

Zoom录制提醒

# 电子电路与系统基础I

理论课第二讲 电源和电阻I

(基本概念, 理想电阻与理想电源)

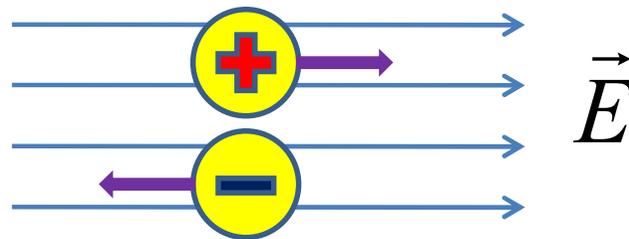
李国林  
清华大学电子工程系

# 电源和电阻I 大纲

- 基本电量
  - 电流
  - 电压
  - 功率
- 系统概念
- 端口与网络
- 理想电阻与理想电源

# 1.1 电流Current

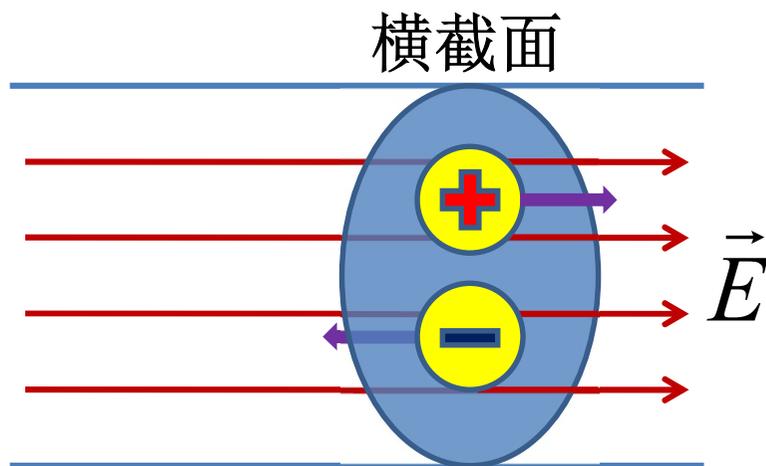
- 电子或离子运动形成电流，如果希望形成确定方向上的电流，则需要施加电动势
  - 所谓电动势**EMF**， **electromotive force**，就是能让带电粒子运动的‘势力’
    - 能够提供让带电粒子运动起来的电场力。或者说，电动势应能提供一个电场，电场力作用下带电粒子沿电场方向定向移动，形成定向电流



$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

# 电流大小与方向 $1A = 1C / s$

- 通过某个截面的电流*I*等于单位时间 $\Delta t$ 内流过这个截面的电荷量 $\Delta q$ 的大小



参考方向与实际方向同  $i = 10mA$

$i = -10mA$

- 电流实际方向为正电荷移动方向
- 可人为定义电流方向，这个方向称为参考方向
- 如果参考方向和实际电流方向相同，电流值则为正值
- 如果参考方向和实际电流方向相反，电流值则为负值

# 直流与交流

- 如果电流方向始终朝一个方向，且电流值恒定，则称之为直流电流**DC Current**
  - **DC: Direct Current**
- 如果电流大小和方向随时间有变化，且电流平均值为零，则称之为交流电流**AC Current**
  - **AC : Alternating Current**

# 1.2 电动势EMF

- 移动单位电荷需要的能量大小，定义为电动势

– 电动势代表的是让电荷运动的电能量大小

- 这个能量可由化学反应产生，如电池
- 也可由发电机将机械能转换而来
- 或者以其他方式将某种形式的能量转换获得

$$\mathfrak{E} = \frac{\Delta E}{\Delta q}$$

– 电动势单位为伏特

- **1伏特的电动势意味着产生电动势的电源移动1库仑电荷所提供的1焦耳能量**

# 电源 electric source

- 可产生电动势的电路器件被称为电源
- 凡是可将某种形式的能量转换为电能的设备或器件，均可建模为电源元件
  - 如果我们仅仅利用的是电源提供的电能量，则称之为**power supply**，中文翻译仍然是电源
  - 如果我们还利用其中电的变化所表征的信息，这种电源被称为**signal generator**，**signal source**，中文译文为信号源
- 可产生直流电流的电源称为直流电源，可产生交流电流的电源称为交流电源
  - 信号源都是交流电源；为电路供能的多为直流电源
- 电源的电动势就是电源的开路电压

# 1.3 电压Voltage

$$1V = 1J / C$$

- 电压

- 电荷量为 $q$ 的电荷在电场中受到电场力的作用而从A点移到B点时，电场对电荷做功为 $W_{AB}$

- A点到B点的电压为电场对单位电荷移动所作的功的大小

$$V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

- 电压单位：伏特：V

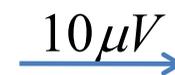
- 电场提供1焦耳的电能将1库仑的电荷从A点移到B点，A点到B点的电压则为1伏特

- 电压方向为电场移动正电荷运动的方向，也就是电场方向

- 可人为设定电压方向，称为电压的参考方向

- 如果参考方向和电压实际方向相同，电压记正值

- 如果参考方向和电压实际方向相反，电压记负值



参考方向与实际方向同



参考方向与实际方向反

电位、电势

# 电位与电压

- **A点到B点的电压为两点之间电位之差**

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

$$V_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

- **某个点的电位potential为该点到参考点reference point之间的电压**
  - 参考点是人为设定的空间的某个点，该点的电位被人为设定为零，参考点也被称为地 **Ground**
  - 电路中，大地、大片金属、设备外壳等经常被设定为参考地，并被连在一起

$$\varphi_A = V_{AG} = V_A - V_G = V_A$$

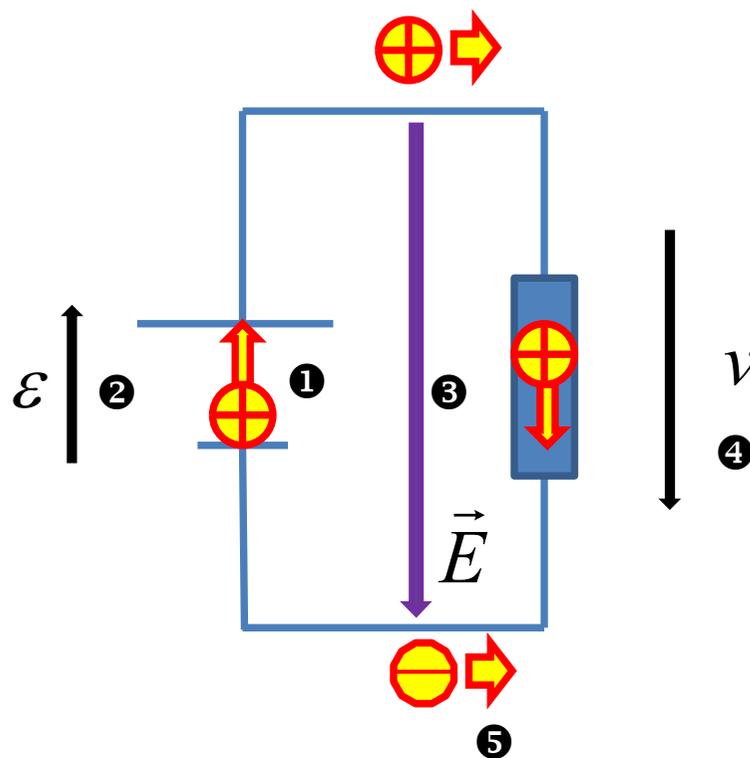
# 电动势和电压

- 电动势

- 化学反应、机械运动等能量形式做功，移动正电荷从电源负端到正端①，正负电荷在正负极的积累可理解为电动势作用下正电荷从电源负极移动到正极② 负极留下负电荷，正负电荷在正负极的积累使得电源对外形成从正端到负端的外部电场③，该外部电场可对电池外部电荷做功，对外提供电能
- 化学能、机械能等能量形式被转换为电能形式

- 电压

- 电动势移动电荷后，在电池外部形成电场（电压）④，它对电荷做功，从而电荷移动起来⑤
- 电能形式被转换为电荷运动能量形式，在电阻中，这个能量被进一步转换为热能



某种能量形式 → (电动势) → 电场 (电能) → (电压) → 其他能量形式

# 1.4 功率 Power

- 电路器件在电路中可能消耗或者吸收能量，这些能量可视为电场力对该器件所作的功
  - 电路器件消耗或吸收的功率为单位时间内电场对该器件所作的功，做功通过电荷移动实现
  - 电场对电荷做功（电压形式），电荷因而移动（电流形式）

$$p = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta W}{\Delta q} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta t} = v \cdot i$$

- 故而，器件吸收的功率等于该器件两端电压和流过该器件电流的乘积
- 功率单位：瓦特：**W**：**1W=1J/s=1V·A**

# 电源和电阻I 大纲

- 基本电量
  - 电压、电流、功率
- 系统概念
  - 线性与非线性
  - 时变与时不变
  - 记忆与无记忆
- 端口与网络
- 理想电源和理想电阻

# 2.1 系统 system

- 电路是电路器件的连接，又称电路系统
- 系统是由若干相互作用的、或者相互依存的事物组合而成的具有特定功能的整体
  - 系统有结构：由部件构成
  - 系统有连接：部件、子系统之间有连接关系
  - 系统有行为，有作用：对信号、能量处理，有输入和输出
  - 系统有功能：行为的结果
    - 电路器件因具有特定的功能也可视为系统
- 电路系统是处理电信号（电子信息）或电能量的系统
  - 系统可实现的功能和系统属性密切相关

## 2.2 系统分类

- 一般可根据描述系统的数学模型（系统属性）的差异来对系统进行分类
  - 无记忆系统，记忆系统
    - 即时系统，动态系统
    - 电阻电路，动态电路
  - 线性系统，非线性系统
  - 时变系统，时不变系统
  
  - 连续时间系统，离散时间系统
  - 集总参数系统，分布参数系统
  - 可逆系统，不可逆系统

## 2.2.1 记忆与无记忆

### memory vs memoryless

- 无记忆系统：系统输出仅由当前输入决定，和之前的输入无关

$$i(t) = \frac{v(t)}{R}$$

线性电阻：无记忆元件

$$i(n) = \frac{1}{R} v(n)$$

- 记忆系统：系统输出不仅由当前输入决定，还和之前的输入（或输出）有关

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

线性电容：记忆元件

$$v(t) = V_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$$

$$i(n) = \frac{C}{\Delta t} (v(n) - v(n-1)) = \frac{1}{R_{eq}} (v(n) - v(n-1))$$

# 2.2.2 线性与非线性

## Linear vs Nonlinear

激励 **e**: excitation  
响应 **r**: response  
函数 **f**: function

vs: versus  
相对, 或比较

$$f$$
$$e \Rightarrow r$$

- 满足叠加性和均匀性的系统, 称为线性系统
  - 不满足叠加性或均匀性的则为非线性系统

$$f$$
$$e_1 \Rightarrow r_1$$
$$f$$
$$e_2 \Rightarrow r_2$$

叠加性 **Additivity**  
**Superposition property**

$$f$$
$$e_1 + e_2 \Rightarrow r_1 + r_2$$

均匀性 **Homogeneity**  
齐次性, 同质性

$$f$$
$$\alpha e_1 \Rightarrow \alpha r_1$$

线性 **Linear**

$$f$$
$$\alpha e_1 + \beta e_2 \Rightarrow \alpha r_1 + \beta r_2$$

# 线性

如果R、L、C和元件两端电压v或流过元件的电流i有关，则为非线性电阻、非线性电感和非线性电容

- 线性不要求输出波形和输入波形一模一样，只要满足叠加性和均匀性即可

$$i(t) = \frac{v(t)}{R}$$

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

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

线性电阻：阻值R和元件电压、电流无关

线性电容：容值C和元件电压、电流无关

线性电感：感值L和元件电压、电流无关

- 线性电阻上的电压电流波形一模一样，是比例线性
  - 这种线性最易理解，但不是唯一的线性关系
    - 无记忆线性电路：输出仅和当前输入有关
  - 线性电容、电感上电压、电流的微积分也是线性关系
    - 有记忆线性电路：输出除了和当前输入有关，还和以前的输入有关

