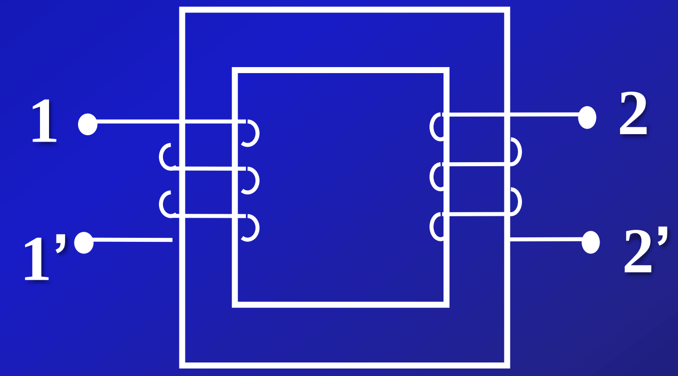
空芯变压器

变压器是利用耦合线圈间的磁耦合来传输能量或信号的器件，通常用含有互感的模型表示。

通常有两个线圈，与电源相接的为初级（原边）线圈，与负载相接的为次级（副边）线圈，它们绕在同一个磁芯上。



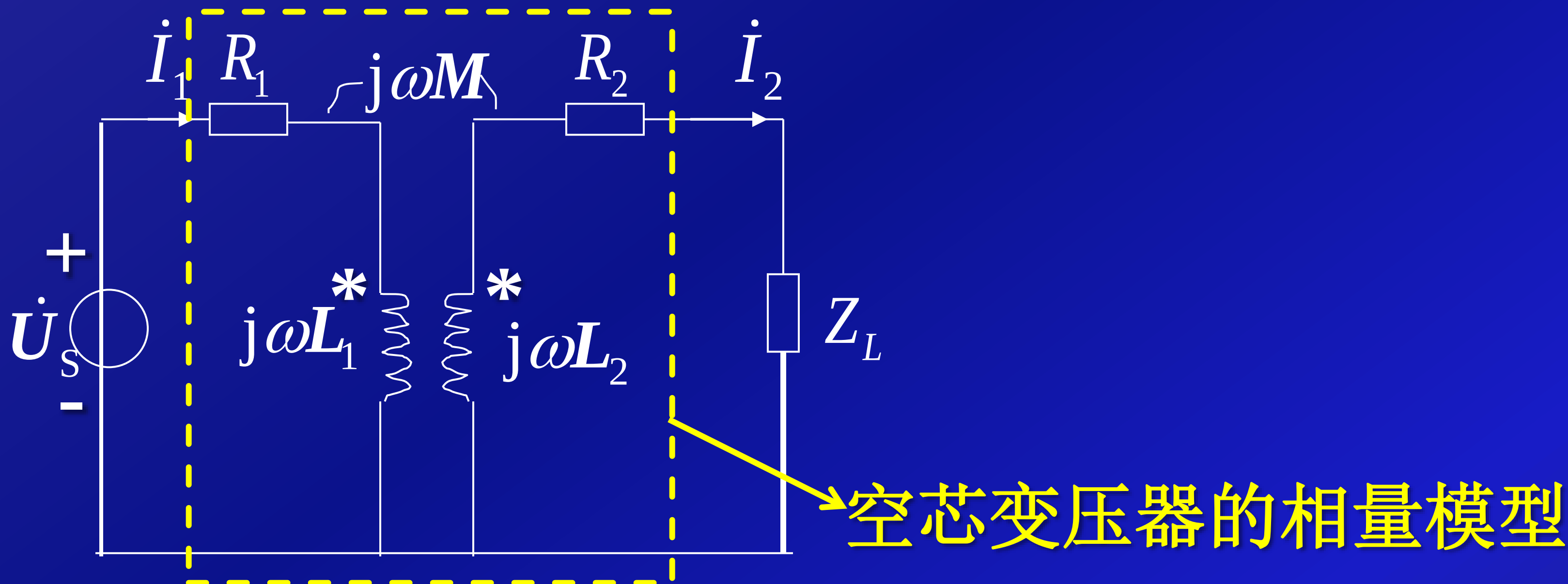
线圈绕在铁芯上，构成铁芯变压器；芯子是非铁磁材料，构成空芯变压器。

铁芯变压器一般耦合系数接近1，属紧耦合，用于输配电设备；空芯变压器耦合系数一般较小，属松耦合，用于高频电路和测量仪器。

空芯变压器的分析通常以互感的VCR作为基础，铁芯变压器的分析通常以理想变压器作为基础，是两种不同的分析方法。

没有严格的限制，这两种的分析方法可以统一。

空芯变压器的正弦稳态分析



R_1, R_2：初、次级线圈的电阻；

L_1, L_2：初、次级线圈的电感；

