

电路与电子技术(2)

一、基本元器件

1. 三极管

基本模型

假设我们已经学会了三极管的最基本的模型和参数，比如： $i_b = \frac{i_c}{\beta} = \frac{i_e}{\beta+1}$ ， $V_{be} \approx 0.7V$ ，那么这个时候我们就已经掌握了三极管的一小半了。嗯，三极管的本质就是一个VCCS（电压控制电流源），没有特别多的东西。下面我们来看一下三极管的基本组态的实际应用：

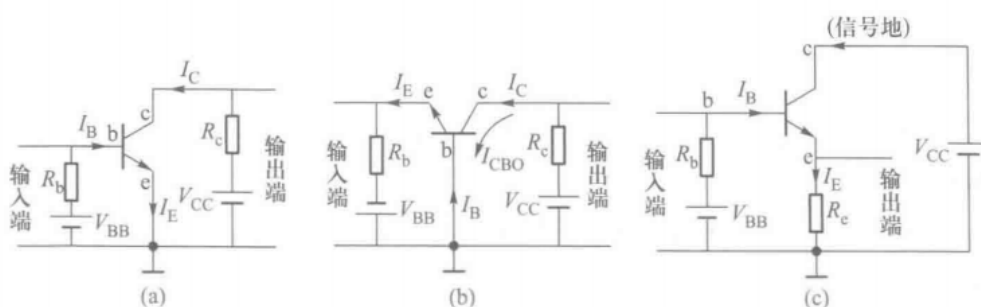


图 1.2.37 BJT 三种组态的实际连接方式
(a) 共射连接 (b) 共基连接 (c) 共集连接

基本组态的判断可以用如下方法：三个端口一个用作输入，一个用作输出，那么**剩下哪个端口，就是共什么组态**。通常来讲，共X组态的X端口会接地（在低频小信号模型中），但是不绝对（只可以用于辅助判断）。其他的东西确实也不怎么考。这个学期的课程并不会过于深入涉及到三极管本身。

低频小信号模型

低频小信号模型是**交流模型**的进一步转化。交流模型的变化非常简单，只需要将**直流电压源短路**，**直流电流源断路**，**电容视为导线**即可。

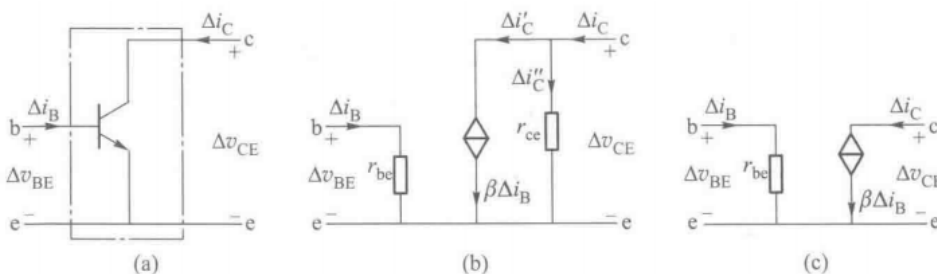


图 1.3.12 晶体管低频小信号模型
(a) 将晶体管视作双口网络 (b) 低频小信号模型 (c) 简化模型

三极管的低频小信号模型牢记以下几点变换法则：

1. be端口之间有等效电阻 r_{be}
2. ce端口之间有等效电流源 $i_s = \beta \Delta i_b$
3. i_b 和电流源 βi_b 的方向都指向e
4. （一般可以忽略）ce之间有等效电阻 r_{ce}

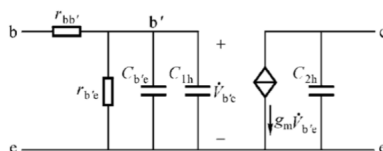
低频小信号模型的参数：

$$1. r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}}, \text{ 其中 } r_{bb'} \text{ 已知, } V_T = 26mV$$

