

大学物理

实验教程

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

◎ 主 编 马国利

◎ 副主编 郭洪岩 周洪科 刘伟波



中国石油大学出版社

大学物理 *Daxuewulishiyanjiaocheng*

实验教程

主 编 马国利

副主编 郭洪岩 周洪科 刘伟波

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/马国利主编. —东营:中国石油大学出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-5636-3037-0

I. 大… II. 马 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 023444 号

本书封面覆有中国石油大学出版社标志的激光防伪膜。

本书封面贴有中国石油大学出版社标志的电码防伪标签,无标签者不得销售。

书 名: 大学物理实验教程

作 者: 马国利

策划编辑: 宋秀勇(电话 0546—8392139)

责任编辑: 曹秀丽

封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: yibian8392139@163.com

印 刷 者: 山东省东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546 8392139)

开 本: 180×235 印张: 10.5 字数: 210 千字

版 次: 2010 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 19.00 元

前 言

大学物理实验教程

本书是按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制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，根据理工科院校大学物理实验教学的特点编写而成。本书采取由浅入深、循序渐进的方式编排实验内容；实验原理简明扼要，实验公式推导完整，实验方法清晰合理，数据处理规范。

本书第一章绪论部分，着重说明物理实验课学习的特点及其教学改革概况。第二章较深入地阐述了有关误差估算与数据处理的方法，并引入了“不确定度”的概念，引导学生正确记录实验数据，学会分析实验误差，绘制实验曲线，正确评价实验结果。书中第三章至第五章分别是力学与热学、电磁学、光学等近代物理学实验。本书编录了基础性、综合性、设计性实验项目共 28 个。书末附有常用物理常数以及国际单位制简介。

本书由马国利老师主编，各章节的撰写安排是：马国利、张杰（第二章，第三章实验 1、2，第四章实验 5、6、15），马国利、姚延立（第四章实验 1、2、3、4，第五章实验 2、5），周洪科、陈庆东（第三章实验 3、4，第四章实验 12、13、14，第五章实验 6），郭洪岩、尹学爱（第三章实验 5，第四章实验 7、8、9、10、11，第五章实验 3、4），刘伟波、韩敬伟（第四章实验 16、17，第五章实验 1），马国利（绪论）。

本书是在使用多年的实验讲义和教材的基础上经调整、更新、扩充、完善后得到的，它凝聚了滨州学院物理实验室全体教师多年的心血。在此，我们谨向为本书编写提出过宝贵意见的同志致以衷心的感谢。

本书为普通理工科院校各专业的大学物理实验教材，也可供实验教师和实验技术人员参考。

由于时间仓促，水平有限，书中难免存在不足之处，恳请各位同行及读者给予指正，在此谨表谢意。

编 者

2010 年 2 月

目 录

大学物理实验教程

第一章 绪论	1
第二章 不确定度与实验数据处理	6
2.1 测量与误差的概念	6
2.2 测量结果不确定度的评定	12
2.3 有效数字及其运算	14
2.4 数据处理的基本方法	18
习题	22
第三章 基础性实验	24
实验 1 用单摆测重力加速度	24
实验 2 刚体转动惯量的测定	26
实验 3 示波器的使用	30
实验 4 用惠斯登电桥测电阻	36
实验 5 薄透镜焦距的测量	40
第四章 综合性实验	45
实验 1 弦振动的研究	45
实验 2 液体黏滞系数的测量	50
实验 3 金属杨氏模量的测量	53
实验 4 液体表面张力系数测定	61
实验 5 声速的测量	69
实验 6 温度传感技术的研究	75
实验 7 用牛顿环测透镜的曲率半径	79
实验 8 用阿贝折射仪测液体的折射率	83
实验 9 光电效应法测普朗克常数	87
实验 10 分光计的调节和棱镜玻璃折射率的测定	94
实验 11 用旋光仪测定糖溶液的浓度	102
实验 12 铁磁材料居里温度的测试	105
实验 13 霍尔效应实验	111
实验 14 用非线性电路研究混沌现象	117
实验 15 多普勒效应综合实验	123

