

# 电路与器件

## 电学部分知识点

### 静态电路分析

#### 1. Y- $\Delta$ 形电路转换

现推方法：

从Y电路的两个节点看整个电路，必然只有两个电阻被串联使用

从 $\Delta$ 电路的两个节点看整个电路，电路呈现一个电阻与两个串联电阻并联的情况

列出两个电路的方程，求解即可

公式：

$$R_3 = \frac{R_a R_b}{R_A + R_B + R_C}$$

注： $R_3$ 是Y- $\Delta$ 形电路中属于Y的，且在 $\Delta$ 电路中 $R_a$ 与 $R_b$ 中间的电阻

当 $R_A = R_B = R_C$ 时，

$$R_Y = \frac{R_\Delta}{3}$$

#### 2. 最大功率传输定理

最大功率传输定理针对的是某一部分的最大功率

当负载 $R_L$ 的电阻值与内电路电阻值相等时，有负载的功率最大

结合戴维南定理，可以将 $R_L$ 外的所有部分等效为一个内电路，当 $R_L = R_{Th}$ 时有 $R_L$ 的功率最大。

### 动态电路元件

#### 1. 电容

- 连接方式

串联：

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

并联：

$$C_t = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

- 动态响应方程  
时间常数:

$$\tau = RC$$

未充电: 断路  
充电阶段:

$$v_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$i_C(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

充电完成: 短路 (理想)  
开关断开的瞬间:

$$u(0_+) = u(0_-)$$

放电阶段:

$$v_C(t) = E e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

放电完成: 断路

- 交流电路响应  
阻抗:

$$Z_c = X_c = -\frac{1}{\omega C} j = \frac{V_m}{I_m}$$

j是虚数单位

随着频率的增加, 阻抗会逐渐减小

## 2. 电感

- 电感的定义

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

- 连接方式  
串联:

$$L_t = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

并联:

$$\frac{1}{L_t} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

- 动态响应方程  
时间常数：

$$\tau = \frac{L}{R}$$

未充电： 短路  
充电阶段：

$$v_L(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_L(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

充电完成： 断路（理想）  
开关断开的瞬间：

$$i(0_+) = i(0_-)$$

放电阶段：

$$v_L(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_L = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

注：放电过程应当与L并联一个电阻以保护整个电路的安全，因此此处的R的阻值与原来相比已经发生了变化

放电完成： 短路

- 交流电路响应  
阻抗：

$$Z_L = X_L = \omega L = \frac{V_m}{I_m}$$

随着频率的增加，阻抗会逐渐增加

- 谐振  
当电路处于谐振状态时，有：  $-X_c = X_L$   
根据该公式可以求出谐振频率。  
在谐振电路中：  $I = \frac{E}{R}$   
谐振的时候功率因子为1。  
品质因数（Q）：

$$Q = \frac{Q(\text{power})}{P} = \frac{X_L}{R} \text{ (并联)} = \frac{R}{X_c} \text{ (串联)}$$

## 交流电基础

### 1. 复角表达

以  $v = V_m \sin(\omega t + \theta)$  为例:

$$v = V_m \sin(\omega t + \theta) \rightarrow V_{rms} \angle \theta$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$V = V_{rms} = V_{rms} \angle \theta$$

相位角相同才能用复角表示

### 2. RLC-交流电电路的功率

平均功率/有功功率:

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \theta = \frac{V_m I_m}{2} \cos \theta$$

在不含LC的交流电电路中:  $P = V_{rms} I_{rms} = \frac{V_m I_m}{2}$

$$P = I_{rms}^2 R$$

功率因子:

$$\cos \theta = \frac{P}{S}$$

视在功率:

$$S = V_{rms} I_{rms}$$

$$S = I_{rms}^2 Z$$

无功功率:

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \theta$$

$$Q = I_{rms}^2 X$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

一般采用通过计算P和S的方式来计算Q

## 无源滤波器

### 1. 增益

功率增益：

$$A_p = \frac{P_o}{P_i}$$

对数形式：

$$A_p = 10\lg\left(\frac{P_o}{P_i}\right)$$

10

电压增益：

$$A_v = \frac{V_o}{V_i}$$

对数形式：

$$A_v = 20\lg\left(\frac{V_o}{V_i}\right)$$

20

### 2. 滤波器电路的连接和功能

- 根据电容和电感频率响应的特性具体问题具体分析
- 截止频率在  $X_L = R$  或者  $X_C = R$  时
- 相位角：  $\theta = \arctan\left(\frac{f_{cutoff}}{f}\right)$
- 在截止频率时，相位角为  $45^\circ$
- 无源带通滤波器的结构是高通和低通滤波器并联

