

例 2-1 如图 2-9 所示并联谐振回路，信号源与负载都为部分接入。已知 R_S 、 R_L ，并知回路参数 L 、 C_1 、 C_2 和空载品质因数 Q_0 ，求

(1) f_0 与 $B_{0.707}$ ；

(2) R_L 不变，要求总负载与信号源匹配，如何调整回路参数？

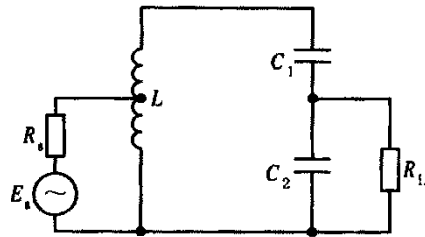


图 2-9

题意分析： 并联谐振回路是高频电路中的最基本、最重要的电路之一，掌握其基本参数与特性非常重要。对这些内容一定要十分熟练。本题的主要目的就是考查这部分内容。另外，题目考查的内容还有抽头接入回路、接入系数、阻抗变换和匹配的概念。在求带宽（通频带）时还要注意有载 Q 值和空（无）载 Q 值的区别。

解：

(1) 计算 f_0 与 $B_{0.707}$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

对于 $B_{0.707}$ ，先考虑空载时地情况：

$$B_{0.707} = \frac{f_0}{Q_0}$$

再考虑有载时的情况。这里不考虑信号源，设 R_L 对回路的接入系数为 p_2 ，则

$$p_2 = \frac{1/\omega C_2}{1/\omega C} = \frac{C}{C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

把 R_L 折合到回路两端，变为 R'_L

$$R_L' = \frac{R_L}{p_2^2}$$

回路本身的并联谐振电阻 $R_0 = Q_0 \omega_0 L$ ，它与 R_L' 并联，构成总的回路负载 R_0' ，即

$$R_0' = R_0 // R_L' = \frac{Q_0 \omega_0 L R_L}{p_2^2 (Q_0 \omega_0 L + \frac{R_L}{p_2^2})}$$

因此，有载 Q 值为

$$Q_L = \frac{R_0'}{\omega_0 L} = \frac{Q_0 R_L}{p_2^2 (Q_0 \omega_0 L + \frac{R_L}{p_2^2})}$$

$$B_{0.707}(\text{有载}) = \frac{f_0}{Q_L}$$

若考虑 R_s 时，也可以求得考虑 R_s 影响后的回路带宽 $B_{0.707}$ 。

(2) 设信号源对回路的接入系数为 p_1 ，则总负载折合到信号源处为：

$$R_0'' = p_1^2 R_0'$$

若要使 R_0'' 与 R_s 匹配，即 $R_0'' = R_s$ ，需调整 R_0'' 。由于 R_L 不变， R_0'' 中可调整的参数有 p_1 、 p_2 、 Q_0 和 L 。但实际上 L 及 Q_0 一般不变，而且回路 f_0 也不能变。因此，可通过调整 p_1 和 p_2 来实现。调整 p_1 就是调整 L 的抽头位置，调整 p_2 就是调整 C_1 和 C_2 。需要注意的是，调 C_1 和 C_2 时要保持 C 不变。

讨论：一般地，阻抗变换时，由回路的低端折合到高端（部分接入到全接入）电阻增加，即除以 p^2 （因为 p 通常不大于 1）。反之，乘以 p^2 。计算这类题目时，要特别注意所有负载对 Q 值、通频带等参数的影响。

