



# 通信电子线路

主讲：凌小峰

[xfling@ecust.edu.cn](mailto:xfling@ecust.edu.cn)



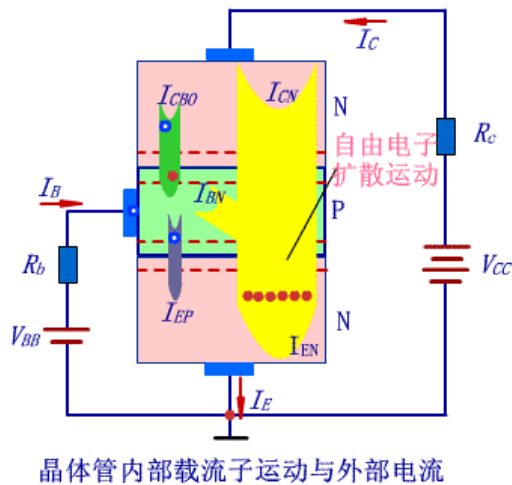
# 第3章 高频小信号放大器

## □ 内容概要

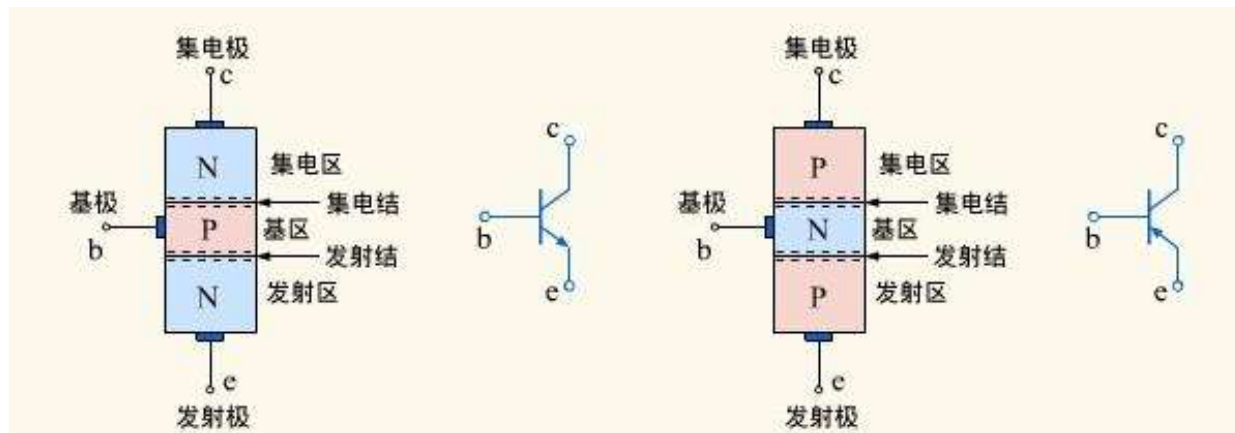
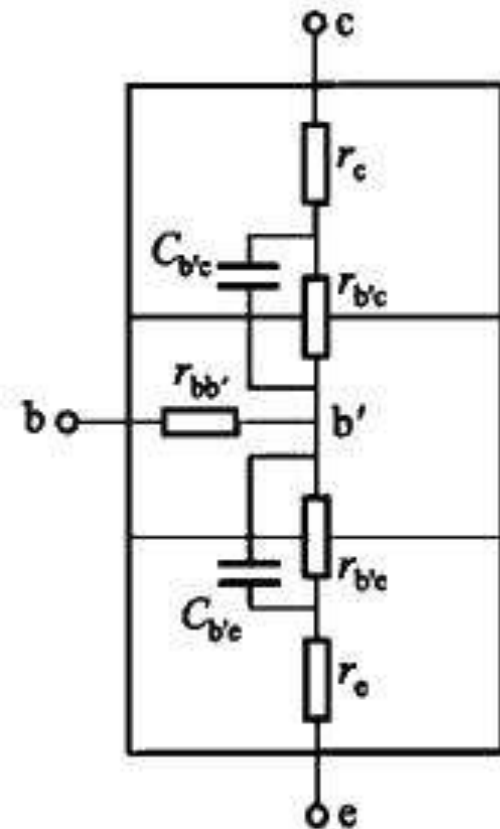
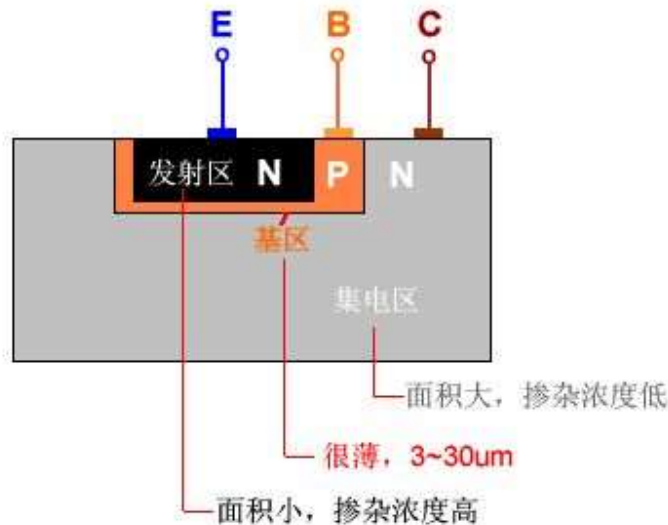
- 相关基础知识
- 高频小信号调谐放大器
- 调谐放大器的稳定性
- 高频集成放大器

