电路理论基础

——电路理论（基础篇）

华中科技大学·电气学院
ccsfm@hust.edu.cn

第13章 含磁耦合的电路

13.1 概述

13.2 耦合电感

13.3 含耦合电感电路的分析

13.4 变压器原理

13.5 理想变压器

13.6 拓展与应用

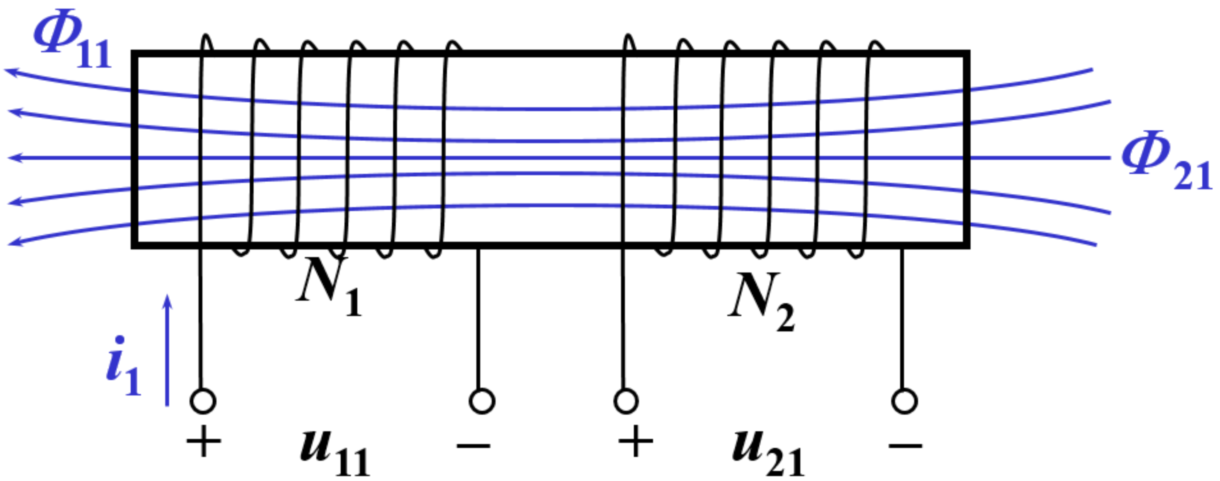
●重点

1. 熟练掌握耦合电感

2. 熟练掌握含耦合电感电路的分析

3. 熟练掌握变压器原理及理想变压器

◆ 自感与互感



当线圈1中通入电流i_1时，在线圈1中产生磁通，同时，有部分磁通穿过临近线圈2。当i_1为时变电流时，磁通也将随时间变化，从而在线圈两端产生感应电压。

当i_1、u_{11}、u_{21}方向与Φ符合右手定则时，根据电磁感应定律和楞次定律，则有

$$u_{11}=\frac{\mathrm{d}\Psi_{11}}{\mathrm{d}t}=N_1\frac{\mathrm{d}\Phi_{11}}{\mathrm{d}t} \qquad u_{21}=\frac{\mathrm{d}\Psi_{21}}{\mathrm{d}t}=N_2\frac{\mathrm{d}\Phi_{21}}{\mathrm{d}t}$$

u_{11}：自感电压；u_{21}：互感电压。Ψ：磁链

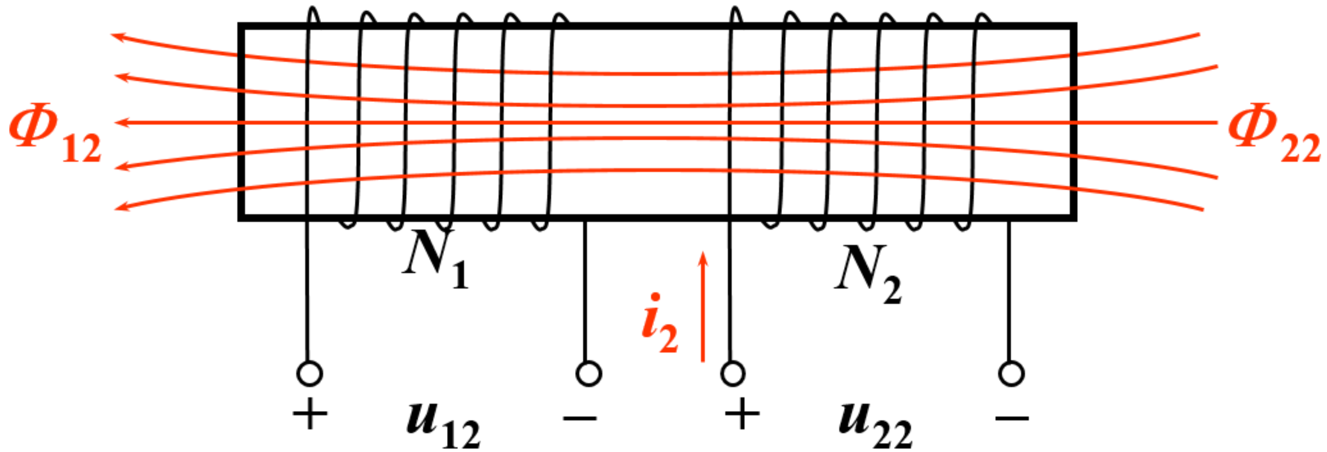
- 假设线圈周围磁介质为线性，有

$$u_{11}=L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \qquad \left(L_1=\frac{\Psi_{11}}{i_1}\right)$$

$$u_{21}=M_{21}\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \qquad \left(M_{21}=\frac{\Psi_{21}}{i_1}\right)$$

L_1：线圈1的自感系数；M_{21}：线圈1对线圈2的互感系数。

同理，当线圈2中通电流i_2时会产生磁通Φ_{22}，Φ_{12} 。 i_2为时变时，线圈2和线圈1两端分别产生感应电压u_{22}， u_{12} 。



$$u_{12}=\frac{\mathrm{d}\Psi_{12}}{\mathrm{d}t}=N_1\frac{\mathrm{d}\Phi_{12}}{\mathrm{d}t}=M_{12}\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\qquad (M_{12}=\frac{\Psi_{12}}{i_2})$$

$$u_{22}=\frac{\mathrm{d}\Psi_{22}}{\mathrm{d}t}=N_2\frac{\mathrm{d}\Phi_{22}}{\mathrm{d}t}=L_2\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\qquad (L_2=\frac{\Psi_{22}}{i_2})$$

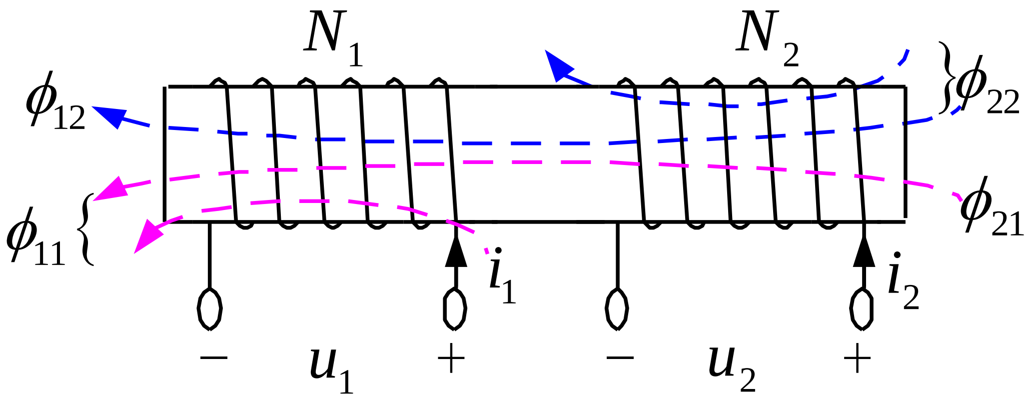
可以证明：$M_{12}=M_{21}=M$。

◆ 耦合类型与特性方程

$$\begin{cases}\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12} \\ \phi_2 = \phi_{21} + \phi_{22}\end{cases}$$

$$\begin{cases}\psi_1 = N_1\phi_1 = N_1\phi_{11} + N_1\phi_{12} \\ \psi_2 = N_2\phi_2 = N_2\phi_{21} + N_2\phi_{22}\end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases}\psi_1 = \psi_{11} + \psi_{12} \\ \psi_2 = \psi_{21} + \psi_{22}\end{cases}$$



加强型耦合线圈

$$\boxed{\begin{cases}u_1 = \dfrac{d\psi_1}{dt} \\ u_2 = \dfrac{d\psi_2}{dt}\end{cases}} \longrightarrow \boxed{\begin{cases}u_1 = L_1\dfrac{di_1}{dt} + M\dfrac{di_2}{dt} \\ u_2 = M\dfrac{di_1}{dt} + L_2\dfrac{di_2}{dt}\end{cases}}$$

若两个线圈为**加强型耦合线圈**，当同时通以电流时，每个线圈两端的电压均包含自感电压和互感电压：

$$u_1 = u_{11} + u_{12} = L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

$$u_2 = u_{21} + u_{22} = M \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

在正弦交流电路中，其相量形式的方程为

$$\dot{U}_1 = \mathrm{j}\omega L_1 \dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M_{12} \dot{I}_2$$

$$\dot{U}_2 = \mathrm{j}\omega M_{21} \dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega L_2 \dot{I}_2$$

互感的性质

①从能量角度可以证明，对于线性电感 $M_{12}=M_{21}=M$

②互感系数 M 只与两个线圈的几何尺寸、匝数 、 相互位置和周围的介质磁导率有关

若两个线圈为**削弱型耦合线圈**，当同时通以电流时，每个线圈两端的电压均包含自感电压和互感电压：

$$u_1 = u_{11} - u_{12} = L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} - M \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

