

4.7 放大电路的频率响应

Frequency Response

放大器输入信号:

传感器(sensors)---- 温湿度: 0~1kHz

音频(audio) —— 话音: 300Hz ~ 3.4kHz

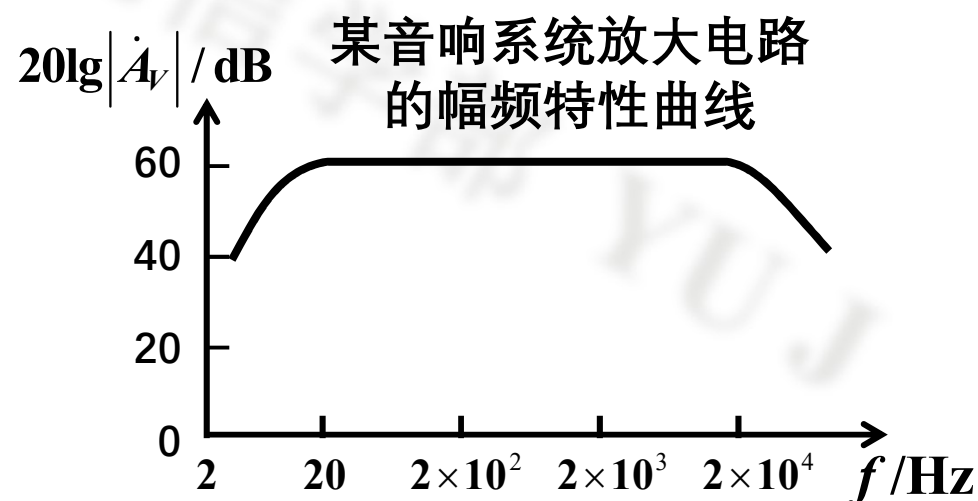
—— 音乐: 20Hz ~ 20kHz

模拟电视频道——视音频信号带宽: 8MHz

主要讨论内容:

- ◆ 频率响应的基本概念
- ◆ 共射放大电路低频特性
- ◆ 三极管的高频小信号模型
- ◆ 共射放大电路高频特性
- ◆ 多级放大器的频率特性

任何放大器都有带宽限制。



4.7.1 放大器频率响应的一般概念

1. 频率响应 Frequency response

放大器的增益与频率的函数关系。

包括幅频特性响应曲线和相频特性响应曲线。

$$\dot{A}_V(\omega) = \frac{\dot{V}_o(\omega)}{\dot{V}_i(\omega)} = \underbrace{\left| \dot{A}_V(\omega) \right|}_{\text{幅频}} \angle \underbrace{\varphi(\omega)}_{\text{相频}}$$

幅频特性：增益的幅值随频率的变化特性；

相频特性：增益的相位随频率的变化特性；

频率 f 单位：Hz ；

角频率 $\omega=2\pi f$ 单位：弧度rad

2. 波特图 Bode Plots

横轴：频率，**对数坐标**！

纵轴：幅度或相位

幅度用**分贝表示！(dB)**

相位单位：度 ($^{\circ}$)

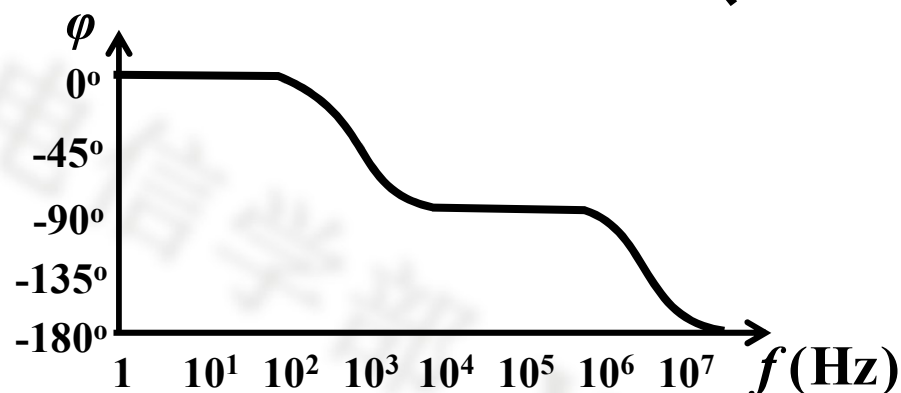
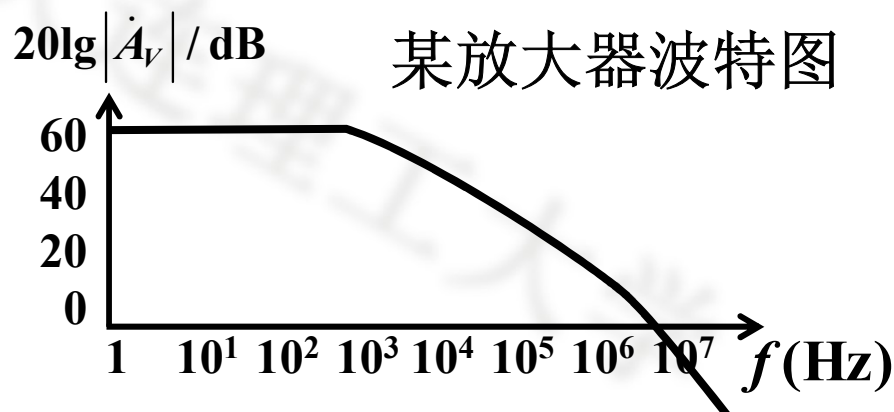
$$|\dot{A}_V| \xrightarrow{\text{分贝表示}} 20 \lg |\dot{A}_V|$$

波特图采用对数坐标优点：

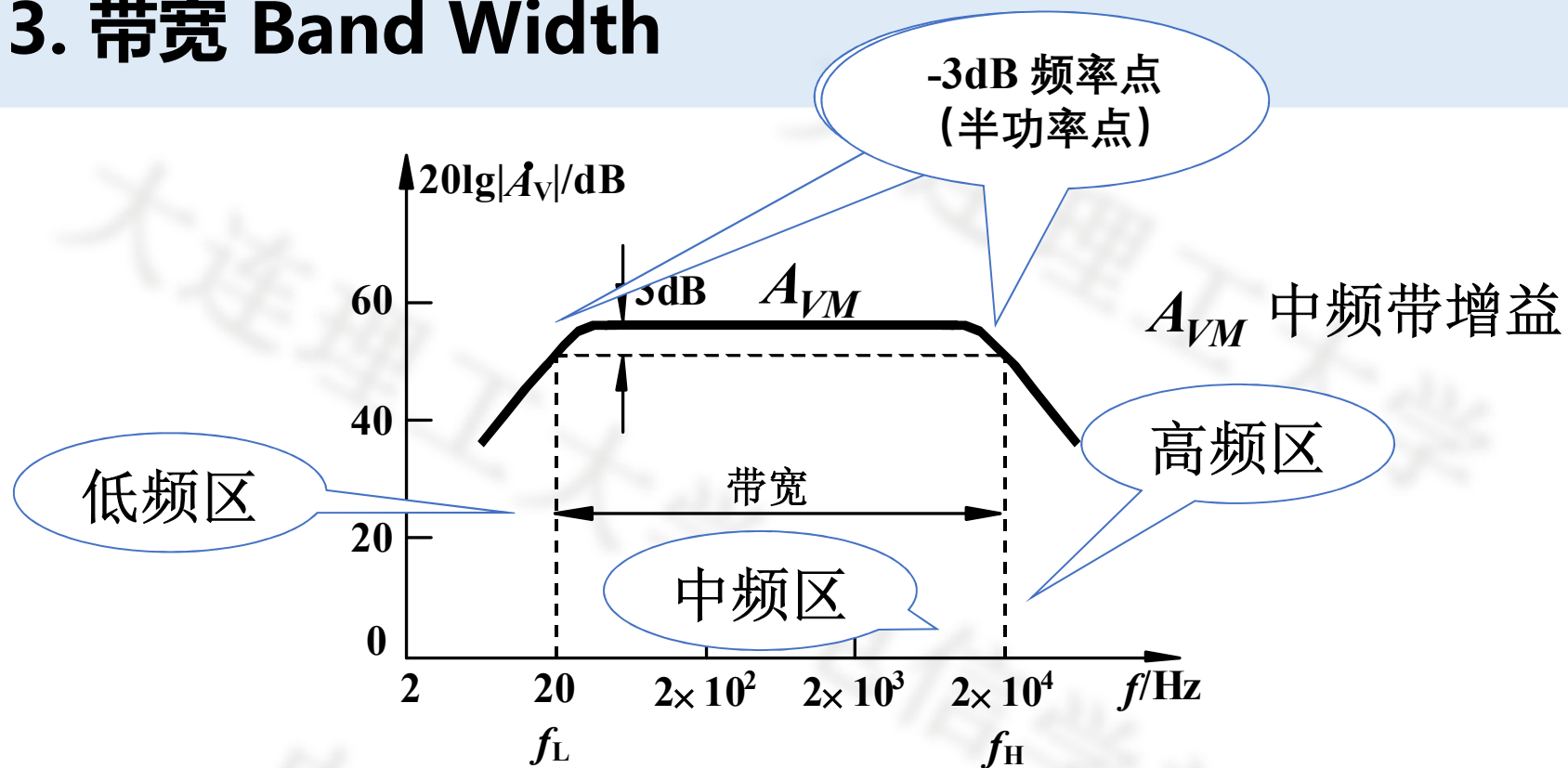
- 适于描述很宽的频率范围。
- 将多级放大电路增益的乘法运算转化为加法运算。

$$A_V: \quad 1 \quad 10 \quad 10^2 \quad 10^3 \quad 10^{-1} \quad 10^{-2} \quad 0.707 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$A_V(\text{dB}): \quad 0 \quad 20 \quad 40 \quad 60 \quad -20 \quad -40 \quad -3$$



