医用物理学实验教程

主编 唐伟跃 张泽全

YIYONG WULIXUE SHIYANJIAOCHENG

河南医科大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学实验教程/唐伟跃,张泽全主编.—郑州:河南医科大学出版社,1999.7
ISBN 7-81048-316-1

Ⅰ.医… Ⅱ.①唐… ②张… Ⅲ.医用物理学-实验-高等学校-教材 Ⅳ.R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 11853 号

内 容 提 要

本书是为医科学生编写的医用物理学实验教材。本书除绪论外,共选编 29 个物理实验。在选材时,力求符合目前高等医药院校物理教研室的实验设备配置状况,并注意与医学相结合。全书实验原理叙述清楚,实验步骤简明扼要,每个实验后面精选的思考题与练习题有利于学生自学和巩固实验知识,开拓学生思路。

本书可以作为高等医学院校临床医学、儿科、卫生、口腔、检验、影像及药学等专业的物理实验教材,也可作为其他医学生以及教师用参考书

河南医科大学出版社出版发行
郑州市大学路 40 号
邮政编码 450052 电话 (0371)6988300
河南医版激光照排中心照排
郑州文华印刷厂印刷
开本 787×1092 1/16 印张 10 字数 237 千字
1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月第 1 次印刷
印数 1-5 450 册 定价:14.80 元

前　言

本书是为医科学生编写的一本物理实验教材，它的任务是为医科学生提供系统的物理实验技能训练的知识，为学习后继课程和将来从事医疗、卫生、检验等工作打好基础。

本书除绪论外，选编了29个实验，其中包括误差理论和数据处理等，内容力求与医药学相结合。本书在编写时吸收了国内各兄弟院校协编和自编的物理实验教材的经验，并在河南医科大学物理学教研室十多年来的教学实践和编写的物理学实验讲义的基础上，经过删节、增补、改写和提高，编写成《医用物理学实验教程》。在编写过程中，认真考虑目前国内多数医药学院校物理实验室现有的设备条件和今后几年医学教育发展的需求，采用多种实验方法和测量项目，尽量使实验原理部分与理论课内容结合得更密切，使本书更能适应高等医药院校物理实验的实际需要。

本书由河南医科大学物理学教研室唐伟跃、张泽全担任主编。参加本书编写工作的有：河南医科大学唐伟跃（绪论、实验十三、实验二十、实验二十三、实验二十六、实验二十七、实验二十八），王杰芳（实验一、实验三、实验五、实验二十一、实验二十二），罗荣辉（实验二、实验十一、实验十九、实验二十四），张建民（实验四、实验九、实验二十九），刁振琦（实验六、实验十四、实验十六、实验十八），饶凤飞（实验七），王海燕（实验八、实验十二），张泽全（实验十、实验十七），阴志刚（实验十五、实验二十五）。

本书在编写过程中得到河南医科大学教务处、基础医学院的积极支持。河南医科大学物理学教研室的领导和老教授对本书的编写和选题提出许多宝贵意见。本书中多数插图由河南医科大学物理学教研室饶凤飞同志绘制。在此一并表示衷心地感谢。

由于编写水平所限，书中难免存在缺点和不足，敬请各位同行和广大读者批评指正。

《医用物理学实验教程》编委会

一九九九年三月

目　录

绪　论

一、医用物理学实验的意义、目的和要求

1.意义　物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的学科，它也是一门实验学科。物理实验的内容十分广泛，其方法和测量技术广泛应用于其他学科和技术中，在临床诊断、治疗、保健、检验和药物分析鉴定及生命机制研究中起着重要作用。物理技术在这些领域中的应用情况已经成为其先进程度的一种标志。因此要掌握现代医药科学技术，必须具备一定的物理实验理论知识和操作技能。

2.目的　物理实验是物理教学中的重要环节。通过实验操作，使学生掌握一些基本物理量的测量方法，学会正确使用物理仪器，熟悉一些物理实验方法。通过实验操作，培养学生使之具备严谨的科学工作作风和较强的科研工作能力。通过实验操作，巩固和加深学生对所学的物理现象及其规律的认识。

3.要求　根据高等医学院校学生基本技能训练项目的基本内容和医学科学发展的需要，要求学生通过物理实验，基本掌握常用的物理量的测量原理和方法，其中包括长度、质量、时间、角度、温度、密度、压强、电流、电阻、电压、电动势、振动频率和光波波长等的测量；包括熟悉阴极射线示波器、万用电表、光学显微镜和分光计的使用；在误差理论，有效数字记录和运算，估计实验结果的可靠性，用表格、曲线、坐标图表示实验结果等方面，能得到一定程度的训练，能写出正确的实验报告；并在照相、显微摄影、扩印的暗房技术、物质对放射线的吸收和简单的电子技术基础等方面得到初步的训练。

