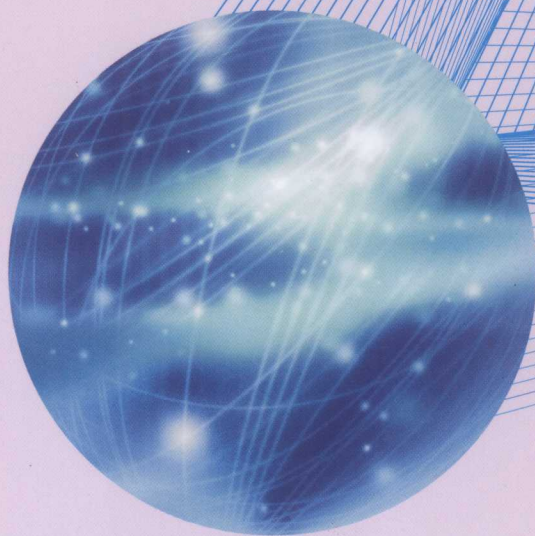


主编 黄志东 杨改蓉

DAXUE WULI JI SHIYAN

大学物理及实验

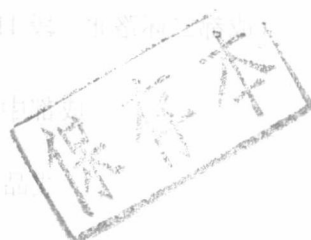


西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

04-33
314

大学物理及实验

主编 黄志东 杨改蓉



西南交通大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理及实验 / 黄志东, 杨改蓉主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.8
ISBN 978-7-5643-0859-9

I. ①大… II. ①黄…②杨… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 167070 号

大学物理及实验

主编 黄志东 杨改蓉

*

责任编辑 孟苏成

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都中铁二局永经堂印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 8

字数: 198 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0859-9

定价: 14.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

大学物理实验是我校（成都纺织高等专科学校）为工科专业的学生开设的一门必修的基础课程。通过这门课程的学习使学生在物理的实验方法和实验技能等方面得到一定的训练，培养学生分析问题和解决问题的能力，为后续课程的学习奠定一定的理论和实验基础。

《大学物理及实验》一书，是根据我校具体的教学要求，结合我校现有的实验仪器设备，在不断地对《大学物理及实验》讲义反复修改的基础上，编写而成的。本书共安排了包括基础、综合、近代及研究性实验等 22 个实验项目。在这些实验项目中，涉及力、热、电、光及近代物理等内容。

本书共分为四个部分：第一部分为“实验误差及数据处理”，主要介绍物理实验中所涉及的基本理论知识和基本概念及实验数据的处理方法；第二部分为“实验项目”，包括 19 个实验；第三部分为“设计性实验”，包括 3 个实验；第四部分为“附录”，其中列出了各类物理量的单位及常用物理量的数据等，以便查阅。

本书由黄志东和杨改蓉两位老师编写。其中实验三、实验四、实验六~实验九、实验十一~实验十四、实验十六~实验十八由杨改蓉老师编写；实验绪论、实验误差及数据处理、实验一、实验二、实验五、实验十、实验十五、实验十九、设计实验一~设计实验三由黄志东老师编写，黄志东老师负责全书的统稿和修订工作。艾琳老师对本书的编写给予了大力支持，在此深表感谢。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者
2010 年 7 月

目 录

绪 论	1
第一章 实验误差及数据处理	4
第一节 误差概述	4
第二节 有效数字及运算法则	10
第三节 数据处理	13
第二章 实验项目	16
实验一 光电效应和普朗克常数的测定	16
实验二 用密立根油滴实验测电子电荷 e	22
实验三 碰撞时的动量守恒	29
实验四 刚体转动惯量的测定	34
实验五 用拉伸法测量金属丝的杨氏模量	40
实验六 电表的改装与校准	44
实验七 电位差计测量电源的电动势	49
实验八 惠斯登电桥测量电阻	53
实验九 静电场的描绘	55
实验十 用亥姆霍兹线圈测量磁场	58
实验十一 霍尔效应实验	62
实验十二 分光计的调整和使用	70
实验十三 迈克尔逊干涉仪的调整和使用	76
实验十四 用牛顿环测透镜的曲率半径	80
实验十五 超声声速的测定	84

