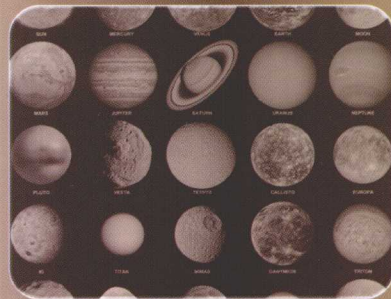
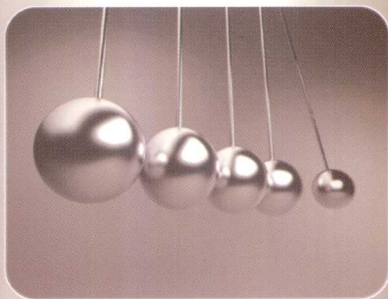
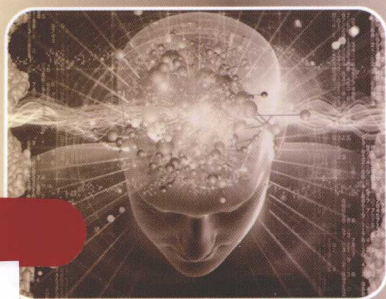




普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验教程

第2版



陈庆东 巩晓阳 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013044120

普通高等教育“十二五”规划教材

04-33
603-2

大学物理实验教程

第2版

主 编 陈庆东 巩晓阳
副主编 汤正新 李新忠



机械工业出版社

04-33/603-2



北航

C1646999

本书按照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),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,结合多年的物理实验及教学经验编写而成。

全书共分5章。第一章为测量的不确定度与测量结果表示,介绍误差分析、测量不确定度及实验数据的处理方法;第二章为物理实验基本仪器和基本操作规则,介绍了常用的物理实验仪器;第三章为基础实验;第四章为综合性提高实验;第五章为设计性实验。本书在内容安排上由浅入深、循序渐进,使学生从逐步学会如何选题、选配实验器材到独立进行实验设计和开展具有研究性内容的实验工作,进而培养学生的独立实验能力、实验设计能力和研究与创新能力。

本书为高等学校理、工、农、医等非物理专业的基础物理实验教学用书,也可作为夜大、函授等成人高等教育的物理实验教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/陈庆东,巩晓阳主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2013.2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-41335-6

I. ①大… II. ①陈…②巩… 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(2013)第020007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:李永联 责任编辑:李永联 陈崇昱

版式设计:张薇 责任校对:樊钟英 肖琳

封面设计:陈沛 责任印制:张楠

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2013年6月第2版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·421千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41335-6

定价:29.80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

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书按照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),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,结合河南科技大学涵盖理、工、农、医等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。

该教材具有以下特点:

1) 教学体系有所创新。根据当前实验教学发展的趋势,打破按力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验分别安排的传统体系,建立三级教学新体系。把实验教学分为基础实验、综合与提高实验和设计性实验,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,以便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和要求、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,自主完成实验任务和目标,从而培养学生的研究意识和创新能力。

3) 在讲授传统误差理论的基础上,以国际权威组织制定的《测量不确定度表示指南》为标准,阐述不确定度的评定,使学生在掌握评定不确定度方法的同时,在计算上进行了一些必要的简化,以适应大学物理实验教学的要求。

本书共分5章;第一章介绍误差分析、测量的不确定度及实验数据的处理方法;第二章介绍常用的物理实验基本仪器;第三至五章为实验项目,从培养学生的基本科学素质和创新能力出发,将基础实验、综合与提高实验和设计性实验各设一章,使学生由浅入深、循序渐进,从逐步学会如何选题、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,进而培养学生的独立实验能力、实验设计能力和研究创新能力。

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开设,都凝结了全体任课教师和实验技术人员的辛勤劳动。教材编写分工具体如下:陈庆东(绪论、第一章、实验3-2、3-3、3-4)、巩晓阳(第二章、实验3-5、3-6、4-5、4-10、4-11、4-12、5-10)、汤正新(实验3-9、3-12、3-13、3-14、4-16、5-8)、李新忠(实验4-14、4-15、4-17、4-18、4-19、4-22、4-29)、刘香菇(实验4-1、4-2、4-20、4-23、4-26、4-27、5-2、5-7)、郝世明(实验4-9、4-21、4-24、4-25、4-28、4-30、4-31、4-32、5-3)、甄志强(实验3-7、4-3、4-13、5-1、5-6、5-9)、魏荣慧(实验3-1、3-8、3-10、3-11、4-4、4-6、4-7、4-8、5-4、5-5)。

