

湖南省实践教学示范中心



新编 大学物理 实验

叶伏秋 邬云文 主编



湘潭大学出版社

湖南省实践教学示范中心

新编 大学物理 实验

主 编：叶伏秋 邬云文

副 主 编：廖立新 全秀娥 刘生长

参编人员 彭登璋 唐世洪 李德俊 颜 琳

韩海强 邓科 廖文虎 赵 晗

湘潭大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理实验 / 叶伏秋, 邬云文主编. —湘潭:
湘潭大学出版社, 2011.6
ISBN 978-7-81128-302-0

I. ①新… II. ①叶…②邬… 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 (2011) 第 091193 号

新编大学物理实验

叶伏秋 邬云文 主编

责任编辑: 丁立松

封面设计: 罗志义

出版发行: 湘潭大学出版社

社 址: 湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真): 0731-58298966 邮编: 411105

网 址: <http://xtup.xtu.edu.cn>

印 刷: 长沙理工大印刷厂

经 销: 湖南省新华书店

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 15.25

字 数: 372 千字

版 次: 2011 年 6 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81128-302-0

定 价: 30.50 元

(版权所有 严禁翻印)

前 言

物理实验是物理学的基础,它反映了理工科及各个学科科学实验的共性和普遍性问题。大学物理实验是理工科学生进入大学后接触的第一门系统的实验课程,在培养学生的基本实验技能、科学实验素养和创新思维能力,培养学生理论联系实际,特别是与科技发展相适应的综合能力等诸多方面具有不可替代的作用。通过大学物理实验,学生可以学到物理学家们卓越的物理思想、巧妙的实验设计和精确地分析问题和解决问题的方法,以及锲而不舍、严谨求实的科学态度。这些思想、方法和态度以后将成为学生终身受益的精神财富。

在近几年教学改革实践的基础上,我们将中央与地方共建高校基础实验室建设资助项目和湖南省实践教学示范中心建设项目结合起来,对大学物理实验的课程体系、教学内容、教学方法和教学模式进行了一系列改革。本书是编者根据国家教育部制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》,在广泛汲取国内同类教材精华的基础上,结合多年实验教学和实验课程改革经验以及实践教学示范中心的仪器设备的实际情况编写而成的。

教材内容的编写打破了传统的按照普通物理(力学、热学、电磁学、光学)的旧的实验课程体系,建立了按照基础性实验、综合性实验、设计性实验三个模块构建的“一体化、多模块、多形式”的物理实验教学新体系,同时增加了使用现代科学技术成果(如计算机技术、传感器技术)的新颖实验(如 PASCO 实验)和反映近现代物理知识前沿的近代物理实验内容。由于大学物理实验是一门独立的课程,同时读者又是大学一、二年级学生,我们在编写基础性实验和综合性实验时,尽量把实验原理叙述详细、清楚,让学生在实验时尽管可能没有学习相关理论知识,也能在实验预习时掌握相关理论知识;实验内容和步骤也尽可能具体,以加强对学生的基本实验技能和基本实验方法的指导和培养。对于设计性实验,书中提出了实验目的和实验要求,让学生自行查阅相关资料,设计实验方案,完成实验操作,以更好地发挥学生的主观能动性,培养学生的创新意识和创新能力。

全书共分为 5 章,绪论部分主要介绍了物理实验的地位和作用、物理实验的学习方法以及物理实验的过程、要求和规则。第 1 章系统地介绍了误差理论与数据处理基础知识等内容。第 2 章至第 4 章分基础性实验、综合性实验、设计性实验三个模块共选编了力学、热学、电磁学、光学等 32 个实验,其中,综合性实验包括了或者使用多个不同测量方法和装置的实验内容,或者包含了适应不同专业要求和不同实验学时数的实验内容,在具体使用时可根据具体的专业要求或学时数选择实验内容。第 5 章为提高性实验,共选编了 5 个近代物理实验,这一部分可以根据专业性性质让学生选做部分实验,使学生接触和了解近代物理的前沿知识,提高学生的学习兴趣。

