

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

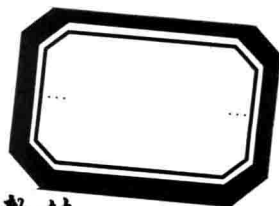
微弱信号检测技术

DETECTION TECHNOLOGY OF WEAK SIGNAL

刘国福 杨俊 © 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

微弱信号检测技术

刘国福 杨 俊 编著



机械工业出版社

本书主要讲解噪声产生的原因和规律、低噪声电子电路的设计方法、微弱信号检测的方法以及相应的理论基础。全书内容共分8章,内容包括:微弱信号检测的含义、特点、常用方法和发展状况,随机信号与噪声基础,电路和系统中的噪声源及特性,低噪声电路的分析与设计,相关检测与锁定放大,取样积分器与数字多点平均器,匹配滤波器,光子计数技术等。

本书适合于仪器仪表类、机电类、自动化类、信息类等相关专业的高年级本科生和研究生以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微弱信号检测技术/刘国福,杨俊编著. —北京:
机械工业出版社, 2014.9

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

ISBN 978-7-111-47890-4

I. ①微… II. ①刘…②杨… III. ①信号检测-高等学校-教材 IV. ①TN911.23

中国版本图书馆(CIP)数据核字(2014)第200354号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王小东 责任编辑:王小东 韩静

封面设计:张静 责任校对:陈秀丽

责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2014年9月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·11.75印张·281千字

标准书号:ISBN 978-7-111-47890-4

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

序

微弱信号检测技术是一门新兴的技术学科，是利用电子学、信息论和物理学的方法，分析噪声产生的原理和规律，研究被测信号的特点与相关性，检测被噪声背景或干扰信号淹没的微弱信号。这一技术的应用范围遍及几乎所有的科学领域。微弱信号检测技术所针对的检测对象，是用常规和传统的方法无法检测到的信号。此技术的发展为现代科学技术、军事和工农业生产提供了强有力的测试手段。

在科学技术、生产力高度发展的今天，科研、生产、国防、工程技术、生物医学、物理、化学、光学等众多领域中，存在大量的微弱信号检测方面的技术问题。我国高等院校为了培养适应21世纪建设人才的需要，在教学计划中应增加和开设有关微弱信号检测技术方面的教学内容，已越来越受到各高校的高度重视，并形成了共识，逐步列入教学计划。但是，由于微弱信号检测技术的教材缺乏，到目前为止，尚无适合我国国情的微弱信号检测技术的理想教材，给一些高校开设此课程带来了困难。本书的出版为我国微弱信号检测技术的课程提供了一本好教材。

微弱信号检测技术是一门技术学科，就学习方法而言，必须要结合实际。通过教学实验加深理解，才能体会到有关检测方法和传统常规检测方法的区别，了解其中的奥妙和乐趣，为将来解决工作中的实际问题打下坚实的基础。

本书的出版，不但为在校大学生和研究生学习提供了一本好教材，也为广大科学工作者和工程技术人员提供了有价值的有关微弱信号检测技术方面的读物，将为推动我国微弱信号检测技术的发展和进步作出贡献。

唐鸿宾
2014年5月

前 言

在研究自然现象和规律的科学研究和工程实践中，经常会遇到需要检测微纳伏量级信号的问题，如测定地震的波形和波速、材料分析时测量荧光光强、卫星信号的接收、红外探测以及生物电信号的测量等。这些问题都归结为噪声中微弱信号的检测。因此，从某种意义上来说，微弱信号检测是一种专门与噪声作斗争的技术；只有抑制噪声，才能提取信号。

微弱信号检测技术是一门新兴的技术性学科，主要研究噪声中微弱信号检测的原理和方法，是测量技术中的综合技术。它是运用电子学和信息论等学科知识，分析噪声产生的原因和规律，研究被测信号和噪声的统计特征及差别，分析电路中噪声和干扰的抑制方法，介绍和分析各种信号处理方法，以达到检测被背景噪声覆盖的微弱信号的目的。微弱信号检测技术通过利用信号与噪声不同的统计特征和规律使测量精度得到大幅度提高，也是发展新技术、探索及发现新规律的重要测量手段。

微弱信号检测与处理技术为现代科学技术和工农业生产提供了强有力的测试手段，应用范围遍及几乎所有的科学领域，已成为现代科技必备的常用仪器。运用这些原理和方法可以测量到传统方法不能测量的微弱量，如弱光、微位移、微振动、微温差、小电容、弱磁、弱声、微电导和微电流等。在物理、化学、生物医学、遥感和材料学等领域都有广泛应用。

目前，准确地掌握一定的低噪声电子电路分析与设计技术、微弱信号检测的新方法以及相应的理论基础，已成为科学研究和工程技术人员的一项基本素质和能力要求。为培养学生掌握微弱信号检测系统的分析与设计的基本理论与方法，为将来从事高精度检测系统开发与应用，尤其是如何提高系统的检测能力和精度等工作建立良好的基础，作者在整理多年教学与科研成果的基础上参考了大量的最新文献，撰写了此书，奉献给广大读者。

