

何开华 汤型正 主编
罗中杰 景锐平 王美娟 副主编

大学物理实验

第2版

清华大学出版社

罗中杰 景锐平 王美娟 副主编

大学物理实验

第2版

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是编者根据多年的大学物理实验教学经验并结合我物理实验中心新购置的实验设备而编写的。全书共分两部分：绪论和实验。绪论着重介绍测量与误差、有效数字、数据处理的基本方法等。实验部分共包括 40 个实验，涵盖力学、热学、声学、电磁学、光学，包括预备性实验、基础性实验、综合性实验。在实验内容的选择上，注重突出物理思想和物理实验的基本方法、基本原理。各学科的学生可以根据自身学科的特点和需求，选择合适的实验内容。

本书编写思路清晰，原理讲述透彻，深入浅出，通俗易懂，可以作为高等院校大学物理实验课程的教学用书，也可以作为从事相关教学人员和工程技术人员的参考用书。

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/何开华，汤型正主编. —2 版. —北京：清华大学出版社，2016

ISBN 978-7-302-45119-8

I. ①大… II. ①何… ②汤… 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(2016)第 227216 号

责任编辑：佟丽霞

封面设计：常雪影

责任校对：赵丽敏

责任印制：宋 林

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 刷 者：清华大学印刷厂

装 订 者：北京市密云县京文制本装订厂

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：14.5 字 数：352 千字

版 次：2014 年 8 月第 1 版 2016 年 12 月第 2 版 印 次：2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数：1~4000

定 价：29.80 元

产品编号：071179-01

前 言

2013年我校物理实验教学示范中心获得教育部专项资金项目的资助,以及近三年在学校教学实验室建设项目的资助下,实验中心新购进了一大批物理实验教学仪器,更新率达到了80%以上,使得原有的实验教材与实际教学仪器严重不符,学生在实验前的预习内容和实际操作内容脱节。为使实验教材更好地符合我中心的实验仪器,更好地为学生服务,物理实验教学中心安排老师整理出这本实验教材。本教材是在原有教材(《大学物理实验》,华中科技大学出版社)的基础上,结合我校新进的仪器设备而重新编写的,对原有的内容做了部分调整和修改,增加和删减了部分实验项目,内容更丰富。全书共列出实验项目40个,覆盖了我中心的绝大部分实验仪器,完全能够满足理工科非物理专业大学物理实验课的需求。

本书凝聚了中国地质大学(武汉)数理学院物理系和物理实验教学示范中心所有老师的教学成果,是在所有老师长期实践教学的基础上结合我实验中心的实验仪器,总结教学经验编写而成的。参加本书编写工作的有汤型正(改编了绪论及附表部分)、王希成(编写实验1、实验3、实验18)、罗中杰(编写实验14、实验15)、李铁平(编写实验12、实验28)、何开华(主持改编工作,编写实验2、实验29)、杜秋姣(编写实验4、实验26)、郭龙(编写实验5)、郑安寿(编写实验6、实验13)、石铁钢(编写实验16)、张自强(编写实验27)、景锐平(编写实验17、实验24、实验36、实验40)、万珍珠(编写实验19)、陈玲(编写实验20)、马冲(编写实验21、实验35)、吕涛(编写实验23)、吴娟(编写实验30)、王清波(编写实验31)、万森(编写实验32)、陈洪云(编写实验33)、左小敏(编写实验34)、金三梅(编写实验25、实验37)、张光勇(编写实验10、实验11)、王美娟(编写实验38、实验39)、汪礼胜(武汉理工大学,编写实验7、实验22)、陈凤翔(武汉理工大学,编写实验8、实验9)。全书由何开华和汤型正组织改编、修订和统稿,由罗中杰、景锐平和王美娟负责校对。

本书在编写过程中,也广泛参考了兄弟院校的相关教材,我们特别到武汉本地如武汉大学、华中科技大学、武汉理工大学等兄弟院校的物理实验中心进行了走访,吸收了其中优秀的实验内容和方法,在此对他们表示衷心的感谢!

