

21世纪应用型高等院校示范性实验教材

主 编 仲志强

大学物理实验

DAXUEWULISHIYAN



南京大学出版社

04-33/303

2009

21世纪应用型高等院校示范性实验教材

大学物理实验

DAXUEWULISHIYAN

主 编 仲志强

副 主 编 高国军

编写人员 (按姓氏笔画为序)

厉淑贞 仲志强 李晓喜

步青华 高国军 韩汝取

 南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 仲志强主编. —南京: 南京大学出版社,
2009. 11

21 世纪应用型高等院校示范性实验教材

ISBN 978 - 7 - 305 - 06561 - 3

I. 大… II. 仲… III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. 04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 194875 号

出 版 者 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093
网 址 <http://www.NjupCo.com>
出 版 人 左 健

丛 书 名 21 世纪应用型高等院校示范性实验教材
书 名 大学物理实验
主 编 仲志强
责任编辑 孟庆生 编辑热线 025 - 83593947
照 排 南京玄武湖印刷照排中心
印 刷 南京京新印刷厂
开 本 787×1 092 1/16 印张 15.5 字数 384 千
版 次 2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷
ISBN 978 - 7 - 305 - 06561 - 3
定 价 27.00 元

发行热线 025 - 83594756
电子邮箱 Press@NjupCo.com
Sales@NjupCo.com(市场部)

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购图书销售部门联系调换

前言

大学物理实验是高等学校理工科大学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是大学生进行系统实验技能训练的开端.它在培养学生运用实验方法去观察、发现、分析乃至研究、解决问题的能力,在提高学生科学实验素养,培育学生的创新精神、创新能力等方面,都起着极为重要的作用,为大学生后续的学习、工作可奠定良好的实验基础.

进入 21 世纪,高等教育已经由精英教育进入了大众化教育阶段,人才培养模式更注重培养学生的实践能力.为了适应新的人才培养模式,满足高等学校特别是高等理工科院校大学物理实验课程教学改革的需要,面对高等学校物理实验室的改建、扩建以及大学物理实验仪器设备正在逐步或已经更新换代的现状,我们遵照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会的《高等工科院校物理实验课程教学基本要求》及《高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》,并参考了兄弟院校成熟的物理实验教材,结合学校的特点和多年的教学改革经验编写了本实验教材.

全书除绪论外共分 4 章,第 1 章为测量误差、不确定度及数据处理,介绍测量、误差处理、不确定度评估、有效数字运算以及常用的数据处理方法.第 2 章为基本测量方法及常用仪器介绍,介绍物理实验的基本方法和操作技术、常用物理量的测量及常用仪器简介.第 3 章为基础性实验,编入力学、热学、光学和电磁学基础性实验 17 个.第 4 章为综合性与设计性实验,编入综合性实验和设计性实验共 28 个.本教材在内容安排上充分考虑到理工科大学有关专业特点及基础课教学的需要,其内容涉及面广,实用性强.基础性实验和综合性实验为学生提供了较为详尽的背景介绍、基本原理、实验装置、实验过程与操作步骤、实验过程中可能会遇到的问题等方面的信息.设计性实验提出了研究对象和一些基本要求,对实验的难点也做了适当的提示,由学生独立思考、查阅资料,确定实验原理、方法,推导公式,设计实验方案,选择合适的仪器设备,完成实验.本教材对所用仪器设备作了原理性的概括介绍,并给出部分仪器的面板图及简要的说明.在实际教学过程中,教师还需对实验中所用的仪器向学生进行必要的说明和操作指导.

本教材由仲志强任主编,高国军任副主编,韩汝取、李晓喜、厉淑贞、步青华等同志参加了编写.其中,绪论、测量误差、不确定度及数据处理、附录、实验 3.17~4.8 由仲志强编写,基本测量方法及常用仪器介绍、实验 4.9~4.17 由高国军编写,实验 3.1~3.7 由厉淑贞编写,实验 3.8,3.9,3.12~3.16 由李晓喜编写,实验 3.10,3.11 由步青华编写,实验 4.18~4.28 由韩汝取编写.仲志强负责全书的统稿,李晓喜整理了全书的插图.

由于编者水平有限,书中疏漏和错误在所难免,敬请读者批评指正.

