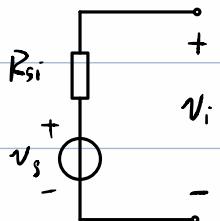


# § 1 谱论

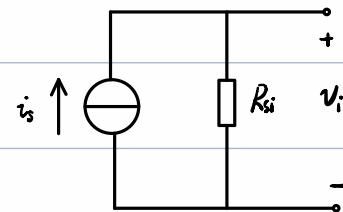
## 1 信号

传感器: 非电信号  $\rightarrow$  电信号 | 电压  
 $\downarrow$   
 信源

### ① 戴维宁等效电路



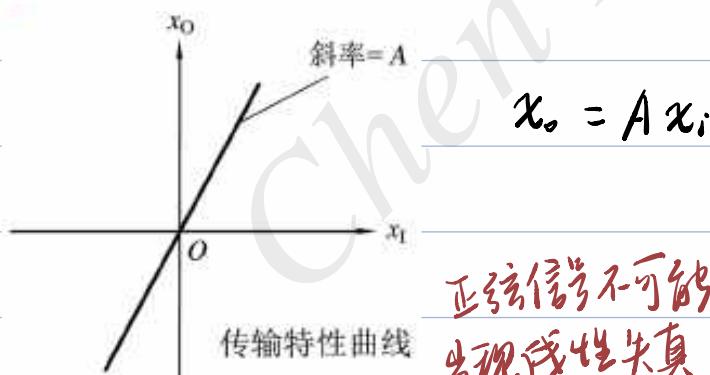
### ② 诺顿等效电路



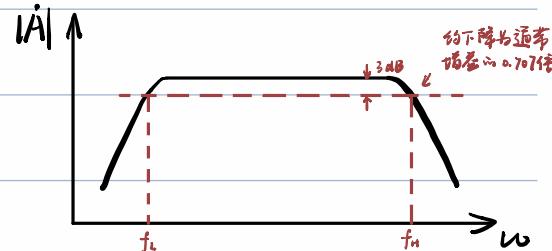
模拟信号  $\rightarrow$  连续函数

{ 时域: 平均值小, 直流分量小  
 { 频域

## 2 信号的线性放大



正弦信号不可能  
出现线性失真



{ 频率失真 / 线性失真 { 中幅度失真 用幅频响应曲线描述  
 { 由线性寄生元件引起 相位失真 相频响应曲线  
 非线性失真

△ 区别: 频率失真不会产生输入信号没有的新频率分量  
 非线性失真会出现新的高次谐波分量

只有在一定的中值范围内和频率范围内，  
 A才能基本保持常数

### 3 放大电路模型

$$\text{电压增益 } A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

$$20 \lg |A_v| \text{ dB}$$

$$\text{电流增益 } A_i = \frac{i_o}{i_i}$$

$$20 \lg |A_i| \text{ dB}$$

$$\text{互阻增益 } A_r = \frac{v_o}{i_i} \quad (r)$$

$$\text{互导增益 } A_g = \frac{i_o}{v_i} \quad (s)$$

$$\text{功率增益 } A_p = \frac{P_o}{P_i}$$

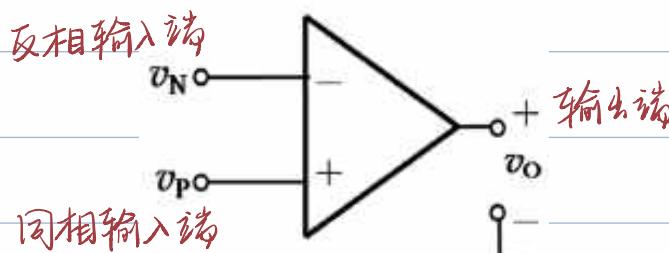
$$10 \lg A_p \text{ dB}$$

	电路模型	增益	对输入 电阻 要求	对输出 电阻 要求	适用 场合