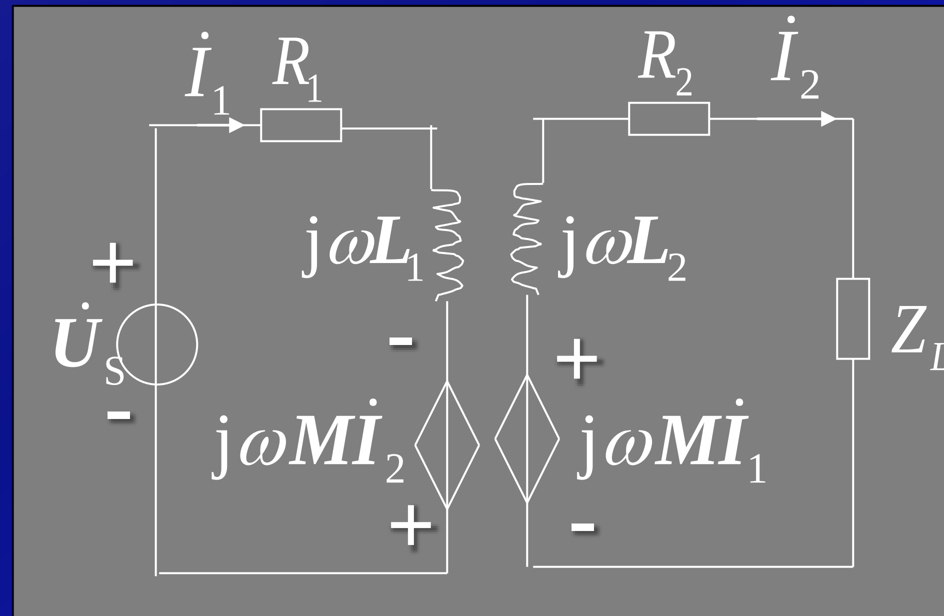
M ：初、次级线圈间的互感；

} 空芯变压器的参数

法1：回路法

用受控源替代互感电压

列写回路KVL方程：

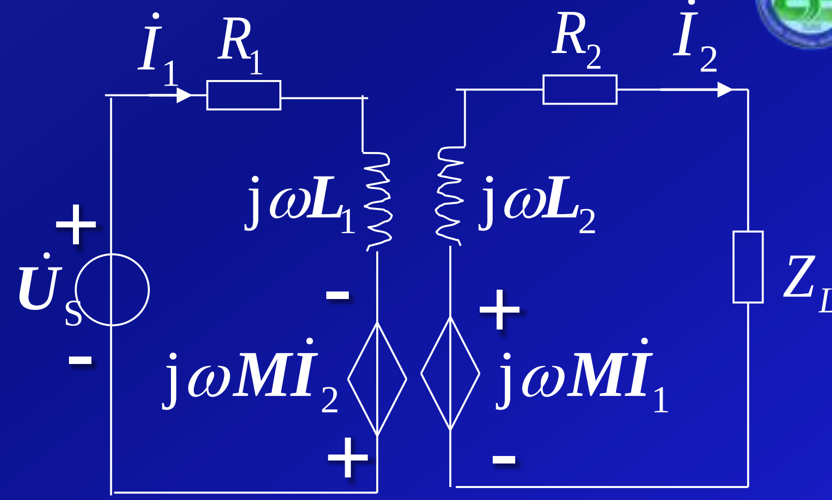


$$\left.\begin{aligned}(R_1+j\omega L_1)\dot{I}_1-j\omega M\dot{I}_2&=\dot{U}_S\\ -j\omega M\dot{I}_1+(R_2+j\omega L_2+Z_L)\dot{I}_2&=0\end{aligned}\right\}\Rightarrow\left.\begin{aligned}Z_{11}\dot{I}_1-j\omega M\dot{I}_2&=\dot{U}_S\\ -j\omega M\dot{I}_1+Z_{22}\dot{I}_2&=0\end{aligned}\right\}$$