编 者

2009 年 10 月

目 录

绪 论	1
§ 1 物理实验的地位和作用	1
§ 2 物理实验课的目的和任务	2
§ 3 物理实验的基本程序	3
第 1 章 测量误差、不确定度及数据处理	5
§ 1.1 测量的定义与基础知识	5
§ 1.2 误差与不确定度	6
§ 1.3 直接测量的不确定度评估	13
§ 1.4 间接测量的不确定度评估	15
§ 1.5 常用数据分析与处理方法	16
§ 1.6 有效数字及其运算	21
§ 1.7 用 Excel 处理实验数据	24
第 2 章 基本测量方法及常用仪器介绍	32
§ 2.1 物理实验中基本测量方法	32
§ 2.2 物理实验的基本仪器	34
第 3 章 基础性实验	48
实验 3.1 规则物体密度的测定	48
实验 3.2 碰撞打靶实验研究	50
实验 3.3 气垫导轨上的实验	53
I 测量速度、加速度及验证牛顿第二定律	53
II 气轨上动量守恒定律的研究	58
实验 3.4 用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	60
实验 3.5 液体表面张力系数的测定	64

实验 3.6 弦线上的驻波研究	68
实验 3.7 金属线膨胀系数的测定	71
实验 3.8 用焦利秤研究弹簧的简谐振动	73
实验 3.9 线性电阻和非线性电阻的伏-安特性曲线	76
实验 3.10 用电桥测电阻	79
I 用惠斯登电桥测电阻	79
II 用开尔文电桥测电阻	82
实验 3.11 非平衡直流电桥的原理与应用	86
实验 3.12 用电位差计测量温差电动势和电阻	92
实验 3.13 示波器原理与使用	98
实验 3.14 薄透镜焦距的测量	106
实验 3.15 分光计的调整和使用	112
实验 3.16 三棱镜折射率的测定	118
实验 3.17 偏振光的研究	121
第 4 章 综合性与设计性实验	125
实验 4.1 用超声波测声速	125
实验 4.2 用凯特摆测量重力加速度	130
实验 4.3 霍耳位置传感器定标及杨氏模量测定	132
实验 4.4 用复摆法测定金属环的转动惯量	137
实验 4.5 空气比热容比的测定	138
实验 4.6 热敏电阻的温度特性	142
实验 4.7 PN 结正向压降温度特性实验	144
实验 4.8 热电偶的定标和测温	148
实验 4.9 利用霍耳效应测磁场	151
实验 4.10 圆线圈和亥姆霍兹线圈磁场的测定	155
实验 4.11 RLC 电路暂态特性的研究	157
实验 4.12 RLC 电路稳态特性的研究	164
实验 4.13 非线性混沌电路实验	171
实验 4.14 用磁聚焦法测电子荷质比	176
实验 4.15 磁化曲线与磁滞回线的测量	181
实验 4.16 磁阻效应实验	187

实验 4.17 电表的改装与校准	190
实验 4.18 用补偿法测电动势	192
实验 4.19 用牛顿环测量透镜的曲率半径	192
实验 4.20 用光栅衍射测波长	196
实验 4.21 光栅特性的研究	199
实验 4.22 光纤基础实验	200
实验 4.23 全息照相	206
实验 4.24 旋光性溶液浓度的测量	210
实验 4.25 金属电子逸出功的测定	214
实验 4.26 光电效应普朗克常数测定	220
实验 4.27 夫兰克-赫兹实验	224
实验 4.28 密立根油滴实验	228
 附录	 235
附表 1 国际单位制的基本单位	235
附表 2 国际单位制的辅助单位	235
附表 3 国际单位制中具有专门名称的导出单位	235
附表 4 国家选定的非国际单位制单位	236
附表 5 用于构成十进制倍数和分数单位的词头	236
附表 6 声波在液体中的传播速度	237
附表 7 某些固体的线胀系数	238
附表 8 20℃时某些金属的杨氏弹性模量	238
 参考文献	 239

