

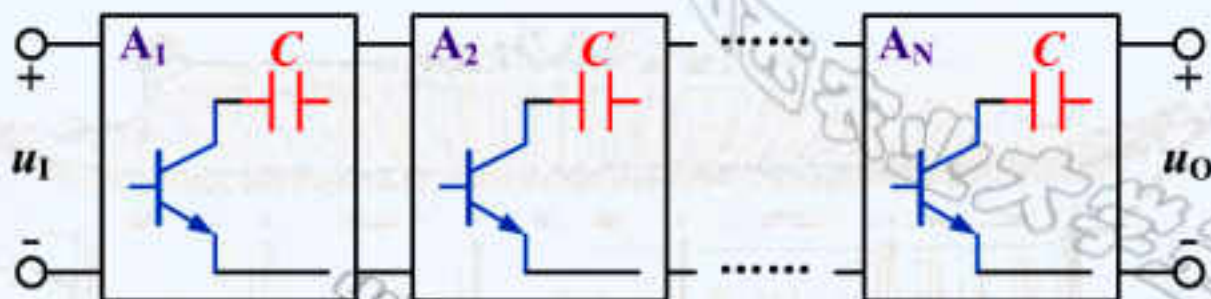
第4章 放大电路的频率响应

——王文俊

山西农业大学

九、多级放大电路的频率响应

• 1、多级放大电路中的电容与截止频率



上限
频率
 f_H

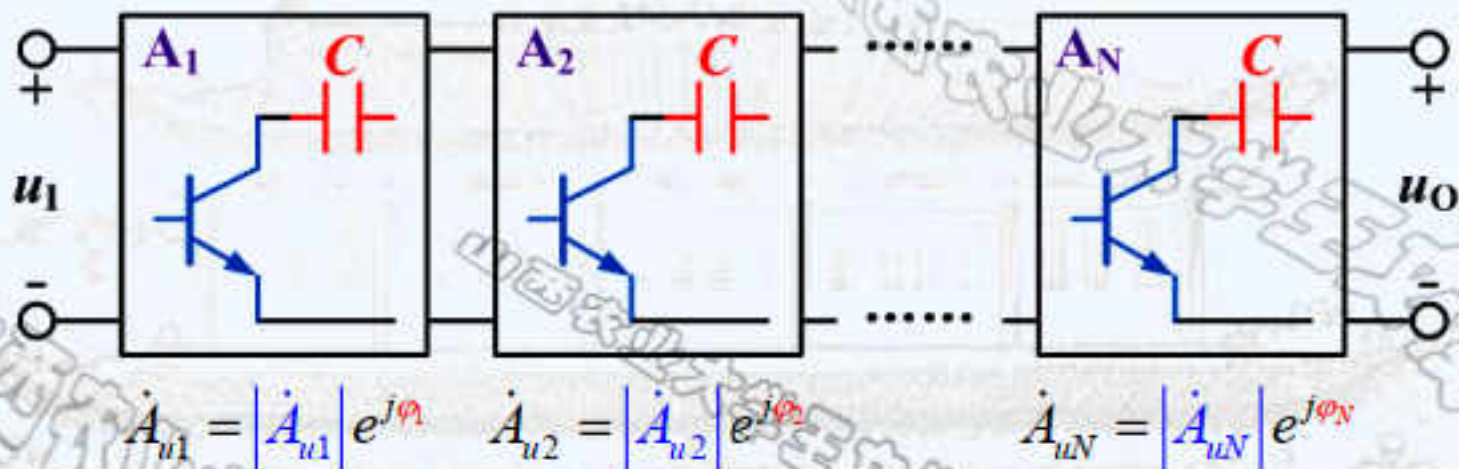
- 多级放大电路包含多个放大管，在高频等效电路中就包含多个 C'_π (或 C'_{gs})，即有多个低通电路，对应多个上限截止频率 f_H 。

下限
频率
 f_L

- 对于阻容耦合电路，若有多个耦合电容（或旁路电容），则在低频等效模型中就含有多个高通电路，对应多个下限截止频率 f_L 。

• 2、多级放大电路的频率响应

假设一个 N 级放大电路各级电压放大倍数分别为 $\dot{A}_{u1}, \dot{A}_{u2}, \dots, \dot{A}_{uN}$ ，
则总的电压放大倍数为 $\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdot \dots \cdot \dot{A}_{uN}$ 。



总的电压放大倍数:

$$|\dot{A}_u| e^{j\varphi} = |\dot{A}_{u1}| e^{j\varphi_1} \cdot |\dot{A}_{u2}| e^{j\varphi_2} \cdot \dots \cdot |\dot{A}_{uN}| e^{j\varphi_N}$$

$$|\dot{A}_u| e^{j\varphi} = |\dot{A}_{u1}| \cdot |\dot{A}_{u2}| \cdot \dots \cdot |\dot{A}_{uN}| e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_N)}$$

• 2、多级放大电路的频率响应

总的电压放大倍数： $\dot{A}_u e^{j\varphi} = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdots \dot{A}_{uN} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_N)}$

频率特性（幅频特性、相频特性）：

$$\begin{cases} |\dot{A}_u| = |\dot{A}_{u1}| \cdot |\dot{A}_{u2}| \cdots |\dot{A}_{uN}| = \prod_{k=1}^N |\dot{A}_{uk}| \\ \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_N = \sum_{k=1}^N \varphi_k \end{cases}$$

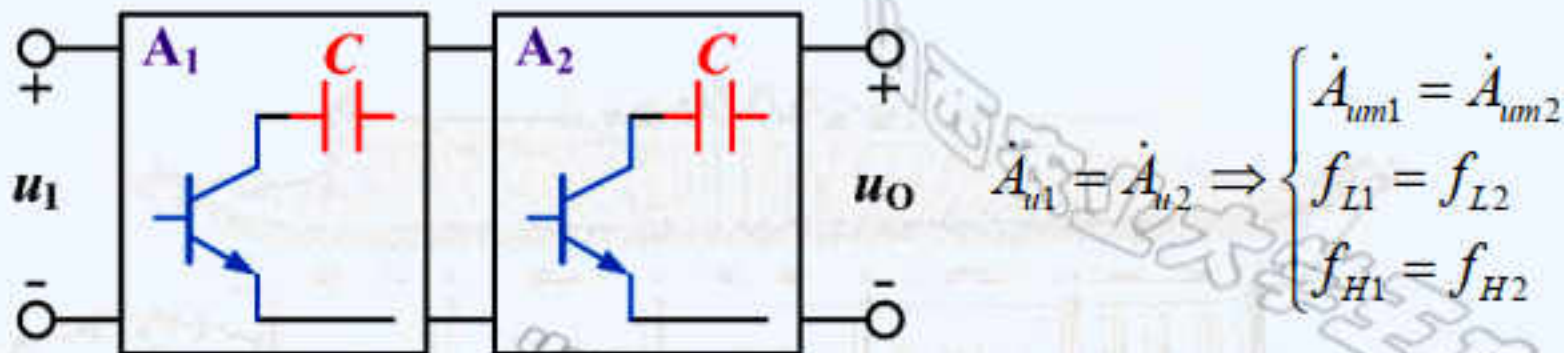
对数频率特性（对数幅频特性、对数相频特性）：

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}_u| = 20\lg|\dot{A}_{u1}| + 20\lg|\dot{A}_{u2}| + \cdots + 20\lg|\dot{A}_{uN}| = \sum_{k=1}^N 20\lg|\dot{A}_{uk}| \\ \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_N = \sum_{k=1}^N \varphi_k \end{cases}$$

多级放大电路的增益为各级放大电路增益之和，相移也为各级放大电路相移之和。

• 3、两级放大电路的频率响应

设组成两级放大电路的两个单管共射放大电路具有相同的频率响应：

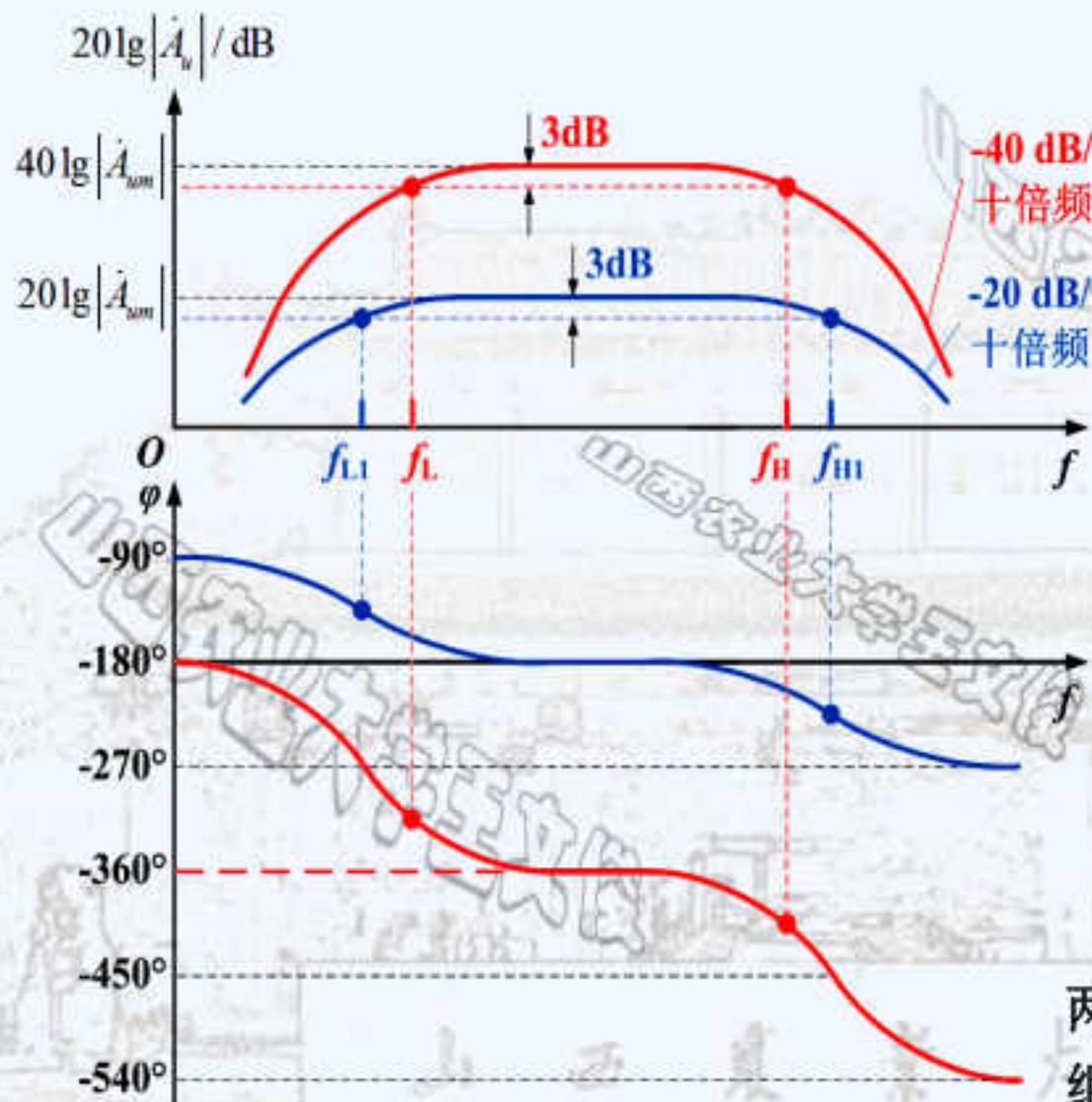


对数频率特性：

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}_u| = 20\lg|\dot{A}_{u1}| + 20\lg|\dot{A}_{u2}| = 2 \times 20\lg|\dot{A}_{u1}| \\ \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 2 \times \varphi_1 \end{cases}$$

