

责任编辑 余健波
封面设计 刘依群

ISBN 7-81035-824-3



9 787810 358248 >

定价:19.80 元

大学物理实验教程

主 编 吴乃爵

主 审 潘人培 陈守川

编 委 (按姓氏笔划为序)

何安华 宗春迎 姚桂瑞

顾伟珠 董忠泽 楼 枚

杭州大学出版社

内 容 提 要

本书从一般工科院校的实际出发,以高等工业学校物理实验课程教学基本要求为纲,由杭州地区物理实验教学协作组编撰而成,它凝聚了杭州地区有关院校十五年教改的经验与成果。

作为一门新兴的独立课程,其体系亟待完善,本书是一种尝试。全书共分七篇:误差与数据处理、基本实验方法和测量方法、物理实验的通用仪器、基本实验、综合及中级物理实验、设计性实验及计算机应用。前两篇是理论基础,四、五、六篇是具体实验内容(它包含 38 个课题共 46 个实验),最后一篇为计算机辅助教学提供了部分程序及通用作图软件。

鉴于一般工科院校专业及层次较多,故在实验的选题及内容安排上铺陈面较广。有些课题中安排了不同的实验方法,有的实验中含提高的要求,以便于选择。

本书可作为各类地方工科院校各专业的物理实验教科书,亦适用于业余大学、函授大学、夜大、电视大学及职工大学。

大学物理实验教程

杭州应用工程技术学院、中国计量学院、杭州电子工学院 合编
浙江丝绸工学院、杭州商学院、浙江工业大学

*

杭州大学出版社出版、发行

(杭州天目山路 34 号)

*

浙江工业大学印刷厂电脑排版 衢州市人民印刷厂印刷

850×1168 mm 1/32 16.5 印张 420 千字

1996 年 8 月第 1 版 1996 年 8 月第 1 次印刷

印数:0001—8600

书号:ISBN 7-81035-824-3/O·055

定价:19.80 元

前 言

谨以此书献给我们的同行——那些长期默默无闻地辛勤耕耘的基础课的园丁们。他们周而复始地承担着繁重的基础课教学,没有前沿学科的辉煌,亦没有卓著的成果与建树,却年复一年地在高教的园地里施着“底肥”。

实验教学是项集体性很强的工作,它凝聚着实验室全体教职员工的劳动。教材也是这样,从一篇篇讲义发展成书,至少经过三代人的努力。改革开放以后,物理实验成为一门独立的课程,发展尤为迅猛,杭州地区高校物理实验协作组织组织编撰了《工科物理实验教程》,在历经五年的教学检验后,应各校的要求与教学的需要重新修订编撰了六校统编教材:《大学物理实验教程》。作为编者,谨以拳拳之心,兢兢业业地讨论、总结、修改,将之编撰成册。

在教材的成书过程中,得到各编委所在院校领导及教研室同仁的关怀与支持。本书由东南大学潘人培、浙江大学陈守川主审,浙江工业大学吴乃爵主编。作者分工如下:

杭州应用技术工程学院姚桂瑞(实验三、五、六、七、三十七、第七篇第二节、第三节),李明(实验八);中国计量学院董忠泽(实验一、九、十、十四、二十一、三十二、三十三、三十五);杭州电子工学院宗春迎(实验二、二十、二十八、三十),郑飞跃(实验二十六),黄曙江(实验三十一);浙江丝绸工学院何安华(第三篇第二章第一节、实验十五、十六、十九、二十二、二十五、三十六),陈晖(实验二十三、三十八)盛建华(实验二十七);杭州商学院顾伟珠(实验十三、十七、十八);浙江工业大学吴乃爵(第一篇、第二篇、实验二十四、二十九、第七篇一、四、五、六节及附录),楼枚(第三篇第一章、

