

大学物理实验

陈巧玲 主编
郭绍忠 杨晓峰 副主编

大学物理实验

陈巧玲 主编
郭绍忠 杨晓峰 副主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是福建工程学院大学物理教研室和基础教学实验中心在长期教学实践的基础上,总结教学经验编写而成的。

全书共分8章。第1章绪论,主要介绍物理实验的重要性,物理实验课的教学目的,实验课程的教学要求,以及实验报告的撰写格式等;第2章误差估算与数据处理,主要介绍实验误差和不确定度的基本概念和计算方法,以及有效数字的概念和常用实验数据处理的方法;第3章到第7章分别为力学、热学、电磁学、光学以及近代物理实验;第8章为综合性、设计性实验。全书共编入41个实验。本教程在基本物理实验中,加强了对实验步骤和实验数据处理要求两方面内容的编写,对指导大学生进行实验,以及培养学生实验数据的处理能力有较好的帮助。本书可作为普通高等院校理工科专业的大学物理实验课程的教材或教学参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/陈巧玲主编.--北京:清华大学出版社,2012.1
ISBN 978-7-302-27470-4

I. ①大… II. ①陈… 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249203号

责任编辑:朱红莲 李 嫚

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:18 字 数:431千字

版 次:2012年1月第1版 印 次:2012年1月第1次印刷

印 数:1~3500

定 价:32.00元

产品编号:043594-01

前言

FOREWORD

本书是福建工程学院大学物理教研室和物理实验中心,在长期教学实践的基础上,总结教学经验编写而成的。全书共分8章,第1章绪论,主要介绍物理实验的重要性,物理实验课的教学目的,实验课程的教学要求,以及实验报告的撰写格式等;第2章误差估算与数据处理,主要介绍实验误差和不确定度的基本概念和计算方法,以及有效数字的概念和常用实验数据处理的方法;第3章到第7章分别为力学、热学、电磁学、光学以及近代物理的基础实验;第8章为综合性、设计性实验。全书共编入41个实验。本教材是在本校物理实验中心提供的实验项目的基础上编写的,更适合本校实验教学的需要。同时,在编写过程中也尽量考虑到教材的通用性,也可作为普通高等院校理工科专业的大学物理实验课程的教材或教学参考书。

本书在第3章到第7章的基本物理实验中,加强了对实验步骤、实验数据记录表格以及数据处理要求等方面内容的编写,对指导刚接触大学基础实验的低年级学生进行实验,以及培养学生实验数据的处理能力有较好的帮助。在综合性实验中,随着实验难度的增加和实验要求的提高,实验数据处理则写得较为简明扼要,数据记录表格一般就不再给出,旨在有目标地训练学生的独立实验能力。设计性实验部分则一般只给出提供的实验仪器、简单实验原理和设计要,让学生在教师的指导下独立完成实验。书中每个实验的开篇都提供了一定的知识背景,篇尾提出的思考题能帮助学生更好地进行实验预习,书中的实验仪器设备基本上都配有实物照片,以便学生在课前预习时就能对实验仪器有一个直观的了解。

本书凝聚了福建工程学院大学物理教研室和物理实验中心所有教师的劳动成果。参加本书编写工作的有陈巧玲(主持编写工作,编写了第1章绪论、第2章误差估算与数据处理、实验1.1、实验1.2、实验2、实验4.2、实验4.3、实验8、实验9、实验16、实验19、实验20、实验28)、郭绍忠(编写实验29~实验38)、杨晓峰(编写实验12、实验15、实验18、实验21)、姚少波(编写实验10、实验23、实验24、实验26)、石梦静(编写实验11、实验13、实验25)、熊玉平(编写实验3、实验7)、白莹(编写实验4.1、实验17)、郭巧杭(编写实验5、实验6、实验27)、陈丽(编写实验14、实验22)。刘发坤、陈静、陈利昕、林文硕参与本书编写的前期资料的准备工作。全书由陈巧玲组织编写、修订和统稿。由陈巧玲、石梦静负责校对。

本书在编写过程中,广泛参考了兄弟院校的相关教材,吸收了其中优秀的思想和内容,在此表示衷心的感谢!