两级单管共射放大电路的增益为单级放大电路增益的两倍，相移也为单级放大电路相移的两倍。

• 3、两级放大电路的频率响应



下限频率 f_L

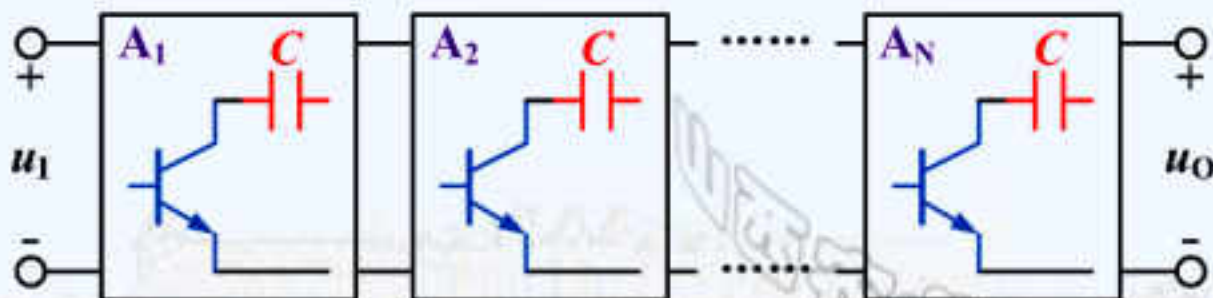
- 当 $f=f_{L1}$ 时, 增益下降 6 dB , 附加相移为 $+90^\circ$ 。
- 因此, $f_L > f_{L1}(f_{L2})$

上限频率 f_H

- 当 $f=f_{H1}$ 时, 增益下降 6 dB , 附加相移为 -90° 。
- 因此, $f_H < f_{H1}(f_{H2})$

两级放大电路的通频带比组成它的单级放大电路窄。

4、多级放大电路的通频带



参数	A_1	A_2	...	A_N	整体
下限频率	f_{L1}	f_{L2}	...	f_{LN}	f_L
上限频率	f_{H1}	f_{H2}	...	f_{HN}	f_H
通频带	f_{bw1}	f_{bw2}	...	f_{bwN}	f_{bw}

下限频率高于任何一级放大电路的下限频率。

$$f_L > f_{Lk} \quad (k=1 \sim N)$$

上限频率低于任何一级放大电路的上限频率。

$$f_H < f_{Hk} \quad (k=1 \sim N)$$

通频带窄于任何一级放大电路的通频带。

$$f_{bw} < f_{bwk} \quad (k=1 \sim N)$$

• 5、下限频率 f_L 的估算

假设各级放大电路的低频电压放大倍数为：

$$|\dot{A}_{ulk}| = |\dot{A}_{umk}| \frac{f}{f_{Lk}} = \frac{|\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{Lk}}\right)^2}}$$

则，多级放大电路低频段的电压放大倍数为：

$$|\dot{A}_{ul}| = \prod_{k=1}^N |\dot{A}_{ulk}| = \prod_{k=1}^N \frac{|\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{Lk}}{f}\right)^2}} = \frac{\prod_{k=1}^N |\dot{A}_{umk}|}{\prod_{k=1}^N \sqrt{1 + \left(\frac{f_{Lk}}{f}\right)^2}}$$

根据 f_L 的定义，当 $f = f_L$ 时，增益变为原来的 0.707 倍，即：

$$|\dot{A}_{ul}| = \frac{|\dot{A}_{um}|}{\sqrt{2}} = \frac{\prod_{k=1}^N |\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{2}}$$

• 5、下限频率 f_L 的估算

对比前两式可得：

$$\prod_{k=1}^N \sqrt{1 + \left(\frac{f_{Lk}}{f_L} \right)^2} = \sqrt{2}$$

等式两边同时平方：

$$\prod_{k=1}^N \left[1 + \left(\frac{f_{Lk}}{f_L} \right)^2 \right] = 2$$

展开上式，得：

$$1 + \sum_{k=1}^N \left(\frac{f_{Lk}}{f_L} \right)^2 + \text{高次项} = 2$$

由于 f_{Lk}/f_L 小于1，因此可将高次项忽略，得出：

$$1 + \sum_{k=1}^N \left(\frac{f_{Lk}}{f_L} \right)^2 \approx 2 \Rightarrow f_L^2 \approx \sum_{k=1}^N f_{Lk}^2 \Rightarrow f_L \approx \sqrt{\sum_{k=1}^N f_{Lk}^2}$$

加上修正系数，则下限截止频率约为： $f_L \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^N f_{Lk}^2}$

• 6、上限频率 f_H 的估算

假设各级放大电路的高频电压放大倍数为：

$$|\dot{A}_{uhk}| = |\dot{A}_{umk}| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{Hk}}\right)^2}} = \frac{|\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{Hk}}\right)^2}}$$

则，多级放大电路高频段的电压放大倍数为：

$$|\dot{A}_{uh}| = \prod_{k=1}^N |\dot{A}_{uhk}| = \prod_{k=1}^N \frac{|\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{Hk}}\right)^2}} = \frac{\prod_{k=1}^N |\dot{A}_{umk}|}{\prod_{k=1}^N \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{Hk}}\right)^2}}$$

根据 f_H 的定义，当 $f = f_H$ 时，增益变为原来的 0.707 倍，即：

$$|\dot{A}_{uh}| = \frac{|\dot{A}_{um}|}{\sqrt{2}} = \frac{\prod_{k=1}^N |\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{2}}$$

• 6、上限频率 f_H 的估算

对比前两式可得：

$$\prod_{k=1}^N \sqrt{1 + \left(\frac{f_H}{f_{Hk}} \right)^2} = \sqrt{2}$$

等式两边同时平方：

$$\prod_{k=1}^N \left[1 + \left(\frac{f_H}{f_{Hk}} \right)^2 \right] = 2$$

展开上式，得：

$$1 + \sum_{k=1}^N \left(\frac{f_H}{f_{Hk}} \right)^2 + \text{高次项} = 2$$

由于 f_H / f_{Hk} 小于1，因此可将高次项忽略，得出：

$$1 + \sum_{k=1}^N \left(\frac{f_H}{f_{Hk}} \right)^2 \approx 2 \Rightarrow \left(\frac{1}{f_H} \right)^2 \approx \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{f_{Hk}} \right)^2 \Rightarrow \frac{1}{f_H} \approx \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{f_{Hk}^2}}$$

加上修正系数，则下限截止频率约为： $\frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{f_{Hk}^2}}$

• 7、两级三级放大电路的上下限频率估算

假设组成多级放大电路的各级放大电路均具有相同的频率响应。

两级放大电路

$$\frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\frac{2}{f_{H1}^2}} \Rightarrow f_H \approx \frac{f_{H1}}{1.1\sqrt{2}} \approx 0.643 f_{H1}$$

$$f_L \approx 1.1\sqrt{2} f_{L1} \approx 1.56 f_{L1}$$

$$f_{bw} \approx f_H \approx 0.643 f_{H1} \approx 0.643 f_{bw1}$$

- 两级放大电路上限频率降低，下限频率升高，带宽变窄。

三级放大电路

$$\frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\frac{3}{f_{H1}^2}} \Rightarrow f_H \approx \frac{f_{H1}}{1.1\sqrt{3}} \approx 0.525 f_{H1}$$

$$f_L \approx 1.1\sqrt{3} f_{L1} \approx 1.91 f_{L1}$$

$$f_{bw} \approx f_H \approx 0.525 f_{H1} \approx 0.525 f_{bw1}$$

- 三级放大电路的通频带几乎是单级电路的一半。

• 7、总结

① 下限频率

- 阻容耦合放大电路中的耦合电容、旁路电容越多，低频特性越差，下限频率越高。
- 将下限频率 f_L 的估算公式展开：

$$f_L \approx \sqrt{\sum_{k=1}^N f_{Lk}^2} \approx \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \cdots + f_{LN}^2}$$

- 当 $f_{L1} \gg f_{L2} \sim f_{LN}$ 时， $f_L \approx \sqrt{f_{L1}^2} = f_{L1}$
- 在多级放大电路中，若某级放大电路的下限频率远高于其它各级的下限频率，则可认为整个电路的下限频率近似为该级的下限频率。

• 7、总结

② 上限频率

- 放大电路的级数越多，上限频率越低，带宽越窄。

- 将上限频率 f_H 的估算公式展开：

$$\frac{1}{f_H} \approx \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{f_{Hk}^2}} \approx \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \cdots + \frac{1}{f_{HN}^2}}$$

- 当 $f_{H1} \ll f_{H2} \sim f_{HN}$ 时， $\frac{1}{f_H} \approx \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2}} = \frac{1}{f_{H1}}$ ，即： $f_H \approx f_{H1}$
- 在多级放大电路中，若某级放大电路的上限频率远低于其它各级的上限频率，则可认为整个电路的上限频率近似为该级的上限频率。

十、多级放大电路的波特图

• 折线化波特图的分析思路

① 定性划分频段

- 斜率为零（即水平）的折线对应中频段。（粗略、不精确）
- 中频段左侧，斜率为正（ >0 ）的折线对应低频段。
- 中频段右侧，斜率为负（ <0 ）的折线对应高频段。

② 中频段分析

- 中频电压放大倍数的数值 $|\dot{A}_{um}|$ ，中频段的附加相移为 0° 。
- 注：由于共射、共源放大电路为反相输出（相移 -180° ），因此在未确定放大电路的级数和各级的构成时，输入与输出之间可能同相，也可能反相。即： $\dot{A}_{um} = \pm |\dot{A}_{um}|$

• 折线化波特图的分析思路

③ 低频段分析

- 根据拐点两侧折线的斜率之差，来确定单级下限频率。
- 若斜率之差为 **20 dB/十倍频**，则拐点处只有一个下限频率；
- 若斜率之差为 **40 dB/十倍频**，则拐点处有两个下限频率；
- 以此类推