在本书的编写过程中参考了许多兄弟院校的教材,同时也吸收了国内外物理实验教学

的改革经验。本书的出版得到了河南科技大学物理与工程学院以及教务处的大力支持，在此向他们表示衷心的感谢！

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

目 录

前言

绪论 1

第一章 测量不确定度与实验数据

处理 4

第一节 测量与误差 4

第二节 误差处理 6

第三节 测量不确定度与测量结果的表示 9

第四节 有效数字及其运算 14

第五节 数据处理的基本方法 16

第二章 物理实验的基本仪器和基本

操作规则 21

第一节 力学基本仪器 22

第二节 电学基本仪器 25

第三节 光学基本仪器 31

第四节 物理实验基本方法 33

第三章 基础实验 37

实验 3-1 固体密度的测量 37

实验 3-2 三线扭摆法测刚体的转动惯量 39

实验 3-3 弹性模量的测量 42

实验 3-4 切变模量的测量 46

实验 3-5 固体线膨胀系数的测量 49

实验 3-6 测量冰的熔解热 52

实验 3-7 液体表面张力系数的测定 56

实验 3-8 蓖麻油的粘度测量 59

实验 3-9 电子元件伏安特性的测定 61

实验 3-10 直流电表的改装与校准 64

实验 3-11 万用表的使用 68

实验 3-12 示波器的工作原理与使用 72

实验 3-13 直流电桥测电阻 78

实验 3-14 薄透镜焦距的测量 82

第四章 综合性提高性实验 86

实验 4-1 利用气垫导轨验证牛顿第二定律 86

实验 4-2 简谐振动的研究 91

实验 4-3 液体比热容的测量 95

实验 4-4 声速的测量 99

实验 4-5 空气比热容比的测量 103

实验 4-6 直流电位差计的使用 109

实验 4-7 用模拟法测绘静电场 112

实验 4-8 用霍尔元件测磁场 117

实验 4-9 灵敏电流计特性研究 120

实验 4-10 用开尔文电桥测低电阻 124

实验 4-11 用冲击电流计测电容 129

实验 4-12 铁磁材料磁滞回线的研究 133

实验 4-13 等厚干涉及其应用 138

实验 4-14 分光计的调整和三棱镜折射率的测定 142

实验 4-15 光栅衍射 149

实验 4-16 单缝衍射光强的研究 152

实验 4-17 双棱镜干涉实验 156

实验 4-18 偏振光的研究 159

实验 4-19 用旋光仪测定糖溶液的浓度 163

实验 4-20 迈克尔逊干涉仪的调整和使用 166

实验 4-21 氢原子光谱的观察与测定 171

实验 4-22 照相与暗室技术 175

实验 4-23 全息照相 180

实验 4-24 密立根油滴实验 187

实验 4-25 弗兰克-赫兹实验 191

实验 4-26 光电效应和普朗克常量的测定 196

实验 4-27 电子自旋共振 202

实验 4-28 微波光学实验 209

实验 4-29 塞曼效应 213

实验 4-30 电子和场实验 221

实验 4-31 利用调制光波测光速 226

实验 4-32 高温超导材料电阻温度特性的测定 231

第五章 设计性实验 237

实验 5-1 重力加速度的测定 237

实验 5-2 用气垫导轨验证动量守恒定律	239
实验 5-3 碰撞打靶实验	240
实验 5-4 多量程电表的设计	242
实验 5-5 磁悬浮现象的研究	244
实验 5-6 设计与组装望远镜	246
实验 5-7 制作全息光栅	248
实验 5-8 用示波器测量电容	251
实验 5-9 用迈克尔逊干涉仪测量空气的折	

射率	252
----------	-----

实验 5-10 电位差计的改进与拓展应用	254
----------------------------	-----

附录	259
----------	-----

附录 A 中华人民共和国法定计量单位	259
--------------------------	-----

附录 B 常用物理数据	261
-------------------	-----

参考文献	266
------------	-----

绪 论

一、物理实验的地位和作用

在以伽利略为代表的一批杰出的物理学家创立了“实验物理学”之后的几百年间，人们把物理实验方法与物理规律的研究结合起来，形成了一个完整的科学实验思想体系，同时也将物理实验方法发展到了一个崭新的高度。这些思想体系和实验方法已成为人类伟大思想宝库中的一部分，那些卓越的实验设计、巧妙的物理构思、高超的测量技术、精心的数据处理、精辟的分析判断为我们展示了极其丰富的物理思想和科学方法。