$$Z_{11}=R_1+j\omega L_1\ ,\ Z_{22}=R_2+j\omega L_2+Z_L$$

分别是初、次级回路的自阻抗。

联立求得



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

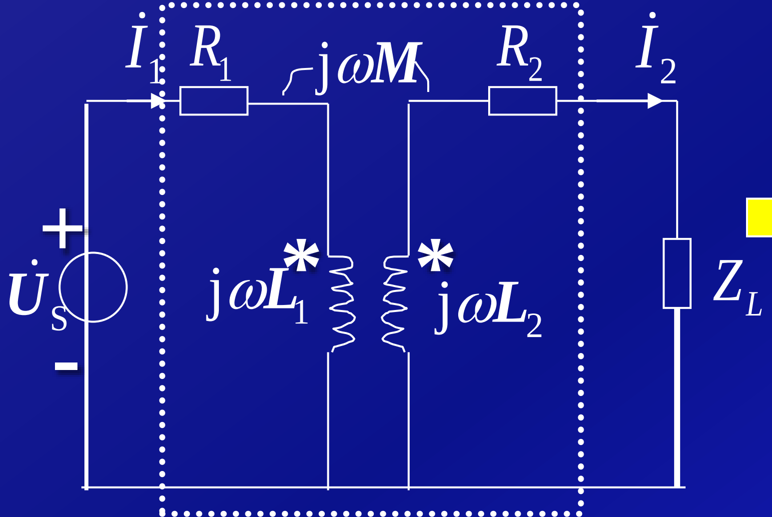
输入阻抗：从初级线圈两端看入的等效阻抗；

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

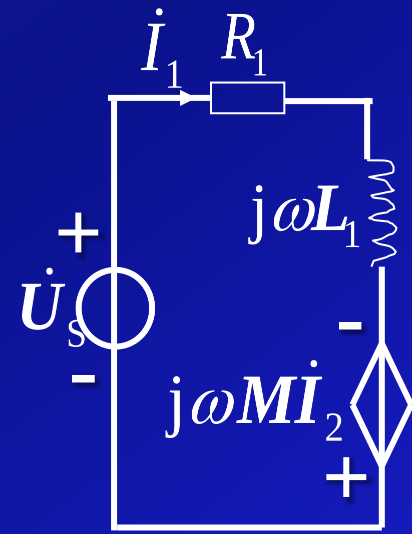
反映阻抗：$(\omega M)^2/Z_{22}$为次级回路反射到初级回路上的阻抗，用Z_{f1}表示。

