

大学物理实验教程

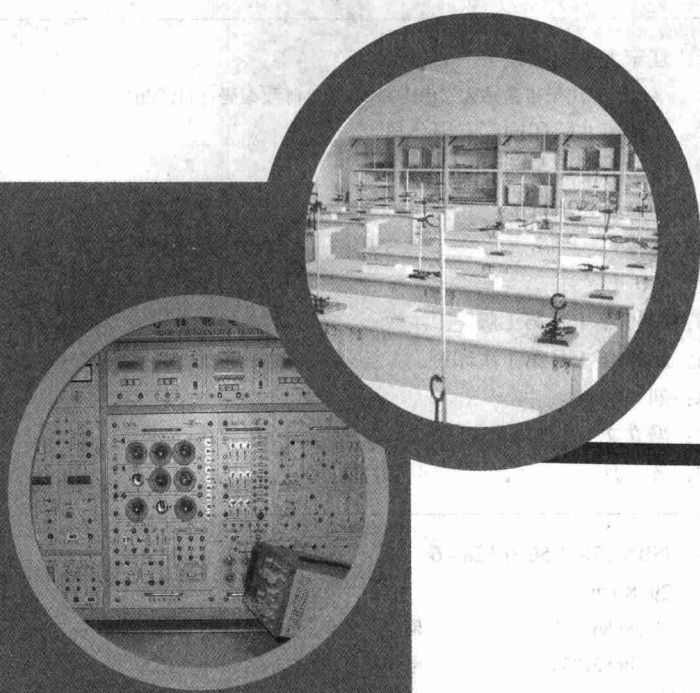
韩红梅 曹永华 王慧君 主编



辽宁大学出版社

大学物理实验教程

韩红梅 曹永华 王慧君 主编



辽宁大学出版社

© 韩红梅 曹永华 王慧君 2008

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验教程/韩红梅, 曹永华, 王慧君主编. —沈阳: 辽宁大学出版社, 2008 .1
ISBN 978-7-5610-5284-6

I. 大… II. ①韩…②曹…③王… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 006879 号

出 版 者: 辽宁大学出版社

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印 刷 者: 沈阳市北陵印刷厂有限公司

发 行 者: 辽宁大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 16.25

字 数: 410 千字

出版时间: 2008 年 1 月第 1 版

印刷时间: 2008 年 1 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 葵

封面设计: 冯立文

责任校对: 齐 月

书 号: ISBN 978-7-5610-5284-6

定 价: 29.80 元

联系电话: 024-86864613

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

邮购热线: 024-86851850

电子邮件: Lnupress@vip.163.com

前 言

本书是根据全国工科物理课程组制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合我校物理实验课程的实际，在 2003 年出版的《大学物理实验》的基础上修改编写而成的。它是河南科技学院物理实验中心全体教师和实验技术人员长期辛勤劳动的结果，是实验教学与改革的经验总结。

由于 20 世纪科学技术的发展，使人们愈来愈认识到物理实验的重要性以及在高等学校的教学中加强对学生进行物理实验训练的必要性。2002 年，我校的“物理实验”从原来的“大学物理”课程中分离出来，形成一门独立课程。多年来，我们努力进行课程建设和教学改革，逐渐形成了自己的教学特色，本教材将尽力反映教学和改革的成果及其发展趋势。

