

高等学校教材

大学物理实验

樊旭峰 主 编

吕 晶 于 华 刘 悦 韩立伟 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

大学物理实验

D A X U E W U L I S H I Y A N

樊旭峰 主 编

吕 晶 于 华 刘 悦 韩立伟 副主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是编者在多年大学物理实验课程教学改革的基础上,总结近年来教学实践探索的经验编写而成的。全书结构紧凑,内容丰富,注重物理实验与工程实践相衔接,充分体现分层次、开放式的教学特点。本书共 36 个实验项目,分为六章,包括测量误差、不确定度和数据处理、物理实验的基本训练、基础性实验、综合性实验、设计性实验和选做性实验等内容。书中有不少反映新的实验仪器和技术的实验内容,具有较好的可读性和实用性。

本书可以作为高等院校大学物理实验教材或教学参考书,也可供相关专业的广大科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/樊旭峰主编. —北京:高等教育出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-04-017338-3

I. ①大… II. ①樊… 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 150568 号

策划编辑 马天魁	责任编辑 王 硕	封面设计 张 楠	版式设计 王艳红
插图绘制 尹 莉	责任校对 殷 然	责任印制 朱学忠	

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	网上订购	http://www.landraco.com
开 本	787mm×960mm 1/16		http://www.landraco.com.cn
印 张	14.5	版 次	2011 年 8 月第 1 版
字 数	270 千字	印 次	2011 年 8 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	19.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 17338-00

前 言

本书依据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会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合编者多年的教学经验和教材编写经验，广泛吸取国内同类教科书的精华编写而成。

本书编写的目的是作为物理实验课教学指导书，规范物理实验教学内容，使理论和实验有机结合，体现分层次、开放式教学特点。

本书作者根据近年来教学改革的实践，将物理实验教学体系分为基础性实验、综合性、设计性和选做性实验，其特点是注重基础性、实践性、探索性、开放性的有机统一。在突出基本技能训练的同时，增大了综合性、设计性实验的比重，以适应新时期培养学生实践能力和创新能力的教学要求。

在基础性实验中共编入十三个实验项目，其教学重点是使学生掌握基本实验方法和基本的技能，每一个实验项目后为学生提供可借鉴的实验数据表格和数据处理方法，以培养学生良好的实验习惯。

在近代及综合实验部分共编入十二个实验项目，其重点是让学生开阔视野和思路，使学生具有将理论知识与实验方法融会贯通的思维能力，具有独立分析问题和解决问题的能力。

设计性实验共编入六个实验项目，引导学生设计实验方案，独立完成实验内容，给学生提供一个独立思考，发挥自己想象力的空间，培养学生创新意识。

选做性实验是根据我校开放式教学特点，对学有余力的学生增开的实验项目，这部分编入了六个实验项目，大多是物理实验与工程实践相衔接的实验，有利于提高学生实验兴趣和培养学生的综合实验能力。

全书结构紧凑，内容丰富，书中增添了许多新的实验内容，力求反映当前的主流实验理论和新的实验技术和方法。例如教材选用了核磁共振、高温超导、传感器、制冷系数的研究等实验项目，以强化物理实验与工程实践相衔接，适应当前社会信息科学技术发展的需要。

本书的实验项目，都是近年来物理实验课中所开设的，要求学生在两学期内完成。对大部分实验项目是一人一套仪器，由学生独立完成，这有助于学生实验能力的培养。教学形式采取网上选课，学生可以按照自己的专业特点和个人兴趣选择相应的实验项目，增强了学生动手实验的主动性和积极性，也培养了学生自我管理的能力。

本书在编写的过程中,得到了沈阳建筑大学有关部门领导和理学院领导的大力支持和帮助,同时参考了其他院校的教材,在此一并表示感谢!

大连大学李学慧教授在本教材编写过程中,提出了许多极具建设性的指导意见和修改建议,并审阅了全部书稿,在此表示衷心感谢!

