

## 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  $100\Omega$ ，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  $|\dot{A}_{ui}| = |\dot{U}_o / \dot{I}_i| > 1000$ ，输出电阻  $R_o < 100\Omega$ ，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, 均为 60,  $r_{bb'}=100$ , 静态时  $|U_{BEQ}|=0.7V$ 。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?

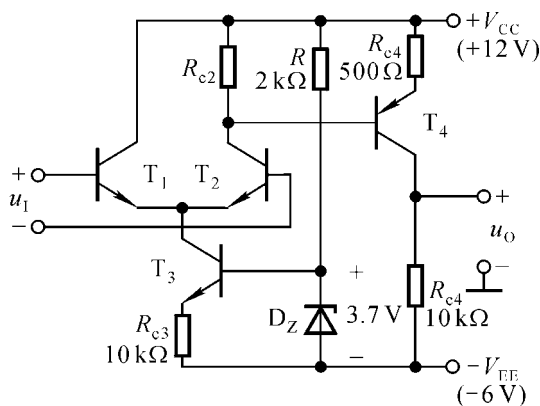


图 T3.4

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：

$$r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ2}} \approx 10.7\text{k}\Omega$$

$$r_{be4} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ4}} \approx 2.74\text{k}\Omega$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\beta \{ R_{c2} [r_{be4} + (1 + \beta) R_{e4}] \}}{2 r_{be2}} \approx 16.5$$

$$\dot{A}_{u2} = - \frac{\beta R_{c4}}{r_{be4} + (1 + \beta) R_{e4}} \approx -18$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx -297$$