第二章第二节、实验四、十一、十二、三十四)。

实验物理,作为一门独立的课程,虽然已历时十六年,但是,完善其课程体系要走的路还很远,本书作为引玉之砖,错误、疏漏之处敬请广大读者批评指正。

编 者

1996 年 5 月

目 录

第一篇 误差与数据处理

第一章 误差基础知识	(2)
第一节 误差的基本概念	(2)
第二节 系统误差	(6)
第三节 偶然误差	(10)
第四节 直接测量误差的估算	(15)
第五节 间接测量误差的估算	(17)
第二章 有效数字及数据处理	(21)
第一节 有效数字	(21)
第二节 有效数字的简单运算法则	(24)
第三节 数据处理流程图	(25)
第四节 数据处理举例	(25)
第五节 数据处理方法	(27)
练习题	(38)

第二篇 实验方法和测量方法

第一章 物理实验中的基本实验方法	(41)
第一节 换测法	(41)
第二节 静态与动态研究法	(43)
第三节 模拟法	(44)
第四节 干涉法	(45)
第二章 物理实验中的基本测量方法	(47)

第一节	比较法	(47)
第二节	测量宽度展延法	(51)
第三节	线性放大法	(52)
第四节	对称测量法	(53)

第三篇 物理实验的通用仪器

第一章	电磁学实验通用仪器	(60)
第一节	仪器的布置、连接和安全操作	(60)
第二节	电源	(61)
第三节	变阻器与标准电阻	(64)
第四节	直、交流电表	(68)
第五节	检流计(灵敏电流计)	(73)
第六节	常见的电表标记符号、精度等级与读数与误差	(74)
第七节	示波器	(77)
第八节	LZ3 型函数记录仪	(79)
第二章	常用光源及摄影、暗房设备	(85)
第一节	常用光源	(85)
第二节	照相、印相设备	(87)

第四篇 基本实验

实验一	长度测量	(97)
实验二	密度的测量	(112)
实验三	金属丝杨氏弹性模量的测定	(116)
实验四	气轨上的物理实验	(123)
	(含测 v 、 a 、 g 与简谐振动的研究)	
实验五	用冲击摆测定子弹的速率	(138)
实验六	三线悬摆测转动惯量	(143)

实验七	用夸特摆测重力加速度·····	(150)
	(使用停表或微机实时测量)	
实验八	液体表面张力系数的测定·····	(157)
实验九	电表的改装和校准·····	(163)
实验十	万用表的使用·····	(170)
实验十一	伏安特性曲线的测绘·····	(187)
实验十二	直流电桥测电阻·····	(194)
	(含惠斯登电桥测中值电阻、凯尔文电桥测低值电阻)	
实验十三	电位差计及其应用·····	(211)
	(含电源电动势及内阻测定、电阻的测量、校准电表及 热电偶定标)	
实验十四	灵敏电流计研究·····	(230)
实验十五	磁场测量·····	(238)
	(含霍尔效应法及感应法)	
实验十六	模拟静电场·····	(254)
实验十七	电子束的聚焦和偏转·····	(261)
实验十八	示波器的调整和使用·····	(277)
实验十九	声速的测定·····	(301)
实验二十	薄透镜的焦距测量·····	(306)
实验二十一	光的等厚干涉·····	(315)
实验二十二	分光计的调整及应用·····	(323)
	(含棱镜折射率的测定及光栅衍射光谱的测定)	
实验二十三	光的偏振·····	(343)
实验二十四	摄影技术·····	(350)
	(含黑白与彩色摄影)	

第五篇 综合及中级物理实验

实验二十五	迈克尔逊干涉仪·····	(365)
实验二十六	微波实验·····	(375)

实验二十七	全息摄影	(385)
实验二十八	模拟电冰箱制冷系数的测量	(390)
实验二十九	气体导热系数的测定	(398)
实验三十	电子衍射	(410)
实验三十一	晶体的电光效应	(419)
实验三十二	夫兰克 赫兹实验	(436)
实验三十三	光电效应法测定普朗克常数	(446)