实验十六 透镜焦距的测定	90
实验十七 物体密度的测定	96
实验十八 液体表面张力系数的测定	100
实验十九 金属线膨胀系数的测定	102
第三章 设计性实验	107
设计实验一 光的双缝干涉	107
设计实验二 弹簧振子在斜面上的振动	111
设计实验三 验证牛顿第二定律	113
附 录	116
A. 基本物理常数表	116
B. 国际单位制简介	117
C. 常用物理参数	118
参考文献	121

绪 论

一、大学物理及实验课程的重要性

物理学是自然科学庞大体系中一门基础学科。从 17 世纪至今,物理学一直是迅速发展、门类浩繁的自然科学体系中的带头学科。

物理学是研究物质的基本结构、相互作用和运动形态的基本规律的学科。物理学的研究目的在于认识物质运动的普遍规律和揭示物质各层次的内部结构。它所涉及的范围极其广泛,既研究人们身边发生的物理现象,也研究宇宙中天体的运动及构造,还研究微观领域中物质的运动规律。

物理学所建立的基本规律和研究方法,深刻地影响着自然科学的其他学科与工程技术,甚至影响着社会科学的发展。许多新学科的建立,工程技术上许多重要的发明和创造,都来源于物理学。可以认为,人类历史上的三次技术革命,都是物理学研究成果的推广和应用。17、18 世纪,由于牛顿力学的建立和热力学的发展而研究成功的蒸汽机和其他机械,以及它们的广泛应用,引起了第一次技术革命;到了 19 世纪,由于电磁理论的建立而研制成功的电力机械和电讯设备,使人类进入广泛应用电能和无线电通讯的时代,引起了第二次技术革命;20 世纪以来,由于相对论、量子论的建立,对原子、原子核以及其他微观粒子运动的研究日益深入,促进了半导体、合成材料、核能应用、激光技术、空间技术和计算机技术等一系列新技术、新材料、新能源以及相应的新兴学科的蓬勃兴起和发展,引起了现代的所谓第三次技术革命。总之,科学与技术的发展,与物理学这门基础与带头学科的研究和应用是分不开的。

物理学是一门实验学科,无论是物理概念的产生还是物理规律的发现都是建立在严格的科学实验基础上的,同时,建立起来的理论正确与否也必须通过实验来验证。因此,在物理学的发展中,理论和实验具有同等的重要性。

随着我国经济的不断发展,发展职业教育成为我国高等教育的一件大事,而高职高专院校学生的素质与能力的高低与我国经济的发展有着更直接、更密切的关系。大学物理及实验课程为高职高专院校学生的素质与能力的提高搭建起了一个很好的平台,并为后续课程的学习奠定了良好的理论和实验基础。

二、大学物理及实验课程的任务和目标

1. 学习和掌握物理实验的基本知识,了解相关的物理理论

在实验中通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法,从而对相关的物理理论有所了解,培养和建立分析问题和解决问题的

物理思维方式。

2. 初步培养和提高学生的科学实验能力

学生的科学实验能力的培养和提高要从自学能力、动手能力、观察能力、分析能力、表达能力及设计能力等几个方面进行。这几个方面主要包括：

- (1) 能够自行阅读实验教材与资料，作好实验前的准备。
- (2) 在老师的指导下，能正确地使用仪器进行各种基本操作，测出较准确的实验数据。
- (3) 捕捉实验过程所呈现的各种现象以及实验现象的各种特征，通过对现象的观察和比较，获得全面的、本质的实验信息。
- (4) 能够运用物理学理论和实验原理对实验现象和实验结果进行初步分析、判断和解释；对各种因素可能引起的误差进行初步估计，对结果进行初步评价。
- (5) 能够正确记录和处理实验数据，设计表格，绘制图线，描述实验现象，说明实验结果，撰写合格的实验报告。
- (6) 能够完成简单的具有设计性内容的实验。

