电子电路与系统基础（II）参考讲义

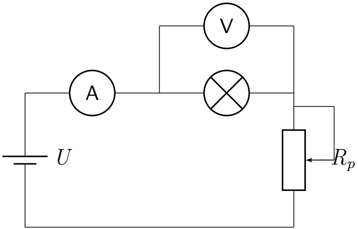
江玮陶　电子系学生科协学培部

2025 年 11 月 23 日

目录

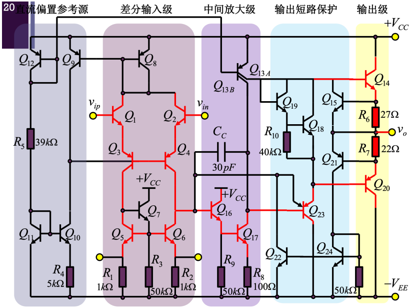
如何学电电?

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
……

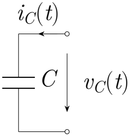
系统

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
……

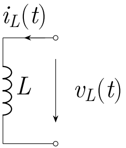
基础：基于矩阵和器件方程的描述方法

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：$B_C = \omega C$

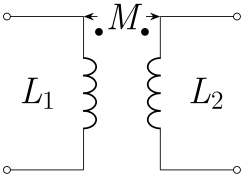


- 时域：$v_L(t) = L\frac{d}{dt}i_L(t)$，$i_L(t) = \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t} v_L(\tau)d\tau$
- 频域：$V_L = j\omega L I_L$，$I_L = \frac{1}{j\omega L} V_L$
- 感抗：$X_L = \omega L$

Laplace 变换：$s = \sigma + j\omega, \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \rightleftharpoons s, \int_{-\infty}^{t}(\cdot)\mathrm{d}t \rightleftharpoons \frac{1}{s}$；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)

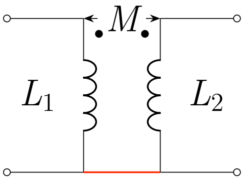
- 物理参数：N_1, N_2（匝数），Ξ（磁导），k（耦合系数）
- 电路参数：L_1, L_2（自感），M（互感）

$\Xi = \mu\frac{S}{p}$：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

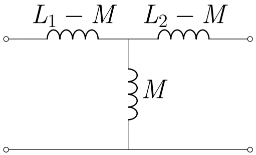


$$\begin{cases} L_1 = N_1^2 \Xi \\ L_2 = N_2^2 \Xi \\ M = k N_1 N_2 \Xi \end{cases}$$

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

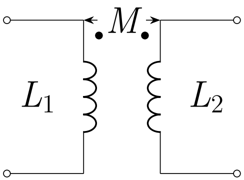
$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} \Rightarrow \text{时域方程}$$

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



两边共地：T 型等效

互感变压器

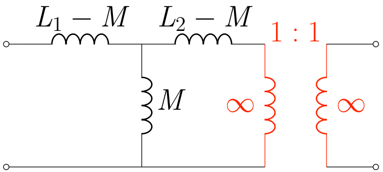


$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} \Rightarrow \text{时域方程}$$

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

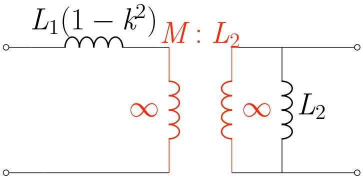
$$\begin{cases} L_1 = N_1^2 \Xi \\ L_2 = N_2^2 \Xi \\ M = k N_1 N_2 \Xi \end{cases}$$

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

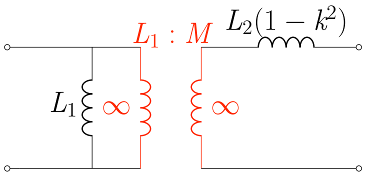


两边不共地：T 型等效加理想变压器

互感变压器



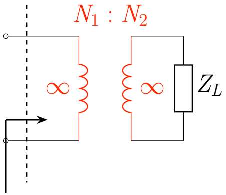
漏磁励磁模型（h 参量）



励磁漏磁模型（g 参量）

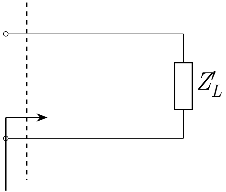
$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \Rightarrow k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

理想变压器



理想变压器: $L_1, L_2 \to \infty$, $k = 1$
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

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

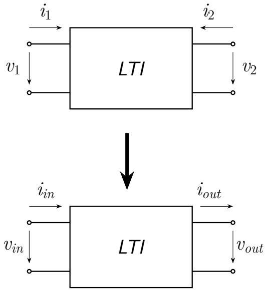
有源性判断：负阻有源性和受控源有源性

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。

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



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

本征电压增益 g_{21}

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

本征跨导增益 $-y_{21}$

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

本征跨阻增益 z_{21}

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

本征电流增益 $-h_{21}$

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

网络参量矩阵

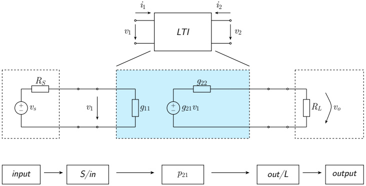
网络参量矩阵可以用于快速求解传递函数。

使用 zyhg 矩阵：

(I) 写出单向网络的传递函数

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

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

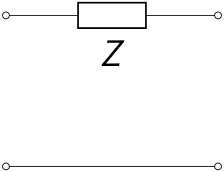


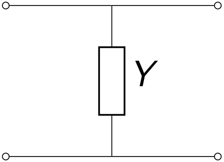
(II) 双向化：分母减去 $p_{12}p_{21}$

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

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。