



高等学校“十一五”规划教材

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

赵军良 主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校“十一五”规划教材

大学物理实验

主 编 赵军良

副主编 邹有连 刘玉金

杨 明

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会 2005 年颁布的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》,结合作者多年物理实验教学实践经验编写而成。打破了传统的按力、热、电、磁、光及近代物理实验分类的编排结构,分为基础实验、提高实验、设计实验和仿真实验。充分反映了近几年来大学物理实验课程教学改革的成果及其发展趋势,注重实验内容的新颖性、综合性和应用性的结合,在精选基本实验的基础上,又充实了大量具有强烈现代意识和高新技术色彩的实验题目,旨在拓宽学生的知识面,加深对实验内容的理解、掌握和应用。

本书可作为高等院校理工科非物理类专业大学物理实验课程的教科书或参考书,也可供高等师范院校、高等职业技术学院、电大等学校的相关专业使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/赵军良主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2010.2

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0598 - 8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 017125 号

书 名 大学物理实验

主 编 赵军良

责任编辑 王江涛 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮政编码 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 20.75 字数 492 千字

版次印次 2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

定 价 36.50 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

大学物理实验是学生进入大学后较早接触的一门全面系统的实验课程,是理工科学生必修的一门重要基础课。学好物理实验的基本知识和方法,掌握物理实验的基本技能,对于学生实验能力的培养和分析解决问题能力的提高有着重要意义。

本书根据教育部颁发的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》,结合编者多年物理实验教学实践经验编写而成。在编写过程中力求做到:从选题、内容叙述到仪器设备的选用等,都立足于当前学校实验室的条件和学生的实际水平;在实验技能的训练上,采取循序渐进、逐步提高的方式,在加强基础的前提下,增大提高性、设计性实验的比例,建立基础性、提高性、设计性和仿真性四个层次的新体系;通过大量提高性实验和一定数量的设计性实验及计算机仿真实验的训练,使物理实验与现代技术接轨,使学生在学习和掌握基本知识、基本仪器和基本方法的基础上,学会运用现代物理实验方法、手段和设计思想解决较复杂的物理实验问题,进一步提高学生的实验技能和动手能力。

本书由河南理工大学赵军良教授任主编,负责本书的选题、编辑和定稿工作。

编写分工为:赵军良执笔第1章、第2章、第5章、第6章、附录及实验4-16至实验4-23,刘玉金执笔实验3-1至实验3-6,邹有连执笔实验3-7至实验3-12,杨明执笔实验3-13至实验3-19,孙明俊执笔实验3-20至实验4-6,邹波蓉执笔实验4-7至实验4-11,河南理工大学陈金生执笔实验4-12至实验4-15。

在本书的编写过程中,得到了王怡录、张培峰、李凤云、李卫彬、曹伟涛、王晓雪、宋爱琴、刘振深、杜保立、王时茂、李旭升、王永强、韩旭、左小刘的大力协助和支持。同时,一些兄弟院校的教材也为本书的编写提供了很好的借鉴。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者提出批评和改进意见,编者将不胜感激。

编 者

2010年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 物理实验课的地位和作用	1
§ 1.2 物理实验课程的基本环节	1
第 2 章 测量误差与实验数据处理	4
§ 2.1 测量与误差	4
§ 2.2 测量的不确定度和测量结果的表示	7
§ 2.3 有效数字及其运算规则	12
§ 2.4 实验数据处理与作图要求	14
第 3 章 基础实验	20
实验 3-1 长度基本测量	20
实验 3-2 物体密度的测定	27
实验 3-3 气垫技术	33
实验 3-3.1 速度、加速度和重力加速度的测量	33
实验 3-3.2 验证动量守恒和机械能守恒	37
实验 3-4 金属杨氏模量的测量	40
实验 3-4.1 拉伸法测金属杨氏模量	40
实验 3-4.2 动态法测金属杨氏模量	45
实验 3-5 转动惯量的测量	48
实验 3-5.1 用三线摆测刚体的转动惯量	49
实验 3-5.2 用扭摆测刚体的转动惯量	53
实验 3-6 简谐振动的研究	58
实验 3-7 用落球法测量液体的黏性系数	62
实验 3-8 液体表面张力系数的测定	64
实验 3-8.1 用拉脱法测液体的表面张力系数	65
实验 3-8.2 用毛细管法测液体的表面张力系数	68
实验 3-9 冷却法测定金属的比热容	71
实验 3-10 导热系数的测定	74
实验 3-11 线性及非线性电阻伏安特性曲线的测绘	77
实验 3-12 简单控制电路	79

