

高等学校教材

# 微弱信号 检测学导论

林理忠 宋敏 编著

中国计量出版社

73.4123  
323

高等学校教材

# 微弱信号检测学导论

林理忠 宋 敏 编著

中国计量出版社

**9910012**

(京)新登字 024 号

图书在版编目(CIP)数据

2011/07

微弱信号检测学导论/林理忠,宋敏编著. —北京:中国计量出版社,1996.3

ISBN 7-5026-0786-2/TB·497

I. 微… I. ①林…②宋… III. 信号检测-导论 IV. T  
N911.23

中国版本图书馆 CIP 数据字核(95)第 07090 号

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787×1092 毫米 32 开本 印张 10.625 字数 236 千字

1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月第 1 次印刷

\*

印数:1-2500 定价:15.00 元

8100100

# 前 言

测量在生产、生活、国防、医卫、科技各领域都是必不可少的。没有进步的测量技术,就没有现代科技、近代化生产与现代化生活。进步的科技推动和促进了测量技术的发展。从某种意义上讲,一个国家的测量技术水平,反应了该国的科技和生产力水平。微弱信号检测学是测量学科中一门新兴分支学科,是测量技术的重点发展方向。因此,不论是做测量工作的,或是从事其它科技方面的工作人员,都有必要学点这方面的内容,以更新原有的知识。

本世纪90年代到下世纪中叶,是中华民族振新的关键时期。根据科技是第一生产力的科学论断,这一阶段,我国科技水平必需紧紧的追踪世界科技发展,学习和采用先进科学技术。我们编这本教材的主要目的,就是提供一点测量方面的先进知识。希望有更多的人能从事信息测量方面的工作,使我国在这方面处于世界先进地位。

微弱信号检测学,无论从理论、还是从技术角度出发,内容都是广泛和较深入的。它的基础与数学、物理、电子技术、计算机技术都密切相连。我们编写这本导论,尽量避免过深的数学,着重物理概念、物理图象。书中内容涉及面较宽,读完后,读者可得到这学科的概貌。根据多年教学的经验,书中选材,对硕士研究生、大学本科生、甚至专科生,都能依据自己的起点,学到不少的知识。而且还会给每位读者,提出一些自己需要加强的知识领域。因此,尽管本人学识有限,但仍考虑国内目前这方面书籍太少,将这本拙著提供给读者分析、研究,请同行批评、指正。

# 目 录

<b>第一章 噪声基础知识</b> .....	(1)
<b>一 微弱信号检测的意义</b> .....	(1)
(一) 测量技术的重要性及当前发展方向 .....	(1)
(二) 何谓微弱信号检测 .....	(2)
(三) 当前微弱信号检测的成效 .....	(4)
<b>二 噪声的基本性质</b> .....	(6)
(一) 噪声的定义和种类 .....	(7)
(二) 噪声的度量 .....	(9)
(三) 电子噪声 .....	(12)
<b>三 噪声的统计性质</b> .....	(15)
(一) 概率与概率分布函数 .....	(15)
(二) 两类常见的概率分布函数 .....	(18)
(三) 相关函数 .....	(21)
(四) 电子噪声的相关函数 .....	(23)
<b>四 器件噪声举例</b> .....	(27)
(一) 电阻的噪声 .....	(27)
(二) 半导体二极管的噪声 .....	(31)
(三) 结型半导体三极管的噪声 .....	(31)
<b>五 微弱信号检测方法概述</b> .....	(33)
(一) 提高信号检测能力的途径 .....	(33)

