

高等学校教材

大学物理实验简明教程 (第一册)

主 编 徐志洁 冯志勇 李 倩
副主编 胡 杰 安长星 吴丽君

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

大学物理实验简明教程

(第一册)

主 编 徐志洁 冯志勇 李 倩
副主编 胡 杰 安长星 吴丽君

内 容 简 介

全书内容共分六章,包括物理实验的数据处理、常用的物理实验方法、常用实验仪器及其使用、基础实验、综合应用实验、设计创新实验。全书强调实验物理学科的系统性和完整性,注重物理实验方法在实验中的运用;在数据处理方面,采用了国内、国际的标准与规范,体现了数据处理的严谨性和科学性。全书内容丰富,许多实验提供了多种实验方法和要求,涉及多个与机械、材料等学科有关的近代综合性实验,还设立了多个设计、创新性的实验课题,以适应机械类、材料类等专业的教学需要。

本书可作为高等学校非物理类各专业物理实验课程的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验简明教程. 1/徐志洁,冯志勇,李倩
主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013. 8
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0623 - 0

I. ①大… II. ①徐… ②冯… ③李… III. ①物
理学 - 高等学校 - 教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 169500 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 13.25
字 数 310 千字
版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

本书依照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，遵循“加强基础、重视应用、培养能力、锐意创新”的指导思想，在多年课程建设的基础上编写而成。

本书以应用能力、创新能力的培养为主线，设置多个与机械、材料等学科有关的近代综合性实验，还设立了多个设计、创新性的实验课题，以适应机械、材料类等专业的教学需要，使学生既能掌握基本的实验知识与技能，又能具备一定的综合应用能力和创新能力。

本书能完整地表达本课程所包含的知识，结构严谨。对实验原理的叙述深入浅出，对实验内容的说明通俗易懂，切实详尽，还纳入了许多教师的教学研究成果，如一些好的实验方法、数据处理方法等，有利于教学，便于学生自学。

本书在实验内容的编写上，把数据处理贯穿于定量测量的实验中，每个实验都有思考题，许多实验之后还有知识拓展，便于学生对重点知识的理解和对相关知识的全面了解，增强了学生分析、解决问题的能力。

本书的前言、绪论、第1章的第1~4节、第1章习题由徐志洁老师编写；第2章的第1节，实验1,9,12,16由李倩老师编写；第2章的第2节，第3章的第3节，实验3由冯志勇老师编写；第3章的第1,2,5节，实验10,14由宋建宇老师编写；第3章的第4节，实验7由吴丽君老师编写；第3章的第6节，实验8,15,17由胡杰老师编写；实验2,6,11,13由宁日波老师编写；实验4，书后附录由安长星老师编写；实验5由邵殿春老师编写。

物理实验教学是物理实验中心全体人员的集体工作。无论是在实验内容的安排还是在实验方法的改进上，都凝聚着全体任课教师的智慧和汗水。在本书的编写过程中，沈阳理工大学的金正一教授、徐送宁教授、李凤岐教授，徐文省、李洪奎、乌日娜、王德力等教师提出了许多宝贵的意见。在此向他们表示诚挚的敬意和衷心的感谢！

本书难免有不妥之处，恳请同行专家和读者们批评、指正。

编 者

2013年5月

目 录

绪论	1
第1章 物理实验的数据处理	5
1.1 测量与误差	5
1.2 不确定度评定的基础知识	7
1.3 实验数据的有效位数	19
1.4 常用的实验数据处理方法	22
第2章 常用的物理实验方法	35
2.1 常用的物理实验方法简介	35
2.2 计算机在物理实验中的应用	40
第3章 常用实验仪器及其使用	48
3.1 长度测量的常用仪器	48
3.2 质量测量的常用仪器	52
3.3 时间测量的常用仪器	55
3.4 电磁量测量的常用仪器	57
3.5 温度测量的常用仪器	73
3.6 光学量测量的常用仪器	77
第4章 基础实验	82
实验1 测定金属的杨氏弹性模量	82
实验2 液体黏滞系数的测定	90
实验3 示波器的应用	98
实验4 分光计的调整及三棱镜折射率的测定	108
实验5 光的衍射及光栅常数的测量	118
第5章 综合应用实验	123
实验6 用超声驻波像测定声速	123
实验7 光电效应及其应用	132
实验8 全息照相实验	138
实验9 核磁共振实验	147
实验10 高温超导材料电阻-温度特性的测量	156
实验11 介质吸收光谱的测量	160

