电子电路与系统基础（II）参考讲义

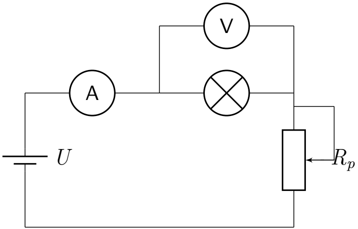
江玮陶　电子系学生科协学培部

2025 年 11 月 23 日

目录

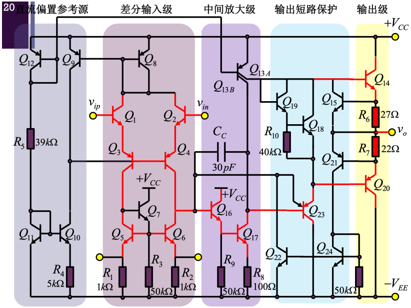
如何学电电?

这是我们中学学习的电路。



如何学电电?

这是我们现在学习的电路。



高增益放大：有源负载，缓冲隔离，级联；大信号放大：A类，B类，AB类；效率；差分放大：电桥结构，平衡电桥共模抑制特性，不平衡电桥差模放大特性，非线性转移特性，小信号线性模型，差模地，单端输出转双端输出。习题讲解录像内容：PMOS是NMOS的互补，PMOS反相器分析，PNP反相器分析

如何学电电?

电电的脉络是什么?

电子

电阻，电容，电感
BJT，MOS，二极管
运放，互感，受控源
……

电路

单管多管放大器
无源有源滤波器
负电阻，振荡器
……

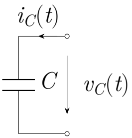
系统

电路等效方法
基尔霍夫定律
时频域分析方法
负反馈和正反馈
……

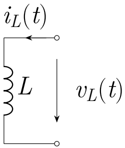
基础：基于矩阵和器件方程的描述方法

电容电感

属于基础内容，请务必记牢两个元件的时频域元件方程和表达式。



- 时域：$i_C(t) = C\frac{d}{dt}v_C(t)$，$v_C(t) = \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i_C(\tau)\,d\tau$
- 频域：$I_C = j\omega C V_C$，$V_C = \frac{1}{j\omega C}I_C$
- 容纳：$B_C = \omega C$

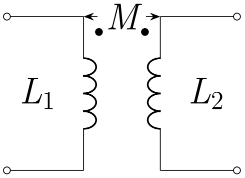


- 时域：$v_L(t) = L\frac{d}{dt}i_L(t)$，$i_L(t) = \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t} v_L(\tau)\,d\tau$
- 频域：$V_L = j\omega L I_L$，$I_L = \frac{1}{j\omega L}V_L$
- 感抗：$X_L = \omega L$

Laplace 变换：$s = \sigma + j\omega$, $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \rightleftharpoons s$, $\int_{-\infty}^{t}(\cdot)\mathrm{d}t \rightleftharpoons \frac{1}{s}$; 特别研究虚轴上的情形（$\sigma = 0$, $s = j\omega$）即为 *Fourier* 变换 (" 频域特性")。电电课不需要，也**不很建议掌握** *Laplace* 变换的具体形式，但要知道上述时频对应关系。

互感变压器

物理模型不太重要，但还是了解一下（尤其是 L 和 N 的关系）。



$$\begin{cases} L_1 = N_1^2\Xi \\ L_2 = N_2^2\Xi \\ M = kN_1N_2\Xi \end{cases}$$

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

同名端：流入电流使得**磁通加强**的两个点 (黑点)

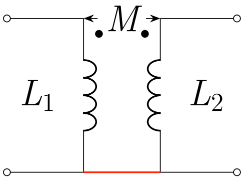
- 物理参数：N_1, N_2（匝数），Ξ（磁导），k（耦合系数）
- 电路参数：L_1, L_2（自感），M（互感）