医用物理学实验课就是为了达到以上目的，根据以上基本要求开设的。因此，学生应该在理论指导下，按正规的操作方法进行操作。在实验过程中，应该认真地观察现象，正确记录数据，分析实验结果，爱护每一件实验仪器。在实验结束后，应科学地完成实验报告。报告中应做到有数据、有分析、有结论，并且书写整齐，图表美观，语句明晰易懂。还要求学生保持实验室整洁，严格遵守实验室各项规章制度。

二、测量的误差

1.误差的概念　物理实验离不开测量，测量的目的是希望确定被测物理量的真值。但由于仪器、设备、测量方法、实验环境和实验者本身存在的各种不理想情况，测量的结果只能具有相对的准确程度，而不是它本身的真值。例如同一个人使用同一个仪器进行多次测量时，各次所得到的测量值也会不同。每一个测量值与真值之差叫误差。误差和错误不同，错误是由测量者不小心或测量方法不正确所造成的，只要仔细、方法正确就能避免错误。但误差是不可避免的，因而真值是测不出来的。所以测量时应该在尽可能消除或减小误差之后，求出在该条件下的最可依赖值，并对它的精确程度做出正确的估计，有关的误差理论就是为了达到这一目的而提出来的。

2.误差的分类　根据误差产生的原因和性质，可分为系统误差和偶然误差两大类。

(1)系统误差：这类误差主要来源于仪器本身的缺陷（如零点未校准、刻度不准确）、实

验条件与理想条件不符合、测量方法上的缺陷或定理、公式本身不够严谨等。这类误差的特点是：测量值总是有规律地朝着某一个方向偏离真值，即使对同一对象做重复测量，其偏离真值的大小总是在一定的范围内。例如由于温度而变长的米尺，测量的长度总是较真值偏小，并且重复测量也不能使这种误差减小。因此把它叫做系统误差，又叫恒定误差。这种误差可以通过改进测量方法，校正仪器的装置，调节仪器的零点，修正定理和公式等方法来减小和消除。

(2)偶然误差：偶然误差又叫随机误差或几率误差。这是一种在实验过程中，由于某些不可避免的偶然因素的影响引起的误差。这些因素是温度、压强、电路中电压、电流等的涨落，环境的干扰以及实验者由于感官条件的限制而使读数不易准确等。偶然误差的特点是：测量值时大时小，有正有负，方向不一。偶然误差是由一些偶然因素造成的，故每次测量的偶然误差是不可预测的，但其出现的机会服从统计规律，即在通常情况下，绝对值小的偶然误差比绝对值大的偶然误差出现的几率大，绝对值相等的正、负误差出现的几率相等，绝对值很大的偶然误差出现的几率为零。偶然误差遵循的这种分布称为高斯分布(Gaussianu distribution)或正态分布。基于以上性质，增加测量次数对于提高测量结果的准确程度是有利的，如不考虑系统误差，则测量次数愈多，其算术平均值就愈接近真值。

3.直接测量和间接测量的误差　测量的种类很多，但可归纳为直接测量和间接测量。

(1)直接测量误差的表示方法：在测量中，某待测量值能够从仪器刻度上直接读出，这类测量称为直接测量，一般的基本测量都属于直接测量。对同一个量进行实际测量时，测量次数不可能无限多，因此测得量的算术平均值并不就是真值，但同各次测量的值相比，它毕竟是最可靠的。设各次测量值分别为 $N_1, N_2 \cdots\cdots N_n$，则测得量的算术平均值为：

$$\overline{N} = (N_1 + N_2 + \cdots\cdots + N_n)/n = \sum_{i=1}^{n} N_i / n$$

为了确定测量的准确程度，需要知道平均值的误差。本来平均值的误差应是平均值 $\overline{N}$ 与真值 N_0 之差，但 N_0 并不知道，因此用平均绝对误差来表示。

绝对误差　测量值与真值之差，称为绝对误差。真值是一个理想的值，是未知的，故在实际测量中常用偏差或残余误差来代替绝对误差。这里的所谓偏差是指平均值 $\overline{N}$ 与各次单独测量值之差，用 ΔN_i 表示，即 $\Delta N_1 = N_1 - \overline{N}, \Delta N_2 = N_2 - \overline{N}, \cdots \Delta N_n = N_n - \overline{N}$，这些偶然误差的大小和正负是随机分布的，取它们绝对值的算术平均值，叫平均绝对偏差，简称绝对偏差，用 ΔN 表示，即：

$$\Delta N = (|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + \cdots + |\Delta N_n|)/n = \sum_{i=1}^{n} |\Delta N_i| / n$$