## 变压器

### 1. 变压器的性质

- 变压器可以变换**阻抗，电压，电流**
- 变压器的耦合系数：

$$k = \frac{\Phi_m}{\Phi_p}$$

$\Phi_m$ ：次级磁通量， $\Phi_p$ ：初级磁通量

初级电动势：

$$e_p = N_p \frac{d\Phi_p}{dt} = L_p \frac{di_p}{dt}$$

次级电动势：

$$e_s = N_s \frac{d\Phi_m}{dt} = k N_s \frac{d\Phi_p}{dt}$$

## 2. 互感系数 (Mutual Inductance)

$$M = N_s \frac{d\Phi_m}{di_p} = N_s \frac{d\Phi_p}{di_s}$$

$$M = k \sqrt{L_p L_s}$$

有,

$$e_p = M \frac{di_p}{dt} \quad \text{和} \quad e_p = M \frac{di_s}{dt}$$

注意下标

## 3. 比例关系

$$a = \frac{N_p}{N_s} = \frac{e_p}{e_s} = \frac{i_s}{i_p}$$

# 电子元件部分知识点

## 半导体原理

### 1. 半导体类型

N型半导体：填入电子

P型半导体：抽去原有的电子

### 2. PN结及性质

PN结：P型半导体和N型半导体拼接在一起，使得电流的方向仅能从P极到N极

正向偏置：电流由P到N，P-N结的电阻非常的小，可视为短路

反向偏置：电流由N到P，P-N结的电阻非常大，可视为断路

## 二极管电路

### 1. 二极管的单向导通性

对于理想二极管，顺箭头方向可视为导线，逆箭头方向可视为断路

