



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验

(第三版)

张兆奎 缪连元 张立 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验

(第三版)

张兆奎 缪连元 张立 主编
钟菊花 陈建华 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第一、第二版的基础上修订而成的。修订后的教材保持了第一、第二版体系新颖、讲解细致、语言流畅的特点,同时引入了一些新的实验以及新的实验技术。

全书共分为四章:第一章阐述了处理实验数据的有关知识,包括不确定度及其简化估算;第二章系统地阐述了物理实验中的基本方法和基本技术;第三章介绍了部分常用的检测技术;第四章介绍了实验方案设计中的一些基本问题。本书精选了46个实验,按训练的性质、层次进行分类,分别编入后三章中,是一本具有新型体系的实验教材。

本书可作为高等院校工科类专业或应用物理专业的物理实验教学用书,也可作为实验技术人员或有关课程教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张兆奎,缪连元,张立主编.—3版.

北京:高等教育出版社,2008.12

ISBN 978-7-04-024874-6

I. 大… II. ①张…②缪…③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(2008)第154050号

策划编辑	高建	责任编辑	张海雁	封面设计	王 睢	责任绘图	杜晓丹
版式设计	余 杨	责任校对	金 辉	责任印制	朱学忠		

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

总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 河北省财政厅票证文印中心

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landracom.com>

<http://www.landracom.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 1993年7月第1版

2008年12月第3版

印 次 2008年12月第1次印刷

定 价 27.00元

开 本 787×1092 1/16

印 张 23.5

字 数 560 000

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 24874-00

第三版前言

本次修订,在保留第一、第二版体系、风格、特色的同时,根据 2004 年教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》及广大使用者提出的建议和意见,做了以下四个方面的调整。

(1) 引入了一些基于基本物理原理、基本技能的应用性实验,如“太阳能电池伏安特性”、“数码摄影”、“传感器的应用——位移量测量组合实验”等。

(2) 将“实验 40 RC 串联电路暂态过程的研究”拓展为“动态物理过程的实时测量”。在保留了原有的用计算机模拟进行参数选择设计内容的基础上,增加了信号采集电路设计,及计算机数据采集实时测量训练。

(3) 将“实验 14 冲击法测磁场”中,基本原理、方法完全一致的实习一、二的实习二删除了,在“实验 15 霍尔法测磁场”中增加了实习二“铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线测量”。

(4) 为保持实验总量不扩增,删除了“模拟电冰箱制冷系数的测量”和“小型棱镜摄谱仪的使用”两个实验。

此次修订由张兆奎、钟菊花、陈建华、张月兰具体负责。

编者

第二版前言

张兆奎、缪连元、张立主编的《大学物理实验》第一版,自 1993 年问世以来,深受广大读者的欢迎。这次修订,考虑了广大使用者提出的建议和意见,在保留第一版体系、风格、特色的同时,除改写了部分内容,调整了个别章节外,主要在以下三方面作了增补。

(1) 根据 1994 年修订的《测量误差及数据处理技术规范》中规定的使用不确定度评定测量结果的误差,增写了不确定度及其简化估算。

(2) 引入了各校近几年开发的反映近代物理教学内容的综合性实验,如“验证快速电子的动量与动能的相对论关系”、“扫描隧穿显微镜”、“熵的测定”、“非线性电路中的混沌现象”等。

(3) 在设计性实验中,介绍了一种新的教学方式,即在微机上进行辅助设计,确定合理方案,再通过动手实践来验证方案并研究分析。

此次修订由华东理工大学张兆奎、钟菊花,上海大学缪连元、钟敏建,上海交通大学叶庆好,同济大学陈铭南,上海理工大学凤宝瑚七人小组负责。张兆奎、缪连元任正、副组长。参加第一版编写的各校部分教师参加了修订的讨论与编写。

编者

第一版前言

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合上海地区部分高等工业学校几年来教学改革的经验编写而成的。

上海地区高等工业学校把物理实验课作为一门独立设置的必修课以来，已经历了十个寒暑。改革的实践使我们认识到，实验教学的根本目的是“培养学生科学实验能力，提高学生科学实验素质”。我们是以这一根本目的为主线来编写本教材的，以使获得具有一定系统性的物理实验基本知识，基本方法和基本技能。

