全国高等农林院校新体系实验教材

基础物理实验

JICHU
WULI
SHIYAN

贾　芳　主编

中国农业大学出版社
ZHONGGUONONGYEDAXUE CHUBANSHE

全国高等农林院校新体系实验教材

基础物理实验

贾　芳　主编

中国农业大学出版社
· 北京 ·

内容简介

本书是根据教育部对高等农林院校物理课程教学基本要求及21世纪教学改革需要而编写的，在普通物理实验中精选出18个与农林院校各专业关系密切的基础实验，结合河南农业大学多年来基础物理实验教学改革的探索与实践，对物理实验教学体系进行了全新的整合。

本书实验1为实验理论与基础知识，阐述了物理实验数据处理的基础知识，着重介绍了与大学物理实验有关的数据处理知识，学生可以用于自学；实验2较为详细地介绍了各种测量工具的使用及其测量原理，目的在于使学生掌握大学物理实验中经常遇到的物理量的测量方法及其测量仪器；实验3为简谐振动实验；实验4、13为液体性质实验；实验5为热学实验；实验6、7、8、9、10、14、15为电学实验，目的在于培养学生综合应用电学知识的能力以及运用所学知识解决给定问题的能力；实验11、12、16、17、18为光学实验，目的在于提高学生对光学知识的掌握和运用。

本书为新体系实验教材，采用全新的活页装订形式，编写上以实验项目为单元，从实验目的、实验原理、实验器材、实验内容、实验步骤和数据记录、处理到思考与创新自成体系。本书可作为农林院校基础物理实验教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基础物理实验/贾芳主编．—北京：中国农业大学出版社，2011．3
ISBN 978-7-5655-0196-8

Ⅰ．①基…　Ⅱ．①贾…　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(2011)第012050号

书　　名　基础物理实验
作　　者　贾　芳　主编

策划编辑　潘晓丽　　**责任编辑**　赵　欢
封面设计　郑　川　　**责任校对**　王晓凤　陈　莹
出版发行　中国农业大学出版社
社　　址　北京市海淀区圆明园西路2号　　**邮政编码**　100193
电　　话　发行部 010-62731190，2620　　读者服务部 010-62732336
编辑部 010-62732617，2618　　出　版　部 010-62733440
网　　址　http://www.cau.edu.cn/caup　　**E-mail** cbsszs@cau.edu.cn
经　　销　新华书店
印　　刷　涿州市星河印刷有限公司
版　　次　2011年3月第1版　2011年3月第1次印刷
规　　格　787×980　16开本　9.5印张　169千字
印　　数　1～3 000
定　　价　17.00元

编写人员名单

主　编　贾　芳

副主编　李　聪　李　辉　郑　丹　曹　晴

参　编　马斌强　谢瑞生　贾树恒　李　波
冯朝岭　赵安庆　袁　超　朱连轩

前　言

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、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

大学物理实验是农林类高等学校各专业学生进行科学实验基本训练的必修基础课程。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。

本书是根据教育部理科基础课程教学指导委员会制定的农林院校物理实验课程教学基本要求，结合河南农业大学多年来基础物理实验教学改革的探索与实践编写而成的，在普通物理实验中精选出 18 个与农林院校各专业关系密切的基础实验，力求做到实验项目的个数少而精。书本薄了，但每个实验的内容却厚重了。我们的目的在于，在有限的学时情况下，让学生用最短的时间通过物理实验来理解物理学的基本原理，并掌握物理实验的基本方法和技能。

《基础物理实验》作为新体系实验系列教材之一，以全新的形式设计带动实验内容创新，具体体现在以下几个方面。

(1)实验项目的个数少而精。本书把每个实验的内容写得尽可能详细、充分，多余的项目一个不要，改变过去那种书本中很多实验项目只是印刷上去，而学生根本不去做的现象。

(2)印刷形式创新。本书采用可拆式活页形式装订，纸质教材和与之衔接的相关网上学习资源相配合、呼应。

(3)编排方式创新。教材按照每个独立的实验项目进行编排，样式灵活，无章无节，在操作上由简单到复杂，内容上由浅入深。

(4)结构体系创新。每个实验项目由实验目的，实验原理，实验器材，实验内容，实验步骤和数据记录、处理，思考与创新，每次实验的得分依据形成实验报告组成，形成一个完整体系。此外，将与实施各实验项目相关的必备知识要素作为相关知识放在项目之后，供学生在实验前的准备阶段自学。