# 一、晶体三极管高频等效电路

## 1. 物理参数模型



平面技术NPN三极管



## □ 共射极混合 $\pi$ 型等效电路

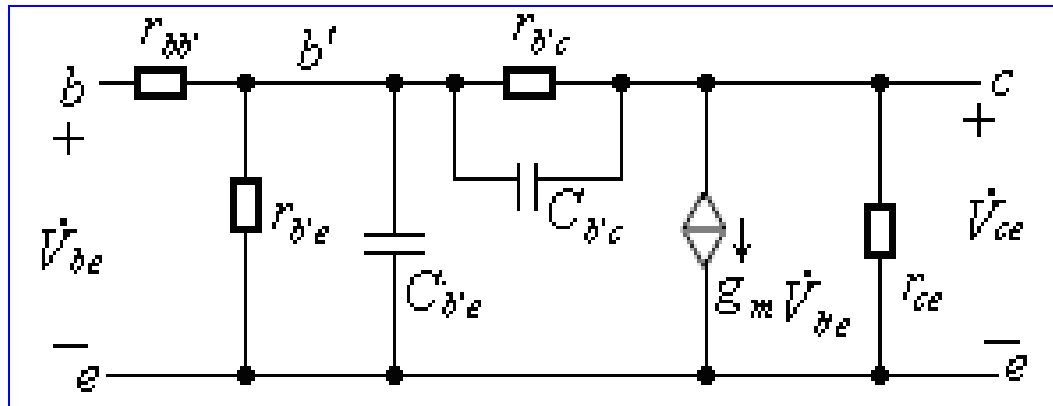


图-晶体管高频共发射极混合  $\pi$  型等效电路

$r_{bb'}$  基区体电阻，约十几欧到几十欧

$r_{b'e}$  发射结电阻  $r_e$  折合到基极回路的等效电阻，约

几十欧到几千欧；

$$r_e \cong \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)} (\Omega)$$



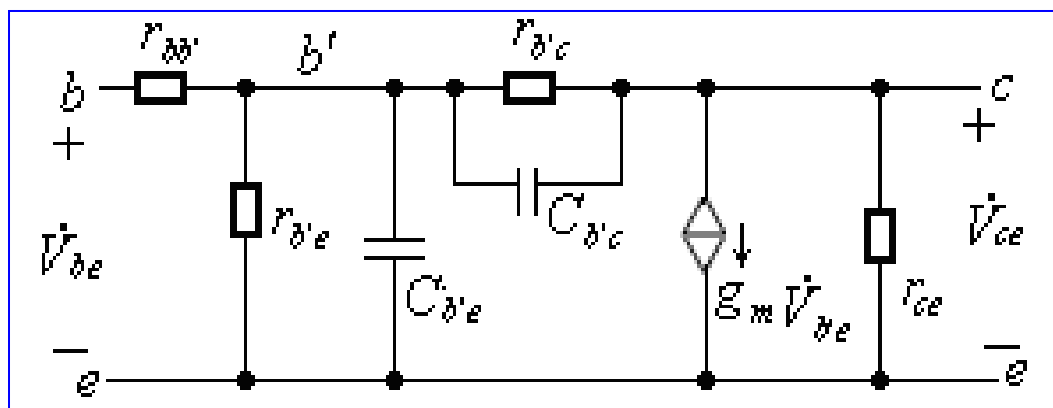
$C_{b'e}$  : 发射结电容, 约10皮法到几百皮法(pF);

$r_{b'c}$  : 集电结电阻, 约10k $\Omega$  ~ 10M $\Omega$ ;

