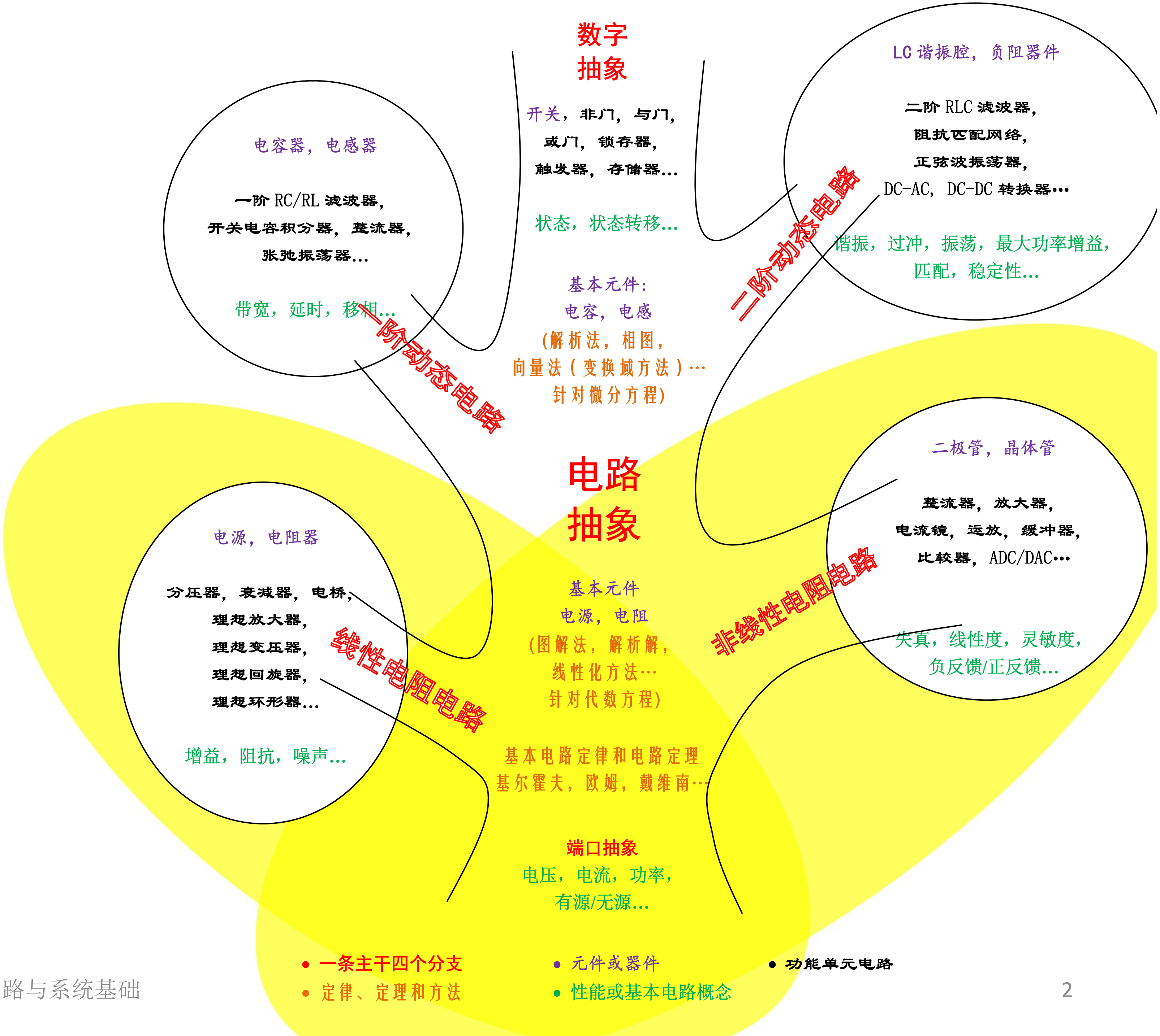
电子电路与系统基础I

《基础I---电阻电路》期末复习
线性部分

李国林
清华大学电子工程系

一条主干 四个分支


数字抽象
开关，非门，与门，
或门，锁存器，
触发器，存储器…
状态，状态转移…
基本元件：
电容，电感
(解析法，相图，
向量法（变换域方法）…
针对微分方程)
电容器，电感器
一阶RC/RL滤波器，
开关电容积分器，整流器，
张弛振荡器…
带宽，延时，移相…
一阶动态电路
LC谐振腔，负阻器件
二阶RLC滤波器，
阻抗匹配网络，
正弦波振荡器，
DC-AC，DC-DC转换器…
谐振，过冲，振荡，最大功率增益，
匹配，稳定性…
二阶动态电路
电路抽象
基本元件
电源，电阻
(图解法，解析解，
线性化方法…
针对代数方程)
基本电路定律和电路定理
基尔霍夫，欧姆，戴维南…
端口抽象
电压，电流，功率，
有源/无源…
电源，电阻器
分压器，衰减器，电桥，
理想放大器，
理想变压器，
理想回旋器，
理想环形器…
增益，阻抗，噪声…
线性电阻电路
二极管，晶体管
整流器，放大器，
电流镜，运放，缓冲器，
比较器，ADC/DAC…
失真，线性度，灵敏度，
负反馈/正反馈…
非线性电阻电路
• 一条主干四个分支
• 定律、定理和方法
• 元件或器件
• 性能或基本电路概念
• 功能单元电路

电阻电路

- 电阻电路：所有电路元件都是阻性元件电路
  - 阻性元件：元件约束条件可以用代数方程表述的元件

- 阻性元件
  - 独立源：恒压源，恒流源
  - 线性电阻，非线性电阻（二极管、晶体管）
    - 微分元件：微分电阻、微分电导、微分跨导增益、微分电压增益
  - 受控源：压控压源、压控流源、流控流源、流控压源
  - 开关，短接线

- 典型阻性网络
  - 线性电阻网络
    - 分压、分流、π、T、H形（桥式）网络：衰减网络
  - 非线性电阻网络
    - 信息处理电路：晶体管放大器，运算放大器
      - 微分线性受控源，理想运放（理想压控流源），缓冲器；负阻放大器
    - 能量处理电路：整流器，逆变器、稳压器
  - 理想回旋器；理想变压器，理想环形器：无损网络
    - 理想变压器，理想环形器：动态电路，极致化抽象后，可以用代数方程描述
    - 理想回旋器：无损网络，实际却用有源的压控流源晶体管电路实现

第一学期上半学期重点内容

- 电路基本定律，基本定理及其运用
  - 第一重点：电路分析的基础
- 线性电阻电路
  - 可用线性代数方程描述的电路
  - 第二重点：线性电路分析本质上是矩阵运算
- 电路基本概念
  - 第三重点

1、电路基本设定

- 了解电路的基本设定并可熟练运用
  - 电压、电流表述
    - 符号：**V，I，P，Q，t，f，R，L，C，…**
    - 单位：**V，A，W，C，s，Hz，Ω，H，F，…**
    - **SI**词头：**G/M/k/m/μ/n/…**
      - **SI**词头表示法
      - 科学计数法

    - **dB**数表述
      - **10log**
      - **20log**

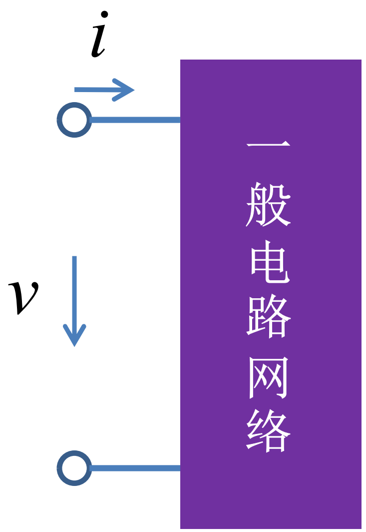
- 要求熟记应用这些设定

2、电压、电流、功率定义

$$P=\overline{p(t)}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-0.5T}^{+0.5T}v(t)i(t)dt$$

- 电压、电流、功率、端口定义
  - 电压/电流参考方向
  - 端口电压电流关联参考方向

如果不特别指明，
功率指平均功率



$p(t)=v(t)i(t)>0$

端口吸收功率

$p(t)=v(t)i(t)<0$

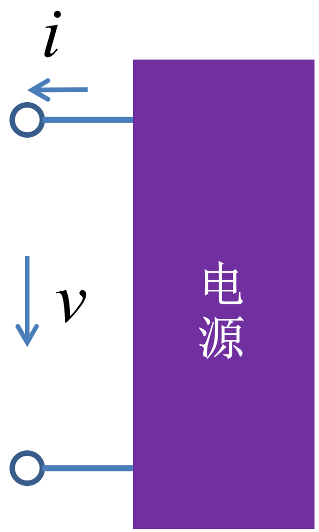
端口释放功率

$p(t)=v(t)i(t)>0$

端口释放功率

$p(t)=v(t)i(t)<0$

端口吸收功率



便于图解法求解

对接关系，一套端口电压电流参量

3、常见电压、电流信号

- 正弦波
  - 峰值，有效值
    - **rms**：均方根值，有效值
      - 峰值为$\mathbf{V_p}$的正弦波电压加载到电阻上，和$\mathbf{0.707V_p}$的直流电压加载到电阻上，电阻将获得完全一致的功率
- 直流
  - 不随时间变化的恒定电量
    - 一般信号的平均值就该信号的直流分量，扣除直流分量后，剩下的为交流分量
      - 一般信号均可分解为’直流分量+交流分量’
- 方波
  - 傅立叶级数分解
    - 直流、基波分量、谐波分量
  - 平均值，有效值

$$v(t)=V_p\cos(\omega_0 t+\varphi_0)$$

$$V_{rms}=0.707V_p$$

$$I_{rms}=\sqrt{\overline{i^2(t)}}=\sqrt{\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-0.5T}^{+0.5T}i^2(t)dt}$$

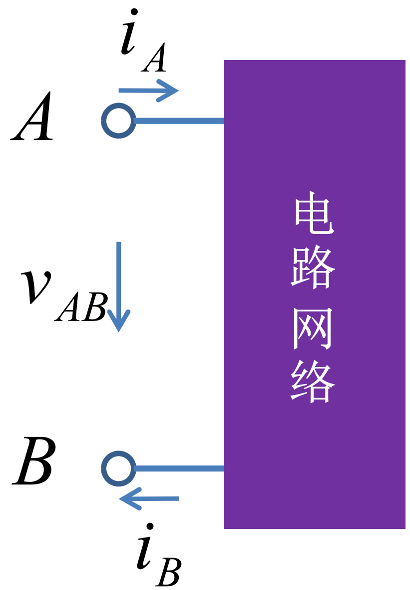
$$I_{DC}=\overline{i(t)}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-0.5T}^{+0.5T}i(t)dt$$

$$i(t)=I_{DC}+i_{ac}(t)$$

$$\overline{i_{ac}(t)}=0$$

4、端口定义

- 端口
- 参考地
  - 规定电压为0的结点
  - 很多情况都可以参考地结点作为端口的另外一个端点
    - 很多电路符号中省略地结点（没有画地结点）
      - 一个结点就是一个端口，端口电压为相对于地的结点电压



端口条件 $i_B(t)=i_A(t)$

电路适用的准静态条件

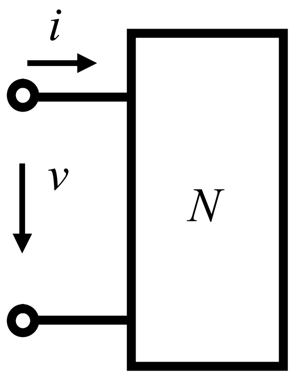
$$d_{AB} << \lambda$$

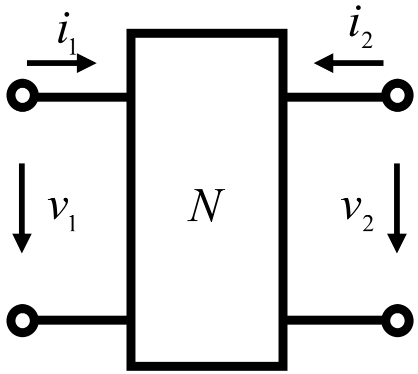
5、电路系统属性

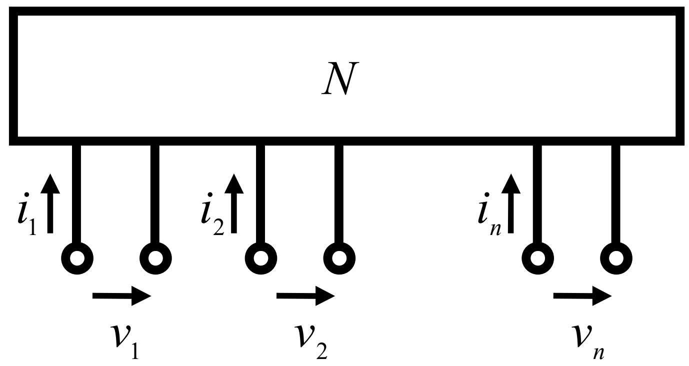
- 线性、非线性
  - 扣除（屏蔽、消除、无视）内部独立源的影响后，端口电压、端口电流之间满足叠加性和均匀性，则为线性电路；否则非线性
- 时变、时不变
  - 描述端口电压、端口电流之间关系的元件约束方程，所有参量都是和时间无关的常量，则为时不变电路；如果网络的描述参量和时间有关，则为时变电路
- 记忆、无记忆
  - 电路系统行为（端口电压、端口电流关系）仅由当前决定，和其以前行为无关，则为无记忆电路；反之为有记忆电路，有记忆电路存在状态和状态之间的转换关系
- 有源、无源
  - 存在满足元件约束的端口电压、端口电流，使得网络端口对外是释放能量的，则有源电路：具有输出功率的能力
  - 任意满足元件约束的端口电压、端口电流，网络端口对外都不可能释放能量，则无源电路：不具输出功率的能力

6、元件约束条件

由元件材料、内部结构决定







$$f(v,i)=0$$

$$f_1(v_1,v_2;i_1,i_2)=0$$

$$f_2(v_1,v_2;i_1,i_2)=0$$

$$f_1(v_1,v_2,\ldots,v_n;i_1,i_2,\ldots,i_n)=0$$

$$f_2(v_1,v_2,\ldots,v_n;i_1,i_2,\ldots,i_n)=0$$

$$f_n(v_1,v_2,\ldots,v_n;i_1,i_2,\ldots,i_n)=0$$

网络端口描述方程

$$\mathbf{f}(\mathbf{v},\mathbf{i})=0 \qquad \mathbf{v}=\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ v_n \end{bmatrix},\ \mathbf{i}=\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \cdot \\ i_n \end{bmatrix},\ \mathbf{f}=\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}$$

向量形式

压控、流控和混控

$$\mathbf{f}(\mathbf{v},\mathbf{i})=0$$

一般形式

$$\mathbf{v}=\mathbf{f}_{vi}(\mathbf{i})$$

流控网络，流控元件

$$\mathbf{i}=\mathbf{f}_{iv}(\mathbf{v})$$

压控网络，压控元件

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ . \\ v_k \\ i_{k+1} \\ . \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{h,1}(i_1,\dots,i_k;v_{k+1},\dots,v_n) \\ . \\ f_{h,k}(i_1,\dots,i_k;v_{k+1},\dots,v_n) \\ f_{h,k+1}(i_1,\dots,i_k;v_{k+1},\dots,v_n) \\ . \\ f_{h,n}(i_1,\dots,i_k;v_{k+1},\dots,v_n) \end{bmatrix}$$

混合控制形式

7、典型单端口网络

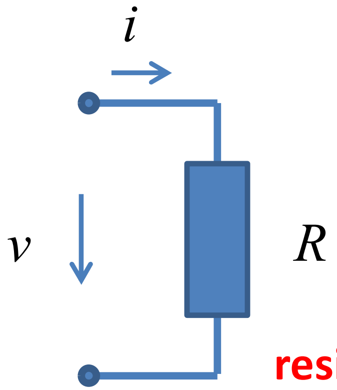
- 电阻
  - 线性电阻 $v = Ri$ $i = Gv$
  - 非线性电阻 $i = I_{S0}\left(e^{\frac{v}{v_T}} - 1\right)$
    - PN结二极管、隧道二极管、稳压二极管、…
  - 短路、开路 $v = 0$ $i = 0$

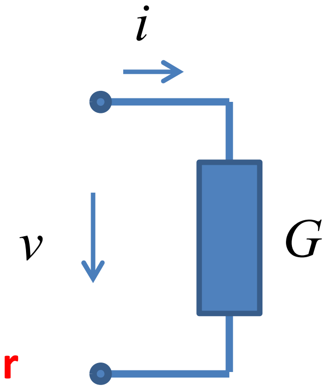
- 电源
  - 恒压源 $v = V_{S0}$ $v(t) = V_{Sp}\cos\omega_0 t$
  - 恒流源 $i = I_{S0}$ $i(t) = I_{Sp}\cos\omega_0 t$
  - 线性内阻，非线性内阻 $v = v_S - iR_S$ $i = i_S - vG_S$