于是测量结果的表达式为：

$$N_0 = \overline{N} \pm \Delta N \tag{0-1}$$

它表示测得的最可靠值是 $\overline{N}$,测得值可能存在的误差范围为 $\pm\Delta N$,而真值 N_0 就在 $\overline{N}+\Delta N$ 和 $\overline{N}-\Delta N$ 的范围内。例如用米尺多次测量一根短棍的长度,得:$\overline{L}=8.34$ cm,$\Delta L=0.01$ cm,则 $L_0=\overline{L}\pm\Delta L=(8.34\pm0.01)$cm,它表示短棍的真实长度在 8.33 cm 与 8.35 cm 之间。

这里应该说明,绝对偏差和绝对误差在概念上是不同的,但在实际运算时,并没有严格区分。

相对误差　一般来说绝对偏差可以大体说明测量结果的好坏,但只用绝对偏差有时并不能明显地表示测量结果的准确程度,特别是不便于明确比较不同测得量中哪一个的准确度更高。例如测量两根长、短不同的棍子,测得结果分别为 $L_1=(8.34\pm0.01)$cm,$L_2=(88.34\pm0.01)$cm,虽然它们的绝对偏差相同,但对长棍测量的准确程度显然要高些。为了鲜明地表示出测量的准确程度,通常采用相对误差表示法,即测量的绝对误差与待测量真值之比,但在实际测量中相对误差又只能以绝对偏差来定义,所以测量结果的相对误差,严格来说应该叫做相对偏差,用下式表示:

$$E_n = \frac{\Delta N}{\overline{N}} \times 100\% \tag{0-2}$$

显然,对于大小不同的物理量,E_n 越小,其测量的准确度越高。有时被测量的物理量有公认值或标准值,此时 E_n 应等于测量值与公认值之差的绝对值除以公认值的百分数。

【例 0-1】 用螺旋测微计测铜杆的直径,其各次测量值、绝对偏差和相对误差列于表 0-1。

表 0-1　用螺旋测微计测铜杆直径

测量次数	测量值(cm)	绝对偏差(cm)	相对误差	测量结果(cm)
1	3.425 5	0.000 1	$E_n=\frac{\Delta N}{\overline{N}}\times100\%$ $=\frac{0.000\,4}{3.425\,6}\times100\%$ $=0.01\%$	$N_0=\overline{N}\pm\Delta N$ $=3.425\,6\pm0.000\,4$
2	3.425 0	0.000 6		
3	3.426 0	0.000 4		
4	3.426 0	0.000 4		
平均	$\overline{N}=3.425\,6$	$\Delta N=0.000\,4$		

有时由于某些原因只可能或只需要测量1次，因而无法计算平均绝对偏差，只能估计可能发生的最大偏差。通常，最大偏差可估计为仪器最小刻度的一半。

在医学测量中，广泛采用标准偏差(又叫方差)来衡量数据的分散程度。标准偏差的数学表达式为：

$$\sigma = \sqrt{\sum (N_i - N_0)^2 / n} \qquad (0-3)$$

计算标准偏差时，对单次测量的偏差加以平方，不仅可以避免单次测量偏差相加时正负抵消，更重要的是大偏差能显著地被反映出来，从而更好地说明数据的分散程度。

在医用物理实验中，测量次数一般不是很多($n<10$)，故用测量对象的标准偏差 S 来衡量测量数据的分散程度，此时标准偏差的数学表达式为：

$$S = \sqrt{\sum (N_i - \overline{N})^2 / (n-1)} \qquad (0-4)$$

式中$(n-1)$称为自由度，是用于计算一组测量值分散程度的独立偏差的数目，如在不知道真值的情况下，对一个量进行一次测量，其独立的偏差数为零。即不可能计算测量值的分散度。如果进行2次测量，独立的偏差数为1(虽然有2个偏差，但由于偏差之和为零，所以独立的偏差数只有1个)，分散程度就是这2个测量值之差。如果进行 n 次测量，则自由度为 $n-1$。在测量次数足够多时，n 与 $n-1$ 的区别很小，此时 $\overline{N} \to N_0$，而 $S \to \sigma$。在本书的实验中用这种方法计算误差虽然不多，但它是一种很重要的计算误差的方法。

(2)间接测量的误差表示方法：在物理实验中的测量几乎都是将某些直接测量值按照已知的测量公式(函数关系)，将待求量计算出来，这就叫间接测量或叫导出量。因为测量公式中的直接测量值都含有误差，所以间接测得量也必然有误差，这叫误差的传递。其误差的大小取决于各直接测量误差的大小以及函数的形式。表示间接测量值误差与直接测量值误差之间的关系式，称为误差传递公式。

