

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

◎主 编 汪 洪 赵青生

◎副主编 夏传鸿 谌正良 杨 杰

高等教育出版社

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

◎主 编 汪 洪 赵青生

◎副主编 夏传鸿 湛正艮 杨 杰

高等教育出版社·北京

内容提要

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合编者多年教学经验,适应当前的教学要求和条件编写而成。全书共八章,61个实验。本书内容包括实验数据处理的基础知识,大学物理实验中常用的一些仪器设备,演示实验,预备实验,基础实验,基本技术实验,设计性实验和近代物理与综合性、应用性实验。

本书可作为高等学校理工科类大学物理实验课程的教材,也可供其他读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 汪洪, 赵青生主编. --北京: 高等教育出版社, 2016.8

ISBN 978-7-04-046131-2

I. ①大… II. ①汪… ②赵… 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(2016)第 190133 号

策划编辑 王 硕	责任编辑 高聚平	封面设计 张申申	版式设计 王艳红
插图绘制 杜晓丹	责任校对 刘 莉	责任印制 赵义民	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京市白帆印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 21.75
字 数 530 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2016年 8月第 1版
印 次 2016年 8月第 1次印刷
定 价 39.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 46131-00

前 言

本书是在安徽大学和合肥学院合作编写的《新编大学物理实验》的基础上改编而成的.随着科学技术的进步和教育改革的发展,大学物理实验课程无论是在教学体系、教学方法、实验技术,还是在仪器设备等方面都发生了很大变化.为了适应新的教学要求和条件,体现近年来教学改革的成果,我们改编了这本实验教材.

本书的实验内容是按分层次教学的需要编排的.第一章为实验数据处理的基础知识,这部分内容可根据实际情况选用.第二章介绍了大学物理实验中常用的一些仪器设备,由于同一类仪器的型号和规格很多,不可能一一举例,这些仪器可作为参考.关于实验内容,本书按照三个教学层次编写.第一层次为入门实验,即第四章的预备实验.考虑到我国高中物理教学的现状和不同地区学校的差异,这一章所选的实验题目主要是为学生学习大学物理实验课程做一些知识的准备,为高中和大学之间做一个衔接.第二层次为第五章的基础实验和第六章的基本技术实验,这两章所选的实验题目为大学物理基本训练实验,包括力、热、电、光等不同学科分支的内容.通过这些实验让学生学习基本物理实验方法和测量技术,熟悉基本物理实验仪器的工作原理和使用方法,学习实验数据处理和分析的基本方法.第三层次为提高实验,包括第七章的设计性实验的训练和第八章的近代物理与综合性、应用性实验,通过该层次实验的学习,锻炼学生对物理实验知识的综合运用能力和独立工作的能力.设计性实验选取的是近几年在教学实践中曾经尝试过的题目,在这些实验题目中一般没有给出具体的实验原理和方法,只是提出了一些实验的要求.由于实验方案不同,所用仪器也会不同,所以题目中只给出了一些参考仪器.通过设计实验的训练,使学生体验查阅资料、设计实验方案、搭建实验设备、解决实验中出现的問題,以及分析实验结果等全过程,在整个实验过程中锻炼学生分析和解决实际物理问题的能力,提高学生的科学素养.

演示物理实验在对学生观察物理现象,增加感性知识,提高学习兴趣方面和对培养学生分析问题及解决问题的能力方面无疑具有重要的作用.尤其是开放性演示物理实验可以让学生自己动手观察实验,思考问题,在培养学生综合应用的动手能力和开拓创新的精神等方面显示出其独特的魅力.为适应开放实验的需要,第三章为演示实验单元.

本书主要供非物理专业的理、工科学生使用,旨在使学生通过学习本课程后能比较系统地掌握进行科学实验的基本知识、学会进行科学实验的基本方法、提高进行科学实验的基本技能,培养学生独立操作、独立思考、独立处理问题的能力.

本书由安徽大学和合肥学院基础物理实验教学中心汪洪、赵青生、夏传鸿组织编写和统稿,参加本次编写工作的教师有谌正良、杨杰、廖艳林、王栋、徐琳、王向川等.

实验教学是一项集体事业,无论是实验教材的编写,还是实验的开设和准备都凝聚着全体任课教师和实验技术人员的智慧和劳动成果.在本次编写过程中,征求了校内外许多具有丰富教学经验的实验指导教师的意见,参考并吸收了兄弟院校的有关教材和经验,在此深表谢

意.我们希望减少书中的不妥和错误,但是愿望与现实总是有差距,书中定有许多不足之处,恳请斧正.

编 者

2016年6月

目 录

绪论	1	实验 15 液体黏度的测定	129
1. 物理量的测量、测量误差和数据		实验 16 模拟静电场	133
处理	6	实验 17 直流电桥测电阻	136
1.1 测量与误差	6	实习 1 用惠斯通电桥测量中值电阻	136
1.2 误差的处理	10	实习 2 用双臂电桥测量低电阻	140
1.3 直接测量结果的表示和总不确定度的		实验 18 补偿原理与电位差计	144
评定	13	实验 19 示波器的使用	149
1.4 间接测量的结果及不确定度的评定	17	实验 20 分光计的调整及棱镜折射率的	
1.5 常用仪器的仪器误差(限)	19	测定	156
1.6 数据处理的基本方法	21	实习 1 分光计的调整及三棱镜顶角的	
练习题	31	测定	157
2. 物理实验的基础知识	33	实习 2 棱镜折射率的测定	162
2.1 物理实验的基本仪器	33	6. 基本技术实验	165
2.2 物理实验的基本测量方法	57	实验 21 声速的测量	165
2.3 物理实验中的基本调整与操作技术	59	实验 22 物体导热系数的测定	169
3. 演示实验	63	实验 23 冷却法测量金属的比热容	173
实验 1 力、热学演示实验	63	实验 24 空气比热容比的测定	176
实验 2 电磁学演示实验	70	实验 25 铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	
实验 3 光学演示实验	77	的测绘	178
实验 4 综合演示实验	86	实验 26 霍尔效应	184
4. 预备实验	94	实习 1 霍尔效应测量通电螺线管内部	
实验 5 长度的测量	94	磁场	184
实验 6 物体密度的测定	95	实习 2 霍尔效应及应用	189
实验 7 气垫技术	98	实验 27 用电磁感应法测交变磁场	194
实验 8 单摆实验	101	实验 28 RLC 串联电路的暂态过程	198
实验 9 测定冰的熔化热	103	实验 29 阿贝折射仪	203
实验 10 电阻元件伏安特性的测定	106	实验 30 光的干涉现象应用——牛顿环、	
实验 11 数字万用表的使用	110	劈尖	208
实验 12 光路调整与薄透镜焦距的测定	114	实验 31 迈克耳孙干涉仪的调整与使用	213
5. 基础实验	119	实验 32 衍射光栅	219
实验 13 用拉伸法测量金属丝的杨氏模量	119	实验 33 单缝衍射的光强分布及微小长度	
实验 14 转动惯量的测量	123	的测量	223
实习 1 三线摆	123	实验 34 偏振光的观察与应用	227
实习 2 扭摆法测定物体的转动惯量	126	实习 1 偏振光的观察与分析	227
		实习 2 小型旋光仪的使用	232

7. 设计性实验的训练	236	实验 51 液晶电光效应	276
实验 35 金属线胀系数的测量	236	实验 52 音频信号光纤通信原理	281
实验 36 用补偿法测量电流、电压和电阻	237	实验 53 用光学多通道分析器 (OMA) 研究 氢原子光谱	287
实验 37 直流电路设计性实验	240	实验 54 阿贝成像原理与空间滤波	293
实验 38 电学实验设计	241	实验 55 密立根油滴实验	296
实验 39 非平衡电桥与电阻温度计	242	实验 56 弗兰克-赫兹实验	302
实验 40 组装望远镜和显微镜	243	实验 57 光电效应测普朗克常量	308
实验 41 金属细丝直径的测量	244	实验 58 计算机虚拟实验	312
实验 42 透明薄片厚度测量	245	实验 59 太阳能电池的特性研究实验	316
8. 近代物理与综合性、应用性实验	246	实验 60 红外物理特性及应用实验	322
实验 43 波尔共振实验	246	实验 61 PASCO 设计实验	332
实验 44 热敏电阻温度特性的研究	252	实习 1 动力学设计实验	332
实验 45 集成电路温度传感器的特性测量 及应用	254	实习 2 电磁学设计实验	332
实验 46 用超声光栅测定液体中的声速	256	实习 3 光学设计实验	333
实验 47 法布里-珀罗干涉仪	259	实习 4 综合设计实验	333
实验 48 用迈克耳孙干涉仪测空气 折射率	263	附表 A 常用物理常量表	335
实验 49 全息照相	266	附表 B 国际单位制简介	337
实验 50 数码照相与图像处理	271	参考文献	339

绪 论

大学阶段物理实验课程的学习,不同于中学阶段的实验课.因为中学里的物理实验主要是为了扩大视野、丰富感性知识和增加动手机会;进而帮助同学了解和巩固课堂上所教的理论知识.它仅是物理课程教学的一个附属教学环节.但是,在大学阶段开设的物理实验课程是独立与“大学物理”之外,对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础实验课程,是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端.它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现乃至研究、解决问题的能力方面;在提高学生科学实验素质方面,都起着重要的作用.同时,它也将为学生今后的学习、工作奠定良好的实验基础.

1. 大学物理实验课程的基本要求

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?概括起来,应通过物理实验课程达到以下三个基本要求:

(1) 在物理实验的基本知识、基本方法、基本技能方面得到严格而系统的训练,这是做好物理实验的基础.

基本知识包括实验的原理、各类仪器的结构与工作机理、实验的误差分析与不确定度评定、实验结果的表述方法、如何对实验结果进行分析与判断等.

基本方法包括如何根据实验目的确定实验的思路与方案、如何选择和正确使用仪器、如何减少各类误差、如何采用一些特殊方法来获得通常难以获得的结果等.

基本技能包括各种调节与测试技术(粗调、微调、准直、调零、读数、定标……),电工技术(识别元件、焊接、排除故障、安全用电……),电子技术(微电流检测、弱信号放大……),传感器技术(力传感器、位移传感器、温度传感器、磁传感器、光传感器……)以及查阅文献的能力、自学能力、协作共事的能力、总结归纳能力等.

这种三基训练有时可能会比较枯燥,却是完全必要的,它体现了最基本的实际动手能力,因而必须首先保证这一要求的实现.没有这种严格的基本训练,很难成为高素质的人才.

(2) 学习用实验方法研究物理现象、验证物理规律,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.在学习“三基”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操作、记录数据、得到结果就算完成.要多问几个为什么,想一想不按所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,也可以做自己设计的实验.

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,科学史上不少重要发现都是在意想不到的情况下“偶

然”出现的。

(3) 养成实事求是的科学态度和积极创新的科学精神。

这是在整个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。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是不允许的,也是比较容易发现的。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,它可能是某个新发现的开端。实际上,只要认真去做实验,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,实验室应当而且可以成为培养学生求实态度和创新精神的最好场所。

2. 大学物理实验课的基本教学环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,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去学习,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大的工夫,有较强的独立实践能力。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

实验教材是进行实验的指导书。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,在上实验课前都要认真阅读,必要时还应阅读有关参考资料。基本看懂实验所用的原理和方法,并学会从中整理出主要实验条件、实验中的关键问题及实验注意事项,根据实验任务在实验数据记录本上画出记录数据的表格。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。对于所涉及的测量仪器,在预习时可阅读教材中有关对仪器的介绍,了解其构造原理、工作条件和操作规程等。一些实验有供预习的软件,学生可以从计算机上更清晰地看到实验概况及原理、仪器设备等,一些实验还没有预习的软件,学生最好在规定时间内去实验室观察实物,并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几个方面:①实验名称;②实验目的;③原理摘要(包括主要原理公式、列出有关测量的条件和将要被验证的规律;其中要明确哪些物理量是直接测量量;哪些物理量是间接测量量;用什么方法和测量仪器等;电学实验应绘出电原理图、光学实验应绘出光路图);④主要仪器设备;⑤在实验记录本上列出数据记录表格;⑥回答预习思考题。总之,课前预习的好坏是本次实验中能否取得主动的关键。

(2) 实验中的操作

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。在不同的实验室中,还分别有大功率电源、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!

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;在教师指导下正确使用仪器,注意爱护,稳拿妥放,防止损坏。对于电磁学实验,必须由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。对于严重违反实验室规则者,指导教师应停止其实验,并按有关规定处理。

学生进入实验室后应遵守实验室规则,按照一个科学工作者那样要求自己.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.不要期望实验工作会一帆风顺,在实验中遇到问题时,应该看作是学习的良机,冷静地分析和处理它.仪器发生故障时,也要在教师的指导下学习排除故障的方法.总之,要将重点放在实验能力的培养上,而不是简单测出几个数据就以为完成了任务.

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.在编好页码的实验记录本上,写明实验名称,实验日期,同组人,必要时还要注明天气、室温、大气压、温度等环境条件.接着要记下实验所用仪器装置的名称、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利用仪器的准确度校对核准实验结果的.对实验数据要严肃对待,要用钢笔和圆珠笔记录原始数据,如果确实记错了,也不要涂改,应轻轻划上一道,在旁边写上正确值(错误多的,需重新记录),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.

要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种较简单的故障.实验最后一般总会有数据结果,这些数据是否正确靠什么去判断?数据的好坏又说明什么?实验结果是否正确?这些问题主要是靠分析实验本身来判断,即必须分析实验方法是否正确,它带来多大误差?仪器带来多大的误差?实验环境有多大的影响等等.实验后的讨论是发挥同学们才智,提高学生分析问题和解决问题的能力之重要环节,应努力去实践.但要注意,不要空发议论,应力求定量地分析问题,做到言之有据.往往有些同学,当实验数据和理论计算一致时,就会心满意足,简单地认为已经学好了这次实验;而一旦数据和计算差别较大,又会感到失望,抱怨仪器装置甚至拼凑数据,这两种态度都是实验教学和一切实验研究活动所不可取的.实际上,任何理论公式都是一定的理论上的抽象和简单化,而客观现实和实验所处的环境条件要复杂得多,实验结果必然带来和理论公式的差异,问题在于差异的大小是否合理.所以不论数据好坏,都应逐步学会分析实验,找出成败的原因.

误差与数据处理知识是物理实验的特殊语言.实验做得好与差;两种方法测量同一物理量其结果是否一致;实验是验证还是没有验证理论等,这不能凭感觉,而必须用实验数据和实验误差来下断言.领悟并运用这种语言,才能真正置身于实验之中,亲身感受到成功的喜悦和失败的困惑.

希望同学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.实验结束,要把测得的数据交给指导老师审阅签字,对不合理的或者错误的实验结果,经分析后还要补做或重做.离开实验室前要整理好使用过的仪器,做好清洁工作.

(3) 实验后的报告

实验报告可以在预习报告的基础上继续写,也可以重写一份.

对于实验报告,有些同学往往只重视数据处理和得出实验结果,对于实验的记录以及原理、步骤等的撰写很不重视.这是很不对的.实验报告的撰写是培养实验研究人才的重要环节.

从事实验研究工作一般都需要有一个实验研究的记录本,用以记录实验中发生的各种现象和数据,这是科学研究的宝贵资料,一般将长期保存在实验室中.为了养成良好的完整记录的习惯,从而学会从事实验研究工作的基本功,在实验报告中,要求详细记录实验条件、实验仪器、实验环境、实验现象和测量数据.

研究工作取得的成果,一般都要写成论文形式发表.为了训练这种对实验成果的文字表达能力,在实验报告中,要求用自己的语言简要地写明实验目的、原理和步骤并进行适当的讨论.

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.计算要有计算式(或计算举例),代入的数据都要有根据,便于别人看懂,也便于自己检查.作图要按照作图规则,图线要规矩、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.

写实验报告的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.报告是实验成果的文字报告,所以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.报告应予同行以清晰的思路、见解和新的启迪才算得上一份成功的报告.这是每一个大学生必须具备的报告工作成果的能力.一般应写在专用的实验报告纸上,下次实验时交给指导教师批阅.实验报告的内容一般应包括:

① 实验名称.

② 实验目的.

③ 实验原理.应该在对原理理解的基础上用自己的语言简要叙述,要求做到简明扼要,图文并茂(光路图、电路图或实验装置示意图),并列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.

④ 实验内容.概括性地写出实验进行的主要过程和安全注意要点.设计型实验应该写出关键性的步骤和注意事项.

⑤ 数据表格与数据处理.记录中应该有主要实验仪器编号、规格及完整的实验数据,一般要求以列表形式来反映完整而清晰的原始测量数据.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.在计算处理完成以后,必须以醒目的方式完整地表示出实验结果.

⑥ 小结或讨论.一般讨论内容不受限制,可以是对观察到的实验现象进行分析,对结果和误差原因进行分析,对实验方案及其改进意见进行讨论评述,还可以谈谈做本实验的体会和对教师或教材的批评及建议等.这是实验报告中最开放,最灵活的部分,重在说理,所以能反映实验者观察和分析能力的高低.

报告无疑应该按照自己的思路来写,特别受赞赏的是分享自身体会的经验.

3. 如何学好大学物理实验课

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.因而上列教学目的能否达到,在很大程度上取决于学生自己的努力.鉴于我国目前中学阶段对学生实验的训练普遍比较薄弱的现状,在大学阶段想学好物理实验课程,不仅要多花力气、下苦工夫;还应当特别注意改进自己的学习方法.

(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既会经常用到,也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,并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.

(2) 要有意识地培养良好的实验习惯

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,这样你才有可能对将要做的

实验工作有具体而清楚的了解;而当你在完成一个实验的同时,一定要有一份完整而真实的实验记录,这样,你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,有足够的资料;才能帮助你正确地去理解,你到底在做什么实验.在实验过程中,凡有必要,应重复测量若干次,多测读几次,一般总要比只读一次为好(至少能确保不读错!).要注意记录实验的环境条件(如室温、气压、温度、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,有时甚至还要注意纠正自己不正确的操作习惯和姿势.良好的习惯需要经过很多实验后的总结、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.如果就单个实验习惯而言,由于比较易于理解,又不难掌握,反而容易被初学者所忽视.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.

在具体的实验课题中,有些实验的完成需与其他同学的合作,与他们共同讨论、分析实验的结果,将会使你获得比你独自分析有着更多的收获;有时,你在做实验时,如果受时间或条件的限制,仅来得及完成实验任务的二分之一或更少,但只要坚持认真去做,也将比仓促而马虎地赶完全部实验任务获益更多.

(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,力争独立地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?靠什么去判断?数据的“好”或“坏”,又说明了什么?实验结果的可靠性和正确性如何?这些问题的解决,主要依靠分析实验的本身和实验的过程去判断;换言之,就是实验方法是否正确、合理?它可能引入多大的误差?实验仪器又会带来多少误差?实验环境、条件的影响又将如何等.

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室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,使初学者便于联系和判断实验结果的正确性.但千万不要误认为做实验的目的就是为了得到一个标准的实验结果.不论实验结果或数据的好坏,都应养成分析的习惯,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.对于小的故障、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;如果仪器失灵,也要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,及时迅速修复,这也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

每个实验中都有较多的内容,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,可以根据自己的具体实际情况,尝试去分析以下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.当然,不应简单地重复.

总之,物理实验课有着自己的特点和规律,要学好这门课不是一件容易的事情.希望同学们在学习过程中不断提高对它的兴趣.

1. 物理量的测量、测量误差和数据处理

物理实验是以测量为基础的.研究物理现象,了解物质特性、验证物理原理都需要进行测量.实践证明:任何测量结果都具有误差,误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中.这是由于任何测量器具、测量环境、测量人员及测量方法等都不能做到绝对严密,这些就使得测量不可避免地伴随有误差产生.因此分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作.为此,我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法等有关知识.

本章主要介绍了物理量的测量、测量误差理论、实验数据处理、实验结果的表示和实验设计等方面的初步知识,作为进入实验前的基础准备.这些知识不仅在每一个物理实验都要用到,而且是今后从事科学实验工作必须了解和掌握的.由于这部分内容牵涉面较广,新概念又多,深入地讨论它们,已超出了本课程的范围.因此,我们只能注重介绍一些基本概念,引用一些结论和公式,以满足本课程的教学需要.由于同学们还不具备足够的基础知识,学习这一部分内容时会觉得有些困难,再加上内容又比较多,所以不可能通过一两次学习即可掌握.这一部分内容非常重要,要求同学们在认真阅读教材基础上,对提到的问题有一个初步的了解,以后结合每一个具体实验再细读有关的段落,通过运用加以掌握.应当说明的是,对这些内容的深入讨论是普通计量学和数理统计学的任务.我们暂时只能引用它们的某些现成结论和计算公式.详细探讨和证明留待在数理统计课中学习.

1.1 测量与误差

1.1.1 测量和单位

1.1.1.1 物理量

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量值.所谓测量,就是将确定的待测物理量直接或间接地与取作标准的单位同类物理量进行比较.得到比值的过程,称为“测量”.这个比值就是待测物理量的数值,加上相应的单位就构成了一个完整的“物理量”.

在人类历史上的不同时期,不同国家,乃至不同地区,同一物理量有着许多不同的计量单位.如长度单位就分别有码、英尺、市尺和米等.为了便于国际贸易及科技文化的交流,单位制的统一成为众望所归.因此国际计量大会于1960年确定了国际单位制(SI),它规定了七个基本单位(SI单位):长度——米(m)、时间——秒(s)、质量——千克(kg)、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(sr).其他一切物理量(如力、能量、电压、磁感应强度等)均作为这些基本单位和辅助单位的导出单位.

1.1.1.2 直接测量与间接测量

按照计量学定义:测量是以确定被测量对象量值为目的的全部操作过程.测量分为直接测量与间接测量.

“直接测量”是指直接将待测物理量与选定的同类物理量的标准单位相比较直接得到测量值大小的一种测量.它不必进行任何函数计算.例如用钢直尺测量长度,用天平测量物体的质量,用电流表测量线路中的电流等都是直接测量.

“间接测量”是指经过测量与被测量有函数关系的其他量,再经运算得到测量值大小的一种测量.例如通过测量长度确定矩形面积,通过用伏特表测量导体两端的电压,用电流表测量通过该导体的电流,由已知公式 $R=U/I$ 算出导体电阻的过程都属于间接测量.

从上面所举的测量导体电阻的例子可以看出,有的物理量既可以直接测量,也可以间接测量,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.

测量结果应给出被测量的量值,它包括数值和单位两个部分(不标出单位的数值不能是量值).实际上仪器在测量中是单位的实物体现.

1.1.1.3 等精度测量与不等精度测量

如果对某一物理量进行重复多次测量,而且设每次测量的条件相同(如同一组仪器、同一种测量方法、同一个观察者及环境条件不变等),测得一组数据分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$. 尽管各次测得结果并不完全相同,但我们没有任何充足的理由来判断某一次测量更为精确,只能认为它们测量的精确程度是完全相同的.于是将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量;这样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.

在物理实验中,凡是要求多次测量均指等精度测量,应尽可能保持等精度测量条件不变.严格地说,在实验过程中保持测量条件不变是很困难的,但当某一条件的变化,对测量结果影响不大时,仍可视为等精度测量.在本章中我们除了特别指明外,都作为等精度测量来讨论.

1.1.2 误差的定义与分类

1.1.2.1 误差的定义

待测物理量的大小(即真值)是客观存在的.然而在具体测量时,要经过一定的方案设计,运用一定的实验方法,在一定的条件下,借助于仪器由实验人员去进行和完成的.尽管我们千方百计地改进实验方案设计,提高仪器精度和测量人员水平.但是,仪器精度的提高总有一个限制,实验方法不可能完美无缺,测量人员技术水平不可能无限提高,这就使得测量结果与客观真值有一定的差异.测量误差就是测量结果与被测量的真值(或约定真值)之间的差值,测量误差的大小反映了测量结果的准确程度.测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示.绝对误差 Δx 等于测量结果(x)与待测量的真值(或约定真值,用 x_0 表示)之差值.即:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1)$$

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发展,测

量误差可以被控制得越来越小。

待测量的真值 x_0 是指在一定时间,一定状态下,待测物理量客观上所具有的数值称为真值。它是一个理想的概念,一般是不可知的。为此,我们通常所说的真值一般有如下三种类型:

(1) 理论真值或定义真值,如三角形的三内角和等于 180° 等;

(2) 计量学约定真值:由国际计量大会决议约定的值,如前面所介绍的基本物理量的单位标准,以及大会约定的基本物理常量等。需要指出的是,由于这些基本常量只能反映大会当时的测量水平,显然它们也是含有一定误差的;因为它们的误差比一般实验室测量结果的误差要小得多,所以将它们作为公认的约定真值。随着时间的推移,测量技术得不断提高,这些基本常数值将会日臻完善而更加接近它们的真值;

(3) 标准器相对真值(或实际值):通常进行测量时,不可能将所使用的测量仪器逐一去直接与国家或国际的标准相校对,而是经过多级计量检定网进行一系列逐级校对,所以比被校仪器高一级的标准器的量值作为标准器相对真值(亦称实际值)。例如,用 0.5 级电流表测得某电路的电流为 1.200 A,用 0.2 级电流表测得为 1.202 A,则后者可视为前者的实际值。

在实际测量工作中常用被测量的实际值或已经修正过的算术平均值来替代真值,亦称为约定真值。

1.1.2.2 误差的表示方法

测量误差不但反映了测量结果偏离真值的大小(即反映了测量结果的准确程度),而且还反映了测量结果是比真值大还是比真值小,并且具有和被测量相同的单位。由于是与真值相比较,所以又有绝对误差之称,简称误差。

为了全面评价测量结果的优劣,还需要考虑被测量本身的大小。例如要比较两个不同的物理量,如 20 mm 和 2 mm 厚的平板,用千分尺测得它们的绝对误差均为 0.004 mm,若用绝对误差来评价,则测量误差相同。显然,用绝对误差表示没有反映出它们的本质特征。另外,若要比两类不同物理量的测量优劣,如某物长 20.000 mm,绝对误差为 0.005 mm;某物质量为 17.03 g,绝对误差为 0.02 g,因绝对误差与单位均不相同而无法比较。基于上述情况,还需引入相对误差的概念。相对误差 E 定义为绝对误差 Δx 与被测量的最佳值 $\bar{x}$ 的比值,即:

$$E = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

相对误差常用百分数表示。由上式可见,相对误差是不带单位的一个纯数,所以它既可以评价量值不同的同类物理量的测量,也可以评价不同类物理量的测量,从而判断它们之间的优劣。

有时被测量有公认值或约定值,则用百分误差 E_0 来表示,其定义式为

$$E_0 = \frac{|\text{测量最佳值} - \text{公认值}|}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (3)$$

1.1.2.3 误差的分类

测量误差的产生有多方面的原因,根据测量误差的性质和产生的原因,可将其分为系统误差和随机误差两大类。

(1) 系统误差

是指在同一被测量的多次测量过程中保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量。产生系统误差的主要原因有:

① 仪器的固有缺欠.例如,刻度不准;零点没有调准;仪器水平或竖直未调整;砝码未经校准等.

例如,按国家计量标准规定,50 g 的三等砝码允许有 ± 2 mg 的误差.当一个砝码的实际量值为 49.998 g 时,它是一个合格的产品.但当实验者使用这一标称值为 50 mg 的砝码进行测量时,它将引入 0.002 g 的误差.

② 实验方法不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性.例如,称重量时未考虑空气的浮力,采用伏安法测电阻时未考虑电表内阻的影响等.

③ 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器.例如,标准电池是以 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的电动势数值作为标称值的,若在 30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下使用时,如不加以修正,就引入了系统误差.

④ 实验者生理或心理特点,或缺乏经验引入的误差.例如,有的人习惯斜视读数,就会使估读的数值偏大或偏小.

很多系统误差的变化是很复杂的,能否识别和消除系统误差,与实验者的经验有着密切的关系.对于初学者而言,从一开始就应注意积累这方面的经验.

(2) 随机误差

是指在同一被测量的多次测量过程中,绝对值和符号以不可预知方式变化的测量误差的分量.随机误差不可能修正.随机误差的产生是由于实验中各种因素的微小变化引起的.例如实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动性,测量仪器指示数值的变动性,观察者本人在判断和估计读数上的变动性等.这些因素的共同影响就使测量值围绕测量的平均值发生有涨落的变化,这个变化量就是各次测量的随机误差.随机误差的出现,就某一测量值而言是没有规律的,其大小和方向是不可预知的,但对某一物理量进行足够多次测量时,则会发现它们的随机误差服从一定的统计规律.常见的一种情况是,正方向误差和负方向误差出行的概率大体相等,数值小的误差出现的概率较大,数值很大的误差在没有错误情况下通常不会出现.这一规律在测量次数越多时表现得越明显,这就是随机误差最典型的分布规律——正态分布规律.因此可以用统计的方法估算其对测量值的影响.

在整个测量过程中,除了上述两种性质的误差外,还可能发生读数、记录上的错误,仪器损坏、操作不当等造成的测量上的错误.错误不是误差,这些错误数据在处理时应当剔除.

我们通常用精度反映测量结果中误差大小的程度.误差小的精度高,误差大的精度低.但这里精度却是一个笼统的概念,它并不明确表示描写的是哪一类误差.为了使精度具体化,精度又可以分为:

(测量)精密度:表示测量结果中随机误差大小的程度.即是指在规定的测量条件下对被测量进行多次测量时,所得结果之间的符合程度(测量值的离散程度),简称为精度.

(测量)正确度:表示测量结果中系统误差大小的程度.它反映了在规定条件下,测量结果中所有系统误差的综合.

(测量)准确度:表示测量结果与被测量的“真值”之间的一致程度.它反映了测量结果中系统误差与随机误差的综合.测量准确度又称测量精确度.

图 01-1 以打靶为例来比较说明.图中靶心为射击目标.

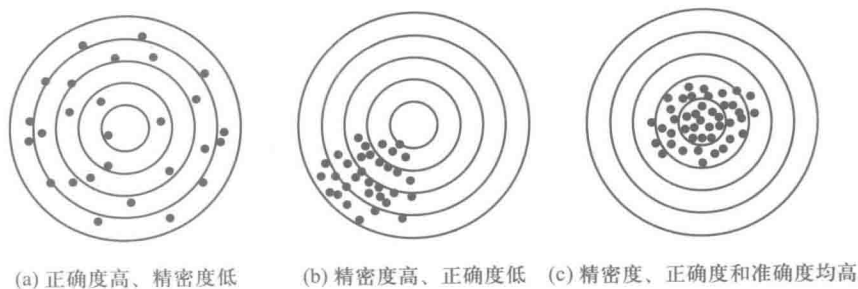


图 01-1

1.2 误差的处理

前面介绍了测量误差的基本概念,强调了误差产生的必然性和普遍性.根据误差对测量结果影响的性质,划分为系统误差和随机误差两大类.本节主要介绍这两类误差的处理方法.

1.2.1 系统误差

系统误差产生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分量和未定系统误差分量.

1.2.1.1 已定系统误差

是指绝对值和符号都已经确定的,可以估算出的系统误差分量;例如,对于一个标称值为 50 mg 的三等砝码,就无法知道该砝码的误差值是多少.只知道它对测量结果造成的未定系统误差限为 ± 2 mg;但如果在使用前用高一级的砝码进行校准,就可得到已定系统误差值.

1.2.1.2 未定系统误差

是指符号或绝对值未经确定的系统误差分量.一般只能估计其限值.例如,仪器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(例如上面所述对于标称值为 50 mg 的三等砝码其误差的极限范围为 ± 2 mg).所以这种系统误差通常只能定出它的极限范围,由于不能知道它的确切大小和正负,故对其无法进行修整.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).

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的系统误差的因素,并设法减小它们.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.

1.2.2 随机误差及其估算

随机误差与系统误差的性质不同,处理的方法也不同.假设我们在实验中已经将系统误差消