实验教学的根本目的是“培养学生科学实验能力，提高学生科学实验素质”。本教材以这一根本目的为主线进行编写，使学生获得具有一定系统性的物理实验基本知识、基本方法和基本技能。通过系统研究各实验项目之间的关系，并结合长期的物理实验教学实践，我们把整个教材分为四个部分，依次为误差与数据处理、基础性实验、提高性实验以及综合性和设计性实验。第一章较为系统地介绍了误差与不确定度及数据处理的理论与方法等基本知识，既考虑到理论上的严谨，又作了适当的简化，以使这些内容能为低年级的同学所接受掌握。第二章包括 13 个基础性实验，主要是基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法，主要是让学生对物理实验过程有个基本了解，掌握基本的实验知识和操作技能，为后续实验打基础。第三章选编了 19 个提高性实验，这部分内容是对前面实验的延伸，通过这些实验，可以让学生在物理实验基本知识、基本方法和基本技能方面得到较为系统和严格的训练。第四章选编了 10 个综合性和设计性实验，目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果，开阔学生的眼界和思路，提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力。各部分内容既具有层次性，又相互衔接，形成一个有机整体，以达到提高学生实验素养，培养其创新意识和能力方面的效果。

参加本教材编写的有:绪论、第一章、实验 6、实验 38、实验 37 由韩红梅编写,实验 3、实验 8、实验 14、实验 34、实验 41、实验 42 由王慧君编写,实验 1、实验 2、实验 5、实验 12、实验 27、实验 31、实验 32 由曹永华编写,实验 13、实验 16、实验 35 由曹军编写,实验 19、实验 23、实验 33、实验 39 由崔小敏编写,实验 22、实验 24、实验 25、实验 30 由夏莹编写,实验 9、实验 17、实验 18、实验 21、实验 28 由闫雷兵编写,实验 4、实验 7、实验 10、实验 36、实验 40 由张文庆编写,实验 11、实验 15、实验 20、实验 29 由任晓燕编写,附表由王慧君和张文庆编写。教研室全体同仁对教材的修订提出了许多宝贵意见,最后由韩红梅负责统稿。

限于编者水平,书中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正,以便改进。

编 者

2007 年 12 月

目 录

绪论	1
第一章 误差与数据处理	3
1.1 测量误差的基本知识	3
1.2 不确定度的估计	6
1.3 有效数字及其运算规则	10
1.4 数据处理基本方法	12
第二章 基础性实验	19
实验 1 长度的测量	19
实验 2 固体密度的测量	25
实验 3 万用表的使用	28
实验 4 惠斯通电桥应用	32
实验 5 示波器的使用	36
实验 6 重力加速度的测量	43
实验 6.1 单摆测量重力加速度	43
实验 6.2 谐振子测量重力加速度	44
实验 7 液体粘滞系数的测定	46
实验 8 液体表面张力系数的测定	49
实验 9 刚体转动惯量的测定	54
实验 9.1 扭摆法测刚体转动惯量	54
实验 9.2 转动定律法测刚体转动惯量	57
实验 10 薄透镜焦距的测定	61
实验 11 测定冰的熔解热	66
实验 12 不良导体导热系数的测定	68
实验 13 静电场的描绘实验	74
第三章 提高性实验	80
实验 14 铁磁材料的磁化特性研究	80
实验 15 霍尔效应及其应用	91
实验 16 黑白摄影与冲洗实验	99
实验 17 迈克耳逊干涉实验	107
实验 18 驻波实验	112

实验 19 气垫导轨实验	115
实验 19.1 测定匀变速直线运动的加速度	115
实验 19.2 验证动量守恒定律	116
实验 19.3 简谐振动的规律研究	118
实验 20 非线性元件伏安特性研究与测量	123
实验 21 惯性秤测质量	128
实验 22 牛顿环实验	131
实验 23 光的干涉实验	136
实验 23.1 菲涅耳双棱镜干涉	136
实验 23.2 杨氏双缝干涉	138
实验 24 光的衍射实验	141
实验 25 偏振光研究	144
实验 26 夫兰克—赫兹实验	147
实验 27 核磁共振实验	153
实验 28 铁磁材料磁致伸缩特性研究	157
实验 29 混合法测定比热容	163
实验 30 分光计的调节和使用	167
实验 31 音频信号光纤传输实验	173
实验 32 电位差计应用	179
第四章 综合性和设计性实验	186
实验 33 密立根油滴实验	186
实验 34 电表的改装与校准	192
实验 35 电子束实验	195
实验 35.1 电子束的电偏转	195
实验 35.2 电子束的电聚焦	199
实验 35.3 电子束的磁偏转	201
实验 35.4 电子束磁聚焦与电子荷质比 e/m 的测定	203
实验 36 声速的测量	209
实验 37 光电效应和普朗克常数的测定	213
实验 38 塞曼效应实验	222
实验 39 动态法测杨氏模量	229
实验 40 阿贝成像原理及空间滤波	233
实验 41 激光全息照相	236
实验 42 传感器特性研究	241
附表 国际单位制与物理常数	246