# 2.2.3 时变与时不变

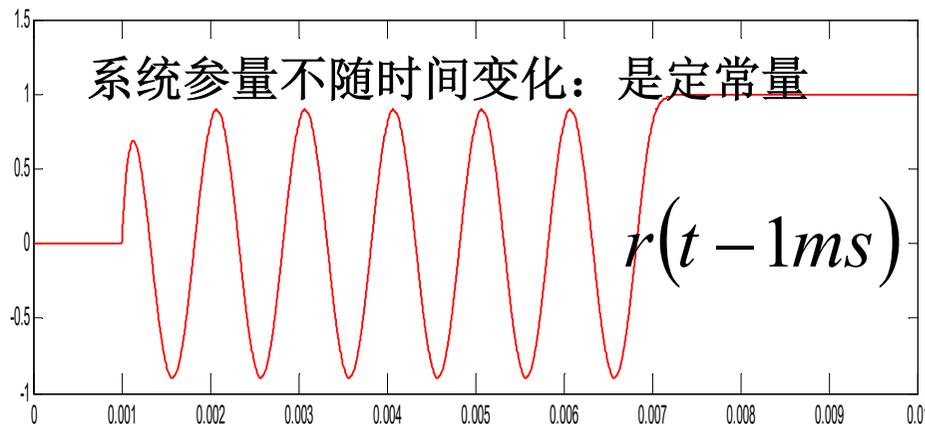
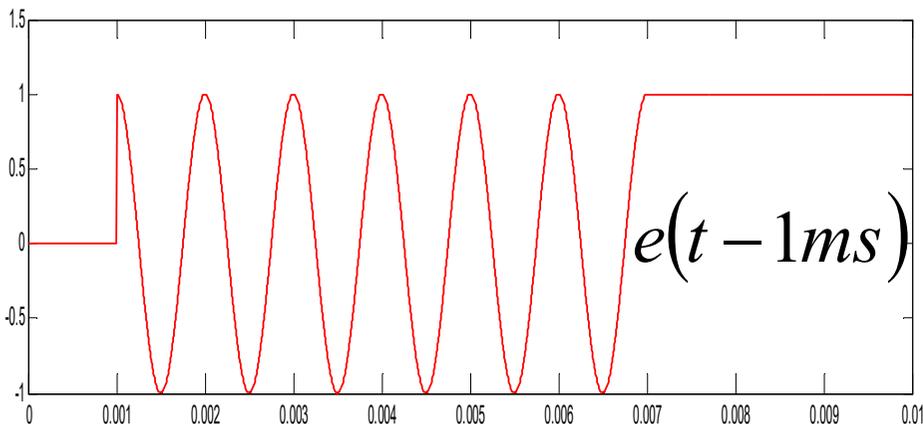
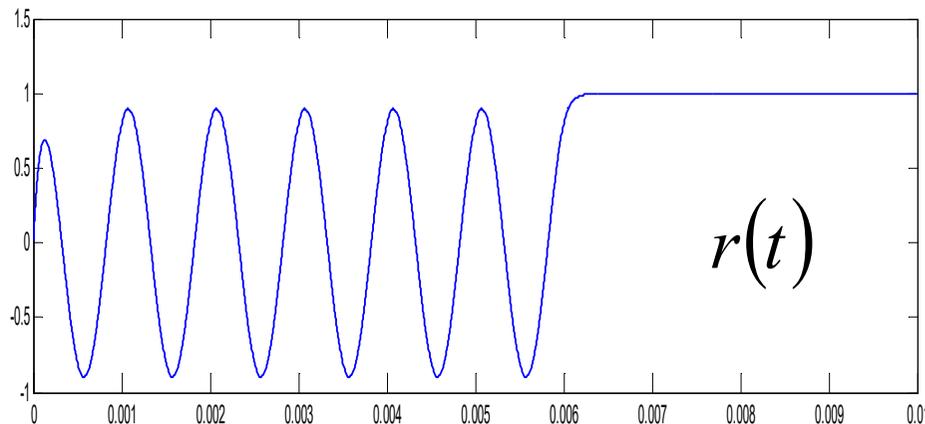
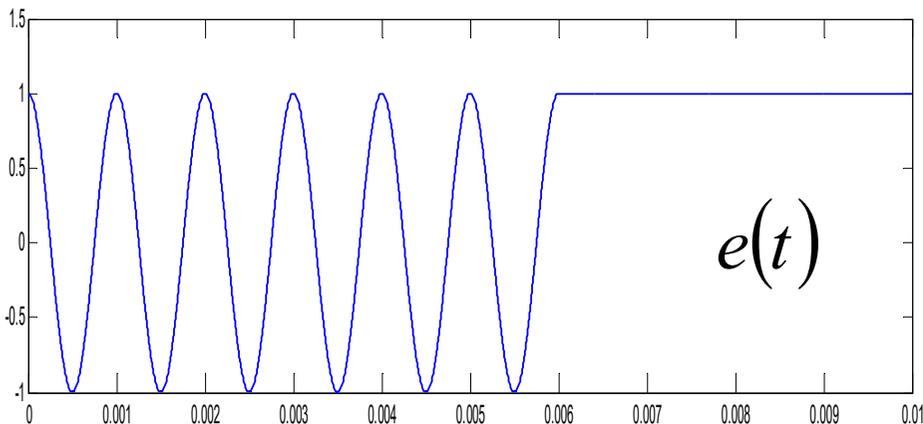
## time varying vs time invariant

$$e(t) \xrightarrow{f} r(t)$$
$$e(t - \tau) \xrightarrow{f} r(t - \tau)$$

$$i(t) = \frac{v(t)}{R}$$

**R是常量：线性时不变电阻**

**R随时间改变，但改变和端口电压、端口电流无关，则为线性时变电阻**

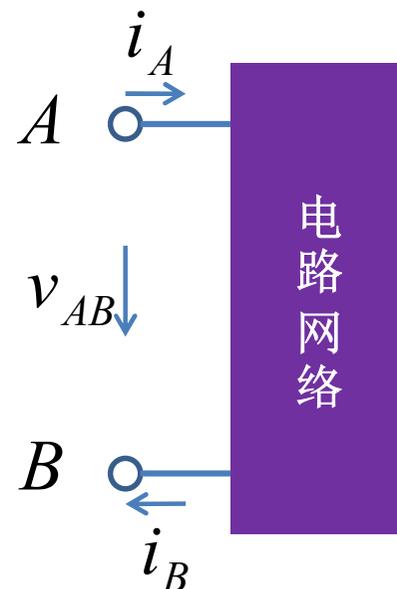


# 电源和电阻 I 大纲

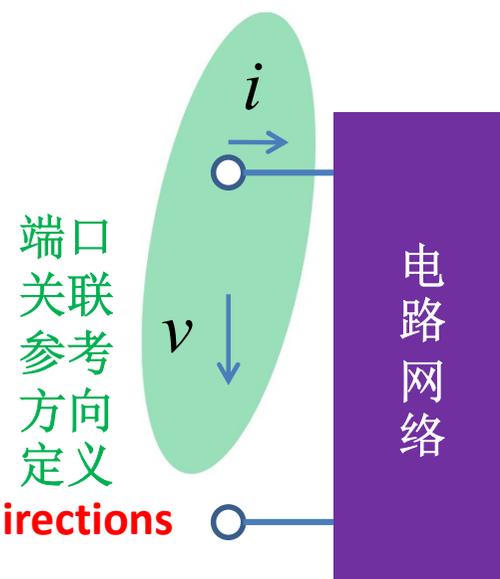
- 基本电量
  - 电流、电压、功率
- 系统概念
  - 记忆与无记忆、线性与非线性、时变与时不变
- 端口与网络
  - 端口定义
  - 单端口网络与多端口网络
  - 端口连接
  - 有源性
- 理想电源和理想电阻

# 3.1 什么是端口port?

- 端点: **terminal**
- 端口: **port**
  
- 如果从一个端点流入多少电流, 从另一个端点流出同样大小的电流, 这两个端点则构成一个端口
  - 一般端口的电压电流关联参考方向如图所示



端口条件  $i_B = i_A$



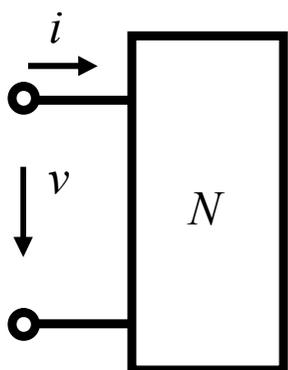
端口  
关联  
参考  
方向  
定义

associated reference directions  
关联参考方向

电路系统的功能, 体现在端口电压电流关系上

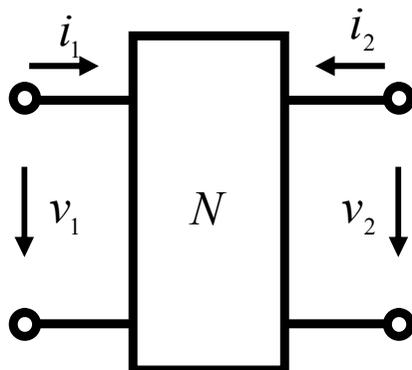
## 3.2 单端口网络和多端口网络

电路功能体现在端口电压电流关系上



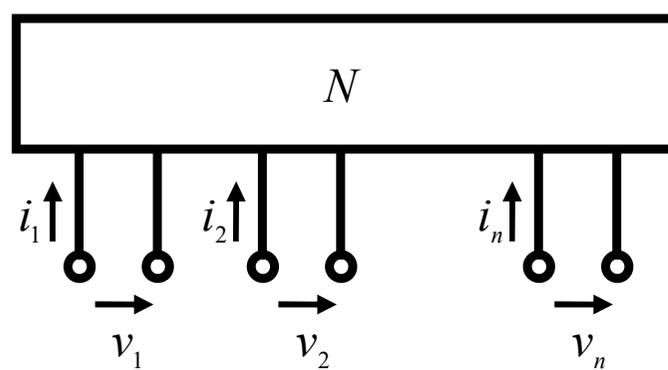
单端口网络

Single-port network



二端口网络

Two-port network



n端口网络

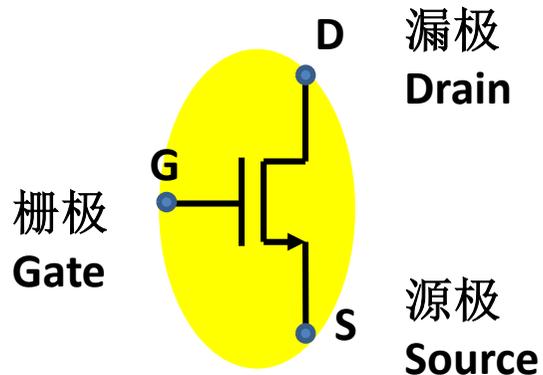
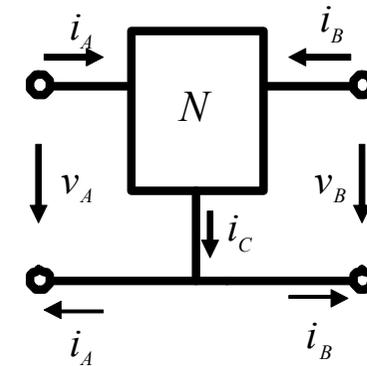
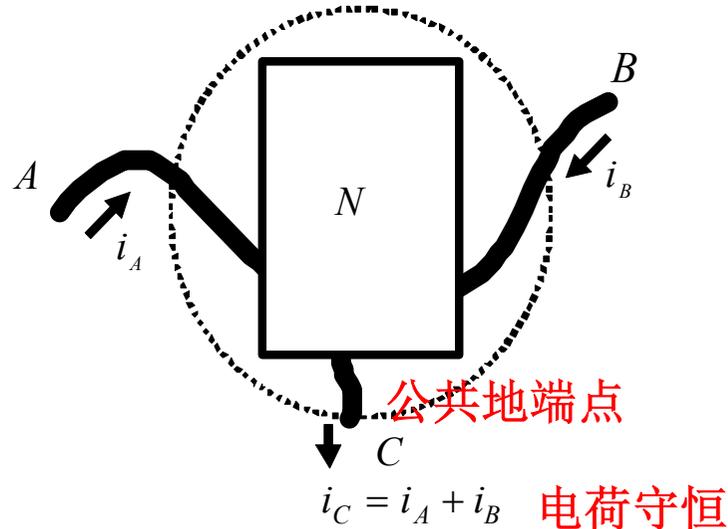
Multi-port network