电压放大		$A_v = \frac{v_o}{v_i} = A_m \frac{R_L}{R_L + R_o}$	$R_i$ 越大越好	$R_o$ 越小越好	电压信号源，电压驱动型负载
电流放大		$A_i = \frac{i_o}{i_i} = A_m \frac{R_o}{R_L + R_o}$	$R_i$ 越小越好	$R_o$ 越大越好	电流信号源，电流驱动型负载
互阻放大		$A_r = \frac{v_o}{i_i} = A_m \frac{R_L}{R_L + R_o}$	$R_i$ 越小越好	$R_o$ 越小越好	电流信号源，电压驱动型负载
互导放大		$A_g = \frac{i_o}{v_i} = A_m \frac{R_o}{R_L + R_o}$	$R_i$ 越大越好	$R_o$ 越大越好	电压信号源，电流驱动型负载

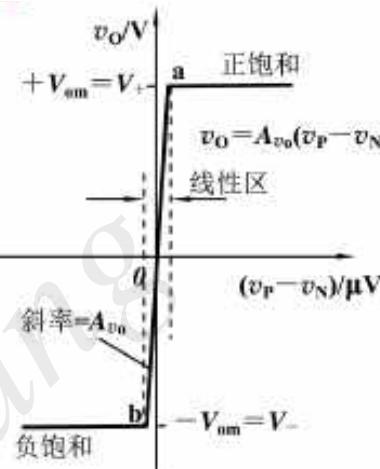
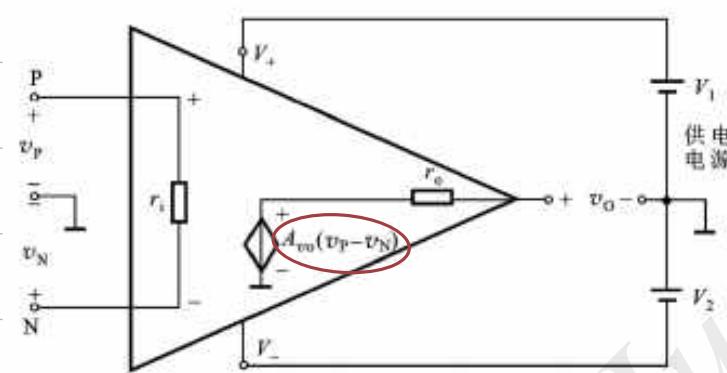
## §2 运算放大器

### I 运算放大器及其信号放大

#### (1) 运放的基本特性



同相 / 反相  
指输入端与输出端  
的相位关系



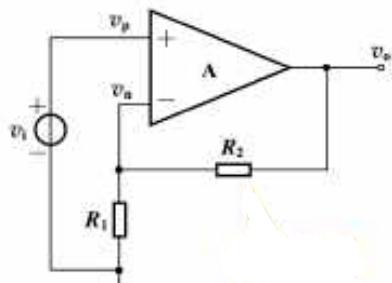
理想模型  $A_{v0} \rightarrow \infty$ ,  $r_i \rightarrow \infty$ ,  $r_o \rightarrow 0$ ,  $BW \rightarrow \infty$

在线性区  $v_P \approx v_N$  虚短

在线性区 / 饱和区  $r_i \rightarrow \infty \Rightarrow i_P \approx 0, i_N \approx 0$  虚断

#### (2) 基本应用

##### 同相放大电路

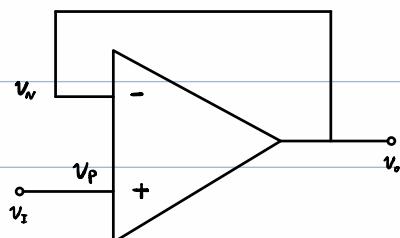


$$V_i = V_p = V_n = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_i \approx \infty \quad R_o \approx 0$$

