

普通高等学校“十二五”规划教材

大学物理实验

主编 阮树仁 盛淑芳



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等学校“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 阮树仁 盛淑芳
副主编 吕太国 王国菊
参 编 冯文侠 梁宝龙 钱 霞 孙桂芳 牟 娟

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是按照教育部《新世纪高等教育教学改革工程》(教高[2001]1号)和《山东省高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》以及大学物理分级教学的要求编写而成的。其内容涉及力学、热学、电磁学、光学等领域的实验,详细介绍了实验项目的内容、原理、实验器材和注意事项,有些实验项目甚至还给出了多种实验方法。

本书可作为综合性院校电子信息工程、通信工程、材料、化学化工、生命科学等专业的大学物理实验教学用书,也可作为实验工作者和其他科技工作者的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/阮树仁,盛淑芳主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2014.8

普通高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3408-1

I. ①大… II. ①阮… ②盛… 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 162943 号

策 划 刘 杰

责任编辑 马武装 曹 锦

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 9

印 数 1~3000册

字 数 207千字

定 价 15.00元

ISBN 978-7-5606-3408-1/O

XDUP 3700001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

为了进一步加强山东省高等学校实验教学和实验教学条件建设,更好地深化高等教育改革和全面实施素质教育,根据教育部《新世纪高等教育教学改革工程》(教高[2001]1号),山东省教育厅于2004年颁布的《山东省高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》,结合我校“大学物理”课程分级教学模式改革,组织、编写了本书,以满足不同专业的需求,进一步优化高等学校资源配置,提高办学效益,深化实验室管理体制,培养学生动手操作能力、实践能力和创新能力。本书的出版对促进高等学校教学资源共享、强化办学特色、加快学校发展具有重要作用。

本书的特点是通用性广,书中介绍的近30个实验项目涉及力学、热学、电磁学、光学等,可满足电子信息技术和工程、通信工程、安全工程、化学化工、材料、生命科学、建筑工程、农学等专业的教学要求。本书也是与教研项目《大学物理分级教学模式探讨与实施》相配套的实验教材。

本书在内容安排上力求突出时代性、先进性、实用性和通用性,力求做到科学、规范。本书的编写凝聚了众多实验教师和实验工作者的心血与智慧,在此深表谢意!

由于编者水平有限,书中难免有不当之处,敬请物理界前辈、教坛同行及专家批评、指正。

编 者

2014年3月

目 录

理 论 篇

第 1 章 概述	2
1.1 物理实验的地位和作用	2
1.2 物理实验的目的和任务	3
1.3 基础物理实验课的教学模式、方法和要求	3
1.4 基础物理实验课的进程和要求	4
第 2 章 不确定度和实验数据处理	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	11
2.3 有效数字及其运算	13
2.4 数据处理的基本方法	16
思考题与习题	19

实 验 篇

第 3 章 力学、热学实验	22
实验 3.1 长度测量	22
思考与讨论题	27
实验 3.2 固、液体密度的测定	28
思考与讨论题	30
实验 3.3 冰的熔解热的测定	31
思考与讨论题	33
实验 3.4 牛顿第二定律的验证	34
思考与讨论题	37
实验 3.5 用单摆测重力加速度	37
思考与讨论题	41
实验 3.6 固体比热容的测定	41
思考与讨论题	43
实验 3.7 导热系数的测定	43

