

3 半导体三极管及放大电路基础

3.1.1 测得某放大电路中 BJT 的三个电极 A、B、C 的对地电位分别为 $V_A = -9\text{ V}$, $V_B = -6\text{ V}$, $V_C = -6.2\text{ V}$, 试分析 A、B、C 中哪个是基极 b、发射极 e、集电极 c, 并说明此 BJT 是 NPN 管还是 PNP 管。

解 由于锗 BJT 的 $|V_{BE}| \approx 0.2\text{ V}$, 硅 BJT 的 $|V_{BE}| \approx 0.7\text{ V}$, 已知 BJT 的电极 B 的 $V_B = -6\text{ V}$, 电极 C 的 $V_C = -6.2\text{ V}$, 电极 A 的 $V_A = -9\text{ V}$, 故电极 A 是集电极。又根据 BJT 工作在放大区时, 必须保证发射结正偏、集电结反偏的条件可知, 电极 B 是发射极, 电极 C 是基极, 且此 BJT 为 PNP 管。

3.1.2 某放大电路中 BJT 三个电极 A、B、C 的电流如图题 3.1.2 所示, 用万用表直流电流挡测得 $I_A = -2\text{ mA}$, $I_B = -0.04\text{ mA}$, $I_C = +2.04\text{ mA}$, 试分析 A、B、C 中哪个是基极 b、发射极 e、集电极 c, 并说明此管是 NPN 管还是 PNP 管, 它的 $\beta = ?$

解 由 $I_A = -2\text{ mA}$, $I_B = -0.04\text{ mA}$ 可知, 图题 3.1.2 中电流 I_A 、 I_B 的方向与其实方向相反, 即 I_A 、 I_B 流入管子为正, 而 I_C 流出管子为正, 故此 BJT 为 NPN 管。由 BJT 的电流分配关系知, 电极 A 是集电极, B 是基极, C 是发射极。其

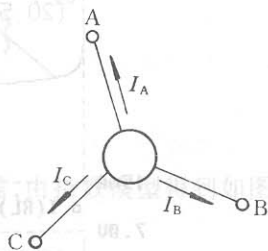
$$\beta = \frac{2\text{ mA}}{0.04\text{ mA}} = 50$$

3.1.3 有两个 BJT, 其中一个管子的 $\beta = 150$, $I_{CEO} = 200\text{ }\mu\text{A}$, 另一个管子的 $\beta = 50$, $I_{CEO} = 10\text{ }\mu\text{A}$, 其他参数一样, 你选择哪个管子? 为什么?

解 选择 $\beta = 50$, $I_{CEO} = 10\text{ }\mu\text{A}$, 即 I_{CEO} 较小的 BJT。 β 大的 BJT 虽然电流放大作用大, 但其 I_{CEO} 大, 使放大电路的温度稳定性差, 这是因为 I_{CEO} 受温度影响较大。此外, I_{CEO} 也是衡量 BJT 寿命的一个指标, I_{CEO} 小的 BJT 寿命要长些。

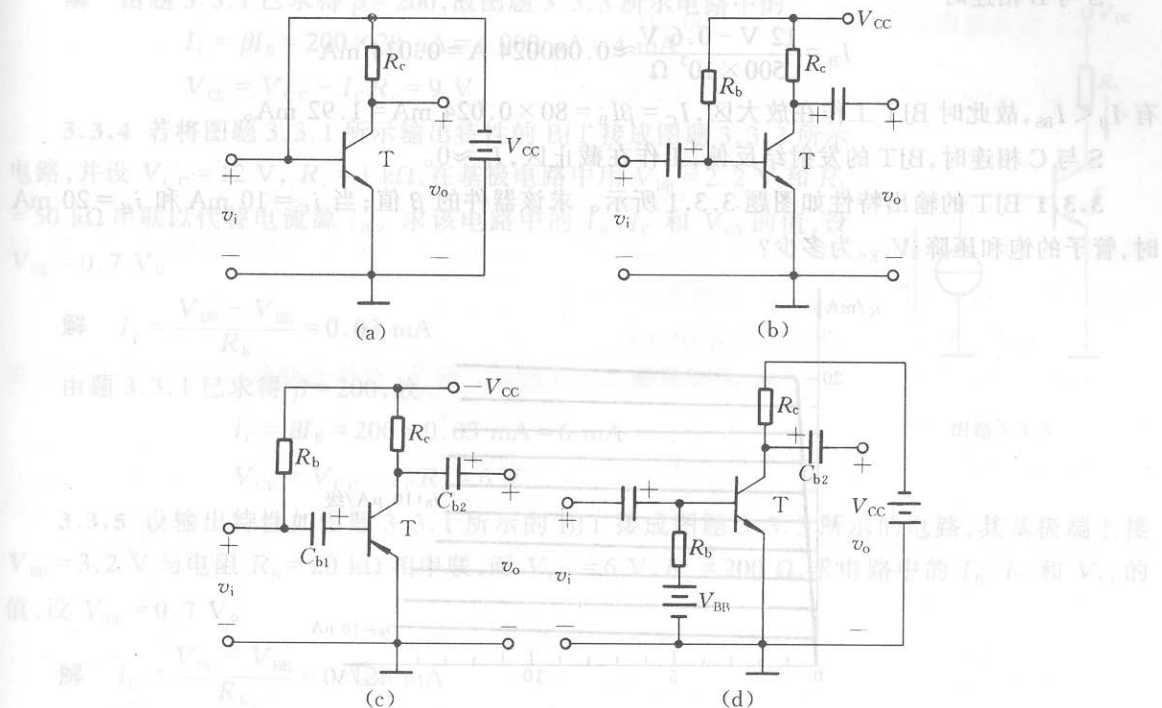
3.1.4 某 BJT 的极限参数 $I_{CM} = 100\text{ mA}$, $P_{CM} = 150\text{ mW}$, $V_{(BR)CEO} = 30\text{ V}$, 若它的工作电压 $V_{CE} = 10\text{ V}$, 则工作电流 I_C 不得超过多大? 若工作电流 $I_C = 1\text{ mA}$, 则工作电压的极限值应为多少?

解 BJT 工作时, 其电压和电流及功耗不能超过其极限值, 否则将损坏。当工作电压 V_{CE} 确定时, 应根据 P_{CM} 及 I_{CM} 确定工作电流 I_C , 即应满足 $I_C V_{CE} \leq P_{CM}$ 及 $I_C \leq I_{CM}$ 。当 $V_{CE} = 10\text{ V}$ 时, $I_C \leq \frac{P_{CM}}{V_{CE}} = 15\text{ mA}$, 此值小于 $I_{CM} = 100\text{ mA}$, 故此时工作电流不超过 15 mA 即可。同理, 当工作电流 I_C 确定时, 应根据 $I_C V_{CE} \leq P_{CM}$ 及 $V_{CE} \leq V_{(BR)CEO}$ 确定工作电压 V_{CE} 的大小。当 $I_C = 1\text{ mA}$ 时, 为同时满足上述两个条件, 则工作电压的极限值应为 30 V 。



图题 3.1.2

3.2.1 试分析图题 3.2.1 所示各电路对正弦交流信号有无放大作用。并简述理由。(设各电容的容抗可忽略)



图题 3.2.1

解 图题 3.2.1a 无放大作用。因 $R_b=0$, 一方面使发射结所加电压太高, 易烧坏管子; 另一方面使输入信号 v_i 被短路。

图题 3.2.1b 有交流放大作用, 电路偏置正常, 且交流信号能够传输。

图题 3.2.1c 无交流放大作用, 因电容 C_{b1} 隔断了基极的直流通路。

图题 3.2.1d 无交流放大作用, 因电源 V_{CC} 的极性接反。

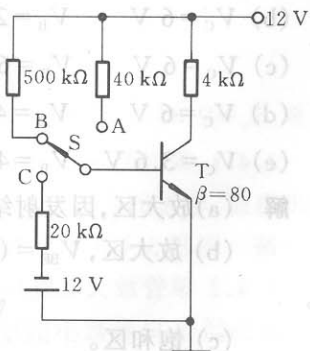
3.2.2 电路如图题 3.2.2 所示, 设 BJT 的 $\beta=80$, $V_{BE}=0.6\text{ V}$, I_{CEO} 、 V_{CES} 可忽略不计, 试分析当开关 S 分别接通 A、B、C 三位置时, BJT 各工作在其输出特性曲线的哪个区域, 并求出相应的集电极电流 I_C 。

解 S 与 A 相连时

$$I_B = \frac{12\text{ V} - 0.6\text{ V}}{40 \times 10^3\ \Omega} \approx 0.0003\text{ A} = 0.3\text{ mA}$$

$$\text{而 } I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{V_{CC}/R_C}{\beta} \approx 0.038\text{ mA}$$

故此时 BJT 工作在饱和区



图题 3.2.2

各臂)。由图题 3.3.1 可知, 当 $\Delta i_B = 10 \mu A$ 时, $\Delta i_C = 2 mA$, 故 $\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = 200$;

$$I_C \approx \frac{V_{CC}}{R_c} = 3 \text{ mA}$$

(初感同对容的容串

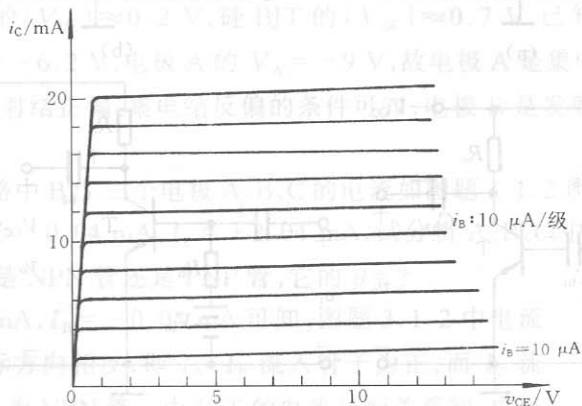
S 与 B 相连时

$$I_B = \frac{12 \text{ V} - 0.6 \text{ V}}{500 \times 10^3 \Omega} \approx 0.000024 \text{ A} = 0.024 \text{ mA}$$

