

第四章 放大电路的频率响应

- 频率特性概述
- 晶体管的高频等效模型
- 共射组态放大电路的频率响应
- 多级放大电路的频率响应

4.1 概述

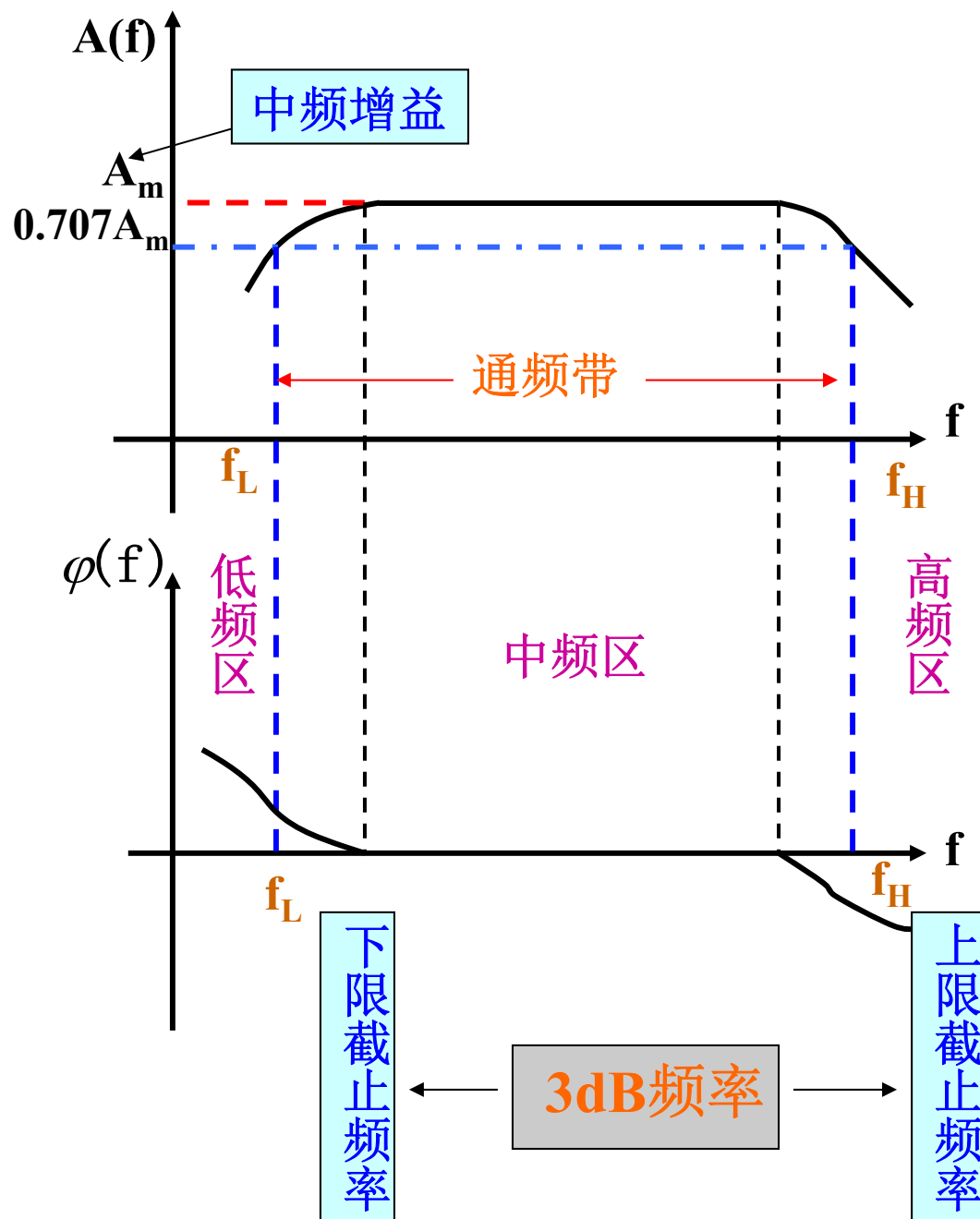
1、幅频特性、相频特性

频率响应：放大电路增益与输入信号频率之间的关系。

$$\dot{A}(j\omega) = \dot{A}(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$$

$\dot{A}(\omega)$	幅频特性	} 频率响应
$\varphi(\omega)$	相频特性	

起因：放大电路中存在的耦合电容、旁路电容，晶体管的极间电容等电抗元件。



1) 低频段 ($f < f_L$)

耦合电容引起的低频响应。在集成电路中大多采用直接耦合，因此 $f_L \approx 0$ 。

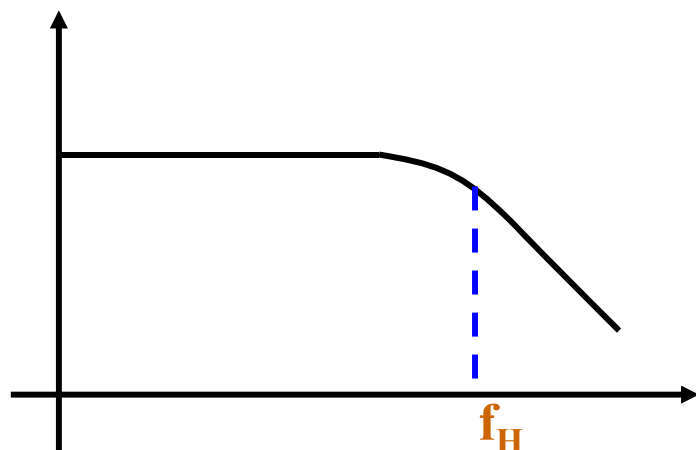
2) 中频段 ($f_L < f < f_H$)

所有电抗元件都不起作用，放大电路为纯阻网络。增益与频率无关。

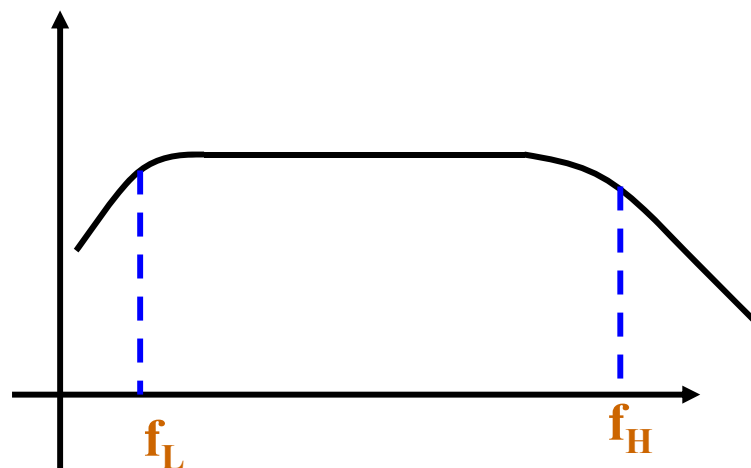
3) 高频段 ($f > f_H$)

晶体管结电容引起的高频响应。

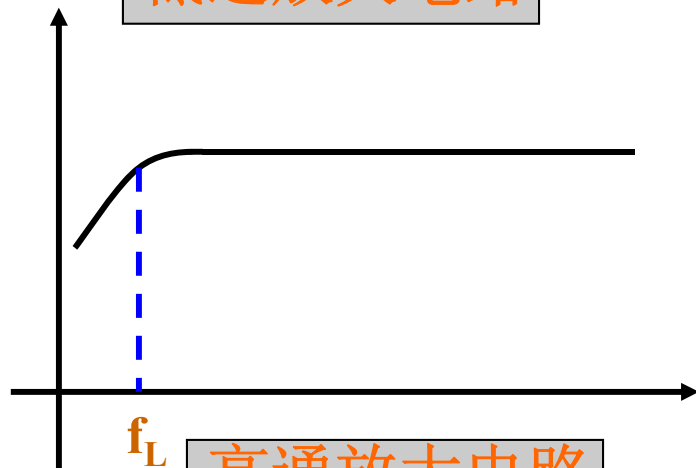
放大电路的类型



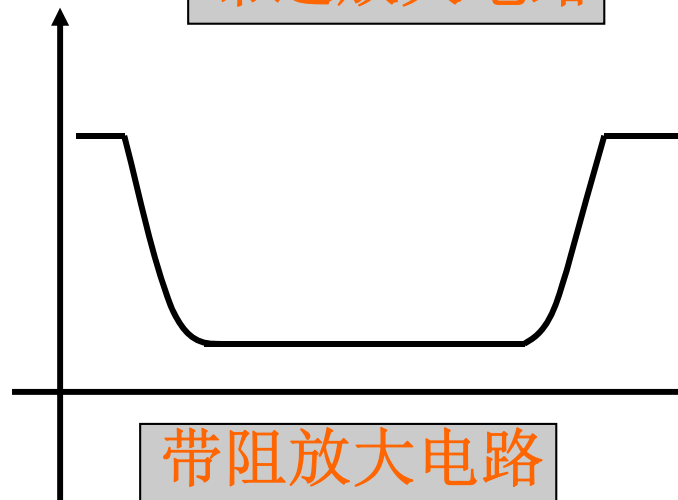
低通放大电路



带通放大电路



高通放大电路



带阻放大电路

要不失真放大信号，放大电路的通频带必须大于输入信号的频率范围

2、放大电路的传输函数及波特图

传输函数：放大电路的输出与输入之间的关系，一般为增益

波特图：用来表示放大电路频率响应的图形方法

a) 传输函数



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \longrightarrow \text{电压增益或电压传输函数}$$
$$\dot{A}_i \quad \dot{A}_{ui} \quad \dot{A}_{iu}$$

