



模拟电路基础（下）

三极管与其放大电路

3.2 三极管放大电路分析



➤ 放大电路分析方法

3.等效电路的分析方法

分析步骤：

- ✓ 近似估算法确定Q点(使用三极管的直流简化模型)；
- ✓ 先画交流通路，再画出小信号等效电路；
- ✓ 求Q点附近的等效模型，列出电路方程并求解。

适用范围：

- ✓ 适用于任何复杂电路的分析；
- ✓ 只能解决小信号交流分量的计算问题，不能确定Q点。

3.2 三极管放大电路分析

3



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

3. 等效电路的分析方法

(1) 利用直流通路求 Q 点

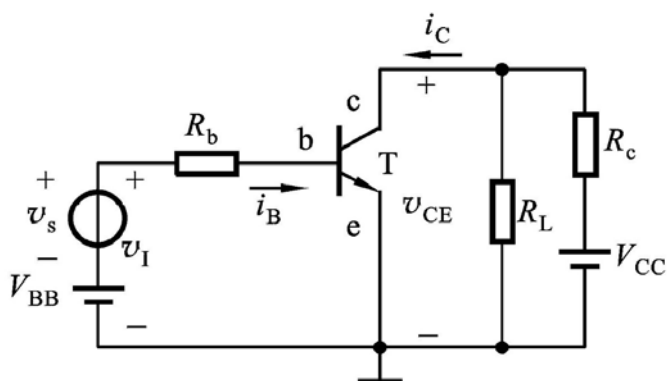
$$v_s = 0$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_b}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = \left(\frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_c} - I_C \right) R_L$$

一般硅管 $V_{BE}=0.7V$ ，锗管 $V_{BE}=0.2V$ ， β 已知。检验 V_{CE} 是否在正常范围内！



共射极放大电路

3.2 三极管放大电路分析

4

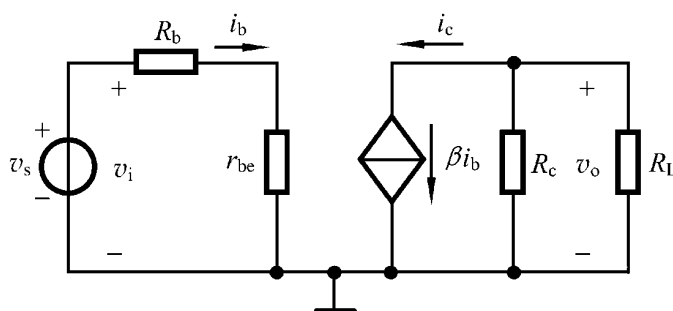
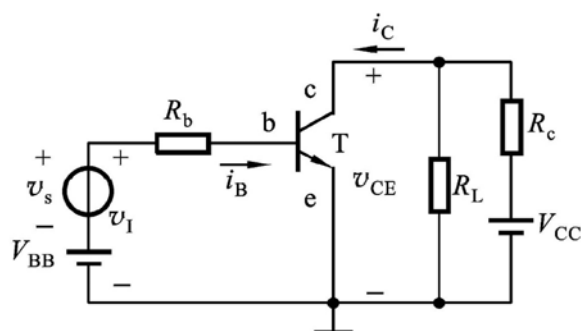


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

3. 等效电路的分析方法

(2) 画小信号等效电路



H参数小信号等效电路

不熟练可先画交流通路再画小信号等效电路

3.2 三极管放大电路分析

5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

3. 等效电路的分析方法

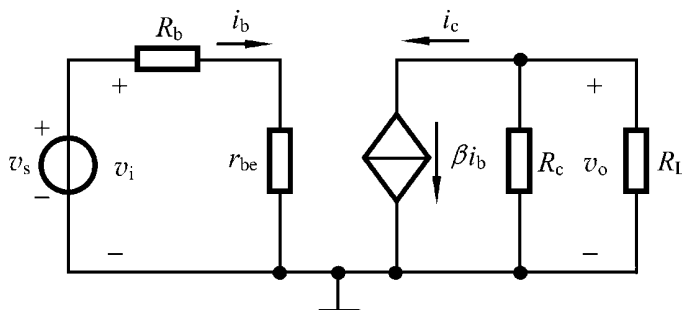
(3) 求放大电路动态指标 **电压增益**

已知 β , 估算 r_{be}

$$r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$

根据 $v_i = i_b \cdot (R_b + r_{be})$ $i_c = \beta \cdot i_b$ $v_o = -i_c \cdot (R_c // R_L)$