有 $I_B < I_{BS}$, 故此时 BJT 工作在放大区, $I_C = \beta I_B = 80 \times 0.024 \text{ mA} = 1.92 \text{ mA}$ 。

S 与 C 相连时, BJT 的发射结反偏, 工作在截止区, $I_C \approx 0$ 。

3.3.1 BJT 的输出特性如图题 3.3.1 所示。求该器件的 β 值; 当 $i_C = 10 \text{ mA}$ 和 $i_C = 20 \text{ mA}$ 时, 管子的饱和压降 V_{CES} 为多少?



图题 3.3.1

解 由图题 3.3.1 可知, 当 $\Delta i_B = 10 \mu A$ 时, $\Delta i_C = 2 \text{ mA}$, 故 $\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = 200$;

当 $i_C = 10 \text{ mA}$ 时, $V_{CES} \approx 0.3 \text{ V}$; $i_C = 20 \text{ mA}$ 时, $V_{CES} \approx 0.8 \text{ V}$ 。

3.3.2 测量某硅 BJT 各电极对地的电压值如下, 试判别管子工作在什么区域。

(a) $V_C = 6 \text{ V}$ $V_B = 0.7 \text{ V}$ $V_E = 0 \text{ V}$

(b) $V_C = 6 \text{ V}$ $V_B = 2 \text{ V}$ $V_E = 1.3 \text{ V}$

(c) $V_C = 6 \text{ V}$ $V_B = 6 \text{ V}$ $V_E = 5.4 \text{ V}$

(d) $V_C = 6 \text{ V}$ $V_B = 4 \text{ V}$ $V_E = 3.6 \text{ V}$

(e) $V_C = 3.6 \text{ V}$ $V_B = 4 \text{ V}$ $V_E = 3.4 \text{ V}$

解 (a) 放大区, 因发射结正偏, 集电结反偏。

(b) 放大区, $V_{BE} = (2 - 1.3) \text{ V} = 0.7 \text{ V}$, $V_{CB} = (6 - 2) \text{ V} = 4 \text{ V}$, 发射结正偏, 集电结反偏。

(c) 饱和区。

(d) 截止区。

(e) 饱和区。

3.3.3 设输出特性如图题 3.3.1 所示的 BJT 接入图题 3.3.3 所示的电路,图中 $V_{CC}=15\text{ V}$, $R_c=1.5\text{ k}\Omega$, $i_B=20\text{ }\mu\text{A}$,求该器件的 Q 点。

解 由题 3.3.1 已求得 $\beta=200$,故图题 3.3.3 所示电路中的

$$I_C = \beta I_B = 200 \times 20\text{ }\mu\text{A} = 4\text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 9\text{ V}$$

3.3.4 若将图题 3.3.1 所示输出特性的 BJT 接成图题 3.3.3 所示电路,并设 $V_{CC}=12\text{ V}$, $R_c=1\text{ k}\Omega$,在基极电路中用 $V_{BB}=2.2\text{ V}$ 和 $R_b=50\text{ k}\Omega$ 串联以代替电流源 i_B 。求该电路中的 I_B 、 I_C 和 V_{CE} 的值,设 $V_{BE}=0.7\text{ V}$ 。

$$\text{解 } I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_b} = 0.03\text{ mA}$$

由题 3.3.1 已求得 $\beta=200$,故

$$I_C = \beta I_B = 200 \times 0.03\text{ mA} = 6\text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 6\text{ V}$$

3.3.5 设输出特性如图题 3.3.1 所示的 BJT 接成图题 3.3.3 所示的电路,其基极端上接 $V_{BB}=3.2\text{ V}$ 与电阻 $R_b=20\text{ k}\Omega$ 相串联,而 $V_{CC}=6\text{ V}$, $R_c=200\text{ }\Omega$,求电路中的 I_B 、 I_C 和 V_{CE} 的值,设 $V_{BE}=0.7\text{ V}$ 。

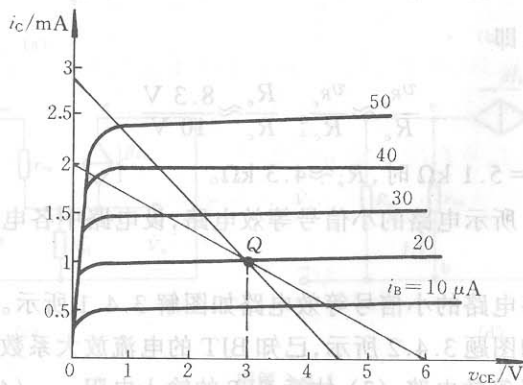
$$\text{解 } I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_b} = 0.125\text{ mA}$$

由题 3.3.1 已求得 $\beta=200$,故

$$I_C = \beta I_B = 200 \times 0.125\text{ mA} = 25\text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 1\text{ V}$$

3.3.6 图题 3.3.6 画出了某固定偏流放大电路中 BJT 的输出特性及交、直流负载线,试求:(1) 电源电压 V_{CC} ,静态电流 I_B 、 I_C 和管压降 V_{CE} 的值;(2) 电阻 R_b 、 R_c 的值;(3) 输出电压的最大不失真幅度;(4) 要使该电路能不失真地放大,基极正弦电流的最大幅值是多少?



图题 3.3.6

解 (1) 由图题 3.3.6 可知, 直流负载线与横坐标轴的交点即 V_{CC} 值的大小, 故 $V_{CC} = 6 \text{ V}$ 。由 Q 点的位置可知, $I_B = 20 \mu\text{A}$, $I_C = 1 \text{ mA}$, $V_{CE} = 3 \text{ V}$ 。

(2) 由基极回路得 $R_b \approx \frac{V_{CC}}{I_B} = 300 \text{ k}\Omega$

由集-射极回路得 $R_c = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} = 3 \text{ k}\Omega$

(3) 求输出电压的最大不失真幅度

由交流负载线与输出特性的交点可知, 在输入信号的正半周, 输出电压 v_{CE} 从 3 V 到 0.8 V , 变化范围为 2.2 V ; 在输入信号的负半周, 输出电压 v_{CE} 从 3 V 到 4.6 V , 变化范围为 1.6 V 。综合起来考虑, 输出电压的最大不失真幅度为 1.6 V 。

(4) 基极正弦电流的最大幅值是 $20 \mu\text{A}$ 。

3.3.7 设 PNP 型硅 BJT 的电路如图题 3.3.7 所示。问 v_B 在什么变化范围内, 使 T 工作在放大区? 令 $\beta = 100$ 。

解 从不进入饱和区角度考虑, 应有 $v_{EC} \geq 1 \text{ V}$, 即应满足

$$v_{EC} = V_{EE} - (-V_{CC}) - i_c(R_e + R_c) \geq 1 \text{ V}$$

$$v_{EC} = 10 \text{ V} + 10 \text{ V} - i_c(10 + 5) \times 10^3 \Omega \geq 1 \text{ V}$$

则应有 $i_c \leq 1.27 \text{ mA}$ 。

又 $v_E = V_{EE} - i_c R_e$, 将 $i_c \leq 1.27 \text{ mA}$ 代入此式, 则 $v_E \geq 10 \text{ V} - 1.27 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3 \text{ V}$, 即应有 $v_E \geq -2.7 \text{ V}$ 。

从不进入截止区的角度考虑, 应满足 $v_{EB} = 0.7 \text{ V}$, 即 $v_B = v_E - 0.7 \text{ V}$, 故 $v_B \geq -3.4 \text{ V}$ 时, T 工作在放大区。

3.3.8 在图题 3.3.7 中, 试重新选取 R_e 和 R_c 的值, 以便当 $v_B = 1 \text{ V}$ 时, 集电极对地电压 $v_C = 0$ 。

解 因 $v_B = 1 \text{ V}$ 时, $v_C = 0 \text{ V}$, $v_E = v_B + v_{EB} = 1.7 \text{ V}$, 则

$$v_{R_e} = V_{EE} - v_E = 10 \text{ V} - 1.7 \text{ V} = 8.3 \text{ V}, v_{R_c} = 10 \text{ V}$$

又因 $\beta = 100 \gg 1$, 则 $i_E \approx i_C$, 即

$$\frac{v_{R_e}}{R_e} \approx \frac{v_{R_c}}{R_c} \quad \frac{R_e}{R_c} \approx \frac{8.3 \text{ V}}{10 \text{ V}}$$

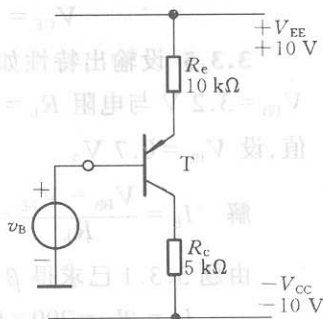
故取 $R_e \approx 0.83 R_c$, 当取 $R_c = 5.1 \text{ k}\Omega$ 时, $R_e \approx 4.3 \text{ k}\Omega$ 。

3.4.1 画出图题 3.4.1 所示电路的小信号等效电路, 设电路中各电容容抗均可忽略, 并注意标出电压、电流的正方向。

解 图题 3.4.1 所示各电路的小信号等效电路如图解 3.4.1 所示。

3.4.2 单管放大电路如图题 3.4.2 所示, 已知 BJT 的电流放大系数 $\beta = 50$ 。(1) 估算 Q 点; (2) 画出简化 H 参数小信号等效电路; (3) 估算 BJT 的输入电阻 r_{be} ; (4) 如输出端接入 $4 \text{ k}\Omega$ 的电阻负载, 计算 $\dot{A}_v = \dot{V}_o / \dot{V}_i$ 及 $\dot{A}_{vs} = \dot{V}_o / \dot{V}_s$ 。