流控为戴维南源，压控为诺顿源

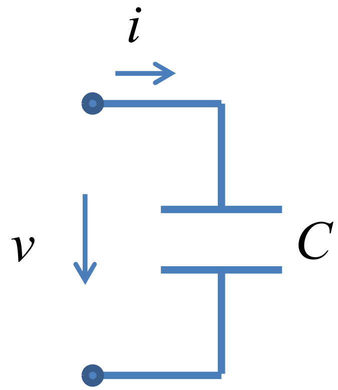
$f(v,i) = 0$

常见单端口元件

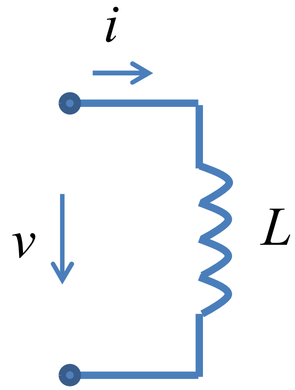




resistor



capacitor



inductor

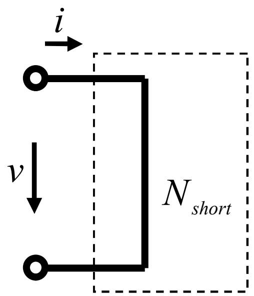
$$v(t) = Ri(t)$$

$$i(t) = Gv(t)$$

$$G = \frac{1}{R}$$

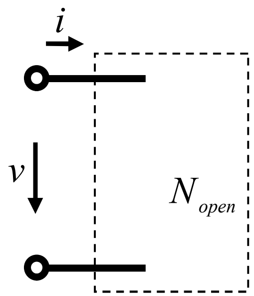
$$i(t) = C\frac{dv(t)}{dt}$$

$$v(t) = L\frac{di(t)}{dt}$$



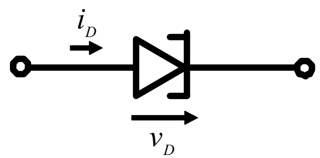
Short Circuits

$$v = 0$$



Open Circuits

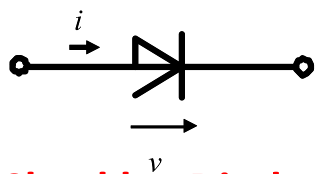
$$i = 0$$



Tunnel Diode

$$i = f_{TD}(v)$$

N型负阻



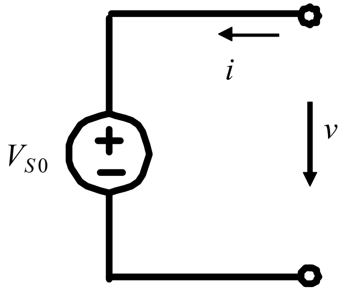
Shockley Diode

$$v = f_{SD}(i)$$

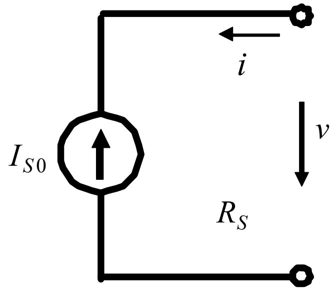
S型负阻

电阻、电源属性

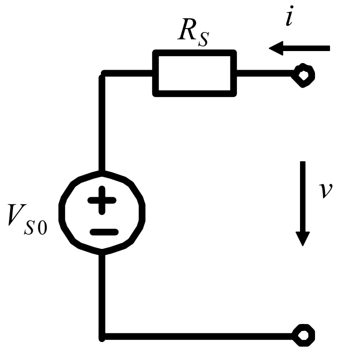
- 电阻
  - 端口电压、电流关系是代数关系
  - 特性曲线过**iv**平面的原点
  - 无源：**P**$_{\Sigma}$**≥0**，特性曲线全部位于**1**、**3**象限或坐标轴上
    - 正电阻
- 电源
  - 端口电压、电流关系是代数关系
  - 有源：存在**P**$_{\Sigma}$**≤0**，特性曲线存在位于**2**、**4**象限的区段



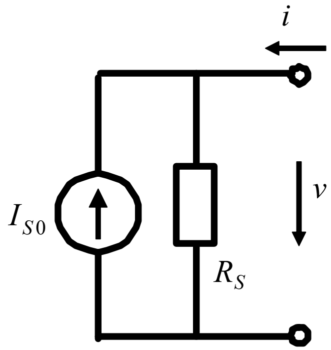
恒压源



恒流源



戴维南电压源



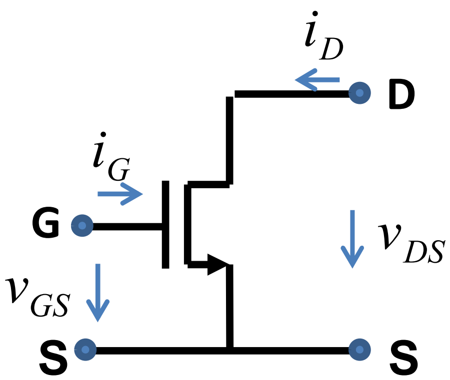
诺顿电流源

线性内阻	$v-V_{S0}=iR_S$	$i+I_{S0}=vG_S$
非线性内阻	$v-V_{S0}=f_{vi}(i)$	$i+I_{S0}=f_{iv}(v)$

可戴维南、诺顿表述的电源，在扣除源后为纯阻
过原点且位于一、三象限（包括坐标轴）

8、典型二端口网络

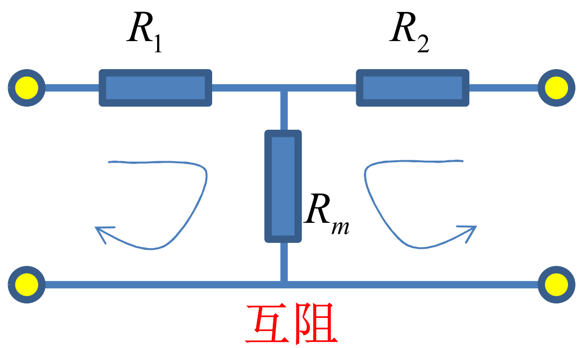
- 线性电阻
  - 二端口电阻
  - 二端口电导
- 非线性电阻
  - 晶体管



$$i_G = 0$$

恒流区

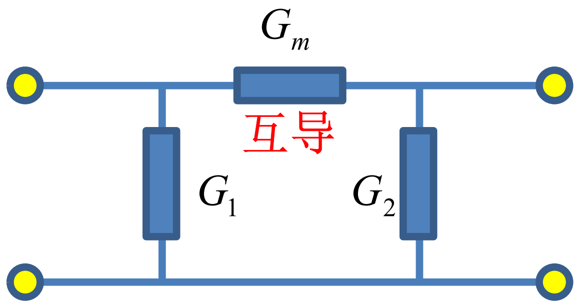
$$i_D = \beta_n (v_{GS} - V_{TH})^2$$



$$\mathbf{v} = \mathbf{zi}$$

$$v_1 = R_1 i_1 + R_m (i_1 + i_2)$$
$$v_2 = R_2 i_2 + R_m (i_1 + i_2)$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} R_1 + R_m & R_m \\ R_m & R_2 + R_m \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{i} = \mathbf{yv}$$

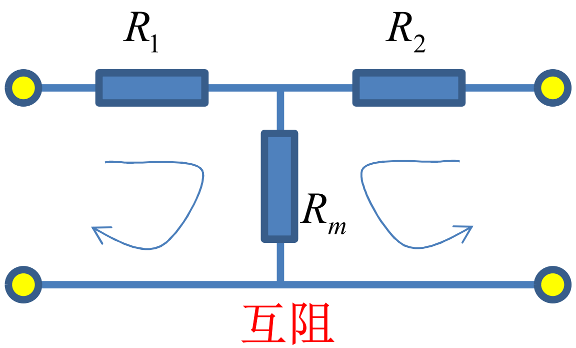
$$i_1 = G_1 v_1 + G_m (v_1 - v_2)$$
$$i_2 = G_2 v_2 + G_m (v_2 - v_1)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} G_1 + G_m & -G_m \\ -G_m & G_2 + G_m \end{bmatrix}$$

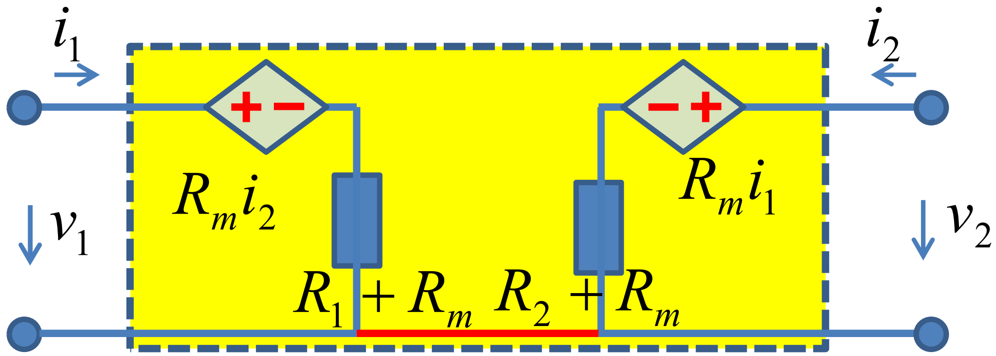
受控源的引入

- 描述一个端口对另外一个端口的作用关系
  - 只要两个端口存在电磁耦合关联，则必有等效受控源的控制作用
    - 两个回路之间存在共同阻抗
      - 一个端口电流影响另外一个端口电压　　跨阻控制关系
      - 互阻，互感
    - 两个结点之间存在共同导纳
      - 一个端口电压影响另外一个端口电流　　跨导控制关系
      - 互导，互容
    - 一个端口对另外一个端口存在控制关系
      - 晶体管：栅源电压V_{GS}影响漏源端口电流I_D　　跨导控制关系
      - **FET**：通过电容（电场）控制导电沟道的导电特性　**MOSFET**
      - **PET**：通过电势控制导电通道的导电特性　**BJT**

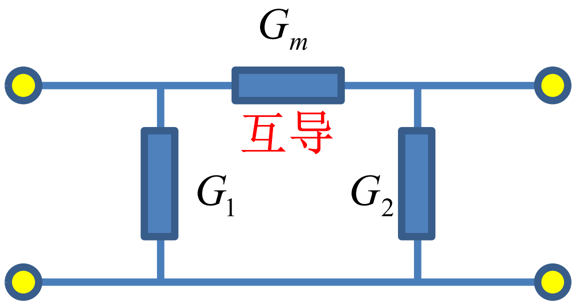
含互阻、互导元件的等效电路

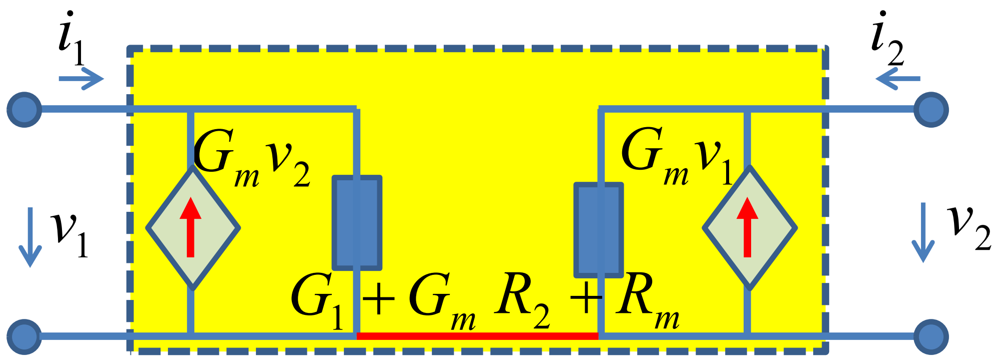


受控源描述的是端口之间的作用关系



$$v_1 = R_1 i_1 + R_m(i_1 + i_2) = (R_1 + R_m)i_1 + R_m i_2, \quad v_2 = R_2 i_2 + R_m(i_1 + i_2) = (R_2 + R_m)i_2 + R_m i_1$$





$$i_1 = G_1 v_1 + G_m(v_1 - v_2) = (G_1 + G_m)v_1 - G_m v_2, \quad i_2 = G_2 v_2 + G_m(v_2 - v_1) = (G_2 + G_m)v_2 - G_m v_1$$

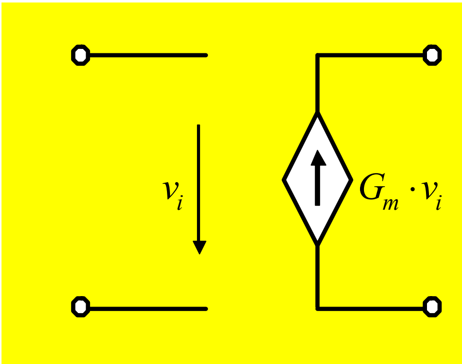
线性阻性二端口网络表述

- 端口电压、端口电流之间是线性代数关系
- 有4个变量v1,i1,v2,i2，任取其二为自变量，剩余两个为因变量，则有$C_4^2=6$种表述方式
  - **i1,i2⇒v1,v2** **z**参量矩阵 流控压源，跨阻
  - **v1,v2⇒i1,i2** **y**参量矩阵 压控流源，跨导
  - **i1,v2 ⇒v1,i2** **h**参量矩阵 压控压源，流控流源
  - **v1,i2 ⇒i1,v2** **g**参量矩阵 流控流源，压控压源
  - **v2,i2 ⇒v1,i1** **ABCD**参量矩阵 **1**端口到**2**端口的**4**个本征增益
  - **v1,i1 ⇒v2,i2** **abcd**参量矩阵 **2**端口到**1**端口的**4**个本征增益

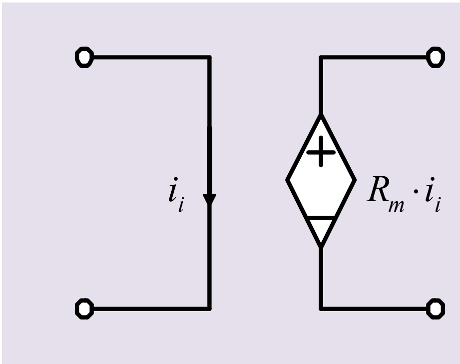
无论何种表述，这些参量们代表的是同一个网络，可以相互转换

根据定义能够自由转换

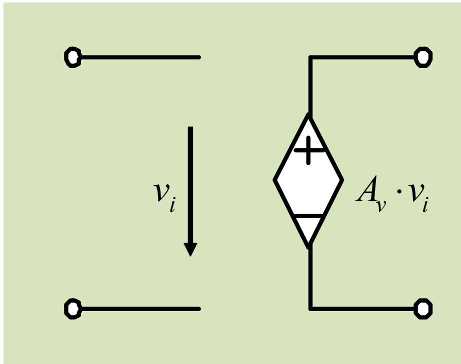
4种线性阻性受控源



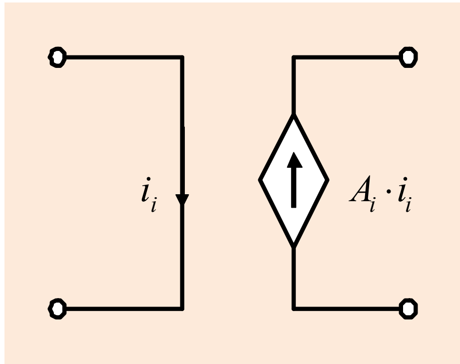
VCCS 跨导



CCVS 跨阻



VCVS



CCCS

$$
\begin{aligned}
i_1 &= 0 \\
i_2 &= -G_m v_1
\end{aligned}
\qquad
\begin{aligned}
v_1 &= 0 \\
v_2 &= R_m i_1
\end{aligned}
\qquad
\begin{aligned}
i_1 &= 0 \\
v_2 &= A_v v_1
\end{aligned}
\qquad
\begin{aligned}
v_1 &= 0 \\
i_2 &= -A_i i_1
\end{aligned}
$$

$$
\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -G_m & 0 \end{bmatrix}
\qquad
\mathbf{z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ R_m & 0 \end{bmatrix}
\qquad
\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_v & 0 \end{bmatrix}
\qquad
\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -A_i & 0 \end{bmatrix}
$$

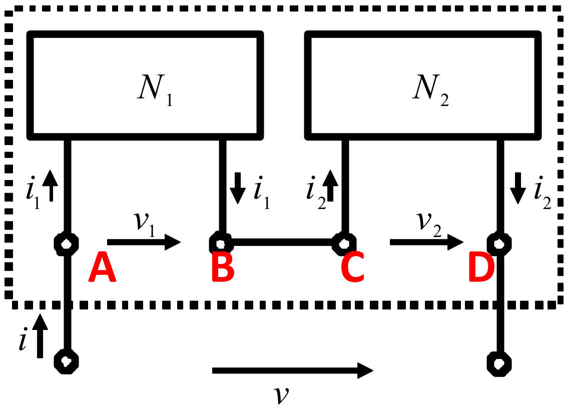
二端口网络属性

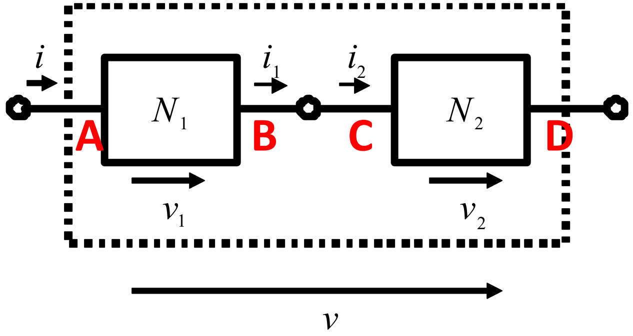
- 线性、非线性
- 互易、非互易
  - 互易：$z_{12}=z_{21}$，$y_{12}=y_{21}$，$h_{12}=-h_{21}$，$g_{12}=-g_{21}$
- 对称、非对称
  - 对称的线性网络：$z_{11}=z_{22}$, $z_{12}=z_{21}$
- 有源、无源
- 无损、有损
  - 针对无源网络
  - 无损阻性网络：$P_{\Sigma}=0$
- 单向、双向

