绪 论

一、医用物理学实验的意义、目的和要求

(一)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。因此要掌握现代医学科学技术，必须具备一定的物理实验理论知识和操作技能。

(二)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，巩固和加深对所学的物理现象及其规律的认识。

(三)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，基本掌握常用物理量的测量原理和方法，其中包括长度、质量、时间、角度、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；熟悉示波器、万用电表、光学显微镜和分光仪的使用；在误差理论，有效数字的记录和运算，实验结果的可靠性估计，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。

医用物理学实验就是为了达到以上目的，根据以上基本要求而开设的。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清洁，严格遵守实验室各项规章制度。

二、测量 的误差

(一)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做误差。误差和错误不同。错误是由于测量者不小心或测量方法不正确所造成的，只要仔细操作、方法正确就能避免；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，并对它的精确程度作出正确的估计，有关的误差理论就是为了达到这一目的而提出来的。

(二)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，即使对同一对象作重复测量，其偏离真值的大小总是在一定的范围内。例如由于受温度影响而引起米尺长度变化，测量的长度总是有误差，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而引起的误差。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（Gaussian 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。

(三)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 $N_1, N_2, \cdots, N_n$,则测得量的算术平均值为

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

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 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。

(1) 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来代替绝对误差。这里所谓的偏差是指平均值 N 与各次单独测量值之差，用 ΔN_i 表示 ,即 $\Delta N_1 = N_1 - N$, $\Delta N_2 = N_2 - N$, $\cdots$, $\Delta N_n = N_n - N$，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 ,叫做平均绝对偏差 ,简称绝对偏差 ,用 $\overline{\Delta N}$ 表示 ,即

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

于是测量结果的表达式为

$$N_0 = \overline{N} \pm \overline{\Delta N} \qquad (0-1)$$

式(0 - 1) 表示测得的最可靠值是 N，测得值可能存在的误差范围为 $\pm \Delta N$,而真值 N_0就在 $N + \Delta N$ 和 $N - \Delta N$ 的范围内。例如用米尺多次测量一根短棍的长度，得到 $L = 8.34$ cm、$\Delta L = 0.01$ cm ,则 $L_0 = L \pm \Delta L =$ (8.34 ± 0.01)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。

(2)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 $L_1=(8.34\pm0.01)\mathrm{cm}$, $L_2=(88.34\pm0.01)\mathrm{cm}$，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：

$$E=\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}}\times100\% \qquad (0-2)$$

显然，对于大小不同的物理量，E 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 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　用螺旋测微器测量铜杆的直径，其各次测量值、绝对偏差和相对误差列于表 0－1 中。

表 0－1　用螺旋测微器测铜杆直径

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	$E=\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}}\times100\%$	$N_0=\overline{N}\pm\overline{\Delta N}$
2	3.425 0	0.000 6		$=3.425\,6\pm0.000\,4$
3	3.426 0	0.000 4	$=\frac{0.000\,4}{3.425\,6}\times100\%$	
4	3.426 0	0.000 4	$=0.01\%$	
平均	$\overline{N}=3.425\,6$	$\overline{\Delta N}=0.000\,4$		

有时由于某些原因只可能或只须测量 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。标准偏差的数字表达式为

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

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

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

上式中，$n-1$ 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 $\overline{N} \longrightarrow N_0$,而 $S \longrightarrow \sigma$。

2. 间接测量误差的表示方法　　在物理实验中的测量,几乎都是将某些直接测量值代入已知的测量公式（函数关系），将待求量计算出来，这就叫做间接测量或导出测量。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，$A, B, C,$ …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

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

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

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$\overline{\Delta N}$是间接测得量的算术平均绝对偏差，它的计算方法如下。

(1)如果间接测量值是两个直接测量值的和或差，即$N=A\pm B$，将$A=\overline{A}\pm\overline{\Delta A}$、$B=\overline{B}\pm\overline{\Delta B}$代入式中，得

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

可见$\overline{N}=\overline{A}\pm\overline{B},\overline{\Delta N}=\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}$，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

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

(2)如果间接测量值是两个直接测量值的一般乘除关系，其相乘积的运算结果为

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

因为$\overline{\Delta A}$和$\overline{\Delta B}$这两个量与$\overline{A}$和$\overline{B}$相比较可视为很小，所以$\overline{\Delta A}\cdot\overline{\Delta B}$可以忽略，因此相乘积的绝对偏差为

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

而相乘积的相对误差为

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

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。

表 0 - 2　间接测量误差计算公式表

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

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

解　设瓶内空气质量为 N ,则有

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

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

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

$$E = \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} \times 100\% = \frac{0.0004}{0.1320} \times 100\% = 0.3\%$$

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

$$E = \frac{\overline{\Delta V}}{\overline{V}} = \frac{\overline{\Delta h}}{\overline{h}} + 2\frac{\overline{\Delta d}}{\overline{d}} = \frac{0.1}{10.0} + \frac{2\times 0.01}{5.00} = 1.4\%$$

