



普通高等教育“十三五”重点规划教材

大学物理实验

EXPERIMENT OF COLLEGE PHYSICS

◎ 占美琼 齐燕舞 于彬 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”重点规划教材

大学物理实验

主 编	占美琼	齐燕舞	于 彬
副主编	贾佑华	高 勇	王胜利
参 编	徐志华	王 玉	吕福和
	徐成年	吴中林	

机 械 工 业 出 版 社

本书参照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委会 2010 年制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合上海第二工业大学物理实验教学的现状与经验，借鉴和吸收国内外近年来物理实验教学的研究成果编写而成。

全书内容包括绪论、测量误差与实验数据处理、基础性实验、综合性实验、设计性实验等几个部分，共 26 个物理实验，涉及力学、热学、光学、电磁学等 16 个基础实验，以及 5 个综合性实验和 5 个设计性实验。

本书可作为高等院校理工科类专业物理实验教材或参考书，也可以供物理教师、实验技术人员和相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/占美琼, 齐燕舞, 于彬主编. —北京: 机械工业出版社, 2018. 1

普通高等教育“十三五”重点规划教材

ISBN 978-7-111-58603-6

I. ①大… II. ①占… ②齐… ③于… 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 (2017) 第 306927 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎 姜 凤 责任校对: 张 薇

封面设计: 张 静 责任印制: 孙 炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·18 印张·359 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58603-6

定价: 39.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

前 言

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱，具有大多数科学实验的共性，在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。近年来随着科技的迅速发展和教学改革不断深入，大学物理实验课程从教学内容到实验设备都在不断更新，新概念、新思路、新方法在逐步体现。因此原有的实验教材已经不适应教学要求。

本书的编写突出了基本能力训练和创新能力培养，在内容安排上分为基础实验理论、基础性实验、综合性实验和设计性实验。

本书的编写既是集体智慧的结晶，也是我们教学实践和教改经验的总结。参加本书编写的有：占美琼（第一章、第二章、实验 4.3、实验 4.4、实验 5.5），齐燕舞（实验 3.9、实验 3.10、实验 3.13、实验 4.2），于彬（实验 3.12、实验 3.16、实验 4.1），贾佑华（实验 5.1、实验 5.3），王胜利（实验 3.1、实验 4.5），高勇（实验 3.3、实验 3.4、实验 3.11），徐志华（实验 3.7、实验 3.14），吕福和（实验 3.5、实验 3.8），徐成年（实验 3.6），王玉（实验 3.2、实验 3.15），吴中林（实验 5.2、实验 5.4）。占美琼、齐燕舞、于彬负责审稿定稿。

在编写过程中，我们借鉴了滕琴、刘传先主编的《大学物理实验教程》部分内容，并参考了许多兄弟院校的实验教材和相关著作，在此表示感谢。但限于编者水平，加上编写时间紧张，书中难免有疏漏与不妥之处，衷心希望同行专家、广大教师及读者批评指正！

编者

2017 年 9 月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 理工学科大学物理实验课程教学基本要求	1
第二节 具体实验的基本程序	2
第二章 测量误差与实验数据处理	5
第一节 测量及其分类	5
第二节 误差及其分类	6
第三节 有效数字和仪器读数规则	11
第四节 不确定度与测量结果表示	18
第五节 数据处理的基本方法	27
第六节 练习题	34
第三章 基础性实验	38
实验 3.1 弹性模量的测定	38
实验 3.2 用三线摆测物体的转动惯量	42
实验 3.3 弦线上的驻波实验	50
实验 3.4 拉脱法测量液体表面张力	54
实验 3.5 空气比热容比测定	57
实验 3.6 固体线膨胀系数的测量	63
实验 3.7 用落球法测量液体的黏度	67
实验 3.8 惠斯通电桥测电阻	72
实验 3.9 数字示波器的使用	78
实验 3.10 整流、滤波电路	87
实验 3.11 霍尔效应法测量螺线管磁场	92
实验 3.12 用磁阻传感器测地磁场	99
实验 3.13 非线性电路混沌实验	105
实验 3.14 薄透镜焦距的测量	114
实验 3.15 用牛顿环干涉测量平凸透镜曲率半径	123
实验 3.16 分光计的调整与使用	127
第四章 综合性实验	137
实验 4.1 塞曼效应仿真实验	137

