



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

## § 3.5 多级放大电路

**lugh@ustc.edu.cn**

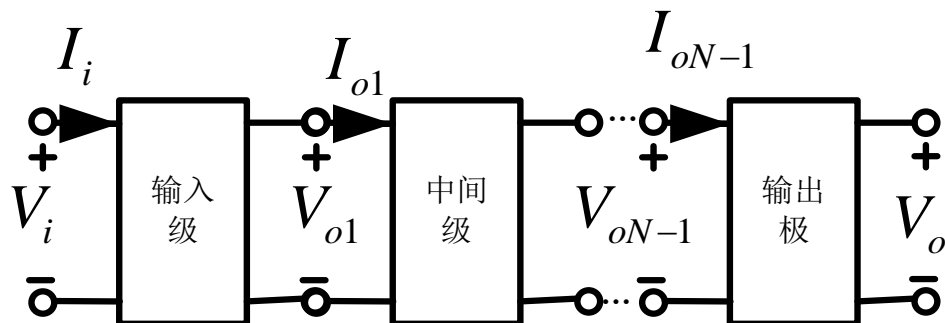
**2016年10月14日**

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. 级间耦合方式

## ■ 多级放大器

- 实际放大器一般是多级放大器，可分为输入级、中间级和输出级三部分
- 第一级称为输入级、最后一级称为输出级、中间部分称为中间级



# 1. 级间耦合方式

## ■ 输入级的主要作用

- 输入级主要完成放大器与信号源的阻抗匹配
- 对于电压信号源，输入级应具有较高的输入阻抗
- 对于电流信号源，输入级应具有较低的输入阻抗

## ■ 输出级的主要作用

- 输出级要求具有一定的带负载能力，以及一定的电压电流的输出幅度
- 对于电压输出方式，输出级应具有较低的输出阻抗
- 对于电流输出方式，输出级应具有较高的输出阻抗