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。对通过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，就到得理论，实验是理论的源泉。理论一旦提出，又必须借助实验来检验其是否具有普遍意义，实验是检验理论的手段，是检验理论的裁判。例如，杨氏的干涉实验使光的波动学说得以确立；赫兹的电磁波实验使麦克斯韦提出的电磁理论获得普遍承认；杨振宁、李政道在 1956 年提出基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”理论，在实验物理学家吴健雄用实验验证后才被同行学者承认并因此获得了诺贝尔奖。实践证明，物理实验是物理学发展的动力。在物理学的发展进程中，物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、共同发展。

自然科学迅速发展，新的科学分支层出不穷，但基础学科就是数学和物理两门，物理实验是研究物理测量方法与实验方法的科学，物理实验的特点在于它具有普遍性：力、热、光、电的内容都有；具有基本性——它是其他一切实验的基础；同时它还有通用性——适用于一切领域。把高、精、尖的复杂实验分解成为“零件”，绝大部分都是常见的物理实验。在工程技术领域中，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，科学技术的发展都离不开物理实验。物理实验是高等院校理、工、农、医等专业的必修基础课。

二、实验课的目的和要求

经过长期的发展和完善，实验物理已形成了自己独立的内容体系。学生通过物理实验课程的学习，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。同学们通过独立完成一定数量的实验，可以学习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。物理类专业的学生将通过基础物理实验的学习，为后续的近代物理实验和专业实验打下良好基础。由于以物理学为基础的现代测量方法已广泛应用于自然科学的各个领域，对于非物理类专业的学生来说，在各自的学习和研究领域中基础物理实验对于提高他们运用现代测量手段的能力无疑是十分重要的。同时，基础物理实验又是素质教育的重要手段，通过学习基础物理实验课程，同学们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，对课程内容的要求是：

(1) 通过测量一些基本的物理量,掌握基本的测量方法和测量技术。

(2) 通过使用一些常用的仪器和设备,学会正确组装、调整、标定和操作的一般方法。根据要求能够设计简单的实验方案,选择仪器设备进行实验,并能排除实验中的一些故障。

(3) 通过对实验现象的观察、实验数据的记录和处理,掌握有效数字的运算法则以及对实验数据处理的一般方法。能分析测量误差的来源,对误差大小做出正确估计,对实验结果的可靠程度和存在的问题作出判断,并对提高实验结果可靠程度的可能途径提出建议。

(4) 通过预习报告和实验报告的书写,了解图表的制作方法,学会用科学的语言描述实验过程、实验现象和实验结果,为今后科技论文的写作打下基础。

(5) 通过在部分实验中应用计算机和传感器,认识它们在物理实验和现代测量中的作用和重要性。

三、物理实验课的教学环节

1. 课前预习

实验能否顺利进行并取得预期的结果,在很大程度上取决于预习是否充分。预习时首先要仔细阅读实验教材,复习相关理论,明确实验目的和要求。

教学实验虽然是经过精心安排设计的,但依然要求学生多问自己些问题。首先,要思考本实验要测量什么?通过怎样的方法测量?为什么这样做?等等。

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实验原理。预习报告应用统一印制的实验报告纸书写。

在预习过程中,除了要写好预习报告以外,还要熟悉实验步骤、了解实验过程中应该观察的现象和记录的数据,同时列出数据的记录表格。有些实验要求实验前进行必要的计算以便正确选择仪器和测量方法,这些工作也应该在预习时完成。

实验前,老师要进行检查,必要时进行提问。预习是实验成绩评定的一部分,对于没有预习的学生,老师有权停止其本次实验。

2. 课堂实验操作

实验操作是物理实验的重要环节。学生到实验室后要遵守有关规章制度,爱护仪器设备,注意安全。进入实验室后,首先要对照实物认识实验仪器,对实验中所需的仪器设备进行检查,主要检查仪器的种类、数量、规格,然后记录所用仪器的型号和规格。了解仪器的主要构造、功能、量程及操作方法。根据实验要求,合理摆放实验仪器、正确连接线路。确认无误并经老师允许后方可进行通电测量。