(5)教材功能创新。实现预习指导、教材、实验记录、实验报告、作业等的“一体化”，学生在实验中能看、能查、能记、能写、能画。教材完全融入实验。学生既是读

者，又是“作者”，有利于师生互动，教学相长，教与学一体化，更能体现出“以人为本”的编写宗旨。

本书凝聚了河南农业大学全体物理教师的辛勤劳动，是集体智慧的结晶。其中实验1、2、12、16由贾芳编写；实验6、8、9、14由李聪编写；实验4、17由谢瑞生编写；其他参编人员完成了其余部分的编写；赵安庆还编写了内容简介与前言，贾芳负责全书的统稿工作。

本书由河南农业大学潘建斌教授主审，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，教材中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编　者

2010年12月

目　录

实验1　基础知识(测量误差与数据处理)

本实验是自学材料，介绍测量误差、实验数据处理和实验结果的表示等方面的内容。这些内容都是初步知识，不仅在每个物理实验中都要用到，而且是今后从事科学实验所必须了解和掌握的。这部分内容牵涉面较广，不可能在一两次学习中掌握。我们要求同学首先阅读基本内容，对提到的问题有一个初步的了解，然后结合每一个具体实验再细读相关的段落，通过运用加以掌握。篇末附有练习题，可以加深对内容的理解。

一、测量误差

物理实验是以测量为基础的，研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要通过测量来实现。一般来说，测量必须借助一定的仪器，采用一定的方法，在人为控制的环境下由实验者来完成。但是在实际测量中，往往由于测量仪器的限制，测量所依据的理论上的公式应满足的条件不能绝对保证，加之实验技术、环境条件等因素的影响，测量不可能无限精确。测量值与被测量的真实值(简称真值)之间总是存在着一定的差异，即测量不可避免的会产生误差。故对测量中可能产生的各种误差进行分析，尽可能地消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差作出准确的估计，是所有科学实验必不可少的任务。本节主要介绍误差的概念、特点、产生的原因和估算方法等有关知识。

(一)误差的概念

测量误差就是测量结果与被测量的真值(或约定真值)间的差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差来表示。

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值}$$

$$\text{相对误差 } E = \frac{\text{测量值的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\% \quad \text{(用百分数表示)}$$

事实上，被测量的真值是未知的。人们对客观物质世界建立的“量”的概念，也是通过各种测量手段和方法了解到其测量值，因而以上关于误差的定义还不能直接用于实际中。于是，人们便依据测量学原理和数理统计学的理论建立了各种误差理论，用来科学地估算测量误差。

（二）误差的分类

从研究误差的需要出发，根据误差产生的原因和性质的差异，可将测量中的误差分为系统误差和随机误差。

1. 系统误差

在相同的实验条件下，对同一物理量进行多次测量中，如果出现的误差大小与正负保持不变，或按确定的规律变化（递增、递减、周期性等），这种测量误差称为系统误差。系统误差的种类很多，按其来源可分为：

（1）方法误差。它是由于测量所用理论公式的近似性及公式中的各参数确定的近似性而引起的误差。产生这一误差的原因在于测量过程中存在着实际上起作用而不能忽略的因素，如空气的阻力和浮力、电表的内阻、连线电阻的压降等，这些因素在推导测量结果的表达式中没有得到反映或被忽略，从而引起了实验误差。

（2）条件误差。由于外界环境因素（如温度、湿度、压力、振动、电磁场等）与要求的标准状态不一致，使测量装置的指示量值发生变化，以及观察者在生理上的视觉分辨能力、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯引起的误差。

（3）仪器误差。由于测量设备（包括测量工具、仪器、量具等）本身不完善，或由于测量设备的安装、布置、调整不得当（如米尺刻度不准确、螺旋测微计有空行程、仪表调零不准等）而产生的误差。

