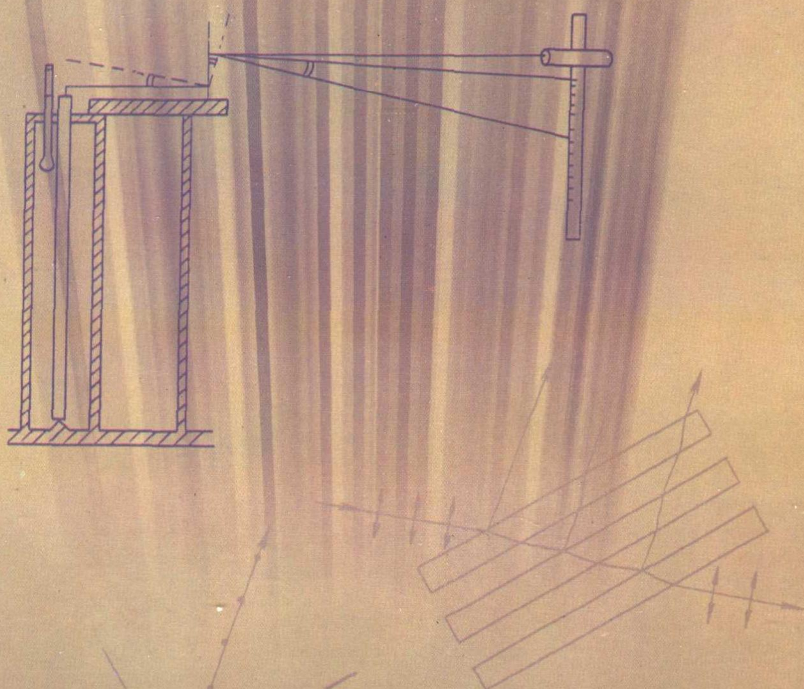
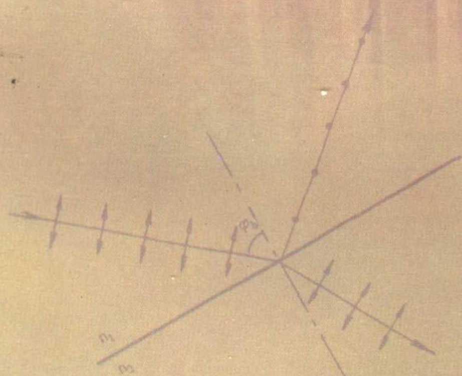
刘云龙 孙文光 主编

大学物理实验

〔工程专科适用〕





同济大学出版社

大 学 物 理 实 验

刘云龙　孙文光　主编
陆廷济　主审

同济大学出版社

责任编辑　陶文文
封面设计　李志云

大学物理实验
刘云龙　孙文光　主编
陆廷济　主审
同济大学出版社出版
(上海四平路 1239 号　邮编:200092)
新华书店上海发行所发行
常熟市印刷八厂·印刷
开本:787×1092 1/16　印张:8.75　字数:224 千字
1998 年 9 月第 1 版　1998 年 9 月第 1 次印刷
印数:1－4 000　定价:12.50 元
ISBN7－5608－1947－8/O·168
如遇印装质量问题,可直接向承印厂调换
地址:常熟市梅李镇通江路 21 号　邮编:215511

内容提要

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学要求》及《高等工业学校普通物理学函授教学大纲(草案)》编写而成的。全书内容包括物理实验基本知识以及力学实验、电学实验、光学实验等共计25个常见的物理实验。

本书内容注重理论与实验相结合,实验原理叙述清楚,实验步骤、数据记录、数据处理方面的描述较为详细,适宜于读者自学。每个实验约需2~3学时。本书可作为函授与继续教育、职业与技术教育及大、中专院校物理实验课程的教材。

前　言

随着高等教育的发展，成人教育、函授教育、继续教育、职业教育、技术教育等多种教育形式已成为高等教育不可缺少的重要组成部分。为了适应这一时代潮流，根据《高等工业学校物理实验课程教学要求》及《高等工业学校普通物理学函授教学大纲（草案）》，结合编者多年在全日制专科、函授“物理学”及“物理实验”课程中的教学实践，在原有的函授物理实验教材（由严导淦、李国群主编）的基础上加以修改、调整，重新编写了这本教材，以期满足上述多种教育形式对物理实验教材的要求。