网络对外有n个端口接出，就是n端口网络

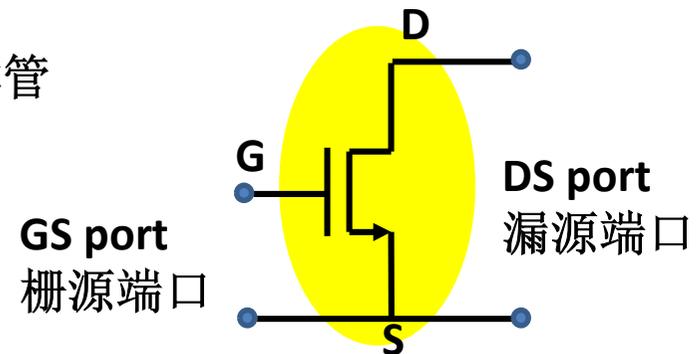
电路系统，功能电路，元件，...，均可视为网络

# 三端网络可视为二端口网络

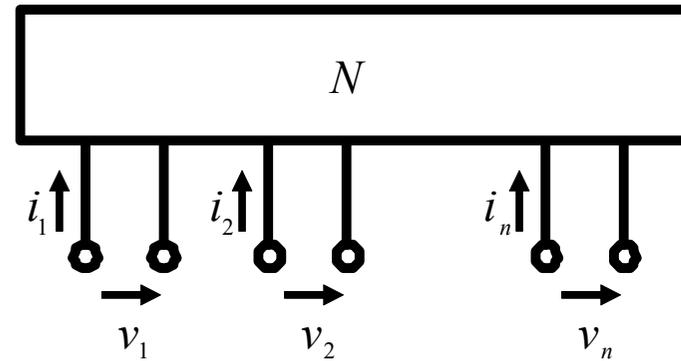
n端口网络不一定  
2n个对外端点，  
如果网络有一个  
端点为公共地，  
所有端点和公共  
地都可构成端口，  
m端网络最大端  
口数为m-1



MOSFET  
MOS场效应晶体管



# 从端口对网络 进行描述



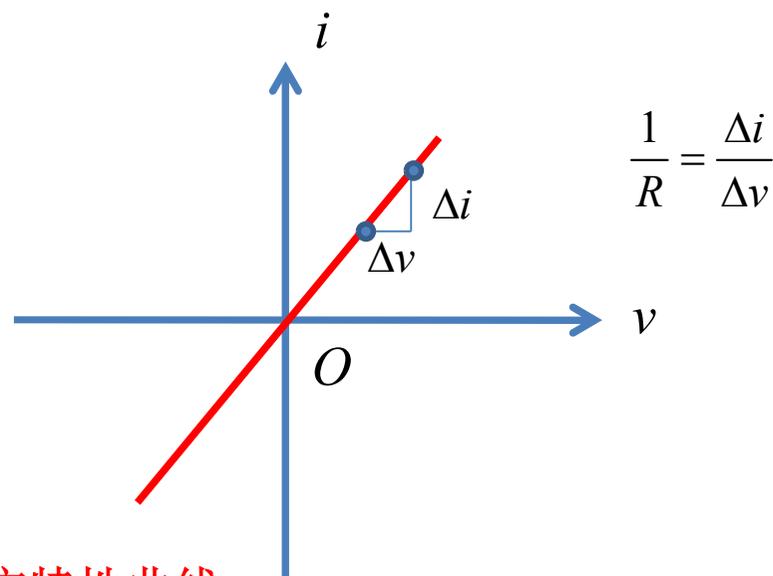
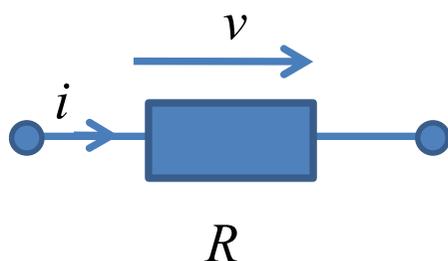
- 外界只能看到端口，电路功能都是从端口电压、电流关系来体现的，因而端口电压、电流关系就是网络特性（系统功能）的表述
- 每个端口都有一对变量：
  - j端口：( $v_j, i_j$ )
- n个端口有n对变量，2n个变量
  - 由于电场、磁场是相互转化的，电压、电流也是相互转化的，因而2n个变量中，只有n个是独立的，n个是非独立的
    - n个非独立的变量可以用另外n个独立变量表述
  - 因而n端口网络需要n个方程才能完备描述其电特性
    - 称之为端口描述方程，元件约束条件，广义欧姆定律

# 线性电阻的元件约束条件

- 欧姆定律

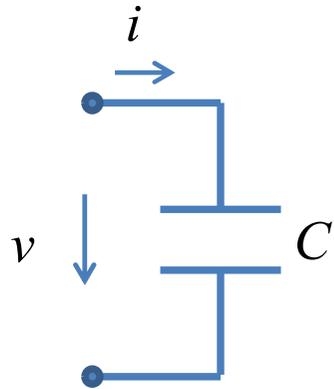
$$i = \frac{v}{R}$$

单端口网络：一个方程就描述清楚了



伏安特性曲线  
IV characteristics

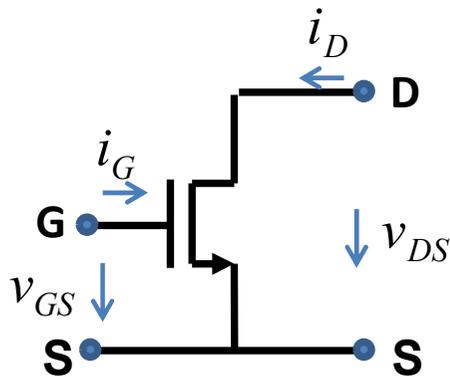
# 网络端口描述方程例



描述电容元件的元件参量：由结构决定

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

单端口网络：一个方程即可完备描述

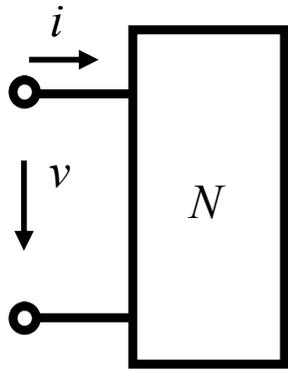


描述MOSFET的工艺参量：由结构和工艺决定

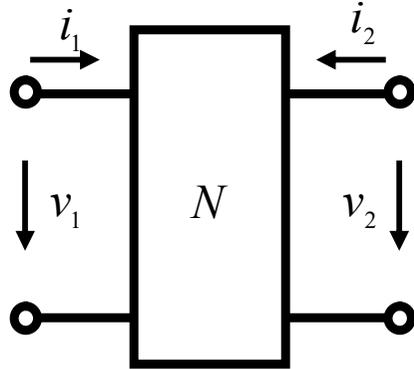
$$i_G = 0$$
$$i_D = \beta_n (v_{GS} - V_{TH})^2$$

二端口网络必须两个方程才能完备描述

# 元件约束方程的一般形式

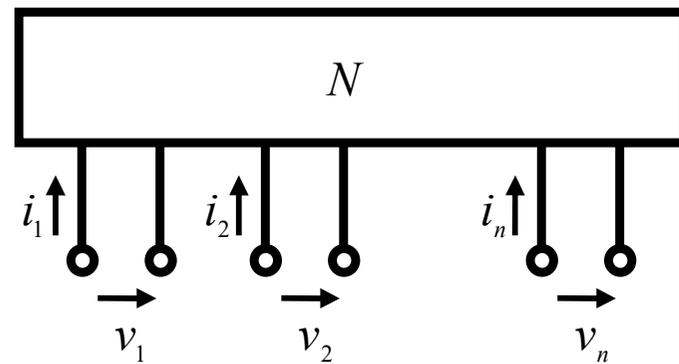


$$f(v, i) = 0$$



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

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



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

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

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

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

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

# 压控和流控

$$\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{i}) = 0 \quad \text{一般形式}$$

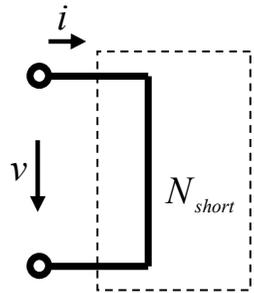
$$\mathbf{v} = \mathbf{f}_{vi}(\mathbf{i}) \quad \text{流控网络, 流控元件}$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{f}_{iv}(\mathbf{v}) \quad \text{压控网络, 压控元件}$$

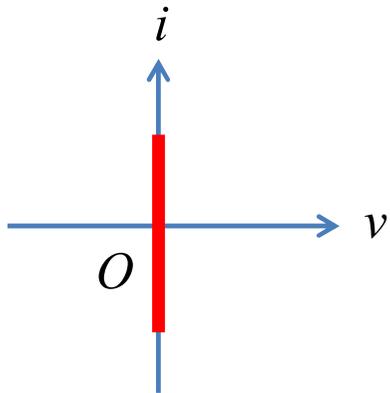
$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \cdot \\ v_k \\ i_{k+1} \\ \cdot \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{h,1}(i_1, \dots, i_k; v_{k+1}, \dots, v_n) \\ \cdot \\ f_{h,k}(i_1, \dots, i_k; v_{k+1}, \dots, v_n) \\ f_{h,k+1}(i_1, \dots, i_k; v_{k+1}, \dots, v_n) \\ \cdot \\ f_{h,n}(i_1, \dots, i_k; v_{k+1}, \dots, v_n) \end{bmatrix} \quad \text{混合控制形式}$$

