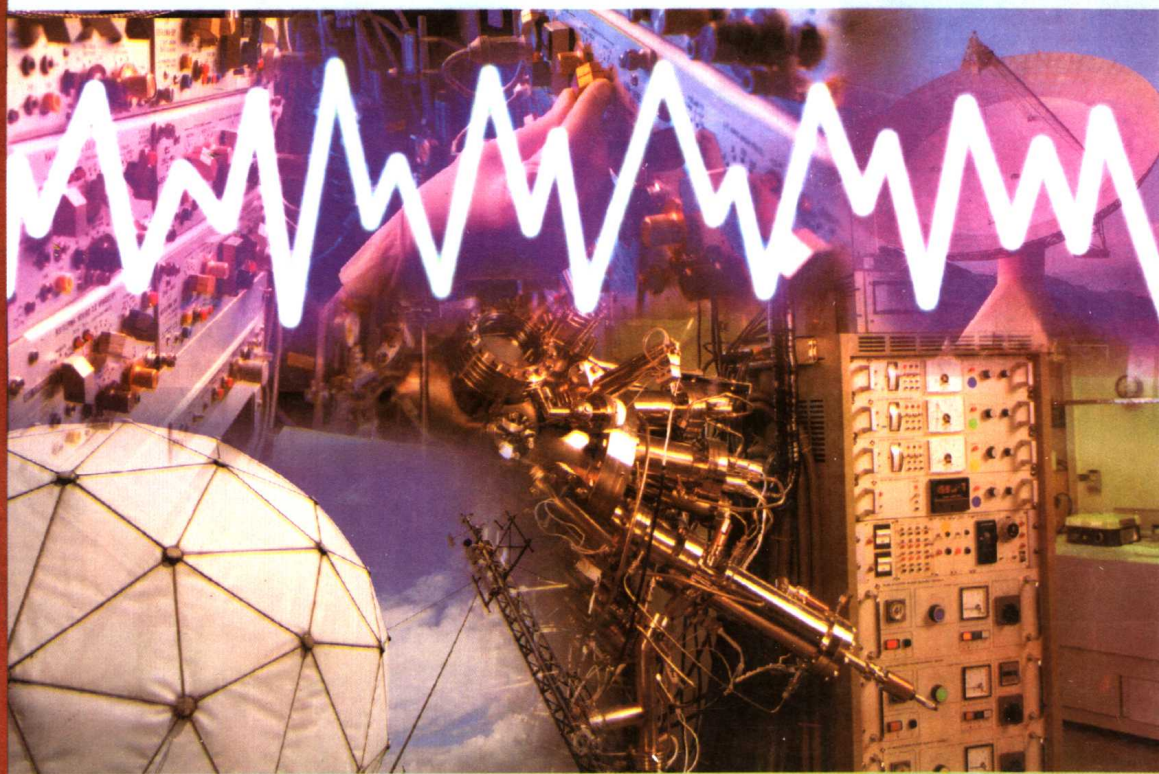




高等学校
电子信息类 规划教材

陈光禴 王厚军 编著
田书林 李为民

现代测试技术



电子科技大学出版社

高等学校 规划教材
电子信息类

现代测试技术

陈光福 王厚军 编著
田书林 李为民

电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代测试技术/陈光祜等编著. —成都: 电子科技大学出版社, 2002.8
ISBN 7—81065—867—0

I. 现… II. 陈… III. ①测试技术②测量仪器 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 004307 号

内 容 简 介

本书系按电子工业部《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由电子仪器与检测技术专业教学指导委员会推荐出版的统编教材。全书共分九章，第一章为电子测量技术基础，第二章为电子仪器平台，第三章为基本电参量测量，第四章为信号的产生与分析，第五章为时间与频率测量，第六章为电路元器件的测试，第七章为光电子测试，第八章为数据域测试，第九章为计算机辅助测试平台。

本书取材新颖，内容广泛，反映了本学科的最新进展，适合作仪器科学与技术、电子科学与技术等学科的大学生和研究生相关课程的教材，对于从事电子工程的技术人员亦是一本有用的参考书。

高等学校 规划教材
电子信息类

现代测试技术

陈光祜 王厚军 编著
田书林 李为民

出 版: 电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号, 邮编: 610054)

责任编辑: 朱丹

发 行: 电子科技大学出版社

印 刷: 成都市青羊火炬印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张 35.5 字数 862 千字