例 2-2 求如图 2-10 所示网络输出至负载电阻 R_L 上的噪声功率和额定噪声功率。

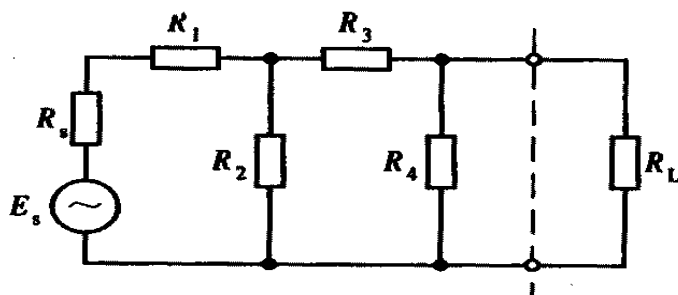


图 2-10

题意分析： 本题所涉及的网络为纯电阻网络，讨论噪声问题肯定是热噪声问题。从题意来看，是要计算纯电阻网络的热噪声功率。热噪声功率与噪声均方电压或均方电流有关，计算十分简单。需要注意的是，均方噪声电压或电流是交流形式的均方值，因此计算功率时不需要 $1/2$ 的系数。另外， E_s 为信号源而非噪声源。

解： 网络总的等效电阻为

$$R = [(R_s + R_1) // R_2 + R_3] // R_4 = \frac{[R_2(R_s + R_1) + R_3(R_1 + R_s + R_2)]R_4}{R_2 + R_1 + R_s + R_3 + R_4 + (R_1 + R_s)(R_3 + R_4)}$$

网络输出的噪声功率为

$$N = \left(\frac{R_L}{R + R_L}\right)^2 E_n^2 / R_L = \left(\frac{R_L}{R + R_L}\right)^2 4kTBR / R_L = \frac{4kTBR R_L}{(R + R_L)^2}$$

当 $R = R_L$ 时（匹配时） N 达到最大值 N_{\max} ，即

$$N_{\max} = \frac{4kTBR^2}{(2R)^2} = kTB$$

讨论：（1）对于纯电阻网络，各个电阻产生的热噪声等效为网络的总等效电阻产生的热噪声（包括均方噪声电压、电流或功率）。

（2）纯电阻网络或电阻产生的最大噪声功率，即额定噪声功率为 kTB 。

例 2-3 求图 2-11 电路的等效噪声带宽 B_n 和噪声电压均方值 E_n^2 。

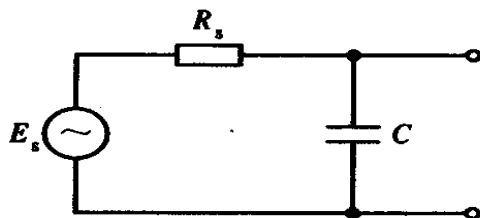


图 2-11

题意分析： 本题是一个非常简单的线性网络，实际上只有信号源内阻 R_s 和电容 C ，

可以把 R_S 和 C 看成并联关系；也可把 R_S 和 C 作为一个线性系统， R_S 的热噪声为噪声源，此题就成为噪声通过线性系统。

此题要考查的内容非常明确，主要是等效噪声宽带。

解：第一种方法：把 R_S 与 C 看成并联关系，利用“纯电抗元件不产生热噪声”的概念求解。

R_S 与 C 并联后的总阻抗为 R ，则

$$R = \frac{R_S \frac{1}{j\omega C}}{R_S + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_S}{1 + (\omega C R_S)^2} - \frac{j\omega C R_S}{1 + (\omega C R_S)^2}$$

R 中的实部为纯电阻，虚部为纯电抗。只有电阻部分才会产生热噪声，产生的热噪声的电压均方值为

$$\begin{aligned} E_n^2 &= 4kT \int_0^\infty R_e(R) df = 4kT \int_0^\infty \frac{R_S}{1 + (\omega C R_S)^2} df \\ &= \frac{4kT R_S}{2\pi R_S C} \left. \operatorname{tg}^{-1}(2\pi f R_S C) \right|_0^\infty = \frac{2kT}{\pi C} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{kT}{C} \end{aligned}$$

第二种方法：按噪声通过线性系统求解。此线性系统的传输函数为

$$H(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R_S + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega R_S C}$$