本书的内容由绪论、物理实验基本知识、力学实验、电学实验、光学实验、实验报告示例、总附录七个部分组成。由于各院校和各函授站物理实验室的仪器配置不尽相同，对各实验的难与易、主与次的理解也不同，要求学生都按同一顺序做同样的实验是不切实际的。因此，本书改变了过去将实验分为基本实验、选做实验两类的做法，而是将总计 25 个物理实验分为力学实验、电学实验、光学实验三大类，对实验的编排顺序并没有作特别的要求。各院校及各函授站可根据教学大纲的要求及各自实验室仪器的配置情况，从本书中选一部分作为学生应做的实验。

本教材的使用对象主要是函授学生、职教学生以及各工程类专科的学生，他们大多数存在工作与学习的矛盾，要在实验上花很多工夫也确有困难。有鉴于此，我们在编写这本教材时，力求通俗易懂。在第一章的物理实验基本知识中，考虑到目前的发展趋势，对误差估算兼述了平均绝对误差和标准误差两种算法，但对每个实验的误差处理不作具体规定。每个实验的内容分成两部分：(一) 实验目的、实验原理、预习检查题。其中，对实验原理的描述清楚、简洁，这部分内容是预习的重点。(二) 实验仪器、实验内容与步骤、数据记录与处理。其中，在实验步骤、数据记录与处理方面作了较为详细的描述，使学生在进行实验时，能够按照教材上的提示，一步一步完成实验。这部分内容也是实验的重点。为了方便学生写实验报告，大多数实验都列出了数据记录表格；在本书的最后部分还给出了三大类实验的实验报告示例。每个实验后面都列出一些思考题，供学生做完实验后自我小结用。

本书由刘云龙、孙文光主编并统稿与定稿、同济大学函授物理教研室的部分教师参与了编写。其中第一章的物理实验基本知识、第三章的声速测定、万用表的使用及第四章光学实验由孙文光执笔；第二章力学实验由李文尉执笔；第三章的电学实验主要由徐少磊执笔；实验报告示例及附录主要由赵跃英执笔；全书由陆廷济教授主审。本书的编写得到了同济大学函授与继续教育学院、职业与技术教育学院及物理系的大力支持，同时还得到了校内外许多同志的帮助和支持，在此谨致深切的谢意。由于时间仓促，编者水平有限，错误之处在所难免，恳请使用及阅读本书的教师、学生、同行不吝指正。

编　者

1998 年 3 月

目　　录

绪　　论

一、物理实验的地位

物理实验是科学实验的重要组成部分之一，物理学是自然科学中一门重要的基础学科，是建立在科学实验基础上的学科。物理学、物理实验的发展促进了历史上许多重大的技术革命，例如：热力学与气体动理论的发展，使人类进入了蒸汽机时代；电磁学的发展使人类进入了电气化的时代；原子物理学、量子力学的发展，促进了半导体、激光、核能技术的迅猛发展。当今世界，大规模集成电路、卫星通讯、超导技术、计算机技术、核能利用等许多高新技术的发展都离不开物理学、物理实验的发展。因此，物理学、物理实验是许多自然科学、工程技术学科的基础。

二、物理实验课的目的

1. 观察一些物理现象并研究其规律，掌握一些物理量的测量方法、技术，加深对物理学原理的理解。

2. 熟悉、了解一些量具、仪器的原理及其正确的使用方法，培养学生初步的科学实验工作能力。

3. 学会一些实验数据记录及其处理方法，能够撰写合格的实验报告。

三、物理实验课的程序

1. 熟悉教材，自学、预习第一章内容并完成练习题。

2. 根据教学安排的实验项目，逐一预习，重点放在每个实验的第一部分，并写出预习报告。其格式如下：

预习报告

一、实验名称

二、实验目的

三、实验原理（原理简述，必要的公式，原理图，线路图，做预习检查题）

四、实验仪器

五、实验内容与步骤

六、数据记录（尽量用表格形式）

3. 进行实验

进入实验室后，必须在教师指导下先熟悉实验中所用的各种仪器，然后按要求进行实验；实验时，应注意安全，爱护仪器设备；测量数据用钢笔或圆珠笔记录在预习报告的数据记录表格中，记录数据要用有效数字；实验中发现问题要及时向教师报告；实验结束后，必须将仪器设备复原。