由此可见，系统误差的出现都具有某种确定的规律性。但是，这种规律对不同的实验测量却是不同的，只能针对每一具体情况采用不同的处理方法。这就要求实验者对研究对象的特殊规律要有充分的掌握，同时实验者在实验经验、实验技巧和理论水平等方面应有相当的水平，并且使所用仪器设备的性能要处于良好的工作状态。一般地说，处理系统误差是比较困难的，甚至在自觉或不自觉中遗漏。

2. 随机误差

随机误差是由于不确定因素引起的误差。它的特征表现为，就某一次测量来讲，其误差值的大小和正负都带有随机性，难以事先确定。但对大量次数的重复测量来说，测量的结果却遵从一定的统计规律。这种误差产生的原因是多方面的，例如实验条件和环境因素的微小的、无规则的起伏及其实验者生理分辨本领、实验技能的熟练程度等因素产生的误差。

随机误差可以根据统计理论进行处理。大量的实验事实及统计理论都证明，当随机误差由许多微小的、彼此独立的随机因素决定时，服从正态分布规律（图 1 - 1）。主要特征表现在以下四个方面：

（1）有界性。绝对值很大的误差出现的概率为零，即误差的绝对值不会超过一定的界限。

(2)单峰性。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。

(3)对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的概率接近相等。

(4)抵偿性。由于绝对值相等的正、负误差出现的概率接近相等,因而随着测量次数的增加,偶然误差的算术平均值将趋于零。

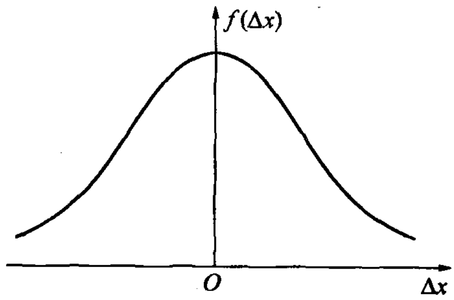

图1-1　随机误差的正态分布

抵偿性是偶然误差最本质的统计特征。一般地讲,凡是具有抵偿性的误差,原则上可以按偶然误差处理。

根据随机误差的分布特征,我们知道:①在多次测量中,正负随机误差大致上可以相互抵消,因而多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响;②测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大。因此,只有对随机误差作出估算才能表示出测量的精密度。

二、随机误差的估算

(一)直接测量量的误差估算

直接测量是以一个未知的物理量与作为标准的量值直接比较而得出未知物理量量值的测量方法。例如,用米尺测量某一物体的长度,用秒表测量某一过程的时间,用温度计测量某一系统的温度,都是直接测量。其特点是,由实验测得的数据直接确定被测物理量的量值。

(二)直接测量的算术平均绝对误差

假设在实验中对某一物理量 x 进行了 n 次等精度的重复测量,获得了 n 个数据,分别为

$$x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_n$$

若该物理量的真值为 R,则第 i 次的测量误差为

$$\Delta_i = x_i - R \tag{1-1a}$$

那么被测量 x 的平均值为

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

$\bar{x}$ 虽然可以作为测量值,但是它不是真值 R,要确定 $\bar{x}$ 与 R 之间的偏离程度,需要从计算各个测量值 x_i 偏离真值 R 的大小着手,最简单的方法是用算术平均的

方法估算误差。如前所述，在 n 次测量中，每次测量产生的误差为 σ_i，则测量的算术平均绝对误差为

$$\overline{\Delta}x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\Delta_i| \tag{1-2}$$

由于随机误差具有正负误差相抵偿的性质，所以用误差的平均值定义算术平均绝对误差。测量的结果通常表示为

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta}x \tag{1-3}$$

算术平均绝对误差 $\overline{\Delta}x$ 与算术平均值的比值

$$E = \frac{\overline{\Delta}x}{\bar{x}} \times 100\%$$

叫平均相对误差。

直接测量的算术平均绝对误差计算较为简单。从理论上讲，只有当测量次数 $n \to \infty$ 时，被测量的平均值才能趋于真值。因此，在实际测量中有限次测量误差的估算的物理意义并不十分明确。

（三）直接测量的标准偏差

如果用各次测量误差平方和的平均值来表示平均误差的平方，可得

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^{\,2}} \tag{1-4}$$

其中 S_x 称为一组测量值 x_i 的标准偏差。

实际上，真值 R 是未知的，所以不能从公式(1 - 1)直接求出 Δ_i 的数据，因此式(1 - 1)可以改写为 $\Delta_i = x_i - x$，$\overline{\Delta}_i = x_i - \bar{x}$ 由式(1 - 2)，式(1 - 3)及标准偏差的定义可以证明

