

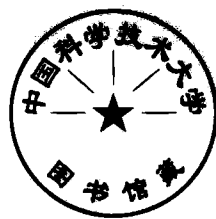
戴逸松 著

声学电子学

山东科学技术出版社

噪声电子学

戴逸松 著



山东科学技术出版社

噪声电子学

戴逸松 著

*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路 邮政编码 250002)

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂德州厂印刷

*

787mm×1092mm 1/16 开本 16.75 印张 4 插页 365 千字

1997 年 3 月第 1 版 1997 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—1000

ISBN 7—5331—1734—4

P·16 定价 40.00 元

内 容 简 介

本书是一本系统阐述电子电路中噪声分析理论及应用的专著。内容包括电子线路噪声源性质(第一章)、噪声电路分析计算理论(第二章)、噪声二端口网络理论(第三章)、低噪声放大器设计(第四章)、电噪声测量方法及装置(第五章)、噪声用于器件缺陷分析及可靠性预测方法(第六章)。

书中除了系统介绍噪声电子学的基本内容外,还将重点介绍有关本领域的最新研究成果及作者近年来的研究成果。本书对从事微弱信号检测、通信、仪器仪表、自动控制及半导体器件研制生产单位的科研、生产及教学人员和大专院校师生均有重要的参考价值。

山东省泰山科技专著出版基金会

名誉会长	赵志浩	宋木文	陆懋曾	伍 杰
	卢鸣谷	董凤基	宋法棠	
会 长	陈光林	石洪印		
副 会 长	宋桂植	何宗贵	吕可英	车吉心
	孙肇琨	王为珍(常务副会长)		
秘 书 长	王为珍(兼)			
副秘书长	尹兆长			
理 事	(以姓氏笔画为序)			
	王为珍	王凤起	尹兆长	刘韶明
	李道生	李德泉	张传礼	陈 刚
	蒋玉凤			
评审委员会	(以姓氏笔画为序)			
	王思敬	卢良恕	师昌绪	吴阶平
	杨 乐	何祚庥	汪成为	高景德
	唐敖庆	蔡景峰	戴念慈	

山东省泰山科技专著出版基金会
赞助单位

山东省财政厅

山东省出版总社

山东省科学技术委员会

山东科学技术出版社

山东泰山酿酒饮料集团总公司

董事长兼总经理 张传礼

山东金泰集团股份有限公司

董事长兼总裁 刘黎明

我们的希望

进行现代化建设必须依靠科学技术。作为科学技术载体的专著，正肩负着这一伟大的历史使命。科技专著面向社会，广泛传播科学技术知识，培养专业人才，推动科学技术进步，对促进我国现代化建设具有重大意义。它所产生的巨大社会效益和潜在的经济效益是难以估量的。

基于这种使命感，自 1988 年起，山东科学技术出版社设“泰山科技专著出版基金”，成立科技专著评审委员会，在国内广泛征求科技专著，每年补贴出版一批经评选的科技著作。这一创举已在社会上引起了很大反响。

1992 年，在山东省委、省政府的支持下，在原“泰山科技专著出版基金”的基础上，由山东省出版总社、山东省科学技术委员会和山东科学技术出版社共同成立了“山东省泰山科技专著出版基金会”，并得到企业界的热情赞助，为资助学术专著的出版提供了更加可靠的保证。

但是，设基金补助科技专著出版毕竟是一件新生事物，也是出版事业的一项改革。它不仅需要在实践中不断总结经验，逐步予以完善；同时也更需要社会上有关方面的大力扶植，以及学术界和广大读者的热情支持。

我们希望，通过这一工作，高水平的科技专著能够及早问世，充分显示它们的价值，发挥科学技术作为生产力的作用，不断推动社会主义现代化建设的发展。愿基金会支持出版的著作如泰山一样，耸立于当代学术之林。

泰山科技专著评审委员会

1992 年 12 月

前 言

噪声电子学的研究内容包括电子线路内部的噪声源性质、噪声电路分析计算理论、电噪声测量方法及低噪声电路设计。它是当代电子学的一个重要方面，也是信息学科的前沿研究方向。近年来，随着在物理、化学、生物医学等基础学科中对自然现象及规律的深入探索，在通信、测量、导航、医疗仪器等工业科技领域中生产的发展及进步，人们必须测量及接收越来越小的电信号。因此，测量或接收装置中的内部噪声影响越来越为明显，这种噪声已成为制约电子仪器和装备进一步提高信号检测灵敏度及改进接收信号质量的关键因素。可见对电子系统中噪声及其规律研究已经成为电子学的一个重要研究方向。