则电压增益为 $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_c \cdot (R_c // R_L)}{i_b \cdot (R_b + r_{be})} = -\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$ (公式, 要记, 但不死记)



3.2 三极管放大电路分析

6



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

3. 等效电路的分析方法

(3) 求放大电路动态指标

输入电阻

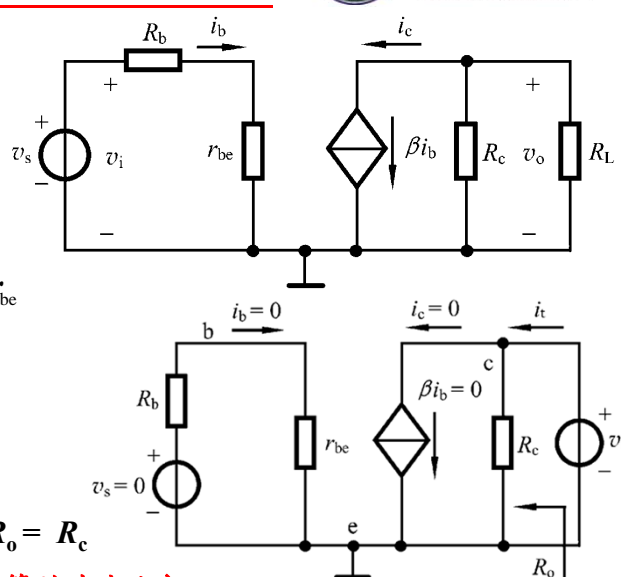
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{i_b} = \frac{i_b(R_b + r_{be})}{i_b} = R_b + r_{be}$$

输出电阻

$$R_o = \left. \frac{v_t}{i_t} \right|_{v_s=0, R_L=\infty}$$

令 $v_i = 0 \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow \beta \cdot i_b = 0$ 所以 $R_o = R_c$

(注意: $i_c=0$ 的条件很关键, 否则受控源会等效为电阻)



3.2 三极管放大电路分析

7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

放大电路如图所示。试求：(1) Q 点；(2) $A_v = \frac{v_o}{v_i}$ 、 $A_{vs} = \frac{v_o}{v_s}$ 、 R_i 、 R_o 。已知 $\beta=50$ 。

解：(1)

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = \frac{12V}{300k\Omega} = 40\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 40\mu A = 2mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 12V - 2mA \times 4k\Omega = 4V$$

$$(2) \quad r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_E(mA)}$$

$$\approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_C(mA)} = 863\Omega$$

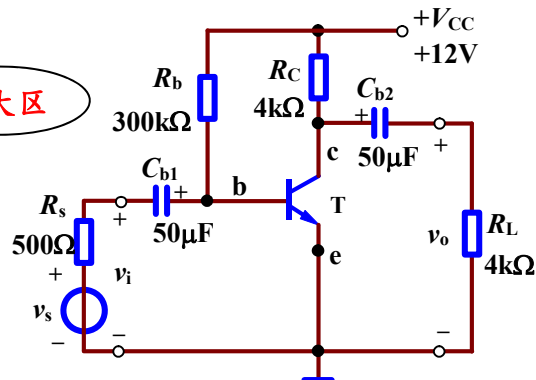
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta \cdot (R_c \parallel R_L)}{r_{be}} = -115.87$$

