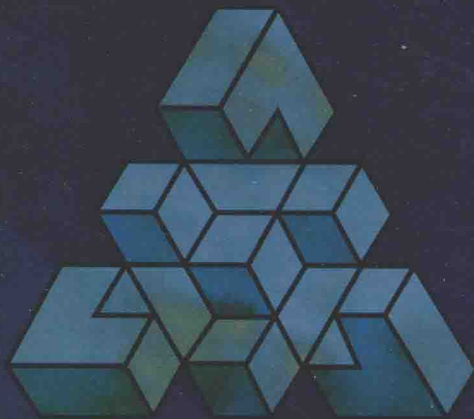




基础物理实验教程

Fundamental Physics Experiment Course

◎ 刘 维 董巧燕 主编
◎ 刘战存 施宇蕾 刘丽峰 副主编

 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

基础物理实验教程

刘 维 董巧燕 主编
刘战存 施宇蕾 刘丽峰 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是首都师范大学物理实验教学中心多年教学改革成果之一。书中内容包括预备实验、深入浅出的普通实验、综合设计实验和探究实验,其中部分实验附有介绍实验学史等内容的阅读资料,可以使了解相关实验的发展史、研究思路和最新研究成果,在有梯度地培养学生的基础实验能力和综合应用能力的同时,加强学生的学习兴趣;书中也给出了教学演示仪器制作、光电应用、计算机应用和传感器等多样化的探究实验内容,有益于提高学生的实践能力和初步科研能力。

本书可以作为高等院校理工科专业物理实验教科书或参考书,也适用于其他需要提高物理实验知识、技能的人员使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

基础物理实验教程/刘维,董巧燕主编. —北京:电子工业出版社,2015.9

ISBN 978-7-121-27094-9

I. ①基… II. ①刘… ②董… 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(2015)第207868号

策划编辑:赵玉山

责任编辑:赵玉山 特约编辑:宋薇

印刷:北京京师印务有限公司

装订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×980 1/16 印张:21 字数:510千字

版次:2015年9月第1版

印次:2015年9月第1次印刷

定价:42.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

普通物理实验是学生进入大学以后接触的第一门实验课, 是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。它是一门基础、综合设计和应用性的实验课。它与物理理论课程有着紧密的联系, 但又是一门独立的课程。它不仅给学生以严格的实验基础训练, 还要使学生受到具有综合和设计实验能力的训练, 以及实践应用和初步研究能力的训练。这本教材, 是作者近 10 年来进行多次教学改革和课程建设积累的成果。

在教学改革中, 我们强调了**加强基础**。当然, 随着物理学和现代科学技术的发展, “基础”的内涵也在发生改变, 过去的一些旧的测量技术和手段, 例如光电检流计和电位差计, 虽然有很好的设计思想, 但是由于使用方法烦琐, 早已被新的技术取代, 因而教学中应予以删除。而像微波布拉格衍射、弗兰克-赫兹实验和核磁共振实验这些原本属于近代物理实验的题目, 有的由于其方法简单, 难度小, 有的则由于其概念已被人们广泛接受, 因而充实到普通物理实验中也是适宜的。

在教学改革中, 也**加强了综合性、设计性实验**。过去的普通物理实验主要分为力热、电磁和光学几部分, 现在很多实验采用了传感器, 从方法和内容上具有一定的综合性, 例如用光拍法测物体振动的微小位移, 这一实验本身是力学实验, 用到了光拍的方法, 利用示波器显示振动波形, 而弗兰克-赫兹实验中则用计算机采集和处理数据等。另外还安排了一定比例的设计性实验, 利用现有的仪器, 学生可以做一些更接近实际应用的题目。此外, 在介绍实验内容上, 通过所给资料和思考题, 引导学生**学习建立与实验方法和测试相关的思路**, 使学生的综合设计能力得到提高, 有利于培养学生解决实际问题的能力。

在教学改革中, 注意突出一个“**新**”字: 实验的内容和思路力求新一些, 例如增加了硅光电池特性和巨磁效应的测量及应用等新内容的实验, 开阔了学生的眼界; 所用的仪器的设计思想力求新一些, 例如开设了数字万用表的设计性实验, 用虚拟仪器代替传统的测试方法等, 加深了学生对现代化测量仪器的认识和理解; 实验的方法和技术力求新一些, 例如在测量金属的线胀系数时使用了光的干涉法, 这些新的实验方法和技术, 使学生加深对新方法和新技术的了解, 使他们学会用实验手段研究和解决问题, 为将来在工作中接受和应用新技术打下基础。

