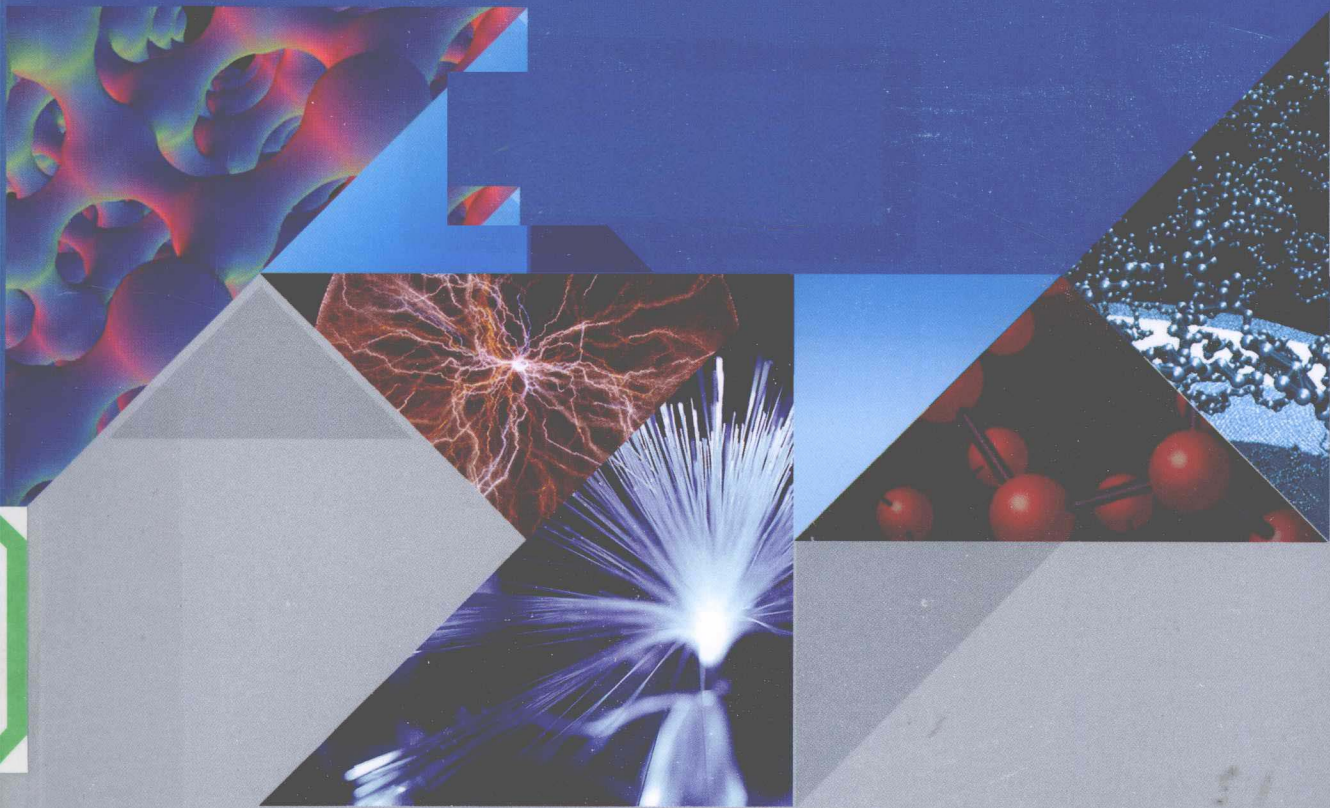




普通高等教育“十一五”规划教材

基础物理实验

吴俊林 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材

基础物理实验

主 编 吴俊林

副主编 刘志存 任亚杰 史智平

朱志平 李宗领

目 录

第一章 绪论
1.1 物理实验的地位和作用
1.2 物理实验的目的和任务
1.3 物理实验的方法和步骤
1.4 物理实验的误差和数据处理

第二章 力学实验

2.1 长度的测量

2.2 质量的测量

2.3 力的测量

2.4 转动惯量的测量

2.5 碰撞实验

2.6 简谐运动的实验

2.7 阻尼振动的实验

2.8 受迫振动的实验

2.9 共振现象的实验

2.10 非弹性碰撞的实验

2.11 动量守恒的实验

2.12 能量守恒的实验

2.13 机械能守恒的实验

2.14 动能定理的实验

2.15 功和功率的实验

2.16 弹性势能的实验

2.17 重力势能的实验

2.18 动能和势能的转化

2.19 机械能守恒定律的应用

2.20 机械能守恒定律的验证

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是在陕西师范大学物理实验教学示范中心及多所高等师范院校十余年来物理实验教学改革与研究成果的基础上,吸纳了近年来物理实验教学改革与研究的主流成果编写而成的。本书将学生探索获取知识的能力、创新意识、独立评判能力以及解决实际问题的科学研究能力和教师教育专业可持续发展能力的培养渗透在物理实验教学的各个环节,形成了鲜明的特色。每个实验由发展过程与前沿应用概述、实验目的及要求、实验仪器选择或设计、实验原理、实验内容、思考讨论、探索创新、拓展迁移”等要素构成,实验内容力争缩小基础实验与前沿应用、教学与科学研究间的差距,突出了自然科学的物理学基础和现代科学技术的主要基础物理实验源泉。全书共6章,其中第1~3章介绍物理实验的基础知识,第4~6章编入33个基础实验。

本书可作为高等师范类和综合类院校物理专业学生基础物理实验和非物理专业学生大学物理实验课教材,也可作为高等院校理工类学生大学物理实验课的教材,并适合不同层次的教学需要。

图书在版编目(CIP)数据

基础物理实验/吴俊林主编. —北京:科学出版社,2010
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978-7-03-028480-8

I. ①基… II. ①吴… 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(2010)第 148862 号

责任编辑:窦京涛/责任校对:朱光兰

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

深海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2010年8月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—6 500 字数:410 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

物理学的性质决定了它是整个自然科学的重要基础,是现代高新技术的主要源泉,也是工程科技的核心基石.物理学的发展不仅在于自身的学科体系内生长和发展出许多新的学科分支,而且它是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科的源头和先导,并成为推动现代高科技发展和新兴学科诞生的原动力.纵观科学技术的发展史,每次重大的技术革命都源于物理学的发展.物理学的每一项新突破,都转化为工程技术上的重大变革,继而发展成为新的生产力,推动社会的发展和人类文明的进步.

