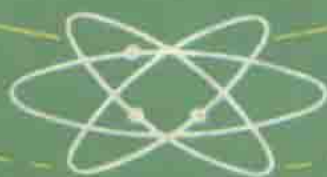


红外电子技术

—高等学校教材—

红外电子技术

郭迪忠 主编



国防工业出版社

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二～一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

序 言

本书系根据1983年6月在西安召开的全国高等学校工科电子类教材编写会上所提交的编写大纲并经各兄弟院校对该大纲所提修改意见而编写的。

本书由华中工学院郭迪忠担任主编，西北电讯工程学院方潮宝担任主审，参加审阅工作的还有孔沐生、刘上乾。编审者均依据《激光与红外》编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅。

本课程的参考时数为60学时，实验课应另行开设，教材中未涉及这方面的内容。本教材主要围绕对探测器输出的已调电信号进行解调、放大、转换和显示等信号处理来编写，内容包括：低噪声电子电路、探测器的辅助电路、解调电路、视频放大器、自动增益控制电路、锯齿波电压与电流电路、同步与分频、数模转换以及图像显示等。书中附有例题、思考题和习题。

使用本教材时，应先学完电工基础和电子技术等课程。

本教材第一、第七、第八、第九章由郭迪忠编写，第二、第三章由吴继友编写，第四、第六章由陈冬珍编写，第五章由蒋本和编写。

编写过程中，华东工学院孔得人、河北大学时琴声、山东大学石连运等对本书内容取舍及编排提出宝贵意见和建议，在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中错误和不妥之处，希望使用本教材的师生和其他读者给予批评、指正。

目 录

第一章 低噪声电子电路	5
§ 1.1 噪声基础	5
1.1.1 噪声 信噪比	5
1.1.2 确定信号与随机信号	5
1.1.3 信号的相关性	8
1.1.4 噪声带宽	9
1.1.5 噪声系数	10
§ 1.2 噪声的物理性质	10
1.2.1 热噪声	10
1.2.2 热噪声等效电路	11
1.2.3 散弹噪声	12
1.2.4 低频噪声	13
1.2.5 过剩噪声	13
1.2.6 含多个噪声源的电路	14
§ 1.3 放大器的噪声	16
1.3.1 放大器的噪声模型	16
1.3.2 等效输入噪声	17
1.3.3 最佳源电阻 R_{opt}	18
1.3.4 级联网络的噪声	19
§ 1.4 元器件的噪声	20
1.4.1 双极晶体管的噪声	20
1.4.2 晶体管的等效输入噪声	22
1.4.3 中频区晶体管的 E_n 与 I_n	23
1.4.4 中频区的最佳源电阻与最佳噪声系数	23
1.4.5 场效应晶体管的噪声	24
1.4.6 集成电路的噪声	25
1.4.7 二极管的噪声	26
1.4.8 电阻的噪声	27
1.4.9 电容器的噪声	27
1.4.10 电感的噪声	27
1.4.11 变压器的噪声	28
§ 1.5 低噪声电子电路的设计	29
1.5.1 设计原则与步骤	29
1.5.2 元件的挑选	29
1.5.3 放大器的无噪声偏置电路	31
1.5.4 晶体管的组态与放大器的反馈	35
1.5.5 屏蔽与接地	37
1.5.6 去耦电路	42
§ 1.6 噪声的测量	43
1.6.1 正弦波法	44
1.6.2 噪声发生器法	45
1.6.3 E_n 和 I_n 的测量	46