解 (1) 估算 Q 点

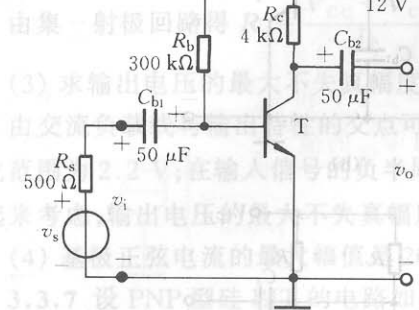


图题 3.3.7

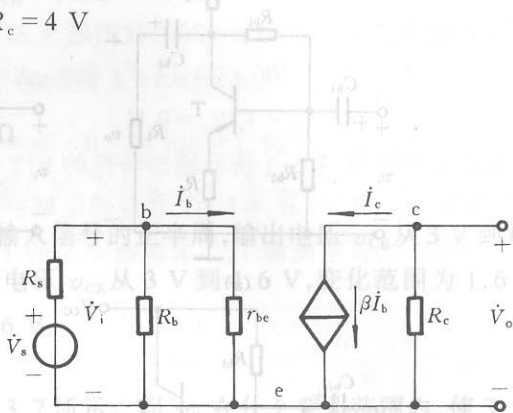
解 (1) 由图题 3.3.6 可知 $I_B \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = 40 \mu\text{A}$ $I_C = \beta I_B = 2 \text{ mA}$ 值的大小, 故 $V_{CE} = 6 \text{ V}$ 。

由 Q 点的位置可知, $I_{BQ} = 40 \mu\text{A}$, $I_{CQ} = 2 \text{ mA}$, $V_{CEQ} = 6 \text{ V}$ 。

(2) 由基极回路得 $R_b = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{BQ}} = \frac{12 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{40 \mu\text{A}} \approx 282.5 \text{ k}\Omega$ 。



图题 3.4.2



图解 3.4.2

(2) 简化的 H 参数小信号等效电路如图解 3.4.2 所示。

(3) 求 r_{be}

$$r_{be} = 200 \Omega + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = 200 \Omega + (1 + 50) \frac{26 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = 863 \Omega$$

(4) 求 $\dot{A}_v$

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = - \frac{\beta R'_L}{r_{be}} = - \frac{\beta (R_c \parallel R_L)}{r_{be}} \approx -116$$

(5) 求 $\dot{A}_{vs}$

$$\dot{A}_{vs} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} = \dot{A}_v \frac{R_i}{R_i + R_s} = \dot{A}_v \frac{R_b \parallel r_{be}}{R_s + (R_b \parallel r_{be})} \approx -73$$

3.4.3 一固定偏流放大电路, 要求 $|\dot{A}_v| \geq 100$, $I_C = 1 \text{ mA}$, $V_{CC} = 12 \text{ V}$, BJT 的 $\beta = 20$, 确定 R_b 、 R_c , 并计算 V_{CE} 。设 $R_L = \infty$ 。

解 由 $I_C = 1 \text{ mA}$, 求得 $I_B = I_C / \beta = 50 \mu\text{A}$, 则

$$r_{be} = 200 \Omega + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \approx 750 \Omega$$

$$R_b \approx \frac{V_{CC}}{I_B} = 240 \text{ k}\Omega$$

由 3.4.2 单管放大电路如图题 3.4.2 所示, 已知 BJT 的电流放大系数 $\beta = 50$ 。(1) 估算 Q 点;

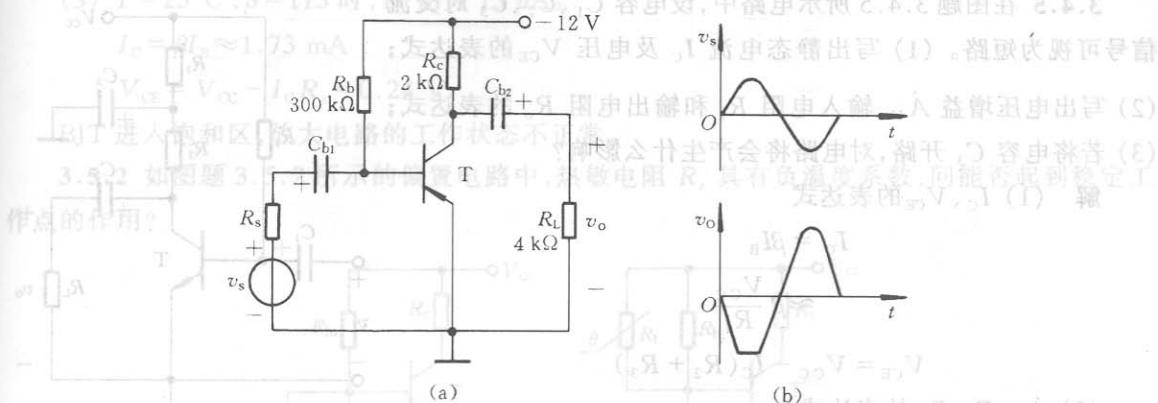
(2) 画出简化 H 参数小信号等效电路; (3) 估算电路的输入电阻 r_{be} ; (4) 如输出端接入 $4 \text{ k}\Omega$ 的电阻负载, 计算 $\dot{A}_v = \dot{V}_o / \dot{V}_i$ 及 $\dot{A}_{vs} = \dot{V}_o / \dot{V}_s$ 。

求得 (1) 估算 Q 点

$$\beta_{(75^{\circ}\text{C})} = \beta_{(25^{\circ}\text{C})} [1 + (75^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \frac{R_c}{V_{CE}}] = 60(1 + 50 \times 0.5\%) = 75$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 8.25 \text{ V} \quad V_{BE(75^{\circ}\text{C})} = V_{BE(25^{\circ}\text{C})} - (75^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \frac{V_{BE(25^{\circ}\text{C})}}{100} = 0.7 \text{ V} - 0.1 \text{ V} = 0.6 \text{ V}$$

3.4.4 电路如图题 3.4.4 所示, 已知 BJT 的 $\beta = 100$, $V_{BE} = -0.7 \text{ V}$ 。(1) 试估算该电路的 Q 点;(2) 画出简化的 H 参数小信号等效电路;(3) 求该电路的电压增益 $\dot{A}_v$, 输入电阻 R_i , 输出电阻 R_o ;(4) 若 v_o 中的交流成分出现图题 3.4.4b 所示的失真现象, 问是截止失真还是饱和失真? 为消除此失真, 应调整电路中的哪个元件? 如何调整?



图题 3.4.4

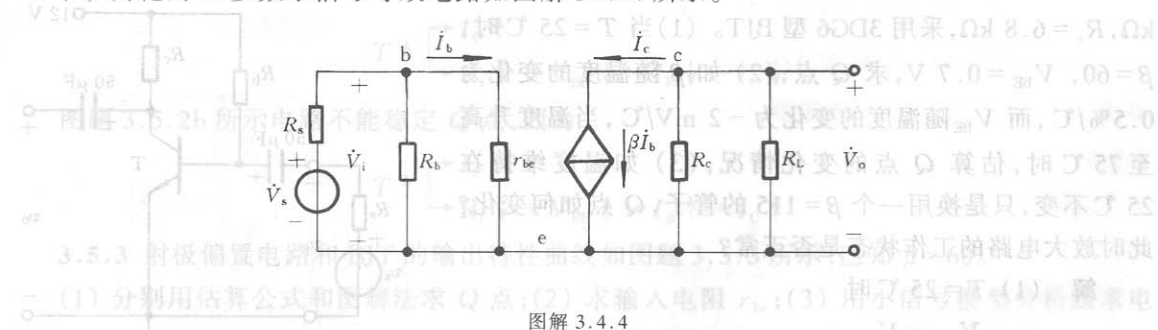
解 (1) 估算 Q 点

$$I_B \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = 40 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 4 \text{ mA}$$

$$-V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 4 \text{ V}$$

(2) 简化的 H 参数小信号等效电路如图解 3.4.4 所示。



图解 3.4.4

(3) 求 $\dot{A}_v$, R_i , R_o 。

BJT 的输入电阻求 Q 点:

$$r_{be} = 200 \Omega + (1 + 100) \frac{26 \text{ mV}}{4 \text{ mA}} \approx 857 \Omega$$

$$\dot{A}_v = -\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{r_{be}} \approx -155.6$$

$$R_i = R_b \parallel r_{be} \approx r_{be} = 857 \Omega$$

$$R_o \approx R_c = 2 \text{ k}\Omega$$

(4) 因图题 3.4.4a 中的 BJT 是 PNP 管, 故图题 3.4.4b 中出现的 v_o 失真截止失真; 应调整 R_b , 使之减小, 可消除此失真。

3.4.5 在图题 3.4.5 所示电路中, 设电容 C_1 、 C_2 、 C_3 对交流信号可视为短路。(1) 写出静态电流 I_C 及电压 V_{CE} 的表达式;

(2) 写出电压增益 $\dot{A}_v$ 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 的表达式;

(3) 若将电容 C_3 开路, 对电路将会产生什么影响?

解 (1) I_C 、 V_{CE} 的表达式

$$I_C = \beta I_B$$

$$\approx \beta \frac{V_{CC}}{R_1}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_2 + R_3)$$

(2) $\dot{A}_v$ 、 R_i 、 R_o 的表达式

$$\dot{A}_v = -\frac{\beta(R_2 \parallel R_L)}{r_{be}}$$

$$R_i = R_1 \parallel r_{be} \quad R_o \approx R_2$$

(3) C_3 开路后, 将使电压增益的大小增加

$$\dot{A}_v = -\frac{\beta[(R_2 + R_3) \parallel R_L]}{r_{be}}$$

同时 R_o 也将增加, $R_o \approx R_2 + R_3$ 。

3.5.1 对固定偏流电路, 如 $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_b = 750 \text{ k}\Omega$, $R_c = 6.8 \text{ k}\Omega$, 采用 3DG6 型 BJT。(1) 当 $T = 25^\circ\text{C}$ 时, $\beta = 60$, $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, 求 Q 点; (2) 如 β 随温度的变化为 $0.5\%/^\circ\text{C}$, 而 V_{BE} 随温度的变化为 $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, 当温度升高至 75°C 时, 估算 Q 点的变化情况; (3) 如温度维持在 25°C 不变, 只是换用一个 $\beta = 115$ 的管子, Q 点如何变化? 此时放大电路的工作状态是否正常?

