

21世纪高等院校实验教学改革与创新系列教材

Experiment of College Physics

大学物理实验



邓水凤 刘红荣 © 主编



湘潭大学 出版社

21 世纪高等院校实验教学改革与创新系列教材

大学物理实验

主 编 邓水凤 刘红荣

副 主 编 陶 霞 李向荣

参编人员 (按姓氏笔画为序)

马 蓐 王秀锋 蔡灿英

湘潭大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 邓水凤, 刘红荣主编. —湘潭: 湘潭大学出版社, 2010.3

ISBN 978-7-81128-168-2

I. 大… II. ①邓…②刘… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV.O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 009394 号

大学物理实验

邓水凤 刘红荣 主编

责任编辑: 罗 联

封面设计: 胡 瑶

出版发行: 湘潭大学出版社

社 址: 湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真): 0731-58298966 邮编: 411105

网 址: <http://xtup.xtu.edu.cn>

印 刷: 湖南省天闻新华印务邵阳有限公司

经 销: 湖南省新华书店

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 22

字 数: 535 千字

版 次: 2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81128-168-2

定 价: 39.50 元

(版权所有 严禁翻印)

总 序

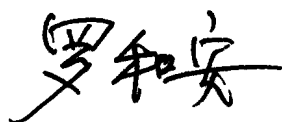
为了提高国家的持续发展能力、综合实力和国际竞争力,党中央、国务院提出构建创新型国家体系、增强自主创新能力的战略,鼓励创造,鼓励创新,特别是鼓励原始创新。创新的关键在人才,人才的成长靠教育。推动教育事业特别是高等教育事业的发展,培养和造就一大批基础扎实、具有创新精神和创新能力的高素质拔尖人才,是构建国家创新体系、建设创新型国家的基础。

正是在这样的背景下,湘潭大学出版社经过精心策划,组织实验教学一线的专家和教师编写了这套“21 世纪高等院校实验教学改革与创新系列教材”。实验教学是培养学生创新能力的基本途径,是培养高素质创新人才教学体系的重要组成部分。目前,对作为连接理论与实践的纽带和激发学生发现问题、研究问题、独立解决问题能力的重要环节——实践教学的研究,还显得相对不足;对如何进一步深化实验教学改革,创新实验教学方法、途径,以更好地发挥实验教学对培养学生创新思维与创造技能的平台作用方面的研究与探讨,尚待深入;已出版的实验教材还比较零散,不成体系和规模,高质量、高水平的实验教材建设与实验教学之间还存在一定的差距。随着科技的发展,各种实验手段、实验仪器不断更新,传统实验教学中的许多范例、方法,既不能体现与学科发展相适应的前沿性,也不能体现与产业相衔接的应用性,使许多实验教材严重滞后于实验教学的现实需要和教学改革的进程。要实现创新人才培养的重要目标,必须重视实验教学;而要实现教学目标,达到好的教学效果,则必须以实验教材为基础,必须有好的实验教材作支撑。因此,湘潭大学出版社出版的这套实验教学改革与创新系列教材就非常有意义。

这套教材最大的特点是融入了许多新的实验教学理念和教学方法,引入了新的实验手段与实验方法,尤其是增加了计算机技术在实验中的应用,有利于激发学生的学习兴趣,增强学生对现代高新技术的了解,具有一定的新颖性和前瞻性。教材范围涵盖了物理、化学、计算机、机械等几大传统学科专业,并注意区分了理科和工科教学过程中各自的侧重,做到

了理工交融,也较好地实现了实践性与理论性、基础性与先进性、基本技能与学术视野、传统教学与开放教学的相互结合。好的实验教材既是实验教学成果的直接反映,也是先进的实验教学理念传播的重要载体。相信湘潭大学社出版的这套系列教材,能够为我们提供有益的借鉴,也相信广大教育理论研究和教师,在不断推进实验教学改革与创新过程中,一定能够探索出新的经验,推出新的成果,编写出更多的精品教材,进一步推广先进的实验教学理念和教学方法,提升实验教学质量与水平,为培养高素质的创新人才,建设创新型国家作出新的贡献。

是为序。

A handwritten signature in black ink, reading '罗和安' (Luo He'an). The characters are stylized and fluid, with the first character '罗' being particularly prominent.