# 1. 级间耦合方式

## ■ 中间级的主要作用

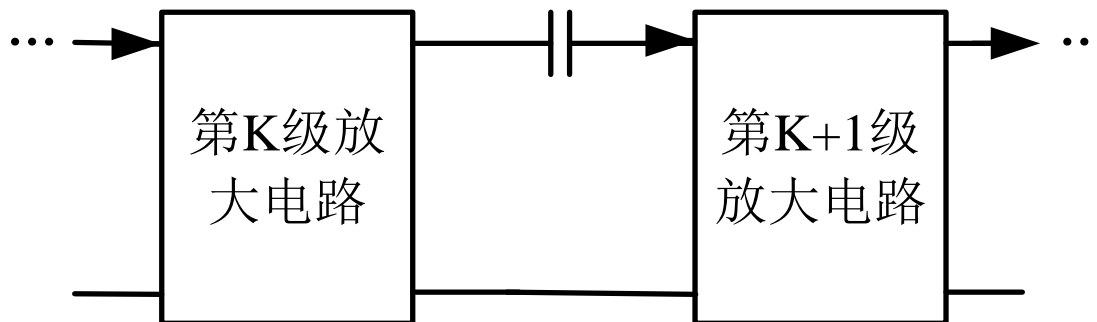
- 中间级通常实现电压增益、信号处理、频率补偿等功能

## ■ 级间耦合方式

- 电容耦合
- 直接耦合
- 变压器耦合

# 1. 级间耦合方式

## ■ 电容耦合



## ■ 优点

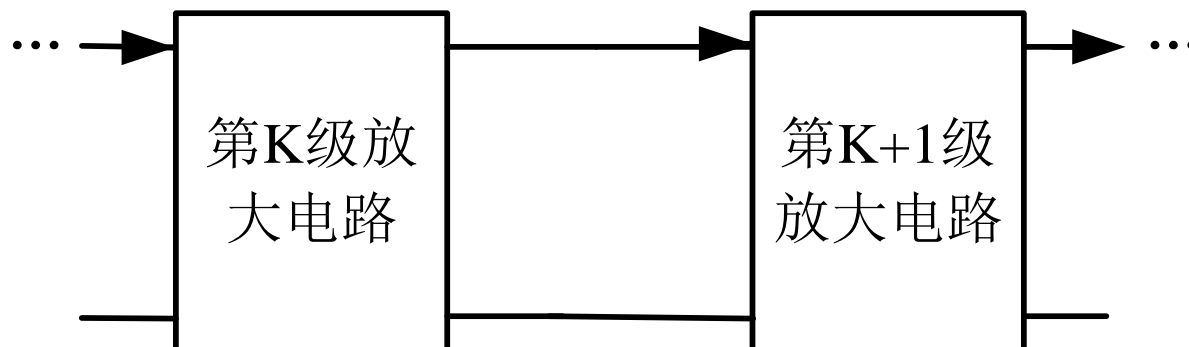
- 直流时，多级放大器的各级之间是被隔断的，各级放大器的直流偏置可以单独设置，级间没有相互的影响

## ■ 缺点

- 恶化了放大电路的低频特性，而且大电容不易集成

# 1. 级间耦合方式

## ■ 直接耦合



## ■ 优点

- 直接耦合放大器可以放大很低频率甚至是直流信号
- 没有耦合电容以后，很易于集成，是目前集成电路中普遍采用的方式

# 1. 级间耦合方式

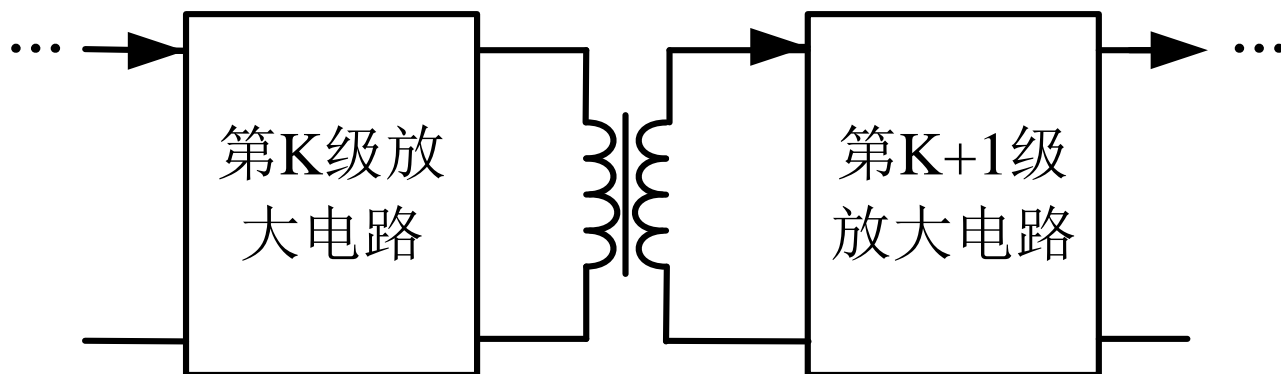
## ■ 缺点

- 该方式使得各级放大电路在直流偏置时相互影响，其直流工作点的设置需要统筹考虑
- 直接耦合放大器的一个最严重的问题是零漂问题，即输入端没有交流输入的时候，多级放大器的输出并不能等于0



# 1. 级间耦合方式

## ■ 变压器耦合



## ■ 优点

- 对于直流，变压器也起到了隔断的作用，因此它的优势也是各级直流偏置可以独立设置
- 由于变压器一般直接接在电源和晶体管的集电极之间，不需要集电极电阻，减小了直流损耗，从而在交流放大时，增大了管子的动态范围

