

绪 论

1.1 要点分析

1.1.1 无线电发射设备的组成及其工作原理

以无线电调幅广播发射机为例,其方框图如图 1.1 所示。无线电调幅广播发射机主要由正弦波振荡器、缓冲器、高频电压放大器、振幅调制器、高频功率放大器、声-电变换器、低频电压放大器及发射天线等组成。正弦波振荡器产生高频载波信号;缓冲器能隔离正弦波振荡器与高频电压放大器,提高正弦波振荡器带负载的能力和频率稳定性;高频电压放大器把载波信号的振幅放大到振幅调制器需要的程度;振幅调制器完成调制,得到调幅波;高频功率放大器实现调幅信号的功率放大,以便于调幅信号远距离辐射出去;天线把调幅信号有效地辐射到空间;声-电变换器把语音信号转换为电信号;低频电压放大器把微弱音频信号的幅度进行放大。我国的调幅广播的载波频率为 $535 \sim 1605\text{kHz}$ 。

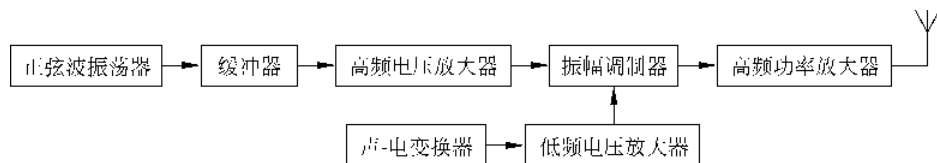


图 1.1 无线电调幅广播发射机的基本组成方框图

1.1.2 超外差式接收机的基本组成

超外差式接收机是目前最流行的无线电接收机,其基本组成方框图如图 1.2 所示,主要包括选频电路、混频器、本机振荡器、中频信号放大器、检波器、低频电压放大器、低频功率放大器和喇叭等。需要注意的是,有一些超外差式接收机的选频电路与混频器之间还有一级高频小信号放大器。

本机振荡器产生正弦波信号,输入混频器后,与输入的高频信号互相作用产生一个固定载波频率的信号——中频信号,这是超外差式接收机的关键技术所在。虽然天线感应不同的已调波信号有不同的载波频率,但是超外差式接收机从中频信号放大器以后的电

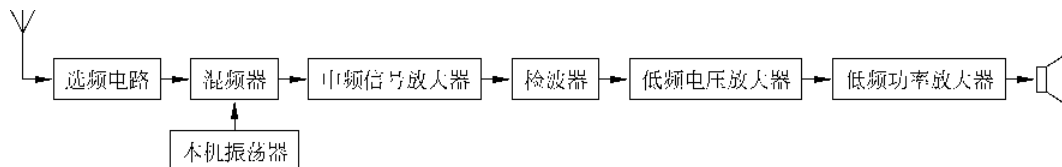


图 1.2 超外差式接收机的基本组成方框图

路的工作频率都是不变的。对于超外差收音机,选择不同的节目,本质上就是选择不同载波频率的已调波信号,这个操作常被称为选台。

1.1.3 超再生接收机的基本组成及其工作原理

超再生接收机,又被称为直接转换型接收机、零差接收机或零中频接收机,可以认为是一种特殊的超外差式接收机。其基本组成方框图如图 1.3 所示。虽然结构简单,但是,目前在一些简易电子通信系统中应用较多。

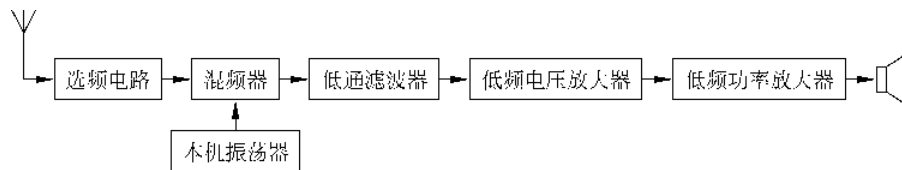


图 1.3 超再生接收机的基本组成方框图

在这种接收机中,本机振荡器输出信号的频率与选频电路输出信号的载波频率或中心频率相同,也就是说,该接收机的中频频率为零,这样放大和滤波就能在低频处实现,而在低频段只需较低的功耗就可以获得与在较高中频处相同的增益,同时还可以用表面贴封装的电阻和电容实现滤波,而无须外加一个既昂贵又庞大的类似 SAW(声表面波滤波器)的滤波器。对于超再生接收机,本质上就是把已调波的频谱线性搬移到调制信号(基带信号)的频带内,而无须检波器。超再生接收机只适用于模拟调制中的标准调幅、双边带调幅、单边带调幅、残留边带调幅和数字调制中的 OOK 调制。

