

# 电子电路与系统基础I

## 理论课第三讲 电源和电阻II

(各种形式的电阻与电源，源阻简单连接的分析)

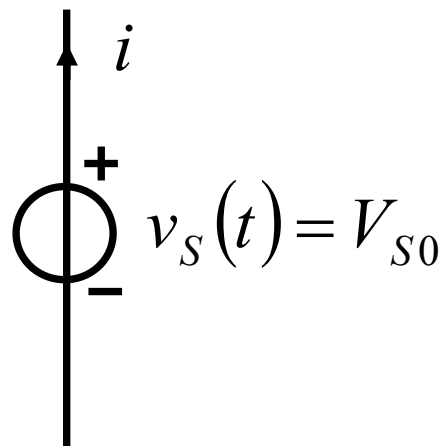
李国林  
清华大学电子工程系

# 电源和电阻II 大纲

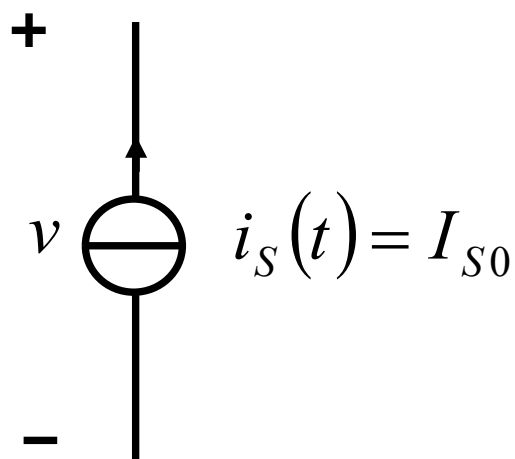
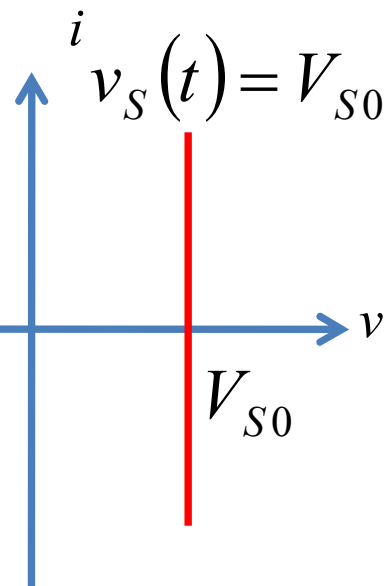
- 线性内阻电源
  - 理想电源
  - 线性内阻电源
- 各种形式的电阻
- 各种形式的电源

# 1.1

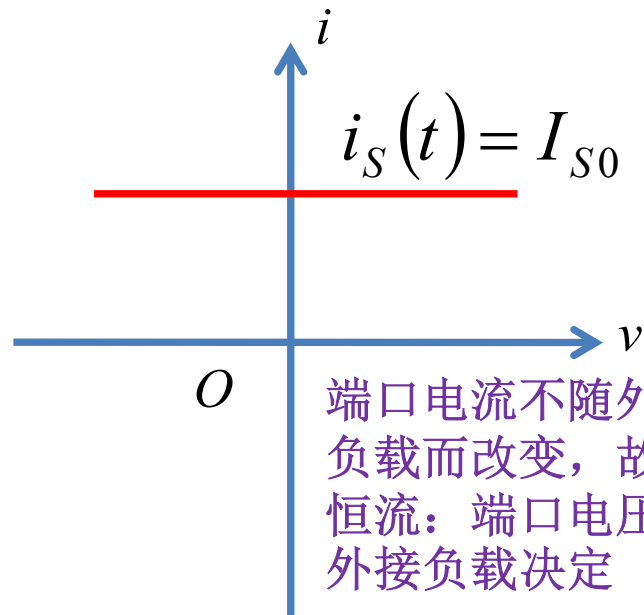
# 理想电源



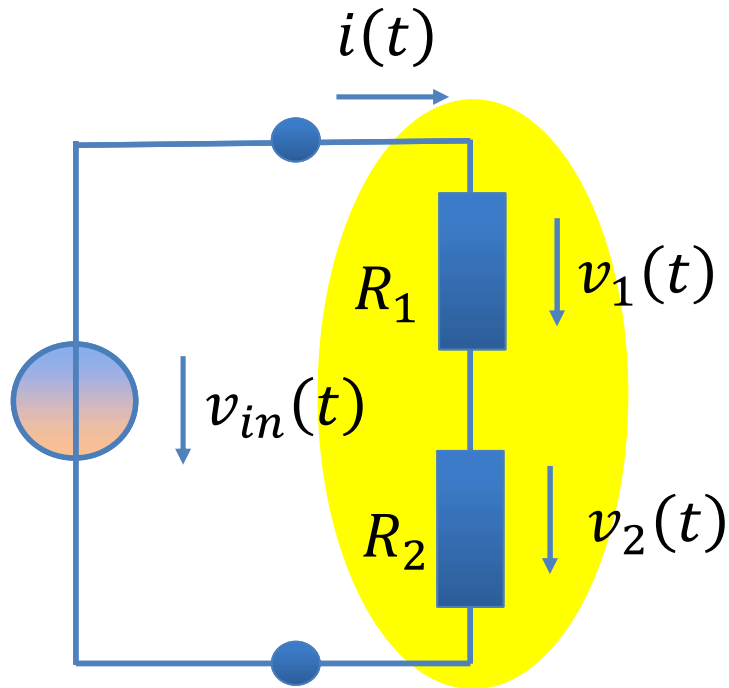
端口电压不随外接负载而改变，故称恒压：端口电流由外接负载决定



端口电流不随外接负载而改变，故称恒流：端口电压由外接负载决定



# 电阻分压电路



$$R_{eq} = \frac{v_{in}(t)}{i(t)} = R_1 + R_2$$

等效电阻

$$v_{in}(t) = v_1(t) + v_2(t)$$

串联总电压等于分电压之和

$$v_1(t) = i(t)R_1$$

$$v_2(t) = i(t)R_2$$

$$v_{in}(t) = v_1(t) + v_2(t)$$

$$= i(t)R_1 + i(t)R_2$$

$$= i(t)(R_1 + R_2)$$

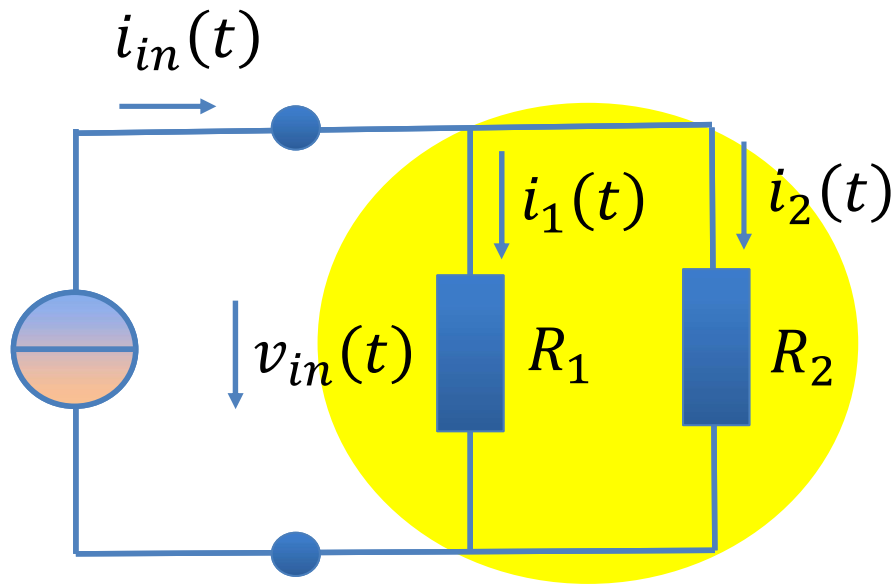
$$i(t) = \frac{v_{in}(t)}{R_1 + R_2}$$

$$v_1(t) = i(t)R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{in}(t)$$

$$v_2(t) = i(t)R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{in}(t)$$

分压系数

# 电阻分流电路



$$i_{in}(t) = i_1(t) + i_2(t)$$

并联总电流等于分电流之和

$$i_1(t) = v_{in}(t)G_1$$

$$i_2(t) = v_{in}(t)G_2$$

$$\begin{aligned} i_{in}(t) &= i_1(t) + i_2(t) \\ &= v_{in}(t)G_1 + v_{in}(t)G_2 \\ &= v_{in}(t)(G_1 + G_2) \end{aligned}$$

$$v_{in}(t) = \frac{i_{in}(t)}{G_1 + G_2}$$

$$G_{eq} = \frac{i_{in}(t)}{v_{in}(t)} = G_1 + G_2$$

等效电导

$$i_1(t) = v_{in}(t)G_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} i_{in}(t)$$

$$i_2(t) = v_{in}(t)G_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} i_{in}(t)$$

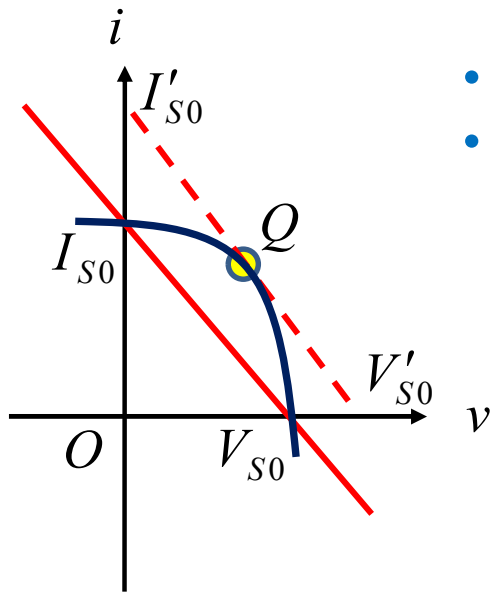
$$R_{eq} = \frac{v_{in}(t)}{i_{in}(t)} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

等效电阻

分流系数

# 1.2 线性内阻电源

- 图示为某太阳能电池单元的端口伏安特性曲线
  - 端口电压和端口电流按电源端口关联参考方向定义
    - 第一象限，向外电路释放功率，属正常工作区域
    - 第二、四象限，则吸收外电路的功率



- 可将曲线抽象为直线：化曲为直，简化分析
- 同时也确实存在具有直线伏安特性的电源

$$\frac{v}{V_{S0}} + \frac{i}{I_{S0}} = 1$$

该直线是两点的连线  
 $(V_{S0}, 0) \text{ --- } (0, I_{S0})$

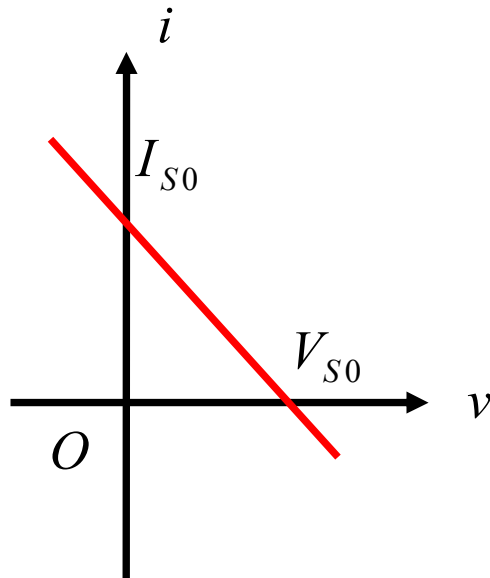
# 直线伏安特性

$$\frac{v}{V_{S0}} + \frac{i}{I_{S0}} = 1$$

端口伏安特性方程的一般形式

$$f(v, i) = \frac{v}{V_{S0}} + \frac{i}{I_{S0}} - 1 = 0$$

$C_2^1 = 2$ 种显式表达方式



流控形式

$$\frac{v}{V_{S0}} = 1 - \frac{i}{I_{S0}}$$

$$v = V_{S0} - i \cdot R_S$$

$$v = f_{vi}(i) = V_{S0} - iR_S$$

$$R_S = \frac{V_{S0}}{I_{S0}}$$

压控形式

$$\frac{i}{I_{S0}} = 1 - \frac{v}{V_{S0}}$$

$$i = I_{S0} - v \cdot G_S$$

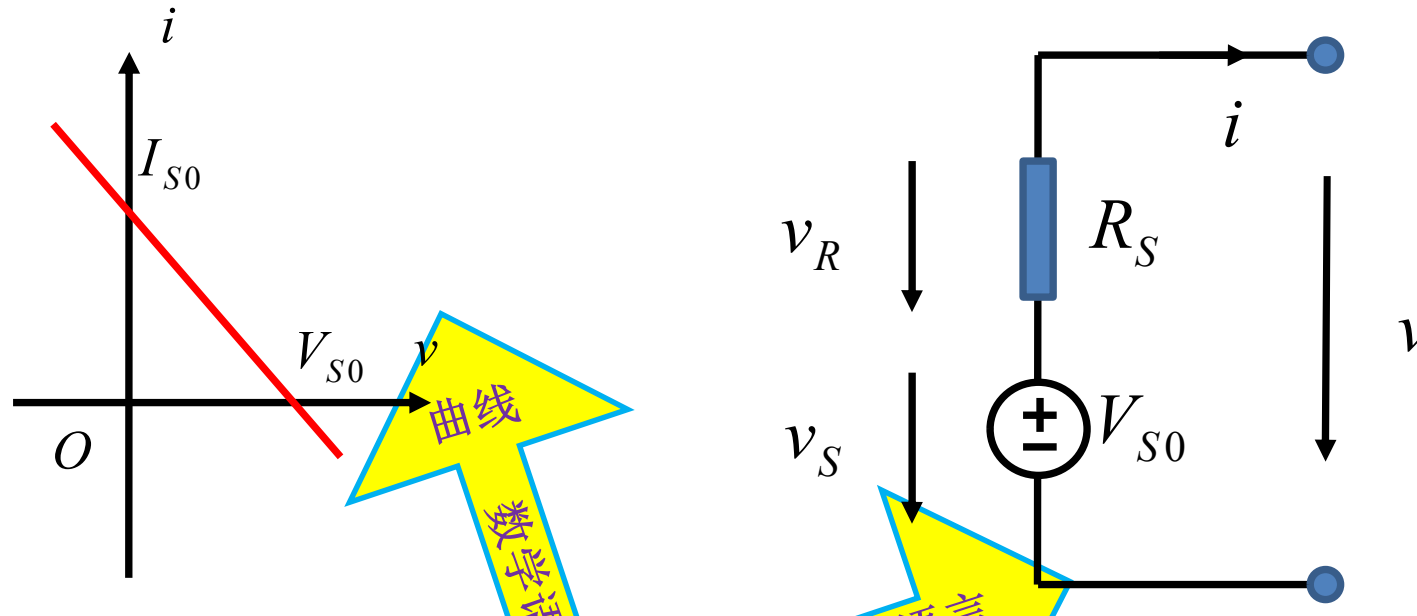
$$i = f_{iv}(v) = I_{S0} - v \cdot G_S$$

$$G_S = \frac{I_{S0}}{V_{S0}} = \frac{1}{R_S}$$

伏安特性是单调变化的  
即可压控，又可流控表述

直线的斜率

# 流控等效电路：有内阻的电压源



$$v = V_{S0} - i \cdot R_S$$

$$R_S = \frac{V_{S0}}{I_{S0}}$$

曲线  
数学  
电路语言

$$v = v_R + v_S$$

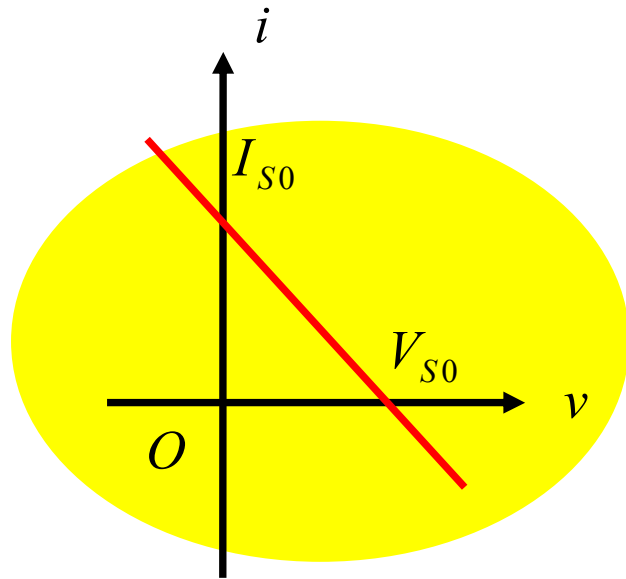
$$v = -i \cdot R_S + V_{S0}$$

$$v = f_{vi}(i) = V_{S0} - iR_S$$

流控形式  
戴维南电压源

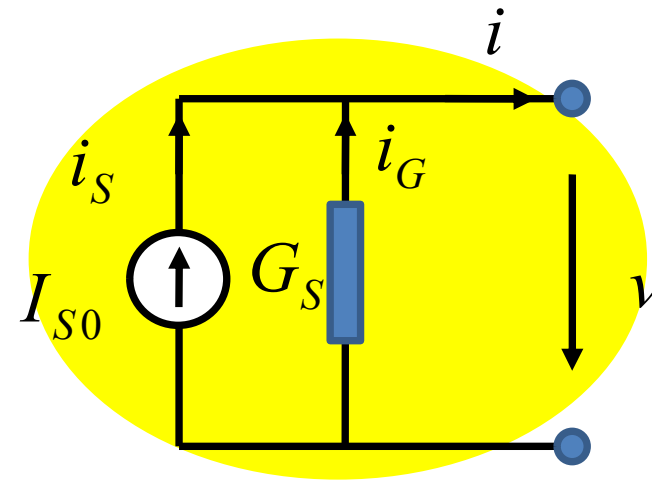


# 压控等效电路：有内阻的电流源



$$i = I_{S0} - v \cdot G_S$$

$$G_S = \frac{I_{S0}}{V_{S0}} = \frac{1}{R_S}$$



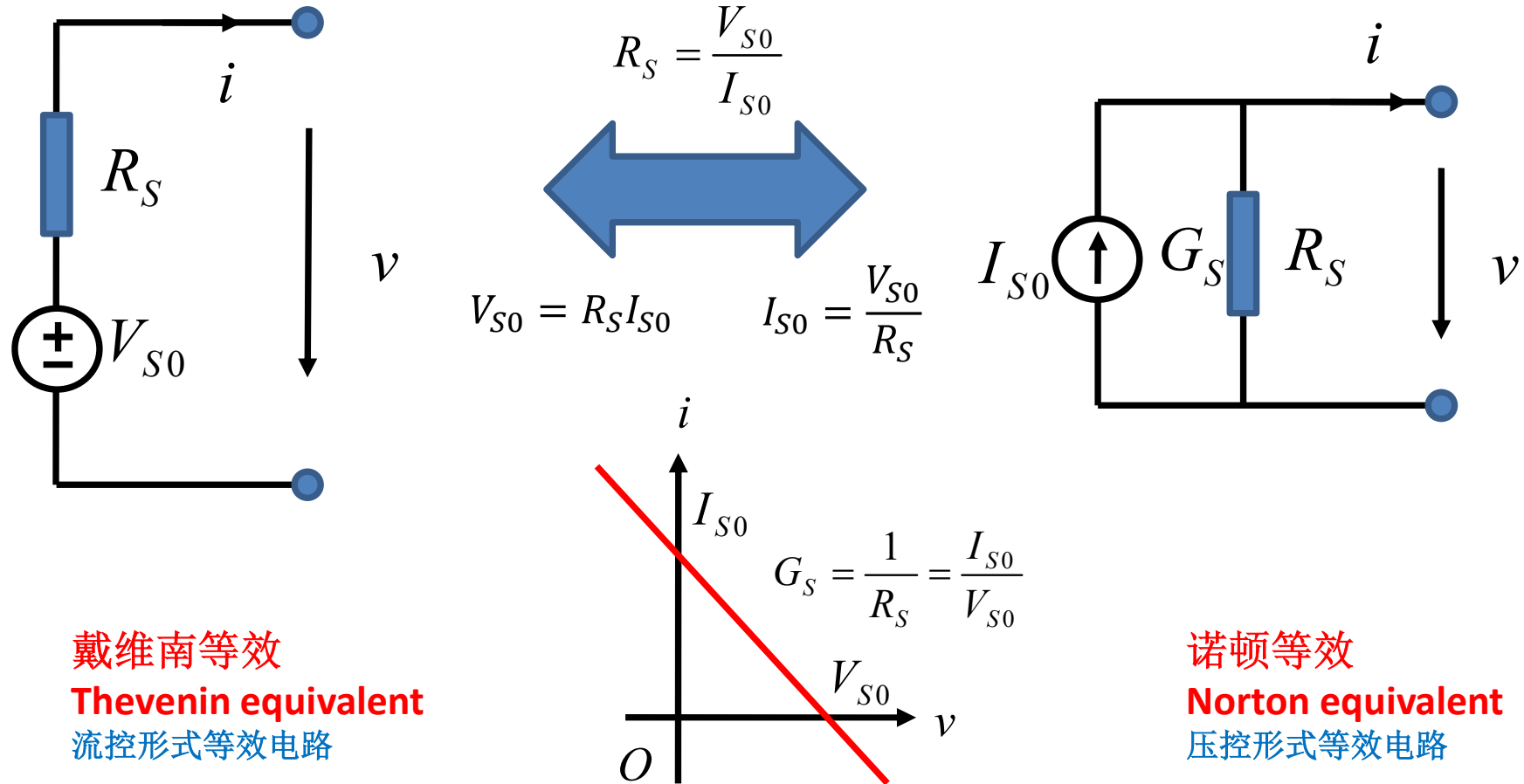
$$i = f_{iv}(v) = I_{S0} - v \cdot G_S$$

$$i = i_G + i_S$$

压控形式  
诺顿电流源

$$i = -v \cdot G_S + I_{S0}$$

# 电源的两种等效形式

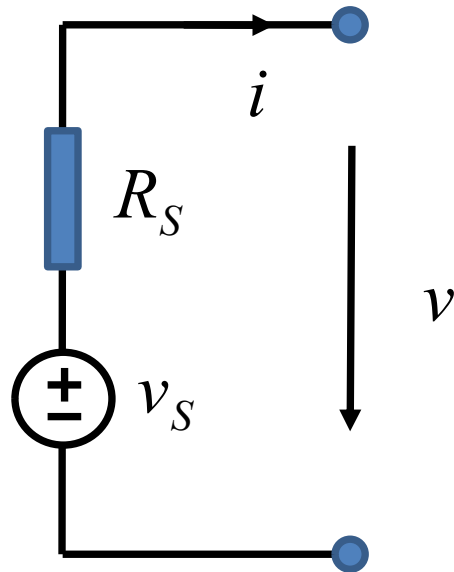


戴维南等效  
**Thevenin equivalent**  
 流控形式等效电路

诺顿等效  
**Norton equivalent**  
 压控形式等效电路

从外端口的伏安特性看：这两种等效完全等价

# 电源内阻代表了什么？



$$v = v_S - i \cdot R_S$$

$$p_{\text{释}} = v \cdot i = (v_S - i \cdot R_S) \cdot i$$

$$= v_S \cdot i - i^2 \cdot R_S$$

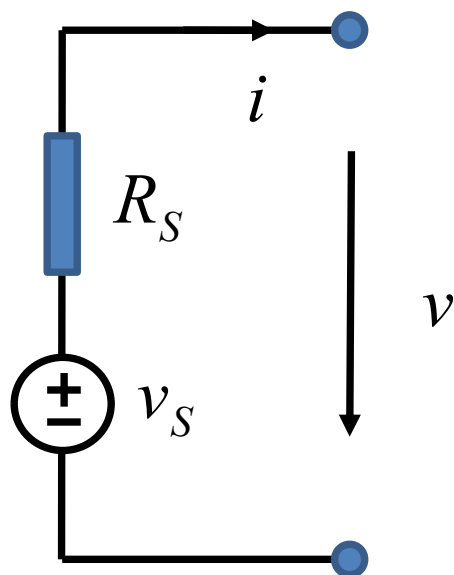
$$= -R_S \left( i^2 - \frac{v_S}{R_S} i \right)$$

$$= -R_S \left( i - \frac{1}{2} \frac{v_S}{R_S} \right)^2 + \frac{1}{4} \frac{v_S^2}{R_S}$$

$$P_{\text{释}} = \overline{p_{\text{释}}} \leq \frac{1}{4} \frac{V_{S,rms}^2}{R_S} = P_{S,\max}$$