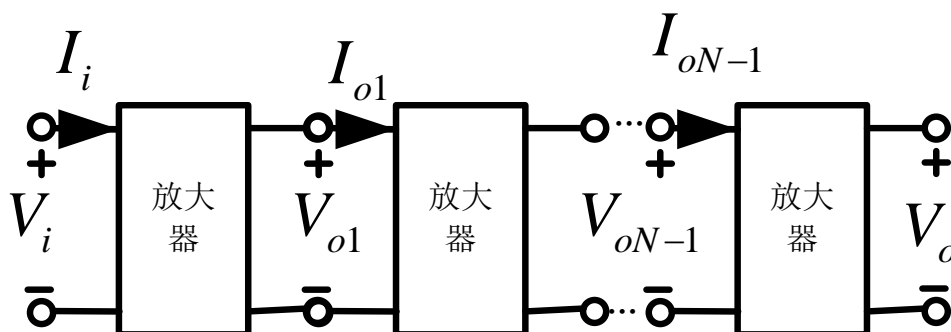
# 1. 级间耦合方式

## ■ 缺点

- 多级放大器的高频性能将受到变压器的电感性阻抗的影响
- 变压器的制造工艺复杂，体积及重量问题使多级放大器不宜集成实现

## 2. 多级放大器的中频增益和阻抗

### ■ 多级放大器的交流框图



### ■ 说明

- 前一级电路的输出是后一级电路的输入，即前一级的输出阻抗相当于后一级的信号源内阻
- 各级电路的中频电压增益均是以后一级作为负载时对应的电压增益

## 2. 多级放大器的中频增益和阻抗

### ■ 中频电压增益(考虑负载效应)

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_{o1}}{V_i} \frac{V_{o2}}{V_{o1}} \cdots \frac{V_o}{V_{oN-1}} = A_{V1} A_{V2} \cdots A_{VN} = \prod_{i=1}^N A_{Vi}$$

### ■ 输入阻抗

$$R_i = R_{i1}$$

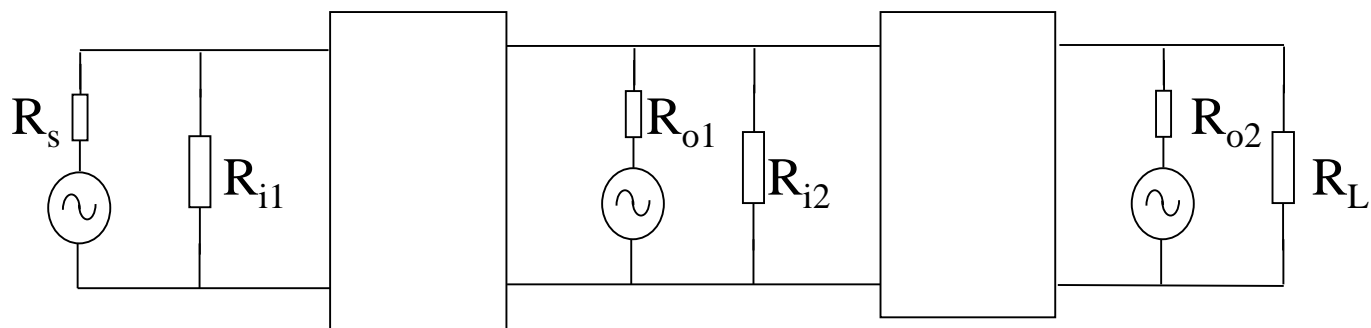
### ■ 输出阻抗

$$R_o = R_{oN}$$

## 例1

放大器由两级组成，每级的开路电压增益 $A_{v\infty} = -100$ ， $R_i = 5k\Omega$ ， $R_o = 2k\Omega$ ，整个放大器接的信号源内阻为 $2k\Omega$ ，负载为 $2k\Omega$ ，求总的源电压增益。