4. 书写实验报告

做完实验后，就可着手写实验报告，其格式与预习报告类似。要求书写清晰，字迹端正，对预习报告上所记录的数据进行整理后记入实验报告中，再按有效数字的运算方法及误差理论进行处理，最后写出实验结果，并进行误差分析与讨论，做思考题。

第一章　物理实验基本知识

第一节　测量与误差

一、测量

所谓测量，就是将待测的物理量与一个被选作标准的同类量(称单位)进行比较，得出它们的倍数关系。因此，测量值必须包含数值和单位两个要素。关于单位的选用，根据《中华人民共和国计量法》，国家计量局规定以国际单位制(SI制)为国家法定计量单位，即以长度的单位“米”(m)，质量的单位“千克”(kg)，时间的单位“秒”(s)，电流的单位“安培”(A)，热力学温度的单位“开尔文”(K)，物质的量的单位“摩尔”(mol)，发光强度的单位“坎德拉”(cd)作为基本单位，其他单位都由以上七个基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。有关中华人民共和国法定计量单位的资料请参见附录。

测量可分为两类，凡是可以用仪器(或仪表)直接读出测量值的称为**直接测量**。例如用米尺测量单摆的摆长为1.095m，用秒表测得单摆的周期为2.1s，用天平称得试件的质量为184.85g，等等。

在一般情况下，对某个物理量的测量不能简单地用一个仪器来直接测得其量值，而必须通过将若干个直接测量值代入一定的公式计算出其结果，这种测量称为**间接测量**。例如：为了测量重力加速度 g，可以先测出单摆的长度 L 和周期 T，再利用公式 $g=\frac{4\pi^2 L}{T^2}$ 就可求得重力加速度值 g，重力加速度 g 就是间接测量量。

二、误差

被测物理量的大小是客观存在的，其值是确定的，我们称其为真值。然而在对其进行测量时，由于仪器的精度是有限的，实验的方法可能不够完美，测量人员的技术水平也各有区别，因此，所测得的结果与真值往往有一定的差异。我们把测量值 x 与真值 X 之差称为测量误差，用 Δ 表示，即

$$\Delta = x - X \tag{1-1}$$

误差可分三大类：系统误差、随机误差(亦称偶然误差)和过失误差。

(一) 系统误差

系统误差是指由以下几个原因引起的误差：

1. 仪器设备固有的缺陷和安装调节不妥。例如：刻度不准，零点没有校正，仪器的水平或垂直没有调整到位，天平不等臂，等等。
2. 实验方法和理论的不完善。
3. 实验环境(如温度、大气压等)的影响。
4. 实验者的生理、心理特点或缺陷引入的误差。

系统误差的特点是有一定的规律，例如，测量结果都大于真值，或者都小于真值，当测量条件改变时，误差亦按一定规律变化。

系统误差可以在实验前、实验中、实验后进行修正、消除或减少。例如:在实验前对仪器进行校准,在实验中采取一定的补偿,在实验后处理数据时加以修正,等等。

虽然系统误差在发现后可以消除、减小和修正,但如何发现它并寻找其规律却不容易。

(二) 随机误差

在我们努力消除或减小了系统误差之后,在相同的条件下对同一物理量进行多次重复测量,每次测量的误差时大时小、时正时负,既不可预测,又无法控制,我们把这种误差称为随机误差。这种误差既受到人们视觉、听觉、触觉等感觉能力的限制,又有实验环境等偶然因素的干扰,例如温度不均匀、振动、人的估读能力不同等。

随机误差虽然带有很大的偶然性,然而当测量次数很多时,它还是会显示出一定的规律,即服从统计规律。

(三) 过失误差

在实验中可能出现各种错误,如读数错误、记录错误、操作错误、计算错误等,由此而产生的误差称为过失误差。避免产生过失误差的方法是端正实验态度,养成认真、仔细的工作习惯。对于个别因失误而引入的异常数据,可以根据剔除准则加以剔除,必要时再补测几个数据。

在上述三种误差中,系统误差和过失误差应尽可能地消除或减小,我们以后的关于误差的计算,主要是估算随机误差。当然,即使算出了随机误差的大小,并不能认为测量的误差仅此而已,很可能还存在一些未知的系统误差或过失误差。

