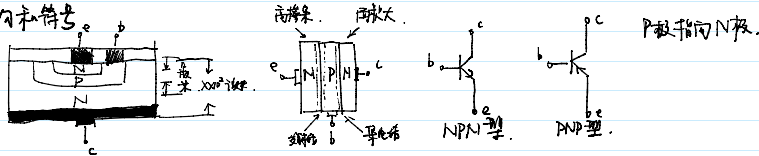


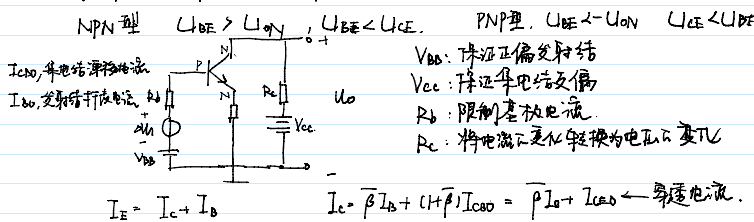
最大整流电流 I_{FM} : 最大平均值.
 最大反向工作电压 U_{RM} : 最大瞬时值
 反向电流 $I_R = I_S$
 最高工作频率 f_m , 结电容效应

3. 三极管

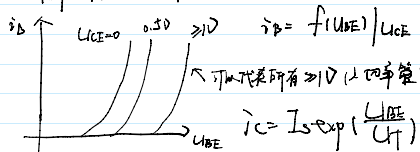
· 结构符号



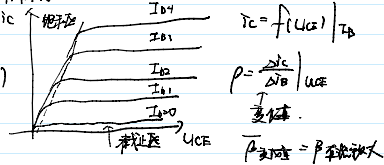
· 放大原理 (发射极正偏, 集电极反偏)



· 输入特性 (发射)



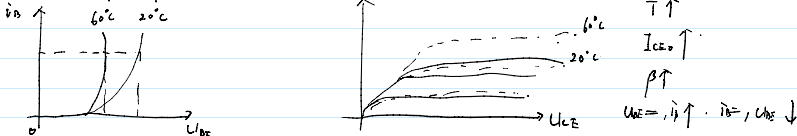
· 输出特性



· 三个工作区域

状态	U_{BE}	I_C	U_{CE}
截止	$\leq U_{ON}$	$I_{C0} \approx 0$	$\approx V_{CC}$
放大	$> U_{ON}$	$\Delta I_C = \beta \Delta I_B$	$\geq U_{BE}$
饱和	$> U_{ON}$	$< \beta \Delta I_B$	$< U_{BE}$

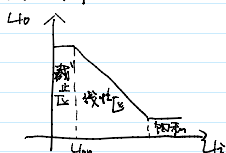
· 温度对晶体管特性的影响



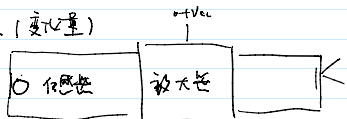
· 主要参数

直流参数 $\bar{\beta}$, I_{C00} , I_{CE0} , 交流参数 β , f_T (使 $\beta = 1$ 的信号频率)
 极限参数, I_{CM} 最大集电极电流 (超过后 β 会下降), P 为静功耗
 P_{CM} 最大集电极耗散功率, $P_{CM} = I_C U_{CE}$ 为常数
 $U_{(BR)CEO}$ 反向击穿电压 (发射极开路)
 $U_{(BR)EB0}$ 发射极和基极反向击穿电压 (C路开路)

· 电压传输特性



· 放大 (变化量)



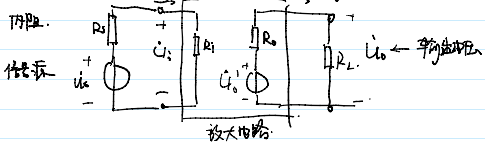
测试信号正弦, 输入信号为 0 静态.
 特征: 功率放大 (不失真)

· 放大性能指标 (放大性能)

可以看成 = 端口网络, 输出电流, 放大倍数, 输出功率与输入功率之比

放大器的性能指标 (放大性能)

