

## 1. 半导体器件基础：

（1）了解半导体的结构，弄清什么是本征半导体，什么是 N 型半导体，什么是 P 型半导体，以及它们的多数载流子是什么？少数载流子是什么？

答：纯净的、不含杂质的半导体称为本征半导体。

在 4 价的硅（或锗）晶体中掺入少量的 5 价杂质元素，如磷，锑，砷等，这种杂质半导体主要依靠电子导电的半导体称电子型半导体或 N 型半导体。其多数载流子为电子，少数载流子为空穴；

在 4 价的硅（或锗）晶体中掺入少量的 3 价杂质元素，如硼，镓，铟等，这种杂质半导体主要依靠空穴导电的半导体称空穴半导体或 P 型半导体。其多数载流子为空穴，少数载流子为电子。

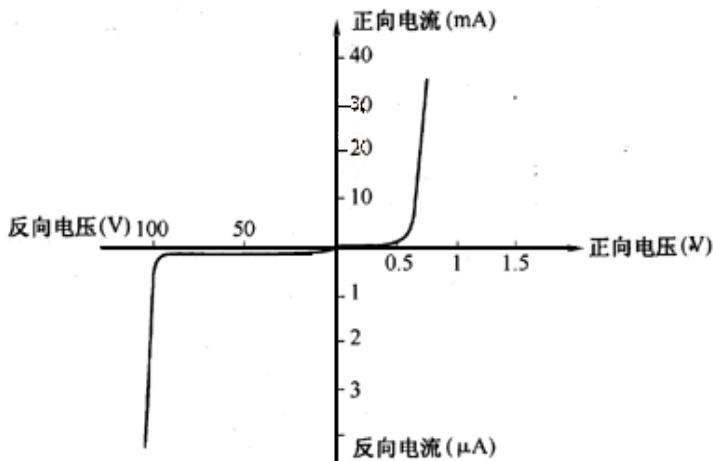
（2）PN 结具有哪些特性，主要特性是什么？二极管的导通条件是什么？二极管的管压降为多少？什么是门坎电压？必须了解二极管的伏安曲线。

答：PN 结有单向导电性、感光特性、感温特性、变容特性、变阻特性，其主要特性是单向导电性。

二极管的导通条件是 PN 结正向偏置。

硅二极管的管压降为 0.6~0.8V，锗二极管的管压降为 0.2~0.3V。

门坎电压即死区电压，是指二极管刚好导通时两端的电压差，硅二极管的死区电压为 0.5V 左右，锗二极管的死区电压为 0.1V 左右。



（3）三极管的导电机理是什么？三极管起正常放大作用的外部条件是什么？能否通过三极管各电极电位来判断它的工作状态。三极管的输出特性曲线分为哪几个区域？起正常放大作用的三极管必须工作在哪些区域上？

答：三极管导电机理是当基极电压  $U_b$  有一个微小的变化时，基极电流也会随之有一小的变化，受基极电流  $I_b$  的控制，集电极电流  $I_c$  会有一个很大的变化，基极电流  $I_b$  越大，集电极电流  $I_c$  也越大，反之，基极电流越小，集电极电流也越小，即基极电流控制集电极电流的变化。

三极管起正常放大作用的外部条件是发射结正向偏置，集电结反向偏置。

发射极反偏，集电极反偏为截止状态；发射极正偏，集电极反偏为放大状态；发射极正偏，集电极正偏为饱和状态，由此来判断它的工作状态。

三极管的输出特性曲线分饱和区、放大区和截止区，起正常放大作用的三极管必须工作在放大区。

## 2. 放大电路基础：

（1）要弄清放大电路有哪几个部分组成，什么是输入回路和输出回路。放大器的电压放大倍数以及通频带是怎样定义的？静态工作点是指哪些参数，为什么要设置静态工作点？稳定静态工作点的电路有哪些？怎样稳定？

答：放大电路有信号源、放大器、负载组成。

输入信号与晶体管组成的回路就是输入回路，负载与晶体管组成的回路就是输出回路。

将放大器输出电压与输入电压的变化量之比定义为放大器的电压放大倍数；通常将放大倍数在高频和低频段分别下降至中频段放大倍数的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  时所包括的频率范围，定义为通频带。

