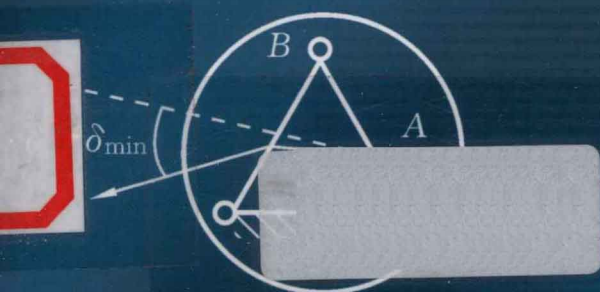




普通高等教育“十一五”规划教材
普通高等院校物理精品教材

大学物理实验

李铁平 王希成 罗中杰 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等教育“十一五”规划教材
普通高等院校物理精品教材

大学物理实验

主 编	李铁平	王希成	罗中杰	
副主编	陈琦丽	张光勇	石铁钢	吕 涛
参 编	毕 洁	杜秋姣	万珍珠	左小敏
	万 森	何开华	陈洪云	王清波
	周俐娜	郑安寿		

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书内容包括预备性实验、基础性实验、综合性实验、设计性实验和课外开放探究性实验。力求使学生通过本教材的学习和实验课程的实践达到对物理思想和方法、仪器的结构及原理的理解,使学生得到实验技能的训练,了解科学实验的主要过程和基本方法,具有一定的科学实验能力,以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅速发展的需要,并为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。

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

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李铁平 王希成 罗中杰 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-5609-6504-8

I. 大… II. ①李… ②王… ③罗… 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 160629 号

大学物理实验

李铁平 王希成 罗中杰 主编

策划编辑:周芬娜

责任编辑:王汉江

封面设计:潘 群

责任校对:史燕丽

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:11.25

字 数:230千字

版 次:2010年9月第1版第1次印刷

定 价:22.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

大学物理实验课程是高等学校理工科类各专业本科学生的公共必修基础主干课,是学生进入大学后系统地学习实验方法和实验技能的开端,是学生进行科学实验训练不可或缺的一门独立课程。物理实验技术是现代科学技术的先导,推动科学技术的发展,是现代工程技术创新和进步的源泉。物理实验技术涉及领域广阔,广泛应用于各理工学科;时间跨度大,一两百年前的经典实验仍然应用于交叉学科。通过对本课程物理实验知识和方法的系统学习,使学生得到实验技能的训练,初步了解科学实验的基本方法和主要过程,得到一定的科学实验能力,以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅速发展的需要,并为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。本教材根据我校大学物理实验课独立设课、分层次教学的要求编写,其目标是培养学生的实践能力和创新精神,培养学生用实验方法,通过实验提高发现、分析和解决物理问题的能力。

大学物理实验课程的内容是给学生提供物理实验的基本知识、基本方法和基本技能训练。大学物理实验是学生本科阶段接触的第一门物理实验课,打好基础尤为重要。因此,课程建设的首要任务是“加强基础”。什么是“基础”,随着知识和科技更新的加速,“基础”的内涵在变化。我们通过对原有实验内容的审查,去掉了一批内容陈旧、技术过时的实验,精心选择一些与当前技术相符的实验项目,同时体现“加强基础,循序渐进,因材施教,全面提高”的课程建设指导思想,达到学以致用目的。

在教学方法上,可以采取“单元专题式”的模块化教学,把全部实验划分为相对独立的单元,各单元之间循环教学,单元内部循序渐进。一般每单元包括几个实验项目,在内容上突出一条主线,围绕某一个专题展开,逐步加深,这样可对学生进行从学习基本知识到强化能力培养的训练。有的专题可能涉及几个实验层次,学生完成了基本要求的实验后,可以跨层次做实验;他们每做完一个单元实验后,可以进行总结与比较,鼓励学生创新实践,并为他们提供拓展实验的条件和探究实践的机会。

在教学中可以打破原“普物实验课”分块进行的格式(即力热、电、光三部分独立排课),按训练层次,循序渐进,每个阶段可以选择力热、电、光实验各一定数量,进行训练。

全书由多位教师共同编写,由于编者水平有限和时间仓促,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2010年8月

