

高等学校物理实验教学示范中心精品系列教材

大学物理实验

◎主 编 王永祥 耿志刚

高等教育出版社

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

◎主 编 王永祥 耿志刚

内容提要

本书是根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)的精神,结合天津大学几十年来的物理实验教学经验,在历年所用教材的基础上,考虑到与中学教学内容的衔接和现代物理学在各个学科领域的应用和发展,并参考兄弟院校的一些教学经验编写而成的。全书分六章,共计 63 个实验。实验包括基础性实验、基本实验、综合实验、近代物理实验。基础性实验的目的在于用一些最基础的实验,训练基础的实验方法,以深刻理解一些基本概念和规律。基本实验的目的在于让学生获得科学实验的基本技能和经验。综合实验是一些多个理论和实验技术相结合的实验,旨在将所学知识普遍联系起来,体现创新和综合素质的训练。近代物理实验则选取了一些物理学史上的重大实验,以体现科学技术的不断发展,学习大师级的思维方式和解决问题的方法。另外大部分实验都安排了拓展与设计题目,以便使更为优秀的学生在理解和掌握实验原理和方法的基础上开拓思路,进行实验探索与创新。

本书的教学内容力求做到层次清晰,注重基础技能的掌握和创新能力的培养。本书可作为高等学校大学物理实验课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王永祥,耿志刚主编. --北京:
高等教育出版社,2016. 11 (2018.9 重印)

ISBN 978-7-04-046313-2

I. ①大… II. ①王… ②耿… 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(2016)第 198557 号

策划编辑 李 颖	责任编辑 缪可可	封面设计 张申申	版式设计 于 婕
插图绘制 杜晓丹	责任校对 刘丽娟	责任印制 耿 轩	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京七色印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 21.5
字 数 410 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
网上订购	http://www.hepmall.com.cn http://www.hepmall.com http://www.hepmall.cn
版 次	2016 年 11 月第 1 版
印 次	2018 年 9 月第 4 次印刷
定 价	38.00 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 46313-00

前 言

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)的精神,在陈荣金、王惠棣、任隆良、谷晋骐等编写的多部大学物理实验教材的基础之上,总结了近年来的教学改革经验和实验室建设成果,并吸收了一些兄弟院校的教学经验和部分优秀的教学内容后编写而成的。

章节安排如下:第一章“测量不确定度和实验数据处理”,第二章“物理实验基础知识”,第三章“力学热学实验”,第四章“电磁学实验”,第五章“光学实验”,第六章“综合与近代物理实验”。去掉单独设计性实验,在多个实验后增添了拓展与设计内容,以培养学生的实验兴趣,提高实验能力,对更为优秀的学生进行课后指导与培训。

我们对测量的不确定度和实验数据处理一章内容进行了改写以适应近几年最新的理论进展和国家标准的变化。

近年来实验仪器更新频繁,里面包含了很多的新技术、新方法。我们对原来的大部分实验进行了改写,增减了一些实验题目,实验内容既保留了系统性、规范性的训练,也为不同专业的学生根据自己的专业和兴趣灵活选择实验题目奠定了基础。

针对目前正在进行的教学质量提升计划,广大教师和实验技术人员做了大量的工作,本教材也反映了近几年的实验室面貌和实验室建设的成果,在此向辛勤工作的各位同事对教材重编所作的贡献表示感谢,向有关参考书作者表示衷心的感谢,同时也感谢天津大学对精品教材的支持。

本书是由王永祥、耿志刚主编,天津大学物理实验中心集体编写而成的。

王永祥修改和编写了第一章和实验 27、31、35、38—47、50—51、54、57、61,并对全书进行了修改与审阅。耿志刚修改和编写了绪论和实验 22—26、32—34、55—56、58—60、63。以下作者按姓氏拼音排序,所改编的实验如下:陈霞(实验 1—4),程利艳(实验 9、14、19),冯列峰(实验 12、13),高宗慧(实验 7、8、11),柯红卫(实验 10、48),廖怡(实验 5、6、15),刘京津(实验 36、37、52),刘新典(实验 20、21),秦珠(实验 16—18),王树国(实验 49、53、62)。

