

21世纪物理学规划课改教材

DAXUE WULI

SHIYAN JIAOCHENG

大学物理

实验教程

主 编 徐滔滔

副主编 董长缨 李家望



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪物理学规划课改教材

大学物理实验教程

主 编 徐滔滔

副主编 董长缨 李家望

科学出版社

北 京

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

内 容 简 介

本书根据教育部制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》编写,是编者多年从事大学物理实验课程教学改革和实践的成果。全书结构紧凑,实验内容丰富,共收入 64 个物理实验项目,有许多新颖的实验基础知识。书中对实验方法及其原理的叙述力求繁简适当,深入浅出,以利于学生的自主学习,自行研究。

本书可作为高等学校理工科各专业物理实验课程的教材或教学参考书,也可作为涉及物理学的广大科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/徐滔滔主编. —北京: 科学出版社, 2008

21 世纪物理学规划课改教材

ISBN 978-7-03-022826-0

I. 大… II. 徐… 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 130750 号

责任编辑: 张颖兵 吉正霞 / 责任校对: 曾 莉

责任印制: 董艳辉 / 封面设计: 苏 波

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>

武汉市新华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

*

2008 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2008 年 8 月第一次印刷 印张: 17 3/4

印数: 1—6 000 字数: 436 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

PREFACE

随着科学技术的发展,特别是随着物理学近年来在其他学科中的渗透和广泛应用,大学物理实验的内容日益广泛,要求日益提高。大学物理实验课除了作为高校理工科学生的重要基础课程外,同时作为其他非理工科学生的素质教育类课程也越来越受到重视。武汉工业学院从事物理实验教学的同仁们从20世纪90年代初以来对物理实验的教学改革进行了有益探索,先后承担了湖北省“工科物理实验‘课题研究’教学模式的研究与实践”、“普通工科物理实验远程辅助教学系统”、“大学物理系列课程的整体构建与改革研究”等教改研究项目,并取得重要成果。本教材是总汇多年教学实践经验和改革研究成果编写而成的。综观全书,有三个方面的特色引人注目。

其一,教材遵从教学规律,以分层次递进模式编排实验项目。全书将课程实验分为三个层次:第一层次,注重物理实验的基本技能训练;第二层次,突出物理实验综合应用能力的提高;第三层次,体现物理实验的初步研究设计能力培养。不同层次分别采用“牵着走”、“引着走”、“放手走”的不同教学方式,既强调夯实物理实验的基础,又在物理实验综合、应用能力逐步提高的过程中,积极地将学生推向自主研究型学习的境地。这样的安排适应学生的认知规律,利于课程目标的实现。

其二,教材内容翔实,选题新颖。全书共精心编写了64个实验项目。在符合《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》的同时,也为学习者提供了充足的自主学习材料。书中传统的基础实验与新技术、新手段的项目以不同的角度和侧面反映了物理实验的丰富内涵。全书以引导学生独立思考为主线,比较好地做到了实验能力训练与实验素质培养相融合。

其三,教材突出了“以学生为本”的教学新理念,注重学生在教学中的主体地位,积极营造利于学生自主学习的氛围,在引导学生思考、动手、观察、分析的实践

教学过程中进行了有益的尝试。特别是开设研究设计性实验,要求学生从选题、查阅资料、设计方案、实验操作、观察记录、综合分析讨论、提交课题报告等环节开展项目研究,促进了学生的自主学习、自行设计、自由发挥,调动了学生的创新思维。比较好地将教师的主导作用和学生的主体地位结合在一起,搭建了有利于学生实践能力训练、创新思维拓展的平台。

此外,教材还附以英译的实验标题及目的要求,让学习者在完成物理实验的同时也熟悉英文物理词汇。总之,教材编排合理,层次分明,内容新颖,颇具时代气息。相信受益于本教材的指导和启示,学生们通过大学物理实验课程的学习,在科学素质和创新能力诸方面定能获得长足的进步。

