基本概念

集中参数： $d \ll \lambda$, $\lambda = \frac{c}{f}$

电路变量： $i(t)=\frac{dq}{dt}$ $\boxed{\text{参考方向}}$

$u(t)=\frac{dw}{dq}$

$p=\frac{dw}{dt}=u(t)i(t)$ 关联参考方向 吸收 $p>0$

电路约束

拓扑约束

⇒图论 I. 连通图. 有向图. 子图. 平面图

II 回路 (网孔) 树 割集

基本回路 $b-n+1$ | 基本割集 $n-1$

树枝 连支

过渡

⇓ KVL: $\sum u(t)=0$

⇓ KCL: $\sum i(t)=0$ (点. 割集. 闭合面)

S 过渡 S

网孔矩阵 M_m

$m_{ik}=\begin{cases}1\\-1\\0\end{cases}$

关联矩阵 A_a

$a_{ik}=\begin{cases}1 & n_i\ b_k\\-1 & n_i\ b_k\\0 & n_i\ b_k\end{cases}$

降阶 $(r(M_m)=b-n+1)$

⇒ $\begin{cases}Mu_b=0\\ i_b=M^T i_m\end{cases}$

降阶 $(r(A_a)=n-1)$

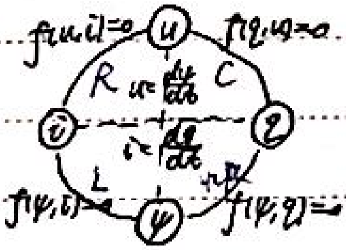
⇒ $\begin{cases}Ai_b=0\\ u_b=A^T u_n\end{cases}$

⇓ 特勒根定理

$\sum_{k=1}^{b} u_k i_k=0$

$\begin{cases}\sum_{k=1}^{b} u_k \hat{i}_k=0\\ \sum_{k=1}^{b} \hat{u}_k i_k=0\\ \sum_{k=1}^{b} u_k(t_1) i_k(t_2)=0\end{cases}$

元件约束



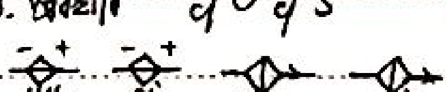
1. 电阻 (电导) R G <(非)线性 <(非)时变 $R>0$ 无源 $R<0$ 有源

VCR: $u=iR$ / $i=Gu$

2. 独立源 有源

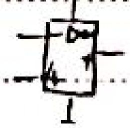
$u=u_s$ 不许短路 $i=i_s$ 不许开路

3. 受控源 V/C V/S 有源



$u_2=\mu u_1$ $u_2=ri_1$ $i_2=gu_1$ $i_2=\beta i_1$

4. 运放 (OP) 有源

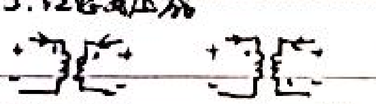


⇒负反馈 线性区

$A\to+\infty$ — $u_i\to0$ 虚短

$R_i\to+\infty$ — $i_i\to0$ 虚断

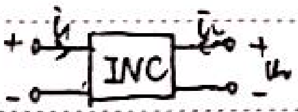
5. 理想变压器 非[illegible]



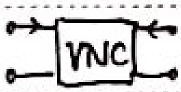
$\begin{cases}u_1=nu_2\\ i_1=-\frac{1}{n}i_2\end{cases}$ $\begin{cases}u_1=-nu_2\\ i_1=\frac{1}{n}i_2\end{cases}$

⇒阻抗变换 $u_1=(n^2R_L)i_1$

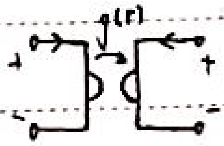
回转器: 负回转器 (造负电阻) & 理想回转器 ($C \rightleftharpoons L$)



$$\begin{cases} i_1 = i_2 \\ u_1 = u_2 \end{cases}$$



$$\begin{cases} i_1 = -i_2 \\ u_1 = -u_2 \end{cases}$$

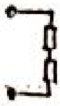
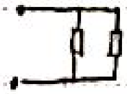


$$\begin{cases} u_1 = -r i_2 \\ u_2 = r i_1 \end{cases} \text{ or } \begin{cases} i_1 = g u_2 \\ i_2 = -g u_1 \end{cases}$$