3. 带宽 Band Width



f_L —— 下限频率

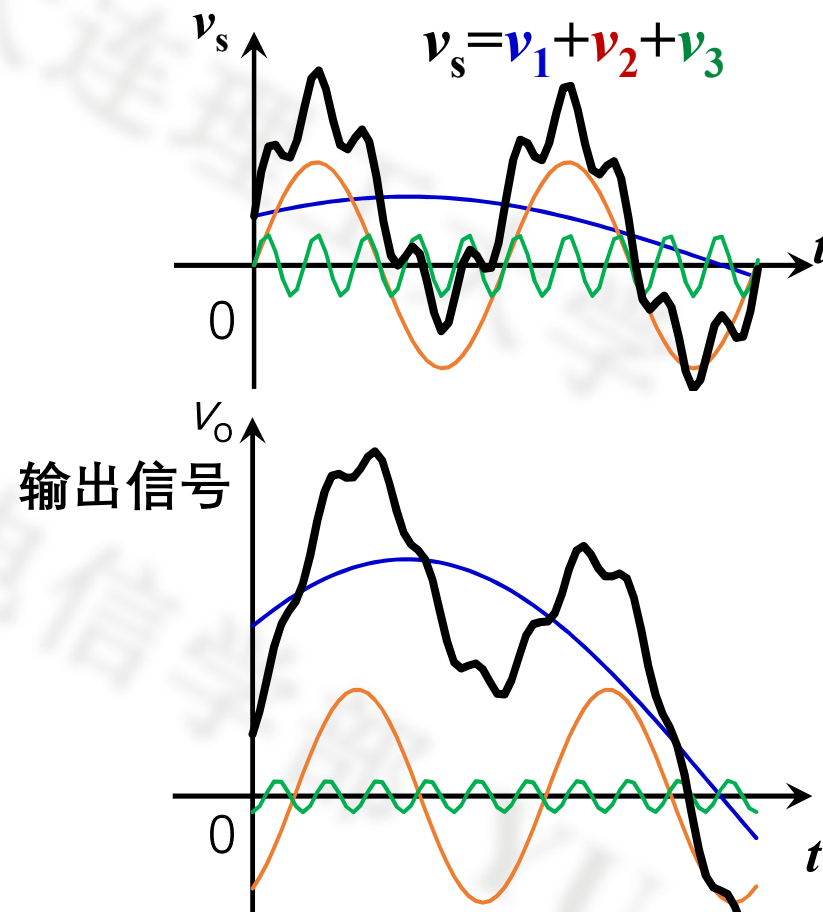
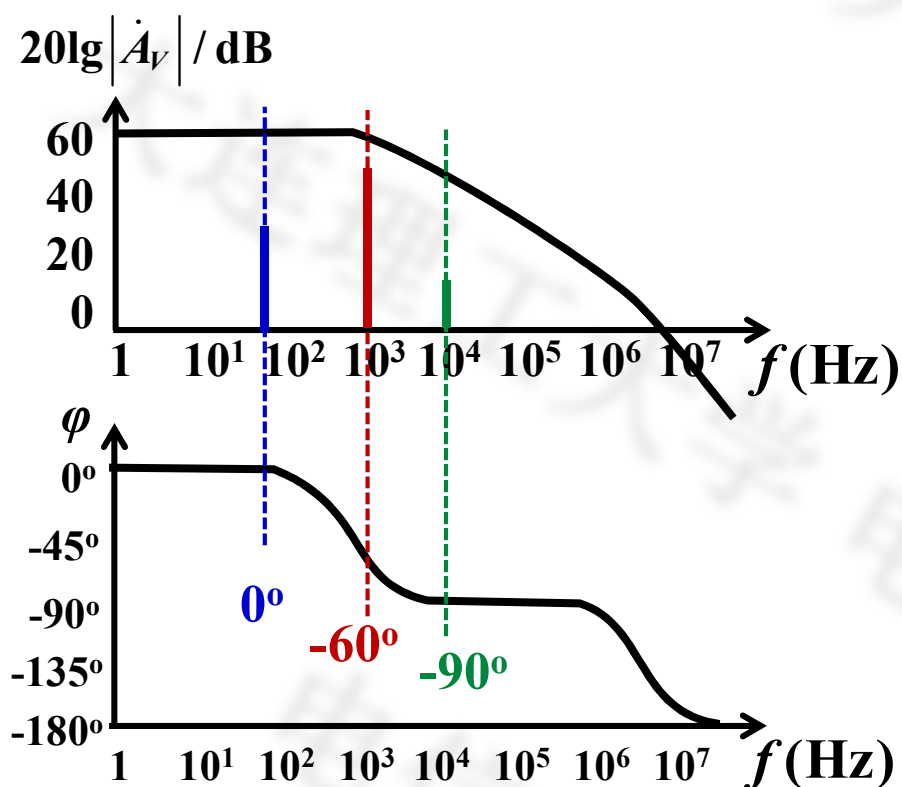
f_H —— 上限频率

$BW = f_H - f_L$ 称为带宽

当 $f_H \gg f_L$ 时, $BW \approx f_H$

4. 频率失真 (线性失真)

为了避免线性失真，输入信号
频谱范围应在放大器通频带内。

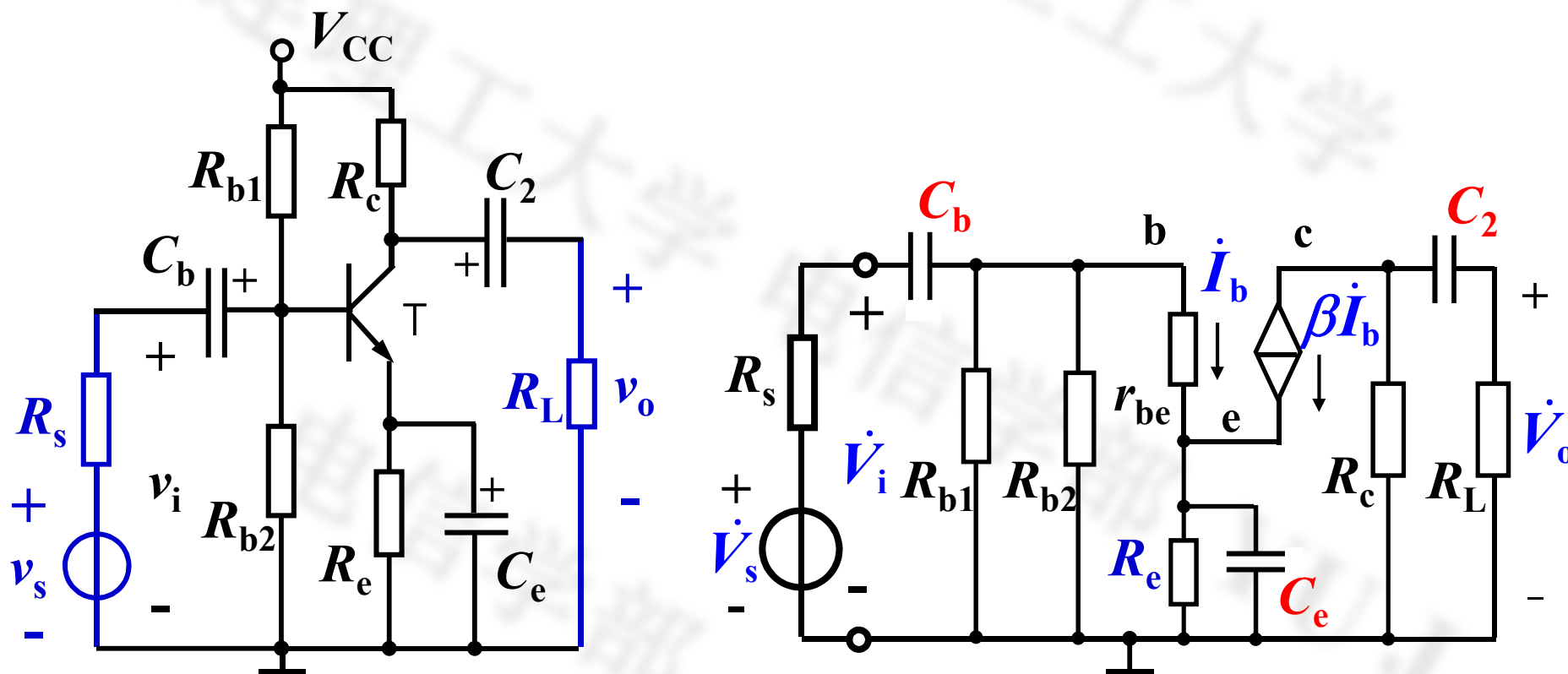


- 线性放大各频率分量;
- 但因为信号频谱超出放大器的通频带，对不同频率信号：
① 幅度放大倍数不同； ②相移角度不同；
- 对完整的输入信号的放大存在线性失真（频率失真）。

4.7.2 单级放大电路的低频响应

1. 低频等效电路

频率太低时，电容的阻抗($1/\omega C$)不再近似为零，
耦合电容及旁路电容不能按短路处理



低频等效电路与小信号等效电路的区别：保留电容。

4.7.2 单级放大电路的低频响应

1. 低频等效电路

低频等效电路的简化：

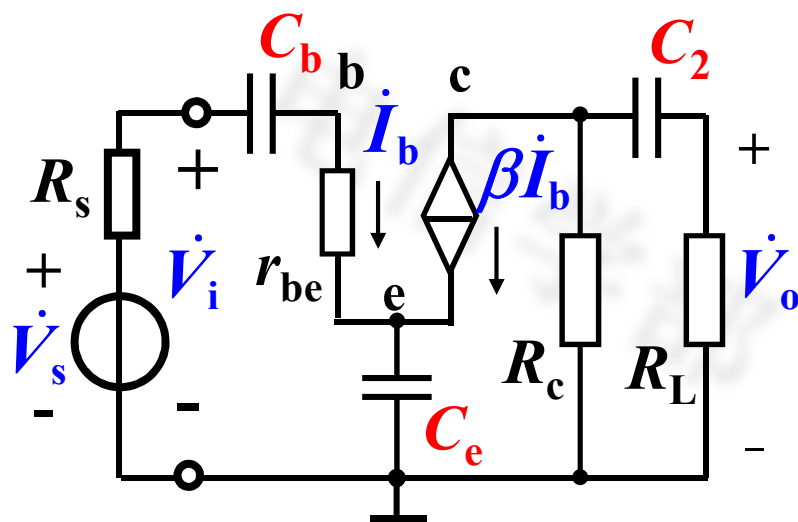
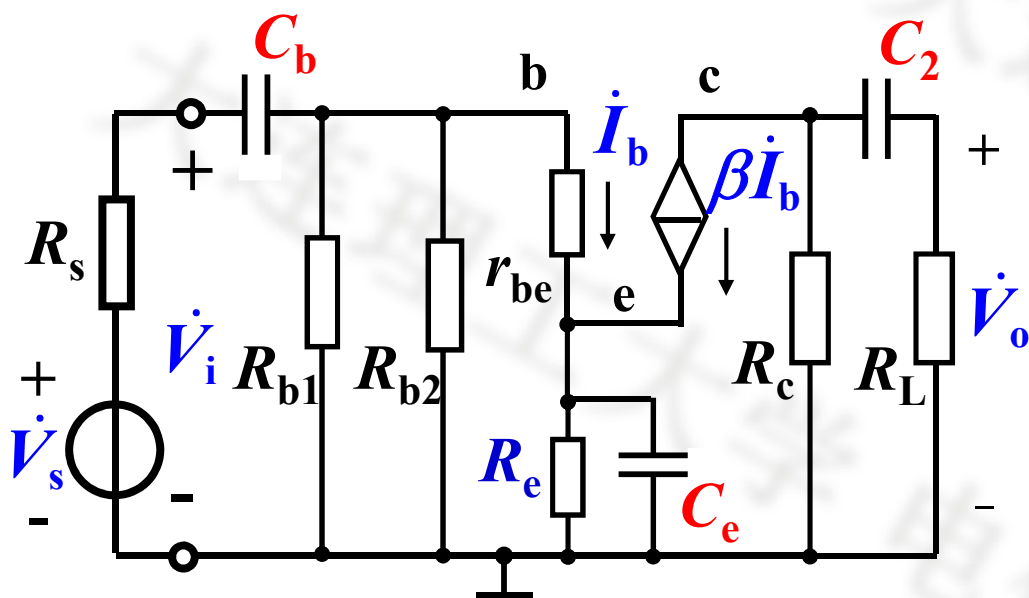
目的是计算下限频率，只关注从通频带过渡到低频带的频率区间，此时：