2009 年 3 月

前言

近年来,随着科学技术的迅猛发展和实验教学改革的不断深入,大学物理实验课的教学从实验内容到实验技术都在不断更新变化。新概念、新方法、新的实验技术和科研领域中的新成果已逐步在物理实验课中得到反映。本书是编者在多年教学实践的基础上,经过反复实践、积累经验、不断改进、充实完善编写而成的。

全书共分为6章。第1章讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基础知识。第2章为基本物理量的测量及常用测量仪器。第3~5章共选编了47个力学、热学、电磁学和光学与近代物理实验,其中,有些实验包括多个使用不同测量方法和装置的实验内容,以供选择。第6章为设计性实验(共选编了10个实验),这是在学生做了一定数量的基础实验,能对实验方法、仪器使用等方面作出恰当评价后,为培养学生自主进行科学研究工作的能力而设置的。设计性实验给出研究对象、实验要求和适当的原理提示,让学生自行综合已掌握的知识,或者某些学科的交叉知识,确定实验方法、选择合适的仪器设备和设计一定的实验程序。这样,既保证了基础训练,又提高了物理实验的综合性和实用程度,促使学生更积极地完成实验。

考虑到物理实验课的独立性和面向低年级学生的特点,对于基础实验,编写时力求将实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,使学生在实验预习时掌握理论依据;实验内容与步骤亦尽可能具体,以加强对基本实验技能与基本实验方法的训练和指导。对于常用仪器(如示波器、分光计等)安排在多个实验中反复使用,使学生能正确熟练地掌握这些常用仪器的调节和使用方法。对于设计性实验,将主要内容放在实验方法和技巧的指导上(如计算机应用类实验,以及力、热、电、磁、光传感器特性与应用等);有的设计性实验,只提出实验任务和基本要求,让学生查阅相关资料,自行设计实验方案,选择仪器用具,完成实验测试,以更多地发挥学生的主观能动性和创造性。每个实验都附有思考题,以引导学生在实验后进一步分析讨论,巩固所学知识。

本书由邓水凤、刘红荣担任主编,陶霞、李向荣担任副主编。参加编写的教师所承担的内容是:绪论以及第1、2章由邓水凤、陶霞编写;第3章由陶霞、王秀锋、马蓦编写;第4章由邓水凤、王秀锋、马蓦编写;第5、6章由刘红荣、李向荣、蔡灿英编写。

本书的编写凝聚着湘潭大学基础物理实验教学中心全体教师和实验技术人员(包括这些年来已经退休的同志)长期辛勤劳动的成果,他们长期工作在实验教学第一线,积累了丰富的教学经验,对本书的编写提供了极大的帮助,同时参考并吸收了兄弟院校的有关资料和经验,在出版过程中得到了湘潭大学出版社的大力支持,在此表示衷心地感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,加之教材的改革又是一项艰难的工作,有赖于不断地改革实践和长期的研究探索才能日臻完善。书中难免有疏漏谬误之处,恳请读者批评指正。