本书编写有以下几个特点：

(1) 把分散在各实验中的基本物理实验知识、基本物理实验方法、基本物理实验技能，进行了归纳和总结，并在阐述中注意系统性。全书共分为四章：第一章为物理实验基本知识，着重阐述与大学物理实验有关的数据处理知识；第二章为物理实验基本训练，比较系统地叙述了物理实验中的基本方法、基本调节技术与常用的基本仪器；第三章为物理实验基本技术，介绍了部分常用的检测技术；第四章为设计性实验，介绍了实验设计中的一些基本问题。在后三章中，每一章都配有一定数量的供训练用的实验课题。

(2) 在实验课题的选取上注意了典型性，改变了按“力、热、电、光”的顺序编排内容的方式。采取了按训练的性质、层次进行分类，按由浅入深、循序渐进的原则进行编排的方式。

(3) 在各个实验训练课题的编写中，原理部分着重实验思路的引导，突出了从提出问题到解决问题的逻辑思维过程；实验要求注重能力培养；实验步骤由详到略，给学生以一定的思考余地。在每个实验课题后，都列有预习思考题和讨论题，前者引导学生实验前的预习，后者供学生实验后分析讨论和巩固提高。

(4) 考虑到目前中学实验的实际基础，以及各高等工业学校的实验条件不尽相同的情况，在实验训练课题的选取上留有一定余地，供各校选择。在涉及仪器介绍时，尽量突出仪器的基本原理与使用方法，在附录中则适当介绍这类仪器几种常用型号的外形特征，以增强适用性。

(5) 在物理量测量次数、数据处理与误差运算方面，本书对直接测量与间接测量分别给出了一张测量的工作流程图，使学生掌握一个基本的程序。

本书是在上海市高等教育局教学处领导下，上海市高等工业学校物理协作组组织下进行编写的。本书编写委员会由华东理工大学张兆奎、上海工业大学缪连元、上海交通大学张立、上海铁道学院张守义、上海大学工学院杨锦文五人组成。张兆奎、缪连元、张立任主编。参加本书编写工作的还有：上海工程技术大学姚世亨，同济大学陆廷济、费定曜，上海科技大学王国华，中国纺织大学王璧如、汪天泰，上海机械学院凤宝瑚，上海交通大学钟洪荪、梁华翰、屈统明，华东理工大学顾懿、洪美霞，上海工业大学范培青、谢学枢、江伯陶，上海大学工学院马民勋，上海铁道学院楼婉珍。华东理工大学周昌寿、黄德昭审阅了全书。

实验教学是一项集体的事业，本书的编写凝聚了上海地区各校实验教师和技术人员的智慧与劳动成果。在本书编写期间还得到了全国兄弟院校许多同行的鼓励和支持，谨致深切的谢意。

编写一本新型体系的教材,是一项艰苦而又复杂的任务,有赖于进行不断地改革实践和长期的研究探索,才能日臻完善。我们所做的工作只是一块引玉之砖,缺点和错误在所难免,敬请使用和阅读本书的教师、同学、技术人员和读者不吝指正,以便再版时修改订正。