可以看成 = 输入网络 → 输出电路



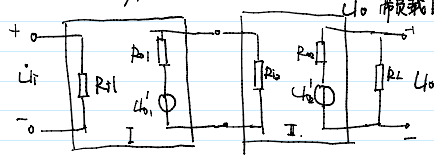
放大倍数: 输出电压与输入量之比

电压放大倍数: $A_{uv} = A_u = \frac{U_o}{U_i}$ "uv" 输出 + 输入
 电流放大倍数: $A_{iu} = A_i = \frac{I_o}{I_i}$
 功率放大倍数: $A_{pw} = \frac{P_o}{P_i}$
 互阻放大倍数: $A_{ur} = \frac{U_o}{I_i}$
 互导放大倍数: $A_{ir} = \frac{I_o}{U_i}$

输入电阻 $R_i = \frac{U_i}{I_i}$ (有效值之比, 不为复数)

输出电阻 (将输出端短路, 求有内阻的电压源)

$R_o = \frac{U_o' - U_o}{U_o / R_L} = R_o (1 - \frac{U_o'}{U_o})$, U_o' 空载时的输出电压有效值



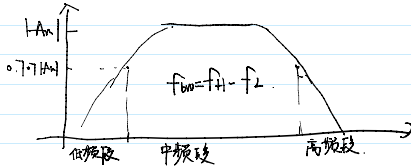
(1) R_{oi} 为放大电路 II 的看进去内阻

(2) R_{io} 为放大电路 I 的负载电阻

(3) 放大电路空载时电压放大倍数的数值 > 带有负载时放大倍数的数值.

通频带

频率过低或过高, 放大倍数会下降, 并产生相移.



U_{om} : 最大不失真的输出电压 (有效值)

最大输出功率和效率

基本共射放大电路

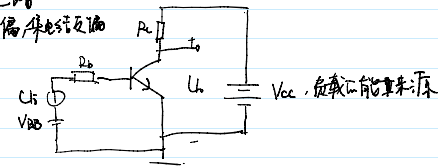
V_{be}, V_{ce} : 精确发射结偏集电极反偏

R_b : 限制输入电流

R_c : 将集电极电流

转换为集电极电压

ΔU_{ce}



动态信号作用

$\Delta U_i \rightarrow \Delta i_b \rightarrow \Delta i_c \rightarrow \Delta U_{ce} \rightarrow \Delta U_{ce}(U_o)$

静态工作点 Q , $I_{EQ}, I_{CQ}(I_{BQ}), U_{CEQ}, U_{CEQ}$

波形分析

若无 V_{be}

失真

U_{om}

U_{ce}

i_b

i_c

U_{ce}

U_o

U_o 与 U_{ce} 大小相等, 极性相反

U_o 含有直流成分

U_{ce} 为 0 进入饱和区

底部失真为饱和失真

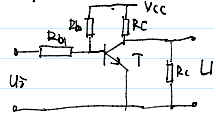
$U_{ce} = V_{cc}$

顶部失真为截止失真

组成原则 & 两种常用放大电路

1. 静态工作点合适 2. 动态信号能均通过输入电路 3. 共地 4. 负载没有直流分量

基本共射放大电路有所路电源, 信号源与放大电路不共地



'直接耦合放大电路'

静态时 $U_{BEQ} = U_{BE}$

动态时 有交流信号

U_i 和 R_{b1} 串联

R_L 才起作用 有直流分量

$U_{CEQ} = V_{cc} - I_{CQ} R_c$

$I_{BQ} = \frac{V_{cc} - U_{BEQ}}{R_{b1} + R_{b2}} = \frac{U_{BEQ}}{R_{b1}}$

$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = \beta I_{BQ}$

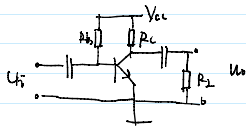
$U_{CEQ} = V_{cc} - I_{CQ} R_c$



电容隔地直连, 仅通过交流

“直接耦合放大电路”

R_L 影响工作点 有直流分量 $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_L$



“阻容耦合电路”

电容隔绝直流, 仅通过交流。
 电容集电极足够大, (电容视为等效电池)
 静态时 $C_1 = U_{CEQ} R_L$ 动态时 $U_{CE} = U_i + U_{CEQ}$
 $C_2 = U_{CEQ} R_L$ $U_{CE} = U_o + U_{CEQ}$
 输入, 输出都为纯交流信号。
 若交流比很大, 电容不能被视作短路。

