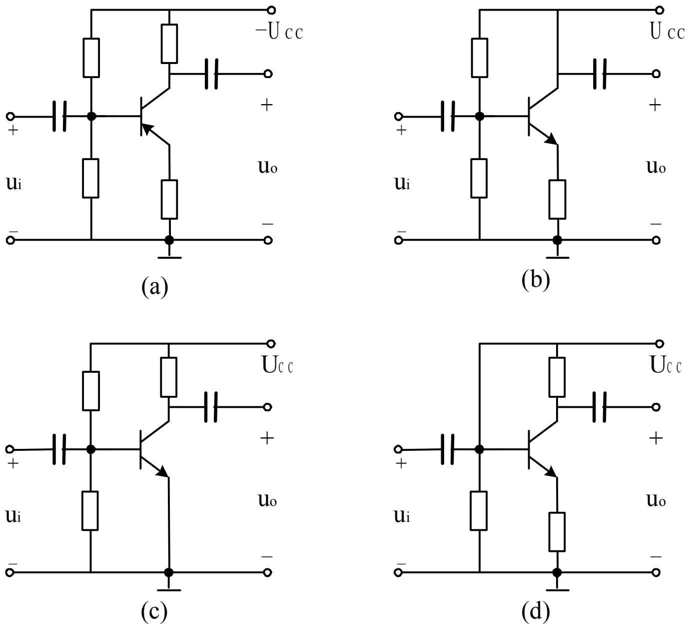
第七章　基本放大电路

7.1　试判断题 7.1 图中各电路能不能放大交流信号，并说明原因。



题7.1图

解： a、b、c 三个电路中晶体管发射结正偏，集电结反偏，故均正常工作，但 b 图中集电极交流接地，故无交流输出。d 图中晶体管集电结正偏，故晶体管不能正常工作，另外，交流输入信号交流接地。因此 a、c 两电路能放大交流信号，b、d 两电路不能放大交流信号。

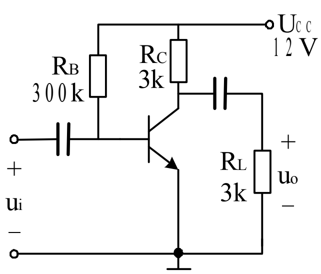
7.2　单管共射放大电路如题 7.2 图所示，已知三极管的电流放大倍数 $\beta = 50$ 。

（1）估算电路的静态工作点；

（2）计算三极管的输入电阻 r_{be} ；

（3）画出微变等效电路，计算电压放大倍数；

（4）计算电路的输入电阻和输出电阻。



题7.2图

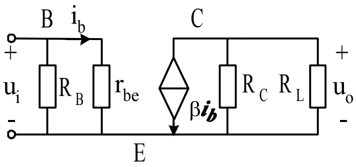
解：(1) $I_B = \dfrac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \dfrac{12 - 0.7}{300 \times 10^3} \approx 4 \times 10^{-5} A = 40 \mu A$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 40 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-3} A = 2mA$$

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C = 12 - 3 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-3} = 6V$$

（2）$r_{be} = 300 + \beta_C \dfrac{26}{I_C} = 300 + 50\dfrac{26}{2} = 950\Omega$

（3）放大电路的微变等效电路如图所示



电压放大倍数

$$A_u = -\beta \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be}} = -50\frac{3 \parallel 3}{0.95} = -79$$

（4）输入电阻：$r_i = R_B \parallel r_{be} = 300 \times 10^3 \parallel 950 \approx 950\Omega$

输出电阻 $r_0 = R_C = 3k\Omega$

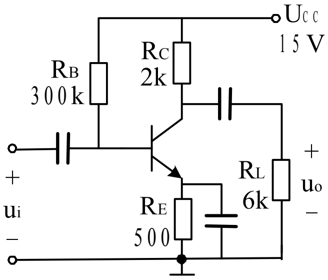
7.3 单管共射放大电路如题 7.3 图所示。已知 $\beta = 100$

（1）估算电路的静态工作点；

（2）计算电路的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻

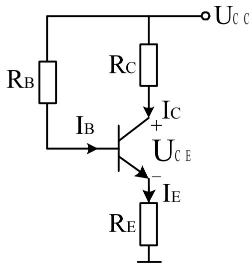
（3）估算最大不失真输出电压的幅值；

（4）当 u_i 足够大时，输出电压首先出现何种失真，如何调节 RB 消除失真？



题7.3图

解：电路的直流通路如图所示，



$$R_B I_{BQ} + U_{BEQ} + R_E(1+\beta)I_{BQ} = U_{CC}$$

$$I_{BQ} \approx \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B + (1+\beta)R_E} \approx \frac{15}{300 + 101 \times 0.5} mA = 43\mu A$$

由此定出静态工作点 Q 为

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 4.3mA,$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 15 - 4.3 \times (2 + 0.5) \approx 4.3V$$