(二) 频域信号的窄带化及相干检测技术 .....	(34)
(三) 时域信号的平均处理 .....	(34)
(四) 离散量的计数统计 .....	(35)
(五) 并行检测 .....	(35)
(六) 计算机数字处理 .....	(36)
(七) WSD 的发展趋势 .....	(38)
<b>第二章 放大器的噪声与屏蔽接地技术 .....</b>	<b>(39)</b>
<b>一 噪声系数、噪声因子和其它噪声度量参量 .....</b>	<b>(39)</b>
(一) 噪声系数 ( $F$ ) .....	(39)
(二) 噪声因子 ( $NF$ ) .....	(41)
(三) 放大器 $NF$ 值的测量 .....	(42)
(四) $NF$ 图 .....	(44)
(五) 其它噪声度量参量 .....	(46)
<b>二 低噪声前置放大器 .....</b>	<b>(49)</b>
(一) 低噪声前置放大器的设计原则 .....	(49)
(二) 最佳输入源电阻 ( $R_s^{opt}$ ) .....	(52)
(三) 实用前置放大器举例 .....	(53)
<b>三 低噪声放大器匹配网络与变压器特性 .....</b>	<b>(56)</b>
(一) 常用匹配网络 .....	(56)
(二) 理想变压器作匹配时的 $SNIR$ .....	(57)
(三) 实际变压器的匹配特性 .....	(59)
<b>四 屏蔽、接地与布线 .....</b>	<b>(63)</b>
(一) 屏蔽 .....	(64)
(二) 接地 .....	(65)
(三) 布线的若干有效措施 .....	(70)
<b>第三章 选频放大测量与相干检测 .....</b>	<b>(72)</b>
<b>一 滤波器 .....</b>	<b>(72)</b>
(一) 有源低通滤波器(LPF) .....	(73)
(二) 有源高通滤波器(HPF)和带通滤波器(BPF) .....	(76)
<b>二 选频检测的局限性与相干检测原理 .....</b>	<b>(80)</b>

(一) 选频放大的可检测下限 .....	(80)
(二) 相敏检波原理 .....	(82)
(三) 相关检测 .....	(87)
<b>三 相敏检波器电路 .....</b>	<b>(89)</b>
(一) 变压器开关型 PSD .....	(89)
(二) 电流开关型 PSD .....	(90)
(三) 四开关电流型 PSD .....	(91)
(四) 场效应管斩波型 PSD .....	(92)
(五) 对称互补型 PSD .....	(93)
<b>四 非周期移相器 .....</b>	<b>(94)</b>
(一) 对参考通道的基本要求 .....	(94)
(二) 非周期移相器框图 .....	(95)
(三) 移相环工作原理 .....	(96)
<b>五 锁相放大器及其主要性能指标 .....</b>	<b>(97)</b>
(一) 典型的锁相放大器 .....	(97)
(二) 当前商品 LIA 的一般性能 .....	(101)
(三) 动态范围 .....	(103)
(四) 谐波响应 .....	(108)
<b>六 锁相放大器的使用与应用 .....</b>	<b>(111)</b>
(一) 锁相放大器的使用 .....	(111)
(二) 锁相放大器对缓变信号的应用方法 .....	(118)
(三) 具体应用举例 .....	(122)
<b>七 提高锁相放大器性能的一些技术 .....</b>	<b>(127)</b>
(一) PCM 技术 .....	(128)
(二) 旋转电容滤波 .....	(130)
(三) 同步外差技术 .....	(135)
<b>第四章 积累平均原理与技术 .....</b>	<b>(137)</b>
<b>一 根号 <math>m</math> 法则与取样定理 .....</b>	<b>(137)</b>
(一) 积累平均的初步概念 .....	(137)
(二) 根号 $m$ 法则 .....	(138)