# 压控还是流控？

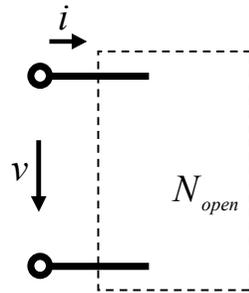
Short Circuits



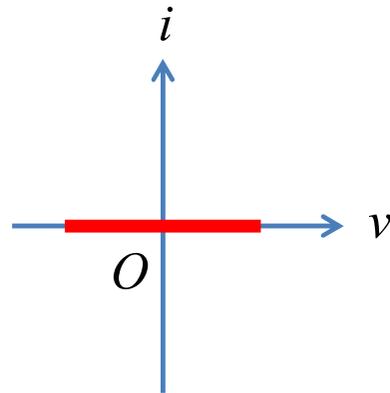
$$v = 0$$



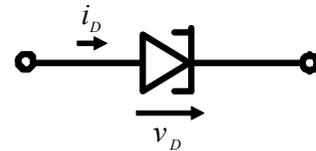
Open Circuits



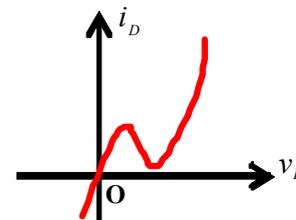
$$i = 0$$



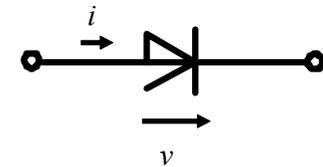
Tunnel Diode



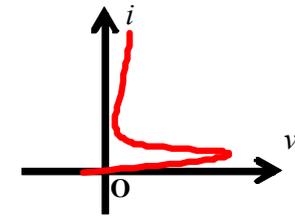
$$i = f_{TD}(v)$$

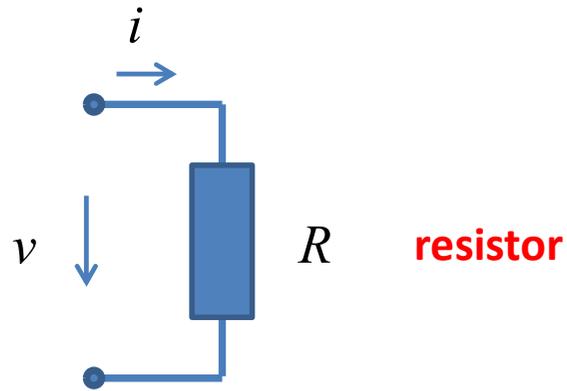


Shockley Diode



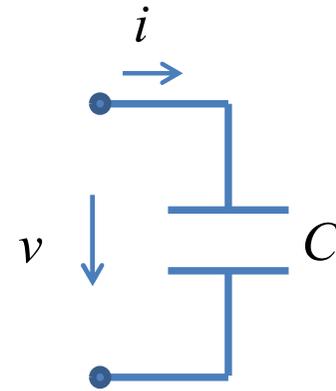
$$v = f_{SD}(i)$$





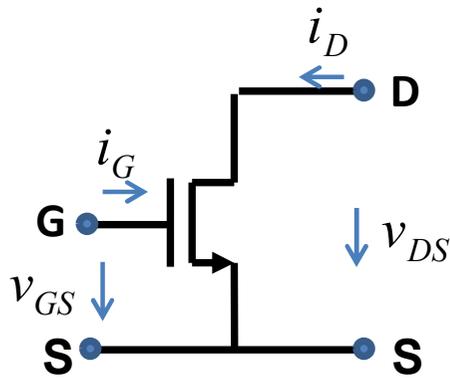
**resistor**

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad v(t) = Ri(t)$$



**capacitor**

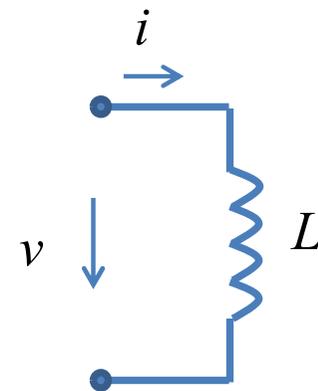
$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$



**transistor**

$$i_G = 0$$

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

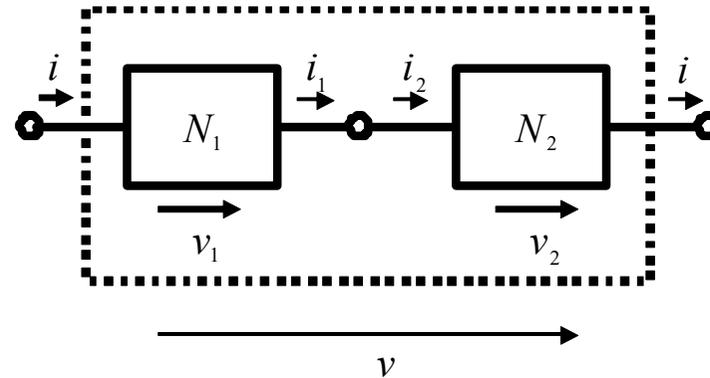
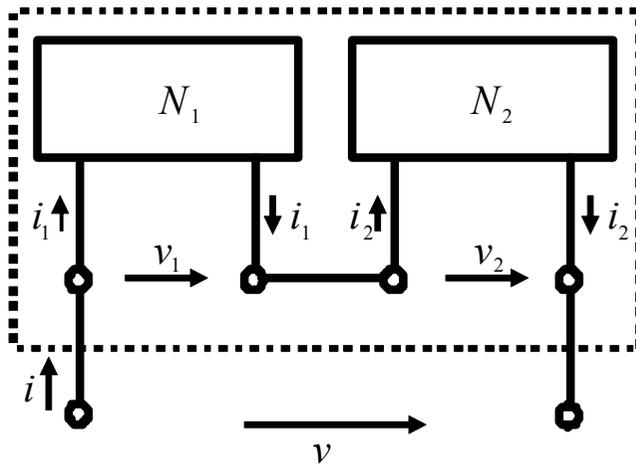


**inductor**

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

压控或流控？

## 3.3 端口连接：串联

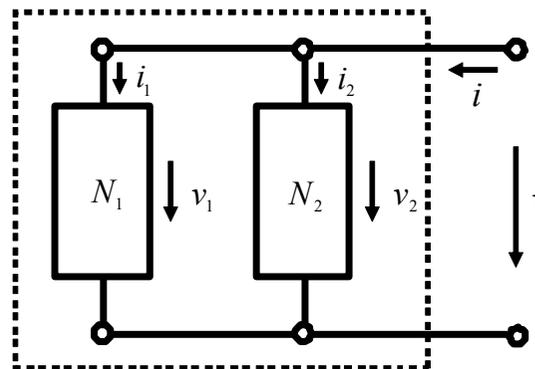
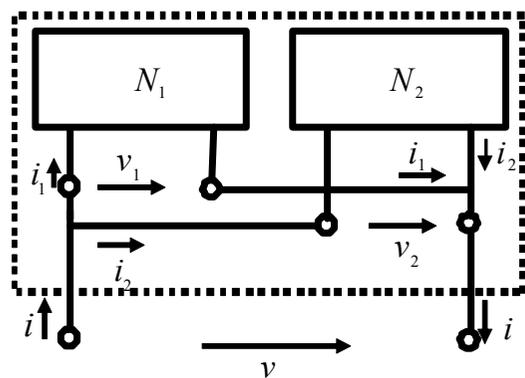


$$v = v_1 + v_2$$

串联：电压相加，电流相等

$$i = i_1 = i_2$$

# 端口连接： 并联

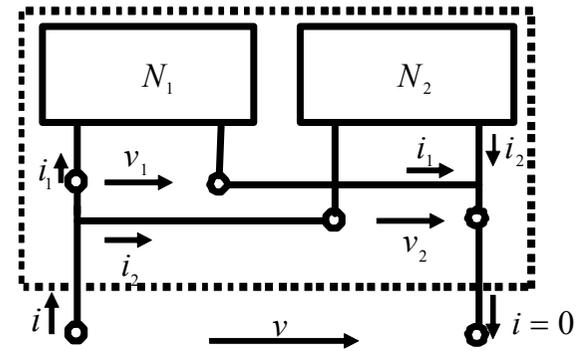
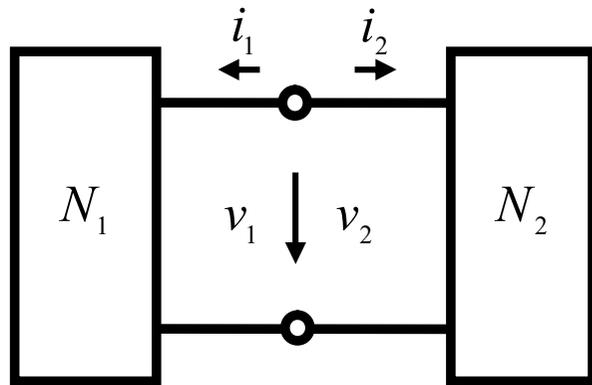