都为频率相关函数

$A(j\omega) \longrightarrow$ 传输函数

$$A(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$$

幅频 $\left\{ \begin{array}{l} A(\omega) \\ A(\omega)(dB) = 20 \lg A(\omega) \end{array} \right.$

相频 $\varphi(\omega)$

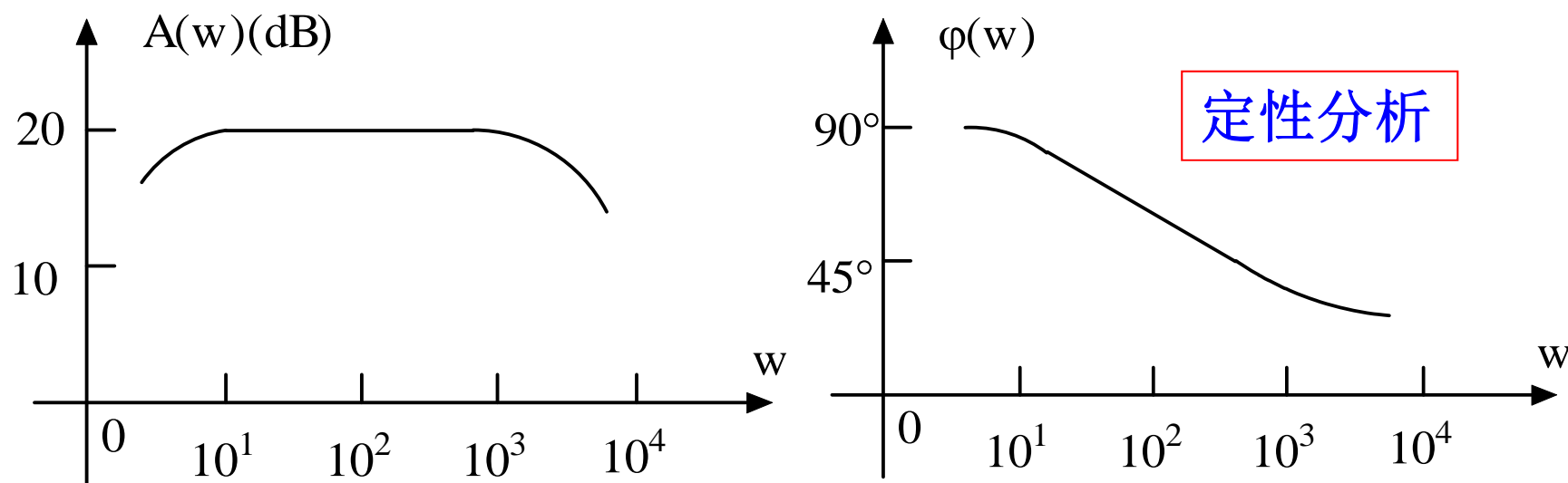
放大电路 $\xrightarrow{\text{正弦稳态分析}}$ 传输函数

利用传输函数来定量分析放大电路的频率特性

b) 波特图

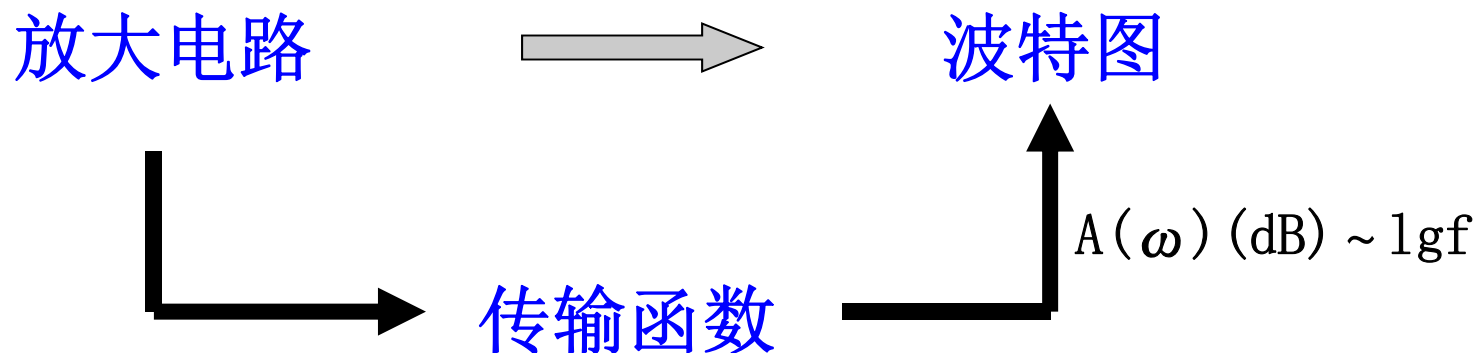
用半对数坐标来图形表示放大电路的频率特性

波特图 { 纵坐标（增益幅度、相移） 等分刻度
横坐标（频率） 对数坐标 10^1 、 10^2 、 10^3 等间距刻度



优点：能够表示较宽的频率范围

获得波特图的途径：



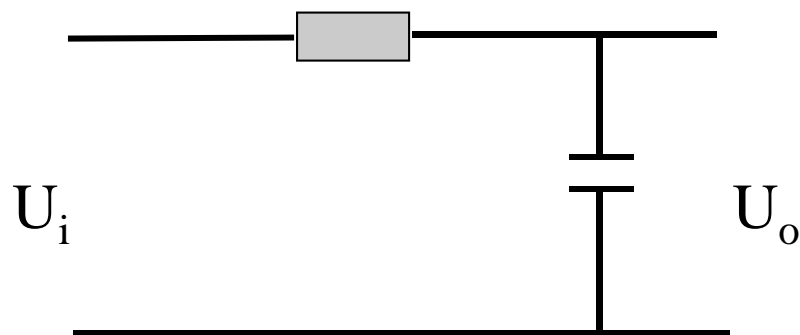
放大电路频率响应分析：

- ❑ 从放大电路得到传输函数
- ❑ 从传输函数得到波特图
- ❑ 从波特图可以定性了解放大电路的频率特性，包括截止频率，带宽等频率指标
- ❑ 从传输函数可以得到定量结果

c) 渐近波特图

用折线来近似逼近波特图来简化系统的波特图。

例1:



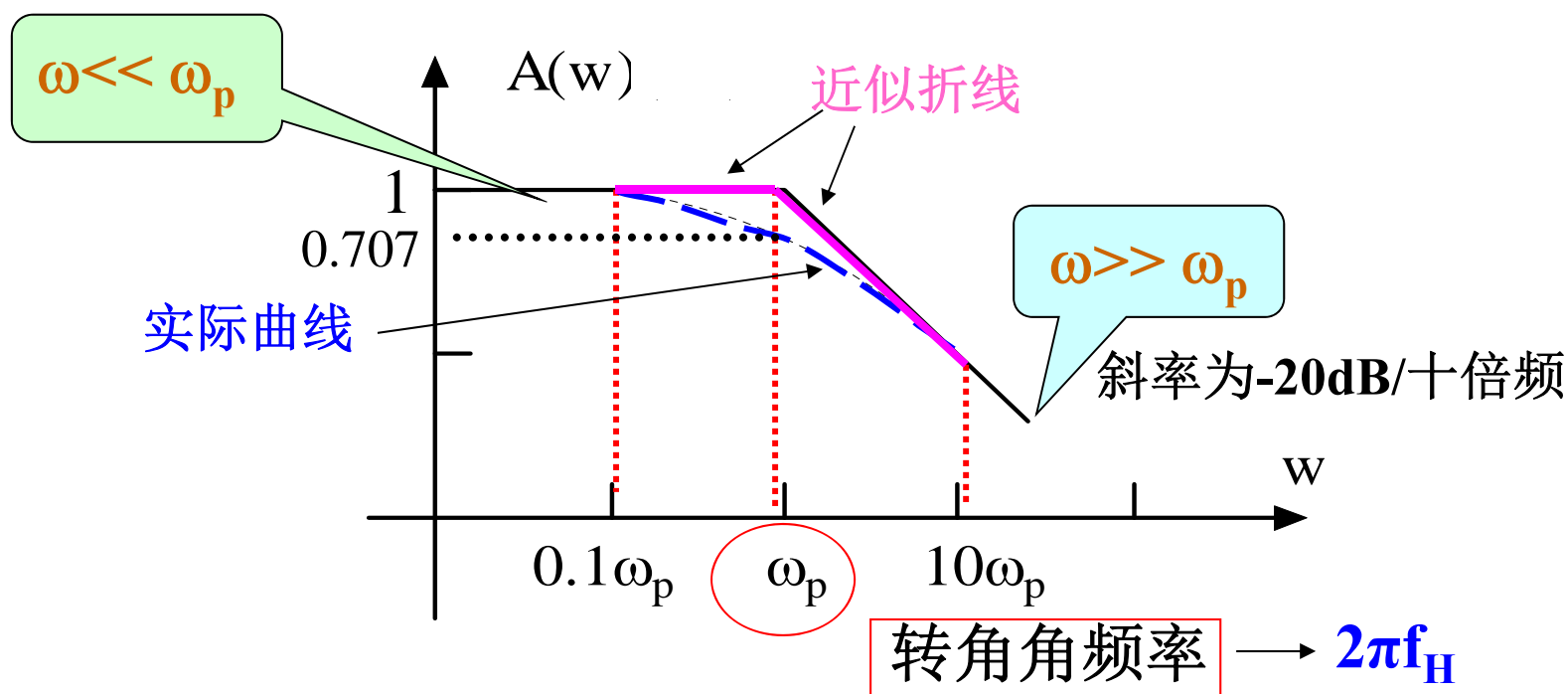
$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_p}}$$

$$\omega_p = \frac{1}{RC}$$

幅频特性

$$A(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega RC} = \frac{1}{1+\frac{j\omega}{\omega_p}} \quad \longrightarrow \quad A(\omega) = 1/\sqrt{1+(\omega/\omega_p)^2}$$