编者

目 录

绪论	1	1.7.2 有效数字运算规则	19
第一章 物理实验基本知识	3	1.8 测量和数据处理程序	21
1.1 观察与分析	3	1.8.1 直接测量及其数据处理的 程序	21
1.2 测量及其误差	4	1.8.2 间接测量及其数据处理的 程序	21
1.2.1 量、测量和单位	4	1.9 数据处理的基本方法	22
1.2.2 直接测量与间接测量	5	1.9.1 列表法	22
1.2.3 测量误差及其分类	5	1.9.2 图示法和图解法	23
1.2.4 系统误差	5	1.9.3 逐差法	28
1.2.5 随机误差	7	1.9.4 最小二乘法和线性拟合	29
1.3 测量结果的最佳值与随机误差 的估算	7	第二章 物理实验基本训练	32
1.3.1 随机误差的统计规律	7	2.1 物理实验的基本测量方法	32
1.3.2 测量结果的最佳值——算 术平均值	8	2.1.1 比较法	32
1.3.3 随机误差的表示法	8	2.1.2 放大法	34
1.3.4 随机误差的估算	10	2.1.3 转换测量法	36
1.3.5 平均值的标准误差	10	2.1.4 模拟法	37
1.4 仪器误差	11	2.2 物理实验的基本仪器	37
1.4.1 仪器的最大误差	11	2.2.1 力学基本仪器	38
1.4.2 仪器的标准误差	12	2.2.2 电学基本仪器	42
1.5 间接测量的误差传递	12	2.2.3 光学基本仪器	50
1.5.1 误差的一般传递公式	13	2.3 物理实验中的基本调整与 操作技术	56
1.5.2 标准误差的传递公式	13	2.3.1 零位调整	56
1.5.3 有限次测量的间接测量 标准误差	14	2.3.2 水平、竖直调整	57
1.6 不确定度	15	2.3.3 消除视差	57
1.6.1 不确定度	15	2.3.4 共轴调整	59
1.6.2 不确定度的简化估算方法	15	2.3.5 逐次逼近法	59
1.6.3 合成不确定度	16	2.3.6 先定性、后定量原则	59
1.6.4 测量结果有效数字取舍 原则	16	2.3.7 电学实验的操作规程	60
1.7 有效数字及其运算	18	2.3.8 光学实验的操作要点	60
1.7.1 有效数字的概念	18	2.4 微机与微型计算器在物理 实验中的应用	61

实验 1 用单摆测量重力加速度	64	3.2.1 冲击法	154
实验 2 微小长度变化的测量—— 光杠杆镜尺法	68	3.2.2 感应法	157
实习 1 金属的杨氏模量的测量	68	3.2.3 霍尔效应法	158
实习 2 金属线膨胀率的测量	72	3.2.4 核磁共振法	160
实验 3 电桥法测中、低值电阻	75	3.3 电学测量动态显示技术	161
实验 4 补偿原理和电势差计	83	3.3.1 阴极射线示波器	161
附录 4-1 分压箱、标准电池及 UJ1 型电势差计	88	3.3.2 电子电势差计	162
实验 5 光路调整和透镜焦距测量	91	3.3.3 $x-y$ 函数记录仪	162
实验 6 分光计	98	3.4 光学测量基本技术	163
附录 6-1 棱镜材料折射率与最小 偏向角关系式证明	105	3.4.1 干涉测量技术	164
附录 6-2 几种型号分光计调节过 程中的光学现象比较	106	3.4.2 衍射测量技术	166
实验 7 气垫技术	109	3.4.3 偏振测量技术	167
实习 1 速度、加速度和重力加速度 的测量	109	3.5 照相和暗室技术	170
实习 2 碰撞实验——验证动量守 恒定律	115	实验 13 阴极射线示波器	172
附录 7-1 两种型号数字计时 (测试) 仪	118	附录 13-1 几种型号示波器面 板图	181
实验 8 液体表面张力系数的 测量	120	附录 13-2 几种型号信号发生器 面板图	182
实验 9 转动惯量的测量	125	实验 14 冲击法测磁场——互感 系数的测量	184
实习 1 三线摆	125	实验 15 霍尔法测磁场	187
实习 2 扭摆	129	实习 1 通电螺线管内磁场分布的 测量	187
实验 10 静电场测绘	132	实习 2 铁磁质材料的磁化曲线和 磁滞回线测量	189
实验 11 灵敏电流计特性研究	137	附录 15-1 霍尔效应中的副效应 及其消除法	193
实验 12 电表改装与校正	142	实验 16 非电量电测(一)——温度 电测法	194
第三章 物理实验基本技术	146	实习 1 电阻温度计与不平衡电桥	194
3.1 非电量电测技术	146	实习 2 热电偶标定与测温	195
3.1.1 热电转换技术	147	附录 16-1 铜电阻的阻值与温度 关系表	198
3.1.2 力电转换技术	150	实验 17 光的干涉——牛顿环	199
3.1.3 光电转换技术	150	实验 18 衍射光栅	203
3.2 测磁技术	154	实习 1 汞光谱波长测量	203
		实习 2 氢原子光谱研究	205