（2）$r_{be} = 300 + 100 \times \dfrac{26}{4.3} = 905\Omega$

由于 RE 被交流傍路，因此

$$A_u = -\beta \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be}} = -100 \times \frac{1.5}{0.90} = -166$$

$$r_i = R_B \parallel r_{be} = 300 \parallel 0.905 \approx 0.9k\Omega$$

$$R_O = R_C = 2k\Omega$$

（3）由于 U_{CEQ}=4.3V，故最大不饱和失真输出电压为

$$U_0' = U_{CEQ} - 0.7 = 4.3 - 0.7 = 3.6V$$

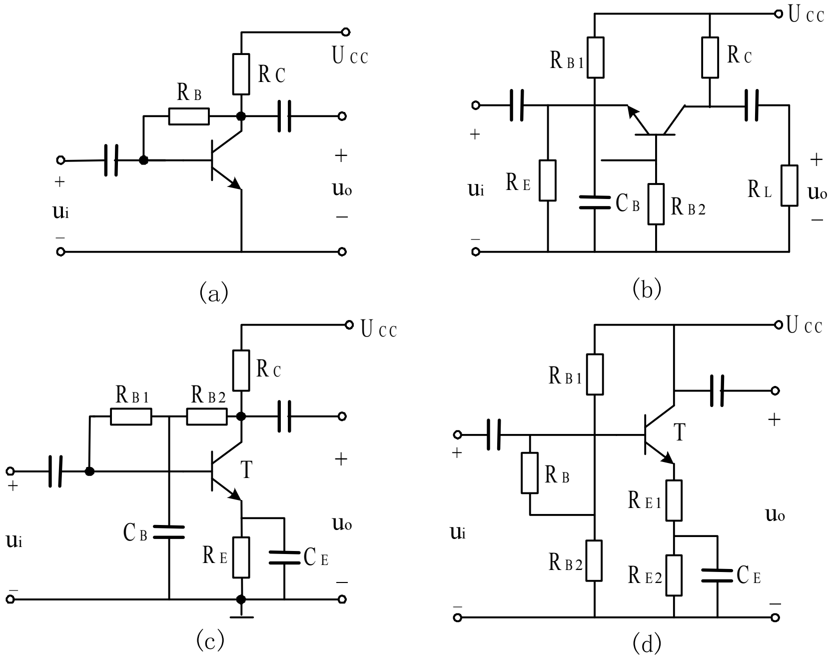
最大不截止失真输出电压近似为

$$U_0'' = I_{CQ} \cdot R_L' = 4.3 \times 1.5 = 6.4V$$

因此，最大不失真输出电压的幅值为 3.6V。

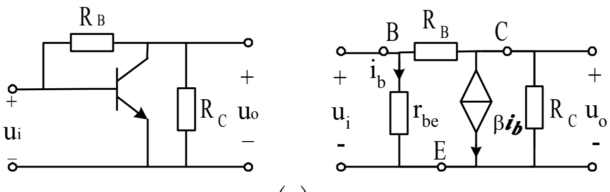
（4）由于 $U_0' < U_0''$，因此，输入电压足够大时，首先出现饱和失真，要消除此种现象，让饱和失真和截止失真几乎同时出现，应增大 R_B，使静态工作点下移。

7.4　画出题 7.4 图所示电路的交流通路和微变等效电路，标明电压电流的参考方向。

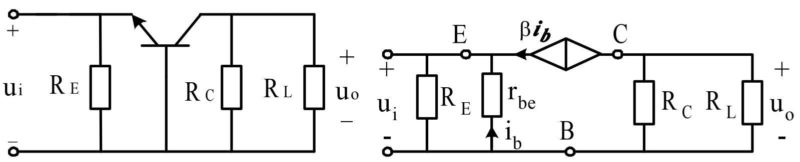


题7.4图

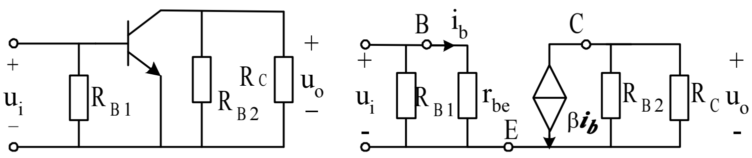
解：各电路的交流通路和微变等效电路如图所示。



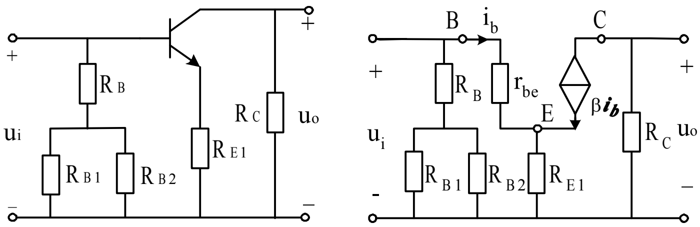
(a)



(b)



(c)



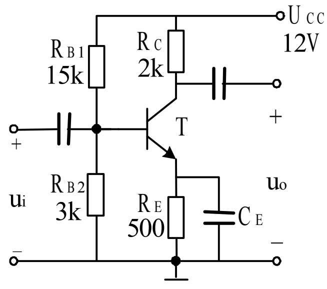
(d)

7.5　在题 7.5 图所示的分压式偏置电路中，三极管为硅管，$\beta = 40$，$U_{BE} = 0.7V$。

（1）估算电路的静态工作点；

（2）若接入 5kΩ 的负载电阻，求电压放大倍数，输入电阻和输出电阻；

（3）若射极傍路电容断开，重复（2）中的计算。



题7.5图

解（1）用估算法求静态工作点

$$U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{3}{15+3} \times 12 = 2V$$

$$I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} = \frac{2-0.7}{500} = 2.6mA$$，I_C=2.6mA

$$I_{BQ} = \frac{I_E}{\beta + 1} = \frac{26}{41} = 63\mu A$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 12 - 2.6 \times (2 + 0.5) = 5.5V$$

（2）电压放大倍数 $A_u = -\beta \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be}}$，

