

图解实用电子技术丛书

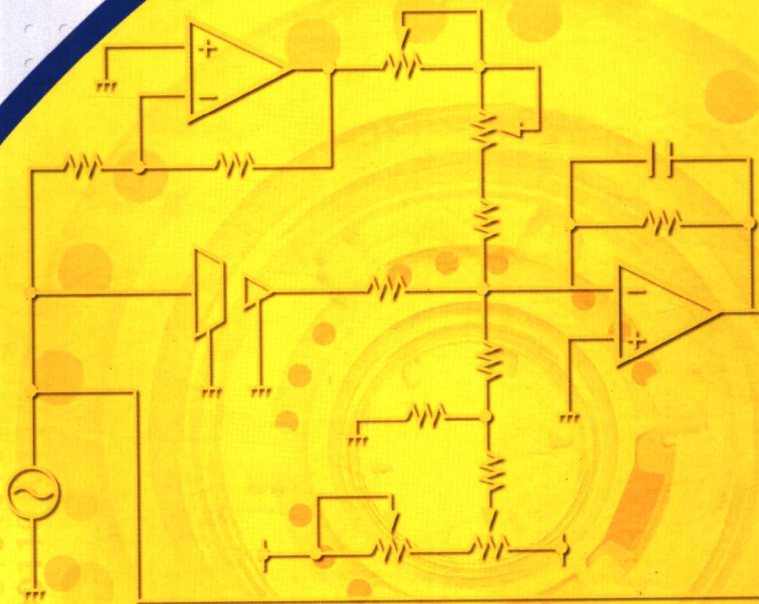
# 测量电子电路设计

## ——模拟篇

从 OP 放大器实践电路到微弱信号的处理

〔日〕远坂俊昭 著

彭 军 译



科学出版社

www.sciencep.com

图解实用电子技术丛书

# 测量电子电路设计

## ——模拟篇

从 OP 放大器实践电路到微弱信号的处理

〔日〕 远坂俊昭 著  
彭 军 译

科学出版社  
北京

图字: 01-2005-4936 号

## 内 容 简 介

本书是“图解实用电子技术丛书”之一,也是《测量电子电路设计——滤波器篇》的姊妹篇。

“噪声”是影响电路性能的重要因素之一。本书的主题是“噪声”和“负反馈”。第1~3章讨论电路内部所产生的噪声;第5、6章介绍了抑制外来噪声的电路技术。本书的各章节都涉及“负反馈”的内容,特别是第4章介绍负反馈电路的基本分析方法以及实现稳定放大器的负反馈设计方法。本书也给出了大量的实验数据和计算机模拟结果,尽可能使所学的知识具体化。

滤波器篇中主要介绍如何从放大的信号中除去有害噪声,提取有用信号的滤波技术。

本书的读者对象主要是电子工程技术人员,也可供电子、自动化、仪器仪表等相关专业的师生参考学习。

### 图书在版编目(CIP)数据

测量电子电路设计:模拟篇/(日)远坂俊昭著;彭军译. —北京:科学出版社,2006

(图解实用电子技术丛书)

ISBN 7-03-017161-6

I. 测… II. ①远…②彭… III. 测量-电子电路 IV. TM930.111-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 037965 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科苑图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

泽海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年6月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年6月第一次印刷 印张: 10 1/2

印数: 1—4 000 字数: 152 000

定 价: 26.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 前 言

---

最近,科技杂志上几乎清一色都是有关计算机软件的文章。硬件,特别是模拟电路似乎已经过时了,只是偶尔以一种怀旧的情调出现而已。模拟电路技术工作者好像生不逢时。现在社会上开始出售所谓的“模拟酒”,难道这表明怀旧模拟的人们在钻“数字社会”的空子吗,还是意味着开始刮起“怀旧”的旋风?真是让人不可理解的社会呀!