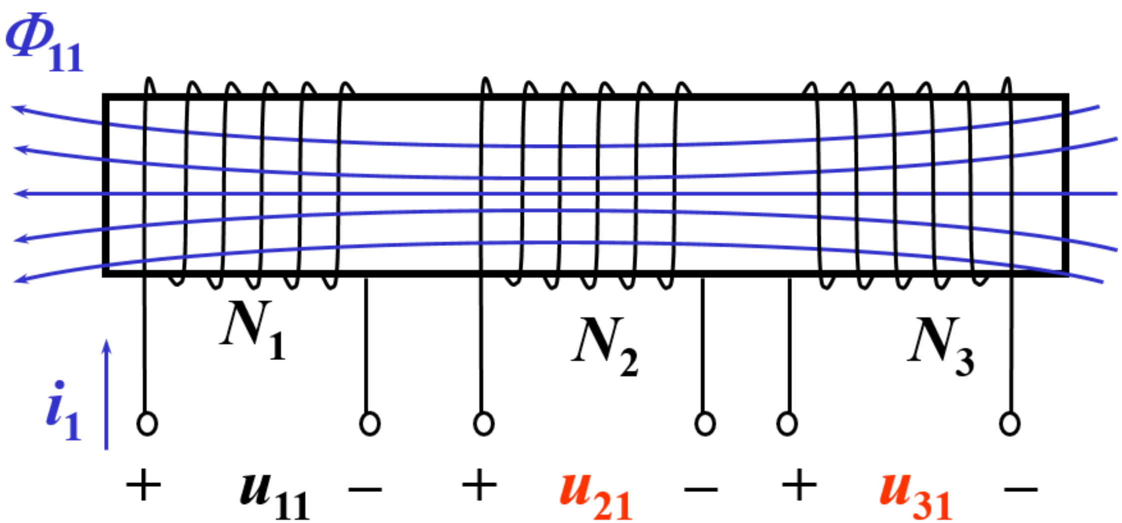
$$u_2 = -u_{21} + u_{22} = -M \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

在正弦交流电路中，其相量形式的方程为

$$\dot{U}_1 = \mathrm{j}\omega L_1 \dot{I}_1 - \mathrm{j}\omega M_{12} \dot{I}_2$$

$$\dot{U}_2 = -\mathrm{j}\omega M_{21} \dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega L_2 \dot{I}_2$$

对互感电压，因产生该电压的的电流在另一线圈上，因此，要确定其符号，就必须知道两个线圈的绕向。这在电路分析中显得很不方便。



$$u_{21} = M_{21}\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$

$$u_{31} = -M_{31}\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$

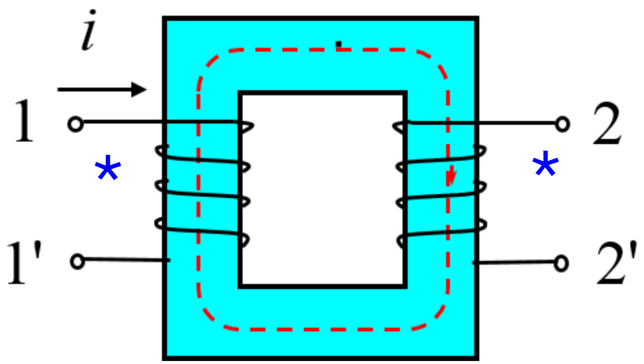
引入同名端可以解决这个问题。

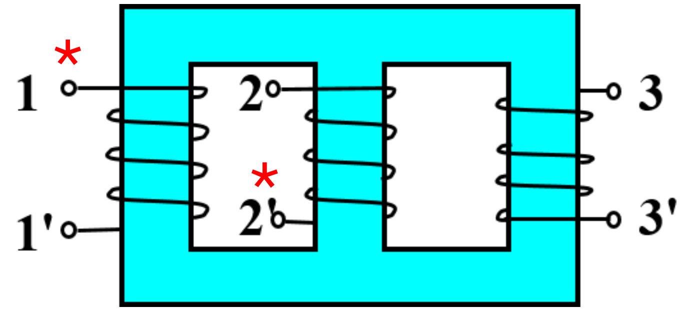
同名端约定： 当电流同时流入（或同时流出）同名端时，耦合电感为加强型耦合。

确定同名端的方法：

(1) 当两个线圈中电流同时由同名端流入(或流出)时，两个电流产生的磁场相互增强。

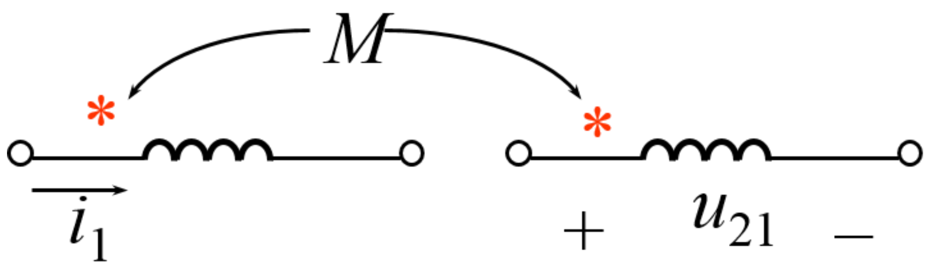
(2) 当随时间增大的时变电流从一线圈的一端流入时，将会引起另一线圈相应同名端的电位升高。



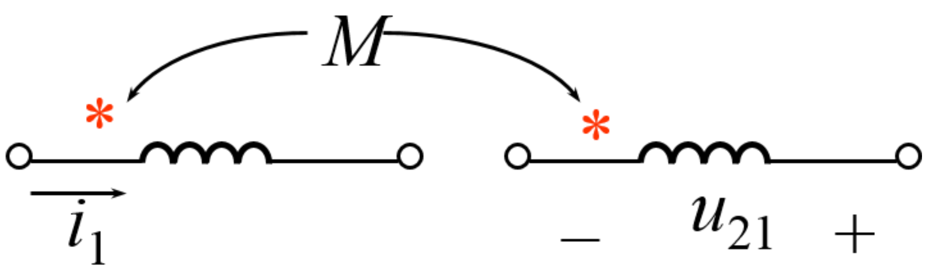


注意：线圈的同名端必须两两确定。

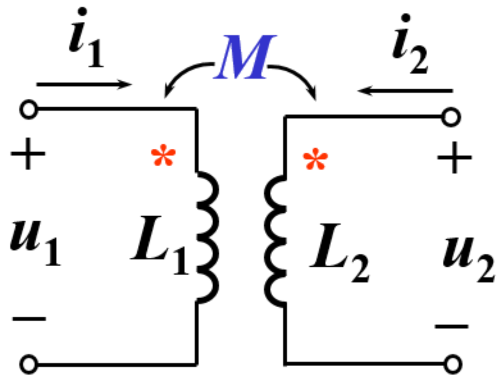
有了同名端，以后表示两个线圈相互作用，就不再考虑实际绕向，而只画出同名端及参考方向即可。(参考前图，标出同名端得到下面结论)。

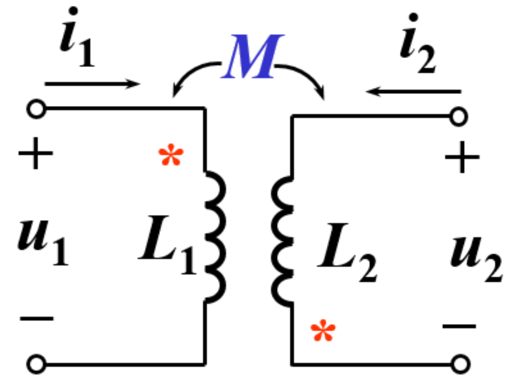


$$u_{21} = M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$



$$u_{21} = -M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$

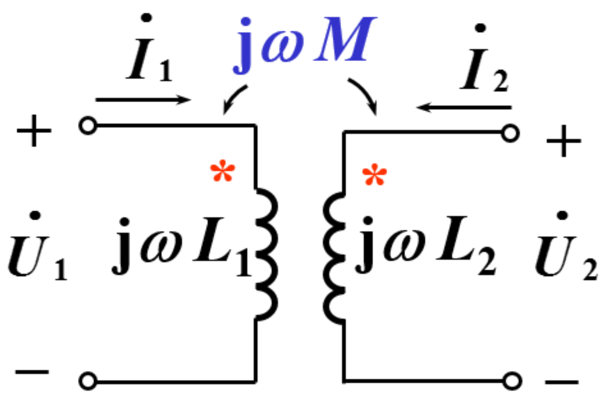




时域形式：

$$u_1 = L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \qquad u_1 = L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} - M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

$$u_2 = M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \qquad u_2 = -M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

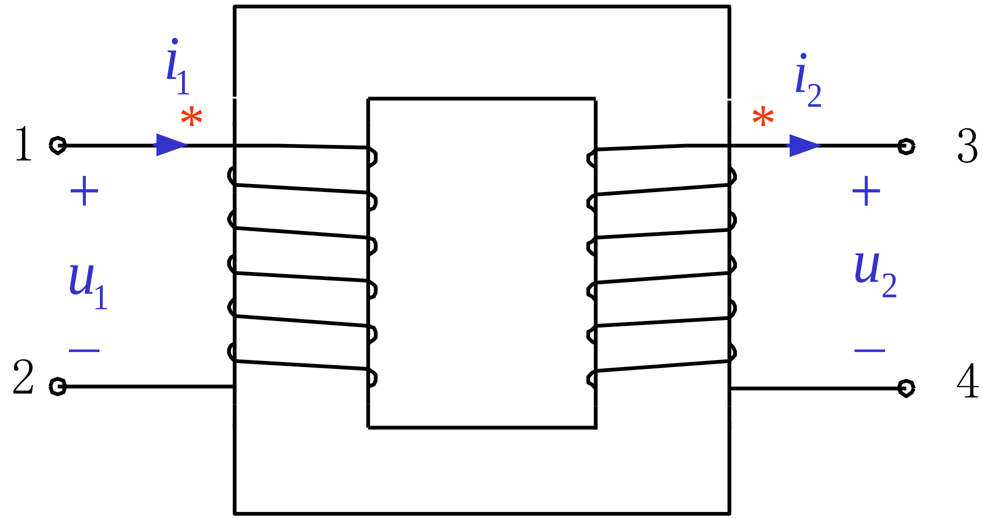


相量形式的方程为

$$\dot{U}_1 = \mathrm{j}\omega L_1\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_2$$

$$\dot{U}_2 = \mathrm{j}\omega M\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega L_2\dot{I}_2$$

