

第十章 含有耦合电感的电路

第一部分 要点、考点归纳

§10-1 互感

载流线圈之间通过彼此的磁场相互联系的物理现象称为**磁耦合**。图 10-1 (a) 为两个有耦合的载流线圈，每一个线圈中电流 i_1 、 i_2 (又称施感电流) 产生的磁场既在自身线圈中形成磁通链，也邻近线圈中形成磁通链，所以耦合线圈中的磁通链等于自感磁通链和互感磁通链的代数和，即

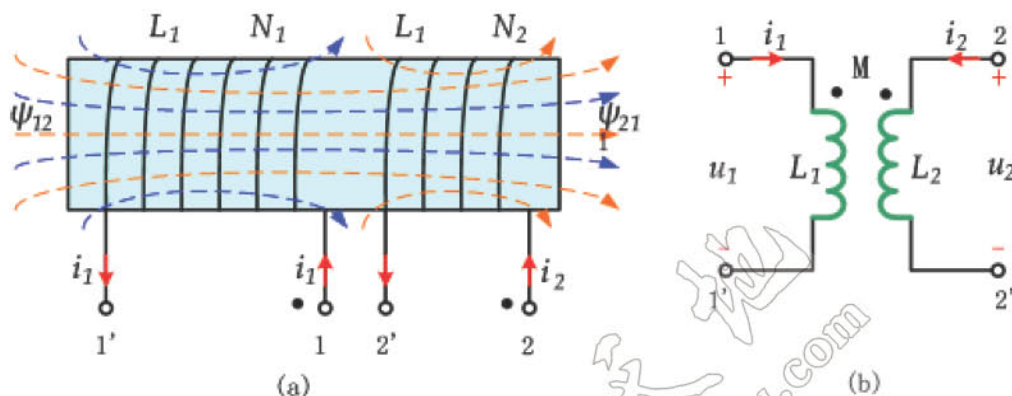


图10-1 两个线圈的互感

$$\Psi_1 = \Psi_{11} \pm \Psi_{12}$$

$$\Psi_2 = \Psi_{22} \pm \Psi_{21}$$

上式中:

Ψ_{11} -- 电流 i_1 在线圈 1 中产生的磁通链，称**自感磁通链**；

Ψ_{12} -- 电流 i_2 在线圈 1 中产生的磁通链，称**互感磁通链**；

Ψ_{22} -- 电流 i_2 在线圈 2 中产生的磁通链，称**自感磁通链**；

Ψ_{21} -- 电流 i_1 在线圈 2 中产生的磁通链，称**互感磁通链**。

式中“ \pm ”号表明磁耦合中互感作用的两种可能性：“+”号表明互感磁通链与自感磁通链方向一致，称为互感的“**增助**”作用；“-”表明互感磁通链与自感磁通链方向相反，称为互感的“**削弱**”作用。

磁场空间为各向同性的线性磁介质时，有

$$\Psi_{11} = L_1 i_1 \quad \Psi_{22} = L_2 i_2$$

$$\Psi_{12} = M_{12} i_2 \quad \Psi_{21} = M_{21} i_1$$

上式中的 L_1 和 L_2 即为自感系数 (自感)，而 M_{12} 和 M_{21} 称为互感系数，简称为互感，单位也为 H。可以证明 $M_{21} = M_{12}$ ，所以当只有两个线圈有耦合时，可以略去下标，即可令 $M = M_{21} = M_{12}$ 。这样有

$$\Psi_1 = L_1 i_1 \pm M i_2$$

$$\Psi_2 = L_2 i_2 \pm M i_1$$

在电路分析中采用**同名端**标记法来反映 (判断) 互感的“增助”作用和“削弱”作用。对两个有耦合的线圈各取一个端子，用符号“ \cdot ”或“ \times ”标记，这一对端子称为“同名端”。如图 10-1 中的端子 1、2 (或端子 1'、2')，端子 1、2' (或端子 1'、2) 为异名端。当一对施感电流各自从同名端流入 (或流出) 时，互感起增助作用，若各自从异名端流入 (或流出) 时，互感

起削弱作用。

同名端是根据两个耦合线圈的绕向和相对位置来确定，若内部结构是不可见的，则用实验方法来确定。

引入同名端的概念后，两个耦合线圈可以用带有同名端标记的电感元件 L_1 和 L_2 表示(称为**耦合电感**)，如图 10-2 (b)，其中 M 表示互感。这样，两个有耦合的电感可视为一个有 4 个端子的元件。

