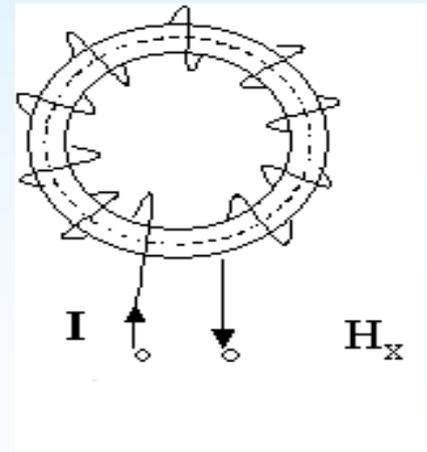
$$\text{则 } \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = H_x l_x = h_x * 2\pi x$$

$$\Sigma \mathbf{I} = \mathbf{NI}$$

$$\text{故 } H_x = \mathbf{NI} / 2\pi x = \mathbf{NI} / l_x = \mathbf{F} / l_x$$

式中N是线圈匝数； l_x 是半径为x的圆周长；

H_x 是半径x处的磁场强度； $F = \mathbf{NI}$ 称为磁通势，单位：安



四、磁导率 μ

磁导率 μ 是一种表达磁场媒质磁性的物理量，也即衡量物质导磁能力的物理量。单位：亨/米

即有 $B = \mu H$ （ B 与 H 成正比）

结论：

磁场强度 H 与电流大小、线圈匝数、以及该点的几何位置有关。而与磁场媒质的磁性无关。但磁感应强度 B 与电磁媒质的磁性有关。

可见，当线圈中媒质不同，则磁导率不同，同一圆周上的磁感应强度的大小就不同，线圈内磁通也就不同。但同一圆周上的磁场强度此时是一样的。

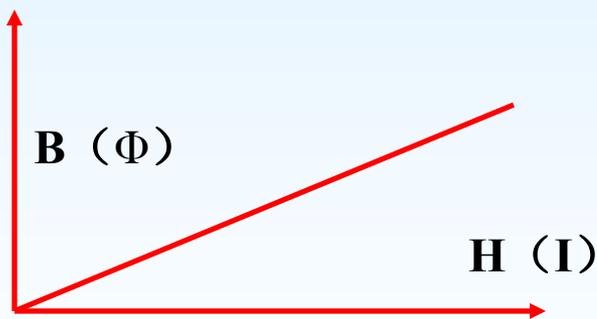
真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{H/m}$

相对磁导率 $\mu_r = \mu / \mu_0 = \mu H / \mu_0 H = B / B_0$

自然界的全部物质按磁导率的大小（或按磁化特征）可分为磁性物质和非磁性物质两大类

非磁性物质 $\mu \approx \mu_0$, $\mu_r \approx 1$, B与H成线性关系如图所示。

磁性物质 $\mu \gg \mu_0$, $\mu_r \gg 1$, B与H为非线性关系。



6.2 磁性材料的磁性能

磁性材料的磁性能

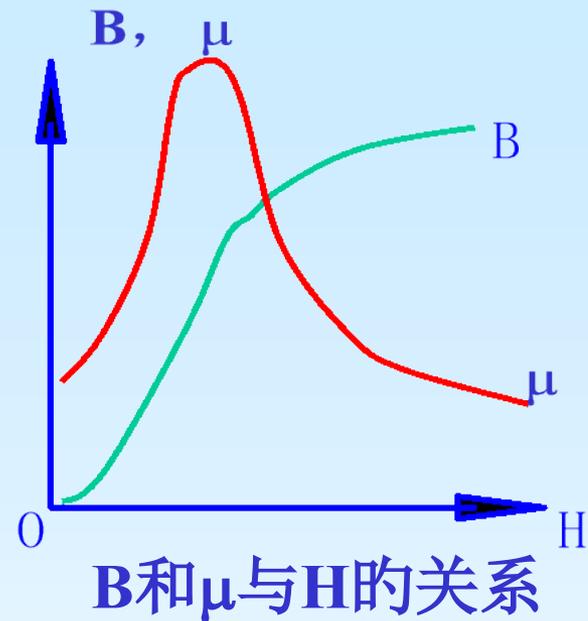
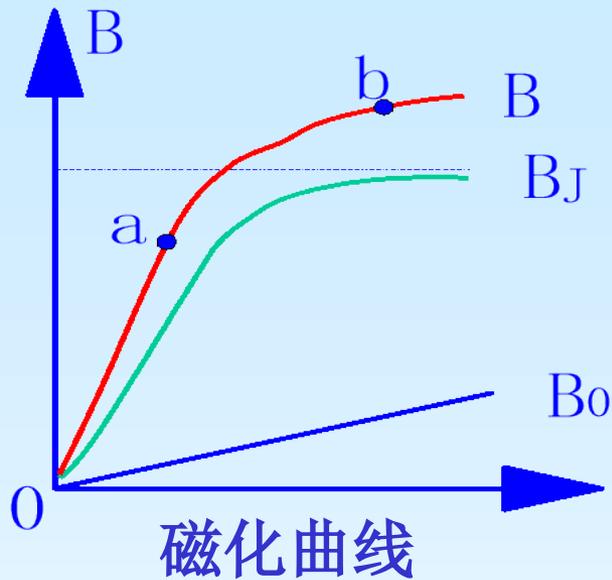
高导磁性、磁饱和性、磁滞性、非线性

