

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理 实验教程 (第二版)

◎主编 袁国祥

◎副主编 柴爱华 戈迪

高等教育出版社

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理 实验教程 (第二版)

Daxue Wuli Shiyan Jiaocheng

◎主编 袁国祥

◎副主编 柴爱华 戈迪

内容提要

本书为袁国祥主编《大学物理实验教程》修订版,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》(2010年版),结合多年的教学实践编写而成,主要内容包括:测量、误差及数据处理、仪器概述、基础实验、近代及综合实验、设计性实验,并简要介绍了物理实验的基本方法、实验原理、数据处理方法以及实验结果正确表达方法等基础知识。本书将大学物理实验与工学进行跨学科知识的结合,并借鉴各种测试方法和手段,与现代科学技术进行融合,使内容更具综合性和时代气息。

本书可作为高等学校应用型工科非物理类专业的教材,也可供有关专业从业者和社会读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程 / 袁国祥主编. —2版. —北京:高等教育出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-04-044197-0

I. ①大… II. ①袁… 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(2015)第 272384 号

策划编辑 高聚平 责任编辑 忻蓓 封面设计 于文燕 版式设计 马敬茹
插图绘制 郝林 责任校对 王雨 责任印制 赵义民

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京市密东印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm×1092mm 1/16	版 次	2013 年 1 月第 1 版
印 张	12.5		2016 年 1 月第 2 版
字 数	300 千字	印 次	2016 年 1 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	22.60 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 44197-00

前 言

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自然科学。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。

大学物理实验是高等学校理工科类专业对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是大学生从事科学实验和研究工作的入门向导,是一系列后续专业实验课程的重要基础。

大学物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、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、提高科学素质的重要基础。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应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

本书是在第一版的基础上,根据实验仪器的更新和扩充改编而成。是多年来大学物理实验教学改革的结晶,是以教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程基本要求》(2010年版)所提出的普通高校物理实验课程具体任务为依据,在多年物理实验教学改革的的基础上,结合面向21世纪高等教育教学改革发展的需要而编写的,可作为高等学校理工科类“大学物理实验”课程的教材。

本书分为第一篇绪论、第二篇实验和第三篇附录,并辅以《大学物理实验活页册》一书。该体系的宗旨是:首先通过实验中的各个环节来培养学生在实验方法、实验技能、误差分析和实验报告等方面初级的能力和严谨的科研作风。其次,在书中对各实验的原理都作了简明扼要的论述,对某些较深的内容,力求深入浅出地阐述其物理意义。同时,不另辟专章讲述实验仪器,而是把实验内容和实验仪器的介绍融于一体(或附在每个实验之后),并较详细地说明了实验的具体方法,以便学生进入实验室后能很快独立地拟定合理的实验步骤,正确使用仪器,并在指定时间内独立地完成实验。在每一个实验的开头均简单地叙述了该实验的意义或提供一些背景知识,以期激发学生的学习热情。在结尾给出思考题,促使学生在学习过程中积极思考,进一步总结,加深理解。除基本要求外,有些实验还附有一些较灵活的提高内容,供有余力的学生作进一步的钻研,以利于因材施教。

实验教材的编写不可能脱离实验室的建设和发展。本书是在历届所使用的教材基础上,经多次调整、更新和扩充而成,凝聚了所有相关教师的智慧和心血,“我们是站在巨人的肩上!”对于他们在本教材中的贡献,编者充满了感激和敬佩之情!

参加此次编写工作的老师是:戈迪、宁丽娜、祁月盈、杨琴、陆佩、张敏、段晓勇、胡伟琴、柴爱华、袁国祥(按姓氏笔画排序)。

物理实验室的老师和其他不署名的老师也为本书的编写做了许多工作。在此,对他们表示深深的谢意。由于成书时间匆忙和编者水平所限,书中难免存在不少错误和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2015.8

目 录

绪论	1
第一节 怎样学好大学物理实验课程	1
第二节 测量与误差	5
第三节 有效数字及其运算	10
第四节 不确定度的计算及测量结果的表示	13
第五节 实验数据处理方法	21
第六节 物理实验的基本方法	27
第七节 计算机技术在物理实验数据处理中的应用	30
习题	38
实验	41
实验一 长度测量	41
实验二 拉伸法测弹性模量	47
实验三 扭摆法测物体的转动惯量	51
实验四 测定气体导热系数	55
实验五 用气垫导轨验证牛顿第二定律	61
实验六 拉脱法测液体表面张力系数	66
实验七 气体比热容比的测定	71
实验八 电学元件伏安特性的测量	76
实验九 电压补偿及电流补偿实验	85
实验十 示波器的原理和使用	89
实验十一 霍耳效应及其应用	99
实验十二 霍耳法测磁场	105
实验十三 直流电桥测电阻	110
实验十四 RC 串联电路暂态过程的研究	116
实验十五 声速的测量	119
实验十六 迈克耳孙干涉仪测 He-Ne 激光的波长	123
实验十七 光电效应测定普朗克常量	128
实验十八 分光计的调节和三棱镜顶角的测定	136
实验十九 光栅衍射	141
实验二十 光的等厚干涉——牛顿环	146

