

## 5.4 多级放大电路的频率响应

设放大电路的低高频区的等效电路均有多个惯性环节

1. 如果各个惯性环节决定的下限截止频率分别为

$$f_{L1} , f_{L2} , \dots , f_{Ln}$$

则，电路的下限截止频率 $f_L$

$$f_L \approx 1.1\sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \dots + f_{Ln}^2}$$

特别地, 当  $f_{Li} \gg (f_{Lj} \quad j = 1, n \quad j) \neq$  时

$f_L \approx f_{Li} \quad \Rightarrow \quad$  下限截止频率取大的

b. 各个惯性环节决定的上限截止频率分别为

$$f_{H1}, f_{H2}, \dots, f_{Hn}$$

电路上限截止频率  $f_H$

$$f_H \approx \frac{1}{1.1 \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \dots + \frac{1}{f_{Hn}^2}}}$$

$$= 0.9 (f_{H1}^{-2} + f_{H2}^{-2} + \dots + f_{Hn}^{-2})^{-1/2}$$

特别地，当  $f_{Hi} \ll (f_{Hj} \quad j = 1, n \quad j) \neq$  时

$f_H \approx f_{Hi} \quad \Rightarrow \quad$  上限截止频率取小的

小结：

对于多级放大电路（相对于单级放大电路）：

- （1）增益高。
- （2）下限截止频率 $f_L$ 增大。
- （3）上限截止频率 $f_H$ 降低。
- （4）频带 $f_{bw}$ 变窄。

