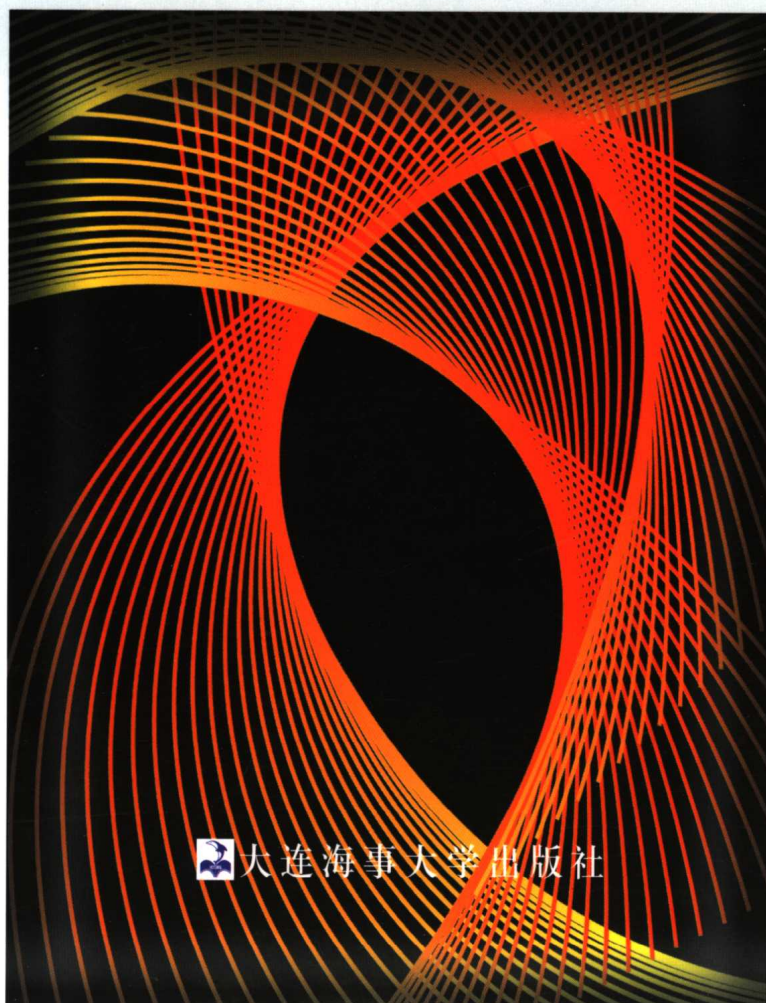


Daxue Wuli Shiyan

大学物理实验

张映辉 主编
王祝和 主审



 大连海事大学出版社

-33
99

大学物理实验

张映辉 主编
王祝和 主审

大连海事大学出版社

© 张映辉 2003

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 张映辉主编 .—大连 : 大连海事大学出版社,
2003.3

ISBN 7-5632-1622-7

I . 大… II . 张… 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(2003)第 003513 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌水桥 邮政编码:116026 电话:4728394 传真:4727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连海事大学印刷厂印装 大连海事大学出版社发行

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:13.5

字数:337 千字 印数:1 ~ 5500 册

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月第 1 次印刷

责任编辑:张 娴

封面设计:王 艳 责任校对:陈景杰

定价:20.00 元

前言

本书是按照国家教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合我校物理实验课教学改革的经验、学生专业特点及现有仪器设备编写的物理实验教材。

大学物理实验课是为工科学学校学生开设的一门独立的必修基础课，是学生进入大学后系统地接受实验方法和实验技能训练的开端，是国家教育部指定的六门重点基础课之一。本书按课程自身的体系和它所承担的任务，遵照循序渐进的原则，分为“测量的不确定度和数据处理”、“物理实验的基本训练”、“基础实验”、“综合实验”、“设计性实验”共五章 43 个实验。本教材具有如下特点：

1. 实验结果质量评定直接采用“不确定度”概念；数据处理采用最小二乘法、列表法、作图法、逐差法。

2. 在教材编写的格式上，注意对实验背景、实验设计思路的介绍，同时尽可能地介绍一些与所选实验相关的实验技术、应用情况及展望。在一些实验的方法和要求上，也提出了多种方案，给学生更多的选择余地，利于因材施教。

3. 本书对各实验的原理、使用的主要仪器及主要的实验方法都作了简要的论述，便于学生预习。某些实验给出了完整的数据记录表格及不确定度分析方法，以作示范。

4. 增加了设计性实验课题，注重实验能力、创新能力的培养，加强了对“科学实验全过程”的训练。

5. 与传统的物理实验教材相比，本教材增添了一些新的实验内容，力求反映当前主流的实验理论、技术和方法。例如将光纤技术、传感器技术等现代技术寓于学生实验中。在一些传统的实验中也使用了新的实验仪器、新的实验技术。