实验 4.2 声速的测量	147
实验 4.3 温度传感器特性和制冷温控实验	154
实验 4.4 测定铁磁材料的磁化曲线	163
实验 4.5 光电效应和普朗克常量的测量	172
第五章 设计性实验	181
实验 5.1 太阳能电池伏安特性的测量	181
实验 5.2 非线性元件的伏安特性测量	186
实验 5.3 光偏振现象的研究	189
实验 5.4 传感器特性研究	194
实验 5.5 多功能电表设计	199
附录 实验报告	205
参考文献	277

第一章

绪论

物理学是自然科学中最基本的学科之一，也是一门实验科学。无论是物理理论的建立还是对理论的检验都离不开实验。而物理实验作为科学实验的先驱，又体现了大多数科学实验的共性，在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

大学物理实验是一门被教育部批准在高校独立开课的实验课程，也是对大学生进行科学实验基础训练的一门重要的必修课程。它的开设目的是培养学生进行科学实验的基本素质，使学生接受系统的实验思想、实验方法和实验技能的训练，培养学生实事求是的科学作风、认真严谨的科学态度、积极主动的探索精神，使学生具有一定的从事科学实验的能力，以适应科学技术不断进步和社会发展的需要。

第一节 理工学科大学物理实验课程教学基本要求

一、物理实验课程的地位、作用和任务

1. 课程的地位

物理实验是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端，是工科类专业对学生科学实验训练的重要基础。

2. 课程的作用

物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法和手段，是培养学生科学实验能力、提高学生科学素养的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

3. 课程的任务

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理现象和规律的理解，为后续课程打下基础。

(2) 学习物理实验的基本方法，进行物理实验的基本训练。学生能够自主阅读实验教材，做好实验准备；能够借助教材或仪器说明书，正确使用仪器；能够掌握基本物理量测量方法，并正确记录和处理实验数据；能够对实验现象进行初步分

析和判断,对实验误差做出分析,写出合格的实验报告;初步培养学生独立实验和设计实验的能力。

(3) 培养学生的科学素养,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、教学内容基本要求

1. 掌握基本物理量的测量方法

掌握基本物理量的测量方法,例如长度、质量、时间、湿度、压强、电流、电压、电阻、磁感应强度、折射率、弹性模量等常用物理量及物性参数的测量,并加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

2. 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力

(1) 掌握测量误差与不确定度的基本概念,逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

(2) 学会处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法和最小二乘法,还包括用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

3. 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用

了解常用的物理实验方法,例如比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中的广泛应用的其他方法。

4. 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用

常用仪器,包括长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等。

根据条件,在物理实验课中逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,例如,激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

5. 掌握常用的实验操作技能

掌握常用的实验操作技能,例如零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整等,能根据给定的电路图正确接线,掌握简单的电路故障检查与排除,以及能正确调节和使用常用仪器。

第二节 具体实验的基本程序

实验集理论、方法、技能和数据处理于一个整体,它不但需要实验者搞懂实验内容与实验原理,而且还需要实验者根据这些原理付之实现,最后还需要从获得的数据结果中得出应有的结论,这些就是物理实验的特点。

为了保证实验的正常进行,必须把握下面三个重要环节:

一、实验前

实验前要认真阅读实验教材,然后填写实验的预习报告,预习报告重点要解决以下三个问题:

(1) 实验的目的是什么?即做这个实验最终要获得什么结果,是测定物理常数,还是要验证某个物理定律,还是要探索某种规律;只有了解实验目的,才能紧紧地围绕这个中心去思考。

(2) 实验的依据是什么?即它涉及的实验理论和实验方法的原理。必须搞清楚研究对象的含义,它与其他物理量之间的关系,最终还必须建立确定的测量关系式,并有方法对其进行测量。