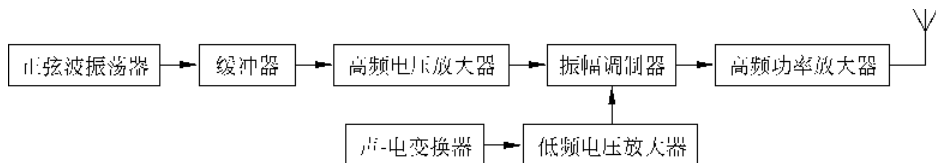
1.2 经典习题详解

1.1 电磁波具有哪些特点?

答 (1)电磁波具有波粒二象性;(2)在真空中的传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$;(3)具有绕射、折射和反射等特点。

1.2 试画出无线电发射设备的一般组成方框图,并简要说明各部分的功能。

答 以调幅广播为例,无线电发射设备的一般组成方框图如图题 1.2 所示。



图题 1.2 调幅广播发射机的基本组成方框图

正弦波振荡器产生高频载波信号；缓冲器能隔离正弦波振荡器与高频电压放大器，提高正弦波振荡器带负载的能力和频率稳定性；高频电压放大器把载波信号的振幅放大到振幅调制器需要的程度；振幅调制器完成调制，得到调幅波；高频功率放大器实现调幅信号的功率放大，以便于调幅信号远距离辐射出去；天线把调幅信号有效地辐射到空间；声-电变换器把语音信号转换为电信号；低频电压放大器把微弱音频信号的幅度进行放大。

1.3 现代通信系统有哪几种接收机？各有什么优缺点？

答 有直接放大式接收机、超外差式接收机和超再生接收机。

直接放大式接收机的优点是结构比较简单，成本较低，特别适合于作固定工作频率的接收机。直接放大式接收机的缺点主要是，由于工作频率一般是固定的或者只能微调，所以不能选择别的电台节目；对于不同的载波频率，接收机的灵敏度（接收微弱信号的能力）和选择性（区分不同电台的能力）变化比较剧烈，而且灵敏度受到高频小信号放大器不稳定的影响，不可能太高。

超外差式收音机的优点是灵敏度比较高，既适合于作固定工作频率的接收机，也适合于作工作频率变化范围较大的接收机，而且调谐方便，工作性能比较稳定。其缺点主要是，结构相对比较复杂。

超再生接收机的优点是灵敏度比较高，既适合于作固定工作频率的接收机，也适合于作工作频率变化范围较大的接收机，而且调谐方便。其缺点主要是，选择性、稳定性和信噪比稍差；当本机振荡器输出信号的频率发生漂移时，接收机的非线性失真比较严重。

高频小信号放大器

2.1 要点分析

本章的要点主要包括：电路的等效互换、晶体管的等效电路、单管谐振放大器的计算、多级谐振放大器的计算、小信号放大器的稳定性和放大电路的噪声等。

2.1.1 串、并联等效互换

图 2.1 是串、并联阻抗的等效互换电路图，其中， X_1 和 X_2 表示电抗（容抗或感抗）。

设 $Q = X_1/r_1 = R_2/X_2$ （等效前后品质因数不变），则串联转换为并联的计算式为

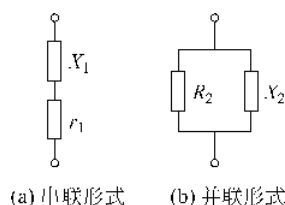
$$\left. \begin{aligned} R_2 &= (1 + Q^2)r_1 \\ X_2 &= (1 + 1/Q^2)X_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