① $1/\omega C_e$ 从趋于0, 变化到不可忽略，但仍远小于 R_e 。
 R_e 可视为开路。

$$R_e // \frac{1}{\omega C_e} \approx \frac{1}{\omega C_e}$$

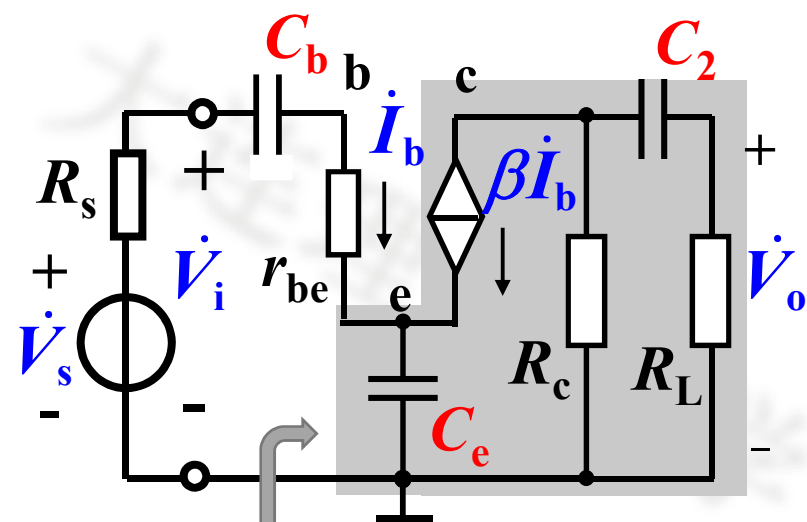
② $R_b = R_{b1} // R_{b2}$ (几十 $k\Omega$)
远大于后续电路等效输入阻抗 (约 $1 k\Omega$)。

R_b 可视为开路。

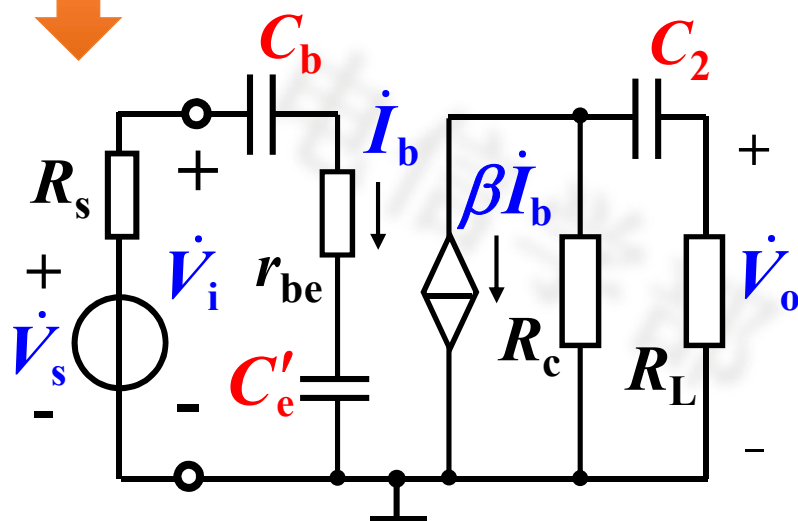


4.7.2 单级放大电路的低频响应

1. 低频等效电路



等效阻抗



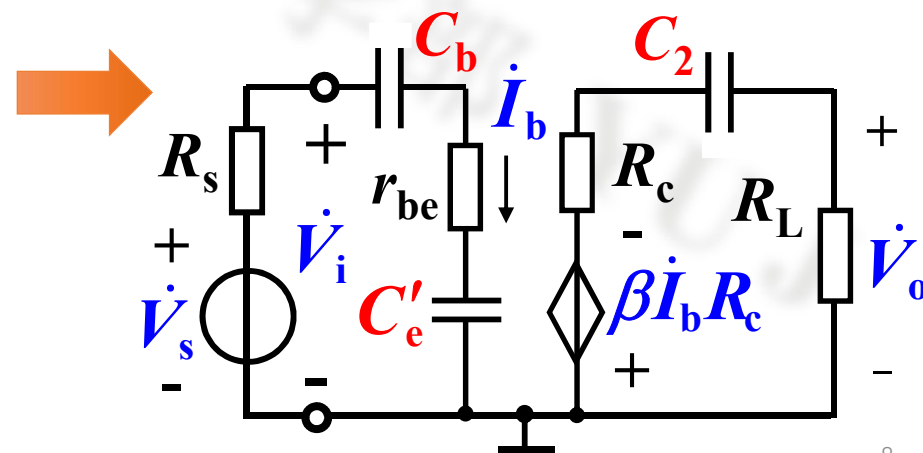
低频等效电路的简化:

从输入端看 $\frac{1}{\omega C'_e} = \frac{1+\beta}{\omega C_e}$
 C_e 等效阻抗

等效电容 $C'_e = C_e / (1 + \beta)$

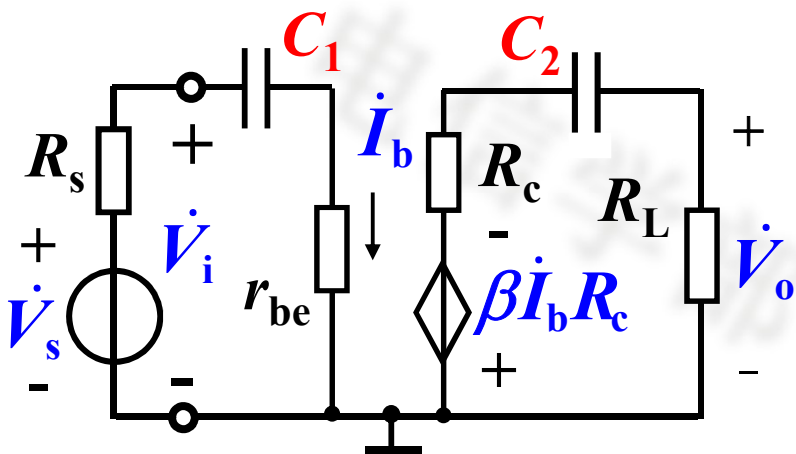
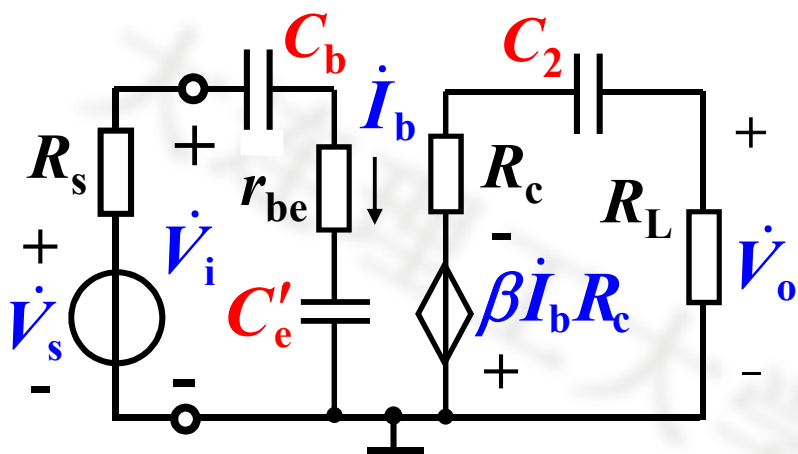
由于受控电流源的存在,
 C_e 对输出端的影响可忽略。

将输出等效为受控电压源
 (戴维南定理)。



4.7.2 单级放大电路的低频响应

1. 低频等效电路



低频等效电路的简化：

合并两个串联的电容：

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_b} + \frac{1}{C'_e} = \frac{C_e + (1 + \beta)C_b}{C_b C_e}$$

$$C_1 = \frac{C_b C_e}{(1 + \beta)C_b + C_e}$$

2. 计算低频源电压增益

$$\begin{aligned} \dot{A}_{VSL} &= \dot{V}_o / \dot{V}_s \\ &= \frac{-\beta \dot{I}_b R_c R_L}{R_c + R_L + \frac{1}{j\omega C_2}} \cdot \frac{1}{\dot{I}_b \left(r_{be} + R_s + \frac{1}{j\omega C_1} \right)} \end{aligned}$$

4.7.2 单级放大电路的低频响应

2. 计算源电压增益

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_{VSL} &= \frac{-\beta \dot{I}_b R_c R_L}{R_c + R_L + \frac{1}{j\omega C_2}} \cdot \frac{1}{\dot{I}_b \left(r_{be} + R_s + \frac{1}{j\omega C_1} \right)} \\
 &= \frac{-\beta R_c R_L}{(R_c + R_L) \left[1 + \frac{1}{j\omega C_2 (R_c + R_L)} \right]} \cdot \frac{1}{(r_{be} + R_s) \left[1 + \frac{1}{j\omega C_1 (r_{be} + R_s)} \right]} \\
 &= \frac{-\beta R_c // R_L}{r_{be} + R_s} \cdot \frac{1}{1 - \frac{j}{2\pi f C_1 (r_{be} + R_s)}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{j}{2\pi f C_2 (R_c + R_L)}} \\
 &= \dot{A}_{VSM} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{f_{L1}}{f}} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{f_{L2}}{f}}
 \end{aligned}$$

中频增益

低频转折频率

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi C_1 (R_s + r_{be})}$$

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

$$\dot{A}_{VSL} = \dot{A}_{VSM} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L1}/f)} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L2}/f)}$$

3. 波特图与下限频率

幅频 $20\lg|\dot{A}_{VSL}| = 20\lg|\dot{A}_{VSM}| - 20\lg\sqrt{1 + \left(\frac{f_{L1}}{f}\right)^2} - 20\lg\sqrt{1 + \left(\frac{f_{L2}}{f}\right)^2}$

