

高等学校教材

大学物理实验

主 编 胡 冰 刘纪彩 黄 霞

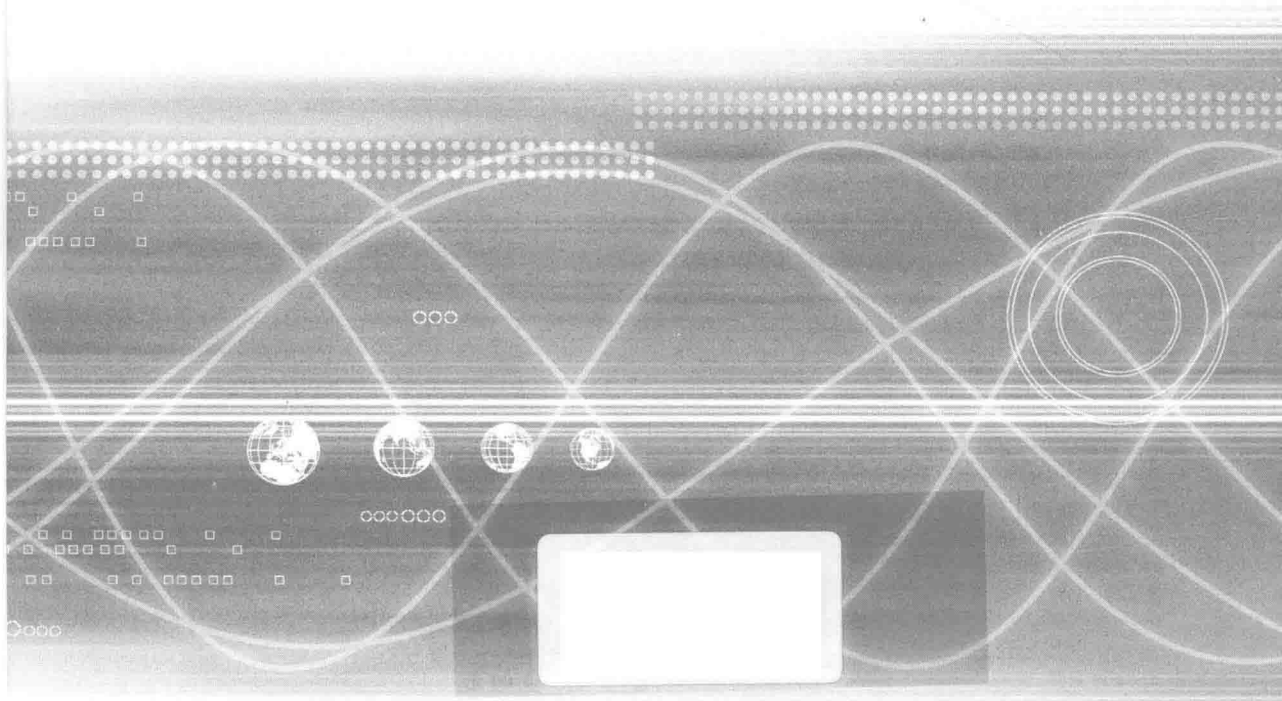
副主编 付星球 李瑞洁 李社强 段志强

高等教育出版社

高等学校教材

大学物理实验

主 编 胡 冰 刘纪彩 黄 霞
副主编 付星球 李瑞洁 李社强 段志强



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是以《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010 年版)为指导,结合华北电力大学物理实验室建设的经验以及当前实验教学的实际编写而成的。全书共分 8 章,主要内容为绪论、测量及误差理论基础、实验数据处理的基本方法、物理实验方法和技术、基本物理量的测量及常用仪器的使用、基础性实验、综合性实验与近代物理实验、设计性与研究性实验。

本书可作为高等学校理工科非物理类专业大学物理实验课程的教学用书,也可作为科研及工程技术人员和其他有关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/胡冰,刘纪彩,黄霞主编.--北京:
高等教育出版社,2017.3
ISBN 978-7-04-047314-8