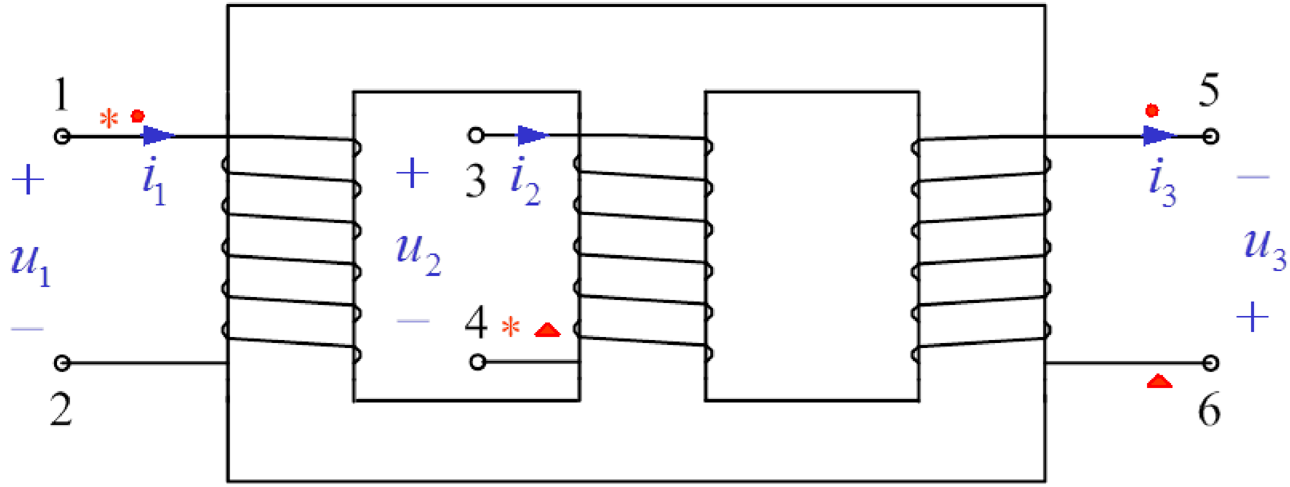
例：求u1和u2的表达式



$$u_1 = L_1\frac{di_1}{dt} + M\frac{d(-i_2)}{dt}$$

$$u_2 = +M\frac{di_1}{dt} + L_2\frac{d(-i_2)}{dt}$$

例： 求u1、u2和u3



$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M_{12} \frac{di_2}{dt} - M_{13} \frac{di_3}{dt}$$

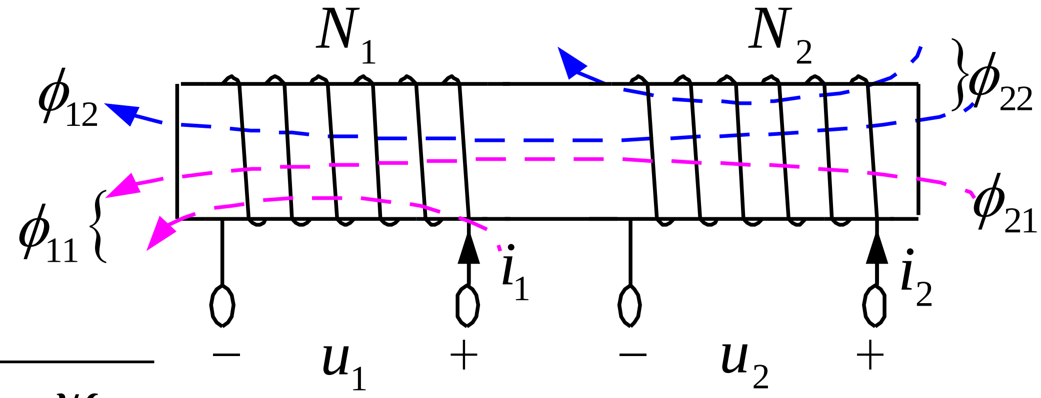
$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{12} \frac{di_1}{dt} - M_{23} \frac{di_3}{dt}$$

$$u_3 = L_3 \frac{di_3}{dt} - M_{13} \frac{di_1}{dt} - M_{23} \frac{di_2}{dt}$$

◆ 耦合系数 *k*

两个线圈磁耦合的紧密程度

$$k=\frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}$$



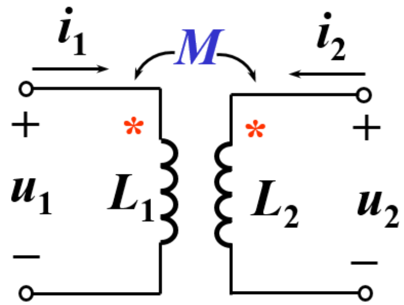
$$k=\frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}=\sqrt{\frac{M_{12}M_{21}}{L_1L_2}}=\sqrt{\frac{\dfrac{\psi_{12}}{i_2}\cdot\dfrac{\psi_{21}}{i_1}}{\dfrac{\psi_{11}}{i_1}\cdot\dfrac{\psi_{22}}{i_2}}}$$

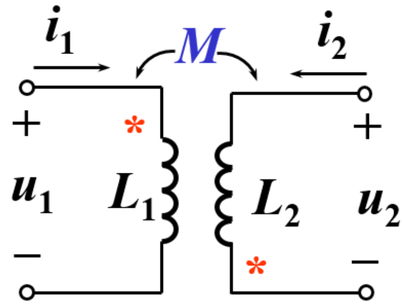
$$=\sqrt{\frac{N_1\phi_{12}\cdot N_2\phi_{21}}{N_1\phi_{11}\cdot N_2\phi_{22}}}=\sqrt{\frac{\phi_{12}\cdot\phi_{21}}{\phi_{11}\cdot\phi_{22}}}\le 1$$

$$\mathbf{0\le \boldsymbol{k}\le 1}$$

互感小于两元件自感的几何平均值。

◆ **耦合电感的储能**





$$w=\int_{-\infty}^{t} p(t)\mathrm{d}\,t$$

$$=\int_{-\infty}^{t} (u_1 i_1 + u_2 i_2)\ \ \mathrm{d}\,t$$

$$=\int_{-\infty}^{t} [(L_1\frac{\mathrm{d}\,i_1}{\mathrm{d}\,t} \pm M\frac{\mathrm{d}\,i_2}{\mathrm{d}\,t})i_1 + (\pm M\frac{\mathrm{d}\,i_1}{\mathrm{d}\,t} + L_2\frac{\mathrm{d}\,i_2}{\mathrm{d}\,t})i_2]\mathrm{d}\,t$$

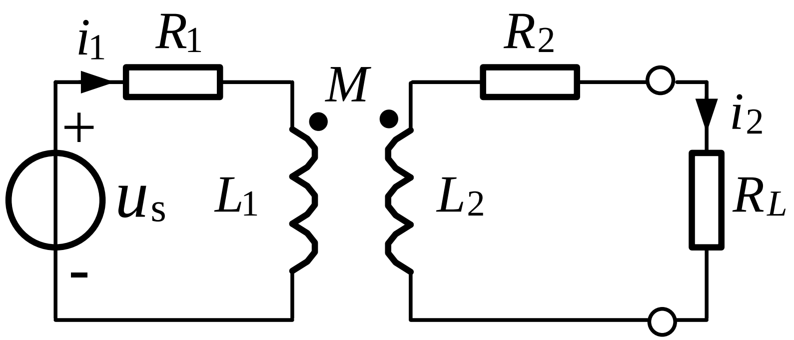
$$=\int_0^{i_1} L_1 i_1 \mathrm{d}\,i_1 + \int_0^{i_2} L_2 i_2 \mathrm{d}\,i_2 + \int_0^{i_1、\ i_2} \pm M\,\mathrm{d}(i_1 i_2)$$

$$=\frac{1}{2}L_1 i_1^2 + \frac{1}{2}L_2 i_2^2 \pm M i_1\, i_2$$

第13章 含磁耦合的电路

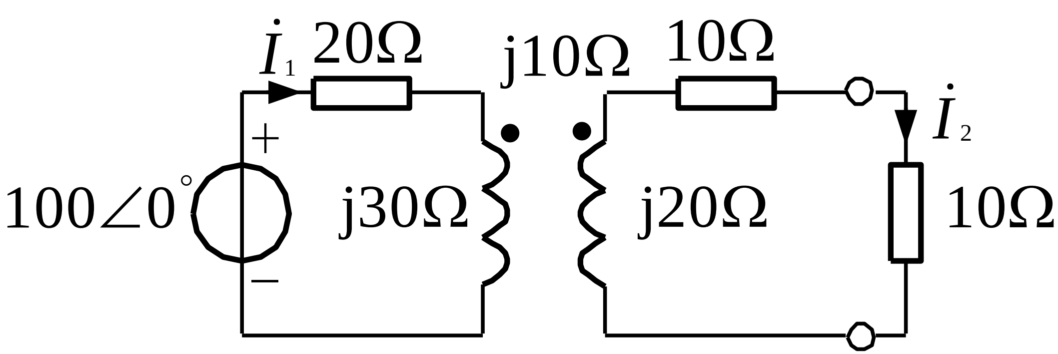
◆ 网孔分析法

$L_1=0.3\text{H}$，$L_2=0.2\text{H}$，$M=0.1\text{H}$，$R_1=20\Omega$，$R_2=10\Omega$，$R_L=10\Omega$，$u_s=100\sqrt{2}\cos(100t)\text{V}$. 求 i_1、i_2。