相频 $\varphi = -180^\circ + \arctan(f_{L1}/f) + \arctan(f_{L2}/f)$

教材P172 例4.7.2

$$\dot{A}_{VSM} \approx -83.2$$

$$20\lg|\dot{A}_{VSM}| \approx 38.4 \text{ dB}$$

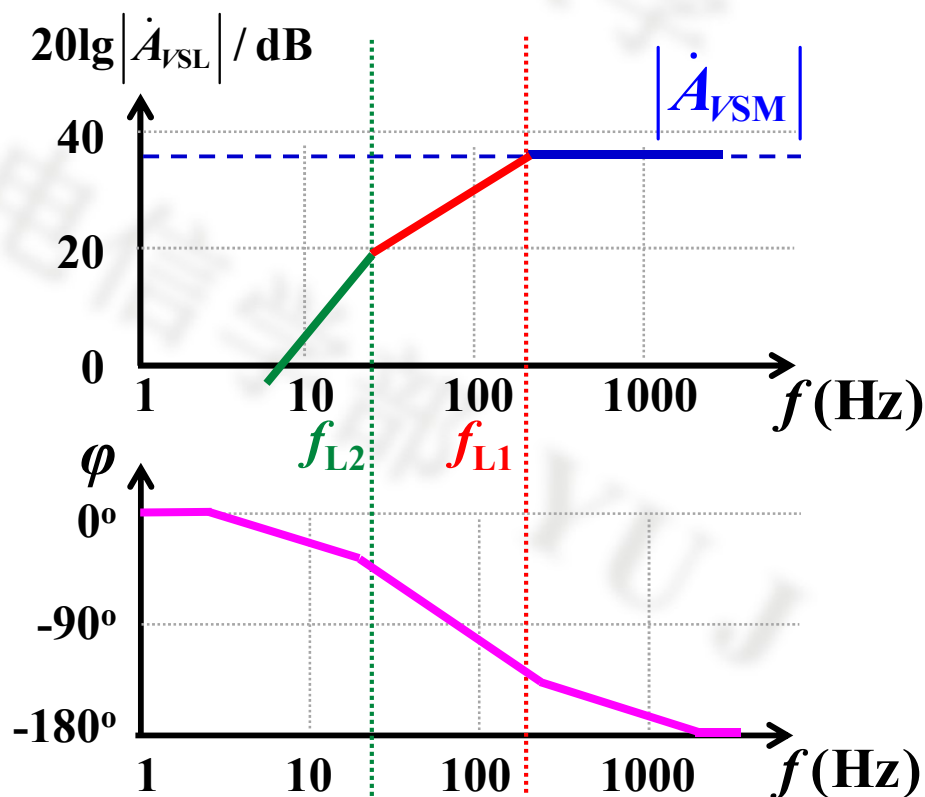
$$f_{L1} \approx 171.2 \text{ Hz} \quad f_{L2} \approx 23.8 \text{ Hz}$$

下限频率 $f_L = \max(f_{L1}, f_{L2})$ ♥

$20\lg|\dot{A}_{VSL}|_{f=f_{L1}}$ 小1个数量级的下限频率的影响都可忽略

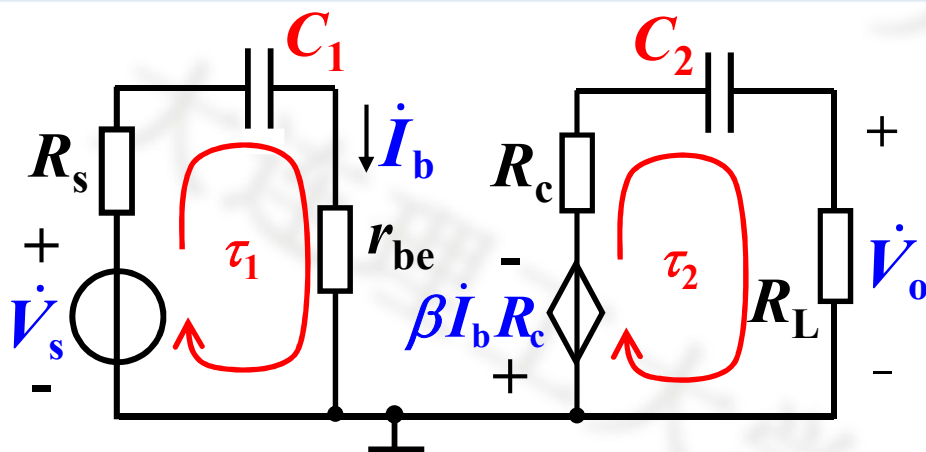
$$\approx 38.4\text{dB} - 3\text{dB} - 0.08\text{dB}$$

半功率点



4.7.2 单级放大电路的低频响应

4.时间常数法分析 f_L



下限频率求解规律：

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi C_1 (R_s + r_{be})}$$

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

(1) 时间常数 $\tau_n = R_n C_n$ ，其中 R_n 是 C_n 回路中的串联电阻之和；

(2) 下限频率 $f_{Ln} = \frac{1}{2\pi R_n C_n}$

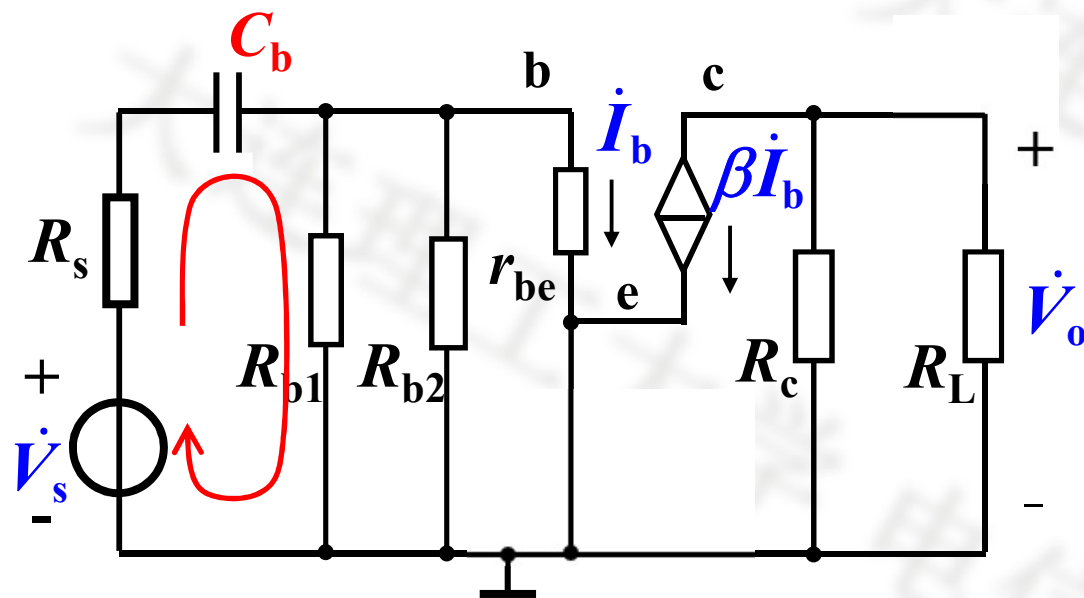
(3) 分别计算每个电容产生的频率点(其余电容视为短路)；

(4) 最关心下限截止频率 $f_L = \max(f_{L1}, \dots, f_{Ln})$

(5) 低频增益：
$$\dot{A}_{VSL} = \dot{A}_{VSM} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L1}/f)} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L2}/f)}$$

4.7.2 单级放大电路的低频响应

4.时间常数法分析 f_L



不进行简化，分别计算三个电容引入的下限频率。

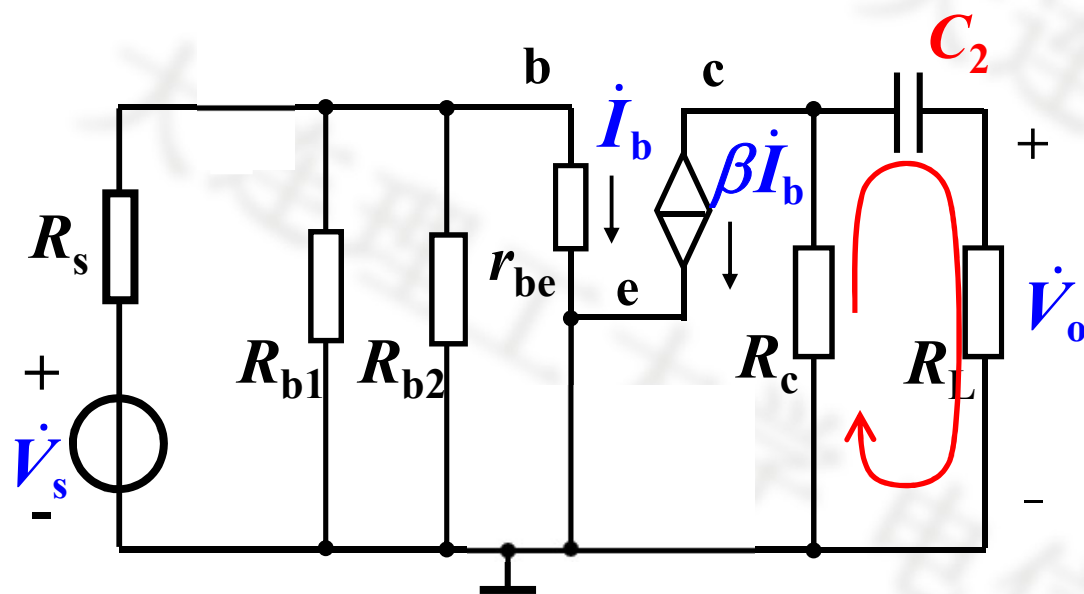
(1) 单独考虑输入耦合电容的影响

$$\begin{aligned} R_{C_b} &= R_s + R_i \\ &= R_s + R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \end{aligned}$$

$$f_{C_b} = \frac{1}{2\pi R_{C_b} C_b}$$

4.7.2 单级放大电路的低频响应

4.时间常数法分析 f_L



(2) 输出耦合电容

$$R_{C_2} = R_L + R_o = R_L + R_c$$

$$f_{C_2} = \frac{1}{2\pi R_{C_2} C_2}$$

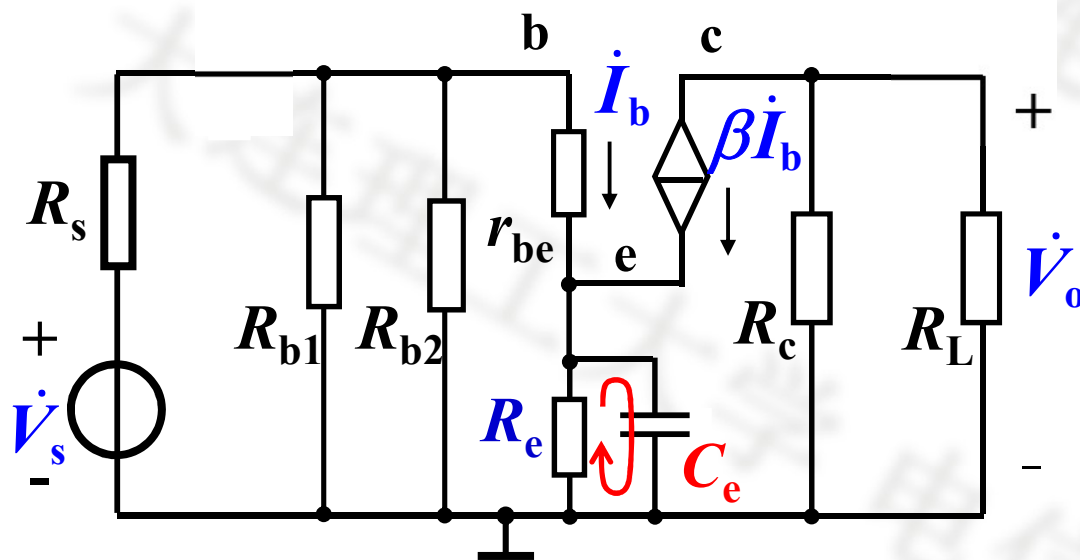
(1) 单独考虑输入耦合电容

$$\begin{aligned} R_{C_b} &= R_s + R_i \\ &= R_s + R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \end{aligned}$$