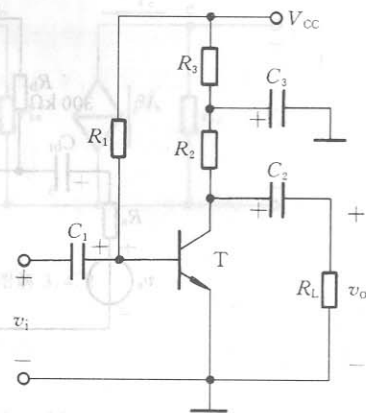
解 (1) $T = 25^\circ\text{C}$ 时

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx 15 \mu\text{A}$$

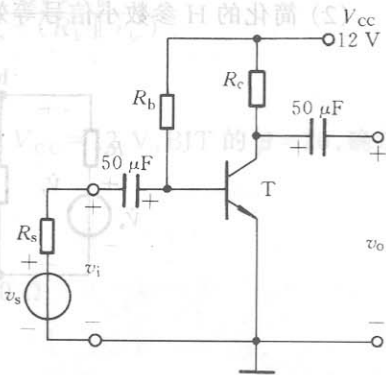
$$I_C = \beta I_B = 0.9 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 5.88 \text{ V}$$

(2) $T = 75^\circ\text{C}$ 时



图题 3.4.5



图题 3.5.1

$$\beta_{(75^{\circ}\text{C})} = \beta_{(25^{\circ}\text{C})} [1 + (75^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \times 0.5\% / ^{\circ}\text{C}] = 60(1 + 50 \times 0.5\%) = 75$$

$$V_{\text{BE}(75^{\circ}\text{C})} = V_{\text{BE}(25^{\circ}\text{C})} - (75^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \times 0.002 \text{ V}/^{\circ}\text{C} = 0.7 \text{ V} - 0.1 \text{ V} = 0.6 \text{ V}$$

$$I_{\text{B}} = \frac{V_{\text{CC}} - V_{\text{BE}(75^{\circ}\text{C})}}{R_{\text{b}}} = 15.2 \mu\text{A}$$

$$I_{\text{C}} = \beta_{(75^{\circ}\text{C})} I_{\text{B}} = 1.14 \text{ mA}$$

$$V_{\text{CE}} = V_{\text{CC}} - I_{\text{C}} R_{\text{c}} = 12 \text{ V} - 1.14 \times 10^{-3} \text{ A} \times 0.8 \times 10^3 \Omega \approx 4.25 \text{ V}$$

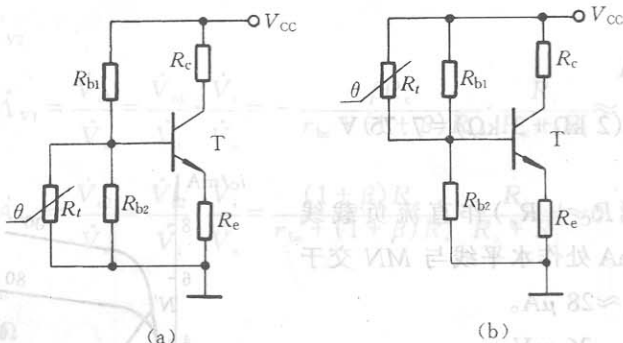
(3) $T = 25^{\circ}\text{C}$, $\beta = 115$ 时, I_{B} 仍为 $15 \mu\text{A}$ 。

$$I_{\text{C}} = \beta I_{\text{B}} \approx 1.73 \text{ mA}$$

$$V_{\text{CE}} = V_{\text{CC}} - I_{\text{C}} R_{\text{c}} = 0.24 \text{ V}$$

BJT 进入饱和区, 放大电路的工作状态不正常。

3.5.2 如图题 3.5.2 所示的偏置电路中, 热敏电阻 R_{t} 具有负温度系数, 问能否起到稳定工作点的作用?



图题 3.5.2

解 图题 3.5.2a 所示电路能稳定 Q 点, 过程如下:

$$\begin{aligned} T \uparrow & \rightarrow I_{\text{C}} \uparrow \\ & \rightarrow R_{\text{t}} \downarrow \rightarrow V_{\text{BE}} \downarrow \rightarrow I_{\text{B}} \downarrow \rightarrow I_{\text{C}} \downarrow \end{aligned}$$

图题 3.5.2b 所示电路不能稳定 Q 点, 因为

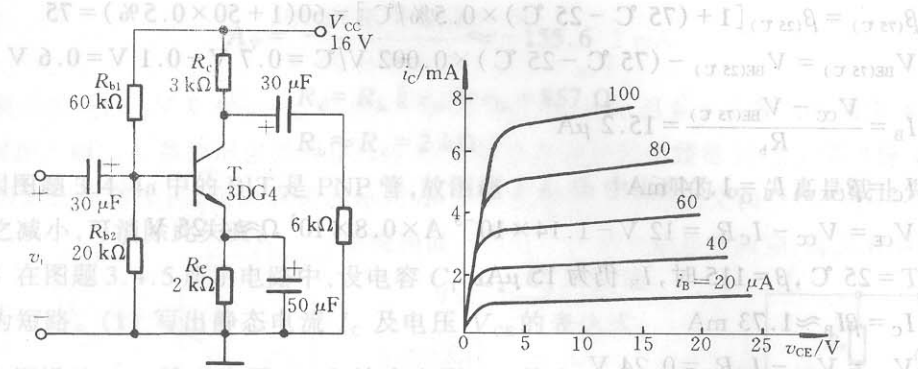
$$\begin{aligned} T \uparrow & \rightarrow I_{\text{C}} \uparrow \\ & \rightarrow R_{\text{t}} \downarrow \rightarrow V_{\text{BE}} \uparrow \rightarrow I_{\text{B}} \uparrow \rightarrow I_{\text{C}} \uparrow \end{aligned}$$

3.5.3 射极偏置电路和 BJT 的输出特性曲线如图题 3.5.3 所示, 已知 $\beta = 60$ 。

(1) 分别用估算公式和图解法求 Q 点; (2) 求输入电阻 r_{be} ; (3) 用小信号模型分析法求电压增益 $\dot{A}_{\text{v}}$; (4) 求输出电压最大不失真幅度; (5) 若电路其他参数不变, 如果要使 $V_{\text{CE}} = 4 \text{ V}$, 问上偏流电阻为多大?

解 (1) 估算法求 Q 点:

$$V_{\text{B}} = \frac{10}{20 + 60} \times 16 \text{ V} = 4 \text{ V}$$



图题 3.5.3

$$I_C = \frac{V_B - V_{BE}}{R_e} = 1.65 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \approx 28 \mu\text{A}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(2 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega) = 7.75 \text{ V}$$

图解法求 Q 点:

由 $v_{CE} = V_{CC} - i_C(R_C + R_e)$ 作直流负载线 MN, 由纵轴 $I_C = 1.65 \text{ mA}$ 处作水平线与 MN 交于 Q 点, 则 $V_{CE} \approx 7.8 \text{ V}$, $I_B \approx 28 \mu\text{A}$ 。

$$(2) r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \approx 1.2 \text{ k}\Omega$$

$$(3) \dot{A}_V = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -100, \text{ 其中}$$

$$R'_L = R_C \parallel R_L = \frac{3 \times 6}{3 + 6} \text{ k}\Omega = 2 \text{ k}\Omega$$

(4) 由交流负载线 $M'N'$ 与输出特性曲线的交点可知, 输出电压的最大不失真幅度 $V_{om} \approx 11.1 \text{ V} - 7.8 \text{ V} = 3.3 \text{ V}$ 。

(5) 当 $V_{CE} = 4 \text{ V}$ 时

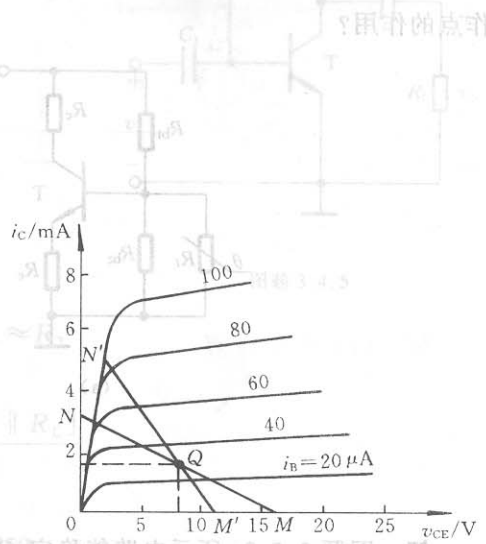
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_e} = 2.4 \text{ mA}$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = I_C R_e + V_{BE} = 5.5 \text{ V}$$

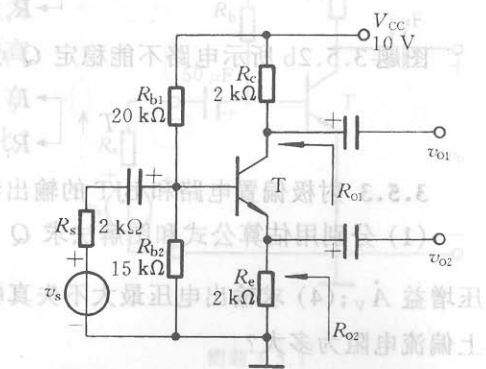
$$\text{上偏流电阻 } R_{b1} = \frac{V_{CC} - V_B}{V_B} \cdot R_{b2} \approx 38.2 \text{ k}\Omega$$

3.5.4 电路如图题 3.5.4 所示, 设 $\beta = 100$, 试求: (1)

Q 点; (2) 电压增益 $\dot{A}_{V1} = \dot{V}_{o1} / \dot{V}_s$ 和 $\dot{A}_{V2} = \dot{V}_{o2} / \dot{V}_s$;