实验 16 全息照相	130
实验 17 电子荷质比的测量	134
第五章 设计性实验	139
实验 1 硅光电池特性研究	139
实验 2 热敏电阻测温仪的制作	142
实验 3 玻璃片折射率的测量	143
实验 4 装调望远镜和显微镜	144
实验 5 细丝直径的测量	145
实验 6 电表的改装与校准	146
附 录	153
附录 1 几种长度测量工具的使用方法	153
附录 2 天平的使用方法	158
附录 3 国际单位制中具有专门名称的导出单位	160
附录 4 基本物理常数	161
参考文献	162

第一章 绪 论

一、大学物理实验的地位和作用

众所周知,物理学是一门实验科学,任何物理现象、物理概念、物理定律都是建立在实验基础之上的。随着实践和科学技术的进步,当今物理实验综合了科学技术的成就,发展形成了自身的科学体系,成为系统性较强的一门独立学科——实验物理学。

人们要揭示宇宙的奥妙,探索物质的存在形式、运动规律以及相互作用,首先要进行的就是物理实验。牛顿创立万有引力定律绝非是从一次苹果落地而悟出的道理,而是通过无数次观测实验和研究,并在总结大量前人研究成果的基础上所得出的结论,伽利略在著名的比萨斜塔上所做的自由落体实验否定了亚里士多德的“落体的速度与重量成正比”的错误结论,得出了“在同一地点不同的物体具有相同的重力加速度”这一科学论断。我们周围的空间不仅有上述引力相互作用的引力场,而且还存在着电磁相互作用的电磁场,光就是其中的一种。这一结论是麦克斯韦在 1862 年通过对库仑定律、安培-毕奥-萨瓦定律、法拉第电磁感应定律等基本实验定律的分析、概括得出的。在 1865 年的理论研究中还指出:“电场和磁场的改变不局限在空间的某一部分,而是以数值等于电荷的电磁单位与静电单位的比值的速度的传播的,即电磁波以光速传播,这说明光是一种电磁现象。”这一理论在 1888 年被赫兹的实验证实。可见物理学理论的提出、创立和发展无不以严格的实验事实为依据,并得到实验的反复检验和仲裁,才被确认其真理性的。正如诺贝尔物理学奖获得者著名华裔物理学家丁肇中曾说:“我是一个做实验的工程师,希望通过我的得奖,能提高中国人对实验的认识。没有实验就没有现代科学技术。”所以,要从事物理学的研究,必须首先掌握物理实验的基本功。也正如创办清华大学物理系的叶企孙先生对李政道这样优秀的清华学子仍规定:“理论课可以免上,只参加考试;但实验不能免,每个必做。”总之,实验是科学创新的重要源头,是培养创新型人才的重要课堂,尤其是物理实验,还是其他新兴学科创立和发展的重要桥梁。对计算机、电子技术及农、工、医、生等学科,这种桥梁作用尤为突出,是其他方法无法跨越和替代的。正是由于物理实验课程的性质和特点,才决定了它在培养学生创新能力方面具有独到作用。

在 21 世纪,世界各国都强调以培养学生的创新能力为核心,培养和造就一大批具有国际竞争能力的高层次创新人才,以适应知识经济时代的发展。这就要求学生不仅具备比较宽厚的理论知识,更要具有较强的科学实验能力。物理实验正是为了

培养和提高学生进行科学实验的能力,开发创新思维而独立设置的必修课程,是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,通过对学生施以科学、系统、严谨的技能训练,把蕴藏在学生身上的聪明才智和创造才能充分挖掘出来,为将来成为创新型人才打好基础。

二、大学物理实验的目的和任务

大学物理实验课的内涵丰富,覆盖的知识面和包含的信息量以及对学生的基本训练内容宽广,除包括本学科的力学、热学、电磁学、光学、原子物理学外,还涉及数学、测量学、误差理论和计算机科学等。作为独立开设的一门必修课,《大学物理实验》的主要的目的和任务是:通过对学生施以系统而严谨的物理实验基本知识、基本方法、基本技能(三基)方面的教育与训练,培养学生的科学思维能力、创新能力和浓厚的实验兴趣,为以后学习专业实验课和近代物理实验课奠定坚实的基础。