$\Xi = \mu\frac{S}{p}$：磁导，μ 磁导率，S 截面积，p 磁路长度

$k \in [0, 1]$：耦合系数，表示磁通量链接百分比

关键：熟练运用等效电路（T 型等效/励漏磁等效）和阻抗变换原理化简电路

互感变压器

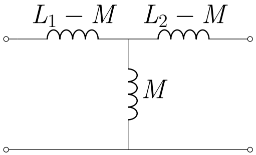


$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} \Rightarrow \text{时域方程}$$

$$\begin{bmatrix} v_1(s) \\ v_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL_1 & sM \\ sM & sL_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(s) \\ i_2(s) \end{bmatrix} \Rightarrow \text{频域方程}$$

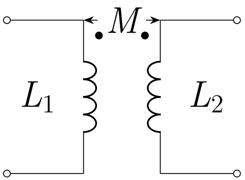
$$\begin{cases} L_1 = N_1^2 \Xi \\ L_2 = N_2^2 \Xi \\ M = k N_1 N_2 \Xi \end{cases}$$

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$



两边共地：T 型等效

互感变压器

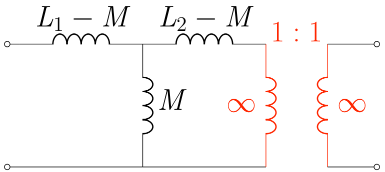


$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} \Rightarrow \text{时域方程}$$

$$\begin{bmatrix} v_1(s) \\ v_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL_1 & sM \\ sM & sL_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(s) \\ i_2(s) \end{bmatrix} \Rightarrow \text{频域方程}$$

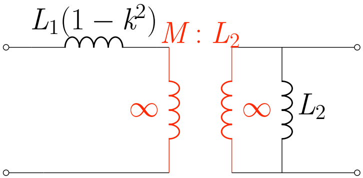
$$\begin{cases} L_1 = N_1^2 \Xi \\ L_2 = N_2^2 \Xi \\ M = kN_1 N_2 \Xi \end{cases}$$

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

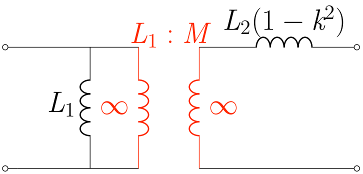


两边不共地：T 型等效加理想变压器

互感变压器



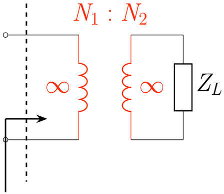
漏磁励磁模型（h 参量）



励磁漏磁模型（g 参量）

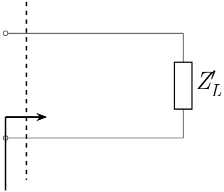
$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \Rightarrow k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

理想变压器



理想变压器： $L_1 , L_2 \rightarrow \infty$, $k = 1$
理想变压器具有阻抗变换作用。变换关系（反射电阻）：

$$Z'_L = n^2 Z_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L = \frac{L_1}{L_2} Z_L$$



其中变压比 $n = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$

非理想阻容感（寄生效应）

非理想阻容感（寄生效应）

非理想晶体管（寄生效应）

网络参量矩阵

虽然是电电 1 内容，但在电电 2 考试中依然有用。网络参量矩阵定义：

Z 参量：阻抗

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \boxed{v_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ \boxed{z_{21}} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{i_1} \\ i_2 \end{bmatrix}$$

Y 参量：导纳

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \boxed{i_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ \boxed{y_{21}} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{v_1} \\ v_2 \end{bmatrix}$$

H 参量：混合

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \boxed{i_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ \boxed{h_{21}} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{i_1} \\ v_2 \end{bmatrix}$$

G 参量：混合

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \boxed{v_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ \boxed{g_{21}} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{v_1} \\ i_2 \end{bmatrix}$$

记忆方法：21 元素表示放大器类型，混合的混是三点水，电流放大也可以用 hi，gv 进行记忆

网络参量矩阵

Z 参量：阻抗

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \boxed{v_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ \boxed{z_{21}} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{i_1} \\ i_2 \end{bmatrix}$$

Y 参量：导纳

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \boxed{i_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ \boxed{y_{21}} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{v_1} \\ v_2 \end{bmatrix}$$

H 参量：混合

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \boxed{i_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ \boxed{h_{21}} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{i_1} \\ v_2 \end{bmatrix}$$