目 录

绪论	(1)
一、物理实验的地位和作用	(1)
二、物理实验的目的和任务	(2)
三、实验课的基本环节	(2)
四、测量与误差	(5)
五、有效数字	(10)
六、测量结果的表示方法	(12)
七、数据处理的基本方法	(12)
实验	(18)
实验 1 拉伸法测量金属的弹性模量	(18)
实验 2 固体的线膨胀系数	(22)
实验 3 双悬扭摆测转动惯量	(25)
实验 4 动态悬挂法测定杨氏模量	(28)
实验 5 弦振动的研究	(32)
实验 6 用玻尔共振仪研究受迫振动	(37)
实验 7 超声声速的测定	(44)
实验 8 分光计的调节	(50)
实验 9 三棱镜顶角测量	(56)
实验 10 色散曲线的测定	(58)
实验 11 光栅衍射	(61)
实验 12 超声光栅及其应用	(64)
实验 13 薄透镜焦距的测定	(67)
实验 14 双棱镜干涉测量光波波长	(73)
实验 15 等厚干涉及应用	(79)
实验 16 迈克耳逊干涉仪的调节和使用	(87)
实验 17 改装双量程电表	(91)
实验 18 惠斯登电桥测电阻及检流计内阻测量设计	(96)
实验 19 用双臂电桥测低电阻	(100)
实验 20 示波器的原理与应用	(102)
实验 21 电子束实验	(111)

实验 22	模拟静电场	(116)
实验 23	霍尔效应及其应用	(122)
实验 24	亥姆霍兹线圈磁场实验	(127)
实验 25	PN 结正向压降的温度特性实验	(133)
实验 26	铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	(137)
实验 27	电子荷质比测定	(145)
实验 28	光电效应及普朗克常数的测定	(148)
实验 29	夫兰克-赫兹实验	(151)
实验 30	密立根油滴实验	(155)
实验 31	金属电子逸出功的测定	(160)
附录		(165)
附录 1	国际单位制	(165)
附录 2	常用基本物理常量	(166)
附录 3	在海平面上不同纬度处的重力加速度	(167)
附录 4	常用物质的密度	(168)
附录 5	在 20 °C 时某些金属的弹性模量(杨氏模量)	(169)
附录 6	固体的线膨胀系数	(170)
附录 7	常用光源的谱线波长表	(170)
参考文献		(171)

绪 论

一、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)是在赫兹做出电磁波实验后才被人们公认的;20世纪,杨振宁、李政道提出的宇称不守恒理论,是在吴健雄做出实验验证后,才被同行学者承认的。然而,人们掌握理论的目的,是在于应用它来指导生产实践,促进科学进步,推动社会发展。理论付诸于实际的应用仍必须通过实验来验证,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了“能量子假设”。但假设还需要再经过大量的实验证实,才能成为科学理论,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,实验必须加以总结、抽象,并上升为理论,才有其存在的价值,而理论又是靠实验来检验的,同时理论上的需要又促进了实验的发展。1752年,富兰克林利用风筝把云层的电引入室内,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。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”，则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、运输等过程中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。

二、物理实验的目的和任务

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；懂得如何运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，做好实验前的准备。对于实验中出现的基本问题，能够通过查阅资料予以解释。

(2) 动手能力。能够对实验仪器设备正确布局连接，借助实验教材或说明书正确使用仪器进行具体测试，获得较准确的实验结果；能够排除实验中的简单故障，掌握和运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，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，拟订实验程序。

3. 培养与提高学生的科学实验素养

要求学生具有实事求是、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。

三、实验课的基本环节

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、实验目的、实验原理。

2. 实验的观测与记录

实验是整个教学中最重要的一环,必须充分利用课内的有限时间,提高教学效果。

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),不注意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,必须按规程操作。在仪器的安装与调整中一般应注意以下几点。

(1) 安排仪器时,应尽量做到便于观察、读数和记录。

(2) 灵敏度高的仪器(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) 停表、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件时,不要用力过猛。

(5) 注意仪器的零点,必要时需进行调零。

(6) 对砝码、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的电压、极性,并须经教师允许后方能接通电源。

