



第2章 高频电路基础

➤2.1 LC 谐振回路

➤2.2 电子噪声

➤2.3 噪声系数和噪声温度



2.2 电子噪声

一、概述

(1) 定义

所谓**干扰（或噪声）**，就是除有用信号以外的一切不需要的信号及各种电磁骚扰的总称。

(2) 分类

按**产生地**分：外部干扰；内部干扰

按**产生根源**分：自然干扰；人为干扰

按**电特性**分：脉冲型；正弦型；起伏型

习惯上对外部来的称为**干扰**；内部来的称为**噪声**

(3) 抑制外部干扰的措施：

- a. 消除干扰源； b. 切断传播途径； c. 躲避干扰



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

来源：电阻热噪声；半导体管噪声

① 电阻热噪声

导体或电阻中自由电子热运动而产生起伏电压才称为**电阻的热噪声**。温度越高，自由电子的运动越剧烈，产生的起伏电压越大，噪声功率就越大。

就一段时间来看，出现正负电压的概率相同，因而两端的平均电压为 0；但是某一瞬间看，电阻两端电势的大小和方向是随即变化的



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

(1) 热噪声电压和功率谱密度

当电阻的温度为 T (K) 时, 电阻 R 两端噪声电压的均方值为:

$$U_n^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T e_n^2 dt = 4kTBR \quad \text{奈奎斯特公式}$$

$k = 1.37 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 伯茨曼常数; B 是测量带宽, T 是绝对温度

$U_n = \sqrt{4kTBR}$ 表示起伏电压交流分量的有效值。

根据概率论的理论, 由于热噪声电压是由大量电子运动产生的感应电势之和, 总的噪声电压 $p(u_n)$ 服从正态分布, 即其概率密度 u_n 为:

$$p(u_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi U_n^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{u_n^2}{U_n^2}\right)$$