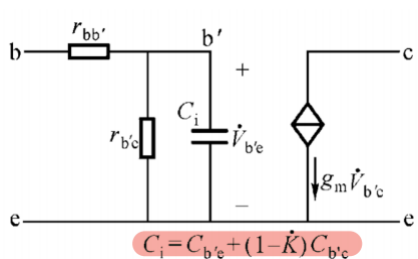
注： I_{EQ} 的计算可以采用在输入回路中用等效电压源的方式，如（这里近似 $I_e = I_c$ ）：

$$R_{eq} = R_{b1} // R_{b2}; V_{eq} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}; I_{EQ} = \frac{V_{CC} - 0.7}{\frac{R_{eq}}{\beta} + R_e}$$

高频小信号模型



对模型进行简化和单向化处理之后：



其中的参数显示如下：

1. 原本的 r_{be} 被拆成了 $r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}}$
2. $\dot{K} = \frac{V_{ce}}{V_{be}}$ ，中频放大倍数，一般而言，K是一个绝对值很大的负数
3. $g_m = \frac{\beta}{r_{b'e}} \approx \frac{I_{EQ}}{V_T}$
4. $C_i = C_{b'e} + (1 - K)C_{b'c}$
5. $C_{b'e} = \frac{g_m}{2\pi f_T}$ ， f_T 为特性频率，会给

感觉不考啊，题都没做到过。做到过这类题目的大佬可以指个路吗？

2. 场效应管

基本模型

学过高中技术的应该对三极管比较了解，场效应管的印象不深。场效应管的本质是一个CCCS（电流控制电流源）。由电压 V_{GS} 来控制电流 i_D 。

种类	增强型		耗尽型			
	NMOS	PMOS	N 结型	P 结型	NMOS	PMOS
V_{GS}	正	负	负	正	负(或正)	正(或负)
V_{DS}	正	负	正	负	正	负

个人感觉增强型和耗尽型才是区分的本质，N和P的区别仅仅在于把V全部反过来即可。由于考试大多数是N，因此这里以N说明。

参数	增强型	耗尽型
电压	开启电压 V_T	夹断电压 V_P
电流	$V = 2V_T$ 的漏极电流 I_{D0}	$V = 0$ 的漏极电流 I_{DSS}
关系	$i_D = i_{D0}(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1)^2, V_{GS} > V_T$	$i_D = i_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2, V_{GS} < 0$

- 长相：
 - P箭头朝外，N箭头朝内
 - 结形的中间是一条线，绝缘栅型中间两条线
 - 增强型的ds端分成三段，耗尽型的ds端分成两段
- 如何解题：见“恒流源”节

低频小信号模型

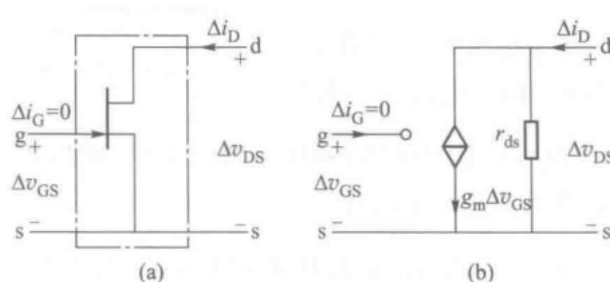


图 1.3.14 场效应管的低频小信号模型
(a) 将 FET 视作双口网络 (b) 低频小信号模型

场效应管的低频小信号模型实际上更加简单，如果我们忽略 r_{ds} （实际上确实经常忽略），那么只有一个电流源。事实上，场效应管简单的本质原因是左右侧互不干扰，尤其是g端一般而言并不存在电流，所以 V_{GS} 很好求解。参数如下：

$$1. \Delta i_D = g_m \cdot \Delta v_{GS}$$

二、单管放大电路

1. 放大电路基本分析

工作原理

- 放大电路的信号输入可以拆解为直流分量+交流分量。我们对放大电路做如下理想化处理：
 1. 输入的交流信号 v 远小于0.7V
 2. 入段耦合电容 C 的阻抗很小，在交流电路中可以视为短接
- 由此，放大电路由直流信号提供静态工作点，交流信号负责在静态工作点附近产生微扰，电路将该微扰信号放大。
- 实际上原理解释需要借助直流和交流的伏安特性曲线图，但是一般不会碰到，如果不想深究原理的话就跳过吧。看懂他对后面的解题（尤其是最大输入电压（最大不失真输出）还是有帮助的。