另一方面, 还考虑到要从现实出发, 师范院校的一些毕业生要到边远地区工作, 那里的实验条件比较落后, 实验器材比较陈旧, 先进实验器材的使用要掌握, 传统的、经典的实验装置也要会用。因此本书也收入了一些如伏安法测二极管的特性等使用传统仪器的实验。一些传统的、经典的实验, 只要我们赋予它新的意义, 也是具有生命力的。例如, 电子束线的聚焦和偏转的实验, 看起来就是一个普通的验证性实验, 它除了出现在大多数示波器的示波管中, 还与电子发现这一历史事件有关, 它提供了电子荷质比测量的一种方法。

现在的普通物理实验中, 有迈克耳孙干涉仪、全息照相、微波布拉格衍射和弗兰克-赫兹实

验等获得诺贝尔奖的著名实验；也有惠斯通电桥、霍尔效应、分光计的调整和用透射光栅测定光波波长等经典实验。体会了这些实验的巧妙构思，学生也往往会对这些著名物理学家的研究思路、创新过程感兴趣。为此，本书在重点介绍各个实验的原理、内容的同时，还扼要介绍了这些实验的背景，如迈克耳孙如何在研究以太漂移过程中，在贾民干涉仪的基础上发明了他的干涉仪；伽伯怎样在研究提高电子显微镜的分辨率时提出了相干成像原理；以及惠斯通如何自学成才，研究出电桥法测电阻；夫琅禾费怎样从一个学徒工成为卓越的光学家，研制出最早的分光计和实用的光栅等。希望这部分内容可以起到激励学生的创新意识、启迪学生创新思路的作用。

探究实验是为大学三年级以上的学生开设的实验选修课。通过这一教学形式，不仅可以充分利用闲置的仪器，提高实验中心仪器的利用率，为实验中心开发充足的实验教学内容；可以调动学生学习的积极性和主动性，提高综合应用所学知识处理和解决科学问题的能力；而且可以活跃教师和实验员进行教学和实验研究的气氛。探究实验是对常规教育方式的良好补充，同时也为研究这种新的教学模式构建了实践平台。

人非生而知之，学习总要有个过程。人的能力也是有差异的，常听到一些同学说，自己比别的同学笨，因此实验做得也慢。这里，我们想用著名物理学家霍尔（Edwin Herbert Hall，1855—1938）的一段话与大家共勉：“在我所有致力于科学的努力中，在一些方面遇到了明显的障碍，动手不熟练，理解问题缓慢。另一方面，我能够坚持不懈，喜欢用我不紧不慢的方式与困难、问题拼搏；我获得的所有成功都可以归结为这两个特点。”霍尔不认为自己有聪明过人的才智，相反认为自己“理解问题缓慢”，“动手不熟练”，但是这没有阻碍他进行研究，由于他坚持一步一步地解决困难、问题，总是能够战胜困难取得成功。这对我们也是一个很好的启发，不可能每个人都那么才思敏捷，但是只要坚持努力，克服困难，深入钻研问题，就能够取得成功。

本书第一、第二和第三章由刘维、董巧燕、施宇蕾、刘战存、刘丽峰、张波、王福合、左剑、尹晓冬和张盛博编写；第四章由易向东、闫海涛、苏波、刘维、施宇蕾、左剑、张盛博、孙文峰和何敬锁编写。

在教学改革中，我们曾到北京大学、清华大学、北京交通大学、复旦大学、同济大学等院校参观学习，得到过许多专家的指导，受到很多启发，获益匪浅，开阔了我们的眼界，为我们编写这本教材拓宽了思路，在此我们向这些专家表示真挚的谢意。教学改革以来，将近十届同学在实验教学中对所用教材和教学内容提出了宝贵的意见和建议，促成了这本教材的编写，我们也向他们表示衷心的感谢。

首都师范大学 物理实验教学中心
2015年5月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 物理实验的重要性和课程要求	(1)
第二节 测量误差和不确定度	(6)
第三节 其他常用数据处理方法	(10)
第四节 电学实验基础知识	(14)
第二章 基础实验	(20)
第一节 预备实验	(20)
实验一 长度的测量	(20)
实验二 单摆测重力加速度	(25)
实验三 万用表的使用	(29)
第二节 普通基础实验	(34)
实验一 惯性秤	(34)
实验二 物质密度的测定	(41)
实验三 基于气垫导轨验证牛顿第二定律	(46)
实验四 弹性(杨氏)模量的测定(伸长法)	(52)
实验五 弦振动的研究	(58)
实验六 用波尔共振仪研究振动现象	(64)
实验七 测定冰的熔解热	(71)
实验八 伏安法测二极管的特性	(76)
实验九 惠斯通电桥测电阻	(79)
实验十 数字万用表的工作原理和使用	(84)
实验十一 半导体热敏电阻温度特性的研究	(93)
实验十二 霍尔效应及其应用	(96)
实验十三 磁电阻效应	(103)
实验十四 巨磁电阻效应	(108)
实验十五 低电阻的测量	(114)
实验十六 交流电桥	(120)
实验十七 电子束的偏转和聚焦	(125)
实验十八 示波器的使用	(134)
实验十九 空气中超声波声速的测量	(140)
实验二十 RLC 串联电路的暂态过程研究	(147)