1.6.4 噪声带宽 Δf 的测量	46
第二章 探测器辅助电路	50
§ 2.1 红外探测器的分类	50
2.1.1 按探测机理分类	50
2.1.2 按偏置方式分类	50
2.1.3 按探测器的内阻高低分类	51
§ 2.2 探测器的偏置与放大	52
2.2.1 一般直流偏置电路与最佳偏置工作点	53
2.2.2 直流匹配偏置、恒流偏置与恒压偏置	54
2.2.3 前放输入信号、输入噪声及信噪比与偏置参数的关系	54
2.2.4 直流偏置与放大电路举例	58
2.2.5 交流偏置与微波偏压偏置	62
§ 2.3 光伏型探测器的偏置与放大	68
2.3.1 探测器的伏-安特性及直流等效电路	68
2.3.2 探测器工作点的确定	70
2.3.3 前放输入信噪比与偏置参数、输入电阻的关系	71
2.3.4 光伏探测器的最佳偏置及信号的放大	73
§ 2.4 低输入阻抗前置放大器	78
2.4.1 升压变压器耦合	79
2.4.2 共基极电路	79
2.4.3 并联负反馈	80
2.4.4 并联晶体管	81
§ 2.5 高输入阻抗前置放大器	84
2.5.1 场效应晶体管放大器的输入阻抗	84
2.5.2 仿真反馈	86
第三章 解调电路	92
§ 3.1 红外已调制信号的产生及已调制信号的性质	92
3.1.1 红外已调制信号的产生	92
3.1.2 调幅波的性质	96
3.1.3 调角波的性质	98
§ 3.2 调幅波的解调	100
3.2.1 二极管峰值包络检波电路	101
3.2.2 平均值包络检波电路	104
3.2.3 同步检波电路	111
§ 3.3 调角波的解调	121
3.3.1 相位检波电路	122
3.3.2 时域微分鉴频电路	127
3.3.3 频域斜率鉴频电路	130
3.3.4 频率计数式鉴频电路	133
3.3.5 相位鉴频电路	134
第四章 视频放大器	141
§ 4.1 共射放大器的高频特性	141
§ 4.2 增益-频率特性的高频补偿	142
4.2.1 负反馈放大器	143
4.2.2 用电抗元件进行补偿	147
§ 4.3 增益-频率特性的低频补偿	157
§ 4.4 视频放大器的输出级	159

第五章 自动增益控制电路(AGC)	162
§ 5.1 闭环 AGC 控制原理及其特性	162
§ 5.2 AGC 的控制方式	165
5.2.1 改变晶体管的 I_e 和 U_{ce}	165
5.2.2 改变受控级与其它级之间的耦合程度	166
5.2.3 差分放大器的增益控制	167
§ 5.3 AGC 控制电压的产生	169
§ 5.4 延迟式 AGC 电路	172
§ 5.5 设计 AGC 电路时的几点考虑	173
§ 5.6 其它类型的 AGC 电路	176
5.6.1 对数放大器用作 AGC 电路	176
5.6.2 非线性(对数特性)负载法	180
5.6.3 运算放大器-场效应管 AGC 电路	181
第六章 锯齿波电压与电流电路	184
§ 6.1 锯齿波电压电路	184
§ 6.2 锯齿波电流电路	192
§ 6.3 慢扫描电流电路	195
§ 6.4 用软件产生锯齿波	199
第七章 同步与分频	203
§ 7.1 同步的概念	203
§ 7.2 直接触发同步	203
§ 7.3 同步范围的确定	205
§ 7.4 锁相同步	208
§ 7.5 分频	212
§ 7.6 锁相分频	214
第八章 数/模与模/数转换	216
§ 8.1 数/模转换器(D/A 转换器)	216
8.1.1 权电阻 D/A 转换器	217
8.1.2 R-2R 梯形网络 D/A 转换器	218
8.1.3 集成电路 D/A 转换器	220
§ 8.2 模/数转换器(A/D 转换器)	221
8.2.1 双积分 A/D 转换器	222
8.2.2 集成电路 A/D 转换器	224
8.2.3 用软件进行 A/D 转换	225
第九章 图像显示	227
§ 9.1 阴极射线管(CRT)	227
9.1.1 电子枪	227
9.1.2 偏转系统	231
9.1.3 荧光屏	237
§ 9.2 一般显示	238
9.2.1 模拟曲线显示	238
9.2.2 图像显示	240
§ 9.3 特殊显示	243
9.3.1 等温显示	243
9.3.2 轮廓增强显示	244
9.3.3 伪彩色显示	247