实验课的教学和教材,离不开实验室的建设和发展,这是一项集体性的工作,本书的编写是沈阳建筑大学物理实验室全体教师智慧的结晶。

本书的具体分工如下:刘悦编写了 3.1、4.1、4.12;韩立伟编写了 3.2、3.8、4.8、附录;吕晶编写了 3.12、3.13、4.7;于华编写了 3.3、4.3、4.9;赵德华编写了 3.5、3.6、4.2、5.3、6.1;陈彪编写了 3.9、4.6、4.11、6.4、6.5;郑君刚编写了 3.4、5.1;刘健编写了 3.7、4.4;樊旭峰编写了绪论、第一章、第二章、3.10、3.11、4.5、4.10、5.2、5.4、5.5、5.6、6.2、6.3。在此向所有付出辛勤劳动的参编教师,致以深深的谢意!

编者

2011年5月于沈阳

目 录

绪论	1
第一章 测量、误差与数据处理	5
1.1 测量与误差	5
1.2 随机误差的估算	7
1.3 不确定度的概念	10
1.4 测量量的结果表示	12
1.5 有效数字及其运算规则	15
1.6 常用的数据处理方法	18
1.7 计算器统计功能简介	23
习题	25
第二章 基本实验知识	27
2.1 基本测量方法	27
2.2 基本调整技术	30
2.3 基本测量仪器简介	33
第三章 基础性实验	45
实验 3.1 气垫导轨上动量守恒定律的研究	45
实验 3.2 刚体转动惯量的测量	51
实验 3.3 物体导热系数的测量	56
实验 3.4 电学元件伏安特性的研究	61
实验 3.5 示波器的使用	65
实验 3.6 声速的测量	70
实验 3.7 用模拟法测绘静电场	74
实验 3.8 电位差计的使用	79
实验 3.9 灵敏电流计的研究	82
实验 3.10 霍尔效应及其应用	87
实验 3.11 薄透镜焦距的测量	93
实验 3.12 三棱镜折射率的测量	98
实验 3.13 光栅衍射实验	105
第四章 近代及综合性实验	109
实验 4.1 拉伸法测金属丝的弹性模量	109
实验 4.2 用示波法测量铁磁材料的磁滞回线	113

实验 4.3	密立根油滴实验	118
实验 4.4	光电效应	124
实验 4.5	弗兰克-赫兹实验	132
实验 4.6	太阳能电池基本特性的研究	137
实验 4.7	光的等厚干涉	140
实验 4.8	迈克耳孙干涉仪的应用	145
实验 4.9	制冷系数的研究	149
实验 4.10	非线性电路混沌实验	155
实验 4.11	小型棱镜摄谱仪	159
实验 4.12	核磁共振实验	163
第五章	设计性实验	178
实验 5.1	电桥及其应用	178
实验 5.2	电表的改装与校准	182
实验 5.3	直流稳压电源的设计与制作	185
实验 5.4	自组望远镜	188
实验 5.5	自组显微镜	190
实验 5.6	自组透射式幻灯机	192
第六章	选做性实验	194
实验 6.1	螺线管内部磁感应强度分布及合成	194
实验 6.2	光纤位移传感器	198
实验 6.3	光敏电阻的特性研究及其应用	201
实验 6.4	高温超导材料特性测量	206
实验 6.5	全息照相	209
附录		215
参考文献		224

绪 论

一、物理实验的地位和作用

大学物理实验课是一门独立设置的必修课程,是教育部指定的六门主要基础课之一,也是教育部对高等学校“双基”评估的十二门基础课之一.物理实验课程不仅可以加深对理论的理解,更为重要的是使学生获得基本的实验知识,在实验方法和实验技能等方面得到较为系统、严格的训练.可以说,大学物理实验课是学生在大学里学习或从事科学实验的起步,同时,在培养科技工作者的良好素质及科学世界观方面也起着潜移默化的作用.现代科技发展要求每一个未来的工程师和科学家必须注重培养自己观察现象、提出问题以及解决问题的能力,因此,每一个科技人员除了具有深厚的专业基础知识外,还必须具有基本实验能力:综合实验的设计能力;心灵手巧的创新精神;细心与耐心、实事求是的工作作风;协作理念和团结精神;更高层次人员还应具有把握全局及协调能力.

物理学从本质上说是一门实验科学.物理规律的发现和理论的建立,都以实验为基础,并受到实验的检验.物理实验不仅对真正理解和掌握物理学理论是不可缺少的教学环节,而且对如何运用理论知识、实验方法和实验技术,解决实际科技问题也是必要的基本训练.科学技术发展的根基是科学实验,工程技术人员必须具备较深广的理论和足够的实验能力,以适应当今科学技术飞速发展的需要.