##### EXP 电压跟随器

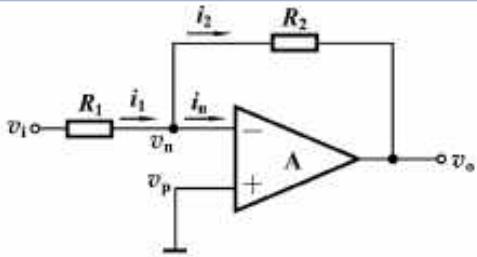


$$V_o = V_n \approx V_p = V_i$$

$$A_{v0} = \frac{V_o}{V_i} \approx 1$$

作用：隔离，缓冲

# 反相放大电路



$$v_N = v_p = 0$$

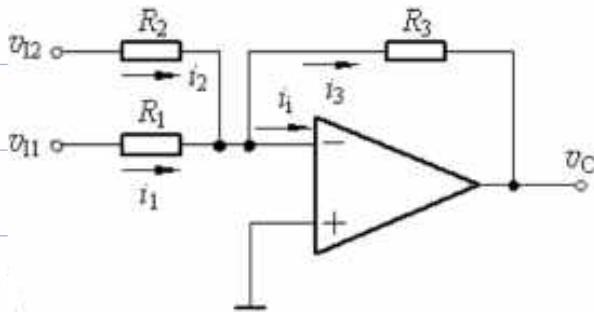
$$\frac{v_i - v_N}{R_1} = \frac{v_N - v_o}{R_2}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

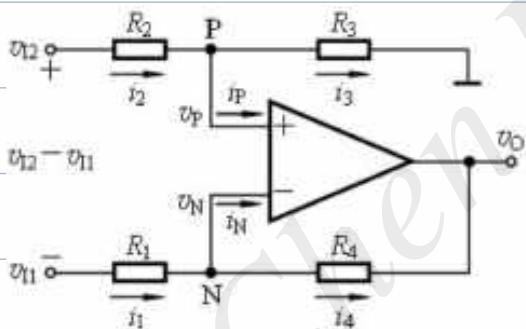
$$R_i = R_1 \quad R_o \approx 0$$

## 2 运算放大器其他应用

### (1) 加法电路



### (2) 反减法电路



$$v_P = \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2}$$

$$v_N = \frac{R_4}{R_1 + R_4} v_{i1} + \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2}$$

$$v_P \approx v_N$$

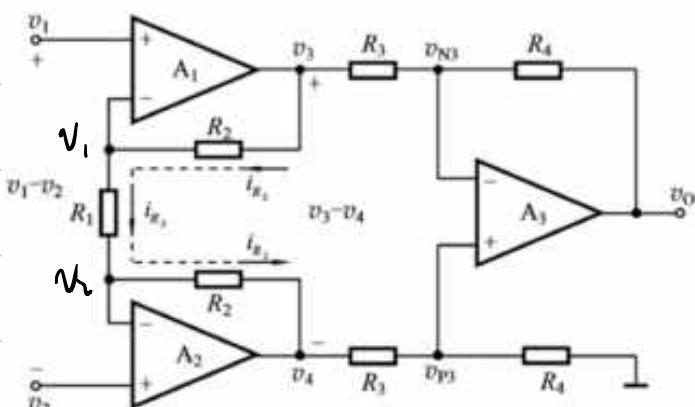
$$\Rightarrow v_o = \frac{R_4 + R_1}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2} - \frac{R_4}{R_1} v_{i1}$$

若  $\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}$ ,  $v_o = \frac{R_4}{R_1} (v_{i2} - v_{i1})$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{i2} - v_{i1}} = \frac{R_4}{R_1}$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{id}} = R_1 + R_2$$

### (3) 仪用放大电路

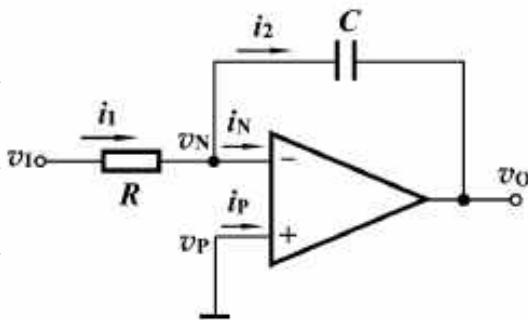


$$v_3 - v_4 = \frac{v_1 - v_2}{R_1} (R_1 + 2R_2)$$

$$v_0 = -\frac{R_4}{R_3} (v_3 - v_4)$$

$$= -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (v_1 - v_2)$$

## (4) 积分电路



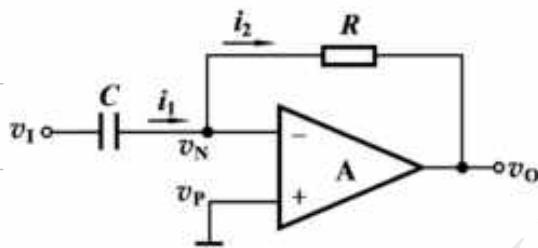
$$\begin{cases} v_p = v_n = 0 \\ i_n = i_p = 0 \\ i_2 = i_1 = \frac{v_i}{R} \end{cases}$$