圆柱体体积的平均值为

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

其绝对偏差为

$$\overline{\Delta V} = E\cdot\overline{V} = 0.01\times 196.2 = 2\ \mathrm{cm}$$

于是测量结果可写成

$$V = \overline{V}\pm\overline{\Delta V} = (196\pm 2)\ \mathrm{cm}$$

三、有效数字及其运算

(一)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了用以表示小数点位置的零外，都是有效数字。

(二)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 0.5、0.05、0.02 mm 等,螺旋测微器的精密度为 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两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，很容易读出该棒的长度是 10～11 cm 。虽然这种皮尺没有刻到毫米，但可以估计到毫米（最小刻度为 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。

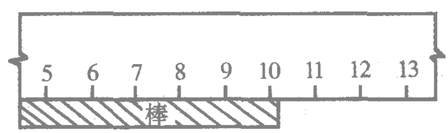


图 0－1　皮尺测量棒的长度

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 ，绝不能写成 10.5 cm。

3. 由前面所讲可知,“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，例如不可能把光速写成 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 2.9976×10^{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 $\pi=3.1416$ 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。

（三)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　举例如下：

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　举例如下：

例 0－6　$4.178\times111=464$.

例 0－7　$5820\div121=48.1$。

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. 有效数字的乘方、开方、三角函数等的运算　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：

$(36.4)^2=1.33\times10^3$, $(56.3)^{\frac{1}{2}}=7.50$; $\sin35°=0.57$.

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、指定数则不须按此规则处理。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。有关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　用单摆测量重力加速度，实验所得摆长 $L = 100.23$,振动次数 $n = 100$ 次,时间 $t = 200.2\ \mathrm{s}$,从单摆周期公式

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

得知 $g = 4\pi^2 L/T^2$, $T = \frac{t}{n} = \frac{200.2}{100} = 2.002\ \mathrm{s}$。上式中, 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。于是有

$$g = 4 \times 3.142^2 \times 100.23/2.002^2 = 987.5\ \mathrm{cm/s}$$

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，常用列表记录法和图示法。

(一)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，在各数据中无须重复地标明单位。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。

(二)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、横轴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。同一坐标纸上可以作若干曲线，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、练习题(误差、有效数字和作图)

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. 测量同一金属杆的长度（10 次）如下：

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

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。

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(即在室温下,空气压强和容积的关系曲线)。

压强(10^5 Pa)	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

第一部分　力学实验

实验一　游标卡尺、螺旋测微器的原理和使用方法

【实验目的】

1. 学习米尺、游标卡尺、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、游标卡尺、螺旋测微器各 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. 以不同的起点作多次测量，被测物两端读数之差即为被测物体的长度，这样可以减小因米尺刻度不均匀所产生的误差。

二、游标卡尺

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 为游标卡尺示意图，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。

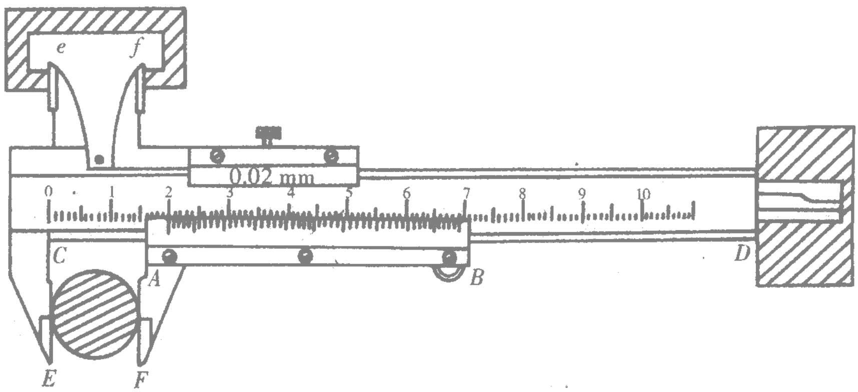


图 1 - 1　游标卡尺示意图

下面介绍游标卡尺的读数原理。游标卡尺在构造上的主要特点是：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

$$px = (p-1)y \tag{1-1}$$

那么，主尺与游标上每个分格的差值为

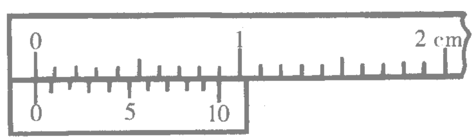
$$\Delta x = y - x = \frac{1}{p}y \tag{1-2}$$

式中,Δx 叫做游标卡尺的精度。游标卡尺的精度可以统一表示为

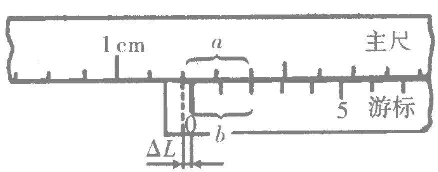
$$\Delta x = \frac{\text{主尺最小分度之长(1 mm)}}{\text{游标的分度数}} \tag{1-3}$$