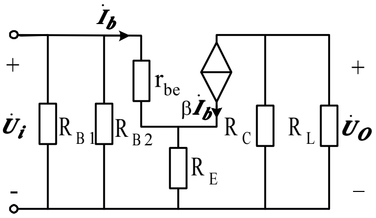
其中 $r_{be} = 300 + \beta \frac{26}{I_C} = 300 + 40\frac{26}{2.6} = 700\Omega = 0.7k\Omega$

$$A_u = -40\frac{2 \parallel 5}{0.7} = -82$$

$$r_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be} = 15 \parallel 3 \parallel 0.7 = 0.55k\Omega$$

$$r_0 = R_C = 2k\Omega$$

（3）C_E 断开，工作点不变，电路的微变等效电路如图所示



电压放大倍数

$$A_u = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R_C // R_L}{\dot{I}_b r_{be} + (1+\beta)\dot{I}_b R_E}$$

$$= \frac{-\beta R_C // R_L}{r_{be} + (1+\beta)R_E} = \frac{-40\times 2//5}{0.7+41\times 0.5}$$

$$= -2.7$$

输入电阻

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta)R_E] = 15//3//(0.7+41\times 0.5) = 2.2k\Omega$$

输出电阻 $r_0 = R_C = 2k\Omega$

7.6 在图 7.4.1 所示的共集放大电路中，设 U_{CC}=10V，R_F=5.6 kΩ，R_B=240 kΩ，三极管为硅管，β=40，信号源内阻 R_S=10kΩ，负载电阻 R_L=1kΩ，试估算静态工作点，并计算电压放大倍数和输入、输出电阻。

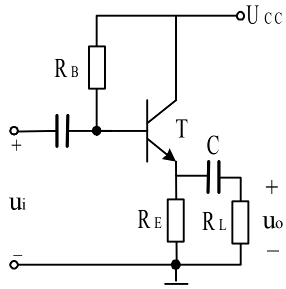


图7.4.1 共集电极放大电路

解：基极电路的电压方程为

$$R_B I_{BQ} + 0.7 + R_E（1+\beta）I_{BQ} = U_{CC}$$

由此得

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - 0.7}{R_B + (1+\beta)R_E} = \frac{10-0.7}{240\times 10^3 + 41\times 5.6} = 19.8\mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 40\times 19.8 = 0.79mA$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - R_E I_E = 10 - 5.6\times 0.79 = 5.6V$$

$$r_{be} = 300 + 40\frac{26}{0.79} = 1.6\times 10^3\Omega$$

$$A_u \approx 1$$

$$r_i = R_B \parallel [r_{be} + (1+\beta)R_E \parallel R_L] = 240 \parallel [1.6 + 41 \times 5.6 \parallel 1] = 32k\Omega$$

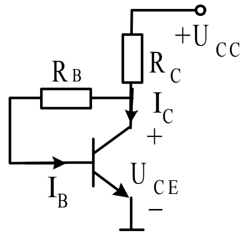
$$r_0 = R_E \parallel \frac{r_{be} + R_S \parallel R_B}{1+\beta} = 5.6 \parallel \frac{1.6 + 10 \parallel 240}{41} = 0.27k\Omega$$

7.7 题 7.4 图（a）所示电路为集电极——基极偏置放大电路，设三极管的 β 值为 50，V_{CC}=20V，R_C=10 kΩ，R_B=330 kΩ。

（1）估算电路的静态工作点；

（2）若接上 2kΩ 的负载电阻，计算电压放大倍数和输入电阻。

解：（1）先画出电路的直流通路，由 KVL 可得



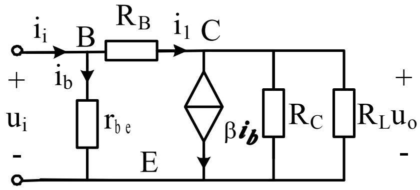
$$R_C(I_C + I_B) + U_{CE} = U_{CC}$$

$$U_{CE} = R_B I_B + U_{BEQ}$$

代入数据，解方程得

$$I_{BQ} = 23\mu A，I_{CQ} = 1.15mA，U_{CEQ} = 8.3V$$

（2）接上负载后的微变等效电路如图所示



$$r_{be} = 300 + \beta\frac{26}{I_C} = 1.43k\Omega$$

显然 $\dot{U}_i = r_{be}\dot{I}_b$。另外，流过 R_B 的电流为 $\dot{i}_1 = \dfrac{\dot{U}_i - \dot{U}_0}{R_B}$，

故

$$\dot{U}_0 = R_L'(\dot{i}_1 - \beta\dot{i}_b) = R'\cdot(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_0}{R_B} - \beta\dot{I}_b) \qquad （R_L' = R_C \parallel R_L）$$

$\dot{I}_b$ 用 $\dot{U}_i$ 表示，解方程可得

$$A_u = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = \frac{R_L'(r_{be} - \beta R_B)}{r_{be}(R_L' + R_B)} \approx -\beta\frac{R_L'}{r_{be}} = -58$$

下面求输入电阻

$$\dot{I}_i = \dot{I}_b + \dot{I}_1 = I_b + \beta I_b + \frac{\dot{U}_0}{R_L'}$$

$$= (1+\beta)\dot{I}_b + \frac{A_u\dot{U}_i}{R_L'}$$

$$= (1+\beta)\frac{\dot{U}_i}{r_{be}} + \frac{(r_{be} - \beta R_B)\dot{U}_i}{(R_L' + R_B)r_{be}}$$

$$\frac{1}{r_i}=\frac{\dot{I}_i}{\dot{U}_i}=\frac{1+\beta}{r_{be}}+\frac{r_{be}-\beta R_B}{R'_L+R_B}\frac{1}{r_{be}}=\frac{R_B+(1+\beta)R'_L}{r_{be}R_B},$$

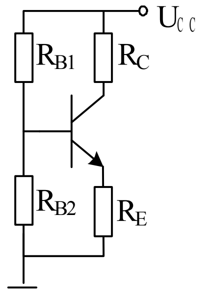
$$r_i=\frac{R_B r_{be}}{R_B+(1+\beta)R'_L}=1.14k\Omega$$

