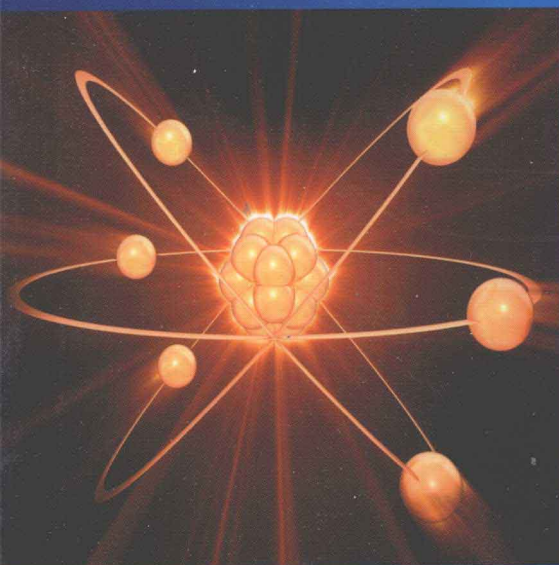


21世纪高等院校教材

大学物理实验

陈玉林 董丽花 丁留贯 主编



科学出版社

大学物理实验

陈玉林 董丽花 丁留贯 主 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是根据教育部 2004 年制定的《大学物理实验课程教学基本要求》，并结合当前民办本科院校物理实验教学现状以及学生的特点而编写的大学物理实验教材。全书除测量误差、不确定度与数据处理和物理实验基本知识内容外，其他内容以实验项目为线条进行编写。为适应不同层次学生的教学需求，本书在具体实验内容上按预备性、基础性实验、提高、综合和设计性实验进行编写，共 30 个实验。

本书可作为独立学院和民办院校理工类本科非物理专业的大学物理实验课程的教材，也可作为相关专业技术人员和其他专业的基础物理实验教学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/陈玉林,董丽花,丁留贯主编. —北京:科学出版社,2011
21 世纪高等院校教材
ISBN 978-7-03-030136-9

I. ①大… II. ①陈… ②董… ③丁… 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(2011)第 014613 号

责任编辑:昌 盛 郝泽潇 杨 然 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

化学工业出版社印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 1 月第一次印刷 印张:13 1/4

印数:1—4 000 字数:310 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是在总结多年的物理实验教学经验和实验改革的基础上,根据教育部 2004 年制定的《大学物理实验课程教学基本要求》,结合一般理工科院校专业的特点和实验仪器的现状,由南京信息工程大学滨江学院和中国传媒大学南广学院的物理实验老师共同编写而成。

本书的编写有以下特点:

(1) 总体结构安排上打破了物理实验教材以往按照物理学理论知识体系——“力、热、电磁、光”的编排方式,而是按照由预备性、基础性实验到提高、综合和设计性实验,这样一个由易到难、循序渐进的原则进行实验项目编排,有利于学生对物理实验课程的学习和实验能力的培养。

(2) 注重实验教学的各个环节,大部分实验都编有思考题,促使学生认真准备,积极思考,加深理解实验目的、原理等内容。

(3) 在大部分实验的开头都有提要,使学生对实验的应用、实验的思想有一个简明扼要的了解,激发学生学习的兴趣。

(4) 将物理实验的基本理论和方法集中进行归纳总结,包括测量误差、不确定度及数据处理、基本实验方法、基本物理实验测量技术、设计性实验的方法等。考虑到大学低年级学生的数理基础,采用简化的不确定度估计方法评定测量结果的误差。

(5) 注意计算机在实验教学中的应用,对一些数据的处理、图线的拟合、线性回归等问题可以进行计算机处理,并介绍了用 Excel 处理实验数据的方法。

本书由陈玉林、董丽花、丁留贯主编。参加编写工作的还有徐飞、张雅男、刘彦力、顾斌、缪菊红、蒋城欢、杨艳、叶影、张磊,由陈玉林负责全书统稿。

本书在编写过程中参考了许多兄弟院校的有关教材和仪器厂家的说明书,从中受益匪浅;科学出版社对本书的出版给予了大力支持;同时,本书还得到了南京信息工程大学滨江学院教材建设项目基金(BGJ008001)和中国传媒大学南广学院教改项目“独立学院大学物理实验室规范化建设与实践的研究”项目基金(JJJG09015)的资助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限而时间紧迫,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请读者和同行专家们批评指正。