静态工作点是指  $I_b$ ， $I_c$ ， $U_{ce}$ 。设置合适的静态工作点，使信号的整个周期内晶体管始终工作在放大状态，输出信号才不会产生失真。

稳定静态工作点的电路有电压负反馈的偏置稳定电路、电流负反馈式工作点稳定电路和典型的分压式偏置稳定电路。

电压负反馈的偏置稳定电路的特点是将电阻  $R_b$  的上端从原来的接正电源改接为三极管集电极，这样就能将集电极的电压变化情况反映回输入端（基极）以稳定工作点，这种电路的基极电流为  $I_b = \frac{U_{be} - U_{ce}}{R_b} \approx \frac{U_{ce}}{R_b}$ ，可见  $I_b$  是随  $U_{ce}$  的变化而变化，假设温度上升时， $\beta$  要增大， $I_b$  增加， $I_c$  也增加，则  $U_{ce}$  要下降，而  $U_{ce}$  的下降又牵引到  $I_b$  的降低。即这样的电路会自动调整  $I_b$  基本不随温度变化而变化，即达到工作点基本稳定的目的。

电流负反馈式工作点稳定电路的特点是在发射极中串接一个  $R_e$  和  $C_e$ ，则  $I_b = \frac{U_{ce} - U_{be} - U_e}{R_b} \approx \frac{U_{ce} - U_e}{R_b}$ ，式中  $U_e = I_e \cdot R_e \approx I_c \cdot R_e$ ，可知发射极电阻  $R_e$  上的电压  $U_e$  对基极电流  $I_b$  有影响。当温度上升时， $I_b$  增加， $I_e$  也增加，使  $U_e$  也增加，于是  $I_b$  会相应地减小，这样可利用它来牵制  $I_e$  和  $I_c$  变化，达到工作点稳定的目的。

典型的分压式偏置稳定电路的特点是利用电阻  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  进行分压来固定基极电位， $U_b \approx V_{cc} \cdot \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}$ ，由于  $V_{cc}$ ， $R_{b1}$ ， $R_{b2}$  是不随温度而变化的，所以  $U_b$  能基本保持不变。再利用发射极电阻  $R_e$  来获得反映电流  $I_e$  的变化信号，然后再反馈到输入端实现工作点的稳定。

(2) 要能画出所学习过的放大器的直流通路、交流通路和微变等效电路。

答：画直流通路时，应将隔直电容开路；画交流通路时，应将电容短路，此外，集电极直流电源  $V_{cc}$  也应短路。

微变等效电路的画法为：①画出交流通路；②在图中找出三极管的三个极，用简化 H 参数等效电路来代替三极管；③将其它元件按照原来的相应位置画出，并用向量符号标出各电压和电流。

(3) 应能利用直流通路、交流通路和微变等效电路来计算共射电路及共集电路的静态工作点、电压放大倍数、输入与输出电阻。

答：静态工作点：画出直流通路：

$$\text{共射电路: } I_{BQ} = \frac{V_{cc} - U_{BEQ}}{R_b}, \quad I_{CQ} = \beta I_{BQ}, \quad U_{CEQ} = V_{cc} - I_{CQ} R_c。$$

$$\text{共集电路: } I_{BQ} = \frac{V_{cc} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e}, \quad I_{CQ} = \beta I_{BQ},$$

$$U_{CEQ} = V_{cc} - I_{EQ} R_e \approx V_{cc} - I_{CQ} R_e。$$

$$\text{电压放大倍数: 共射电路: } \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}, \quad \text{其中 } R'_L = R_c // R_L。$$

$$\text{共集电路: } \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{(1 + \beta) R'_e}{r_{be} + (1 + \beta) R'_e}, \quad \text{其中 } R'_e = R_e // R_L。$$

输入输出电阻：画出交流通路和微变等效电路：

$$\text{共射电路: } R_i = r_{be} // R_b, \quad R_o = R_c。$$

$$\text{共集电路: } R_i = [r_{be} + (1 + \beta) R'_e] // R_b, \quad R_o = \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} // R_e。$$

(4) 要能判断放大电路属于哪种接法的电路，要能分析基本放大器的工作原理。要了解多级放大器（包括直流放大器）的级间耦合方式以及多级放大器的放大倍数的计算。

答：画出等效电路，看三极管的哪个端是输入信号和输出信号的公共端。

常用的耦合方式有阻容耦合，变压器耦合，光电耦合，直接耦合等，最常用的是阻容耦合和直接耦合。（具体的在笔记）

多级放大器的放大倍数：多级放大电路总的放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积，即  $\dot{A}_u = \dot{A}_{u_1} \cdot \dot{A}_{u_2} \cdot \dot{A}_{u_3} \cdot \dots \cdot \dot{A}_{u_n}$  为了方便计算，常