编者

2009年10月

目 录

绪论	(1)
第 1 章 测量误差与数据处理	
1.1 测量与误差	(4)
1.2 随机误差的处理	(7)
1.3 系统误差的处理	(11)
1.4 测量结果的不确定度评定	(14)
1.5 有效数字及运算规则	(22)
1.6 数据处理方法	(24)
第 2 章 基本物理量的测量及常用测量仪器	
2.1 基本物理量的测量	(33)
2.2 力学和热学实验常用仪器	(36)
2.3 电磁学实验常用仪器	(45)
2.4 光学实验常用仪器	(54)
第 3 章 力学与热学实验	
实验 1 气垫导轨上测滑块的速度和加速度	(60)
实验 2 动量守恒定律的验证	(67)
实验 3 简谐振动的研究	(71)
实验 4 拉伸法测金属的杨氏弹性模量	(75)
实验 5 霍尔位置传感器的定标和弯曲法测杨氏模量	(80)
实验 6 液体表面张力系数测量	(85)
实验 7 落球法测量液体粘度	(90)
实验 8 用三线摆测物体的转动惯量	(95)
实验 9 气体中声速的测量	(98)
实验 10 温度传感器测试及半导体制冷控温实验	(109)
实验 11 热敏电阻器的电阻温度特性测量	(115)
实验 12 用稳态法测量不良导体的导热系数	(120)
第 4 章 电磁学实验	
实验 13 用模拟法测绘静电场	(124)
实验 14 惠斯登电桥测电阻	(129)
实验 15 双臂电桥测低电阻	(134)
实验 16 非平衡电桥测量铂电阻的温度系数	(137)
实验 17 电子束的电偏转和磁偏转	(142)
实验 18 示波器的使用	(149)
实验 19 存储示波器及其应用	(156)
实验 20 RC 和 RL 电路的稳态过程	(160)

实验 21	非线性元件伏安特性的测量	(163)
实验 22	半导体 PN 结的物理特性及弱电流测量	(169)
实验 23	霍尔效应法测螺线管磁场	(172)
实验 24	霍尔式传感器交直流激励特性的研究	(178)
实验 25	用磁阻传感器测地磁场	(189)
实验 26	用示波器测动态磁滞回线	(192)
实验 27	金属电子逸出功的测定	(201)
实验 28	方波的傅里叶分解与合成	(207)
实验 29	非线性电路振荡周期的分岔与混沌实验	(213)
第 5 章 光学与近代物理实验		
实验 30	等厚干涉	(217)
实验 31	分光计的调节与使用	(223)
实验 32	衍射光栅	(228)
实验 33	光电效应法测定普朗克常数	(233)
实验 34	光敏传感器光电特性研究	(240)
实验 35	光拍法测量光速	(249)
实验 36	声光法测量透明介质中的声速	(257)
实验 37	全息照相	(259)
实验 38	阿贝成像和空间滤波	(264)
实验 39	用干涉法测空气折射率	(269)
实验 40	杨氏双缝实验	(273)
实验 41	共焦球面扫描干涉仪与氦氖激光束的模式分析	(277)
实验 42	氦氖激光束光斑大小和发散角	(281)
实验 43	迈克尔逊干涉仪	(284)
实验 44	夫兰克-赫兹实验	(289)
实验 45	密立根油滴实验	(293)
实验 46	黑体辐射实验	(301)
实验 47	塞曼效应	(309)
第 6 章 设计性实验		
实验 48	变阻器制流特性和分压特性应用设计	(315)
实验 49	电表改装和校准	(317)
实验 50	简易万用表的设计	(318)
实验 51	非平衡电桥及热敏电阻温度计	(321)
实验 52	RC 串联电路暂态过程的设计与研究	(322)
实验 53	硅光电池特性研究	(325)
实验 54	设计用分光计测定液体折射率	(327)
实验 55	光栅特性研究	(328)
实验 56	数字电表原理及万用表设计	(330)
实验 57	传感器系列实验设计	(336)
附录		(338)
参考文献		(341)

绪 论

一、物理实验课的地位和作用

物理学从本质上说是一门实验科学,物理规律的研究都以严格的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验。例如,麦克斯韦的电磁场理论是建立在法拉第等科学家长期实验的基础上。赫兹的电磁波实验又使理论得到普遍的承认和广泛的应用。

物理实验是推动科学技术发展的重要组成部分之一。历史上每次重大的技术革命都起源于物理学的发展。热力学、分子物理学的发展使人类进入了热机、蒸汽机时代;电磁学的发展使人类进入了电气化时代;原子物理、量子力学的发展促进了半导体、激光、原子核、电子计算技术的迅猛发展。

