



模拟电路基础（下）

三极管与其放大电路

3.3 多级放大器



➤ 多级放大器的性能分析

例4-3-1, 已知 $R_{B1}=120k\Omega$, $R_{B2}=5k\Omega$, $R_{C1}=15k\Omega$, $R_{C2}=3k\Omega$, 稳压二极管 $V_Z=4V$, $V_{CC}=20V$, $\beta_1=\beta_2=50$, 两个三极管的 $V_{BE(on)}=0.7V$ 。试计算各级放大电路的静态工作点, 多级放大电路的输入电阻、输出电阻和电压放大倍数。

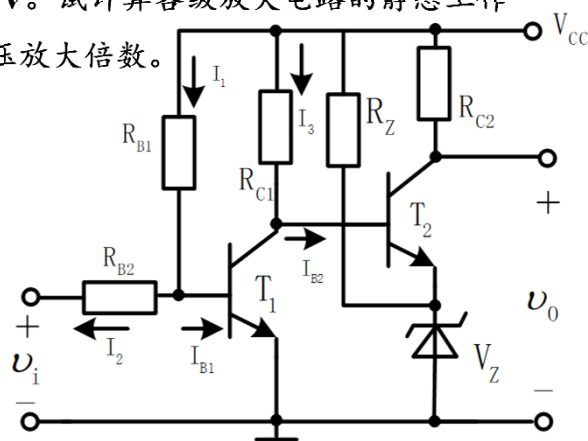
解: 对于第一级:

$$V_{B1}=V_{BE(on)}=0.7V$$

$$I_{B1}=I_1-I_2=\frac{V_{CC}-V_{B1}}{R_{B1}}-\frac{V_{B1}}{R_{B2}}=\frac{20-0.7}{120}-\frac{0.7}{5}=0.02mA$$

$$I_{C1}=\beta I_{B1}=50\times 0.02=1mA$$

$$V_{CE1}=V_{BE2}+V_Z=0.7+4=4.7V$$



3.3 多级放大器

3



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的性能分析

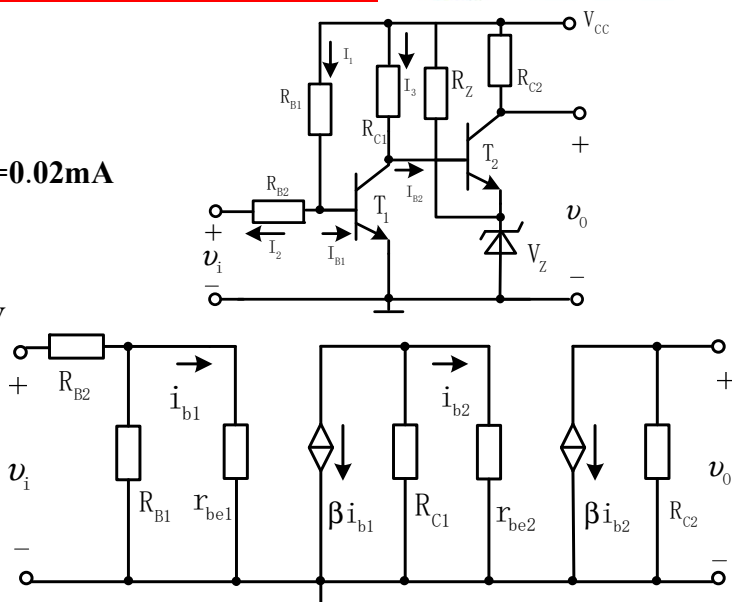
对于第二级：

$$I_{B2} = I_3 - I_{C1} = \frac{V_{CC} - V_{CE1}}{R_{C1}} - I_{C1} = \frac{20 - 4.7}{15} - 1 = 0.02 \text{ mA}$$

$$I_{C2} = \beta I_{B2} = 50 \times 0.02 = 1 \text{ mA}$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2} R_{C2} - V_Z = 20 - 1 \times 3 - 4 = 13 \text{ V}$$

稳压管的动态电阻很小，其等效电阻可以忽略，得到小信号等效图。



3.3 多级放大器

4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的性能分析

$$r_{be1} = r_{bb'} + \frac{V_T}{I_{B1}} = 200 + \frac{26}{0.02} = 1500 \Omega = 1.5 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be2} = r_{bb'} + \frac{V_T}{I_{B2}} = 200 + \frac{26}{0.02} = 1500 \Omega = 1.5 \text{ k}\Omega$$

$$A_{V1} = -\frac{\beta(R_{C1} \parallel r_{be2})}{R_{B2} + r_{be1}} = -50 \times \frac{15 \parallel 1.5}{5 + 1.5} \approx -10.5$$

对吗？

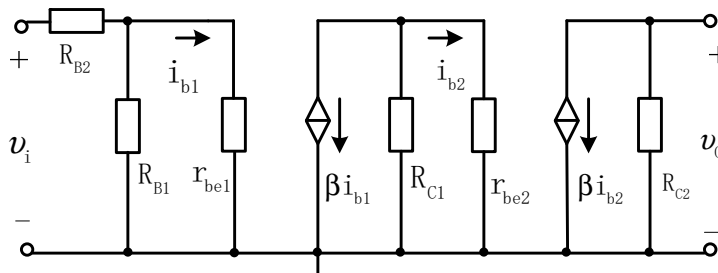
$$A_{V1} = -\frac{\beta(R_{C1} \parallel r_{be2})}{(1 - r_{be1}/R_{B1})R_{B2} + r_{be1}} \approx -10.59$$

$$A_{V2} = -\frac{\beta R_{C2}}{r_{be2}} = -50 \times \frac{3}{1.5} = -100$$

$$A_V = A_{V1} A_{V2} = (-10.5) \times (-100) = 1050$$

$$R_i = R_{B2} + R_{B1} \parallel r_{be1} = 5 + 120 \parallel 1.5 = 6.48 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_{C2} = 3 \text{ k}\Omega$$



3.3 多级放大器

➤ 多级放大器的性能分析

共X-共X两级阻容耦合放大电路如图所示。

已知电路中 $\beta_1=\beta_2=50$, $V_{BE}=0.7V$ 。

- (1) 求各级的静态工作点;
- (2) 求电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ;
- (3) 试分别计算 R_L 接在第一级输出端和第二级输出端时, 电路的电压放大倍数。

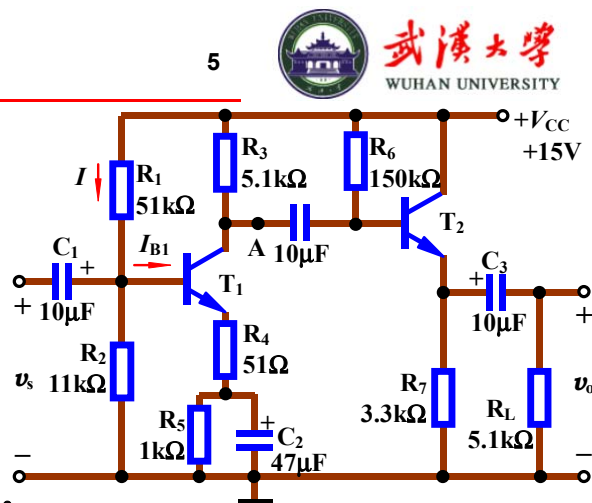
解: 电容开路, 所以各级静态工作点彼此独立。

第一级: $V_{B1} = \frac{V_{CC}R_2}{R_1 + R_2} \approx 2V$

$$I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{V_{B1} - V_{BE}}{R_4 + R_5} = 1.24mA$$

$$V_{CE1} \approx V_{CC} - I_{C1}(R_3 + R_4 + R_5) = 4.37V$$

$$I_{B1} = I_C / \beta = 24.8\mu A$$



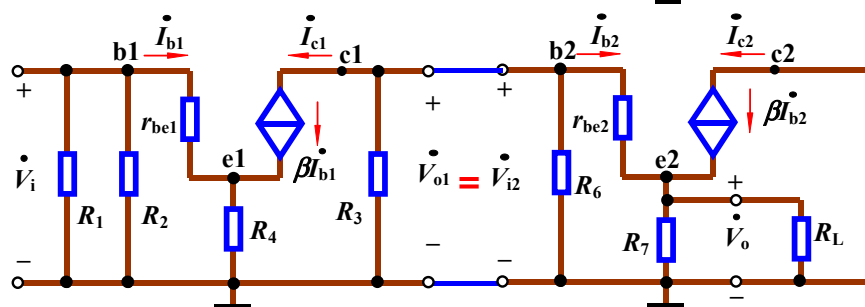
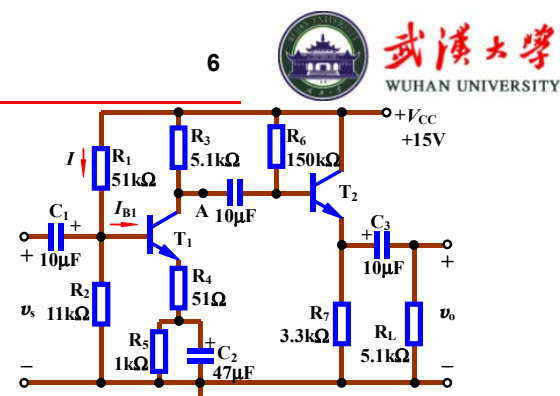
3.3 多级放大器

➤ 多级放大器的性能分析

第二级: $I_{B2} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_6 + (1 + \beta_2)R_7} = 0.035mA$

$$I_{C1} \approx I_{E2} \approx \beta I_{B2} = 1.75mA$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - I_{E2}R_7 = 6.23V$$