编 者

2010 年 7 月

目 录

前言

绪论	1
第1章 测量误差、不确定度与数据处理	5
1.1 测量与误差	5
1.2 有效数字及其运算法则	12
1.3 不确定度评定与测量结果的表示	15
1.4 实验数据处理方法	22
练习题	35
第2章 物理实验基本知识	37
2.1 物理实验的基本测量方法	37
2.2 物理实验中的基本调整与操作技术	40
2.3 电磁学实验基本知识	42
2.4 光学实验基本知识	51
第3章 预备性、基础性实验	58
实验1 长度测量	58
实验2 物体密度的测量	63
实验3 验证牛顿第二定律	66
实验4 用自由落体仪测定重力加速度	71
实验5 欧姆定律的验证及其应用	74
实验6 学习使用多用电表	78
实验7 薄透镜焦距的测量	82
实验8 验证马吕斯定律	86
实验9 转动惯量的测定	89
实验9-1 用三线摆测定物体的转动惯量	90
实验9-2 用转动惯量仪测定物体的转动惯量	93
实验10 用落球法测定液体黏滞系数	96
实验11 惠斯通电桥测电阻	100
实验12 用模拟法测绘静电场	105
实验13 电势差计与电动势的测定	111
实验14 线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线	115

实验 15	示波器的使用	119
实验 16	等厚干涉及其应用	132
实验 17	用分光计测量三棱镜的折射率	136
实验 18	用旋光仪测溶液的浓度	144
第 4 章	提高、综合和设计性实验	149
实验 19	用静态拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	149
实验 20	液体表面张力系数的测定	153
实验 21	用电势差计与热电偶测温度	157
实验 22	霍尔效应的研究	160
实验 23	RC 和 RLC 串联电路的暂态过程	167
实验 24	迈克耳孙干涉仪	173
实验 25	利用单缝衍射测量光波波长	177
实验 26	光栅衍射	180
实验 27	弗兰克-赫兹实验	184
实验 28	光速测定	189
实验 29	电表的改装和校准	193
实验 30	单摆法测重力加速度的研究	196
参考文献		199
附录		200
附表		203

绪 论

一、物理实验的地位和作用

“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一则题词。这是物理学界的共识。无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证都要靠实验。麦克斯韦提出的电磁理论（他预言电磁波存在）只有当赫兹做出电磁学实验后才被人们公认；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”的理论，只有当实验物理学家吴健雄用实验验证后，才被同行学者承认，从而才能获得诺贝尔奖。然而，人们掌握理论的目的是在于应用它来指导生产实际，促进科学进步，推动社会前进。当理论在实际中应用时，仍必须通过实验，实验是理论和应用的桥梁。任何一门科学的发展都离不开实验，这就使实验物理课有了充实的教学内容。物理实验是主要基础课程之一。

物理实验的重要性，不仅表现在通过实验发现物理定律，而且物理学中的每一项重要突破都与实验密切相关。物理学史表明，经典物理学的形成，是伽利略、牛顿、麦克斯韦等人通过观察自然现象，反复实验，运用抽象思维的方法总结出来的。近代物理的发展，是在某些实验的基础上提出假设，例如，普朗克根据黑体辐射提出“能量子假设”，再经过大量的实验证实、假设才成为科学理论。实践证明物理实验是物理学发展的动力。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，而理论靠实验来检验，同时理论上的需要又促进实验的发展。1752 年富兰克林利用风筝把天空的电引入室内，进行室内雷鸣闪电实验，证实了雷电与电火花放电有同样的本质，进而找出了雷电的成因，并且在此基础上发明了避雷针。这个简单的实验事实，足以说明物理实验在物理学发展中所起的重要作用。

物理学发展到当今的时代，与实验的关系就更为密切，而且在许多边缘科学的建立过程中，物理实验也起了重要的桥梁作用。物理实验在探索和研究新科技领域，在推动其他自然科学和工程技术的发展中，起到的重要作用是不可低估的。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，物理实验的特点是在于它具有普遍性——力、热、光、电都有；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，科学技术的发展离不开物理实验。

在物理学发展过程中，人类积累了丰富的实验方法，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, 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, 使自己在理论应用于实践的过程中, 加深对理论的理解, 提高分析和解决实际问题的能力.

因此, 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并重.