物理学的发展,把人类对自然界的认识推进到了前所未有的深度和广度.在微观领域,已经深入到基本粒子世界,并建立起起统一描述电磁、弱、强相互作用的模型,还引起了人们测量观、因果观的深刻变革.量子力学为描述自然现象提供了一个全新的理论框架,并成为现代物理学乃至化学、生物学等学科的基础.在宇观领域,研究的空间尺度已达到 10^{26} cm,时间标度已达到 10^{17} s 的宇宙纪元.相对论引起了人们时空观、宇宙观的深刻变革.在宏观领域,关于物质存在状态和运动形式的多样性、复杂性的探索,也取得了突破性的进展.物理学还与其他学科相互渗透,产生一系列交叉学科.物理学的研究领域,将继续朝着更小的尺度、更快的时间、更强的相互作用、更为复杂的结构体系过渡.物理学中的每一个重大发现几乎都会导致生产技术上的许多重大突破.例如,几次工业革命无不与物理学密切相关:19世纪,力学和热学理论的发展,使人类开创了以蒸汽机为标志的第一次工业革命;电磁理论的建立,使人们制造出了发电机、电动机、电话、电报等电器设备,人类跨进了电气化时代;电磁波的发现和半导体材料的研制成功,诞生了电子技术这门应用学科,从而使广播、电视、雷达、通信、计算机等事业异军突起;近代物理学的发展,为半导体、原子能、激光、量子器件的发现奠定了基础,人类进入了以航天技术、微电子技术、光电子技术、生物技术、计算机及信息技术等高新技术为主要内容的新时代.物理学是当代工程技术的重大支柱,是许多工程技术如机械制造、土木建筑、采矿、水利、勘探、电工、无线电、材料、计算机、航空和火箭等的理论基础.物理学对人类文化和文明的发展作出了巨大的贡献,对社会发展和人类生活产生了不可估量的影响.

物理实验是物理学和自然科学的核心基础,物理理论和实验的发展,哺育着自然科学和近代高新技术的成长和发展.物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点.现代高新技术的发明和突破,无不源于物理实验研究上的重大发现,而高新技术的发展,又不断推动着实验物理研究的手段、方法和设备的发展,大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度.物理实验课是为高等学校理工科学生开设的一门实践性很强的必修课,它的任务是通过实验过程培养学生发现、分析和解决问题的能力,为从事科学研究打下坚实的基础.物理实验课曾经为培养20世纪的优秀人才作出了卓越的贡献,也必将为培养新时期的高素质创新人才奠定坚实的基础.

《基础物理实验》一书是作者长期从事物理实验教学改革研究与实践的成果总结.本书试图以“从自然到物理、从物理到实验、从实验到技术、从技术到应用”为脉络,实验所讲述的内容既注重知识的发现发展过程,又适当介绍物理学史和著名人物传记,借以引入方法论的教育和

科学精神、人文精神的熏陶,强调物理方法及思维方法的培养;强调现代科学技术应用背景与物理学原理、基础物理实验相融合,使学生拓宽视野,加深其对物理学基本原理及基础物理实验在工程技术领域前沿作用的理解;在实验内容和教学方面力争营造自由的时空和选择,以兴趣驱动自主探索、独立评判和解决实际问题过程的感悟,以满足能力培养和层次化教学需要,努力做到在个性化发展中融入创新意识和创新能力的潜在生长;实验内容中加入了“探索创新与拓展迁移”两方面的元素,意在营造氛围、引导兴趣和好奇心,激励需要动机和探索创新的原动力,同时把基础物理实验的物理思想和方法拓展到现代科学技术的前沿应用,缩短了基础与前沿应用、教学与科学研究的距离.教材最大限度地营造宽松自由或选择空间,启迪学生独立评判,注重兴趣探索和个性化发展,把科学素养、实践能力和创新能力培养渗透到物理实验教学的全过程,真正做到创新人才培养和风细雨,持之以恒.

悠久的历史,几代人的积淀,陕西师范大学物理实验教学及实验室建设已经历了 60 余年的辉煌历史.60 多年来,在几代人的辛勤耕耘下,物理实验教学及实验室建设经过多次大调整、不断改进、更新和扩充、积累经验、反复实践、不断改革完善,才达到目前的规模和水平.因而,本书的编写凝聚了多年来所有从事物理实验课教学的教师和实验技术人员的智慧和劳动成果.许多实验题目都包含了多位同志先后的贡献,这里难以逐一记录他们的功绩.在新教材出版之际,谨向他们的无私奉献和辛勤劳动表示感谢!

全书共分 6 章:第 1 章物理实验概述;第 2 章物理实验测量误差与数据处理基础知识;第 3 章物理实验基本测量方法与操作技能;第 4 章力学、热学量的测量及实验探索(实验 4.1~4.16);第 5 章电磁学量的测量及实验探索(实验 5.1~5.9);第 6 章光学量的测量及实验探索(实验 6.1~6.8).本书的编写由吴俊林、刘志存、任亚杰、史智平、朱志平、李宗领等共同完成,最后由吴俊林统稿和定稿.