G 参量：混合

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \boxed{v_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ \boxed{g_{21}} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{v_1} \\ i_2 \end{bmatrix}$$

输入输出阻抗/导纳计算：

$$w_{in} = p_{11} - \frac{p_{12}p_{21}}{p_{22} + w_L} \qquad w_{out} = p_{22} - \frac{p_{12}p_{21}}{p_{11} + w_S}$$

网络参量矩阵

Z 参量：阻抗

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \boxed{v_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ \boxed{z_{21}} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{i_1} \\ i_2 \end{bmatrix}$$

Y 参量：导纳

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \boxed{i_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ \boxed{y_{21}} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{v_1} \\ v_2 \end{bmatrix}$$

H 参量：混合

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \boxed{i_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ \boxed{h_{21}} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{i_1} \\ v_2 \end{bmatrix}$$

G 参量：混合

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \boxed{v_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ \boxed{g_{21}} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{v_1} \\ i_2 \end{bmatrix}$$

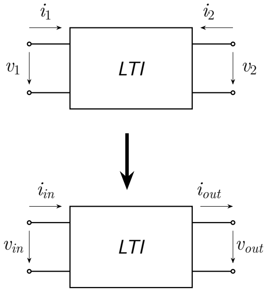
有源性判断：负阻有源性和受控源有源性

有源 $\Leftrightarrow \Re p_{11} < 0$或$\Re p_{22} < 0$或$|p_{21} + p_{12}^*|^2 > 4\Re p_{11}\Re p_{22} \Leftrightarrow P^T + P^*$半正定

网络参量矩阵

ABCD 矩阵：一边当作负载，一边当作输出；本征增益就是开路电压/短路电流对应的增益。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{out} \\ i_{out} \end{bmatrix}$$



本征电压增益 g_{21}

$$A_{v0} = \frac{v_{out}}{v_{in}}\bigg|_{i_{out}=0} = \frac{1}{A}$$

本征跨导增益 $-y_{21}$

$$G_{m0} = \frac{i_{out}}{v_{in}}\bigg|_{v_{out}=0} = \frac{1}{B}$$

本征跨阻增益 z_{21}

$$R_{m0} = \frac{v_{out}}{i_{in}}\bigg|_{i_{out}=0} = \frac{1}{C}$$

本征电流增益 $-h_{21}$

$$A_{i0} = \frac{i_{out}}{i_{in}}\bigg|_{v_{out}=0} = \frac{1}{D}$$

$$\begin{cases} i_{in} = i_1 \\ v_{in} = v_1 \\ i_{out} = -i_2 \\ v_{out} = v_2 \end{cases}$$

网络参量矩阵

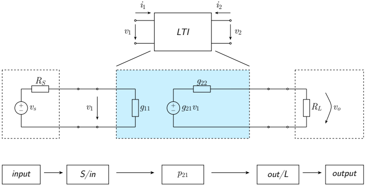
网络参量矩阵可以用于快速求解传递函数。

使用 zyhg 矩阵：

(I) 写出单向网络的传递函数

$$H_{v\text{单向}} = \frac{1/g_{11}}{R_S + 1/g_{11}} \cdot g_{21} \cdot \frac{g_{21} R_L}{R_L + g_{22}}$$

$$= \frac{(1/R_S) g_{21} R_L}{(1/R_S + G_{11})(R_L + g_{22})}$$

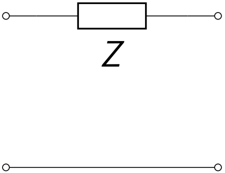


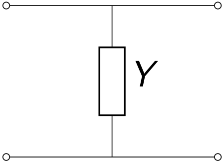
(II) 双向化：分母减去 $p_{12}p_{21}$

$$H_{v\text{双向}} = \frac{(1/R_S) g_{21} R_L}{(1/R_S + g_{11})(R_L + g_{22}) - g_{12} g_{21}}$$

网络参量矩阵

网络参量矩阵可以用于快速求解传递函数。
对于梯形网络，可以使用 ABCD 矩阵。





$$\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix}$$

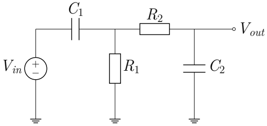
拆成梯形网络后将各个部件的 ABCD 乘起来即可。然后利用

$$H_v = \frac{1}{A}, G_m = \frac{1}{B}, R_m = \frac{1}{C}, H_i = \frac{1}{D}$$

得到总的传递函数。

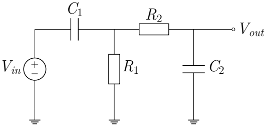
网络参量

求如下网络的电压传递函数 H_v.



