

新编《信息、控制与系统》系列教材

# 微弱信号检测 (第2版)

**Detection of Weak Signals**  
**(Second Edition)**

高晋占 编著  
Gao Jinzhan

清华大学出版社

新编《信息、控制与系统》系列教材

# 微弱信号检测 (第2版)

## Detection of Weak Signals (Second Edition)

高晋占 编著  
Gao Jinzhan

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

微弱信号检测是发展高新技术、探索及发现新的自然规律的重要手段,对推动很多领域的发展具有重要的应用价值。对于淹没在强背景噪声中的微弱信号,运用电子学和近代信号处理手段抑制噪声,进而从噪声中提取和恢复有用的微弱信号,是本书的主要内容。本书涉及利用随机噪声理论分析和解释电子系统内部噪声和外部干扰噪声的产生和传播问题,并详细介绍各种不同噪声的抑制方法,以及锁相放大、取样积分、相关检测、自适应降噪等应用技术。

本书可作为自动化、电子工程、物理、化学、生物医学工程、核技术、测试技术与仪器等专业的研究生和高年级本科生的教材,也可供涉及电子噪声、低噪声设计、电磁兼容性、微弱信号检测的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

微弱信号检测/高晋占编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2011.4

(新编《信息、控制与系统》系列教材)

ISBN 978-7-302-24530-8

I. ①微… II. ①高… III. ①信号检测 IV. ①TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 007582 号

责任编辑:王一玲

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

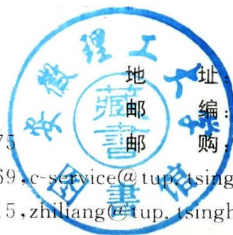
经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:22.25 字 数:539千字

版 次:2011年4月第2版 印 次:2011年4月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:35.00元



## 新编《信息、控制与系统》系列教材编委会

顾	问	李衍达	吴澄	边肇祺	王桂增		
主	编	郑大钟					
编	委	徐文立	王雄	萧德云	杨士元	肖田元	
		张贤达	周东华	钟宜生	张长水	王书宁	
		范玉顺	蔡鸿程				
责任编辑		王一玲					

# 新编《信息、控制与系统》系列教材 出版说明

信息、控制与系统学科是在 20 世纪上半叶形成和发展起来的一门新兴技术科学。在人类探索自然和实现现代化的进程中,信息、控制与系统学科的理论、方法和技术始终起着重要的和基础的作用。基于信息、控制与系统科学的自动化的发展和应用水平在一定意义上是一个国家和社会的现代化程度的重要标志之一。本系列教材是关于信息、控制与系统学科所属各个领域的基本理论和前沿技术的一套高等学校系列教材。

本系列教材所涉及的范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、智能控制、过程和运动控制、传感技术、系统工程、机器人控制、工业自动化、计算机控制和仿真、网络化系统、电子技术等方面。主要读者对象为自动控制、工业自动化、计算机科学和技术、电气工程、机械工程、化工工程和热能工程等专业有关的高年级大学生和研究生,以及工作于相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

十多年前,清华大学出版社同清华大学自动化系,曾经组编出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了较大的社会影响,其中多数著作获得过包括国家级教学成果奖和部委优秀教材奖在内的各种奖励,至今仍为国内众多院校所采用,并被广大相关领域科技人员作为进修和自学读物。我们现在组编的这套新编《信息、控制与系统》系列教材,从一定意义上说,就是先前那套教材的延伸和发展,以反映近年来学科的发展和在科学研究与教学实践上的新成果和新进展,以适应当前科技发展和教学改革的新形势和新需要。列入这套新编系列教材中的著作,大多是清华大学自动化系开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上的新编著的教材,也有部分原系列教材的更新和修订版本。这套新编系列教材总体上仍将保持原系列教材求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理论和最新进展,力求做到学科先进性和教学适用性统一。需要说明的是,此前我们曾以《信息技术丛书》为名组编这套教材,并已出版了若干种著作。现为使“书”和“名”更为相符,这些已出版的著作将在重印或再版时列入这套新编系列教材。

我们希望,这套新编系列教材,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和教学适用的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会  
2002 年 6 月

