



§ 3.6 多级放大电路

郭圆月

2022年10月25日





§ 3.6 多级放大电路

1. 级间耦合方式

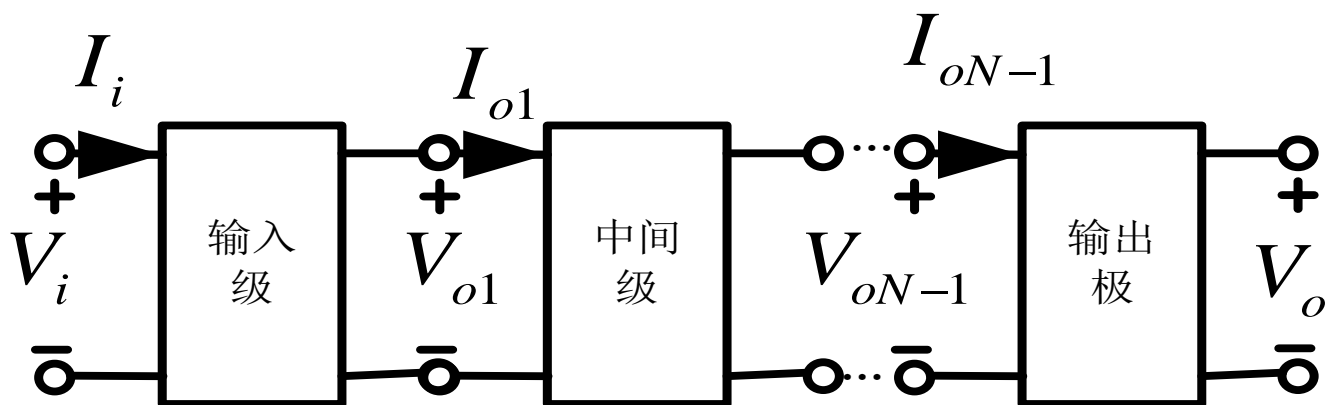
2. 多级放大器的中频增益和阻抗

3. 多级放大器的带宽收缩特性





1. 多级放大器分析



■ **输入级：**完成放大器与信号源的**阻抗匹配**；

➤ 电压信号源→较高的 R_i ； 电流信号源→较低 R_i ；

■ **输出级：**带负载能力强，一定的电压、电流的输出幅度；

➤ 电压输出→较低的 R_o ； 电流输出→较高的 R_o ；

■ **中间级：**实现电压增益、信号处理、频率补偿等功能。





1. 多级放大电路的耦合方式

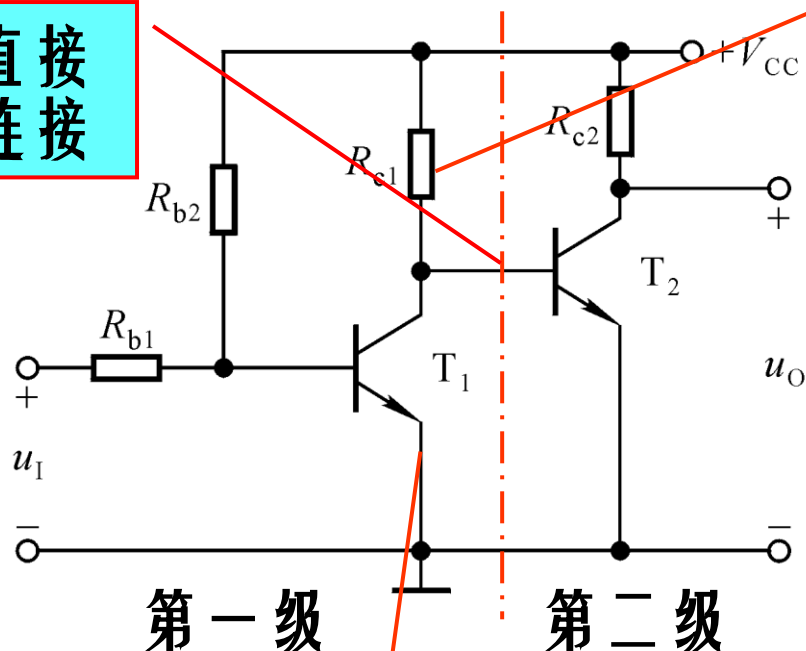
- 一. 直接耦合
- 二. 电容耦合
- 三. 变压器耦合





一、直接耦合

直接
连接



Q_1 合适吗?