由于编者水平有限,本书难免有不当与错误之处,恳请批评指正,我们也会不断地修改和完善。

编 者

2016年6月

目 录

绪论	(1)
0.1 物理实验课的重要性	(1)
0.2 物理实验课的教学目的和任务	(1)
0.3 物理实验课的基本程序	(2)
0.4 严格基本训练 培养科学素养	(3)
第一章 测量不确定度和实验数据处理	(4)
1.1 测量及其误差	(4)
1.2 误差分析与处理方法	(6)
1.3 测量的不确定度及评定方法	(9)
1.4 直接测量结果的不确定度计算	(10)
1.5 间接测量结果的合成不确定度	(16)
1.6 有效数字	(17)
1.7 实验数据处理的基本方法	(19)
第二章 物理实验基础知识	(28)
2.1 物理实验的基本操作技术	(28)
2.2 力学热学实验基础知识	(30)
2.3 电磁学实验基础知识	(46)
2.4 光学实验基础知识	(53)
第三章 力学热学实验	(62)
实验1 长度测量	(62)
实验2 物质密度的测定	(66)
实验3 牛顿第二定律	(69)
实验4 动量守恒和机械能守恒	(72)
实验5 简谐振动	(76)
实验6 钢丝的杨氏模量	(79)
实验7 扭摆法测定物体的转动惯量	(83)
实验8 三线扭摆法测物体的转动惯量	(86)
实验9 扭摆法研究受迫振动	(88)
实验10 声速的测量	(93)
实验11 落球法测定液体的黏度	(98)
实验12 固体导热系数的测定	(100)
实验13 压力传感器和温度传感器测气体的绝热指数	(102)

实验 14	冷却法测定金属的比热容	(107)
实验 15	拉脱法测定液体的表面张力系数	(112)
第四章	电磁学实验	(116)
实验 16	滑线变阻器分压特性与制流特性	(116)
实验 17	磁电式直流电表的改装与校验	(118)
实验 18	RC 电路的暂态过程	(123)
实验 19	线性电阻与非线性电阻的伏安特性曲线	(126)
实验 20	用电流场模拟静电场	(130)
实验 21	自组惠斯通电桥测电阻	(137)
实验 22	自组电位差计	(142)
实验 23	用冲击法测高电阻	(147)
实验 24	用开尔文双电桥测低电阻	(149)
实验 25	示波器的使用	(152)
实验 26	RLC 电路的稳态特性	(161)
实验 27	电子比荷的测定	(166)
实验 28	电阻温度系数	(170)
实验 29	温差热电偶的定标与使用	(173)
实验 30	PN 结温度传感器特性	(176)
实验 31	非平衡电桥及其应用	(180)
实验 32	用冲击法测螺线管磁场	(184)
实验 33	铁磁材料的磁滞回线	(187)
实验 34	霍耳效应及其应用	(191)
第五章	光学实验	(198)
实验 35	薄透镜焦距的测定	(198)
实验 36	分光计的调节与使用	(203)
实验 37	测定棱镜玻璃的折射率	(208)
实验 38	用极限法测液体的折射率	(211)
实验 39	等厚干涉	(214)
实验 40	菲涅耳双棱镜	(218)
实验 41	迈克耳孙干涉仪的使用	(222)
实验 42	用迈克耳孙干涉仪测定钠双线的波长差	(226)
实验 43	空气折射率的测定	(230)
实验 44	光栅衍射	(232)
实验 45	光的夫琅禾费衍射现象的观测	(235)
实验 46	单缝衍射法测光的波长	(239)
实验 47	偏振光的观测	(242)