9、端口连接关系

元件的连接
网络的连接

串联

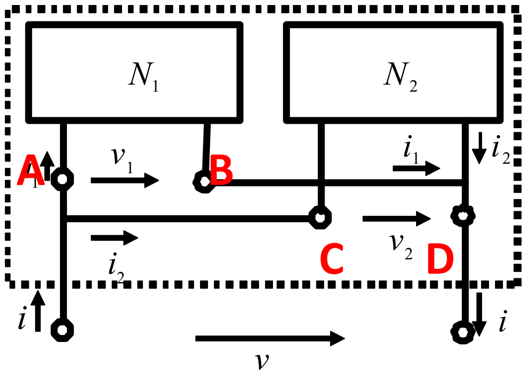


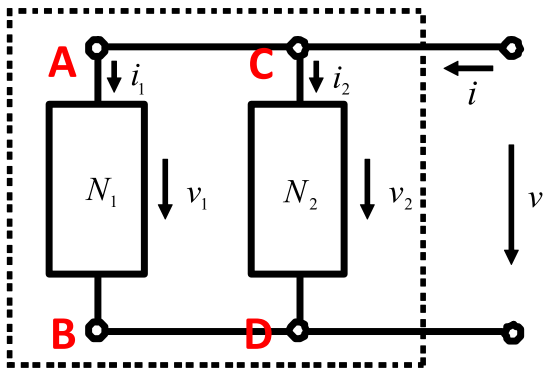


$v = v_1 + v_2$　　$i = i_1 = i_2$　　相同电流下，电压相加

线性电阻R相加

并联

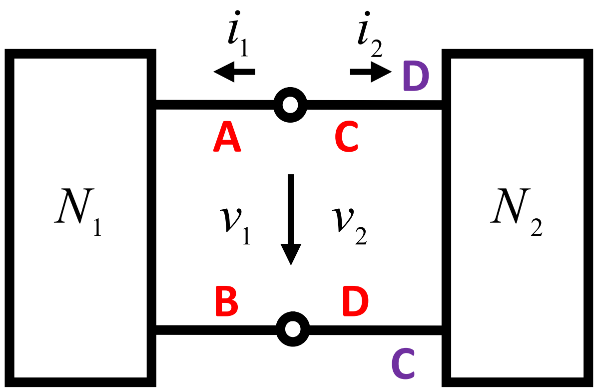


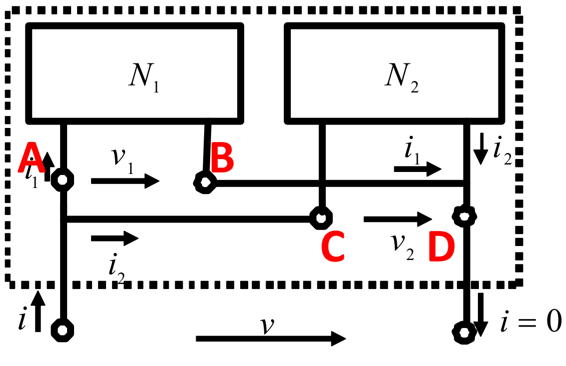


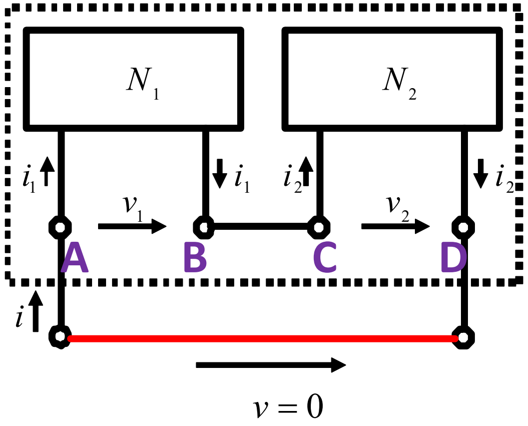
线性电导G相加

$i = i_1 + i_2$　　$v = v_1 = v_2$　　相同电压下，电流相加

端口对接







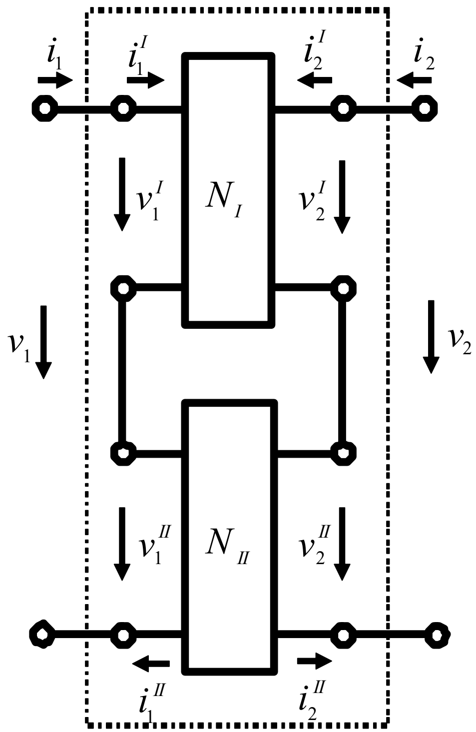
一般视其为并联后总端口开路，
也可视为串联后总端口短路

$$v_1 = v_2$$

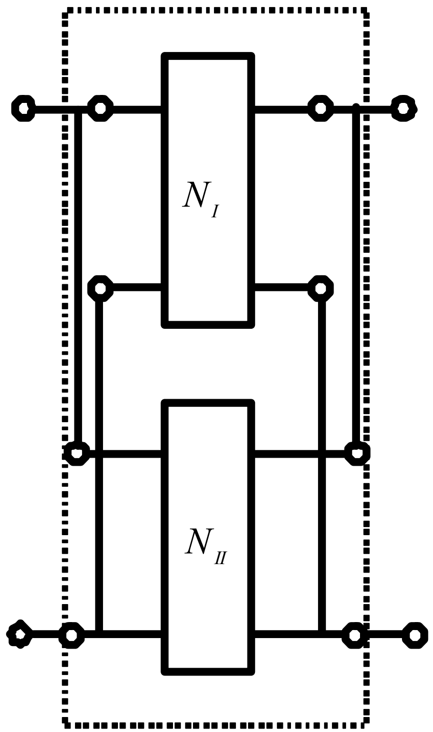
$$i_1 = -i_2$$

只需定义一套端口电压、端口电流足矣：**KVL**、**KCL**自动满足

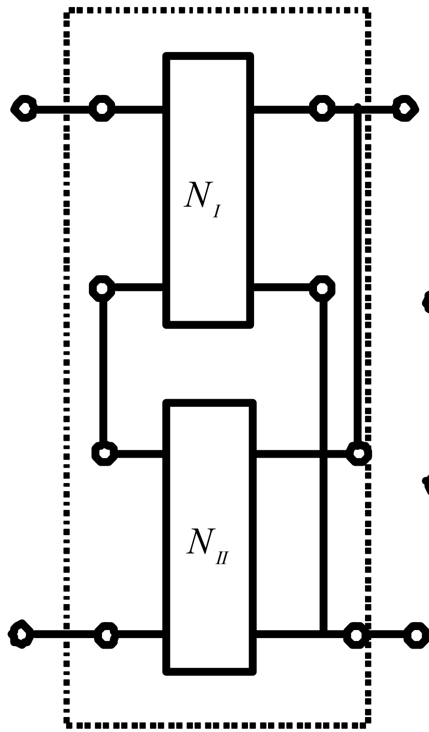
二端口网络端口连接关系



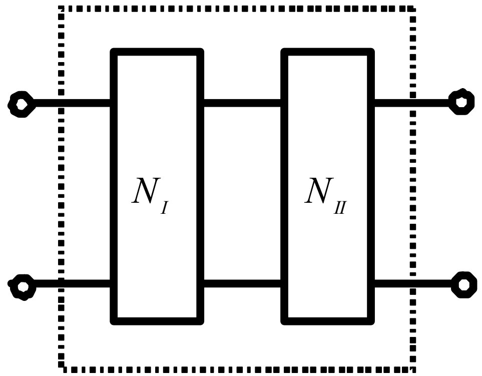
串串连接z相加



并并连接y相加



串并连接h相加
并串连接g相加

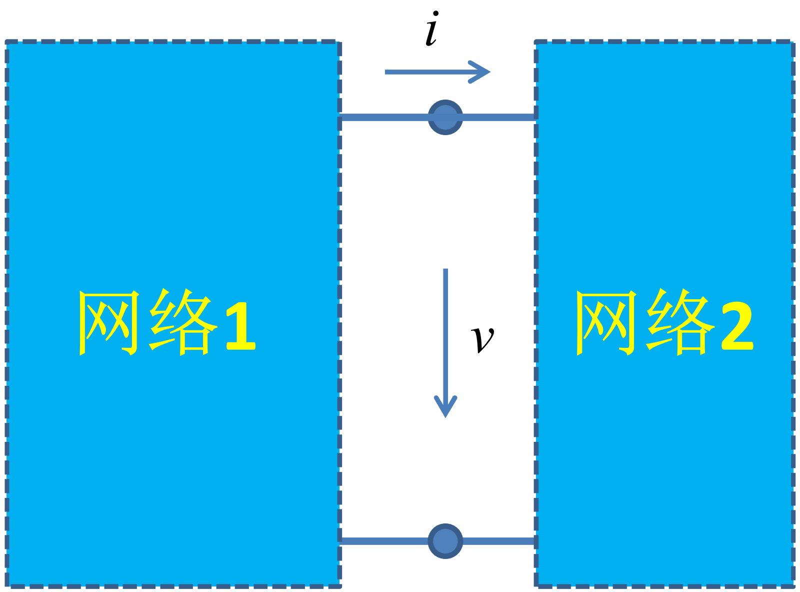


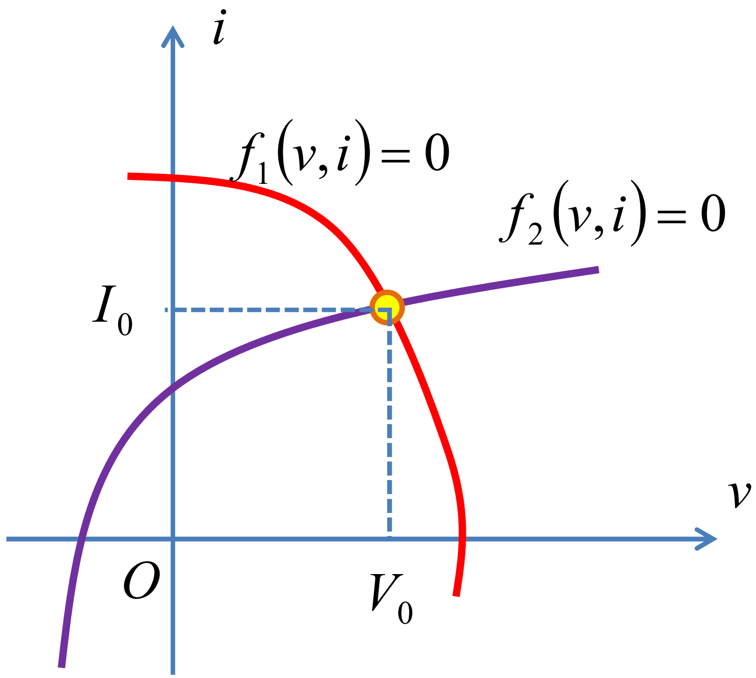
级联连接
ABCD相乘

$$i_1 = i_1^I = i_1^{II} \quad i_2 = i_2^I = i_2^{II}$$

$$v_1 = v_1^I + v_1^{II} \quad v_2 = v_2^I + v_2^{II}$$

10、端口对接：图解法





$v = V_0$ $\quad$ $i = I_0$

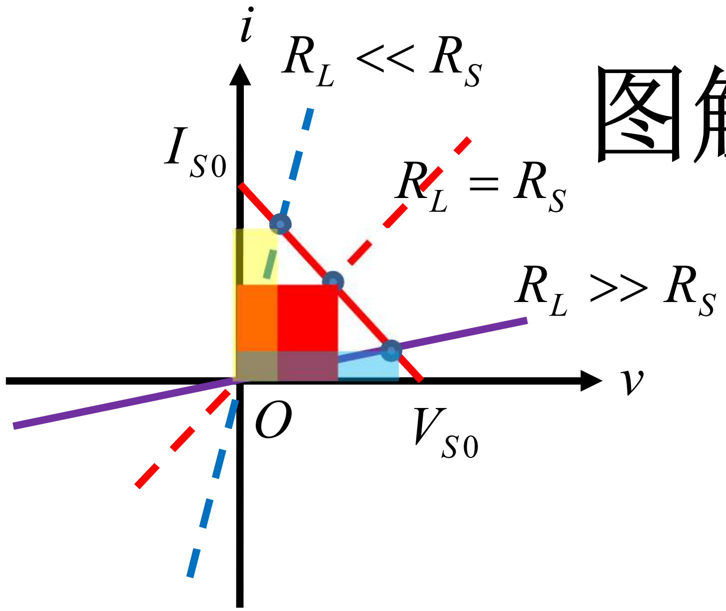
只有（V_0，I_0）同时满足两个网络的元件约束条件，故而为唯一解

有几个交点，就存在几个解

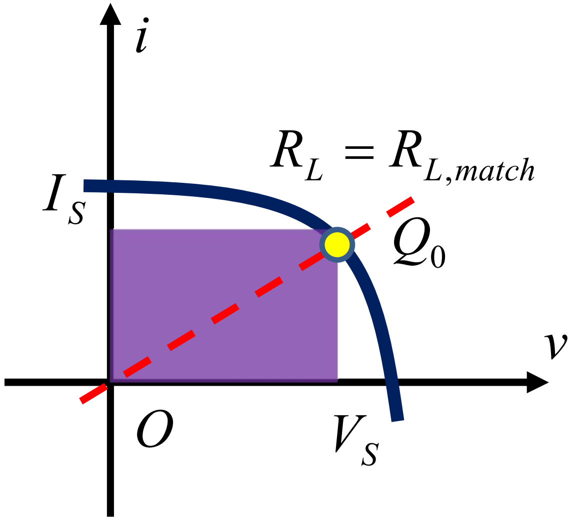
图解法的最大优点是直观，使得非线性电路的解可直观获得

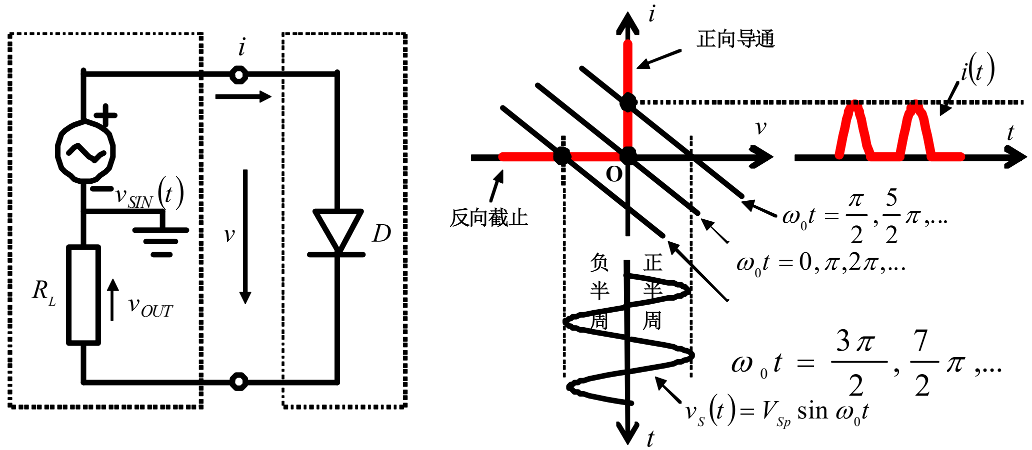
很多非线性电路的原理性分析都采用图解法先给出最直观的解释

图解法的几个应用例（1）

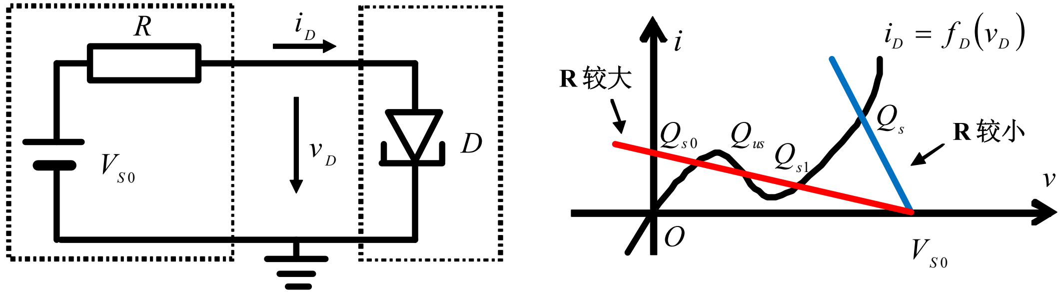


源和负载的对接：额定功率
源能够输出的最大功率



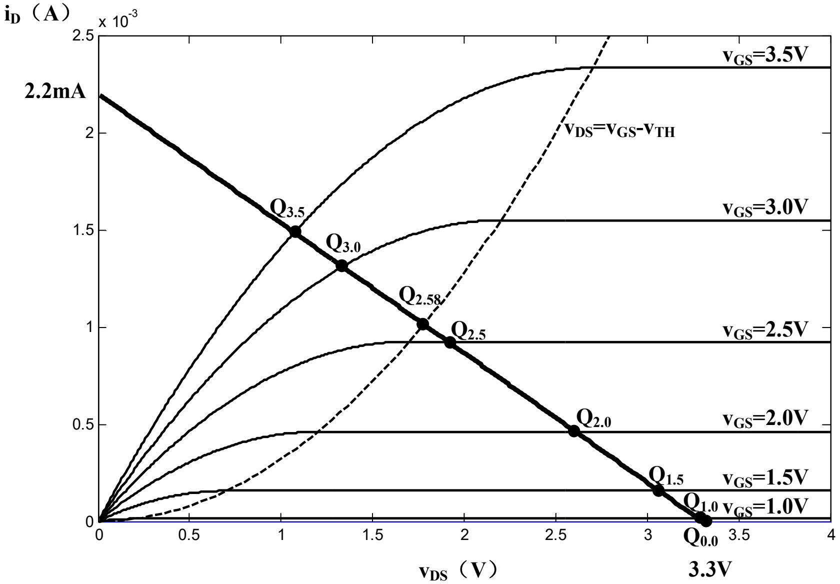


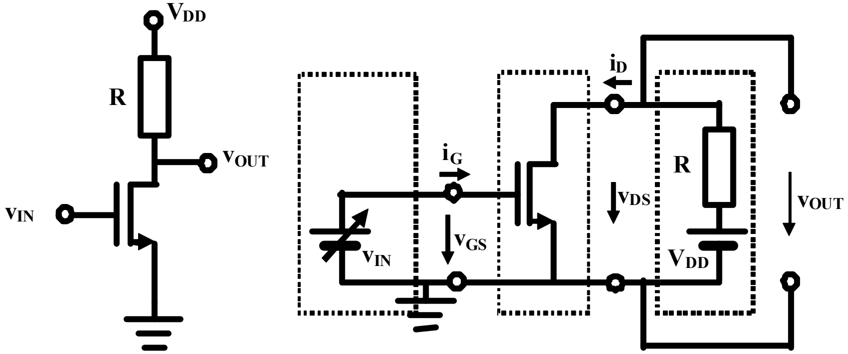
半波整流：半波信号的形成



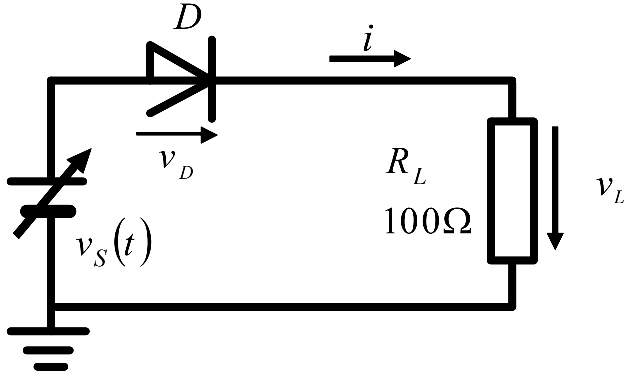
负阻区：不稳定区：不稳定工作点分析

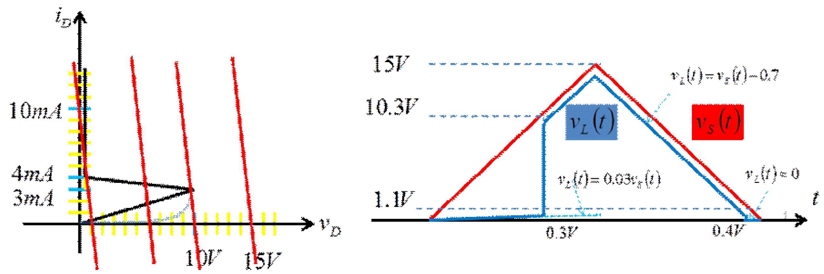
图解法的几个应用例（2）





NMOS反相器：反相特性的形成

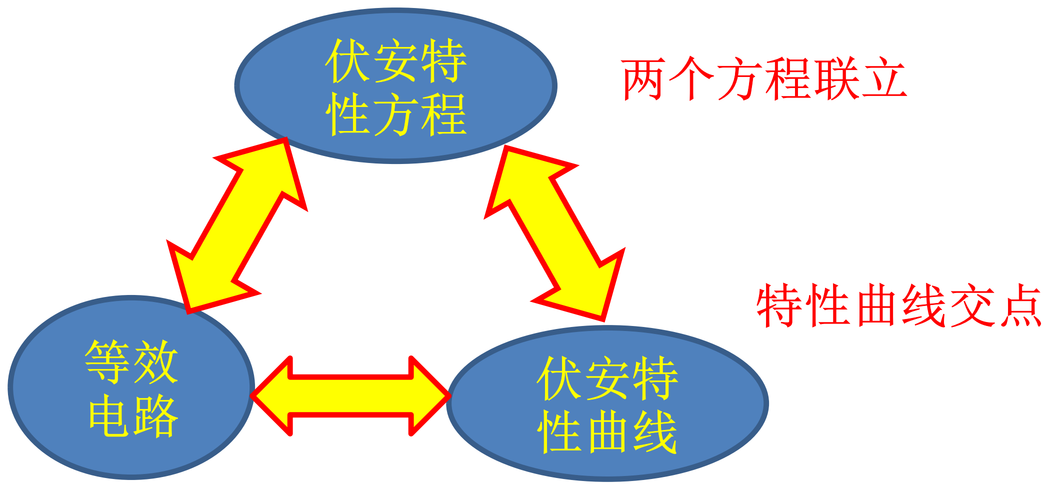




S型负阻的开关应用

图解法

- 可以给出直观的结论
  - 对于非线性电路工作原理理解至关重要
  - 要求掌握：电路分析技术层面上的重点要求

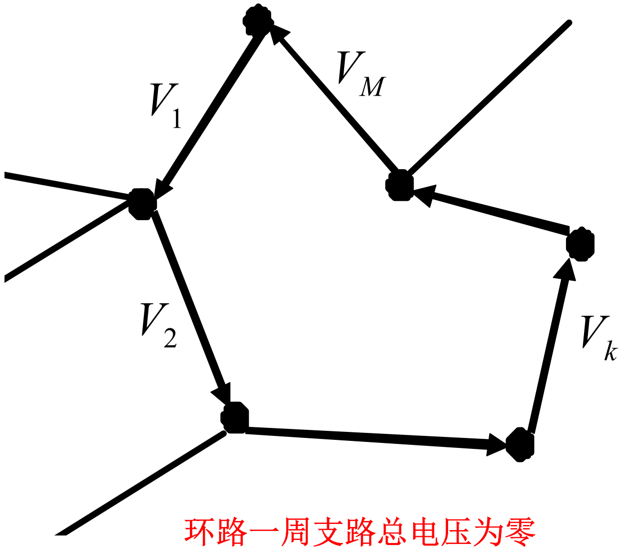


三者之间的转换是电路原理的基本要求

11、基尔霍夫定律

- 元件约束条件描述的是网络端口电压、电流关系，由网络内部结构决定的电特性方程
  - 构成材料的结构，组件连接关系共同决定对外的端口约束
    - 欧姆定律
- 基尔霍夫定律描述的是网络端口连接关系，和网络内部结构无关，只和连接关系（拓扑结构）有关
  - 定义：每个端口为一条支路，闭环串接支路构成回路，并接支路的连接点为结点

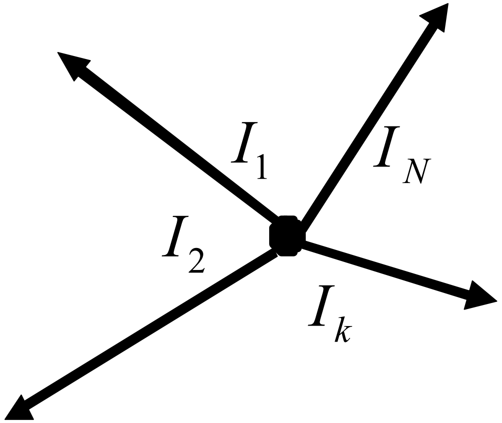
Kirchhoff's Law



环路一周支路总电压为零

$$\sum_{k=1}^{M} V_k = 0$$

KVL: Kirchhoff's Voltage Law



流出结点总电流为零

$$\sum_{k=1}^{N} I_k = 0$$

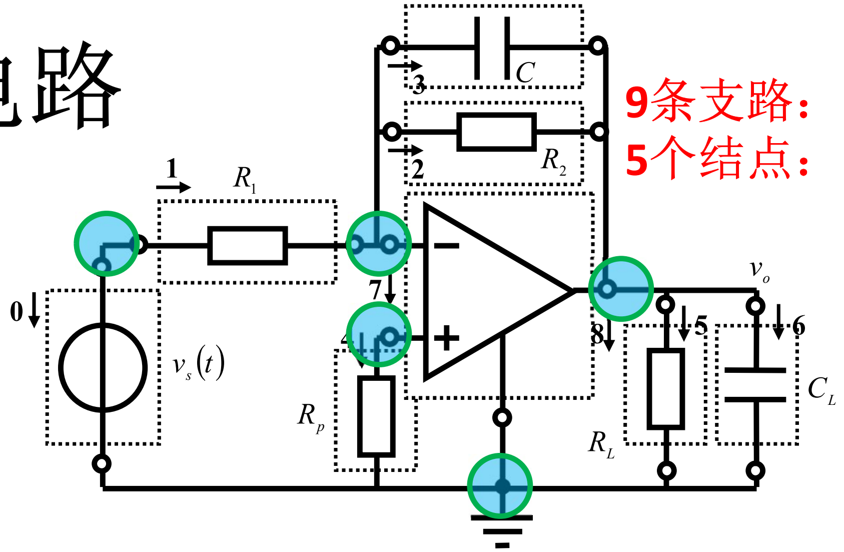
KCL: Kirchhoff's Current Law

12、电路方程列写基本方法

- 基尔霍夫定律描述的是元件、网络端口（支路）之间的相互连接关系
  - **KVL，KCL**
- 元件约束条件、网络端口方程描述的是元件、网络自身的电特性
  - **OL**：电阻元件约束条件就是欧姆定律
- **KVL+KCL+OL**方程可完备描述整个电路网络的特性
  - 求解方程组，根据对方程解的解析确认电路具有什么功能
- 支路电压电流法（**2b**法）：**KVL+KCL+OL**
  - 某电路网络，有**b**条支路，**n**个结点
  - 以**b**条支路的支路电压和支路电流为待解未知量，共**2b**个待求量
  - 列**2b**个方程如下，可求解获得**2b**个待求量