# 第2版前言

《微弱信号检测》于2004年11月由清华大学出版社出版,已重印5次,其中的若干不足之处在第2次印刷中作了更正。尽管如此,随着科学技术的发展,经过全国多所高等院校6年的教学应用,发现书中仍然存在不少需要修订、补充和提高之处,促使作者对本书进行修改和增补。第2版中的改动主要包括以下几个方面:

(1) 部分章节和段落补充了新的素材,增加了有关的IC芯片的介绍,以反映新技术、新器件在微弱信号检测方面的应用。

(2) 部分章节进行了重新编写,在第2章中增加了“噪声特性测量”一节,并改写了“ $1/f$ 噪声”小节的内容,重写了第3章中的“屏蔽”一节,在第7章中增加了“卡尔曼滤波”一节。

(3) 对全书文字进行了校订,各章内容均有增删和修改,删除了第1版中一些可有可无和阐述不严格的内容。

(4) 对本书部分内容的条理和层次进行了调整,以增强本书的可读性。

(5) 对原版中某些不统一的符号,进行了统一处理,例如 $I_{DC}$ 和 $I_{dc}$ , $\beta_0$ 和 $\beta_{DC}$ 等。某些符号使用不当,则予以改正。

内容更新和语言推敲是一个无止境的工作,没有最好,只有更好。尽管我已在订正方面做了很大的努力,修正补充了许多内容,我相信肯定还会有一些不尽如人意的地方,书中疏漏和错误在所难免,恳请读者批评指正。

高晋占

2011年1月于清华大学

# 第1版前言

信息时代需要获取信息,许多科学研究和工程技术的信息需要用检测的方法来获取。在现代科学的发展中,认识未知世界的必要手段是把未知量转换为人们可以感知的某种示值。人类对自然界的探索越深入,所需检测的信息就越微弱。当被测信号非常微弱时,因为被噪声淹没,它们的检测往往变得十分困难。微弱信号检测就是利用近代电子学和信号处理方法从噪声中提取有用信号的一门新兴的技术学科。

微弱信号检测技术在许多领域具有广泛的应用,例如物理学、化学、电化学、生物医学、天文学、地学、磁学等。微弱信号检测所针对的检测对象,是用常规和传统方法不能检测到的微弱量,例如弱光、弱磁、弱声、小位移、微流量、微振动、微温差、微压差以及微电导、微电流等。随着科学技术的发展,越来越需要把深埋在噪声中的微弱信号检测出来。可以说,微弱信号检测是发展高新技术、探索及发现新的自然规律的重要手段,对推动相关领域的发展具有重要意义。

“微弱信号”不只意味着信号的幅度很小,它主要是指被噪声淹没的信号,“微弱”是相对于噪声而言的。只有在有效地抑制噪声的条件下放大微弱信号的幅度,才能提取出有用信号。因此,微弱信号检测是一门专门与噪声作斗争的技术,其主要任务是提高信噪比。为了从噪声中提取出有用的信号,就需要研究噪声的来源和性质,分析噪声产生的原因和规律,以及它们的传播途径,有针对性地采取有效措施抑制噪声,研究被测信号和噪声的统计特性及其差别,以寻找出从背景噪声中检测出有用信号的理论和方法。

本书内容分为7章。第1章介绍随机噪声的统计特性,这是后续各章和读者继续阅读和学习的理论基础。第2章介绍电路内部固有噪声源及其特性,对各种电子器件的噪声性能进行分析,并阐述低噪声放大器设计中需要考虑的几个问题。第3章介绍干扰噪声的来源、特点及各种耦合途径,并详细介绍屏蔽和接地对于各种干扰噪声的抑制作用,以及其他一些常用的抗干扰措施和微弱信号检测电路设计原则。

经过多年的研究和实践,科技工作者提出和发展了一些从噪声中提取微弱信号的有效方法和技术,包括锁定放大、取样积分、相关检测、自适应噪声抵消等。本书的第4章~第7章分别介绍这些方法的理论基础、设计实现以及一些应用实例。

微弱信号检测技术仍在继续发展,不断出现新的研究成果。例如,基于人工神经网络、小波变换、混沌理论的微弱信号检测理论和方法都已经取得可喜的进展,限于篇幅本书不予介绍。

