

6 集成电路运算放大器

6.1.1 某集成运放的一单元电路如图题 6.1.1 所示, T_1 、 T_2 的特性相同, 且 BJT 的 β 足够大, 问: (1) T_1 、 T_2 和 R 组成什么电路? 在电路中起什么作用? (2) 写出 I_{REF} 和 I_{C2} 的表达式。设 $|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$, V_{CC} 和 R 均已知。

解 (1) T_1 、 T_2 和 R 组成镜像电流源电路, 在电路中作为 T_3 的恒流源负载, 可提高放大电路的电压增益。

(2) I_{C2} 看作是 I_{REF} 的镜像电流, 即

$$I_{C2} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - |V_{BE}|}{R} = \frac{V_{CC} - 0.7 \text{ V}}{R} \approx \frac{V_{CC}}{R}$$

6.1.2 电路如图题 6.1.2 所示, 所有 BJT 的 β 均很大, $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, 且 T_2 、 T_3 特性相同, 电路参数如图。问: (1) T_2 、 T_3 和 R 组成什么电路? 在电路中起什么作用? (2) 电路中 T_1 、 R_{e1} 起电平移动作用, 保证 $v_i = 0$ 时, $v_o = 0$ 。求 I_{REF} 、 I_{C3} 和 R_{e1} 的值。

解 (1) T_2 、 T_3 和 R 组成镜像电流源电路, 在电路中作为 BJT T_1 的恒流源负载, 提高带负载能力。

(2) 当 $v_i = 0$ 时, $v_o = 0$

$$I_{C3} \approx I_{REF} = \frac{V_{REF} - V_{BE2} - (-V_{EE})}{R} = \frac{(12 - 0.7 + 12) \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 23.3 \text{ mA}$$

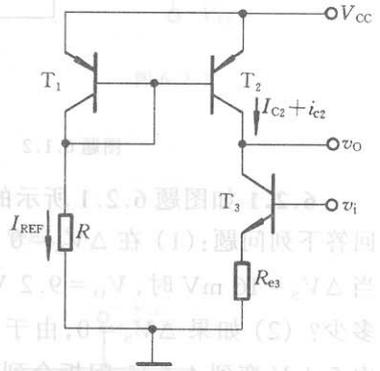
$$R_{e1} = \frac{V_1 - V_{BE}}{I_{C3}} = \frac{(8 - 0.7) \text{ V}}{(23.3 \times 10^{-3}) \text{ A}} = 313 \Omega$$

6.1.3 图题 6.1.3 所示是由 NPN 管(T_1)与 PNP 管(T_2)组成的电平移动电路, BJT 均为硅管, 设 $|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$ 。静态 $v_i = 0$ 时, 若要求 $v_o = 0$, 计算 I_{E1} 和 I_{E2} 的值。

解 $v_i = 0$ 时

$$I_{E1} = \frac{-V_{BE} - (-V_{EE})}{R_{e1}} = \frac{(-0.7 + 12) \text{ V}}{56 \times 10^3 \Omega} \approx 0.2 \times 10^{-3} \text{ A} = 0.2 \text{ mA}$$

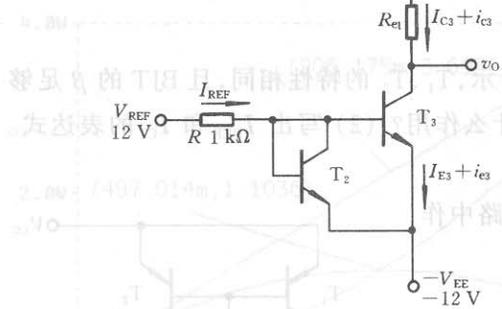
$$I_{E2} \approx I_{C2} = \frac{0 - (-V_{EE})}{R_{c2}} = \frac{12 \text{ V}}{12 \times 10^3 \Omega} = 1 \times 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$



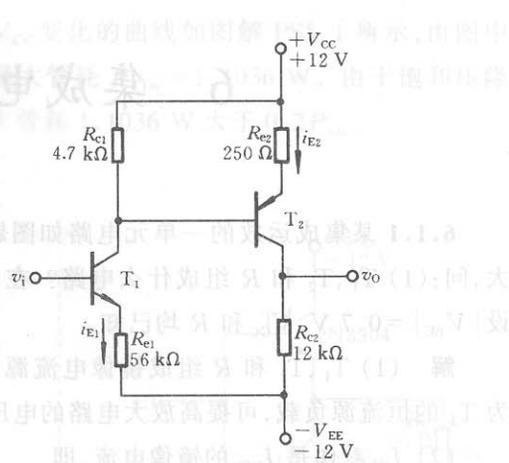
图题 6.1.1

P_{om} 及最大管耗 P_{Tm}

解 设置直流扫描分析, 得 V_{ce} 、 V_{be} 、 V_{ce} 变化的曲线如图解 6.1.2 所示, 由图中看出, 负载上可能得到的最大输出功率 P_{om} 为 1.2 W 。由于地加元件的存在, $V_{ce} = 12 \times 0.906 = 10.87 \text{ V}$ 。

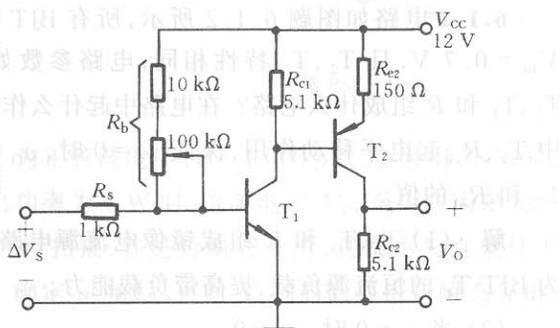


图题 6.1.2



图题 6.1.3

6.2.1 如图题 6.2.1 所示的放大电路中, 试回答下列问题: (1) 在 $\Delta V_s = 0$ 时, $V_o = 5.1 \text{ V}$; 当 $\Delta V_s = 16 \text{ mV}$ 时, $V_o = 9.2 \text{ V}$, 问电压增益是多少? (2) 如果 $\Delta V_s = 0$, 由于温度的影响, V_o 由 5.1 V 变到 4.5 V , 问折合到输入端的零点漂移电压 ΔV_1 为多少?



图题 6.2.1

解 (1) 放大电路的电压增益

$$A_v = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = \frac{(9.2 - 5.1) \text{ V}}{16 \times 10^{-3} \text{ V}} \approx 256$$

(2) 折合到输入端的零点漂移电压

$$\Delta V_1 = \frac{(4.5 - 5.1) \text{ V}}{256} = -2.3 \text{ mV}$$

6.2.2 双端输入、双端输出理想的差分式放大电路如图题 6.2.2 所示。求解下列问题: (1) 若 $v_{i1} = 1500 \mu\text{V}$, $v_{i2} = 500 \mu\text{V}$, 求差模输入电压 v_{id} , 共模输入电压 v_{ic} 的值; (2) 若 $A_{VD} = 100$, 求差模输出电压 v_{od} ; (3) 当输入电压为 v_{id} 时, 若从 c_2 点输出, 求 v_{c2} 与 v_{id} 的相位关系; (4) 若输出电压 $v_o = 1000 v_{i1} - 999 v_{i2}$ 时, 求电路的 A_{VD} 、 A_{VC} 和 K_{CMR} 的值。

解 (1) 差模输入电压为

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} = 1500 \mu\text{V} - 500 \mu\text{V} = 1000 \mu\text{V}$$

共模输入电压为

$$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2})$$

$$= \frac{1}{2}(1500 + 500) \mu\text{V} = 1000 \mu\text{V}$$

(2) $A_{VD} = 100$, 差模输出电压为

$$v_{Od} = A_{VD} \cdot v_{id} \\ = 100 \times 1000 \mu\text{V} = 100 \text{ mV}$$

(3) v_{c2} 与 v_{id} 同相。

(4) $v_{O} = 1000 v_{i1} - 999 v_{i2}$, 求 A_{VD} 、 A_{VC} 和 K_{CMR} 的值。

$$v_{O} = A_{VD} v_{id} + A_{VC} v_{ic} \\ = A_{VD} (v_{i1} - v_{i2}) + A_{VC} \times \frac{1}{2} (v_{i1} + v_{i2}) \\ = (A_{VD} + \frac{1}{2} A_{VC}) v_{i1} + (A_{VD} - \frac{1}{2} A_{VC}) v_{i2}$$

所以

$$A_{VD} + \frac{1}{2} A_{VC} = 1000$$

$$A_{VD} - \frac{1}{2} A_{VC} = 999$$

则 $A_{VC} = 1, A_{VD} = 999.5, K_{CMR} = \left| \frac{A_{VD}}{A_{VC}} \right| = 999.5$

6.2.3 电路如图题 6.2.3 所示, $R_{e1} = R_{e2} = 100 \Omega$,

BJT 的 $\beta = 100, V_{BE} = 0.6 \text{ V}$ 。求: (1) Q 点 (I_{B1} 、 I_{C1} 、 V_{CE1}); (2) 当 $v_{i1} = 0.01 \text{ V}$ 、 $v_{i2} = -0.01 \text{ V}$ 时, 求输出电压 $v_{O} = v_{O1} - v_{O2}$ 的值; (3) 当 c_1 、 c_2 间接入负载电阻 $R_L = 5.6 \text{ k}\Omega$ 时, 求 v_{O} 的值; (4) 求电路的差模输入电阻 R_{id} 、共模输入电阻 R_{ic} 和输出电阻 R_{o} 。

解 (1) 当 $v_{id} = 0$ 时, 求 Q 点。

$$I_0 = 2 \text{ mA}$$

$$I_{C1} = \frac{1}{2} I_0 = \frac{2}{2} \text{ mA} = 1 \text{ mA}$$

$$I_{B1} = I_{C1} / \beta = 1 \text{ mA} / 100 = 10 \mu\text{A}$$

$$V_{CE1} = V_{CC} - I_{C1} R_{e1} - V_{E1} \\ = [10 - 1 \times 5.6 - (-0.6)] \text{ V} = 5 \text{ V}$$

(2) 当 $v_{i1} = 0.01 \text{ V}$ 、 $v_{i2} = -0.01 \text{ V}$ 时, 求输出电压 v_{O} 的值。

$$r_{be1} = 200 \Omega + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{E1}} \\ = 200 \Omega + 101 \times \frac{26 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} \Omega \approx 2.8 \text{ k}\Omega$$

$$A_{VD} = - \frac{\beta R_c}{r_{be1} + (1 + \beta) R_{e1}} \\ = \frac{-100 \times 5.6}{2.8 + (1 + 100) \times 100 \times 10^{-3}}$$

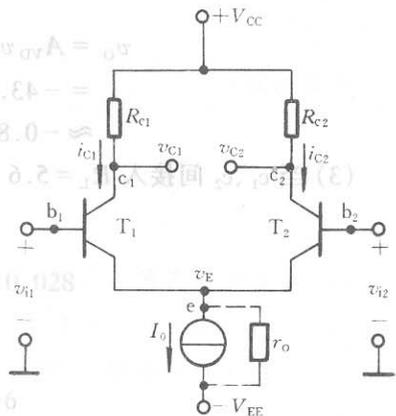
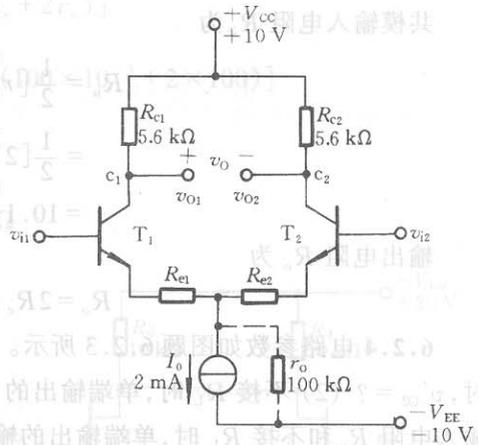


图 6.2.2



图题 6.2.3

$$= -43.75$$

式五由出辦辦基, 001 = $\sigma, A (\Omega)$

$$\begin{aligned} v_o &= A_{VD} v_{id} \\ &= -43.75 [0.01 - (-0.01)] \text{ V} \\ &\approx -0.88 \text{ V} \end{aligned}$$

(3) 当 c_1, c_2 间接入 $R_L = 5.6 \text{ k}\Omega$ 时, 求 v_o 。

$$\begin{aligned} A'_{VD} &= -\frac{\beta [R_{c1} \parallel (\frac{1}{2} R_L)]}{r_{be1} + (1 + \beta) R_{e1}} \\ &= -\frac{100 \times 1.87}{2.8 + (1 + 100) \times 100 \times 10^{-3}} \\ &\approx -14.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v'_o &= A'_{VD} v_{id} \\ &= -14.5 \times 0.02 \text{ V} = -0.29 \text{ V} \end{aligned}$$

(4) 求 R_{id}, R_{ic} 和 R_o 。

差模输入电阻 R_{id} 为

$$\begin{aligned} R_{id} &= 2[r_{be} + (1 + \beta) R_{e1}] \\ &= 2[2.8 + (1 + 100) \times 100 \times 10^{-3}] \text{ k}\Omega = 25.6 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

共模输入电阻 R_{ic} 为

$$\begin{aligned} R_{ic} &= \frac{1}{2} [r_{be} + (1 + \beta)(R_{e1} + 2r_o)] \\ &= \frac{1}{2} [2.8 + (1 + 100)(100 \times 10^{-3} + 2 \times 100)] \text{ k}\Omega \\ &= 10.1 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

输出电阻 R_o 为

$$R_o = 2R_c = 2 \times 5.6 \text{ k}\Omega = 11.2 \text{ k}\Omega$$

6.2.4 电路参数如图题 6.2.3 所示。求: (1) 单端输出且当 $R_L = \infty$ 时, $v_{O2} = ?$; $R_L = 5.6 \text{ k}\Omega$ 时, $v'_{O2} = ?$ (2) 不接 R_L 时, 单端输出的 A_{VD2}, A_{VC2} 和 K_{CMR} 的值。 (3) 差模输入电阻 R_{id} 、共模输入电阻 R_{ic} 和不接 R_L 时, 单端输出的输出电阻 R_o 的值。

解 (1) $R_L = \infty$ 时, 求 v_{O2}

$$\begin{aligned} A_{VD2} &= +\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta R_{c2}}{r_{be} + (1 + \beta) R_{e2}} \\ &= \frac{100 \times 5.6}{2[2.8 + (1 + 100) \times 0.1]} \approx 21.8 \end{aligned}$$

$$v_{O2} = A_{VD2} \cdot v_{id} = 21.8 \times 0.02 = 0.44 \text{ V}$$

当 $R_L = 5.6 \text{ k}\Omega$ 时, 求 v'_{O2}

$$A'_{VD2} = +\frac{\beta (R_{c2} \parallel R_L)}{2[r_{be} + (1 + \beta) R_e]}$$

$$= 10.9$$

$$v_{O2} = A_{VD2} v_{id} = 0.22 \text{ V}$$

(2) $R_L = \infty$ 且单端输出时, 差模电压增益为

$$A_{VD2} = 21.8$$

共模电压增益为

$$A_{VC2} \approx -\frac{R_c}{2r_o} = -\frac{5.6}{2 \times 100} = -0.028$$

共模抑制比为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{VD2}}{A_{VC2}} \right| = \frac{21.8}{0.028} = 778.6$$

(3) 求单端输出时的 R_{id} 、 R_{ic} 和 R_o 。

差模输入电阻为

$$\begin{aligned} R_{id} &= 2[r_{be} + (1 + \beta)R_e] \\ &= 2[2.8 + (1 + 100) \times 100 \times 10^{-3}] \Omega = 25.6 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

共模输入电阻

$$\begin{aligned} R_{ic} &= \frac{1}{2}[r_{be} + (1 + \beta)(R_e + 2r_o)] \\ &= \frac{1}{2}[2.8 + (1 + 100)(100 \times 10^{-3} + 2 \times 100)] \\ &= 10 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

输出电阻为

$$R_o = R_c = 5.6 \text{ k}\Omega$$

6.2.5 电路如图题 6.2.5 所示, JFET 的 $g_m = 2 \text{ mS}$, $r_{DS} = 20 \text{ k}\Omega$, 求: (1) 双端输出时的差模电压增益 $A_{VD} = (v_{O1} - v_{O2})/v_{id}$ 的值; (2) 电路改为单端输出时, A_{VD1} 、 A_{VC1} 和 K_{CMR} 的值。

解 (1) 差模电压增益

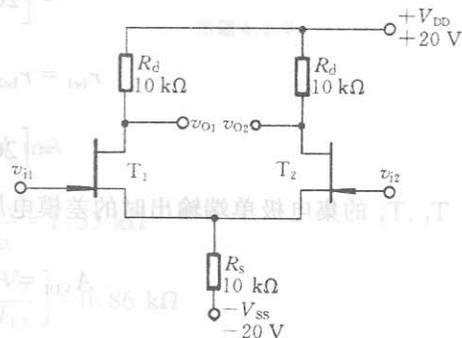
$$\begin{aligned} A_{VD} &= \frac{v_{O1} - v_{O2}}{v_{id}} \\ &= -g_m(R_d \parallel r_{DS}) \\ &= -2 \text{ mS}[6.67 \text{ k}\Omega] = -13.3 \end{aligned}$$

(2) 单端输出时, 差模电压增益

$$A_{VD1} = \frac{1}{2} A_{VD} = -6.67$$

共模电压增益

$$A_{VC1} = -\frac{g_m(R_d \parallel r_{DS})}{1 + g_m(2R_s)} = -\frac{13.3}{1 + 2 \times 10} = -0.56$$



图题 6.2.5

$$= -\frac{2 \times 10^{-3} (6.67 \times 10^3)}{1 + 2 \times 10^{-3} (20 \times 10^3)} = -0.33$$

共模抑制比

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{\text{VD1}}}{A_{\text{VC1}}} \right| = \frac{6.67}{0.33} = 20.2$$

6.2.6 电路如图题 6.2.6 所示, 设 BJT 的 $\beta_1 = \beta_2 = 30, \beta_3 = \beta_4 = 100, V_{\text{BE1}} = V_{\text{BE2}} = 0.6 \text{ V}, V_{\text{BE3}} = V_{\text{BE4}} = 0.7 \text{ V}$ 。试计算双端输入、单端输出时的 $R_{\text{id}}, A_{\text{VD1}}, A_{\text{VC1}}$ 和 K_{CMR} 的值。

解 静态时, $v_{i1} = v_{i2} = 0, V_{\text{E3}} = V_{\text{E4}} = 0 - (0.6 + 0.7) = -1.3 \text{ V}$, 故

$$\begin{aligned} I_{\text{E3}} = I_{\text{E4}} &= \frac{1}{2} I_{\text{R}_e} \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{V_{\text{E3}} - (-V_{\text{EE}})}{R_e} \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{-1.3 + 6}{4.7 \times 10^3} \text{ A} = 0.5 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$I_{\text{E1}} = I_{\text{E2}} = \frac{I_{\text{E3}}}{\beta_3} = \frac{0.50 \text{ mA}}{100} = 0.005 \text{ mA}$$

$$r_{\text{be3}} = r_{\text{be4}} = 200 \Omega + (1 + \beta_3) \frac{V_T}{I_{\text{E3}}}$$

$$= \left[200 + 101 \times \frac{26}{0.5} \right] \Omega \approx 5.5 \text{ k}\Omega$$

$$r_{\text{be1}} = r_{\text{be2}} = 200 \Omega + (1 + \beta_1) \frac{V_T}{I_{\text{E1}}}$$

$$= \left[200 + 31 \times \frac{26}{0.005} \right] \Omega = 161.4 \text{ k}\Omega$$