一、高导磁性

指磁性材料的磁导率很高， $\mu_r \gg 1$ ，使其具有被强烈磁化的特征。

二、磁饱和性

当外磁场（或励磁电流）增大到一定值时，磁性材料的全部磁畴的磁场方向都转向与磁场的方向一致，磁化磁场的磁感应强度 B_J 到达饱和值。



注

当有磁性物质存在时

B 与 H 不成百分比， Φ 与 I 也不成百分比。

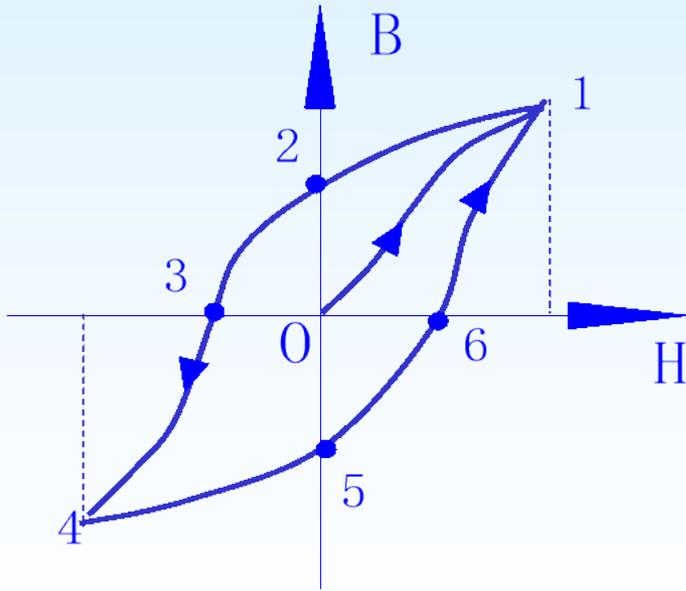
三、磁滞性

当铁心线圈中通有交变电流（大小和方向都变化）时，铁心就受到交变磁化，电流变化时， B 随 H 而变化，当 H 已减到零值时，但 B 未回到零，这种磁感应强度滞后于磁场强度变化的性质称磁性物质的磁滞性。

$H=0$ 时 $B=B_r$ B_r 称剩磁强度

剩磁的存在,有时是有利的,有时是有害的。所以有时需要去调剩磁。而要去掉铁心中的剩磁,必须变化线圈中励磁电流的方向,也即变化磁场强度 H 的方向来进行反向磁化。

$B=0$ 时, $H=H_c$, H_c 称矫顽磁力



在铁心反复交变磁化的情况下,表达 B 与 H 变化关系的闭合曲线,称为磁滞回线。

按磁性物质磁性能，磁性材料可分为三种类型：

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。

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。

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，在计算机和控制系统中可用作记忆元件、开关元件、和逻辑元件。

§ 6.3 磁路及其基本定律

磁路：磁通的途径。

以图所示的环行线圈为例：

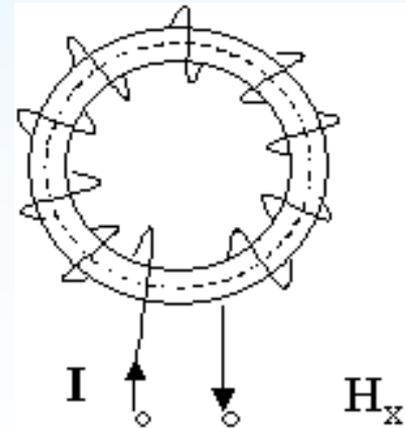
$$\oint H dl = \Sigma I$$

得出： $NI = H * l = (B / \mu) * l = (\Phi / \mu S) * l$

或 $\Phi = NI / (l / \mu S) = F / R_m$ (7.3.1)