武汉大学 周殿清

2008年5月

前言

FOREWORD

大学物理实验是学生进入大学后接触的第一门较为系统、完整的实验课程。它对学生的基本实验技能、科学实验素质和创新思维习惯等诸多方面的培养具有不可替代的作用。编者本着能更好地发挥课程教学功能这一目的,结合多年实验教学和课程改革的实践经验,在广泛吸收国内同类教材精华的基础上编写了本教材。具有以下三个特点:

第一,教材以低起点、高落点、分层次递进模式推行实验训练。全书将课程实验分为三个层次。第一层次为基础性实验(共 15 个项目),教学重点是物理实验基本的训练。通过“长度”、“重力加速度”、“转动惯量”、“杨氏模量”、“比热容”、“电阻”测量等基础性实验项目,让学生熟悉物理实验的常用仪器和设备,掌握基本实验操作规程,建立误差分析和不确定度评估等概念,夯实学生物理实验基础。第二层次为综合应用性实验(共 18 个项目),教学重点是培养学生综合运用物理实验方法的能力。通过“欧姆表的设计”、“数字式温度计的制作”、“双光栅测量微弱位移”、“密立根油滴法”等经典实验项目,使学生从中学习丰富的物理实验方法,领略精湛的实验设计思想,欣赏巧妙的实验技术,增强学生将物理实验原理与实际工程应用有机结合的思维和意识,强化学生实践动手能力。第三个层次为研究设计性实验(共 31 个项目),教学重点是培养学生科学研究的思维和能力,立足于学生的自主性、个性化发展,激发学生创新思维。教材提供了可供学生自主选择,自行训练、研究与设计的课题。让学生独自承担项目,在尝试和体验课题研究与设计的全过程中,激发学生自身潜能,展示学生创新思想,提升学生的综合科学素质。

第二,教材反映了当前的主流实验理论和最新的科技信息。全书精心编写了 64 个实验项目,除保留传统基础性实验外,新增添了一些采用新技术、新手段的实验,如“双光栅”技术测量位移、CCD 图像传感器手段观察油滴运动测定电子电荷、计算机仿真实验等。在数据处理方面,教材摒弃了传统误差理论中的一些不科学与不确切的内容,以由国际权威组织制定的《测量不确定度表示指南》为标准来阐述不确定度的评定。采用高置信概率(约等于或大于 0.95)的扩展不确定度 U 的表示形式,以符合 ISO、IEC 及工程技术中广泛使用的情形。在实验项目开篇引入

了实验的意义及实验背景知识,以拓展学生的视野和知识面。

第三,教材突出学生在教学中的主体地位,注重鼓励学生阅读,启发学生思维,在不同的层次以不同的方式营造利于学生自主学习的氛围。为了引导学生的学习,教材对每个实验项目均提出了详细的“目的与要求”,在基础性与综合应用性实验层次,对各项实验原理均作了严谨而扼要的论述。即使是较深奥的内容,也力求深入浅出地阐明物理意义,以便学生能理解其中的缘由,减少盲目性。对实验项目涉及的主要仪器与设备的性能和使用方法,教材都给予了简要的说明,以便于学生通过阅读,掌握其操作。每个实验均附有“预习自测”和“思考问题”,以帮助学生在实验预习时更好地理解实验的重点与难点,启发学生在实验之后进行更深入的思考。在研究设计性实验层次,教材以课题形式对学生提出项目任务,要求学生通过自行查阅资料,设计实验思想,确定实验方案、步骤,最终实际进行研究、设计实验,写出课题论文。为学生提供了发现问题、分析问题、解决问题的自行训练平台。教材的整体结构益于学生的基础物理实验技能训练与全面素质培养的有机融合。

教材还采用渗透式双语编写模式。教材中的标题和各个实验、课题的目的与要求,均配有英文。目的在于让学生在学习物理知识、掌握物理实验技能的同时,通过点点滴滴、潜移默化地渗透,熟悉英文物理专业词汇,提高学生查阅英文专业资料的水平。相信这一编写模式会对生物理实验课程学习和专业英文学习两方面都有所裨益。