$C_{b'c}$  : 集电结电容, 约几个皮法(pF);

$g_m$  : 晶体管跨导, 几十毫西门子(mS)以下;

各参数有关的公式如下:



其中:  $I_{EQ}$  是发射极静态电流,  $\beta_o$  是晶体管低频短路电流

放大系数,  $f_T$  是晶体管特征频率。

注意: 各参数均与静态工作点有关。

## □ 晶体管高频共基极T型等效电路

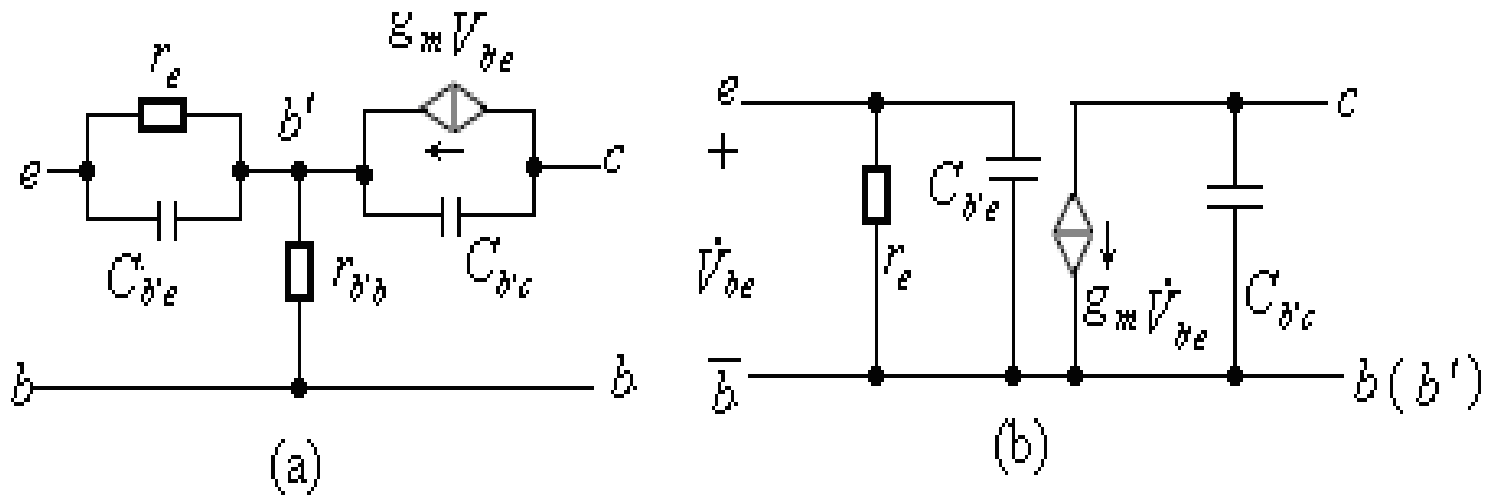


图-晶体管高频共基极等效电路及其简化电路

## 2. Y 参数等效电路

双口网络即具有两个端口的网络。

参数方程是选取各端口的电压为自变量，电流为应变量，其方程如下

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = y_{11}\dot{V}_1 + y_{12}\dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 = y_{21}\dot{V}_1 + y_{22}\dot{V}_2 \end{cases}$$

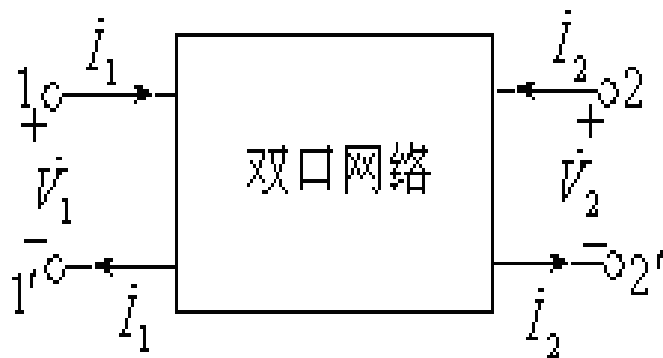


图-双口网络



其中  $y_{11}$ 、 $y_{12}$ 、 $y_{21}$ 、 $y_{22}$  四个参量均具有导纳量纲，即

$$\begin{cases} y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2=0} (S) & y_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2=0} (S) \\ y_{12} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1=0} (S) & y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1=0} (S) \end{cases}$$