绪 论

一、物理实验课的地位与作用

物理学是一门实验科学,物理规律的研究都以实验为基础,并不断接受实验的检验。不仅如此,物理实验在探索和开拓新的科技领域中,在推动其他自然科学和工程技术发展中也起着重要的作用。在大学里,物理实验课是对学生进行科学实验基本训练的重要基础课程,是学生在大学里受到系统实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现,乃至研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学实验素质方面,都起着重要的作用。

二、物理实验课的目的

(1)通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,学习实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深对物理学原理的理解。

(2)使学生获得必要的实验知识和操作技能的训练,培养与提高学生的科学实验能力。

(3)培养和提高学生从事科学实验的素质,包括实事求是的科学态度,严谨踏实的工作作风,勇于探索的钻研精神,团结协作的精神,遵守操作规程、爱护国家财产的科学习惯。

三、物理实验课的基本程序

1. 实验前的预习

实验课的目的是培养学生的独立实验能力,学生在实验过程中一定要在教师指导下积极发挥自己的主观能动性,动手又动脑,而不是依赖教师的一般性介绍。要主动去做实验,就要深入地预习。课前要认真阅读实验指导书,明确实验目的和要求,理解实验原理,掌握测量方案,初步了解仪器的构造原理和使用方法等,在此基础上写好预习报告。有些实验还要求学生在课前自拟实验方案,自己设计线路图、光路图,拟定好数据表格等。

2. 课堂实验

进入实验室,严格遵守操作规程及注意事项操作。实验结束,要把测得的数据交给指导教师检验,经指导教师确认签字后方可离开实验室,对不合理的或者错误的实验结果,经分析后还要补做或重做。未经重新测试,不允许擅自修改实验数据。离开实验室前要整理好使用过的仪器,做好清洁工作。

3. 完成实验报告

实验报告是实验课学习过程的总结,而不仅是供教师评定成绩的资料。因此,实验报告要对实验过程和结果有分析和评价,要有自己的思考,所以实验报告是实验课学习的重要组成部分。

实验报告的基本要求是:字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备和结论明确。

报告的内容包括:

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验原理。在理解实验原理的基础上做到简明扼要、图文并茂(原理图和装置示意图等),并列测量和计算所依据的主要公式,注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件。

(4)实验仪器。列出实验中使用的仪器名称、型号、规格等。

(5)实验内容。概括性地写出实验进行的主要过程,特别是关键性的步骤和注意事项。

(6)数据处理与分析。一般要求以列表形式给出完整而清晰的原始测量数据,写出数据处理的主要过程,绘制图线并进行误差分析等,以醒目的方式完整地表示出实验结果。

(7)实验讨论。例如,对物理现象、实验结论和误差来源进行分析,对实验方案提出改进建议,或回答实验思考题,叙述实验体会等。

四、学生实验制度

(1)凡参加物理实验的学生,实验前必须认真预习,写出预习报告,经教师检查同意后方可进行实验。

(2)遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。室内严禁吸烟、吐痰和大声喧哗。上课时不准迟到,不准无故缺课。无正当理由迟到 10 分钟者,教师有权取消其本次实验资格;无故缺席者本次实验记零分。

