

普通高等教育“十三五”规划教材

21世纪高等学校规划教材

大学物理实验

陈庆东 甄志强 主 编

巩晓阳 汤正新 副主编



21st Century University
Planned Textbooks



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

21世纪高等学校规划教材

大学物理实验

陈庆东 甄志强 主 编

巩晓阳 汤正新 副主编

21st Century University
Planned Textbooks

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 陈庆东, 甄志强主编. — 北京 :
人民邮电出版社, 2018. 1
21世纪高等学校规划教材
ISBN 978-7-115-45824-7

I. ①大… II. ①陈… ②甄… III. ①物理学—实验
—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第202859号

内 容 提 要

本书是按照教育部高等学校物理基础课程教学指导委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》, 借鉴国内物理实验教学内容和课程体系改革与研究的成果, 结合作者多年的物理实验及教学经验编写而成。

全书共 5 章, 内容包括测量不确定度与实验数据处理, 物理实验基本仪器和基本操作规则, 基础物理实验, 综合与设计性实验, 研究与提高性实验。本书在内容安排上由浅入深、循序渐进, 使学生逐步学会从选题、选配实验器材到独立进行实验设计、开展具有研究性内容的实验工作, 培养学生的独立实验能力、实验设计能力和研究创新能力。

本书可作为高等学校理、工、农、医等各专业的物理实验教学用书, 也可供夜大、函授等成人高等教育物理实验参考使用。

-
- ◆ 主 编 陈庆东 甄志强
 - 副 主 编 巩晓阳 汤正新
 - 责任编辑 张 斌
 - 责任印制 沈 蓉 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19 2018 年 1 月第 1 版
字数: 452 千字 2018 年 1 月北京第 1 次印刷
-

定价: 49.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前言 Foreword

本书是按照教育部高等学校物理基础课程教学指导委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，借鉴国内物理实验教学内容 and 课程体系改革与研究的成果，结合河南科技大学多种学科门类的特点，在原有物理实验教材的基础上，融入了物理教师多年的实验教学研究成果编写而成的。

本书具有以下特点。

(1) 教学体系有所创新。根据当前实验教学发展的趋势，建立了新的课程体系，力求系统地反映出当前主流的实验理论、技术与方法，注重实验教学内容与课程体系的层次化、模块化相结合。同时，为培养学生的创新精神和科研能力，在综合性、设计性实验部分增添了许多新的实验内容，充分体现分类指导、因材施教的原则，更加有利于学生跨学科思维能力和创新能力的培养。

(2) 编写上注重循序渐进。基础性实验和综合与提高实验提供了较为详尽的实验原理、实验器材、实验内容以及实验过程中可能遇到的问题等方面的信息，以使学生在课前充分预习和认真思考，实现课堂上的自主实验，培养实验操作技能。设计性实验则只给出实验内容要求、实验器材和部分原理提示，要求由学生设计实验方案、选择实验器材，来实现实验任务和目标，以培养学生的研究意识和创新能力。

(3) 内容上加入微课，教学形式更多样。微课不但能满足学生的个性化学习需求，还能帮助学生查缺补漏、强化巩固知识，而且能让学生随时随地进行学习，是传统课堂学习的重要补充和资源拓展。本书相关配套资源也可登录人邮教育社区网站(www.ryjiaoyu.com)下载。

大学物理实验作为一门基础实验课程，它覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法和手段，能够逐步培养学生动手能力、思维能力和科学创新能力，也是学生学习后续实验课程的基础。

物理实验教学是一门体现集体智慧和劳动结晶的工作，无论是教材的编写还是实验项目的设置，都凝聚了全体任课教师和实验技术人员的辛勤劳动。

本书由陈庆东、甄志强担任主编,巩晓阳、汤正新担任副主编。本书编写具体分工如下:陈庆东(绪论,第1章,实验3-4、3-5、3-13)、甄志强(第2章,实验4-2、4-5、4-10、4-11、4-12、4-16、4-22、4-25、4-26)、巩晓阳(实验3-6、4-3、4-18、4-19)、汤正新(实验3-9、3-10、3-11)、刘香茹(实验3-2、4-15、4-24)、杜凯(实验3-1、3-3、3-7、4-1、4-4、4-6、4-7、4-8、4-9、4-13、4-17、4-21)、郝世明(实验4-20、4-23、4-27、5-1、5-2、5-4、5-6、5-9、5-10)、周锋子(实验3-8、3-12、3-14、4-14、5-3、5-7、5-11、5-12、5-13、5-14、5-15)、李秋泽(实验5-5、5-8、5-16、5-17、附录)。