本书由叶伏秋、邬云文担任主编,廖立新、全秀娥、刘生长担任副主编。具体编写内容是:绪论、第1章及力学、热学实验由全秀娥编写,电磁学实验由刘生长编写,光学实验由廖立新编写,近代物理实验由叶伏秋和邬云文编写。参加编写和讨论的还有彭金璋、唐世洪、李德俊、颜琳、韩海强、邓科、廖文虎、赵晗等。

本书的编写是吉首大学物理实验教学中心全体实验教学人员共同辛勤劳动的结晶,在编写过程中,编者参阅了大量的相关著作和文献,在参考文献中未能一一列出,在此向相关著作和文献的作者表示诚挚的感谢和敬意,也向相关实验仪器的生产厂家表示谢意,并请对我们编写工作中的不周之处予以谅解。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免会有疏漏不妥之处,恳请专家、同行不吝批评指正。

编者

2011年6月

目 录

绪论	(1)
第 1 章 误差理论与数据处理基础知识	
1.1 测量误差的基本概念	(4)
1.2 测量值的有效数字	(6)
1.3 测量误差的分类和评定	(8)
第 2 章 基础性实验	
实验 1 长度测量	(21)
实验 2 用三线悬盘测定物体的转动惯量	(28)
实验 3 测定液体的比热容	(35)
实验 4 电学基本仪器的使用	(39)
第 1 部分 电源、电阻器、电表的使用	(39)
第 2 部分 万用电表的使用	(43)
实验 5 示波器的使用	(49)
实验 6 测量固体和液体的折射率	(57)
实验 7 用牛顿环测平凸透镜的曲率半径	(59)
第 3 章 综合性实验	
实验 8 测定金属的杨氏模量	(63)
第 1 部分 用伸长法测定钢丝的杨氏模量	(63)
第 2 部分 动态法测量金属棒的杨氏模量	(67)
实验 9 测定液体的表面张力系数	(71)
第 1 部分 用液体表面张力系数测定仪测量	(71)
第 2 部分 用焦利秤测量液体表面张力系数	(73)
实验 10 热传导综合实验	(77)
第 1 部分 非良导体热导率的测量	(77)
第 2 部分 热电偶的定标	(80)
第 3 部分 冷却法测定金属的比热容	(83)
第 4 部分 金属电阻温度系数的测定	(84)
第 5 部分 热敏电阻温度特性的研究	(86)
实验 11 刚体转动综合实验	(88)

第1部分 质点的转动惯量	(88)
第2部分 测量圆盘和圆环的转动惯量	(91)
第3部分 扭摆的应用	(94)
实验12 制冷制热综合实验	(98)
实验13 中、低值电阻的测量	(105)
第1部分 中值电阻的测量	(105)
第2部分 低值电阻的测量	(108)
实验14 模拟法描绘静电场和磁场	(112)
第1部分 静电场的描绘	(112)
第2部分 磁场的描绘	(115)
实验15 硅光电池的特性研究	(120)
实验16 交流电路的谐振特性研究	(123)
实验17 电子射线的电偏转和磁偏转研究	(126)
实验18 PASCO电学组合实验	(131)
第1部分 欧姆定律	(131)
第2部分 RC电路	(132)
实验19 分光计	(134)
第1部分 分光计的调节	(134)
第2部分 用分光计测三棱镜的折射率	(136)
第3部分 光栅特性参数的测量	(139)
实验20 光的干涉	(142)
第1部分 菲涅尔双棱镜干涉	(142)
第2部分 菲涅尔双面反射镜干涉	(145)
第3部分 洛埃镜干涉	(146)
第4部分 杨氏双缝干涉	(148)
第5部分 法布里-珀罗干涉	(151)
实验21 光的衍射	(154)
第1部分 夫琅和费单缝衍射	(154)
第2部分 夫琅和费圆孔衍射	(156)
第3部分 菲涅尔单缝衍射	(157)
第4部分 菲涅尔圆孔衍射	(158)
第5部分 菲涅尔直边衍射	(160)
实验22 光的偏振现象研究	(161)
第1部分 偏振光原理实验	(161)
第2部分 物质的旋光性研究	(166)
实验23 迈克尔逊干涉仪	(170)
第1部分 等倾干涉、等厚干涉、白光干涉和非定域干涉	(170)
第2部分 用迈克尔逊干涉仪测量空气折射率	(175)
实验24 全息照相	(178)

