

测量不确定度手册

刘智敏 陈坤尧 翁怀真 吴国政 编著

倪伟清 杨孝仁 审校

HANDBOOK FOR
MEASUREMENT
UNCERTAINTY

中国计量出版社

测量不确定度手册

Handbook for Measurement Uncertainty

刘智敏 陈坤尧 翁怀真 吴国政 编著

倪伟清 杨孝仁 审校

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

测量不确定度手册/刘智敏等编著. —北京:中国计量出版社,1997.3
ISBN 7-5026-0860-5/TB·488

I. 测… I. 刘… III. 参考值-测量-手册 IV. TB9-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 03543 号

内 容 提 要

测量不确定度是评定测试结果的重要依据,对科研和生产过程具有十分重要的意义。目前已成为国际计量组织、国家标准化组织等机构关注的重点。

本手册主要介绍了测量不确定度的基础理论,计量统计和检验技术,测量不确定度的计算方法及其应用技术。书中用大量实例介绍了测量不确定度在测试和实验中具体应用及计算方法,内容涉及长度、力学、光学、电学等十大计量,实用性很强。

本手册不仅是从事计量工作的工程技术人员常用的工具书,亦可供高等学校有关专业的师生阅读。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 22 字数 525 千字

1997 年 3 月第 1 版 1997 年 3 月第 1 次印刷

*

印数 1—4000 定价:30.00 元

序

对事物要有较深入的了解,就要对它进行测量,并以可靠的数值来表示测量的结果。测量的参数愈详尽、测量的不确定度愈微小,则对事物属性的了解愈透彻。

评定和表示测量不确定度的方法很多。为了求得在全世界上的统一和交流,国际计量局设立了不确定度工作小组,提出了表示测量不确定度的建议 INC-1(1980)和随后的一些建议 CI-1981,CI-1986。这时,国际标准化组织、国际法制计量组织、国际电工委员会也共同成立国际不确定度工作组,与国际计量委员会协同研究和推进这个建议。

评定测量不确定度的理论基础是误差理论。多年来,我国出版了不少有关误差理论的书籍,它们对于测量不确定度的评定起到了有益的作用。但是,如何使误差理论与测量不确定度的评定结合得更密切、更易于评定测量不确定度,这方面的书籍(例如手册一类的书)还很缺乏。

福建省标准计量局陈坤尧同志多年从事计量培训工作,翁怀真同志多年从事计量情报工作,积累了不少有关评定测量不确定度方面的经验和资料,提出要编一本测量不确定度手册。他们的想法得到我国参加国际不确定度工作组的代表刘智敏同志的赞许,愿意提任手册的主编;又得到福州大学吴国政同志和中国计量出版社倪伟清同志的襄助,终于使手册得以面世。手册中的词汇概念、理论知识、公式图表和众多的计算实例等,都力求与国际建议接轨。希望它对广大从事测量工作的读者在不同程度上能够有所帮助。

本书在编著过程中,参考了中国计量科学研究院研究报告,鉴定会文献,航天部 203 所鉴定会文献及计量技术、计量学报、宇航计测技术、计测技术、计量测试、计测论文多篇,对文章作者,编著者深表谢意。

杨孝仁

1997年2月於北京

目 录

第一章 测量不确定度基础	(1)
1 概述	(1)
1.1 简介	(1)
1.2 国际计量局建议	(2)
2 基本名词	(2)
2.1 测量过程、真值、测量结果	(2)
2.2 测量误差分类	(3)
2.3 期望、方差、矩、标准差	(3)
2.4 协方差、相关系数、均方根、自由度	(3)
2.5 不确定度名词分类	(4)
2.6 合成不确定度	(4)
3 误差	(5)
3.1 定义	(5)
3.2 表现形式	(5)
3.3 分类	(5)
3.4 误差分析	(7)
3.5 系统误差的发现和消除	(9)
4 不确定度	(10)
4.1 定义和分类	(10)
4.2 A、B类不确定度与偶然误差、系统误差的关系	(11)
4.3 一些说明	(11)
5 概率基础	(12)
5.1 概论	(12)
5.2 概率基本运算	(13)
5.3 概率运算法则	(14)
6 随机变量与概率分布	(14)
6.1 随机变量及其分布	(14)
6.2 一元随机变量函数	(17)
6.3 多元随机变量函数	(18)
7 随机变量的数字特征	(22)
7.1 期望与方差	(22)
7.2 重要特征	(24)
8 概率论一些定理	(28)
8.1 小概率原理	(28)
8.2 大数定律	(28)