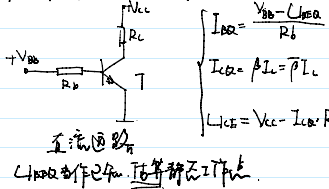
• 直流电路

令 $C_1 = 0$, 保留 R_S , 令电容开路, 电容相当于短路

• 交流电路

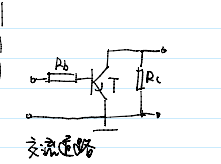
大容量电容相当于短路, 直流电源相当于短路 (内阻为 0)

1) 基本共射放大电路



直流电路

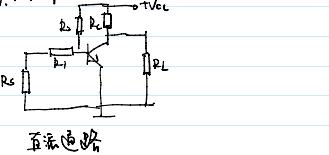
U_{CEQ} 已知, 估算静态工作点。



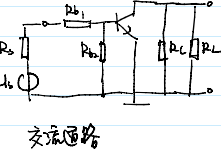
交流电路

$$\begin{cases} I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_B} \\ I_{CQ} = \beta I_{BQ} = \bar{\beta} I_{BQ} \\ U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C \end{cases}$$

2) 直接耦合放大电路

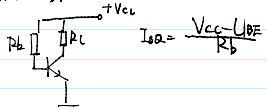


直流电路

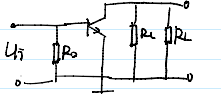


交流电路

3) 阻容耦合共射放大电路



直流电路



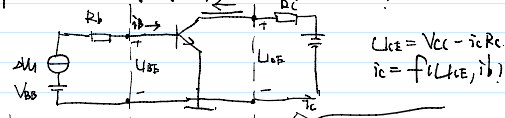
交流电路

• 分析方法

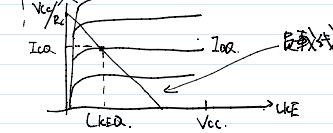
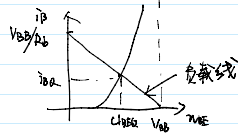
1) 图解法 (需测量输入特性和输出特性)

外电路方程

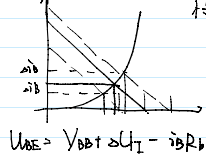
$$\begin{cases} U_{BE} = V_{BB} - i_B R_b \\ i_B = f(U_{BE}) \end{cases}$$



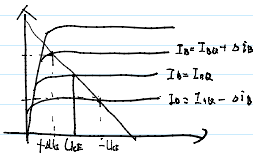
$$\begin{cases} U_{CE} = V_{CC} - i_C R_c \\ i_C = f(U_{CE}, i_B) \end{cases}$$



静态初始信号



包围特征曲线
可以画负载线

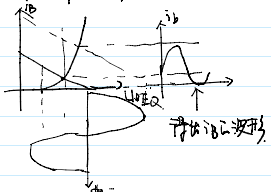


$$U_{BE} = V_{BB} - i_B R_b$$

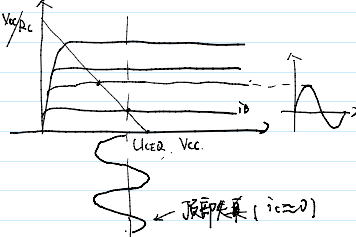
$$\Delta U_i \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta U_{CE} (\Delta U_o) \rightarrow A_u = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i}$$

2) 用矢量信号分析 (直接耦合)

截止失真

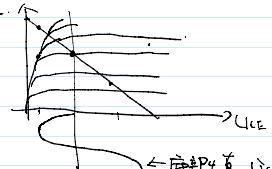
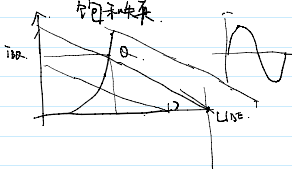


输出波形

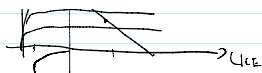
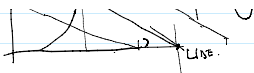


