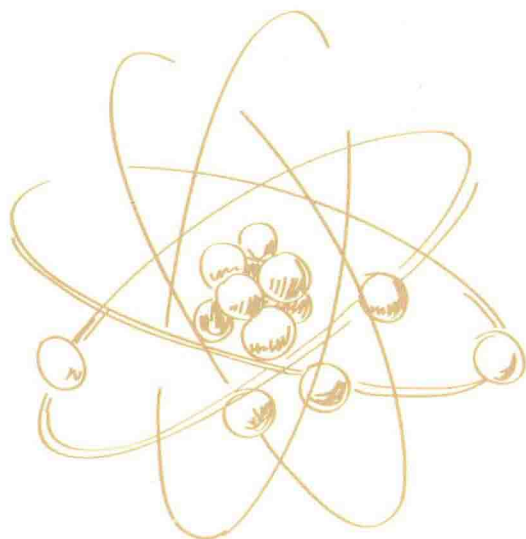




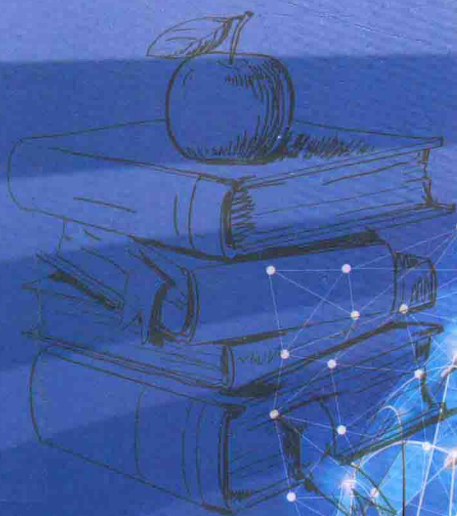
“十三五”普通高等教育规划教材



大学物理实验

DAXUEWULI SHIYAN

主 编 张志国



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”普通高等教育规划教材

大学物理实验

主 编 张 志 国

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是在北华大学工学、林学、医学等各专业历届大学物理实验讲义基础上,以现有的实验设备为基础,结合我国高等学校本科应用型人才培养中基础物理实验教学的特点和要求,经多次修改提高编写而成。全书主要包括物理实验基础知识(测量误差及实验数据处理知识、实验中常用的测量方法)、实验室常用实验仪器和量具、实验项目、附录等,实验项目共计40个实验,可供不同类型专业和课程学时的实验教学进行选择。

本书可作为高等学校农学、医学和工学等各学科门类下的各本科专业的物理实验课程的教学用书,也可以供其他有关的科技工作者和教师参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张志国主编. --北京:北京邮电大学出版社,2017.12

ISBN 978-7-5635-5081-4

I. ①大… II. ①张… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第099625号

书 名	大学物理实验
主 编	张志国
责任编辑	刘国辉
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www3.buptpress.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	16.5
字 数	409千字
版 次	2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-5081-4

定价:39.00元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

编写组人员名单

主编 张志国

编者 (按姓氏笔画排序)

于连波 冯正南 曲长红 华 伟

刘军胜 张利云 张志国 张明辉

张淑萍 李雅丹 姜一平 贾 辉

韩 莉 谭 翀

前 言

物理实验课是高等学校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课覆盖面广,具有丰富独特的实验思想、方法和手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力,提高学生科学素质的重要基础课程。物理实验课在培养学生严谨的科学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面,具有其他实践类课程不可替代的作用。

编写本教材,对教学内容的基本要求主要突出以下几个特点:

第一,掌握测量误差的基本知识,培养学生正确处理实验数据的基本能力。一方面,强化测量误差与不确定度的基本概念,使学生能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。另一方面,注重实验数据处理的一些常用方法,包括列表法、作图法、逐差法以及用计算机通用软件处理实验数据的基本方法等。

第二,掌握基本物理量的测量方法。例如,长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量及物性参数的测量,注意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。

第三,了解常用的物理实验方法,让学生逐步学会使用。例如,比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法、干涉和衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法等。

第四,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、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

第五,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、消除视差调整、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,等等,这些都是在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确技术。