思考与讨论题	44
实验 3.8 空气比热容比的测定	45
实验 3.9 玻耳共振实验	46
思考与讨论题	49
第 4 章 电磁学实验	50
实验 4.1 伏安法测电阻	50
思考与讨论题	53
实验 4.2 示波器的使用	53
思考与讨论题	55
实验 4.3 惠斯通电桥测电阻	56
思考与讨论题	58
实验 4.4 静电场的描绘	58
思考与讨论题	61
实验 4.5 RLC 电路特性研究	61
练习一: RLC 电路的稳态及谐振特性测量	61
思考与讨论题	67
练习二: RLC 电路的暂态过程	68
思考与讨论题	74
实验 4.6 铁磁物质动态磁滞回线的测定	74
思考与讨论题	78
实验 4.7 交流电桥实验	78
思考与讨论题	84
实验 4.8 电子束的偏转与聚焦	84
思考与讨论题	92
第 5 章 光学实验	93
实验 5.1 薄透镜焦距的测定	93
思考与讨论题	98
实验 5.2 显微镜、望远镜的原理与使用	98
思考与讨论题	102
实验 5.3 共轴光具组基点的测定	102
思考与讨论题	104
实验 5.4 等厚干涉现象的研究	105
思考与讨论题	107
实验 5.5 单缝衍射实验	108
思考与讨论题	110
实验 5.6 偏振现象的观察和研究	110
练习一: 偏振光的分析	110

练习二：偏振光的定量研究	113
练习三：用旋光计测定糖溶液的浓度	114
思考与讨论题	117
实验 5.7 利用光电效应测定普朗克常数	117
思考与讨论题	121
实验 5.8 迈克尔逊干涉仪的调整和使用	121
思考与讨论题	126
实验 5.9 光敏电阻特性研究	126
思考与讨论题	131
附表 1 国际单位制	132
附表 2 基本物理常数(1986 年国际推荐值)	133
附表 3 20℃时常见固体和液体的密度	133
附表 4 标准大气压下不同温度的纯水密度	134
附表 5 在海平面上不同纬度处的重力加速度	134
附表 6 某些物质的比热容	135
附表 7 固体的导热系数	135
参考文献	136

理论篇

理论篇

理论篇

第1章 概 述

1.1 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、概念、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,发展并形成了自身的科学体系,成为系统性较强的独立学科——实验物理学。其中,基础物理实验在物理学这座雄伟的科学大厦中有着十分重要的地位和作用。

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。我们日常所熟悉的光就是波长在一定范围内的电磁场,这一结论是麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)在1862年通过对库仑定律、安培-毕奥-莎瓦定律、法拉第电磁感应定律等基本实验定律的分析、概括得出的,从而形成了麦克斯韦方程组,并预言了电磁波的存在。他在1865年的理论研究中还指出:“电场和磁场的改变不局限于空间的某一部分,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(H. R. Hertz, 1857—1894)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。正如诺贝尔物理学奖获得者、著名华裔物理学家丁肇中所说:“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做出规定:“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,它还是其他新兴学科创立和发展的重要桥梁。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的独到作用。

在21世纪到来之际,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。这就要求学生不仅要具备比较宽厚的理论知识,更要具有较强的科学实验能力。物理实验正是为了对学生进行科学实验基本训练、创新能力的培养而独立设置的必修课,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,使我

们中华民族能真正昂首屹立于世界科技文明之林。

1.2 物理实验的目的和任务

基础物理实验课内涵丰富,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泛。除本学科的力学、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,“基础物理实验”其主要的目的是: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、基本技能方面(三基)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:实验的目的、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,思考题的解答等。

物理实验基本方法主要是: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。实验中常有直接测量法与间接测量法一说,也有特殊法一说,如比较法、放大法、平衡法、补偿法、冲激法、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。

物理实验的基本技能主要是: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原理、实验方法、实验条件、实验设计、实验操作、仪器设备、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,在成功中发现新的问题,在兴趣的激励下做到有所发现、有所发明、有所创新、有所前进才算是真正的实验成功,完成了实验任务。

1.3 基础物理实验课的教学模式、方法和要求

基础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。同时它又将实验内容分成基础型实验、提高型实验、综合设计与研究创新型实验来完成实验教学任务,这三个实验教学层次的比例大体为60%、30%、10%。

基础型实验又称为基本性实验,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、实验误差不确定度及实验数据处理方法等,涉及力、热、电、光、原子物理等领域的内容。此类实验重在对学生进行物理实验基本知识、基本方法、基本技能的教育与训练。考虑到各地中学物理实验教学的差异,为大一新生实验基础较为薄弱的学生特设了基本技能训练实验单元,旨在进行入门教育,使学生在入学时有一个良