常用符号表

A	增益
AGC	自动增益控制
A_0	运算放大器符号、开环增益
A_p	功率增益
A_{sy}	系统增益
A_u	电压增益
A_{u0}	中带电压增益
$\dot{A}_u = a_1 + ja_2$	复数电压增益
A_{p0}	最大功率增益
a	阳极
B	磁感应强度
C	电容、相关系数
C_b/e	发射结电容
C_i	输入电容
CP	时钟脉冲
D	二极管
D_0	光伏探测器
D_Z	稳压二极管
d_{rc}	集肤深度
E_s	直流电源
E_{sz}	过剩噪声
E_f	低频噪声
E_n	E_n-I_n 噪声模型中的噪声电压
E_{ni}	噪声模型中的等效输入噪声
E_{no}	放大器总输出噪声
E_r	电阻热噪声
E	电场强度
F	噪声系数
F_0	点噪声系数
F_{opt}	最佳噪声系数
FET	场效应晶体管
f	频率、电场力、磁场力
f_h	上限频率

f_l	下限频率
Δf	带宽
G	电导、场效应管栅极标志、(高)
G_L	负载电阻的电导
g_d	动态电导
g_m	双极型晶体管的跨导
H	磁场强度
$H(t)$	开关函数
$h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$	双极型晶体管的混合参数
I	直流电流值、正弦电流有效值
I_b	双极晶体管基极电流
I_{ceo}	晶体管穿透电流
I_D	二极管电流、漏极电流
I_d	FET 导电沟内的热噪声
I_{DSS}	FET 的 $U_{GS}=0$ 时的漏极电流
I_f	低频噪声电流
I_g	FET 输入噪声电流发生器
I_m	交变电流的最大值
I_n	E_n-I_n 噪声模型的噪声电流发生器
I_o	反向饱和电流
I_{ph}	P-N 结光伏二极管的光电流
I_{sb}	散弹噪声
I_s	热噪声电流
i	交变电流瞬时值
J	入射光子密度
K	常数、绝对温度单位
K_d	检波器电压传输系数
K_t	传输函数
k	阴极、玻尔兹曼常数
k_i	检波器非线性失真系数、调频比例系数
k_p	调相比比例系数
L	电感
m	调制度
N	电子型半导体、噪声功率、反射系数
N_i, N_o	输入、输出噪声功率
NF	对数噪声系数
n	变压器变比
n_c	载流子带中的态密度
n_o	无光照时的自由载流子浓度

P	空穴型半导体
$p(e)$	概率密度
Q	品质因数
q	电荷 $q = 1.59 \times 10^{-19}(\text{C})$
$\mathcal{R}$	响应度
R_o	集电极负载电阻、传输线特性电阻
R_f	反馈电阻
R_i, r_i	输入电阻
R_L	负载电阻
R_n	FET 沟道电阻
R_0	探测器的暗电阻、谐振腔的谐振电阻
R_{opt}	最佳源电阻
R_s	信号源电阻
$r_{bb'}$	基极扩展电阻
$r_{b'e}$	共射接法下, 发射结的微变电阻
r_{ce}	共射接法下, 集射极之间的微变电阻
r_d	动态电阻
r_e	肖克莱射极电阻
S_d	探测器面积
S	FET 的源极标志、面积
S_i, S_o	输入、输出信号功率
S/N	信号噪声功率比、信噪比
$S(f)$	功率谱密度
SW	开关
T	半导体三极管、周期、温度
Tr	变压器
t	时间
U	直流电压、正弦电压有效值
U_b	基极偏压
U_c	控制电压
U_{c*o}	截止电压
U_m	交变电压最大值
U_p	FET 的夹断电压
U_s	信号电压
u_i, u_o	输入、输出电压瞬时值
v	光生载流子运动速度、电磁波传播速度
W	能量
Y	电路导纳
Z	电路阻抗、介质特性阻抗

Z_0	传输线特性阻抗
Z_i, Z_o	输入、输出阻抗
α	波纹系数、低频噪声公式中的指数
β	共射接法下 $\beta = \Delta I_c / \Delta I_b$ 、衰减系数
β_f	反馈系数
γ	导电系数
δ	电流密度、去极化因子
ε	介质的介电系数、自然对数之底, $\varepsilon = 2.718$
η	效率
θ	检波二极管导通角、辐角
λ	波长
μ	磁导率、载流子漂移迁移率
ρ	电阻率
τ	时间常数、脉冲宽度
τ_0	光生载流子寿命
τ_r	渡越时间
τ_{rel}	电介质的介电弛豫时间
ϕ	光通量、磁通量
φ	相位差、电位
Ω	调制波角频率
ω	正弦角频率、载波角频率

