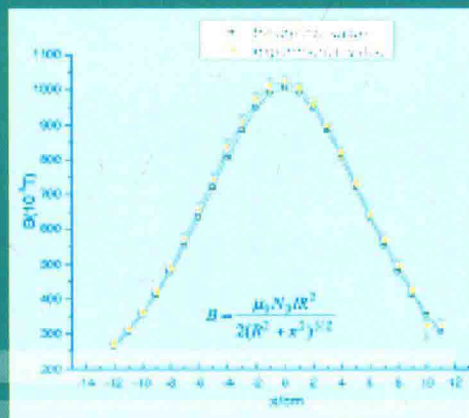
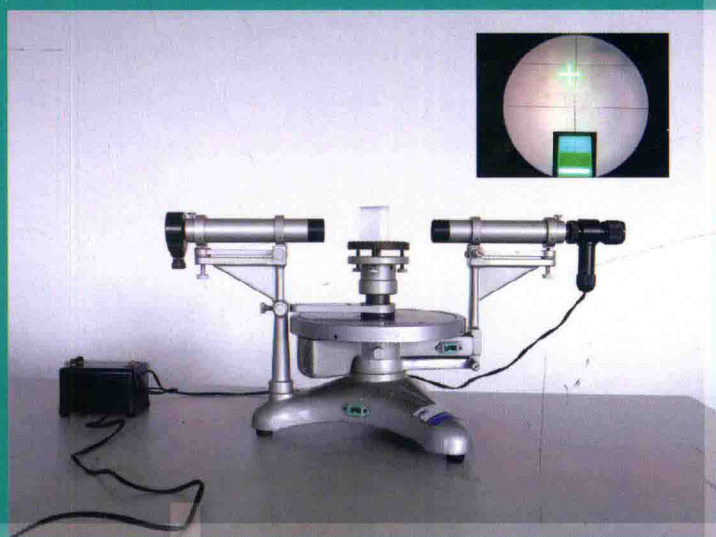


大学物理实验实用教程

(第2版)

主编 刘俊星 副主编 张建华 赵浙明



清华大学出版社

内容简介

本书为清华大学“物理实验”课程主要教材，也是物理系“物理实验”课程的主要教材。本书共分两册，上册为力学、热学、电磁学、光学、原子核物理实验，下册为近代物理实验。本书可作为高等院校物理系及相关专业本科生的教材，也可供从事物理实验工作的工程技术人员参考。

大学物理实验实用教程

(第2版)

主 编 刘俊星
副主编 张建华 赵浙明

清华大学出版社
清华大学出版社
清华大学出版社
清华大学出版社
清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书根据高等院校工科“大学物理实验课程教学基本要求”而编写。在编写过程中,考虑了独立学院及一般本科院校大学物理实验室的实际情况,力争使教学体系更加切合实际情况,教材内容与现有设备密切配合。

本教材系统介绍了大学物理实验课的任务与基本要求,测量误差及数据处理,计算机技术在物理实验数据处理中的应用等,包括力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验以及综合性实验。

本教材适用性强,贴近实际,可作为高等院校及独立学院理工科专业的物理教科书和参考书,也可作为相关技术人员的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验实用教程/刘俊星主编.—2版.—北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-35187-0

I. ①大… II. ①刘… 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(2014)第 014319 号

责任编辑:邹开颜

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:10.5 字 数:254千字

版 次:2012年1月第1版 2014年1月第2版 印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:24.00元

产品编号:057830-01

第 2 版前言

本教材第 1 版自出版以来,已经在嘉兴学院南湖学院使用了两年。在使用过程中,得到了广大任课教师和同学的认可和好评,并提出了大量宝贵的批评和建议。

在这两年里,我校物理实验仪器进行了一些升级和改造,有些实验项目引入了新技术、新方法。本着物理实验教学应该反映时代发展趋势、教材内容与现有设备配合更加密切的原则,结合我校物理实验室的实际情况,我们对原教材作了适当的调整和修正。对于原书使用过程中发现的许多不足和错误,我们也作了修订,并更新了一些新的内容。

本次教材的修订是在刘昶时教授指导和帮助下进行的,并由刘昶时教授审核。在教材的改编过程中,得到了嘉兴学院南湖学院领导的大力支持,嘉兴学院物理实验室的老师也提供了宝贵的支持,在此,全体编者表示衷心的感谢!