电源内阻代表了源的能力大小，  
理想电压源具有无限功率能力

# 额定功率



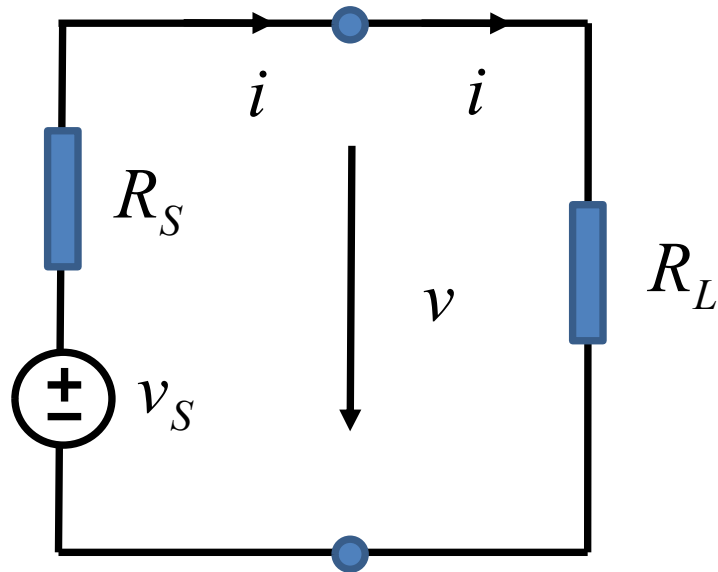
- 电源能够输出的最大功率称为电源的额定功率 (**rated power**)
- 什么时候能够输出最大功率呢？

$$i = \frac{1}{2} \frac{v_S}{R_S}$$

$$P_{\text{释}} = \overline{p_{\text{释}}} = \overline{v \cdot i} = -R_S \left( i - \frac{1}{2} \frac{v_S}{R_S} \right)^2 + \frac{1}{4} \frac{v_S^2}{R_S} \leq \frac{1}{4} \frac{V_{S,rms}^2}{R_S} = P_{S,\max}$$

# 最大功率传输匹配

impedance matching for maximum power transfer



$$P_{\text{信源释放}} = \overline{v \cdot i} = P_{\text{负载吸收}}$$

$$P_L = \overline{v \cdot i} = P_{\text{负载吸收}} = P_{\text{信源释放}}$$

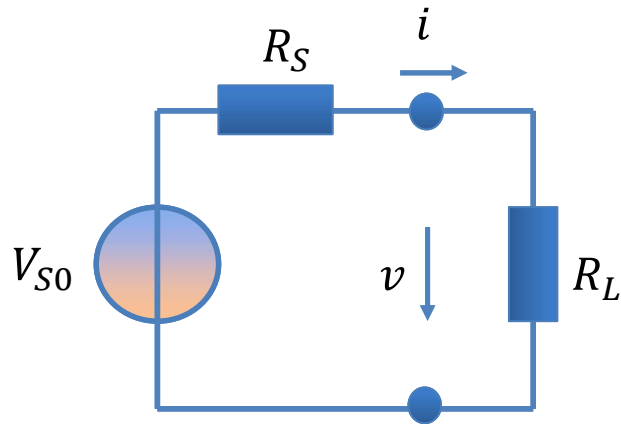
$$\leq \frac{V_{S,rms}^2}{4R_S}$$

$$R_L = R_S$$

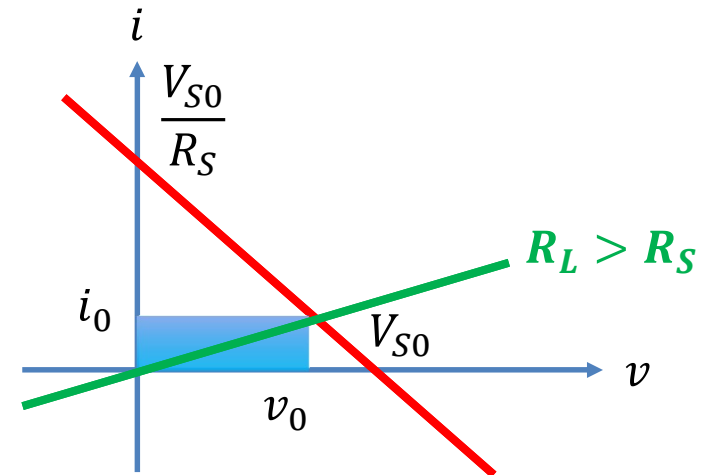
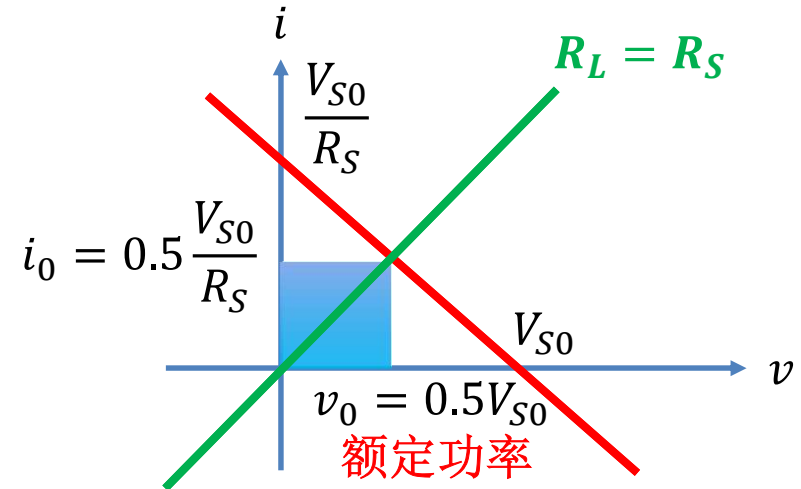
$$i = \frac{v_S}{R_S + R_L} \stackrel{R_L=R_S}{=} \frac{v_S}{2R_S}$$

- 只有当负载电阻等于电源内阻时，负载才能获得电源能够输出的最大功率，这被称为最大功率传输匹配

# 图解法看额定功率



按源关联参考和阻关联参考方向定义端口电压电流，使得对接端口共用一套端口电压电流定义，从而可以在一个  $v$ - $i$  平面上画出电源和负载的伏安特性曲线，可以用图解法进行电路分析

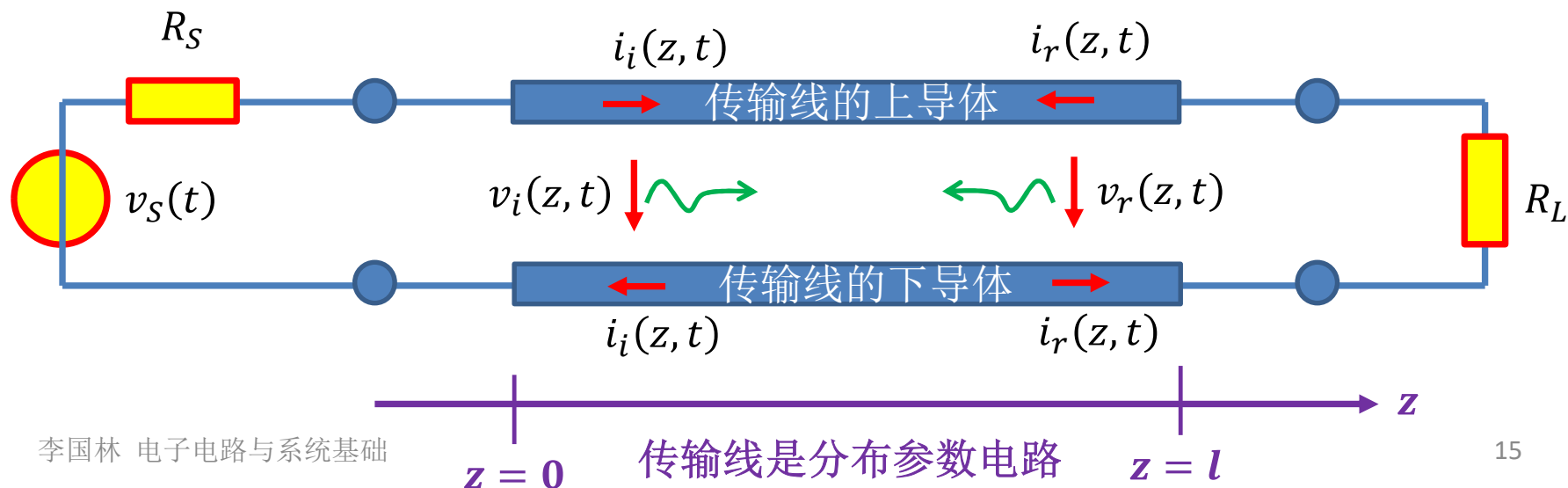


# 短路线 传输线

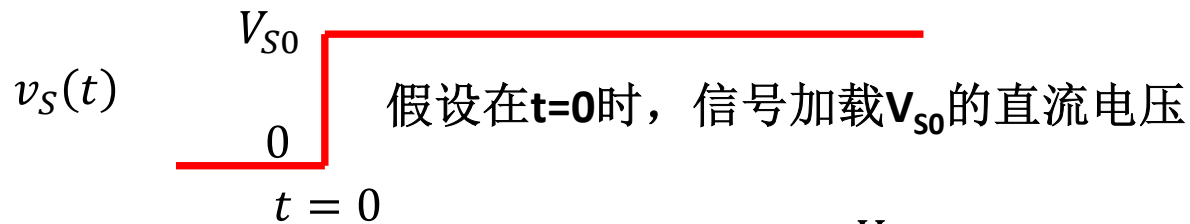
实际信源和负载之间总是有一段传输线，如同轴电缆将信号源和负载电阻连接起来。低频时，传输线被视为短路线，负载电阻直接获得信源电压的分压；但是频率较高时，传输线传播延时和信号周期比不可忽视，传输线上的电磁波反射则需要予以考察。传输线上的电磁波传播视为电压波（电场）和电流波（磁场）的传播，显然这种波动传播和传输线位置相关，记从源向负载方向传播的电压波电流波为 $v_i(z, t), i_i(z, t)$ ，从负载到源方向传播的电压波和电流波为 $v_r(z, t), i_r(z, t)$ ，则有如下关系

$$\frac{v_i(z, t)}{i_i(z, t)} = Z_0 = \frac{v_r(z, t)}{i_r(z, t)}$$

$Z_0$ 是传输线的特征阻抗，代表传输线上电场和磁场沿传输线传播方向相互激发相互转换的比例关系：假设一个半无限长传输线，在端口加载电压，电磁波沿传输线传播下去，则在端口产生一个流入电流，端口加载电压和端口输入电流之比定义为传输线的特征阻抗 $Z_0$ ，半无限长传输线因为吸收电功率而被等效为电阻 $Z_0$



# 不匹配 则反射



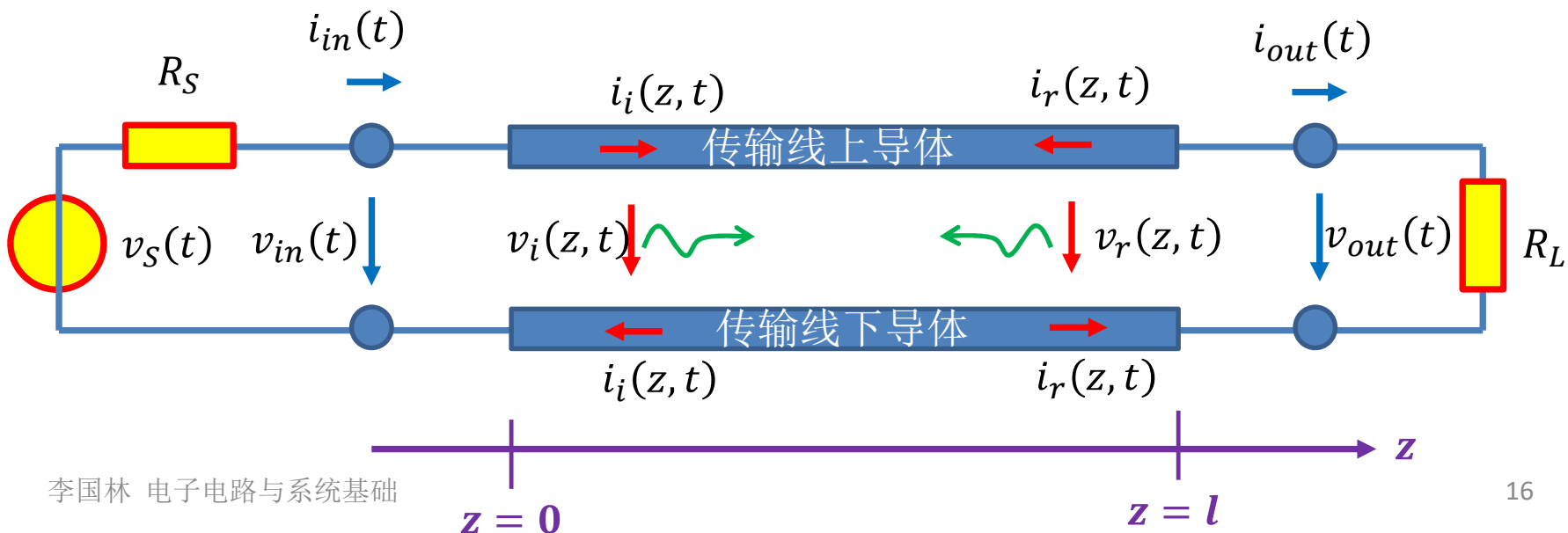
$$v_{in}(0) = \frac{Z_0}{R_S + Z_0} V_{S0} = v_i(0,0) \quad i_{in}(0) = \frac{V_{S0}}{R_S + Z_0} = i_i(0,0)$$

传输线输入端口产生的分压经一个传输线延时 $T_D$ 到达传输线末端

$$v_i(l, T_D^-) = v_i(0,0) \quad i_i(l, T_D^-) = i_i(0,0)$$

如果负载电阻和传输线特征阻抗不同，则会产生反射电压和反射电流，故而

$$v_{out}(T_D^+) = v_i(l, T_D^+) + v_r(l, T_D^+) \quad i_{out}(T_D^+) = i_i(l, T_D^+) - i_r(l, T_D^+)$$





# 反射系数

$$v_{out}(T_D^+) = v_i(l, T_D^+) + v_r(l, T_D^+) \quad i_{out}(T_D^+) = i_i(l, T_D^+) - i_r(l, T_D^+)$$

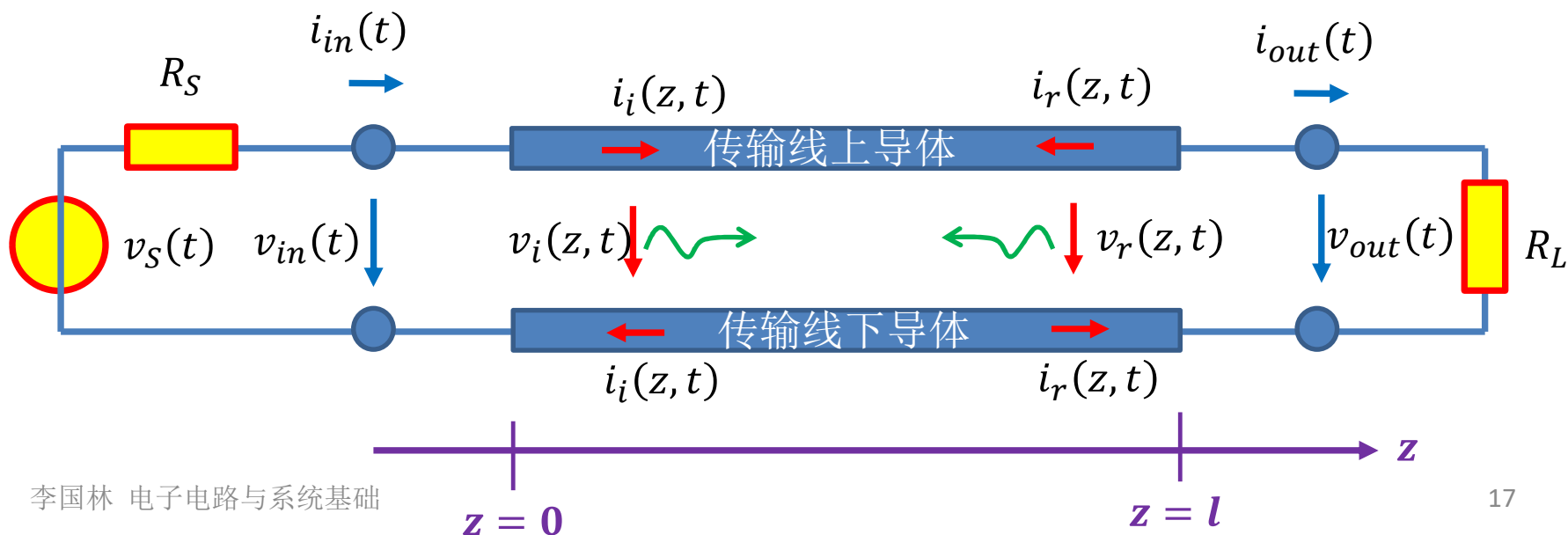
传输线输出端口电压电流关系被负载电阻所约束

$$R_L = \frac{v_{out}(T_D^+)}{i_{out}(T_D^+)} = \frac{v_i(l, T_D^+) + v_r(l, T_D^+)}{i_i(l, T_D^+) - i_r(l, T_D^+)} = \frac{Z_0 i_i(l, T_D^+) + Z_0 i_r(l, T_D^+)}{i_i(l, T_D^+) - i_r(l, T_D^+)} = Z_0 \frac{i_i(l, T_D^+) + i_r(l, T_D^+)}{i_i(l, T_D^+) - i_r(l, T_D^+)}$$

$$= Z_0 \frac{1 + \frac{i_r(l, T_D^+)}{i_i(l, T_D^+)}}{1 - \frac{i_r(l, T_D^+)}{i_i(l, T_D^+)}} = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \Rightarrow \Gamma = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}$$

$$v_r(l, T_D^+) = \Gamma v_i(l, T_D^+)$$

$$i_r(l, T_D^+) = \Gamma i_i(l, T_D^+)$$



# 功率反射

为了简单起见，假设信源内阻  $R_S$  和传输线特征阻抗  $Z_0$  相等，那么在  $t = 0$  瞬间，由于信源感受到的是匹配阻抗  $Z_0 = R_S$ ，故而将其额定功率输出，传输线输入端口吸收了信源的额定功率，并以电压波和电流波形式沿传输线传播，经过一个传输线延时  $T_D$ ，到达负载端。如果负载电阻和传输线特征阻抗（信源内阻）不等，则会导致反射，

$$v_r(l, T_D^+) = \Gamma v_i(l, T_D^+)$$

$$i_r(l, T_D^+) = \Gamma i_i(l, T_D^+)$$

负载电压为入射电压和反射电压之和， ...

$$v_{out}(T_D^+) = v_i(l, T_D^+)(1 + \Gamma) = 0.5V_{S0} \frac{2R_L}{R_L + R_S} = \frac{R_L}{R_L + R_S} V_{S0}$$

$$i_{out}(T_D^+) = i_i(l, T_D^+)(1 - \Gamma) = \frac{V_{S0}}{2R_S} \frac{2R_S}{R_L + R_S} = \frac{V_{S0}}{R_L + R_S}$$

负载吸收功率为

$$P_L(T_D^+) = v_{out}(T_D^+)i_{out}(T_D^+) = \frac{R_L}{(R_L + R_S)^2} V_{S0}^2$$

沿传输线反方向反射回去的功率为

$$P_r(T_D^+) = v_r(l, T_D^+)i_r(l, T_D^+) = \Gamma^2 v_i(l, T_D^+)i_i(l, T_D^+) = \Gamma^2 v_i(0, 0)i_i(0, 0) = \Gamma^2 P_{S,max}$$

