

线性电子线路

第三章作业简要参考答案

题 3.3

题 3.3 图 P3.3 电路中的晶体管的 β 均等于 100, 根据图中标示的测量值, 分别求各电路的 I_C 和 R_C 值。

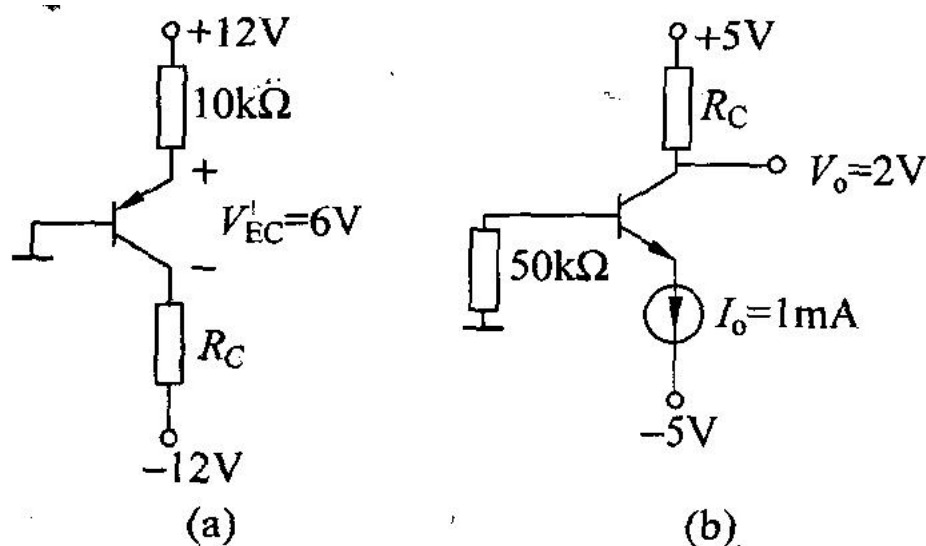


图 P3.3

解

(a) 由图, $V_B = 0$, 所以 $V_E = 0.7V$

$$I_C = I_E = \frac{+12V - V_E}{10K\Omega} = 1.13mA$$

$$R_C = \frac{24V - V_{EC}}{I_C} - 10K\Omega = 5.9K\Omega$$

$V_{EC} > 0.7V$, 符合放大状态。

(b)

$$I_C = I_E = I_o = 1mA$$

$$R_C = \frac{5V - V_o}{I_C} = 3K\Omega$$

电流方向为 $C \rightarrow B \rightarrow E$, 符合放大状态。

题 3.5

题 3.5 若测得图 P3.5 电路中的发射极电压为 $4V$ ，设 $V_{BE(on)} = 0.7V$ ，求电路中晶体管的 α 值。

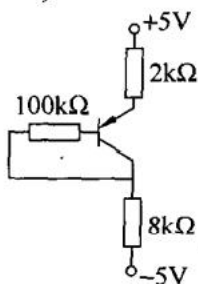


图 P3.5

$$I_E = \frac{5V - 4V}{2k\Omega} = 0.5mA$$

$$V_C = -5V + I_C * 8k\Omega = -1V$$

$$I_B = \frac{V_C - V_{BE(on)} - V_E}{100k\Omega} = \frac{4V - 0.7V - (-1V)}{100k\Omega} = 0.043mA$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_E - I_B}{I_E} = \frac{0.5mA - 0.043mA}{0.5mA} = 0.914$$

题 3.6

题 3.6 图 P3.6 电路中晶体管的 $\beta = 200$ ， $V_{BE(on)} = 0.7V$ ，以及晶体管 C、E 间的饱和压降用 $0.3V$ 估算，求下述情况的 I_C 和 V_C ，并说明晶体管的工作状态。

- (1) $V_B = 0$;
- (2) $V_B = 1V$;
- (3) $V_B = 2V$ 。

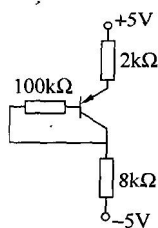


图 P3.5

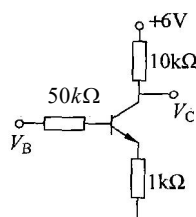


图 P3.6

(a) $V_B = 0$ ，三极管截止，所以

$$I_C = 0, V_C = 6V$$

(b) 设管子处在放大状态，则

$$I_B \cdot 50K\Omega + (\beta + 1)I_B \cdot 1K\Omega + 0.7V = V_B$$

$$\Longrightarrow I_C = \beta I_B = 0.24mA$$

$$V_C = 6V - I_C R_C = 3.6V$$

$V_C > V_B$ ，符合放大条件。

(c) 设管子处在放大状态，则

$$I_B \cdot 50K\Omega + (\beta + 1)I_B \cdot 1K\Omega + 0.7V = V_B$$

$$\Longrightarrow I_C = \beta I_B = 1mA$$

$V_{CB} < 0$ ，不符合放大条件，故三极管应处于饱和状态， $V_{CE} = 0.3V$

$$\begin{cases} V_B = I_B \cdot 50K\Omega + 0.7V + I_E \cdot 1K\Omega \\ 6V = I_C \cdot 10K\Omega + 0.3V + I_E \cdot 1K\Omega \\ I_E = I_C + I_B \end{cases}$$

$$\Longrightarrow I_C = 0.52mA$$

$$V_C = 6V - I_C R_C = 0.8V$$

题 3.10

题 3.10 图 P3.10 电路中晶体管的 $\beta=100$, 问
 (1) 若 $R_E=0.5k\Omega$, 晶体管处于何种工作状态;
 (2) 求使晶体管工作在放大区的最小 R_E 值。

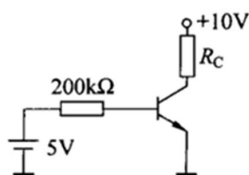


图 P3.9

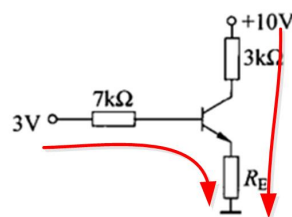


图 P3.10

解法一：若晶体管工作在放大区的临界情况是 $V_{BC} = 0$,

此时有

$$\begin{cases} 3V = 7k\Omega \cdot I_B + V_{BE} + I_E R_E = 7k\Omega \cdot \frac{I_E}{\beta} + 0.7V + I_E R_E \\ 10V = 3k\Omega \cdot I_E + 0.7V + I_E R_E \end{cases}$$

由此求得 $R_{E\min} = 0.89k\Omega$ 。

由于 $R_E = 0.5k\Omega < 0.89k\Omega$, 因此晶体管工作于饱和状态。

解法二：假设其处于放大工作状态, 求出 V_B, V_C , 由

$$V_B > V_C。$$

得出结论, 发射结与集电结都正偏, 不满足放大状态, 由此可判断晶体管工作于饱和态。

题 3.11

题 3.11 判断图 P3.11 电路中的晶体管处于何种工作状态。

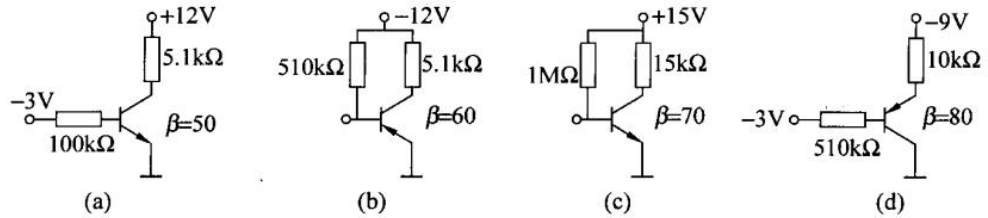


图 P3.11

(a) $V_{BE} < 0, V_{BC} < 0$ ，因此晶体管处于截止状态。

(b) 晶体管为 PNP 型， $V_{BE} < 0$ 。假设其处于放大工作状态，则

$$V_{BE} = -0.7V, \quad I_B = \frac{V_{BE} - (-12V)}{510k\Omega} = \frac{113}{5100} mA$$

$$\text{因此 } V_C = -12V + \beta \times I_B \times 5.1k\Omega = -5.22V。$$

可见晶体管满足发射结正偏，集电结反偏，处于放大工作状态，假设成立。

(c) 假设晶体管处于放大状态，则 $V_B = V_{BE} = 0.7V$ ，

$$I_B = \frac{15V - V_{BE}}{1000k\Omega} = \frac{143}{10000} mA,$$

$$V_C = 15V - 15k\Omega \times I_B \times \beta = -0.015V。$$

可见，发射结与集电结都正偏，不满足放大状态，由此可判断晶体管工作于饱和态。

(d) 晶体管为 PNP 型，由于 $V_{BE} > 0, V_{BC} < 0$ ，可知为晶体管的反向运用。

题 3.16

题 3.16 对 $\alpha_0 = 0.98$ 的晶体管, 若要求 $f = 30\text{MHz}$ 时的共发电流放大系数的大小不低于 20, 则应选用 f_β 为多大的晶体管?