实验 48 超声光栅	(248)
实验 49 全息照相	(251)
第六章 综合与近代物理实验	(257)
实验 50 多功能传感器	(257)
实验 51 光电效应与普朗克常量	(262)
实验 52 弗兰克-赫兹实验	(265)
实验 53 氢原子光谱	(268)
实验 54 发射光谱与吸收光谱	(272)
实验 55 阿贝成像原理和空间滤波	(276)
实验 56 微波的布拉格衍射	(283)
实验 57 真空镀膜技术	(286)
实验 58 密立根油滴实验	(291)
实验 59 反射式光纤位移传感器的应用	(297)
实验 60 核磁共振	(299)
实验 61 巨磁阻效应	(305)
实验 62 塞曼效应	(311)
实验 63 黑体辐射	(316)
附录	(322)
参考文献	(334)

绪论

0.1 物理实验课的重要性

物理实验是高等学校理工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的基础课程,是学生进入大学后接受系统科学实验方法和实验技能训练的开端.现代科学技术离不开物理学和物理实验方法,科学技术的每一项新进展基本上都来源于物理学的新发现.显然,理工科学生学好物理学和物理实验,获得进行科学实验的基本技能和经验,对后续工程技术类课程的学习以及以后从事科学技术工作都有重要的作用.

科学实验是人们按照一定的研究目的,借助特定仪器设备,在预先安排和严格控制的条件下,对自然事物和现象进行精密、反复地观察和测试,以探索其内部规律性的过程.这种对自然有目的、有控制、有组织的探索活动是现代科学技术发展的源泉.

科学实验中,人们可以利用各种实验手段,对研究对象进行各种人为干预和控制,使其摆脱各种偶然因素的干扰,从而使研究对象的特性能以纯粹的本来面目显露出来.而有些魔术和伪科学实验则是人为地加入干扰因素,使研究对象神秘化、新奇化,隐藏对象的本性以造成某种表演效果或骗局.掌握科学的实验方法,不仅是获得技能,更应该培养一种科学精神,提高自己质疑、探索和创新能力.

“物理学是以实验为本的科学”,这一精辟论述出自诺贝尔物理学奖获得者、著名理论物理学家杨振宁教授的题词.这也是物理学界的共识,无论是物理规律的发现,还是物理理论的验证都要靠实验.在物理学的发展过程中,人类积累了丰富的实验方法,创造出各种精巧的仪器设备,涉及广泛的物理现象,这就使物理实验课有了充实的教学内容.学生从中可以学到许多基本实验方法和实验技能,可观察到许多生动的自然现象,并在客观实际的事物与抽象模型化的物理理论之间架起了桥梁,使自己在应用理论于实践的过程中,加深对理论的理解,提高了分析问题和解决实际问题的能力.

总的说来,在大学学习期间要做到理论课与实验课并重,掌握书本知识与提高科学实验的实践能力和动手能力并重.我们提倡提高动手能力,但其根本在于心灵才能手巧.

0.2 物理实验课的教学目的和任务

物理实验课可以使学生得到系统的实验方法和实验技能的训练,使学生

初步了解科学实验的主要过程和基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的基础。

物理实验课是一门实践性课程。学生在教师的指导下,通过自己独立完成实验课题的过程增长知识,提高能力。整个教学活动的进行也将有助于学生作风、态度及品德的培养和素质的提高。

本课程的具体任务如下:

(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,加深对物理学原理的理解。

(2) 培养、提高学生的科学实验能力。其中包括:①能够通过阅读实验教材或资料,做好实验前的准备;②能够借助教材或仪器的说明书正确使用常用仪器;③能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断;④能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线、说明实验结果、撰写合格的实验报告;⑤能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养、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,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

0.3 物理实验课的基本程序

物理实验课的基本程序一般分为三个阶段。

(1) 课前预习。每次实验课前要做好实验准备工作。通过阅读实验教材和参考资料,弄清本次实验的目的、原理、所要使用的仪器,明确测量方法,了解实验要求及实验中特别要注意的问题等,在此基础上写出简要的预习报告。预习报告包括:实验名称、实验目的、实验仪器、简要的原理及计算公式、计量测试数据的表格以及简单的电路图、光路图等。