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{1-5}$$

上式中的 S_x 称为标准偏差。其值可通过各次测量值与平均值 $\bar{x}$ 之差来计算，当值 S_x 较小时，测量的数据比较集中，说明测量的精度高，测量较为可靠；当 S_x 较大时，数据较分散，测量的精度低，测量值不大可靠。

应该指出，S_x 表示的是一组测量值的偏差，它只反映获得算术平均值的那组数据 x_i 的离散性，而不能表示平均值偏离真值的情况。$\bar{x}$ 的离散性是平均值本身的波动。离散程度可以用平均值的标准偏差 $S(\bar{x})$ 来表示 $\bar{x}$ 的离散程度，可以证明其表达式为

$$S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{1-6}$$

一般情况下，S_x 的值愈大，$S(\bar{x})$也愈大，但 $S(\bar{x})$随测量次数的增加而减小。

(四)直接测量结果的表示

对于一列在相同条件下等精度测量的结果，可以表示成

$$x = \bar{x} - S(\bar{x}) \tag{1-7}$$

我国和世界上许多国家在科学中都使用“标准偏差”，而在工程技术报告中一般使用“极限误差”。由误差理论可知随机误差绝对值大于 $3S_x$ 概率很小，一般测量中，测量次数很少有超过几十次的，可以认为绝对值大于 $3S_x$ 的误差是不可能出现的。通常这种误差称为“单次测量的极限误差”，用 $S_{\lim}x$ 来表示，即

$$S_{\lim}x = \pm 3S_x \tag{1-8}$$

测量列算术平均值极限误差的计算方法与单次测量相同，但用算术平均值的标准偏差 $S(\bar{x})$代替式(1 - 8)中的 S_x，则有

$$S_{\lim}\bar{x} = \pm 3S(\bar{x}) \tag{1-9}$$

当用极限误差表示测量结果时，应具有下列的形式

$$x = \bar{x} \pm 3S(\bar{x}) \tag{1-10}$$

(五)间接测量量的误差估算

当未知的物理量与几个参量之间存在一定的函数关系时，应先直接测量这些参量，然后代入函数式中进行计算，从而求得未知物理量的测量值，这种测量值称为间接测量量。

在很多实验中，我们进行的测量都是间接测量。间接测量的结果是由直接测量的结果根据一定的数学式计算出来的。

(六)间接测量的误差传递规律

一般而言，直接测量量的标准偏差比该量的平均值小得多，也可以把它看作是直接测量量的微分，因此可用微分法来确定间接测量量的误差。

设有函数式 $y = f(z_1, z_2, \cdots, z_m)$，其中 $z_1, z_2, \cdots, z_m$为直接测量量，若用 Δz_1，$\Delta z_2, \cdots, \Delta z_m$ 分别代表 $z_1, z_2, \cdots, z_m$ 的随机误差，而相应的引起 y 的随机误差不确定度为 Δy，则有

$$y + \Delta y = f(z_1 + \Delta z_1, z_2 + \Delta z_2, \cdots, z_m + \Delta z_m)$$

将上式按泰勒级数展开(略去高次项)，得

$$\Delta y = \left|\frac{\partial f}{\partial z_1}\right| \overline{\Delta} z_1 + \left|\frac{\partial f}{\partial z_2}\right| \overline{\Delta} z_2 + \cdots + \left|\frac{\partial f}{\partial z_m}\right| \overline{\Delta} z_m \tag{1-11}$$

显然，对于和差函数，用上式来估算误差比较方便。如 $y=A+B$，则 $\Delta y=|\Delta A|+|\Delta B|$，$\frac{\Delta y}{y}=\frac{|\Delta A+\Delta B|}{y}$，对于积商函数，就显得不那么方便了。实用中，常先取自然对数，再求全微分，得到相对误差，然后按 $\Delta y=\left(\frac{\Delta y}{y}\right)y$，求出 Δy。根据标准偏差的定义，当函数中各 z_i 的误差之间彼此无关、相互独立时，则 y 的标准偏差 S_y 等于各分量的标准偏差与相应偏导数的乘积的平方和的平方根，即

$$\Delta y=\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial z_1}\right)^2 S_{z_1}^2+\left(\frac{\partial f}{\partial z_2}\right)^2 S_{z_2}^2+\cdots+\left(\frac{\partial f}{\partial z_m}\right)^2 S_{z_m}^2} \tag{1-12}$$