既是第一级的集电极电阻，
又是第二级的基极电阻

低频特性好：能够放大变化缓慢的信号，便于集成化， Q 点相互影响，存在**零点漂移**现象。

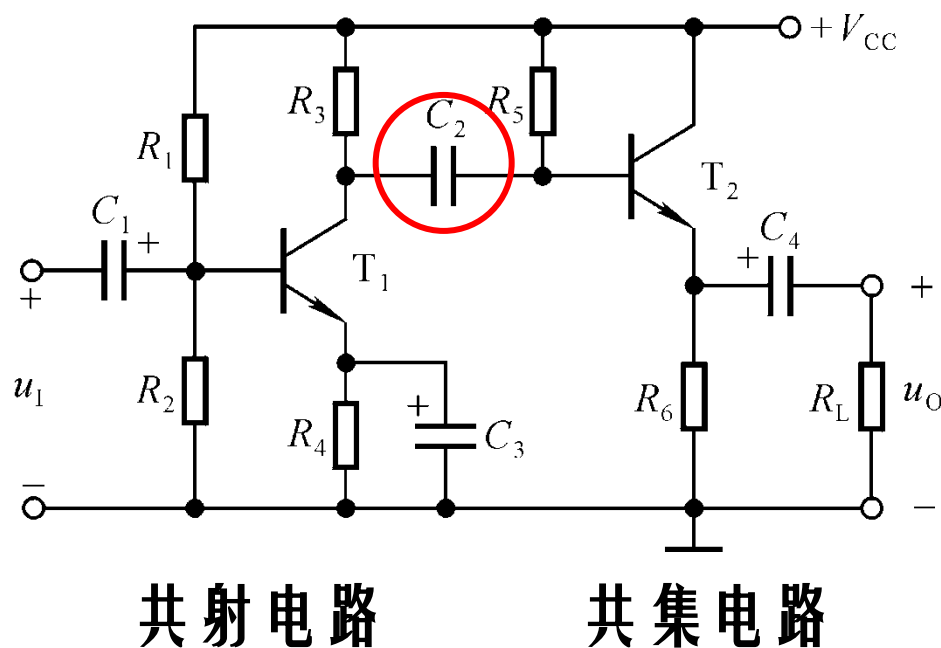
输入为零，输出产生变化的现象称为**零点漂移**

当输入信号为零时，前级由温度变化所引起的电流、电位的变化会逐级放大。





二、阻容耦合



利用电容连接信号源
与放大电路、放大电路
的前后级、放大电路与
负载，为阻容耦合。

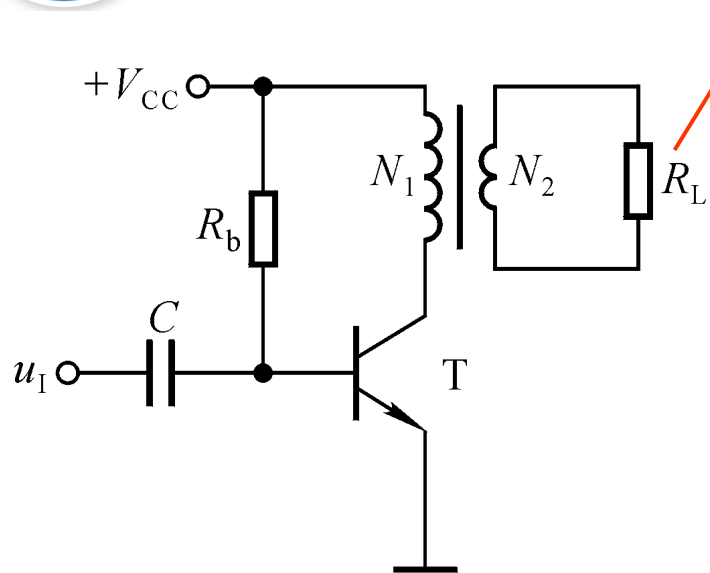
有零点漂移吗？

隔离直流，Q点相互独立。不能放大变化缓慢的信号，低频特性差，不能集成化。



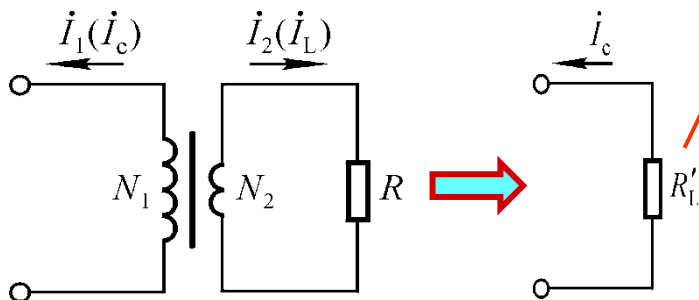


三、变压器耦合



静态时，集电极电阻 R_C 为零，减小了直流损耗；
交流时，阻抗变换增大了管子的动态范围；

可能是实际的负载，也可能是下级放大电路，各级Q点可以独立设置。



从变压器原边看到的等效电阻

$$P_1 = P_2, I_c^2 R_L' = I_L^2 R_L$$

$$R_L' = \frac{I_L^2}{I_c^2} \cdot R_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_L$$