版 次: 2002 年 8 月第一版

印 次: 2002 年 8 月第一次印刷

书 号: ISBN 7—81065—867—0/TN·44

印 数: 1—1000 册

定 价: 53.00 元

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社、各专业教学指导委员会，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我部教材办协商各专指委、出版社后，审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由电子仪器与检测技术专业教学指导委员会推荐出版。本教材由电子科技大学陈光祜教授担任主编，责任编辑及主审是东南大学杨吉祥教授。

著名科学家门捷列夫说：“没有测量，就没有科学。”

测量科学的先驱凯尔文又说：“一个事物你如果能够测量它，并且能用数字来表达它，你对它就有了深刻的了解；但如果你不知道如何测量它，且不能用数字表达它，那么你的知识可能就是贫瘠的，是不令人满意的。测量是知识的起点，也是你进入科学殿堂的开端。”

现代信息理论和技术是研究如何获取、处理、传输和利用信息。而现代测试理论和技术正是科学研究中信息的获取、处理、显示和利用的重要手段，是人们认识客观世界、取得定性和定量信息的基本方法，是现代信息技术的源头和重要组成部分。众所周知，物理定律是定量的定律，它的正确性只能通过精确的测量来确定，离开测量便无科学，这是不言而喻的。同时，现代科学技术的发展又极大地推动了测试技术及仪器的发展，它们是相辅相成的。因此，测试技术及仪器的先进性也是一个国家科学技术先进水平的重要标志。

信息与信号处理理论是现代测试理论和技术的基础，它包括测量误差理论和测量信息论、测试仪器平台和测试系统平台以及时域测试分析、频域测试分析、时频域测试分析及数据域测试分析。其中测试信号处理理论又包含数字滤波、快速变换、信号检测、参数估计、图像处理、模式识别、数据压缩、信息编码和信息传输等原理。而采用测量信息论的最大熵谱估计及最大熵谱分析等现代谱估计方法是现代测量信息处理的最好方法。

长期以来，“电子测量技术”和“电子测试仪器”都是分两门课讲授的，因此也就分别编写了两本相关内容的教材。作者在长期的教学实践中感到，这两门课联系十分紧密。因此，两门课之间很难相互衔接，常常出现相互脱节或重复的现象。本书试图将两门课合成一门课，将两门课的内容融为一体，互为支撑和深化，这也许有助于教学的安排及学生对知识的掌握。当然，我们的这种设想是否实际可行，只有待教学实践来检验了。

本教材的参考学时数为 80~100 学时，全书共有九章。

第一章电子测量技术基础主要介绍测量误差理论、测量信息论基础、测量过程的统计控制、校准方法学和基本的电子标准；第二章测试仪器平台重点介绍电子仪器平台的结构、模数转换器和测试信号的处理；第三章基本电参量测量介绍了电压、电流、电阻和波形测试技术及仪器；第四章信号的产生与分析重点介绍了信号源、频谱分析仪、相位噪声测量技术与仪器；第五章时间与频率测量介绍了时间与频率测量仪器、微波计数器、时间与频率间隔分析仪和时间与频率标准；第六章电路元器件的测试介绍了阻抗测试、半导体测试、网络分析仪和微波无源器件的测试；第七章光电子测试介绍了光信号的产生及分析、光学元件分析仪和光时域反射计；第八章数据域测试主要介绍了数据域测试仪器，包括数字信号发生器和逻辑分析仪；第九章计算机辅助测试（CAT）平台介绍了 GPIB 总线系统与测

试编程语言、VXI 总线系统、仪器的程控和 CAT 平台的结构。

本书由陈光禔教授任主编，并编写了第一章、第二章和第八章；王厚军教授编写了第三章和第四章；田书林副教授编写了第五章和第九章；李为民教授编写了第六章和第七章。

本书取材新颖，内容广泛，反映了本学科的最新进展，适合作为仪器科学与技术、电子科学与技术等学科的大学生和研究生相关课程的教材，对于从事电子工程的技术人员亦是一本有用的参考书。

本书经全国电子信息类电子仪器与检测技术专业教学指导委员会推荐，责任编委及主审人杨吉祥教授认真审阅了本书全稿，提出了许多宝贵意见和建议，为提高本书质量付出了不少心血；电子科技大学教务处、出版社和自动化工程学院的领导 and 老师们对本教材的出版给予了积极、热情的支持和帮助，在此表示诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中难免存在缺点或错误，殷切希望读者批评指正！