当然,绝不是模拟电路技术没有进步。以 OP 放大器为例,几年前处理 MHz 信号的器件还只是陶瓷封装器件,其功耗很大,摸着就烫手;而现在消耗的电流已经降低到只有数 mA,实现了表面实装型。所以,说模拟电路技术停滞不前是不符合实际的。

计算机模拟等设计方法的运用使得模拟电路的设计发生了很大的变化。计算机特别是个人计算机以及高性能软件的普及,已经能够使电路图编辑器和电路模拟器得到了广泛的应用。在优胜劣汰的激烈竞争中,也要求人们必须熟练地运用模拟 ASIC(专用集成电路)。

在模拟电路世界里,计算机的使用引起了理论框架的巨大改变。这种变化也许会带来与真空管向半导体的理论框架变化相匹敌的变革。

这就是模拟电路的世界。模拟技术人才的培养和造就仍然需要一定的时间,这是因为与数字技术或软件相比,模拟技术所涉及的知识面更宽,繁多的器件种类就说明了这一点。要从众多的模拟电路种类中挑选出最适合、最理想的器件,不仅需要有丰富的经验,更需要具备最新的知识。而且,由于设计环境的不同,选择的条件也就不同。

模拟电路世界中的基本知识永远是必须具备的。现代电子设备的设计中,可以不需要曾经是逻辑电路器件主流的 DTL(二极管晶体管逻辑,也许现在许多人已经不知道它了)或者 TTL,还有曾经是微机 OS(Operating System,操作系统)主流的 CP/M(操作系统之一,知道它的人大概也不多了)的知识。但是,模拟电路中

欧姆定律或者电阻产生热噪声等方面的知识却是不可缺少的。为了学习这些必要的模拟技术,老师的指导是不可缺少的。但是,不见得谁都能找到最合适的老师。庆幸的是我们可以找到许多模拟电路方面的优秀著作,本书就是其中之一。

本书涉及的内容不过是模拟电路领域中很少的一部分。但是给出的大量实验数据和计算机模拟结果,可以使学习的知识具体化。本书中使用的模拟试验都是用 PSpice/CQ 版 Ver. 5 进行的。

本书的主题是“噪声”和“负反馈”。

设计模拟电路的场合,不仅要关注电路的动作,更重要的是深刻理解决定电路性能的各种因素。其中一个重要的因素就是噪声。

噪声可分为设备内部产生的噪声和外部混入的噪声。第 1~3 章介绍内部产生的噪声;第 5、6 章介绍抑制外来噪声的电路技术。

几乎可以说模拟电路中到处都会涉及“负反馈”的概念。最近,由于 OP 放大器性能的提高,关于“负反馈”的话题少了。但是深刻理解“负反馈”仍然是非常必要的。

本书的各章节都涉及了“负反馈”的内容,特别是第 4 章详细地介绍了负反馈电路的基本分析方法以及实现稳定的放大器的负反馈设计方法。

最后,向给予本书出版机会的 CQ 出版株式会社的蒲生良治先生,对作者的写作以及本书的出版给予帮助的(株)NF 电路设计常务董事荒木邦弥先生致以深深的谢意。

著 者

# 目 录

<b>第 1 章 前置放大器的低噪声技术</b> .....	1
1.1 前置放大器应该具备的性能 .....	1
1.1.1 能够可靠地放大信号 .....	1
1.1.2 低频电路的输入阻抗要高 .....	2
1.1.3 前置放大器中采用非反转放大电路 .....	3
1.2 热噪声(Thermal Noise) .....	4
1.2.1 电阻中产生的热噪声 .....	4
1.2.2 热噪声的性质 .....	5
1.2.3 噪声的单位—— $V/\sqrt{\text{Hz}}$ (噪声密度) .....	6
1.3 OP 放大器电路中产生的噪声 .....	7
1.3.1 非反转放大电路中产生的噪声 .....	7
1.3.2 双极晶体管 OP 放大器与 FET 输入 OP 放大器 .....	9
1.3.3 OP 放大器噪声的三个频率范围 .....	10
1.3.4 用噪声系数 NF 评价放大器的噪声 .....	11
1.3.5 噪声系数 NF 的意义 .....	12
1.4 前置放大器的频率特性和失真特性 .....	13
1.4.1 放大电路的频率上限 .....	13
1.4.2 振幅增大时的频率特性 .....	14
1.4.3 线性度与失真率 .....	15
<b>第 2 章 低噪声前置放大器的设计、制作及评价</b> ...	17
2.1 前置放大器的设计 .....	17
2.1.1 前置放大器 .....	17
2.1.2 OP 放大器(NJM5534)的噪声特性 .....	20
2.1.3 消除失调漂移的电路 .....	21
2.1.4 超级伺服电路的积分常数 .....	22
2.2 前置放大器的调整及特性的确认 .....	24
2.2.1 直流失调电压及其调整 .....	24