为了使读者能对微弱信号检测得到一个较完整的概念，能够运用微弱信号检测技术解决面临的各种微弱物理量的检测问题，本书紧密围绕传感器和电路系统中产生噪声的大小及其测量这个问题来展开论述，全书内容共分为8章。第1章为绪论，介绍微弱信号检测的含义、特点、常用方法和发展状况；第2章介绍随机信号与噪声的基础知识，重点讨论噪声的基本概念，对噪声的机理、性质、统计特征作了必要的叙述，给出了噪声通过电路系统后的响应；第3章介绍电路和系统中的噪声源及其特性，讨论常用电路元器件，如电阻、电容、电感、二极管、双极型晶体管、场效应晶体管与运算放大器的噪声性能；第4章介绍低噪声放大电路的分析与设计方法，给出低噪声放大电路设计的一般原则与方法；第5章讨论相关检测与锁定放大，介绍相关函数的概念、相关检测的原理、典型相关器电路、基于相关检测技术的锁定放大器及其性能指标等知识；第6章介绍取样积分器与数字多点平均器，讨论取样积分器与数字多点平均器的原理、构成与

方法；第7章介绍白噪声背景下的匹配滤波器和色噪声背景下的广义匹配滤波器的原理与设计方法；第8章介绍光子计数技术，讨论弱光信号的随机计数原理及技术。

本书由刘国福、杨俊编著并对全书进行了统稿。感谢罗晓亮、杨云、朱金涛、熊艳等老师和研究生为本书的编写做出的工作。其中，罗晓亮和杨云为本书的编写搜集了相关资料，朱金涛完成了本书的插图绘制工作，熊艳完成了本书的排版工作。

本书承蒙我国著名微弱信号检测专家南京大学微弱信号检测中心唐鸿宾教授写序，对此表示衷心感谢。

在本书内容策划与撰写过程中，承蒙清华大学丁天怀教授、中国计量学院李东升教授等对我们的工作给予了热情支持与帮助，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中学习和参考了许多文献，还吸收了国内外科技人员近几年的科研成果，在此谨向文献的作者们表示衷心感谢。

本书的内容选材、编写形式是一种新的尝试，由于作者水平有限，且成书时间仓促，书中难免存在疏漏甚至错误，恳请广大读者批评指正，我们将不胜感激。

编著者

目 录

序	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 微弱信号检测基础知识	1
1.1.1 噪声与干扰	1
1.1.2 信噪比与信噪改善比	2
1.1.3 微弱信号检测的含义与特点	3
1.2 微弱信号检测方法	4
1.2.1 微弱信号检测的基本方法	4
1.2.2 微弱信号检测的新方法	5
1.3 本书主要内容	7
思考题与习题	7
第2章 随机信号与噪声基础	8
2.1 确定信号与随机信号	8
2.1.1 确定信号	8
2.1.2 随机信号	9
2.2 随机信号的统计特性	10
2.2.1 概率密度函数	10
2.2.2 统计平均	11
2.2.3 平稳随机过程的自相关函数	14
2.2.4 平稳随机过程的互相关函数	15
2.2.5 平稳随机过程的功率谱密度	17
2.3 常见随机噪声及特性	19
2.3.1 高斯噪声	19
2.3.2 白噪声、高斯白噪声和限带白噪声	20
2.3.3 有色噪声	22
2.4 随机过程通过线性系统	22
2.4.1 确定信号通过线性时不变系统	23
2.4.2 平稳随机过程通过线性时不变系统	23
2.5 随机过程通过非线性系统简介	26
2.6 噪声带宽	27
2.7 额定功率和额定功率增益	30
思考题与习题	31
第3章 电路和系统中的噪声	33
3.1 电子系统内部的固有噪声源	33
3.1.1 热噪声	33
3.1.2 散粒噪声	37
3.1.3 闪烁噪声	38
3.1.4 其他噪声	39
3.2 噪声指标	40
3.2.1 放大器的噪声模型	40
3.2.2 等效输入噪声	41
3.2.3 噪声系数	42
3.2.4 最佳源电阻	45
3.2.5 噪声温度	45
3.2.6 放大器的极限灵敏度	46
3.2.7 多级放大电路的噪声系数	47
3.3 元器件的噪声	48
3.3.1 电阻的噪声	48
3.3.2 电容的噪声	50
3.3.3 电感的噪声	50
3.3.4 变压器的噪声	51
3.3.5 二极管的噪声	51
3.3.6 双极型晶体管的噪声	53
3.3.7 场效应晶体管的噪声	59
3.3.8 运算放大器的噪声	63
3.3.9 自归零放大器的噪声特性	66
3.3.10 模-数转换器的噪声特性	68
思考题与习题	72
第4章 低噪声电路的分析与设计	75
4.1 噪声电路的分析与计算	75
4.1.1 计算过程	75
4.1.2 差分运算放大器电路噪声计算	76
4.1.3 反相和同相运算放大器电路噪声计算	77
4.2 低噪声电子电路的设计	79
4.2.1 设计原则与步骤	79
4.2.2 元器件的选择	79
4.2.3 同相放大与反相放大的选择	83
4.2.4 负反馈对噪声性能的影响	83