好的开端。

提高型实验主要是在完成基础型实验的基础上提高了实验教学的要求。实验教学的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,既体现物理学科内涵、实验内容的更新,又反映新技术、新方法、新设备的现代实验技术和手段,实现基础与前沿、经典与现代的有机结合,重在对学生素质能力的培养。

综合性实验指实验内容涉及本课程的综合知识或与本课程相关知识的实验;设计性实验指给定实验目的、要求和实验条件,由学生自行设计实验方案并加以实现的实验,它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,给学生提供自主学习的机会,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、愿做或不愿做的教学活动,而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。

1.4 基础物理实验课的进程和要求

基础物理实验课从教学环节上分为三个进程:预习实验、正式实验、实验后的总结报告及成绩评定,现就各教学环节提出如下具体要求。

1. 预习实验

实验课是有组织、有计划、有目的的教学活动,即使是在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,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,明确实验的目的、步骤、方法。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、实验材料的性能和使用方法以及注意事项等,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、实验器材及规格与型号、实验原理、实验方法、步骤、注意事项等。其中,实验原理一般应用自己融会贯通的语言写出实验所依据的主要原理公式及公式中各量的意义,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、自行设计的实验等,其目的都是给学生更多的自主活动空间,以便于培养创新型人才,通过实验达到培养观察、思考、分析、判断、直觉、设计等多方面创新的能力。

2. 正式实验

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,如环境、温度、湿度、气压、振动、外电磁场的影响等,仪器、设备、器材的规格、型号准确无误。切忌急于求成,盲目操作。要反复检查连接成的实验电路或光路,确保没有问题才能通电、通光正式进行操作,必要时要经指导老师检查同意后方可进行实验。在实验中要细心观察现象,实事求是做好记录,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,然后在实验签名卡上签名,必要时可请指导老师验收、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;还可以写出自己的心得体会、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和总结,重要的是培养学生善于总结的能力,还可训练学生的归纳、整理、书写、表达能力,为将来撰写科研论文打下基础。坚决杜绝抄袭实验报告的现象。

学生实验成绩的评定与评价是否合理,是学生们非常关心的事,也涉及对教师教学的评价问题,所以应由师生共同进行,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,两者原则上各占50%的比例。根据学生在教学环节三个进程中的表现,重在对学生能力的考察,尽量定出符合客观实际的成绩,一般划分为优秀、良好、中等、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,教师根据设计的内容给出成绩。

第2章 不确定度和实验数据处理

误差在实验中是无法避免的,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。通过学习和在实验中的应用与实践,要达到:

- (1) 掌握误差与不确定度两个概念,明确两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、消弱系统误差的方法;
- (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

1. 测量及其分类

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(或称被测量)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(m),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。直接测量就是将待测量与测量仪器直接比较,得出待测量的量值。例如,用米尺测量长度,用天平测量物体质量等。但在物理实验中,还有一些物理量不能直接用仪器测得,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待测量的大小,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 g 的过程就是间接测量。

2. 误差及其分类

在实验中所测量的物理量,均有不依人的意志与客观环境而转移的真实大小,称为被

测量的真值。测量的理想结果是真值，但又很难准确地得到它。因为测量仪器只能精确到一定程度，还因为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，所得测量值和真值之间总存在一定的差异，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

$$\text{误差}(\epsilon) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0) \quad (2.1.1)$$

式(2.1.1)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

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (2.1.2)$$

有时被测量有公认值或理论值，还可“百分误差”来表征：

$$\text{百分误差} = \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (2.1.3)$$

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

根据误差的性质和特点，可将误差分为两类：系统误差与偶然误差。

1) 系统误差

在同一条件(即实验方法、仪器、实验环境、实验者)下，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。其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(如温度、湿度、光照、电磁场等)的影响而产生的误差。

