



普通高等教育“十二五”（精品）规划教材

普通物理学实验

General Physics Experiment

General Physics Experiment

程素君 赵红枝
蒋利娟 陆志



南京大学出版社



普通高等教育“十二五”(精品)规划教材

普通物理学实验

主 编 ◆ 程素君 赵红枝 蒋利娟 陆 志
副主编 ◆ 吴花蕊 张向丹 梁彦天



南京大学出版社

内 容 简 介

本书是根据国家教育部对高等学校本、专科普通物理学实验的要求并结合各高校实验设备编写的。

全书共分7章:第1章绪论;第2章数据处理与误差分析;第3~7章分别为力学、热学、电磁学、光学和原子物理学等实验。全书共列出了58个实验,可供不同层次的学生选做。在每个实验中,都列出了实验目的、实验仪器、实验原理和实验内容及步骤。

图书在版编目(CIP)数据

普通物理学实验/程素君等主编. --南京:南京
大学出版社,2011.12

普通高等教育“十二五”(精品)规划教材

ISBN 978-7-305-08840-7

I. ① 普… II. ① 程… III. ① 普通物理学—实验—高
等学校—教材 IV. ① 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 178281 号

出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093
网 址 <http://www.NjupCo.com>
出 版 人 左 健

丛 书 名 普通高等教育“十二五”(精品)规划教材
书 名 普通物理学实验
主 编 程素君 赵红枝 蒋利娟 陆 志
责任编辑 胥橙庭 编辑电话 025-83593962

照 排 华兴同盟
印 刷 高碑店市鑫宏源印刷包装有限责任公司
开 本 787×1092 1/16 印张 20 字数 499 千字
版 次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-305-08840-7
定 价 39.80 元

电子邮箱 Press@NjupCo.com
Sales@NjupCo.com(市场部)

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购图书销售部门联系调换

前 言

《高等教育法》明确指出:高等教育的任务是培养具有创新精神和实践能力的高级专门人才。物理学作为一门实验学科,物理实验教学在创新人才培养和素质教育中起着非常重要的作用。为了探索物理实验教学规律、推进物理实验的教学改革、使物理实验达到提高学生实践能力的目的,我们编写了这本《普通物理学实验》教材。

在编写本教材时,我们注意了以下几个突出特点:

1. 改变了物理实验“重理论、轻实践,重知识、轻能力”的教学模式,使培养出来的学生具有创造性、具有分析问题和解决问题的能力。在传统的实验教学中,学生的实验只是按标准的程序验证原理和定律,实验教材对所需的仪器设备、线路连接、操作步骤、观察内容、实验结果等均已详细说明,这样的实验很难达到培养动手能力、分析与解决问题能力的目的,创新意识的培养更是无从谈起。

2. 改变了“物理实验教学各部分各自设置实验、实验又依附于理论课程”的教学体系。这种传统的实验教学方法存在的问题:①实验课仅仅是对理论的简单验证;②实验内容重复,缺乏完整性;③缺乏对学生综合素质的培养;④实验内容陈旧老化,不能体现现代科技发展水平。基于以上弊端,在编写过程中,我们把物理实验分为基础实验、专业实验、综合设计研究实验,实现了基础与专业相结合、专业与综合相结合的实验教学新模式,体现了“基础性、综合性、实践性、创新性”的特点。

3. 改变了物理实验“重结果、轻方法”的弊端。在本教材中,注重提高学生的动手能力和基本实验方法的训练,强调实验的物理思想、实验技术的归纳及培养。

经审定,本书可作为普通高等学校本、专科各专业的实验教材,亦可作为物理教师和物理实验工作者的工具书。

参加本书编写的有程素君、梁彦天、陆志、段世政、张家平、吴花蕊、蒋利娟、张向丹、赵红枝,其中程素君编写第7章,梁彦天编写第1章、陆志编写第2章,赵红枝编写第6章实验1~5,吴花蕊编写第6章实验6~10及第6章中的附录1和附录2,张家平编写第3章,段世政编写第4章,蒋利娟编写第5章实验1~9,张向丹编写第5章实验10~17。