8.3	契贝雪夫不等式	(29)
8.4	中心极限定理	(29)
9	基本分布	(30)
9.1	正态、均匀、反正弦分布	(30)
9.2	χ^2, t, F 分布	(31)
9.3	其它基本分布	(32)
10	分布分析	(35)
10.1	概述	(35)
10.2	正态分布	(35)
10.3	均匀分布	(40)
10.4	反正弦分布	(41)
10.5	三角分布	(41)
10.6	梯形分布	(42)
10.7	χ^2 分布	(42)
10.8	t 分布, 学生分布	(43)
10.9	F 分布	(47)
第二章 计量统计和检验		(48)
1	基本计量统计	(48)
1.1	数理统计概述	(48)
1.2	直方图	(50)
1.3	统计评定	(52)
1.4	正态分布的统计	(53)
2	专用计量统计	(57)
2.1	方差分析	(57)
2.2	稳健统计	(60)
2.3	统计区间	(67)
3	基本计量检验	(73)
3.1	概述	(73)
3.2	正态性检验	(75)
4	专用计量检验	(88)
4.1	χ^2 检验	(88)
4.2	t 检验	(91)
4.3	F 检验	(92)
4.4	系统误差检验	(93)
第三章 测量不确定度计算		(95)
1	概述	(95)
1.1	不确定度评定模型	(95)
1.2	不确定度的传播	(96)
2	A 类不确定度	(98)
2.1	标准差	(99)
2.2	单次标准差的几种求法	(99)
2.3	算术平均值	(102)

2.4	加权平均值	(104)
2.5	标准差计算	(105)
2.6	最小二乘法	(107)
3	B类不确定度	(112)
3.1	基本方法	(112)
3.2	讨论	(112)
4	合成不确定度	(118)
4.1	不确定度的合成	(118)
4.2	相关系数	(122)
5	总不确定度(展伸不确定度)	(130)
5.1	概述	(130)
5.2	t 分布临界值	(130)
5.3	总合不确定度	(133)
6	异常值的发现和处理	(135)
6.1	概述	(135)
6.2	单个异常值判断	(135)
6.3	多个异常值判断	(142)
6.4	异常值的判断和处理	(144)
7	实验标准差修正	(145)
7.1	实验标准差的无偏修正	(145)
7.2	实验标准差的置信区间	(147)
7.3	求极限误差时实验标准差的修正	(150)
8	数据处理基础	(154)
8.1	数字位数	(154)
8.2	数值修约规则	(155)
8.3	测量数据化整	(157)
8.4	运算中的凑整	(158)
8.5	微小误差准则	(158)
第四章 不确定度应用		(161)
1	不确定度的形成	(161)
1.1	测量结果不确定度	(161)
1.2	测量装置不确定度	(167)
1.3	不确定度评定的前期工作	(171)
1.4	不确定度的表示方式	(171)
2	两类不确定度	(172)
2.1	两类评定	(172)
2.2	A类评定	(172)
2.3	B类评定	(174)
2.4	自由度	(178)
3	不确定度综合	(180)
3.1	合成不确定度	(180)
3.2	总不确定度	(180)