实验 12 光纤传感器及光电传感器实验·····	165
第 6 章 设计创新实验 ·····	174
实验 13 直流电桥的设计·····	174
实验 14 集成温度传感器的特性及其应用·····	184
实验 15 激光散斑摄影术·····	188
实验 16 设计测量硅光电池的相对光谱响应·····	193
实验 17 非接触式测距·····	196
附录 1 法定计量单位 ·····	198
附录 2 常用物理常量表(2013 年国际推荐值) ·····	201
参考文献 ·····	203

绪 论

一、物理实验课的地位、任务、基本要求

(一) 物理实验课的地位

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法,以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理实验是大学生入学后系统地接受实验技能训练的开端,也是培养学生创新思维和创新能力的课堂。

(二) 物理实验课的任务

大学物理实验课遵循“加强基础、重视应用、培养能力、锐意创新”的指导思想,主要完成以下教学任务:

1. 培养与提高学生的科学实验能力,包括独立地阅读实验教材(或资料),掌握实验原理;了解实验仪器的基本构造,掌握仪器的使用方法;正确地记录数据,完成实验内容;对实验数据进行处理、分析,绘制实验曲线;说明实验结果,写出合格的实验报告等。

2. 培养与提高学生的创新能力。在具备一定实验能力的基础上,让学生接触一些技术先进、应用广泛的近代综合性实验及设计、研究性实验,以开阔学生的视野、激发学生的学习兴趣,增强学生的探索精神,提高学生的动手能力以及分析、解决实际问题的能力。

3. 培养与提高学生的科学实验素养,使学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的工作态度,遵守纪律、爱护公共财物的优良品德。

(三) 物理实验课的基本要求

大学物理实验应包括普通物理实验(力学、热学、电学、光学实验)和近代物理实验,内容涵盖基础实验、近代综合实验、设计创新实验等,教学内容的基本要求如下:

1. 掌握测量误差与不确定度的基本知识,学会用不确定度评估测量结果,掌握一些常用的实验数据处理方法,包括列表法、作图法和最小二乘法,以及用计算机通用软件处理实验数据的基本方法等。

2. 掌握基本物理量的测量方法,例如长度、质量、时间、温度、压力、电流、电压、电阻、折射率、普朗克常量等常用物理量及物性参数的测量,加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

3. 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用,例如比较法、转换法、放大法、平衡法、补偿法、模拟法、干涉法和衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。



4. 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用,例如长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、常用电源和光源等常用仪器。还应掌握在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,例如激光技术、传感器技术等。

5. 掌握常用的实验操作技术,例如零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除、根据给定的光路图正确地摆放各个光学元件等。

二、上物理实验课的基本程序

(一) 课前预习

预习应以理解实验原理为主,必须弄清楚待求量与实测量之间的关系,基本了解实验的大体过程,以便在做实验时能抓住关键内容。在上实验课之前,必须按照预习报告的要求把预习情况认真地填写好,并对实验仪器有一定的了解。可以把预习中遇到的问题写出来,在以后做实验时注意并加以解决,这样能达到更好的效果。