3. 培养与提高学生的科学实验素质

在实验过程中，培养学生实事求是、理论联系实际的科学作风；严肃认真、一丝不苟、不怕困难的科学态度；不断探索、大胆质疑、勇于创新的科学精神；以及遵守纪律、团结协作、节约资源、爱护公物的优良品德。

三、如何学好大学物理及实验这门课程

要想学好这门课程，学生需要做好以下几个环节：

1. 实验前的预习

实验前的预习是做好实验的关键。预习时主要阅读实验教材，必要时还需参阅其他资料，以便基本掌握实验的整体概况。预习过程中要明确实验的目的，要了解实验原理、实验内容、实验中使用的仪器和装置以及仪器和装置的使用方法和注意事项。总之，通过课前预习的思考，在脑海中形成一个初步的实验方案，并在此基础上写出预习实验报告。预习报告的内容包括实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容以及数据记录的表格等。表格的设计要清晰、明确、简洁、规范。

2. 实验过程

实验过程是实验课的中心环节。学生做实验时，一定要遵守实验课的纪律，按实验课规定的程序和要求进行实验。在动手做实验之前，首先要熟悉一下所用仪器设备的性能、正确的操作方法以及仪器正常工作的条件，不可盲目操作，以免损坏仪器。测量时，原始数据要整齐地记录在已经准备好的数据表格中，注意数据的有效数字和单位。一份完整的实验原始记录，除数据之外，还应包括实验日期、环境条件（温度、湿度、气压等）。测量结束后，将记录的原始数据经老师审阅认可后，才可以整理仪器结束实验。

3. 实验报告的撰写

实验报告是对所做实验的系统总结, 撰写实验报告是培养学生分析、解决问题的能力, 提高文化素养和综合素质的一个重要方面。学生撰写的实验报告需要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来, 要求层次分明、字迹清楚、文理通顺、简明扼要、图表规范、结论明确。实验报告应写在学校统一印刷的“实验报告”上。

实验报告通常包括以下内容:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验原理。在对实验原理充分理解的基础上, 用实验者自己的语言简要阐明实验的理论依据, 写出待测量计算公式的简要推导过程, 画出相关的原理图(电路图、光路图等)。
- (4) 实验仪器。列出主要仪器的名称、型号、量程、精度、最小分度值等。
- (5) 实验内容。
- (6) 数据处理。测量出的实验数据的计算、作图、误差及结果表达等都需要在数据处理过程中完成。在数据处理和误差运算中, 要有计算过程。实验结果要按照误差理论的要求来表达。
- (7) 实验现象、实验误差的分析、讨论及对实验的体会、建议等。

对于上述几个实验环节, 学生只要给予了足够的重视, 并能踏踏实实地做好它, 就一定能够达到学好该课程的目的。

第一章 实验误差及数据处理

做物理实验有两个方面的目的，一是定性地观察物理现象和物理现象的变化过程，二是定量地测定物理量和确定物理量之间的关系。对后者而言，在实验过程中人们将通过不同的测量手段记录下许许多多的实验数据，在此过程中如何获得较准确的实验数据，如何对这些数据进行处理，加以归纳，并对这些数据给以合理的解释，这将涉及误差理论和数据处理方面的知识。在本章中主要介绍测量过程中涉及的一些基本概念以及处理实验数据的基本方法。

第一节 误差概述

一、测 量

1. 测量的定义

测量就是将待测量与同类标准量（量具）进行比较，得出结论，这个比较的过程就称之为测量，比较的结果记录下来就是测量数据。测量数据应包括测量值的大小和单位，两者缺一不可。