本书可作为高等学校农学、医学和工学等各学科门类下的各本科专业的物理实验课程的教学用书,也可以供其他有关的科技工作者和教师参考使用。全书主要内容包括四个部分:第一部分是物理实验基础知识,由绪论、测量误差及数据处理基础知识构成;第二部分是物理实验室常用仪器、仪表和量具的性能与用法的简要介绍;第三部分是实验项目,含有教学实验项

目中基础性实验项目,具有提高性质的综合性实验,具有培养学生创新性的设计性实验等内容,这些内容涵盖力学、热学、电学、光学等实验内容,共收入实验项目 40 个,可供不同类别专业和课程学时的实验教学进行选择;第四部分是参考文献和附录等。

编写一部适用的实验教材,是一项艰巨而又复杂的任务,尽管我们做了很大的努力,但由于水平有限,缺点错误在所难免,敬请读者批评指正,使我们得以进一步的改正,谢谢!

编者

2017 年 1 月

目 录

绪论	1
第一部分 物理实验基础知识	3
第一章 测量误差与数据处理基础知识	3
一、测量与误差	3
二、误差的分类及其处理方法	4
三、不确定度	6
四、有效数字	10
五、数据处理的基本方法	10
六、实验测量结果的表示	12
第二章 物理实验中常用的测量方法	15
一、比较法	15
二、放大法	16
三、平衡法	17
四、补偿法	18
五、转换法	19
六、模拟法	20
七、干涉法	21
第二部分 实验室常用的仪器、仪表和量具	22
一、游标卡尺	22
二、外径千分尺	24
三、滑线变阻器	26
四、标准电池	28
五、标准电阻和电阻箱	30
六、直流电压表和直流电流表	32
七、直流检流计	33
八、直流电位差计	34

九、读数显微镜·····	35
十、钠光灯·····	36
十一、汞灯·····	36
十二、激光器·····	37
十三、数字万用表·····	37
十四、物理天平·····	43
第三部分 实验项目 ·····	45
第一章 力学实验 ·····	45
实验一 长度测量·····	45
实验二 杨氏弹性模量的测量·····	48
实验三 弦线上的驻波实验·····	56
实验四 液体表面张力系数的测定·····	60
实验五 气轨上守恒定律的研究·····	63
实验六 简谐振动的研究·····	70
实验七 转动惯量的测量·····	75
实验八 声速测量·····	82
第二章 热学实验 ·····	87
实验一 混合法测物质比热容·····	87
实验二 冷却法测定金属比热容·····	90
实验三 导热系数测量·····	93
第三章 电磁学实验 ·····	98
实验一 模拟法测心电·····	98
实验二 电位差计·····	101
实验三 电表的改装与校准·····	106
实验四 学习使用数字万用表·····	113
实验五 惠斯通电桥测电阻·····	119
实验六 示波器的使用·····	124
实验七 直流电位差计测电动势·····	130
实验八 静电场的模拟测绘·····	136
实验九 用示波器测动态磁滞回线·····	141
实验十 密立根油滴实验·····	146
实验十一 灵敏电流计的研究·····	150
实验十二 霍尔效应·····	157
第四章 光学实验 ·····	163
实验一 分光计的调节与掠入射法测量折射率·····	163
实验二 物质折射率测定·····	172

实验三	显微镜放大率的测量	177
实验四	分光计与衍射光栅	180
实验五	光的等厚干涉	185
实验六	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	190
实验七	用双棱镜干涉测光波的波长	194
第五章	综合性、设计性实验	200
实验一	光电效应	200
实验二	弗兰克-赫兹实验	207
实验三	观测氢原子光谱	211
实验四	全息照相	216
实验五	非线性电阻的研究	220
实验六	RC 串联电路暂态过程的研究	222
实验七	密度测量与误差分配、实验仪器选择的关系研究	227
实验八	光栅特性的研究	230
实验九	硅光电池的特性研究	232
实验十	热电偶的定标	239
附 录		241
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	241
附录 B	常用物理数据	244
附录 C	常用电气测量指示仪表和附件的符号	252
参考文献		254

绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。它本身以及它与各个自然学科、工程技术的相互作用对人类文明和科学技术的发展起着引领和推动的作用。作为人类追求真理、探索未知世界的工具,物理学是一种哲学观和方法论,它深刻影响着人类对自然的基本认识、人类的思维方式和社会活动,在人的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验体现了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。

物理实验课是高等院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验的知识、方法和技能是学生进行后继实践训练的基础,也是毕业后从事各项科学实践和工程实践的基础。物理实验课覆盖广,具有丰富的实验思想、方法和手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力,提高科学素养的重要基础课程。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。因此,学好物理实验对于高等学校的学生是十分重要的。

一、物理实验课的目的

1. 培养学生的基本科学实验能力。

(1)独立学习的能力:能够自行阅读与钻研实验教材和资料,必要时自行查阅相关文献资料,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备。

(2)独立进行实验操作的能力:能够借助教材或仪器说明书,正确使用常用仪器及辅助设备,独立完成实验内容,逐步形成自主实验的基本能力。

(3)分析和研究的能力:能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳和综合,通过实验掌握对物理现象和物理规律进行研究的基本方法,具有初步的分析和研究的能力。

(4)书写表达能力:掌握科学与工程实践中普遍使用的数据处理与分析方法,建立误差与不确定度的概念,正确记录和处理实验数据,绘制曲线,分析说明实验结果,撰写合格的实验报告,逐步培养科学技术报告和科学论文的写作能力。

(5)理论联系实际的能力:能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(6)创新与实验设计的能力:能够完成符合规范要求的设计性、综合性实验,能进行初步的具有研究性或创意性内容的实验,逐步培养创新能力。

2. 通过对物理实验现象的观测和分析,学习运用理论指导实验,逐步提高学生观察和分析实验现象的能力,加深对物理学的概念、规律和理论的理解。

3. 培养学生实事求是的科学态度,严谨踏实的工作作风,勇于探索、坚忍不拔的钻研精神,遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的教学环节

(一) 实验预习

课前要仔细阅读实验教材或有关材料,弄清实验的目的、原理,熟悉所要使用的仪器,明确测量方法、实验条件,了解实验的主要步骤及注意事项,根据实验任务画好记录数据的表格。有些实验还要求学生课前自拟实验方案,自己设计电路图、光路图。

因此,预习的好坏是顺利完成实验的关键。

(二) 实验操作

学生进入实验室后应遵守实验室规则。

(1) 实验前应首先认识和熟悉仪器,了解使用方法。

(2) 有条理地布置仪器,按步骤调整、操作。细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。

仪器发生故障时,要在教师的指导下学习排除故障的方法。

总之,要把重点放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就算完成了任务。

(3) 记录数据要用钢笔或圆珠笔正确记录原始数据,记错数据时,不要涂改,在记错的数据上划一道,再填上正确数据。还要记录实验条件(温度、湿度、气压等)、仪器规格、型号等。

实验结束时,将数据交给教师审阅签字,整理还原仪器后,方可离开实验室。

(三) 实验总结

做完实验后要及时对实验数据进行处理。数据处理过程包括:计算(要有计算式,并代入数据,便于检查)、作图(按作图规则,图线要规矩、美观)、误差分析。数据处理后要得出实验结果。最后根据要求撰写出一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告。

实验报告包括以下内容:

(1) 实验名称、实验者姓名、实验日期。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器(型号、规格)。

(4) 实验原理。简要叙述有关物理原理内容(包含电路图、光路图及实验装置示意图)和测量中依据的主要公式及其成立的实验条件等。

(5) 实验步骤。根据实际过程写明关键步骤和注意要点等。

(6) 数据表格与数据处理。记录中应有仪器台件的编号、规格及完整的实验数据,要完成计算、作图、误差分析,最后给出实验结果。

(7) 实验结果讨论:包括对实验现象的分析;实验关键问题的研究体会,实验的收获、建议;回答思考题等内容。

第一部分 物理实验基础知识

第一章 测量误差与数据处理基础知识

由于受测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,测量中的误差不可避免。没有测量误差的基本知识,就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度就不能正确表达和评价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果。测量误差、不确定度与数据处理的基本知识在整个实验中有非常重要的地位。本章从实验教学的角度出发,主要介绍误差和不确定度的基本概念、测量结果不确定度的计算、实验数据处理和实验结果表达的基本知识。