具有这种概率密度的噪声为**高斯噪声**。



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

(1) 热噪声电压和功率谱密度



图 2-30 电阻热噪声电压波形

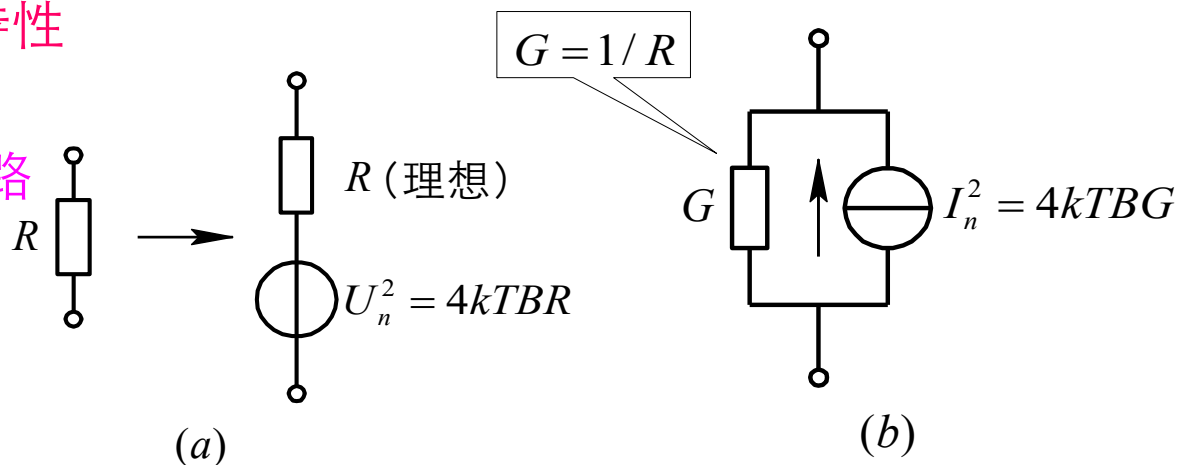


2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

(2) 热噪声等效电路



因为功率与电压或电流的均方值成正比，故电阻热噪声也可以看成是一噪声功率源。

由图可以看出，功率源输出的最大噪声功率（负载电阻为 R 时的输出功率）：

$$P_m = \left(\frac{U_n}{2R}\right)^2 R = kTB$$



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

$$P_m = \left(\frac{U_n}{2R}\right)^2 R = kTB$$

(2) 热噪声等效电路

说明：电阻热噪声功率与带宽成正比，而单位频带内的最大噪声功率为 kT ，与频带无关。 kT 为噪声源的噪声功率谱密度，将功率谱不随频率变化的噪声，称为白噪声。

因为它与光学中的“白光”相似，具有均匀的功率谱。

定义：均方电压谱密度——单位频带内噪声电压均方值。

均方电流谱密度——单位频带内噪声电流均方值。

$$S_U = 4kTR \quad (V^2 / Hz)$$

$$S_I = 4kTG \quad (A^2 / Hz)$$



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

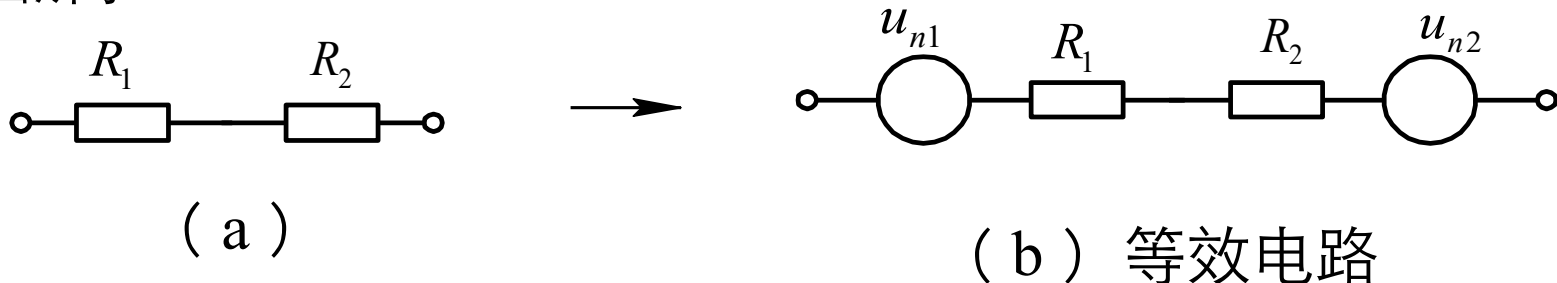
① 电阻热噪声

(3) 线性电路中的热噪声

在计算线形电路中的热噪声时，往往会遇到如下情况：多个电阻的热噪声；热噪声通过线形电路。

a. 多个电阻的热噪声

- 考虑两个电阻**串联**，假设两个电阻上的噪声电势是统计独立的，如图所示：



串联后总的电势为：
$$u_n = u_{n1} + u_{n2}$$



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

$$u_n = u_{n1} + u_{n2}$$

(3) 线性电路中的热噪声

a. 多个电阻的热噪声

则总的噪声电压均方值为：

$$\begin{aligned}
 U_n^2 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (u_{n1} + u_{n2})^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_{n1}^2 dt \\
 &\quad + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_{n2}^2 dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T 2u_{n1}u_{n2} dt \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_{n1}^2 dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_{n2}^2 dt
 \end{aligned}$$

