放大电路的全频带增益特性分析

莫孝飞

研讨目的：

对放大电路的中频增益、输入电阻、输出电阻、频率特性等主要性能进行分析、定量计算。其中的频率特性分析运用了三极管的高频模型，并从系统的角度分析整理放大电路的增益函数，进而运用Matlab语言和MULTISIM 进行了相应的仿真。

电路图

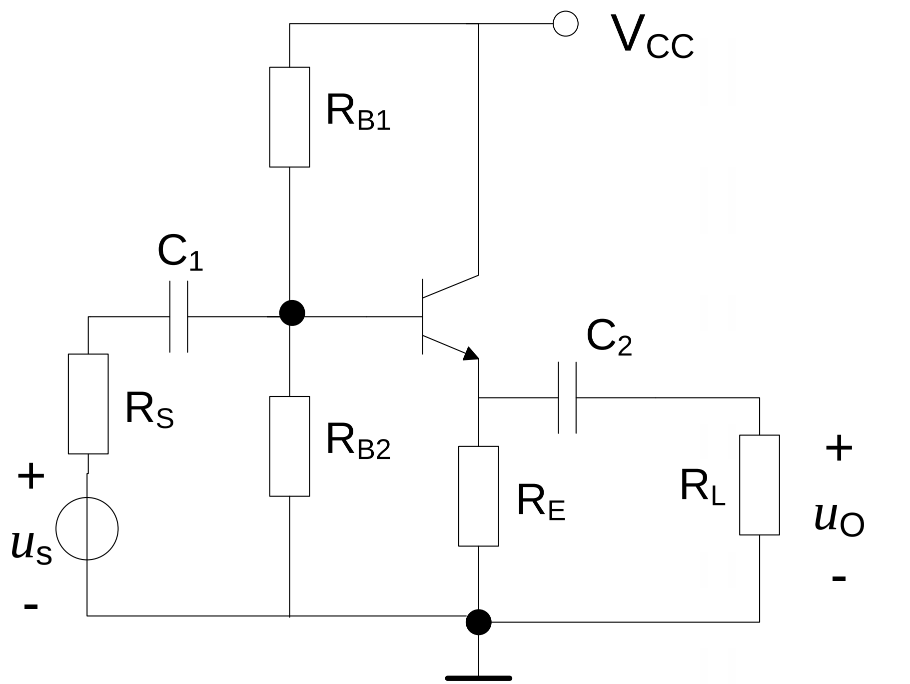
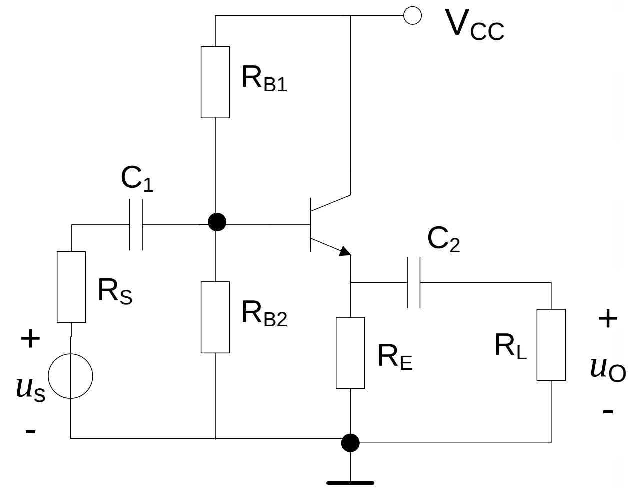


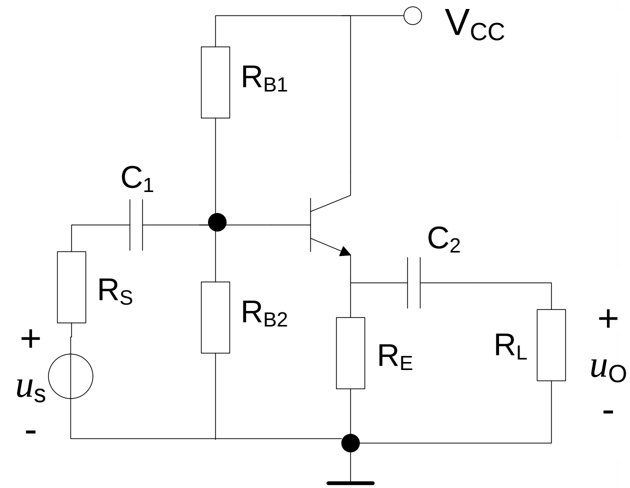
图3中，R_S=500Ω，R_{B1}=51kΩ，R_{B2}=20kΩ，R_E=2kΩ，R_L=2kΩ，C_1=C_2=10μF，晶体管的h_{fe}=100，$r_{bb'}$=80Ω，$C_{b'c}$=10μF，f_T=200MHz，U_{BE}=0.7V，V_{CC}=12V。



一、静态分析

$$U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{CC} = \frac{20}{20+51}*12 = 3.38V$$

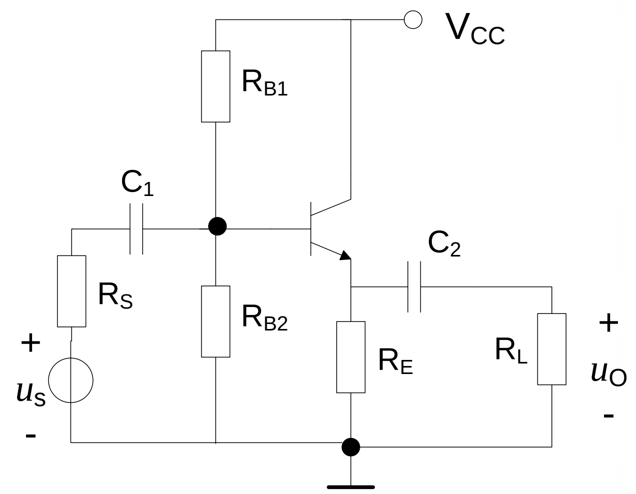
$$\therefore I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{3.38-0.7}{2k} = 1.34mA$$



$$I_{BQ}=\frac{1}{h_{fe}+1}I_{EQ}=\frac{1}{101}\ *1.34mA=13.3uA\approx 0.\ 01mA$$

$$\therefore I_{CQ}=\frac{h_{fe}}{h_{fe}+1}I_{EQ}=\frac{100}{101}*1.34mA=1.33mA$$

=1.34mA-0.01mA=1.33mA

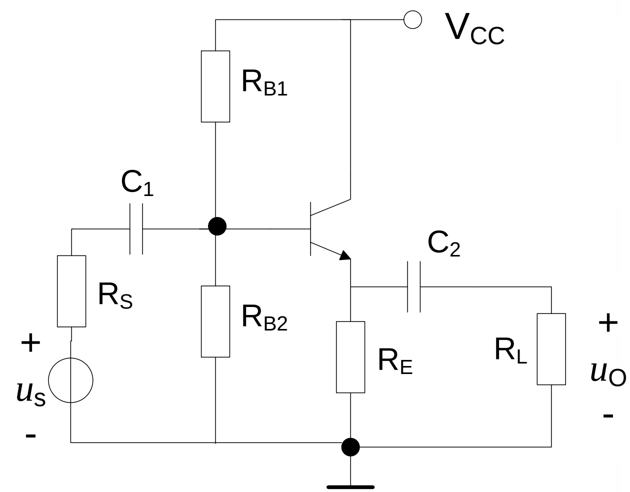


$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_E = 12 - 1.34*2 = 9.32\text{V}$$