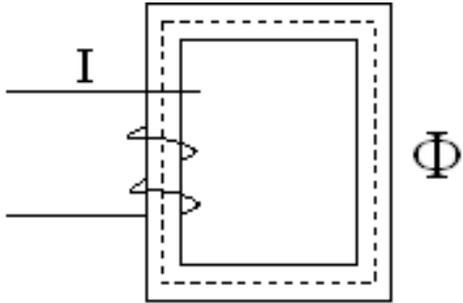
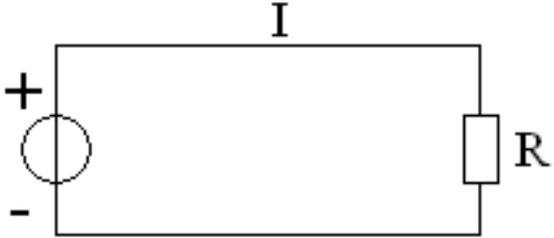
上式中 $F = NI$ 为磁通势， R_m 称为磁阻，是表达磁路对磁通具有阻碍作用的物理量。

式(7.3.1)与电路的欧姆定律在形式上相同，故称为磁路的欧姆定律。



电路与磁路对照

电路与磁路有诸多相同之处

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 $R_m = 1 / \mu S$</p>  <p>$\Phi = F / R_m = NI / (1 / \mu S)$</p>	<p>电动势 E</p> <p>电流 I</p> <p>电流密度 J</p> <p>电阻 $R = 1 / \gamma S$</p>  <p>$I = E / R = E / (1 / \gamma S)$</p>

电路与磁路有诸多相同之处

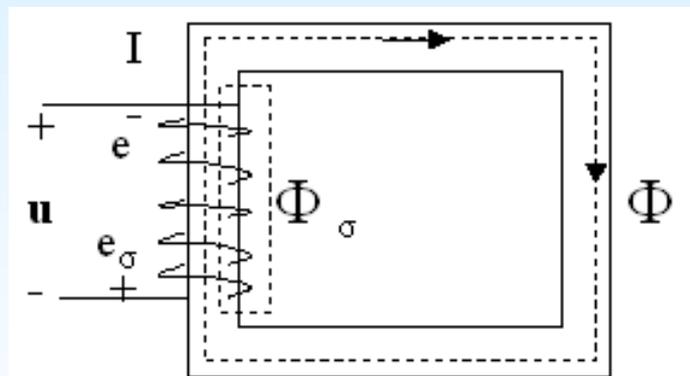
- 1、在处理电路时一般不涉及电场问题，而在处理磁场时离不开磁场的概念。
- 2、在处理电路时一般能够不考虑漏电流，但在处理磁路时一般都要考虑漏磁通。
- 3、磁路的欧姆定律与电路的欧姆定律只是在形式上相同。因为 μ 不是常数，它随励磁电流而变，所以不能直接应用磁路的欧姆定律来计算，它只能用于定性分析。
- 4、在电路中，当 $E=0$ 时 $I=0$ ；但在磁路中，因为有剩磁，当 $F=0$ 时， $\Phi \neq 0$ 。
- 5、磁路几种基本物理量的单位也较复杂，学习时应注意。

§ 6.4 交流铁心线圈电路

铁心线圈分为直流铁心线圈和交流铁心线圈。

直流铁心线圈通直流来励磁，产生的磁通是恒定的，在线圈和铁心中不会感应出电动势来，功率损耗也只有 RI^2 。交流铁心线圈通交流来励磁，在电磁关系、电压电流关系及功率损耗等几种方面和直流铁心线圈不同。

一、电磁关系



$$u \rightarrow I(Ni) \begin{cases} \Phi \rightarrow e = -Nd\Phi/dt \\ \Phi_{\sigma} \rightarrow e_{\sigma} = -Nd\Phi_{\sigma}/dt = -L_{\sigma}di/dt \end{cases}$$