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、电都有;具有基本性——它是一切实验的基础;同时它还具有通用性——应用于一切领域,把高、精、尖的实验拆成“零件”,绝大部分是常见的物理实验。在工程技术领域中,研制、生产、加工、运输等都涉及物理量的测量及物体运动状态的控制,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,物理实验是工程技术和高科技发展的基础。

物理学是一门实验科学。物理实验教学与物理理论教学具有同等重要的地位。它们既有深刻的内在联系和配合,又有各自的任务和作用。物理实验课程是教育部确定的6门主要基础课程之一,是独立设置的必修课,是学生进入大学后系统学习科学实验知识和技术的开端,是后继实验课程的基础,它在培养学生用实验手段去发现、观察、分析和研究问题,最终解决问题的能力方面将起到至关重要的作用。

二、物理实验课的目的和任务

1. 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,并能运用物理学原理、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. 培养与提高学生从事科学实验的素质。即:理论联系实际和实事求是的科学作风;勤奋工作,严肃认真的工作态度;不怕困难,主动进取的探索精神;遵守操作规程,爱护公物的优良品质。

3. 培养与提高学生科学实验的能力。

自学能力:能够自行阅读实验教材,做好实验的准备。

动手实验能力:能够借助于教材和说明书,正确使用常用仪器,进行实验。

思维判断能力:能够应用物理学理论对实验现象进行初步分析判断,对实验结果有初步判定。

表达书写能力:能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,表达实验结果,撰写合格的实

验报告。

简单的设计能力:能够完成简单的设计性实验。

三、物理实验课的主要教学环节

为达到物理实验课的目的,同学们应重视物理实验教学的3个重要环节。

1. 实验预习

进行实验前,要仔细阅读实验教材或有关的资料,了解本实验的目的、原理和方法,并初步了解有关的测量仪器的使用方法。根据实验任务画好记录数据的表格。有些实验还要求学生课前自拟实验方案,自己设计线路图或光路图,自拟数据表格等。因此,课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键。

2. 进行实验阶段

进入实验室要遵守实验室规则:

(1) 认真听取老师讲解,并积极回答老师提问。

(2) 熟悉实验所需仪器,注意仪器种类、量程、精度,调整仪器使其处于可用状态。

(3) 按步骤进行实验,遵守操作规程,井井有条地布置仪器,安全操作,注意细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。仪器发生故障时,要在教师指导下学习排除故障的方法。对于电磁学实验,必须由教师检查电路的连接无误后,方可接通电源进行实验。总之,要把着重点放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就以为完成了任务。

(4) 待条件稳定方可读取数据。对待实验数据要严肃,要用钢笔和圆珠笔记录原始数据。如确系记错了,也不要涂改,应轻轻划上一道,在旁边写上正确值(错误多的,须重新记录),使正确数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记录,给自己留有涂抹的余地,切勿先将数据随意记在草稿纸上,然后再写在数据表格里,这样容易出错,况且,这已不是“原始记录”了。希望同学们注意纠正自己的不良习惯,从一开始就不断培养良好的科学作风。

(5) 实验结束时,将实验数据交教师审阅签字,整理仪器,切断水、电源后方可离开实验室。

3. 实验总结

实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始记录删改较多,应加以整理,对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。要求书写字迹工整,文句简练,卷面清洁,画图必须用规定的坐标纸,并且合乎规范和美观。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写出一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告。这是每一个大学生必须具备的报告工作成果的能力。

实验报告内容包括:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器。

(4) 实验原理。简要叙述有关物理内容(包括电路图或光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式,式中各量的物理含义及单位,公式成立所应满足的实验条件等。

(5) 实验内容与步骤。根据实验的实验过程写明内容与关键步骤。

(6) 数据表格与数据处理。记录中应有仪器编号、规格及完整的实验数据。要完成计

算、曲线图、误差分析。最后写明实验结果。

(7) 小结或讨论。内容不限,可以是实验中现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可解答思考题或讨论题。