参数

基本放大电路的几个参数如下：

1. 增益 $A_v = \frac{V_o}{V_i}$ ，有时也用单位分贝（dB）表示，公式是 $A_v = 20\lg \frac{V_o}{V_i}$ dB
2. 输入电阻 $R_i = \frac{V_i}{I_i}$ ；输入电阻 $R_o = \frac{V_o}{I_o}$
3. 通频带 $BH = f_H - f_L$
4. 最大不失真输出

$$\begin{cases} \text{截止区} & \Rightarrow \text{当 } i_B = 0 \text{ 时截止} & \Rightarrow \Delta v_1 = I_{CQ} \cdot R'_L \\ \text{饱和区} & \Rightarrow \text{当 } v_{CE} < 0.7V \text{ 时截止} & \Rightarrow \Delta v_2 = V_{CEQ} - 0.7V \end{cases}$$

2. 三极管基本放大电路

- 只供理解，不建议死记硬背。如果放大系数输入输出电阻不能看图直接写出来的话我的评价是寄。

共射组态CE

共射组态连接	微变等效电路

参数：

$$A = \frac{-\beta I_b R'_L}{I_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$R_i = R_b // r_{be}$$

$$R_o \approx R_c$$

共集组态CC

共集组态连接	微变等效电路

参数:

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

$$R_i = R_b // (r_{be} + (\beta + 1)R'_L)$$

$$R_o = R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta}$$

共基组态CB

共基组态连接	微变等效电路

参数:

$$A = \frac{-\beta I_b R'_L}{-I_b r_{be}} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$R_i = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

$$R_o \approx R_c$$

说实话感觉这个微变等效电路画的不如我好...

3. 场效应管基本放大电路

共源组态CS

共源组态连接	微变等效电路

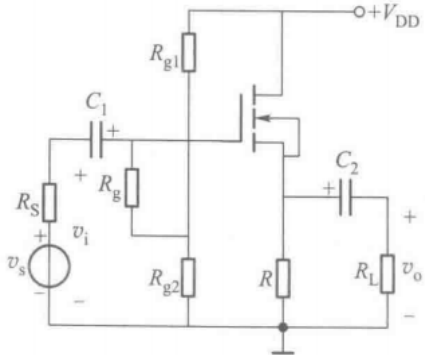
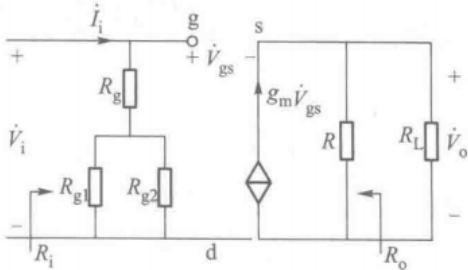
参数:

$$A = \frac{-g_m V_{gs} R'_L}{V_{gs}} = -g_m R'_L$$

$$R_i = R_g + (R_{g1} // R_{g2})$$

$$R_o \approx R_d$$

共漏组态CD

共源组态连接	微变等效电路
	

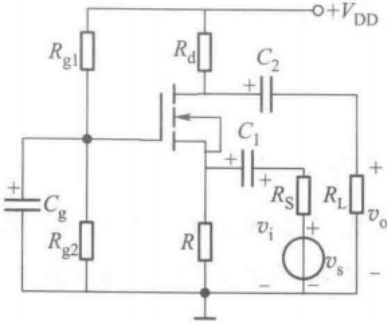
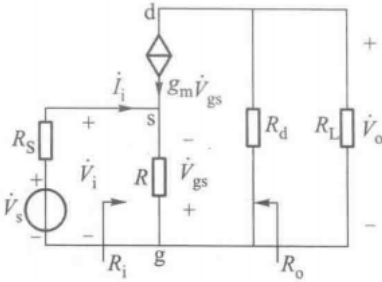
参数:

$$A = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L}$$

$$R_i = R_g + (R_{g1} // R_{g2})$$

$$R_o = \frac{V_o}{-g_m V_{gs} + \frac{V_o}{R}} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R}} = \frac{1}{g_m} // R$$

共栅组态CG

共源组态连接	微变等效电路
	

参数:

$$A = \frac{g_m V_{gs} R'_L}{-V_{gs}} = -g_m R'_L$$

$$R_i = R_d$$

$$R_o = \frac{V_o}{-g_m V_{gs} + \frac{V_o}{R}} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R}} = \frac{1}{g_m} // R$$

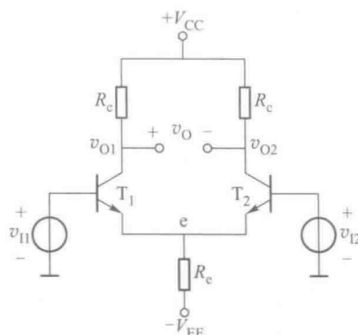
总结

组态	特点	特点	优点
CE/CS	电压反向放大（最常用）	输入电阻简单，且与后方电路无关	电流放大
CC/CD	电压跟随，同向	电压跟随器，电压之比约为1	电阻特性好
CB/CG	电压同相放大		频率特性好

- 发现了吗，**只有CE/CS是反向放大的**，其他两个都是同向放大。这个一定要记住，在后面的正弦波发生电路中要用

三、差分放大电路

1. 工作原理



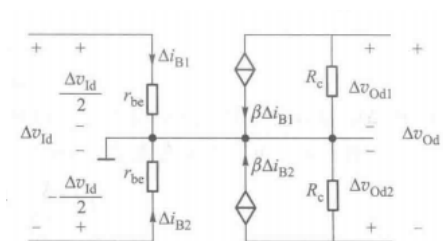
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{静态} \left\{ \begin{array}{l} I_{Re} = 2I_{EQ} \approx 2I_{CQ} = \frac{V_{EE} - 0.7V}{R_e} \\ \text{静态偏置由 } V_{EE} \text{ 提供，与 } R_e \text{ 有关，左右完全对称，故 } v_o = 0 \end{array} \right. \\ \text{动态} \left\{ \begin{array}{l} \text{输入} \left\{ \begin{array}{l} \text{差模: } \Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2} \\ \text{共模: } \Delta v_{Ic} = (\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}) / 2 \end{array} \right. \\ \text{输出: } \Delta v_o = A_{vd} \cdot \Delta v_{Id} + A_{vc} \cdot \Delta v_{Ic} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

注意，共模输入量是直接相减！也就是说还原的时候要除以2。比如差模100共模20，那么输入就是 100 ± 10 ，如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta v_{I1} = \Delta v_{Ic} + \frac{1}{2} \Delta v_{Id} \\ \Delta v_{I2} = \Delta v_{Ic} - \frac{1}{2} \Delta v_{Id} \end{array} \right.$$

2. 差模放大电路

- 注意交流接地点：Re会被短接
- 微变等效电路：



参数：

$$i_{B1} = \frac{\frac{v_{Id}}{2}}{r_{be}} = \frac{v_{Id}}{2r_{be}}$$

$$A_{vd1} = \frac{v_{od1}}{v_{Id}} = -\frac{\beta R_c}{2r_{be}}$$

$$A_{vd} = \frac{v_{od}}{v_{Id}} = -\frac{\beta R_c}{r_{be}}$$

$$R_i = \frac{v_{Id}}{i_{Id}} = 2r_{be}$$

$$R_o = 2R_c(\text{双端}); R_o = R_c(\text{单端})$$

说明：

- 不管是单端输出还是双端输出，输入端电压均为 v_{Id} ，因此单端和双端的放大系数差了2倍。
- 上面的量应该有 Δ ，但是嫌麻烦就没打。
- 端口2和端口1完全反向，只差一个负号。