当两个耦合电感 L_1 和 L_2 中有变化的电流时，由电磁感应定律，两个耦合电感的端电压(各电感的电压和电流取关联参考方向)为

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}$$

记：

$$u_{11} = L_1 \frac{di_1}{dt}, \quad u_{22} = L_2 \frac{di_2}{dt}, \quad \text{称为自感电压，是自身电流变化引起的电压；}$$

$$u_{12} = M \frac{di_2}{dt}, \quad u_{21} = M \frac{di_1}{dt}, \quad \text{称为互感电压，是邻近电感中电流变化引起的电压；}$$

互感电压前的“+”、“-”的正确选取是写出电感端电压的关键，选取的**原则**：如果互感电压“+”极性端子与产生它的电流流进的端子为一对同名端，互感电压前取“+”号，反之，取“-”号。

当施感电流为同频率的正弦量时，在正弦稳态情况下，上式的有相量形式

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

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

如同电感元件的阻抗定义，令 $Z_M = j\omega M$ ， ωM 称为互感抗。

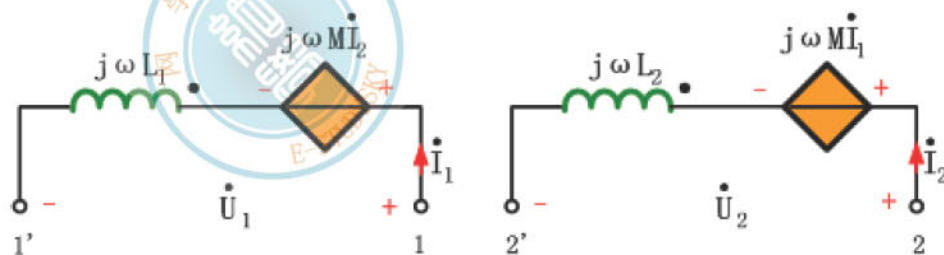


图10-2 用CCVS表示的耦合电感的电路

为了突现互感电压的作用及物理意义，可用 CCVS 来表示互感电压的作用。如图 10-1 (b) 的耦合电感有

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

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

可见两电感中的互感电压项为邻近电感中的电流所控制的受控电压源，故有图 10-2 所示的相量形式的电路。

工程上为了定量地描述两个耦合线圈的耦合紧密程度，把两线圈的互感磁链与自感磁链

的比值的几何平均值定义为**耦合系数**，记为 k

$$k \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{|\Psi_{21}|}{\Psi_{11}} \cdot \frac{|\Psi_{12}|}{\Psi_{22}}}$$

对各向同性的线性磁介质因 $\Psi_{11} = L_1 i_1$ ， $\Psi_{22} = L_2 i_2$ ， $\Psi_{12} = M i_2$ ， $\Psi_{21} = M i_1$ ，代入上式有

$$k = \sqrt{\frac{|\Psi_{12}|}{\Psi_{11}} \cdot \frac{|\Psi_{21}|}{\Psi_{22}}} = \sqrt{\frac{M i_2 \cdot M i_1}{L_1 i_1 \cdot L_2 i_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \leq 1$$

k 的大小与线圈的结构、两线圈的相互位置以及周围磁介质情况有关。如果两线圈靠得很紧或缠绕在一起，则 k 值可接近为1；反之，它们相隔很远，或其轴线垂直，则 k 值很小，甚至可能接近于零。可见，当 L_1 、 L_2 一定时，改变或调整它们的相互位置可以改变耦合系数的大小，也就相应地改变了互感 M 地大小。

§10-2 含有耦合电感电路的计算

含有耦合电感的电路简称为互感电路。在分析互感电路时，其关键是正确使用同端列出互感电压。若为正弦稳态情况，相量法仍是常采用的方法。为了突现互感电压的作用及物理意义，常将互感电路等效为含CCVS的电路，即引用电流控制的电压源表示互感电压的作用。