第二节　测量结果与误差的估算

一、随机误差的统计规律

在较多的情况下,测量的随机误差服从正态分布(亦称高斯分布)规律。正态分布曲线如图 1-1 所示。图中,横坐标表示误差 $\Delta = x - X$,纵坐标为概率密度函数 $f(\Delta)$。

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \tag{1-2}$$

式中特征量 σ 为

$$\sigma = \lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^2} \tag{1-3}$$

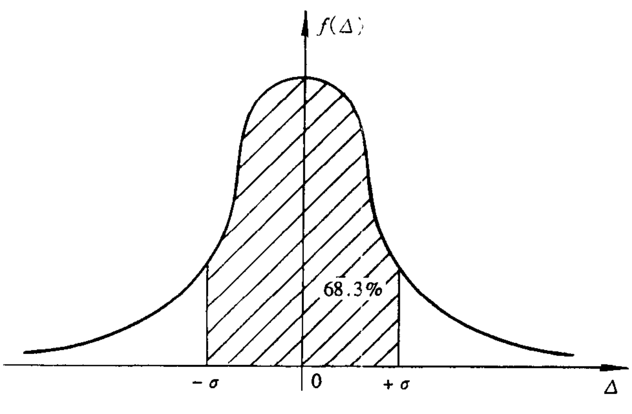


图 1-1　随机误差的正态分布曲线

称为标准误差。

服从正态分布的随机误差具有下列特点：

1．单峰性　绝对值小的误差出现的概率大。

2．对称性　绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

3．有界性　在一定的条件下，误差的绝对值不超过一定限度。

4．抵偿性　随机误差的平均值随测量次数的增加而趋于零，即

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i=0$$

根据上述统计特性可以证明，多次测量值的算术平均值是实验结果的最佳值——近真值。

由随机误差的抵偿性可知，当 $n\to\infty$ 时，有

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-X)=\frac{1}{n}\sum x_i-X\to 0$$

因此，平均值 $\bar{x}$ 趋近于真值 X，即　$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i\to X$　(1-4)

二、误差的估算

(一) 单次测量的误差

测量是用量具或仪器进行的，而任何仪器不可能无限精确，都存在误差。在正确使用仪器的条件下，测量可能出现的最大误差为仪器误差 $\Delta_{仪}$。

(二) 多次测量的误差

如前所述，当测量次数 $n\to\infty$ 时，平均值 $\bar{x}$ 趋近于真值 X，即

$$\bar{x}\to X$$

因此，在可能和需要的情况下，宜采用多次测量，将各次测量的算术平均值作为测量结果。

误差是测量值与真值之差；在实验中，被测物理量的真值往往是未知的，我们只能用对该物理量的测量结果的最佳值——多次测量的平均值 $\bar{x}$ 来替代其真值，而后计算各次测量的误差。则第 i 次测量的误差为　$\Delta_i=x_i-\bar{x}$

平均绝对误差为　$\overline{\Delta}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\Delta_i|$　(1-5)

测量结果可表示为　$x=\bar{x}\pm\overline{\Delta}$　(1-6)

应当指出，如果每次测量值都相同，则会出现 $\overline{\Delta}=0$；然而，由于任何测量都存在误差，因此不能将测量结果写成 $x=\bar{x}\pm 0$。出现这种情况时，应参照单次测量的误差处理。