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

推广： m 个电阻串联，则有

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



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

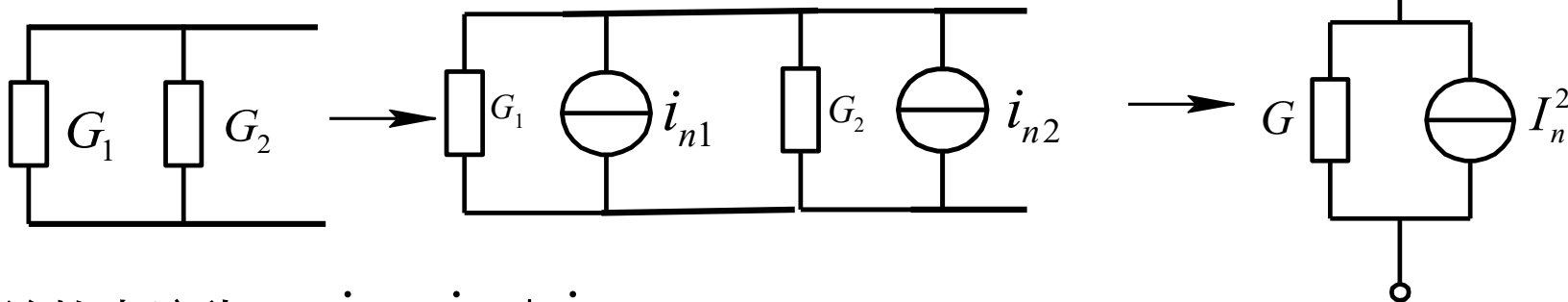
① 电阻热噪声

推广：m 个电阻并联，则

(3) 线性电路中的热噪声 $I_n^2 = I_{n1}^2 + \dots + I_{nm}^2 = 4kTB(G_1 + \dots + G_m)$

a. 多个电阻的热噪声

● 考虑两个电阻并联，假设两个电阻上的噪声电势是统计独立的。

总的电流为： $i_n = i_{n1} + i_{n2}$

$$\text{则： } I_n^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (i_{n1} + i_{n2})^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T i_{n1}^2 dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T i_{n2}^2 dt$$

$$\text{故 } I_n^2 = I_{n1}^2 + I_{n2}^2 = 4kTB(G_1 + G_2) = 4kTBG$$



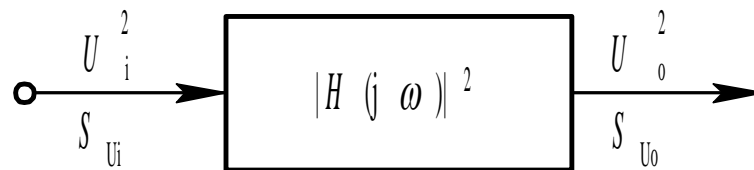
2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

(3) 线性电路中的热噪声

b. 热噪声通过线形网络



热噪声通过线路电路的模型

对单频信号来说，输入输出电压均方值之间的关系为：

$$U_o^2 = |H(j\omega)|^2 U_i^2$$

同样： $S_{Uo} = |H(j\omega)|^2 S_{Ui}$ (2)

其中 S_{Uo} 和 S_{Ui} 分别是输出、输入端噪声均方电压谱密度

输出噪声电压均方值为：

$$U_n^2 = \int_0^\infty S_{Uo} df$$



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

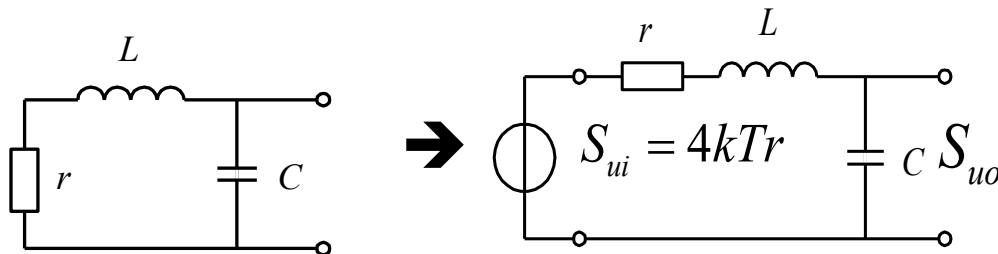
① 电阻热噪声

(3) 线性电路中的热噪声

b. 热噪声通过线形网络

$$S_{U_o} = |H(j\omega)|^2 S_{U_i}$$

下面以并联谐振回路为例分析热噪声通过线性电路后的输出噪声。



$$S_{U_o} = \frac{\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \cdot 4kTr \quad (3)$$