### 2. 二极管电路分析

先假设二极管是导通的，求出二极管所在支路的电流方向，如果解出电流方向为逆箭头方向，则实际的二极

管处于反向偏置状态，假设错误；如果解出的电流方向为顺箭头方向，则二极管处于正向偏置状态，假设正确，以此来判断电路中的二极管是否处于导通状态

错误的假设情况下 需要重新计算电路

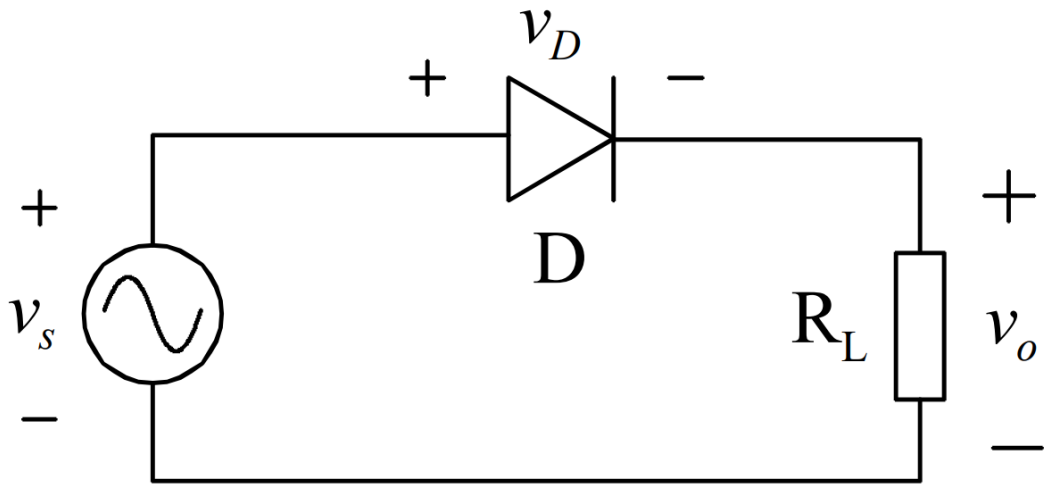
### 3. 非理想二极管的等效模型

非理想的二极管可以等效为一个理想的二极管和一个0.7V的直流电压源串联

### 4. 二极管的应用

#### 。半波整流器

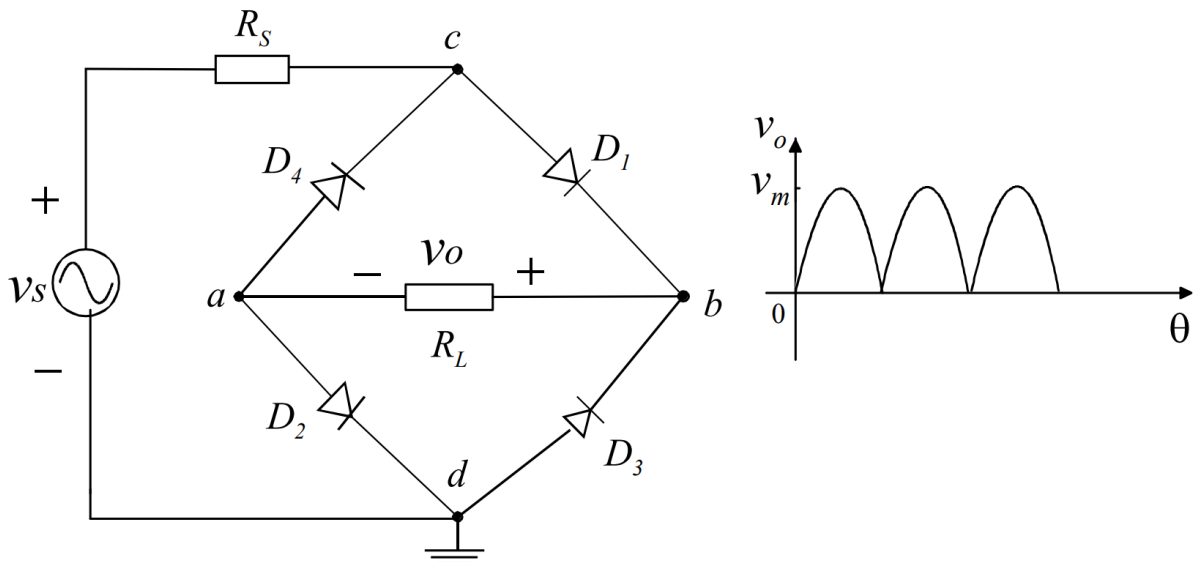
结构：交流电源和二极管串联



分析：交流电源的某一方向可以通过二极管，达到整流器的作用

#### 。全波/桥式整流器

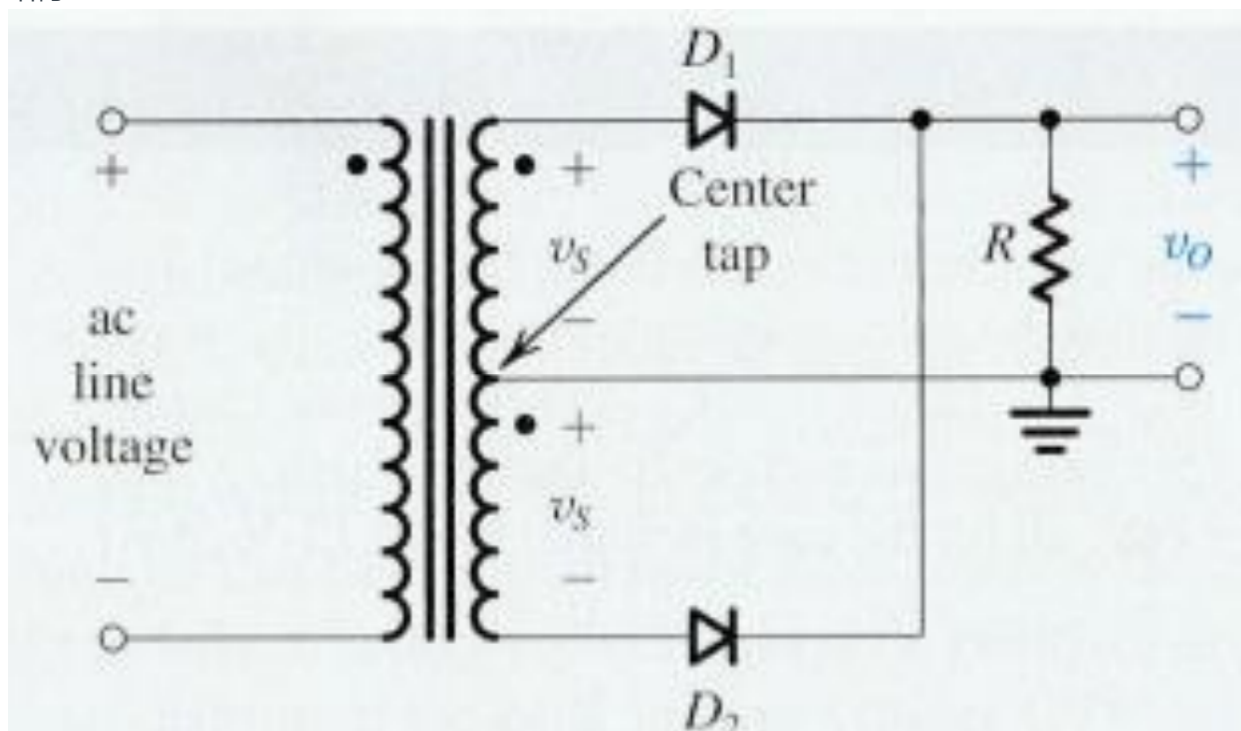
结构：



分析：无论是交流电源的前半期还是后半期，流过电阻的电流始终是同一个方向

- 全波/变压器整流器

结构:

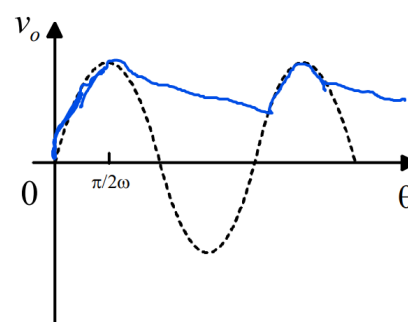
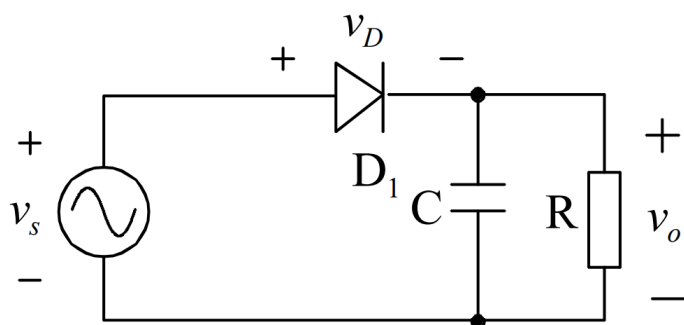


分析: 变压器的输出端被分成了两段, 在交流电的前半期还是后半期, 电流都能通过其中的一半电路, 流过电阻的电流是同一个方向

由于引入了变压器, 这种整流器的噪声非常的大

- 并联限流器

结构: 二极管和直流电压源E串联

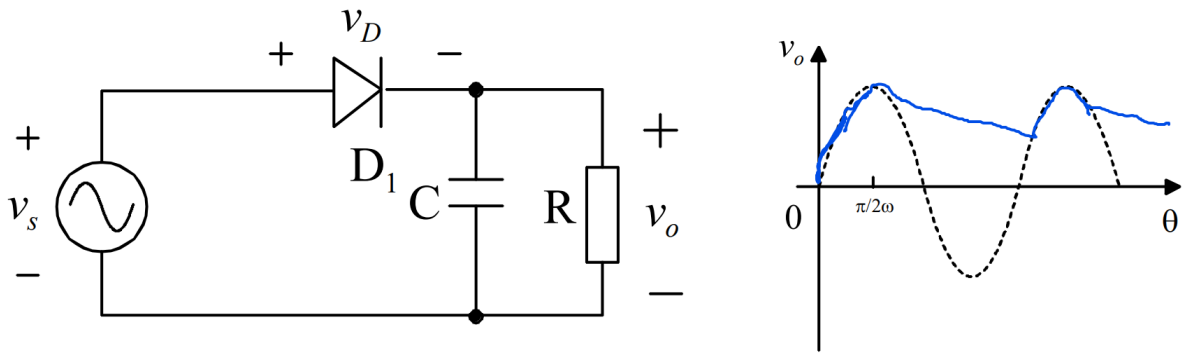


分析: 当  $|V_{sin}| < E$  时, 二极管导通  $V_{out} = E$   
 当  $|V_{sin}| > E$  时, 二极管导通  $V_{out} = V_{sin}$