7.8　题 7.4 图（b）所示电路为共基极放大电路。

（1）画出直流通路，估算电路的静态工作点；

（2）导出电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的计算公式。

解：（1）先画出电路的直流通路，如右图所示，与分压式偏置电路相同



$$U_B=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}U_{CC}$$

$$I_{EQ}=\frac{U_B-U_{BEQ}}{R_E}\approx I_{CQ}，\quad I_{BQ}=\frac{I_{EQ}}{1+\beta}$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}(R_C+R_E)$$

（2）由 7.4 题所画微变等效电路得

$$\dot{U}_i=-r_{be}\dot{I}_b，\quad \dot{U}_0=-R'_L\beta\dot{I}_b，\quad A_u=\frac{\dot{U}_0}{U_i}=\beta\frac{R'_L}{r_{be}}$$

$$\dot{I}_i=\frac{\dot{U}_i}{R_E}-\dot{I}_b-\beta\dot{I}_b=\frac{\dot{U}_i}{R_E}+(1+\beta)\frac{\dot{U}_i}{r_{be}}$$

$$\frac{1}{r_i}=\frac{\dot{I}_i}{U_i}=\frac{1}{R_E}+\frac{1+\beta}{r_{be}}，\qquad 即：\quad r_i=R_E\,\|\,\frac{r_{be}}{1+\beta}$$

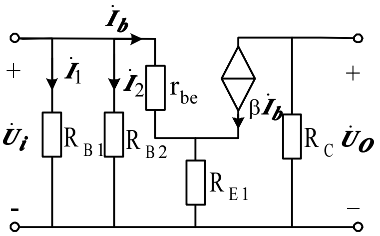
$$r_0=R_C$$

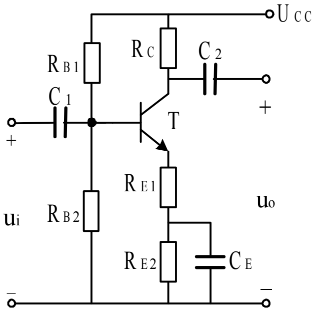
7.9　导出题 7.9 图所示电路的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的计算公式，证明当 $\beta R_{E1}>>r_{be}$ 时，$\dot{A}_u\approx\frac{-R_C\,//\,R_L}{R_{E1}}$。

解：电路的微变等效电路如图所示

$$\dot{U}_i=r_{be}\dot{I}_b+R_{E1}(1+\beta)\dot{I}_b，\quad \dot{U}_0=-\beta R_C\dot{I}_b$$

$$A_u=\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i}=\frac{-\beta R_C}{r_{be}+(1+\beta)R_{E1}}$$





题7.9图

输入电阻

$$\frac{1}{r_i}=\frac{\dot{I}_i}{\dot{U}_i}=\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_i}+\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_i}+\frac{\dot{I}_3}{\dot{U}_i}=\frac{1}{R_{B1}}+\frac{1}{R_{B2}}+\frac{1}{r_{be}+(1+\beta)R_{E1}}$$

$$r_i=R_{B1}\parallel R_{B2}\parallel[r_{be}+(1+\beta)R_{E1}]$$

输出电阻 $r_0=R_C$

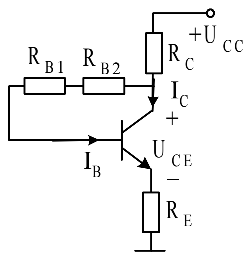
当 $\beta R_{E1}>>r_{be}$ 时，$A_u=\dfrac{-\beta R_C}{(1+\beta)R_{E1}}$

接有负载时 $A_u=\dfrac{-\beta R_L'}{(1+\beta)R_{E1}}\approx\dfrac{R_C\parallel R_L}{R_{E1}}$

7.10 在题 7.4 图（c）所示电路中，设 $R_{B1}=75\,\text{k}\Omega$，$R_{B2}=5\,\text{k}\Omega$，$R_C=4\,\text{k}\Omega$，$R_E=1\,\text{k}\Omega$，三极管的 $\beta=50$，$U_{BE}=0.7V$，$U_{CC}=12V$，求

（1）电路的静态工作点；

（2）电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。



解：（1）先画出电路的直流通路，由 KVL 可得

$$R_C(I_{BQ}+I_{CQ})+U_{CEQ}+R_EI_{EQ}=U_{CC}$$

$$(R_{B1}+R_{B2})I_{BQ}+U_{BEQ}=U_{CEQ}$$

由 $I_{CQ}=\beta I_{BQ}$ 和 $U_{BEQ}=0.7V$ 可得

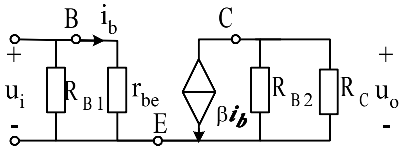
$$I_{BQ}=\frac{U_{CC}-0.7}{R_{B1}+R_{B2}+(1+\beta)(R_C+R_E)}=\frac{12-0.7}{75+5+51\times(4+1)}=34\mu A$$

$$I_{CQ}=\beta I_{BQ}=50\times34\times10^{-3}=1.7mA$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}(R_C+R_E)=12-1.7\times(4+1)=3.5V$$