3.3 多级放大器

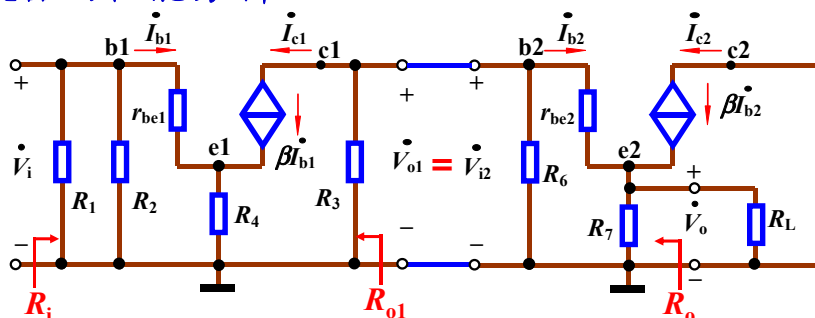
7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的性能分析

(2) 求 R_i 和 R_o ;



$$r_{be1} = 200\Omega + (1 + \beta_1) \frac{26(\text{mV})}{I_{E1}(\text{mA})} \approx 1.27\text{k}\Omega$$

$$R_i = R_{i1} = R_1 // R_2 // [r_{be1} + (1 + \beta_1)R_4] \approx 2.66\text{k}\Omega$$

$$r_{be2} = 200\Omega + (1 + \beta_2) \frac{26(\text{mV})}{I_{E2}(\text{mA})} \approx 0.96\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_{o2} = R_7 // \left[\frac{r_{be2} + (R_6 // R_3)}{1 + \beta_2} \right] = 0.11\text{k}\Omega$$

3.3 多级放大器

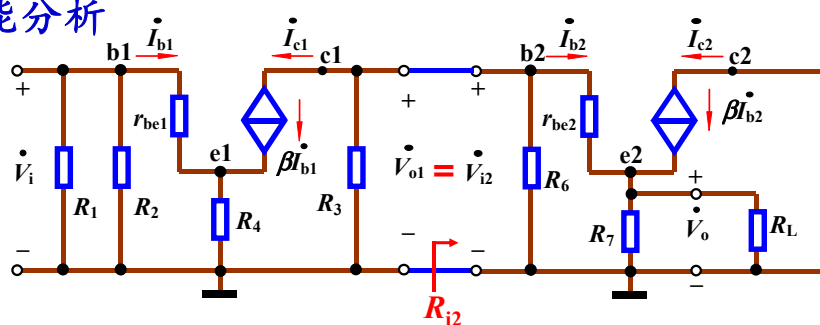
8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的性能分析

(3) R_L 接在第一级输出端和第二级输出端时，电路的电压放大倍数；



多级时：

$$R_{i2} = R_6 // [r_{be2} + (1 + \beta)(R_7 // R_L)]$$

$$A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_i} = \frac{-\beta(R_3 // R_{i2})}{r_{be1} + (1 + \beta)R_4}$$

$$A_{v2} = \frac{v_o}{v_{i2}} = \frac{(1 + \beta)(R_7 // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta)(R_7 // R_L)} = 0.99$$

$$A_v = A_{v1} \times A_{v2} = -60.82 \times 0.99 = -60.21 \quad \text{单级时:} \quad A_v = A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_i} = \frac{-\beta(R_3 // R_L)}{r_{be1} + (1 + \beta)R_4} = -32.95$$

增益下降
的原因？

3.3 多级放大器

9

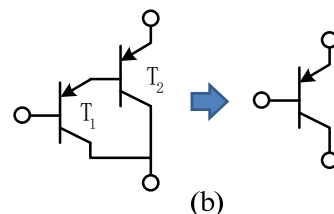
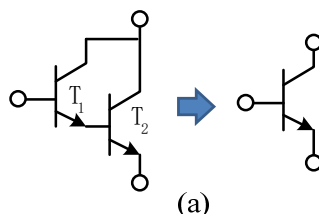


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

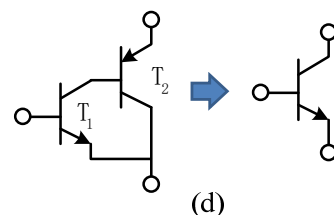
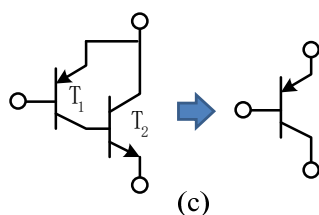
➤ 复合管以及组合放大器

1. 复合管（达林顿管）

A. 两个同类型的三极管组成复合管，其类型与原来相同。如（a）和（b）



B. 两个不同类型的三极管组成复合管，其类型与前级三极管相同。如（c）和（d）



3.3 多级放大器

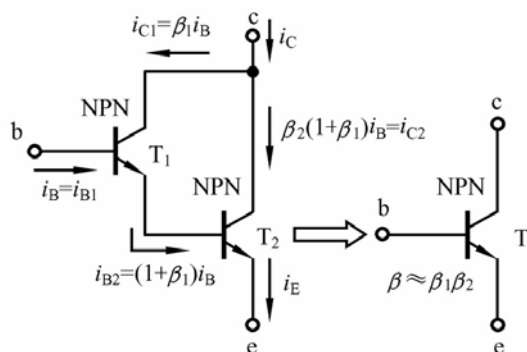
10



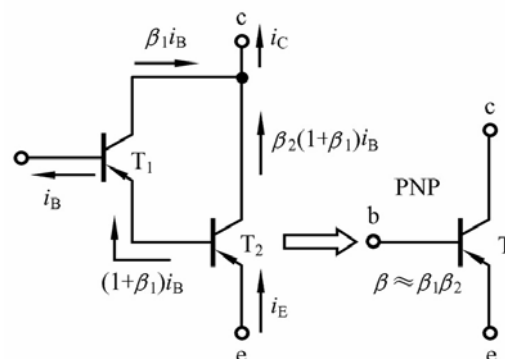
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 复合管以及组合放大器

1. 复合管（达林顿管）



两只NPN型BJT组成的复合管



两只PNP型BJT组成的复合管

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \quad r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}$$

3.3 多级放大器

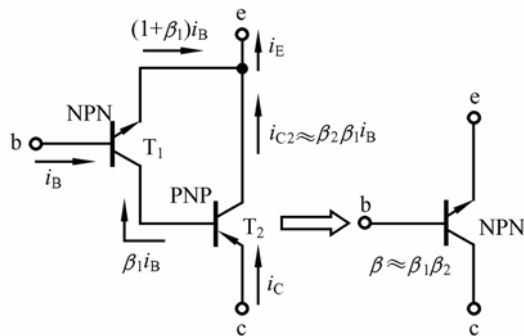
11



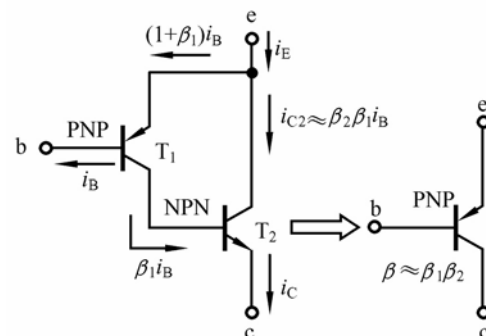
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 复合管以及组合放大器

1. 复合管（达林顿管）



NPN与PNP型BJT组成的复合管



PNP与NPN型BJT组成的复合管

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \quad r_{be} = r_{be1}$$

3.3 多级放大器

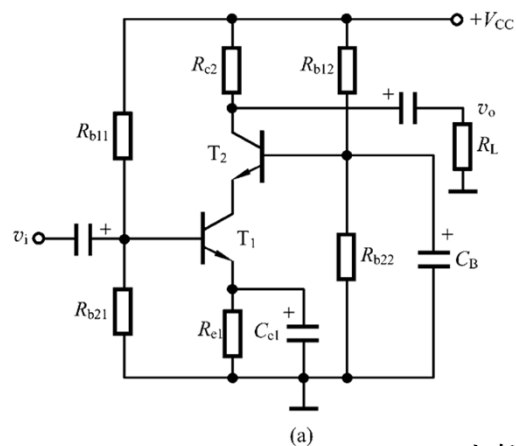
12



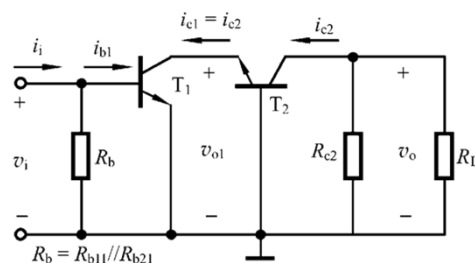
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 复合管以及组合放大器

2. 共射-共基组合放大器



共射—共基放大电路



(b)

3.3 多级放大器

13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 复合管以及组合放大器

2. 共射-共基组合放大器

电压增益

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_{o1}}{v_i} \cdot \frac{v_o}{v_{o1}} = A_{v1} \cdot A_{v2}$$

其中

$$A_{v1} = -\frac{\beta_1 R'_L}{r_{be1}} = -\frac{\beta_1 r_{be2}}{r_{be1}(1+\beta_2)} \quad A_{v2} = \frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}} = \frac{\beta_2 (R_{c2} \parallel R_L)}{r_{be2}}$$