第六篇 设计性实验

实验三十四	碰撞实验设计	(459)
实验三十五	简易欧姆表设计	(460)
实验三十六	单缝衍射的光强分布	(462)
实验三十七	光栅衍射法测定光波的波长	(465)
实验三十八	布儒斯特角与玻璃折射率的测量	(470)

第七篇 计算机应用

第一节	计算机辅助教学 示波器的结构与示波器原理演示	(473)
第二节	冲击摆实验数据的微机处理	(488)
第三节	夸特摆实验数据的微机处理	(490)
第四节	一元线性回归	(491)
第五节	气体导热系数测定数据的微机处理	(496)
第六节	APPLE PLOT 绘图软件应用	(498)

附 录

参考文献

误差与数据处理

任何测量和实验都受到误差的影响,估算并分析误差是科学实验过程中极为重要的组成部分。有关误差的理论及其应用已发展成为一门专门的学科。作为进行科学实验基本训练的物理实验课,必须赋予学生正确的、最基本的误差理论知识,它包含误差的成因及其分类、减少测量误差的基本方法,以及误差的估算与测量结果的正确表达。本篇讲的是最基础的误差理论,它为物理实验而写,亦适用于其他实验过程,是一切实验的基础知识。

第一章 误差基础知识

第一节 误差的基本概念

一、研究误差的重要意义

在科学实验中,由于实验仪器、实验方法、实验环境以及人的鉴别能力的局限,实验测得值和客观实际值(真值)不一致,这就是所谓误差。

任何实验结果都不可避免地存在着误差,一个没有标明误差的实验结果几乎没有用,因为人们将对它的可靠性提出质疑,所以,误差是评价测量结果必不可少的数据。

误差的存在,可能歪曲客观规律。如相对论业已指出:光速是宇宙间的最高速度,然而有些科学家经多年观测,却提出了可能存在超光速的“快子”。他们劳而无功的原因,是误差歪曲了事实。可见,在未对误差进行科学分析之前,不能贸然下结论。

历史上不乏由于对误差的分析,成功地检验了科学理论,推动了科学技术的发展的例子。如1916年爱因斯坦据广义相对论预言:光线行进至太阳附近时,其弯曲角度 $\alpha=1.8''$,三年后被实验所证实:在置信度为95%情况下, $\alpha=2.0''\pm 0.3''$ 。又如:雷莱(Rayleigh)分别测量了由大气中分离出的氮和用化学法制取的氮,两者密度相差二万分之一。经误差分析发现,其差异并非测量误差,这导致发现惰性气体。可以说,人类在科学技术“量”方面的研究所取得的一切成就,几乎都与分析误差、变革实验方法以减少

误差及提高测量结果的准确度密切相关。

二、直接测量、间接测量

测量分直接测量和间接测量,可从量具或仪表直接测出某物理量的测量,称为直接测量,如位移量 s 与时间量 t 。而对平均速度 $\bar{v}$ 的测量是通过直接测量的 s 及 t 求出的,故 $\bar{v}$ 的测量被称为间接测量。

任何测量都存在着误差,间接量 $\bar{v}$ 的误差来源于直接量 s 及 t 的误差。所以在研究误差时,必须彻底搞清楚直接量的误差及其估算。

三、绝对误差、相对误差及其表示方法

(一)绝对误差

测得值与其真值之差称为该测得值的绝对误差,并表示为:

$$\Delta x = x - x_0$$

式中 Δx 为绝对误差; x 为测得值; x_0 为被测量真值。

可见对某一测得值而言,绝对误差有方向性(正负)。万勿将绝对误差与误差的绝对值混为一谈。

但表示测量结果时,却一律记为:

$$x \pm \Delta x \quad (1)$$

此时 Δx 反映的是测量结果 x 的绝对误差(不是某一次测得值的绝对误差), $\pm$ 号说明 Δx 是个范围,从而模糊了 Δx 的方向性。亦即对某量 x 进行多次重复测量,其每一次测得值绝对误差 Δx_i 是有方向的,但估算出这一组测量结果的绝对误差 Δx 的大小时,该绝对误差除了表示其范围外,还隐含了真值在此范围内的几率。

