

高等院校物理系列教材

大学物理实验

李 林 主 编
吴新全 副主编



清华大学出版社

大学物理实验

李 林 主 编
吴新全 副主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书根据教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，总结衢州学院大学物理实验课程教学改革的实践经验编写而成。

全书共七章，分为概述、测量误差与数据处理基础、物理实验的基本方法与技术、基础性实验、综合性实验、设计性实验和计算机仿真实验。在附录中介绍了世界十大经典物理实验、诺贝尔物理学奖与物理实验等。本书定位于基础性实验课程，在总体设计上力求贯彻“以生为本，尊重生命”的教育理念，注重基础性、实践性、探索性和开放性的有机统一，有利于实施“以导引学，先学后教，多学少教，会学不教”的课堂教学方式，既保证基本训练，又使学生的创新意识和能力得到启发与锻炼。

本书可作为各类高等学校工科专业和理科非物理专业大学物理实验教材，也可供其他专业参考使用。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李林主编. --北京:清华大学出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-302-29408-5

I. ①大… II. ①李… 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(2012)第 159727 号

责任编辑:朱红莲 洪 英

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19.5 字 数:472千字

版 次:2012年8月第1版 印 次:2012年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.00元

产品编号:048312-01

前言

大学物理实验课是高等学校理工科类专业学生的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是一系列后续专业实验课程的重要基础。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应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

为贯彻落实教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》),适应 21 世纪高素质、强能力的多层次人才需求,体现把我校建设成一所以工为主、特色鲜明的应用型本科院校的办学理念,我们编写了这本适合于“二本”培养层次、具有广阔覆盖面和足够实验项目的《大学物理实验》教材。本教材的编写具有以下几个特点。

在体系编排上,突破了传统的以力学、热学、电磁学、光学和近代物理知识为顺序且各成系统的课程框架结构,建立了和《基本要求》相适应的多模块、多层次的大学物理实验课程体系。教材按实验基本知识、基础性实验、综合性实验、设计性实验和计算机仿真实验共 5 个模块分层次编排,以更好地体现分类指导与因材施教的原则。

在内容选取上,教材定位于基础性实验课程,精选那些比较经典、相对稳定,又具有迁移价值的物理实验项目。同时,为了调动和发挥学生学习的主动性、自主性和创造性,加大了综合性与设计性实验的比重。例如,教材选入了在化学、生物、环境、食品卫生、医疗和制药等领域得到广泛应用,现已成为一种新型光电检测技术的表面等离子体共振实验;具有设计性、趣味性、开放性和拓展性特点的电磁学自主设计性系列实验和传感器自主设计性系列实验。这样既保证了基本训练,又提高了实验的综合性以及与现代高科技发展的衔接性。

在实验指导上,每一个实验的开始均简要地叙述了该实验的意义或提供一些背景知识,尽可能地介绍一些与实验相关的实验技术、应用情况及其展望,以期激发学生的学习热情。实验原理的论述力求简明扼要,对某些较深的内容,尽可能深入浅出地阐述其物理意义。实验仪器的介绍一般和实验内容融于一体,复杂仪器的介绍则以附录形式放在实验最后。实验方法大都说明得比较具体详细,以便学生课前进行自主学习,进入实验室后能很快独立地拟订合理的实验步骤,正确使用仪器,在规定时间内独立完成实验。在结尾处给出思考题,促使学生在预习过程中积极思考。有些实验除基本要求

外,还附有一些较灵活的提高内容,在书中均标注了“*”,供有潜力的学生作进一步的钻研。核心内容或需特别注意处都用黑体突出显示。

在数据处理上,对基础性实验,每个实验均给出了完整的数据记录表格及数据处理要求,以规范学生的实验行为。对综合性和设计性实验,有些实验只给出部分或不给出数据记录表格,要求学生自行根据实验内容进行设计。数据处理的技术平台为 Excel 软件,并专门列出一节详细介绍如何用该软件来处理物理实验数据。此外,我们特别设计与本教材相配套的实验报告册,每次实验课都要求学生课前完成实验预习报告,课中如实填写实验原始数据,课后写出完整规范的实验报告。通过以上各环节来培养学生在实验方法、实验技能、误差分析和总结报告等各方面初步的能力以及严谨的科研作风。

在素质培养上,我们注意到理工科教材的主要功能是培养和提高学生的业务素质,但也应该兼具培养其他多方面素质的功能。为此我们在教材中编入一些既与课程内容相关,又有一定知识性和广延性的内容,如“世界十大经典物理实验”、“诺贝尔物理学奖与物理实验”和“物理实验室的典范——卡文迪许实验室”等。篇幅不大,只起一个引导作用。

本书的编写,得到了衢州学院教务处、教师教育学院领导的大力支持,浙江工业大学物理实验中心主任隋成华教授、副主任魏高尧高级工程师的鼎力相助,衢州学院教师教育学院张昆教授、郑文珍副教授的通力协作,清华大学出版社朱红莲编辑也为本书的出版提出了许多建设性意见。在此,编者谨向他们表示诚挚的敬意和衷心的感谢!

由于成书时间匆忙和编者水平所限,书中难免有疏漏、错误之处,敬请读者批评指正;并且,在使用过程中,把您的意见和建议告诉我们,以利于我们今后作进一步的修订。

编 者

2012年5月于衢州学院



第一章 概述	1
一、课程的地位、作用和任务	1
二、课程的主要教学环节	2
三、物理实验报告	3
四、物理实验室规则	7
第二章 测量误差与数据处理基础	8
一、测量与误差	8
二、有效数字及其规则	13
三、测量结果的不确定度评定	14
四、实验数据处理方法	20
五、用 Excel 软件进行实验数据处理	25
六、大学物理实验基础知识自测题	31
第三章 物理实验的基本方法与技术	34
一、物理实验基本测量方法	34
二、物理实验的基本调整与操作技术	36
三、电磁学实验常用仪器及操作规范	37
四、光学仪器的正确使用与维护	43
第四章 基础性实验	45
实验一 长度、质量与密度测量	45
实验二 气垫导轨实验	52
实验三 用三线摆法测定物体的转动惯量	58
实验四 气体比热容比的测定	64
实验五 电学元件的伏安特性测量	68
实验六 示波器的原理和使用	76
实验七 用电磁感应法测磁场分布	90
实验八 分光计的调整和棱镜材料折射率的测定	96

第五章 综合性实验	104
实验九 金属丝杨氏模量的测定	104
实验十 声速测量	109
实验十一 电表改装及校准	116
实验十二 温度传感器特性的研究	120
实验十三 固体导热系数的测定	130
实验十四 光的等厚干涉	135
实验十五 光栅衍射实验	140
实验十六 迈克耳孙干涉仪的调整和使用	144
实验十七 霍耳效应及其应用	149
实验十八 光电效应测定普朗克常量	158
实验十九 弗兰克-赫兹实验	164
实验二十 表面等离子体共振实验	176
第六章 设计性实验	180
群实验一 电磁学自主设计性系列实验	181
群实验二 传感器自主设计性系列实验	207
第七章 计算机仿真实验	244
仿真实验一 计算机仿真示波器的原理和使用	245
仿真实验二 计算机仿真分光计的调整和棱镜材料折射率的测定	255
仿真实验三 计算机仿真金属丝杨氏模量的测定	265
仿真实验四 计算机仿真双臂电桥测低值电阻	270
附录	275
附录 A 世界十大经典物理实验	275
附录 B 诺贝尔物理学奖与物理实验	282
附录 C 物理实验室的典范——卡文迪许实验室	292
附录 D 物理学常用数表	298
大学物理实验基础知识自测题参考答案及评分标准	302
主要参考文献	304

概 述

实验是科学理论的源泉,工程技术诞生的摇篮。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、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。学好物理实验课对于高校理工科学生是十分重要的。

一、课程的地位、作用和任务

实验是人们根据研究的目的,运用科学仪器设备,人为地控制、创造或纯化某种自然过程,使之按预期的进程发展,同时在尽可能减少干扰因素的前提下进行观测,以探究物理过程变化规律的一种科学活动。在实验中人们处于一种主动的地位,可以充分发挥主观能动性,控制实验条件、改变客观状况和进程,使自然现象的变化有利于得出规律性的认识。因此实验是人类发挥高度智慧的一种特殊的实践活动。

物理学本质上是一门实验科学。在物理学史上,16世纪意大利物理学家伽利略(Galileo Galilei,1564—1642)首先摒弃了形而上学的空洞的思辨,代之以敏于观察、勤于实验的实践,并把物理实验作为物理学系统理论的基础、依据和发展物理学必不可少的手段,从而使物理学走上了真正的科学道路。19世纪美国实验物理学家密立根(Robert Andrews Millikan,1868—1953),在获诺贝尔物理学奖(验证了爱因斯坦的光电效应方程,并且测出了普朗克常量 h 的值)演说中,用非常形象的比喻说明了理论和实验在科学发展中的作用:“科学是用理论和实验这两只脚前进的,有时这只脚先迈出一大步,有时是另一只脚先迈出一大步,但是前进要靠两只脚”。

随着物理学的发展,人类积累了丰富的实验思想、方法和手段,创造出了各种精密巧妙的仪器设备。同时,用于实验的数学方法以及计算机科学在实验中的应用等,使物理测量技术不断得到发展。这实际上已赋予物理实验以极其丰富的、不同于物理学本身的特有的内容,并逐步形成一门单独开设的具有重要教育价值和教育功能的实验课程。它不仅加深了对物理学理论的理解,更重要的是能使获得基本的实验知识、技能,提高科学创新的能力,为今后从事科学研究和工程实践打下扎实的基础。

教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》中明确指出:“物理实验课是高等学校理工科类专业学生的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端”。“物理实验课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、提高科学素质的重要基础,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应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用”。

本课程的目的和任务是：

(1) 通过对实验现象的观察、分析和物理量的测量,学习物理实验基本知识和技能,加深对物理学原理的理解,提高对科学实验重要性的认识。

(2) 培养学生的科学实验能力:

① 信息处理能力。能够通过阅读教材或网上资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备。

② 动手实践能力。能够借助教材或仪器说明书,正确调整和使用常用仪器,基本独立完成实验。

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 书面表达能力。能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

⑤ 科学创新能力。能够完成简单的具有设计性内容的实验,即根据课题要求,自行设计实验方案、组织实验系统、独立进行操作并得出实验结果。

(3) 提高学生的科学素养。使学生具有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,以及遵守纪律、团结协作和爱护公物的优良品德。

二、课程的主要教学环节

大学物理实验课程的学习主要由以下 3 个环节构成:

1. 课前的实验预习

实验预习是不可或缺的实验前期准备,主要是搞清楚本实验“做什么,怎么做”的问题。学生们在课前一定要认真阅读实验教程和有关资料,明确实验目的、原理和所用仪器,拟出实验步骤,然后在脑子中“操作”这一实验,思考有可能出现的问题和应得出怎样的结论,最后写出预习报告。

未完成预习报告者,教师有权停止其实验或本实验成绩降档!

2. 课中的实验操作

实验操作是整个实验教学中的核心环节,主要是通过实验操作观察实验现象和记录实验原始数据。学生在实验操作时应:

- (1) 遵守实验室规则;
- (2) 了解实验仪器的使用及注意事项;
- (3) 正式测量之前进行试探性操作;
- (4) 仔细观察和认真分析实验现象;
- (5) 不过分地依赖教师,逐步学会自己排除实验中出现的故障;
- (6) 如实记录实验现象和数据;
- (7) 对所得实验结果与理论预期是否一致作出粗略判断。

离开实验室前,必须把实验原始数据交教师审阅签名,并按原样整理好所用仪器设备和做好相关清洁工作!

3. 课后的实验报告

实验报告是实验的结果及其总结,主要是完成实验数据处理和小结或讨论等工作。学生们应养成在实验操作后尽快写出实验报告的良好习惯。实验报告应文字通顺、字迹端正、

图表规范、数据完备和结论明确。一份好的实验报告还应给同行以清晰的思路、见解和新的启迪。

数据处理必须按各个实验的要求进行。

预习报告、数据记录和实验报告均用本中心编制的《大学物理实验报告册》。

三、物理实验报告

(一) 实验报告组成

物理实验报告通常分 3 个部分：

1. 实验预习报告

预习报告在实验课前写好，内容包括：

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理摘要。在理解的基础上，用简短的文字扼要阐述实验原理，切忌照抄。力求图文并茂，图是指原理图、电路图或光路图。写出实验所用的主要公式，说明各物理量的意义和单位，以及公式的适用条件等。

(4) 主要仪器设备(型号、规格等)。

(5) 实验内容及注意事项。重点写“做什么，怎么做”，以及实验时应注意的问题。

(6) 列出记录数据的表格。

2. 实验观测记录

观测记录在实验课上完成，内容包括：

(1) 实验仪器。记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯，便于以后必要时对实验进行复查。

(2) 实验环境。有必要时注明室温、大气压等实验条件。

(3) 实验数据。不能只记结果而略去原始数据，记录时要实事求是，绝不可为实验结果而对原始数据作随心所欲的修改！

3. 实验数据处理

数据处理一般在实验课后进行，内容包括：

(1) 根据实验要求，采用合适的方法进行数据处理和误差分析，最后按标准形式写出测量结果(最佳估计值、不确定度和单位)。

(2) 对实验中出现的问题进行说明和讨论，以及实验心得或建议等。

(3) 完成教师指定的思考题。

下边给出一个实验报告范例，供学生参考。

(二) 实验报告范例

【实验名称】 长度测量

【实验目的】

(1) 掌握游标卡尺、螺旋测微计的原理和使用方法。

(2) 了解读数显微镜测长度的原理，并学会使用。

(3) 巩固测量误差、不确定度和有效数字等知识，学习数据记录、处理及测量结果表示的方法。

【实验原理】**1. 游标卡尺**

游标卡尺是由主尺和附加在主尺上一段能滑动的游标(副尺)构成的。它可将主尺估计的那位数较准确地读出来,其特点是游标上 N 个分格的长度与主尺上 $(N-1)$ 个分格的长度相等,利用主尺上最小分度值 a 与游标上最小分度值 b 之差来提高测量精度。

因为

$$Nb = (N-1)a$$

所以

$$a - b = \frac{1}{N}a$$

a 往往为 1mm , N 越大,则 $(a-b)$ 越小,游标精度越高。 $(a-b)$ 称为游标最小读数或精度。例如 50 分度 ($N=50$) 的游标卡尺,其精度为 $1/50=0.02\text{mm}$ 。这也是游标卡尺的示值误差。

读数时,根据游标“0”线所对主尺的位置,可在主尺上读出毫米位的准确数,毫米以下的尾数由游标读出。

2. 螺旋测微计

螺旋测微计(又名千分尺)主要由一根精密的测微螺杆、螺母套管和微分筒构成,是利用螺旋推进原理而设计的。螺母套管的螺距一般为 0.5mm ,当微分筒相对于螺母套管转一周时,测微螺杆就向前进或向后退 0.5mm 。若在微分筒的圆周上均分 50 格,则微分筒每旋转一格,测微螺杆进、退 $0.5/50=0.01\text{mm}$,主尺上读数变化 0.01mm 。可见,螺旋测微计的最小分度值为 0.01mm ,再下一位还可以再做估计,因而能读到千分之一位。螺旋测微计的示值误差为 0.004mm 。

读数时,先在螺母套管的标尺上读出 0.5mm 以上的读数,再由微分筒圆周上与螺母套管横线对齐的位置读出不足 0.5mm 的整刻度数值和毫米千分位的估计数字,三者之和即为被测物之长度。

3. 读数显微镜

读数显微镜是将显微镜和螺旋测微计组合起来,作为测量长度的精密仪器。显微镜由目镜和物镜组成,目镜筒中装有十字叉丝,供对准被测物用。把显微镜装置与测微螺杆上的螺母套管相连,旋转测微鼓轮(相当于千分尺的微分筒),即转动测微螺杆,就可以带动显微镜左右移动。常用的读数显微镜测微螺杆螺距为 1mm ,测微鼓轮圆周上刻有 100 分格,则最小分度值为 0.01mm ,读数方法与螺旋测微计相同,其示值误差为 0.015mm 。

【实验仪器】

游标卡尺、螺旋测微计、读数显微镜、待测物体。

【实验内容】**1. 用游标卡尺测量圆环的体积**

(1) 记下游标卡尺的零读数。

(2) 用外量爪测量圆环的外径 D_1 、高 H ,用内量爪测内径 D_2 ,在不同位置测量 5 次。测量时注意保护游标卡尺的量爪。

(3) 求圆环的体积和不确定度。

2. 用螺旋测微计测量小球的体积

- (1) 记下螺旋测微计的零读数。
- (2) 在不同位置测量小球直径 5 次。测量时注意保护螺旋测微计的测砧与测杆。
- (3) 求小球的体积和不确定度。

3. 用读数显微镜测量毛细管的直径

- (1) 调整显微镜, 对准待测物, 消除视差。
- (2) 在不同位置测量毛细管直径 5 次。测量时, 测微鼓轮应始终在同一方向旋转, 以避免回程差。
- (3) 求毛细管的直径和不确定度。

【数据与结果】

- (1) 用游标卡尺测圆环体积(见表 1-1)

表 1-1 游标卡尺测量数据

仪器: 游标卡尺; 示值误差: $\Delta_{\text{仪}} = 0.02\text{mm}$; 零点误差: $D_0 = 0.00\text{mm}$

次数	项目	外径 D_1/mm	内径 D_2/mm	高 H/mm
1		48.04	34.96	21.88
2		48.06	35.02	21.90
3		47.98	34.98	21.96
4		47.96	34.94	21.94
5		48.00	35.04	21.86

$$\bar{D}_1 = 48.008\text{mm}$$

$$S_{D_1} = \sqrt{\frac{\sum (D_{1i} - \bar{D}_1)^2}{5 - 1}} = 0.041\text{mm}$$

$$\Delta_{D_1} = \sqrt{S_{D_1}^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} = 0.046 \approx 0.05\text{mm}$$

所以

$$D_1 = (48.01 \pm 0.05)\text{mm}$$

同理可得

$$D_2 = (34.96 \pm 0.05)\text{mm}$$

$$H = (21.91 \pm 0.05)\text{mm}$$

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4}(\bar{D}_1^2 - \bar{D}_2^2)\bar{H} = 18\,575.179\text{mm}^3$$

$$\Delta_V = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\bar{H}\bar{D}_1\Delta_{D_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{2}\bar{H}\bar{D}_2\Delta_{D_2}\right)^2 + \left[\frac{\pi}{4}(\bar{D}_1^2 - \bar{D}_2^2)\Delta_H\right]^2}$$

$$= 88.494\text{mm}^3 \approx 0.009 \times 10^4\text{mm}^3$$

$$V = (1.858 \pm 0.009) \times 10^4\text{mm}^3$$

- (2) 用千分尺测小球直径(略)

- (3) 用读数显微镜测毛细管直径(见表 1-2)

表 1-2 读数显微镜测量数据

仪器：读数显微镜；示值误差： $\Delta_{\text{仪}} = 0.015\text{mm}$

项目 \ 次数	1	2	3	4	5
D_2/mm	27.373	27.237	27.389	27.270	27.384
D_1/mm	27.270	27.377	27.284	27.388	27.288
$D = D_2 - D_1 /\text{mm}$	0.103	0.104	0.105	0.108	0.104

$$\bar{D} = 0.1048\text{mm}$$

$$S_D = 0.0017\text{mm}$$

$$\Delta_D = \sqrt{S_D^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \approx 0.015\text{mm} (\text{因为 } \Delta_{\text{仪}} \approx 10S_D)$$

$$D = (0.105 \pm 0.015)\text{mm}$$

【分析与讨论】

(1) 测定圆环体积时，分别测了外径 D_1 、内径 D_2 和高 H ，利用公式

$$V = \frac{1}{4}\pi H(D_1^2 - D_2^2)$$

求得体积。这一公式虽然简单，但求不确定度时却较繁琐。若作如下变换：

$$V = \frac{1}{4}\pi H(D_1 + D_2)(D_1 - D_2) = \pi H \frac{D_1 + D_2}{2} \cdot \frac{D_1 - D_2}{2} = \pi HQP$$

式中， P 、 Q 如图 1-1 所示。

这时有

$$\frac{\Delta_V}{V} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_P}{P}\right)^2}$$

这样，求 Δ_V 就简单多了。

本方法的缺点是用游标卡尺不易测准 Q 值，可以采用多次测量来减小测量的随机误差分量。

(2) 圆环、钢球直径的多次测量结果表明偶然误差比较大，可能是被测物件形状不理想所致，比如球不圆等。在这种情况下，只有从不同方位多次测量取平均值才能得到接近真值的体积测量值。

(3) 用统计方法求得偶然误差分量 S_D ，它同仪器的误差是相互独立的，在求总不确定度时，用方和根合成。如果其中一个远比另一个小时（如 $S_D < \frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$ ），根据微小误差原理，小误差的影响可以忽略不计，在求总不确定度时可以简化计算。

(4) 用读数显微镜测量毛细管直径 D ，测量结果的相对不确定度 $E_r = \frac{\Delta_D}{D} \times 100\% = 14\%$ 。检查测量过程无误，这说明用精度为 0.01mm 、示值误差为 0.015mm 的读数显微镜测量如此微小的长度，显然不太合适。建议用更加精密的仪器或其他方法来测量。

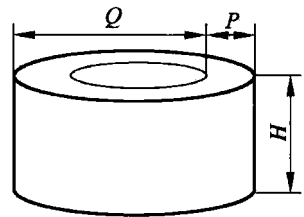


图 1-1 圆环体积的测量

四、物理实验室规则

- (1) 按规定时间上课,如因故不能到课,必须在课前向教师请假,经准许后方可安排补做实验。
- (2) 每次实验前必须认真预习实验并写出预习报告,否则不得进行本次实验。
- (3) 进入实验室后,应在指定位置实验,不得随意动用他组及与本实验无关的其他仪器设备。
- (4) 严禁在实验室内高声喧哗、吸烟、随地吐痰、吃零食和乱涂乱画等。
- (5) 听从教师指导,严格遵守仪器设备操作规程,要以实事求是的科学态度进行实验,认真观察实验现象,如实记录实测数据。
- (6) 实验过程要时时注意安全,如发生仪器设备故障,要立即切断电源等,并报告教师及时处理。
- (7) 爱护仪器设备和实验室设施,节约用水、用电和实验材料等,严禁私自将公物拿出实验室。
- (8) 实验完毕后,应及时切断水、电及气源,将仪器设备整理还原,对实验场地进行清扫,经教师检查后,方可离开实验室。
- (9) 认真、独立地完成实验报告,按时送交教师批阅。
- (10) 因不遵守操作规程而造成仪器设备损坏的,将要求写出书面检查,并按学校有关规定酌情赔偿经济损失。

测量误差与数据处理基础

物理实验的任务,不仅仅是定性地观察物理现象,也需要对物理量进行定量测量,并找出各物理量之间的内在联系。

由于测量仪器的精度限制、测量方法的不完善、测量环境的不理想及测量人员的实验技能等诸多因素的影响,所有测量都只能做到相对精确。随着科学技术的不断发展,测量误差被控制得越来越小,但是绝对不可能使误差降为零。因此,作为一个测量结果,不仅应该给出被测对象的量值和单位,而且还必须对量值的可靠性作出评价。一个没有误差评定(不确定度计算)的测量结果是没有价值的。

测量误差、有效数字、不确定度和常用数据处理方法等实验基本知识,不仅在每一个实验中要用到,而且也是学生以后从事科学实验必须掌握的。然而,这部分内容涉及面较广,深入的学习需要较多的数学知识和丰富的实践经验,因此不能指望通过几节课的学习就完全掌握它,要结合一个个具体的实验再仔细阅读有关内容,通过实际运用,逐步加以掌握。

一、测量与误差

(一) 测量

所谓**测量**,就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较,确定它是标准量的多少倍。这个标准量称为该物理量的**单位**,这个倍数称为待测量的**数值**。可见,一个**物理量必须由数值和单位组成,两者缺一不可**。

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、秒表和天平等,都有符合一定标准的单位和与单位成倍数的标度。

本书采用通用的国际单位制(SI)。

(二) 测量分类

根据获得测量结果的方法是否直接,测量可分为**直接测量**和**间接测量**。

由仪器或量具直接与待测量进行比较读数,称为**直接测量**。如用米尺测量物体的长度,用电流表测量电流强度等。

在大多数情况下,需要借助一定函数关系由直接测量量计算出所要求的物理量,这样的测量称为**间接测量**。如钢球的体积 V 可由直接测得的直径 D ,用公式 $V = \frac{1}{6} \pi D^3$ 计算得到, D 为直接测量量, V 为间接测量量。在误差分析和估算中,要注意直接测量量与间接测量量的区别。另外,这种测量的分类是相对的,随着测量技术的提高,一些间接测量量也可以通

过直接测量得到。如密度的测量,如果通过测量物体的体积和质量求得密度,则密度便是间接测量量;如用密度计测量物体的密度,那么,密度就是直接测量量。

对重复的多次测量,可分为等精度测量和不等精度测量。

如对某一待测物进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一测量者、同一套仪器、同一种实验方法和同一实验环境等),那么就没有理由可以判定某一次测量比另一次测量更准确,对每次测量的精度只能认为是具有相同精度级别的,我们把这样的重复测量称为等精度测量。在诸测量条件中,只要有一个条件发生了变化,这时所进行的重复测量,就难以保证各次测量精度一样,我们称这样的测量为不等精度测量。

一般在进行重复测量时,要尽量保持为等精度测量。

(三) 测量误差

物理量在客观上存在确定的数值,称为真值。然而,实际测量时,由于受实验条件、实验方法、仪器精度和实验人员操作水平等的限制,使得测量值与客观存在的真值之间总有一定的差异。为描述测量中这种客观存在的差异性,我们引进测量误差的概念。

误差就是测量值与客观真值之差,即:误差=测量值-真值。

真值是一个理想概念,一般来说,真值是不知道的。为了对测量结果的误差进行估算,一般用约定真值来代替真值求误差。所谓约定真值就是被认为是非常接近真值的值,它们之间的差别可以忽略不计。一般情况下,常把多次测量结果的算术平均值、公认值、理论值、标称值、校准值和相对真值等作为约定真值来使用。

