

第三章 多级放大电路

自 测 题

一、判断下列说法是否正确，凡对的在括号内打“√”，否则打“×”。

(1) 现测得两个共射放大电路空载时的电压放大倍数均为 -100 ，将它们连成两级放大电路，其电压放大倍数应为 10000 。()

(2) 阻容耦合多级放大电路各级的 Q 点相互独立，()它只能放大交流信号。()

(3) 直接耦合多级放大电路各级的 Q 点相互影响，()它只能放大直流信号。()

(4) 只有直接耦合放大电路中晶体管的参数才随温度而变化。()

(5) 互补输出级应采用共集或共漏接法。()

解：(1) × (2) √ (3) √ (4) × (5) √

二、现有基本放大电路：

- A. 共射电路 B. 共集电路 C. 共基电路
D. 共源电路 E. 共漏电路

根据要求选择合适电路组成两级放大电路。

(1) 要求输入电阻为 $1k\Omega$ 至 $2k\Omega$ ，电压放大倍数大于 3000 ，第一级应采用_____，第二级应采用_____。

(2) 要求输入电阻大于 $10M\Omega$ ，电压放大倍数大于 300 ，第一级应采用_____，第二级应采用_____。

(3) 要求输入电阻为 $100k\Omega \sim 200k\Omega$ ，电压放大倍数数值大于 100 ，第一级应采用_____，第二级应采用_____。

(4) 要求电压放大倍数的数值大于 10 ，输入电阻大于 $10M\Omega$ ，输出电阻小于 100Ω ，第一级应采用_____，第二级应采用_____。

(5) 设信号源为内阻很大的电压源，要求将输入电流转换成输出电压，且 $|A_{ui}| = |U_o / I| > \frac{1000}{10000}$ ，输出电阻 $R_o < 100$ ，第一级应采用_____，第二级应采用_____。

解：(1) A, A (2) D, A (3) B, A (4) D, B
(5) C, B

三、选择合适答案填入空内。

- (1) 直接耦合放大电路存在零点漂移的原因是_____。
- A. 电阻阻值有误差 B. 晶体管参数的分散性
C. 晶体管参数受温度影响 D. 电源电压不稳定
- (2) 集成放大电路采用直接耦合方式的原因是_____。
- A. 便于设计 B. 放大交流信号 C. 不易制作大容量电容
- (3) 选用差分放大电路的原因是_____。
- A. 克服温漂 B. 提高输入电阻 C. 稳定放大倍数
- (4) 差分放大电路的差模信号是两个输入端信号的_____, 共模信号是两个输入端信号的_____。
- A. 差 B. 和 C. 平均值
- (5) 用恒流源取代长尾式差分放大电路中的发射极电阻 R_e , 将使电路的_____。
- A. 差模放大倍数数值增大 B. 抑制共模信号能力增强 C. 差模输入电阻增大
- (6) 互补输出级采用共集形式是为了使_____。
- A. 电压放大倍数大 B. 不失真输出电压大
C. 带负载能力强

解: (1) C, D (2) C (3) A (4) A, C (5) B (6) C

四、电路如图 PT3.4 所示, 所有晶体管均为硅管, β 均为 60, $r_{be} = 100 \Omega$, 静态时 $|U_{BEQ}| \approx 0.7V$ 。试求:

- (1) 静态时 T_1 管和 T_2 管的发射极电流。
- (2) 若静态时 $u_o > 0$, 则应如何调节 R_{c2} 的值才能使 $u_o = 0V$? 若静态 $u_o = 0V$, 则 $R_{c2} = ?$ 电压放大倍数为多少?

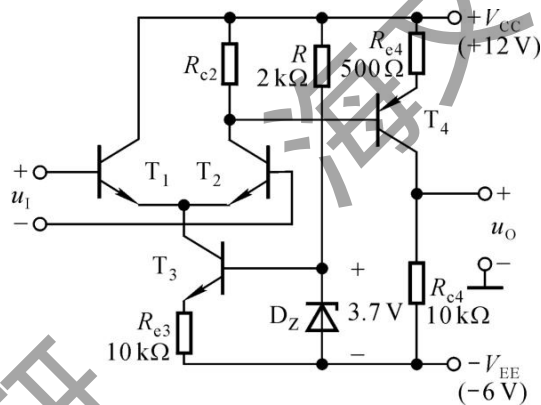


图 T3.4

解: (1) T_3 管的集电极电流

$$I_{C3} = (U_Z - U_{BEQ3}) / R_{e3} = 0.3 \text{ mA}$$

静态时 T_1 管和 T_2 管的发射极电流

$$I_{E1} = I_{E2} = 0.15 \text{ mA}$$

(2) 若静态时 $u_O > 0$, 则应减小 R_{c2} 。

当 $u_I = 0$ 时 $u_O = 0$, T_4 管的集电极电流 $I_{CQ4} = V_{EE} / R_{c4} = 0.6 \text{ mA}$ 。 R_{c2} 的电流及其阻值分别为

$$I_{R_{c1}} = I_{C2} - I_{B4} = I_{C2} - \frac{I_{CQ4}}{\beta} = 0.14 \text{ mA}$$

$$R_{c2} = \frac{I_{E4} R_{e4} + |U_{BEQ4}|}{I_{R_{c2}}} \approx 7.14 \text{ k}\Omega$$