3. 共模放大电路

- 注意交流接地点：Re不会被短接
- 双端输出：
 - 电压放大倍数 $A = 0$ ，应该很好理解，因为左右完全对称全部抵消掉了
- 单端输出：
 - 电压放大倍数 $A = \frac{v_{Od}}{v_{Id}} = \frac{-\beta i_{B1} R_c}{i_{B1} r_{be} + (\beta + 1) i_{B1} 2R_c} = \frac{-\beta R_c}{r_{be} + 2(\beta + 1) R_c}$
- 共模抑制比：
 - $K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| = 20 \lg \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \text{dB}$

四、放大电路的应用与其他

1. 多级放大电路

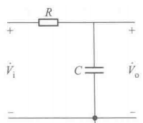
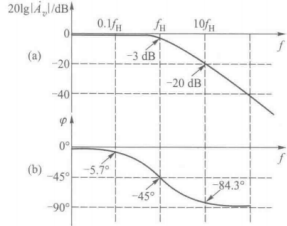
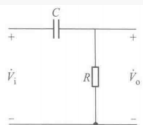
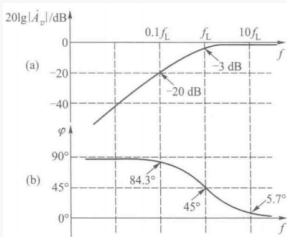
级联方式

级联	缺点	优点
直流	静态工作点相互影响，容易零漂	低频特性好，集成性好
阻容	低频响应差	静态工作点相互独立，可分立考虑

性能指标

- 定义比较简单，只要求分立的电压放大倍数相乘即可，电阻的定义也相同。
- 注意，输入电阻（CC）和电压放大倍数都有可能与其他部分的电阻有关，需要写出 R'_i 或 R'_o 才行。

2. 频率特性

电路模型	电路图	电压/频率特性方程	频率特性图像
低通电路		$A_v = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + jf/f_H}$ $\varphi = -\arctan(f/f_H)$	 <p>图 1.4.3 RC 低通电路的频率特性 (a) 幅频特性 (b) 相频特性</p>
高通电路		$A_v = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L}$ $\varphi = 90 - \arctan(f/f_L)$	 <p>图 1.4.5 RC 高通电路的频率特性 (a) 幅频特性 (b) 相频特性</p>

频率特性图像**直线简化**:

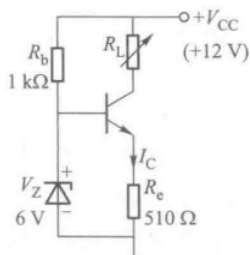
- 电压从 f_O 处开始变化，下降速度为**20dB/十倍频**。（ f_O 为 f_L 或 f_H ）
- 高频处从 0° 开始**下降**，速度为 45° /十倍频；低频处从 0° 开始上升，速度为 45° /十倍频
- 记住两个电路的电压放大系数公式，低频处有分子

3. 恒流源电路

在电路分析中，有时会使用恒流源来增加稳定性/提供直流偏置。但是一般会用电子元器件来等效恒流源。

三极管

- 一个（典型）的三极管恒流源电路



- 在微变等效电路中，恒压二极管可以等效成小电阻（导线）
- 如果要求参数（如输出电阻），则需要画出微变等效电路图之后列方程求解（ $R_o = (1 + \frac{\beta R_e}{r_{be} + R_e}) r_{ce}$ ）这个表达式可以看出输出电阻是一个很大的数（符合恒流源的要求），所以如果题目说 r_{ce} 可以不考虑，那就直接是 ∞ 。
- $I_C = \frac{V_Z - 0.7}{R_e}$

