

21 世纪高等院校教材

物理量测量

主 编 袁长坤

副主编 武步宇 王家政 闫兴华

 科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

物 理 量 测 量

主编 袁长坤

副主编 武步宇 王家政 闫兴华

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》编写而成,立意新颖,突出物理量的测量.首先介绍了不确定度和测量误差处理以及部分常用仪器的使用等基础知识;其次分章节讲述了力学量测量、热学量测量、电磁学量测量、光学量测量及近代物理中物理量的测量;最后编排了部分具有综合性与设计性的物理量测量实验;书末附表给出了常用物理量.书中列出了 67 个不同层次的实验,内容比较全面.强调学生基本测量技能的培养和科学观念、科学行为的养成教育.

本书可作为高等工业学校各专业本、专科及理科类学生的物理实验教材,也可供成人教育学院、函授大学和职工大学选用或参考.

图书在版编目(CIP)数据

物理量测量/袁长坤主编. —北京:科学出版社, 2004

(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-014396-5

I. 物… II. 袁… III. 物理量-测量-高等学校-教材 IV. O4-34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 102421 号

责任编辑:胡华强 昌盛 姚庆爽 / 责任校对:朱光光

责任印制:安春生 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2004 年 11 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2004 年 11 月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:0 001—9 000 字数:370 000

定价:22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

世界是物质的,研究物质的基本结构和运动规律是物理学的任务.科学地、理性地、正确地研究物质世界的方法,就是伽利略首先倡导并身体力行的实验方法.迄今为止,在研究、验证、探索物质世界的性质和规律中,实验仍然是极其重要、不可或缺的手段.物理实验通常以测量物理量来验证物理定律或检测物质的性质.从这个意义上讲,物理实验就是对物理量的测量,大学物理实验也是如此.

在工科院校众多的实验课中,只有“大学物理实验”单独设课.这是因为“大学物理实验”课不是“大学物理”课的附属或延续,它具有自己独立、独特的教学目的和任务.仅就学习各种基本仪器的使用,掌握各种物理量的测量方法而言,它对理工类各专业学生今后的学习和工作都具有重要的意义.

当今任何重大科学发现或高技术的发展,只要与物质有关,都会与物理量测量或多或少相关联.无论是机械制造、交通运输、电子通讯,还是生命科学、考古学,甚至是历史学研究领域,只要是涉及到自然科学的,无一不存在对物理量的测定问题.基于上述考虑,将《大学物理实验》定名为《物理量测量》以显示其宽泛、深厚的内涵.

本书是编者根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,以1996年出版的《物理实验教程》为基础,结合编者多年教学实践,修改补充而成.

全书共分7章.首先介绍了不确定度和误差处理,以及部分仪器的使用,然后以物理量测量为主线,介绍了力学量、热学量和波动特征量的测量,电磁学量测量,光学量测量和近代物理与综合性实验,以及设计性实验.教学中,不一定按教材中顺序进行.

在具体实验项目选取上,力求新颖、现代.在编写中,力求做到实验原理叙述清楚、计算公式推导完整、实验步骤简明扼要,以适应大学物理实验独立设课的要求.

本书由袁长坤任主编,武步宇、王家政、闫兴华任副主编.参加编写的有刘玉金、李强、盛爱兰、穆晓东、耿雪、王军等.

本书由荣玮主审.

编写中,参考了兄弟院校的有关教材,在此表示衷心感谢.

由于编者水平有限,疏漏和错误在所难免,恳请读者不吝批评指正.