并联转换为串联的计算式为

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{R_2}{1 + Q^2} \\ X_1 &= \frac{X_2}{1 + 1/Q^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

当 $Q \gg 10$ 时，可以近似为

$$\left\{ \begin{aligned} R_2 &\approx Q^2 r_1 \\ X_2 &\approx X_1 \end{aligned} \right\}, \quad \text{或} \quad \left\{ \begin{aligned} r_1 &\approx \frac{R_2}{Q^2} \\ X_1 &\approx X_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$



(a) 串联形式 (b) 并联形式

图 2.1 串、并联阻抗等效互换电路图

2.1.2 并联谐振回路的耦合连接与接入系数

1. 变压器耦合连接

在图 2.2 中，设变压器为理想变压器。等效后的电阻为

$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L \quad (2.4)$$

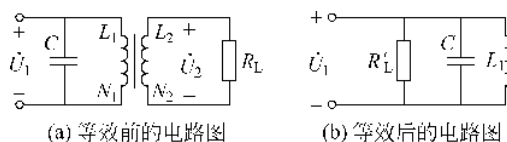


图 2.2 变压器耦合连接电路图

2. 自耦变压器耦合连接

在图 2.3 中,等效后的电阻为

$$R'_L = \left(\frac{N_1 + N_2}{N_2} \right)^2 R_L \quad (2.5)$$

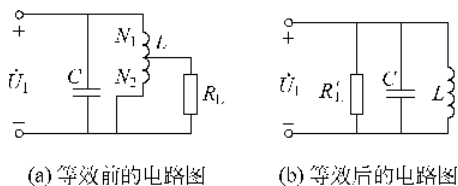


图 2.3 自耦变压器耦合连接电路图

3. 双电容分压耦合连接

在图 2.4 中,等效后的电阻为

$$R'_L = \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1} \right)^2 R_L \quad (2.6)$$

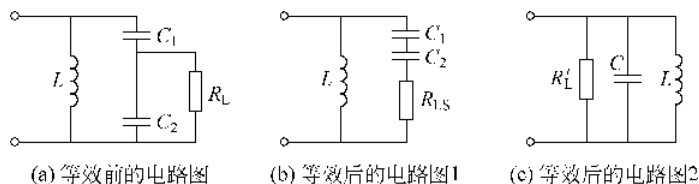


图 2.4 双电容分压耦合连接电路图

定义与变比关系有关的接入系数为

$$p = \frac{\text{转换前的圈数(或容抗)}}{\text{转换后的圈数(或容抗)}} \quad (2.7)$$

则对于上面讨论的三种情况,可以得到电阻转换的通式为

$$R'_L = \frac{1}{p^2} R_L \quad (2.8)$$

推广到电导、电抗、电流源和电压源的等效变比关系为

$$g'_L = p^2 g_L, \quad X'_L = \frac{1}{p^2} X_L, \quad I'_g = p I_g, \quad U'_g = \frac{1}{p} U_g \quad (2.9)$$

2.1.3 空芯变压器的等效电路

在图 2.5 中,变压器是空芯变压器。利用反映阻抗,可以简化电路的分析与计算。

设 $Z_L = R_L + jX_L$, $Z_{11} = R_1 + jX_{11}$, $Z_{22} = (R_2 + R_L) + j(X_{L2} + X_L) = R_{22} + jX_{22}$, $X_M =$

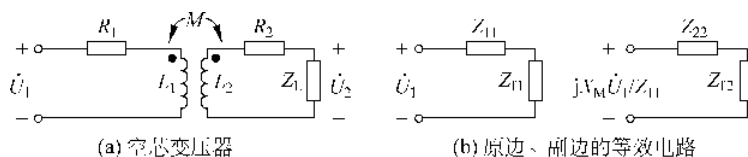


图 2.5 空芯变压器及其等效电路

$j\omega M$, 则反映阻抗为

$$\left. \begin{aligned} Z_{f1} &= R_{f1} + jX_{f1} = \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} - j \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} \\ Z_{f2} &= R_{f2} + jX_{f2} = \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} R_{11} - j \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