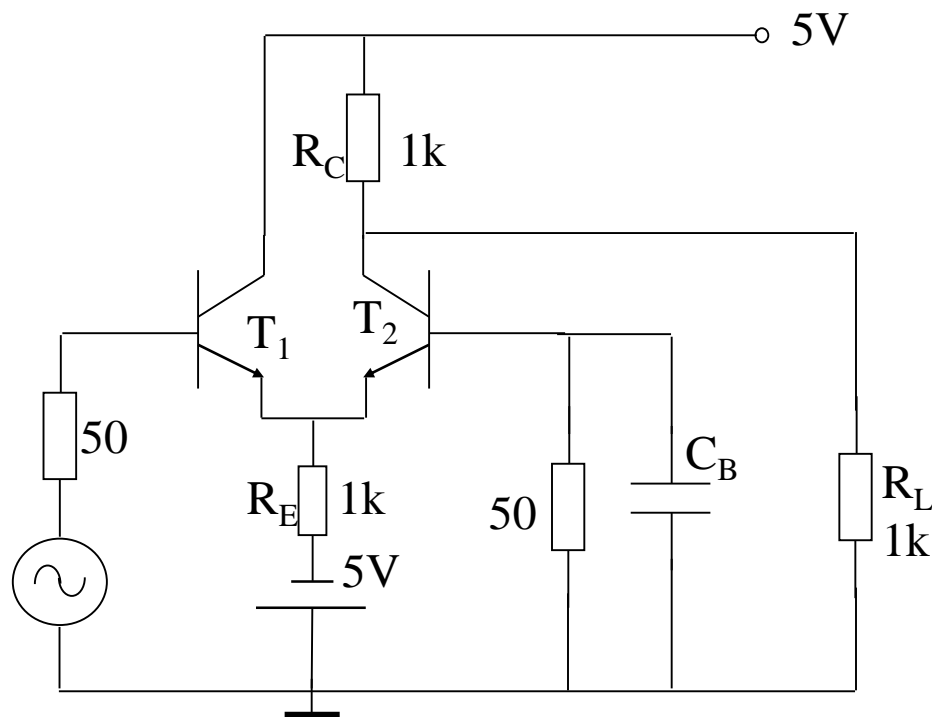
# 例1



$$A_{vs} = \frac{R_{i1}}{R_{i1} + R_s} \cdot A_{v1\infty} \cdot \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_{o1}} \cdot A_{v2\infty} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{o2}} = 2551$$

## 例2

- 作电路的直流分析和中频交流分析，已知各管子的参数相同为  $\beta = 100$ ,  $r_b = 100\Omega$ ,  $V_{BEON} = 0.7V$ 。



## 例2

- 直流分析
- 交流电压源短路、电流源开路
- 静态下，两管完全对称

$$\begin{cases} I_{B1} \cdot R_s + V_{BE1} + (I_{E1} + I_{E2}) \cdot R_E = 5V \\ I_{B2} \cdot R_{B2} + V_{BE2} + (I_{E1} + I_{E2}) \cdot R_E = 5V \end{cases}$$

$$I_{B1} = I_{B2} \quad I_B \cdot R \ll (I_{E1} + I_{E2}) \cdot R_E \quad V_B \approx 0$$

$$V_{E1} = V_{E2} = -0.7V \quad I_{E1} = I_{E2} = \frac{(5 - 0.7)V}{2 \times 1k\Omega} = 2.15mA$$



## 例2

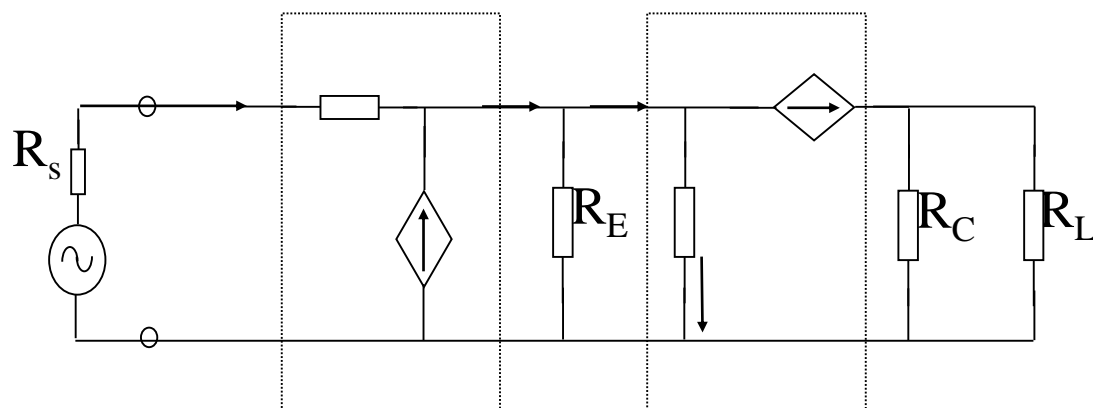
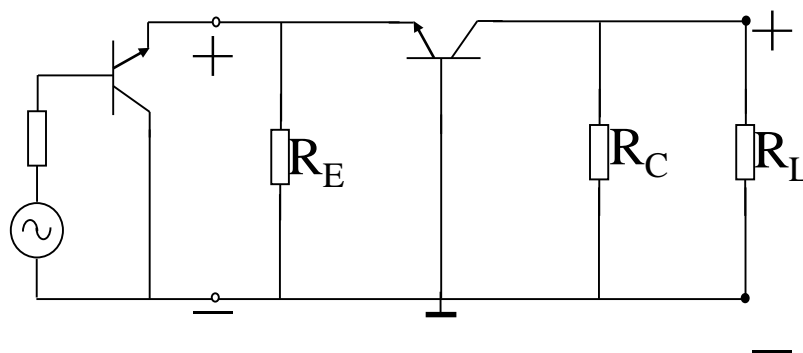
$$V_{C1} = 5V \quad V_{CE1} = 5 - (-0.7) = 5.7(V)$$