第一章 低噪声电子电路

§1.1 噪声基础

1.1.1 噪声 信噪比

噪声的广义定义是：掩盖或扰乱有用信号的某种不期望的扰动。分两种情形讨论。扰动源位于电路外部，例如附近有电力输电线、电话线、带触点的电器（继电器、开关）、以电动机作动力的用具（电钻、机床、电扇）等，通过电磁耦合来影响有用信号，习惯上将这种扰动称为干扰。一般可以采用电磁屏蔽、去耦合、滤波、元件的合理布局及合理走线等方法，使干扰减小或消除。倘扰动源位于电路内部，由于构成电路的材料或器件的物理原因所产生的扰动就称之为噪声。例如处于绝对零度以上的导体中出现的热噪声，通过势垒的载流子构成的散弹噪声等，均为本书研究的对象。

噪声是一个随机变量，它由振幅随机和相位随机的许多频率分量组成，因此其波形为非周期的非正弦量。这样的随机过程是无法确切知道它在某一时刻的瞬时值的，但是可以测定其较长时间内的均方根值。

噪声的存在，使得探测器的分辨能力下降，并且限制了系统的动态范围。

一般地说，无论多么微弱的信号总是可以放大到所要求的大小，但与此同时，噪声也被放大，这是因为在放大器中噪声与信号是相对存在着的。在低噪声电路中，单独谈信号的大小或者噪声的高低是不能说明问题的。在实际工作中，常用信号与噪声的功率之比来衡量电子电路在弱信号工作时的情况，这个比值简称为信噪比，即

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{信号功率}}{\text{混入信号中的噪声功率}}$$

信噪比还可以用分贝表示，即

$$\frac{S}{N} = 10 \lg \frac{\text{信号功率}}{\text{混入信号中的噪声功率}} \quad (\text{dB})$$

1.1.2 确定信号与随机信号

按照信号的性质可以分为确定信号与随机信号两大类。确定信号中又有周期确定信号与非周期确定信号之分。周期信号是最简单的确定信号，例如正弦周期信号

$$e(t) = E_m \sin \omega t \quad (1-1)$$

和非正弦周期信号

$$e(t) = E_{m1} \sin \omega_1 t + E_{m2} \sin 2\omega_1 t + E_{m3} \sin 3\omega_1 t + \dots \quad (1-2)$$

均为确定信号，因为无论任何时刻，信号大小可由式（1-1）与式（1-2）分别确定。图1-1的（a）和（b）是这两种周期信号的波形。

非周期确定信号有三种，一种是概周期信号，另一种是一次过程，还有一种是瞬态过程。概周期信号〔见图1-2（a）〕是一种含有谐波分量的周期信号的延伸，可将它看作是一些正弦项（或余弦项）的叠加，即

$$e(t) = E_{m1}\sin\omega_1 t + E_{m2}\sin\omega_2 t + E_{m3}\sin\omega_3 t + \dots \quad (1-3)$$

式中

$$\omega_1 \neq n\omega_2 \neq m\omega_3 \neq \dots$$

这表示各个分量的频率是互相无关，相互之间的比值既非整数也非有理分数，而是

$$\frac{\omega_j}{\omega_k} = \text{无理数}$$

就是说，信号波形要在无限长时间以后才重现。

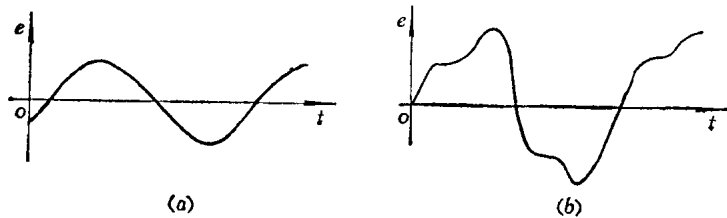


图1-1 正弦周期信号 (a) 与非正弦周期信号 (b)