## 思考题

1. 通常影响晶体管高频性能的主要因素有那些？
2. 影响放大电路低频性能的主要因素是什么？
3. 放大电路频率特性用波特图表示有何好处？

## 本章小结

### 放大电路的频率特性

放大电路  
频率响应

晶体管的高频特性

单管放大电路  
的频率响应

多级放大  
电路的频率  
响应

频率响  
应和频  
率失真

频率响  
应分析  
方法

晶体管  
高频模  
型

晶体管高  
频特性和  
高频参数

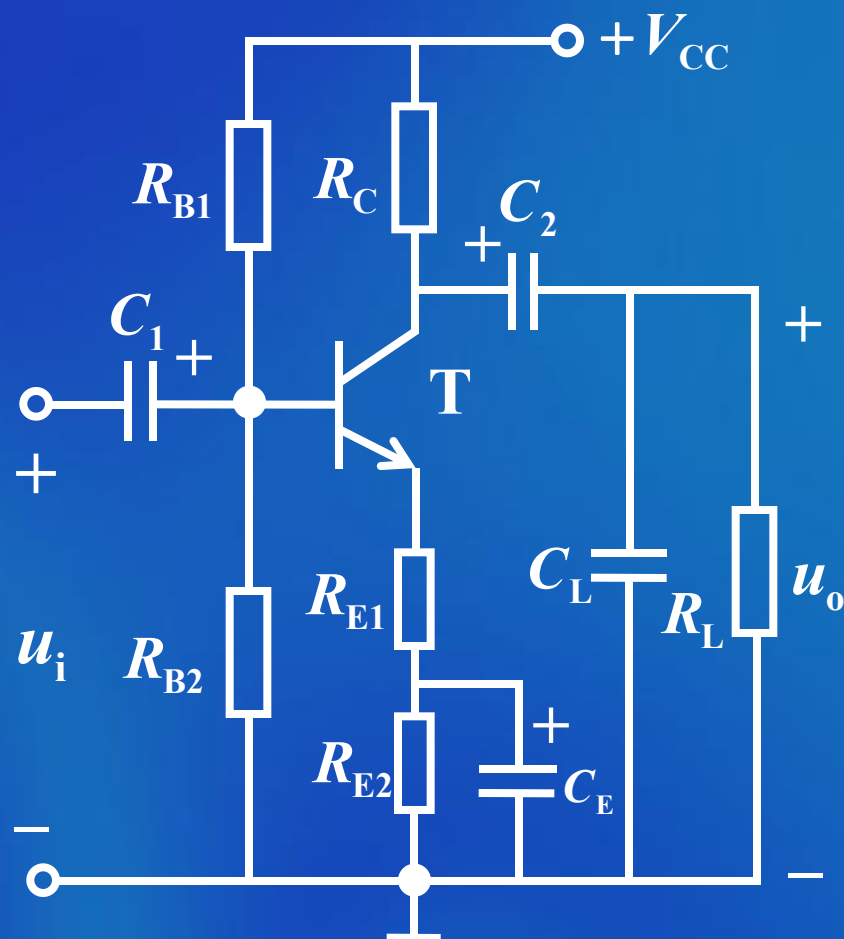
单管共  
射极放  
大电路

单管共  
漏极放  
大电路

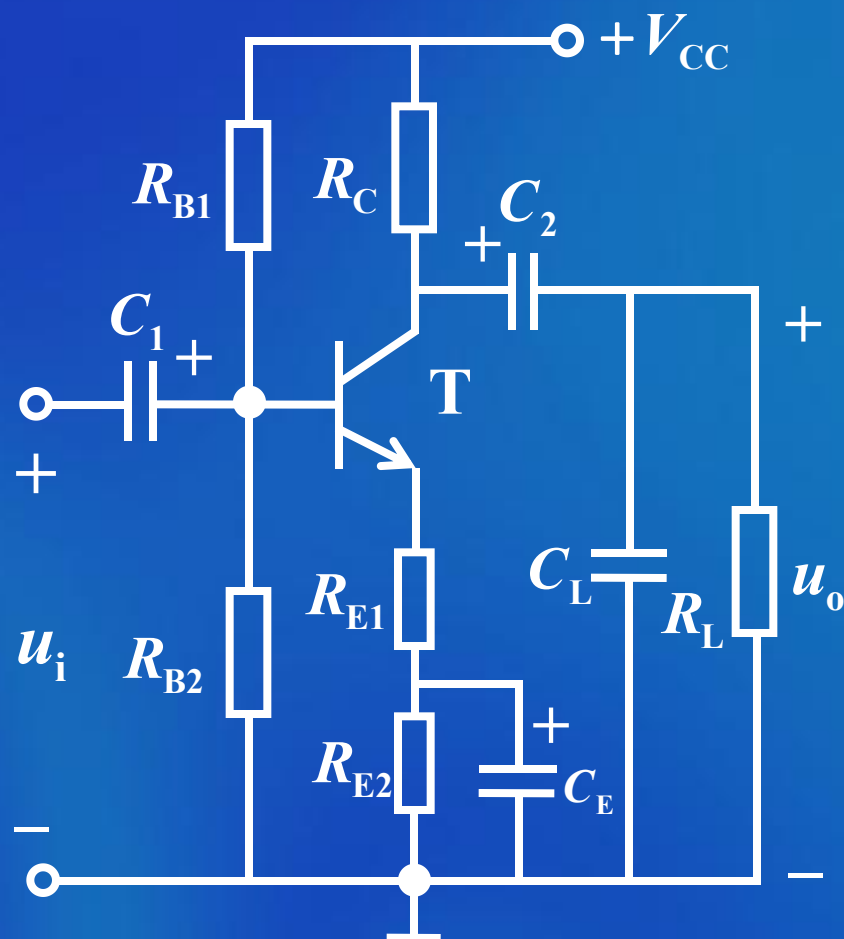
## 练习题

例1 在图示放大电路中，  
已知  $V_{CC}=15V$ ,  $R_{B1}=90k\Omega$ ,  
 $R_{B2}=60k\Omega$ ,  
 $R_C=R_L=2k\Omega$ ,  $R_{E1}=0.2k\Omega$ ,  
 $R_{E2}=1.8k\Omega$ ,  $C_1=C_2=10\mu F$ ,  
 $C_E=50\mu F$ ,  $C_L=1600pF$ 。

三极管的  $r_{bb'}=300\Omega$ ,  
 $\beta=100$ ,  $U_{BE}=0.7V$ , 结电容  
可以忽略。试求：



- (1) 静态工作点  $I_{CQ}$ ,  $U_{CEQ}$  ;
- (2)  $A_{um}$ 、 $R_i$ 、 $R_o$  ;
- (3) 估计上、下限截止频率  $f_H$  和  $f_L$  ;
- (4)  $U_{opp}$  及输入电压最大值  $U_{im}$  ;
- (5) 当输入电压  $u_i$  的最大值大于  $U_{im}$  时, 输出将首先出现什么失真?