场效应管

- 两个（典型）的场效应管恒流源电路（**结形N沟道**（耗尽型））

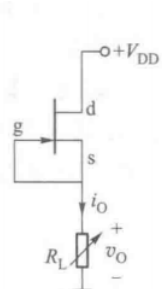


图 1.3.37 简单恒流源电路

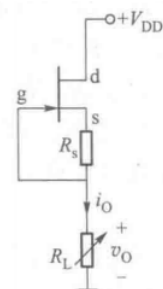


图 1.3.38 自偏压恒流源电路

- 简单恒流源电路： $V_{gs} = 0; i_D = I_{DSS}$
- 自偏压恒流源电路方程求解办法：（这是耗尽型，增强型请把第二条方程换掉）

$$\begin{cases} V_{gs} = -i_D \cdot R_s; \\ i_D = i_{DSS} \cdot (1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2 \end{cases}$$

集成电路恒流源

1. 基本镜像电流源

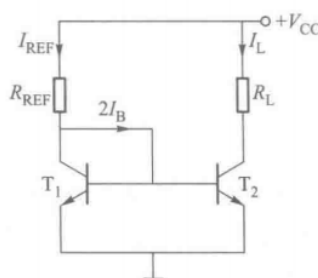


图 1.3.41 基本镜像电流源

基本上可以认为**两个三极管的电流相等对称**。其中：

$$\begin{cases} I_{REF} = I_C + 2I_B(\text{差值}); \\ I_L = I_C \end{cases}$$

2. 跟随镜像电流源

在中间多插入了一个三极管，可以进一步加强对称性。（差值减小约β倍）

3. 多路电流源

拆掉一个个看就行，运用等电压点，应该不会考。

五、负反馈放大电路

- 基本形式：

$$X_s \rightarrow \begin{cases} X_f < -F - X_o \\ X_i - A - > X_o \end{cases}; X_s - A_f - > X_o$$

- 由于 $A_f = \frac{A}{1+AF}$ ，可以看做负反馈放大电路是放大电路的修正，所以 $|1+AF| > 1$ 称为负反馈放大电路，反之为正反馈

1. 分类

类别	图片	反馈系数	闭环放大增益
电压串联		$F = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$	$A_f \approx 1/F$
电压并联		$F = -\frac{1}{R_f}$	略
电流串联		$F = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_f}$	略
电流并联		$F = \frac{R_2}{R_2 + R_f}$	略

串联	并联	电压	电流
从 V_s 中得到	从 I_s 中得到	反馈量由 V_o 得到	反馈量由 I_o 得到
i 与 f 异节点	i 与 f 同节点	输出电压源特性	输出电流源特性
分压	分流	R_L 一般接地	R_L 一般接地
可以使 R_{if} 增大	可以使 R_{if} 减小	V_o 为0反馈也为0	I_o 为0反馈也为0

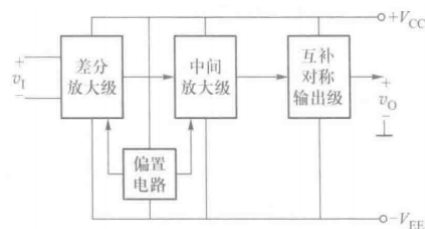
- 负反馈的好处：增加稳定性，减少非线性失真，提高抗干扰能力（温漂），扩展通频带，改善输入输出电阻特性
 - 若涉及定量计算，则记住系数均为 $(1 + AF)$ ，至于是乘还是除，看物理量，反正是往好的方向变化