全书由程素君、赵红枝、蒋利娟、梁彦天校阅、修订并定稿。

由于我们水平有限,敬请使用本书的同仁不吝批评指正,以便进一步修订和完善。

高等教育教材编审委员会

2011年6月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 大学物理实验的目的	(1)
1.2 大学物理实验课的过程	(1)
1.2.1 实验前的准备(预习)	(2)
1.2.2 操作	(2)
1.2.3 写实验报告	(3)
第2章 数据处理与误差分析	(4)
2.1 测量与误差	(4)
2.1.1 直接测量和间接测量	(4)
2.1.2 测量误差及其表示方法	(4)
2.1.3 误差的分类及其处理方法	(5)
2.1.4 精度	(7)
2.2 实验不确定度的评定	(8)
2.2.1 不确定度	(8)
2.2.2 标准不确定度	(8)
2.2.3 直接测量结果的标准不确定度的评定	(9)
2.2.4 间接测量结果的标准不确定度的评定	(10)
2.2.5 测量结果的表示	(10)
2.2.6 测量不确定度计算举例	(11)
2.3 有效数字及其运算规则	(12)
2.3.1 有效数字的一般概念	(12)
2.3.2 有效数字的运算规则	(13)
2.3.3 在有效数字运算中还应注意的一些问题	(14)
2.4 实验数据的处理方法	(14)
2.4.1 列表法	(14)
2.4.2 作图法	(14)
2.4.3 逐差法	(16)
2.4.4 最小二乘法	(16)
习题	(17)
第3章 力学实验	(19)
3.1 概述	(19)
3.2 实验	(19)
实验1 长度的测量	(19)

实验 2 用单摆测量重力加速度	(22)
实验 3 固体和液体密度的测定	(23)
实验 4 用气垫导轨测量速度和加速度	(27)
实验 5 重力加速度的测定(光电控制计时法)	(30)
实验 6 牛顿第二定律的验证	(33)
实验 7 验证动量守恒定律	(34)
实验 8 金属杨氏弹性模量的测量	(36)
实验 9 刚体转动惯量的测量(三线摆法)	(40)
实验 10 刚体转动惯量的测定	(44)
实验 11 简谐振动的研究	(47)
实验 12 液体黏滞系数的测定	(51)
实验 13 声速的测量(超声)	(53)
第 4 章 热学实验	(56)
4.1 概述	(56)
4.2 实验	(56)
实验 1 固体比热容的测定	(56)
附录 1 电热法测固体的比热容	(59)
实验 2 金属线胀系数的测定	(61)
实验 3 水的汽化热测定	(64)
实验 4 热功当量的测量	(66)
实验 5 液体比热容的测定	(68)
实验 6 冰的比熔解热的测定	(70)
实验 7 不良导体导热系数的测定	(72)
实验 8 沸点与压强关系的研究	(75)
实验 9 液体表面张力系数的测定	(77)
附录 2 液体表面张力系数的测定	(78)
实验 10 气体三定律及气态方程验证	(80)
第 5 章 电磁学实验	(84)
实验	(84)
实验 1 制流电路与分压电路	(84)
实验 2 伏安法测电阻	(90)
实验 3 单臂电桥测中值电阻	(95)
实验 4 用双臂电桥测量低电阻	(101)
实验 5 灵敏电流计特性的研究	(105)
实验 6 用电位差计测电池电动势	(113)
实验 7 交流电桥测量电容电感	(116)
实验 8 静电场的描绘	(122)
实验 9 示波器的原理及应用	(130)
实验 10 磁场分布的测量	(137)

实验 11 万用表的设计与定标	(143)
实验 12 RLC 串联电路的稳态特性	(148)
实验 13 RLC 电路暂态特性研究	(156)
实验 14 RLC 串联电路谐振特性研究	(162)
实验 15 铁磁物质的磁性研究	(168)
实验 16 霍尔效应及其应用	(173)
实验 17 电子束实验	(177)
第 6 章 光学实验	(184)
6.1 概述	(184)
6.2 基础实验	(185)
实验 1 薄透镜焦距的测定	(185)
实验 2 透镜组基点的测量	(190)
实验 3 平行光管的调节和使用	(193)
实验 4 分光计的调节和使用	(200)
6.3 专业实验	(209)
实验 5 等厚干涉的观察与研究	(209)
实验 6 迈克尔逊干涉仪	(218)
附录 1 光的相干条件和时间相干性	(226)
附录 2 使用钠光灯的实验操作说明	(227)
实验 7 衍射光栅	(228)
6.4 综合设计研究实验	(235)
实验 8 偏振光的观察和研究	(235)
实验 9 光电效应和普朗克常数的测定	(242)
实验 10 全息照相	(248)
第 7 章 原子物理实验	(255)
7.1 概述	(255)
7.2 实验	(255)
实验 1 用电视显微油滴仪测电子电荷	(255)
实验 2 夫兰克-赫兹实验	(261)
实验 3 氢原子光谱(A)	(266)
实验 4 小型棱镜摄谱仪的使用(B)	(271)
实验 5 钠原子光谱的拍摄与分析	(274)
附录 1 平面光栅摄谱仪简介及使用说明	(279)
附录 2 量子数亏损及固定项值的计算举例	(285)
实验 6 塞曼效应	(286)
实验 7 扫描隧道显微镜实验	(294)
实验 8 激光喇曼光谱	(301)

