

21 世纪应用型高等院校示范性实验教材

主 编 卢佃清 李新华

大学物理实验

DAXUEWULISHIYAN



 南京大学出版社

21世纪应用型高等院校示范性实验教材

大学物理实验

DAXUEWULISHIYAN

主 编 卢佃清 李新华
编 委 (按姓氏笔画排序)

王 勇	王 琪	王秉坤
王步根	朴红光	孙庆强
吴同成	宋晓敏	周 朕
范 喆	唐小村	徐友冬
徐 超	黄增光	蔡 立

 南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 卢佃清, 李新华主编. —南京: 南京大学出版社, 2007. 1

21 世纪应用型高等院校示范性实验教材

ISBN 978-7-305-04984-2

I. 大… II. ①卢… ②李… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 006958 号

出版者 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093

网 址 <http://press.nju.edu.cn>

出版人 左 健

丛 书 名 21 世纪应用型高等院校示范性实验教材

书 名 大学物理实验

主 编 卢佃清 李新华

责任编辑 潘新华

编辑热线 025-83597141

照 排 南京玄武湖印刷照排中心

印 刷 南京大学印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 443 千

版 次 2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数 1~4 000

ISBN 978-7-305-04984-2

定 价 28.80 元

发行热线 025-83592169 025-83592317

电子邮件 sales@press.nju.edu.cn(销售部)

nupress1@public1.ptts.js.cn

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购图书销售部门联系调换

序

进入新世纪,随着社会经济的发展,各行各业对人才的需求呈现出多元化的特点,对应用型人才的需求也显得十分迫切,因此我国高等教育的建设面临着重大的改革.就目前形势看,大多数的理、工科大学,高等职业技术学院,部分本科院校办的二级学院以及近年来部分由专科升格为本科层次的院校,都把办学层次定位在培养应用型人才这个平台上,甚至部分定位在研究型的知名大学,也转为培养应用型人才.

应用型人才是能将理论和实践结合得很好的人才,为此培养应用型人才需理论教学与实践教学并行,尤其要重视实践教学.

针对这一现状及需求,教育部启动了国家级实验教学示范中心的评审,江苏省教育厅高教处下达了《关于启动江苏省高等学校基础课实验教学示范中心建设工作的通知》,形成国家级、省级实验教学示范体系,意在促进优质实验教学资源的整合、优化、共享,着力提高大学生的学习能力、实践能力和创新能力.基础课教学实验室是高等学校重要的实践教学场所,开展高等学校实验教学示范中心建设,是进一步加强教学资源建设,深化实验教学改革,提高教学质量的重要举措.

我们很高兴地看到很多相关高等院校已经行动起来,除了对实验中心的硬件设施进行了调整、添置外,对近几年使用的实验教材也进行了修改和补充,并不断改革创新,使其有利于学生创新能力培养和自主训练.其内容涵盖基本实验、综合设计实验、研究创新实验,同时注重传统实验与现代实验的结合,与科研、工程和社会应用实践密切联系.实验教材的出版是创建实验数学示范中心的重要成果之一.为此南京大学出版社在为“示范中心”出版实验教材方面予以全面配合,并启动“21世纪应用型高等院校示范性实验教材”项目.该系列教材旨在整合、优化实验教学资源,帮助示范中心实现其示范作用,交希望能够为更多的实验中心参考、使用.

教学改革是一个长期的探索过程,该系列实验教材作为一个阶段性成果,提供给同行们评议和作为进一步改革的新起点.希望国内广大的教师和同学能够给予批评指正.