$$i = i_1 + i_2$$

并联： 电流相加， 电压相等

$$v = v_1 = v_2$$

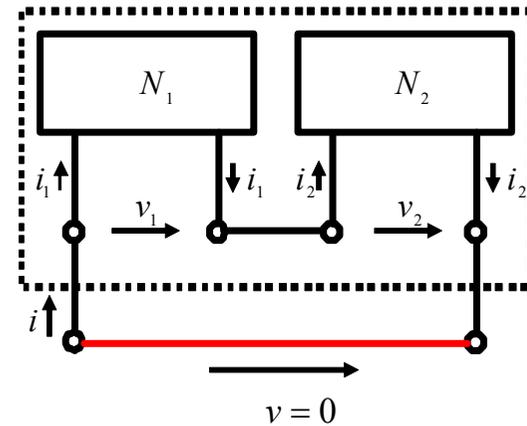
# 端口对接



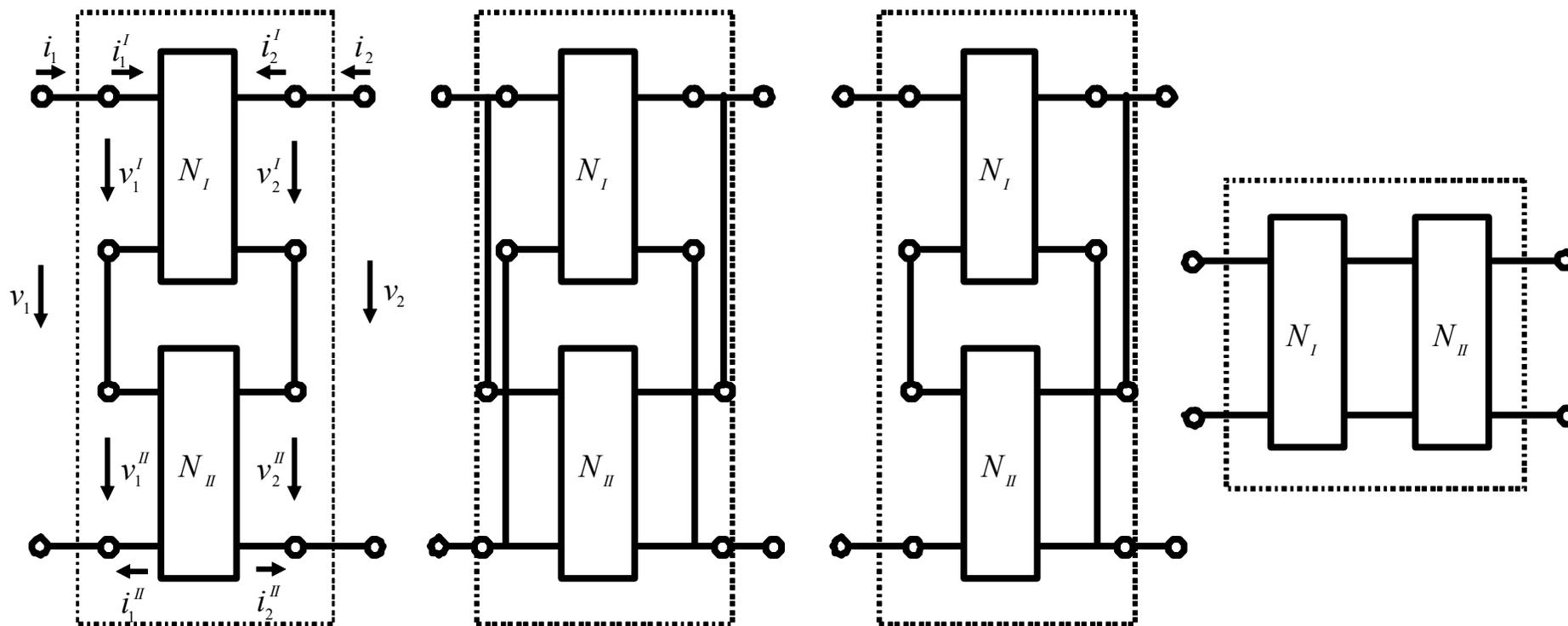
一般视其为并联后总端口开路，  
也可视为串联后总端口短路

$$v_1 = v_2$$

$$i_1 = -i_2$$



# 二端口网络端口连接关系



串串连接

并并连接

串并连接

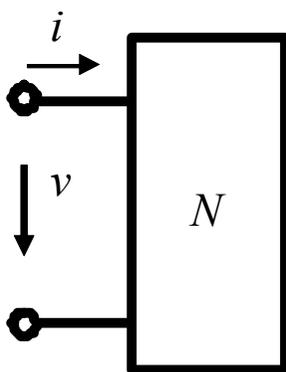
级联连接

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

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

## 3.4 有源性

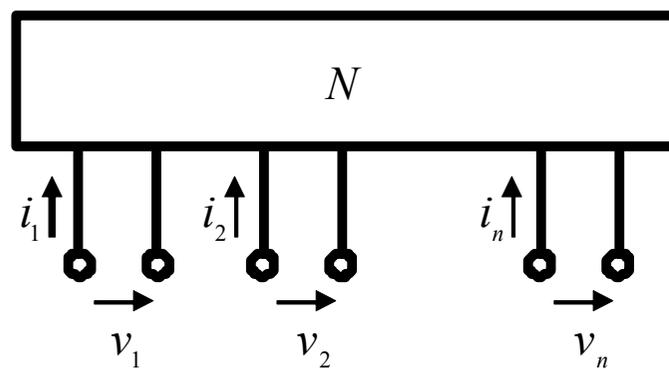
- 如果一个网络具有向外部提供电能的能力，该网络有源（**active**）；否则无源（**passive**）



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

$$p = vi > 0 \quad \text{吸收功率}$$

$$p = vi < 0 \quad \text{释放功率}$$

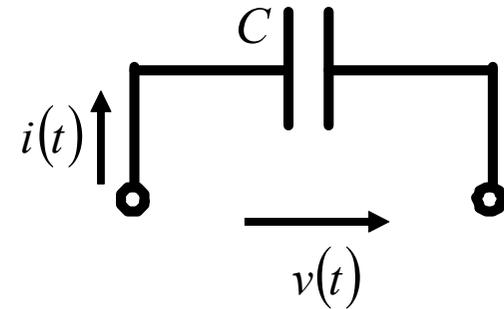
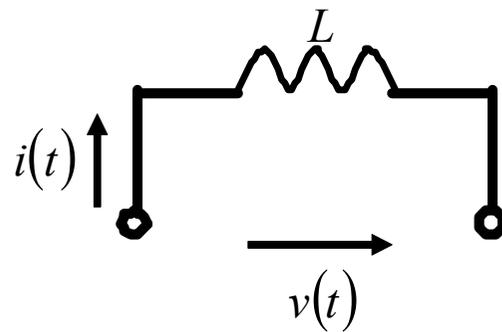
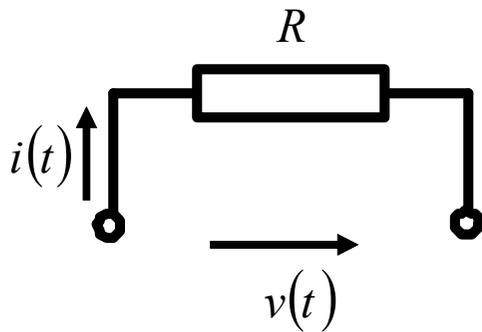


$$p_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^n v_k(t)i_k(t)$$

如果 $p_{\Sigma}(t) \geq 0 (\forall t)$ ，则无电能向外释放，肯定无源

如果 $p_{\Sigma}(t)$ 有时大于0，有时小于0？有源还是无源？

# 例：线性时不变单端口的 电阻、电容和电感



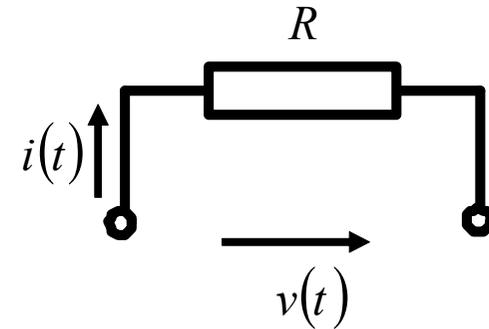
元件约束条件

$$v(t) = R \cdot i(t)$$

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

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

# 线性电阻是无源元件



$$p(t) = v(t)i(t) = R \cdot i^2(t) \geq 0$$

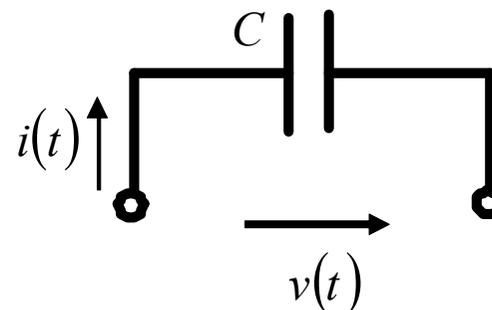
$$v(t) = R \cdot i(t)$$

恒 $\geq 0$ ，只能消耗电能，不具向端口外提供电能的能力

$$\Delta E_R(\Delta t) = \int_{t_0}^t p_R(t) dt = R \cdot \int_{t_0}^t i^2(t) dt \geq 0$$

只要这段时间内有不为零的电流，电阻即消耗电能（转化为热能、光能、...）  
由于不具向外提供电能的能力，故而无源

# 线性电容无源、有源？



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

功率正负不定：有源？无源？

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

$$\begin{aligned} \Delta E_c(\Delta t) &= \int_{t_0}^t p_c(t) dt = C \cdot \int_{t_0}^t v(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt} dt = C \cdot \int_{v(t_0)}^{v(t)} v(t) \cdot dv(t) \\ &= \frac{1}{2} C v^2(t) \Big|_{t_0}^t = \frac{1}{2} C v^2(t) - \frac{1}{2} C v^2(t_0) \end{aligned}$$

如果电容初始电压  $v(t_0)=0$ ，则无源：之后相对初始总是吸收电能量不具向外部提供电能的能力，故而无源

$$\Delta E_c(\Delta t) = \int_{t_0}^t p_c(t) dt = \frac{1}{2} C v^2(t) - \frac{1}{2} C v^2(t_0) \stackrel{v(t_0)=0}{=} \frac{1}{2} C v^2(t) \geq 0$$

# 电容无源、有源？

$$\Delta E_C(\Delta t) = \int_{t_0}^t p_C(t) dt = \frac{1}{2} C v^2(t) - \frac{1}{2} C v^2(t_0)$$

如果电容初始电压  $v(t_0) \neq 0$ ，则有源：之后电压绝对值低于初始电压绝对值，则表明端口向外释放了电能量：既然具有向外释放电能的能力，故而有源

$$\Delta E_C(\Delta t) = \int_{t_0}^t p_C(t) dt = \frac{1}{2} C v^2(t) - \frac{1}{2} C v^2(t_0) \stackrel{|v(t)| < |v(t_0)|}{<} 0$$

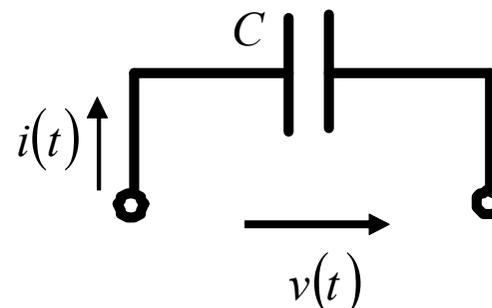
$$\stackrel{v(t)=0}{\cong} -\frac{1}{2} C v^2(t_0)$$

定义电容储能

$$E_C(t) = \frac{1}{2} C v^2(t)$$

$$E_C(t_0) = \frac{1}{2} C v^2(t_0) \neq 0$$

电容储能由当前电压决定：如果初始电压不为零，则有源  
考虑到电容初始储能可以全部释放出来，故称电容为无损元件



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

# 电阻耗能， 电容储能-释能

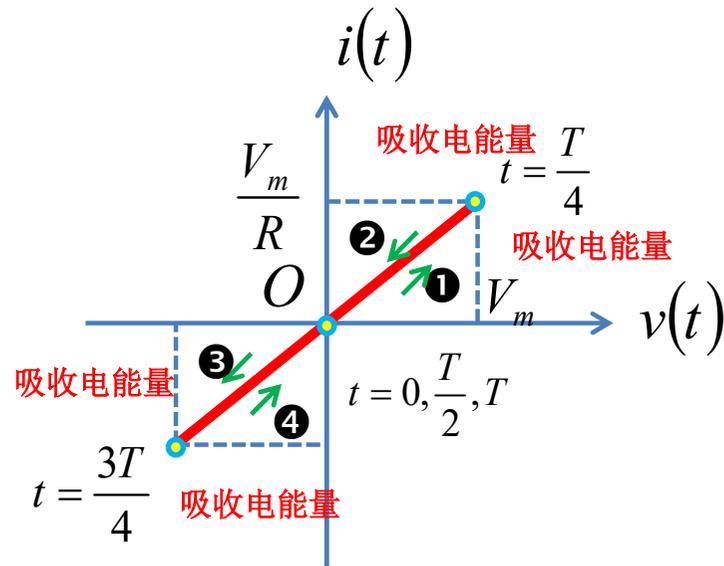
$$i(t) = \frac{v(t)}{R}$$

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

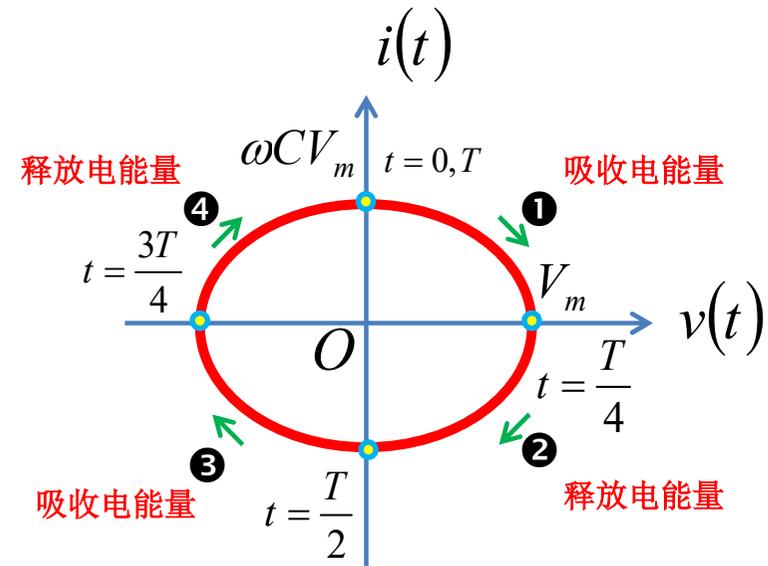
$$i(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

$$i(t) = \frac{V_m}{R} \sin \omega t$$

$$i(t) = \omega C V_m \cos \omega t$$



一个正弦周期内全部都是吸收电能量：耗能元件



一个正弦周期内：1/4周期吸收电能，1/4周期释放电能，再吸再放：储能元件/无损元件

# 无源网络定义

- 如果任意满足网络描述方程  $\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{i}) = \mathbf{0}$  的端口电压、端口电流，存在  $\mathbf{t}_0$ ，使得任意  $\mathbf{t} \geq \mathbf{t}_0$ ，均有

$$\Delta E(t) = \int_{t_0}^t p_{\Sigma}(t) dt \geq 0 \quad (\exists t_0, \forall t \geq t_0, \forall \mathbf{v}(t), \mathbf{i}(t), \mathbf{f}(\mathbf{v}(t), \mathbf{i}(t)) = \mathbf{0})$$