绪 论

§ 1 物理实验的地位和作用

物理学是人类认识自然的基础,它揭示和阐述了物质世界基本构成及其运动和相互作用的基本规律.物理学也是一门建立在实验基础上的科学,在物理学的发展过程中,实验起着决定性的作用.首先,任何物理概念的确立、物理规律的发现、物理理论的建立都必须以严格的科学实验为基础.科学实验是人们认识自然和改造客观世界的基本手段,科学技术越进步,科学实验就显得越重要.任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品都必须通过实验才能获得.由实验观察到的现象和测出的数据,加以总结和抽象,找出内在的联系和规律就得到理论,实验是理论的源泉.牛顿总结了伽利略、开普勒等人的实验研究成果,建立了经典力学理论;麦克斯韦总结了库仑、奥斯特、安培和法拉第等人的实验研究成果,建立了电磁场理论.其次,理论一旦提出后,又必须借助实验加以检验其正确性,是否具有普遍意义.麦克斯韦提出的电磁场理论(预言了电磁波存在),只有当赫兹成功地完成电火花实验后才被人们公认;近代物理的发展,是在某些实验的基础上提出假设的,例如普朗克根据黑体辐射提出“量子假设”,再经过大量的实验证实,量子假设才成为科学理论;爱因斯坦的狭义相对论是以“光速不变”假设为基础,经过长期大量的实验后,才被人们普遍接受的.物理学上的任何理论,都必须由实验来验证,正确的得到发展,错误的就被摒弃.当旧理论不能解释新的物理现象时,新理论就会诞生.在物理学发展的进程中,物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、相得益彰的.没有理论指导的实验是盲目的,实验必须经过总结抽象上升为理论,才有其存在的价值,而理论又需实验来检验,这种需要又促进了实验的发展.

物理实验不仅对于物理学的研究极其重要,对于物理学在其他学科中的应用也十分重要.20世纪以来,物理学的发展以及在各行各业中的应用已经使我们的世界发生了巨大变化.由物理学研究带来的新技术、新产品层出不穷,极大的改变了人们的生活方式和生产方式,如无线电广播、电视、电话、手机、汽车、飞机、火箭、卫星、计算机、因特网、微波炉、电磁灶、摄像机、DVD、液晶电视等.物理学的发展带动了化学、天文、生物、医学、能源、材料、信息等学科的发展,并为其他学科提供了强有力的研究方法和探测手段,如X射线应用于生物大分子的结构研究,发现了DNA的双螺旋结构;CT、核磁共振、超声、微波、激光、光纤成像被广泛应用于医学和生物学研究;同步辐射强光源应用于研究材料的结构和性能、化学反应过程、生物细胞活动;快中子束和离子束、微光机电器件、扫描显微镜应用于纳米材料的研究.这些应用无不和物理实验有关,实验正是联结物理学发展和其他学科发展的桥梁.物理实验是研究物理测量方法

与实验方法的科学,是其他一切实验的基础,其他学科的复杂实验经过分解,其中绝大部分是常见的物理实验.在工程技术领域中,产品的研制、生产、加工、运输等都普遍涉及物理量的测量及物理运动状态的控制,这正是成熟的物理实验的推广和应用.现代高科技发展,设计思想、方法和技术也来源于物理实验.因此,物理实验是自然科学、工程技术和高科技发展的基础,科学技术的发展离不开物理实验.

物理实验在其发展过程中,形成了一套自己的理论、方法和技术,它们是进行各类科学实验的基础.掌握好这套理论、方法和技术是很不容易的,需要由浅入深、由简到繁逐步学习、训练和提高.物理实验具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,体现了大多数科学实验的共性,是科学实验的基础.因此,大学物理实验是理工科类院校大学生进行实验训练的一门独立的必修基础课程,也是理工科大学生进入大学后接受系统的实验方法和实验技能训练的开端,它使学生初步了解科学实验的主要过程和基本方法.它在培养学生用实验手段去观察、发现、分析和研究问题,最终解决问题的能力方面起着重要的作用,也为学生独立地进行科学实验研究,设计实验方案,选择、使用仪器设备和提出新的实验课题,为进一步学习后续的实验课程打下良好的基础.

§ 2 物理实验课的目的和任务

1. 物理实验课的目的

(1) 使学生通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识和设计思想,理解和掌握相关物理理论;

(2) 培养和提高学生的实验能力,包括查阅实验教材和资料,借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器,运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断,正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;

(3) 提高学生实验素养,包括严肃认真的工作态度,理论联系实际和实事求是的科学作风,主动研究的探索精神以及遵守纪律、团结协作和爱护公物的优良品德.