本书在编写过程中,征求了许多兄弟院校从事物理实验教学的老师的意见和建议,参考并吸收了许多兄弟院校的有关资料和经验;陕西师范大学教务处、实验室建设与管理处、物理学与信息技术学院的领导对本书的编写和出版给予了极大的支持和鼓励;科学出版社的有关领导和编辑们为本书的出版作了巨大的贡献.借此表示衷心的感谢!

实验室建设和实验教学改革是一项长期的和复杂的系统工程,我们深知教材编写中可能还有许多不完善和需要改进之处,加上编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正.

编 者

2009 年 12 月于陕西师范大学

目 录

前言

第 1 章 物理实验概述	1
1.1 物理实验课的目的和任务	2
1.2 基础物理实验课的三个环节	3
第 2 章 物理实验测量误差与数据处理基础知识	6
2.1 测量误差的基本知识	6
2.2 测量不确定度和测量结果的表示.....	27
2.3 有效数字及其运算.....	31
2.4 实验数据处理的常用方法.....	34
习题	47
第 3 章 物理实验基本测量方法与操作技能	50
3.1 物理实验的基本测量方法.....	50
3.2 物理实验的基本操作技能与实验原则.....	61
第 4 章 力学、热学量的测量及实验探索	66
实验 4.1 长度和体积测量	66
实验 4.2 固体和液体密度的测量	74
实验 4.3 空气密度的测定	81
实验 4.4 单摆及偶然误差的统计规律	88
实验 4.5 自由落体运动规律研究	94
实验 4.6 牛顿第二定律的研究	98
实验 4.7 碰撞规律的研究	105
实验 4.8 弦振动的研究	109
实验 4.9 用三线摆测定物体的转动惯量	115
实验 4.10 扭摆法测定物体的转动惯量	118
实验 4.11 物体比热容的测定	122
实验 4.12 用落球法测定液体的黏滞系数	125
实验 4.13 金属线胀系数的测量	132
实验 4.14 液体表面张力系数的测定	135
实验 4.15 金属材料杨氏模量测定	144
实验 4.16 声速的测定	150
第 5 章 电磁学量的测量及实验探索	155
实验 5.1 制流与分压电路	165
实验 5.2 元件伏安特性的测量	169
实验 5.3 惠斯通电桥测中值电阻	174

实验 5.4	模拟法测绘静电场	178
实验 5.5	直流电势差计的原理及应用	182
实验 5.6	示波器的原理及应用	186
实验 5.7	RLC 串联电路谐振特性研究	193
实验 5.8	霍尔效应及其应用	196
实验 5.9	多功能电表的设计与校准	201
第 6 章	光学量的测量及实验探索	218
实验 6.1	薄透镜焦距的测量及成像规律的研究	218
实验 6.2	分光计的调节及三棱镜折射率的测量	221
实验 6.3	显微镜与望远镜放大率的测定	229
实验 6.4	等厚干涉的应用	233
实验 6.5	用掠入射法测定物质的折射率	238
实验 6.6	单缝衍射光强分布及缝宽的测量	243
实验 6.7	迈克耳孙干涉仪的调节及光波波长的测定	248
实验 6.8	光电效应测定普朗克常量	254
附表	260
附表 1	基本和重要的物理学常数表	260
附表 2	海平面上不同纬度处的重力加速度	261
附表 3	一些物质的密度	262
附表 4	固体的弹性模量	264
附表 5	固体的线胀系数($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$)	264
附表 6	黏度系数	265
附表 7	表面张力系数	266
附表 8	某些物质中的声速	266
附表 9	常用材料的导热系数	267
附表 10	部分固体和液体的比热	267
附表 11	部分金属合金的电阻率及温度系数	268
附表 12	热电偶电动势	268
附表 13	电介质的介电常数	270
附表 14	一些物质的折射率(对 $\lambda_D = 589.3 \text{ nm}$)	271
附表 15	常见谱线波长	272
附表 16	光在有机物中偏振面的旋转	273



第1章 物理实验概述

物理学是研究物质运动一般规律及物质基本结构的科学,是整个自然科学的基础,也是当代科学技术的主要源泉。物理学的发展不仅推动了整个自然科学,而且对人类的物质观、时空观、宇宙观和对整个人类文化都产生了极其深刻的影响。

物理学的发展,把人类对自然界的认识推进到了前所未有的深度和广度。在微观领域,已经深入到基本粒子世界,并建立起统一描述电磁、弱、强相互作用的模型,还引起了人们测量观、因果观的深刻变革。量子力学为描述自然现象提供了一个全新的理论框架,并成为现代物理学乃至化学、生物学等学科的基础。在宇观领域,研究的空间尺度已达到 10^{26} cm,时间标度已达 10^{17} s 的宇宙纪元;相对论引起了人们时空观、宇宙观的深刻变革。在宏观领域,关于物质存在状态和运动形式的多样性、复杂性的探索,也取得了突破性的进展。物理学还与其他学科相互渗透,产生一系列交叉学科。物理学的研究领域,将继续朝着更小的尺度、更快的时间、更强的相互作用、更为复杂的结构体系过渡。