II 目录

实验二十一	透镜焦距的测定	150
实验二十二	弦振动共振波形及波的传播速度测量	155
实验二十三	光纤通信原理	160
实验二十四	用电流场模拟静电场	166
实验二十五	密立根油滴实验	171
实验二十六	激光全息照相	176
附录		181
附录 A	物理量单位	181
附录 B	用计算器计算 S_x 和 \bar{x} 值	183
附录 C	实验报告范例	184
参考文献		191

第一节 怎样学好大学物理实验课程

一、物理实验的地位和作用

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自然科学。物理学本质上是一门实验科学。

物理学的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。物理学的研究方法通常是在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析、抽象和概括,建立物理模型,探索物理规律,进而形成物理理论。物理规律是实验事实的总结,而物理理论的正确与否需要实验来验证。“大学物理”和“大学物理实验”是两门关系密切的课程。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。

我们学习物理学,要认识各种物理现象,掌握物理现象形成与演变的规律,了解各种实验方法。而物理实验需要数学和物理的理论指导,建立起数学和物理模型,在物理实验过程中,通过理论的运用与现象的观测、分析,使理论与实验相互补充,以加深和扩大对物理知识的理解。

物理实验的任务不仅是观察物理现象,更重要的是找出物理现象中各物理量之间的数量关系,找出它们变化的规律。任何一个物理定律的确定,都必须依据大量的实验素材。即使已经确定的物理定律,如果出现了新的实验事实和这个定律相违背,那么便需要修正原有的物理定律或物理理论,因此,物理学本质上是一门实验科学,物理实验是物理理论的基础,它是物理理论正确与否的试金石。

物理实验也是推动科学技术发展的有力工具。20世纪以来科学技术的发展是建立在实验的基础上的,如现代核技术是建立在发现铀、钚和镭等元素具有天然放射性、 α 粒子散射实验、重核裂变和实现核的链式反应等物理实验基础之上的,然后才有后来的原子弹、氢弹的爆炸,核电站的建立。再以激光技术为例,如激光通信、激光熔炼、激光切割、激光钻孔、激光全息术、激光外科手术和激光武器几乎都是从物理实验室中走出来的。而信息技术则是在量子力学、Fermi-Dirac统计、Bloch理论和能带理论的建立与验证的基础上发展起来的,人类于1947年在物理实验室中研制出晶体管,才有了现在的大规模集成电路、超大规模集成电路,集成度以每十年一千倍的速度增长。可见,现代技术的突破,大多是从实验室中诞生的。

物理实验既为开拓新理论、新领域奠定基础,又是丰富和发展物理学应用的广阔天地。最近数十年来,物理学和其他学科一样发展很快,尤其是核物理、激光、电子技术和计算机等现代化科学技术的发展,更反映了物理实验技术发展的新水平。科学技术的发展越来越体现出物理实验技

术的重要性,基于这方面的原因,人们逐渐感到理工科及师范院校加强对学生进行物理实验训练的重要性.理论课是进行物理实验必要的基础,在实验过程中,通过理论的运用与现象的观测分析,理论与实验相互补充,从而加深和扩大学生的物理知识.物理实验是高等理工科院校和师范院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是大学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端,可为今后从事科学研究和工程实践打下扎实的基础.

二、大学物理实验课程的任务

物理实验是一门独立的必修基础课程,是高校进行科学实验训练的一门重要的基础课程,也是素质教育的重要环节.物理实验在培养学生运用实验手段观察、分析、发现、研究和解决问题,进行科学实验基本训练,提高动手能力和科学实验素养等方面都起着重要的作用,同时也为学生今后的学习、工作奠定良好的实验基础.物理实验课的主要任务是:

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习有关实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深对物理学原理的理解,提高学习能力.

2. 培养和提高学生的科学实验能力,包括能够通过阅读实验教材或资料做好实验前的准备工作,能够自己动手组建实验测量系统,能够正确使用仪器,能够运用物理学原理对实验现象进行观察、分析和判断,能够正确记录、处理实验数据,绘制图表,撰写合格的实验报告,能够完成具有设计性内容的实验.