解决方案: 上移 Q 点, 增加 V_{BB} , 减小 R_b (作用不大)

饱和失真



← 饱和失真 (iC ≈ 0) 饱和失真 (iC ≈ 0)

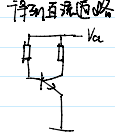
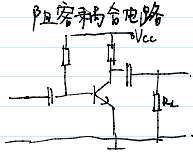


静态工作点, 下移 \$Q\$ 点, \$R_b \uparrow, V_{bE} \downarrow\$
 $\beta \downarrow, R_{cE} \downarrow, V_{cc} \downarrow$ 不好的办法
 负载线, 下移 \$Q\$ 点, \$R_b \uparrow, V_{bE} \downarrow\$
 $\beta \downarrow, R_{cE} \downarrow, V_{cc} \downarrow$ 不好的办法

最大不失真电压

负载线, $U_{om} = \frac{V_{cc} - U_{ceQ}}{\sqrt{2}}$ 相位失真 $U_{ceQ} - U_{ce1}, U_{ceQ}$ 的饱和管压降 (取近似)

直流负载线和交流负载线 (由于直流回路和交流回路 (差) 物大)

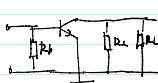
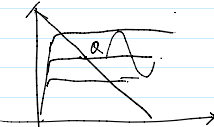


$$V_{cc} - U_{ce} = I_b R_b$$

$$-R_b U_{bE} + \frac{V_{cc}}{\beta} = I_b$$

$$V_{cc} - U_{ce} = I_c R_c$$

$$-\frac{1}{R_c} U_{ce} + \frac{I_c}{\beta} = I_c$$



$$U_{ce} = I_c \cdot \frac{R_c \parallel R_L}{R_c \parallel R_L}$$

$$K = \frac{R_c \parallel R_L}{R_c \parallel R_L}$$

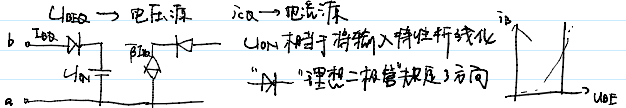


语言判断失真问题

- 等效模型: (动态参数) 相位失真
- 直流等效模型, $U_i = 0$ 外部特性 (近似)
- 交流等效模型, 低频信号 内部结构 (EDA)
- 高频等效模型, 高频信号

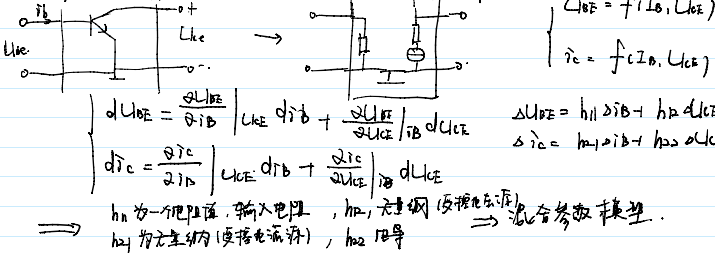
相位失真

1.) 直流等效模型



$U_{ce} > U_{om}, U_{ce} > U_{bE}$

2.) 交流等效模型: (两端口网络)



$$U_{bE} = h_{11} i_b + h_{12} U_{ce}$$

$$i_c = h_{21} i_b + h_{22} U_{ce}$$

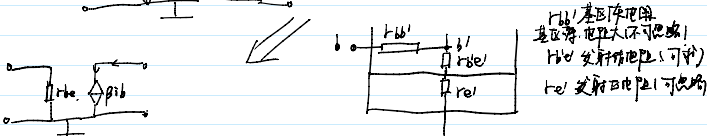
h_{11} 为一个电阻值, 输入电阻, h_{12} 无量纲 (受控电压源) \Rightarrow 混合参数模型
 h_{21} 为无量纲 (受控电流源), h_{22} 电阻

设信号为正弦信号 (方便复数表示)

$$U_{bE} = h_{11} i_b + h_{12} U_{ce}$$

$$i_c = h_{21} i_b + h_{22} U_{ce}$$

h_{11}, r_{be} 输入电阻
 h_{12} 反馈系数 (U_{ce} 是输入对输入的影响)
 h_{21} 电流放大系数
 $h_{22}, \frac{1}{r_{ce}}$ ce 之间的等效电阻 (适用于高频)
 h_{11}, h_{22} 可以忽略