利用对数的方法来表示放大倍数，称为增益，电压增益  $G_u$  与电压放大倍数  $A_u$  的关系为  $G_u = 20 \lg \frac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i} = 20 \lg \dot{A}_u$ ，单位 dB。

(5) 要能判断电路能否起放大作用，不能起放大作用的，应能说明原因。

答：

### 3.集成运放电路与运算电路：

(1) 要了解集成运放电路的特点及基本结构，直流放大器为什么会产生零点漂移问题，如何利用补偿法来抑制“零漂”，为什么运放的输入级都要采用差动放大器，差动放大器的公共发射极电阻主要起什么作用。共模抑制比是什么？

答：集成运放电路的特点：①由于制造的原因，几乎大部分电路采用直接耦合方式。②为克服零点漂移问题，大多数电路采用差动放大电路。③通常采用恒流源

来代替大阻值的电阻，或用来设置电路的静态工作点。④采用复合管的连接来改善单管的性能。

产生零点漂移的主要原因是放大器件的参数受温度的影响而发生波动，导致放大电路的静态工作点不稳定，是静态工作点的缓慢变化逐级传递和放大。因此，一般来说，直接耦合放大电路的级数越多，放大倍数越高，则零点漂移问题越严重。

在放大电路中接入另一个对温度敏感的元件，如热敏电阻，半导体二极管等，使该元件在温度变化时产生的零漂，能够抵消放大三极管产生的零漂。（课本 P89）  
将两个参数对称的单管放大电路接成差动放大电路，理想状态下，在静态时，两管子产生的零点漂移是完全相同的，这样就可以使它们产生的零漂互相抵消。  
差动放大器的公共发射极电阻  $R_e$  的作用是引入一个共模负反馈，使共模放大倍数  $A_c$  减小，降低了每个管子的零点漂移，但对差模放大倍数  $A_d$  没有影响，因此提高了电路的共模抑制比。

共模抑制比定义为差模电压放大倍数与共模电压放大倍数之比，一般用对数表示单位为 dB，即  $K_{CMR} = 20\lg\left|\frac{A_d}{A_c}\right|$ 。 $K_{CMR}$  越大，说明抑制零漂的能力越强。

(2) 集成运放用于运算电路中必须引入什么样的负反馈？而用在电压比较器电路中呢？

答：集成运放用于运算电路中必须引入深度负反馈，即  $\dot{A}\dot{F} \gg 1$ 。而电压比较器则工作于开环或正反馈状态下。

(3) 在分析计算运算电路时。所考虑的运放的“虚地”、“虚断”和“虚短”的意思是什么？要求应能计算常用的运算电路的输出电压。

答 虚短 由于运放工作在线性区，故输出、输入之间符合关系式  $u_O = A_{od}(u_+ - u_-)$ ，而且，因理想运放的  $A_{od} = \infty$ ，所以可得  $u_+ - u_- = \frac{u_O}{A_{od}} = 0$ ，

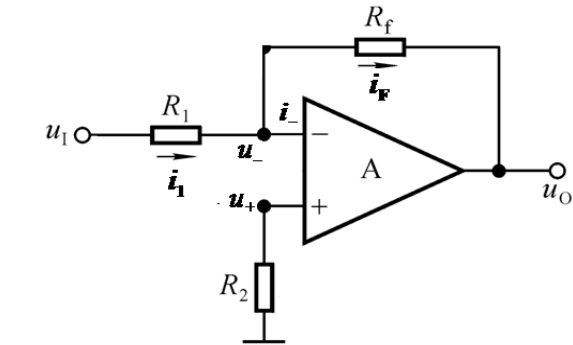
即  $u_+ = u_-$ ，此式表示运放同向输入端与反向输入端两点电压相等，如同将该两点短路一样，所以将这种现象称为“虚短”。

虚断：由于理想运放的差模输入电阻  $r_{id} = \infty$ ，因此在其两个输入端均没有电流，即  $i_+ = i_- = 0$ ，此时，运放的同向输入端和反向输入端的电流都等于零，如同该两点被断开一样，这种现象称为“虚断”。

虚地：输入端一端接地即  $u_+ = 0$  或  $u_- = 0$ ，由于有虚断即  $u_+ = u_-$  的概念，则  $u_+ = u_- = 0$ ，此时运放的同向输入端和反向输入端的电压都为零，如同两端都接地了一样，这种现象称为“虚地”。