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega R_S C)^2}$$

$$|H(j\omega)|_{\max}^2 = 1$$

设输入与输出噪声的均方电压谱密度分别为 S_{ui} 和 S_{uo} ，则

$$S_{ui} = 4kT R_S$$

$$S_{uo} = |H(j\omega)|^2 S_{ui} = \frac{4kT R_S}{1 + (\omega R_S C)^2}$$

$$E_n^2 = \int_0^\infty S_{uo} df = 4kT R_S \int_0^\infty \frac{1}{1 + (\omega R_S C)^2} df = \frac{kT}{C}$$

$$B_n = \frac{\int_0^\infty |H(j\omega)|^2 df}{|H(j\omega)|_{\max}^2} = \frac{1}{4 R_S C}$$

讨论：对于此类题目，除了弄懂噪声和等效噪声带宽的基本概念外，最关键的在于求线性系统的传输函数，至于数学运算并不困难。

例 2-4 计算图 2-12 虚框内电路的噪声系数。

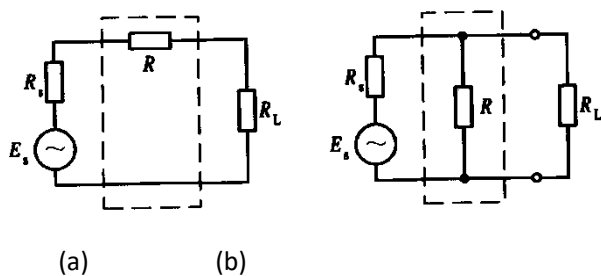


图 2-12

题意分析：本题题意十分明确，就是要求计算网络的噪声系数。只是要注意这种网络的特殊性——纯电阻网络， N_F 的计算方法很多，都可以采用。题目没有指明用何种方法，我们可以根据自己的爱好自由选择。另外，此题的两个网络都十分简单，但这里选择此电路的目的只是为了说明计算 N_F 的方法而已。

解：对于图 (a) 电路

(1) 开路电压法

将负 R_L 开路，在输出端总的均方噪声电压为 $U_{no}^2 = 4kTB(R + R_s)$ ，其中 $R + R_s$ 为从负载向左看的总的戴维南等效电阻。

网络内部的噪声在输出端为 $U_{nno}^2 = 4kTBR$ ，输入端 R_s 的噪声传至输出端为 $U_{nio}^2 = 4kTBR_s$ 。

$$\therefore N_F = \frac{U_{no}^2}{U_{nio}^2} = 1 + \frac{U_{nno}^2}{U_{nio}^2} = 1 + \frac{R}{R_s}$$

(2) 短路电流法

将 R_L 短路，输出总的均方电流为 $I_{no}^2 = 4kTB \frac{1}{R + R_s}$ ，其中， $\frac{1}{R + R_s}$ 为等效总电导。

$$I_{nno}^2 = \frac{4kTBR}{(R + R_s)^2}$$

$$I_{nio}^2 = \frac{4kTBR_s}{(R + R_s)^2}$$

$$\therefore N_F = 1 + \frac{R}{R_s}$$

(3) 额定功率法

在输出端，等效戴维南电路参数为

$$E'_S = E_S, R_O = R_S + R$$

网络的最大输入功率为 $S_{im} = \frac{E_S'^2}{4R_S}$

因此,输出最大功率为 $S_{om} = \frac{E_S'^2}{4R_O} = \frac{E_S'^2}{4(R_S + R)}$

$$\therefore N_F = \frac{S_{im}}{S_{om}} = \frac{R_S + R}{R_S} = 1 + \frac{R}{R_S}$$

对于图 (b) 电路:

(1) 开路电压法

将 R_L 开路, 有以下参数值

$$U_{no}^2 = 4kTB \left(\frac{R \cdot R_S}{R + R_S} \right)$$

$$U_{nno}^2 = 4kTBR \cdot \left(\frac{R_S}{R + R_S} \right)^2$$

$$U_{nio}^2 = 4kTB R_S \left(\frac{R}{R + R_S} \right)^2$$

$$\therefore N_F = 1 + \frac{U_{nno}^2}{U_{nio}^2} = \frac{U_{no}^2}{U_{nio}^2} = 1 + \frac{R_S}{R}$$