物理学又是当代科学技术发展最主要的原动力,其理论与实验的发展哺育着近代高新技术的创新和发展,其思想、方法、技术、手段、仪器设备已经被普遍地应用在各个自然科学领域和技术部门,常常成为自然科学研究和工程技术创新发展的生长点。纵观科学技术的发展史,可以看出,每次重大的技术革命都源于物理学的发展。物理学的每一项新突破,都转化为工程技术上的重大变革,继而发展成为新的生产力,推动人类社会的进步和发展。例如,几次工业革命无不与物理学密切相关:19世纪,力学和热学理论的发展,使人类开创了以蒸汽机为标志的第一次工业革命;电磁理论的建立,使人们制造出了发电机、电动机、电话、电报等电器设备,人类跨进了电气化时代;电磁波的发现和原子物理学、量子力学导致了半导体材料的研制成功,诞生了电子技术这门应用学科,从而使广播、电视、雷达、通信、计算机、网络等事业异军突起,从此人类进入了信息化时代。近代物理学的发展,为半导体、原子能、激光、量子器件的发现奠定了基础。人类进入了以航天技术、微电子技术、光电子技术、生物技术、计算机及信息技术等高新技术为主要内容的崭新时代。物理学是当代工程技术的重大支柱,是许多工程技术如机械制造、土木建筑、采矿、水利、勘探、电工、无线电、材料、计算机、航空和火箭等的理论基础。

从本质上讲,物理学是一门实验科学,自从伽利略以实验的方法研究物体的运动,从而为物理学奠定基础之后,物理学的发展就离不开实验的推动,在物理学的建立和发展过程中物理实验一直起着十分重要的作用。从人们认识客观事物的规律来看,总是先从实验出发,经过分析和归纳,上升为理论,然后再回到实践中去指导实践,并接受实践的检验。三四百年前,伽利略和牛顿等学者,以科学实验方法研究自然规律,逐渐形成了一门物理科学。从此物理学中每个概念的提出、每个定律的发现、每个理论的建立,都以坚实、严格的实验为基础,且还要经受实验的进一步检验。所以物理实验是物理学的基础。例如,法拉第于1831年在实验室里发现了电磁感应现象,进而得出电磁感应定律和其他几个实验定律。麦克斯韦系统总结了电磁学的成就,在1864年提出著名的电磁场理论。二十几年后,赫兹的电磁波实验又检验和证实了电磁场理论的正确性。麦克斯韦的电磁场理论把电、磁、光三个领域的规律综合在一起,具有划时代的

意义. 物理学的发展离不开实验的推动,就是在物理学的研究深入到原子、核子、夸克等微观层次并扩展到星系、星系团等宇观层次,实验也总是理论的先导和准绳,即使在理论体系已相当完整的领域,物理学的发展和进步也还是离不开实验技术的发展. 物理学实验的仪器设备和研究方法还成为其他自然科学发展的必要工具,化学、生物学和材料科学的研究前沿已与物理难以区分,化学物理、分子生物学和纳米材料科学就是例子. 物理学实验的仪器和方法也广泛应用于技术领域和日常生活,医学中的 X 射线、CT、B 超、核磁共振,信息技术中的计算机、通信设备、光纤,无一不是来源于物理学实验仪器. 这些令人感慨的例子数不胜数,但都说明了物理学及物理实验对人类社会发展的重要性.

人类改造自然的实践活动不外乎两种:一是生产实践,二是科学实验. 所谓科学实验,是人们按照一定的研究目的,借助特定的仪器设备,人为地控制或模拟自然现象,突出主要因素,对自然事物和现象进行精密、反复地观察和测试,探索其内部的规律性. 这种对自然有目的、有控制、有组织的探索活动是现代科学技术发展的源泉. 原子能、半导体和激光等最新科技成果仅仅依靠总结生产技术经验是发现不了的,只有在科学家的实验室里才会被发现. 现代化的企业为了不断地改进生产过程和创新产品,也十分重视实验研究工作,都有相当规模的研究实验室. 因而科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,是工程技术的基础,同时科学理论对实验起着指导作用. 要处理好实验和理论的关系,重视科学实验,重视进行科学实验训练的实验课教学.

现代教育理论研究表明,人的创新能力是在实践活动中通过构建知识,获取体验,形成技能,最终发展为能力. 物理实验是高等学校理工科学生特别是综合大学和高等师范院校物理专业学生实践性很强的必修基础课. 物理实验教学是以教学形式培养科学技术后备人才的重要途径,在创新人才培养方面起着不可替代的重要作用. 物理学在发展,物理实验的技术在不断更新,如何在基础物理实验教学中引入新的教学内容和方法,如何根据教学内容和方法的更新改革物理实验课教学模式,使物理实验教学适应创新人才培养的要求,并把学生创新能力培养渗透到物理实验教学的各个环节是许多从事基础物理实验教学的老师近年来一直在努力探索的课题. 在西部部分高等师范院校中,从事基础物理实验教学的老师结合西部和师范特点在这方面做了大量的探索工作,取得了一些成效,本书就是其中之一.

1.1 物理实验课的目的和任务

大学物理实验课是一门独立设置的实践性很强的必修基础课程,它和理论课具有同等重要的地位. 实验研究有自己的一套理论、方法和技能. 通过本课程的学习使学生了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定基础. 本课程以基本物理量的测量方法、基本物理现象的观察和物理思想研究、常用测量仪器的结构原理和使用方法为主要内容进行教学,对学生的基本实验能力、分析能力、表达能力和综合运用设计能力进行严格的培养. 本课程是对理工科学生进行科学实验基本训练的一门必修基础课,是学生进入大学后在科学实验思想、方法、技能诸方面,接受较为系统、严格训练的开端,是学生进行自主学习、培养创新意识、为后续课程及科学研究打好基础的第一步. 基本实验能力是科学研究的基本功,只有具备熟练扎实的实验基础知识、方法和技能,才有可能在科学研究中做出成绩. 各个层次的实验题目和内容都经过了精心设计和安排,它不仅可以使学生在理论和实验两方面融会贯通,更重要的是

在培养学生的基本科学实验能力、科学世界观和良好素质等方面,具有特殊的不可替代的重要作用。

开设物理实验课的目的简单说来有以下三点:

(1)学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。它包括学习使用各种测量仪器,学习各种物理量的测量方法,观察分析各种实验现象,还要学习测量误差的理论知识,学会正确地记录和处理数据,正确地表达实验结果,对实验结果进行正确的分析评价等,为以后的科学研究工作或其他科学技术工作打下良好的实验基础。

(2)逐步培养起严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风,养成良好的实验习惯。科学是老老实实的学问,来不得半点虚假和马虎。良好的实验习惯是做好实验的重要条件,一旦形成不好的习惯,以后就很难改正。要在每次实验中有意识地锻炼自己。

(3)通过实际的观察和测量,加深对物理理论知识的理解和掌握,同时激发大家对学习物理科学的兴趣。

物理实验课程的具体任务。

(1)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,加深对物理学原理的理解。

(2)培养与提高学生的科学实验能力。它包括:①自学能力,即能够自行阅读实验教材和资料,能正确理解原理,作好实验前的准备;②实践能力,即能够借助教材或仪器的说明书,正确使用常用仪器,完成实验操作;③思维判断能力,即能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析,作出判断;④表达书写能力,即能够正确记录和处理实验数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;⑤简单的设计能力,即能够完成综合提高实验和设计性实验;⑥创新能力,即能够举一反三,灵活运用,有所创新。

(3)培养与提高学生的科学实验素质。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的科学态度,主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德。

1.2 基础物理实验课的三个环节

物理实验课是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,无论实验内容的要求或研究的对象如何不同,无论采用什么方法,其基本程序大致相同,一般都有以下三个基本环节。

1.2.1 实验课前预习

物理实验课不同于理论课,做实验前一定要认真预习,预习的好坏直接影响实验的成败,因此,预习是做好实验的基础。预习时首先要仔细阅读教材的有关章节及实验,不能只将实验内容通读一遍,关键是要理解其意。明确实验的目的要求,搞清实验所依归的原理和采用的方法,初步了解所用量具、仪器、装置的主要性能及使用方法,明白如何进行操作,要测量哪些数据,要注意哪些事项。对一时搞不清楚的问题,应做出记录,以便在实验过程中加倍注意,通过实验来解决。

阅读教材后要在规定的实验报告本或报告纸上写出简明扼要的预习报告,设计画好记录原始数据的表格。上课时,教师将通过不同的方式检查预习情况,并作为评定课内成绩的一项内容。对于没有预习的学生,一般不允许做本次实验。

1.2.2 实验观测

实验课内操作是实验课的关键环节,是学习科学实验知识、培养实验技能、完成实验任务的主要过程。进入实验室要遵守实验室规则。实验前应首先清点量具、仪器及有关器材是否完备,然后根据实验内容和测量方法进行合理布局,对量具、仪器及进行调整或按电路、光路图进行连接。清楚了解所用仪器的性能、使用方法,牢记注意事项。实验前,如有必要应请指导教师检查。实验开始,如果条件允许,可先粗略定性地观察一下实验的全过程,了解数据分布情况,有无异常现象。如果正常就可以从头按步骤进行实验测试。实验过程中如出现异常情况,应立即中止实验,以防损坏仪器,并认真思考,分析原因,力求自己动手寻找、排除故障,当然也可与指导教师讨论解决。通过实验学习探索和研究问题的方法。

物理实验过程中要仔细观察实验现象,手脑并用,边做实验边思考,做到认真测量如实记录原始数据。实验完毕,原始数据记录经教师检查后,方能归整仪器,离开实验室。

1.2.3 实验报告撰写

实验报告是实验完成后的书面总结,是把感性认识转化为理性认识的过程,是培养表达能力的主要环节。首先应该完整地分析一下整个实验过程,实验依据的理论和物理规律是什么;通过计算、作图等数据处理,得到什么实验结果,有的还要进行科学合理的误差或不确定度估算;有哪些提高;存在什么问题。应该注意的是,写实验报告不要不动脑筋地去抄教材。因为实验教材是供做实验的人阅读的,是用来指导别人做实验的。实验报告则是向别人报告实验的原理、方法,使用的仪器,测得的数据,供别人评价自己的实验结果。认真书写实验报告,不仅可以提高自己写科研报告和科学论文的水平,而且可以提高组织材料,语句表达,文字修饰的写作能力,这是其他理论课程无法替代的。

物理实验报告一般包括以下几项内容:

(1)实验名称。

(2)实验目的(或要求)。

(3)实验仪器用具。

(4)实验原理。简要叙述实验的物理思想和依据的物理规律,主要计算公式,电学和光学实验应画出相应的电路图和光路图。

(5)数据表格及数据处理。把教师签字的原始数据如实地誊写在报告的正文中,写出计算结果的主要过程及误差或不确定度估算过程。进行数值计算时,要先写出公式,再代入数据,最后得出结果。若用作图法处理数据,应严格按作图要求,画出符合规定的图线。

(6)讨论分析小结。讨论分析实验中的遇到的问题,写出自己的见解、体会和收获,提出对实验的改进意见等。讨论分析是培养分析能力的重要途径。

(7)回答问题。回答指定的问题。

物理实验论文式实验报告一般应包括:

(1)论文题目(可以是实验名称或派生的相关研究题目)。论文题目是论文的总纲,是能反映论文最重要的特定内容的最恰当、最简明的词语的逻辑组合。论文题目要准确得体,简短精练,一般不宜超过20个汉字。

(2)摘要. 摘要是对“论文的内容不加注释和评论的简短陈述”,文字必须十分简练,内容亦需充分概括和浓缩,一般为50~200字. 论文摘要不要列举例证,不讲研究过程,不用图表、公式,也不要做自我评价. 摘要内容主要包含:研究的目的意义;研究的主要内容和方法;研究成果,突出新见解;结论及意义. 摘要的作用主要有:让读者尽快了解论文的主要内容;为科技情报人员和计算机检索提供方便.