所以，其静态工作点为：

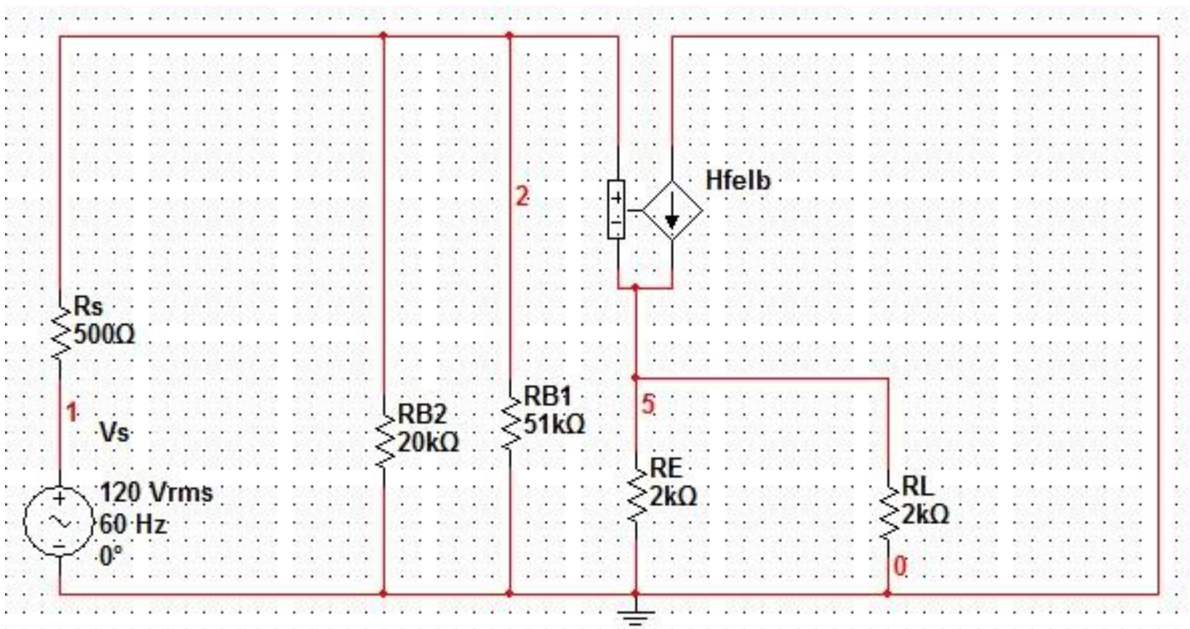
I_{BQ}=13.3uA　　I_{CQ}=1.33mA

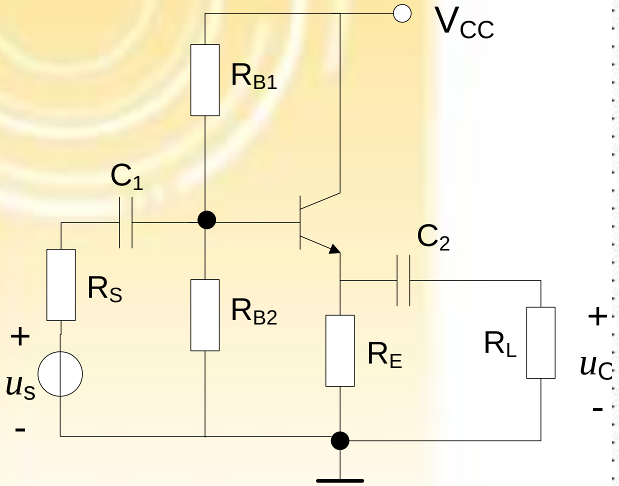
I_{EQ}=1.34mA　　U_{CEQ} = 9.32V

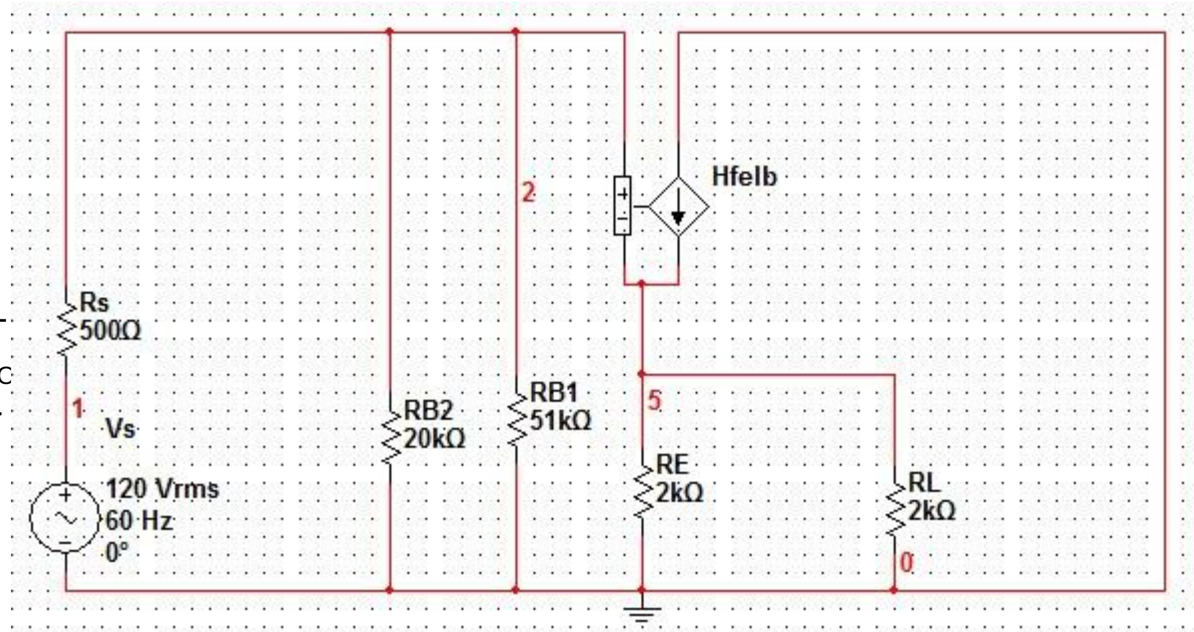


二、输入输出电阻和中频增益的计算

交流通路





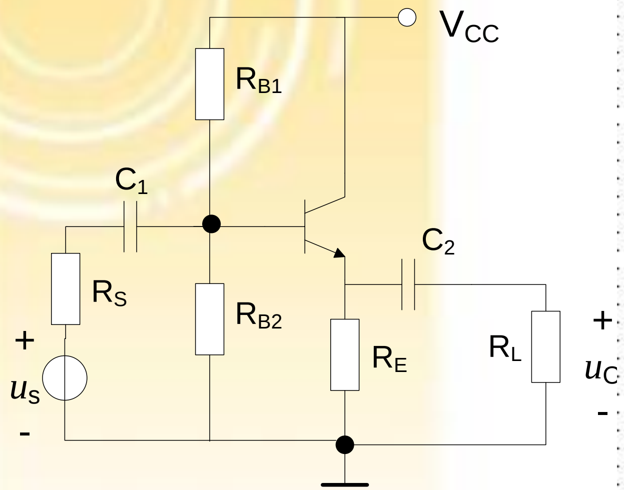


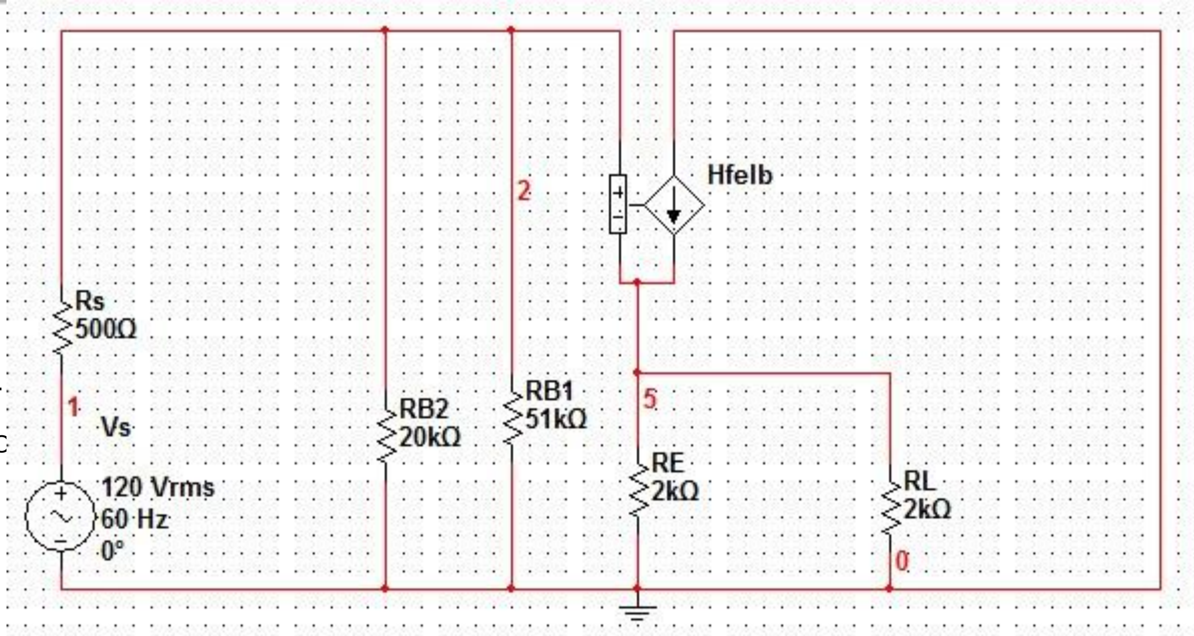
$$h_{ie} = r_{bb'} + (h_{fe}+1)\frac{26mV}{I_{EQ}} = 80 + 101 * \frac{26}{1.33} = 2.04k\ \Omega$$