$$20\dot{I}_1+\text{j}30\dot{I}_1-\text{j}10\dot{I}_2=100\angle 0^\circ$$

$$10\dot{I}_2+\text{j}20\dot{I}_2-\text{j}10\dot{I}_1+10\dot{I}_2=0$$

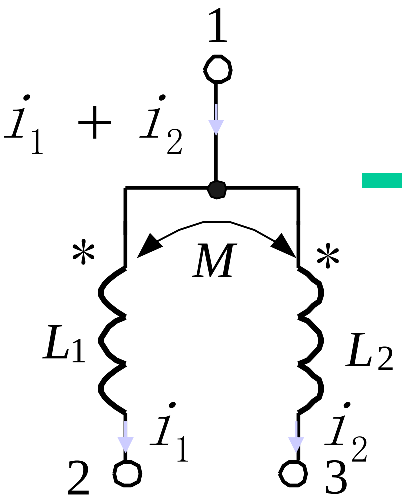


$$\dot{I}_1=2.82\angle-50.71^\circ\text{A}$$

$$\dot{I}_2=0.995\angle 174.3^\circ\text{A}$$

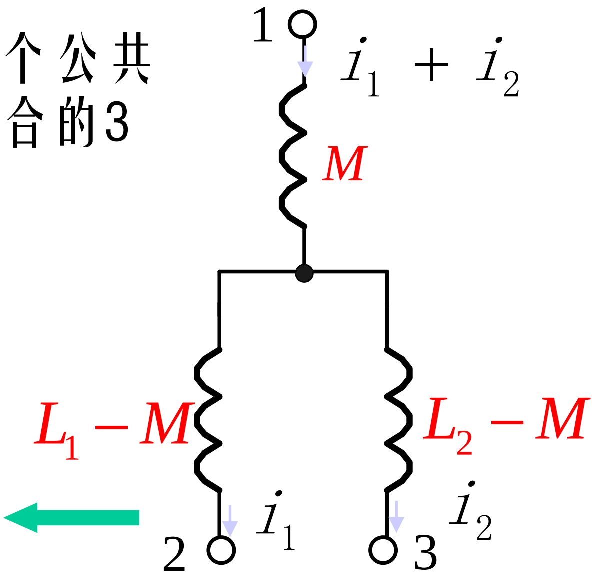
◆ 去耦合等效电路

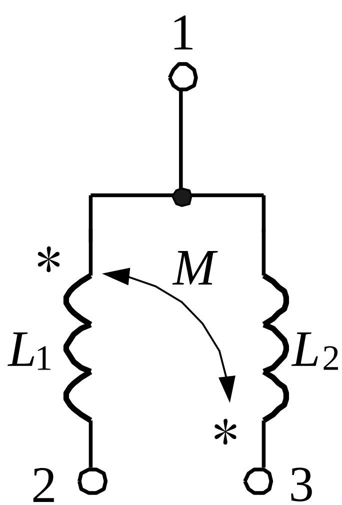
当耦合的两个线圈有一个公共端时，可以等效为非耦合的3个电感相连。



$$u_{12} = L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

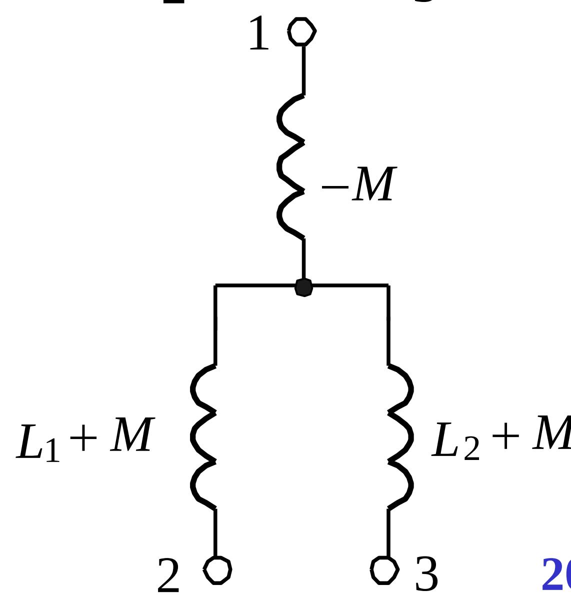
$$= (L_1 - M)\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\left(\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\right)$$



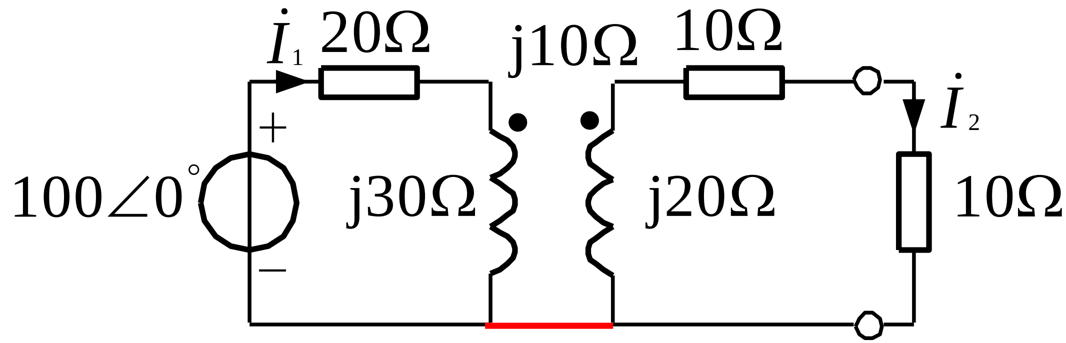


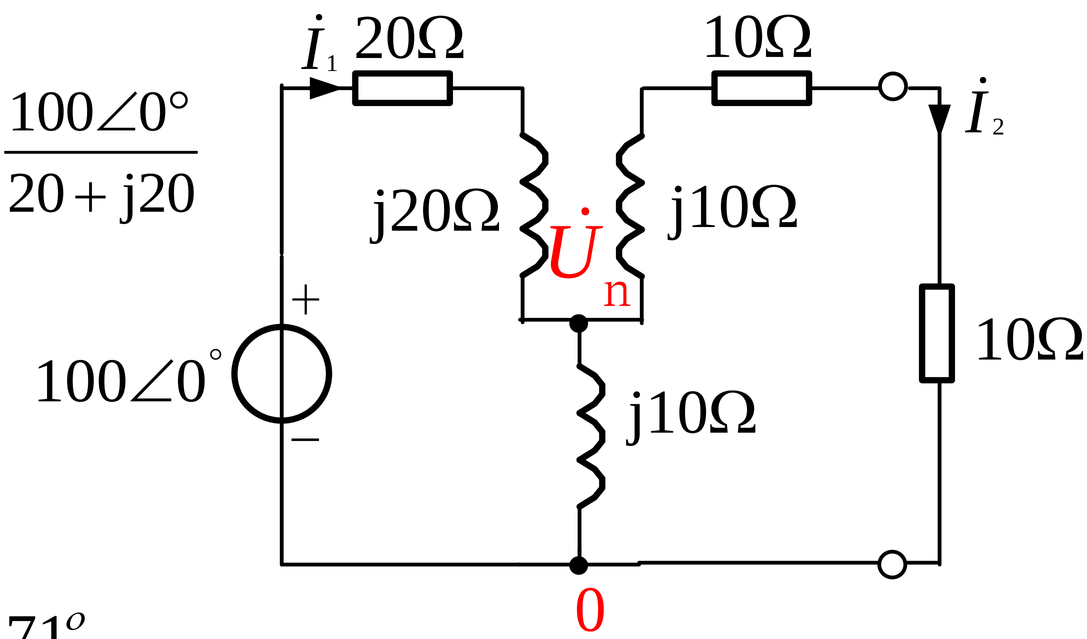
$$u_{12} = L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} - M \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

$$= (L_1 + M)\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} - M\left(\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\right)$$



◆ 去耦合等效电路





$$\left(\frac{1}{20+j20}+\frac{1}{j10}+\frac{1}{20+j10}\right)\dot{U}_n=\frac{100\angle 0^\circ}{20+j20}$$

$$\dot{U}_n=\frac{2100+j800}{101}$$

$$\dot{I}_1=\frac{100-\dot{U}_n}{20+j20}=2.82\angle-50.71^o$$

13.3 含耦合电感电路的分析

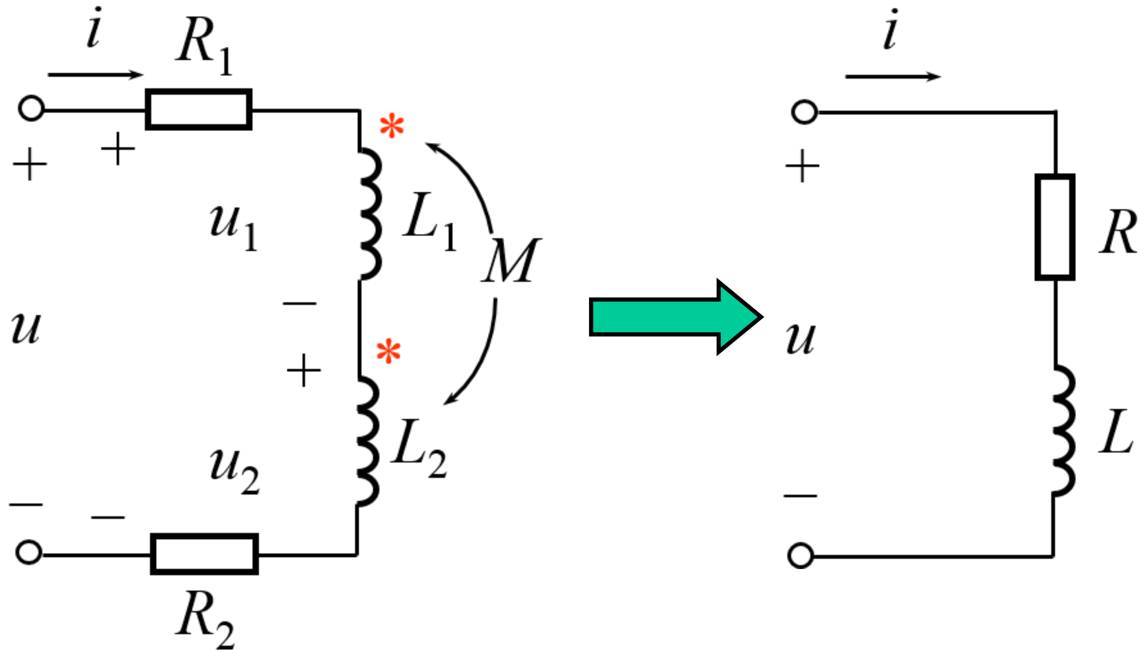
◆ 去耦合等效电路

- 两个耦合线圈有一个公共端时才可以去耦等效，去耦等效电路的参数与公共端是否为同名端相关。

- 原电路与去耦等效电路对应端子间的电压、对应支路的电流相等，去耦等效电路比原电路多一个结点，即3个电感的连接点。

13.3 含耦合电感电路的分析

◆ u-i关系

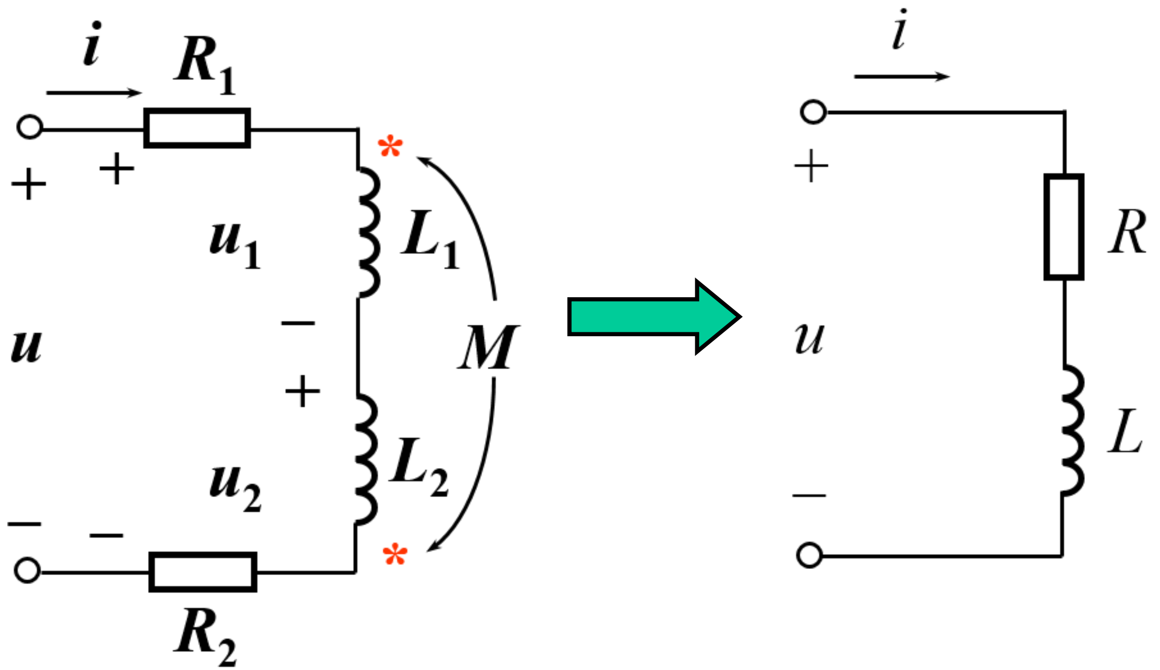


$$u = R_1 i + L_1\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + L_2\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + R_2 i$$