孙尔康

2006年3月

前言

大学物理实验是理工科学生必修的一门基础实验课程,它在培养学生科学的实验思想、研究方法、实验技能,特别是实事求是的实验态度等方面肩负着重要使命。进入 21 世纪,高等教育大众化对人才培养模式提出了全新的要求,即培养的规格更加多样化,培养的方式更加开放,教学内容更具有选择性,更加注重培养学生的实验能力,部分学校更是明确提出了培养应用型本科人才的理念。

为适应新的人才培养模式,满足培养应用型人才的需要,我们参考教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》及《高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》,编写了这本大学物理实验教材。

本书共分 6 章,实验项目 40 余个,分布在基础性实验、综合性与设计性实验及提高性与应用性实验等板块中,可以按不同需要和培养计划组织教学。

本书在保证大学物理实验体系完整性的基础上,还有如下几个特点:

- (1) 部分实验增加了“实验拓展”,实验室可提供相应的实验条件,以达延伸课内实验内容之目的,满足不同层次学生的需要;
- (2) 部分实验设置了“思考与创新”,以开拓学生思维,培养学生的创新意识和创新能力;
- (3) 绝大多数实验设了“实验注意事项及常见故障的排除”,有利于学生实验时能正确使用仪器,并能处理实验过程中遇到的简单仪器故障,以培养学生独立实验的能力,从而为学生进行自主实验打下基础;
- (4) 配备了“仪器使用说明书”,以方便学生预习,增加对仪器的熟悉程度,若有条件让学生到现场对照仪器预习,则效果会更好;
- (5) 单列了第 3 章“常用仪器的使用及说明”,既方便实验基础较好的学生进实验室前能进一步熟悉这些常用仪器的使用方法,又可为一些实验基础薄弱的学生开设预备性实验,以保证正常实验课的教学质量;
- (6) 用 Excel 等软件进行实验数据处理、分析、拟合及统计;
- (7) 大部分实验项目后列出了“参考文献”,以供学生查阅相关资料及进一步学习之用,同时也可培养学生查阅文献的能力;
- (8) 部分实验项目的最后给出了“附录”,主要介绍与该实验有关的史料和物理实验在

现代科学技术中的应用知识,以开阔学生的视野,激发他们的学习兴趣。

实验教材的编写需要多年的实践积累,需要集体的智慧,当然也会遇到许多困难,如大学物理实验中不确定度的评定就是一个较棘手的问题。为此,我们参考了许多资料,也进行了反复的研究和推敲,并结合我校的教学实际,最终主要参考了沈元华、陆申龙两位教授主编的《基础物理实验》中的方案,在此向两位教授表示衷心的感谢。编写过程中参考的其他资料也都在“参考文献”中逐一列出,在此向它们的作者表示衷心的感谢。同时也感谢包括已退休和调离同志在内的为本书作出过贡献的所有教师和实验技术人员。

本书可作为理工科和师范院校非物理类专业、职业技术学院及其他院校的大学物理实验课教材或参考书。

由于作者水平、时间及条件所限,书中错误和疏漏之处在所难免,对基础性、综合性与设计性及提高性与应用性实验内容的划分也不一定恰当,编排体式也未必合理,敬请同行专家和读者批评指正。

编者

2006年12月

目 录

第 1 章 绪论

§ 1.1	大学物理实验的重要性	1
§ 1.2	大学物理实验课的基本要求	2
§ 1.3	大学物理实验的重要环节	3

第 2 章 数据处理与误差分析

§ 2.1	测量与误差	6
§ 2.2	实验不确定度的评定	10
§ 2.3	有效数字及其运算规则	15
§ 2.4	实验数据的处理方法	18
§ 2.5	用 Excel 软件进行实验数据处理	22

第 3 章 常用仪器的使用及说明

§ 3.1	力学基本测量工具简介	27
§ 3.2	电学基本仪器简介及操作规程	32
§ 3.3	光学实验基本知识	35

第 4 章 基础性实验

实验 4.1	密度测定	38
实验 4.2	杨氏弹性模量的测定	42
实验 4.3	三线摆实验	46
实验 4.4	表面张力系数的测定	51
实验 4.5	简谐振动的研究	57
实验 4.6	声速测定	64
实验 4.7	导热系数的测定	68
实验 4.8	热电偶定标实验	73
实验 4.9	普通照明电路安装	78
实验 4.10	电子束的偏转与聚焦	81
实验 4.11	示波器的原理及使用	92
实验 4.12	电阻率的测定	103

实验 4.13	惠斯登电桥测电阻	107
实验 4.14	电位差计测电动势	111
实验 4.15	霍尔效应实验	115
实验 4.16	薄透镜焦距的测定	120
实验 4.17	光的干涉实验	125
实验 4.18	光伏效应实验	130

第 5 章 综合性与设计性实验

实验 5.1	热学制冷循环实验	138
实验 5.2	空气比热容比的测定	144
实验 5.3	光栅常数测定	149
实验 5.4	全息照相	155
实验 5.5	光纤传感器实验	160
实验 5.6	摄影技术(一)	167
实验 5.7	摄影技术(二)	175
实验 5.8	核磁共振	179
实验 5.9	液晶电光效应实验	184
实验 5.10	音频信号光纤传输技术实验	188
实验 5.11	电表的改装与校正	197
实验 5.12	超声波液位计的设计	200

第 6 章 提高性与应用性实验

实验 6.1	迈克尔逊干涉实验	202
实验 6.2	电子荷质比的测定	206
实验 6.3	夫兰克-赫兹实验	212
实验 6.4	普朗克常数的测定	217
实验 6.5	密立根油滴实验	221
实验 6.6	超声波探伤实验	225
实验 6.7	制冷技术与应用	230
实验 6.8	用磁阻传感器测量地磁场	235
实验 6.9	旋光仪的应用	239
实验 6.10	声光效应实验	244
实验 6.11	光导纤维中光速的测定	249
实验 6.12	高温超导体临界温度的电阻测量	256
实验 6.13	纳米微粒制备实验	264

附 表

附表 1	常用基本物理常量	268
附表 2	在 20℃ 时某些固体和液体的密度	269

附表 3	在标准大气压下不同温度时水的密度	269
附表 4	在海平面上不同纬度处的重力加速度	270
附表 5	某些固体的线膨胀系数	270
附表 6	在 20℃ 时某些金属的弹性模量(杨氏模量)	271
附表 7	在 20℃ 时与空气接触的液体的表面张力系数	271
附表 8	在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	271
附表 9	不同温度时水的粘滞系数	272
附表 10	某些液体的粘滞系数	272
附表 11	不同温度时干燥空气中的声速	272
附表 12	声波在液体中的传播速度	273
附表 13	固体导热系数 λ	273
附表 14	某些固体的比热容	273
附表 15	不同温度时水的比热容	274
附表 16	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	274
附表 17	铜-康铜热电偶分度	274
附表 18	在常温下某些物质相对于空气的折射率	275
附表 19	常用光源的谱线波长表	275
附表 20	几种常用激光器的主要谱线波长	275
附表 21	一些单轴晶体的折射率	276
附表 22	一些双轴晶体的折射率	276
附表 23	一毫米厚石英片的旋光率(20℃)	276
附表 24	光在有机物中偏振面的旋转	276

第1章 绪论

§ 1.1 大学物理实验的重要性

物理学是一门实验科学,在物理学发展的长河中,实验起着决定性的作用。一部物理学史充分说明,整个物理学大厦正是建立在物理实验这块基石上的。发现新的物理现象,寻找和验证物理定律等,都只能依靠实验。正是16世纪伟大的实验物理学家伽利略,用他出色的实验工作把古代对物理现象的一些观察和研究引上了当代物理学的科学道路,使物理学发生了革命性的变化。牛顿的经典力学就是建立在伽利略、开普勒和惠更斯等人的实验基础之上的。电磁学的研究,也是从库仑发明扭秤并用其来测量电荷之间的相互作用开始的。随后奥斯特、法拉第等人的实验工作成为麦克斯韦建立电磁场理论的重要基础。

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。19世纪以前是没有纯粹的理论物理学家的,所有物理学家都亲自从事实验工作。到了20世纪初,普朗克、爱因斯坦、玻尔等人的理论研究使物理学发生了巨大的、乃至革命性的变化,这些理论的发展则是从所谓“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逊-莫雷实验;后者是指在实验室中发现了X射线、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;他当初提出的相对论是以“光速不变”的假设为基础的,只是经过长期大量的实验后,相对论才普遍被人们接受。

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。物理实验不仅对于物理学的工作极其重要,对于物理学在其他学科中的应用也十分重要。当代物理学的发展已经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、光信息科学与技术等学科显然都是以物理学为基础的;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,也无一不是物理学的应用;近代生命科学更是离不开物理学,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射线衍射实验所证实的,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射线透视、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,实验正是连接物理基础理论与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。

大学物理实验是其他物理实验的入门,因而被列为理工科学生的必修基础课。大学物理实验课是理工科学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,具有不可替代的重要作用。然而,中国社会长期以来所形成的重理论轻实践的错误观念至今仍有影响,物理实验,尤其是所谓“不结合专业”的大学物理实验的重要性往往被忽视。诺贝尔物理学奖获得者、著名的美籍华裔实验物理学家丁肇中先生曾说:“我是一个做实验的工程师,希望通过我的得奖,能提高中国人对实验的认识,没有实验就没有现代科学技术。”据统计,1901年以来,实验物理学家得诺贝尔奖的人数是理论物理学家人数的两倍;而近30年来,前者的人数超过后者的6倍以上。由此可见,物理实验的重要性正在越来越明显地被认识到。

§ 1.2 大学物理实验课的基本要求

1. 使学生在实验的基本知识、基本方法和基本技能等方面得到严格而系统的训练。

基本知识主要包括实验的原理、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以及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和要求确定实验的思路与方案、如何选择和正确使用仪器、如何减少各类误差及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、定标等)、电工技术(识别元件、焊接、排除故障和安全用电等)、电子技术(微电流检测、弱信号放大等)、传感器技术(力传感器、位移传感器、温度传感器、磁传感器和光电传感器等),以及查阅文献能力、自学能力、协作共事能力、总结归纳能力和口头表达能力等。

这种“三基”训练有时会比较枯燥,但却是完全必要的,它是最基本的动手能力的体现,因而必须确保其实现。没有这种严格的基本训练,很难成为高素质的实验人才。

2. 开设大学物理实验并不是为了建立新概念、发现新规律,而是从中学习用实验的方法研究物理现象、验证物理规律。通过实验与理论的相互配合,加深对物理理论的理解和掌握,并在实践中培养发现问题、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、记数据、得结果就算完成。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,经教师同意,也可以做自己设计的实验。

进行物理实验也是真正理解和掌握物理学理论的重要手段。只从书本上得到的知识往往是不完整、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。因此,要真正理解和掌握物理学理论,就不能只从课堂上学习,还必须要到实验室去学习,只有亲自动手、亲身体会,才能学到真正的、活生生的物理。

在实验中要做到及时发现问题,就必须有意识地培养自己的观测能力,要乐于观测、善于观测。观测能力是实验能力的一个重要表现,观测的基本任务是合理地、充分地发挥仪器的功能,观察物理现象,并在仪器精度范围内测准物理信息。我们应充分利用各种感观和大

脑去判断、试探和估量物理现象是否按预期出现、设备运行是否正常及仪器显示的物理信息是否受到干扰等。只有这样,才能准确捕捉所需要的实验现象,为后续的实验分析提供丰富的实验素材。

在实验过程中还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则尤为重要。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允许的。在物理实验课中,严格规定了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,这些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,它可能是某个新发现的开端。历史上许多新的物理学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相联系的。只有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需要坚忍不拔的毅力和积极创新的思维。实际上,只要认真去做实验,一定会发现许多问题,其中有些问题教师也未必能解决。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。

§ 1.3 大学物理实验的重要环节

一、预习

预习是上好实验课的基础和前提。没有预习,或许可以听好一堂理论课,但绝不可能完成好一堂实验课。预习的基本要求是仔细阅读教材,了解实验的目的和要求及所用到的原理、方法和仪器设备。大多数实验有供预习的多媒体课件或仿真实验,学生可以利用校园网从电脑上更清晰地看到实验概况及原理、仪器设备等。对于那些暂时还无法通过校园网进行预习的实验,则最好在规定时间内去实验室实地了解一下仪器设备的状况。有些实验还需要翻阅一些参考书。通过预习,应对将做的实验有大致地了解,并写好预习报告。一份完整的预习报告主要包括实验目的、原理(必要时还应绘出说明原理用的草图)、步骤及数据表格等。数据表格中要留有余地,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。

二、操作

进入实验室前必须详细了解实验室的各项规章制度,这些规章制度是为保护人身和仪器设备的安全而制定的,进入实验室后必须严格遵守。

实验操作主要包括线路的连接、仪器仪表的安装调试和使用、实验现象的观测、数据测量及列表记录等。做实验时,要胆大心细、严肃认真、一丝不苟。对于精密贵重的仪器或元件,特别要稳拿轻放。在电学实验中,接好的线路必须经教师检查无误后方可接通电源。在使用任何仪器前,必须先看注意事项或说明书;在调节时,应先粗调后微调;在读数时,应先取大量程后取小量程。实验完成后,应整理好仪器设备,填写仪器使用登记簿,并关闭门、窗、水、电后,方可离开实验室。

在实验中要多动手、勤动脑,提高实验分析能力,掌握排除故障的技巧。只有在实验中认真动手、积极动脑,才能触类旁通,掌握实验的真谛,学到从实践中发现问题、分析问题、解决问题的真功夫。其中,发现问题是解决问题的第一步,有所发现才能有所创新。因此,在实验过程中要十分注意各种实验现象。教学实验与科学实验不同,在教学实验中,实验结果(或测量值)往往是预知的,或有公认值(或理论值)的,实验结果与公认值不一致的情况是经常会发生的。这种不一致的原因,不一定是因为学生操作的失误、概念理解不当或计算错误,它也可能是由于仪器设备不正常或环境等其他原因造成的。决不可认为实验结果与公认值越接近,就表明实验做得越好,得分也会越高;更不可为追求实验结果与公认值的一致而伪造或篡改实验记录。从学生学习的角度讲,过程比结果更重要。教师对学生的培养与评价,侧重于实验的态度与作风,以及发现、分析、解决问题的能力。一旦发现测量值与理论值相差很远,就应该分析实验方法是否正确,仪器设备是否符合要求,实验环境是否影响太大。找出产生误差的原因,尽力排除一般故障。可以说,能否发现仪器故障及掌握排除故障的技能、能否正确分析误差来源是实验能力强弱的重要表现。

实验记录是做实验的重要组成部分,它应全面真实地反映实验的全过程,包括时间、地点、姓名、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、观察到的现象和测量到的数据(为了清楚起见,数据常用表格来记录)以及发现的问题等。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。科学研究中的实验记录本是极其宝贵的资料,要长期保存。数据记录必须真实,绝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。

三、写实验报告

写实验报告是培养实验研究人才的重要一环。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,有些学生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。

研究工作取得的成果,一般都要以论文形式发表。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。初学者对此往往感到难以下手,下面提供几点内容以供参考:

1. 简要地阐明为什么和如何做实验。这主要包括实验的目的、原理和步骤。写这些内容时,要尽量用自己的语言,不要从教材、书本或其他地方抄;内容应以别人能看懂,自己今后也能看懂为标准;篇幅应力求简短。

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(如室温和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,但不要先把数据先记在草稿上再誊写上去,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,它不仅包括不确定度的评定、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.

4. 对所用的仪器设备能否提出改进的设想,做本实验的体会及对教师或教材的意见和建议等.

第 2 章 数据处理与误差分析

一切科学实验都要进行测量,因此总会记录大量的数据.所有的测量均存在误差,大学物理实验当然也不例外.误差理论和数据处理是每一个实验都会遇到的问题,两者是不可分割的有机整体,已经成为一门广受科技界重视的科学.限于篇幅和学时,本章只介绍误差理论与数据处理的初步知识,有的只引用它的结论和计算公式,以满足大学物理实验的基本要求.

§ 2.1 测量与误差

一、直接测量和间接测量

在大学物理实验中,我们不仅要定性地观察和描述物理现象及其变化,还要定量地测量某些物理量的值.研究物理现象、了解物质的性质及验证物理原理都离不开测量.所谓测量就是将被测的物理量与同类已知物理量进行比较,用已知量来表示被测量.这些已知量称作计量单位.测量时,待测量与已知量比较得到的倍数称为测量值.例如某一物体的长度是单位米的 1.119 6 倍,则该物体的测量值为 1.119 6 米.

在人类历史的不同时期、不同国家乃至不同地区,同一物理量有许多不同的计量单位.为了便于国际贸易以及科技文化的交流,国际计量大会于 1960 年确定了国际单位制,其国际代号为 SI.国际单位制中有 7 个基本单位,它们分别是长度单位米(m),质量单位千克(kg),时间单位秒(s),电流强度单位安培(A),热力学温度单位开尔文(K),物质的量单位摩尔(mol),发光强度单位坎德拉(cd).

测量可分为直接测量和间接测量两类.直接测量是指某些物理量可以通过相应的测量仪器直接得到被测量的量值的方法.如用米尺量长度,用天平和砝码测物体的质量,用电桥或欧姆表测导体的电阻等.间接测量是指利用直接测得量与被测量之间已知的函数关系,经过计算而得到被测量值的方法.例如,用单摆测量重力加速度 g 时,先直接测出摆长 L 和摆动周期 T ,再依据公式 $g = 4\pi^2 L/T^2$ 进行计算,求出 g 值;再如要测量导体的电阻 R ,可用电压表测量导体两端的电压 U ,用电流表测量通过该导体的电流 I ,然后用公式 $R = U/I$ 计算出导体的电阻.

二、测量误差及其表示方法

任何测量过程中必然伴随有误差产生,这是因为任何测量仪器、测量方法都不可能绝对正确,测量环境不可能绝对稳定,测量者的观察能力和分辨能力也不可能绝对精细和严密.因此,分析测量中可能产生的各种误差,尽可能地消除其影响,并对测量结果中未能消除的

误差作出估计,是科学实验中不可缺少的工作.为此,我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因、消除的方法以及对未能被消除的误差如何作出估计等知识.

(一) 误差的定义

测量误差就是测量值 x 与被测量的真值 μ 之差值,若用 δ 表示,则有

$$\delta = x - \mu \quad (2-1-1)$$

δ 反映了测量值偏离真值的大小,即反映了测量结果的可靠程度.所谓真值是指该物理量本身客观存在的真实量值,但由于客观实际的局限性,真值一般是不知道的.通常我们只能测得物理量的近似真值,故对测量误差的量值范围也只能给予估计.国际上规定用不确定度(Uncertainty)来表征测量误差可能出现的量值范围,它也是对被测量的真值所处的量值范围的评定.

有时出于使用上的需要,在实际测量中,常用被测量的实际值来代替真值.而实际值是指满足规定精确度的用来代替真值使用的量值(又称约定真值).例如在检定工作中,把高一等级精度的标准所测得的量值称为实际值,如用 0.5 级电流表来测得某电路的电流为 2.100 A,用 0.2 级电流表测得为 2.102 A,则后者视为实际值.

(二) 误差的表示方法

误差 δ 常称为绝对误差,其大小不同,反映了测量结果的优劣不等,但它只能适用于同一物理量.例如 20 mm 厚的平板,用千分尺测得的绝对误差分别为 0.005 mm 和 0.003 mm,则显然后者优于前者.但若要比两个不同的物理量,如 20 mm 和 2 mm 厚的两块平板,用千分尺测得它们的绝对误差都为 0.005 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能反映出它的本质特征.另外,若要比两类不同物理量的测量优劣,如某物长 20 mm,绝对误差为 0.05 mm,某物质量为 17.03 g,绝对误差为 0.02 g,因绝对误差数值与单位都不同而无法比较.基于上述两种情况,还需引入相对误差的概念,即

$$E_r = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% \quad (2-1-2)$$

所以相对误差也称为百分误差.由(2-1-2)式可见相对误差是一个不带单位的纯数,所以它既可评价量值不同的同类物理量的测量,也可评价不同类物理量的测量,以判断它们之间的优劣.

三、误差的分类及其处理方法

按照误差的特点与性质,误差可分为系统误差、随机误差(也称偶然误差)和粗大误差三类.

(一) 系统误差

在同一条件下(指方法、仪器、人员及环境不变),多次测量同一量值时,绝对值和符号保持不变的误差;或在条件改变时,按一定规律变化的误差,称为系统误差.系统误差的来源大致有以下几个方面:

1. 仪器误差:由于仪器本身的缺陷或未按规定条件使用仪器而造成的误差.如仪表指针在测量前没有调准到零位而带来的测量误差;米尺本身由于刻度划分得不准,或因环境温

度的变化导致米尺本身长度的伸缩带来的测量误差等。

2. 理论或方法的误差: 由于所依据的理论及公式本身的近似性, 测量时未能达到公式理想化的条件或实验方法不完善而带来的误差. 如用伏安法测电阻, 由于没有考虑电流表或电压表内阻而带来的测量误差。

3. 环境误差: 由于外界环境, 如温度、湿度、电场、磁场和大气压强等因素的影响而带来的误差。

4. 个人误差: 由于观测者本身的感官, 特别是眼睛或其他器官的不完善以及心理因素而导致的习惯性误差. 这种误差, 往往是因人而异, 如停表计时, 有人反应较慢, 所以计时总是失之过长。

系统误差可以通过校准仪器、改进实验装置和实验方法, 或对测量结果进行理论上的修正来加以消除或尽可能减小. 然而发现和减小实验中的系统误差并非易事, 这需要实验者深入了解实验的原理、方法与步骤, 熟悉所使用仪器的特点和性能, 还要在实验中不断积累理论知识和实践经验, 才能找出产生系统误差的原因, 以及消除、减小系统误差的方法。

(二) 随机误差

随机误差是在对同一被测物理量进行多次测量过程中, 绝对值与符号都以难以预知的方式变化着的误差. 这种误差是由于实验中各种因素的微小变化而引起的, 如温度、气流、光照强度、电磁场的变化引起的环境变化. 观测者在判断、估计读数上的偏差等使得多次测量值在某一值附近有涨落. 就某一次测量而言, 这种涨落完全是随机的, 其大小和方向都是难以预测的. 但对某个量进行足够多次的测量后, 随机误差总是按照一定的统计规律分布. 常见的一种情况是: 测量值比真值大或比真值小的概率相等; 误差较小的数据比误差大的数据出现的概率大; 同时, 绝对值很大的误差出现的概率趋于零. 这是称之为正态分布(即高斯分布)的一种情况. 事实上随机误差还有其他的分布情况, 如 t 分布、均匀分布、 χ^2 分布等。

由于正态分布的随机误差有上述特点, 因此减小随机误差对测量结果的影响的有效办法是进行多次测量, 并尽可能增加测量次数。

在相同的条件下, 对某物理量 x 作 n 次的独立测量, 得到的 x 值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. 于是平均值 $\bar{x}$ 为测量结果的最佳值, 即

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) / n = \sum x_i / n \quad (2-1-3)$$

可以证明, 当系统误差已被消除, 则测量值的算术平均值最接近被测量的真值. 因此常用测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 表示测量结果。

对于测量值的可靠程度常用标准偏差来估计. 标准偏差小, 说明多次测量数据的分散程度小, 测量的可靠性就大; 反之, 测量的可靠性就小. 在大学物理实验中, 多次独立测量得到的数据一般可近似看作正态分布, 此时实验的标准偏差以 $S(x)$ 表示, 即

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-1-4)$$

其意义为任一次测量的结果落在 $[\bar{x} - S(x)]$ 到 $[\bar{x} + S(x)]$ 的区间内的概率为 0.683. 式中 $x_i - \bar{x}$ 是每一次测量值与算术平均值之差, 称为残差。