(4) 人身误差。这是由于实验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，实验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

$$\text{实际值}(x') = \text{示值}(x) + \text{修正值}(c_x) \quad (2.1.4)$$

对不能消除的未定系统误差，应设法估计其大小，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。

2) 偶然误差

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，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：一是受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，如图 2-1-1 所示，它为正态分布曲线，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：

- (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，可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、精密度和精确度三者的含义可用图 2-1-2 所示的情况来说明。

图 2-1-2(a) 表示精密度很高，但准确度低，即偶然误差较小，但有较大的系统误差。图 2-1-2(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 2-1-2(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。

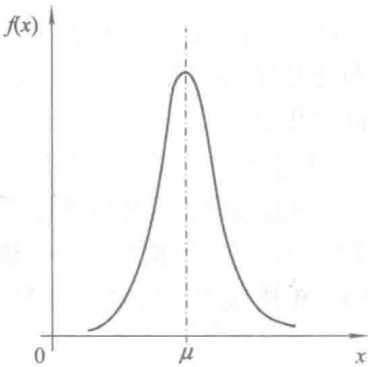


图 2-1-1 正态分布曲线

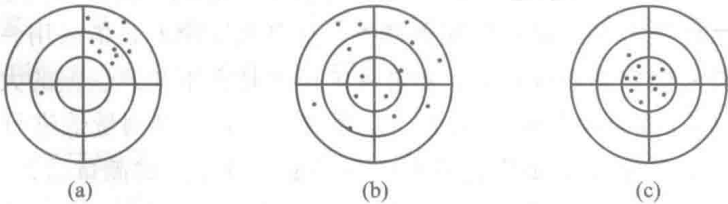


图 2-1-2 测量结果精度示意图

3. 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计

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，例如，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，某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，因此难于用统一标准。目前一般按照如下两个约定：

(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

$$\sigma = \frac{1}{3} \delta_{\max} \quad (2.1.5)$$

2) 间接测量中的误差传递

在物理实验中，除直接测量外，大部分实验都是经过间接测量获得最终结果的。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 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ 代入公式，即可求出间接测量的最佳估计值 $\bar{y}$ ，即

$$\bar{y} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \quad (2.1.6)$$

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

$$\bar{y} \pm \Delta y = F(\bar{x}_1 \pm \Delta x_1, \bar{x}_2 \pm \Delta x_2, \dots, \bar{x}_m \pm \Delta x_m) \quad (2.1.7)$$

其中， Δy 为间接测量值 y 的误差； $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$ 分别为直接测量值 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 的误差。

按泰勒公式展开式(2.1.7)并略去二次方以上各项，得

$$\bar{y} \pm \Delta y = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) + \frac{\partial F}{\partial x_1} (\pm \Delta x_1) + \frac{\partial F}{\partial x_2} (\pm \Delta x_2) + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_m} (\pm \Delta x_m) \quad (2.1.8)$$

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

$$\Delta y = \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_m} \right| \Delta x_m \quad (2.1.9)$$

相对误差为

$$\frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| \frac{\Delta x_1}{F} + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| \frac{\Delta x_2}{F} + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_m} \right| \frac{\Delta x_m}{F} \quad (2.1.10)$$

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

$$E = \frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_m} \right| \Delta x_m \quad (2.1.11)$$

$$\Delta y = E \cdot \bar{y} \quad (2.1.12)$$

以上讨论没有考虑各误差项的实际符号，而总是从最不利的情况入手进行讨论，忽略了可以相互抵消的情况，因而估计出的误差有些偏大。根据上述公式，可推导出表 2-1-1

所列的一些常用函数关系式的误差传递公式。

表 2-1-1 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= nx^{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=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 2-1-1 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量的绝对误差之和。在此情况下可先计算绝对误差，后计算相对误差。

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，可先计算相对误差，后计算绝对误差。

(2) 标准误差的传递公式：

设直接测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ 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 $\sigma(\bar{y})$ 的传递公式为

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

(2.1.13)

其相对误差为

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

(2.1.14)