输入电阻：$r_i = R_{B1} // R_{B2} // [h_{ie} + (1+h_{fe})(R_E // R_L)]$

$$= 51k // 20k // [2.04 + 101 * (2//2)]k$$

$$= 12.6k\Omega$$



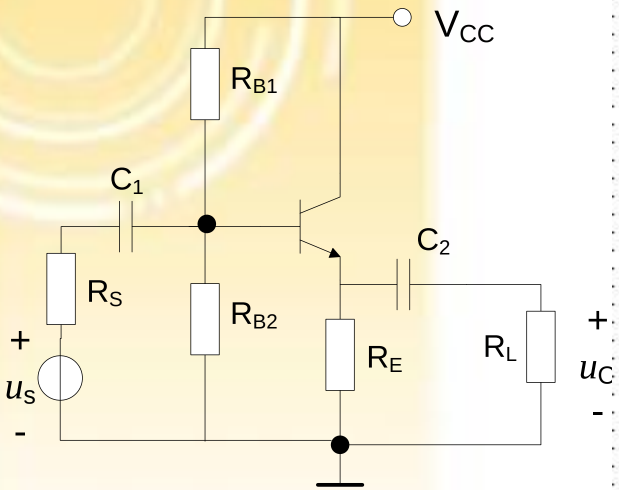


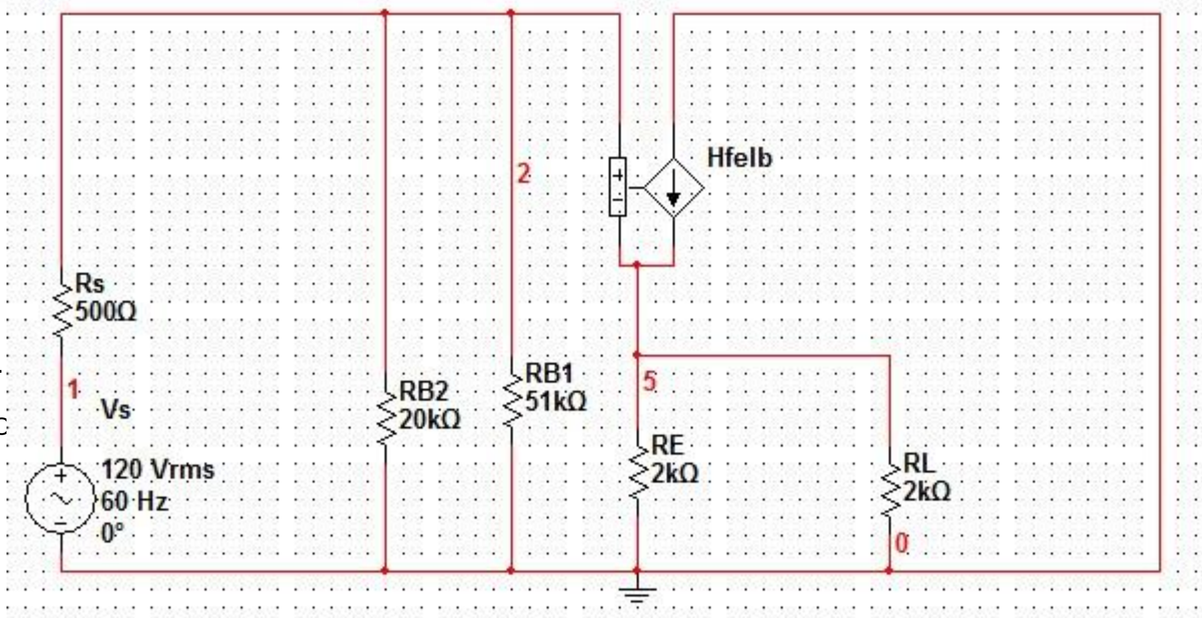
输出电阻：

$$r_o = \left(\frac{R_S // R_{B1} // R_{B2} + h_{ie}}{1 + h_{fe}}\right) // R_E = 25\Omega$$

电压增益：

$$A_U = \frac{(h_{fe}+1)(R_E // R_L)}{h_{ie} + (h_{fe}+1)(R_E // R_L)} = \frac{101*(2k//2k)}{2.04+101*(2k//2k)} = 0.98$$