1976 年 12 月 10 日, 因发现 J/ψ 粒子而获得诺贝尔物理学奖的丁肇中教授在斯德哥尔摩的颁奖仪式上曾语重心长地讲过这样一段震撼人心的话: “我是在旧中国长大的, 因此想借这个机会向发展中国家的青年强调实验工作的重要性. 中国有一句古话‘劳心者治人, 劳力者治于人’, 这种落后的思想, 对发展中国家的青年们有很大的害处. 由于这种思想, 很多发展中国家的学生都倾向于理论研究, 而避免实验工作. 事实上, 自然科学理论不能离开实验的基础, 特别是物理学是从实验中产生的. 我希望由于我这次获奖, 能够唤起在发展中国家的学生们的兴趣, 而注意实验工作的重要性.” 丁肇中教授的这段话值得大家认真体会.

二、物理实验课的目的和任务

物理实验是对高等学校理工科类学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程, 也是理工科学生进入大学后受到系统的实验思想和实验技能训练的开端. 通过本课程的学习, 不仅可以加深对物理理论的理解, 更重要的是使学生获得基本的实验知识, 掌握一定的实验方法和技能, 提高创新思维能力, 为进一步学习后续课程和日后的工作打好基础. 理工科学生毕业后绝大部分将不同程度地从事科研、工程技术和新技术应用开发等与实验有关的工作, 培养良好的实验素质有重要的意义. 本课程的教学目的和任务是:

(1) 通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量, 学习物理实验的基本知识、基本方法, 掌握物理实验的基本技能.

(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查阅参考资料, 正确理解实验内容, 做好实验前的准备;
- 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对象进行初步分析判断, 加深对物理学原理的理解;
- ④ 能够正确记录和处理实验数据, 绘制曲线, 评价实验结果, 撰写合格的实验报告;
- ⑤ 能够按科学实验的主要过程独立完成简单的具有设计性内容的实验.

(3) 培养与提高学生的科学实验素质. 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以及遵守纪律、团结协作、爱护公共财物的优良品德.

三、物理实验课的主要教学环节

为达到物理实验课的目的和任务, 学生应重视物理实验教学的三个重要环节.

1. 实验前的预习

为了在规定时间内, 高质量地完成实验课的任务, 学生应当作好实验前的预习. 预习

时,主要阅读实验教材,了解实验目的,搞清楚实验内容,要测量什么量,使用什么方法,实验的理论依据(原理)是什么,使用什么仪器,其仪器性能是什么,如何使用,操作要点及实验中特别要注意的问题等.在此基础上,写好预习实验报告(包括实验名称、目的、仪器、原理、内容等)以及为将要测的实验数据在原始数据记录纸上适当画好表格.有时实验不要求另写正式报告的,预习报告就是正式报告了,要特别认真撰写(按以下关于“实验报告”的要求写).如果是课题实验或设计性实验内容,需制定初步实验方案,提出对仪器设备的要求.

只有在充分了解实验内容的基础上,才能在实验操作中有目的地观察实验现象,思考问题,减少操作中的忙乱现象,提高学习的主动性.因此,每次实验前,学生必须完成规定的预习内容.一般情况下,教师要检查学生预习情况,并评定预习成绩,没有预习的学生不得动手做实验.

2. 进行实验

学生进入实验室后应遵守实验室规章制度,犹如一个科学工作者那样严格要求自己,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.不要期望实验工作始终一帆风顺,尤其是课题实验.在遇到问题时,应看作是学习的良机,冷静地分析和处理,直到修改甚至推翻你的实验方案.仪器装置出现故障时,学生应在教师指导下学习排除故障的方法,力求自己动手解决,或留意观看教师是怎样分析判断仪器的毛病、怎样修复仪器的(可能当场修复的仪器).总之,要把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任务.对实验数据要严肃对待,要用钢笔或圆珠笔把测量的原始数据正确地记录在实验课前画好的数据表格中(不允许用铅笔记录原始数据).读数一定要认真仔细(注意单位和有效数字位数),不要忘记记录有关的环境条件,如温度、压强等.如确实记错了,也不要涂改,可在错误的数字上画一条整齐的直线,在旁边写上正确值,如果整段数据都测错了,则画一个与此段大小相适应的“×”号,在情况允许时,可以简单说明为什么是错误的.记录的错误数据不要用黑圆圈或黑方块涂掉,这样可使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考.如发现数据有疑问时,可以重新实验,并对原来数据标上特殊符号以备查考.实验原始数据的优劣,决定着实验工作结果的成败.但是,未重新测量绝不允许修改实验数据,这是一个科学工作者的基本道德素养.我们保留“错误”数据,不毁掉它,是因为“错误”数据有时经过比较后竟是对的.不要用铅笔记录,给自己留有涂抹的余地,也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里,这样容易出错,况且,这已经不是“原始记录”了.