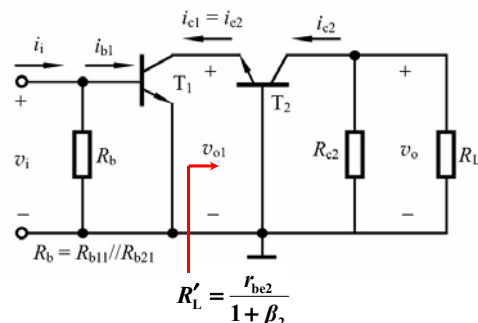
$$\text{所以} \quad A_v = -\frac{\beta_1 r_{be2}}{(1+\beta_2)r_{be1}} \cdot \frac{\beta_2 (R_{c2} \parallel R_L)}{r_{be2}}$$

$$\text{因为} \quad \beta_2 \gg 1$$

$$\text{因此} \quad A_v = -\frac{\beta_1 (R_{c2} \parallel R_L)}{r_{be1}}$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_b \parallel r_{be1} = R_{b11} \parallel R_{b21} \parallel r_{be1}$$

$$R_o \approx R_{c2}$$



与共射相比，参数没有变化，用途？

由于T1管以输入电阻小的共基电路为负载，使T1管集电结电容对输入回路的影响减小，从而使共射电路高频特性得到改善。

3.3 多级放大器

14



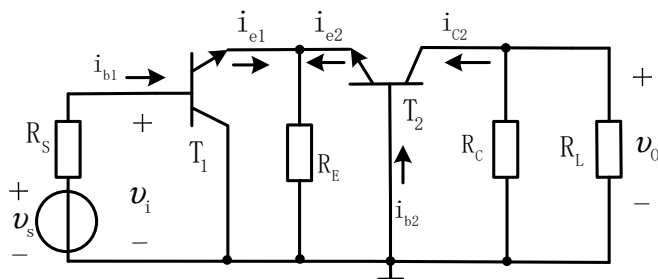
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 复合管以及组合放大器

3. 共集-共基组合放大器

A. 以T₁管组成的共集电路作为输入端，故输入电阻较大，将信号源的电压跟随输出，具有较大的电流放大能力；

B. 以T₂管组成的共基电路作为输出级，虽然没有电流放大能力，但具有较大的电压放大能力。



3.3 多级放大器

15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 复合管以及组合放大器

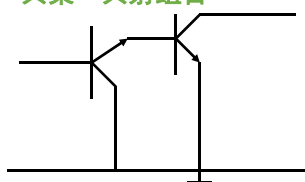
4. 总结

理想的电压放大器：输入电阻无穷大，输出电阻为0的放大器。 一共集放大器相似

理想的电流放大器：输入电阻为0，输出电阻为无穷大的放大器。 一共基放大器相似

共发射极放大器：既有电压增益又有电流增益，但其输入、输出电阻和理想的电压放大器和电流放大器相差较大，经组合可以获得理想放大器相似的性质。

● 共集—共射组合



电压放大倍数为第二极的放大器的放大倍数，但是输入电阻大大提高。

3.4 放大器的频率响应

16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应(复习)

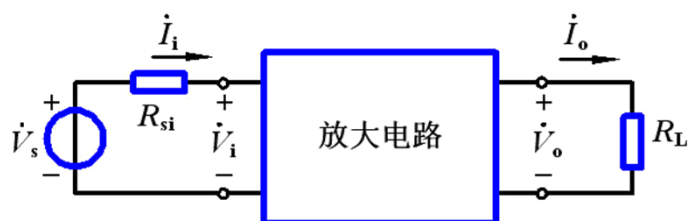
在输入正弦信号情况下，输出随输入信号频率连续变化的稳态响应，称为放大电路的频率响应。

电压增益可表示为

$$\dot{A}_v(j\omega) = \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)}$$

$$= \left| \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} \right| \angle [\varphi_o(\omega) - \varphi_i(\omega)]$$

或写为 $\dot{A}_v = A_v(\omega) \angle \varphi(\omega)$



其中

$$A_v(\omega) = \left| \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} \right| \text{ 称为幅频响应}$$

$$\angle \varphi(\omega) = \varphi_o(\omega) - \varphi_i(\omega) \text{ 称为相频响应}$$

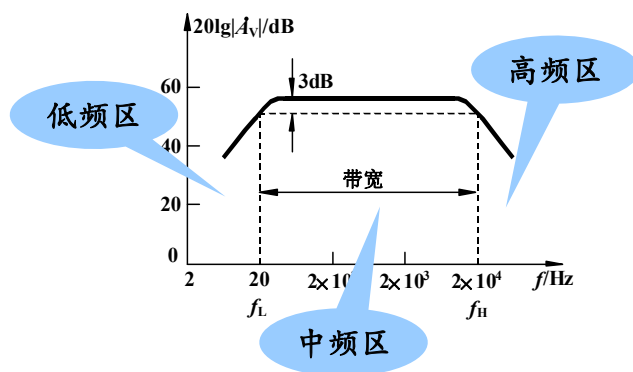
3.4 放大器的频率响应

17



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应(复习)



其中 f_H —— 上限频率

f_L —— 下限频率

$BW = f_H - f_L$ 称为带宽

当 $f_H \gg f_L$ 时, $BW \approx f_H$

普通音响系统放大电路的幅频响应

3.4 放大器的频率响应

18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应基础

放大电路对不同频率信号产生不同响应的原因

- 1、电抗元件的阻抗会随信号频率的变化而变化。
- 2、放大电路中有耦合电容、旁路电容和负载电容，三极管也存在PN结电容，此外实际电路中还有分布电容。

之前分析放大电路的性能指标时，是假设电路中所有耦合电容和旁路电容对输入信号频率来说都呈现非常小的阻抗而视为短路；（信号频率降低后会？）

三极管的极间电容、电路中的负载电容及分布电容对信号频率来说都呈现非常大的阻抗而视为开路。（信号频率提升后会？）

3.4 放大器的频率响应

19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应基础

频率响应的分析方法

- 1、正弦稳态响应是分析频率响应的基本方法
- 2、工程上常采用分段分析的简化方法。即分别分析放大电路的低频响应、中频（通频带）响应和高频响应，最后合成全频域响应。其中通频带内的响应与频率无关，就是之前放大电路性能指标的分析结果。
- 3、也可以用计算机辅助分析（如Spice、Multisim 等）的方法，获得放大电路精确的频率响应曲线。

3.4 放大器的频率响应

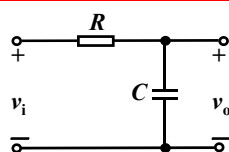
20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应基础

1.RC低通电路



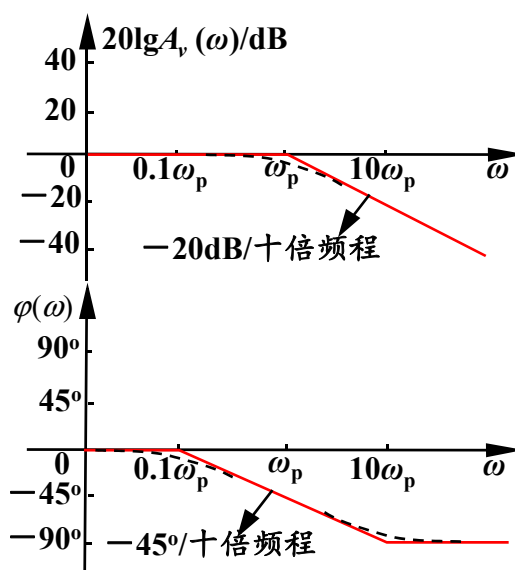
$$V_o(s) = \frac{1/sC}{R + 1/sC} V_i(s) = \frac{1}{1 + sRC} V_i(s)$$

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + sRC} = \frac{1}{1 + s\tau} \quad s = j\omega = j2\pi f$$

$$A_v(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau} = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_p} \quad \omega_p = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$$

$$\text{幅频特性 } |A_v(j\omega)| = 20\lg \left| \frac{1}{1 + j\omega/\omega_p} \right| = -20\lg \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2}$$

$$\text{相频特性 } \phi(\omega) = -\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)$$



3.4 放大器的频率响应

21



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应基础

2. RC高通电路

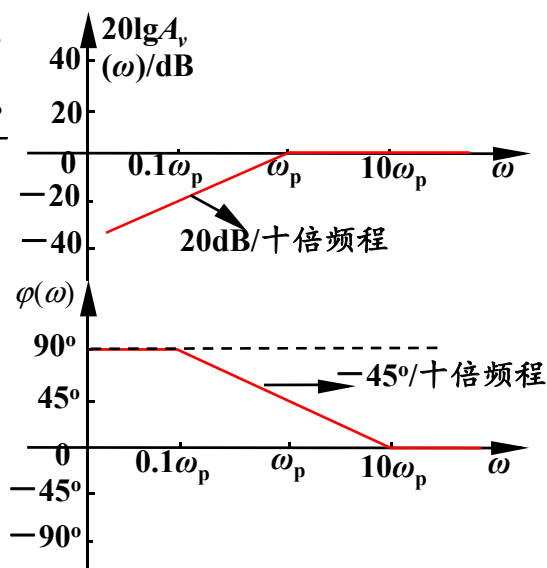
$$V_o(s) = \frac{R}{R + 1/sC} V_i(s) = \frac{sRC}{1 + sRC} V_i(s)$$

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{sRC}{1 + sRC} = \frac{s\tau}{1 + s\tau} \quad s = j\omega = j2\pi f$$

$$A_v(j\omega) = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} = \frac{j\omega/\omega_p}{1 + j\omega/\omega_p} \quad \omega_p = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$$

$$\text{幅频特性 } |A_v(j\omega)| = 20\lg \left| \frac{j\omega/\omega_p}{1 + j\omega/\omega_p} \right| = -20\lg \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2}$$

$$\text{相频特性 } \phi(\omega) = \arctan\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)$$