幅频 { 当 $\omega \ll \omega_p$ 时, $A(\omega) \approx 1$, $A(\omega)(dB) = 0$
 当 $\omega \gg \omega_p$ 时, $A(\omega) \approx \omega_p/\omega$, $A(\omega)(dB) = 20\lg(\omega_p/\omega)$



相频

$$\varphi_A(\omega) = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right) \left\{ \begin{array}{l} \text{当 } \omega \ll 0.1\omega_p \text{ 时, } \varphi(\omega) \approx 0 \\ \text{当 } \omega \gg 10\omega_p \text{ 时, } \varphi(\omega) \approx -90^\circ \\ \text{当 } 0.1\omega_p < \omega < 10\omega_p \text{ 时, } \varphi(\omega) \end{array} \right.$$

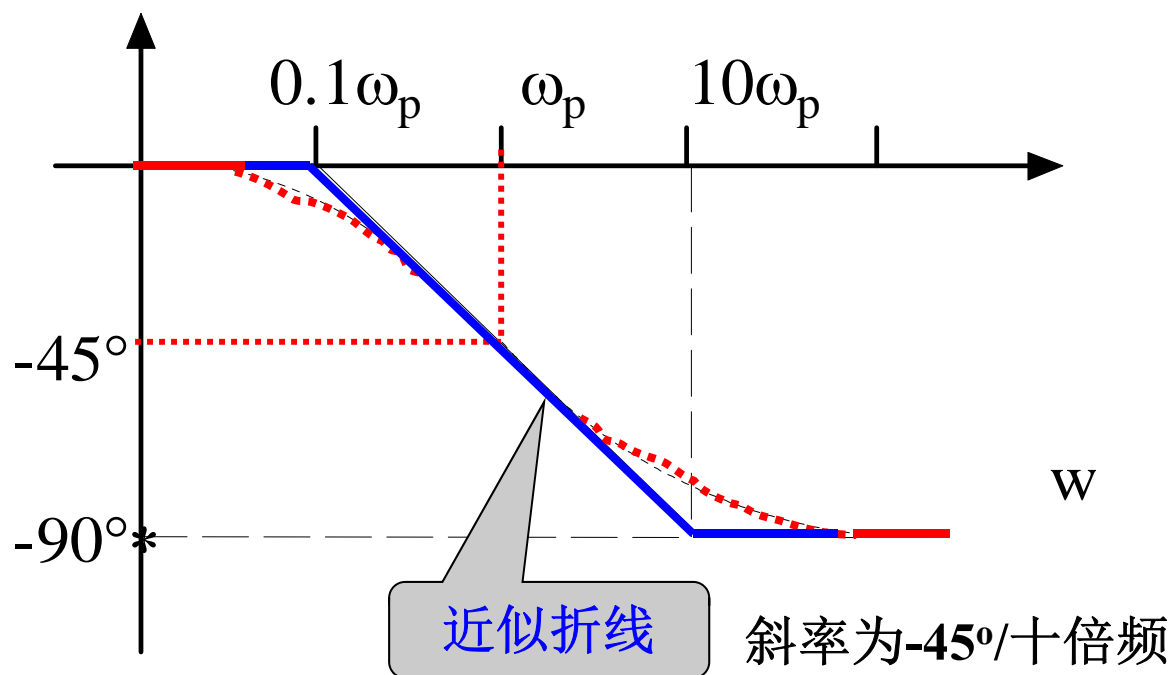
□ 低通电路

□ $f_L = 0$

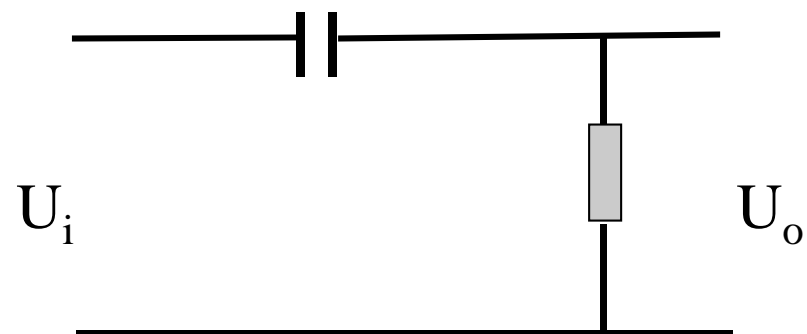
□ $f_H = 1/(2\pi RC)$

□ 带宽: $1/(2\pi RC)$

□ 渐近波特图



例2:



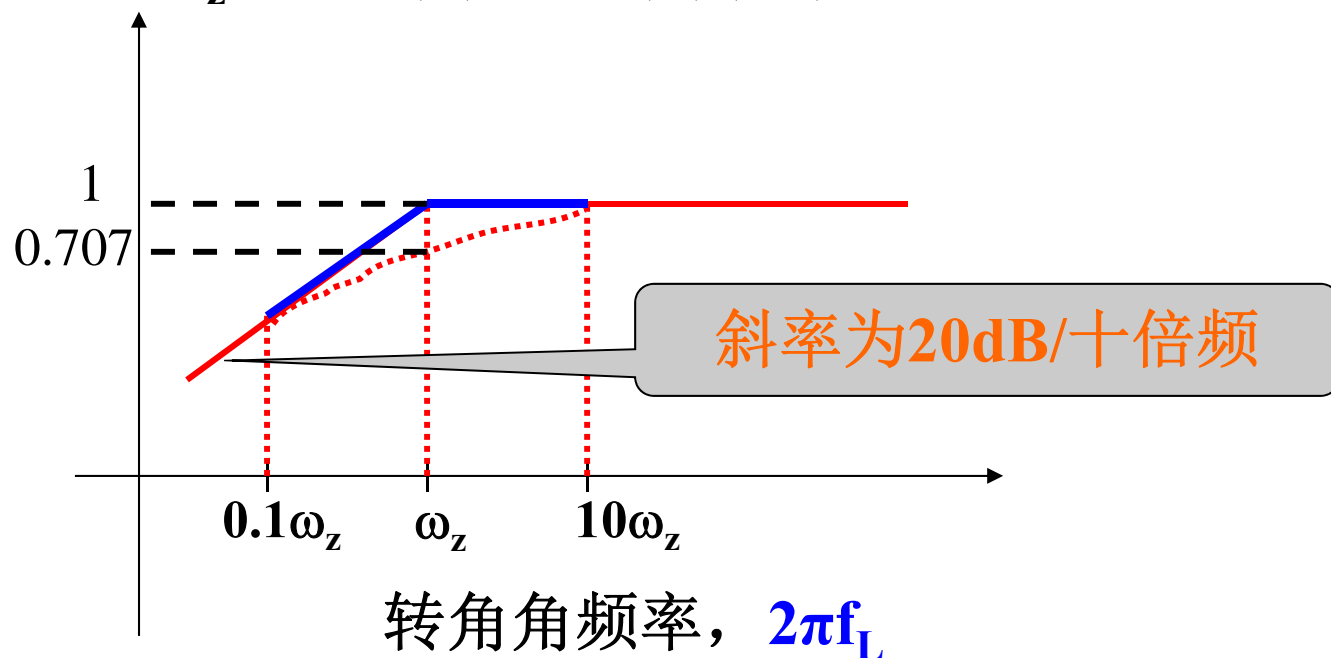
$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} = \frac{1}{1 + \frac{\omega_z}{j\omega}}$$

$$\omega_z = \frac{1}{RC}$$

$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} = \frac{1}{1 + \frac{\omega_z}{j\omega}} \quad \longrightarrow \quad A(\omega) = 1 / \sqrt{1 + (\omega_z / \omega)^2}$$

幅频 { 当 $\omega \ll \omega_z$ 时, $A(\omega) \approx \omega / \omega_z$, $A(\omega)(\text{dB}) = 20\lg(\omega / \omega_z)$
 当 $\omega \gg \omega_z$ 时, $A(\omega) \approx 1$, $A(\omega)(\text{dB}) \approx 0$