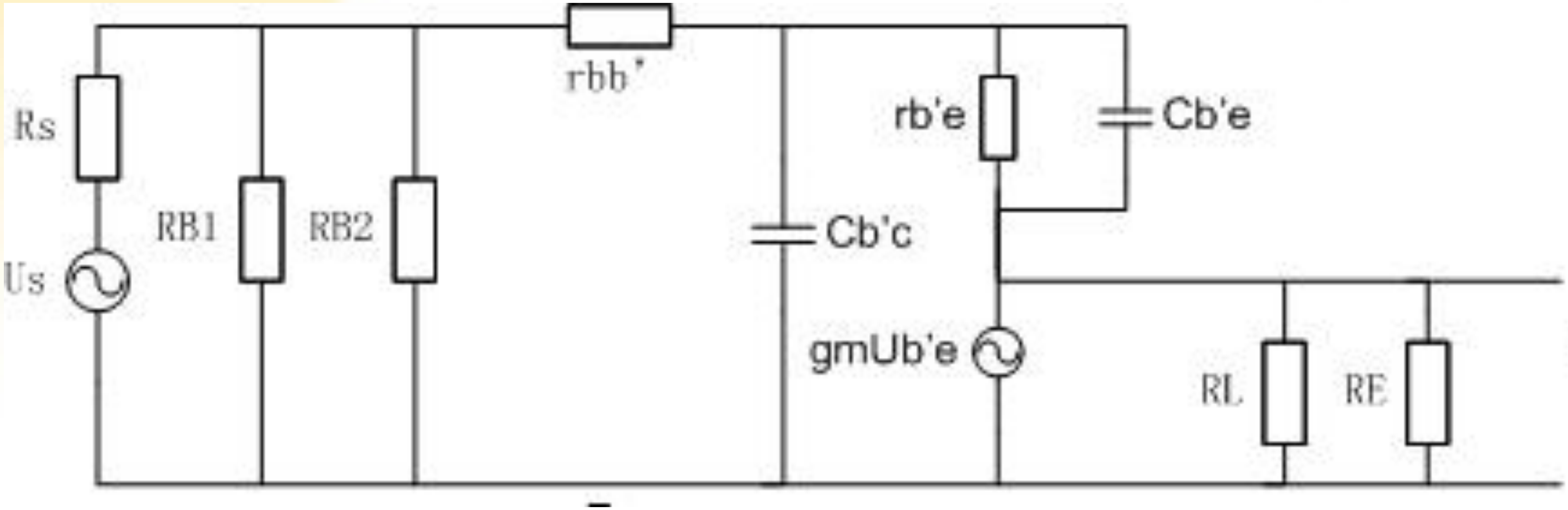


当计算电流源内阻时：

$$A_{US}=\frac{r_1}{R_S+r_1}A_U=\frac{12.6}{0.5+12.6}\times 0.98=0.94$$

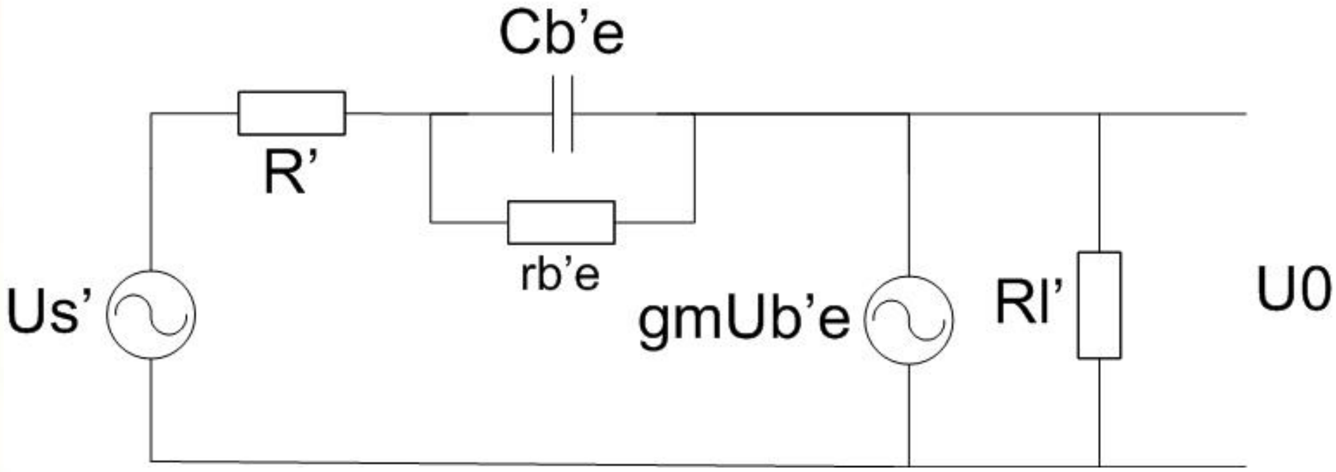
三、电路的频率特性分析

根据题目要求，运用高频模型分析如下：



共集高频混合π等效电路

又因为Cb’c很小，其容抗远大于（Rs+Rb1//Rb2+rb’b），因而可以忽略。同时应用戴维南定理可以对电路进一步简化如下图：

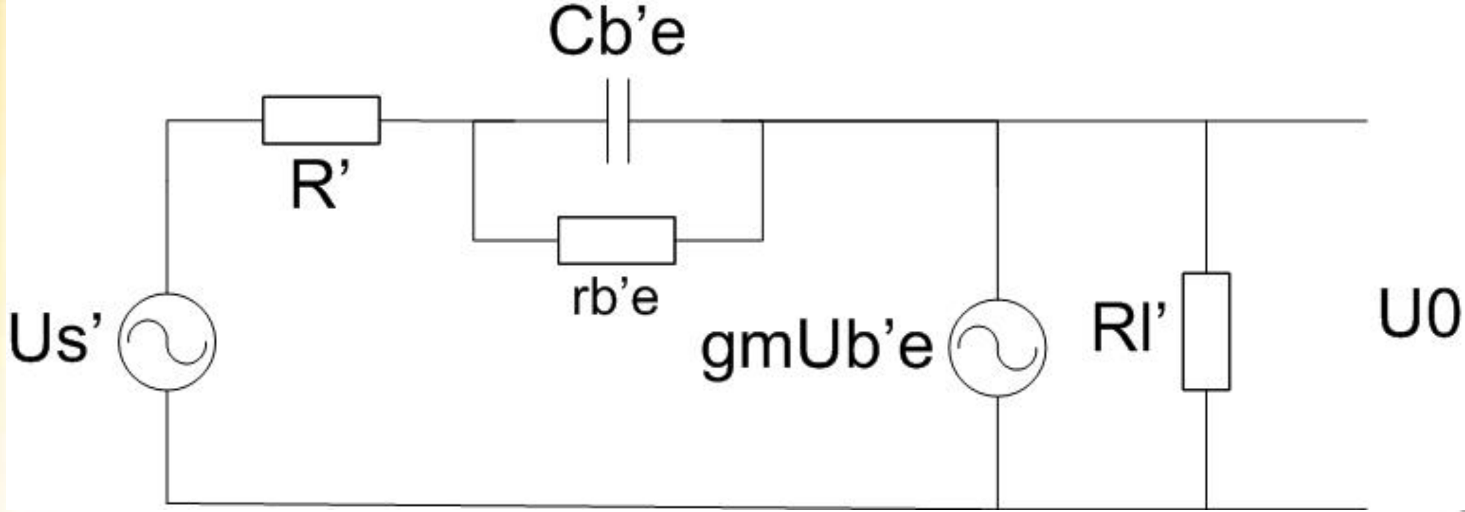


简化共集高频π等效电路

三极管特征频率$f_{\mathrm{T}} = \beta_0 f_{\beta}$

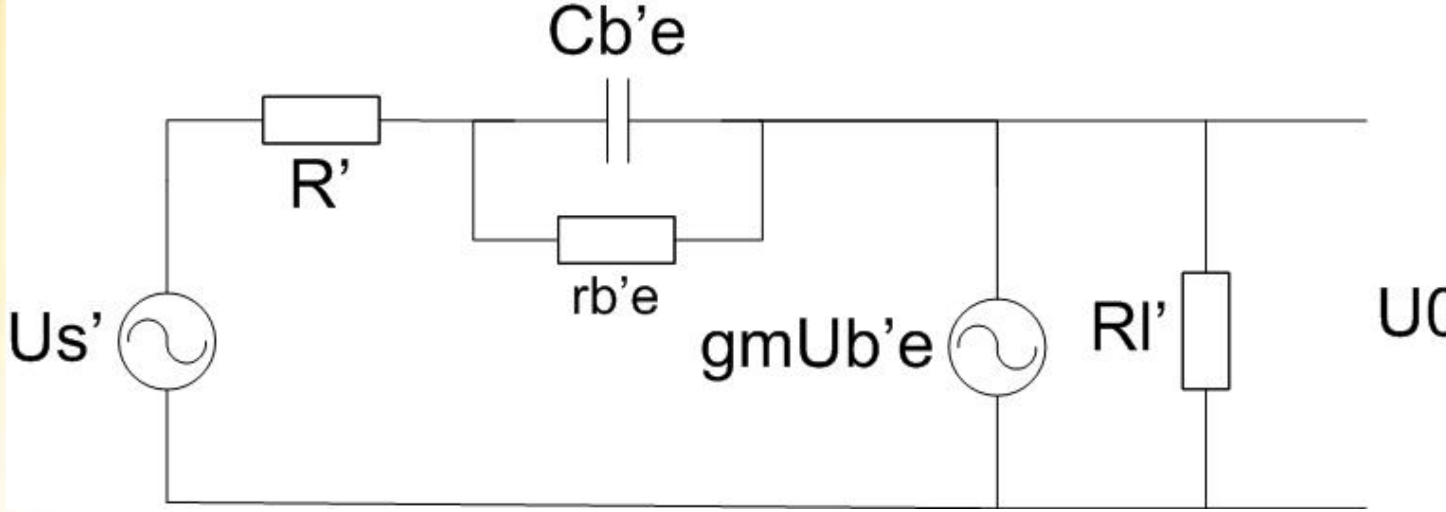
其中：β_0是中频增益，$\beta_0 = h_{\mathrm{fe}}$

f_{β}是三极管上限频率，$f_{\beta} = \dfrac{1}{2\pi r_{\mathrm{b'e}}(C_{\mathrm{b'e}} + C_{\mathrm{b'c}})}$。