实验 3-13	电桥法测中、低值电阻	83
实验 3-13.1	惠斯通电桥测量中值电阻	83
实验 3-13.2	开尔文电桥测量低值电阻	87
实验 3-14	放电法测高电阻	93
实验 3-15	用电位差计测电池的电动势和内阻	95
实验 3-16	数字万用表的使用	100
实验 3-17	示波器的使用	105
实验 3-18	模拟法测绘静电场	114
实验 3-19	霍耳效应的研究	118
实验 3-20	螺线管磁场的测量	125
实验 3-21	薄透镜焦距的测量	129
实验 3-22	等厚干涉—劈尖和牛顿环	135
实验 3-23	用分光计测光学玻璃的折射率	140
第 4 章	提高实验	147
实验 4-1	声速的测定	147
实验 4-2	用玻尔共振仪研究受迫振动	152
实验 4-3	电表改装与校准	157
实验 4-4	RLC 串联电路特性的研究	164
实验 4-5	铁磁材料动态磁滞回线的测定	169
实验 4-6	单缝衍射及光强分布	174
实验 4-7	光栅的衍射	179
实验 4-8	偏振光的研究	182
实验 4-9	迈克尔孙干涉仪的调节和使用	188
实验 4-10	弗兰克—赫兹实验	193
实验 4-11	CCD 微机密立根油滴实验	198
实验 4-12	塞曼效应	203
实验 4-13	微波的特性研究	211
实验 4-14	硅光电池特性的研究	217
实验 4-15	PN 结正向压降温度特性的研究	221
实验 4-16	液晶物理特性	227
实验 4-17	核磁共振	230
实验 4-18	超声波探伤实验	235
实验 4-19	利用超声光栅测液体中的声速	241
实验 4-20	光纤传输技术实验	244
实验 4-21	电冰箱制冷系数的测量	249
实验 4-22	用非线性电路研究混沌现象	252
实验 4-23	高温超导体的临界温度和临界电流的测量	255

第 5 章 设计实验	259
实验 5-1 重力加速度的研究	262
实验 5-2 半导体温度计的设计	263
实验 5-3 设计组装万用表	266
实验 5-4 模拟电子秤	270
实验 5-5 光敏电阻的特性与开关的设计	273
第 6 章 仿真实验	277
§ 6.1 计算机仿真实验系统简介	277
§ 6.2 物理仿真实验的基本操作方法	279
§ 6.3 实验报告处理系统	283
§ 6.4 物理仿真实验示例	288
附录	304
附录 1 Origin 在大学物理实验中的应用	304
附录 2 中华人民共和国法定计量单位	313
附录 3 常用基本物理常量	315
附录 4 常用物理数据	315
参考文献	323

第1章 绪 论

§ 1.1 物理实验课的地位和作用

物理学是一门实验科学,实验在物理学的发展史上有其重要的地位和作用。物理理论建立在实验的基础上,同时又要接受实验的不断检验,而物理实验本身则必须以理论为指导。理论与实验的这一辩证关系是物理学发展的规律。从经典物理学发展到量子物理学,从宏观领域深入到微观领域,物理学中的许多成果都是理论与实验密切结合的产物。

大学物理实验是工科院校的一门基础实验课程,是学生进入大学后接受系统、全面实验技能训练的开端,也是后续实验课程的重要基础。在工科的整个教学过程中,它是一门单独开设的课程。物理实验的基本教学内容,如实验数据处理、误差分析与计算、物理量的测量方法等,在理论课教学中是无法学到的。通过实验,还有助于巩固、加深和理解理论课所学的内容。因此,我们在学习物理学时,应当注意理论联系实际,既要重视理论知识的学习,又要培养和提高实验能力。

大学物理实验教学的目的和任务是:

(1) 通过实验方法和实验技能的基本训练,要求学生做到:

① 能够自行阅读实验教材和资料,概括实验原理和方法的要点,做好实验前的准备。

② 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器,掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能。

③ 能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断。

④ 能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,分析实验结果,撰写合格的实验报告。

⑤ 能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(2) 培养并逐步提高学生观察和分析实验现象的能力以及理论联系实际的独立工作能力。通过对实验的观察、测量、分析和判断,加深对物理学某些概念和定律的理解。