2. 自激振荡

- 自激振荡条件： $A_f = \frac{A}{1+AF} = \infty \Rightarrow AF = -1$ ，即：
 - $$\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \\ \Delta\varphi = (2n+1)\pi \end{cases}$$
 - 起振条件： $|AF| > 1$
- 自激振荡判据（这个东西是我们要避免的）：
 - 在附加相移 180° 的时候， $|AF|$ 是否衰减到1以下（若 $|AF| < 1$ 则稳定）
 - 在环路增益下降到1的时候，附加相移是否达到 180° （若超过 180° 则稳定）
- 裕度：
 - 增益裕度 $G_m = 20\lg|AF|_{\Delta\varphi=180^\circ}$ ，要求小于10dB
 - 相位裕度 $\varphi_m = \Delta\varphi - (-180^\circ)$ ，要求大于 45°

六、集成运放

1. 集成运放的基本概念



2. 基本运算电路

- 比例运算、仪用放大器、求和、积分、微分、指数对数、电压电流转换、精密整流、滤波器、电压比较器等
 - 感觉没什么好记录的，也不是说都会了，就是太多太杂了反正也记不住，有这个时间不如多看两道题

- 唯一需要注意的就是滞回比较器，其比较电压需要使用叠加定理来计算，电压传输特性图纵坐标是 v_o ，横坐标是 v_i ，他会存在一个方框。

七、信号发生电路

1. 正弦波

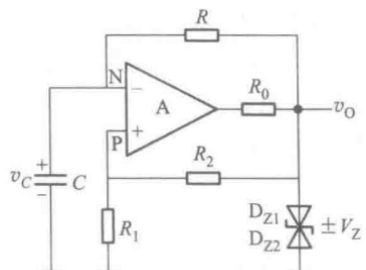
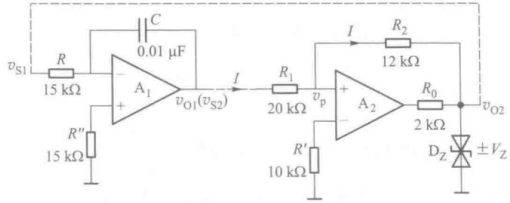
- 震荡条件：

$$\begin{cases} |AF| = 1 \\ \Delta\varphi = 2n\pi \end{cases}$$

- 事实上就是一般而言只要能判断出来是正反馈就行。（对了还有**静态工作点也要满足**）
- 环节：放大—正反馈网络—选频网络—稳幅
- 正反馈的判断：
 - 很喜欢我在“第二节：单管放大电路”中的最后一句话。现在你记住了吗？
 1. 找到反馈线（ C_b 或 R_F ），切断，并将其作为输入。
 2. 输入端给一个(+)的信号
 3. 找附近的三极管，判断一下组态（输入已经找到了(1)，再确定一下输出，剩下什么就是共什么组态）。用组态去判断输出端是(+)还是(-)
 4. 从输出端引到反馈线，看看是不是也是正的
- 对于带电阻和电容的电路，正负号的判断如下：
 1. 互感：同名端同极性
 2. 三点式电感：中心抽头接地，两端极性相反；首尾端口接地，其余两者极性相同。
 3. 三点式电容：跟上面一样

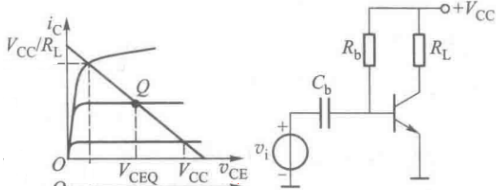
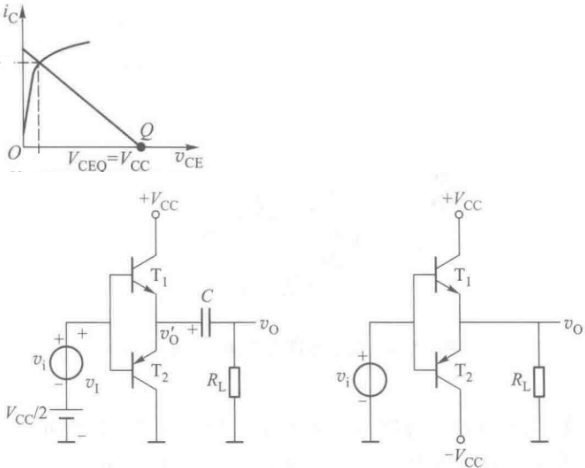
并联型石英	串联型石英
电感性，电容三点式	电阻性
振荡频率在 f_s 和 f_p 之间	振荡频率 $f_0 = f_s$ 时