本书在编写过程中,参考了许多兄弟院校的教材,吸收了国内外物理实验教学的改革经验;本书的出版得到河南科技大学物理工程学院和教务处的大力支持,在此向他们表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者
2017年8月

目 录 Contents

绪 论

1

第 1 章 测量不确定度与实验数据处理

4

1-1 测量与误差 /4

1-2 误差处理 /6

1-3 测量不确定度与测量结果表示 /10

1-4 有效数字及其运算 /15

1-5 数据处理的基本方法 /18

习 题 /21

第 2 章 物理实验基本仪器和基本操作规则

23

2-1 力学基本仪器 /24

2-2 电学基本仪器 /28

2-3 光学基本仪器 /34

2-4 物理实验基本测量方法 /36

第 3 章 基础物理实验

41

实验 3-1 固体密度的测量 /41

实验 3-2 利用气垫导轨验证牛顿第二定律 /43

实验 3-3 简谐振动的研究 /49

实验 3-4 杨氏模量的测量 /53

实验 3-5 切变模量的测量 /56

实验 3-6 测量冰的熔化热 /60

实验 3-7 用沉降法测蓖麻油的黏度 /63

实验 3-8 电子元件伏安特性实验 /66

实验 3-9 示波器的工作原理与使用 /69

实验 3-10 直流电桥测电阻 /75

实验 3-11 薄透镜焦距的测量 /80

实验 3-12 万用表的使用 /84

实验 3-13 三线扭摆法测刚体的转动惯量 /84

实验 3-14 用旋光仪测定糖溶液的浓度 /87

第4章 综合与设计性实验**88**

- 实验 4-1 声速的测量 /88
- 实验 4-2 液体比热容的测量 /92
- 实验 4-3 固体线膨胀系数的测量 /97
- 实验 4-4 直流电位差计的使用 /100
- 实验 4-5 液体表面张力系数的测定 /103
- 实验 4-6 用模拟法测绘静电场 /106
- 实验 4-7 用霍尔元件测磁场 /112
- 实验 4-8 直流电表的改装与校准 /115
- 实验 4-9 铁磁材料的磁滞回线研究 /118
- 实验 4-10 等厚干涉及其应用 /124
- 实验 4-11 分光计的调整和三棱镜折射率的测定 /128
- 实验 4-12 光栅衍射 /136
- 实验 4-13 单缝衍射实验 /139
- 实验 4-14 双棱镜干涉实验 /141
- 实验 4-15 迈克耳孙干涉仪的调整和使用 /145
- 实验 4-16 设计组装望远镜 /152
- 实验 4-17 密立根油滴实验 /155
- 实验 4-18 用开尔文电桥测低电阻 /159
- 实验 4-19 空气比热容比的测量 /164
- 实验 4-20 氢原子光谱的观察与测定 /164
- 实验 4-21 磁悬浮实验 /168
- 实验 4-22 偏振光的观察与研究 /170
- 实验 4-23 碰撞打靶实验 /174
- 实验 4-24 用气垫导轨验证动量守恒定律 /176
- 实验 4-25 重力加速度的测定 /178
- 实验 4-26 测量空气的折射率 /180

实验 4-27 灵敏电流计特性研究 /180

第5章 研究与提高性实验**185**

- 实验 5-1 光电效应实验 /185
- 实验 5-2 电子和场系列实验 /191
- 实验 5-3 用光学多道分析仪测钠原子光谱 /197
- 实验 5-4 全息照相 /200
- 实验 5-5 制作全息光栅 /208
- 实验 5-6 弗兰克-赫兹实验 /212
- 实验 5-7 用光栅光谱仪测量未知光源的光谱特性 /217
- 实验 5-8 电子顺磁共振 /224
- 实验 5-9 微波光学实验 /231
- 实验 5-10 塞曼效应 /235
- 实验 5-11 光泵磁共振实验 /244
- 实验 5-12 利用调制光波测光速 /253
- 实验 5-13 空间滤波与 θ 调制 /258
- 实验 5-14 脉冲核磁共振实验 /265
- 实验 5-15 测量激光远场发散角 /273
- 实验 5-16 固体激光器倍频、调 Q 实验 /277
- 实验 5-17 光纤传感器综合实验 /282