4.2.5 工作点的选择	85	6.2.1 工作原理	141
4.2.6 噪声匹配	86	6.2.2 信噪比的改善	142
4.3 屏蔽与接地	88	6.2.3 频率响应	143
4.3.1 屏蔽	88	6.2.4 参数选择	143
4.3.2 接地	93	6.3 几种典型的取样积分器	146
4.4 噪声的测量	98	6.3.1 具有基线取样补偿的取样积 分器	146
4.4.1 噪声测量仪器	98	6.3.2 双通道取样积分器	147
4.4.2 正弦波法	102	6.3.3 多点取样积分器系统	148
4.4.3 噪声发生器法	102	6.4 数字多点平均器	148
4.4.4 噪声带宽 B_n 的测量	103	思考题与习题	153
思考题与习题	103	第7章 匹配滤波器	154
第5章 相关检测与锁定放大	105	7.1 白噪声背景下的匹配滤波器	154
5.1 相关函数	105	7.2 色噪声背景下确知信号的匹配滤 波器	159
5.1.1 能量信号与功率信号	105	7.3 信号波形未知时构造匹配滤波器 的方法	161
5.1.2 相关函数的概念	106	7.3.1 用相干平均方法提取未知确 定性信号波形	161
5.2 相关检测	107	7.3.2 有用信号有一定随机性时的 匹配滤波处理	163
5.2.1 自相关法	107	思考题与习题	163
5.2.2 互相关法	108	第8章 光子计数技术	165
5.2.3 自相关检测法中信噪比的 计算	109	8.1 光子计数原理概述	165
5.2.4 互相关检测法中信噪比的 计算	111	8.1.1 光子流量和光流强度	165
5.3 相关器概念及其传输函数	112	8.1.2 光子发射的泊松分布	166
5.3.1 相关器的数学解	112	8.1.3 光电子脉冲堆积效应	167
5.3.2 相关器的传输函数及性能	114	8.1.4 光子计数原理框图	167
5.3.3 相关器的等效噪声带宽	117	8.2 常用单光子探测器	167
5.4 典型相关器电路	118	8.2.1 光电倍增管	167
5.5 锁定放大器	119	8.2.2 雪崩光敏二极管	173
5.5.1 锁定放大器的基本原理	120	8.3 放大器-甄别器	174
5.5.2 锁定放大器的主要性能	121	8.3.1 放大器	174
5.5.3 锁定放大器的主要技术指标	123	8.3.2 甄别器	175
5.5.4 锁定放大器的动态范围	126	8.4 光子计数器的自动背景扣除测 量法	176
5.5.5 双相锁定放大器	132	8.5 光子计数器的信噪比	177
5.5.6 数字锁定放大器	134	8.5.1 量子效率和 SNR	177
思考题与习题	136	8.5.2 斩波条件下的 SNR	178
第6章 取样积分器与数字多点平 均器	138	思考题与习题	178
6.1 取样过程、取样定理与取样积分	138	参考文献	179
6.1.1 取样的物理过程	139		
6.1.2 取样定理	139		
6.1.3 取样积分的基本原理	140		
6.2 Boxcar 积分器	141		

第1章 绪论

微弱信号处理技术主要是解决伴有噪声的信号的检测、降噪和分离问题。在人们的日常生活中，噪声干扰随处可见，它常常与有用信号共存，并且普通方法难以将其分离，从而严重影响系统的运行和目标信号的正常监测。因此在信号处理领域，总是想方设法去除干扰噪声以获取有用信号。而在目前一些科学研究和工程实践中，我们经常会遇到噪声很强的情况，就是在噪声中检测微弱信号(纳伏数量级)的问题，这无疑增加了信号检测的难度，比如测定材料分析时测量荧光光强、地震的波形和波速检测、红外探测、生物电信号测量、卫星信号的接收等，这些问题都归结为噪声中微弱信号的检测。所以微弱信号主要是指被强噪声淹没的小幅度信号，微弱信号检测的目的是从强噪声中提取有用信号，或用一些新技术和新方法来提高检测系统输出信号的信噪比。

微弱信号检测作为一门新兴的技术学科，应用范围遍及光、电、磁、声、热、生物、力学、地质、环保、医学、激光、材料等领域，对微弱信号检测理论的研究，探索新的微弱信号检测方法，研制新的微弱信号检测设备是当今检测技术领域的一个热点。目前，微弱信号检测技术主要采用电子学、信息论、计算机及物理学的手段，分析噪声产生的原因和统计特性，研究被测信号的特点与相关性，从而检测被噪声淹没的微弱有用信号。常用的检测方法有窄带滤波、取样积分、相关检测、随机共振、混沌检测、小波变换等方法，其宗旨都是研究如何从强噪声中提取有用信号，任务是研究微弱信号检测的理论、探索新方法和新技术，从而将其应用于各个学科领域当中。

1.1 微弱信号检测基础知识

国际通用计量学基本名词中，检测(Detect)指示某些特殊量的存在但无需指示量值的过程。信号检测指对信号存在与否的判决。测量(Measurement)指以确定量值为目的的一组操作。检测技术指为了对被观测量进行定性判决或定量测量所采用的理论方法和技术措施。微弱信号检测则不同于一般的检测技术，它注重的不是传感器的物理模型、传感原理、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。