2. 物理实验课的任务

学生通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;通过对物理原理的运用、物理实验方法的训练,加深对物理实验知识、物理学原理的理解,培养学生的科学思维能力、创新能力和创新精神,具体可分为以下几个方面:

(1) 学习和掌握运用实验原理、方法去研究某些物理现象,通过具体测试,得出某些结论;

(2) 初步培养学生进行科学实验的能力,即如何从实验目的出发,依据哪种原理,通过什么方法,选用哪种合适的仪器与设备,确定什么样的实验程序,去获取准确的实验结果;

(3) 进行实验技能的基本训练,熟悉常用仪器的基本原理、结构、性能、调整操作,观测分析和排除故障等;

(4) 学习和掌握处理实验数据的方法以及分析试验方法、测量仪器、周围环境、测量次数和操作技能对实验结果的影响;

(5) 通过实验,尤其是设计性实验有意识地培养创新意识和创新能力;

(6) 通过实验培养学生严肃认真、细致踏实、一丝不苟、实事求是的科学工作态度,克服困

难、坚韧不拔、勇于进取的探索精神,以及团结协作的优良品质,为后续课程的学习打下良好的基础。

§ 3 物理实验的基本程序

物理实验是学生在教师指导下独立进行和完成的。每次实验,学生必须主动努力自觉地获取相关实验知识和实验技能,绝不仅仅是测出一些实验数据。如果能进一步去领悟实验中的物理思想方法,那就会获得更大的受益。物理实验课程分为实验预习、实验操作和课后实验报告三个教学环节。

1. 实验预习

预习是上好实验课的基础和前提,为了在规定的时间内高质量地完成实验任务,学生必须在实验前做好充分的预习,只有这样,才能正确分析实验中各种现象,掌握物理现象的本质,充分发挥自己的主观能动性,自觉地、创造性地获取实验知识和掌握实验技能。

预习时应仔细阅读实验教材,明确实验目的,了解实验原理和方法。学生要弄清实验的内容是什么,实验采用了什么方法,依据什么原理,实验用到哪些仪器,实验的关键环节是什么。通过预习,应对实验有大致地了解,在此基础上写出预习报告。预习报告的主要内容包括:实验名称、实验目的、简要的实验原理、实验步骤、实验数据记录表格,解答预习思考题,也可写上不清楚的问题。其中,实验目的、实验原理部分应自己组织语言,写出实验所依据的主要原理、公式以及公式中各物理量的含义,画出原理图、电路图或光路图。在实验数据记录表格中,要将直接测量量和间接测量量清楚分开,避免混淆。

2. 实验操作

学生进入实验室前必须详细了解实验室的各项规章制度,这些规章制度是为保护人身和仪器设备的安全,维护正常的教学秩序而制定的,进入实验室应严格遵守。

实验操作包括仪器仪表的布局、线路的连接、仪器仪表的安装调试、实验现象的观察、故障分析和排除、数据测量和记录。学生做实验时,要做到大胆心细、严肃认真,多动手、勤动脑,遇到问题多思考。这样才能在实验中发现、分析问题并解决问题,提高动手实践能力和思维判断能力。实验操作一般按照如下程序进行:

实验前,教师会对本次实验做简要的讲解、介绍,分析实验的难点及强调操作中的注意事项。学生应结合预习,认真听讲,并且对照实验仪器,了解仪器的使用方法。

在实验台上合理安排仪器仪表布局,连接线路,调试实验装置。在实验测量前,仪器和元件必须处于最合理的工作状态。学生在使用任何仪器前,必须阅读注意事项或说明书;实验装置调节符合要求后,方可进行实验操作、测试数据;在电学实验中,接好的线路必须检查无误才可接通电源;调节仪器时,应先粗调后微调;在读数时,应先读取大量程数据后再读取小量程数据。

根据实验要求记录实验数据及相关实验现象。实验记录应该按照科学、实事求是的原则进行,应全面反映实验的全过程。学生除了记录直接的测量数据外,还应记录实验条件(如环境温度、湿度等)、仪器型号规格、仪器的准确度等级、仪器误差、实验中发现的问题。不仅要记录与预想一致的数据和现象,更要记录与预想不一致的数据和现象。记录应尽量详尽、清晰、条理清

楚. 实验过程中如发生反常现象或仪器故障时, 应冷静地分析其产生的原因, 恰当处理, 排除故障, 必要时可请老师帮助解决.

学生实验完毕, 将数据交给老师审阅通过后, 整理还原好实验仪器, 离开实验室.

3. 实验报告

实验后要及时进行数据处理, 并写出完整的实验报告. 实验报告是实验工作的总结, 要求字体工整、文理通顺、数据齐全、图表规范、结论明确、布局整洁. 一份完整的实验报告应包含以下内容:

(1) 实验名称、姓名、学号、实验日期.

