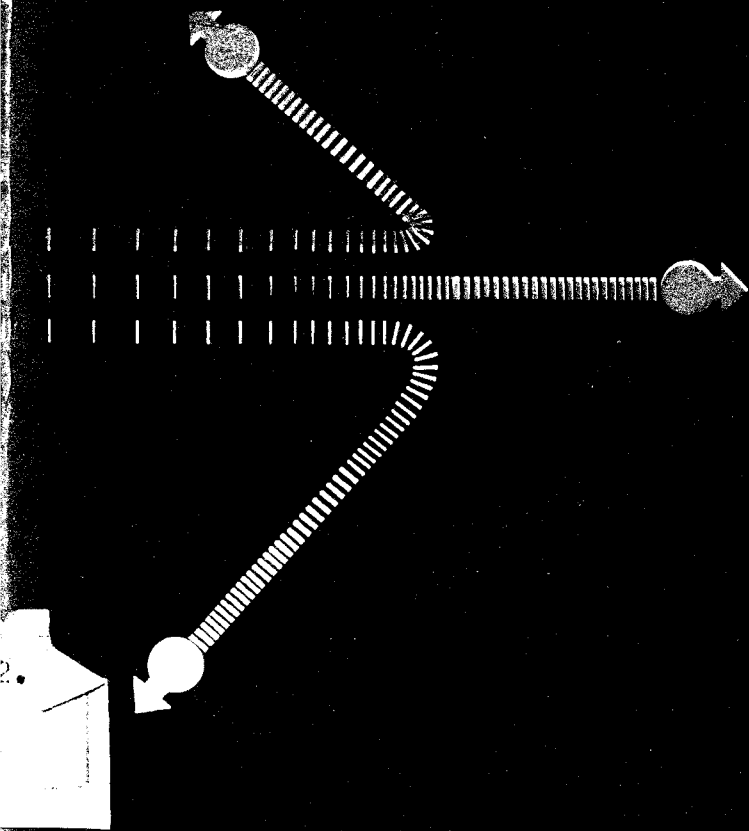


电子系统 噪声及低噪声设计方法



电子系统噪声及低噪声设计方法

戴逸松 编著

*

吉林人民出版社出版 吉林省新华书店发行
长春新华印刷厂印刷

*

787×1092毫米32开本 10.75印张 231,000字

1984年6月第1版 1984年6月第1次印刷

印数：1—4,040册

统一书号：13091·165 定价：1.45元

内 容 简 介

本书应用了平稳随机过程理论,较全面地讨论了电子系统内部噪声的表示方法(包括了噪声源的相关性),并给出了电子系统中噪声的一般计算方法。

本书主要是从工程应用的角度,系统论述了各种类型的检测仪器中前置放大器的低噪声设计方法,包括源电阻及源电抗,窄带放大器及宽带放大器等情况,并给出了一些典型的低噪声前置放大器线路。

本书还论述了电子系统对外部干扰的抑制方法。最后讨论了噪声的测试方法,并研究了各种测量方法的系统误差及随机误差来源和修正方法。

本书可以作为从事微弱信号检测、通信、仪器仪表、自动控制等方面的科研人员、工程技术人员及大专院校师生的参考书。

序 言

众所周知，通讯、雷达、电视、物理、化学、生物、医学、机械、天文、宇航、地质、海洋等方面的检测仪器，要达到的一个主要目的是通过各种传感器来检测一些微弱信号。对这些微弱信号放大处理过程中，遇到的共同问题就是要尽量排除电子系统内部的噪声及外来的干扰，这是因为电子系统的噪声及干扰越小，就能够检测到越微弱的信号，不仅可以提高检测到的信息的可靠性，而且可以从检测到的微弱信号中发现被研究对象的新的规律及现象。

对电子系统噪声的研究及各种低噪声电子设计方法，近年来已越来越引起人们的重视。国外在噪声理论及低噪声设计方面，已经发表了大量的文章，有了一些专著，并且被列入大学生及研究生课程；运用这些理论成功地设计了一些低噪声线路，从而提高了检测仪器的灵敏度。我国近年来虽然也翻译了其中一些代表性著作，但数量很少，有些侧重于噪声物理，有些则过于简单，对于系统阐述低噪声设计方面的书还很少见到。