受编写时间和水平所限,疏漏之处在所难免,热诚欢迎专家及广大读者对本书批评并提出宝贵意见,以供我们再版时参考,使本书的编写质量得到不断的改进和提高。

编 者

2011.10

第 1 章 绪论	1
1.1 物理实验的重要性	1
1.2 物理实验课的教学目的	2
1.3 物理实验课程的教学要求	3
附录	5
第 2 章 误差估算与数据处理	6
2.1 误差基础知识	6
2.1.1 测量	6
2.1.2 误差分类和误差处理	7
2.2 测量结果的不确定度评定	10
2.2.1 不确定度的概念	10
2.2.2 不确定度的 A 类评定与 B 类评定	11
2.2.3 直接测量结果的不确定度评定	11
2.2.4 间接测量结果的不确定度评定	14
2.3 测量值的有效数字及其运算规则	16
2.3.1 测量值的有效数字	16
2.3.2 有效数字的运算规则	17
2.3.3 确定测量结果有效数字的方法	18
2.3.4 计算实例	19
2.4 实验数据处理的基本方法	22
2.4.1 列表法	22
2.4.2 图示法	23
2.4.3 图解法	25
2.4.4 逐差法	26
2.4.5 最小二乘法与线性拟合	27
练习题	30
第 3 章 力学实验	32
实验 1 固体密度的测量	32
实验 1.1 固体密度的测量方法一(用物理天平测质量)	32

实验 1.2 固体密度的测量方法二(用电子天平测质量)	35
实验 2 在气垫导轨上测定物体的速度和加速度并验证牛顿第二定律	45
实验 3 金属弹性模量的测量	53
实验 4 物体转动惯量的测定	58
实验 4.1 恒力矩转动法测定刚体转动惯量(一)	58
实验 4.2 恒力矩转动法测定刚体转动惯量(二)	62
实验 4.3 扭摆法测定物体的转动惯量	66
第 4 章 热学实验	72
实验 5 固体线膨胀系数的测定及温度的 PID 调节	72
实验 6 落球法测定液体在不同温度的黏度	76
实验 7 气体比热容比的测定	80
第 5 章 电磁学实验	85
实验 8 用模拟法测绘静电场	85
实验 9 直流电桥电路及其应用	91
实验 10 万用电表的使用	99
实验 11 用惠斯通(单臂)电桥测中值电阻	106
实验 12 电表的改装和校正	110
实验 13 晶体二极管伏安特性曲线的描绘	117
实验 14 用电位差计测量电池电动势	121
实验 15 霍尔效应实验	126
实验 16 示波器的使用	133
实验 17 声速的测定	148
第 6 章 光学实验	158
实验 18 测定薄透镜的焦距	158
实验 19 等厚干涉——牛顿环测凸透镜曲率半径	164
实验 20 分光计的调整及三棱镜顶角的测定	170
实验 21 光栅的衍射	179
第 7 章 近代物理实验	185
实验 22 迈克耳孙干涉仪测定 He-Ne 激光的波长	185
实验 23 密立根油滴实验	191
实验 24 利用超声光栅测定液体中的声速	197
实验 25 弗兰克-赫兹实验	201
实验 26 非线性电路混沌实验	207
实验 27 光电效应与普朗克常数的测定	213

第 8 章 综合性、设计性实验	219
实验 28 动力学综合实验(一)	219
实验 29 动力学综合实验(二)	224
实验 30 动力学综合实验(三)	227
实验 31 动力学综合实验(四)	229
实验 32 波尔共振实验	232
实验 33 多普勒效应综合实验	237
实验 34 微波分光仪综合实验	243
实验 35 光学综合实验系列	253
实验 36 空气热机综合实验	261
实验 37 燃料电池综合特性实验	266
实验 38 磁滞回线的测绘与研究	273
参考文献	278



绪 论

1.1 物理实验的重要性

物理学是一门实验科学。在物理学的发展过程中,实验是决定性的因素。发现新的物理现象、寻找物理规律以及验证物理定律等,都只能依靠实验。离开了实验,物理理论就会苍白无力,就会成为“无源之水,无本之木”,不可能得到发展。

经典物理学的基本定律几乎全部是实验结果的总结与推广。在 19 世纪以前,没有纯粹的理论物理学家。所有物理学家,包括对物理理论的发展有重大贡献的牛顿、菲涅耳、麦克斯韦等,都亲自从事实验工作。近代物理的发展则是从所谓“两朵乌云”和“三大发现”开始的。前者是指当时经典物理学无法解释的两个实验结果,即黑体辐射实验和迈克耳孙-莫雷实验;后者是指在实验室中发现了 X 光、放射性和电子。由于物理学的发展越来越深入、越来越复杂,而人的精力有限,才有了以理论研究为主和以实验研究为主的分工,出现了“理论物理学家”。然而,即使理论物理学家也绝对不能离开物理实验。爱因斯坦无疑是最著名的理论物理学家,而他获得诺贝尔奖是因为他正确解释了光电效应的实验。他提出的相对论是以“光速不变”的假设为基础的,在经过长期大量的实验后,相对论才成为一个被人们普遍接受的理论。