电路分析法

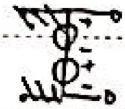
1. 支路分析法： b个 i，b个 u $\Rightarrow \begin{cases} n-1: & KCL \\ b-n+1: & KVL \\ b: & VCR \end{cases}$

2. 等效变换法　等效：相同外特性 ⇒ 重要性质：外还相同电路 — $\frac{oc}{sc}$
求电路等效

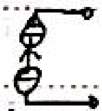
(i) R/G　串 　并 

$R=R_1+R_2$　　$G=G_1+G_2$

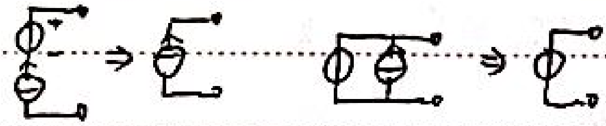
分压 $u_k=\frac{R_k}{\sum R}u$　　分流 $i_k=\frac{G_k}{\sum G}i$

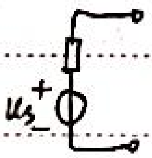
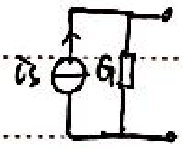
(ii) 　串 　并 

$u_s=u_{s1}+u_{s2}$　　$i_s=i_{s1}+i_{s2}$

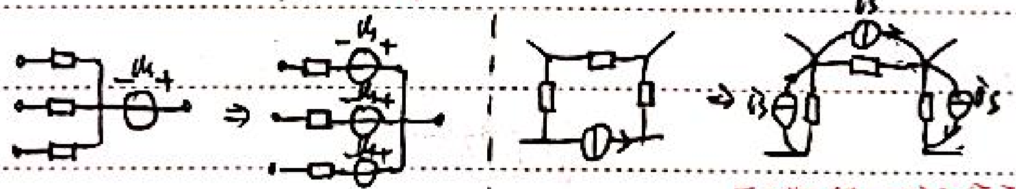
Caution: 　

必须 $u_{s1}=u_{s2}$　　必须 $i_{s1}=i_{s2}$

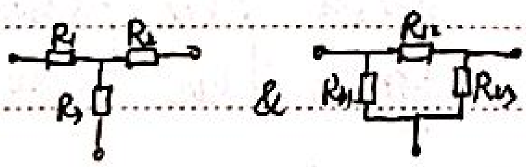
Eaten: 

(iii) 戴&诺　 戴维南 &  诺顿　切换串并联 可合并电阻

$\begin{cases} i_s=\frac{u_s}{R} & \text{(短路)} \\ G=\frac{1}{R} & \text{(开路)} \end{cases}$

(iv) 转移 

可适戴/诺工的转移等效

(v) $\nabla \rightleftarrows Y$ 

$\begin{cases} R_1=\frac{R_{12}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} \\ \cdots \end{cases}$　$\begin{cases} R_{12}=R_1+R_2+\frac{R_1R_2}{R_3} \\ \cdots \end{cases}$

也 $R_Y=\frac{1}{3}R_\nabla$, $R_\nabla=3R_Y$

(vi) 对称　翻转　旋转　　(vii) Y/C Y/S — 当成独立源；保留控制变量

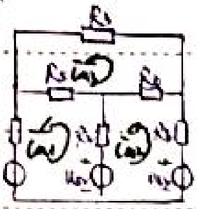
可断 ($i=0$)　可短 ($u=0$)

3. 独立变量法

回路(网孔)分析法 $(b-n+1)$ KVL

割集(节点)分析法 $(n-1)$ KCL

e.g.



$$\begin{pmatrix} R_1+R_4+R_5 & -R_4 & -R_5 \\ -R_4 & R_2+R_4+R_6 & R_6 \\ \boxed{-R_5} & R_6 & \boxed{R_3+R_5+R_6} \end{pmatrix}$$

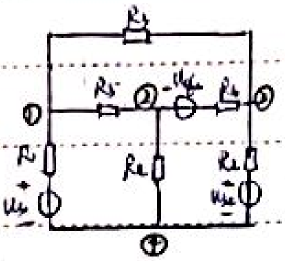
互电阻：同向正，反向负

自电阻：i_m 上的电阻，恒正

在无受控源时对称

$$\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_{m1} \\ i_{m2} \\ i_{m3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{s2}-u_{s1} \\ u_{s3}-u_{s2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