改变初、次级回路参数或耦合参量, 可使耦合回路达到部分谐振、复谐振或全谐振。

1. 部分谐振

部分谐振又分为初级部分谐振与次级部分谐振。初级部分谐振的条件是

$$X_{11} = \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} \quad (2.11)$$

次级部分谐振的条件是

$$X_{22} = \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11} \quad (2.12)$$

2. 复谐振

有两种情况可以产生复谐振。第一种是在初级部分谐振的同时, 初级回路达到共轭匹配的情况为

$$\left. \begin{aligned} X_{11} &= \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} \\ R_{11} &= \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

另一种是在次级部分谐振的同时, 次级回路达到共轭匹配的情况为

$$\left. \begin{aligned} X_{22} &= \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11} \\ R_{22} &= \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} R_{11} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

3. 全谐振

全谐振的条件是: 初级和次级回路都呈现电阻性。对于全谐振有一种特殊情况——最佳全谐振, 它既满足全谐振的条件, 初、次级回路又满足共轭匹配的条件。

2.1.4 耦合谐振回路的频率特性

耦合谐振回路的谐振曲线的通用表达式为

$$\alpha = \frac{2\eta}{\sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}} \quad (2.15)$$

其中, $\eta = kQ$ 是耦合因数; $\xi = Q_L \times 2\Delta f / f_0$ 是广义失谐量。

η 值不同, 频率特性也不同。

1. $\eta = 1$ 时特性曲线的通频带和矩形系数

$\eta = 1$ 时, 称为临界耦合, 特性曲线呈单峰, 回路处于最佳耦合下的全谐振。

特性曲线的通频带为

$$2\Delta f_{0.7} = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q_L} \quad (2.16)$$

矩形系数为

$$K_{r0.1} = \frac{\sqrt[4]{396}}{\sqrt{2}} = \sqrt[4]{99} \approx 3.15 \quad (2.17)$$

2. $\eta < 1$ 时的特性曲线

$\eta < 1$ 时, 称为弱耦合, 特性曲线呈单峰, 次级回路两端电压小于临界耦合时的值, 通频带也变窄了。

3. $\eta > 1$ 时的特性曲线

$\eta > 1$ 时, 称为强耦合, 特性曲线呈双峰。

2.1.5 晶体管的等效电路

1. y 参数等效电路

晶体管的 y 参数等效电路如图 2.6 所示。其中, y_{11} 为输出短路时的输入导纳; y_{12} 为输入短路时的反向传输导纳; y_{21} 为输出短路时的正向传输导纳; y_{22} 为输入短路时的输出导纳。

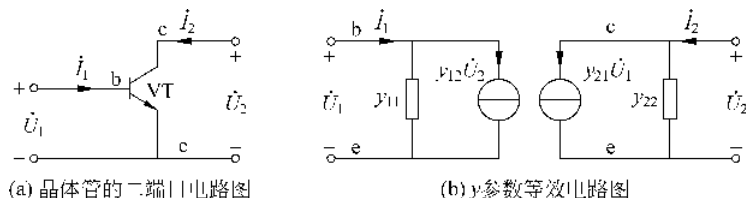


图 2.6 晶体管及其 y 参数等效电路图

2. 混合 π 型等效电路

晶体管的混合 π 型等效电路如图 2.7 所示。其中, $r_{b'e} = \frac{26\beta_0}{I_E(\text{mA})}$, $g_m = \frac{I_E(\text{mA})}{26}$ 。

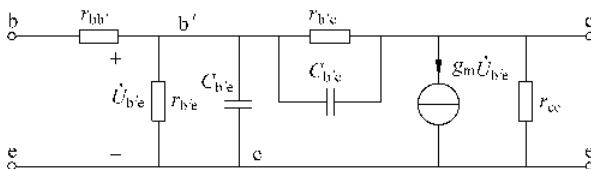


图 2.7 晶体管混合 π 型等效电路

2.1.6 晶体管谐振放大器

以图 2.8 为例。直接分析图 2.8 是不易的,尤其是计算放大器的性能指标。只有通过简化的等效电路才可行。一般的,等效电路分三步完成。第一步,把晶体管 VT_1 用其 y 参数等效电路进行等效,如图 2.9(a)所示;第二步,把变压器的 1、2 端和 4、5 端的电路等效到 1、3 端,如图 2.9(b)所示;第三步,把电路等效为简单的 RLC 并联谐振回路,如图 2.9(c)所示。