常见的互感电路有串联形式的并联形式。

1. 串联互感电路

如图10-3(a)所示，视为两支路的串联：

支路1： R_1 与 L_1 的串联，支路电压为 u_1 。

支路2： R_2 与 L_2 的串联，支路电压为 u_2 。

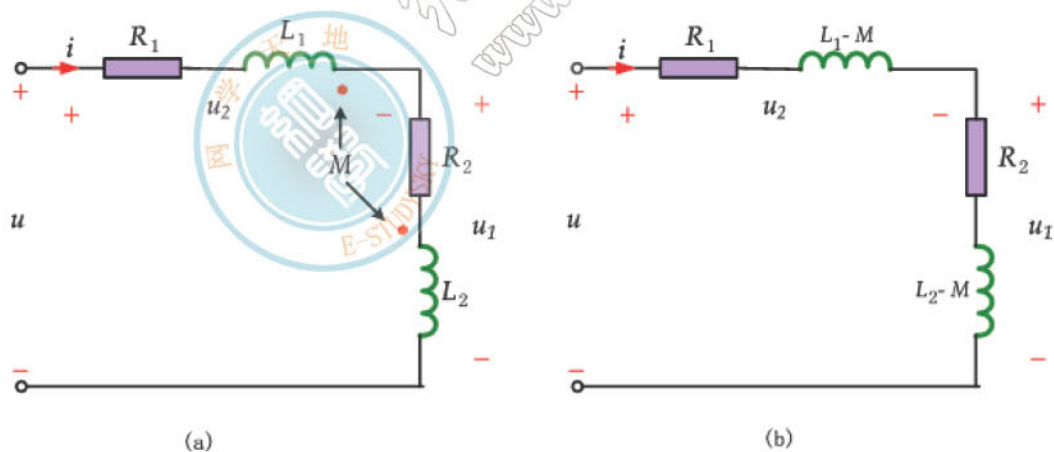


图10-3 耦合电感的串联电路

各支路的电流和电压取关联参考方向。因电流 i 是从两电感的异名端流入（流出），互感起“削弱”作用，故称为**反向串联**。若电流 i 是从两电感的同名端流入（流出），故互感起“增助”作用，故称为**顺向串联**。由图有

$$u_1 = R_1 i + (L_1 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt}) = R_1 i + (L_1 - M) \frac{di}{dt}$$

$$u_2 = R_2 i + (L_2 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt}) = R_2 i + (L_2 - M) \frac{di}{dt}$$

由上式可作出如图 10-3 (b) 所示的**无互感等效电路**，无互感等效电路又称为**去耦等效电路**，它将互感作用纳入自感中一并考虑， $(L_1 - M)$ 和 $(L_2 - M)$ 分别为两支路的**等效电感**。输入端的电压为

$$u = u_1 + u_2 = (R_1 + R_2)i + (L_1 + L_2 - 2M)\frac{di}{dt}$$

电路等效为电阻 R_1 、 R_2 和电感 $(L_1 + L_2 - 2M)$ 的串联。对正弦稳态电路，上述议程有相量形式

$$\dot{U}_1 = [R_1 + j\omega(L_1 - M)]\dot{I}$$

$$\dot{U}_2 = [R_2 + j\omega(L_2 - M)]\dot{I}$$

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

由阻抗的概念有

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}} = R_1 + j\omega(L_1 - M)$$

$$Z_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}} = R_2 + j\omega(L_2 - M)$$

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = (R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2 - 2M) = Z_1 + Z_2$$

由上式可知，由于互感的“削弱”作用，每一条耦合电感支路的阻抗比无互感时要小，在这里互感类似于电容的作用，称这种现象为互感的**容性效应**。应注意的是两个等效电感 $(L_1 - M)$ 和 $(L_2 - M)$ 有可能其中一个为负值，但不可能都为负，整个电路仍呈感性。证明如下：

$$\begin{aligned} \because (\sqrt{L_1} - \sqrt{L_2})^2 &\geq 0 \\ \therefore (L_1 + L_2 - 2\sqrt{L_1 L_2}) &\geq 0 \\ \therefore \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} &\leq 1 \\ \therefore 2M &\leq 2\sqrt{L_1 L_2} \\ \text{故 } (L_1 + L_2 - 2M) &\geq 0 \end{aligned}$$

即整个电路仍呈感性。

如果为顺向串联电路，互感起“增助”作用，只要将上述式中互感 M 前的负号改为正号即可。对顺向串联互感不存在的容性效应。

2. 并联互感电路

如图 10-4 (a)，作正弦稳态情况考虑，其中两耦合电感的同名端连接在同一个结点，故称为**同侧并联**。否则，如图 10-4 (b) 所示，称为**异侧并联**。