(3)关键词. 关键词是为了满足文献标引或检索工作的需要,从论文中选取出的用以表示全文主要内容信息款目的词语或者术语,一般为3~6条.

(4)引言. 论文的引言又叫绪论,引言属于整篇论文的引论部分. 引言的内容应包括:研究的理由、目的和背景;理论依据、实验基础和研究方法;预期的结果及其地位、作用和意义. 也就是引出论文研究问题的来龙去脉,回答为什么要写该论文,其作用在于唤起读者的注意,使读者对论文先有一个总体的了解. 引言的文字不可冗长,内容不宜过于分散、琐碎,措词要精炼,要吸引读者读下去.

(5)正文. 正文即论证部分,是论文的主体与核心部分,它占据论文的最大篇幅. 论文所体现出的创造性成果或新的研究结果,都将在这一部分得到充分的反映,因此,要求这部分内容充实,论据充分、可靠,论证有力,主题明确. 为了满足这一系列要求,同时也为了做到层次分明、脉络清晰,常常将正文分成几个大段落(即所谓逻辑段),一个逻辑段可包含几个自然段,并冠以适当标题,没有固定的格式,但大体上可以有以下几个部分. 理论分析(实验原理和研究内容);实验仪器用具、实验材料和实验方法;实验结果及其分析;结果的讨论(突出结果新发现);结论和建议. 结论又称结束语. 它是在理论分析和实验验证的基础上,通过严密的逻辑推理而得出的富有创造性、指导性、经验性的结果描述,是论文或研究成果的价值. 结论不是研究结果的简单重复,而是对研究结果经过判断、归纳、推理的更深入一步的认识,是将研究结果升华成新的学术见解.

(6)参考文献. 所谓参考文献是指在论文中引用前人已发表的论文和有关图书资料中的观点、数据和材料等,都要对它们在文中出现的地方予以标明,并在文末列出参考文献表. 其目的是:能够反映出真实的科学依据;体现严肃的科学态度,分清楚是自己的观点或者成果,还是别人的观点或者成果;对前人的科学成果表示尊重,同时也是为了指明引用资料出处.

物理实验是以教学形式培养学生创新意识、实际问题能力和初步从事科学研究能力的实践性环节. 论文式实验报告的写作过程,是实验事实即客观事物经过实验者主观思维的加工整理,便形成论文. 这是一个从认识过程到表达过程的飞跃. 在论文形成过程中,实验者经过加工整理材料,提炼主题思想或科学观点,安排论文的结构,都要找出事物之间本质的和必然的联系,并加以概括、抽象,进而揭示出事物的规律性,促进科学研究向生产力的转化,提高人类认识世界和改造世界的能力.

要写好论文式实验报告,就要求同学们必须从研究角度去观察实验现象,发现实验过程中出现的新问题并用物理思想分析思考,进而提出有自己独特见解的解决实际问题的设想或方案. 所以从实验预习、资料查询、实验操作、现象分析、数据研究到论文式实验报告的撰写的各个环节都渗透着能力培养,使物理实验教学真正发挥促进学生物理思想升华和创新能力培养的不可替代的作用.



第2章 物理实验测量误差与数据处理基础知识

2.1 测量误差的基本知识

物理学是建立在实验基础上的科学,物理实验离不开对物理量进行测量,人们认识能力和科学技术水平的限制,使得物理量的测量很难完全准确.也就是说,一个物理量的测量值与其客观存在的值总有一些差异,即测量总存在误差.误差的存在,使得测量结果带有一定的不确定性,因此,对一个测量质量的评估,要给出它的误差或不确定度,不知道可靠程度的测量值是没有意义的.本节主要介绍测量误差的基本知识,同时要注意体会误差分析的思想对于做好实验和实验设计的意义.

2.1.1 测量与误差

1. 测量及其分类

在物理实验中,不仅要定性地观察各种物理现象,还必须定量地说明物理量的变化规律,为此就需对物理量进行测量.测量是将被测物理量与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程,其比值即为被测物理量的测量值,被测量的测量结果用标准量的倍数和标准量的单位来表示.因此,测量的必要条件是 measurable 物理量、标准量及操作者.测量结果应是一组数字和单位,必要时还要给出测量所有的量具或仪器,测量的方法和条件等.

按照测量的方法,可将测量分为两类.一类是可用标准计量仪器直接和待测量进行比较而得到结果的测量,称为直接测量,相应物理量称为直接测量量.例如,用米尺测得单摆摆线长度为 $L=90.0\text{cm}$,用停表测量单摆周期 $T=1.91\text{s}$,用电流表测量线路中的电流等.另一类是被测物理量不能用标准计量仪器直接比较,而需要依据待测量和某几个直接测量量一定的函数关系计算出结果的测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测量量.例如,用单摆测定重力加速度,可在直接测定摆长和周期后,依据公式 $g=4\pi^2 \frac{L}{T^2}$ 计算出测量结果.

如果按测量次数来分类,可将直接测量分为单次测量和多次测量.而根据测量条件有无变化又可将多次测量分为等精度测量和不等精度测量两类.由于所有测量都是依据一定的方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的观察者进行的,所以我们把这一定的测量方法、仪器、环境和观察者统称为条件,如果多次测量时,每次的测量条件都完全相同(同一方法、同一仪器、同一环境、同一观察者),则这种测量称为等精度测量,测得的一组数据称为测量列.如果在多次重复测量过程中,有一个或几个条件发生了变化,则这种测量称为非(不)等精度测量.物理实验中尽量采用等精度测量.