I. ①大… II. ①胡… ②刘… ③黄… 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(2017)第 020328 号

Daxue Wuli Shiyān

策划编辑 高 建	责任编辑 高 建	封面设计 张 志	版式设计 王艳红
插图绘制 杜晓丹	责任校对 窦丽娜	责任印制 田 甜	

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京市联华印刷厂		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	29	版 次	2017 年 3 月第 1 版
字 数	620 千字	印 次	2017 年 3 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	50.00 元
咨询电话	400-810-0598		

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 47314-00

前 言

物理学是一门实验科学,理论和实验都是研究物理的手段,终极目标是找到物质运动和变化的规律。所有通过理论手段得到的物理规律最终都要通过实验来验证其正确性,不能在实验中证实的规律很有可能是错误的,无论得到的物理规律是如何的漂亮。物理实验作为面向全体理工科大学生的第一门系统的、完整的实验课,肩负着让学生受到严格的、系统的实验技能训练,掌握科学实验的基本知识、方法的重任,对培养学生的动手能力、科研创新能力是必不可少的。

近年来,高等教育中的人才培养模式发生了深刻的变化,更加注重素质教育,特别是创新精神和实践能力的培养。为此,华北电力大学数理学院物理实验教学中心进行了物理实验教学体系的改革。本书是以《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)为指导,在华北电力大学北京校部使用多年的校内讲义和曾用教材的基础上编写而成。本书共分为8章。第1章介绍了大学物理实验课的作用、基本教学要求以及如何撰写实验报告。第2章阐述了测量及误差理论基础,为了让学生掌握评定不确定度的基本方法而不陷入过于严格的繁琐计算,特别对这部分内容进行了一些必要的简化,以适合于大学物理实验要求。第3章讲述了几种常用的处理实验数据的基本方法。第4章一般性地介绍了物理实验中常用的基本实验方法、测量方法以及基本实验操作技术。第5章介绍了长度、质量、时间及温度等几个基本物理量的测量方法及相关测量仪器的使用,同时也介绍了电流、电压及电阻等几个电学量的测量方法以及相关的测量仪器。第4章、第5章的内容以及第6章前两节的电学实验与光学实验的基本知识是学生在正式开始实验前应该仔细阅读的。第6章安排的是十四个基础性实验,这些实验通常是必做的。综合性实验与近代物理实验置于第7章,这些实验涉及物理学多个方面的内容,不但包括了近代物理实验,还包括了密切结合当今科技的实验。第8章是设计性与研究性实验。这一章的教学模式由教师排好实验,准备好仪器,学生来做实验的程序,过渡到学生在教师的指导下,自己设计实验,自己准备仪器完成实验的程序,以培养学生的综合思维和创造能力。这部分实验内容可根据教学的具体情况予以适当选取。

物理实验教学是一个集体的事业,从实验仪器的制作、购置,到实验的编排和实验内容的编写都需要许多教师和实验技术人员长期的努力和改进。本书是华北电力大学数理学院物理实验教学中心集体劳动的成果,是近年来教学改革成果的体现。本书是在彭建、皮伟主编的华北电力大学曾用教材《大学物理实验》的基础上,吸收了兄弟院校实验教学的经验编写而成的。感谢彭建、皮伟、邓加军、师青梅、李克强、马续波等老师为本书的编写打下的坚实基础,没有他们的辛勤劳动,就不可能有本书的出版。陈雷老师以及其他多位老师在本书的编写过程中提出了许多宝贵的具体意见,对于他们的贡献表示诚挚的感谢。同时感谢数理学院及学校相关部门对于本书的出版所给予的帮助和支持。