牛顿对理论和实验的关系阐述得很明白。他在 1672 年给奥尔登堡的信中说:“探求事物属性的准确方法是从实验中把他们推导出来。……考察我的理论的方法就在于考虑我所提出的实验是否确实证明了这个理论;或者提出新的实验去验证这个理论。”事实上,牛顿提出过许多理论,其中,万有引力定律被海王星的发现和哈雷彗星的准确观测等实践所证明;而他关于光的本性的学说却被杨氏干涉实验和许多衍射实验所推翻。

总之,物理学的理论来源于物理实验又必须最终由物理实验来验证。因此,要从事物理学的研究,必须掌握物理实验的基本功。正因为如此,我国物理学界的前辈们对物理实验都十分重视。创办复旦大学物理系的王福山先生亲自从一个弹簧开始筹措实验仪器设备,为建立物理教学实验室倾注了大量的心血;创办清华大学物理系的叶企孙先生对李政道这样优秀的学生,仍规定:“理论课可以免上,只参加考试;但实验不能免,每个必做。”

物理实验不仅对于物理学的研究工作极其重要,对于物理学在其他学科的应用也十分重要。当代物理学的发展已使我们的世界发生了惊人的改变,而这些改变正是物理学在各行各业中应用的结果。电子物理、电子工程、光源工程、光科学信息工程等学科都显然是以物理学为基础的,当然有大量物理学的应用。在材料科学中,各种材料的物性测试、许多新

材料的发现(如高温超导材料等)和新材料制备方法的研究(如离子束注入、激光蒸发等),都离不开物理的应用。在化学中,从光谱分析到量子化学,从放射性测量到激光分离同位素,也无不存在物理的应用。生物学的发展离不开各类显微镜(光学显微镜、电子显微镜、X光显微镜、原子力显微镜)的贡献;近代生命科学更离不开物理学,DNA的双螺旋结构就是美国遗传学家和英国物理学家共同建立,并被X光衍射实验所证实的,而对DNA的操纵、切割、重组也都需要实验物理学家的帮助。在医学中,从X光透视、B超诊断、CT诊断、核磁共振诊断到各种理疗手段,包括放射性治疗、激光治疗、 γ 刀等都是物理学的应用。物理学正在渗透到各个学科领域,而这种渗透无不与实验密切相关。显然,实验正是从物理基础理论到其他应用学科的桥梁。只有真正掌握了物理实验的基本功,才能顺利地把物理原理应用到其他学科,从而产生质的飞跃。

综上所述,要研究与发展物理学,要把物理理论应用到各行各业的实际中去,都必须重视物理实验,学好物理实验。

1.2 物理实验课的教学目的

物理实验既然那么重要,怎样才能通过物理实验课教学使学生掌握物理实验的基本功,达到培养高素质创新人才的目的呢?在培养具有创造性的工程技术人才中,物理实验教学过程必须十分重视实验知识、实验方法和实验技能的学习与训练,使学生了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。概括起来,物理实验课程要达到以下三个基本教学目的:

1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,加深对物理理论的理解和掌握,并在实践中提高发现问题、分析问题和解决问题的能力。

研究物理现象和验证物理规律是进行物理实验的根本目的。在实验的过程中要有意识地学习这种能力。一般的“验证性实验”虽然是教师安排好的,但学生应仔细体会其中的奥妙所在,不应只按所规定的步骤进行操作、记录数据、得出结果就算完成。要多问几个为什么,想一想不按规定的步骤去做会有什么问题,或者能否想出别的方法来达到同样的目的。在一定的条件下,经老师同意,还可以自己设计并完成实验。

进行物理实验是真正理解和掌握物理理论的重要手段。单从书本上得到的知识往往是不完整的、不具体的。只有通过实验,才能使抽象的概念和深奥的理论变成具体的知识和实际的经验,变为在解决实际问题中的有力工具。亲自动手,亲身体会,才能学到真正有血有肉的活生生的物理。

在实验中往往会遇到一些意想不到的问题。这些问题虽然可能不是实验研究的主要对象,但也不应轻易放过。这常常是提高分析问题、解决问题能力的好机会。要注意观察、及时记录、认真分析,必要时可以进行深入研究。实际上,科学发展过程中的不少重要发现都是在意想不到的情况下“偶然”得到的。

2) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:

- (1) 自行阅读实验教材或查阅有关资料,作好实验前的准备。
- (2) 借助教材或仪器说明书,正确使用仪器。
- (3) 运用物理学理论对实验现象进行分析判断。