$$\therefore C_{b'e} + C_{b'c} = \frac{\beta_0}{2\pi r_{b'e} f_T}$$

$$\text{如果忽略}C_{b'c}\text{，则}C_{b'e} = \frac{\beta_0}{2\pi r_{b'e} f_T}$$

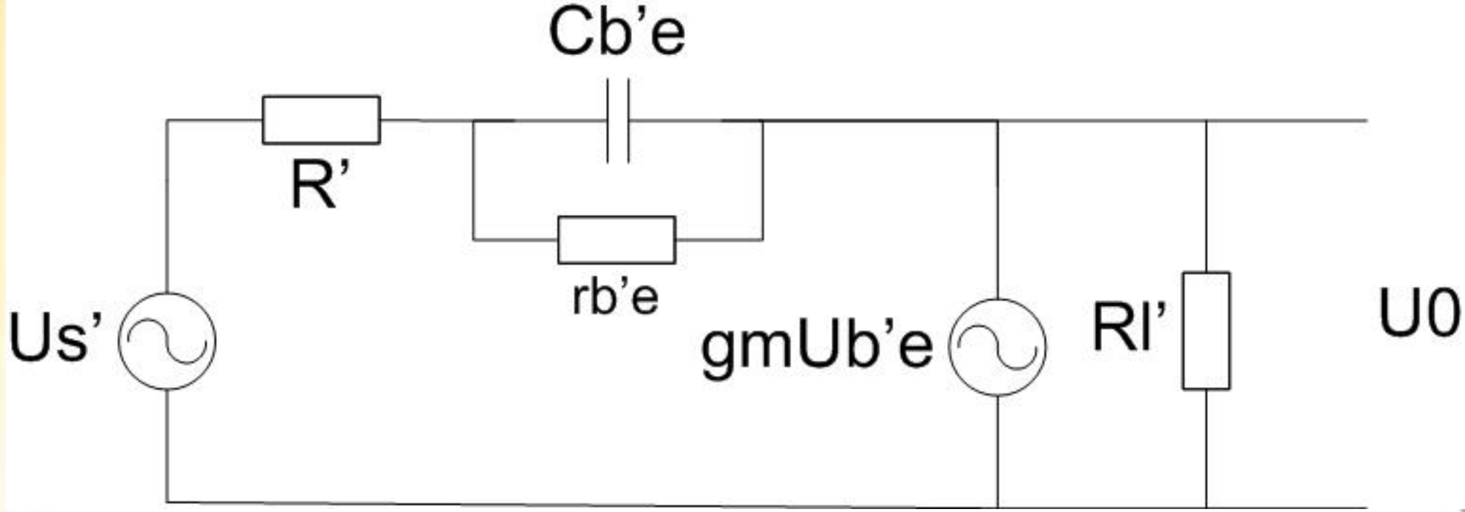


首先设流过R‘的电流为I,那么根据上图，可以得到以下的关系：

$$u_{b'e} = Z_{b'e} I \qquad \frac{U_O}{R_{L'}} - g_m u_{b'e} = I$$

进而推导：

$$U_s' = \frac{U_0}{R_L'(1+g_m Z_{b'e})}(R' + Z_{b'e}) + U_0$$



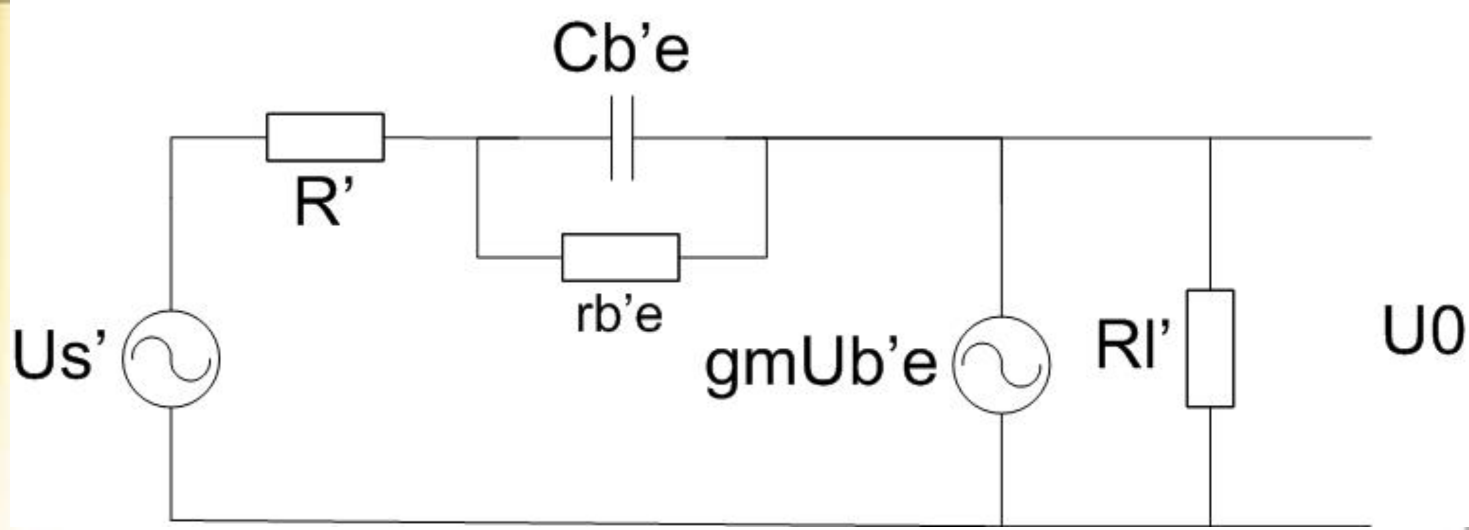
则可得将内阻计算电压增益为：

$$\frac{U_0}{U_s'} = \frac{R_L'(1+g_m Z_{b'e})}{R' + Z_{b'e} + R_L'(1+g_m Z_{b'e})}$$