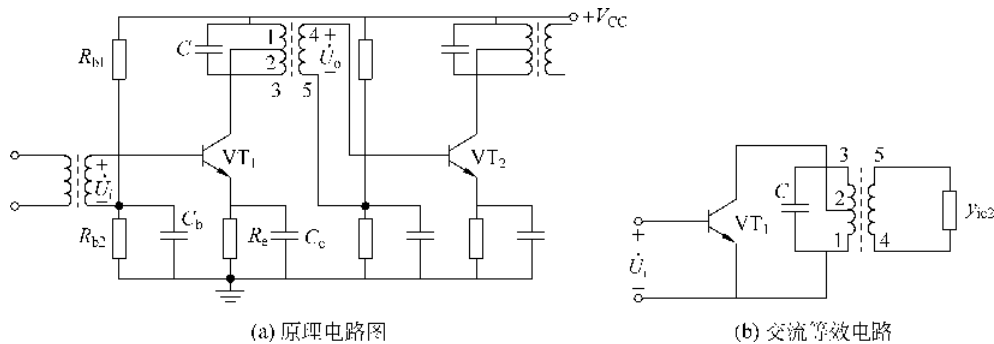


图 2.8 高频小信号放大器电路图

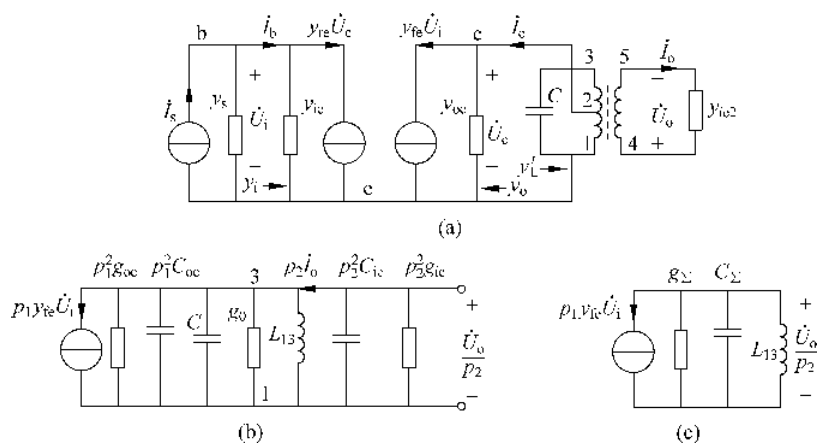


图 2.9 单调谐放大器的等效电路

图 2.9 中, $p_1 = \frac{N_{12}}{N_{13}}$, $p_2 = \frac{N_{45}}{N_{13}}$, $g_\Sigma = p_1^2 g_{oe} + g_0 + p_2^2 g_{ie}$, $C_\Sigma = p_1^2 C_{oe} + C + p_2^2 C_{ie}$, $g_0 = \frac{1}{\omega_0 L_{13} Q_0}$, $Q_L = \frac{1}{\omega_0 L_{13} g_\Sigma}$ 。

放大器的增益为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = - \frac{p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma + j \left(\omega C_\Sigma - \frac{1}{\omega L_{13}} \right)} \quad (2.18)$$

放大器的谐振电压增益为

$$\dot{A}_{u0} = -\frac{p_1 p_2 y_{fe}}{g_{\Sigma}} \quad (2.19)$$

通频带为

$$2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_L} \quad (2.20)$$

矩形系数为

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \sqrt{99} \approx 10 \quad (2.21)$$