④ 高频段分析

- 根据拐点两侧折线的斜率之差，来确定单级上限频率。
- 若斜率之差为 **-20 dB/十倍频**，则拐点处只有一个上限频率；
- 若斜率之差为 **-40 dB/十倍频**，则拐点处有两个上限频率；
- 以此类推

折线化波特图的分析思路

⑤ 电压放大倍数

- 中频电压放大倍数: $\dot{A}_{um} = \pm |\dot{A}_{um}|$

- 对每一个单级下限频率 f_{Lk} , 附加项为: $\frac{j \frac{f}{f_{Lk}}}{1 + j \frac{f}{f_{Lk}}}$

- 对每一个单级上限频率 f_{Hk} , 附加项为: $\frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{Hk}}}$

- 电压放大倍数: $\dot{A}_u = \pm |\dot{A}_{um}| \cdot \prod_{k=1}^{N_1} \frac{j \frac{f}{f_{Lk}}}{1 + j \frac{f}{f_{Lk}}} \cdot \prod_{k=1}^{N_2} \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{Hk}}}$

• 折线化波特图的分析思路

⑥ 附加相移

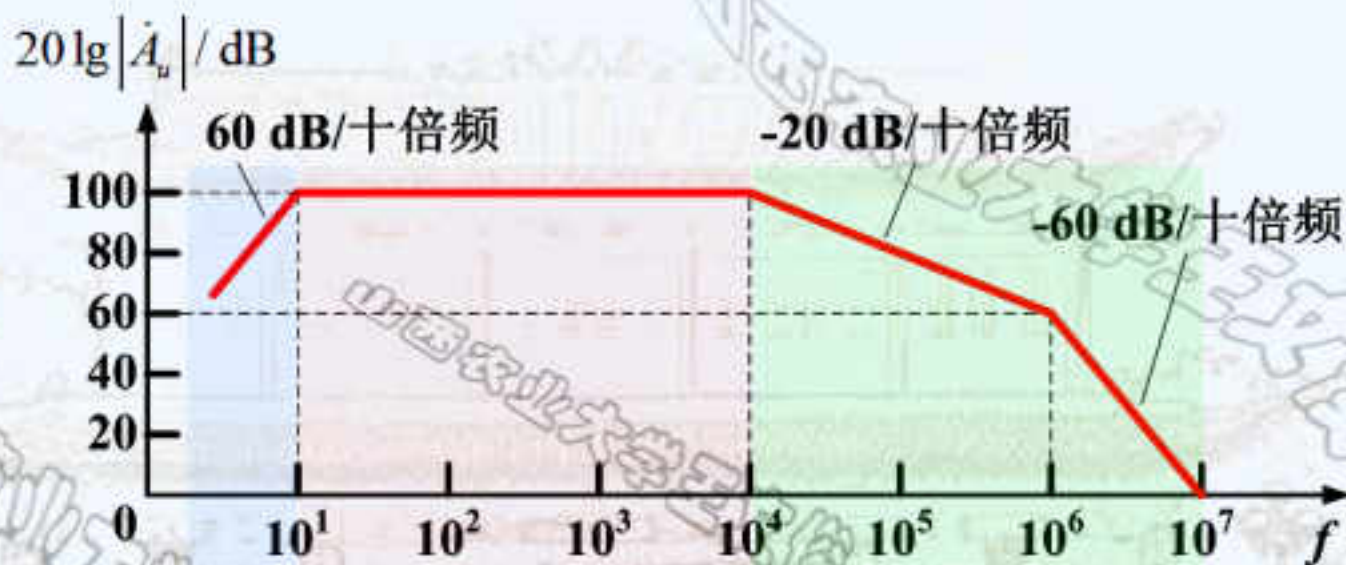
- 中频段的附加相移： 0° 。

- 对每一个单级下限频率 f_{Lk} ，附加相移： $\varphi_{Lk} = \begin{cases} +90^\circ & f \leq 0.1f_{Lk} \\ +45^\circ & f = f_{Lk} \\ +0^\circ & f \geq 10f_{Lk} \end{cases}$

- 对每一个单级上限频率 f_{Hk} ，附加相移： $\varphi_{Hk} = \begin{cases} -0^\circ & f \leq 0.1f_{Hk} \\ -45^\circ & f = f_{Hk} \\ -90^\circ & f \geq 10f_{Hk} \end{cases}$

- 将附加相移整理到一起，进而得到整个频率范围内的折线化的对数相频特性曲线。

- 例：已知某电路的各级放大电路均为共射放大电路。
 - 其对数幅频特性如图所示。
 - 试求解下限频率 f_L 、上限频率 f_H 和电压放大倍数 \dot{A}_u 。

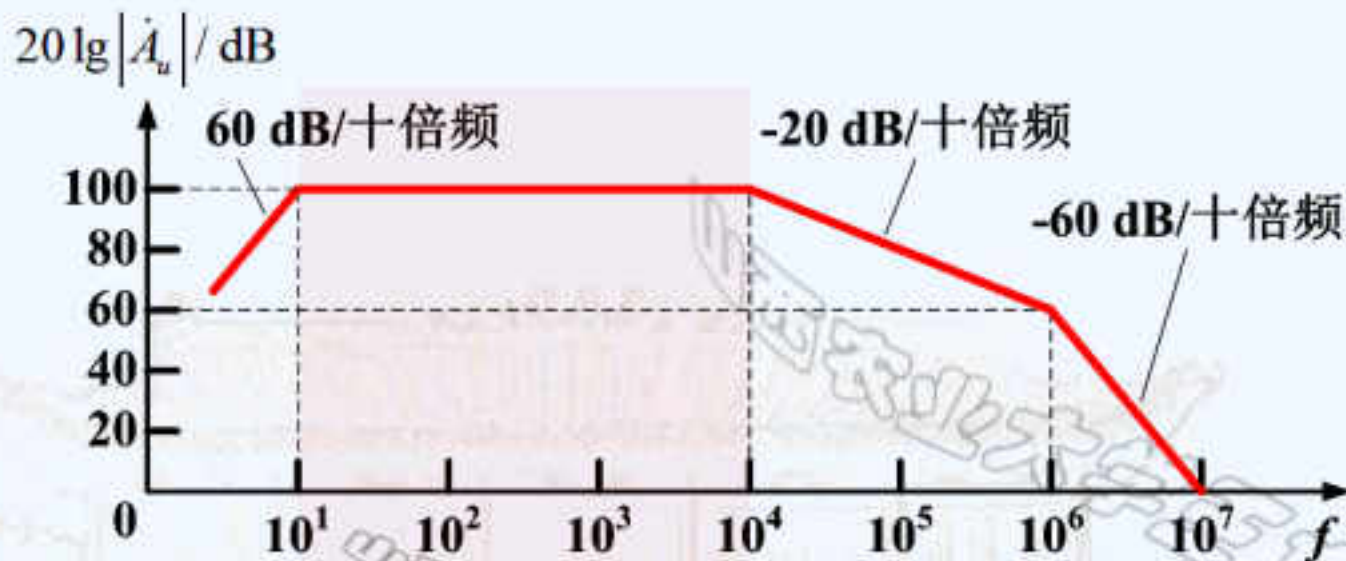


①
定性
划分
频段

低频段

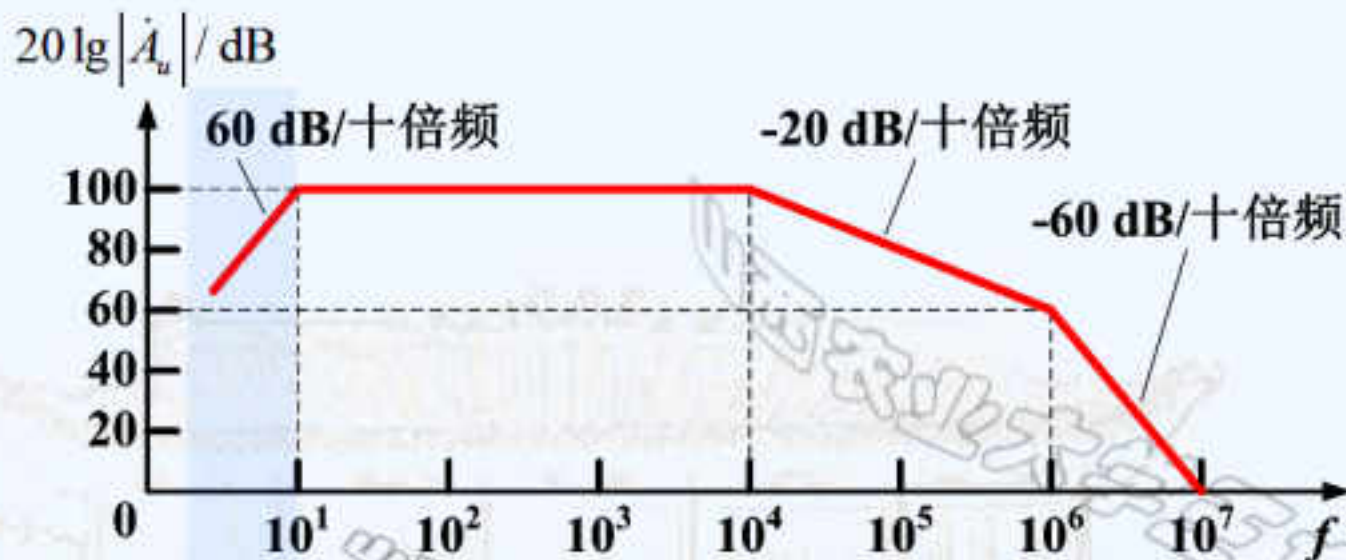
中频段
(粗略划分)