网络参量

求如下网络的电压传递函数 H_v.



解答

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{sC_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{R} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ sC_2 & 1 \end{bmatrix}$$

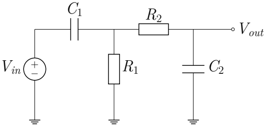
$$= \begin{bmatrix} 1 + \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} + \frac{1}{sC_1 R_1} + sC_2 R_2 + \frac{C_2}{C_1} & * \\ * & * \end{bmatrix}$$

$$H_v = \frac{1}{A} = \frac{1}{s^2 C_2 R_2 + (1 + \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} + \frac{C_2}{C_1})s + \frac{1}{C_1 R_1}}$$

网络参量

检查量纲：$[j\omega]=[s]=s^{-1},[RC]=[GL]=s$

求如下网络的电压传递函数 H_v.



解答

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{sC_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{R} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ sC_2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 + \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} + \frac{1}{sC_1 R_1} + sC_2 R_2 + \frac{C_2}{C_1} & * \\ * & * \end{bmatrix}$$

$$H_v = \frac{1}{A} = \frac{1}{s^2 C_2 R_2 + (1 + \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} + \frac{C_2}{C_1})s + \frac{1}{C_1 R_1}}$$

时域分析

在《信号与系统》中，我们将会学习如何严谨推导出所谓的时频对应关系和各种要素法。

时域分析

在《信号与系统》中，我们将会学习如何严谨推导出所谓的时频对应关系和各种要素法。诚然，三要素五要素这些都是记忆微分方程的解，而这些微分方程可以利用 *Laplace* 变换

$$\mathscr{L}\{x(t)\} = X(s) = \int_0^\infty x(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t$$

得到其解，因此三要素和五要素法在数学上是“不本质的”。然而，在电路中，研究系统的时域响应如何受到各种要素的影响反而是物理上“本质”的。因此学习时可以**多留意各种要素是如何获得的、由谁决定、如何影响总体响应**，这样或许有利于所谓“电路感觉”的培养。

时域分析

在《信号与系统》中，我们将会学习如何严谨推导出所谓的时频对应关系和各种要素法。诚然，三要素五要素这些都是记忆微分方程的解，而这些微分方程可以利用 *Laplace* 变换

$$\mathscr{L}\{x(t)\} = X(s) = \int_0^\infty x(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t$$

得到其解，因此三要素和五要素法在数学上是“不本质的”。然而，在电路中，研究系统的时域响应如何受到各种要素的影响反而是物理上“本质”的。因此学习时可以**多留意各种要素是如何获得的、由谁决定、如何影响总体响应**，这样或许有利于所谓“电路感觉”的培养。

私以为研究变换域复平面上的几何、在电路中观察主极点、写出具体表达式乃至打开 cadence 都可以等价地给出我们需要的各种信息，这些方法也不应该有高下之分。

时域分析

对于一阶系统采用三要素法

$$X(j\omega)=\frac{*}{1+\tau\omega}\Rightarrow x(t)=(x(0)-x_\infty(0))\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}+x_\infty(t)$$

$$\begin{cases}\tau & :\text{时间常数}\\ x_\infty(t) & :\text{稳态响应}\\ x(0) & :\text{初始条件}\end{cases}$$

其中:

- τ 由电路直接给出，比如常见的 $\tau=RC,\frac{L}{R}$ 等。注意这里 R 是电容/电感**看到**的等效电阻。
- $x_\infty(t)$ 由稳态分析得到。常见：**直流稳态**（电感短路，电容开路）、**正弦稳态**（使用相量法分析）。
- $x(0)$ 由初始条件给出，需要列**瞬时电路方程**求解（利用电感电流不突变，电容电压不突变）。