(三) 取样概念与取样定理 .....	(140)
<b>二 取样积分器</b> .....	(144)
(一) 取样积分器的工作原理框图 .....	(144)
(二) 门积分器 .....	(147)
(三) Boxcar 的工作模式 .....	(150)
(四) 常见 Boxcar 积分器的结构与性能 .....	(156)
<b>三 参数图解选择法</b> .....	(158)
(一) 取样积分器的参数分类及相互关系 .....	(159)
(二) 参数图解选择法 .....	(161)
(三) 参数不当的影响 .....	(164)
<b>四 取样积分器性能的一些重大改进</b> .....	(165)
(一) 快速取样 .....	(165)
(二) 基线取样 .....	(167)
(三) 双通道 Boxcar .....	(169)
<b>五 Boxcar 信噪比改善的数学讨论</b> .....	(171)
<b>六 数字平均器的特点及工作模式</b> .....	(174)
(一) 数字平均器与 Boxcar 性能比较 .....	(174)
(二) 数字平均器的工作模式 .....	(176)
<b>七 数字多点平均器</b> .....	(182)
(一) 原理框图及工作流程 .....	(182)
(二) 数字平均器的实际框图 .....	(184)
(三) 实用平均器发展简介 .....	(189)
<b>八 Boxcar 与数字平均器应用举例</b> .....	(194)
<b>第五章 弱离散信号的检测</b> .....	(198)
<b>一 离散信号检测的特点</b> .....	(198)
(一) 离散信号、弱离散信号的概念 .....	(198)
(二) 弱离散信号测量必须解决的问题 .....	(199)
(三) 光子流强测量的特点和要求 .....	(201)
<b>二 光子计数器的结构</b> .....	(203)
(一) 光子计数器框图 .....	(203)



(二) 作光子计数用的光电倍增管(PMT) .....	(204)
(三) 放大器 .....	(211)
(四) 脉冲幅度甄别器 .....	(212)
(五) 计数器 .....	(216)
(六) 实用光子计数的框图 .....	(217)
三 光子计数器的使用与应用 .....	(220)
(一) 计数器的几种计数方式 .....	(220)
(二) 采样时间选取引起的误差估计 .....	(224)
(三) 脉冲堆积效应 .....	(226)
(四) 当前光子计数器的主要性能指标 .....	(228)
(五) 应用举例 .....	(229)
<b>第六章 微弱并行检测技术</b> .....	<b>(232)</b>
一 概述 .....	(232)
(一) 何谓并行检测技术 .....	(232)
(二) 光学多道分析技术的发展与特点 .....	(235)
二 多道探测器件 .....	(237)
(一) OMA 探测器的种类 .....	(237)
(二) SV、SIT、ISIT 管 .....	(239)
(三) SPA 管 .....	(243)
(四) 电耦合器件(CCD) .....	(247)
三 光电并行检测器件的性能与特点 .....	(249)
(一) 各类检测器性能比较 .....	(249)
(二) 各类检测器使用过程中须注意的几个问题 .....	(252)
四 OMA 系统 .....	(256)
(一) 框图 .....	(256)
(二) 分光设备部分 .....	(256)
(三) 多道信息采集部分 .....	(258)
(四) 主微机 .....	(261)
(五) 主机外围设备 .....	(262)
五 OMA 的应用 .....	(263)

(一) OMA 的应用范围 .....	(263)
(二) 应用实例 .....	(266)
<b>第七章 数字弱信号检测的基本概念</b> .....	<b>(271)</b>
<b>一 误差理论简介</b> .....	<b>(271)</b>
(一) 误差的概念及分类 .....	(271)
(二) 平均值的定义 .....	(273)
(三) 测量的正确度、精密度、准确度 .....	(275)
(四) 误差传递公式 .....	(277)
<b>二 平滑与拟合</b> .....	<b>(279)</b>
(一) 实验曲线的平滑 .....	(279)
(二) 拟合 .....	(285)
(三) 微分 .....	(289)
<b>三 数字图象处理简介</b> .....	<b>(289)</b>
(一) 概述 .....	(289)
(二) 灰度变换技术 .....	(291)
(三) 图象的平滑与锐化 .....	(294)
<b>四 线性、时不变、离散时间系统的基本概念</b> .....	<b>(296)</b>
(一) 连续时间系统的分析 .....	(296)
(二) 离散时间系统的分析 .....	(301)
(三) 实现离散时间系统的原则形式 .....	(305)
<b>五 几种数字滤波器</b> .....	<b>(309)</b>
(一) 低通滤波器 .....	(309)
(二) 高通滤波器 .....	(312)
(三) 最小二乘法滤波 .....	(313)
(四) 维纳滤波 .....	(315)
<b>六 离散傅氏变换与快速傅氏变换的基本概念</b> .....	<b>(317)</b>
(一) 离散傅里叶变换 .....	(317)
(二) 快速傅里叶变换 .....	(321)
(三) FFT 在数字滤波中的应用注意事项 .....	(324)