## 解：(1) 估算法

$$V_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$= \frac{60}{90 + 60} \times 15$$

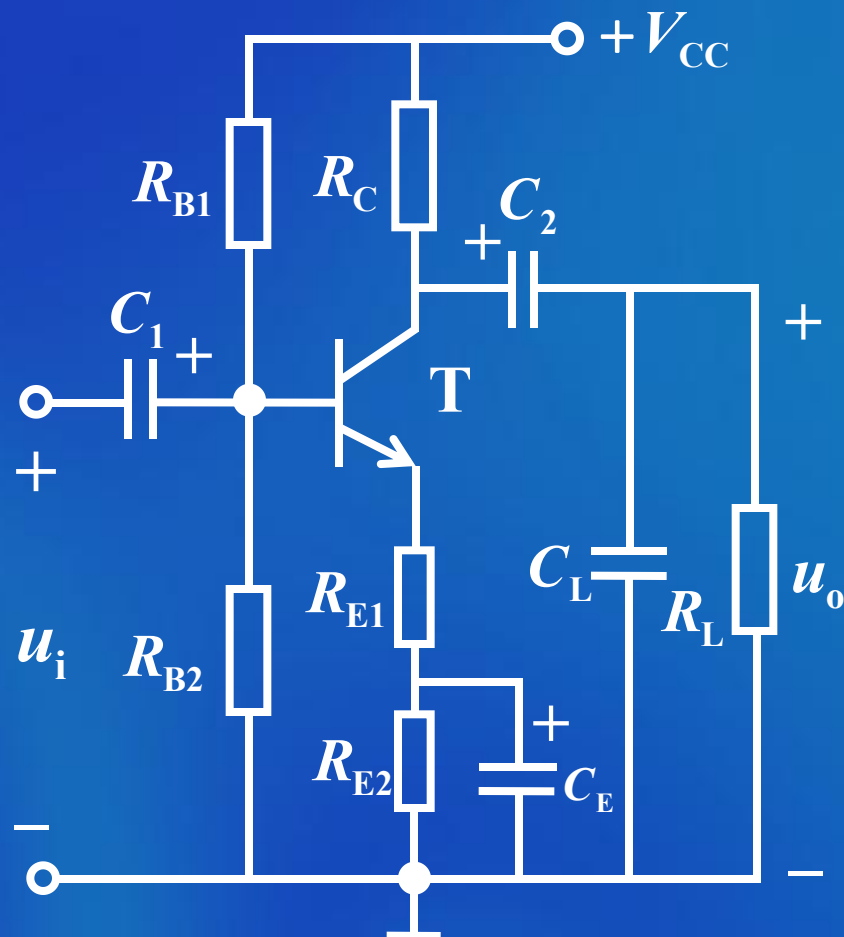
$$= 6V$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ}$$