## 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。

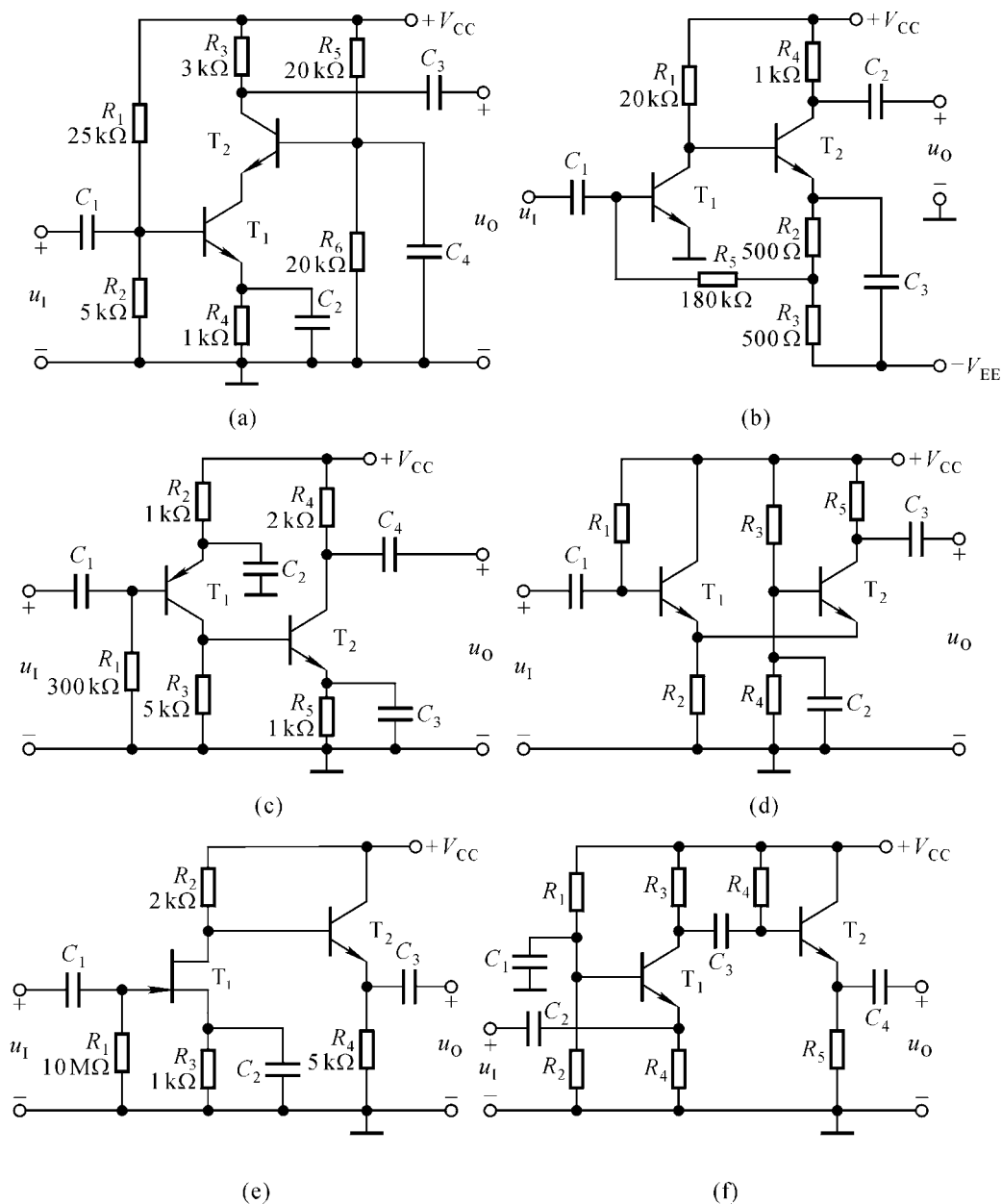


图 P3.1

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  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  的表达式。

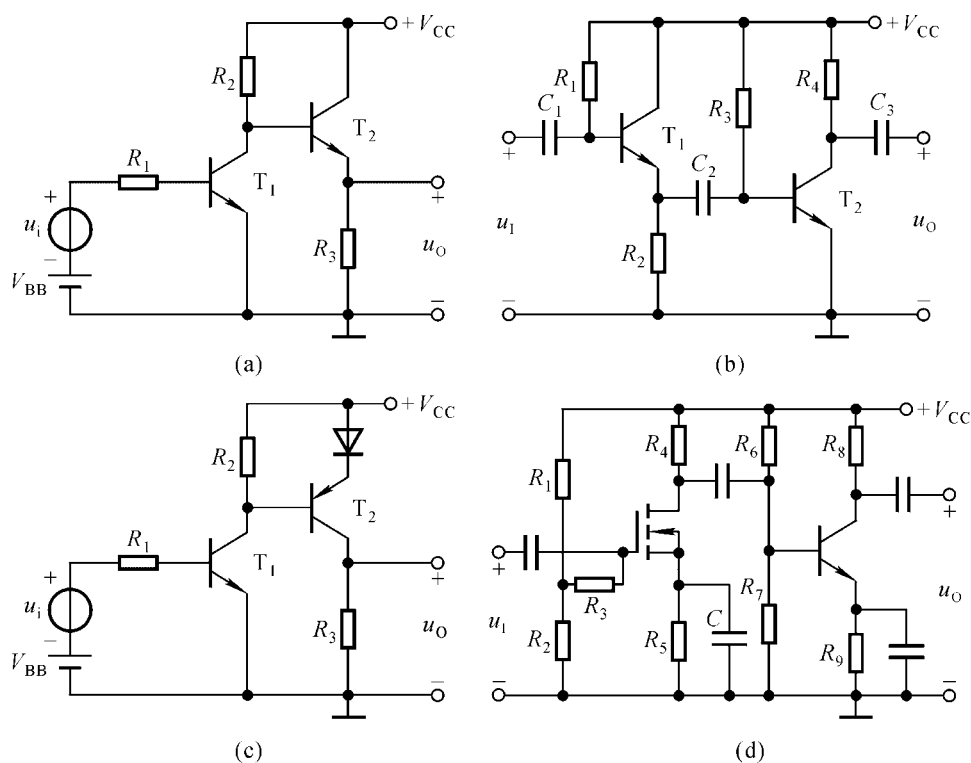


图 P3.2

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  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  的表达式分别为

图 (a)

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

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

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

图 (b)

$$\dot{A}_u = \frac{(1 + \beta_1)(R_2 \quad R_3 \quad r_{be2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_2 \quad R_3 \quad r_{be2})} \cdot \left(-\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}}\right)$$

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

$$R_o = R_4$$

图 ( c )

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta_1 \{R_2 \quad [r_{be2} + (1 + \beta_2)r_d]\}}{R_1 + r_{be1}} \cdot \left[-\frac{\beta_2 R_3}{r_{be2} + (1 + \beta_2)r_d}\right]$$