# 第一章 噪声基础知识

## 一、微弱信号检测的意义

### (一) 测量技术的重要性及当前发展方向

#### 1. 重要性

测量一词是指:对被检测对象(宇宙内万物)的物理、化学、工程技术等参量作数值测定工作。

测量在生活、生产、科技、国防等各方面,都是必不可少的。可以说凡与人类相关的各领域皆需要测量。生活上要称斤量尺,已达到没有测量,就没有现代生活的程度;生产中必须依靠测量,来保证产品的质量;科研中先进的测量技术,能揭示新的客观规律;现代国防只有利用先进的测量方法,才能进行侦察和制导。可以说现代的一切皆脱离不了科技,而没有先进的测量技术,就没有现代科学技术。科技进步需要测量技术的发展;测量技术的进步,推动了科技进步。

反之,也必须认识到:进步的科技才能发展测量技术,测量技术是科技的一部分,是被科技发展要求所推动,被其它科技的成就所促进。

#### 2. 发展方向

测量技术的发展初期,是建立各种被测“量”的测量方法。

9910012

1

对基本量的测量,是建立“原器”或“标准”,对复杂的派生量,常是寻找或制作适用的传感器,以及建立比较方法等。

一旦某被测“量”已建立起测量方法后,人们就将围绕着测量速度和精度这两方面进行发展。

测量速度的加快,绝不仅仅是节省了测量时间,而且还意味着对被测“量”的快速变化的响应和处理能力的提高。因而可以应用于实时监控,可应用于瞬变现象快速动力学过程的研究等等。例如,就是简单的距离测量,若不能快速获得结果,我们就无法获得运载火箭的飞行轨迹,也就不可能作火箭的飞行控制。又如,若不能测量光强的快速变化,我们就无法获得脉冲激光特性资料。从许多类似例子,可以看出测量速度的提高,对高科技是多么重要。类似的例子举不胜举,读者可据自己的工作,找到许多要加快测量速度的需求。

测量精度的提高,是测量技术的另一发展方向。精度是一个测量系统,一种测量方法优劣的重要评判指标。提高精度,意味着测量灵敏度(测量值的可分辨间隔)的提高,和可检测下限的下降(测量的动态范围将扩大)。提高灵敏度,直接关连着测量准确度(多次测量的平均值,与被测“量”的真实值之差)。准确度越高,才能有一些更先进的产品,或更准确的实验数据。例如,精密的机加工机械(如坐标镗床等),首先要能精密测定刀具和被加工工件的相对位置,才能加工出精密产品。测量下限的下降,往往能促使一些新现象的发现和应。例如俄歇谱的发现,没有测量弱二次电子的能力,是不可能的。

## (二) 何谓微弱信号检测

除少数基本“量”的测量方法(如时间、长度、质量),是用“原器”或“准原器”,与被测对象作比较而得外。大量的物理、化学、工程技术参量的测量,是利用相关物理现象做成的传感

器,来进行测量的。如温度的测量,可用最简单的,热胀冷缩现象作的温度计,将温度的变化,转换成长度变化进行。由于当前电学及电子学技术的发展,大量的参数测量,被转换成电信号的测量。

无论是电传感器、或者是其它传感器,在作信息转换时,或转换后作信息测量时,都不可避免的会带进些“噪声”。这些噪声包括:传感器本身的噪声;测量仪表系统的噪声;以及其它的随机偶然误差。此外,被测对象本身,在测量时间内的起伏,也应算作测量中的噪声。

按传统观念,若信号低于噪声,是不可能进行测量的。故通常讲,各种噪声之和,本质上决定了测量的精度,也就决定了测量的灵敏度(对较强或中等强度信号),及可检测下限(对弱信号)。因此,要想降低测量下限,首先是设法降低各种噪声的水平,其中尤以降低传感器的噪声为关键。