附 录**289**

- 附录 A 中华人民共和国法定计量单位 /289
- 附录 B 常用物理数据 /291
- 附录 C 常用电气测量指示仪表和附件的符号 /297

参考文献**298**

绪 论

一、物理实验课程的地位、作用与任务

物理学是研究物质结构、性质和变化基本规律的学科。它的研究涉及物质运动的普遍形式,包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内的运动等。物理学是自然科学的基础,也是当代工程技术的重大支柱。物理学有助于技术的基本建设,有助于扩展和提高人们对其他学科的理解。物理学也提供了应用于其他学科新设备和新技术所需的基本知识。

科学的理论来源于科学的实验并受到实验的检验,当然实验也离不开理论的指导。作为自然科学基础的物理学在本质上是一门实验学科。从物理学的发展历史看,物理规律的发现和物理理论的建立都必须以物理实验为基础,物理学中的每一项突破都与实验密切相关。麦克斯韦总结前人的实验结果和理论,归纳出完整的电磁场理论,并预言了电磁波的存在;但直到 1887 年,赫兹完成了电磁波的发射和接收实验后,这一深深影响当代生活的理论才由假设得到最终确立。科学技术的进步离不开物理学理论和实验。作为科技工作者,物理知识和实验技能的掌握必不可少。

大学物理实验是理、工、农、医科学生必修的一门基础课程,是学生进入大学后较早接触的一门实验学科。它将使学生受到系统的物理实验方法和实验技能的训练,并了解科学实验的主要过程和基本方法,为今后的科学实验活动奠定基础。同时,物理实验把理论与实际,方法与技能结合起来,促使学生既动手又动脑,在实践中学习,培养创新精神和科学实验能力。整个教学活动的进行将有助于学生的知识、能力和素质的培养与提高。通过物理实验,至少使学生具有以下几方面的能力:①通过具体实验,学习实验的基本方法和一定的操作技能;②通过阅读教材和资料,做好实验前的准备,能概括出实验原理和设计要点;③学会正确使用常用仪器;④正确记录和处理实验数据,分析实验结果,撰写实验报告;⑤能完成简单设计性实验,从具体实验中,体会每个实验的基本设计思想、实验手段和实验方法。

基于物理实验的重要性,物理实验应得到更普遍的重视。很多高校都把物理实验从大学物理课程里分离出来,单独设立为一门基础课,而且也加大了实验方面人力、财力的投入,很多综合性大学都建立了物理实验教学中心。物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位,而且在推动其他自然科学、工程技术的发展中也起着重要作用。特别在不少交叉学科中,物理试验的构思、方法和技术与化学、生物学、天文学等学科的相互结合已取得丰硕的成果。

二、物理实验课程的目的和要求

经过长期的发展和完善,实验物理已形成自己独立的内容体系。学生通过物理实验课的学习,将学到很多物理理论课上不能学到的实验知识、方法和技能。学生通过独立完成一定数量的实验,能学

习到物理实验的一般规律,掌握物理实验的基本知识、基本技能和基本方法。通过基础物理实验课的学习,学生将会培养起良好的实验习惯、严谨的科学作风和辩证唯物主义的世界观。

为了实现上述教学目的,主要的课程内容如下。

(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,提高对科学实验重要性的认识。

(2)培养与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,作好实验前的准备。

② 能够借助教材或仪器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,绘制实验曲线,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。

⑥ 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,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

三、物理实验课程的三个主要教学环节

1. 实验前的预习

为了在规定的时间内保质保量地完成实验内容,学生在实验前必须做好预习工作。实验教材是实验的指导参考,它对每一个实验的目的、要求、原理都作了明确的阐述,因此,在上实验课前必须认真阅读。另外,还需查阅有关参考资料,对实验中涉及的仪器在预习时就需认真阅读仪器介绍,弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项等。特别是注意事项,不仅要看,还要牢记,否则会造成仪器损坏,甚至人身事故。对仪器的构造,应尽可能地去理解、去想象,必要时还需要去实验室观察实物。

实验前,应清楚本次实验要达到什么目的,通过什么实验方法和测量哪些数据才能实现实验的目的。

写出预习报告。预习报告主要包括:①实验名称;②实验目的;③实验器材;④原理简图(电路图或光路图);⑤列出记录数据表格(分清已知量、指定量、待测量和单位)。预习报告应用统一印制的实验报告纸书写。

未完成预习和预习报告者,教师有权停止其实验或成绩降档!