由于编写时间紧,参与编写的老师多,多数老师初次编写实验教材,水平有限,疏漏之处在所难免,衷心希望专家及广大读者对本书提出批评指正意见,以供我们再版时改正,提高本书的编写质量。

编 者

2016年8月

目 录

绪论	1
实验 1 拉伸法测量金属的弹性模量	17
实验 2 固体线膨胀系数	21
实验 3 双悬扭摆测转动惯量	24
实验 4 动态悬挂法测定杨氏弹性模量	27
实验 5 弦振动的研究	31
实验 6 电学元件的伏安特性测量	37
实验 7 超声声速的测定	40
实验 8 分光计的调节	46
实验 9 三棱镜顶角测量	51
实验 10 色散曲线的测定	53
实验 11 光栅衍射	57
实验 12 超声光栅及其应用	60
实验 13 薄透镜焦距的测定	63
实验 14 双棱镜干涉测量光波波长	67
实验 15 等厚干涉及应用	73
实验 16 迈克尔逊干涉仪的调节和使用	81
实验 17 温差电动势实验	86
实验 18 惠斯通电桥测电阻及检流计内阻测量设计	91
实验 19 自组双臂电桥测量低值电阻	94

实验 20	示波器的原理及应用	98
实验 21	新能源电池特性研究	106
实验 22	模拟静电场	113
实验 23	霍尔效应及其应用	119
实验 24	RLC 电路特性的研究	125
实验 25	金属箔式应变片性能传感实验	134
实验 26	大功率白光 LED 发光特性研究	139
实验 27	磁悬浮导轨实验	145
实验 28	光电效应及普朗克常数的测定	152
实验 29	弗兰克-赫兹实验	156
实验 30	密立根油滴实验	160
实验 31	测定金属钨的电子逸出功	166
实验 32	气体比热容比的测定	171
实验 33	偏振光的观测与研究	175
实验 34	单缝单丝衍射	180
实验 35	地磁场测量实验	184
实验 36	多普勒测声速	191
实验 37	三线摆、扭摆	199
实验 38	FD-NST-I 液体表面张力系数测定仪	206
实验 39	准稳态法测量导热系数和比热	208
实验 40	光纤通信及光纤传感综合实验	215
附表		220
参考文献		225

绪 论

0-1 物理实验的地位和作用

用人为的方法让自然现象再现,从而加以观察和研究,这就是科学实验。科学实验是人们认识自然和改造客观世界的基本手段,科学技术越进步,科学实验就显得越重要,任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品都必须通过科学实验才能获得。由科学实验观察到的现象和测出的数据,加以总结抽象,找出内在的联系和规律,就得到科学理论,科学实验是科学理论的源泉。理论一旦提出,又必须借助科学实验来检验其是否具有普遍的意义,实验是验证理论的手段,是检验理论的裁判。19世纪,麦克斯韦提出的电磁理论(预言了电磁波的存在)只有当赫兹做出电磁波实验后才被人们公认;20世纪,杨振宁、李政道提出基本粒子弱相互作用的领域内宇称不守恒理论,只有当吴健雄做出实验验证后,才被同行学者承认,从而才有可能获得诺贝尔物理学奖。而且,人们掌握理论的目的,在于用它来指导生产实践,促进科学进步,推动社会发展,当理论付诸于实际应用时,仍必须通过实验。实验是理论应用的桥梁,任何一门科学的发展都离不开实验。

物理学是一门实验科学,物理学的形成和发展是以实验为基础的。物理实验的重要性,不仅表现在通过实验发现物理定律,而且物理学中的每一项重要突破都与实验密切相关。物理学史表明,经典物理学理论的形成,是伽利略、牛顿、法拉第、麦克斯韦等人通过观察自然现象,反复实验,运用抽象思维方法总结出来的。近代物理的发展,是先在某些实验基础上提出假设,例如普朗克根据黑体辐射提出“能量子假设”,但假设还需要再经过大量的实验证实,才成为科学理论,实践证明物理实验是物理学发展的动力。在物理学发展的进程中,物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、相得益彰的:没有理论指导的实验是盲目的,实验必须总结抽象上升为理论,才有其存在的价值;而理论靠实验来检验,同时理论上的需要又促进实验的发展。1752年,富兰克林利用风筝把云层中的电引入室内,进行室内雷鸣闪电实验,证实了雷电与电火花放电具有同一本质,进而找出了雷电的成因,并且在此基础上发明了避雷针。这个简单的实验事实,足以说明物理实验在物理学发展中所起的重要作用。

物理实验在探索和研究新科技领域,在推动其他自然科学和工程技术的发展中,同样起着重要的作用。自然科学迅速发展,新的学科分支层出不穷,但基础学科就是数学和物理两门。物理实验是研究物理测量方法与实验方法的科学,物理实验的特点是在于它具有普遍性——力、热、电、光都有;具有基础性——它是其他一切实验的基础;同时它还具有通用性——适用于一切领域,如果把高、精、尖的实验拆成“零件”,绝大部分是常见的物理实验。

在工程技术领域中,研制、生产、加工、运输等都普遍涉及物理量的测量及物体运动状态的控制,这正是成熟的物理实验的推广和应用。现代高科技的设计思想、方法和技术也来源于物理实验,因此,物理实验是工程技术和高科技发展的基础。