$$\begin{aligned}
 3.16 \quad \beta_0 &= \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0} = \frac{0.98}{0.02} = 49 \quad \text{令 } \beta(jf) = \frac{\beta_0}{1+j\frac{f}{f_\beta}} \quad |\beta(jf)| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1+(\frac{f}{f_\beta})^2}} \\
 |\beta(jf)| &= \frac{\beta_0}{\sqrt{1+(\frac{f}{f_\beta})^2}} = 20 \\
 \therefore \left(\frac{49}{20}\right)^2 &= 1 + \frac{(30\text{M})^2}{f_\beta^2} \quad f_\beta = 13.4\text{MHz} \\
 \alpha(jf) &= \frac{\beta(jf)}{1+\beta(jf)} = \frac{\beta_0}{1+j\frac{f}{f_\beta} + \beta_0} = \frac{\alpha_0}{1+j\frac{f}{f_\alpha}} = \frac{\beta_0}{1+j\frac{f}{f_\alpha}} \\
 \text{又 } \frac{\beta_0}{1+j\frac{f}{f_\beta} + \beta_0} &= \frac{\beta_0/(1+\beta_0)}{1+jf/f_\beta(1+\beta_0)} \\
 \therefore f_\alpha &= (1+\beta_0)f_\beta = 50 \times 13.4\text{MHz} = 670\text{MHz}
 \end{aligned}$$

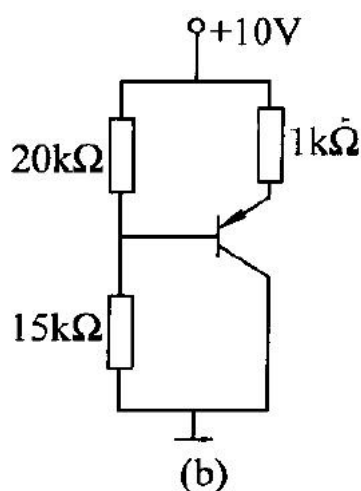
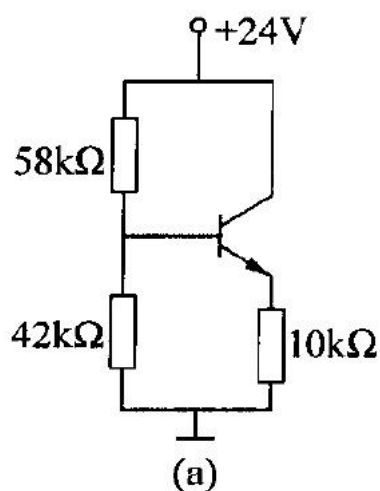
题 3.17

题 3.17 已知晶体管的低频电流放大系数为 β_0 , 试求当 $f = f_\beta$ 时的 β 值。

3.17 由 3.16 $\beta(jf) = \beta_0 / \sqrt{1 + (f/f_\beta)^2} = \beta_0 / \sqrt{1 + (f_2/f_\beta)^2}$
 $= \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + (1+\beta_0)^2}} = \frac{\beta_0}{\sqrt{\beta_0^2 + 2\beta_0 + 2}} \approx \frac{\beta_0}{\beta_0 + 1}$

题 3.12

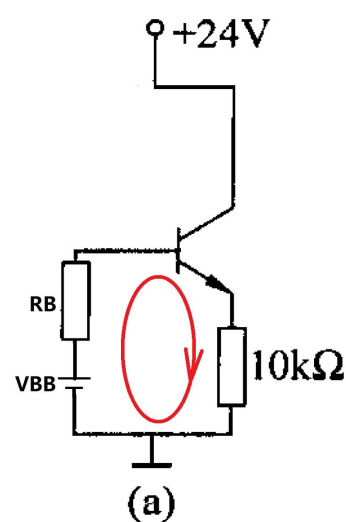
题 3.12 图 P3.12 电路中晶体管的 $\beta = 100$, 求电路的直流工作点。若 β 变化 $\pm 15\%$, 则 I_C 和 V_{CE} 的变化为多少?



(a) 作戴维南等效

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 24.36 K\Omega$$

$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10.08 V$$



图示回路列 KVL:

$$V_{BB} = I_B R_B + 0.7V + (\beta + 1)I_B R_E$$

$$\therefore I_E = (\beta + 1)I_B = \frac{V_{BB} - 0.7V}{\frac{R_B}{\beta + 1} + R_E} = \begin{cases} 0.91mA(\beta = 85) \\ 0.92mA(\beta = 100) \\ 0.92mA(\beta = 115) \end{cases}$$

$$V_{CE} = 24V - I_E R_E = \begin{cases} 14.9V(\beta = 85) \\ 14.8V(\beta = 100) \\ 14.8V(\beta = 115) \end{cases}$$

确处于放大状态

$$\therefore \frac{\Delta I_C}{I_C} = \pm 1\%, \frac{\Delta V_{CE}}{V_{CE}} = \pm 1\%$$

可看出, 在 β 变化 $\pm 15\%$ 时, I_C 和 V_{CE} 基本不变

(b) 作戴维南等效

$$(b) R_B = 20k\Omega / 15k\Omega = 8.57k\Omega$$

$$V_{B3} = 10V \times \frac{20}{20+15} = 5.71V$$

$$I_{B3} = \frac{5.71V - 0.7V}{R_B + R_E(1+\beta)} = 4.57 \times 10^{-2} mA$$

$$I_C = \beta I_{B3} = 4.57 mA$$

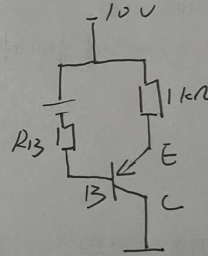
$$V_{CE} = -10V + 4.57 = -5.43V$$

$$\beta = 85 \quad I_C = \frac{5.01\beta}{8.57 + 1 + \beta} mA = 4.50 mA$$

$$V_{CE} = -10V + 4.5V = -5.5V$$

$$I_C = \frac{5.01\beta}{8.57 + 1 + \beta} mA = 4.62 mA$$

$$V_{CE} = -10V + 4.63V = -5.37V$$



可看出，在 β 变化 $\pm 15\%$ 时， I_C 和 V_{CE} 基本不变

原因： R_E 有负反馈作用，能在 β ， I_B ， I_C 变化时稳定静态工作点。

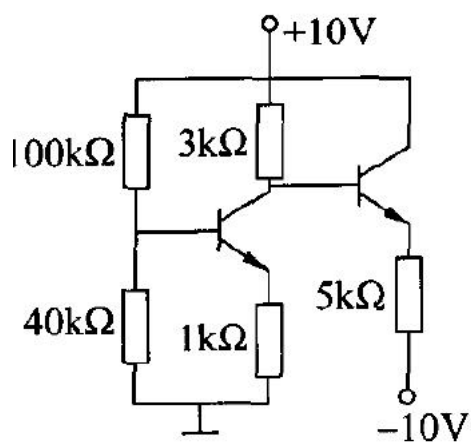
由于射极电阻 R_E 接在直流输出回路和输入回路中间， R_E 中既有输出电流 I_C ，也有输入电流 I_B ，它可以把输出电流的变化反馈到输入回路，去影响输入电流，最后可以起到稳定输出电流的作用，将这种过程称为直流电流负反馈，可以表示为

$$\begin{array}{ccccccc} T \uparrow & \longrightarrow & I_C(I_E) \uparrow & \longrightarrow & V_E \uparrow & \longrightarrow & V_{BE} \downarrow \\ & & & & & & \downarrow \\ & & & & & & I_C \downarrow \longleftarrow I_B \downarrow \end{array}$$

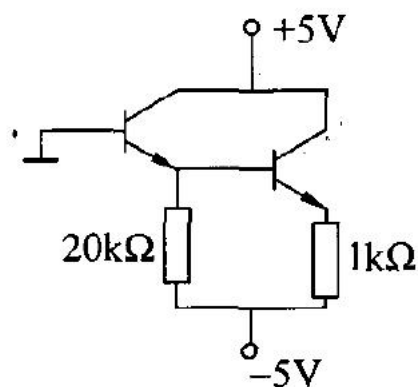
即若有温度 T (或其他原因) 升高而造成的 I_C (即 I_E) 的升高，则会在 R_E 上产生较大的压降而使射极电压 V_E 升高，由于 V_E 升高导致了发射结电压 V_{BE} 下降，而使 I_B 减小，因此达到使 I_C 减小的自动调节过程。这种调节过程起到了稳定 I_C 的作用。显然， R_E 越大，其上的压降越能有效地控制 V_{BE} ，但是 R_E 上的直流损耗也会增大，降低了电源电压的利用率。

题 3.14

题 3.14 硅晶体管电路如图 P3.14 所示, 电路(a)中晶体管的 β 均为 120, 电路(b)中的晶体管的 β 均为 80, 求电路的静态工作点 (I_{C1} 、 I_{C2} 、 V_{CE1} 、 V_{CE2})。



(a)

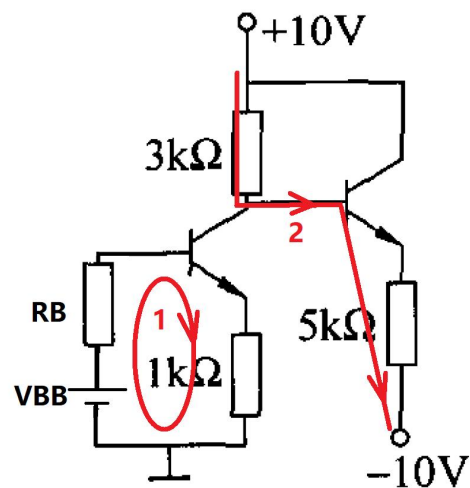


(b)