所以 Y 参数又称为短路导纳参数，即确定这四个参数时必须使某一个端口电压为零，也就是使该端口交流短路。



如共发射极接法的晶体管，如下图所示，相应的 Y 参数方程为

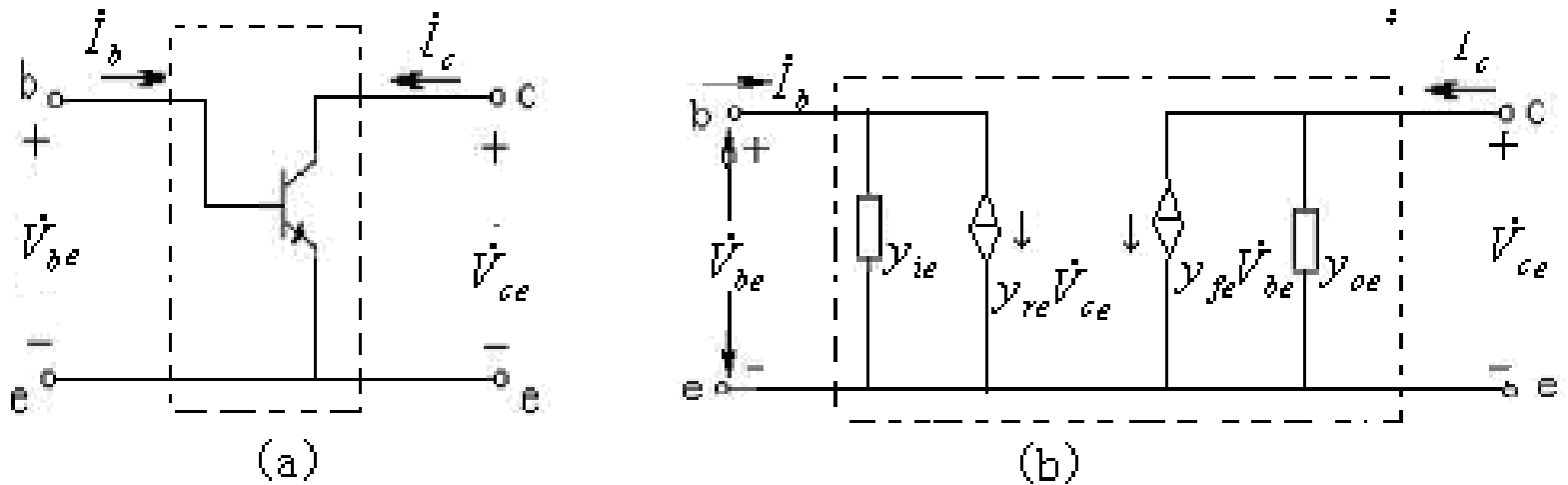


图-共发射极接法的晶体管 Y 参数等效电路

$$\begin{cases} \dot{I}_b = y_{ie} \dot{V}_{be} + y_{re} \dot{V}_{ce} \\ \dot{I}_c = y_{fe} \dot{V}_{be} + y_{oe} \dot{V}_{ce} \end{cases}$$

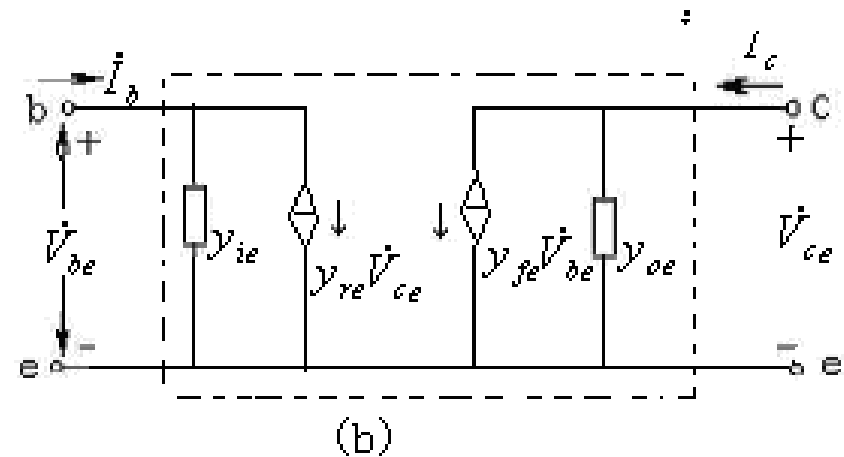
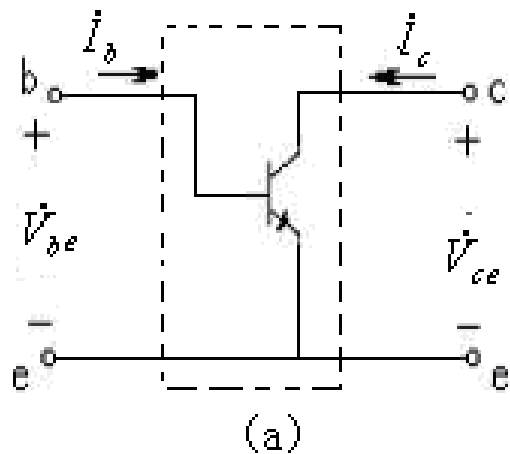