实现了阻抗变换功能

缺点：高频性能电感性阻抗，工艺复杂重量等不宜集成；



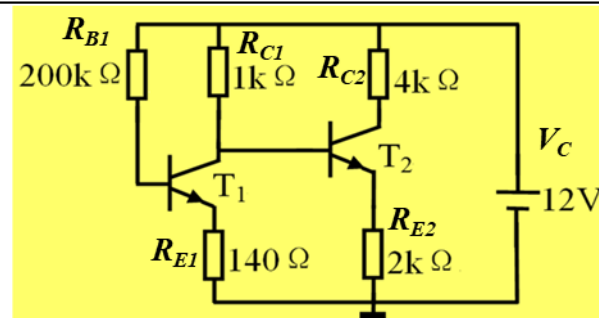


典型题解-多级放大电路静态估算

例：电路如图所示，已知三极管的 $\beta = 100$

$V_{BE} = 0.7V$ ，饱和时 $V_{BC} = 0.4V$

求静态工作时， T_1 、 T_2 管的 I_{C1} I_{C2} V_{CE1} V_{CE2}



解：假设BJT均工作于线性区， $\beta=100 \gg 1$ ，一般忽略二级 I_B 的影响，则：

$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_{B1} + (1 + \beta)R_{E1}} = \frac{12 - 0.7}{200 + 0.14 \times 101} = 0.053mA$$

$$I_{E1} \approx I_{C1} = \beta I_{B1} = 5.3mA$$

$$V_{CE1} \approx V_{CC} - I_{C1} \cdot R_{C1} - I_{E1} \cdot R_{E1} = 5.96(V)$$

$$V_{C1} \approx V_{CC} - I_{C1} \cdot R_{C1} = 12 - 5.3 = 6.7(V)$$

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{C1} - V_{BE2}}{R_{E2}} = \frac{6.7 - 0.7}{2} = 3mA$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2} \cdot R_{C2} - I_{E2} \cdot R_{E2} = -6(V)$$

所以 T_1 工作于线性区， T_2 工作于饱和区，此时基极电流 I_{B2} 一般不忽略其影响。

$$V_{B2} = V_{CC} - (I_{C1} + I_{B2}) \cdot R_{C1} = 6.7 - I_{B2}$$

$$I_{E2} = \frac{V_{B2} - V_{BE2}}{R_{E2}} = \frac{6 - I_{B2}}{2} (mA) \quad I_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{B2} - V_{CB}}{R_{C2}} = \frac{5.7 + I_{B2}}{4} (mA)$$

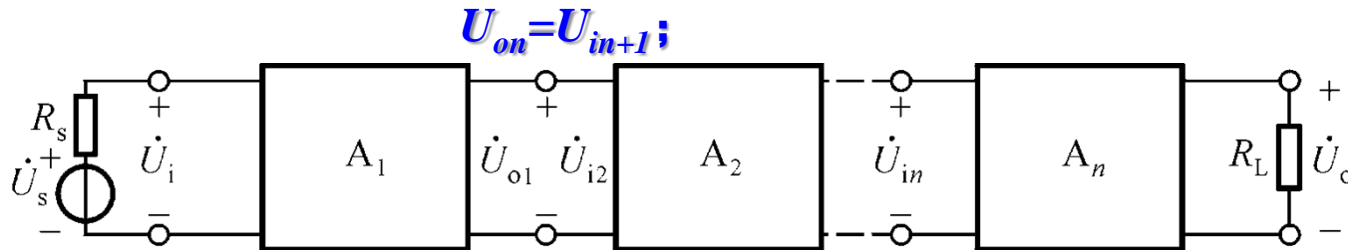
$$\text{而 } I_{B2} + I_{C2} = I_{E2}, \text{ 得到 } I_{B2} = 0.9(mA) \quad I_{C2} = \frac{5.7 + 0.9}{4} = 1.65(mA) \quad I_{E2} = \frac{6 - 0.9}{2} = 2.55(mA)$$

$$I_{C1} = 5.3mA, \quad V_{CE1} = V_{CC} - (I_{C1} + I_{B2}) \cdot R_{C1} - I_{E1} \cdot R_{E1} = 5(V) \quad V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2} \cdot R_{C2} - I_{E2} \cdot R_{E2} = 0.3(V)$$



2. 多级放大器的中频增益和阻抗

1. 中频电压增益（考虑负载效应）



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{in}} = \prod_{j=1}^n \dot{A}_{uj}$$