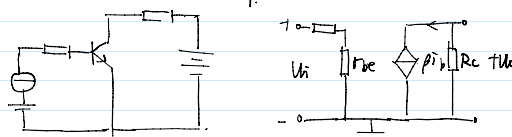


$$r_{be} = \frac{U_{bE}}{I_b} = r_{bb'} + r_{b'e} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{cQ}} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{cQ}}$$

$$i_c = I_{cQ} (e^{\frac{U_{bE}}{U_T}} - 1) \approx \beta I_{cQ} \frac{U_{bE}}{U_T}$$

$$d i_c = I_{cQ} \frac{\beta}{U_T} d U_{bE} \Rightarrow d i_c = \beta \frac{I_{cQ}}{U_T} d U_{bE} \Rightarrow r = \frac{U_T}{\beta I_{cQ}} \quad Q \text{ 点}, I_b \uparrow, r \downarrow, h_{11} \downarrow$$

共射放大电路动态分析 (原理性)



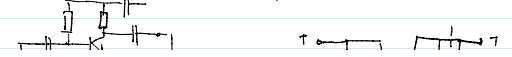
$$\dot{A}_u = \frac{U_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta r_c}{R_b + r_{be}}, R_b \text{ 仅 } \dot{A}_u \downarrow$$

$$R_i = R_b \parallel r_{be}, R_c \text{ 仅输入电阻}$$

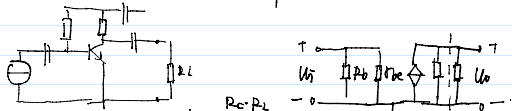
$$R_o = R_c, \text{ 输出电阻}$$

$$\dot{U}_i = I_b (R_b + r_{be}) \quad \dot{U}_o = -\beta I_b r_c$$

阻容耦合放大电路动态分析



· 阻容耦合放大电路动态分析



$$A_{u0} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-\beta i_b \cdot \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be} + R_i}}{i_b} = \frac{-\beta R_C \parallel R_L}{r_{be}}$$

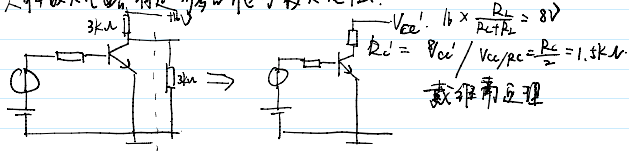
$$A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{U_i}{U_s} \cdot \frac{U_o}{U_i} = \frac{r_{be}}{R_s + r_{be}} \cdot \frac{-\beta R_C \parallel R_L}{r_{be}} = \frac{-\beta R_C \parallel R_L}{R_s + r_{be}}$$

$$R_i = R_b \parallel r_{be} \approx r_{be}$$

$$R_o = R_C$$

· 分析方法总结：先静态，后动态。

共射放大电路有是同时具有放大电压。



$$R_L' = R_C \parallel R_L = 1.5k\Omega$$

戴维南定理

由 V_{BB} 和 U_{BEQ} 求 I_{BQ} (可用图解法 [至共射放大电路卷])

· 放大电路中静态对动态的影响

对于阻容耦合电路： $A_{u0} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{r_{be} + (1+\beta)\frac{R_b}{\beta}}$

若 $r_{be} \gg (1+\beta)\frac{R_b}{\beta}$, 增大 β 不能提高放大倍数

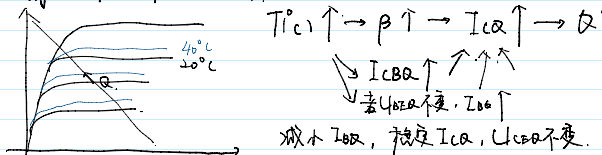
若 $R_C \ll R_L$, 增大 R_C 不能有效提高放大倍数 (且 U_{CEQ} 会饱和失真)