0-2 物理实验的目的和任务

物理实验课的目的是:

1. 学习和掌握物理实验的基本知识

通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习和掌握物理实验基本知识、基础理论方法和基本技术;懂得如何应用实验原理和方法去研究某个物理问题,加深对物理学原理的理解;熟悉常用仪器的基本原理、结构性能及使用方法。

2. 培养与提高学生的科学实验能力

(1) 自学能力。能够自行阅读实验教材,作好实验前的准备。对于实验中出现的基本问题,能够通过查阅资料而得到解释。

(2) 动手能力。能够对实验仪器设备正确布局连接,借助教材或说明书正确使用仪器,具体测试,获得较准确的实验结果。能够排除实验中的简单故障,掌握和应用基本的物理实验技能。

(3) 分析能力。理论联系实际,能够对实验现象进行初步分析、判断和解释,用理论去指导实验。

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

(5) 设计能力。对于简单问题,能够从研究对象或课题要求出发,自己阅读资料,依据某项原理,设计实验方法,确定实验参数,选择配套仪器,拟定实验程序方案。

3. 培养与提高学生的科学实验素养

培养学生具有实事求是、理论联系实际的科学作风,严肃认真、不怕困难、艰苦努力的科学态度,不断探索、勇于创新的科学精神,以及遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

0-3 实验课的基本环节

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

1. 实验前的准备(预习)

实验前的准备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理论依据和条件。

(2) 实验仪器的准备。了解所用仪器的工作原理、工作条件和操作规程;了解实验室为何选用这样的装置和仪表,是否有其他的实验装置可用。

(3) 观测的准备。掌握实验步骤和注意事项,设计记录表格。记录的表格既要便于记录,又要便于整理数据。

在此基础上,写出预习报告。预习报告作为实验报告的一部分,其内容包括实验名称、目的、原理等。

2. 实验的观测与记录

实验是整个教学中最重要的一环,动手能力、分析问题和解决问题的能力培养主要在于具体实验时完成,因此,必须充分利用课内的有限时间,提高教学效果。一般实验的步骤有:

(1) 仪器的安装与调整。使用仪器进行测量时,必须满足仪器的正常工作条件(工作电压、光照、温度、湿度等),没经过耐心细致地调整仪器,而忙于进行测量,这是很多同学容易出现的毛病。使用仪器测量时,必须按操作规程操作。在仪器的安装与调整中一般应注意:

- ① 安排仪器时,应尽量做到便于观察、读数和便于记录。
- ② 灵敏度高的仪器(例如物理天平、灵敏电流计)都有制动器,不进行测量时,应使仪器处于制动状态。
- ③ 秒表、温度计、放大镜等小件仪器,在用完之后要放到实验台中间的仪器盒中。
- ④ 拧动仪器上的旋钮或转动部分时,不要用力过猛。
- ⑤ 注意仪器的零点,必要时需进行调零。
- ⑥ 砝码、透镜、表面镀膜反射镜等器件,为了保持其测量精确度和光洁不许用手去摸,也不要随使用布去擦。
- ⑦ 使用电学仪器要注意电源电压、极性,并需经教师允许后方能接通电源。
- ⑧ 不要动用别组的仪器,仪器不够用要请示教师。
- ⑨ 实验后要将仪器整理、恢复到实验前的状态。

(2) 观测。当从各种仪器的刻度尺上读数时,一定要估读到最小分度的 $1/10$,例如,用一最小分度为 mm 的米尺测一物体长度时,20.14cm 的最后一位 4 是估读的,一定要读出,不能写成 20.1cm。

(3) 记录。实验记录就是如实地记下各项观测数据、过程以及观测到的现象。要简单整洁、清楚明白,以使自己和别人都能看懂记录的内容,数据一定要记在表格中,并注明单位。

① 记录的内容包括:日期、时间、合作者、室温、气压、仪器型号及其编号、实验过程、原始数据、实验有关现象、实验中发现的问题等。原始数据是指从仪器上直接读出的、未经任何运算的数值。

② 原则上所有的数据(包括可疑的数据)都得记录,出现异常的数据时,应增加测量次数。

3. 数据的处理

实验结束后要尽快整理好数据。数据整理工作应尽可能在实验课上完成,这样可以根据数据整理中的问题作必要的补充测量。一般是在计算结束之后,再收拾仪器,但在实际实验过程中,数据处理往往是在课后完成。所以,实验测量结束后,让任课老师检查数据非常重要,只有任课老师签字任课数据后,才能收拾实验仪器。我校物理中心实行网上选课,具

体实验流程图如图 0-1 所示。

4. 实验的讨论

实验的讨论是培养我们分析能力的非常重要的部分,应当努力去做。实验后可供讨论的问题是各方面的,以下提示几点供参考:

(1) 实验的原理、方法、仪器给你留下什么印象? 实验目的完成得如何?