其中 $g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}}$

$$Z_{b'e} = r_{b'e} // \frac{1}{sC_{b'e}} = \frac{r_{b'e}}{sC_{b'e} r_{b'e} + 1}$$

$$R' = r_{bb'} + R_s // R_{B1} // R_{B2} = 0.56K\Omega$$

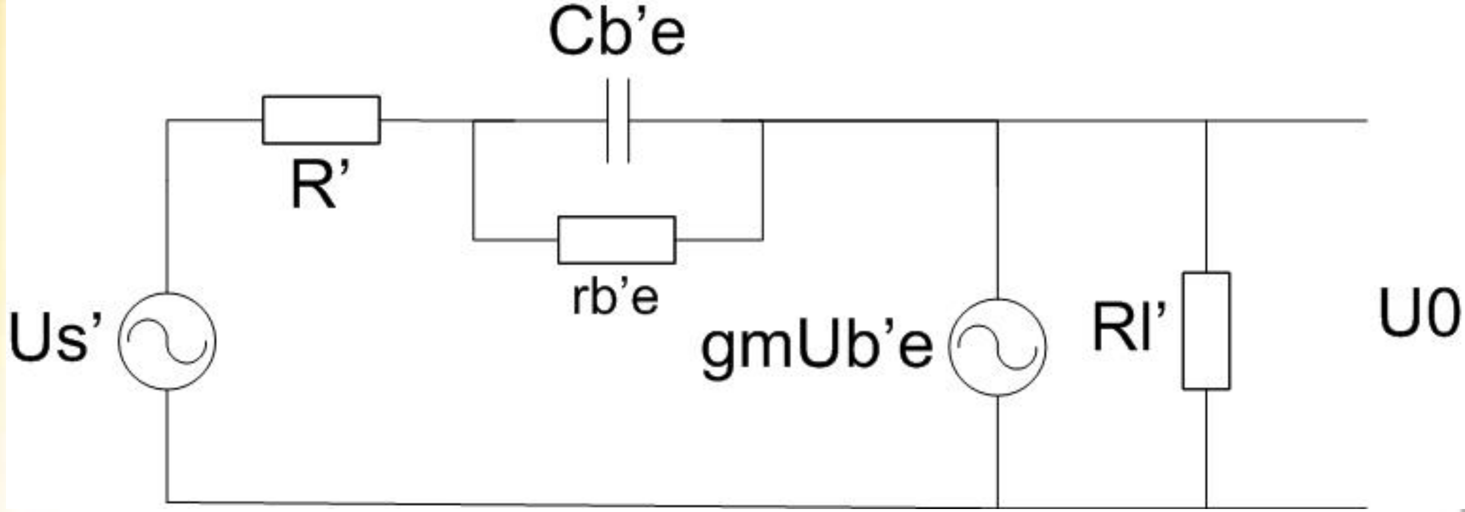


将以上三个参数代入并化简得：

$$\frac{U_0}{U_s'}=\frac{R_L'(1+\beta_0)+(R_L'C_{b'e}r_{b'e})s}{R'+R_L'(1+\beta_0)+r_{b'e}+(R'+R_L')(C_{b'e}r_{b'e})s}$$

将s = jw代入，得：

$$\frac{U_0}{U_s'}=\frac{R_L'(1+\beta_0)+(R_L'C_{b'e}r_{b'e})j\omega}{R'+R_L'(1+\beta_0)+r_{b'e}+(R'+R_L')(C_{b'e}r_{b'e})j\omega}$$

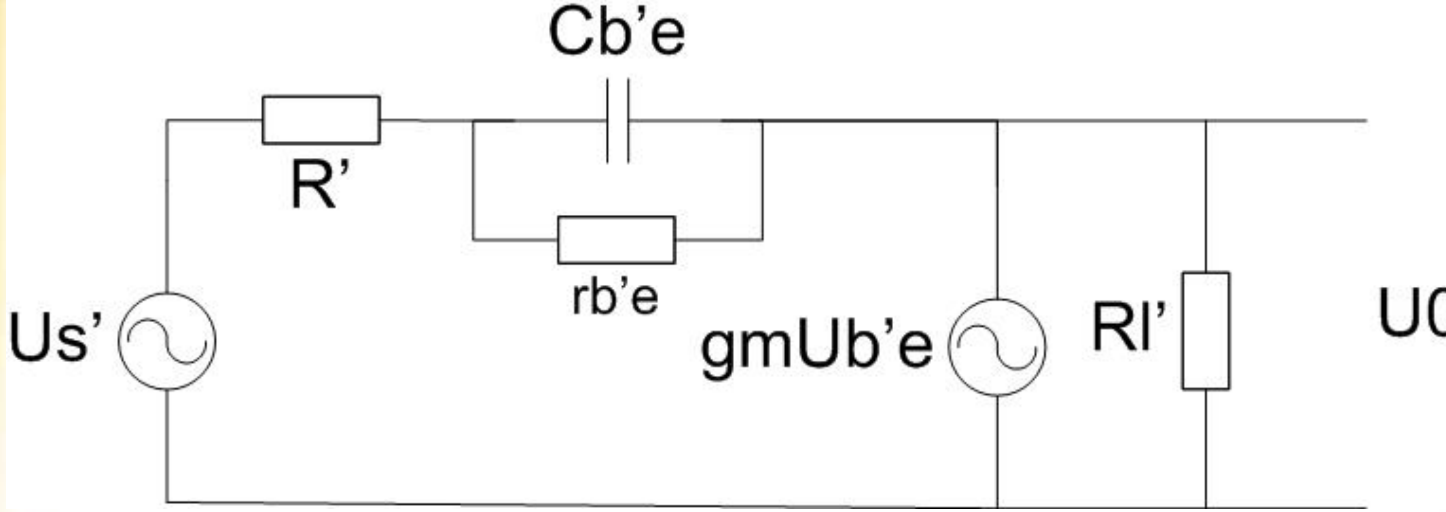


上式可以化简成如下形式：

$$\frac{U_0}{U_s'} = A_{Us}'\left(\frac{1+j\omega/\omega_z}{1+j\omega/\omega_p}\right)$$ 其中 $$\omega_z = \frac{\beta_0+1}{C_{b'e}r_{b'e}} = 2\pi f_T$$

$$\omega_p = \frac{R'+R_L'(1+\beta_0)+r_{b'e}}{(R'+R_L')(C_{b'e}r_{b'e})} = \frac{R'+R_L'(1+\beta_0)+r_{b'e}}{(R'+R_L')(1+\beta_0)} * 2\pi f_T = 0.657 * 2\pi f_T$$

