

GAO DENG

高等
师专
教材

主编 吴正怀

普通物理实验 指导

SHI
ZHUAN
JIAOCAI

出版说明

1986年,我社受国家教委有关部门的委托,根据国家教委师范司制订的《二年制师范专科学校八个专业教学计划》的要求,与全国各省、市、自治区教委合作,共同组织编写了全国高等师范专科学校教材20余种;并与华东六省教委密切协作,编写了能反映华东地区师专教学和科研水平的、适应经济建设较为发达地区的师专教学需要的教材40余种,师专第一次拥有了比较符合自己培养规格、规律和教学要求而自成系统的教材。实践证明,师专教材建设对于提高师专教学水平,保证师专教学质量起到了重要作用。

近几年来,在邓小平同志建设有中国特色社会主义理论的指引下,我国的教育事业取得了很大发展。国家教委根据《中国教育改革发展纲要》的要求,针对高等师范专科学校的教育特点,颁发了《高等师范专科学校二、三年制教学方案》,进一步明确了高等师范教育面向21世纪的发展目标和战略任务,以及教学内容和教学结构的改革要求。

自出版第一本师专教材以来,我社多年来分阶段地对师专教材的使用情况进行了跟踪分析,又于1995年开展了较为系统的全面调查。调查中,教师普遍反映,现有师专教材尚不同程度存在着与当前师专教学实际相脱节的现象;对各学科中的新发现、新理论、新成果,未能加以必要的反映,已跟不上当前社会、经济、科技等发展的新形势。考虑到师专从二年制向三年制发展的现状和趋势,我社于1996年初与华东六省教委有关部门一起,邀集全国48所师专代表专门研讨了师专教材建设问题,随即开展了部分教材的修订和新编工作。

1996/06

师专教材建设并不是一个孤立的系统,它必须服务于师范教育的总体规划。它已经历了从“无”到“有”的过程,并将逐步实现从“有”到“优”的目标。我们相信,通过各方面的努力,修订和新编的师专教材将充分体现基础与能力相结合,理论与实践相结合,当前与未来相结合的特色,日臻完善和成熟。

这次编写和修订工作得到了华东六省教委的大力支持,我们谨在此深表谢忱,并向为师专教材建设付出辛勤劳动的各地师专领导和所有参加编写、修订和审稿的专家、学者等致以衷心的感谢。

华东师范大学出版社

1997年3月

前 言

本书根据 1995 年《高等师范专科教育二、三年制教学方案》的精神,为师专非物理专业“普通物理实验”课程而编写,内容着重普通物理实验基础知识的介绍和基本实验技能的训练。

全书分三个部分,共五章。第一部分为基础实验知识,分为两章。第一章主要讨论实验测量误差的意义和实验数据处理过程;第二章则简要介绍了一些常用的仪器。第二部分为基础性实验,由十五个基础实验组成,完整地叙述各基础实验的原理和实验过程,让学生能通过较少的实验课时,得到规范的实验训练。各实验尽可能相对独立,教学中可根据不同专业的要求选做其中部分实验。例如化学专业在“物化实验”等后续实验课程中,将会应用到电位差计、分光计、示波器等物理实验仪器,可选取本书中的有关实验进行训练;数学专业则可偏重力学、电学方面的实验,加强基础训练。第三部分为设计性实验部分,其中第四章有两方面内容,“物理实验基本方法”总结、归纳了基础实验中学习的各种实验测量方法,“实验方案的设计”则为设计性实验训练介绍实验方案的构思和设计过程。第五章为设计性实验训练。开设设计性实验有助于培养学生运用所学实验知识独立进行实际实验工作的能力。在中学实际教学工作中,还常需自制教具、改装仪器设备,我们在设计性实验中亦安排了一些这方面的实验内容。

本书编写分工为:张明玉编写第三章实验三、四、五、七和第五章实验二,周淮玲编写第三章实验六、八、九、十和第五章实验三,金秀慧编写第三章实验十一、十二、十三、十四、十五,其余均由