预习的好坏将决定预习者能否主动、顺利地进行试验。

(2) 实验操作。在动手操作前应首先认识和熟悉仪器,了解仪器的使用方法,记录仪器的型号,然后进行仪器的安装(或接电路)、调试。实验要按步骤并井有条地进行,在正式获得实验数据之前,要把仪器设备调试到最佳工作状态。明确每步操作的意义,掌握正确的调整操作方法,认真观察实验现象,正确记录实验数据。实验过程中若出现不正常的实验现象要及时请教老师,不要自己随意处理。如果对实验有新的想法或想进一步深入研究,必须向指导教师说明并经同意后方可进行。实验完毕,实验数据须经教师审阅签字,离开前将仪器整理好。

实验操作是物理实验基本程序中的核心,是学生主动研究、积极探索的好时机。每一个实验收获的多少,主要取决于学生主观能动性的发挥程度。

(3) 整理实验报告. 实验报告是实验成果的文字报道, 是实验过程的总结. 要写好一份实验报告, 应做到: 认真学习和掌握实验的原理和方法; 正确进行数据处理和误差分析; 记录并分析实验中观察到的现象; 正确表示出测量结果, 并对结果做出合理分析和讨论. 实验报告内容包括: ① 实验名称, 完成日期; ② 实验目的; ③ 使用的仪器(要写明主要仪器的规格、型号和被测试样品的编号); ④ 扼要的原理及公式(电学实验要画电路图, 光学实验要画光路图); ⑤ 简要操作步骤; ⑥ 列表记录的原始数据及数据处理(包括实验结果准确度的评定和要求绘制的实验曲线图); ⑦ 必要的讨论(包括回答教师指定的思考题, 实验中发现的现象及其解释, 对实验装置和方法的改进意见等).

写出一份文字简练通顺、字迹清晰、数据齐全、图标规范正确的实验报告是对学生起码的要求, 也是学生应具备的基本能力.

0.4 严格基本训练 培养科学素养

进行科学实验训练是为成才锻炼基本功. 实验能力的提高是一点一滴积累起来的, 严格的科学实验训练是从一招一式做起的. 例如正确使用仪器就涉及怎样布局仪器最合理, 按什么顺序调节仪器最便捷, 以及调零、消视差等在操作中都需要考虑到.

实验不能只为了测得几个数据, 要充分利用实验的机会来培养自己的动手能力, 遇到困难或在实验过程中出现不理想的情况不要一概归咎于仪器, 而是要认真分析观察到的现象, 找出原因, 自己动手排除障碍, 使实验顺利进行. 其实, 在实验中遇到困难是正常的, 也是一件好事, 它可以使我们有更多思考问题和处理问题的机会.

物理实验中所选择的实验项目, 集中了许多科学实验的训练内容, 其中包含很多具有普遍意义的实验知识、实验方法和实验技能. 初学者必须在每一个实验后进行归纳总结, 这样就能不断积累实验知识、提高实验技能. 例如, 这个实验的实际环境条件是否满足实验涉及的物理原理, 做了哪些简化, 实验体现了哪些基本实验方法, 用了哪些数据处理方法等.

好奇心是一名优秀科技人员必须具有的心理特征之一. 学生在实验时也要有好奇心, 这样就会发现更多的实验现象, 就会体会到更多的实验设计和仪器设计中的妙处, 就有更多思考问题的机会和更多实验知识的累积.

“千里之行, 始于足下.” 同学们要以培养自己成为严谨的科技工作者为远大志向, 认真做好每一个实验, 加速提高自己的实验能力和实验素养.

第一章 测量不确定度和实验数据处理

1.1 测量及其误差

1.1.1 测量的概念和常用词汇

测量是物理实验的基本操作. 测量操作是一种比较过程,就是把待测量和体现计量单位的标准量进行比较,从而确定待测量的值.

1. 测量值和测量单位

测量的结果应包括数值(度量的倍数)、单位以及结果可信赖的程度(用不确定度来表示)三个部分.

国际单位制(the International System of Units),其简称 SI 来自法语“Le Système International d’Unités”,是国际计量大会(CGPM)所采用和推荐的一贯单位制.我国法定计量单位是以国际单位制(SI)为基础制定的.在国际单位制(SI)中有 7 个独立定义的基本单位,详见附录“中华人民共和国法定计量单位”.