图-共发射极接法的晶体管 Y 参数等效电路

其中

$$\begin{cases} y_{ie} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{V}_{be}} \right|_{\dot{V}_{ce}=0} & y_{fe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{V}_{be}} \right|_{\dot{V}_{ce}=0} \\ y_{re} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{V}_{ce}} \right|_{\dot{V}_{be}=0} & y_{oe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{V}_{ce}} \right|_{\dot{V}_{be}=0} \end{cases}$$

式中,  $y_{ie}$ 、 $y_{re}$ 、 $y_{fe}$ 、 $y_{oe}$  分别称为输入导纳、反向传输导纳、正向传输导纳和输出导纳。

### 3. Y 参数等效电路与混合 $\pi$ 参数的关系

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{ie} = g_{ie} + j\omega C_{ie} = \frac{g_{b'e} + j\omega C_{b'e}}{1 + r_{b'b}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \\ y_{oe} = g_{oe} + j\omega C_{oe} = g_{oe} + j\omega C_{b'c} + \frac{j\omega C_{b'e} r_{b'b} g_m}{1 + r_{b'b}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \\ y_{re} = |y_{re}| e^{j\varphi_{re}} = \frac{-j\omega C_{b'c}}{1 + r_{b'b}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \\ y_{fe} = |y_{fe}| e^{j\varphi_{fe}} = \frac{g_m}{1 + r_{b'b}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \end{array} \right.$$

## 二、电子噪声基础

□ 电子噪声来源：主要由电阻热噪声和半导体管噪声。

### 1. 电阻热噪声

定义：由电阻内部的自由电子的热运动而产生的，它是系统内部噪声的主要来源。



具有起伏  
特性

# 1) 热噪声电压和功率谱密度

## ① 噪声电压均方值

$$U_n^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_n^2 dt = 4kTBR$$

$$k = 1.37 \times 10^{-23} \text{ J/K};$$

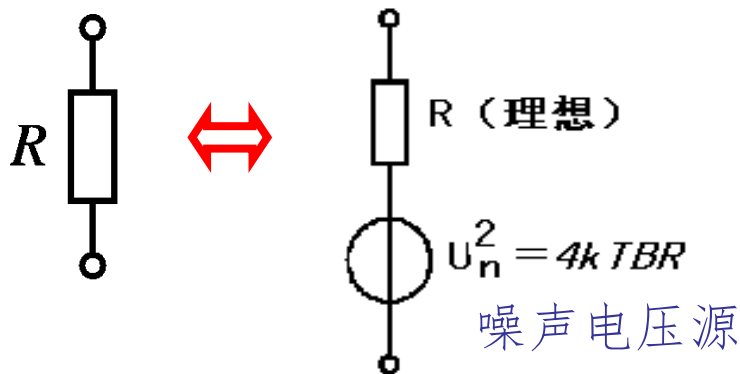
$T$ : 绝对温度 (K)。

$B$ : 测量此电压时的带宽;