第4章 设计性实验

实验 25	测量重力加速度	(183)
实验 26	简谐振动的研究	(186)
实验 27	金属线膨胀系数的测定	(187)
实验 28	测量物体的密度	(188)
实验 29	简单万用电表的设计与制作	(191)
实验 30	线性电阻和非线性电阻的测量	(192)
实验 31	薄透镜焦距的测量	(193)
实验 32	光学仪器组装设计	(195)
第 1 部分	自组装望远镜并测其放大率	(195)
第 2 部分	自组装显微镜并测其放大率	(195)
第 3 部分	自组装透射式幻灯机	(196)

第5章 提高性实验

实验 33	原子能量的测量	(198)
实验 34	电子电量的测量	(203)
实验 35	塞曼效应	(207)
实验 36	半导体泵浦激光器	(217)
实验 37	光纤光栅传感实验	(221)

附 录	(230)
-----------	-------

参考文献	(236)
------------	-------

绪 论

一、物理实验的作用与任务

物理学是一门实验科学,在物理学发展的长河中,物理实验起着积极的甚至决定性的作用,整个物理学大厦正是建立在物理实验这块基石上的。例如,牛顿的经典力学是建立在伽利略、开普勒、惠更斯等人的实验基础上;麦克斯韦电磁场理论的完善也是建立在库仑、奥斯特、法拉第等人的实验基础上;本世纪初,普朗克、爱因斯坦、玻尔等使物理学的面貌发生了巨大的、革命性的变化,但仍然是以黑体辐射、光电效应、康普顿效应等实验为基础的。所以说,物理实验既是学习、研究物理学必不可少的重要手段,又是物理学揭示宇宙奥秘,开拓未知世界的有力武器。

大学物理实验是对高等学校理工科专业学生进行科学实验基本训练的一门独立设置的重要基础课程。它的主要任务是:

1. 在物理实验方面,使学生受到基础的比较系统的训练(包括基本物理量的测量、基本仪器的作用、数据分析与处理的基本知识、实验现象的观测与判断等),培养学生的物理实验能力;
2. 通过实验学习与理论知识学习的相互配合,加深、巩固、扩大学生对物理概念和物理定律的掌握程度,普通物理实验并不是为了建立新概念、发现新定律,而是从中学习实验思想方法、技能技巧,为培养有独创能力的人才打基础;
3. 培养学生严格、细致、实事求是、一丝不苟的科学态度和爱护公物的道德品质,使学生养成讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全措施的良好实验习惯。

二、物理实验的学习方法

1. 了解实验思想,掌握原理方法,这在实验中始终占主导地位。实验思想是整个实验的根本,只有理解了设计者的意图,懂得了实验原理,才能发挥自己的积极性,避免盲目性,才能提高实验技能与实验素养。

2. 乐于观测,善于观测,有意识地在实验中培养自己的观测能力。观测能力是实验能力的一个重要表现,它的基本任务是合理地、充分地发挥仪器的功能,观察物理现象,在仪器精度范围内测量准物理信息。我们要充分运用感官(听、视、嗅、触等)和大脑思维去判断、试探、估量物理现象是否按期出现、设备是否正常、仪器显示的物理信息是否受到干扰等。这样才能捕捉到需要的实验现象,提供丰富的实验素材。

3. 在实验中要养成勤动脑、多动手的习惯,提高实验分析的能力,掌握排除故障的技巧。实验时,不能说测量结果接近了理论值(或标准值)就心满意足,而与理论值相差较远就感到失望。一旦测量值与理论值相差较远,就应该分析实验方法是否正确,仪器设备是否符