一、测量与误差

物理实验是将自然界物质运动中的物理形态按人们的意愿在实验中再现,找出各物理量之间的关系,确定它们的数值大小,从中获得规律性的认识,或验证理论,或发现规律,或作为实际应用的依据。为确定被测对象的测量值,首先必须选定单位,然后用这个单位与被测对象进行比较,求出它对该单位的比值,这个比值即为数值。数值的大小与所选用的单位有关。表示被测对象的测量值时必须包括数值和单位。

1. 直接测量和间接测量

可以用测量仪器或仪表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,用天平称质量等。

在实际测量中,许多物理量没有直接测量的仪器,往往需要根据某些原理得出函数关系式,由直接测量量通过数学运算才能获得测量结果。这种测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测量量。例如,先测出物体的体积和质量,再用公式算出物体的密度。在物理实验中进行的测量,大多数是间接测量。

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),我们就把这样进行的重复测量称为等精度测量。在诸多测量条件中,只要有一个发生了变化,这样所进行的测量,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

在一定条件下,任何物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不依人的意志为转移的客观值,称为真值。在测量过程中,我们总希望准确地测得待测量的真值。但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。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和判断能力的影响等,使测量值与待测的真值之间总存在着差异,把这种差异称为测量误差。若某物理量的测量值为 X , 真值为 A , 则测量误差定义为:

$$\epsilon = X - A$$

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称 ϵ 为绝对误差。一般来说,真值仅是一个理想的概念。实际测量中,一般只能根据测量值确定测量的最佳值。通常取多次重复测量的算术平均值作为最佳值。

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则不适用,需要用相对误差表示。例如,测量 10 m 长时相差 1 mm 与测量 1 m 长时相差 1 mm,两者绝对误差相同,而相对误差不同。相对误差的定义为:

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

有时被测量有公认值或理论值,还可用“百分误差”来表征:

$$\text{百分误差} = \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \times 100\%$$

分析测量中可能产生的误差,尽可能消除其影响,并对最后结果中未能消除的误差做出估计,是物理实验和许多科学实验中不可缺少的工作,必须进一步研究误差的性质和来源。

二、误差的分类及其处理方法

误差按其性质和产生原因可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。它们的性质不同,需分别处理。

1. 系统误差

在同一条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定;以可预知方式变化的测量误差分量称为系统误差。系统误差的特征是它的确定性。此外,还有一类方向和绝对值无法确定的系统误差,叫作未定系统误差。这类误差常用估计方法得出,归并到随机误差中,用统计方法处理。

1) 系统误差产生的主要原因

①仪器误差。这是由于仪器本身的缺陷或未按规定条件使用而造成的。如仪器老化,磨损,零点不准,水平度、垂直度未调节好,砝码标称质量不准,电阻箱转盘接触电阻增大等。

②理论误差。这是由于实验方法或理论不完善而导致的。如计算公式是近似的,或忽略

了一些因素的影响。伏安法测电阻时,就是忽略了电表内阻。

③人员误差。这是由于观测者生理或心理特点造成的。如有人估计读数总是偏大或偏小,观测者的反应速度不同,以及视力差异等。

④环境误差。这是外界环境改变、偏离确定工作条件而造成的。如光照、温度、湿度、电磁场等环境因素变化。

2) 消除系统误差的一般方法

实验前,可以通过校准仪器、改进实验装置和实验方法来消除。

实验后,可对测量结果进行理论上修正加以消除,或尽可能减小。

实验中,可用以下方法:

①交换法,如惠斯通电桥测电阻,把待测电阻与标准电阻交换位置再次测量,消除电阻不均匀造成的误差。

②补偿法,如在测物质比热容时,先使系统的初温低于室温而吸热,以补偿升温时的散热损失。

③异号法,使系统误差在测量中出现两次,且两次的符号相反,取平均值为结果,如霍尔效应测磁场实验中,消除不等势电势差。

④半周期偶数测量法,按正弦曲线变化的周期性系统误差(如分光计的偏心差),在差半个周期的两对应点处的绝对值相等而符号相反,在相差半个周期处测两个值,并以平均值作为测量结果。