如果两个学生同时做一个实验,既要分工又要协作,各自记录实验数据,共同完成实验任务,并且,原始数据记录上应写上同组者姓名.

实验结束时,将实验数据交教师审阅签字,整理好仪器设备,关好水、电、窗等,方可离开实验室,这些都是一个实验工作者的基本素质,要成为良好的习惯.

3. 写实验报告

实验报告是对实验工作的全面总结,是交流实验经验、推广实验成果的媒介.学会撰

写实验报告是培养实验能力的一个方面. 写实验报告要用简明扼要的形式将实验结果完整、准确地表达出来, 这也是进行科学实验素质培养的必要内容之一.

实验报告要求文字通顺, 字迹端正, 数据齐全, 图表规范, 结果表示正确, 分析讨论认真. 实验报告要求在做完实验一周之内独立完成. 用学校统一印制的“实验报告纸”来书写并按时交报告, 因为这样做可以收到事半功倍的效果.

完整的实验报告通常包括以下内容:

实验名称 表示做什么实验.

实验目的 说明为什么做这个实验, 做该实验要达到什么目的.

实验仪器 列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等.

实验原理 用自己的语言对实验所依据的理论做简要叙述, 不要照抄书本. 实验原理一般包括: ①文字; ②测量和计算所依据的主要公式及其简要推导过程, 注明公式中各物理量的含义, 公式成立所应满足的实验条件等; ③画出有关的图(原理图或装置图), 如在电磁学、光学实验中, 应有相应的电路图或光路图等.

实验内容与步骤 根据实验的过程概括地、条理分明地写明实验所进行的主要内容与关键步骤.

实验数据表格与数据处理 将原始记录数据转记于实验报告纸上(原始记录也应附在报告纸后, 以便教师检查), 并尽可能用表格的形式列出, 正确表示有效数字和单位. 该作图的还应在专门的作图纸上作图. 计算按照有效数字的运算法则进行、写出主要的计算内容, 并求出误差或实验结果的不确定度, 正确运用不确定度表示实验结果.

实验结果及讨论 该部分要明确给出实验结果, 并对结果进行讨论. 实验结果不是简单的测量结果, 它包括误差分析或不确定度的评定、分析误差的主要原因和改进方法, 还应包括对实验中观察到的现象分析与解释、对实验中有关存在问题的思考及讨论和回答实验思考题等. 实验报告中也可写完成该实验的收获和建议(如对实验本身的设计思想、实验仪器的选择和改进等).

对于课题实验, 则应对实验原理的阐述、实验公式的推导、电路或光路的设计、操作步骤的安排、仪器设备的选择、数据结果的讨论等比较详尽地探讨.

物理实验虽然是在教师指导下进行的, 但在实验中学生不应是完全按照“操作指令”运转的“机器人”, 而应该积极发挥自己的主观能动性去思考问题, 进行观测与分析, 探讨最佳实验方案, 不断改进实验方法, 增强自己的才干和实验技巧. 在做物理实验时, 我们不是要一个塞满东西的脑袋, 而是要一个善于分析问题的头脑! 我们不仅要有知识, 更重要的是将知识转化为能力!

第 1 章 测量误差、不确定度与数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察物理现象,更重要的是对物理量进行定量地测量,并找出各物理量之间的内在联系。

由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等诸多因素的影响,对一物理量的测量不可能是无限精确的,即测量中的误差是不可避免的。没有测量误差的基本知识,就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度就不能正确表达和评价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果。

本章从实验教学的角度出发,主要介绍测量与误差、误差分析、有效数字、测量结果的不确定度评定等基本知识,这些知识不仅在本课程的物理实验中要经常用到,而且对于今后从事科学实验也是必须了解和掌握的。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量及其分类

所谓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,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,表示一个被测对象的测量值必须包括数值和单位。

根据测量方式,测量可分为直接测量和间接测量。

直接测量是指可直接从仪器或量具上直接读出待测量大小的测量。例如,用米尺测长度,用温度计测量温度,用电压表测电压,用天平测物体的质量等都属于直接测量。

有些物理量无法进行直接测量,待测量的量值是由若干个直接测量量经过一定的函数关系运算后才获得,这样的测量称为**间接测量**。例如,测铜柱的密度,是先用米尺直接测得它的高 h 和直径 d ,用天平测得它的质量 m ,然后由关系式 $\rho = 4m/\pi d^2 h$ 计算出铜的密度 ρ ,这就是间接测量, ρ 称为间接测量量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展,测量仪器的改进,很多原来只能间接测量的量,现在可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量,现在也可以用电表来进行直接测量。大多数的物理量都是间接测量量,但直接测量是一切测量的基础。