3. 培养学生的理论联系实际和实事求是的科学作风、探索精神、创新精神和严格、细致、实事求是、一丝不苟的科学态度,培养与提高学生的自主学习能力和创新能力,培养学生善于动手、乐于动手、遵守操作规程、爱护实验室财产、注意安全等良好的科学学习习惯.

实验教学是以培养学生科学实验能力与提高学生科学实验素养为重点,使学生在获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力以及培养严肃认真的作风、实事求是的科学态度等方面得到训练与提高.

三、学习物理实验课程的具体要求

1. 学好误差理论

误差理论是大学物理实验中进行数据测量和处理所必备的基础知识.每一个物理实验都要先进行测量,再对所得的数据进行数据处理得出结论,这两个过程都需要误差理论作为基础知识.只有掌握了误差理论,我们才能得到正确而合理的实验数据,只有很好地掌握了误差理论,才能够对所得的实验数据进行精确、合理的计算,得出严格、精确的实验结论,最终对该实验成功与否做出判断.误差理论与每一个物理实验息息相关,至关重要.掌握了误差理论,是确保每个实验都顺利完成的关键.另外,误差理论也是其他学科相关实验的数据处理的理论基础.

2. 物理实验课前的预习

每个实验都要分三步进行,即:预习(实验前完成)、实验记录(实验中完成)、数据处理(实验后完成).那么,怎样进行预习呢?

实验前的预习是实验的基础,是一次“思想实验”的练习,即在课前认真阅读实验教材(讲义)和有关资料,弄清实验原理、方法和实验目的,然后在脑子中“操作”这一实验,拟出实验步骤,思考可能出现的问题和得出的结论,最后写出预习报告.

物理实验课与理论课不同,它的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立完成实验任务.因此,实验前必须认真阅读教材,做好预习.预习的内容包括以下几个方面:

(1) 实验目的:通过该实验,要得到或验证什么结论,从该实验中能学到什么。

(2) 实验原理:要认真阅读实验教材、参考资料,事先对实验内容作全面的了解。如果相应的理论尚未接触,一定要找到相应的参考资料进行预习。该实验通过什么途径得出结论,实验中用到了哪些物理理论,必须对基本方程、表达式和原理图有足够的理解和掌握。要求写出主要原理公式及简要说明,画出必要的原理图、电路图或光路图。

(3) 实验仪器:对相应的实验仪器要有一定的了解,掌握仪器使用过程中应该注意的事项。

(4) 实验任务、步骤及注意事项:结合实验原理,明确每个实验有哪些步骤,每个步骤是如何进行的,要达到什么目的。重点要写出“做什么,怎么做”,哪些是直接测量,各用什么仪器和方法测量,哪些是间接测量,结果的不确定度如何估算等。

(5) 数据处理:弄清每个实验后面实验处理版块所附的表格,养成科学记录实验数据的良好习惯,画出记录数据的表格。

在进行预习时,应该把精力重点放在对实验原理的理解上。要在实验报告册上完成预习报告。用简短的文字扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄,力求做到图文并茂,尽量用作图的方法来表示原理图、电路图和光路图。写出实验所用的主要公式,说明式中各物理量的意义和单位,以及公式适用条件(或实验必要条件)。我们要求:在实验原理版块,必须列出基本方程、公式和必要的原理图,这是预习的重点!

注意:未完成预习和预习报告者,教师有权停止其实验或成绩降挡。

3. 实验操作

实验操作的内容包括仪器的安装与调整,观察实验现象与选择测试条件,读数与数据记录等。在实验操作中要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种故障,而不能过分地依赖教师。

仪器:记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个很好的工作习惯,便于以后对实验进行复查。

过程:实验内容和观测现象记录。

数据:数据记录应做到整洁、清晰而有条理,便于计算与复核,达到省工省时的目的;在标题栏内要注明单位;数据不得任意涂改;确定测错而无用的数据,可在旁边注明“作废”字样,不要任意删去。

进入实验室,要遵守实验室规则,实验过程中对观察到的现象和测得的数据要及时进行判断,判断它们是否正常与合理。实验过程中可能会出现故障,这时,一定要在教师的指导下,分析故障原因,学会排除故障的本领。实验过程中,要把测得的实验数据填写到实验报告册的原始数据记录表中。对所得结果要做出粗略的判断,与理论预期相一致后,再交教师签字认可。教师检查、签字确认无误后,实验完成。

注意:离开实验室前,要整理好所用的仪器,做好清洁工作,数据记录须经教师审阅签名。

4. 实验报告

实验报告是实验工作的总结,一份好的实验报告还应体现清晰的思路、见解和新的启迪。要养成在实验操作后在预习报告的基础上尽早写出实验报告的习惯,即对原始数据进行处理和分析,得出实验结果并进行不确定度的评估和讨论。这是完成一个实验题目的最后程序,也是对实验进行全面总结分析的一个过程,必须予以高度重视。

依据误差理论,进行结果计算与误差计算:计算时先将文字公式化简,再代入数值进行运算,

误差计算要预先写出误差公式。

实验结果:按较准确形式写出实验结果.在必要时,注明结果的实验条件.