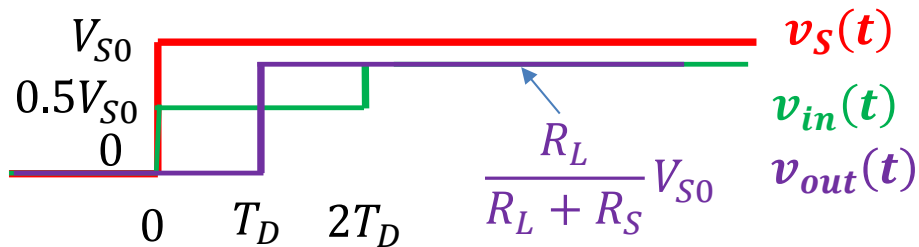
$$\Gamma = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} = \frac{R_L - R_S}{R_L + R_S}$$

可以证明：

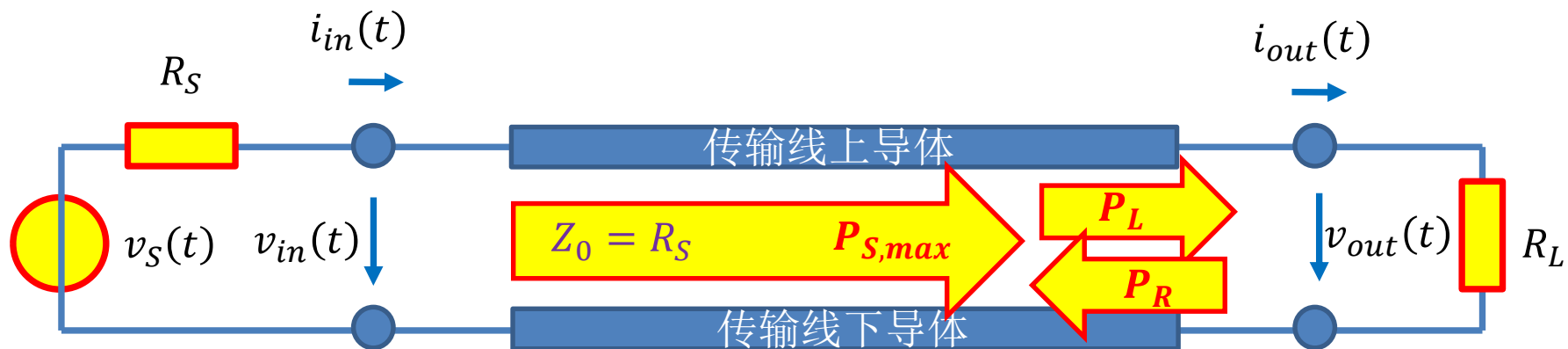
$$P_L(T_D^+) + P_r(T_D^+) = P_{S,max}$$

从源端入射过来的额定功率（ $P_{S,max}$ ），一部分被负载吸收（ $P_L$ ），一部分被反射回去（ $P_r$ ）

# 不匹配 则反射



一个 $T_D$ 延时，负载看到信源，两个 $T_D$ 延时，信源看到负载



在信源内阻等于传输特征阻抗假设下，一个传输线传播延时后可实现电阻分压功能；如果传输特征阻抗和信源内阻和负载电阻均不相等，则需要更多次来回反射多个传输线传播延时后才会完成分压功能，传输线才能视为短路线。显然，短路线是传输线的低频模型，或者说，分压是等待足够长时间后的稳态结果，低频下等待时间和信号周期比可忽略不计

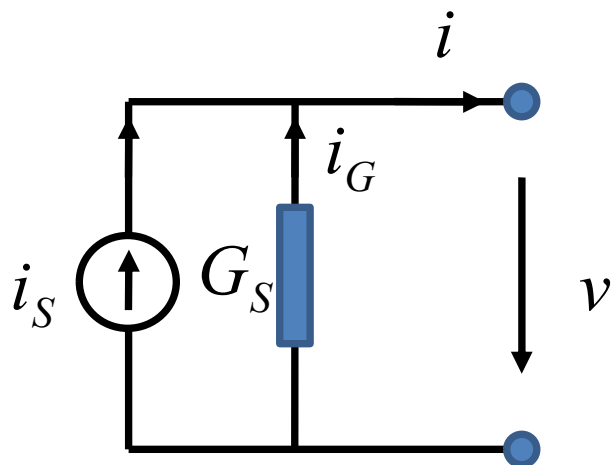
$$v_{out}(T_D^+) = v_i(l, T_D^+)(1 + \Gamma) = \frac{R_L}{R_L + R_S} V_{S0}$$

$$i_{out}(T_D^+) = i_i(l, T_D^+)(1 + \Gamma) = \frac{V_{S0}}{R_L + R_S}$$

$$P_L(T_D^+) = \frac{R_L}{(R_L + R_S)^2} V_{S0}^2 = i_{out}^2(T_D^+) R_L$$

$$P_r(T_D^+) = \Gamma^2 P_{S,max} \quad \Gamma = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} = \frac{R_L - R_S}{R_L + R_S}$$

# 电流源？



$$i = i_S - v \cdot G_S$$

- 自行推导，...

$$P_{\text{释}} = \overline{v \cdot i} = \dots$$
$$\leq \frac{1}{4} \frac{I_{S,rms}^2}{G_S} = P_{S,\max}$$

理想恒压源和理想恒流源有无限驱动能力

# 直流源和交流源的额定功率

$$P_{S,\max} = \frac{1}{4} \frac{V_{S,rms}^2}{R_S}$$

$$P_{S,\max} = \frac{1}{4} \frac{V_{S0}^2}{R_S}$$

$$P_{S,\max} = \frac{1}{8} \frac{V_{S,p}^2}{R_S}$$

单说功率时，一般都是指平均功率

$$P_{S,\max} = \frac{1}{4} \frac{I_{S,rms}^2}{G_S}$$

$$P_{S,\max} = \frac{1}{4} \frac{I_{S0}^2}{G_S}$$

$$P_{S,\max} = \frac{1}{8} \frac{I_{S,p}^2}{G_S}$$

电源额定功率  
的一般形式

直流电源

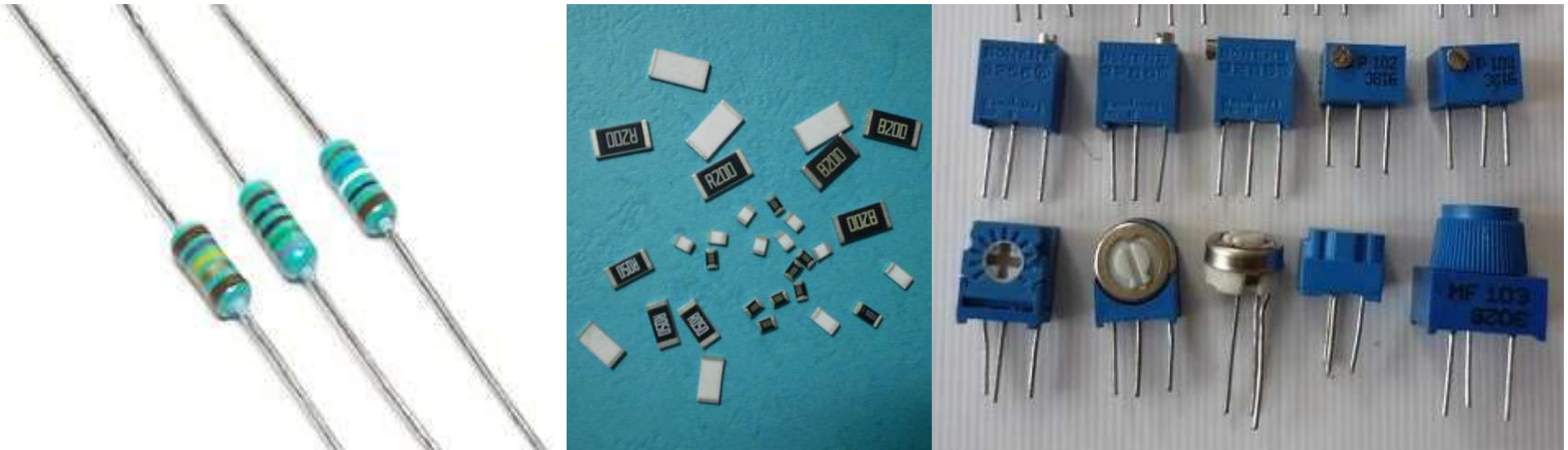
正弦波电源

源的能力大小由源幅度和内阻共同决定

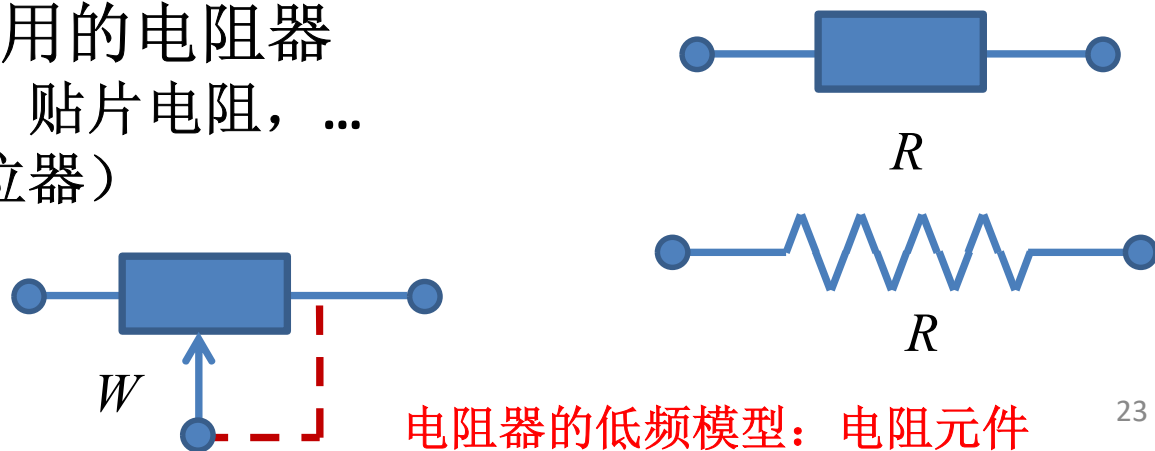
# 电源和电阻II 大纲

- 线性内阻电源
  - 理想电源、线性内阻电源
- 各种形式的电阻
  - 电阻
  - 短路与开路
  - 开关
  - **PN**结二极管
  - **N**型和**S**型非线性电阻
  - 晶体管：**MOSFET**
- 各种形式的电源

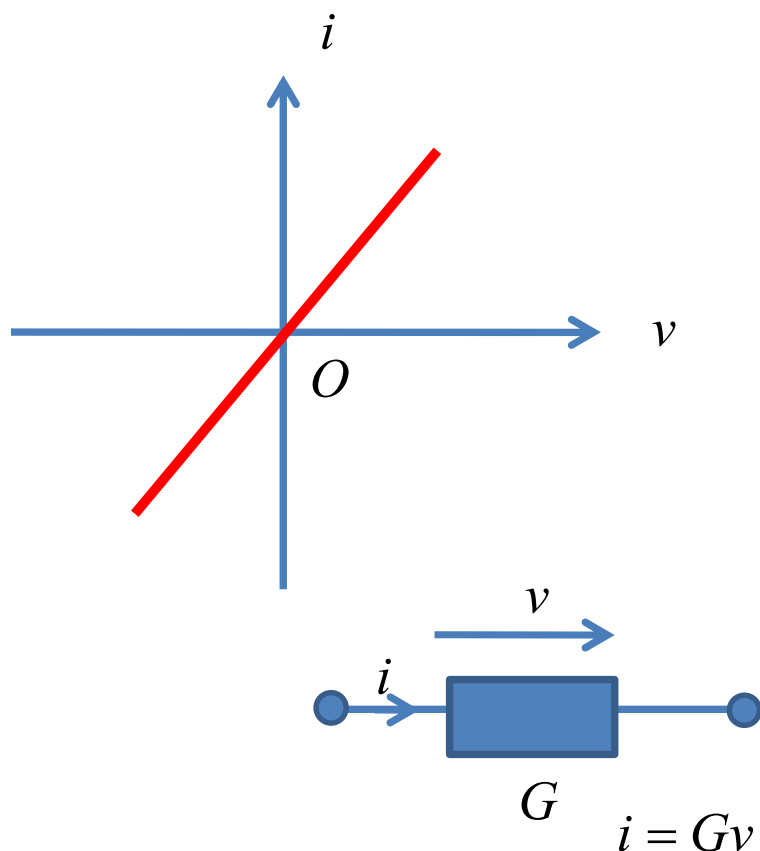
## 2.1 电阻器 resistor



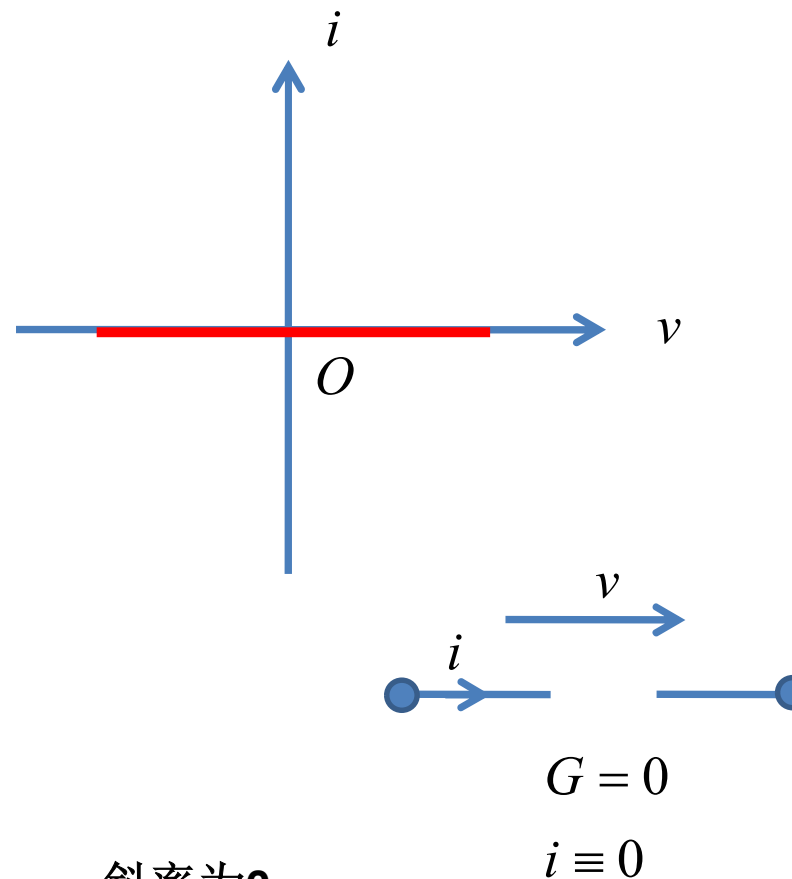
- 电路设计中，常用的电阻器
  - 金属薄膜电阻，贴片电阻，...
  - 可变电阻（电位器）



## 2.2 极限情况：开路



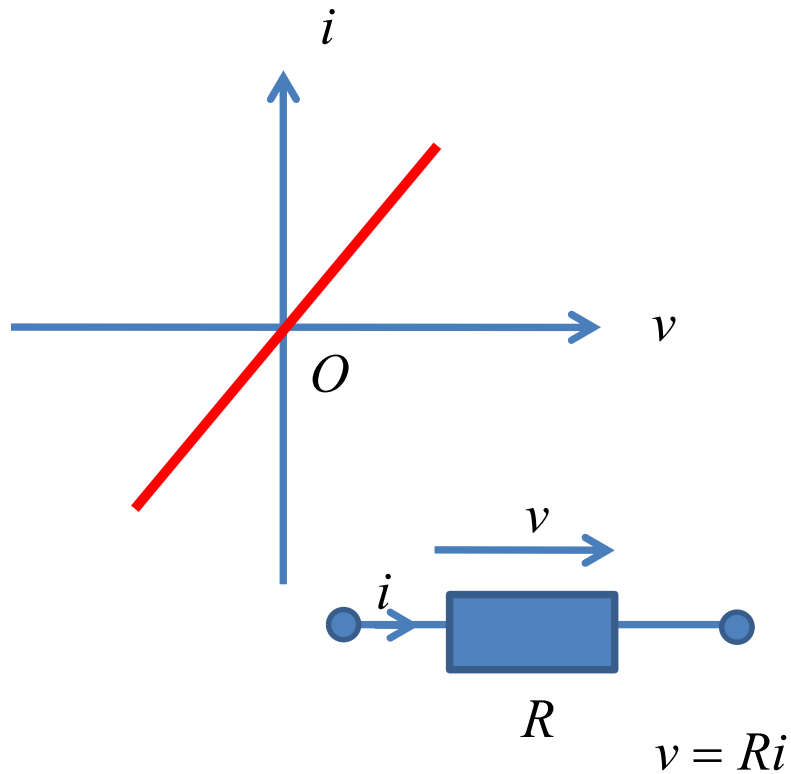
普通电阻伏安特性  
直线斜率为电导值



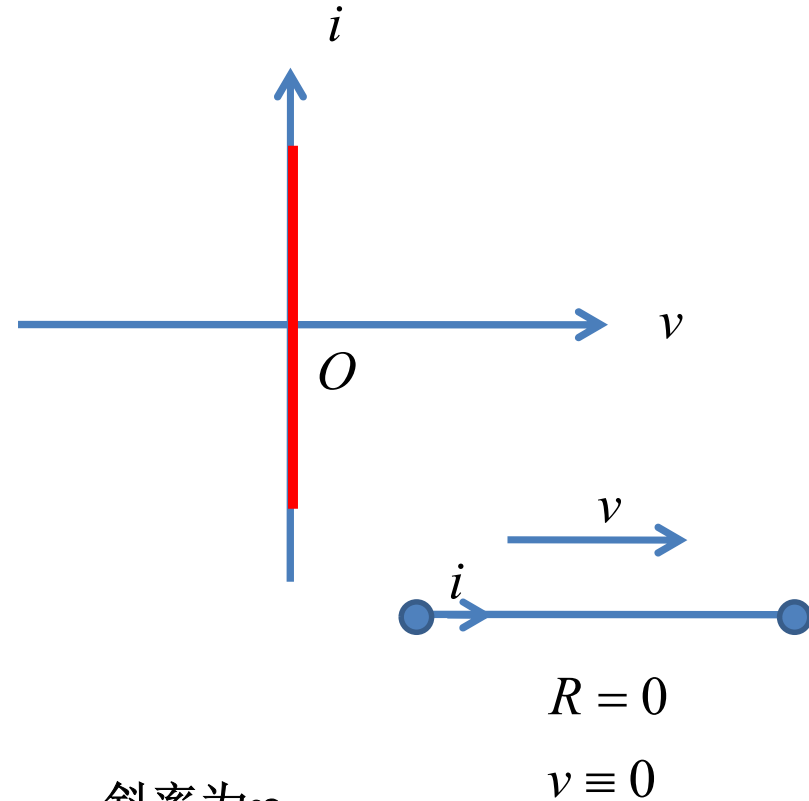
斜率为**0**  
电导值为**0**：不导电  
开路



# 极限情况：短路

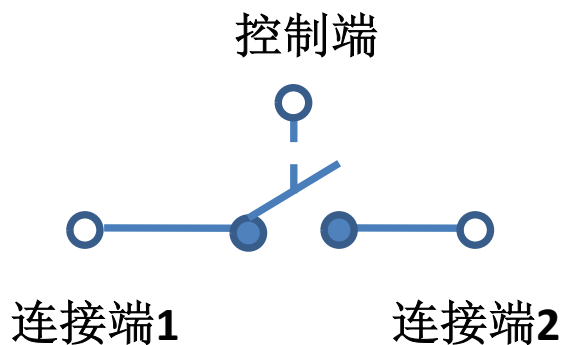


普通电阻伏安特性  
直线斜率为电导值

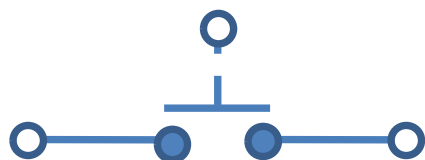


斜率为 $\infty$   
电导值为 $\infty$   
电阻值为**0**：电流流动没有任何阻力  
短路

## 2.3 开关

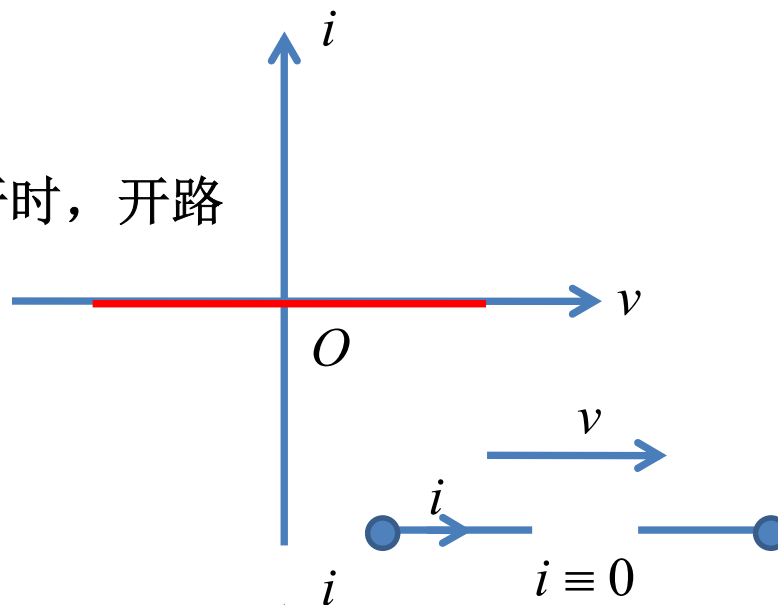


开关是三端器件: **three terminal component**  
理想模型为短路或开路

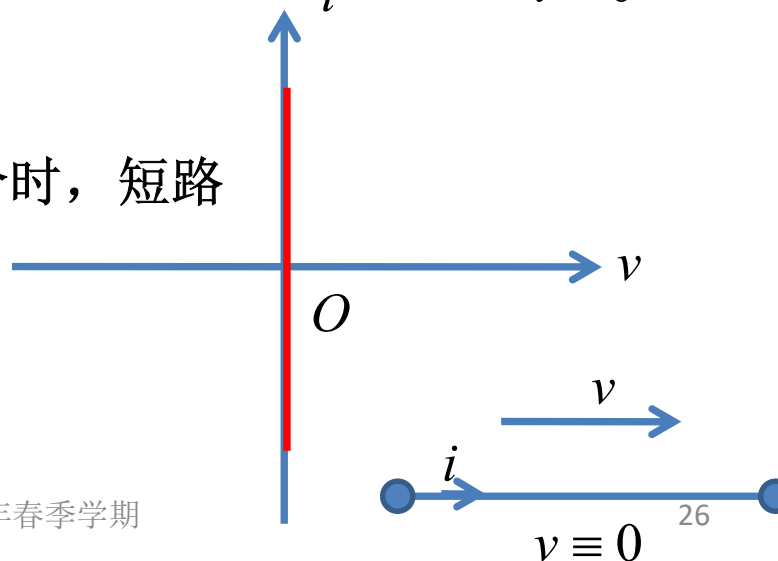


第二种常见开关符号

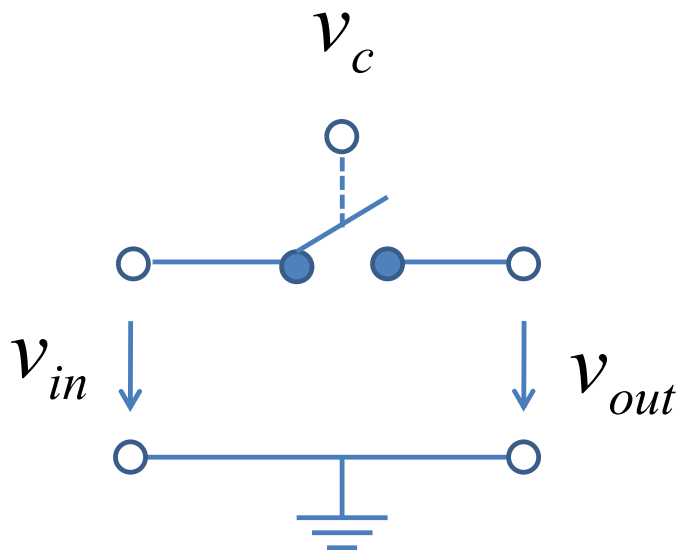
开关断开时, 开路



开关闭合时, 短路



# 开关是线性的



$$v_{out} = \begin{cases} v_{in} & v_c > 0 \text{ 开关闭合} \\ 0 & v_c < 0 \text{ 开关断开} \end{cases}$$