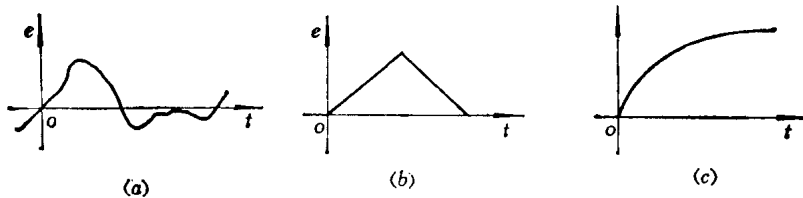


图1-2 概周期信号 (a)、一次过程 (b) 和瞬态过程 (c)

一次过程的信号是：在整个观察时间内，信号仅出现一次，不再重复；在信号出现期间，它可以用确定的函数式 $e(t)$ 表示，也可以用图形〔图1-2(b)〕表示。在无限长时间内，仅出现一个矩形脉冲或者一周正弦波等就属于一次过程的例子。

瞬态过程一般发生在电路状态改变时。电路状态的改变可以是电路与电源接通或断开造成，也可以是电路参数突然变化（短路、开路）造成。无论是哪一种原因，电路都要从一种稳定状态过渡到另一种稳定状态，中间经历的过渡状态就是瞬态过程。电路形式一定，改变电路状态的方式也一定，瞬态过程便是确定的。图1-2(c)代表一个实际电容器接通直流电源时的瞬态过程。实际上的瞬态过程会比这复杂得多，但是，只要重复同一状态的改变，瞬变过程便重现原来的过程一次。

随机信号与确定信号有很大的区别。例如拿随机信号和概周期信号进行比较，随机信号在任何时刻的幅度以及相位均不能预见，亦即其富里叶变换的幅度及相位均为未知；此外，随机信号的频谱至少分段连续。概周期信号则在任何时刻的幅度以及相位均为确定。

随机过程可以像确定过程的方法一样用一个函数 $e(t)$ 来表示，此函数值可能是实数或者是复数，也可能是矢量；同一的 t ， $e(t)$ 具有随机的值，这种随机的变化可以用分布函数的图形来描绘。许多噪声（如热噪声、散弹噪声等）的瞬时幅度随时间按高斯分布，这种概率密度分布是高斯在实验中测量误差的分布时所发现，故又名误差

律，其数学形式为

$$p(e) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \varepsilon^{-\frac{(e-\bar{e})^2}{2\sigma^2}} \quad (1-4)$$

式中 ε 为自然对数的底， $\varepsilon = 2.718$ 。噪声电压平均值 $\bar{e}$ 为

$$\bar{e} = \int_{-\infty}^{\infty} e p(e) de$$

概率密度分布的方差 σ^2 为

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (e - \bar{e})^2 p(e) de \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^2 p(e) de - 2\bar{e} \int_{-\infty}^{\infty} e p(e) de + (\bar{e})^2 \int_{-\infty}^{\infty} p(e) de \\ &= \bar{e}^2 - 2(\bar{e})^2 + (\bar{e})^2 = \bar{e}^2 - (\bar{e})^2 \end{aligned}$$

式 (1-4) 对应的图形为图 1-3，这是一个以噪声电压平均值 $\bar{e}$ 为中心的方差 σ^2 的对称分布，对于远离平均值的 e 值，近似按指数规律下降至零。高斯曲线下所包含的面积代表事件发生的概率，因概率的范围从 0 至 1，故曲线下的总面积等于 1。