(2) 实验目的. 要求自己组织语言书写, 简明扼要.

(3) 实验原理. 写出简要的原理及实验所依据的主要公式以及公式中各物理量的含义, 画出原理图、电路图或光路图. 要求学生自己组织语言书写, 简明扼要.

(4) 实验仪器. 包括仪器的型号及准确度等级.

(5) 实验内容. 实验内容和主要步骤要依据实验所进行的具体情况简要写出. 要求学生自己组织语言书写, 简明扼要.

(6) 数据处理. 该部分是实验报告的核心, 学生应把实验所测得的原始数据整理列表, 再按照实验要求计算测量结果. 如需作图, 则应使用坐标纸作图. 计算时应有数据代入的简单过程, 并按照不确定度理论评估测量结果. 最后写出实验结果表达式. 鼓励使用 Excel, Origin, Matlab 等计算机软件来进行处理、分析、作图、拟合及统计.

(7) 实验结论. 根据测量结果写出实验结论、误差分析及对实验的建议、体会等.

(8) 思考题解答.

(9) 原始数据. 实验过程中记录的实验数据.

上述(1)(2)(3), 学生要在预习阶段完成, (4)(9)在实验操作阶段完成, 其余的(5)(6)(7)(8)在实验后完成. 完成实验报告后, 学生在规定的时间内将实验报告交给教师批阅.

测量误差、不确定度及数据处理

§ 1.1 测量的定义与基础知识

1.1.1 测量

1. 测量的定义

测量就是将待测物理量与选做计量标准的同类已知物理量进行比较,得出其倍数的过程. 倍数称为待测物理量的数值,选做计量标准的已知量称为单位. 因此,一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成,两者缺一不可.

2. 测量结果

测量结果,即由测量所得到的赋予被测量的值. 这里的“赋予”两字,指明了测量结果不是“真值”(被测量的真实值),而只是对真值的一个估计结果. 对于直接测量来说,如果只做了单次测量,则此测量值可作为测量结果;如果对同一物理量做了多次重复性测量,得到多个观测值,则取其多次测量值的算术平均值作为测量结果.

1.1.2 物理量的单位

按照中华人民共和国计量法规定,物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的,其中长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度是基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,称为导出单位.

1.1.3 测量的分类

测量的分类标准很多,本教材只介绍一种按测量值的获取方法进行的分类:直接测量和间接测量.

1. 直接测量

直接测量,即无需对被测量与其他量值进行函数关系的辅助计算,而直接得到被测量量值的测量. 如用卷尺量桌子长度、用电流表测量线路中的电流等,相应的长度与电流称为直接测量量. 直接测量按测量次数分为单次测量和多次测量.

单次测量:只测量一次的测量称为单次测量,主要用于测量精度要求不高、测量比较困难

或测量过程带来的误差远远大于仪器误差的测量中,如在测杨氏弹性模量实验中,测钢丝长度就用的是单次测量。

多次测量:测量次数超过一次的测量称为多次测量。多次测量按测量条件,主要分为等精度测量和非等精度测量。

2. 间接测量

已知被测量与直接测量法测得的其他量值之间的函数关系,通过计算间接得到被测量值的测量称做间接测量,如在测圆柱体密度的实验中,先测量圆柱体的高度、直径和质量,再利用公式 $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ 计算出圆柱体的密度,像这样的测量就是间接测量。

§ 1.2 误差与不确定度

1.2.1 误差

1. 误差的定义

测量误差是指测得值与被测量的真值之差。若以 x 表示测量结果, x_0 表示真值,则误差可以表示为

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

δ 反映了测量值偏离真值的大小。所有的被测量值在特定的条件下,理论上都有一个对应的客观、实际值存在,我们称之为“理论真值”,简称真值。真值只是一个理想的概念,由于客观实际的局限性,真值是不可知的,我们通过测量只能得到物理量的近似真值,对测量误差的量值范围也只能给予估计,国际上规定用不确定度来表征测量误差可能出现的量值范围。式(1-2-1)定义的误差 δ 又称为绝对误差。