降低噪声是提高测量精度的关键,但并不是唯一的方法。人们开创了几种从噪声中提取信息的方法,从而使测量下限,可低于测量系统的噪声水平。这就是微弱信号检测,与非微弱信号检测的关键差别。

各种微弱信号检测法,都是基于研究噪声的规律(如噪声幅度、频率、相位等),和分析信号特点(如信号频谱、相干性等)的基础上的。然后利用电子学、信息论和其它物理、数学方法,来对被噪声覆盖的弱信息,进行提取、测量。

微弱信号检测学,就是研究从噪声中提取信息的方法、及技术的学科。由于目前对电子噪声研究较成功,微弱信号检测与电子技术联系密切,发展较快。与其它方面的联系,尚大有发展余地。

### (三) 当前微弱信号检测的成效

微弱信号检测的英语名称是 Weak Signal Detection, 以后我们用其三词头的缩写, WSD 简称。由于 WSD 能大幅度提高许多参量的测量灵敏度和可检测下限, 因此已在物理、化学、天文、生物、医学及多种工程技术领域, 得到了广泛应用, 甚至促成了一些新学科的建立。下面先举两例说明, 以后在介绍各种 WSD 检测法的应用时, 还会了解更多成效。

表面学科是研究固体表面 1—10nm 厚度(约合 1—10 原子层)范围内性质的学科。表面的原子、分子除受本体原子、分子的作用外, 还受外界环境的影响, 因此其结构、成分、形貌等性质, 与体内原子有所不同。测量其性质是十分有意义的, 可获得许多新知识。目前研究表面的手段, 多数是将电子、光子、离子入射到表面, 使其与表面原子“相互作用”, 然后分析其出射的电子、光子或离子的状况, 从而取得相关信息。由于出射粒子数, 一般是不多的, 具有特定特征の出射粒子数更少, 因此, 绝大多数情况, 都必利用 WSD 技术。

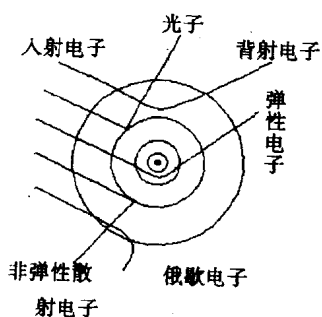


图 1-1 各类出射粒子示意

图 1-1 是入射电子后, 可能出射的多种粒子。表 1-1 是这些出射粒子, 可能带有的信息。表 1-2 是目前表面科学, 已开发的一些分析手段。

地质勘探、医学诊断、潜艇搜索等许多方面, 都需要弱磁场的探测技术。以人体磁信号为例, 图 1-2 是各种器官的磁信号强度, 和地磁起伏的强度范围。由其可知, 当磁信号低于地磁水平( $10^{-9}$ T)时, 必须

采用微弱信号检测手段。目前常用的磁通门磁力计,虽然其噪声水平是 $10^{-11}-10^{-12}$  特斯拉量级。但为解决地磁噪声,还是用WSD 技术较好。现用WSD 方法做成的超导量子干涉器件(SQUID),其噪声范围是 $10^{-14}$  特斯拉量级。用SQUID 器件,已制出最好的磁场计;磁场梯度计(灵敏度达 $10^{-15}$ GTS/CMB);磁化率计(灵敏度 $10^{-13}$ );用它做的无电阻,低电感的检流计,灵敏度达 $10^{-7}$ A;电压表灵敏度达 $10^{-15}$ V);低噪声温度计,灵敏度达 $10^{-3}$ K。

表 1-1 出射粒子所带有信息

出 射 粒 子	功 能
弹性散射电子	电子衍射、结构分析、原子排列及相互作用
非弹性散射电子	能量损失下的电子空间分布、原子状态
二次电子	表面组份分析、形貌分布
荧光、磷光光子	光谱分析、荧光衰减
X 射线	电位能谱
离子	表面吸附