4	不确定度报告	(181)
4.1	概述	(181)
4.2	不确定度报告方法	(182)
4.3	不确定度报告位数	(182)
第五章	测量不确定度实例	(184)
1	长度	(184)
1.1	检测方法及有关数据	(184)
1.2	不确定度分量	(184)
1.3	各项不确定度及总不确定度	(185)
2	温度	(186)
2.1	密封型氧三相点复现的不确定度	(186)
2.2	密封式氦三相点复现的不确定度	(187)
2.3	检测超导转变温度中的不确定度	(188)
3	力学	(189)
3.1	测量原理及有关装置	(189)
3.2	不确定度分量	(190)
3.3	各项不确定度及总不确定度	(190)
4	电磁	(191)
4.1	测定奥氏体不锈钢电阻率中的不确定度	(191)
4.2	1 Ω 一等标准电阻检定中的不确定度	(192)
4.3	10 Ω 一等标准电阻检定中的不确定度	(193)
4.4	利用磁通基准向被测量具进行量值传递的不确定度	(194)
4.5	标准磁通量具小于被测磁通量具时的测量不确定度	(197)
5	无线电	(198)
5.1	用 436A 功率计进行功率自动化测量的不确定度	(198)
5.2	同轴小功率标准测量微波功率的不确定度	(200)
5.3	时域自动测试系统的不确定度的表征	(203)
6	时间频率	(204)
6.1	电子计数器时间间隔法检定电秒表的不确定度	(204)
6.2	标准脉冲幅度发生器测量的不确定度	(205)
7	光学	(206)
7.1	测量方法及测量过程	(206)
7.2	不确定度分量	(207)
7.3	各项不确定度及总不确定度	(207)
8	电离辐射	(208)
8.1	内充气正比计数器氡的绝对测量	(208)
8.2	用 4 π PC-Ge(Li)符合装置测量 ⁷⁵ Se 核素活度的不确定度	(210)
8.3	用标准光子场定度 IRM-80 型组织等效电离室的不确定度	(211)
9	标准物质	(212)
9.1	用精密库仑滴定法测定基准试剂氯化钠纯度的不确定度	(212)
9.2	水溶液高温 pH 标度的不确定度	(213)
9.3	重量法测定气体中水蒸气含量的不确定度	(214)

9.4	外渗式水渗透管微量水发生装置测量不确定度	(216)
第六章	测量装置不确定度实例	(218)
1	长度	(218)
1.1	光电光波比长仪的不确定度	(218)
1.2	量块检定比较仪	(220)
1.3	大圆弧样板的平台测量装置	(221)
1.4	直线导轨动态测量仪	(222)
1.5	万能渐开线检查仪	(224)
1.6	实用型激光干涉仪	(225)
1.7	经纬仪标准检定装置	(226)
1.8	标定测深钢卷尺“零位”的光学读数装置	(227)
1.9	车床主轴回转误差的计算机辅助测试系统	(228)
1.10	测量螺旋线的滚刀螺旋线样板	(229)
1.11	大齿轮蜗轮周节的测量装置	(230)
2	温度	(231)
2.1	氩三相点检定设备不确定度	(231)
2.2	高温凝固点的国际比对容器	(232)
2.3	高精度热管分度装置	(233)
2.4	短偶测温仪表的整体检定装置	(235)
2.5	标准温度灯检定装置	(236)
2.6	钨铼高温热电偶分度测试系统	(237)
3	力学	(238)
3.1	测量压力的压力平衡器	(238)
3.2	冲击加速度校准装置	(240)
3.3	扭矩扳子检定仪	(241)
3.4	出租汽车计价器检定装置	(242)
3.5	阿纽巴流量计	(243)
3.6	雷达测速仪检定装置	(245)
3.7	小流量自动测量装置	(246)
3.8	计量泵检测装置	(247)
3.9	旋转式小流量水标准装置	(248)
3.10	杨氏模量实验装置	(249)
4	电磁	(251)
4.1	在较强磁场中绝对测定质子回转磁比装置	(251)
4.2	交流弱磁场标准源	(252)
4.3	用于工业热电阻检定的直流电桥测量线路装置	(254)
4.4	高精度标准电池检定仪	(255)
4.5	直流大电流的微机稳流控制系统	(256)
4.6	数字相位计功率因数表校验装置	(257)
4.7	单相电度表校验台	(258)
5	无线电	(259)
5.1	高精度自动网络参数标准装置	(259)

5.2	热标准噪声源	(262)
5.3	衰减标准校准装置	(263)
5.4	低失真系数校准装置	(265)
5.5	功率表校验装置	(266)
6	时间频率	(268)
6.1	机械式秒表比较校验器	(268)
6.2	频率稳定度测量系统	(269)
6.3	简易电秒表检验台	(269)
6.4	测频示波器	(270)
7	光学	(271)
7.1	激光功率计	(271)
7.2	激光大功率基准	(273)
7.3	光度基准装置	(274)
7.4	长波长光通信光功率标准装置	(275)
7.5	自动测量旋光度的激光检糖仪	(277)
7.6	多模光纤损耗测试装置	(278)
8	电离辐射	(279)
8.1	放射浓度测量装置	(279)
8.2	中能 X 射线照射量装置	(282)
8.3	液体闪烁计数法测量活度装置	(283)
8.4	γ 源相对测量装置	(284)
8.5	X 射线防护仪器	(285)
8.6	核素活度的绝对测量装置	(287)
9	标准物质	(288)
9.1	高纯水电阻率测量仪	(288)
9.2	直接测定高纯水中痕量金属元素装置	(289)