    - **b**条支路，每个支路有一个元件约束条件（广义欧姆定律）
    - **n-1**个独立的**KCL**方程
    - **b-n+1**个独立的**KVL**方程

完备的电路方程组

2b个未知量
2b个方程



9条支路：b=9
5个结点：n=5

$$\boxed{v_1 + v_7 + v_4 - v_0 = 0}$$

$$\boxed{v_3 - v_2 = 0}$$

$$\boxed{v_2 + v_8 - v_4 - v_7 = 0}$$

$$\boxed{-v_8 + v_5 = 0}$$

$$\boxed{-v_5 + v_6 = 0}$$

b-n+1=5个独立KVL方程

$$\boxed{-i_1 - i_0 = 0}$$

$$\boxed{i_1 - i_2 - i_3 - i_7 = 0}$$

$$\boxed{i_7 - i_4 = 0}$$

$$\boxed{i_2 + i_3 - i_5 - i_6 - i_8 = 0}$$

n-1=4个独立KCL方程

$$v_0 = v_s(t)$$

$$v_1 - R_1 i_1 = 0$$

$$v_2 - R_2 i_2 = 0$$

$$i_3 - C\frac{dv_3}{dt} = 0$$

$$v_4 - R_p i_4 = 0$$

$$v_5 - R_L i_5 = 0$$

$$i_6 - C_L\frac{dv_6}{dt} = 0$$

$$v_7 - R_{in} i_7 = 0$$

$$v_8 - R_{out} i_8 + A_{v0} v_7 = 0$$

b=9个元件约束方程

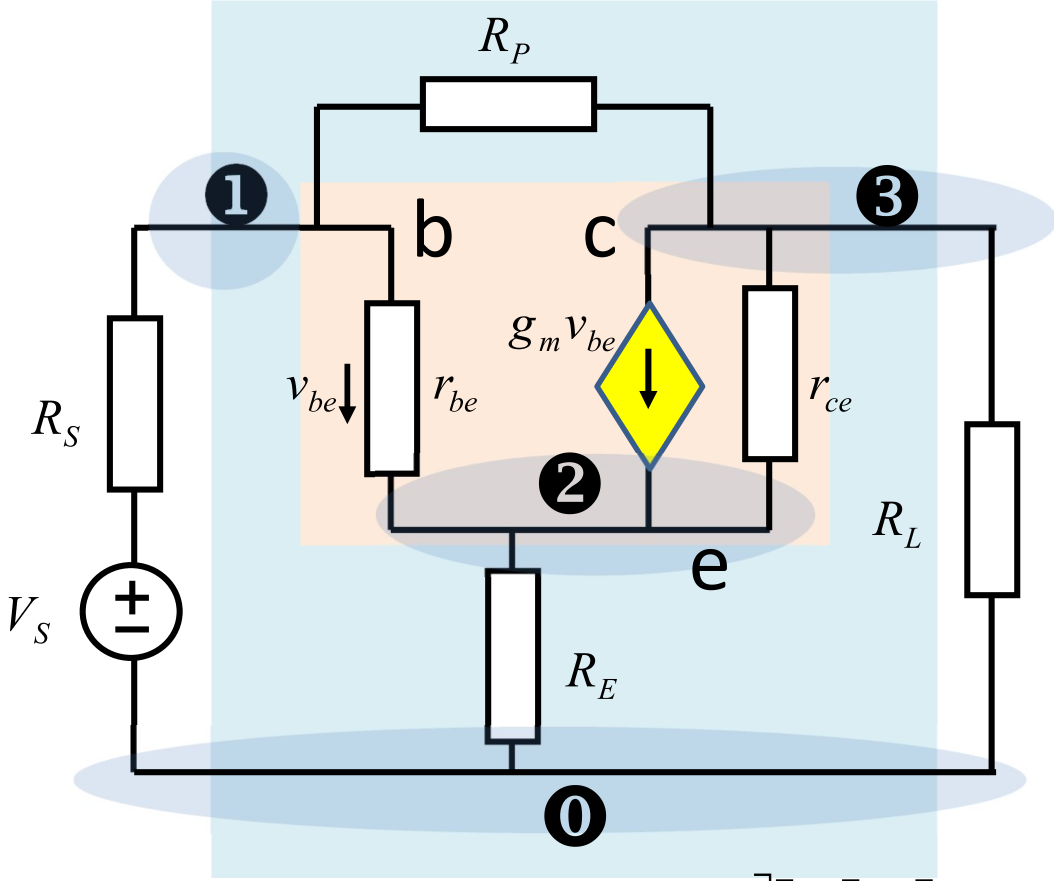
13、降低电路规模的方程列写方法

- 支路电压电流法
  - **2b**法是基本方法

核心内容
必须掌握

- 降低未知量个数
  - 支路电流法
    - **b**个支路电流作为未知量
  - 回路电流法
    - **b-n+1**个回路电流作为未知量
  - 结点电压法
    - **n-1**个结点电压作为未知量

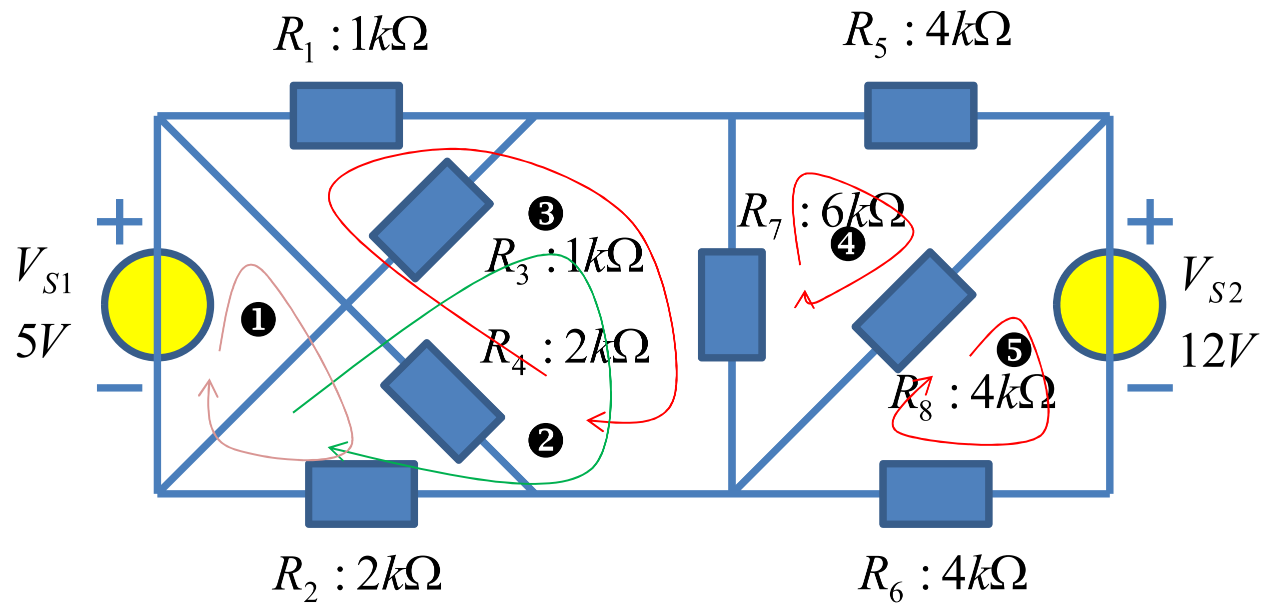
结点电压法例



$$\begin{bmatrix} G_S+g_{be}+G_p & -g_{be} & -G_p \\ -g_{be} & g_{be}+g_{ce}+G_E & -g_{ce} \\ -G_p & -g_{ce} & g_{ce}+G_p+G_L \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_b \\ v_e \\ v_c \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} V_S G_S \\ g_m v_{be} \\ -g_m v_{be} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} V_S G_S \\ g_m\left(v_b-v_e\right) \\ g_m\left(v_e-v_b\right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} G_S+g_{be}+G_p & -g_{be} & -G_p \\ -g_{be}-g_m & g_{be}+g_{ce}+G_E+g_m & -g_{ce} \\ -G_p+g_m & -g_{ce}-g_m & g_{ce}+G_p+G_L \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_b \\ v_e \\ v_c \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} V_S G_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

回路电流法例

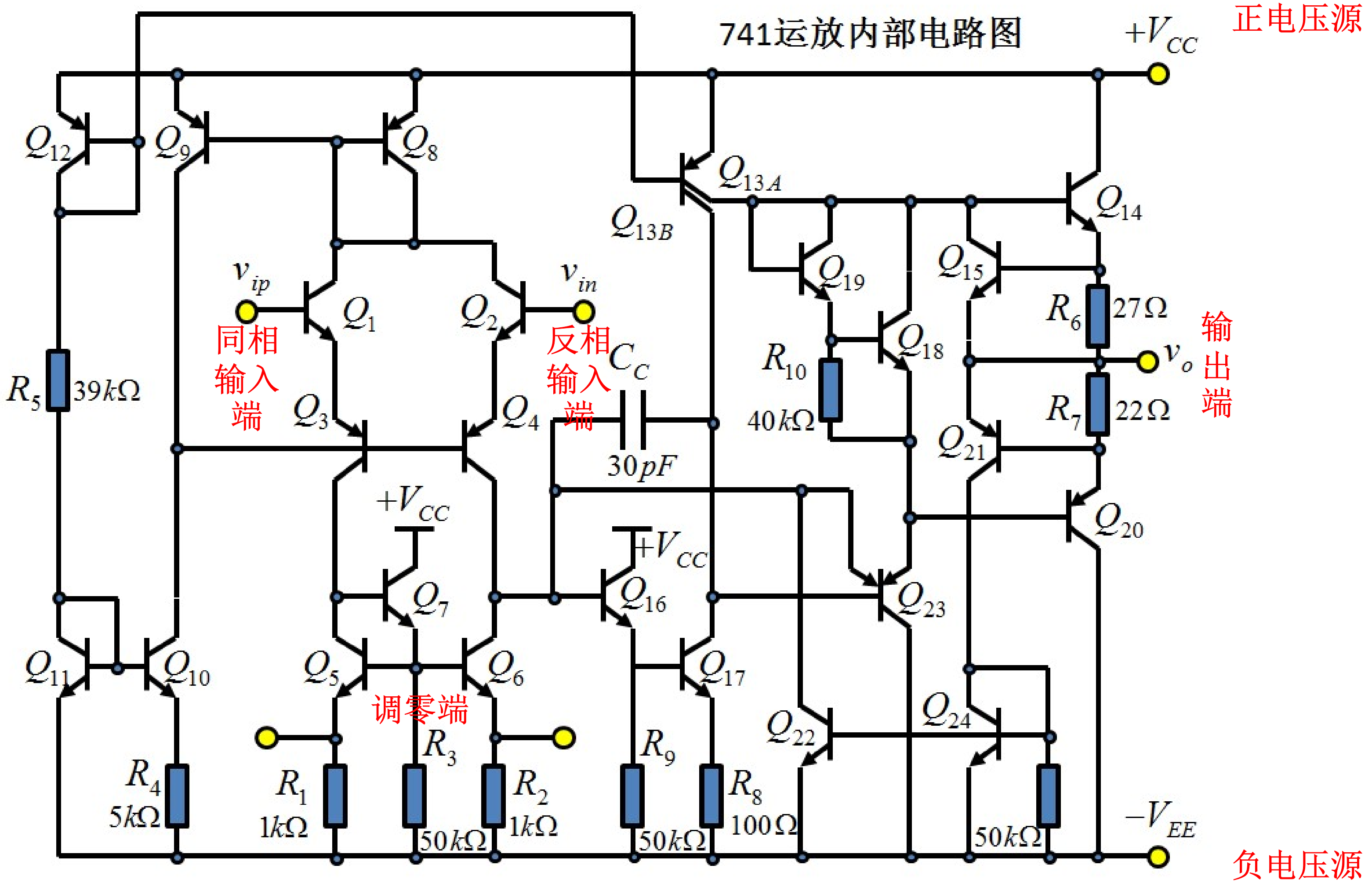


$$\begin{bmatrix} R_4+R_2 & R_2 & -R_4 & 0 & 0 \\ R_2 & R_3+R_7+R_2 & R_7 & -R_7 & 0 \\ -R_4 & R_7 & R_4+R_1+R_7 & -R_7 & 0 \\ 0 & -R_7 & -R_7 & R_7+R_5+R_8 & -R_8 \\ 0 & 0 & 0 & -R_8 & R_8+R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ i_{l3} \\ i_{l4} \\ i_{l5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +V_{S1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -V_{S2} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ i_{l3} \\ i_{l4} \\ i_{l5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +3.7500 \\ -2.8333 \\ +2.1667 \\ -0.8333 \\ -1.9167 \end{bmatrix} mA$$