上面定义的误差称为绝对误差。设测量值的真值为 X ,则测量值 x 的绝对误差为

$$\delta = x - X \quad (2-1)$$

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。例如,用同一仪器测量长 10m 相差 1mm 与测量长 100m 相差 1mm,其绝对误差相同,但显然后者的测量要好些。因此为了比较不同测量结果的优劣,必须引入相对误差的概念。相对误差是绝对误差与真值之比,常用百分数表示,即

$$E = \frac{|\delta|}{X} \times 100\% \quad (2-2)$$

在测量过程中,我们要建立起误差永远伴随其中的实验思想。

(四) 误差分类及其处理方法

按误差产生的原因和性质的不同,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一物理量时,误差值的大小和正负总保持不变,或按一定的规律变化,这类误差称为系统误差。系统误差具有确定性的特征。

系统误差有多种来源,从基础物理实验教学角度出发,系统误差主要分为以下几类。

(1) 仪器的示值误差

例如,1mm 刻度尺示值不准,假定它的各个毫米刻度都偏小,则用它所测出的物体长度将都偏大,给测量带来系统误差。

(2) 仪器的零值误差

例如,电表的指针在测量前不指在零位,就会产生零值误差。所以在使用电表前,应先检

查指针是否指零,否则必须旋动零位调节器使指针指零。又如,在使用螺旋测微计测长度之前,也要先检查零位,并记下零读数(即零值误差),以便对测量值进行修正。

(3) 仪器机构误差和测量附件误差

前者由于诸如等臂天平的两个臂事实上不完全相等,或者惠斯通电桥两个比例臂示值虽然相等但实际上不相等等原因所致,这类误差可用交换测量法来消除;后者如电学线路中由开关、导线等附加电阻所引入的误差,这类误差可用替代法来消除。

(4) 理论和方法误差

由于实验方法不完善,所引用的理论与实验条件不相符等产生的误差。如在空气中称量质量而没有考虑空气浮力的影响;用单摆测定重力加速度,其测量所依据的理论 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 本身是一个近似公式。

(5) 按一定规律(指非统计规律)变化的误差

例如,在干电池供电电路中,可分别测出两串联电阻电压 U_1 、 U_2 ,并由 U_1/U_2 求得此两电阻之比。但由于干电池在工作时,其电动势随时间均匀地略有下降,依次测定 U_1 、 U_2 时的电路电流有些不同,因而产生有规律性的误差。要消除这一误差,可采用相同时间间隔依次测定 U_1 、 U_2 和 U_1' (即再测一次 U_1 的值),将 U_1 的平均值与 U_2 相比即可。再如实验八中,角度的测量存在周期性的误差,此误差可通过对称设置双读数游标来解决。

从上述的介绍可知,我们不能依靠在相同条件下多次重复测量来发现系统误差的存在,也不能借此来消除它。

原则上,系统误差均应予以消除或修正,但它的发现和估计是一件较复杂而困难的工作,不仅涉及许多实验知识、技能,还需要实验者具有丰富的实验经验和判断能力。处理系统误差的通常做法是:首先对实验依据的原理、方法、测量过程和所用仪器等可能引起误差的因素一一进行分析,查出系统误差源;其次通过改进实验方法和实验装置,以及校准仪器等方法对系统误差加以补偿、抵消;最后在数据处理中对测量结果进行一些必要的修正,以消除或尽可能减小系统误差对实验结果的影响。

在本课程中,我们把处理系统误差的思想和方法结合到每个实验中进行讨论。比如在长度测量实验中对零值误差进行修正;在牛顿环实验中,用逐差法消除中心难以确定和因附加光程差而引起的系统误差等等。希望学生们重视对系统误差的学习,并在实践中不断总结提高。

2. 随机误差(偶然误差)

在相同条件下多次测量同一物理量时,即使已精心排除了系统误差的影响,也会发现每次测量结果不一样,其误差时大时小、时正时负,在测量次数少时,显得毫无规律,但当测量次数足够多时,却服从一定的统计规律,这种误差称为随机误差。随机误差具有偶然性的特征。

随机误差是实验中各种因素的微小变动性引起的。例如实验周围环境或操作条件的微小波动、测量对象的自身涨落、测量仪器指示数值的变动性、观测者在判断和估计读数上的变动性……,这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化,这个变化量就是各次测量的随机误差。