- 1、磁通势产生的磁通绝大部分经过铁心而闭合，称为主磁通或工作磁通 Φ 。
- 2、有极少的一部分磁通经过空气或其他非导磁媒质闭合，称为漏磁通 Φ_{σ} 。
- 3、这两个磁通分别产生感应电动势 e 和 e_{σ} ，但注意主磁通经过铁心， i 与 Φ 不成线性关系，漏磁通不经过铁心， i 与 Φ_{σ} 成线性关系。

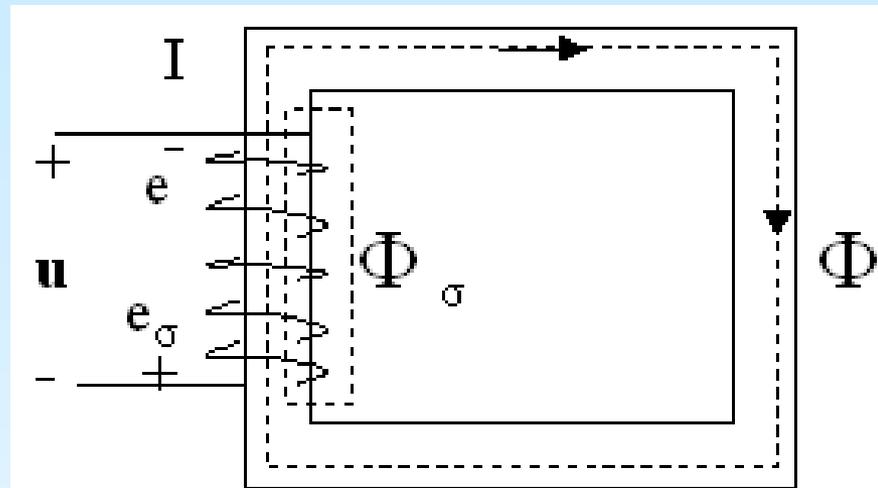
二、电压电流关系

如图据 KVL，有 $u + e + e_{\sigma} = Ri$

各量视为正弦量，用相量表达有

$$\dot{U} = RI + (-\dot{E}_{\sigma}) + (-\dot{E}) = RI + jX_{\sigma}I + (-\dot{E}) = \dot{U}_R + \dot{U}_{\sigma} + \dot{U}$$

其中 $X_{\sigma} = \omega L_{\sigma}$ 称为漏磁感抗



$$\dot{U} = RI_+(-\dot{E}_\sigma) + (-\dot{E}) = RI_+ jX_\sigma I_+(-\dot{E}) = \dot{U}_R + \dot{U}_\sigma + \dot{U}$$

下列计算主磁感应电动势，设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d(\phi_m \sin \omega t)}{dt} = -N\omega\phi_m \cos \omega t \\ &= 2\pi f N \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

幅值 $E_m = 2\pi f N \Phi_m$

有效值 $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \phi_m$

因为线圈的电阻R和感抗 X_σ 较小，与主磁电动势比较起来，它们的压降较小，可忽视。故

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

$$U \approx E = 4.44 N f \Phi_m$$

三、功率损耗

交流铁心线圈中除线圈电阻 R 上有功率损耗 RI^2 即铜损 ΔP_{cu} ，处于交变磁化下的铁心中也有功率损耗即铁损 ΔP_{fe} 。

$$\text{功率损耗} \left\{ \begin{array}{l} \text{铜损} \Delta P_{cu} = RI^2 \\ \text{铁损} \Delta P_{Fe} \left\{ \begin{array}{l} \text{磁滞损耗} \Delta P_h \\ \text{涡流损耗} \Delta P_e \end{array} \right. \end{array} \right.$$

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

磁滞损耗 ΔP_h ：

由磁滞所产生的铁损，与磁滞回线所围面积成正比

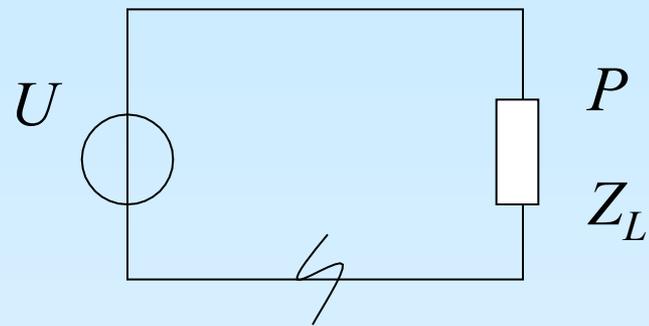
涡流损耗 ΔP_{Fe} ：

由涡流所产生的铁损，会造成铁心发烧。可采用顺磁场方向铁心由彼此绝缘的硅钢片叠加而成。

§ 6.5 变压器

变压输电的优点

线路损耗 $\Delta P = I^2 r = \left(\frac{P}{U \cos \varphi} \right)^2 \cdot \frac{\rho l}{S}$