电压升代数和



$$\begin{pmatrix} G_1+G_3+G_5 & -G_5 & -G_3 \\ -G_5 & G_4+G_5+G_6 & -G_6 \\ \boxed{-G_3} & -G_6 & \boxed{G_2+G_3+G_6} \end{pmatrix}$$

互电导：恒负

自电导：与节点相连的电导，恒正

$$\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_{n1} \\ u_{n2} \\ u_{n3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_1u_{s1} \\ -G_6u_{s6} \\ G_2u_{s2}+G_6u_{s6} \end{pmatrix}$$

流入电流取正，流出取负

&矩阵&

基本回路矩阵 $B_{l\times b}$

$$b_{ik}=\begin{cases} 1 & \text{基本回路 } i \text{ 包含支路 } b_k\text{，方向相同} \\ -1 & \text{相反} \\ 0 & \text{不含} \end{cases}$$

基本割集矩阵 $Q_{c\times b}$

$$q_{ik}=\begin{cases} 1 & \text{支路 } k \text{ 与基本割集 } i \text{ 有关联，方向相同} \\ -1 & \text{相反} \\ 0 & \text{无关} \end{cases}$$

以基本回路方向—连支方向 $\Rightarrow B_f=(E_{l\times l} \vdots B_t)$

以基本割集方向—树支方向 $\Rightarrow Q=(Q_l \vdots E_t)$

而 $Bu_b=0 \Rightarrow u_l=-B_t u_t$

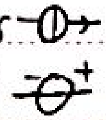
$i_b=B^T i_l$

而 $Qi_b=0 \Rightarrow i_t=-Q_l i_l$

$u_b=Q^T u_t$

对偶关系

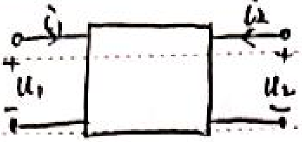
节点	基准节点	节点电压	串联支路	KCL	支路电压	开路
网孔	外网孔	网孔电流	并联支路	KVL	支路电流	短路

G	L	q	
R	C	ψ	

端口特性分析

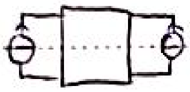
1. 单口　VCR：$u=Ai+B$

2. 双口



$$\begin{cases} c_{11}u_1+c_{12}u_2+d_{11}i_1+d_{12}i_2=0 \\ c_{21}u_1+c_{22}u_2+d_{21}i_1+d_{22}i_2=0 \end{cases}$$

(i) 流控型 VCR



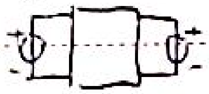
$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = R\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$$

$$r_{11}=\frac{u_1}{i_1}\bigg|_{i_2=0} \qquad r_{12}=\frac{u_1}{i_2}\bigg|_{i_1=0} \qquad r_{21}=\frac{u_2}{i_1}\bigg|_{i_2=0} \qquad r_{22}=\frac{u_2}{i_2}\bigg|_{i_1=0}$$

端口1的开路策动点电阻　　开路反向转移电阻

反向：左边激励 右边响应

(ii) 压控型 VCR

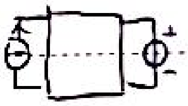


$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = G\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

$$g_{11}=\frac{i_1}{u_1}\bigg|_{u_2=0} \qquad g_{12}=\frac{i_1}{u_2}\bigg|_{u_1=0} \qquad g_{21}=\frac{i_2}{u_1}\bigg|_{u_2=0} \qquad g_{22}=\frac{i_2}{u_2}\bigg|_{u_1=0}$$

端口1的短路策动点电导　　短路反向转移电导

(iii) 混合I型 VCR



$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = H\begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

$$h_{11}=\frac{u_1}{i_1}\bigg|_{u_2=0} \qquad h_{12}=\frac{u_1}{u_2}\bigg|_{i_1=0} \qquad h_{21}=\frac{i_2}{i_1}\bigg|_{u_2=0} \qquad h_{22}=\frac{i_2}{u_2}\bigg|_{i_1=0}$$

(注意量纲)　端口1的短路策动点电阻　　开路反向转移电压比

(iv) 混合II型 VCR

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{12} \\ \hat{h}_{21} & \hat{h}_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \hat{H}\begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$$