设电容初始电压为0

$$v_n - v_o = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C} \int \frac{v_i}{R} dt = \frac{1}{RC} \int v_i dt$$

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt$$

## (5) 微分电路



$$v_o = -RC \frac{d v_i}{dt}$$

$$i_1 = i_2$$

$$i_1 = C \frac{d(v_i - v_n)}{dt} = C \frac{d v_i}{dt}$$

$$i_2 = \frac{v_n - v_o}{R} = -\frac{v_o}{R}$$

虚断、虚短  
电路方程

注意事项

必须保证运放工作在线性区  
反馈电阻必须接在反相端和输出端之间

## 运放线性应用电路



# 3 二极管及其基本电路

## 1. 半导体基本知识

空穴正负电荷对区别于导体的一个重要标志

本征半导体：+4 自由电子 & 空穴成对呈现（温度会影响）  
 杂质半导体：掺入 +3 多出一个空穴 P型半导体 (positive)  
 ↓ +5 多出一个电子 N型半导体 (negative)

产生多数载流子；提高自由电子和空穴的复合几率

## 2. PN 结

← 内电场

P型	- -	++	N型
空穴	- -	++	自由电子
	- -	++	

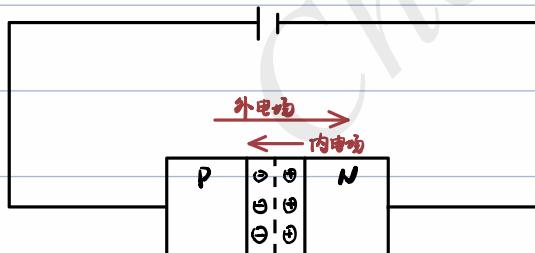
电阻  $\Rightarrow$  PN结

多子扩散 + 少子漂移

## 3. PN结特性

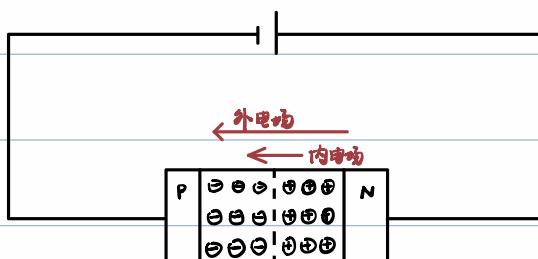
### (1) 单向导电性

#### 正向偏置



PN结变窄  $\Rightarrow$  阻值  $\downarrow$

#### 反向偏置 PN结截止



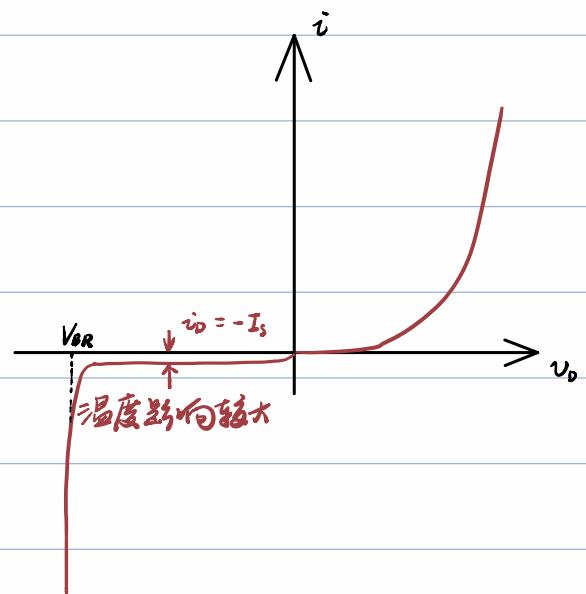
阻止多子扩散，促进少子漂移

$$i_D = I_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$$

$$I_s \text{ 反向饱和电流 } V_T = \frac{kT}{q}$$

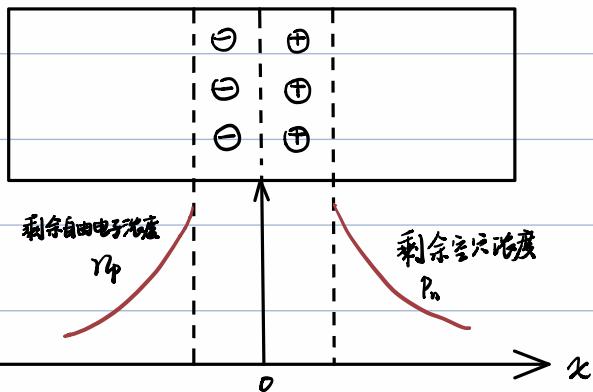
$$V_D \gg V_T \text{ 时, } i_D \approx I_s e^{\frac{V_D}{V_T}}$$

$$V_D < 0 \text{ 且 } |V_D| \gg V_T \text{ 时, } i_D \approx -I_s$$

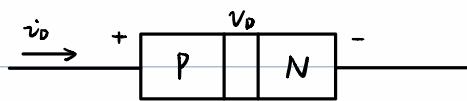


(2) 反向击穿 { 电击穿(可逆)  
热击穿(不可逆)

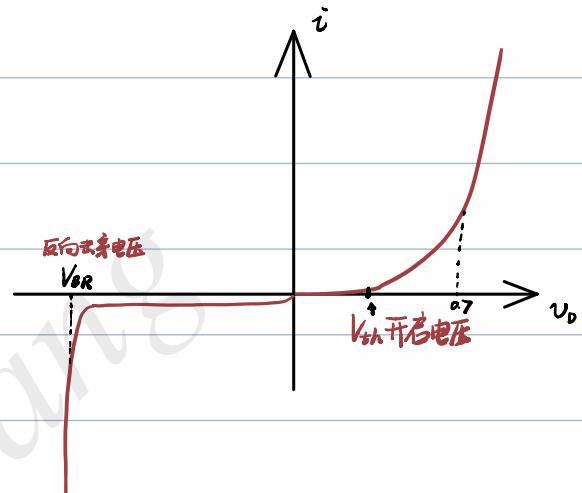
(3) 电容效应(扩散电容)