物理实验是工程技术的基础,物理实验技术和工程技术是相辅相通的.工程技术人员所需要掌握的测量方法和技巧以及有关实验的设计、方法的确定、仪器的选择、数据处理等多是物理实验中测量方法和技巧的移置和推广.从这个意义上讲,物理实验是一门独立的必修课程,是学生进入大学后受到系统的实验技能训练的开端,也是今后学习和工作的基础.

二、物理实验课程的具体任务

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基础知识、基本方法和基本技能;并能运用物理学原理和物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解.

2. 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:自行阅读实验教材(或资

料), 看懂实验原理, 掌握仪器的基本构造及其使用方法, 正确记录实验数据, 完成实验内容, 并能对一些数据进行处理, 绘制曲线, 说明实验结果, 写出合格的实验报告; 能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法, 逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力; 培养学生独立实验的能力, 逐步形成自主实验的基本能力。

3. 培养与提高学生的科学实验素养. 要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风, 严肃认真的工作态度, 主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

4. 培养学生的创新能力. 要求学生能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验, 进行初步的具有研究性或创意性内容的实验, 激发学生的学习主动性, 逐步培养学生的创新能力。

三、物理实验课的基本过程

物理实验课是一门实验基础课, 其教学的着重点是严格的基础技能和思维判断能力的训练, 而不是对所谓“结果”的追求. 物理实验课的基础内容基本上都属于验证性实验, 即重复前人已做过的实验过程. 学生在教师的指导下通过实验过程学习实验的理论与技术, 提高各方面的能力. 实验课与理论课不同, 实验的结果因周围环境、实验条件等诸多因素的影响, 又会使实验的结果有着许多不确定的因素, 所以学生在实验的过程中必须发挥自己的主观能动性, 既动脑又动手, 积极主动地以一个研究者、探索者的姿态进行学习。

1. 掌握实验的基础知识

(1) 注意掌握实验中所采用的基本实验方法和数据处理方法. 比如掌握一些基本仪器的结构原理、规格性能、维护知识和使用方法; 掌握一些常用的物理量测量方法; 了解一些常用的物理实验方法; 学会列表法、逐差法、作图法、最小二乘法等数据处理方法; 了解测量误差的基本知识, 掌握不确定度的计算和有效数字的运算规则等。

(2) 培养良好的科学实验习惯和作风. 要习惯于遵守实验室的规章制度和仪器操作规程, 比如课前做好预习, 按时来上实验课; 实验数据的记录以及必要的实验环境条件, 正确地操作实验仪器和实验后整理仪器等, 这些细小的环节都是在实验课中需要注意、不断强化的, 逐渐使学生养成习惯, 使之成为具有良好科学实验素养的科技人才。

(3) 培养自己的分析能力. 在整个实验过程中始终保持积极的思维状态, 努力做到: 对实验原理、方法、实验条件能全部掌握; 对实验仪器的结构、特点及使用方法了解得清楚明确; 对测量的实验数据是否合理能给予正确的判断; 能发现实验中可能出现的误差和问题的环节; 在保证实验仪器安全的前提下, 应力求自

已解决实验中遇到的问题。

2. 实验课的主要教学环节

(1) 实验前的预习

课前预习是实验课的一个基本环节,是在实验中能否取得主动的关键。上课前,应该认真阅读实验教材或相关资料,对实验任务有一个基本了解,以便顺利完成规定的实验任务。通过预习应该写出预习报告,其中包括实验原理、方法、实验条件、实验关键,待测量与实测量之间的关系,以及测量数据表格,仪器调整的主要步骤等,有些实验还要求学生课前自拟实验方案,自己设计线路或光路,自拟数据表格等。

(2) 实验操作

实验操作是实验课的中心环节。主要是对仪器进行调整和对待测量的测量。学生来到实验室后,应该作为一个科学技术工作者,严格要求自己,合理布置仪器,安全并正确地操作,认真、细心地观察实验现象,实事求是地观察和测量,认真探索和研究实验工作中的问题,从一开始就不断培养自己良好的科学作风,努力培养自己的科研能力和创新意识。