该网络则是  $\mathbf{t}_0$  时刻后无源的

因为自  $\mathbf{t}_0$  之后，网络不具向外输出电能的能力，它只能吸收电能量（或者也可能释放电能量，但释放的电能量不会超过吸收的电能量）

电容、电感一般被视为无源元件：但有初始电压的电容、有初始电流的电感则是有源元件：例如，超级电容可用作电池

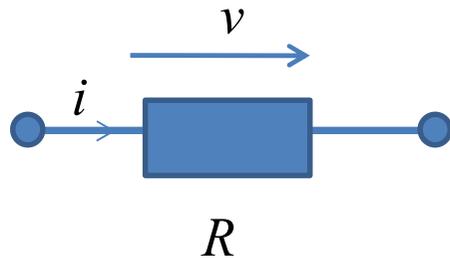
# 电源和电阻 I 大纲

- 基本电量
  - 电流、电压、功率
- 系统概念
  - 线性与非线性、时变与时不变、记忆与无记忆
- 端口
  - 端口、单端口与多端口、端口连接、有源性
- 理想电阻和理想电源
  - 理想电阻
  - 理想电源

# 4.1 电阻resistance

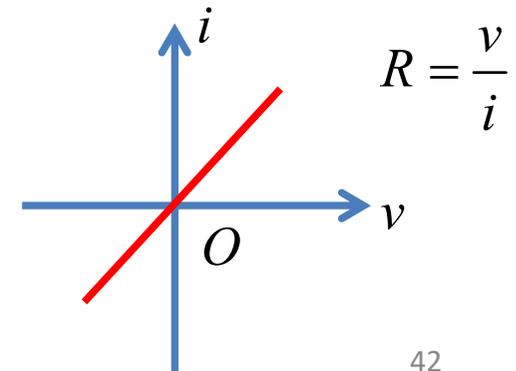
电阻单位为欧姆： $\Omega$

- 以金属导体为例，假设将电压施加到一段金属导体两端
- 在电场作用下，金属的自由电子朝电场反方向运动，运动的电子和金属原子晶格碰撞，阻碍了电子的运动
  - 电阻描述了阻碍电子运动的程度大小
  - 电阻越大，电子运动受到的阻碍越大，电流越小



$$i = \frac{v}{R}$$

欧姆定律Ohm's Law



# 例：瞬时功率和平均功率

- 经测量， $50\Omega$ 电阻上的电压为

$$v(t) = 30 + 20 \cos(2\pi f_0 t) (mV) \quad f_0 = 1MHz$$

- 问电阻上消耗的功率为多少？

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{v^2(t)}{R} = \frac{(30 + 20 \cos \omega_0 t)^2 \cdot (10^{-3})^2}{50} \\ &= \frac{900 + 1200 \cos \omega_0 t + 400 \cos^2 \omega_0 t}{50} \cdot 10^{-6} \\ &= \frac{900 + 1200 \cos \omega_0 t + 200(1 + \cos 2\omega_0 t)}{50} \cdot 10^{-6} \\ &= \frac{1100 + 1200 \cos \omega_0 t + 200 \cos 2\omega_0 t}{50} (\mu W) \end{aligned}$$

注意：如果题目不特别指明求某时刻的瞬时功率，则功率一般指平均功率

$$P = \overline{p(t)} = \frac{1100}{50} \mu W = 22 \mu W$$

# 总功率为直流功率与交流功率之和

$$v(t) = 30 + 20 \cos \omega_0 t \quad (mV)$$

$$P = 22 \mu W$$

$$V_{DC}(t) = 30 mV$$

$$v_{AC}(t) = 20 \cos \omega_0 t (mV)$$

信号中直流分量提供的功率被称为直流功率，信号中交流分量提供的功率被称为交流功率

$$P(t) = \frac{900 + 1200 \cos \omega_0 t + 400 \left( \frac{1 + \overline{\cos 2\omega_0 t}}{2} \right)}{50} 10^{-6}$$

$$P_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{R} = \frac{900}{50} \mu W = 18 \mu W$$

$$P_{AC} = \frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{V_p^2}{2R} = \frac{20^2}{2 \times 50} \mu W = 4 \mu W$$

$$P = P_{DC} + P_{AC}$$

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{R}$$

$$P_{AC} = V_{rms} I_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

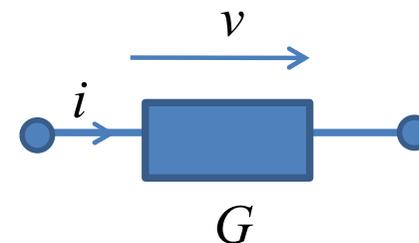
# 电导 conductance

- 电阻描述的是电子运动受阻碍的程度
  - 电阻越大，对电子运动的阻碍越大，相同电压下电流就越小
- 反之，电导描述的则是电子运动的畅通程度
  - 电导越大，对电子运动的阻碍就越小，电流就越畅通，相同电压下的电流就越大

$$i = \frac{v}{R}$$

$$i = G \cdot v$$

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



- 例：50Ω电阻的电导为多少？

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{50} = 0.02S = 20mS$$

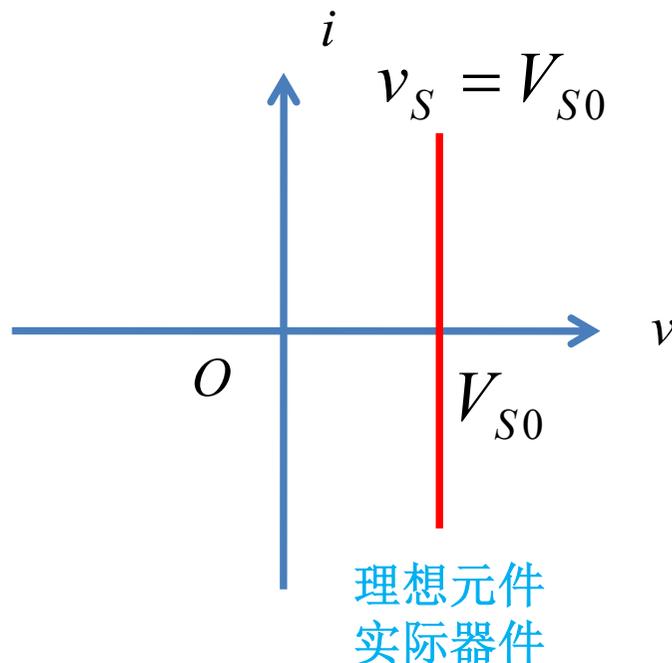
注意：电阻伏安特性的斜率为电导导值

## 4.2 电源 source

- 可产生电动势的器件被称为电源
  - 电源产生的电动势维持电源两端的电位差，驱动外部电路中的电荷源源不断地流动
- 根据电源的特性，有两种电源模型
  - 电压源和电流源
- **4.2.1 理想电压源**
- **4.2.2 理想电流源**
- **4.2.3 线性内阻电源**
  - 下节课讨论

# 4.2.1 理想电压源

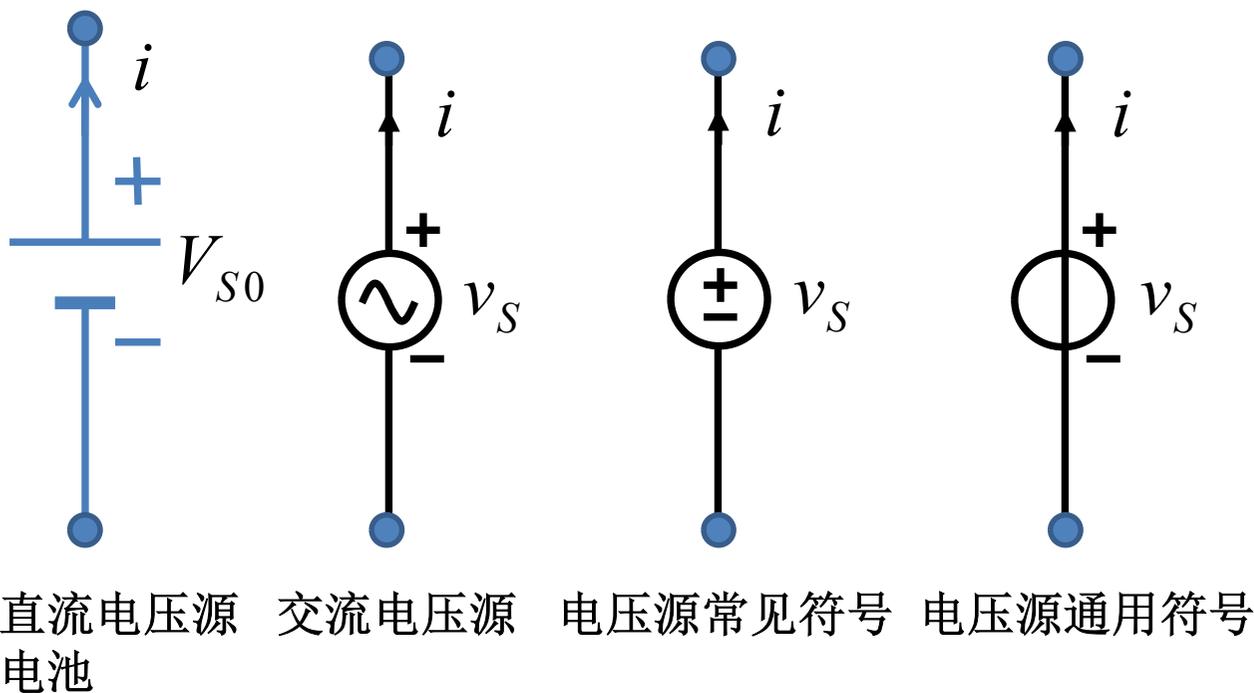
- 可提供  $v_S(t)$  的电压，该电压和流经电源的电流大小无关，电压源电流由外接元件决定
  - 恒压源