操作过程中要严肃认真,准确记录实验现象和实验数据,切不可急于求成、草率从事。实验的重点是对学生实验能力的培养,而不是测出几个实验数据就算完成了任务。实验中出现的现象是分析实验结果的重要依据之一,应该如实、认真地记录。要对现象和原始数据进行及时的分析和思考。如果发现出乎意料或不合理现象和数据,要重复观察和测量。两人合作一个实验时,要分工协作,共同提高实验技能。

在确认完成全部测量后,让指导教师检查原始记录单并签字。指导教师确认无误后,学生要将仪器整理还原归位。如有损坏仪器,应及时报告。凡属于实验者的责任事故,按实验室管理规定,要根据情节轻重,赔偿部分或全部损失。

3. 撰写实验报告

如何写好一份合格的实验报告,是实验课的一项重要基本功。实验报告是对实验工作的简明总结,是让他人评价自己实验成果的依据。实验报告可以在预习报告的基础上完成,用自己的语言表达出所做实验的内容、依据、结果及结果分析。实验报告的内容包括以下几部分:

- (1) 实验目的 简要写出实验的目的。
- (2) 实验器材 记录所有仪器名称、规格和型号、准确度和量程等。
- (3) 实验原理 用简短的文字简单阐述实验原理,画出原理图,写出实验所用到的主要公式,注明公式中符号的物理意义。
- (4) 实验内容 写出简要步骤及注意事项。对于关键步骤和设计性实验,还应写得详细些。并列表记录实验数据。
- (5) 数据处理及结果 数据采用表格记录,发生的现象用文字记录,所作图表应符合规范。计算实验结果时应详细写出计算步骤,并按实验教材中误差计算的具体要求计算误差。简要写出误差计算的过程和依据。如计算过程中要用到实验记录以外的数据,应该对其来源及依据作出说明。如实验教材没有明确指出误差计算的具体要求,在计算时应注明误差的种类。实验结果应按标准格式书写,实验结果中有效数字的位数应正确反映实验结果的精密度或不确定度。
- (6) 分析讨论 对实验结果进行必要的讨论并分析误差来源,或提出减小误差可采取的措施。也可以写对实验的体会、收获或改进建议。最后,完成实验教材的思考题。

四、实验室规则

- (1) 学生应在规定时间内进行实验,不得无故缺课或迟到。
- (2) 进行实验时必须严肃认真,不得大声喧哗。
- (3) 按编组在指定仪器处进行实验,未经教师同意不得调换。
- (4) 实验前清点仪器,如有问题应及时告诉老师。
- (5) 实验结束后实验仪器应复位。如有损坏应及时报告老师,并填写仪器损坏报告单。
- (6) 实验室内不准随地吐痰、乱扔纸屑。实验结束后要打扫实验室卫生,整理仪器和桌凳。

第一章 测量不确定度与实验数据处理

第一节 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，那么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做等精度测量；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，或使用不同的方法，或依据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

测量的目的就是为了得到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诸多因素的限制，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 之间一般都会存在一定的差值，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，反之则称为负误差。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

为了便于对误差作出估算并研究减小误差的方法, 有必要对误差进行适当分类。根据误差的性质和来源不同, 一般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, 误差的符号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合使用等。

(4) 个人因素 由于实验者个人的不良习惯而引起的误差。例如, 有的人在读取指针式仪表的读数时习惯性地把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

表示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

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的程度小,即系统误差小,但随机误差的大小不明确。

3. 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。

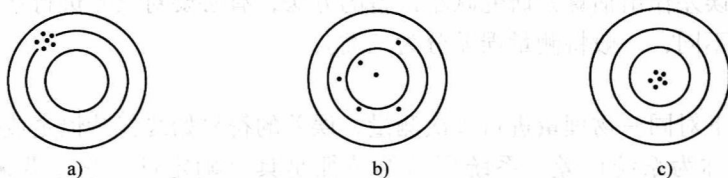


图 1-1-1 精密度、准确度、精确度示意图

a) 精密度高、准确度低 b) 准确度高、精密度低 c) 精确度高

第二节 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,可将待测物先后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粘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。常用的方法有:

(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

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

(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、千分尺(也叫螺旋测微计)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、反方向测量法和补偿法等。