实验二十一	薄透镜焦距的测定	(158)
实验二十二	分光计的调节及棱镜折射率的测定	(166)
实验二十三	生物显微镜	(175)
实验二十四	牛顿环与劈尖干涉	(186)
实验二十五	用透射光栅测量光波波长	(193)
实验二十六	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	(199)
实验二十七	全息照相	(207)
实验二十八	彩虹全息	(214)
实验二十九	偏振现象的观察与分析	(217)
实验三十	微波的布拉格衍射	(224)
第三章	综合设计实验	(230)
实验一	金属线膨胀系数的测量	(230)
实验二	双光栅测量微弱振动位移量	(234)
实验三	PN 结的物理特性及其参数的测定	(240)
实验四	示波器黑盒子	(243)
实验五	液体折射率的测定	(244)
实验六	阿贝成像原理和空间滤波	(251)
实验七	硅光电池的性能研究	(261)
实验八	金属电子逸出功的测定	(265)
实验九	密立根油滴实验	(271)
实验十	弗兰克-赫兹实验	(277)
实验十一	利用虚拟仪器技术测量元件的伏安特性	(283)
第四章	探究实验	(290)
第一节	演示仪器的制作	(290)
实验一	手机投影仪的制作	(290)
实验二	全息投影成像实验装置的制作	(291)
实验三	飞机机翼升力实验仪制作	(292)
实验四	开尔文滴水起电机的制作	(294)
实验五	电磁炮	(295)
实验六	超远程遥控炸弹	(297)
第二节	综合应用	(299)
实验一	悬浮在空中的乒乓球	(299)
实验二	水波特性研究	(300)
实验三	斯特林热机的制作及其性能研究	(301)
实验四	霍尔器件的特性及应用	(302)
实验五	基于虚拟仪器的温度传感器性能测试系统的设计	(304)

实验六 烹饪机器人	(305)
第三节 光电应用	(307)
实验一 He-Ne 激光器的模式测量与分析	(307)
实验二 基于光纤的视频信号双向传输	(308)
实验三 基于全光纤马赫-曾德尔干涉仪的性能研究	(310)
实验四 混合物的太赫兹/远红外光谱分析与识别	(311)
实验五 太赫兹远红外光谱对于药物分子的探测和分析	(312)
实验六 基于光电导航的智能移动测量小车	(313)
第四节 计算机应用	(315)
专题 1 计算机系统性能的优化与整合	(315)
实验一 CPU 超频特性研究	(316)
实验二 显卡超频、内存超频、主板超频和硬盘提速	(318)
实验三 计算机软件系统的优化与整合	(320)
专题 2 声音的音质测定与音响设备改装专题	(322)
实验一 音质测试平台的搭建	(322)
实验二 声音在传输过程中的失真研究	(324)
实验三 音箱的制作与改装	(325)

第一章 绪 论

第一节 物理实验的重要性和课程要求

“基础物理实验”是理工科专业的大学生进入本科生教育的第一门实验课，它是进行科学实验训练的重要基础课程，是学生受到系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理学是一门实验的科学。任何物理概念的确立，物理规律的发现，都必须以严格的科学实验为基础；人们提出的理论是否正确，也必须通过科学实验来检验。物理实验的一些实验理论和方法已经渗透到了自然科学的各个学科和工程技术的各个领域。因而，对于理工专业的同学来说，学好物理实验，也是学好相关知识的一个重要方面。

实验在学科的发展过程中起着重要的和直接的作用。经典物理学（力学、热学、电磁学和光学）规律是由以往的无数实验事实为依据总结出来的；X 射线、放射性和电子的实验发现为原子物理学、核物理学等的发展奠定了基础；卢瑟福曾经根据大角度 α 粒子散射实验结果提出了原子核的基本模型。实验又是检验理论正确与否的重要判据，理论实验相辅相成，规律、公式是否正确必须接受实践的检验，只有经过实验证实，才会得到公认。1905 年爱因斯坦的光量子假说总结了光的微粒说和波动说之间的争论，很好地解释了勒纳德等人的光电效应实验结果，但是直到 1916 年当密立根以极其严密的实验证实了爱因斯坦的光电方程之后，光的粒子性才被人们接受。

所谓实验是人们根据研究的目的，运用科学仪器，人为地控制、创造和纯化某种自然过程，使之按预期的进程发展。同时在尽可能减少干扰的情况下，进行定性或定量的观测，以探求自然过程变化规律的一种科学活动。著名的物理学家开尔文勋爵（Lord Kelvin）曾经说过：“如果你能对面前的物体进行测量并用数值表达，就可以说你对它有了一些了解；如果你不能对其进行测量，不能用数值表达它，那你对它的了解就太少，不能令人满意。”我们的实验，就是要通过测量了解物体或系统的一些属性，描述它们的内在规律。