本书的目的是要系统地阐述电子系统中噪声源特点、电路噪声计算及分析理论和方法、放大器的噪声性能指标及低噪声设计方法、电噪声测量及谱成分分析技术和装置。虽然电子系统中噪声是一种有害的因素，它妨碍了信号的正确检测，但由于噪声是半导体器件内部物理现象的反映，因此噪声又可以作为对半导体器件内部缺陷及可靠性的一种最灵敏、最有效的指示及衡量标准。为此本书还将专门讨论电噪声用于器件缺陷及可靠性评估的原理及方法。

有关噪声的研究最早为奈奎斯特(Nyquist)对电阻热噪声及约翰逊(Johnson)对电真空器件散弹噪声的研究。1944年弗里斯(Friis)开始研究电路中噪声计算，至今仅几十年历史。虽然目前国外对半导体器件内部噪声的物理机理研究已基本成熟，并出版了一系列著作，但是专门论述电路噪声分析计算理论及低噪声电路设计的专著在国外仍很少见。特别是近十年以来，有关噪声电子学方面又取得了长足的进步，因此本书中除了系统介绍噪声电子学的基本内容外，还将介绍有关本领域的最新研究成果，包括作者近年来有关本领域方面的研究成果。本书主要特色及创新处为：

1. 在噪声电路分析及计算理论中，提出了噪声二端口网络理论及复杂噪声电路理论。进一步发展及完善了噪声电路理论，解决了像低噪声集成运放一类复杂电路的噪声准确计算。

2. 在低噪声电路设计中，提出了噪声匹配网络理论，运用噪声系数图及最佳源阻抗解决了与各种信号源配合的低噪声放大器的最优设计。首次深入研究了具有各种组态的级联电路及反馈电路的低噪声设计方法，解决了宽带放大器的低噪声设计。

3. 在噪声测量技术中，传统的正弦波法发展成为对噪声谱测量，并进一步对噪声成分进行定量的分析(包括白噪声、 $1/f$ 噪声及 $g-r$ 噪声)。为准确了解器件内部噪声机理及对低噪声放大器优化设计提供了有力的测量手段。

4. 首次详细阐述用低频噪声及其谱成分来分析器件内部深能级杂质及评估器件的使用可靠性，给出国内外学者在这方面的试验成果。本书中计算中低频噪声对器件的内在缺陷及寿命预测方法是一项正在发展的新技术，已引起国内外普遍重视。这种方

法具有快速、经济及非破坏性等方面的优点，可以为高可靠器件的筛选及使用提供一种有效的手段。

综上所述，《噪声电子学》中讨论的噪声分析理论、低噪声放大器设计、噪声测量技术及噪声用于器件内在缺陷评估方法，在通信、测量、红外探测、地质勘探、水声技术、医学仪器等各个工业领域中均有广泛的应用前景。本书对从事微弱信号检测、通信、仪器仪表、自动控制等领域科研、生产及教学和科技人员及大专院校师生均有重要参考价值。

本书介绍的作者研究成果曾列入国家自然科学基金、国家教委博士点基金、吉林省科委应用基础项目及机械部教育司科技项目，得到这些单位的资助，在此表示衷心的感谢。

作者还要在这里特别感谢中国科学院及中国工程院院士叶培大教授、王越教授、保铮教授及刘永坦教授对本书的热枕推荐和积极帮助。本书出版过程中得到山东科学技术出版社“泰山科技专著出版基金”的资助以及责任编辑的热心支持、大力推荐和精心编辑，在此表示衷心感谢。