高频段



② 中频段 分析

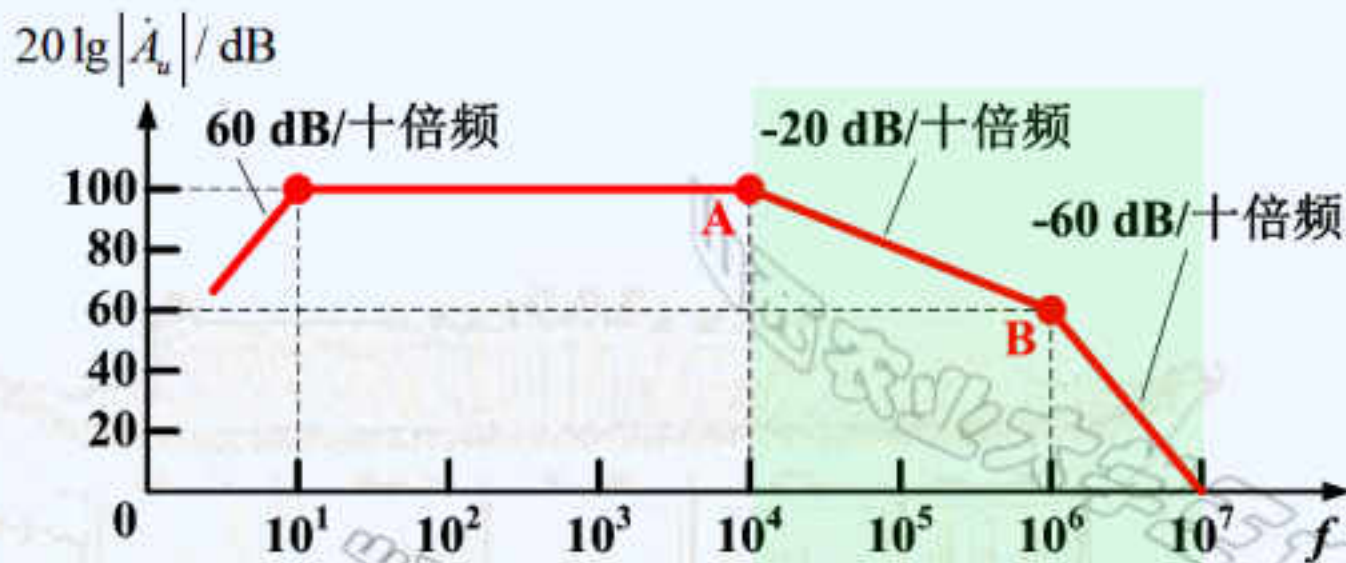
- $20\lg|\dot{A}_{um}| = 100 \rightarrow | |$
- 单级共射放大电路在中频段的相移为 -180° ，但由于无法确定放大电路的级数，因此暂时无法确定输入与输出之间的相位关系，即： $\dot{A}_{um} = \pm 10^5$
- 中频段的附加相移为 0° 。



③ 低频段 分析

- 拐点两侧斜率变化为 **60 dB/十倍频**，因此拐点处包含三个单级下限频率，即：
- 由于三个单级下限频率相同，则下限频率为：

$$f_L = 1/\sqrt{3} \times 1.91 \times 10^4 = 1 \text{ Hz}$$



④

高频段
分析

- 拐点 A 两侧斜率变化为 -20 dB/十倍频，因此拐点 A 处包含一个单级上限频率，即： $f_{H1} = 10^4 \text{ Hz}$
- 拐点 B 两侧斜率变化为 -40 dB/十倍频，因此拐点 B 处包含两个单级上限频率，即：
- 由于 $f_{H1} = 10^4 \text{ Hz}$ ，则上限频率为：

⑤ 电压放大倍数

- 由于有 3 个上限频率，因此该多级放大电路为三级共射放大电路，相移为 $-180^\circ \times 3 = -540^\circ$ ，输出与输入反相，即： $\dot{A}_{um} = -10^5$ 。
- 单级下限频率： $f_{L1} = f_{L2} = f_{L3} = 10\text{Hz}$ ，附加项为：

$$\frac{j\frac{f}{10}}{1+j\frac{f}{10}} \cdot \frac{j\frac{f}{10}}{1+j\frac{f}{10}} \cdot \frac{j\frac{f}{10}}{1+j\frac{f}{10}} = \left(\frac{j\frac{f}{10}}{1+j\frac{f}{10}} \right)^3$$

- 单级上限频率： $f_{H1} = 10^4\text{Hz}$ ， $f_{H2} = f_{H3} = 10^6\text{Hz}$ ，附加项为：

$$\frac{1}{1+j\frac{f}{10^4}} \cdot \frac{1}{1+j\frac{f}{10^6}} \cdot \frac{1}{1+j\frac{f}{10^6}} = \frac{1}{1+j\frac{f}{10^4}} \left(\frac{1}{1+j\frac{f}{10^6}} \right)^2$$

⑤ 电压放大倍数

• 电压放大倍数: $\dot{A}_u = \pm |\dot{A}_{um}| \cdot \prod_{k=1}^{N_1} \frac{j \frac{f}{f_{Lk}}}{1 + j \frac{f}{f_{Lk}}} \cdot \prod_{k=1}^{N_2} \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{Hk}}}$

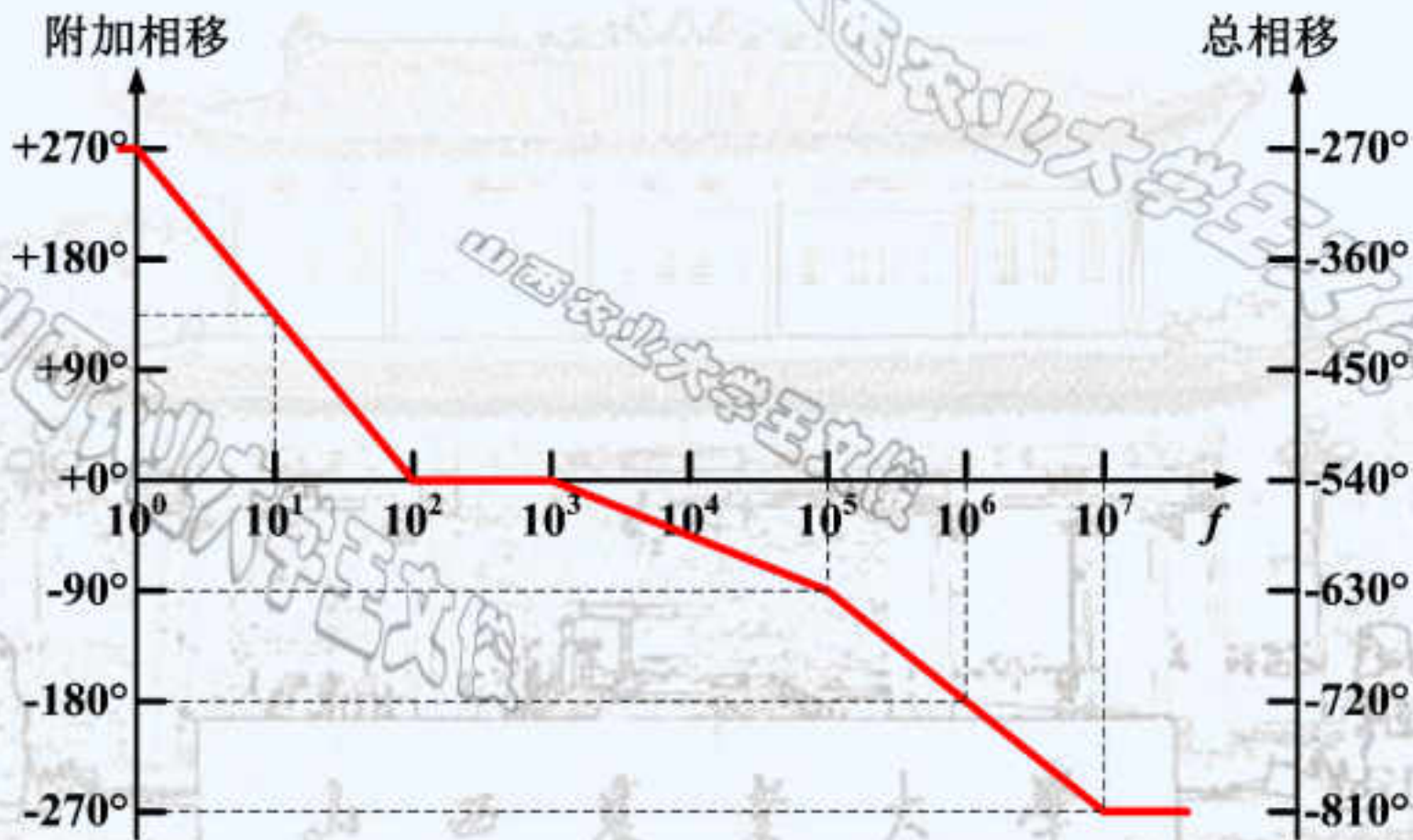
$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= -10^5 \cdot \left(\frac{j \frac{f}{10}}{1 + j \frac{f}{10}} \right)^3 \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{10^4}} \left(\frac{1}{1 + j \frac{f}{10^6}} \right)^2 \\ &= \frac{100 j f^3}{\left(1 + j \frac{f}{10} \right)^3 \left(1 + j \frac{f}{10^4} \right) \left(1 + j \frac{f}{10^6} \right)^2} \end{aligned}$$

⑥ 附加相移

- 中频段相移为 -540° ，附加相移为 0° 。
- 单级下限频率: $f_{L1} = f_{L2} = f_{L3} = 10\text{Hz}$
- 单级上限频率: $f_{H1} = 10^4\text{Hz}$, $f_{H2} = f_{H3} = 10^6\text{Hz}$

频率		1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
f_{L1}	10	+90	+45	0	0	0	0	0	0
f_{L2}	10	+90	+45	0	0	0	0	0	0
f_{L3}	10	+90	+45	0	0	0	0	0	0
f_{H1}	10^4	0	0	0	0	-45	-90	-90	-90
f_{H2}	10^6	0	0	0	0	0	0	-45	-90
f_{H3}	10^6	0	0	0	0	0	0	-45	-90
附加相移		+270	+135	0	0	-45	-90	-180	-270
总相移		-270	-405	-540	-540	-585	-630	-720	-810

频率	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
附加相移	+270	+135	0	0	-45	-90	-180	-270
总相移	-270	-405	-540	-540	-585	-630	-720	-810



十一、多级放大电路的下限频率分析

• 1、多级放大电路的频率响应分析思路

低频
等效
电路

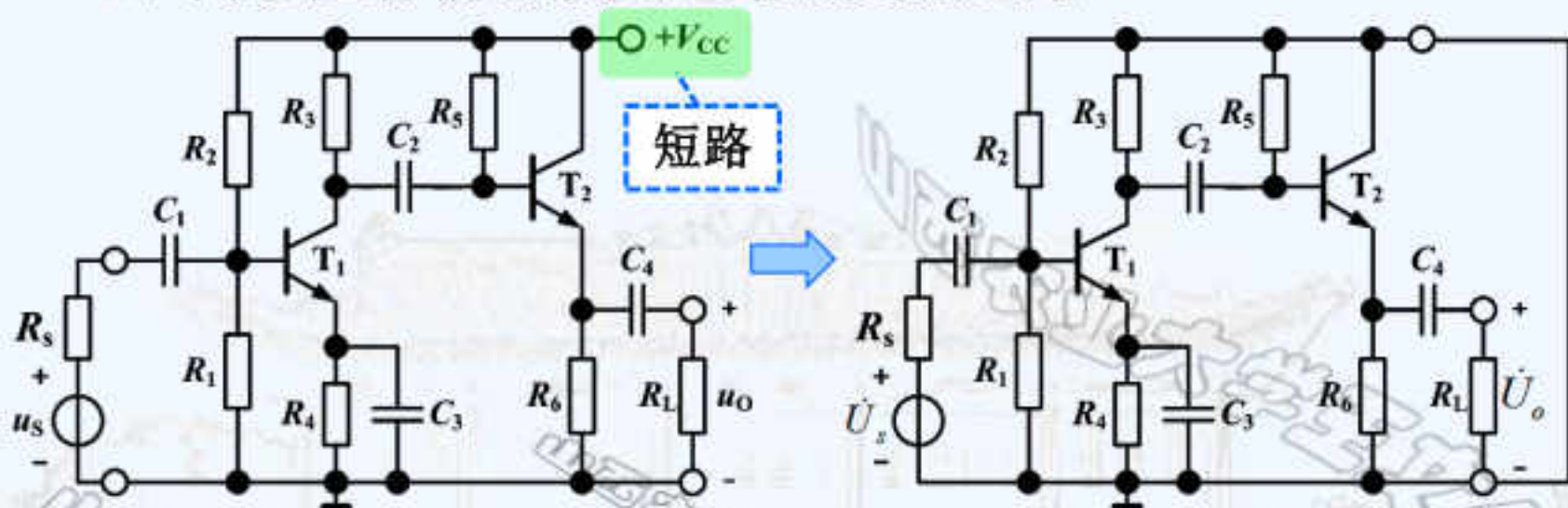
- 在低频段，考虑耦合电容或旁路电容的影响。
- 由于忽略极间电容的影响，因此可以采用晶体管/场效应管的低频等效模型构建低频等效电路。