(二) 上实验课

课堂上进行实验是实验课的中心环节。

1. 教师讲解

教师就实验的基本原理(包括物理原理或实验原理)、主要的实验内容、注意事项等作简要的讲解,对于设计性实验提出相应的要求。

2. 调整仪器

首先应对照实验仪器进一步熟悉、掌握仪器的工作原理和使用方法,然后按要求进行调节,如天平的水平和平衡调节、光路的同轴和等高调节、各类仪表的零点调节,等等。

3. 测量数据

通常是用较短的时间粗略地测量,即调整或选定测量范围、测量间隔以及仪器的量程,大致了解测量规律,然后重新开始仔细地测量。

4. 记录数据

记录中至少要包括实验日期、实验题目、实验条件(如电流、电压值、室温、大气压等一些与测量相关的量)、测量值(含计量单位、数量级)、仪器名称、型号、量程、准确度等。将实验数据完整、清晰地记录在记录本(或预习纸)上,数据之间应留有一定的间隙,以便补充或修改。当时认为不对的数字也不要随便毁掉,应在此数据上面轻轻地打一个记号,如“×”,以待进一步验证。这是因为原以为错误的数字很可能没有错或者可能具有相当的参考价值。记录时一定要注意数据的有效位数,并加以简要说明。做这样记录的目的是可在经过了一段时间之后也能回忆起当时做实验的基本状况。做实验时应避免连一本笔记都不带,用零散的纸片简单、草率地记个数据,或先做草率的记录再转抄的做法。

一般来讲,实验是从不清楚至清楚,从各种正确与错误的多个推理和判断中步步前进,最终获得正确结果的过程,这一过程恰好是学习实验的重要过程,不能简单地问一问其他组的同学,甚至模仿其他组的数据。做实验固然需要正确的结果,但更需要亲手实践,这在

实验课的学习中是最重要的。若两人同用一台仪器做一个实验,则应分工协作、共同完成好实验。

5. 教师签字

实验数据或最终的实验结果及仪器的还原情况需由教师检查,确认合格并签字后,本次实验才算完成;否则应重新做实验、测量数据、整理仪器等。

(三) 写实验报告

实验报告是对实验工作的全面总结,要简明扼要、准确地表达实验的全貌。报告要求文字通顺,字迹端正,图表规范,结果正确,讨论认真。做完实验应养成尽快写实验报告的习惯,因为这样做可避免遗忘,及时地发现问题、解决问题。

实验报告应包括以下内容:

1. 实验名称

写明实验的题目。

2. 实验目的

简要说明实验的目的。

3. 实验原理

应包括理论依据或实验仪器的原理,要列出主要公式,画出原理示意图,包括电路图或光路图等。

4. 实验内容(步骤)

必须写明重要而且不能颠倒顺序的实验步骤,写清注意事项。

5. 实验数据

应当用表格形式表示,注意写清楚数据的有效位数、数量级、计量单位、重要的实验条件及所使用仪器的型号、规格、仪器的分度值等。

6. 数据处理

对于重要的计算过程及不确定度的评定过程应简略地表示出来,较复杂且重复性的计算过程可用表格形式表示。计算完毕时要注意测量结果的表示。

7. 问题讨论

包括对测量结果影响较大因素的接近量化的分析讨论,实验方法的改进,实验中应注意的问题等方面的内容。

虽然现行的实验报告有固定的格式,但对每个实验报告的要求并不是千篇一律的,要根据不同的实验内容和要求,侧重某一些方面来写。在写实验报告之前,应当用较短的时间回想一下本实验的重点、难点、体会较深之处等,防止和避免完全填表式的做法。

三、做物理实验需遵守的有关规定

1. 学生进入实验室之前必须按要求完成预习报告,教师检查同意后,方可进行实验。

2. 遵守课堂纪律,保持安静、整洁的实验环境。

3. 使用电源时,必须经过教师检查线路后才可接通电源。

4. 要爱护仪器。学生进入实验室后,不得擅自搬弄实验仪器。实验中要严格按照实验内容和仪器说明书的要求进行操作,若发现仪器损坏,须立即报告老师并照章赔偿。公用



的工具用完后应立即放回原处。

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。经过教师检查测量数据和仪器还原情况并签字后,方可离开实验室。

6. 实验报告(还包括实验预习报告及相应的数据处理结果,如坐标纸等)应在下次做实验时统一交给老师。

第1章 物理实验的数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察物理现象,而且需要对物理量进行定量测量并找出各个物理量之间的内在联系。