3.4 放大器的频率响应

22



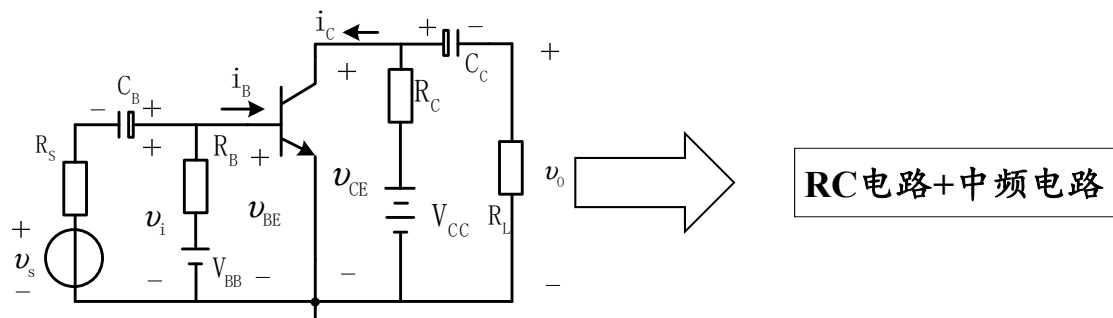
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应基础

为什么要学习RC低/高通电路？

1、频率响应的基础

2、将复杂的电路等效为RC低/高通电路，进而分析复杂电路的频率响应



3.4 放大器的频率响应

23



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

频率响应基础

3.波特图与响应函数

波特图

采用半对数坐标来描述幅频特性和相频特性

放大增益采用对数单位
频率采用对数表示

典型传递函数: $A(j\omega) = \frac{A_1 j\omega(j\omega + \omega_1)}{(j\omega + \omega_2)(j\omega + \omega_3)(j\omega + \omega_4)}$

有两个零点
和三个极点

$$A_v(j\omega) = \frac{j\omega\tau}{1+j\omega\tau} = \frac{j\omega/\omega_p}{1+j\omega/\omega_p}$$

为了绘制幅频特性、相频特性, 首先 将传递函数写成便于作图的形式

$$A(j\omega) = \frac{A_1 j\omega \left(1 + j\frac{\omega}{\omega_1}\right)}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_2}\right) \left(1 + j\frac{\omega}{\omega_3}\right) \left(1 + j\frac{\omega}{\omega_4}\right)}$$

$A = A_1 \omega_1 / (\omega_2 \omega_3 \omega_4)$

$$A_v(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega\tau} = \frac{1}{1+j\omega/\omega_p}$$

用dB表示: $20\lg|A(j\omega)| = 20\lg A + 20\lg|j\omega| + 20\lg\left|1 + j\frac{\omega}{\omega_1}\right| - 20\lg\left|1 + j\frac{\omega}{\omega_2}\right| - 20\lg\left|1 + j\frac{\omega}{\omega_3}\right| - 20\lg\left|1 + j\frac{\omega}{\omega_4}\right|$

3.4 放大器的频率响应

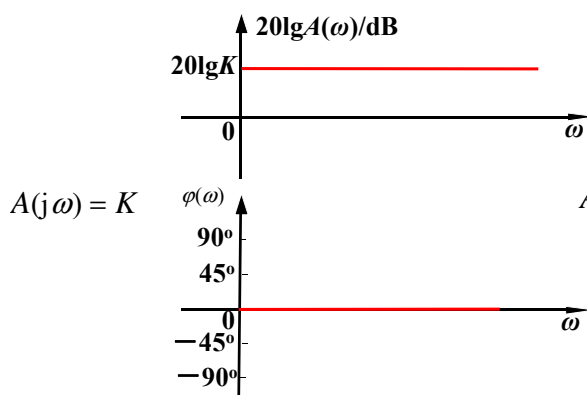
24



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

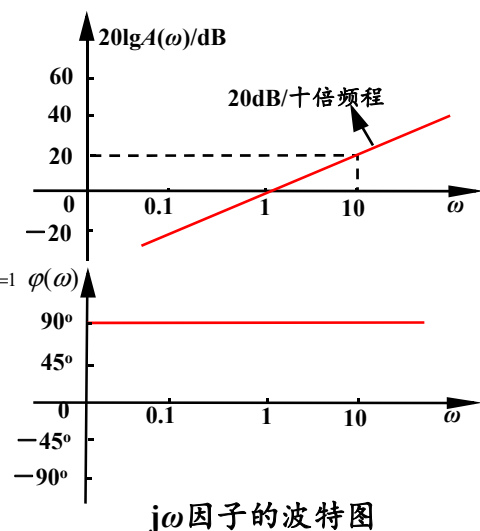
频率响应基础

3.波特图与响应函数



常数因子的波特图

$$A(j\omega) = j\frac{\omega}{\omega_0} \Big|_{\omega_0=1}$$



3.4 放大器的频率响应

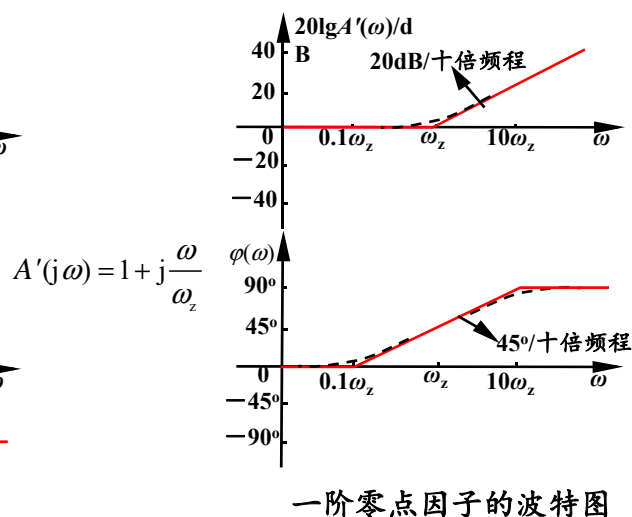
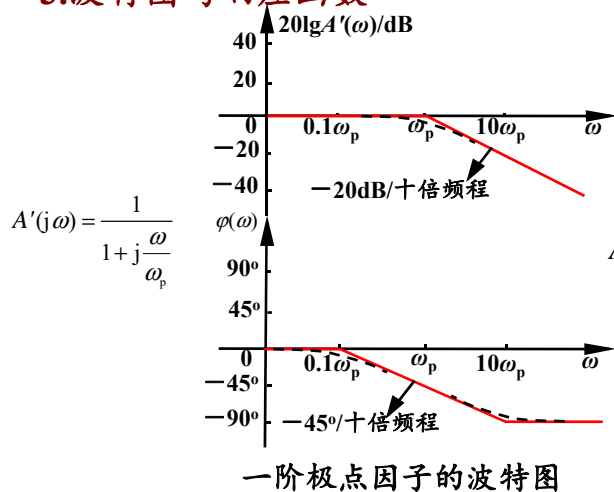
25



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

频率响应基础

3.波特图与响应函数



3.4 放大器的频率响应

26

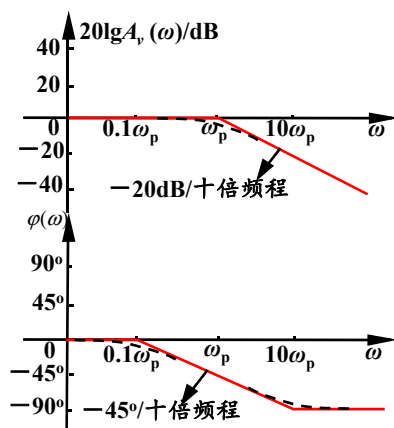


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

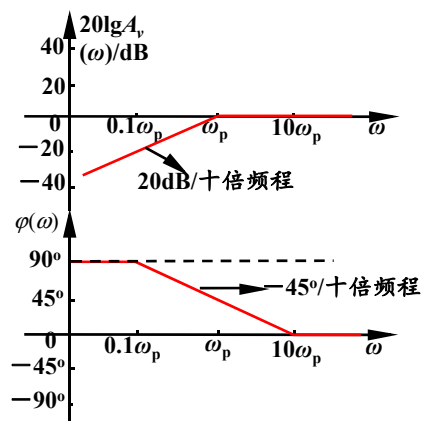
频率响应基础

如何根据响应函数画波特图

$$A_v(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau} = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_p}$$



$$A_v(j\omega) = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} = \frac{j\omega/\omega_p}{1 + j\omega/\omega_p}$$



3.4 放大器的频率响应

27



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应基础

3.波特图与响应函数

步骤总结：

1. 写出标准式，找常数项

2. 按照频率大小将零点与极点的影响累加起来

幅频特性：经过一个零点，斜率增加20dB/十倍频；

经过一个极点，斜率减小20dB/十倍频。

相频特性：常数和 $j\omega$ 因子相位不变

经过一个零点(0.1~10倍频)，斜率增加 45° /十倍频（0.1~10倍频范围内）；

经过一个极点(0.1~10倍频)，斜率减小 45° /十倍频（0.1~10倍频范围内）。

3.4 放大器的频率响应

28



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

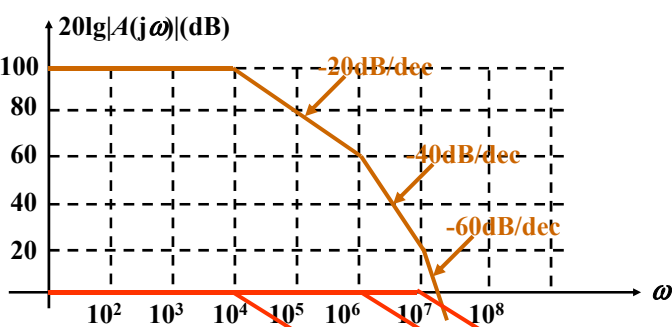
➤ 频率响应基础

3.波特图与响应函数

例1: $A(j\omega) = \frac{10^5}{(1 + j\frac{\omega}{10^4})(1 + j\frac{\omega}{10^6})(1 + j\frac{\omega}{10^7})}$

解：1. $A=10^5$ $20\lg A=20\lg 10^5=100\text{dB}$;

