

运算放大器 噪声优化手册

OPERATIONAL AMPLIFIER NOISE

Techniques and Tips for Analyzing and Reducing Noise

[美] Art Kay 著
杨立敬 译

- 提供对低噪声电路分析与设计有帮助的经验和技巧
- 举例来分析和解决特定的噪声问题，包含详细的描述和解释
- 为加快设计速度和提高研发效率，对本征噪声等级进行测量、计算和预测

运算放大器 噪声优化手册

OPERATIONAL
AMPLIFIER NOISE

[美] Art Kay 著
杨立敬 译

人 民 邮 电 出 版 社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

运算放大器噪声优化手册 / (美) 凯 (Kay, A.) 著 ;
杨立敬译. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2013.4
ISBN 978-7-115-30777-4

I. ①运… II. ①凯… ②杨… III. ①运算放大器—
噪声控制—最佳化—技术手册 IV. ①TN722.7-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第004804号

版权声明

Operational Amplifier Noise: Techniques and Tips for Analyzing and Reducing Noise, 1st Edition by Art Kay
ISBN:978-0-750-68525-2

Copyright © 2012 by Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2013 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予人民邮电出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

内容提要

本书详细讲解了运算放大器噪声, 内容主要包括运算放大器噪声的基本知识、噪声的计算方法、噪声的测试方法、噪声的种类以及降噪技巧。指导你如何设计运算放大器和利用相关电子设备来减少噪声, 成功地创建低噪声电路。运算放大器在现代电子设计中扮演重要角色, 广泛地运用于数字接口、微处理器以及其他电子电路中, 而噪声一直是困扰其发展的一大因素, 所以本书非常适合于电子工程师以及缺乏噪声分析经验的大学生, 为你揭开运算放大器噪声的秘密。

运算放大器噪声优化手册

◆ 著 [美] Art Kay

译 杨立敬

责任编辑 宁茜

执行编辑 魏勇俊

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号

邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京天宇星印刷厂印刷

◆ 开本: 800×1000 1/16

印张: 12.75

字数: 283千字

印数: 1—3 000册

2013年4月第1版

2013年4月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2012-6771号

ISBN 978-7-115-30777-4

定价: 58.00元

读者服务热线: (010)67132827 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154



前言

在电子系统中，任何不希望出现的信号都可以叫作噪声。噪声会在精确测量时增加误差，降低音频信号的质量。板级和系统级设计者们会关心他们的设计中可预计的最差噪声情况，寻找降低噪声的方法和可以精确验证其设计的测量技巧。

本征噪声和外源噪声是影响电路的两种基本噪声形态。外源噪声由外部因素产生。数字开关、工频噪声、电源开关噪声是常见的外源噪声。本征噪声由电路元件本身产生。宽带噪声、热噪声和闪烁噪声是常见的本征噪声。本书阐述了如何利用计算和 Spice 仿真来预测本征噪声的数量级，对噪声测量相关技巧也有介绍。