当测量次数很多且随机误差服从正态分布时，可用正态分布函数中的特征量标准误差 σ 表示误差大小：

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^2}$$

由正态分布概率密度函数可算出，测量值 x 出现在 $\bar{x}\pm\sigma$ 范围内的概率为 68.3%。

当测量次数 n 不是很多时，应该用抽样样本标准偏差 s 来估算偶然误差，即

$$s_x=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}\qquad(1\text{-}7)$$

上式称为贝塞尔公式,实验结果可表示为

$$x = \bar{x} \pm s_x \tag{1-8}$$

由于一般测量次数总是有限的,因此通常直接将 s_x 称为标准误差。

(三) 相对误差

仅仅根据绝对误差的大小,还不能评价一个测量结果的可靠程度,还需看测定值本身的大小,为此引入相对误差的概念,其定义为

$$E = \frac{\Delta}{\bar{x}}$$

式中,Δ 可以是绝对平均误差$\overline{\Delta}$,也可是标准误差 s_x。相对误差一般用百分比来表示,即

$$E_r = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\% \tag{1-9}$$

它表征绝对误差在测定值中所占的比例,E_r 称为百分误差。

三、间接测量的结果与误差传递

(一) 间接测量的结果计算

设间接测定量 $$N = f(x, y, z, \cdots) \tag{1-10}$$

式中,$x, y, z, \cdots$为各自独立的直接测定量,当 $x = \bar{x} \pm \Delta x, y = \bar{y} \pm \Delta y,\ z = \bar{z} \pm \Delta z$ 时,间接测量的结果只需将各直接测量值的平均值代入式(1-10)即可得

$$N = f(\bar{x},\ \bar{y},\ \bar{z},\ \cdots)$$

若 $x, y, z, \cdots$虽经多次测量,但不在同一条件下测定,此时不能各自求平均值,而必须将每次测量结果代入式(1-10),即

$$N_1 = f(x_1,\ y_1,\ z_1,\ \cdots)$$

$$N_2 = f(x_2,\ y_2,\ z_2, \cdots)$$

$$\cdots$$

然后求平均值,得 $$N = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} N_i \tag{1-11}$$

(二) 误差的一般传递公式

若间接测量的物理量 N 是各自独立的直接测量物理量$x, y, z, \cdots$的函数,即

$$N = f(x, y, z, \cdots)$$

对上式求全微分得 $$\mathrm{d}N = \frac{\partial f}{\partial x}\mathrm{d}x + \frac{\partial f}{\partial y}\mathrm{d}y + \frac{\partial f}{\partial z}\mathrm{d}z + \cdots$$

用 $\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z, \cdots$,代替式中的 $\mathrm{d}x,\ \mathrm{d}y,\ \mathrm{d}z, \cdots$,由于上式中各项的符号并不确定,为谨慎起见,作最不利的情况考虑,因此将上式中各项取绝对值相加,即

$$\mathrm{d}N = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right|\Delta x + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right|\Delta y + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\right|\Delta z + \cdots \tag{1-12}$$

可以证明 $$\overline{\Delta N} = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right|\overline{\Delta x} + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right|\overline{\Delta y} + \left|\frac{\Delta f}{\Delta z}\right|\overline{\Delta z} + \cdots \tag{1-13}$$

(三) 标准误差的传递公式

由式(1-12)可知,每次测量的 ΔN_i 为

$$\Delta N_i = \frac{\partial f}{\partial x}\Delta x_i + \frac{\partial f}{\partial y}\Delta y_i + \frac{\partial f}{\partial z}\Delta z_i + \cdots$$

等式两边各自平方

$$(\Delta N_i)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x_i)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y_i)^2 + \cdots + 2\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\Delta x_i \Delta y_i + \cdots$$

然后对 i 求和得

$$\sum(\Delta N_i)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sum(\Delta x_i)^2 + \cdots + 2\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\sum(\Delta x_i)(\Delta y_i) + \cdots$$

当 n 很大时,上式中交叉项之和将趋于零,即

$$\sum = (\Delta x_i)(\Delta y_i) = \sum(\Delta y_i)(\Delta z_i) = 0$$

然后将式两边同除以 n,则得

$$\frac{1}{n}\sum(\Delta N_i)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \frac{1}{n}\sum(\Delta x_i)^2 + \cdots$$

式中,$\frac{1}{n}\sum(\Delta N_i)^2 = \sigma_N^2$,$\frac{1}{n}\sum(\Delta x_i)^2 = \sigma_x^2$。

由此可得标准误差的传递公式为

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \cdots} \tag{1-14}$$

表 1-1　　常用函数算术误差传递公式

函数表达式	绝对误差 ΔN	相对误差 $E = \frac{\Delta N}{N}$
$N = x \pm y$	$\Delta N = \Delta x + \Delta y$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x \pm y}$
$N = kx$	$\Delta N = k\Delta x$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x}{x}$
$N = xy$	$\Delta N = y\Delta x + x\Delta y$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
$N = \frac{x}{y}$	$\Delta N = \frac{y\Delta x + x\Delta y}{y^2}$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
$N = x^k$	$\Delta N = kx^{k-1} \cdot \Delta x$	$\frac{\Delta N}{N} = k\frac{\Delta x}{x}$
$N = \sqrt[n]{x}$	$\Delta N = \frac{1}{n}x^{\frac{1}{n}-1}\Delta x$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{n}\frac{\Delta x}{x}$
$N = \sin x$	$\Delta N = \|\cos x\|\Delta x$	$\frac{\Delta N}{N} = \|\cos x\|\Delta x$
$N = \ln x$	$\Delta N = \frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x}{x\ln x}$