一般的观察只是被动等待自然界按其本来的进程发展，人们仅仅对现象进行记录和研究。可见实验和观察是不同层次的认识手段，起着不同的作用。实验是科学理论指导下的探索活动，离不开理论的指导和分析判断。因此，实验首先强调的是动脑能力的培养，其次才是动手能力的培养。

一、物理实验课的主要环节

物理实验课是在教师指导下学生独立进行的一种实践活动,无论实验内容的要求或研究的对象有何不同,其基本程序大致是相同的,一般包括三个环节。

1. 课前预习

实验课前要仔细阅读教材中的有关内容(并尽可能多查阅一些相关参考资料),理解本次实验的目的、原理、所要用的实验仪器,弄清楚要观察哪些现象,测量哪些物理量,了解实验要求和注意事项。在此基础上,在实验室提供的预习报告模板上写出简要的预习报告。预习报告包括实验名称、仪器装置、目的、简要的原理(画出实验原理图——特别是电路图和光路图,列出实验所依据的主要理论公式和测量公式),根据测试内容,画出数据表格。有些实验还要求学生自己设计拟定实验方案,自己设计电路图或光路图。因此课前预习的好坏是能否顺利、主动进行实验的关键。

2. 实验操作

认真听取教师对本次实验的要求、重点、难点、操作规程、注意事项的讲解;认识和熟悉仪器,了解使用方法,记录规格型号。在实验室要遵守有关的规章制度和守则,爱护仪器设备,注意安全。

注意做好仪器的调节,在力学、热学实验中一些仪器使用前往往要求调到水平或垂直状态;电磁学实验中,连接电路前要注意布局合理;连好电路后,先将仪器调节到“安全位”,初次做电学实验的学生,需经教师检查电路连接,无误后方可接通电源。光学实验更要特别注意仪器的调整,一定要将仪器调整到最佳状态再开始测量;仪器调整不好往往不能进行测量,即使能够勉强测量,误差也一定很大;光学仪器的光学面一定不要用手触摸,以免损伤光学面。

测量前可以先做定性观察,以判断实验系统是否正常,了解所测物理量的变化趋势,之后再再进行仔细测量。实验中一定要仔细观察,积极思考,脑子里应有清楚的物理图像,以便对实验中可能出现的现象有一定的估计,对实验中出现的现象要认真思考,想一想是否合乎物理规律。遇到问题要冷静分析,不要急躁。实验中若出现不正常的情况,要及时向教师请教,不要自己随意处理。如果对实验有新的想法或想进一步深入研究,须经指导教师同意后。有个别同学带着别人的实验数据来做实验,实验中不认真思考,照着他人的“猫”来画自己的“虎”,这是一种很不好的作风,每个同学都要充分相信自己的能力,相信靠着自己的努力能把实验做好,要立足锻炼自己的独立工作能力。

实验中要记录好原始数据。实验记录是计算结果和分析问题的依据,要一边测量,一边及时记录;要把数据细心完整地记录在预习报告上(同时注意数据的有效数字和单位),记录时要用圆珠笔、钢笔或签字笔,不得使用铅笔。不要把数据先记在草稿纸上,然后再誊写在表格内,这是一种不科学的习惯。如果发现记录的数据确实有错误,可将其划掉,在旁边写上正确的数据。实验完毕,要将记录的数据交给教师检查,得到认可后,再将仪器整理复原,方可离开实验室。

实验中要特别注意安全,用电要注意弄清电源电压、仪器的用电要求,一定不要接触有高

电压的地方，插、拔电源插头时要特别小心；在光学实验中使用激光器时要特别注意不得用眼睛去看未经扩束的激光束，以免损伤视力。

3. 写好实验报告

实验报告是对实验的全面总结，是把感性认识深化为理性认识的过程，是交流实验经验的材料。要写好实验报告，就需要认真学习和掌握实验原理和方法，正确地分析和处理数据，正确地表达测量结果，并对结果做出合理的分析和讨论。

实验报告一般包括实验名称、实验目的、仪器用具、实验原理（用自己的语言简要叙述，并附有必要的公式、电路图或光路图）、数据及处理、结果和分析等。要用指定的实验报告模板和规定的格式写实验报告，要求字迹清晰、文理通顺、数据齐全、图表规范，结论明确。写实验报告不要不动脑筋地去抄教材，要学会自己分析归纳实验的要点。实验报告要按时交给教师。

二、物理实验课的基本要求

1. 注重培养能力

做实验不能只是为了测几个数据，我们要通过物理实验，深入掌握实验的物理思想，物理量变化的规律，实验要求的条件，学会实验仪器的使用方法，得出正确的实验结果；要在实验中培养自己的观察能力、分析和解决问题的能力、研究能力以及综合设计能力。