(3)必须严格按照实验要求和仪器操作规程,积极认真地进行实验,并做好相关实验记录。对电学实验,线路接好后,先经教师或实验室工作人员检查无误后才可接通电源,以免发生意外。

(4)爱护仪器。进入实验室不能擅自搬弄仪器,实验中严格按仪器说明书操作,不得随意从他组乱拉仪器,不准擅自拆卸仪器;仪器发生故障应立即报告,不得自行处理;如有损坏,照章赔偿。

(5)做完实验,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐。经教师审查测量数据并签字后,整理好使用过的仪器,做好清洁工作,方能离开实验室。

第一章 误差与数据处理

物理实验的定性和定量测定是不可分割的两个方面。为了揭示物理量之间的内在数量关系,我们一定要动用测量器具对物理量进行测量,在进行测量的时候,总会有误差。这说明,由于测量仪器、测量方法、测量环境、测量人员的观察力等种种因素的局限,测量是不能无限精确的,测量结果与客观存在的真值之间总是存在一定的差异,即存在测量误差。因此,分析测量中产生的各种误差,尽量消除或减小其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,给出测量结果的不确定度就是物理实验和科学实验中必不可少的工作。为此,我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因及测量结果的不确定度的概念与估算方法等有关知识。

误差理论是普通计量学和数理统计学的重要组成部分。本课程仅仅应用数理统计的一些有关结论和误差理论的一些思想方法来处理实验中的一些问题,使同学们在误差理论的学习中有个良好的开端。

1.1 测量误差的基本知识

1.1.1 测量与误差

1. 直接测量和间接测量

可以用测量仪器直接读出测量值的测量称为直接测量,相应的物理量称为直接测量量。例如,用米尺测长度,用天平称质量,用电表测电流和电压等都是直接测量。

从一个或几个直接测量结果按一定的函数关系计算出来的过程,称为间接测量。相应的物理量称为间接测量量。

2. 等精度测量和不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一测量者,同一组仪器,同一种实验方法,温度和湿度等环境也相同),那么我们就没有任何依据可以判断某一次测量一定比另一次更准确,所以每次测量的精度只能认为是具有同等级别的。我们把这样进行的重复测量称为等精度测量。在诸测量条件中,只要有一个发生了变化,这时所进行的测量,就称为不等精度测量。一般在进行多次重复测量时,要尽量保持为等精度测量。

3. 测量误差

任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人员

进行的。由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性和人的实验技能与判断能力的影响等,使测量值与待测量的真值之间总存在着差异,我们把这种差异称为测量误差,测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示。

绝对误差 = 测量值 - 被测量的真值

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$$

被测量的真值是一个理想概念,一般是不知道的,在实际测量中常常用修正过的测量最佳值来代替,有时被测量有公认值或理论值,这时相对误差可用下列式子来表示:

$$\text{相对误差} = \frac{\text{测量最佳值} - \text{理论值}}{\text{理论值}} \times 100\%$$

1.1.2 误差的分类

误差按其性质和产生原因可分为系统误差、偶然误差和过失误差三类。

一、系统误差

系统误差是指在多次测量同一物理量的过程中,保持不变或以可预知方式变化的测量误差的分量。系统误差主要来源于以下几方面:

(1) 仪器的固有缺陷。例如,仪器刻度不准、零点位置不正确、仪器的水平或铅直未调整、天平不等臂等。

(2) 实验理论近似性或实验方法不完善。例如,用伏安法测电阻没有考虑电表内阻的影响,用单摆测重力加速度时取 $\sin\theta \approx \theta$ 带来的误差等。

(3) 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如,标准电池是以 20℃ 时的电动势数值作为标称值的,若在 30℃ 条件下使用时,如不加以修正就引入了系统误差。