合要求,实验环境是否影响太大。找出产生误差的原因,排除故障。应该说,能否发现仪器装置故障与修复仪器的技能、能否正确分析误差来源是实验能力强弱的一种重要表现。

4. 每次实验要掌握好重点和难点。实验有它自己的特点和规律,不像讲理论课那样条理清楚、层次分明,但它所遇到的问题比讲理论课要更加复杂具体、丰富多彩。这时,我们应该先抓住一些关键性的、重要的问题予以解决,对那些零散枝节问题则滞后一步进行处理,全部问题要同时解决是不可能的。

三、物理实验的过程与要求

物理实验课一般分为三个阶段来完成:实验前预习、实验过程、实验报告。这三个阶段互相联系,不可分割。

1. 实验前预习

实验前必须预习实验教材和仪器使用说明书等参考资料,明确实验目的,看懂实验原理和实验方法,了解有关测量仪器、设备的性能和操作技术。在此基础上写出实验预习报告(或预习笔记),内容主要包括如下几点:

- (1)实验名称、实验目的(注意实验误差要求);
- (2)实验仪器、设备(注意型号和精度);
- (3)简要原理、计算公式及原理图(电路图或光路图);
- (4)实验内容和步骤:写出简要的实验内容和步骤以及注意事项。

2. 实验过程(仪器操作、测量记录)

操作和测量是实验教学的主要环节。实验前指导教师应作简要讲授和提问。学生开始进行实验时应先检查仪器、设备并简单练习操作,基本熟悉仪器性能及使用方法后才能开始进行实验。实验过程要严肃认真,仔细观察物理现象,正确读取和记录测量数据,不要一碰到问题就一概归咎于仪器设备,要实事求是地分析处理。若发现问题而无法解决时,应及时向指导教师报告,由指导教师处理。仪器设备的调整、操作和测量记录,是科学实验的基本功。实验记录内容一般包括以下几个方面。

- (1)与实验条件有关的物理量(室温、气压等)。
- (2)仪器设备(仪器设备的型号、编号、级别、精度等)。

(3)与测量有关的物理量。应该按照实验要求多次测量、记录。每次测读到的数值、有效数字和单位应立即如实地记录在表格上。若发现记录数据有问题,可以删掉或再测量,但切不可抄袭或涂改数据。实验完毕后,把记录数据交指导教师审阅签名。最后还应该按照实验前状况整理好仪器设备。

3. 写好实验报告

实验结束后,应根据实验要求及时正确处理所记录的数据,并写出完整的实验结果报告。实验报告要用统一印制的实验报告纸书写,其格式和内容一般包括以下几个部分。

- (1)实验题目名称、实验目的要求。
- (2)实验原理:写出原理概要及计算公式。
- (3)实验内容和步骤:写出简要的实验内容和步骤及注意事项。
- (4)实验数据记录:测量数据一般采用表格形式记录。
- (5)数据处理:描绘曲线及计算结果。

(6)结果报告:分析误差及计算结果,回答实验思考题以及提出改进实验的建议。

以上内容中(1)~(3)部分应在实验预习时完成,(4)部分是在实验中进行,(5)~(6)部分是在实验课后做好,实验报告要求书面整洁、字迹清楚、层次分明、文句通顺、数据齐全、作图规范。

四、物理实验规则

1. 进入实验室时应保持安静,不得喧哗取闹,保持清洁,不准吸烟和抛弃纸屑等。
2. 实验前应先检查仪器设备,了解仪器性能和使用方法,然后才能开始实验。如有疑问,应询问指导教师。
3. 实验过程中,应遵从指导教师和实验工作人员的指导,未经许可不得任意调换各组仪器。
4. 爱护仪器设备,对仪器性能不了解时不得随意扭动仪器开关部件。如损坏了仪器,应立即报告指导教师并进行登记,根据具体情况按学校规定处理。
5. 注意安全,严禁违反用电规程,防止发生损坏仪器及人身事故。
6. 实验过程中如有违反实验室规则而又不听从规劝改正者、预习报告未写者以及无故迟到 15 分钟以上者,应停止其实验。
7. 无故缺课者,实验室不予补做。因事因病缺做实验者,由实验室和指导教师统一安排补做实验。
8. 实验结束后,应把仪器整理清点好,经指导教师检查并签名后,方能离开实验室。