$$= (R_1 + R_2)i + (L_1 + L_2 + 2M)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

$$\therefore \quad R = R_1 + R_2 \qquad\qquad L = L_1 + L_2 + 2M$$

◆ u-i关系

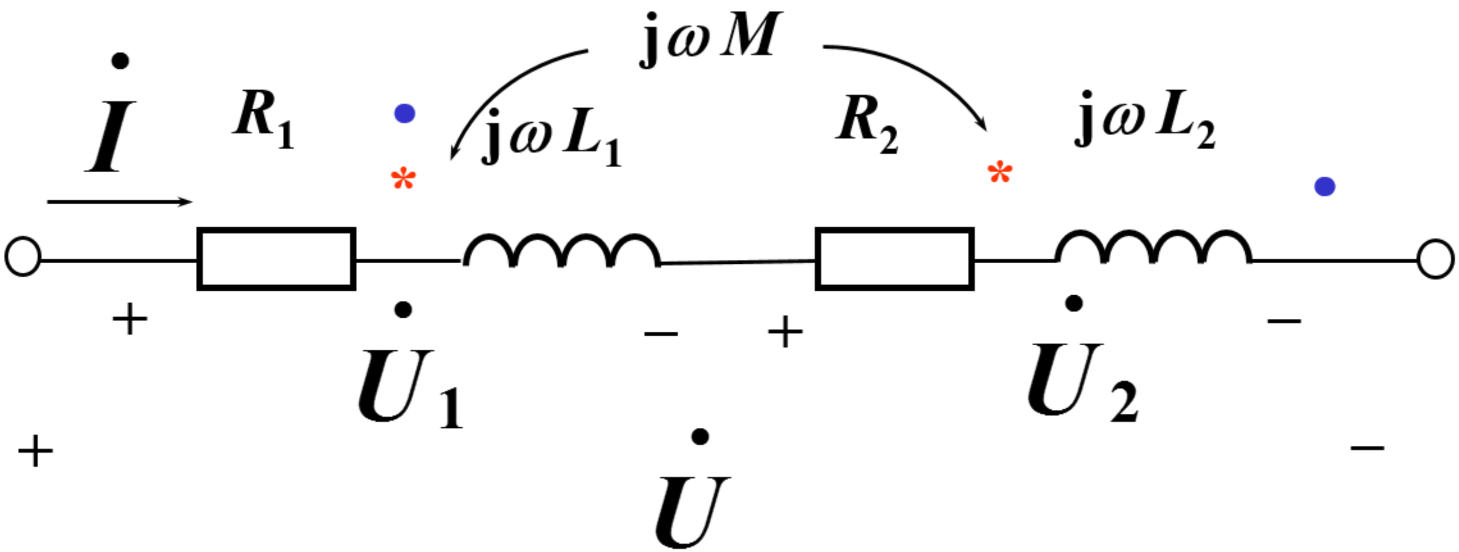


$$u = R_1 i + L_1 \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} - M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + L_2 \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} - M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + R_2 i$$

$$= (R_1 + R_2)i + (L_1 + L_2 - 2M)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

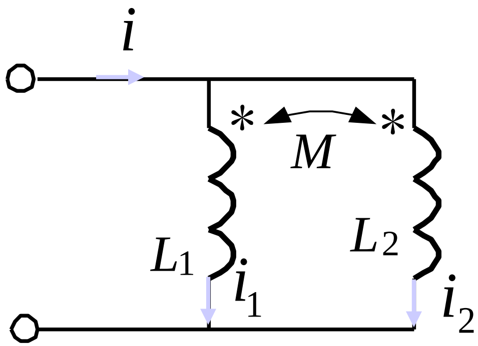
$$\therefore \quad R = R_1 + R_2 \qquad\qquad L = L_1 + L_2 - 2M$$

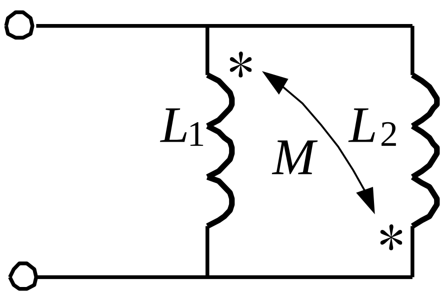
在正弦激励下：

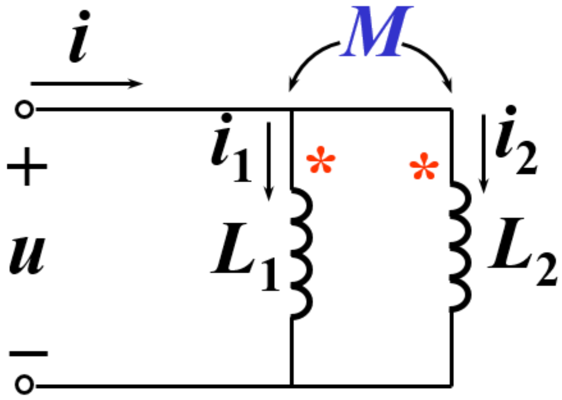


$$\dot{U}=(R_1+R_2)\dot{I}+j\omega(L_1+L_2\pm 2M)\dot{I}$$

◆ 计算等效电感





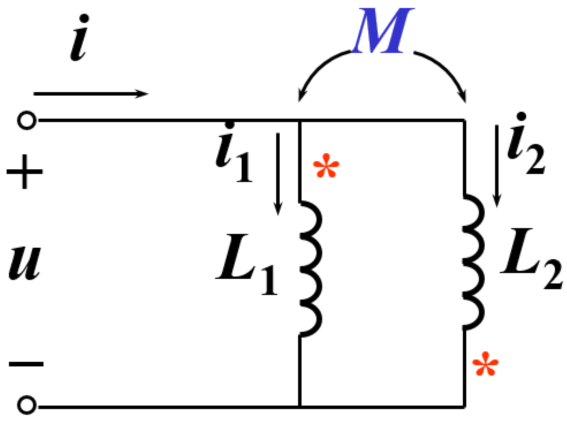


$$\begin{cases} u = L_1 \dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \\ u = L_2 \dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + M\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \\ i = i_1 + i_2 \end{cases}$$

解得u, i的关系：

$$u = \frac{(L_1L_2 - M^2)}{L_1 + L_2 - 2M}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

$$L_{eq} = \frac{(L_1L_2 - M^2)}{L_1 + L_2 - 2M} \geq 0$$



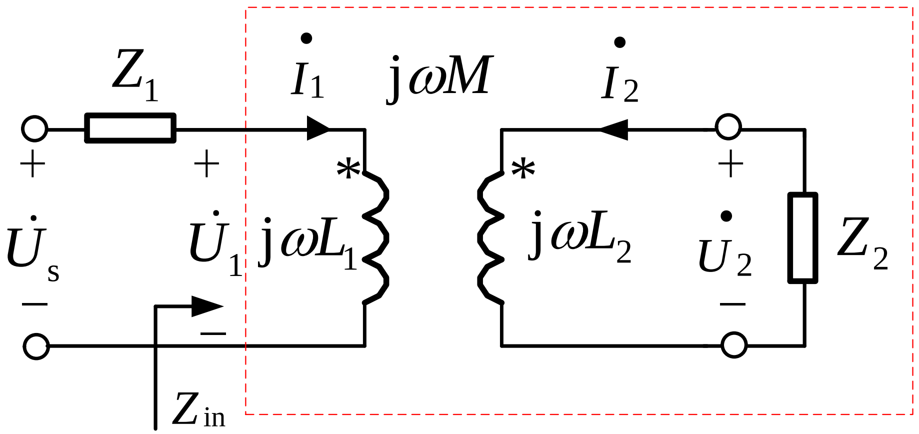
$$\begin{cases} u = L_1 \dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} - M\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \\ u = L_2 \dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} - M\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \\ i = i_1 + i_2 \end{cases}$$

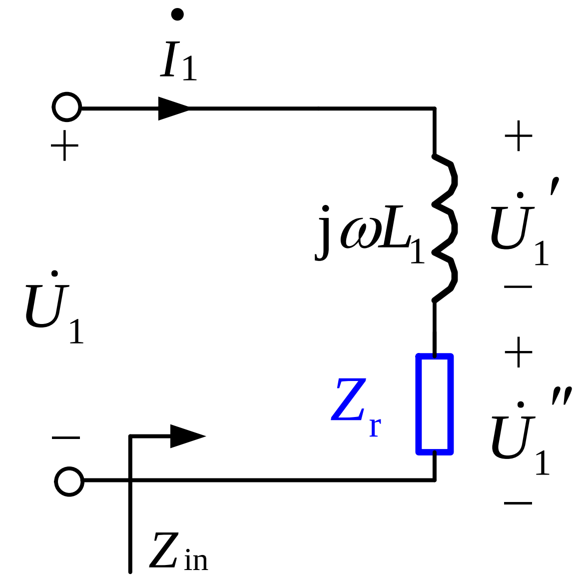
解得u, i的关系：

$$u = \frac{(L_1 L_2 - M^2)}{L_1 + L_2 + 2M}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

$$L_{eq} = \frac{(L_1 L_2 - M^2)}{L_1 + L_2 + 2M} \geq 0$$

◆ 映射阻抗





$$Z_{in}=\frac{\dot U_1}{\dot I_1}=\frac{\mathrm{j}\omega L_1\dot I_1+\mathrm{j}\omega M\dot I_2}{\dot I_1}=\mathrm{j}\omega L_1+\mathrm{j}\omega M\frac{\dot I_2}{\dot I_1}$$