2.2.2	增益频率特性的确认	25
2.2.3	输出最大振幅时频率特性的确认	27
2.2.4	观察过渡响应特性	27
2.2.5	电路的噪声特性	29
2.2.6	计算输入换算噪声电压密度	30
2.2.7	测量输入换算噪声电压密度的频率特性	30
2.2.8	失真率	33
专栏 A	噪声特性的评价	36
<b>第 3 章</b>	<b>电流输入放大器的设计</b>	<b>39</b>
3.1	电流输入放大器概述	39
3.1.1	电流输入放大器	39
3.1.2	实现电流输入放大器的两种电路	40
3.1.3	从噪声角度看负反馈电流输入前置放大器的效果	41
3.1.4	检测大电流的电流输入前置放大器	42
3.2	负反馈电流输入前置放大器的设计	44
3.2.1	负反馈电流输入前置放大器的 $S/N$	44
3.2.2	负反馈电流输入前置放大器的模拟	45
3.2.3	负反馈电流输入用 OP 放大器的选择	48
3.2.4	反馈电阻——大电阻的选择	49
3.2.5	前置放大器的实装技术	50
3.3	实际的负反馈电流输入放大器	52
3.3.1	试制的电流输入放大器的概况	52
3.3.2	实际特性的测量	53
3.4	CT 中使用的电流输入放大器	55
3.4.1	测量用电流互感器(CT)的特性	55
3.4.2	实际的 CT 用前置放大器	57
专栏 B	印制电路板的绝缘性	59
<b>第 4 章</b>	<b>负反馈电路的解析与电路模拟</b>	<b>61</b>
4.1	稳定负反馈电路的构成	61
4.1.1	负反馈电路	61
4.1.2	负反馈的优点与缺点	62
4.1.3	开环、闭环及其稳定性	62

4.1.4	稳定的负反馈电路的相位特性	65
4.1.5	实际的 OP 放大器中分布有多个电容器	69
4.1.6	含有两个滞后要素的情况	69
4.1.7	具体的模拟例	71
4.1.8	为了减小高频特性的牺牲,合成两个时间常数	72
4.1.9	大反馈量下实现稳定的负反馈	74
4.1.10	给 $\beta$ (反馈)电路追加相位超前补偿	76
4.2	电容性负载对 OP 放大器的影响	77
4.2.1	OP 放大器接电容性负载	77
4.2.2	测量 OP 放大器的输出阻抗	78
4.2.3	由厂商提供的宏模型模拟输出阻抗	81
4.2.4	电容性负载特性的模拟	82
4.2.5	实际测量电容性负载特性	84
4.2.6	减小电容性负载影响的电路	86
专栏 C	测定频率特性	87

## 第 5 章 差动放大器技术的应用 89

5.1	共态噪声的消除	89
5.1.1	常态噪声与共态噪声	89
5.1.2	共态噪声转换为常态噪声	90
5.2	差动放大器	92
5.2.1	差动放大器	92
5.2.2	差动放大器与输入电缆的连接	93
5.2.3	高输入阻抗的 FET OP 放大器	94
5.2.4	输入偏置电流的影响	95
5.2.5	减少输入偏置电流影响的方法	96
5.2.6	要注意 FET OP 放大器输入失调电压的温度漂移	98
5.2.7	差动放大器的性能——共态抑制比	98
5.3	改良的差动放大器	99
5.3.1	一个 OP 放大器的差动放大器	99
5.3.2	使用多个 OP 放大器的差动放大器	99
5.3.3	信号电缆电容成分的影响	101
5.3.4	消除电缆电容的隔离驱动	102