本书的目的，是要从工程角度来系统研究电子系统的低噪声设计方法，因此对于噪声物理仅给出一些必要的知识。在阐述电子线路中噪声计算及低噪声设计方法的同时，将介绍一些典型的低噪声线路及噪声测试方法。本书为工程技术领域中从事检测工作的科技工作者提供了有效的低噪声设计方法。

书中除了系统介绍近代噪声理论及低噪声设计方法外，还包括作者近年来发表在国内有关学术刊物上的低噪声设计理论及方法，还吸收了国内兄弟单位在这个领域内的科研成果（所引用的资料见书末文献索引），作者在这里一并表示感谢。

第一章，介绍了有关电噪声的统计特征及通过线性电路的计算方法。重点阐述了噪声带宽的概念及噪声源相关性的表示法；指出了常用的相关系数的局限性，引出了噪声功率谱相关系数的概念。

第二章，系统地研究了电路噪声的计算方法。目前文献中噪声计算，通常忽略噪声源的相关性，这不仅会带来40%的误差，而且从理论上也是不完善的。作者应用平稳随机过程的随机谐波分量概念，解决了各种复杂的电子线路中噪声谱密度计算，完善地解决了考虑噪声源相关性后的电路噪声计算方法。其次，从低噪声设计出发，本章重点讨论了噪声四端网络的等效噪声模型的计算及变换，为低噪声设计提供了有效的计算工具。应该指出，本书为低噪声放大线路的专著，因此书中不涉及非线性电路中噪声现象及计算，读者可参考其他著作。

第三章介绍了电子系统中晶体管、场效应管、电阻等器件的噪声及计算。重点讨论了噪声源的功率谱密度（包括自谱密度及互谱密度计算）。本章给出有关的结果，而对于器件内部噪声的物理本质未进行详细介绍。

第四章讨论了衡量前置放大器噪声性能的各种指标。重点讨论了在源电阻及窄带放大器常用的噪声系数，以及在源电抗及宽带放大器中应用的等效输入噪声电压（或电流）的定义及计算。本章还指出，噪声电阻及噪声温度概念虽然较

为简单，但仅适用于某些器件（电子管、场效应管）。

第五章应用了上述概念，系统地研究了前置放大器的低噪声设计方法。对于源电阻、窄带放大器中应用噪声系数来讨论，而对于源电抗及宽带放大器中应用等效输入噪声来讨论。本章除了介绍常用的选择最佳工作点方法外，还重点探讨了噪声匹配的概念以及用噪声匹配网络来获得最佳噪声性能的方法。介绍了各种典型的低噪声前置放大器线路，可供读者选用。由于前置放大器不仅有内部噪声，而且可能接收各种外来干扰（从广义上说，任何迭加在信号上的不希望随机扰动均称为噪声，但本书中噪声及干扰有所区别，即分别代表来自内部及外来的随机扰动），因此本章还介绍了前置放大器的抗干扰措施。

第六章讨论了噪声测试方法，研究了各种测试方法的随机误差及系统误差，指出了这些方法适用范围及减少误差方法。最后还介绍了几种比较典型的国产噪声测试仪器。

作者希望本书能对在各种工程技术领域中从事微弱信号检测的科技工作者及通信、自动控制、检测仪器专业的大专院校师生、研究生有所帮助。由于作者水平所限，书中难免有不妥及错误的地方，热忱希望读者批评指正。

作 者

目 录

序言

第一章 电噪声的基本知识

§1 噪声的统计特征	(1)
1.1 噪声的概率密度	(1)
1.2 噪声的平均值及有效值	(4)
§2 噪声的功率谱密度及相关函数	(5)
2.1 平稳随机过程的概念	(5)
2.2 噪声的功率谱密度	(6)
2.3 噪声的相关函数	(7)
§3 噪声通过线性电路的计算	(12)
3.1 放大器输出噪声的计算	(12)
3.2 放大器的噪声带宽	(15)
§4 噪声源的相关性	(21)
4.1 噪声相关系数	(21)
4.2 噪声源的迭加原理	(22)
4.3 电阻网络中噪声迭加原理	(24)