逐个
计算
下限
频率

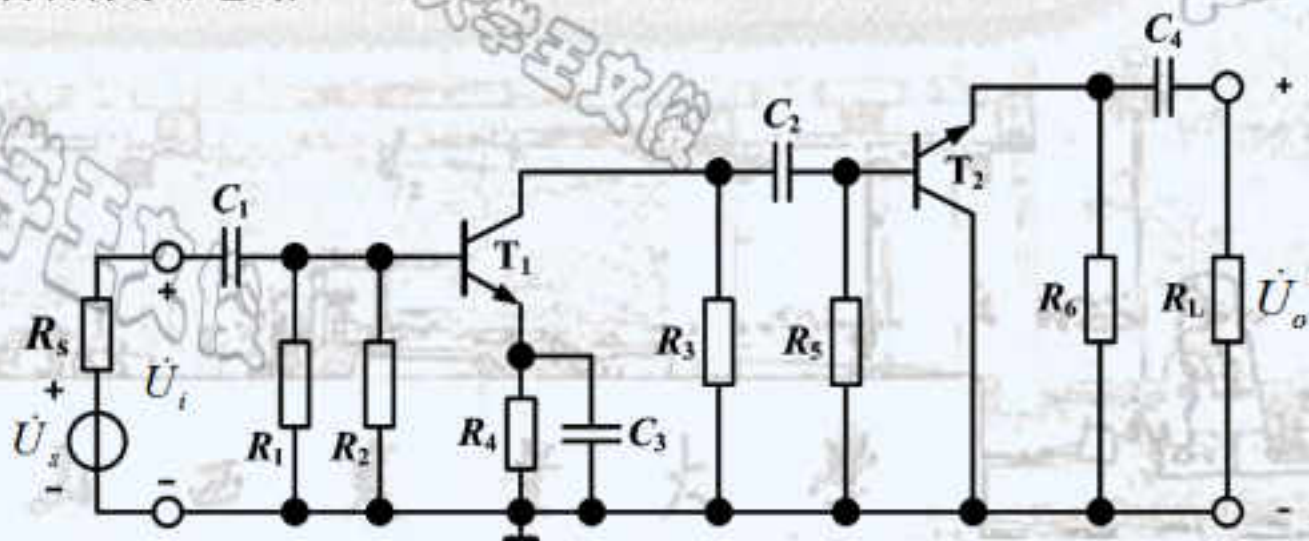
- 多级放大电路中，常常存在多个耦合电容或旁路电容。每一个耦合或旁路电容均各自对应一个下限频率。
- 在求解某一电容所对应的下限频率时，应将其余耦合电容或旁路电容做理想化处理，视为短路。