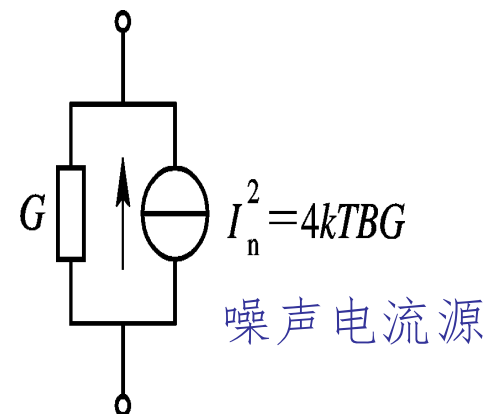
## ② 噪声电压均方根

$$U_n = \sqrt{4kTBR} \quad U_n \text{ 表示起伏电压交流分量的有效值。}$$

## ③ 电阻热噪声等效电路



或





例：常温下（ $T=290K$ ）工作的 $1K\Omega$ 电阻，与 $B=100KHZ$ 的理想网络相连接。求噪声电压均方根 $U_n$ 。

$$U_n^2 = 4kTBR = 1.6 \times 10^{-12} V^2$$

$$U_n \approx 1.26 \mu V \cdot \circ \circ \circ \text{可忽略吗?}$$

一般电阻的热噪声是相当微弱的，故在电平较高的电路可忽略。

在接收机的前级，由于有用信号极其微弱，电阻热噪声的影响就不能忽略，它已成为限制接收机性能的主要因素。



#### ④ 噪声电压功率谱密度 $S_U(f)$

$$S_U(f) = \frac{4KTR}{1 + \left(\frac{f}{\alpha}\right)^2} (V^2 / Hz)$$

$$\alpha = 10^{13} \sim 10^{14}$$

$$\because f \ll \alpha$$

(自由电子每秒钟的碰撞次数)

$$\therefore S_U = 4kTR (V^2 / Hz) \quad : \text{单位频带内噪声电压均方值}$$

$$S_I = 4kTG (A^2 / Hz) \quad : \text{单位频带内噪声电流均方值}$$

电阻器单位频带噪声功率在很宽的频率范围内均为一恒定值。

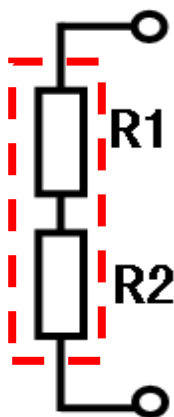
白噪声

## 2) 线性电路中的热噪声

有两种情况：一是多个电阻的热噪声；二是热噪声通过线性网络。

### ① 多个电阻的热噪声

设两个电阻上的噪声电势  $u_{n1}$ 、 $u_{n2}$  是统计独立的，即互不相关的。

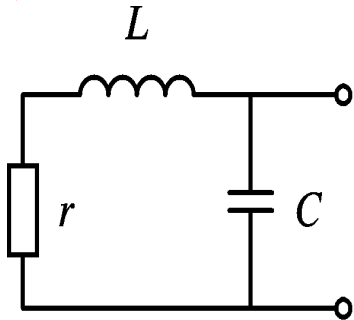


$$U_n^2 = U_{n1}^2 + U_{n2}^2 = 4kTB(R_1 + R_2)$$

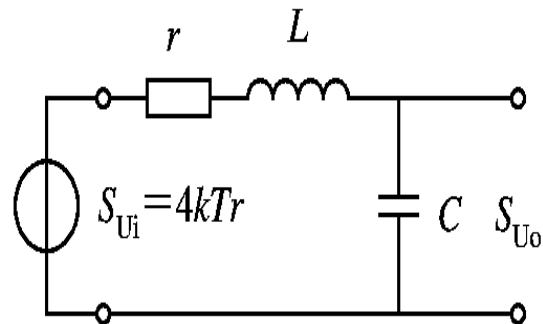
只要各噪声源是相互独立的，则总的噪声服从均方叠加原则。



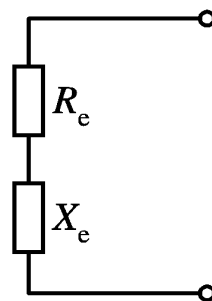
## ② 热噪声通过线性网络



噪声源的形式



或等效阻抗的形式



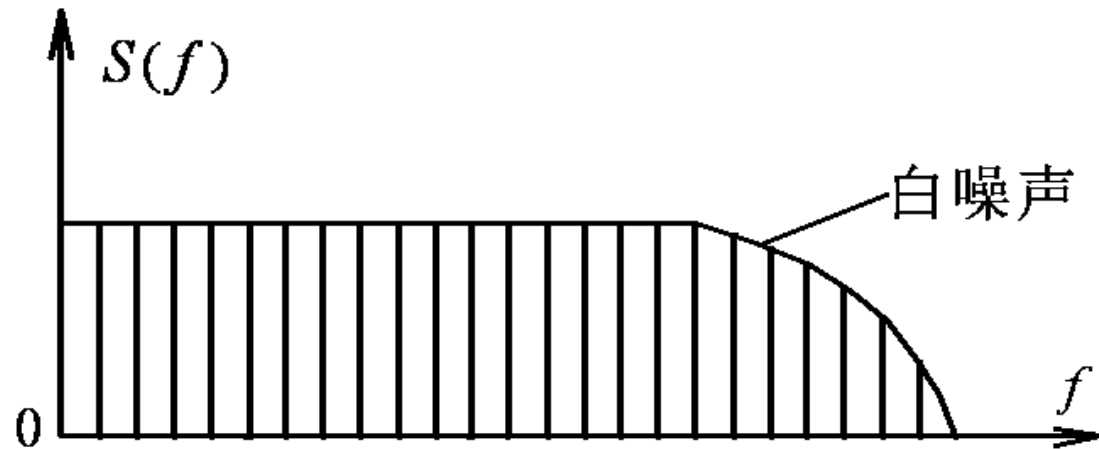
$$S_{U_o} = 4kTR_e$$

结论:

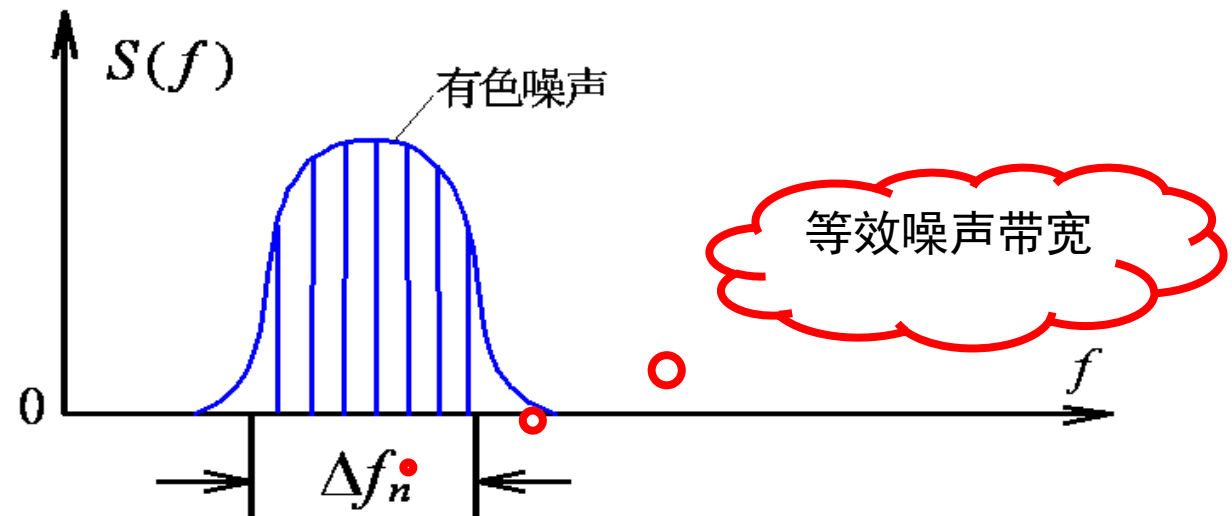
(1) 对于二端线性电路，其噪声电压或噪声电流谱密度  $S_U$ 、 $S_I$  可以用等效电阻  $R_e$  (或  $G_e$ ) 来代替  $S_U = 4kTR$  中的  $R$ 。