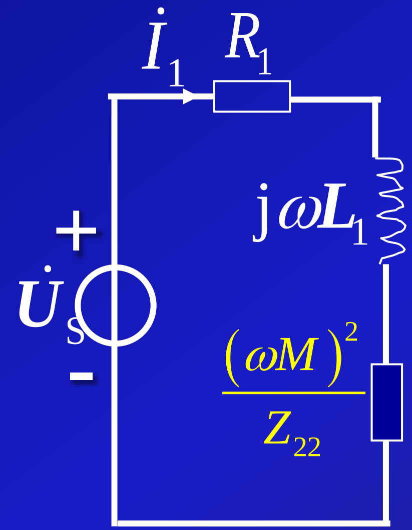
反映了次级回路通过磁耦合对初级回路的影响。

据此，可作出空芯变压器的初级等效电路，故可很方便地求出初级回路电流。



空芯变压器电路相量模型





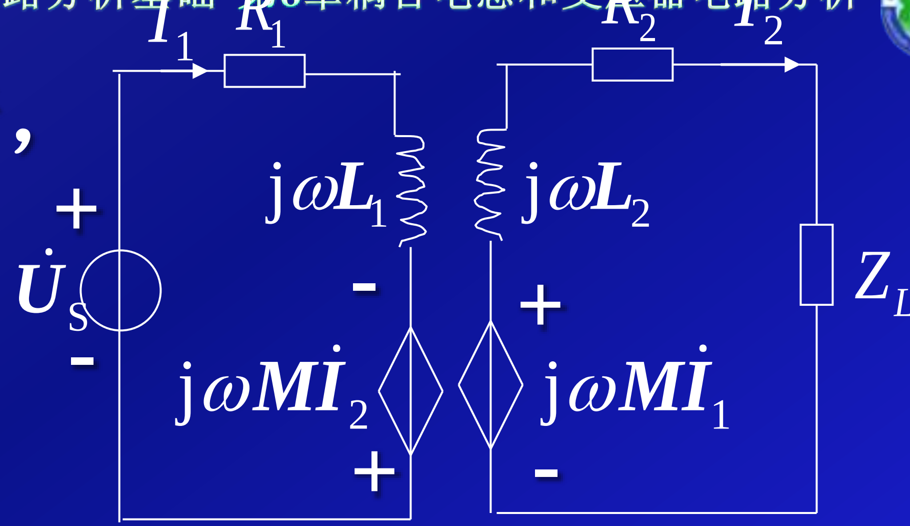
初级等效电路

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

求得初级回路电流 $\dot{I}_1$ 后，

次级回路的电流 $\dot{I}_2$为：

$$\dot{I}_2 = \frac{\mathrm{j}\omega M\dot{I}_1}{Z_{22}}$$



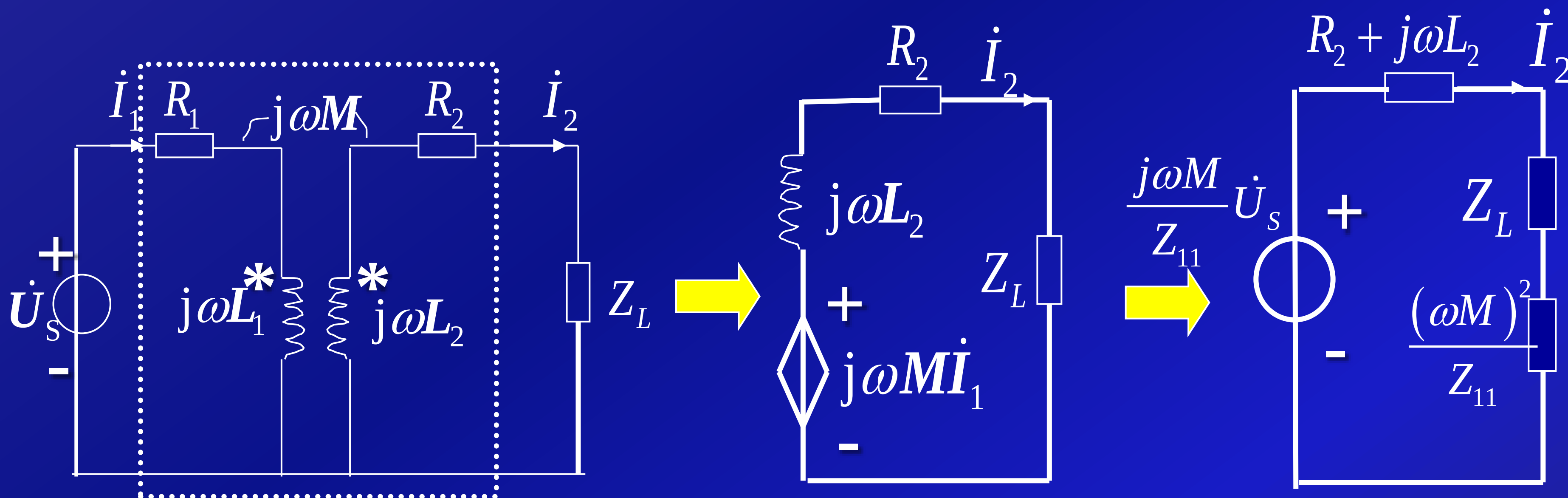
初级回路电流与同名端无关，而次级回路电流则与同名端有关。

- 若 $Z_L = \infty$，即次级未接，则 $Z_i = Z_{11}$，即次级对初级无影响；
- 若 $Z_L = 0$，当k=1，线圈绕阻近似为零时：

$$Z_i = \mathrm{j}\omega L_1 + \frac{(\omega M)^2}{\mathrm{j}\omega L_2} = \mathrm{j}\omega L_1 - \mathrm{j}\omega\frac{M^2}{L_2} = 0$$