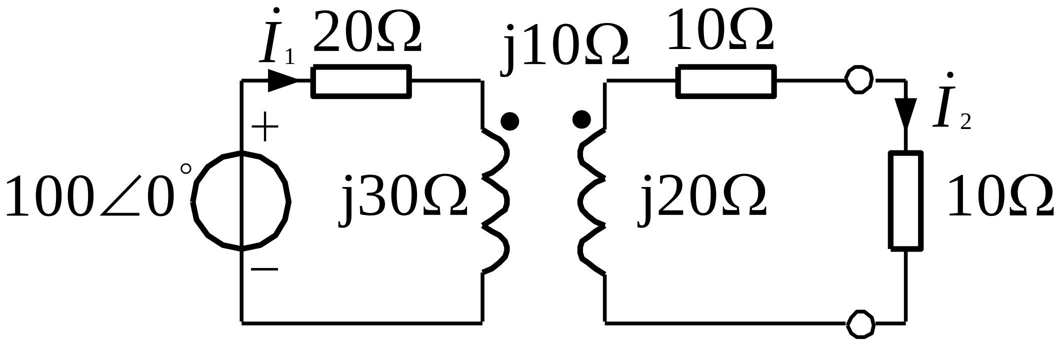
$$\dot U_2=\mathrm{j}\omega L_2\dot I_2+\mathrm{j}\omega M\dot I_1=-Z_2\dot I_2$$

$$\frac{\dot I_2}{\dot I_1}=-\frac{\mathrm{j}\omega M}{Z_2+\mathrm{j}\omega L_2}$$

$$Z_{in}=\mathrm{j}\omega L_1+\frac{(\omega M)^2}{Z_2+\mathrm{j}\omega L_2}$$

$$Z_r=\frac{(\omega M)^2}{Z_2+\mathrm{j}\omega L_2}$$

◆ 映射阻抗



$j30+Z_r$

$$Z_r=\frac{10^2}{10+10+j20}\Omega=\frac{5-j5}{2}\Omega$$

$$\dot{I}_1=\frac{100\angle 0^o}{20+j30+Z_r}=2.82\angle -50.71^o$$

$$Z_{\text{in}}=\text{j}\omega L_1+\frac{(\omega M)^2}{Z_2+\text{j}\omega L_2}$$

$$Z_r=\frac{(\omega M)^2}{Z_2+\text{j}\omega L_2}$$

□ 映射阻抗与同名端状况无关

第13章 含磁耦合的电路

13.1 概述

13.2 耦合电感

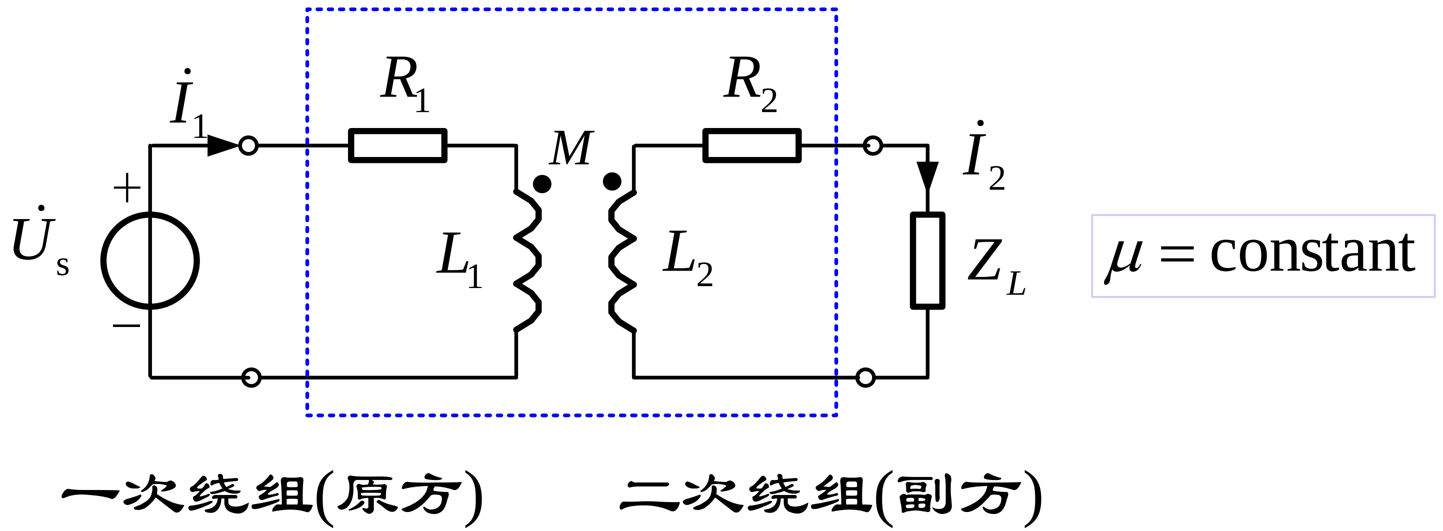
13.3 含耦合电感电路的分析

13.4 变压器原理

13.5 理想变压器

13.6 拓展与应用

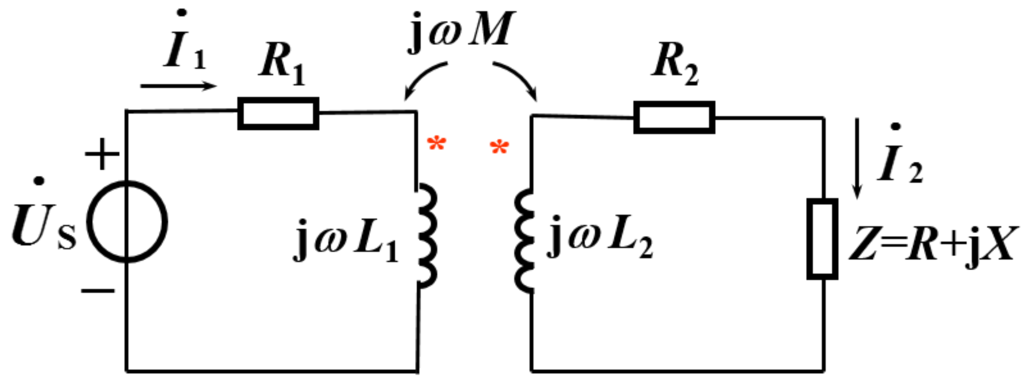
◆ 变压器



◆ **线性变压器**　自感不大，低频下自感抗低，因而线圈电流大。一般用在高频下。优点是没有铁心损耗。分析时用线性耦合电感为模型。

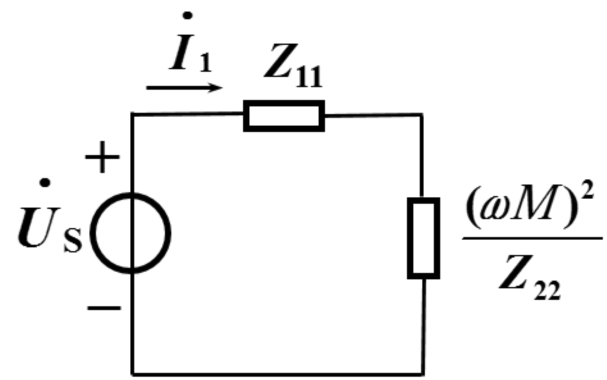
◆ 为了加大自感，采用铁心，即为**铁心变压器**，是**非线性耦合系统**。由于自感大，可以用于低频下。存在铁心损耗。分析时近似为**理想变压器**。

◆ 线性变压器



原边回路总抗阻 $Z_{11}=R_1+jwL_1$

副边回路总阻抗 $Z_{22}=(R_2+R)+j(wL_2+X)$

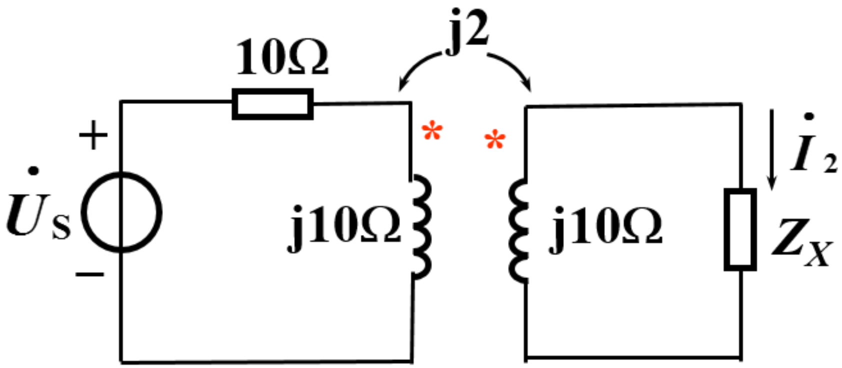


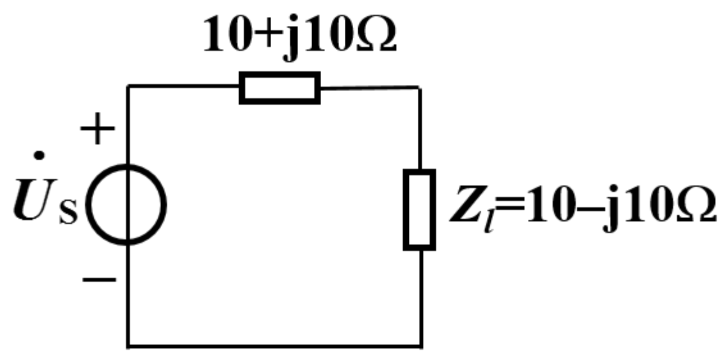
$$\begin{cases} Z_{11}\dot{I}_1 - j\omega M\dot{I}_2 = \dot{U}_S \\ -j\omega M\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 = 0 \end{cases}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_S}{Z_{11} + \dfrac{(\omega M)^2}{Z_{22}}} \qquad \dot{I}_2 = \frac{j\omega M\dot{I}_1}{Z_{22}}$$

例：已知 U_S=20 V，原边等效电路的映射阻抗 Z_l=10–j10.

求：Z_X 并求负载获得的有功功率.