注意：电源的电压电流关联参考方向一般和电阻相反

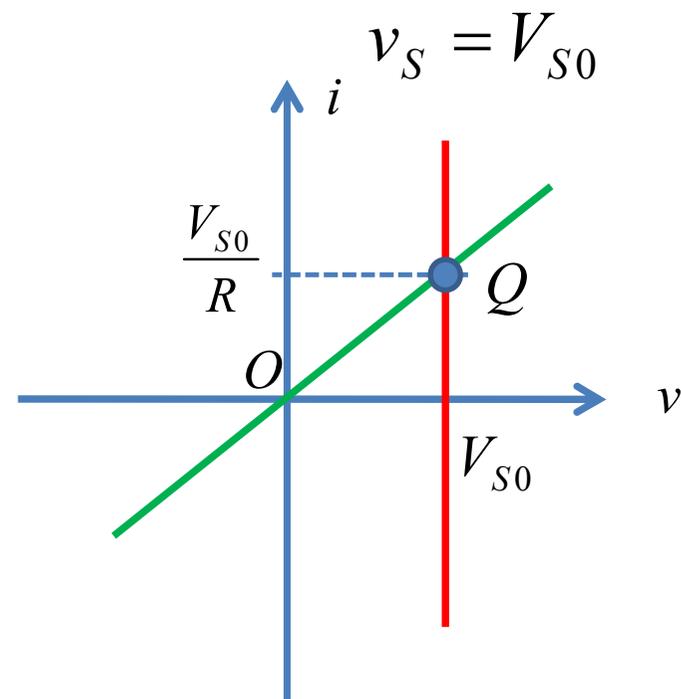
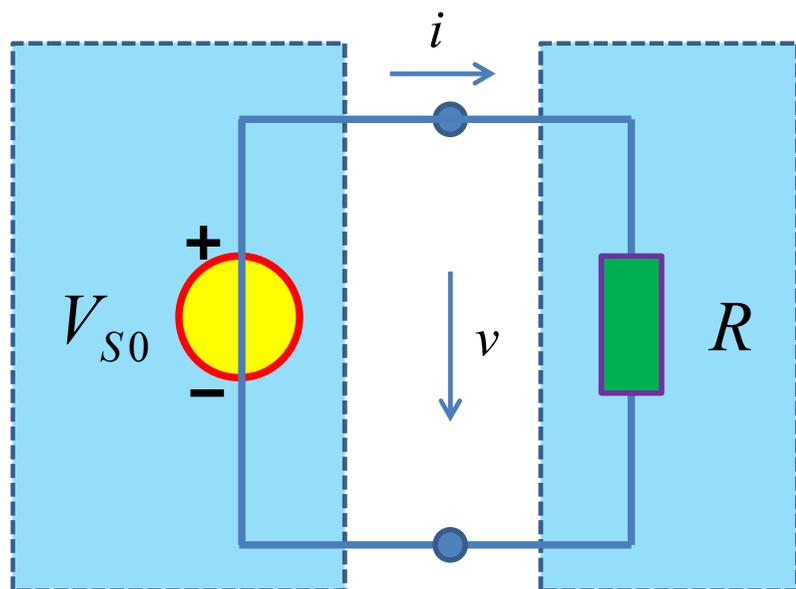
$$p = vi > 0$$

输出功率



直流电压源 交流电压源 电压源常见符号 电压源通用符号  
电池

# 利于图解法分析

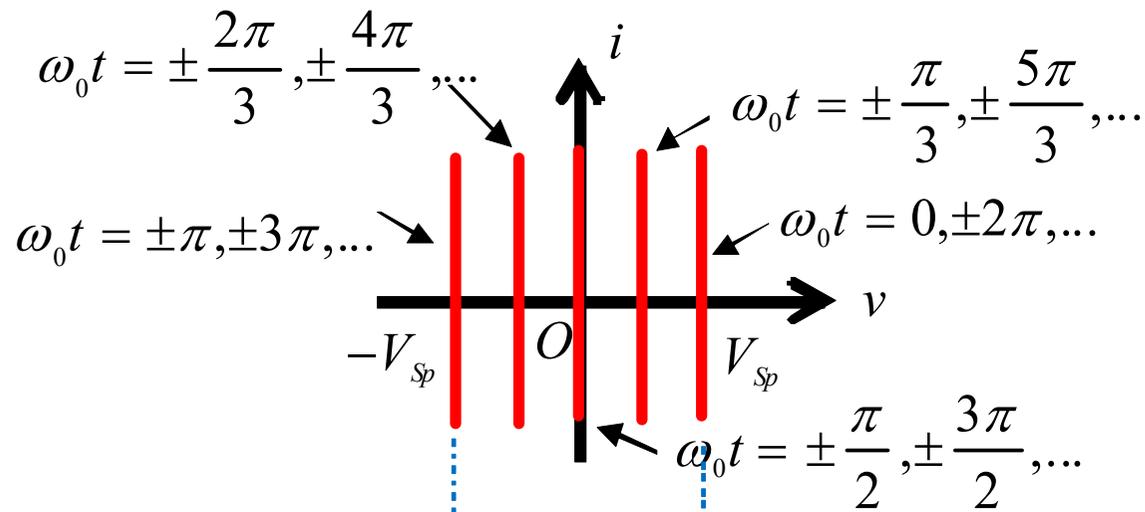


这种关联参考方向定义可以确保两个单端口网络的伏安特性曲线可以画在一个 $vi$ 平面内，伏安特性曲线的交点就是端口电压、端口电流

$$v = V_{S0}$$
$$i = \frac{V_{S0}}{R}$$

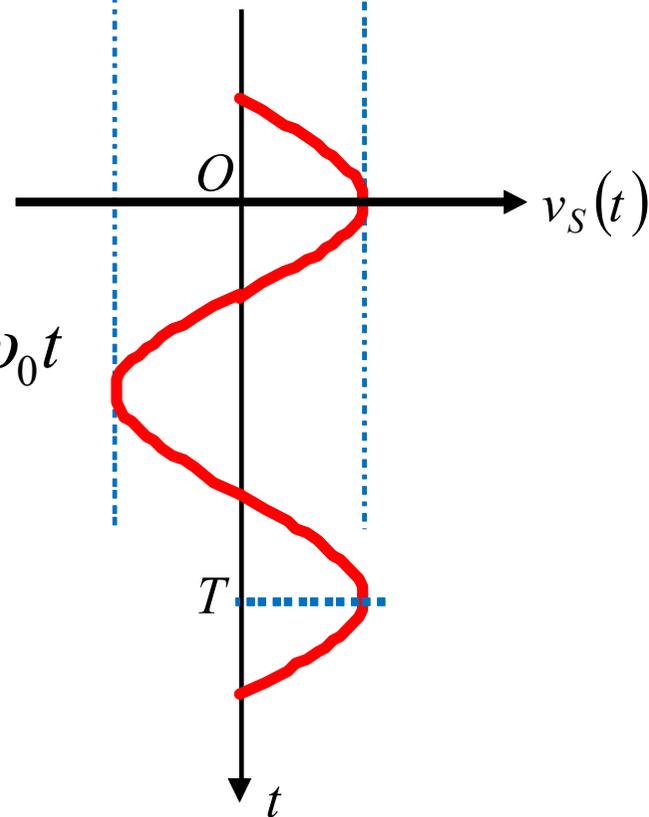
# 交流电压源

# 时变恒压源



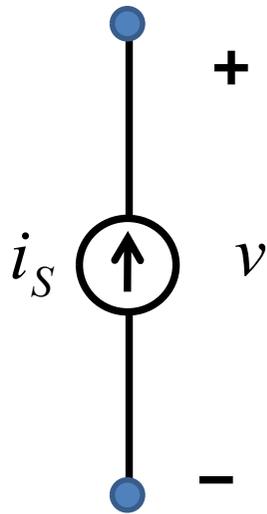
$$v_S(t) = V_{Sp} \cos \omega_0 t$$

所谓恒压，其电压不随外部电路变化，是恒定不变的

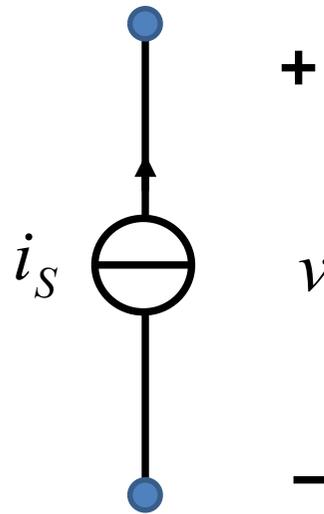


## 4.2.2 理想电流源

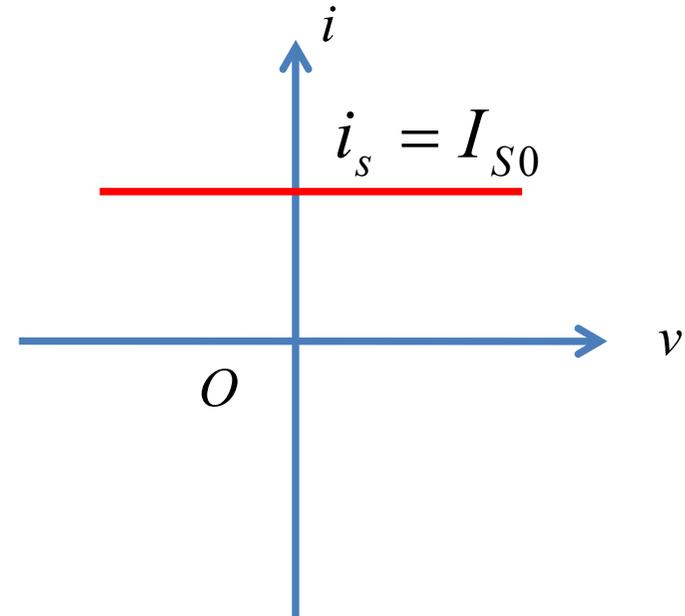
- 可提供 $i_s(t)$ 的电流，该电流和电源两端的电压大小无关，电流源电压由外接元件决定
  - 恒流源



电流源常见符号



电流源通用符号



注意：电源的电压电流关联参考方向和电阻不一致

# 下节课内容

- 本周习题课
  - 电子学基础
    - 物质基础（导体、半导体、绝缘体）
    - 半导体基础（电子、空穴，P型、N型）
    - PN结二极管（结的形成、特性、等效电路）
    - 半导体二极管分类
- 下周2理论课
  - 线性内阻电源：最大功率传输匹配，额定功率
  - 各种形式的电阻：短路、开路，开关，二极管，晶体管
  - 各种形式的电源：发电机，电池，...
  - 电阻与电源的简单连接分析：半波整流器，反相器
    - 图解法，解析法

# 作业

本节课概念很多，只布置其中一部分作为作业  
讲义中关于系统属性的练习看书时自行练习，下周习题课部分讨论

- **1、**电子流过某根导线的截面，通过该截面电荷量的变化规律为

$$q(t) = (5 \sin(2\pi f_1 t) + 2 \cos(2\pi f_2 t) + 10)(\mu C)$$

$$f_1 = 1kHz$$

$$f_2 = 3kHz$$

- 则通过该截面的电流变化规律是什么？
  - 在**t=50ms**时，电流为多大？
- 
- **2、**某交流电源（正弦波输出）以**270mA<sub>rms</sub>**的电流流过某灯泡**1h**，灯泡以光和热的形式消耗了**216kJ**的能量，求（**1**）灯泡两端电压为多少**V<sub>rms</sub>**？（**2**）灯泡的等效电阻阻值为多少？（**3**）灯泡消耗了多少**Wh**的电能？