5.3.5	用同相电压驱动电源	103
5.3.6	差动放大器产品——测试设备用放大器	104
5.4	差动放大器的实验	106
5.4.1	制作的前置放大器概况	106
5.4.2	确定电路的参数	108
5.4.3	试制的差动放大器的增益-频率特性	108
5.4.4	制作的差动放大器的 CMRR 特性	110
5.4.5	噪声与失真特性	111
5.4.6	确认电源升压对 CMRR 特性的改善	114
<b>第 6 章 隔离放大器的使用</b>		<b>117</b>
6.1	隔离放大器的作用	117
6.1.1	隔离放大器	117
6.1.2	处理不同电位的信号	118
6.1.3	切断接地环路	119
6.1.4	保证安全,防止误动作和事故的扩大	120
6.2	隔离放大器的结构	121
6.2.1	ISO 放大器的内部结构	121
6.2.2	应用变压器的 ISO 放大器	122
6.2.3	应用光耦合器的 ISO 放大器	125
6.2.4	使用电容器的 ISO 放大器	126
6.3	隔离放大器的特性	127
6.3.1	选用 ISO 放大器的要点	127
6.3.2	隔离态噪声抑制特性 IMRR	128
6.3.3	绝缘阻抗	128
6.3.4	ISO 放大器的绝缘耐压	129
6.3.5	ISO 放大器的频率特性	130
6.3.6	ISO 放大器的直线性	132
6.3.7	ISO 放大器的噪声	132
6.3.8	直流失调的温度漂移	134
6.4	隔离放大器的使用方法	134
6.4.1	隔离放大器与前置放大器的相对位置	134
6.4.2	消除噪声的滤波器的配置	135
6.4.3	不输入无用的高频信号	136
6.4.4	当噪声源靠近 ISO 放大器时	137

---

6.4.5	ISO放大器的实装——绝缘是重要的问题	137
6.4.6	外接电源——使用DC/DC转换器	139
6.4.7	不使用ISO放大器的隔离的方法	139
6.4.8	输入浮置的信号调节器	141
6.5	基于光耦合器的非调制型隔离放大器的制作	143
6.5.1	试制隔离放大器	143
6.5.2	从分析光耦合器的特性入手	144
6.5.3	隔离放大器的设计	146
6.5.4	关于线性传输	147
6.5.5	测量频率特性	148
6.5.6	隔离特性IMRR	150
6.5.7	失真特性与噪声特性	151
6.5.8	使用保证特性相似的光耦合器	154

# 第 1 章 前置放大器的低噪声技术

检测微弱信号过程中最关键的部分就是传感器。而要充分发挥传感器的功效,并将检测信号放大为易于处理的信号电平,需要前置放大器完成此任务。

在进入具体的设计之前,首先介绍为了最大限度地获得  $S/N$  (Signal(信号)对 Noise(噪声)之比)的电路技术。

## 1.1 前置放大器应该具备的性能

### 1.1.1 能够可靠地放大信号

在详细介绍电路技术之前,首先了解传感器用前置放大器的基本性能要求(图 1.1)。

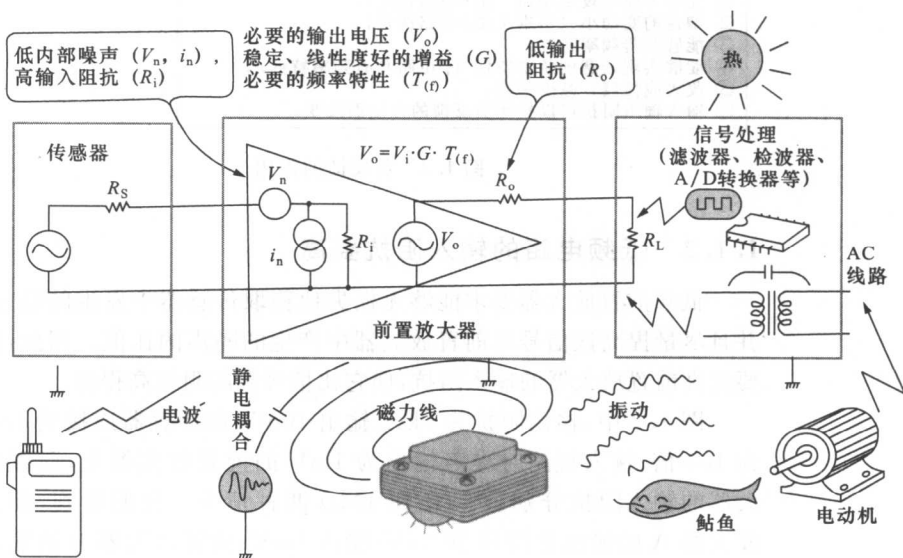
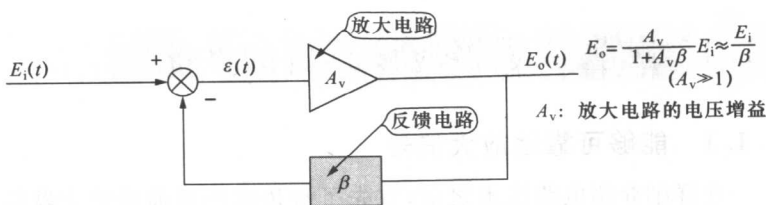