(a) 左侧作戴维南等效

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 28.57 K\Omega$$

$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2.86V$$



回路 1 列 KVL:

$$V_{BB} = I_{B1}R_B + 0.7V + (\beta + 1)I_{B1}R_{E1}$$

$$\Rightarrow I_{B1} = 14\mu A, I_{C1} = I_{E1} = 1.73mA$$

回路 2 列 KVL:

$$20V = (I_{C1} + I_{B2})RC + 0.7V + (\beta + 1)I_{B2}R_{E2}$$

$$\Rightarrow I_{C2} = \beta I_{B2} = 2.76mA$$

所以:

$$V_{CE1} = V_{CC} - (I_{C1} + I_{B2})R_C - I_{E1}R_{E1} = 3.0V$$

$$V_{CE2} = 20V - I_{E2}R_{E2} = 6.2V$$

确处于放大状态

题 3.15

题 3.15 图 P3.15 为直接耦合的两级放大器, 其中硅晶体管的 β 为 50, 估算该放大器的静态工作点。

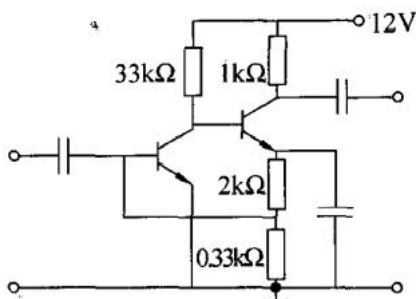
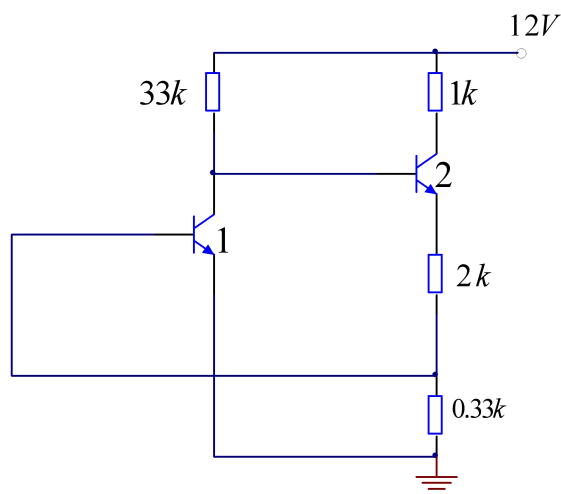


图 P3.15

解：电容不影响电路的直流特性，将电路简化如下



由如上电路图得到

$$\begin{cases} 33k\Omega \cdot (I_{C1} + I_{B2}) + 0.7V + 2k\Omega \cdot I_{E2} = 12V - 0.7V \\ I_{E2} - I_{B1} = (\beta + 1)I_{B2} - I_{B1} = \frac{0.7V}{0.33k\Omega} = 2.1212mA \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} I_{B1} = 0.003mA \\ I_{B2} = 0.042mA \end{cases}$$

由此得到

$$\begin{cases} I_{C1} = 50I_{B1} = 0.15mA \\ I_{C2} = 50I_{B2} = 2.1mA \end{cases}$$

$$V_{C1} = 12V - 33k\Omega \cdot (0.15mA + 0.042mA) = 5.664V$$

$$V_{C2} = 12V - 1k\Omega \times 2.1mA = 9.9V$$

$$V_{E2} = V_{C1} - 0.7V = 4.964V$$

$$\text{因此} \begin{cases} V_{CE1} = V_{C1} = 5.664V \\ V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 4.936V \end{cases}$$

题 3.18

题 3.18 在 $I_C = 5\text{mA}$ 、 $V_{CE} = 10\text{V}$ 时,测得室温下锗晶体管的参数: $h_{fe} = 100$, $h_{ie} = 0.6\text{k}\Omega$, $C_c = 3\text{pF}$ 以及在 10MHz 时的 $|\beta| = 10$,求该晶体管的 f_β 、 f_T 、 C_π 、 r_e 和 r_b 值。

解:

$$h_{fe} = \beta_0 = 100$$

$$r_e = \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}} \approx \frac{26\text{mV}}{I_{CQ}} = 5.2\text{V}$$

$$h_{ie} = 0.6\text{k}\Omega = r_b + (1 + \beta_0)r_e \Rightarrow r_b = 74.8\Omega$$

$$C_c = 3\text{pF}$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}} \Rightarrow f = 10\text{MHz} \text{ 时, } |\beta| = \frac{100}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_\beta^2}}} = 10 \Rightarrow f_\beta = 1\text{MHz}$$

$$f_T = \beta_0 f_\beta = 100\text{MHz}$$

$$C_\pi = \frac{1}{2\pi f_T r_e} = 0.3\text{nF}$$

题 3.20

题 3.20 试证明图 P3.20 所示电路的 h 参数可表示为

$$h'_{ie} \approx h_{ie} + \frac{(1 + h_{fe})R_E}{1 + h_{oe}R_E}$$

$$h'_{re} \approx \frac{h_{re} + h_{oe}R_E}{1 + h_{oe}R_E}$$

$$h'_{fe} \approx \frac{h_{fe} - h_{oe}R_E}{1 + h_{oe}R_E}$$

$$h'_{oe} \approx \frac{h_{oe}}{1 + h_{oe}R_E}$$

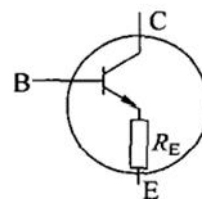
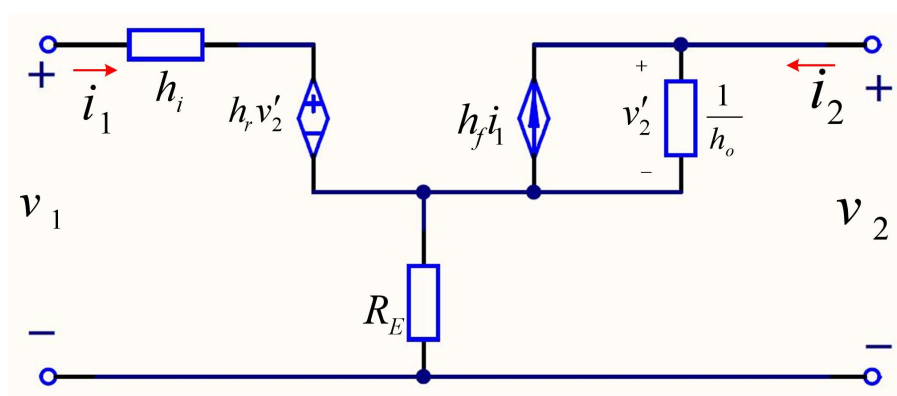


图 P3.20

证明： h 参数等效电路如下图所示，根据 h 参数的性质有

$$\begin{cases} v_1 = h'_i i_1 + h'_r v_2 \\ i_2 = h'_f i_1 + h'_o v_2 \end{cases}$$



由上图可得，

$$\begin{cases} v_1 = i_1 h_i + h_r v_2 + (i_1 + i_2) R_E \\ v_2 = v'_2 + (i_1 + i_2) R_E \\ v'_2 = (i_2 - h_f i_1) \frac{1}{h_o} \end{cases} \Rightarrow i_2 = \frac{\frac{h_f}{h_o} - R_E}{\frac{1}{h_o} + R_E} i_1 + \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_E} v_2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} h'_f = \frac{\frac{h_f}{h_o} - R_E}{\frac{1}{h_o} + R_E} = \frac{h_f - h_o R_E}{1 + h_o R_E} \\ h'_o = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_E} = \frac{h_o}{1 + h_o R_E} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 v_1 &= i_1 h_i + h_r (i_2 - h_f i_1) \frac{1}{h_o} + (i_1 + i_2) R_E \\
 &= \left[h_i - \frac{h_r h_f}{h_o} + R_E + \frac{h_r + h_o R_E}{1 + h_o R_E} \right] i_1 + \frac{h_r + h_o R_E}{1 + h_o R_E} v_2 \\
 \Rightarrow h'_i &= h_i - \frac{h_r h_f}{h_o} + R_E + \frac{h_r + h_o R_E}{1 + h_o R_E} \\
 &= h_i + \frac{(1 + h_f) R_E}{1 + h_o R_E} + \frac{h_r R_E (1 - h_f)}{1 + h_o R_E}
 \end{aligned}$$

因为在 h 参数模型中, $h_r = b = v_{be}/v_{ce} \approx 0$, 故

$$h'_i \approx h_i + \frac{(1 + h_f) R_E}{1 + h_o R_E}$$

$$h'_r = \frac{h_r + h_o R_E}{1 + h_o R_E}$$

题 3.21

题 3.21 图 P3.21 放大器中晶体管的 $\beta = 180$, $r'_e = \infty$ 以及 $R_s = 200\Omega$, $R_L = 1.2k\Omega$, 求:

- (1) 该电路的静态工作点;
- (2) h_{ie} ;
- (3) A_{V_S} , R_i 和 R_o 。

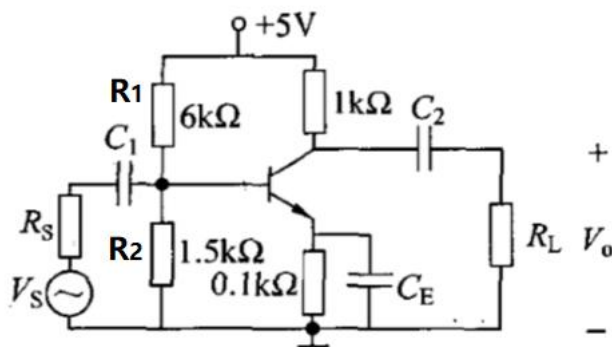


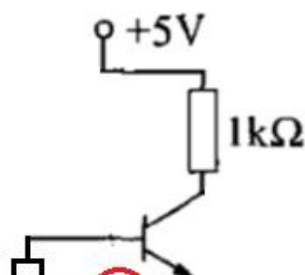
图 P3.21

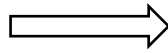
(1) 直流分析

作戴维南等效

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 1.2K\Omega$$

$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1V$$





假设在放大状态

图示回路列 KVL:

$$V_{BB} - 0 = I_B R_B + 0.7V + (\beta + 1)I_B R_E$$

$$\therefore I_E = (\beta + 1)I_B = 2.81mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 1.92V$$

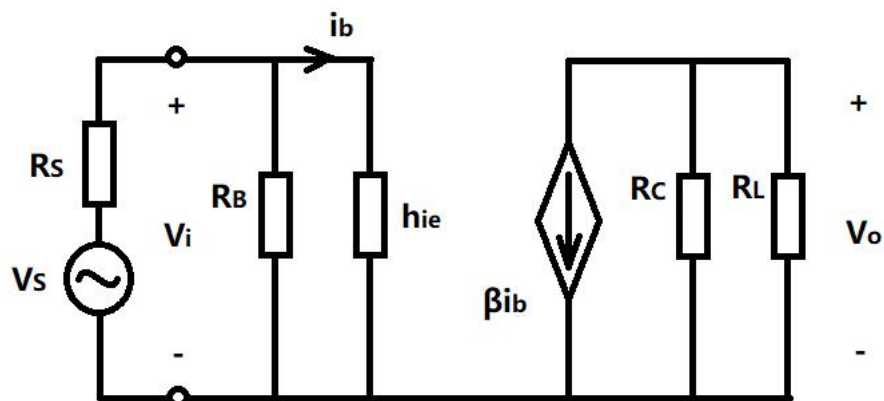
确处于放大状态

(2)

$$r_e = \frac{26mV}{I_E} = 9.24\Omega$$

$$h_{ie} = r_b + (\beta + 1)r_e = 1.87K\Omega$$

(3) 交流分析



$$A_{VS} = -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie}} \frac{R_B \parallel h_{ie}}{R_S + R_B \parallel h_{ie}} = -41.2$$

$$R_i = R_B \parallel h_{ie} = 0.731K\Omega$$

$$R_o = R_C = 1K\Omega$$

题 3.22

题 3.22 在图 P3.22 放大器中, 晶体管的 $\beta=80, r_c'=\infty$; $V_{BE(on)}=0.7V, C_E、C_C$ 分别为旁路电容和耦合电容。

- (1) 若要求 $I_{EQ}=0.75mA, V_{ECQ}=7V$, 则电路中 R_E 和 R_C 应取多大?
- (2) 若 $R_L=10k\Omega$, 求交流 A_{VS} 和 R_i 。

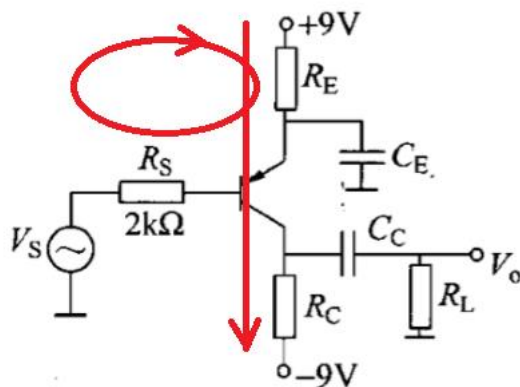


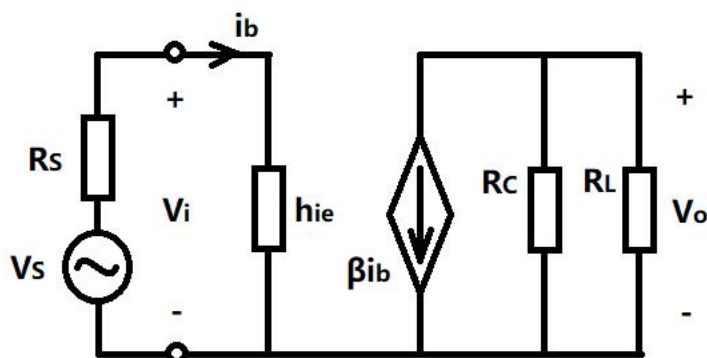
图 P3.22

- (1) 图示回路列 KVL:

$$\begin{cases} V_{EE} - 0 = V_{BE(on)} + I_{EQ}R_E \\ V_{EE} - V_{CC} = I_{EQ}R_E + V_{ECQ} + I_{CQ}R_C \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_E = 11.067 K\Omega, R_C = 3.6 K\Omega$$

(2) 交流分析



$$r_e = \frac{26mV}{I_E} = 34.67\Omega$$

$$R_i = h_{ie} = r_b + (\beta + 1)r_e = 2.8K\Omega \quad 300\Omega$$

$$A_{VS} = - \frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie}} \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

$$= - \frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s}$$

$$= -44.12 \quad -42$$

题 3.23

题 3.23 晶体管放大器如图 P3.23 所示, 已知 $\beta=100, V_{BE(on)}=0.7V$ 。

(1) 若要求 $I_{CQ}=0.25mA, V_{CEQ}=3V$, 则 R_C 和 R_E 应为多大? 。

(2) 画交流电路, 求 A_v, R_i 和 R_o 。

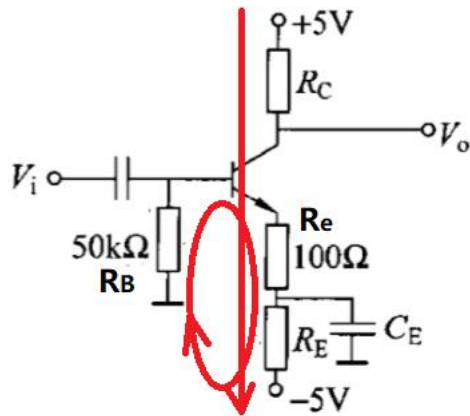


图 P3.23

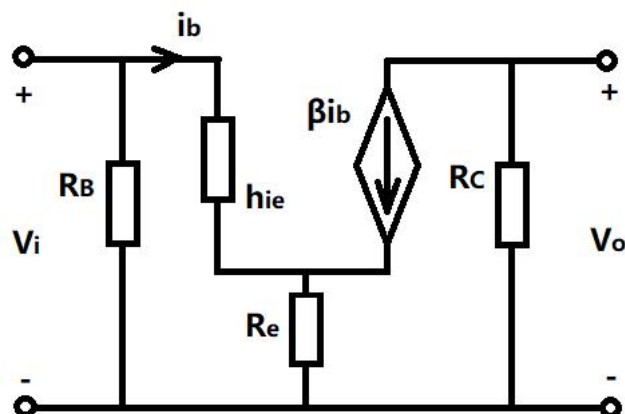
(1) $I_{EQ} \approx I_{CQ} = 0.25mA$

图示回路列 KVL:

$$\begin{cases} 0 - V_{EE} = \frac{I_{CQ}}{\beta} R_B + V_{BE(on)} + I_{EQ} (R_E + R_e) \\ V_{CC} - V_{EE} = I_{CQ} R_C + V_{CEQ} + I_{EQ} (R_E + R_e) \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_E = 16.6K\Omega, R_C = 11.3K\Omega$$

(2) 交流分析



$$r_e = \frac{26mV}{I_{EQ}} = 104\Omega$$

$$A_V = -\frac{\beta R_C}{h_{ie} + (\beta + 1)R_e} = -\frac{R_C}{r_e + R_e} = -55.4$$

$$R_i = R_B \parallel [h_{ie} + (\beta + 1)R_e] = 14.6K\Omega$$

$$R_o = R_C = 11.3K\Omega$$

题 3.24

题 3.24 射极跟随器电路如图 P3.24 所示, 已知 $\beta=180$, $V_{BE(on)}=0.7V$,

(1) 求该电路的直流 I_C 和 V_{CE} ;

(2) 画交流电路, 求 A_V 、 A_{V_S} 、 R_i 和 R_o 。

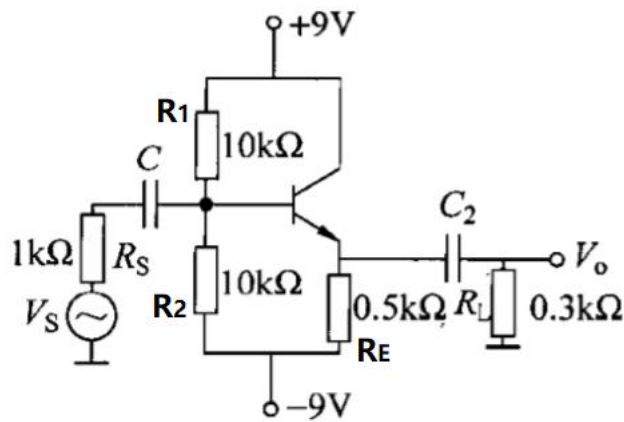
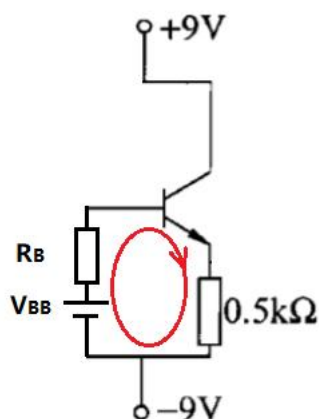