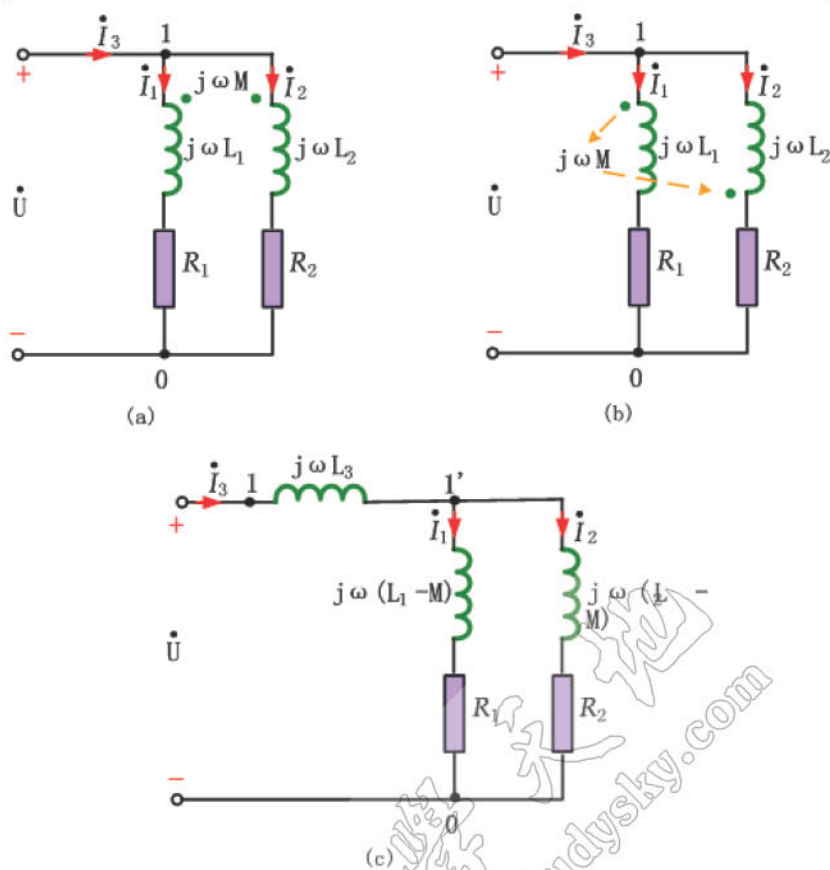


图10-4 耦合电感的并联电路

以图 10-4 (a) 的同侧并联为例, 有:

$$\text{支路 1: } \dot{U} = (R_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 \quad (10-3)$$

$$\text{支路 2: } \dot{U} = (R_2 + j\omega L_2) \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1$$

令 $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$, $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$, $Z_M = j\omega M$, 由 (10-3) 式有

$$\dot{I}_1 = \frac{Z_2 - Z_M}{Z_1 Z_2 - Z_M^2} \dot{U} = \frac{1 - Z_M Y_2}{Z_1 - Z_M^2 Y_2} \dot{U}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{Z_1 - Z_M}{Z_1 Z_2 - Z_M^2} \dot{U} = \frac{1 - Z_M Y_1}{Z_2 - Z_M^2 Y_1} \dot{U}$$

由 KCL 可求得

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{Z_1 + Z_2 - 2Z_M}{Z_1 Z_2 - Z_M^2} \dot{U} = \frac{1 - Z_M Y_2}{Z_1 - Z_M^2 Y_2} \dot{U}$$

消去 (10-3) 式的支路 1 方程中的 \dot{I}_2 和支路 2 方程中的 \dot{I}_1 , 得

$$\dot{U} = j\omega M \dot{I}_3 + [R_1 + j\omega(L_1 - M)] \dot{I}_1$$

$$\dot{U} = j\omega M \dot{I}_3 + [R_2 + j\omega(L_2 - M)] \dot{I}_2$$

根据上式可作出如图 10-4 (c) 所示的去耦等效电路, 去耦等效电路由 3 条无耦合的电感支路构成, 各支路的电感为

$$\text{支路 1: } L'_1 = L_1 - M$$

$$\text{支路 2: } L_2' = L_2 - M$$

$$\text{支路 3: } L_3 = M$$

如果为异侧并联电路，互感起“削弱”作用，只要将上述式中互感 M 前的正号改为负号、负号改为正号即可。

§10-3 空心变压器

空心变压器由两个同轴的耦合线圈构成，如图 10-1 (b) 所示（实际中两线圈是同轴重叠在一起的），线圈周围空间为非铁磁材料，其电路模型如图 10-5。图中一个线圈作为输入，与电源形成一回路，称为**原边回路**（初级回路）；另一个线圈作为输出，与负载形成一回路，称为**副边回路**（次级回路）。变压器通过耦合作用，将原边回路中电源的能量传递到副边回路。

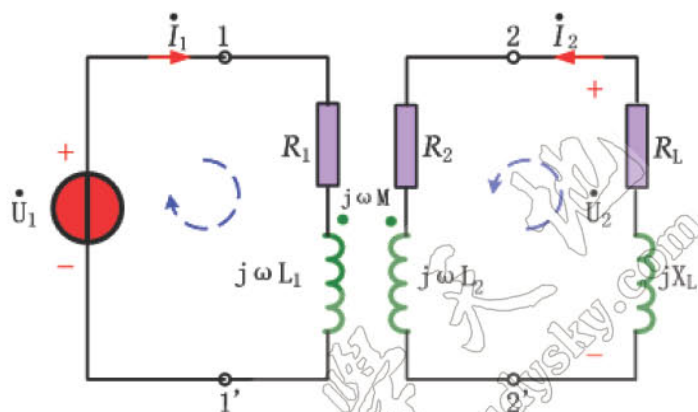


图10-5 空心变压器电路模型

在图 10-5 中， R_1 与 L_1 为原边线圈的电阻和电感， R_2 与 L_2 为副边线圈的电阻和电感， M 为两线圈的互感，而 R_L 与 X_L 为负载电阻和感抗。在正弦稳态情况下，由图中所示的电压和电流的参考方向，有

$$(R_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1$$

$$j\omega M \dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2 + R_L + jX_L) \dot{I}_2 = 0$$