由于物理实验方法和手段在不断发展和改进,实验仪器设备也在不断升级换代,书中难免存在不完善及不妥当之处,欢迎各位使用本教材的教师和学生提出宝贵建议,以便进一步改进。

编 者

2014 年 1 月

前 言

大学物理实验课程是工科学校必须开设的一门重要的实践性公共基础课,是高校理工科进行科学实验训练的一门基础课程,是各专业后继实验课程的基础,也是大学生从事科学实验工作的入门课程。通过本课程的学习,能使 学生获得必要的实验知识和操作技能,初步培养学生具有正确使用仪器进行测量、数据处理、结果分析以及编写实验报告等方面的能力,培养学生具有一般工程工作者所必须的实验能力和素质,使学生树立实事求是、严肃认真的科学态度。

本教材是根据“高等工科院校物理实验课程基本教学要求”,并结合实际情况编写而成的。本教材共分两部分,其中第一部分绪论,重点阐述了测量与误差、有效数字及简算方法、不确定度及测量结果的表示、数据处理方法、计算机技术在物理实验数据处理中的应用等内容。第一部分内容是重点也是难点,掌握好第一部分内容是学好大学物理实验这门课程的前提和基础。第二部分为物理实验部分,包括了力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验以及综合性实验。内容的选取上力求在保证基础性、实用性的同时不失时代性;对实验内容的阐述,力求做到将大学物理理论与大学物理实验紧密联系,由浅入深、循序渐进;对实验内容与步骤的安排,强调与实验理论内容的相互衔接,强调可操作性,使学生明确具体实验步骤的目的;对实验数据的处理,结合误差理论知识,尽量给出详细的推导过程和计算公式,并且给出了利用计算机软件(例如 Excel、Origin)进行误差处理的方法;在版面的安排上,尽量减轻学生负担,数据处理部分内容单成一页,并给出详细的数据记录表格及计算公式,免去了学生画制表格的繁琐工作,可以使 学生将主要精力放到实验上。本教材的最大特点就是适用性强,贴近实际,指导功能强,能在减少不必要负担的前提下,提高学生的学习兴趣和积极性,给大学物理实验一个轻松的学习环境。

本教材适合独立学院及一般本科院校学生使用。教材的编写是在刘昶时教授的设计、指导和帮助下进行的,并由刘昶时教授审核。在教材的编写过程中,得到了嘉兴学院南湖学院领导的大力支持,嘉兴学院物理实验室的老师也为本教材的编写提供了宝贵的支持,刘雅洁老师也给予了热情无私的帮助。本教材在编写过程中,还参考了大量的实验教材,在此一并致以深深的谢意!

本教材编者长期工作在教学第一线,积累了一定的教学经验,我们力求将这些经验融入到本教材中,希望本教材能为大学物理实验教学贡献一点绵薄之力。由于编者水平有限,编写时间紧迫,教材中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 11 月

目 录

绪论	1
第一节 大学物理实验的地位、任务及要求	
实验一 拉伸法测杨氏模量	30
实验二 扭摆法测物体的转动惯量	40
实验三 用拉脱法测定液体表面张力系数	46
实验四 空气绝热系数的测定	51
实验五 线性元件及非线性元件的伏安特性	58
实验六 单、双臂电桥测电阻	63
实验七 示波器的原理和使用	70
实验八 空气中声速测量	81
实验九 霍尔效应测直流圆线圈与亥姆赫兹线圈轴线上的磁场	88
实验十 补偿法校验电流表	96
实验十一 调节分光计以测定三棱镜顶角	103
实验十二 光栅衍射	111
实验十三 牛顿环——光的等厚干涉之一	118
实验十四 静电场的描绘	123
实验十五 迈克尔孙干涉仪的调整和波长的测量	129
实验十六 光纤通信性能测试	137
实验十七 用光电效应实验测定普朗克常数	143
实验十八 霍尔效应及其应用	150
参考文献	159

绪 论

第一节 大学物理实验的地位、任务及要求

一、大学物理实验的地位

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。因此,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“物理实验”是两门关系密切的课程。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。而实验需要理论指导,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,以加深和扩大对物理知识的理解。

在研究物理现象时,实验的任务不仅是观察物理现象,更重要的是找出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。即使已经确定的物理定律,如果出现了新的实验事实与这个定律相违背,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。物理实验体现了大多数科学实验的共性,在指导思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接收系统实验方法和实验技能训练的开端。

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实验课程,是高校理工科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。它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、爱护国家财产、注意安全等良好的科学学习习惯。