2. 非正弦波

方波/三角波发生	波形改进—恒流充电
	
周期： $\frac{R_1}{R_1+R_2} V_Z = V_Z - (V_Z + \frac{R_1}{R_1+R_2} V_Z) e^{\frac{T/2}{RC}}$	周期： $U = \frac{1}{C} \int dq = \frac{V_Z}{RC} \frac{T}{2} = 2 \frac{R_1}{R_2} V_Z$

八、功率放大电路

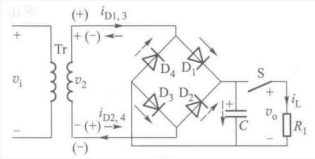
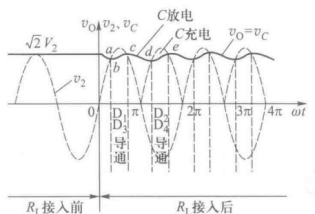
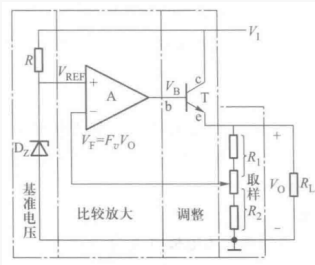
1. 分类

分类	甲类	乙类
图形		
特点	动态范围 $V_{CEQ} = \frac{1}{2} V_{CC}$	互补对称式（单电源/双电源）、变压器耦合推挽式
效率	$\eta = \frac{P_o}{P_E} = \frac{\frac{1}{2} I_{cm}^2 R_L}{V_{CC} I_{CQ}} \rightarrow \frac{\frac{1}{2} (\frac{V_{CC}}{2R_L})^2 R_L}{V_{CC} \frac{V_{CC}}{2R_L}} = 25\%$	$\eta = \frac{P_o}{P_E} = \frac{V_{om}^2 / (2R_L)}{\frac{2V_{CC} V_{om}}{\pi R_L}} \rightarrow \frac{\pi}{4} \frac{V_{om}}{V_{CC}} = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$
管耗		$P_T = P_E - P_o \leq \frac{4}{\pi^2} P_{om} = P_{T1} + P_{T2}$ （平均每个 $0.2P_{om}$ ）
参数		耐压 $> 2V_{CC}$; $I_{CM} > \frac{V_{cm}}{R_L}$; $P_{CM} > 0.2P_{om}$ （双电源为例）

2. 集成功率放大

- 1. 扩流
- 2. 扩压
- 3. 集成功率放大

3. 整流与滤波

步骤	图示	参数
输入	通过变压器	输入 $v_i = \sqrt{2}V_1\sin\omega t$
整流		输出 $v_o = \sqrt{2}V_2\sin\omega t$ 有效值 V_2 平均值 $V_{o(avg)} = \frac{1}{\pi} \int v_o dt = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_2 \approx 0.9V_2$
滤波		输出平均值 $V_{o(avg)} \approx 1.2V_2$ (用于估算) 二极管耐压 $V_R = \sqrt{2}V_2$ 最大整流电流 $I_{D(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{2R_L}$
稳压		稳压系数 $S_r = \frac{\Delta V_o/V_o}{\Delta V_i/V_i}$ 输出电阻 $R_o = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} _{\Delta V_i=0}$ 输出电压 $V_o = (1 + \frac{R_1}{R_2})V_{REF} \leq V_I - V_{CE}$ 最大电流 $I_{C(max)} = I_{R_Lmax} + I'(\text{控制电路})$ 最大管耗 $P_{CM} = V_{CE(max)}I_{C(max)}$ 最大耐压 $V_{BR(CEO)} = V_{I(max)} - V_{o(min)}$