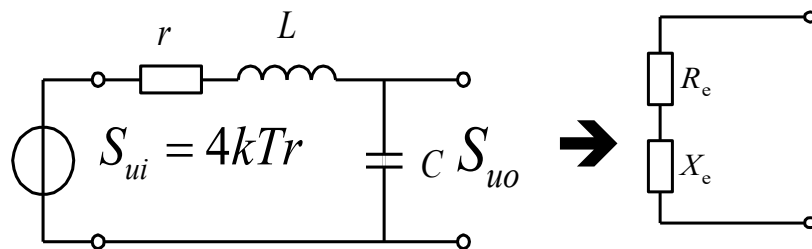
2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

(3) 线性电路中的热噪声

b. 热噪声通过线形网络



又并联回路可以等效为 $R_e + jX_e$

$$R_e + jX_e = \frac{-j \frac{1}{\omega C} (r + j\omega L)}{(r + j\omega L) - j \frac{1}{\omega C}} \Rightarrow R_e = \frac{\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2 r}{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (4)$$



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

(3) 线性电路中的热噪声

b. 热噪声通过线形网络

$$\diamond S_{U_o} = 4kTR_e$$

$$U_n^2 = \int_0^\infty S_{U_o} df = \int_0^\infty S_{U_o} d\Delta f$$

$$\diamond \left[\frac{1}{1 + (2Q \frac{\Delta f}{f_0})^2} \right] kTr d\Delta f = 4kT \left[\frac{R_0}{1 + (2Q \frac{\Delta f}{f_0})^2} \right] d\Delta f$$

$$= 4kTR_0 \frac{\pi f_0}{2Q} \quad \text{这里 } R_0 = \frac{1}{\omega_0^2 C^2 r} \text{ 是回路并联谐振电阻。}$$

$$\left(\frac{1}{\omega C} \right)^2$$

结论 (1) 电阻热噪声通过线性电路后，一般不再是白噪声。

(2) 二端线性电路其噪声电压或噪声电流谱密度可用等效电阻 R_e (G_e) 来代替 R (G)

(4)



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

(4) 噪声带宽

在电阻热噪声公式中，有一带宽因子 B ，它是测量此噪声电压均方值的带宽。因为电阻热噪声是均匀频谱的白噪声，因此这一带宽应该理解为一理想滤波器的带宽。实际的测量系统，包括噪声通过的后面的线性系统都不具有理想的滤波特性。此时输出端的噪声功率或噪声电压均方值应该按谱密度进行积分计算。为了计算和测量的方便，引入“**噪声带宽**”的概念。

假设在线性系统中，电压传输函数为 $H(j\omega)$ ，输入一电阻热噪声，其均方电压谱为 $S_{U_i}=4kTR$ ，输出均方电压谱为 S_{U_o} 。

则输出均方电压 U_{n2}^2 为：

$$U_{n2}^2 = \int_0^B S_{U_o} df = \int_0^B S_{U_i} |H(j\omega)|^2 df = 4kTR \int_0^B |H(j\omega)|^2 df$$