$$A_{us} = A_u \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

2. 输入电阻

$$R_i = R_{i1}$$

3. 输出电阻

$$R_o = R_{on}$$

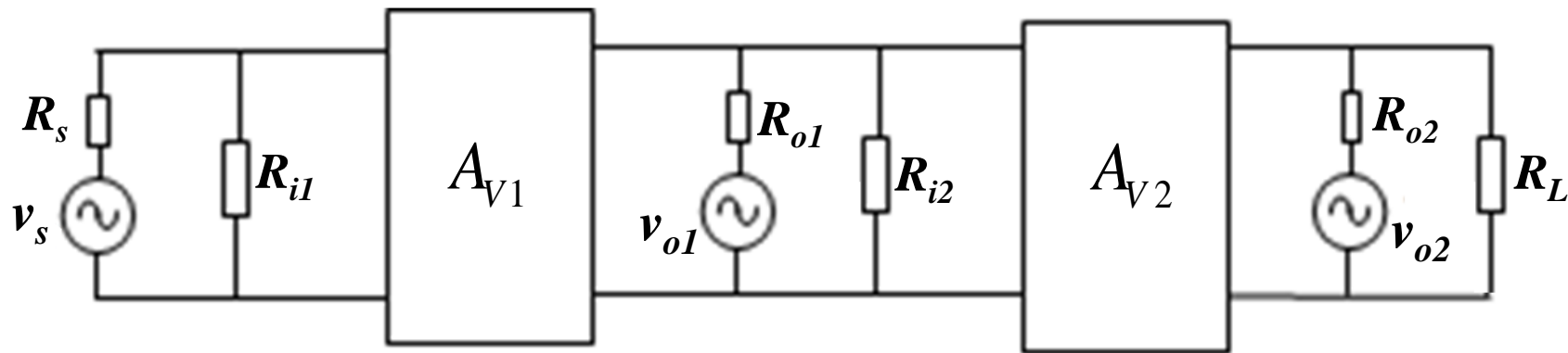
对电压放大电路的要求： R_i 大， R_o 小， A_u 的数值大，最大不失真输出电压大。





2. 级间影响和级间匹配

■ 下一级输入阻抗：前级负载；前级输出阻抗：下一级信号源内阻。



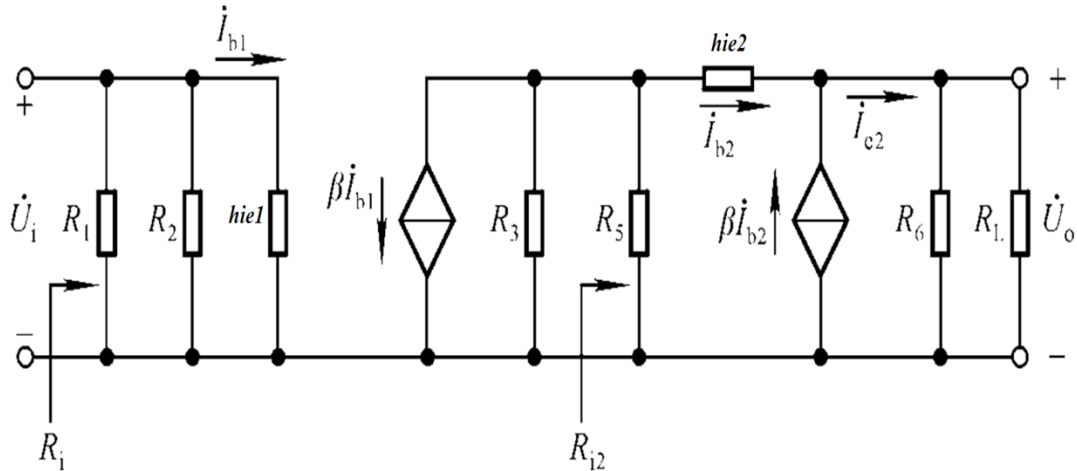
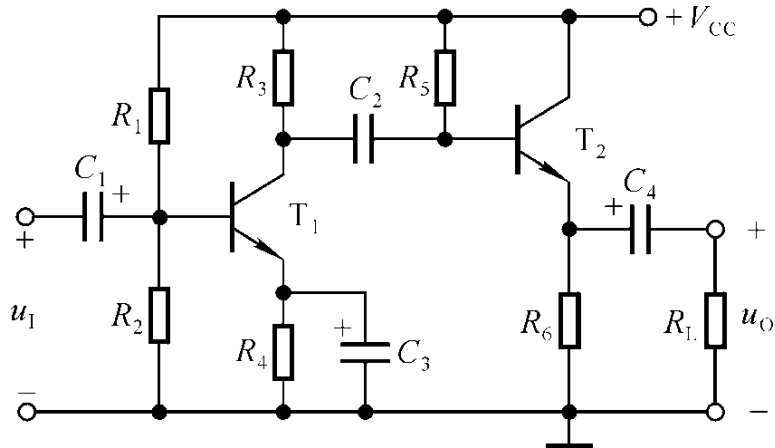
例放大器由两级组成，每级的空载电压增益 $A_v=100$ ， $R_i=5\text{k}\Omega$ ， $R_o=10\text{k}\Omega$ ，整个放大器接的信号源内阻 R_s 为 $1\text{k}\Omega$ ，负载 R_L 为 $10\text{k}\Omega$ ，求总的源电压增益 A_{V_s} 。

$$\longrightarrow A_{V_s} = \underbrace{\frac{5}{5+1}}_{\text{阻抗匹配}} \cdot (-100) \cdot \underbrace{\frac{5}{5+10}}_{\text{阻抗匹配}} \cdot (-100) \cdot \underbrace{\frac{10}{10+10}}_{\text{阻抗匹配}}$$