$$f_{C_b} = \frac{1}{2\pi R_{C_b} C_b}$$

4.7.2 单级放大电路的低频响应

4.时间常数法分析 f_L



(1) 单独考虑输入耦合电容

$$\begin{aligned} R_{C_b} &= R_s + R_i \\ &= R_s + R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \end{aligned}$$

$$f_{C_b} = \frac{1}{2\pi R_{C_b} C_b}$$

(2) 输出耦合电容

$$R_{C_2} = R_L + R_o = R_L + R_c$$

$$f_{C_2} = \frac{1}{2\pi R_{C_2} C_2}$$

(3) 射极旁路电容

$$R_{C_e} = R_e // \frac{r_{be} + R_{b1} // R_{b2} // R_s}{1 + \beta}$$

共集电路输出阻抗

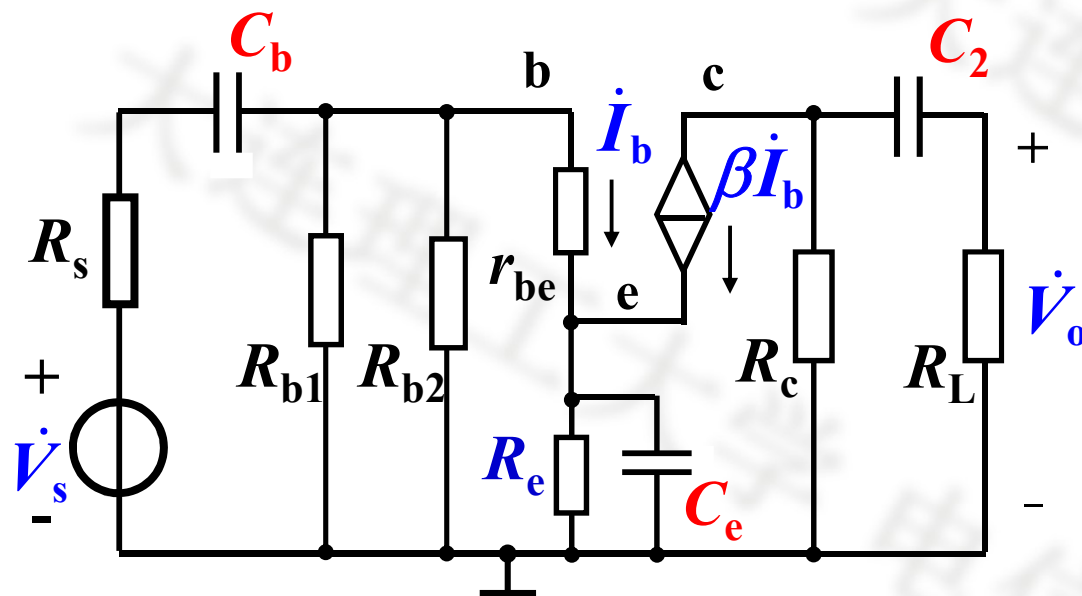
$$f_{C_e} = \frac{1}{2\pi R_{C_e} C_e}$$

(4) 下限截止频率

$$f_L \approx \max(f_{C_b}, f_{C_2}, f_{C_e})$$

4.7.2 单级放大电路的低频响应

4.时间常数法分析 f_L



$$f_L \approx \max(f_{C_b}, f_{C_2}, f_{C_e})$$

频率点之间差距大于4倍时误差较小。

工程上通常只考虑最大的两个频率。

特殊情况，当最大的两个下限频率 f_{L1} 、 f_{L2} 数值相当时，

$$\text{下限截止频率 } f_L \approx \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2}$$

$$\text{低频增益: } \dot{A}_{VSL} = \dot{A}_{VSM} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L1}/f)} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L2}/f)}$$

4.7.2 单级放大电路的低频响应

5. 耦合电容和旁路电容的选择

(1) 耦合电容 $C_1 = C_2 = (3 \sim 10) \frac{1}{2\pi f_L R}$

$$C_1 \rightarrow R_{C_1} = R_s + R_i$$

$$C_2 \rightarrow R_{C_2} = R_o + R_L$$

(几 μ F~几十 μ F)

(2) 旁路电容 $C_e = (1 \sim 3) \frac{1}{2\pi f_L R'_e}$

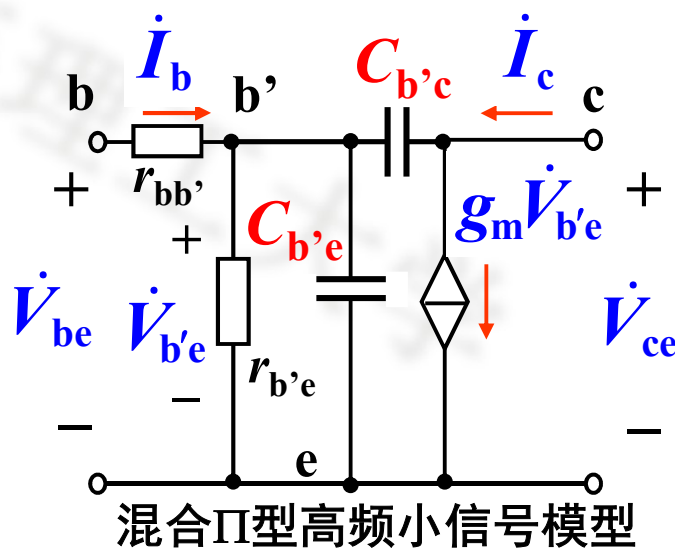
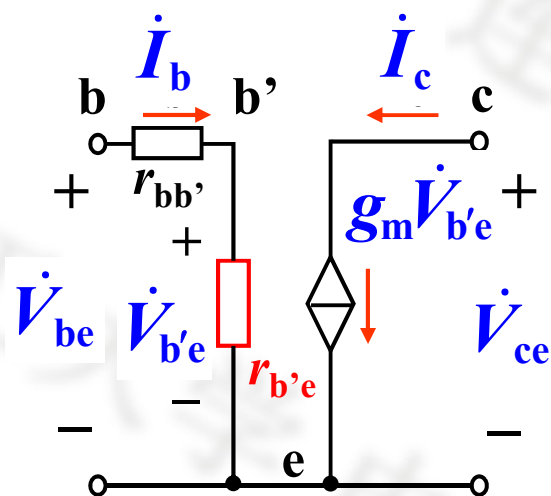
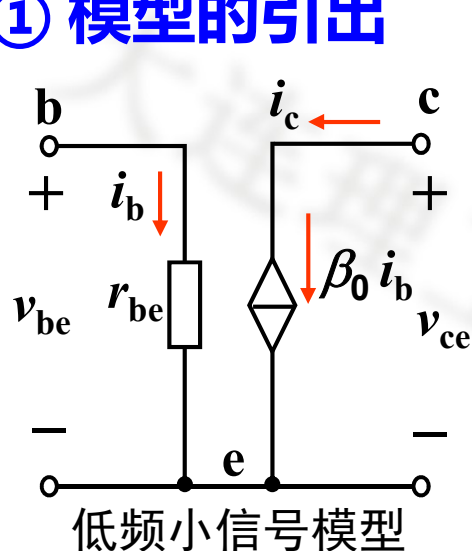
$$R'_e = R_e // \frac{(R_b // R_s + r_{be})}{1 + \beta}$$

(几十 μ F~几百 μ F)

4.7.3 单级放大电路的高频响应

1. BJT的高频小信号建模

① 模型的引出



基区体电阻 $r_{bb'}$ 低频值

$$r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta_0) V_T / I_{EQ}$$

$r_{bb'}$ 基区体电阻 $r_{b'e}$ 发射结等效电阻

$$= r_{bb'} + r_{b'e}$$

$$\beta_0 i_b = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} \dot{V}_{b'e} = g_m \dot{V}_{b'e}$$

互导 $g_m = \beta / r_{b'e} \approx I_{EQ} / V_T$

两个电容：发射结电容 $C_{b'e} = \frac{g_m}{2\pi f_T}$ 特征频率 f_T 从手册中查出

集电结电容 $C_{b'c}$ 从手册中查出(2~10pF)

4.7.3 单级放大电路的高频响应

1. BJT的高频小信号建模

② BJT的频率参数(f_β, f_T, f_a)

根据H参数定义: $\beta = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} \bigg|_{\dot{V}_{ce}=0}$

根据高频混合 Π 模型

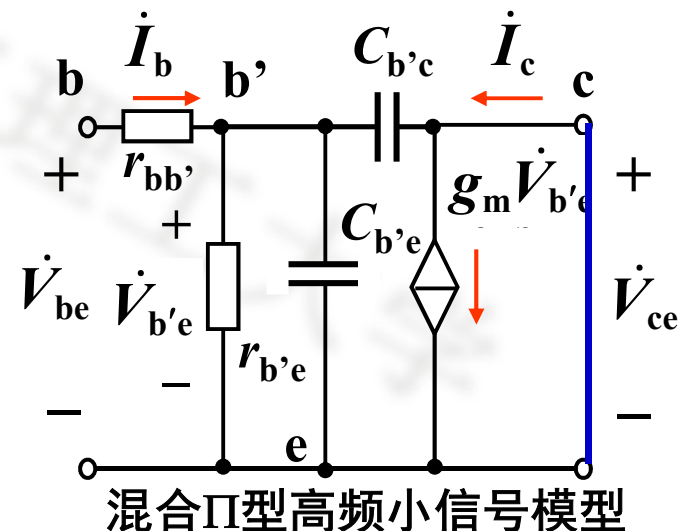
$$\dot{I}_c = g_m \dot{V}_{b'e} - \dot{V}_{b'c} \cdot j\omega C_{b'c} = (g_m - j\omega C_{b'c}) \dot{V}_{b'e}$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{V}_{b'e}}{r_{b'e}} + j\omega C_{b'e} \dot{V}_{b'e} + j\omega C_{b'c} \dot{V}_{b'e} = \left(\frac{1}{r_{b'e}} + j\omega C_{b'e} + j\omega C_{b'c} \right) \dot{V}_{b'e}$$

$$\text{所以 } \beta = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} = \frac{g_m - j\omega C_{b'c}}{1/r_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})}$$

$$\text{低频时 } \beta_0 = g_m r_{b'e}$$

$$\text{高频且 } g_m \gg \omega C_{b'c} \text{ 时 } \beta \approx \frac{\beta_0}{1 + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})r_{b'e}}$$