实验 19	单缝衍射的光强分布	207	第四章	设计性实验	296
实验 20	光的偏振	211	4.1	设计性实验的性质与任务	296
实验 21	光电效应	217	4.1.1	科学实验的全过程	296
实验 22	太阳能电池伏安特性的 测量	221	4.1.2	设计性实验的特点	297
实验 23	用波尔共振仪研究受迫 振动	225	4.2	处理系统误差的一般知识	297
实验 24	非电量电测(二)—— 声速测量	232	4.2.1	系统误差的分类	297
实验 25	金属逸出电势的测定	237	4.2.2	系统误差的处理	299
实验 26	元电荷测定——密立根 油滴实验	241	4.3	实验方案的选择和实验仪器 的配套	302
实验 27	迈克耳孙干涉仪	247	4.3.1	实验方法的选择	302
附录 27-1	干涉条纹图样与时间 相干性	251	4.3.2	测量方法的选择	303
实验 28	照相技术	254	4.3.3	测量仪器的选择	304
实习 1	黑白照相	254	4.3.4	测量条件的选择	305
实习 2	数码摄影	259	4.3.5	数据处理方法与实验方案 的选择	306
附录 28-1	底片种类与性能指标	263	4.3.6	实验仪器的配套	308
附录 28-2	常用的显影液和定影 液的配方	265	实验 33	误差分配和实验仪器的 选择	310
附录 28-3	照相纸的选择	266	实验 34	重力加速度的研究	312
附录 28-4	彩色基本知识	267	实验 35	简谐振动的研究	314
实验 29	传感器的应用——位移量 测量组合实验	268	实验 36	落球法测定液体的黏度	316
实习 1	光纤传感器	269	实验 37	变阻器的使用与电路 控制	319
实习 2	霍尔式传感器	271	实验 38	电势差计校准电表和 测定电阻	324
实习 3	电涡流式传感器	271	实验 39	非线性电阻特性研究	326
实习 4	电容式传感器	272	实验 40	动态物理过程的实时 测量	328
实习 5	电阻应变片传感器	273	实验 41	动态悬挂法测定金属 材料的杨氏模量	333
实验 30	全息照相	276	附录 41-1	圆棒横振动杨氏模量 测量式证明	334
实习 1	激光再现全息照相	276	实验 42	硅光电池特性的研究	337
实习 2	白光再现全息照相	280	实验 43	光栅特性的研究	340
实验 31	验证快速电子的动量与 动能的相对论关系	284	实验 44	组装迈克耳孙干涉仪	342
实验 32	扫描隧穿显微镜	290	实验 45	熵的测定	345

实验 46 非线性电路中的混沌	
现象	348
总附录	351

1. 中华人民共和国法定计量单位 ...	351
2. 一些常用的物理常量	354

绪 论

1. 科学实验的地位和作用

认识来源于实践. 科学实验是独立的实践活动之一. 它是人们根据一定的研究目的, 通过积极的构思, 利用科学仪器、设备等物质手段, 人为地控制或模拟自然现象, 使自然过程或生产过程以比较纯粹的或典型的形式表现出来, 从而在有利条件下, 探索自然规律的一种研究方法.

科学实验的任务主要是: 研究人类尚未认识或尚未充分认识的自然过程, 发现未知的自然规律, 创立新学说、新理论, 研制、发明新材料、新方法、新工艺, 为生产实践提供科学理论的依据, 促进生产技术的进步和革命, 提高人们改造自然的能力. 近代自然科学的重大突破, 一般不是直接来自生产实践, 往往是通过科学实验这个环节研究出来的结果.

科学实验既是一切理论研究活动的基础, 又离不开理论的指导. 科学理论来源于科学实验, 并受科学实验的检验. 然而, 实验研究课题的选择, 实验的构思和设计, 实验方法的确定, 实验数据的处理, 以及从实验结果中提出的科学假设, 作出的科学结论等等, 都始终受理论支配. 理论对实验的指导作用, 还突出地表现在怎样对待科学探索中的“机遇”. 有的科学工作者, 由于具有较高的理论修养、较强的洞察力和良好的实事求是的作风, 因而对“机遇”所提供的信息十分敏感, 能及时作出正确的判断, 选择那些看来有意义的现象进行深入的研究, 这也是他们富有创造力的表现. 相反, 有的科学工作者对“机遇”视而不见, 或者轻易放过, 这是缺乏创造力的表现.