在条件允许的情况下,课外开放实验室,使学生能对照仪器仔细阅读有关资料,或学生通过校园网的实验中心网络平台,进一步熟悉仪器使用方法和理解实验原理,以便能更加主动地、独立地做好实验。

2. 课堂实验

实验时应严格遵守实验室的规章制度。在实验正式进行前,首先结合仪器实物,对照实验教材或仪器说明书,认识和熟悉仪器的结构和使用方法;其次要全面考虑实验的操作程序,怎样做更为合理,不要急于动手。因为对于操作程序中某些关键步骤而言,哪怕是很小的错误,都有可能使实验前功尽弃。

实验测量应遵循“先定性、后定量”的原则。即先定性地观察实验全过程,确认整个实验装置工作

是否正常,对所测内容要做到心中有数。在可能的情况下,对数据的数量级和趋势做出估计后,再定量地读取和记录测量数据。测量时,观测者应集中精力,细心操作,仔细观察,并积极发挥主观能动性,以获得所用仪器可能达到的最佳效果。

实验操作时应做到:①遵守实验室规则;②了解实验仪器的使用及注意事项;③正式测量之前可做试验性探索操作;④仔细观察和认真分析实验现象;⑤如实记录实验数据和现象。

实验完毕,应将所测得的数据交给教师审阅。经教师认可后,再记下实验实际所用的仪器名称、型号、规格和编号等,细心收拾仪器,保持实验台整洁,保证不留事故隐患,然后才能离开实验室。

3. 撰写实验报告

书写实验报告的目的是为了培养学生以书面形式总结工作和报告科学成果的能力,所以必须充分反映自己的工作收获和结果,反映自己的能力水平。实验报告要有自己的特色,要有条理性,并注意运用科学术语,一定要有实验的结论和对实验结果的讨论、分析或评估。

实验报告内容包括:①实验名称;②实验目的;③实验器材;④原理简述(原理图、电路图或光路图,以及主要计算公式等);⑤实验数据表格、数据处理计算主要过程、作图及实验结论;⑥实验现象分析、误差评估、小结和讨论。

实验报告必须在下一次实验时交教师批阅!

实验报告要求文字通顺,字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确。对于实验原理应在理解教材内容的基础上用自己的语言来阐述,做到简明扼要。实验步骤只要写出关键性的仪器调整方法和测量技巧,一般不要完全照抄教材中的内容。原始测量数据一般要求以列表形式出现。数据处理要写出数据计算的主要过程、图表最后结果的误差分析,对实验结果的讨论,要具体深入、有分析、有见解,不要泛泛而谈,其内容一般不受限制,可以是对观察到的实验现象进行分析,对结论和误差原因进行分析,也可以对实验方案提出改进意见。

第1章

测量不确定度与实验数据处理

1-1

测量与误差

一、测量

对物理量进行测量是物理实验的重要任务之一。测量就是将待测物体的某物理量与相应的标准作定量比较。测量的结果应包括数值(即比较所得的倍数)、单位(即所选标准的物理量)以及结果可信赖的程度(用不确定度表示)。

在科学实验中会遇到各种类型的测量,从不同角度可以对测量分类:根据测量方法可分为直接测量和间接测量;根据测量条件可分为等精度测量和非等精度测量;根据测量次数可分为单次测量和多次测量。