（1）具有敏锐的观察能力，才有可能观察到重要的实验现象

X射线的发现者、第一届诺贝尔物理奖获得者伦琴（Wilhelm Conrad Röntgen, 1845—1923）在进行阴极射线的实验时，气体放电管（勒纳德管）发生了泄漏，他用另一个厚壁的气体放电管（克鲁克斯管）代替它。熄灭了照明灯，接通感应圈，看看会不会有光从他制作的遮光罩中跑出来。结果没有发现漏光现象，他很满意，准备先断开电流，再做下一步实验。

突然，他发现在黑暗中距离放电管约一米远处的长凳上发出微弱的闪光。断开电源，闪光随即消逝；再次加上电压，闪光重新出现。划着火柴一看，原来是涂有荧光物质的纸屏上出现的闪光，这一现象出人意料。他设想闪光与放电管有关，实验肯定了他的想法，当纸屏距离移远到 2m 处时仍有荧光。他注意到无论纸屏涂有荧光物质的一面朝向或背对放电管都同样有荧光。伦琴马上意识到这是一种新的别人没有报道过的不可见光，他将其称为 X 射线（后来被人们称为伦琴射线）。他后来又进行了一系列实验，研究 X 射线的性质。试想，假如他没有超人的观察能力，对微弱的荧光没有充分重视，不就错过了一个最重要的发现吗？实际上在伦琴之前，就有不少人发现过一些和 X 射线有关的实验现象，但是由于观察不细致，让这些现象白白溜走了。我们在实验中，要像伦琴那样善于观察和捕捉那些稍纵即逝的实验现象，培养观察能力。

（2）在实验中还要培养分析问题的能力

对同一个现象，经过认真分析可以得出重要的结论，不认真分析就有可能一无所获。英国物理学家，1917 年诺贝尔物理奖获得者巴克拉（Charles Glover Barkla, 1877—1944），测量了多种物质对 X 射线的吸收情况，即测定 X 射线穿过不同厚度的铝片和其他物质后的强度。他发现对 X 射线的某些成分，吸收系数为常数，即与厚度无关，这种辐射称为均匀辐射，就是标识辐射。通过一系列巧妙的实验，巴克拉推断，元素受入射 X 射线激发时放射出两种特征辐射，他

称之为 K 辐射和 L 辐射。当时他所能应用的确定辐射性质的唯一方法，就是测量吸收。能从吸收的规律中分析出 X 射线的光谱结构，这样的分析可以说是“入木三分”，非常深刻。分析是要在深入事物的内部、掌握各个细节的同时，排除各种干扰和影响因素，透过事物的现象揭示本质和规律。我们要在实验中养成分析问题的习惯，遇到问题都想一下“为什么”，使分析能力逐渐提高。

(3) 培养研究和创新能力

有的同学习惯于照着书上给出的实验步骤一步一步做，做一步，看一步。做完实验，合上书本，脑子里什么也没有剩下。我们提倡同学在实验中研究问题，从实验的器材装置到实验的方法、从仪器调整到实验数据的测量、从实验电路的选择到仪器装置的合理利用等都是值得考虑的。同一个物理量，使用相同的装置测量，可以有不同的方法；例如用分光计测量三棱镜的顶角，可以利用望远镜找出其法线测量，也可以由准直管发出的平行光经过望远镜测量。我们的同学在探究实验和学生科研立项中，提出过很多既有实际应用价值、又适合用所学过的实验方法解决问题的题目。可见只要大家留心观察、认真思考，是可以找到适当的方法去研究和解决问题的。我们提倡同学之间、同学和老师之间的交流，但是反对事无巨细，全都去问别人，自己不做任何思考；我们主张以自己的思考为主，实在想不出来，看书也解决不了的问题再去问。我们做的教学实验，虽然多是比较成熟的实验，但只要肯于思考，认真研究，都有一定的发挥和创新余地。

(4) 培养综合设计能力

教学实验是要通过基础的实验培养实验能力，只去验证别人的实验结果不是我们的最终目的。在做实验的过程中，要注意综合能力的培养。有的同学擅长接电路，再难的电学实验也不怕，但遇到需要调整光学仪器的实验就不知从何下手了。的确，光学实验仪器的调整与电学仪器调整的规律和方法完全不同；但是近年来的实验技术已经向综合性发展，传感器被大量应用，计算机采集和处理数据在物理实验中也日益增多，力学实验中多处用到传感器，很多实验是集光学、电学、力学的方法于一体。因此，同学们应当增强自己的综合能力。同时也要学会设计实验，学习用实验解决实践中遇到的问题。例如有的电学实验中用到的电压表、电流表，需要测定它的内阻，在我们学习了电桥法测电阻的实验后，能否自己设计测定电表的内阻的实验？当然设计实验时，应当考虑到各种条件的限制，如电流表内阻较小，同时允许通过的电流强度又受到量程的限制。在我们的实验中，安排了一些设计性实验的题目，希望同学充分发挥出自己的聪明才智，设计出自己的实验来。

2. 培养实事求是、一丝不苟的作风

要尊重事实，绝不能因为与实验规律不符而随意修改实验数据。著名物理学家穆斯堡尔 (Rudolf Ludwig Mössbauer, 1929—2011) 为我们树立了很好的榜样。穆斯堡尔在测量 ^{191}Ir 的 129keV 激发态寿命时，出乎意料地发现核共振吸收随温度的降低不但没有降低，反而加强了万分之一左右，与预期的情况相反。他最初以为可能是由某种污染效应引起的。他在一次颁奖仪式上说：“我那时正对 γ 射线的另一个特殊的特性感兴趣，因此我没有更多地为这一‘污染’效应所担心。然而，在完成这一计划内的（由此我要写论文）实验时，我只是出于好奇，再一次开

始寻找这一“污染”效应。我将实验装置进行了各种可能的改变，但仍然不能去除它。于是我变得越来越兴奋，用了好几天的时间，要通过愉快的努力去消除这一效应，但是不可能成功……我首先试着从实践上去解释，但是各种解释都失败了。”对这个只有万分之一左右的“反常”吸收，穆斯堡尔没有轻易错过它，而是紧紧抓住不放，开始以为几天就能解决，实际上用了将近一年的时间，终于证明了温度降低的确使共振吸收增加了。万分之一是个很小的数字，很容易被人们忽略，或者被随意地归结为仪器误差，但是穆斯堡尔没有这样做，他从“好奇”出发追踪这一现象，“反常”吸收没有消除，坚持深入研究；正是一丝不苟的严谨作风，使他抓住了机遇，做出了这一重要发现。

可见，实事求是、一丝不苟的作风在科学研究中是极为重要的，我们的同学要在实验中培养这种优良的作风。

3. 注意理论与实验的结合

物理学是基础科学，理工专业的同学做物理实验，是要通过实验，学习物理学基本的实验方法和实验技术，更深刻地理解理论与实验的关系，培养科学的思想方法。对于每个物理实验，我们要认真分析它的思路，从一定的高度上认识这些实验的意义。例如霍尔效应的实验，第一步是已知磁场测霍尔灵敏度，第二步是已知霍尔灵敏度测磁场；实际上可以将第一步作为对霍尔元件进行定标，第二步就是用已定标的霍尔元件测未知磁场，而这正是霍尔元件的重要应用之一。如果保持霍尔元件的电流不变，使其在一个均匀梯度的磁场中沿梯度方向移动，则输出的霍尔电势差的变化量与移动距离成正比，就可以做成霍尔位移传感器。这样就可以扩展我们的眼界。

一般地说，物理学的很多理论，是在一定的实验事实基础上总结概括出来的。但也有一些理论，是先提出一些假说，如果能够经过实验的检验和证明，就可以成为大家公认的理论，如果被实验证明是错了的，就需要对假说进行修改或推翻。理论对实验又具有一定的指导作用，对实验中的现象，要用理论去分析研究。教学实验更需要理论的指导。1923年诺贝尔物理奖获得者密立根（Robert Andrews Millikan, 1868—1953）在他的获奖演说中这样说：“科学是用理论和实验这两只脚前进的，有时这只脚先迈出一大步，有时是另一只脚先迈出一大步，但是前进要靠两只脚；先建立理论然后做实验，或者是先在实验中得出了新的关系，然后再迈出理论这只脚并推动实验前进，如此不断交替进行。”他用非常形象的比喻说明了理论和实验在科学发展中的作用。作为一名实验物理学家，他不但重视实验，也极为重视理论的指导作用。

在我们即将开始物理实验的时候，我们还想起了美国俄亥俄州立大学 E. L. J. Jossem 教授讲过的一句话：“I hear and I forget, I see and I remember, I do and I understand.”译成汉语即为：“我只听，易忘记；我看过，易牢记；我做过，易掌握。”他说明了亲眼看到实验现象和亲手做实验有多么重要。相信同学们一定能够通过自己亲手实验，对物理学的原理和方法有更深入的理解，为进一步学习各门专业课打好基础。

第二节 测量误差和不确定度

物理实验不仅有定性观察,更多的是定量测量。一个完整的测量结果,可以表述为下面的形式:

$$Y = y \pm u_y \quad (1)$$

式中, Y 是被测物理量的符号, y 是被测量值, u_y 是被测物理量的不确定度。该式表示被测对象的真值落在 $(y - u_y, y + u_y)$ 范围内的概率是很大的, u_y 的取值与一定的概率相联系。这是一种常用的、较为严谨地评价测量结果的方式。

测量分为直接测量和间接测量。直接测量是指无需对被测的量与其他实测的量进行函数关系的计算而直接得到被测量值的测量,所测得的量称为直接测量量;间接测量是指利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系,经过计算从而得到被测量值的测量,所测得的量称为间接测量量。例如普通基础实验中实验四“杨氏模量的测定(伸长法)”,需要测量钢丝的直径和光杠杆长度等,以便计算钢丝的弹性模量,对钢丝的直径和光杠杆长度的测量就称为直接测量,而对钢丝弹性模量的测量是间接测量。

无论哪种测量都是存在误差的,测量不可能无限准确。测量的任务,不仅是要给出被测量真值的最佳估计值,而且要给出最佳估计值可靠程度的评价。

一、测量误差的定义和分类

1. 测量误差的定义

测量误差用公式表述为

$$\text{误差}(\varepsilon) = \text{测量结果}(X) - \text{真值}(a) \quad (2)$$

误差的基本特性有两个:首先它是普遍存在的,其次一般误差都是小量。虽然随着测试技术的发展,测量误差可以被控制到很小,但却不可能完全消除。

误差的表示方法有两种:绝对误差和相对误差,其中公式(2)中的 ε 即为绝对误差。相对误差 E 有

$$E = \frac{\varepsilon}{a} \times 100\% \quad (3)$$

在已知最佳估计值、经验值或理论值时,公式(3)中的 a 可用这些值替代计算。此时相对误差也被称作相对偏差。这是常用的评价测量结果的方式之一。

2. 测量误差的分类

测量误差可分为系统误差和随机误差(也称偶然误差)。所谓系统误差是指在相同条件下,对同一被测量的多次测量过程中,绝对值或符号保持恒定,或以可预知的方式变化的测量误差。而随机误差同样是在相同条件下,对同一量的多次重复测量中,绝对值和符号以不可预知方式变化的测量误差,其大量测量结果服从正态分布。

系统误差的产生是由于理论条件的近似性、测量方法和测量仪器的误差等。典型的理论近似导致的系统误差是利用单摆周期公式

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

测量本地重力加速度 g 。在实验中，如果单摆摆角较大，不满足公式摆角很小的条件，就会产生由于理论近似导致的系统误差。

典型的由于测量方法产生系统误差的实验是伏安法测电阻。由于测量时电表存在内阻，使得阻值测量不准确，从而产生误差。测量电阻常用的方法是电桥法，尤其对于中值电阻，用电桥法测试更准确。伏安法常用于测试元器件等的伏安特性曲线。

仪器误差主要是由于仪器的工艺制作等原因造成的，如螺旋测微计的螺纹间距误差，指针式仪表的刻度不准等。

另外有些实验者有习惯性的测试误差，如秒表计时总是超前或滞后等。

系统误差又可分为已定系统误差和未定系统误差。前者包括仪表、螺旋测微计等的零位误差，伏安法测电阻中电流表内接、外接引起的误差等。已定系统误差是必须加以修正的。而后者有螺旋测微计制造时的螺纹公差等，一般可以根据出厂时仪器说明书上的误差限确定其范围。

随机误差产生的原因包括实验条件 and 环境因素无规则的起伏变化，引起测量值围绕真值发生波动。例如：电表轴承的摩擦力变动；在一定范围内，螺旋测微计测量结果随机变化；操作读数时的视差影响等等。

服从正态分布的随机误差具有三个特点：单峰性、对称性和有限性。

①单峰性是指小误差 (ϵ) 出现的概率 ($P(\epsilon)$) 比大误差出现的概率大；②对称性是指多次测量时，随机误差分布对称，具有抵偿性——因此用多次测量的平均值作为测量结果的最佳估计值，有利于消减随机误差。③有限性是指超过某一误差的大误差是不可能出现的。这三个特点可以通过正态分布曲线来反映，如图 1 所示。关于正态分布函数的知识参见本章阅读资料 1。

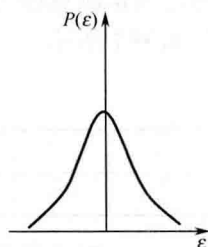


图 1 随机误差的正态分布曲线

3. 随机误差的计算

假定对一个量进行了 n 次测量，测得的值为 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，可以用多次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 作为被测量的最佳估计值（假定无系统误差），有

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

根据随机误差的对称性可以证明公式 (4) 成立。可以发现测量次数 n 越大，算数平均值越接近真值。

用标准偏差 $s(x)$ 表示测量值 x_i 的分散性。按照贝塞耳公式求出 $s(x)$ ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

它又称为测量列的标准偏差。

平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$ 可写为（推导过程参见本章阅读资料 2）

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

s 的物理意义是， s 值大表明测得值很分散，随机误差分布范围宽，测量的精密度低； s 值小表明测得值很密集，随机误差分布范围窄，测量的精密度高。

4. 数据的格罗布斯判据

实验中由于某种错误会出现大误差的测量值，根据误差理论，可以利用格罗布斯判据剔除错误数据。设测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为正态样本，其平均值为 $\bar{x}$ ，格罗布斯判据的统计量 G 如下式所示：

$$G = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \quad (7)$$

式中， s 为标准偏差。对于可疑值 x_m ，当

$$\frac{|x_m - \bar{x}|}{s} > G(n) \quad (8)$$

时，判定测量值 x_m 为高度异常数据。式中 $G(n)$ 为判据临界值， n 为测量次数。不同 n 的临界值如表 1 所示。

表 1 格罗布斯判据临界值表

n	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$G(n)$	1.75	1.94	2.10	2.22	2.32	2.41	2.48	2.55	2.61	2.66	2.70

二、测量误差与不确定度

不确定度的权威文件 *Guide to the expression of Uncertainty in measurement* 是国际标准化组织 (ISO)、国际计量局 (BIPM) 等七个国际组织在 1993 年联合推出的。

不确定度表示由于存在测量误差而对被测量值不能确定的程度。它是一定概率下的误差限值，反映了可能存在的误差分布范围，这是包含了偶然误差分量和未定系统误差分量的联合分布范围。

不确定度与误差是有区别的，由于真值是不可知的，误差一般是不能计算的，它可正、可负，也可能十分接近零；而不确定度总是不为零的正值，是可以具体评定的。

1. 直接测量量不确定度 u 的估算

直接测量量的总不确定度分为两类：A 类分量 $u_A(\bar{x})$ 是和多次重复测量有关、用统计学方法估算的分量；B 类分量 $u_B(\bar{x})$ 是用非统计学方法评定的分量，它与仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 有关，在各类仪器误差出现概率都相等的情况下，有 $\Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$ 。

这两类不确定度分量在相同置信概率下，用方和根方法合成总不确定度：

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (9)$$

单次测量时，有 $u = u_B$ 。

2. 直接测量量不确定度的结果表示

用不确定度表示直接测量量的测试结果，根据式 (9) 有

$$x = (\bar{x} - x_0) \pm \sqrt{s^2(\bar{x}) + (\Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3})^2} \quad (10)$$

其中，以测量列 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的平均值 $\bar{x}$ ，再修正掉已定系统误差 x_0 ，得到被测对象的最佳估计值 $(\bar{x} - x_0)$ ；A 类不确定度有 $u_A = s(\bar{x})$ ，即等于算术平均值的标准偏差，参见计算式 (6) 和式 (5)；B 类不确定度为 $u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$ 。

例：用螺旋测微计测某一钢丝的直径，6 次测量值 x_i 分别为 0.249 mm, 0.250 mm, 0.247 mm, 0.251 mm, 0.253 mm, 0.250 mm；同时读得螺旋测微计的零位 x_0 为：0.004 mm，已知螺旋测微计的仪器误差为 $\Delta_{\text{仪}} = 0.004$ mm，请给出完整的测量结果。

解：测得值的最佳估计值为

$$y = \bar{y} - y_0 = 0.250 - 0.004 = 0.246(\text{mm})$$

平均值的标准偏差为

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)n}} = 0.00082 \text{ mm}$$

测量次数 $n=6$ ，可近似有

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{s^2(\bar{x}) + (\Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3})^2} = \sqrt{0.00082^2 + (0.004 / \sqrt{3})^2} \approx 0.0024 \text{ mm}$$

则测量结果为 $Y = 0.2460 \pm 0.0024 \text{ mm}$ 。

3. 间接测量量的不确定度

间接测量量的不确定度采用直接测量量的不确定度“方和根”合成的方式得到，即一定权重的各直接测量量的不确定度，进行“平方”、“求和”再“求根”的运算，得到间接测量量的不确定度，具体形式如公式 (11) 所示：

$$\begin{aligned} Y &= f(x_1, x_2, x_3, \dots) \\ u_Y &= \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2} \quad \text{和差形式} \\ \frac{u_Y}{Y} &= \sqrt{\sum \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2} \quad \text{乘、除、指数形式} \end{aligned} \quad (11)$$

其中，第一式中 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为各直接测量量， Y 是间接测量量。如果函数关系是“和”或“差”的形式，则间接测量量的不确定度 u_Y 的计算公式是第二式，其中 u_{x_i} 是各直接测量量的不确定度， $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 是利用第一式对第 i 个直接测量量 x_i 求偏导的结果。如果函数关系是“乘”、“除”、“对数”或“指数”的形式，则间接测量量的相对不确定度 $\frac{u_Y}{Y}$ 的计算公式是第三式，其中 $\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}$