设 N 为间接测得量，$A, B, C\cdots$为直接测得量，它们之间的函数关系为：

$$N = f(A, B, C, \cdots)$$

各直接测得量可表示为：$A = \overline{A} \pm \Delta A$，$B = \overline{B} \pm \Delta B$，$C = \overline{C} \pm \Delta C$，…代入上式计算，间接测得量的结果可写成：

$$N = \overline{N} \pm \Delta N$$

$$E_n = \frac{\Delta N}{\overline{N}} \times 100\%$$

式中 $\overline{N} = f(\overline{A}, \overline{B}, \overline{C}, \cdots)$是间接测得量的算术平均值，是把各个直接测得量的平均值代入公式经计算得出的。而 ΔN 是间接测得量的算术平均绝对偏差，它的计算方法如下：

①如果间接测量值是 2 个直接测量值的和或差，即 $N = A \pm B$，将 $A = \overline{A} \pm \Delta A$，$B = \overline{B} \pm \Delta B$ 代入式中，得：

$$N = \overline{N} \pm \Delta N = (\overline{A} \pm \Delta A) \pm (\overline{B} \pm \Delta B)$$

可见 $\overline{N} = \overline{A} \pm \overline{B}$，$\Delta N = \Delta A + \Delta B$，即两量之和或差的绝对偏差等于两量的算术平均绝对偏差之和。而相对误差为：

$$E_n = \frac{\Delta N}{\overline{N}} \times 100\% = \frac{\Delta A + \Delta B}{\overline{A} \pm \overline{B}} \times 100\%$$

②如果间接测量值是 2 个直接测量值的一般乘、除关系，其相乘积的运算结果是：

$$\begin{aligned}\overline{N} \pm \Delta N &= (\overline{A} \pm \Delta A) \cdot (\overline{B} \pm \Delta B) \\ &= \overline{A} \cdot \overline{B} \pm \overline{A} \cdot \Delta B \pm \overline{B} \cdot \Delta A \pm \Delta B \cdot \Delta A\end{aligned}$$

因为 ΔA 和 ΔB 2 个量与 $\overline{A}$ 和 $\overline{B}$ 相比较可视为很小，所以 $\Delta A \cdot \Delta B$ 可以忽略，因此相乘积的绝对偏差为：

$$\pm \Delta N = \pm (\overline{A} \cdot \Delta B \pm \overline{B} \cdot \Delta A)$$

而相乘积的相对误差为：

$$E_N = \frac{\Delta N}{\overline{N}} = \frac{\overline{A} \cdot \Delta B + \overline{B} \cdot \Delta A}{\overline{A} \cdot \overline{B}} = \frac{\Delta A}{\overline{A}} + \frac{\Delta B}{\overline{B}}$$

即等于各量的相对误差之和。

对于两量的商，依同样的方法可以计算出它们的绝对偏差和相对误差。对于其他的函数形式，间接测量误差计算公式可由求函数的全微分求得，这里不再作推导，只把它们的结果列在表 0 - 2 中，以备查用。

【例 0 - 2】 有一装有空气的瓶，其总质量 $M = 20.142\,5\ \text{g} \pm 0.000\,2\ \text{g}$，今将其中空气抽去，称得其质量 $m = 20.010\,5\ \text{g} \pm 0.000\,2\ \text{g}$，问瓶内空气的质量为多少克？

解：设瓶内空气质量为 N，则：

$$\bar{N} = \bar{M} - \bar{m} = 20.142\,5 - 20.010\,5 = 0.132\,0$$

$$\Delta N = \Delta M + \Delta m = 0.000\,2 + 0.000\,2 = 0.000\,4$$

$$N = \bar{N} + \Delta N = 0.132\,0 + 0.000\,4$$

$$E_N = \frac{\Delta N}{\bar{N}} \times 100\% = \frac{0.000\,4}{0.132\,0} \times 100\% = 0.3\%$$