2. 测量的分类

测量如果按不同的测量方法进行分类，可分为直接测量和间接测量；如果按不同的条件进行分类，可分为等精度测量和非等精度测量。

1) 直接测量和间接测量

直接测量：是指将被测量与标准量直接进行比较，从而直接获得被测量的量值。例如，用千分尺测量物体的长度，用天平称衡物体的质量，用温度计测量温度等都是直接测量。

间接测量：是依据相应的理论函数关系式即公式，将直接测量的值代入公式计算出所要求的物理量。例如，测一个直径为 D ，高为 h 的圆柱体体积时，须将直接测量出的 D 和 h 的值代入公式 $V = \frac{1}{4}\pi D^2 h$ 中，就可得到圆柱体体积的间接测量值。

在物理实验中大多数的测量都是间接测量，但直接测量是间接测量的基础。

2) 等精度测量和非等精度测量

等精度测量：是指在对某一物理量进行多次重复测量的过程中，每次的测量条件都相同。

测量条件包括人员、仪器、方法等。物理实验中通常都采用等精度测量。

非等精度测量：是指在对某一物理量进行多次测量时，测量条件完全或部分不同而得到的测量结果。例如，在对某一物理量进行多次测量时，选用的仪器不同、测量方法不同或测量人员不同等都属于非等精度测量。

二、误差

1. 误差的定义

误差存在于一切测量之中，贯穿于整个物理实验的始终。由于测量仪器、实验条件、环境等因素的局限，测量结果和客观的物理量之间，总是存在着一定的差异，即是存在着测量的误差，简称“误差”。

在实验中用仪器测量出某物理量的值称作测量值，用 x 表示。该物理量的客观存在的值称为真值，用 x_0 表示。测量值与真值之差

$$\Delta x = x - x_0$$

就称为测量误差。

2. 误差的种类

根据误差产生的性质、来源，误差可分为系统误差和偶然误差两大类。

1) 系统误差

系统误差的特点是具有恒定性，即测量结果总是向某一方向偏离，且误差的大小总是一定的，或按一定的规律变化。系统误差主要由仪器误差、理论误差以及个人误差等几个因素产生。

仪器误差：由于仪器本身的不完善或未按规定条件使用仪器而造成的。如仪器刻度不准、天平不等臂、螺旋测微计零点不准等。

理论误差：指实验本身所依据的理论，公式的近似性，或对实验条件及测量方法考虑不同带来的误差。如力学中用单摆测量重力加速度的实验，振幅对周期的影响，热学实验中热量的散失等带来的被忽略而造成的误差。

个人误差：由于测量者生理上的最小分辨力、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯引起的误差。如用停表计时时，有人常使之过长，有人常使之过短；对刻度线读数时，始终偏左或偏右等。

系统误差不能通过多次测量来消除。但是如果我们找出产生系统误差的原因，我们就能采取一定的方法来消除它的影响或对结果加以修正。

2) 偶然误差

偶然误差就是在测量时，即使消除了各种产生系统误差的因素，在同一条件下对同一物理量进行多次测量时，每次测量结果还会出现无规律的随机变化，其值时大时小，时正时负，

不可预测,但就总体来说又服从一定的统计规律的误差。偶然误差的特点是具有随机性。例如,用米尺测某物体长度,毫米以内的数值是由人们估读的,即使是消除了系统误差,同一个人,在每次测量中估读的读数也不尽相同。由于偶然误差是必然发生的,只能设法减小,而不可能消除。

三、直接测量的误差估计

在下面的讨论中,我们假设系统误差已经消除或修正了,误差仅针对偶然误差而言。

1. 多次测量的误差估计

为了减小偶然误差,在可能情况下,一般都要进行多次测量。设在相同条件下,对同一物理量 x 进行多次重复测量,测得值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, n 为测量次数,则其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1.1)$$