图 P3.24

(1) 直流分析

作戴维南等效



$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 5K\Omega$$

$$V_{BB} = (V_{CC} - V_{EE}) \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{EE} = 0V$$

假设在放大状态

图示回路列 KVL:

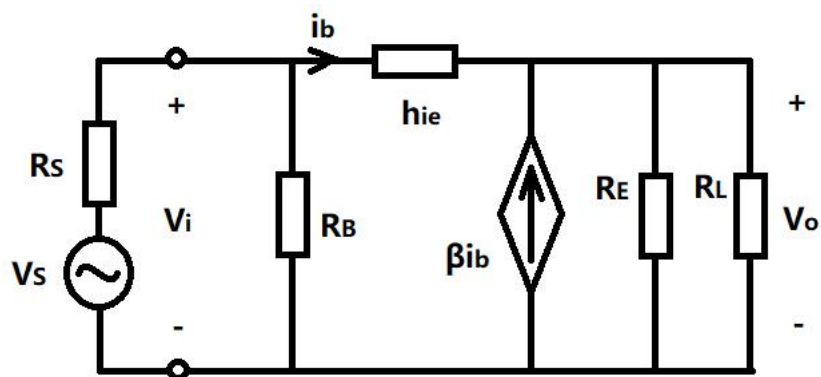
$$V_{BB} - V_{EE} = I_B R_B + V_{BE(on)} + (\beta + 1) I_B R_E$$

$$\therefore I_E = (\beta + 1) I_B = 15.731mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{EE} - I_E R_E = 10.13V$$

确处于放大状态

(2) 交流分析



$$r_e = \frac{26mV}{I_{EQ}} = 1.65\Omega$$

$$h_{ie} = r_b + (\beta + 1)r_e = 299.15\Omega$$

$$R_i = R_B \parallel [h_{ie} + (\beta + 1)(R_E \parallel R_L)] = 4.363K\Omega$$

$$R_o = R_E \parallel \frac{h_{ie} + R_S \parallel R_B}{\beta + 1} = 6.18\Omega$$

$$A_V = \frac{(\beta + 1)(R_E \parallel R_L)}{h_{ie} + (\beta + 1)(R_E \parallel R_L)} = \frac{R_E \parallel R_L}{r_e + R_E \parallel R_L} = 0.991$$

$$A_{V_S} = \frac{R_i}{R_i + R_S} A_V = 0.806$$

题 3.26

题 3.26 图 P3.26 为自举式射极跟随器, 已知晶体管的 $\beta = 50$ 、 $r_b = 300\Omega$ 以及 $R_L = 12k\Omega$ 。

- (1) 若要求 $V_E = 10V$, 确定 R_B 的值;
- (2) 计算交流 R_i 和 A_V ;
- (3) 若不接电容 C , 则 R_i 为多大?

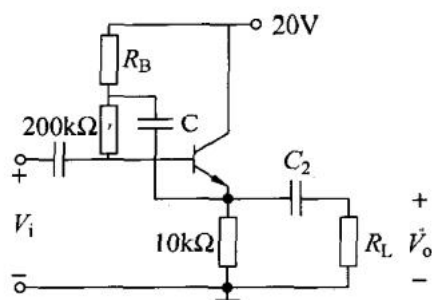
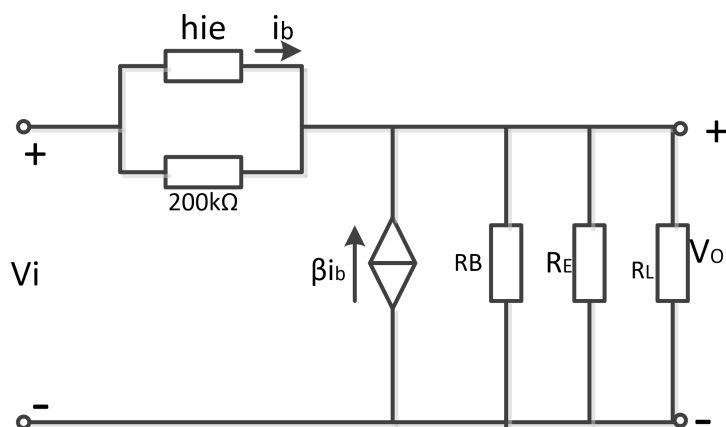


图 P3.26

解: (1)

$$\begin{cases} (R_B + 200k\Omega)I_B + V_{BE} + V_E = 20V \\ I_E = (1 + \beta)I_B = \frac{V_E}{10k\Omega} = 1mA \end{cases} \Rightarrow R_B = 274.3k\Omega$$

(2) 交流分析



$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{26mV}{1mA} = 26\Omega \Rightarrow h_{ie} = r_b + (1 + \beta)r_e = 300\Omega + 51 \times 26\Omega = 1626\Omega$$

$$\text{令 } R_1 = 200k\Omega, R_E = 10k\Omega$$

$$\begin{cases} v_i = i_b h_{ie} + (i + \beta i_b)(R_B \parallel R_E \parallel R_L) \\ i = \left(\frac{h_{ie}}{R_1} + 1 \right) i_b \end{cases} \Rightarrow R_i = h_{ie} \parallel R_1 + \frac{\left(\frac{h_{ie}}{R_1} + 1 + \beta \right) (R_B \parallel R_E \parallel R_L)}{\frac{h_{ie}}{R_1} + 1} = 272.2k\Omega$$

$$\text{近似计算: } \because R_1 \gg h_{ie} \quad \therefore \frac{h_{ie}}{R_1} \ll 1 (\text{即 } i \approx i_b)$$

$$R_i = h_{ie} \parallel R_1 + (1 + \beta)(R_B \parallel R_E \parallel R_L) = 274.37k\Omega$$

$$A_v = \frac{(1 + \beta)(R_B \parallel R_E \parallel R_L)}{h_{ie} \parallel R_1 + (1 + \beta)(R_B \parallel R_E \parallel R_L)} = \frac{272.76}{274.37} = 0.994$$

(3)

$$\begin{aligned} R_i &= (R_1 + R_B) \parallel [h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L)] \\ &= (200k\Omega + 274.3k\Omega) \parallel [1.626k\Omega + 51 \times (10k\Omega \parallel 12k\Omega)] = 175.99k\Omega \end{aligned}$$

题 3.27

题 3.27 图 P3.27 电路中晶体管的 $\beta = 80, I_o = 0.5mA$ 。

(1) 求直流 V_E, V_B 和 I_C ;

(2) 求交流 A_v, A_i, R_i 和 R_o ;

(3) 若 $R_s = 2k\Omega$, 则 A_{v_s}, A_i, R_i 和 R_o 为多少?

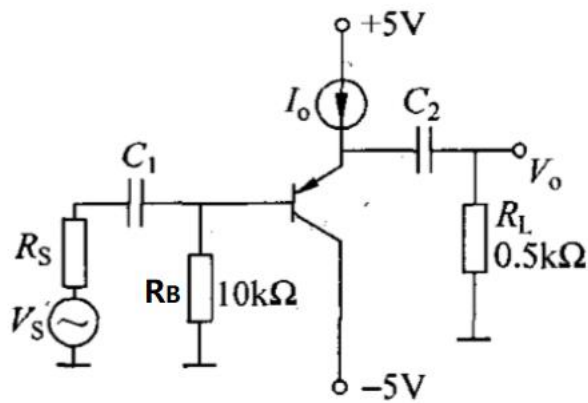


图 P3.27

(1) 直流分析

$$I_E = I_0 = 0.5mA$$

假设在放大状态

$$I_C \approx I_E = 0.5mA$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = 6.173\mu A$$

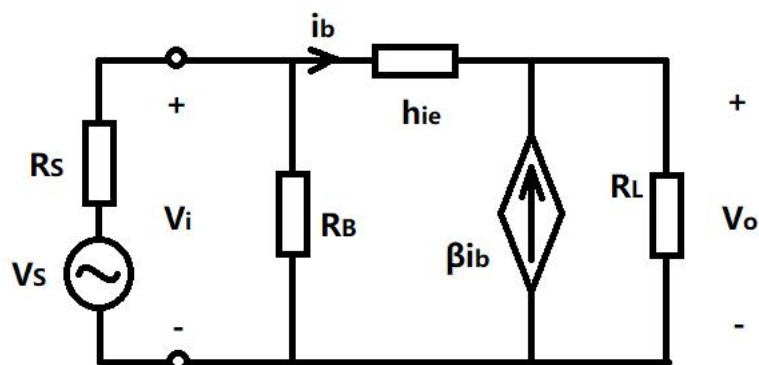
$$V_B = V_{BB} + I_B R_B = 0.0617V$$

$$V_E = V_B + V_{EB(on)} = 0.762V$$

$$V_{EC} = V_E - V_C = 5.76V$$

确处于放大状态

(2) 交流分析



$$r_e = \frac{26mV}{I_{EQ}} = 52\Omega$$

$$h_{ie} = r_b + (\beta + 1)r_e = 4.2K\Omega$$

$$A_V = \frac{(\beta + 1)R_L}{h_{ie} + (\beta + 1)R_L} = \frac{R_L}{r_e + R_L} = 0.906$$

$$A_I = \frac{(\beta + 1)R_B}{R_B + h_{ie} + (\beta + 1)R_L} = 14.8$$

$$R_i = R_B \parallel [h_{ie} + (\beta + 1)R_L] = 8.17K\Omega$$

R_S 值未知，结果包含 R_S 即可

$$R_o = \frac{h_{ie} + R_S \parallel R_B}{\beta + 1} = \frac{4.2K\Omega + R_S \parallel 10K\Omega}{81}$$