图 1.1 前置放大器的工作环境及其必要的性能

- ① 前置放大器内部的噪声小,也不易受外来噪声的影响。
- ② 前置放大器的输入阻抗要比传感器的输出阻抗高得多。
- ③ 增益-频率特性能够覆盖必要的频带。
- ④ 具有必要的增益,当温度等因素变化时具有良好的稳定性。
- ⑤ 具有良好的增益线性,失真小。
- ⑥ 为了能够获得必要的输出电压,输出阻抗要小,且不易受负载的影响。

在进行设计时应该满足以上各项要求。而且基于提高增益的稳定性、频率特性的平坦性和直线性的要求,还应该减少输入输出间的相位变化,减小输出阻抗,这就是图 1.2 所示的负反馈(Negative Feedback)技术所承担的重要任务。关于负反馈技术将在第 4 章作详细说明。



#### 负反馈的作用:

- ① 能够方便地设定增益(由 $\beta$ 电路设定)。
- ② 增益的变动小(基本上由 $\beta$ 电路决定)。
- ③ 能够改善频率特性。
- ④ 能够实现任意的频率特性( $\beta$ 电路具有频率特性)。
- ⑤ 改善线性度,减少失真。
- ⑥ 输入输出阻抗可以按照负反馈的方法而改变。

图 1.2 负反馈的作用

### 1.1.2 低频电路的输入阻抗要高

低频前置放大器要求能够无损失地获取传感器中发生的信号,并且尽量提高该信号与前置放大器中产生的噪声的比值。因此,需要提高前置放大器的输入阻抗,使它比信号源的阻抗高得多。

图 1.3 中,输出阻抗为  $1\text{k}\Omega$ 、输出  $10\text{mV}$  的传感器连接到增益为 100 倍、输入短路时噪声输出为  $1\text{mV}$  的前置放大器上,前置放大器的输入阻抗分别有  $1\text{k}\Omega$  和  $1\text{M}\Omega$  两种情况。我们看到,前置放大器 A 的输出是信号  $500\text{mV}$ /噪声  $1\text{mV}$ ;前置放大器 B 的输出是信号  $999\text{mV}$ /噪声  $1\text{mV}$ 。

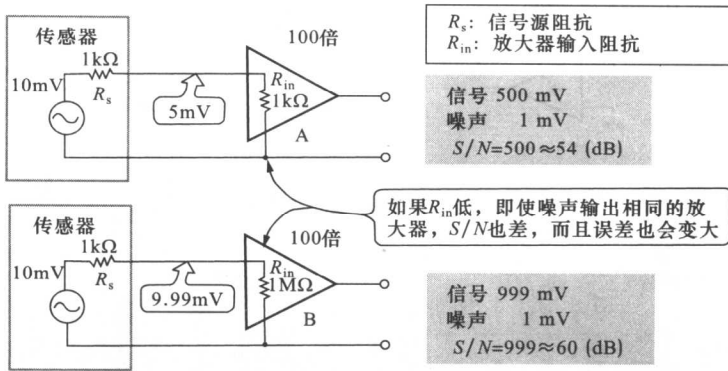


图 1.3 在低频情况下, 信号源阻抗要满足  $R_{in} \gg R_s$ 。

A 的信号输出比 B 的输出小也是问题, 更重要的是 A 的前置放大器输出信号 S 与噪声 N 的比值比 B 小。把这个信号与噪声之比称为信噪比, 记为  $S/N$ 。如果  $S/N$  一旦变小, 那么不管后级连接性能怎么好的放大器也无法改善这个值。