附录 (291)

附录 1	数学公式	(291)
1	导数	(291)
2	常用测量近似计算公式	(292)
3	特殊函数	(293)
4	矩阵	(294)
5	几个公式推导	(296)
附录 2	附表	(299)
附表 1	标准正态分布密度函数值表	(299)
附表 2	标准正态分布函数值表	(300)
附表 3	置信概率值	(301)
附表 4	拉普拉斯函数值	(307)
附表 5	χ^2 分布函数表	(308)
附表 6	t 分布函数表	(321)
附表 7	t 分布临界值表	(324)
附表 8	F 分布表	(324)

附表 9 单双侧正态分布临界值表	(326)
附表 10 单双侧 χ^2 分布临界值表	(326)
附表 11 单双侧 t 分布临界值表	(327)
附表 12 泊松分布 $P\{\xi=k\}$ 的数值表	(328)
附表 13 泊松分布表	(329)
附录 3 基本物理常数的最新国际推荐值	(330)
参考文献	(336)

第一章 测量不确定度基础

1 概 述

1.1 简 介

不确定度是建立在误差理论基础上的一个新概念。误差的数字指标称为不确定度,它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度,不确定度是指测量结果带有的一个参数,用以表征合理赋予被测量的值的分散性。一个测量结果,只有当知道它的测量不确定度时才有意义。一个完整的测量结果,不仅要表示其量值大小,还必须指出其测量不确定度。在给出测量结果时,应同时给出相应的测量不确定度,以表明该测量结果的可信赖程度。不确定度小的测量结果,其可信度高。测量结果的使用与其不确定度有密切关系,不确定度愈小,其使用价值愈高,不确定度愈大,其使用价值愈低。测量不确定度必须正确表示,表示过小,会对产品质量造成危害,过大,会造成浪费。

不确定度与计量科学技术密切相关。在仪器设计制造和计量工作中常常要用到误差理论的有:处理检定数据;估计测量结果和测量结果的精确度;建立计量标准和设计仪器;设计新的测量方法与新的检定规程;在仪器设计制造和计量工作中的其它一些问题中的应用,如:修正值误差的计算、定度仪器时定度误差的计算、定度时标准表精确度的选择等。不确定度用以说明基准标准、检定测试的水平,作为量值传递的依据,表明仪器质量。在基准标准研究和测量检定工作中,应采用不确定度作为误差数字指标的名称。

长期以来,国内外对数据处理以及测量结果不确定度的概念、符号和表达式均存在不同程度的分歧和混乱。对不确定度的表示一直存在着问题,各国有着不同的看法和规定,各单位提出的概念相互矛盾。不确定度的表达缺乏统一性,使国际比对分析困难,影响了各国计量工作的交流和各种计量成果的相互利用。为此,国际计量局(BIPM)于1980年作出了《实验不确定度的规定建议书 INC-1(1980)》。这一建议书可以使各国在不确定度的计算上有了共同的基础,也使各种计量不确定度的说明有了共同的语言。该建议书随后被国际计量委员会采纳。1981年10月第70届国际计量委员会在巴黎召开会议,我国代表王大珩出席了这次大会。会上通过了《关于不确定度的建议草案》。1989年11月由ISO(国际标准化组织)、CIPM(国际计量委员会)、OIML(国际法制计量组织)、IEC(国际电工委员会)共同组成的国际不确定度工作组在柏林召开会议,我国代表刘智敏出席了会议。这次会议在INC-1(1980)的基础上,使不确定度的评定得到了进一步发展,目前正深入研究不确定度表示问题。1992年1月刘智敏作为我国代表赴法国巴黎参加国际不确定度工作组会议。该会仍贯彻BIPM的INC-1精神。

1993年国际不确定度工作组制定了 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement,经BIPM(国际计量局)、OIML、IEC、ISO、IUPAC(国际理论与应用化学联合会)、IUPAP(国际理论与应用物理联合会)、IFCC(国际临床化学联合会)批准实行,由ISO公布。

我国长期以来在误差理论及不确定度方面另辟蹊径,自成流派,误差名词和合成方法存在

着分歧和混乱。为了尽快解决这一问题,国家技术监督局规定我国要以 INC-1(1980)《建议书》为依据,择其符合我国国情的规定,统一理解测量不确定度的概念,以相对统一的符号、公式来计算或估算 A、B 两类不确定度分量和合成不确定度及总不确定度,以应有的表达方式来评价和表示测量结果的不确定度,使测量结果更接近客观情况,以便在工农业、国防、科研等方面得到使用。此外,力求与国际上的不确定度的研究方法、公式和符号取得一致,以利国际间的比对分析,促进学术交流,从而推进我国计量事业的健康发展。

实验不确定度的计算和表示极其重要。如何表述、表征和表达不确定度,正是本《手册》努力探讨的问题。

1.2 国际计量局建议

(1) 根据国际计量局实验不确定度的规定建议书测量结果的不确定度一般包含几个分量。按其数值的评定方法,这些分量可归入两类:

A 类:用统计方法计算的那些分量;

B 类:用其它方法计算的那些分量。

对于不确定度的分类,A 类和 B 类与以前的“偶然”和“系统”不一定存在简单的对应关系。“系统不确定度”这个术语可以引起误解,应避免使用。

任何详细的不确定度报告应该有各分量的完整清单,每个分量应说明其数值的获得方法。

(2) A 类分量用估计方差 s_i^2 (或估计“标准差” s_i)和自由度 ν_i 表征。必要时,应给出估计协方差。

(3) B 类分量用 u_i^2 表征。可以认为 u_i^2 是假设存在的相应方差的近似。可以象方差那样去处理 u_i^2 ,并象标准差那样去处理 u_i 。必要时,也应给出协方差。

(4) 用方差合成的通常方法,可以得到表征合成不确定度的数值。应以“标准差”形式表示合成不确定度及其分量。

(5) 对特殊用途,若须将合成不确定度乘以一个因子以获得总不确定度时,必须说明此因子的数值。

2 基本名词

2.1 测量过程、真值、测量结果

(1) 测量过程:与给定测量目标有关的全部信息、设备和操作。

(2) 真值:当量和测量过程完全确定,且所有测量不完善性可以排除时,由测量所获得的值。表征在研究某量时所处的条件下完善地确定的量值。

注 1:量的真值是理想的概念,一般是未知的。

注 2:有些量的真值是由国际公认的,如国际千克原器的质量值。

注 3:真值和实际值的区别。

真值:一个量在被观测时,该量本身所具有的真实大小。真值是理想的概念,因为自然界任何物体都处于永恒的运动中,一个量在一定时间和空间都会发生变化,从而具有不同的真值。真值是指在瞬间条件下的值,实际上真值常常不知道。保存在国际计量局的千克基准是按照定义在特定条件下人为规定的真值。

实际值:满足规定准确度的用来代替真值使用的量值。通常把检定中高一级别的计量标准所测量的量值作为实际值。在实际测量中常用实际值或把已修正过的多次测量的算术平均值作为真值使用。实际值不是真值,但它接近真值。

(3) 测量结果:由测量得到的被测量值。

2.2 测量误差分类

(1) (绝对)测量误差:测量结果与被测量真值之差。

(2) 相对误差:绝对测量误差除以测量的真值。

(3) 偶然误差:期望为零的随机误差。

(4) 系统误差:测量误差的分量,在同一被测量的多次测量过程中,它保持常数或以可预知的方式变化着。

(5) 随机误差:测量误差的分量,在同一被测量的多次测量过程中,它以不可预知的方式变化着。

(6) 极限误差:误差绝对值的实际上限,即误差模值小于该极限误差的可信赖程度很高。

注1:可信赖程度可用不同的数学方法评定,最常见的一种是置信概率。

注2:对于合格的测量仪器,其测量极限误差可取其技术规范规定的最大允许误差。

2.3 期望、方差、矩、标准差

(1) 期望:无穷多次测量的算术平均值。它是描述随机变量 X 特性的加权平均数,称为随机变量的平均值,记为 $E(X)$ 或 EX 。

(2) 方差:随机变量 X 的或概率分布的方差是相应的中心化随机变量平方的期望 $E(X - E(X))^2$,无系统误差时方差 σ^2 就是无穷多次测得值真误差平方的平均值。记为 $V(X)$ 或 VX 。

(3) 矩:随机变量 X 对于 c 的 k 阶矩为 $(X - c)^k$ 的平均值,即

$$\rho_k(c) = E(X - c)^k$$

其中, c 是任意常量, k 是任意正整数。当 $c=0$ 时,称为原点矩,通常以 ν_k 表示 k 阶原点矩,当 $c = EX$ 时,称为中心矩,通常以 μ_k 表示 k 阶中心矩。平均值是一阶原点矩 ν_1 ;方差是二阶中心矩 μ_2 。三阶中心矩刻划分布的非对称性(偏倚程度),工程上有时用三阶中心矩 μ_3 与 σ^3 的比值 $\gamma_1 = \mu_3/\sigma^3$ 作为刻划分布偏倚程度的无量纲指标, γ_1 称为偏倚系数,也称偏度 β_1 。

四阶中心矩 μ_4 刻划峰态特性,即分布的凸出程度。 $\gamma_2 = (\mu_4/\sigma^4) - 3$ 称为超越系数,用以刻划分布陡削程度, $\beta_2 = \mu_4/\sigma^4$ 称为峰度。

(4) 标准差:随机变量 X 方差的正平方根 $\sigma = \sqrt{E(X - E(X))^2}$,为表征同一被测量值的 n 次测量结果的分散性的参数,若 n 次测量结果的偶然误差为 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$,则表达式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}$$

2.4 协方差、相关系数、均方根、自由度

(1) 协方差

(1.1) 阶联合中心矩

$$E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\} \approx \frac{1}{n} \sum_{i,j} n_{ij}(x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})$$

其中, n_{ij} 是数对 (x_i, y_j) 的观测次数; $n = \sum_{i,j} n_{ij}$ 是数对的总观测次数。

设 X 和 Y 是两个随机变量, 则 XY 也是一个随机变量, 若 EX^2 和 EY^2 存在, 则 XY 的平均值 EXY 也存在, 而且有:

$$EXY = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} xy dF(x, y)$$

当 $F(x, y)$ 的密度 $f(x, y)$ 存在时上式可写成:

$$EXY = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} xy f(x, y) dx dy$$

当 X, Y 是离散型时, 则可写成级数形式

$$EXY = \sum_j \sum_k x_j y_k p_{jk}$$

其中: $p_{jk} = P(X = x_j, Y = y_k)$, 将:

$$E[(X - EX)(Y - EY)] = EXY - EXEY$$

称为 X 和 Y 的协方差, 并记为 $\text{cov}(X, Y)$ 或 K_{xy} 。

(2) 相关系数: 两误差间协方差与标准差之积 $\sigma_\xi \sigma_\eta$ 之比, 即:

$$\rho = \frac{E(\xi - E\xi)(\eta - E\eta)}{\sqrt{E(\xi - E\xi)^2 \cdot E(\eta - E\eta)^2}} = \frac{K_{\xi\eta}}{\sigma_\xi \sigma_\eta}$$

它表示两误差 ξ, η 之间线性关连的松紧程度。

(3) (随机变量 X 的) 均方根: 随机变量 X 平方的期望的正平方根, 即:

$$\alpha(X) = \sqrt{E(X^2)}$$

(4) 自由度: 和中分量数目减去对和的限制条件数目。

2.5 不确定度名词分类

(1) 不确定度: 测量结果带有的一个参数, 用以表征合理赋予被测量的值的分散性, 它表示被测量真值所处的量值范围的评定结果, 通常带有给定的可能性。

(2) 标准不确定度: 表征测量质量的一个参数, 它与统计法评定的标准差等价。

(3) A 类(评定标准)不确定度分量: 标准不确定度的分量, 它由统计方法求出、推出或评价。

(4) B 类(评定标准)不确定度分量: 标准不确定度的分量, 它由不同于 A 类分量的其它方法得到。

(5) A 类(评定标准)不确定度: A 类标准不确定度分量的全部集合。

(6) B 类(评定标准)不确定度: B 类标准不确定度分量的全部集合。

2.6 合成不确定度

(1) 合成(标准)不确定度: 受几个不确定度分量影响的测量结果的标准不确定度, 它由分量的方差、协方差相加导出。

(2) 包含因子

为获得总不确定度对(标准)不确定度所乘数值,也称范围因子。

(3) 总不确定度(展伸不确定度):将合成(标准)不确定度乘以一个因子所得的不确定度。

(4) 极限不确定度:以误差实际不应超过的界限表征的不确定度。

3 误差

误差和不确定度两个领域中涉及的概念本身就是研究和争论的题目。“误差”是个意义明确的概念,“不确定度”一词同义于疑问、含糊、不明确、不知道、不完善的知识。

所有测量都受到误差的影响,一个数据(测得的或计算、估算或估计的)与真值之间有误差。获得的测量值只能反映它与被测量的某种程度上的近似,这种近似是用误差来衡量的。评定测量结果是否有效或有效程度如何,也只能用误差来衡量,这是处理有效数字问题的总依据。

3.1 定义

测量结果与被测量真值之间的差即为测量误差,即:

$$\text{测量误差} = (\text{测量值}) - (\text{真实值}) \quad (1-1)$$

如测量三角形,若测得三个角之和为 $180^{\circ}00'03''$,而理论上三角之和应为 180° ,则测量误差为 $180^{\circ}00'03'' - 180^{\circ} = 3''$ 。

3.2 表现形式

不同的测量次数或者不同的测量时刻,测得值的误差就不同。某一条件因素改变后,误差也不同。有的误差表现有规律,有的误差则在离散中呈现某些规律。如图 1-1 所示,图中左图的误差(垂直方向)呈规律性,右图的误差看成为在左图有规律误差基础上叠加起伏波动的误差而表现的形式。右图用“×”号标示个别误差出现的离散现象。

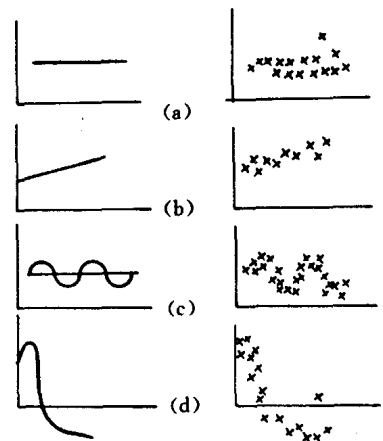


图 1-1 误差表现形式

3.3 分类

误差按性质可分为偶然、系统和粗大三类。详见表 1-1

(1) 偶然误差

“单次测量时,误差可大可小、可正可负,但多次测量后其平均值(期望)趋于零”,具有这种性质的误差称为偶然误差。

当由一误差转向另一误差时,无论正负和大小都没有明显规律。偶然误差单次出现没有任何规律,但多次测量同一量时,其绝对值和符号以不可预定方式变化。多次测量后,它们具有相互抵偿的统计规律性。若多次出现的偶然误差为

$$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$$

则其算术平均值随测量次数 n 的增大而趋于零,即

$$\frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n} \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$$

偶然误差是期望为零的随机误差。

表 1-1 误差分类

误差类别	定义	起因	特点	性质	分布	研究方法	描述法及表示式	作用
偶然误差	单次测量时,误差可大可小,可正可负,但多次测量后,其平均值趋于零,具有这种性质的误差称为偶然误差	如对准标志、刻线、汞柱等的不一致,读数的不一致,仪器的变化(天平变动性等),环境条件(温度、湿度等)的波动而产生		抵偿性	多为正态分布,(虽也不排除其它分布)	概率论和统计学方法	用标准差 σ 表示。 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}$	反映重复测量同一量值时彼此间的一致程度,即:测量结果的分散性,它决定了测量的精密度
系统误差	在偏离测量规定条件时或由于测量方法等所引入的因素,按某确定规律所引起的误差称为系统误差	仪表示值与实际值有一误差,若不经计量部门检定就使用,则其示值有一系统误差,起因主要是测量条件的变化和由于测量方法(包括计量器和观测者能力)的差异	按确定的规律变化,其大小、方向固定或有确定的规律;一般可以进行修正或通过测量方法来消除它。 按误差特点,系统误差可分为:常差(已定系差),即误差的符号和绝对值已经确定;不确定系差虽有规律,但其符号和绝对值尚未确定	无抵偿性	分布多种多样,有:正态、均匀、梯形、三角、反正弦、指数、双众数、对称及各种非对称分布	用个别考察、具体问题具体对待的方法	常差(已定系差)大小、符号已知,可进行修正,用 ϵ 表示 未定系差用系统误差限 $\pm e$ 表示	反映误差时真值的偏离程度,它决定了测量的正确度
粗大误差	超出在规定条件下预期的误差	如错误地读取示值,错误的测量方法,使用了有缺陷的计量器具,记录错误等所致。往往是粗心大意造成的				应予剔除		

注:分类:误差按性质可分为三类,即:偶然、系统和粗大误差。