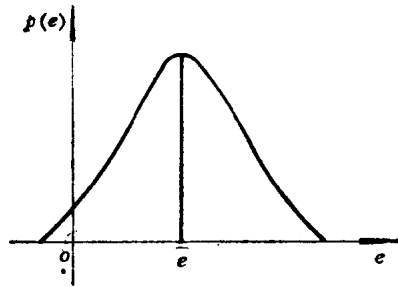


图1-3 高斯分布

图 1-4 表示一个典型的随机噪声波形以及与之对应的高斯分布。若在某瞬间对噪声电压取样，则瞬时幅度落在 e_1 至 e_2 范围内的概率为

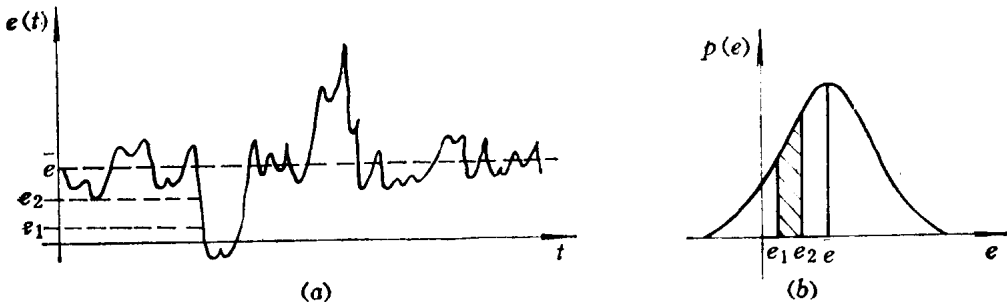


图1-4 随机变量 $e(t)$ 的波形 (a) 及其高斯分布图 (b)

$$\int_{e_1}^{e_2} p(e) de = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{e_1}^{e_2} \varepsilon^{-\frac{(e-\bar{e})^2}{2\sigma^2}} de$$

这就是图 1-4(b) 中阴影部分的面积。 $\bar{e}$ 为噪声电压的直流分量，通常可以不去考虑

它, 因而高斯分布简化为

$$p(e) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{e^2}{2\sigma^2}} \quad (1-5)$$

实际上这就相当于用电容器隔去了直流分量。

1.1.3 信号的相关性

从物理意义上来讲, 如噪声电压系各自独立产生, 其瞬时值之间没有任何关系时, 它们就是不相关的, 否则就是相关的。

两个形状相同、相位一致, 但幅度可以不同的波形, 叫做全相关或 100% 的相关。例如两个频率相同、初相一致的正弦波, 就是全相关波形的例子。全相关的波形, 其瞬时值可以代数相加, 而其均方根值则可算术相加。

从数学形式而言, 两个不同的连续波形 $e_1(t)$ 与 $e_2(t)$ 的相关函数 $\overline{e_1 e_2}$ 定义为

$$\overline{e_1 e_2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T e_1(t) \cdot e_2(t) dt \quad (1-6)$$

上式实际上就是乘积 $e_1(t) \cdot e_2(t)$ 对时间的平均, 也是 $e_1(t)$ 与 $e_2(t)$ 之间相似性或关联性的量度。例如频率相同、相位一致的两正弦波 $e_1(t) = E_{1m} \sin \omega t$ 与 $e_2(t) = E_{2m} \sin \omega t$, 其相关函数为

$$\begin{aligned} \overline{e_1 e_2} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T e_1(t) e_2(t) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_{1m} \sin \omega t \cdot E_{2m} \sin \omega t dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} E_{1m} E_{2m} (1 - \cos \omega t) dt = E_1 E_2 \end{aligned}$$

此时的 $\overline{e_1 e_2}$ 为最大, 这是全相关时的情形。如果 $e_1(t)$ 与 $e_2(t)$ 的相位相差 90° , 则相关函数为

$$\overline{e_1 e_2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_{1m} \sin \omega t \cdot E_{2m} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) dt = 0$$

这是不相关的情形。

不相关波形的瞬时值可以代数相加, 均方根值 $\sqrt{\overline{e^2}}$ 可以按下列公式计算

$$\overline{e^2} = \overline{e_1^2} + \overline{e_2^2}$$

因为均方根值 $E = \sqrt{\overline{e^2}}$, 所以上式又可写为

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 \quad (1-7)$$

如果介乎相关与不相关之间, 则属于部分相关, 这通常发生在噪声电压中的一部分有关联, 另一部分则是独立的情形。部分相关的波形求和时的一般表达式为

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2CE_1 E_2 \quad (1-8)$$

其中

$$C = \frac{\overline{e_1 e_2}}{\overline{E_1} \cdot \overline{E_2}}$$

C 称为相关系数, 它的数值范围从 -1 到 $+1$ (包括 0)。 $C = 0$ 时, 两电压不相关; $C = 1$ 时, 两电压全相关, 即 $E = E_1 + E_2$ 为直接相加。