(2) 实验的系统误差表现在哪些地方? 怎样改进测量方法或装置,可以减少误差? 对实验的改进有何设想?

(3) 实验步骤怎样安排更好?

(4) 观察到什么反常现象? 遇到过什么困难? 能否提出可供以后实验人员借鉴的东西?

(5) 测量结果是否满意? 如果未达到预期的结果,是何缘故?

(6) 对实验的安排(目的、要求、方法和仪器的配置,等等)和教师的指导有何希望?

实验报告要力求简单明了,用语确切,字迹清楚。

完整的实验报告应包括:

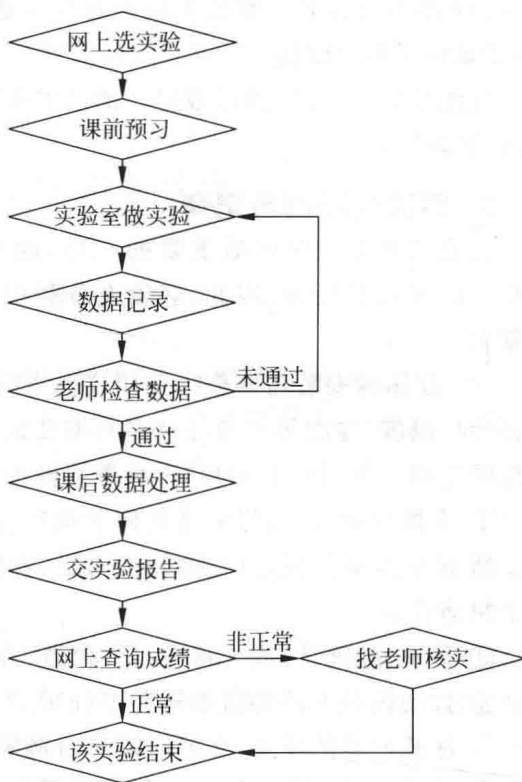


图 0-1 实验流程图

(实验名称)

实验目的

实验仪器及其编号

实验原理(含公式、简图)

实验步骤

数据记录及处理(被测量的数值及不确定度、图线或经验公式)

问题及讨论

0-4 测量与误差

1. 测量

在物理实验中,要用实验的方法研究各种物理规律,因此要定量地测量出有关物理量的大小。例如,测出一摆线长为 0.9867m ,某物体质量为 6.87g ,某电路的电流强度为 1.56A ,某地的重力加速度为 $9.796\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,电子电荷为 $1.6021917 \times 10^{-19}\text{C}$,等等。所谓测量就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来,即待测量是该计量单位的多少倍。

对待测量物理量的测量可分两类,一类是用计量仪器和待测量进行比较,就可获得结果。例如,用米尺和某单摆相比较,读出摆线长为 0.9867m 。这一类测量称为直接测量。另一类是不能直接用计量仪器把待测量的大小测出来,而需依据待测量和某几个直接测量值的函数关系求出待测量的,例如重力加速度,可以由测量单摆的摆长和周期根据单摆周期的公式算出,这一类的测量称为间接测量。

物理量多数是间接测量值,一般是设计一个(或一套)装置,通过几个直接测量值求出结果。例如,单摆就是一个测量重力加速度的装置,惠斯通电桥就是一个测量电阻的装置。掌握直接测量仪器的原理和用法,掌握实验装置的设计和调整是学习物理实验的重要内容。

2. 误差

每一个物理量都是客观存在,在一定的条件下具有不以人的意志为转移的固定大小,这个客观大小称为该物理量的真值。进行测量是想要获得待测量的真值。但是测量是依据一定的理论或方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人进行的。而由于受实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响,待测量的真值是不可能测得的,测量结果和被测量真值之间总会存在或多或少的偏差,这种偏差就称为测得值的误差。设被测量的真值为 a ,测得值为 x ,误差为 ϵ ,则

$$x - a = \epsilon \quad (0-1)$$

测量所得的一切数据,毫无例外地都包含一定量的误差,因而没有误差的测量结果是不存在的。在误差必然存在的情况下,测量的任务是:①设法将测得值中的误差减至最小;②求出在测量的条件下,被测量的最近真值(最佳值);③估计最近真值的可靠程度(接近真值的程度)。为此必须研究误差的性质、来源,以便采取适当的措施,以期达到最好结果。