常用, $\downarrow R_b$, $\downarrow R_C$, $\downarrow U_{CEQ}$, 向饱和区靠近

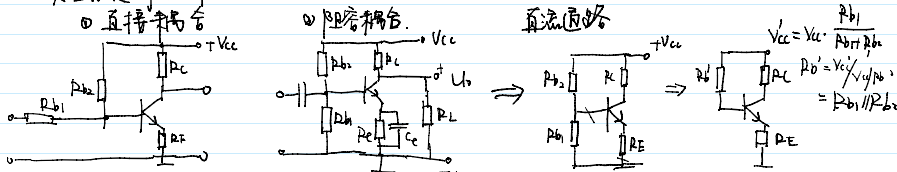
在 U_i 不变的情况下, R_b 减小, U_o \uparrow , R_i \downarrow

当 U_o 较大时, $\downarrow R_b$, 会出现饱和失真

· 静态工作点的稳定性 (温度)



· 典型稳定静态工作点的电路



若 $I_{B1} \gg I_B \Rightarrow I_{B1} \approx I_{B2}, \Rightarrow U_{BEQ} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}}$, 则 U_{BEQ} 不与温度有关

(若 $U_{BE} - U_{BE} \approx U_{BE}$) $I_{EQ} = \frac{\beta I_{EQ}}{1+\beta} \leftarrow I_{EQ} \frac{U_{BE}}{R_E} \leftarrow U_{BE} = U_{BE} - U_{BEQ}$

当 $T_C \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_{BE} \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$ (反馈!!)

仅输出量更大的反馈称为负反馈, 仅输出量增大的称为正反馈, R_E 则为负反馈 (直流)

· 典型稳定静态工作点电路的分析 (分压式电流源反馈工作点稳定电路)

Q点分析, $U_{BEQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$, $I_{EQ} = \frac{U_{BEQ} - U_{BEQ0}}{R_E}$, $I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{(1+\beta)}$

$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ} \cdot R_C - I_{EQ} \cdot R_E \approx V_{CC} - I_{EQ}(R_C + R_E)$

戴维南等效, $V_{BB} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$, $R_b = R_{b1} \parallel R_{b2}$

$V_{BB} = I_{BQ} \cdot R_b + I_{EQ} \cdot R_E + U_{BE}$

$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_b + (1+\beta)R_E}$, 若忽略 R_b 的下降, 则 $U_{BE} = V_{CC} \cdot \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}}$ 成立 (当 $R_b \ll (1+\beta)R_E$, 则可忽略)

· 动态分析



$A_{u0} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{r_{be}}$ $R_i = r_{be} \parallel r_{be}$

$R_o = \frac{\beta i_b \cdot R_C}{\beta i_b} = R_C$

若取 C_e 电容

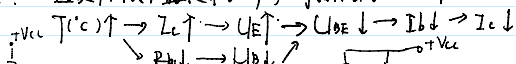
$A_{u0} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{r_{be} + (1+\beta)r_e} \approx \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{(1+\beta)r_e} \approx \frac{R_C \parallel R_L}{r_e}$ (稳定)

$R_i = r_{be} \parallel (1+\beta)r_e$

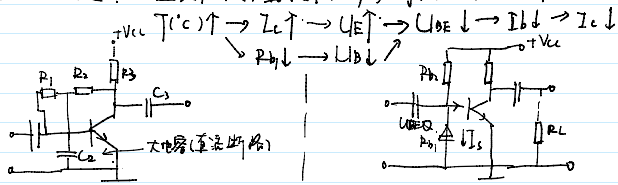
$R_o = R_C$

· 稳定静态工作点的方法

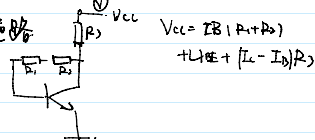
① 直接负反馈 ② 温度补偿 (温度系数), 例如, R_{b1} 为热敏电阻



① 温度补偿 (温度系数), 例如: R_{b1} 为热敏电阻.