本书引用了书末所附的参考文献中的内容，在此向有关作者致谢。

作 者
1996 年 9 月

目 录

第一章 电子线路内部噪声源及其性质	1
第一节 电噪声及其统计特征.....	1
一、噪声的概率分布	1
二、噪声的功率谱密度	3
三、噪声的相关函数	4
第二节 电噪声通过线性电路计算.....	6
一、放大器输出噪声计算	6
二、放大器的噪声带宽	7
第三节 电阻中的噪声.....	8
一、电阻的热噪声	8
二、电阻的过剩噪声	10
第四节 双极晶体管中的噪声	12
一、PN 结噪声及二极管噪声等效电路	12
二、晶体三极管的内部噪声源	13
三、共基极晶体管的噪声等效电路.....	15
四、共射极晶体管的噪声等效电路.....	17
第五节 场效应晶体管中的噪声	17
一、场效应晶体管的内部噪声源	17
二、场效应管的噪声等效电路	19
第六节 集成电路中的噪声	20
一、模拟集成电路.....	20
二、数字集成电路.....	21
第二章 噪声电路分析理论	23
第一节 噪声电路的功率叠加原理	23
一、噪声相关系数.....	23
二、噪声功率叠加原理	23
第二节 噪声电路的谱分解方法	25
一、噪声的随机谐波分量及功率谱密度	25
二、噪声功率谱相关系数	26
三、噪声电路的谱分解方法	27
第三节 复杂噪声电路分析理论	29
一、节点电压噪声谱方程	29
二、回路电流噪声谱方程	30

第四节 噪声二端口网络的等效噪声模型	30
一、 $e-i$ 噪声模型	30
二、 i_1-i_2 噪声模型	33
三、 e_1-e_2 噪声模型	35
四、 e_1-i_2 噪声模型	36
五、 i_1-e_2 噪声模型	37
第五节 噪声二端口网络等效噪声模型的转换	38
一、二端口网络的传递函数	38
二、 i_1-i_2 与 $e-i$ 噪声模型的转换	40
三、 e_1-e_2 与 $e-i$ 噪声模型的转换	42
四、 e_1-i_2 与 $e-i$ 噪声模型的转换	43
五、 e_2-i_1 与 $e-i$ 噪声模型的转换	44
第六节 二端口网络噪声模型的合并与转移	45
一、二端口网络的噪声合并	46
二、二端口网络 $e-i$ 噪声的转移	48
第三章 放大器的 E_n-I_n 噪声分析	55
第一节 共射极晶体管放大器的 E_n-I_n 噪声模型	55
一、共射极放大器的 E_n-I_n 噪声模型计算	55
二、共射极放大器的 E_n-I_n 噪声性能分析	57
三、 E_n-I_n 噪声相关系数分析	59
第二节 共集极晶体管放大器的 E_n-I_n 噪声模型	61
一、共集极放大器的 E_n-I_n 噪声模型计算	61
二、共集组态与共射组态 E_n-I_n 噪声比较	63
第三节 共基极晶体管放大器的 E_n-I_n 噪声模型	65
一、共基极放大器的 E_n-I_n 噪声模型计算	65
二、共基组态与共射组态 E_n-I_n 噪声比较	67
第四节 场效应管放大器的 E_n-I_n 噪声模型	68
一、共源极场效应管放大器 E_n-I_n 噪声	68
二、场效应管三种组态的 E_n-I_n 噪声比较	70
第五节 复合管的 E_n-I_n 噪声模型	72
一、共集—共射组态	72
二、共射—共基组态	73
三、共基—共射组态	74
第六节 集成运放的 E_n-I_n 噪声模型	76
一、集成运放器件的 E_n-I_n 噪声模型	77
二、集成运放电路的 E_n-I_n 噪声模型	77

第七节 无源网络噪声模型	81
一、无源二端网络等效噪声模型	81
二、无源四端网络噪声等效电路	83
第八节 级联放大器的 $E_n - I_n$ 噪声模型	84
第九节 反馈放大器的 $E_n - I_n$ 噪声模型	87
一、并联电压负反馈放大器的 $E_n - I_n$ 噪声	87
二、并联电流负反馈放大器的 $E_n - I_n$ 噪声	90
三、串联电压负反馈放大器的 $E_n - I_n$ 噪声	91
四、串联电流负反馈放大器的 $E_n - I_n$ 噪声	93
第十节 复杂电路的 $E_n - I_n$ 噪声模型	96
一、共射—共基电路的 $E_n - I_n$ 噪声	97
二、高输入阻抗放大器的 $e - i$ 噪声计算	98
第十一节 放大器的 $R_n - G_n$ 噪声模型	99
一、放大器的等效噪声电阻	100
二、放大器的等效噪声电导	100
三、放大器的噪声相关导纳及相关阻抗	101
第四章 低噪声放大器设计	104
第一节 低噪声电子设计的基本原则	104
第二节 放大器的等效输入噪声	105
一、放大器等效输入噪声电压	105
二、放大器等效输入噪声电流	106
第三节 放大器的噪声系数	107
一、噪声系数的定义	107
二、放大器的极限灵敏度	108
三、噪声系数与放大器噪声模型的关系	108
第四节 放大器的等效噪声温度	110
第五节 放大器噪声系数计算	111
一、单级放大器的噪声系数	111
二、级联放大器的噪声系数	112
三、无源网络的噪声系数	113
第六节 放大器的噪声系数图(NF 图)及应用	115
一、 NF 图的分类	115
二、 NF 图的应用	117
第七节 放大器的最佳源阻抗及噪声匹配	118
一、最佳源阻抗及最小噪声系数	118
二、放大器的噪声匹配原理	120
三、噪声匹配网络设计	122