$R_b??$

$$R_i = R_b \parallel r_{be} \approx r_{be} = 863\Omega$$

$$R_o = R_c = 4k\Omega$$

放大区



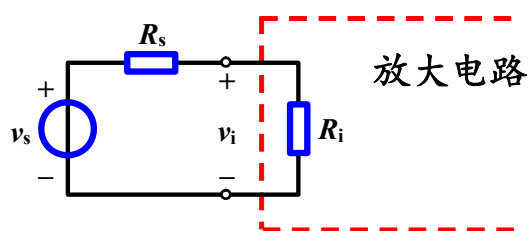
3.2 三极管放大电路分析

8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

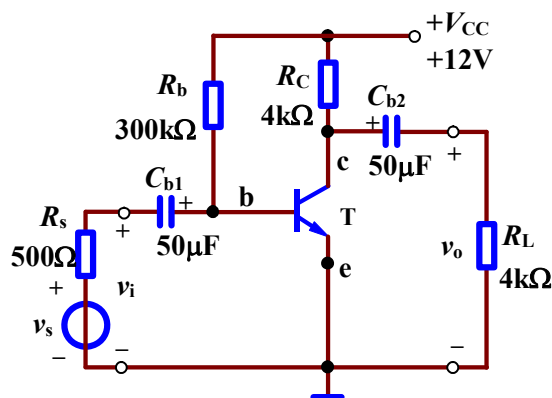


$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot A_v$$

$$= \frac{863}{863 + 500} \times (-115.87)$$

$$= -73.36$$

增益的变化说明了什么问题？



3.2 三极管放大电路分析

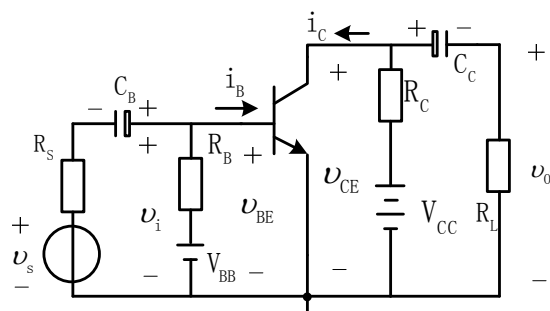
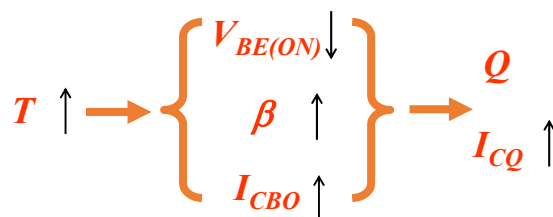
9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进

- ✓ 为了保证放大电路的稳定工作，必须有合适的、稳定的静态工作点
- ✓ 温度的变化影响静态工作点(不合适的静态工作容易导致放大信号的失真)



要想使 I_{CQ} 基本稳定不变，就要求在温度升高时，电路能自动地适当减小基极电流 I_{BQ} 。

3.2 三极管放大电路分析

10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

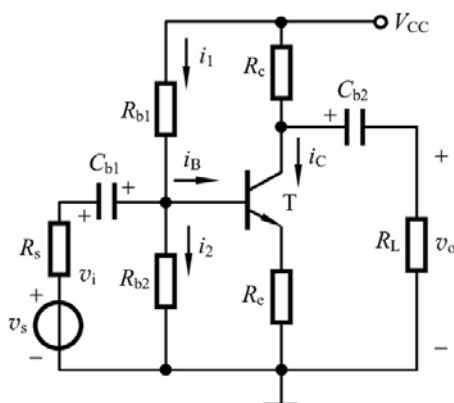
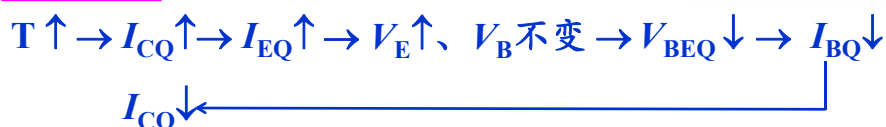
➤ 放大电路的改进