一般的,实验过程总是从不清楚到清楚,从各种正确和错误的结果中,经过判断并逐步分析和研究而最终取得正确的结果。这正是学习实验的重要过程。

如果是和他人一组,应该分工协作,共同完成规定的实验工作任务。实验结束后,应该将实验数据交教师审阅、签字,并在整理还原仪器后,方可离开实验室。

(3) 书写实验报告

实验结束后,应该撰写实验报告。对实验报告的书写,应做到内容完整、语言简练、有自己的观点和见解、文理通顺、字迹工整、图表规范、结论明确、数据处理方法科学合理。实验报告应该包括以下内容。

① 实验名称。

② 实验目的。

③ 实验原理。应该包括有关的理论依据和仪器原理,列出主要公式及其成立时所应满足的实验条件等,并且画出相应的电路图或光路图。

④ 实验步骤。必须写明重要而且顺序不能颠倒的关键步骤和实验的注意事项。

⑤ 实验数据及其处理。数据必须用表格形式表示,包括单位、有效数字和重要的实验条件,同时必须注明仪器编号、型号、规格、精度(分度值);数据处理应该包括计算过程、曲线图、测量结果。

⑥ 实验结论。测量结果的表达及必要的文字表述,包括待测量及其不确定度。

⑦ 误差分析. 一般的,误差分析应该是对测量结果影响较大的误差进行分析,要根据具体的实验任务和内 容,分析或找出主要的因素进行具体的、接近量化的分析讨论,并且提出相应的消除方法. 切忌泛泛罗列各种误差来源和几乎所有实验都存在的或可以用的误差来源及分析.

⑧ 问题与讨论. 可以是实验现象的分析,对实验关键问题的研究体会,对改进实验的建议或实验后的收获,也可以解答思考题. 总之,其内容应按具体实验任务要求完成.

四、实验室规则

1. 学生进入实验室需带上实验预习报告,课前应完成指定的预习内容,经教师检查同意方可进行实验.

2. 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境.

3. 使用电源时,务必经过教师检查线路后才能接通电源.

4. 爱护仪器. 进入实验室不能擅自搬弄仪器,实验中严格按仪器说明书操作,如有损坏,照章赔偿. 公用工具用完后应立即归还原处.

5. 做完实验,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子摆放整齐. 经教师审查测量数据和仪器还原情况并签字后,方能离开实验室.

6. 实验报告应在规定时间内交到实验室.

第一章 测量、误差与数据处理

1.1 测量与误差

本章介绍大学物理实验所必需的基础知识. 这些知识不仅每一个物理实验都要用到, 而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的. 由于这部分内容涉及面较广, 不可能在一两次课中学习掌握, 因此要求同学们在本章中初步了解, 在后续实验课中不断加以运用和掌握.

1.1.1 物理量的测量

物理实验是以测量为基础的. 研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量. 可以说, 测量是进行科学实验必不可少的、极其重要的环节.

测量可分为直接测量和间接测量. 直接测量就是将被测量与标准量(量具)进行比较, 直接得到被测量的数值. 如用米尺测量长度, 用安培计测量电流, 用天平和砝码测量物体的质量等. 而间接测量是利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系, 从而间接得到被测量的数值. 如: 测量均匀圆柱体的密度 ρ 可通过测量圆柱的高 h 、直径 D 和质量 m 由公式 $\rho = \frac{4m}{\pi D^2 h}$ 计算得到. 在物理实验中进行的测量, 有许多是间接测量.

按照测量条件的不同, 又可将测量分为等精度测量和非等精度测量. 等精度测量是指在相同条件下对同一被测量量进行多次重复测量, 即在测量仪器、测量方法、测量人员、测量环境均不变的情况下对同一物理量进行重复测量所得到的测量值都有相同的精度, 或者说它们具有相同的可信赖程度. 不等精度测量是指各次测得数据的精度各不相同. 即每次测量的条件、环境、仪器、人员等都有变动, 使测得数据精度不同.

测量的数据不同于普通的数值, 它是由数值和单位两部分组成的. 数值有了单位, 才具有特定的物理意义, 因此测量所得的数值和单位, 缺一不可.