表 0 - 2 间接测量误差计算公式表

函数关系 $N = f(A, B, \cdots)$	间接测得量的	
	绝对偏差 $\pm \Delta N$	相对误差 $E_N = \frac{\Delta N}{\bar{N}}$
$A + B + \cdots$	$\pm(\Delta A + \Delta B + \cdots)$	$\frac{\Delta A + \Delta B + \cdots}{\bar{A} + \bar{B} + \cdots}$
$A - B$	$\pm(\Delta A + \Delta B)$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{\bar{A} - \bar{B}}$
$A \cdot B$	$\pm(A \cdot \Delta B + B\Delta \cdot A)$	$\frac{\Delta A}{\bar{A}} + \frac{\Delta B}{\bar{B}}$
$A \cdot B \cdot C$	$\pm(\bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \Delta A + \bar{A} \cdot \bar{C} \cdot \Delta B + \bar{A} \cdot \bar{B}\Delta \cdot C)$	$\frac{\Delta A}{\bar{A}} + \frac{\Delta B}{\bar{B}} + \frac{\Delta C}{\bar{C}}$
A^n	$n\bar{A}^{n-1} \cdot \Delta A$	$n\frac{\Delta A}{\bar{A}}$
$A^{1/n}$	$\frac{1}{n}\bar{A}^{1/n-1} \cdot \Delta A$	$\frac{1}{n}\frac{\Delta A}{\bar{A}}$
$\frac{A}{B}$	$\pm\frac{\bar{B} \cdot \Delta A + \bar{A} \cdot \Delta B}{\bar{B}^2}$	$\frac{\Delta A}{\bar{A}} + \frac{\Delta B}{\bar{B}}$
kA（k 为常数）	$\pm k \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta A}{\bar{A}}$

【例 0 - 3】 有一圆柱体，测得其高 $h = (10.0 \pm 0.1)$cm，直径 $d = (5.00 \pm 0.01)$cm，试计算其体积，并写出测量结果。

解： 已知圆柱体的体积公式 $V = \frac{\pi}{4}hd^2$，根据表 0 - 2 中的公式，得圆柱体的相对误差为：

$$E_N = \frac{\Delta V}{\overline{V}} = \frac{\Delta h}{\overline{h}} + 2\frac{\Delta d}{\overline{d}} = \frac{0.1}{10.0} + \frac{2 \times 0.01}{5.00} = 1\%$$

圆柱体体积的平均值为：

$$\overline{V} = \frac{\pi}{4} hd^2 = \frac{1}{4} \times 3.14 \times 10.0 \times (5.00)^2 = 196.2\ \text{cm}^3$$

其绝对偏差为：

$$\Delta V = E_N \cdot \overline{V} = 0.01 \times 196.2 = 2\ \text{cm}^3$$

于是测量结果可写成：

$$V = \overline{V} \pm \Delta V = 196 \pm 2\ \text{cm}^3$$

三、有效数字及其运算

1.有效数字的概念　任何一个物理量，其测量的结果既然都存在着误差，那么，它的数值就不能无止境地写下去。由于实验结果不仅要表示量值的大小，还要反映数据的准确程度，所以在记录测量结果和进行运算的时候，就必须遵守有效数字的法则。所谓有效数字，就是将一测量结果的数值记录到有误差的那一位为止，所有这些记录下来的数字除用以表示小数点位置的零外，都是有效数字。

2.有效数字的记录　测量仪器的最小刻度所表示的大小称为仪器的精密度。例如米尺的精密度为 1 mm；游标卡尺的精密度为 0.1 mm、0.05 mm、0.02 mm 等；螺旋测微计的精密度为 0.01 mm；温度计的精密度为 0.1 ℃等。仪器的刻度越小，说明精密度越高。

在用数字表示测量结果时，要求既能表示出测量数据的大小又能表示测量的准确程度，因此测量数据的记录和通常数学上数字的记法是不相同的。在大多数情况下，所量度的物理量其数值在 2 个刻度之间就必须加以估计，例如图 0－1，用刻有厘米的皮尺来测量一棒的长度，很容易读出这棒的长度是 >10 cm，<11 cm。虽然这种皮尺没有刻到毫米，但可以估计到毫米（最小刻度约 1/10），因此棒长可以读为 10.2 cm，至于再想多读一位小数，用这种皮尺是不可能的，因为任何一个读数的估计数字一般不能超过 1 位。如果用刻有毫米的米尺来测量，便可直接读到毫米，估计到毫米的 1/10，如 10.23 cm。若该棒的长度恰巧为 10.2 cm，则应该写成 10.20 cm。

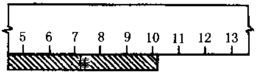

图 0－1　皮尺测量棒的长度

上面的例子说明，因测量仪器的精密度不同，测量同一长棒所得到的结果也不同。前

者仅可估计到毫米，得到3位有效数字，后者可估计到1/10 mm，得到4位有效数字。这些数字中最后1位是估计得到的，是欠准数字，又叫可疑数字，而估计数字前面的数字都是准确数字，准确数字和欠准数字合称为有效数字。有效数字的多少是由测量仪器的精密度决定的，因此不能随便增减数字。同一物理量有效数字愈多表示测量的准确度愈高。