（2）$r_{be}=300+\beta\dfrac{26}{I_C}=300+50\times\dfrac{26}{1.7}=1.06k\Omega$

由 7.4 题的微变等效电路可得

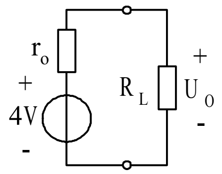


$$A_u=\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i}=\frac{-(R_{B2}\parallel R_C)\cdot\beta\dot{I}_b}{r_{be}\dot{I}_b}=-\beta\frac{R_{B2}\parallel R_C}{r_{be}}=-105$$

$$r_i=R_{B1}\parallel r_{be}=75\parallel 1.06=1k\Omega$$

$$r_0=R_{B1}\parallel R_C=5\parallel 4=2.2k\Omega$$

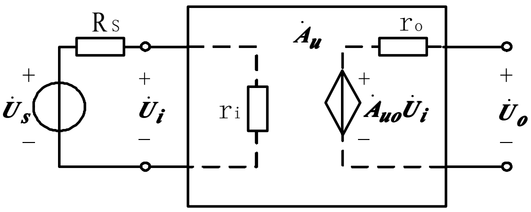
7.11　已知某放大电路的输出电阻为 2kΩ，负载开路时的输出电压为 4V，求放大电路接上 3kΩ 的负载时的输出电压值。



解：根据戴维宁定理，对负载而言，放大电路和信号源可等效成一电压源与一电阻的串联，电压源的电压为负载开路时的输出电压，即 4V，电阻即为输出电阻 2kΩ，故接上 3 kΩ 的负载电阻时，如图所示，输出电压为

$$U_0=\frac{3}{3+2}\times 4=2.4V$$

7.12　将一电压放大倍数为 300，输入电阻为 4kΩ 的放大电路与信号源相连接，设信号源的内阻为 1kΩ，求信号源电动势为 10mV 时，放大电路的输出电压值。

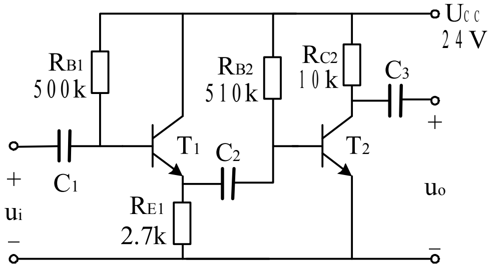


解：放大电路的框图如图所示，$r_i=4k\Omega$

$$U_0=A_uU_i=A_u\frac{r_i}{R_S+r_i}U_S=300\times\frac{4}{1+4}\times 10=2.4V$$

7.13　求题 7.13 图所示两级放大电路的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。设

$\beta_1 = \beta_2 = 50$。



题7.13 图

解：第一级电路为共集放大电路， $A_{u1} \approx 1$

第二级电路为共射放大电路， $A_{u2} = -\beta \dfrac{R_{C2}}{r_{be2}}$

对第二级放大电路

$$I_{BQ2} = \frac{24-0.7}{R_{B2}} = \frac{24}{510} = 47\mu A，$$

$$I_{CQ2} = \beta I_{BQ2} = 2.35mA$$

$$r_{be2} = 300 + 50 \times \frac{26}{2.35} = 0.85k\Omega$$

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \approx A_{u2} = -50 \times \frac{10}{0.85} = 588$$

$$r_{i2} = R_{B2} \parallel r_{be2} = 0.85k\Omega$$

对第一级放大电路

$$I_{BQ1} = \frac{U_{CC} - 0.7}{R_{B1} + (1+\beta)R_{E1}} = \frac{24}{510 + 51 \times 2.7} = 37\mu A$$

$$I_{CQ1} = \beta I_{BQ1} = 50 \times 37 = 1.85mA$$

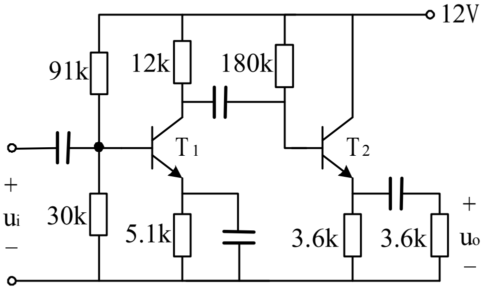
$$r_{be1} = 300 + 50\frac{26}{1.85} = 1.0k\Omega$$

输入电阻

$$r_i = r_{i1} = R_{B1} \parallel [r_{be1} + (1+\beta_1)R_{E1} \parallel r_{i2}] = 510 \parallel [1.0 + 51 \times 2.7 \parallel 0.85] = 32k\Omega$$

输出电阻 $r_0 = r_{02} = R_{C2} = 10k\Omega$

7.14　在题 7.14 图所示的两级放大电路中，设 $\beta_1=\beta_2=100$，$r_{be1}=6\,k\Omega$，$r_{be2}=1.5\,k\Omega$，求电压放大倍数、输入电阻、输出电阻。



题7.14图

解：第一级电路为分压式射极偏置电路，其负载为第二级的输入电阻，第二级为射极输出器，其输入电阻为

$$r_{i2}=R_{B2}\parallel[r_{be2}+(1+\beta)R_{E2}\parallel R_{L2}]=180\parallel(1.5+101\times3.6\parallel3.6)=90k\Omega$$

r_{i2} 作为第一级的负载 R_{L1}，故有

$$A_{u1}=-\beta_1=\frac{R_{C1}\parallel R_{L2}}{r_{be1}}=-100\frac{12\parallel 90}{6}=-176$$