根据测量条件是否相同,测量又可分为等精度测量和不等精度测量。

在相同的测量条件下进行的一系列测量称为**等精度测量**。例如,同一个人,使用同一仪器,采用同样的方法,对同一待测量连续进行多次重复测量,此时应该认为每次测量的可靠程度都相同,故称之为等精度测量,这样的一组测量值称为一个测量列。应该指出:重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是仅仅为重复读数。

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,则各次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,选用的测量仪器不同,或测量方法不同,或测量人员不同等都属于不等精度测量.处理不等精度测量的结果时,需根据每个测量值的“权重”,进行“加权平均”,因此在一般物理实验中很少采用.

事实上,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.等精度的误差分析和数据处理比较容易,所以绝大多数物理实验都采用等精度测量.本书所介绍的误差和数据处理知识都是针对等精度测量的.

1.1.2 真值与误差

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不依人的意志为转移的客观量值,称为**真值**.测量的目的就是要力图得到被测量的真值,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,只能获得该物理量的近似值.也就是说,一个被测量值 x 与真值 x_0 之间总是存在着这种差值,这种差值称为**测量误差**,即

$$\Delta x = x - x_0$$

由测量所得的一切数据,都毫无例外地包含有一定数量的测量误差.没有误差的测量结果是不存在的.测量误差存在于一切测量之中,贯穿于测量过程的始终.随着科学技术水平的不断提高,测量误差可以被控制得越来越小,但是却永远不会降低到零.

从上式我们还可以看出,测量误差 Δx 显然有正负之分,因为它是指与真值的差值,常称为**绝对误差**,为与下面定义的相对误差相区别,这就是老的术语“绝对误差”的来历.注意,不要把绝对误差与测量误差的绝对值相混淆!

绝对误差是一个有量纲的数值,它表示测量值偏离真值的程度,一般保留一位有效数字.

一般来讲,真值仅是一个理想的概念,只有通过完善的测量才能获得.但是,严格的完善测量难以做到,故真值就在很多情况下都难以得到.所以绝对误差的概念只有理论上的价值.这正是人们放弃难以实际定量操作的“误差”和与绝对误差有关的概念,转而使用不确定度概念的基本原因.

“相对误差”术语也是我们常常会听到的,它同样也是一个很难定量操作的词.

测量的**相对误差**定义为测量误差的绝对值与真值的比值,用 E_r 表示

$$E_r = \frac{|\Delta x|}{x_0} \times 100\%$$

“相对误差”是一个无量纲量,常常用百分比来表示测量准确度的高低,因而相对误差有时也称为百分误差,一般保留 1 或 2 位有效数字.

1.1.3 误差的分类

正常测量的误差,按其产生的原因和性质,一般可分为系统误差、随机误差和粗大误

差三大类. 这种划分及其相应的概念, 虽然与现在广泛采用的描述测量结果的不确定度概念之间不一定存在简单的对应关系, 甚至有些概念可能还是不太严格的, 但是作为思维和理解的基础, 还是应该有所了解.

1. 系统误差

在相同条件下, 多次测量同一物理量时, 误差的大小恒定, 符号总偏向一方或误差按照某一确定的规律变化, 称为系统误差. 系统误差的来源有以下几个方面:

(1) 仪器误差: 由于仪器本身的缺陷或没有按照规定条件使用仪器而造成的. 如温度计零刻度不在冰点, 仪器的水平或铅直未调整, 天平不等臂等.

(2) 理论误差: 由于实验方法本身的不完善或测量所依据的理论公式本身的近似性而造成的. 如推导理论公式时没有把散热和吸热考虑在内, 称量轻物体的质量时忽略了空气浮力的影响, 单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋于零, 但实际做不到.

(3) 环境误差: 由于环境影响和没有按规定的条件使用仪器引起的. 如标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标称值的, 若在 30°C 条件下使用时, 如不加以修正, 就引入了系统误差.

(4) 个人误差: 由于观测者本人生理或心理特点造成的, 如动态滞后、读数有偏大或偏小的痼癖等.