(3) 实验该如何做?在熟悉了实验理论方法之后,必须设想如何去做。这包括仪器装置的原理图(如电路图、光路图等)、调整的要求、哪些是直接测量、用什么方法和仪器进行测量、测量的先后次序及数据记录表格准备等。

综上所述,实验预习报告应简要写出以下项目:

- ① 实验名称;
- ② 实验目的;
- ③ 实验仪器设备:要求写清楚所用实验仪器的名称、型号、编号及规格等;
- ④ 实验原理:应包括必要的原理图(如电路图、光路图、装置示意图等),原理应该建立在自己的理解基础上去写,不要一味地抄书,原理必须写到实验的目的能够实现为止;
- ⑤ 实验步骤;
- ⑥ 实验数据记录表格。

实验的准备工作至关重要,它决定着实验的成败和收效的大小,所以实验前务必做好充分的准备工作。

二、实验时

实验是依据确定的原理解决具体问题,实验者应先根据设想好的步骤,看一看、想一想,是否已熟悉实验仪器的用法,怎样做会更好些、更合理些;确认一切都正常无误后,再按确定的步骤逐步走向实验的目的。

在上实验课时,特别要注意以下四点:

(1) 认真听讲,积极思考有关实验原理、实验要求、仪器使用、注意事项等问题。

(2) 自己动手做实验时,应按实验步骤和要求,认真调试仪器,仔细观察测量有关的物理量,并正确、如实地记录测量数据于预习报告的数据记录表格中。实验中若出现问题,应积极思考并及时请教老师,不要随意处理。如果发现数据有疑

问,可以重新进行实验,并将原来数据标上特殊符号以备参考,绝不允许私自篡改实验数据。在与他人合作做实验时,应分工协作,各司其职,互相配合。

(3) 实验完毕,应将数据记录表交给教师审阅,经教师签字后,整理好仪器方可离开实验室。

(4) 严格遵守实验室规则,维护实验室整洁,爱护实验仪器。仪器如有损坏,要及时报告老师,凡属于学生责任事故将视情节酌情赔偿。

由上可见,实验是一项艰苦的劳动,不但要动手,而且还要不断思考、判断,实验者必须具备严谨的科学态度。

三、实验后

实验后要回去认真书写实验报告。实验报告是实验成果的文字报道,所以应该做到字迹清楚,条理清晰,图表正确,数据完备和结论明确。一份完整的实验报告一般应包括实验预习报告、实验时的原始数据记录表以及实验后的数据处理部分。

预习报告包括:①实验名称、②实验目的、③实验仪器设备、④实验原理、⑤实验步骤、⑥实验数据记录表格。

实验过程中要求将原始数据完整而清晰地如实记录在原始数据记录表里。

实验后要及时完成⑦数据处理和⑧实验分析讨论。⑦数据处理中要完成计算过程、误差估算、计算不确定度、作图等工作,在计算中,应该有主要过程,要做到言之有据,结果可信。在数据处理完成之后,必须以醒目的方式完整地表示出实验结果。实验结果的表达,不仅要指出测量值的大小,还必须按要求用不确定度来评定测量结果。⑧实验分析讨论的内容很广泛,可以深入讨论实验现象或者进一步做误差分析,也可以对实验本身的设计思想、实验仪器、实验方法的改进写出自己的体会或者建设性意见。通过分析讨论,实验者可以进一步深入理解物理实验的理论,为他们在更高层次上发挥自己的聪明才智提供一个自由思考的广阔空间。在书写此部分内容时,重要的是写出实验者的认识过程,而不只是结论性的语句。

以上只是提供了实验报告的一般格式,一份成功的实验报告,力求用严谨的结构,流畅的文笔,清晰的思路和个性化的方式,简洁地描述实验的内容、方法和步骤,表达实验所阐明的物理思想和概念,给出可信的明确结论。实验报告的撰写可以培养和提高学生的分析、表达和信息交流能力。实验报告应在实验后一周内独立完成,并在下次实验时交给教师批阅。