即：次级短路相当于(近似于)初级短路。

可作出次级的等效电路，故可很方便地求出次级回路电流。

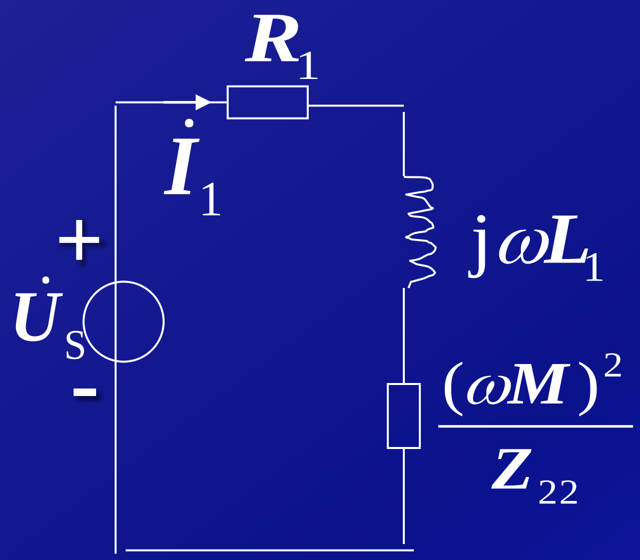


空芯变压器电路相量模型

次级等效电路

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

法2：初级等效电路法（反映阻抗法）



反映阻抗特点：

(1)与同名端无关；

(2)反映阻抗与次级阻抗的性质相反。

分析方法：1)先求输入阻抗Z_i；2)求初级电流$\dot{I}_1$(与同名端无关)；3)求次级电流$\dot{I}_2$(与同名端有关)。

带耦合线圈的等效电路：

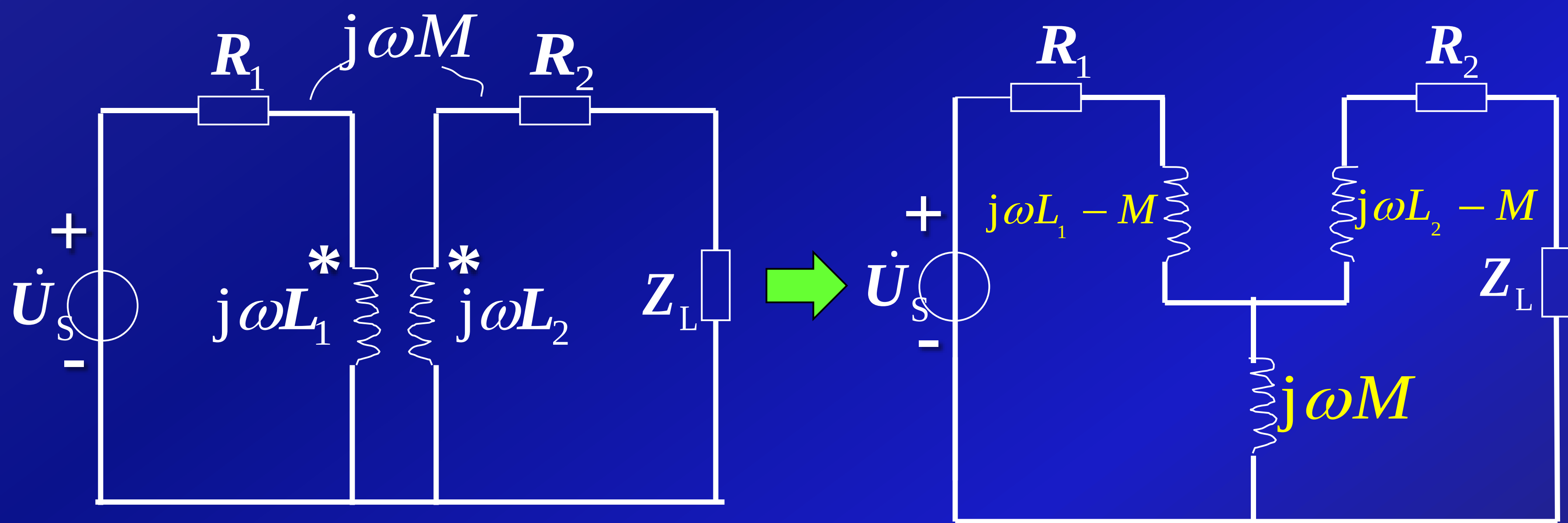
(1) 等效电路的核心是反映阻抗，其大小与耦合电抗ωM的平方成正比，与回路的自阻抗成反比；