14、等效电路法

- 高层根据低层网络端口特性进行端口抽象，将低层网络的电特性用端口伏安特性表述，而不再关注低层网络内部结构、内部工作机制，这就是等效电路法
  - 通过端口施加测试电压或测试电流，研究端口在测试电压、测试电流激励下产生的端口电流或端口电压，即可确知该网络电特性
    - 狭义等效电路：用基本元件的组合描述网络电特性
      - 等效电路中的基本元件符号：电阻、电容、电感、恒压源、恒流源、受控源、开关、传输线、短接线
    - 广义等效电路：用端口描述方程（元件约束条件）、特性曲线、测试表格、元件组合说明网络电特性

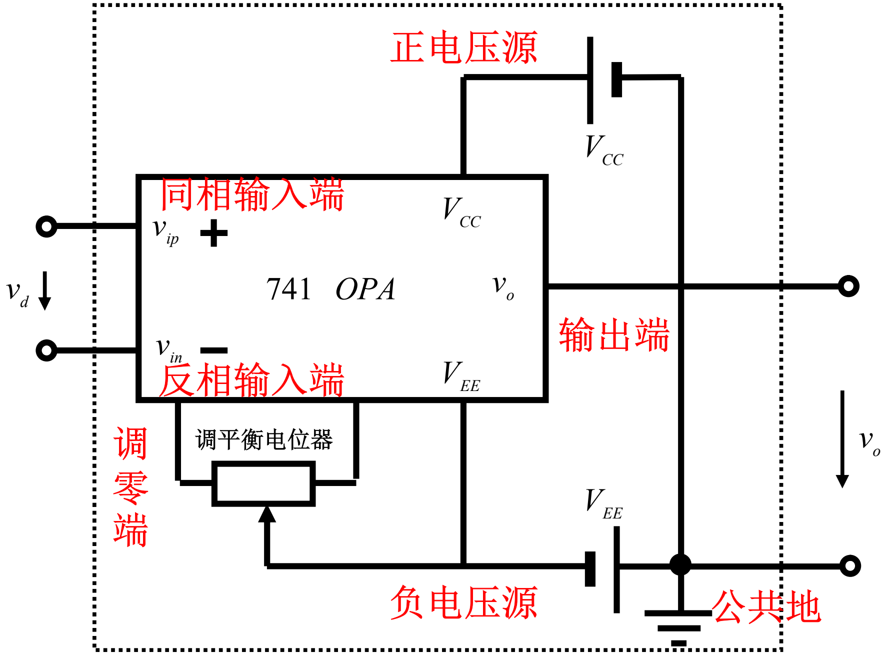
741运放内部电路



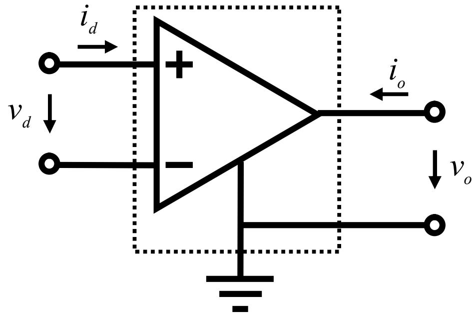
对外引出**7**个端点

运放等效电路

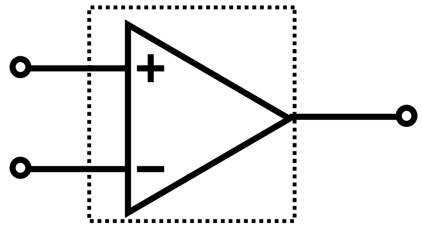
高层次应用：应用741实现其他功能电路时，无需关注741内部电路



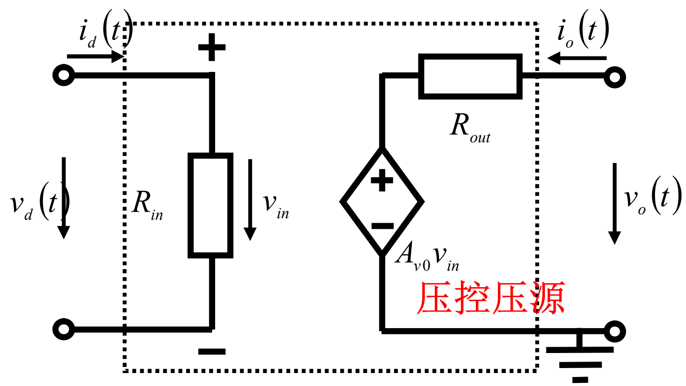
（a）实际运放外部连接关系



（b）运放符号：（带地）

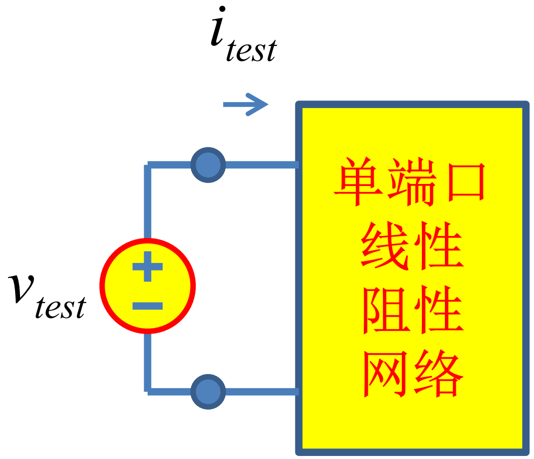


（c）运放符号：（默认带地）



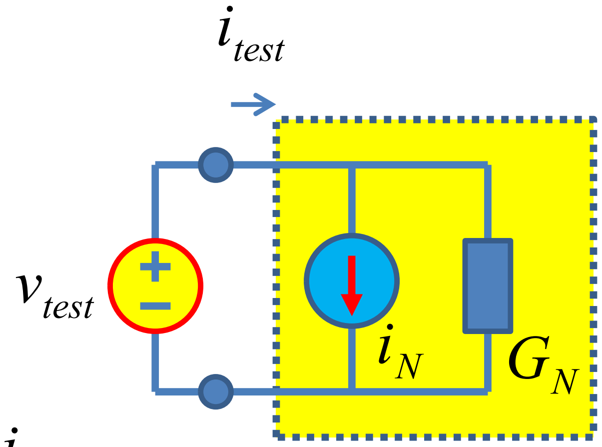
（d）运放二端口等效电路

15、加压/加流测试



加压求流

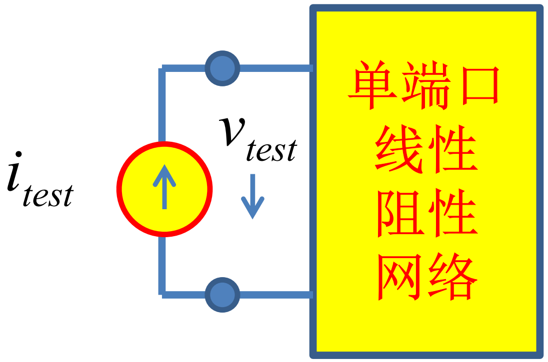
$$i_{test} = \alpha \cdot v_{test} + \beta$$



$$i_{test} = G_N \cdot v_{test} + i_N$$

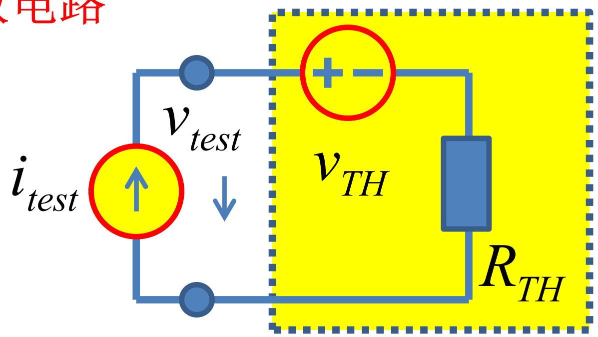
$$i_N = \beta \quad G_N = \alpha$$

加压测试获得压控形式的等效电路
加流测试获得流控形式的等效电路



加流求压

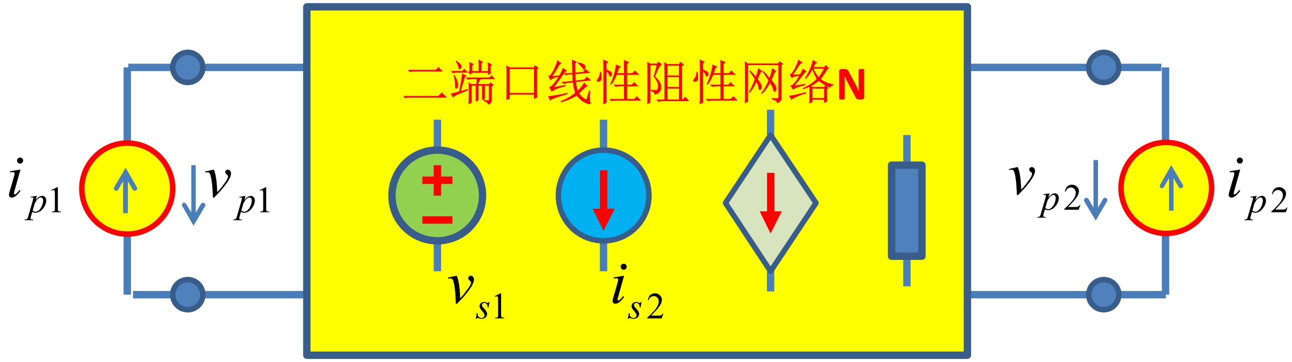
$$v_{test} = \alpha \cdot i_{test} + \beta$$



$$v_{test} = R_{TH} \cdot i_{test} + v_{TH}$$

$$v_{TH} = \beta \quad R_{TH} = \alpha$$

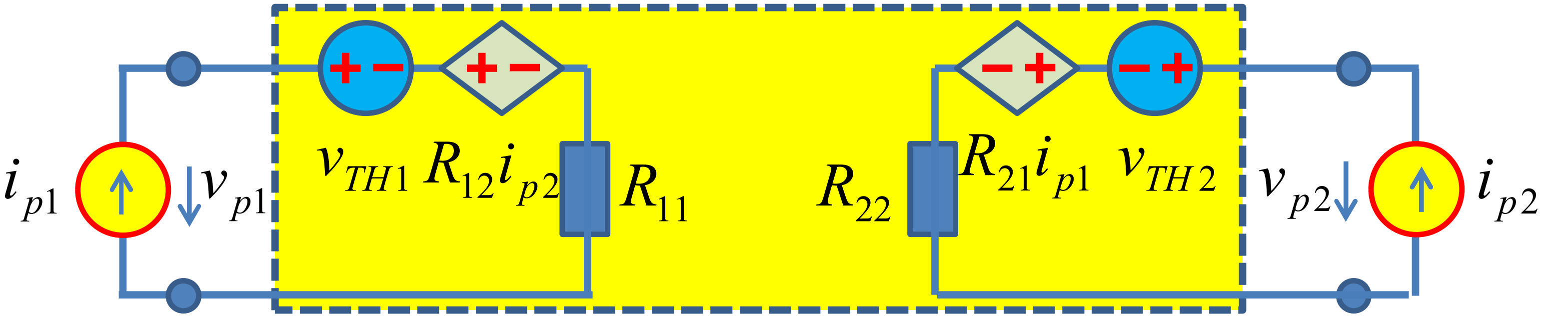
两个端口同时加流测试



$$v_{p1}=\alpha_{11}i_{p1}+\alpha_{12}i_{p2}+\lambda_{11}v_{s1}+\lambda_{12}i_{s2}+\ldots=R_{11}i_{p1}+R_{12}i_{p2}+v_{TH1}$$

叠加定理

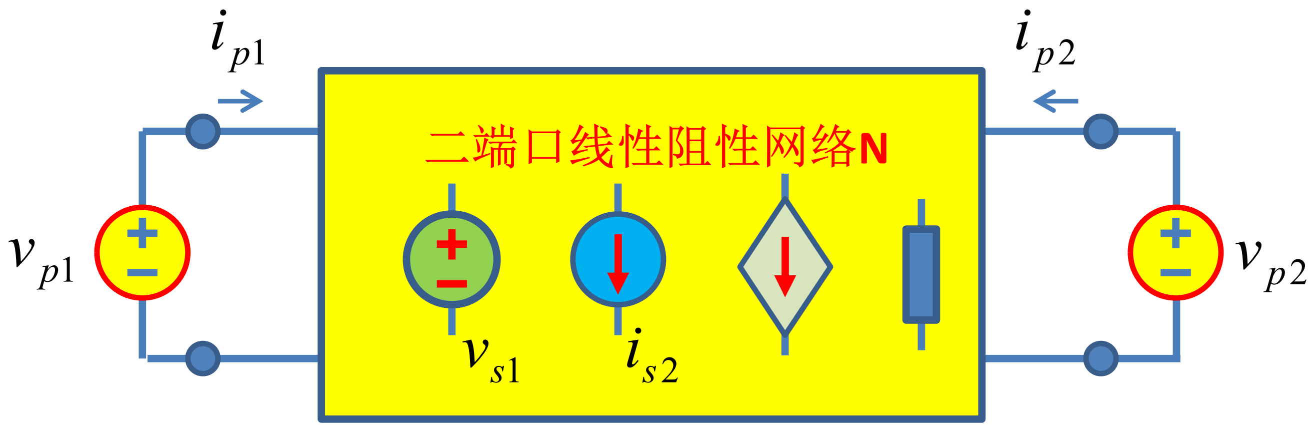
$$v_{p2}=\alpha_{21}i_{p1}+\alpha_{22}i_{p2}+\lambda_{21}v_{s1}+\lambda_{22}i_{s2}+\ldots=R_{21}i_{p1}+R_{22}i_{p2}+v_{TH2}$$



$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} v_{TH1} \\ v_{TH2} \end{bmatrix}$$

阻抗参量：**impedance parameters**

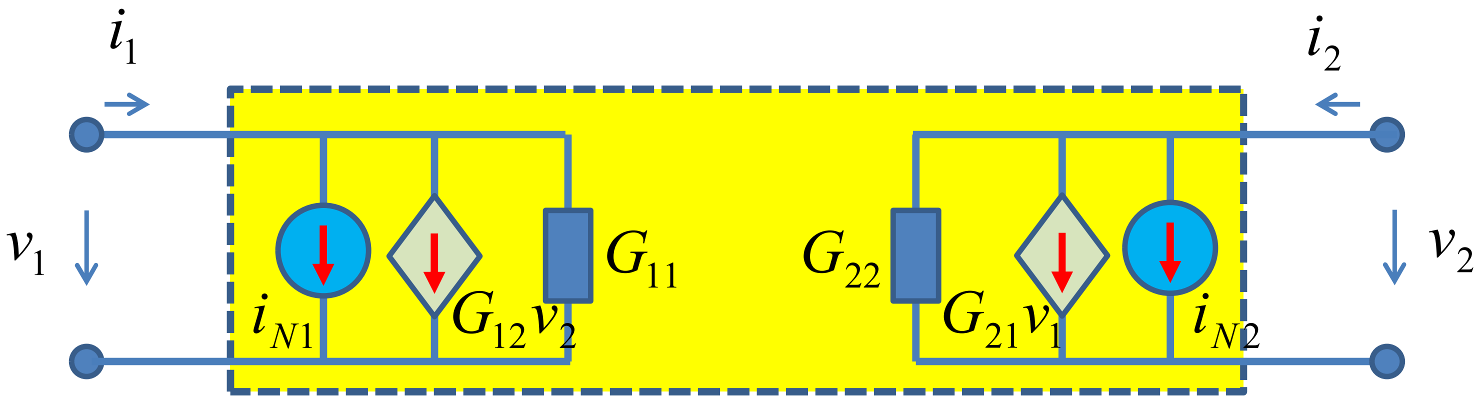
两个端口同时加压测试



$$i_{p1}=\alpha_{11}v_{p1}+\alpha_{12}v_{p2}+\lambda_{11}v_{s1}+\lambda_{12}i_{s2}+\ldots=G_{11}v_{p1}+G_{12}v_{p2}+i_{N1}$$

叠加定理

$$i_{p2}=\alpha_{21}v_{p1}+\alpha_{22}v_{p2}+\lambda_{21}v_{s1}+\lambda_{22}i_{s2}+\ldots=G_{21}v_{p1}+G_{22}v_{p2}+i_{N2}$$

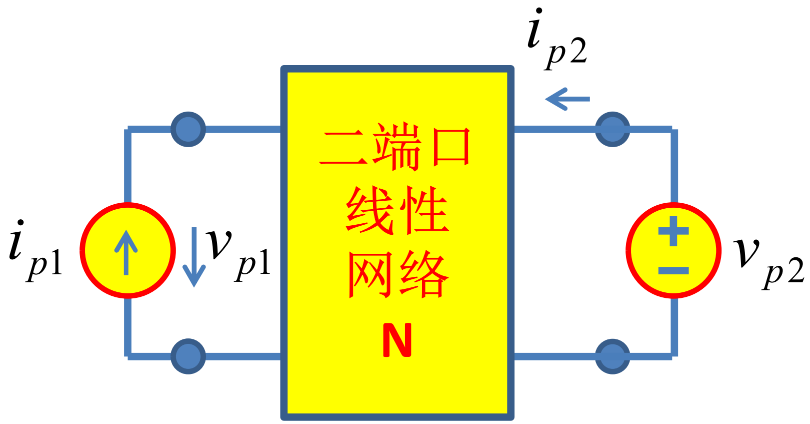


$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} i_{N1} \\ i_{N2} \end{bmatrix}$$