上式即为有独立变量的任意函数的标准偏差传递公式。它适用于和差形式的函数，对于积商形式的函数，在大学物理实验中常用下式来化简计算其相对标准偏差

$$\frac{\Delta y}{y}=\sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial z_1}\right)^2(\Delta z_1)^2+\left(\frac{\partial \ln f}{\partial z_2}\right)^2(\Delta z_2)^2+\left(\frac{\partial \ln f}{\partial z_3}\right)^2\Delta z_3+\cdots\cdots} \tag{1-13}$$

表 1-1 常用函数的误差传递公式

函数形式	算术平均误差	标准偏差 $S(\bar{y})$	相对标准偏差 E_y
$y=\sum_{i=1}^{n} a_i x_i$	$\sum_{i=1}^{n} a_i \Delta x_i$	$\sqrt{\sum_{i=1}^{n} a_i^2 s_x^2}$	$\frac{1}{y}\sum_{i=1}^{n} a_i^2 s_x^2$
$y=\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{S_x}{x}$	$\frac{1}{y}\frac{S_x}{x}$
$y=ax_1\cdot x_2$	$ax_1\Delta x_2+ax_2\Delta x_1$	$y\sqrt{\left(\frac{S_{x_1}}{x_1}\right)+\left(\frac{S_{x_2}}{x_2}\right)}$	$\sqrt{\left(\frac{S_{x_1}}{x_1}\right)+\left(\frac{S_{x_2}}{x_2}\right)}$
$y=a\frac{x_1}{x_2}$	$\frac{\Delta x_1\cdot x_2+ax_1\Delta x_2}{x_2^2}$	$y\sqrt{\left(\frac{S_{x_1}}{x_1}\right)+\left(\frac{S_{x_2}}{x_2}\right)}$	$\sqrt{\left(\frac{S_{x_1}}{x_1}\right)+\left(\frac{S_{x_2}}{x_2}\right)}$
$y=ax^n$	$anx^{n-1}\Delta x$	$y^n\frac{S_x}{x}$	$n\frac{S_x}{x}$
$y=e^{ax_1+bx_2}$	$y(a\Delta x_1+b\Delta x_2)$	$y\sqrt{a^2S_{x_1}+b^2S_{x_2}}$	$\sqrt{a^2S_{x_1}+b^2S_{x_2}}$
$y=x^{1/n}$	$y\frac{1}{n}\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{1}{n}\frac{S_x}{x}$	$\frac{1}{n}\frac{S_x}{x}$
$y=\sin x$	$\cos x\cdot\Delta x$	$\lvert\cos x\rvert S_x$	$\lvert\tan x\rvert S_x$

在一些简单的测量问题中也可以采用绝对值合成的方法,即

$$\Delta y=\left|\frac{\partial f}{\partial z_1}\Delta z_1\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial z_2}\Delta z_2\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial z_3}\Delta z_3\right|+\cdots\cdots \tag{1-14}$$

$$\frac{\Delta y}{y}=\left|\frac{\partial \ln f}{\partial z_1}\Delta z_1\right|+\left|\frac{\partial \ln f}{\partial z_2}\Delta z_2\right|+\left|\frac{\partial \ln f}{\partial z_3}\Delta z_3\right|+\cdots\cdots \tag{1-15}$$

这种合成方法所得合成结果一般偏大,与实际不确定度合成情况相比可能有较大出人。但因其比较简单,在项数较少时,可作为简化处理方法。但在科学实验中一般都采用方和根合成来估计间接测量结果的不确定度,也叫做标准偏差。

三、有效数字及其运算法则

如前所述,既然任何实验结果都存在着误差,那么直接测量各待测量时,应取几位有效数字?在按函数关系计算间接测量结果的数值时,应保留几位有效数字?这都是不能随意确定的,必须采用有效数字及其运算法则,这是大学物理实验课的基本要求之一,也为将来科学实验的数据处理打下必要的基础。