实验讨论及作业:对实验结果进行分析讨论(对实验中出现的说明和讨论),以及写出实验心得或建议等,完成教师指定的作业题.

编写实验报告有助于锻炼逻辑思维能力,把自己在实验中的思维活动变成有形的文字记录,发表自己对本次实验结果的评价和收获.实验报告可供他人借鉴,促进学术交流.因此,编写实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明扼要.

注意:预习报告、数据记录和实验报告均用实验室编制的实验报告册.

5. 实验室规则

为了保证实验正常进行,以及培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,特制定下列规则,望同学们遵守执行.

(1) 学生应在课程表规定时间内进行实验,严禁无故缺席或迟到.实验时间若要更改,须经实验室同意.

(2) 学生在每次实验前对该实验应进行预习,并完成预习报告,进入实验室后,应将预习报告由教师检查,经过教师检查认为合格后,才可以进行实验.

(3) 实验时应携带必要的物品,如文具、计算器和草稿纸等.

(4) 进入实验室后,根据实验卡片框或仪器清单核对自己使用的仪器是否缺少或损坏.若发现问题,应向教师或实验室管理员提出.未列入清单的仪器,另向管理员借用,实验完毕后归还.

(5) 实验前应细心观察仪器构造,操作应谨慎细心,严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项.尤其是电学实验,线路接好后先经教师或实验室工作人员检查,经许可后才可接通电路,以免发生意外.

(6) 实验完毕前应将实验数据交给教师检查,对于实验合格者,教师予以签字通过.余下时间在实验室内进行实验计算与做作业题,待下课后方可离开.实验不合格或请假缺课的学生,由指导教师登记,通知在规定时间内补做.

(7) 实验时应注意保持实验室整洁、卫生、安静.实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐.

(8) 如有仪器损坏应及时报告教师或实验室工作人员,并填写损坏单,注明损坏原因.赔偿办法根据学校规定处理.

综上所述,通过实验课的教学,使学生的智能得到全面的训练和提高.各类实验的方法、技巧的训练应由易到难、循序渐进.在规范、严格要求的前提下,也要有意识地进行强化训练.随着实验课的深入进行,逐步培养学生自觉、独立地完成实验的能力,由封闭式“黑匣子”实验室,向开放型、研究型实验室过渡,培养出新世纪的合格人才.

第二节 测量与误差

一、测量的分类

任何实验都离不开测量,没有测量就没有科学.在一定条件下,任何物理量都必然具有某一客观真实的数据.所谓测量,就是以测量出某一物理量值为目的的一系列有意识的科学实践活动.

1. 测量和单位

所谓测量,就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较,确定它是标准量的多少倍.这个标准量称为该物理量的单位,这个倍数称为待测量的数值.可见,一个物理量必须由数值和单位组成,两者缺一不可.

按测量方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量;按测量条件的不同,测量又分为等精度测量和不等精度测量.

选作比较用的标准量必须是国际公认的、唯一的和稳定不变的.各种测量仪器,如米尺、秒表、天平等,都有合乎一定标准的单位和与单位成倍数的标度.

本教材采用国际上通用的国际单位制(SI),在附录中列出了国际单位制的基本单位和部分导出单位,供读者查阅.

2. 直接测量和间接测量

直接测量是把一个量与同类量直接进行比较以确定待测量的量值.一般基本量的测量都属于此类,如用米尺测量物体的长度,用天平称铜块的质量,用秒表测量单摆的周期等.仪表上所标明的刻度或从显示装置上直接读取的值,都是直接测量的量值.

直接比较	——	直接测量	}	——	量数和单位(物理量值)
间接比较	——	间接测量			

在物理实验中,能够直接测量的量毕竟是少数,大多数是根据直接测量所得数据,根据一定的公式,通过运算,得出所需要的结果.例如,直接测出单摆的长度 l 和单摆的周期 T ,应用公式

$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$,以求当地的重力加速度 g ,这种测量称为间接测量.在误差分析和估算中,要注意直接测量量与间接测量量的区别.

直接测量量与间接测量量的区别.

3. 等精度测量和不等精度测量

对某一量 N 进行多次测量,得 k 个测量值: $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$, 如果每次测量都是在相同的条件下进行的,则没有理由认为所得的 k 个值中,某一个值比另一个值要测得更准确些.在这种情况下,所进行的一系列测量称为等精度测量.所谓相同条件的含义,是指同一个人,用同一台仪器,每次测量的周围条件都相同(如测量时环境、气温、照明情况等未变动).这种情况就可认为各测量值的精确程度是相同的.对某一量 N ,进行了 k 次测量,得到 k 个值: $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$, 如果每次测量的条件不同,那么这些值的精确程度不能认为是相同的.在这种情况下,所进行的一系列测量叫做不等精度测量.例如,同一实验者用精度不同的 3 种天平称量某一物体质量 m ,得到 3 个值 m_1, m_2, m_3 ,或者用 3 种不同的方法测量某一物质的密度 ρ ,得 3 个值 ρ_1, ρ_2, ρ_3 ,这都是不等精度测量.

二、误差分类及其处理方法

采用实验的方法去研究事物的客观规律,总是在一定的环境(温度、湿度等)和仪器条件下进行的,由于测量条件(环境、温度、湿度等)的变化以及仪器精度的不同,因而在任何测量中,测量结果与待测量客观存在的真值之间总存在着一定的差异,也就是说误差是永远存在的.为了描述测量中这种客观存在的差异性,可以引进测量误差的概念.

误差就是测量值与客观真值之差.即:误差 = 测量值 - 真值

被测量的真值是一个理想概念,一般来说真值是不知道的(否则就不必进行测量了).为了对测量结果的误差进行估算,我们用约定真值来代替真值求误差.所谓约定真值就是被认为是非常接近真值的值,它们之间的差别可以忽略不计.一般情况下,常把多次测量结果的算术平均值、标称值、校准值、理论值、公认值、相对真值等作为约定真值来使用.

上面定义的误差是绝对误差.在没有特别指明时,误差就是用绝对误差来表示.设测量值的真值为 X , 则测量值 x 的绝对误差

$$\Delta x = x - X$$

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.例如,用同一仪器进行两次测量:① 测量 10 m 的物体,相差 2 cm; ② 测量 20 m 的物体,相差 2 cm,两次测量绝对误差相同,但是,哪次测量得准确一些呢?

显然,只有绝对误差还难以评价测量结果的可靠程度,因此引入相对误差的概念.相对误差是绝对误差与真值之比,真值不能确定则用约定真值.在近似情况下,相对误差也往往表示为绝对误差与测量值之比.相对误差常用百分数表示.即

$$E = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \approx \frac{|\Delta x|}{X} \times 100\%$$

如果待测量有理论值或公认值,也可用百分差来表示测量的好坏.即

$$\text{百分差 } E_0 = \frac{|\text{测量值 } x - \text{公认值 } x'|}{\text{公认值 } x'} \times 100\%$$

相对误差 E 和百分差 E_0 通常只取 **2** 位有效数字并且以百分数形式来表示.

因此,在测量过程中,我们要建立起误差永远伴随测量过程始终的实验思想.不标明误差的测量结果,在科学上是没有价值的.

既然测量不能得到真值,那么怎样才能最大限度地减小测量误差,并估算出误差的范围呢?要回答这些问题,首先要了解误差产生的原因及其性质.

测量误差主要来源于:仪器误差,环境误差,人员误差,方法误差.为了便于分析,根据测量误差的性质把它们归纳为系统误差和随机误差两大类.

1. 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.系统误差主要来源有以下几方面:

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

(2) 实验理论近似性或实验方法不完善,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,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,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,如计时的滞后,习惯于斜视读数等。

系统误差一般应通过校准测量仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。发现并减小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、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。实验结果是否正确,往往在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因此对系统误差不能轻易放过。

在实际测量中,如果判断出有系统误差存在,就必须进一步分析可能产生系统误差的因素,想方设法减小和消除系统误差。由于测量方法、测量对象、测量环境及测量人员不尽相同,因而没有一个普遍适用的方法来减小或消除系统误差。

下面简单介绍几种减小和消除系统误差的方法和途径:

① 从产生系统误差的根源上消除。从产生系统误差的根源上消除误差是最根本的方法,通过对实验过程中的各个环节进行认真仔细分析,发现产生系统误差的各种因素,可以从下面几个方面采取措施从根源上消除或减小误差:采用近似性较好又比较切合实际的理论公式,尽可能满足理论公式所要求的实验条件;选用能满足测量误差所要求的实验仪器装置,严格保证仪器设备所要求的测量条件;采用多人合作,重复实验的方法。

② 引入修正项消除系统误差。通过预先对仪器设备将要产生的系统误差进行分析计算,找出误差规律,从而找出修正公式或修正值,对测量结果进行修正。

③ 采用能消除系统误差的方法进行测量。对于某种固定的或有规律变化的系统误差,可以采用交换法、抵消法、补偿法、对称测量法、半周期偶数次测量法等特殊方法进行清除。采用什么方法要根据具体的实验情况及实验者的经验来决定。

无论采用哪种方法都不可能完全将系统误差消除,只要将系统误差减小到测量误差要求允许的范围内,或者系统误差对测量结果的影响小到可以忽略不计,就可以认为系统误差已被消除。

2. 随机误差

随机误差(偶然误差)是指在同一被测量的多次测量过程中,测量误差的绝对值与符号以不可预知(随机)的方式变化并具有抵偿性的测量误差分量。

实践和理论证明,大量的随机误差服从正态分布(高斯分布)规律。正态分布的曲线如图 0-1 所示。图中的横坐标表示误差 $\Delta x = x_i - \bar{X}$,纵坐标为误差的概率密度 $f(\Delta x)$ 。其数学表达式为

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}}$$

式中的特征量 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty)$$

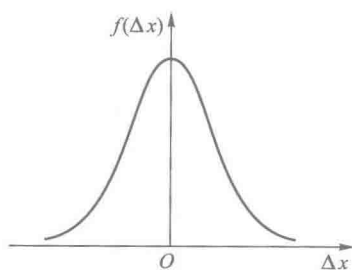


图 0-1 随机误差分布特点

称为总体标准误差,其中 n 为测量次数.

σ 表示的概率意义可以从 $f(\Delta x)$ 函数式求出.由概率论可知,误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率 P 就是图 0-1 中该区间内 $f(\Delta x)$ 曲线下的面积,表示为

$$P(-\sigma < \Delta x < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta x) d\Delta x = 68.3\%$$

因此, σ 所表示的意义就是:做任何一次测量,测量误差落在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 之间的概率为 68.3%. σ 并不是一个具体的测量误差值,它提供了一个用概率来表达测量误差的方法.

$[-\sigma, +\sigma]$ 称为置信区间,其相应的概率 $P(\sigma) = 68.3\%$ 称为置信概率.显然,置信区间扩大,则置信概率提高.置信区间取 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 、 $[-3\sigma, +3\sigma]$, 相应的置信概率 $P(2\sigma) = 95.4\%$, $P(3\sigma) = 99.7\%$.

图 0-2 是不同 σ 值时的 $f(\Delta x)$ 曲线. σ 值小,曲线陡且峰值高,说明测量值的误差集中,小误差占优势,各测量值的分散性小,重复性好.反之, σ 值大,曲线较平坦,各测量值的分散性大,重复性差.

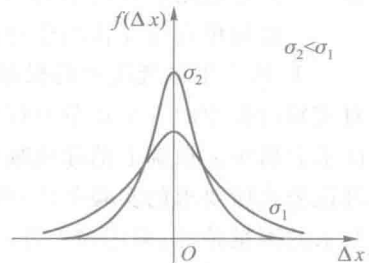


图 0-2 不同 σ 的概率密度曲线

服从正态分布的随机误差具有以下几个特征:

(1) 单峰性:测量值与真值相差愈小,这种测量值(或误差)出现的概率(可能性)愈大,与真值相差愈大,则出现概率愈小.

(2) 对称性:绝对值相等、符号相反的正、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.也即是说,总可以找到这样一个误差限,某次测量的误差超过此限值的概率小到可以忽略不计的地步.

(4) 抵偿性:随机误差的算术平均值随测量次数的增加而越来越趋向于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$$

3. 随机误差的处理

对测量中的随机误差如何处理呢? 我们可以利用正态分布理论的一些结论来进行处理.

例如,在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 个测量值为

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

往往称此为一个测量列.在测量不可避免地存在随机误差的情况下,处理这一测量列时必须回答下列两个问题:

(1) 由于每次测量值各有差异,那么怎样的测量值是最接近于真值的最佳值?

(2) 测量值的差异性即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,那么怎样对测量的随机误差做出估算才能表示出测量的精密程度?

在数理统计中,对此已有充分的研究,下面我们只引用它们的结论.

结论一:当系统误差已被消除时,测量值的算术平均值最接近被测量的真值,测量次数越多,接近程度越好(当 $n \rightarrow \infty$ 时,平均值趋近于真值),因此我们用算术平均值表示测量结果真值的最佳值.

算术平均值的计算式是： $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

我们将各次测量值 x_i 与算术平均值之差称为该次测量的残差, 写为

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, n)$$

因为真值 X 不可知, 我们只能知道残差而不知道绝对误差 $\Delta x = x - X$, 所以只能用残差代替误差计算, 此时总体标准误差 δ 常用“方均根”方法对残差进行统计, 其估计值为 S_x (称为实验标准偏差), 后面将给出。

结论二: 一测量列的随机误差用标准偏差来估算. 标准偏差的计算公式为

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

这个公式又称为贝塞尔公式, 它表示一测量列中各测量值所对应的标准偏差. 它所表示的物理意义是, 如果多次测量的随机误差遵从正态分布, 那么任意一次测量, 测量值误差落在 $-S_x$ 到 $+S_x$ 之间的可能性为 68.3%; 或者说, 对某一次测量结果, 真值在 $\bar{x} - S_x$ 到 $\bar{x} + S_x$ 区间内的概率为 68.3%. 它可以表示这一列测量值的精密度, 反映出测量值的离散性. 标准偏差小就表示测量值很密集, 即测量的精密度高; 标准偏差大就表示测量值很分散, 即测量精密度低. 现在很多计算器上都有这种统计计算功能, 可以直接用计算器求得 S_x 和 \bar{x} 等数值, 用 Excel 软件亦可计算出标准偏差.

值得指出的是, 在多次测量时, 正负随机误差常可以大致相消, 因而用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, 但多次重复测量不能消除或减小测量中的系统误差.

第三节 有效数字及其运算

一、有效数字的概念

一般来说,实验所处理的数值有两种:一种是没有误差的准确值(如测量的次数,公式中的纯数等);另一种是测量值.任何物理量的测量都存在误差,因此表示该测量值的数值位数不能随意取位,而应能正确反映测量精度.另一方面,数值计算都有一定的近似性,这就要求计算的准确性既不能超过测量的准确性,也不能低于测量的准确性,使测量的准确性受到损失,即计算的准确性必须与测量的准确性相适应.能正确而有效地表示测量和实验结果的数字,称为有效数字.有效数字由直接从度量仪器最小分度以上的若干位准确数字(或称为可靠数字)与最小分度值的下一位(有时是在同一位)估读数字(或称为可疑数字)构成.

测量值 = 读数值(有效数字) + 单位

有效数字 = 可靠数字 + 可疑数字(估读)

直接测量的读数原则

在进行直接测量物理量的过程中,测量值的有效数字位数取决于测量仪器.例如:用最小刻度为毫米的米尺测量长度,如图 0-3(a)所示, $L=1.67\text{ cm}$.那么,我们该如何读出其测量值呢?首先,由于该米尺的最小刻度为毫米位,所以可以直接读出前两位“1.6”,是准确的,称为可靠数字.但是该被测物的长度超过了1.6 cm,超过多少却无法确定,原因就是此米尺的最小刻度是毫米位,第三位有效数字的单位应为0.1 mm,因此这位有效数字无法准确确定,只能估计!这个估计的数字叫做可疑数字,可疑数字带有一定的主观色彩,我们估计它为“7”,这个“7”虽然是估计的,却是有效的,所以读出的是三位有效数字“1.67”.若如图 0-3(b)所示, $L=2.00\text{ cm}$,仍是三位有效数字,而不能读为 $L=2.0\text{ cm}$ 或 $L=2\text{ cm}$,因为这样表示分别只有两位或一位有效数字.如图 0-3(c)所示, $L=90.70\text{ cm}$,有四位有效数字.若是改用厘米刻度米尺测量该长度,如图 0-3(d)所示,则 $L=90.7\text{ cm}$,只有三位有效数字.在平时实验过程中,同学们经常犯的错误就是:不能根据所用的测量仪器得到合理、正确的测量数据.所以请大家务必牢记:所得的测量数据的最后一位是可疑数据,是主观估计的,而可疑数字前一位数字的单位必定为仪器的最小刻度单位!