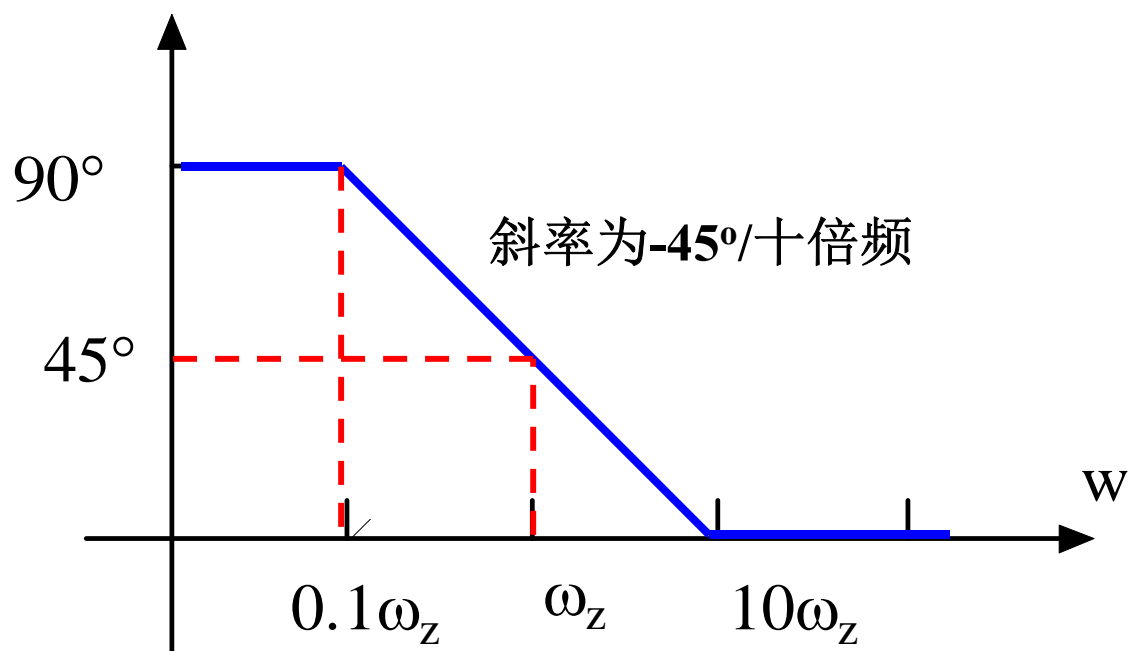
幅频特性



相频特性

$$\varphi_A(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_z}{\omega}\right) \left\{ \begin{array}{l} \text{当 } \omega \ll 0.1\omega_z \text{ 时, } \varphi(\omega) \approx 90^\circ \\ \text{当 } \omega \gg 10\omega_z \text{ 时, } \varphi(\omega) \approx 0 \\ \text{当 } 0.1\omega_z < \omega < 10\omega_z \text{ 时, } \varphi(\omega) \end{array} \right.$$

- 高通电路
- $f_H = \infty$
- $f_L = 1/(2\pi RC)$
- 渐近波特图



d. 任意传输函数的渐近波特图

$$A(j\omega) = H_0 \frac{(j\omega + \omega_{z1})(j\omega + \omega_{z2}) \dots (j\omega + \omega_{zm})}{(j\omega + \omega_{p1})(j\omega + \omega_{p2}) \dots (j\omega + \omega_{pn})}$$

$$A(\omega) (\text{dB}) = 20 \lg A(\omega)$$

幅频

$$= 20 \lg H_0 + 20 \lg \sqrt{\omega^2 + z_1^2} + \dots + 20 \lg \sqrt{\omega^2 + z_m^2} \\ - 20 \lg \sqrt{\omega^2 + p_1^2} - \dots - 20 \lg \sqrt{\omega^2 + p_n^2}$$

相频

$$\varphi_A(\omega) = \lg^{-1}\left(\frac{\omega}{z_1}\right) + \dots + \lg^{-1}\left(\frac{\omega}{z_m}\right) \\ - \lg^{-1}\left(\frac{\omega}{p_1}\right) - \dots - \lg^{-1}\left(\frac{\omega}{p_n}\right)$$

总波特图： 传输函数中各个因子的子波特图的叠加

初始幅频

$$20 \lg \left(H_0 \cdot \frac{\omega_{z1} \omega_{z2} \cdots \omega_{zm}}{\omega_{p1} \omega_{p2} \cdots \omega_{pn}} \right)$$

如果 ω_z 或 ω_p 是0，则不要去乘或除。

初始相频

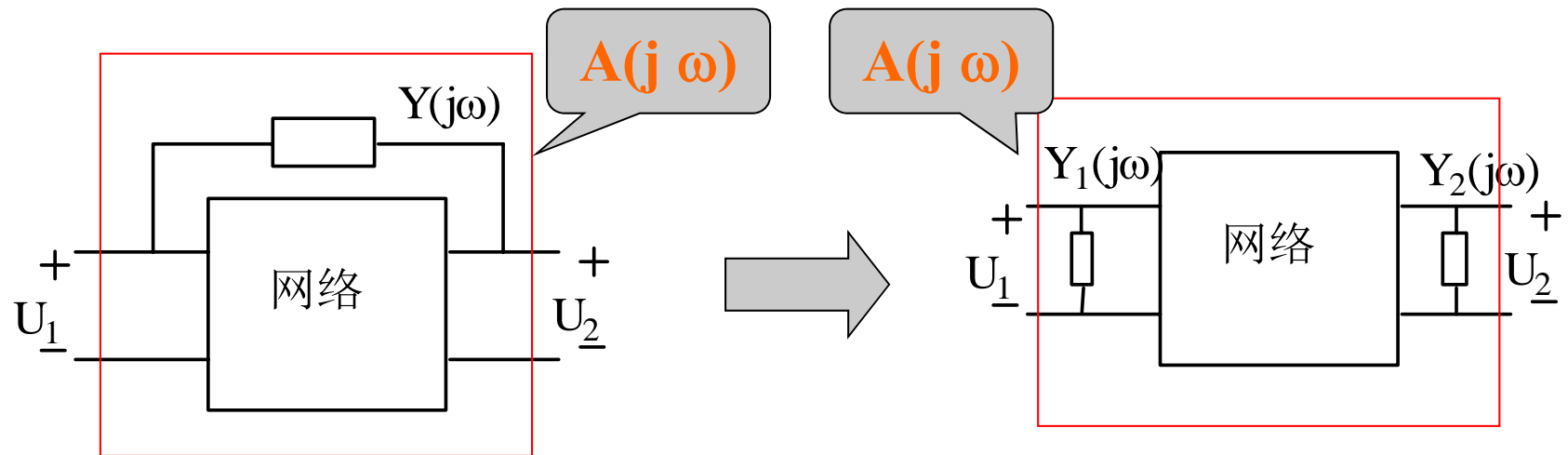
0

幅频特性波特图：从初始幅频出发，每碰到一个转角频率，曲线斜率改变，改变方式：如果转角频率是分子上的，则斜率增加**20dB/十倍频**，如果位于分母，则斜率减小**20dB/十倍频**。

相频特性波特图：从0度水平线出发，经过**0.1 ω_{p1}** 后，斜率开始改变，改变的斜率取决于各因子之间的频率间距，也即重叠情况，有几段重叠，以及正负情况，进行相加。

4.2 晶体管的高频等效模型

1、密勒定理及单向化近似模型

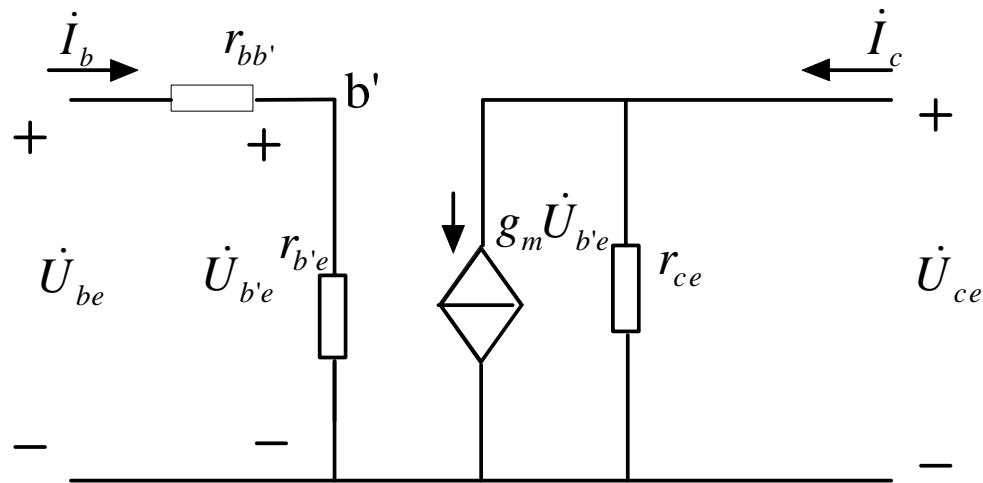
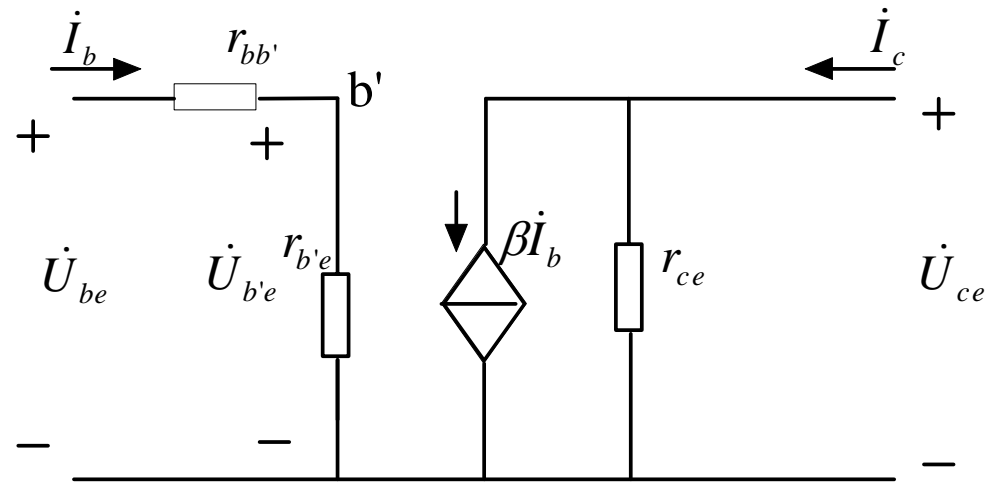


$$\begin{cases} Y_1(j\omega) = Y(j\omega) \cdot [1 - A(j\omega)] \\ Y_2(j\omega) = Y(j\omega) \cdot [1 - 1/A(j\omega)] \end{cases}$$