系统误差按掌握程度分类, 可分为:

(1) 已定系统误差: 是指绝对值和符号已经确定, 可以估算出的系统误差分量, 一般在实验中通过修正测量数据和采用适当的测量方法(如交换法、补偿法、替换法和异号法等)予以消除. 如千分尺的零点修正.

(2) 未定系统误差: 指符号和绝对值未能确定的系统误差分量, 在实验中常用估计误差极限的方法得出(这与后面引出的 B 类不确定度有大致的对应关系). 例如, 仪表出厂时的准确度指标是用符号 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示的. 它只给出该类仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 的极限范围. 但实验者使用该仪器时并不知道该仪器的误差的确切大小和正负, 只知道该仪器的准确程度不会超过 $\Delta_{\text{仪}}$ 的极限. 对于未定系统误差, 在物理实验中我们一般只考虑测量仪器的(最大)允许误差 $\Delta_{\text{仪}}$ (简称“仪器误差”).

系统误差按数值特征或其表现的规律又可分为:

(1) 定值系统误差: 这种误差在测量过程中其大小和符号恒定不变. 例如, 天平砝码的标称值不准确等.

(2) 变值系统误差: 这种误差在测量过程中呈现规律性变化. 这种变化, 有的可能随时间而变, 有的可能随位置变化. 例如, 分光计的偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系统误差.

系统误差的特征是具有确定性和方向性, 或者都偏大, 或者都偏小. 系统误差一般应通过校准测量仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小.

系统误差是测量误差的重要组成部分, 在任何一项实验工作和具体测量中, 最大限度

地消除或减小一切可能存在的系统误差,是实验测量工作的主要任务之一,但发现并减小系统误差通常比较困难,需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析.实验结果是否正确,往往在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因此对系统误差不能轻易放过.

一般而言,对于系统误差可以在实验前对仪器进行校准,对实验方法进行改进等;在实验时采取一定的方法对系统误差进行补偿和消除;实验后对实验结果进行修正等.应预见和分析一切可能产生系统误差的因素,并尽可能减小它们.一个实验结果的优劣,往往就在于系统误差是否已经被发现或尽可能消除.在以后的实验中,对于已定系统误差,要对测量结果进行修正;对于未定系统误差,则尽可能估算出其误差限值,以掌握它对测量结果的影响.我们将在今后实验课中,针对各个实验的具体情况对系统误差进行分析和讨论.

2. 随机误差

在极力消除或修正一切明显的系统误差之后,在同一条件下多次测量同一物理量时,测量结果仍会出现一些无规律的起伏.这种在同一量的多次测量过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着的测量误差分量称为随机误差,随机误差有时也称偶然误差.随机误差是实验中各种因素的微小变动引起的,主要有:

- (1) 实验装置的变动性.如仪器精度不高,稳定性差,测量示值变动等;
- (2) 观察者本人在判断和估计读数上的变动性.主要指观察者的生理分辨本领、感官灵敏程度、手的灵活程度及操作熟练程度等带来的误差;
- (3) 实验条件和环境因素的变动性.如气流、温度、湿度等微小的、无规则的起伏变化,电压的波动以及杂散电磁场的不规则脉动等引起的误差.

这些因素的共同影响使测量结果围绕测量的平均值发生涨落变化,这一变化量就是各次测量的随机误差.随机误差的出现,就某一测量而言是没有规律的,当测量次数足够多时,随机误差服从统计分布规律,可以用统计学方法估算随机误差.

3. 粗大误差

实验中,由于实验者操作不当或粗心大意,如看错刻度、读错数字、记错数或计算错误等都会使测量结果明显地被歪曲.这种由于错误引起的误差称为粗大误差或过失误差.

由定义可以看出,严格地讲,粗大误差应称为错误,它是通过实验者的主观努力能够克服的.错误不是误差,要及时发现并在数据处理时予以剔除.而系统误差和随机误差是客观的,不可避免的,只能通过实验条件的改善和实验方法的改进予以减小,它们是由客观环境和人的感官的局限决定的.

1.1.4 随机误差的分布规律与特性

随机误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的.但对同一物理量进行多次测量时,则发现随机误差的出现服从某种统计规律.理论和实践证明,等精度测量中,当测量次数 n 很大时(理论上是 $n \rightarrow \infty$),测量列的随机误差多接近

于正态分布(即高斯分布). 标准化的正态分布曲线如图 1.1.1 所示. 图中横坐标 $\Delta x = x_i - x_0$ 表示随机误差, 纵坐标表示对应的误差出现的概率密度 $f(\Delta x)$, 应用概率论方法可导出

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1.1.1)$$

式中的特征量 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1.1.2)$$

称为标准误差, 其中 n 为测量次数.