由于测量原理及测量方法的不完善、测量仪器的准确度不够高、测量环境的不理想、测量人员的实验技能不精湛等诸多因素的影响,所有的测量都只能做到相对准确。随着科学技术的不断发展,人们的实验知识、手段、经验、技巧的不断提高,测量的准确程度将会越来越高,但测量值不可能绝对准确。因此,作为一个测量结果,不仅应该给出被测对象的量值和单位,而且必须对量值的可靠性作出评价。

本章主要介绍测量与误差、测量结果的不确定度评定、实验数据的有效位数、常用的实验数据处理方法等基本知识。这些知识不仅在本课程的实验中会经常用到,而且是今后从事科学实验工作应该了解和掌握的。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

测量一般是指以确定被测对象量值为目的的全部操作过程。在这个过程中,待测量与预先选定的计量标准(如仪器、仪表等)之间进行相互比较。根据国家计量技术规范《JJF 1059—1999测量不确定度评定与表示》(以下简称《JJF 1059—1999》),量值一般是指由一个数乘以计量单位所表示的特定量的大小。

测量的分类方法有许多种,通常按照下列方法进行分类。

1. 直接测量和间接测量

按照测量方法来划分,可分为直接测量和间接测量两大类。

不必测量与被测量有函数关系的其他量就能得到被测量的测量称为直接测量。如用游标卡尺测量长度,用等臂天平测量物体的质量,用电流表测量回路电流,用秒表测量时间间隔等都是直接测量。所得的物理量如长度、质量、电流、时间等称为直接测量值。

有些量很难进行直接测量,需依据它与某几个直接测量值的函数关系求出,这样的测量称为间接测量。间接测量可用如下函数关系表示:

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_N) \quad (1.1.1)$$

式中, $x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_N$ 为直接测量值, y 为间接测量值。例如,某种物体的密度 ρ 是通过测量质量 m 、体积 V 间接得到的,即 $\rho = \frac{m}{V}$ 。其中质量 m 、体积 V 是直接测量值,密度 ρ 是间接测量值。

2. 单次测量和多次测量

根据测量次数的不同来划分,测量又可分为单次测量和多次测量。为了提高测量的准确度,在重复性条件下进行多次测量,即为多次测量。一些物理量在一定测量条件下会迅



速地变化,这时就不能进行多次重复测量而只能进行单次测量;有时一些物理量不必进行太精确的测量,也可进行单次测量。

重复性条件包括相同的测量程序、相同的观测者、在相同的条件下使用相同的测量仪器、相同地点、在短时间内重复测量。

3. 静态测量和动态测量

按照被测量是否随时间变化来划分,测量又可分为静态测量和动态测量。

按照测量技术来划分,可分为比较法、放大法、平衡法、补偿法、转换法、模拟法、干涉法和衍射法等。

1.1.2 (测量)误差

根据《JJF 1059—1999》,真值(记为 μ)的定义为:与给定的特定量定义一致的值。可理解为某一物理量在一定客观条件下存在的真实大小。由于测量仪器、实验条件、测量方法、操作人员等诸多因素的限制,测量不可能无限准确。测量结果(记为 x)减去被测量的真值 μ 称为(测量)误差,记为 δ ,可表示为

$$\delta = x - \mu \quad (1.1.2)$$

1.1.3 随机误差与系统误差

1. 随机误差(或称偶然误差)

在同一量的多次测量中,一些影响量的变化是不可预期或由随机的时间、空间变化量而引起的,这种效应称为随机效应(或称偶然效应)。随机效应的存在,使得测量结果在测量的平均值附近起伏变化,即随机效应导致重复观测中的分散性。测量结果与重复性条件下对同一量进行无限多次测量所得结果的平均值之差称作随机误差。随机误差可通过增加测量次数来减小,但无法完全消除。在一般情况下,测量次数不宜过大。因为测量次数过大,就很难保证测量条件的恒定,而且可能带来其他不确定的因素。