第 1 章 绪 论

1.1 大学物理实验的目的

物理学是一门实验科学，在物理学发展的长河中，实验起着决定性的作用。一部物理学史充分说明，整个物理学大厦正是建立在物理实验这块基石上的。发现新的物理现象、寻找和验证物理定律等，都只能依靠实验。正是 16 世纪伟大的实验物理学家伽利略，用他出色的实验工作把古代对物理现象的一些观察和研究引上了当代物理学的科学道路，使物理学发生了革命性的变化。牛顿的经典力学就是建立在伽利略、开普勒和惠更斯等人的实验基础之上的。电磁学的研究，也是从库仑发明扭秤并用来测量电荷之间的作用力开始的。随后奥斯特、法拉第等人的实验工作成为麦克斯韦建立电磁场理论的重要基础。总之，物理学的理论来源于物理实验，最终又必须由物理实验来验证。因此，要从事物理学的研究，必须掌握物理实验的基本功。物理实验不仅对于物理学的研究工作极其重要，对于物理学在其他学科中的应用也十分重要。当代物理学的发展已经使我们的世界发生了惊人的改变，而这些改变正是物理学在各行各业中应用的结果。

大学物理实验是其他物理实验的入门，因而被列为理工科学生的必修基础课。大学物理实验课是理工科学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端，具有不可替代的重要作用。因此，大学物理实验课的目的是：

(1) 通过观察、测量和分析，加强对物理概念和理论的认识。

(2) 学习物理实验的基本知识、基本方法，培养基本的实验技能。要做好一个实验，除了要了解有关的理论外，还必须能运用恰当的实验方法，合理地选取符合实验要求的仪器，懂得怎样装配、调整及正确操作这些装置，在取得必要的实验数据之后，能从中得出切合实际的结论，并能分析、判断实验结果的可靠程度和存在的问题。

(3) 培养严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风。

大学物理实验课虽然是在教师指导下的学习环节，但在实验过程中，学生的活动有较大的独立性，我们应以一个研究者的态度去组装仪器，进行观测与分析，探讨最佳的实验方案，从中积累经验、锻炼技巧和机智，这将为以后独立地设计实验方案、选择并使用新的仪器设备和解决新的实验课题打下一定的基础。

1.2 大学物理实验课的过程

任何实验过程都应包括：(1) 准备，(2) 观测与记录，(3) 数据的整理与分析这三个步骤。

1.2.1 实验前的准备(预习)

预习是上好实验课的基础和前提,是保证实验顺利进行并能取得满意结果的重要步骤。

1. 理论的准备

从实验指导书和有关参考书籍中充分了解实验的目的和要求及所用到的实验的原理、方法等。

2. 实验仪器的准备

了解所有仪器的工作原理、工作条件和操作规程。

3. 观测的准备

掌握实验步骤和注意事项,设计记录表格。

一份完整的预习报告主要包括实验目的、原理(必要时还应绘出说明原理用的草图)并写好预习报告、步骤及数据表格等。数据表格中要留有余地,以便有估计不到的情况发生时能够记录。直接测量的量和间接测量的量(由直接测量的量计算所得的量)在表中要清楚地分开,不应混淆。