$A(j\omega)$ 包含 $Y(j\omega)$ 在
内的传输函数

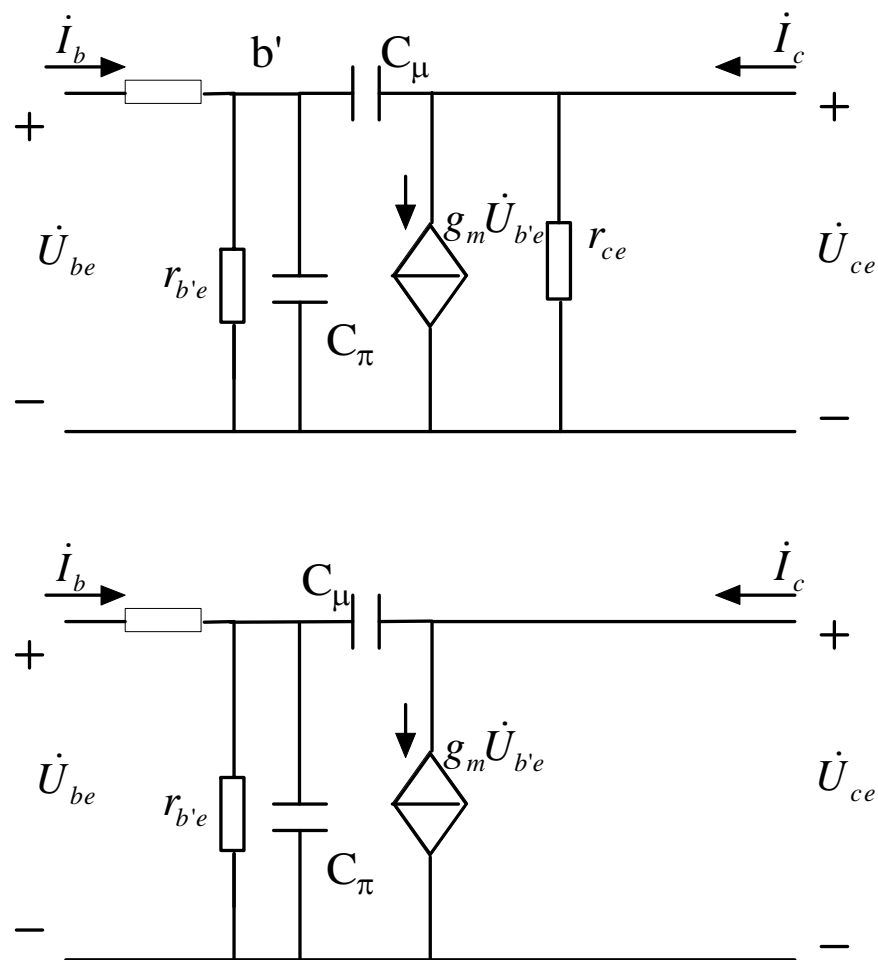
2、晶体管高频等效电路模型

低频
h
参数模型



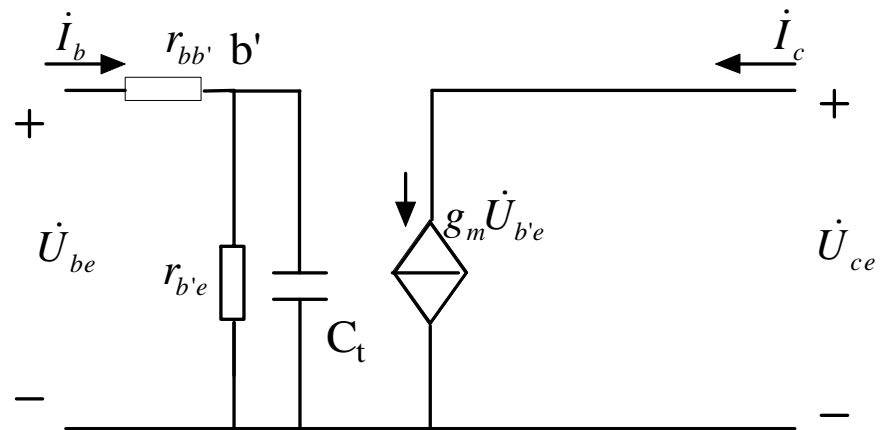
$$g_m = \frac{\beta}{r_{b'e}}$$

高频模型



考虑BC和BE两个PN结的电容效应后得到的等效模型。在低频H参数模型的基础上增加了BC和BE间的电容。在低频时与H参数模型一致。称为混合 π 模型。

单向化模型（简化）



用于高频分析

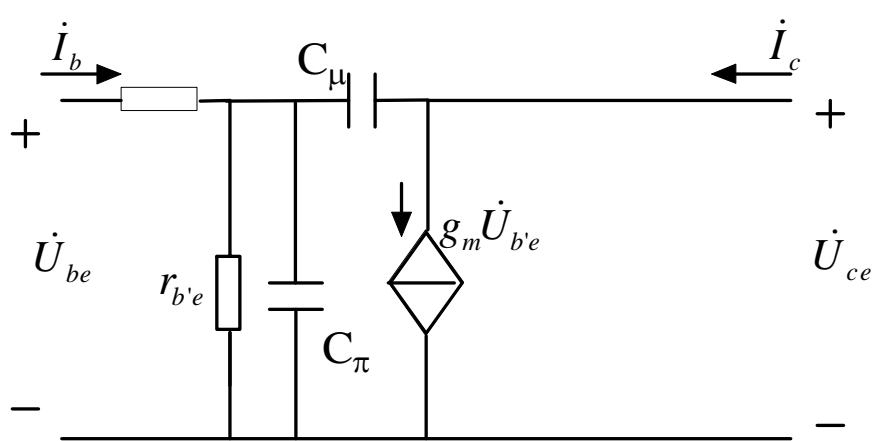
$$C_t = C_\pi + (1 - \dot{A}) \cdot C_\mu = D \cdot C_\pi$$

$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}}$$

D:密勒效应倍增因子

3、电流放大倍数 β 的频率特性

β 低频时为常数，高频时与频率有关



$$\dot{\beta} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} \right|_{\dot{U}_{ce}=0}$$

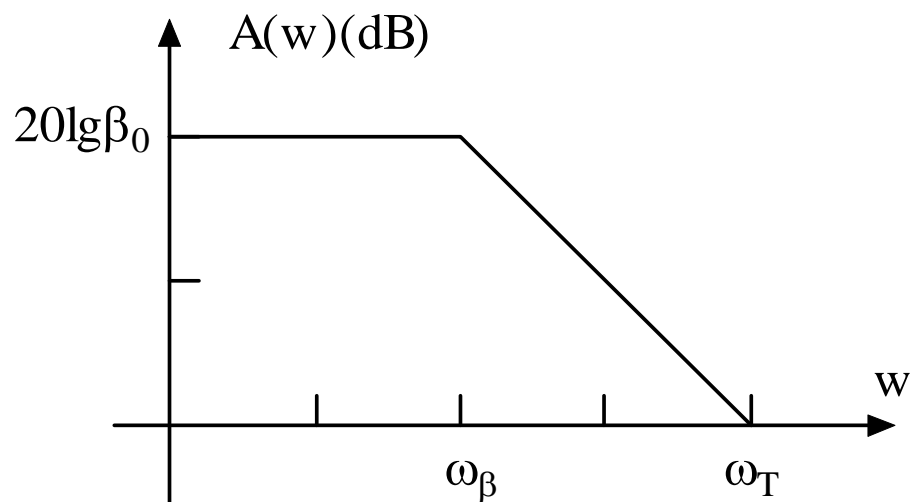
$$\dot{\beta} = \frac{g_m r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e} (C_{\pi} + C_{\mu})}$$

$$\text{令: } \beta_0 = g_m r_{b'e} \quad \omega_{\beta} = \frac{1}{r_{b'e} (C_{\pi} + C_{\mu})}$$