(3)

$$R_S = 2K\Omega$$

A_V 、 A_I 、 R_i 不变

$$A_{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_S} A_V = 0.728$$

$$A_I = 14.8$$

$$R_i = 8.17K\Omega$$

$$R_o = \frac{h_{ie} + R_S \parallel R_B}{\beta + 1} = 72.58\Omega$$

题 3.28

题 3.28 图 P3.28 放大器中，已知 $\beta=125$ 及电流源内阻 $R_S=100k\Omega$ ， $R_L=4k\Omega$ 。

(1) 求电路的直流工作点；

(2) 求交流 A_V 、 A_I 、 A_{IS} 及 R_i 、 R_o 。

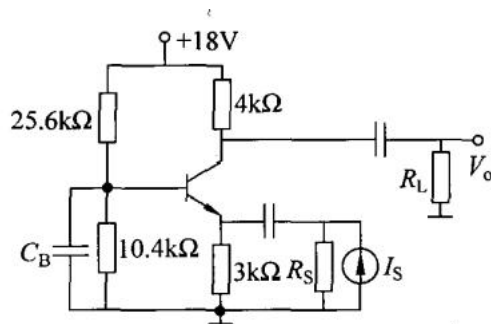


图 P3. 28

解：

(1) 求电路的直流工作点

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{10.4k\Omega}{25.6k\Omega + 10.4k\Omega} \times 18V = 5.2V$$

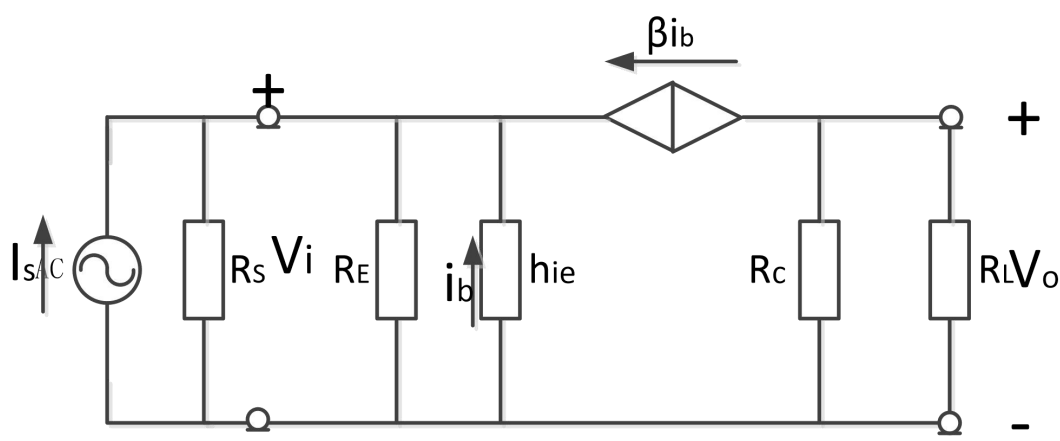
$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2} = 25.6k\Omega \parallel 10.4k\Omega = 7.4k\Omega$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B / (1 + \beta) + R_E} = \frac{5.2 - 0.7}{7.4 / 126 + 3} mA = 1.47mA \approx I_C$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 18V - 7k\Omega \times 1.47mA = 7.71V$$

(2) 求交流 A_v 、 A_i 、 A_{IS} 及 R_i 、 R_o

共基极放大电路



$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{26mV}{1.47mA} = 17.69\Omega \Rightarrow h_{ie} = r_b + (1 + \beta)r_e = 200\Omega + 126 \times 17.69\Omega = 2.43k\Omega$$

$$R_i = R_E \parallel \frac{h_{ie}}{1+\beta} = 3k\Omega \parallel \frac{2.43k\Omega}{126} = 19.2\Omega$$

$$R_o = R_C = 4k\Omega$$

$$A_v = \beta \frac{R_C \parallel R_L}{h_{ie}} = 125 \times \frac{4k\Omega \parallel 4k\Omega}{2.43k\Omega} = 102.9$$

$$A_I = \alpha_0 \frac{R_E}{R_E + \frac{h_{ie}}{1+\beta}} \frac{R_C}{R_C + R_L} = \frac{125}{126} \times \frac{3}{3 + \frac{2.43}{126}} \times \frac{4}{4+4} = 0.493$$

$$A_{IS} = \frac{R_S}{R_S + R_i} A_I = 0.493 \times \frac{100k\Omega}{100k\Omega + 19.2 \times 10^{-3}k\Omega} \approx 0.493$$

题 3.30

题 3.30 图 P3.30 所示单级共发射放大器可以利用 R_d 、 C_d 来改善电压传递函数的低频端响应,若 $R_B \gg R_S$ 。试求:

(1) 低频时电压增益函数的零极点模型;

(2) 若 $R_L = 2k\Omega$, $R_d = 4k\Omega$, $R_E = 1k\Omega$, $R_S = 0$, $C_d = 1\mu F$, $C_E = 100\mu F$, $h_{fe} = 50$, $h_{ie} = 1k\Omega$, 画电压增益函数的幅频伯德图。

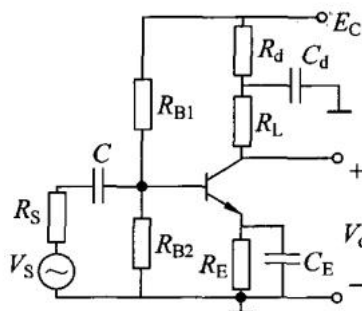
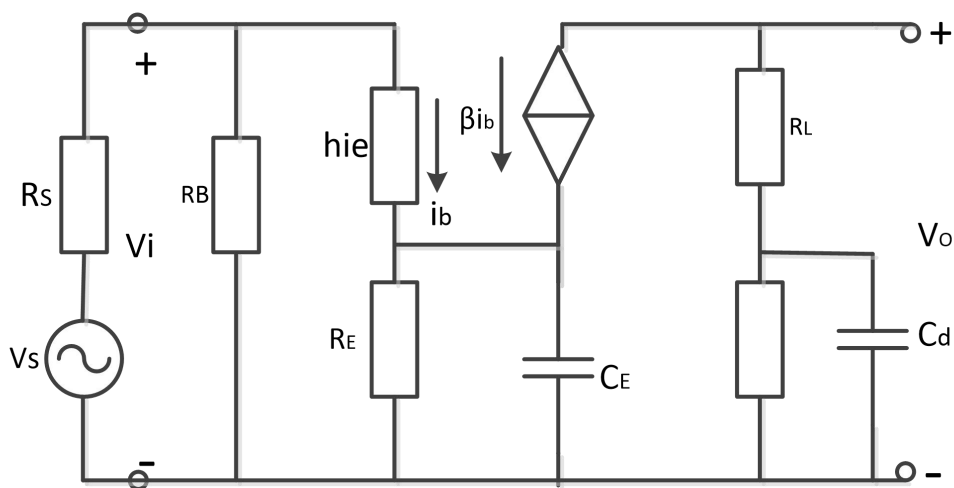


图 P3.30

解: (1) 低频交流等效电路:



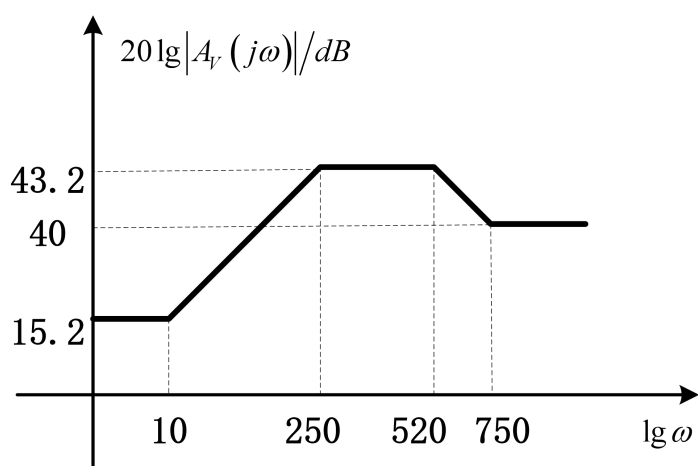
$$\begin{cases} v_i(S) = i_b h_{ie} + (1 + \beta) i_b \left(R_E + \frac{1}{SC_E} \right) \\ v_o(S) = -\beta i_b \left[R_L + R_d \parallel \frac{1}{SC_d} \right] \end{cases}$$

$$A_v(S) = \frac{v_o(S)}{v_i(S)} = -\beta \frac{R_L + R_d \parallel \frac{1}{SC_d}}{h_{ie} + (1 + \beta) \left(R_E \parallel \frac{1}{SC_E} \right)}$$

(2) 代入数据后，

$$A_v(S) = -\frac{75}{13} \frac{\left(1 + \frac{S}{10} \right) \left(1 + \frac{S}{750} \right)}{\left(1 + \frac{S}{250} \right) \left(1 + \frac{S}{520} \right)}$$