$$= \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_{E1} + R_{E2}}$$

$$= \frac{6 - 0.7}{2}$$

$$= 3.15mA$$





$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}(R_{E1} + R_{E2})$$

$$\approx V_{CC} - I_{EQ} (R_C + R_{E1} + R_{E2})$$

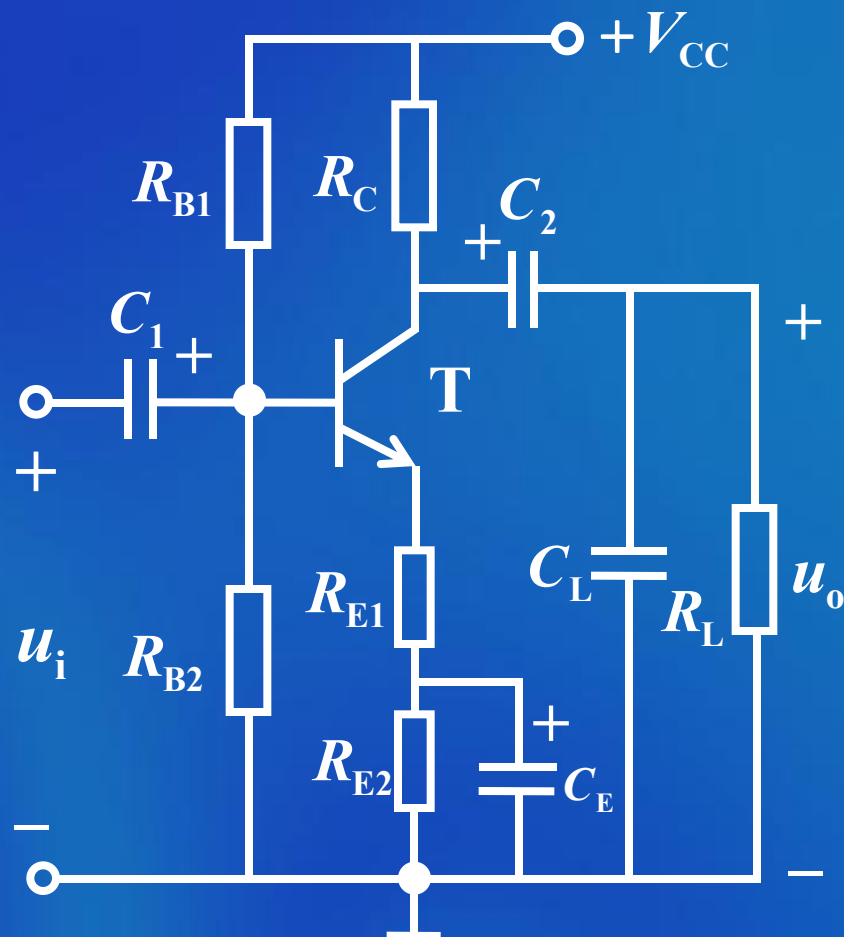
$$= 15 - 3.15 \times (2 + 2)$$

$$= 2.4 \text{ V}$$

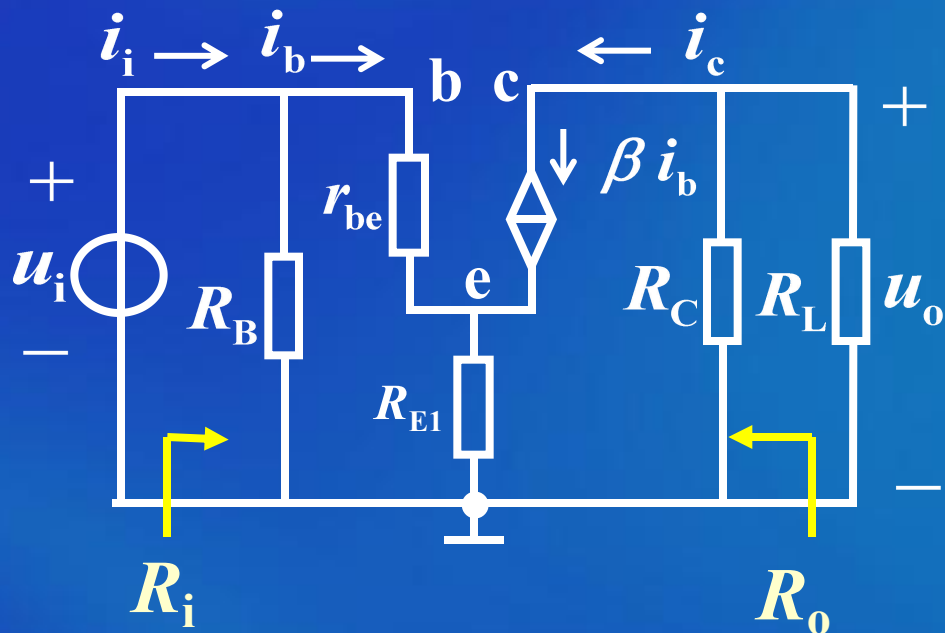
$$(2) \quad r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

$$\approx 300 + 101 \times \frac{26}{3.15}$$

$$\approx 1.13 \text{ k}\Omega$$



$$\begin{aligned}\dot{A}_{um} &= \frac{-\beta R_L // R_C}{r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}} \\ &= \frac{-100 \times 2 // 2}{1.13 + 101 \times 0.2} \\ &\approx -4.7\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}R_i &= R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}] \\ &\approx 90 // 60 // [1.13 + 101 \times 0.2] \\ &\approx 13.4 \text{ k}\Omega\end{aligned}$$