确定有效数字的位数时应注意以下几点：

(1)小数点前后的数字都是有效数字，有效数字的位数与小数点的位置无关，例如10.23 cm和0.102 3 m都是四位有效数字；

(2)测量结果的读数中，最后1位数字必须是欠准数字。如果物体刚好与刻度线相齐，则估计数为“0”。这里的“0”不能忽略，否则测量结果将比仪器的精密度降低10倍。例如测得一棒长为10.50 cm，绝不能写为10.5 cm；

(3)由前面所说可知，“0”字在数字之后或在数字之间都是有效数字，但要注意数字前面的“0”不是有效数字。因为数字前面的“0”仅仅表示所用单位的大小，并不表示量度的准确程度，例如7.03 cm和0.070 3 m都是3位有效数字；

(4)遇到很大的数时，往往用10的 n 次方表示，例如不可把光速写成29 976 000 000 cm/s，因为这样表示的话，其有效数字是11位，实际上不可能有这样高的准确程度，所以应根据实际测量时的有效数字来决定其位数，如把它记成 $2.997\,6\times10^{10}$ cm/s，其有效数字是5位。遇到很小的数字，可用10的负 n 次方来表示，如钠光波长为0.000 058 93 cm，有效数字是4位，应把它写成 5.893×10^{-5} cm，有效数字也是4位。

应该说明，有效数字只适用于实验数据和一些常数的近似值(例如 $\pi=3.14$ 是3位有效数字，而 $\pi=3.141\,6$ 是5位有效数字)，但不适用于准确值，如球形体积 $V=\frac{4}{3}\pi r^3$，公式中分母、分子和指数，不能认为是1位有效数字，它们都是准确数字，参与运算不影响有效数字的位数。

使用有效数字，可以避免烦琐运算，并能使测量结果与测量仪器的精密度相符合。

3.有效数字的运算　有效数字的运算方法是以误差理论为根据的，因此在进行运算时，任何一个欠准数字与其他数字进行四则运算的结果，也是欠准数字，并遵从如下原则：

计算结果的数值只保留一位欠准数字，去掉第二位欠准数字时要用四舍五入法。

(1)有效数字的加、减法

【例0-4】　$251.3+24.45=275.8$

【例0-5】　$10.5-4.28=6.2$

可见，有几个数相加或相减时，最后结果只保留到参加运算的各量中欠准数字位数最大的一位。

(2)有效数字的乘、除法

【例0-6】　$4.178\times111=464$

【例0-7】　$582\,0\div121=48.1$

可见，有几个数相乘或相除时，最后结果的有效数字的位数和各量中有效数字位数最少的相同。此外乘除法有时可多保留1位，有时则少保留1位，这里不作详细讨论，但在大多数的情况下，以上规则都是合理的，所以在计算实验结果时，根据以上规则即可。

(3)乘方、开方、三角函数等运算结果的有效数字的位数，均与测量值的有效数字相同，例如：$(36.4)^2 = 1.33 \times 10^3$；$(56.3)^{1/2} = 7.50$；$\sin 35° = 0.57$。

以上这些规则只适用于测量数值的计算，至于公式中的常数、指定数则不需按此规则处理。在计算时如遇到常数，其位数的取法应以测量数中有效数字位数最少的一位为标准。关于绝对偏差或绝对误差、相对偏差或相对误差的有效数字，在我们的实验中规定只取1位。

【例0-8】 用单摆测定重力加速度，实验所得摆长 $L = 100.23$，振动次数 $n = 100$ 次，时间 $t = 200.2$ s，从单摆周期公式

$$T = 2\pi\sqrt{L/g}$$

得知 $g = 4\pi^2 L/T^2$，$T = \dfrac{t}{n} = \dfrac{200.2}{100} = 2.002$ s，式中 4π 是常数，n 是指定数，L、T 是测量数，以测量数为依据，π 应取4位有效数字。于是：

$$g = 4 \times 3.142^2 \times 100.23/2.002^2 = 987.0\ \mathrm{cm/s^2}$$

在这个例子里，要特别注意哪些是测量数，哪些是常数，在运算过程中的有效数字要取得适当，同时实验结果的数据和计算结果不用分数表示。

四、数据处理

在物理实验中，为了直观地表达物理量之间的关系，便于检查测量结果是否合理，分析物理量之间存在的规律性，常用列表记录和图示法。

1.列表记录法　表格设计要简明，易于看出有关物理量之间的关系。表格中各符号所代表的物理量的意义要清楚并写出单位。单位一般写在标题栏中，在各数据中无需重复地标明单位。表中数据要正确地选用测量结果的有效数字，以反映测量的精确度。在表中不好说明的问题，可在表下附注。