第二章 噪声电路的计算方法

§1 噪声的谱分解方法	(28)
1.1 噪声的随机谐波分量	(28)
1.2 噪声的自谱密度及互谱密度	(29)
1.3 噪声的谱相关系数	(31)
§2 噪声电路的计算方法	(32)

§3 噪声四端网络的等效噪声模型及应用.....	(35)
3.1 $e-i$ 噪声模型.....	(36)
3.2 i_1-i_2 噪声模型.....	(40)
3.3 e_1-e_2 噪声模型	(42)
3.4 e_1-i_2 噪声模型	(43)
3.5 i_1-e_2 噪声模型	(45)
§4 噪声四端网络等效噪声模型的计算方法.....	(46)
4.1 i_1-i_2 噪声模型计算方法.....	(46)
4.2 e_1-e_2 噪声模型计算方法.....	(49)
4.3 e_1-i_2 噪声模型计算方法	(51)
4.4 i_1-e_2 噪声模型计算方法	(52)
4.5 $e-i$ 噪声模型计算方法	(53)
§5 四端网络等效噪声模型的转换	(57)
5.1 i_1-i_2 与 $e-i$ 噪声模型的转换公式.....	(57)
5.2 e_1-e_2 与 $e-i$ 噪声模型的转换公式	(59)
5.3 e_1-i_2 与 $e-i$ 噪声模型的转换公式.....	(60)
5.4 e_2-i_1 与 $e-i$ 噪声模型的转换公式.....	(61)
5.5 $e'-i'$ 与 $e-i$ 噪声模型的转换公式.....	(62)

第三章 电子器件内部的噪声

§1 引 言	(66)
§2 电阻中的噪声	(67)
2.1 电阻的热噪声	(67)
2.2 电阻的过剩噪声	(70)
2.3 无源二端网络输出热噪声计算	(74)
2.4 无源四端网络噪声等效电路	(77)
§3 晶体管的内部噪声	(80)
3.1 P-N 结的噪声等效电路	(80)
3.2 共基极晶体管的噪声等效电路	(82)

3.3	共射极晶体管的噪声等效电路	(85)
3.4	晶体管低频噪声	(87)
§4	晶体管的 $e-i$ 噪声模型	(89)
4.1	晶体管共射组态的 $e-i$ 噪声模型.....	(90)
4.2	晶体管共集组态的 $e-i$ 噪声模型.....	(96)
4.3	晶体管共基组态的 $e-i$ 噪声模型.....	(101)
4.4	晶体管三种组态的 $e-i$ 噪声比较.....	(106)
§5	场效应管的内部噪声	(108)
5.1	场效应管的内部噪声源	(109)
5.2	场效应管的 $e-i$ 噪声模型	(113)
5.3	场效应管三种组态的 $e-i$ 噪声比较.....	(119)
§6	集成运算放大器的内部噪声	(122)
§7	二极管的噪声	(125)

第四章 放大器的噪声性能分析

§1	放大器的噪声系数	(127)
1.1	噪声系数的定义	(127)
1.2	检测系统的实际灵敏度	(131)
§2	晶体管的噪声系数计算	(133)
2.1	共射组态的噪声系数计算	(133)
2.2	共基组态的噪声系数计算	(139)
2.3	晶体管三种组态噪声系数比较	(142)
2.4	晶体的最佳源电阻及最佳源电抗	(145)
§3	放大器的等效输入噪声	(149)
§4	级联电路的噪声系数	(151)
4.1	级联电路的噪声系数计算——弗里斯公式	(151)
4.2	无源网络的噪声系数	(154)
§5	级联电路的等效输入噪声.....	(159)
5.1	级联电路等效输入噪声电流计算	(159)