(3) 培养学生文明实验的良好作风,严谨的科学实验素质,理论联系实际和实事求是的科学态度,爱护公物、遵守纪律的良好道德。

随着科学技术的飞速发展,要求现代工程技术人才必须具有深而广的理论和足够的现代科学实验所需要的能力,只有具备了这些能力,才能担负起国家现代化建设的重任。

§ 1.2 物理实验课程的基本环节

物理实验是在教师和教材的指导下,由学生独立进行的课程。为达到物理实验课程的目的,完成物理实验课程的任务,必须充分发挥学生的主动精神,调动学生的学习积极性,使

他们自觉地、创造性地获得知识和技能。为此,应当高度重视物理实验课程所特有的三个基本教学环节,即课前预习、实验过程和实验报告。

1. 课前预习

课前预习是做好实验的关键。

一次实验课的时间有限,从熟悉仪器到测出数据,任务繁重。若课前不明确实验的目的、要求、原理和方法,不知道要测量哪些物理量、用什么仪器和怎样测量,不明确实验的思路和基本过程,不了解哪些地方是本次实验的重点,到上课时就不可能做好实验。可以肯定地说,实验能否顺利进行,能否获得预期的结果,在很大程度上取决于预习得是否充分。因此,每次做实验之前必须认真预习。

预习时主要阅读实验教材,必要时还需参考其他资料,以求基本掌握实验的整体概况,明确实验目的,看懂实验原理,了解实验内容,知道实验步骤。对实验中使用的仪器和装置,要阅读教材中有关仪器介绍部分,了解使用方法和注意事项。当然,如果有条件,在实验室预习,才是最科学、最合理的方式。总之,要通过课前预习和思考,在脑海中形成一个初步的实验方案,并在此基础上写出预习报告。预习报告的内容包括实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容和步骤以及数据记录和处理表格。表格的设计要清晰、明确、简洁、规范。

2. 实验过程

实验过程是实验课的中心环节。

在动手实验之前,要先认识和清点所用仪器、装置和器具,了解其主要功能、量程、级别、操作方法和注意事项,不要急于实验。

实验时,要有目的、有计划地进行操作。

首先是布置、安装(或接线)和调试仪器。仪器的布局要合理,以方便操作和读数,特别要考虑到实验者和仪器的安全。合理选择仪器量程,严格遵守使用说明和操作规程,细致、耐心地把仪器调整到最佳工作状态。在电磁学实验中,接线完毕后,学生应自己做一次检查,再请指导教师复查,确认无误后才能接通电源。

调试完毕后即可开始实验。起初可进行探索性试验操作,粗略地观察一下实验过程,若无异常现象,便可正式进行实验。如有异常现象,应立即切断电源,认真分析,仔细排查,并向指导教师反映。待找出原因,排除异常后再开始进行实验。

测量时,要把原始数据整齐地记录在预习时已经准备好的数据处理表格中,注意数据的有效数字和单位。不要用铅笔记录,也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格中,这样容易出错,况且这已经不再是第一手的“原始记录”了。如果记录的数据有错误,可用一斜线轻轻划掉,把正确的原始数据写在其旁,但不得涂改数据。要永远记住,原始数据是实验最珍贵的资料。

一份完整的实验原始记录,除数据之外,还应包括实验日期、环境条件(温度、湿度、气压、阴晴风雨等气象状况)、观察到的有关现象以及主要仪器的名称、型号、级别、量程、编号等。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变,注意操作姿势,不要使仪器受到振动或移动。

实验完毕后,要暂时保持测试条件,请教师审阅实验记录,必要时也可能要重新测量。

最后,经教师确认并签字后,再复原整理仪器,离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是对所做实验的系统总结,是学生表达能力和信息交流能力的集中体现,也是交流实验成果的媒介。

实验报告应写在专用的“实验报告”上,要求层次分明、字迹清楚、文理通顺、简明扼要、图表规范、结论明确。书写实验报告是培养学生分析、总结问题的能力,提高文化素养和综合素质的一个重要方面。

实验报告的内容一般为:

- (1) 实验者姓名。
- (2) 实验的环境条件。
- (3) 实验名称。
- (4) 实验目的。
- (5) 实验仪器。主要包括型号、编号、量程、精度、最小分度值等。