本书可用作自动化、电子工程、物理、生物医学工程、核技术、测试技术与仪器等专业的研究生和高年级本科生教材,也可供涉及电子噪声、低噪声设计、电磁兼容性、微弱信号检测的工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

高晋占

2004年6月于清华大学



# 符号说明

## 1. 基本符号

$f$	频率通用符号,单位为 Hz
$f_0$	中心频率,单位为 Hz
$f_c$	截止频率,单位为 Hz
$i$	电流通用符号,单位为 A
$l$	距离或长度,单位为 m
$u, v$	电压通用符号,单位为 V
$r$	器件内部的等效电阻,单位为 $\Omega$
$B$	系统频带宽度,单位为 Hz
$C$	电容的通用符号,单位为 F
$E$	数学期望运算符
$G$	电导的通用符号,单位为 S
$I$	电流的有效值,单位为 A
$I_{DC}$	平均直流电流,单位为 A
$L$	电感的通用符号,单位为 H
$M$	互感的通用符号,单位为 H
$P$	功率的通用符号,单位为 W
$R$	电阻或等效电阻,单位为 $\Omega$
$R_i$	电路的输入电阻,单位为 $\Omega$
$R_o$	电路的输出电阻,单位为 $\Omega$
$R_L$	负载电阻,单位为 $\Omega$
$R_s$	信号源内阻,单位为 $\Omega$
$U, V$	电压的有效值,单位为 V
$T$	热力学温度,单位为 K
$X$	电抗的通用符号,单位为 $\Omega$

$Z$	阻抗的通用符号,单位为 $\Omega$
$\omega$	角频率通用符号,单位为 rad/s

## 2. 线性系统符号

$A(t)$	幅度函数
$\varphi(t)$	相位函数
$G(\omega)$	幅频特性函数
$\varphi(\omega)$	相频特性函数
$h(t)$	冲激响应函数
$H(j\omega)$	频率响应函数
$H(s)$	传递函数
$H(z^{-1})$	离散传递函数

## 3. 随机噪声符号

$e_n$	噪声电压
$i_n$	噪声电流
$\overline{e_n^2}$	噪声电压的均方值
$\overline{i_n^2}$	噪声电流的均方值
$E_n$	噪声电压的有效值, $E_n = \sqrt{\overline{e_n^2}}$
$I_n$	噪声电流的有效值, $I_n = \sqrt{\overline{i_n^2}}$
$e_N$	噪声电压的平方根谱密度,单位为 $V/\sqrt{\text{Hz}}$
$i_N$	噪声电流的平方根谱密度,单位为 $A/\sqrt{\text{Hz}}$
$e_t$	热噪声电压
$i_t$	热噪声电流