鸣谢

特别感谢以下提供技术见解的个人：

Texas Instruments

Rod Burt, Senior Analog IC Design Manager

Bruce Trump, Manager-Linear Products

Matt Hann, Applications Engineering Manager

Bryan Zhao, Field Applications Engineering

Neil Albaugh, Senior Applications Engineer Retired

Analog and Rf Models

Bill Sands, Consultant

Cirrus Logic

Tim Green, Senior Staff Systems Engineer

www.en-genious.net

Paul McGoldrick, Editor-in-Chief

目录

第1章 统计学导论及回顾	1
1.1 噪声的时域表示	1
1.2 噪声的统计学表示	2
1.3 噪声的频域表示	5
1.4 通过频谱密度计算均方根 (RMS) 噪声	8
本章小结	10
习题	10
扩展阅读	10
第2章 运放噪声简介	11
2.1 运放噪声分析技术	11
2.2 运放噪声模型简介	11
2.3 噪声带宽	12
2.4 宽带均方根 (RMS) 噪声的计算	14
2.5 $1/f$ 均方根噪声的计算	14
2.6 闪烁噪声和宽带噪声的叠加	16
2.7 示例电路的噪声模型	17
2.8 噪声增益	17
2.9 将电流噪声转换成电压噪声	18
2.10 将热噪声效果包含进去	19
2.11 合并所有噪声源并计算峰峰值输出噪声	20
2.12 关键噪声公式的推导	21
本章小结	23
习题	23
扩展阅读	24
第3章 运放噪声计算范例	25
3.1 计算范例#1: OPA627 正向放大器	25
3.2 计算噪声带宽	25
3.3 从规格书中获取关键噪声指标	27

3.4 计算运放总电压的噪声分布	28
3.5 计算总热噪声分布	28
3.6 将所有噪声源叠加并且计算输出峰峰值噪声	29
3.7 计算范例#2：二级放大器	30
本章小结	32
习题	33
扩展阅读	34
第4章 Spice 噪声分析导论	35
4.1 在 TINA Spice 中运行噪声分析	35
4.2 测试运放模型噪声精度	37
4.3 建立自己的噪声模型	40
4.4 用 TINA 分析第3章中的电路	46
4.5 反馈电容仿真示例	48
本章小结	52
习题	52
扩展阅读	53
第5章 噪声测量导论	55
5.1 测量噪声的仪器：真均方根（RMS）数字万用表（DMM）	55
5.2 测量噪声的仪器：示波器	56
5.3 测量噪声的仪器：频谱分析仪	59
5.4 屏蔽	63
5.5 验证噪声电平	63
5.6 考虑噪声电平	64
5.7 使用真均方根（RMS）表测量示例电路#1	65
5.8 使用示波器测量示例电路#1	66
5.9 使用频谱分析仪测量示例电路#1	67
5.10 测量 OPA227 的低频噪声	71
5.11 低频噪声测量中的失调温漂与 $1/f$ 噪声	73
本章小结	73
习题	73
扩展阅读	74
第6章 运放内部噪声	75

6.1 最差噪声分析与设计中的 5 条经验原则	75
6.2 双极型噪声的深入数学分析	78
6.3 FET 噪声的深入数学分析	81
6.4 放大器内部的简化物理连接	84
本章小结	85
习题	85
扩展阅读	86
第 7 章 跳跃噪声	87
7.1 回顾 $1/f$ 及宽带噪声	87
7.2 什么是跳跃噪声	88
7.3 是什么导致了跳跃噪声	88
7.4 这个问题有多常见?	89
7.5 跳跃噪声、电流噪声还是电压噪声?	89
7.6 电压跳跃噪声的平台测试和产品测试	89
7.7 电流跳跃噪声的平台测试和产品测试	91
7.8 分析跳跃噪声数据	94
7.9 确定跳跃噪声测试的门限	98
7.10 何时需要关注跳跃噪声	99
本章小结	100
习题	101
扩展阅读	101
第 8 章 $1/f$ 噪声和零漂移放大器	103
8.1 零漂移运放	103
8.2 零漂移放大器频谱密度曲线	105
8.3 低频噪声	109
8.4 测量低频噪声	115
本章小结	120
习题	121
扩展阅读	121
第 9 章 仪表放大器噪声	123
9.1 三运放仪表放大器简介	123
9.2 三运放仪表放大器噪声模型	126