1.1.1 噪声与干扰

在几乎所有的微弱信号测量领域，微弱的物理量信号最终都是转变为微弱的电信号再进行放大处理。微弱信号不仅表现为其幅值极其微弱，更表现在其可能被各种噪声信号所严重淹没。在广泛意义上，可以认为噪声就是扰乱或干扰被测信号的某种不期望的扰动。噪声可以来自检测系统内部，也可以来自系统外部，而且噪声源的种类可以有很多，并且可以具有不同的特点，对信号检测的影响可以不同。

噪声一般分两种情形讨论。一是扰动源位于电路外部，例如，附近有电力输电线、电话

线、带触点的电器(继电器、开关)、以电动机作动力的设备(电钻、机床、电扇)等,通过电磁耦合来影响有用信号,习惯上将这种扰动称为干扰。干扰对系统的影响往往带有一定的周期性、瞬时性(脉冲性),有一定的规律性,一般可以采用电磁屏蔽、去耦合、滤波、元器件的合理布局及合理走线等方法,使干扰减小或消除。二是如果扰动源位于电路内部,由构成电路的材料或器件的物理原因所产生的扰动,称之为噪声(或称固有噪声、基本噪声)。噪声是电系统内部的随机扰动源,是由一系列的随机电压所组成的,其频率和相位都是彼此不相关的,而且是连续不断的。例如,处于绝对零度以上的导体中出现的热噪声、通过势垒的载流子构成的散粒噪声等。固有噪声是我们以后各章讨论的重点。

克服干扰和噪声的影响是研制电子设备要考虑的首要问题。其中,克服噪声的影响又是至关重要的,因为噪声是电系统极限性能(最小可检测电平、动态范围)的限制因素。以通信系统为例,限制通信距离的不是信号电平的微弱程度,而是噪声干扰的程度。对于高质量的信号传送和处理、发生器和测量仪器,噪声更是影响质量的重要因素。因此,如何对付噪声是电子系统面临的根本问题之一,这正是我们以后各章如何从低噪声设计观点设法降低系统内部噪声要详加讨论的问题。而干扰往往影响电系统工作的可靠性和稳定性,干扰严重时,系统根本无法正常工作。可见,在花很大力气研究系统内部噪声时,头脑应十分清醒,必须先设法排除外来干扰对系统的影响后,所做的降低系统内部噪声的工作才是有意义的。下面介绍一个有效区分噪声和干扰的方法。

假定有一个系统噪声很大,但是这种噪声是干扰引起的还是固有噪声引起的尚难肯定,这时可以先加屏蔽。频率高于 1kHz 或阻抗大于 1kΩ 时,一般采用金属导体屏蔽,如铝或铜等。对于低频或小阻抗,可以采用磁屏蔽(如铁镍导磁合金、锰游金属等)和双绞线,还可以将前置放大器用单独电池供电。如果这样做有好处,就可以进一步加以屏蔽。也可以换一个地方调试,或在比较安静的晚间进行测量。如果这些方法还不能减少干扰,就认为噪声主要是系统内部的随机的基本噪声,即真正的噪声,对此噪声的控制方法在以后各章节中要详加讨论。

1.1.2 信噪比与信噪改善比

噪声的存在,使得探测器的分辨能力下降,并且限制了系统的动态范围。一般地说,无论多么微弱的信号总是可以放大到所要求的大小,但与此同时,噪声也被放大,这是因为在放大器中噪声与信号是相对存在的。在低噪声电路中,单独谈信号的大小或者噪声的高低是不能说明问题的。在实际工作中,常用信号与噪声的功率之比来衡量电子电路在弱信号工作时的情况,这个比值简称为信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR),即

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n}$$

式中, P_s 和 P_n 分别为信号功率和噪声功率。

当用分贝(dB)表示信噪比时,有

$$\text{SNR}(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_s}{P_n} = 20 \log \frac{V_s}{V_n}$$

式中, V_s 和 V_n 分别代表信号和噪声电压的有效值。

信噪比越大, 信号质量越好。注意, 信噪比只反映了系统外部加上系统内部总噪声对信号影响的程度, 它反映不出系统内部噪声对信号的影响程度。为此, 在第3章专门引入噪声系数来度量系统内部噪声的大小。

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^[1-6]: 一种是信噪改善比(Signal Noise Improvement Ratio, SNIR), 另一种是检测分辨率。信噪改善比定义为

$$\text{SNIR} = \frac{\text{SNR}_o}{\text{SNR}_i}$$

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。

微弱信号检测的另一个指标是检测分辨率, 它的定义是检测仪器示值可以响应与分辨的最小输入量的变化值。当输入变量从某个任意值开始缓慢增加, 直至可以观测到输出量的变化时为止的输入量的增量即为检测仪器的分辨率。分辨率可以用绝对值表示, 也可以用满刻度的百分比表示。例如, 某位移传感器的分辨率为 0.001mm, 某指针式仪表的分辨率为 0.01% FS (FS 表示满量程) 等。对于数字式仪表, 分辨率是指数字显示器的最末一位数字间隔所代表的被测量值。例如, 某光栅式位移传感器与 100 细分的光栅数显表相配时的分辨率为 0.0001mm, 与 20 细分的光栅数显表相配时的分辨率为 0.0005mm 等。