2.图示法　将测量的数据在坐标纸上标记出来，形成一系列的点，把这些点连成曲线，这种以几何图形表示实验数据的方法，就是图示法，它能一目了然地显示出相关物理量之间的变化规律。作图时应注意以下几点：

(1)坐标纸的选用：应根据实验情况确定坐标纸大小，以充分利用纸张幅面为原则；

(2)坐标轴的确定：习惯上以横轴表示自变量，纵轴表示因变量，并标明名称、单位以及整齐的数字；

(3)标度要适当：作图时纵横坐标的起点不一定以“0”开始，应使坐标轴的两端接近测量值中最大和最小的量。纵横的分度值不一定相同，使所画的图线不偏于一边或一角，并注意使实验数据中的有效数字都能标出；

(4)实验数据表示：常用小圆圈或打叉等符号在坐标纸上准确地表示实验数据；

(5)用曲线板或直尺画出光滑曲线：不一定通过所有的点，只要使标明的符号均匀分布在曲线或直线两侧的近旁。同一坐标纸上可以做若干曲线，但不同曲线上的实验数据点应以不同的符号表示；

(6)在图的下方应注明曲线的名称。

五、误差、有效数字和作图练习

1. 下列情况属于哪种误差?

(1)游标卡尺的零点不准;

(2)水银温度计的毛细管不均匀;

(3)实验室用电功率较大幅度的变化引起电压测量的误差。

2. 测同一金属杆的长度(10 次)如下,试计算其算术平均值、绝对偏差、标准偏差(方差)和相对误差,并写出测量结果。

30.45,30.52,30.43,30.49,30.48,30.50,30.46,30.51,30.47,30.49。

3. 用误差理论和有效数字的运算法则,改正下列错误:

(1)$L = 10.30 \pm 0.002$ cm

(2)$m = 54\ 000 \pm 1\ 000$ g

(3)$t = 10.60 \pm 0.5$ s

(4)$12.34 + 1.234 + 0.012\ 34 = 13.586\ 34$ kg

(5)$12.34 \times 0.023\ 4 = 0.288\ 756$ cm

(6)$0.123\ 4 \div 0.023\ 4 = 5.273\ 5$ cm

4. 完成下列单位变换

$L = 3.756 \pm 0.001$ m =　　　　cm =　　　　mm =　　　　dm

5. 有一铅圆柱体,测得其高 $h = (4.12 \pm 0.01)$cm,直径 $d = (2.040 \pm 0.001)$cm,质量 $m = (149.10 \pm 0.05)$g,求其密度。

6. 将下列数据画成曲线(在定温下,空气压强和容积的关系曲线)

压强(10^5Pa)	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	6.00	10.00
容积(L)	49.2	24.6	16.4	12.3	0.85	8.20	7.05	6.10	5.48	4.90	4.10	2.46

实验一　长度测量

【实验目的】

1.学习米尺、游标尺、螺旋测微器的测量原理和正确使用方法。

2.进一步掌握有效数字的概念和测量结果的处理方法，估计测量结果的可靠性。

【实验仪器】

米尺1把，游标尺1把，螺旋测微器1把，金属圆柱1块，金属圆筒1个，金属小球1个等等。

【原理与说明】

一、米尺

米尺是测量长度的常用工具，它的全长一般为1 m，最小刻度为1 mm。用它来测量长度时，可以准确到1 mm，估计到0.1 mm。用米尺测量长度必须注意以下几点：

1.不使用米尺的端点，因为端点常被磨损，会引起误差。

2.被测长度紧靠米尺有刻度的一边，以减小视差。

3.以不同的起点做多次测量，被测物两端读数之差即为被测物体的长度，这样可以减少因米尺刻度不均匀所产生的误差。

二、游标尺

为了使米尺测得更准一些，在米尺上附加一个能够沿米尺滑动的有刻度的小尺，叫做游标，利用它可以把米尺估读的那位数值准确地读出来。

图1-1为游标尺示意图，CD为主尺(主尺按米尺刻度)；AB为游标，游标可沿主尺滑动。当E和F两颚吻合时，游标的0线应与主尺的0线对齐。测物体长度或外径时，将物体夹于E和F之间；测槽宽或内径时，将被测物套于e和f上；测槽的深度时，将被测物放在主尺右端，用深度尺来测。它们的读数值，都是由游标的0线与主尺的0线之间的距离表示出来。