第二章

测量误差与实验数据处理

物理实验就是对被测系统各种相关物理量的观察和测量，本质上讲，测量过程就是测量仪器与被测系统相互作用并在仪器上显示的过程。由于测量仪器、测量方法、测量条件、实际环境等不可控制的影响，即使在实验室中已做了充分控制，也难免会受到种种因素的影响，从而导致测量的数值并非是物理量的真实值。因此，实验除了要测得应有的数据外，还需要对测量结果的误差范围做出合理的估计。从这个角度说，测量是随机过程，被测量是个随机变量，需用概率和数理统计的方法来处理实验数据并表示测量结果。

本章将介绍测量、误差、不确定度以及数据处理的基本知识，它将使实验者能建立起误差分析的思想，学会简单的数据处理，并能正确地表达测量结果。

第一节 测量及其分类

物理实验的任务，不仅是定性地观察物理现象，而且还需要定量地测量有关物理量，并寻找各个物理量之间的内在联系。测量是物理实验的基础。

测量的实质是将待测的物理量与选为计量标准单位的同类物理量进行定量比较的全部操作，即为确定被测对象的量值而进行的一组操作。测量的结果包括数值（即度量出它是标准单位的倍数）、单位以及结果的可信程度（用不确定度表示）。

测量可以分为直接测量和间接测量两类。凡是直接由仪器读数获得测量值的过程称为直接测量。例如用米尺测量长度，用天平测量质量，用秒表测量时间等。直接测量是测量的基础。通过对直接测量量的测定并利用与直接测量量之间的函数关系计算得到的量称为间接测量量，相应的过程称为间接测量。例如测量一个圆柱体的体积可通过直接测量其直径和高，利用体积公式计算出体积。

直接测量是基本的、简单的。而间接测量是大量的、复杂的。随着现代测量技术特别是传感器技术和电子信息技术的迅速发展，原来大量复杂的间接测量正被相对简单的直接测量所替代。

第二节 误差及其分类

一、真值与误差

任何物质都有自己的特性,反映这些特性的物理量所具有的客观实际值,称为该物理量的真值。从测量的要求来说,人们总希望测量的结果能很好地符合客观实际。但在实际测量中,由于受实验条件、实验方法、实验仪器精度、操作人员的水平以及物理量本身等种种因素的制约,使得真值与测量值之间总是存在一定的差异,为了描述这种差异,引入误差的概念。也就是说,任何一种测量结果的量值与真值之间总会或多或少地存在一定的差值,将其称为测量值的测量误差,简称“误差”,误差的大小反映了测量的准确程度。测量误差的大小可以用绝对误差表示,测量结果的好坏则用相对误差来表示。

若用 x_0 表示真值,用 x 表示测量值,则测量值与真值之差称为绝对误差,表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2-2-1)$$

式(2-2-1)反映了测量值偏离真值的大小和方向,单位与测量值的单位相同。但是它不能明显反映出测量的相对精度。例如,用同一把尺寸测量两个物体的长度,分别得到 $d_1 = 25.0\text{mm}$ 和 $d_2 = 250.0\text{mm}$,两者的绝对误差都是 0.5mm ,哪个结果精确程度高呢?为了比较测量值的精度,引入相对误差的概念。

相对误差就是绝对误差与真值的比值,用下式表示:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (2-2-2)$$

式(2-2-2)反映了测量值偏离真值的相对大小,它是没有单位的纯数。

二、误差的分类

误差的产生有多方面的原因,按照误差的来源和性质不同,一般将误差分为“系统误差”和“随机误差”两大类。还有一类误差是由于读数错位、操作失误等原因造成明显与规定条件下预期值相差甚远的误差,称为粗大误差,这类误差在测量中要尽量避免。包含粗大误差的测量值称为异常值。已被确定为异常值的个别数据要直接剔除。

1. 系统误差

在相同条件下(指方法、仪器、环境、人员等),多次测量同一物理量,绝对误差的(正、负)符号保持不变,或在改变条件时,误差也按一定规律变化,这类误差称为系统误差。其特点是恒定性好。系统误差的来源大致有以下几种:

(1) 理论方面:这是由于测量所依据的理论公式的近似性或者测量方法本身

的不完善性而产生的误差。例如,单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 成立的条件之一是摆角趋于零,而在实验中,摆角为零的条件是无法满足的,此外摆球的体积以及摆线的质量都会对测量结果产生影响,不计这些影响都将产生系统误差。

(2) 仪器方面:这是由于测量仪器本身的不完善或者调整、使用不当而引起的误差。例如,温度计的刻度不准,天平的两臂不等长等。

(3) 环境方面:这是由于实验环境(如温度、湿度、气压、电磁场等)与仪器要求的环境不一致而引起的误差。例如,标准电池是以 20°C 时的电动势数值值作为标称值,若在 10°C 条件下使用时,未加以修正,就会产生系统误差。

(4) 人为方面:这是由于测量者心理或者生理因素所造成的误差,这类误差往往因人而异。例如,记录某一信号时有人习惯滞后,有人习惯超前,对标准线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。值得一提的是,随着数字化、智能化仪器的不断普及,测量人员对测量的干预越来越少,此时,人员误差往往可以不再考虑。

系统误差的特点是恒定性,不能用增加测量次数的方法使它减小。在实验中发现和消除系统误差是很重要的,因为它常常是影响实验结果准确程度的主要因素。能否用恰当的方法发现和减小系统误差,是测量者实验水平高低的反映,但是又没有一种普遍适用的方法去消除误差,主要靠对具体问题做具体分析与处理,要靠实验经验的积累。

2. 随机误差

在相同的条件下,多次测量同一物理量时误差时大时小,时正时负,这种以随机方式变化的误差称为随机误差。

随机误差是由测量过程中一系列随机的、不确定的因素引起的,例如测量仪器的不稳定性以及灵敏度的有限性、被测系统状态的随机涨落、实验环境的随机变化等,它不能消除也无法控制。

随机误差主要特点是随机性,对某次测量而言,误差的大小和正负是无法预见的,测量次数少时,显得毫无规律,但当测量次数足够多时,可以发现误差的分布服从一定的统计规律。利用此规律并通过统计方法可对随机误差进行估算。

习惯上,随机误差又被称为“偶然误差”,但在理解这一概念时要注意,所谓随机误差(偶然误差)仅仅是指在某一次具体的测量中,其误差的大小与正负带有偶然性(随机性),而不能理解为在测量过程中,这类误差只是偶然出现的,也不能理解为“随机误差是完全偶然的,随机性的,没有什么规律可循”。对一个量进行多次的测量,会发现它们的偶然误差是按一定的统计规律分布的,常见的分布有正态分布、均匀分布、 T 分布等。

常见的一种情况是:正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,数值很大的误差在没有错误的情况下通常不出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显,它就是一种最典型的分布规律——正态分布规

律。因此，可以用对同一测量值进行多次测量的方法来减小随机误差。

3. 误差的几个相关概念

为了能正确评价实验中测量结果的好坏，可引入精密度、正确度和精确度这三个概念。

(1) 精密度

精密度表示重复测量所得的各测量值相互接近的程度，它描述了测量结果的重复性的优劣，反映了测量中随机误差的大小。所谓测量精密度高，就是指测量数据的离散性小，即随机误差小（但系统误差大小不明确）。

(2) 正确度

正确度表示测量结果与真值相接近的程度，它描述了测量结果的正确性的高低，反映了测量中系统误差的大小程度。所谓测量的正确度高就是指最后的测量结果与真值的偏差小，即系统误差小（但随机误差的大小不确定）。