为了比较两个不同的物理量的测量优劣,还需引入相对误差的概念,即

$$E = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% \quad (1-2-2)$$

相对误差也称做百分误差,是一个不带单位的纯数。它既可以评价量值大小不同的同类物理量的测量,也可以评定不同类物理量的测量,判断不同测量的优劣,如测得某圆柱体的长度为 $L = 80.20 \text{ mm}$, 绝对误差为 $\delta_L = 0.08 \text{ mm}$; 直径为 $d = 20.055 \text{ mm}$, 绝对误差为 $\delta_d = 0.005 \text{ mm}$; 质量为 $m = 215.35 \text{ g}$, 绝对误差为 0.05 g 。计算可知质量的相对误差最小,长度的相对误差最大,因此质量的测量优于直径的测量,直径的测量优于长度的测量。

2. 误差的分类

在测量中,存在着诸多的测量误差,这些误差均是由不同的因素造成的。由于成因不同,以致误差的特征也不同。研究误差的一个重要内容就是要掌握各种误差所具有的特征,只有这样,才能有正确的误差处理方法。按照误差的特点与性质,可将测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

(1) 系统误差

在同一条件下(方法、仪器、人员及环境),多次测量同一量值,误差的符号保持不变;或当条件改变时,误差按一定规律变化,这样的误差称为系统误差.系统误差是由固定不变的或按特定规律变化的因素所造成的,这些产生误差的因素是可以掌握的.系统误差的主要来源于测量装置、环境、测量理论或方法、测量人员等方面的因素.

产生系统误差的原因可能是各不相同的,但是他们的共同特点是确定的变化规律,这也使误差的变化具有确定规律性.各系统误差的成因不同,所表现出的规律也不同,因此可以根据其产生原因,采取一定的技术措施如校准仪器,改进实验装置和实验方法,设法消除或减小系统误差;也可以在相同条件下对已知约定真值的标准器具进行多次重复的测量,或者在多次变化的条件下,采取重复测量的方法,设法找出其系统误差的规律,然后对测量结果进行修正.

(2) 随机误差

随机误差又称偶然误差,是指在对同一被测物理量进行多次测量的过程中,误差的绝对值及符号均以不可预知的方式变化,这样的误差称为随机误差.在实验中,即使已经消除了系统误差,但在同一条件下对某物理量进行多次测量时,仍存在差异,误差时大时小,时正时负,呈无规则的起伏,这是因为存在随机误差的缘故.随机误差是由某些偶然的或不确定的因素所引起的,如实验者受到感官的限制,读数会有起伏,或实验环境(温度、湿度、风,电源电压等)无规则的变化,或是测量对象自身的涨落等.这些因素的影响一般是微小、混杂的,也是无法排除的.

随机误差的最主要特征是具有随机性,单次测量的随机误差的绝对值和符号是以不可预测的方式变化的,没有确定的规律;无限次测量,各次测量的随机误差是服从统计规律的.常见的分布规律是:

- ① 比真值大或比真值小的测量值出现的几率相等;
- ② 误差较小的数据比误差较大的数据出现的几率要大得多,同时绝对值很大的误差出现概率趋于零;
- ③ 在多次测量中绝对值相等的正误差或负误差出现的机会是相等的,全部可能的误差总和趋于零.

这就是被称做为正态分布(高斯分布)的一种情况.对于正态分布的随机误差,尽可能进行多次测量,增加测量次数,可以有效地减小随机误差.随机误差也存在其他分布情况,如 t 分布、均匀分布等.

(3) 粗大误差

粗大误差又称为粗差,它是由于实验者使用仪器的方法不正确,粗心大意读错、记错、算错测量数据或试验条件突变等原因造成的.含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,正确的结果中不应包含有过失、错误.在实验测量中要极力避免过失、错误,在数据处理中要尽量剔除坏值.

上述各种误差在一定条件下是可以相互转化的.对某项具体误差,在此条件为系统误差,在另一条件下可能表现为随机误差,反之亦然.例如,一只电表,它的刻度误差在制造时可能是随机的,但用此电表来校准一批其他电表时,该电表的刻度误差就会造成被校准的这一批电表的系统误差.又如,由于电表刻度不准,用它来测量某电源的电压时必然带来系统误差,但如果采用很多只同类电表测量该电压,由于每一只电表的刻度误差有大有小,有正有负,就使得这些测量误差具有随机性.

3. 随机误差的处理

在大学物理实验中,多次独立测量得到数据的随机误差一般可近似看成正态分布.在相同条件下,对某物理量 x 作 n 次独立测量,得到测量列为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-3)$$

可以证明,当系统误差已被消除,测量值的算术平均值最接近被测量的真值.因此,常用测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 表示测量结果,即 $\bar{x}$ 为测量最佳值.