1.1.3 微弱信号检测的含义与特点

微弱信号(Weak Signal)有两个方面的含义^[1-6]: 其一是指有用信号的幅度相对于噪声或干扰来说十分微弱。如输入信号的信噪比为 10^{-1} 、 10^{-2} 以至 10^{-4} , 也就是说有用信号的幅度比噪声小 10 倍、100 倍乃至万倍。这时有用信号完全淹没在噪声之中, 要检测这种信号, 真可谓“大海捞针”。二是指有用信号幅度绝对值极小。如检测 μV 、 nV 、 pV 量级的电压信号, 检测每秒钟多少个光子的弱光信号与图像。利用微弱信号检测技术和仪器设备, 可以大大提高信噪改善比。常规检测方法的信噪改善比为 10 左右, 而通过微弱信号检测技术则信噪改善比可达 $10^4 \sim 10^5$, 检测分辨率达到电压 $\leq 0.1\text{nV}$ 、电流 $\leq 10^{-14}\text{A}$ 、温度 $\leq 5 \times 10^{-7}\text{K}$ 、电容 $\leq 10^{-5}\text{pF}$ 、微量分析 $\leq 10^{-8}\text{mol}$ 、位移 $\leq 10^{-3} \sim 10^{-4}\mu\text{m}$ 等, 比常规测量灵敏度高 3~4 个数量级。

微弱信号检测具有两个重要特点: 第一, 要求在较低的信噪比下检测信号; 第二, 要求检测具有一定的快速性和实时性。工程实际中所采集的数据长度或持续时间往往会受到限制, 这种在较短数据长度(或较短采集时间)下的微弱信号检测在诸如通信、雷达、声呐、地震、工业测量、机械系统实时监控等领域有着广泛的需求。因此, 微弱信号检测技术的发展应该归结为两个方向: 一是提高检测能力, 尽可能降低其所能达到的最低检测信噪比; 二是提高检测速度, 最大限度满足现场实时监控和故障诊断的要求。正是由于微弱信号检测技术应用的广泛性和迫切性, 使之成为一个热点, 并促使人们不断探索与研究微弱信号检测的新理论、新方法, 以期能更快速、更准确地从强噪声背景中检测微弱信号。

1.2 微弱信号检测方法

1.2.1 微弱信号检测的基本方法^[1-6]

1. 滤波

滤波就是根据被测信号的特点,使用滤波器对信号进行滤波处理,以减少其他频率范围的信号和噪声对被测信号的影响,提高信噪比。滤波消噪只适用于信号与噪声的频谱不重叠的情况。利用滤波器的频率选择特性,可以把滤波器的通带设置为能够覆盖有用信号的频宽,所以滤波不会使有用信号衰减。而噪声的频带一般较宽,当通过滤波器时,通带之外的噪声功率受到大幅度衰减,从而使得信噪比得以提高。

2. 相关检测

相关函数和协方差函数用于描述不同随机过程之间或同一随机过程内不同时刻取值的相互关系。确定性信号的不同时刻取值一般都具有较强的相关性,而对于干扰噪声,因为其随机性较强,不同时刻取值的相关性一般较差,相关检测技术就是基于这种信号和噪声统计特性间的差异来进行检测的。因此,从本质上说,相关函数是两个时域信号(有时是空间域信号)相似性的一种度量。

相关检测方法,既利用了信号的频率特征,也利用了信号的相位特征,即利用与被测信号同步的参考信号来和被测信号进行相干检测,从而仅仅检测出与被测信号同频同相的信息,因此噪声大为减小。埋在比自己大百万倍噪声中的信号,也可用这种方法检测出来。

3. 锁定放大器

锁定放大器(Lock-in Amplifier, LIA)是一种相干检测,也是相关接收,它是一个积分过程:

$$\int_0^T [s(t) + n(t)] \varphi(t) dt$$

式中, $\varphi(t)$ 是一个取决于接收方法的加权函数。

若 $\varphi(t) = s(t - \tau) + n(t - \tau)$, 即 $\varphi(t)$ 为经过延迟后的输入函数时,则是自相关。对于频域信号(例如正弦信号的处理),经过延迟后的输入函数在这里就意味着固定频率,并具有一定相位差的参考信号,因此锁定放大是自相关的一个特例与变通形式。加权函数 $\varphi(t)$ 中的 τ 是一个常数,在时域中表示为固定延迟,在频域测量中则意味着相位的固定,由于噪声的随机特性,锁定放大完成了相位的锁定。一般来说,带通滤波器的 Q 值为 $10 \sim 100$,而锁定放大器的等效 Q 值可达 10^8 ,噪声几乎被抑制殆尽。

4. 取样积分与数字式平均

取样积分与数字式平均是检测频率已知的微弱周期信号的很有效的方法,而且适合于频率成分复杂的信号。早在 20 世纪 50 年代,国外的科学家就提出了取样积分的概念和原理。1962 年,加利福尼亚大学劳伦茨实验室的 Klein 用电子技术实现了取样积分,并命名为 Box-car 积分器。为了恢复淹没于噪声中的快速变化的微弱信号,必须把每个信号周期分成若干个时间间隔,间隔的大小取决于恢复信号所要求的精度。然后对这些时间间隔的信号进行取样,并将各个周期中处于相同位置(对于信号周期起点具有相同的延时)的取样进行积分或