而　　$A_{u2}\approx 1$

因此　　$A_u=A_{u1}\cdot A_{u2}=A_{u1}=-176$

$$r_i=r_{i1}R_{B1}\parallel R_{B2}\parallel r_{be1}=91\parallel30\parallel6=91\parallel5=4.7k\Omega$$

$$r_{01}=R_{C1}=12k$$

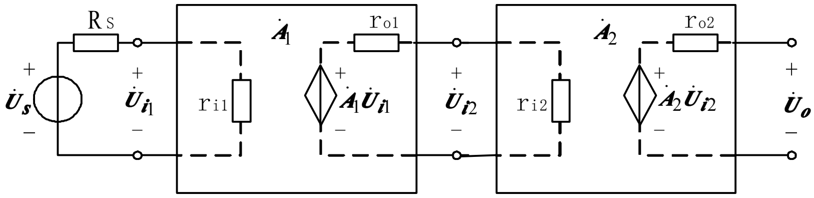
$$r_0=r_{02}=R_{E2}\parallel\frac{r_{be2}+R_{01}\parallel R_{B2}}{1+\beta}=3.6\parallel\frac{1.5+12\parallel180}{101}=0.12k\Omega$$

7.15　两单管放大电路，A_{u1}=-30，$r_{i1}=10\,k\Omega$，$r_{o1}=2\,k\Omega$，A_{u2}=-100，$r_{i2}=2\,k\Omega$，$r_{o2}=2\,k\Omega$，现将它们通过电容耦合。

（1）分别计算 A_1 作为前级和 A_2 作为前级时两级放大电路的电压放大倍数；

（2）设信号源的内阻为 10kΩ，计算上述两种放大电路的源电压放大倍数 $\dot{A}_{us}=\dfrac{\dot{U}_o}{\dot{U}_S}$。

解：将两放大电路用框图表示，如图所示



（1）A_1 作前级，$U_0 = A_{u2}U_{i2} = A_2 \dfrac{r_{i2}}{r_{01}+r_{i2}} A_{u1}U_{i1} = A_{u1}A_{u2}\dfrac{r_{i2}}{r_{01}+r_{i2}}U_{i1}$

$$A_u = (-30)\times(-100)\frac{2}{2+2} = 1500$$

A_2 作前级，则

$$A_u = A_{u1}A_{u2}\frac{r_{i1}}{r_{02}+r_{i1}} = (-30)(-1000)\frac{10}{2+10} = 2500$$

（2）A_1 作前级 $\quad A_{us} = A_u\dfrac{r_{i1}}{R_S+r_{i1}} = 1500\dfrac{10}{10+10} = 750$

A_2 作前级，则

$$A_{us} = A_u\frac{r_{i2}}{R_S+r_{i2}} = 2500\frac{2}{10+2} = 417$$

7.16　一个甲乙类 OCL 互补对称放大电路，U_{CC}=12V，R_L=8Ω，设三极管的饱和压降 U_{CES}=0。求：

（1）电路的最大不失真输出功率；

（2）直流电源提供的功率；

（3）功率管的最小额定功率。

解：U_{CES}=0 时，OCL 互补对称放大电路的最大输出电压为电源电压，最大不失真输出功率

$$P_0 = \frac{U_{CC}^2}{2R_L} = \frac{12^2}{2\times 8} = 9W$$

（2）直流电源提供的功率

$$P_U = \frac{2}{\pi}\frac{U_{CC}^2}{R_L} = \frac{2}{\pi}\cdot\frac{12^2}{8} = 11.5W$$

（3）最小额定管耗功率

$$P_T = 0.2P_0 = 1.8W$$

7.17　一额定功率为 4W，阻值为 8Ω的负载，如用 OTL 互补对称放大电路驱动，忽略三极管的饱和压降，电源电压应不低于多少？

解：忽略晶体管的饱和压降时，OTL 互补对称放大电路的最大不失真输出功率 $P_0 = \frac{U_{CC}^2}{8R_L}$，因此 4W、8Ω的负载正常工作时，应有$\frac{U_{CC}^2}{8\times 8} \geq 4$，$U_{CC} \geq 16V$。

7.18　在上题中，设三极管的饱和压降 U_{CES}=1V，求电源电压及电源提供的功率。

解：考虑晶体管的饱和压降U_{CES}时，OTL 电路的最大输出电压$U_{0m} = \frac{U_{CC}}{2} - U_{CES}$，故有

$$\frac{(\frac{U_{CC}}{2} - U_{CES})^2}{2R_L} \geq 4$$

$$U_{CC} \geq 2(\sqrt{8R_L} + U_{CES}) = 2(\sqrt{8\times 8} + 1) = 18V$$

由式（7.5.2）得

$$P_U = \frac{2}{\pi}\frac{\frac{U_{CC}}{2}(\frac{U_{CC}}{2} - U_{CES})}{R_L} = \frac{18(9-1)}{8\pi} = 5.7W$$

7.19　图 7.7.2 所示差动放大电路中，设 $U_{CC}=U_{EE}$=12V，R_B=10 kΩ，R_C=4 kΩ，R_P=100 Ω，R_E=3kΩ，R_L=10kΩ，$\beta_1=\beta_2$=50。计算电路的静态工作点、差模电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

解：静态工作点

$$I_{BQ} = \frac{U_{EE}}{2(1+\beta)R_E} = \frac{12}{2\times 51\times 3} = 40\mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2mA$$

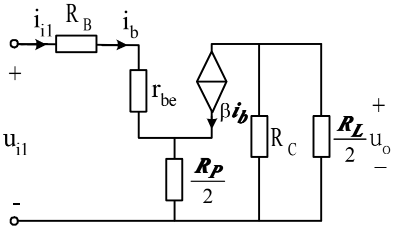
$$U_{CEQ} = U_{CC} - \frac{R_C}{2R_E} = 12 - \frac{4}{2\times 3}12 = 4V$$

$$r_{be}=300+\beta\frac{26}{I_C}=300+50\times\frac{26}{2}=950\Omega$$

差模放大倍数

$$A_d=-\frac{\beta(R_C\parallel\frac{1}{2}R_L)}{R_B+r_{be}+(1+\beta)\frac{R_P}{2}}=-\frac{50(4\parallel 5)}{10+0.95+51\times 0.05}=-8.2$$