9.3 三运放仪表放大器的计算分析	129
9.4 三运放仪表放大器的仿真	135
9.5 利用平均值电路减小噪声	137
本章小结	140
习题	141
扩展阅读	142
第 10 章 光电二极管放大器噪声	143
10.1 光电二极管介绍	143
10.2 简单互阻放大器	145
10.3 光电二极管电流噪声	146
10.4 来自 R_f 的热噪声	146
10.5 来自运放电压噪声源的噪声	147
10.6 总噪声（运放、二极管和电阻）	154
10.7 互阻放大器的稳定性	154
本章小结	157
习题	157
扩展阅读	158
第 11 章 光电二极管放大器示例的噪声计算	159
11.1 光电二极管示例的规格	159
11.2 光电二极管电流噪声的计算	159
11.3 运放规格书	160
11.4 运放电压噪声的计算	160
11.5 热噪声（电阻噪声）的计算	162
11.6 运放电流噪声的计算	162
11.7 互阻放大器示例电路的总噪声计算	163
11.8 示例电路的 Spice 分析	163
11.9 测量互阻放大器示例的噪声	165
本章小结	172
习题	173
扩展阅读	174
术语表	175
习题答案	185

统计学导论及回顾

噪声分析可以在时域中、频域中进行，或通过统计学分析的方法来完成。本章介绍这3种方法。对这些方法的应用将会贯穿本书。

1.1 噪声的时域表示

时域是噪声最普通的观察视角。图 1.1 为典型的噪声时域图。在时域图中， y 轴为噪声电压， x 轴为时间。通过示波器可以在时域上观察噪声。通过图 1.1 我们还可以看出如果从统计学角度来观察，随机信号可以用高斯分布来表示。为了方便观察与时域信号的关系，高斯分布如右图所示。关于统计学视角的详细讨论见 1.2 节。

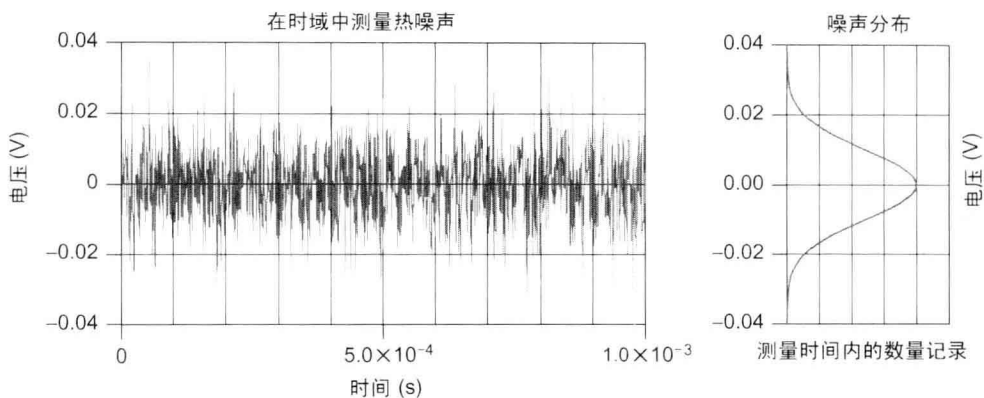


图 1.1 热噪声在时域和统计学中的显示

图 1.1 将热噪声显示在时域中。热噪声由导体中的电子自由运动而产生。由于运动幅度会随着温度的上升而上升，所以热噪声的幅度也会跟随温度一起上升。热噪声可以看作在特定器件上以电压形式表示的随机变化（例如电阻）。图 1.2 中的公式用来在已知电阻、温度和带宽时计算热噪声均方根（RMS）。

$$e_n = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} \quad (1.1) \text{ 热噪声公式}$$

在这里

e_n 是 RMS 噪声电压

T 是以开尔文 (K) 为单位的温度

R 是以欧姆 (Ω) 为单位的电阻

Δf 是以赫兹(Hz)为单位的噪声带宽

k 是玻尔兹曼常数 (J/K)

备注: 将温度单位从摄氏度转换成开尔文

$$T_k = 273.15 \text{ } ^\circ\text{C} + T_c$$

图 1.2 热噪声电压公式

热噪声公式最重要的贡献是为我们提供一种得到噪声电压均方根值的方法。然而在很多情况下, 工程师会关注噪声电压的峰峰值。在 1.2 节, 我们将学到一些可以用来在噪声均方根值已知的情况下估算峰峰值的统计学方法。1.2 节同时也涵盖了噪声分析中用到的其他基本统计学方法。