目标：温度变化时，使 I_{CQ} 维持恒定

原理：

- ✓ 利用 R_e 将 I_{EQ} 的变化转化为 V_E 电位的变化，同时 $V_{BE} = V_B - V_E$ ，使 V_{BE} 下降
- ✓ 利用 R_{b1} 和 R_{b2} 组成的分压器固定基极电位使 $I_2 \gg I_B$ 从而固定基极电位 $V_B = R_{b2} / (R_{b1} + R_{b2}) \times V_{CC}$

稳定过程：



3.2 三极管放大电路分析

11



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进

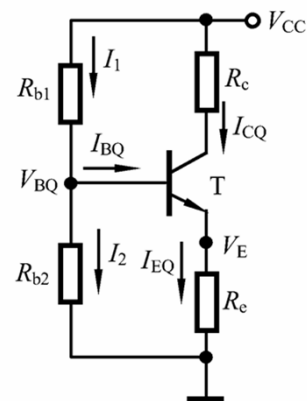
① 静态工作点

$$V_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC} \quad (I_{BQ} \ll I_1, I_2 \text{ 时})$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_B - V_{BEQ}}{R_e}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

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



直流通路

3.2 三极管放大电路分析

12



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进

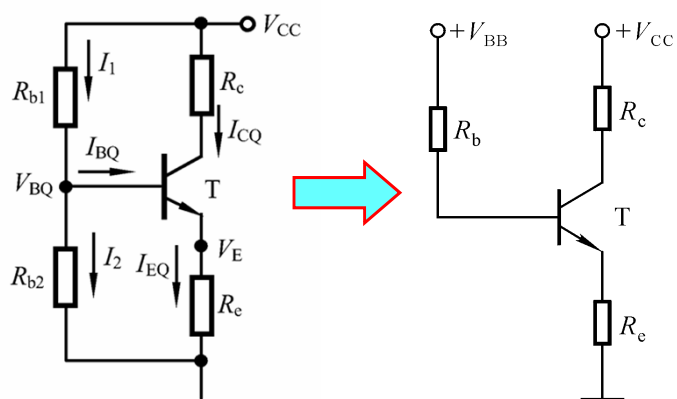
① 静态工作点

精确求解需要通过戴维南等效

$$V_{BB} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2}$$

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



直流通路

$(\beta + 1)R_e \gg R_b$ 时, 可用近似求解

3.2 三极管放大电路分析

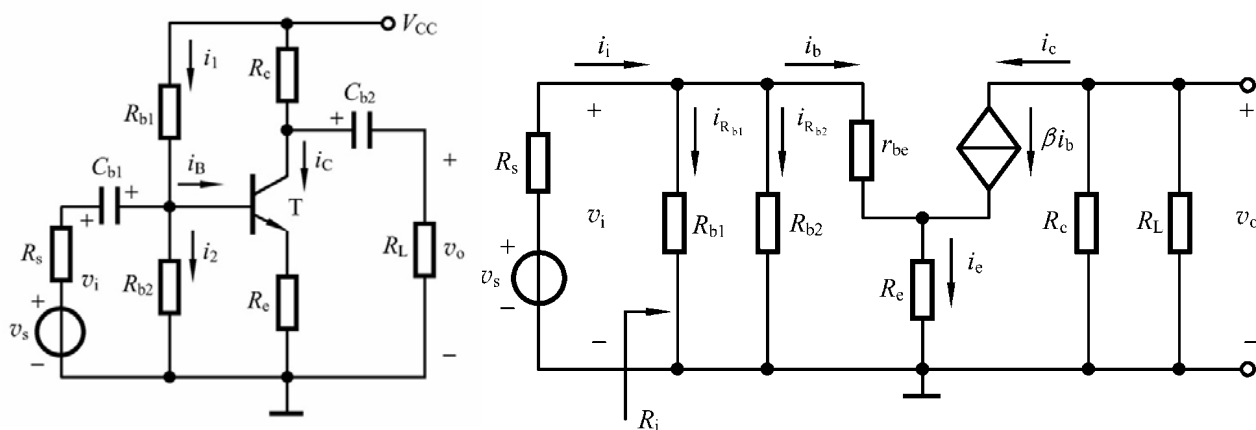
13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进