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

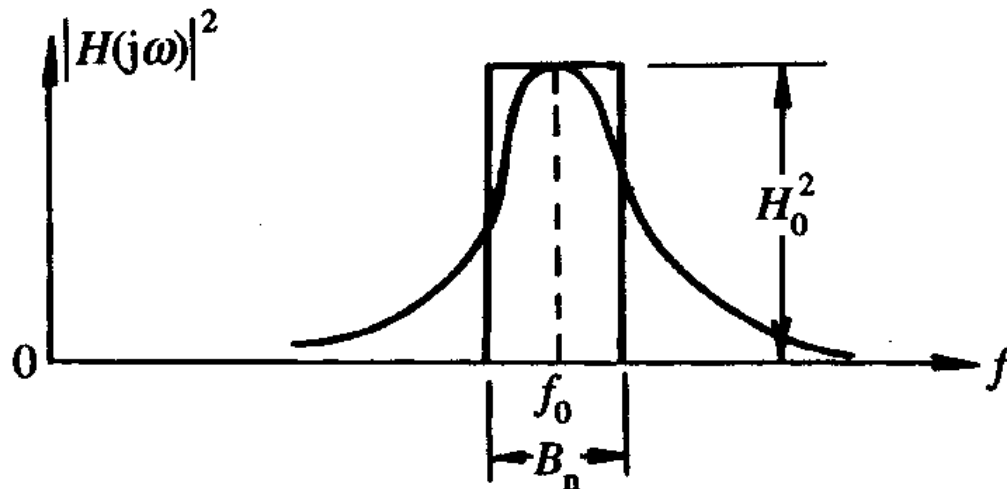
(4) 噪声带宽

设 $|H(j\omega)|$ 的最大值为 H_0 ，则可定义一等效噪声带宽 B_n ，令

$$U_{n2}^2 = 4kTRB_n H_0^2$$

则等效噪声带宽 B_n 为

$$B_n = \frac{\int_0^\infty |H(j\omega)|^2 df}{H_0^2}$$



噪声带宽的物理意义：

使 H_0^2 和 B_n 为两边的矩形面积与曲线下的面积相等。

线性系统的等效噪声带宽



2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

① 电阻热噪声

(4) 噪声带宽

例：计算单震荡回落等效噪声带宽。

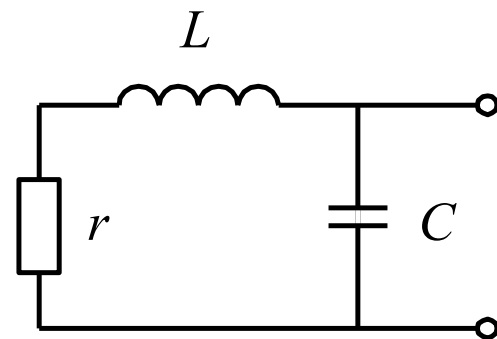
$$|H(j\omega)|^2 = \frac{(1/\omega C)^2}{r^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} = \frac{(1/\omega Cr)^2}{1 + [\omega L/r - 1/(\omega Cr)]^2}$$

设回路为高 Q 电路，设谐振频率为 f_0 ，则：

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{(1/\omega Cr)^2}{1 + [\omega L/r - 1/(\omega Cr)]^2} = \frac{(1/\omega Cr)^2}{1 + \left\{ \frac{\omega_0 L}{r} \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{1}{\omega_0 Cr} \frac{\omega_0}{\omega} \right\}^2} \square \frac{\left(\frac{1}{\omega_0 Cr} \right)^2}{1 + (2Q \frac{\Delta f}{f_0})^2}$$

式中， Δf 为相对于 f_0 的频偏，由此可得等效噪声带宽为

$$B_n = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + (2Q \frac{\Delta f}{f_0})^2} d\Delta f = \frac{\pi f_0}{2Q} = \frac{\pi}{2} B_{0.7}$$





2.2 电子噪声

二、电子噪声的来源与特性

② 晶体三级管的噪声

晶体三级管噪声是设备内部固有噪声的另一个重要来源。他们有：

1) 散弹（粒）噪声； 2) 分配噪声； 3) 闪烁噪声

（1）**散弹噪声**——由于载流子随机起伏运动产生的噪声称为散弹噪声，它也是白噪声。

噪声均方电流谱密度 $S_I(f) = 2qI_0$

$q = 1.6 \times 10^{-19} C$ 是每个载流子的电荷量, I_0 是结的平均电流。

（2）**分配噪声**——由分配比起伏变化而产生的集电极电流、基极电流起伏噪声，称为晶体管的分配噪声，它本质上也是白噪声。

（3）**闪烁噪声**——由于半导体材料及制造工艺水平造成表面清洁处理不好而引起的噪声称为闪烁噪声。