(2) 反映阻抗改变了自阻抗的性质；

(3) 初级等效电路：在初级回路中增加了一反映阻抗Z_{f1}；

法3：空芯变压器电路也常用去耦等效电路来分析。

同名端相连，故由三端联接分析可知：。

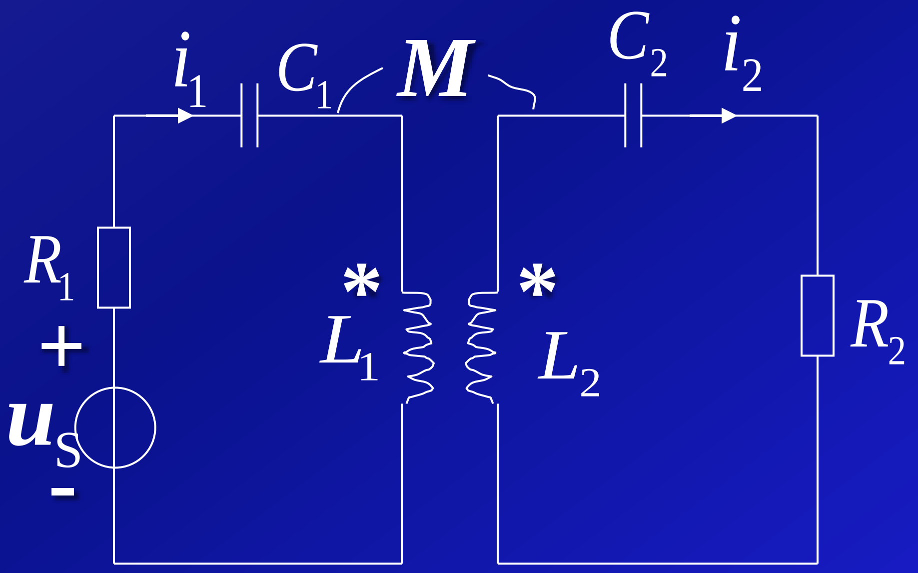


例7（P259例8-3）一空芯变压，已知

$$L_1 = 2\mathrm{mH}, L_2 = 1\mathrm{mH}, M = 0.2\mathrm{mH}, R_1 = 9.9\Omega,$$

$$R_2 = 40\Omega, C_1 = C_2 = 10\mu\mathrm{F}，\ u_S(t) = 10\sqrt{2}\cos 10^4 t\ \mathrm{V}$$

求次级回路电流 $i_2(t)$

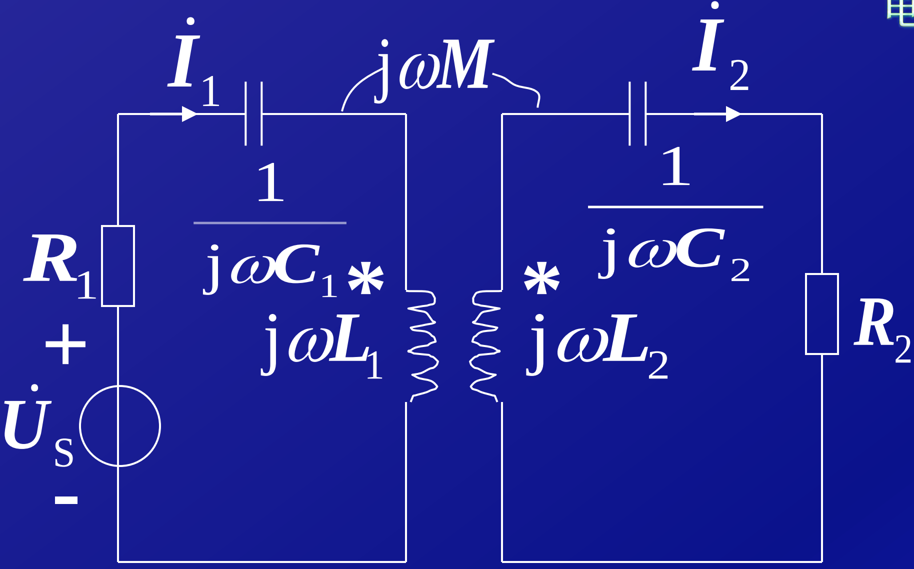


解：**方法1：反映阻抗**

1)先求输入阻抗 Z_i；

2)求初级电流 $\dot{I}_1$ (与同名端无关)；

3)求次级电流 $\dot{I}_2$ (与同名端有关)。



$$\dot{U}_S = 10\angle 0^\circ \ \text{V}$$

$$Z_{11} = R_1 + \mathrm{j}(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) = 9.9 + j10\Omega$$

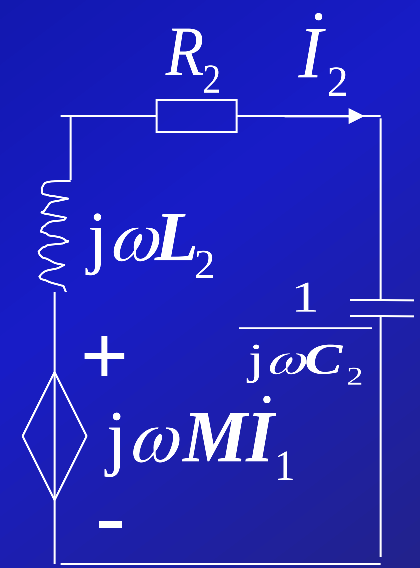
$$Z_{22} = R_2 + \mathrm{j}(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) = 40\Omega$$

$$\mathrm{j}\omega M = \mathrm{j}2\Omega$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_S}{Z_{11} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{22}}} = \frac{10\angle 0^\circ}{10 + j10\Omega} = \frac{1}{\sqrt{2}}\angle -45^\circ \ \text{A}$$