编 者

2002 年 5 月于电子科技大学自动化工程学院

目 录

第一章 测量技术基础.....	1
1.1 测量误差理论.....	1
1.1.1 测量过程.....	1
1.1.2 测量值的数学期望和方差.....	2
1.1.3 随机误差的统计处理.....	3
1.1.4 标准偏差的传递.....	6
1.1.5 有限次测量的算术平均值及其方差.....	6
1.1.6 测量结果的置信概率.....	7
1.1.7 异常数据的剔除.....	7
1.1.8 测量不确定度的表征方法.....	8
1.2 测量信息论基础.....	10
1.2.1 测量信息论的原理.....	11
1.2.2 用误差熵计算不确定度.....	13
1.2.3 采用最大信息熵原理估计误差概率分布.....	14
1.3 测量过程的统计控制.....	17
1.3.1 基本概念.....	17
1.3.2 测量过程的统计控制参数.....	17
1.3.3 测量过程统计控制的检验方法.....	18
1.4 校准方法学.....	20
1.4.1 校准方法.....	20
1.4.2 计量标准.....	21
1.4.3 校准类型.....	23
1.4.4 校准的要求.....	23
1.4.5 互检和检验.....	24
1.4.6 仪器特性和校准测试.....	25
1.4.7 对校准标准的要求.....	25
1.5 基本的电子标准.....	26
1.5.1 国际测量单位制.....	27
1.5.2 标准的可溯源性.....	31

第二章 测试仪器平台.....	32
2.1 测试仪器平台的基本结构.....	32
2.1.1 基本概念.....	32
2.1.2 测试仪器的信息流程.....	33
2.1.3 测试仪器平台的结构.....	36
2.2 传感器.....	37
2.2.1 传感器的通用结构.....	37
2.2.2 传感器的分类及转换原理.....	38
2.2.3 传感器的主要技术指标.....	43
2.3 模数转换器.....	44
2.3.1 模数转换器的基本概念.....	44
2.3.2 模数转换器的静态误差和测试.....	48
2.3.3 模数转换器的动态误差和测试.....	51
2.4 测试信号的处理.....	57
2.4.1 基本概念.....	57
2.4.2 傅里叶变换.....	59
2.4.3 离散傅里叶变换.....	59
2.4.4 窗口化.....	62
2.4.5 模拟滤波器.....	65
2.4.6 数字滤波器.....	68
2.4.7 混频.....	73
2.4.8 检波和解调技术.....	74
2.4.9 衰减和放大.....	75
2.4.10 测试结果的类型.....	77
2.4.11 信号处理硬件.....	83
2.5 测试仪器中的微处理器.....	84
2.5.1 微处理器在仪器中的作用.....	84
2.5.2 微处理器在仪器中的工作.....	85
2.5.3 测试仪器的硬件结构.....	86
2.5.4 仪器软件的编程.....	88
2.5.5 仪器固件的开发.....	89
2.5.6 人机界面.....	90
2.5.7 校准和误差修正.....	91

第三章 基本电参量测量.....	92
3.1 电压、电流和电阻测量仪器.....	92
3.1.1 引言.....	92
3.1.2 数字多用表.....	92
3.1.3 直流电压测量技术.....	93
3.1.4 交流电压测量技术.....	95
3.1.5 电流测量技术.....	98
3.1.6 电阻测量技术.....	100
3.1.7 测量误差源.....	102
3.1.8 电压表的技术指标.....	111
3.2 示波器.....	114
3.2.1 引言.....	114
3.2.2 通用示波器.....	115
3.2.3 垂直放大器.....	117
3.2.4 水平控制（时基）与触发.....	125
3.2.5 模拟示波器.....	132
3.2.6 数字示波器.....	141
3.2.7 示波器的探头.....	153
3.3 功率测量.....	157
3.3.1 概述.....	157
3.3.2 基本的功率定义.....	157
3.3.3 传送类功率测量.....	159
3.3.4 接收类功率测量.....	160
3.3.5 热敏电阻传感器及相应功率计.....	161
3.3.6 热偶式功率计.....	163
3.3.7 二极管功率传感器.....	164
3.3.8 峰值功率测量.....	166
3.3.9 多反射的影响.....	166
3.3.10 指标.....	167
3.3.11 校准.....	168
第四章 信号的产生与分析.....	169
4.1 信号源.....	169
4.1.1 信号的表征与生成方法.....	169
4.1.2 通用信号发生器.....	177