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,因此要对整个实验依据的原理、方法、测量步骤、所用仪器等可能引起误差的因素一一进行分析。

2. 随机误差

随机误差是在同一条件下,对同一被测量的多次测量过程中,绝对值与符号以不可预知的方式变化着的误差。这种误差是实验中各种因素的微小变动性引起的。例如,实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动性,测量仪器指示数值的变动性,以及观测者本人在判断和估计读数上的变动性……这些因素的共同影响就使测量值围绕测量的平均值发生有涨落的变化,这种变化量就是各次测量的随机误差。对某一测量值,其随机误差的大小和方向是不可预知的,没有规律,但对一个量进行足够多次的测量,则会发现它们的随机误差是按一定的统计规律分布的。随机误差都满足正态分布规律:正误差和负误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,这一规律在测量次数越高时表现得越明显。根据随机误差的分布特征,可以如下处理。

(1)在多次测量时,正负随机误差可大致相消,因而多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响。

(2)测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大。因此,必须对测量的随机误差做出估计才能表示出测量的精密度。

对随机误差做估计的方法有多种,科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差。

①以算术平均值代表测量结果。

设对某一物理量在测量条件相同的情况下进行几次无明显系统误差的独立测量,测得几个测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 。那么,它们的算术平均值是

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

以上为了简洁,略去求和号的求和范围。

可以证明,当系统误差已被消除时,测量值的平均值是被测量的最佳估计值,测量次数越多,接近的程度越好(当 $n \rightarrow \infty$ 时,平均值趋近真值),因此以平均值表示测量结果,平均值也称最佳值。

②多次测量结果随机误差的估计。

每一次测量值 x_i 与平均值 \bar{x} 之差称为残差,即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (1-1-2)$$

显然,这些残差有正有负,有大有小。用“方均根”法对它们进行统计,得到的结果就是有限次 (n 次) 测量中某一次测量结果的标准偏差,以 σ_x 表示

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-1-3)$$

这个公式称为贝塞尔公式。这一标准偏差表示测量的随机误差,它可以表示这一列测量值的精密度。标准偏差小就表示测量值很密集,即测量精密度高;标准偏差大就表示测量值很分散,即测量的精密度低。

n 次测量结果的算术平均值 \bar{x} 的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 定义为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-1-4)$$

3. 粗大误差

明显歪曲了测量结果的误差称为粗大误差。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。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,正确的结果中不应含有过失错误。在实验测量中要极力避免过失错误,在数据处理中要尽量剔除坏值。

三、不确定度

(一) 不确定度的分类

不确定度是表征测量结果分散性的参数,它是被测物理量的真值在某个量值范围内的一个评定。或者说,它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。不确定度反映了可能存在的误差分布范围,即随机误差分量和系统误差分量的联合分布范围。任一测量结果都存在着不确定度,因此一个测量结果不仅要指出其测量值的大小,还要指出其测量的不确定度,以表示测量结果的可信赖程度。不确定度小,测量结果可信赖程度高;不确定度大,测量结果可信赖程度低。

测量不确定度按评定方法的不同一般分为两类。

1. A 类不确定度分量

A 类不确定度分量是指可以采用统计方法评定与计算的不确定度。在物理实验教学中

我们约定 A 类不确定度取平均值的实验标准偏差,即

$$u_A = \sigma_x \quad (1-1-5)$$

2. B 类不确定度分量

B 类不确定度分量是指用非统计方法求出或评定出的不确定度。评定 B 类不确定度常用估计方法,要估计适当,需要确定分布规律,同时要参照标准,更需要估计者的实践经验、学识水平。因此可能不同的估计者有不同的评定结论。