1.2.2 操 作

进入实验室前必须详细了解实验室的各项规章制度,这些规章制度是为保护人身和仪器设备安全而制定的,进入实验室后必须严格遵守。实验操作主要包括线路的连接、仪器仪表的安装调试和使用、实验现象的观测、数据测量及列表记录等。做实验时,要胆大心细、严肃认真、一丝不苟。对于精密贵重的仪器或元件,特别要稳拿轻放。在电学实验中,接好的线路必须经教师检查无误后才可接通电源。在使用任何仪器前,必须先看注意事项或说明书;在调节时,应先粗调后微调;在读数时,应先取大量程后取小量程。实验完成后,应整理好仪器设备,填写仪器使用登记簿,并关闭门、窗、水、电后,方可离开实验室。在实验中要多动手、勤动脑,提高实验分析能力,掌握排除故障的技巧。只有在实验中认真动手、积极动脑,才能触类旁通,掌握实验的真谛,学到从实践中发现问题、分析问题、解决问题的真功夫。其中,发现问题是解决问题的第一步,有所发现才能有所创造。因此,在实验过程中要十分注意各种实验现象。教学实验与科学实验不同,在教学实验中,实验结果(或测量值)往往是可预知的,或有公认值(或理论值)的,实验结果与公认值不一致的情况是经常会发生的。这种不一致的原因,不一定是因为学生操作的失误、概念理解不当或计算错误,它也可能是由于仪器设备不正常或环境等其他原因造成的。绝不可认为实验结果与公认值越接近,就表明实验做得越好,得分也会越高;更不可为追求实验结果与公认值的一致而伪造或篡改实验记录。从学生学习的角度讲,过程比结果更重要。教师对学生的培养与评价,侧重于实验的态度与作风以及发现、分析、解决问题的能力。一旦发现测量值与理论值相差很远,就应该分析实验方法是否正确、仪器设备是否符合要求、实验环境是否影响太大,找出产生误差的原因,尽力排除一般故障。可以说,能否发现仪器故障及掌握排除故障的技能、能否正确分析误差来源是实验能力强弱的重要表现。

1.2.3 写实验报告

写实验报告是培养实验研究人才的重要一环。实验报告可以在预习报告的基础上继续写,也可以重写一份。对于实验报告,过去有些学生往往只重视数据处理和得出实验结果,对于实验的记录以及原理、步骤等的撰写很不重视,这是很不对的。研究工作取得的成果,一般都要写成论文形式发表。为了训练这种对实验成果的文字表达能力,在实验报告中,要求用自己的语言简要地写明实验目的、原理和步骤并进行适当的讨论。初学者对此往往感到难以下手,下面提供几点参考内容。

(1)简要地阐明为什么和如何做实验,这主要包括实验的目的、原理和步骤。写这些内容时,要尽量用自己的语言,不要从教材、书本或其他地方抄;内容应以别人能看懂、自己若干年后也能看懂为标准;篇幅应力求简短。

(2)真实而全面地记录实验条件和实验过程中得到的全部信息。实验条件包括实验的环境(如室温和气压等与实验有关的外部条件)、所用的仪器设备(名称、型号、主要规格和编号等)、实验对象(样品名称、来源及其编号等)以及其他有关器材等。实验过程中要随时记下观察到的现象、发现的问题和自己产生的想法;特别当实际情况和预期不同时,要记下有何不同,分析为何不同。记录实验数据要认真、仔细,但不要把数据先记在草稿上再誊写上去,更不要算好了再填上去;要培养清晰而整洁地记录原始数据的能力和习惯。

(3)认真地分析和解释实验结果,得出实验结论。实验结果不是简单的测量结果,它应包括不确定度的评定、对测量结果与期望值的关系的讨论,分析误差的主要原因和改进方法,还应包括对实验现象的分析与解释,对实验中有关问题的思考和对实验结果的评论等。

(4)对所用的仪器设备能否提出改进的设想,做本实验的体会及对教师或教材的批评和建议。

第2章 数据处理与误差分析

一切科学实验都要进行测量，总会记录大量的数据。所有的测量均存在误差，大学物理实验当然也不例外。误差理论和数据处理是每一个实验都会遇到的问题，两者是不可分割的有机整体，已经成为一门广受科技界重视的科学。限于篇幅和学时，本章只介绍误差理论与数据处理的初步知识，有的只引用它的结论和计算公式，以满足大学物理实验的基本要求。