时域分析

对于二阶系统采用五要素法

$$X(s)=\frac{*}{s^2+2\xi\omega_0 s+\omega_0^2}$$

$$x(t)=\begin{cases} x_\infty(t)+\left(x(0)-x_\infty(0)\right)\mathrm{e}^{-\xi\omega_0 t}\cos\sqrt{1-\xi^2}\omega_0 t \\ \quad +\left(x(0)-x_\infty(0)+\frac{\dot{x}(0)-\dot{x}_\infty(0)}{\xi\omega_0}\right)\frac{\xi}{1-\xi^2}\mathrm{e}^{-\xi\omega_0 t}\sin\sqrt{1-\xi^2}\omega_0 t & 0<\xi<1 \\ x_\infty(t)+\left(x(0)-x_\infty(0)\right)\mathrm{e}^{-\omega_0 t}+\left(x(0)-x_\infty(0)+\frac{\dot{x}(0)-\dot{x}_\infty(0)}{\omega_0}\right)\omega_0 t\mathrm{e}^{-\omega_0 t} & \xi=1 \\ x_\infty(t)+\left(x(0)-x_\infty(0)\right)\mathrm{e}^{-\xi\omega_0 t}\cosh\sqrt{\xi^2-1}\omega_0 t \\ \quad +\left(x(0)-x_\infty(0)+\frac{\dot{x}(0)-\dot{x}_\infty(0)}{\xi\omega_0}\right)\frac{\xi}{\xi^2-1}\mathrm{e}^{-\xi\omega_0 t}\sinh\sqrt{\xi^2-1}\omega_0 t & \xi>1 \end{cases}$$

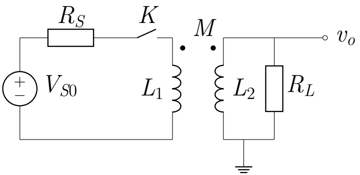
- ω_0,ξ 由电路直接给出, 对于简单电路 $\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}},\xi=\frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$；复杂电路直接抓传递函数，分母化简为 $s^2+2\xi\omega_0 s+\omega_0^2$ 获得。
- $x_\infty(t)$ 由稳态分析得到。常见：**直流稳态**（电感短路，电容开路）、**正弦稳态**（使用相量法分析）。
- $x(0),\dot{x}(0)$ 由初始条件给出，$x(0)$ 需要列**瞬时电路方程**求解（利用电感电流不突变，电容电压不突变）;$\dot{x}(0)$ 可以通过**瞬变量电路方程**求解（利用电感电流不突变，电容电压不突变）；

时域分析

例题

如图，$V_{s0}=5\mathrm{V}$，$R_S=100\Omega$, $R_L=1\mathrm{k}\Omega$, $L_1=1\mu\mathrm{H}$, $L_2=4\mu\mathrm{H}$, $M=0.8\mu\mathrm{H}$.

1. 若 $t<0$，开关闭合，而 $t=0$ 时开关断开，求 $t>0$ 时 $v_o(t)$。
2. 若 $t<0$，开关断开，而 $t=0$ 时开关闭合，求 $t>0$ 时 $v_o(t)$。

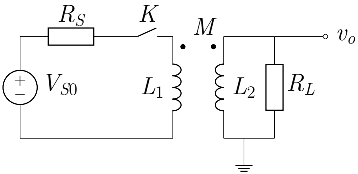


时域分析

例题

如图，$V_{s0}=5\text{V}$，$R_S=100\Omega$, $R_L=1\text{k}\Omega$, $L_1=1\mu\text{H}$, $L_2=4\mu\text{H}$, $M=0.8\mu\text{H}$.

1. 若 $t<0$，开关闭合，而 $t=0$ 时开关断开，求 $t>0$ 时 $v_o(t)$。
2. 若 $t<0$，开关断开，而 $t=0$ 时开关闭合，求 $t>0$ 时 $v_o(t)$。



提示

利用变压器的等效电路化简，然后看是几要素法。