(4) 实验者心理或生理特点造成的误差。例如,计时的滞后,习惯于斜视读数等。

对实验中的系统误差应如何处理呢? 可以通过校准仪器,改进实验装置和实验方法,或对测量结果进行理论上的修正加以消除或尽可能减小。发现和减小实验中的系统误差通常是一件困难的任务,需要对整个实验所依据的原理、方法、所用仪器和测量步骤等可能引起误差的各种因素一一进行分析。一个实验结果是否正确,往往就在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因而对系统误差不能轻易放过。对于那些既不能修正,又不能消除的系统误差应根据具体情况在测量误差(或测量不确定度)中反映出来。

二、偶然误差

由于偶然的或不确定的因素所造成的每一次测量值的无规则的、以不可预知方式变化的测量误差称为偶然误差,也称为随机误差。偶然误差是由实验中各种因素的微小变动引起的,主要有:

(1) 实验装置在各次调整操作时的变动性。例如,仪器精度不高,稳定性差,测量示值变动等。

(2) 观察者本人在判断和估计读数上的变动性。主要指观察者的生理分辨本领、感官灵敏程度、手的灵活程度及操作熟练程度等带来的误差。

(3) 实验条件和环境因素的变动性。例如,气流、温度、湿度等微小的、无规则的起伏变化,电压的波动以及杂散电磁场的不规则脉动等引起的误差。

这些因素的共同影响使测量结果围绕测量的平均值发生涨落变化,这一变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现,就某一测量而言是没有规律的,当测量次数足够多时,随机误差服从统计分布规律,可以用统计学方法估算随机误差。

无限多次测量中,偶然误差服从正态分布(高斯分布)规律,如图 1。其中 x 表示测量值, $\Delta x = x - \mu$ 为被测量的误差, μ 表示被测量的真值, $f(\Delta x)$ 为测量值的概率密度, $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{n}}$ 。图 1 中 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 之间的面积表示偶然误差在 $\pm \sigma$ 范围内的概率,经计算为 68.3%。从图中可以看出,偶然误差有如下特征:

- (1) 单峰性。绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。
- (3) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率趋近于零。
- (4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零。

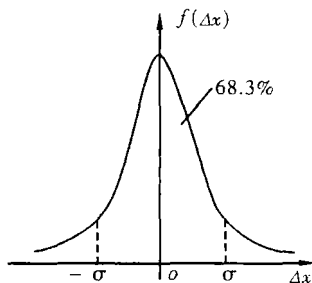


图 1 偶然误差的正态分布

从分布曲线可以看出:(1)在多次测量时,正负随机误差常可以大致抵消,因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减少随机误差的影响;(2)测量值的分散程度直接代表了随机误差的大小,测量值越分散,测量结果越分散,随机误差也就越大。

三、过失误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为过失误差。它是由于实验者使用仪器的方法不正确,粗心大意读错、记错、算错测量数据或实验条件突变等原因造成的。含有过失误差的测量值称为坏值或异常值,正确的结果中不应包含有过失。在实验测量中要极力避免过失,在数据处理中要尽量剔除坏值。

1.1.3 随机误差的处理

一、真值的估算

由于在实验时不可能作无限多次测量,测量次数只能是有限的,此时的随机误差的处理方法应该怎样呢?

假设对某一物理量在测量条件相同的情况下进行 n 次无明显系统误差的独立测量,测得 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。当没有明显的系统误差时,可以用 n 次测量的平均值作为真值 x_0 的最佳估计值,即 $x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$ 。当测量次数越多时, x_0 和 $\bar{x}$ 就越接近。因此,当无明显的系统误差时,可以用平均值表示测量结果。

二、标准偏差

常用标准偏差表示 n 个测量数据中各个数据的离散程度,即 x_0 和 $\bar{x}$ 的接近程度:

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

标准偏差小表示测量结果分布在平均值附近,测量的精度较高;标准偏差大表示测量结果较分散,测量的精度较低。

1.2 不确定度的估计

1.2.1 不确定度的基本概念和直接测量结果的表示

测量不可避免地存在误差,所以用测量结果作为被测量真值的估计值必定会有偏差。不确定度是指由于测量误差的存在而对被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。测量结果应给出被测量的量值 x_0 , 同时还要标出测量的总不确定度 Δ , 测量结果的表达式写成 $x = x_0 \pm \Delta$ 的形式, 这表示被测量的真值在 $(x_0 - \Delta, x_0 + \Delta)$ 的范围之外的可能性(或概率)很小。显然,测量不确定度的范围越窄,测量结果就越可靠。

直接测量时被测量的量值 x_0 一般取多次测量的平均值 $\bar{x}$; 若实验中有时只能测一次或只需测一次,就取该次测量值 x 。最后表示被测量的直接结果 x_0 时,通常还必须将已经确定的系统误差分量(即绝对值和符号都确定的已经估算出的误差分量)从平均值 $\bar{x}$ 中或一次测量值 x 中减去,以求得 x_0 , 即就已确定误差分量对测量值进行修正。比如,螺旋测微器的零点修正,伏安法测电阻中电表内阻影响的修正等。

1.2.2 直接测量不确定度的简化估算方法

不确定度是由误差引起的,由于误差的复杂性,准确计算不确定度是一件很复杂的事情,已经超出了本课程的范围。因此,物理实验中采用具有一定近似性的不确定度估算方法。

不确定度按其数值的估计方法可分为两类分量,即多次测量用统计方法估计的 A 类分量 Δ_A 和用其他非统计方法评定的 B 类分量 Δ_B 。总不确定度由 A 类分量和 B 类分量按“方、和、根”的方法合成,即

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1)$$

一、 A 类分量的估算

在实际测量中,一般只能进行有限次测量,这时测量误差不完全服从正态分布规律,而是服从称之为 t 分布(又称学生分布)的规律。在这种情况下,对测量误差的估计,就要在前述标准偏差公式的基础上再乘上一个因子。在相同条件下对同一被测量作 n 次测量,若只计算总不确定度 Δ 的 A 类分量 Δ_A ,那么它等于测量值的标准偏差 S_x 乘以一因子 $t_p(n-1)/\sqrt{n}$,即

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

式中: $t_p(n-1)$ 是与测量次数 n 、置信概率 P 有关的量。置信概率 P 及测量次数 n 确定后, $t_p(n-1)$ 也就确定了,可从专门的数据表中查得。在 $P = 0.95$ 时, $t_p(n-1)/\sqrt{n}$ 的部分数据可以从下表中查得。

表 1 $P = 0.95$ 时 $t_p(n-1)/\sqrt{n}$ 的数据

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_p(n-1)/\sqrt{n}$	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72

物理实验中测量次数 n 一般不大于 10,从该表中可以看出,当 $n = 6 \sim 8$ 时,因子 $t_p(n-1)/\sqrt{n}$ 近似取为 1,误差并不很大。这时,总不确定度 Δ 的 A 类分量 Δ_A 可简化为

$$\Delta_A = S_x \quad (3)$$

有关的计算还表明,在 $5 < n \leq 10$ 时,作 $\Delta_A = S_x$ 近似,置信概率近似为 0.95 或更大,即当 $5 < n \leq 10$ 时,取 $\Delta_A = S_x$ 已足以保证被测量的真值落在 $\bar{x} \pm S_x$ 范围内的概率接近或大于 0.95。所以我们可以直接把 S_x 的值当作测量结果的总不确定度的 A 类分量 Δ_A 。当然,测量次数 n 不在上述范围或要求误差估计比较精确时,要从有关数据表中查出相应的因子 $t_p(n-1)/\sqrt{n}$ 的值。

