



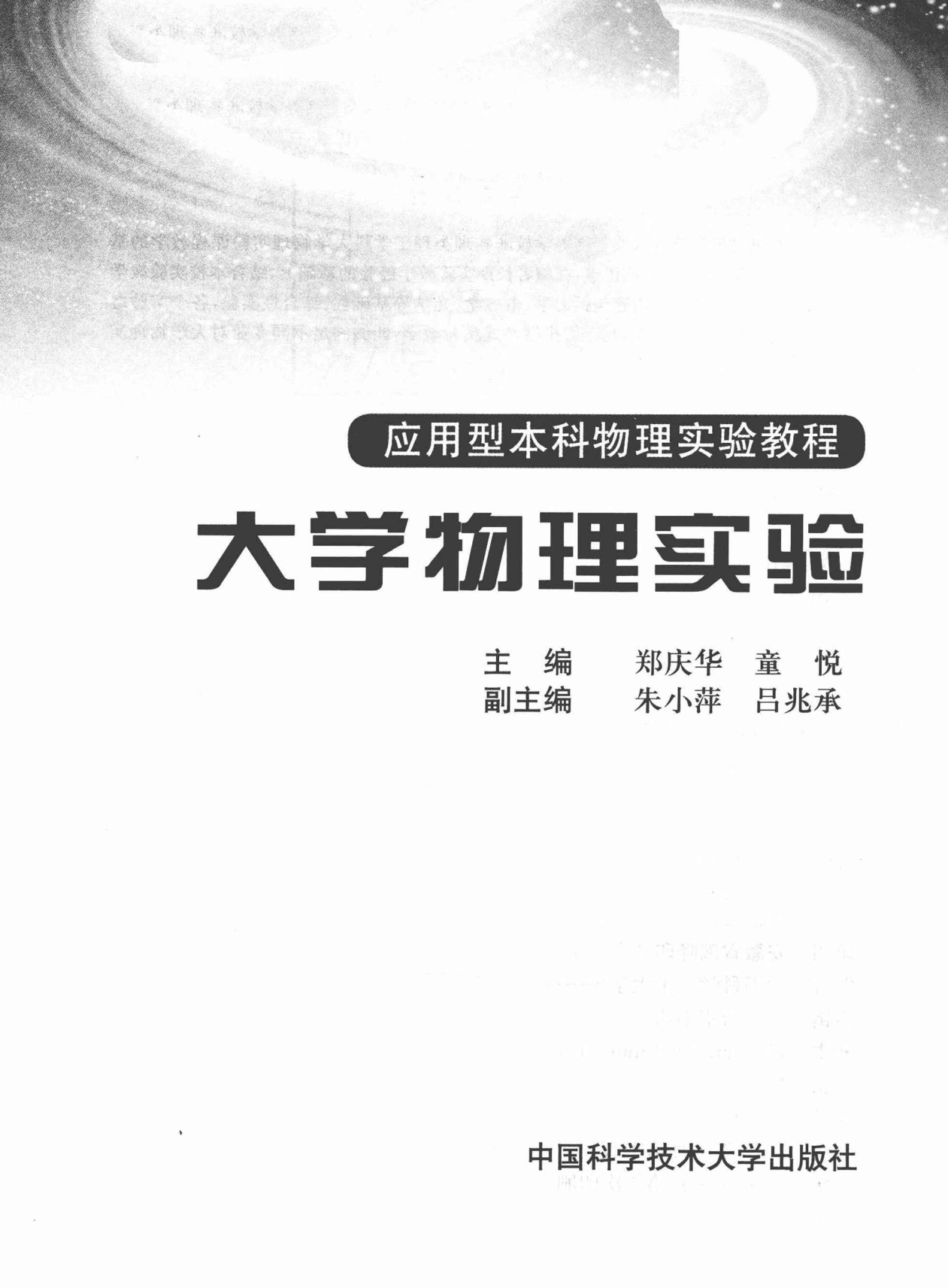
应用型本科物理实验教程

# 大学物理实验

D A X U E W U L I S H I Y A N

主编 郑庆华 童悦

中国科学技术大学出版社



应用型本科物理实验教程

# 大学物理实验

主 编 郑庆华 童 悦  
副主编 朱小萍 吕兆承

中国科学技术大学出版社

## 内 容 简 介

本书是根据教育部关于高等学校非物理类理工学科大学物理实验课程教学的基本要求,吸取同类教材的优点,在编者长期实验教学经验的基础上,结合本校实验教学的实际编写而成的。内容包括力学、电磁学、光学等基础性、综合性实验,各个实验之间没有严格的先后次序,利于安排循环式实验教学,能够满足不同专业对大学物理实验的基本需求。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/郑庆华,童悦主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2012.1  
ISBN 978-7-312-02953-0

I. 大… II. ①郑… ②童… 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(2011)第 263241 号

**出版** 中国科学技术大学出版社  
地址:安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026  
网址:<http://press.ustc.edu.cn>  
**印刷** 安徽省瑞隆印务有限公司  
**发行** 中国科学技术大学出版社  
**经销** 全国新华书店  
**开本** 710 mm×960 mm 1/16  
**印张** 14.5  
**字数** 285 千  
**版次** 2012 年 1 月第 1 版  
**印次** 2012 年 1 月第 1 次印刷  
**定价** 23.00 元

# 前 言

本书是根据教育部关于高等学校非物理类理工学科大学物理实验课程教学的基本要求,吸取同类教材的优点,在编者长期实验教学经验的基础上,结合本校实验教学的实际编写而成的。内容包括力学、电磁学、光学等基础性、综合性实验,各个实验之间没有严格的先后次序,利于安排循环式实验教学,能够满足不同专业对大学物理实验的基本需求。

全书内容共分为两部分,第一部分主要讲述测量误差和实验数据处理的基本知识;第二部分给出物理实验项目的基本内容,共 28 个实验项目,这些实验涵盖了大学物理实验中基本的物理内容、实验方法、物理思想等,以加强学生在实验方法、实验技术方面的训练。书末附录给出了教学中常用仪器的误差限和数字修约的国家标准,以方便学生查阅。

本书在编写过程中力求做到:实验目的具体、突出,要求明确;实验原理叙述清楚;实验内容、方法和步骤详尽;方便学生的学习。

实验教学是一项集体性很强的工作,实验教材的编写凝聚了集体的智慧。参与教材编写的教师有朱小萍、马建国、杜建明、宇文家宝、许江荣、郑庆华、张瑾、童悦、李徽、王子峰、张春早、余海军、吕兆承、陈景霞、夏峥嵘等,郑庆华、童悦两位教师并负责统稿。

本教材虽然只由以上教师编写,但实际上是全体实验教师共同的劳动成果,并得到了学校和物理与电子信息系的大力支持,同时参阅了兄弟院校相关的教材,在此一并表示感谢!由于时间和水平有限,错误和疏漏在所难免,希望本教材在今后的使用过程中能逐步完善并在此基础上得到不断提高!

编 者

2011 年 10 月 10 日

# 目 录

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 前言 .....                 | ( I )  |
| 绪论 .....                 | ( 1 )  |
| 0-1 课程的地位、作用和任务 .....    | ( 1 )  |
| 0-2 课程的教学内容 .....        | ( 2 )  |
| 0-3 能力的培养 .....          | ( 3 )  |
| 0-4 物理实验课程的基本教学环节 .....  | ( 3 )  |
| 0-5 实验守则 .....           | ( 6 )  |
| 第 1 章 测量误差及数据处理 .....    | ( 7 )  |
| 1-1 测量与误差 .....          | ( 7 )  |
| 1-2 测量结果的评定和不确定度 .....   | ( 15 ) |
| 1-3 有效数字及其运算法则 .....     | ( 23 ) |
| 1-4 数据处理 .....           | ( 26 ) |
| 第 2 章 基础实验 .....         | ( 40 ) |
| 2-1 长度的测量 .....          | ( 40 ) |
| 2-2 物质密度的测定 .....        | ( 47 ) |
| 2-3 弦振动的研究 .....         | ( 52 ) |
| 2-4 验证牛顿第二定律 .....       | ( 55 ) |
| 2-5 碰撞过程中守恒定律的研究 .....   | ( 60 ) |
| 2-6 自由落体测重力加速度 .....     | ( 65 ) |
| 2-7 单摆测重力加速度 .....       | ( 67 ) |
| 2-8 拉伸法测金属杨氏模量 .....     | ( 71 ) |
| 2-9 用刚体转动实验仪测转动惯量 .....  | ( 77 ) |
| 2-10 用三线摆法测物体的转动惯量 ..... | ( 85 ) |
| 2-11 相对湿度的测定 .....       | ( 90 ) |
| 2-12 液体黏滞系数的测定 .....     | ( 93 ) |
| 2-13 电阻元件伏安特性的测定 .....   | ( 95 ) |

---

|       |                             |         |
|-------|-----------------------------|---------|
| 2-14  | 万用电表的使用 .....               | ( 103 ) |
| 2-15  | 双臂电桥测低电阻 .....              | ( 109 ) |
| 2-16  | 示波器的使用 .....                | ( 115 ) |
| 2-17  | 用板式十一线电势差计测干电池的电动势和内阻 ..... | ( 124 ) |
| 2-18  | 霍尔效应 .....                  | ( 130 ) |
| 2-19  | 静电场的描绘 .....                | ( 144 ) |
| 2-20  | 分光计的调节与使用 .....             | ( 151 ) |
|       | 练习 1 用分光计测三棱镜的顶角 .....      | ( 158 ) |
|       | 练习 2 三棱镜折射率的测定 .....        | ( 162 ) |
| 2-21  | 牛顿环实验 .....                 | ( 165 ) |
| 2-22  | 迈克尔逊干涉仪的调节和使用 .....         | ( 173 ) |
| 2-23  | 薄透镜焦距的测定 .....              | ( 179 ) |
| 2-24  | 磁场的描绘 .....                 | ( 185 ) |
| 2-25  | 声速的测量 .....                 | ( 189 ) |
| 2-26  | 普朗克常数的测定 .....              | ( 201 ) |
| 2-27  | 密立根油滴实验 .....               | ( 207 ) |
| 2-28  | 夫兰克-赫兹实验 .....              | ( 217 ) |
| 附录 I  | 教学中常用仪器的误差限 .....           | ( 224 ) |
| 附录 II | 数字修约的国家标准 .....             | ( 226 ) |

# 绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

## 0-1 课程的地位、作用 and 任务

“大学物理实验”是高等院校对大学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是大学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

“大学物理实验”覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力和提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

本课程的具体任务是:

(1) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力。

(2) 提高学生的科学素养,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风、认真严谨的科学态度、积极主动的探索精神和遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

## 0-2 课程的教学内容

“大学物理实验”应包括普通物理实验中的力学、热学、电学、光学实验,具体的教学内容基本要求如下:

### 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、逐差法和最小二乘法等。能用计算机通用软件进行实验数据的处理。

### 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、电子电荷等。

### 3. 掌握常用的物理实验方法

例如,比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法、示波法和干涉、衍射、偏振法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的传感器技术等。

### 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、分光仪、干涉仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

### 5. 掌握常用的实验操作技术

例如,零位调整、水平/铅直调整、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。

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

## 0-3 能力的培养

### 1. 独立实验的能力

能够通过阅读实验讲义、查询有关资料和相关问题的思考,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备;正确使用仪器及辅助设备、独立完成实验内容、撰写合格的实验报告;逐步养成自主实验的基本能力。

### 2. 分析与研究的能力

能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究的能力。

### 3. 理论联系实际的能力

能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

### 4. 创新能力

能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验,进行初步的具有研究性或创意性内容的实验,激发学生的学习主动性,逐步培养学生的创新能力。

## 0-4 物理实验课程的基本教学环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动。实验课的教学安排不可能像书本教学那样使所有的学生按照同样的内容以同一进度进行;教学方式主要是学生自己动手,以完成实验规定的任务,教师只是在关键的地方给予提示和指导。因此,物理实验课要求学生有较强的独立工作能力。上好物理实验课的关键,在于把握住下列三个基本教学环节:

## 1. 实验前的预习——实验的基础

实验讲义是进行实验的指导书。它对每个实验的目的与要求,甚至实验原理都做了明确的阐述。因此,在上实验课前都要认真阅读,必要时还应阅读有关参考资料,看懂实验的原理和方法,并学会从中整理出主要实验条件、实验中的关键问题及实验注意事项,根据实验任务在实验数据记录本上画出记录数据的表格。有些实验还要求学生课前自拟实验方案,自己设计线路图或光路图,自拟数据表格等。对于实验中所涉及的测量仪器,在预习时可阅读教材中的仪器介绍或利用实验室开放时间,了解其构造原理、工作条件和操作规程等,并在此基础上写好预习报告,回答预习思考题。预习报告内容主要包括以下几个方面:

**【实验名称】** 表示做什么实验。

**【实验目的】** 说明为什么做这个实验,做该实验要达到什么目的。

**【实验仪器】** 列出主要仪器的名称、型号、规格等。

**【实验原理】** 简要叙述与本实验有关的物理背景和推导原理公式,明确实验中将要测量的物理量以及实验测量方法、条件和注意事项。电学实验应绘出电路图,光学实验应绘出光路图,力学实验可绘出示意图。

**【数据表格】** 根据实验内容,在明确哪些是待测物理量、哪些是已知物理量、哪些是需要计算的物理量的基础上,认真设计并画出原始数据表格。

**【回答问题】** 回答预习思考题。

课前预习是本次实验取得成功的关键。每次实验前,学生必须完成规定的预习内容,上课时,指导教师要检查学生的预习情况,对于没有预习和未完成预习报告的学生,指导教师有权停止该生本次实验。

## 2. 实验中的操作——实践的过程

实验操作是实验的实践环节。学生实验时必须详细了解并严格遵守实验室的各项规章制度,仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书,在教师指导下正确使用仪器,注意爱护,稳拿妥放,防止损坏。学会分析实验现象,能够独立或半独立地排除实验中出现的故障。对于严重违反实验室规则者,指导教师应停止其实验,并按有关规定处理。

**原始数据记录:**做好实验记录是科学实验的一项基本功。在观察、测量时,要做到正确读数,实事求是地记录客观现象和数据。接着要记下实验所用仪器装置的名称、型号、规格、编号和性能等情况,以便以后需要时可以用来重复测量和利用仪器的准确度校核实验结果的误差,切勿将数据随意记录在草稿纸上,不可事后凭回忆“追忆”数据,更不可为拼凑数据而将实验记录做随心所欲的涂改。对实验数

据要严肃对待,要用钢笔或圆珠笔记录原始数据,如果确实记错了,也不要涂改。应轻轻划上一道,在旁边写上正确值(错误多的,必须重新记录),使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记录原始数据,给自己留有涂抹的余地,也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里,这样容易出错,况且,这已经不是“原始记录”了。

希望同学们从一开始就不断培养良好的科学作风。实验结束,要把测得的数据交给指导老师审阅签字,对不合理的或者错误的实验结果,经分析后还要补做或重做。离开实验室前要自觉整理好使用过的仪器,做好清洁工作。

### 3. 实验后的报告——实验的总结

实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始记录删改较多,应加以整理,对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式(或计算举例),代入的数据都要有根据,便于别人看懂,也便于自己检查。作图要按照作图规则,图线要规矩、美观。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写出一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告,用以汇报自己的实验成果。

撰写实验报告的目的之一,是为了培养和训练学生以书面形式总结工作或报告科学成果的能力。实验报告应遵循简洁、准确、实事求是的原则,并充分体现个性。应该做到字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备和结论明确。一份成功的报告,应能给予老师或同行以清晰的思路、明确的见解和新的启迪。实验报告一般应写在专用的实验报告纸上并按时完成,决不能敷衍塞责,下次实验时交指导教师批阅。实验报告的主要内容一般应包括:

**【实验名称】** 表示做什么实验。

**【实验目的】** 说明为什么做这个实验,做该实验要达到什么目的。

**【实验仪器】** 列出实际使用的主要仪器的名称、型号和规格等。

**【实验原理】** 应该在对原理理解的基础上用自己的语言简要叙述,要求做到简明扼要,图(光路图、电路图或实验装置示意图)文并茂,并列出的测量和计算所依据的主要公式,注明公式中各量的物理含义及单位,公式成立所应满足的实验条件等。

**【实验内容与步骤】** 写明本次实验的实验内容、关键性的步骤和注意事项。

**【原始数据】** 记录中应该有主要实验仪器编号和规格,一般要求以列表形式来反映完整而清晰的原始测量数据。原始数据要求记录在预习报告后的“实验原始数据和实验现象记录”表中。

**【数据处理】** 要求写出数据处理的主要过程、曲线图的绘制及误差分析等。在计算处理完成后,必须以醒目的方式完整地表示出实验结果。

**【问题讨论】** 一般讨论内容不受限制,可以是对观察到的实验现象进行分析,对结果和误差原因进行分析,对实验方案及其改进意见进行讨论评述,还可以谈谈做本实验的体会和对教师或教材的看法及建议等。

**【课后习题】** 回答课后习题。

实验报告可以在预习报告的基础上继续写,也可以重写一份。如果实验报告是在预习报告的基础上撰写的,则实验原理部分可以酌情简写或省略。实验报告应遵循简洁、准确和实事求是的原则,并充分体现个性,下次实验时交指导教师批阅。

## 0-5 实验守则

为了保证实验教学正常进行,培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,特制定如下守则,望同学们遵照执行。

- (1) 实验前做好预习,无预习实验报告和无故迟到者不准进入实验室。
- (2) 进入实验室后要在实验指导教师的监督下认真填写相关的登记表。按照实验项目要求做好实验前的各项准备工作,经指导教师检查许可后,方可接通电源或启动仪器设备。实验中要严肃认真地按规程操作仪器;要仔细观察和认真记录数据;视抄袭他人的数据或敷衍实验和自编数据为耻。实验期间不得擅自离开实验岗位。
- (3) 实验操作结束后,请指导教师检查并签阅数据,并将仪器设备、用品及场地整理复原,认真填写仪器使用记录册,清理桌面和地面卫生。经指导教师检查后方可离开实验室。下次实验时,交该次的实验报告。
- (4) 遵守实验室的各项规章制度,保持室内安静、整洁。不准在室内吸烟、随地吐痰和乱扔杂物,不准在实验室接、打手机(包括发短信),非实验用品原则上一律不准带进实验室。
- (5) 实验中,使用易燃易爆物品或接触带电设备,要严格操作,注意防护。仪器设备发生故障和损坏,应主动停止实验,并立即向指导教师报告。未经教师允许不得擅自动用其他仪器设备,更不能自行拆卸所用仪器设备,如擅自运用仪器设备或违反操作规程造成仪器设备损坏,要按规定赔偿。

# 第 1 章 测量误差及数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象,更重要的是定量地测量相关物理量。而对事物定量地描述又离不开数学方法和进行实验数据的处理。因此,误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始,逐步介绍有关误差和实验数据处理的方法和基本知识。误差理论及数据处理是一切实验结果中不可缺少的内容,是不可分割的两部分。误差理论是一门独立的学科。随着科学技术事业的发展,近年来误差理论基本的概念和处理方法也有很大发展。误差理论以数理统计和概率论为其数学基础,研究误差性质、规律及如何消除误差。实验中的误差分析,其目的是对实验结果做出评定,最大限度地减小实验误差,或指出减小实验误差的方向,提高测量质量,提高测量结果的可信赖程度。对低年级大学生,这部分内容难度较大。本课程仅限于介绍误差分析的初步知识,着重点放在几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法,不进行严密的数学论证,降低学生学习的难度,有利于学好物理实验这门基础课程。

## 1-1 测量与误差

物理实验不仅要定性地观察物理现象,而且还要找出有关物理量之间的定量关系,因此就需要进行定量的测量,以取得物理量数据的表征。对物理量进行测量,是物理实验中极其重要的一个组成部分。对某些物理量的大小进行测定,实验上就是将此物理量与规定的作为标准单位的同类量或可借以导出的异类物理量进行比较,得出结论,这个比较的过程就叫做测量。例如,物体的质量可通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码进行比较而得出测量结果;物体运动速度的测定则必须通过与两个不同的物理量,即长度和时间的标准单位进行比较而获得。比较的结果记录下来就叫做实验数据。测量得到的实验数据应包含测量值的大小和单位,二者缺一不可。

国际上规定了七个物理量的单位为基本单位。其他物理量的单位则是由以上

基本单位按一定的计算关系式导出的。因此,除基本单位之外的其余单位均称它们为导出单位。如以上提到的速度以及经常遇到的力、电压、电阻等物理量的单位都是导出单位。

一个被测物理量,除了用数值和单位来表征它外,还有一个很重要的表征它的参数,这个参数便是对测量结果可靠性的定量估计。这个重要参数却往往容易被人们忽视。设想如果得到一个测量结果的可靠性几乎为零,那么这种测量结果还有什么价值呢?因此,从表征被测量这个意义上来说,对测量结果可靠性的定量估计与其数值和单位至少具有同等的重要意义,三者缺一不可。

测量可以分为两类。按照测量结果获得的方法来分,可将测量分为直接测量和间接测量两类,而从测量条件是否相同来分,又有所谓等精度测量和不等精度测量。

根据测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果。如用米尺测量物体的长度,用天平称量物体的质量,用电流表测量电流等,都是直接测量。间接测量借助函数关系由直接测量的结果计算出所谓的物理量。例如已知了路程和时间,根据速度、时间和路程之间的关系求出的速度就是间接测量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展,测量仪器的改进,很多原来只能间接测量的量,现在可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量,现在也可以用电度表来进行直接测量。物理量的测量,大多数是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。

根据测量条件来分,有等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在同一(相同)条件下进行的多次测量,如同一个人,用同一台仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。反之,若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法、条件改变。这样所进行的一系列测量叫做非等精度测量,非等精度测量的结果,其可靠程度自然也不相同。物理实验中大多采用等精度测量。应该指出:重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是仅仅为重复读数。

测量仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能、掌握仪器的使用方法及正确进行读数,是每个测量者必备的基础知识。以下简单介绍仪器精密性、准确度和量程等基本概念。

仪器精密性是指仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小的分度越小,所测量物理量的位数就越多,仪器精密性就越高。对测量读数最小一位的取值,一般来讲应在仪器最小分度范围内再进行估计读出一位数字。如具有毫米分度的米尺,其精密性为1毫米,应该估计读出到毫米的十分位;螺旋测微计的精密性为

0.01 毫米,应该估计读出到毫米的千分位。

仪器准确度是指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在仪器说明书上。如电表仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器,可粗略地取仪器最小的分度数值或最小分度数值的一半,一般对连续读数的仪器取最小分度数值的一半,对非连续读数的仪器取最小的分度数值。在制造仪器时,其最小的分度数值是受仪器准确度约束的,对不同的仪器准确度是不一样的,对测量长度的常用仪器米尺、游标卡尺和螺旋测微计,它们的仪器准确度依次提高。

量程是指仪器所能测量的物理量最大值和最小值之差,即仪器的测量范围(有时也将所能测量的最大值称量程)。测量过程中,超过仪器量程使用仪器是不允许的,轻则仪器准确度降低,使用寿命缩短,重则损坏仪器。

### 1-1-1 误差与偏差

测量的目的就是为得到被测物理量所具有的客观真实数据,但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,只能获得该物理量的近似值,也就是说,一个被测量值  $N$  与真值  $N_0$  之间总是存在着这种差值,这种差值称为测量误差,即

$$\Delta N = N - N_0 \quad (1-1-1)$$

显然误差  $\Delta N$  有正负之分,因为它是指与真值的差值,常称为绝对误差。注意,绝对误差不是误差的绝对值!

误差存在于一切测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是实验中的一项重要工作,也是实验的基本技能。实验总是根据对测量结果误差限度的一定要求来制订方案和选用仪器的,不要以为仪器精度越高越好。因为测量的误差是各个因素所引起的误差的总和,要以最小的代价来取得最好的结果,要合理地设计实验方案,选择仪器,确定采用哪种测量方法。如比较法、替代法、天平复称法等,都是为了减小测量误差;对测量公式进行这样或那样的修正,也是为了减小某些误差的影响;在调节仪器时,如调节仪器使其处于铅直或水平状态,要考虑到什么程度才能使它的偏离对实验结果造成的影响可以忽略不计;电表接入电路和选择量程都要考虑到引起误差的大小。在测量过程中某些对结果影响大的关键量,就要努力想办法将它测准;有的测量不太准确对结果没有什么影响,就不必花太多的时间和精力去对待,在进行数据处理时,某个数据取到多少位,怎样使用近似公式,作图时坐标比例、尺寸大小怎样选取,如何求直线的斜率等,都要考虑到引入误