$$V_{C2} = 5V - R_C \cdot (I_{C2} + \frac{V_{C2}}{R_L}) \Rightarrow V_{C2} = 1.43V$$

$$V_{CE2} = 1.43 - (-0.7) = 2.13(V)$$

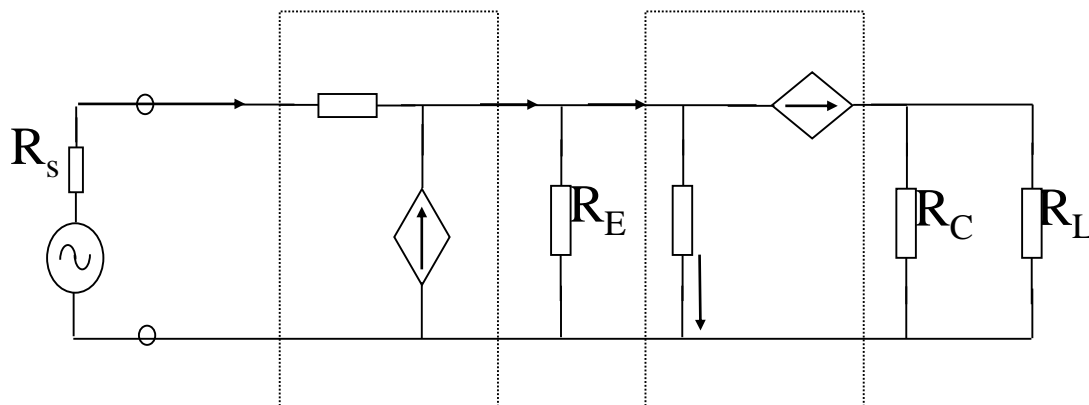
# 例2

## □ 中频交流分析



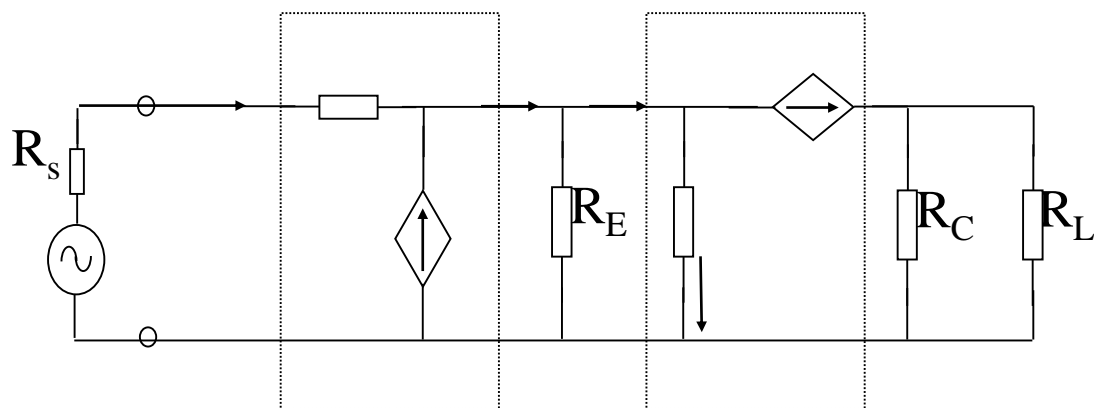
## 例2

### □ 中频交流分析



- 注意**T2**管的电流，**T2**管的电流可认为是**T1**管提供的、可以设成和**T1**管电流方向相同，因此**T2**管三个极电流方向和原来的定义全部反向

# 例2



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_1} \cdot \frac{v_1}{v_i} = \frac{\beta_2 R_L'}{h_{ie2}} \cdot \frac{(1 + \beta_1)(R_E \parallel \frac{h_{ie2}}{1 + \beta_2})}{h_{ie1} + (1 + \beta_1)(R_E \parallel \frac{h_{ie2}}{1 + \beta_2})} \approx \frac{\beta_2 R_L'}{h_{ie2}} \cdot \frac{h_{ie2}}{h_{ie1} + h_{ie2}} = \frac{\beta_2 R_L'}{h_{ie1} + h_{ie2}}$$

## 例2

$$h_{ie1} = h_{ie2} = 1.31k\Omega$$

$$A_v = \frac{100 \times 0.5}{1.31 + 1.31} = 19.1(\text{倍})$$

$$R_i = R_{i1} = h_{ie1} + (1 + \beta)(R_E \parallel \frac{h_{ie2}}{1 + \beta_2}) = 2.62k\Omega$$

$$R_o = R_C = 1k\Omega$$

### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

#### ■ 多级放大器的3dB带宽

$$B = \omega_h - \omega_l$$

#### ■ 基本思路

- 将各级放大电路看作单极点系统，研究多级级联系统的频率特性
- 研究**3dB**上截止频率：将各级看作单极点低通系统
- 研究**3dB**下截止频率：将各级看作单极点高通系统

### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

#### ■ 3dB上截止频率的收缩特性

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

$$A_i(j\omega) = \frac{A_{0i}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{hi}}}, A(j\omega) = \frac{A_0}{\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_{h1}}\right)\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_{h2}}\right) \cdots \left(1 + \frac{j\omega}{\omega_{hn}}\right)}$$

### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