5.2	级联电路等效输入噪声电压计算	(163)
5.3	级联电路的等效输入 $e-i$ 噪声模型	(166)
§6	反馈放大器的等效输入噪声	(169)
6.1	并联电压负反馈放大器的等效输入噪声	(170)
6.2	并联电流负反馈放大器的等效输入噪声	(172)
6.3	串联电压负反馈放大器的等效输入噪声	(173)
6.4	串联电流负反馈放大器的等效输入噪声	(175)
§7	放大器的等效噪声电阻及噪声电导	(176)
7.1	放大器的等效噪声电阻	(176)
7.2	放大器的等效噪声电导	(178)
7.3	级联电路的等效噪声电阻	(182)
§8	放大器的等效噪声温度	(185)
§9	场效应管的噪声系数	(186)
9.1	共源组态的场效应管噪声系数	(186)
9.2	场效应管共集、共基组态的噪声系数	(199)
§10	集成电路运算放大器的噪声系数	(199)
10.1	反相输入运算放大器的噪声分析	(200)
10.2	同相输入运算放大器的噪声分析	(203)

第五章 前置放大器的低噪声设计方法

§1	低噪声电子设计的基本原则	(205)
§2	直接耦合方式的有源器件及工作点选择	(207)
2.1	有源器件的选择原则	(207)
2.2	有源器件的直流工作点的选择	(209)
2.3	多个有源器件的联合工作方式	(212)
§3	噪声匹配网络的原理及设计	(223)
3.1	前置放大器输入级的噪声匹配原理	(223)
3.2	半导体器件最佳工作点的选择	(225)
3.3	噪声匹配网络的设计原则	(230)

3.4	几种噪声匹配网络的设计	(232)
§4	级联电路的低噪声设计方法	(241)
4.1	输入级线路的选择原则	(241)
4.2	集电极负载的选择	(245)
4.3	第二级电路的设计	(248)
§5	具有源电抗的放大器的低噪声设计	(249)
5.1	直接耦合方式的低噪声设计	(250)
5.2	噪声匹配网络的设计	(251)
§6	宽带放大器的低噪声设计	(253)
6.1	宽带放大器的低噪声设计原则	(253)
6.2	电视摄像前置放大器的低噪声设计	(257)
6.3	磁带记录器的磁头输入电路低噪声设计	(265)
§7	前置放大器供电电路的低噪声设计	(267)
7.1	基极偏置电路的低噪声设计	(267)
7.2	射极偏置电路的低噪声设计	(270)
§8	前置放大器的抗干扰技术	(271)
8.1	来自电源干扰的抑制方法	(273)
8.2	来自空间电磁耦合干扰的抑制方法	(276)
8.3	来自地线干扰的抑制方法	(280)

第六章 噪声测试方法

§1	放大器输出噪声电压测量	(284)
1.1	测量原理	(284)
1.2	测量误差的分析	(285)
§2	放大器等效输入噪声电压测量	(292)
2.1	测量原理	(292)
2.2	正弦信号源法	(295)
2.3	测量系统的误差分析	(297)

§3 标准噪声源法	(301)
3.1 测量原理	(301)
3.2 测量系统的误差分析	(302)
3.3 其他标准噪声源及应用	(308)
§4 国产噪声测试仪器	(314)
4.1 QG—7 型高频噪声系数测试仪	(314)
4.2 QC—14 型低频噪声系数测试仪	(319)
4.3 频谱分析仪	(321)
参考文献	(324)

第一章 电噪声的基本知识

§1 噪声的统计特征

1.1 噪声的概率密度

在信号检测电路中,我们经常会遇到各种干扰和噪声,妨害了对微弱信号的检测,因而是影响仪器灵敏度的主要原因之一。通常干扰是指来自电路外部的原因,例如电源的50Hz干扰,无线电波的干扰或附近工业设备引起的电火花干扰等。这种干扰具有一定规律性,可以采取适当的屏蔽、滤波等方法加以减少或消除,有关内容我们将在第五章介绍。