2. 测量误差及其分类

1) 真值与测量值

任何一个物理量在确定条件下客观存在的、也就是实际具备的量值称为真值。例如,某一物体在常温条件下具有一定的几何形状及质量。真值是一个比较抽象和理想的概念,一般来说不能确切知道这个值。真值包括理论真值,如三角形内角和之和恒为 180° ,以及约定真值,如指定值、标准值、公认值及最佳估计值等。

通过各种实验所得到的量值称为测量值,多是仪器或装置的读数或指示值,测量值是被测量真值的近似值。包括:①单次测量值;②算术平均值;③加权平均值等。

2) 测量误差

每一个物理量在一定条件下具有的客观大小称为物理量的真值。进行测量的直接目的就是力图获得待测量的真值。但是由于测量条件的不完善,如实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性及环境的不稳定性等因素的影响,任何测量结果和待测量的真值间总有差异,这种差异在数值上的表示称为误差。误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中,测量结果都存在误差,这就是误差公理。

任何测量所得数据,都要不可避免地出现误差,因而没有误差的测量结果是不存在的,在误差必然存在的情况下,测量的任务是:第一,尽量设法减小误差;第二,求出待测量的最近真值,并估算其误差。为此,必须研究误差的性质、来源及其对测量结果的影响,以便采用适当措施,得到最好的结果。

3) 测量误差的分类

按照测量过程中误差的性质和所产生原因,可将误差分为系统误差、随机误差(偶然误差)及粗大误差三大类。实验数据中三种误差是混杂在一起的,但是由于不同性质的误差,对测量结果的影响不一样,因而对它们的处理方法也不相同,我们可根据这一基本特点,分别讨论三者的变化规律,研究其对结果的影响,以便采用相应的措施减少误差。

A. 系统误差

在相同条件下(指方法、仪器、环境、人员)多次重复测量同一量时,误差的大小和符号(正、负)均保持不变或按某一确定的规律变化,这类误差称为系统误差,它的特征是确定性,前者称为定值系统误差,后者称为变值系统误差。

系统误差的来源有以下4方面:

(1) 仪器误差。这是由于仪器或装置的缺陷或未按正常工作条件操作使用所造成的误差。例如,刻度不准;零点没有调准;仪器垂直或水平未调整;砝码未经校正等。

(2) 方法(理论)误差。由于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所产生的误差。例如,称重量时未考虑空气浮力;采用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等。

(3) 环境误差。这是由于环境的影响或没有按规定的条件使用仪器所引入的误差。例如,标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标准的,若在 30°C 条件下使用时,不加以修正,就引入了系统误差。

(4) 主观误差。这是由于实验者生理或心理特点,或缺乏经验引入的误差。例如,有人习惯于侧坐斜视读数,就会使估读的数值偏大或偏小。此种误差因人而异。

系统误差的消除、减小或修正可在实验前、实验中、实验后进行。例如,实验前对测量仪器进行校准,使方法完善,对人员进行专门的训练等;实验中采取一定的方法对系统误差加以补偿;实验后在结果处理中进行修正等。

虽然系统误差的发现、消除、减小或修正是一个技能问题。但是,要找出原因,寻求其规律决非轻而易举之事。这是因为:

第一,实验条件一经确定,系统误差就获得了一个客观上的恒定值,在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差。

第二,在一个具体的测量过程中,系统误差往往会和随机误差同时存在,这给分析是否存在系统误差带来了很大困难。

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有密切关系。因此对于实验初学者来说,从一开始就逐步地积累这方面的感性知识,在实验时要分析采用这种实验方法(理论)、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会给测量结果引入系统误差。如果找到了某个系统误差产生的原因,掌握了它的变化规律,就可采用不同的方法去消除它的影响,或者对测量结果进行修正。

科学史上曾有这样一个事例。

1909~1914年美国著名物理学家密立根以他巧妙设计的油滴实验,证实了电荷的不连续性,并精确地测得基本电荷量为

$$e = (1.591 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{ C}$$

后来,由X射线衍射实验测的 e 值与油滴实验值之差了千分之几。通过查找原因,发现密立根实验中所用的空气黏度数值偏小,以致引入系统误差。在重新测量了空气的黏度之后,油滴实验测得到

$$e = (1.601 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{ C}$$

它与X射线衍射法测得的结果 $(1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ C})$ 十分吻合。

此例说明了实验条件一经确定,多次测量(密立根曾观察了几千个带电油滴)发现不了系统误差。必须要用其他的方法(本例中改变了产生系统误差根源的条件)才可能发现它;同时也说明了实验应该从各方面去考虑是否会引入系统误差,当忽略某一方面时,系统误差就可能从这一方面渗透到测量结果中去。

B. 随机误差(偶然误差)

在测量时,即使消除了系统误差,在相同条件下多次重复测量同一量时,每次测得值仍会有些差异,其误差的大小和符号没有确定的变化规律。但如大量增加测量次数,其总体(多次测量得到的所有测得值)服从一定的统计规律,这类误差称为随机误差,它的特征是偶然性。

随机误差产生的原因很多,主要是由于测量过程中存在许多难以控制的不确定的随机因素引起的。这些随机因素有空气的流动,温度的起伏,电压的波动,不规则的微小振动,杂散电磁场的干扰,以及实验者感觉器官的分辨能、灵敏程度和仪器的稳定性等。某一次测量的随机误差往往是由多种因素的微小变动共同引起的。例如,用停表测量三线摆的周期,按下按钮的时刻有早有迟,动作迟早的程度有差异,从而产生了不可避免的随机误差。

实践和理论都证明,在相同条件下,对同一物理量进行大量次数的重复测量,可以发现大部分测量的随机误差服从统计规律。统计规律用分布描述,分布常用图形表示,其中最常见的是高斯分布,又称正态分布。服从正态分布的随机误差具有下面的一些特性:

(1)单峰性. 由大量重复测量所获得的测量值,是以它们的算术平均值为中心而相对集中分布的. 即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(次数多).