$e_{sh}$	散弹噪声电压	$r_{b'e}$	发射结的微变等效电阻
$i_{sh}$	散弹噪声电流	$r_{cc}$	共射接法下集射极之间的微变电阻
$e_f$	1/f 噪声电压	$r_{ds}$	场效应管漏源之间的等效电阻
$i_f$	1/f 噪声电流	$r_{on}$	导通电阻
$F$	噪声系数(noise factor)	D	二极管,场效应管的漏极
$NF$	噪声因数(noise figure),单位为 dB	G	场效应管的栅极
$SNR$	信噪比	S	场效应管的源极
$SNIR$	信噪改善比	$I_D$	二极管电流,漏极电流
$B_e$	等效噪声带宽	$I_B$	共射接法下的基极电流
$\Delta f$	窄带宽度	$I_C$	共射接法下的集电极电流
$p(x)$	$x$ 的概率密度函数	$I_E$	共射接法下的发射极电流
$\mu_x$	$x$ 的均值	$\alpha$	共基接法下的电流放大倍数, $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$
$\sigma_x^2$	$x$ 的方差	$\beta$	共射接法下的电流放大倍数, $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
$\sigma_x$	$x$ 的标准差	$\beta_0$	共射接法下的直流电流放大倍数, $\beta_0 = I_C / I_B$
$\overline{x^2}$	$x$ 的均方值		
$C_x(\tau)$	$x$ 的自协方差函数	<b>5. 其他符号</b>	
$c_x(\tau)$	$x$ 的归一化自协方差函数	$c$	电磁辐射速度, $c = 2.998 \times 10^8$ m/s
$C_{xy}(\tau)$	$x$ 和 $y$ 的互协方差函数	$h$	普朗克(Planck)常数, $h = 6.62 \times 10^{-34}$ J·s
$c_{xy}(\tau)$	$x$ 和 $y$ 的归一化互协方差函数	$k$	玻耳兹曼(Boltzmann)常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K
$R_x(\tau)$	$x$ 的自相关函数	$q$	电子电荷, $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C
$R_{xy}(\tau)$	$x$ 和 $y$ 的互相关函数	$\lambda$	波长,单位为 m
$S(f)$	噪声的功率谱密度函数	$\epsilon$	介质的介电常数
$S_e(f)$	噪声电压的功率谱密度函数	$\epsilon_0$	自由空间的介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m
$S_i(f)$	噪声电流的功率谱密度函数	$\epsilon_r$	对自由空间的相对介电常数, $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$
$S_x(f)$	$x$ 的功率谱密度函数	$\mu$	介质的磁导率
$S_{xy}(f)$	$x$ 和 $y$ 的互功率谱密度函数	$\mu_0$	自由空间的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m = $4\pi \times 10^{-4}$ $\mu$ H/mm
$\rho_x(\tau)$	$x$ 的归一化自相关函数	$\mu_r$	对自由空间的相对磁导率, $\mu_r = \mu / \mu_0$
$\rho_{xy}(\tau)$	$x$ 和 $y$ 的归一化互相关函数	$\sigma$	介质的电导
$ J $	雅可比(Jacobi)行列式	$\sigma_c$	铜的电导, $\sigma_c = 5.82 \times 10^7$ S/m
<b>4. 半导体器件参数符号</b>		$\sigma_r$	对铜的相对电导, $\sigma_r = \sigma / \sigma_c$
b	基极	CMRR	共模抑制比
c	集电极		
e	发射极		
$f_T$	晶体管的特征频率,即共射接法下电流放大倍数为 1 的频率,单位为 Hz		
$g_m$	跨导		
$r_{bb'}$	基区体电阻		

# 目 录

第 1 章 微弱信号检测与随机噪声	1
1.1 微弱信号检测概述	1
1.2 常规小信号检测方法	2
1.2.1 滤波	3
1.2.2 调制放大与解调	5
1.2.3 零位法	7
1.2.4 反馈补偿法	8
1.3 随机噪声及其统计特征	9
1.3.1 随机噪声的概率密度函数	10
1.3.2 随机噪声的均值、方差和均方值	11
1.3.3 随机噪声的相关函数与协方差函数	12
1.3.4 随机噪声的功率谱密度函数	18
1.4 常见随机噪声	21
1.4.1 白噪声与有色噪声	21
1.4.2 窄带噪声	23
1.5 随机噪声通过电路系统的响应	28
1.5.1 随机噪声通过线性系统的响应	28
1.5.2 非平稳随机噪声通过线性系统的响应	31
1.5.3 随机噪声通过非线性系统的响应	32
1.6 等效噪声带宽	36
1.6.1 等效噪声带宽的定义	36
1.6.2 等效噪声带宽的计算方法	37
第 2 章 放大器的噪声源和噪声特性	41
2.1 电子系统内部的固有噪声源	41