(2) 短路电流法

将 R_L 短路, 有

$$I_{no}^2 = 4kTB \frac{1}{R_S // R} = 4kTB \frac{R_S + R}{R_S R}$$

$$I_{nno}^2 = 4kTB \frac{1}{R}$$

$$I_{nio}^2 = 4kTB \frac{1}{R_S}$$

$$\therefore N_F = \frac{I_{no}^2}{I_{nio}^2} = 1 + \frac{I_{nno}^2}{I_{nio}^2} = 1 + \frac{R_S}{R}$$

(3) 额定功率法

$$S_{im} = \frac{E_S'^2}{4R_S}$$

在输出端戴维南等效参数为

$$E'_S = \frac{R_S}{R + R_S} E_S, R_O = \frac{R R_S}{R + R_S}$$

$$\therefore S_{om} = \frac{E_S'^2}{4R_O} = \frac{R E_S'^2}{4R_S (R + R_S)}$$

$$\therefore N_F = \frac{S_{im}}{S_{om}} = \frac{R_S + R}{R} = 1 + \frac{R_S}{R}$$

讨论: (1) 在对均方电压或电流的处理过程中, 由于它们是平方关系, 因此, 无

论是电压与电流转换，还是分压系数或分流系数，都要为平方关系。

(2) 一般情况下，串联形式的电路用开路电压法较简单，并联形式的电路用短路电流法较为方便。但当电路较为复杂时，这两种方法都不如额定功率法简便。需要注意的是，额定功率法只适用于纯电阻网络或无源网络。

例 2-5 已知接收机的输入阻抗为 50Ω ，噪声系数为 6dB。用一个 10m 长，衰减量为 0.3dB/m 的 50Ω 电缆将接收机连至天线，试问总的噪声系数为多少？

题意分析：此题明确指出是求噪声系数，但整个系统是一个什么样的结构呢？根据题中描述可知，该系统是一个将天线通过一段电缆连接至接收机的系统。由于天线的任何参数未给定，说明该系统应是从天线与电缆的连接处开始，直到接收机部分。可以认为它是一个两级网络级联而成，第一级为电缆，第二极为接收机。电缆有衰减，也就会引入噪声。这样，此题的题意已明，即计算级联网络的噪声系数。

解：电缆衰减量为

$$L = 0.3 \times 10 = 3(\text{dB}) = 2$$

这就是第一级网络的噪声系数 N_{F1} ，而且第一级网络的功率增益 $K_{P_{m1}} = \frac{1}{L} = \frac{1}{2}$ 。

$$\therefore N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{K_{P_{m1}}} = 2 + \frac{4 - 1}{\frac{1}{2}} = 8$$

讨论：题意已明，计算十分简单，需要注意以下问题：

(1) 电缆与接收机要匹配（实际上还要与天线匹配）。若不匹配，就会引起反射，引入更大的衰减或噪声。

(2) 明确无源纯电阻网络的噪声系数、衰减量和功率增益之间的关系。

(3) 这里假设的是两个网络的等效噪声带宽一致，否则就要按噪声系数的定义来计算，请看例 2-6。

例 2-6 两个四端网络级联。设两网络的噪声系数，额定功率增益和等效噪声带宽分别为 N_{F1} 、 N_{F2} ， K_{P1} 、 K_{P2} 和 B_{n1} 、 B_{n2} ，两网络的合成等效噪声带宽为 B_n ，如图 2-13 所示。求级联网络的总噪声系数。

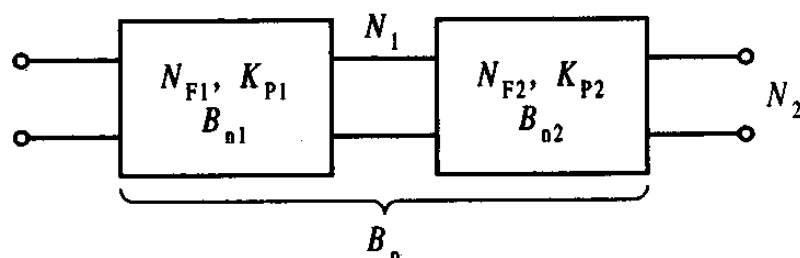


图 2-13

题意分析：本题也是求级联网络的噪声系数，但这里的两级网络的等效噪声带宽不同，因此，不能简单地套用多级网络的噪声系数公式，只能是根据噪声系数基本概念来推导。这也是出此题目的本意。