图解 3.5.3



图题 3.5.4

(3) 输入电阻 R_i ; (4) 输出电阻 R_{o1} 和 R_{o2} 。

解 (1) 求 Q 点

$$V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} \approx 4.3 \text{ V}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_e} = 1.8 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_c + R_e)$$

$$= 2.8 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 18 \text{ } \mu\text{A}$$

(2) 求 r_{be} 及 R_i $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \approx 1.66 \text{ k}\Omega$

$$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \approx 8.2 \text{ k}\Omega$$

(3) 求 $\dot{A}_{v1}$ 、 $\dot{A}_{v2}$

$$\dot{A}_{v1} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} = - \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} \approx -0.79$$

$$\dot{A}_{v2} = \frac{\dot{V}_{o2}}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_{o2}}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} = \frac{(1 + \beta)R_e}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} \approx 0.8$$

(4) 求 R_{o1} 、 R_{o2}

$$R_{o1} \approx R_c = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{o2} = R_e \parallel \frac{r_{be} + (R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel R_s)}{1 + \beta} \approx 31 \text{ } \Omega$$

3.5.5 在图题 3.5.5 所示的电路中, v_s 为正弦波小信号, 其平均值为 0, BJT 的 $\beta = 100$ 。

(1) 为使发射极电流 I_E 约为 1 mA, 求 R_e 的值; (2) 如需建立集电极电压 V_C 约为 +5 V, 求 R_c 的值; (3) 设 $R_L = 5 \text{ k}\Omega$, 求 $\dot{A}_{v_s}$ 。电路中的 C_{b1} 和 C_{b2} 的容抗可忽略。取 $R_s = 500 \text{ } \Omega$ 。

解 (1) 求 R_e

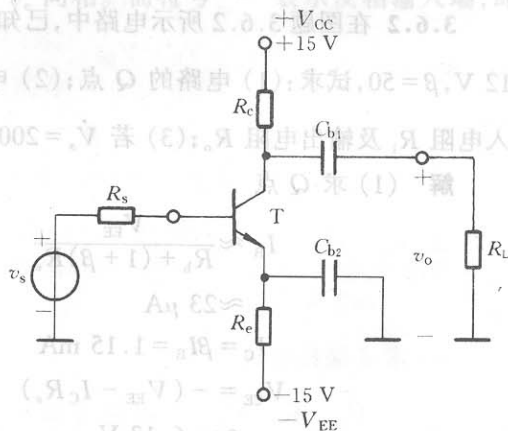
因 $I_B = \frac{I_E}{\beta} = 0.01 \text{ mA}$

故 $V_B \approx 0, V_E = -0.7 \text{ V}$

$$R_e = \frac{V_{R_e}}{I_E} = \frac{V_E - V_{EE}}{I_E} = 14.3 \text{ k}\Omega$$

(2) $R_c = \frac{V_{CC} - V_C}{I_E}$

$$= 10 \text{ k}\Omega$$



图题 3.5.5

(3) 求 $\dot{A}_{V_s}$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \approx 2.83 \text{ k}\Omega$$

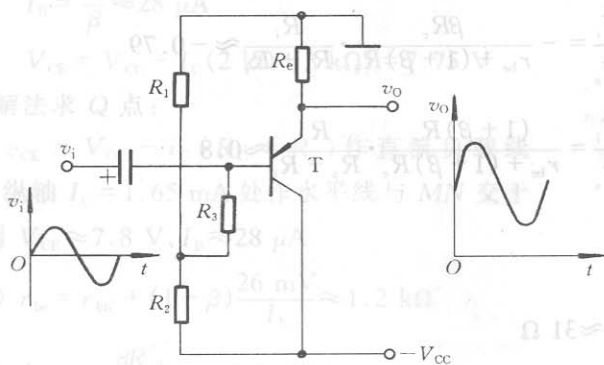
$$R_i = r_{be}$$

$$\dot{A}_{V_s} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} = \dot{A}_v \frac{R_i}{R_s + R_i} = - \frac{\beta(R_c \parallel R_L \parallel r_{ce})}{r_{be}} \times \frac{r_{be}}{R_s + r_{be}}$$

设 $r_{ce} \gg R_c, r_{ce} \gg R_L$, 则 $\dot{A}_{V_s} \approx - \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{R_s + r_{be}} \approx -100$

3.6.1 图题 3.6.1 所示电路属于何种组态? 其输出电压 v_o 的波形是否正确? 若有错, 请改正。

解 图题 3.6.1 所示电路是共集电极电路。因为其中 BJT 为 PNP 管, 所以 v_o 波形应改为如图解 3.6.1 所示。



图题 3.6.1

图解 3.6.1

3.6.2 在图题 3.6.2 所示电路中, 已知 $R_b = 260 \text{ k}\Omega, R_e = R_L = 5.1 \text{ k}\Omega, R_s = 500 \Omega, V_{EE} = 12 \text{ V}, \beta = 50$, 试求: (1) 电路的 Q 点; (2) 电压增益 $\dot{A}_v$ 、输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o ; (3) 若 $\dot{V}_s = 200 \text{ mV}$, 求 $\dot{V}_o$ 。

解 (1) 求 Q 点

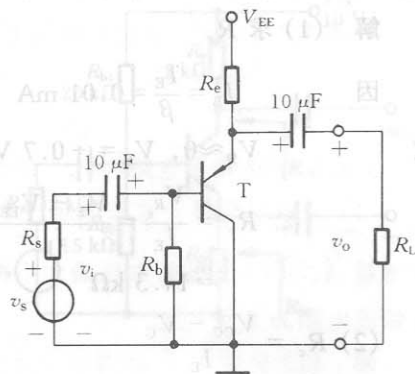
$$I_B \approx \frac{V_{EE}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

$$\approx 23 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 1.15 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = - (V_{EE} - I_C R_e)$$

$$\approx -6.13 \text{ V}$$



图题 3.6.2

(2) 求 $\dot{A}_v, R_i, R_o$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \approx 1.35 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_v = \frac{(1 + \beta)(R_e \parallel R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e \parallel R_L)} \approx 0.99$$

$$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta)(R_e \parallel R_L)] \approx 87.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_e \parallel \frac{r_{be} + R_b \parallel R_s}{1 + \beta} \approx 36 \text{ }\Omega$$

(3) $\dot{V}_s = 200 \text{ mV}$ 时

$$\dot{V}_o = \dot{A}_v \dot{V}_i = \dot{A}_v \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \dot{V}_s \approx 197 \text{ mV}$$

3.6.3 共基极电路如图题 3.6.3 所示。射极电路里接入一恒流源, 设 $\beta = 100$, $R_s = 0$, $R_L = \infty$ 。试确定电路的电压增益、输入电阻和输出电阻。

$$\begin{aligned} \text{解 } r_{be} &= r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \\ &= 2.8 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

其中 $I_E = 1.01 \text{ mA}$ 。

$$\dot{A}_v = \frac{\beta R'_L}{r_{be}} \approx 268$$

$$R_i = \frac{r_{be}}{1 + \beta} \approx 28 \text{ }\Omega$$

$$R_o \approx R_c = 7.5 \text{ k}\Omega$$

3.6.4 电路如图题 3.6.4a 所示。BJT 的电流放大系数为 β , 输入电阻为 r_{be} , 略去了偏置电路。

试求下列三种情况下的电压增益 $\dot{A}_v$ 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o : ① $v_{s2} = 0$, 从集电极输出; ② $v_{s1} = 0$, 从集电极输出; ③ $v_{s2} = 0$, 从发射极输出。并指出上述①、②两种情况的相位关系能否用图 b 来表示? 符号“+”表示同相输入端, 即 v_c 与 v_e 同相。而符号“-”表示反相输入端, 即 v_c 与 v_b 反相。

$$\text{解 } ① \dot{A}_v = - \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

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

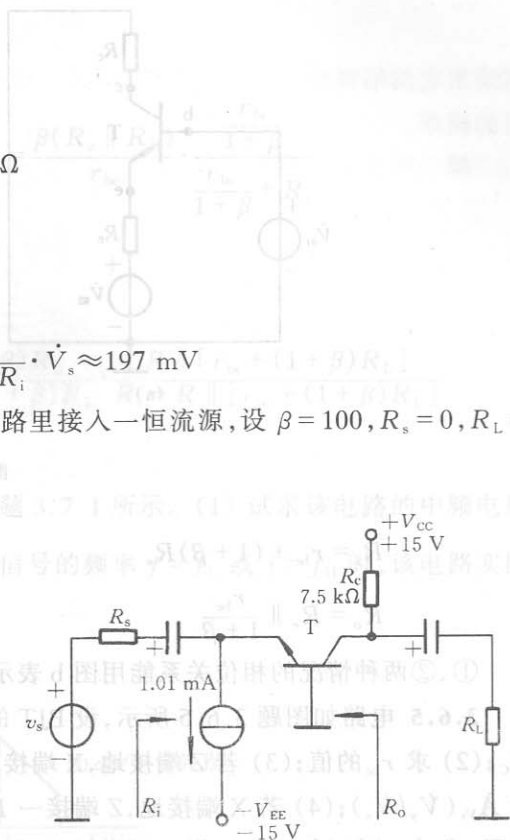
$$R_o \approx R_c$$

$$② \dot{A}_v = \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

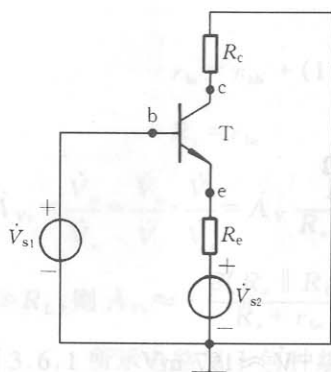
$$R_i = R_e + \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

$$R_o \approx R_c$$

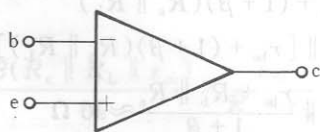
$$③ \dot{A}_v = \frac{(1 + \beta) R_e}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$



图题 3.6.3



(a)



(b)