幅频伯德图如下图所示：



题 3.34

题 3.34 图 P3.34 共射放大电路中晶体管的 $\beta_0 = 100$, $V_{BE(on)} = 0.7V$ 。

- (1) 计算该电路的中频电压增益 A_v 、 A_{v_s} ；
- (2) 计算电压增益函数 $A_{v_s}(S)$ 的 3dB 下截止频率。

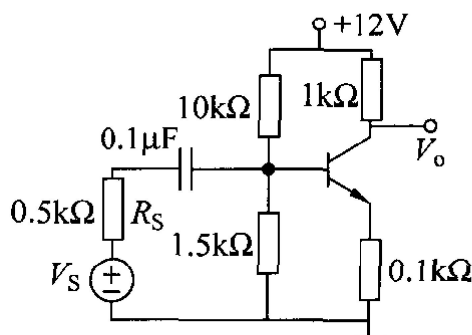
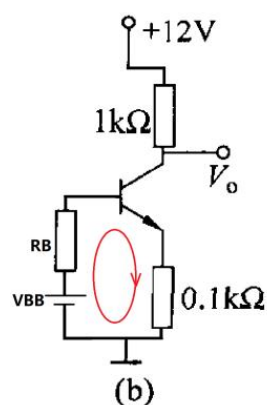


图 P3.34

- (1) 作戴维南等效



$$V_{BB} = V_{CC} \frac{1.5K\Omega}{10K\Omega + 1.5K\Omega} = 1.565V$$

$$R_B = 10K\Omega \parallel 1.5K\Omega = 1.30K\Omega$$

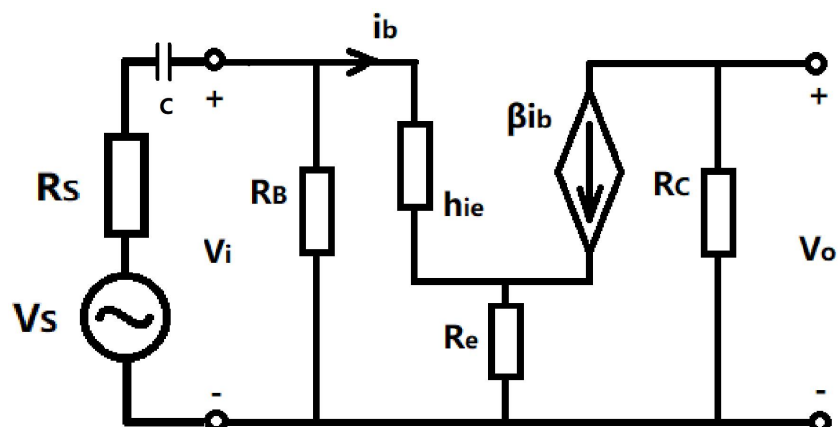
图示回路列 KVL:

$$V_{BB} = I_B R_B + 0.7V + (\beta + 1)I_B R_E$$

$$\Rightarrow I_E = (\beta + 1)I_B = 7.66mA$$

$$V_{CE} > 0.7V$$

确处于放大状态，交流分析如下：



$$A_V = -\frac{\beta R_C}{h_{ie} + (\beta + 1)R_e} = -\frac{R_C}{r_e + R_e} = -9.6$$

$$R_i = R_B \parallel [h_{ie} + (\beta + 1)R_e] = 1.16K\Omega$$

$$A_{Vs} = A_V \frac{R_i}{R_s + R_i} = -6.8$$

(2)

$$A_{Vs}(s) = A_V \frac{R_i}{R_s + R_i + \frac{1}{sC}} = A_V \frac{\frac{R_i}{R_s + R_i}}{1 + \frac{1}{sC(R_s + R_i)}}$$

$$\therefore \omega_l = \frac{1}{C(R_s + R_i)} = 6.02 \times 10^3 rad/s$$

题 3.31

题 3.31 已知晶体管的 $r_b = 100\Omega$, $\beta = 50$, $C_x = 100pF$, $C_c = 5pF$, 由它组成的共发射放大电路如图 P3.31。

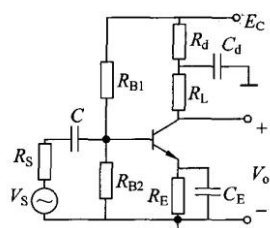


图 P3.30

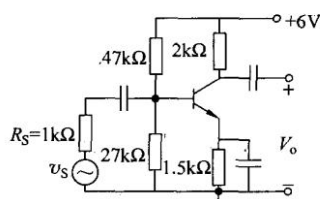


图 P3.31

- (1) 求中频时的 A_V 、 A_{V_S} 、 R_i 和 R_o ；
- (2) 求高频时的源电压传递函数 $A_{V_S}(S)$ 及其 ω_{3dB} ；
- (3) 若在发射极再串接一个小电阻 $R_e = 20\Omega$ ，则其 $A_{V_S}(S)$ 的 ω_{3dB} 为多少？

解：(1) 求中频时的 A_V 、 A_{V_S} 、 R_i 和 R_o

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{27k\Omega}{47k\Omega + 27k\Omega} \times 6V = 2.19V$$

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2} = 47k\Omega \parallel 27k\Omega = 17.15k\Omega$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B / (1 + \beta) + R_E} = \frac{2.19V - 0.7V}{17.15k\Omega / 51 + 1.5k\Omega} = 0.81mA$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{26mV}{0.81mA} = 32\Omega \Rightarrow h_{ie} = r_b + (1 + \beta)r_e = 100\Omega + 51 \times 32\Omega = 1.732k\Omega$$

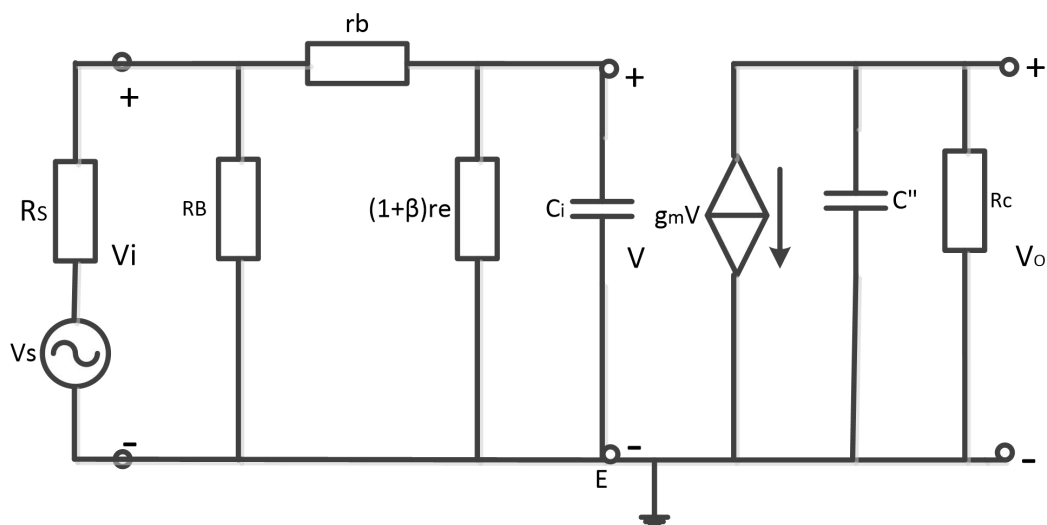
$$A_V = -\beta \frac{R_C}{h_{ie}} = -50 \times \frac{2k\Omega}{1.732k\Omega} = -57.7$$

$$R_i = R_B \parallel h_{ie} = 17.15k\Omega \parallel 1.732k\Omega = 1.57k\Omega$$

$$R_o = R_C = 2k\Omega$$

$$A_{V_S} = A_V \frac{R_B \parallel h_{ie}}{R_S + R_B \parallel h_{ie}} = -57.7 \times \frac{1.57k\Omega}{1k\Omega + 1.57k\Omega} = -35.2$$

- (2) 求高频时的源电压传递函数 $A_{V_S}(S)$ 及其 ω_{3dB}



由高频等效电路可得：

$$\begin{cases} C' = (1 + g_m R_C) C_C = \left(1 + \frac{1}{r_e} R_C\right) C_C = \left(1 + \frac{2000}{32}\right) \times 5 pF = 317.5 pF \\ C'' = \left(1 + \frac{1}{g_m R_C}\right) C_C = \left(1 + \frac{r_e}{R_C}\right) C_C = \left(1 + \frac{32}{2000}\right) \times 5 pF = 5.08 pF \end{cases}$$

$$C_i = C_\pi + C' = 100 pF + 317.5 pF = 417.5 pF$$

$$R'_S = R_B \parallel R_S = 17.15 k\Omega \parallel 1 k\Omega = 0.945 k\Omega$$

$$\begin{cases} v_o = -g_m V \frac{\frac{1}{SC''} R_C}{R_C + \frac{1}{SC''}} = -g_m V \frac{R_C}{1 + SC'' R_C} \\ V = \frac{R_B V_S}{R_S + R_B} \frac{\beta r_e \parallel \frac{1}{SC_i}}{(R_B \parallel R_S + r_b) + \beta r_e \parallel \frac{1}{SC_i}} \end{cases}$$

$$A_{v_s}(S) = \frac{v_o}{V_S} = A_{v_S} \frac{1}{1 + SC'' R_C} \frac{1}{1 + S \frac{(R_B + R'_S) \beta r_e}{r_b + R_S + \beta r_e} C_i}$$