(8) 不要借用其他组的仪器,仪器不够用时请示教师。

(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,用一最小分度为毫米(mm)的米尺测一物体长度时,读为 20.14 cm,最后一位 4 是估读的,一定要读出,不能写成 20.1 cm。

3) 记录

实验记录就是如实地记下各观测数据、过程及观测到的现象。实验记录要简单整洁、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。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) 记录表格举例。

测量圆柱体(见图 0-1)的体积公式:

$$V = \frac{1}{4} \pi d^2 l$$

使用仪器^①: 游标卡尺, 千分尺, 圆柱体。

游标卡尺零点读数为 0.00 mm, 千分尺零点读数为 -0.011 mm。将实验数据列于表 0-1 中。

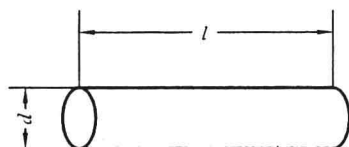


图 0-1 圆柱体的测量

表 0-1 圆柱体的直径和长度

d/mm	5.123	5.129	5.118	5.124	5.120	5.125	5.120 ^②	5.134 ^③
l/cm	10.726	10.720	10.720	10.726				

3. 数据处理

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。

4. 实验讨论

实验讨论是培养学生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多方面的, 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? 实验的完成情况如何?
- (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? 如果未达到可能达到的结果, 是何缘故?

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

5. 写实验报告

实验报告要力求简单明了, 用语确切, 字迹清楚。

实验报告示例

××××(实验名称)

目的

仪器及其编号

原理(含简图)

① 游标卡尺测量 l , 精度 0.02 mm; 千分尺测量 d , 精度 0.01 mm。

② 小数点后的尾数为“0”一定记上。

③ 发现错误不要涂掉。

实际实验步骤

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

四、测量与误差

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 $0.986\ 7\ \text{m}$,某物体质量为 $6.87\ \text{g}$,某电路的电流强度为 $1.56\ \text{A}$,某地的重力加速度为 $9.796\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,电子电荷为 $1.602\ 191\ 7 \times 10^{-19}\ \text{C}$,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。对待测物的测量可分两类,一类是用计量仪器与待测物进行比较,就可获得结果,这一类测量称为直接测量。例如,用米尺与某单摆相比较,读出摆线长为 $0.986\ 7\ \text{m}$ 。另一类是不能直接用计量仪器把待测量的大小测出来,而是需要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,这一类的测量称为间接测量。例如,重力加速度的测量,可以先通过测量单摆的摆长和周期,然后根据单摆周期的公式算出。

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。

每一个物理量都是客观存在的,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。而由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度与分辨能力的局限性,以及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,毫无例外地都包含有一定量的误差,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,以期得到最好的结果。

1. 系统误差与偶然误差

按照对测得值影响的性质,误差可分为系统误差与偶然误差两类。实验数据中,

两类误差虽然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)多次测量同一物理量时,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,用天平称量物体的质量时,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、天平臂不等长、空气浮力的影响引起的误差,在多次反复称量同一物体的质量时是恒定不变的,这就是系统误差。又如,在一电路中的电池的电压,随放电时间的延长而降低时,将给电路中的电流的测量带来系统误差。

系统误差又可以按其产生的原因分为以下几种。

(1) 仪器误差。这是由于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而导致的误差。

(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) 人为误差。这是由于观测者的感觉器官或运动器官不完善而引起的误差。此种误差因人而异,并和个人当时的精神状况密切相关。

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) 绝对值相等的正和负的误差的出现机会相同。

(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 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的误差为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$, 真值为 a , 则

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \cdots + (x_n - a) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \cdots + \varepsilon_n$$

将上式展开整理后,分别除以 n ,得出

$$\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) - a = \frac{1}{n}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \cdots + \varepsilon_n)$$

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 越大相抵消的机会越多。

(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,偶然误差由于测量次数的增加而减小,即测量值的平均值趋近于真值,因此可取算术平均值作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,测量次数取 10~20 次,而在物理实验课中则只取 4~10 次。

2. 测量不确定度

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。由于测量真值是一个理想概念,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。

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(实际上也简称为不确定度),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有多个分量,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,如果分量较多则须列成表格,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。

对于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 $x_1, x_2, \dots, x_n$ (已不含定值系统误差)。