表 1-2　　常用函数标准误差传递公式

函数表达式	标准误差 s_N	相对误差 $E=\frac{s_N}{N}$
$N=x\pm y$	$\sqrt{s_x^2+s_y^2}$	$\sqrt{s_x^2+s_y^2}/(x\pm y)$
$N=kx$	ks_x	$\frac{s_x}{x}$
$N=xy$	$\sqrt{y^2s_x^2+x^2s_y^2}$	$\sqrt{\left(\frac{s_x}{x}\right)^2+\left(\frac{s_y}{y}\right)^2}$
$N=\frac{x}{y}$	$\frac{x}{y}\sqrt{\left(\frac{s_x}{x}\right)^2+\left(\frac{s_y}{y}\right)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{s_x}{x}\right)^2+\left(\frac{s_y}{y}\right)^2}$
$N=x^k$	$kx^{k-1}s_x$	$k\left(\frac{s_x}{x}\right)$
$N=\sqrt[n]{x}$	$\frac{1}{n}x^{\frac{1}{n}-1}s_x$	$\frac{1}{n}\frac{s_x}{x}$
$N=\sin x$	$\lvert\cos x\rvert = s_x$	$\left\lvert\frac{\cos x}{\sin x}\right\rvert s_x$
$N=\ln x$	$\frac{s_x}{x}$	$s_x\frac{\ln x}{x}$

第三节　有效数字及其运算

一、有效数字

在物理实验中，测量任何一个物理量都要用数字及其单位来表示其大小，这个数字的位数主要由被测物理量的大小和所使用的仪器的精度决定。因此，在用仪器测量时，一般规定读数要读到仪器的最小刻度后再估读一位，这个包括了最后一位估读数（欠准数）的数字称为有效数字。上述规定就是直接测量的读数原则，按此原则读得的数一共有几位就称这个数有"几"位有效数字。有效数字的位数反映了物理量的大小和仪器的精度，不能随意地增减。应当注意，数字前面的"0"不是有效数字，数字后面的"0"是有效数字，例如：0.0200m 是三位有效数字。为了保证在单位换算时不改变有效数字的位数，应采用科学记数法，即小数点前面保留一位非零数，再乘 10 的幂次数表示数量级。例如，不能将 1.4m，记为 140cm，1400mm，即 1.4m≠140cm≠1400mm，应记为 $1.4\text{m}=1.4\times10^2\text{cm}=1.4\times10^3\text{mm}$。

二、有效数字的运算规则

在实验中往往要将测量结果进行运算，经运算后，会出现数字的位数越来越多；当两数相除而除不尽时，则商的数字位数为无限多。为了简化运算过程，在不增加因计算而引进的误差的情况下，必须按有效数字的运算规则来确定数字位数，其总原则是：运算结果只保留一位欠准数。下面我们通过举例来说明有效数字的运算规则（例题中在欠准数下面划线）。

（一）加减运算

【例 1】

$$\begin{array}{r} 21.\underline{3} \\ +\quad 4.28\underline{1} \\ \hline 25.\underline{58}\underline{1} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 21.\underline{3} \\ -\quad 4.28\underline{1} \\ \hline 17.\underline{01}\underline{9} \end{array}$$

根据总原则，有效数字只能保留一位欠准数，从而应舍去多余欠准数（四舍五入），此例中加法结果应为 25.6，减法结果应为 17.0。由此我们可以得到加减运算规则：

几个数相加减，最后结果中欠准数的位置与诸数中最大的欠准数位置对齐；亦可先对诸数按最大欠准数取齐有效数字，然后再加减，结果仍相同。这样计算可简单些，即例 1 题可按下面方法计算：

$$\begin{array}{r} 21.\underline{3} \\ +\quad 4.\underline{3} \\ \hline 25.\underline{6} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 21.\underline{3} \\ -\quad 4.\underline{3} \\ \hline 17.\underline{0} \end{array}$$