(3) 精确度

精确度是对测量结果的精密性与正确性的综合评定，因而反映了总的误差情况。所谓测量的精确度高，就是指测量值集中于真值附近，即测量的随机误差与系统误差都较小。

图 2-2-1 所示子弹打靶时子弹的分布情况可以形象地说明上述三个量的意义。

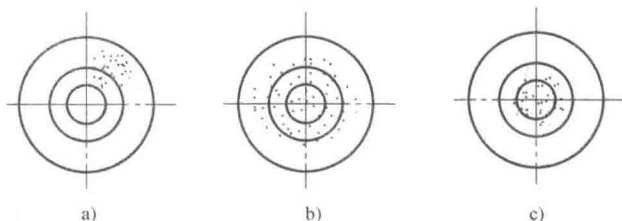


图 2-2-1 打靶时子弹的分布

图 2-2-1a 表明数据的精密度高，但正确度低，相当于随机误差小而系统误差大；图 2-2-1b 则表示数据的正确度高而精密度低，即系统误差小而随机误差大；图 2-2-1c 则代表精密度和正确度都较高，即精确度高，总误差小。

4. 系统误差的处理

(1) 系统误差的发现

系统误差一般难以发现，并且不能通过多次测量来消除，我们应该从系统误差的来源着手分析。

理论分析法，分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方；检查公式理论所要求的条件是否得到了满足；仪器是否存在缺陷；实验环境是否能使仪器正常工作等。

数据分析法，因为随机误差是遵从统计分布规律的，所以若测量结果不服从统

计规律,则说明存在系统误差,我们可将绝对误差按测量次序排列,观察其变化,若绝对误差不是随机变化而是呈现规律变化,如线性增大或减小,则测量中一定存在系统误差。

(2) 系统误差的减小和修正

① 减小或消除产生系统误差的根源,如采用更符合实际的公式,满足仪器的正常使用条件,保持仪器及装置处于良好状态等。

② 利用实验技巧改进测量方法。

③ 通过理论公式引入修正值。

5. 随机误差的处理

(1) 随机误差的统计规律

大量的实验事实和统计理论都证明,大多数情况下,随机误差服从正态分布规律,误差的正态分布如图 2-2-2 所示。横坐标为测量值 x ,纵坐标表示概率密度 $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2-2-3)$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, $\mu = \sum x_i/n$, 其中 μ 称为总体平均值。 σ 称为正态分布的标准偏差,它是表征测量分散性的一个重要参量。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (2-2-4)$$

正态分布曲线满足归一化条件,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (2-2-5)$$

这条曲线可以用来表示随机误差在一定范围内的概率。测量数据出现在某一区间的概率可以由正态分布函数在该区间的积分求得,这个概率称为置信概率 P ,所对应的区间称为置信区间。式 (2-2-5) 表明,当 $n \rightarrow \infty$ 时,任何一次测量误差落在 $[-\infty, +\infty]$ 置信区间的概率为 100%。图 2-2-2 中阴影部分的面积就是随机误差在 $[-\sigma, +\sigma]$ 范围内的概率。由定积分可以算出

$$P(\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(x) dx = 68.3\% \quad (2-2-6)$$

式 (2-2-6) 表明,任何一次测量误差落在 $[-\sigma, +\sigma]$ 置信区间的概率为 68.3%。例如扩大置信区间,置信概率也将提高,例如区间扩大到 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, +3\sigma]$,可以分别得到

$$P(2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(x) dx = 95.4\% \quad (2-2-7)$$

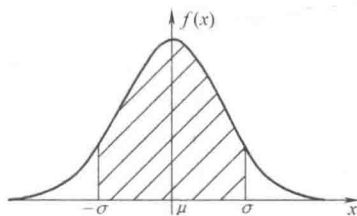


图 2-2-2 正态分布曲线

$$P(3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(x) dx = 99.7\% \quad (2-2-8)$$

可见, 测量标准差的绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%, 对于有限次测量, 这种可能是微乎其微的, 因此, 可以认为是测量失误, 应予以剔除, 所以在物理实验中常将 3σ 作为判定数据的异常标准, 3σ 称为极限误差。

正态分布曲线有以下性质:

单峰性: 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。

对称性: 绝对值相同的正负误差出现的概率相同。

有界性: 在一定的测量条件下, 误差的绝对值不超过一定的限度。

抵偿性: 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而减小, 最后趋于零。

(2) 随机误差的实际估算

在实际实验中, 都是有限次数的测量, 而且真值也不可不知。因此, 标准误差只有理论上的意义, 对于标准误差处理只能估算。实验中我们只知道残差 $v_i = x_i - \bar{x}$, 而不知道误差, 所以实验中我们只能用残差来代替误差计算, 当测量次数为 n ($6 \leq n \leq 10$) 时, 误差用贝塞尔公式 (2-2-9) 估算, 这是求实验标准偏差的常用公式。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-2-9)$$