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{\beta}}}$$

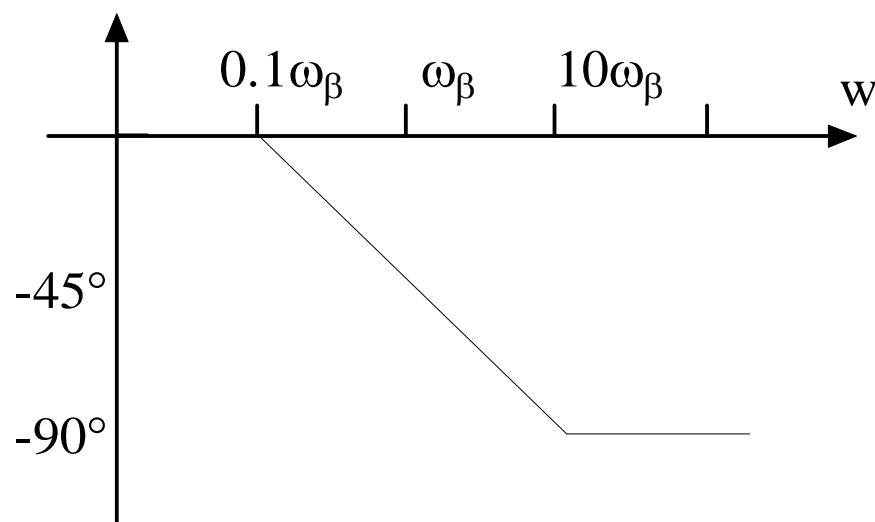
ω_{β} : 上限角频率

β波特图



ω_T : 特征角频率 ($\beta(\omega)$ 下降为1或0dB时所对应的角频率), 即晶体管丧失电流放大能力时所对应的频率。

$$\omega_T = \beta_0 \omega_\beta = \frac{g_m}{C_\pi + C_\mu}$$



从此式可以求得 C_π 的值

α 的频率特性

$$\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_\alpha}}$$

$$\omega_T = \alpha_0 \omega_\alpha$$

其中：

$$\alpha_0 = \frac{\beta_0}{1 + \beta_0}$$

$$\omega_\alpha = (1 + \beta_0) \omega_\beta$$

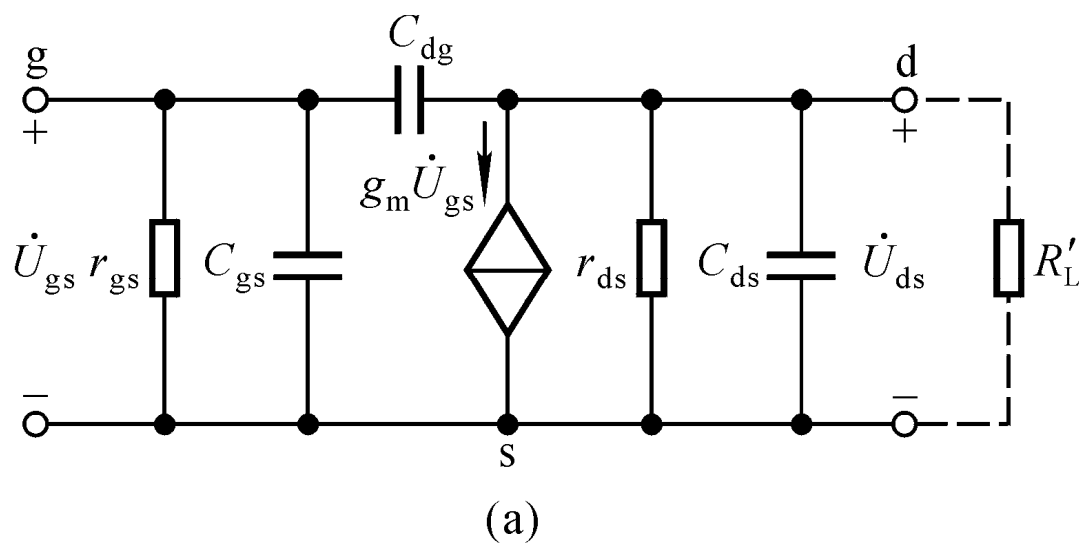
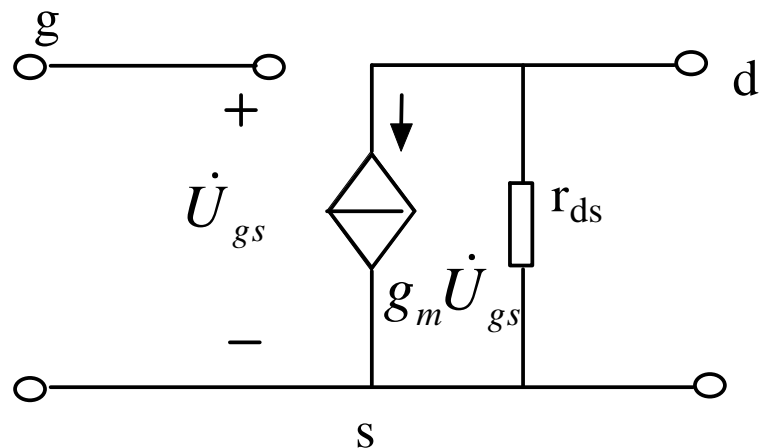
$$\omega_\beta \ll \omega_T < \omega_\alpha$$

晶体三极管的频率特性：

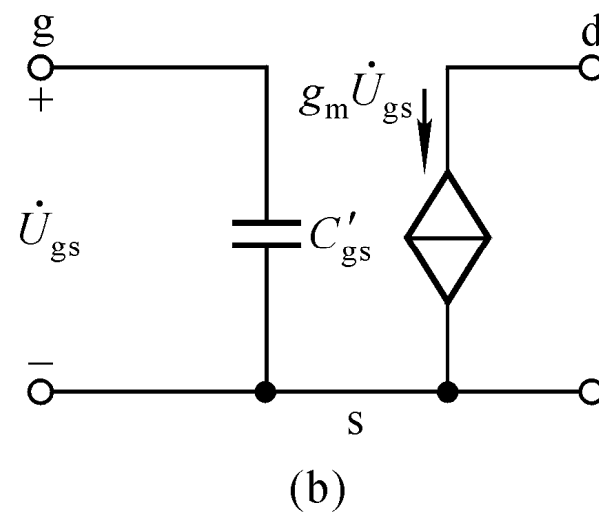
- 频率越高，晶体管的极间电容效应越强，因此高频时需要考虑这些电容，分析放大电路时，需用高频等效电路模型
- 频率较低时，**BE**间电容，**BC**间电容相当于开路，此时用低频等效电路模型进行分析。
- β 参数也是频率相关函数，具有低通频率特性。

4、场效应管高频等效电路模型

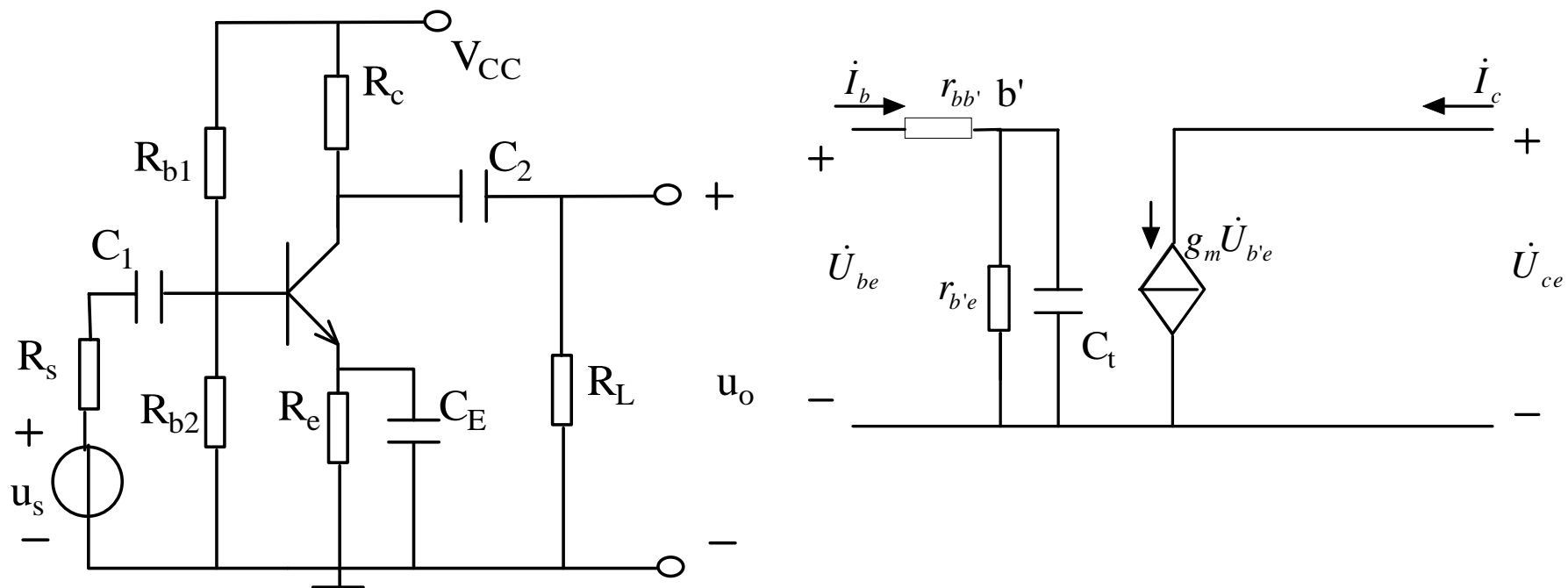
低频模型



高频模型



4.3 晶体管放大电路的频率响应



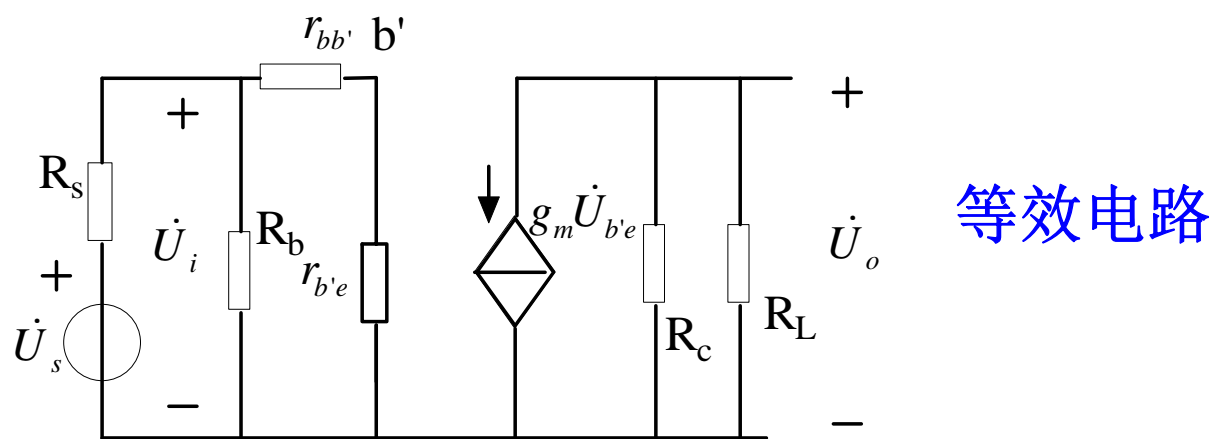
影响频率特性的参数：耦合电容 C_1, C_2 ，旁路电容 C_E ，极间电容 C_t 。