服从正态分布的随机误差符合如下特征:

- (1) 单峰性——绝对值小的误差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——在一定的测量条件下, 绝对值很大的误差出现的概率趋于零;
- (4) 抵偿性——随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋于零, 即

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$. 也就是说, 若测量误差只有随机误差分量, 即随着测量次数的增加, 测量值的算术平均值越来越趋近于真值. 因此增加测量次数, 可以减小随机误差的影响. 抵偿性是随机误差最本质的特征, 原则上具有抵偿性的误差都可以按随机误差的方法处理.

随机误差的大小常用标准误差表示. 由概率论可知, 服从正态分布的随机误差落在 $[\Delta x, \Delta x + d(\Delta x)]$ 区间内的概率为: $f(\Delta x)d(\Delta x)$. 由此可见, 某次测量的随机误差为一确定值的概率为零, 即随机误差只能以确定的概率落在某一区间内. 概率密度函数 $f(\Delta x)$ 满足下列归一化条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x) d(\Delta x) = 1 \quad (1.1.3)$$

所以误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率 P 就是图 1.1.1 中该区间内 $f(\Delta x)$ 曲线下的面积

$$P(-\sigma < \Delta x < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta x) d(\Delta x) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}\right] d(\Delta x) = 68.3\% \quad (1.1.4)$$

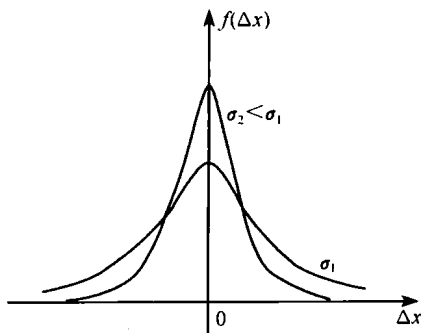


图 1.1.2 不同 σ 的概率密度曲线

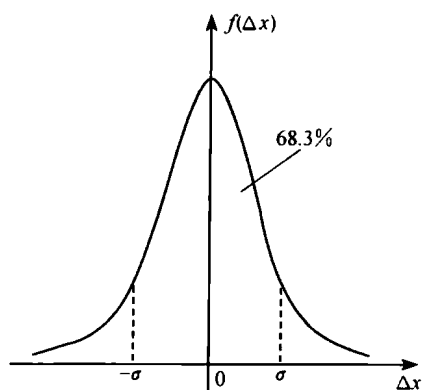


图 1.1.1 随机误差的正态分布

该积分值可由拉普拉斯积分表查得.

标准误差 σ 与各测量值的误差 Δx 有着完全不同的含义. Δx 是实在的误差值, 而 σ 并不是一个具体的测量误差值, 它反映在相同条件下进行一组测量后, 随机误差出现的概率分布情况, 只具有统计意义, 是一个统计特征量, 其物理意义为代表测量数据和测量误差分布离散程度的特征数. 图 1.1.2 是不同 σ 值时的 $f(\Delta x)$ 曲线. σ 值小, 曲线陡且峰值高, 说明测量值的误差集中, 小误差占优势, 各测量

值的分散性小,重复性好;反之, σ 值大,曲线较平坦,各测量值的分散性大、重复性差.

式(1.1.4)表明,做任一次测量,随机误差落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的概率为68.3%. 区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 称为置信区间,相应的概率称为置信概率. 显然,置信区间扩大,则置信概率提高. 置信区间取 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 、 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 时,相应的置信概率 $P(2\sigma)=95.4\%$ 、 $P(3\sigma)=99.7\%$. 定义 $\delta=3\sigma$ 为极限误差,其概率含义是在1000次测量中只有3次测量的误差绝对值会超过 3σ . 由于在一般测量中次数很少超过几十次,因此,可以认为测量误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围的概率是很小的,故称为极限误差,一般可作为可疑值取舍的判定标准,也称作剔除坏值标准的 3σ 法则.