解： $$Z_l = \frac{\omega^2 M^2}{Z_{22}} = \frac{4}{Z_X + j10} = 10 - j10$$

$$\therefore Z_X = \frac{4}{10 - j10} - j10 = 0.2 - j9.8$$

此时负载获得的功率：$P = P_R = \left(\frac{20}{10+10}\right)^2 R_l = 10\ \text{W}$

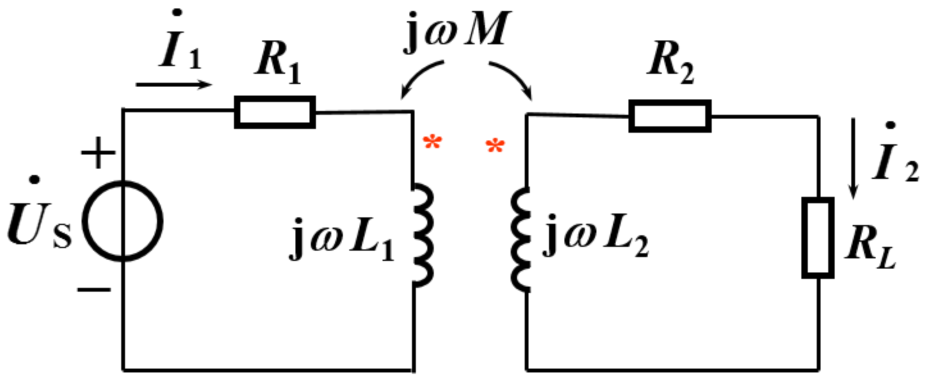
实际是最佳匹配：$Z_l = Z_{11}^*$，$P = \frac{U_S^2}{4R} = 10\ \text{W}$

例： L_1=3.6H , L_2=0.06H , M=0.465H , R_1=20Ω , R_2=0.08Ω ,

R_L=42Ω , ω=314rad/s,

$\dot{U} = 115\angle 0^\circ$ V

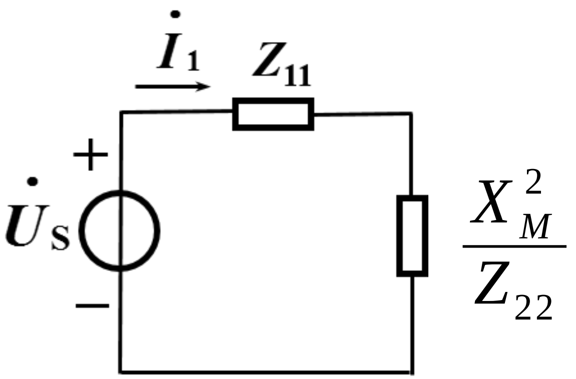
求：$\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$.



$$Z_{11} = R_1 + \mathrm{j}\omega L_1 = 20 + \mathrm{j}1131\ \Omega$$

$$Z_{22} = R_2 + R_L + \mathrm{j}\omega L_2 = 42.08 + j18.85\ \Omega$$

$$Z_l = \frac{X_M^2}{Z_{22}} = 464\angle(-24.1^\circ)\quad \Omega$$



$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_S}{Z_{11} + Z_l} \qquad \dot{I}_2 = \frac{\mathrm{j}\omega M \dot{I}_1}{Z_{22}}$$

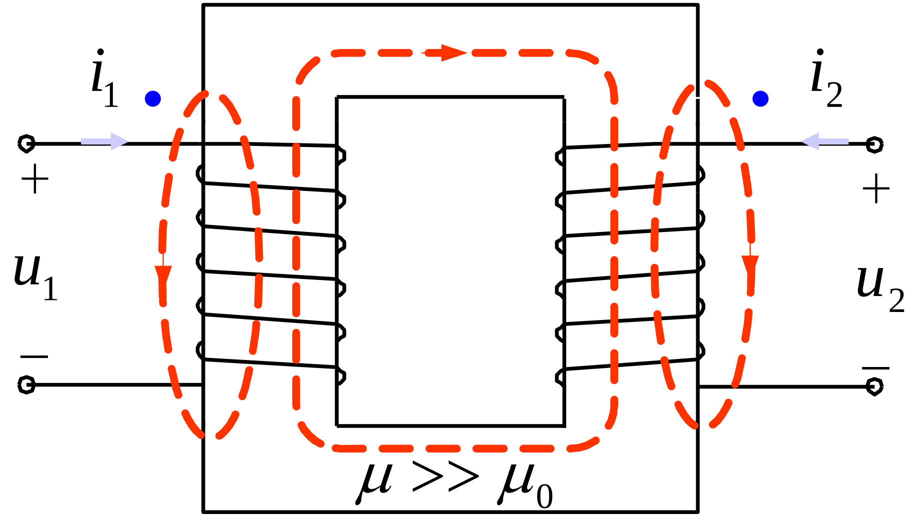
第13章 含磁耦合的电路

◆ 理想变压器

(a) $k=1$ 线性全耦合系统

(b) $\mu \to \infty$ ➡ $L_1, L_2 \to \infty$

(c) $R_1 = 0 = R_2$ 没有损耗



$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = \frac{d(N_1\phi)}{dt} = N_1\frac{d\phi}{dt}$$

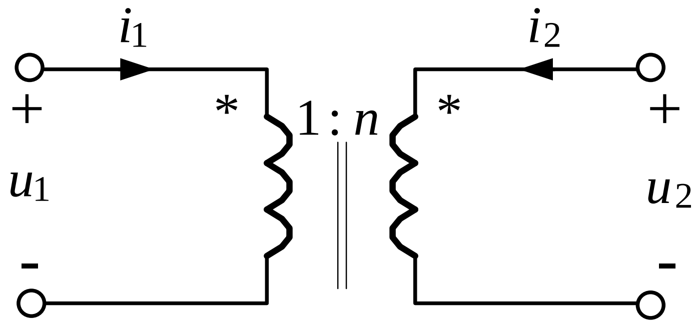
$$u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} = \frac{d(N_2\phi)}{dt} = N_2\frac{d\phi}{dt}$$

$$\boxed{\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = n}$$ 电压方程

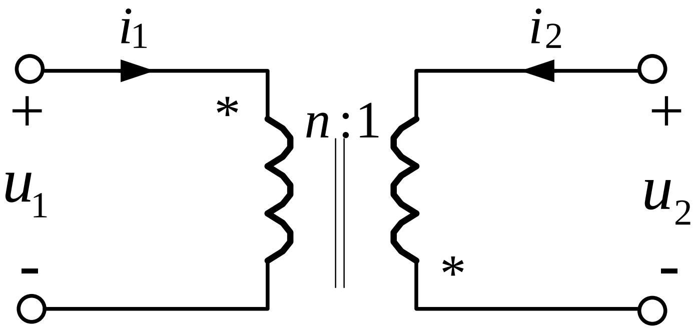
$$\boxed{i_1 = -\frac{N_2}{N_1}i_2 = -\frac{1}{n}i_2}$$ 电流方程

功率方程 $$\boxed{u_1 i_1 + u_2 i_2 = 0}$$

◆ 电压比与电流比



$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{1}{n} \qquad \frac{i_1}{i_2} = -\frac{n}{1}$$

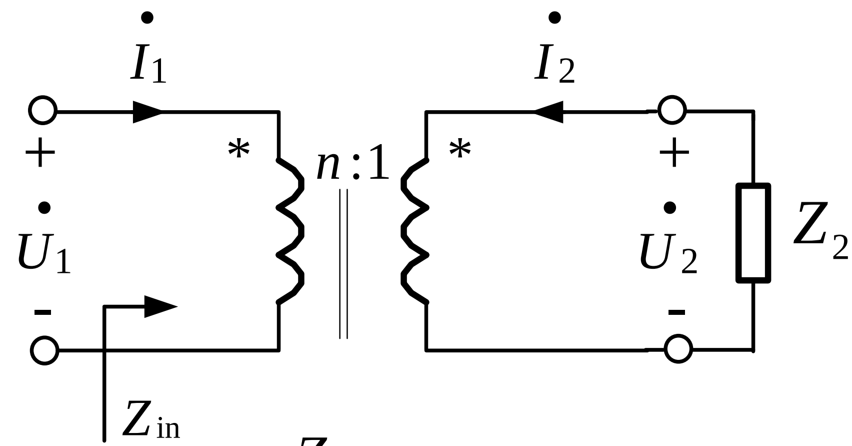


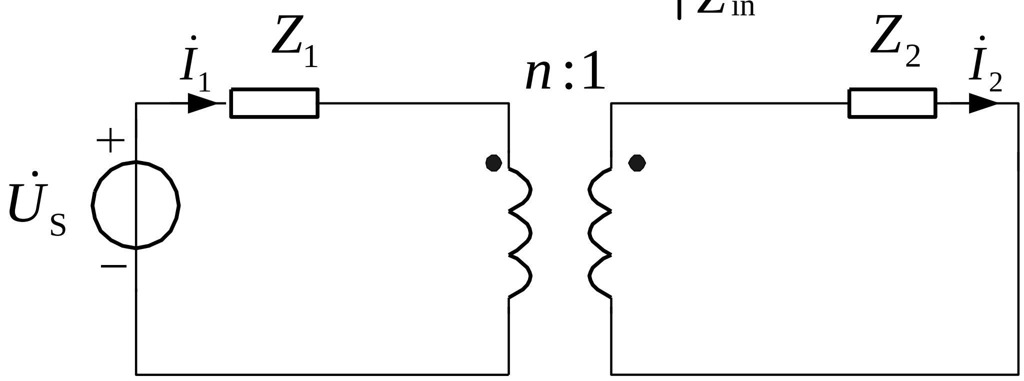
$$\frac{u_1}{u_2} = -n \qquad \frac{i_1}{i_2} = \frac{1}{n}$$

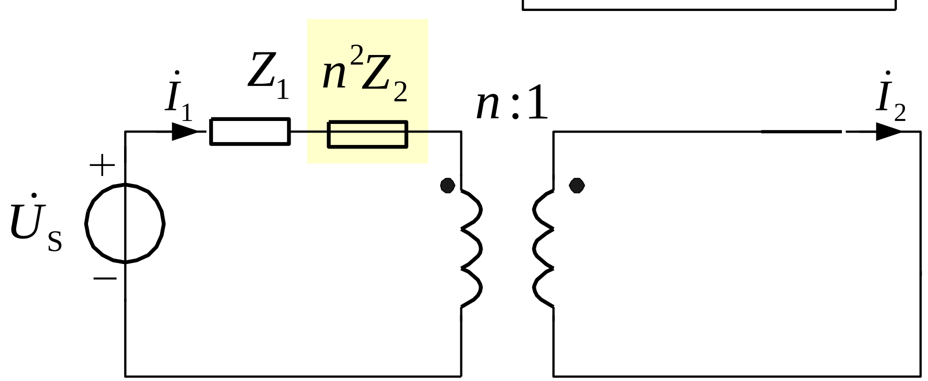
13.5 理想变压器

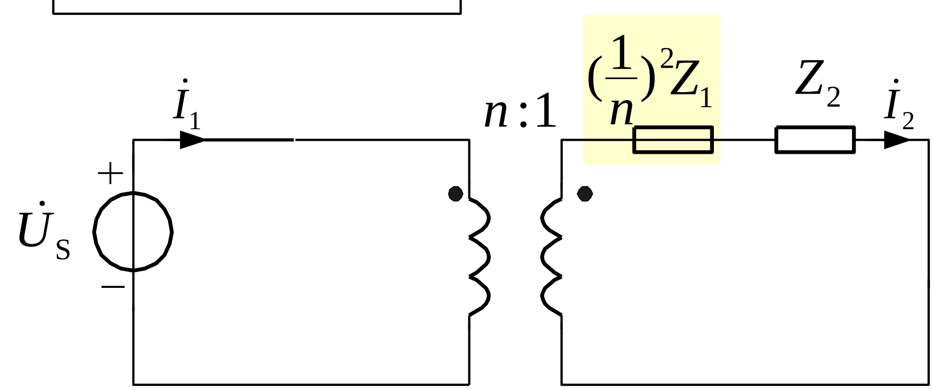
◆ 阻抗变换

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{n\dot{U}_2}{-\frac{1}{n}\dot{I}_2} = n^2 Z_2$$