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

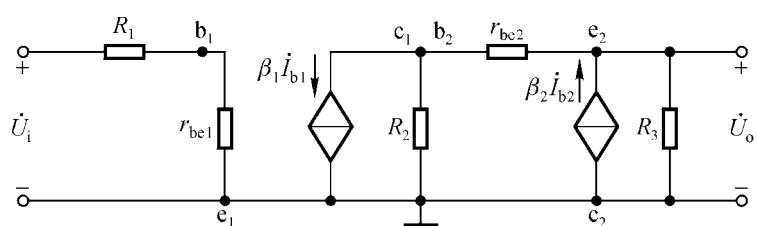
$$R_o = R_3$$

图 ( d )

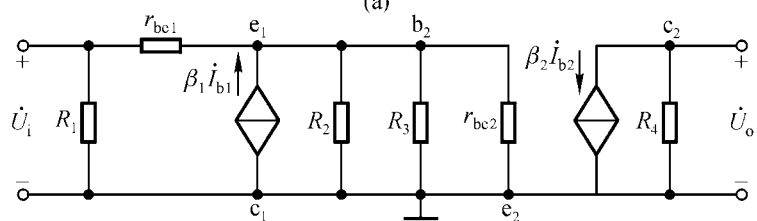
$$\dot{A}_u = [-g_m(R_4 \quad R_6 \quad R_7 \quad r_{be2})] \cdot \left(-\frac{\beta_2 R_8}{r_{be2}}\right)$$

$$R_i = R_3 + R_1 \quad R_2$$

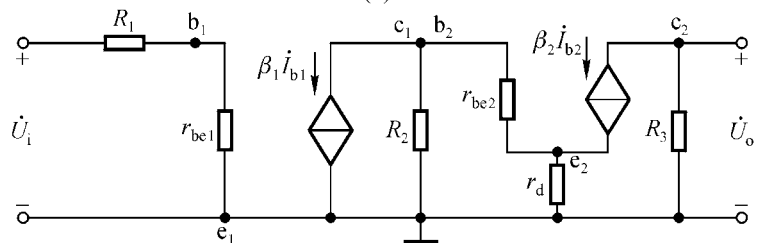
$$R_o = R_8$$



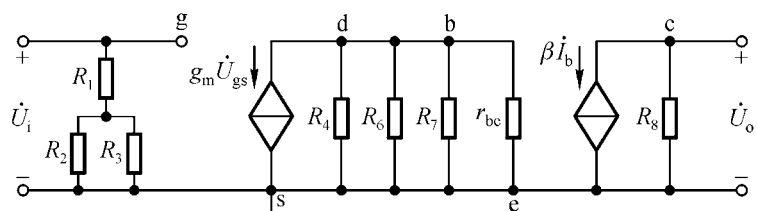
(a)



(b)



(c)



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 , 图 (b) 虚线框内为电路 。由电路 、 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  $|\dot{A}_{us}| = |\dot{U}_o / \dot{U}_s|$  最大。