电压放大倍数求解过程如下:

$$r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ2}} \approx 10.7 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be4} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ4}} \approx 2.74 \text{ k}\Omega$$

$$A_{u1} = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{R_{c2} // [r_{be4} + (1 + \beta) R_{c4}]}{r_{be2}} \approx 16.5$$

$$A_{u2} = -\frac{\beta R_{c4}}{r_{be4} + (1 + \beta) R_{c4}} \approx -18$$

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \approx -297$$

习 题

3.1 判断图 P3.1 所示各两级放大电路中， T_1 和 T_2 管分别组成哪种基本接法的放大电路。设图中所有电容对于交流信号均可视为短路。

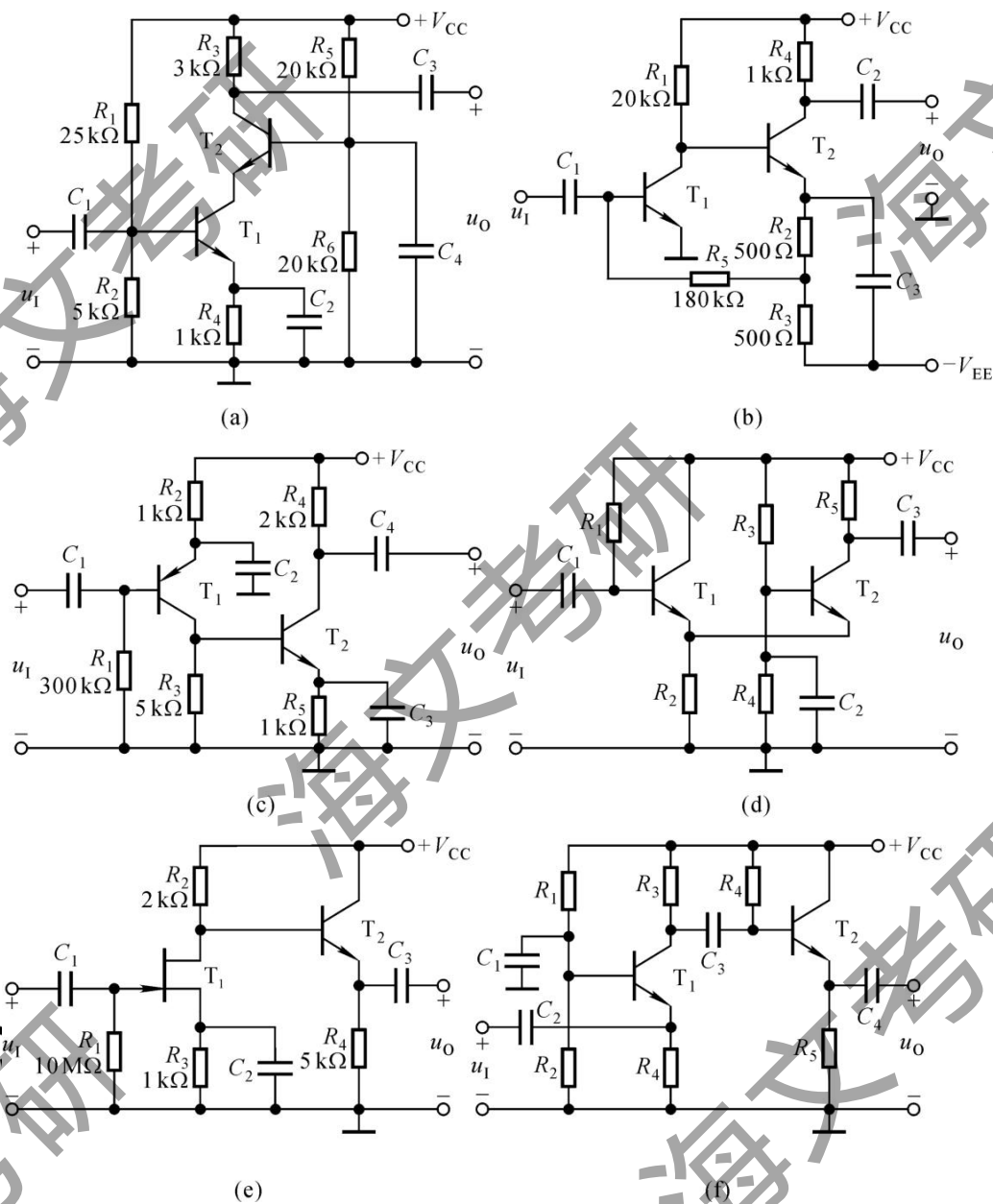


图 P3.1

解：(a) 共射，共基 (b) 共射，共射 (c) 共射，共射
 (d) 共集，共基 (e) 共源，共集 (f) 共基，共集

3.2 设图 P3.2 所示各电路的静态工作点均合适，分别画出它们的交流等效电路，并写出 A_u 、 R_i 和 R_o 的表达式。

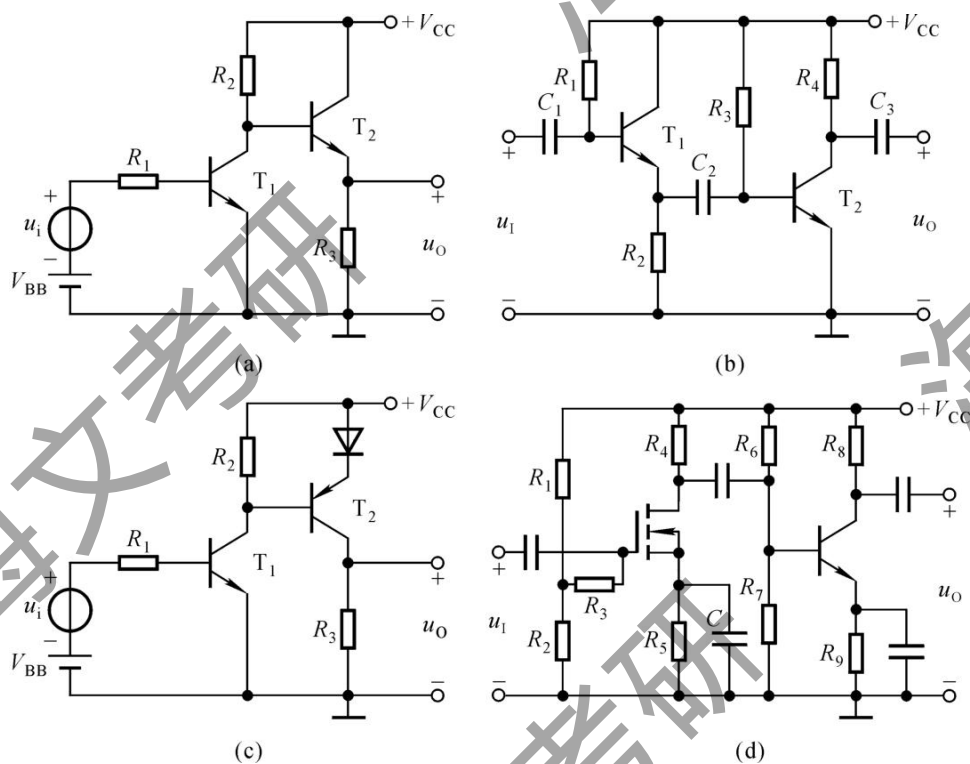


图 P3.2

解：(1) 图示各电路的交流等效电路如解图 P3.2 所示。

(2) 各电路 A_u 、 R_i 和 R_o 的表达式分别为

图 (a)

$$A_u = -\frac{\beta_1 \{ \frac{R_2}{R_1 + R_2} // [r_{be2} + (1 + \beta_2) R_3] \}}{R_1 + r_{be1}} \cdot \frac{(1 + \beta_2) R_3}{r_{be2} + (1 + \beta_2) R_3}$$

$$R_i = R_1 + r_{be1}$$

$$R_o = R_3 // \frac{r_{be2} + R_2}{1 + \beta_2}$$

图 (b)

$$A_u = \frac{(1 + \beta_1)(R // R_3 // r_{be2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_2 // R_3 // r_{be2})} \cdot \left(\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} \right)$$

$$R_i = R_1 // [r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_2 // R_3 // r_{be2})]$$

$$R_o = R_4$$

图 (c)

$$A_u = - \frac{\beta_1 \{ r_{be2} // [r_d + (1 + \beta_2) r_d] \}}{R_1 + r_{be1}} \cdot \frac{\beta_2 R_3}{r_{be2} + (1 + \beta_2) r_d}$$

$$R_i = R_1 + r_{be1}$$

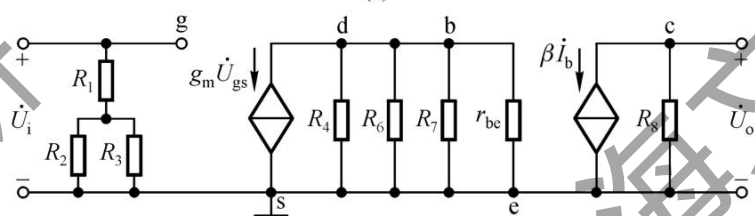
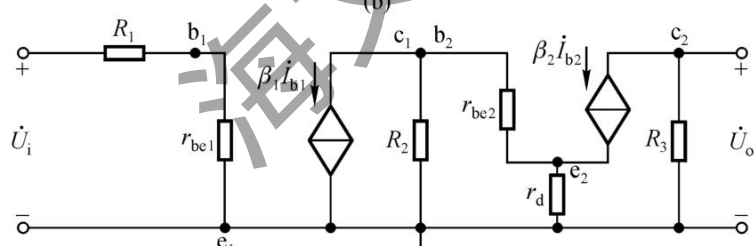
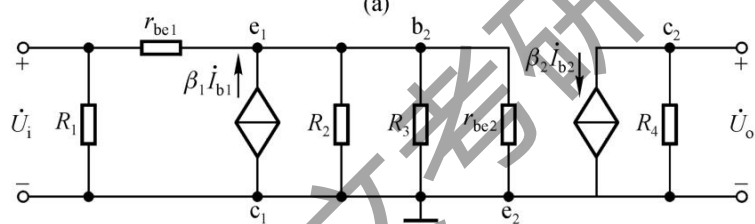
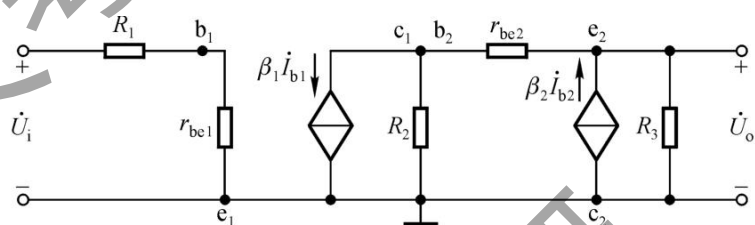
$$R_o = R_3$$

图 (d)

$$A_u = [-g_m (R_4 // R_6 // R_7 // r_{be2})] \left(\frac{\beta_2 R_8}{r_{be2}} \right)$$

$$R_i = R_3 + R_1 // R_2$$

$$R_o = R_8$$



解图 P3.2

3.3 基本放大电路如图 P3.3 (a)(b) 所示，图 (a) 虚线框内为电路 I，图 (b) 虚线框内为电路 II。由电路 I、II 组成的多级放大电路如图 (c)(d)(e) 所示，它们均正常工作。试说明图 (c)(d)(e) 所示电路中

- (1) 哪些电路的输入电阻比较大；
- (2) 哪些电路的输出电阻比较小；
- (3) 哪个电路的 $|A| = |U_o/U_s|$ 最大。

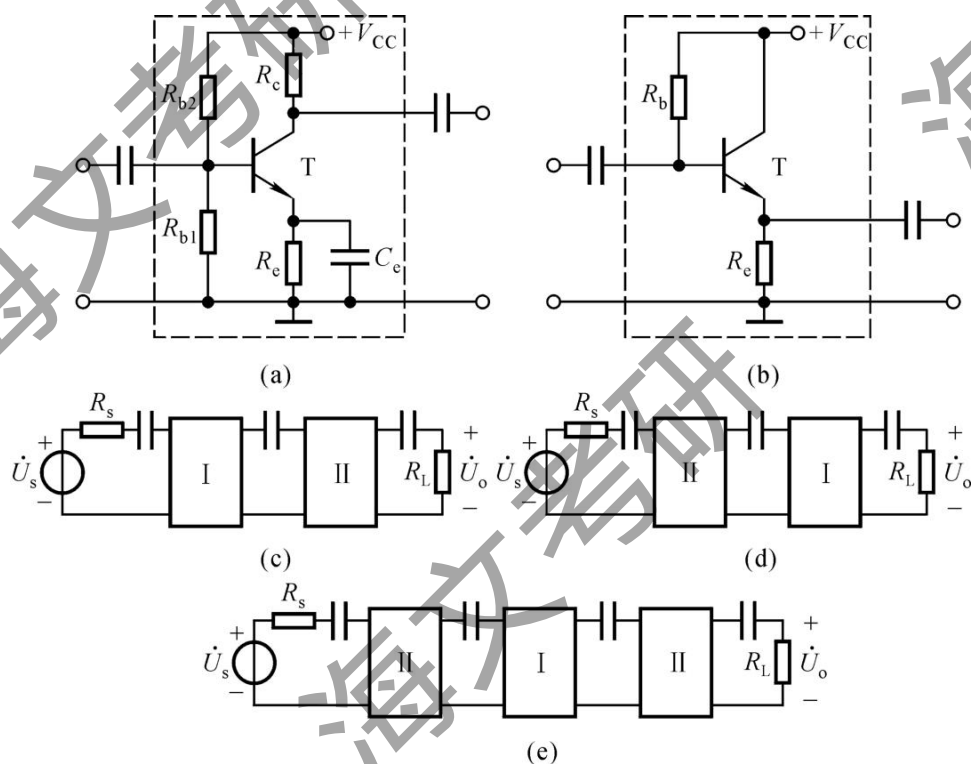


图 P3.3

解：(1) 图 (d)(e) 所示电路的输入电阻较大。

(2) 图 (c)(e) 所示电路的输出电阻较小。

(3) 图 (e) 所示电路的 $|A|$ 最大。

3.4 电路如图 P3.1 (a)(b) 所示, 晶体管的 β 均为 50, r_{be} 均为 $1.2\text{k}\Omega$, Q 点合适。求解 A_u 、 R_i 和 R_o 。

解: 在图 (a) 所示电路中

$$A_{u1} = \frac{-\beta_1 \cdot \frac{r_{be2}}{\beta_2}}{r_{be1}}$$

$$A_{u2} = \frac{\beta_2 R_3}{r_{be2}} = 125$$

$$A_u = A_1 \cdot A_2 \approx -125$$

$$R_i = R_1 // R_2 // r_{be1} \approx 0.93\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_3 = 3\Omega$$

在图 (b) 所示电路中

$$A_{u1} = \frac{-\beta_1 \cdot (R_1 // r_{be2})}{r_{be1}} \approx -50$$

$$A_{u2} = -\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} \approx -42$$

$$A_u = A_1 \cdot A_2 \approx 2100$$

$$R_i = (R_5 + R_2 // R_3) // r_{be1} \approx 2\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_4 = 1\text{k}\Omega$$

3.5 电路如图 P3.1 (c)(e) 所示, 晶体管的 β 均为 80, r_{be} 均为 $1.5\text{k}\Omega$, 场效应管的 g_m 为 3mA/V ; Q 点合适。求解 A_u 、 R_i 和 R_o 。

解: 在图 (c) 所示电路中

$$A_{u1} = \frac{-\beta_1 \cdot (R_3 // r_{be2})}{r_{be1}} \approx -62$$

$$A_{u2} = -\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} \approx -107$$

$$A_u = A_1 \cdot A_2 \approx 6634$$

$$R_i = R_1 // r_{be1} \approx 5\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_4 = 2\text{k}\Omega$$

在图 (e) 所示电路中

$$A_{u1} = -g_m \{ r_{be} + (1 + \beta) R_4 \} \approx g_m R_2 \approx -6$$

$$A_{u2} = \frac{(1 + \beta) R_4}{r_{be} + (1 + \beta) R_4} \approx 1$$

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \approx -6$$

$$R_i = R_1 = 10 \text{ M}\Omega$$

$$R_o = R_4 // \frac{r_{be} + R_2}{1 + \beta} \approx 43 \Omega$$

3.6 图 P3.6 所示电路参数理想对称, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, $r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$ 。

(1) 写出 R_w 的滑动端在中点时 A_d 的表达式;

(2) 写出 R_w 的滑动端在最右端时 A_d 的表达式, 比较两个结果有什么不同。

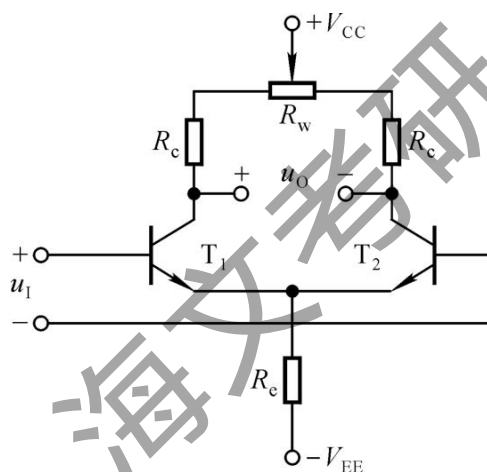


图 P3.6

解: (1) R_w 的滑动端在中点时 A_d 的表达式为

$$A_d = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} = - \left(\frac{\beta R_c + \frac{R_w}{2}}{r_{be}} \right)$$

(2) R_w 的滑动端在最右端时

$$\Delta u_{c1} = -\frac{\beta(R_c + R_w)}{2r_{be}} \cdot \Delta u_i \quad \Delta u_{c2} = +\frac{\beta R_c}{2r_{be}} \cdot \Delta u_i$$

$$\Delta u_o = \Delta u_{c1} - \Delta u_{c2} = -\frac{\beta(R_c + \frac{R}{2})}{r_{be}} \cdot \Delta u_i$$

所以 A_d 的表达式为

$$A_d = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} = -\left(\frac{\beta R_c + \frac{\beta R}{2}}{r_{be}}\right)$$

比较结果可知，两种情况下的 A_d 完全相等；但第二种情况下的

$$|\Delta u_{c1}| > |\Delta u_{c2}|。$$

3.7 图 P3.7 所示电路参数理想对称，晶体管的 β 均为 50， $r_{be} = 100 \Omega$ ， $U_{BEQ} \approx 0.7$ 。试计算 R_w 滑动端在中点时 T_1 管和 T_2 管的发射极静态电流 I_{EQ} ，以及动态参数 A_d 和 R_i 。

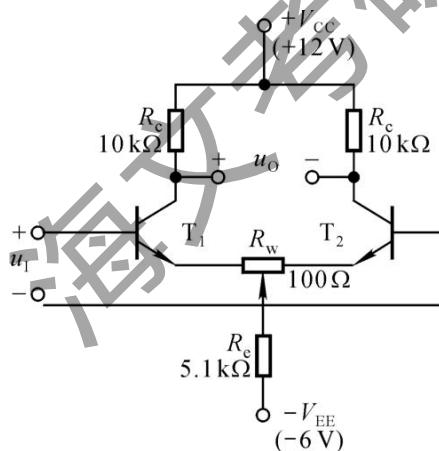


图 P3.7

解： R_w 滑动端在中点时 T_1 管和 T_2 管的发射极静态电流分析如下：

$$U_{BEQ} + I_{EQ} \cdot \frac{R_w}{2} + 2I_{EQ}R_e = V_{EE}$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{\frac{R_w}{2} + 2R_e} \approx 0.517 \text{mA}$$

A_d 和 R_i 分析如下：

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx 5.18 \text{ k}\Omega$$

$$A_d = - \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) \frac{R}{2}} \approx -97$$

$$R_i = 2r_{be} + (1 + \beta) R_w \approx 20.5 \text{ k}\Omega$$

3.8 电路如图 P3.8 所示， T_1 管和 T_2 管的 β 均为 40， r_{be} 均为 $3 \text{ k}\Omega$ 。试问：若输入直流信号 $u_{i1}=20 \text{ mV}$ ， $u_{i2}=10 \text{ mV}$ ，则电路的共模输入电压 $u_{ic}=?$ 差模输入电压 $u_{id}=?$ 输出动态电压 $\Delta u_o=?$

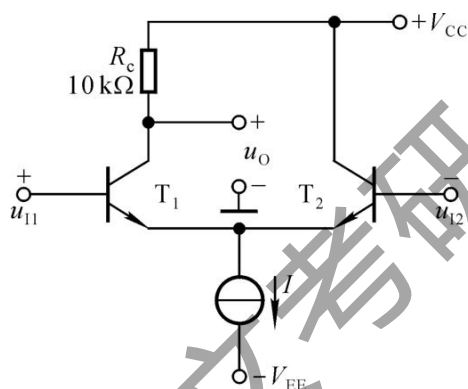


图 P3.8

解：电路的共模输入电压 u_{ic} 、差模输入电压 u_{id} 、差模放大倍数 A_d 和动态电压 Δu_o 分别为

$$u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} = 15 \text{ mV}$$

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 10 \text{ mV}$$

$$A_d = - \frac{\beta R_c}{2r_{be}} \approx -67$$

$$\Delta u_o = A_{id} u_{id} \approx -0.67 \text{ V}$$

由于电路的共模放大倍数为零，故 Δu_o 仅由差模输入电压和差模放大倍数决定。

3.9 电路如图 P3.9 所示，晶体管的 $\beta=50$ ， $r_{bb'}=100\Omega$ 。

(1) 计算静态时 T_1 管和 T_2 管的集电极电流和集电极电位；

(2) 用直流表测得 $u_o=2V$ ， $u_i=?$ 若 $u_i=10mV$ ，则 $u_o=?$

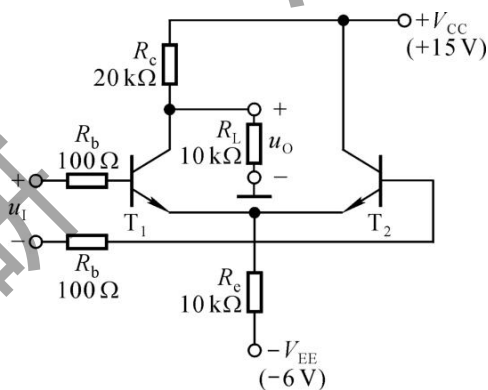


图 P3.9

解：(1) 用戴维宁定理计算出左边电路的等效电阻和电源为

$$R'_L = R_c \parallel R_L \approx 6.67k\Omega, \quad V'_{CC} = \frac{R_L}{R_c + R_L} \cdot V_{CC} = 5V$$

静态时 T_1 管和 T_2 管的集电极电流和集电极电位分别为

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ} \approx I_{EQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_c} = 0.265mA$$

$$U_{CQ1} = V'_{CC} - I_{CQ}R'_L \approx 3.23V$$

$$U_{CQ2} = V_{CC} = 15V$$

(2) 先求出输出电压变化量，再求解差模放大倍数，最后求出输入电压，如下：

$$\Delta u_o = u_o - U_{CQ1} \approx -1.23V$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} \approx 5k\Omega$$

$$A_d = -\frac{\beta R'_L}{2(R_b + r_{be})} \approx -32.7$$

$$u_i = \frac{\Delta u_o}{A_d} \approx 37.6mV$$

若 $u_i=10mV$ ，则

$$\Delta u_o = A_d u_i \approx -0.327V$$

$$u_o = U_{CQ1} + \Delta u_o \approx 2.9V$$

3.10 试写出图 P3.10 所示电路 A_d 和 R_i 的近似表达式。设 T_1 和 T_2 的第三章题解-12

流放大系数分别为 β_1 和 β_2 ，b-e 间动态电阻分别为 r_{be1} 和 r_{be2} 。

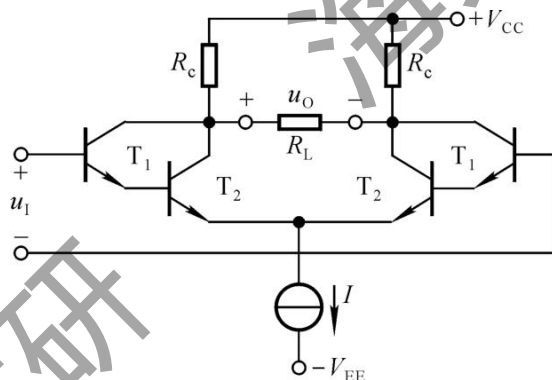


图 P3.10

解： A_d 和 R_i 的近似表达式分别为

$$A_d \approx -\frac{\beta_1 \beta_2 (R_c // \frac{R}{2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}}$$

$$R_i = [r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}]$$

3.11 电路如图 P3.11 所示， T_1 和 T_2 的低频跨导 g_m 均为 2mA/V 。试求解差模放大倍数和输入电阻。

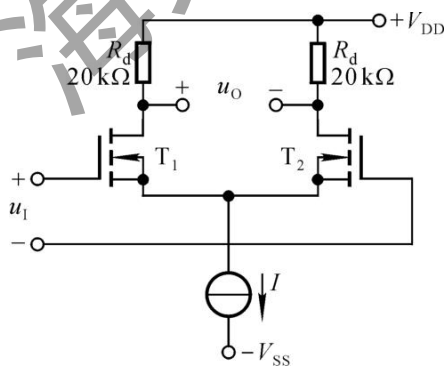


图 P3.11

解：差模放大倍数和输入电阻分别为

$$A_d = -g_m R_D = -40$$

$$R_i = \infty$$

3.12 试求出图 P3.12 所示电路的 A_d 。设 T_1 与 T_3 的低频跨导 g_m 均为

2mA/V, T_2 和 T_4 的电流放大系数 β 均为 80。

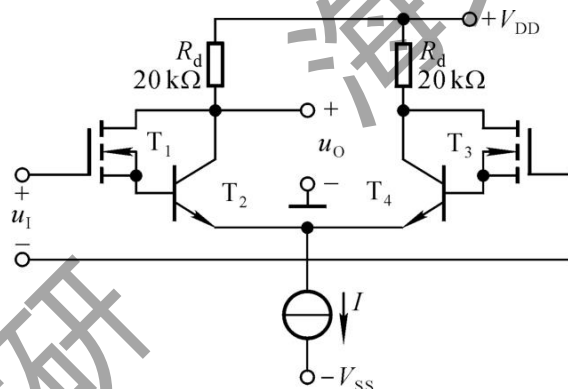


图 P3.12

解：首先求出输出电压和输入电压的变化量，然后求解差模放大倍数。

$$\Delta u_O = -\Delta u_D + \Delta u_C = -(\Delta u_D - \Delta u_C)R_D = -(\Delta u_{GS} + \beta \Delta u_{GS})R_D$$

$$\frac{1}{2} \Delta u_I = \Delta u_{GS} + \Delta u_{BE} = \Delta u_{GS} + \Delta u_D r_{be} = \Delta u_{GS} + \Delta u_{GS} r_{be}$$