平均。积分过程常用模拟电路实现，称之为取样积分；平均过程常通过计算机以数字处理的方式实现，称之为数字式平均。对信号进行 m 次取样并累积平均，根据同步累积法的原理，输出信噪比的改善与 \sqrt{m} 成正比，平均次数 m 越大，信噪比的改善也越大。因此，如果想得到较高的信噪比，则需要较长的检测时间。

多年来，取样积分在物理、化学、生物医学、核磁共振等领域得到了广泛的应用，对于淹没在噪声中的周期或似周期脉冲波形卓有成效，例如，生物医学中的血流、脑电或心电信号的波形测量，核磁共振信号的测量等，并研制出各种测量仪器。随着集成电路技术和微型计算机技术的发展，以微型计算机技术为核心的数字信号平均器应用也越来越广泛。

特别要指出的是，平均的方法不仅用于测量信号幅度和恢复信号的波形，还可测量未知的时间间隔，不过积累的是计数脉冲数。这是一种启示，平均将开拓更多的方法，渗透更多的测量领域。

5. 光子计数器

光信息的测量是信号检测领域中的一项重要内容。当一束光照射一个物质时，测量入射光及反射光、透射光、散射光和激发出另一种波长光，就可以确定该样品的组分、结构、能态等。在近代科学研究中，例如物理、化学、生物医学等领域，被测量的光往往是很微弱的，因此这种弱光检测就成为微弱信号检测的一个专门分支，引起了各方面的重视，由此产生了许多针对极微弱光信号测量的新方法及设备仪器。

一个光子计数器一般包括光电探测器、前置放大器、幅度甄别器及计数器等几部分。在充分分析噪声特性的情况下，人们采用以下措施来提高光子计数系统的信噪比：一是对探测器低温制冷以降低热电子发射；二是设置合适的鉴别电平以除去倍增极上的热噪声和外来高能辐射噪声；三是采用不同的测量方式消除背景干扰、光源强度波动及脉冲堆积效应等引入的误差。同理，这种方法对于其他形式的离散信号检测也有一定的借鉴作用。

6. 自适应消噪

自适应消噪属于自适应信号处理的领域，它是干扰噪声为处理对象，利用噪声与被测信号不相关的特点，自适应地调整滤波器的传输特性，尽可能地抑制和衰减干扰噪声，以提高信号检测或信号传递的信噪比。自适应消噪不需要预先知道干扰噪声的统计特性，它能在逐次迭代的过程中将自身的工作状态自适应地调整到最佳状态，对抑制宽带噪声或窄带噪声都有效。因此，自适应消噪在通信、雷达、声呐、生物医学等工程领域得到了广泛的应用。例如，水下侦查系统中的发射器和接收器靠得很近，为了探测水下远程目标，发射信号的功率必须很强，这必然会串扰到接收器中，所以接收到的远程目标的反射波就被淹没在串扰信号中，必须采取有效的串扰抵消措施，才可能利用反射波的到达时间测出发射点到目标的距离。

1.2.2 微弱信号检测的新方法

近年来，国内外研究学者将更多先进的算法用于微弱信号检测领域，并根据测试结果积极对算法进行研究改进，从而取得了丰硕的成果。下面主要介绍一下目前较为先进的微弱信号检测算法。

1. 混沌检测^[7-9]

当前基于混沌理论的微弱信号检测技术是混沌理论在信息科学领域的一个重要分支。混

沌理论应用于信息处理领域是现阶段混沌学发展的主要趋势。目前基于混沌背景中的微弱信号检测在通信、自动化等需实时处理领域中都有很广阔的应用前景。因此,若能够对已证明的混沌检测模型加以利用,寻求更好的相空间重构方法,采用混沌理论和方法检测微弱信号,一方面可以有效地提高信号检测性能,另一方面也是对现有方法的补充。混沌系统对小信号的敏感性及对噪声的强免疫力,使得它在微弱信号检测中有着十分广阔的应用前景。

混沌系统之所以能检测微弱周期信号,就是因为它对与系统策动力频率相近的微小信号极其敏感,相反,对噪声却有很强的免疫力,从而使它在微弱信号检测领域具有很好的发展前景。

2. 随机共振理论微弱信号检测方法^[10]

随机共振理论最初是用来解释气象中冰期和暖气候期周期交替出现的现象,近年来随着科学的发展,人们研究发现将随机共振技术用于微弱信号检测有很好的应用前景。传统的微弱信号检测方法,无论是用硬件实现还是软件实现,都立足于减弱噪声,采用各种措施尽量抑制噪声,然后把有用信号提取出来。随机共振方法则不同,它通过一个非线性系统,利用将噪声的部分能量转化为信号能量的机制来增强检测微弱特征信号。

长期以来,人们较多认为“噪声”是讨厌的东西,它破坏了系统的有序行为,降低了系统的性能,是微弱特征信号检测的一大障碍。但是人们研究发现,在某些非线性系统中,噪声的增加不仅没有进一步恶化某些特定频带范围内输出的特征信号,反而使得输出局部信噪比得到一定的改善,增强了信号的显现,这一现象被称为“随机共振”。随机共振现象及在此基础上拓展的一些非线性现象为微弱特征信号的增强检测开辟了一条新途径,在理论上和应用上具有重要意义。

3. 基于小波变换的微弱信号检测^[11-14]