2. 系统误差

在对同一被测量的多次测量过程中,有些影响量是可预知的、可识别的,它们总是使测量结果向一个方向偏离,有些偏离的数值恒定或按一定规律变化,这种效应称为系统效应。在重复性条件下,由系统效应引起的误差称作系统误差。它不能通过增加测量次数来减小或消除,而需针对不同情况采用不同的方法予以消减。系统误差的来源主要有以下几个方面:

(1) 人员

这是由于观察者感官、习惯或技术不熟练等因素所引入的,例如,读数时总是偏大或偏小。

(2) 仪器

这是由于仪器本身的缺陷或未按规定的条件调整、使用仪器所造成的,例如,在使用前对仪器零点的校正不准确,等等。

(3) 方法

这是由于理论或实验方法本身不完善所造成的,例如,用伏安法测量电阻时,未计算电表的内阻,等等。

(4) 环境

由于外界环境(如温度、电压、光照、电磁等)恒定偏离规定的条件而产生的,例如,较精确地测量某一金属材料的长度时,由于外界环境温度偏高而使测量结果偏大,等等。

对于实验中存在的系统误差,可以通过校准仪器、改进设计方案、选择更好的实验方法、进行合理的理论修正、稳定外界条件等途径来基本消除或减小。对于那些既不能修正,又不能消除的系统误差,应当根据具体的情况,在测量结果中反映出来。

系统误差可分为定值系统误差、线性变值系统误差、正弦规律的系统误差和复杂规律的系统误差等。除了复杂规律的系统误差外,系统误差的处理有几种较典型的实验方法,具体的内容将在第2章第1节及以后的物理实验课中进行简单介绍。

1.1.4 几个常见的基本术语及其概念

《JJF 1059—1999》给出几个在大学物理实验中经常遇到的术语及其简单解释。

注 方括号[]中的文字一般可省略。

1. [可测量的]量(liàng)

现象、物体或物质可定性区别和定量确定的属性。

术语“量”可指一般意义的量,如长度、温度等,或指特定量,如某一根棒的长度、某种液体的温度等。

2. 被测量(liàng)

被测量是指作为测量对象的特定量,例如,给定的水样品在100℃时的蒸汽压力。对被测量的详细描述,可要求包括对其他相关量(如时间、温度和压力等)做出的说明。

3. 测量结果

由测量所得到的赋予被测量的值称为测量结果。

对“测量结果”的说明详见下一节内容。

4. 测量准确度

测量结果与被测量的真值之间的一致程度称为测量准确度。

这是一个定性的概念。一致程度若需定量表示,则可用不确定度表征真值基本处于“测量结果 $\pm$ 不确定度”的区间之内。关于不确定度的相关知识详见下一节内容。应区分准确度与精密度、正确度的不同。在测量结果中,准确度反映的是系统误差和随机误差综合的影响程度;精密度反映的是随机误差的影响程度;正确度反映的是系统误差(简称系差)的影响程度。

5. [测量结果的]重复性

在相同的测量条件下,对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性称为重复性。

重复性可用测量结果的分散性定量地表示,详见下一节内容。

1.2 不确定度评定的基础知识

不确定度这一概念及其评定在现代测量和数据处理中占有十分重要的地位,但以往各国对不确定度的表示和评定却有着不同的看法和规定,这无疑影响了国际间的交流与合作。1993年,国际标准化组织(ISO)等七个国际组织联名发布了《测量不确定度表示指南》(修订版),我国也于1999年颁布了国家计量技术规范《JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示》,使得涉及测量的技术领域和部门均可用统一的准则对不确定度进行评定和表示。



1.2.1 测量不确定度的概念

在测量中,由于预先选定的标准(如各类的仪器、仪表)并非十全十美,操作人员每次判断、读数及不同操作人员之间判断上的差异,测量方法不够完善,再加上环境的变化等,不仅使得测量标准发生变化,而且使得各个直接测量值也发生变化,因而对于某一待测量来讲,其数值不是恒定的而都有所起伏,如图 1.2.1 所示,说明误差是不可避免的。