本书所讨论的噪声是指电路中各个器件内带电粒子无规则运动引起的,这种器件内部固有的噪声是一种随机过程,即在任何一瞬间的取值是不能预料的,图1—1 a 为电噪声

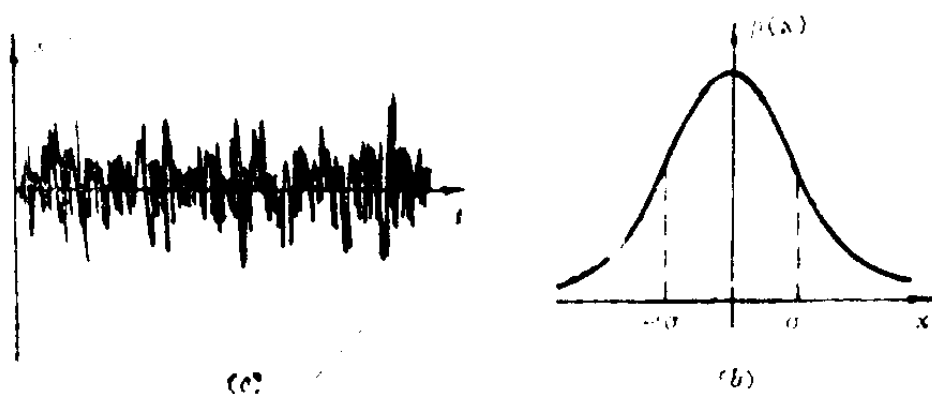


图 1—1 电噪声的波形及其概率分布

的波形。通常噪声电压可能具有各种数值，因此是一种连续型随机变量。要完全消除电路的噪声是不可能的，我们研究噪声的目的是要掌握噪声的统计特征，并在电路中采取可能的措施尽量减少它，从而提高仪器对微弱信号检测的灵敏度。所以，研究噪声问题的重要性是显而易见的。

电噪声最重要的统计特征是它的概率密度 $p(x)$ ，它表示在某一时刻噪声电压 $x(t)$ 取值在 $(x, x + \Delta x)$ 的概率 $P(x, x + \Delta x)$ 的相对比值，即

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x, x + \Delta x)}{\Delta x} \quad (1-1)$$

知道了 $p(x)$ ，那么电路噪声电压在某一时刻取值在 (x_1, x_2) 之间的概率为

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx \quad (1-2)$$

电路中噪声电压的概率分布曲线 $p(x)$ 一般符合高斯正态分布规律，即

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 a 表示随机变量的统计平均值， σ^2 为随机变量的方差，如果 $a = 0$ ，则式 (1-3) 表示成

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

图 1-1 b 表示 $a = 0$ 的 $p(x)$ 曲线。具有高斯分布的噪声称高斯噪声（又称正态噪声），这种噪声有下列几个特点值得注意。

(1) 电路噪声在任何瞬间均可能取得很大的数值（实际上当然受到晶体管放大器的限幅，而不会很大），但取值越

大的概率越小，取值超过 $|x| > x_0$ 的概率为

$$P(|x| > x_0) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-x_0}^{x_0} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx$$

表 1—1 表示在不同 x_0/σ 值下的 $P(|x| > x_0)$ 值^{〔1〕}

表 1—1 高斯噪声的峰值超过 x_0 的概率

超过 (某-) 值 x_0 的 概率 $P(x > x_0)$	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.00001	0.000001
x_0/σ	1.645	2.576	3.291	3.890	4.417	4.892

由表 1—1 可见，任何瞬间电路噪声的值基本是在 $\pm 3\sigma$ 之间，超过 $\pm 4\sigma$ 值的可能性很小（小于 0.001%）。这在噪声测量中有一定实用价值，例如用示波器观察噪声波形时，则能够看到的最大噪声峰峰值 V_{P-P} 可以认为是有效值 σ 的 4×2 倍，于是被测噪声电压有效值 $\sigma = V_{P-P}/8$ 。但在用记录仪记录噪声电压波形时，由于记录仪的惯性使噪声的快变化部分得不到响应，因而一般认为可以记录到的 $V_{P-P} = 3 \times 2\sigma$ ，于是被测噪声电压有效值 $\sigma = V_{P-P}/6$ 。