由于编者水平有限且时间紧迫,本书不妥之处在所难免,恳请老师和同学们在使用中不吝指正。

编 者

2015年12月于华北电力大学

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 大学物理实验课的地位、作用和要求	1
§ 1.2 大学物理实验课的基本教学要求和基本教学程序	2
§ 1.3 大学物理实验报告格式	4
§ 1.4 学生实验守则	5
第 2 章 测量及误差理论基础	7
§ 2.1 测量及分类	7
§ 2.2 误差的性质与处理	9
§ 2.3 测量结果的不确定度评定	19
§ 2.4 有效数字及其运算规则	29
习题	33
第 3 章 实验数据处理的基本方法	36
§ 3.1 列表法	36
§ 3.2 作图法	37
§ 3.3 逐差法	41
§ 3.4 最小二乘法	42
§ 3.5 数据处理软件及计算器统计计算介绍	46
习题	59
第 4 章 物理实验方法和技术	61
§ 4.1 物理实验中的基本实验方法	61
§ 4.2 物理实验中的基本测量方法	64
§ 4.3 物理实验中基本操作技术	70
第 5 章 基本物理量的测量及常用仪器的使用	73
§ 5.1 长度的测量	73
§ 5.2 质量的测量	83
§ 5.3 时间的测量	86
§ 5.4 温度的测量	89
§ 5.5 电流的测量	94
§ 5.6 电压的测量	98
§ 5.7 电阻的测量	99
习题	100

第 6 章 基础性实验	101
§ 6.1 电学实验的基本知识	101
§ 6.2 光学实验的基本知识	110
实验一 长度、密度的测量	117
实验二 利用碰撞打靶研究平抛运动	129
实验三 单摆运动特性的研究	134
实验四 液体表面张力系数的测定	139
实验五 静态法测量金属丝的杨氏模量	143
实验六 落球法测定液体在不同温度下的黏度	149
实验七 用惠斯通电桥测电阻	157
实验八 用电势差计测量电动势和内阻	164
实验九 示波器的使用	170
实验十 用模拟法测绘静电场	178
实验十一 磁悬浮动力学实验	184
实验十二 分光计的调整与光的衍射	194
实验十三 分光计的应用与棱镜折射率的测量	202
实验十四 用牛顿环测量透镜曲率半径	208
第 7 章 综合性实验与近代物理实验	213
实验十五 刚体转动惯量的测量	213
实验十六 玻尔共振实验	224
实验十七 动态法测量杨氏模量	235
实验十八 空气声速与绝热系数的测定	245
实验十九 准稳态法测导热系数和比热容	252
实验二十 电表的改装与校准	260
实验二十一 双臂电桥测量低电阻	265
实验二十二 电子荷质比的测定	273
实验二十三 霍尔效应	280
实验二十四 用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	286
实验二十五 密立根油滴实验	296
实验二十六 用小型棱镜摄谱仪测定光波波长	307
实验二十七 迈克耳孙干涉实验	315
实验二十八 双棱镜干涉法测量光波波长	320
实验二十九 偏振光实验	328
实验三十 微波光学实验	335
实验三十一 普朗克常量的测定	343
实验三十二 弗兰克-赫兹实验	352
实验三十三 太阳能电池基本特性测量	358

实验三十四	PN 结正向特性的研究和应用	368
实验三十五	燃料电池综合特性研究	375
实验三十六	液晶电光效应实验	385
第 8 章	设计性与研究性实验	394
§ 8.1	设计性实验的设置与实施	394
§ 8.2	设计性实验的目的	394
§ 8.3	设计性实验的基本步骤	394
实验三十七	非平衡电桥的应用	397
实验三十八	等厚干涉的应用	402
实验三十九	弗兰克-赫兹实验的深入研究	405
实验四十	LED 基本特性测量	407
实验四十一	巨磁电阻效应	410
实验四十二	光栅常量与半导体激光波长的测定	413
实验四十三	光栅传感器特性测定实验	414
实验四十四	多普勒效应综合实验	415
实验四十五	真空的获得与测量	416
实验四十六	真空镀膜	419
实验四十七	氧化锌纳米材料的制备	421
实验四十八	锁相放大器的使用	423
实验四十九	低温的获得与测量	425
实验五十	反常霍尔效应	427
实验五十一	光纤特性及传输实验	429
实验五十二	声波在物质中的衰减系数的测量	431
实验五十三	空气物理参量的测量	432
实验五十四	磁悬浮导轨上碰撞设计性实验	433
实验五十五	用电势差计校准电压表	438
实验五十六	简易万用表的设计与制作	439
附表		440
附表 1	国际单位制	440
附表 2	常用物理常量表	441
附表 3	SI 词头	442
附表 4	部分物质的比热容	443
附表 5	部分固体的导热系数	443
附表 6	铜-康铜热电偶分度表	444
附表 7	海平面上不同纬度处的重力加速度	444
附表 8	部分固体的摩擦因数	444
附表 9	20 ℃ 时常见固体的密度	445