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

### (3) a. 估算法下限截止频率

单独考虑电容影响

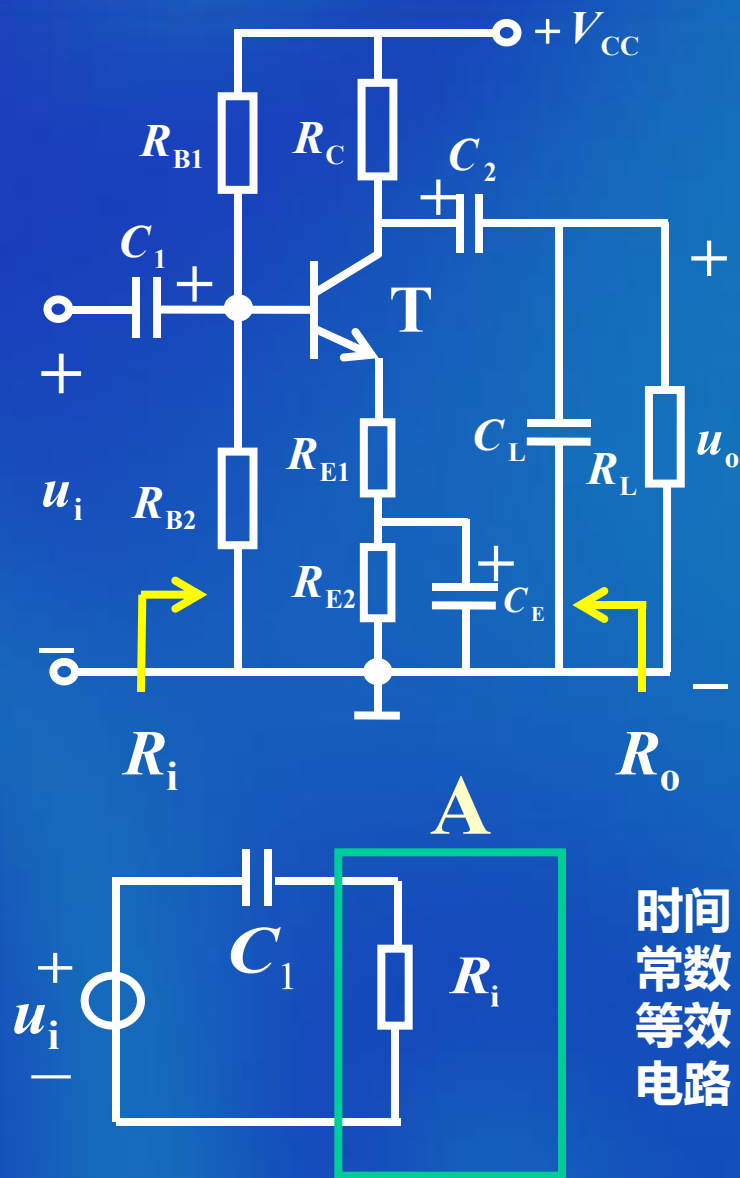
(a)  $C_1$  决定的下限截止频率

将  $C_E$  和  $C_2$  看成短路

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi R_i C_1}$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 13.4 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}}$$

$$\approx 1.2 \text{Hz}$$

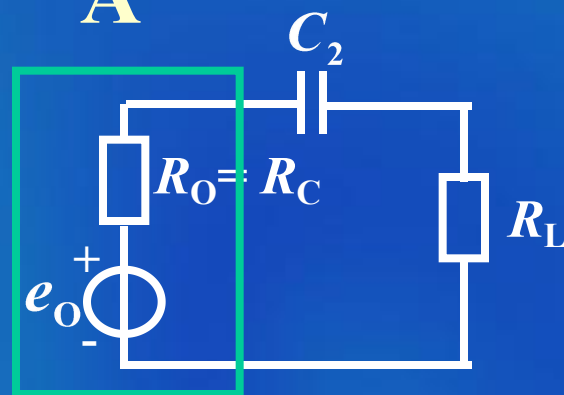
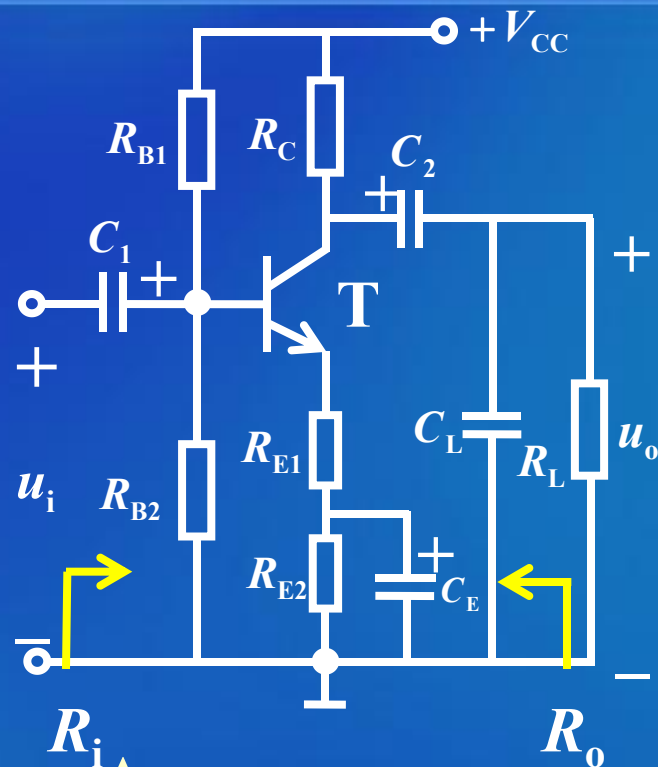