(2)对称性. 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同.

(3)有界性. 误差的绝对值不会超过某一界限,即绝对值很大的误差出现的概率趋于零,随机误差的分布具有有限的范围.

(4)抵偿性. 随着测量次数的增加,随机误差的代数和趋于零,即随机误差的算术平均值将趋于零. 实际上,抵偿性可由单峰性及对称性导出.

C. 粗大误差(粗差)

明显地歪曲了测量结果的异常误差称为粗大误差. 通常用测量时的客观条件不能解释为合理的误差,或超出了规定条件下随机误差范围的误差,均称为粗差. 它是由没有觉察到的实验条件的突变、仪器在非正常状态下工作、无意识的不正确的操作等因素造成的. 含有粗大误差的测得值称为可疑值,或异常值、坏值. 在没有充分依据时,绝不能按主观意愿轻易地去除,应该按照一定的统计准则慎重地予以剔除.

由于实验者的粗心大意,疏忽失误,使观察、读数或记录错误,是应该及时发现,力求避免的. 错误不是误差.

在分析误差时,必须根据具体情况,对误差来源进行全面分析,不但要找全产生误差的各种因素,而且要找出影响测量结果的主要因素. 首先剔除粗差,消除或减弱系统误差,然后估算随机误差.

4) 测量误差的表示

尽管误差有几类,但对于测量结果而言,在剔除粗差后,其误差应是系统误差和随机误差的总和. 测量误差通常有两种表示方法:一是定性说明,一是定量表示.

A. 测量的精密性、准确度和精确度

为了定性的描述各测量值的重复性及测量结果与真值的接近程度,常用精密性、准确度、精确度来描述.

精密性:表示重复测量各次测量值相互接近的程度,即测得值分布的密集程度,它表征随机误差对测量值的影响,精密性高表示随机误差小,测量重复性好,测量的数据比较集中. 精密性反映随机误差大小的程度.

准确度:表示测量值或实验所得结果与真值的接近程度,它表征系统误差对测量值的影响,准确度高表示系统误差小,测量值与真值的偏离小,接近真值的程度高. 准确度反映了系统误差大小的程度.

精确度:描述各测量值重复性及测量结果与真值的接近程度,它反映测量中的随机误差和系统误差综合大小的程度,测量精确度高,表示测量结果即精密又正确,数据集中,而且偏离真值小,测量的随机误差和系统误差都比较小.

图 2-1-1 是以打靶时弹着点的分布为例,说明这三个词的含义. 图 2-1-1(a)表示射击的精密度高但准确度低,即随机误差小系统误差大. 图 2-1-1(b)表示射击的准确度高但精密性低,即系统误差小而随机误差大. 图 2-1-1(c)的弹着点比较集中,又都聚集在靶心附近,表示射击的准确度高,既精密又准确,随机误差和系统误差都小.

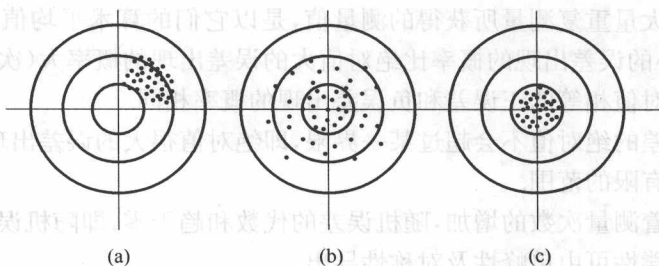


图 2-1-1

B. 绝对误差

误差的定义为

$$\text{测量误差 } \sigma x = \text{测量值 } x - \text{真值 } x_0$$

测量误差是测量值与真值的差值,常称为绝对误差,绝对误差可正可负,具有与被测量值相同的量纲和单位,它表示测量值偏离真值的程度.但要注意,绝对误差不是误差的绝对值.由于真值一般是得不到的,因此误差也无法计算.实际测量中是用多次测量的算术平均值 \bar{x} 来代替真值,测量值与算术平均值之差称为偏差,又称残差,用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - \bar{x} \quad (2-1-1)$$

假定一个物体的真实长度为 100.00mm,而测得值为 100.5mm,则测量误差为 0.5mm.另一个物体的真实长度为 10.0mm,测得值为 10.5mm,测量误差也为 0.5mm.从绝对误差看两者相等,但测量结果的准确程度却大不一样.显然,评价一个测量结果的优劣,不仅要看绝对误差的大小,还要看被测量本身的大小.

C. 相对误差

测量值的绝对误差与被测量值真值之比称为相对误差.由于真值不能确定,实际上常用约定真值,如公认值、算术平均值.相对误差 E 是一个无单位的无名数,常用百分数表示,如

$$E = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2-1-2)$$

前述第 1 个测量的相对误差 $E = \frac{0.5}{100.0} = 0.5\%$,而第 2 个测量的相对误差 $E = \frac{0.5}{10} = 5\%$.

第 1 个测量比第 2 个测量准确程度高.

2.1.2 直接测量结果随机误差的估算

在下面的讨论中,我们都是排除系统误差的前提下进行的,或者认为系统误差已经小到可以忽略不计的程度了.随机误差的大小常用标准误差、平均误差和极限误差表示.

1. 测量结果的最佳值——算术平均值

设对某一物理量进行了 n 次等精度的重复测量,所得的一系列测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$,测量结果的算术平均值为 \bar{x} .

根据最小二乘法原理:一个等精度测量列的最佳值是能使各次测量值与该值之差的平方和为最小的那个值,设那个值为 x_0 ,则