第 1 章 误差理论与数据处理基础知识

1.1 测量误差的基本概念

1.1.1 测量

测量分为直接测量和间接测量。直接测量是把待测量与同类的标准量进行比较,得到待测量值的大小和单位的过程,例如,用游标卡尺测物体的长度、用天平测物体的质量等;间接测量的待测量则是由若干个直接测量的量经过一定的函数关系运算后获得,例如,圆柱体的体积 $V = \frac{\pi}{4}d^2h$, 梯形面积 $S = \frac{a+b}{2}h$ 。

1.1.2 误差

测量结果不仅应当提供被测量对象的量值大小和单位,还应该对量值本身的可靠程度作出判断。不知道可靠程度的测量值,是没有多大意义的。不确定度就是用于表征测量值可靠程度的一个定量指标。

在确定的条件下,待测量具有的客观实际值叫真值。当被测量的对象和测量过程完全确定,且所有测量的不完善性完全排除时,测量值就等于真值。但是,严格的完善测量难以做到,故真值也不可以完全达到。由于受测量的环境、方法、仪器以及观测者等诸多因素的影响,使得测量值偏离真值,这种偏差叫做误差(Error)。设被测量真值为 a , 测量值 x 的绝对误差 Δx 定义为

$$\Delta x = x - a \quad (1.1.1)$$

误差的绝对值越小,测量值就越准确。但对于不同的测量结果,即使误差相同,测量结果的优劣也不一定相同。例如,假设某物体的长度测量值为 10 cm,若误差为 1 cm;另一物体的长度测量值为 100 cm,误差也为 1 cm,它们的误差值相同,但后者的测量结果要好于前者,用相对误差可以表示出这种区别。用 E 表示相对误差,其定义为

$$E = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

1.1.3 不确定度

由于真值不可以完全达到,因此,误差只是一个理想的概念,无法通过测量给出。在实

际测量中,保持测量条件相同,对一个被测量进行多次测量得到的一组数据叫做一组等精度的测量值,即一个测量列。这些测量值的算术平均值叫做这个测量列的最佳估计值,或者数学期望。

设被测量 x 的测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则最佳估计值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1.3)$$

最佳估计值只能无限趋近于真值。所以,实验中用不确定度 u (Uncertainty) 表示测量值与最佳估计值的偏差

$$u = |x - \bar{x}| \quad (1.1.4)$$

这样定义的不确定度是绝对不确定度,在没有特别指明时,不确定度就用绝对不确定度来表示。它是对测量的真值在某个量值范围的一个客观评定。用 u 代表不确定度, x 表示测量值,则测量的真值以某一较高的概率出现在 $(x - u, x + u)$ 区间。

不确定度通常含有两类分量:用统计学方法计算的 A 类分量 u_A 和用其他方法评定的 B 类分量 u_B 。 u_A 通常用标准误差来表示, u_B 的评定方法与实际的实验仪器和测量条件有关。

总不确定度按“方和根法”合成

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \text{ 或 } u = ku_c \quad (1.1.5)$$

其中, u_c 表示标准不确定度。而有些问题往往需要用相对不确定度来表示,相对不确定度常常表示为绝对不确定度与测量列的最佳估计值 $\bar{x}$ 之比。相对不确定度常用百分数来表示,即

$$u_r = \frac{u}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1.1.6)$$

不确定度是说明测量结果的一个参数,是说明测量结果可靠程度的一个定量指标,用于表征合理赋予被测量值的分散性,也就是表征被测量所处量值范围的一个评定。由此可见,误差与不确定度是有区别的,误差是一个理想的概念,不能准确地知道,但不确定度反映误差分布的范围,可由不确定度理论求得。