2.1.7 场效应管谐振放大器

以场效应管共源放大器为例。图 2.10 所示为场效应管的 y 参数等效电路(共源)和模拟等效电路。

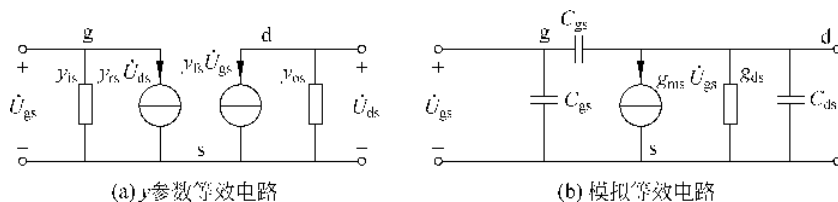


图 2.10 共源场效应管的等效电路

利用前面所述的三步等效方法,不难计算出电压增益为

$$\dot{A}_u = -\frac{p_1 p_2 y_{fs}}{g_{\Sigma} + j\left(\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L_{13}}\right)} \approx -\frac{p_1 p_2 g_{ms}}{g_{\Sigma} + j\left(\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L_{13}}\right)} \quad (2.22)$$

式中, $g_0 = \frac{1}{Q_0 \omega L_{13}}$, $g_{\Sigma} = g_0 + p_1^2 g_{ds} + p_2^2 g_L$, $C_{\Sigma} = C + p_1^2 (C_{gd} + C_{ds}) + p_2^2 C_L$ 。

谐振电压增益为

$$\dot{A}_{u0} = -\frac{p_1 p_2 y_{fs}}{g_{\Sigma}} \approx -\frac{p_1 p_2 g_{ms}}{g_{\Sigma}} \quad (2.23)$$

谐振曲线、通频带和矩形系数都与晶体管相同,这里就不重复了。

2.1.8 放大电路的噪声

1. 电阻的热噪声

电阻的热噪声的功率谱密度为

$$S(f) = 4kTR \quad (2.24)$$

式中, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 为波尔兹曼常数; T 为电阻的绝对温度值, 单位是 K; R 为电阻值, 单位是 Ω 。

电阻的热噪声电压 $u_n(t)$ 的方均值为

$$\overline{u_n^2(t)} = 4kTR\Delta f_n \quad (2.25)$$

或把热噪声电压 $u_n(t)$ 表示成噪声电流 $i_n(t)$ 的方均值为

$$\overline{i_n^2(t)} = \frac{4kT\Delta f_n}{R} = 4kT\Delta f_n g \quad (2.26)$$

2. 晶体管的噪声

晶体管的噪声主要有热噪声、散粒噪声、分配噪声和闪烁噪声。

3. 场效应管的噪声

场效应管是电压控制型器件,其噪声主要是栅极的散粒噪声、沟道电阻的热噪声、漏极与源极之间的等效电阻热噪声,还存在闪烁噪声。

2.1.9 放大电路噪声的表示方法及其计算

1. 等效噪声频带宽度

设二端口线性网络的电压传输系数为 $A(f)$, 输入端的噪声功率谱密度为 $S_i(f)$, 则输出噪声电压的等效噪声频带宽度为

$$\Delta f_n = \frac{\overline{u_n^2}}{A^2(f_0)S_i(f_0)} = \frac{\int_0^\infty A^2(\tau)S_i(\tau)d\tau}{A^2(f_0)S_i(f_0)} \quad (2.27)$$

2. 噪声系数

放大电路的噪声系数是指其输入端的信噪比与输出端的信噪比之比值,即

$$N_F = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} \quad (2.28)$$

用分贝值表示噪声系数 N_F 为

$$N_F(\text{dB}) = 10\lg \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} \quad (2.29)$$

噪声系数 N_F 的另一种形式为

$$N_F = \frac{P_{no}}{A_P P_{ni}} = 1 + \frac{P_{noII}}{P_{noI}} \quad (2.30)$$

3. 噪声温度

噪声温度是用来表征放大电路内部噪声的另一种形式。设放大电路的实际温度为 T , 用噪声温度和额定噪声功率的概念表示噪声系数的另一种形式为

$$N_F = 1 + \frac{T_i}{T} \quad (2.31)$$

4. 多级放大器的噪声系数

设 N_{Fi} 和 A_{PHi} 分别是第 i 级放大器的噪声系数和功率增益, n 级放大器的总噪声系数为

$$N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{A_{PH1}} + \frac{N_{F3} - 1}{A_{PH1} A_{PH2}} + \cdots + \frac{N_{Fn} - 1}{A_{PH1} A_{PH2} \cdots A_{PH(n-1)}} \quad (2.32)$$