2. 典型分析举例



$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta(R_3 \parallel R_{i2})}{h_{ie1}}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{(1+\beta_2)(R_6 \parallel R_L)}{h_{ie2} + (1+\beta_2)(R_6 \parallel R_L)}$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2}$$

$$R_{i2} = R_5 \parallel [h_{ie2} + (1+\beta_2)(R_6 \parallel R_L)]$$

$$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{ie1}$$

$$R_o = R_6 \parallel \frac{R_3 \parallel R_5 + h_{ie2}}{1+\beta}$$





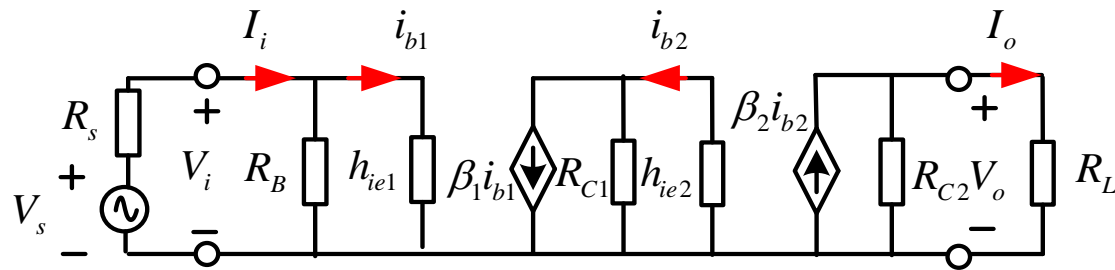
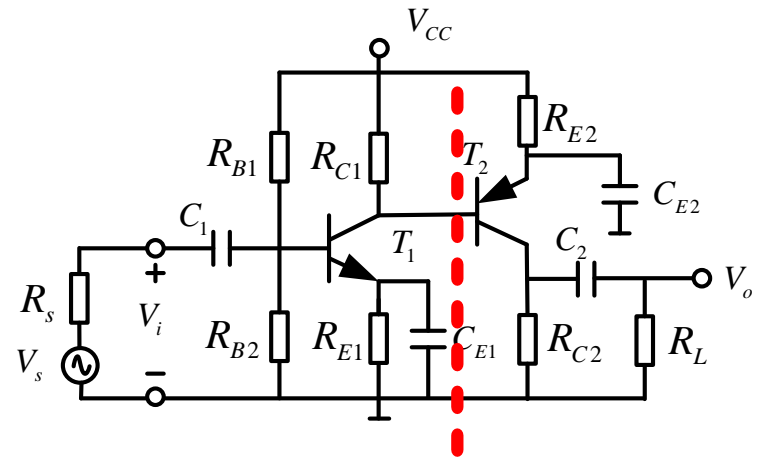
例. 多级放大器中频分析

■ 例：已知两管参数 β_1, h_{ie1} , β_2, h_{ie2} , 求中频电压增益及输入阻抗、输出阻抗

$$A_{V1} = -\frac{\beta_1 (R_{C1} \parallel R_{i2})}{h_{ie1}}$$

$$A_{V2} = -\frac{\beta_2 (R_{C2} \parallel R_L)}{h_{ie2}}$$

$$R_{i2} = h_{ie2}$$



$$\Rightarrow A_V = A_{V1} A_{V2} = \frac{\beta_1 (R_{C1} \parallel h_{ie2})}{h_{ie1}} \frac{\beta_2 (R_{C2} \parallel R_L)}{h_{ie2}} \Rightarrow \begin{cases} R_i = R_{i1} = h_{ie1} \parallel R_B \\ R_o = R_{o2} = R_{C2} \end{cases}$$