根据阻抗的概念，对上式中可以令 $Z_{11} = R_1 + j\omega L_1$ ($Y_{11} = 1/Z_{11}$)，称**原边回路阻抗**（导纳）， $Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 + R_L + jX_L$ ($Y_{22} = 1/Z_{22}$)，称**副边回路阻抗**（导纳）， $Z_M = j\omega M$ ，由上列方程可求得

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{11} - Z_M^2 Y_{22}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{11} + (\omega M)^2 Y_{22}} \quad (10-5a)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-Z_M Y_{11} \dot{U}_1}{Z_{22} - Z_M^2 Y_{11}} = \frac{-j\omega M Y_{11} \dot{U}_1}{R_2 + j\omega L_2 + R_L + jX_L + (\omega M)^2 Y_{11}} \quad (10-5b)$$

由阻抗的定义，式(10-5a)中的分母 $Z_{11} + (\omega M)^2 Y_{22}$ 是原边的输入阻抗，其中 $(\omega M)^2 Y_{22}$ 称为**引入阻抗**（反映阻抗），它是副边回路阻抗通过互感作用反映到原边的等效阻抗，于是可有图 10-6 (a) 所示的原边回路的等效电路。在式 (10-5b) 中，其分子可视为一电压为 $j\omega M Y_{11} \dot{U}_1$ 的受控电压源，分母为副边输入阻抗 $Z_{eq} = R_2 + j\omega L_2 + (\omega M)^2 Y_{11}$ 与负载阻抗

$Z_L = R_L + jX_L$ 之和, 于是可有图 10-6 (b) 所示的副原边回路的等效电路。应注意的是副边输入阻抗中也含有一个引入阻抗 $(\omega M)^2 Y_{11}$, 它是原边回路阻抗通过互感作用反映到副边的等效阻抗。

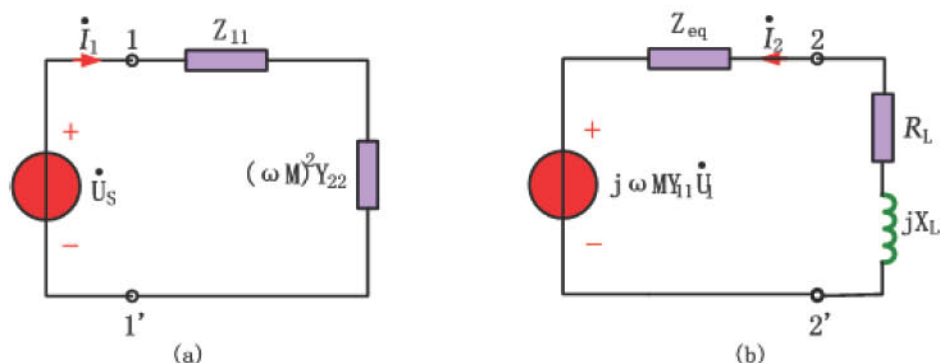


图10-6 空心变压器的等效模型

§10-4 理想变压器

理想变压器是空心变压器的在一定的理想化条件下的演变, 电路模型如图 10-7 (a), 理想化条件有 3 个:

- (1) 变压器无损耗;

- (2) 耦合系数 $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 1$, 即为全耦合;

- (3) L_1 、 L_2 和 M 均为无限大, 但有 $\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \frac{N_1}{N_2} = n$ 为常数, n 为匝数比。

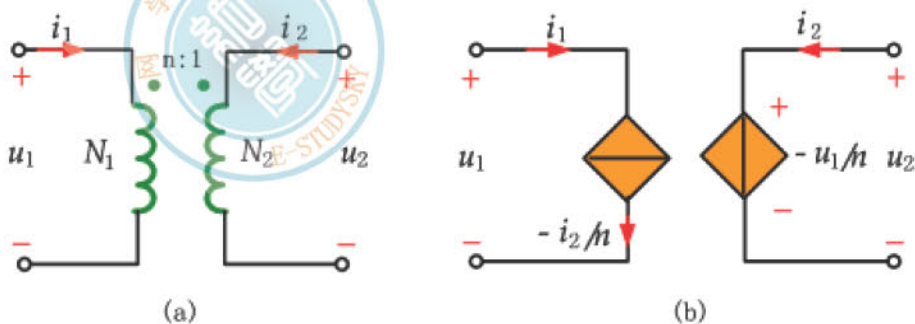


图10-7 理想变压器电路模型

对图 10-5 所示的空心变压器, 由条件 (1) 有原、副边电阻 $R_1 = R_2 = 0$, 此时式 (10-4) 时域形式为

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} &= u_1 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} &= u_2 \end{aligned} \quad (10-7)$$