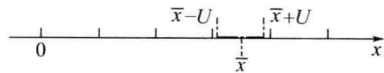


图 1.2.1 被测量之值的分散性示意图

人们进行的任何测量,只能无限地逼近真值而不能测得真值。因此,真值无法准确确定。因为一些实验条件无法完全被掌握(或控制),所以误差是不能准确地确定出来的。由(1.1.2)式可知,测量结果 x 也是一个不确定的量。

那么如何表示测量结果呢?人们自然会想到用算术平均值来表示。但这是否能全面地反映测量的水平呢?显然这种表示方法是不够全面的。

由于误差的存在,各个被测量(量)之值会比其算术平均值 $\bar{x}$ 大或小,即以 $\bar{x}$ 为中心,各个被测量之值以一定概率在范围 U 内浮动(如图 1.2.1 所示),称 U 为扩展不确定度,它是确定测量结果区间的量,大部分合理赋予的被测量之值分布在此区间内。这样可把测量结果表示成

$$x = \bar{x} \pm U (\text{单位}) \quad (1.2.1)$$

无系统误差时,若测量次数无限增加,则算术平均值 $\bar{x}$ 必然趋近于真值 μ 。实际上,在做有限次数的测量时,算术平均值 $\bar{x}$ 也是真值的最佳估值。在表示测量结果时,不仅要给出最可信赖的被测量之值,而且还要给出这一量值不能确定的程度,用一个区间 $(\bar{x} - U, \bar{x} + U)$ 来表示,即被测量之值在 $(\bar{x} - U, \bar{x} + U)$ 范围内浮动。

根据《JJF 1059—1999》,不确定度定义为表征合理地赋予被测量之值的分散性,是与测量结果相联系的参数。扩展不确定度表征被测量之值所处的范围,它表示被测量不能够确定的程度。

本书用扩展不确定度作为表示测量结果的参数,认为当重复测量的次数足够多时,对被测量可能值的分布作正态分布的估计,并取置信概率为 95%。相当于进行 20 次测量,可能有 1 个被测量之值超出 $(\bar{x} - U, \bar{x} + U)$ 的范围。

说明 (1) 扩展不确定度 U 越小,说明测量的准确度越高;反之, U 越大,说明测量的准确度越低。

(2) 一般情况下, U 取 1~2 位有效位数。为简单起见,本书规定直接用模拟式仪器、仪表读数时,应根据表盘上每格代表的值(即分度值)来决定扩展不确定度 U 取 1 位或是 2 位有效位数;其他情况 U 取 2 位有效位数,且被测量之值的最末位与 U 的最末位对齐(两者的数量级和计量单位均应相同),最末位的后一位位数的取舍一般遵循四舍五入原则。如某一被测量之值为 1.234 6 m,其扩展不确定度为 0.016 m,不确定度的最后一位为千分位,应将被测量之值保留到千分位,最后测量结果为

$$1.235 \pm 0.016 \text{ m}$$

1.2.2 实验标准差、贝塞尔公式

多次重复测量某一量 X 所得的值 x 在某一个值的附近起伏变化,这种测量值的分散性用实验标准差来描述。实验标准差可用贝塞尔公式进行计算:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.2.2)$$

式中, $s(x)$ 表示实验测量列中单次测量结果的实验标准差, $k=1, 2, 3, \dots, n$ 为测量次数, x_k 为被测量 x 的第 k 次测量值。 x_k 与 $\bar{x}$ 之差称为残余偏差, 记为 V_k , 即 $V_k = x_k - \bar{x}$, $\bar{x}$ 为被测量 x 的 n 次测量值的算术平均值, 可表示为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (1.2.3)$$

因为测量结果用(1.2.1)式表示, 其中算术平均值可用(1.2.3)式计算, 所以应求出 n 次重复测量平均值的标准差。可以证明, 平均值标准差 $s(\bar{x})$ 与 $s(x)$ 之间存在关系式:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (1.2.4)$$