附表 10 20 ℃时常见液体的密度 446

附表 11 标准状态下常见气体的密度 446

附表 12 部分固体的弹性模量 446

附表 13 部分液体的黏度 η 447

附表 14 部分液体的表面张力系数 448

附表 15 部分固体中的声速(沿棒传播的纵波) 448

附表 16 20 ℃时部分液体中的声速 448

附表 17 标准状态下部分气体中的声速 449

附表 18 水的饱和蒸汽压与温度的关系 449

附表 19 101 325 Pa 下部分物质的熔点和沸点 450

附表 20 相对湿度查对表 450

附表 21 常温下部分物质相对于空气的光的折射率 451

附表 22 常用光源的谱线波长 451

参考文献 452

第1章 绪 论



绪论

NOTE

§ 1.1 大学物理实验课的地位、作用和要求

物理学是自然科学的基础,也是当代工程技术的重要支柱.物理学本质上是一门实验学科,从物理学的发展历史看,物理规律的发现和物理理论的建立都必须以物理实验为基础,物理学中的每一项突破都与实验密切相关.例如麦克斯韦总结前人的实验结果和理论,统一成完整的电磁场理论,并预言了电磁波的存在,但直到1887年,赫兹完成了电磁波的发射和接收实验后,才使这一深深影响我们当代生活的理论假设得到最终确认.物理学理论就是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法,并通过实验的检验而建立起来的.

科学技术的进步离不开物理学理论和实验.物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位,而且在推动其他自然科学、工程技术的发展中也起着重要作用.物理学有助于技术的基本建设,有助于扩展和提高我们对其他学科的理解,物理学也提供了应用于其他学科新设备和新技术所需的基本知识,特别在不少交叉学科中,物理试验的构思、方法和技术与化学、生物学、天文学等学科的相互结合已取得丰硕的成果.鉴于物理学的重要性,联合国大会于2004年6月通过了将2005年为“国际物理年”的决议,该决议摘录如下:“联合国大会承认物理学为了解自然界提供了重要基础,注意到物理学及其应用是当今众多技术进步的基石,确信物理教育提供了建设人类发展所必需的科学基础设施的工具……”.

大学物理实验是高等学校理工科专业课程体系中的一门重要的基础课程,是这些专业的学生进校后的第一门科学实验课程,是后续专业实验的基础,也是学生实验素质的基础.其教学目的不仅仅是让学生受到严格的、系统的实验技能训练,掌握进行科学实验的基本知识、方法和技巧,更重要的是培养学生敏锐的观察能力和严谨的思维能力,培养学生分析问题和解决问题的能力,特别是与科学技术发展相适应的综合能力和创新精神.

近三十多年来,物理实验得到更普遍的重视,很多高校都把物理实验从大学物理课程里面分离出来,单独设立为一门基础课,而且也加大了实验方面人力、财力的投入,很多综合性大学都建立了物理实验教学中心.

物理实验是物理学的重要内容,是学生进行科学实验基本训练的必修的基础课程,是学生受到系统的实验方法和实验技能训练的开端.大学物理课程的具体任务是:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验的基础知识。

① 掌握常用物理量的基本测量方法、常用实验方法及常用测量仪器的原理和使用等,这些测量方法及有关仪器在科学实验或日常工作中会经常遇到。

② 学习误差理论、有效数字的读取、记录和运算方法以及正确处理实验数据的基本方法,学习提高实验精度和减小实验误差的常用方法和技巧。例如,学会分析哪些误差是主要的,哪些可以减小或忽略。在满足精度要求的前提下,能够提出初步的最简便、经济的实验方案,包括选择恰当的仪器与测量步骤等。

③ 了解理论知识的有关应用,包括最新应用。这不但能加深对物理学原理的理解,反过来还可以提高理论课的学习兴趣及主动性,同时也可以拓宽知识面,开阔思路,丰富应用实践方面的经验。