#### 4. 二极管 单向导电性



$\alpha_{阳极} \xrightarrow{i_o} + v_o -$  K<sub>阴极</sub>

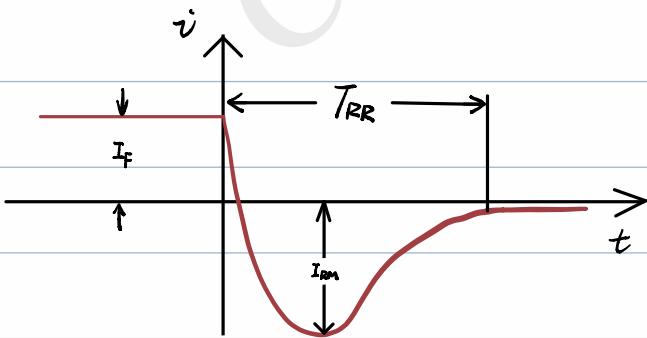


- 最大整流电流：长时间工作允许通过的最大正向平均电流

- 反向击穿电压

- 反向电流：工作在反向截止状态时的电流

- 极间电容  $\propto$  PN结面积

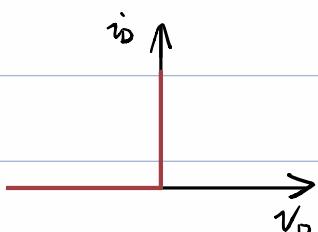


- I\_F 正向电流

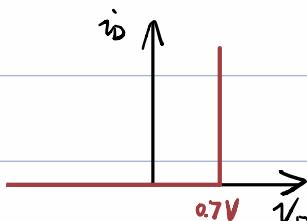
- T\_RR 反向恢复时间

- I\_{RM} 最大反向恢复电流

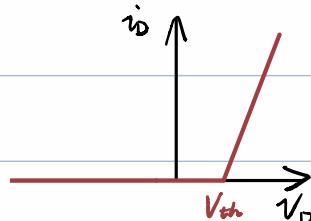
(1) 理想模型



(2) 恒压降模型



(3) 折线模型



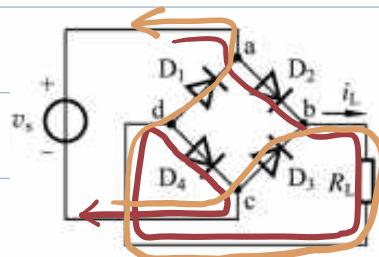
#### (4) 小信号模型 (小范围线性近似)

$$g_m = \frac{d i_o}{d v_o} = \frac{d}{d v_o} [I_s (e^{\frac{v_o}{V_T}} - 1)] = \frac{I_s}{V_T} e^{\frac{v_o}{V_T}} \Big|_a \approx \frac{i_o}{V_T} \Big|_a = \frac{I_o}{V_T}$$

$$r_d = \frac{1}{g_m} \quad \text{动态电阻 / 交流电阻}$$

### 5. 二极管基本电路

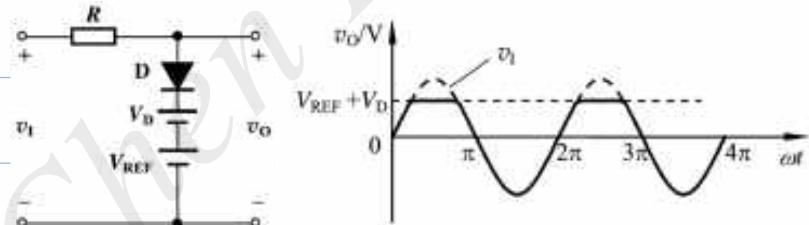
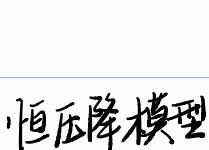
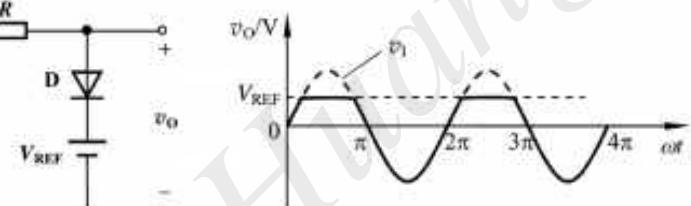
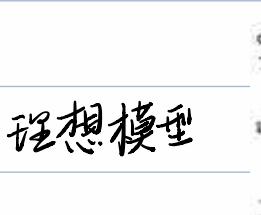
#### (1) 整流电路 { 半波整流 桥式整流 }



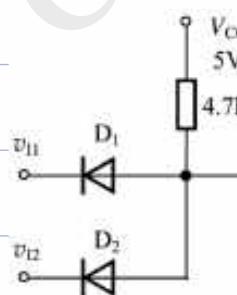
正半周  $v_a > v_b > v_d > v_c$   $D_2, D_4$  正偏;  $D_1, D_3$  反偏

负半周  $v_c > v_b > v_d > v_a$   $D_1, D_3$  正偏;  $D_2, D_4$  反偏

#### (2) 限幅电路



#### (3) 开关电路



$v_{H1}/V$	$v_{H2}/V$	二极管工作状态		$v_O/V$
		$D_1$	$D_2$	
0	0	导通	导通	0
0	5	导通	截止	0
5	0	截止	导通	0
5	5	截止	截止	5