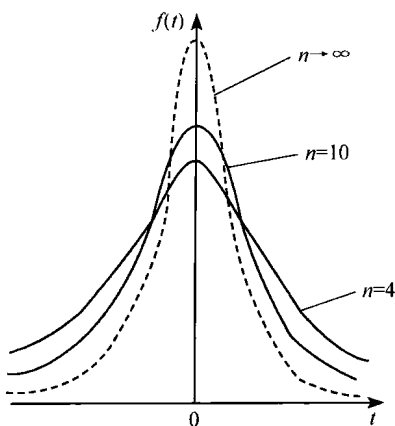


图 1.1.3

然而,实际测量总是在有限次内进行,如果测量次数 $n \leq 20$,误差分布明显偏离正态分布而呈现 t 分布形式. t 分布函数已算成数表,可在数学手册中查到, t 分布曲线如图1.1.3所示. 数理统计中可以证明,当 $n \rightarrow \infty$ 时, t 分布趋近于正态分布(图1.1.3中的虚线对应于正态分布曲线). 由图可见, t 分布比正态分布曲线变低变宽了; n 越小, t 分布越偏离正态分布. 但无论哪一种分布形式,一般都有两个重要的数字特征量,即算术平均值和标准偏差.

设在某一物理量的 n 次等精度测量中,得到测量列为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 各次测量值的随机误差为 $\Delta x_i = x_i - x_0$. 将随机误差相加

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 \quad \text{或} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_0 \quad (1.1.5)$$

用 $\bar{x}$ 代表测量列的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1.6)$$

式(1.1.5)改写为

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \bar{x} - x_0 \quad (1.1.7)$$

根据随机误差的抵偿特征,即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$,于是

$$\bar{x} \rightarrow x_0 \quad (1.1.8)$$

可见,当测量次数相当多时,系统误差忽略不计时的算术平均值 $\bar{x}$ 最接近于真值,称为测量的最佳值或近真值. 我们把测量值与算术平均值之差称为偏差(或残差)

$$\nu_i = x_i - \bar{x} \quad (1.1.9)$$

当测量次数 n 有限时,测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 仍然是真值 x_0 的最佳估计值. 证明如下:假设最佳值为 X 并用其代替真值 x_0 ,各测量值与最佳值间的偏差为 $\Delta x'_i = x_i - X$,按照最小二乘法原理,若 X 是真值的最佳估计值,则要求偏差的平方和 S 应最小,即

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2 \rightarrow \min \quad (1.1.10)$$

由求极值的法则可知, S 对 X 的微商应等于零

$$\frac{dS}{dX} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i - X) = 0 \quad (1.1.11)$$

于是

$$nX - \sum_{i=1}^n x_i = 0 \quad (1.1.12)$$

即

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad (1.1.13)$$

所以测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 是真值 x_0 的最佳估计值。

由误差理论可以证明某次测量的标准偏差的计算式为

$$S_x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (1.1.14)$$

这一公式称为贝塞尔公式。其意义表示某次测量值的随机误差在 $-\sigma_x \sim +\sigma_x$ 的概率为 68.3%, 也即表示测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 及其随机误差的离散程度。标准偏差 S_x (或 σ_x) 小表示测量值密集, 即测量的精密度高; 标准偏差 S_x (或 σ_x) 大表示测量值分散, 即测量的精密度低。

$\bar{x}$ 是被测量的最佳估计值, 但它与真值之间仍存在误差。由随机误差的抵偿性可知, $\bar{x}$ 的误差理应比任何一次单次测量值的误差更小些。

用平均值的标准偏差表示测量算术平均值的随机误差的大小程度, 数理统计理念可以证明

$$S_{\bar{x}} = \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.1.15)$$

由上式可知, $S_{\bar{x}}$ 随着测量次数的增加而减小, 似乎 n 越大, 算术平均值越接近于真值。实际上, 在 $n > 10$ 以后, $S_{\bar{x}}$ 的变化相当缓慢, 另外测量精度主要还取决于仪器的精度、测量方法、环境和测量者等因素, 因此在实际测量中, 单纯地增加测量次数是没有必要的。在本课程中一般取 5~10 次。

1.1.5 测量的精密度、正确度和准确度

测量的精密度、正确度和准确度都是评价测量结果的术语, 但目前使用时其含义并不尽一致, 以下介绍较为普遍采用的意见。

(1) 精密度: 精密度是指对同一被测量做多次重复测量时, 各次测量值之间彼此接近或分散的程度。它是对随机误差的描述, 它反映随机误差对测量的影响程度。随机误差小, 测量的精密度就高。

(2) 正确度: 正确度是指被测量的总体平均值与其真值接近或偏离的程度。它是对系统误差的描述, 它反映系统误差对测量的影响程度。系统误差小, 测量的正确度就高。