显然, n 越大, $\bar{x}$ 越接近真值。故用 $\bar{x}$ 表示该物理量的测量结果。

测量结果的误差,在大学物理实验中通常用算术平均偏差表示。所谓偏差,是指各测量量与算术平均值 $\bar{x}$ 的差的绝对值,即

$$\Delta x_i = |x_i - \bar{x}| \quad (1.1.2)$$

则算术平均偏差为

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (1.1.3)$$

一般情况下就将 $\overline{\Delta x}$ 称为绝对误差。

这样,我们把最后测量结果表示为下面的形式

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad (1.1.4)$$

公式 (1.1.4) 为测量结果的标准表达式。它表示对物理量 x 进行 n 次测量后,真值为 x 的值是在 $\bar{x} + \overline{\Delta x}$ 与 $\bar{x} - \overline{\Delta x}$ 之间,而不是表示 $x = \bar{x} + \overline{\Delta x}$ 和 $x = \bar{x} - \overline{\Delta x}$,它给出的是真值的一个取值范围。

例 1 测一钢管长度十次,测量值列表如下,试写出测量结果的标准表达式。

次数	测得值 (cm)	偏差值 (cm)
1	4.587	0.000 2
2	4.589	0.002 2

续表

次数	测得值 (cm)	偏差值 (cm)
3	4.585	0.001 8
4	4.579	0.001 8
5	4.591	0.004 2
6	4.593	0.006 2
7	4.587	0.000 2
8	4.587	0.000 2
9	4.588	0.001 2
10	4.582	0.004 8
平均	4.586 8	0.002 82 (绝对误差)

解 根据上述表格中的测量数据得到测量结果的标准表达式为

$$x = 4.587 \pm 0.003 \text{ (cm)}$$

上式不能理解为 x 只能取 $x = 4.587 + 0.003 = 4.590 \text{ cm}$ 和 $x = 4.587 - 0.003 = 4.584 \text{ cm}$ 两个值, 而是表示钢管长度的真实值在 $4.584 \sim 4.590 \text{ cm}$ 范围内。

绝对误差 Δx , 一般保留一位有效数字。

2. 单次测量的误差估计

在物理实验过程中, 常常由于条件不允许, 或者对测量的精度要求不高等原因, 对物理量仅作一次测量。一般情况下, 是取所用仪器的最小精度值的一半作为单次测量的绝对误差。同样, 测量结果也要表示成标准的表达式。

3. 相对误差

为了说明测量结果的准确程度, 不但要看其绝对误差的大小, 而且还需要看测得量本身的大小。例如, 用米尺测得一根木棒长 $l_1 = (87.56 \pm 0.05) \text{ cm}$ 。一个立方体的边长 $l_2 = (1.08 \pm 0.05) \text{ cm}$, 虽然它们的绝对误差都是 0.05 cm , 但其准确程度是不同的, 显然后者低于前者, 为此需要引入相对误差的概念。

相对误差 δ 定义为

$$\delta = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \quad (1.1.5)$$

相对误差, 也叫百分误差, 常用百分比表示。如上例中木棒的相对误差用 δ_1 表示, 立方体边长的相对误差用 δ_2 表示, 根据相对误差的定义, 通过计算得到 $\delta_1 = \frac{0.05}{87.56} = 0.057\%$,

$\delta_2 = \frac{0.05}{1.05} = 4.8\%$ 两者测量的准确程度就显而易见了。

相对误差 δ , 一般保留两位有效数字。

四、间接测量的误差估计

间接测得量是由直接测得量代入公式计算出来的,既然公式中所包含的直接测得量都有误差,因而间接测得量必然是有误差的。这样的误差和直接测得量的误差是有关系的,可以通过计算求出。

1. 和的绝对误差等于各分量的绝对误差之和

设 $x_1 = \bar{x}_1 \pm \Delta x_1$, $x_2 = \bar{x}_2 \pm \Delta x_2$ 。其中 x_1, x_2 为直接测得量, $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ 为绝对误差, 求 $y = x_1 + x_2$ 。

其中 y 为间接测得量, Δy 为绝对误差, 则

$$\bar{y} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$$

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

$$y = \bar{y} \pm \Delta y$$

相对误差

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}$$

2. 差的绝对误差等于各分量绝对误差之和

$$y = x_1 - x_2$$

则

$$\bar{y} = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$$

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

$$y = \bar{y} \pm \Delta y$$

相对误差

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{\bar{y}} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}$$