上述结果也说明，测量噪声电压时，其测量放大器的动态范围必需要大于三倍的被测噪声有效值，否则噪声峰值可能被限幅，使测量带来误差。

(2) 式(1-3)的 $p(x)$ 对 x 求二阶导数 $p''(x)$ ，令 $p''(x) = 0$ ，求出 $x = \pm\sigma$ 。说明 $x = \pm\sigma$ 为概率曲线 $p(x)$ 的拐点，即在该点上 $p(x)$ 的斜率最大，说明噪声电压过有效值 σ 后出现概率很快减少，因此噪声电压大部分时间是集中在 $|x| < \sigma$ 。上述结论给噪声电压有效值测量提供了一种可能，即在

示波器观察噪声时，其显示图形中亮度的明暗分界面的位置，即是噪声电压的有效值 σ 。

1.2 噪声的平均值及有效值

概率密度虽然是噪声的主要统计特征，但它仅用来衡量噪声分布规律，而不能直接用来衡量噪声电压的大小。因此从工程计算角度，我们更需要了解的是噪声的平均值及有效值。

(1) 噪声的平均值

随机过程的平均值 $E\langle x \rangle$ 的定义为

$$E\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx \quad (1-5)$$

对于高斯噪声有 $E\langle x \rangle = a$ 。电路的噪声是属于平稳随机过程，故噪声平均值表示了噪声的直流分量，因此电路噪声的平均值 $a = 0$ 。所以研究电路噪声的平均值没有实用价值。

(2) 噪声的有效值

随机过程的方差 $D\langle x \rangle$ 的定义为

$$D\langle x \rangle = E\langle (x - \bar{x})^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx \quad (1-6)$$

对于平稳随机过程，噪声电压均方值等于 $E\langle x^2 \rangle$ 。由于对高斯分布的电路噪声，当 $a = 0$ 时，有

$$E\langle x^2 \rangle = D\langle x \rangle = \sigma^2 \quad (1-7)$$

式(1-7)说明 σ^2 反映了噪声电压的功率（在单位电阻上噪声提供的功率），而 σ 即为高斯噪声的有效值。

噪声电压的有效值是电路噪声大小的最主要指标，表示噪声电压的强度。设噪声电压为 $u(t)$ ，则用 U 来表示噪声电

压有效值，单位为伏特（噪声电流有效值为 I ）。电路中若同时存在信号及噪声，则衡量信号与噪声间相对大小的指标是信噪比 SNR ，定义为

$$SNR = \frac{U_s}{U_n} \quad (1-8)$$

式(1-8)中 U_s 表示信号的有效值（有时也可用信号峰值）， U_n 为噪声的有效值。电路中某点的 SNR 越大，则表示该处的信号越强。从信号检测角度来看， SNR 太小时则从噪声中提取信号将会遇到困难。因此，低噪声设计的主要目的就是要选择器件、工作点、线路，尽量减少放大器的固有噪声及外来干扰，使输出的信噪比尽量提高。

§2 噪声的功率谱密度及相关函数

2.1 平稳随机过程的概念

电路噪声不仅在某一时刻取值是随机的，而且这种噪声随时间变化也是随机的，称为随机过程。通常我们研究的电路噪声都是指电路已经达到稳定状态后的情况，所以是一种平稳随机过程。这种平稳随机过程的主要特征是它的概率密度、平均值、方差等不随时间变化。因此电路噪声的平均值 $E\langle x \rangle$ 及均方值 $E\langle x^2 \rangle$ 也可以用时间的平均来求，即

$$\begin{aligned} E\langle x \rangle &= \overline{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x dt \\ E\langle x^2 \rangle &= \overline{x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2 dt \end{aligned} \quad (1-9)$$

式(1-9)的重要性是给我们提供了一个测量噪声电压均方