直流电路



$$I_b = \frac{V_{cc} - U_{BE} - I_c R_c}{R_{b1} + R_{b2} + R_c}$$

$\therefore I_c \uparrow, I_b \downarrow$

②

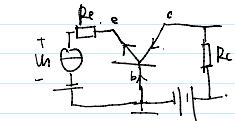
$$I_B + I_S = I_{R_{b2}}$$

$$I_B = I_{R_{b2}} - I_S$$

$$T \uparrow \rightarrow I_c \uparrow \rightarrow I_B \downarrow$$

• 基本共集放大电路

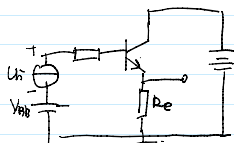
• 基本共集放大电路 (输入级/输出级)



直流: $I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_b}$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = (V_{CC} - \beta I_{BQ} R_c) + U_{BEQ}$$

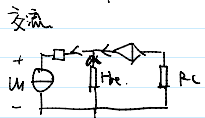


直流等效: $V_{BB} = I_{BQ} \cdot R_b + U_{BE} + (1+\beta) I_{BQ} R_e$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_b + (1+\beta) R_e}$$

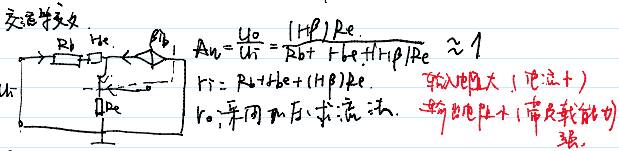
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - (1+\beta) I_{BQ} R_e$$



交流: $A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\beta R_c}{\beta R_c + (1+\beta) R_e}$ (电压放大倍数)

$$R_i = R_b + \frac{\beta R_e}{1+\beta}$$
 (输入电阻)
$$R_o = R_e$$



交流等效: $A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{(1+\beta) R_e}{R_b + (1+\beta) R_e} \approx 1$

$$R_i = R_b + (1+\beta) R_e$$

R_o : 采用加压求流法. (输入电阻+电压增益)

• 三种接法比较

共射: 较大增益, 输入电阻适中, 低频失真
共基: 电压放大倍数, 输入电阻小, 宽频带的电路
共集: 输入电阻大, 输出电阻小, 无较大能力 (I_o / O_{ut})

$$i_o = \frac{U_o}{R_e} - (1+\beta) \frac{U_o}{R_b + (1+\beta) R_e}$$

$$r = \frac{1}{R_e} - \frac{1+\beta}{R_b + (1+\beta) R_e} = \frac{(R_b + R_e) + (1+\beta) R_e}{R_e (R_b + (1+\beta) R_e)}$$

$$R_o = R_e \parallel \frac{R_b + (1+\beta) R_e}{1+\beta}$$

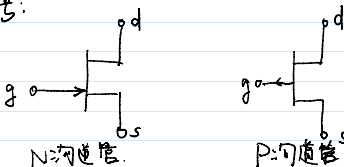
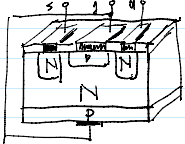
4. 场效应管 (Field Effect Transistor)

场效应管的输入电阻大到无穷大, 场效应管是单极型管, 利用输入回路的电场效应来控制输出回路. 一种半导体的器件.
特点: 输入电阻高 ($10^7 \sim 10^{12} \Omega$), 噪声低, 热稳定性好, 抗峰能力强, 工作电压低.

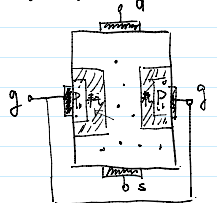
- 1) 有三极: 源极 (s), 栅极 (g), 漏极 (d) \rightarrow e, b, c.
- 2) 三个工作区: 截止区, 放大区, 可变电阻区 \rightarrow 截止区, 放大区, 饱和区.

• N沟道增强型场效应管

符号:



示意图



工作原理: g_s 间的 PN 结双向导电 $\rightarrow U_{GS} < 0$ (N沟道管)
只有少数载流子导电. $U_{GS} > 0$ (P沟道管)
漏极, 源极可以互换使用

1. 栅-源电压对导电沟道宽度的控制作用.
短路 G_S , $U_{GS} = 0$, 此时沟道变窄.
当 $U_{GS} < 0$ (反向电压), 耗尽层会扩展, 沟道变窄.
继续增大, 沟道变窄, 此时 $U_{GS} = U_{GS(off)}$
 G_S 间外加反向电压的原因, 此时电阻特别大, 电流小.