2. 存在三个极点 10^4 、 10^6 和 10^7 ，
分别画出三个极点的渐近线；



3.4 放大器的频率响应

29



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

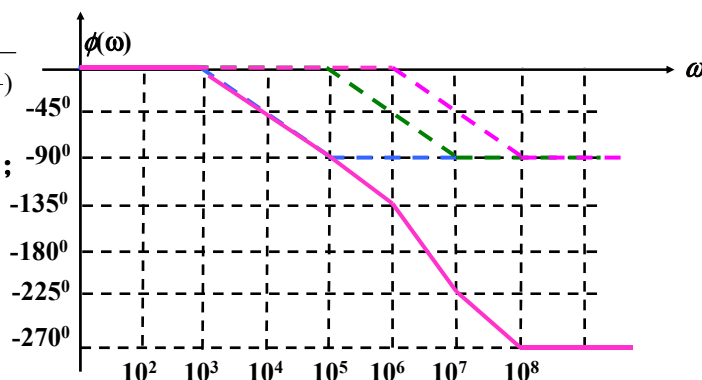
➤ 频率响应基础

3.波特图与响应函数

例1: $A(j\omega) = \frac{10^5}{(1 + j\frac{\omega}{10^4})(1 + j\frac{\omega}{10^6})(1 + j\frac{\omega}{10^7})}$

解: 1. $A=10^5$ $20\lg A = 20\lg 10^5 = 100\text{dB}$;

2. 存在三个极点 10^4 、 10^6 和 10^7 ,
分别画出三个极点的渐近线;



3.4 放大器的频率响应

30



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应基础

3.波特图与响应函数

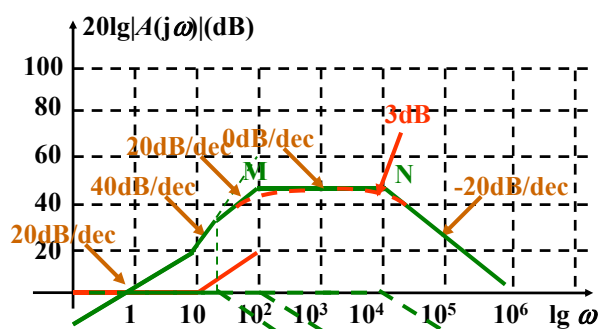
例2: $A(j\omega) = \frac{2 \times 10^6 j\omega(j\omega + 10)}{(j\omega + 20)(j\omega + 100)(j\omega + 10^4)}$

解: 1. 标准式:

$$A(j\omega) = \frac{j\omega(1 + j\frac{\omega}{10})}{(1 + j\frac{\omega}{20})(1 + j\frac{\omega}{100})(1 + j\frac{\omega}{10^4})}$$

常数项: $A=1$, $20\lg A = 0\text{ dB}$.

2. 存在两个零点0、10和三个极点20、100和 10^4 , 分别画出零、极点的渐近线。



放大器的低频截频—

由低频段最大的低频极点决定。 $\omega_l = 10^2$

放大器的高频截频—

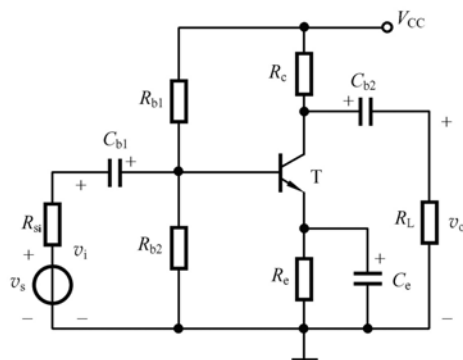
由高频段最小的高频极点决定。 $\omega_h = 10^4$

3.4 放大器的频率响应

三极管放大电路的低频响应

共射放大电路的低频响应

信号频率降低后耦合电容
和旁路电容不再视为短路



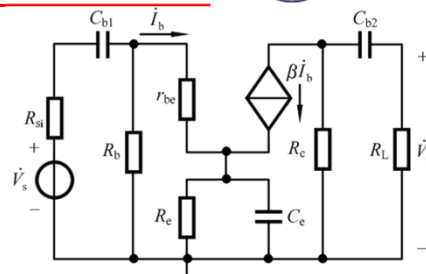
$$\frac{1}{\omega C_e} \ll R_e$$

$$R_b = (R_{b1} \parallel R_{b2}) \text{ 远大于 } R'_i$$

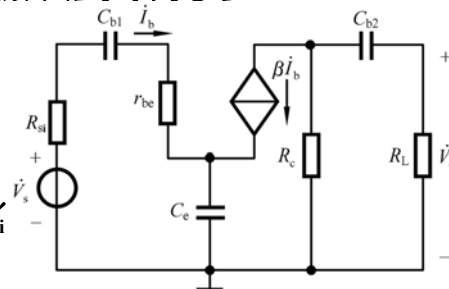
31



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



低频小信号等效电路



3.4 放大器的频率响应

三极管放大电路的低频响应

共射放大电路的低频响应

定性分析

输入回路

$$\omega \downarrow \rightarrow \frac{1}{\omega C_{b1}} \text{ 和 } \frac{1}{\omega C_e} \uparrow \rightarrow |i_b| \downarrow$$

输入回路构成的是RC高通电路

输出回路

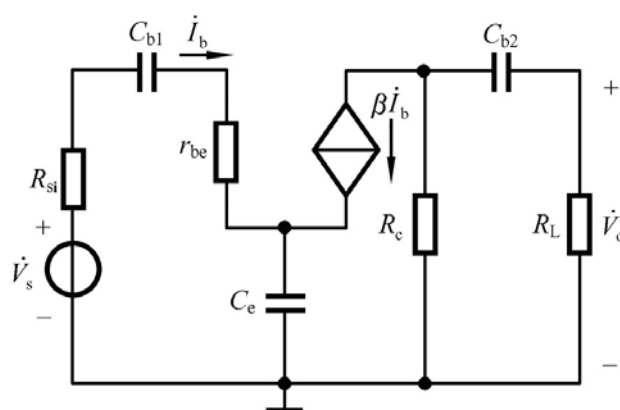
$$\omega \downarrow \rightarrow \frac{1}{\omega C_{b2}} \uparrow \rightarrow |\dot{V}_o| \downarrow$$

输出回路也是高通电路

32



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



3.4 放大器的频率响应

33



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的低频响应

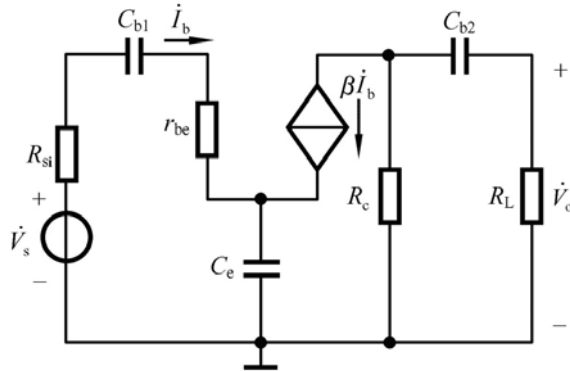
共射放大电路的低频响应

由电路可列出方程

$$\begin{cases} \dot{V}_o = -R_L \cdot \left(\frac{R_c}{R_c + R_L + \frac{1}{j\omega C_{b2}}} \cdot \beta \dot{I}_b \right) \\ \dot{I}_b \left(R_{si} + \frac{1}{j\omega C_{b1}} + r_{be} \right) + (1 + \beta) \dot{I}_b \cdot \frac{1}{j\omega C_e} = \dot{V}_s \end{cases}$$

由第2个方程得

$$\dot{I}_b = \frac{1}{R_{si} + r_{be} + \frac{1}{j\omega C_1}} \cdot \dot{V}_s$$



$$\text{其中 } C_1 = \frac{C_{b1}C_e}{(1 + \beta)C_{b1} + C_e}$$

与书本PP124一致!

3.4 放大器的频率响应

34



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的低频响应

共射放大电路的低频响应

$$\dot{A}_{vSL} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = -\beta \cdot \left(\frac{R_c R_L}{R_c + R_L + \frac{1}{j\omega C_{b2}}} \cdot \frac{1}{R_{si} + r_{be} + \frac{1}{j\omega C_1}} \right)$$

$$= -\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{r_{be}} \cdot \frac{r_{be}}{R_{si} + r_{be}} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega(R_c + R_L)C_{b2}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega(R_{si} + r_{be})C_1}} \right)$$

$$= -\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{r_{be}} \cdot \frac{r_{be}}{R_{si} + r_{be}} \cdot \left(\frac{j\omega(R_c + R_L)C_{b2}}{1 + j\omega(R_c + R_L)C_{b2}} \cdot \frac{j\omega(R_{si} + r_{be})C_1}{1 + j\omega(R_{si} + r_{be})C_1} \right)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_o &= -R_L \cdot \left(\frac{R_c}{R_c + R_L + \frac{1}{j\omega C_{b2}}} \cdot \beta \dot{I}_b \right) \\ \dot{I}_b &= \frac{1}{R_{si} + r_{be} + \frac{1}{j\omega C_1}} \cdot \dot{V}_s \end{aligned}$$

3.4 放大器的频率响应

35



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的低频响应

共射放大电路的低频响应

$$\dot{A}_{v_{SL}} = - \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{r_{be}} \cdot \frac{r_{be}}{R_{si} + r_{be}} \left(\frac{j\omega(R_c + R_L)C_{b2}}{1 + j\omega(R_c + R_L)C_{b2}} \cdot \frac{j\omega(R_{si} + r_{be})C_1}{1 + j\omega(R_{si} + r_{be})C_1} \right)$$