4.1.3	任意波形合成器.....	189
4.1.4	微波信号的生成方法.....	200
4.2	固态微波信号源.....	200
4.3	频谱分析仪.....	222
4.3.1	概述.....	222
4.3.2	频谱仪的工作特性.....	227
4.3.3	现代频谱分析仪的设计.....	234
4.3.4	频谱仪的附件.....	240
4.4	相位噪声测量与仪器.....	240
4.4.1	为什么需要测量相位噪声.....	240
4.4.2	相位噪声的定义和表示.....	241
4.4.3	相位噪声的时域测量方法.....	242
4.4.4	相位噪声的频域测量法.....	243
4.4.5	相位噪声的测量与分析.....	246
4.4.6	微波信号源相位噪声的测量.....	252
4.4.7	各种相位噪声测试系统测试灵敏度的对比.....	254
第五章	时间与频率测量.....	256
5.1	概述.....	256
5.1.1	时间与频率的数字化测量.....	256
5.1.2	时间与频率测量仪器.....	257
5.2	电子计数器的原理与组成.....	260
5.2.1	基本计数器.....	260
5.2.2	倒数计数器.....	261
5.2.3	连续计数器.....	263
5.2.4	微波计数器.....	264
5.2.5	脉冲微波计数器.....	266
5.3	电子计数器的主要技术特性.....	266
5.3.1	通用计数器的技术特性.....	266
5.3.2	微波计数器的技术特性.....	273
5.4	时间与频率间隔分析仪.....	275
5.4.1	概述.....	275
5.4.2	原理与组成.....	276
5.4.3	主要技术特性.....	278
5.4.4	FTIA 的应用.....	279
5.5	时间与频率标准.....	282

5.5.1	概述.....	282
5.5.2	石英晶体振荡器.....	283
5.5.3	原子频率标准.....	285
5.5.4	铯 Cs ¹³³ 原子频标.....	286
5.5.5	铷泡原子频标.....	287
5.5.6	氢频率标准和氢脉泽.....	290
第六章	电路元器件的测试.....	292
6.1	阻抗测试的原理及仪器.....	292
6.1.1	阻抗测试技术和误差分析.....	292
6.1.2	连接和隔离.....	297
6.1.3	阻抗测试仪器 (RLC)	300
6.2	半导体测试.....	312
6.2.1	曲线记录仪.....	312
6.2.2	源监控器 (SMU)	317
6.2.3	数字插头电子 (PE) 仪器.....	323
6.2.4	半导体测试系统.....	327
6.3	网络分析仪.....	329
6.3.1	网络特性.....	329
6.3.2	网络分析系统和精度分析.....	331
6.3.3	标量网络分析仪.....	336
6.3.4	矢量网络分析仪.....	340
6.4	微波无源器件.....	344
6.4.1	同轴传输线及同轴无缘器件.....	344
6.4.2	平行平面传输线及平行平面无源器件.....	351
6.4.3	波导及波导无源器件.....	357
第七章	光电子测试.....	370
7.1	光信号的产生及分析.....	370
7.1.1	光信号源.....	370
7.1.2	光功率计.....	373
7.1.3	光信号分析仪.....	375
7.1.4	光谱分析仪.....	376
7.1.5	光波偏振分析仪.....	377
7.2	光学元件分析仪.....	379
7.2.1	调制域元件分析仪.....	379

7.2.2	波长域元件分析仪.....	380
7.2.3	基于反射的元件分析仪.....	381
7.3	光学时域反射计.....	383
7.3.1	光学时域反射计原理.....	383
7.3.2	光学时域反射计的技术指标.....	384
7.3.3	光学时域反射计的应用.....	385
第八章	数据域测试.....	386
8.1	数据域测试的概念.....	386
8.1.1	数据域测试的重要性.....	386
8.1.2	数据域测试的基本理论及方法简述.....	387
8.2	数字信号发生器.....	390
8.2.1	数字信号发生器的作用.....	390
8.2.2	数字信号发生器的结构.....	391
8.2.3	数据的产生.....	392
8.2.4	数据流的特征.....	392
8.2.5	数字信号发生器的主要技术指标.....	396
8.3	逻辑分析仪.....	400
8.3.1	逻辑分析仪的基本组成.....	400
8.3.2	数据的捕获与触发跟踪.....	401
8.3.3	数据流的高速存储.....	404
8.3.4	数据的建立时间和保持时间.....	406
8.3.5	数据的显示.....	406
8.3.6	逻辑分析仪的主要特点及技术指标.....	408
8.3.7	数字测试系统.....	409
8.4	规约分析仪.....	411
8.4.1	概述.....	411
8.4.2	通信规约的结构.....	412
8.4.3	通信规约举例.....	413
8.4.4	基本结构及操作.....	416
8.4.5	规约分析仪的性能指标.....	418
8.5	误码率测试仪.....	421
8.5.1	基本概念.....	421
8.5.2	误码源.....	422
8.5.3	误码测量.....	423
8.5.4	误码率测试仪的结构.....	431