实验报告在下次实验时交给任课老师。

第 1 章 测量误差与数据处理

物理实验的任务,不仅仅是定性地观察物理现象,还需要对物理量进行定量测量,并找出各物理量之间的内在联系。

由于测量原理的局限性或近似性、测量方法的不完善、测量仪器的精度限制、测量环境的不理想以及测量者的实验技能等诸多因素的影响,所有测量都只能做到相对准确。随着科学技术的不断发展,人们的实验知识、手段、经验和技巧不断提高,测量误差被控制得越来越小,但是绝对不可能使误差降为零。因此,作为一个测量结果,不仅应该给出被测对象的量值和单位,而且还必须对量值的可靠性做出评价,一个没有误差评定的测量结果是没有价值的。

本章介绍测量与误差、误差处理、测量结果的不确定度评价、有效数字等基本知识,这些知识不仅在本课程的实验中要经常用到,而且也是今后从事科学实验工作所必需了解和掌握的。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量分类

测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较,并得出其倍数的过程。倍数称为待测物理量的数值,选作的计量标准称为单位。因此,一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成,缺一不可。

按测量方法分为直接测量和间接测量两种。

(1) 直接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量。如用米尺测长度、用温度计测温度、用电压表测电压等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量值。

(2) 间接测量

有些物理量无法进行直接测量,而需依据待测量与若干个直接测量值的函数关系求出,这样的测量就称为间接测量。如物体的表面积和密度的测量就是间接测量。在实验中,间接测量的量远远多于直接测量的量。实验中的原理、方法、计算等,大都是间接测量的内容。

按测量条件分为等精度测量和不等精度测量。

(1) 等精度测量

在对某一物理量进行多次重复测量的过程中,每次测量条件都相同的一系列测量称为

等精度测量。例如：由同一个人在同一仪器上采用同种测量方法对同一待测物理量进行多次测量，每次测量的可靠程度都相同，或是在一系列测量中，测量各个量的不同仪器的精确度相同的测量，都称为等精度测量。在我们进行的物理实验中，绝大部分的测量属于这一类。这类测量的数据处理比较简单。

(2) 不等精度测量

在对某一物理量进行多次测量时，测量条件完全不同或部分不同，各测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如：在对某一物理量进行多次测量时，选用的仪器不同，或测量方法不同，或测量人员不同等都属于不等精度测量。

一般来讲，在实验中，保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的。但当某一条件的变化对结果影响不大时，仍可视这种测量为等精度测量。不等精度测量的数据处理比较复杂，一般情况不采用这种测量。本书只限于等精度测量的数据处理。

1.1.2 测量误差

1. 真值

在某一时空状态下，被测物理量所具有的客观实际值称为真值。一般来说，用数字表示它时，应是一个无穷多位的数。

2. 测量误差

测量是在一定条件下，使用一定的仪器，通过一定的方法，力图获得被测量的真值。但是由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响，待测量的真值是不可能测得的，其测量值和被测量真值之间总有一定的差异。我们定义测量值与被测量真值之差为测量误差，即

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

它不但反映了测量值偏离真值的大小，而且还反映了测量值是比真值大还是比真值小。于是与真值相比较故又有绝对误差之称，简称误差。

被测量的真值是指在一定时间、一定状态下，被测量客观存在的真实大小，它是个理想的概念，包含：理论真值、公认真值、计量学约定真值和标准器相对真值。但在多数情况下，特别是在研究性的实验中，被测量的真值往往都是未知的，实验的目的就是采用科学的方法测得其“真值”，探索其规律。

测量所得的一切数据都包含着一定的误差，因此，误差存在于一切科学实验过程中，并因测试理论、测试环境、测试技术等不同而有所差异。

3. 研究测量误差理论的意义

既然测量误差的存在是一切测量中的普遍现象，那么，研究测量误差的性质和产生的原因，研究如何有效地减小测量误差对实验结果的影响，研究如何科学地表达含有误差的测量结果，以及对实验结果如何评价等就显得十分重要。正是在这样的背景下，产生并发展了一门专门的科学，这就是测量误差理论。它是人们把概率论与数理统计理论应用于测量误差的研究中而形成并发展起来的一种科学理论，要想深入地讨论测量误差，需要有丰富的实践经验和较多的概率统计知识，这里只能对其基本方面作些简单介绍。我们学习误差理论，要着重了解它的物理意义，逐步建立起误差分析的思想，这对于做好物理实验是非常重要的。