- 峰值限流器

结构: 二极管和 (电容器||电阻) 结构串联





分析：在交流电源的前半期，二极管导通，电容器断路，处于充电状态  
在交流电源的后半期，二极管断开，电容器放电维持电路的工作

## 运算放大器

### 1. 放大器的增益

线性增益：输出与输入的比值是一个定值

**电压增益：**  $A_v = \frac{V_o}{V_i}$

**电流增益：**  $A_i = \frac{I_o}{I_i}$

**功率增益：**  $A_P = \frac{P_o}{P_i} = A_v A_i$

**增益的指数形式：**  $A_p = 10 \lg \frac{P_o}{P_i}$

10

$$A_v = 20 \lg \frac{V_o}{V_i}$$

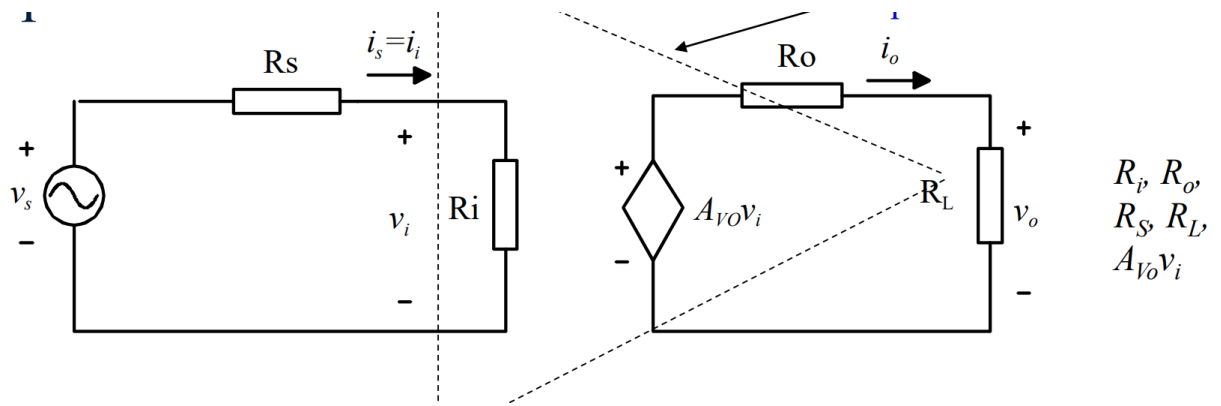
20

饱和状态：对于有两个电源的运算放大器，输出电压不会超过最大/最小饱和电压

### 2. 理想放大器的直流线性等效模型

#### 。电压等效模型

结构：



分析:

$$\frac{V_s}{V_i} = \frac{R_s + R_i}{R_i} \quad (1)$$

$$\frac{A_{V_o} V_i}{V_o} = \frac{R_o + R_L}{R_L} \quad (2)$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i} \frac{V_i}{V_s} = \frac{A_{V_o}}{(1 + \frac{R_s}{R_i})(1 + \frac{R_o}{R_L})}$$

对于理想的运算放大器:

$$A_o = \infty, R_i = \infty, R_o = 0$$

### 。 电流等效模型

结构:

分析:

### 3. 级联放大器的增益计算

#### 。 一般形式:

$$A_t = \prod A_i$$

#### 。 指数形式:

$$A_t = \sum A_i$$

### 4. 运算放大器的符号和端口

- 。 pin1: 反相输入端
- 。 pin2: 同相输入端
- 。 pin3: 输出端

### 5. 运算放大器电路分析

#### 。 虚短路和虚接地

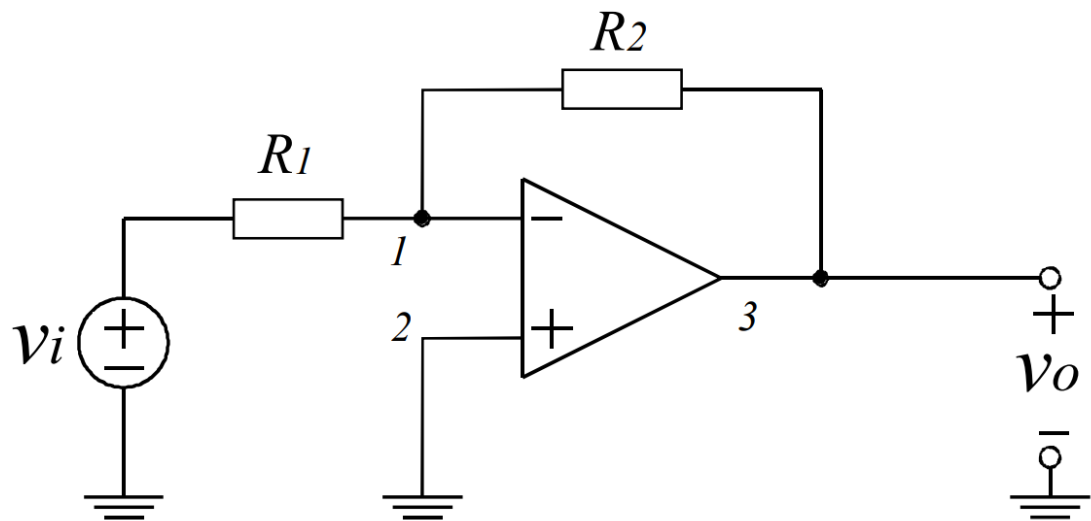
在线性应用当中, 电流从+ 流向 - 时 (同相输入) 运算放大器的同相输入端和反相输入端之间可以认为

是短路的，称为虚短路。

当电流从-流向+时（反相输入），反相输入端相当于接地，称为虚接地。

### 。反相输入的运算放大器电路分析

电路图:



如图，

由虚接地  $V_- = 0$ :

$$i_1 = \frac{V_i}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{-V_o}{R_2}$$