2.1 测量与误差

2.1.1 直接测量和间接测量

在大学物理实验中，我们不仅要定性地观察和描述物理现象及其变化，还要定量地测量某些物理量的值。研究物理现象、了解物质的性质及验证物理原理都离不开测量。所谓测量，就是将被测的物理量与同类已知物理量进行比较，用已知量来表示被测量。这些已知量称作计量单位。测量时，待测量与已知量比较得到的倍数称为测量值。例如，某一物体的长度是单位米的1.311 5倍，则该物体的测量值为1.311 5米。在人类历史的不同时期、不同国家乃至不同地区，同一物理量有许多不同的计量单位。为了便于国际贸易以及科技文化的交流，国际计量大会于1960年确定了国际单位制，其国际代号为SI。国际单位制中有七个基本单位，它们分别是长度单位米(m)，质量单位千克(kg)，时间单位秒(s)，电流强度单位安培(A)，热力学温度单位开尔文(K)，物质的量单位摩尔(mol)，发光强度单位坎德拉(cd)。

测量可分为直接测量和间接测量两类。直接测量是指某些物理量可以通过相应的测量仪器直接得到被测量的量值的方法。如用米尺量长度、用天平和砝码测物体的质量、用电桥或欧姆表测导体的电阻等。间接测量是指利用直接测的量与被测量之间已知的函数关系，经过计算而得到被测量值的方法。例如，用单摆测量重力加速度 g 时，先直接测出摆长 L 和摆动周期 T ，再依据公式 $g = 4\pi^2 L / T^2$ 进行计算，求出 g 值；再如，要测量导体的电阻 R ，可用电压表测量导体两端的电压 U ，用电流表测量通过该导体的电流 I ，然后用公式 $R = U / I$ 计算出导体的电阻。

2.1.2 测量误差及其表示方法

任何测量过程中必然伴随有误差产生，这是因为任何测量仪器、测量方法都不可能绝对正确，测量环境不可能绝对稳定，测量者的观察能力和分辨能力也不可能绝对精细和严

密。因此,分析测量中可能产生的各种误差、尽可能地消除其影响、并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是科学实验中不可缺少的工作。为此,我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因、消除的方法以及对未能被消除的误差如何做出估计等有关知识。

1. 误差的定义

测量误差就是测量值 x 与被测量的真值 a 之差值,若用 ε 表示,则有

$$x - a = \varepsilon。 \quad (2-1)$$

ε 反映了测量值偏离真值的大小,即反映了测量结果的可靠程度。所谓真值,是指该物理量本身客观存在的真实量值,但由于客观实际的局限性,真值一般是不知道的。通常我们只能测得物理量的近似真值,故对测量误差的量值范围也只能给予估计。国际上规定用不确定度(Uncertainty)来表征测量误差可能出现的量值范围,它也是对被测量的真值所处的量值范围的评定。有时为了使用上的需要,在实际测量中,常用被测量的实际值来代替真值。而实际值是指满足规定精确度的用来代替真值使用的量值(又称约定真值)。在检定工作中,把高一等级精度的标准所测得的量值称为实际值。如,用0.5级电流表来测得某电路的电流为1.200 A,用0.2级电流表测得的电流为1.202 A,则后者视为实际值。

2. 误差的表示方法

误差 ε 常称为绝对误差,其大小不同,反映了测量结果的优劣不等,但它只能适用于同一物理量。例如,20 mm厚的平板,用千分尺测得的绝对误差分别为0.005和0.003 mm,显然后者优于前者。但若要比两个不同的物理量,如20和2 mm厚的两块平板,用千分尺测得它们的绝对误差都为0.005 mm,若用绝对误差来评价,则测量误差相同。显然,用绝对误差表示不能反映出它的本质特征。另外,若要比两类不同物理量的测量优劣,如某物长20 mm,绝对误差为0.05 mm,某物质量为17.03 g,绝对误差为0.02 g,因绝对误差数值与单位都不同而无法比较。基于上述两种情况,还需引入相对误差的概念,即

$$E = \frac{\varepsilon}{x} \times 100\%。 \quad (2-2)$$

所以相对误差也称为百分误差。由式(2-2)可见,相对误差是不带单位的一个纯数,所以它既可评价量值不同的同类物理量的测量,也可评价不同类物理量的测量,以判断它们之间的优劣。

2.1.3 误差的分类及其处理方法

按照误差的特点与性质,误差可分为系统误差、随机误差(也称偶然误差)和粗大误差(也称过失误差)三类。

1. 系统误差

方法、仪器、人员及环境不变,多次测量同一量值时,绝对值和符号保持不变的误差;或在条件改变时,按一定规律变化的误差,称为系统误差。系统误差的来源大致有以下几个方面:

(1) 仪器误差: 由于仪器本身的缺陷或未按规定条件使用仪器而造成的误差。如, 仪表指针在测量前没有调准到零位而带来的测量误差; 米尺本身由于刻度划分得不准, 或因环境温度的变化导致米尺本身长度的伸缩带来的测量误差均属于这一类型。

(2) 理论或方法的误差: 由于所依据的理论及公式本身的近似性、测量时未能达到公式理想化的条件或实验方法不完善而带来的误差。如用伏安法测电阻, 由于没有考虑电流表或电压表内阻带来的测量误差。

(3) 环境误差: 由于外界环境, 如温度、湿度、电场、磁场和大气压强等因素的影响而带来的误差。

(4) 个人误差: 由于观测者本身的感官, 特别是眼睛或其他器官的不完善以及心理因素而导致的习惯性误差。这种误差, 往往是因人而异, 如停表计时, 有人反应较慢, 所以计时总是使之过长。

系统误差可以通过校准仪器、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来加以消除或尽可能减小。然而发现和减小实验中的系统误差并非易事, 这需要实验者深入了解实验的原理、方法与步骤, 熟悉所使用仪器的特点和性能, 还要在实验中不断积累理论知识和实践经验, 才能找出产生系统误差的原因以及消除、减小系统误差的方法。

2. 偶然误差(随机误差)

偶然误差是在同一条件下多次测量同一物理量时, 测量值总是有稍许差异而且变化不定, 并在消除系统误差之后依然如此, 这部分绝对值和符号经常变化的误差, 称为偶然误差。这种误差是由于实验中各种因素的微小变化而引起的, 如, 温度、气流、光照强度、电磁场的变化引起的环境变化; 观测者在判断、估计读数上的偏差等使得多次测量值在某一值附近有涨落。就某一次测量而言, 这种涨落完全是随机的, 其大小和方向都是难以预测的。但对某个量进行足够多次的测量, 随机误差总是按着一定的统计规律分布。常见情况有:

- (1) 测量值比真值大或比真值小的概率相等;
- (2) 误差较小的数据比误差大的数据出现的概率大;
- (3) 绝对值很大的误差出现的概率趋于零。

因此, 减小偶然误差对测量结果的影响的有效办法是进行多次测量, 并尽可能增加测量次数。

在相同的条件下, 对某物理量做 n 次的独立测量, 得到的值为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 于是平均值 $\bar{x}$ 为测量结果的最佳值:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (2-3)$$

可以证明, 当系统误差已被消除, 则测量值的算术平均值最接近被测量的真值。因此, 常用测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 表示测量结果。

对于测量值的可靠程度常用标准偏差来估计。标准偏差小, 说明多次测量数据的分散程度小, 测量的可靠性就大。反之, 测量的可靠性就小。在大学物理实验中, 多次独立测

量得到的数据一般可近似看做正态分布,此时实验的标准偏差以 s 表示,

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-4)$$

式中: n 为测量次数,其意义为任一次测量的结果落在 $[-s(x), s(x)]$ 区间的概率为 0.683; $x_i - \bar{x}$ 为每一次测量值与算术平均值之差,称为残差。

平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差为

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-5)$$

其意义为待测物理量处于 $[-s(x), s(x)]$ 区间的概率为 0.683。很明显, $s(\bar{x})$ 越小,上述各范围越窄,因而用平均值 $\bar{x}$ 作为真值的估计值就越可靠。

关于测量次数:增加测量次数对提高平均值的价值是有利的。但是,测量次数也不是越多越好,因为增加测量次数,测量时间就越长,实验环境可能出现不稳定,实验者也会疲劳,这将引入新的误差。对此一般的原则是,在偶然误差较大的测量中要多测几次,否则可少些,一般实验取 4~6 次为宜。

3. 粗大误差(过失误差)

实验测量中出现的那些用测量的客观条件不能合理解释的突出误差称为粗大误差。它是由于实验者的疏忽而引进的差错,例如,读数或计算出现的错误等。含有粗大误差的测量值称为坏值,应在整理数据时依据常用的准则加以剔除。