(3) 仪器的标准偏差

测量是用仪器或量具进行的, 有的仪器灵敏度较高, 有的仪器灵敏度较低, 但任何仪器均存在误差, 习惯上称之为仪器误差。它是指仪器在规定条件下使用时, 所允许的误差限值, 用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。

仪器的误差一般由生产厂家在仪器铭牌或仪器说明书中给出, 对于未说明仪器的误差又不知道仪器准确度级别, 可根据具体情况做出合理估算, 例如取仪器最小分度值作为仪器误差, 表 2-2-1 给出了实验室常用仪器的误差。

表 2-2-1 物理实验中常用仪器的允差及其主要指标

仪器	量程	最小分度值	最大允差
钢板尺	150mm	1mm	$\pm 0.10\text{mm}$
	500mm	1mm	$\pm 0.15\text{mm}$
	1000mm	1mm	$\pm 0.20\text{mm}$
钢卷尺	1m	1mm	$\pm 0.8\text{mm}$
	2m	2mm	$\pm 1.2\text{mm}$
游标卡尺	125mm	0.02mm	$\pm 0.02\text{mm}$
	125mm	0.05mm	$\pm 0.05\text{mm}$
	125mm	0.1mm	$\pm 0.1\text{mm}$

(续)

仪器	量程	最小分度值	最大允差
螺旋测微器	0~25mm	0.01mm	0级为 $\pm 0.002\text{mm}$
			1级为 $\pm 0.004\text{mm}$
	25~50mm	0.01mm	0级为 $\pm 0.002\text{mm}$
			1级为 $\pm 0.004\text{mm}$
七级天平(物理天平)	500g	0.05g	满量程为 $\pm 0.08\text{g}$
			1/2 量程为 $\pm 0.06\text{g}$
			1/3 量程为 $\pm 0.04\text{g}$
三级天平(分析天平)	200g	0.1mg	满量程为 $\pm 1.3\text{mg}$
			1/2 量程为 $\pm 1.0\text{mg}$
			1/3 量程为 $\pm 0.7\text{mg}$
普通温度计	0~100℃	1℃	$\pm 1^\circ\text{C}$
精密温度计	0~100℃	0.1℃	$\pm 0.2^\circ\text{C}$
电表(0.5级)			0.5% $\times$ 量程
电表(0.1级)			0.1% $\times$ 量程

第三节 有效数字和仪器读数规则

一、有效数字的概念

实验所处理的数值有两种：一种是准确值，如测量次数、公式中的纯数字等；另一种是测量值。前面已经指出，测量不可能得到被测量的真值，只能是近似值，都有一定的不确定性，决定了测量值只能是一个具有有限位数的数值。它的尾数主要是由测量仪器决定的，绝不能随意取舍。例如用厘米分度尺去测量一个铜棒的长度（见图 2-3-1）。我们先看到铜棒的长度大于 4cm，小于 5cm，其端点位于 4cm 和 5cm 刻度的中间，测量数据可以是 4.2cm、4.3cm、4.4cm。换不同的观察者进行测量，第一位数不会发生变化，称之为准确数字，但最后一位数字会因不同人的估计而不同，我们称之为欠准确数字或可疑数字。虽然最后一位欠准确，但客观上反映出了该物体既比 4cm 长又比 5cm 短的事实，不能舍去。对一个测量数据取其可靠位数的全部数字，后面加上估计的第 1 位可疑数字，称为这个测量数据的有效数字。

有效数字位数的多少，直接反映了实验测量结果的精确度，有效数字位数越多，测量结果的精确度越高。例如，如果用毫米分度尺测量图 2-3-1 中的铜棒的长度，如图 2-3-2 所示，从尺的刻度可以直接看出测量值在 4.2cm 和 4.3cm 之间，再