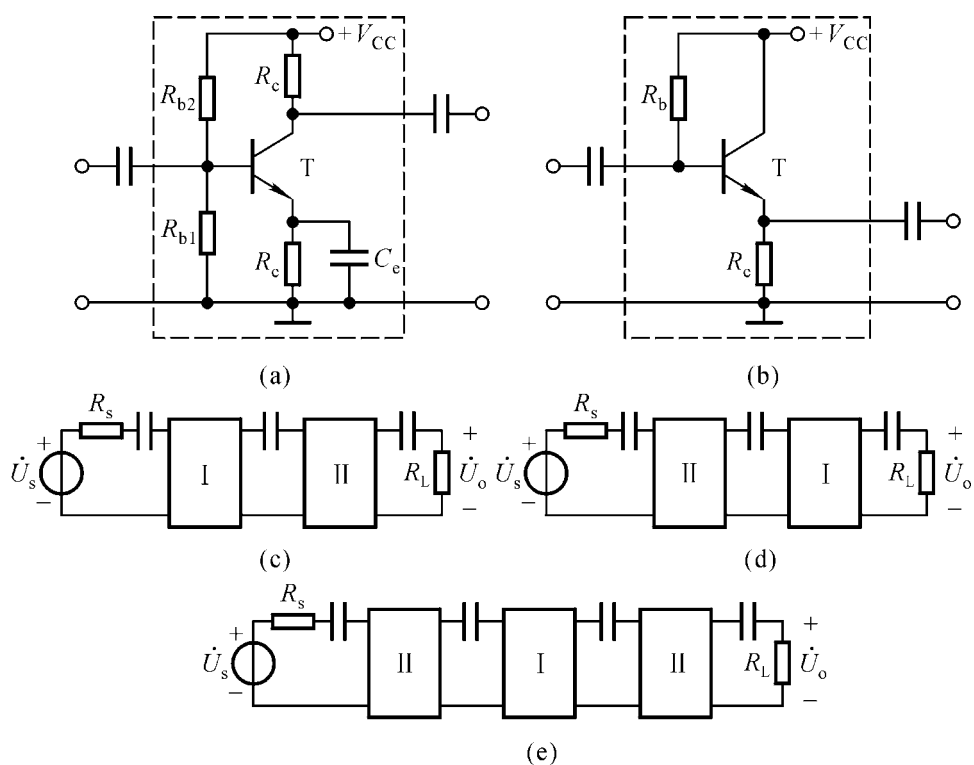


图 P3.3

- 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  $|\dot{A}_{us}|$  最大。

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

解：在图 ( a ) 所示电路中

$$\begin{aligned}\dot{A}_{u1} &= \frac{-\beta_1 \cdot \frac{r_{be2}}{1+\beta_2}}{r_{be1}} \\ \dot{A}_{u2} &= \frac{\beta_2 R_3}{r_{be2}} = 125 \\ \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx -125 \\ R_i &= R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be1} \approx 0.93k\Omega \\ R_o &= R_3 = 3k\Omega\end{aligned}$$

在图 ( b ) 所示电路中

$$\begin{aligned}\dot{A}_{u1} &= \frac{-\beta_1 \cdot (R_1 \parallel r_{be2})}{r_{be1}} \approx -50 \\ \dot{A}_{u2} &= -\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} \approx -42 \\ \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx 2100 \\ R_i &= (R_5 + R_2 \parallel R_3) \parallel r_{be1} \approx 1.2k\Omega \\ R_o &= R_4 = 1k\Omega\end{aligned}$$

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

解：在图 ( c ) 所示电路中

$$\begin{aligned}\dot{A}_{u1} &= \frac{-\beta_1 \cdot (R_3 \parallel r_{be2})}{r_{be1}} \approx -62 \\ \dot{A}_{u2} &= -\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} \approx -107 \\ \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx 6634 \\ R_i &= R_1 \parallel r_{be1} \approx 1.5k\Omega \\ R_o &= R_4 = 2k\Omega\end{aligned}$$



在图 (e) 所示电路中

$$\dot{A}_{u1} = -g_m \{R_2 \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R_4]\} \approx -g_m R_2 \approx -6$$

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

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx -6$$

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

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

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。

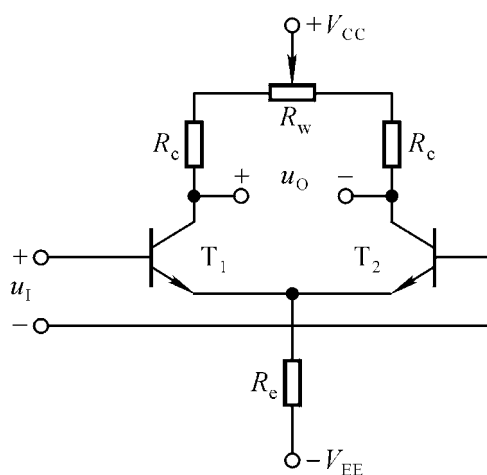


图 P3.6

解: (1)  $R_W$  的滑动端在中点时  $A_d$  的表达式为

$$A_d = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = -\frac{\beta(R_c + \frac{R_W}{2})}{r_{be}}$$

(2)  $R_W$  的滑动端在最右端时

$$\Delta u_{C1} = -\frac{\beta(R_c + R_w)}{2r_{be}} \cdot \Delta u_I \quad \Delta u_{C2} = +\frac{\beta R_c}{2r_{be}} \cdot \Delta u_I$$

$$\Delta u_O = \Delta u_{C1} - \Delta u_{C2} = -\frac{\beta(R_c + \frac{R_w}{2})}{r_{be}} \cdot \Delta u_I$$

所以  $A_d$  的表达式为

$$A_d = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = -\frac{\beta(R_c + \frac{R_w}{2})}{r_{be}}$$