第八节 低噪声放大器的有源器件	127
一、有源器件的选择原则	128
二、低噪声放大器常用的有源器件	129
第九节 低噪声放大器的前置级设计	133
一、低噪声前置级的设计原则	133
二、前置级的直流工作点确定	134
三、多个有源器件的并联工作	136
第十节 低噪声放大器电路设计	139
一、级联电路形式的选择	139
二、集电极负载的选择	145
三、放大器偏置电路设计	146
四、反馈电路形式及其参数选择	148
第十一节 具有源电抗的放大器低噪声设计	152
一、直接耦合方式的低噪声设计	152
二、噪声匹配网络的设计	153
第十二节 宽带放大器的低噪声设计	154
一、宽带放大器的低噪声设计原则	154
二、磁带记录器的磁头输入电路低噪声设计	156
三、电视摄像机前置放大器的低噪声设计	157
第五章 噪声测量方法及装置	161
第一节 放大器输出噪声电压测量	161
一、测量原理	161
二、噪声有效值测量仪表	162
三、噪声测量的随机误差	164
四、电噪声峰值测量法的准确度分析	166
第二节 放大器 $E_n - I_n$ 噪声模型测量——正弦信号源法	168
一、放大器等效输入噪声测量	168
二、放大器 $E_n - I_n$ 噪声模型测量	168
三、增益测定	169
四、测量系统的误差分析	171
第三节 放大器 $R_n - G_n$ 噪声模型测量——标准噪声源法	172
一、放大器噪声系数测量	172
二、放大器 $R_n - G_n$ 噪声模型测量	173
三、测量系统的误差分析	175
第四节 放大器低频噪声系数测量	178
一、噪声系数测量原理	178
二、放大器 NF 图测量	179
第五节 基于 FFT 算法的低频噪声谱测量	181

一、低频噪声谱测量系统	181
二、低频噪声谱测量误差分析	183
第六节 采用带通滤波器的低频噪声谱测量	185
一、锁定放大器法 (LIA 法)	186
二、带通数字滤波算法	186
三、带通滤波法的测量误差及参数确定	189
第七节 微弱噪声测量方法	193
一、低噪声匹配变压器	193
二、互相关方法	194
三、互谱测量法	194
四、实验与结果	198
第八节 宽温度范围低频噪声测量	200
一、77~300K 温度范围内低频噪声谱的测量	200
二、77~300K 温度范围内噪声测量系统	201
第九节 高频噪声谱测量	202
一、实时频谱分析仪	202
二、高频扫频频谱仪	202
第六章 低频噪声用于半导体器件的缺陷诊断及可靠性估计	204
第一节 半导体器件过激噪声形成机理及与器件缺陷的关系	205
一、过激白噪声	205
二、过激 $1/f$ 噪声	206
三、 $g-r$ 噪声	210
四、爆烈噪声	213
第二节 低频噪声谱成分分析方法	215
一、确定噪声谱成分的定性方法	215
二、确定噪声谱成分的快速算法	215
三、噪声谱分析方法的应用实例	216
第三节 低频噪声用于半导体器件可靠性评估	218
一、器件可靠性评估的低频噪声方法	218
二、二极管噪声与可靠性	221
三、双极晶体管噪声与可靠性	223
四、场效应管噪声与可靠性	227
五、集成电路噪声与可靠性	227
第四节 低频噪声用于半导体器件内部缺陷诊断	228
一、 $1/f$ 噪声用于氧化层陷阱参数的估计	228
二、 $g-r$ 噪声用于半导体材料与器件中的深能级杂质分析	229
三、金属薄板塑性形变时位错密度检测	235
四、低频噪声用于介质击穿的诊断	235