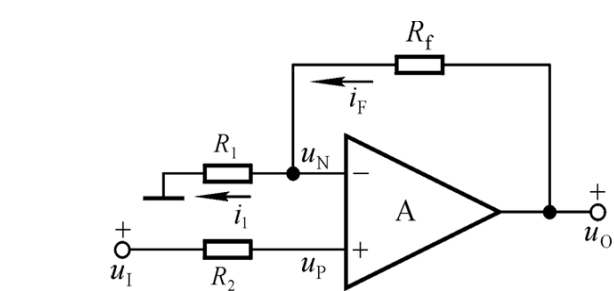
常用运算电路：

①反向比例运算：



$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}u_i, \text{ 其中 } R_2 = R_1 // R_f。$$

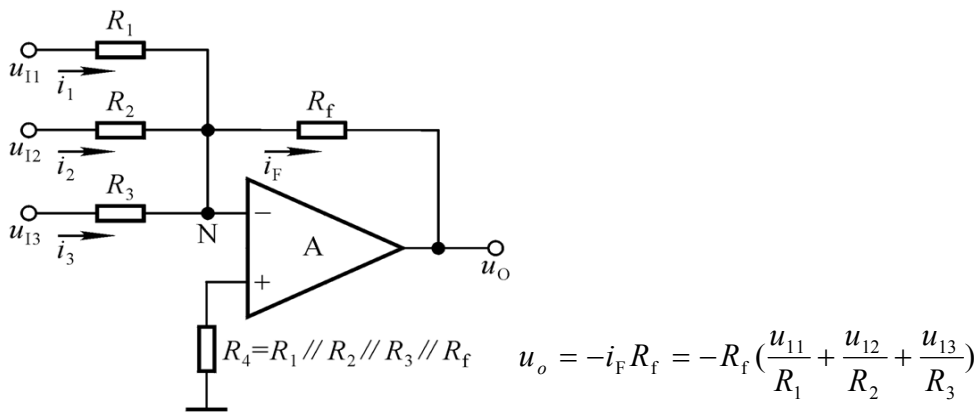
②同向比例运算：



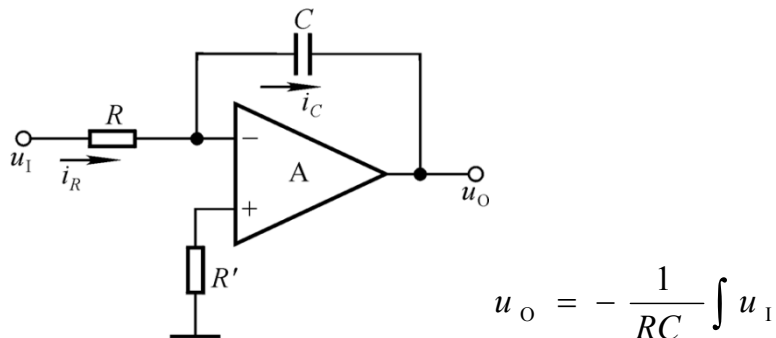
$$u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})u_i, \text{ 其中 } R_2 = R_1 // R_f。$$

③其他运算：

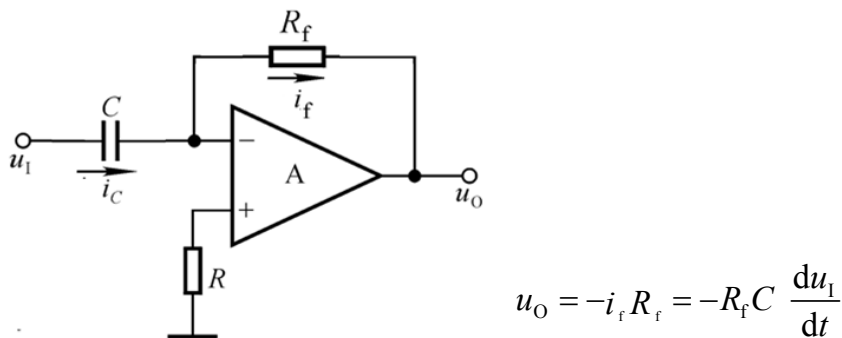
a. 加法运算：



b. 积分运算:



c 微分电路:



(其它运算电路参照笔记)

#### 4. 放大电路中的反馈:

(1) 要弄清楚反馈的概念, 什么是反馈通路, 应能判断正反馈还是负反馈, 是交流反馈还是直流反馈, 是电流反馈还是电压反馈 (即判断反馈电路的组态)。

**答:** 反馈通常是指将放大电路中的输出量 (输出电压或输出电流) 或输出量的一部分通过一定方式, 反送到放大电路的输入回路中去。

如果引入的反馈信号增强了外加输入信号的作用, 从而使放大电路的放大倍数得到提高, 这样的反馈称为正反馈; 相反, 如果反馈信号削弱了外加输入信号的作用, 使放大电路的放大倍数降低, 则称为负反馈。