6. 教材各部分间依据由浅入深、循序渐进的原则，既可在更大的范围内适应不同类型、不同专业的学生，又可使学生更好地学习和掌握物理实验中的物理思想和方法。

实验教学是一项集体的事业，本书的编写凝聚了许多实验教师和技术人员的智慧，是他们多年积累的劳动成果，同时也吸收了兄弟院校的宝贵经验。再此一并表示感谢。

本书由张映辉主编，并编写绪论、第一章、第二章、基本操作练习一、基本操作练习二及第五章，负责全书的统稿；鲍宏志编写第三章实验一～十三、三十一及设计性实验(九)；彭勇编写实验十六、十九、二十、二十五～三十及设计性实验(十)、(十一)；陈季香编写实验十四、十五、十七、十八、二十一～二十四、三十二及设计性实验(一)～(八)。全书由王祝和老师审稿。由于业务水平有限，难免有漏误之处，敬请读者给予批评和指正。

编者

2002 年 10 月

目 录

绪论	1
第一章 测量的不确定度和数据处理	6
第一节 测量	6
第二节 有效数字	7
第三节 测量的不确定度	9
第四节 数据处理的基本方法	20
附录 1-1 Origin 数据处理软件简介	27
附录 1-2 计算器的统计学功能	28
附录 1-3 物理学常量表	30
第二章 物理实验的基本训练	31
第一节 基本物理量的测量和实验室常用器具	31
第二节 物理实验的基本测量方法	47
第三节 物理实验的基本操作技术	52
基本操作 练习一	54
基本操作 练习二	56
第三章 基础实验	58
实验一 测量物质的密度	58
实验二 用光杠杆测量固体的线膨胀系数	62
实验三 平衡电桥与非平衡电桥特性的研究	65
实验四 电子元件伏安特性的测定	70
实验五 用补偿法测电源电动势和内阻	74
实验六 比热容的测量	78
实验七 用扭摆法测定物体的转动惯量	81
实验八 示波器的使用	85
实验九 超声速的测定	92
实验十 衍射光栅的研究	97
实验十一 用牛顿环测透镜的曲率半径	101
实验十二 阿贝折射仪的调整与使用	105
实验十三 偏振光的观测与研究	108
第四章 综合实验	113
实验十四 用扭秤拉脱法测定液体的表面张力系数	113
实验十五 动态悬丝法测定金属材料的杨氏模量	116
实验十六 落针法测液体黏滞系数	120
实验十七 空气比热容比的测定	123

实验十八	用凯文电桥测量铜的电阻温度系数	125
实验十九	用霍尔法测磁场	129
实验二十	硅光电池的特性测定	134
实验二十一	RC 串联电路充放电特性的研究	136
实验二十二	测定铁磁材料的磁化曲线	139
实验二十三	迈克尔逊干涉仪实验	143
实验二十四	气体折射率的测定	150
实验二十五	测定热电偶的温差电动势和温差系数	153
实验二十六	光电效应法测普朗克常数	155
实验二十七	用密立根油滴仪测电子电荷	160
实验二十八	夫兰克-赫兹实验	166
实验二十九	金属电子逸出功的测定	171
实验三十	音频信号光纤传输技术	176
实验三十一	非线性位相调制假彩色编码	185
实验三十二	照相、印相和放大	189
第五章	设计性实验	192
第一节	制定设计性实验方案的原则	192
第二节	设计举例	195
第三节	系统误差的分析与处理	196
第四节	设计性实验选题	200
实验(一)	测量不规则物体的密度	200
实验(二)	重力加速度的测量	201
实验(三)	电表内阻的测量	202
实验(四)	万用表的组装	202
实验(五)	电表的改装	204
实验(六)	电子温度计的组装	205
实验(七)	玻璃折射率的测定	205
实验(八)	波长的测量	205
实验(九)	霍尔传感器应用实验	206
实验(十)	测定电子荷质比	206
实验(十一)	光敏电阻特性测定及其应用	207
参考文献		209

绪 论

一、物理实验在物理学发展史上的重要性

物理学是自然科学的基础,是当代科学技术的前沿,它的发展与突破总是标志着人类征服自然界的新的里程碑。

物理学是建立在实验基础上的实验科学。无论是物理概念的建立还是物理规律的发现都必须以严格的科学实验为基础,并通过今后的科学实验来证实。整个物理学的发展过程经历了积累和变革的交替发展过程,不论在哪一个阶段,物理实验都起着重要的作用。

16世纪意大利物理学家伽利略首先把科学实验方法引入到物理学研究中来,从而使物理学走上真正的科学道路。在他所设计的斜面实验中,有意识地忽略了空气阻力,以便抓住主要问题;改变斜面倾角(即变更实验条件),观测实验结果的变化。在此基础上,他还运用推理概括的方法,得出了超越实验本身的更为普遍的规律:物体在光滑水平面上的运动是等速直线运动;各种物体沿铅直方向自由下落均作等加速直线运动,且具有相同的加速度。伽利略的这种丰富的实验思想和实验方法对我们当今的物理实验仍有着重要的启示。17世纪,牛顿正是在伽利略、开普勒工作的基础上,建立了完整的经典力学理论。