2.1.4 精 度

反应测量结果与真值接近程度的量称为精度,它与误差的大小相对应。精度可分为

(1) 准确度,指测量数据的算术平均值偏离真值的程度,它反映了系统误差的大小。

(2) 精密度,指测量数据本身的离散程度,它反映了随机误差的大小。

(3) 精确度,指测量数据偏离真值的离散程度,它反映了系统误差和随机误差的综合影响的大小。

对于具体的测量,精密度高的,准确度不一定高;准确度高的,精密度也不一定高;但精确度高的,精密度和准确度都一定高。如图 2-1 所示的打靶结果,子弹落在靶心周围有三种情况,图 2-1(a) 表示系统误差小而随机误差大,即准确度高而精密度低;图 2-1(b) 表示系统误差大而随机误差小,即准确度低而精密度高;图 2-1(c) 表示系统误差和随机误差均小,即精密度高。具体的测量有等精度与非等精度之分。对同一被测量,在相同的实验条件下(指同一实验仪器、同一实验方法、同一实验环境、同一实验者等),进行多次重复测量,各次测得结果又有所不同。对于这类测量,没有任何理由能说其中某一次测量比另一次测量更精确,只能认为每次测量的精确程度是相同的,这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量。反之,在多次重复测量中,只要上述诸实验条件中任何一个发生了变化,那么,这种测量便是非等精度测量。非等精度测量情况比较复杂,限于本课程的教学时数及教学要求,下面只讨论等精度测量的数据处理问题。

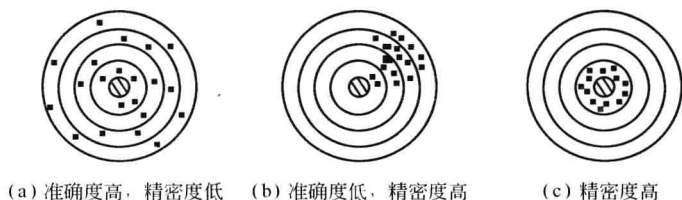


图 2-1 准确度、精密度和精确度示意图

2.2 实验不确定度的评定

2.2.1 不确定度

测量的理想是获得被测量在测量条件下的真值,但是实际上在测量时,由于实验方法和计量器具的不完善,测量环境不理想、不稳定,实验者在操作上和读取数值时不十分准确等原因,都将使测量值偏离真值,因而测量值不能准确表达真值。为了更确切地表征实验测量数据,我们引入了不确定度作为实验测量结果接近真实情况的量度。不确定度表征了测量结果的分散性和测量值可信赖的程度,它是被测量的真值在某个量值范围内的一个评定。在测量方法正确的情况下,不确定度愈小,表示测量结果愈可靠。反之,不确定度愈大,测量的质量愈低,其可靠性也愈差。

不确定度必须正确评价。若评价得过大,则在实验中会因怀疑结果的正确性而不能果断地做出判断,在生产中会因测量结果不能满足要求而需再投资,造成浪费;若评价得过小,在实验中可能会得出错误的结论,在生产中则产品质量不能保证,造成危害。必须指出,不确定度概念的引入并不意味着排除使用误差的概念。实际上,误差仍可用于定性地描述实验的结果。误差仍可按其性质分为随机误差、系统误差等,仍可描述误差分布的数据特征,表征与一定置信概率相联系的误差分布范围等。不确定度则用于给出具体数值或进行定量运算、分析的场合,表示由于测量误差的存在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。

2.2.2 标准不确定度

不确定度的评定十分重要,但以往各国对不确定度的表示和评定没有统一的规定,这无疑影响了国际间的交流和合作。1992年,国际标准化组织(ISO)发布了具有指导性的文件《测量不确定度表示指南》(以下简称《指南》),为世界各国不确定度的统一奠定了基础。1993年ISO和国际理论与应用物理联合会(IUPAP)等七个国际权威组织又联合发布了《指南》的修订版。从此,物理实验的不确定度评定有了国际公认的准则。《指南》对实验的测量不确定度有十分严格而详尽的论述,但作为大学物理实验教学,这里只介绍标准不确定度。所谓标准不确定度,是指以“标准偏差”表示的测量不确定度估计值,简称不确定度,常记为 ν 。