一个物理实验自始至终都与测量误差理论有密切的关系。

第一,测量误差理论可以帮助我们正确地设计实验方案,合理地选择实验仪器,以使用最小的代价取得最好的结果,不能片面地认为仪器越高级越好、环境条件越稳定越好、测量次数越多越好等。

第二,测量误差理论可以帮助我们正确地进行实验操作,从而减小误差对实验结果的影响。要正确地调整仪器装置,注意满足理论所要求的实验条件,正确地使用仪器,合理安排操作步骤等。特别值得指出的是,一个比较复杂的实验,往往只有少数几个物理量是主要的,它们的准确与否对结果影响很大,测量误差理论可以帮助我们抓住主要矛盾,把精力用在关键的地方。可以说,实验过程的每一步操作都与测量误差理论密切相关。

第三,测量误差理论可以帮助我们正确处理数据,科学地表达实验结果。这一点,下面还要具体说明。在表达实验结果时,给出的不确定度要力求符合实际,既不能太小,也不能太大。如果不确定度太小,由于夸大了实验结果的准确度,有可能对实际工作造成危害;如果不确定度太大,由于过分保守,有可能造成浪费,例如它可能导致拒绝使用一台本来可以使用的仪器。

第四,测量误差理论可以帮助我们对实验结果进行分析判断,从而得出适当的结论。例如,1894年英国物理学家瑞利测定空气中氮气的密度为 $1.256\ 5\text{ g/L}$,而他从分解氨气得到的氮气密度为 $1.250\ 7\text{ g/L}$,他肯定两者的差异超出了实验的误差范围(他当时认为空气中除了氧都是氮)。后来经过进一步的研究,导致了空气中氩气的发现。历史上这一类例子很多。判断实验结果是验证了还是推翻了理论假设,就要看实验结果与理论值的差异是否落在实验的误差范围之内。

4. 误差分类

为了研究误差的来源,根据误差性质和产生原因可将误差分为以下几类。

(1) 系统误差

系统误差的特点:在确定条件下多次测量同一物理量时,误差的数值和符号保持恒定,或者在条件改变时按一定规律变化。引起系统误差的原因可能是已知的,也可能是未知的。系统误差包括已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指符号和绝对值已经确定的系统误差,未定系统误差是指符号或绝对值未经确定的系统误差。

产生系统误差的原因:仪器误差与调整误差,仪器固有的缺陷(刻度不准、零点没有调好或漂移、安装不合格、部件老化等),以及由于测量前未能将测量器具或被测对象调整到正确位置或状态所引起的误差。

理论误差与方法误差是由于测量理论的近似或由于测量方法的不完善所引起的误差。如单摆的周期公式 $T=2\pi(l/g)^{1/2}$ 的成立条件是摆角趋于零,摆球的体积趋于零,这些条件在实验中是达不到的;用伏安法测电阻时电表的内阻影响等都会引起误差。

环境误差是由于实际环境条件与规定条件不一致所引起的误差。如温度、气压、振动、照明、电磁场等与要求的标准状态不一致,在空间梯度上随时间的变化,引起测量设备的量值变化、机构失灵、相互位置改变等产生的误差。

人员误差是由于测量人员的主观因素和操作技术所引起的误差。测量人员的习惯与偏向(有的读数偏高,有的偏低)会引起误差,在实验过程中有关的因素未计入也会导致系统误差。

系统误差服从因果律,任何一种系统误差,在测量条件不变时有确定的大小和方向,增

加测量次数并不能减小系统误差。在实验之前,对测量中可能产生的系统误差应加以充分的分析和估计,并采取必要的措施尽量消除其影响。测量后应设法估计未能消除的系统误差之值,对测量结果加以修正。