如果反馈信号中只包含直流成分, 则称为直流反馈; 若反馈信号中只有交流成分, 则称为交流反馈。

如果反馈信号取自输出电压, 称为电压反馈; 如果反馈信号取自输出电流, 则称为电流反馈。为了判断放大电路中引入的反馈是电压反馈还是交流反馈, 一般可假设将输出端交流短路 (即令输出电压等于零), 观察此时是否仍有反馈信号, 如果反馈信号不存在, 则为电压反馈, 否则就是电流反馈。

如果反馈信号与输入信号在输入回路中以电压形式求和 (即反馈信号与输入信号串联), 称之为串联反馈; 如果二者以电流形式求和 (即反馈信号与输入信号并联), 则称为并联反馈。

(电压串联负反馈, 电压并联负反馈, 电流串联负反馈, 电流并联负反馈参照笔记)

(2) 要求对深度负反馈的电路的闭环放大倍数能够计算, 弄清负反馈到的能改善电路的哪些性能。

**答:** 放大器的开环放大倍数  $\dot{A}_o = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i}$ , 反馈系数  $\dot{F} = \frac{\dot{x}_f}{\dot{x}_o}$ ,

闭环放大倍数  $\dot{A}_F = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i}$ 。

基本方程:  $\dot{x}_i' = \dot{x}_i - \dot{x}_F$ ,

$\dot{x}_F = \dot{F} \bullet \dot{x}_o = \dot{A} \bullet \dot{F} \bullet \dot{x}_i'$ , ( $\dot{A} \bullet \dot{F}$  称为回路增益, 无量纲)

推导出  $\dot{A}_F$  与  $\dot{A}$  的关系式:

$$\dot{A}_F = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i} = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i' + \dot{x}_F} = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i' + \dot{A} \bullet \dot{F} \bullet \dot{x}_i'} = \frac{\frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i'}}{1 + \dot{A} \bullet \dot{F}} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \bullet \dot{F}}。$$

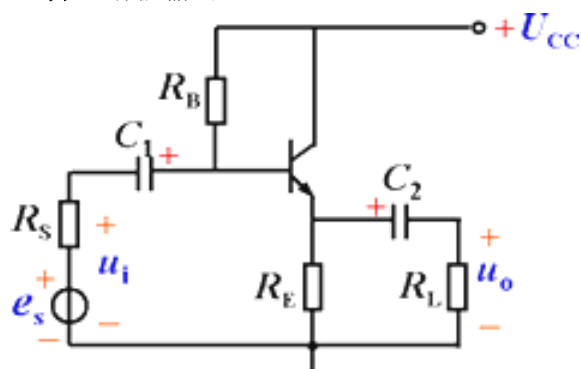
若放大器反馈深度很深 (即  $AF \gg 1$ ), 则  $A_F = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{A}{AF} = \frac{1}{F}$ 。

引入负反馈来改善性能的几点:

- ① 想要稳定直流工作点, 必须引入直流负反馈;
- ② 想要稳定交流性能, 必须引入交流负反馈;
- ③ 想要稳定输出电压, 必须引入电压负反馈;
- 想要稳定输出电流, 必须引入电流负反馈;
- ④ 想要提高输入电阻, 必须引入串联负反馈;
- 想要减小输出电阻, 必须引入并联负反馈。

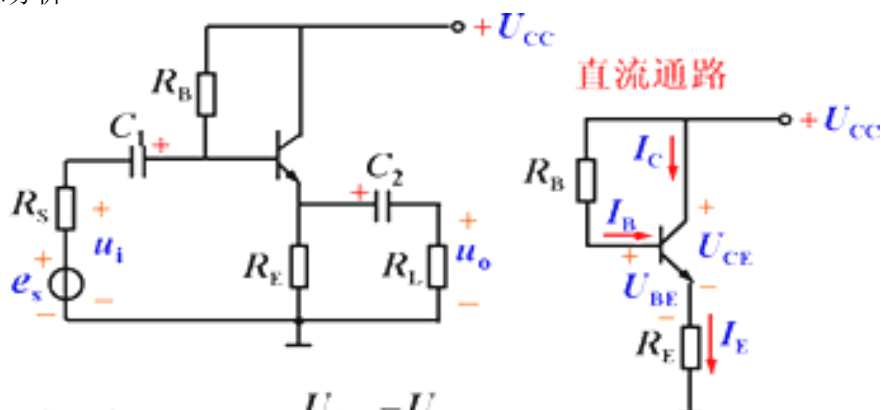
(3) 射极输出器是一种什么样的负反馈电路? 要求对它的电路特点, 电压放大倍数和电流放大倍数, 以及输入与输出电阻等都要有所了解。