解：设级联网络输出的总噪声功率为 N_2 ，则 N_2 有以下三部分组成：

(1) 输入端的噪声经两级放大至输出端

$$N_{21} = K_P N_i = K_{P1} K_{P2} kT B_n$$

其中， $K_P = K_{P1} K_{P2}$ 为级联网络的总额定功率增益， $kT B_n$ 为输入端的额定噪声功率。

(2) 第一个网络的附加噪声经第二个网络放大至输出端

$$N_{22} = K_{P2} \Delta N_1 = K_{P2} \cdot (N_{F1} - 1) K_{P1} \cdot kT B_{n1}$$

其中， $\Delta N_1 = K_{P1} (N_{F1} - 1) kT B_{n1}$ 为第一级网络的内部噪声。

(3) 第二个网络的附加噪声

$$N_{23} = K_{P2} (N_{F2} - 1) kT B_{n2} = \Delta N_2$$

∴ 总的输出噪声功率为

$$N_2 = N_{21} + N_{22} + N_{23}$$

$$N_F = \frac{N_2}{K_P N_i} = \frac{N_{21} + N_{22} + N_{23}}{K_{P1} K_{P2} kT B_n}$$

讨论： (1) 求每一级网络的附加噪声功率均可用公式 $\Delta N = N_F kTB$ 来计算，只不过式中所有参数均为本级网络所具有的。

若 $B_{n1} = B_{n2} = B_n$ ，则此题结论与一般多级网络的噪声系数公式相同。

例 2-7 某接收机的噪声系数为 5dB，带宽为 10MHz，输入阻抗为 50Ω ，若要求输出信噪比应为 10 dB，问接收机灵敏度为多少？

题意分析： 本题的要求是计算接收机的灵敏度，这就需要考虑以下问题：

- (1) 灵敏度的含义与表示方法；
- (2) 灵敏度与 N_F 的关系；
- (3) 接收机的等效噪声带宽 B_n 与额定输入噪声功率。

接收机的灵敏度就是为了保证必要的输出信噪比，接收机输入端所必须的最小有用信号电平。这个电平可以用功率表示，也可用电压表示。用电压表示时要用到输入阻抗。

灵敏度若用功率表示，则它与 N_F 的关系非常简单，就是噪声系数的定义，只是其中的输入噪声功率用电阻的额定噪声功率来表示。这就需要知道测量带宽或等效噪声带宽。由于接收机前端通常由许多级组成，因此其等效噪声带宽 B_n 可用信号的通频带（带宽）来近似。

$$\text{解: } S_o / N_o = 10 \text{ dB} = 10$$

$$N_F = 5 \text{ dB} = 3.16$$

$$\begin{aligned} \therefore S_{i(\min)} &= \frac{S_o}{N_o} \cdot N_F \cdot kTB_n \\ &\approx 10 \times 3.16 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10 \times 10^6 = 1.26 (\text{pW}) \end{aligned}$$

若用最小可检测电压表示，为

$$U_{i(\min)} = 2\sqrt{R_i S_{i(\min)}} = 2\sqrt{50 \times 1.26 \times 10^{-12}} = 15.9 (\mu V)$$

讨论：用最小可检测电压表示必须是在输入匹配时才是最佳。若输入不匹配，则会降低接收机的灵敏度。对于接收机来讲，灵敏度是一个非常重要的参数，也就是说，噪声系数是接收机的一个非常重要的参数。为了提高接收机的灵敏度，就必须降低接收机前端的噪声系数。至于具体方法，有很多，这里就不一一列举了。