1.2 噪声的统计学表示

大部分本征噪声满足高斯分布且可以用统计学方法来分析。例如, 可以通过统计学方法计算两个噪声的叠加或者估算峰峰值。本节简述了一些进行噪声分析所需要的基本统计学方法。

1.2.1 概率密度函数

描述正态分布的数学公式叫做“概率密度函数”(见图 1.3)。将一段时间间隔内测量到的噪声电压用柱状图绘制出来, 其包络与这个函数近似。图 1.4 为一幅在实测噪声柱状图上叠加概率分布函数的图片。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.2) \text{ 正态 (高斯) 分布概率密度方程}$$

在这里

$f(x)$ 是 x 在任意时间间隔内被测量到的概率

x 是随机常数

μ 是平均值

σ 是标准差

图 1.3 高斯分布的概率密度公式

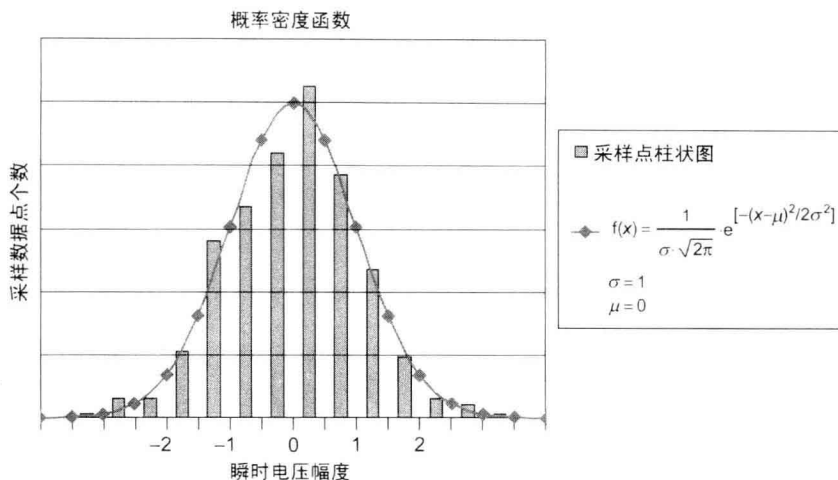


图 1.4 实测叠加概率密度函数分布

1.2.2 概率分布函数

概率分布函数是概率密度函数的积分。这个函数十分有用，因为通过它可以得知一个事件在已知区间内的发生概率（见图 1.5 和图 1.6）。例如：假设图 1.5 是噪声概率分布函数。那么我们可以知道在任何时刻测量到的噪声电压在 $-1 \sim 1\text{V}$ 之间的概率为 30%。

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx = \int_a^b \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{[-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2]} dx \quad (1.3) \text{ 正态 (高斯) 分布的概率分布方程}$$

在这里

$P(a < x < b)$ 是在任意时间上 x 出现在间隔 (a, b) 内的概率。

例如， $P(-1 < x < +1) = 0.3$ 表示不管何时测量， x 出现在 $-1 \sim 1$ 之间的概率为 30%。

x 是随机变量。在本例中噪声电压 $= x$

μ 是平均值

σ 是标准差

图 1.5 概率分布函数

概率分布函数有助于我们将均方根噪声转化成峰峰值噪声或者电流噪声。注意到高斯分布的两端是无限延伸的，这说明任何电压的噪声都是有可能出现的。虽然理论上是这样，但是实际上瞬时产生极大电压噪声的概率非常小。例如测量到的噪声电压幅度在 $-3\sigma \sim 3\sigma$ 之间的概率是 99.7%。换句话说，测量到噪声电压幅度在这个范围外的概率只有 0.3%。因此， $\pm 3\sigma$ （即 6σ ）经常被用来估算噪声信号的峰峰值。需要注意的是有些工程师会用 6.6σ 来估算噪声的峰峰值，这个估算并没有统一的标准。图 1.7 显示了 68% 的噪声集中在 2σ 范围内。表 1.1 总结了噪声电压的测量数据和标准差之间的关系。