这 7 个基本单位所对应的物理量称为基本量,由基本量导出的单位称为导出单位,其对应物理量是导出量.有些导出单位还有专门名称和特有符号,如赫兹(Hz)、牛顿(N)、帕斯卡(Pa)、伏特(V)、焦耳(J)、瓦特(W)、库仑(C)、法拉(F)、欧姆(Ω)、亨利(H)、韦伯(Wb)、特斯拉(T)等.

导出单位中还有两个辅助单位:平面角以弧度(rad)为单位,立体角以球面度(sr)为单位.

2. 直接测量与间接测量

测量分为直接测量和间接测量,直接测量是指把待测物理量直接与作为标准的物理量相比较.间接测量则是由一个或多个直接测量的量按一定的函数关系计算出的另一个物理量.例如,直接测量一个圆柱体的直径 d 和高度 h ,根据 $V=\pi d^2 h/4$ 计算出圆柱体的体积,体积就是间接测量量.

3. 等精度测量

由于测量仪器的不同、方法的差异和测量条件的改变会造成测量结果的变化,这样的测量是不等精度的,而同一个人、用同样的方法、使用同样的仪器并在相同的条件下对同一物理量进行的多次测量,称为等精度测量.尽管各测量值可能不相等,但没有理由认为哪一次或几次的测量值更可靠或不可靠.实际上,每一次测量值都可能变化,但是只要其变化对实验的影响很小,就可以认为是等精度测量.如有一项测量值发生变化,导致明显影响实验结果,即

为不等精度测量. 本教材规定: 实验中所提到的对一个量重复测量, 若无其他说明, 都是指等精度测量.

4. 准确度、精密度和精确度

准确度、精密度和精确度是三个用来评价测量结果好坏的常用术语.

实验测量结果的准确度是指测量值与真值的接近程度. 准确度高说明测量值接近真值的程度好, 系统误差小. 即准确度是反映测量结果系统误差大小的术语.

实验测量结果的精密度是指重复测量所得测量结果相互接近的程度. 精密度高说明实验测量的重复性好, 各个测量值的误差的分布密集, 随机误差小. 即精密度是反映测量结果随机误差大小的术语.

实验测量的精确度所描述的是综合评定测量结果的重复性和接近真值的程度. 精确度高说明精密度和准确度都高. 即精确度反映的是随机误差和系统误差的综合效果. 对于系统误差与随机误差的讨论详见 1.1.3 节.

1.1.2 真值和误差

真值或称被测量真值是在确定条件下客观存在的值. 定义测量值与真值(给出值)的差为测量值的误差, 记为

$$\Delta x = x - A \quad (1.1-1)$$

式中, x 为测量值, A 为待测量真值, Δx 为测量误差, 也称绝对误差.

待测量真值是客观存在的, 但它只是一个期望值, 在一般情况下是不可能准确知道的. 按照定义, 测量误差是测量值与客观真值的差, 它不仅有大还有方向(正、负). 由于真值一般无法知道, 因此测量误差也无法知道, 只能对它做出估计.

有时想了解绝对误差与真值之比有多大, 常用百分数表示, 称为相对误差

$$E_r = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.1-2)$$

对于同一种测量, 相对误差较小的测量的准确度较高.

1.1.3 误差的分类

根据误差的特征和表现形式, 可将误差主要分为系统误差和随机误差两类.

1. 系统误差

在相同条件下, 对同一被测量的多次测量, 误差的绝对值和方向(正、负)保持恒定; 当在条件改变时, 误差按某一确定的规律变化, 这种误差称为系统误差.