1.1.2 误差

对某一物理量进行测量时, 由于受到测量仪器、测量方法、测量环境、测量者

的观察力等因素的影响,测量结果与被观测的客观真实值(真值)存在一定的偏离,也就是说存在测量误差。

测量误差就是测量结果与被测量的真值之间的差值,测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值} \quad (1.1)$$

$$\text{相对误差 } E = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \quad (1.2)$$

被测量的真值是一个理想概念,一般说来实验者对真值是不知道的。在实际测量中用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值,称为约定真值。

1.1.3 误差的分类

测量中的误差按其来源的性质可分为三类:系统误差、随机误差、过失误差。

1. 系统误差

在相同条件下对同一物理量的多次测量过程中,保持恒定或以某种确定的规律变化的误差称为系统误差。系统误差的来源大概有以下几个方面。

(1) 仪器误差。仪器本身制造及校准的不完善以及仪器没有调整到理想使用状态所引起的误差;如仪器零点未校准,仪表刻度不准,米尺弯曲、计时工具总是快或慢等。

(2) 环境误差。由于各种环境如温度、湿度、光照等因素与要求的标准状态不一致引起的误差。

(3) 理论误差。由于理论不完善或采用的理论公式具有一定的近似性造成的误差;如单摆测重力加速度时所用公式的近似性,用天平称质量时未考虑空气的影响等。

(4) 人员误差。由于观察者本人感觉器官不完善或心理特点造成的误差。有的人用秒表计时,计时短或计时长;有的人看仪表时头总是偏向一方。

系统误差产生的原因和规律不一定都能被实验者掌握。凡能被确定大小和符号的系统误差称为可定系统误差,它一般是可以被消除和修正的。例如游标尺的零点修正值就是这类误差。对于大小和符号不能确定的系统误差称为未定系统误差,这样的误差一般难以修正,只能估计出极限范围。

发现、消减、修正系统误差是一项艰巨而又重要的任务,也是实验技能的重要体现。实验者需要对实验所依据的原理、方法、测量步骤、所用仪器等仔细分析。实验前尽可能采取减少系统误差的措施,实验后尽可能对系统误差进行修正,以期得到正确的实验结果。完成实验后所作的“误差分析”主要是讨论系统误差及其修正办法。

2. 随机误差

在对同一被测量的多次测量过程中,绝对值与其符号以不可预知的方式变化的测量误差称为随机误差.它包括测量的偶然误差以及物理过程或物理量的统计所反映在测量上的涨落性,是由实验中各种因素的微小变动性引起的.随机误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的,但对一个量进行足够多次的测量,则会发现其随机误差是按一定的统计规律分布的.因此,对于实验中存在的随机误差,可以按照数理统计理论对其做出估计.

系统误差和随机误差有着不同的产生原因和不同的性质,因此,它们对测量结果的影响也各不相同.通常用正确度这一术语来表征系统误差的大小,用精密度这一术语来表征随机误差的大小.如以打靶的结果与某次测量的结果进行类比,图 1.1(a)的弹着点明显偏离靶心,存在系统误差.这种情况说明测量的正确度不高,但弹着点比较集中,离散程度不大,因此可以说它的精密度还是很高的.图 1.1(b)则相反,弹着点比较分散,因此精密度不高,但是从弹着点分布情况来看,并没有明显的固定偏向,因此可以认为它的正确度还是很高的.图 1.1(c)则不仅精密度高,而且正确度也高,我们说这一测量结果准确度高.

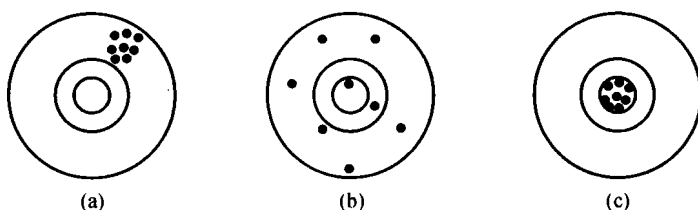


图 1.1 测量结果准确度与射击打靶的比较

3. 过失误差

由于测量者在测量过程中粗心大意所发生的错误或失误而造成的一种误差称为过失误差,例如:漏记、错记、算错等引起的.它所对应的测量值称为坏值,一旦发现,应按一定规则将其从测量列中剔除.在实验中只要认真、细心操作,完全可以避免这种误差.