$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{(1 + \beta) R_D}{1 + r_{be}}, \text{ 若 } r_{be} = 1 \text{ k}\Omega, \text{ 则 } A_d = -540.$$

3.13 电路如图 P3.13 所示, $T_1 \sim T_5$ 的电流放大系数分别为 $\beta_1 \sim \beta_5$, b-e 间动态电阻分别为 $r_{be1} \sim r_{be5}$, 写出 A_u 、 R_i 和 R_o 的表达式。

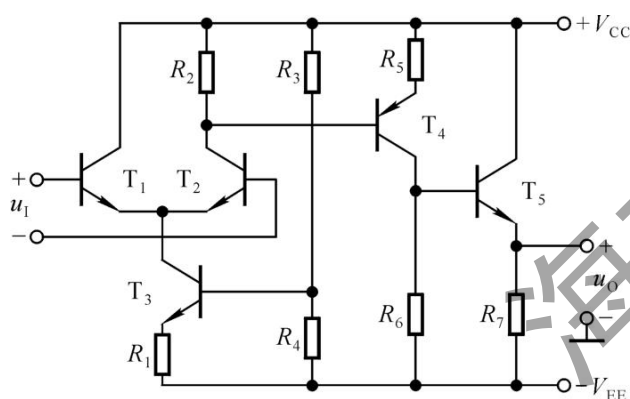


图 P3.13

解： A_u 、 R_i 和 R_o 的表达式分析如下：

$$A_{u1} = \frac{\Delta u_{O1}}{\Delta I_1} = \frac{\beta_1 \{ R_2 // [r_{be4} + (1 + \beta_4) R_5] \}}{R_1 + 2r_{be1}}$$

$$A_{u2} = \frac{\Delta u_{O2}}{\Delta I_2} = - \frac{\beta_4 \{ R_6 // [r_{be5} + (1 + \beta_5) R_7] \}}{R_4 + r_{be4} + (1 + \beta_4) R_5}$$

$$A_{u3} = \frac{\Delta u_{O3}}{\Delta I_3} = \frac{(1 + \beta_5) R_7}{r_{be5} + (1 + \beta_5) R_7}$$

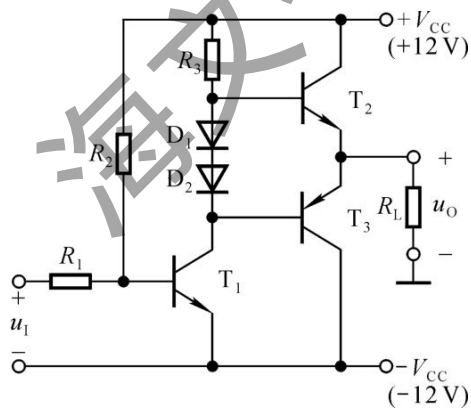
$$A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta I_1} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3}$$

$$R_i = r_{be1} + r_{be2}$$

$$R_o = R_7 // \frac{r_{be5} + R_6}{1 + \beta_5}$$

3.14 电路如图 3.14 所示。已知电压放大倍数为 -100 ，输入电压 u_i 为正弦波， T_2 和 T_3 管的饱和压降 $|U_{CES}| = 1V$ 。试问：

- (1) 在不失真的情况下，输入电压最大有效值 U_{imax} 为多少伏？
- (2) 若 $U_i = 10mV$ (有效值)，则 $U_o = ?$ 若此时 R_3 开路，则 $U_o = ?$ 若 R_3 短路，则 $U_o = ?$



P3.14

解：(1) 最大不失真输出电压有效值为

$$U_{om} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \approx 7.78V$$

故在不失真的情况下，输入电压最大有效值 U_{imax}

$$U_{\text{imax}} = \frac{U_{\text{om}}}{|A_u|} \approx 77.8 \text{ mV}$$

(2) 若 $U_i = 10 \text{ mV}$ ，则 $U_o = 1 \text{ V}$ (有效值)。

若 R_3 开路，则 T_1 和 T_3 组成复合管，等效 $\beta \approx \beta_1 \beta_3$ ， T_3 可能饱和，使得 $u_o \approx -11 \text{ V}$ (直流)。

若 R_3 短路，则 $u_o \approx 11.3 \text{ V}$ (直流)。