第五节 低频噪声用于器件失效模式的激活能估计.....	237
一、器件失效模式的激活能	237
二、动态噪声测量技术用于激活能计算	238
三、铝膜电迁移失效的激活能测量	238
第六节 半导体激光器的噪声可靠性估计方法.....	241
一、半导体激光器的噪声谱测量装置	241
二、半导体激光器电噪声用于可靠性估计	242
三、半导体激光器光噪声用于可靠性估计	243
参考文献.....	247

第一章 电子线路内部噪声源及其性质

电噪声是电子线路中普遍存在的一种物理现象，它起源于电子线路内部元器件的内在固有扰动。除了电阻的热噪声外，主要是有源器件(晶体管、场效应管及集成运放)内部的散弹噪声、 $1/f$ 噪声及 $g-r$ 噪声。因此，要计算、分析电子线路噪声、进行低噪声放大器设计，我们必需首先了解电路中元器件的噪声源及其性质，包括对这些噪声的计算。因此本章将介绍电路噪声的统计特征，给出器件中几种主要噪声的特点及计算方法。最后给出器件的噪声模型(包括晶体管、场效应管及集成运放)。

第一节 电噪声及其统计特征

一、噪声的概率分布

在信号检测电路中，我们经常会遇到各种干扰和噪声，妨碍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。本书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，即任何瞬间取值是不能预料的。图 1-1(a)为电噪声的波形。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。

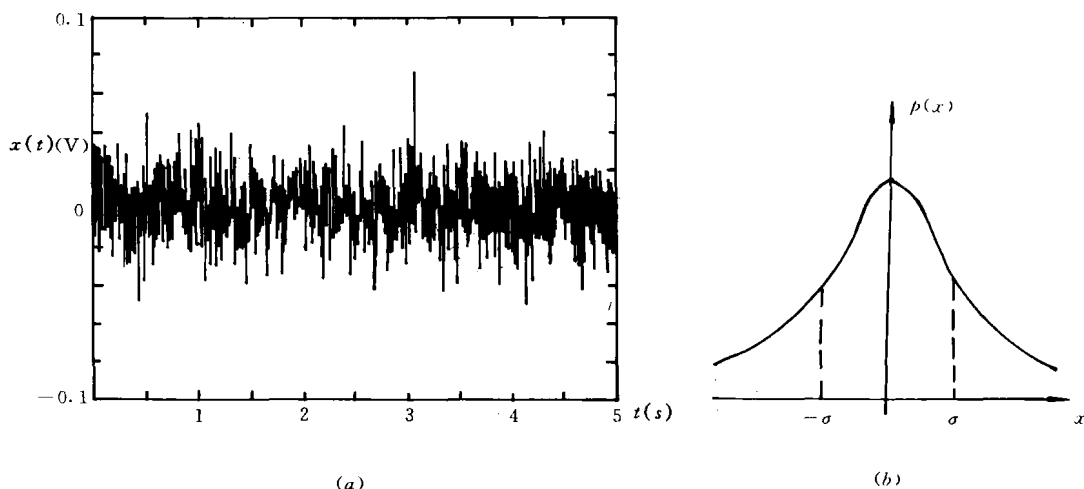


图 1-1 电噪声的波形及其概率分布

电噪声最重要的统计特征是概率密度 $p(x)$ ，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

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

线性电路中噪声电压的概率分布曲线 $p(x)$ 一般符合高斯(Gauss)正态分布，即

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-2)$$

式中 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(1-2)表示成

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-3)$$

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)。

电路噪声在某一瞬间可能取得很大的数值，但取值越大的概率越小，限值超过 $|x| > x_0$ 的概率为

$$P(|x| > x_0) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-x_0}^{x_0} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (1-4)$$

表 1-1 表示在不同 x_0/σ 值下的 $P(|x| > x_0)$ 值。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 U_{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 $\sigma = U_{P-P}/8$ 。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 $U_{P-P} = 3 \times 2\sigma$ ，于是被测噪声电压有效值 $\sigma = U_{P-P}/6$ 。

表 1-1 不同 x_0/σ 值下的 $P(|x| > x_0)$ 值

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

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须要大于 3 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。

概率密度仅用来衡量噪声分布规律，从工程计算角度，我们还要了解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

$$E[x] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx \quad (1-5)$$

对于各态经历的平稳随机过程，我们有

$$E[x] = \bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x dt \quad (1-6)$$