$$v_{out} = S_w(v_c) \cdot v_{in}$$

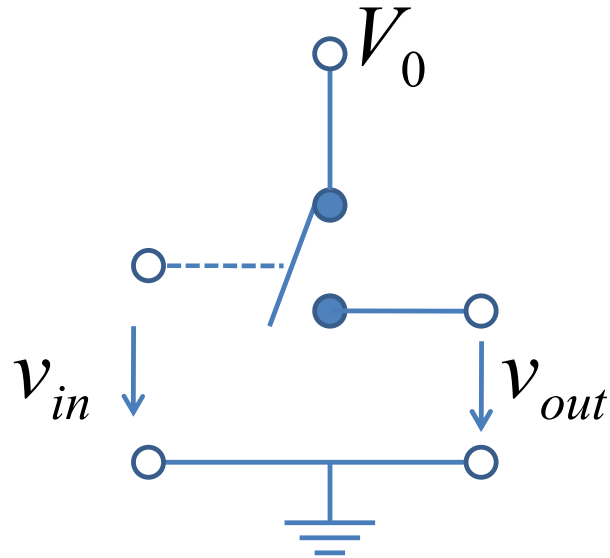
电子开关，控制端是电信号

- 添加一个地结点，构成三端口网络
- 如是使用的开关是线性的
  - 满足叠加性和均匀性
  - 但线性比值关系可能是时变的
    - 如果控制电压在正负值之间随时间而变化，则开关是线性时变系统

$$S_w(v_c) = \begin{cases} 1 & v_c > 0 \\ 0 & v_c < 0 \end{cases}$$

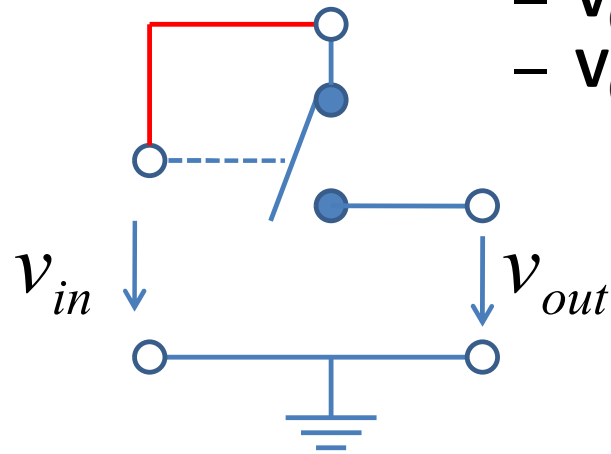
开关控制函数

# 开关是非线性的



$$v_{out} = \begin{cases} V_0 & v_{in} > 0 \text{ 开关闭合} \\ 0 & v_{in} < 0 \text{ 开关断开} \end{cases}$$

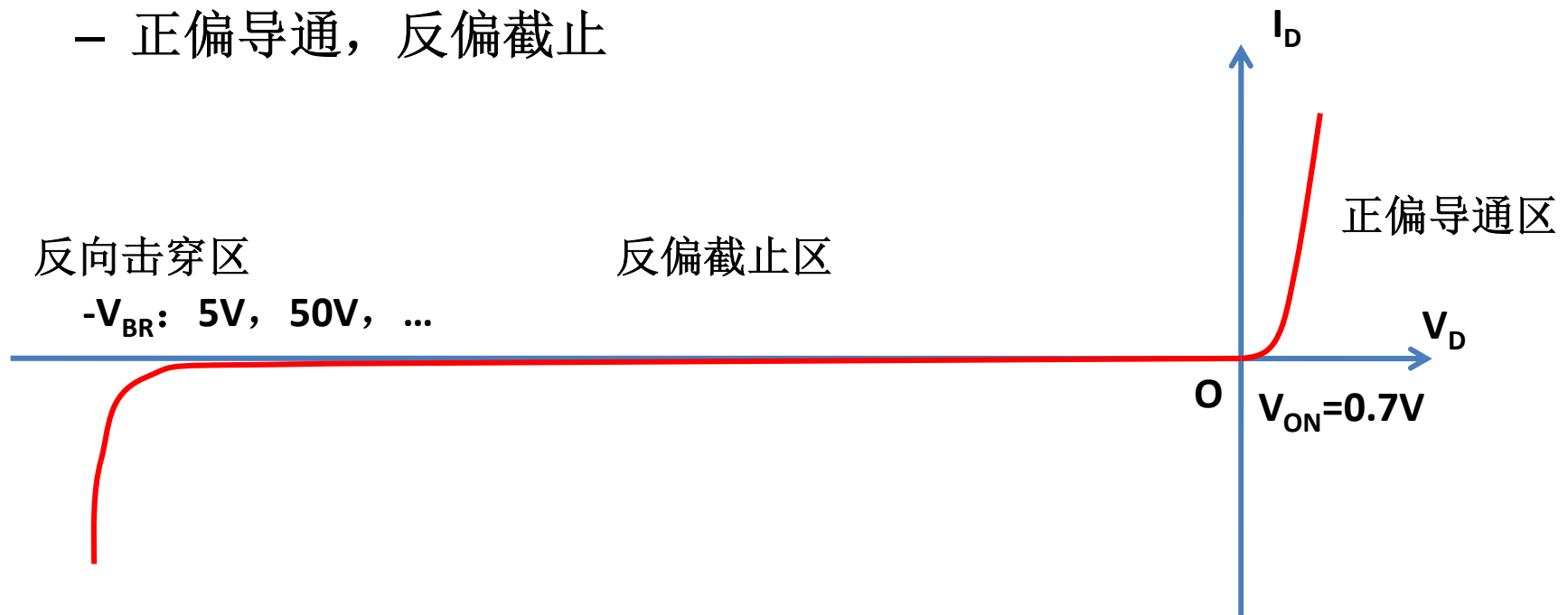
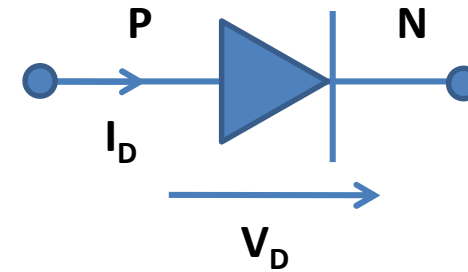
- 输入信号作为开关的控制端，开关则是一个非线性系统
  - $V_0$ 为常数，则为非线性时不变系统
  - $V_0$ 为随时间变化的变量，则为非线性时变系统
  - $V_0$ 直连输入，此为非线性时不变系统



$$v_{out} = \begin{cases} v_{in} & v_{in} > 0 \text{ 开关闭合} \\ 0 & v_{in} < 0 \text{ 开关断开} \end{cases}$$

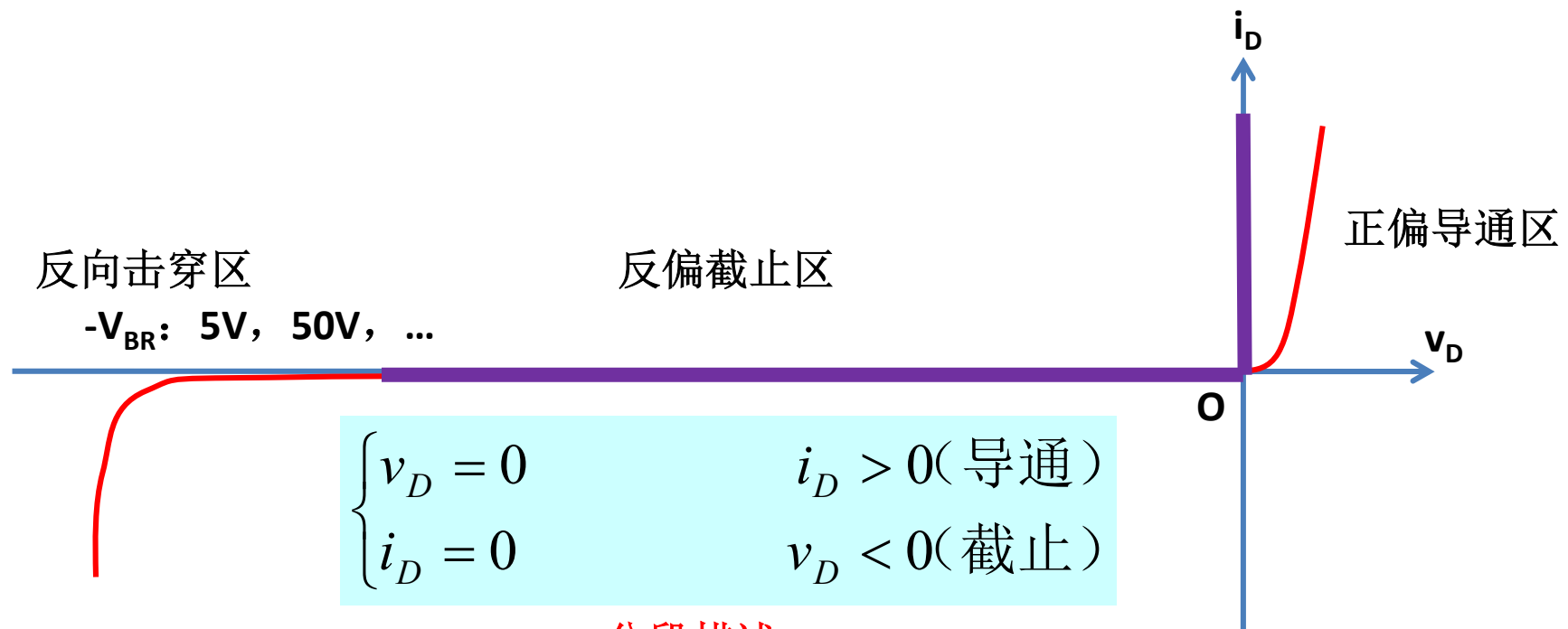
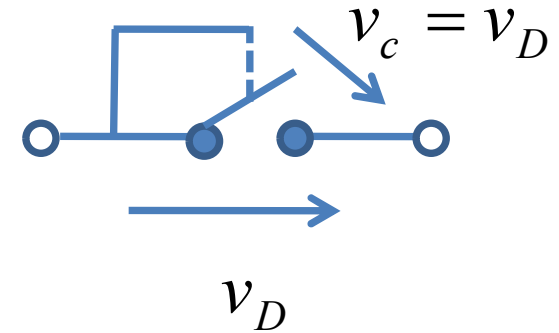
## 2.4 PN结二极管

- **PN结二极管**是将一个**PN结**封装后的二端器件（单端口网络）
- 二极管伏安特性曲线
  - 正偏导通，反偏截止



# 零阶模型：理想整流二极管

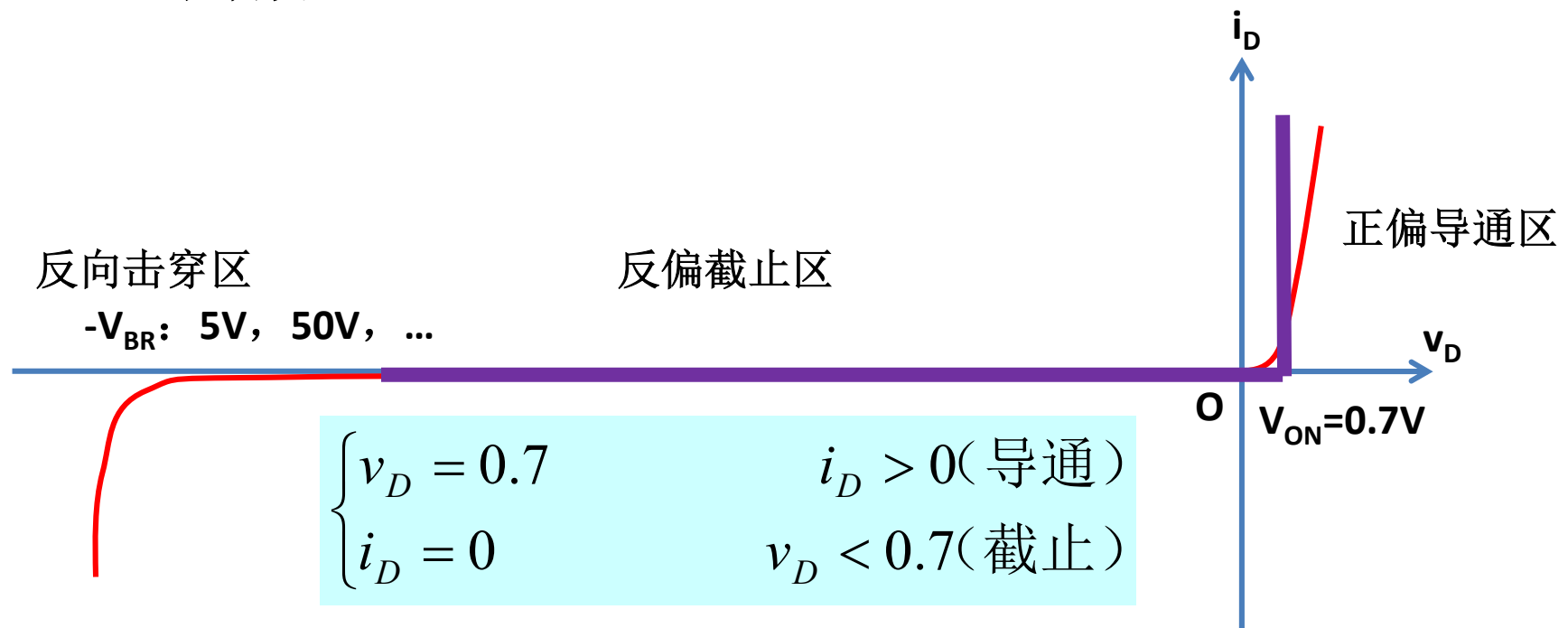
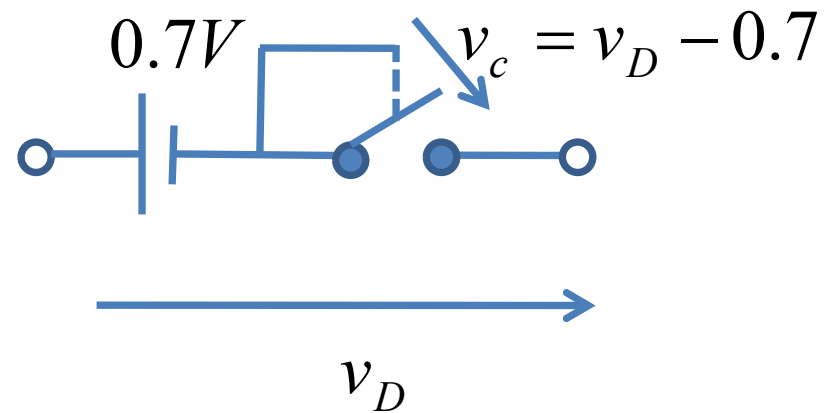
- 正向导通，反向截止
  - 导通即短路，截止即断路
    - 开关模型

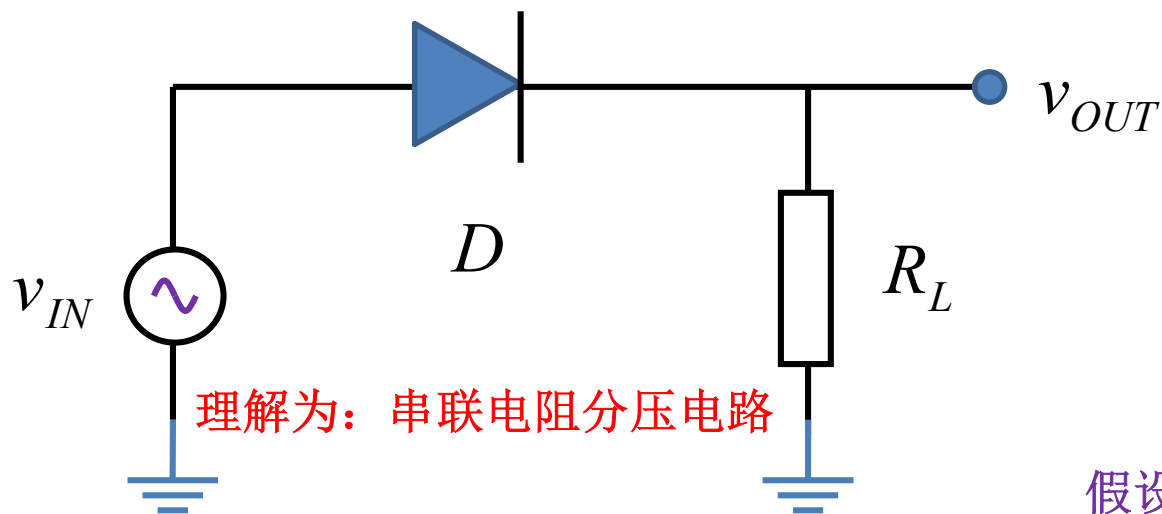


分段描述

# 一阶模型

- 考虑内建电位差影响
  - 低于势垒电压则截止



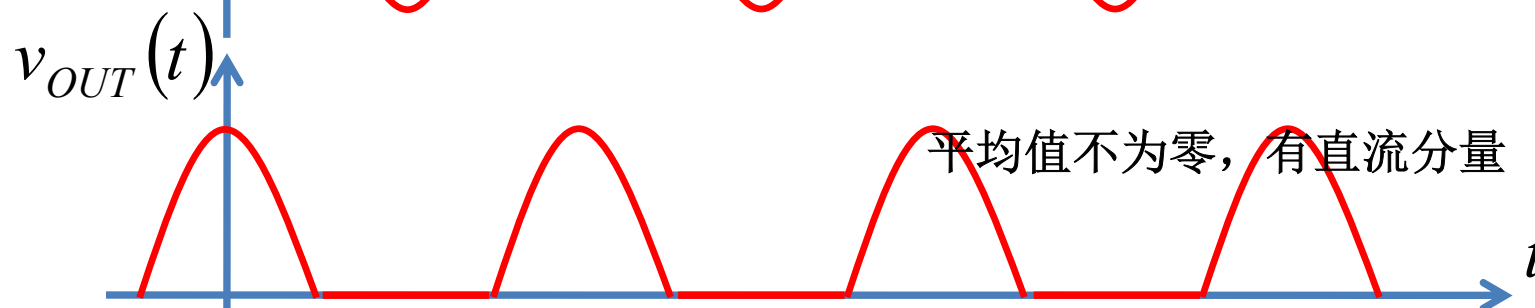
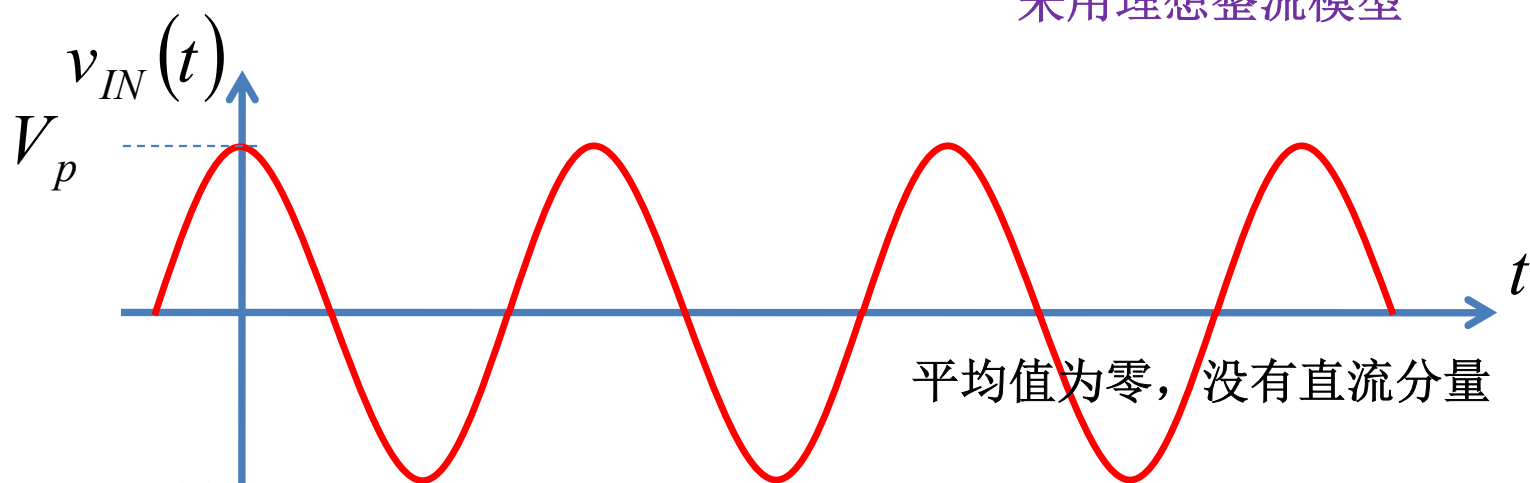