1.2 随机误差的估算

1.2.1 随机误差的正态分布规律

大量实践证明,随机误差的出现是服从正态分布(也称高斯分布)规律的,常见的正态分布曲线如图 1.2 所示.图中 x 代表某一物理量的实验测量值, $f(x)$

为测量值的概率密度函数,且:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3)$$

其中:

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x}{n}, \quad \sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x-\mu)^2}{n}}$$

其中, μ 和 σ 是反映测量值这个随机变量分布特征的重要参数,从曲线上可以看出被测量值在 $x=\mu$ 处的概率密度最大,是测量次数趋向无穷时被测量的算术平均值。在消除了系统误差后, μ 为真值。横坐标上任一点到 μ 值的距离 $(x-\mu)$,即为与测量值 x 相应的随机误差。随机误差小的概率大,随机误差大的概率小。 σ 为曲线上拐点处的横坐标与 μ 值之差,它是表征测量值离散程度的参数,称为正态分布的标准偏差。 σ 小,随机误差小,测量值精密度高; σ 大,随机误差大,测量值精密度低。这条曲线是概率密度分布曲线,当曲线和 x 轴之间的总面积定为 1 时,其中介于横坐标上任何两点间的某一部分面积可以用来表示随机误差在相应范围内的概率。如图中阴影部分 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 到之间的面积就是随机误差在 $\pm\sigma$ 范围内的概率(又称置信概率),即测量值落在 $(\mu-\sigma)$ 到 $(\mu+\sigma)$ 的区间的概率,由定积分计算得其值为 $P=68.3\%$ 。如将区间扩大到 -2σ 到 $+2\sigma$,则落在 $(\mu-2\sigma)$ 到 $(\mu+2\sigma)$ 区间的概率就提高到 95.5% ;如图 1.3 所示,落在 $(\mu-3\sigma)$ 到 $(\mu+3\sigma)$ 区间的概率为 99.7% 。

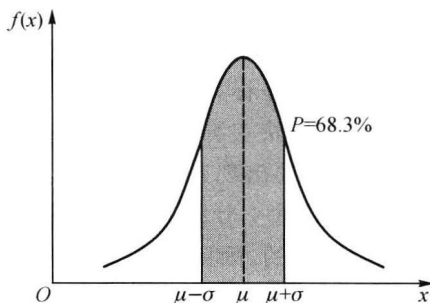
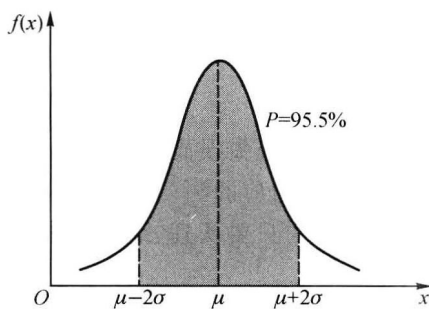
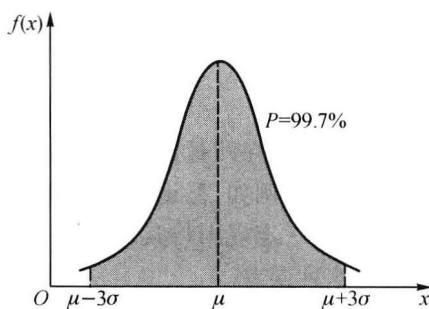


图 1.2 正态分布曲线



(a)



(b)

图 1.3

从正态分布曲线可以看出:(1) 在多次测量时,正负随机误差可以大致相消,因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小误差的影响;(2) 测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大。因此,必须对测量的随机误差做出估计才能表示出测量的精密度。

1.2.2 测量列的平均值

从图 1.2 可以看出,随机误差具有可抵偿性,即在相同的测量条件下对同一物理量进行了多次重复测量,误差的代数平均值随着测量次数的增加而逐渐趋于零.如果用测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示对物理量 x 进行 n 次测量的值,那么

$$\delta_1 = x_1 - \mu$$

$$\delta_2 = x_2 - \mu$$

.....

$$\delta_n = x_n - \mu$$

将以上各式相加得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - n\mu$$

由于

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

因此有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \mu$$

而

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \mu \quad (1.4)$$

可见,测量次数越多,算术平均值 $\bar{x}$ 越接近真值 μ ,因此,在实际测量中可以用算术平均值 $\bar{x}$ 作为真值 μ 的最佳估计值.