4.7.3 单级放大电路的高频响应

1. BJT的高频小信号建模

② BJT的频率参数(f_β , f_T , f_a)

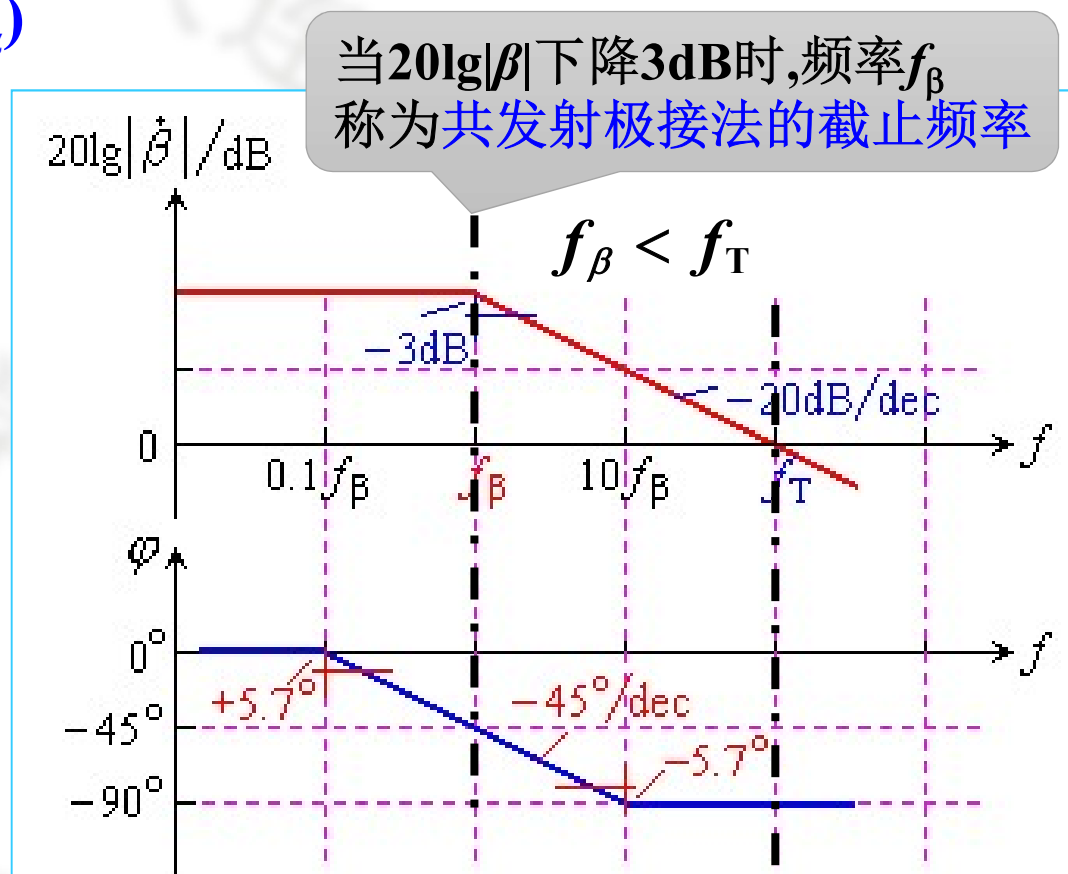
$$\begin{aligned}\dot{\beta} &\approx \frac{\beta_0}{1 + j \cdot 2\pi f (C_{b'e} + C_{b'c}) r_{b'e}} \\ &= \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}\end{aligned}$$

上限频率 $f_\beta \approx \frac{1}{2\pi(C_{b'e} + C_{b'c})r_{b'e}}$

f_β 共发射极截止频率

f_T BJT的特征频率

$$f_T = \beta_0 f_\beta = \frac{g_m}{2\pi(C_{b'e} + C_{b'c})} \approx \frac{g_m}{2\pi C_{b'e}}$$



当 $|\dot{\beta}|=1$ 时对应的频率称为特征频率 f_T , 且有 $f_T \approx \beta_0 f_\beta$

4.7.3 单级放大电路的高频响应

1. BJT的高频小信号建模

② BJT的频率参数(f_β , f_T , f_α)

共发射极截止频率 $f_\beta \approx \frac{1}{2\pi(C_{b'e} + C_{b'c})r_{b'e}}$ (10M~100MHz数量级)

BJT的特征频率 $f_T = \beta_0 f_\beta$ (数百兆到1GHz数量级)

共基极截止频率 $f_\alpha = (1 + \beta_0) f_\beta$ (数百兆到1GHz数量级)

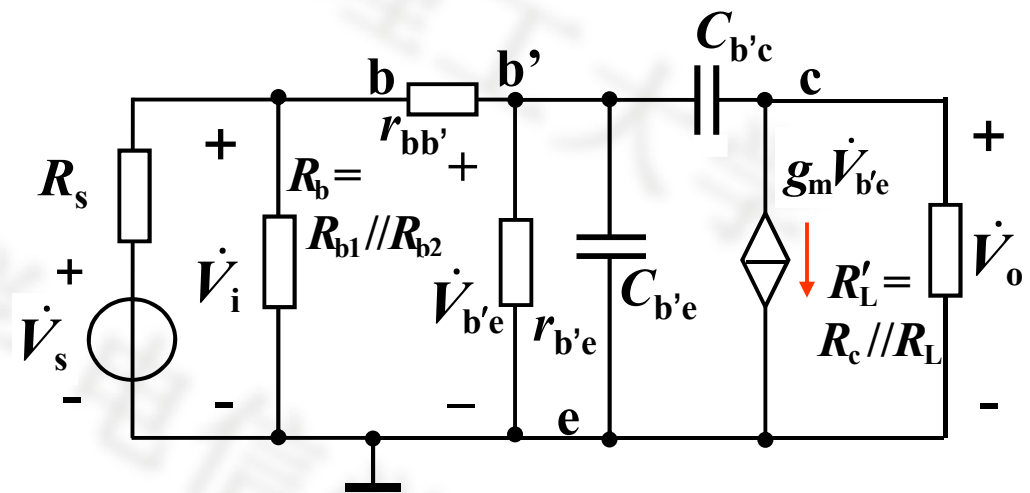
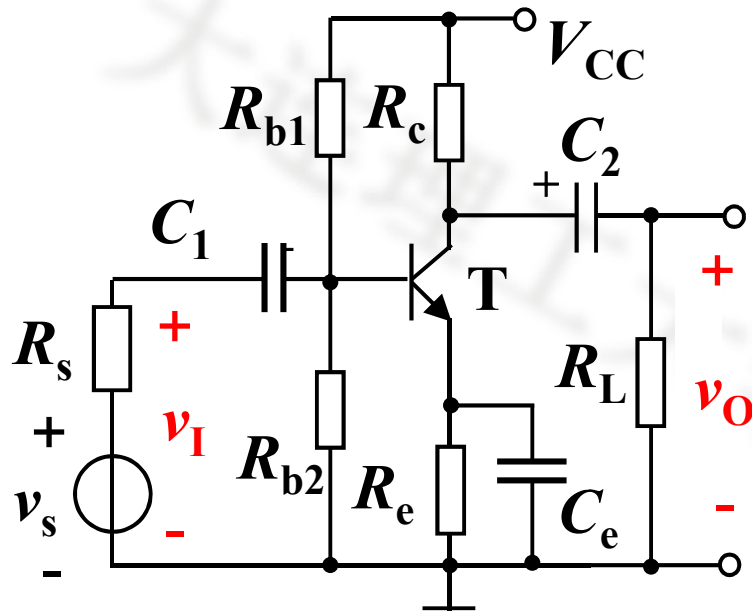
$$f_\beta \ll f_T < f_\alpha$$

共基极
电流增益

$$\dot{\alpha} = \frac{\dot{\beta}}{1 + \dot{\beta}} = \frac{\frac{\beta_0}{1 + j f / f_\beta}}{1 + \frac{\beta_0}{1 + j f / f_\beta}} = \frac{\frac{\beta_0}{1 + \beta_0}}{1 + j \frac{f}{(1 + \beta_0) f_\beta}} = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}$$

4.7.3 单级放大电路的高频响应 2.共射极放大电路的高频响应

① 高频小信号等效电路



4.7.3 单级放大电路的高频响应 2.共射极放大电路的高频响应

① 高频小信号等效电路

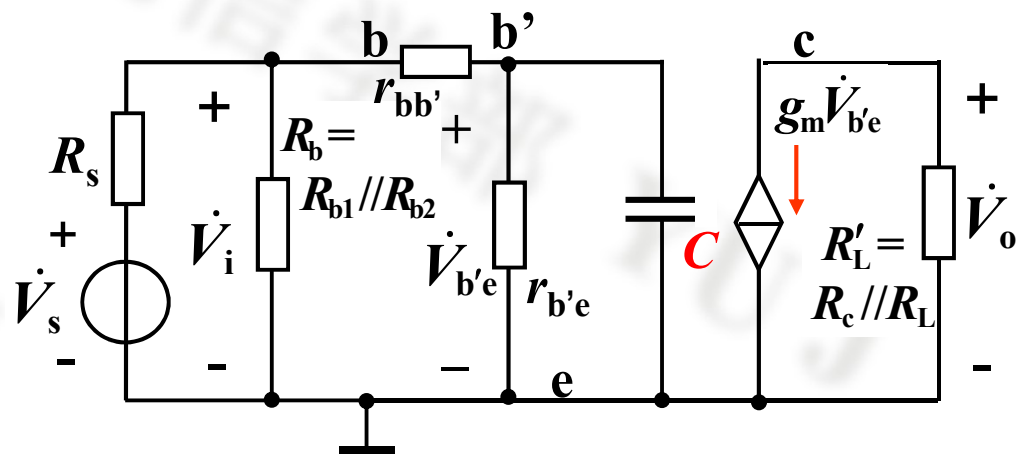
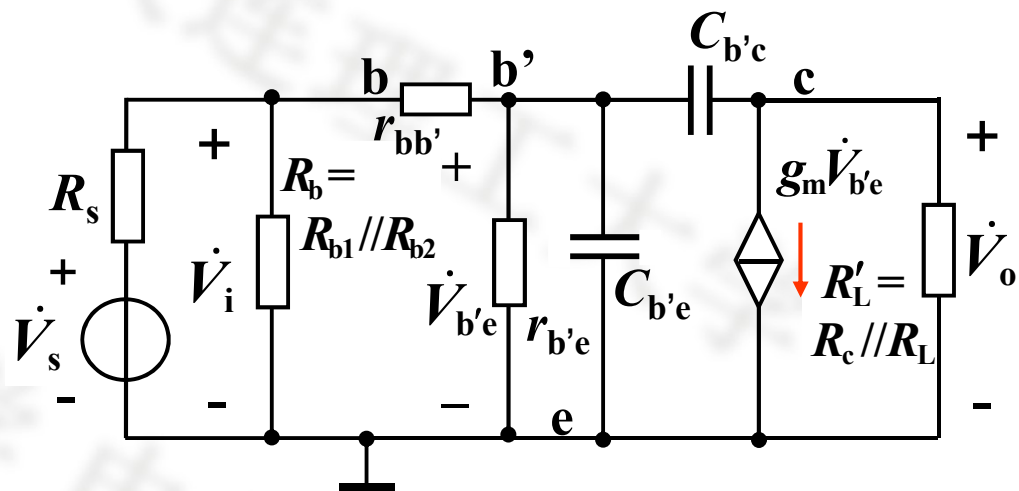
电路简化(推导过程略)