本教材是在武汉工业学院主编的《大学物理实验》基础上,吸收兄弟院校实验教学的经验而编写的。它是武汉工业学院大学物理实验室近年来教学研究、教学改革成果的体现,也是大学物理实验室全体教师多年辛勤工作经验的积累。本书由徐滔滔任主编,董长缨、李家望任副主编。除主编外,参加本教材编写的教师有董长缨(实验 2.14、实验 3.10、实验 3.11、课题 4.12)、李家望(实验 2.11、实验 3.1、课题 4.4、课题 4.5)、闵爱琳(实验 2.3.1、实验 2.6、实验 2.7)、江建平(实验 2.2、实验 2.3.2、实验 3.13)、李玉华(实验 2.15、实验 3.12)、何雄韬(实验 3.18、课题 4.13)、陈艳山(实验 2.10、实验 3.3、课题 4.3)。范吉军负责全书的英文编译。全书由徐滔滔负责统稿。

周殿清教授在百忙中审阅了书稿,提出了许多宝贵意见,并为本书作序。孙向阳、赵斌教授参与了本书的筹划和审稿工作。武汉工业学院数理科学系的同小军、吴正邦、谢柏林、严俊、陈西曲、刘卫华、李强、陈修芳、文国知等教师,以及大学物理教研室的全体同仁对本书的出版给予了大力支持和帮助,在此一并深表感谢。

编写过程中参阅了大量相关著作和文献,在参考文献中未能一一列出,在此向文献作者表示诚挚的感谢和敬意,并请未列入参考文献的作者谅解。由于编者水平有限,时间仓促,本教材不妥之处在所难免,恳请读者和同行专家不吝批评指正。

编者

2008年5月于武汉

目 录

CONTENTS

绪论	001
0.1 物理实验的地位与作用	001
0.2 大学物理实验课程的教学目的	002
0.3 大学物理实验课程的基本程序	002
第1章 物理实验的基础知识	004
1.1 测量与误差	004
1.2 不确定度的估算	011
1.3 有效数字及其运算	022
1.4 实验数据处理的常用方法	026
1.5 物理实验的基本方法	034
1.6 物理实验的基本调整技术及操作规程	039
自测习题	042
第2章 基础性实验	044
实验 2.1 长度的测量	044
实验 2.2 重力加速度的测定	048
实验 2.3 物体转动惯量的测量	053
实验 2.4 金属丝杨氏模量的测量	062
实验 2.5 金属杆线膨胀系数的测定	068
实验 2.6 液体表面张力系数的测定	072
实验 2.7 冷却法测量金属材料比热容	076
实验 2.8 电路故障判断	080
实验 2.9 电阻元件电阻值的测量	082
实验 2.10 电表的改装与校正	101
实验 2.11 双踪示波器的使用	105
实验 2.12 薄透镜焦距的测量	116

实验 2.13 牛顿环与劈尖干涉的观测及应用	119
实验 2.14 分光计的调整和使用	124
实验 2.15 迈克耳孙干涉仪的调整和使用	131
第 3 章 综合应用性实验	137
实验 3.1 声速的测量	137
实验 3.2 弦振动特性的研究	140
实验 3.3 欧姆表的设计及制作	145
实验 3.4 数字式温度计的设计及制作	148
实验 3.5 霍尔效应法测量磁场	151
实验 3.6 铁磁材料磁滞回线的测试	157
实验 3.7 电子束的电聚焦和电偏转	162
实验 3.8 电子束的磁偏转和磁聚焦	169
实验 3.9 电位差计测量干电池的电动势和内阻	174
实验 3.10 最小偏向角法测量折射率和色散曲线	179
实验 3.11 光栅衍射参数的测量	183
实验 3.12 干涉仪测定光源相干长度和薄透明体的折射率	186
实验 3.13 双光栅测量微弱振动的位移	188
实验 3.14 用超声光栅测量声速	193
实验 3.15 光电效应特性的观测	196
实验 3.16 弗兰克-赫兹实验	202
实验 3.17 密立根油滴法测量电子电荷	208
实验 3.18 计算机仿真实验	216
第 4 章 研究设计性实验	226
4.0 研究设计性实验概述	226
课题 4.1 物体密度的测量	229
课题 4.2 黑箱探秘	231
课题 4.3 设计与组装简易万用电表	236
课题 4.4 双踪示波器测量相位角	240
课题 4.5 示波器测量超声波衰减曲线和压电换能器转换效率	242
课题 4.6 单臂电桥测量电压表内阻	243
课题 4.7 替代法测量线性电阻	244
课题 4.8 补偿电压法测量电阻	245
课题 4.9 UJ31 型低电势直流电位差计校准微安表	246
课题 4.10 UJ31 型低电势直流电位差计测量低电阻及材料的电阻率	247
课题 4.11 望远镜组装及其视放大率的测量	248
课题 4.12 最小偏向角法测量光波波长	249
课题 4.13 全息照相	251
课题 4.14 二极管特性的研究	252

课题 4.15	三极管的应用研究	253
课题 4.16	三极管放大倍数测试仪的设计制作	256
课题 4.17	转动惯量的测量及研究	258
课题 4.18	反射光偏振性的研究	259
课题 4.19	旋光性溶液浓度的测量	260
课题 4.20	材料力学特性的研究	261
课题 4.21	动态法测量固体材料的杨氏模量	261
课题 4.22	干涉法测量金属的热膨胀系数	262
课题 4.23	落针法测定液体的黏性系数	262
课题 4.24	RLC 串联电路暂态过程的研究	263
课题 4.25	交流电桥的研究及应用	263
课题 4.26	利用 p-n 结特性测量玻尔兹曼常量	264
课题 4.27	电介质相对介电常数的测定	264
课题 4.28	微波特性的研究	265
课题 4.29	温差电现象的研究	265
课题 4.30	太阳能电池基本特性的测定	266
课题 4.31	氢燃料电池工作性能的研究	267
参考文献		268
附录 A 国际单位制		269
附录 B 基本物理常量		272
基本物理实验仪器索引		273

Introduction

绪 论

0.1 物理实验的地位与作用

Status and role of the physical experimentation

物理学是自然科学中最基础、最活跃的一门实验科学。物理实验在物理学的发展过程中起着至关重要的作用。

无论是物理规律的发现,还是物理理论的验证,都要取决于实验。例如,杨氏的干涉实验使光的波动学说得以确立;赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁波理论获得普遍承认;卢瑟福的 α 粒子散射实验揭开了原子的秘密;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。在19世纪以前,没有纯粹的理论物理学家。所有物理学家,包括对物理理论的发展有重大贡献的牛顿、菲涅耳、麦克斯韦等,都亲自从事实验工作。近代物理的发展更是从所谓“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孙-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,而他获得诺贝尔奖却是因为其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,也是受迈克耳孙-莫雷实验结果的启示。最终经过长期大量的实验后,相对论才成为一个被人们普遍接受的理论。

总之,物理学的理论来源于物理实验,最终又必须由物理实验来验证。

物理实验不仅在物理学自身的发展中起着重要的作用,而且在推动其他学科和技术的发展中也起着重要的作用。例如,电子物理、电子工程、光源工程、光科学信息工程等学科都是以物理学为基础的,其中包含有大量物理学的应用。在材料科学中,各种材料的物性测试,许多新材料的发现(如 C_{60} 、高温超导材料等)和新材料制备方法的研究(如离子束注入、激光蒸发等),都离不开物理的应用。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,也无不是物理的应用。在生物学的发展史中,离不开各类显微镜(光学显微镜、电子显微镜、X光显微镜、原子力显微镜)的贡献。近代生命科学更离不开物理学,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光透视、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。可以说,实验正是联系物理基础理论到其他应用学科的桥梁。只有真正掌握了物理实验的基本技能,才能顺利地把物理原理应用到其他学科从而使其产生质的飞跃。

综上所述,在物理学发展和应用的过程中,人类积累了丰富的实验方法,设计制造出各种

精密巧妙的仪器设备,涉及广泛的物理现象,从而使物理实验课程有了充实的实验内容。物理实验在培养学生严谨的科学思维和理论联系实际方面,在训练学生运用实验手段去分析、观察、发现乃至研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学实验素质方面,都起着极其重要的作用。

0.2 大学物理实验课程的教学目的

Instructional objectives of the university physics experimental curriculum

大学物理实验课程是高等学校对理工类专业学生进行科学实验基本训练的必修课程,是大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。大学物理实验课覆盖广泛的学科领域,具有多样化的实验方法和手段,以及综合性很强的基本实验技能训练,它是培养学生创新意识和创新能力,引导学生确立正确科学思想和科学方法,提高学生科学素质的重要基础。物理实验课程的教学,拟在以下几个方面帮助学生学有所成。

(1) 学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生能运用物理学原理和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) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:①自学能力,能够自行阅读教材或参考资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备;②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;③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;④书写表达能力,能够正确记录和处理实验数据,绘制图线,说明、分析实验结果,撰写规范的实验报告(课题报告);⑤简单的设计能力,能够根据课题要求,确定实验方法和条件,合理地选择仪器,拟定具体的实验程序,正确地完成实验任务。

(3) 培养与提高学生的科学实验素质,使学生逐步养成理论联系实际、实事求是的科学作风,严肃认真的工作态度和主动研究、勇于创新的精神,以及团结协作、遵守纪律、爱护资源的优良品德。

0.3 大学物理实验课程的基本程序

Basic process of university physics experimental curriculum

大学物理实验课程是一门实验基础课,也是学生在教师指导下独立进行操作、测试的一项实践性活动。为更好地遵循教学规律,循序渐进地实现物理实验课程教学目的,本教材将课程实验分为三个层次来进行。第一层次,基础性实验,着力培养学生的基本实验技能;第二层次,综合应用性实验,加强学生物理实验的综合应用训练;第三层次,研究设计性实验,用以拓展学生自主研究、自行设计的空间。在第一、二层次,课程的基本程序分为三个主要教学环节。

0.3.1 实验前的预习(Preparation for the experiments)

实验前的预习是完成好物理实验的基础和前提。预习的基本要求是仔细阅读教材,明确

实验目的,理解实验原理和内容,了解实验仪器和测量方法,弄清实验步骤和注意事项。通过预习应写出预习实验报告,并依据实验要求作出原始数据记录表格。本教材的每项实验都设有预习自测题,供自行检查预习效果之用。预习是实验顺利进行的基本保证,务必予以重视。

0.3.2 实验操作(Operation of experiments)

实验操作是物理实验的关键步骤。实验预习的效果通过这一步骤来检验,实验原始数据的获取通过这一步骤来完成,学生实际动手能力和思维判断力的培养通过这一步骤来强化。进入实验室后,首先要根据教师的安排或讲解,对照实验设备、仪器实物,进一步弄清实验用具的结构、使用方法。其次要温习实验内容,按要求调整实验仪器到最佳工作状态。最后,先定性预调试一遍仪器设备(在可能条件下),再开始正式定量操作。

在实验操作过程中,要仔细观察和认真分析实验现象,如实记录原始实验数据和现象(用钢笔或圆珠笔记录)。实验记录是做实验的重要组成部分,它应全面真实反映实验的全过程,包括实验的主要步骤(必要时写明为什么要采取这样的步骤)、观察与测量的条件以及观察到的现象和测量到的数据。记录应尽量清晰、详尽。实验完毕经指导教师核准数据、签字认可后,整理好仪器,方可离开实验室。

0.3.3 撰写实验报告(Write the experiment report)

撰写实验报告是物理实验不可缺少的重要环节(实验报告可以在预习报告的基础上继续写,也可以重新另写)。它是对实验工作的总结,应该充分反映实验工作的收获和结果,反映实验的特色。实验报告要有条理性,并注意运用科学术语。实验报告主要包含三方面内容。

(1) 简要地阐明为什么和如何做实验。

要尽量用自己的语言,内容应以别人能看懂,自己若干年后也能看懂为标准;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。

记录实验的环境、所用的仪器设备、实验对象以及有关器材等。记录观察到的现象、发现的问题和实验数据。

(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,它应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。

实验报告的基本格式及要求可以用表 0.3.1 简要表述。

表 0.3.1 实验报告的基本格式及要求

栏 目	说 明
实验名称	项目题目及实验者的班级、姓名
实验目的	扼要叙述实验应达到的要求
实验仪器	标明仪器名称、型号、规格、准确度等级等
实验原理	简述实验的理论依据,画出原理图,列出主要公式
实验步骤	扼要简述实验的过程
数据处理及误差分析	原始数据表格、数据处理方法、主要计算式、不确定度的评估、实验结果表达等
讨 论	内容不限,实验现象描述、规律归纳、实验方案改进意见、实验体会等

1.1 测量与误差

Measurement and errors

物理实验是研究者根据项目的目的,创造一定的条件,使物理过程在实验场所再现,并运用科学仪器、方法,探求其变化规律的实践活动。物理实验一般包含定性分析与定量研究两个层面。定量研究要进行测量,而测量不可能绝对准确,所以需要测量结果的可靠性作出评价,对其误差范围作出估计。本章主要介绍测量误差、不确定度、数据处理、物理实验基本方法及操作规程等基本知识。

1.1.1 测量(Measurement)

1. 测量及单位

测量就是用相应的手段对实验中的现象和客观实体取得定量信息的过程。具体而言,要知道被测对象的量值,首先要选择一个标准量,用它与被测对象比较,得到的比值即为被测对象的量值。显然,这个量值的大小与所选择的标准量的单位有关。单位越大,量值就越小;反之亦然。因此,测量结果应具有量值与单位两个要素。

选作比较用的标准量必须是国际公认的、唯一的和稳定不变的。各种测量仪器,如米尺、秒表、天平等,都有符合一定标准的单位和与单位成倍数的标度。物理学中各物理量的单位,均采用 1960 年第 11 届国际计量大会所确定的国际单位制(SI)。它以米(m,长度)、千克(kg,质量)、秒(s,时间)、安[培](A,电流)、开[尔文](K,热力学温度)、摩尔(mol,物质的量)和坎[德拉](cd,发光强度)为基本单位。称为国际单位制的基本单位。其他物理量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。详细内容请查阅附录 A 国际单位制介绍。

2. 测量的分类

测量可分为直接测量和间接测量。

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量方法称为直接测量。例如,用米尺测量长度、用温度计测量温度、用电压表测量电压等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量量。

有些物理量无法进行直接测量,而需依据待测物理量与若干个直接测量量的函数关系求出,这样的测量就称为间接测量。大多数的物理量都是间接测量量。例如,用单摆法测重力加速度 g 时, T (周期)、 L (摆长)是直接测量值,而 g 就是间接测量量。

由测量情况考虑,测量分为等精度测量和不等精度测量。

在对某一物理量进行多次重复测量过程中,每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量。例如,由同一个人在同一仪器上采用同样的测量方法对同一待测物理量进行多次测量,每次测量的可靠程度都相同,这些测量量是等精度测量。

在对某一物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,各测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如,对某一物理量进行多次测量时,选用的仪器不同,或测量方法不同,或测量人员不同等都属于不等精度测量。

一般来说,在实验中,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某些条件变化对结果影响不大时,仍可视这些测量为等精度测量。等精度测量的数据处理比较简单,所以常规实验都采用等精度测量。本课程主要学习等精度测量的数据处理。

1.1.2 测量误差(Measurement errors)

在一定条件下,任何一个被测对象的量值的大小都是客观存在的,都有一个实实在在的客观量值,称为真值。在测量过程中,我们总希望准确地测得待测量的真值;但是,由于实验理论的近似性、实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性、实验环境的不稳定性、实验者的实验技能和判断能力的影响等,使测量值与待测量的真值之间总存在着差异,我们把这种差异称为测量误差。若某物理量的测量值为 x ,真值为 A ,则测量误差定义为

$$\Delta = x - A \quad (1.1.1)$$

式(1.1.1)所定义的测量误差反应了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称 Δ 为绝对误差。一般来说,真值仅是一个理想的概念,只有通过完善的测量才能获得;但是,严格的完善测量难以做到,故真值就不能确定。实际测量中,一般只能根据测量值确定测量的最佳值。通常取多次重复测量的平均值作为最佳值。

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则不适用,需要用相对误差表示。例如,测量 10 m 长相差 1 mm 与测量 1 m 长相差 1 mm,两者绝对误差相同,而相对误差不同。相对误差定义为

$$\text{相对误差 } \epsilon = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

有时被测量有公认值或理论值,还可使用“百分误差”来表征:

$$\text{百分误差 } E = \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (1.1.3)$$

相对误差描述了绝对误差对测量结果影响的程度。

测量总是存在着一定误差,但实验者应该根据要求和误差限度来制定或选择合理的测量方案和仪器,不能不切合实际地要求实验仪器的精度越高越好,环境条件总是越稳定越好,测量次数总是越多越好。一个高水平的实验工作者,应该是在一定的要求下,以最低的代价来取得最佳的实验结果,要做到既保证必要的实验精度,又合理地节省人力与物力。误差自始至终贯穿于整个测量过程中,为此必须分析测量中可能产生各种误差的因素,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差做出评价。

1.1.3 误差分类(Classification of errors)

误差的产生有多方面的因素。从误差的基本性质和产生原因可分为系统误差、随机误差

和粗大误差三类。

1. 系统误差

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量时,误差的大小和符号均保持不变;而当条件改变时,误差按某种确定的规律变化(如递增、递减、周期性变化等),这类误差称为系统误差。

系统误差的主要来源有以下几个方面。

(1) 仪器误差。仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差。例如,天平不等臂、分光计读数装置的偏心差、电表的示值与实际值不符等属于仪器缺陷,在使用时可采用适当测量方法加以消除。仪器设备安装调整不妥,不满足规定的状态,如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况应尽量避免。

(2) 理论或方法误差。它是由测量所依据的理论公式近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求等引起的。例如,单摆测重力加速度时所用公式的近似性;伏安法测电阻时,不考虑电表内阻的影响等。

(3) 环境误差。它是由于外部环境如温度、湿度、光照等仪器使用要求的环境条件不一致而引起的误差。

(4) 人员误差。由于实验者的不正确习惯所造成的误差。例如,用停表计时时,总是超前或滞后;对仪表读数时总是偏向一方斜视等。

在一定条件下采用一定的方法,对误差取值的变化规律及其大小和符号均能确切掌握的一类系统误差称为已定系统误差;另外,对剩余的不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号,而仅可估算其最大误差范围的一类系统误差称为未定系统误差。

2. 随机误差

在测量过程中,即使尽力消除或减少一切明显的系统误差以后,在相同条件下重复测量同一物理量时,仍然不会得到完全相同的结果,其测量值分散在一定的范围内,所得误差时正时负,绝对值时大时小,不能预知且呈现无规则的起伏,这类误差称为随机误差。

随机误差的产生,一方面是由测量过程中一些随机的未能控制的可变因素或不确定的因素引起的。例如,人的感官灵敏度以及仪器精密度的限制,使平衡点确定不准或估读数有起伏;由于周围环境干扰而导致读数的微小变化,以及伴随测量而来的其他不可预测的随机因素的影响等。另一方面是由被测对象本身的不稳定性引起的。例如,加工零件或被测样品本身存在的微小差异,这时被测量量就没有明确的定义值,这也是引起随机误差的一个原因。