由 T_1, T_3 的集电极单端输出时的差模电压增益

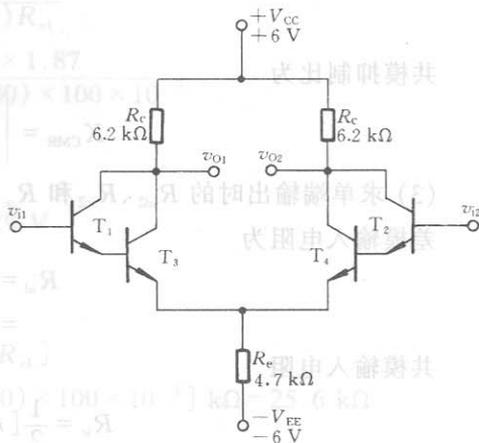
$$A_{\text{VD1}} = -\frac{\beta_1 \beta_3 R_c}{2[r_{\text{be1}} + (1 + \beta_1)r_{\text{be3}}]}$$

$$= -\frac{100 \times 30 \times 6.2}{2[161.4 + 5.5 \times 31]}$$

$$= -\frac{18600}{663.8} = -28$$

单端输出时共模电压增益

$$A_{\text{VC1}} = -\frac{\beta_1 \beta_3 R_c}{r_{\text{be1}} + (1 + \beta_1)[r_{\text{be3}} + (1 + \beta_3)2R_e]}$$



图题 6.2.6

输出电阻 R_o 为

$$R_o = 2R_c = 2 \times 6.2 \text{ k}\Omega = 12.4 \text{ k}\Omega$$

6.2.4 电路参数如图题 6.2.4 所示

时, $v_{i2} = ?$ (2) 不接 R_{e1} 时, 单端输出时的电压增益 A_{v1} 和共模抑制比 K_{CMR} 为多少? (3) 不接 R_{e1} 时, 单端输出时的电压增益 A_{v1} 和共模抑制比 K_{CMR} 为多少?

益微丑申册基 (1) 翰



2.5.0 电路

当 $R_c = 5.6 \text{ k}\Omega$ 时, 求 A_{v1}

$$= -\frac{30 \times 100 \times 6.2}{161.4 + (1+30)[5.5 + (1+100) \times 2 \times 4.7]}$$

$$= -0.63$$

共模抑制比

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{VD1}}{A_{VD1}} \right| = \left| \frac{-28}{-0.63} \right| = 44.4$$

差模输入电阻

$$R_{id} = 2[r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be3}]$$

$$= 2[161.4 + 31 \times 5.5] \text{ k}\Omega = 664 \text{ k}\Omega$$

6.2.7 电路如图题 6.2.7 所示, 已知 BJT 的 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 50, r_{ce} = 200 \text{ k}\Omega, V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, 试求单端输出时的差模电压增益 A_{VD2} 、共模抑制比 K_{CMR} 、差模输入电阻 R_{id} 和输出电阻 R_o 。

提示: AB 两端的交流电阻

$$r_{AB} = r_o = r_{ce3} \left[1 + \frac{\beta_3 R_{e3}}{r_{be3} + (R_1 \parallel R_2) + R_{e3}} \right]$$

解 R_2 两端的电压为

$$V_{R_2} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{EE}$$

$$= \frac{3}{3 + 5.6} (+9) = +3.1 \text{ V}$$

$$I_{E3} = \frac{V_{R_2} - V_{BE3}}{R_{e3}}$$

$$= \frac{3.1 - 0.7}{1.2 \times 10^3} \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{1}{2} I_{E3} = 1 \text{ mA}$$

$$r_{be1} = 200 \Omega + (1 + \beta_1) \frac{V_T}{I_{E1}} = 1.53 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be3} = \left[200 \Omega + (1 + \beta_3) \frac{V_T}{I_{E3}} \right] = 0.86 \text{ k}\Omega$$

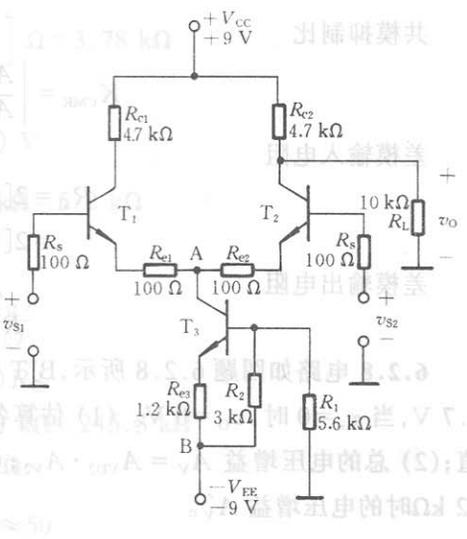
$$R_1 \parallel R_2 = 1.95 \text{ k}\Omega$$

单端输出差模电压增益

$$A_{VD2} = + \frac{\beta(R_{e2} \parallel R_L)}{2[R_s + r_{be1} + (1 + \beta)R_{e1}]}$$

$$= \frac{50 \times 3.2}{2 \times [0.1 + 1.53 + (1 + 50) \times 0.1]} = 12$$

AB 两端交流电阻为



图题 6.2.7

$$r_{AB} = r_o = r_{ce3} \left(1 + \frac{\beta_3 R_{e3}}{r_{be3} + R_1 \parallel R_2 + R_{e3}} \right)$$

$$= 200 \left[1 + \frac{50 \times 1.2}{0.86 + 1.95 + 1.2} \right] \text{ k}\Omega$$

$$= 3.2 \text{ M}\Omega$$

单端输出的共模电压增益

$$A_{VC2} \approx - \frac{\beta(R_{c2} \parallel R_L)}{2(1 + \beta)r_o}$$

$$= - \frac{50 \times 3.2}{2 \times (1 + 50) \times 3.2 \times 10^3} = -0.0005$$

共模抑制比

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{VD2}}{A_{VC2}} \right| = \frac{12}{0.0005} = 24000$$

差模输入电阻

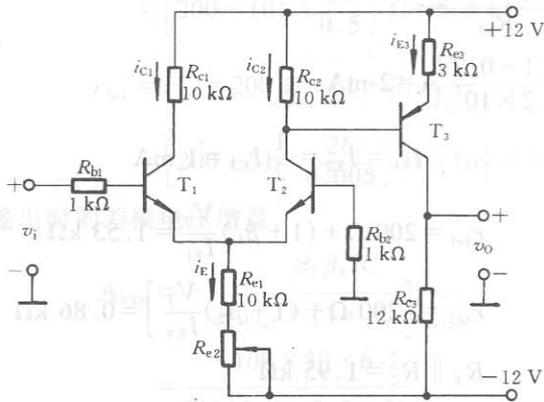
$$R_{id} = 2[R_s + r_{be1} + (1 + \beta)R_e]$$

$$= 2[0.1 + 1.53 + 51 \times 0.1] \text{ k}\Omega = 13.5 \text{ k}\Omega$$

差模输出电阻

$$R_o = R_{c2} = 4.7 \text{ k}\Omega$$

6.2.8 电路如图题 6.2.8 所示, BJT T_1 、 T_2 、 T_3 均为硅管, 设 $\beta_1 = \beta_2 = 50$, $\beta_3 = 80$, $|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$, 当 $v_i = 0$ 时, $v_o = 0 \text{ V}$ 。(1) 估算各级的静态电流 I_{C3} 、 I_{C2} 、 I_E 、管压降 V_{CE3} 、 V_{CE2} 及 R_{c2} 的值; (2) 总的电压增益 $A_V = A_{VD2} \cdot A_{V2}$; (3) 当 $v_i = 5 \text{ mV}$ 时, $v_o = ?$ (4) 当输出端接一 $R_L = 12 \text{ k}\Omega$ 时的电压增益 A'_V 。



图题 6.2.8

解 (1) T_1 、 T_2 组成单入-单出差分式输入级, T_3 为共射放大电路, 其静态工作点为

$$I_{C3} = \frac{-(-12 \text{ V})}{12 \times 10^3 \Omega} = 1 \text{ mA}$$

$$V_{CE3} = V_{C3} - V_{E3} = V_O - (12 \text{ V} - I_{E3} R_{e3})$$

$$= 0 - (12 - 1 \times 3) \text{ V} = -9 \text{ V}$$

$$r_{be3} = 200 \Omega + (1 + \beta_3) \frac{V_T}{I_{E3}} = \left[200 + (1 + 80) \frac{26}{1} \right] \Omega = 2.3 \text{ k}\Omega$$

T₂:

$$I_{C2} = \frac{I_{E3} R_{e3} + |V_{BE3}|}{R_{e2}}$$

$$= \left(\frac{1 \times 3 + 0.7}{10 \times 10^3} \right) \text{ A} = 0.37 \text{ mA}$$

$$V_{CE2} = 12 \text{ V} - I_{C2} R_{e2} - (V_{E2})$$

$$= [12 - 0.37 \times 10 - (-0.7)] \text{ V} = 9 \text{ V}$$

$$r_{be2} = \left[200 + (1 + 50) \frac{26}{0.37} \right] \Omega = 3.78 \text{ k}\Omega$$

$$I_E = 2 I_{E2} = 0.74 \text{ mA}$$

$$(R_{e1} + R_{e2}) I_E = (12 - 0.7) \text{ V}$$

$$R_{e2} = \frac{12 - 0.7 - 10 \times 0.74}{0.74} \text{ k}\Omega = 5.2 \text{ k}\Omega$$

(2) 总的电压增益

$$A_{VD2} = \frac{\beta_2 (R_{e2} \parallel R_{i2})}{2(r_{be2} + R_b)}$$

$$R_{i2} = r_{be3} + (1 + \beta_3) R_{e3}$$

$$= (2.3 + 81 \times 3) \text{ k}\Omega = 245.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_{e2} \parallel R_{i2} = 9.6 \text{ k}\Omega$$

$$A_{VD2} = \frac{50 \times 9.6}{2(3.78 + 1)} \approx 50$$

$$A_{V2} = - \frac{\beta_3 R_{e3}}{r_{be3} + (1 + \beta_3) R_{e3}}$$

$$= - \frac{80 \times 12}{2.3 + (1 + 80)3} = -3.9$$

$$A_V = A_{VD2} \cdot A_{V2} = -50 \times 3.9 = -195$$

(3) 当 $v_i = 5 \text{ mV}$ 时, 输出电压

$$v_O = A_V \cdot v_i = -195 \times 5 \times 10^{-3} = -0.98 \text{ V}$$

(4) 当输出端接一负载电阻 $R_L = 12 \text{ k}\Omega$ 时

$$A'_{V2} = - \frac{\beta_3 (R_{e3} \parallel R_L)}{r_{be3} + (1 + \beta_3) R_{e3}}$$

$$= - \frac{80 \times 6}{2.3 + (1 + 80)3} = -1.95$$

$$A'_V = A_{VD2} \cdot A'_{V2} = -97.5$$

6.2.9 电路如图题 6.2.9 所示, 设所有 BJT 的 $\beta = 20$, $r_{be} = 2.5 \text{ k}\Omega$, $r_{ce} = 200 \text{ k}\Omega$, FET 的 $g_m = 4 \text{ mS}$, 其他参数如图所示。求: (1) 两级放大电路的电压增益 $A_V = A_{V1} \cdot A_{V2}$; (2) R_{id} 和 R_o ;

(3) 第一级单端输出时的差模电压增益 $A_{VD1} = \frac{v_{o1}}{v_{id}}$ 、共模电压增益 A_{VC1} 和共模抑制比 K_{CMR} 。

注：源极恒流源交流等效电阻为

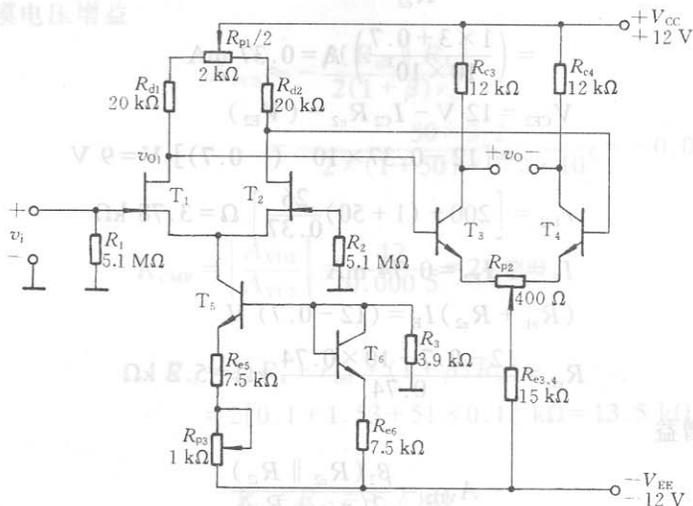
$$r_o = r_{ce5} \left[1 + \frac{\beta(R_{e5} + R_{p3})}{[R_3 \parallel (r_{be6} + R_{e6})] + r_{be5} + (R_{e5} + R_{p3})} \right]$$

单端输出的共模电压增益

共模抑制比

差模输入电阻

差模输出电阻



图题 6.2.9

解 (1) 两级放大电路的电压增益

$$\begin{aligned} A_{VD} &= A_{V1} \cdot A_{V2} = -g_m R'_{L1} \left[-\frac{\beta R_{c3}}{r_{be3} + (1 + \beta) \frac{R_{p2}}{2}} \right] \\ &= -g_m \left\{ \left(R_{d1} + \frac{R_{p1}}{2} \right) \parallel \left[r_{be3} + (1 + \beta) \frac{R_{p2}}{2} \right] \right\} \left[-\frac{\beta R_{c3}}{r_{be3} + (1 + \beta) \frac{R_{p2}}{2}} \right] \\ &= -4 \times 5.1 \times \left[-\frac{20 \times 12}{2.5 + (1 + 20) \times 0.2} \right] \\ &= 730 \end{aligned}$$

(2) 输入电阻 $R_{id} = R_1 \parallel r_{gs} \approx R_1 = 5.1 \text{ M}\Omega$

输出电阻 $R_o = R_{c3} + R_{c4} = 24 \text{ k}\Omega$

(3) 第一级单端输出时的差模电压增益

$$\begin{aligned} A_{VD1} &= -\frac{1}{2} g_m R'_{L1} \\ &= -\frac{1}{2} g_m \left\{ \left(R_{d1} + \frac{R_{p1}}{2} \right) \parallel \left[r_{be3} + (1 + \beta) \frac{R_{p2}}{2} \right] \right\} \end{aligned}$$

$$= -\frac{1}{2} \times 4 \times 5.1 = -10.2$$

T_1 、 T_2 源极恒流源交流等效电阻

$$r_o = r_{ce5} \left\{ 1 + \frac{\beta(R_{e5} + R_{p3})}{[R_3 \parallel (r_{be6} + R_{e6})] + r_{be5} + (R_{e5} + R_{p3})} \right\} V$$

$$= 200 \left\{ 1 + \frac{20 \times 8.5}{2.8 + 2.5 + 8.5} \right\} k\Omega = 2\,664\,k\Omega$$

第一级单端输出的共模电压增益

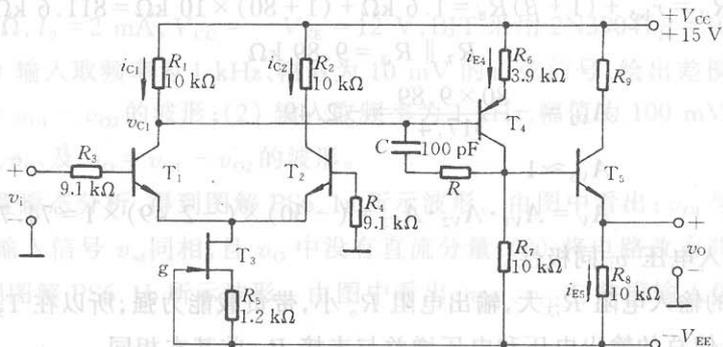
$$A_{v_{c1}} = -\frac{g_m R'_{L1}}{1 + g_m (2r_o)} = -\frac{4 \times 5.1}{1 + 4 \times 2 \times 2\,664} = -0.96 \times 10^{-3}$$

共模抑制比

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{v_{D1}}}{A_{v_{c1}}} \right| = \frac{10.2}{0.96 \times 10^{-3}} = 10.6 \times 10^3$$

6.2.10 电路如图题 6.2.10 所示, 设 BJT 的 $\beta = 80$, T_1 、 T_2 、 T_5 为硅管, $V_{BE} = 0.7\text{ V}$, T_4 为锗管, $|V_{BE4}| = 0.2\text{ V}$ 。(1) 当 $v_i = 0$ 时, $v_o = 0$, 求 I_{C5} 、 I_{C4} 、 I_{C1} 及 V_{GS} 的值;(2) 求电路总的电压增益 A_v , 并标出输出电压的极性;(3) 求当电路输出端接一电阻 $R_L = 12\text{ k}\Omega$ 时的电压增益 A'_v 。

注: 电路计算过程中, 忽略 RC 补偿电路的影响。



图题 6.2.10

解 (1) 求 I_{C5} 、 I_{C4} 、 I_{C1} 及 V_{GS}

$$I_{C5} \approx I_{E5} = \frac{v_o - V_{EE}}{R_8} = \frac{0 - (-15)\text{ V}}{10 \times 10^3 \Omega} = 1.5\text{ mA}$$

$$I_{C4} = \frac{V_{B5} - V_{EE}}{R_7} = \frac{[0.7 - (-15)]\text{ V}}{10 \times 10^3 \Omega} = 1.57\text{ mA}$$

$$V_{B4} \approx V_{CC} - I_{C4} R_6 = (15 - 1.57 \times 3.9 - 0.2)\text{ V}$$

$$= 8.68\text{ V}$$

$$I_{C1} = \frac{V_{CC} - V_{B4}}{R_1} = \frac{(15 - 8.68)\text{ V}}{10 \times 10^3 \Omega} = 0.6\text{ mA}$$

$$r_{be1} = \left[200 + (1 + 80) \frac{26}{0.6} \right] \Omega = 3.7\text{ k}\Omega$$

$$r_{be4} = \left[200 + (1 + 80) \frac{26}{1.57} \right] \Omega = 1.54\text{ k}\Omega$$

(3) 第一级单端输出时的差模电压增益

$$r_{be5} = \left[200 + (1 + 80) \frac{26}{1.5} \right] \Omega = 1.6 \text{ k}\Omega$$

注：源极偏流 $V_{GS} = -I_S R_S = -2I_{C1} R_S = -(2 \times 0.6 \times 1.2) \text{ V} = -1.44 \text{ V}$

(2) 电路总的电压增益

$$A_{V1} = - \frac{\beta(R_1 \parallel R_2)}{2(r_{be1} + R_3)}$$

其中

$$R_{i2} = r_{be4} + (1 + \beta)R_6 = 1.54 \text{ k}\Omega + (1 + 80) \times 3.9 \text{ k}\Omega = 317.4 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 \parallel R_2 = 9.695 \text{ k}\Omega$$

则

$$A_{V1} = - \frac{80 \times 9.695}{2(3.7 + 9.1)} = -30$$

$$A_{V2} = - \frac{\beta(R_7 \parallel R_{i3})}{r_{be5} + (1 + \beta)R_8}$$

其中

$$R_{i3} = r_{be5} + (1 + \beta)R_8 = 1.6 \text{ k}\Omega + (1 + 80) \times 10 \text{ k}\Omega = 811.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_7 \parallel R_{i3} = 9.89 \text{ k}\Omega$$

则

$$A_{V2} = - \frac{80 \times 9.89}{317.4} = -2.49$$

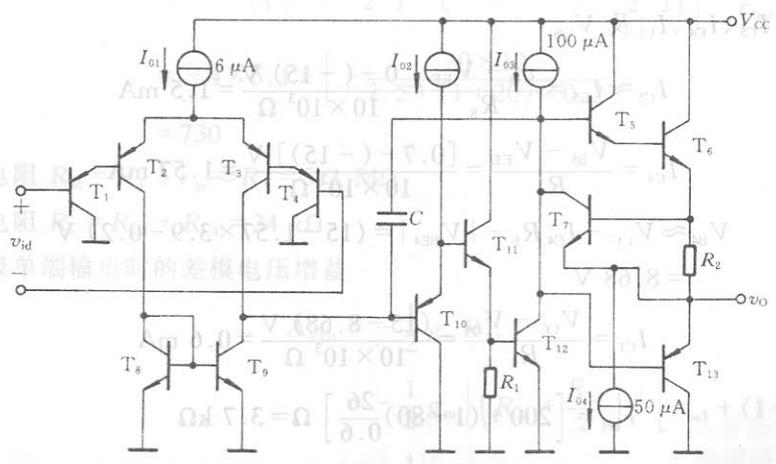
$$A_{V3} \approx 1$$

$$A_V = A_{V1} \cdot A_{V2} \cdot A_{V3} = (-30) \times (-2.49) \times 1 = 74.7$$

输出电压 v_o 与输入电压 v_i 同极性。

(3) 由于 T_5 的输入电阻 R_{i3} 大, 输出电阻 R_o 小, 带负载能力强, 所以在 T_5 输出接一负载电阻 $R_L = 12 \text{ k}\Omega$ 时, 使总的输出电压和电压增益与未接 R_L 前基本相同。

6.4.1 低功耗型运放 LM324 的简化原理电路如图题 6.4.1 所示。试说明: (1) 输入级、中间



图题 6.4.1 LM324 的简化原理电路

级和输出级的电路形式和特点;(2) 电路中 T_8 、 T_9 和电流源 I_{01} 、 I_{02} 和 I_{03} 各起什么作用。

解 (1) 输入级由 T_1 、 T_2 和 T_3 、 T_4 组成的双入-单出的差分式放大电路,该电路可减小零点漂移,提高电路的共模抑制比。

中间级由 T_{10} 、 T_{11} 电压跟随电路和 T_{12} 共射电压增益放大电路组成。 T_{10} 、 T_{11} 组成的电路输入电阻大、输出电阻小,具有阻抗匹配作用; T_{12} 具有恒流源负载的共射电路,保证它的电压增益大。

输出级由 NPN 管 T_5 、 T_6 与 PNP 管 T_{13} 组成的互补对称电路,具有输出电阻小,带负载能力强的特点。

(2) T_8 、 T_9 组成镜像电流源电路,作为输入级的集电极有源负载,可提高输入级的电压增益;电流源 I_{01} 是差分输入级的射极恒流源,可提高电路的共模抑制比。

电流源 I_{02} 作为 T_{10} 的射极有源负载,提高该级的输入电阻,扩大跟随范围;电流源 I_{03} 为 T_{12} 的集电极有源负载,提高中间级的电压增益。

PSPICE 习题

PS6.1 差分式放大电路形式如图题 6.2.3 所示,电路参数为 $R_{c1} = R_{c2} = 6.8 \text{ k}\Omega$, $R_{e1} = R_{e2} = 200 \Omega$, $r_o = 100 \text{ k}\Omega$, $I_0 = 2 \text{ mA}$, $V_{CC} = -V_{EE} = 12 \text{ V}$, BJT 采用 2N3904 ($\beta = 100$)。运用 PSPICE 分析该电路。(1) 输入取频率为 1 kHz、幅值为 10 mV 的正弦信号,绘出差模输入时,输出电压 v_{O1} 和 v_{O2} 及 $v_O = v_{O1} - v_{O2}$ 的波形;(2) 输入取频率为 1 kHz、幅值为 100 mV 的正弦信号,绘出共模输入时, v_{O1} 、 v_{O2} 及 $v_O = v_{O1} - v_{O2}$ 的波形。

解 (1) 设置瞬态分析,得到图解 PS6.1a 所示波形。由图中看出: v_{O1} 与差模输入信号 v_{sd} 反相, v_{O2} 与差模输入信号 v_{sd} 同相,且 v_O 中没有直流分量;(2) 将电路改为共模输入形式,再进行瞬态分析,得到图解 PS6.1b 所示波形。由图中看出: v_{O1} 、 v_{O2} 与共模输入信号 v_{sc} 反相,且 $v_O = 0$ 。

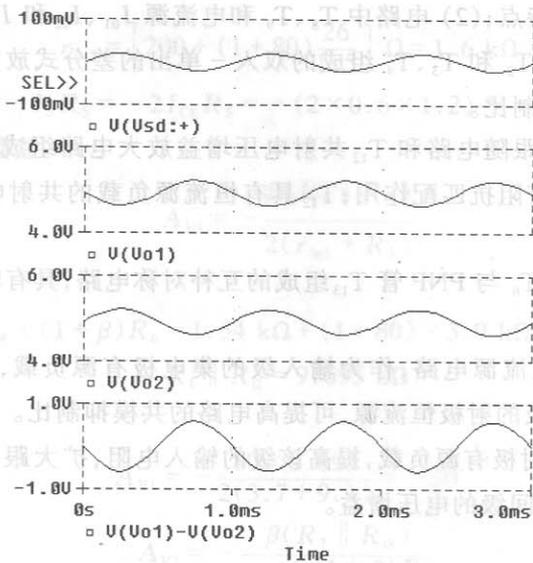
PS6.2 差分式放大电路如图题 6.2.7 所示,BJT 采用 2N2222 ($\beta = 50$),其他参数不变。试运用 PSPICE 分析该电路。(1) 求电路静态工作点;(2) 求单端输出时的差模电压增益 A_{VD2} 、共模电压增益 A_{VC2} 及共模抑制比 K_{CMR} ;(3) 断开负载 R_L ,分别绘出 $R_{c1} = R_{c2} = 0$ 和 $R_{c1} = R_{c2} = 300 \Omega$ 时的电压传输特性曲线,观察放大电路线性运用时, R_c 对差模输入信号范围的影响。

解 (1) 设置静态工作点分析(Bias Point Detail),得

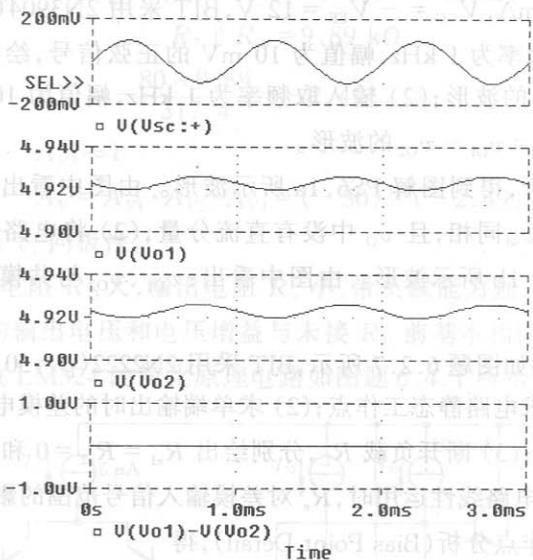
	Q_Q1	Q_Q2	Q_Q3
I_B (A)	2.08E-05	2.11E-05	4.13E-05
I_C (A)	9.59E-04	9.55E-04	1.96E-03
V_{CE} (V)	5.14E+00	3.71E+00	5.86E+00

(2) 设置直流小信号传递函数值分析(Transfer Function)功能,得到 $A_{VD2} = 12$;将电路改成共模输入形式,再进行分析,得到 $A_{VC2} = 0.001465$ 。则共模抑制比 $K_{CMR} = |A_{VD2}/A_{VC2}| = 8191$ 。

(3) 设置直流扫描分析(DC Sweep)功能,对输入电压进行扫描。同时在参数分析(Paramet-



(a)

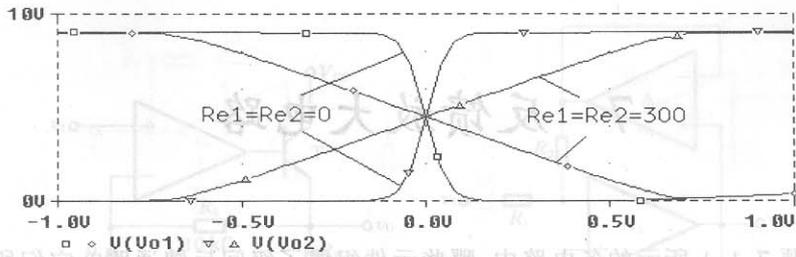


(b)

图解 PS6.1

ric)功能中设置 R_e 取 $0.000\ 1\ \Omega$ 和 $300\ \Omega$ 两个值,经仿真分析,得到电压传输特性曲线如图题 PS6.2 所示,由图中看出, R_e 越大,差模输入信号范围也越大,但放大倍数会下降(电压传输特性曲线斜率减小)。

PS6.3 电路如图题 6.2.9 所示, $R_3 = 6.8\ \text{k}\Omega$, JFET—— T_1 、 T_2 采用 2N3819,且 $g_m = 4\ \text{mS}$,



图题 PS6.2

BJT 采用 2N2222, 且 $\beta = 20$ 。试用 PSPICE 分析该电路。(1) 求电路 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 的 Q 点;(2) 求两级放大电路单端输出的差模电压增益;(3) 求第一级单端输出时的 A_{VD1} 、 A_{VC1} 和 K_{CMR} ;(4) 当输入电压 v_i 取频率为 1 kHz、幅值为 2 mV 的正弦电压信号时, 绘出单端(T_4) 输出电压 v_o 的波形。

解 (1) 将 2N3819 模型中的 Beta 改为 12 m, 此时 $g_m = 4 \text{ mS}$; 将 2N2222 模型中的 BF 改为 20, 设置静态工作点分析, 得

	T1	T2
I_D	3.49E-04	3.49E-04
V_{GS}	-2.83E+00	-2.83E+00
V_{DS}	1.32E+00	1.32E+00

	T3	T4
I_B	2.54E-05	2.54E-05
I_C	4.89E-04	4.88E-04
V_{CE}	2.62E+00	2.62E+00

(2) 设置直流小信号传递函数数值分析, 由 T_4 集电极输出, 得到 $A_{VD4} = -357.7$;

(3) 设置直流小信号传递函数数值分析, 由 T_1 漏极输出, 得到 $A_{VD1} = -8.012$, $A_{VC1} = -0.005799$, 则 $K_{CMR} = |A_{VD1}| / |A_{VC1}| = 1381.6$;

(4) 设置瞬态分析, 输入、输出波形如图解 PS6.3 所示。

c 图中, R_1 、 R_2 引入电流并联负反馈;

d 图中, R_1 、 R_2 引入电压并联负反馈;

e 图中, V_{o1} 、 V_{o2} 引入电压并联负反馈;

f 图中, V_{o1} 、 V_{o2} 引入电压串联负反馈;

7.1.3 在图题 7.1.3 中, 分别指出 R_1 、 R_2 引入的反馈类型及各自的主要作用; 若 R_1 、 R_2 的大小有何要求?

解 图题 7.1.3a 中, R_1 、 R_2 引入电压串联负反馈, 故从反馈效果考虑, 要求 R_1 越小越好。b 图中引入电压并联负反馈, 故从反馈效果考虑, 要求 R_1 越大越好。

7.1.4 电路如图题 7.1.4 所示。(1) 分别指出由 R_1 、 R_2 引入的两路反馈的类型及各自的主要作用;(2) 指出这两路反馈在影响该放大电路性能方面可能出现的矛盾是什么?(3) 为了消除上述可能出现的矛盾, 有人提出将 R_1 、 R_2 并联, 此方法是否可行? 为什么? 你认为怎样才能消除这个矛盾?

图解 PS6.3