理解为：串联电阻分压电路

# 半波整流

$$V_{BR} > V_P \gg 0.7V$$

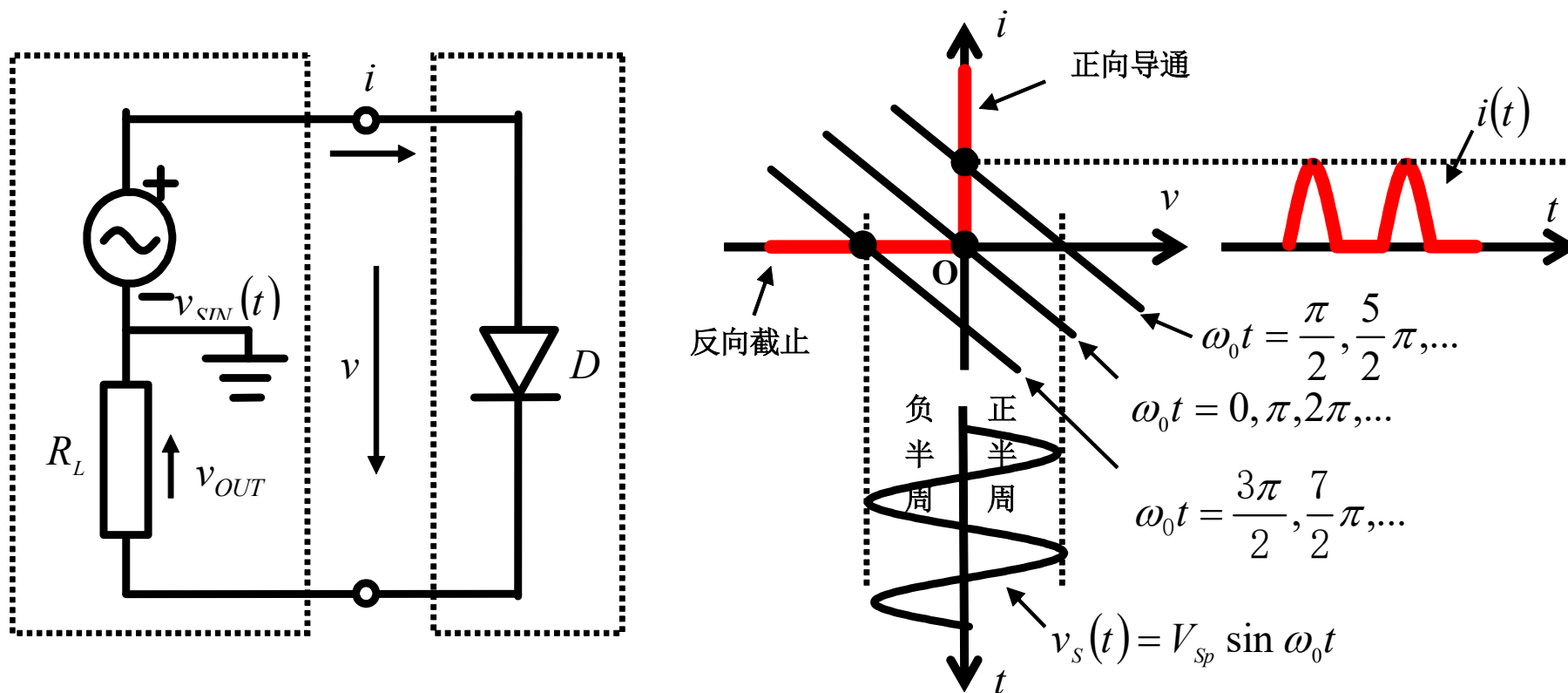
假设输入峰值电压很高，二极管采用理想整流模型



反向截止时，输入电压全部加载在二极管两端，二极管应能承受这样的反向偏压

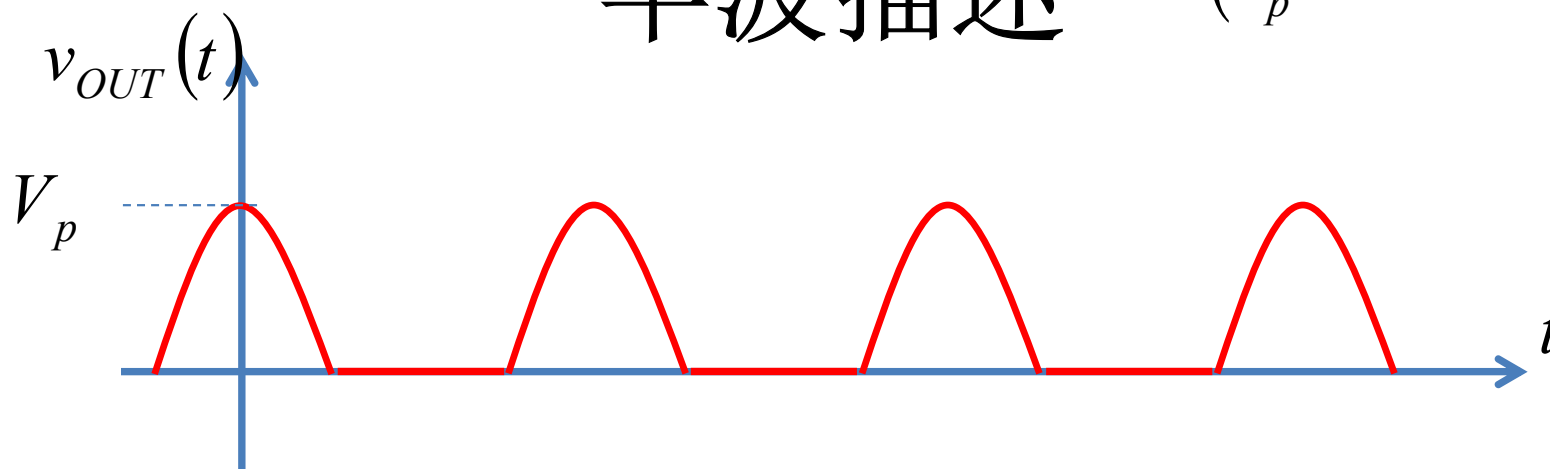


# 图解法理解半波信号的形成



$$v_{OUT}(t) = i(t)R_L$$

# 半波描述 $(V_p \gg 0.7V)$

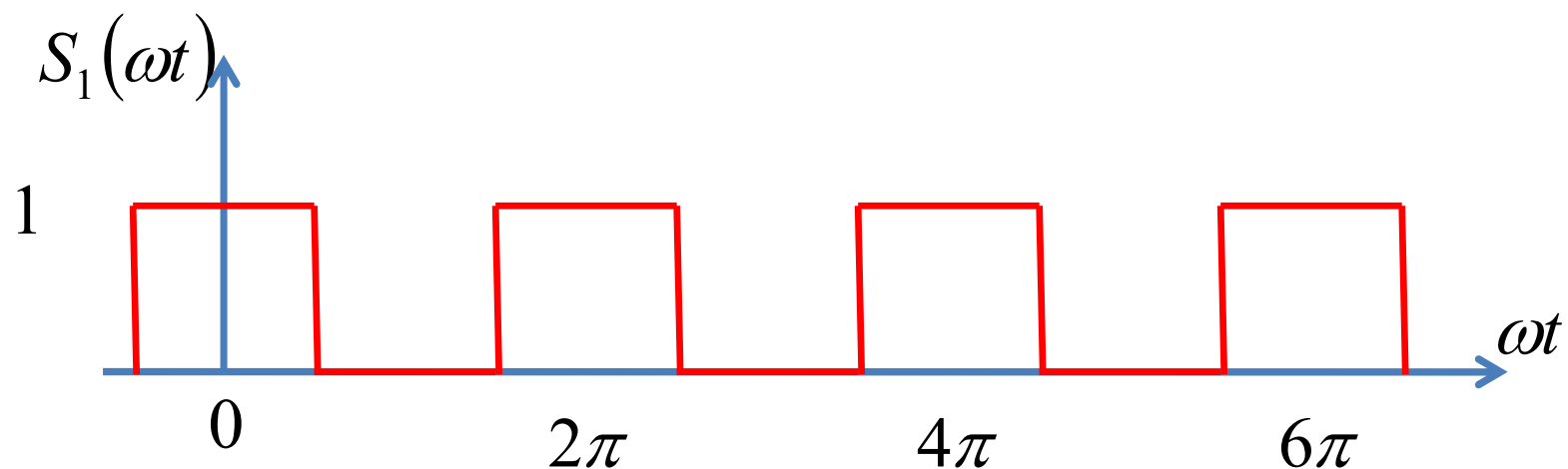


$$v_{IN}(t) = V_p \cos \omega t$$

$$v_{OUT}(t) = \begin{cases} V_p \cos \omega t & \cos \omega t > 0 \\ 0 & \cos \omega t < 0 \end{cases}$$
$$= S_1(\omega t) \cdot v_{IN}(t)$$

$$S_1(\omega t) = \begin{cases} 1 & \cos \omega t > 0 \\ 0 & \cos \omega t < 0 \end{cases} \begin{pmatrix} v_{IN} > 0 \\ v_{IN} < 0 \end{pmatrix}$$

# 开关函数



$$S_1(\omega t) = \begin{cases} 1 & \cos \omega t > 0 \\ 0 & \cos \omega t < 0 \end{cases}$$
$$= \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega t - \dots$$

# 输出频率分量

$$\begin{aligned}v_{OUT}(t) &= S_1(\omega t) \cdot v_{IN}(t) \\&= \left( \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega t - \dots \right) \cdot V_p \cos \omega t \\&= \frac{V_p}{\pi} + \frac{V_p}{2} \cos \omega t \\&\quad + \frac{V_p}{\pi} \frac{2}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{V_p}{\pi} \frac{2}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{V_p}{\pi} \frac{2}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots\end{aligned}$$

周期信号可傅立叶级数分解

$$V_{dc} = \overline{v_{OUT}(t)} = \frac{V_p}{\pi}$$

$$f_{out} = f_{in}$$

周期信号的频率：基频

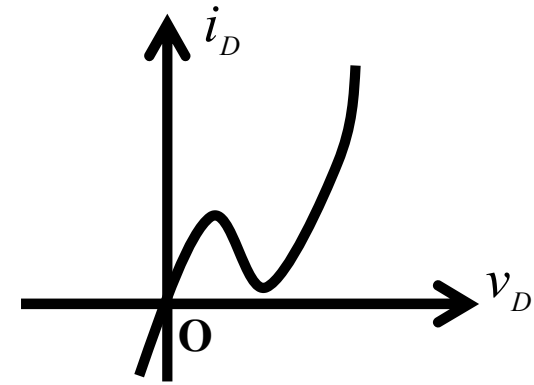
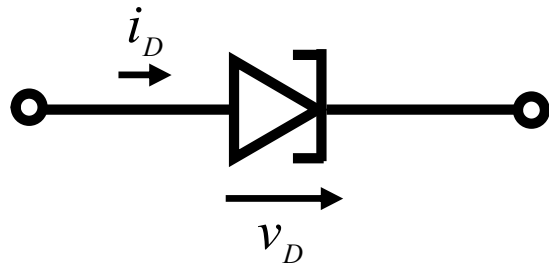
# 平均值和有效值

- 有效值：代表的是功率平均效果
  - 如果两个信号的有效值相等，则它们对电阻的热效果是一致的

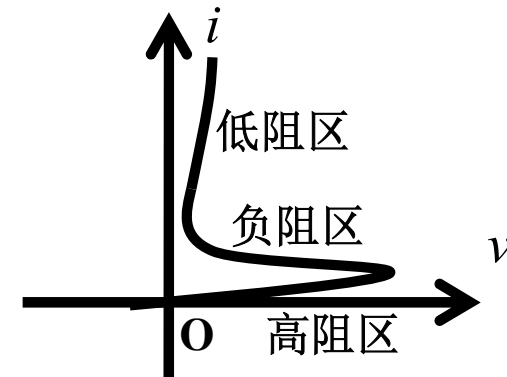
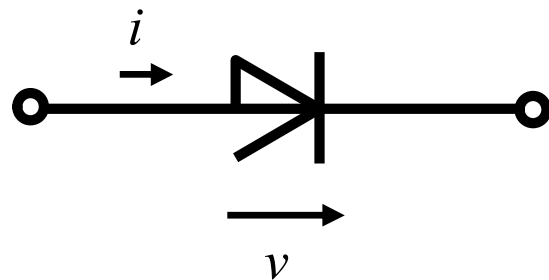
$$V_{dc} = \overline{v_{OUT}(t)} = \frac{V_p}{\pi} = 0.318V_p$$

$$V_{rms} = \sqrt{\overline{v_{OUT}^2(t)}} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = 0.707V_p$$

## 2.5 N型和S型负阻：非线性电阻

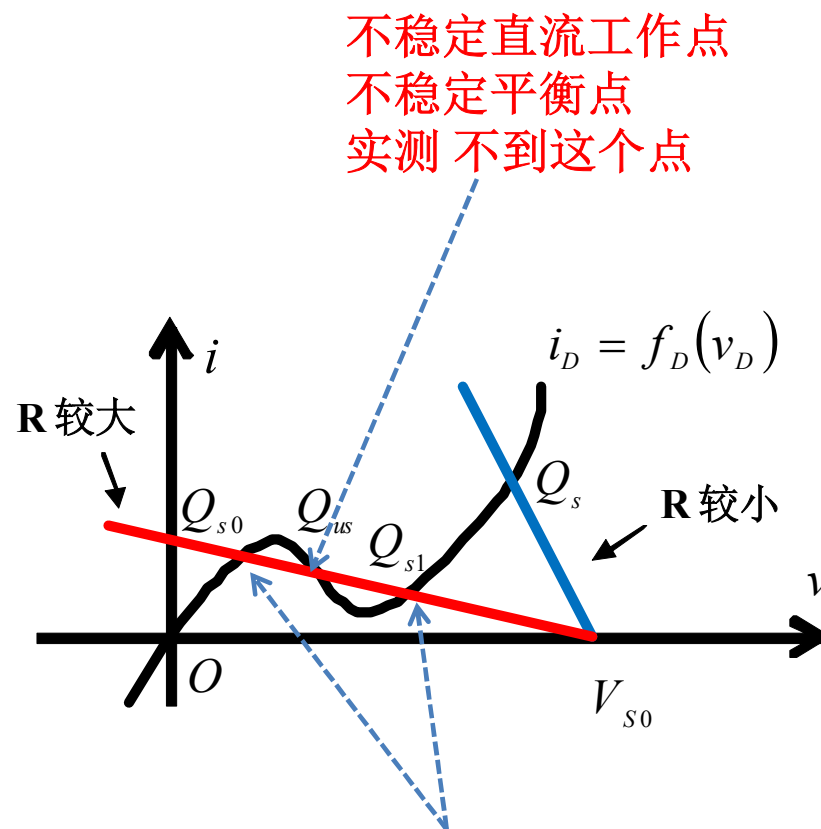
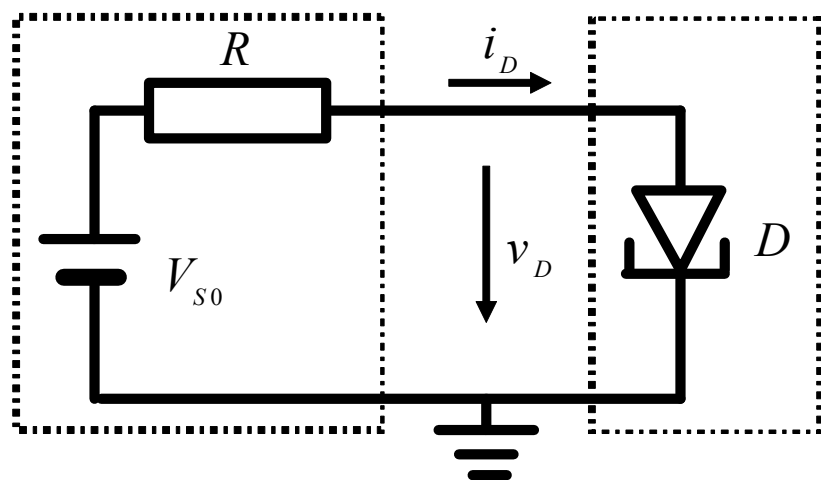


**Tunnel Diode: 隧道二极管: N型负阻**



**Shockley Diode: 肖克利二极管: S型负阻**

# 非单调的非线性可能具有多值解



不稳定直流工作点  
不稳定平衡点  
实测 不到这个点

可以作为状态存储器使用：**0、1**两个存储状态

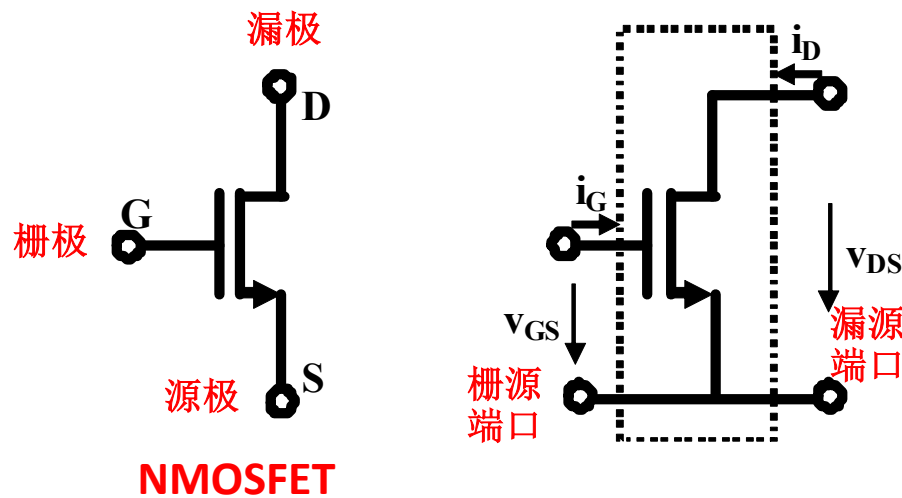
稳定直流工作点  
稳定平衡点

# 2.6 晶体管 transistor

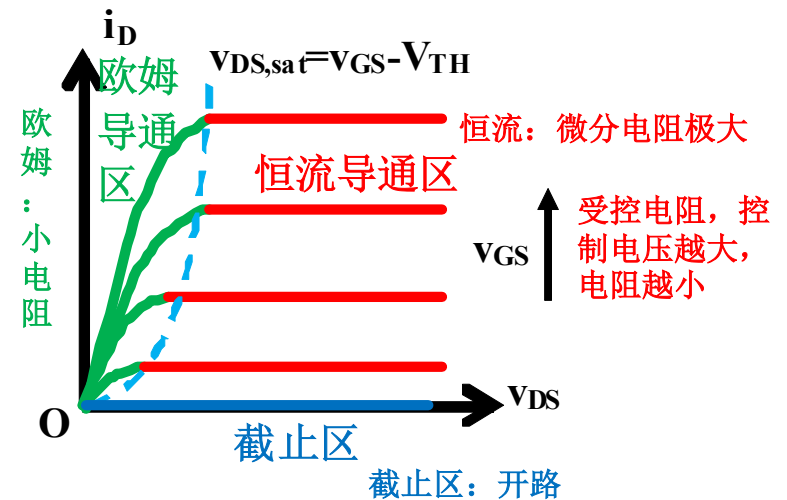
transfer resistor: 转移电阻器

- 二端口非线性受控电阻

$$i_G = f_{iv,G}(v_{GS}, v_{DS}) = 0 \quad (1)$$



附录A12



$$i_D = f_{iv,D}(v_{GS}, v_{DS}) = \begin{cases} 0 \\ \beta_n (v_{GS} - V_{TH})^2 \\ 2\beta_n ((v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - 0.5v_{DS}^2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{GS} < V_{TH} \\ v_{GS} > V_{TH}, v_{DS} > v_{GS} - V_{TH} \\ v_{GS} > V_{TH}, v_{DS} < v_{GS} - V_{TH} \end{cases} \quad (2)$$



$$V_{DD} = 3.3V$$

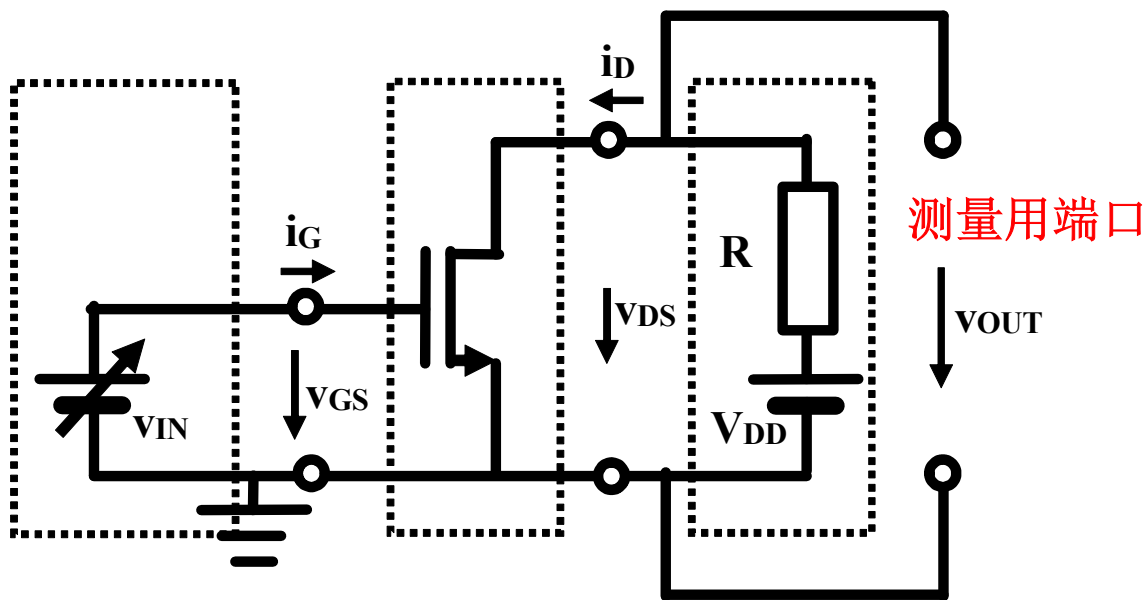
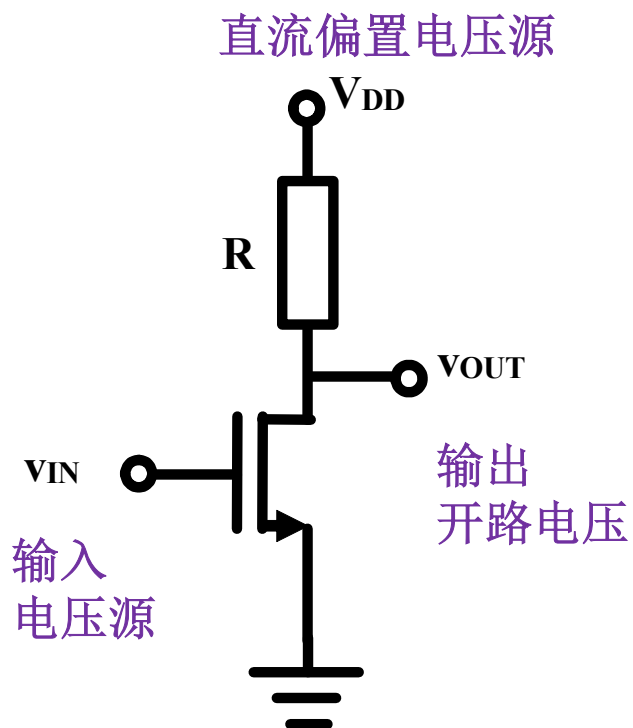
$$R = 1.5k\Omega$$