(4) 正确记录和处理实验数据,绘制曲线,分析实验结果,撰写合格的实验报告。

(5) 进行实验方案的设计、优化和仪器选择。

3) 培养和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,积极创新的科学精神,严肃认真的工作态度,遵守纪律和爱护公共财产的优良品德。

3

这是在整个物理教学过程中都要贯彻的要求,而在物理实验教学中是特别重要的。因为物理学研究“物”之“理”,就是从“实事”中去求“是”,所以严肃认真的物理学工作者都坚持“实践是检验真理的唯一标准”。物理学中的“实践”主要就是物理实验,在物理实验课中最能培养实事求是、严谨踏实的科学态度。任何弄虚作假,篡改甚至伪造数据的行为都是绝对不能允许的。在物理实验课中,严格规定记录数据不准用铅笔,不能用涂改液,误记或错记数据的更改要写明理由并经指导教师认可等,都是为了帮助学生养成实事求是的良好习惯。实际上,实验结果是什么就是什么,没有“好”、“坏”之分。与原来预想不一致的实验结果不仅不应随便舍弃,还应特别重视,因为它可能是某个新发现的开端。历史上许多新的物理理论都是由于旧理论无法解释某些实验现象而建立起来的。因此,实事求是的严谨态度与积极创新的科学作风是紧密联系的。在严谨的实验中才能发现真正的问题,而解决这些问题往往就需要坚韧不拔的毅力和积极创新的思维。实际上,只要认真做实验,一定会发现许多问题,其中有些问题是教师也未必能解决的。所以,实验室可以而且应当成为培养学生求实态度和创新精神的最好场所。

1.3 物理实验课程的教学要求

1. 课前预习

预习是上好实验课的基础和前提。预习的基本要求是仔细阅读教材,了解实验的目的和要求以及所用到的原理、方法和仪器设备。一些实验有提供预习用的 CAI 软件,学生可以从电脑上清晰地看到实验概况及原理。一些实验还没有用于预习的 CAI 软件,学生最好在规定时间内去实验室了解一下实验的仪器设备状况。另外有些实验还需要阅一些参考书。通过预习,对将要做的实验应有一个初步的大致了解,并在此基础上按要求写好实验预习报告。预习报告的内容除包括实验名称、目的、仪器、实验涉及的物理量及主要计算公式,并对其作出必要的简单文字说明外,还应有实验主要内容、步骤、自行设计的实验数据表格、实验注意事项等。预习报告要求用作业纸认真撰写。预习报告中,实验数据表格要留有余地,以便有估计不到的情况发生时能够记录。直接测量的量和间接测量的量(由直接测量的量计算所得的量)在表中要清楚地分开,不应混淆。

2. 课堂实验

做实验时必须带上本次实验的预习报告。进入实验室应先做好实验登记,并将预习报告放在实验桌上以备教师检查。实验过程应注意以下几点:

(1) 遵守实验室规程,安全实验,并注意实验室卫生。实验室与教室的最大区别就是实验室中有大量的仪器设备和实验材料。在某些实验室中,有大功率电源、自来水源、煤气、压缩空气以及放射性物质、激光、易燃易爆物品或其他有毒、有害物品等。因此,进入实验室前必须详细了解并严格遵守实验室的各项规章制度。这些规章制度是为保护人身安全和仪器

设备安全而规定的,违反了就可能酿成事故,这是必须首先牢记的。做实验前要认真阅读与
本实验有关的资料,在使用任何仪器前,必须先看注意事项或说明书;对于精密贵重的仪器
或元件,要稳拿妥放,防止损坏。在电学实验中,接线完毕后,自己做一次检查,再请教师检
查,确认正确无误后才能接通电源。在调节时,应先粗调后微调;在读数时,应先取大量程
后再取小量程;实验完成后,应整理好仪器设备,关好水、电、煤气等,方可离开实验室,这
都是一个实验工作者的基本素质,应养成的良好习惯。

(2) 进行实验时,首先要记录主要仪器的型号、规格、精度等,然后再进行实验设备的布
置、安装(或接线)与调试,最后按实验步骤认真进行实验。仪器的布置是否合理,直接影
响到操作、读数是否方便。对仪器进行调试(水平、垂直、正常的工作电压、光照等),使仪器达
到最佳工作状态。调试过程必须细致、耐心,切忌急躁,如果调试中遇到困难不能解决,可
以请教指导教师。实验时,要胆大心细、严肃认真、一丝不苟。实验应独立完成,如有两人或多
人合做一个实验时,应注意团队精神和分工合作,人人动手,不要一人包办代替。在实验过
程中要十分注意各种实验现象。不仅对主要的现象、预先估计到的现象,要认真观察、仔细
测量、工整记录;对于一些次要的现象、预先没有估计到的现象,也要注意观察和如实记录,
以便进行分析和讨论。