直接用(1.2.2)式、(1.2.3)式、(1.2.4)式计算标准差较麻烦, 但用具有统计功能的小型计算器便能非常方便地完成这一计算。现以较普遍使用的计算器为例, 简述平均值标准差的计算方法。

例 1.2.1 用千分尺测量某一圆柱体的直径 d , 测量数据如表 1.2.1 所示, 求其算术平均值的标准差。

表 1.2.1 测量某一圆柱体直径的实验数据表

测量次数 n	1	2	3	4	5
直径 d/mm	9.855	9.831	9.868	9.871	9.846
测量次数 n	6	7	8	9	10
直径 d/mm	9.849	9.836	9.842	9.854	9.867

解 使用计算器的操作顺序如下:

①按 on 键, 打开计算器。

②按 2ndF 键, 再按 stat 键, 使计算器进入统计功能状态, 这时显示屏上出现 stat 字样。

③每输入一个数据, 屏上便显示该数据; 再按 data 键, 将这一数据输入计算器中, 此时在屏上显示输入的次数。

④重复步骤③, 直到把全部数据输入完为止。

⑤可分别按计算器上的 $\bar{x}$ 和 s 键, 得到最佳测量值(即算术平均值)以及实验标准差:

$$\bar{d} = \bar{x} = 9.8519 \text{ mm}, s(x_i) = s = 0.014 \text{ mm}$$

由(1.2.4)式, 有

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \frac{0.014}{\sqrt{10}} = 0.0044 \text{ mm}$$

1.2.3 标准不确定度、标准不确定度与扩展不确定度的关系、B 类标准不确定度的评定、相对不确定度

1. 标准不确定度

用标准差来表示的测量不确定度称为标准不确定度。



标准不确定度按评定方法可分为两种: A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度。

(1) A 类标准不确定度

用对“观测列”进行统计分析的方法来评定标准不确定度,称为标准不确定度的 A 类评定方法。(1.2.5)式计算的标准差就是某一被测量 x_i 的 A 类标准不确定度,记作 $u_A(x_i)$ 。前面例 1.2.1 中计算平均值的标准差就是 A 类标准不确定度。在进行标准不确定度的 A 类评定时,要求在重复性的条件下对某一被测量 x_i 进行 n 次足够多的独立观测,以得到更为客观的 A 类标准不确定度。将(1.2.2)式与(1.2.4)式合并,得到某一被测量 x_i 的 A 类标准不确定度的一般表达式为

$$u_A(x_i) = s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.2.5)$$

式中的 s 为按计算器统计功能中的“s”键得到的实验标准差。

(2) B 类标准不确定度

用对“观测列”进行非统计分析的方法来评定标准不确定度,称为标准不确定度的 B 类评定方法。用 B 类评定方法计算的标准不确定度称为 B 类标准不确定度,它也可以用标准差(或方差)来表征,记作 $u_B(x_i)$ 。

综上所述, A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度均可用标准差(或方差)来表征,因此它们均可按标准差(或方差)的方法进行处理(如合成)。

(3) 合成标准不确定度

当测量结果是由若干个其他量的值求得时,按照其他各个量的方差和协方差算得的标准不确定度称为合成标准不确定度。它是测量结果标准差的估计值。

当全部直接测量值 x_i 彼此互不相关或互相独立时,若用 $u(x_i)$ 表示 x_i 的合成标准不确定度,用 $u_A(x_i)$ 表示某一被测量 x_i 的 A 类标准不确定度,用 $u_B(x_i)$ 表示 x_i 的 B 类标准不确定度,则

$$u(x_i) = \sqrt{u_A^2(x_i) + u_B^2(x_i)} \quad (1.2.6)$$

$u(x_i)$ 可以只有 A 类标准不确定度 $u_A(x_i)$, 只有 B 类标准不确定度 $u_B(x_i)$, 或者两类都有。

设间接测量值 y 与 N 个输入量 x_i (直接测量值) ($i=1, 2, 3, \dots, N$) 的函数关系式为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$$

y 的不确定度与各个输入量 x_i 的不确定度以及它们之间的函数关系有关,各个 x_i 是 y 的不确定度的来源。寻找不确定度来源时,可从操作人员、测量仪器、测量方法、环境条件等多方面考虑。在物理实验中,一般只考虑 x_i 作为 y 的直接测量值的情况。