(2) 培养和提高学生的科学实验能力。

① 独立阅读实验教材和仪器说明书,查阅相关参考资料以及做好实验前准备工作的能力,正确使用常用仪器进行测量的能力。

② 初步掌握常用物理仪器的基本操作方法以及利用这些仪器对基本物理量进行测量的能力。

③ 运用物理学理论及相关知识对实验现象进行初步分析判断的能力。

④ 正确记录和处理实验数据,绘制曲线和图表,说明实验结果,撰写合格实验报告的能力。

(3) 培养和提高学生的科学实验素养。

使学生具有理论联系实际的优良作风,实事求是、严谨认真的科学态度,有序细致的操作习惯,自觉研究和探索科学问题的创新精神,自觉遵守纪律、团结协作爱护公共财物的优秀品德。

§ 1.2 大学物理实验课的基本教学要求和基本教学程序

本书包括力学、热学、电学、光学和近代物理等实验,课程的基本教学要求如下:

(1) 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力。

① 掌握测量误差与不确定度的基本概念,能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

② 掌握处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及,还应包括用计算机软件处理实验数据的基本方法。

(2) 掌握基本物理量的测量方法。

例如:长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、元电荷、普朗克常量、里德伯常量等常用物理量及物性参量的测量,注意加强数字化测量技术和计算机技术在物理实验教学中的应用。

(3) 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用。

例如:比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。

(4) 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用。

例如:长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光计、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

各校可根据条件,在物理实验课中逐步引进当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,例如,激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

(5) 掌握常用的实验操作技术。

例如:零位调整、水平/竖直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节方法。

(6) 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

要想实现物理实验的培养目标,完成物理实验教学任务,学生应该根据物理实验课的特点和要求认真对待实验教学的各个环节,潜心钻研,才可以达到更好的效果。大学物理实验课通常分下列四个阶段进行:

(1) 实验前的预习。

为了在规定的时间内保质保量地完成实验内容,学生在实验前必须做好预习工作。

实验教材是实验的指导参考,它对每一个实验的目的、要求、实验原理都作了明确的阐述,因此,在上实验课前必须认真阅读。还需查阅相关参考资料,实验中涉及的仪器有许多是从未见过的,在预习时就需认真阅读教材中的仪器介绍,弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项等,特别是注意事项,不仅要看,还要牢记,否则会造成仪器损坏,甚至人身事故。对仪器的构造,应尽可能地去理解、去想象,必要时还需要去实验室观察实物。

在预习的基础上,写好预习报告,其内容包括实验名称、实验目的、实验原理和数据记录表格。此外,根据实验内容,准备好实验中所需的绘图工具和计算器等。

(2) 课堂讲解。

实验前老师对仪器的调节使用方法、主要实验内容、具体步骤和注意事项进行简要的讲解,为学生准确无误地完成实验打好基础。

(3) 实验操作。

课堂实验操作是实验课最重要的环节,实验时应严格遵守实验室的规章制度。

① 实验前必须检查和辨认仪器设备、材料是否完好、齐备,明确各部分的作用、使用方法和注意事项。

② 根据实验要求正确地将有关仪器组成所需的测试系统。经检查确保无误,方可按步骤进行实验操作。特别是在电磁学实验中,在连接电路前,应考虑仪器设备的合理布局及电源的正负极性,电路连接好之后,还要注意把仪器调节到“安全

NOTE

待测状态”，然后请教师检查，确定电路连接正确无误后方可接通电源进行实验。

③ 在实验中必须仔细观察、积极思考、认真操作、防止急躁，做到实事求是地观察和测量。要初步学会分析实验现象，遇到问题时应冷静分析和思考；在实验中有意识地培养自己的独立工作能力。

④ 实验数据的记录是实验结果和分析问题的依据。在实验中，应根据所使用仪器的精度和实验条件认真、真实地读取和记录实验数据，千万不可根据主观臆想来编造数据、凑数据，特别是要正确使用有效数字。原始数据必须要用钢笔或圆珠笔记录在原始数据记录本上，不要随意涂改，对认为错误的数字应轻轻划上一道，在旁边写上正确值，以便在分析测量结果和误差时参考。

两人以上合作做实验时要合理分工，充分交流，协调一致，共同达到实验要求。

实验完毕，应将所测量的数据交给任课老师检查、签字。对不合理的或错误的实验结果，应分析原因，及时补测或重做。离开实验室前，应听从实验管理员和指导老师的指挥，自觉整理好仪器，并做好清洁工作。

(4) 实验报告的书写。

书写实验报告的目的是为了培养学生以书面形式总结工作和报告科学成果的能力。一份完整的实验报告应包括：实验名称、实验目的、实验原理、原始数据、数据处理和讨论等主要内容。对于实验原理应在理解教材内容的基础上用自己的语言来阐述，做到简明扼要。实验步骤只要写出关键性的仪器调整方法和测量技巧，不要完全照抄教材中的内容。原始测量数据一般要求以列表形式出现。数据处理要写出数据计算的主要过程，作出图表，对最后结果的误差分析、对实验过程和结果的讨论要具体深入、有分析、有见解，不要泛泛而谈，其内容一般不受限制，可以是对观察到的实验现象进行分析，对结论和误差原因进行分析，也可以对实验方案提出改进意见。

§ 1.3 大学物理实验报告格式

实验报告是对实验过程及其结果的系统而全面的总结，要用简明的形式将实验结果完整而真实地表达出来。实验报告要用统一规格的实验报告纸书写（可加附页），必须独立及时地完成，要做到文字通顺、表述明确、字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确、讨论认真。好的实验报告可以给予同行或老师以清晰的思路、独到见解和新的启迪。

实验报告通常包括预习报告、原始数据记录、数据处理分析和结果讨论等部分。

(1) 预习报告。预习报告是实验能否顺利进行的关键，应在实验前完成。进入实验室须带上预习报告，经教师检查合格方可进行实验。预习报告包括以下内容：

- ① 实验名称。
- ② 实验目的。

③ 实验仪器.

④ 实验原理. 用简洁的语言对实验所依据的理论进行叙述, 不要照抄书本. 要给出实验所依据的定理、定律、线路图、光路图以及有关实验条件等. 其中主要公式要有简要推导过程, 重要实验仪器要有原理图、操作要领和操作中的注意事项, 要有对实验结果的评价手段及减少实验误差的方法.

⑤ 实验的内容和步骤. 要求简明扼要地说明主要实验内容和关键步骤.

⑥ 原始数据记录表格. 在理解实验原理及实验内容的基础上, 科学合理地设计出原始数据记录表格于规定的地方.

特别说明: 预习报告是预习时写的实验报告, 可以作为实验报告的一部分. 撰写实验报告时可以在此基础上续加其他内容.

(2) 实验记录. 实验数据要用表格或其他形式简洁明了地列出, 正确表示有效位数和单位. 数据记录还应包括相关的常量.

(3) 数据处理分析. 包括结果计算、实验曲线、表格、误差分析、最后结果表示等内容. 计算按照有效数字的运算法则进行. 根据要求计算各直接测量量和间接测量量的标准误差, 并将实验结果正确地表示出来.

(4) 结果讨论. 根据实验的具体情况, 必要时应对实验结果进行讨论, 讨论内容不限. 如实验中观察到的现象分析、误差来源分析、实验仪器选择和实验方法改进的建议、实验异常现象的解释、回答实验思考题、实验中存在的问题讨论等.

撰写实验报告是实验的重要组成部分, 是分析问题解决问题的过程, 也是综合运用知识的过程, 对培养实验能力起到重要的作用. 同时, 实验报告是学生实验考核的主要依据, 必须严肃对待, 认真完成.

§ 1.4 学生实验守则

为了维护正常的实验教学秩序, 提高实验课的教学质量, 顺利完成各项实验任务, 确保人身、设备安全, 在实验过程中学生应遵守如下规则:

(1) 准时上课, 迟到者本次实验成绩作降分处理(降 5 ~ 10 分), 迟到 10 分钟及以上者, 教师有权禁止该生做实验. 一般不得请假, 特殊情况(如生病)需出具证明(班主任或辅导员在请假条上签字并盖院系公章), 并及时找相应实验教师联系补做时间. 缺做一次实验者, 本学期的实验成绩为不及格.

(2) 学生实验前必须认真预习, 并写好预习报告(含教材指定课前必做的内容及实验数据表格). 进入实验室须带上预习报告, 经教师检查合格方可进行实验.

(3) 遵守课堂纪律, 保持安静整洁的实验环境. 严禁吸烟、吃东西、随地吐痰、乱扔脏物、大声喧哗等不文明行为.

(4) 按实验步骤规范操作. 实验前先检查实验仪器, 仪器完好无损时, 在签字板上签下自己的名字. 实验过程中爱护仪器, 严格按仪器说明书或操作规程操作, 如果仪器有问题应及时报告教师, 不得擅自更换实验仪器. 否则出现仪器损坏情

况,按有关规定予以处罚并降低本次实验成绩.

(5) 使用电源时,严禁带电接线或拆线,务必经过教师检查线路后才能接通电源;实验后要切断电源.

(6) 实验中要注意安全,如仪器设备出现异常气味、响声、打火、冒烟、发热、震动等现象,应立即切断电源,关闭仪器,并向教师报告.

(7) 实验中要注意节约使用实验材料.

(8) 如实记录数据,原始数据不得改动.伪造或抄袭他人者,数据无效.

(9) 实验完毕,数据记录要经过教师检查无误并签字后才能生效.学生整理好实验仪器,待教师在签字板上签字后方可离开.

在整个实验过程中,对不遵守本守则的学生,指导教师和实验技术人员视情况给予批评教育,直至责令其停止实验.

第2章 测量及误差理论基础

本章围绕测量、误差、测量结果的表示及实验的数据处理等方面介绍其基本知识,作为实验前的基础准备.这些知识在每次实验中都要用到,是必须了解和掌握的.相信掌握好本章的内容,对学习物理实验课和今后从事科学实验工作都具有重要意义.

NOTE

§ 2.1 测量及分类

一、测量及测量分类

物理实验是以测量为基础的.在实验中,研究物理现象、物质特性、验证物理原理都需要进行测量.所谓测量,就是将待测的物理量与一个选来作为标准的同类量进行比较,得出它们的数量关系的过程.选来作为标准的同类量称为单位,数量关系的值称为测量数值.测量所得的值(数据)应包括数值(大小)和单位,两者缺一不可.

在人类的发展历史上,不同时期,不同的国家,乃至不同的地区,同一种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.为了便于国际交流,国际计量大会于1990年确定了国际单位制(SI),它规定了以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位,其他物理量(如力、能量、电压、磁感应强度等)的单位均作为这些基本单位的导出单位.

1. 直接测量与间接测量

测量按测量过程可分为两类,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而得到测量值的一种测量,它无需进行任何函数关系的辅助运算.如用尺测量长度、秒表计时间、天平称质量、电流表测电流等.

间接测量,是指被测量与直接测量的量之间需要通过一定的函数关系的辅助运算,才能得到被测量物理量的量值的测量.如单摆测量重力加速度时,需先直接测量单摆长 l 和单摆的周期 T ,再应用公式 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$,求得重力加速度 g .物理量的测

量中,绝大部分是间接测量,但直接测量是一切测量的基础.不论是直接测量,还是间接测量,都需要满足一定的实验条件,按照严格的方法正确地使用仪器,才能得

出应有的结果. 因此实验过程中, 一定要充分了解实验目的, 正确使用仪器, 细心地进行操作、读数和记录, 才能达到巩固理论知识和加强实验技能的目的.

2. 等精度测量与不等精度测量

测量按测量条件可分为两类, 等精度测量与不等精度测量.

对某一物理量进行多次测量, 而且每次测量的条件相同(如同一观察者, 同一组仪器, 同一测量方法和同样的环境条件下测试等), 测得的数据为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 称为等精度测量. 在所有的测量条件中, 只要有一个发生变化, 这时所进行的测量就是不等精度测量.

严格地说, 在实验过程中保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的, 但当某一条件的变化对结果的影响不大, 甚至可以忽略时, 仍可将此种测量视为等精度测量. 除了特别指明外, 一般情况下的测量都作为等精度测量来讨论. 物理实验中大多采用等精度测量.

二、测量值的确定

1. 直接测量值的确定——算术平均值

如果对同一物理量进行多次测量, 例如对物理量 X 进行等精度测量, 得到一系列数据 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 在测量没有错误及符合统计规律的情况下, 可以用算术平均值 $\bar{X}$ 表示测量的最佳值, 即

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2-1)$$

可以证明, 当测量次数无限多时, 算术平均值将无限接近真值.

对于有限次测量, 平均值会随着测量次数的不同而有所改变, 也会因不同范围的测量数据而稍有差别.

2. 间接测量值的确定

对于间接测量值 $w = f(x, y, \dots)$, 它由直接测量值 $(x, y, \dots)$ 所确定. 当多次测量时, 有两种可能的情况.

(1) 对于各直接测量值 $(x_i, y_i, \dots)$ 相互独立地进行测量, 且测量条件变化幅度很小. 首先分别求出各自的算术平均值 $(\bar{x}, \bar{y}, \dots)$, 然后将其带入函数关系式 $w = f(x, y, \dots)$ 中求得 w 的测量值, 即

$$\bar{w} = f(\bar{x}, \bar{y}, \dots) \quad (2-2)$$

(2) 在同一条件下, 对各量测量一遍, 得到一组 $(x_i, y_i, \dots)$, 相应的有 $w_i = f(x_i, y_i, \dots)$, 而每次间接测量之间又是相互独立的, 用测量算术平均值 $\bar{w}$ 作为测量值, 即

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^k w_i / k = \sum_{i=1}^k f(x_i, y_i, \dots) / k \quad (2-3)$$

通常, 当测量条件没有大幅度变化时, 两种计算方法所得到的结果是极其相近的. 所以, 除了测量条件变化幅度过大时必须采用式(2-3)外, 一般都可以采用较简单的式(2-2)来计算.

§ 2.2 误差的性质与处理

物理实验一般都离不开物理测量. 由于测量仪器, 环境条件, 实验方法(测量手段与计算方法等)的限制和测量者的观察能力的局限, 实验测量得到的物理量的数值与它的真实值并不一致, 这种情况在数值上的表现即为误差. 随着科学技术水平的提高和人们的经验、技巧、专门知识的丰富, 误差可以控制得越来越小, 但不能使误差降低为零. 因此, 实验结果都具有误差, 误差始终存在于一切科学实验过程之中.

一、误差的定义

1. 绝对误差

若实际测得值 X 与该物理量的客观真值 A 之间的差值为 ΔX , 则称 ΔX 为测量值的绝对误差.

如果 X 是指针式仪器的示值, 则 ΔX 称为示值误差, 如果 X 为某一元器件的标准值, 则 ΔX 称为标称误差, 这些都通常称之为误差, 表示为

$$\Delta X = X - A \quad (2-4)$$

真值有 3 种类型:

(1) 理论值或定义值: 如三角形的内角和等于 180° .

(2) 计量学约定真值: 国际计量大会决议的 7 种标准.

(3) 标准器相对真值: 高一级标准器的误差与低一级标准器或普通计量仪器的误差相比, 为其 $\frac{1}{5}$ (或者说 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{3}$) 时, 则可以认为前者是后者的相对真值. 如 0.5 级电压表测得某电阻上的电压值为 1.03 V, 而用 1.0 级电压表测得的电压值为 1.05 V, 则可认为 1.0 级电压表测得的电压值的误差为 +0.02 V.

2. 相对误差

绝对误差的表示方式往往不能反映测量的精确程度. 例如, 测量两个不同物体的长度, 用最小分度值为 1 mm 的米尺测量一个物体长度为 $L_1 = 51.4$ mm, 绝对误差 $\Delta L_1 = 0.02$ mm; 用最小分度为 0.01 mm 的螺旋测微器测量另一物体的长度为 $L_2 = 0.235$ mm, 绝对误差 $\Delta L_2 = 0.005$ mm. 初看起来, 绝对误差 0.2 mm 远大于 0.005 mm, 但我们不能说后者的测量精度比前者高, 而恰恰相反, 这是因为 L_1 的测量误差对 51.4 mm 而言仅为 0.4%, 而 L_2 的测量误差相对 0.235 mm 却为 2%. 因此, 为了弥补绝对误差的不足, 我们引进相对误差 E_r . 根据所取的相对参考值的不同, 可分为

(1) 实际相对误差 = (误差/真值) $\times 100\%$, 即

$$E_r = \frac{|\Delta X|}{A} \times 100\% \quad (2-5)$$

(2) 标称相对误差 = (误差/测量值) $\times 100\%$, 即