耦合电容和旁路电路在低频时产生影响

极间电容在高频时产生影响

1) 中频段---中频增益，输入电阻、输出电阻

耦合电容、旁路电容相当于短路，极间电容相当于开路，此时放大电路为**纯阻网络**

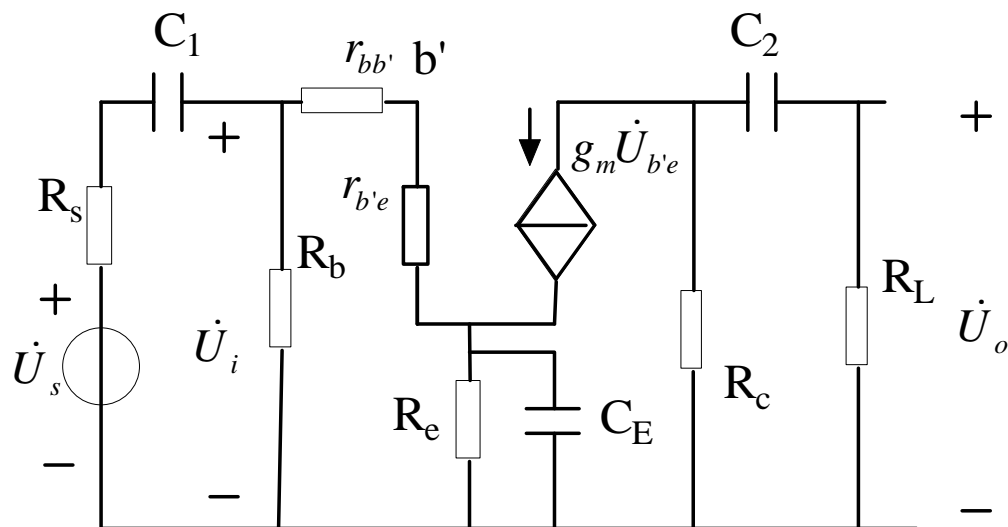


$$\dot{A}_{usm} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{-g_m \dot{U}_{b'e} (R_c // R_L)}{\dot{U}_{b'e} \frac{r_{be}}{r_{b'e}} \cdot \frac{R_s + R_i}{R_i}} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{-g_m r_{b'e} (R_c // R_L)}{r_{be}}$$

$$R_i = R_b // r_{be} \quad R_o = R_c$$

具有固定增益和稳定相移（180°）

2) 低频段—低频增益、输入电阻、输出电阻，下限频率



极间电容开路

耦合电容、旁路电容产生影响

1. 只考虑 C_1

$$\dot{A}_{us1} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i + \frac{1}{j\omega C_1}} \cdot \frac{-g_m r_{be} (R_c // R_L)}{r_{be}} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{j\omega}{j\omega + \frac{1}{(R_s + R_i)C_1}}$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{(R_s + R_i)C_1} = \frac{1}{R_{C1}C_1}$$

R_i : 放大器输入电阻

R_{C1} : C_1 两端的等效电阻

2. 只考虑 C_2

$$\dot{A}_{us1} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{j\omega}{j\omega + \frac{1}{(R_L + R_o)C_2}}$$

$$\omega_{p2} = \frac{1}{(R_o + R_L)C_2} = \frac{1}{R_{C2}C_2}$$

R_o : 放大器输出电阻

R_{C2} : C_2 两端的等效电阻

3. 只考虑 C_E

$$\omega_{p3} = \frac{1}{(R_e // \frac{R_s // R_b + r_{be}}{1 + \beta}) C_E} = \frac{1}{R_{Ce} C_E}$$

R_{Ce} : C_e 两端的等效电阻

4. 当三个电容同时存在时

1) 互相不影响（差别较大时）

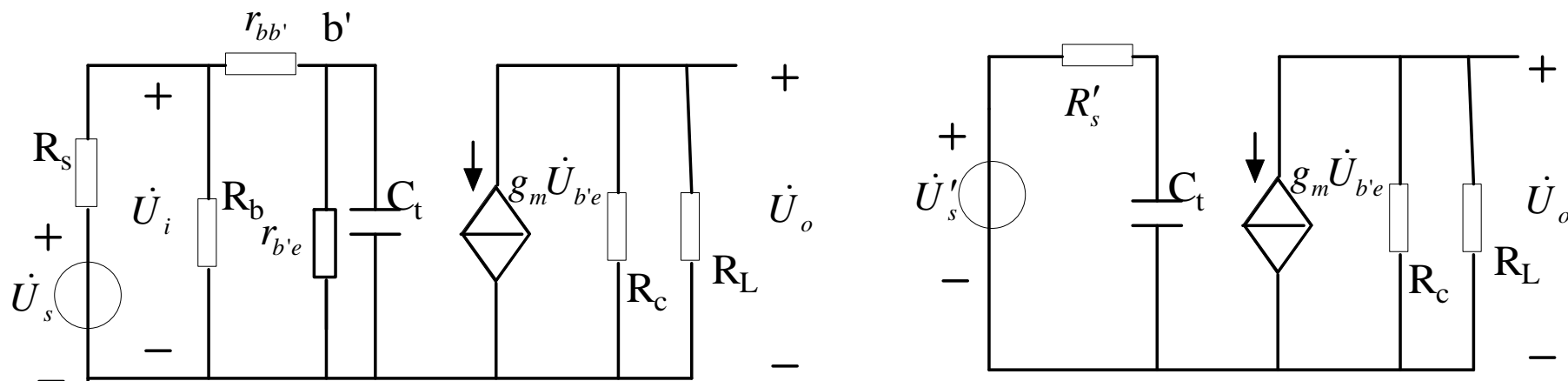
下限频率为 ω_{p1} ， ω_{p2} 和 ω_{p3} 中最大者，一般为由 C_e 确定的值。

2) 互相影响

$$\omega_L = 1.1\sqrt{\omega_{p1}^2 + \omega_{p2}^2 + \omega_{p3}^2}$$

在低频段，具有高通特性，频率越低，电压增益越小，得到下限截止频率

3) 高频增益—高频增益、输入电阻、输出电阻，上限频率

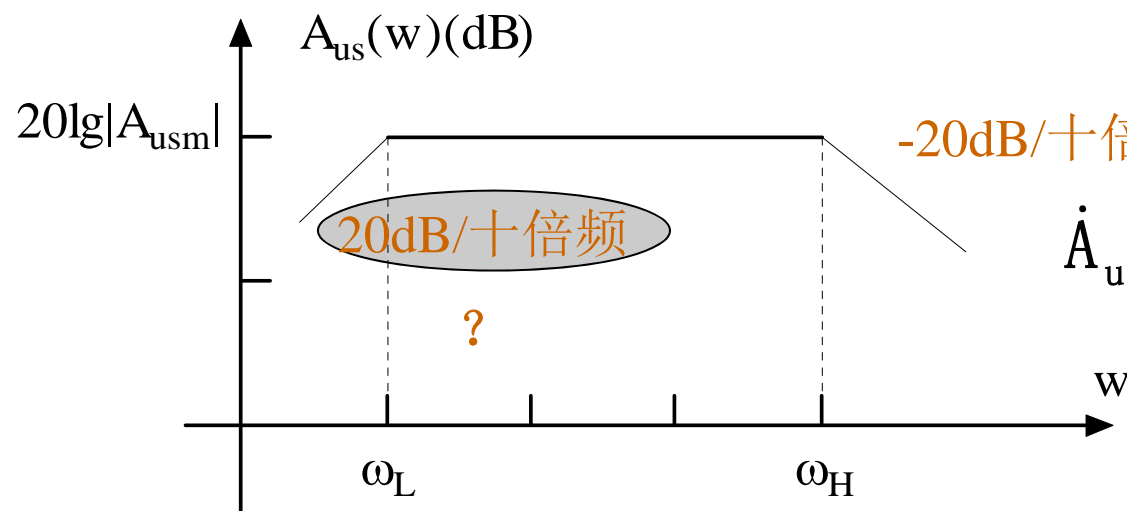


$$\dot{A}_{ush} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{1}{R'_s + \frac{1}{j\omega C_t}} \cdot [-g_m (R_c // R_L)] = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R'_s C_t}$$