求解电路的下限截止频率，就是求解某电容所在回路的时间常数；而求解时间常数的关键是求解该电容所在回路的等效电阻。

2、两级阻容耦合放大电路的交流通路

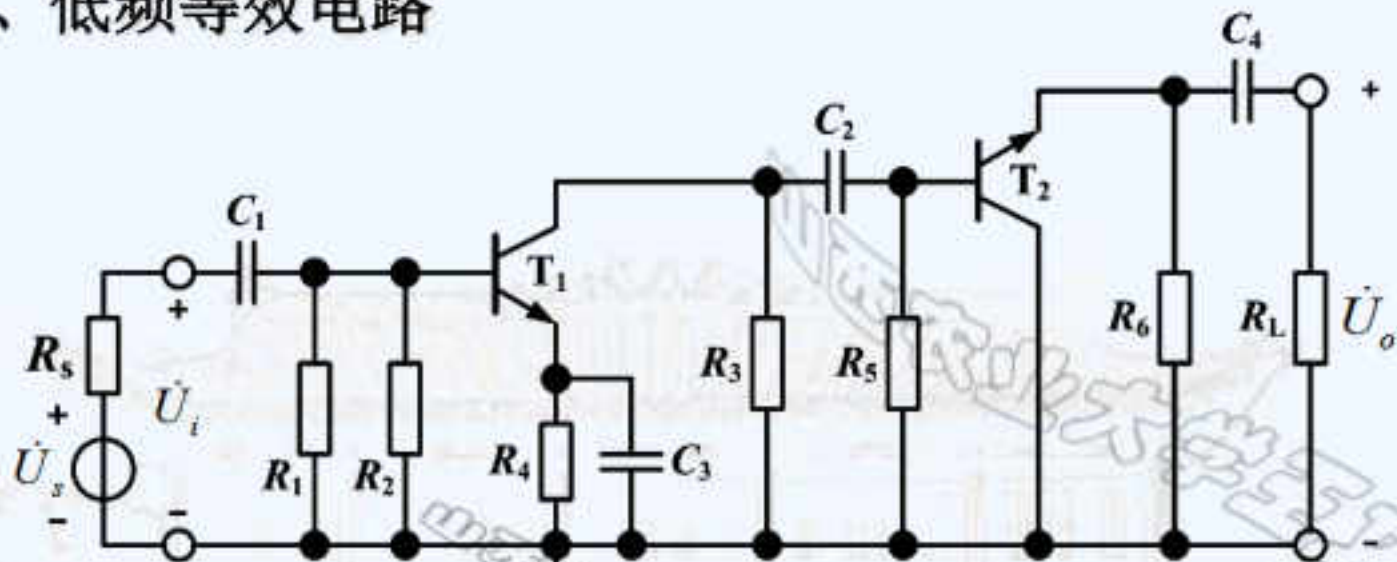


整理

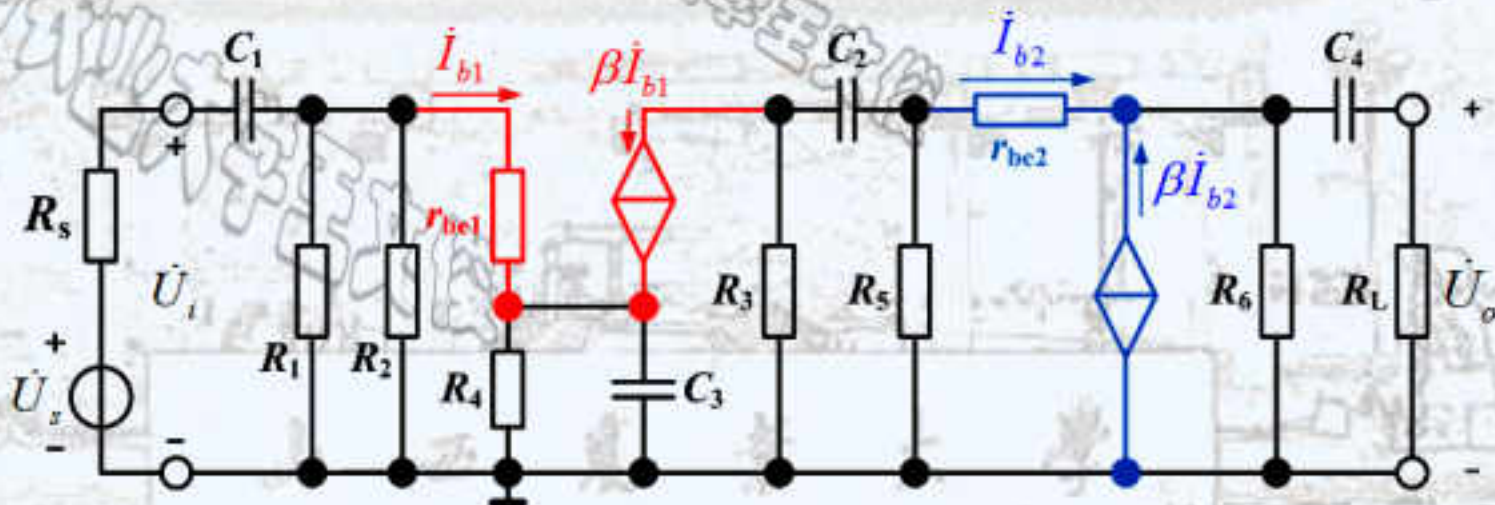


• 3、低频等效电路

交流通路



低频等效电路

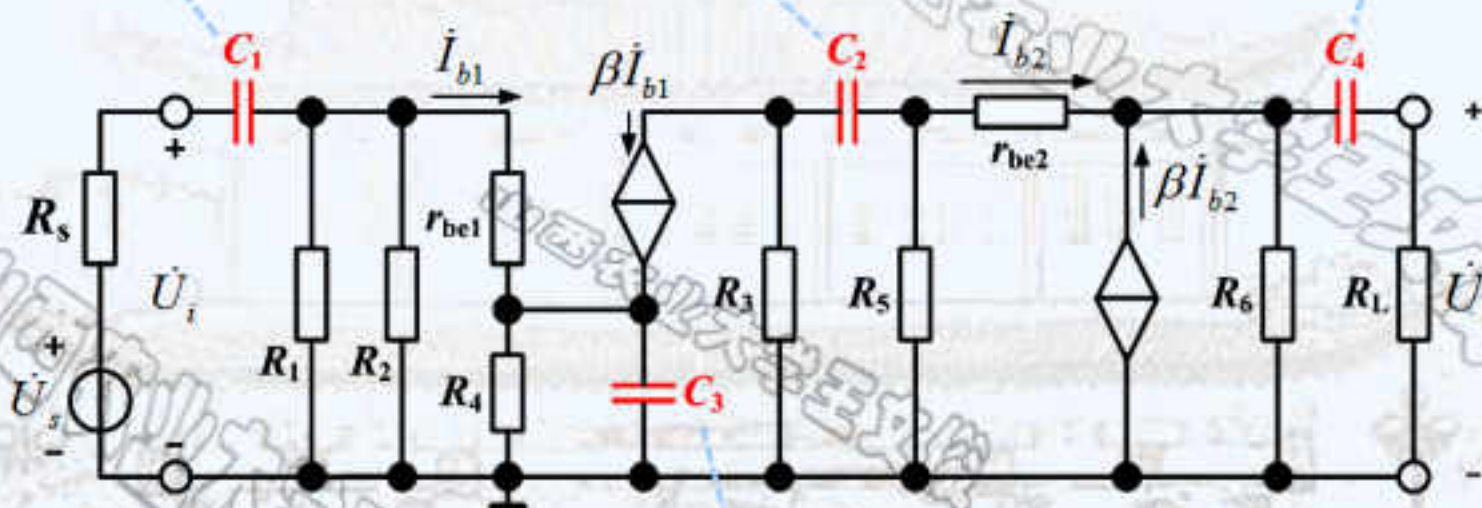


• 3、低频等效电路

耦合电容 1
下限频率 f_{L1}

耦合电容 2
下限频率 f_{L2}

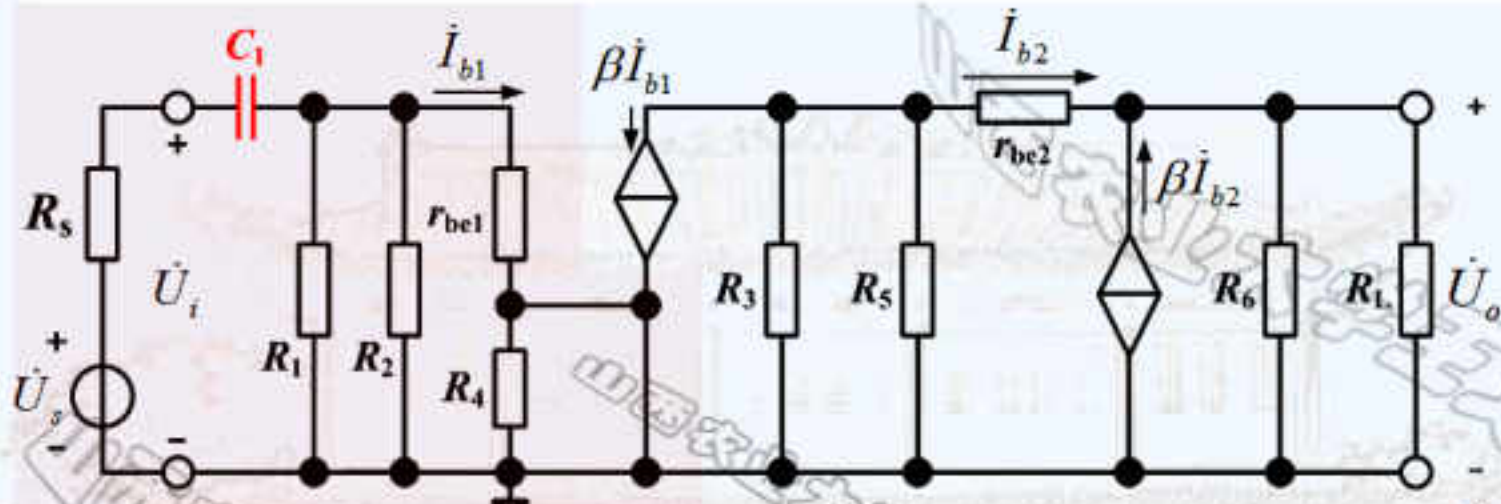
耦合电容 4
下限频率 f_{L4}



旁路电容 3
下限频率 f_{L3}

• 4、考虑 C_1 的影响

仅考虑 C_1 的影响，将 C_2 、 C_3 、 C_4 短路。



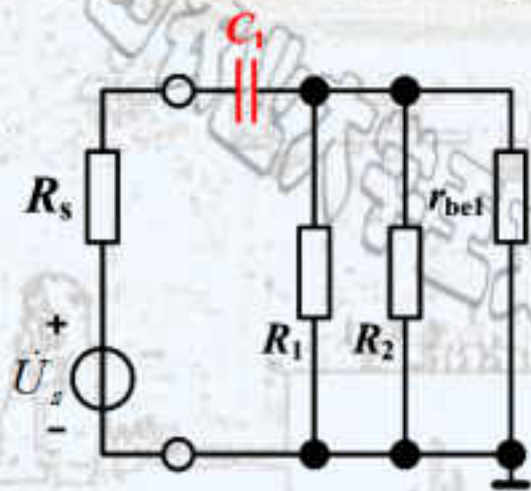
C_1 所在回路等效电阻: $R_{C1} = R_s + R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be1}$

C_1 所在回路时间常数:

$$\tau_{C1} = R_{C1} C_1 = (R_s + R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be1}) C_1$$

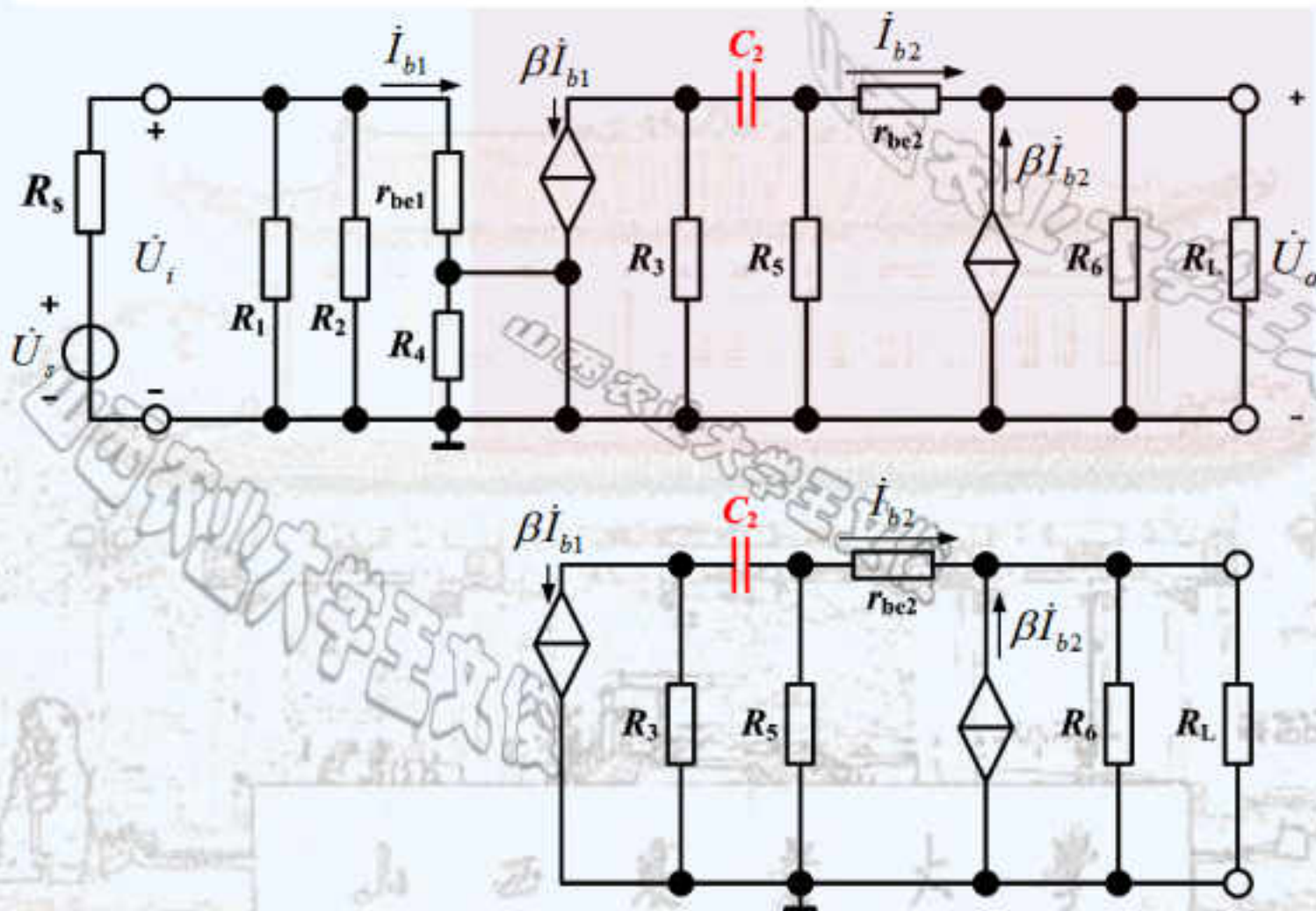
下限频率 f_{L1} :

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi\tau_{C1}} = \frac{1}{2\pi(R_s + R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be1}) C_1}$$

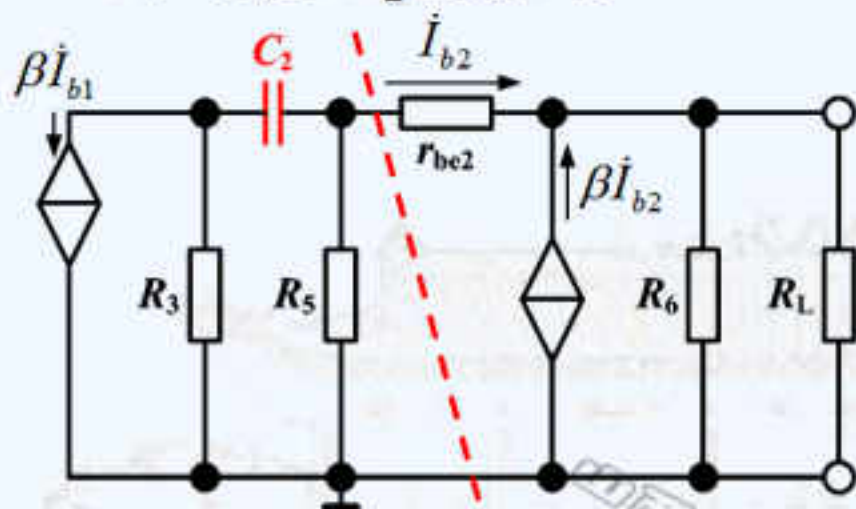


• 5、考虑 C_2 的影响

仅考虑 C_2 的影响，将 C_1 、 C_3 、 C_4 短路。



5、考虑 C_2 的影响



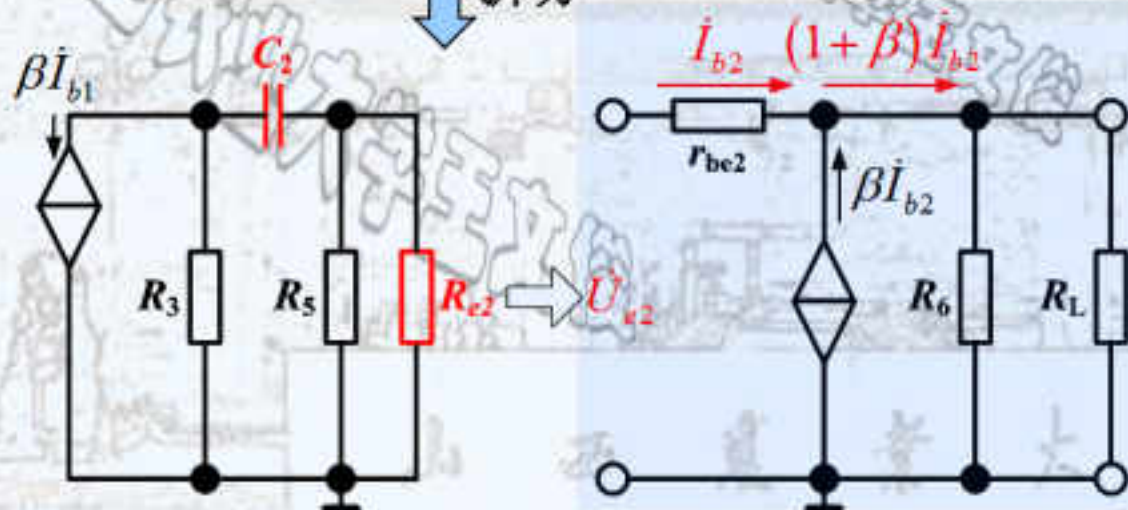
等效电阻 R_{e2} :

$$R_{e2} = \frac{U_{e2}}{I_{e2}}$$

$$= \frac{I_{b2}r_{be2} + (1+\beta)I_{b2}(R_6 \parallel R_L)}{I_{b2}}$$

$$= r_{be2} + (1+\beta)(R_6 \parallel R_L)$$

拆分



• 5、考虑 C_2 的影响



C_2 所在回路等效电阻:

$$R_{C2} = R_3 + R_5 \parallel R_{e2} = R_3 + R_5 \parallel [r_{be2} + (1 + \beta)(R_6 \parallel R_L)]$$

C_2 所在回路时间常数:

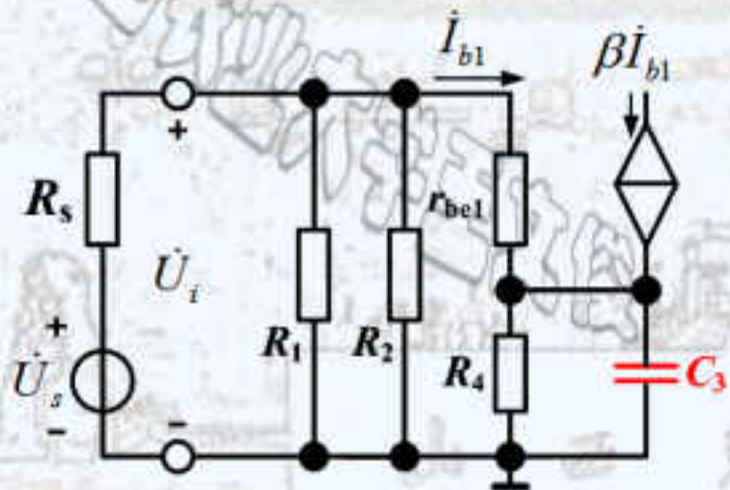
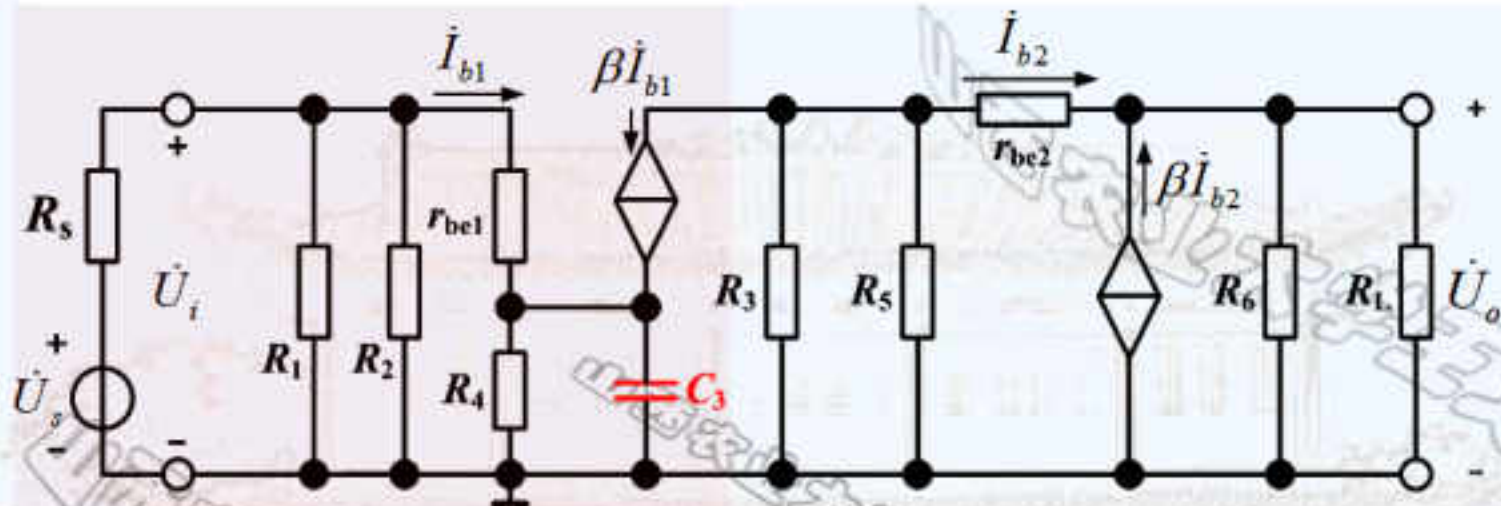
$$\tau_{C2} = R_{C2} C_2 = \{ R_3 + R_5 \parallel [r_{be2} + (1 + \beta)(R_6 \parallel R_L)] \} C_2$$

下限频率 f_{L2} :

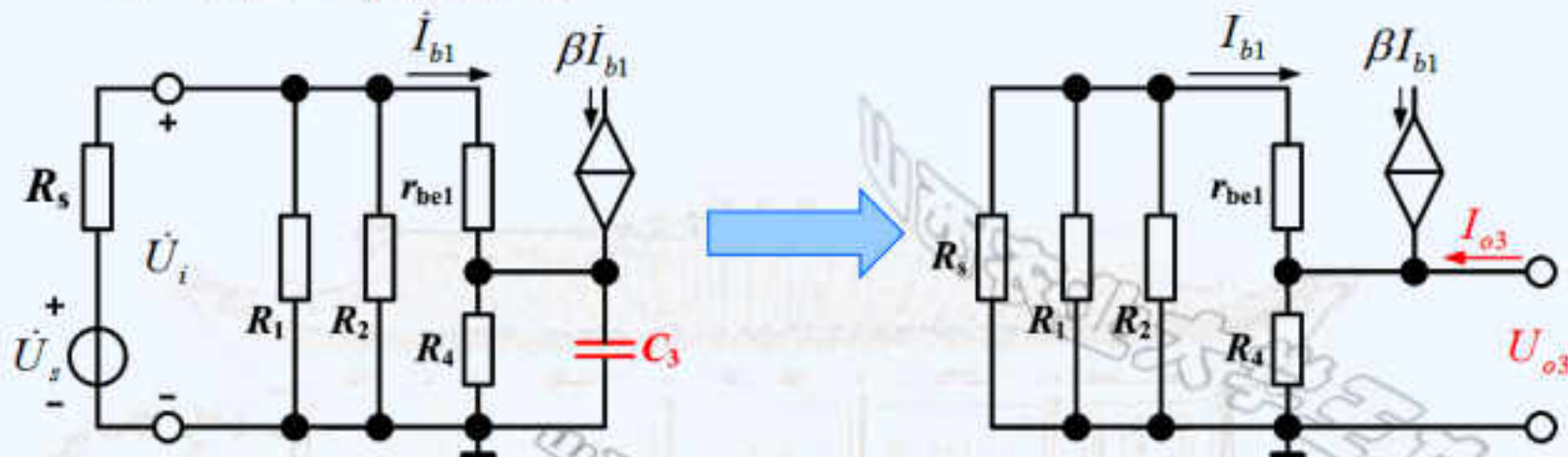
$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi\tau_{C2}} = \frac{1}{2\pi \{ R_3 + R_5 \parallel [r_{be2} + (1 + \beta)(R_6 \parallel R_L)] \} C_2}$$

• 6、考虑 C_3 的影响

仅考虑 C_3 的影响，将 C_1 、 C_2 、 C_4 短路。



• 6、考虑 C_3 的影响



电阻 $R_1 \parallel R_2 \parallel R_s + r_{be1}$ 所在回路方程:

$$U_{o3} = -(r_{be1} + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s) I_{b1}$$

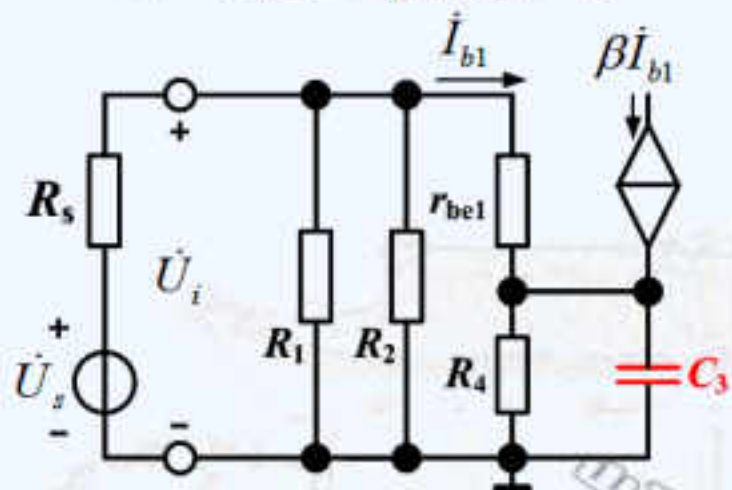
电阻 R_4 所在回路方程:

$$U_{o3} = [(1 + \beta) I_{b1} + I_{o3}] R_4$$

联立方程, 消去 I_{b1} , 得:

$$R_{C3} = \frac{U_{o3}}{I_{o3}} = R_4 \parallel \frac{r_{be1} + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s}{1 + \beta}$$

• 6、考虑 C_3 的影响



C_3 所在回路等效电阻:

$$R_{C3} = R_4 \parallel \frac{r_{be1} + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s}{1 + \beta}$$

C_3 所在回路时间常数:

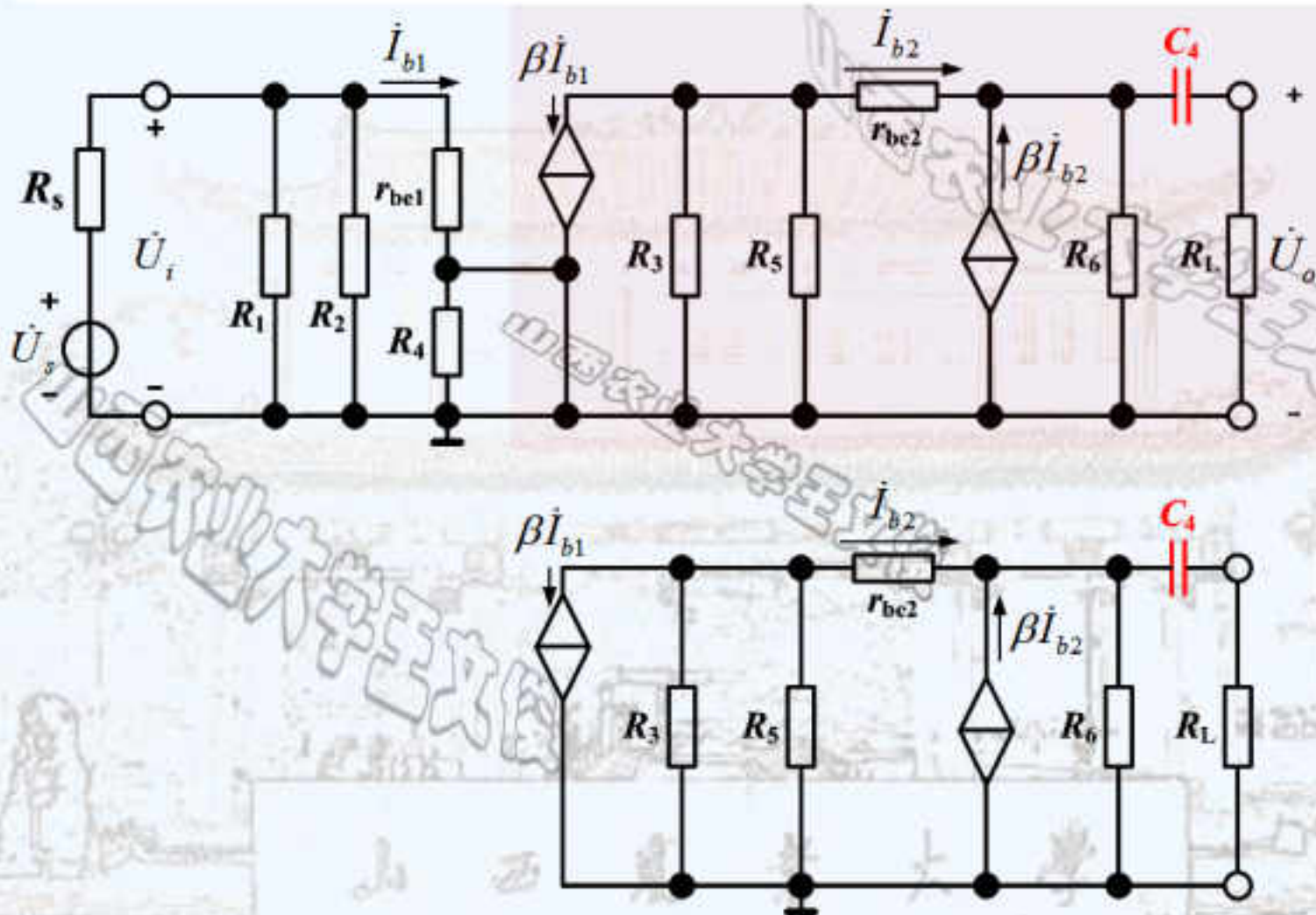
$$\tau_{C3} = R_{C3} C_3 = \left(R_4 \parallel \frac{r_{be1} + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s}{1 + \beta} \right) C_3$$

下限频率 f_{L3} :

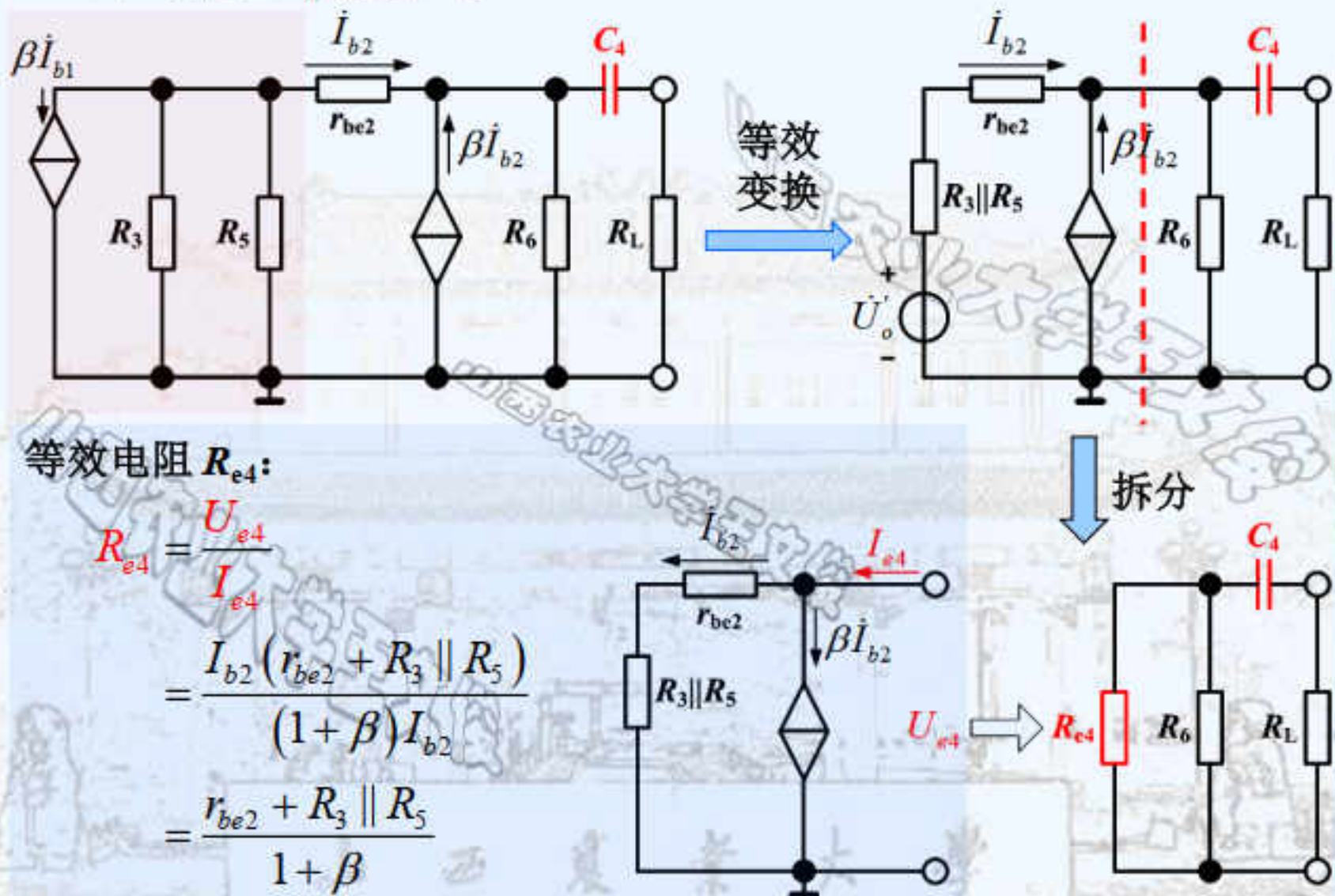
$$f_{L3} = \frac{1}{2\pi\tau_{C3}} = \frac{1}{2\pi \left(R_4 \parallel \frac{r_{be1} + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s}{1 + \beta} \right) C_3}$$

• 7、考虑 C_4 的影响

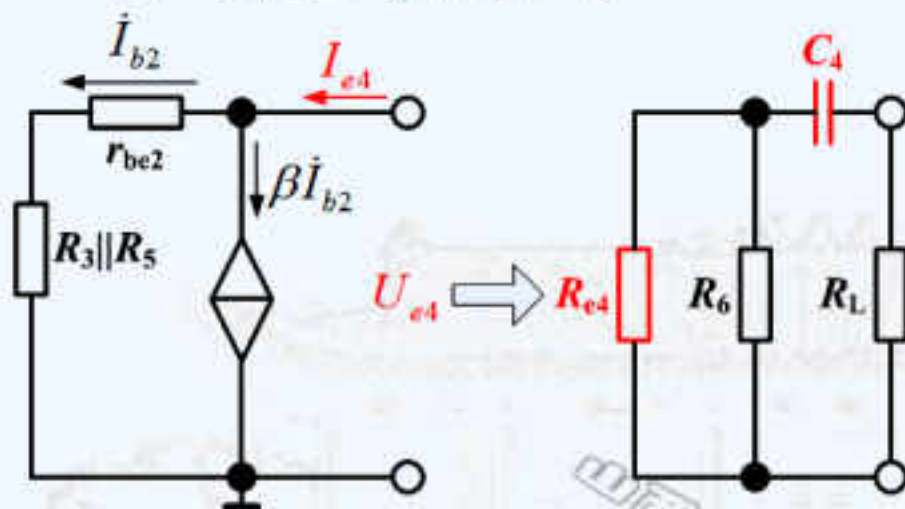
仅考虑 C_4 的影响，将 C_1 、 C_2 、 C_3 短路。



7、考虑 C_4 的影响



• 7、考虑 C_4 的影响



C_4 所在回路等效电阻:

$$R_{C4} = R_{e4} \parallel R_6 + R_L$$

$$= \frac{r_{be2} + R_3 \parallel R_5}{1 + \beta} \parallel R_6 + R_L$$

C_4 所在回路时间常数:

$$\tau_{C4} = R_{C4} C_4 = \left(\frac{r_{be2} + R_3 \parallel R_5}{1 + \beta} \parallel R_6 + R_L \right) C_4$$

下限频率 f_{L4} :

$$f_{L4} = \frac{1}{2\pi\tau_{C4}} = \frac{1}{2\pi \left(\frac{r_{be2} + R_3 \parallel R_5}{1 + \beta} \parallel R_6 + R_L \right) C_4}$$

• 8、下限频率总结

下限频率 f_{L1}	$f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_s + R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be1})C_1}$
下限频率 f_{L2}	$f_{L2} = \frac{1}{2\pi\{R_3 + R_5 \parallel [r_{be2} + (1 + \beta)(R_6 \parallel R_L)]\}C_2}$
下限频率 f_{L3}	$f_{L3} = \frac{1}{2\pi\left(R_4 \parallel \frac{r_{be1} + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s}{1 + \beta}\right)C_3}$
下限频率 f_{L4}	$f_{L4} = \frac{1}{2\pi\left(\frac{r_{be2} + R_3 \parallel R_5}{1 + \beta} \parallel R_6 + R_L\right)C_4}$

当四个下限频率相差不大时，可以用多级放大电路下限频率的计算公式进行计算。

$$f_L \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^N f_{Lk}^2}$$