小波变换的思想来源于伸缩和平移方法,其概念是在1984年由法国地球物理学家J. Morlet正式提出的。Mallat于1987年将计算机视觉领域的多分辨率分析思想引入到小波分析中,提出了多分辨率的概念,并提出了相应的分解和重构算法。研究表明,小波分析可以成功地进行非平稳信号、带有强噪声的信号等的分析与检测。但是,常用的基于二进特性的小波具有明显的局限性,而且在频域中具有明显的移相特性;某些二进小波不具有明显的表达式,只能给出滤波器系数的数值,不便于信号的细节分析和频域分析。

1993年,Newland提出的谐波小波在信号分解过程中可保持数据信息量不变,算法实现简单,且具有明确的表达式。同时,谐波小波还具有相位定位特性。谐波小波的这些优点使其在信号处理中得到应用。在谐波小波分解的基础上对微弱振动信号进行频段提取,并与二进特性的小波提取结果进行对比,提取所关心频段的数据点,并重构信号。谐波小波具有的优良信号频域识别能力已成为分析电力系统非平稳谐波畸变、机械振动、雷达回波信号和电视图像等信号时进行噪声滤波的有力工具。

4. 基于稀疏分解的微弱信号检测方法^[15]

为了寻找有效信号检测方法,必须从信号处理的底层问题——信号表示与信号分解出发进行研究。信号稀疏分解是一种新的信号分解方法,信号稀疏分解为微弱信号提取提供了一种新的解决方案。经典的Fourier分解在信号处理中有着重要的应用,并曾经有力地推动了信号处理的发展。经典的Fourier分解用以表示信号时,把信号分解成一个个具有不同强度和不同频率的分量的组合。但是Fourier分解仅能刻画信号频域特性,而无法刻画信号时域

特性。小波分解很好地解决了这个问题，但小波分解的局限性在于，在进行小波分解时，小波基是确定的，这限制了小波分解的灵活性。为了实现对信号更加灵活、简洁和自适应的表示，在小波分析的基础上，Mallat 和 Zhang 总结前人研究成果，于1993年提出了信号在过完备库上分解的思想。通过信号在过完备库上的分解，用来表示信号的基可以自适应地根据信号本身的特点灵活选取，分解的结果将可以得到信号的一个非常简洁的稀疏表示，而得到信号稀疏表示的过程称为信号的稀疏分解。

由于信号稀疏表示的优良特性，信号稀疏分解很快被应用到信号处理的许多方面，如信号时频分析、信号去噪、信号分选等。目前针对信号稀疏分解已经发展了多种算法，其中最常用的是1993年 Mallat 等提出的信号稀疏分解的匹配跟踪(Matching Pursuit)方法。

1.3 本书主要内容

为了使读者能对微弱信号检测得到一个较完整的概念，能够运用微弱信号检测技术解决面临的各种微弱物理量的检测问题，除第1章绪论中给出微弱信号检测的含义、特点、常用方法和发展状况外，我们通过下述章节对微弱信号检测的主要内容进行介绍。

第2章 随机信号与噪声基础：重点讨论噪声的基本概念，对噪声的机理、性质、统计特征作了必要的叙述，给出了噪声通过电路系统后的响应。

第3章 电路和系统中的噪声：讨论常用电路元器件，如电阻、电容、电感、二极管、双极型晶体管、场效应晶体管、运算放大器(简称运放)的噪声性能。

第4章 低噪声电路的分析与设计：给出低噪声放大电路分析、设计与计算的一般原则与方法。

第5章 相关检测与锁定放大：介绍相关函数的概念、相关检测的原理、典型相关器电路、基于相关检测技术的锁定放大器及其性能指标等知识。

第6章 取样积分器与数字多点平均器：讨论取样积分器与数字多点平均器的原理、构成与方法。

第7章 匹配滤波器：介绍白噪声背景下的匹配滤波器和色噪声背景下的广义匹配滤波器的原理与设计方法。

第8章 光子计数技术：讨论弱光信号的随机计数原理及技术。

思考题与习题

1. 简述微弱信号的含义。
2. 简述微弱信号检测的特点，说明与一般检测技术的区别与联系。
3. 简述微弱信号检测的目的。
4. 干扰对检测系统的影响有何特点？怎样减小或消除干扰？
5. 什么是噪声？简述噪声的性质。
6. 为什么说研制电子设备首先要考虑的问题是克服干扰和噪声的影响？
7. 简述评价某种微弱信号检测方法优劣的指标。
8. 常用的微弱信号检测方法有哪些？

第2章 随机信号与噪声基础

噪声是限制信号检测系统性能的决定性因素,因此它是信号检测中的不利因素。对于微弱信号检测来说,若能有效地克服噪声,就可以提高信号检测的灵敏度。电路中噪声是一种连续型随机变量,即它在某一时刻可能出现各种可能数值。电路处于稳定状态时,噪声的方差和数学期望一般不再随时间变化,这时噪声电压称为广义平稳随机过程。若噪声的概率分布密度不随时间变化,则称为狭义平稳随机过程(或严格平稳随机过程)。显然,一个严格平稳随机过程一定为广义平稳随机过程,反之则不然。

噪声是一种典型的随机过程,因而必须采用随机信号分析与处理方法来研究噪声的统计特性和在系统中的行为^[16-22]。在下面各节中采用的叙述方法是先介绍随机信号分析与处理的基本理论,再举例说明噪声的特性,这样可以使读者得到一个完整的概念,为以后各章的深入讨论打下一定的基础。