同时,  $i_1 = i_2$

电压增益:  $A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$

反向放大器使用负反馈牺牲增益来增加精度

### 反相加法放大器（2个输入电阻的情况）：

$$i_1 = \sum_{x=1} \frac{V_x}{R_x} \quad (1)$$

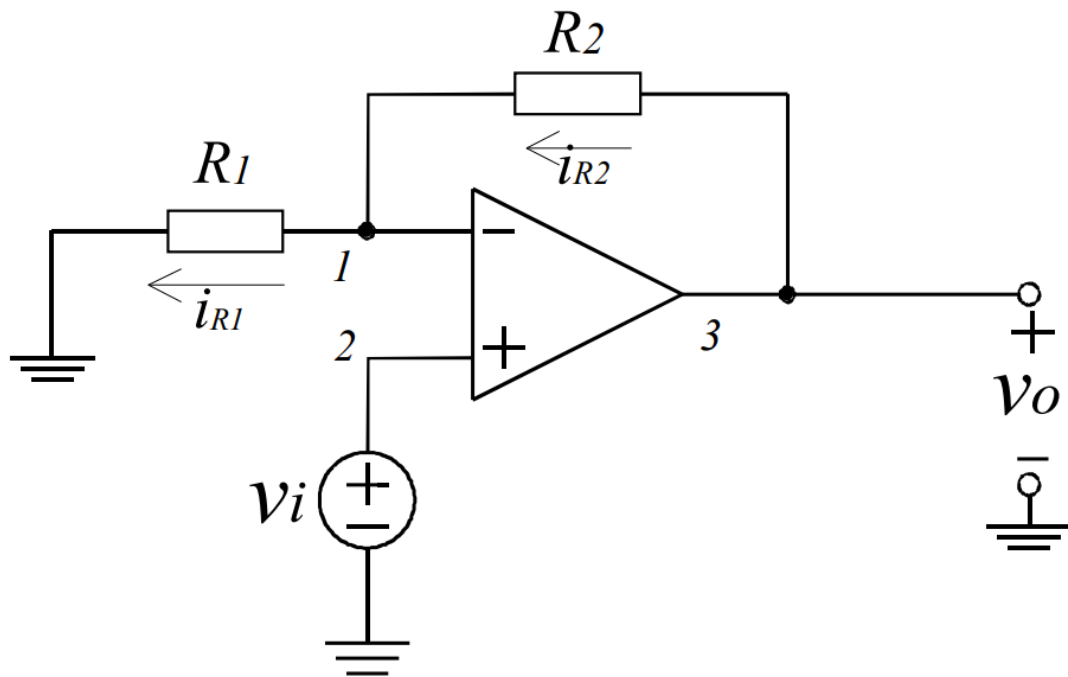
$$i_2 = \frac{-V_o}{R_f} \quad (2)$$

$$i_1 = i_2 \quad (3)$$

$$V_o = -R_f \sum_{x=1} \frac{V_x}{R_x}$$

### 。同相输入的运算放大器电路分析

电路图:



如图，由虚短路  $V_+ = V_- = V_i$ ：

$$i_1 = \frac{0 - V_i}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{V_o - V_i}{R_2}$$

同时， $i_1 = i_2$

电压增益： $A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

**同相加法放大器（2个输入电阻的情况）：** 设输入节点电压为  $V_n$ ，有：

$$\frac{V_o}{V_n} = 1 + \frac{R_f}{R_b} \quad (1)$$

由叠加定理：

$$V_n = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_2 \quad (2)$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_b}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_2\right)$$

## 三极管电路

### 1. 三极管电路的符号和三种模式

- 三极管有PNP和NPN型两种，无论是哪一种，三极管的箭头永远是在基极（B）和发射极（E）两端，由P型半导体指向N型半导体（即激活态下三极管BE的电流方向）
- 三种模式：**激活态**（相当于放大器）、截止态、饱和态（CE之间短路）