（二）乘除运算

【例 2】

$$\frac{3.\underline{4}\times 5.7\underline{8}}{12.0\underline{3}}=\frac{3.\underline{4}\times 5.\underline{8}}{1\underline{2}}=1.\underline{6}$$

按上例方法进行乘除运算，可以得出乘除运算规则：几个数相乘，最后结果的有效数字位数与诸数中有效数字位数最少的相同。同样也可先对诸数取齐有效数字位数，再行计算。

（三）函数运算

在乘法、开方、三角函数等运算中，有效数字位数一般保持不变。

（四）常数

π，e，整数的有效数字位数的取定应比其他数多取一位。

三、误差与有效数字

误差的有效数字一般取一位（取舍时采取进一法），且这一位是欠准数字，该欠准数位置必须与测量结果的欠准数位置对齐。

【例 3】

1.23 ± 0.0013 应写成 1.23 ± 0.01

1.23 ± 0.13 应写成 1.2 ± 0.2

相对误差的有效数字，我们作如下规定：

当 $E<10\%$ 时，取一位；

当 $E\geqslant10\%$ 时，取两位。

第四节　数据处理的基本方法

一、列表法

当测量的物理量较多，并且是多次测量时，必须将数据列入表格，这样才能有条不紊，既有助于表达出各物理量之间的对应关系，又有利于随时检查数据是否合理，发现实验中的问题。在设计表格时，有时也可把一些计算过程中的中间值列入表内，以利于计算和误差估算。

用列表法处理数据，需注意下列要求：

1. 标明表格名称及一些无法列入表中的物理量及其数据。
2. 各栏目均应标明名称及单位。
3. 表格中的数据应正确反映物理量的有效数字。

【例 4】　将二极管正向伏安特性曲线测量数据列表如下：

表 1-3　　　　**硅晶体二极管电压 U 与电流 I 的关系**

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U(V)	0.00	0.20	0.30	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
I(mA)	0.0	0.0	0.0	0.8	1.3	2.1	2.7	3.0	4.1	5.2	6.7

一、作图法

有些物理规律用图线表示，可以比较直观地表达相关各物理量之间的对应关系。从图中不用计算就可以查出物理量之间的对应值，在某些场合，还可以利用图线来求出实验所需的参数。因此，作图法在实验中是经常采用的一种处理数据的方法。

用作图法处理数据应注意下列几点：

1. 数据的记录　要用列表法记录数据。

2. 图纸的选用　根据变量间的函数关系选用相应的图标纸(通常采用的有直角坐标纸、对数坐标纸、极坐标纸等)，也可通过变量代换将某种函数关系转化为较简单的直线关系，然后用直角坐标纸作图。纸的大小要根据实验数据的有效数字及数据范围来确定，要使数据中的可靠数字在图中也是可靠数，而最后一位欠准数字在图中也应是估读数。

3. 坐标的分度和标记　一般以自变量作横坐标，应变量作纵坐标，并标明各坐标轴所代表的物理量符号及单位；坐标的分度不一定从零开始，可以从低于最小实验原始数据的某一整数开始，到高于实验数据最大数的某一整数为止；在坐标轴上每隔一定间距标出分度值，分度值之间的差值取 1,2,5 的组合数，禁忌用 3,7,11 的组合数。

4. 标实验数据点　根据实验数据，用"＋"，"×"，"⊙"，"△"等记号标出数据点在图上的位置，同一图线上的数据用同一种记号，不同的图线用不同的记号以示区别。

5. 连线　必须使用工具(通常是用透明的直尺、曲线板等)依照实验数据点的走向，画出光滑的线。所画的线应尽量通过较多的实验标点，其他不能通过的点应均匀地分布在线的两侧；线的长度一般不能随意延伸。对已知函数关系的曲线，则必须按函数关系画线(例如直线、抛物线等)。