综上所述, 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. 因此, 我们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的教学.

2. 物理实验的地位和作用

物理实验是科学实验的重要组成部分之一. 物理实验在科学、技术的发展中有着独特的作用. 历史上每次重大的技术革命都源于物理学的发展. 热力学、分子物理学的发展, 使人类进入热机、蒸汽机时代; 电磁学的发展使人类跨入电气化时代; 原子物理学、量子力学的发展, 促进了半导体、原子核、激光、电子计算技术的迅猛发展. 然而物理学本质上是一门实验科学. 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. 从此一切物理概念的确立, 物理规律的发现, 物理理论的建立都有赖于实验, 并受实验的检验.

物理学史上, 如果没有法拉第等实验科学家进行电磁学的实验研究, 发现了电磁感应定律等一系列实验规律, 麦克斯韦就不可能建立麦克斯韦方程组. 在确定了经典电磁学理论后, 麦克斯韦预言了电磁波的存在, 经过赫兹的实验研究, 证实了电磁波的存在, 从而使经典电磁学理论更为人们所信服. 被称为“牛顿以来最伟大的发现之一”的能量量子化概念, 就是在人们面对着黑体辐射实验, 遇到了运用经典理论无法克服的困难时, 普朗克紧紧抓住了 1900 年夏天德国物理学家康尔鲍姆和鲁本斯对热辐射光谱所作的新的精确测量结果, 大胆地提出了能量子的假设, 运

用合理的数学方法,从理论上导出了符合实验结果的黑体辐射公式,为量子力学的发展开辟了道路.

物理实验在物理学自身发展中有着重要的作用,同时在推动其他科学、工程技术的发展中也起着重要的作用.特别是近代各学科相互渗透,发展了许多交叉学科,物理实验的构思、物理实验的方法和技术与化学、材料学、生物学、信息学、天文学等学科相互结合已经取得了丰硕的成果,而且必将发挥更大的作用.

因此,作为培养高级工程技术人才的高等工业学校,不仅要使学生具备比较深入而广博的理论知识,而且要使学生具有较强的从事科学实验的能力.物理实验是对高等工业学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,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发现、观察、分析、研究和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、工作奠定一个良好的实验基础.

3. 物理实验课的目的与任务

物理实验作为一门独立的基础课程,它有以下三方面的目的和任务:

(1) 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;并能运用物理学原理、物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解.

(2) 培养与提高学生从事科学实验的素质.包括: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;不怕困难,主动进取的探索精神;遵守操作规程,爱护公共财物的优良品德;以及在实验过程中同学间相互协作,共同探索的合作精神.

(3) 培养与提高学生科学实验的能力.包括:

自学能力——能够自行阅读实验教材或参考资料,正确理解实验内容,在实验前做好准备.

动手实践能力——能够借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用仪器.

思维判断能力——能够运用物理学理论,对实验现象进行初步的分析和判断.

表达书写能力——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.

简单的设计能力——能够根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择仪器,拟定具体的实验程序.

第一章

物理实验基本知识

科学实验是人们根据研究的目的,创造一定的条件,使自然过程在实验场所再现,并运用科学仪器、科学方法,探求其变化规律的实践活动.科学实验一般包含定性分析与定量研究两个层面,它们并不截然分开,而是相互交结在一起,它们共同的基础是观察和分析.为此,专辟一节加以阐述.定量研究要进行测量,而测量绝不可能绝对准确,所以需要对测量结果的可靠性作出评价,对其误差范围作出估计.否则,测量的数据就会毫无价值.本章第二节起将介绍测量误差和数据处理的基本知识.在第四章中将进一步介绍误差分析在确定实验方案过程中的重要指导作用.

1.1 观察与分析

探求自然过程变化规律的科学实验包含定性分析与定量研究两个层面,它们的共同基础是观察与分析.但是,学生在进行实验课的学习过程中,往往片面地理解为实验就是测量,只求测得结果,而忽视观察和分析.然而仔细的观察,客观的分析,敏锐的洞察,往往是新规律发现的源泉.因为新规律的发现,有的是在理论预言的指引下,在实验中探索论证出来的;有的则是在进行某一实验时,偶然出现一个新现象,抓住它并使之重复出现,深入研究进而得到“必然的”客观规律,即所谓“偶然之中有必然”.对于前者,例如:① 麦克斯韦在总结了当时已有的成就基础上,创建了电磁场理论方程组,并预言电磁波的存在和传播,赫兹用实验证实了这一预言.② 李政道、杨振宁进行基本粒子研究时,为解决“ $\theta - \tau$ ”疑难,提出弱相互作用过程中宇称可以不守恒,吴健雄用实验证明 β 衰变过程中宇称是不守恒的.对于后者,例如:① X 射线的发现.19 世纪末,阴极射线研究是物理学热门课题之一,1895 年 11 月 8 日伦琴到实验室为探明阴极射线性质进行实验工作.为防止外界对放电管的影响和管内的可见光漏到管外,他把研究阴极射线的克罗克斯放电管用黑纸包严,房间也布置成全遮光的暗室.他突然意外地发现在一米附近的小桌上有一块亚铂氰化钡做成的荧光屏发出闪光.他很奇怪,就移远荧光屏继续观察,发现荧光屏的光仍随着放电过程的节奏继续出现.他又用各种不同的物品,如书本、木板、铝片等放在放电管和荧光屏之间,发现有的挡不住光,有的起到一定的阻挡作用.经过六周的研究,他分析判断放电管发出的一种穿透力很强的射线,它是本质上与阴极射线不同的新射线,他称之为 X 射线.伦琴通过观

察,发现了这一“偶然”现象.之所以能抓住这一“机遇”,则是和他一贯的严谨作风、客观的科学态度和敏锐的洞察力分不开的.因为,在伦琴之前,曾有人碰到过阴极射线管附近的胶片感光或物体发出荧光的现象,但是他们都没有仔细研究这个奇怪的现象而失去“机遇”.实际上 X 射线在研究阴极射线的过程中被发现是有其必然性的.因为正是高速电子打到靶子上,才有可能在原子内层激发出这种高频辐射.② 超导电性的发现.昂内斯在测量一个固态汞样品的电阻与温度的关系时,惊奇地发现,当温度降至 4.2 K 附近时,样品的电阻突然减小到约为 $10^{-5} \Omega$.昂内斯以实验揭示了物质的超导电性.③ 正电子的发现.安德森将观测宇宙射线的威耳逊云室置于磁场中,进行宇宙射线轨迹照相时,发现了一条奇特的轨迹,它与电子轨迹相似却又具有相反的方向,显示它是某种带正电粒子的轨迹,从曲率判断又不可能是质子.他敏锐地判断这是一种具有正电荷,质量与负电子相同的新粒子.他当时并不知道狄拉克已经在相对论电子理论中预言正电子存在的可能性.当知道狄拉克预言后,他断定观察到的是正电子.

在物理学发展历史上,上述类似的例子举不胜举.所以在物理实验课的学习过程中,要十分重视“观察现象”这一环节,要认真、细致、实事求是,要在观察中培养发现问题、提出问题的能力,以及运用理论指导分析,提高判断、分析能力.

诚然,作为基础教学的物理实验,一般是较为成熟的实验,难以通过观察有什么新的发明创造,但它却蕴涵着创新意识的培养.因为在实验过程中,会出现在教材中没有提到的或是与原先的估计不相吻合的现象.例如,在透镜焦距测量实验中,发光体在透镜左侧时,可在同侧看到虚像,在右侧屏幕上看到实像,但是在透镜表面上又会出现一个像.又如,在示波器观察并记录整流滤波波形实验中,会出现半波整流的波形,如图 01-1 所示, a 和 b 不相等的现象.对于这类现象,有的学生能及时发现,并提出问题并进行分析与判断;有的学生却视而不见,漠然置之,明显地反映了科学实验基本素养上的差别.所以学生要重视对现象的观察,自觉地提高观察和分析能力,教师要积极地启发引导.

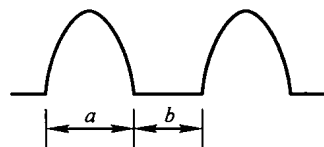


图 01-1

1.2 测量及其误差

1.2.1 量、测量和单位

任何现象和实体都能以量来表征.量具有对现象和实体作定性区别或定量确定的属性.