3. 误差的分类

按照对测得值影响的性质,误差可分为系统误差和偶然误差两类。实验数据中,两类误差是混杂在一起出现的,但必须分别讨论其规律,以便采取相应的措施去减少误差。

(1) 系统误差

在同一条件下(方法、仪器、环境和观测人不变)多次测量同一量时,符号和绝对值保持不变的误差,或按某一确定的规律变化的误差,称为系统误差。

例如用天平称衡物体的质量时,由于砝码的标称质量(或名义质量,即标刻在砝码上的

质量数值)不准引入的误差;由于天平臂不等长引入的误差;由于空气浮力的影响引入的误差。所有这些误差在多次反复测量同一物体的质量时是恒定不变的,这就是系统误差。又例如在一电路中的电池的电压,随放电时间的延长而降低时,将给电路中的电流强度的测量引入系统误差。

系统误差又可以按其产生的原因分为:

- ① 仪器误差,这是所用量具或装置不完善而产生的误差。
- ② 方法误差(理论误差),这是由于实验方法本身或理论不完善导致的误差。
- ③ 装置误差,这是由于对测量装置和电路布置、安装、调整不当而产生的误差。
- ④ 环境误差,这是外界环境(如光照、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差。
- ⑤ 人身误差,这是由于观测人的感觉器官或运动器官不完善引入的误差。此种误差因人而异,并和个人当时的精神状态密切相关。

系统误差的出现一般都有较明确的原因,因此可采取适当措施使之降低到可忽略的程度,但是怎样找到产生系统误差的原因,从而采取恰当的对策,又没有一定的规律可循,因此在实验过程中逐渐积累经验、提高实验素养是很重要的。分析系统误差应当是实验的讨论问题之一。

(2) 偶然误差(随机误差)

在同一条件下多次测量同一物理量时,测得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。

产生偶然误差的原因很多,比如观测时目的物对得不准,平衡点确定得不准,读数不准确,实验仪器由于环境温度、湿度、电源电压的起伏而引起的微小变化,振动的影响等。这些因素的影响一般是微小的,并且是混杂出现的,因此难以确定某个因素产生的具体影响的大小,所以对待偶然误差不能像对待系统误差那样,找出原因加以排除。

偶然误差并非毫无规律,它的规律性是在大量观测数据中才显现出来的统计规律。在多数物理实验中,偶然误差表现出如下的规律性:

- ① 误差为正和负的次数出现的机会相同;
- ② 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多;
- ③ 误差不会超出一定的范围。

设 n 次测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的误差分别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$, 真值为 a , 则

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \dots + (x_n - a) = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n$$

将式子展开整理后,分别除以 n , 得出

$$\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - a = \frac{1}{n}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n)$$

它表示平均值的误差等于各测量值误差的平均。由于测量值的误差有正有负,相加后可抵消一部分,而且 n 越大相消的机会越多,因此得到:

- ① 在确定的测量条件下,减小测量结果偶然误差的办法是增加测量次数。
- ② 在消除数据中的系统误差之后,算术平均值的误差由于测量次数的增加而减小,平均值即趋近于真值。因此可取算术平均值为直接测量的最近真值(最佳值)。

测量次数的增加对于提高平均值的可靠性是有利的,但不是测量次数越多越好。因为增加次数必定要延长测量时间,这将给保持稳定的测量条件增加困难,同时延长时间也会给

观测者带来疲劳,这又可能引起较大的观测误差。另外,增加测量次数只能对降低偶然误差有利而与系统误差的减小无关,所以实际测量次数不必过多。一般在科学研究中,取 10~20 次,而在物理实验课中则只取 4~10 次。

4. 测量的精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的。但这三个词的含义不同,使用时应加以区别。