不确定度并不是实际值的误差,也不代表误差的绝对值,它只是提供了在概率含义下的误差可能取值范围的一种估计。在许多情况下,测量值可能相当接近于真值,两者之间的差值明显地小于不确定度。真值落在不确定度提供的范围之外的可能性很小。

1.1.4 精密度、准确度

表达测量不确定度的大小,有两个常用的术语。其一是精密度(Precision),它用来描述重复测量的离散程度,反映随机不确定度的大小,精密度高则离散小、重复性好;另一个是准确度(Accuracy),它用来描述测量结果与被测量真值之间的一致性程度,反映系统不确定度和随机不确定度综合的结果,准确度越高,则测量值越接近于真值。此外,还有一些教科书中常用正确度来反映系统不确定度的大小。如图 1.1.1 所示给出了精密度、正确度和准确度的形象说明。

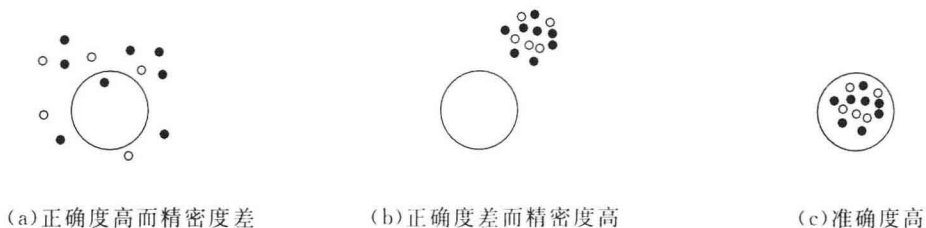


图 1.1.1 精密度、正确度和准确度形象说明图例

1.2 测量值的有效数字

某个测量结果究竟应该给出多少位数字呢? 经常有学生把数据保留至两位小数, 也有许多学生把计算器或计算机算出的一大串数字全部抄写在实验报告上, 这样做都是错误的。其实, 当一个实验方案确定后, 所选用的测量仪器就已经认定了实验结果的数位, 这些数位不能由主观随意而定。

1.2.1 有效数字

实验结果给出的数字叫有效数字。有效数字给出测量的有效信息, 是由不确定度决定的。有效数字的第一个影响因素就是有效读数, 如何进行有效读数, 下面通过举例说明。

用两把分度分别为毫米(钢卷尺)和厘米(皮尺)的刻度尺, 测量一段木杆的长度。用厘米分度的刻度尺测量的读数为 6.7 cm, 其中, 6 是准确读数, 7 是估计读数, 估计读数也叫欠准数字。用毫米分度的刻度尺测量的读数为 6.70 cm, 其中, 6.7 为准确读数, 最后一个 0 为估计读数, 如图 1.2.1 所示。

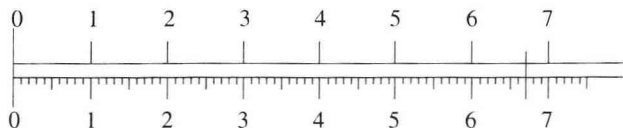


图 1.2.1 刻度尺读数示例图

准确读数与估计读数构成有效数字, 也就是说有效读数在末位上的数字是可疑的, 具有不确定性。但它能使测量结果更准确, 没有这一位数字, 测量值与待测量的实际值偏差就更大, 所以测量时都要在末位估数。例如, 实验室中测量微小长度的千分尺, 将 0.5 mm 分成 50 格, 每格 0.01 mm, 再估计 1 位, 可读到 0.001 mm 数位上。分度为 1 °C 的温度计, 可以读到 0.1 °C 的数位上。用电流表、电压表测量电流强度和电压时, 可以按最小刻度的十分之一估读 1 位。用电子表测量物理量时, 如电子秒表能读出“××分××秒××”, 即能够读到 1/100 s, 最后一位为欠准数字。数字表读数的最后一位都是欠准数字。对于 50 分度的游标卡尺, 因为主尺上 49 mm 在辅尺(游标)上分成 50 格, 故称为 50 分度游标卡尺, 其精度为