电磁学研究的真正开创人是开文迪许和库仑,他们用自己研制出的各种测量仪器对静电现象进行定量测量,于1785年总结出了电磁理论的基础——库仑定律。电与磁之间相互联系的突破性实验是奥斯特在1820年发现的,他在一次课堂教学中,观察到通电导线会引起附近小磁针的偏转,这个实验轰动了整个欧洲。接着安培又设计研究了通电导线之间的相互作用,并在1822年建立了安培定律。既然电能产生磁,磁能否产生电呢?这理所当然是当时很多科学家的研究课题。其中法拉第进行了10年之久的实验研究,终于在1831年首次发现了电磁感应现象,总结出了电磁感应定律,并建立了场的概念。麦克斯韦将电磁现象统一成完整的电磁场理论,且预言了电磁波的存在,并指出光也是一种电磁波,这是物理学史上一次重大的变革。但这只是一种假说,问题的焦点又回到了实验。1878年夏季在柏林大学任教的亥姆霍兹向他的学生们提出一个物理竞赛题,希望有人用实验来验证电磁波的存在。这一实验课题终于由他的学生赫兹在9年之后完成了,使电磁场理论的地位得以确立。

物理学中的任何理论,都必须由实验来验证,正确的就会得到发展,错误的就会被摒弃。如在对光的本性的认识中,牛顿倡导的微粒说和惠更斯主张的波动说进行了长期的争论。最后托马斯·杨在1800年发表了双缝干涉实验,才使波动说得以确认。由于光电效应实验揭示了光的粒子性,人们又认识到光具有波粒二象性。19世纪初,多数物理学家对光和电磁波的传播不需要媒质的观点是不能接受的,因此假设宇宙空间存在着一种称之为“以太”的媒质,它具有许多异常而又不合理的特性。正是在这种情况下,1887年迈克耳逊和莫雷合作,用干涉仪进行了有名的“以太风”实验,从而否定了“以太”的存在。

在物理学发展过程中,常常出现由于旧理论不能解释新的实验现象,从而促使新理论的诞生。19世纪以来,对黑体辐射、电磁波能量的测量,人们找不到适当的理论来解释,普朗克提出量子化的观点,圆满地解释了实验结果,这就是量子理论的开端。赫兹在电磁波存在的实验

中,发现了光电效应现象,电磁波理论却不能解释它,这就促使爱因斯坦提出了光量子假说。

当代获得诺贝尔物理学奖的成果均是物理学中划时代的、里程碑级的重大发现和发明。从1901年第一次授奖至今已有百余年的历史,有近150名获奖者。其中因物理实验方面的伟大发现或发明而获奖的占2/3以上。如1901年,首届诺贝尔物理学奖得主德国人伦琴因发现X射线而获奖。著名的美籍华人杨振宁、李政道于1956年发现在弱相互作用下没有任何实验能说明宇称守恒,这一学说当时震惊了世界物理学界。以世界著名物理大师朗道、泡里为代表的反对派公开反对这一学说。然而另一位美籍华人吴健雄率领的课题组于1956年完成的 Co^{60} 衰变实验结果显示:弱相互作用下宇称不守恒。杨振宁和李政道因而于1957年获得诺贝尔物理学奖。1921年爱因斯坦因光电效应定律的发现而获得诺贝尔物理学奖,而他的具有划时代意义的相对论却没有获奖,究其根本原因是当时这一理论缺乏实验支持。随着实验技术的提高和完善,经过后来“光谱线的引力红移”实验及“雷达回波延迟”实验的完成,相对论才最终被人们接受。这些历史事实雄辩地说明了物理实验结果在物理学概念的提出、理论规律的确立及被公认的过程中所占的重要地位和所起的关键作用。

可以毫不夸张地说,没有物理实验就没有物理学的发展。因有赫兹的电磁波实验,才导致了马可尼和波波夫无线电的发明;因有1909年卢瑟福的 α 粒子散射实验,才有40年后核能的利用。单一波长激光器的问世,带来巨大的技术变革;半导体的实验结果引起大规模集成电路和计算机技术的出现;霍尔效应的实验结果,产生大量以此效应为基础的新元件和新产品。正是由于实验手段的不断进步、仪器精度的不断提高、实验设计思想的巧妙创新等,才使得人类在认识自然界的历程中不断探索、发现,进而攀登上更高的高峰。现在,物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在从物理学中不断分化出的新分支(如粒子物理、原子核物理、原子分子物理、凝聚态物理、激光物理、电子物理、等离子体物理等)以及从物理学和其他学科的交叉中生长出来的众多交叉学科(如天体物理、地球物理、化学物理、生物物理等)和各自然科学领域、技术部门,是推动科学技术发展的有力工具。当然,强调实验的重要性,绝不意味着轻视理论。任何轻视实验或轻视理论的想法都是错误的。特别是物理学发展到今天,用已经确立的理论来指导实验向新的未来领域探索,就显得更加重要。

二、物理实验课的重要性

物理实验在物理学发展中起了重要的作用。同样,物理实验技术和工程技术是相融相通的。大学物理实验是工程技术的基础。在工程技术领域工作的人从事的工作不外乎材料制作、加工、运转以及生产条件的控制。所有这些工作都离不开测量。这些测量方法和技巧多是物理实验中测量方法与技巧的移置或推广。工程技术要不断地探索新理论、新材料、新工艺,以求提高质量,降低成本,为此要进行科学实验。有关实验的设计、方法的确定、仪器的选择、数据处理等等同样也多是物理实验的移置与推广。正是在这个意义上,大学物理实验课是工科学生必修的基础课,是学生进入大学后接受系统科学实验知识和技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去发现、观察、分析、研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学素养方面,都起着至关重要的作用,将为学生今后的进一步学习和工作打下一个良好的实验基础。

物理实验在素质教育中充当重要角色。素质培养的核心是思维和创造能力的培养。从实验的角度看,人的思维和创造能力有“硬”和“软”两个方面。“硬”的方面表现为:基本实验技能与动手能力以及现代技术的应用水平。“软”的方面表现为:实验课题的选择、实验的设计思想和实验方法等。几十年来,物理实验教学的课程体系和教学内容正是从“硬”和“软”两个方

面培养学生的思维和创造能力,激发他们强烈的求知欲望及严谨的科学作风和坚韧不拔的苦干精神。

三、大学物理实验课的任务

通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,从理论和实践的结 合上加深对物理学原理的理解。

培养和提高学生基本的科学实验能力,其中包括:

1.自学能力。通过自行阅读实验教材和其他资料,能正确概括出实验内容、方法和要求,做好实验前的准备;

2.动手能力。借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用的基本仪器;安排实验顺序,把握主要实验条件,排除实验故障;

3.分析能力。运用所学知识,对实验现象和结果进行分析判断,作出结论;

4.表达能力。正确记录和处理实验数据,绘制曲线,正确表达实验结果,撰写合格的实验报告;

5.设计能力。根据课题要求,确定实验方法,合理选择仪器,拟定具体实施方案,完成简单的设计性实验。

6.培养和提高学生科学实验素养。要求学生养成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和遵守纪律、遵守操作规程、爱护公共财产、团结协作的优良品德。

四、物理实验课的基本教学环节和要求

物理实验是学生在教师指导下独立进行操作的一种实践活动。实验课的教学安排不可能像书本教学那样使所有的学生按照同样的内容以同一进度进行,教学方式主要是学生自己动手,完成实验内容规定的任务,教师只是在关键的地方给予提示和指导。因此学习物理实验就要求同学们花比较多的功夫,作较强的独立工作能力的训练。学好物理实验课的关键,在于把握住下列三个基本教学环节:

1.实验前的预习

预习至关重要,它决定着实验能否取得主动和收获的大小。为此,学生在实验前必须了解实验的全貌。要认真阅读实验教材,明确该实验的目的、实验原理、待测物理量及其测量方法;并对所用仪器的构造原理、操作方法和注意事项做到心中有数。在此基础上书写预习报告。预习报告内容主要包括以下几方面:实验名称;实验目的;原理摘要(包括主要原理公式、各量代表的物理含义及有关的测量条件。电磁学实验应绘出电路原理图;光学实验应绘出光路图);主要仪器设备;实验步骤;数据记录表格。上课时,指导教师检查学生的预习情况,对于没有预习和未完成预习报告的学生,指导教师有权停止该生本次实验。

2.实验中的操作

实验操作是实验的主要内容。进入实验室后首先对所使用的仪器设备进行检查,看其是否完备、齐全,如有问题,应向指导教师提出解决。并将主要仪器的名称、型号、规格和编号记录下来。实验时应遵守实验室规章制度,仔细阅读仪器说明书或有关仪器使用的注意事项,在教师指导下正确地组装和调试仪器。不要盲目操作、急于求成。实验时要先观察实验现象后进行精确测量。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,用钢笔或圆珠笔将原始数据如实记录在事先准备好的表格中。原始数据要做到整洁而有条

理,以便于计算和复核。如确系记错,应轻轻划上一道,在旁边写上正确值,使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和不确定度时参考。

不要忘记完成书后思考题中需要观察或测量的实验内容。

实验中遇到故障时要积极思考,在教师指导下学习排除故障的方法。实验结束时,将实验数据交教师审阅签字,整理还原仪器后方可离开实验室。

3. 实验报告

实验后要对实验数据及时处理并撰写出一份简洁明了、工整、有见解的实验报告。其目的是为了培养和训练学生书面形式总结工作或报告科学成果的能力,是物理实验基本功训练的重要组成部分。实验报告最起码应该做到字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备和结论明确。报告应给人以清晰的思路、见解和新的启迪。一般要用统一的实验报告纸书写,除填写实验名称、日期、姓名等项外,一般还包括以下几个部分:

(1)实验目的。

(2)实验原理。在理解实验原理的基础上,用自己的语言简要叙述有关物理内容。一般应写出测量中所依据的主要公式,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。必要时画出电路图或光路图。

(3)主要仪器设备。

(4)实验步骤。根据实际的实验过程写明关键步骤和安全注意要点。

(5)实验数据与数据处理。以列表形式来反映完整而清晰的原始测量数据。数据处理是对原始数据整理的过程,数据处理过程包括计算、作图、不确定度分析等。计算要有计算式,代入的数据都要有根据,既让别人看懂,也便于自己检查。作图要按作图规则,图线要规矩、美观。最后给出实验结果。

(6)小结或讨论。内容不限。可以是对实验中观察到的现象进行分析,对结果和误差原因进行分析,对实验中的关键问题或感兴趣的问题的研究讨论,也可解答思考题,提出收获或建议等。

五、怎样学好物理实验课

大学物理实验是一门实践性课程,学生是在自己独立工作的过程中增长知识、提高能力。在实验中应注意下述几个环节。

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,有足够的第一手资料。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养成。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,是在实验过程中有意识地锻炼中行成的。

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困难,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样着手解决的,向教师学习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,以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。

第一章 测量的不确定度和数据处理

第一节 测量

一、测量和单位

一切描述物质状态与物质运动的量都是物理量。这些量都只有通过测量才能确定其结果。物理量的测量是物理实验的基本操作过程,其实质是借助一定的实验器具,通过一定的实验方法,直接或间接地将待测物体的某物理量与选作计量标准单位的同类物理量做定量比较。测量的结果应包括数值(即度量的倍数)、单位(即所选定的物理量)以及结果可信赖的程度(用不确定度来表示)。

物理量的计量单位采用中华人民共和国法定计量单位,即国际单位制(SI)。国际单位制(SI)是1971年第十四届国际计量大会确定的,它规定了7个基本单位:长度——米(m)、质量——千克(kg)、时间——秒(s)、电流——安培(A)、热力学温度——开尔文(K)、物质的量——摩尔(mol)和发光强度——坎德拉(cd),还规定了两个辅助单位:平面角——弧度(rad)和立体角——球面度(sr)。有了这几个基本单位,其他一切物理量的单位就都可以导出,如体积单位(m^3)、密度单位(kg/m^3)等等,称为国际单位制的导出单位。

二、直接测量和间接测量

测量分为直接测量和间接测量。

直接测量是指将待测物理量直接与标准量(量具或仪表)进行比较,直接得到数据的方法。相应的物理量称为直接测量量。例如用米尺测量长度,用天平测量质量,用欧姆表测量电阻等。直接测量是测量的基础。

有些物理量不能用仪器或量具直接测得,而需先通过与待测量相关的一个或几个物理量的直接测量,再依据它们之间的函数关系计算出待测物理量,这种测量称为间接测量,相应的物理量就是间接测量量。例如,先直接测得圆柱体的高 H 和直径 D ,再根据 $V = \pi D^2 H/4$ 计算出体积,圆柱体体积的测量就是间接测量,圆柱体体积就是间接测量量。

值得注意的是:有的物理量既可以直接测量,也可以间接测量,这主要取决于使用的仪器和测量方法。随着测量技术的发展,用于直接测量的仪器越来越多。但在物理实验中,有许多物理量仍需要间接测量。

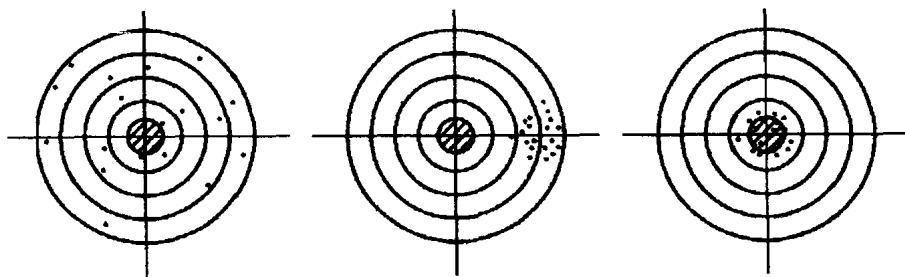
三、等精度测量与不等精度测量

如果对某物理量进行多次重复测量,而每次的测量条件都相同(即同一观测者,用同一组仪器、同一方法在同一环境下),测得一组数据分别为: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。尽管各测量值可能不相等,但没有理由认为哪一次(或几次)的测量值更可靠或更不可靠,只能认为每次测量的可靠程度都相同,这些测量称为等精度测量;相应的一组数列称为等精度测量列(简称测量列)。在所有的测量条件中,只要有一个发生变化,这时所进行的测量即为不等精度测量。实际上,一切物质都在运动中,没有绝对不变的人和事物,只要其变化对实验的影响很小乃至可以忽略,就可以认为是等精度测量。以后说到对一个物理量的多次测量,如无另加说明,都是指等精度测

量,应尽可能保持等精度测量条件不变。

四、测量的正确度、精密度和精确度

评价测量结果常用正确度、精密度和精确度三个概念。对同一物理量进行多次等精度测量,其结果也不完全相同。这好比打靶,着弹点会有一定的弥散性。如图 1.1-1, (a) 的结果比较接近客观实际,测量正确度高; (b) 的结果彼此接近,测量精密度高; 而 (c) 的测量既精密又正确则为精确度高。正确度表示测量结果系统误差的大小,精密度表示测量结果随机性误差的大小,精确度则综合反映出测量的系统误差与随机性误差的大小。



(a) 正确度高, 精密度低 (b) 精密度高, 正确度低 (c) 精密度、正确度均高

图 1.1-1 测量中的三种情况示意图

五、测量的系统误差

图 1.1-1 中的 (b) 很可能是枪的准星不正所致。同样, 测量仪器的零点不准、砝码磨损乃至测量环境和条件的变化都可能造成测量结果的不正确, 由此引起的误差称为系统误差。没被发现或没校正系统误差的测量, 其误差最终都应反映在测量的不确定度上。因其对实验结果的影响很大, 有时还难以发现, 所以有必要予以重视。有些系统误差是遵从一定规律的, 譬如卡尺端面缺损, 量具长度与温度有关, 单摆运动周期公式中忽略了周期与摆角的关系等, 这些理论上的欠缺、公式的近似、仪器的零位不准、测量者的因素以及环境的影响等等, 都会使测量值恒偏大 (偏小) 或遵从一定的规律。这些误差一般不服从统计规律。有时系统误差在一定条件下也表现出随机性, 如米尺刻度不准, 如果每次都用该米尺的这部分测量, 误差恒定, 但如用尺的不同部位多次测量, 其结果又具有统计规律。我们应学会发现系统误差, 进而减小、校正乃至消除它的影响。

第二节 有效数字

一、有效数字的一般概念

实验数据是通过测量得到的。读出的数据有几位、运算后应保留几位在实验数据处理中都有明确的规律可寻。为了理解有效数字的概念, 我们先举一个例子。如图 1.2-1 所示, 用米尺测量一棒的长度, 测量结果记为 4.14 cm、4.15 cm 或 4.16 cm 都可以。换不同的测量者进行测量, 前两位数不会变化, 我们称之为可靠数字, 但最后一位数字每个人估读的结果可能略有不同, 我们把这位数称为欠准数字或可疑数字。虽然最后这位数字欠准, 但是它客观地反映出该物体比 4.1 cm 长, 比 4.2 cm 短的实际情况, 比较合理。我们把测量中得到的全部可靠



图 1.2-1 用米尺测量棒的长度

数字和欠准数字,总称为有效数字。当被测物理量和测量仪器选定以后,测量值的有效数字的位数就已经确定了。用不同的量具或仪器测量同一物理量,精度较高的量具或仪器得到的测量结果有效位较多。另外,有效位的多少还与被测量的大小有关。

有效数字的上述定义,适用于直接测量量,也适用于间接测量量。

特别需要指出,一个物理量的测量值和数学上的一个数有着不同的意义。在数学上,4.27 cm 和 4.270 cm 没有区别,但是从测量的意义上看,4.27 cm 表示百分位上的“7”是欠准数;而 4.270 cm 表示百分位上这个“7”是准确测量出来的,而千分位的“0”才是欠准的。有效位的多少,是测量实际的客观反映,不能随意增减测得值的有效位。

因为有效数字只有最后一位是欠准的,因此大体上说有效数字的位数越多,相对不确定度就越小。

写有效数字时应注意的要点是:

1. 有效数字的位数与小数点位置无关。用以表示小数点位置的“0”不是有效数字。在单位换算时,有效数字的位数不变。例如 4.07 cm 和 0.0407 m 都是三位有效数字。

2. 对较大或较小的数,为了方便地反映有效数字的位数,应尽量采用科学记数法。即在小数点前只写一位数字,用 10 的几次幂来表示其数量级。例如地球的平均半径 6 371 km 可写作 6.371×10^6 m,表明有四位有效数字。这样可避免有效数字写错,也便于识别和记忆。

3. 表达测量结果的有效数字,其尾数应与不确定度值尾数对齐。例如 $L = (100.00 \pm 0.06)$ cm。不确定度值和相对不确定度值的有效数字一般取一位至两位(其首位数 ≥ 3 时,一般取一位;首位数 < 3 时,宜保留两位)。对有些比较精确而重要的测量结果,常将不确定度多保留一位,则测量值也就多保留一位,如普朗克常量 $h = (6.626\ 076 \pm 0.000\ 036) \times 10^{-34}$ J·s。

二、直接测量量的有效数字读取

在进行直接测量时,要用到各种各样的仪器和量具。从仪器和量具上直接读数应反映出有效数字,它是进一步估算不确定度和数据处理的基础。

一般而言,仪器的分度值是考虑到仪器误差所在位来划分的。由于仪器多种多样,读数规则也是略有区别。正确读取有效数字的方法大致归纳如下:

1. 一般读数应读到最小分度以下再估一位。但不一定估读 1/10,也可根据情况(如分度的间距、刻线及指针的粗细、分度的数值等)估读最小分度值的 1/5 或 1/2。但无论怎样估,最小分度位总是准确位,最小分度的下一位是估计的欠准位。

2. 有时读数的估读位,就取在最小分度位。如 TW-05 型物理天平的最小分度值为 0.05 g,则 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 及 0.06, 0.07, 0.08, 0.09 都是估读的,不必再估到下一位。

3. 游标类量具,只读到游标分度值,一般不再估读。

4. 数字式仪表不需要进行估读,仪器所显示的末位,就是欠准数字。

5. 实验仪器或仪表给出仪器的示值误差时,应读到仪器误差所在的那一位。

6. 在读取数据时,如果测量值恰好为整数,则必须补“0”,一直补到可疑位。例如:用最小刻度为 1 mm 的钢板尺测量某物体的长度恰为 12 mm 时,应记为 12.0 mm;如果改用游标卡尺测量同一物体,读数也为整数,应记为 12.00 mm;如再改用千分尺来测量,读数仍为整数,则应记为 12.000 mm;切不可一律记为 12 mm。

三、间接测量量有效数字的运算

间接测量量测量结果的有效数字,最终应由测量不确定度的所在位来决定。但是在计算

不确定度之前,间接测量量需要经过一系列的运算过程。运算时,参加运算的量可能很多,有效数字的位数也不一致。为了简化运算过程,一般可以按以下规则进行运算:

1. 加减法运算。和或差的末位数字所在的位置,与参与加减运算的诸数中末位数字位置最高的一个相同。例如: $278.2 + 12.451 = 290.7$ 。

2. 乘除法运算。其结果的有效数字的位数一般与参与运算诸数中有效数字位数最少的那个相同。例如: $5.348 \times 20.5 = 110$ 。

3. 乘方开方运算。一个数进行乘方、开方运算,其结果的有效数字位数一般与被乘方、开方数的有效数字位数相同。例如: $\sqrt{200} = 14.1$ 。

4. 对数运算。对数函数运算结果的有效数字中,小数点后面的位数取成与真值的位数相同。例如: $\lg 543 = 2.735$ 。

5. 指数运算。指数函数运算结果的有效数字中,按科学记数法,小数点后的位数取成与指数中小数点后的位数相同。例如 $e^{9.14} = 9.32 \times 10^3$ 。

6. 三角函数运算。结果中有效数字的取法为:将自变量欠准位变化 1,运算结果产生差异的最高位就是应保留的有效数字的最后一位。例如: $\sin 30^\circ 2' = 0.500\ 503\ 748$, $\sin 30^\circ 3' = 0.500\ 755\ 559$, 两者差异出现在小数后第 4 位上,故 $\sin 30^\circ 2' = 0.500\ 5$ 。

7. 对于常数 $\pi, \sqrt{2}, \sqrt{3}$ 等可看成有任意多位有效数字,不影响最后的计算结果。运算中其位数比计算式中其他测量值中有效位最少的多取一位。

以上所述的有效数字运算规则,只是一个基本原则。在实际问题中,为防止多次取舍而造成误差的累积效应,常常采用在中间运算时多取一位的办法。最后结果表达时,有效数字的取位再由不确定度的所在位来一并截取。

四、有效数字的修约规则

在有效数字的运算过程中,多余的欠准数如何进舍呢?按国家计量技术规范 JJG1027-91 规定进舍规则为:拟舍弃数字左边的一位数小于 5 时,舍去;大于 5 时(包括等于 5 而其后面尚有非零的数)进 1,即保留的末位加 1;拟舍数字左边一位为 5 时,且其后无数字或皆为零时,按欲保留的末位为奇数时则进 1,所保留的末位为偶数时则舍弃拟舍数字。有效数字不可连续修约。例如:

1.234 51 m 修约成 4 位有效数字,为 1.235 m;

1.233 49 m 修约成 4 位有效数字,为 1.233 m;

1.234 50 m 修约成 4 位有效数字,为 1.234 m;

1.233 50 m 修约成 4 位有效数字,为 1.234 m。

第三节 测量的不确定度

在报告物理量的测量结果时,不但要写明计量单位,而且还有责任给出表示测量质量的某些指标。1980 年 10 月,国际计量局提出了用不确定度作为评定测量结果质量如何的指标。1993 年国际计量局、国际理论与应用物理联合会等 7 个国际组织正式发布了具有国际指导性的《测量不确定度表示指南》。1999 年 5 月 1 日起我国实行了新的计量技术规范《JJF1059—1999 测量不确定度评定与表示》。本书以《指南》为基础,结合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、测量不确定度的定义

测量不确定度是与测量结果相联系的参数,用以表征测量值可信赖的程度,表征合理地赋予被测量之值的分散性。

从词义上理解,测量不确定度是指由于测量误差的存在而对测量结果有效性的可疑程度或不肯定程度;从统计概率的概念上理解,它是被测量的真值所处范围的估计值。真值是一个理想化的概念,是实际上难以操作的未知量,我们把通过实际测量所得到的量值赋予被测量,这就是测量结果。这个结果不一定落在真值上,即测量结果具有分散性或者说不确定性。因此还要考虑测量中各种因素的影响,估算出一个参数,并把这个参数赋予实际测量量的不确定性。也就是说,用一个恰当的参数来表达测量结果的实际测量量的不确定性,这个参数就是不确定度。

测量不确定度按其计算方法可分为 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量。我们将可用统计学方法求得的不确定度归为 A 类,用 Δ_A 表示;B 类不确定度分量用 Δ_B 表示,那些不能用传统统计学方法获得而又客观存在的误差,都归结为 B 类不确定度分量。

二、直接测量量的 A 类不确定度

1. 测量列的标准偏差和高斯分布

从理论上说,对物理量 X 做 n 次等精度测量,得到包含 n 个测量值的 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 一个测量列。由于是等精度测量,我们无法断定哪个值更可靠,概率论可以证明,其平均值

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

为最佳值,是最可以信赖的,也称期望值。定义该测量列的标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)} \quad (2)$$

式中, σ 是表征测得值 x_i 对其平均值 $\bar{x}$ 分散程度的参数。这一公式称为贝塞尔公式。

当 n 趋于 ∞ 时,物理量 X 将成为连续型随机变量,其概率密度分布为正态函数,形式为

$$y(x - \bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta} e^{-(x-\bar{x})^2/2\zeta^2} \quad (3)$$

或

$$y(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta} e^{-\delta^2/2\zeta^2} \quad (4)$$

其分布为一连续曲线,像一个倒扣的钟罩,如图 1.3-1 所示。 $\delta = x - \bar{x}$ 为绝对误差(简称误差), ζ 为一与具体测量条件有关的正参数。这种分布叫高斯分布或正态分布。

正态分布具有以下特点:

- (1) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的概率相等。
- (2) 单峰性:曲线呈凸形,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,曲线的峰值对应于 $\bar{x}$ 。
- (3) 有界性:绝对值很大的误差出现的概率极小,即误差的绝对值不超过一定的界限,通常 $|x_i - \bar{x}|$ 不大于 3σ 。
- (4) 抵偿性:误差的算术平均值随着 $n \rightarrow \infty$ 而趋于零,即

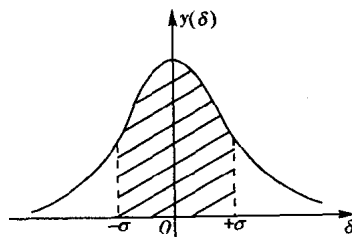


图 1.3-1 正态分布曲线

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{n} = 0$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,用式(2)中 σ 代替式(4)中 ζ , 得到

$$y(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\delta^2/2\sigma^2} \quad (5)$$

从正态函数积分表得到

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} y(\delta) d\delta &= 1, \int_{-\sigma}^{+\sigma} y(\delta) d\delta = P(\sigma) = 0.683 \\ \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} y(\delta) d\delta &= P(2\sigma) = 0.955, \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} y(\delta) d\delta = P(3\sigma) = 0.997 \end{aligned}$$

以上各式表明,当 $n \rightarrow \infty$ 时,任何一次测量值与平均值之差落在 $[-\infty, \infty]$ 区间的概率为 1, 满足归一化条件;而落在 $[-\sigma, \sigma]$ 区间的概率为 0.683, 即表示置信概率为 68.3%, 记为 $P = 0.683$; 落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 区间的概率为 0.955, 置信概率 $P = 0.955$; 落在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 区间的概率为 0.997, $P = 0.997$ 。这就是标准偏差 σ 的统计意义。

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%, 对于有限次测量,这种可能性是微乎其微的,因此可以认为是测量失误,该测量值是“坏值”,应予以剔除。在分析多次测量的数据时,这是很有用的 3σ 判据。 $\pm 3\sigma$ 称为极限误差。正态分布是连续型随机变量中最重要、最常用的分布。一般而言,若某个数量指标 X 是很多随机因素之和,而每个因素所起的作用均匀微小,则 X 为服从正态分布的变量。如上述多次等精度独立测量的情况。实际上,大量生产的同类产品,当设备、技术、原料、工艺、操作等可控制的生产条件都相对稳定,不存在明显的系统误差影响时,产品的质量指标近似服从正态分布。

2. 测量列的 A 类不确定度

在实际工作中,人们往往关心的不是测量列的数据散布特性,而是测量结果,即算术平均值的离散程度。我们设想进行了有限的 n 次(n 仍然足够大)测量后,得到一个最佳值 $\bar{x}$, 这一测量列中任一次测量值 x_i 的误差落在 $[-\sigma, \sigma]$ 区间内的概率为 68.3%。如果我们增加测量次数,例如 $(n+m)$ 次,则可得到另一个最佳值 $\bar{x}'$ 和相应的标准偏差 σ' , $\bar{x}$ 与 $\bar{x}'$ 、 σ 与 σ' 一般不会相同。继续增加测量次数,可以发现 $\bar{x}$ 也是一个随机变量。那么,随着测量次数的增加,算术平均值 $\bar{x}$ 本身的可靠性如何呢?算术平均值的标准偏差用 u_A 表示,具有什么样的性质呢?显然, $\bar{x}$ 肯定要比测量列中的任一测量值更可靠。由概率论可以证明算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差为

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

当测量次数趋于无限时,算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 将无限接近待测物理量的客观值,为最佳值。 u_A 的统计意义为:待测物理量落在 $[\bar{x} - u_A, \bar{x} + u_A]$ 区间内的概率为 68.3%;落在 $[\bar{x} - 2u_A, \bar{x} + 2u_A]$ 区间内的概率为 95.5%;落在 $[\bar{x} - 3u_A, \bar{x} + 3u_A]$ 区间内的概率为 99.7%。 u_A 叫做该测量列的 A 类不确定度,即该测量列的平均值的标准偏差。

3. t 分布

测量次数趋于无穷只是一种理论情况。根据误差理论,当测量次数很少时(如少于 10 次),