图题 3.6.4

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

$$R_o = R_e \parallel \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

①、②两种情况的相位关系能用图 b 表示,即将 v_{s1} 加于“-”端, v_{s2} 加于“+”端。

3.6.5 电路如图题 3.6.5 所示,设 BJT 的 $\beta = 100$ 。(1) 求各电极的静态电压值 V_B 、 V_E 及 V_C ; (2) 求 r_{be} 的值; (3) 若 Z 端接地, X 端接信号源且 $R_s = 10 \text{ k}\Omega$, Y 端接一 $10 \text{ k}\Omega$ 的负载电阻, 求 $\dot{A}_{v_s} (\dot{V}_y / \dot{V}_s)$; (4) 若 X 端接地, Z 端接一 $R_s = 200 \Omega$ 的信号电压 $\dot{V}_s$, Y 端接一 $10 \text{ k}\Omega$ 的负载电阻, 求 $\dot{A}_{v_s} (\dot{V}_y / \dot{V}_s)$; (5) 若 Y 端接地, X 端接一内阻 R_s 为 $100 \text{ k}\Omega$ 的信号电压 $\dot{V}_s$, Z 端接一负载电阻 $1 \text{ k}\Omega$, 求 $\dot{A}_{v_s} (\dot{V}_z / \dot{V}_s)$ 。电路中容抗可忽略。

解 (1) 求 V_B 、 V_E 及 V_C

$$V_B = -I_B R = -\frac{I_E}{\beta} R$$

$$= -0.1 \text{ V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

$$= -0.8 \text{ V}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_c$$

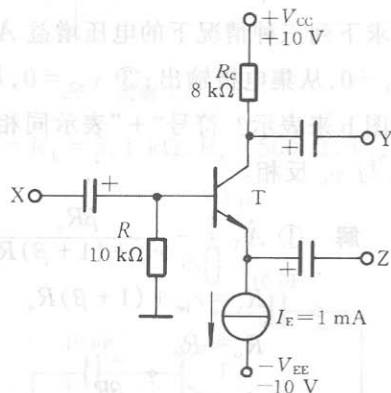
$$= 2 \text{ V}$$

$$(2) r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E}$$

$$\approx 2.83 \text{ k}\Omega$$

(3) 求 Z 端接地时的 $\dot{A}_{v_s}$

$$\dot{A}_{v_s} = \frac{\dot{V}_y}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_y}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} = -\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{r_{be}} \cdot \frac{R \parallel r_{be}}{R_s + R \parallel r_{be}}$$



图题 3.6.5

≈ -28.42

(4) 求 X 端接地时的 $\dot{A}_{V_s}$

$$\dot{A}_{V_s} = \frac{\dot{V}_y}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_y}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} = \dot{A}_V \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} = \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{r_{be}} \cdot \frac{r_{be}}{1 + \beta} \cdot \frac{r_{be}}{1 + \beta + R_s}$$

$$\approx 19.47$$

(5) 求 Y 端接地时的 $\dot{A}_{V_s}$

$$\dot{A}_{V_s} = \frac{\dot{V}_z}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_z}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} = \dot{A}_V \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \approx \frac{(1 + \beta)R_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_L} \cdot \frac{R \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R_L]}{R_s + R \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R_L]}$$

$$\approx 0.08$$

3.7.1 某放大电路中 $\dot{A}_V$ 的对数幅频特性如图题 3.7.1 所示。(1) 试求该电路的中频电压增益 $|\dot{A}_{VM}|$, 上限频率 f_H , 下限频率 f_L ; (2) 当输入信号的频率 $f = f_L$ 或 $f = f_H$ 时, 该电路实际的电压增益是多少分贝?



图题 3.7.1

解 (1) 由图题 3.7.1 可知, 中频电压增益 $|\dot{A}_{VM}| = 1000$, 上限频率 $f_H = 10^8$ Hz, 下限频率 $f_L = 10^2$ Hz。

(2) 当 $f = f_L$ 或 $f = f_H$ 时, 实际的电压增益是 57 dB。

3.7.2 已知某放大电路电压增益的频率特性表达式为

$$A_V = \frac{100j \frac{f}{10}}{\left(1 + j \frac{f}{10}\right) \left(1 + j \frac{f}{10^5}\right)} \quad (\text{式中 } f \text{ 的单位为 Hz})$$

试求: 该电路的上、下限频率, 中频电压增益的分贝数, 输出电压与输入电压在中频区的相位差。

解 该电路的上限频率 $f_H = 10^5$ Hz = 100 kHz

下限频率 $f_L = 10$ Hz

中频电压增益 $A_{VM}(\text{dB}) = 40$ dB

v_o 与 v_i 在中频区的相位差为 0°

3.7.3 一放大电路的增益函数为

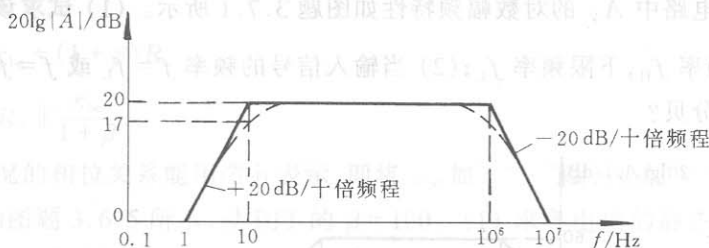
$$A(s) = 10 \frac{s}{s + 2\pi \times 10} \cdot \frac{1}{1 + s/(2\pi \times 10^6)}$$

试绘出它的幅频响应的波特图,并求出中频增益、下限频率 f_L 和上限频率 f_H 以及增益下降到 1 时的频率。

解 对于实际频率而言,可用 $s = j2\pi f$ 代入原增益传递函数表达式,得

$$\begin{aligned} \dot{A} &= 10 \frac{j2\pi f}{j2\pi f + 2\pi \times 10} \cdot \frac{1}{1 + \frac{j2\pi f}{2\pi \times 10^6}} \\ &= \frac{10}{1 - j\frac{10}{f}} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{f}{10^6}} \end{aligned}$$

由此式可知,中频增益 $|\dot{A}_M| = 10$, $f_L = 10$ Hz, $f_H = 10^6$ Hz。其幅频响应的波特图如图解 3.7.3 所示。增益下降到 1 时的频率为 1 Hz 及 10 MHz。



图解 3.7.3

3.7.4 一单级阻容耦合共射放大电路的通频带是 50 Hz ~ 50 kHz, 中频电压增益 $|\dot{A}_{VM}| = 40$ dB, 最大不失真交流输出电压范围是 -3 V ~ +3 V。(1) 若输入一个 $10\sin(4\pi \times 10^3 t)$ mV 的正弦波信号, 输出波形是否会产生频率失真和非线性失真? 若不失真, 则输出电压的峰值是多大? $\dot{V}_o$ 与 $\dot{V}_i$ 间的相位差是多少? (2) 若 $v_i = 40\sin(4\pi \times 25 \times 10^3 t)$ mV, 重复回答(1)的问题; (3) 若 $v_i = 10\sin(4\pi \times 50 \times 10^3 t)$ mV, 输出波形是否会失真?

解 (1) 此时输入正弦波信号的频率 $f = 2$ kHz, 在 50 Hz ~ 50 kHz 的通频带内, $|\dot{A}_V| = |\dot{A}_{VM}| = 100$, 输出电压的峰值为

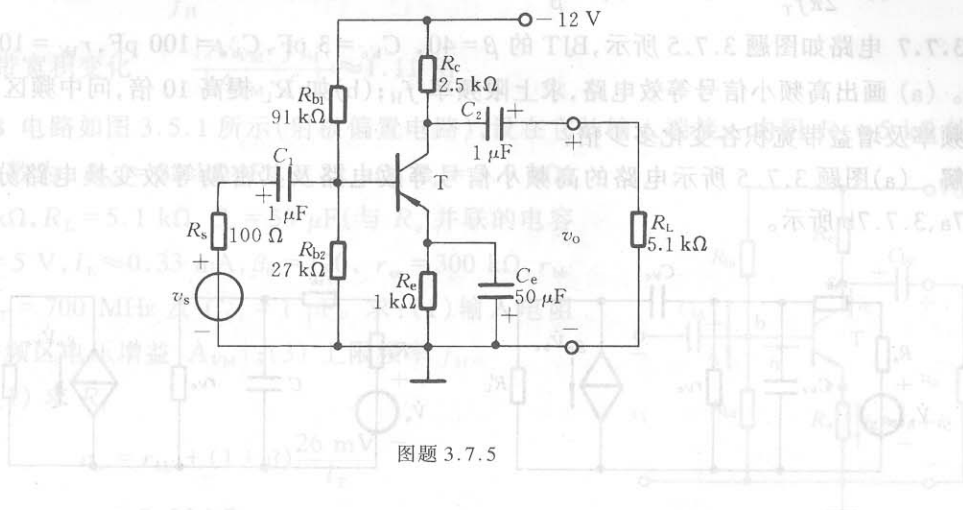
$V_{om} = A_V V_{im} = 100 \times 10 \text{ mV} = 1000 \text{ mV} = 1 \text{ V}$, 所以输出波形不会产生频率失真和非线性失真。 $\dot{V}_o$ 与 $\dot{V}_i$ 间的相位差是 -180° 。

(2) 此时输入信号的频率 $f = 2 \times 25 \times 10^3 \text{ Hz} = 50 \text{ kHz} = f_H$, 输出波形的峰值 $V_{om} = 0.707 A_{VM} V_{im} = 0.707 \times 100 \times 40 \text{ mV} = 2.83 \text{ V}$, 输出波形不失真。 v_o 与 v_i 间的相位差是 -225° 。

(3) 此时输入信号的频率 $f = 2 \times 50 \times 10^3 \text{ Hz} = 100 \text{ kHz}$, 超出通频带, v_o 的幅度会下降, 相移增大, 但因 v_i 是单一频率的正弦波, 故输出波形不会失真。

3.7.5 电路如图题 3.7.5 所示, 已知 BJT 的 $\beta = 50$, $r_{be} = 0.72 \text{ k}\Omega$ 。(1) 估算电路的下限频

率; (2) 若 $V_{im} = 10 \text{ mV}$, 且 $f = f_L$, 则 $V_{om} = ?$, $\dot{V}_o$ 与 $\dot{V}_i$ 间的相位差是多少?