2.1.1	电阻的热噪声 .....	42
2.1.2	PN 结的散弹噪声 .....	46
2.1.3	1/f 噪声 .....	47
2.1.4	爆裂噪声 .....	49
2.2	放大器的噪声指标与噪声特性 .....	50
2.2.1	噪声系数和噪声因数 .....	50
2.2.2	级联放大器的噪声系数 .....	52
2.2.3	放大器的噪声模型 .....	54
2.2.4	放大器的噪声特性 .....	56
2.3	二极管和双极型晶体管的噪声特性 .....	61
2.3.1	半导体二极管的噪声模型 .....	61
2.3.2	双极型晶体管的噪声模型 .....	62
2.3.3	双极型晶体管的等效输入噪声 .....	64
2.3.4	双极型晶体管的噪声因数频率分布 .....	67
2.4	场效应管的噪声特性 .....	70
2.4.1	场效应管的内部噪声源 .....	71
2.4.2	场效应管的噪声等效电路与噪声特性 .....	72
2.5	运算放大器的噪声特性 .....	75
2.5.1	运算放大器的等效输入噪声模型 .....	75
2.5.2	运算放大器的噪声性能计算 .....	76
2.6	低噪声放大器设计 .....	80
2.6.1	有源器件的选择 .....	80
2.6.2	偏置电路与直流工作点选择 .....	82
2.6.3	噪声匹配 .....	86
2.6.4	反馈电路对噪声特性的影响 .....	91
2.6.5	高频低噪声放大器设计考虑 .....	94
2.7	噪声特性测量 .....	96
2.7.1	噪声功率和有效值测量 .....	96
2.7.2	噪声功率谱密度测量 .....	101
2.7.3	噪声系数测量 .....	104
2.7.4	其他噪声特性的测量和计算 .....	110
<b>第 3 章</b>	<b>干扰噪声及其抑制 .....</b>	<b>114</b>
3.1	环境干扰噪声 .....	114
3.1.1	干扰噪声源 .....	114
3.1.2	干扰噪声的频谱分布 .....	119
3.2	干扰耦合途径 .....	120
3.2.1	传导耦合 .....	121
3.2.2	电场耦合 .....	124

3.2.3	磁场耦合	127
3.2.4	电磁辐射耦合	132
3.3	屏蔽	133
3.3.1	场传播与波阻抗	134
3.3.2	屏蔽层的吸收损耗	136
3.3.3	屏蔽层的反射损耗	137
3.3.4	屏蔽效果分析	141
3.4	电缆屏蔽层接地	147
3.4.1	电缆屏蔽层和芯线之间的耦合	147
3.4.2	电缆屏蔽层接地抑制电场耦合噪声	149
3.4.3	电缆屏蔽层接地抑制磁场耦合噪声	152
3.4.4	屏蔽层接地点的选择	155
3.5	电路接地	157
3.5.1	电路的接地方式	157
3.5.2	放大器输入信号回路接地	159
3.6	其他噪声抑制技术	163
3.6.1	隔离	163
3.6.2	共模扼流圈	165
3.6.3	信号线和电源线的抗干扰措施	167
<b>第4章</b>	<b>锁定放大</b>	<b>171</b>
4.1	概述	171
4.2	相敏检测	173
4.2.1	模拟乘法器型相敏检测器	173
4.2.2	电子开关型相敏检测器	182
4.3	锁定放大器的组成与部件	185
4.3.1	锁定放大器的基本组成与部件	185
4.3.2	正交矢量型锁定放大器	190
4.3.3	外差式锁定放大器	191
4.3.4	微机化数字式相敏检测器	193
4.4	旋转电容滤波及其在锁定放大器中的应用	195
4.4.1	旋转电容滤波器的工作原理	195
4.4.2	基于旋转电容滤波器的同步外差锁定放大器	200
4.5	锁定放大器的性能指标与动态协调	204
4.5.1	锁定放大器的主要性能指标	204
4.5.2	动态范围与动态协调	206
4.6	锁定放大器应用	208
4.6.1	阻抗测量	208
4.6.2	放大器噪声系数测量	212