(v) 传输I型 VCR

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{pmatrix} = A\begin{pmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{pmatrix}$$ 保持电流往一个方向

(vi) 传输II型 VCR

$$\begin{pmatrix} u_2 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{a}_{11} & \hat{a}_{12} \\ \hat{a}_{21} & \hat{a}_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_1 \\ -i_1 \end{pmatrix} = \hat{A}\begin{pmatrix} u_1 \\ -i_1 \end{pmatrix}$$

电路定理

1、齐次性定理 & 叠加原理

激励 & 响应 (u, i)　线性　$L(a_1w_1+a_2w_2)=a_1L(w_1)+a_2L(w_2)$

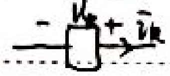
单一激励的线性、非时变电路：网络函数 $H=\frac{响应}{激励}$ ：策动点函数 G_i R_i；转移函数 G_T R_T H_i H_u (量纲)

一个电源作用：电压源 短路 ($u_s=0$)，电流源 断路 ($i_s=0$)

对于受控源，也可叠加，受控源应保留

2、置换定理

对于已知 u_k / i_k，可用电压源 u_k 或电流源 i_k 替换

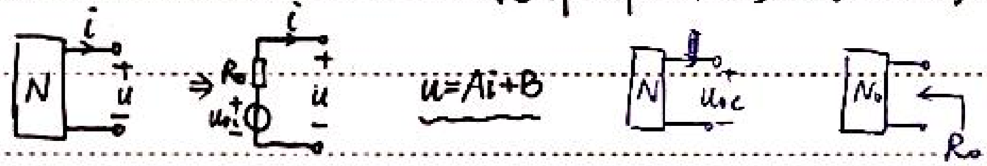


(求电压可用)

置换后，电路中 u, i 均不变

3、戴维南定理

任何一个含电源、线性电阻、受控源的一端口电路，就端口来说，可等效为一个电压源串联电阻支路

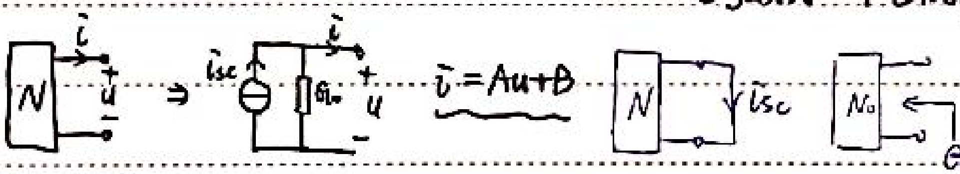


$u=Ai+B$

(所有独立源置零)

诺顿定理

可等效为一个电流源并联电阻组合



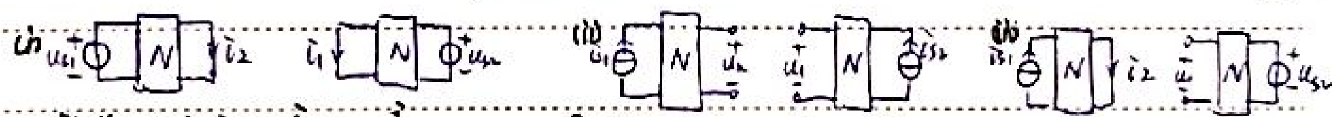
$i=Au+B$

(所有独立源置零)

4、互易定理

对于不含独立电源的电路（互易电路），其激励端口和响应端口互易后，描述该端口特性的响应特性不变

$\boxed{u_1\hat{i}_1+u_2\hat{i}_2=\hat{u}_1 i_1+\hat{u}_2 i_2}$

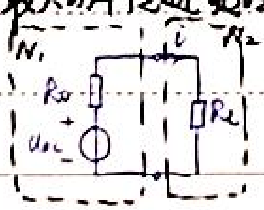


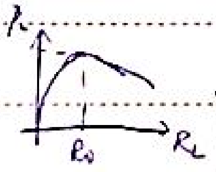
转移电导不变　$\frac{i_2}{u_{s1}}=\frac{i_1}{u_{s2}}$

转移电阻不变　$\frac{u_2}{i_{s1}}=\frac{u_1}{i_{s2}}$

$\frac{i_2}{i_{s1}}=\frac{u_1}{u_{s2}}$

5、最大功率传递定理





$R_L=R_0$

$P_L=\frac{u_{oc}^2}{4R_0}$