(3) 做好实验记录。实验记录是做实验的重要组成部分,应全面真实反映实验的全过
程,包括实验的主要步骤(必要时写明为什么要采取这样的步骤)、观察与测量的条件和情况
以及观察到的现象和测量到的数据。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。记录应尽量清晰、详尽。数据记录必须真实,决不可任意伪造或篡
改。这是一个科学工作者的基本道德素养。

(4) 进行实验不确定度分析和直接测量物理量的数据处理。实验过程应根据实验的条
件进行误差分析以便得到测量不确定度的合理评定,同时应在实验室中对各个直接测量物
理量进行预处理,即进行测量数据的检验并剔除坏值,确定直接测量物理量的最佳值及标准
偏差,A、B类不确定度等。

(5) 进行实验数据检查。一个好的实验结果必须是经过反复实验才能得到。对于已经
测量的实验数据应认真进行自查。认为没有问题时,再将实验记录提交指导老师审查,并由
指导老师签名盖章认可。在实验记录未获得指导老师审查认可盖章前,切勿拆除实验装置。

3. 书写实验报告

实验报告是实验成果的总结并用于交流的书面材料。撰写实验报告是实验工作的一个
重要组成部分,应在实验结束后及时、认真撰写,并按时上交。上交时必须附上预习报告和
获得指导老师审查认可盖章的课堂实验记录的原始数据。撰写实验报告属于科技应用写作
范畴,要求按科学实验报告的规范格式书写,并做到文字简明通顺、表达清楚、字迹端正、图
表规范、数据真实、结果正确。

实验报告的内容主要应含有以下三方面:

(1) 简要地阐明为什么和如何做实验

这部分应包括实验的目的、原理、实验电路图或光路图及实验数据表格、实验步骤和实
验注意事项。尽量不要从教材、书本或其他地方照抄。

(2) 真实而全面地记录实验条件和实验过程中得到的全部信息

实验条件包括实验的环境(室温、气压等与实验有关的外部条件)、所用的仪器设备(名

称、型号、主要规格和编号等)、实验对象(样品名称、来源及其编号等)以及其他有关器材等。实验过程中要随时记下观察到的现象、发现的问题和自己产生的想法。特别当实际情况和预期不同时,要记下有何不同,分析为何不同。记录实验数据要认真、仔细,不要把数据先记在草稿上再誊上去,更不要算好了再填上去;要培养清晰而整洁地记录原始数据的能力和习惯。

(3) 认真地分析和解释实验结果,得出实验结论

实验结果不是简单的测量结果,应包括测量不确定度的评定、对测量结果与期望值的关系的讨论,分析误差的主要原因和改进方法,还应包括对实验现象的分析与解释,对实验中有关问题的思考和对实验结果的评论等。

【附录】

实验报告参考格式

《大学物理实验》实验报告

实验名称: _____

实验报告者: _____ 班级: _____ 学号: _____ 实验时

间: _____

1. 实验目的

2. 实验仪器设备(分项列出实验使用的主要仪器设备,包括名称、型号、规格、数量等。)

3. 实验原理(简明叙述,并附有必要的公式及电路图、光路图等。)

4. 实验内容和步骤(简明叙述,分项详细写出。)

5. 数据记录与处理(含实验数据表格、数据计算、作图及测量结果、不确定度、实验结论等。)

6. 分析讨论(包括对实验结果的误差分析,减少误差所采取的措施,对实验时出现或意识到的问题的讨论、实验改进建议和心得等。)

7. 回答思考与练习题

第2章

误差估算与数据处理

物理实验的目的是探寻和验证物理规律,而许多物理规律是用物理量之间的定量关系来表述的。在物理实验中可以获得大量的测量数据,这些数据必须经过认真地、正确地、有效地处理,才能得出合理的结论,从而把感性认识上升为理性认识,形成或验证物理规律。误差估算与数据处理是物理实验中极其重要的工作。本章将介绍一些最基本的误差估算与数据处理的方法,包括误差基础知识、不确定度评定、有效数字运算及实验数据处理等。

2.1 误差基础知识

2.1.1 测量

1. 测量的定义

在物理实验中,要用实验的方法研究各种物理规律,必然要对有关的物理量进行测量。所谓测量是借助专门的仪器或量具,通过一定的实验方法,将待测量与选作计量标准单位的同类量相比较,从而确定待测量是该计量单位的多少倍的过程。其倍数加上单位就是待测物理量的测量值。

2. 测量的分类

从不同的角度考虑,测量有不同的分类法。

1) 按照测量结果获得方法的不同,分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量。在测量中,利用测量仪器能够直接测出物理量的量值的测量过程称为直接测量,相应的被测量称为直接测量量。如,可以用长度测量仪器米尺、游标卡尺、螺旋测微计等测量物体的长度,用停表测单摆的摆动周期,用天平测物体的质量等。

(2) 间接测量。某些物理量,由于不便进行直接测量,或没有可以直接测量的仪器,不能进行直接测量,可以通过测量另外一个或多个相关的直接测量量,再应用相应的函数关系,求出该物理量的值,这一类的测量称为间接测量。例如,要测量一个圆柱体的体积,就可先用直接测量的方法测量出圆柱体的直径 d 和高度 h ,再用体积公式 $V = \pi d^2 h / 4$ 求出圆柱体的体积。

实际上多数物理量是采用间接测量的。原因是:待测量不能直接测量,或直接测量相当复杂,或者直接测量准确度不高。

2) 按照测量条件的不同,分为等精度测量与非等精度测量。

在相同的测量条件下,对同一对象的多次测量叫做等精度测量。若测量的条件发生变

化,同一对象测量结果的误差就不相同,这样的测量称为非等精度测量。例如,在相同的环境中,由同一个人在同一台仪器上,采用同样的方法对同一物理量进行多次测量,就是等精度测量。显然,等精度测量的可靠程度是相同的。仪器的不同,方法的差异,测量条件的改变以及测量者素质的参差不齐都会造成测量结果的不同,这样的测量结果就不是等精度的。事实上,环境、条件甚至被测物本身总是在不断变化的,但只要其变化对实验的影响很小可以忽略,就可认为是等精度测量。为了减小实验结果的误差,在实验中都要对被测的物理量进行多次等精度测量。这是实验测量的一个基本原则。

2.1.2 误差分类和误差处理

1. 真值与测量误差

任何一个物理量在确定的条件下,都存在着一个客观值。这个客观值称为真值,记为 X 。测量的目的就是得到了被测物理量的真值。但由于受到测量方法、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。被测量的真值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。对可多次测量的物理量,常用已修正过的算术平均值代替真值。

在具体测量时,由于测量误差的存在,测量值与客观真值总会有一定的差异。测量误差(绝对误差)被定义为测量值 x 与真值 X 之差,用 ϵ 表示

$$\epsilon = x - X \quad (2-1-1)$$

误差存在于一切科学实验的过程之中,不可能被完全消除。

作为科学实验的结果,不仅要知道测量所得到的值,还要知道误差的范围并了解产生误差的原因,以便将来进行新的科学实验时能够尽可能地减少误差。

2. 误差的分类和处理方法

根据误差产生的原因及特点,传统的误差理论一般将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1) 系统误差。系统误差是指在重复的测量中,保持恒定或以可预知的方式变化的测量误差分量。系统误差的来源可归结为以下几个方面:

(1) 仪器误差。由于仪器或测量工具的不完善或缺陷所造成的误差。如米尺、温度计等仪器的刻度不均匀,物理天平的不等臂等。这种误差,有的可以借助于误差修正曲线来校正,有的可以通过某种特定的方法来消除。

(2) 调整误差。由于仪器在使用中未调整到规定的状态而产生的误差。如游标卡尺、螺旋测微计等仪器的零点未校正,天平未调整到水平等。在实验测量前应严格遵守仪器调节的步骤,将仪器调节到最佳状态,最大限度地减小或消除调整误差的影响。

(3) 方法(理论)误差。由理论公式本身的近似性、测量方法的不完善,或由于实验条件不能达到理论公式所规定的条件而引起的实验误差。

如单摆周期的公式用到 $\sin\theta \approx \theta$ 的近似条件,在测重力加速度时,随着摆角的增大,误差也随之增大。

(4) 环境误差。由于测量时仪器所处的环境不能满足所要求的标准状态而引起的误差。如温度发生变化时,由米尺与被测物的膨胀系数不同所引起的测量误差;温度变化引

起电阻的阻值发生变化,从而给测量结果带来的误差。对测量结果进行适当的修正或控制环境的状态可减小或消除这种误差。

(5) 人员误差。它主要是由于实验人员的反应速度和固有的习惯而产生的。如,实验人员由于不熟练,在按停表时总是过早或过迟地按下;判读指针式仪表时,总是偏左或偏右而引起的读数误差。人员的误差应尽量克服。

系统误差可根据产生的原因采取一定的方法来减小,如将仪器进行校正、改变实验方法、对测量结果引入修正量等,但不可能绝对地“消除”。

2) 随机误差。随机误差是重复测量中以不可预知的方式变化的测量误差。这里的重复测量指的是等精度条件下的测量。

随机误差主要是由测量过程中的一系列随机因素而引起的。如,待测量本身随环境条件的涨落变化,测量对象本身的不确定性等。随机误差的特点是具有随机性,在任意一次测量之前无法预知它的大小和方向。但多次测量得到的随机误差表现出一定的统计规律性,服从某种统计分布规律。鉴于此,下面对随机误差的估算进行深入的讨论。

(1) 随机误差的统计分布规律。随机误差是一种随机变量,服从某种统计分布规律。随机误差的常用分布有二项式分布、正态分布、泊松分布、均匀分布、指数分布等。在物理实验中,等精度测量的次数足够多时,随机误差服从正态分布(又称高斯分布)。在实际的实验测量中,一般情况下测量的次数都不够多,误差的分布更接近 t 分布(又称学生分布)。

(2) 可用算术平均值表示测量结果的最佳值。在相同条件下(即等精度),对某一物理量进行的一组 n 次测量的值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的总和除以测量次数 n 所得的值,就是算术平均值,记为 $\bar{x}$,即

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

对这组测量来讲, $\bar{x}$ 被认为是最接近真值的,故又称为测量的最佳值或近真值。它与真值的关系为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = X \quad (2-1-3)$$

上述关系表明,测量次数的增加对于提高算术平均值的可靠性是有利的。但是实际上不是测量次数越多就越好。因为增加测量次数必定延长测量时间,给保持稳定的测量条件增加困难,还有可能引起大的观测误差。另外,增加测量次数对系统误差的减少不起作用,所以在实际的实验测量(尤其是学生课堂实验)中,测量的次数不必过多。一般在科学研究中,取 10~20 次,而在物理教学实验中,通常取 6~10 次。

(3) 测量结果的随机误差的正态分布和标准误差 σ 。如前所述,随机误差的特点是具有随机性,但多次测量得到的随机误差服从某种统计分布律,而最典型的分布就是正态分布。

随机误差的正态分布曲线如图 2-1-1 所示。图中, ϵ 为绝对误差, σ 为标准误差, $f(\epsilon)$ 为概率密度函数(表示在 ϵ 附近单位区间内,被测量误差出现的概率)。

由概率论知识可知,服从正态分布的随机误差的概率密度函数为

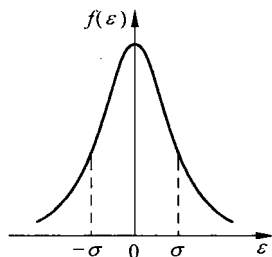


图 2-1-1 随机误差的正态分布曲线

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\epsilon^2/2\sigma^2} \quad (2-1-4)$$

其中,标准误差 σ 可表示为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} \quad (2-1-5) \quad (9)$$

由图 2-1-1 可见,正态分布的随机误差具有以下特点:

- 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;
- 对称性: 绝对值相等的正负误差出现的概率相同;
- 有界性: 在实际测量中,超过一定限度(如 $\pm 3\sigma$) 的绝对值的误差一般不会出现;
- 抵偿性: 当测量次数非常多时,由于正负误差相互抵消,故所有误差的代数和趋于零。即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = 0$ 。因此,通过多次测量求算术平均值可以减少随机误差。

(4) 标准误差 σ 的统计意义。由式(2-1-4)表示的正态分布的随机误差的概率密度函数和概率论知识可以求出:

- $\int_{-\infty}^{+\infty} f(\epsilon) d\epsilon = 1$ (满足归一化条件)。表明当 $n \rightarrow \infty$ 时,任何一次测量值与真值之差(测量误差)落在区间 $(-\infty, \infty)$ 内的概率为 1(100%)。
- $\int_{-\sigma}^{\sigma} f(\epsilon) d\epsilon = P(\sigma) = 0.683$, 即任何一次测量数据的误差落在区间 $(-\sigma, \sigma)$ 内的概率为 0.683(68.3%),或者说在所测的所有测量数据中,有 68.3% 的数据的测量误差落在区间 $(-\sigma, \sigma)$ 内。其中, P 称作置信概率, $(-\sigma, \sigma)$ 称为 68.3% 的置信概率所对应的置信区间。
- $\int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\epsilon) d\epsilon = P(2\sigma) = 0.954$, $\int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\epsilon) d\epsilon = P(3\sigma) = 0.997$ 。即测量误差落在区间 $(-2\sigma, 2\sigma)$ 内的置信概率为 0.954, 测量误差落在区间 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 内的置信概率为 0.997。