(b)  $C_2$ 决定的下限截止频率将 $C_1$ 和 $C_E$ 看成短路

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(R_L + R_C)C_2}$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 4 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}}$$

$$\approx 4\text{Hz}$$

时间  
常数  
等效  
电路

# (c) $C_E$ 决定的下限截止频率

将  $C_1$  和  $C_2$  看成短路

忽略  $R_B$  的影响，电路可以从  $C_E$  前等效

$$f_{L3} = \frac{1}{2\pi R C_E}$$

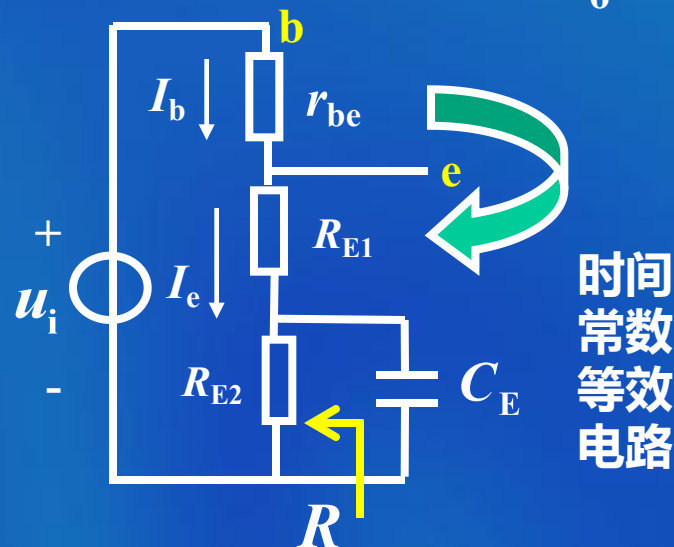
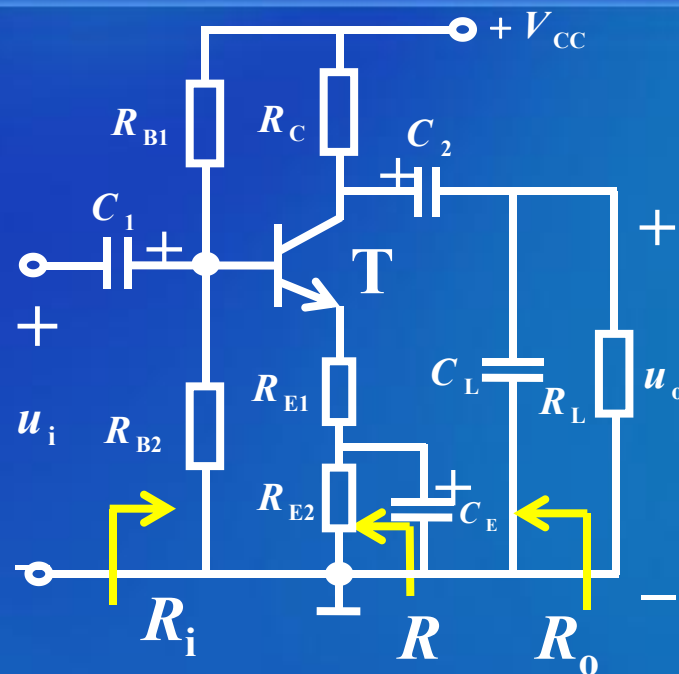
图中  $R = R_{E2} // [R_{E1} + \frac{r_{be}}{1+\beta}]$

$$\approx 0.18 \text{ k}\Omega$$

故  $f_{L3} = \frac{1}{2\pi R C_E}$

$$= \frac{1}{2\pi \times 0.18 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-6}}$$