4.6.3	其他应用	214
<b>第5章</b>	<b>取样积分与数字式平均</b>	<b>218</b>
5.1	取样积分的基本原理	218
5.1.1	线性门积分	219
5.1.2	指数式门积分	221
5.2	指数式门积分器分析	222
5.2.1	取样过程频域分析	222
5.2.2	指数式门积分器电路频域分析	224
5.2.3	指数式门积分器的输出特性	225
5.2.4	指数式门积分的信噪改善比	227
5.3	取样积分器的工作方式	228
5.3.1	定点工作方式	228
5.3.2	扫描工作方式	230
5.4	取样积分器的参数选择及应用	234
5.4.1	取样积分器的参数选择	234
5.4.2	基线取样与双通道取样积分器	237
5.4.3	多点取样积分器系统	239
5.4.4	取样积分器应用实例	241
5.5	数字式平均	243
5.5.1	数字式平均的原理及实现	244
5.5.2	数字式平均的信噪改善比	245
5.5.3	数字式平均的频域分析	247
5.5.4	数字式平均算法	250
<b>第6章</b>	<b>相关检测</b>	<b>255</b>
6.1	概述	255
6.2	相关函数的实际运算及误差分析	258
6.2.1	相关函数的实际运算	258
6.2.2	运算误差分析	259
6.3	相关函数算法及实现	261
6.3.1	递推算法	262
6.3.2	继电式相关算法	263
6.3.3	极性相关算法	265
6.3.4	其他相关算法	267
6.4	相关函数峰点位置跟踪	269
6.5	相关检测应用	271
6.5.1	噪声中信号的恢复	271
6.5.2	延时测量	277

6.5.3	泄漏检测	278
6.5.4	运动速度测量	280
6.5.5	流速测量	281
6.5.6	系统辨识	286
<b>第 7 章</b>	<b>自适应噪声抵消</b>	<b>291</b>
7.1	自适应噪声抵消原理	291
7.1.1	简述	291
7.1.2	基于最小 MSE 准则的自适应噪声抵消原理	293
7.1.3	自适应 FIR 维纳滤波器	295
7.2	最陡下降法	297
7.2.1	最陡下降法的递推公式	297
7.2.2	最陡下降法的性能分析	298
7.3	最小均方算法	302
7.3.1	LMS 算法的原理	303
7.3.2	LMS 算法的性能分析	304
7.4	其他自适应算法	310
7.4.1	归一化 LMS 算法	310
7.4.2	LMS 符号算法	312
7.5	卡尔曼滤波	314
7.5.1	标量信号的卡尔曼滤波	315
7.5.2	向量信号的卡尔曼滤波	320
7.6	自适应滤波器应用	323
7.6.1	消除心电图的工频干扰	323
7.6.2	胎儿心电图检测	325
7.6.3	涡街流量检测中机械振动噪声的抑制	326
7.6.4	窄带信号和宽带信号的分离	327
7.6.5	自适应回声抵消	328
<b>附录 A</b>	<b>常用常数</b>	<b>331</b>
<b>附录 B</b>	<b>线性二端口网络的噪声模型</b>	<b>333</b>
<b>附录 C</b>	<b>磁场在薄屏蔽层中的多次反射</b>	<b>335</b>
	<b>参考文献</b>	<b>337</b>

# 第 1 章

## 微弱信号检测与随机噪声

### 1.1 微弱信号检测概述

“微弱信号”不仅意味着信号的幅度很小,而且主要指的是被噪声淹没的信号,“微弱”是相对于噪声而言的。为了检测被背景噪声覆盖着的微弱信号,人们进行了长期的研究工作,分析噪声产生的原因和规律,研究被测信号的特点、相关性以及噪声的统计特性,以寻找出从背景噪声中检测出有用信号的方法。

微弱信号检测技术的首要任务是提高信噪比,这就需要采用电子学、信息论、计算机和物理学的方法,以便从强噪声中检测出有用的微弱信号,从而满足现代科学研究和技术发展的需要。微弱信号检测技术不同于一般的检测技术,它注重的不是传感器的物理模型和传感原理,也不是相应的信号转换电路和仪表实现方法,而是如何抑制噪声和提高信噪比,因此可以说,微弱信号检测是一门专门抑制噪声的技术。

对于各种微弱的被测量,例如弱光、弱磁、弱声、小位移、小电容、微流量、微压力、微振动、微温差等,一般都是通过相应的传感器将其转换为微电流或低电压,再经放大器放大其幅度,以期指示被测量的大小。但是,由于被测量的信号微弱,传感器的本底噪声、放大电路及测量仪器的固有噪声以及外界的干扰噪声往往要比有用信号的幅度大得多,放大被测信号的过程同时也放大了噪声,而且必然还会附加一些额外的噪声,例如放大器的内部固有噪声和各种外部干扰噪声,因此只靠放大是不能把微弱信号检测出来的。只有在有效地抑制噪声的条件下增大微弱信号的幅度,才能提取出有用信号。为了达到这样的目的,必须研究微弱信号检测的理论、方法和设备。