测量的精密度高,是指测量数据比较集中,偶然误差较小,但系统误差的大小不明确。

测量的准确度高,是指测量数据的平均值偏离真值较少,测量结果的系统误差较小,但数据分散的情况,即偶然误差的大小不明确。

测量的精确度高,是指测量数据比较集中在真值附近,即测量的系统误差和偶然误差都比较小。精确度是对测量的偶然误差与系统误差的综合评定。

图 0-2 是射击时弹着点的情况,图(a)表示精密度高,但准确度较差,图(b)表示准确度高,但精密度较差,图(c)表示精密度和准确度均较好,即精确度高。

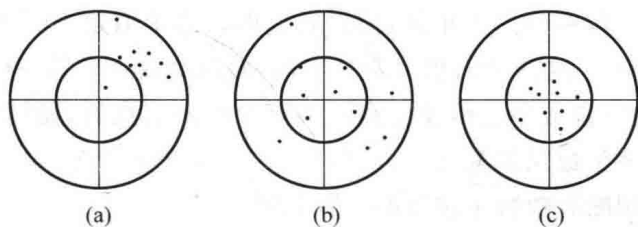


图 0-2 射击时弹着点的情况

0-5 有效数字

实验中总要记录很多数值,并进行计算。但是记录时应取几位,运算后应留几位,这是实验数据处理的重要问题,必须有一个明确的认识。

实验时处理的数值,应能反映出被测量的实际大小的数值,即记录与运算后保留的应为能传递出被测量实际大小信息的全部数字,我们称这样的数字为有效数字。但是实验中接触的数字,哪些是传递了被测量大小信息的有效数字应予保留,哪些则不是而应舍弃呢?

1. 仪器读数、记录与有效数字

一般来讲,仪器上显示的数字均为有效数字,均应读出(包括最后一位的估读)并记录。例如,用一最小分度为 mm 的尺,测得一物体的长度为 7.62cm,其中 7 和 6 是准确读出的,最后一位数字 2 是估计的,并且仪器本身也将在这一位出现误差,所以它存在一定的可疑成分,即实际上这一位可能不是 2,虽然读数 2 不十分准确,但还是近似地反映出这一位大小的信息,还应算作有效数字。

仪器上显示的最后一位数是“0”时,此“0”也是有效数字,也要读出并记录。例如,用 1mm 分度尺测得一物体的长度为 3.60cm,它表示物体的末端是和分度线“6”刚好对齐,下一位是 0;这时若写成 3.6cm 则不能肯定这一点。所以此“0”是有效数字,必须记录。另外

在记录时,由于选择单位的不同,也会出现一些“0”。例如,3.60cm也可记为0.0360m,或36000 μm 。这些由于单位变换才出现的“0”,没有反映出测量大小的信息,不能认为是有效数字。在物理实验中常用一种称为标准式的写法,就是任何数值都只写出有效数字,而数量级则用10的幂数表示,例如上述两例可分别写成为 $3.60 \times 10^{-2} \text{m}$, $3.60 \times 10^4 \mu\text{m}$ 。

对于分度式的仪表,读数要读到最小分度的十分之一。例如,最小分度是mm的尺,测量时一定要估测到十分之一毫米那一位;最小分度是0.1A的安培针,测量时一定要估测到百分之一安培那一位。但有的指针式仪表,它的分度较窄,而指针较宽(大于最小分度的五分之一),这时要读到最小分度的十分之一有困难,可以读到最小分度的五分之一甚至二分之一。

2. 运算后的有效数字

在具体讨论运算后有效数字位数的规则之前,先就一个例子分析一下。例如,测得一长方形的长为15.74cm,宽为5.37cm,求其面积。按一般算术计算得到面积为 84.5238cm^2 ,这个数的6个数字是否都是有效数字呢?可以肯定这两个直接测量值都具有一定的误差,而且误差不小于最后一位数的一个单位,假设它们的较准确值是15.73cm和5.36cm,则算出的面积为 84.3128cm^2 。这两个面积值明显不同,而且小数点后第一位就出现差异。相比之下可以考虑,只有前三位数字是传递出实际面积大小的信息的,而后三位数则无意义,因此所求面积的有效数字位数只能取三位。

下面讨论运算后判断有效数字位数的一般规则。

(1) 实验后计算误差,根据误差确定有效数字是正确决定有效数字的基本依据。

误差只取一位或二位有效数字,测量值的数值的有效数字是到误差末位为止,即测量值有效数字的末位和误差末位取齐。例如,用单摆测得某地重力加速度为

$$g = 981.2 \pm 0.8 \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$$

误差只取一位,测量值的有效数字的末位是和误差同一位的2。

(2) 实验后不计算误差时,测量结果有效数字位数只能按以下的规则粗略地确定。

① 加减运算后的有效数字。根据误差的讨论,已知加减运算后结果的绝对误差应等于参与运算的各数值误差之和,因此运算后的误差应大于参与运算的各数中任何一个的误差,所以加减运算后小数点有效数字的位数,可估计为与参加运算各数中小数点后位数最少的相同。

② 乘除运算后的有效数字。已知乘除运算结果的相对误差等于参加运算各数值的相对误差之和,因此运算结果的相对误差应大于参加运算的各数值中任何一个的相对误差。而一般来说有效数字位数越少,其相对误差就越大,所以乘除运算后的有效数字位数,可估计为与参加运算各数中有效数字位数最少的相同。