2. 随机误差

在相同条件下多次重复测量同一个量时, 每次测量出现的误差以不可预

知的方式变化,这类误差称为随机误差。随机误差又称偶然误差,这种测量误差的大小和方向是无法预测的。即使在尽可能相同的条件下,对某一指定的物理量重复进行测量,在尽量排除和修正明显有规律的偏差后,每次得到的测量值,总是在一定范围内呈随机性的波动变化。

除上述两类误差外,还有一种误差是由于测量条件的突发性变化或由于读错、记错等原因引起数据异常造成的,称为粗大误差,简称粗差。测量时应该避免出现这类误差。具有粗差的数据必须剔除。必须指出,判断一个观测值是否异常,需要以实验理论与技术上的理由为依据,原因不明时可用统计方法做出判断,不能无依据地贸然处理。

1.2 误差分析与处理方法

1.2.1 系统误差的来源和处理方法

1. 系统误差的来源

系统误差有多种来源,从基础物理实验教学角度出发,主要有:

(1) 仪器误差。由于仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差,如未校准的螺旋测微器、分光计圆形刻度盘中心与仪器转动中心不重合造成的偏心差等。

(2) 理论和方法误差。由于实验理论和实验方法不完善,所引起的理论与实验条件不符产生的误差。如用落体法测重力加速度忽略空气阻力的影响;用伏安法测未知电阻时,没有考虑电表内阻的影响等,使测量值比实际值总是偏大或总是偏小。

(3) 环境误差。由于外部环境,如气压、湿度、温度等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差。

(4) 实验人员的生理或心理特点所造成的误差,如实验者在测量读数时总是习惯偏向一方斜视。

2. 系统误差按对其掌握的程度可分为已定系统误差和未定系统误差

(1) 已定系统误差。在一定条件下,采用一定方法,对误差取值的变化规律及其大小和符号都能确切掌握的系统误差。一经发现,在测量过程中要加以修正,如仪表和千分尺的零点读数误差等。

(2) 未定系统误差。不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号,而仅知最大误差范围的系统误差,如仪器的基本允差主要属于未定系统误差。

3. 系统误差按其表现规律可分为定值系统误差和变值系统误差

(1) 定值系统误差。在测量过程中大小和符号恒定不变,如天平砝码不准

确引起的测量误差。

(2) 变值系统误差. 在测量过程中呈现规律性变化. 这种变化有可能随时间而变, 也可能随位置而变, 如分光计的偏心差就是随位置而变化的周期性系统误差。

4. 系统误差的处理

系统误差的发现和估计是个实验技能问题, 常取决于实验者的经验和判断能力. 在物理实验教学中, 处理系统误差的通常做法是: 首先对实验依据的原理、实验方法和所用仪器可能引起误差的因素——进行理论分析, 然后通过数据分析和实验对比等手段查出系统误差的来源, 再通过改进测量方法或校准仪器设法抵消系统误差的影响. 总之对已定的系统误差必须修正, 对未定的系统误差设法减小其影响并估算出误差范围。

1.2.2 随机误差的统计处理方法

随机误差主要来源于环境的扰动, 误差的大小、方向既不能预测也无法控制, 呈现出无规则的起伏. 统计理论和实验都证明, 在绝大多数物理测量中, 当测量次数足够多时, 随机误差服从正态分布规律。

1. 随机误差的正态分布规律

正态分布函数是由德国数学家和理论物理学家高斯于 1795 年最先导出, 因而又称为高斯误差分布函数。

标准化的正态分布曲线如图 1.2-1 所示, 图中横坐标 x 为某一物理量的测量值, 纵坐标 $p(x)$ 表示测量值的概率密度:

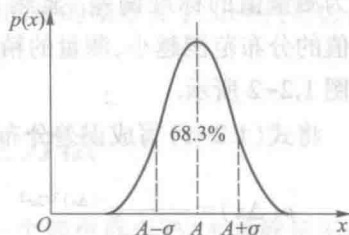


图 1.2-1 正态分布曲线

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-A)^2/2\sigma^2} \quad (1.2-1)$$

式中, A 是待测量真值, σ 是测量的标准偏差。

用概率密度函数 $p(x)$ 来描述测量值在区间 $[x_1, x_2]$ 出现的概率为

$$P[x_1, x_2] = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx \quad (1.2-2)$$

显然测量值在 $(-\infty, \infty)$ 区间出现的概率为

$$P(-\infty, \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad (1.2-3)$$

正态分布下随机误差的统计规律:

- (1) 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。
- (2) 对称性. 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。
- (3) 有界性. 绝对值很大的误差出现的概率近于零, 误差的绝对值不会超

过某一个界限.