由条件 (2), 当 $k=1$ 时, $M = \sqrt{L_1 L_2}$, 代入上方程组, 得

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + \sqrt{L_1 L_2} \frac{di_2}{dt} &= u_1 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + \sqrt{L_1 L_2} \frac{di_1}{dt} &= u_2 \end{aligned}$$

两式相比, 得

$$\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \frac{u_1}{u_2}$$

由条件 (3), 得

$$\frac{u_1}{u_2} = n \quad \text{或} \quad \frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (10-8)$$

按式 (10-7) 的第一式, 有

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{L_1} \int u_1 dt - \frac{M}{L_1} \int \frac{di_2}{dt} dt \\ &= \frac{1}{L_1} \int u_1 dt - \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \int di_2 \\ &= \frac{1}{L_1} \int u_1 dt - n \int di_2 \end{aligned}$$

当 $L_1 \rightarrow \infty$ 时, 有

$$i_1 = -\frac{1}{n} i_2 \quad \text{或} \quad \frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1} \quad (10-9)$$

式 (10-8) 和式 (10-9) 分别是理想变压器的电压方程和电流方程, 根据此两式有理想变压器的电路模型如图 10-7 (a), 图 10-7 (b) 是用受控电源表示的电路模型。

理想变压器的电压、电流方程是通过参数 n 描述的代数方程, 所以说理想变压器不是一个动态元件。

将理想变压器的电压方程和电流方程相乘得

$$u_1 i_1 + u_2 i_2 = 0$$

可输入理想变压器的瞬时功率等于零, 它既不耗能也不储能, 它将电源的能量由原边全部的传输到副边输出, 在传输过程中仅仅将电压、电流按比例作数值变换。

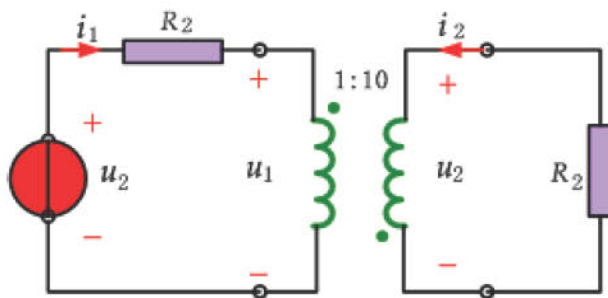
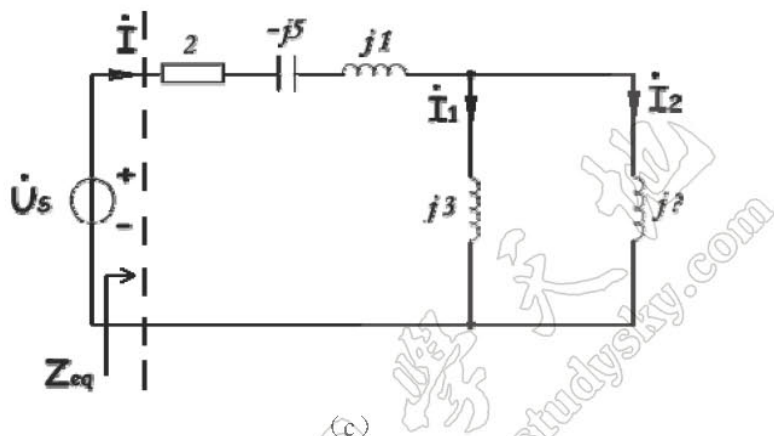
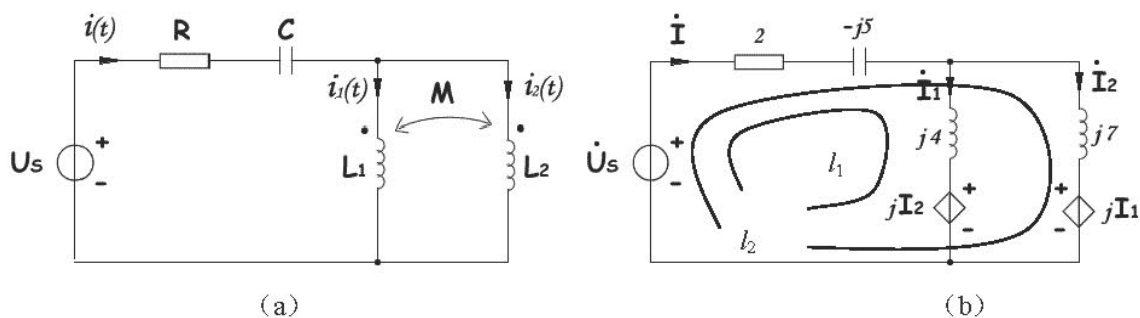