中频增益

RC高通

RC高通

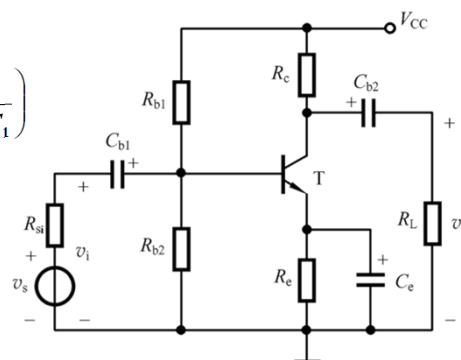
且 $\omega = 2\pi f$

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

$$C_1 = \frac{C_{b1}C_e}{(1 + \beta)C_{b1} + C_e}$$

由 C_{b1} 和 C_e 、 R_{si} 和 r_{be} 组成的RC高通电路

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C_{b2}}$$

由 C_{b2} 、 R_c 和 R_L 组成的RC高通电路

3.4 放大器的频率响应

36



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的低频响应

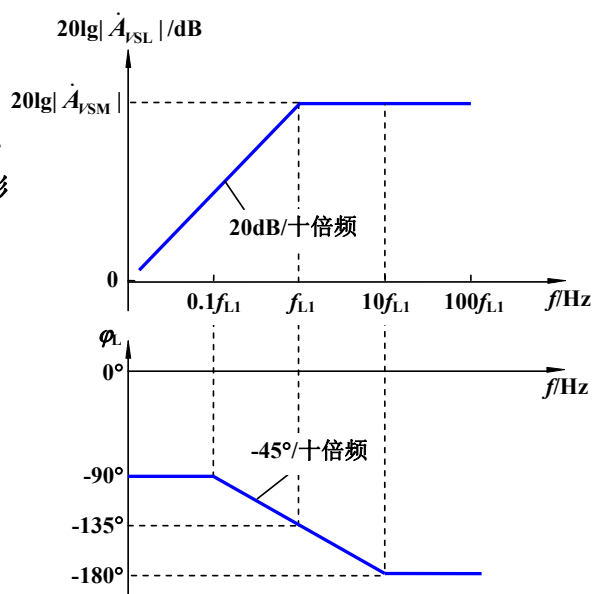
共射放大电路的低频响应

假设2个下限截止频率 f_{L1} 和 f_{L2} 之间相距较远 (4倍以上), 可以只考虑起主要作用的截止频率的影响。假设有 $f_{L1} > 4f_{L2}$, 则

$$20\lg|\dot{A}_{v_{SL}}| = 20\lg|\dot{A}_{v_{SM}}| + 20\lg\frac{1}{\sqrt{1 + (f_{L1}/f)^2}}$$

$$\dot{A}_{v_{SM}} = - \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{R_{si} + r_{be}}$$

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



3.4 放大器的频率响应

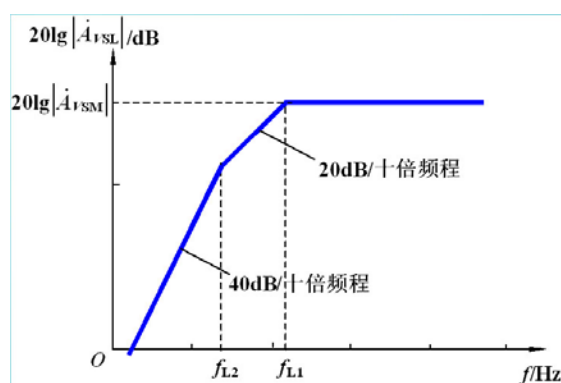
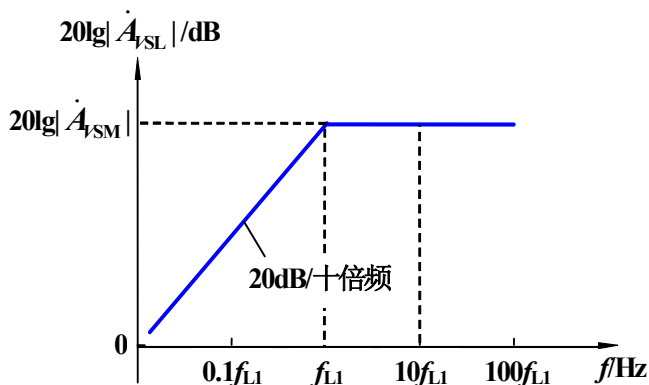
37



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 三极管放大电路的低频响应

共射放大电路的低频响应



3.4 放大器的频率响应

38



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 三极管放大电路的低频响应

总结

(1) 通过共射放大电路低频响应的分析看到，影响低频响应的主要因素是旁路电容和耦合电容。若想尽可能降低放大电路的下限截止频率，则尽量选用容量较大的旁路电容和耦合电容，其它组态的放大电路有类似的结论。

(2) 以上分析过程均假设电路满足一定条件，进行了简化处理，实际上通过EDA仿真可以得到更精确的分析结果。

(3) 通过选用大容量电容降低下限截止频率的效果通常是有限的，因此在信号频率很低的场合，可考虑采用直接耦合的放大电路。

3.4 放大器的频率响应

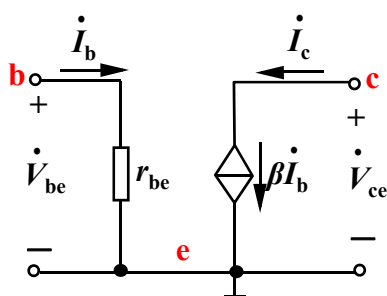
39



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

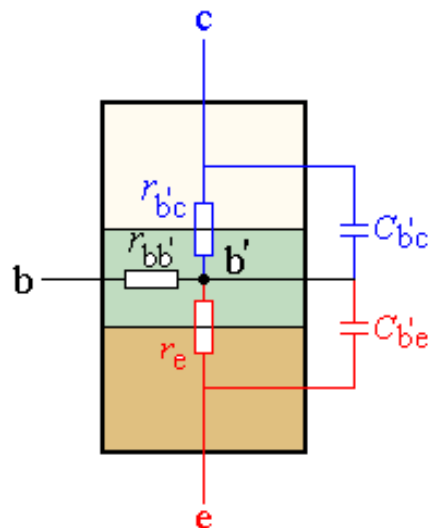
➤ 三极管放大电路的高频响应

1. 三极管高频小信号模型（混合π模型）



BJT的低频小信号模型

$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} \quad r_e = r_{b'e} = (1 + \beta_0) \frac{V_T}{I_E}$$



3.4 放大器的频率响应

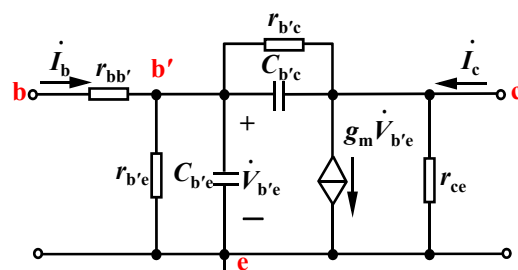
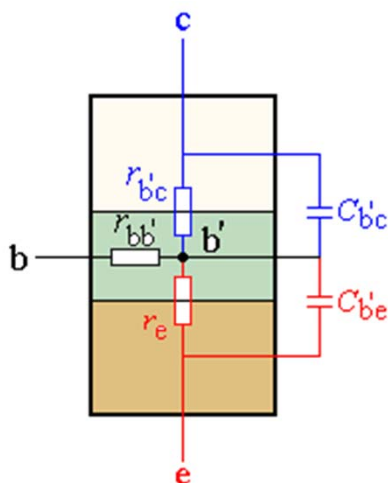
40



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 三极管放大电路的高频响应

1. 三极管高频小信号模型（混合π模型）



BJT的高频小信号模型

3.4 放大器的频率响应

41



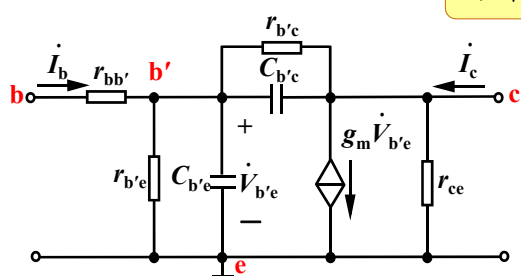
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的高频响应

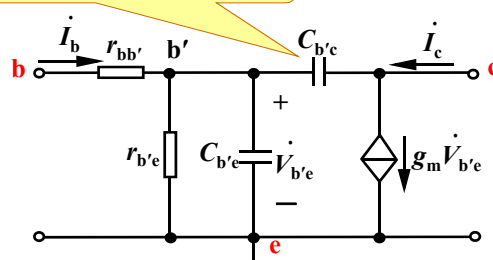
1. 三极管高频小信号模型（混合π模型）

$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{B'E}} \right|_{v_{CE}=C} \quad g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} \approx \frac{I_E}{V_T}$$

为什么不再用 β ? $C_{b'e}$ 怎么处理?