直接测量是指直接由仪器标尺(刻度)读数而得到被测量值的测量。例如,用米尺测量物体的长度,用秒表测量时间,用天平称量物体的质量以及用电流表测电流等,都是直接测量。

间接测量是指按一定的函数关系,由一个或多个直接测量量经过计算得到测量结果的测量。例如,用米尺测量得到的长度就是直接测量量,而通过测量单摆的摆长 l 和周期 T ,根据公式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 计算得到的重力加速度 g 就是间接测量量。一个物理量是直接测量量还是间接测量量并不是绝对的,而是与测量方法有关。如果我们通过测量电流和电压算出某元件的电功率,这时电功率就是间接测量量;如果我们用功率表来测量电功率就变成了直接测量量。无可置疑的是,随着科学技术的发展,越来越多的物理量将有可能成为直接测量量。

在多次测量过程中,影响测量结果的各种条件和参数不发生改变,测量叫作等精度测量;反之,称为非等精度测量。例如,在相同的环境里,由同一个实验者在同一台仪器上,采用同样的方法和参数,对同一个物理量进行多次重复测量就是等精度测量。我们没有任何理由认为某次测量比其他的测量更准确,只能认为每次测量的精确程度都是相同的。反之,如果在不同的环境中,或由不同的人员,或不同的方法,或使用不同的参数进行的测量,即测量条件在多次测量过程中有所改变,这样的测量就是非等精度测量。

二、误差

测量的目的就是得到了被测物理量所具有的客观真实值(简称真值)。但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,我们只能获得该物理量的近似值。任何一个被测量的测量值 x 与真值 x_0 之间一般会存在一定的差值,这个差值称为测量误差,又称绝对误差,用 δ 表示,即

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

注意:绝对误差不同于误差的绝对值,它可正可负。当 δ 为正时,称为正误差,反之则为负误差。因此,由式(1-1-1)定义的误差,不仅反映了测量值偏离真值的大小,也反映了偏离的方向。

绝对误差与真值之比称为相对误差,相对误差 E 常用百分数表示,即

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

应该指出:被测量的真值 x_0 是一个理想概念,一般来说是无法知道的。因此,绝对误差和相对误差一般不能准确求得。在实际测量中,常用理论值、国际计量大会通过的公认值或高一级别的“标准”仪器的测量值来代替真值。

三、误差分类

为了便于对误差做出估算并研究减小误差的方法,有必要对误差适当分类。根据误差的性质和来源不同,将测量误差分为三类。

1. 系统误差

在相同条件下对同一物理量进行多次测量,误差始终保持恒定或按一定规律发生变化,这种误差称为系统误差。系统误差的特征是具有确定性,它主要来源于以下几个方面。

(1) 仪器因素

由于仪器本身的固有缺陷而引起的误差。如仪器的刻度不准确,仪器零点没有校准,等臂天平的臂长不相等。

(2) 理论或方法因素

由于理论公式本身的近似而引起的误差。如用单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 测重力加速度,公式成立的条件是摆角趋近于零,而实际测量中摆角不可能趋于零。

(3) 环境因素

由于外界环境因素引起的误差。如在 20°C 下标定的标准电阻、标准电池在温度较高或较低的场所使用等。

(4) 个人因素

由于实验者个人的不良习惯而引起的误差。如有的人在读取指针式仪表的读数时习惯性地将头偏向左侧或偏向右侧,致使读数偏大或偏小;按秒表时,习惯早按或迟按等。

2. 随机误差

在相同条件下,多次测量同一个物理量时,即使排除了系统误差的影响,也会发现每次测量结果都不一样,测量误差时大时小、时正时负,完全是随机的。在测量次数少时,显得毫无规律,但是当测量次数足够多时,误差的大小以及正负都服从统计规律。这种误差称为随机误差。随机误差的特征是具有随机性,由测量过程中的一些随机的或不确定的因素引起。

3. 粗大误差

根据测量的客观条件无法给出合理解释的个别过大的误差称为粗大误差,又称过失误差。粗大误差的出现和实验者的技术水平、精神状态等有关,也有可能和客观条件的一次性突然变化有关。粗