标准不确定度一般可分为以下三类：

(1) A 类不确定度。在同一条件下多次测量，即由一系列观测结果的统计分析评定的不确定度，简称 A 类不确定度，常记为 u_A 。

(2) B 类不确定度。由非统计分析评定的不确定度，简称 B 类不确定度，常记为 u_B 。

(3) 合成不确定度。某测量值的 A 类与 B 类不确定度按一定规则算出的测量结果的标准不确定度，简称合成不确定度。

2.2.3 直接测量结果的标准不确定度的评定

1. A 类不确定度 u_A

在相同的条件下，对某物理量做 n 次的独立测量，得到的值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

(应为测量结果的最佳值)，其不确定度为

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-6)$$

按误差理论的高斯分布，如果不存在其他误差影响，则测量值范围 $[\bar{x} - u_A(\bar{x}), \bar{x} + u_A(\bar{x})]$ 中包括真值的概率为 68.3%；如扩大测量值范围为 $[\bar{x} - 1.96u_A(\bar{x}), \bar{x} + 1.96u_A(\bar{x})]$ ，则其中包括真值的概率为 95%。

2. B 类不确定度 u_B

当误差的影响仅使测量值向某一方向有恒定的偏离，这时不能用统计的方法评定不确定度，这一类的评定就是 B 类不确定度。

B 类评定，有的依据计量仪器说明书或鉴定书，有的依据仪器的准确度等级，有的则粗略地依据仪器分度值或经验。从这些信息中可以获得极限误差 Δ (或示值误差)，此类误差一般可视为均匀分布，而 $\frac{\Delta}{\sqrt{3}}$ 为均匀分布的标准差，则 B 类评定标准不确定度 u_B 为

$$u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (2-7)$$

3. 合成不确定度 σ

对一物理量测定之后，要计算测得值的不确定度，由于其测得值的不确定度来源不唯一，所以要合成其标准不确定度。在相同条件下，对待测量进行多次测量时，待测量的标准不确定度 σ 由 A 类不确定度和 B 类不确定度合成而得。由于各项误差的符号不一定相同，采用算术求和将可能增大合成值，因而采用平方和根法。所以，有

$$\sigma = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2-8)$$

4. 单次测量的不确定度

当无需、无法多次测量或仪器精密度差，只测量一次时，称为单次测量。对待测量进行单

次测量时,待测量的标准不确定度一般是估计它的最大值,因为误差的来源很多,而各实验又有各自的特点,所以确定统一的规则。但是,至少也不能少于仪器的最小分度值的一半。

2.2.4 间接测量结果的标准不确定度的评定

在许多实验和研究中,所得到的结果有时不是用仪器直接测量得到的,而是要把实验现场直接测量值代入一定的理论关系式中,通过计算才能求得所需要的结果,即间接测量值。由于直接测量值总有一定的不确定度,因此它们必然引起间接测量值也有一定的不确定度,也就是说直接测量不确定度不可避免地传递到间接测量值中去,从而产生间接测量不确定度。

间接测量结果的标准偏差的传递公式:从数学中知道,当间接测量值(y)与直接测量值($x_1, x_2, \dots, x_n$)有函数关系时,即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

则其微分式为

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n; \quad (2-9)$$

$$\frac{dy}{y} = \frac{1}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \left[\frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \right]. \quad (2-10)$$

根据式(2-9, 2-10),当直接测量值的误差($\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$)很小、并且考虑最不利的情况时,应是误差的累积和取绝对值。则可求间接测量值的误差 Δy 或 $\frac{\Delta y}{y}$ 为

$$\Delta y = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot |\Delta x_1| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot |\Delta x_2| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot |\Delta x_n|; \quad (2-11)$$

$$E = \frac{\Delta y}{y} = \frac{1}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \left[\left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot |\Delta x_1| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot |\Delta x_2| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot |\Delta x_n| \right]. \quad (2-12)$$

式(2-11, 2-12)就是由直接测量误差计算间接测量误差的标准偏差的传递公式,则有

$$s_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 s_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 s_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 s_{x_n}^2}. \quad (2-13)$$

式中: $s_{x_1}, s_{x_2}, \dots, s_{x_n}$ 分别为直接测量的标准偏差; s_y 为间接测量值的标准偏差。

因各 x_i 的标准不确定度为 σ_{x_i} , 则 y 的合成标准不确定度 σ_y 为

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{x_n}^2}. \quad (2-14)$$

2.2.5 测量结果的表示

测量结果表示如下: