



21 世纪高等学校规划教材

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

主 编 王栋臣



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



21 世纪高等学校规划教材

大学物理实验

主 编 王栋臣

副主编 邢 伟 胡雪惠

北京邮电大学出版社

• 北京 •

内容简介

本书以《高等工科大学物理实验课程基本要求》为依据,根据非物理专业的特点,在使用多年的大学物理实验讲义的基础上,经过大量修改编写而成。书中介绍了大学物理实验课程的基本教学环节、如何学好大学物理实验课程、测量误差的基本概念和数据处理的基本方法,以及物理实验的基本测量方法和技术,同时精选了 17 个基本实验项目,每个实验介绍了实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容、数据记录、注意事项和问题讨论。

本书可以作为高等理工科院校各非物理学专业不同层次的物理实验教材或教学参考书,也可作为成人教育、电视大学 and 高职高专等物理实验课程的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王栋臣主编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2011.8

ISBN 978-7-5635-2634-5

I. ①大… II. ①王… 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 110898 号

书 名	大学物理实验
主 编	王栋臣
责任编辑	唐咸荣
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京市梦宇印务有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	11.5
字 数	285 千字
版 次	2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2634-5

定价: 23.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

物理实验是为理工科学生开设的一门独立的必修基础课程。本书按课程自身的体系和它所承担的任务,根据目前大部分高校非物理专业现有仪器设备情况精选了17个实验,内容以加强基础训练为主,让学生在学习物理实验知识、掌握实验方法和实验技能等方面受到系统的基本训练。

本书力求叙述规范,简明易懂,图文并茂。通过“大学物理实验”这门课程的学习,可以使学生会一些基本的实验方法、基本仪器的使用和基本的数据处理方法,能够养成良好的实验习惯,独立完成实验,在实验能力和实验素养等方面得到严格的培养,为后续的实验课乃至今后的科学技术工作打下坚实的基础。

参加本书编写的有王栋臣(第1章、第2章、实验1、2、3、4、5、16、17)、邢伟(实验6、7、8、附录)、胡雪惠(实验9、10、11、12、13、14、15)。

在本书的编写过程中,力求结合学生实际,符合实验教学要求,使该书成为学生学习中较为实用的教材。但由于水平有限,难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

学生实验守则

1. 不迟到、不早退,按照实验分组在规定的时间内参加实验。
2. 实验前要认真预习,提交实验预习报告,没有预习者不允许做实验。
3. 检查仪器完好情况,发现问题及时报告指导教师。
4. 实验时严格遵守操作规程,按规程组装、操作仪器,经教师检查后方可进行实验。
5. 树立良好的学风,做实验一丝不苟,积极思考,仔细操作,如实记录各种实验数据,严禁抄袭、伪造实验数据,每次实验结束后要请指导教师审阅签字。
6. 认真填写实验情况记录本。
7. 实验结束后,整理好设备,经教师检查后方可离开实验室,仪器设备若有损坏,按规定赔偿。
8. 讲文明、讲礼貌,保持实验室安静,不随地吐痰,不乱扔纸屑,不乱涂乱画,严禁在室内吸烟,保持实验室整洁。

目 录

第 1 章 绪论	1
第 1 节 大学物理实验开设的重要性	1
第 2 节 大学物理实验课程的基本教学环节	2
第 3 节 如何学好大学物理实验课程	4
第 2 章 基本概念和数据处理	6
第 1 节 测量与误差	6
第 2 节 实验不确定度的评定	13
第 3 节 有效数字	18
第 4 节 数据处理方法	21
第 5 节 物理实验的基本测量方法与技术	28
实验 1 薄透镜焦距的测量	33
实验 2 液体黏滞系数的测量	39
实验 3 静电场的模拟	50
实验 4 牛顿第二定律的验证	54
实验 5 分光计的调节和使用	62
实验 6 物体密度的测量	70
实验 7 电表的改装与校准	77
实验 8 示波器的调节和使用	94
实验 9 重力加速度的测量	117
实验 10 杨氏模量的测量	122
实验 11 迈克耳孙干涉仪的调整及使用	132
实验 12 等厚干涉现象的研究	137
实验 13 物体转动惯量的测量	141
实验 14 声速的测量	149
实验 15 直流电桥测电阻	154
实验 16 密立根油滴实验	158
实验 17 全息照相实验	163
附表	168

第1章 绪 论

第1节 大学物理实验开设的重要性

物理学是研究自然界的物质结构、物体间的相互作用和物体运动的一般规律的自然科学。物理学的研究对象具有极大的普遍性,它的基本理论渗透在自然科学和技术科学的许多领域,应用于生产技术的各个部门,它为现代科学技术文明奠定了决定性的基石。

物理学是建立在实验基础上的一门自然科学学科,物理概念的建立和物理规律的发现都以严格的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验。在科学技术高度发展的今天,科学实验的重要性更加突出了,电子物理、电子工程、光源工程、光科学信息工程等学科都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 C_{60} 、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,也无不是物理的应用;在生物学的发展史中,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为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。物理学所渗透的各个学科领域都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而产生质的飞跃。

大学物理实验是理工科学生进行科学基础训练的重要实践环节,无论专业如何,物理实验能力的培养必不可少,大学物理实验是学习和从事科学实验的起步,其目的是学习获得基本的实验知识,在实验方法、实验技能和实验数据处理等方面受到较为系统和严格的训练,培养学生严肃认真的科学态度和实事求是的科学精神,提高学生的科学素养。

在实验课上,学生借助于自己动手组建的测量系统,得到被测量的具体量值及其变化规律,加强了对被测量的认识。著名物理学家开尔文(Kelvin)曾说:“当你能把所讲的东西测量出来并用数字表示时,那么你对这个东西已有所认识。但是如果不能用数字表示,那么你的认识是不够的,不能令人满意的,可能只是初步的认识,在你的思想上,还没有上升到科学的阶段,不论你所讲的是什么东西。”

因此,物理实验是高校理工科进行科学实验训练的一门重要的基础课程,是各专业后继实验课程的基础之一,也是素质教育的重要环节。它在培养学生运用实验手段观察、分析、发现、研究和解决问题,进行科学实验基本训练,提高动手能力和科学实验素养等方面都起着重要的

作用。同时也为学生今后的学习、工作奠定良好的实验基础。通过大学物理实验课程的开设,能够做到:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,能够学习有关实验的基本知识、基本方法和基本技能,以加深和扩大对物理知识的理解;

(2) 能够培养和提高学生的科学实验能力,包括能够通过阅读实验教材或资料做好实验前的准备工作,能够自己动手组建实验测量系统,能够正确使用仪器,能够运用物理学原理对实验现象进行观察、分析和判断,能够正确记录、处理实验数据,绘制图表,撰写合格的实验报告,能够完成具有设计性内容的实验;

(3) 能够培养学生的探索精神、创新精神和严格、细致、实事求是、一丝不苟的科学态度,培养与提高学生的自主学习能力和创新能力,培养学生善于动手、乐于动手、遵守操作规程、爱护国家财产、注意安全等的科学习惯。

第2节 大学物理实验课程的基本教学环节

物理实验都着自己的特点和规律,有自己的实验理论、实验方法和实验技能,实验课的进行大致分为:提出任务,确定方案,选择仪器设备,安装调试,观察测量,记录数据,总结分析,写出实验报告。每个实验环节都有一定的基本要求、基本技能的训练。实验技能的训练贯穿于实验的全过程中,实验方法又各自分散在不同类型的实验中,因此要达到学会实验,掌握基本技能的目的,就要求认真进行每个实验环节的训练,并且在不同实验内容中学习实验方法。

大学物理实验的基本教学环节有以下三个:

1. 实验前的预习

预习是实验的准备阶段,只有认真做好预习,才能在有限的实验时间内做好实验。实验教材是学生进行实验的指导书,它对每个实验的目的与要求、实验原理都作了明确的阐述。因此,在实验前要认真地阅读,必要时还要阅读和实验有关的参考资料,基本弄清楚实验所用的实验原理和方法、使用什么仪器、仪器性能是什么、如何使用、要测试什么、操作要点及注意事项等,根据实验任务在实验记录纸上画出记录数据的表格。有些实验还要求学生在实验课前自拟实验方案,自己设计线路或光路图,自拟数据表格等。在此基础上,写好预习报告,回答预习思考题。预习报告内容主要包括以下内容:

(1) 实验名称 要做的是什么实验。

(2) 实验目的 扼要说明该实验所要解决的中心问题。

(3) 实验仪器 说明所用的主要仪器型号、规格等。

(4) 实验原理 简要阐述实验所依据的物理规律或主要公式、列出有关测量的条件,要明确哪些物理量是直接测量量、哪些是间接测量量,电学实验要绘出电原理图、光学实验应绘出光路图。

(5) 实验方法 拟出测量计划、实验步骤或操作程序。

(6) 数据记录 设计好测量数据记录表格。

每次实验前,学生必须完成规定的预习内容,指导教师在上课前将检查学生的预习情况,

并评定预习成绩;对于没有预习和未完成预习报告的学生,指导教师将停止该生本次实验。

2. 实验中的操作

进入实验室后,在不同的实验室中,分别有不同的电源、水源、激光、放射性物资等,因此,学生必须详细了解并严格遵守实验室规则和各项规章制度。

实验操作是实验的主要内容,实验时应仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书;在教师的指导下正确使用仪器,注意爱护,稳拿妥放,防止损坏。对于电学实验,要在指导教师检查电路的连接正确无误后,方可接通电源进行实验。

实验进程,首先是布置、安装和调试仪器,实验台上仪器布置要合理,要方便读数,做到操作有序,为了使仪器达到最佳的工作状态,必须细致、耐心地进行调试,冷静地分析和处理调试中出现的仪器故障,如果遇到有困难不能自己解决时,可以请教教师指导。

调试准备就绪后,开始进行测量,对实验数据要严肃对待,测量的原始数据要用钢笔或圆珠笔整齐地记录在自己准备好的表格中,做好实验记录是科学实验的一项基本功;在观察、测量时,要做到正确读数,实事求是地记录客观现象和数据。在测量过程中要尽量保持实验条件不变,在实验记录中也要反映出当天实验的室温、大气压等环境条件以及所用仪器的型号、规格、编号和性能等情况,以便以后需要时可以用来重复测量和核实实验结果的误差;测完数据后,记录的数据要经指导教师审阅签字,发现错误数据时,要重新进行测量。离开实验室前要整理好使用过的仪器,做好清洁工作。

实验操作中,要保持安静,养成自己独立完成实验的良好习惯,真正做到通过实验来提高动手能力。操作中,指导教师会根据学生的动手操作情况给出实验的操作成绩。

3. 实验后的报告

实验报告是实验工作的全面总结,写实验报告的目的是为了培养和训练学生以书面形式总结工作或报告科学成果的能力。写实验报告要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来,要求文字通顺,字迹清楚,图表正确,数据完备和结论明确,讨论认真。

实验报告通常包括以下内容:

- (1) 实验名称 表示做什么实验。
- (2) 实验目的 说明为什么做这个实验,做该实验达到什么目的。
- (3) 实验仪器 列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。
- (4) 实验原理 简明扼要地说明实验的理论依据,列出测量和计算所依据的主要公式,注明公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。画出有关的图(光路图、电路图或实验装置示意图等)。
- (5) 实验内容 概括性地写出实验进行的主要过程和注意要点。设计性实验应写出关键性的步骤和注意事项等。
- (6) 数据记录与数据处理 实验中所测得的原始数据一般要求以表格的形式列出,正确表示有效位数和单位。根据实验目的对测量的结果进行计算或作图表示,要求写出数据处理的主要过程、曲线图的绘制及误差分析等。
- (7) 实验分析及讨论 扼要写出实验结论,讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释,分析实验误差的主要来源,对实验方案及其改进意见进行讨论评述,简述自己做本实验的心得体会,回答实验思考题。一般讨论内容不受限制,这是实验报告中最灵活的部分。

实验报告必须在做完实验一周之内完成,要按时交实验报告,认真进行实验总结,撰写合格的实验报告,提高科学实验的表达能力,指导教师根据实验报告完成情况给出实验报告成绩。

第3节 如何学好大学物理实验课程

大学物理实验是一门实践性课程,对一个高等学校的学生来讲,不论专业如何,大学物理实验都是一门重要的基础课程。对所有学生来讲,了解和掌握这些进行实验研究的方法和技术,不仅对物理学理论的学习是重要的,而且对后续课程的学习,尤其是对将来所从事的实际工作所需要具备的独立工作能力和创新能力等素质来讲,也是十分必要的,这是大学物理理论课不能做到,也不能取代的。因此,大学物理实验应该是理工科学生的一门独立的重要的必修基础课程。

1. 要注意掌握基本的实验方法和测量技术

基本的实验方法和测量技术在实际工作中会经常遇到,并且是复杂的方法和技术的基础。学习时不但要搞清它们的基本道理,还应该逐步地熟悉和记牢它们,且能运用这些方法和技术设计一些简单的实验。任何一种实验方法和测量技术都有着它应用的条件、优缺点和局限性,只有亲自做了一定数量的实验后,才会对这些条件、优缺点和局限性有切身的体会。虽然方法和手段会随着科学技术和工业生产的进步而不断改进,但历史积累的方法仍是人类知识宝库精华的一部分,有了积累才能有创新,因此,从一开始就应十分重视实验方法知识的积累。

2. 要有意识地培养良好的实验习惯

学生进入实验室要遵守实验室操作规程和安全规则。在开始做实验之前,应当先认真阅读实验教材和有关仪器资料,这样才有可能对将要做的实验工作有具体而清楚的了解;在实验过程中要求认真并重视观察实验现象,一丝不苟地记录实验数据。要求记录数据要原始、完整、全面、清楚,要有必要的说明注释等。这样,才有可能在需要时随时查阅这些记录,从而在处理数据、分析结果时,有足够的 firsthand 资料。在实验过程中,凡有必要,应重复测量若干次。注意记录实验的环境条件(如室温、气压、湿度、仪表名称、规格、量程和精度等),注意实验仪器在安置和使用上的要求和特点,还要注意纠正自己不正确的操作习惯和姿势。需要两人合作时,要密切配合。良好的习惯需要经过很多次实验后的总结、反思和回顾以后才能形成。而良好的实验习惯,对保证实验的正常进行,确保实验中的安全,防止差错的发生,都有很好的作用。无数实践证明,良好习惯的养成,只有在实验的过程中有意识地去锻炼自己才行。

3. 要注意养成善于分析的习惯

实验中要善于捕捉和分析实验现象,力争独立排除实验中各种可能出现的故障,并锻炼自己自主发现问题、分析问题和解决问题的能力。如:实验数据是否合理、正确?实验结果的可靠性和正确性又如何?这些问题的解决,主要依靠分析实验方法是否正确、合理?它可能引入多大的误差?实验仪器又会带来多大的误差?实验环境、条件的影响又将如何?

为了帮助初学者克服实验经验少、还没有掌握一整套分析实验的方法等实际情况,作为大

学基础教学实验的物理实验课往往在实验教材中安排少数已有十分确切理论结论的实验课题,使初学者便于判断实验结果的正确性。但千万不要误认为做实验的目的只是为了得到一个标准的实验结果。如果获得的实验数据与标准数据符合了就高兴,一旦有所差别,就大失所望,抱怨仪器或装置不好,甚至拼凑数据,这些表现都是不正确的,是违背科学的。事实上,任何理论公式和结论都是经过一定的理论上的抽象并被简化了的,而客观事实与实验所处的环境条件则要复杂得多,实验结果与理论公式、结论之间发生差别是必然会有的,问题是差异有多大?是否合理?不论实验结果或数据的好坏,都应养成分析的习惯。当然也不要贸然下结论。首先要检查自己的操作和读数,注意实验装置和环境条件。若操作和读数经检查正确无误,那么毛病可能出现在仪器和装置本身。小的故障、小的毛病,实验者应力求自己动手去排除,起码也应留意教师或实验室工作人员是怎么着手解决的。学习教师如何去判定仪器失灵或故障所在、怎样修复。在此还应着重指出,能否发现仪器装置的故障、能否及时迅速修复,正是一个人的实验能力强弱的重要表现,初学者应要求自己逐步提高这方面的能力。

4. 要掌握好每个实验的重点

每个实验的内容都是有弹性的,首先应完成基本内容,这既是基础,也是重点。所以必须注意实验的目的,这样可以提高学习效率。完成基本内容后,如果时间许可,可以根据具体情况,进一步完成其他内容。尝试去分析实验可能存在的一些问题,如使用仪器的精度、可靠性、实验条件是否已被满足,怎样给予证实,或进一步提出改进实验的建议,试做一些新的实验内容等。

5. 要注意创新能力的培养

教学实验虽然是经过安排设计的,但同学仍然要多思考些问题。如每一项实验内容为什么要通过这样的途径(方法)进行测量,有什么改进建议等。激发求知欲望和学习热情,从而提高创新意识、增强创新能力。

第2章 基本概念和数据处理

第1节 测量与误差

物理实验离不开物理量的测量,由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,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。由此可知,测量误差、不确定度和数据处理等基本知识在整个实验过程中占有非常重要的地位。

本章从实验教学的角度出发,主要介绍误差和不确定度的基本概念、测量结果不确定度的计算、实验数据的处理和实验结果的表示等方面的基本知识。这些知识不仅在每一个实验中要用到,而且也是同学们以后从事科学实验必须要具备的基本素养。然而,这部分内容涉及面较广,深入的讨论需要较多的数学知识和丰富的实践经验,因此不能指望通过一两次的学习就完全掌握它。我们要求实验者首先对上述提到的问题有一个初步的了解,在以后的学习中,要结合一个个具体的实验再仔细阅读有关内容,通过实际运用,逐步加以掌握。

误差分析、不确定度计算以及数据处理贯穿在实验的过程始终,它表现在实验前的设计与论证、实验过程中的控制与监视,实验结束后的数据处理和结果分析。通过本章的学习和今后各实验的运用,要求达到:

- (1) 建立误差和不确定度的概念,能正确估算不确定度,懂得如何正确、完整地表达实验结果。
- (2) 掌握有效数字的概念及运算规则,了解有效数字与不确定度的关系。
- (3) 了解系统误差对测量结果的影响,学会发现某些系统误差、减少系统误差以及削弱其影响的方法。
- (4) 掌握列表法、作图法、逐差法和线性回归法等常用的数据处理方法。

一、测量

为了对物理现象作定量的描述,物理实验中必须进行物理量的测量。测量就是由测量者采取某种测量方法、用某种测量仪器将待测量与标准量进行比较。比如,为测量一个钢球的质量,可以用物理天平(测量仪器)把钢球(待测物)放在物理天平的一侧,把适量的砝码(其质量为标准量)放在另一侧,适当调节而使两侧平衡时(测量方法),即可得到待测物的质量,即待测量。

按测量方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量;按测量条件的不同,测量又分为等

精度测量和不等精度测量。

(一) 直接测量和间接测量

直接测量是把一个量与同类量直接进行比较以确定待测量的量值,就是使用量具、量仪等标准量具经过比较可以直接测得结果的测量。一般基本量的测量都属于此类,如用米尺测量物体的长度,用天平称铜块的质量,用秒表测量单摆的周期等。仪表上所标明的刻度或从显示装置上直接读取的值,都是直接测量的量值。

在物理实验中,能够直接测量的量毕竟是少数,大多数是根据直接测量所得数据,根据一定的公式,通过运算,得出所需要的结果。例如,直接测出单摆的长度 l 和单摆的周期 T ,应用公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$,以求重力加速度 g ,这种测量称为间接测量。

(二) 等精度测量和不等精度测量

对某一量 N 进行多次测量,得 k 个数值: $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$, 如果每次测量都是在相同的条件下进行的,则没有理由认为所得的 k 个值中,某一个值比另一个值要测得准确些。在这种情况下,所进行的一系列测量称为等精度测量。所谓相同条件的含义,是指同一个人,用同一台仪器,每次测量的周围条件都相同(如测量时环境、气温、照明情况等未变动)。这种情况就可认为各测量值的精确程度是相同的。对某一量 N ,进行了 k 次测量,得到 k 个值: $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$, 如果每次测量的条件不同,那么这些值的精确程度不能认为是相同的。在这种情况下,所进行的一系列测量叫做不等精度测量。例如,同一实验者用精度不同的 3 种天平称量某一物体质量 m ,得到 3 个值 m_1, m_2, m_3 , 或者用 3 种不同的方法测量某一物质的密度 ρ ,得 3 个值 ρ_1, ρ_2, ρ_3 , 这都是不等精度测量。

二、误差

一个待测物理量的大小,在客观上应该有一个真实的数值,叫做“真值” N' 。由于测量方法、测量仪器、测量条件及测量者的种种问题,实际测得的数值即测量值 N ,只能是一个真值的近似值。测量值与真值之差称为误差 ΔN 。

$$\Delta N = N - N' \quad (1)$$

任何测量都不可避免地存在误差,所以,一个完整的测量结果应该包括测量值和误差两个部分。真值是理想的概念,一般来说是不可能确切知道的。既然测量不能得到真值,那么怎样才能最大限度地减小测量误差,并估算出误差的范围呢?要回答这些问题,首先要了解误差产生的原因及其性质。误差主要来源于:仪器误差、环境误差、人员误差、方法误差。为了便于分析,根据误差的性质把它们归纳为系统误差和随机误差两大类。

(一) 系统误差

系统误差的特征是:在同一条件下,多次测量同一量值时绝对值和符号保持不变;或在条件改变时,按一定规律变化的误差。系统误差在某些情况下对测量结果的影响还比较大,因此研究系统误差产生的原因,发现、减小或消除系统误差,使测量结果更加趋于正确和可靠,是误差理论的重要课题之一,是数据处理中的一个重要的内容。

(1) 系统误差产生的原因

系统误差是由固定不变的或按确定规律变化的因素所造成的,这些误差一般是可以掌握的。

① 测量装置方面的因素。由于仪器设计制造方面的缺陷(例如尺子刻度偏大、表盘刻度不均匀等),仪器安装、调整不当等因素产生的误差。

② 测量方法方面的因素。测量所依据的理论和公式的近似性引起的误差,例如单摆实验中所用的测重力加速度公式 $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ 就是近似公式;测量条件或测量方法不能满足理论公式所要求的条件等引起的误差,例如在实验中一般忽略了摩擦、散热、电表的内阻等引起的误差都属于这一类。

③ 环境方面的因素。测量时实际温度与所要求的温度有偏差,测量过程中温度、湿度、气压等按一定规律变化的因素引起的误差。

④ 测量人员方面的因素。由于测量者本身的生理特点或固有习惯所引起的误差,例如,某些人在进行动态测量记录某一信号时有滞后的倾向。

(2) 系统误差服从的规律

根据系统误差产生的原因可以确信它不具有抵偿性,它是固定的或服从一定的规律。

① 不变系统的误差。在整个测量过程中,误差的符号和大小都固定不变的系统误差,叫做不变系统误差。例如,某尺子的公称尺寸为 100 mm,实际尺寸为 100.001 mm,误差为 -0.001 mm,若按公称尺子使用,始终会存在 -0.001 mm 的系统误差。

② 线性变化的系统误差。在测量过程中,误差值随某些因素作线性变化的系统误差,叫做线性变化的系统误差。例如,刻度值为 1 mm 的标准刻度尺,由于存在刻画误差 Δl ,每一刻度间距实际为 $1 \text{ mm} + \Delta l$,若用它测量某一物体,得到的值为 k ,则被测长度的实际值为 $L = k(1 + \Delta l)$ 这样就产生了随测量值 k 的大小而变化的线性系统误差($-k\Delta l$)。

③ 周期性变化的系统误差。测量值随某些因素按周期性变化的误差,称为周期性变化的系统误差。典型的例子如仪表指针的回转中心与刻度盘中心有偏心值 e 时,则指针在任一转角 φ 下由于偏心引起的读数误差 ΔL 即为周期性系统误差 $\Delta L = e \sin \varphi$, ΔL 的变化规律符合正弦曲线,指针在 0° 和 180° 时误差为零,而在 90° 和 270° 时误差最大为 $\pm e$ 。

④ 复杂规律变化的系统误差。在整个测量过程中,若误差是按确定的且复杂规律变化的,叫做复杂规律变化的系统误差。例如微安表的指针偏转角与偏转力矩不能严格保持线性关系,而表盘仍采用均匀刻度所产生的误差等。变化规律不太复杂的系统误差可用多项式来表示,如电阻与温度的关系可用下式表述

$$R = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2$$

式中, R 为温度为 t 时的电阻; R_{20} 为温度为 20°C 时的电阻; α 和 β 分别为电阻的一次和二次温度系数。

(3) 系统误差的发现

提高测量精度,首要问题是发现系统误差,然而在测量过程中形成系统误差的因素是复杂的,目前还没有能够适用于发现各种系统误差的普遍方法,只有根据具体测量过程和测量仪器进行全面的仔细分析,针对不同情况合理选择一种或几种方法加以校验,才能最终确定有无系统误差。下面简单介绍几种适用于发现某些系统误差的常用方法。

① 实验对比法。这种方法主要适用于发现固定系统误差,其基本思想是改变产生系统误差的条件,进行不同条件的测量。例如,采用不同方法测同一物理量,若其结果不一致,表明至少有一种方法存在系统误差。还可采用仪器对比法、参量改变对比法、改变实验条件对比法、改

变实验操作人员对比法等,测量时可根据具体实验情况选用。

② 理论分析法。主要进行定性分析来判断是否有系统误差。如分析仪器所要求的工作条件是否满足,实验所依据的理论公式所要求的条件在测量过程中是否满足,如果这些要求没有满足,则实验必有系统误差。

③ 数据分析法。主要进行定量分析来判断是否有系统误差。一般可采用残余误差观察法、残余误差校验法、不同公式计算标准差比较法、计算数据比较法、 t 检验法、秩和检验法等方法。有关误差理论方面的专著对这些方法有详尽的介绍。

(4) 系统误差的减小和消除

在实际测量中,如果判断出有系统误差存在,就必须进一步分析可能产生系统误差的因素,想方设法减小和消除系统误差。由于测量方法、测量对象、测量环境及测量人员不尽相同,因而没有一个普遍适用的方法来减小或消除系统误差。下面简单介绍几种减小和消除系统误差的方法和途径。

① 从产生系统误差的根源上消除。从产生系统误差的根源上消除误差是最根本的方法,通过对实验过程中的各个环节进行认真仔细分析,发现产生系统误差的各种因素。可以从下面几个方面采取措施来从根源上消除或减小误差:采用近似性较好又比较切合实际的理论公式,尽可能满足理论公式所要求的实验条件;选用能满足测量误差所要求的实验仪器装置,严格保证仪器设备所要求的测量条件;采用多人合作,重复实验的方法。

② 引入修正项消除系统误差。通过预先对仪器设备将要产生的系统误差进行分析计算,找出误差规律,从而找出修正公式或修正值,对测量结果进行修正。

③ 采用能消除系统误差的方法进行测量。对于某种固定的或有规律变化的系统误差,可以采用交换法、抵消法、补偿法、对称测量法、半周期偶数次测量法等特殊方法进行清除。采用什么方法要根据具体的实验情况及实验者的经验来决定。

无论采用哪种方法都不可能完全将系统误差消除,只要将系统误差减小到测量误差要求允许的范围内,或者系统误差对测量结果的影响小到可以忽略不计,就可以认为系统误差已被消除。

(二) 随机误差(又称偶然误差)

该种误差是由于感官灵敏度和仪器精密程度的限制,周围环境的干扰以及伴随着测量而来的不可预料的随机因素的影响而造成的。它的特点是大小无定值,一切都是随机发生的,因而把它叫做随机误差。但它的出现服从以下统计规律。

① 单峰性。测量值与真值相差越小,其可能性越大;与真值相差很大,其可能性较小。

② 对称性。测量值与真值相比,大于或小于某量的可能性是相等的。

③ 有界性。在一定的测量条件下,误差的绝对值不会超过一定的限度。

④ 抵偿性。随机误差的算术平均值随测量次数的增加越来越小。

根据随机误差分布的这一特点,可从数学上推导随机误差出现概率的分布函数。这个函数首先由德国数学家和理论物理学家高斯于1795年导出,因而称为高斯误差分布函数,也称正态分布函数,这一分布规律在数理统计中已有充分的研究,同学们可参阅相关书籍。

对测量中的随机误差如何处理呢?可以利用正态分布理论的一些结论来进行处理。

现设对某一物理量在测量条件相同的情况下,进行 n 次无明显系统误差的独立测量,测得 n 个测量值为

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

往往称此为一个测量列。在测量不可避免地存在随机误差的情况下,处理这一测量列时必须回答下列两个问题:

① 由于每次测量值各有差异,那么,怎样的测量值是最接近于真值的最佳值?

② 测量值的差异性即测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大,那么怎样对测量的随机误差作出估算,才能表示出测量的精密度?

在数理统计中,对此已有充分的研究。下面我们只引用它们的结论。

结论:当系统误差已被消除时,测量值的算术平均值最接近被测量的真值,测量次数越多,接近程度越好(当 $n \rightarrow \infty$ 时,平均值趋近于真值),因此我们用算术平均值表示测量结果的佳值。

算术平均值的计算式:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

以后为了简洁,常略去求和号上的求和范围,例如,将上式中简写为 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$ 。

结论:一测量列的随机误差用标准偏差来估算。标准偏差的计算公式为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}}$$

其中 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 是每一次测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 之差,称为偏差,显然,这些偏差有正有负,有大有小,不能全面体现一列测量值的离散性。因此,常用“均方根”法对它们进行统计,于是得到上述称之为标准偏差的统计公式。它可以表示这一列测量值的精密度,反映出测量值的离散性。标准偏差小就表示测量值很密集,即测量的精密度高;标准偏差大就表示测量值很分散,即测量精密度低。现在很多计算器上都有这种统计计算功能,可以直接用计算器求得 $S_x, \bar{x}$ 等数值(见计算器的使用说明书)。

值得指出的是,在多次测量时,正、负随机误差常可以大致抵消,因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响。但多次重复测量不能消除或减小测量中的系统误差。

根据上述特性,通过多次测量求平均值的方法,可以使随机误差相互抵消。算术平均值与真值较为接近,一般作为测量的结果。

随机误差用误差范围来表示,它可由误差理论估算出来,其表示方法有标准误差、平均误差和极限误差等。它们的区别仅在于概率大小的不同。对于初学者来说,首先需要的是建立误差概念以及学会用对实验结果进行评价的简单误差来进行误差估算。有些函数袖珍计算器有标准误差的计算程序,可以直接进行标准误差的计算,具体的用法可参阅计算器的使用说明书。

在测量中还可能出现错误,如读数错误、记录错误、操作错误、计算错误等。错误已不属于正常的测量工作范畴,应当尽量避免。克服错误的方法,除端正工作态度、操作方法无误外,可用与另一次测量结果相比较的办法发现并纠正。

三、误差的表示形式

误差的表示形式有绝对误差和相对误差两种。绝对误差 $\pm \Delta N$ 表示测量结果 N 与真值 N'

间的相差范围,正、负号“ $\pm$ ”表示 N 可能比 N' 大或小。由测量结果 N 及其绝对误差 ΔN 可以看出真值所在的可能范围为 $N - \Delta N \leq N' \leq N + \Delta N$,或简写为 $N' = N \pm \Delta N$ 。仅仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度,还需要看测定值本身的大小,为此引入相对误差的概念。相对误差 $E = \frac{\Delta N}{N'} = \frac{\Delta N}{N} \times 100\%$,表示绝对误差在所测物理量中所占的比重,一般用百分比表示。例如,测量一长度时得 1 000 m,而绝对误差为 1 m,测另一长度时得 100 cm,而绝对误差为 1 cm,后者的相对误差为 1%,而前者为 0.1%,所以我们认为前者较后者更可靠。

由于误差的存在,任何测量值 N 都只能在一定近似程度上表示真值 N' 的大小,而误差范围大致说明这种近似程度。完整的测量结果,不仅要说明所得数值 N 及其单位,还必须说明相应的误差,用以下的标准形式表示:

$$N' = (N \pm \Delta N)(\text{单位}) \quad (2)$$

$$E = \frac{\Delta N}{N'} \times 100\% \quad (3)$$

不标明误差的测量结果,在科学上是没有价值的。

如果待测量有理论值或公认值,也可用百分差来表示测量的好坏,即

$$\text{百分差 } E_0 = \frac{\text{测量值 } N - \text{公认值 } N''}{\text{公认值 } N''} \times 100\% \quad (4)$$

绝对误差、相对误差和百分差通常只取 1 或 2 位数字来表示。

四、误差的估算方法

(一) 单次直接测量的误差估算

在同一次实验里,常常由于条件不许可,或对测量精密度的要求不高等原因,对一物理量的直接测量只进行了一次。这时,对于测定值的误差,应根据仪器精度(最小刻度和仪器误差)、测量方法、实验条件以及实验者的感觉能力、技术水平等实际情况,进行合理估计,不能一概而论。在一般情况下,可用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ (仪器出厂时的检定)作为绝对误差。如果无厂家提供的仪器误差,则可分两种情况确定仪器误差,当仪器可连续读数时取仪器最小分度值 a 的一半作为 $\Delta_{\text{仪}}$,即 $\Delta_{\text{仪}} = a/2$;当仪器不能连续读数时则取 $\Delta_{\text{仪}} = a$;有时也可以根据实际情况,采用比仪器最小分度更大的合理数值。如果在几个测量值中,某些测量值的误差相对来说显得很小,它的误差在计算时可以忽略。

(二) 多次测量平均值的误差

为减小随机误差的影响,在可能情况下,总是采用多次测量,将各次测量值的算术平均值作为测量的结果。如 $N_1, N_2, \dots, N_n$ 为对物理量 N' 所进行的 n 次测量值,则最后结果为

$$\bar{N} = \frac{1}{n}(N_1 + N_2 + \dots + N_n)$$

每一次测量值与算术平均值的差值为

$$N_1 - \bar{N} = v_1, N_2 - \bar{N} = v_2, \dots, N_n - \bar{N} = v_n$$

在大学物理实验中,通常采用算术平均误差作为绝对误差范围。即

$$\Delta N = \frac{1}{n}(|v_1| + |v_2| + |v_3| + \dots + |v_n|)$$