表 1-2 表面分析手段

出 射 入 射	电 子	光 子	离 子	声 子
电 子	LEED HEED SAM ELS ILEED AES	APS	EPSMS	
光 子	UPS XPS AES	光 谱		PAS
离 子	INS	IIR	ISS SIMS	

LEED 低能电子衍射

AES 俄歇电子衍射

HEED

ILEED

高能电子衍射

非弹性低能电子衍射

SAM	扫描俄歇电子能谱	ELS	电子损失谱
UPS	光电子能谱	INS	离子中和能谱
APS	表面电位能谱	IIR	离子诱导 X 射线能谱
PAS	光声光谱	ISS	离子微子散射质谱
SIMS	二次离子质谱	EPSMS	电子探针表面质谱

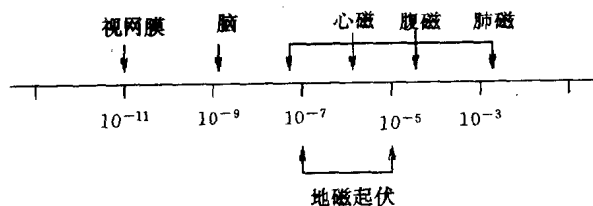


图 1-2 人体磁信号

最后我们给出表 1-3。对比常规检测的水平,可以看出,表中那些基本量的测量精度,在利用 WSD 方法后,一般都提高了  $10^3-10^4$ 。

表 1-3 微弱检测的灵敏度提高

	电压	电流	温度	微量分析	电容	信噪比改善
常规检测	1 $\mu$ V	0.1nA	>0.1mK	10 <sup>-5</sup> 克分子	0.1PF	10
微弱检测	0.1nV	10 <sup>-14</sup> A	5 $\times$ 10 <sup>7</sup> K	10 <sup>-8</sup> 克分子	10 <sup>-5</sup> PF	10 <sup>5</sup>
提高	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>

## 二、噪声的基本性质

噪声是无处不在,总与信号共存。WSD 技术,总是首先设法尽量抑制噪声,然后再进行噪声中的信号提取。因此,从某种意义上讲,WSD 是一种专门与噪声作斗争的技术。故学习本课程,首先需要对噪声有所了解。



## （一）噪声的定义和种类

噪声是真实信息以外,测量所得的值,往往也称为有害信号。广义的讲,噪声是扣除被测信号真实值以后的各种测量值,不论这些非零测值的来源,是外界环境、测量系统、测量人员、还是被测对象。广义的噪声,可以分为两类:一是干扰,另一被称为噪声(狭义)。

干扰是指非被测信号或非测量系统所引起的噪声。是来自于外界的影响,而造成的非信号测量值。这些外界干扰可能来自于宇宙,如宇宙射线、宇宙电磁干扰。也可能是人为的其它器件,如开关的电火花、汽车火花塞的电火花、强广播、强电视信号等等。最通常的是市电的干扰和附近的有强电的外部器件。

从理论上讲,干扰是属于理想上可排除的噪声。不少干扰源,发出的干扰是有规律的,有些具有周期性,有些只是瞬时的。因此,人们可以通过屏蔽、工作时间错开、电源净化器等手段,加以排除或削弱。显然排除的措施,需要针对干扰源的特点进行。为此,我们提供表1-4和1-5供参考。干扰源可分为:与被测“量”有相同类型的外界干扰源和与传感器转换后的“信号”有相同类型的外界干扰源。前者,如光测量时,其它光源的光,将是干扰源。后者,如用电传感器时,其它电器的电信号就是干扰源。

电干扰的引入途径,主要为感应和电源偶合。在弱信号检测时,电源干扰必须引起足够的重视。常见的电源干扰有:①供电线路中的严重超载引起的电压降低,②大负载切断时,造成的超压,③非线性功率因子负载,引起的正弦波失真,④电源频率与相位漂移,⑤你的配电盘之前的输电线,受外界的影响,而带入的常模噪声,⑥你的配电盘后的其它用电设备,引