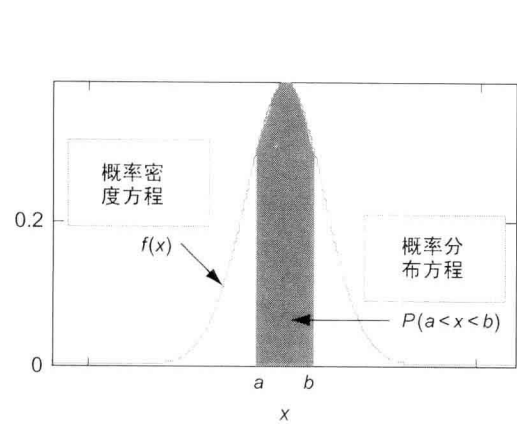


图 1.6 概率密度函数与概率分布函数

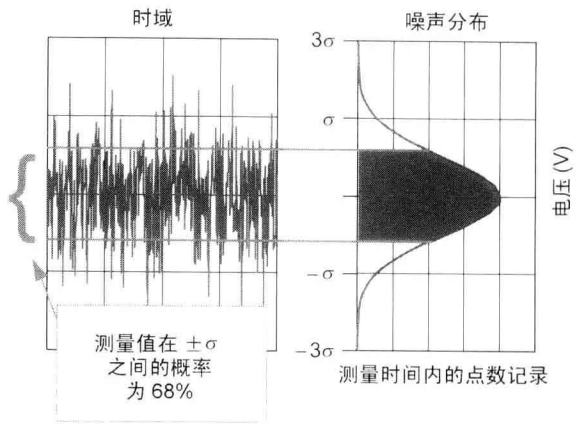


图 1.7 显示标准差与峰峰值的关系

表 1.1 标准差倍数与测量电压几率的关系

标准差倍数	测量电压几率 (%)
2σ (即 $\pm\sigma$)	68.3
3σ (即 $\pm 1.5\sigma$)	86.6
4σ (即 $\pm 2\sigma$)	95.4
5σ (即 $\pm 2.5\sigma$)	98.8
6σ (即 $\pm 3\sigma$)	99.7
6.6σ (即 $\pm 3.3\sigma$)	99.9

现在，我们有了一个对应关系，可以在已知标准差的情况下估算峰峰值噪声。然而一般来说我们更需要将 RMS 值转化为峰峰值。人们经常假设 RMS 值就等于标准差的值。这并不总是对的。这两个值只有在没有 DC 成分（DC 成分就是平均值 μ ）的情况下才是相等的。例如热噪声就没有 DC 成分，所以标准差和 RMS 值是相等的。

一种计算 RMS 噪声电压的方法是测量大量的离散采样值，并用统计学方法来估算标准差。例如，如果从模拟数字转换器（A/D）得到了大量采样样本，就可以用式（1.6）至式（1.8）来计算噪声信号的平均值、标准差和 RMS 值。包括 Microsoft Excel 软件在内的很多软件可以用来计算这些函数。事实上，Excel 中就嵌入了计算标准差和平均值的函数。一些测试设备也会包含这样或者那样的嵌入数学函数。例如，很多示波器就包含 RMS、平均值和标准差函数。

一般来说，在进行噪声计算时最好是用标准差而不是 RMS 方程。本征噪声不应该包含 DC 成分。由于 DC 成分不是噪声信号的真实部分，所以噪声计算时不应该把 DC 成分考虑进去。当把 RMS 方程用在一个含有 DC 成分的噪声上时，结果会受 DC 成分的影响。然而标准差方程却可以消除 DC 成分的影响。