(一)有效数字

一般地说,测量结果的最后一位,即在测量中,凡是用仪器和量具直接读出的数字(包括最后一位估读数字)都称为有效数字,它只允许测量值的最后一位出现误差。例如,用最小分度为毫米的直尺,测得型钢的宽度是 12.35 cm,这个读数的前三位“12.3”是直接从直尺上读出的可靠数字,而末位的“5”则是估计的读数,所以读取上述数字至少有±0.1 mm 的误差。

(二)有效数字的性质

(1)有效数字的多少与被测对象的大小有关。

(2)有效数字的多少与测量仪器的精密度有关。例如测量一平板玻璃的厚度,用米尺测得 2.34 cm,是 3 位有效数字(读到 0.01 cm);用游标卡尺测得2.342 cm,是 4 位有效数字(读到 0.001 cm);用螺旋测微器测得 2.342 5 cm,是 5 位有效数字(读到 0.000 1 cm)。可见,仪器的精确度越高,测同一被测对象,所得的有效数字也就越多。

(3)有效数字的多少还与测量的方法有关。如用单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 测量某地的重力加速度 g,应使用米尺和秒表分别测量摆长 L 和周期 T。用秒表测量一物体运动的时间时,测量误差主要由启动和制动秒表时手的动作与目测协调的情况而定的,一般估计启动和制动时各有 0.1 s 误差,总的误差为 0.2 s,测量单摆周期时,如果每次只测量一个周期,得 T 为 1.9 s。为了减小相对误差提高测量

的相对精度，我们可以连续测量 100 个周期，如果 $100T=198.7$ s，那么，一个周期为 1.987 s。可见，采用了不同的测量方法，同时测量周期 T，后一种测量的有效数字是 4 位，而前一种测量方法的有效数字只有 2 位。

（三）关于有效数字的几点说明

(1)在十进制中，有效数字与小数点的位置无关。如型钢的宽度为 12.35 cm，也可以表示为0.123 5 m 或0.000 123 5 km，它们的有效数字都是 4 位。

(2)出现在数值中间的“0”和末尾的“0”都是有效数字。如用米尺测得一物体的长度为1.068 0 m，此数值中间的“0”和末尾的“0”都是有效数字。其中末尾的“0”，表示物体的末端与尺上的刻线“8”正好对齐，估读数为“0”，这个“0”不可随意抛弃。

(3)表示特大数值与特小数值，应采用科学记数法。特大数值与特小数值采用将有效数字乘以 10 的幂指数来表示，称为科学记数法。一般规定在小数点前只取一位。如 369.5 m 用 mm 作单位时，应写为 3.695×10^5 mm，而不能写为 369 500 mm，因为这样写扩大了原来的有效数字。又如 0.000 678 应写为 6.78×10^{-4}。

（四）有效数字的运算法则

总的原则是根据误差确定有效数字，即测量值和运算结果的有效数字的末位应和误差末位取齐。

1. 几个量相加减

设 y 为测量值 x_1,x_2,x_3,x_4 的和，即

$$y = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$$

如 $x_1 = 19.6 \pm 0.2$，$x_2 = 28.15 \pm 0.1$，$x_3 = 6.748 \pm 0.001$，$x_4 = 0.357\,2 \pm 0.000\,2$。则绝对误差 $\Delta y = 0.2+0.01+0.002 \approx 0.3$，$y = 19.6+28.15+6.748+0.357\,2 = 54.\overline{8}\,\overline{5}\,\overline{5}\,\overline{2}$（加上画线者为含误差的数字）。

根据绝对误差 Δy 的有效数字，则 $y=54.9\pm0.3$。

2. 几个量相乘除

设 y 为测量值 x_1,x_2 的积，即

$$y = x_1 \cdot x_2$$

如 $x_1=2.378\pm0.001$，$x_2=21.02\pm0.01$。则 $y = 2.378\times21.02 = 50.1\overline{7}\,\overline{4}\,\overline{7}\,\overline{4}$，绝对误差

$$\Delta y = \left(\frac{0.001}{2.387}+\frac{0.01}{21.02}\right)\times 50.174\,74 \approx 0.05$$

根据绝对误差 Δy 可以确定 y 的有效数字，则 $y=50.17\pm0.05$。

如果实验结果不需要计算误差时，那么测量结果的有效数字只能按下列规则

粗略的确定:

(1)几个加减运算后的有效数字,其小数点后保留的位数应与诸量中小数点后位数最少的一个相同。

(2)几个量乘除后的有效数字应与诸量中有效数字最少的一个相同。

3. 指定数或常数

在式中有指定数或常数的运算时,应作以下处理:

(1)将半径 r 化为直径 d 时,$d=2r$ 中出现的倍数"2",它是指定数而不是有效数,因此在确定运算结果的有效数字时,不必考虑它的位数。若 $r=4.17$ cm,则 $d=2\times4.17=8.34$ (cm)。

(2)圆周长 $L=2\pi r$,常数 π 的位数应取得与 r 的有效数字相同,若 $r=1.375$ mm,应取 $\pi=3.142$,则得 $L=8.640$ cm,运算中遇到其他常数(如 g,h,e 等)均可按此例取位数。

4. 对数函数

某数值 A 的对数 $\lg A$,其定值部的位数(即对数的小数位数)应与数值 A 的有效位数相同。如 $A_1=6.085$,$\lg A_1=0.8328$;$A_2=68.05$,$\lg A_2=1.8328$。

5. 乘方与开方

某数值的乘方和开方的有效位数与其底(即该数值)的有效位数相同。如 $B_1=25.36$,则 $B_1^2=643.1$;$B_2=36.87$,则 $\sqrt{B_2}=6.072$。

以上函数运算,在实验结果需计算误差的情况下,还要贯彻根据误差来决定其有效位数的原则,其他函数(如指数函数、三角函数)也是如此。

四、列表法和作图法处理数据

实验中,在记录和处理数据时,常将数据列成表格。这样可以简明地表示出有关物理量之间的关系,便于检查测量结果和运算是否合理,有助于发现和分析问题。作图法也是物理实验中处理数据常用的方法,依据它可研究物理量之间的变化关系,并便于找出其中规律、确定对应量的函数关系、求得经验公式。用作图法处理数据的优点是直观、简便,作出的图线对多次测量量有取平均的效果。

(一)列表的要求

(1)必须标明表中各符号所代表的物理量的意义,并写明单位。单位应写在标题栏里,不要重复记在各数值上。

(2)表中所列数据要正确反映测量值的有效数字。

表 1-2 测量金属电阻器的温度系数

次序	被测值	
	温度 t/℃	电阻 R/Ω
1	10.5	10.42
2	29.4	10.92
3	42.7	11.32
4	60.0	11.80
5	75.0	12.24
6	91.0	12.67

(二)作图的要求

1. 坐标纸

坐标纸有直角坐标纸(毫米方格纸)、对数纸和极坐标纸等几种。可根据数据处理的需要,选用坐标纸的种类和大小,在大学物理实验中一般选用(20×25)cm^2规格的直角坐标纸。

2. 图的名称

必须在图的左上角标明图的名称,例如“I-V 图”(伏安特性图)。

3. 画坐标轴

一般以横轴代表自变量,在坐标纸上画两条粗细适当的线表示纵轴和横轴。坐标轴上标明数值,数值递增的方向也就明确了,所以坐标轴不必再加箭头。

4. 坐标标度值

(1)为避免图纸上出现大片空白而图线却偏于图纸一角的现象,坐标标度不一定从“0”开始。

(2)坐标标度值不必用有效数字表示。如坐标标度值只要写明 1、1.5、2、2.5、3 等,而不必写成 1.000、1.500 等。

(3)坐标轴分度的估读数应与测量值的估计数(即有效数字的末位)相对应。

5. 标明物理量的名称、单位的符号

分别在纵、横坐标轴中部外侧标明物理量的名称及单位符号,应沿坐标轴横写。

6. 标出数据的坐标点

(1)测量数据点常用“+”符号标出,并使交叉点正好落在数据的坐标上,如果同一张图上要画几条图线时,则每条图线上的数据点分别用+、×、□等符号,以示区别。