除特别声明外, 一般在处理噪声电压时, 不论它是相关或不相关或部分相关, 为简单起见, 统统都当作不相关的来处理。这样自然会带来一些误差, 但是误差不大。例如两电压相等且为全相关时, 相加后的电压为 $E = 2E_1$; 若它们为不相关时, 相加后则为 $\sqrt{2} E_1$, 这样带来的误差是 $\frac{2 - \sqrt{2}}{2} \approx 30\%$ 。如果它们是部分相关, 或一个远大于另一个, 则误差将比 30% 小。

1.1.4 噪声带宽

放大器或调谐电路的带宽的定义是: 高半功率点与低半功率点之间的频率间隔。此定义对噪声而言就不再适用。

噪声带宽 Δf 是系统或电路的电压增益平方的带宽, 在此带宽的范围内有相同的增益。噪声带宽的数学形式为

$$\Delta f = \frac{1}{A_{u0}^2} \int_0^\infty [A_u^2(f)] df \quad (1-9)$$

式中 Δf ——噪声带宽 (Hz);

$A_u(f)$ ——电压增益, 频率的函数;

A_{u0} ——最大 (或中带) 电压增益。

由于功率增益正比于电压增益的平方, 所以噪声带宽也可以写为

$$\Delta f = \frac{1}{A_{p0}} \int_0^\infty A_p(f) df \quad (1-10)$$

式中 $A_p(f)$ ——功率增益, 频率的函数;

A_{p0} ——最大功率增益。

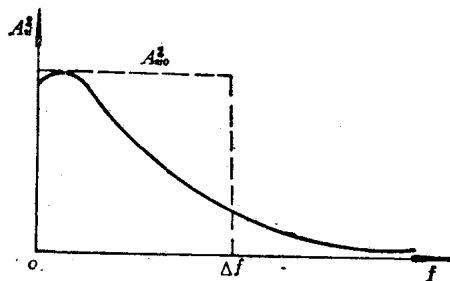


图1-5 噪声带宽的图形表示

图 1-5 是一个功率增益曲线, 从图上可以求得噪声带宽。按下列方法作出矩形: 以最大电压增益的平方为高; 宽度 Δf 的选择必须使矩形面积等于曲线下方面积, 则该矩形的水平坐标就是噪声带宽。如果将上述图形画在线性坐标纸上, 通过数坐标的格子, 能很快确定 Δf 。

1.1.5 噪声系数

一个理想的无噪声放大器，其输出端的噪声仅仅是被放大的输入端噪声。由于实际的放大器本身还存在着噪声，所以其输出端的噪声必然大于上述理想的情况，放大器本身的噪声越大，则这种差别就越大。这个问题不仅存在于放大器中，而且也存在于系统或元器件中。为了描述这类电路的噪声水平，采用了噪声系数 F ，即

$$F = \frac{\text{实际电路的输出噪声功率}}{\text{理想电路的输出噪声功率}} \quad (1-11)$$

或者用信噪比来表示

$$F = \frac{\text{输入信噪比}}{\text{输出信噪比}} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} = \frac{N_o}{A_p N_i} \quad (1-12)$$

式中 S_i 、 S_o ——输入、输出信号功率；

N_i 、 N_o ——输入、输出噪声功率；

A_p ——功率增益。

噪声系数也可以写成对数形式，以分贝表示

$$NF = 10 \lg F \quad (1-13)$$

为区别起见，称 NF 为对数噪声系数。此外，在窄带情形时常用到点噪声系数，以 F_p 表示，通常规定 $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ 时的 F 为 F_p 。

噪声系数的主要用途是用来比较放大器的噪声性能，由它可以衡量出放大器引起信噪比恶化的程度。一个好的放大器，它本身的噪声应很小，即 $F \approx 1$ 或 $NF \approx 0$ 。对于一个放大器，总输入噪声不增加，随着源电阻增大，热噪声增加，由此使得噪声系数减小，这说明不便于用噪声系数来比较不同的放大器。为此，通常规定输入噪声功率 N_i 由信号源电阻的热噪声所引起，在仅仅考虑源电阻热噪声，而且源电阻相同时，对两个放大器的噪声系数进行比较才有意义。