3. 积的相对误差等于各分量的相对误差之和

求 $y = x_1 x_2$ 。

因

$$\delta_{x_1} = \frac{\Delta x_1}{\bar{x}_1}, \quad \delta_{x_2} = \frac{\Delta x_2}{\bar{x}_2}$$

则

$$\delta_y = \delta_{x_1} + \delta_{x_2} = \frac{\Delta x_1}{\bar{x}_1} + \frac{\Delta x_2}{\bar{x}_2}$$

而

$$\bar{y} = \bar{x}_1 \bar{x}_2$$

绝对误差

$$\Delta \bar{y} = \bar{y} \cdot \delta_y, \quad y = \bar{y} \pm \Delta y$$

4. 商的相对误差等于各分量的相对误差之和

求 $y = \frac{x_1}{x_2}$ 。

因

$$\delta_{x_1} = \frac{\Delta x_1}{\bar{x}_1}, \quad \delta_{x_2} = \frac{\Delta x_2}{\bar{x}_2}$$

则

$$\delta_y = \delta_{x_1} + \delta_{x_2} = \frac{\Delta x_1}{\bar{x}_1} + \frac{\Delta x_2}{\bar{x}_2}$$

而

$$\bar{y} = \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2}$$

绝对误差

$$\Delta \bar{y} = \bar{y} \cdot \delta_y$$

$$y = \bar{y} \pm \Delta y$$

5. x 的 n 次方的相对误差等于 x 的相对误差的 n 倍

设 $x = \bar{x} \pm \Delta x$, 求 $y = x^n$ 。

则

$$\delta_y = n \delta_x = n \frac{\Delta x}{\bar{x}}$$

6. x 的 n 次方根的相对误差等于 x 的相对误差的 $1/n$

求 $y = x^{1/n}$ 。

则

$$\delta_y = \frac{1}{n} \delta_x = \frac{1}{n} \frac{\Delta x}{\bar{x}}$$

例 2 用单摆测重力加速度的实验中, 测得摆线的长度 $\bar{l} \pm \Delta l$ 为 95.88 ± 0.04 (cm), 摆球直径 $\bar{D} \pm \Delta D$ 为 3.772 ± 0.02 (cm), 求摆长 $L = \bar{L} \pm \Delta L$ 。

解 摆线 $\bar{L} = \bar{l} + \bar{D}/2$

$$= 95.88 + 1.886$$

$$= 95.88 + 1.89$$

$$= 97.77 \text{ (cm)}$$

$$\overline{\Delta L} = \overline{\Delta l} + \frac{\overline{\Delta D}}{2}$$

$$= 0.04 + 0.01$$

$$= 0.05 \text{ (cm)}$$

$$\text{故摆长 } L = \overline{L} \pm \overline{\Delta L} = 97.77 \pm 0.05 \text{ (cm)}$$

例 3 有一矩形, 测得其长为 $\overline{l} \pm \overline{\Delta l} = 5.45 \pm 0.05 \text{ (cm)}$, 宽为 $\overline{d} \pm \overline{\Delta d} = 2.30 \pm 0.02 \text{ (cm)}$, 求该矩形的面积 $s = \overline{s} \pm \overline{\Delta s}$ 。

$$\text{解 } \overline{s} = \overline{l} \overline{d}$$

$$= 5.45 \times 2.30$$

$$= 12.535 \text{ (cm)}^2$$

$$\delta_s = \frac{\overline{\Delta l}}{\overline{l}} + \frac{\overline{\Delta d}}{\overline{d}}$$

$$= \frac{0.05}{5.45} + \frac{0.02}{2.30}$$

$$= 0.0092 + 0.0087$$

$$= 0.0179$$

$$= 0.018$$

$$\overline{\Delta s} = \overline{s} \cdot \delta_s$$

$$= 12.535 \times 0.018$$

$$= 0.227$$

$$\approx 0.2 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\text{故 } s = \overline{s} \pm \overline{\Delta s} = 12.5 \pm 0.2 \text{ (cm}^2\text{)}$$

第二节 有效数字及运算法则

一、有效数字的一般概念

在进行物理量测量时, 总是存在着测量误差的, 因此, 结果的表达式或运算就不可能是任意的, 而必须遵循一定的法则, 这个法则就称为有效数字及其运算法则。

1. 有效数字

什么是有效数字呢? 有人认为在测量一个物理量时, 结果中保留的位数越多, 其准确程

度就越高。实际上在测量结果中无论写多少位都不可能将准确度超过测量所允许的范围。例如用以毫米为刻度的米尺测量物长时,假使物体的一端与米尺的零点对齐,另一端不是恰好与某一刻线对齐,而是在两刻线之间。这时,毫米整数刻度可以准确读出。两刻线之间的读数只能凭眼睛估读(例如大约在毫米内十分之几的位置)。由刻度尺直接读得的显然是可靠的,就是说它是有效的;而估读的准确度是可疑的,但读出来总比不读它要精确,所以我们规定:把测量结果中可靠的几位数字加上可疑的一位数字统称为测量结果的有效数字。有效数字的位数标志着仪器的准确程度,即反映绝对误差的大小。使用准确度不同的仪器测量时,可以得到不同位数的有效数字。例如用毫米为刻度的米尺测物长时得到 $L = 1.85 \text{ cm}$, 其中 1 和 8 两位数字是准确的,5 是可疑的,即得到三位有效数字;当用准确度为 0.05 mm 的卡尺量同一物长时得到 $L = 1.855 \text{ cm}$, 即得到四位有效数字。

在测量工作中规定,所有的测量数据都只写有效数字,而不能随意多写或少写,对一组等精度测量数据,其有数字的位数一般不能由测量仪器的准确度确定,而是由测量结果的绝对误差的大小来确定。误差的有效数字一般取一位,将有效数字的定义和误差取一位数结合起来,就能写出测量结果的数值了。例如 $L = 2.00 \pm 0.01 (\text{cm})$ 的写法是正确的,而 $L = 3.00 \pm 0.3 (\mu\text{A})$ 的写法是错误的。由绝对误差决定有效数字,这是处理一切有效数字问题的依据。

2. 关于有效数字的几点说明

(1) “0” 在数字中间或数字后面都是有效数字,不能随意省略,例如 1.0 和 1.00 在数学上是等效的,在物理实验中则有完全不同的意义,1.0 是两位有效数字,而 1.00 是三位有效数字,两者的误差不同,准确度也不同。

(2) 如果用“0”来表示小数点的位置,即小数点前面的“0”和紧接小数点后面的零不算作有效数字。如 0.0123 dm 、 0.123 cm 、 0.00123 m 等的有效数字都是三位。由此可见,在十进制单位中,进行单位换算时,有效数字的位数不变。

(3) 当结果中数字很大或很小,且有效数字位数较少时,常用 10 的指数形式来表示。例如太阳的质量 $M = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$,有效数字是指系数部分,即四位有效数字。

(4) 计算的常数如 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 等,其有效数字的位数可以认为是无限的,可以根据需要取舍。

(5) 有效数字与仪器的关系。有效数字位数的多少取决于待测量本身的大小和仪器的精度。比如用米尺测量某一物体的长度 $L = 2.52 \text{ cm}$,有效数字为三位;用比米尺准确度高的二十分度游标卡尺测量,则 $L = 2.515 \text{ cm}$,有效数字是四位;而用准确度更高的螺旋测微计测得 $L = 2.5153 \text{ cm}$,有效数字为五位。

二、有效数字的运算法则

在物理实验中,涉及大量的间接测量,求间接测量需要将直接测得量进行各种运算。为了不致因运算引入误差,并尽量简化运算过程,下面通过例题来学习有效数字的运算法则。

1. 加减法(以加法为例)

设 $y = x_1 \pm x_2 \pm x_3 \pm x_4$, 当 $x_1 = 1321.0 \pm 0.2 (\text{cm})$, $x_2 = 235.44 \pm 0.01 (\text{cm})$, $x_3 = 3.139 \pm 0.002$