2.1 确定信号与随机信号

工程实际和各种物理现象中存在一类随时间变化的信号,它们是时间 t 的函数。在电子技术领域,如电压、电流等电信号均属于这一类信号。通常,信号的形式体现为两种:确定信号和随机信号。确定信号可用明确的数学关系式来描述,而随机信号则不能,也无法预测其未来时刻的精确值,只能用概率分布函数或概率密度函数来描述,或用统计平均来表征。对于确定性信号其时域表示是确定的,其频域表示(频谱)可用傅里叶变换求取。随机信号无始无终,具有无限能量,因而不满足绝对可积条件,其傅里叶变换不存在,需要研究其功率在频域上的分布,即功率密度谱或功率谱。

2.1.1 确定信号

按确定性规律变化的信号称为确定信号。确定信号可以用数学解析式或确定性曲线准确地描述,在相同的条件下能够重现。因此,只要掌握了变化规律,就能准确地预测它的未来。

确定信号中又有周期确定信号与非周期确定信号之分。周期信号是最简单的确定信号,例如正弦周期信号

$$s(t) = A \sin \omega t \quad (2.1)$$

和非正弦周期信号

$$s(t) = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin \omega_3 t + \cdots \quad (2.2)$$

均为确定信号,因为无论任何时刻,信号大小可由式(2.1)与式(2.2)分别确定。图2.1a和b是这两种周期信号的波形。

非周期确定信号有三种:一种是概周期信号,另一种是一次过程,还有一种是瞬态过程。概周期信号(见图2.2a)是一种含有谐波分量的周期信号的延伸,可将它看做是一些正

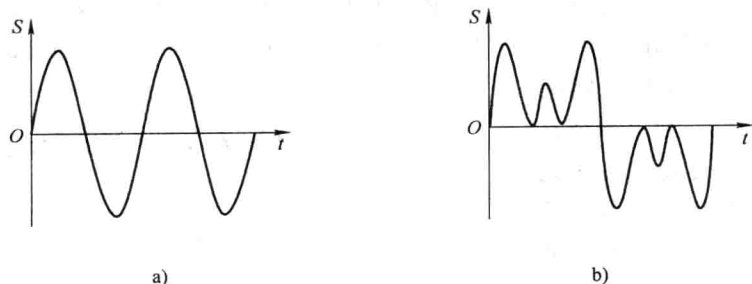


图 2.1 周期信号
a) 正弦周期信号 b) 非正弦周期信号

弦项(或余弦项)的叠加,如式(2.2)所示,其中 $\omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega_3 \neq \dots$,这表示各个分量的频率是相互无关的,相互之间的比值既非整数也非有理分数,而是 $\omega_i/\omega_j = \text{无理数}$ 。就是说,信号波形要在无限长时间以后才重现。一次过程的信号是在整个观察时间内,信号仅出现一次,不再重复,在信号出现期间,它可以用确定的函数式 $s(t)$ 表示,也可以用图形(见图2.2b)表示。在无限长时间内,仅出现一个矩形脉冲或者一周正弦波等就属于一次过程的例子。瞬态过程一般发生在电路状态改变时,电路状态的改变可以是电路与电源接通或断开造成的,也可以是电路参数突然变化(短路、开路)造成的。无论是哪一种原因,电路都要从一种稳定状态过渡到另一种稳定状态,中间经历的过渡状态就是瞬态过程。电路形式一定,改变电路状态的方式也一定,瞬态过程便是确定的。图2.2c代表一个实际电容接通直流电源时的瞬态过程。实际上的瞬态过程会比这复杂得多,但是,只要重复同一状态的改变,瞬变过程便重现原来的过程一次。

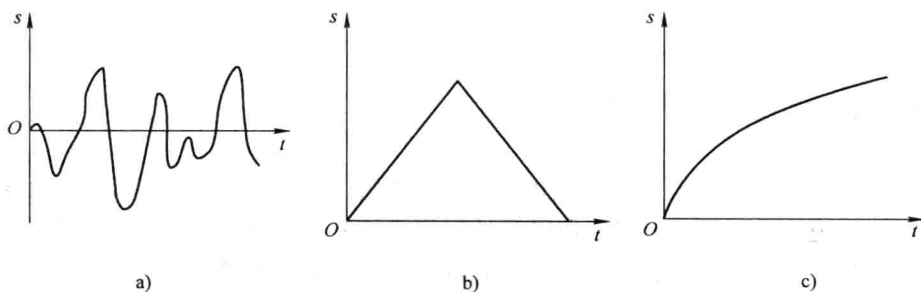


图 2.2 非周期确定信号
a) 概周期信号 b) 一次过程 c) 瞬态过程

2.1.2 随机信号

不遵循任何确定性规律变化的信号称为随机信号。随机信号的未来值不能用精确的时间函数描述,无法准确地预测,在相同的条件下,它也不能准确地重现。电路里的噪声、电网电压的波动量、生物电、地震波等都是随机信号。

尽管随机信号取何种波形是不可预测的、随机的,但它们的统计特性却显得很有规律,这就提供了用其统计特性而不是一些确定性的方程来描述随机信号的依据。研究随机信号统