$C_{b'e}$ 对后续电路影响可忽略；
对前面电路的影响很大，可
等效为密勒电容，与 $C_{b'e}$ 并联

$$C_{M1} = (1 + g_m R'_L) C_{b'e}$$

$$C = C_{b'e} + C_{M1}$$

可分别计算输入和输出
(简化计算)



4.7.3 单级放大电路的高频响应 2.共射极放大电路的高频响应

②高频源电压增益

$$\begin{aligned}\dot{A}_{VSH} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{-g_m \dot{V}'_{b'e}}{\dot{V}_s} \\ &= \frac{\dot{A}_{VSM}}{1 + j(f/f_H)}\end{aligned}$$

其中，中频源电压增益

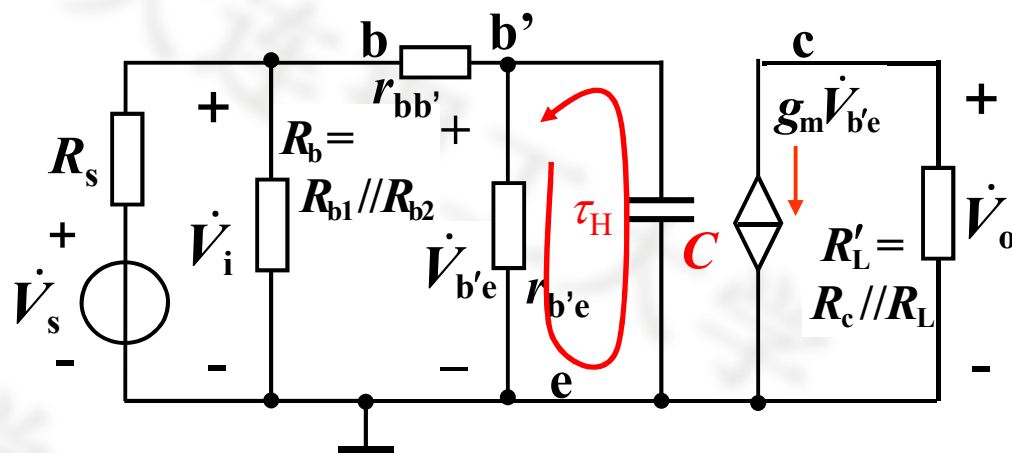
$$\dot{A}_{VSM} = \frac{-\beta_0 R'_L}{r_{b'e}} \cdot \frac{R_b // r_{be}}{R_s + R_b // r_{be}}$$

$$\text{上限频率 } f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$

教材P168例4.7.1，算得共射放大电路的 $f_H \approx 3.36 \text{ MHz}$

该BJT的共射极截止频率 $f_\beta \approx 5 \text{ MHz}$

特征频率 $f_T \approx 400 \text{ MHz}$



$$C = C_{b'e} + C_{M1}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e}$$

$$C_{M1} = (1 + g_m R'_L) C_{b'e}$$

$$\beta_0 = g_m r_{b'e}$$

C回路中的等效电阻

$$R = r_{b'e} // (r_{bb'} + R_s // R_b)$$

综合：单级放大电路的源电压增益

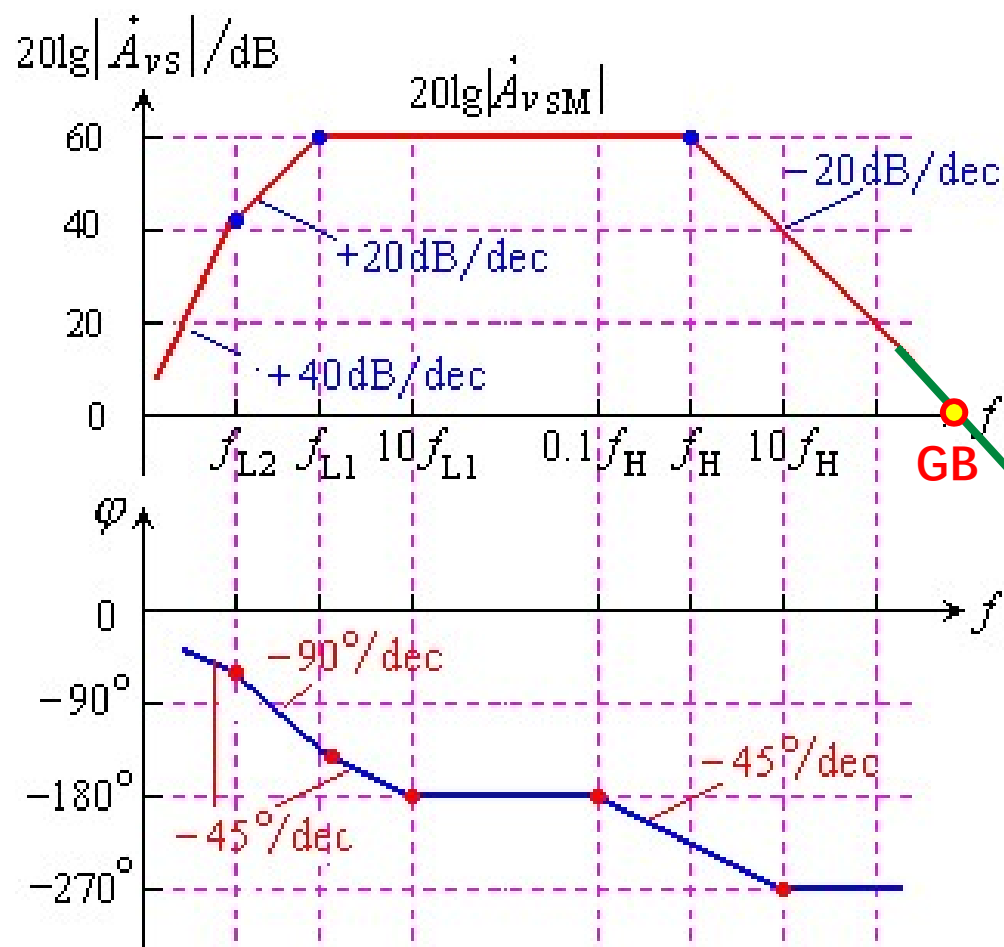
$$\dot{A}_{VS} = \dot{A}_{VSM} \times \frac{1}{1 + j f_{L1}/f} \times \frac{1}{1 + j f_{L2}/f} \times \frac{1}{1 + j f/f_H}$$

③单位增益带宽（了解）

$$GB \approx |\dot{A}_{VSM}| \times f_H$$

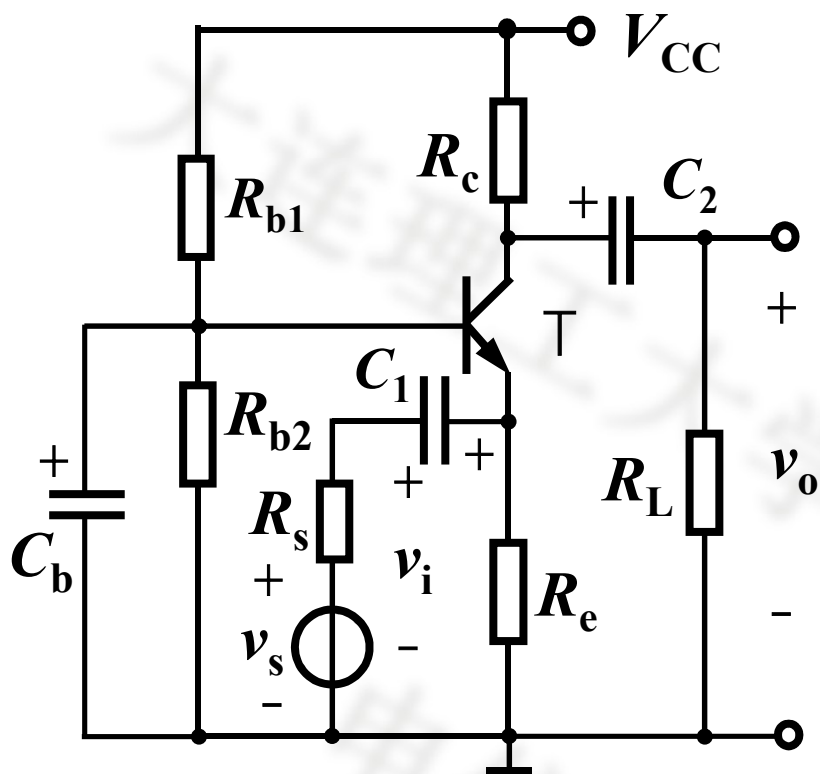
注：单级放大电路的单位增益带宽，等于其中频增益与上限截止频率的乘积（简称增益带宽积Gain-Bandwidth）。