# NMOS反相器

$$\beta_n = 320 \mu A/V^2$$

$$V_{TH} = 0.8V$$

阈值电压  
Threshold Voltage



$$i_D = f_{D,iv}(v_{GS}, v_{DS}) = \begin{cases} 0 & v_{GS} < V_{TH} \\ \beta_n (v_{GS} - V_{TH})^2 & v_{GS} > V_{TH}, v_{DS} > v_{GS} - V_{TH} \\ 2\beta_n ((v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - 0.5v_{DS}^2) & v_{GS} > V_{TH}, v_{DS} < v_{GS} - V_{TH} \end{cases}$$

$$v_{GS} < V_{TH}$$

$$v_{GS} > V_{TH}, v_{DS} > v_{GS} - V_{TH}$$

$$v_{GS} > V_{TH}, v_{DS} < v_{GS} - V_{TH}$$

电路分析是列写端口连接关系方程和欧姆定律方程，求解方程，对方程的解进行解析的过程

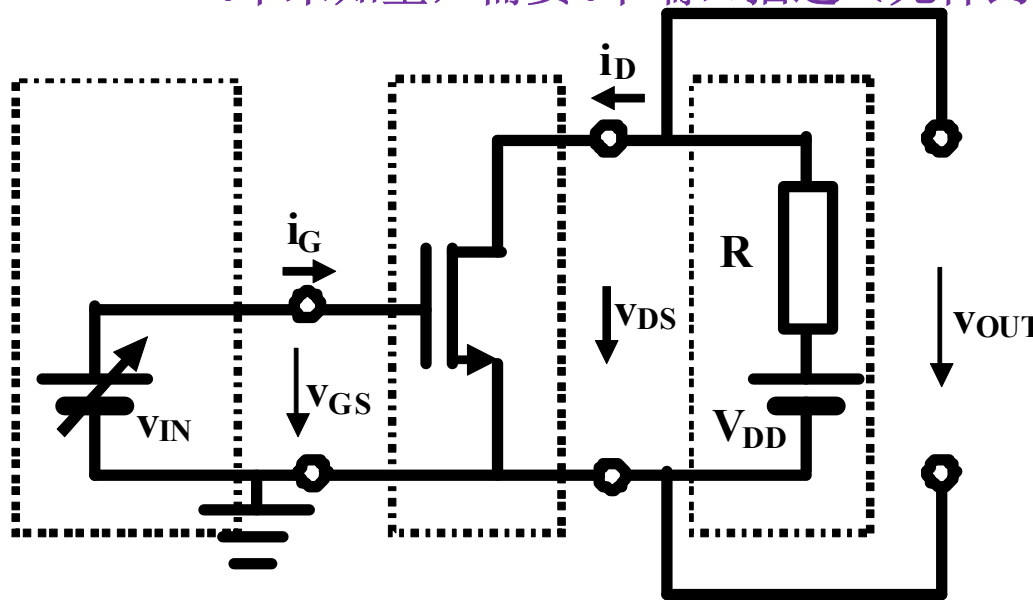
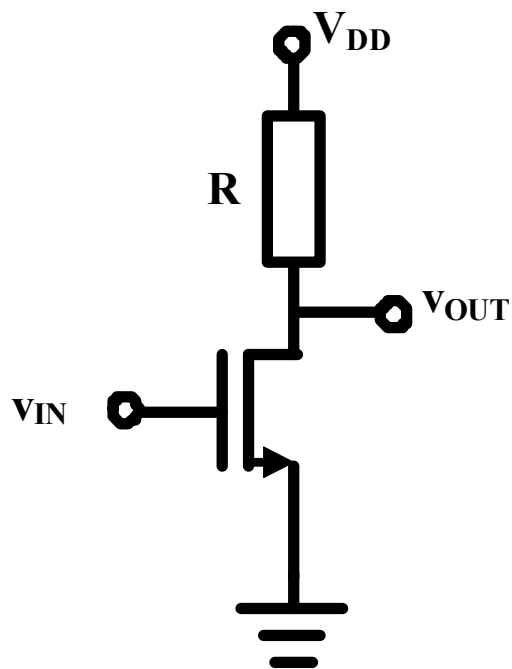
# 分析第一步：列方程

两个对接端口，两套端口电压电流定义

无需列写端口连接关系方程

只需列写欧姆定律方程（元件约束方程）

4个未知量，需要4个端口描述（元件约束）方程



未知：被确定

已知

$$v_{GS} = v_{IN}$$

恒压源约束方程

$$i_G = 0$$

NMOS栅源端口约束方程

栅源端口对接元件约束方程

未知：待定

未知：待定

$$v_{OUT} = v_{DS} = V_{DD} - i_D R$$

戴维南源约束：外接负载约束方程

$$i_D = f_{D,iv}(v_{GS}, v_{DS}) = f_{D,iv}(v_{IN}, v_{OUT})$$

NMOS漏源端口约束方程

漏源端口对接元件约束方程

两个方程  
两个未知量  
可解

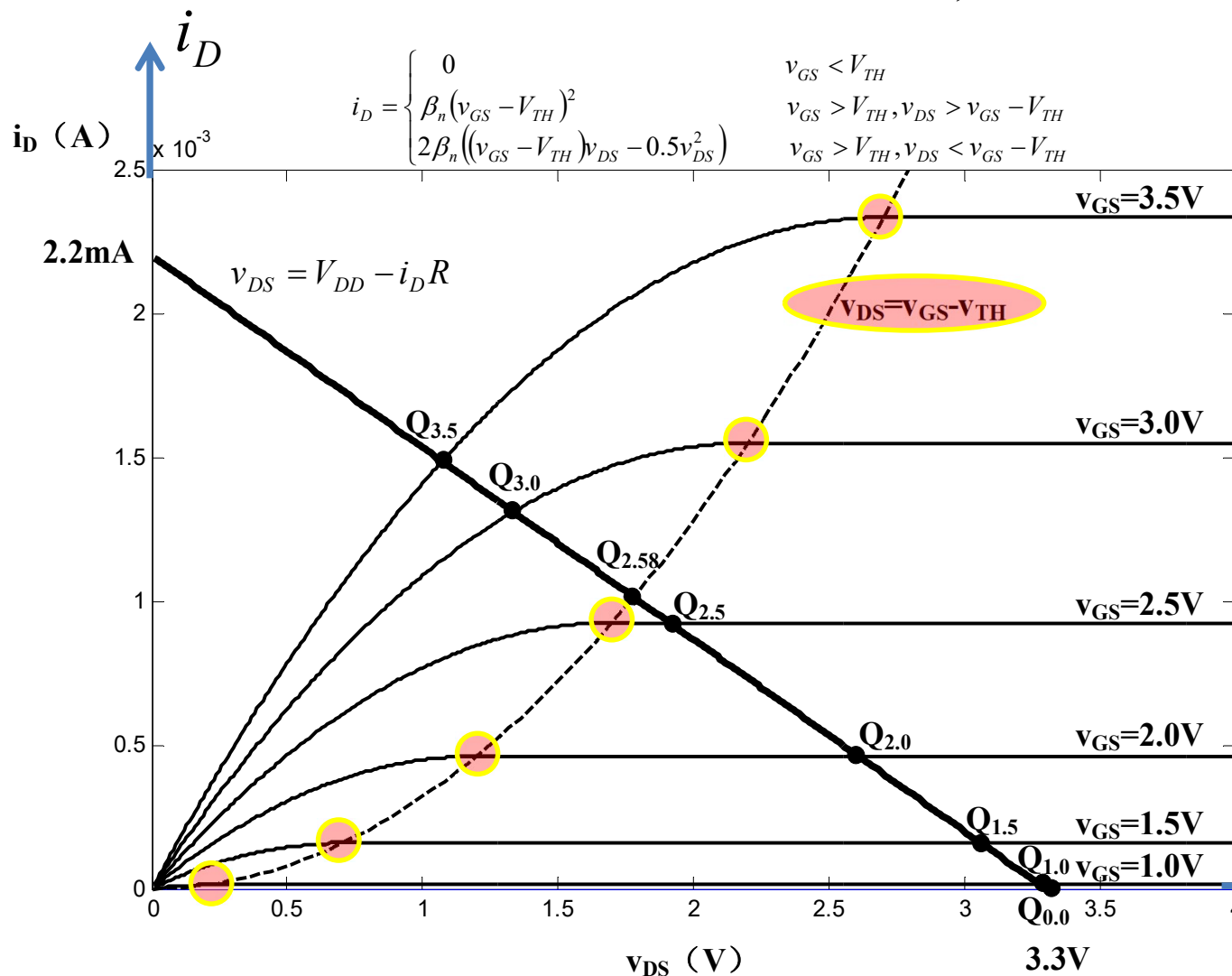
# 分析第二步

## 求解电路方程：图解法

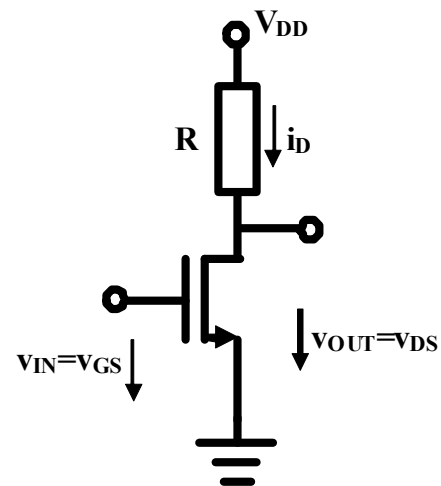
联立方程的数学求解过程，自己看教材

$$v_{OUT} = V_{DD} - i_D R$$

$$i_D = f_{D,iv}(v_{IN}, v_{OUT}) = f_{D,iv}(v_{GS}, v_{DS})$$

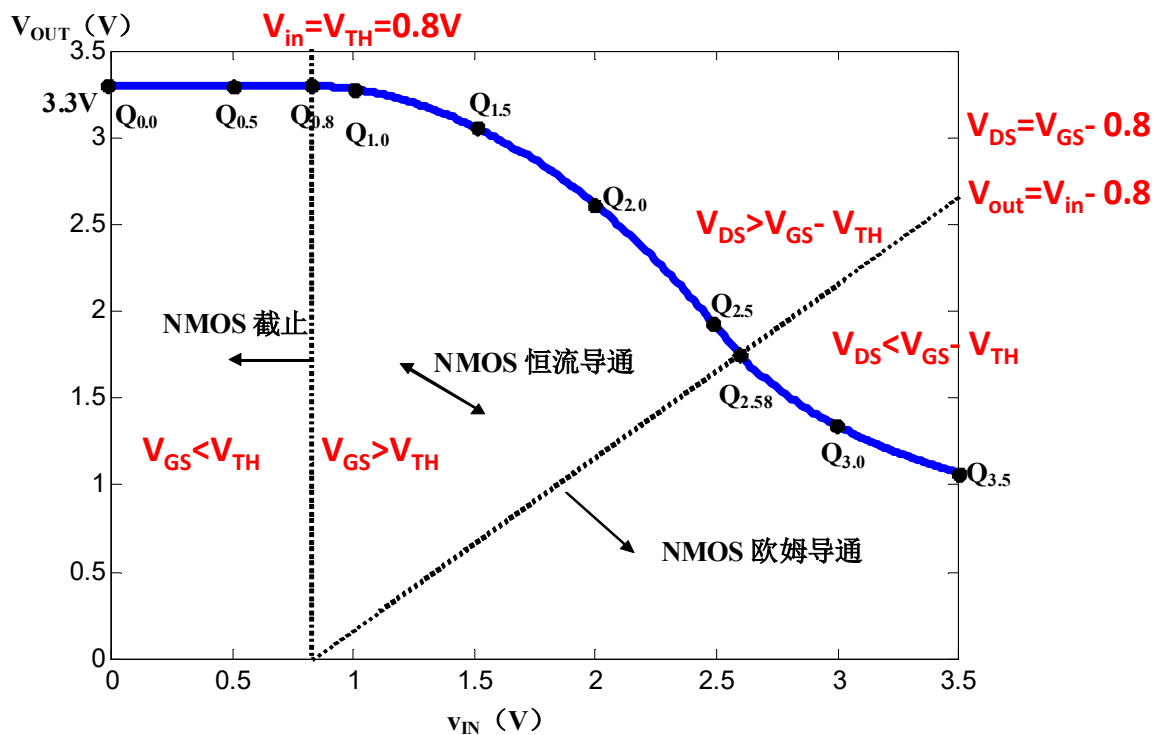
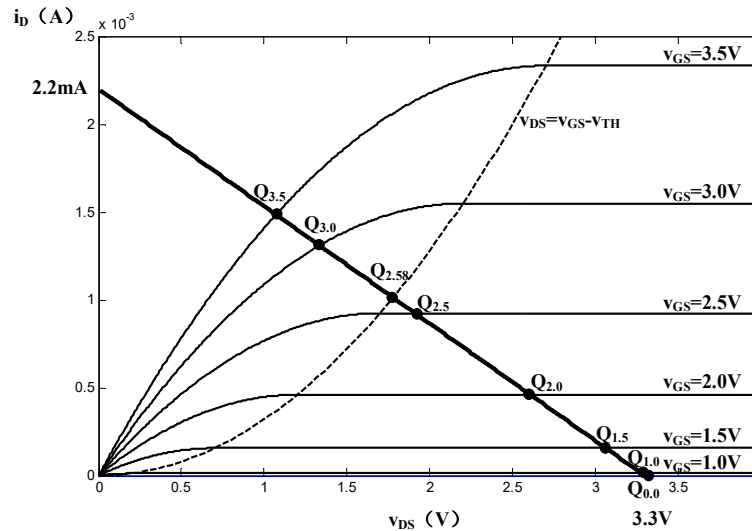
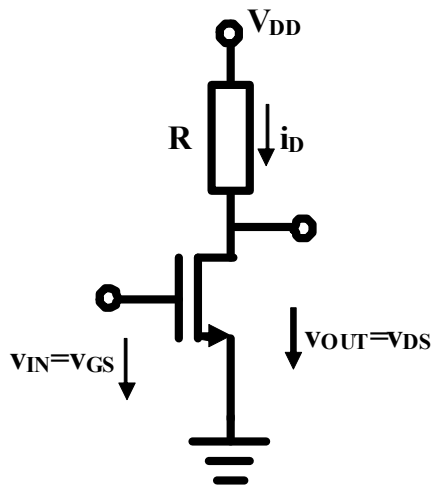


在同一个vi平面上  
分别画出它们的  
曲线，交点就是  
联立方程的解



$$v_{OUT} = v_{DS}$$

# 输入电压输出转移特性曲线



电压反相功能

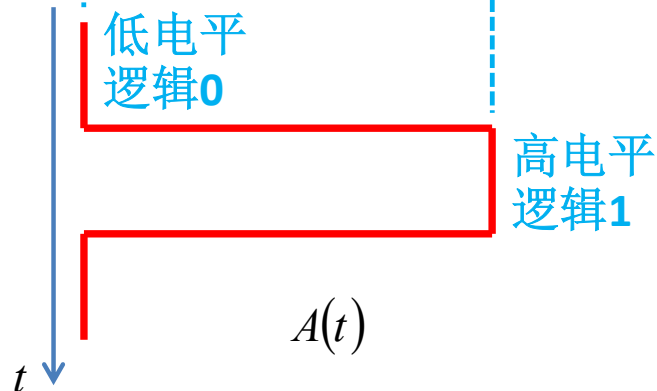
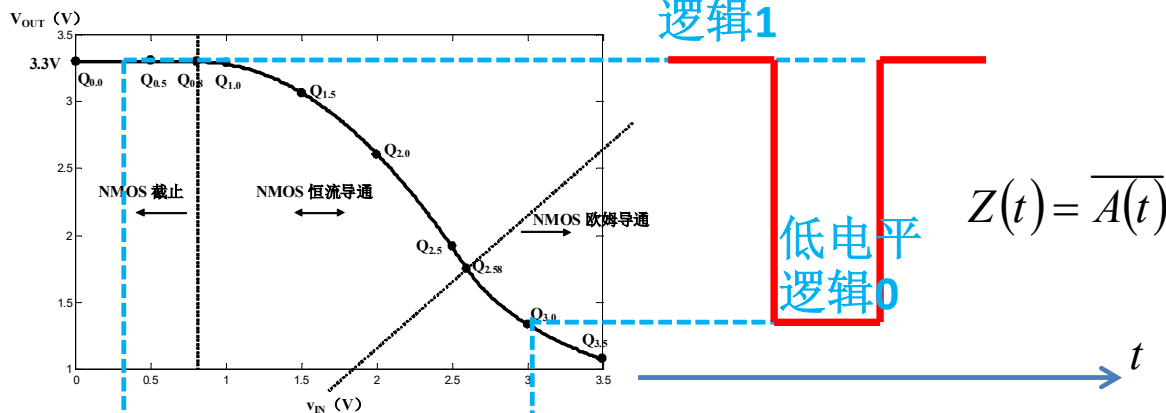
输入高电平  
输出低电平

输入低电平  
输出高电平

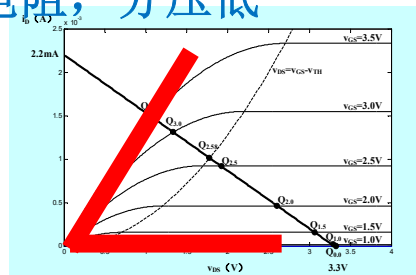
# 分析第三步：对解的解析 (1)

- 从输入输出转移特性曲线看，反相器可以作为数字非门使用

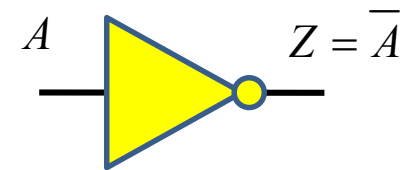
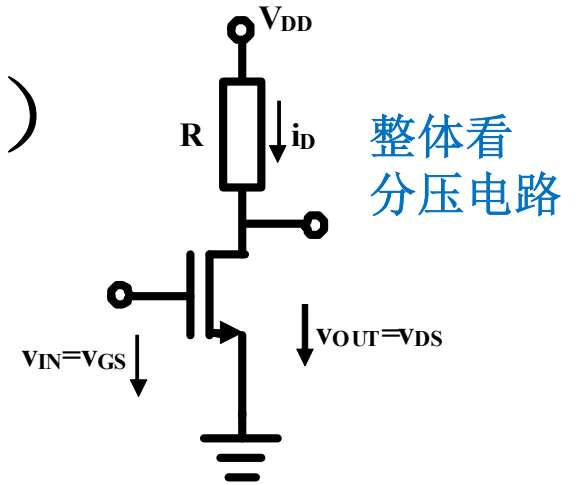
$$v_{OUT}(t) = f(v_{IN}(t))$$