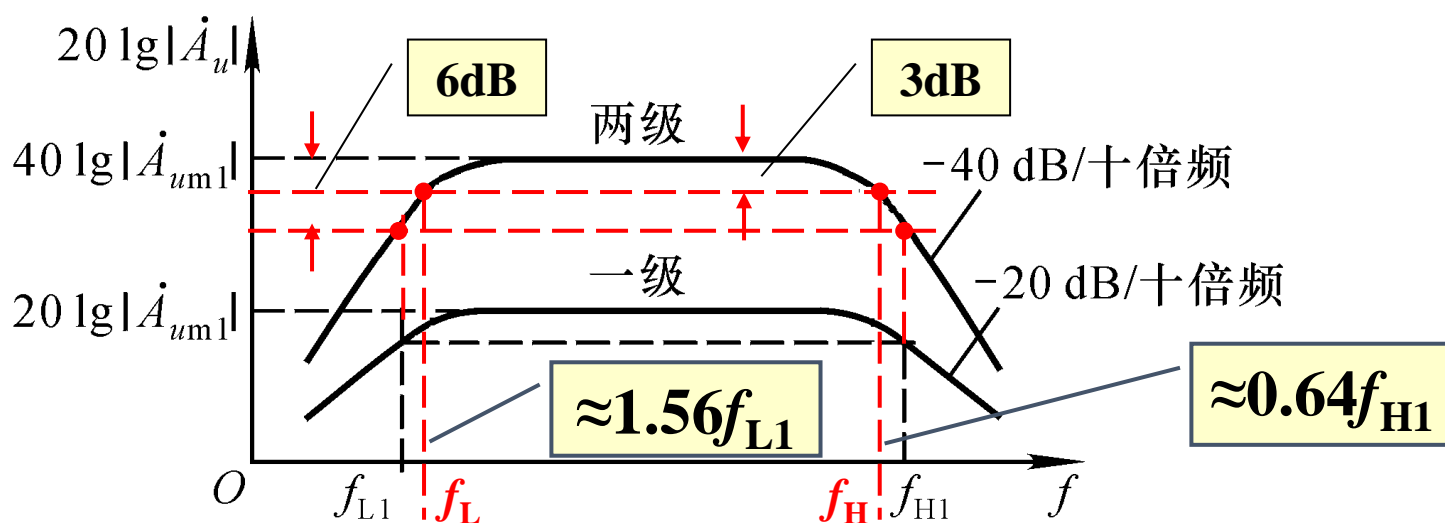




3. 多级放大电路的**频率响应**

1. 讨论：一个两级放大电路每一级（已考虑了它们的相互影响）的幅频特性均如图所示。

$$20\lg|\dot{A}_u| = 20\lg|\dot{A}_{u1}| + 20\lg|\dot{A}_{u2}| = 40\lg|\dot{A}_{u1}|$$



→ $f_L > f_{L1}$, $f_H < f_{H1}$, **频带变窄!** → $B = f_H - f_L$





3. 多级级联3dB上截止频率 ω_h

■ 思路：将每级放大器看作有一个主极点的低通系统；

$$\rightarrow A_i(s) = \frac{A_{0i}}{1 + \frac{s}{p_i}} \rightarrow A(s) = \frac{A_{01}A_{02} \cdots A_{0n}}{\left(1 + \frac{s}{p_1}\right)\left(1 + \frac{s}{p_2}\right) \cdots \left(1 + \frac{s}{p_n}\right)}$$

$$\rightarrow A(j\omega) = \frac{A_0}{\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_{h1}}\right)\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_{h2}}\right) \cdots \left(1 + \frac{j\omega}{\omega_{hn}}\right)} \rightarrow |A(j\omega_h)| = \frac{A_0}{\sqrt{2}}$$

$$\rightarrow \left[1 + \left(\frac{\omega_h}{\omega_{h1}}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{\omega_h}{\omega_{h2}}\right)^2\right] \cdots \left[1 + \left(\frac{\omega_h}{\omega_{hn}}\right)^2\right] = 2$$

$$\rightarrow 1 + \left(\frac{\omega_h^2}{\omega_{h1}^2} + \frac{\omega_h^2}{\omega_{h2}^2} \cdots + \frac{\omega_h^2}{\omega_{hn}^2}\right) + \left(\frac{\omega_h^4}{\omega_{h1}^2 \omega_{h2}^2} + \cdots\right) + \cdots = 2$$

$$\rightarrow \omega_h = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\omega_{h1}^2} + \frac{1}{\omega_{h2}^2} \cdots + \frac{1}{\omega_{hn}^2}}} < \omega_{hi}$$

$\omega_h < \omega_{hi}$

先求各单级主极点，

近似求总 ω_h

精确的解 ω_h 会更小





3. ω_h : 特殊情况1: 各极点均相同

$$\omega_{hi} = \omega_{h0}, |A(j\omega)| = \left| \frac{A_0}{\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_{h0}}\right)^n} \right| = \frac{A_0}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{h0}}\right)^2} \right)^n} = \frac{A_0}{\sqrt{2}}$$

$$\Rightarrow \omega_h = \omega_{h0} \sqrt{2^{1/n} - 1}$$

带宽收缩因子: $S_n = \sqrt{2^{1/n} - 1}$

$$\omega_h = \omega_{h0} S_n, (S_n < 1)$$

$$S_n = \begin{cases} 1.00, & n = 1 \\ 0.64, & n = 2 \\ 0.51, & n = 3 \\ 0.44, & n = 4 \end{cases}$$

➤ 级数越多，多级放大器的3dB带宽收缩越严重；





3. ω_h : 情况2: 存在一个总主极点

当 $|p_j|$ 值比其他极点值小5倍以上:

$$\omega_{h1} \ll \omega_{hi}, \quad i = 2, 3, \dots, n,$$

$$\rightarrow \omega_h = \omega_{h1}$$

多级放大器的3dB带宽等于各级中的最小带宽，亦表现为收缩现象





例题

$$(1) A(S) = \frac{A(0)}{(1 + \frac{S}{10^2})(1 + \frac{S}{10^3})(1 + \frac{S}{10^4})} \Rightarrow$$