大误差会明显地歪曲实验结果,一旦发现并确认,必须予以剔除,但要慎重处理,舍弃的数据在实验报告中必须注明原因。

四、精密度、准确度和精确度

评定测量结果的好坏常用到精密度、准确度和精确度三个概念。

1. 精密度

精密度表示在多次等精度测量时各测量值相互接近的程度。精密度高是指多次测量结果比较集中一致,随机误差小,但系统误差不明确。

2. 准确度

准确度表示测量结果的平均值与真值接近的程度。准确度高是指多次测量的平均值偏离真值小,即系统误差小,但随机误差的大小不明确。

3. 精确度

精确度是对测量结果的精密度与准确度的综合评定。精确度高是指测量数值集中在真值附近,测量结果既精密又准确,即测量的随机误差和系统误差均小。

下面以射击打靶的弹着点分布为例,形象地说明三者的意义和区别,如图 1-1-1 所示。

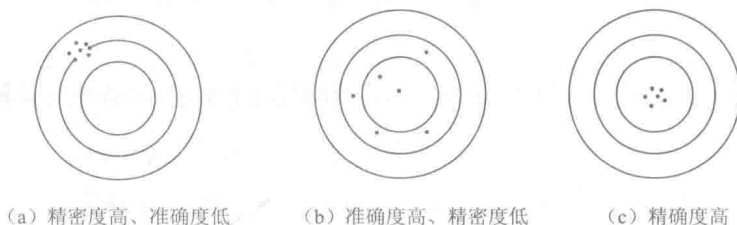


图 1-1-1 精密度、准确度、精确度示意图

1-2

误差处理

一、系统误差的处理

在许多情况下,系统误差是影响测量结果准确度的主要因素,然而它又常常不明显地表现出来。当它被忽略时,有时会给实验结果带来严重影响。

1. 发现系统误差的方法

要发现系统误差,需要对整个实验依据的原理、实验方法、测量步骤、所用仪器以及实验者等可能引起系统误差的因素进行分析。这要求实验者既要有坚实的理论基础,又要有丰富的实践经验。查找系统误差的几种常用方法如下。

(1) 实验对比法

① 实验方法对比。用不同方法测同一个量,看结果是否一致。

② 实验仪器对比。用型号相同的仪器替代实验中所用仪器,如结果不一致,则说明至少有一个存在系统误差。

③ 测量方法对比。如用天平称衡时,分别将待测物放在天平的左盘和右盘(即复称法)对比测量结果,可以发现天平是否存在两臂不等长而带来的误差。

④ 实验参数对比。如在气垫导轨实验中,有意识地增大和减小滑块速度,二者对比可发现空气阻力和黏滞阻力对测量结果的影响。

⑤ 实验条件对比。在不同的温度、压力、湿度、电磁场等环境下做对比实验,看看结果是否一致。

(2) 理论分析法

分析实验依据的理论公式所要求的条件是否与实际情况相符。分析仪器所要求的条件是否得到满足。

(3) 数据分析法

当测量数据明显不服从统计分布规律时,说明存在系统误差。此时可将测量数据依次排列,如偏差(即测量值与平均值之差)的大小有规则地向一个方向变化,则测量中存在线性系统误差,如偏差的符号有规律地交替变化,则测量中存在周期性系统误差。

2. 系统误差的消除或修正

消除和修正系统误差是一件复杂而困难的事情,一般没有固定不变的方法,需要具体问题具体分析。常用的方法如下。

(1) 从原理入手消除系统误差

采用更加符合实际的理论公式。如单摆周期公式通常为 $T=2\pi\sqrt{l/g}$,若考虑摆角 θ 的影响,则周期公式应为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left(1+\frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta}{2}+\frac{9}{64}\sin^4\frac{\theta}{2}+\dots\right)$$

(2) 从测量仪器入手消除系统误差

① 消除仪器的零误差。对游标卡尺、螺旋测微计以及指针式仪表等,在使用前应先记录下零误差,以便对测量结果加以修正。

② 校准仪器。用高级别的仪器校准一般仪器,得出修正值或校准曲线。

③ 规范使用实验仪器。

(3) 从实验方法入手消除系统误差

采用合适的测量方法可消除或抵消系统误差,常用的方法有交换法、替代法、反方向测量法、补偿法等。

① 交换法。在测量过程中对某些条件(如被测物与参考物的位置)进行交换再次测量。例如用天平测质量时,把被测物和砝码交换进行测量,设两次测得的质量分别为 m_1 、 m_2 ,取物体的质量 $m=\sqrt{m_1 m_2}$,即可消除天平不等臂产生的系统误差。