求差模输入电阻的微变等效电路如图所示



$$r_{id}=\frac{u_i}{i_i}=\frac{2u_{i1}}{i_{i1}}=2\frac{u_{i1}}{i_b}=2[R_B+r_{be}+(1+\beta)\frac{R_P}{2}]=27k\Omega$$

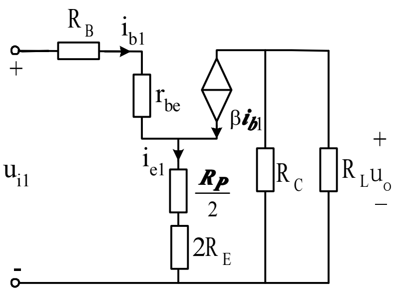
$$r_{od}=2R_C=8k\Omega$$

7.20　证明：单端输出时，长尾式差动放大电路的共模放大倍数和输出电阻分别为

$$A_C=-\frac{\beta R_C // R_L}{R_B+r_{be}+(1+\beta)\left(\frac{1}{2}R_P+2R_E\right)}$$

$$r_o=R_C$$

证明：共模输入 $u_{i1}=u_{i2}$，因此 $i_{b1}=i_{b2}$，$i_{e1}=i_{e2}$，流过 R_E 的电流为 $2i_{e1}$，R_E 上的压降为 $2i_{e1}R_E$，折算到电流为 i_{e1} 的回路中，折合电阻为 $2R_E$。因此，单端输出时，微变等效电路如图所示。



$$u_0=-(R_C\parallel R_L)\beta i_b$$

$$u_{i1}=(R_B+r_{be})i_{b1}+(1+\beta)\left(\frac{1}{2}R_P+2R_E\right)i_{b1}$$

共模放大倍数

$$A_C = \frac{u_0}{u_{i1}} = -\frac{\beta R_C \parallel R_L}{R_B + r_{be} + (1+\beta)\left(\frac{1}{2}R_P + 2R_E\right)}$$

7.21　试证明图 7.7.7(d)所示单端输入，单端输出差分电路的差模电压放大倍数和输入电阻分别为

$$A_d = -\frac{1}{2}\frac{\beta(R_C // R_L)}{R_B + r_{be}}$$

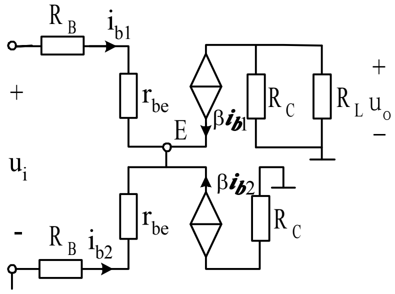
$$r_{id} = 2(R_B + r_{be})$$

（提示：由 $i_{E1} + i_{E2} = I$ 可得 $\Delta i_{E1} + \Delta i_{E2} = 0$，恒流源对输入信号相当于开路）。

证明：由于 T_1 与 T_2 相同，故 $r_{be1} = r_{be2}$，由 $i_{E1} + i_{E2} = I$ 得

$\Delta i_{E1} + \Delta i_{E2} = 0$，即 $i_{e1} + i_{e2} = 0$

理想电流源对交流信号相当于开路，放大电路的微变等效电路如图所示。



由 $i_{e1} + i_{e2} = 0$ 得

$$i_{b1} = -i_{b1},\quad u_i = 2(R_B + r_{be})i_{b1}$$

$$u_0 = -\beta(R_C \parallel R_L)i_{b1}$$

$$A_d = \frac{u_0}{u_i} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)i_{b1}}{2(R_B + r_{be})i_{b1}} = -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{2(R_B + r_{be})}$$

输入电阻　　$r_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_i}{i_{b1}} = 2(R_B + r_{be})$

7.22　已知 CF741 运算放大器的电源电压为±15V，开环电压放大倍数为 2×10^5，最大输出电压为±14V，求下列三种情况下运放的输出电压。

（1）$u_+ = 15\mu V$，$u_- = 5\mu V$；

（2）$u_+ = -10\mu V$，$u_- = 20\mu V$；

（3）$u_+ = 0$，$u_- = 2mV$

解：运放在线性工作区时 $u_0 = A_{0d}(u_+ - u_-)$，由此得运放在线性工作区时

$|u_+ - u_-|_{\max} = \dfrac{u_{0\max}}{A_{0d}} = \dfrac{14}{2\times10^5} = 70\mu V$，$|u_+ - u_-|$ 超过 $70\mu V$ 时，输出电压不再增大，仍为最大输出电压。

（1）$u_+ - u_- = 15-5 = 10\mu V < 70\mu V$,故　$u_0 = A_{0d}(u_+ - u_-) = 2V$

（2）$u_+ - u_- = -10-20 = -30\mu V < 70\mu V, u_0 = -6V$

（3）$|u_+ - u_-| = 2mV > 70\mu V$，输出为饱和输出，由于反相端电位高于同相端电位，故为负饱和输出，$u_0 = -14V$

7.23　已知某耗尽型 MOS 管的夹断电压 $U_P = -2.5V$，饱和漏极电流 $I_{DSS} = 0.5mA$，求 $U_{GS} = -1V$ 时的漏极电流 I_D 和跨导 g_m。