图题 3.7.5

解 (1) 求下限频率 f_L

因

$$R_b = R_{b1} // R_{b2} \\ \approx 20.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_b \gg r_{be} (= 0.72 \text{ k}\Omega)$$

故 R_b 的影响可忽略。

$$C'_1 = \frac{C_1 C_e}{(1 + \beta) C_1 + C_e} \\ = 0.495 \mu\text{F}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi(R_s + r_{be})C'_1} \\ = 392 \text{ Hz}$$

(2) 求 V_{om} 及 $\dot{V}_o$ 与 $\dot{V}_i$ 的相位差

$$\text{中频电压增益 } \dot{A}_{VM} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \approx -115.7$$

$$\text{当 } f = f_L \text{ 时 } \dot{A}_V = 0.707 \dot{A}_{VM} \approx -81.8$$

$$V_{om} = |\dot{A}_V| V_{im} = 818 \text{ mV}$$

v_o 与 v_i 间的相位差是 -135° 。

3.7.6 一高频 BJT, 在 $I_C = 1.5 \text{ mA}$ 时, 测出其低频 H 参数为: $r_{be} = 1.1 \text{ k}\Omega$, $\beta_0 = 50$, 特征频率 $f_T = 100 \text{ MHz}$, $C_{b'e} = 3 \text{ pF}$, 试求混合 Π 型参数 g_m 、 $r_{b'e}$ 、 $r_{bb'}$ 、 $C_{b'e'}$ 。

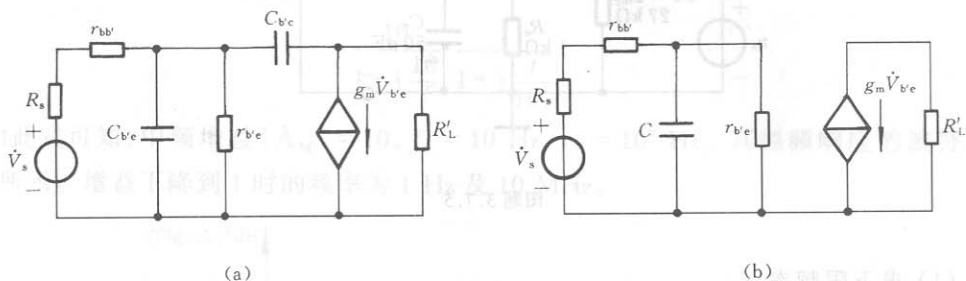
$$\text{解 } g_m = \frac{1}{r_e} = \frac{I_E}{26 \text{ mV}} = 57.69 \times 10^{-3} \text{ S} = 57.69 \text{ mS}$$

$$r_{b'e} = \frac{\beta}{g_m} = 866.7 \Omega \quad r_{bb'} = r_{be} - r_{b'e} = 233.3 \Omega$$

$$C_{b'e} = \frac{g_m}{2\pi f_T} = 92 \text{ pF} \quad f_\beta = \frac{f_T}{\beta} = 2 \text{ MHz}$$

3.7.7 电路如图题 3.7.5 所示, BJT 的 $\beta = 40$, $C_{b'c} = 3 \text{ pF}$, $C_{b'e} = 100 \text{ pF}$, $r_{bb'} = 100 \Omega$, $r_{b'e} = 1 \text{ k}\Omega$ 。(a) 画出高频小信号等效电路, 求上限频率 f_H ;(b) 如 R_L 提高 10 倍, 问中频区电压增益、上限频率及增益带宽积各变化多少倍?

解 (a) 图题 3.7.5 所示电路的高频小信号等效电路及其密勒等效变换电路分别如图解 3.7.7a、3.7.7b 所示。



图解 3.7.7

该 BJT 的 $g_m = \frac{\beta}{r_{b'e}} = 0.04 \text{ S}$

图解 3.7.7b 中的等效电容

$$C = C_{b'e} + C_{b'c}(1 + g_m R'_L) \approx 304.6 \text{ pF}$$

其中 $R'_L = R_c \parallel R_L \approx 1.68 \text{ k}\Omega$ 。

等效电阻 $R = r_{b'e} \parallel (R_s + r_{bb'}) \approx 167 \Omega$

上限频率 $f_H = \frac{1}{2\pi RC} \approx 3.13 \text{ MHz}$

中频电压增益 $A_{VM} = g_m R'_L \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \approx 55.78$

增益带宽积 $|A_{VM} f_H| \approx 174.59 \text{ MHz}$

(b) R_L 提高 10 倍时

$$R'_L \approx 2.38 \text{ k}\Omega$$

$$C = C_{b'e} + C_{b'c}(1 + g_m R'_L) \approx 388.6 \text{ pF}$$

$$R \approx 167 \Omega$$

$$f'_H = \frac{1}{2\pi RC} \approx 2.45 \text{ MHz}$$

$$A'_{VM} = g_m R'_L \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \approx 79$$

$$|A'_{VM} \cdot f'_H| = 193.55$$

中频电压增益变化 $\frac{A'_{VM}}{A_{VM}} \approx 1.42 \text{ 倍}$

上限频率变化 $\frac{f'_H}{f_H} \approx 0.78$ 倍

增益带宽积变化 $\frac{|A'_{VM} \cdot f'_H|}{|A_{VM} \cdot f_H|} \approx 1.11$ 倍

3.7.8 电路如图 3.5.1 所示(射极偏置电路),设在它的输入端接一内阻 $R_s = 5 \text{ k}\Omega$ 的信号源,电路参数为: $R_{b1} = 33 \text{ k}\Omega$, $R_{b2} = 22 \text{ k}\Omega$, $R_e = 3.9 \text{ k}\Omega$, $R_c = 4.7 \text{ k}\Omega$, $R_L = 5.1 \text{ k}\Omega$, $C_e = 50 \text{ }\mu\text{F}$ (与 R_e 并联的电容), $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $I_E \approx 0.33 \text{ mA}$, $\beta_0 = 120$, $r_{ce} = 300 \text{ k}\Omega$, $r_{bb'} = 50 \text{ }\Omega$, $f_T = 700 \text{ MHz}$ 及 $C_{b'e} = 1 \text{ pF}$ 。求:(1) 输入电阻 R_i ; (2) 中频区电压增益 $|A_{VM}|$; (3) 上限频率 f_H 。

解 (1) 求 R_i

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E}$$

$$\approx 9.58 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel r_{be}$$

$$\approx 5.55 \text{ k}\Omega$$

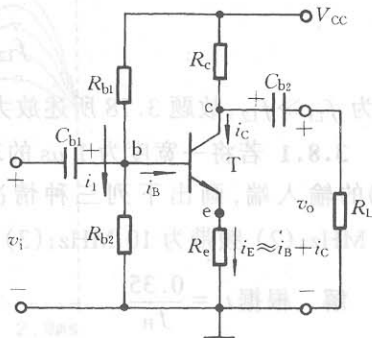


图 3.5.1

(2) 求中频电压增益 $|A_{VM}|$

因 $r_{ce} \gg R_L$

$$|A_{VM}| = \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{r_{be}} \approx 30.64$$

(3) 求上限频率 f_H

$$g_m = \frac{I_E}{26 \text{ mV}} \approx 12.69 \text{ mS}$$

$$r_{b'e} = \frac{\beta_0}{g_m} \approx 9.47 \text{ k}\Omega$$

$$C_{b'e} = \frac{g_m}{2\pi f_T} \approx 2.89 \text{ pF}$$

$$C = C_{b'e} + (1 + g_m R'_L) C_{b'c} = 34.98 \text{ pF}$$

其中 $R'_L = R_c \parallel R_L \approx 2.45 \text{ k}\Omega$ 。

$$R = (r_{bb'} + R_s \parallel R_b) \parallel r_{b'e} \approx 2.65 \text{ k}\Omega$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} \approx 1.72 \text{ MHz}$$

3.7.9 在题 3.7.8 所述的放大电路中, $C_{b1} = C_{b2} = 1 \text{ }\mu\text{F}$, 射极旁路电容 $C_e = 10 \text{ }\mu\text{F}$, 求下限频率。

解 将射极旁路电容折合到基极回路后, 基极回路的等效电容

$$C_1 = \frac{C_{b1} C_e}{(1 + \beta) C_{b1} + C_e} = \frac{10}{131} \mu\text{F}$$

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_s + r_{be})C_1} \approx 143 \text{ Hz}$$

其中

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \approx 9.58 \text{ k}\Omega$$

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C_{b2}} \approx 16.25 \text{ Hz}$$

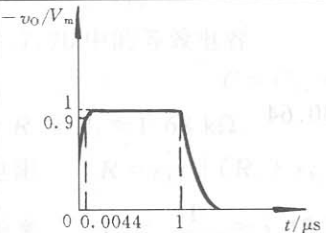
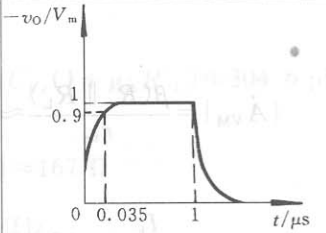
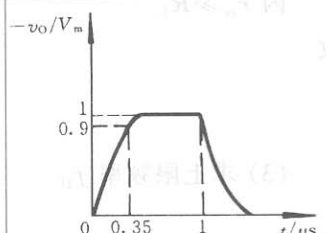
因为 $f_{L1} \gg f_{L2}$, 故题 3.78 所述放大电路的下限频率 $f_L \approx 143 \text{ Hz}$ 。

3.8.1 若将一宽度为 $1 \mu\text{s}$ 的理想脉冲信号加到一单级共射放大电路(假设只有一个时间常数)的输入端, 画出下列三种情况下的输出波形。设 V_m 为输出电压最大值: (1) 频带为 80 MHz ; (2) 频带为 10 MHz ; (3) 频带为 1 MHz 。(假设 $f_L = 0$)。

解 根据 $t_r = \frac{0.35}{f_H}$

$$v_O = -V_m(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

得三种情况下的输出电压波形如下表所示。

$f_H(\text{MHz})$	80	10	1
$t_r(\mu\text{s})$	0.0044	0.035	0.35
输出 电压 波形			

3.8.2 电路如图题 3.8.2 所示。(1) 当输入方波电流的频率为 200 Hz 时, 计算输出电压的平顶降落; (2) 当平顶降落小于 2% 时, 输入方波的最低频率为多少?