$$A_{Us}' = \frac{R_L'(1+\beta_0)}{R'+R_L'(1+\beta_0)+r_{b'e}} = 0.98$$



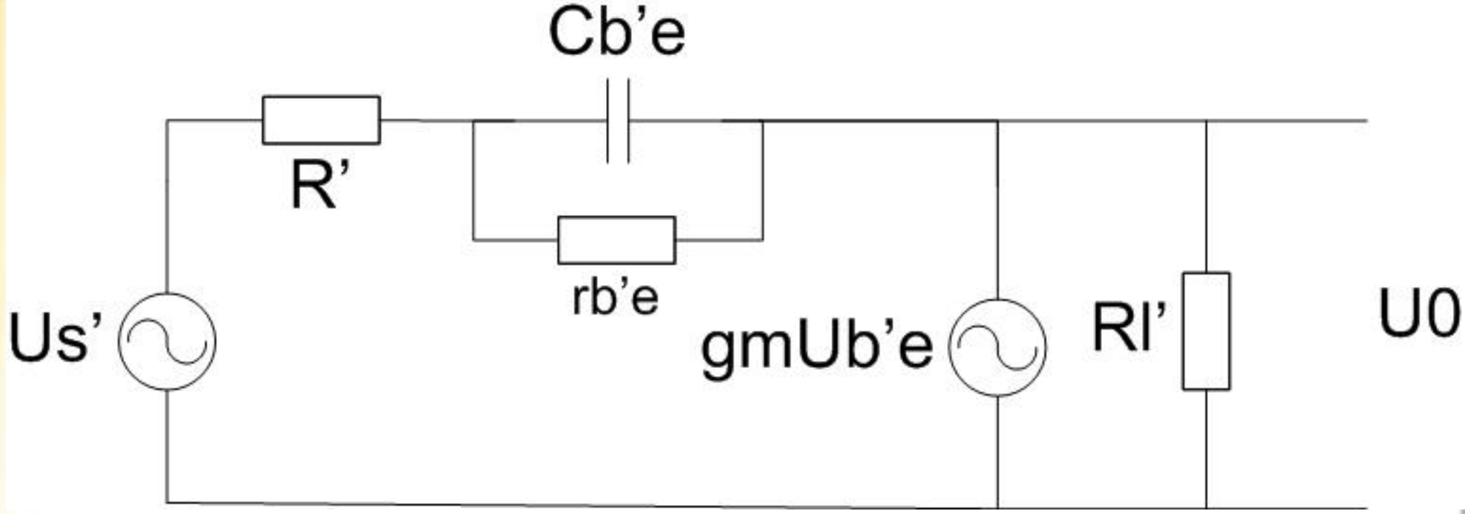
又因为

$$U_s' = U_s * \frac{R_s // R_{B1} // R_{B2}}{R_s} = 0.96 U_s$$

则会有：

$$A_{Us}(j\omega) = \frac{U_0(j\omega)}{U_s(j\omega)} = 0.96 * A_{Us}'(\frac{1 + j\omega/\omega_z}{1 + j\omega/\omega_p})$$

$$= 0.94 * \frac{1 + j\omega/(2\pi f_T)}{1 + j\omega/(0.657 * 2\pi f_T)}$$



根据已知条件fT=200MHz将其代入得：

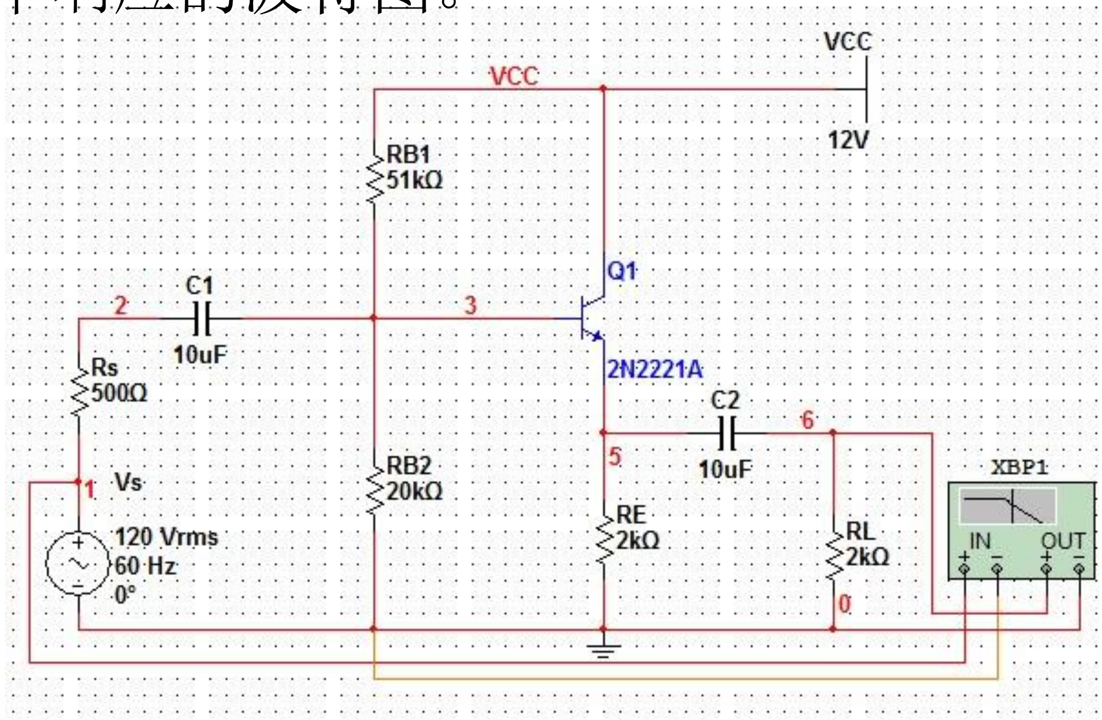
$$A_{Us}(j\omega)=0.94*\frac{1+j\omega/(1.256\times10^{9})}{1+j\omega/(8.252\times10^{8})}=A_{US}*\frac{1+j\omega/(1.256\times10^{9})}{1+j\omega/(8.252\times10^{8})}$$