吴正怀编写。华东师范大学马葭生教授审定全书,滁州师专物理系有关教师和实验室工作人员在本书拟定编写内容时提出了宝贵意见。

在编写时,我们力图根据教学体会,尽可能做到选题典型,要求恰当,适用各专业。但由于我们水平有限,书中一定存在错误和不恰当之处,恳请使用本书的同志提出宝贵意见。

编者

目 录

前言	1
绪论	1
第一章 测量误差与实验数据处理的基础知识	4
§ 1.1 测量与误差的基本概念	4
§ 1.2 误差的估算和测量结果的表示	8
§ 1.3 有效数字	17
§ 1.4 数据列表与作图法	22
第二章 常用仪器介绍	29
第三章 基础物理实验的训练	43
实验一 力学基本物理量的测量	43
实验二 金属丝杨氏弹性模量的测量(伸长法)	48
实验三 用气垫技术验证牛顿第二定律	54
实验四 固体比热容的测量	61
实验五 空气比热容比的测定	66
实验六 万用电表的使用	70
实验七 模拟静电场	78
实验八 用电位差计测电池电动势和电阻	85
实验九 用惠斯登电桥测电阻	93
实验十 示波器的使用	98
实验十一 光路调整和薄透镜焦距的测量	104
实验十二 分光计的调节和使用	113
实验十三 牛顿环测透镜的曲率半径	122
实验十四 衍射光栅实验	127
实验十五 摄谱仪的认识和光谱观察	132
第四章 物理实验的基本方法和实验方案的设计	138
第五章 设计性实验训练	146
实验一 部分设计要求实验练习	146

实验二 简易恒温控制器	148
实验三 多量程电表	152
附表	158

绪 论

物理实验课的意义

科学实验是人们认识自然的重要实践活动。历史上自然科学的重大突破,生产技术的重大革新,当今科学技术的迅速发展,科学实验都起了重要作用。

物理学是一门实验性很强的学科。物理学新概念的确定和新规律的发现,都依赖于反复实验。物理实验在物理学的发展中,更显著地具有重要的地位。随着物理学的发展,人们积累了丰富的实验方法和实验技术,创造出各种精密巧妙的仪器设备,物理实验的思想、方法和实验技术已被广泛地应用到各自然科学领域和技术部门。在高等学校中,普通物理实验是各类理工类专业学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程。

随着科学技术的迅速发展,对从事教育事业者的素质提出了更高的要求。通过基本的物理实验技能训练,将为我们将来从事教学工作,组织学生科技活动,培养学生的实践能力,以及应用越来越先进的教学设备等方面,奠定良好的实验基础。

物理实验课程的教学特点

实验课程教学是理论与实践相结合的教学过程。在实验教学中更注意培养我们的实践能力,包括运用所学理论知识指导实验,分析实验现象,解决实际问题的思维和分析能力;正确使用仪器,安装、调试实验装置,正确进行实验操作的动手实验能力;处理实验测量数据,分析实验结果,得出正确的结论,撰写实验报告的科学实验总结能力。

实验果是在教师指导下的学习环节,但学生在实验课堂上将

有较大的独立性。学生应注意发挥自己的能动性,以投身科学实验的态度积极探索,掌握实验技能,培养独立实验能力和创造性思维的能力。

物理实验是在实验室条件下,人为地、典型地再现自然界的物理现象来探索客观的物理规律。这就要求严格遵守实验室规则,以严肃认真、实事求是的科学态度从事实验,并逐步培养良好的实验习惯。

物理实验过程

实验过程通常包括三个实验环节:(1)实验前的预习;(2)实验操作;(3)实验后报告的书写。

实验预习以理解原理为主,通过阅读教材和有关资料,搞清实验内容是什么?依据什么理论知识?采用什么方法?并摘要地记下实验依据的主要公式、电路图、光路图,需要测量的物理量,设计好实验数据记录表格,写成预习报告。实验是一种有目的的实践活动,实验预习则是我们在实验中能够有目的地观察和深入理解实验现象,有意识地训练实验技巧的重要环节。