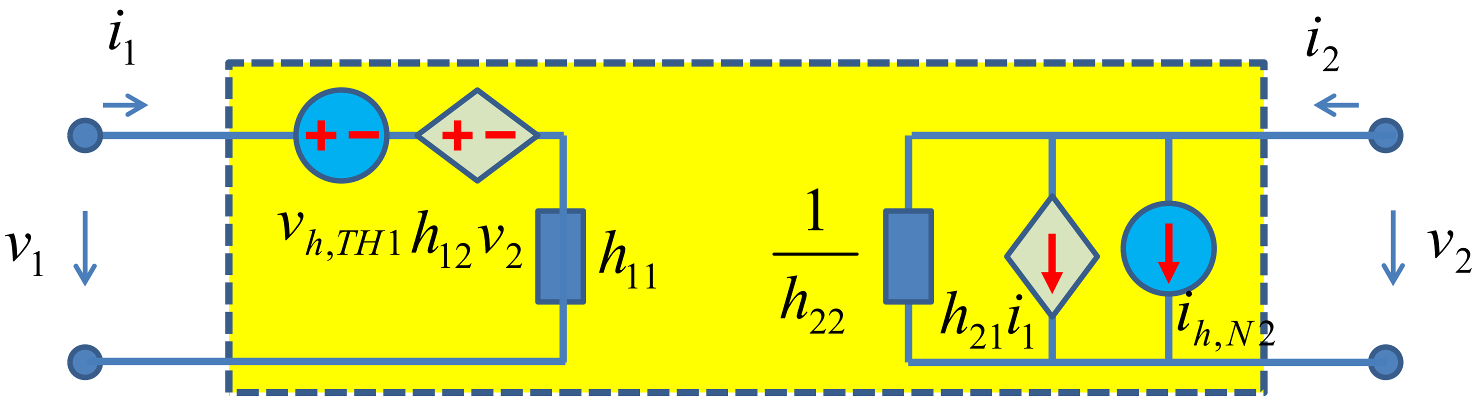
导纳参量

admittance parameters

二端口线性网络的戴维南-诺顿等效

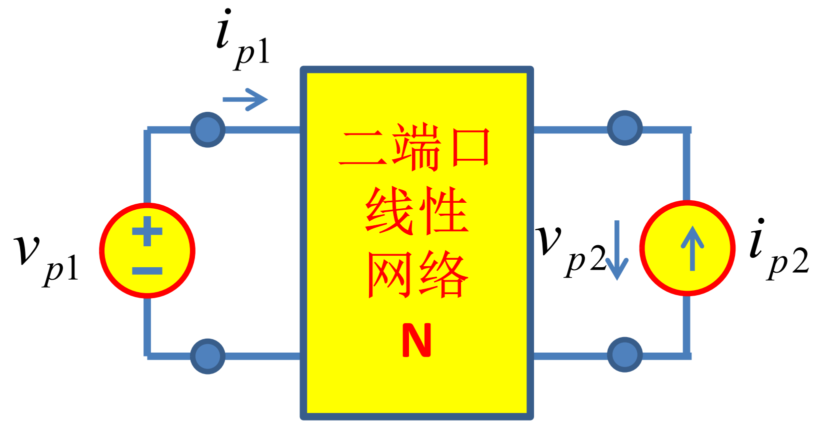


1端口加流、2端口加压测量：混合参量： hybrid parameters

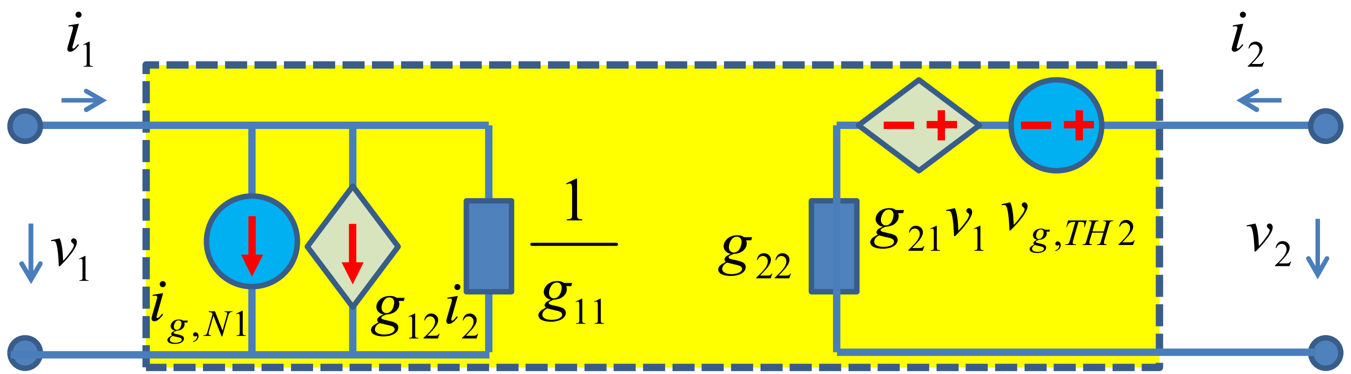


$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{h,TH1} \\ i_{h,N2} \end{bmatrix}$$

二端口线性网络的诺顿-戴维南等效



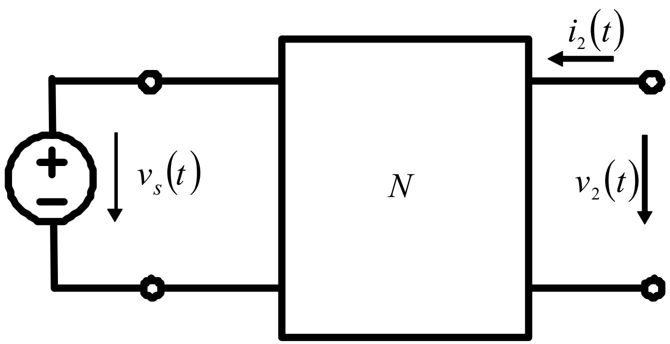
1端口加压、2端口加流测量：逆混参量：inverse hybrid parameters

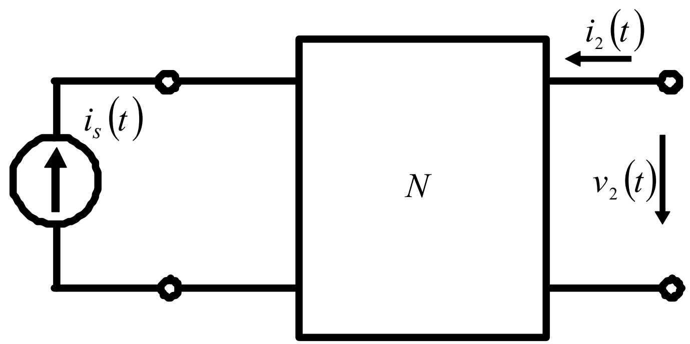


$$\begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{g,N1} \\ v_{g,TH2} \end{bmatrix}$$

二端口线性网络参量矩阵每个元素的物理意义必须能够说清楚
四个网络参量的等效电路必须能够画出来

分别加压加流测试传输参量



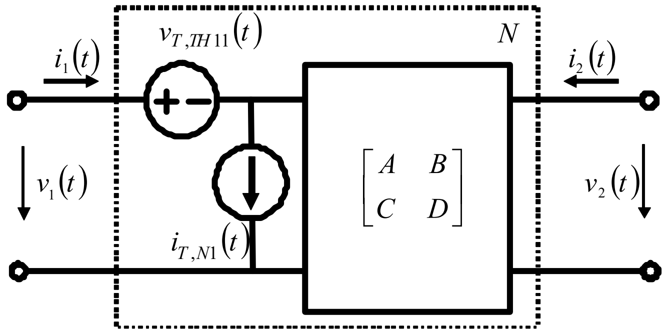


先假设内部独立源都置零：内部独立电压源短路， 内部独立电流源开路

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{g_{21}} & \dfrac{1}{-y_{21}} \\ \dfrac{1}{z_{21}} & \dfrac{1}{-h_{21}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{A_{v0}} & \dfrac{1}{G_{m0}} \\ \dfrac{1}{R_{m0}} & \dfrac{1}{A_{i0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}$$

再把内部独立源影响折合到输入端口

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{T,TH1} \\ i_{T,N1} \end{bmatrix}$$

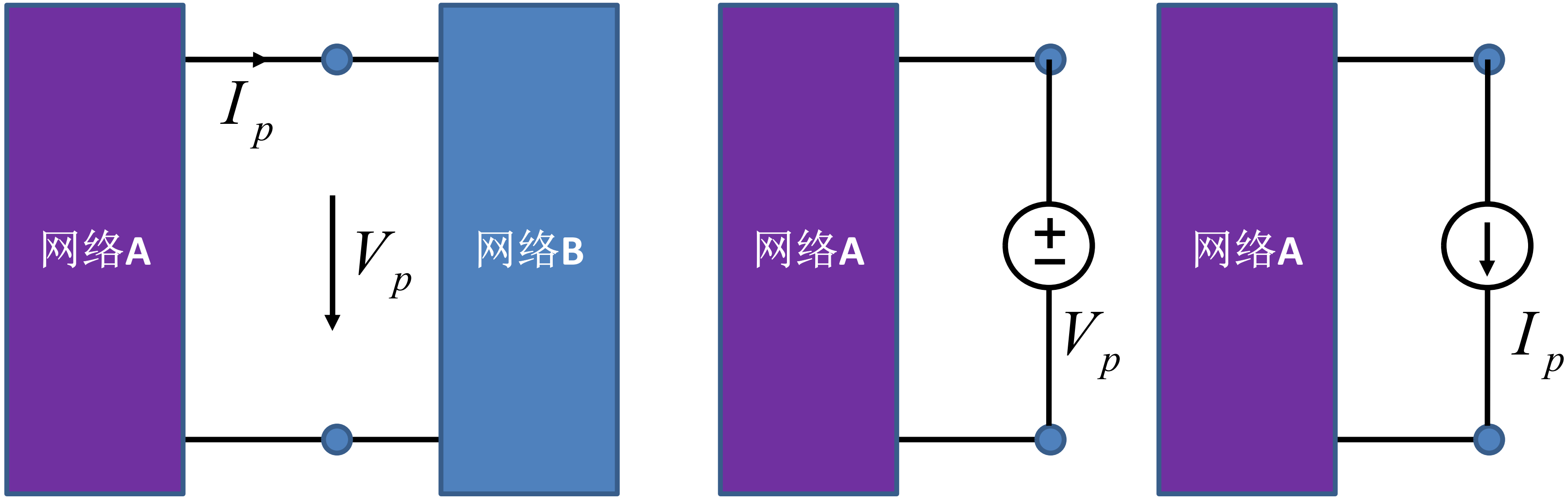


16、电路基本定理

- 替代定理
- 叠加定理
- 戴维南-诺顿定理
- 特勒根定理
- 互易定理

替代定理

- 当我们确认某端口电压或端口电流后，即可用恒压源或恒流源替代
  - 方程求解的代入方法



叠加定理

- 叠加定律仅适用于线性电路
  – 在一个电路中，可能有多个独立源同时激励

- 网络**N**是一个线性时不变电阻电路，它内部包含**n**个独立恒压源$\mathbf{v_{s1},\ldots v_{sn}}$和**m**个独立恒流源$\mathbf{i_{s1},\ldots i_{sm}}$，那么该电路中的任意一个支路电压或支路电流都可以表述为如下的线性叠加形式，

$$P_1 v_{s1}(t)+P_2 v_{s2}(t)+\ldots+P_n v_{sn}(t)+Q_1 i_{s1}(t)+Q_2 i_{s2}(t)+\ldots+Q_m i_{sm}(t)$$

  – 其中系数 $\mathbf{P_i(i=1,2,\ldots,n)}$和$\mathbf{Q_j(j=1,2,\ldots,m)}$仅由网络**N**决定，它们和独立源无关

叠加定理的另外一种表述

- 叠加定理
  - 线性电路中，所有独立源同时激励时所产生的总响应，等于各独立源单独激励时所产生的分响应的代数和
    - 这是由线性系统的均匀性和叠加性所决定的
    - 单独激励：其他源不起作用
      - 独立电压源不起作用：短路处理
      - 独立电流源不起作用：开路处理

$$r = f\left(v_{s1}, i_{s2}, v_{s3}, ..\right)$$

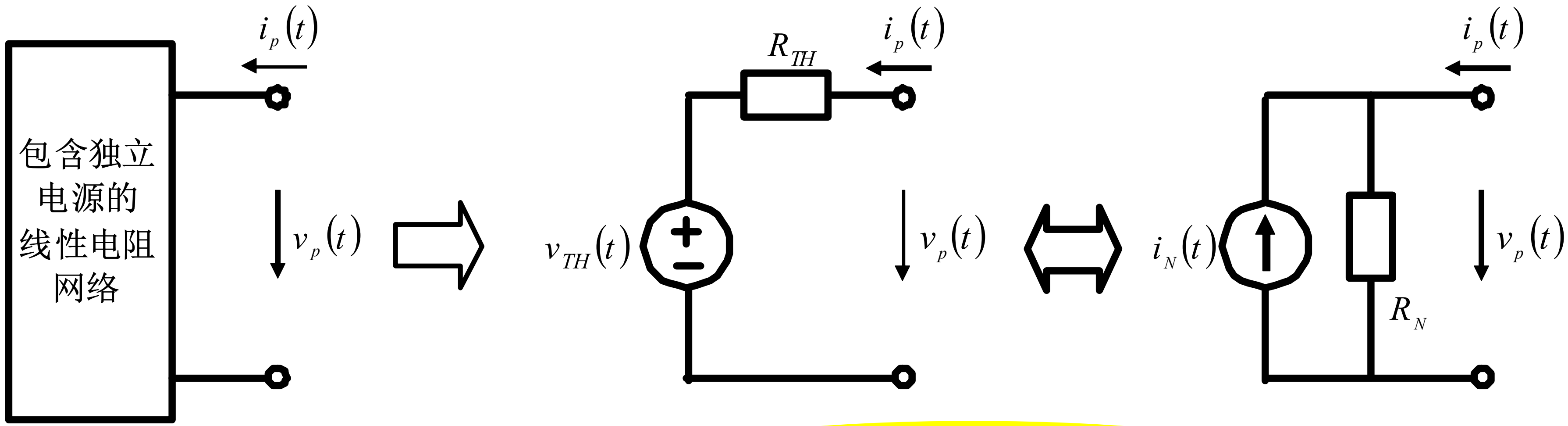
叠加性 $$= f\left(v_{s1}, 0, 0, ...\right) + f\left(0, i_{s2}, 0, ...\right) + f\left(0, 0, v_{s3}, ..\right) + ...$$

$$= r_1 + r_2 + r_3 + ...$$

均匀性 $$= f\left(1, 0, 0, ...\right) v_{s1} + f\left(0, 1, 0, ...\right) i_{s2} + f\left(0, 0, 1, ..\right) v_{s3} + ...$$

$$= \lambda_1 v_{s1} + \lambda_2 i_{s2} + \lambda_3 v_{s3} + ...$$

戴维南-诺顿定理



$R_{TH} = R_N \qquad v_{TH} = R_N i_N$

- 戴维南定理**Thevenin’s Theorem**：一个包含独立电源的单端口线性电阻网络，其端口等效电路可表述为一个恒压源和一个电阻的串联，源电压为端口开路电压，串联电阻为电阻网络内所有独立电源为零时的端口等效电阻。
- 诺顿定理**Norton’s Theorem**：一个包含独立电源的单端口线性电阻网络，其端口等效电路可表述为一个恒流源和一个电阻的并联，源电流为端口短路电流，并联电阻为电阻网络内所有独立电源为零时的端口等效电阻。

独立源为零：独立电压源短路，独立电流源开路

戴维南-诺顿定理（推广）

- 只要是线性网络，无论端口数目，均可等效为如下形式
  - 独立电压源+受控电压源+内阻
    - 端口加流测试，串联形式，戴维南源形式
  - 独立电流源+受控电流源+内导
    - 端口加压测试，并联形式，诺顿源形式
  - 混合参量等效电路…

- 由线性网络的叠加定理可以推导获得
  - 多个端口同时加压加流，作为独立测试源

- 非线性网络表述复杂，也存在表述为戴维南源或诺顿源的可能性，其中内阻（端口的自作用）、受控源（端口的互作用）可能是非线性作用关系

17 对偶原理

对偶量duals及对偶关系式dual expression			
电压voltage	$v(t)$	$i(t)$	电流current
磁通magnetic flux	$v(t)=\frac{d\Phi(t)}{dt}$	$i(t)=\frac{dQ(t)}{dt}$	电荷electric charge
电阻resistance 欧姆定律	$v(t)=R\cdot i(t)$	$i(t)=G\cdot v(t)$	电导conductance 欧姆定律
线性电感 inductanc	$\Phi=Li$	$Q=Cv$	线性电容 capacitance
线性时不变电感	$v(t)=L\frac{di(t)}{dt}$	$i(t)=C\frac{dv(t)}{dt}$	线性时不变电容
短路short circuit	$v(t)=0$	$i(t)=0$	开路 open circuit
串联serial	$v=\sum_{k=1}^{n}v_k$ $R=\sum_{k=1}^{n}R_k$	$i=\sum_{k=1}^{n}i_k$ $G=\sum_{k=1}^{n}G_k$	并联parallel
分压 voltage divider	$v_{R2}=\frac{R_2}{R_1+R_2}v$	$i_{G2}=\frac{G_2}{G_1+G_2}i$	分流 current divider
结点node			网孔mesh/回路loop
KVL	$\sum_{k=1}^{n}v_k=0$	$\sum_{k=1}^{n}i_k=0$	KCL
结点电压法 Node voltage analysis	$\mathbf{Gv}_n=\mathbf{i}_{\Sigma s}$	$\mathbf{Ri}_l=\mathbf{v}_{\Sigma s}$	网孔/回路电流法 Mesh/Loop current analysis
戴维南定理 Thevenin's theorem	$v(t)=v_{TH}(t)+R_{TH}i(t)$	$i(t)=i_N(t)+G_Nv(t)$	诺顿定理 Norton's theorem
…			…

知其一则知其二

18、典型功能电路

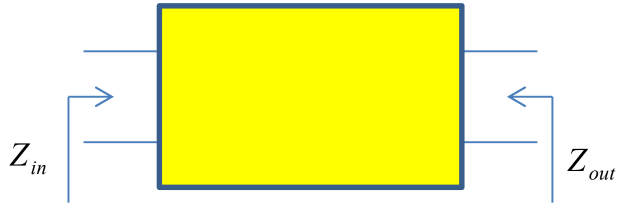
- 信息处理
  - 放大器　　信号电平调整
  - 振荡器　　周期信号产生
  - 滤波器　　信号选择
  - 调制解调器　　利于信号传输
  - 存储器　　信号存储
  - 数字处理器　　数字信号处理
    - 与或非门
  - **AD、DA**　　数模转换

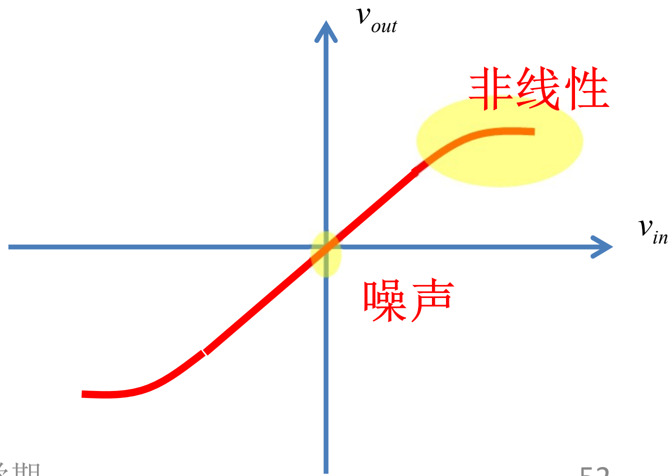
虽然不知如何实现，但要求知道其功能

- 电能处理
  - 整流器　　将交流电能转换为直流电能
  - 逆变器　　将直流电能转换为交流电能
  - 稳压器　　将不太稳定的直流转换为稳定直流

19、线性网络描述参量

- 衰减器、放大器、滤波器是典型的线性网络，描述线性网络的典型参量包括
  - 增益（衰减）
    - 传递函数
  - 阻抗
    - 输入阻抗，输出阻抗，特征阻抗
  - 噪声系数
    - 处理微弱信号必须考虑噪声
  - 线性度
    - 在多宽的范围内可能视为线性电路？
    - 处理大信号必须考虑非线性失真