8.5.5	误码率测试仪的技术指标.....	435
8.6	可测性设计.....	439
8.6.1	可测性的测度.....	439
8.6.2	可测性的改善设计.....	440
8.6.3	结构可测性设计.....	440
8.6.4	边缘扫描测试.....	441
第九章	计算机辅助测试 (CAT) 平台	448
9.1	基本概念.....	448
9.1.1	CAT 平台	448
9.1.2	CAT 平台的基本结构	449
9.1.3	程控仪器及接口.....	449
9.1.4	CAT 控制器	452
9.1.5	软件系统.....	453
9.2	GPIB 接口.....	455
9.2.1	GPIB 的发展历史.....	455
9.2.2	GPIB 系统的基本结构.....	457
9.2.3	GPIB 总线信号.....	459
9.2.4	GPIB 接口功能.....	462
9.2.5	GPIB 总线接口消息.....	463
9.2.6	电气与机械特性.....	466
9.2.7	GPIB 控制器.....	468
9.2.8	GPIB 测试编程语言.....	476
9.3	VXIbus 系统	485
9.3.1	模块化仪器的标准化.....	485
9.3.2	机械结构.....	486
9.3.3	VXI 总线信号.....	487
9.3.4	VXI 器件.....	491
9.3.5	VXI 总线系统的通信协议.....	494
9.3.6	VXI 测试系统.....	497
9.4	仪器的程控.....	505
9.4.1	器件数据的标准化.....	505
9.4.2	IEEE488.2 标准	506
9.4.3	可编程仪器标准命令 SCPI	517
9.5	CAT 平台	523
9.5.1	虚拟仪器.....	523

9.5.2 仪器驱动器.....	527
9.5.3 可视化测试编程环境.....	531
9.5.4 开关器件.....	538
9.5.5 网络连接技术.....	541
9.5.6 CAT 平台实例	545
习题和思考题.....	547
第一章习题和思考题.....	547
第二章习题和思考题.....	547
第三章习题和思考题.....	548
第四章习题和思考题.....	549
第五章习题和思考题.....	550
第六章习题和思考题.....	550
第七章习题和思考题.....	550
第八章习题和思考题.....	551
第九章习题与思考题.....	551
参考文献	553

第一章 测量技术基础

1.1 测量误差理论

1.1.1 测量过程

从本质上来说,测量就是将未知量与一个假定已知量进行比较的过程,后者被称为“标准”。而“测量仪器”其实就是一台简化测量过程的设备,它可以是一台仪表、刻度计或者分析仪。

图 1.1 示出了两个测量仪器的例子:天平和安培表。对最早的测量仪器天平来说,测量过程非常简单。未知质量的物体放在天平的右边,质量标准放在天平的左边,直到两边平衡,未知物体的质量就可通过对已知质量的计算来得到。

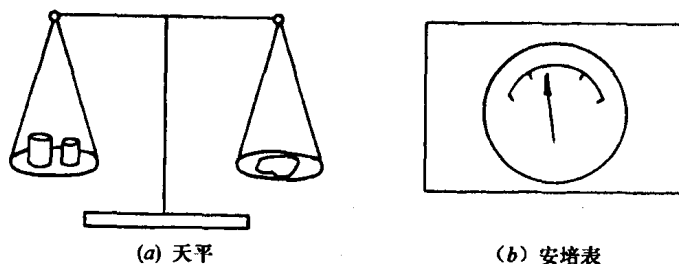


图 1.1 测量仪器举例

注意:图 1.1 中的质量标准是一个形状规则的物体,而未知量则是不规则的。这是为了强调我们已了解标准的性质,它们是可准确定义的;而未知物体的形状是不可简单定义的,因为客观事物常常是十分复杂的。在安培表中,已知量和未知量的比较过程不像天平那样直观,标准并不是与被测物体放在仪器的相同位置,而是在测量前,已用标准量对安培表进行了校准。

在任何测量过程中,都不可避免地会产生测量误差。测量误差就是真值与测量值之间的差异,测量误差理论就是分析和处理测量误差的理论和方法。

测量误差的来源可能是多种多样的;但是,按测量误差的性质和特点可分为系统误差和随机误差两大类。

严格说来,任何测量仪器在物理上都不可能十全十美。例如,连接器会导致衰减和反射;“完全相同”的信号通道之间也会有细微的差别;相同放大器的增益大小不一样等等。这些差异都是固定不变或有规律的,它是由系统所造成的。因此,由此而产生的测量误差就称为系统误差。