噪声系数随着偏置、频率、温度以及源电阻等的不同而不同，因此，确定噪声系数时，应该考虑到上述这些因素。

§ 1.2 噪声的物理性质

1.2.1 热噪声

导体中电荷载流子的随机热运动所产生的噪声叫做热噪声或约翰逊噪声。这种载流子的运动类似于微粒的布朗运动。在无外加电压作用时，载流子热运动的方向杂乱无章，没有任何倾向性。随着温度的升高，这种热运动变得更加剧烈。设想在电阻中有一横截面 S ，在某个时刻，观察从左向右穿过截面 S 的载流子数目一般与从右向左穿过 S 面的数目相等。如果观察的时间间隔取得更短一些，则从一个方向穿过 S 面的载流子数也许会比反方向穿过的多一些，而在另一个时间里可能会少一些，这就出现了正或负偏差。这些正、负偏差在全部时间里的平均值等于零，可是它们的方差却不为零，而是一个定值。它表现在电阻两端就是开路热噪声电压，其数学表达式为

$$E_r = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (1-14)$$

其中 k ——玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s/K}$)；

T ——电阻的绝对温度 (K);

Δf ——测量系统的带宽 (Hz);

R ——电阻或阻抗的实部 (Ω)。

热噪声普遍的存在, 与电阻的种类无关。例如 $1\text{ k}\Omega$ 炭质电阻与 $1\text{ k}\Omega$ 线绕电阻就热噪声而言大小是一样的。实际上, 炭质电阻的噪声是大于线绕电阻的, 这是因为还存在有其它噪声的缘故。因此, 热噪声也就成为电阻性元件的低限噪声。

热噪声功率的频率分布是均匀的, 就是说, 每赫芝带宽内的噪声功率是一个常数; 从 100 Hz 到 200 Hz 带宽内的噪声功率等于 1000 Hz 到 1100 Hz 带宽内的噪声功率。凡是对于频率有均匀的功率分布的噪声就称为白噪声, 这意味着, 它包含了很多的频率成分, 如同白光由许多颜色组成的一样。除热噪声外, 其它许多噪声源也有这种特性, 同样称之为白噪声。单位带宽内的噪声功率称为功率谱密度。热噪声的功率谱密度为 $s(f) = E^2/\Delta f = 4kTR(\text{V}^2/\text{Hz})$, $s(f)$ 与 f 的关系曲线是一条平行于 f 轴的直线。

为尽可能减小电子电路的热噪声, 一般可采取下列办法: 1. 减小电阻; 2. 在所需信号的频谱能够通过的条件下, 带宽尽可能窄一些; 3. 将电路放在低温或散热条件良好的环境中使用。

1.2.2 热噪声等效电路

为了便于对含有噪声的电路进行分析, 把产生热噪声的每个电阻元件用一个等效电路表示, 等效电路由噪声电压(电流)发生器和无噪声电阻组成。例如接入 a 、 b 端的一个有噪声的电阻, 可用一个同样欧姆数但无噪声的电阻与一个噪声电压为 $E_r = \sqrt{4kTR\Delta f}$ 的噪声电压发生器串联的电路来代替, 如图 1-6(a) 所示。

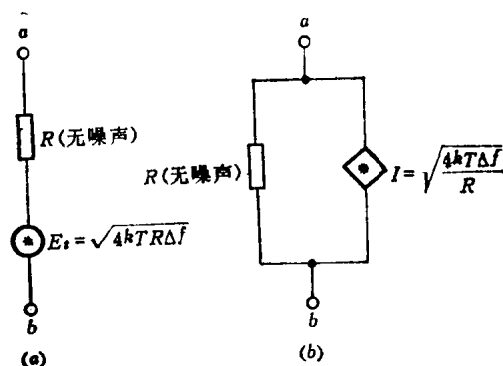


图1-6 热噪声等效电路

根据电势源与电流源的等效互换原则, 图 1-6(a) 的串联等效电路可用一个等效噪声电流发生器并联一个无噪声的电阻来代替, 如图 1-6(b) 所示。

噪声电流发生器 I_r 的均方根值为

$$I_r = \frac{E_r}{R} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}} \quad (1-15)$$

由于噪声的相位是随机的, 所以图 1-6 中的噪声发生器均不标明它的参考正向。