编 者
2004年4月

目 录

前言

绪论	(1)
----	-----

第1章 测量的不确定度与数据处理	(3)
------------------	-----

1.1 测量、测量误差与误差处理	(3)
------------------	-----

1.2 测量的不确定度	(7)
-------------	-----

1.3 数据处理	(10)
----------	------

第2章 部分常用仪器的使用	(17)
---------------	------

2.1 气垫导轨的应用	(17)
-------------	------

2.1.1 验证动量守恒定律	(17)
----------------	------

2.1.2 简谐振动	(23)
------------	------

2.1.3 验证牛顿第二定律	(24)
----------------	------

2.2 电表使用	(26)
----------	------

2.2.1 电表改装与校正	(26)
---------------	------

2.2.2 制流电路与分压电路	(31)
-----------------	------

2.3 示波器原理与使用	(35)
--------------	------

2.4 读数显微镜的调节与使用	(43)
-----------------	------

2.4.1 牛顿环法测量透镜曲率半径	(43)
--------------------	------

2.4.2 劈尖干涉测微小直径或厚度	(48)
--------------------	------

2.5 分光计的调整与使用	(50)
---------------	------

第3章 力学量、热学量与波动特征量测量	(56)
---------------------	------

3.0 力学、热学量测量基本知识	(56)
------------------	------

3.0.1 长度的测量	(56)
-------------	------

3.0.2 质量的测量	(57)
-------------	------

3.0.3 时间的测量	(58)
-------------	------

3.0.4 温度的测量	(58)
-------------	------

3.1 密度测量	(59)
----------	------

3.1.1 游标卡尺、螺旋测微计与天平的使用	(59)
------------------------	------

3.1.2 液体与不规则物体密度的测量	(66)
---------------------	------

3.2 惯性质量测量	(68)
------------	------

3.3 重力加速度测量	(70)
-------------	------

3.3.1 自由落体法测重力加速度·····	(70)
3.3.2 单摆法测重力加速度·····	(74)
3.3.3 复摆法测重力加速度·····	(76)
3.4 转动惯量测量·····	(79)
3.4.1 转动惯量仪的使用·····	(79)
3.4.2 扭摆法测物体的转动惯量·····	(82)
3.5 杨氏模量测量·····	(88)
3.5.1 拉伸法测量杨氏模量·····	(88)
3.5.2 动态悬挂法、支撑法测量杨氏模量·····	(93)
3.6 液体表面张力系数测量·····	(98)
3.7 空气绝热指数测量·····	(102)
3.8 不良导体的导热系数测量·····	(105)
3.9 比热容测量·····	(108)
3.10 金属线膨胀系数测量·····	(112)
3.11 冰的熔解热测量·····	(115)
3.12 声速测量·····	(117)
3.13 机械波波波长测量·····	(122)
3.14 玻尔共振仪使用与相差测量·····	(125)
第4章 电磁学量测量·····	(133)
4.0 电磁学量测量基本知识·····	(133)
4.1 静电场测绘·····	(139)
4.2 电阻测量·····	(143)
4.2.1 惠斯通电桥测电阻·····	(143)
4.2.2 双臂电桥测电阻·····	(148)
4.3 电动势测量·····	(152)
4.3.1 电势差计测量温差电动势·····	(152)
4.3.2 板式电势差计测电池电动势与内阻·····	(160)
4.4 非线性电阻伏安特性曲线测绘·····	(164)
4.5 PN结温度传感器研究·····	(168)
4.6 热敏电阻特性与温度系数测量·····	(174)
4.7 霍尔效应及应用·····	(177)
4.7.1 霍尔元件基本参数测量·····	(177)
4.7.2 霍尔元件测量磁感应强度·····	(184)
4.8 磁滞回线和磁化曲线测绘·····	(190)
4.9 电子电量测量·····	(198)

4.10 电子比荷测量·····	(203)
第5章 光学量测量 ·····	(213)
5.0 光学量测量基本知识·····	(213)
5.1 透明材料折射率测量·····	(215)
5.2 光强分布的测量·····	(220)
5.3 单色光波长测量·····	(225)
5.3.1 单缝衍射·····	(225)
5.3.2 光栅衍射·····	(229)
5.3.3 迈克耳孙干涉仪测量 He-Ne 激光波长·····	(232)
5.4 椭圆偏振消光法测薄膜厚度及折射率·····	(237)
5.5 旋光物质溶液浓度测量·····	(242)
第6章 近代物理与综合性实验 ·····	(248)
6.0 近代物理与综合性实验基本知识·····	(248)
6.1 原子能级与激发电势测量·····	(248)
6.2 金属电子逸出功的测量·····	(255)
6.3 爱因斯坦方程验证及普朗克常量测量·····	(262)
6.4 德布罗意波长及普朗克常量测量·····	(267)
6.5 波的傅里叶分解与合成·····	(272)
6.6 全息照相·····	(278)
第7章 设计性实验 ·····	(284)
7.1 固体密度测量·····	(284)
7.2 气轨斜面上测滑块的瞬时速度·····	(284)
7.3 单臂电桥法测微安表内阻·····	(285)
7.4 测定电流计内阻 R_g 和电流计灵敏度 S_i ·····	(285)
7.5 研究热敏电阻的温度特性·····	(285)
7.6 自组迈克耳孙干涉仪——空气折射率测量·····	(286)
7.7 两次成像法测凸透镜焦距·····	(288)
7.8 菲涅耳双棱镜干涉·····	(290)
7.9 杨氏双缝干涉·····	(291)
7.10 劳埃德镜干涉·····	(292)
7.11 夫琅禾费圆孔衍射·····	(293)
7.12 菲涅耳单缝衍射·····	(294)
7.13 光栅衍射·····	(294)
附表 ·····	(297)
附表1 基本物理常数、常量表·····	(297)