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

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

按式(0-2)计算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

$$s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (0-4)$$

对于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 0-2。

表 0-2 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	50 cm 以下	1 mm	1 mm
	100 cm	1 mm	1.5 mm
钢卷尺	1 m	1 mm	0.8 mm
	2 m	1 mm	1.2 mm
钢板尺	150 mm	1 mm	0.1 mm
	300~500 mm	1 mm	0.15 mm
	1 000 mm	1 mm	0.2 mm
游标卡尺	300 mm 以下	0.02 mm	0.02 mm
	300~1 000 mm	0.05 mm	0.05 mm
	1 000~3 000 mm	0.1 mm	0.1 mm
千分尺	0~25 mm	0.01 mm	0.004 mm
物理天平	500 g	0.05 g	1/3 量程以下 0.04 g
			1/3~1/2 量程 0.06 g
			1/2 量程以上 0.08 g

续表

仪 器 名 称	量 程	最小分度值和精度等级	ϵ
水银温度计	100 °C	1 °C	1 °C
	100 °C	0.1 °C	0.2 °C
电表	—	精度等级: K 级	$I \times K\%$
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 :

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

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值。估算间接测量值的不确定度时,首先要明确各原始测量值的不确定度对间接测量值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。

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

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

各直接测量 $x, y, \dots, w$ 的不确定度为 $U_{x0}, U_{y0}, \dots, U_{w0}$ 。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。根据数学知识知, 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 的其他分量分别为

$$u_y = \frac{\partial f}{\partial y} U_{y0} \quad (0-9)$$

$$u_w = \frac{\partial f}{\partial w} U_{w0} \quad (0-10)$$

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,将它们按下式合成为不确定度 U ,即

$$U = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + \dots + u_w^2} \quad (0-11)$$

3) 不确定度数值表示的约定

不确定度一般只保留最大的一位非零数,其后面的尾数只要不全为零,就一律向所保留下来的数进1。

3. 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用来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小,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。

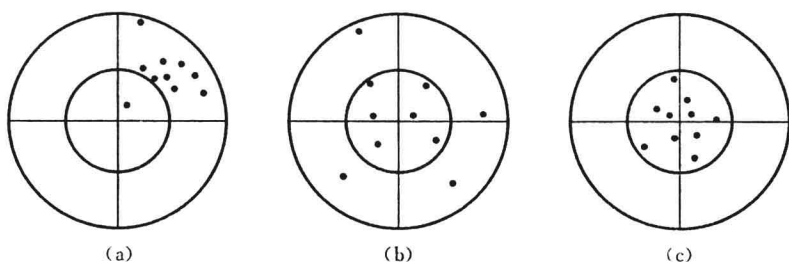


图0-2 射击时弹着点的情况

五、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,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

一般地讲,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,用一最小分度为毫米(mm)的尺,测得一物体的长度为7.62 cm,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,应视为有效数字。

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,用一毫米分度尺测得一物体的长度为 3.60 cm,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 3.6 cm 则不能肯定这一点,所以此“0”是有效数字,而且必须记录。另外在记录时,由于选择单位的不同,也会出现一些“0”,例如,3.60 cm 也可记为 0.036 0 m 或 36 000 μm ,这些由于单位变换才出现的“0”,没有反映出被测量大小的信息,不能认为是有效数字。在物理实验中常用一种被称为标准的写法,就是任何数值都只写出有效数字,而数量级则用 10 的幂数去表示。例如,上述数值可写为 $3.60 \times 10^{-2} \text{ m}$, $3.60 \times 10^4 \mu\text{m}$ 。

对于分度式的仪表,读数要读到最小分度的 1/10。例如,最小分度是毫米的尺,测量时一定要估测到 0.1 mm;最小分度是 0.1 A 的安培计,测量时一定要估测到 0.01 A。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 1/5),这时要读到最小分度的 1/10 有困难,可以读到最小分度的 1/5 甚至 1/2。

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 15.74 cm,宽为 5.37 cm,求其面积。按一般算术计算面积为 84.5238 cm^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 15.73 cm 和 5.36 cm,则算出的面积为 84.3128 cm^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

实验后计算误差时,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

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各数值误差之和,因此运算后的误差应大于参与运算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