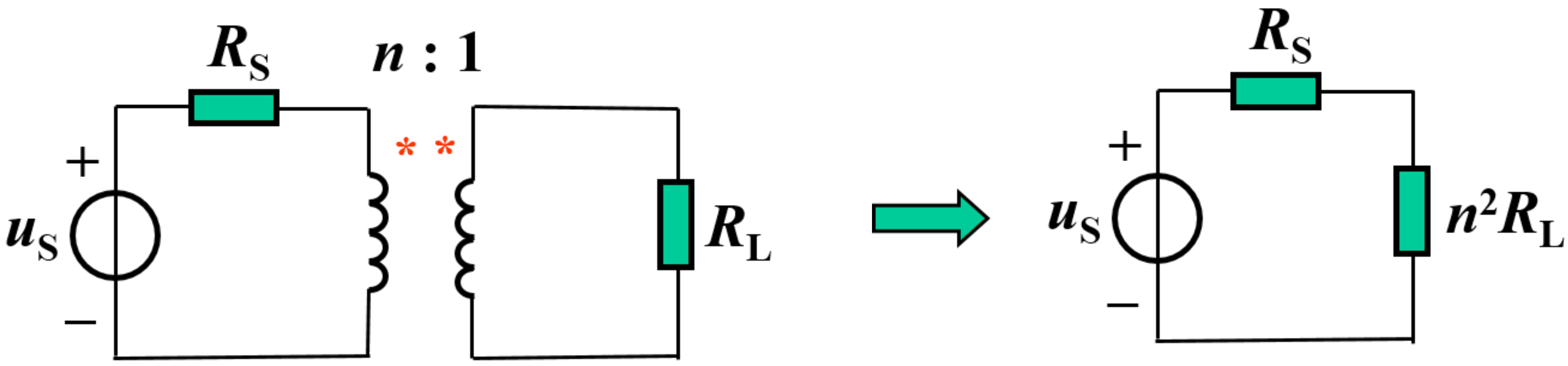








例： 已知电阻R_S=1k欧姆，负载电阻R_L=10欧姆。为使R_L上获得最大功率，求理想变压器的变比n。

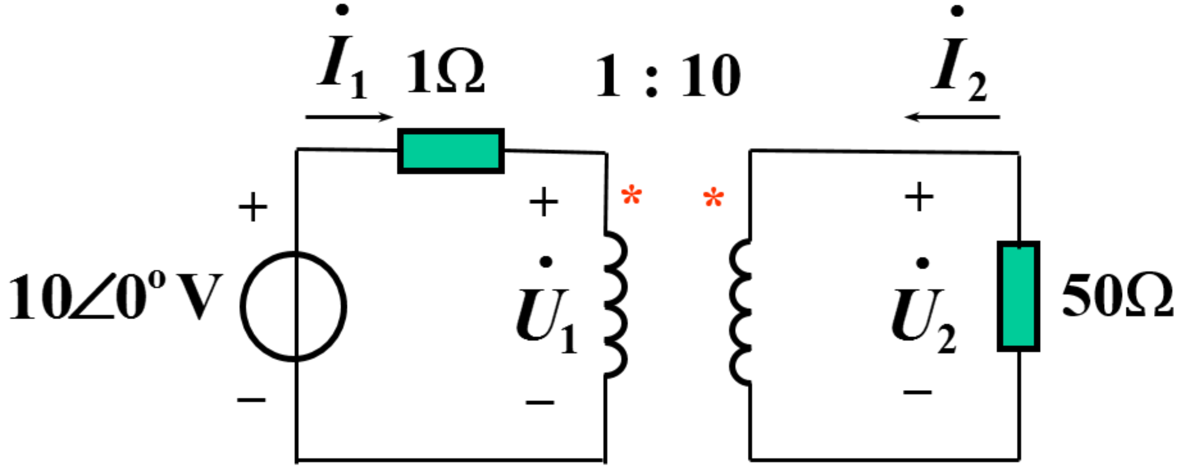


解： 当 $n^2R_L=R_S$ 时匹配，即

$$10n^2=1000$$

$$n^2=100 \qquad n=10$$

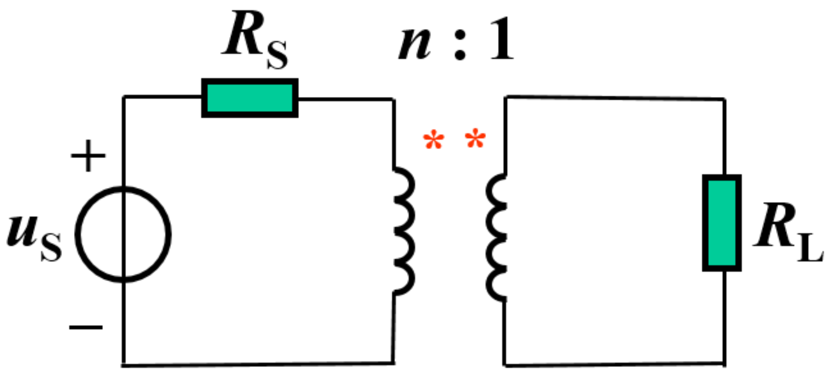
例：求 $\dot{U}_2$.

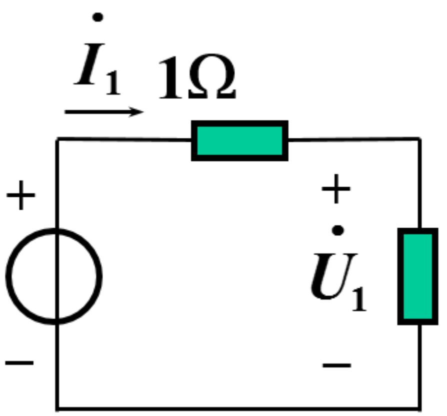


◆ 方法1：列方程

$$
\begin{cases}
1\times \dot{I}_1+\dot{U}_1=10\angle 0^{\circ} \\
\dot{U}_2=-50\dot{I}_2 \\
\dot{U}_1=\dfrac{1}{10}\dot{U}_2 \\
\dot{I}_1=-10\dot{I}_2
\end{cases}
\Longrightarrow \quad \dot{U}_2=33.33\angle 0^{\circ}\ \mathrm{V}
$$

◆ 方法2：阻抗变换





$$(\frac{1}{10})^2\times 50=\frac{1}{2}\Omega$$

$$\dot{U}_1=\frac{10\angle 0^\circ}{1+1/2}\times\frac{1}{2}=\frac{10}{3}\angle 0^\circ\ \mathrm{V}$$

$$\dot{U}_2=10\ \dot{U}_1$$

$$=33.33\angle 0^\circ\ \mathrm{V}$$

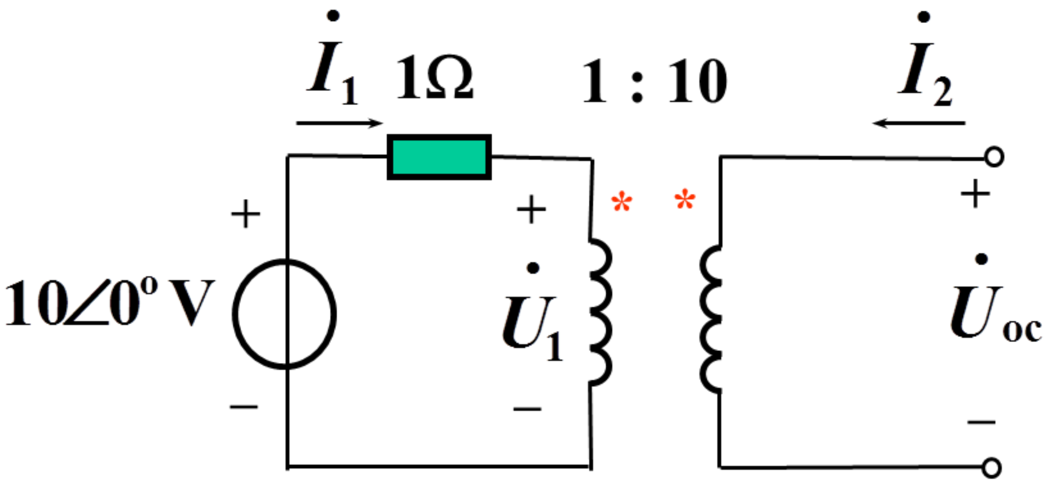
◆ 方法3：戴维南等效

求$\dot{U}_{oc}$：

$\because \dot{I}_2 = 0, \quad \therefore \dot{I}_1 = 0$

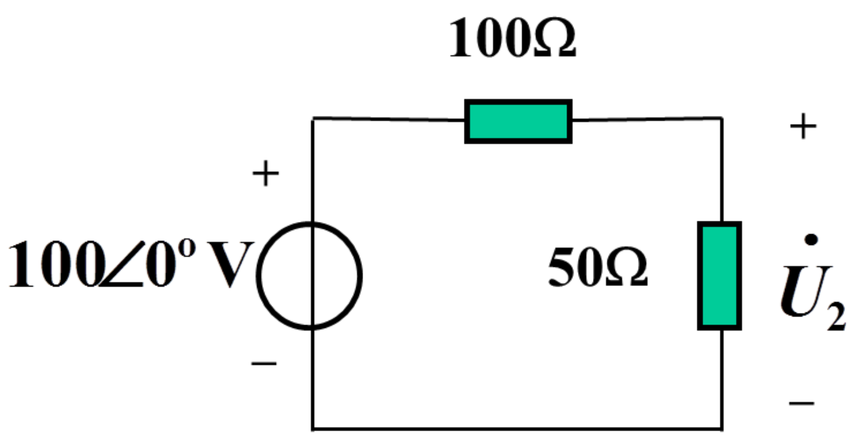
$\dot{U}_{oc} = 10\dot{U}_1$

$= 100\angle 0^{o}\ \mathrm{V}$



求R_0：

$R_0 = 10^2 * 1 = 100$



$$\dot{U}_2 = \frac{100\angle 0^{o}}{100+50} \times 50 = 33.33\angle 0^{o}\ \mathrm{V}$$