在物理实验教学中,约定 B 类不确定度是将测量仪器的误差限折合成等价的标准偏差。仪器的误差限一般在仪器说明书中注明,它给出了在正确使用仪器的条件下,测量值和被测量物理量的真值之间可能产生的最大误差(见表 1-1-1)。如果给出的误差限 Δ_{ix} 的范围在 $[-\alpha, +\alpha]$ 之内,若约定误差的概率分布是均匀分布,则根据均匀分布理论,其不确定度 B 类分量 u_{B_i} 为

$$u_{B_i} = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \quad (1-1-6)$$

表 1-1-1 物理实验教学中正确使用仪器时的仪器误差限

仪 器	Δ_{ix}	备注
米尺(最小刻度 1 mm)	0.5 mm	
游标卡尺(20 分度、50 分度)	最小分度值 (0.05 mm, 0.02 mm)	
螺旋测微仪(0~50 mm)	0.004 mm	1 级
物理天平(0.1 g)	0.05 g	
各类数字式仪表	仪器最小读数	
分光计(杭州光学仪器厂)	最小分度值(1')	
电磁仪表(指针式电流表、电压表)	(AK)%	A 是量程, K 是仪表准确度等级
直流电阻箱	$(\alpha R + bm)\%$	R 为示值, α 是直流电阻箱准确度等级, b 是与准确度等级有关的系数, m 是所使用的电阻箱的旋钮数
钢直尺	0.10 mm	<300 mm

3. 合成不确定度与相对不确定度

当两类不确定度各分量 $u_{A1}, u_{A2}, \dots, u_{B1}, u_{B2}, \dots$ 彼此独立时,则合成不确定度 u_C 为

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u_{A_i})^2 + \sum_i (u_{B_i})^2} \quad (1-1-7)$$

相对不确定度 = 不确定度 / 测量平均值,即

$$E_r = \frac{u_C}{\bar{x}} \quad (1-1-8)$$

(二) 不确定度与误差的关系

1. 误差与不确定度是两个不同的概念

误差是一个理想的概念。根据传统的误差定义,由于真值一般是未知的,则测量误差一般也是未知的,是不能准确得知的。因此,一般无法表示测量结果的误差。“标准误差”“极限误差”等词,也不是指具体的误差值,而是用来描述误差分布的数值特征、表征和与一定置信概率相联系的误差分布范围的。不确定度则是表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度,反映了可能存在的误差分布范围,表征被除测量的真值所处的量值范围的评定,所以不确定度能更准确地用于测量结果的表示。一定置信概率的不确定度是可以计算出来(或评定)的,其值永远为正值。而误差可能为正,可能为负,也可能十分接近于零,而且一般是无法计算的。

2. 误差和不确定度是互相联系的

误差和不确定度都由测量过程的不完善引起,而且不确定度概念和体系是在现代误差理论的基础上建立和发展起来的。在估算不确定度时,用到了描述误差分布的一些特征参量。两者不是割裂的。

(三) 直接测量量不确定度的估算

1. 单次测量不确定度的估算

作为单次测量,不存在采用统计方法计算的不确定度 A 类分量。因此,单次测量的合成不确定度就等于不确定度 B 类分量。

2. 多次测量不确定度的估算

对不确定度 A 类分量主要讨论多次等精度(精度相同)测量条件下,读数分散对应的不确定度,并且用平均值的标准偏差计算不确定度 A 类分量;对不确定度 B 类分量,主要讨论仪器不准所对应的不确定度;合成不确定度由两类不确定度的“方和根”得到,即

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1-1-9)$$

例 1-1-1 用螺旋测微器测量小钢球的直径,5 次测量值分别为 5.499 mm、5.500 mm、5.499 mm、5.498 mm、5.498 mm,试求其合成不确定度。

解: $u_A = S(\bar{d}) = 0.00037 \text{ mm}$

$$u_B = \frac{0.004}{\sqrt{3}} \text{ mm} = 0.0023 \text{ mm} \text{ (螺旋测微器的误差限为 } 0.004 \text{ mm)}$$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.00037^2 + 0.0023^2} \text{ mm} = 0.003 \text{ mm}$$

(四) 间接测量量不确定度的估算

间接测量量的最佳估计值和合成不确定度是由直接测量结果通过函数式计算出来的,设间接测量量的函数式为

$$N = F(x, y, z, \dots) \quad (1-1-10)$$

其中