综上,直接测量量的有效数字位数取决于使用的测量仪器,仪器的精确程度越高,测量结果的有效数字位数越多,测量结果的相对误差越小,测量越准确.反过来,我们也可以通过被测数据的有效数字位数来确定仪器的精确程度,例如,我们得到一个测量数据 $L=1.67\text{ cm}$,就可以断定:测量仪器的最小刻度为毫米位.因为在这个数据中,“7”是可疑数字,“6”是准确的,“6”对应的为

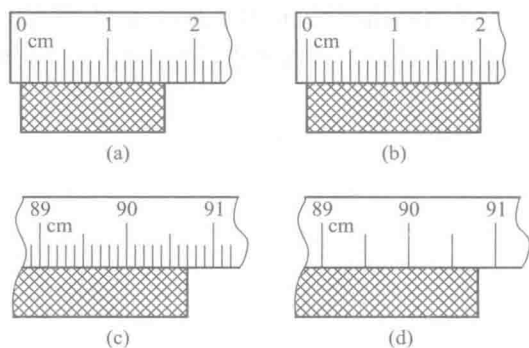


图 0-3 直接测量的有效数字

毫米位,故而,测量仪器的最小刻度一定为毫米位!

有效数字中的“0”不同于1,2,⋯,9等其他9个数字,需要注意下面两种情况:

(1) 有效数字的位数从第一个不是“0”的数字开始算起,末尾的“0”和数值中间出现的“0”都属于有效数字.如图0-3(c)所示,物体的边缘恰好与毫米尺上的90.7 cm刻度线对齐,测量数据应为90.70 cm,不能写成90.7 cm,因为此处的“0”仍然是有效数字的有效成分,它表示的测量值在十分位的“7”是准确的,而90.7 cm则表示测量值在十分位的“7”是可疑的,90.70 cm表示的是四位有效数字.

(2) 有效数字的位数与小数点位置或单位换算无关.例如,1.2 m不能写作120 cm、1 200 mm或1 200 000 μm,应记为

$$1.2 \text{ m} = 1.2 \times 10^2 \text{ cm} = 1.2 \times 10^3 \text{ mm} = 1.2 \times 10^6 \mu\text{m}$$

它们都是两位有效数字.反之,把小单位换成大单位,小数点移位,在数字前出现的“0”不是有效数字,如2.42 mm=0.242 cm=0.002 42 m,它们都是3位有效数字.

二、有效数字的运算

为获得实验结果,往往需要对测得的数据进行运算.在数据运算中,首先应保证测量的准确程度,在此前提下,尽可能节省运算时间,免得浪费精力.运算时应使结果具有足够的有效数字,不要少算,也不要多算.少算会带来附加误差,降低结果的精确程度;多算是没有必要的,算得位数越多,运算难度越大,同时也不可能减少误差.下面将分别介绍有效数字的运算规则.

运算规则:运算结果保留一位可疑数字.

1. 加减运算

几个数相加减时,最后结果的可疑数字与各数值中最先出现的可疑数字对齐.下面例题运算过程中数字下划线的是可疑数字.

例1 已知 $Y=A+B-C$,式中 $A=(103.3\pm 0.5) \text{ cm}$, $B=(13.561\pm 0.012) \text{ cm}$, $C=(1.672\pm 0.005) \text{ cm}$,试问计算结果应保留几位数字?

解:先观察一下具体的运算过程:

$$\begin{array}{r} 103.\underline{3} \\ + 13.\underline{561} \\ \hline 116.\underline{861} \end{array} \xrightarrow{\text{可简化为}} \begin{array}{r} 103.\underline{3} \\ + 13.\underline{6} \\ \hline 116.\underline{9} \end{array} \quad \begin{array}{r} 116.\underline{9} \\ - 1.\underline{672} \\ \hline 115.\underline{228} \end{array} \xrightarrow{\text{可简化为}} \begin{array}{r} 116.\underline{9} \\ - 1.\underline{7} \\ \hline 115.\underline{2} \end{array}$$

一个数字与一个可疑数字相加或是相减,其结果必然是可疑数字.本例各数值中最先出现可疑数字的位置在小数点后第一位(即103.3),按照运算结果保留一位可疑数字的原则,上例的简算方法为

$$Y = (103.3 + 13.6 - 1.7) \text{ cm} = 115.2 \text{ cm}$$

结果表示为

$$Y = (115.2 \pm 0.5) \text{ cm}, \frac{\Delta Y}{Y} = 0.43\%$$

2. 乘除运算

几个数相乘除,计算结果的有效数字位数与各数值中有效数字位数最少的一个相同(或最多再多保留一位).

例2 $1.111 \underline{1} \times 1.\underline{11} = ?$ 试问计算结果应保留几位数字?

解:用计算器计算可得 $1.111 \underline{1} \times 1.\underline{11} = 1.233 \ 321$,但是,此结果究竟应取几位数字才合理.我们来看一下具体