最后一个涉及的统计学概念是噪声信号的叠加。在进行两个信号的叠加时，我们必须事先知道这两个信号是否相关。分别产生于两个独立噪声源的噪声信号之间是不相关的。例如，从两个独立电阻或两个运算放大器（运放）产生的噪声是不相关的。反馈机制可以使噪声源变得相关。相关噪声源叠加的一个很好的例子就是降噪话筒。它通过叠加相反的相关噪声来消除听觉噪声。式（1.4）表明了如何进行相关噪声间的叠加。注意当用在降噪耳机上时，相关系数应该是 $C=-1$ （见图 1.8）。

在大部分场合中，我们叠加的都是不相关噪声（见式（1.5））。叠加这种形式的噪声事实上就是用毕达哥拉斯定理（Pythagorean theorem）来叠加两个向量。图 1.9 所示为叠加的图像表示。一个有用的近似法是如果其中一个噪声源的幅度是其他噪声源幅度的 $1/3$ ，那么较小的那个噪声源可以被忽略掉。

$$e_{nT} = \sqrt{e_{n1}^2 + e_{n2}^2 + 2Ce_{n1}e_{n2}} \quad (1.4) \text{ 叠加两个相关噪声}$$

$$e_{nT} = \sqrt{e_{n1}^2 + e_{n2}^2} \quad (1.5) \text{ 叠加两个不相关噪声}$$

在这里

C 是相关系数， $-1 < C < 1$

e_{n1} 、 e_{n2} 是噪声源

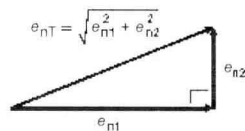


图 1.8 随机不相关噪声源的叠加

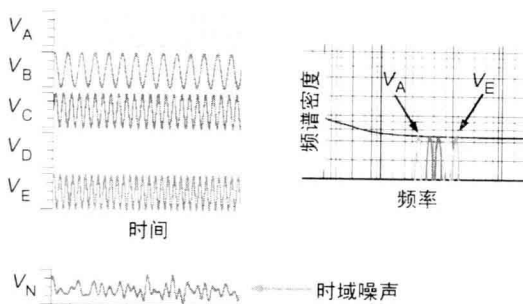
图 1.9 毕达哥拉斯定理用作噪声叠加

1.3 噪声的频域表示

噪声的一个重要特点就是它的频谱密度。电压噪声频谱密度是每平方根赫兹测量到的 RMS 电压噪声（或通常表示为 $nV/\sqrt{\text{Hz}}$ ）。功率谱密度以 W/Hz 表示。一个随机噪声信号可以被看做无限个在不同频率上的正弦波的总和。图 1.10 左半边显示了几个不同频率的信号如何叠加成为一个随机噪声信号。图 1.10 右半边为这几个信号在频域上的显示。注意每个正弦波都会产生频域上的一个脉冲（或者说尖峰）。从这个例子可以看出 5 个正弦波就可以组合成一个“随机”信号。实际上，噪声信号含有无限多的频率元素。我们可以想象无限多个在频域上的脉冲组合在一起，形成了频谱密度曲线。

之前我们已经知道通过式（1.1）可以计算出电阻的热噪声。这个式子可以重写成频谱密度形式（见图 1.12）。此噪声的一个重要特性是它的频谱密度曲线是平坦的（或者说在所有频率上都有相同的能量）。因此，热噪声有时候又叫做宽带噪声或者白噪声（见图 1.12）。“白”用来形容噪声在所有频率上都有一样的功率，就像白光是由相同能量的所有颜色（波长）光混合得到的一样。运放也会含有宽带噪声。宽带噪声的定义是具有平坦功率密度的噪声。图 1.13 为

电阻的噪声频谱密度随阻值的变化图。此图可以用来快速确定特定阻值下的噪声频谱密度。同时可以注意到温度对整体噪声的影响非常小。



噪声是所有频率分量的叠加

$$V_N = V_A + V_B + V_C + V_D + V_E$$

图 1.10 理解频谱密度曲线

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.6) \text{ 平均值}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (1.7) \text{ 标准差}$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1.8) \text{ RMS}$$