对于仪器的校正曲线和定标曲线，则必须将相邻两点用直线连接，整个线形呈折线状。

6. 图名和注解　在图纸的明显位置写上图名、绘制者的姓名、日期及必要的说明。

【例 5】 图 1-2 为用表 1-3 中的数据作的晶体二极管的伏安特性曲线。

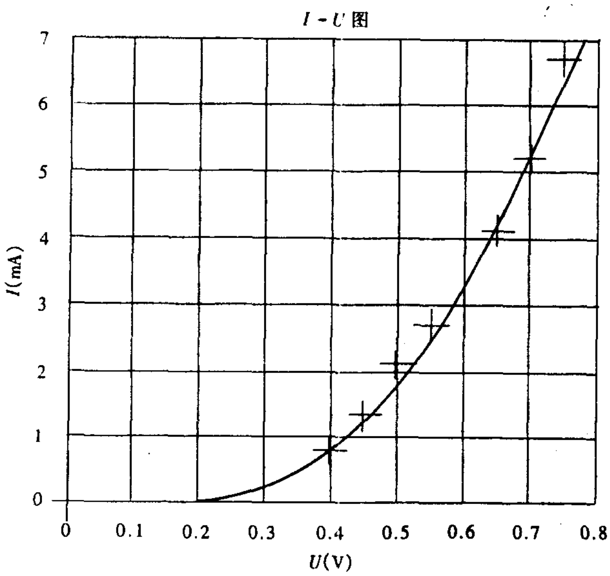


图 1-2　晶体二极管伏安特性曲线

三、逐差法

在等间隔线性变化测量中，常常采用逐差法来处理数据。逐差法是物理实验中常用的数据处理方法之一。设 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 为测得的一组等间隔数，n 为测量次数，是偶数。若欲求其平均差值 $\overline{\Delta x}$，用一般的求平均值的方法，得

$$\overline{\Delta x} = \frac{(x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + (x_4 - x_3) + \cdots + (x_n - x_{n-1})}{n-1}$$

$$= \frac{x_n - x_1}{n-1}$$

由此可知，只有始末两个测量值起作用，而中间测量值全部抵消，显然这就失去了多次测量能减小随机误差的作用。然而，只需在数据处理方法上作一些变化，就能将多次测量的优点保留下来。通常，将数据分成两组，一组为 $x_1, x_2, \cdots, x_{\frac{n}{2}}$；另一组为 $x_{\frac{n}{2}+1}, x_{\frac{n}{2}+2}, \cdots, x_n$，用对应项的差值（即逐差）来求间隔值得

$$\Delta x_1 = \left(x_{\frac{n}{2}+1} - x_1\right) \Big/ \left(\frac{n}{2}\right)$$

$$\Delta x_2 = \left(x_{\frac{n}{2}+2} - x_2\right) \Big/ \left(\frac{n}{2}\right)$$

$$\cdots$$

$$\Delta x_{\frac{n}{2}} = \left(x_n - x_{\frac{n}{2}}\right) \Big/ \left(\frac{n}{2}\right)$$

从而得平均值

$$\overline{\Delta x} = (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \cdots \Delta x_{\frac{n}{2}}) \Big/ \left(\frac{n}{2}\right)$$

$$= (x_n + x_{n-1} + \cdots x_{\frac{n}{2}+1} - x_{\frac{n}{2}} - x_{\frac{n}{2}-1} - \cdots - x_1) \Big/ \left(\frac{n}{2}\right)^2 \tag{1-15}$$

由此可见，用逐差法求平均值，各次测量数据都被用上了，保持了多次测量的优点。

第五节　常用量具、器件和仪器

一、游标卡尺

游标卡尺是一种精度较高的长度测量工具，其基本原理是利用精密加工的主尺刻度与游标刻度存在的微小长度差作为最小分度值，进行高精度测量。常用的游标卡尺测量范围0～125mm，最小分度值为0.02mm，用该种游标卡尺测量长度，最后一位数一定为偶数，且不能估读。游标卡尺的外形图、原理和使用方法详见本书实验一的“固体密度的测量”。

二、螺旋测微计

螺旋测微计是一种精度比游标卡尺更高的长度测量工具，它是利用螺旋测微的原理实现高精度的长度测量。常用的螺旋测微计测量范围为0～25mm，最小分度值为0.01mm。使用螺旋测微计需注意下面几点：

1. 必须使用螺旋测微计尾部的棘轮旋钮来旋转套筒，以防止损坏螺纹。
2. 必须消除零点误差，即先记下初读数，再将末读数（测量结果）减去初读数。
3. 螺旋测微计可以估读一位，因此读数应精确到0.001mm。