(4) 抵偿性. 在一定测量条件下, 测量值误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零.

2. 标准偏差与置信概率

在正态分布的概率密度函数中包含着随机变量的一些重要信息. 一个随机变量具有两个重要的参量: 数学期望(被测量真值) A 和方差 σ^2 . 被测量真值 A 体现了测量值取值平均的大小, 它反映了测量值取值的集中位置, 而用方差 σ^2 来衡量测量值取值在被测量真值 A 附近的散布程度. 正态分布的概率密度函数曲线反映了这两个重要参量: A 是概率密度极值的取值位置, 而 $A-\sigma$ 、 $A+\sigma$ 是曲线两个拐点的横坐标位置. 定义方差

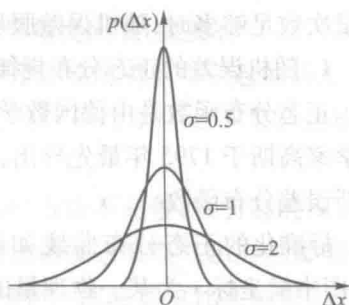
$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - A)^2 p(x) dx \quad (1.2-4)$$

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum (x_i - A)^2}{n} \quad (1.2-5)$$

在误差理论中, 方差 σ^2 的平方根 σ 称为测量值的标准偏差. 显然 σ 越小, 测量值的分布范围越小, 测量的精密度越高, 如图 1.2-2 所示.

将式(1.2-1)写成误差分布函数:

$$p(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(\Delta x)^2/2\sigma^2} \quad (1.2-6)$$



则测量的随机误差落在 $[-\infty, +\infty]$ 区间的 图 1.2-2 不同 σ 值的正态分布曲线
概率为

$$P(\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\Delta x) d(\Delta x) = 1 \quad (1.2-7)$$

可以计算某次测量的随机误差落在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率为

$$P_{\sigma} = \int_{-\sigma}^{\sigma} p(\Delta x) d(\Delta x) = 0.683 \quad (1.2-8)$$

同理, 某次测量的随机误差落在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率分别为

$$P_{2\sigma} = \int_{-2\sigma}^{2\sigma} p(\Delta x) d(\Delta x) = 0.954 \quad (1.2-9)$$

$$P_{3\sigma} = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} p(\Delta x) d(\Delta x) = 0.997 \quad (1.2-10)$$

用百分数表示则分别为 68.3%、95.4% 和 99.7%, 其所对应曲线下的面积如

图 1.2-3 所示.

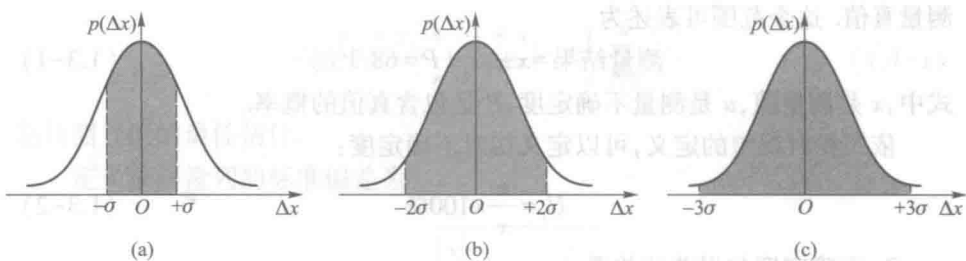


图 1.2-3 误差落在不同区间的概率

用语言可描述为:在一定条件下对某一物理量进行任何一次测量,则在 $[x-\sigma, x+\sigma]$ 区间内找到待测量真值 A 的概率为 68.3%. 这种说法的重要性在于它提供了一个以一定概率包含待测量真值的量值范围来表达测量结果精密度的途径. 人们把区间 $[x-\sigma, x+\sigma]$ 称为置信区间,而把在此区间包含真值的概率 ($P=68.3\%$) 称为置信概率. 如果把置信区间扩大到 $[x-2\sigma, x+2\sigma]$, 则置信概率为 95.4%; 扩大到 $[x-3\sigma, x+3\sigma]$, 置信概率为 99.7%. 因而只要对测量结果给出置信区间和置信概率就表达了测量结果的精密程度. 在误差处理中,常把 3σ 称为极限误差,是很有用的“ 3σ ”判据. 当测量的偏差大于 3σ 时,可以认为是粗大误差,其测量值是“坏”值,要予以剔除.