解：耗尽型 MOS 管的转移特性为 $I_D = I_{DSS}\left(1-\dfrac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$，代入数据得

$$I_D = 0.5\left(1+\frac{U_{GS}}{2.5}\right)^2 mA$$

由跨导的定义 $g_m = \dfrac{dI_D}{dU_{GS}}$ 得

$$g_m = \frac{1}{2.5}\left(1+\frac{U_{GS}}{2.5}\right)$$

因此，$U_{GS} = -1V$ 时

$$I_D = 0.5\left(1+\frac{-1}{2.5}\right)^2 = 0.18mA$$

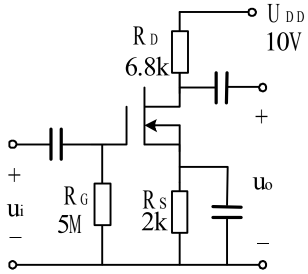
$$g_m = \frac{1}{2.5}\left(1+\frac{-1}{2.5}\right) = 0.24mS$$

7.24　题 7.24 所示电路为耗尽型场效应管的自给偏压放大电路，设场效应管的夹断电压 U_p=−2V，饱和漏极电流 I_{DSS}=2mA，各电容的容抗均可忽略。

（1）求静态工作点和跨导；

（2）画出微变等效电路，并求电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

（3）若 C_S=0，重复（2）的计算。



题7.24图

解：（1）求静态工作点。转移特性：

$$I_D = 2(1+\frac{U_{GS}}{2})^2$$

$$U_{GS} = -R_S I_D = -2I_D$$

由此解得

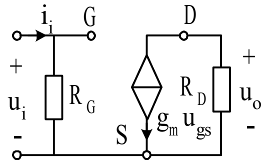
I_{DQ}=0.5mA，U_{GSQ}=-1V（舍去 I_D=2mA，U_{GS}=-4V），

由 KVL 方程：$R_DI_D+U_{DS}+R_SI_D=U_{DD}$，可得

$U_{DSQ}=U_{DD}-(R_D+R_S)I_{DQ}=10-(6.8+2)\times0.5=5.6V$

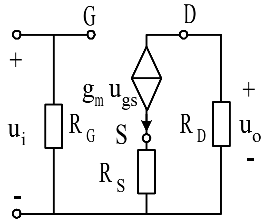
$$g_m = -\frac{2\sqrt{I_{DQ}I_{DSS}}}{U_P} = -\frac{2\sqrt{0.5\times 2}}{-2} = 1mS$$

（2）放大电路的微变等效电路如图（a）所示（R_S 被旁路）



(a)

$$A_u = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m\dot{U}_{gs}R_D}{\dot{U}_{gs}} = -g_mR_D = -1\times6.8 = -6.8$$



(b)

输入电阻　$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_G = 5M\Omega$

输出电阻　$r_0 = R_D = 6.8k\Omega$

（3）C_3 断开时，放大电路的微变等效电路如图（b）所示

$$\dot{U}_{GS} = \dot{U} - R_S g_m \dot{U}_{GS} \quad 故 \quad \dot{U}_{GS} = \frac{\dot{U}_i}{1+g_mR_s}$$

$$A_u = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = \frac{-R_Dg_m\dot{U}_{GS}}{\dot{U}_i} = -\frac{g_mR_D}{1+g_mR_S} = -\frac{6.8}{1+2} = -2.27$$

输入电阻、输出电阻不变

7.25　在图 7.9.7 所示的分压式自偏共源放大电路中，R_G=1MΩ，R_{G1}=40kΩ，R_{G2}=10Ω，R_D=R_S=2.5kΩ，R_L=10kΩ，U_{DD}=20V，各电容的容抗均可忽略，已知场效应管的夹断电压 U_p=−2V，饱和漏极电流 I_{DSS}=8mA。

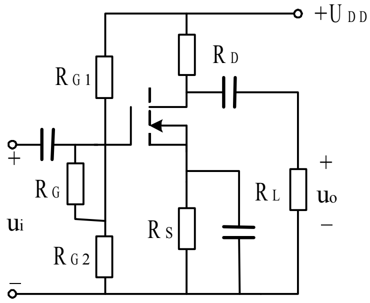


图7.9.7 分压式自偏共源放大电路

（1）求静态工作点和跨导；

（2）画出微变等效电路，计算电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

解：（1）转移特性输入回路的 KVL 方程为

$$I_D = I_{DSS}\left(1-\frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2 = 8\left(1+\frac{U_{GS}}{2}\right)^2$$

$$U_{GS} = U_G - R_S I_S = \frac{R_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}} U_{DD} - R_S I_D = 4 - 2.5 I_D$$

解联立方程得

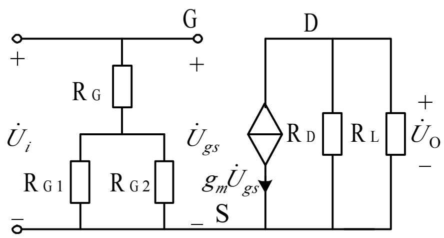
$$I_{DQ} = 2mA，\ U_{GSQ} = -1V$$

（U_{GS} 应大于 U_P，故舍去 $I_D = \frac{72}{25} mA，\ U_{GS} = -3.2V$）

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ}(R_D + R_S) = 20 - 2\times(2.5+2.5) = 10V$$

$$g_m = \frac{-2\sqrt{I_{DQ} I_{DSS}}}{U_P} = \frac{-2\sqrt{2\times 8}}{-2} = 4mS$$

（2）微变等效电路如图所示



放大倍数

$$A_u = \frac{\dot U_0}{\dot U_i} = \frac{-g_m \dot U_{GS}(R_D \parallel R_L)}{\dot U_{GS}} = -g_m(R_D \parallel R_L) = -4\times(2.5\parallel 10) = -8$$

输入电阻

$$r_i = \frac{\dot U_i}{\dot I_i} = R_G + R_{G1}\parallel R_{G2} = 1000 + 40\parallel 10 = 1008k\Omega$$

输出电阻

$$r_0 = R_0 = 2.5k\Omega$$