总之,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、大学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,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,才能对该实验成功与否作出判断。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. 物理实验课的具体准备

(1) 实验前的准备(完成预习报告)

每个实验之后,都要完成一份实验报告。每个实验报告册都有以下几个版块构成:①实验目的,②实验原理主述,③实验仪器,④实验任务、步骤及注意事项,⑤原始数据记录与处理和⑥思考题原题及解答。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)和数据处理(试验后完成)。下面先谈一下如何进行预习。

物理实验课与理论课不同,它的特点是同学们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,这是大学物理实验最重要的问题。

② 实验原理: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。如果相应的理论并未接触,一定要找到相应的参考资料进行预习。

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。

⑤ 数据处理：看懂每个实验后面实验处理版块所附表格，养成科学记录实验数据的良好习惯。

同学们在进行预习时，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，用图表示原理图、电路图或者光路图。写出实验所用的主要公式，并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，必须出现基本方程、公式和必要的原理图，这是预习的重点。注意：一份预习报告绝不是照抄教材。

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档。

(2) 实验的进行(完成原始数据的记录)

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，计算与分析实验结果，以及误差估算等。

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⑦原始数据记录与处理版块。这些数据要经过教师检查、签字确认无误后，实验才算完成。做好实验后，要做好仪器设备的整理工作。

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。

(3) 完成实验报告(完成数据处理和实验小结、思考题)

进行数据处理，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，进行计算结果与误差计算：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。

结果：准确地写出实验结果。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(对实验中出现的问题进行说明和讨论)，以及写出实验心得或建议等，完成教师指定的作业题。

实验报告是实验工作的总结，是经过对实验操作和观察测量、数据分析以后的永久性的科学记录。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。

3. 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。实验时间若要变动,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,应将预习报告交由教师检查,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。对于需要作图的实验应事先准备好毫米方格纸和铅笔。

(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。若发现有问題,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,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。具体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,培养出跨世纪的“四有”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。

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。本教材采用通用的国际单位制(SI)。

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。

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。

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 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$,以求重力加速度 g ,这种测量称为间接测量。

二、误差分类及其处理方法

用实验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:

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

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、相对真值等均可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 长相差 2 cm,②测量 20 m 相差 2 cm,两次测量绝对误差相同,但是,哪次测量的准确一些呢?

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 E_0 来表示测量的好坏,即

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

相对误差和百分差通常只取 2 位有效数字,并且用百分数形式来表示。

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。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、仪器的水平或铅直未调整、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,例如标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标称值的,若在 30°C 条件下使用时,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 $\Delta x = x_i - X$,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

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

σ 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 $f(\Delta x)$ 的函数式求出。由概率论可知,误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率就是图 0-1 中该区间内 $f(\Delta x)$ 曲线下的面积:

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

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。

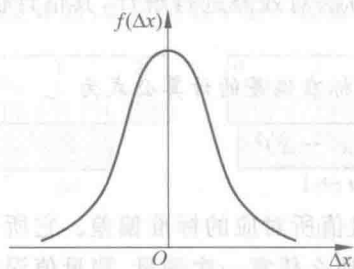


图 0-1 随机误差分布特点

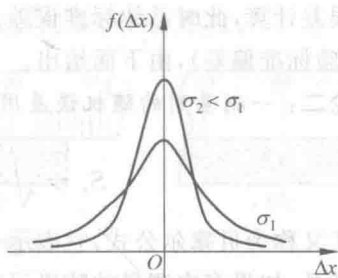


图 0-2 不同 σ 的概率密度曲线

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,与真值相差大的,则概率愈小。

(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。也就是说,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。

现设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度呢?

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

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

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

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

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),由下面给出。

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 $[-S_x, +S_x]$ 之间的可能性为 68.3%;或者说,对某一次测量结果,真值在 $[-S_x, +S_x]$ 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(这部分内容在第六节详细讨论)。

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 有效数字及简算方法

一、有效数字的概念

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值与最小分度值的下一位(有时是在同一位)估读(或称为可疑)数值构成。

1. 直接测量的读数原则

在进行物理量的直接测量过程中,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,第三位有效数字应为 $1/10(\text{mm})$,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,但是是有效的,所以读出的是三位有效数字“1.67”。若如图 0-3(b)所示时, $L=2.00\text{ cm}$,仍是三位有效数字,而不能读写为 $L=2.0\text{ cm}$ 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时,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。