因此, 为了确保高的  $S/N$ , 必须提高输入阻抗, 无损失地获取传感器发生的信号, 尽量减少前置放大器内部发生的噪声。这对于提高信噪比  $S/N$  非常重要。

而且, 为了正确获取并放大传感器发生的电压, 也需要尽可能提高输入阻抗。

但是这是对低频电路而言。在信号波长相对于传输电缆线长度不可忽略的高频电路中, 当信号源阻抗与输入阻抗不同时, 就会产生驻波, 导致频率特性混乱。

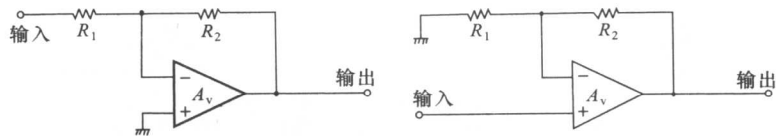
在高频电路中, 使信号源阻抗、电缆线阻抗以及前置放大器的输入阻抗三者相等, 且要进行匹配是原则。

### 1.1.3 前置放大器中采用非反转放大电路

使用 OP 放大器的前置放大电路中, 如图 1.4 所示, 由于负反馈技术的运用, 有反转放大电路和非反转放大电路两种熟知的电路形式。反转放大器的输入阻抗几乎与  $R_1$  相当。因此, 反转放大电路中为了提高输入阻抗, 需要提高  $R_1$  的值。

但是在低噪声前置放大器中, 电阻  $R_1$  的值成为问题的关键。之所以这样说, 是因为电阻器会产生热噪声, 电阻值越大, 热噪声也就越大。

所以在低频低噪声前置放大器中, 采用能够降低反馈电路的电



$$\begin{aligned} \text{增益} &= -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\frac{R_2}{R_1 \cdot A_v} + \frac{R_2}{Z_{in} \cdot A_v} + \frac{1}{A_v} + 1} \\ &\approx \frac{R_2}{R_1} \\ \text{输入阻抗} &= R_1 \cdot \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{Z_{in}} + \frac{1}{R_2} + \frac{A_v}{R_2}}{\frac{1}{Z_{in}} + \frac{1}{R_2} + \frac{A_v}{R_2}} \approx R_1 \quad (A_v \gg 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{增益} &= \frac{A_v}{1 + \frac{R_1 \cdot A_v}{R_1 + R_2}} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_1} \\ \text{输入阻抗} &= \frac{Z_{in} (R_1 + R_2 + R_1 \cdot A_v)}{R_1 + R_2} \\ &= Z_{in} \left( 1 + \frac{R_1 \cdot A_v}{R_1 + R_2} \right) \end{aligned}$$

$A_v$ : OP放大器的电压增益;  $Z_{in}$ : OP放大器的输入阻抗。

(a) 反转放大器

(b) 非反转放大器

图 1.4 两种典型的放大电路

阻值  $R_1$  并且能够提高输入阻抗值的非反转放大器是有利的。

从图 1.4(b)也可以看出,非反转放大电路的输入阻抗由于负反馈作用能够比  $R_1$  的值大很多。

## 1.2 热噪声(Thermal Noise)

### 1.2.1 电阻中产生的热噪声

前面已经提到电阻器产生热噪声的问题。在讨论噪声问题时,这种热噪声是各种噪声的基础。热噪声是由导体内部的自由电子做布朗运动引起的,其大小由下式决定:

$$v_n = \sqrt{4kTRB} \quad (V_{\text{rms}}) \quad (1.1)$$

式中,  $k$  为玻尔兹曼常量 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ );  $T$  为绝对温度 (K);  $R$  为电阻值 ( $\Omega$ );  $B$  为带宽 (Hz)。