图 1.11 离散人口模型的统计学公式

$$e_n = \sqrt{4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

$$\frac{e_n}{\sqrt{\Delta f}} = \sqrt{4k \cdot T \cdot R} \quad (1.9) \text{ 热噪声方程}$$

图 1.12 在频谱密度中显示热噪声方程

图 1.14 显示了频谱密度曲线的两个常见区域。在宽带区域内噪声频谱密度是平坦的，即所有不同频点因素的贡献是相同的。运放还可能有频谱密度曲线不平的低频噪声区。这个噪声叫做 $1/f$ 噪声、闪烁噪声或低频噪声。通常， $1/f$ 噪声的功率频谱以斜率 $1/f$ 滚降。这意味着电压频谱以斜率 $1/f^{(1/2)}$ 滚降。然而实际上 $1/f$ 方程的指数会有轻微偏差。图 1.14 显示了典型的带有 $1/f$ 区域和宽带区域的运放频谱。我们注意到频谱密度图中同时也显示了电流噪声（以 $\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 为单位）。

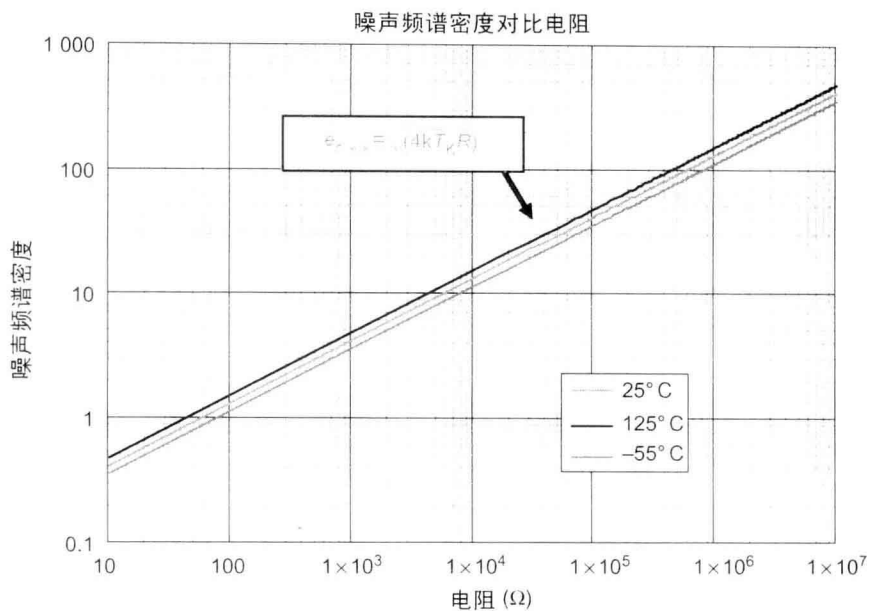


图 1.13 在频谱密度图中显示热噪声方程

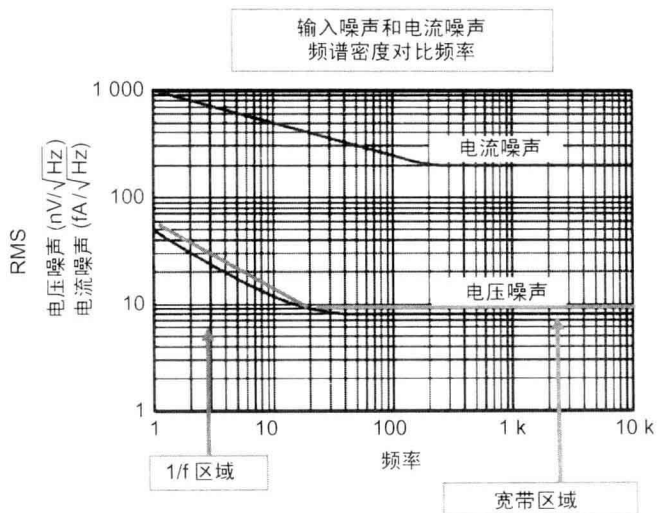
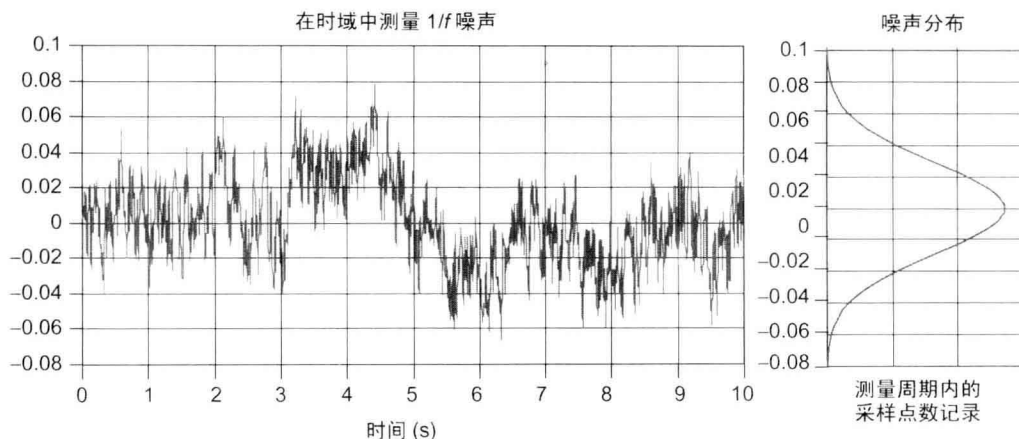


图 1.14 运放噪声频谱密度

因为 $1/f$ 噪声依然具有正态分布，因此之前的数学描述依然适用。图 1.15 显示了 $1/f$ 噪声的时域描述。注意图中 x 轴是以 s 为单位，随时间缓慢变化是 $1/f$ 噪声的特点。

图 1.15 在时域和统计学中显示 $1/f$ 噪声