随机误差和系统误差并不存在绝对的界限,在一定条件下它们可以相互转化。例如,按一定基本尺寸制造的量块,存在制造误差,对某一具体量块而言,制造误差是一确定数值,可以认为是系统误差;但对一批量块而言,制造误差则属于随机误差。又如,测量对象的不均匀性(如小球直径、金属丝的直径等),既可以当作系统误差,又可以当作随机误差。有时系统误差和随机误差混在一起,也难以严格加以区分。例如,测量者使用仪器时的估读误差往往既包含系统误差,又包含随机误差,前者是指测量者读数时总是有偏大或偏小的倾向,后者是指测量者每次读数时偏大或偏小的程度又互不相同。

3. 粗大误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差,它是由于实验者使用仪器的方法不正确,粗

心大意读错、记错或实验条件突变等原因造成的过失差错。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,正确的结果中不应包含粗大误差。在实验测量中要极力避免过失差错,在处理数据时,应首先检出含有粗大误差的测量值,并将其剔除。

1.1.4 测量结果的定性评价(Qualitative evaluation of measurement results)

评价测量结果的好坏,常用精密度、正确度和准确度三个术语来描述,但它们的含义各不相同。

精密度——表示测量数值集中的程度。反应随机误差的大小。

正确度——表示测量数值的平均值偏离真值的程度。反应系统误差的大小。

准确度——是对测量数值的精密度和正确度的综合评定。准确度高说明测量值比较集中而靠近真值,即测量的随机误差与系统误差都比较小。

图 1.1.1 是用打靶时弹着点的情况为例说明这三个术语的意义。图 1.1.1(a)表示射击的精密度高,但正确度较差。图 1.1.1(b)表示射击的正确度高,但精密度较差。图 1.1.1(c)表示精密度和正确度都高,即准确度高。

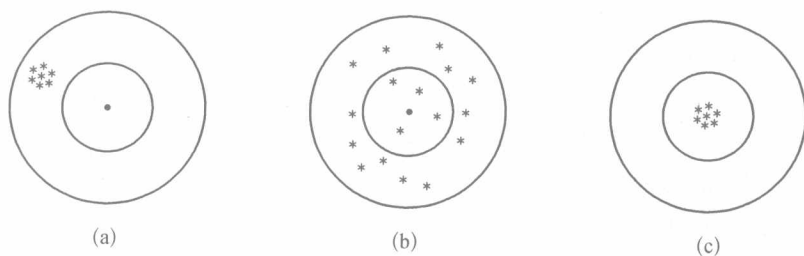


图 1.1.1 关于精密度、正确度、准确度的示意图

精密度、正确度、准确度只是对测量结果做定性评价,一般不严格区分这“三度”,而泛称为“精度”。要对测量结果做定量评价,就必须定量地估算各误差的分量。

1.1.5 系统误差的处理(Treatment of system errors)

系统误差的特征有规律性,但缺乏显著性。因而我们不能依靠在相同条件下多次重复测量来发现它的存在,也不能借此来消除或是减少它的影响。在许多情况下,系统误差往往是影响测量结果准确度的主要因素。在实验中,我们应特别重视系统误差的分析。发现系统误差,估算它对结果的影响。尽可能设法修正、减小或消除它的影响。

1. 系统误差的检查方法

1) 数据分析法

当随机误差比较小时,将待测量的绝对误差按测量次序排列,观察其变化。若绝对误差不是随机变化而呈规律性变化,如线性增大或减小、周期性变化等,则测量中一定存在系统误差。

2) 理论分析法

分析实验依据的理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足。例如,气垫导轨实验中,滑块在导轨上的运动因受到周围空气及气垫层的黏性摩擦阻力的作用会引起速度减小。如果实验中作无摩擦的理想情况来处理,就会产生与摩擦力有关的系统