代入数据，

$$A_{v_s}(S) = -35.2 \frac{1}{(1 + 10^{-8} S)(1 + 2.64 \times 10^{-7} S)}$$

$$\Rightarrow \omega_h = \frac{1}{2.64 \times 10^{-7}} = 3.79 \times 10^6 \text{ rad} / s$$

(3) 射极串小电阻后源电压增益

$$\omega_h = \frac{\omega_\beta}{D} \left[1 + \frac{\beta_0 (r_e + R_e)}{r_b + R_e + R'_S} \right]$$

$$\therefore \begin{cases} \omega_\beta = \frac{\omega_T}{\beta} \\ \omega_T = \frac{1}{r_e (C_\pi + C_C)} = 3 \times 10^8 \text{ rad} / s \\ D = 1 + \omega_T C_C R'_L = 1 + 3 \times 10^8 \times 5 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^3 = 4 \end{cases}$$

$$\omega_h = \frac{3 \times 10^8}{50 \times 4} \left[1 + \frac{50(32 + 20)}{100 + 20 + 945} \right] = 5.16 \times 10^6 \text{ rad} / s$$

题 3.35

题 3.35 图 P3.35 是一个简单的音频放大器输出级, 已知晶体管参数 $\beta_0 = 200$, $V_{BE(on)} = 0.7V$, 若要求放大器电压增益函数 A_{V_s} 的 3dB 下截止频率为 15Hz, 则电路中的 C_C 应取多大?

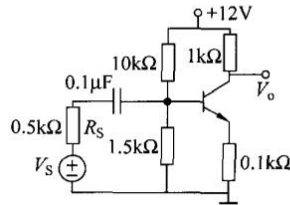


图 P3.34

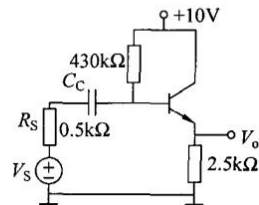


图 P3.35

$$\text{解: } I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_B}{1 + \beta} + R_E} = \frac{9.3V}{\frac{430k\Omega}{201} + 2.5k\Omega} = 2mA$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = 13\Omega \Rightarrow h_{ie} = r_b + (1 + \beta)r_e = 2.613k\Omega \quad (\text{取 } r_b = 0)$$

$$\omega = \frac{1}{C_C \{ [h_{ie} + (1 + \beta)R_E] \parallel R_B + R_S \}} = 2\pi f_L \Rightarrow C_C = 4.6 \times 10^{-8} F$$

题 3.36

题 3.36 在图 P3.36 电路中, 两个晶体管的 β 相同, $\beta = 40$, 静态时的输出电压 $V_o = 3V$, 试求

(1) 两管的静态工作点, 并计算出 R_B 值;

(2) 该两级放大器的中频电压增益 A_V 、 A_{V_s} ;

(3) 若用压降合适的二极管替代放大器中的 R_{E2} , 则中频电压增益 A_V 、 A_{V_s} 又为多少?

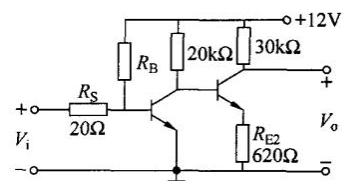


图 P3.36

解: (1) 两管的工作点, 并计算出 R_B 的值

$$I_{C2} = \frac{12V - V_o}{30k\Omega} = 0.3mA \Rightarrow I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta} = \frac{0.3mA}{40} = 0.0075mA \Rightarrow I_{E2} = 0.3075mA$$

$$V_{CE2} = 12V - I_{C2}R_{C2} - I_{E2}R_{E2} = 2.81V$$

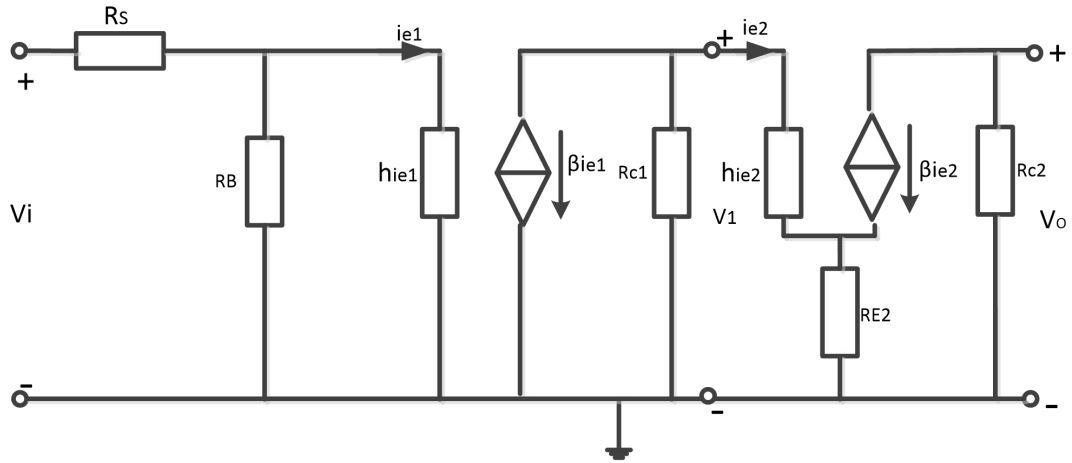
由回路方程,

$$12V - R_{C1}(I_{C1} + I_{B2}) - 0.7V - I_{E2}R_{E2} = 0 \Rightarrow I_{C1} = 0.548mA$$

$$V_{CE1} = 12V - (I_{C1} + I_{B2})R_{C1} = 0.89V$$

$$\text{由 } \frac{17-0.7}{R_B} = \frac{I_{C1}}{\beta} \Rightarrow R_B = 825k\Omega$$

(2) 该两级放大器的中频电压增益 A_V 、 A_{V_S}



$$r_{e1} = \frac{V_T}{I_{E1}} = 46.3\Omega \Rightarrow h_{ie1} = r_b + (1 + \beta)r_{e1} = 1.9k\Omega \text{ (取 } r_b = 0 \text{)}$$

$$r_{e2} = \frac{V_T}{I_{E2}} = 84.6\Omega \Rightarrow h_{ie2} = r_b + (1 + \beta)r_{e2} = 3.47k\Omega \text{ (取 } r_b = 0 \text{)}$$

$$R_{i1} = R_B \parallel h_{ie1} = 825k\Omega \parallel 1.9k\Omega \approx 1.9k\Omega$$

$$R_{i2} = h_{ie2} + (1 + \beta)R_{E2} = 28.89k\Omega$$

设第一级的输出电压为 V_1 ，其作为第二级的输入电压，有

$$\begin{cases} \frac{V_o}{V_1} = -\beta \frac{R_{C2}}{R_{i2}} \\ \frac{V_1}{V_i} = -\beta \frac{R_{C1} \parallel R_{i2}}{h_{ie1}} \end{cases} \Rightarrow A_V = \frac{V_o}{V_i} = \beta^2 \frac{R_{C1}}{h_{ie1}} \frac{R_{C2}}{R_{C1} + R_{i2}} = 1600 \frac{20k\Omega}{1.9k\Omega} \frac{30k\Omega}{28.89k\Omega + 20k\Omega} = 1.03 \times 10^4$$

$$A_{V_S} = \frac{R_{i1}}{R_{i1} + R_S} A_V = \frac{1.9k\Omega}{1.9k\Omega + 0.02k\Omega} \times 1.03 \times 10^4 = 1.02 \times 10^4$$

(3) 若用压降合适的二极管代替放大器中 R_{E2} ，则中频电压增益 A_V 、 A_{V_S} 又为多

少?

R_{E2} 上压降为 $V_{E2} = I_{E2} R_{E2} = 0.19V$ ，所以选择锗管，使其正向导通，

二极管的交流小电阻 $r_d = r_{e2} = 84.6\Omega$

则 $R'_{i2} = h_{ie2} + (1 + \beta)r_e = 6.94k\Omega$

$$A_v = \beta^2 \frac{R_{C1}}{h_{ie1}} \frac{R_{C2}}{R_{C1} + R'_{i2}} = 1600 \frac{20k\Omega}{1.9k\Omega} \frac{30k\Omega}{20k\Omega + 6.94k\Omega} = 1.88 \times 10^4$$

$$A_{v_s} = \frac{R_{i1}}{R_{i1} + R_s} A_v = \frac{1.9k\Omega}{1.9k\Omega + 0.02k\Omega} \times 1.88 \times 10^4 = 1.86 \times 10^4$$

题 3.37

题 3.37 多级放大器的电压增益函数为

$$A_v(S) = \frac{8 \times 10^{12} S^2 (S + 3)}{(S + 6)(S + 10)(S + 200)(S + 10^5)(S + 2 \times 10^5)}$$

求该多级放大器的中频增益和近似的 3dB 高频截止频率和低频截止频率。

解：

$$A_{v0} \approx \frac{8 \times 10^{12}}{10^5 \times 2 \times 10^5} = 400$$

由于低频端的主极点和其它极点相隔较远，所以

$$\omega_L = 200 \text{ rad/s}$$

高频端两个极点比较近，所以

$$\omega_h = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\omega_{h1}^2} + \frac{1}{\omega_{h2}^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{10^{10}} + \frac{1}{4 \times 10^{10}}}} = 8.9 \times 10^3 \text{ rad/s}$$