为了表征噪声对信号的覆盖程度,人们引入了信噪比(signal-noise ratio,简记为 SNR)的概念,信噪比指的是信号  $S$  与噪声  $N$  之比,即

$$SNR = S/N \quad (1-1)$$

信噪比可以是电压或电流的有效值比值,一般表示为  $SNR_V$  或  $SNR_I$ ; 也可以是功率



比值,一般表示为  $SNR_p$ 。微弱信号检测的关键是提高信噪比。评价一种微弱信号检测方法的优劣,经常采用两种指标:一种是信噪改善比  $SNIR$ (signal noise improvement ratio),另一种是有效的检测分辨率。 $SNIR$  定义为

$$SNIR = \frac{SNR_o}{SNR_i} \quad (1-2)$$

式中, $SNR_o$  是系统输出端的信噪比, $SNR_i$  是系统输入端的信噪比。 $SNIR$  越大,表明系统抑制噪声的能力越强。因为  $SNR_v$  和  $SNR_p$  之间为平方关系,相应的  $SNIR$  之间也是平方关系。所以,在谈及信噪比或信噪改善比时,必须说明是哪一种。

微弱信号检测的另一种指标是检测分辨率,它的定义是检测仪器示值可以响应与分辨的输入量的最小变化值。检测分辨率不同于检测灵敏度,后者定义为输出变化量  $\Delta y$  与引起  $\Delta y$  的输入变化量  $\Delta x$  之比,即灵敏度等于  $\Delta y/\Delta x$ 。也就是说,灵敏度表示的是检测系统标定曲线的斜率。一般情况下,灵敏度越高,分辨率越好。但是,提高系统的放大倍数可以提高灵敏度,但却不一定能提高分辨率,因为分辨率要受噪声和检测误差的制约。

表 1-1 对比了常规检测方法与微弱信号检测方法所能达到的最高分辨率和  $SNIR$ (有效值),表中最后一行是专门从事微弱信号检测仪器生产的吉时利(Keithley)公司的产品近年能够达到的指标。从这些指标中可以看出微弱信号检测技术发展的大致水平。

表 1-1 检测的最高分辨率

检 测 量	电压/nV	电流/nA	温度/K	电容/pF	微量分析/克分子	$SNIR_v$
常规检测方法	$10^3$	0.1	$10^{-4}$	0.1	$10^{-5}$	10
微弱信号检测方法	0.1	$10^{-5}$	$5 \times 10^{-7}$	$10^{-5}$	$10^{-8}$	$10^5$
吉时利公司	$10^{-3}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$			

抑制噪声以提高信噪比的研究工作由来已久,可以说从电子器件和电子学诞生的年代开始,人们一直在探索抑制噪声的技术。自从 1962 年第一台锁相放大器问世的四十多年来,经过很多科学工作者的不懈努力,微弱信号检测技术得到了长足的发展,信噪改善比  $SNIR$  得到不断提高。到 20 世纪 80 年代末,微弱信号检测的  $SNIR_v$  可达  $10^5$ ,近年在一些专门检测领域(例如微弱电流) $SNIR_v$  已能达到  $10^7$ ,从而推动了物理、化学、电化学、天文、生物、医学等学科的发展。目前,微弱信号检测的原理、方法和设备已经成为很多领域中进行现代科学研究不可缺少的理论和手段,而未来科技的发展也必将对微弱信号检测技术提出更高的要求。

## 1.2 常规小信号检测方法

与微弱信号相比,小信号的信噪比要高得多,其检测技术也要成熟得多。但是,就提高信噪比,从而检测出被噪声污染的有用信号这一点来看,小信号检测与微弱信号检测具有一定的共同之处。经过多年的研究和实践,人们已经掌握了一些行之有效的小信号检测方法,其中的一些方法还被成功地应用到检测仪器仪表产品之中。了解这些小信号检测的成熟手段和方法,对于微弱信号检测具有一定的参考价值。