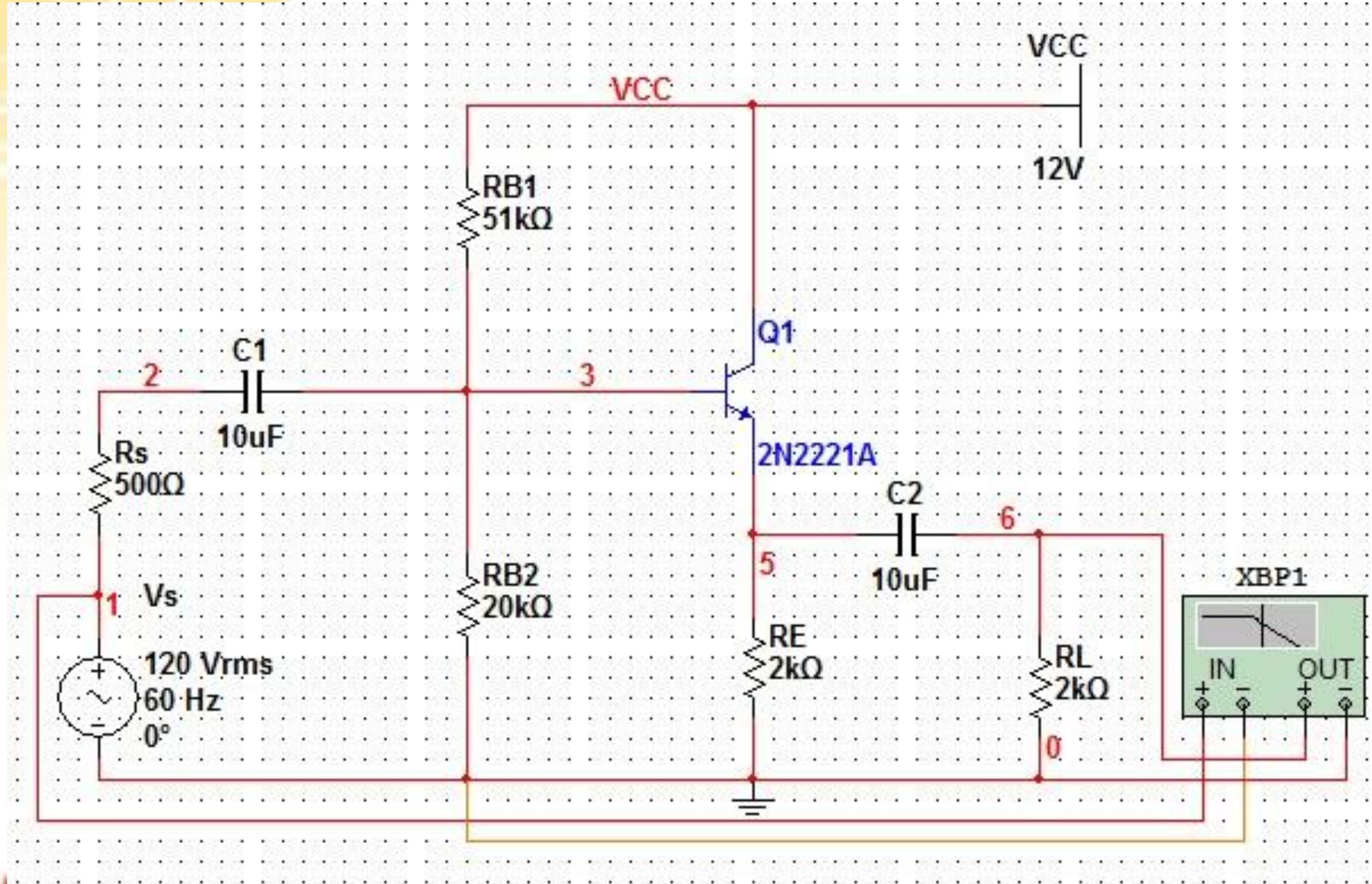
h_{fe}

五、在MULTISIM中的仿真

仿真的电路图：

由于软件中提供的三极管参数的限制，选择了参数与题目接近的2N-2221A 三极管，他的hfe的为20~120，特征频率250Hz，比较符合要求。同时，在电路中，选用了波特图仪，将输入输出端口分别与相应位置接好，以分析放大电路频率响应的波特图。



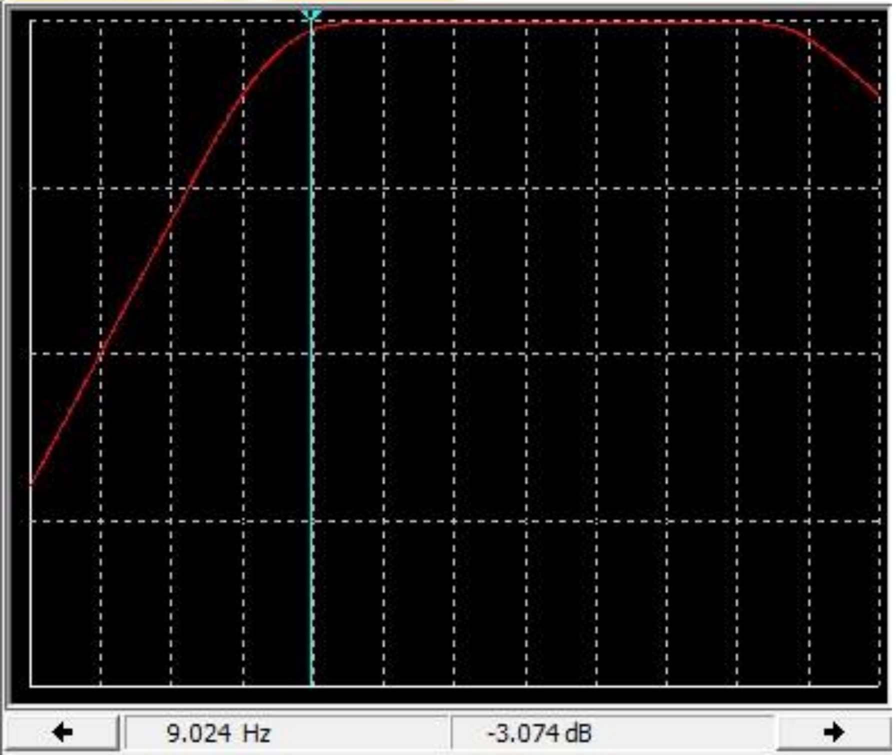

VCC
VCC
12V
RB1
51kΩ
Q1
C1
2
3
10uF
2N2221A
Rs
500Ω
C2
6
5
10uF
RB2
20kΩ
1
Vs
XBP1
120 Vrms
60 Hz
0°
RE
2kΩ
RL
2kΩ
IN
OUT
0

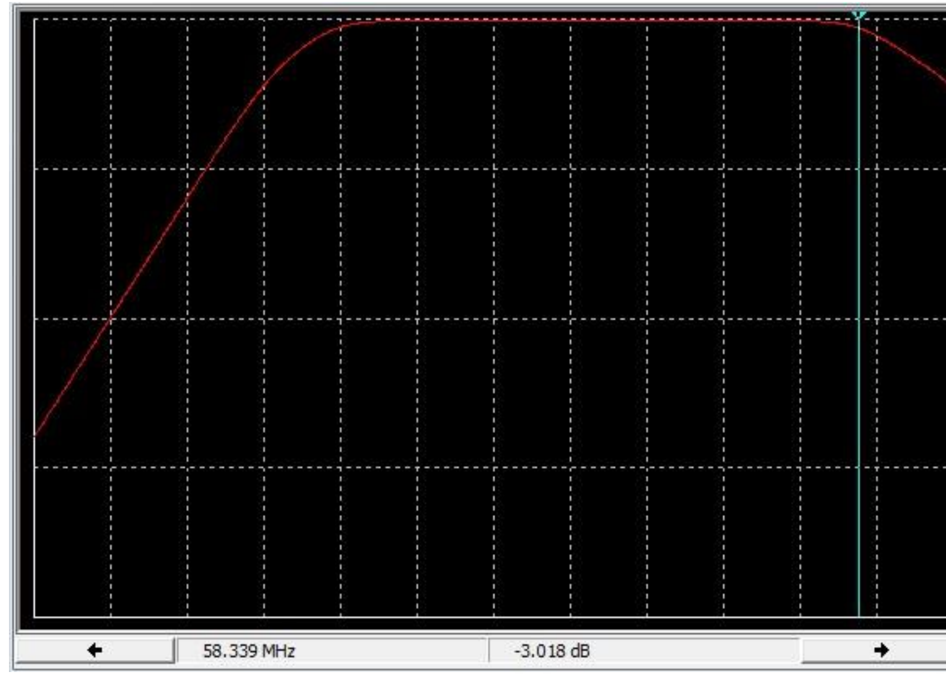
静态工作点仿真分析

Icq=1.268mA　　　Ieq=1.282mA

通过对比可知，仿真得电路的直流工作点Icq=1.268mA， Ieq=1.282mA，与 $i_{CQ理论}=1.33mA$ $i_{EQ理论}=1.34mA$ 有4.5%的误差，分析应该是选用的三极管参数与理论的提供的存在差别造成的

波特图分析





由以上波特图得$f_L \approx 9.0\text{Hz}$　$f_H \approx 58.3\text{MHz}$　其在较宽的频带范围内，电路很好的稳定在中频增益，可见共集电路的频响特性较好。

结论：

（1） 共集放大电路输入阻抗高，输出阻抗低，电流增益近似等于1，电流增益大。

（2）高频情况下，上限频率高.在较宽的频率范围内输出电压几乎维持不变，频率特性好。

Thanks

感想

回顾

仔细

实践