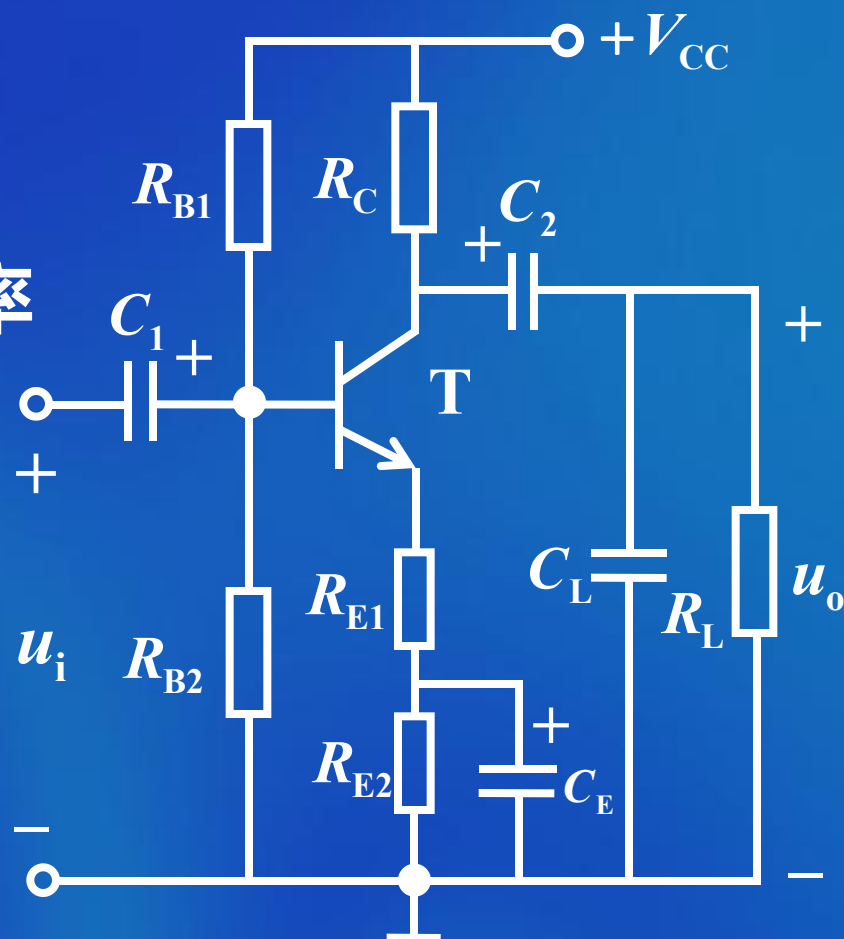
$$\approx 1.8 \text{ Hz}$$



三个频率相差不大

由此可得电路的下限截止频率

$$\begin{aligned}f_L &\approx 1.1\sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2} \\&= 1.1\sqrt{1.2^2 + 4^2 + 1.8^2} \\&\approx 5\text{Hz}\end{aligned}$$



## b. 估算法上限截止频率

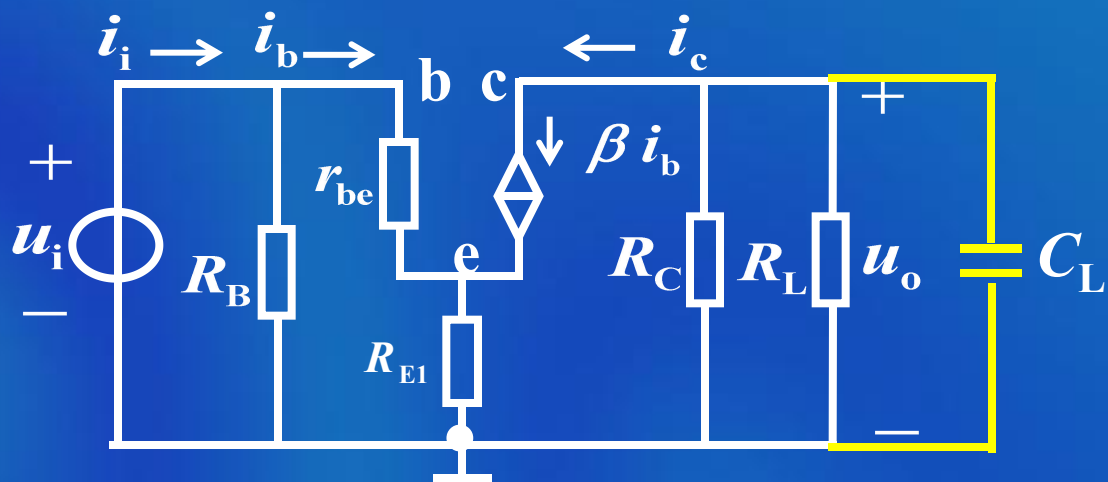
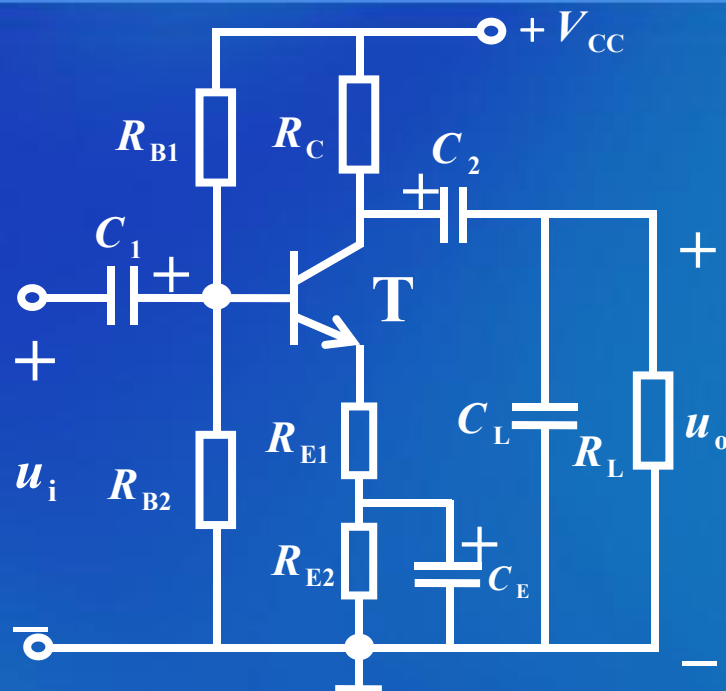
根据题意，忽略结电容的影响。则影响电路上限截止频率的电容只有 $C_L$ 。