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

图 1 -2(a) 表示 10 分度的游标卡尺,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 分度游标卡尺的精度 $\Delta x=y-x=\frac{1}{p}y=\frac{1}{10}=0.1$(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 条刻度线的左边 0.1 mm 处,游标上第 2 条刻度线在主尺第 2 条刻度线的左边 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 E、F 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,如果游标上第 2 条刻度线与主尺的第 2 条刻度线重合,那么纸片的厚度就是 0.2 mm。



(a)



(b)

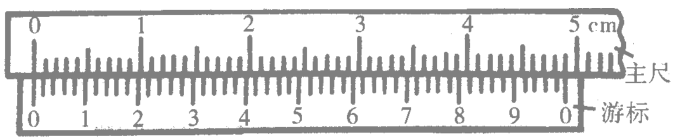
图 1 -2 游标卡尺读数原理示意图

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。即用游标卡尺测量长度 L 的普遍表达式为

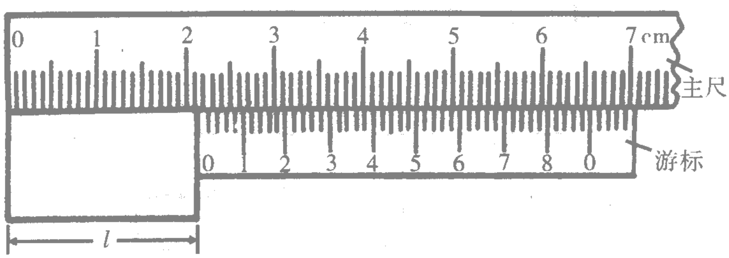
$$L=ky+n\Delta x \tag{1-4}$$

式中，k 是指游标的 0 线所在处主尺上刻度的整毫米数；n 是指游标的第 n 条刻度线与主尺上某一条刻度线重合。如图 1－2(b) 所示，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）。

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 分度的游标卡尺($p = 50$)，其精度 $\Delta x = \frac{1}{p}y = 0.02$ 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。



(a)



(b)

图 1－3　游标卡尺读数原理示意图

综上所述，游标卡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目决定的。各种常用游标卡尺的读数都写到百分之一毫米这一位上。

需要提醒的是，游标卡尺给出毫米以下的读数，毫米以上的读数要看游标 0 线在主尺上的位置，从主尺上读出。用游标卡尺测量之前，要先注意标准零点或作零点修正。

三、螺旋测微器

螺旋测微器的结构如图 1-4 所示。D 为主尺，沿主尺水平轴上下两侧有相互交错的两排刻度，上下相邻两刻度间的距离为 0.5 mm。螺旋柱 F、转柄 A 和圆帽套筒 C 三者连在一起,F 从主尺 D 中穿过,C 套在主尺的外面。

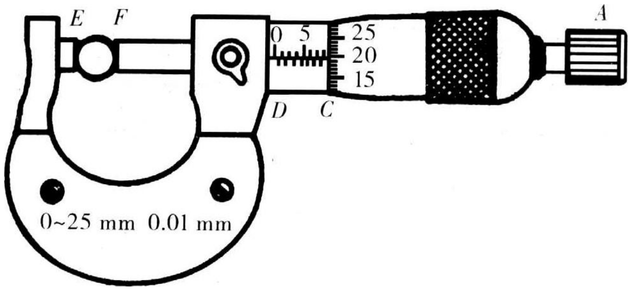


图 1-4　螺旋测微器结构图

当套筒 C 在主尺上旋转一周时，螺旋柱 F 就前进或后退 0.5 mm。套筒 C 左端边缘的圆周等分为 50 刻度,C 每转过一刻度，F 就前进或后退 0.5 mm/50 = 0.01 mm，因此可以准确读出百分之一毫米，连同估计的一位,可以读出 0.001 mm。

当 E 和 F 相接触时,套筒 C 左端边缘应与主尺 D 的 0 线重合,C 的 0 线应与 D 的水平轴重合,如图 1-5(a) 所示。

测量时,如将被测物体夹于 E、F 之间,E、F 之间的距离等于被测物体的长度,也等于主尺 0 线与 C 的左端边缘之间的距离。读数时,首先读出 D 上 0.5 mm 以上的数,然后从 C 上读出 0.5 mm 以下的数，两者之和即为被测物体的长度。例如,图 1-5(d) 所示读数为(8.5 + 0.375)mm = 8.875 mm，最后一位是估计出来的。图 1-5(e) 所示读数为 (7.5 + 0.450)mm = 7.950 mm,有人以为看到了主尺上的 8 mm 线,常读为(8.0 + 0.450)mm = 8.450 mm,这是错误的。

【实验步骤】

1. 用米尺测量卡片之长,测量 3 次,记入表 1-1 中,求出其平均值 $\bar{L}$,计算出平均绝对误差 ΔL,写出测量结果的表达式 $L_0 = \bar{L} \pm \overline{\Delta L}$。

2. 用游标卡尺测量金属圆柱体的直径 d 和高 h,各测 3 次,记入表 1-2 中,求出平均值 d 和 h 以及平均绝对误差 Δd 和 Δh,写出直径和高的测量结果表达式，进而求出圆柱体的体积 V 和绝对误差 ΔV,写出体积值的测量结