实验操作过程一般包括安装实验装置,调整仪器进入正常使用状态;进行实验测试,观察和分析实验现象,记录测量数据;实验完成后拆除实验装置,整理仪器,清理现场。未调整好仪器不能急于进行测量,否则往往会导致实验失败。进行实验测量时,必须注意仔细观察和分析实验现象,如实记录数据。当怀疑有些数据有误的时候,可进行重测。错误数据可删去,但不要擦掉或涂掉,可供分析出现错误的原因,有时可能并非错误,而是有新的发现而成为有价值的实验数据。实验完毕,应将实验记录经教师检查签字认可后再拆除实验装置。实验操作过程是培养实际动手能力和科学实验作风的重要环节,应精心进行实验操作,并注意严格遵照必要的规范程序和注意事项,例如联结电路后须经教师检查确认无误,方可接通电源。

实验报告内容一般包括：

实验名称、实验环境的记录。如实验日期、天气情况、实验桌编号和合作者姓名等。

实验目的。一般与教材中的提法一致。

实验原理。在对原理理解的基础上，用自己的语言简要叙述，画出必要的实验装置示意图、电路图、光路图，列出测量和计算所依据的公式，注明公式中各量的物理意义和公式适用条件。

实验步骤。写出实际实验中的关键步骤，实验方法、技巧。

数据记录与处理。准确如实记录实验测量数据，注明主要仪器的规格、型号。写出数据处理的主要过程、图线、误差分析等，最后清楚地写出实验结论。

讨论。内容不限，可以是对实验中观察到的现象、实验方案、实验结果和误差原因等问题进行讨论，也可以是实验中的收获、体会，还可解答思考题。

实验报告有一定规范要求，但形式并不完全限定，应力求字迹清楚，图表规范，语言简炼，叙述清楚，数据处理过程完整，实验结果表示正确，讨论问题反映自己的实验体会。总之，应尽量将实验报告作成一份简单的科学研究报告，使别人能够看出你的工作情况和结果、收获。

第一章 测量误差与实验数据处理 的基础知识

物理实验常要通过定量测量有关物理量以及它们之间的数量关系去认识自然现象的本质,探索自然界的客观规律。实际的实验测量总存在误差,本章将介绍测量数据的误差分析和数据处理的基础知识,以便在实验测量中能正确地写出实验测量结果,科学地评价实验结果的可靠程度。

§ 1.1 测量与误差的基本概念

测量及其分类

测量是通过被测量与仪器进行比较来确定被测量量值的实验过程。测量分直接测量和间接测量。

直接测量是将被测量直接与仪器比较,并能直接从仪器上读出测量值的测量过程。相应的物理量称为直接测量量。例如用米尺测量物体的长度,用电流表测量电路中的电流强度。

间接测量是指由一个或几个直接测量量经已知函数关系计算出被测量大小的测量过程。相应的物理量称为间接测量量。例如通过测量球体的直径而计算出其体积,伏安法测电阻时通过测量电阻上的电压和电流强度来计算其电阻值。

实验中的测量多数为间接测量,而直接测量则是一切测量的基础。

测量误差

在一定条件下,某物理量客观存在的量值称为真值。

在实际测量中,由于实验理论的近似性,测量仪器准确度的限制,实验条件不可能完全理想化以及观测者操作和读数不可能绝对准确等原因,测量结果不可能绝对正确,只能是真值的近似值。测量值 x 与真值 a 之间的差异称为误差 ϵ ,即

$$\epsilon = x - a. \quad (1.1)$$

真值无法精确得到,误差是不可能完全避免的,也是不能完全确定的。在实际测量中,存在一定的误差也是允许的,过高地要求减小误差必然增加选择测量仪器和进行测量工作的难度。研究误差理论的目的就在于:

(1) 分析测量实验中的误差估计,评定测量结果接近真值的可靠程度,即给出被测量的真值在某个量值范围内的估计。

(2) 根据实际测量对误差的要求,确定或改进实验方法和实验仪器,在最有利的条件下,获得符合要求的测量结果。

按照测量误差的性质和产生的原因,误差可分为两大类:系统误差和随机误差。

系统误差

在实验测量中,由于某些确定的不合理因素的影响而产生的那一部分误差,总是具有确定的大小和符号,这类误差称为系统误差。若寻找到产生系统误差的原因和规律,可采取措施消除或抵消系统误差,或修正测量数据以减小系统误差。下面介绍常见的系统误差及其修正方法。