为方便计算起见,令式中  $T=300\text{K}(27^\circ\text{C})$ ,则有

$$v_n = 0.126 \sqrt{R(\text{k}\Omega) \times B(\text{kHz})} \quad (\mu V_{\text{rms}}) \quad (1.2)$$

由上式可得,电阻器产生的热噪声与温度、电阻值、带宽三个参数的平方根成比例。热噪声在频谱图中是均匀的。如图 1.5 所示,只要带宽相同,不论在什么频率范围内,其振幅值都是相等的。

例如,温度为  $27^\circ\text{C}$ ,  $1\text{k}\Omega$  的电阻在以  $1\text{kHz}$  为中心的  $100\text{Hz}$

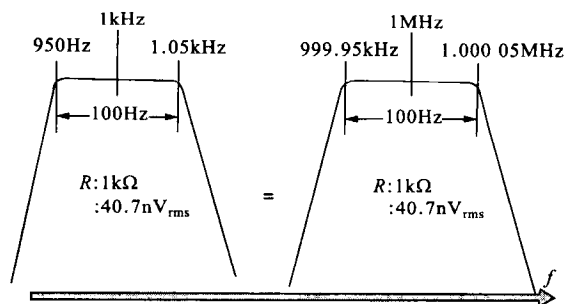


图 1.5 如果带宽相同,在任何频率下热噪声都具有相等的振幅

带宽中产生的噪声电压为  $40.7\text{ nV}_{\text{rms}}$ ,在以  $1\text{ MHz}$  为中心的  $100\text{ Hz}$  带宽中产生的噪声电压也是  $40.7\text{ nV}_{\text{rms}}$ 。

图 1.6 示出不同带宽中热噪声产生量与电阻值的关系。

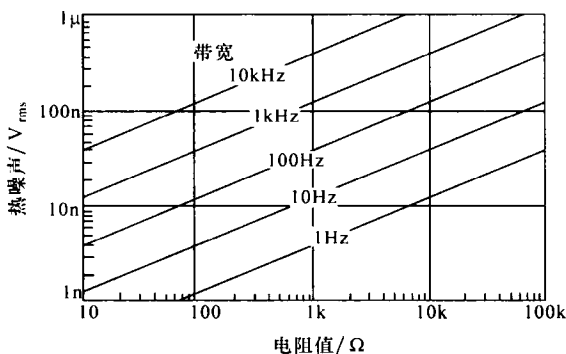
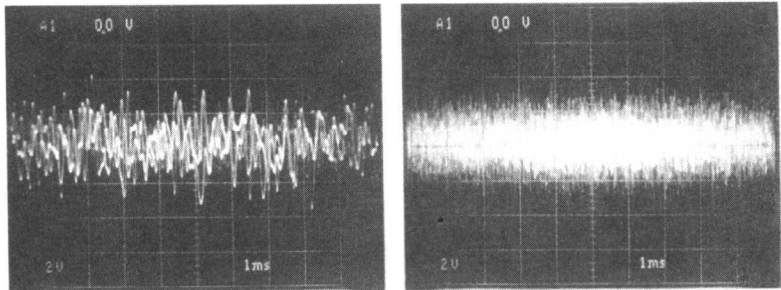


图 1.6 热噪声与带宽及电阻值的关系

### 1.2.2 热噪声的性质

照片 1.1 是一例放大的在限定带宽内测得的电阻器上产生的热噪声。可以看到热噪声的波形是无规则的。但是不可思议的是当测量波形瞬时值的产生频度时,看到如图 1.7 所示的规则分布(高斯分布)。就是说热噪声的最大瞬时电压是没有限度的,不过电压越大出现的频度越小。

因此,用示波器仔细观测可以发现有效值 3 倍的电压以  $0.1\%$  的频度出现,表 1.1 所示为热噪声的峰值系数(Crest Factor 或者 Peak Factor)与频度的关系。峰值系数是表示波形的峰值相对于有效值大小的参数,在正弦波の場合为  $\sqrt{2}$ ,对于方波为 1。若是脉冲状的噪声,峰值系数为更大。



(a) 观测上限频率为5kHz(-3dB)1V<sub>rms</sub>的热噪声(1ms/div)