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  $\beta$  均为 50， $r_{bb'} = 100 \Omega$ ， $U_{BEQ} = 0.7V$ 。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  $R_i$ 。

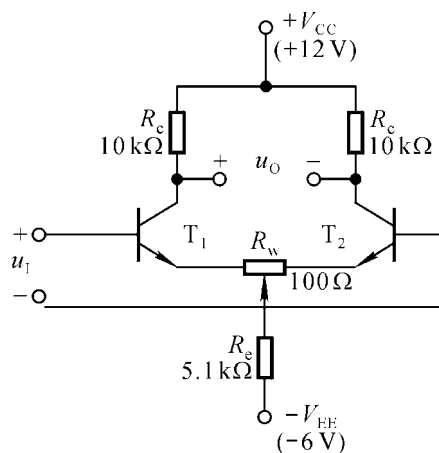


图 P3.7

**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：

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

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

$A_d$  和  $R_i$  分析如下：

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}} \approx 5.18\text{k}\Omega$$

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

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

3.8 电路如图 P3.8 所示， $T_1$  管和  $T_2$  管的  $\beta$  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  $u_O=?$

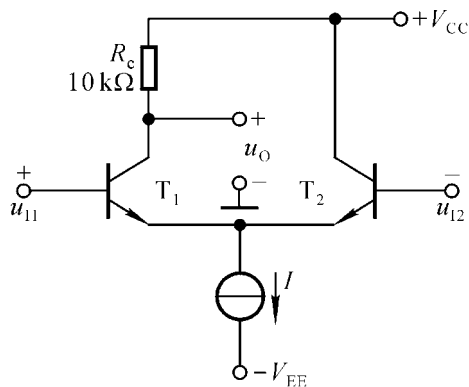


图 P3.8

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  $u_O$  分别为

$$u_{IC} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} = 15\text{mV}$$

$$u_{Id} = u_{I1} - u_{I2} = 10\text{mV}$$

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

$$\Delta u_O = A_d u_{Id} \approx -0.67\text{V}$$

由于电路的共模放大倍数为零，故  $u_O$  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  $u_O = ?$

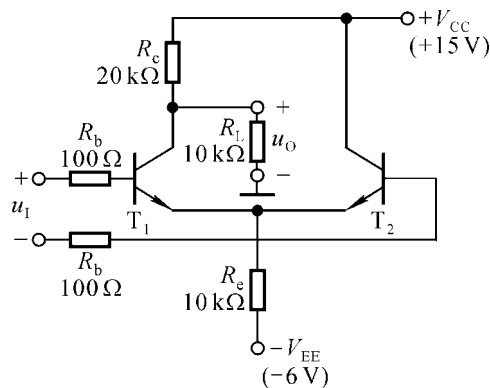


图 P3.9

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

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

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

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

(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：

$$u_O = u_{O1} - U_{CQ1} = -1.23V$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} \approx 5.1k\Omega$$