### 2. 激活状态下的电路分析

- 电流关系

$$i_E = i_B + i_c$$

$$\frac{i_C}{i_B} = \beta$$

当 $\beta > 100$ 时，通常可以认为 $i_C = i_E$

$$V_{BE} = 0.7V$$

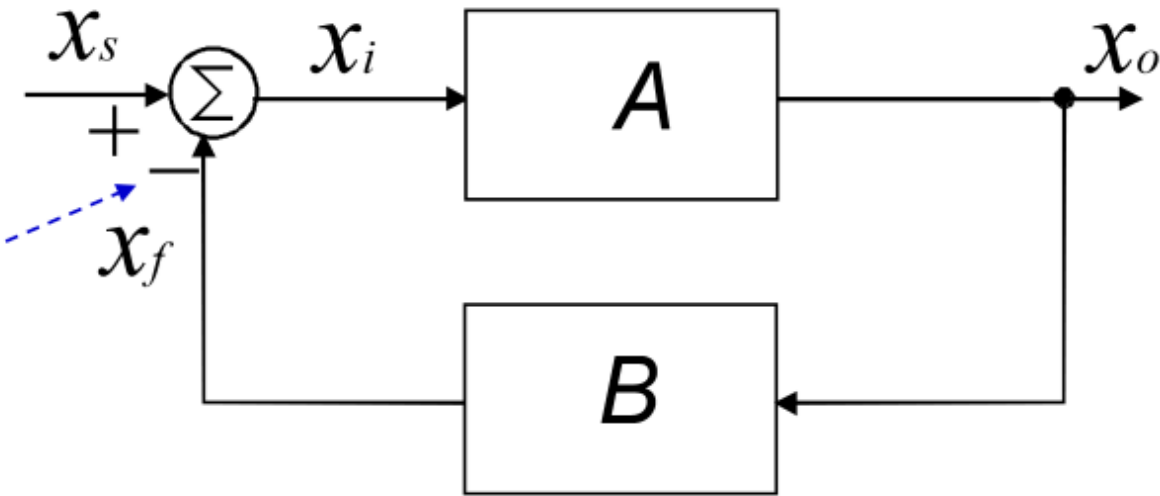
$V_B$ 和 $V_E$ 的孰大孰小由半导体类型决定

善用戴维南等效定理，对复杂的三极管电路进行化简

- **KVL在直流三极管电路下的应用**  
如果E最后未接地而接的电源，则可以对BE间进行KVL分析，列出方程，结合电流关系解出方程

反馈模型

1. 反馈模型的结构



开环增

益：当电路中没有反馈结构B时候的输入与输出之比： $A = \frac{x_o}{x_i}$

2. 反馈放大器的闭环增益

$$A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{A}{1 + AB}$$

推导：

$$x_o = Ax_i \tag{1}$$

$$x_f = Bx_o \tag{2}$$

$$x_s = x_f + x_i = x_i + ABx_i \tag{3}$$

$$A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{A}{1 + AB}$$

### 3. 反馈放大器的优点

当 $AB$ 足够大时,  $A_f = \frac{1}{B}$ ,

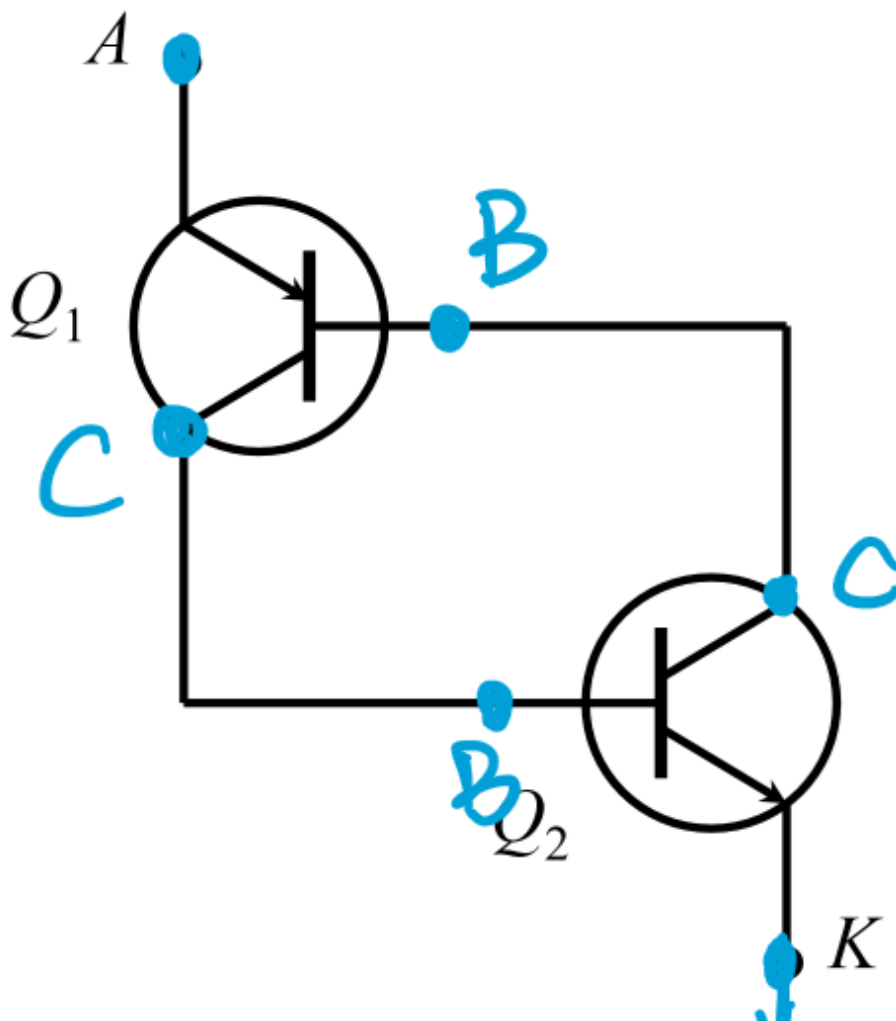
反馈电路 (B) 通常是由无源器件 (RLC) 组成, 因此此时的增益十分稳定而且可以直接精确地计算得出, 即:

- 准确
- 可预测
- 稳定

## 电闸管

### 1. 肖克利二极管

- 结构



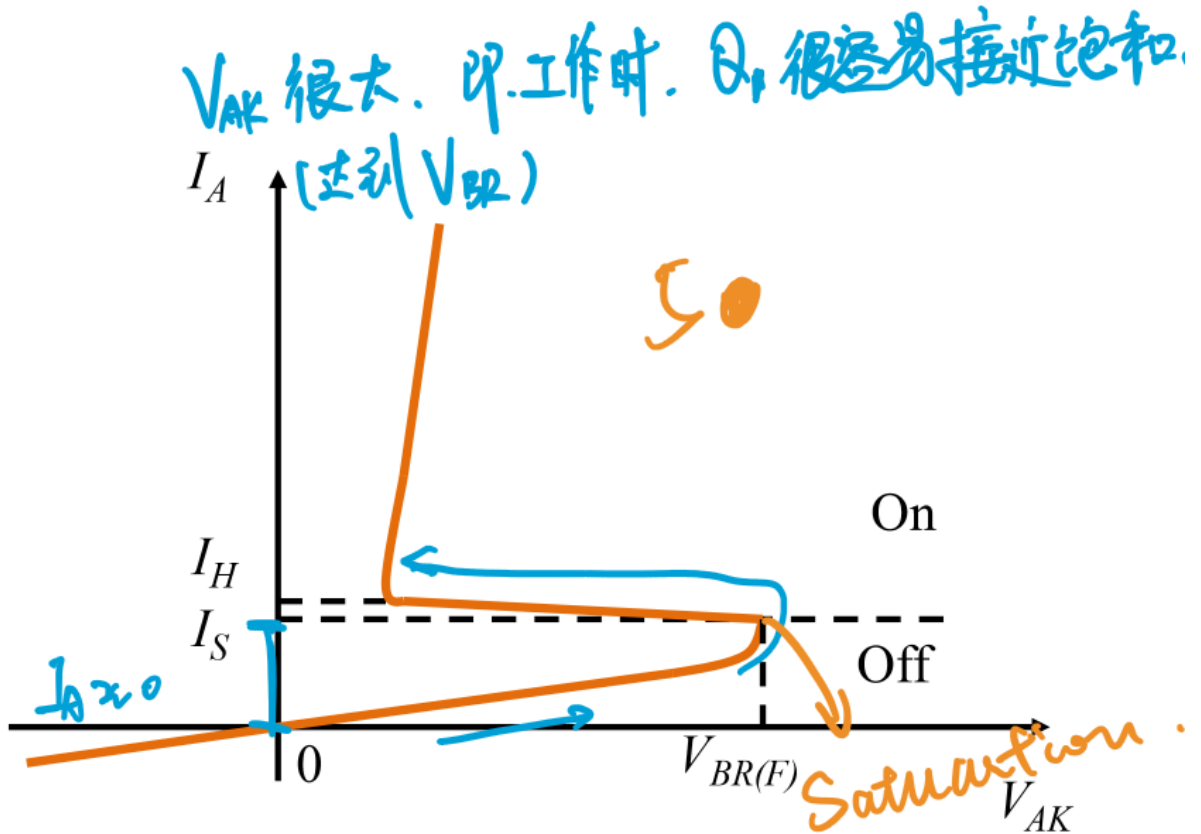
三极管串联, 其中:

$B_1 \rightarrow C_2$  且  $C_1 \rightarrow B_2$

$E_1 = A, E_2 = K$

两个PNP, NPN

特性曲线



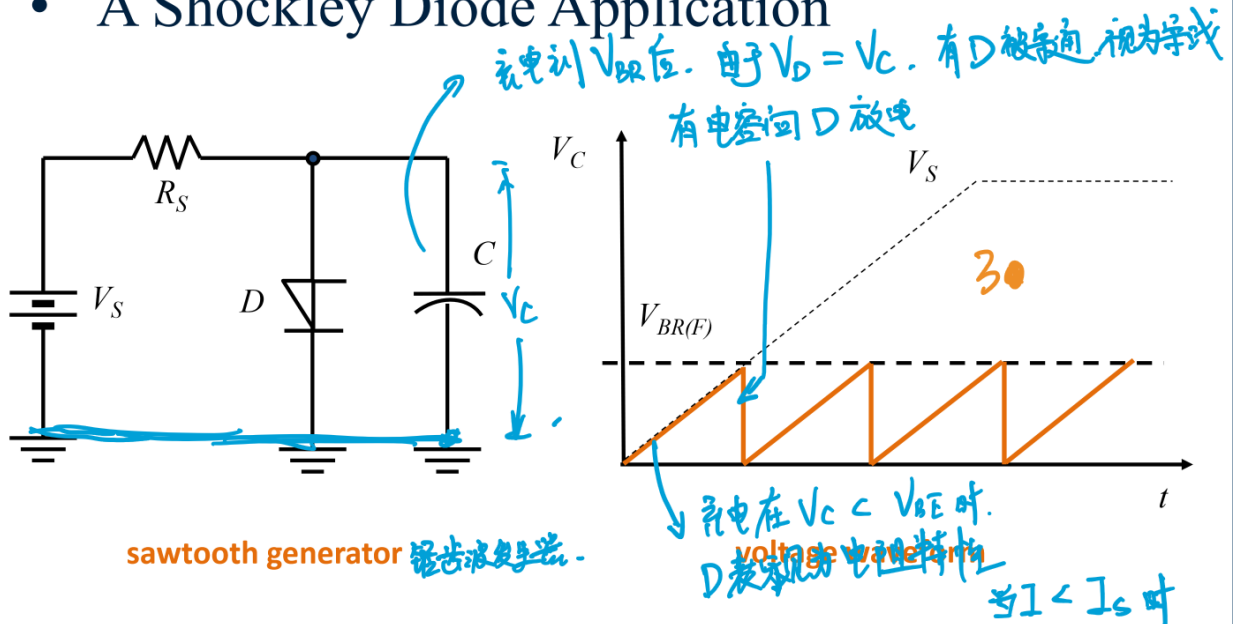
当AK之间的电压非常小时,流过肖克利二极管的电流 $I_A$ 非常小,即肖克利二极管表现大电阻的特性 当 $V_{AK} = V_{BR}$ 时, A的三极管很容易饱和,此时会回落到某个电压,此后肖克利二极管可视为小电阻或者导线

2. 锯齿波发生器

结构

肖克利二极管和电容器并联

A Shockley Diode Application



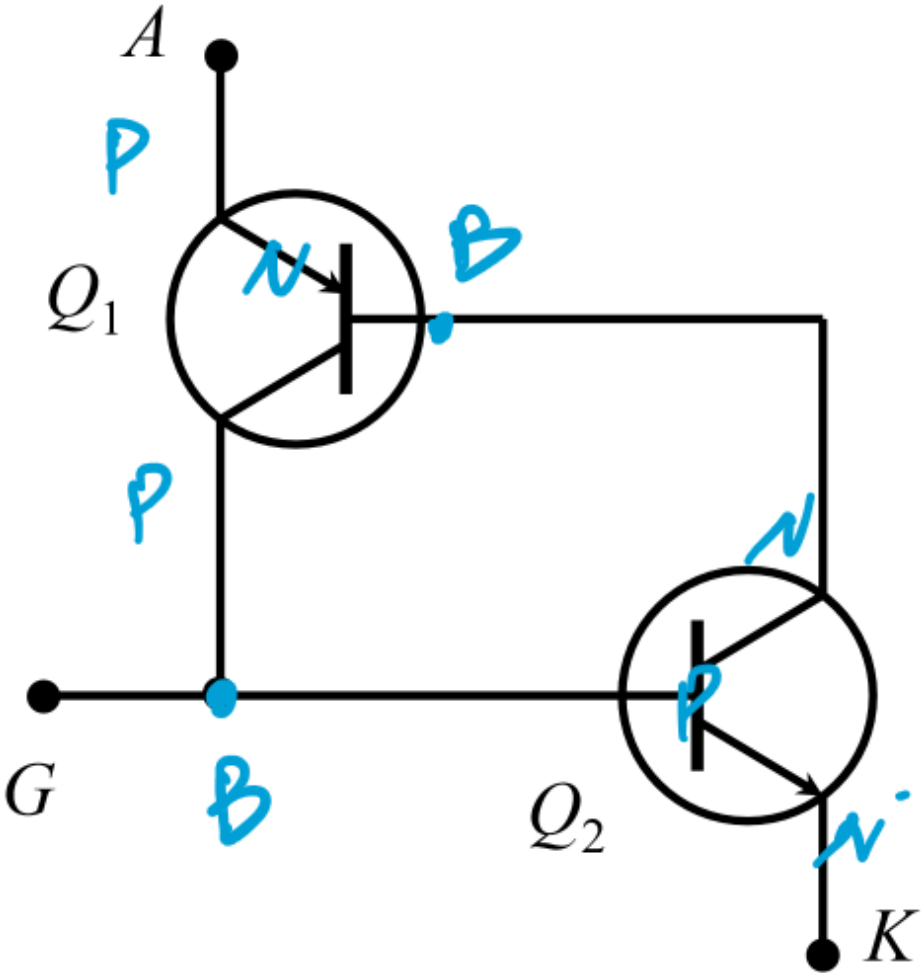
分析

肖克利二极管和电容器两端的电压相等, 设为 $V_C$ ,

当 $V_C < V_{BR}$ 时, 肖克利二极管表现大电阻特性, 电容器充电  
当 $V_C > V_{BR}$ 时, 肖克利二极管表现小电阻特性 (相当于短路), 电容器迅速放电

3. SCR整流器

◦ 结构



两个三极管

串联, 其中:  
 $B_1 \rightarrow C_2$  且  $C_1 \rightarrow B_2$   
 $E_1 = A, E_2 = K, B_2 = G$

◦ 原理  
给 $B_2$ 一个非常小的电流 $i_G$ ,

$$\begin{aligned} i_{B2} &= i_G \\ i_{C2} &= \beta_2 i_G = i_{B1} \\ i_{C1} &= \beta_1 i_{C2} = \beta_1 \beta_2 i_G = i_{B2} \\ &\dots \end{aligned}$$