0.02 mm,读数时按游标零点处读出主尺上的毫米数,再找到主尺和游标对齐的位置,读数的末位是0.02 mm的倍数,与主尺上的毫米数相加,得有效数字。注意,末位不会出现奇数,末位就是欠准数。

在一次测量结果中,数字前面的“0”不作为有效数字,它通常由选取的单位所决定,而数字后面的“0”则是有效数字,它反映了所取的实验工具的精度和测量的精度。

1.2.2 有效数字的运算规则

影响有效数字的第二个因素就是有效数字的运算,有效数字的运算规则如下:

(1) 加减运算

$$N = A - B + C - D \quad (1.2.1)$$

在同一单位下,各因子中欠准数位最高的那个数字就决定了结果的有效数字的最后一位数。例如, $N = 15.43 - 4.263 + 503.2 - 87 = 427$ 。

15.43	11.16 $\overline{7}$	514.36 $\overline{7}$
-4.263	+503.2	-87
-----	-----	-----
11.16 $\overline{7}$	514.36 $\overline{7}$	427.36 $\overline{7}$

在上面的竖式中,有上划线的数字表示欠准数,最后结果欠准数保留1位。

(2) 乘除运算

$$N = \frac{AB}{C} \quad (1.2.2)$$

各因子中有效数字位数最少的因子决定结果的有效数字位数。例如,

$$N = \frac{\pi}{4} (4.326)^2 \times \frac{5.64}{32.44} = 2.55 \quad (1.2.3)$$

(3) 乘方与开方。其结果的有效数字应与其底的有效数字相同。

(4) 三角函数。三角函数的有效数字位数由角度的有效数字位数决定。物理实验中,角度多由分光计测出,其精度为1'。sin 1' = 0.000 3,故一般取4位有效数字。

(5) 准确数与常数及一些系数不影响有效数字的位数,但在具体运用时所取数字的位数不得少于测量所得的各因子中有效数字最少的那个因子的位数。

注:其他函数有效数字运算参阅有关书籍,这里不再详述。

1.2.3 不确定度对有效数字的影响

影响有效数字的第三个因素就是不确定度的分析。在测量结果中,结果的有效数字应当与不确定度相符。一般来说,不确定度数字最多保留2位。在普通物理实验中只要求保留1位不确定数字,所以有效数字的最后1位是测量的不确定度所在的数位。

1.3 测量误差的分类和评定

1.3.1 误差的分类

当分析导致测量值偏离其真值的原因时,可以根据误差出现的不同特点,把误差分为系统误差和随机误差。

1. 系统误差

在一定的实验条件下,对同一被测量进行多次测量时,保持恒定或以预知的方式变化的测量误差称为系统误差。它有两类:一类是固定值的系统误差,其值(包括正负号)恒定;另一类是随条件变化的系统误差,其值以确定的、已知的规律随某些测量条件而变化。系统误差来源于测量装置(标准器具、仪器、附件和电源等)、环境(温度、湿度、气压、振动和电磁辐射等)、方法(理论公式的近似限制或测量方法的不完善等)以及测量人员(测量人员感官不完善、具有某种习惯或偏向)等方面。

在进行测量之前,测量者要对可能产生系统误差的环节作仔细分析,从产生根源上加以消除。例如,若系统误差来自仪器不准确或使用不当,则应该把仪器校准并按规定的使用条件去使用;若理论公式是近似的,则应在计算时加以修正;若测量方法上存在着某种因素会带来系统误差,则应估计其影响的大小或改变测量方法以消除其影响;若外界环境条件急剧变化或存在某种干扰,则应设法稳定实验条件,排除有关干扰;另外,有些物理现象存在着统计涨落,测量仪器产生零点漂移,控制的实验条件随时间而明显变化等,这些因素都将带来系统误差。总之,对于实验本身的分析研究,往往使我们能直接找出系统误差的来源,并估计其大小。