由此可知, σ 是个统计特征值,它表明了在一定条件下等精度测量结果随机误差的概率分布情况。当测量次数无限多时,测量误差的绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%,对于有限次数的测量,这种可能性更是微乎其微,于是可以认为测量误差的绝对值大于 3σ 的测量值是不可信的,应予以剔除。这是著名的 3σ 判据,在分析多次测量数据时很有用处。

(5) 标准偏差 S_x 。在有限次数测量的情况下,可以用算术平均值近似替代真值,每次测量的误差也可用测量值与算术平均值的差来估算。这种用算术平均值代替真值算出的误差称为偏差或残差,用 ν_i 表示

$$\nu_i = x_i - \bar{x} \quad (2-1-6)$$

显然,误差 ϵ 与偏差 ν_i 是有区别的,但是,测量次数 n 越大,偏差与误差的相差就越小。在有限次数测量的情况下,都用偏差来估算误差。

由于真值无法知道,因而误差无法计算。同样,标准误差 σ 也无法计算。但在测量次数 n 有限的情况下,偏差 ν_i 是可以计算的,可以用 ν_i 来计算标准误差 σ ,称为标准偏差,用符号 S_x 表示。由误差理论可得,标准偏差

$$S_x = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i^2}{n-1}} \quad (2-1-7)$$

标准偏差 S_x 的概率统计意义为,当测量次数足够多时,在一组等精度的重复测量值中,任一测量值与平均值的偏差落在区间 $(-S_x, S_x)$ 内的概率为 68.3%。式(2-1-7)亦称为贝塞尔公式。

(6) 平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 。平均值 $\bar{x}$ 也是一个随机变量,随 n 的增减而变化。但是, $\bar{x}$ 比每一次测量值 x_i 的误差更小,更接近真值。由误差理论可以证明,平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 为

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-1-8)$$

即平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 是 n 次测量标准偏差 S_x 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍,它表示真值 X 在 $(\bar{x} - S_{\bar{x}}, \bar{x} + S_{\bar{x}})$ 范围内概率是 68.3%。

3) 粗大误差。测量的误差如果明显超过规定的测量条件下的预期误差,则为粗大误差。

粗大误差产生的原因主要是实验者在实验操作、读数、记录、计算等过程中由于粗心或失误所造成的。含有粗大误差的测量值会明显歪曲客观事实,因而在数据处理时必须用适当的方法将其剔除。在实验过程中,应当避免出现粗大误差。

综上所述,系统误差、随机误差和粗大误差性质不同,来源不同,处理方法也是不同。在实验中这些误差往往是并存的,共同影响着实验测量结果。

2.2 测量结果的不确定度评定

2.2.1 不确定度的概念^①

测量中的误差是客观而普遍存在的,误差可以被减少,但不可能完全被消除(也没有必要这样做)。人们关心的是怎样把误差控制在允许的范围内。

如何评价测量结果的优劣是我们关心的另一个问题。测量结果的表述应当包含结果精确度,即误差的信息。但是由于真值的未知性,使得测量误差的大小与正负难以确定。因此,在对测量结果的质量进行定量评定时,往往只是给出误差以一定概率出现的范围,而这个用来定量评定测量结果质量的参数,即为测量不确定度。

测量不确定度,是“表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数”。测量结果不确定度是对被测量的真值所处量值范围的评定。不确定度反映了被测量的平均值附近的一个范围,真值以一定的概率落在其中。不确定度越小,标志着误差的可能值越小,测量的可信赖程度越高;不确定度越大,标志着误差的可能值越大,测量的可信赖程度越低。

^① 20 世纪 70 年代初,国际上已有越来越多的计量学者认识到使用“不确定度”代替“误差”更为科学。从此,不确定度这个术语逐渐在测量领域内被广泛应用。1978 年国际计量局(BIPM)提出了实验不确定度表示建议书 INC-1。1993 年制定的《测量不确定度表示指南》得到了 BIPM、OIML、ISO、IEC、IUPAC、IUPAP、IFCC 七个国际组织的批准,由 ISO 出版,是国际组织的重要权威文献。我国也已于 1999 年颁布了与之兼容的测量不确定度评定与表示计量技术规范。至此,测量不确定度评定成为检测和校准实验室必不可少的工作之一。