附表 2	在海平面上不同纬度处的重力加速度	(298)
附表 3	20℃ 时某些金属的弹性模量	(298)
附表 4	固体的线膨胀系数	(299)
附表 5	液体的比热容	(299)
附表 6	固体比热容	(300)
附表 7	某些金属合金的电阻率及其温度系数	(300)
附表 8	几种标准温差电偶	(300)
附表 9	常用光源的谱线波长	(301)
附表 10	常温下某些物质相对于空气的折射率	(301)
参考文献		(302)

绪 论

认识源于实践,又要得到实践的检验.科学实验是实践的重要形式之一,自然规律的认识与应用,无不与实验息息相关,在科学研究和生产活动中,有着十分重要的作用.随着教学改革的深入,作为一门独立的实验课程,大学物理实验不再仅仅是对物理理论的简单应用和机械重复,而应当承担起对学生进行科学实验基础训练的功能.鉴于此,使学生掌握基本科学仪器的使用方法和常规物理量的测量方法,成为这种基础训练的重中之重,这也是开设“物理量测量”课程的目的所在.通过本课程的学习,为今后更高层次的科学实验研究打下牢固的基础,以适应 21 世纪“面向现代化,面向未来”的人才培养要求.

1. “物理量测量”课程目的

通过对物理现象的观察和分析,阅读教材和相关资料,概括出具体物理量测量的原理与方法,正确使用仪器,科学测量,同时记录和处理数据,分析测量结果并撰写实验报告.对一些不太复杂的物理量,能够自行设计测量方法并完成测量.同时注意培养实事求是的科学态度和严谨的工作作风以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品质.

2. 主要教学环节

为达到课程开设目的,基本程序大致有三个重要环节.

1) 课前预习

课前应根据网上预约的课程项目,认真阅读教材,必要时应查阅相关资料,明确本次课的测量目的,基本弄懂所用的原理方法,在此基础上,弄清楚要观察哪些现象,测量哪些数据,是直接测量还是间接测量.全面了解之后,写出预习报告,内容包括:基本原理的文字概述、画出原理图、列出理论公式、拟定数据记录表格.

2) 课堂测量

学生进入实验室之后,应遵守实验室规则,在教师指导下,进一步明确测量的目的、仪器的使用方法及注意事项,认真操作,仔细观察,积极思考,细心记录.实验结束时,将测量数据交教师审阅签字后,方可离开实验室.

3) 课后总结

课后及时对测量数据进行处理,数据处理包括计算、作图、误差分析等方面.数据处理后给出实验结果,撰写出实验报告,要求字迹工整、文理通顺、图表合理、结

论明确、格式规范.实验报告内容包括:

- (1) 实验名称(同时注明实验者姓名、实验日期).
- (2) 实验目的.
- (3) 实验原理.概述本次测量所依据理论,附带必要的公式、原理图.
- (4) 实验步骤.根据实际操作过程,条理分明地概括说明测量主要程序及注意事项.
- (5) 数据处理.记录测量数据、完成数据计算、曲线图绘制、误差分析.

第 1 章 测量的不确定度与数据处理

1.1 测量、测量误差与误差处理

1. 测量与测量误差

自然科学的发展过程是通过对客观世界的观察研究,发现现象,找出物质运动规律,并作出正确解释的过程.为了更准确地分析事物,测量物理量的大小是必不可少的,因此要借助于实验的方法来测量数据.物理量须有一个标准单位来与之比较方能知道其大小.被测物理量与所选的标准单位进行比较,得到的倍数即为测量值.例如长度选择米(m)为标准单位(它是光在真空中 $1/299792458$ s 传播的距离).显然,测量值的大小与所选用单位有关.因此,表示一个物理量的测量值时必须包括数值和单位.

1) 直接测量与间接测量

测量分为两类,直接测量和间接测量.

直接测量是用能直接读出被测值的仪器进行测量的方法,相应测量值称为直接测量值.例如用米尺测物体的长度,用天平测物体的质量,用电流表测量电路中的电流强度等都是直接测量.