2. 随机误差

在一定条件下对被测量物理量进行多次测量时,以不可预知的随机方式变化的测量误差称为随机误差,这种误差时大时小、时正时负,没有规律性,任何计量性测量中随机误差总是存在的。

随机误差来源于许多不可控因素的影响,例如,环境的无规则起伏,仪器性能的微小波动,观察者感官分辨本领的限制,以及一些尚未发现的因素等。这种误差对每次测量来说没有必然的规律性,但进行多次重复测量时会呈现出统计规律性。虽然无法消除或补偿测量结果的随机误差,但增加观测次数可使它减小,并可用统计方法估算其大小。

假设有一个物理量,其测量值为 z ,其真值为 a ,横坐标表示误差 $\Delta = z - a$,纵坐标表示误差出现的概率密度 $f(\Delta)$, $f(\Delta)$ - Δ 的关系曲线具有左右对称性,称为正态分布曲线,如图1.3.1所示。

由数理统计理论可知

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3.1)$$

式中,特征量 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 f(\Delta) d\Delta} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2} \quad (1.3.2)$$

其称为标准差。数理统计理论证明,测量值 x_i 落在 $[a - \sigma, a + \sigma]$ 范围内的可能性为 68.3%, 落在 $[a - 2\sigma, a + 2\sigma]$ 范围内的可能性达到 95.5%, 落在 $[a - 3\sigma, a + 3\sigma]$ 范围内的可能性达到 99.7%。值得注意的是,在实验中测量的次数不可能是无穷多次的,一般只进行 8~10 次,所以,常用标准差的估计值

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.3.3)$$

来表示有限次测量值的标准差,叫做样本不确定度。

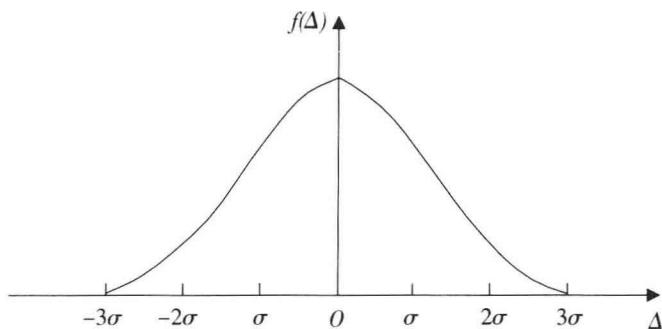


图 1.3.1 $f(\Delta)$ 的正态分布曲线

3. 随机误差与系统误差的关系

随机误差与系统误差是两种不同性质的误差,但它们之间又有着内在的联系。在一定的实验条件下,它们有自己的内涵和界限,当条件变化时,彼此又可能互相转化。随机误差本身是许多微小的、独立的、难以控制的、不可分解的系统误差的随机组合。随着测量技术的发展和实验设备的更新与改进,某些造成随机误差的因素能够得到控制,随机误差就可确定为系统误差,并且得到改善或修正;而有些规律复杂的未定系统误差,也可以通过改变测量状态使之随机化,这种系统误差又可作为随机误差处理。事实上,对于那些微小的未定系统误差,很难做到在测量时保证其确定的状态,因此,它们就会像随机误差那样,呈现出某种随机性。

在实际测量中,虽然尽可能地设法限制和消除系统误差,通过多次测量来减小随机误差,但两种误差还会同时存在,这时需要按其对测量结果的影响分别对待:

- (1) 若系统误差经技术处理后可以消除,或远小于随机误差,可按纯随机误差处理;
- (2) 若系统误差的影响远大于随机误差,可按纯系统误差处理;
- (3) 若系统误差与随机误差的影响差别不大,两者均不可忽略,则应按不同的方法分别处理并综合两种误差。

4. 粗差

此外,还有一种由于环境或人为因素导致的错误,叫做粗差。在数值上粗差表现为明显超出规定条件下预期值的不确定度。在实验过程中,由于某种差错使得测量值明显偏离正常的测量结果,例如,读错数、记错数或者环境条件突然发生变化而引起测量值的错误等。