BJT的高频小信号模型



化简后的模型

3.4 放大器的频率响应

42



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的高频响应

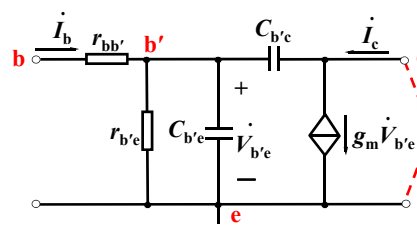
1. 三极管高频小信号模型（混合π模型）

$$\dot{\beta} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} \right|_{\dot{V}_{ce}=0} = \frac{g_m - j\omega C_{b'c}}{1/r_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})}$$

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

$$\dot{V}_{b'e} = \dot{I}_b \left[r_{b'e} \parallel \frac{1}{j\omega C_{b'e}} \parallel \frac{1}{j\omega C_{b'c}} \right]$$

$$\dot{\beta} \approx \frac{g_m r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_\beta}}$$



求 β 的等效电路

如何得知? 提示: 低频时.....

$$\beta_0 = g_m r_{b'e} \quad \omega_\beta = \frac{1}{r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})}$$

3.4 放大器的频率响应

43



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 三极管放大电路的高频响应

1. 三极管高频小信号模型（混合π模型）

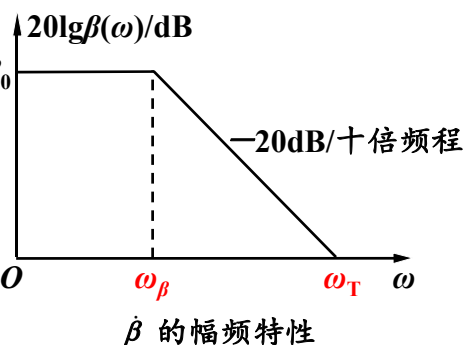
$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_\beta}}, \quad \beta_0 = g_m r_{b'e}, \quad \omega_\beta = \frac{1}{r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})}$$

$$\beta \text{ 的截止频率 } f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})}$$

$$\beta(\omega_T) = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_T}{\omega_\beta}\right)^2}} = 1 \quad \omega_T \approx \beta_0 \omega_\beta \quad \omega_T = \frac{g_m}{C_{b'e} + C_{b'c}} \approx \frac{g_m}{C_{b'e}}$$

已知 f_T 求 $C_{b'e}, C_{b'c}$

$$\beta \text{ 的特征频率 } f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{b'e} + C_{b'c})} \approx \frac{g_m}{2\pi C_{b'e}} \quad \text{当 } f = f_T \text{ 时, BJT 失去了电流放大能力。}$$



3.4 放大器的频率响应

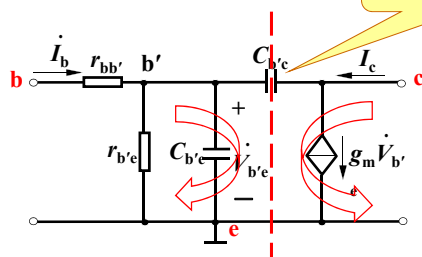
44



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 三极管放大电路的高频响应

2. 密勒定理



不利于电路分析

- (1) 输入回路与输出回路之间有电容 $C_{b'c}$, 不利于电路分析与求解
- (2) 密勒定理可以将跨接元件时等效为分别并联在输入和输出端的两个元件

3.4 放大器的频率响应

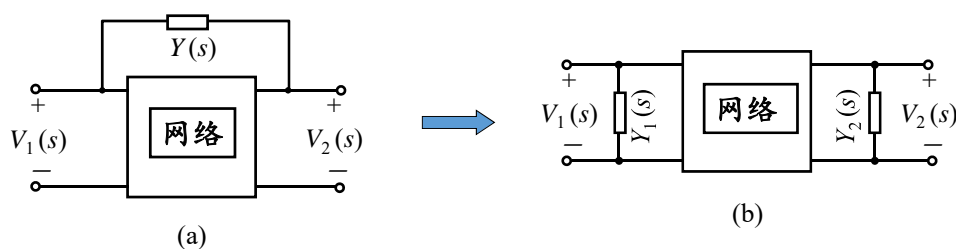
45



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 三极管放大电路的高频响应

2. 密勒定理



$$Y(s) [V_1(s) - V_2(s)] = Y(s)V_1(s) [1 - A(s)] = Y_1(s)V_1(s) \quad Y_1(s) = \frac{1}{Z_1(s)} = Y(s) [1 - A(s)]$$

$$A(s) = V_2(s)/V_1(s)$$

$$Y(s) [V_2(s) - V_1(s)] = Y(s)V_2(s) [1 - 1/A(s)] = Y_2(s)V_2(s) \quad Y_2(s) = \frac{1}{Z_2(s)} = Y(s) [1 - \frac{1}{A(s)}]$$

3.4 放大器的频率响应

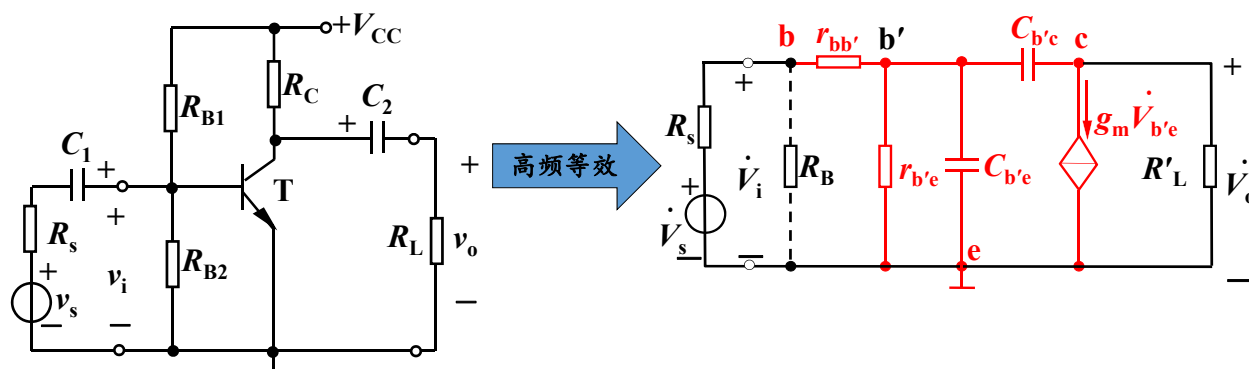
46



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 三极管放大电路的高频响应

3. 共射放大电路的高频响应



3.4 放大器的频率响应

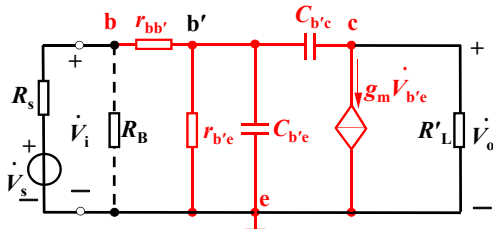
47



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

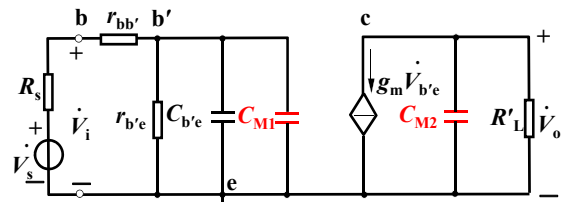
三极管放大电路的高频响应

3.共射放大电路的高频响应



密勒近似

这个是什么电路？

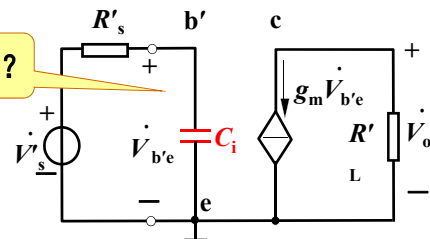


$$C_{M1} = (1 - A_v) C_{b'e} = (1 + g_m R'_L) C_{b'e}$$

$$C_{M2} = \left(1 - \frac{1}{A_v(s)}\right) C_{b'e} = \left(1 + \frac{1}{g_m R'_L}\right) C_{b'e} \approx C_{b'e}$$

$$C_i = C_{b'e} + C_{M1} = C_{b'e} \left(1 + \frac{C_{b'e}}{C_{b'e}} g_m R'_L\right) = DC_{b'e}$$

$$\dot{V}'_s = \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \dot{V}_s \quad R'_s = r_{b'e} // (R_s + r_{bb'})$$



3.4 放大器的频率响应

48



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的高频响应

3.共射放大电路的高频响应

$$\dot{A}_{vs} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{b'e}} \cdot \frac{\dot{V}_{b'e}}{\dot{V}'_s} \cdot \frac{\dot{V}'_s}{\dot{V}_s} = -g_m R'_L \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}}$$

$$\omega_H = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{R'_s C_i} = \frac{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}{r_{b'e} (R_s + r_{bb'}) (C_{b'e} + C_{M1})}$$

$$= \frac{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}{r_{b'e} (R_s + r_{bb'}) DC_{b'e}}$$

中频增益

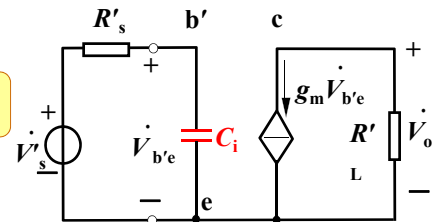
RC低通

$$\dot{A}_{vs} = -g_m R'_L \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}} = \frac{\beta_0 R'_L}{r_{be}} \frac{r_{be}}{R_s + r_{be}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}}$$

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

$$\dot{V}'_s = \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \dot{V}_s \quad R'_s = r_{b'e} // (R_s + r_{bb'})$$

$$C_i = C_{b'e} + C_{M1} = C_{b'e} \left(1 + \frac{C_{b'e}}{C_{b'e}} g_m R'_L\right) = DC_{b'e}$$



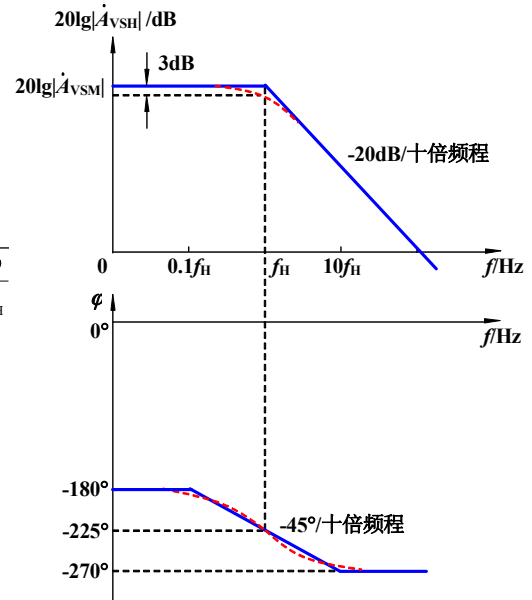
3.4 放大器的频率响应

➤ 三极管放大电路的高频响应

3.共射放大电路的高频响应

$$\dot{A}_{vs} = -g_m R'_L \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}} = -\frac{\beta_0 R'_L}{r_{be}} \frac{r_{be}}{R_s + r_{be}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}}$$

$$\omega_H = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{R'_s C_i} = \frac{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}{r_{b'e}(R_s + r_{bb'})(C_{b'e} + C_{M1})}$$