测量值的可靠程度常用标准偏差来估计.标准偏差小,说明多次测量数据分散程度小,测量的精密度就高.满足正态分布的测量列标准偏差由贝塞尔公式定义为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-2-4)$$

由正态分布的特性可知,对于任何一次测量,其结果落在 $[\bar{x} - \sigma_x, \bar{x} + \sigma_x]$ 区间的概率为 0.683;落在 $[\bar{x} - 2\sigma_x, \bar{x} + 2\sigma_x]$ 区间的概率为 0.954;落在 $[\bar{x} - 3\sigma_x, \bar{x} + 3\sigma_x]$ 区间的概率为 0.997. 上述概率称为置信概率,记为 P ,对应的区间称为置信区间.由于测量值落在区间 $[\bar{x} - 3\sigma_x, \bar{x} + 3\sigma_x]$ 以外的可能性很小,所以将 $3\sigma_x$ 称为极限误差,可作为粗差的判据.当测量值与平均值 $\bar{x}$ 的差超过 $3\sigma_x$ 时为粗差,数据处理时应予剔除.在物理实验中,置信概率一般取 0.95.

在实际工作中,人们关心的往往不是测量列的数据散布特性,而是测量结果即算术平均值 $\bar{x}$ 对真值的离散程度.误差理论可以证明,平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-2-5)$$

其意义为待测物理量的真值落在 $[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + \sigma_{\bar{x}}]$ 区间的置信概率为 0.683,落在 $[\bar{x} - 2\sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + 2\sigma_{\bar{x}}]$ 区间的置信概率为 0.954,落在 $[\bar{x} - 3\sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + 3\sigma_{\bar{x}}]$ 区间的置信概率为 0.997.

式(1-2-5)是在测量次数 n 很大,数据分布可视为在正态分布的条件求得的.在物理实验教学中,测量次数往往较少(一般 $n < 10$),在这种情况下,测量结果呈 t 分布.设在正态分布的情况下,置信概率 P 对应的置信区间为 $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$,则对于 t 分布,相同的置信概率 P 对应的置信区间为 $[\bar{x} - t_{P\sigma}/\sqrt{n}, \bar{x} + t_{P\sigma}/\sqrt{n}]$.因子 t_P 与测量次数和置信概率有关,其值可通过查表得到.表 1-2-1 给出了置信概率 $P = 0.95$ 时,因子 $t_{0.95}$ 和 $t_{0.95}/\sqrt{n}$ 与不同测量次数 n 的关系.

表 1-2-1 不同测量次数 n 时 $t_{0.95}$ 和 $t_{0.95}/\sqrt{n}$ 的数值

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
$t_{0.95}$	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09
$t_{0.95}/\sqrt{n}$	2.48	1.59	1.20	1.05	0.926	0.834	0.770	0.715	0.553	0.467

4. 测量精度

精度是测量结果与真值接近的程度,与误差的大小相对应.精度可分为:

- (1) 准确度,是指一组测量的最佳值偏离真值的程度,反映了测量系统误差的大小;
- (2) 精密度,是指一组测量数据本身的离散程度,反映了测量随机误差的大小;
- (3) 精确度,是指一组测量数据偏离真值的离散程度,反映了测量的系统误差和随机误差的综合影响。

在科学实验中,我们希望得到精确度高的结果,即准确度和精密度都高.而对于具体的测量,精密高的,准确度不一定高;准确度高的,精密度也不一定高.有人认为:重复性好的测量就是准确度高的测量.其实并不一定,因为重复性好,仅指测量结果精密度高,即测量的随机误差小.而测量结果的好坏还取决于准确度的高低,即系统误差的大小.用同一台测量仪器对同一被测物理量进行多次重复测量,仅能确定其量值的分布性和重复性,而不能断定它的准确性。

1.2.2 不确定度

1. 不确定度的基本概念

测量的目的是为了得到被测量的真值,但由于客观实际的局限性,真值不是准确可知的.测量结果只能得到一个真值的近似估计值和一个用于表示近似程度的误差范围,导致测量结果不能定量给出,具有不确定性.为了确切表征实验测量结果,我们引入了不确定度的概念,作为实验测量结果接近真实情况的量度.不确定度表征了测量结果的分散性和测量值可依赖程度,也表明了真值出现的范围.在测量方法正确的前提下,不确定度越小,测量结果就越可靠;不确定度越大,测量的可靠程度就越差。