按照以上讨论,判断运算后有效数字位数举例如下:

$$126.7 + 35.05 + 76.213 \pm 0.16 = 238.1$$

$$325.7 - 16.78 + 125.66 = 434.6$$

$$27.13 / (3.1416 \times 0.561^2 \times 10.085) = 2.721$$

$$3.144 \times (3.615^2 - 2.684^2) \times 12.39 = 3.144 \times (13.07 - 7.204) \times 12.39$$

$$= 3.144 \times 5.87 \times 12.39 = 229$$

在按有效数字运算时,还应注意以下几点:

① 物理公式中有些数值,不是由实验测量出,例如,测量圆柱体的直径 d 和长度 l ,求其体积公式 $M = \frac{1}{4}\pi d^2 l$ 中的 $\frac{1}{4}$ 不是测量值,在确定 M 的有效数字位数时不必考虑 $\frac{1}{4}$ 的位数。

② 对数运算时,首数不算有效数字。

③ 首位数是 8 或 9 的 m 位数值的相对误差和首位数是 1 的 $m+1$ 位数值相对误差相似,因此在乘除运算中,计数有效数字位数时,对首位数是 8 或 9 的可多算一位。

例如, $9.81 \times 16.24 = 159.3$,按 9.81 是三位有效数字,结果应取 159,但因为 9.81 的首位数是 9,可将 9.81 算作 4 位数,所以结果取 159.3。

④ 有多个数值参加运算时,在运算中途应比按有效数字运算规则规定的多保留一位,以防止由于多次取舍引入计算误差,但运算最后仍应舍去。例如,前述运算例子,按此则应是

$$\begin{aligned} & 3.144 \times (3.615^2 - 2.684^2) \times 12.39 \\ &= 3.144 \times (13.068 - 7.2039) \times 12.39 \\ &= 3.144 \times 5.864 \times 12.39 = 228.4 \end{aligned}$$

3. 数值取舍的约定

取舍约定的原则是,4 舍 6 入 5 凑偶。具体为

(1) 若舍去部分的数值小于所保留的末位数单位的 $1/2$,末位数不变。

(2) 若舍去部分的数值大于保留的末位数单位的 $1/2$,末位数加 1。

(3) 若舍去部分的数值恰好等于保留的末位数单位的 $1/2$,当末位数为偶数时,保持不变;末位数为奇数时,末位数加 1。

0-6 测量结果的评定

误差存在于一切科学实验过程中。因此,作为科学实验不仅要知道实验的结果,还需要知道误差的范围。由于测量真值是一理想概念,因而前面所定义的误差在实际中无法精确计算。但根据误差的特性,可以估算出误差的大致范围,并以此作为一种评定测量结果质量好坏的指标。1980 年以来,在国际计量局的正式建议下,世界各国开始推广使用统一的测量结果质量评定标准——测量不确定度,简称不确定度。

换言之,测量中总的不确定性误差,包括偶然误差和各项非定值系统误差,以一定的概率落在不确定度所表达的范围内。不确定度所对应的概率值可以有不同的选择,其中最基本、最常用的概率是 68.3%,与之对应的不确定度称为标准不确定度(实际上也简称不确定度),其他概率的不确定度称为扩展不确定度。扩展不确定度一般可由标准不确定度乘以相应的扩展因子而获得。在表示扩展不确定度时一定要附加说明其概率值。在物理实验中主要学习掌握标准不确定度的计算与表示方法。

由于测量过程中的误差来源往往不是单一的,因此测量结果的不确定度中一般包含多个分量,每个分量对应一种误差来源。根据计算方法的不同,不确定度的分量可归并为 A、B 两类。其中 A 类是用统计方法计算的那些分量,B 类是用其他方法计算的那些分量。根

据国际不确定度工作组的建议,完整的不确定度报告的表示过程是:先分别计算其各个分量,如果分量较多则需列成表格,在表格中详细说明各分量的误差来源、计算方法、计算公式和计算结果。然后将这些分量按“方和根”(即:将各分量值先平方,再求和,最后开平方根)的形式合成为测量不确定度。下面按直接测量和间接测量分别介绍相应的不确定度的计算方法。

(1) 直接测量结果的不确定度的计算

物理实验中直接测量的误差来源主要是偶然误差和仪器误差,因此直接测量的不确定度一般有两个分量。

来源于偶然误差的不确定度分量用 s 表示,属于 A 类。设通过重复测量得到 n 个测量值 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ (已不含定值系统误差),则

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{0-2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{0-3}$$