物理实验基本知识包括:实验目的、原理、思想、概念、公式;实验仪器的测量原理、基本结构、精度等级;实验误差的分析与不确定度的评定;实验结果的正确表示;实验报告的撰写、思考题解答等。

物理实验基本内容主要是:根据实验目的与要求,确定实验的思路与方案;正确选择与使用测量仪器、减少测量误差等。测量方法有直接测量法、间接测量法及特殊测量法,例如:比较法、放大法、平衡法、补偿法、冲击法、霍耳法、干涉法、衍射法、偏振法、全息法等。基础物理实验中所采用的科学方法还有内推、外插、替换、修正等。

物理实验基本技能主要有实验仪器的操作、调节、测试读数、制表、绘图、安全用电、合理布线、眼手脑并用、查阅文献、排除故障、独立思考、和谐交流、发现问题与解决问题的能力等。

总之,通过对学生进行实验方法、实验设计、实验操作、仪器使用、数据处理、实验报告撰写、问题分析解答等诸方面的训练,从而培养学生的观察思维能力、阅读理解能力、设计布置能力、动手操作能力、分析判断能力、书写表达能力、数据处理和独立解决问题的能力。

兴趣是最好的老师,兴趣是靠科学实验方法培养出来的,培养兴趣就是培养运用科学方法去寻求成功之路,在失败中吸取经验教训,在成功中总结出新的问题;在兴趣的激励下,做到有所发现、有所发明、有所创新、有所前进才算真正的成功实验,完成了实验任务。

三、大学物理实验课的教学方法和要求

大学物理实验课实行开放式、分层次、多模块、立体化的教学模式和方法。通过开设一定数量的必修、选修两个模块的实验项目,来满足学生个性化教育的需求。同时又将实验内容分成基础性实验、综合性实验、设计性实验来完成实验教学任务,这

3个实验教学层次的比例大体为:60%,30%,10%。

基础性实验,又称为基本性实验。它主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验方法和基本实验技能的掌握、实验误差不确定度及实验数据处理方法等,涉及力、热、电、光、原子物理等各个领域的内容。

综合性实验主要是在完成基本性实验的基础上,提高了实验教学的要求。实验教学内容与理论教学既有机结合,又与科研、工程、社会应用实践密切联系。通过改造传统的实验教学内容和实验技术方法,既体现出物理学科内涵、实验内容的更新,又反映出新技术、新方法、新设备的现代实验技术和手段,实现了基础与前沿、经典与现代的有机结合,重在对学生进行素质和能力的培养。

设计性实验指给定实验目的、要求及条件,由学生自行设计实验方案并加以实现的实验,注重对学生探索精神、科学思维、实践能力、创新能力的培养,从而为有余力的学生大大延伸了课内实验内容。

实行开放式、立体化的教学模式和方法,旨在从时间、空间上给学生更多的选择自由,提供学生自主学习的机会,搭建师生相互交流的平台。学生可通过电话、网络等多媒体进行预约实验、预习实验、回答问题,教师可同时实现全方位为教学服务,形成良性互动,大大有利于学生综合素质的培养和实验教学质量的全面提高。学生必须明确:开放实验课绝不是开门、放松、来去自由、愿做不愿做的教学活动。开放实验室是让学生有更多的空间充分实现自我,形成个体独特的新思维、新方法。要把宽松的课堂气氛与严谨的科学实验融洽起来,切实处理好寻求自我与提高实验教学质量的关系。

四、大学物理实验课的进程和要求

大学物理实验课从教学环节上可分为3个进程:预习实验、正式实验、实验后的总结报告与成绩评定。现就各教学环节提出如下具体要求:

1. 实验前的准备、预习实验课

实验课是有组织、有计划、有目的的教学活动,即便是开放实验室学生也必须遵守实验守则,通过预约到实验室上课,很好地完成学习任务,不得擅自行动,影响教学秩序。

实验前要认真做好预习,力求理解实验的全部内容、原理及要求,明确实验目的、步骤、方法。要从观察仪器外观铭牌、面板旋钮标识,仪表读数记录系统等入手,初步了解实验仪器,实验材料的性能和方法,注意事项等,在此基础上写出实验预习报告,同时在实验数据记录本上画好数据记录表格。预习报告的内容包括:姓名、学号、专业、班级、实验日期、实验台号、实验题目、实验目的、实验器材及规格型号、实验原理、实验方法、步骤注意事项等。其中,实验原理一般应融会贯通地写出实验所依据的主要原理公式及公式中各物理量的意义。画出原理图、电路图或光路图。实验方法、步

骤、注意事项应是自己思考设计出来的,也可参照教材或有关指导书、使用手册等资料。

对于开放实验教学或专题研究性质的实验、自行设计实验等,目的都是为了给学生更多的自主活动的空间,以便于培养创新型人才,更要做好预习,保证实验的顺利进行。

2. 实验操作、正式实验课

正式实验课主要进行实验操作,要做到眼手脑并用。首先按照预习实验时设计好的方法、步骤、注意事项等,认真进行对照,检查实验条件是否完备,包括环境、温度、湿度、气压、振动、外电磁场影响等;仪器设备器材规格型号准确无误。切忌急于求成,盲目操作。特别是一些关键地方,万一疏忽,将导致全盘失败。所以要反复检查连接成的实验电路或光路,确保万无一失,才能通电、通光,正式进行操作,必要时经指导老师检查同意后进行。在实验中要细心观察现象,实事求是地做好记录,不得单纯追求好数据而忽视偶然(也可能是必然)实验现象。往往偶然现象蕴涵着新的待发现的物理规律。要坚决反对马虎从事,弄虚作假,要尊重实验事实,讲究严格的科学态度,提高实验技能,要注意安全用电,万一出现意外事故要冷静,迅速采取有效措施,切断电源,及时报告,把意外损失降到最小。

完成一个好的实验不仅是创新能力大小的反映,更重要的是一个人的高尚品德、情操、科学态度与精神的体现。

3. 实验后的总结报告及成绩评定

实验操作观测结束后及时断电、断水、整理复原所使用的仪器器材、清扫周围卫生等,然后在实验仪器设备使用记录簿上签名,请指导老师验收、核查后才能离开实验室。

实验后要及时撰写出实验报告,对实验中观测到的现象、实验数据进行整理和分析并给出误差评价及不确定度的大小;要进行必要的问题讨论及思考题解答;对要求作图的实验还要绘出相应的实验曲线;还可以写明自己的心得体会、意见、建议等。

撰写实验报告是实验课的重要内容,不仅是对实验的分析总结,更重要的是培养学生善于总结分析的能力,还训练学生的归纳整理书写表达能力,为将来撰写科研论文打下基础,要坚决杜绝抄袭实验报告的现象。实验报告的格式:

① 实验名称。

② 实验目的:学习的重点。

③ 实验原理:用自己的语言简要叙述实验原理(包括电路图或光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式,公式中各物理量的含义,公式成立所应满足的实验条件等。

④ 实验仪器:记录仪器名称、级别、型号以及实验装置的仪器编号。

⑤ 实验内容:要详细记录实验过程中的实验现象,主要的实验步骤以及原始的

实验数据。

⑥ 数据处理:画出详细的实验数据表格,写出计算公式及主要的计算过程,计算出误差。

⑦ 正确的实验结果和结论的表述。

⑧ 问题讨论。

学生实验成绩的评定与评价合理与否,是同学们非常关心的事,也涉及对教师教学的评价问题,所以应建立多样化的考核方式。一般根据学生平时成绩与期末考试成绩评定,二者原则上各占 50% 的比例。根据学生在 3 个教学环节中的表现及所作所为的情况,重在学生能力考察,尽量定出符合客观实际的成绩,一般划分为优秀、良好、及格、不及格。例如学生在实验中自己主动排除故障修好了仪器,或是发现了新的很值得深入探索的物理现象,或是完成了与实验有关的小发明、小制作都可被评为优秀。若考核内容为设计性实验,学生必须在规定的时间内完成,教师根据设计内容水平给出成绩。