(b) 观测上限频率为100kHz(-3dB)1V<sub>rms</sub>的热噪声(1ms/div)

照片 1.1 热噪声的测定

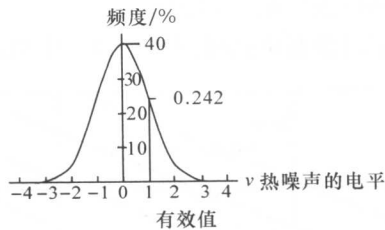


图 1.7 热噪声的振幅几率密度呈高斯分布

表 1.1 热噪声的振幅频度与峰值系数

频度/%	峰值系数/(peak/rms)
1.0	2.6
0.1	3.3
0.01	3.9
0.001	4.4
0.0001	4.9

### 1.2.3 噪声的单位—— $V/\sqrt{\text{Hz}}$ (噪声密度)

热噪声的频率特性是平坦的噪声(处处都均匀地含有白色成分,所以叫做白噪声),如式(1.1)所示,它的产生量与频率带宽的平方根成比例。因此表示噪声大小时,噪声密度常常以  $V/\sqrt{\text{Hz}}$ (噪声电流的场合使用  $A/\sqrt{\text{Hz}}$ )作为单位。如果确定了1Hz带宽中产生的噪声量,就能够通过计算求得在希望使用的任意频带内的噪声量。

即使是具有不同频带、不同增益的放大器,如果用输入换算的



噪声密度进行比较,就能够比较出它们噪声特性的优劣。

因此,OP 放大器的噪声特性也可以用输入换算噪声电压密度来表征。例如,输入换算噪声电压密度为  $5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  的 OP 放大器在增益 100 倍,频率带宽  $30\text{kHz}$  下使用,那么出现在输出端的噪声  $v_{on}$  为:

$$\begin{aligned} v_{on} &= 5\text{nV} \times 100 \times \sqrt{30\text{kHz}} \\ &= 86.6 \mu\text{V}_{\text{rms}} \end{aligned}$$

(实际上,OP 放大器产生的噪声不只是热噪声,所以还有些差异。)

用示波器观测这个  $v_{on}$ ,可以得到它的峰值  $v_{onp}$  为:

$$\begin{aligned} v_{onp} &= 86.6 \mu\text{V}_{\text{rms}} \times 3 \\ &= 260 \mu\text{V}_{\text{opp}} = 0.52\text{mV}_{\text{pp}} \end{aligned}$$

计算噪声电压时,只是说明了一定带宽范围内的噪声特性。但是在放大器振幅-频率特性的上限/下限附近的增益衰减斜率是各不相同的,因此一概规定为降低  $3\text{dB}$  的频率是不准确的,需要对衰减斜率进行修正。如图 1.8 所示,这被称为等效噪声带宽。

巴特沃斯特性的噪声带宽系数  $k$

阶数	衰减斜率	$k$
1	-6dB/oct	1.57
2	-12dB/oct	1.11
3	-18dB/oct	1.05
4	-24dB/oct	1.03

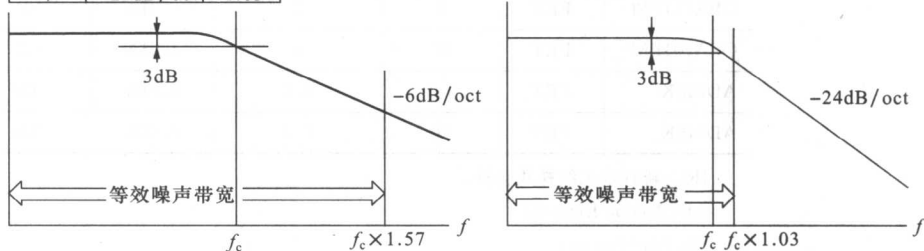


图 1.8 等效噪声带宽与噪声带宽系数

## 1.3 OP 放大器电路中产生的噪声

### 1.3.1 非反转放大电路中产生的噪声

前面说明了噪声的基本考虑方法。对于 OP 放大器中发生的噪声来说,如图 1.9 所示,有输入换算噪声电压和输入噪声电流两种。在低噪声 OP 放大器参数表中,一定会提供这些数据。表 1.2