1.2.3 有限次测量的标准偏差

在物理实验中,测量次数总是有限的,而且真值也不可知,因此不能用式(1.3)计算出标准差 σ ,只能用其他方法对 σ 的大小进行估算.如果对某一物理量测量了 n 次,测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,称为一个测量列,每一次测量值与平均值之差称为残差,即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1.5)$$

显然,这些残差有正有负,有大有小.常用“方和根”法对它们进行统计,得到的结果就是该测量列单次测量的标准偏差,用 S_x 表示为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.6)$$

有时也简称为标准差,它具有与标准误差 σ 相同的概率含义. 式(1.6)在实际测量中非常有用,称其为贝塞尔公式.

对 x 的有限次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 也是一个随机变量,即对 x 进行不同组的有限次测量,各组结果的算术平均值一般是不会相同的,彼此总会有所差异. 因此,也存在标准偏差,用 $S_{\bar{x}}$ 表示. 可以证明, $S_{\bar{x}}$ 与 S_x 间的关系为

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (1.7)$$

由此可见,平均值的标准偏差可以通过 n 次测量中任意一次测量值的标准偏差计算得出,显然 $S_{\bar{x}}$ 小于 S_x ,说明平均值的离散程度要小于单个测量值的离散程度. 增加测量次数可以减小平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$,提高测量的精密度,但是单纯凭增加测量次数来提高精密度的作用是有限的. $S_{\bar{x}}$ 的概率意义为:测量量的真实值落在 $\bar{x} - S_{\bar{x}}$ 到 $\bar{x} + S_{\bar{x}}$ 范围内的可能性为 68.3%,落在 $\bar{x} - 2S_{\bar{x}}$ 到 $\bar{x} + 2S_{\bar{x}}$ 范围内的可能性为 95.5%,落在 $\bar{x} - 3S_{\bar{x}}$ 到 $\bar{x} + 3S_{\bar{x}}$ 范围内的可能性为 99.7%.

当测量次数无穷多或足够多时,测量值的误差分布才接近正态分布,当测量次数较少时,例如 $n=6 \sim 10$ 次,测量值的误差分布将明显偏离正态分布,而遵从 t 分布曲线. t 分布曲线与正态分布曲线形状类似,但是 t 分布曲线峰值低于正态分布,且上部较窄,下部较宽,如图 1.4 所示.

此时,其置信区间宽度与正态分布的置信区间宽度差 t_P 倍. 换句话说, t 分布时置信区间 $(\bar{x} - S_{\bar{x}}, \bar{x} + S_{\bar{x}})$ 对应的置信概率达不到 0.683,若保持置信概率不变,则应当扩大置信区间为 $(\bar{x} - t_P S_{\bar{x}}, \bar{x} + t_P S_{\bar{x}})$. 其中系数 t_P 称为 t 因子,其数值既与测量次数 n 有关,又与置信概率 P 有关.

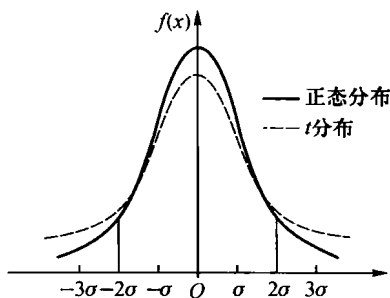


图 1.4 t 分布与正态分布曲线

1.3 不确定度的概念

对一个物理量测量后,应给出测量结果并对测量的质量做出评价. 根据定义,误差是指测量值与真值之差,由于真值是无法知道的,因此误差也是无法知道的. 而不确定度是表征被测量的真值在某个量值范围的一个评定,因此,用它取代误差来评价测量结果的质量,显得更科学、合理. 目前,不确定度在国外已被普遍采用,在国内也逐步推行. 在物理实验课中,也将用不确定度的形式来表示测量结果. 将问题进行理想化与简单化处理,可使初学者有一个基本概念,为以