实际测量中,很多物理量是没有专门仪器来直接测量的.通常的方法是先直接测量的方法测出几个物理量,然后代入公式计算得到所需物理量,这种方法称为间接测量.例如用单摆测量重力加速度时,先测出摆长 l 和周期 T ,然后代入公式

$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$,得到当地的重力加速度.实际接触到的测量,大部分属于间接测量.

2) 等精度测量和不等精度测量

对某一物理量进行多次测量时,如果测量条件保持不变(同一的测量者、仪器、方法及相同的外部环境),是无法判断测量精度有何差异的,即无法判断某一次测量比另一次测量是否更准确,那么只能认为每次测量的精度是同等级别的,这样进行的重复测量称为等精度测量.如果测量条件中,一个或几个发生了变化,这时所进行的测量就称为不等精度测量.实际测量中应尽量保持为等精度测量.

3) 测量误差

在一定条件下,任何待测物理量都是客观存在的,不依人的意志为转移的确定量值,称为真值.测量过程中,测量仪器不可能是尽善尽美的,测量所依据的理论公式所要求的条件也是无法绝对保证的,再加上测量技术、环境条件等各种因素的限

制,测量不可能是无限精确的,测量结果与客观存在的真值之间都有一定的差异,我们把测量结果与真值之间的差值叫做测量误差.测量误差反映了测量结果的准确程度,可用绝对误差表示,也可以用相对误差表示:

绝对误差 = 测量结果 - 被测量的真值

$$\text{相对误差}(E) = \frac{\text{绝对误差}}{\text{被测量真值}} \times 100\%$$

式中绝对误差表示测量结果偏离真值的大小与方向,即表示某一次测量结果的优劣;相对误差则可以比较不同测量结果的优劣度.

2. 误差分类

误差按其性质和产生原因可分为系统误差和随机误差.

1) 系统误差

系统误差总是使测量结果向一个方向偏离,其数值是一定的或以可预知的方式变化的.它来源于仪器本身的缺陷(仪器误差),如仪器的零点不准,球面镜各处的曲率不一样;或来源于理论公式和测量方法的近似性(理论误差或方法误差),如用伏安法测电阻时没考虑电表内阻,单摆测重力加速度时忽略了空气阻力;或来源于测量者个人习惯性误差(个人误差),如计时时有人反应快有人反应慢等.

系统误差有时是定值,如游标卡尺的零点不准;有些是积累性的,如在较高温度下用钢制米尺进行测量,其指标值小于真值,误差随待测长度成正比增加;还有些是周期性变化的,如分光计的转动中心轴与刻度中心不重合而造成的偏心差,在不同的位置有不同的数值,按一定规律变化,但在某一定位置,其误差又是定值.

可见,系统误差的出现是有规律的,或全部结果都大于真值,或全部结果都小于真值,增加测量次数并不能减小这种误差的影响.消除和纠正系统误差的方法是对仪器进行校正,修正实验方法,或者在计算公式中引入修正项,以消除某些因素对实验结果的影响.本课程只要求初步建立系统误差的概念,并在某些实验中学习消除系统误差的方法.

2) 随机误差

测量时,由于测量者的感官有一定限制,如估读仪器读数时最后一位不准;或由于周围环境条件变化,如测量中气流扰动或温度起伏;或由于测量对象本身有统计的涨落,如一定温度下以一定速度运动的分子数目是个有涨落的统计量;或由于其他一些不可预测的随机因素造成的干扰等,都会引起测量误差.这些由于随机的或不确定的因素所引起的每一次测量值无规律的涨落而造成的误差,称为随机误差,也叫偶然误差.

随机误差的存在使得每次测量值涨落不定,但它服从一定的统计分布规律,常见的一般性测量中,基本上属于正态分布,因此可以用统计的方法处理随机误差.

3. 随机误差的处理方法

由于偶然因素的影响,每一次测量中随机误差的出现在大小和方向上是不可预知的.但在相同条件之下,对同一物理量的多次重复测量结果,服从某种统计分布规律,其中最常见的是正态分布.