(2) 电阻热噪声通过线性电路后，一般就不再是白噪声了。

白噪声频谱图



有色噪声频谱图





## 2. 晶体三极管噪声

晶体三极管的噪声是设备内部固有噪声的另一个重要来源。一般地，在一个放大电路中，晶体三极管的噪声往往比电阻热噪声大得多，主要包括以下四部分：

- ①电阻热噪声
- ②散弹(粒)噪声
- ③分配噪声
- ④闪烁噪声



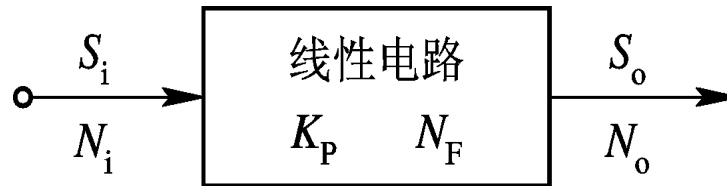
### 3. 场效应管噪声

在场效应管中，由于其工作原理不是靠少数载流子的运动，因而散弹噪声的影响很小。场效应管的噪声来源主要包括：

- ①沟道电阻产生的热噪声；
- ②沟道热噪声通过沟道和栅极电容的耦合作用在栅极上的感应噪声；
- ③闪烁噪声。



## □ 噪声系数

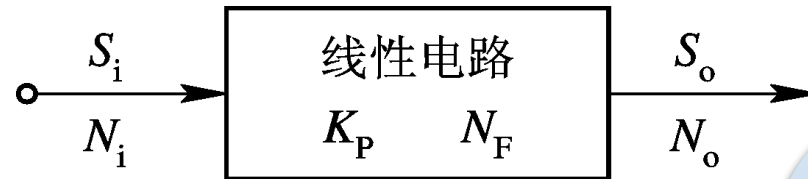


噪声系数定义: 
$$N_F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

另一种形式: 
$$N_F = \frac{N_o}{K_P N_i} \quad (K_P: \text{功率增益或功率放大倍数})$$

或 
$$N_F = 1 + \frac{N_a}{K_P N_i} \quad (N_a: \text{表现在输出端的内部附加噪声功率})$$

由于输入信噪比总是大于输出信噪比，故噪声系数的数值总是大于1；理想无噪声系统的噪声系数等于1。



$$N_F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

思考：多个放大器级联，噪声系数与输入是否有关，要如何计算？

对噪声系数的几点说明：

1、 $N_F$ 与 $S_o$ 、 $S_i$ 无关但与 $N_i$ 有关，

规定 $N_i$ 为信号源内阻 $R_S$ 的热噪声输出功率。并规定 $R_S$ 的温度为 290 K，此温度称为标准噪声温度。

2、 $N_F$ 与输入端、输出端是否匹配无关。

3、 $N_F$ 的定义只适用于线性或准线性电路。

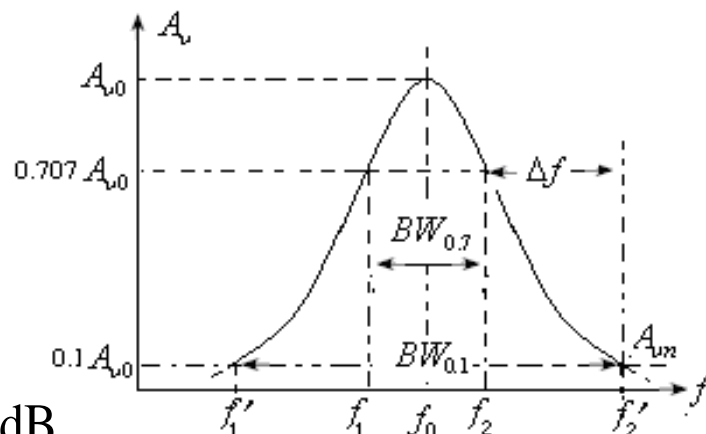


# 三、高频小信号放大器的主要指标

## 1. 增益

(1) 电压放大倍数  $A_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$

或 电压增益  $20\lg A_v = 20\lg \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \text{dB}$



(2) 功率放大倍数

$$A_p = \frac{P_o}{P_i}$$

或 功率增益

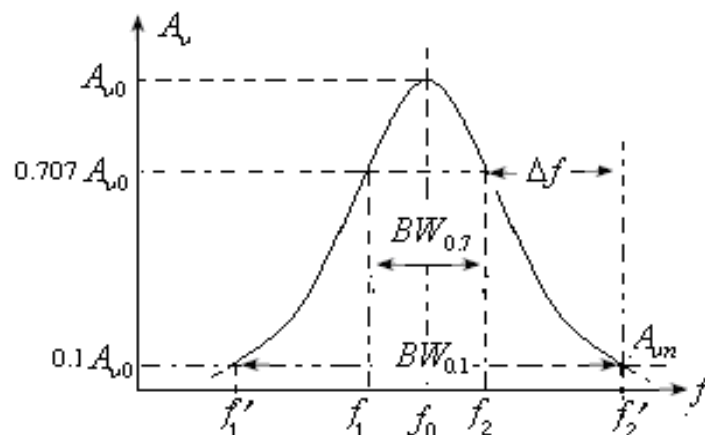
$$10\lg A_p = 10\lg \frac{P_o}{P_i} \text{dB}$$



## 2. 通频带

### 常用3dB带宽表示

$$BW_{0.7} = f_2 - f_1 = 2\Delta f_{0.7}$$



## 3. 选择性

### 常用矩形系数衡量

$$K_{r0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}}$$

## 4. 噪声系数

$$N_F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

分贝表示:  $N_{F\_dB} = 10\lg(N_F) \text{ dB}$

噪声系数是高频小信号放大器的关键指标，决定系统灵敏度；在级联的放大器中，前一、二级放大器的噪声对整个放大链路的噪声起决定作用。





## 5. 工作稳定性

### □ 定义:

指放大器的工作状态，晶体管参数，电路元件参数等发生可能变化时，其主要质量指标的稳定程度。

### □ 放大器的不稳定表现:

- 增益的变化,
- 中心频率的偏移,
- 通频带变化,
- 谐振曲线变形,
- ...
- 其极端状态是放大器产生自激。