测量是人类对自然界中的现象和实体取得数量概念的一种认识过程.为确定被测对象的测量值,首先要选定一个单位,用它与被测对象进行比较,求出被测对象与它的比值——倍数,这个倍数即为数值.显然数值的大小与所选用的单位有关,对同一对象测量时,选用单位越大,数值就越小,反之亦然.因此,在表示一个被测对象的测量值时就必须包含数值和单位两个部分.

目前,物理学上各物理量的单位,都采用中华人民共和国法定计量单位,它是以国际单位制(SI)为基础的单位.国际单位制是在 1960 年第 11 届国际计量大会上确定的,它以米(长度)、千

克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)作为基本单位,称为国际单位制的基本单位.其他量(如力、能量、电压、磁感应强度等)的单位均可由这些基本单位导出,称为国际单位制的导出单位(详见总附录1).

1.2.2 直接测量与间接测量

测量可分为两大类:直接测量和间接测量.

直接测量是将待测量与预先标定好的仪器、量具进行比较,直接从仪器、量具上读出量值的大小.例如:用米尺测量长度;用天平称质量;用秒表测时间等.

间接测量则是待测量由若干直接测量的物理量在一定的函数关系下,运算后获得的.例如:欲测物体运动的平均速度 $\bar{v}$,可由直接测量物体运动的时间 Δt 和在时间 Δt 内通过的位移 Δs ,并由平均速度的定义式 $\bar{v} = \Delta s / \Delta t$ 计算出 $\bar{v}$.

1.2.3 测量误差及其分类

被测物理量的大小(即真值)是客观存在的,然而在具体测量它时,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完成.尽管我们千方百计改进实验方案设计,提高仪器精度和测量人员水平.但是,仪器精度总有一个限度,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,这就使测量所得的值与客观真值有一定差异.测量值 x 与真值 X 之差称为测量误差 Δx ,简称误差.

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

$$\text{即} \quad \Delta x = x - X \quad (01-1)$$

误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中.所以,科学实验的结果不仅要包括测量所得的数据,而且还要包括误差的范围.

测量永远不可能得到真值,那么怎样的测量值是最接近真值的最佳值呢?又如何来估算误差范围呢?这就有必要对误差进行研究和讨论,用误差分析的思想方法来指导实验的全过程.

误差分析的指导作用包含下列两个方面:

(1) 为了从测量中正确认识客观规律,必须分析误差的原因和性质,正确地处理所测得的数据,尽量消除、减少误差或确定误差范围,以便能在一定条件下得到接近真值的最佳结果,并作出精度评价.

(2) 在设计一项实验时,先对测量结果确定一个精度要求,然后用误差分析指导我们合理地选择测量方法、仪器和条件,以便能在最有利的条件下,获得恰到好处的预期结果.

误差产生有多方面的原因,根据误差的性质和产生的原因,可将误差分为系统误差和随机误差两大类.

1.2.4 系统误差

系统误差的特点是:在相同的条件下(指方法、仪器、环境、人员)对同一量进行多次测量时,

误差的绝对值和符号(正、负)保持不变.当测量条件改变时,误差亦按一定的规律变化.

它的来源有以下几个方面:

(1) 仪器的固有缺陷.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.

(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 °C 时的电动势数值作为标准值的,若在 30 °C 条件下使用时,不加以修正,就引入了系统误差.

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

系统误差的消除、减小或修正都属于技能问题.可以在实验前、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,对人员进行专门训练等;在实验中采取一定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,要找出其原因,寻求其规律绝非轻而易举之事.这是因为:

(1) 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.

(2) 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的困难.

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有着密切关系.因此,对于实验初学者来说,应该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.

科学史上曾有过这样一个事例.

1909—1914 年间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,并精确地测得元电荷,即

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

后来,由 X 射线衍射实验测得 e 值与油滴实验值差了千分之几.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 $(1.602\ 177\ 33(49) \times 10^{-19} \text{ C})$ 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;同时也说明了实验中应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.

我们将在今后实验中,针对各实验具体情况对系统误差进行分析和讨论.在第四章中将作专门介绍.