二端口线性网络的本征增益

Intrinsic Gain网络自身的和负载无关的属性

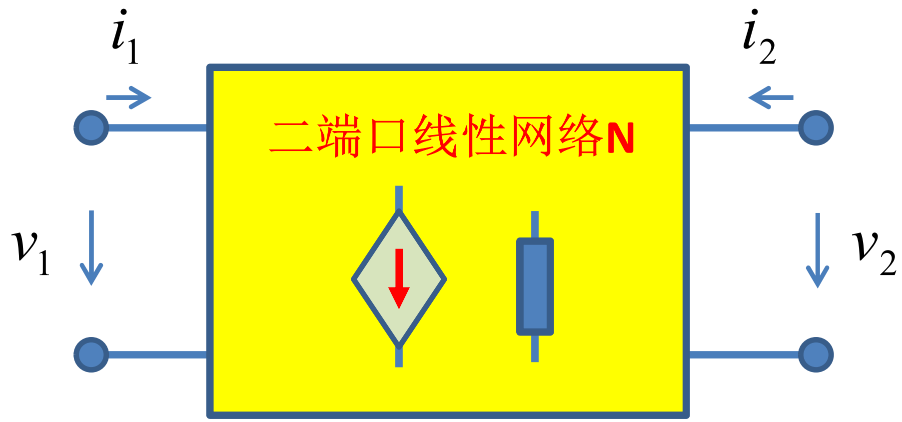
- 输入信号对输出端口开路电压、短路电流的线性传递系数

$$A_{v0}=\frac{v_2}{v_1}\bigg|_{i_2=0}=\frac{1}{A}=g_{21}$$

$$G_{m0}=\frac{-i_2}{v_1}\bigg|_{v_2=0}=\frac{1}{B}=-y_{21}$$

$$R_{m0}=\frac{v_2}{i_1}\bigg|_{i_2=0}=\frac{1}{C}=z_{21}$$

$$A_{i0}=\frac{-i_2}{i_1}\bigg|_{v_2=0}=\frac{1}{D}=-h_{21}$$



$$\mathbf{ABCD}=\begin{bmatrix}\frac{1}{A_{v0}} & \frac{1}{G_{m0}}\\ \frac{1}{R_{m0}} & \frac{1}{A_{i0}}\end{bmatrix}$$

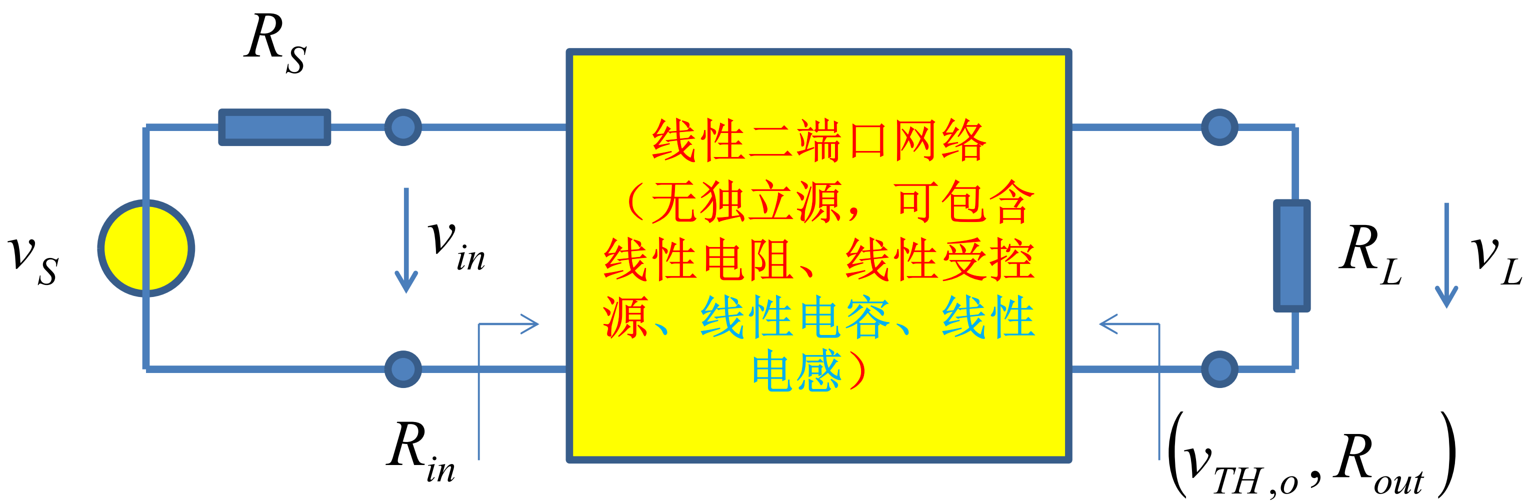
传输参量描述的就是1端口到2端口的本征增益

信源内阻、负载电阻 非短非开
电压传递函数

$$H = A_v = \frac{v_L}{v_S} = \frac{y_{21}G_S}{y_{21}y_{12} - (y_{11}+G_S)(y_{22}+G_L)}$$

线性二端口网络对信息的处理结果
二端口网络参量和信源、负载的相互作用后的综合效果

功率增益的三种定义



$$G_T = \frac{P_L}{P_{si,\max}}$$

转换功率增益**Transducer power gain**

通常定义：如滤波器，射频放大器、…

$$G_A = \frac{P_{so,\max}}{P_{si,\max}}$$

资用功率增益**Available power gain**

考察线性二端口网络噪声性能时采用

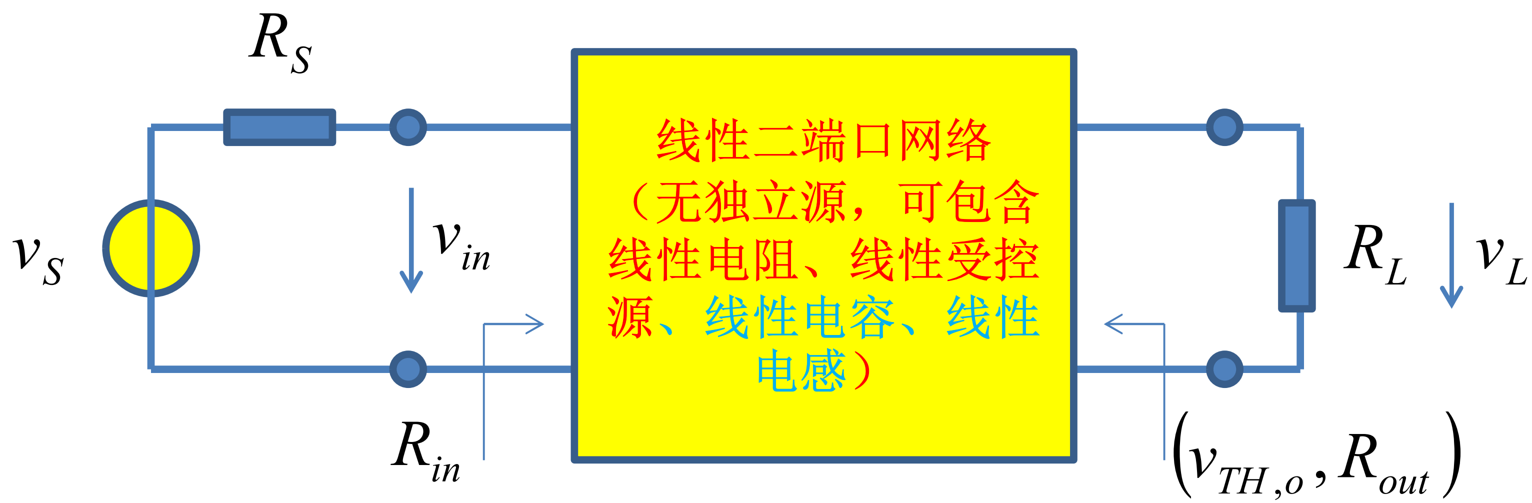
$$G_p = \frac{P_L}{P_{in}}$$

工作功率增益**Operating power gain**

低频线性电路常用，能量转换电路能量转换效率定义

$$P_L = \frac{V_{L,rms}^2}{R_L} \qquad P_{si,\max} = \frac{V_{S,rms}^2}{4R_S} \qquad P_{so,\max} = \frac{V_{TH,o,rms}^2}{4R_{out}} \qquad P_{in} = \frac{V_{in,rms}^2}{R_{in}}$$

最大功率增益



$$G_T = \frac{P_L}{P_{sim}}$$

$$G_A = \frac{P_{som}}{P_{sim}}$$

$$G_p = \frac{P_L}{P_{in}}$$

$$G_T \le G_A$$

$$G_T \le G_p$$

两个端口同时最大功率传输匹配时，三个功率增益等同，称之为线性二端口网络的最大功率增益

$$R_{in} = R_S \qquad R_{out} = R_L$$

$$G_T = G_A = G_p = G_{p,\max}$$

输入阻抗，输出阻抗

双向网络输入电阻、输出电阻是在一定负载、信源内阻条件下获得的

$$Z_{in} = z_{11} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{22} + R_L} \qquad Z_{out} = z_{22} - \frac{z_{21}z_{12}}{z_{11} + R_S}$$

z_{11}，**y_{11}**，**h_{11}**，**g_{11}**等是开路、短路负载情况下的输入电阻**/**电导

$$Z_{in} = z_{11} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{22} + R_L} \overset{R_L \to \infty}{=} z_{11} \qquad Z_{out} = z_{22} - \frac{z_{21}z_{12}}{z_{11} + R_S} \overset{R_S \to \infty}{=} z_{22}$$

单向网络输入电阻、输出电阻和负载、信源内阻无关

$$Z_{in} = z_{11} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{22} + R_L} \overset{z_{12}z_{21}=0}{=} z_{11} \qquad Z_{out} = z_{22} - \frac{z_{21}z_{12}}{z_{11} + R_S} \overset{z_{21}z_{12}=0}{=} z_{22}$$

特征阻抗

多端口网络的特征阻抗定义：Z_{01}，Z_{02}，…，Z_{0n}为n端口网络n个端口的特征阻抗，只需满足如下要求：当其他n-1个端口端接各自的特征阻抗时，从第i个端口看入的输入阻抗为Z_{0i}。

$$Z_{in} = Z_{01} \qquad Z_{out} = Z_{02}$$

线性二端口网络的特征阻抗

$$Z_{01}=Z_{in}=z_{11}-\frac{z_{12}z_{21}}{z_{22}+Z_{02}} \qquad Z_{02}=Z_{out}=z_{22}-\frac{z_{21}z_{12}}{z_{11}+Z_{01}}$$

$$Z_{01}=\sqrt{z_{11}\frac{z_{11}z_{22}-z_{12}z_{21}}{z_{22}}}=\sqrt{\frac{z_{11}}{y_{11}}}=\sqrt{Z_{in,short}\cdot Z_{in,open}}=\sqrt{\frac{A}{D}\cdot\frac{B}{C}}$$

$$Z_{02}=\sqrt{z_{22}\frac{z_{11}z_{22}-z_{12}z_{21}}{z_{11}}}=\sqrt{\frac{z_{22}}{y_{22}}}=\sqrt{Z_{out,short}\cdot Z_{out,open}}=\sqrt{\frac{D}{A}\cdot\frac{B}{C}}$$

$$G_{p\max,\text{电阻电路}}=\frac{1}{\left|\sqrt{AD}+\sqrt{BC}\right|^{2}}$$

20、信号电平调整

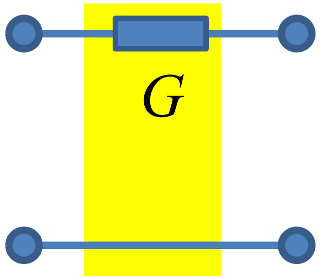
- 衰减器
  - 信号进入衰减器网络后，该网络吸收了部分信号能量，输出信号功率低于输入信号功率
  - 线性电阻构成的分压、分流、**T**型、π型网络是常见的衰减器网络

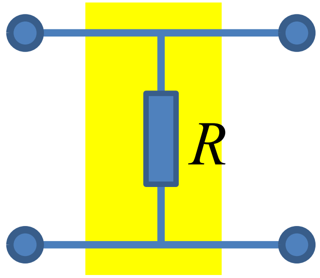
衰减系数 $$L = 10\log\frac{P_{S,\max}}{P_L} > 0dB$$

- 放大器
  - 交流信号进入放大器网络后，该网络将直流偏置电压源的电能转换为交流信号能量输出，输出信号功率高于输入信号功率
  - 具有负阻区的非线性电阻、或可控的非线性电阻，具有将直流电能转换为交流电能的能力
    - 小信号分析晶体管+直流偏置电压源可等效为线性负阻，线性受控源，均为有源元件

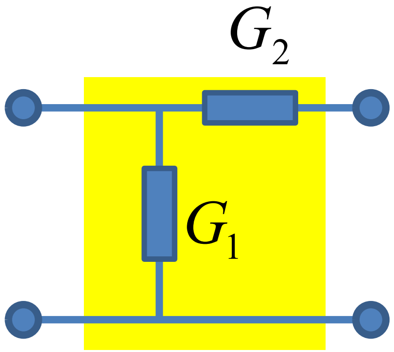
功率增益 $$G_T = 10\log\frac{P_L}{P_{S,\max}} > 0dB$$

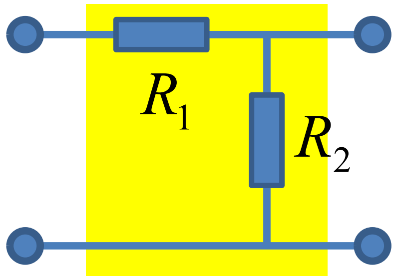
典型电阻衰减网络



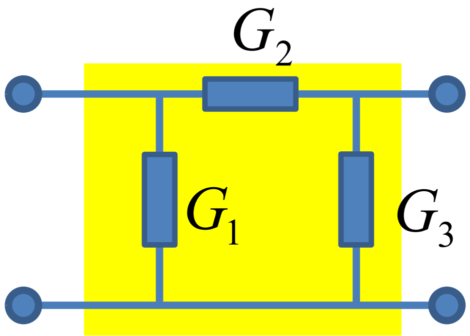


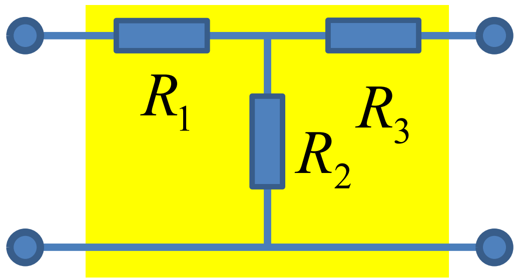
必有衰减
不考虑匹配问题





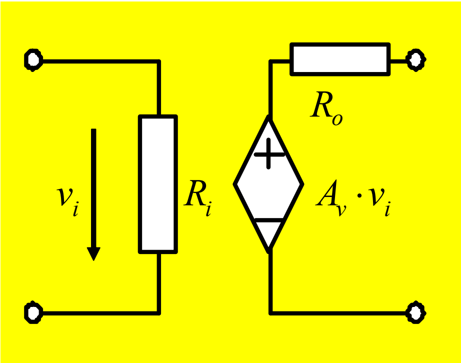
匹配
衰减系数
两者控其一

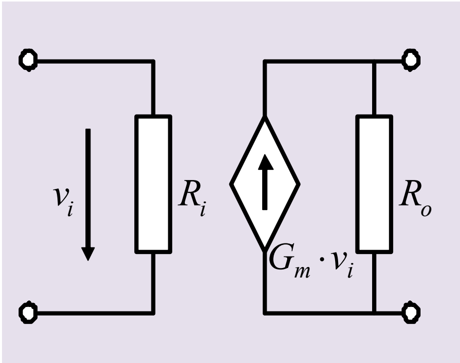


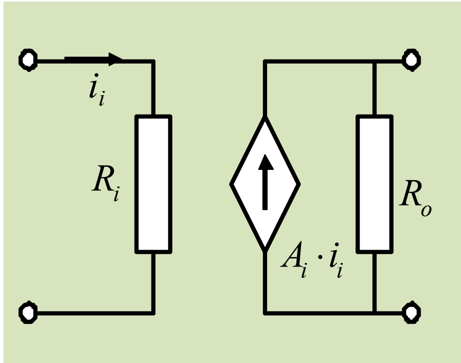


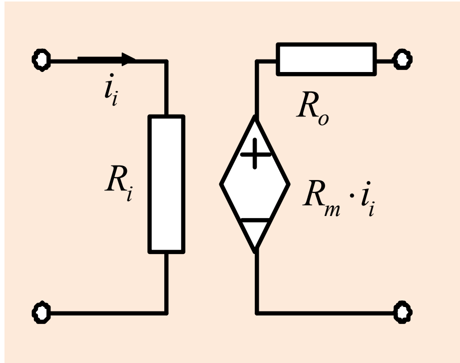
匹配
衰减系数
两者皆可控

四种基本线性放大器是单向网络









Voltage Amplifier 电压放大器 | **Transconductance Amplifier** 跨导放大器 | **Current Amplifier** 电流放大器 | **Transimpedance Amplifier** 跨阻放大器

- 描述线性放大器的基本参数
  - 增益：端口传递关系
    - 电压增益$\mathbf{A_v}$，跨导增益$\mathbf{G_m}$，电流增益$\mathbf{A_i}$，跨阻增益$\mathbf{R_m}$
  - 阻抗：端口阻抗特性
    - 输入电阻$\mathbf{R_i}$，输出电阻$\mathbf{R_o}$

单向网络总传递函数为级联分传递函数之积

采用何种网络参量，还和网络连接关系有关
串串连接**z**相加
并并连接**y**相加
串并连接**h**相加
并串连接**g**相加
级联连接**ABCD**相乘

数学分析时，选用**zyhg**任意参量都可以！
原理分析时，多选用最适参量模型
实际增益接近本征增益时，则为最适参量

$R_S << R_{in}, R_L >> R_{out}$ 电压放大器模型最适 $v_L = \frac{R_{in}}{R_{in}+R_S}\frac{R_L}{R_{out}+R_L}A_{v0}v_S \approx A_{v0}v_S$

$R_S >> R_{in}, R_L >> R_{out}$ 跨阻放大器模型最适 $v_L = \frac{G_{in}}{G_{in}+G_S}\frac{R_L}{R_{out}+R_L}R_{m0}i_S \approx R_{m0}i_S$

$R_S << R_{in}, R_L << R_{out}$ 跨导放大器模型最适 $i_L = \frac{R_{in}}{R_{in}+R_S}\frac{G_L}{G_{out}+G_L}G_{m0}v_S \approx G_{m0}v_S$