二、B 类分量的估算

作为基础训练,在物理实验中一般只考虑仪器误差所带来的总不确定度的 B 类分量。

测量是用仪器或量具进行的,任何仪器都存在误差。仪器误差一般是指在正确使用仪器的条件下,测量结果与真值之间可能产生的最大误差,用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。仪器误差产生的原因和具体误差分量的分析计算已超出了本课程的要求范围。我们约定,大多数情况下简单地把仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 直接当作总不确定度中用非统计方法估计的 B 类分量 Δ_B ,即

$$\Delta_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (4)$$

下表列出了物理实验中几种常用仪器的仪器误差。

表 2 常用仪器的仪器误差

仪 器 名 称	量 程	分度值(准确度等级)	仪 器 误 差
钢直尺	0 ~ 300mm	1mm	$\pm 0.1\text{mm}$
钢卷尺	0 ~ 1000mm	1mm	$\pm 0.5\text{mm}$
游标卡尺	0 ~ 300mm	0.02, 0.05, 0.1mm	分度值
螺旋测微计(一级)	0 ~ 100mm	0.01mm	$\pm 0.004\text{mm}$
TW-1 物理天平	1000g	100mg	$\pm 50\text{mg}$
TG928A 矿山天平	200g	10mg	$\pm 5\text{mg}$
水银温度计	-30 ~ 300℃	0.2, 0.1℃	分度值
读数显微镜		0.01mm	$\pm 0.004\text{mm}$
数字式测量仪器			最末一位的一个单位 或按仪器说明估算
指针式电表		$\alpha = 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0$	$\pm \text{量程} \times \alpha \%$

三、总不确定度的合成

由式(1)、(2)和(4)知,总不确定度为

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{t_P(n-1)}{\sqrt{n}} S_x\right)^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (5)$$

当取置信概率 $P = 0.95$, 测量次数 $5 < n \leq 10$ 时,

$$\Delta = \sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (6)$$

式(6)是物理实验中常用的不确定度估算公式。

如果因为 $S_x < \frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$, 或因估算出的 Δ_A 对实验的最后结果影响甚小, 或因条件限制而只进行单次测量, 这时的不确定度估算只能根据仪器误差、测量方法、实验条件以及操作者技术水平等实际情况, 进行合理估计, 不能一概而论。在一般情况下, 简化的做法是采用仪器误差或其数倍的大小作为单次直接测量的不确定度的估计值。当实验中只要求测量一次时, 取 $\Delta = \Delta_{\text{仪}}$ 并不意味着只测一次比多次测量时 Δ 的值小, 只说明 $\Delta_{\text{仪}}$ 和用 $\sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$ 估算出的结果相差不大。

有了总不确定度 Δ , 就可以算出相对不确定度 $E = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\%$, 测量结果表示为 $x = x_0 \pm \Delta$ 。

【例 1】用螺旋测微器测量某一铜环的厚度 7 次, 测量数据如下:

i	1	2	3	4	5	6	7
$H_i(\text{mm})$	9.515	9.514	9.518	9.516	9.515	9.513	9.517

求 H 的算术平均值、标准偏差和不确定度, 写出测量结果。

$$\text{【解】} \bar{H} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 H_i = \frac{1}{7} (9.515 + 9.514 + \cdots + 9.517) = 9.515 \text{mm}$$

$$\begin{aligned} S_H &= \sqrt{\frac{1}{7-1} \sum_{i=1}^7 (H_i - \bar{H})^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{6} [(9.515 - 9.515)^2 + (9.514 - 9.515)^2 + \cdots + (9.517 - 9.515)^2]} \\ &= 0.0018 \text{mm} \end{aligned}$$

$$\Delta_H = \sqrt{S_H^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} = \sqrt{0.0018^2 + 0.004^2} = 0.005 \text{mm}$$

$$\therefore H = 9.515 \pm 0.005 \text{mm}$$

计算结果表明, H 的真值以 95% 的置信概率落在 $[9.510 \text{mm}, 9.520 \text{mm}]$ 区间内。

1.2.3 间接测量的结果和不确定度的估计

对于间接测量 $N = f(x, y, z, \cdots)$, 设各直接测量结果为 $x = x_0 \pm \Delta_x, y = y_0 \pm \Delta_y, z = z_0 \pm \Delta_z, \cdots$, 则间接测量的结果 $N_0 = f(x_0, y_0, z_0, \cdots)$, 不确定度 Δ_N 可套用标准误差传递公式进行估算, 即

$$\Delta_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \cdots} \quad (7)$$