(1) 仪器误差,又称工具误差。这是由于实验仪器或测量工具的不完善或缺陷所造成的。可用标准仪器来校验和调节,也可考虑其它修正方法,如游标卡尺、螺旋测微计的零位读数不为零时,可引进修正值修正测量数据;用复称法修正天平不等臂所带来的误差;互易电桥两比例臂重复测量以抵消系统误差等。

(2) 调整误差或装置误差。这是由于某些仪器的调整或实验装置的安装不恰当,未达到原设计要求而造成的。为减小调整误差,实验者应养成良好的实验习惯,注意仪器使用要求,严格按照操作规程将仪器装置调整到最佳使用状态再进行测量。例如注意电表的调零以避免出现零值误差;天平使用时应首先调整到水平状态;消除测微目镜、望远镜的视差;光学系统的等高共轴调节等。

(3) 环境误差。这是由于测量时所处的周围环境,比如温度、气压、电磁场等与设计要求的标准状态不一致而引起的。实验测量中应尽可能排除引起误差的环境因素,在无法排除时,可采用某些方法进行补偿或估计误差数值加以修正。如混合量热法测物质比热容实验中进行散热修正。

(4) 理论误差或方法误差。这是由于测量所依据的理论公式本身的近似性或者对测量方法考虑不周造成的。实验中应注意尽可能满足所依据理论公式的近似条件,如单摆实验所依据的公式

$$T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{l}{g}}$$
,要求摆角小于 5° 。否则,可通过理论分析改进实验方法或确定修正值。如伏安法测电阻可根据电表的内阻影响大小考虑内接法还是外接法,也可根据电表的内阻值进行电路计算,得出所测电阻值的实际大小。

(5) 人身误差。这是由于测量者生理因素和个人偏向产生的。例如读仪表指针所指读数时,有人总是偏左或偏右。

我们还可以通过对比实验发现可能存在的系统误差的产生原因和大小,通过分析测得的数据发现是否存在可能的系统误差。总之,系统误差的出现虽然一般都有确定的原因,但发现和消除系统误差却没有固定的方法和规律,需要我们不断地丰富实验知识,在实践中积累经验,增强处理这类问题的能力。

随机误差

在实验中即使消除了产生一切系统误差的因素,在一定条件

下多次测量同一物理量时,各次测量值一般仍不完全相同,出现绝对值和符号随机变化的误差,称为随机误差。随机误差是由于许多不可预测的偶然因素造成的,如温度的微小变化,电源电压的随机变动,振动的影响等都会使测量仪器性能和实验过程中的物理现象发生随机的变化。操作者的操作动作和感官感觉也会有无规律的微小变化。这些偶然因素是随机的,使得测量的误差有时大,有时小,有时正,有时负,但当测量次数足够多时,出现的随机误差显示明显的统计规律,常服从或大体服从正态分布(高斯分布),如图 1.1。

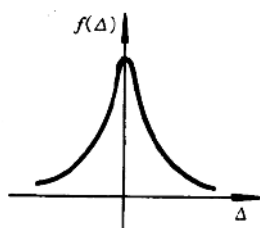


图 1.1

服从正态分布的随机误差有如下的分布特性:

- (1) 对称性。绝对值相同的正负误差出现的机会相近。
- (2) 单峰性。出现绝对值小的误差的机会比出现绝对值大的误差的机会多。
- (3) 有界性。在一定条件下,误差的绝对值不超过一定的限度。
- (4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋近于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = 0. \quad (1.2)$$

由于随机误差的抵偿性,我们可以通过增加测量次数来减小测量结果的随机误差。后面有关误差估计的讨论主要是关于随机误差的处理。

除系统误差和随机误差外,还有可能出现由于实验操作或记录数据的差错造成的粗差,将含有粗差的测量值称为坏值或异常值。实验测量中应尽量避免出现粗差,在数据处理时应进行检查并剔除异常值。