(2) 随机误差

在实际测量条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值和符号的变化时大时小、时正时负,以不可预定方式变化的误差称为随机误差。

随机误差起因于一些随时随地都会发生的微小的不可控制的因素。如周围环境的干扰,无规则的温度、气压波动,电磁场的干扰,光线的闪动,电压、电流的波动,以及人的感官灵敏程度和仪器精密程度有限等。这些因素既不可控制,又无法预测和消除,但它们服从统计规律。在一般场合中,某一次测量的偶然误差往往是多种随机因素共同造成的。

尽管在任意一次测量中随机误差的数值和符号不可预知,但是在同一条件下对被测量进行多次测量的误差分布服从正态分布规律。因此可以用统计方法估算其对测量结果的影响。

(3) 过失误差

过失误差是由于观测者不正确地使用仪器、观察错误或记录错数据等不正常情况下引起的误差。它会明显地歪曲客观现象,应将其剔除。所以,在作误差分析时,要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

总之,由于误差的性质不同、来源不同、处理方法不同,对测量结果的影响也不同。有时系统误差与随机误差可以加以区别,有时又难以划分,有时两者之间能够互相转化。因此,有必要对误差进行研究和讨论,要用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

1.2 随机误差的处理

假设在实验中已将系统误差消减到可以忽略的程度,通过等精度测量(即同一测量者,在同样的条件下,用相同的仪器,对被测量进行多次重复测量),由于各种因素的微小变动所引起测量值间微小的不可预测的差异,得到一系列的测量值为 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。我们所关心的是最接近真值的值(称真值的最佳估计值,在计量学上称为测量列的测量结果期望估计值)是多少,又如何对该列测量数据的质量作一个恰当的评价。

1.2.1 随机误差的统计分布规律

随机误差是指某一次具体的测量,其误差的大小与正负都不确定,而在大量的重复测量中却遵守一定的统计规律的误差。处理随机误差问题时,为了方便初学者,尽量避开繁琐的数学推导,只给出必要的过程和最终结论。另外为了更有效地讨论随机误差,假设不存在系统误差(关于系统误差的处理可见 1.3 节)。

随机误差的存在使每次测量值涨落不定,但是,它又服从一定的统计分布规律。无数的实验事实与统计理论都证明,大部分测量中的随机误差服从的是正态分布规律。但并不是所有的随机误差都遵守这一分布,在某些情况下也会遵守其他分布,如泊松分布、均匀分布或 t 分布等。设某物理量的真值为 x_0 , 等精度测量条件下的测量值为 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。由统计理论可知随机误差 $\Delta x = x_i - x_0$ 的概率密度函数符合正态分布:

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

其中, σ 为标准误差。(1-2-1)式也可用如图 1-2-1 所示的正态分布曲线表示。

由图可见, 随机误差具有以下性质:

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 绝对值相同的正负误差出现的概率相同。

③ 有界性 绝对值很大的误差出现的概率接近零。

④ 抵偿性 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而减小, 最后趋于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x = 0 \quad (1-2-2)$$

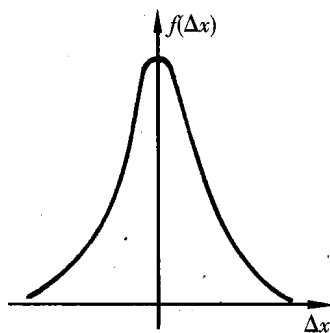


图 1-2-1 正态分布曲线

1.2.2 置信区间与置信概率

由图 1-2-2 可见, $f(\Delta x)$ 值与 σ 值有关, 当 σ 值较小时, 正态分布曲线高而窄, 表示误差分布在较小的范围之内, 测量数据的离散性小, 重复性好, 即精密度高。当 σ 值较大时, 正态分布曲线低而宽, 则表示误差在较大的范围内变动, 测量数据的离散性大, 重复性差, 即精密度低。因此, 标准误差反映的是一组等精密重复测量数据的离散性。按概率理论, 可以算出随机误差出现在 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率为