当全部输入量 x_i 互不相关或互相独立、不考虑协方差(在本教材中,不作特殊说明都不考虑协方差)时,若用 $u(x_i)$ 表示输入量 x_i 的合成标准不确定度,则 y 的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 为

$$\begin{aligned} u_c(y) &= \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N} u(x_N) \right)^2} \end{aligned} \quad (1.2.7)$$

式中, $u(x_i)$ 是 x_i 的 A 类标准不确定度 $u_A(x_i)$ 与 B 类标准不确定度 $u_B(x_i)$ 的合成, 由 (1.2.6) 式可求出。偏导数 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 表征各个输入量 x_i 的合成不确定度 $u(x_i)$ (可只有 A 类标准不确定度 $u_A(x_i)$ 或只有 B 类标准不确定度 $u_B(x_i)$) 对间接测量值 y 的影响。

在评定 y 的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 时, 如果某一直接测量值 x_i 的 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i)\right)^2$ 与其他各项相比很小, 那么可以略去此项。如果某一直接测量值 x_i 的 A 类标准不确定度 $u_A(x_i)$ 远远小于 B 类标准不确定度 $u_B(x_i)$, 或者 B 类标准不确定度 $u_B(x_i)$ 远远小于 A 类标准不确定度 $u_A(x_i)$, 那么可以略去非常小的一项。

对于直接测量, 可以列出 $y = x$ 的关系式, 因为 $\frac{\partial y}{\partial x} = 1$, 所以直接测量实际上是间接测量的特例。对于直接测量值的合成标准不确定度可由 (1.2.6) 式求出。

目前, 在国际、国家实物基准的比对以及一些物理常量的测量中, 直接用合成标准不确定度来表示测量结果, 而在工业、商业及与健康或与安全有关的某些领域, 往往要求提供更高的置信概率, 即更大的区间来表示测量结果。本书采用后者, 即用扩展不确定度 U 来表示测量结果。

2. 标准不确定度与扩展不确定度的关系

标准不确定度 $u_c(y)$ 乘以包含因子 k , 得到扩展不确定度 U 。如前所述, 它是确定被测量分布区间的量, 被测量之值的大部分分布在此范围内, 即

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (1.2.8)$$

式中, k 与被测量的分布、置信概率以及自由度等有关, 为简化, 本书中未做说明的, 置信概率一般都取 95%, 这样对于被测量值的各种分布类型, 包含因子 k 均取 2, 即

$$U = 2u_c(y) \quad (1.2.9)$$

也就是说, 扩展不确定度可由合成标准不确定度 $u_c(y)$ 乘以 2 获得。测量结果可表示成

$$y = \bar{y} \pm U \quad (\text{单位}) \quad (1.2.10)$$

式中, $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_N)$, 为测量结果的算术平均值。

3. B 类标准不确定度的评定

在物理实验中, 通常把仪器的标准不确定度作为用该仪器测量某些量的 B 类标准不确定度, 记为 u_c , 因此

$$u_B(x_i) = u_c(x_i)$$

按不同的情况, 仪器的 B 类标准不确定度的评定如下:

(1) 给出参考数据的情况

由生产部门、计量部门的技术文件, 如校准报告、技术手册或其他资料所提供的参考数据。

① 给出仪器的扩展不确定度

已知仪器的扩展不确定度 $U_c = a$, 根据 (1.2.9) 式, 可求得仪器的 B 类标准不确定度为 $u_c = \frac{a}{2}$ 。

② 给出仪器的误差限

仪器的误差限 (最大允许误差) 是指在技术规范、规程中, 给定的某一型号测量仪器所