如果我们先对间接测量量 $N = f(x, y, z, \cdots)$ 函数式两边取自然对数再求全微分, 可得到计算相对不确定度的公式如下

$$\frac{\Delta_N}{N_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \cdots} \quad (8)$$

当间接测量所依据的数学公式较为复杂时,计算不确定度的过程也较为繁琐。如果函数形式主要以和差形式出现时,一般采用式(7);而函数形式主要以积、商或乘方、开方等形式出现时,用式(8)会使计算过程较为简便。间接测量的最终结果表示为: $N = N_0 \pm \Delta_N$ 。

【例2】已知某铜环的外径 $D = 2.995 \pm 0.006\text{cm}$, 内径 $d = 0.997 \pm 0.003\text{cm}$, 高度 $H = 0.9516 \pm 0.0005\text{cm}$, 试求该铜环的体积及其不确定度, 并写出测量结果表达式。

$$\text{【解】} V = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)H = \frac{3.1416}{4}(2.995^2 - 0.997^2) \times 0.9516 = 5.961\text{cm}^3$$

$$\ln V = \ln \frac{\pi}{4} + \ln(D^2 - d^2) + \ln H$$

$$\frac{\partial \ln V}{\partial D} = \frac{2D}{D^2 - d^2}, \frac{\partial \ln V}{\partial d} = -\frac{2d}{D^2 - d^2}, \frac{\partial \ln V}{\partial H} = \frac{1}{H}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_V}{V} &= \sqrt{\left(\frac{2D}{D^2 - d^2}\right)^2 \Delta_D^2 + \left(-\frac{2d}{D^2 - d^2}\right)^2 \Delta_d^2 + \left(\frac{1}{H}\right)^2 \Delta_H^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{2 \times 2.995 \times 0.006}{2.995^2 - 0.997^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 0.997 \times 0.003}{2.995^2 - 0.997^2}\right)^2 + \left(\frac{0.0005}{0.9516}\right)^2} \\ &= 0.0046 \end{aligned}$$

$$\Delta_V = 0.0046 \times V = 0.0046 \times 5.961 = 0.027\text{cm}^3$$

$$\therefore V = 5.961 \pm 0.027\text{cm}^3$$

通常约定不确定度最多用两位数字表示,且仅当首位为1或2时保留两位。尾数采用“只进不舍”的原则,在运算过程中只需取两位数字计算即可。

1.3 有效数字及其运算规则

1.3.1 测量结果的有效数字

在实验中所测得的都是含有误差的数值,因而测量结果应该反映出测量值的准确度,所以在记录数据、计算以及书写测量结果时,究竟写出几位数字有严格的要求,要根据测量误差和实验结果的不确定度来定。例如,根据高度和直径的测量值用计算器算出的圆柱体体积为 $V = 6237.1508\text{mm}^3$, $\Delta_V = \pm 4\text{mm}^3$, 由不确定度为 4mm^3 可知,第四位数字7已经是不准确的,它后面的四位数字1508没有意义。因此,圆柱体体积的间接测量结果应写为 $V = (6237 \pm 4)\text{mm}^3$, 6237 这四位数字前面的三位是准确数字,后面一位是存疑数字。

一、有效数字的定义

测量结果中所有可靠数字加上末位的存疑数字统称为测量结果的有效数字。

(1) 有效数字位数与仪器精度(最小分度值)有关,也与被测量的大小有关。

(2) 有效数字的位数与小数点的位置无关,单位换算时有效数字的位数不应发生变化。