1.3 测量的不确定度及评定方法

前面我们讲述了误差的概念,但是误差是一个理想概念,它本身就是不确定的. 由于真值一般不可能准确地知道,因而测量误差也无法确定,因此现实可行的办法只能根据测量数据和测量条件进行推算,去求得误差的估计值. 显然,由于误差是未知的,因此不应再将任何一个确定值作为误差. 误差的估计值和数值指标便采用了另一个专门名称——不确定度.

以前,国内外对测量结果的不确定度的表述、运算规则都不尽统一. 1992 年国际计量大会以及四个国际组织制定了协调的具有国际指导性的《测量不确定度表达指南》(以下简称《指南》). 1993 年,《指南》经国际理化等组织批准实施. 我国的计量标准部门也已明确指出应采用不确定度作为误差数字指标的名称. 本教材将以《指南》为基础,结合我国高校物理实验教学的实际情况,讲述测量不确定度的基本原理和具体应用.

1.3.1 不确定度的基本概念

1. 基本概念

测量不确定度是测量结果必须具有的一个参量. 测量不确定度反映了对待测量真值不能肯定的程度,或者说测量值作为待测量真值的估计值可能存

在的一个散布范围并在这个散布范围内以一定的概率(如 $P=68.3\%$) 包含待测量真值. 这个范围可表述为

$$\text{测量结果} = x \pm u \quad (P=68.3\%) \quad (1.3-1)$$

式中, x 是测量值, u 是测量不确定度, P 是包含真值的概率.

依照相对误差的定义, 可以定义相对不确定度:

$$U_r = \frac{u}{x} \times 100\% \quad (1.3-2)$$

2. 不确定度与误差的关系

不确定度是在误差理论的基础上发展起来的. 不确定度和误差是两个不同的概念, 它们既有根本的区别, 但又是相互联系的, 都是由测量过程不完善性引起的.

误差是一个理想的概念, 因此无法表示测量结果的误差大小. “标准偏差” “极限误差” 等词并不是指某一测量结果具体的误差值, 而是用来描述误差分布的一个特征数值, 它表征与一定置信概率相联系的误差分布范围. 不确定度则是表示由于测量误差的存在而对待测量真值不能确定的程度, 反映了可能存在的误差分布范围, 表征待测量的真值所处的量值范围的评定, 所以不确定度能更确切地用于测量结果的表示. 一定置信概率的不确定度是可以计算出来的, 其值永远为正值. 而误差可能为正, 也可能为负, 而且无法计算.

误差与不确定度是相互联系的, 在估算不确定度时会用到描述误差分布的一些特征参量, 因此两者不是割裂的, 也不是对立的, 不确定度越小, 说明误差的散布范围越小, 表示测结果与真值越靠近, 测量结果越可靠. 反之, 测量的可靠性越差.

1.3.2 不确定度的评定方法

测量不确定度一般包含几个分量, 按其数值评定的方法, 可分为两大类: 采用统计方法评定的 A 类不确定度和采用其他方法评定的 B 类不确定度.

(1) A 类不确定度, 用统计方法评定的不确定度分量用 u_A 表示, 其大小用标准偏差计算.

(2) B 类不确定度, 用其他非统计方法估出的不确定度分量, 用 u_B 表示, 其大小可用仪器误差限估算.

(3) 总不确定度, 简称不确定度, 采用方和根合成: $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$.

1.4 直接测量结果的不确定度计算

1.4.1 测量列的平均值和标准偏差

从理论上讲, 对物理量做 n 次等精度测量, 得到包含 n 个测量值 x_i ,