第二章 不确定度与实验数据处理

误差是实验无法避免的问题,故实验误差分析、测量结果不确定度的评定以及实验数据处理贯穿在实验全过程中,即在预习实验、实验仪器选择布局、正式实验进程中的检测与监控、实验结束后的结果分析与实验报告中都要用到或涉及实验误差。所以,不掌握实验误差的基本知识,就不可能做好物理实验;不会计算测量结果的不确定度,就不能正确评定与表达测量结果;不会处理实验数据,就不可能得到正确的测量值与实验结果。因此,这部分内容在整个实验中是非常重要的。通过本章的学习,应熟练掌握以下知识:

1. 掌握好误差与不确定度 2 个概念,明确 2 者的关系及其异同点;
2. 与国际接轨,用不确定度正确完整地表示实验测量结果;
3. 掌握有效数字的概念及运算规则,熟悉有效数字与不确定度的关系;
4. 懂得系统误差对测量结果的影响,学习发现系统误差、削弱系统误差的方法;
5. 掌握列表法、作图法、逐差法、最小二乘法(即回归法)等常用的数据处理方法。

2.1 测量与误差的概念

一、测量与测量分类

物理学是一门实验的科学,物理实验就是要把自然界中物质的运动形态,按人们的意愿在预定的条件下,以比较纯粹或典型的形式再现,从而使人们有可能在较有利的条件下,探索各相关量之间的规律性或验证理论。因此,物理实验中基本的操作就是测量。所谓测量,就是将待测量与规定为基本单位的物理量进行比较,其倍数即为待测量的大小,其单位就是与之进行比较的基本单位。例如,我们说测得某一物体的长度为 1.248 m,则表示基本单位为米,而物体的长度为基本单位的 1.248 倍(数值),显然数值的大小与选用的单位有关。因此,我们在给出某一待测量的结果时,必须同时给出数值和单位,两者缺一不可。实际的测量过程一般要借助于测量仪器,测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具,如游标卡尺、天平、停表等,测量仪器是基本单位的实物体现。

测量通常分为直接测量和间接测量两类。直接测量是指将待测量与测量仪器直接比较,得出被测量量值的测量。例如,用米尺测量长度,用天平测量物体质量,等

等。但在物理实验中,还有一些物理量不能直接从仪器上测得,而是通过对某些相关物理量的直接测量,再根据相应的公式计算出被测量的大小,这种测量称为间接测量。例如在单摆实验中,通过对摆长 L 和周期 T 的测量,由公式 $g = \frac{4\pi^2}{T^2} L$, 计算出重力加速度的过程就是间接测量。

二、误差及其分类

物理实验时,要对一些物理量进行测量。我们所测量的物理量在一定条件下,均有不依人的意志为转移的真实大小,称此值为被测量的真值。测量的理想结果是真值,但它又是不能确知的。因为测量仪器只能准确到一定程度,测量原理与方法的不完善,环境条件的影响及测量者感官能力的限制,所得测量值和真值总存在一定的差异,这种测量值 x 与真值 x_0 之差称为测量误差 ϵ , 简称误差,即

$$\text{误差}(\epsilon) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0) \quad (2-1)$$

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此也称 ϵ 为绝对误差。绝对误差虽然可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则不适用,需要用相对误差表示。相对误差的定义为

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (2-2)$$

有时被测量有公认值或理论值,还可用“百分误差”来表征,即

$$\text{百分误差} = \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (2-3)$$

由于被测量的真值不可知,测量误差也不可知。只能给出被测量的最佳估计值及其不确定范围的估计,即测量的不确定度表示。

根据误差的性质和特点,可将误差分为两类,即系统误差与偶然误差。

1. 系统误差

在同一条件下(实验方法、仪器、实验环境、实验者),对同一物理量进行多次测量,误差的符号和绝对值保持不变或按某种规律变化,该误差称为系统误差。其产生的原因主要有以下几个方面:

(1) 理论(方法)误差。这是由于实验方法或理论不完善导致的误差。

(2) 仪器误差。这是由所用量具或装置本身不完善或调整不当而产生的误差。主要表现有示值误差、零值误差、调整误差及回程误差等。

(3) 环境误差。这是由外界环境(温度、湿度、光照、电磁场等)的影响而产生的误差。

(4) 人身误差。这是由观察者的不良习惯与偏向引入的误差。

从上述系统误差产生的原因可知,测量者不能依靠在相同条件下进行多次测量来消除和发现它。但在实验中应尽可能进行系统误差的修正和处理。按对系统误差

掌握的程度,常将其分为已定系统误差和未定系统误差两类。已定系统误差是指采用一定的方法,可以对误差的数据和符号确定的系统误差。未定系统误差是指不知道误差的大小和符号,仅仅知道误差的可能范围(或称误差限)。对于已定系统误差,可对测量值进行修正。设已知测量某量的已定系统误差为 Δx ,则修正值为 $c_x = -\Delta x$,修正后的测量值为

$$\text{实际值}(x') = \text{示值}(x) + \text{修正值}(c_x) \quad (2-4)$$

对不能消除的未定系统误差,应设法估计其误差的大小,但寻找系统误差并估计其大小,没有普遍规律可循,在很大程度上有赖于实验者的经验与素养。

2. 偶然误差(随机误差)

在相同条件下,对某一物理量进行多次测量,各测量值之间总存在差异,且变化不定,在消除系统误差后仍然如此,这种绝对值和符号随机变化的误差称为偶然误差(或称随机误差)。产生偶然误差的原因很多,而且各种偶然因素对实验的影响一般都很小,且是混合出现的。它的主要来源有两个方面:一是实验者本人感觉器官分辨能力的限制;二是测量过程中,实验条件和环境因素的微小的无规则的起伏变化。在大量的观测数据中,偶然误差服从一定的统计分布规律。通常在大学物理实验中,服从正态分布规律。图 2-1 所示为正态分布曲线,其横坐标是测量值,纵坐标是每单位 x 出现的概率,或称为概率密度。特点如下:

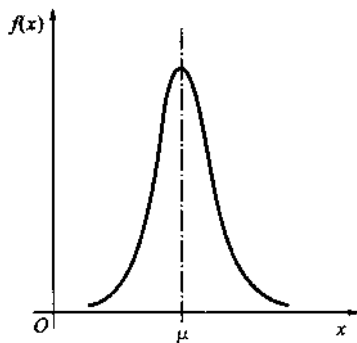


图 2-1 正态分布曲线

- (1) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多。
- (2) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的机会相等。
- (3) 有界性:超过一定大小范围的误差出现的概率为零。

根据偶然误差的特点,采用多次重复测量求平均来减小偶然误差的影响,事实上,多次测量的算术平均值就是最佳估计值;另外,还可以根据偶然误差服从的统计分布规律,对偶然误差的大小及测量结果的可靠性作出合理的评价。

3. 精度

误差反映了测量结果与真值的差异,差异小,俗称精度高;差异大,俗称精度低。根据误差的种类,可将精度细分为如下几种:

- (1) 准确度:表示测量结果中系统误差大小的程度。
- (2) 精密度:表示测量结果中偶然误差大小的程度。
- (3) 精确度:是测量结果中系统误差与偶然误差的综合,表示测量结果与真值的一致程度。准确度、精密度和精确度 3 者的含义可用图 2-2 所示的情况来说明。

图 2-2(a)表示精密度很高,但准确度低,即偶然误差较小,但有较大的系统误

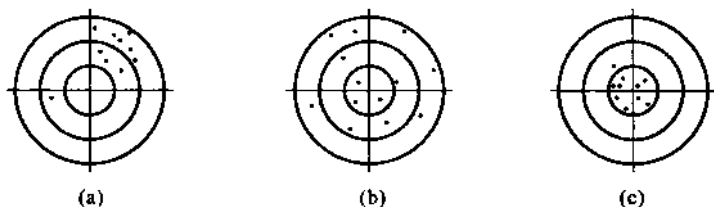


图 2-2 测量结果精度示意图

差;图 2-2(b)表示准确度高,但精密度低,即系统误差较小,但偶然误差较大;图 2-2(c)表示精密度和准确度均较好,即精确度高,说明偶然误差和系统误差均较小。因此,在评价测量结果时,原则上应指出精确度的大小,即同时反映其系统误差和偶然误差的大小。