(6) 实验原理。在对实验原理充分理解的基础上,用实验者自己的语言简要叙述有关的物理内容(包括电路图、光路图、原理和实验装置示意图),测量和计算所依据的主要公式,式中各量的物理含义、单位以及公式成立必须满足的实验条件等。

(7) 实验内容和步骤。除概括地写出实验进行的主要程序之外,还应包括实验中观察了哪些物理量,测量了哪些物理量,调节的要领和技巧,以便必要时重复或检验已经完成的实验。

(8) 数据处理。在数据处理中要完成计算、作图、误差估算及结果表达等工作。要把原始数据按有效数字列成科学的表格,使阅读者能纵观全局,一目了然。在数据处理和误差运算中,应有主要过程,做到言之有据、结果可信。实验结果的表达,不仅要指出测量值的大小,还须按要求用误差范围的估算或不确定度来评定测量结果。

(9) 分析讨论。分析讨论的内容相当广泛,可以深入探讨实验现象或进一步进行误差分析,也可以对实验本身的设计思想、实验仪器、实验方法的改进写出自己的心得体会或建设性意见,甚至于根本不同的意见。通过对分析讨论题的回答,还可以进一步深入理解物理实验的理论。分析讨论将为学生在更高层次上发挥自己的聪明才智提供一个自由思考的广阔空间。

以上只是提供了实验报告的一般格式。一份成功的实验报告,就是一篇科学论文的雏形,应力求用严谨的结构、流畅的文笔、清晰的思路和个性化的色彩,简洁地描述实验的内容、方法和步骤,表达实验所阐明的物理思想和概念,给出可信的明确结论。实验报告的撰写可以培养和提高学生的分析、表达和信息交流的能力。

第2章 测量误差与实验数据处理

§ 2.1 测量与误差

一、测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的。著名物理学家伽利略有一句名言:“凡是可能测量的,都要进行测量,并且要把目前无法度量的东西变成可以测量的。”物理测量的内容很多,大至日、月、星辰,小到原子、分子。现在人们能观察和测量到的范围,在空间方面已小到 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ cm,大到百亿光年,大小相差在 10^{40} 倍以上。在时间方面已短到 $10^{-23} \sim 10^{-24}$ s的瞬间,长达百亿年,两者相差也在 10^{40} 倍以上。在定量地验证理论方面,也需要进行大量的测量工作。因此可以说,测量是进行科学实验必不可少的极其重要的一环。

所谓测量,就是用一定的工具或仪器,通过一定的方法,直接或间接地与被测对象进行比较。测量包含两个必要的过程,一是对物理量进行检测,二是对测量的数据进行处理。在实验前,必须对所观测的对象进行分析研究,以确定实验方法和选择具有适当精度的测量仪器。在实验后,对测得的数据加以整理、归纳,用一定的方式(如列表或图解)表示出它们之间的相互关系,并对实验结果给予合理的解释,做出正确判断。

测量分直接测量和间接测量。直接测量是指把待测物理量直接与认定为标准的物理量相比较,例如用直尺测量长度和用天平测物体的质量。间接测量是指按一定的函数关系,由一个或多个直接测量物理量计算出另一个物理量,例如测物体密度时,先测出该物体的体积和质量,再用公式算出物体的密度。在物理实验中进行的测量,大多属于间接测量。

在一切条件都相同的情况下做多次测量,没有理由说各次测量的精度不同,就称为等精度测量;相反,条件不同的测量就称为非等精度测量。非等精度测量不能用一般求平均值的办法,需要加权平均,让误差小的测量在结果中占比例大些。大学物理实验中的测量,基本上都可以认为是等精度测量。

一个测量数据不同于一个数值,它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位,才具有特定的物理意义,这时它才可以称之为一个物理量。因此,测量所得的值(数据)应包括数值(大小)和单位,两者缺一不可。

目前,物理学上各种物理量单位,都采用中华人民共和国法定的计量单位,它以国际单位制(SI)为基础单位。国际单位制(SI)是在1971年第十四届国际计量大会上确定的。国际单位制(SI)基本单位包括七个基本量单位,它们是:长度——米(m),质量——千克(kg),时间——秒(s),电流——安培(A),温度——开尔文(K),物质的量——摩尔(mol),发光强度——坎德拉(cd)。

此外,国际单位制还有两个辅助单位:平面角单位——弧度(rad)和立体角单位——球面度(sr)。其他物理量的单位均可以由这些基本单位导出,称为国际单位制的导出单位。

二、误差

从测量的要求来说,人们总希望测量的结果能很好地符合客观实际。但在实际测量过程中,由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平以及种种因素的局限,不可能使测量结果与客观存在的真值完全相同,我们所测得的只能是某物理量的近似值。也就是说,任何一种测量结果的量值 x 与真值 x' 之间总会或多或少地存在一定的差值,测量值 x 与真值 x' 的差值叫做测量误差 Δ ,简称误差。即

$$\Delta = x - x' \quad (2-1-1)$$

测量总是存在着一定的误差,但实验者应该根据要求和误差限度来制定或选择合适的测量方案和仪器。不能不切合实际地要求实验仪器的精度越高越好,环境条件总是恒温、恒湿、越稳定越好,测量次数总是越多越好。一个优秀的实验工作者,应该是在一定的要求下,以最低的代价来取得最佳的实验结果。要做到既保证必要的实验精度,又合理地节省人力和物力。误差自始至终贯穿于整个测量过程之中,为此必须分析测量中可能产生各种误差的因素,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差做出评价。

三、误差的分类

误差的产生有多方面的原因,从误差的来源和性质上可分为偶然误差和系统误差两大类。

1. 偶然误差

偶然误差(又称随机误差)是指在相同条件下,多次测量同一物理量,其测量误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化。这种误差是由实验中多种因素的微小变动而引起的,例如实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动,测量仪器指示数值的变动,以及观测者本人在判断和估计读数上的变动等等。这些因素的共同影响使测量值围绕着测量的平均值产生涨落,这种变化量就是各次测量的偶然误差。偶然误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的,但对一个量进行足够多次的测量,则会发现它们的偶然误差是按一定的统计规律分布的,常见的分布有正态分布、均匀分布、 t 分布等。

常见的一种情况是:正方向误差和负方向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,数值很大的误差在没有错误的情况下通常不出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显,它就是一种最典型的分布规律——正态分布规律。

2. 系统误差

在相同条件下,多次测量同一物理量时,测量值对真值的偏离(包括大小和方向)总是相同的,这类误差称为系统误差。系统误差的来源大致有以下几种:

(1) 理论公式的近似性:例如单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 成立的条件之一是摆角趋于零,而在实验中,摆角为零的条件是不现实的。

(2) 仪器结构不完善:例如温度计的刻度不准,天平的两臂不等长,示零仪表存在灵敏阈等。

(3) 环境条件的改变:例如在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下校准的仪器拿到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中使用。

(4) 测量者生理心理因素的影响:例如记录某一信号时有滞后或超前的倾向,对准标志线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。

系统误差的特点是恒定性,不能用增加测量次数的方法使它减小。在实验中发现和消除系统误差是很重要的,因为它常常是影响实验结果准确程度的主要因素。能否用恰当的

方法发现和消除系统误差,是测量者实验水平高低的反映,但是又没有一种普遍适用的方法去消除误差,主要靠对具体问题作具体的分析和处理,要靠实验经验的积累。

3. 偶然误差和系统误差的关系

偶然误差和系统误差的区别不是绝对的,在一定条件下,它们可以相互转化。例如天平的砝码误差,对于制造厂家来说,它是偶然误差,但对于使用者来说,它又是系统误差。又如测量对象的不均匀性(如小球直径、金属丝的直径等),既可以当做偶然误差,又可以当做系统误差。有时偶然误差和系统误差混在一起,也难以严格加以区分。例如测量者使用仪器时的估读误差往往既包含有偶然误差,又包含有系统误差。这里的偶然误差是指他每次读数时偏大或偏小的程度是互不相同的,系统误差是指他读数时又总是有偏大或偏小的倾向。

除系统误差和偶然误差外,还可能发生人为读数、记录上的错误或仪器故障、操作不正确等造成的错误。错误不是误差,要及时发现并在数据处理时予以剔除。

四、误差的几个相关概念

(1) 精密度

精密度是指重复测量所得的结果相互接近(或离散)的程度,它的高低反映偶然误差的大小。即精密度越高,数据越接近,偶然误差越小;反之偶然误差就越大。

(2) 正确度

正确度是指测量值或实验结果与真值的符合程度,它的高低反映系统误差的大小。即正确度越高,测量值越接近真值,系统误差就越小;反之,系统误差就越大。

(3) 准确度

准确度(又称精确度)是精密度和正确度的综合反映。当偶然误差小到可以忽略不计,准确度等于正确度;当系统误差小到可以忽略或得到修正消除时,准确度等于精密度。两者都高,准确度就高;两者之一低或都低,则准确度低。

它们之间的关系可以通过打靶形象地表示出来,如图 2-1-1 所示。

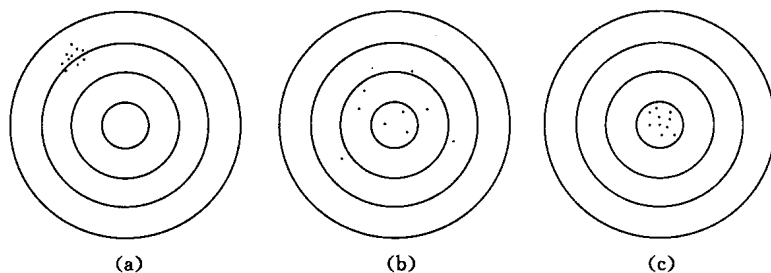


图 2-1-1 误差的几个相关概念示意图

(a) 精密度高; (b) 正确度高; (c) 准确度高

另外,“精度”这个词也经常出现在各类实验书中,其实它是一个含义不确切的词,通常是指准确度。

五、误差的表示形式

误差的表示形式有绝对误差和相对误差两种。绝对误差 $\pm \Delta x$ 表示测量结果 x 与真值 x' 间的相差范围,“ $\pm$ ”表示测量结果 x 可能比 x' 大或者比 x' 小。由测量结果 x 及其绝对误差 Δx 可以看出,真值所在的可能范围为 $x - \Delta x \leq x' \leq x + \Delta x$,或简写为 $x' = x \pm \Delta x$ 。但是

仅仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度,还需要看测定值本身的大小,为此引入相对误差的概念。

$$\text{相对误差} \quad E_r = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2-1-2)$$

表示绝对误差在所测物理量中所占的比重,一般用百分比表示。例如,测量一长度时得 1 000 m,绝对误差为 1 m,测另一长度时得 100 cm,而绝对误差为 1 cm,后者的相对误差为 1%,而前者为 0.1%,所以我们认为前者较后者更可靠。

由于误差的存在,任何测量值 x 都只能在一定近似程度上表示真值 x' 的大小,而误差范围大致说明这种近似程度。完整的测量结果,不仅要说明所得数值 x 及其单位,还必须说明相应的误差,一般用以下的标准形式表示:

$$x' = x \pm \Delta x (\text{单位}) \quad (2-1-3)$$

$$E_r = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2-1-4)$$

不标明误差的测量结果,在科学上是没有价值的。

如果待测量有理论值或公认值,可用百分差来表示测量的好坏,即

$$\text{百分差} \quad E_r = \frac{x - x'}{x'} \times 100\% \quad (2-1-5)$$

式(2-1-5)中, x 为测量值, x' 为公认值。

绝对误差、相对误差和百分差通常只取 1~2 位数字来表示。

§ 2.2 测量的不确定度和测量结果的表示

一、测量的不确定度

测量误差存在于一切测量中,由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度即为测量的不确定度,它给出测量结果不能确定的误差范围。一个完整的测量结果不仅要标明其量值大小,还要标出测量的不确定度,以表明该测量结果的可信赖程度。

目前世界上已普遍采用不确定度来表示测量结果的误差。我国从 1992 年 10 月开始实施的《测量误差和数据处理技术规范》中,也规定了使用不确定度评定测量结果的误差。

通常不确定度按计算方法分为两类,即用统计方法对具有随机误差性质的测量值计算获得的 A 类分量 Δ_A ,以及用非统计方法计算获得的 B 类分量 Δ_B 。

二、偶然误差与不确定度的 A 类分量

1. 偶然误差的分布与标准偏差

偶然性是偶然误差的特点。但是,在测量次数相当多的情况下,偶然误差仍服从一定的统计规律。在物理实验中,多次独立测量得到的数据一般可近似看做正态分布。正态分布的特征可以用正态分布曲线形象地表示出来,如图 2-2-2 所示。测量值 x 的正态分布函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2-2-1)$$

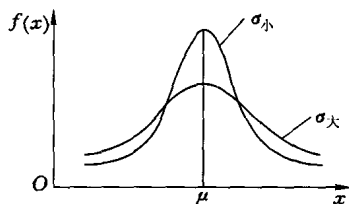


图 2-2-1 正态分布

其中, μ 表示 x 出现概率最大的值, 在消除系统误差后, μ 为真值; σ 称为标准偏差, 它反映测量值的离散程度。

定义

$$\xi = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$$

表示变量 x 在 (x_1, x_2) 区间出现的概率, 称为置信概率。

x 出现在 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 之间的概率为

$$\xi = \int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} f(x) dx = 0.683 \quad (2-2-2)$$

说明对任一次测量, 其测量值出现在 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 区间的可能性为 0.683。为了给出更高的置信水平, 置信区间可扩展为 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 和 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$, 其置信概率分别为

$$\xi = \int_{\mu-2\sigma}^{\mu+2\sigma} f(x) dx = 0.954 \quad \text{和} \quad \xi = \int_{\mu-3\sigma}^{\mu+3\sigma} f(x) dx = 0.997 \quad (2-2-3)$$

2. 多次测量平均值的标准偏差

尽管一个物理量的真值 μ 是客观存在的, 但由于随机误差的存在, 企图得到真值的愿望仍不现实, 我们只能估算 μ 值。根据偶然误差的特点, 可以证明如果对一个物理量测量了相当多次后, 分布曲线趋于对称分布, 其算术平均值就是接近真值 μ 的最佳值。如对物理量 x 测量 n 次, 每一次测量值为 x_i , 则算术平均值 $\bar{x}$ 为

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

x 的标准偏差可用贝塞尔公式估算为

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

其意义为任一次测量的结果落在 $(\bar{x} - \sigma_x)$ 到 $(\bar{x} + \sigma_x)$ 区间的概率为 0.683。

由于算术平均值是测量结果的最佳值, 最接近真值, 因此我们更希望知道 $\bar{x}$ 对真值的离散程度。误差理论可以证明 $\bar{x}$ 的标准差为

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

上式说明, 平均值的标准差是 n 次测量中任意一次测量值标准差的 $1/\sqrt{n}$, 显然 $\sigma_{\bar{x}}$ 小于 σ_x 。 $\sigma_{\bar{x}}$ 的意义是待测物理量处于 $\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$ 区间内的概率为 0.683。从上式中可以看出, 当 n 为无穷大时, $\sigma_{\bar{x}} = 0$, 即测量次数无穷多时, 平均值就是真值。

值得注意的是测量次数相当多时, 测量值才近似为正态分布, 上述结果才成立。在测量次数较少的情况下, 测量值将呈 t 分布。测量次数较少时, t 分布偏离正态分布较多; 当测量次数较多(例如多于 10 次)时, t 分布趋于正态分布。 t 分布时, $\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$ 的置信概率不是 0.683。在这种情况下, $x = \bar{x} \pm t_{\xi} \sigma_{\bar{x}} = \bar{x} \pm t_{\xi} (\sigma_x / \sqrt{n})$ 的置信概率是 ξ 。在物理实验中, 我们建议置信概率采用 0.95。 $t_{0.95}$ 和 $t_{0.95} / \sqrt{n}$ 的值见表 2-2-1。

表 2-2-1 $t_{0.95}$ 和 $t_{0.95}/\sqrt{n}$ 的值

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	≥ 100
$t_{0.95}$	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09	≤ 1.97
$t_{0.95}/\sqrt{n}$	2.48	1.59	1.204	1.05	0.926	0.834	0.770	0.715	0.553	0.467	≤ 0.139

3. 不确定度的 A 类分量

不确定度的 A 类分量一般取多次测量平均值的标准偏差,一般取置信概率为 0.95。从表 2-2-1 中可以看出,当 $n=6$ 时,有 $t_{0.95}/\sqrt{n} \approx 1$,取 $\Delta_A = \sigma_x$,即在置信概率为 0.95 的前提下,A 类不确定度 Δ_A 可用测量值的标准偏差 σ_x 估算。

三、不确定度的 B 类分量

不确定度的 B 类分量 Δ_B 是用非统计方法计算的分量,如仪器误差等。不确定度的 B 类分量 Δ_B 在我们的物理实验中可简化用仪器标定的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表述,即不确定度的 B 类分量 Δ_B 取仪器标定的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ 。某些常用实验仪器的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ 见表 2-2-2。

表 2-2-2 某些常用实验仪器的最大允差

仪器名称	量 程	最小分度值	最大允差
钢板尺	150 mm	1 mm	± 0.10 mm
	500 mm	1 mm	± 0.15 mm
	1 000 mm	1 mm	± 0.20 mm
钢卷尺	1 m	1 mm	± 0.8 mm
	2 m	1 mm	± 1.2 mm
游标卡尺	125 mm	0.02 mm	± 0.02 mm
		0.05 mm	± 0.05 mm
螺旋测微计(千分尺)	0~25 mm	0.01 mm	± 0.004 mm
七级天平(物理天平)	500 g	0.05 g	0.08 g(接近满量程)
			0.06 g(1/2 量程附近)
			0.04 g(1/3 量程附近)
三级天平(分析天平)	200 g	0.1 mg	1.3 mg(接近满量程)
			1.0 mg(1/2 量程附近)
			0.7 mg(1/3 量程附近)
普通温度计(水银或有机溶剂)	0~100 $^{\circ}\text{C}$	1 $^{\circ}\text{C}$	± 1 $^{\circ}\text{C}$
精密温度计(水银)	0~100 $^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$	± 0.2 $^{\circ}\text{C}$
电表(0.5 级)			0.5% $\times$ 量程
电表(0.1 级)			0.1% $\times$ 量程
数字万用电表			$\alpha\% \cdot U_x + \beta\% \cdot U_m$ (其中 U_x 表示测量值即读数, U_m 表示满度值即量程, α, β 对不同的测量功能有不同的数值。通常将 $\beta\% \cdot U_m$ 用“字数”表示,如“2 个字”等)

1. 测量结果的表示

若用不确定度表征测量结果的可靠程度,则测量结果需写成下列标准形式

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm u \\ u_r = \frac{u}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases} \quad (2-2-7)$$

式中, $\bar{x}$ 为多次测量的平均值; u 为合成不确定度; u_r 为相对不确定度。合成不确定度 u 由 A 类不确定度 Δ_A 和 B 类不确定度 Δ_B 采用均方根合成方式得到

$$u = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (2-2-8)$$

若 A 类分量有 n 个, B 类分量有 m 个, 那么合成不确定度为

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{A_i}^2 + \sum_{i=1}^m \Delta_{B_i}^2} \quad (2-2-9)$$

2. 直接测量的不确定度计算过程

(1) 单次测量时, 大体有三种情况:

- ① 仪器精度较低, 偶然误差很小, 多次测量读数相同, 不必进行多次测量;
- ② 对测量的准确程度要求不高, 只测一次就够了;
- ③ 因测量条件的限制, 不可能多次重复测量。

单次测量的结果也用式(2-2-7)表示测量结果。这时 u 常用极限误差 Δ 表示。 Δ 的取法一般有两种: 一种是仪器标定的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$; 另一种是根据不同仪器、测量对象、环境条件和仪器灵敏阈等估计一个极限误差。两者中取数值较大的作为 Δ 值。

(2) 多次测量时, 不确定度以下面的过程进行计算:

- ① 求测量数据的算术平均值: $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$;
- ② 修正已知的系统误差, 得到测量值(如螺旋测微计必须消除零误差);
- ③ 用贝塞尔公式计算标准差: $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}$;
- ④ 标准差乘以一置信参数 $t_{0.95}/\sqrt{n}$, 若测量次数 $n=6$, 取 $t_{0.95}/\sqrt{n}=1$, 则 $\Delta_A = \sigma_x$;
- ⑤ 根据仪器标定的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ 确定 Δ_B , 即 $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$;
- ⑥ 由 Δ_A 、 Δ_B 计算合成不确定度: $u = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$;
- ⑦ 计算相对不确定度: $u_r = \frac{u}{\bar{x}} \times 100\%$;
- ⑧ 给出测量结果: $\begin{cases} x = \bar{x} \pm u \\ u_r = \frac{u}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$

例 2-2-1 在室温 23°C 下, 用共振干涉法测量超声波在空气中传播时的波长 λ , 数据见表:

N	1	2	3	4	5	6
λ/cm	0.687 2	0.685 4	0.684 0	0.688 0	0.682 0	0.688 0

试用不确定度表示测量结果。