答: 射极输出器



因对交流信号而言, 集电极是输入与输出回路的公共端, 所以是共集电极放大电路。因从发射极输出, 所以称射极输出器。

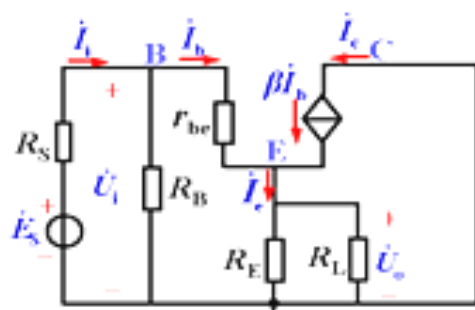
静态分析



求Q点:  $I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$

$I_E = (1 + \beta)I_B$       $U_{CE} = U_{CC} - I_E R_E$

动态分析



微变等效电路

## 1. 电压放大倍数

$$R'_L = R_E // R_L$$

$$\dot{U}_o = \dot{I}_e R'_L$$

$$= (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L$$

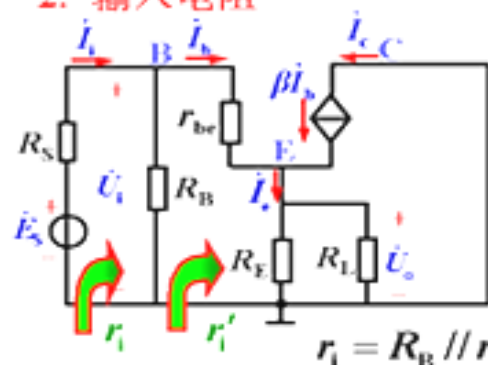
$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R'_L$$

$$= \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L$$

$$A_u = \frac{(1 + \beta) \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

电压放大倍数  $A_u \approx 1$  且输入输出同相，输出电压跟随输入电压，故称电压跟随器。

## 2. 输入电阻



$$r_i = R_B // r'_i$$

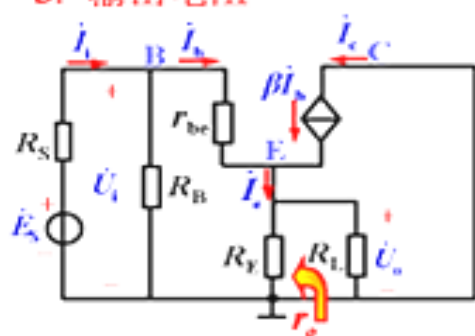
$$r'_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = \frac{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_E // R_L}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1 + \beta) R'_L$$

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$$

$$R'_L = R_E // R_L$$

射极输出器的输入电阻高，对前级有利。  
 $r_i$  与负载有关

## 3. 输出电阻



$$r_o = R_E // \frac{r_{be} + R'_S}{1 + \beta}$$

$$R'_S = R_B // R_S$$

通常:  $(1 + \beta) R_E \gg r_{be} + R'_S$

$$r_o \approx \frac{r_{be} + R'_S}{1 + \beta}$$

射极输出器的输出电阻很小，带负载能力强。

共集电极放大电路(射极输出器)的特点:

$$A_u = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}$$

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$$

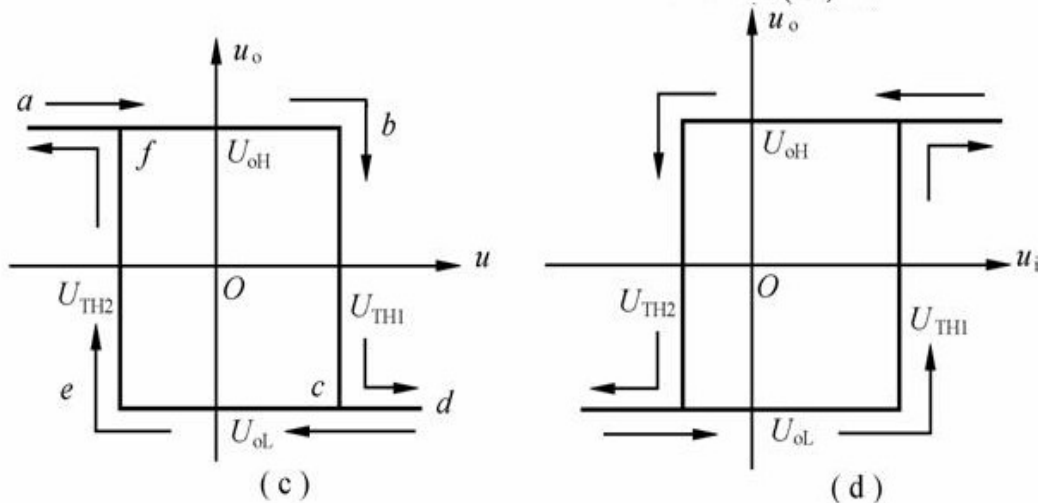
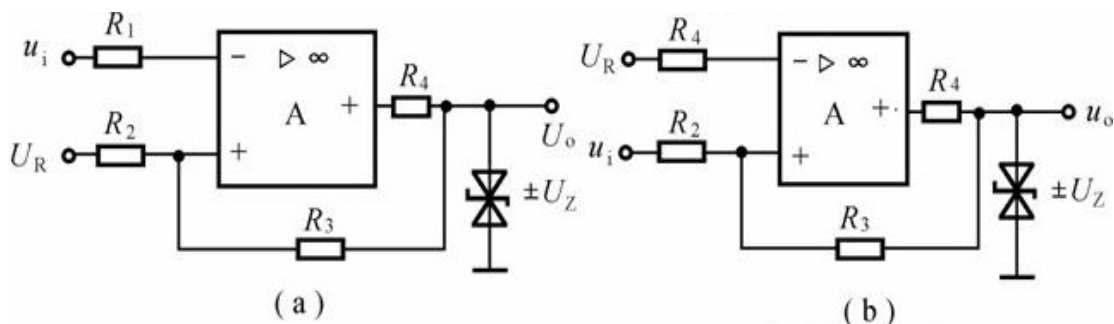
$$r_o \approx \frac{r_{be} + R'_L}{1 + \beta}$$

1. 电压放大倍数小于 1，约等于 1；
2. 输入电阻高；
3. 输出电阻低；
4. 输出与输入同相。

#### 5. 电压比较器：

(1) 集成运放接成电压比较器为什么必须工作在开环或正反馈的工作状态下，什么是电压比较器的传输特性？

答：运放在线性运用时，由于开环增益一般在  $10^5$  以上，所以其对应的输入的线性范围很小，为了拓宽其线性范围就必须引入负反馈，降低其开环增益。而比较器则希望其输入的线性范围越小(即比较灵敏度越高)越好，所以采用开环或使开环增益更高的正反馈应用。



(2) 过零比较器的阈值是多少？滞回比较器有几个阈值，如何计算，回差电压是什么？

答：过零比较器的阈值为 0。

滞回比较器有两个阈值：

① 反相滞回比较器的两个阈值（如上题特性曲线 c）

a. 正向过程

正向过程的阈值为

$$U_{TH1} = \frac{R_3 U_R + R_2 U_{oH}}{R_2 + R_3} = \frac{R_3 U_R + R_2 U_Z}{R_2 + R_3}$$

形成电压传输特性的 abcd 段。

b. 负向过程

负向过程的阈值为

$$U_{TH2} = \frac{R_3 U_R + R_2 U_{oL}}{R_2 + R_3} = \frac{R_3 U_R - R_2 U_Z}{R_2 + R_3}$$

形成电压传输特性上 defa 段。

②同相滞回比较器的两个阈值（如上题特性曲线 d）

$$U_{TH1} = (1 + \frac{R_2}{R_3})U_R - \frac{R_2}{R_3}U_{oL}$$

$$U_{TH2} = (1 + \frac{R_2}{R_3})U_R - \frac{R_2}{R_3}U_{oH}$$

回差电压是两个阈值的差值  $\Delta U_{TH} = U_{TH1} - U_{TH2}$ 。

（3）电压比较器的应用电路原理是否能够分析？

答：（参考笔记 8.4 应用实例）

#### 6.波形发生电路：

（1）一个完整的正弦波振荡器有哪几个部分组成？产生振荡的条件是什么？哪个是主要条件？

答：一个完整的正弦波振荡器是由放大器，反馈网络，选频网络和稳定环节四个部分组成。

产生振荡的条件有：相位平衡条件  $\varphi = \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi$ ，（n=1, 2, 3……）。

$$\text{振幅平衡条件 } |A_0 F| = 1。$$

其中相位平衡条件更重要。

（2）如何画振荡器的交流通路，应能计算学过的振荡器的振荡频率。

答：交流通路画法同前面所学的放大器交流通路画法相同，即电容接通，Vcc 接地，但是选频网络中的电容一定不能接通，即不能看做导线。

振荡器振荡频率的计算：（笔记上有详解）

①RC 移相式正弦波振荡器

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}, \quad \beta \geq 29。$$

②RC 桥式正弦波振荡电路

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

③LC 正弦波振荡电路

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

④电感反馈式（电感三点式）振荡器

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M) \cdot C}}, \quad \text{其中 } L = L_1 + L_2 + 2M \text{ 是等效电感。}$$

⑤电容三点式振荡电路

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}}$$

⑥石英振荡器

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \frac{C \cdot C_0}{C + C_0}}} \approx f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}。 \text{ 由于 } C \ll C_0, \text{ 故 } f_s \text{ 和 } f_p \text{ 非常接近。}$$

（3）应了解石英振荡器的结构原理，应能分析学习过的正弦振荡器的工作原理。

答：石英晶体振荡器的工作原理基于晶片的压电效应（晶片两面加上不同极性的电压时，晶片的几何尺寸将压缩或伸张，此现象即为压电效应）。石英晶片的两面对应表面上涂敷银层，由晶片支架固定并引出电极。当晶片两面加上交变电压时，晶片将随着交变信号的变化而产生机械振动。当交变电压的频率与晶片的固有频率（只与晶片几何尺寸相关）相同时，机械振动最强，电路中的电流也最大，这即是晶体谐振特性。



(具体振荡器工作原理分析见笔记)

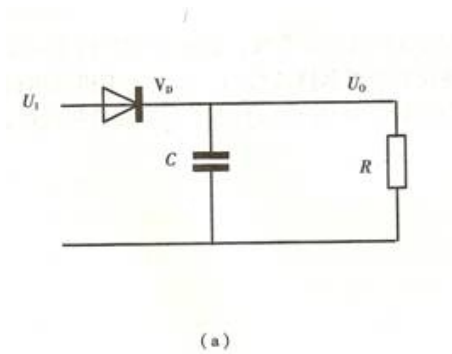
## 7.直流电源:

(1) 整流电路有哪几种? 它们的原理如何, 它们的导电角是多少? 能否计算它们的输出电压。

答: 整流电路有单相半波整流电路, 单相全波整流电路和单相桥式整流电路。

(详解请参照笔记)

①单相半波整流电路:

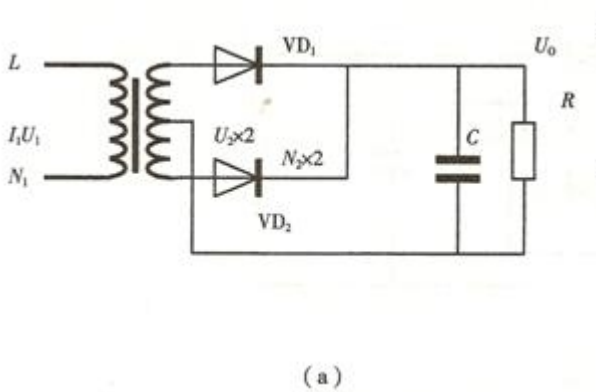


导电角为  $\pi$  度。

输出电压:  $\tilde{u}_1 = \sqrt{2}u_1 \sin \omega t$ ,

正半周:  $u_o = \sqrt{2}u_1 \sin \omega t$ , 负半周:  $u_o = 0$ 。

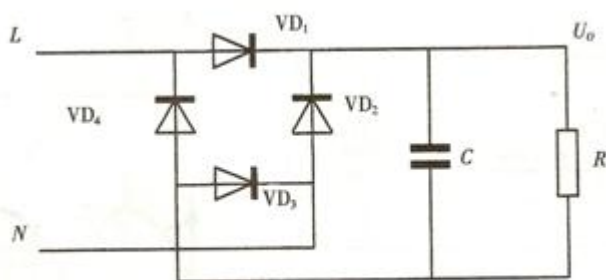
②单相全波整流电路:



导电角为  $2\pi$  度。

输出电压:  $u_o = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \tilde{u}_2 = 0.9 \tilde{u}_2$ 。

③单相桥式整流电路:



导电角为  $2\pi$  度。

输出电压:  $u_o = 0.9 \tilde{u}_{LN}$

(2) 电容滤波器的主要作用是什么? 它对输出电压是否有影响?

答: 电容滤波器的主要作用是将脉冲直流电中的交流成分过滤去, 成为平滑直流电。

当电路接上滤波电容后, 其直流电压会升高到原来的 1.2 倍。

(3) 必须弄清稳压电路的工作原理。

答: (详细讲解请参看笔记)