按式(0-2)算出它们的平均值作为测量的结果,按式(0-3)计算标准差 σ ,则 s 的计算式为

$$s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{0-4}$$

来源于仪器误差的不确定度分量用 u 表示。 u 的大小通常根据仪器误差限的大小来估计,属于 B 类。所谓仪器误差限(又称为仪器最大误差),是指在正确使用仪器的条件下,测量结果可能出现的最大误差。对于一些常用仪器,其误差限 ϵ (或 Δ)值见表 0-1。

表 0-1 常用仪器误差限

仪 器 名 称	量 程	最小分度值和精度等级	ϵ
木 尺	50cm 以下	1mm	1mm
	100cm	1mm	1.5mm
钢卷尺	1m	1mm	0.8mm
	2m	1mm	1.2mm
钢板尺	150mm	1mm	0.1mm
	300~500mm	1mm	0.15mm
	1000mm	1mm	0.2mm
游标尺	300mm 以下	0.02mm	0.02mm
		0.05mm	0.05mm
		0.1mm	0.1mm
千分尺	0~25mm	0.01mm	0.004mm
物理天平	500g	0.05g	1/3 量程以下 0.04g
			1/3~1/2 量程 0.06g
			1/2~满量程 0.08g
水银温度计	100℃	1℃	1℃
	100℃	0.1℃	0.2℃
电表		精度等级; K 级	$A \times K\%$
电阻		精度等级; K 级	$R \times K\%$

一般认为：在正常使用条件下，由仪器原因产生的误差在误差限范围内服从均匀分布，即仪器误差值可能是 $-\epsilon \sim \epsilon$ 范围内的任意值，且它等于任一可能值的概率是相同的。因此，来源于仪器误差的不确定度分量（它表示仪器误差有68.3%的可能性在 $-u \sim u$ 的范围内）是

$$u = 0.683\epsilon \quad (0-5)$$

由式(0-4)、式(0-5)分别算出 s 、 u 之后，则应按下式将两个分量合成为不确定度 U ：

$$U = \sqrt{s^2 + u^2} \quad (0-6)$$

例 0-1 用螺旋测微计测某一钢丝的直径，6次测量值 L_i 分别为：0.249、0.250、0.247、0.251、0.253、0.250；同时读得螺旋测微计的零位为+0.004，单位mm，已知螺旋测微计的仪器误差限为 $\epsilon = 0.004\text{mm}$ ，请给出完整的测量结果。

解 $\bar{L} = \left(\sum L_i \right) / n = 0.250\text{mm}$

考虑到零位修正：

$$\bar{L} = 0.250 - 0.004 = 0.246\text{mm}$$

$$\sigma_L = \sqrt{\sum (\bar{L} - L_i)^2 / (n - 1)} = 0.002\text{mm}$$

$$s = \frac{\sigma_L}{\sqrt{n}} \approx 0.001\text{mm}, \quad u = 0.683\epsilon \approx 0.003\text{mm}$$

$$U = \sqrt{s^2 + u^2} \approx 0.004\text{mm}$$

最终测量结果表达式为

$$L = 0.246 \pm 0.004\text{mm}$$

(2) 间接测量的不确定度计算

在间接测量中，每一个直接测量的误差都通过计算而传递给间接测量量。估算间接测量量的不确定度时，首先要明确各原始测量量的不确定度对间接测量量的不确定度影响的传递关系，即明确间接测量不确定度各分量的计算式。

设间接测量量 Z 是直接测量量 x 、 y 、 $\dots$ 、 w 的函数，即

$$Z = f(x, y, \dots, w) \quad (0-7)$$

各直接测量量 x 、 y 、 $\dots$ 、 w 的不确定度分别为 U_{x0} 、 U_{y0} 、 $\dots$ 、 U_{w0} 。用 u_x 、 u_y 、 $\dots$ 、 u_w 表示间接测量值 Z 的不确定度 U 中分别来源于 x 、 y 、 $\dots$ 、 w 的测量误差的分量。根据数学知识， U_{x0} 相当于自变量 x 的微小变化，它引起因变量 Z 的微小变化即 u_x ，两者之间的数学关系为

$$u_x = \frac{\partial f}{\partial x} U_{x0} \quad (0-8)$$

同理， U 的其他分量分别是

$$u_y = \frac{\partial f}{\partial y} U_{y0} \quad (0-8a)$$

$$u_w = \frac{\partial f}{\partial w} U_{w0} \quad (0-8b)$$

以上就是间接测量不确定度分量计算的一般公式，式中的偏导数在此称为误差传递系数。

在计算出各分量的数值后，将它们按“方和根”方式合成为不确定度 U ，即

$$U = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + \dots + u_w^2} \quad (0-9)$$