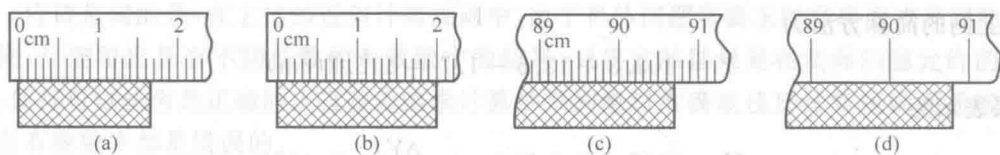


图 0-3 直接测量的有效数字

综上所述,直接测量值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愈小,测量愈准确。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。例如图 0-3(c),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,它表示的测量值是十分位准确的,而 90.7 cm 则表示十分位是可疑的,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、1200 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 $2.42 \text{ mm} = 0.242 \text{ cm} = 0.00242 \text{ m}$,它们都是三位有效数字。

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,算得位数很多,但决不可能减少误差。下面分别介绍有效数字的运算规则。

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画线的是可疑数字。

例 1 已知 $Y = A + B - C$, 式中 $A = (103.3 \pm 0.5) \text{ cm}$, $B = (13.561 \pm 0.012) \text{ cm}$, $C = (1.652 \pm 0.005) \text{ cm}$, 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:

$$\begin{array}{r} 103.\underline{3} \\ + 13.56\underline{1} \\ \hline 116.86\underline{1} \end{array} \xrightarrow{\text{可简化为}} \begin{array}{r} 103.\underline{3} \\ + 13.\underline{6} \\ \hline 116.\underline{9} \end{array} \quad \begin{array}{r} 116.\underline{9} \\ - 1.65\underline{2} \\ \hline 115.24\underline{8} \end{array} \xrightarrow{\text{可简化为}} \begin{array}{r} 116.\underline{9} \\ - 1.\underline{7} \\ \hline 115.\underline{2} \end{array}$$

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

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

结果表示为

$$Y = (115.2 \pm 0.5) \text{ cm}, \quad \frac{\Delta Y}{Y} = 0.44\%$$

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 $1.1111 \times 1.11 = ?$ 试问计算结果应保留几位数字?

解: 用计算器计算可得 $1.1111 \times 1.11 = 1.233321$,但是,此结果究竟应取几位数字才合理呢?我们来看一下具体的运算过程便一目了然。见运算式,因为一个数字与一个可疑数字相乘,其结果必然是可疑数字,所以,由上面的运算过程可见,小数点后面第二位的“3”

及其以后的数字都是可疑数字。按照保留 1 位可疑数字的原则,计算结果应写成 1.23,为 3 位有效数字。这与上面叙述的加减简算法则是一致的,即在此例中,5 位有效数字与 3 位有效数字相乘,计算结果为 3 位有效数字。

$$\begin{array}{r} 1.1111 \\ \times 1.11 \\ \hline 11111 \\ 11111 \\ 11111 \\ \hline 1.233321 \end{array}$$

除法是乘法的逆运算,这里不再详细论述。

3. 乘方运算

乘方运算的有效数字位数与其底数相同。

4. 对数、三角函数和 n 次方运算

对数、三角函数和 n 次方运算它们的计算结果必须按照误差传递公式来决定有效数字位数,而不可以用前面所述的简算方法。

5. 数字的截尾运算

在数据处理时,经常要截去多余的尾数,一般截尾时以“尾数大于五进,小于五舍,等于五时取偶”来定。

根据以上的截尾原则,将下列数截去尾数成 4 位有效数字时,应有

$$2.34526 \rightarrow 2.345$$

$$2.34550 \rightarrow 2.346$$

$$2.34650 \rightarrow 2.346$$

$$2.34750 \rightarrow 2.348$$

6. 计算的中间过程

计算的中间过程,有效数字可以暂保留两位可疑数字,即多保留一位有效数字,但最终计算结果仍要按前面的规定处理有效数字。

应该强调的是,在上述的近似计算规则中,由于具体问题所要求的准确度或采用的方法不同,可能得出具有不同位数的有效数字的结果,只要这些结果是在实际问题允许的范围之内,便都可以认为是正确的。盲目地追求计算结果的绝对准确或违反计算规则而无根据的取舍有效数字都是错误的。

第四节 实验不确定度及测量结果的表示

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度,是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。实验结果不仅要给出测量值的最佳值 \bar{x} ,同时还要标出测量的总不确定度 Δx ,最终写成

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

这表示被测量的真值在 $(\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x)$ 的范围之外的可能性(或概率)很小。显然,测量不