需要注意的是,测量结果不确定度与测量误差是两个不同的概念,两者既有区别又有联系,不能混淆,也不能相互取代.测量误差是被测量的真值与所引用的测量结果之差,由于真值是未知的,因此误差是无法精确计量的.测量的不确定度则表示由于测量误差的存在,被测量值不能确定的程度,它是未知的误差数值的可能范围,是一种估计值,是用来表述一种客观存在的可能性.在实际工作中,遇到的几乎都是不确定度的问题。

根据国际计量局(BIPM)于1980年建议并推广的用不确定度来表述测量结果可信赖程度的方法[(INC-1)1980],我国计量部门也相继制定了一系列与其相符的规范,其范围几乎覆盖了计量系统的各个领域,这些规范中一般都采用了不确定度表示体系。

本书根据实际教学和实验的需要介绍不确定度的一种简化方案——以标准偏差表示的测量不确定度估计值,即标准不确定度。

2. 标准不确定度的两类评定

测量不确定度来源于多个因素,因而它由多个分量组成.其中,一些分量可由一系列在同一条件下多次测量的结果统计分析评定,称为A类不确定度,记为 u_A ;另一些分量由非统计分析的方法评定,称为B类不确定度,记为 u_B 。

(1) A类不确定度 u_A

在相同的条件下,对某物理量 x 作 n 次独立测量,得到测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$,其A类不确定度为

$$u_A = t_P \cdot \sigma_{\bar{x}} = \frac{t_P}{\sqrt{n}} \cdot \sigma_x \quad (1-2-6)$$

其中 $t_P/\sqrt{n}$ 的取值见表1-2-1.当置信概率 $P = 0.95$, $n = 6$ 或 7 时, $t_{0.95}/\sqrt{n} \approx 1$,则A类

不确定度可近似地直接取标准偏差 σ_x 的值,即

$$u_A = \sigma_x \quad (1-2-7)$$

(2) B类不确定度

在进行不确定度 B 类评定时,应考虑到影响测量准确度的各种可能因素,因此 u_B 通常是由多项合成的, u_B 的估计也是测量不准确度估算中的难点. 在大学物理实验中,我们采用了简化方案,产生 B 类不确定度的因素主要考虑仪器误差, u_B 可简化为用仪器的最大允许误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示,即

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{c} \quad (1-2-8)$$

c 为称为置信因子,当置信概率 P 取 0.95 时, $c = 1.05 \approx 1$, 因此

$$u_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (1-2-9)$$

所谓最大允许误差,是指对给定的测量仪器,其有关规范、规程允许的误差极限值,以 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示. 仪器的型号不同,其最大允许误差也不同. 有些仪器可以通过查询国家计量检定规程而得到的,如卡尺、千分尺、天平等. 有些仪器可以在其铭牌和使用说明书中查到. 还有些仪器,在铭牌上给出了准确度等级,它可以换算成 $\Delta_{\text{仪}}$. 表 1-2-2 给出常用仪器的最大允许误差.

表 1-2-2 常用实验仪器的最大允许误差 $\Delta_{\text{仪}}$

仪器名称	量 程	最小分度值	最大允差
钢板尺	150 mm	1 mm	± 0.10 mm
	500 mm	1 mm	± 0.15 mm
	1000 mm	1 mm	± 0.20 mm
钢卷尺	1 m	1 mm	± 0.8 mm
	2 m	1 mm	± 1.2 mm
游标卡尺	125 mm	0.02 mm	± 0.02 mm
		0.05 mm	± 0.05 mm
螺旋测微计(千分尺)	0~25 mm	0.01 mm	± 0.004 mm
七级天平(物理天平)	500 g	0.05 g	0.08 g(接近满量程) 0.06 g(1/2 量程附近) 0.04 g(1/3 量程附近)
三级天平(分析天平)	200 g	0.1 mg	1.3 mg(接近满量程) 1.0 mg(1/2 量程附近) 0.7 mg(1/3 量程附近)
普通温度计(水银或有机溶剂)	0℃~100℃	1℃	$\pm 1^\circ\text{C}$
精密温度计(水银)	0℃~100℃	0.1℃	$\pm 0.2^\circ\text{C}$