表达式(1)的物理内涵为: x 的真值有较大的概率出现在 $(x - \Delta x) \sim (x + \Delta x)$ 区间。如某一长度量经10次重复测量,其算术平均值为4.32mm,其绝对误差在置信度(将在第三节中介绍)为90%

时是 0.04mm,则表示为:

$$l = 4.32 \pm 0.04 \text{mm} (P = 90\%, n = 10)$$

(二) 相对误差

某测量值的绝对误差 Δx 与其真值 x_0 之比的绝对值的百分数,称为该测得值的相对误差 E (无单位),并表示为:

$$E = \left| \frac{\Delta x}{x_0} \right| \cdot 100\%$$

四、真值 x_0 、算术平均值 $\bar{x}$ 与残差 V

(一) 真值 x_0 的概念

真值是个理想的概念,一般不可能准确知道。下列几种情况可视为真值:

(1) 理论值:如三角形的内角和为 180° 。

(2) 公认值:世界公认的一些常数值,如普朗克常数、阿佛加德罗常数等。

(3) 计量学约定真值:如国际及国家计量部门规定的长度、时间、质量等标准。

(4) 相对真值:用准确度高一个数量级的仪器校准的测定值,可视为真值。校准仪器的误差应比测量仪器的误差小一个数量级。通常规定:校准仪器误差与测量用的仪器误差之比,应等于 $1:3 \sim 1:20$ 。

(二) 算术平均值 $\bar{x}$

实际上绝大多数的测量都不知其真值,但根据统计学的原理,当对某不变的量进行 n 次重复测量后,其算术平均值(又称为数学期望)最接近于真值。故将算术平均值 $\bar{x}$ 视为真值的最佳近似值。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中 x_i 为第 i 次的测得值。

必须指出,这样的计算方法以等精度测量为前提,亦即每一次重复测量的测量人员、测量工具、测量方法及测量环境必须保持不变。鉴于本教程中重复测量多为等精度测量,故所讨论的数据处理方法皆以此为前提,下文不再赘述。

(三)残差 V

当未知真值 x_0 时,用算术平均值 $\bar{x}$ 替代它,所求出的误差称为残差,并以 V 表示:

$$V_i = x_i - \bar{x}$$

V_i 为第 i 次测得值 x_i 的残差。

必须指出:在实际工作中,多数情况只能以算术平均值 $\bar{x}$ 替代真值 x_0 。而估算误差时,也多以残差 V 来表示误差的大小。

五、误差的分类

误差分为系统误差与偶然误差两大类。

(一)系统误差

大小与方向皆固定不变或变化规律确定的误差称为系统误差。产生系统误差的原因是:

(1)仪器装置:由仪器设计、制造、装配等方面引起的误差,如零点不准,天平不等臂等引起的误差。

(2)测量环境:如温度、湿度、气压、电磁场等的定向或规律变化而引起的误差。

(4)测量人员的感官功能或习惯引起的误差:如有人计时总是超前,而有人却滞后。

(二)偶然误差

在同一条件下,多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化着,且其数学期望为零的误差称之为偶然误差。

六、精密度、正确度、准确度与精度

描写科学实验结果与真值接近程度的是精度。它是误差的反义词,误差小则精度高。但精度却是个笼统的概念,它并不明确表明描写的是哪一类误差。为了使精度具体化,于是规定了以下几个概念:

(1)精密度:反映偶然误差的大小。

(2)正确度:反映系统误差的大小。

(3)准确度:反映了系统误差与偶然误差的综合,它表示测量结果与真值的一致程度。

第二节 系统误差

一、研究系统误差的意义

系统误差是由仪器、方法或理论、环境及观测人员的习惯产生的,它的大小直接影响到实验的正确度。因此在实验中应首先消除它的影响,设法予以校正。只有当系统误差减小到可以忽略或它的影响小于或等于偶然误差的情况下,才能保证实验有可靠的结果。

二、系统误差的分类及其消除办法

按其出现的规律可分为定值系统误差与变值系统误差。

(一)定值系统误差及其校正

定值系统误差指大小(数值)和方向(符号)已经确定的系统误差。按人们对它的掌握程度又可分为已定与未定系统误差。

1. 已定系统误差

如以高精度仪器校准测量仪器时,尽管测量仪器各分度的示值误差大小与方向皆不相同,但它们皆为定值。这类系统误差被称

为定值系统误差中的已定系统误差。

由于已定系统误差是确定了大小与方向的误差,校正时只要从测得值中减去。

$$x_i = x_{i\text{测}} - \Delta_{i\text{已定}}$$

亦即某分度 i 处的测得值减去该分度处已定系统误差即得到经校正后的测得值 x_i 。

又如:某量具零位误差为 Δ_0 ,它也是已定系统误差,该量具的任何读数皆应作此校正:

$$x_i = x_{i\text{测定}} - \Delta_0$$

2. 未定系统误差

指数值没有确定或无法确定的系统误差。如未经严格校准的仪器,我们并不知道它每个分度上的具体系统误差的大小,但它却是个定值。下列办法可以消除之:

(1) 抵消法

采用改变测量中的某些条件(例如测量方向),使得两种条件下测量产生的系统误差大小相等符号相反,取平均值即可消除此未定系统误差。

例如,在用斜面法测定重力加速度的实验中,为了消除气轨面(斜面)与滑块之间的粘滞阻力对测量滑块沿斜面的加速度 a 的影响(它是测量中的定值未定系统误差,设其为 ϵ),若无此系统误差时加速度的测量值应为 a ,由于粘滞阻力在滑块沿斜面下行与上行时产生的误差 ϵ 大小相等方向相反,故应测出滑块下行时的加速度 $a_{\text{下}}$,及滑块上行时的加速度 $a_{\text{上}}$,于是:

$$\begin{aligned} a_{\text{下}} &= a - \epsilon, a_{\text{上}} = a + \epsilon \\ \frac{a_{\text{上}} + a_{\text{下}}}{2} &= \frac{a + \epsilon + a - \epsilon}{2} = a \end{aligned}$$

可见,两次测得值的算术平均值即为 a ,从而消除了此定值未定系统误差。

(2) 交换法

将测量中的某些条件相互交换(如交换被测物位置),使交换前后产生的系统误差大小相等方向相反,从而抵消了系统误差。

如在等臂天平上称物体质量 x , 由于天平臂不相等, ($L_1 \neq L_2$) 而存在尚未确定的定值系统误差。若 x 与标准砝码 P 平衡, 则

$$x = P \frac{L_2}{L_1}$$

将被测量 x 与砝码 P 交换位置, 此时需将 P 改为 P' 才能与 x 平衡, 于是

$$x = P' \frac{L_1}{L_2}$$

故若取

$$x = \sqrt{PP'}$$

则可消除此系统误差。

(3) 替代法

保持测量条件不变, 用某一已知标准量替换被测量, 再作测量, 则可消除系统误差。

仍以天平称衡为例, 被测量 x 与砝码 P 平衡时,

$$x = P \frac{L_2}{L_1}$$

由于 $L_1 \neq L_2$, 存在未确定的定值系统误差。若选用已知标准砝码 P_0 代替 x , 再与 P 平衡, 得

$$P_0 = P \frac{L_2}{L_1}$$

若两次平衡时天平力臂没有变化, 于是

$$x = P_0$$

则消除了此未定系统误差。