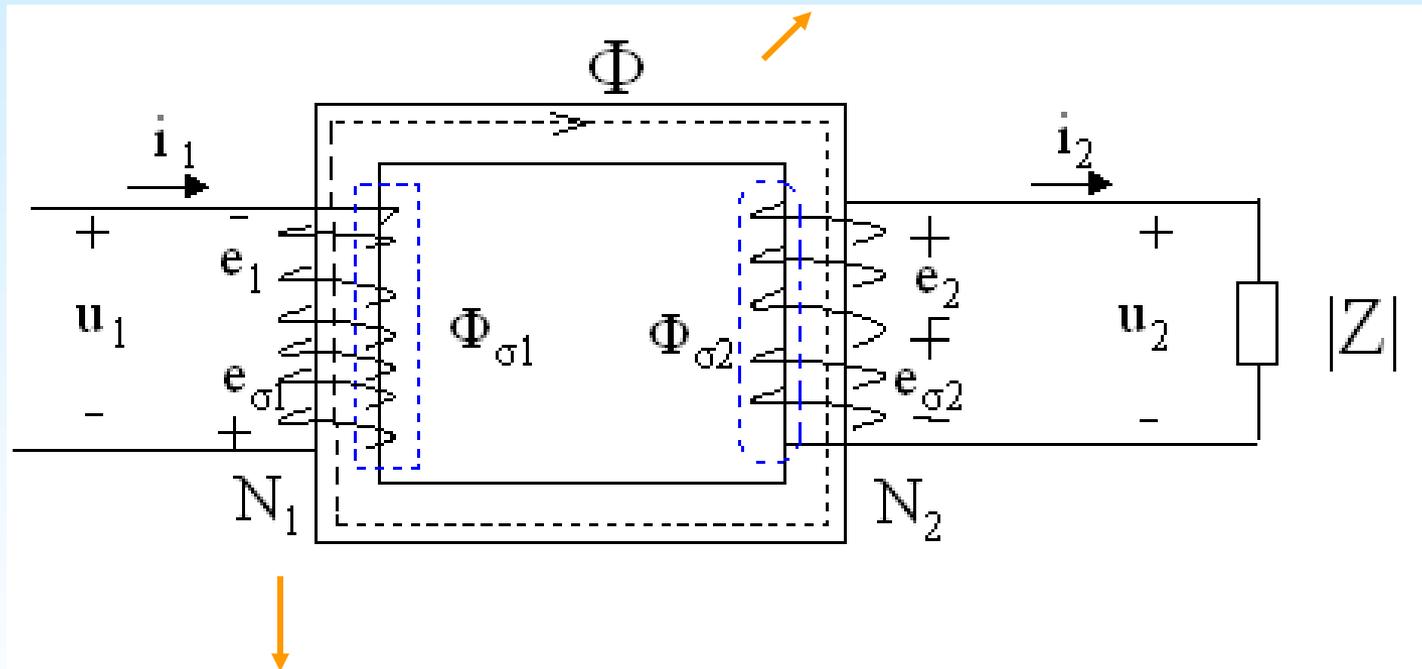
当输送功率 P ，负载功率因数 $\cos \varphi$ 一定

$U \uparrow$ ， $S \downarrow$ ，节省铜线

$U \uparrow$ ， $\Delta P \downarrow$ ，节省电能

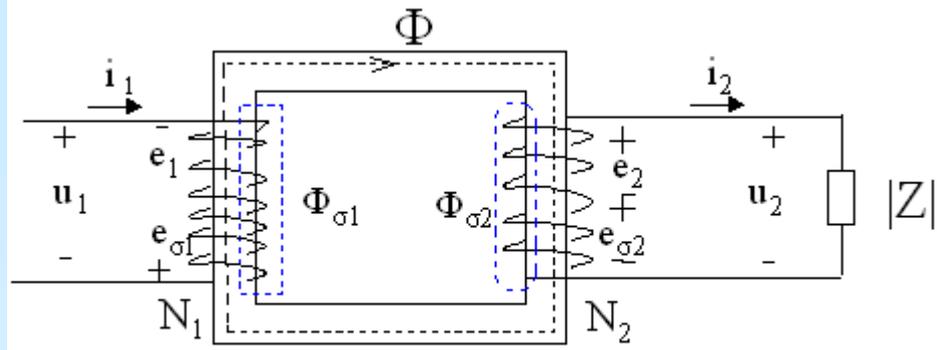
一、变压器的工作原理

副绕组，或称次级绕组、二次绕组。接负载，输出端



原绕组，或称为初级绕组、一次绕组与电源相连，起输入电能的作用

1、电磁关系



$$u_1 \rightarrow i_1 (N_1 i_1) \rightarrow \Phi \begin{cases} e_1 = -N_1 d\Phi/dt \\ e_2 = -N_2 d\Phi/dt \end{cases}$$

$$\Phi_{\sigma 1}$$

$$i_2 (N_2 i_2) \rightarrow \Phi_{\sigma 2} \rightarrow e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} di_2/dt$$

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} di_1/dt$$

- 1、磁通势产生的磁通绝大部分经过铁心而闭合，称为主磁通或工作磁通 Φ 。
- 2、有极少的一部分磁通经过空气闭合，称为漏磁通 Φ_{σ} 。
- 3、这两个磁通分别产生感应电动势 e 和 e_{σ} ，但注意主磁通经过铁心， i 与 Φ 不成线性关系，漏磁通不经过铁心， i 与 Φ_{σ} 成线性关系。

(1) 电压变换

原绕组电路 $u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = R_1 i_1$

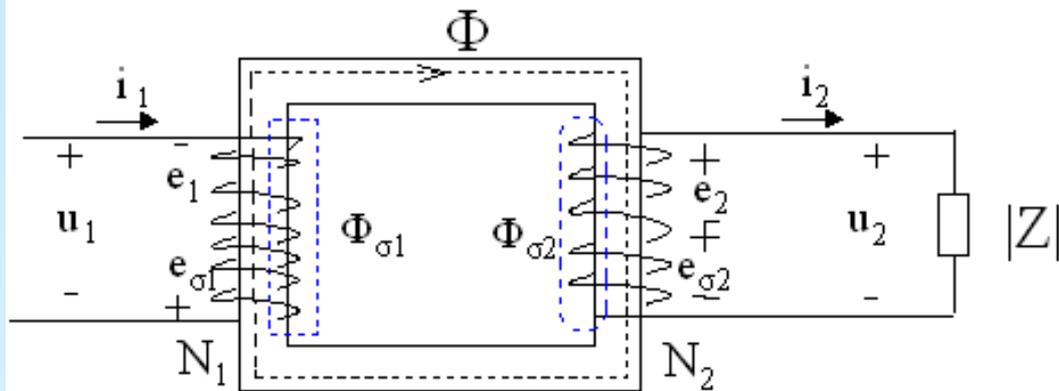
各量视为正弦量，用相量表达：

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + (-\dot{E}_{\sigma 1}) + (-\dot{E}_1) = R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1 + (-\dot{E}_1)$$

忽视 $R_1 \dot{I}_1$ 、 $jX_1 \dot{I}_1$ 两项，于是有 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$

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

其中 $X_1 = \omega L_{\sigma 1}$ 称为漏磁感抗。



副绕组电路

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

用相量表达:

$$\dot{E}_2 = R_2 \dot{I}_2 + (-\dot{E}_{\sigma 2}) + \dot{U}_2 = R_2 \dot{I}_2 + jX_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2$$

$$E_2 = 4.44f N_2 \Phi_m$$

空载时 $I_2 = 0$, $E_2 = U_{20}$, 其中 U_{20} 是空载时副绕组的端电压。

原副绕组的电压比 $U_1 / U_{20} \approx E_1 / E_2 = N_1 / N_2 = K$

K 称为变压器的变比, 亦即原副绕组的匝数比。

例如: 变压器铭牌上额定电压“6000/400V”。

意思是: 原绕组加额定电压6000V时, 副绕组的额定电压即其空载电压为400V。一般较满载时高5%—10%。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/627124121051006164>