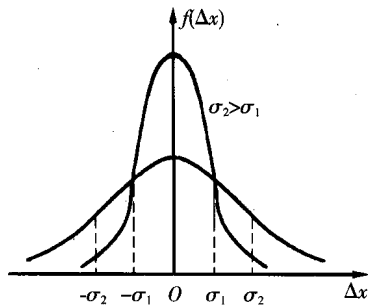


图 1-2-2 误差大小与分布曲线关系

$$P_1 = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\Delta x) dx = 68.3\% \quad (1-2-3)$$

这就是说, 在等精度的重复测量时, 测量值在 $[-\sigma, \sigma]$ 的范围内的概率将为 68.3%。其几何意义如图 1-2-3 所示, 在 $[-\sigma, \sigma]$ 之间曲线下的面积占曲线总面积的 68.3%。我们把 P_1 称为置信概率, $[-\sigma, \sigma]$ 就是 68.3% 的置信概率所对应的置信区间。

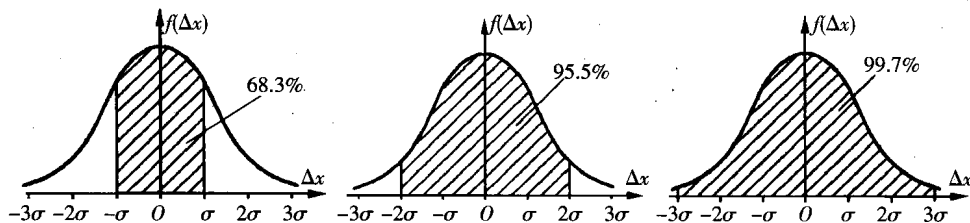


图 1-2-3 置信概率的几何意义

由此可见, 扩大置信区间, 置信概率就会提高, 用同样方法计算可得测量值的误差落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 之间的概率为:

$$P_2 = \int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\Delta x) dx = 95.5\% \quad (1-2-4)$$

$$P_3 = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\Delta x) dx = 99.7\% \quad (1-2-5)$$

从式(1-2-5)可见,对应于 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 的置信区间,其置信概率为99.7%,即在1 000次测量中,随机误差超出 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 的,平均只有3次。因此测量误差超出 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 的情况几乎不会出现,所以把 3σ 称为极限误差。若某一误差果真超出此区间,则可舍去,事实上这是剔除坏值的一种粗略的方法。

1.2.3 多次直接测量随机误差的估算

1. 算术平均值

等精度测量条件下的测量值为 x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$),其算术平均值为

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

根据随机误差的抵偿性,即式(1-2-2)可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = x_0$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow x_0 \quad (1-2-7)$$

式(1-2-7)说明,减小测量结果随机误差的办法是增加测量次数,且测量次数越多,测量列的算术平均值越接近真值。故也称测量值的算术平均值为近真值,它是测量结果的最佳值。

2. 标准偏差

根据随机误差理论可以证明对真值 x_0 的标准误差是

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (1-2-8)$$

一般情况下真值 x_0 无法得到,即 Δx 无法计算,又因实验中测量次数 n 是有限的,在大学物理实验中,通常 $5 \leq n \leq 10$,且算术平均值是测量结果的最佳值。由误差理论可得, n 次测量中某次测量值的标准偏差用下式表示:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-2-9)$$

其中, $\Delta x = x_i - \bar{x}$ 称为偏差。

3. 平均值的标准偏差

我们通过测量获得一组数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$,并算出平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果。如果完全相同的条件下,重复上述实验,由于随机误差的影响,不一定能得到完全相同的 $\bar{x}$ 值。若干组 n 次测量所获得的平均值之间的差异表明, $\bar{x}$ 本身亦有离散性。由误差理论可以得出算术平均值的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \quad (1-2-10)$$