三、直接测量与间接测量中的误差传递

1. 单次直接测量结果的误差估算

有些实验,由于是在动态中测量,不容许对被测量在相同条件下作重复测量,如热学实验中的温度测量就无法多次测量。另外在间接测量中,该物理量的误差对最后的结果影响较小,或在有些实验中对精度要求不高,在这些情况下,对被测量只测一次,那么它的误差应如何估算呢?对于单次测量,由于误差的来源很多,各个实验又有各自的特点,所以难于用统一标准。目前一般有如下两个约定:①当测量的偶然误差较小时,通常取仪器的最小分度值为极限误差;②当测量的偶然误差较大时,选取仪器的最小分度值的几倍为极限误差。一般取最小分度值为极限误差 $\delta_{\max}$,所以单次直接测量结果的误差可估计为

$$\sigma = \frac{1}{3} \delta_{\max} \quad (2-5)$$

2. 间接测量中的误差传递

在物理实验中,除直接测量外,大部分实验都是通过间接测量获得最终结果。所谓间接测量,就是把直接测量值代入某种函数关系求出待测量。由于各直接测量值有误差,经过函数运算必然影响到间接测量值,这就是误差传递。各直接测量值的误差与间接测量值的误差之间的关系式,称为误差传递公式。

(1) 误差传递的基本公式

设 $y = F(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 其中 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为 m 个直接测量值, y 为间接测量值,将各直接测量值的算术平均值代入公式,即可求出间接测量的最佳估计值,即

$$\bar{y} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \quad (2-6)$$

当考虑各直接测量值的误差时,间接测量值也有误差,所以有

$$\bar{y} \pm \Delta y = F(\bar{x}_1 \pm \Delta x_1, \bar{x}_2 \pm \Delta x_2, \dots, \bar{x}_m \pm \Delta x_m) \quad (2-7)$$

按泰勒公式展开式(2-7)并略去二次方以上各项得

$$\begin{aligned}\bar{y} \pm \Delta y = & F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) + \frac{\partial F}{\partial x_1}(\pm \Delta x_1) \\ & + \frac{\partial F}{\partial x_2}(\pm \Delta x_2) + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_m}(\pm \Delta x_m)\end{aligned}\quad (2-8)$$

在计算偶然误差时,由于误差本身的正或负是不可知的,因此,上式中各误差项的系数必须取其绝对值,即

$$\Delta y = \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_m} \right| \Delta x_m \quad (2-9)$$

相对误差为

$$\frac{\Delta y}{\bar{y}} = \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| \frac{\Delta x_1}{F} + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| \frac{\Delta x_2}{F} + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_m} \right| \frac{\Delta x_m}{F} \quad (2-10)$$

如果间接测量 y 是直接测量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 的相乘或相除的函数关系,则为了运算方便,通常对 $\bar{y} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$ 两边取对数,即 $\ln \bar{y} = \ln F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$, 先计算相对误差,再求绝对误差。公式为

$$E = \frac{\Delta y}{\bar{y}} = \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_m} \right| \Delta x_m \quad (2-11)$$

$$\Delta y = E \cdot \bar{y} \quad (2-12)$$

以上讨论没有考虑各误差项的实际符号,而只是从最不利的情况讨论,忽略了可以相互抵消一些变量的情况,因而估计出的误差将有些偏大。根据上述公式,可推导出表 2-1 所列的一些常用函数关系式的误差传递公式。