② 替代法。在测量条件不变的情况下,选择一个已知的标准量替代被测量,而不引起测量仪器指示值的改变,于是被测量就等于这个已知量。由于在两次测量中,测量仪器的状态和示值都相同,

从而消除了系统误差。如用电桥测量电阻,先接入被测电阻使电桥平衡,再用标准电阻替代被测电阻,调整标准电阻使电桥仍然平衡,则被测值等于标准电阻值等。

③ 反方向测量法(异号法)。改变测量条件使两次测量系统误差的符号相反从而在求平均时被抵消。如用霍尔元件测磁场实验中,分别改变磁场和工作电流的方向测量,可以减小或消除系统误差等。

④ 补偿法(示零法)。在测量过程中,使被测量的作用效果与已知量的作用效果互相抵消,总的效应为零。如用电位差计测电阻、测电动势等。

总之,要减小或消除系统误差的影响,首先是设法不让它产生,如果做不到,就应修正它,或者通过采取合适的测量方法,设法抵消它的影响。

二、随机误差及其分布

实验中随机误差不可避免,也不可能消除。但是可以根据随机误差理论来估计其大小。为简单起见,下面的讨论中,均认为系统误差已被消除或者系统误差已减小到可以忽略的程度。

1. 随机误差的正态分布规律

在相同条件下对一个物理量进行多次测量时(测量次数趋于无穷),随机误差或测量值的分布服从一定的统计规律性。在大多数物理实验中,随机误差服从正态分布,又称高斯(Gauss)分布,如图 1-2-1 所示。图中横坐标 $\delta = x - x_0$, 表示随机误差;纵坐标 $f(\delta)$ 是误差概率密度分布函数。

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left[-\frac{(\delta)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-2-1)$$

$f(\delta)$ 表示测量误差出现在 δ 附近单位误差范围内的概率;曲线下阴影包含的面积元 $f(\delta)d\delta$ 就是误差出现在 δ 和 $\delta+d\delta$ 区间内的概率。显然,误差 δ 出现在 $(-\infty, +\infty)$ 范围内的概率为 100%, 所以

$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta)d\delta = 1$, 即曲线与横轴所包围的面积恒等于 1。

式中 σ 是衡量测量值离散程度的量,即表示测量精密度的参数,称为标准误差。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (1-2-2)$$

标准误差 σ 越大,峰值越小,曲线越平坦,表示数据离散度大,测量精密度低;反之,标准误差 σ 越小,峰值越大,曲线越尖锐,表示数据离散度小,测量精密度高,如图 1-2-2 所示。

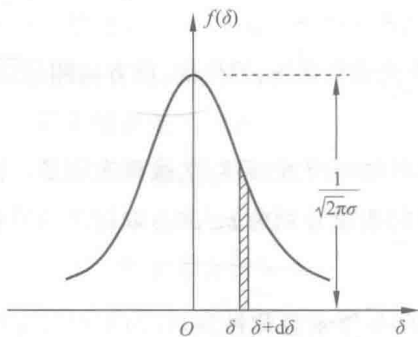


图 1-2-1 随机误差的分布

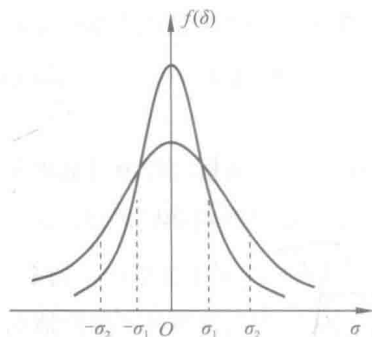


图 1-2-2 σ 的大小反映测量数据的离散程度

按照概率理论,误差出现在 $[-\sigma, \sigma]$ 区间的概率

$$p = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683$$

区间 $[-\sigma, \sigma]$ 称为置信区间, p 称为置信概率。按照同样的方法可算出误差在区间 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 、 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 出现的概率分别为 0.954 和 0.997, 即置信区间越大, 相应的置信概率就越高。

服从正态分布的随机误差具有如下几个特性。

- 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。绝对值相等的正负误差对应的概率密度相同。
- ③ 抵偿性。随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零。
- ④ 有界性。在一定测量条件下, 误差的绝对值一般不超过一定限度, 即很大的正负误差出现的概率趋于零。