图10-8 例题

第二部分 例题

例1 图示电路中, 已知 $u_s(t) = 12\sqrt{2} \cos 1000t \text{ V}$, $R=2 \Omega$, $C=200 \mu\text{F}$, $L_1=4\text{mH}$, $L_2=7\text{mH}$, $M=1\text{mH}$, 求各支路电流。



解: (1) 支路电流法

$$\frac{1}{\omega C} = 5\Omega, \omega L_1 = 4\Omega, \omega L_2 = 7\Omega, \omega M = 1\Omega, \text{ 则有}$$

解得:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{4}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ \\ \dot{I}_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ \\ \dot{I} = \frac{6}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ \end{cases}$$

所以 $i_1(t) = 4 \cos(1000t + 45^\circ) \text{ A}$, $i_2(t) = 2 \cos(1000t + 45^\circ) \text{ A}$
 $i(t) = \cos(1000t + 45^\circ) \text{ A}$

(2) 回路法

将原电路作等效变换, 得到如图 (b) 所示电路。设回路电流分别为 $\dot{I}_{l1}, \dot{I}_{l2}$, 则

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{l1}, \dot{I}_2 = \dot{I}_{l2} \text{ 故有: } \begin{cases} (2 - j5 + j4)\dot{I}_{l1} + (2 - j5)\dot{I}_{l2} = \dot{U}_s - j\dot{I}_{l2} \\ (2 - j5)\dot{I}_{l1} + (2 - j5 + j7)\dot{I}_{l2} = \dot{U}_s - j\dot{I}_{l1} \end{cases}$$

$$\text{解得: } \dot{I}_{l1} = \frac{4}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ, \dot{I}_{l2} = \frac{2}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ \therefore \dot{I} = \dot{I}_{l1} + \dot{I}_{l2} = \frac{6}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ$$

(3) 互感消去法

采用到感消去法, 可得到如图 (C) 所示电路。再选一正弦稳态电路中的任一种方法分析即可, 此处应用阻抗串、并联等效法, 可得等效阻抗为:

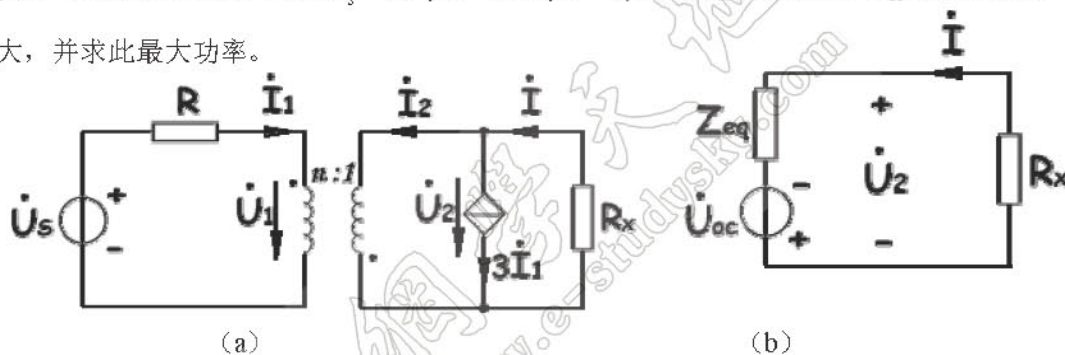
$$Z_{eq} = 2 - j5 + j1 + \frac{j3 \times j6}{j3 + j6} = 2 - j2$$

$$\therefore \dot{I} = \frac{\dot{I}_s}{Z_{eq}} = \frac{6}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ A$$

再由分流公式, 得

$$\dot{I}_1 = \frac{j6}{j3 + j6} \dot{I} = \frac{4}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ, \dot{I}_2 = \frac{j3}{j3 + j6} \dot{I} = \frac{2}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ A$$

例 2 如图所示电路, 已知 $U_s = 8V$, $R = 10\Omega$, $n = 2$, 问当 R_x 为何值时, R_x 所吸收的功率最大, 并求此最大功率。