# 作业

- **3、**如果流入某单端口元件的电流为  $i(t) = 50 \cos(100\pi t) (mA)$  在端口关联参考方向定义下，该元件两端电压为

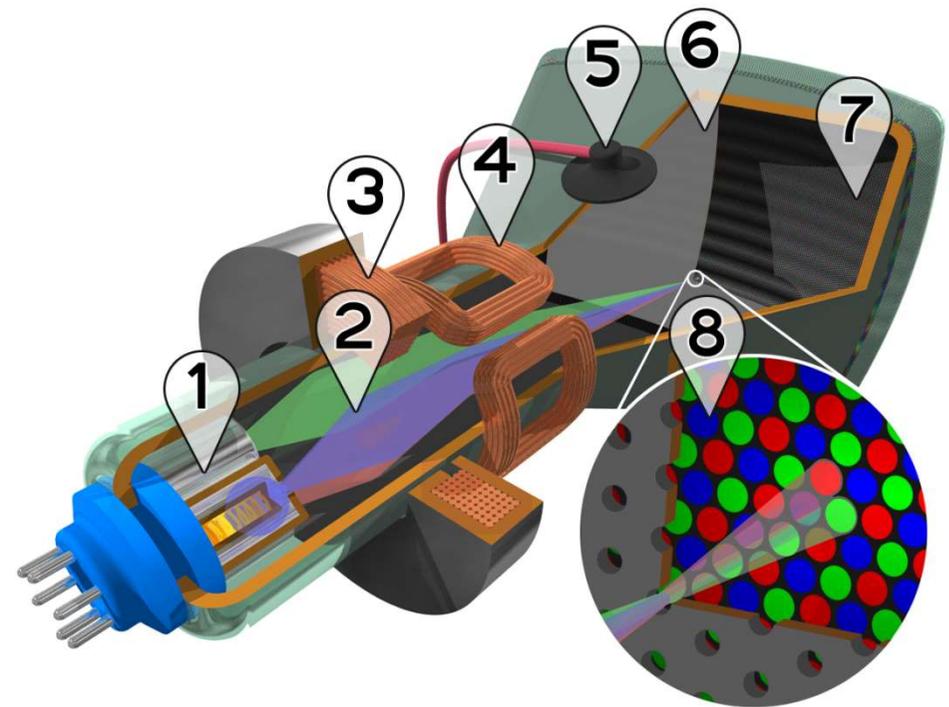
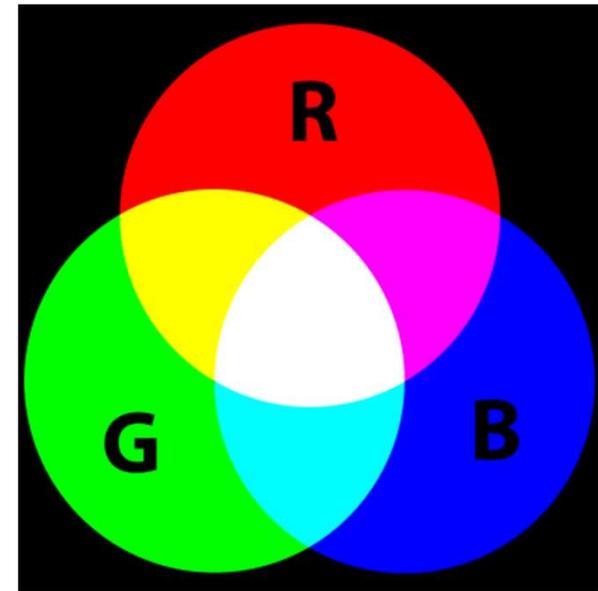
$$(a) \quad v = 1000i \quad (b) \quad v = 0.003 \frac{di}{dt} \quad (c) \quad v = 10 + 10000 \int_0^t i dt$$

- 求
- (1) **t=3ms**时，该元件吸收的功率为多少？
  - (2) 长时间来看，元件吸收的平均功率为多少？
  - (3) 已知**a**元件为电阻，**b**元件为电感，**c**元件为电容，根据上述计算结果你能够推断出什么结论来？

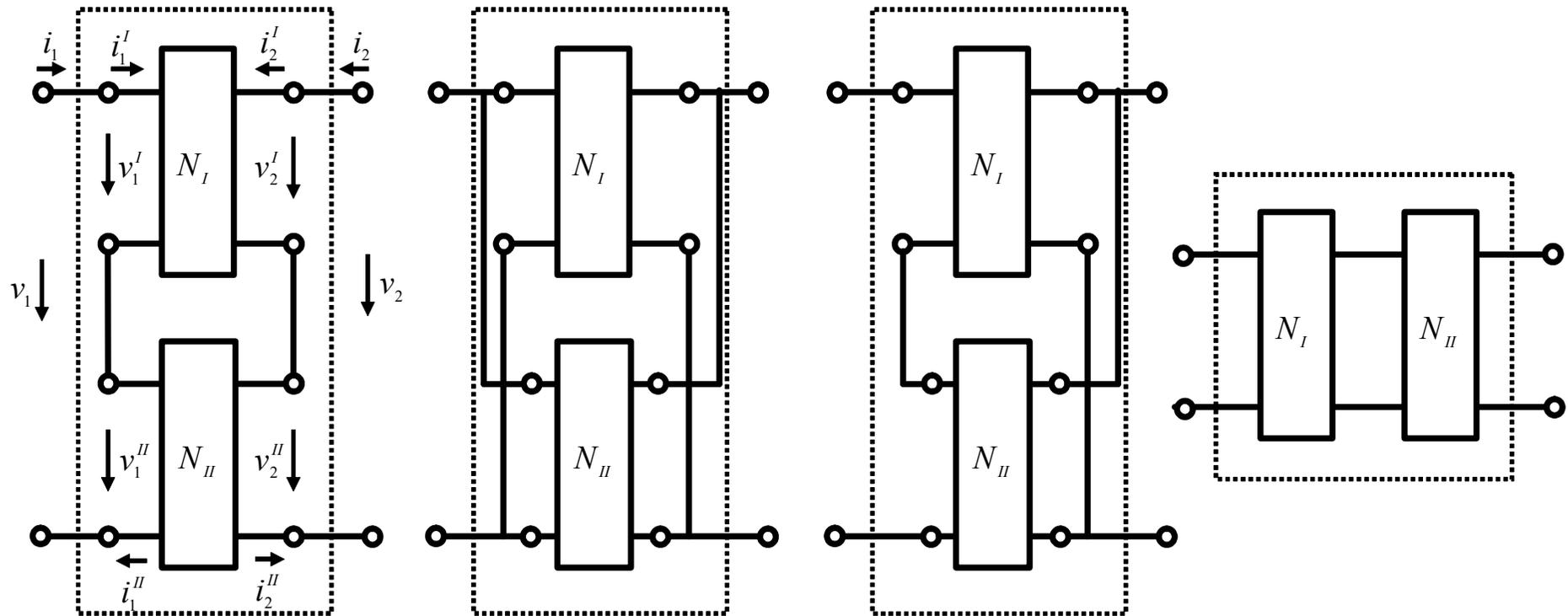
- **4、**画出线性时不变电阻和电容两端电流波形、电压波形，瞬时功率波形，由时域波形说明电阻是耗能的，电容是储能且可释放能量的。假设加载到元件两端的电压为正弦波。（画示意图即可）

# 作业5 激励器需要 大功率激励

- 某阴极射线管中的电子束每秒可发射 $10^{15}$ 个电子，我们希望加速电子束，使得电子束具有**10W**的功率，请问需要多大的驱动电压？



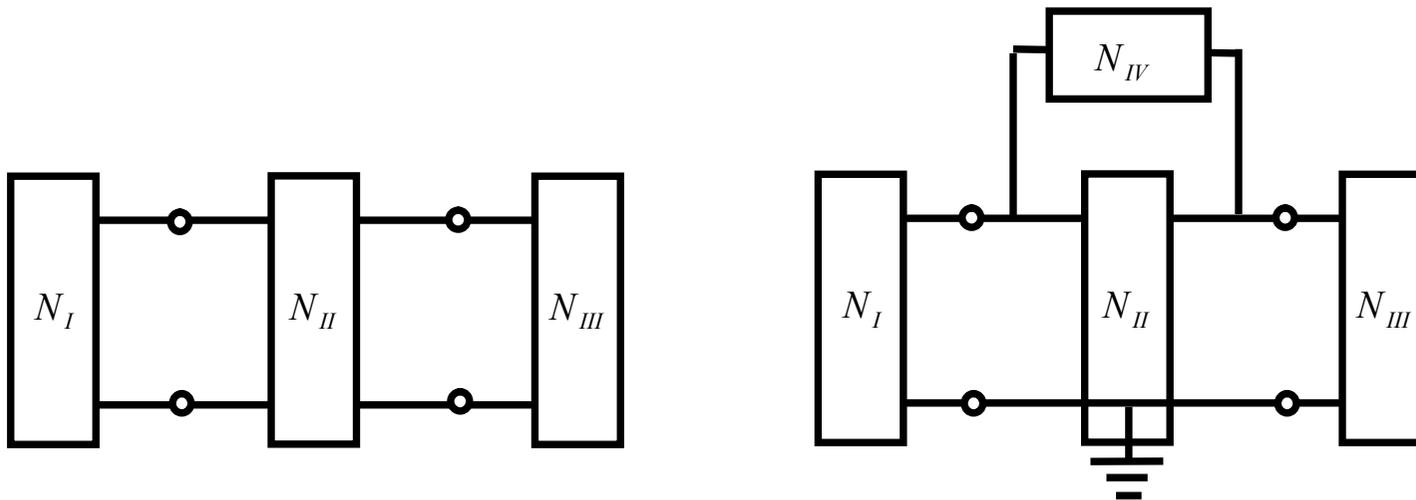
# 作业6：二端口网络连接关系描述



- p39, 练习2.3.3, 题目要求

# 作业7：网络连接关系描述

- 如图所示为二端口网络和单端口网络的连接，请标记各网络的端口电压、端口电流，写出有连接关系的这些端口电压电流之间的连接关系

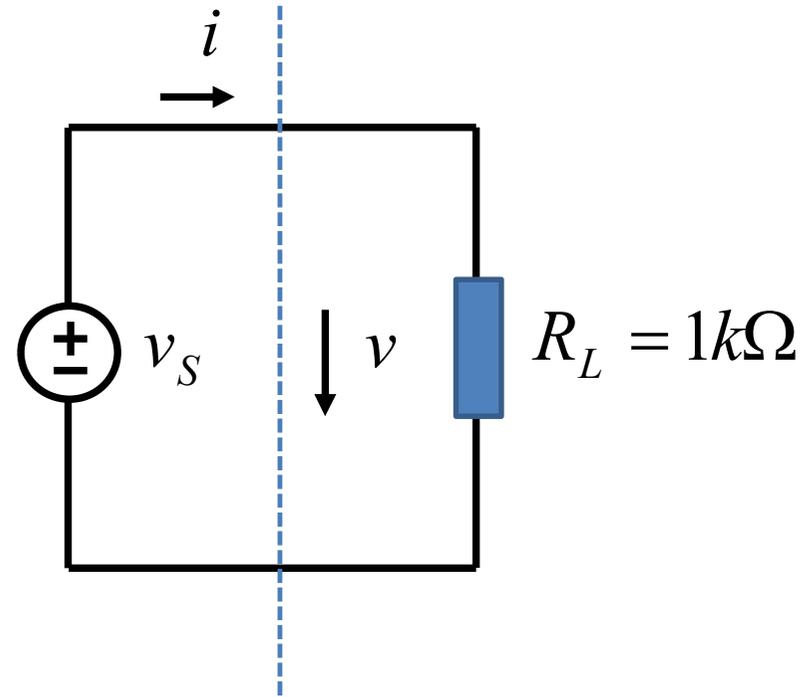


确认每个端口都满足端口条件

# 作业8：画伏安特性曲线

- 如图所示，恒压源和电阻连接，在 $v$  $i$ 坐标系中画出两个元件的伏安特性曲线，求交点对应电压电流，给出负载电阻上的电压和电流表达式

- 直流电压源
- 交流电压源



$$v_S(t) = V_{S0} = 10V$$

$$v_S(t) = 10 \cos \omega t \quad (V)$$

弹幕  
退出直播

# CAD练习：进一步熟悉CAD工具

- 源对接负载
  - 源两种情况
    - 直流电压源
    - 交流电流源
  - 负载三种情况
    - 纯阻负载
    - 纯容负载
    - 串联阻容负载

提交报告时，说明你是如何操作获得这些结果的？

助教为了便于批改，可以统一确定电容值/电阻值/电源电压形式等。

- 仿真获得电源输出功率，电阻获得功率，电容获得功率
  - 说明：电源输出功率=电阻吸收功率，电容不消耗功率
  - 练习：学会用**CAD**工具做相关计算，例如功率计算