晶体管工作在欧姆区：  
小电阻，分压低



晶体管工作在截止区：  
大电阻，分压高



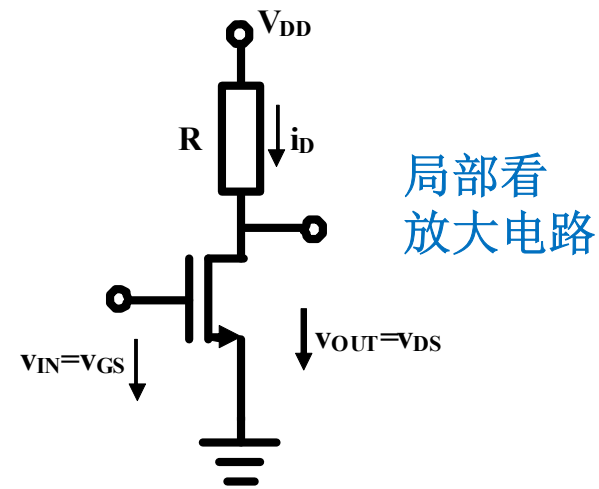
not gate

A	not A
0	1
1	0

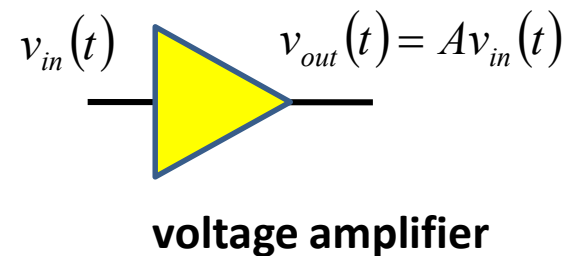
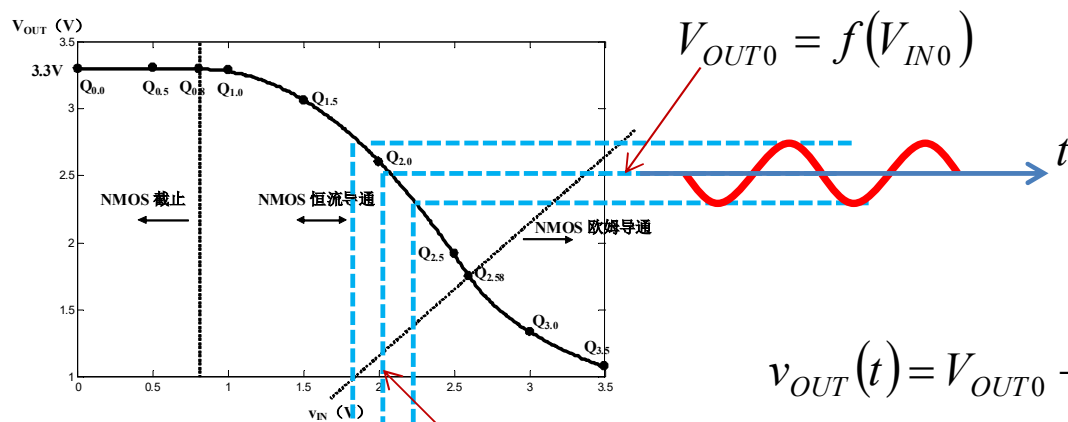
反着来，对着干

# 对解的解析 (2)

- 从输入输出转移特性曲线看，反相器还可以作为反相电压放大器使用



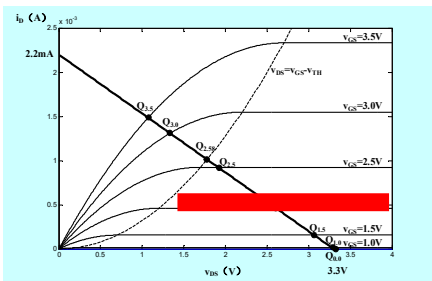
$$v_{OUT}(t) = f(v_{IN}(t)) = f(V_{IN0} + v_{in}(t)) = f(V_{IN0}) + f'(V_{IN0})v_{in}(t) + 0.5f''(V_{IN0})v_{in}^2(t) + \dots$$



$$v_{OUT}(t) = V_{OUT0} + v_{out}(t)$$

$$v_{out}(t) \approx Av_{in}(t)$$

$$A = \left. \frac{df}{dv_{IN}} \right|_{v_{IN}=V_{IN0}} < 0$$

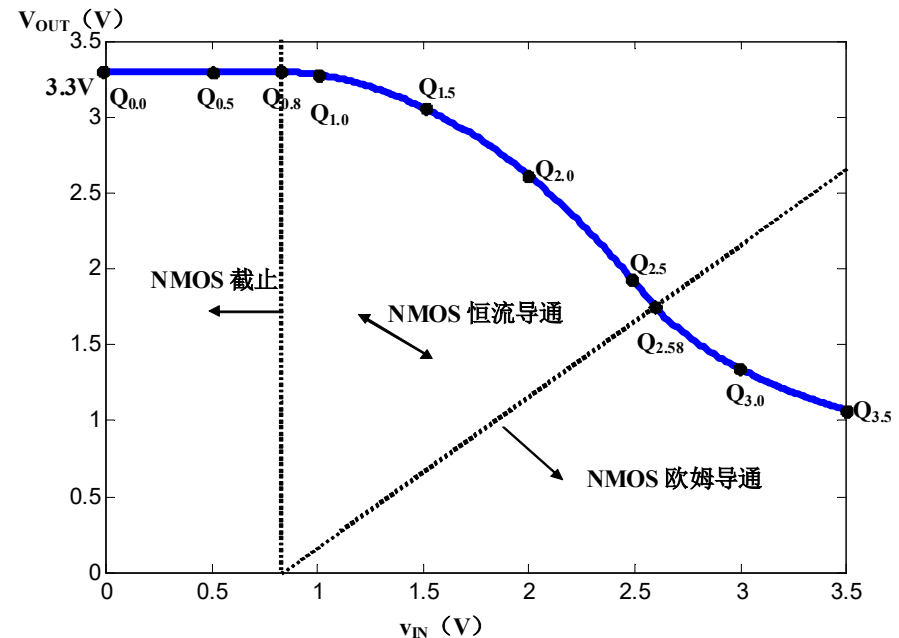
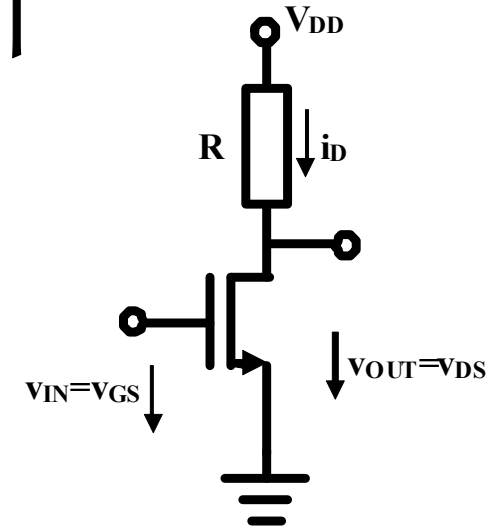


$$v_{IN}(t) = V_{IN0} + v_{in}(t)$$

晶体管工作在恒流区：晶体管是受控电流源，随输入电压变化，输出电流、输出电压随之变化：输出由输入线性决定，线性放大器

# 电路分析是为了电路设计

- 电路分析：列方程，解方程，对解进行解析（说明电路有什么功能）
- 原则上，对于某个电路结构，只要正确列写方程，正确求解电路方程，想到一个解的应用案例，即可完成对该电路的分析
  - 列写方程，求解方程是一个数学过程，严格的数学分析过程不是本课程的目标，虽然电路CAD工具是严格的电路方程的数值解
    - 对简单电路尚可接受，大规模电路求解方程只能交给计算机
    - 电路的最终设计者是人！设计者如何理解电路？
  - 本课程的目标：培养**电路抽象思维**模式，用电路语言思考电路问题，从而具有电路设计能力
    - **电路设计者必有的素质**
    - 后续章节将讨论如何进行电路抽象，从电路等效模型上进行电路分析



## 2.7 等效电阻

- 金属电阻器消耗的功率转换为热能耗散出去
- 电路中的电阻不仅仅是这种电阻器，凡是吸收电能并将其转化为其他能量形式的器件，都可等效为电阻

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

$$R_{等效} = \frac{V_{有效}^2}{P_{吸收}}$$

- 电热器：**95%**转化为热能
- 电灯：白炽灯**8%**，荧光灯**28%**转成光能，其他热能
- 电动机：**50%-90%**转换为机械能，其他热能
- 发射天线：**90%**转换为辐射电磁能量
- 对电路而言，它们吸收了电能，转换为其他形式的能量，它们都被等效为电阻

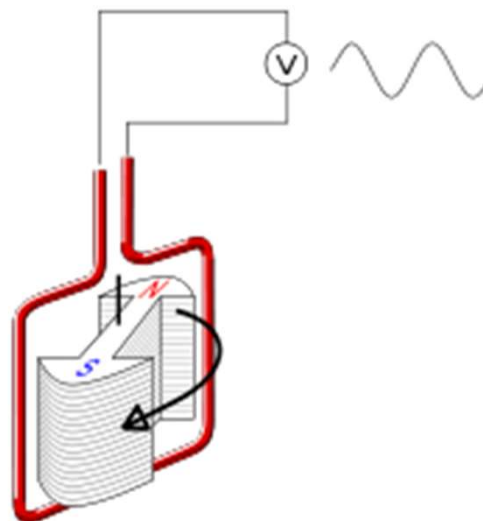


# 电源和电阻II 大纲

- 线性内阻电源
  - 理想电源、线性内阻电源
- 各种形式的电阻
  - 短路与开路、开关、PN结、N型负阻和S型负阻二极管、晶体管
    - 要求把握图解法理解并分析源和阻的简单连接关系
- 各种形式的电源
  - 交流发电机
  - 化学电池
  - 太阳能电池
  - 传感器
  - 信号发生器
  - 噪声源

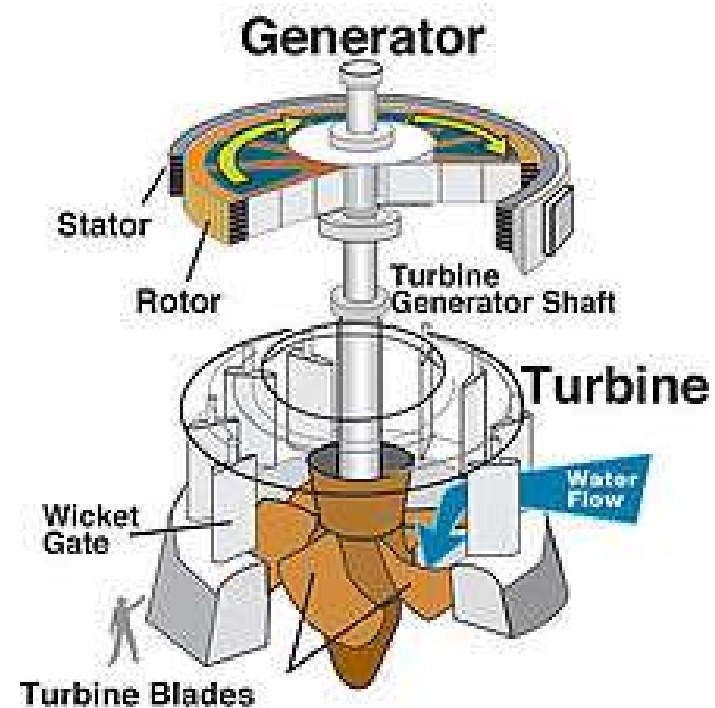
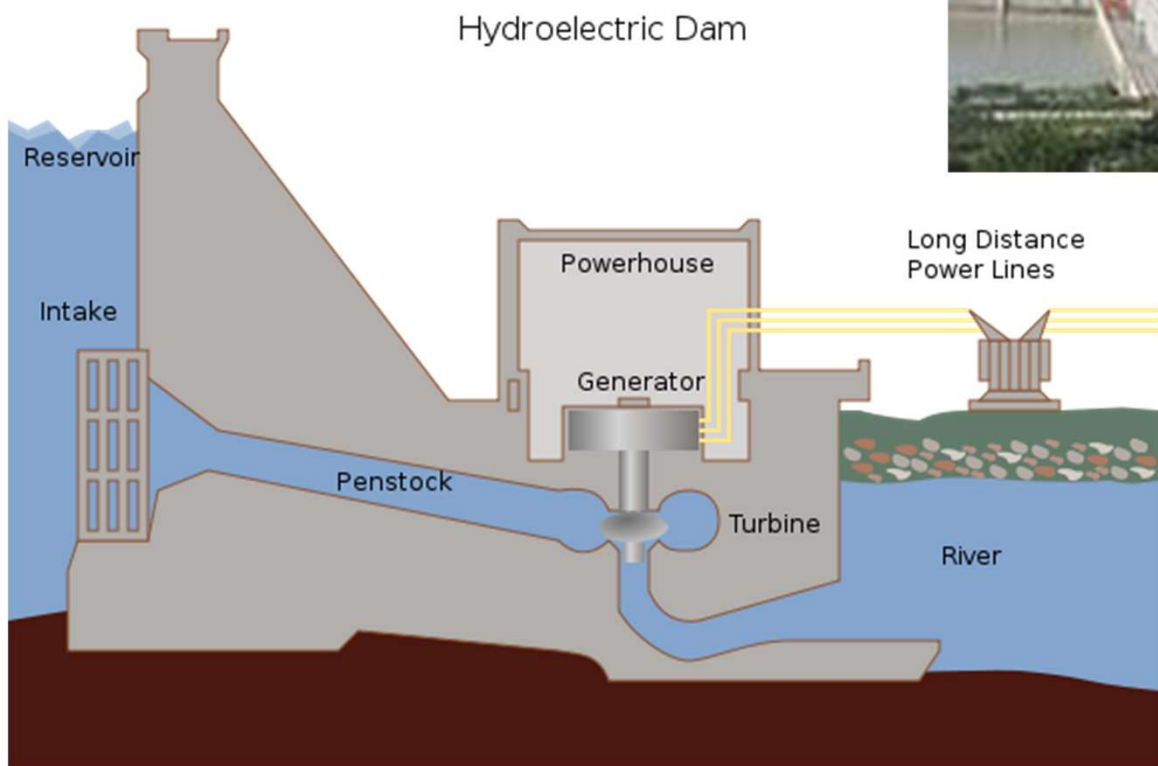
# 3.1 交流发电机

- 将机械能（mechanical energy）转换为交流电能（electrical energy）
  - 机械能：水推动涡轮机（势能转动能），热驱动蒸汽机（化学能转热能转动能），汽油燃烧驱动内燃机（化学能转热能转动能），风驱动风轮机（风能转动能），...
  - 动能驱动一个磁体在闭合回路线圈内转动，闭合回路中则会产生交变信号
    - 如果转动是匀速的，感生电动势对外输出的电压信号就是正弦波，正弦波周期等于磁体转动周期



- 法拉第电磁感应定律
  - 如果闭合回路内发生磁场变化，就会产生感应电动势

# 水电



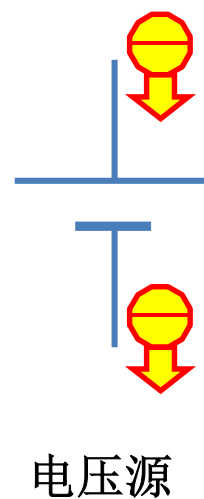
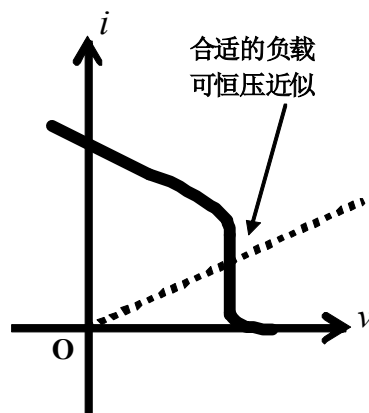
图片直接取自维基百科en.wikipedia.org

# 3.2 化学电池

- 电池**battery**通过氧化还原反应将化学能转换为电能
  - **Oxidation:**阳极（负电极）  
发生氧化反应，失去电子：对外释放电子
  - **Redox:**阴极（正电极）  
发生氧化还原反应，吸收电子：对外吸收电子



电流流入端为**阳极**  
 电流流出端为**阴极**



电池	内阻
9V锂电池	18Ω
9V碱性电池	1Ω
AA碱性电池	150mΩ
AA镍氢电池	20mΩ
D镍镉碱性电池	9mΩ
铅酸电池	6mΩ
氧化银电池	10Ω

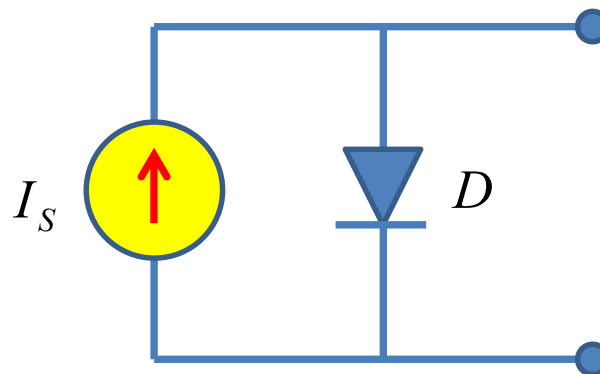
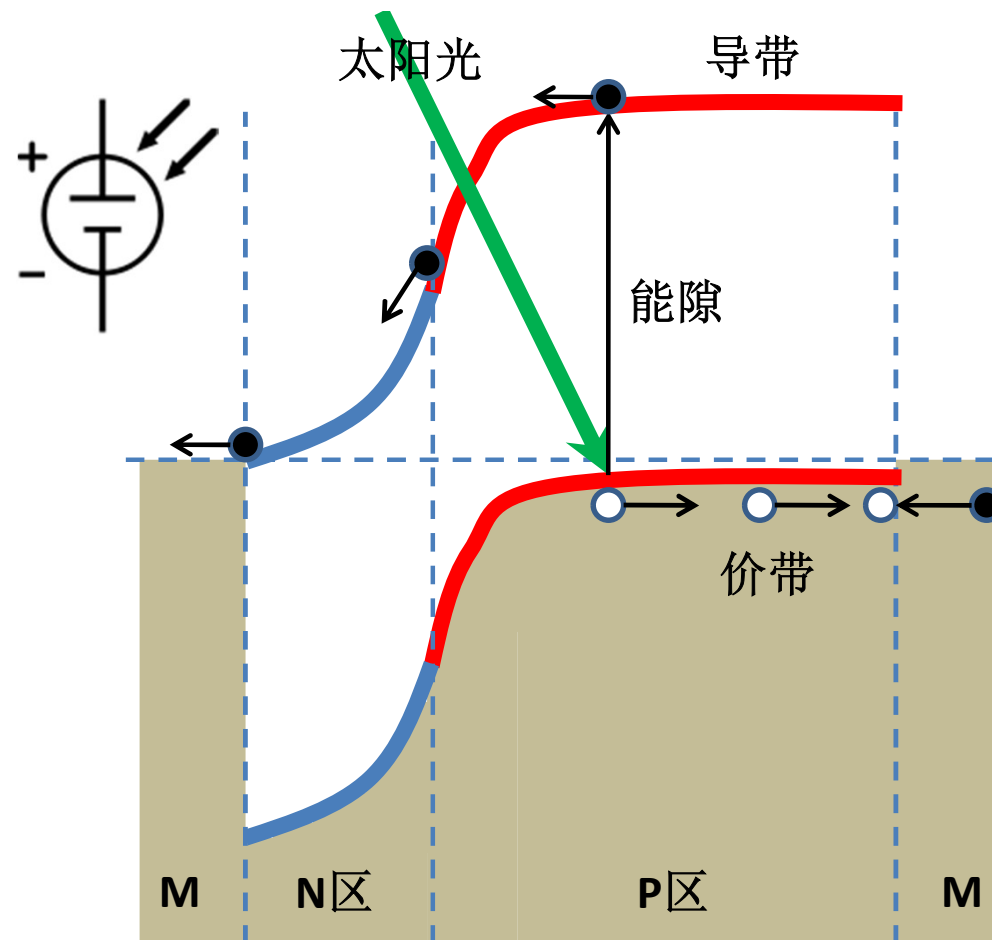
# 3.3 太阳能电池

## solar cell

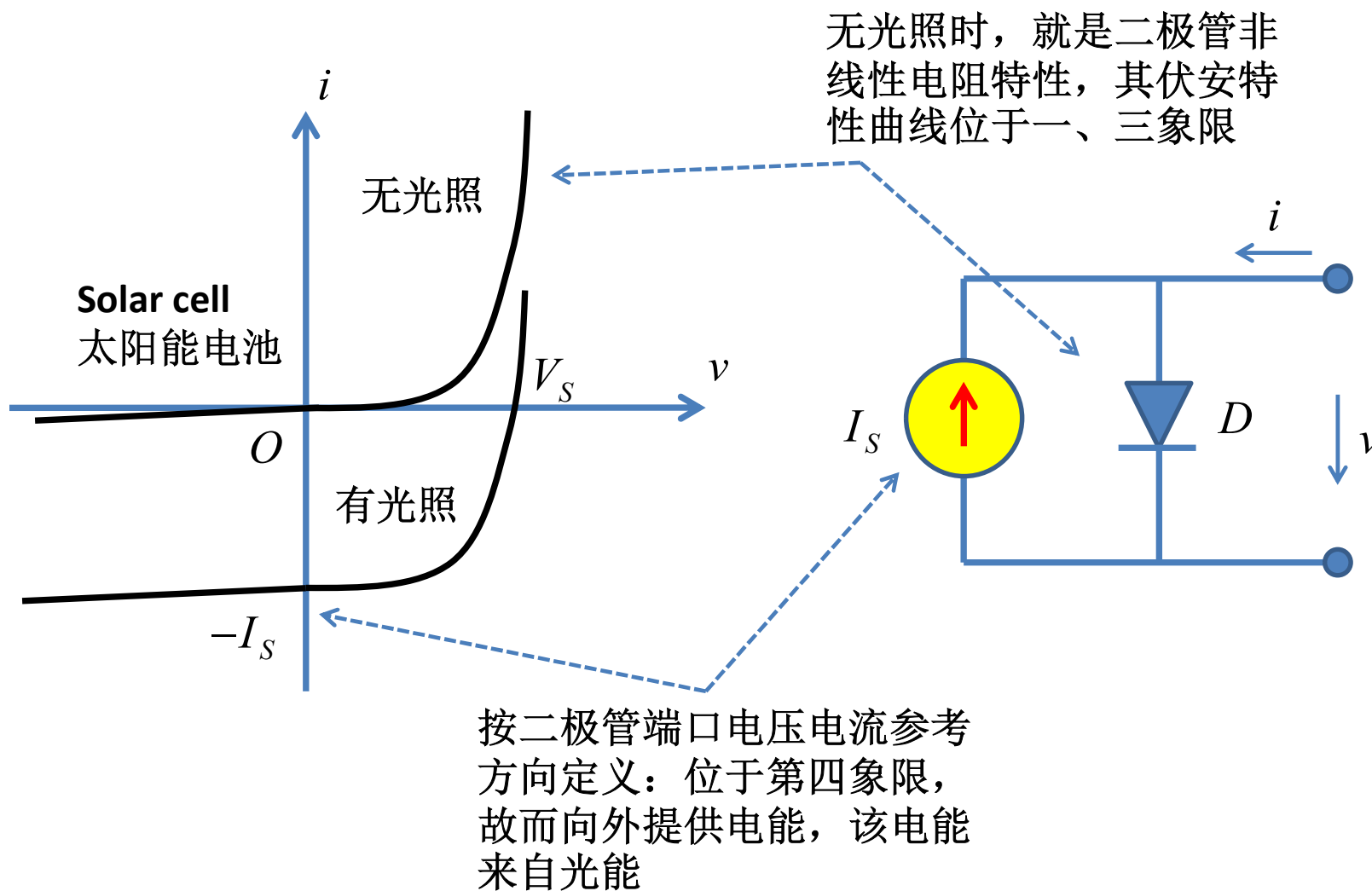
- 将光能转为电能
  - 太阳光照射电池板，光子被电池板P区半导体吸收
  - P区半导体材料中，电子获得光子能量，从价带轨道跳入导带，成为自由电子，同时形成一个空穴
    - 多余能量以热形式耗散
  - 电子向N区移动，对外输出直流电流