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 和 m_2 , 取物体的质量 $m=\sqrt{m_1m_2}$, 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值时被抵消。如用霍尔元件测磁场实验中, 分别改变磁场和工作电流的测量方向, 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, 但可以根据随机误差理论来估计其大小。为简单起见, 在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。

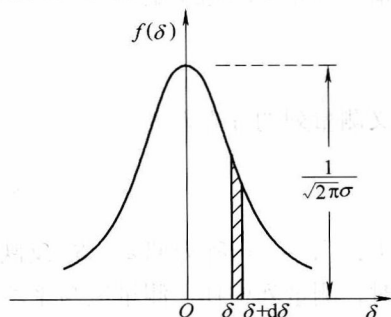


图 1-2-1 随机误差的正态分布

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

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。

$f(\delta)$ 表示测量误差出现在 δ 附近单位误差范围内的概率; 曲线下阴影部分包含的面积元 $f(\delta)d\delta$ 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 $(-\infty, +\infty)$ 范围内的概率为百分之百, 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。

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

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。

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, $S_x = \sigma$ 。

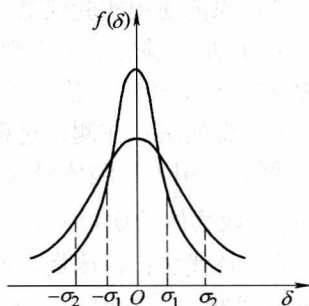


图 1-2-2 σ 的大小反映测量数据的离散程度

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

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

t 值与测量次数 n 有关，也与置信概率 p 有关。

表 1-2-1 $t-n$ 对应值

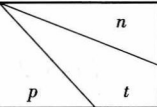
	3	4	5	6	7	8	9	10	20	∞
0.683	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03	1
0.954	4.30	3.18	2.78	2.57	2.46	2.37	2.31	2.26	2.09	1.96
0.997	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.86	2.58

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 $p = 68.3\%$ 。

第三节 测量不确定度与测量结果的表示

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》），之后 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 年制定并实施了《测量不确定度评定与表示》。本教材将以《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、不确定度的概念及其分类

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，说明测量结果可信赖程度高；反之，不确定度大，则说明测量结果的可信赖程度低。

由于测量方法和误差来源的不同，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 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ ，平均值为 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ，在物理实验教学中，通常以 $\bar{x}$ 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引起系统误差的因素导致的。对于确定的已知系统误差，应对测量结果进行修正。完整准确地评定 B 类不确定度是一件十分需要经验的工作。本课程中只考虑测量仪器误差和单次测量中由测试条件限制估值误差所导致的 B 类不确定度。

(1) 仪器误差造成的不确定度 u_{B1} 仪器误差造成的不确定度是由仪器本身的特性所决定的，其不确定度为

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C} \tag{1-3-2}$$

式中， $\Delta_{\text{仪}}$ 是仪器说明书上所标明的“最大允差”； C 称为“置信因子”，是一个与仪器误差在 $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$ 范围内的概率分布有关的常数。仪器误差的概率分布通常有正态分布、均匀分布和三角分布等，其置信因子 C 分别取 3， $\sqrt{3}$ 和 $\sqrt{6}$ 等。如果仪器说明书上只给出最大允差，却没有给出关于误差概率分布的有关信息，一般可按均匀分布处理，即 $u_{B1} = \Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$ 。表 1-3-1 给出物理实验教学常用仪器的最大允差。

表 1-3-1 物理实验教学常用仪器的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$

仪 器	最小分度值	$\Delta_{\text{仪}}$	备 注
米 尺	1 mm	0.5 mm	
游标卡尺	0.02 mm	0.02 mm	
	0.05 mm	0.05 mm	
千分尺（螺旋测微计）	0.01 mm	0.004 mm	
物理天平	0.02 g	0.02 g	
电磁仪表		量程 · $\alpha\%$	α 是仪表准确度等级
各类数字式仪表		仪器最小读数	

表 1-3-2 给出了几种常见仪器的仪器误差分布与相应的置信因子。

表 1-3-2 常见实验仪器的误差分布与置信因子

仪器名称	米尺	游标卡尺	千分尺	物理天平	秒表
误差分布	正态分布	均匀分布	正态分布	正态分布	正态分布
C	3	$\sqrt{3}$	3	3	3