1) 随机误差的正态分布规律

理论和实践均表明,大量的随机误差服从正态分布(或称高斯分布)规律.正态分布曲线如图 1.1.1 所示, x 表示测量值的概率密度

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1.1)$$

式中

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (1.1.2)$$

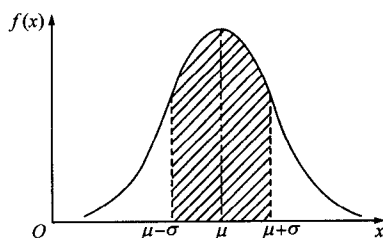


图 1.1.1

从正态分布曲线图上可以看出,测量值在 $x = \mu$ 处的概率密度最大,相应横坐标 μ 为测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时的测量平均值.横坐标上任一点 x 到 μ 值的距离为 $x - \mu$,即为与测量值 x 相应的随机误差分量.随机误差小的概率大,随机误差大的概率小. σ 称为正态分布的标准偏差,其值为曲线上拐点处的横坐标与 μ 值之差,是表征测量值分散性的参数.正态分布曲线,即正态分布的概率密度分布曲线,当曲线与 x 轴之间的总面积为 1 时,介于横坐标上任意两点之间的面积可用来表示此范围内随机误差的概率.例如,图中 $\mu - \sigma$ 到 $\mu + \sigma$ 之间的面积就是随机误差在 $\pm \sigma$ 范围内的概率,即测量值落在 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 区间中的概率,可计算得概率 $P = 68.3\%$.区间扩大 2 倍,测量值落在 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 区间内的概率为 95.4% ;落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 区间内的概率为 99.7% .

2) 残差、偏差和误差

残差为单次测量值 x_i 与有限次测量平均值 $\bar{x}$ 之差, 即

$$\Delta x = x_i - \bar{x} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.1.3)$$

偏差为单次测量值 x_i 与总体平均值 μ 之差. 注意: 偏差即为随机误差, 系统误差为 0 时, 偏差才是误差.

误差为单次测量值 x_i 与被测量真值 x_0 之差.

3) $\sigma, S, S_{\bar{x}}$ (1) 总体标准偏差 σ .

由前文已经知道, 总体平均值

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

为 $n \rightarrow \infty$ 时的理想值, 在系统误差为零时, μ 就是某物理量的真值. 总体标准偏差

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (1.1.4)$$

说明了一定测量条件下, 等精度测量列随机误差的概率分布情况, 尽管某一次测量值的随机误差不可能恰等于 σ , 但可以认为这一系列测量中的所有测量值都服从同一个标准偏差为 σ 的概率分布.

(2) 有限次测量时的单次测量值标准差 S .

实际测量中, 测量次数是有限的, 算术平均值可以近似地代表真值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1.5)$$

相应单次测量得到的标准差

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1.1.6)$$

称为实验标准偏差 (概率论称为样本标准差), 它是对总体标准差 σ 的最佳估计值, 表征 n 次有限测量结果的分散程度.

(3) $\bar{x}$ 的标准偏差 $S_{\bar{x}}$.

相同条件下, 进行多组重复的系列测量, 每组都有一个算术平均值. 由于随机误差的存在, 任何两组的算术平均值不相同, 它们在真值周围有一定分散, 这种分散表明算术平均值的不可靠性. 表征各个组中算术平均值分散性的参数称为算术平均值的标准偏差

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.1.7)$$

显然,由于算术平均值 $\bar{x}$ 相对于单次测量值 x_i 的随机误差有一定抵消,更接近于真值,其误差分散程度也小得多,因而,算术平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 比单次测量的标准偏差 S 小得多。

1.2 测量的不确定度

1. 不确定度

1) 不确定度的概念

不确定度是指由于测量误差的存在而对测量值不能肯定的程度,是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。

引入不确定度可以对测量结果的准确程度作出科学合理的评价。不确定度愈小,表示测量结果与真值愈靠近,测量结果愈可信。反之,不确定度愈大,测量结果与真值差别愈大,可信度愈差,使用价值愈低。

2) 不确定度与误差的关系

不确定度和误差是两个不同的概念,前者是在后者理论上发展起来的,它们都是由于测量过程的不完善性引起的。误差用于定性地描述理论和概念的场合;不确定度用于给出具体数值或进行定量运算分析的场合。在叙述误差分析方法、合成方法和误差传递的一般原理公式时,可保留原来的名称,在具体计算和表示计算结果时,应改为不确定度,即凡涉及到具体数值场合均应用不确定度代替误差。

由于真值一般是未知的,测量误差一般也是未知的,所以无法表示测量结果的误差。前文所涉及的“误差”等词,也不是指具体的误差数值,而是用来描述误差分布的数值特征和与一定置信概率相联系的误差分布范围的。不确定度则表示由于测量误差的存在而对被测值不能确定的程度,反映了可能存在的误差分布范围,表征被测量的真值所处的量值范围,所以不确定度准确地用于测量结果的表示。不确定度可以计算或评定出来的,其值永为正值。而误差一般是无法计算的,可正可负也可接近于零。

2. 直接测量结果不确定度的估计

完整的测量结果应记为 $x = x_0 \pm \Delta$, x_0 为被测量的量值, Δ 为总不确定度,这表示被测量的真值以很大概率落在 $(x_0 - \Delta, x_0 + \Delta)$ 内。“总不确定度”有时简称为“不确定度”。

不确定度从估计方法上可以分为两类:

A 类不确定度是指多次重复测量用统计方法计算出的分量,用 Δ_A 表示.