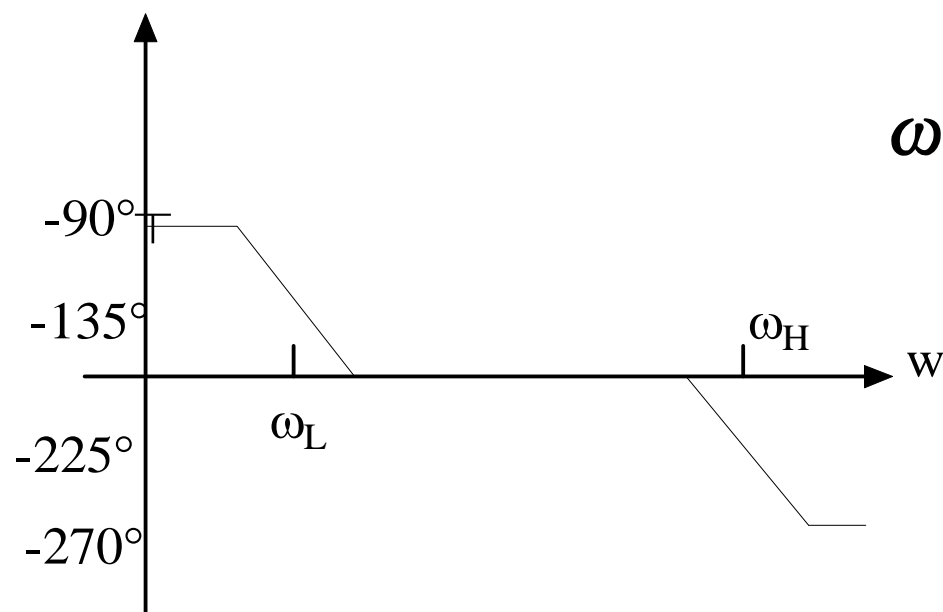
$$\omega_H = \frac{1}{R'_s C_t}$$

在高频段，具有低通特性，频率越高，电压增益越小，得到上限截止频率

4) 增益频率特性



$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_H}} \cdot \frac{j\frac{\omega}{\omega_L}}{j\frac{\omega}{\omega_L} + 1}$$



$$\omega_L = \sqrt{\omega_{p1}^2 + \omega_{p2}^2 + \omega_{p3}^2}$$

$$\omega_H = \frac{1}{R'_s C_t}$$

共射组态放大电路的频率响应

对于一个放大电路，通过分析中频增益，下限频率和上限频率可以大致知道放大电路的频率特性。

$$\omega_{p1} = \frac{1}{(R_s + R_i) C_1} = \frac{1}{R_{C1} C_1}$$

1) 降低下限频率：增大耦合电容及等效电阻，或采用直接耦合方式

$$\omega_{p2} = \frac{1}{(R_o + R_L) C_2} = \frac{1}{R_{C2} C_2}$$

2) 增大上限频率：

$$\omega_{p3} = \frac{1}{(R_e // \frac{R_s // R_b + r_{be}}{1 + \beta}) C_E} = \frac{1}{R_{Ce} C_E}$$

□ 选择器件：结电容小

$r_{bb'}$ 小

$$\omega_H = \frac{1}{R'_s C_t} = \frac{1}{[r_{be'} // (r_{bb'} + R_s // R_b)] C_t}$$

□ 外参数 R_s 要小，采用恒压源

通过改变 ω_p 和 ω_H 的值来展宽带宽

增益带宽积 (GBW)

$$\text{GBW} = |A_{\text{usm}} f_{\text{bw}}|$$

$$\dot{A}_{\text{usm}} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{-g_m r_{b'e} (R_c // R_L)}{r_{b'e}}$$

$$\omega_H = \frac{1}{R'_s C_t} = \frac{1}{[r_{b'e} // (r_{bb'} + R_s // R_b)] C_t}$$

对于一个放大电路来说，增益带宽积基本保持不变，即增大增益将使带宽变窄。

单管放大电路的分析

中频增益：通过得到放大电路中频时的交流等效电路进行分析（将所有耦合电容、旁路电容短路，将所有晶体管的极间电容开路）

上限截止频率：通过得到放大电路高频时的交流等效电路进行分析（将所有耦合电容、旁路电容短路，利用晶体管的高频等效模型替代晶体管），得到所有影响高频段的电容 C_i 以及该电容所在回路的等效电阻 R_i ，求得 $f_{Hi}=1/(2\pi R_i C_i)$

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

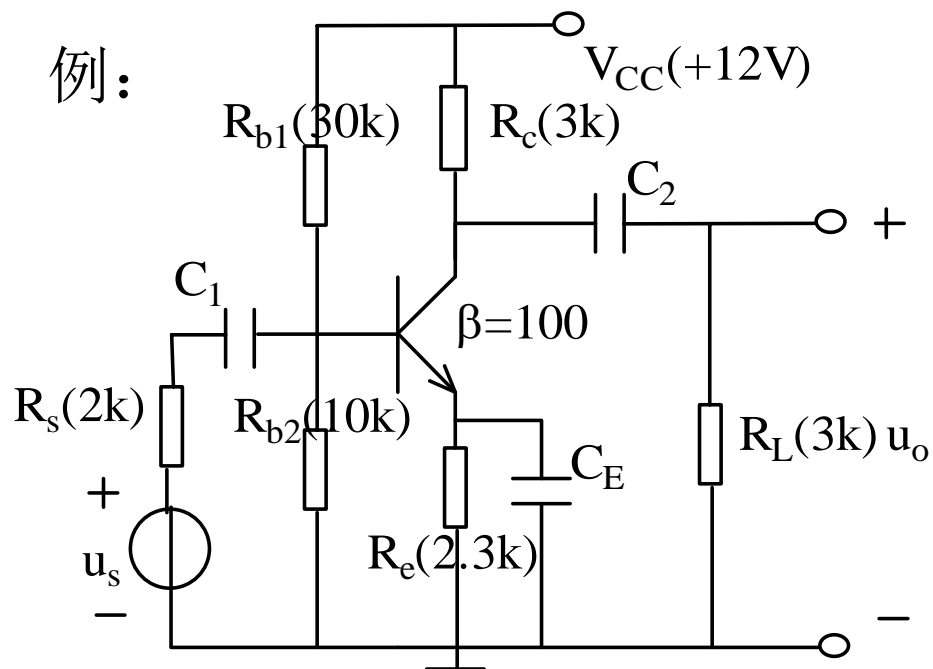
下限截止频率：通过得到放大电路低频时的交流等效电路进行分析（保留所有耦合电容、旁路电容以及影响低频段的电容，利用晶体管的低频等效模型替代晶体管），得到各个电容 C_i 以及该电容所在回路的等效电阻 R_i ，求得 $f_{Li}=1/(2\pi R_i C_i)$

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

带宽：

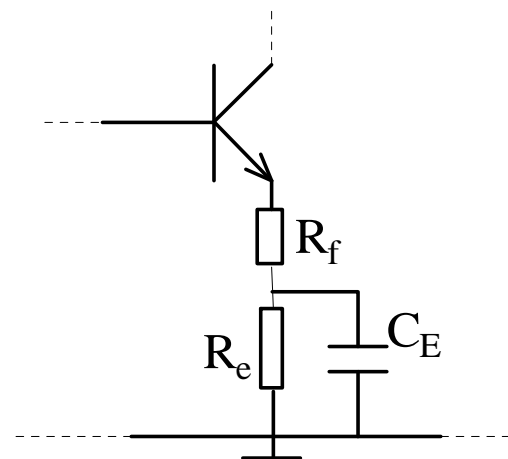
$$f_{bw} = f_H - f_L$$

例:



$$r_{be} = 1.4k$$

(a)



(b)

- 1) $C_1 = 3\mu F$, C_2 和 C_E 足够大时电路的 f_L
- 2) $C_1 = 3\mu F$, $C_2 = 10\mu F$, $C_E = 30\mu F$ 时 f_L 的大小
- 3) 将(a)中电路射极接成(b)所示结构, $R_f = 300$, $R_e = 2k$, $C_E = 30\mu F$, C_1 和 C_2 足够大, 求此时 f_L
- 4) $f_T = 150MHz$, $C_\mu = 5pF$, $r_{bb'} = 100$, 求 f_H

4.4 多级放大电路的频率响应

如果放大器由多级级联而成，那么，总增益

$$A_u(j\omega) = \prod_{k=1}^n A_{uk}(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$$

$$20\lg A_u(\omega) = 20\lg A_{u1}(\omega) + 20\lg A_{u2}(\omega) + \cdots + 20\lg A_{un}(\omega)$$

幅频

$$= \sum_{k=1}^n 20\lg A_{uk}(\omega)$$

相频

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) + \cdots + \varphi_k(\omega) = \sum_{k=1}^n \varphi_k(\omega)$$

1、多级放大器的上限频率 f_H

假设每级放大电路的上限频率分别为:

$$f_{H1}, f_{H2}, f_{H3}, \dots, f_{Hn}$$

并且 $f_{H1} < f_{H2} < f_{H3} < \dots < f_{Hn}$

1) f_{H1} 与 f_{H2} 相差较大时

$$f_H = f_{H1}$$

$$f_H < f_{Hi}$$

$$i=1 \sim n$$

2) 所有上限频率大小都相当时

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

2、多级放大器的下限频率 f_L

假设每级放大电路的下限频率分别为:

$$f_{L1}, f_{L2}, f_{L3}, \dots, f_{Ln}$$

并且 $f_{L1} > f_{L2} > f_{L3} > \dots > f_{Ln}$

1) f_{L1} 与 f_{L2} 相差较大时

$$f_L = f_{L1}$$

$$f_L > f_{Li} \quad i=1 \sim n$$

2) 所有下限频率大小都相当时

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