精密度、准确度、精确度

重复测量某一物理量所得的一组数据彼此接近,随机误差小,则称测量的精密度高。若测量数据的平均值接近真值,系统误差小,则称测量的准确度高。若测量数据比较集中在真值附近,系统误差和随机误差都比较小,则称测量的精确度高。

仪器性能的好坏常用精密度和准确度来衡量。仪器的精密度简称精度,指仪器的最小分度值。仪器的准确度是指正确使用质量合格的仪器测量时所能达到的最小误差范围。一般来说,仪器准确不到最小分度,准确度要大于精度。有的仪器上标出准确度级别,这是依照一定的计量标准通过鉴定给出的。

仪器误差

不考虑其它因素,正确使用测量仪器时仪器的示值与被测量真值之间可能产生的最大误差限称为仪器误差,记为 $\Delta_{\text{仪}}$ 。仪器误差包含系统误差和随机误差两部分。由仪器的准确度级别可以确定仪器误差,例如电表的仪器误差(参见第二章)。如果仪器误差没有明确给出,可取仪器的最小分度值。

§ 1.2 误差的估算和测量结果的表示

对随机误差进行估算的方法有多种。科学实验中常用标准偏差的估算方法,我们这里主要介绍其基本知识和处理步骤。

直接测量误差的估算和测量结果的表示

1. 算术平均值是真值的最佳估算值

在相同的测量条件下,对某一物理量进行 n 次测量得到的数据为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 称为测量列。各次测量的误差为

$$\epsilon_i = x_i - a。$$

对 ϵ_i 求和

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i = \sum_{i=1}^n (x_i - a) = \sum_{i=1}^n x_i - na,$$

即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i + a。$$

按随机误差的抵偿性,当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \rightarrow 0,$$

因此

$$\bar{x} \rightarrow a。$$

这表明,当测量次数足够多时,算术平均值接近真值。在进行有限次测量时,算术平均值则是真值的最佳估计值。

2. 测量列的标准偏差

测量列的标准误差定义为

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \dots + \epsilon_n^2}{n}} \\ &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n}}。 \end{aligned} \quad (1.3)$$

由于真值未知,各次测量的误差 ϵ_i 无法确定,实际计算中用标准偏差作为标准误差的估计值,测量的标准偏差定义为(白塞尔公式)

$$\begin{aligned}\sigma_i &= \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}.\end{aligned}\quad (1.4)$$

式中 $v_i = x_i - \bar{x}$, 称为残差。

3. 算术平均值的标准偏差

由于算术平均值比单次测量值更可靠, 算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ (也常用 σ_x 表示) 应小于 σ_i , 计算公式为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \quad (1.5)$$

4. 标准偏差的物理意义

随机误差对每次测量是不确定的, 但在多次测量中随机误差呈现出一定的统计规律, 各次测量误差落在一定区间范围内的可能性具有一定的统计概率。据统计理论计算, 在相同测量条件下, 重复测量某一物理量的次数足够多时, 测量列的标准偏差趋于一个稳定的值 σ_i , $\pm\sigma_i$ 值分别对应图 1.1 中误差分布曲线的两个拐点, 各次测量误差将有 68.3% 的概率落在 $(-\sigma_i, \sigma_i)$ 的区间范围内。因此, 测量列的标准偏差并不表示各次测量的误差就是 $-\sigma_i \sim \sigma_i$ 中的某一个值, 而是表示其绝对值将有 31.7% 的概率大于 σ_i 。如果一组测量值比较分散, 则误差变动较大, 误差分布曲线比较平坦, 对应的标准误差也较大。因此, 测量列的标准偏差的大小反映测量数据的离散程度。

在相同条件下, 有限次测量的平均值 $\bar{x}$ 也是一个随机变量。由统计理论计算, 在消除系统误差的条件下, 当测量次数足够多时, 算术平均值的随机误差在 $(-\sigma_{\bar{x}}, \sigma_{\bar{x}})$ 区间范围内的概率为