B 类不确定度是指用其他方法估计出的分量,用 Δ_B 表示.

这两类不确定度用方和根法合成

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1.2.1)$$

1) A 类不确定度 Δ_A

在进行无限次测量时($n \rightarrow \infty$),测量误差服从正态分布律,而实际测量中,只可能进行有限次测量,这时测量误差服从 t 分布(又称学生分布)律. A 类不确定度 Δ_A 的表达式为

$$\Delta_A = \frac{S_x}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \quad (1.2.2)$$

式中: $t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)$ 是与测量次数 n , 置信度 $(1-\alpha)$ 有关的量, 可以从表 1.2.1 中查得.

表 1.2.1

n	$\alpha=0.25$	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9646	9.9248
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8409
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7764	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0322
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9980	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693

$$S \text{ 为标准偏差, 表达式为 } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

实验室中一般要求测量次数 n 不大于 10, 在要求精度不高的情况下, 当 $6 \leq n \leq 10$ 时, 式(1.2.2)可简化为

$$\Delta_A = S_x \quad (1.2.3)$$

经计算当 $6 \leq n \leq 10$ 时, 取 $\Delta_A = S_x$, 置信概率近似为 0.95 或更大, 故而可直接把 S_x 的值当作测量结果的 A 类不确定度. 当 n 不在上述范围内时或要求精确误差估计时, 应查表得到相应的值.

2) B 类不确定度 Δ_B

B 类不确定度 Δ_B 分量的误差成分与不确定的系统误差相对应, 而后者存在于测量的各个环节之中, 因此 B 类不确定度的估计是测量不确定估算中的难点.

从教学的实际出发,我们只要求掌握由仪器误差引起的 B 类不确定度 Δ_B 的估计方法.

常用仪器的误差或误差限值,由生产厂家或实验室给出,用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示.实际测量中一般约定把 $\Delta_{\text{仪}}$ 简化地直接当作不确定度中用非统计方法估计的 B 类分量 Δ_B ,即

$$\Delta_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (1.2.4)$$

3) 总不确定度的合成

由式(1.2.1)、式(1.2.2)和式(1.2.4)可得

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{\left[\frac{S_x t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)}{\sqrt{n}} \right]^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (1.2.5)$$

当测量次数 n 符合 $6 \leq n \leq 10$ 条件时,简化为

$$\Delta = \sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (1.2.6)$$

当 $S_x < \frac{1}{3} \Delta_{\text{仪}}$, 或 Δ_A 对测量结果影响甚小,或只进行了一次测量, Δ 可简单地用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示.这只是一种近似或粗略的估算方法,并不意味着单次测量的不确定度小于多次测量的不确定度.

3. 间接测量结果不确定度的估计

实际生活中,大部分测量属于间接测量.间接测量结果由直接测量结果经过数学计算得到,也必然存在不确定度.

设间接测量所用的数学表达式为

$$\varphi = f(x, y, z, \dots)$$

式中 φ 为间接测量结果, $x, y, z, \dots$ 为直接测量结果,且它们相互独立. $x, y, z, \dots$ 的不确定度(分别为 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \dots$)必然影响间接测量结果,使 φ 也有相应的不确定度.不确定度是微量,相当于数学中的“增量”,所以间接测量结果不确定度的计算公式和数学中的全微分公式基本相同.不同之处在于不确定度 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$ 替代了 $dx, dy, dz, \dots$ 以及不确定度用“方和根”合成的统计性质.我们常用以下两式简化地计算间接测量结果 φ 的不确定度 Δ_φ :

$$\Delta_\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 \Delta_z^2 + \dots} \quad (1.2.7)$$

$$\frac{\Delta_\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} \right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} \right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z} \right)^2 \Delta_z^2 + \dots} \quad (1.2.8)$$

式(1.2.7)适用于 φ 为和差形式的函数,式(1.2.8)适用于积商形式的函数.

间接测量结果的表示方法为