低通函数，主极点，
故 $\omega_h = 100 \text{rad/s}$

$$(2) A(S) = \frac{A(0)}{(1 + \frac{S}{50})^3} \Rightarrow$$

$$\omega_h = S_3 \quad \omega_{hi} = 0.51 * 50 = 25.5 \text{rad/s}$$

$$(3) A(S) = \frac{A(0)}{(1 + \frac{S}{10} + \frac{S^2}{100})(1 + \frac{S}{10^3})}$$

$$\Rightarrow \left| 1 + \frac{j\omega}{10} - \frac{\omega^2}{100} \right| = \sqrt{2} \Rightarrow \begin{matrix} \omega_{h1} = 12.7 \text{rad/s} \\ \omega_{h2} = 1000 \text{rad/s} \end{matrix}$$

$$\Rightarrow \omega_h = 12.7 \text{rad/s}$$





3. 多级放大3dB下截止频率 ω_l

➤ **思路**：将各级看作单主极点高通系统

$$A_i(s) = \frac{A_{0i}}{1 + \frac{p_i}{s}}, \quad A(s) = \frac{A_{01} A_{02} \cdots A_{0n}}{\left(1 + \frac{p_1}{s}\right) \left(1 + \frac{p_2}{s}\right) \cdots \left(1 + \frac{p_n}{s}\right)}$$

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{\left(1 + \frac{\omega_{l1}}{j\omega}\right) \left(1 + \frac{\omega_{l2}}{j\omega}\right) \cdots \left(1 + \frac{\omega_{ln}}{j\omega}\right)}$$

同样

$$\rightarrow \omega_l = \sqrt{\omega_{l1}^2 + \omega_{l2}^2 + \cdots + \omega_{ln}^2}$$

1) 各级有相同 ω_{li}

$$\omega_l = \omega_{l0} / S_n \quad 1/S_n = \begin{cases} 1.00, & n=1 \\ 1.56, & n=2 \\ 1.96, & n=3 \\ 2.32, & n=4 \end{cases}$$