故

$$f_H = \frac{1}{2\pi(R_L // R_C)C_L}$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 1 \times 10^3 \times 1600 \times 10^{-12}}$$

$$\approx 99.5 \text{ kHz}$$



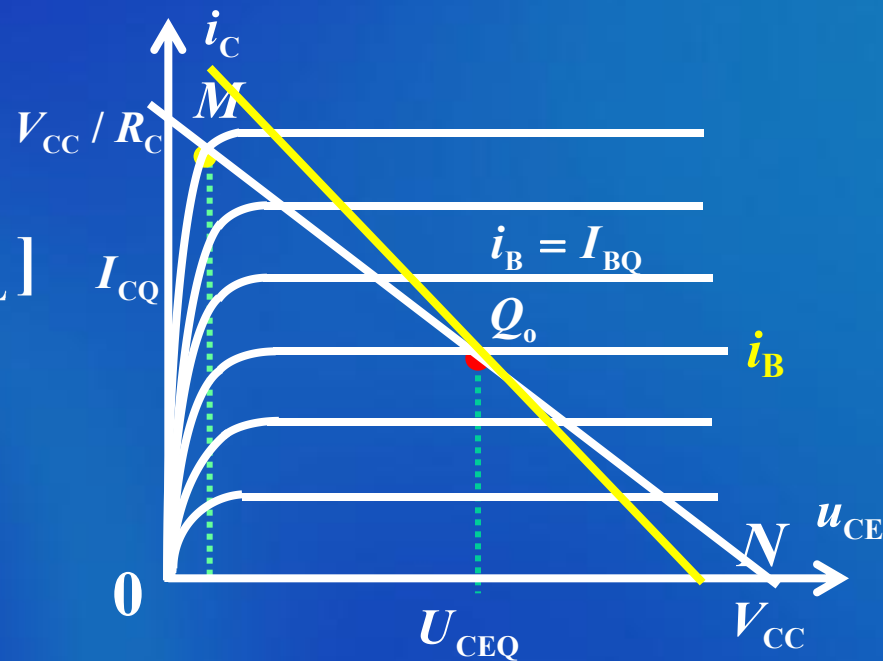
(4) 求  $U_{opp}$  及输入电压最大值  $U_{im}$

由  $U_{CEQ} = 2.4 \text{ V}$

得  $I_{CQ} R'_L = 3.15 \text{ V}$

$$U_{opp} = 2 \times \min[ U_{CEQ}, I_{CQ} R'_L ] \\ = 4.8 \text{ V}$$

$$U_{im} = \frac{U_{opp}}{|A_{um}|} = \frac{2.4}{4.7} \approx 0.5 \text{ V}$$





(5) 当输入电压 $u_i$ 的最大值大于 $U_{im}$ 时, 输出将首先出现什么失真?

由于  $I_{CQ}R'_L > U_{CEQ}$

故

当输入电压 $u_i$ 的最大值大于 $U_{im}$ 时

输出将首先出现饱和失真