最终 $i_{B2}$ 会非常大



- $I_{G0}=0$ 时的特性曲线  
肖克利二极管

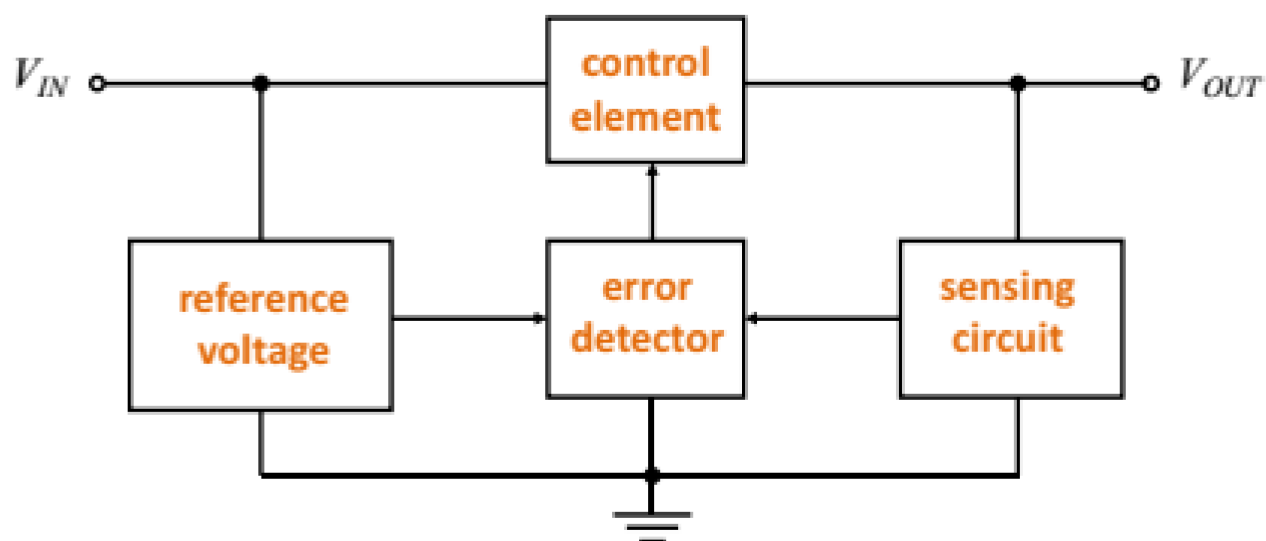
## 标准电源调节

### 1. 线性调节公式

$$LineRegulation = \frac{\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} \times 100}{\Delta V_{in}}$$

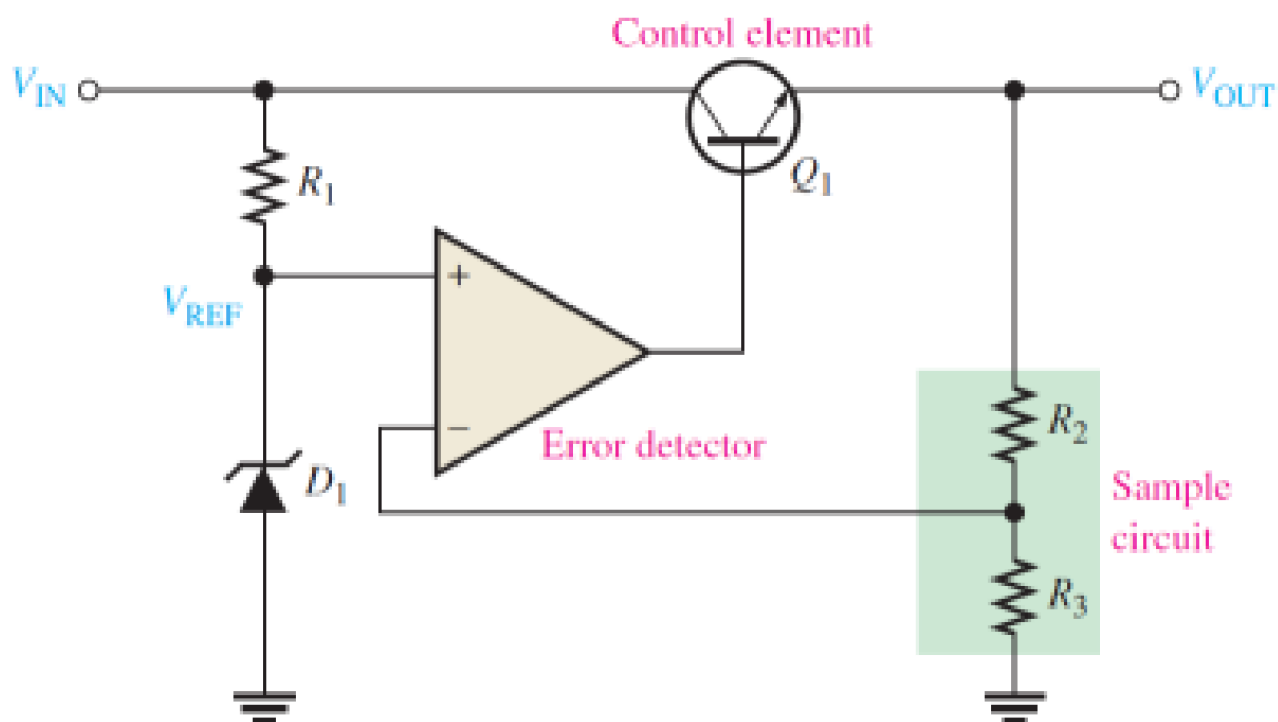
### 2. 串联电压调节器

结构：



### 3. 调整晶体管电路

结构：



原理：

肖克利二极管为运算放大器的+提供稳压的作用。

当 $V_{out}$ 因为各种原因上升时，与之相连接的分压器 $R_2 - R_3$ 会分走一部分电压，对于放大器的反相输入端 $V_- = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_-$ 上升，对于整个运算放大器的输入端，有：

$$V_{in}(\downarrow) = V_+(-) - V_-(\uparrow)$$

因此输出端 $V_{out} = V_B$ 下降，对于可控晶体管，其 $V_B(\downarrow)$ 导致 $V_E(\downarrow)$ ，最终调整 $V_{out}(\downarrow)$ 。

与此同时， $V_C(\downarrow)$ 使得 $V_{REF}(\uparrow)$ ，使得 $V_+$ 上升，但由于肖克利二极管的存在 $V_+$ 的上升幅度不明显。