解: 将 R_x 以外电路用戴维南定理等效, 如图 (b) 所示。

$$\text{由图 (a) 知, } \dot{I}_2 = n\dot{I}_1, \dot{U}_1 = -n\dot{U}_2 = -2\dot{U}_2$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 + 3\dot{I}_1 = n\dot{I}_1 + 3\dot{I}_1 = (n+3)\dot{I}_1 = 5\dot{I}_1$$

$$\therefore \dot{I}_1 = \frac{1}{5}\dot{I}, \dot{U}_1 = \dot{U}_s - R\dot{I}_1 = \dot{U}_s - 10\dot{I}_1 = \dot{U}_s - 2\dot{I} = -2\dot{U}_2$$

$$\therefore \dot{U}_2 = -\frac{1}{2}\dot{U}_s + \dot{I} \times 1, \therefore U_{OC} = \frac{-U_s}{2} = -4V, Z_{eq} = 1\Omega (\because \dot{U}_2 = \dot{U}_{OC} + Z_{eq}\dot{I})$$

\therefore 当 $R = Z_{eq} = 1\Omega$ 时, R_x 所吸收功率最大, 该最大功率为:

$$\therefore P_{\max} = \frac{U_{OC}^2}{4Z_{eq}} = \frac{4^2}{4 \times 1} = 4W$$

例 3 图 10-1 (b) 中, $i_1 = 10A$, $i_2 = \cos(10t)A$, $L_1 = 2H$, $L_2 = 3H$, $M = 1H$ 。求两耦合电感的电压。

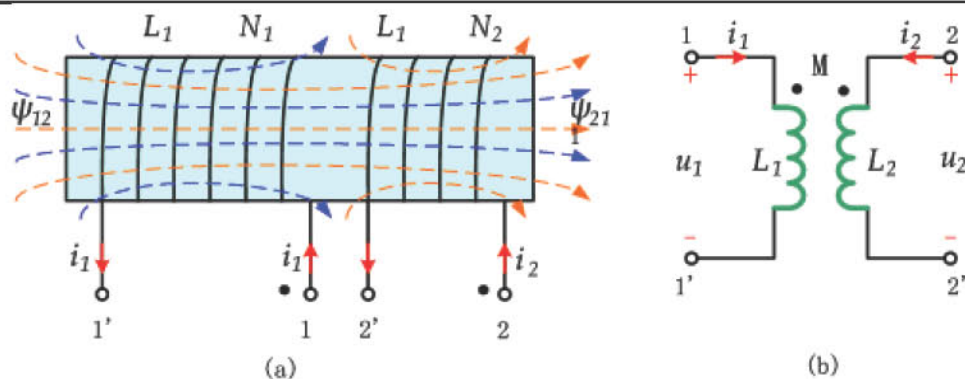


图10-1 两个线圈的互感

解: 两电感的电流 i_1 、 i_2 都是从同名端流入, 互感起“增助”作用。 L_1 中的电流为直流, L_2 中的电流为交流, 故 i_1 在自身产生的自感电压以及在 L_2 中产生的互感电压均为零, 故有

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = M \frac{di_2}{dt} = -50 \sin(10t) V$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} = -150 \sin(10t) V$$

可见, L_1 中的直流 i_1 虽产生自感磁通链和互感磁通链, 但不产生自感电压和互感电压。

例 4 图 10-8 为一理想变压器, 已知: $n=1:10$, $u_s = 10 \cos(10t) V$, $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 100 \Omega$ 。求 u_2 。

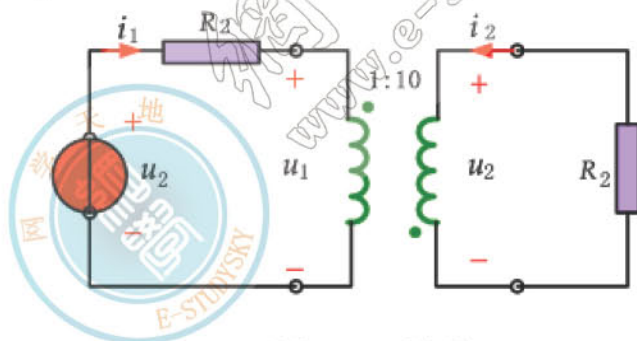


图10-8 例题

解: 式 (10-8)、(10-9) 是根据图 10-5 导出的, 图设的原、副边电流参考方向都是从同名端流入, 即互感起“增助”作用。本题中原、副边电流参考方向是从异名端流入, 互感起“削弱”作用, 所以式 (10-7) 中的 M 应用 $-M$ 替换, 这时式 (10-8)、(10-9) 中的 n 应替换为 $-n$, 有

$$u_1 = -n u_2 = -\frac{1}{10} u_2$$

$$i_1 = \frac{1}{n} i_2 = 10 i_2$$

由图有原、副边回路的 KVL 方程

$$R_1 i_1 + u_1 = u_s$$

$$R_2 i_2 + u_2 = 0$$

将 u_1 , i_1 代入第一式后, 两式相减得

$$u_2 = -5 u_s = -50 \cos(10t) V$$