下面介绍游标尺的读数原理。游标尺在构造上的主要特点：游标上p个分格的总长与主尺上$(p-1)$个分格的总长相等。设y代表主尺上一个分格的长度，x代表游标上一个分格的长度。则有：

$$px = (p-1)y \qquad (1-1)$$

那么，主尺与游标上每个分格的差值是：

$$\Delta x = y - x = \frac{1}{p}y \qquad (1-2)$$

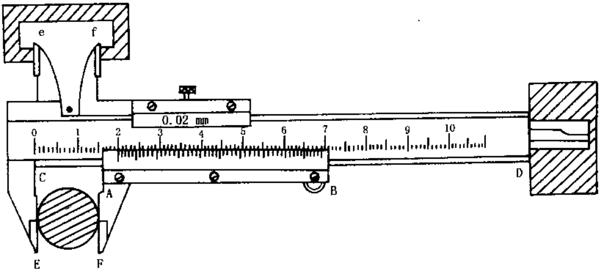

图 1-1 游标尺

Δx 叫做游标尺的精度。游标尺的精度可以统一表示为:

$$\Delta x = \frac{\text{主尺最小分度之长(1 mm)}}{\text{游标的分度数}} \tag{1-3}$$

所以 10 分度、20 分度和 50 分度游标尺的精度分别为 0.1 mm、0.05 mm 和 0.02 mm。

图 1-2(a)表示 10 分度的游标尺,游标 10 格总长等于主尺上 9 小格的总长,即 $p = 10$, $y = 1$ mm, $x = 0.9$ mm,主尺上一小格与游标上一小格之差 $y - x = 0.1$ mm,所以 10 分度游标尺的精度 $\Delta x = y - x = \frac{1}{p}y = \frac{1}{10} = 0.1(\mathrm{mm})$。当图 1-1 中的 E,F 吻合时,游标上的 0 线与主尺上的 0 线重合,如图 1-2(a)所示。这时游标上第 1 条刻度线在主尺第 1 条刻线的左边 0.1 mm 处,游标上第 2 条刻线在主尺第 2 条刻线的左边 0.2 mm 处,依此类推。这就提供了利用游标进行测量的依据。如果在 EF 之间放进一张厚度为 0.1 mm 的纸片,那么,游标就要紧贴着主尺向右移动 0.1 mm。这时,游标的第 1 条刻度线就与主尺的第 1 条刻度线相重合,而游标上所有其他各条线都不与主尺上任一条刻度线相重合。如果纸片厚 0.2 mm,那么,游标就要向右移动 0.2 mm,游标的第 2 条刻度线就与主尺的第 2 条刻度线相重合,依此类推。反过来讲,如果游标上第 2 条刻度线与主尺的刻度线重合,那么纸片的厚度就是 0.2 mm。

当测量大于 1 mm 的长度时,应先看游标的 0 线在主尺的位置,从主尺上读出毫米的整数位,再从游标上读出毫米的小数位。即用游标尺测量长度 L 的普遍表达式为:

$$L = ky + n\Delta x \tag{1-4}$$

k 是游标的 0 线所在处主尺上刻度的整毫米数,n 是游标的第 n 条刻度线与主尺上某

一条刻度线重合。如图 1－2(b)，游标的 0 线在主尺上 12 mm 与 13 mm 之间，且游标的第 2 条刻度线与主尺某刻度线对齐，可知 $y=1$ mm，$k=12$，$n=2$，如果此游标是 10 分度的游标，则读数为 12.20 mm(因为这时 $\Delta x=0.1$ mm)。如果此游标为 20 分度的游标，则读数为 12.10 mm(这时 $\Delta x=0.05$ mm)。

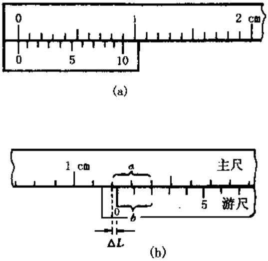

图 1－2 游标尺读数原理示意图

如图 1－3(a)所示，主尺上 49 mm 处刻度线与游标上 50 格对齐，它是一个 50 分度的游标尺($p=50$)，其精度 $\Delta x=\dfrac{1}{p}y=0.02$ mm，游标上刻有 0，1，2，…9，以便于读数。如图 1－3(b)所示的情况，$k=21$，$y=1$ mm，$\Delta x=0.02$ mm，$n=24$，所以 $l=21.48$ mm $=$ 2.148 cm。

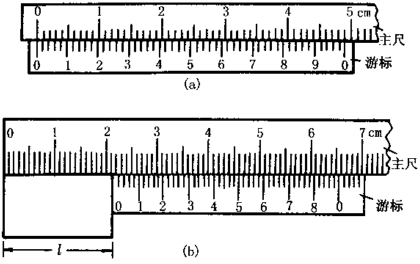

图 1－3 游标尺读数原理示意图

综上所述，游标尺的精度是由主尺与游标刻度的差值决定的，亦即是由游标的分度数