解 (1) 当 $f = 200 \text{ Hz}$ 时, 平顶降落

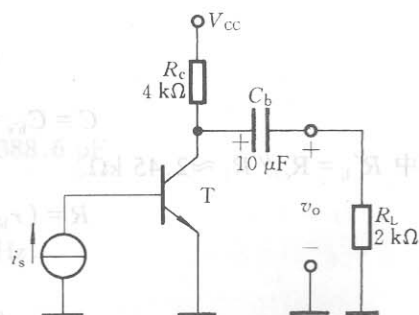
$$\delta = \frac{\pi f_L}{f} \times 100\% \approx 4.16\%$$

其中

$$f_L = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C_b} \approx 2.65 \text{ Hz}$$

(2) 当 $\delta < 2\%$ 时, 输入方波的最低频率为

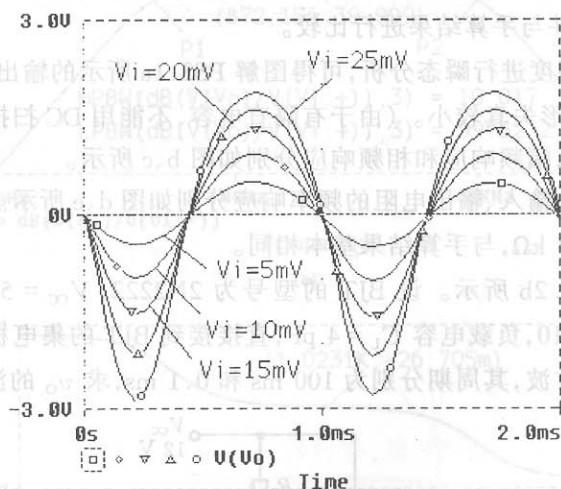
$$f_{\min} = \frac{\pi f_L}{\delta} = \frac{3.14 \times 2.65 \text{ Hz}}{\frac{2}{100}} \approx 416 \text{ Hz}$$



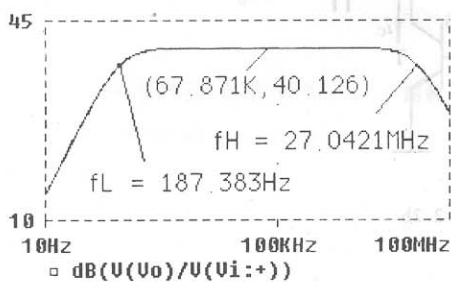
图题 3.8.2

PSPICE 习题

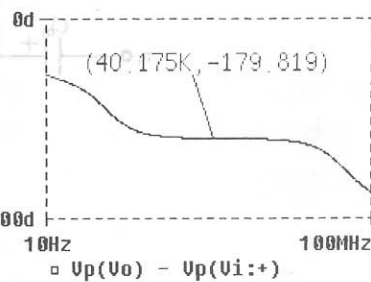
PS3.1 电路如图 3.5.1(见题 3.7.8)所示,其中 $R_c = 3.3 \text{ k}\Omega$, $R_e = 1.3 \text{ k}\Omega$, $R_{b1} = 33 \text{ k}\Omega$,



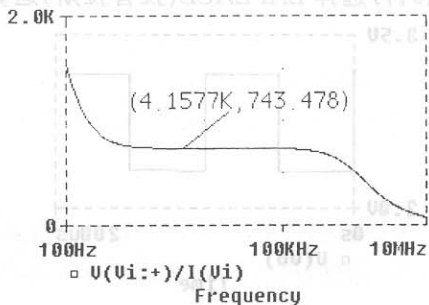
(a)



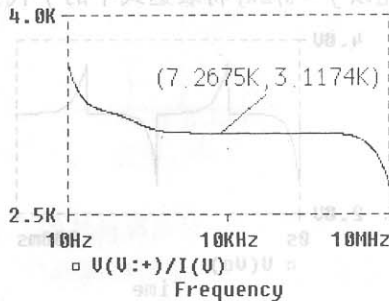
(b)



(c)



(d)



(e)

图解 PS3.1

$R_{b2} = 10\text{ k}\Omega$, $R_L = 5.1\text{ k}\Omega$, $C_{b1} = C_{b2} = 10\text{ }\mu\text{F}$, $V_{CC} = 12\text{ V}$ 。在 R_e 两端并联一电容 $C_e = 50\text{ }\mu\text{F}$ 。试运用 PSPICE 作如下分析: (1) 当输入 v_i 取频率为 1 kHz 的正弦交流电压时, 求最大不失真输出电压幅度和相应的输入电压幅度; (2) 求电压增益的幅频响应和相频响应; (3) 求电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o , 并与手算结果进行比较。

解 (1) 改变 v_i 的幅度进行瞬态分析, 可得图解 PS3.1a 所示的输出波形。由图看出, v_i 小于 10 mV 时, 输出电压波形失真较小。(由于有隔直电容, 不能用 DC 扫描作传输特性来求解。)

(2) 作交流扫描分析, 幅频响应和相频响应分别如图 b、c 所示。

(3) 作交流扫描分析, 输入、输出电阻的频率响应分别如图 d、e 所示。由图中看出通带内 $R_i = 743.478\text{ }\Omega$, $R_o = 3.1174\text{ k}\Omega$, 与手算结果基本相同。

PS3.2 电路如图 3.2.2b 所示。设 BJT 的型号为 2N2222, $V_{CC} = 5\text{ V}$, $C_{b1} = 1\text{ }\mu\text{F}$, $R_b = 1\text{ M}\Omega$, $R_c = 3.3\text{ k}\Omega$ 及 $\beta = 210$, 负载电容 $C_L = 4\text{ pF}$, 直接接到 BJT 的集电极。当输入信号电压 v_i 为峰-峰值为 10 mV 的方波, 其周期分别为 100 ms 和 0.1 ms , 求 v_o 的波形。

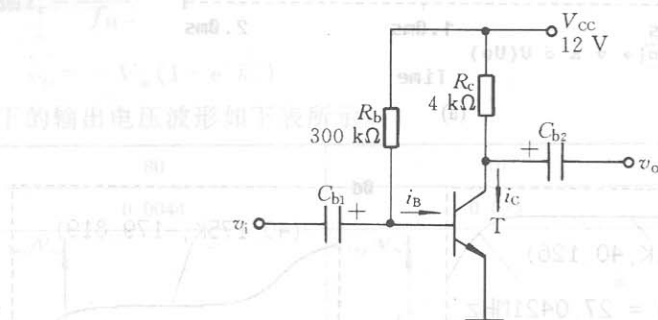
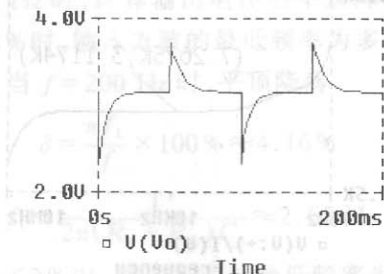


图 3.2.2b

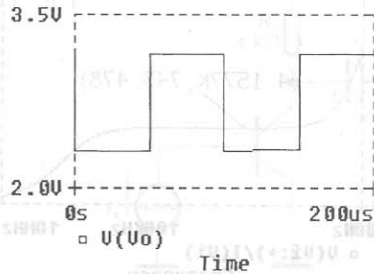
解 对 v_i 不同的周期分别进行瞬态分析, 可得图解 PS3.2 所示波形。其中图 a 是 v_i 周期为 100 ms 时的 v_o 波形; 图 b 是 v_i 周期为 0.1 ms 时 v_o 的波形。

PS3.3 试用 PSPICE 程序求解题 3.7.2 的答案。

解 首先以 $f = s/2\pi j$ 将表达式中的 f 代换成 s , 再选择 LAPLACE(拉普拉斯)运算模型作交



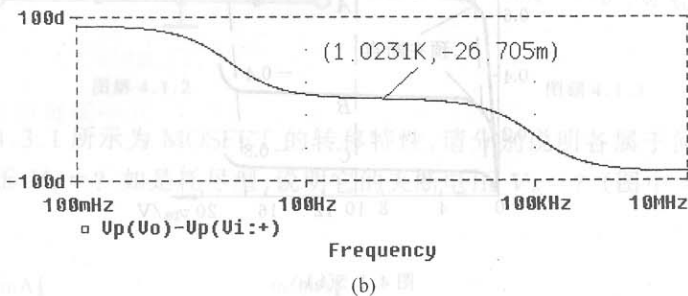
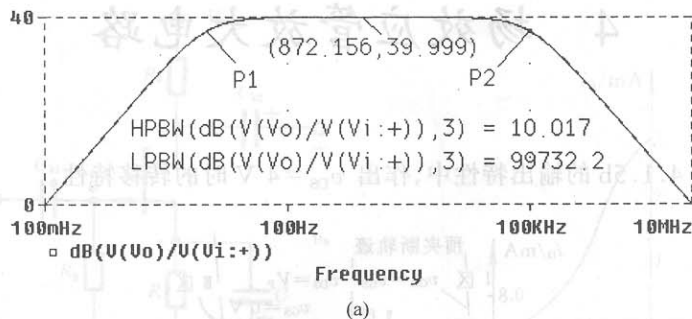
(a)



(b)

图解 PS3.2

流扫描分析,得到电压增益函数的幅频及相频响应分别如图解 PS3.3a、b 所示。由此得: f_L (HP-BW) = 10 Hz, f_H (LPBW) = 99.7322 kHz, $A_{VM} = 39.999$ dB, 中频段相位差约为 0。



图解 PS3.3