3.4 放大器的频率响应

➤ 三极管放大电路的高频响应

3.共射放大电路的高频响应

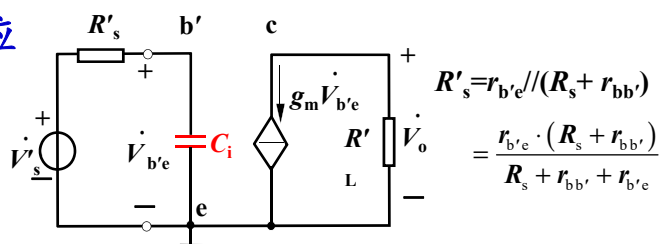
——增益-带宽积

$$|\dot{A}_{vs0} \cdot f_H| = g_m R'_L \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \cdot \frac{1}{2\pi R'_s C_i}$$

$$= g_m R'_L \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \cdot \frac{1}{2\pi [(R_s + r_{bb'})/r_{b'e}][C_{b'e} + (1 + g_m R'_L)C_{b'e}]}$$

$$= \frac{g_m R'_L}{2\pi (R_s + r_{bb'})(C_{b'e} + C_{b'e} g_m R'_L)}$$

$$= \frac{g_m R'_L}{2\pi (R_s + r_{bb'}) C_{b'e} g_m R'_L} = \frac{1}{2\pi (R_s + r_{bb'}) C_{b'e}}$$



$$R'_s = r_{b'e} // (R_s + r_{bb'}) = \frac{r_{b'e} \cdot (R_s + r_{bb'})}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}$$

BJT 一旦确定, 带宽增益积基本为常数

如何提高带宽? R_s ?

3.4 放大器的频率响应

51



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的高频响应

3.共射放大电路的高频响应

设共射放大电路在室温下运行，其参数为： $R_s = 1\text{k}\Omega$ ， $R_c = 5\text{k}\Omega$ 。

$r_{bb'} = 100\Omega$ ， $I_C = 1\text{mA}$ ， $\beta_0 = 100$ ， $f_T = 400\text{MHz}$ ， $C_{b'e} = 0.5\text{pF}$ ，
负载开路， R_b 足够大忽略不计。试计算它的低频电压增益和上限频率。

解：模型参数为

$$g_m = \frac{I_E}{V_T} = \frac{1\text{mA}}{26\text{mV}} = 0.038\text{ S} \quad r_{b'e} = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{100}{0.038\text{ S}} = 2.6\text{ k}\Omega$$

$$C_{b'e} = \frac{g_m}{2\pi f_T} = 14.8\text{ pF} \quad C_{M1} = (1 + g_m R_c) C_{b'e} = 96.7\text{ pF}$$

低频电压增益为

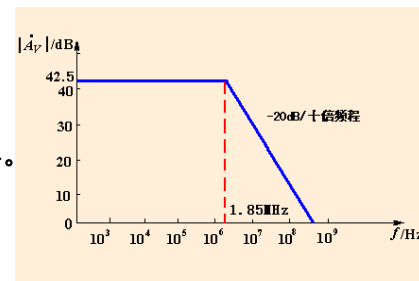
$$\text{又因为 } R = (R_s + r_{bb'}) \parallel r_{b'e} = 0.77\text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_{VSM} = -g_m R_c \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} = -133.51$$

$$C = C_{b'e} + C_{M1} = 111.5\text{ pF}$$

$$20\lg|\dot{A}_{VSM}| = 20\lg|-133.51| = 42.5\text{ dB}$$

$$\text{所以上限频率为 } f_H = \frac{1}{2\pi RC} = 1.85\text{ MHz}$$



3.4 放大器的频率响应

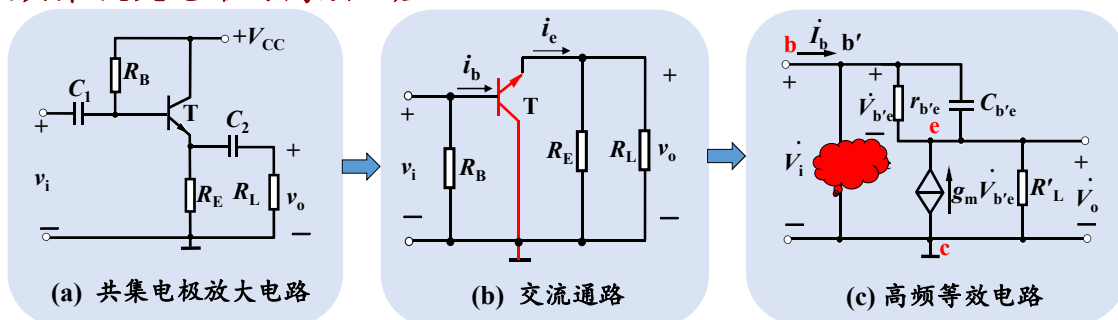
52



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三极管放大电路的高频响应

3.共集放大电路的高频响应



$C_{b'e}$ 会产生密勒效应，但是应为电路的增益小于等于1，所以密勒电容很小。

上限频率远高于同等工作条件下的共射放大电路。

3.4 放大器的频率响应

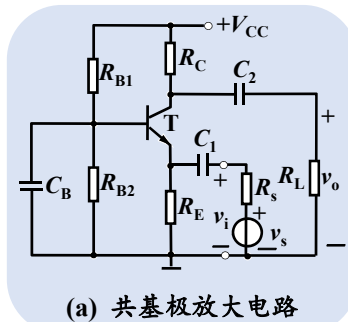
53



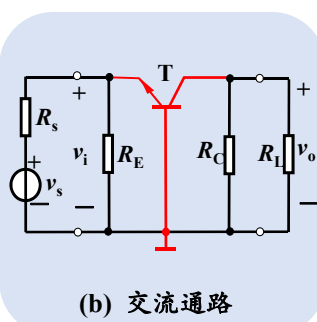
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 三极管放大电路的高频响应

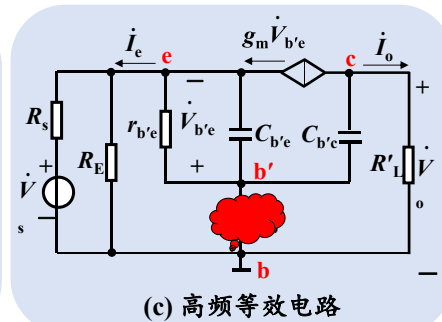
3. 共基放大电路的高频响应



(a) 共基极放大电路



(b) 交流通路



(c) 高频等效电路

共基放大电路无跨接在输入输出之间的电容，所以无密勒电容效应，上限频率高于共射放大电路。

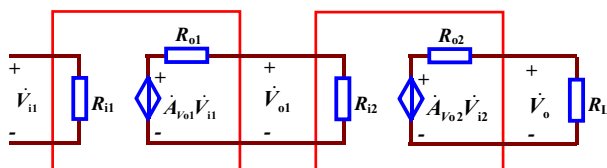
3.4 放大器的频率响应

54



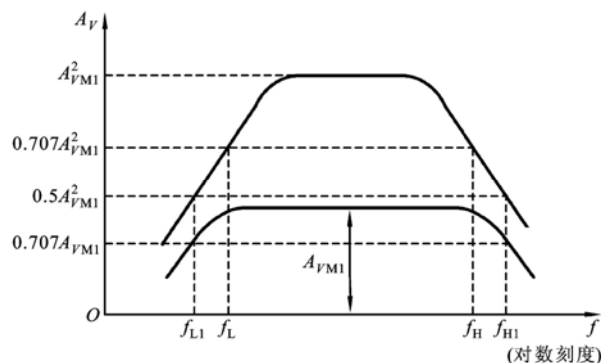
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大电路的频率响应



$$\begin{aligned}\dot{A}_v(j\omega) &= \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} = \frac{\dot{V}_{o1}(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} \cdot \frac{\dot{V}_{o2}(j\omega)}{\dot{V}_{o1}(j\omega)} \cdots \frac{\dot{V}_{on}(j\omega)}{\dot{V}_{o(n-1)}(j\omega)} \\ &= \dot{A}_{v1}(j\omega) \cdot \dot{A}_{v2}(j\omega) \cdots \dot{A}_{vn}(j\omega)\end{aligned}$$

- 前级的开路电压是下级的信号源电压
- 前级的输出阻抗是下级的信号源阻抗
- 下级的输入阻抗是前级的负载



多级放大电路的通频带比构成它的任何一级都窄。

第3章 三极管与其放大电路

55



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

知识点掌握要求

- 掌握三极管的工作原理、特性曲线、静态工作点与非线性失真的关系
- 熟练掌握放大电路静态工作点的合理设置和估算
- 熟练掌握用小信号模型分析法求解放大电路的动态指标（包括多级放大器）
- 熟练掌握三极管放大电路三种组态的结构及性能的特点
- 了解复合管及组合放大器
- 了解放大电路的频率响应的基本概念
- 熟练掌握RC低通高通电路的频率响应（波特图、响应函数）
- 熟练掌握波特图与响应函数的转化
- 掌握共射放大电路的低频响应指标求解
- 掌握高频三极管高频小信号模型（混合 π 模型）及共射级放大电路高频指标求解

课后作业

56



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

- 3. 7
- 3. 12
- 3. 13
- 3. 24
- 4. 2
- 4. 9
- 4. 11
- 4. 14
- 4. 21
- 4. 26 ($\beta = 60$ $R_L = \infty$)