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

$$u_I = \frac{\Delta u_O}{A_d} \approx 37.6mV$$

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  $T_2$  的电

流放大系数分别为  $\beta_1$  和  $\beta_2$  , b-e 间动态电阻分别为  $r_{be1}$  和  $r_{be2}$ 。

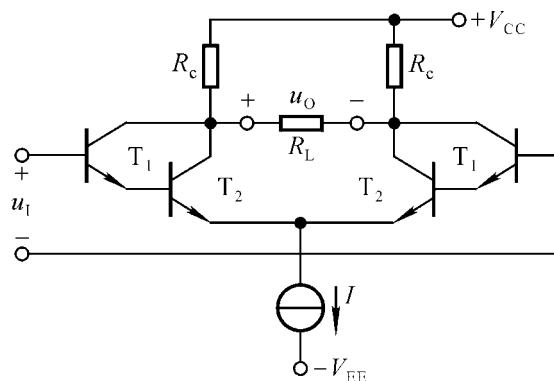


图 P3.10

解：  $A_d$  和  $R_i$  的近似表达式分别为

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

$$R_i = 2[r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}]$$

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

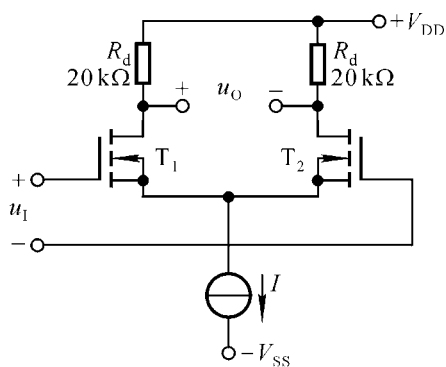


图 P3.11

解：差模放大倍数和输入电阻分别为

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

$$R_i =$$

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 均为 80。

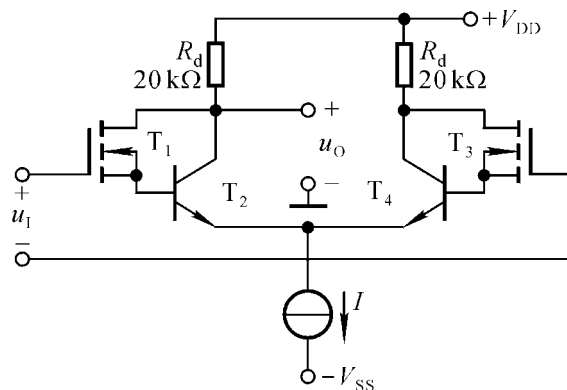


图 P3.12

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。

$$\Delta u_o = -(\Delta i_D + \Delta i_C)R_D = -(g_m \Delta u_{GS} + \beta g_m \Delta u_{GS})R_D$$

$$\frac{1}{2} \Delta u_i = \Delta u_{GS} + \Delta u_{BE} = \Delta u_{GS} + \Delta i_D r_{be} = \Delta u_{GS} + g_m \Delta u_{GS} r_{be}$$

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

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。

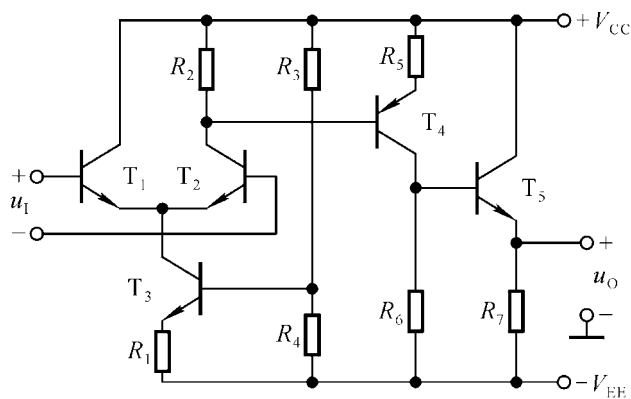


图 P3.13

解：  $A_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  的表达式分析如下：

$$A_{u1} = \frac{\Delta u_{O1}}{\Delta u_1} = \frac{\beta_1 \{R_2 [r_{be4} + (1 + \beta_4)R_5]\}}{2r_{be1}}$$

$$A_{u2} = \frac{\Delta u_{O2}}{\Delta u_{12}} = -\frac{\beta_4 \{R_6 [r_{be5} + (1 + \beta_5)R_7]\}}{r_{be4} + (1 + \beta_4)R_5}$$

$$A_{u3} = \frac{\Delta u_{O3}}{\Delta u_{13}} = \frac{(1 + \beta_5)R_7}{r_{be5} + (1 + \beta_5)R_7}$$

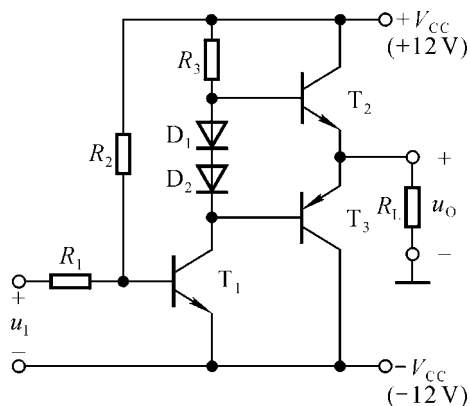
$$A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_1} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3}$$

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

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

**3.14** 电路如图 3.14 所示。已知电压放大倍数为 -100，输入电压  $u_1$  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  $U_{imax}$

$$U_{\text{imax}} = \frac{U_{\text{om}}}{|\dot{A}_u|} \approx 77.8\text{mV}$$

( 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  $\beta = \beta_1 \beta_3$  ,  $T_3$  可能饱和 , 使得  $u_o = -11\text{V}$  ( 直流 )。

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