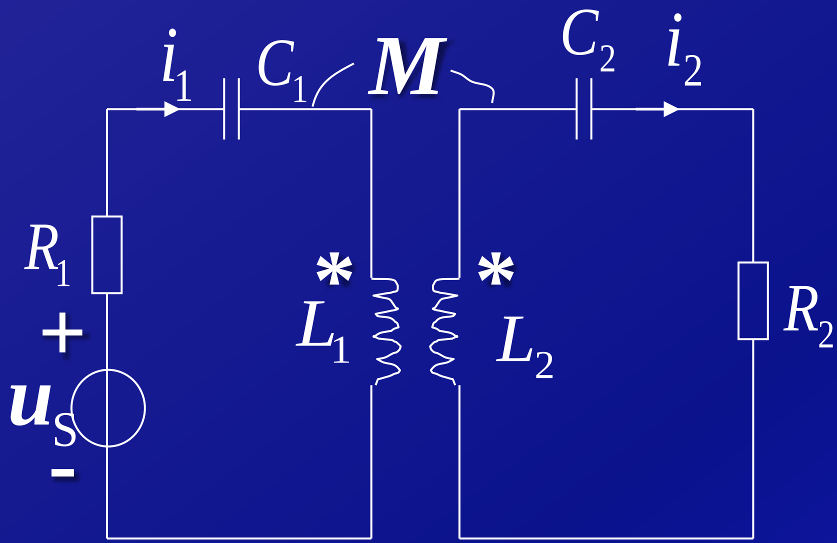
$$\dot{I}_2 = \frac{\mathrm{j}\omega M\dot{I}_1}{Z_{22}} = \frac{1}{20\sqrt{2}}\angle 45^\circ \ \text{A}$$

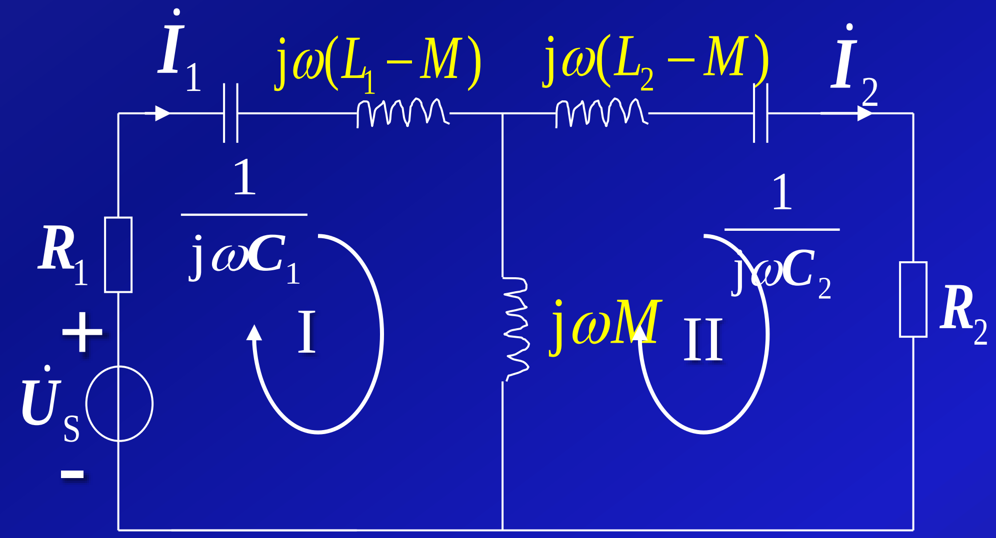
$$\therefore \quad i_2(t) = 0.05\cos(10^4 t + 45^\circ) \ \text{A}$$



次级等效电路

方法2：去耦等效电路法





网孔法：

$$\left.\begin{aligned}\left(R_1+\mathrm{j}\omega L_1+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_1}\right)\dot{I}_1-\mathrm{j}\omega M\dot{I}_2=\dot{U}_S\\-\mathrm{j}\omega M\dot{I}_1+\left(R_2+\mathrm{j}\omega L_2+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_2}\right)\dot{I}_2=0\end{aligned}\right\}$$

代入数据

$$\left.\begin{aligned}(9.9+\mathrm{j}10)\dot{I}_1-\mathrm{j}2\dot{I}_2&=10\angle 0^\circ\\ -\mathrm{j}2\dot{I}_1+40\dot{I}_2&=0\end{aligned}\right\}$$