GB是评价放大电路性能的重要指标。



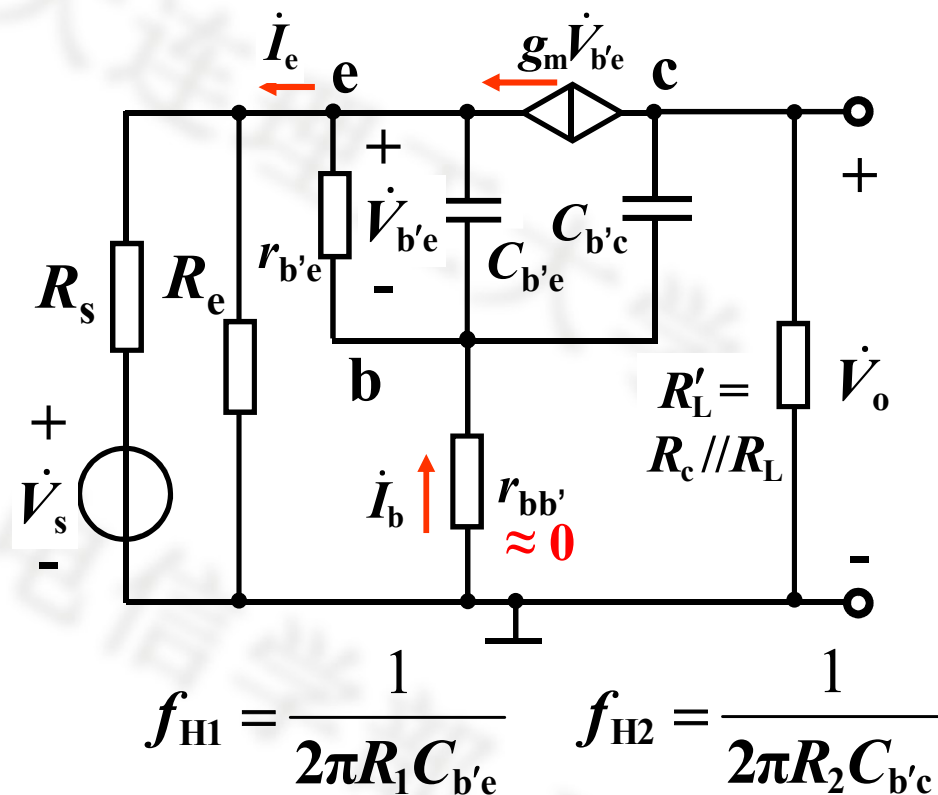
单级放大电路波特图

4.7.3 单级放大电路的高频响应 3.共基极放大电路的高频响应



$$\dot{A}_{VSH} = \frac{\dot{A}_{VSM}}{[1 + j(f/f_{H1})] \cdot [1 + j(f/f_{H2})]}$$

$$\dot{A}_{VSM} \approx \frac{\beta_0 R'_L}{r_{be}} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} \approx g_m R'_L \frac{R_i}{R_s + R_i}$$



$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_{b'e}} \quad f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_{b'c}}$$

$$R_1 = R_s // R_e // \frac{r_{b'e}}{1 + \beta_0}$$

$$R_2 \approx R'_L$$

$$R_i = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta_0}$$

4.7.3 单级放大电路的高频响应 3.共基极放大电路的高频响应

教材P174例4.7.3，与前面共射电路完全相同的BJT，采用共基放大电路结构时，

$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_{b'e}} \approx 426.7 \text{ MHz}$$

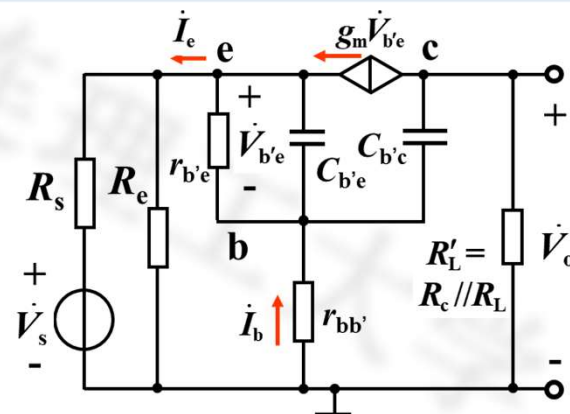
$$f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_{b'c}} \approx 124.9 \text{ MHz}$$

与集电结电容相关的上限频率 f_{H2} 与负载有关。

本例的共基放大电路上限截止频率 $f_H = f_{H2}$

当共基放大电路 R'_s 和 R'_L 都趋于无穷大时， $f_{H2} > f_{H1}$

$$f_H = f_{H1} \approx \frac{1}{2\pi \frac{r_{b'e}}{1+\beta_0} C_{b'e}} \approx \frac{g_m}{2\pi C_{b'e}} \approx f_T$$



共基电路无密勒电容效应，频带最宽

共集电路带宽较宽， f_H 介于共射和共基之间。分析略。

4.7.3 单级放大电路的高频响应

4. 几个上限频率的比较

共射电路
上限频率

$$f_{H(CE)}$$

<

β 的上
限频率

$$f_{\beta}$$

<<

共基电路
上限频率

$$f_{H(CB)}$$

\approx

BJT特
征频率

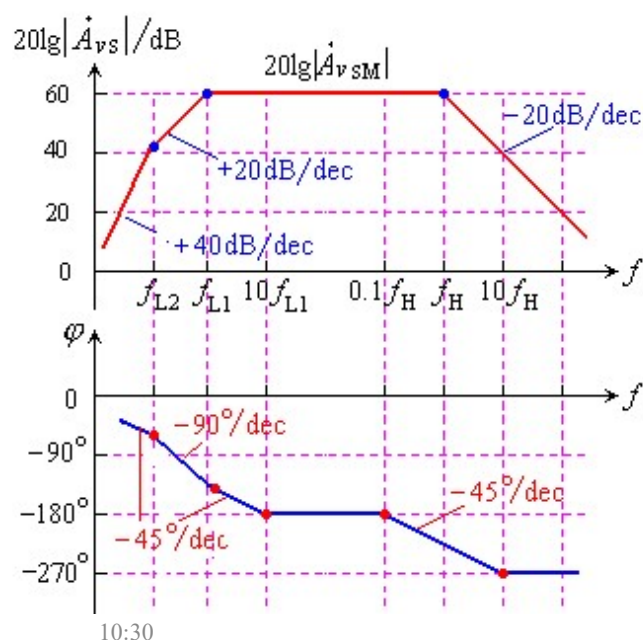
$$f_T = \beta_0 f_{\beta}$$

10M~100MHz

百兆~1GHz

4.7.4 单级放大电路的频率响应小结

| $X_C = 1/j\omega C$ | 频段 | 隔离和旁路电容 (C_1, C_2, C_e) | 寄生电容 (C_{be}, C_{bc} 等) |
|---------------------|-----|--------------------------------|-------------------------------|
| 小 | 高频段 | 0 | $X_C = 1/j\omega C$ |
| ↓ | 中频段 | 0 (短路) | ∞ (开路) |
| 大 | 低频段 | $X_C = 1/j\omega C$ | ∞ |



时间常数法分析电路频率响应:

- (1) 分别计算各电容产生的频率 $f = 1/2\pi RC$;
- (2) 下限频率来自耦合、旁路电容，取最大频率；此处增益比通带增益下降3dB (即0.707倍)且在通带相移的基础上产生+45°的相移；
- (3) 上限频率来自寄生电容，取最小频率；此处增益比通带增益下降3dB (即0.707倍)，且在通带相移的基础上产生-45°的相移。

4.7.5 多级放大电路的频率特性

♥ 频带比单级电路更窄

1、频率特性关系式 $\dot{A}_V = \dot{A}_{V1} \times \dot{A}_{V2} \times \dot{A}_{V3} \cdots = \prod_{k=1}^n \dot{A}_{Vk}$

2、幅频特性 $20\lg|\dot{A}_V| = 20\lg|\dot{A}_{V1}| + 20\lg|\dot{A}_{V2}| + \cdots = \sum_{k=1}^n 20\lg|\dot{A}_{Vk}|$

3、相频特性

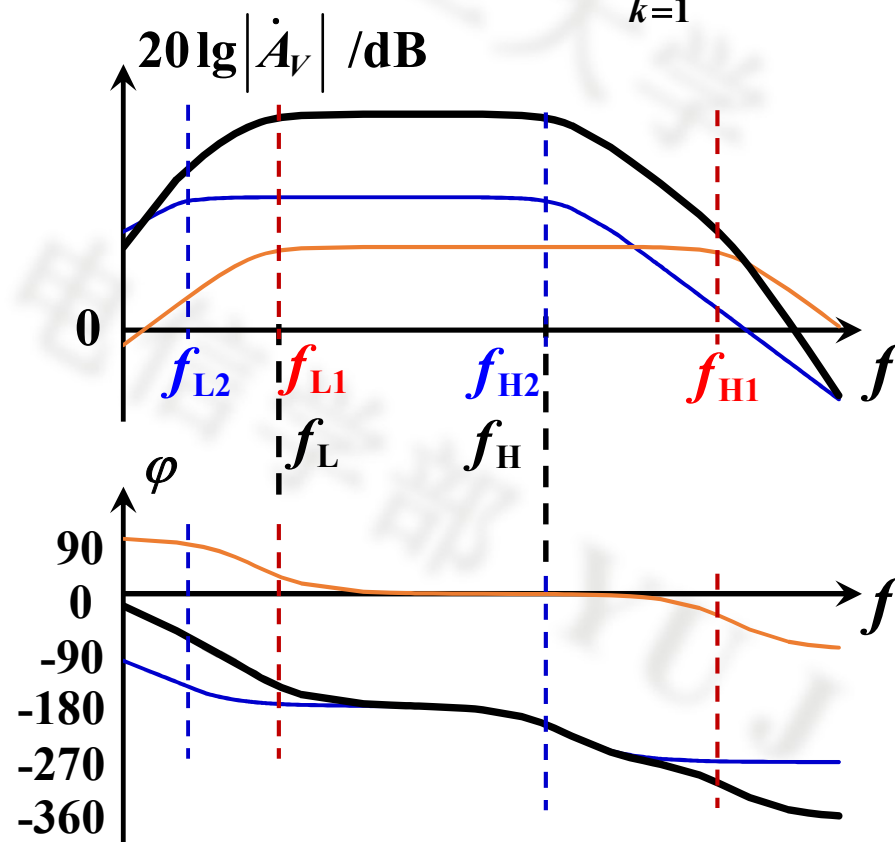
$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \cdots = \sum_{k=1}^n \phi_k$$

4、下限频率

$$f_L \approx \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \cdots}$$
$$\approx \max(f_{L1}, f_{L2}, \dots, f_{Ln})$$

5、上限频率

$$\frac{1}{f_H} \approx \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \cdots + \frac{1}{f_{Hn}^2}}$$
$$f_H \approx \min(f_{H1}, f_{H2}, \dots, f_{Hn})$$



4.7 放大电路的频率响应

小结

掌握：波特图、频率失真

掌握：低频特性分析方法(下限频率估算)

了解：高频特性分析方法

了解：多级组合放大电路频响的估算规律

预习：场效应管

作业

P194： 4.7.1, 4.7.4, 4.7.5, 4.7.7

问题？



群名称:模电2018_生医和计算机
群 号:561745191

本章要点

1.熟练掌握三极管的符号、主要参数。

2.正确理解三极管的工作原理。

3.掌握放大电路的静、动态分析

静态：直流偏置电路

用计算法求 Q点 (I_B 、 I_C 和 V_{CE})

动态：三种放大电路

用小信号等效电路法求放大倍数，输入、输出阻抗

4.理解图解法求解Q点及最大不失真电压幅度的确定。

5.掌握频率特性的基本概念,波特图（**幅频特性**）特点，掌握 **f_L** 的计算方法。