— 直流电流源

- 非线性内阻



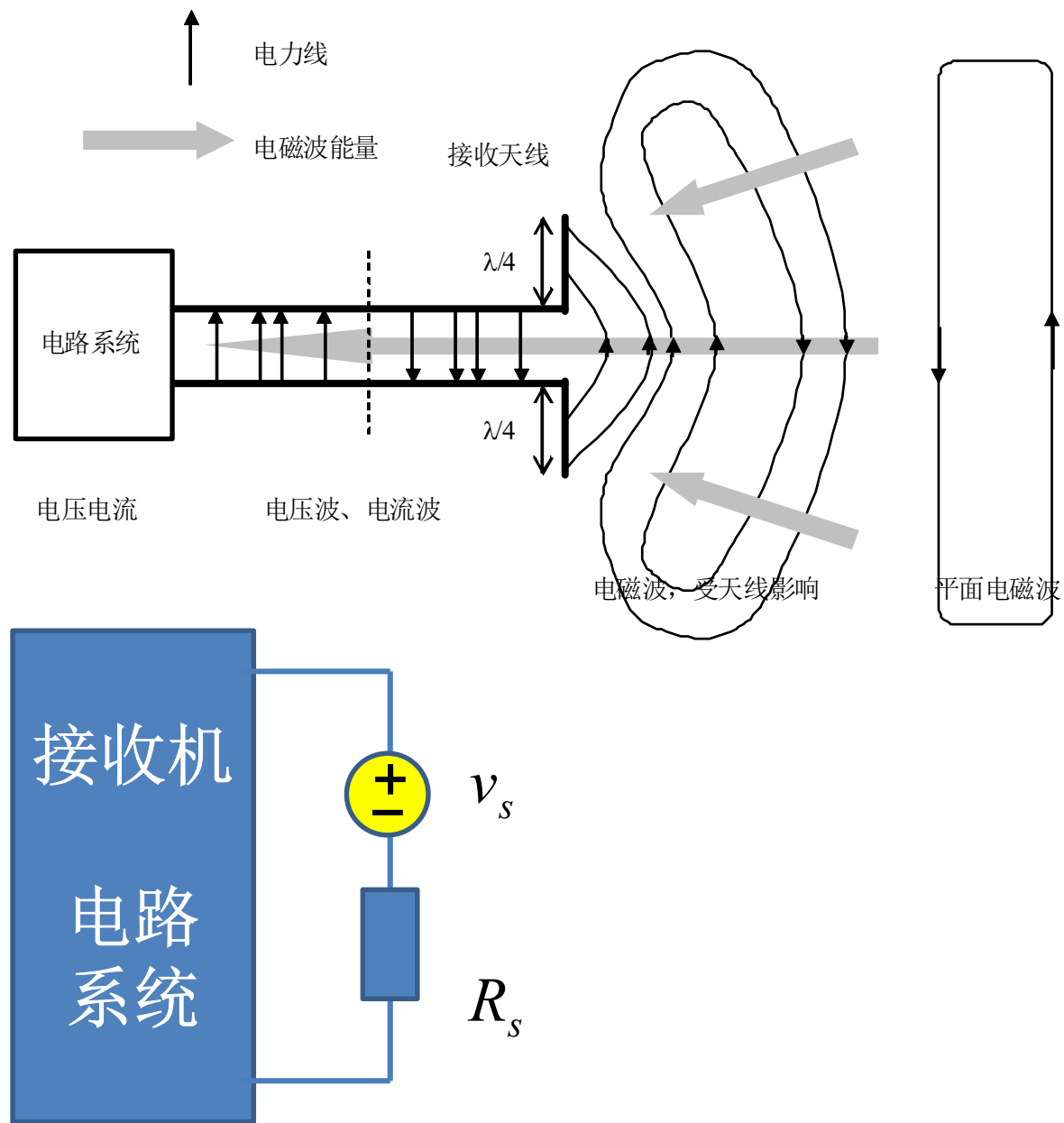
# 太阳能电池伏安特性曲线



# 3.4

# 传感器例

# 天线



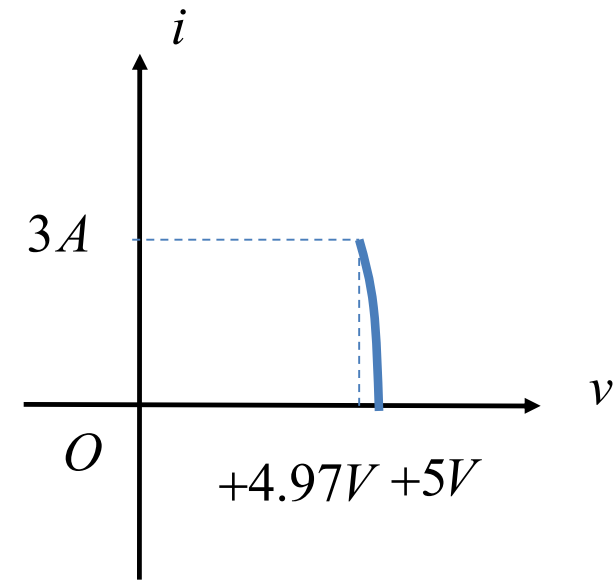
# 下节课内容

- 本周习题课
  - 第一周习题讲解
  - 电源补充讨论
    - 额定功率
    - 噪声源
  - 第二章练习节选讨论
- 下周2理论课：**如何确保能够列写出完备的方程**
  - 电路基本定律
  - 列写电路方程的方法
  - 等效电路法
    - 基本定理：替代定理，叠加定理



# 作业1：电源的线性抽象

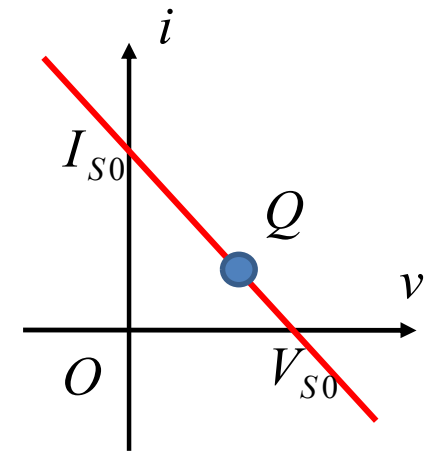
- 某+5V直流电压源伏安特性如右图所示，该电压源的工作电流范围是输出电流小于**3A**。如果电流超过**3A**，电源过流保护电路起作用，电源不再有电压输出。请建立该电源在正常工作范围内的等效电路模型
  - 说明你是如何考虑的？



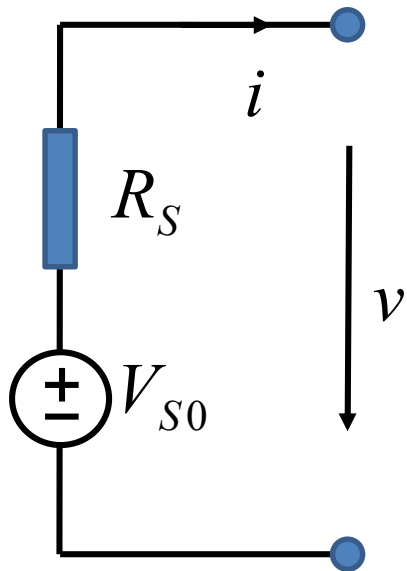
- 下面四个电压源是同一电压源，但是由于电压电流参考方向规定的原因，其伏安特性曲线不同

- (1) 画出对应的四条伏安特性曲线，比较其不同之处
- (2) 将电压源模型转化为电流源模型，描述伏安特性曲线与两种模型及端口电压、电流参考方向的关系

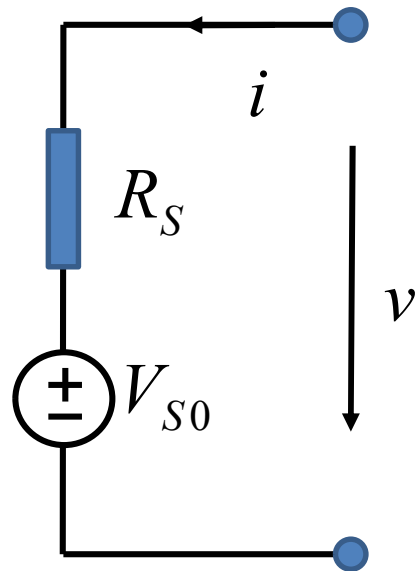
## 作业2 关联参考方向 伏安特性曲线



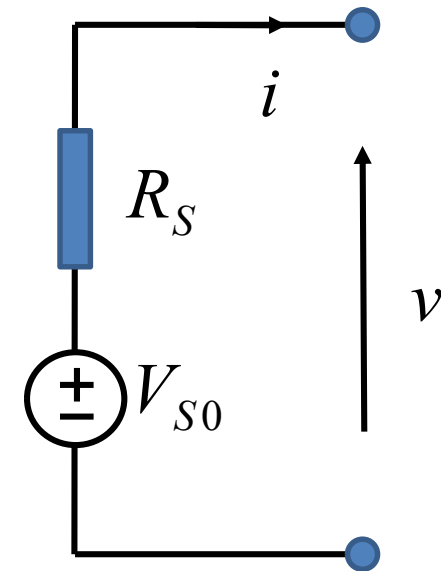
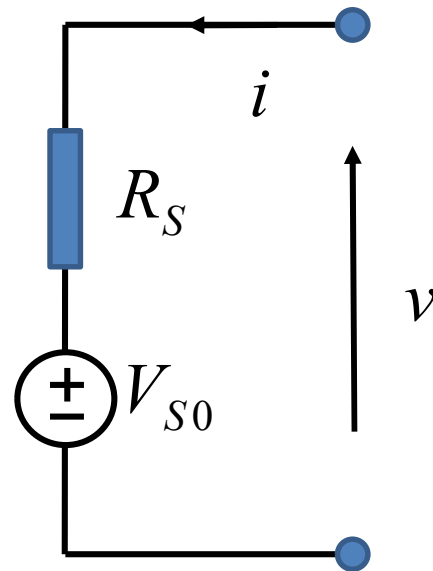
这里：直流电压源 $V_{S0}$ 的实际方向就是图示标定方向，即 $V_{S0} > 0$ 。



电源端口  
关联参考方向定义

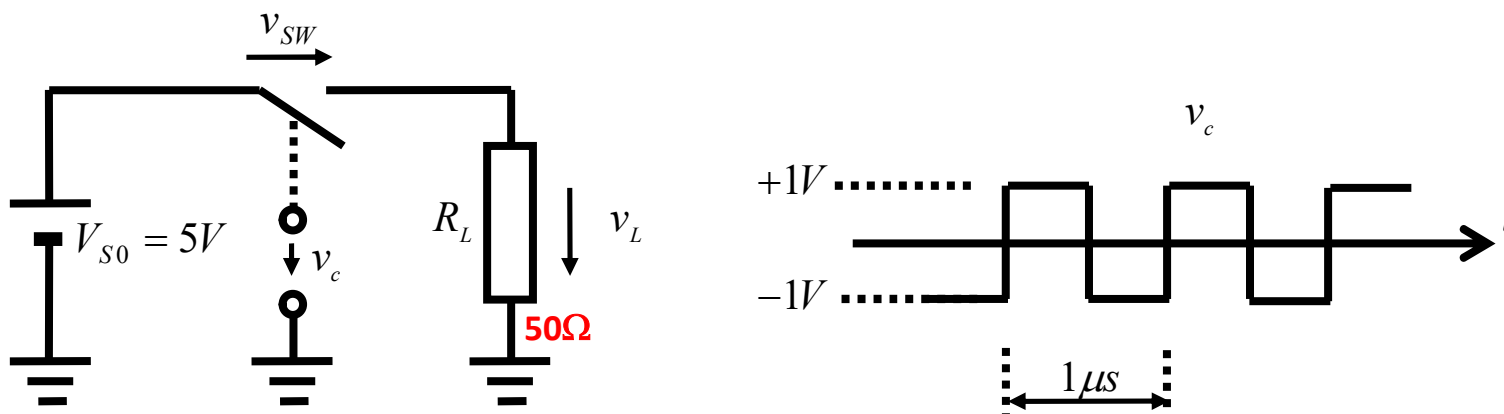


网络端口通常  
关联参考方向定义



# 作业3 简单逆变器

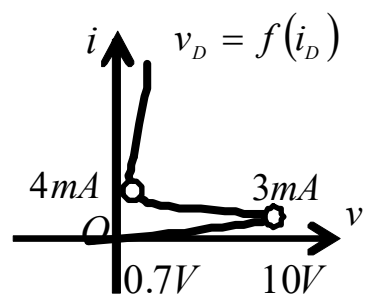
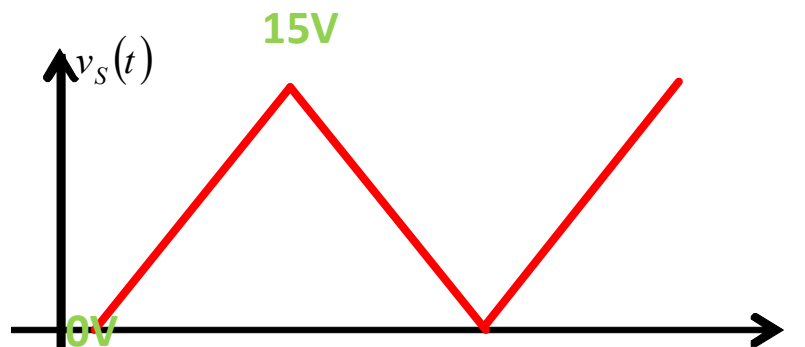
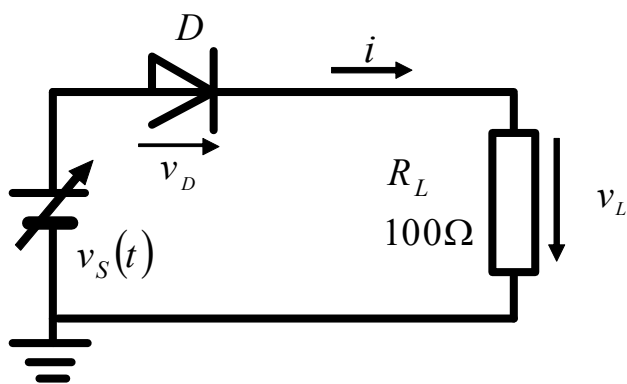
- **练习2.30:** 假设直流电压源电压为+5V，开关控制电压 $v_c$ 为1MHz频率的±1V幅度的方波信号。 $v_c=+1V$ 时开关闭合，5V电压全部加载到电阻 $R_L$ 上， $v_c=-1V$ 时开关断开，5V电压全部加载到开关两端，电阻上没有电流流通。



- (1) 画出电阻两端电压 $v_L(t)$ 和开关两端电压 $v_{SW}(t)$ 的时域波形。
- (2) 电阻获得的直流电压为多少伏？
- (3) 电阻获得的瞬时功率如何变化？
- (4) 电阻获得的平均功率为多少？折合为有效值电压，为多少伏的电压？
- (5) 开关消耗功率为多少？
- (6) 负载电阻上消耗的直流功率和交流功率分别为多少？

# 作业4: S型负阻做开关

- 用图解法分析 $v_{S0}$ 由0电压变化到15V, 再由15V变化到0V, 这个过程中, 电阻上的电流大小



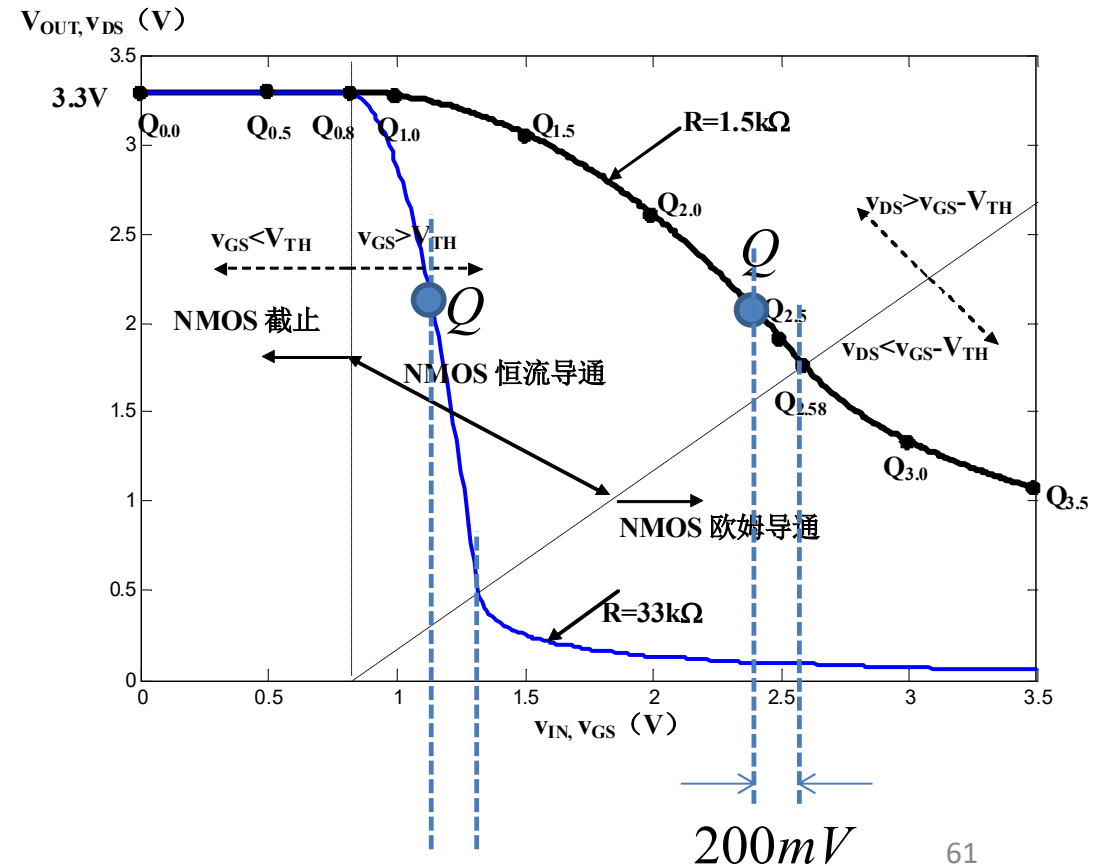
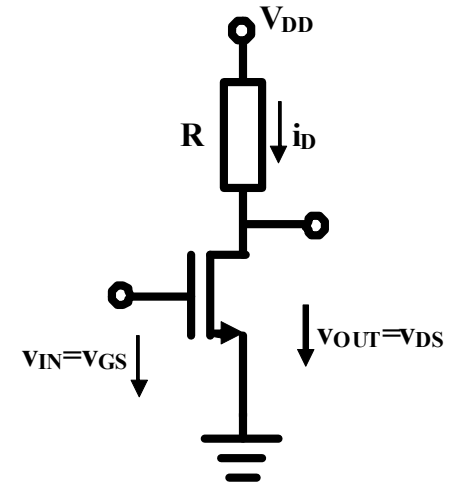
# 作业5 反相电压放大倍数

## 选作题：需要求解数学方程

- 选取**NMOS**反相器的直流工作点位于恒流导通区，且输入电压比欧姆区分界点电压低**200mV**，求反相电压放大器的电压增益

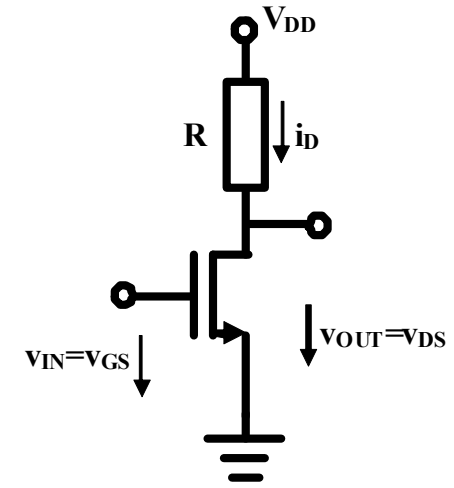
—  $R=1.5k\Omega$

—  $R=33k\Omega$



# CAD作业

- 在库中选择一个晶体管
- 自行选择不同阻值的偏置电阻**R**
- 画出输入输出转移特性曲线
- 寻找最适当的直流工作点，使得交流小信号放大的线性度最好
  - 在所有工作点中，相同交流小信号正弦波幅度，具有最小的总谐波失真



关直播提醒