差的大小。

由于客观条件所限、人们认识的局限性,测量不可能获得待测量的真值,只能是近似值。设某个物理量真值为  $x_0$ , 进行  $n$  次等精度测量, 测量值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (测量过程无明显的系统误差)。它们的误差为

$$\Delta x_1 = x_1 - x_0 \quad (1-1-2)$$

$$\Delta x_2 = x_2 - x_0 \quad (1-1-3)$$

.....

$$\Delta x_n = x_n - x_0 \quad (1-1-4)$$

求和

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 \quad (1-1-5)$$

即

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - x_0 \quad (1-1-6)$$

当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时, 可以证明  $\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} \rightarrow 0$ , 而且  $\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}$  是  $x_0$  的最佳估计值, 称  $\bar{x}$  为测量值的近似真实值。为了估计误差, 定义测量值与近似真实值的差值为偏差, 即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (1-1-7)$$

偏差又叫做“残差”。实验中得不到真值, 因此误差也无法知道, 而测量的偏差可以准确知道, 实验误差分析中要经常计算这种偏差, 用偏差来描述测量结果的精确程度。

## 1-1-2 相对误差

绝对误差与真值之比的百分数叫做相对误差, 用  $E$  表示:

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\% \quad (1-1-8)$$

由于真值无法知道, 所以计算相对误差时常用  $N$  代替  $N_0$ 。在这种情况下,  $N$  可能是公认值, 或高一级精密仪器的测量值, 或测量值的平均值。相对误差用来表示测量的相对精确度, 相对误差用百分数表示, 保留两位有效数字。

## 1-1-3 系统误差与随机误差

根据误差的性质和产生的原因, 可分为系统误差和随机误差。

## 1. 系统误差

系统误差是指在一定条件下多次测量的结果总是向一个方向偏离,其数值一定或按一定规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性。系统误差的来源有以下几个方面:① 仪器误差。它是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差;② 理论误差。它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或测量方法等所带来的误差;③ 观测误差。它是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差。例如,用“落球法”测量重力加速度,由于空气阻力的影响,多次测量的结果总是偏小,这是测量方法不完善造成的误差;用停表测量运动物体通过某一段路程所需要的时间,若停表走得太快,即使测量多次,测量的时间  $t$  总是偏大为一个固定的数值,这是仪器不准确造成的误差;在测量过程中,若环境温度升高或降低,使测量值按一定规律变化,是由于环境因素变化引起的误差。

在任何一项实验工作和具体测量中,必须要想尽一切办法,最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差,或者对测量结果进行修正。发现系统误差需要改变实验条件和实验方法,反复进行对比,系统误差的消除或减小是比较复杂的一个问题,没有固定不变的方法,要具体问题具体分析各个击破。产生系统误差的原因可能不止一个,一般应找出影响的主要因素,有针对性地消除或减小系统误差。以下介绍几种常用的方法。

检定修正法指将仪器、量具送计量部门检验取得修正值,以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

替代法指测量装置测定待测量后,在测量条件不变的情况下,用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。如消除天平的两臂不等对测量的影响可用此办法。

异号法指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差,采取平均值后消除的一种方法。例如在外界磁场作用下,仪表读数会产生一个附加误差,若将仪表转动  $180^\circ$  再进行一次测量,外磁场将对读数产生相反的影响,引起负的附加误差。两次测量结果平均,正负误差可以抵消,从中可以减小系统误差。

## 2. 随机误差

在实际测量条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值符号的变化,时大时小、时正时负,以不可预定方式变化着的误差叫做随机误差,有时也叫做偶然误差。当测量次数很多时,随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明,随机误差服从一定的统计规律(正态分布),其特点是: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(单峰性);绝对值相等的正负误差出现的概率相同(对称性);绝对值很大的误差出现的概率趋于零(有界性);误差的算术平均值随着测量次数的增加而