#### (4) 小信号应用

#### { 直流电源单独作用时 (静态) 交流电源单独作用时 (动态) }

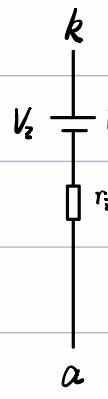
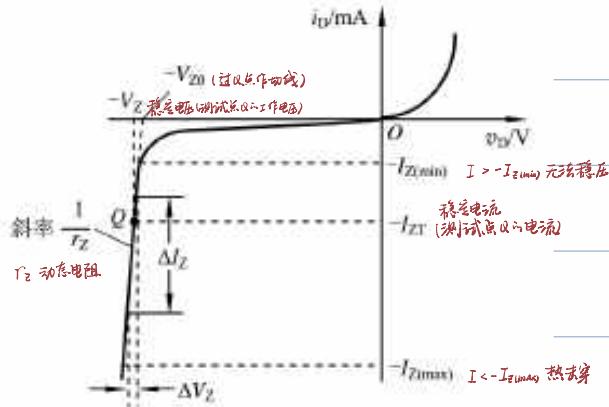
#### (5) 图解分析法 (前提: 已知二极管特性曲线)

## 6. 特殊二极管

### (1) 齐纳二极管

稳压二极管  
↑

可以在反向击穿下工作，电流反向迅速增加，电压变化很小。



$\Leftrightarrow$  反向击穿

$$V_z = 0 \Rightarrow V_z = V_{z0}$$

正常工作时处于反向击穿，电压及电流参考方向与普通二极管相反。  
使用时

① 电压  $V_I > V_z$ ，使齐纳二极管反向击穿

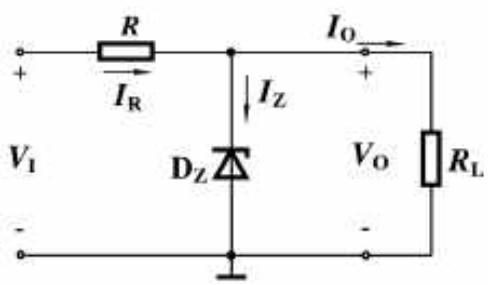
② 带入限流电阻  $R$ ，将电流  $I_z$  限制在  $[I_{z(min)}, I_{z(max)}]$

③ 负载电阻并联在二极管两端

● 输入电压  $[V_{I(min)}, V_{I(max)}]$

● 输出电压  $V_o$  ( $V_{I(min)} > V_o$ )

● 输出最大电流  $I_{o(max)}$



齐纳二极管的选择条件：

- 电压  $V_o = V_z$
- 电流  $I_z(max) > I_z(min) + I_{o(max)}$
- 最大耗散功率  $P_{zm} > V_z (I_{z(min)} + I_{o(max)})$
- 限流电阻  $R = \frac{V_I - V_z}{I_z + I_o}$

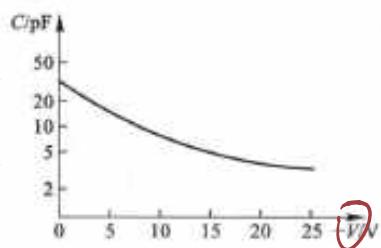
$$\textcircled{1} \quad V_I = V_{I(min)} \quad I_o = I_{o(max)} \quad I_z = I_{z(min)} \Rightarrow R_{max}$$

$$\textcircled{2} \quad V_I = V_{I(max)} \quad I_o = 0 \quad I_z = I_{z(max)} \Rightarrow R_{min}$$

$$\frac{V_{I(max)} - V_z}{I_{z(max)} + I_{o(min)}} < R < \frac{V_{I(max)} - V_z}{I_{z(min)} + I_{o(max)}}$$

$$P_R > \frac{(V_{I(max)} - V_z)^2}{R}$$

## (2) 变容二极管 (突出电容与电压的关系)



反偏电压

## (3) 肖特基二极管

- ① 电容效应小，工作速度快，适用于高频 / 开关状态应用
- ② 正向导通的正向压降和反向恢复时间小。

## (4) 光电二极管 (光→电)

反偏电压

少子浓度与光照强度有关

## (5) 发光二极管 (电→光)

正偏电压

发光二极管必须施加正向偏置电压才能发光；光电二极管在不同的光照强度下，会有不同的反向饱和电流，所以应该加反向偏置电压；变容二极管正常工作时，也应该施加反向偏置电压。