用克莱姆法则

$$D=\begin{vmatrix}9.9+j10 & -j2\\ -j2 & 40\end{vmatrix}=400+j400$$

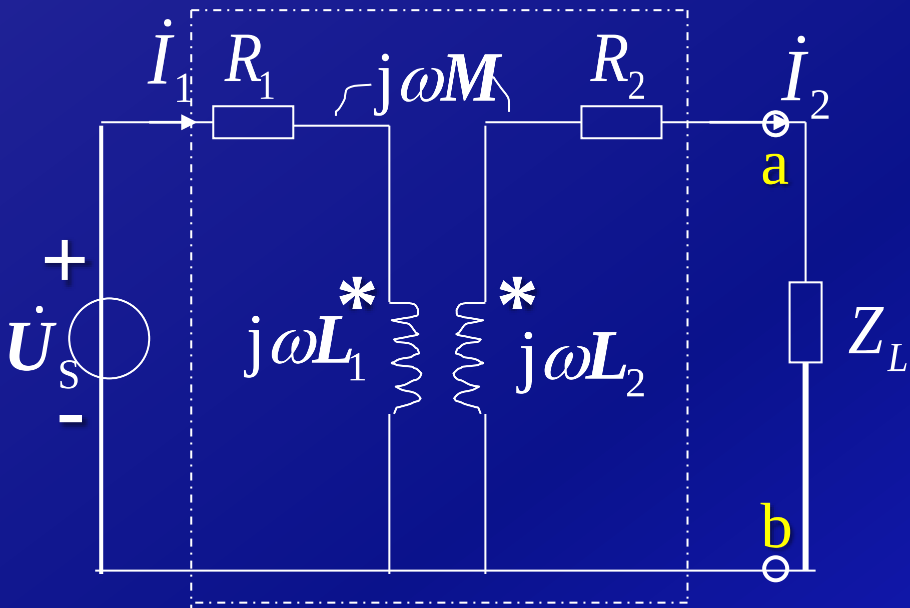
$$D_2=\begin{vmatrix}9.9+j10 & 10\\ -j2 & 0\end{vmatrix}=j20$$

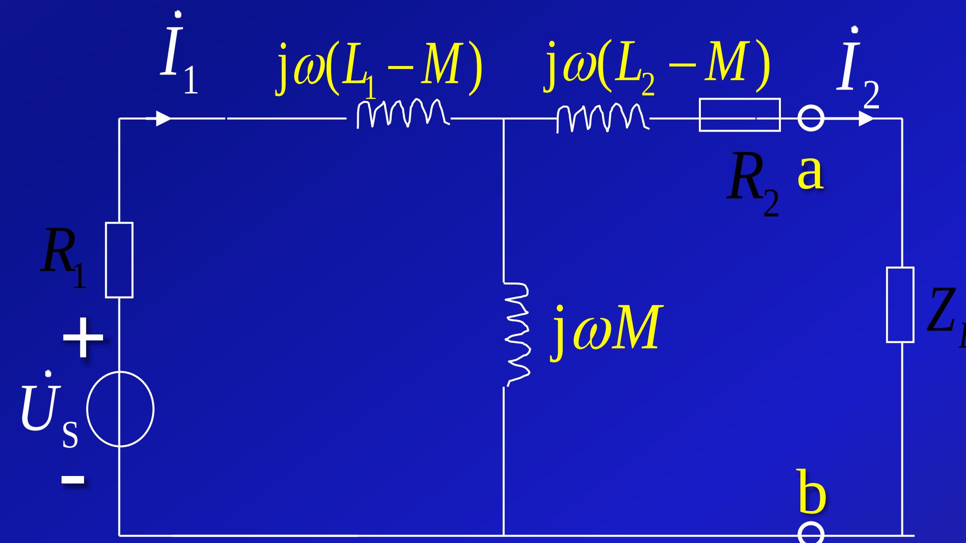
$$\dot{I}_2=\frac{\mathrm{j}20}{400+\mathrm{j}400}=\frac{1}{20\sqrt{2}}\angle 45^\circ$$

$$\therefore\quad i_2(t)=0.05\cos(10^4 t+45^\circ)\ \mathrm{A}$$

方法3：戴维南等效电路类的问题

当需求负载可变化获得最大功率时常用此法。





$$\dot{U}_{OC} = \mathrm{j}\omega M\dot{I}_{1o} \qquad \dot{I}_{1o} = \frac{\dot{U}_S}{R_1 + \mathrm{j}\omega L_1}$$

注意：这是次级开路时的初级电流，开路电压与同名端有关。

$$Z_o = Z_{22} + Z_{f2} = R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 + \frac{(\omega M)^2}{R_1 + \mathrm{j}\omega L_1}$$