在实际测量中, 测量的次数总是有限的, 而且被测量量的真值往往也不知道, 因此, 式(1-2-2)只具有理论意义。

设实验中对物理量 x 进行 n 次等精度的测量, 得到测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。概率理论表明: 当系统误差不存在时, 测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 为被测物理量真值的最佳估计值, 又称近真值。算术平均值 $\bar{x}$ 定义为

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

定义测量列的标准差为

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

式中 $(x_i - \bar{x})$ 称为偏差。 S_x 反映了测量列的离散程度, 其统计意义是指当测量次数足够多时, 测量列中任一测量值与平均值的偏离落在 $[-S_x, S_x]$ 区间的概率为 68.3%。当测量次数趋近于无穷时, $S_x = \sigma$ 。

2. 算术平均值的标准偏差

严格的正态分布只适用于无限多次测量的情况, 而实际的测量总是有限次的, 因而人们关心的往往不是测量列的分布特性, 而是测量结果(即算术平均值 $\bar{x}$)的分布特性。根据概率理论, $\bar{x}$ 亦为统计量, 即: 在相同条件下进行不同的有限次测量(设每个测量列的测量次数均为 n), 其每个测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 也不尽相同, n 足够大时 $\bar{x}$ 服从正态分布。其平均值的标准偏差为

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

当测量次数减小时, 概率密度曲线变得平坦, 称为 t 分布, 也叫学生分布。要保持同样的置信概率, 显然要扩大置信区间, 将 $S_{\bar{x}}$ 乘以一个大于 1 的因子 t , 则测量列平均值的标准偏差为

$$S_{\bar{x}} = t \frac{S_x}{\sqrt{n}} = t \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-2-6)$$

式中, t 值与测量次数 n 有关, 也与置信概率 p 有关。

表 1-2-1 给出不同置信概率下 t 因子与测量次数 n 的关系,供实验时查用。在物理实验教学中,约定取置信概率 $p=68.3\%$ 。

表 1-2-1 t - n 对应值

$\begin{matrix} n \\ t \\ p \end{matrix}$	3	4	5	6	7	8	9	10	20	∞
0.683	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03	1
0.954	4.30	3.18	2.78	2.57	2.46	2.37	2.31	2.26	2.09	1.96
0.997	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.86	2.58

1-3

测量不确定度与测量结果表示

在科学、工程、工农业生产和商业贸易等各个领域都需要提供测量结果及置信度的数据。以往人们习惯于用误差来表示测量结果。由于误差是测量值与真值之差,而真值在大多数情况下是未知的,从而使这种表示方法受到质疑。1993 年,由国际标准化组织(ISO)等 7 个国际组织联名共同发表了《测量不确定度表示指南》(简称《指南》),尔后 ISO 的各成员国广泛执行和应用了该指南,依据现代误差理论测量不确定度来评价测量结果的质量。我国于 1999 年制定了实施国家计量技术规范《测量不确定度评定与表示(JJF 1059—1999)》。本书将以《指南》为基础,结合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。

一、不确定度概念及分类

测量不确定度是与测量结果相关联的参数,用以表征测量值可信赖的程度,它是被测量客观值在某一量值范围内的一个评定。任一测量结果都存在着不确定度。不确定度小,表示测量结果可信赖程度高;反之,不确定度大,测量结果的可信赖程度低。

由于测量方法和误差来源不同,不确定度有不同的种类和不同的确定方法。通常将可以通过统计方法计算的不确定度称为 A 类不确定度,用 u_A 表示;而不能用统计方法估计的不确定度统称为 B 类不确定度,用 u_B 表示。两类不确定度的方和根为总不确定度 u_C 。

1. A 类不确定度 u_A

在相同条件下,对某物理量 x 作 n 次独立测量,测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 在物理实验教学中,我们用 $\bar{x}$ 的标准偏差作为测量的 A 类标准不确定度

$$u_A = t \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{1-3-1}$$

式中, t 与测量次数和置信概率有关,查表 1-2-1 可得。

2. B 类不确定度 u_B

测量中凡是不符合统计规律的不确定度统称为 B 类不确定度。B 类不确定度一般是由产生系统