系统误差在相同测量条件下,其误差的大小是恒定的,或者遵循确定的规律而变化,也就是说,系统误差具有规律性。因此,对于系统误差的处理比较方便,可通过校准来消除或减小。

随机误差是测量误差的主要来源,随机误差是由不相关的多种因素造成的,它包括随机噪声和测量仪器的不稳定性。随机误差的大小和符号的变化均没有固定规律,因此,随机误差的特点是没有规律性、不可预见性和不可控制性。然而,随机误差具有概率分布的特点,因此,随机误差又具有有界性、对称性和抵偿性。所以,随机误差不能用校准的方法来处理,而只能用概率统计方法来进行误差处理。人们常说的误差处理,大都是指随机误差而言。

1.1.2 测量值的数学期望和方差

由于随机误差的存在,当对一个被测值进行多次等精度重复测量(在相同条件下的测量)时,其测量值并不是恒定的,常在一定范围内变化,这种测量的不确定性就是由于随机误差造成的。因而,测量值不可准确知道,它是一个随机变量。那如何获得测量值呢?

一、测量值的数学期望

当对一个被测值 x 进行 n 次等精度测量而获得 n 个测试数据时,由概率论的贝努力(Bernoulli)定理可知:事件发生的频度 n_i/n 依概率收敛于它的概率 p_i , 即当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,可以用事件发生的频度 n_i/n 代替事件发生的概率 p_i ($i=1 \sim n$)。这时,测量值 x 的数学期望为:

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i = \sum_{i=1}^n x_i \frac{n_i}{n} \quad \text{当 } n \rightarrow \infty \text{ 时} \quad (1.1)$$

式中: n 为总的测量次数; n_i 为取值 x_i 的次数; x_i 为每次的测量取值。

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,可用测量值出现的频度 $1/n$ 代替概率 p_i , 因此,可得到测量值 x 的数学期望值 $M(x)$:

$$M(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{当 } n \rightarrow \infty \text{ 时} \quad (1.2)$$

可见,测量值 x 的数学期望值就是当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,各次测量值的算术平均值。

二、方差

测量值的数学期望只反映了测量值的大小,而方差则反映了测量数据的离散程度。可以证明,测量值的方差为:

$$\sigma^2(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - M(x)]^2 \quad \text{当 } n \rightarrow \infty \text{ 时} \quad (1.3)$$

测量值的方差不仅描述了测量数据的离散程度，同时，也说明了随机误差对测量值的影响。这里要说明的是：

- (1) 方差是对 $[x_i - M(x)]$ 平方后再进行平均，目的是防止正负误差的相互抵消。
- (2) 平方后再平均的方法，使方差对大的误差有更高的灵敏度。
- (3) 方差的均方根称为均方根误差，也称为标准偏差，有：

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - M(x)]^2} \quad \text{当 } n \rightarrow \infty \text{ 时} \quad (1.4)$$

1.1.3 随机误差的统计处理

随机误差根据其概率分布特性的不同有不同的统计处理结果。

一、高斯分布

在概率论中，中心极限定理认为：如果一个随机变量可以表示为大量独立随机变量之和，而其中每一个随机变量对于总和而言是十分微小的，则可认为这个随机变量服从正态分布，即高斯分布。

显然，随机误差是满足上述条件的，因为造成随机误差的多种因素是彼此独立的，其值也是微小的。因此，随机误差的概率服从高斯分布。这样，测量值的随机误差及测量值的概率密度分别为：

$$\phi(\delta) = \frac{1}{\sigma(\delta)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2(\delta)}} \quad (1.5)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[x-M(x)]^2}{2\sigma^2(x)}} \quad (1.6)$$

式中： δ 为随机误差； x 为测量值； $\sigma(\delta)$ 为随机误差的标准方差； $\sigma(x)$ 为测量值的标准方差； $M(x)$ 为 x 的数学期望。

从如图 1.2 所示的测量值及测量误差的概率分布曲线，可以看出：

- (1) 测量误差由于随机误差的影响呈正态分布时，测量值对称地分布于数学期望的两侧。
- (2) 绝对值小的随机误差出现的概率大，而绝对值大的随机误差出现的概率小。
- (3) 测量值的分散程度可用标准方差来表示，随机误差大的测量值出现的概率小。