表 2-1 常用函数关系式的误差传递公式

序号	函数关系式	误差传递公式	
		绝对误差	相对误差
1	$y = x_1 + x_2$	$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 $	$E = \frac{ \Delta x_1 + \Delta x_2 }{x_1 + x_2}$
2	$y = x_1 - x_2$	$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 $	$E = \frac{ \Delta x_1 + \Delta x_2 }{x_1 - x_2}$
3	$y = x_1 \times x_2$	$\Delta y = x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2 $	$E = \left \frac{\Delta x_1}{x_1} \right + \left \frac{\Delta x_2}{x_2} \right $
4	$y = \frac{x_1}{x_2}$	$\Delta y = \frac{ x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2 }{y^2}$	$E = \left \frac{\Delta x_1}{x_1} \right + \left \frac{\Delta x_2}{x_2} \right $
5	$y = x^n$	$\Delta y = n x^{n-1} \cdot \Delta x $	$E = n \left \frac{\Delta x}{x} \right $
6	$y = \sqrt[n]{x}$	$\Delta y = \left \frac{1}{n} x^{\frac{1}{n}-1} \cdot \Delta x \right $	$E = \frac{1}{n} \left \frac{\Delta x}{x} \right $
7	$y = \sin x$	$\Delta y = \cos x \cdot \Delta x $	$E = \frac{ \cos x \cdot \Delta x }{\sin x}$
8	$y = \cos x$	$\Delta y = \sin x \cdot \Delta x $	$E = \frac{ \sin x \cdot \Delta x }{\cos x}$

由表 2-1 所列常用函数关系式的误差传递公式, 我们可总结出如下规律:

① 当间接测量值是几个直接测量值的和(或差)时, 间接测量的绝对误差等于各直接测量值的绝对误差之和。在此情况下, 先算绝对误差, 后算相对误差较方便。

② 当间接测量值是几个直接测量值的积(或商)时, 间接测量的相对误差等于各直接测量的相对误差之和。在此情况下, 先算相对误差, 后算绝对误差较方便。

(2) 标准误差的传递公式

设直接测量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ 的标准误差分别为 $\sigma(\bar{x}_1), \sigma(\bar{x}_2), \dots, \sigma(\bar{x}_m)$, 根据误差的有关理论, 可以证明, 间接测量标准误差的传递公式为

$$\sigma(\bar{y}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \cdot \sigma^2(\bar{x}_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \cdot \sigma^2(\bar{x}_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_m}\right)^2 \cdot \sigma^2(\bar{x}_m)} \quad (2-13)$$

其相对误差为

$$\frac{\sigma(\bar{y})}{\bar{y}} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma(\bar{x}_1)}{\bar{y}}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma(\bar{x}_2)}{\bar{y}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma(\bar{x}_m)}{\bar{y}}\right)^2} \quad (2-14)$$

同样, 当间接测量值是各直接测量值的积(或商)时, 则先求标准误差的相对误差较方便, 其公式为

$$E = \frac{\sigma(\bar{y})}{\bar{y}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x_1}\right)^2 \cdot \sigma^2(\bar{x}_1) + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial x_2}\right)^2 \cdot \sigma^2(\bar{x}_2) + \dots + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial x_m}\right)^2 \cdot \sigma^2(\bar{x}_m)} \quad (2-15)$$

标准误差为

$$\sigma(\bar{y}) = E \cdot \bar{y} \quad (2-16)$$

根据上面的公式, 可以推导出表 2-2 所列一些常用函数的标准误差传递公式。

表 2-2 一些常用函数的标准误差传递公式

序号	函数关系式	误差传递公式	
		标准误差	相对误差
1	$y = x_1 + x_2$	$\sigma(\bar{y}) = \sqrt{\sigma^2(\bar{x}_1) + \sigma^2(\bar{x}_2)}$	
2	$y = x_1 - x_2$	$\sigma(\bar{y}) = \sqrt{\sigma^2(\bar{x}_1) + \sigma^2(\bar{x}_2)}$	
3	$y = x_1 \times x_2$		$E = \sqrt{\left(\frac{\sigma(\bar{x}_1)}{\bar{x}_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(\bar{x}_2)}{\bar{x}_2}\right)^2}$
4	$y = \frac{x_1}{x_2}$		$E = \sqrt{\left(\frac{\sigma(\bar{x}_1)}{\bar{x}_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(\bar{x}_2)}{\bar{x}_2}\right)^2}$