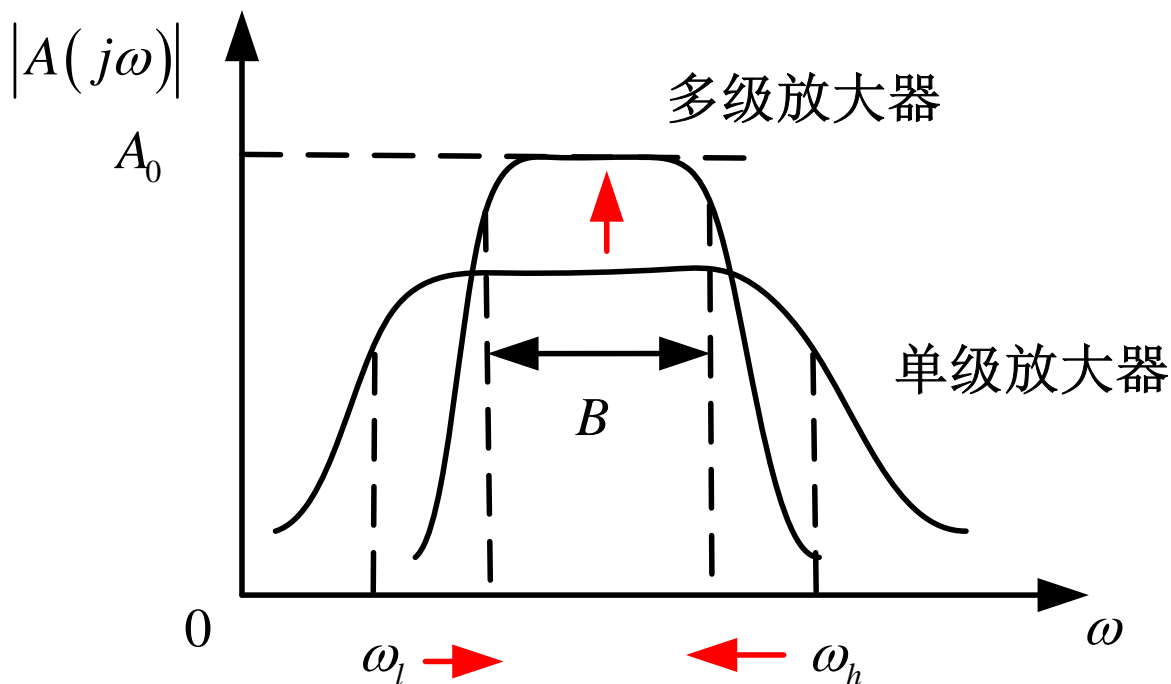
2) 有主极点

$$\omega_{l1} \gg \omega_{li}, i = 2, 3, \cdots, n,$$

$$\omega_l = \omega_{l1}$$



3. 多级放大器的带宽收缩特性



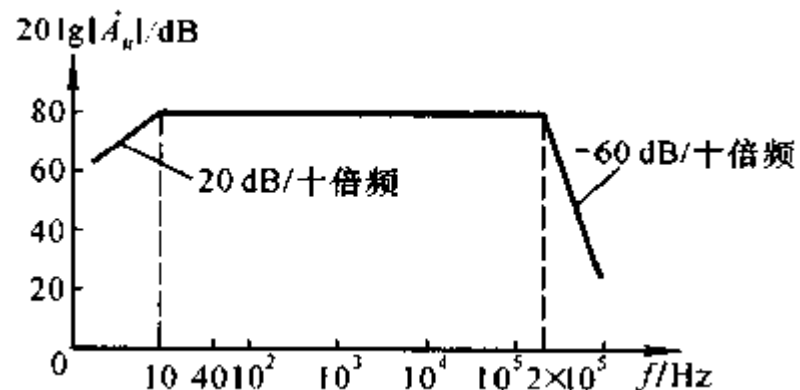
结论：多级放大器的 ω_l 变大， ω_h 变小，整个**带宽收缩**；增益**提高**。增益和带宽的矛盾在多级放大器中更加突出。





例题

■ 已知某电路的各级均为共射放大电路，其幅频特性如图所示。试求解上、下限截止频率 f_L 、 f_H ，以及全频段电压放大倍数 A_v 。



解:(1)频率特性曲线的低频段只有一个拐点，且低频段曲线斜率为 20dB/十倍频 ，说明影响低频特性的只有一个电容，故电路的下限截止频率为 10Hz 。

(2)频率特性曲线的高频段只有一个拐点，说明电路每一级的上限截止频率均为 $2 \times 10^5 \text{ Hz}$ ，且因高低频段曲线斜率为 -60dB/十倍频 ，说明影响高频特性的有三个电容，即电路为三级放大电路，故可得上限截止频率为：

$$f_H \approx 0.51 f_{H1} = (0.51 \times 2 \times 10^5) \text{ Hz} = 1.02 \times 10^5 \text{ Hz} = 102 \text{ kHz}$$

(3)因各级均为共射电路，所以在中频段输出电压与输入电压相位相反。因此，

$$\text{电压增益为 } \dot{A}_u = \frac{-10^4}{(1 + \frac{10}{jf})(1 + j\frac{f}{2 \times 10^5})^3}$$





本章小结

■ BJT的非线性伏安特性

- 熟悉NPN及PNP型晶体管的电路符号
- 熟悉晶体管**结构**、**电流放大原理**，掌握晶体管处于放大态时各极电流之间的关系；
- 熟悉Moll**模型**、晶体管在共射组态下的非线性**伏安特性曲线**；
- 熟悉晶体管的三种工作区（工作状态）及其判断依据；





本章小结

■ BJT基本放大电路的静态直流分析—基础

- 理解晶体管直流偏置电路的作用和意义
- 熟悉晶体管直流偏置电路的组成结构
- 熟悉耦合电容、旁路电容的作用
- 掌握晶体管电路的模型法直流分析及其分析步骤





本章小结

■BJT基本放大电路的**动态交流中频分析**

- 熟悉通用放大电路中各项交流性能指标的定义;
- 掌握各项交流性能指标的求解方法;
- 理解输入阻抗与输出阻抗的物理意义;
- 熟悉晶体管的**三种组态**及其判别方法;
- 掌握**晶体管低频交流小信号模型（混合H参数模型）**，牢记模型结构及模型参数;
- 熟悉基于**模型法**的晶体管放大电路**交流分析**步骤;
- 熟悉**多级放大器**的中频特性;
- 熟悉并能定性比较单级**共射、共集、共基放大器的中频性能**;





本章小结

■ 晶体管放大电路的高、低频率特性

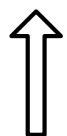
- 熟悉晶体管和放大电路的频率参数；
- 熟悉基于耦合电容 C_1 、 C_2 、 C_E 的电路低频分析； ω_l 取决于 C_1 、 C_2 、 C_E ；
- 掌握晶体管高频交流小信号模型及其单向化近似模型（混合 π 型模型及密勒等效），牢记模型结构及模型参数； ω_h 取决于 C_c 、 C_π --> 为主极点 C_i ；
- 熟悉单级共发射放大器的高频特性，牢记密勒因子表达式，并注意等效负载的计算；
- 熟练依信号工作频段绘制低频、中频、高频交流通路；
- 理解放大器增益与带宽之间的矛盾，熟悉改善晶体管放大电路频率特性的有效举措，熟悉不同级间耦合方式的优缺点；
- 多级：增益 $+R_i$ 、 R_o + BW，带宽收缩特性。



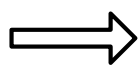


本章小结

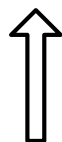
工作特性



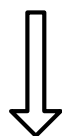
BJT管



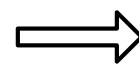
多级放大电路



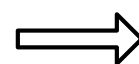
基本放大电路



交流分析方法



直流分析方法



频率特性