② 画小信号等效电路



3.2 三极管放大电路分析

14



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进

③ 计算电路参数

<A>增益

输出回路: $v_o = -\beta \cdot i_b (R_c \parallel R_L)$

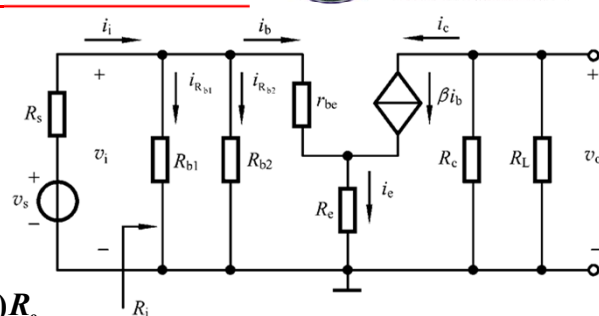
输入回路: $v_i = i_b r_{be} + i_e R_e = i_b r_{be} + i_b (1 + \beta) R_e$

电压增益: $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta \cdot i_b (R_c \parallel R_L)}{i_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]} = -\frac{\beta \cdot (R_c \parallel R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$ $r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$

(公式牢记)

$$A_v = -\frac{\beta \cdot (R_c \parallel R_L)}{R_b + r_{be}} \quad A_v = -\frac{\beta \cdot (R_c \parallel R_L)}{r_{be}}$$

各种电路的电压增益有何区别和联系?



3.2 三极管放大电路分析

15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进

③ 计算电路参数

输入电阻

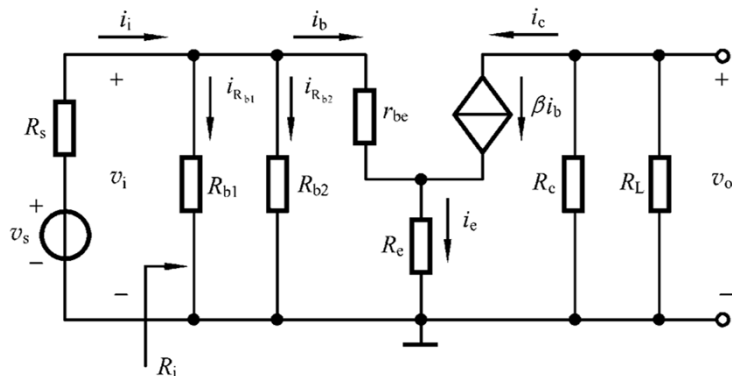
根据定义 $R_i = \frac{v_i}{i_i}$

由电路列出方程

$$\begin{cases} i_i = i_{R_b} + i_b \\ i_{R_b} = i_{R_{b1}} + i_{R_{b2}} \\ v_i = i_{R_b} (R_{b1} \parallel R_{b2}) \\ v_i = i_b r_{be} + i_e R_e = i_b r_{be} + i_b (1 + \beta) R_e \end{cases}$$

则输入电阻 $R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$

输入电阻比之前的 $R_b + r_{be}$ 、 r_{be} 有什么不同？



3.2 三极管放大电路分析

16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进

③ 计算电路参数

<C>输出电阻

求输出电阻的等效电路

- 网络内独立源置零、负载开路
- 输出端口加测试电压、考虑 r_{ce} 的影响

对回路1和2列KVL方程

$$\begin{cases} i_b (r_{be} + R'_s) + (i_b + i_c) R_e = 0 \\ v_t - (i_c - \beta i_b) r_{ce} - (i_c + i_b) R_e = 0 \end{cases}$$

则 $R'_o = \frac{v_t}{i_c} = r_{ce} \left(1 + \frac{\beta \cdot R_e}{r_{be} + R'_s + R_e} \right)$ 其中 $R'_s = R_s \parallel R_{b1} \parallel R_{b2}$

$$R_o = R_c \parallel R'_o$$

当 $R'_o \gg R_c$ 时, $R_o \approx R_c$

(一般 $R'_o > r_{ce} \gg R_c$)