1.4 通过频谱密度计算均方根 (RMS) 噪声

通过频谱计算 RMS 噪声是非常常见的噪声计算。它被广泛地用于运放噪声计算中。有 3 种不同形式的功率频谱密度需要考虑：噪声功率频谱密度（单位 $W/\sqrt{Hz}$ ）、噪声电压频谱密度（单位 $V/\sqrt{Hz}$ ）和噪声电流频谱密度（单位 $A/\sqrt{Hz}$ ）。通过对频谱密度积分可以将功率频谱密度转化成 RMS 功率。功率频谱密度定义为电压频谱密度或者电流频谱密度的平方。因此，要将电压频谱密度或者电流频谱密度转化为 RMS 噪声，需要先将其转化成功率（ V_n^2 或 i_n^2 ），将其积分，然后再转换回电压或电流（平方根），细节见图 1.16。

$$\text{噪声功率} = \int_{f_1}^{f_2} e_n^2 df \quad (1.10) \text{ 某频段内的噪声功率。} e_n \text{ 为噪声电压频谱密度}$$

$$\text{噪声电压} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} e_n^2 df} \quad (1.11) \text{ 某频段内的噪声电压。} e_n \text{ 为噪声电压频谱密度}$$

图 1.16 将频谱密度转化成 RMS 噪声

在进行电压频谱密度到 RMS 密度转换时，人们通常会错误地用电压频谱密度积分代替功率频谱密度积分。在图 1.17 和图 1.18 中我们用量纲分析法来演示不能这样做的原因。然而在此之前我们需要先复习一下积分。一种速记方法是积分结果等于曲线下包围的面积。图 1.19 显示了为什么常数方程可以简单地通过将高和宽相乘（矩形的面积）来积分。将积分看成矩形面积简化了从频谱密度曲线到 RMS 噪声值的转化过程。