#### ■ 情况一：各极点均相同

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

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



### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

定义带宽收缩因子:  $S_n = \sqrt{2^{1/n} - 1}$

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

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

#### ■ 说明

□ 级数越多，多级放大器的**3dB**带宽收缩越严重

### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

- 情况二：各极点均不同，但是存在主极点

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

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

- 说明

- 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

### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

- 情况三：各极点均不同，且不存在主极点

$$\begin{aligned} |A(j\omega_h)| &= \frac{A_0}{\sqrt{2}} \\ \Rightarrow \left[ 1 + \left( \frac{\omega_h}{\omega_{h1}} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{\omega_h}{\omega_{h2}} \right)^2 \right] \cdots \left[ 1 + \left( \frac{\omega_h}{\omega_{hn}} \right)^2 \right] &= 2 \\ \Rightarrow 1 + \left( \frac{\omega_h^2}{\omega_{h1}^2} + \frac{\omega_h^2}{\omega_{h2}^2} \cdots + \frac{\omega_h^2}{\omega_{hn}^2} \right) + \cdots &= 2 \\ \Rightarrow \omega_h \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\omega_{h1}^2} + \frac{1}{\omega_{h2}^2} \cdots + \frac{1}{\omega_{hn}^2}}} < \omega_{hi} \end{aligned}$$

### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

#### ■ 3dB下截止频率的带宽收缩特性

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

$$A_i(j\omega) = \frac{A_{0i}}{1 + \frac{\omega_{li}}{j\omega}}, A(j\omega) = \frac{A_0}{\left(1 + \frac{\omega_{l1}}{j\omega}\right)\left(1 + \frac{\omega_{l2}}{j\omega}\right) \cdots \left(1 + \frac{\omega_{ln}}{j\omega}\right)}$$

### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

- 情况一：各极点均相同

$$\omega_l = \omega_{l0} / S_n \quad (A_i(S) = \frac{A_i(0)}{1 + \frac{\omega_{li}}{S}})$$

- 情况二：各极点均不同，但是存在主极点

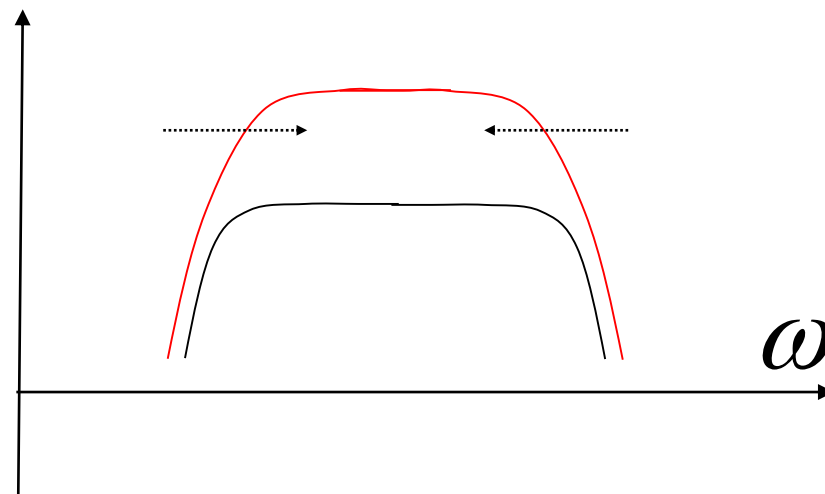
$$\omega_{l1} \gg \omega_{li}, i = 2, 3, \dots, n,$$

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

- 情况三：各极点均不同，且不存在主极点

$$\omega_l \approx \sqrt{\omega_{l1}^2 + \omega_{l2}^2 + \dots + \omega_{ln}^2}$$

### 3. 多级放大器的带宽收缩特性



### 3. 多级放大器的带宽收缩特性

#### ■ 结论

- 多级放大器具有带宽收缩特性，即级联产生的结果使多级放大器的带宽小于各单级的带宽，级数越多，收缩的越多
- 多级放大器的总增益则是级数越多，级联后总增益越大
- 由此可见，增益和带宽的矛盾在多级放大器中更加突出了，为了获得一定的增益和必需的带宽，选择合适的单极增益和带宽以及合适的级数是十分重要的



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

□ 首先判断为低通函数，且有主极点。故

$$\omega_h = 10rad / s$$





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

$$\omega_h = S_3 \omega_{hi} = 0.51 \times 100 = 51(\text{rad} / s)$$



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

- 先求复极点对的  $\omega_{hi}$
- 令  $\left| 1 + \frac{j\omega}{10} - \frac{\omega^2}{100} \right| = \sqrt{2}$
- 得到  $\omega_{h1} = 12.7rad/s$      $\omega_{h2} = 1000rad/s$   
 $\omega_h = 12.7rad/s$

# 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
- 熟悉晶体管电流放大系数，掌握晶体管处于放大状态时各极电流之间的关系
- 熟悉晶体管在共发组态下的非线性伏安特性
- 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基本放大电路的直流分析
  - 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
  - 掌握晶体管电路的估算法直流分析及其分析步骤

# 本章小结

## ■ BJT基本放大电路的中频分析

- 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发、共集、共基放大器的中频性能

# 本章小结

## ■ 晶体管放大电路的频率特性

- 了解晶体管和放大电路的频率参数
- 了解依信号工作频段绘制低频、中频、高频交流通路
- 理解发射极旁路电容的低频主极点作用
- 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

# 本章小结

## ■ 多级放大器

- 熟悉不同级间耦合方式的优缺点
- 熟悉多级放大器增益，输入、输出阻抗和每级的关系
- 掌握多级放大器的带宽收缩特性，熟悉由单极放大器带宽求多级放大器带宽的方法