$R_S >> R_{in}, R_L << R_{out}$ 电流放大器模型最适 $i_L = \frac{G_{in}}{G_{in}+G_S}\frac{G_L}{G_{out}+G_L}A_{i0}i_S \approx A_{i0}i_S$

实际放大器：**zyhg**参量的**12**元素并不为**0**，是双向网络
包含输出端口对输入端口的反馈，上述级联分传递函数之积则不成立

双向网络的单向化近似条件

$$H_{\text{双向网络}} = \frac{v_L}{v_S} = \frac{y_{21}G_S}{y_{21}y_{12} - (y_{11}+G_S)(y_{22}+G_L)}$$

$$\overset{\text{近似单向化条件}}{\approx} \frac{y_{21}G_S}{-(y_{11}+G_S)(y_{22}+G_L)} = H_1H_2H_3H_4 = \text{分压系数}\cdot\text{跨导增益}\cdot\text{负载电阻}\cdot\text{分流系数}$$

单向化近似条件

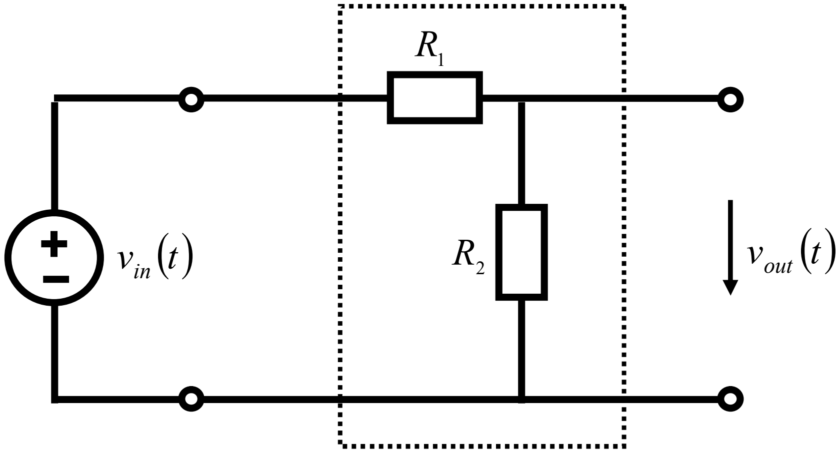
$$|y_{21}y_{12}| << |(y_{11}+G_S)(y_{22}+G_L)|$$

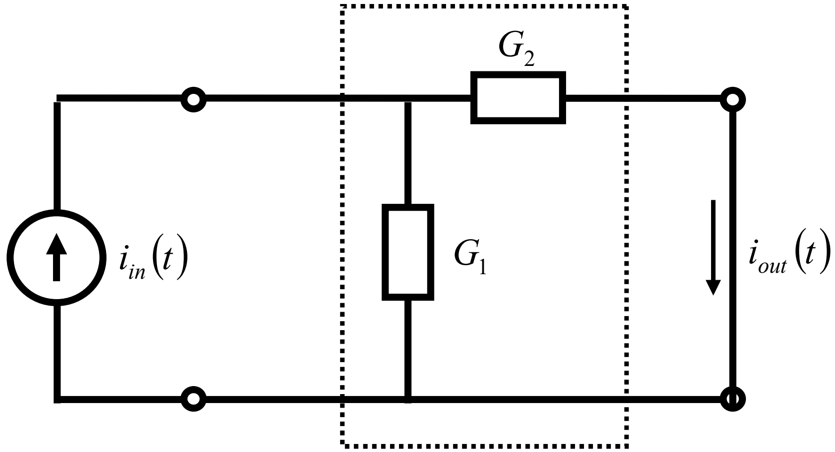
$$|z_{12}z_{21}| << |(z_{11}+R_S)(z_{22}+R_L)|$$

$$|h_{12}h_{21}| << |(h_{11}+R_S)(h_{22}+G_L)|$$

$$|g_{12}g_{21}| << |(g_{11}+G_S)(g_{22}+R_L)|$$

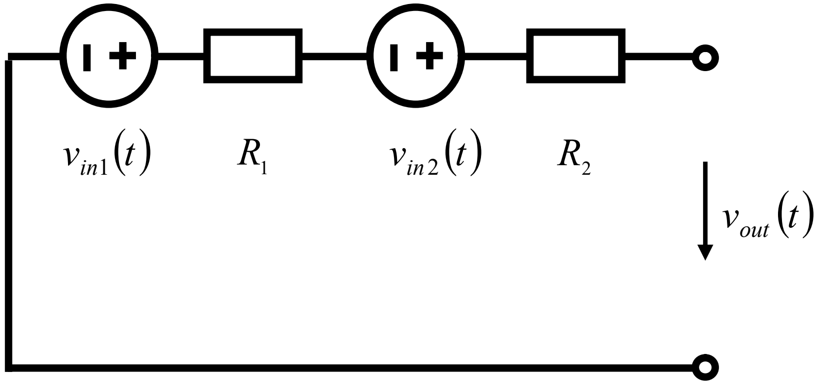
21、信号分解与合成

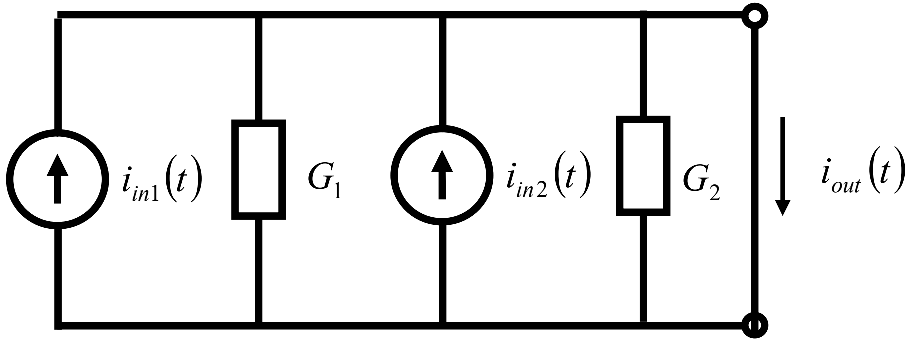




串联总电压等于分电压之和

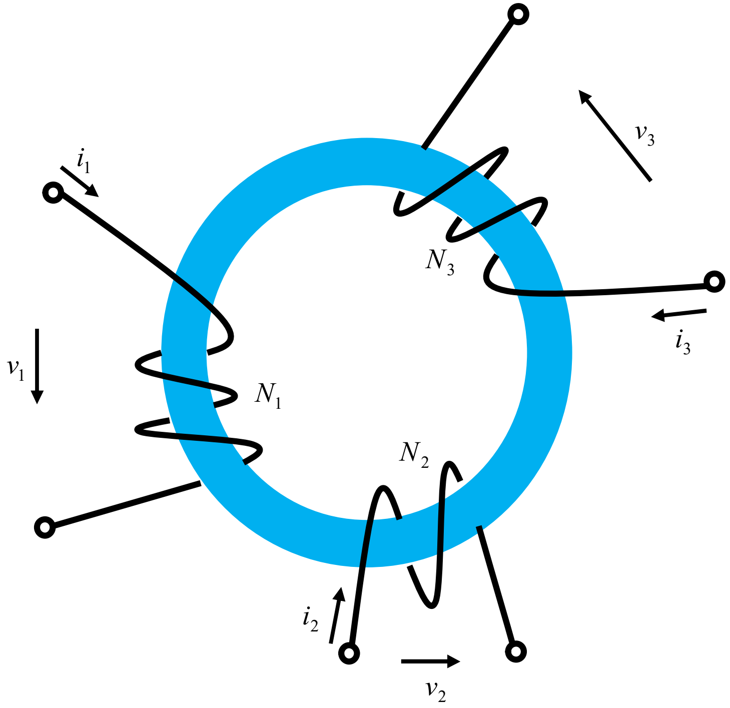
并联总电流等于分电流之和



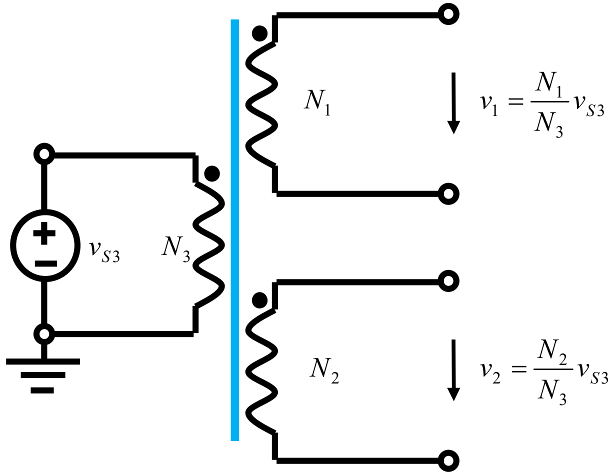


三端变压器

合流分压网络



（a）三端口电感绕制方式



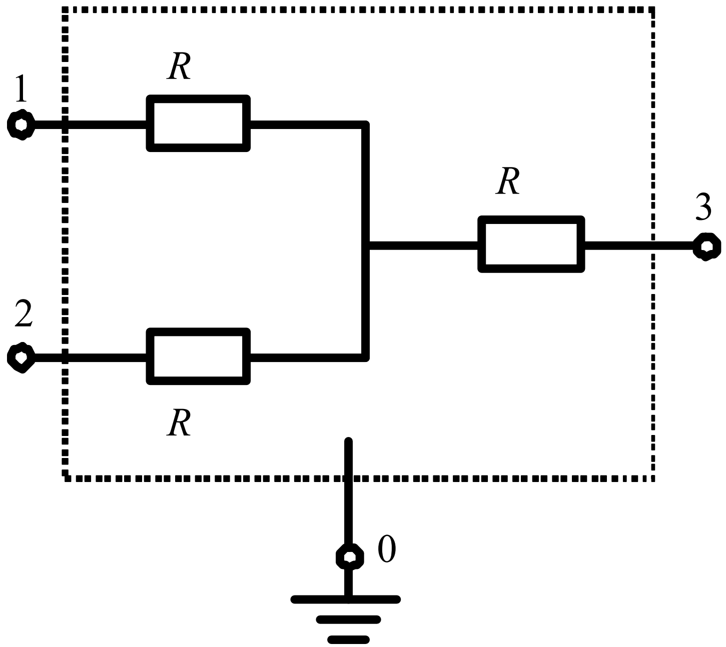
（b）三端口理想变压器信号分解

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{N_1}{N_3} \\ 0 & 0 & \frac{N_2}{N_3} \\ -\frac{N_1}{N_3} & -\frac{N_2}{N_3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

互易的无损的线性网络

叠加定理：电流合成
互易性：电流合成必对应电压分解

三端电阻合压分流网络



$$Z_0 = 3R$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5Y_0 & -1.5Y_0 & -0.5 \\ -1.5Y_0 & 1.5Y_0 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5Z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$$

互易的有损的线性网络

叠加定理：电压合成
互易性：电压合成必对应电流分解

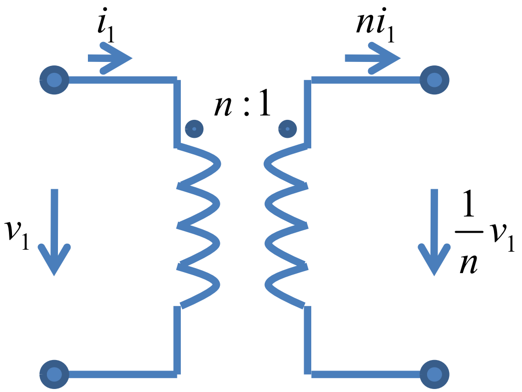
22、阻抗变换网络

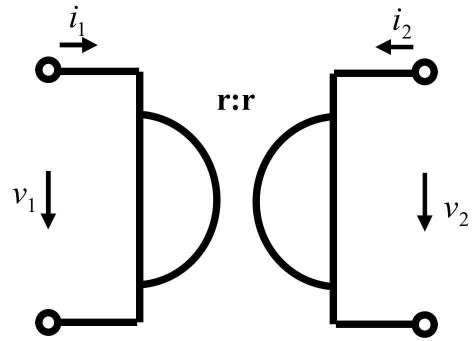
- 只要是双向网络，则必可实现阻抗变换
- 专门用于实现阻抗变换的网络，其**zyhg**的**12**元素$\mathbf{p}_{12}$和**21**元素$\mathbf{p}_{21}$相当

$$\mathbf{p}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{p}=\mathbf{z},\mathbf{y},\mathbf{h},\mathbf{g}$$

  - 放大网络，$\mathbf{p}_{12}$极小，可抽象为**0**
    - 基本放大器模型都是单向网络

理想变压器和理想回旋器
无损二端口阻抗变换网络





$$\mathbf{h}=\begin{bmatrix}0 & n\\ -n & 0\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{z}=\begin{bmatrix}0 & -r\\ r & 0\end{bmatrix}$$

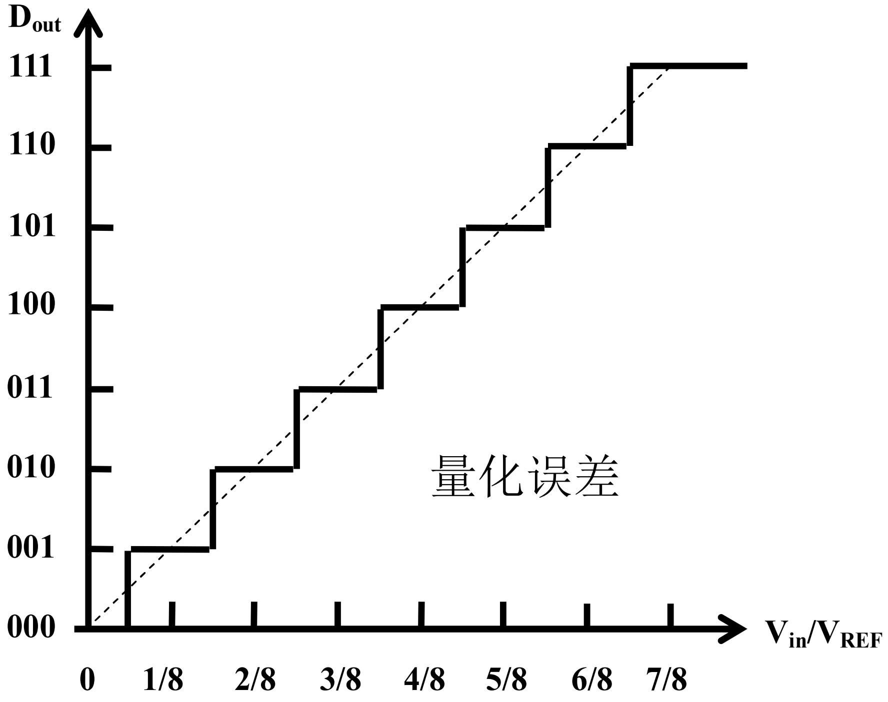
$$Z_{01}=n^2 Z_{02}$$

$$Z_{01}=r^2 Y_{02}$$

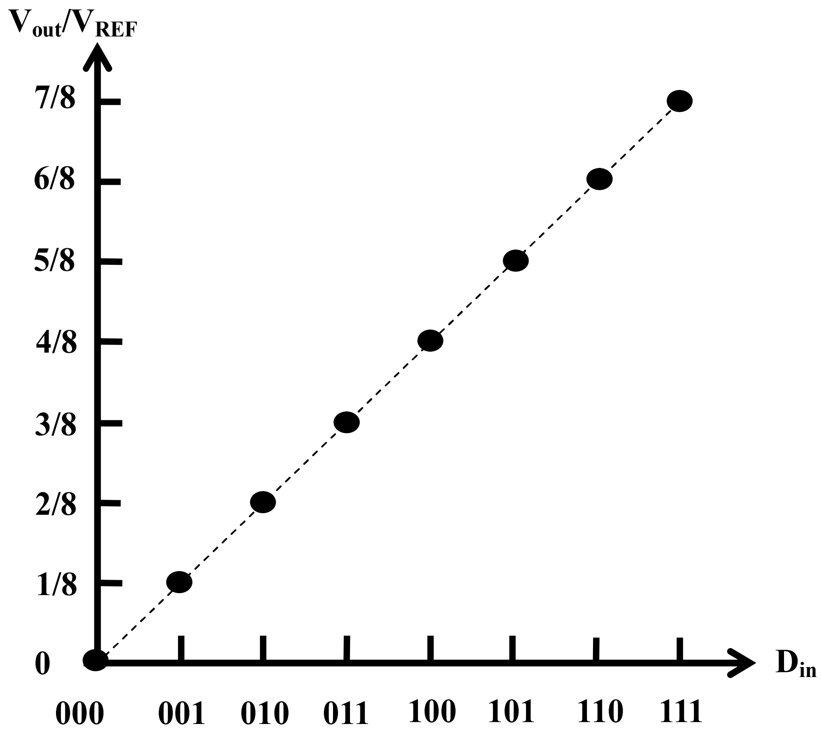
阻抗同属性变换

阻抗对偶变换

23、AD/DA



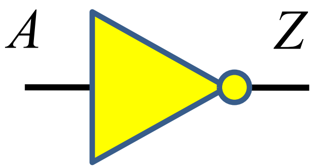
ADC



DAC

24、门电路逻辑运算

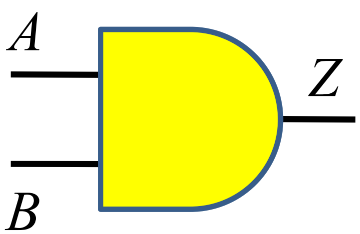
二值逻辑	1	0
正反判断	true	false
	真	假
	正	反
	正确	错误
	同意	反对
	是	否
	许可	不可
	…	…



not gate

A	not A
0	1
1	0

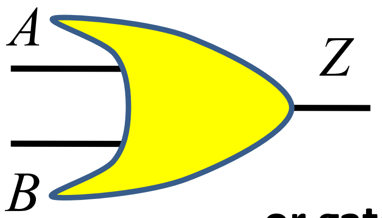
反着来，对着干



and gate

A	B	A and B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

两个都同意才通过



or gate

A	B	A or B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

两个中有一个同意即可通过

与、或、非逻辑运算可以实现各种信号处理，包括数学运算

数字电路的底层单元电路就是这三个门电路

25、电能转换

- 交流转直流　　整流器　　rectifier
  – 二极管整流电路

利用开关不消耗能量特性实现电能转换，能量转换效率高

- 直流转交流　　逆变器　　inverter
  – 开关逆变器（作业）

利用非线性电阻中的恒压特性实现稳压，恒流特性实现稳流

- 直流转直流　　稳压器　　regulator
  – 二极管稳压器

利用电容、电感、开关实现升压、降压直流变换

- 交流转交流　　变压器　　transformer
  – 理想变压器

利用变压器的无损性实现升压、降压