高等医学院校试用教材

（供临床 预防 基础医学类各专业用）

医用物理实验

秦任甲　叶向前　李前勋　主编

广西师范大学出版社

高等医学院校试用教材

医用物理实验

（供临床、预防、基础医学类各专业用）

主编　秦任甲　叶向前　李前勋

编者：

韦正邦　王凤岐　王录瑞　叶向前　陈文棠　陈世书
李前勋　李宾中　张良秀　钟育乔　秦任甲　席青霄
潘成巨

广西师范大学出版社

内 容 简 介

本书是根据卫生部1982年颁发的高等医学院校医用物理学教学大纲（试用稿）的基本精神，结合一般医学院校的实际情况编写的医用物理实验教材。

全书选入22个实验，涉及的内容较广，既注意到尽可能加强多方面的基本技能的训练，又注意到与医学相结合。书中还简要介绍了误差和数据处理的基本知识。

本书可供临床、预防、基础医学类各专业用，也可作为其它专业物理实验教学参考书。

高等医学院校试用教材

医 用 物 理 实 验

（供临床、预防、基础医学类各专业用）

秦任甲　叶向前　李前勋　主编

☆

广西师范大学出版社出版发行

（广西桂林市育才路3号）

广西桂林市印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16　印张 7.25　字数176千字

1990年8月第1版　1990年8月第1次印刷

印数：0001—7500

ISBN7-5633-0880-6/G·743

定价：2.30元

前 言

物理学是建立在实验基础之上的一门自然科学。物理实验是物理学的重要组成部分，也是无法用理论课来替代的可以相对独立开设的一门课程。物理仪器在医学教学、临床实践和医学科学研究中已被广泛应用，物理实验方法和操作技能是其它学科实验教学和科学研究的基础。因此，物理实验课的教学目的不仅要掌握进行实验的物理理论，更重要的是学习物理的实验方法，进行操作技能的训练，以培养学生自己动手进行科学试验的能力。为加强实验教学，提高实验教学质量，我们编写了这本试用教材。

本试用教材根据卫生部1982年修订的高等医药院校医用物理学教学大纲的基本要求，结合编者的教学经验，参考了兄弟院校的有关教材，选取了22个实验。有些实验还包含了多项实验内容或多种实验方法，以适应不同的需要。要求学生自行设计一些实验数据表格，正确运用有效数字运算法则和误差理论处理实验数据。

本书可供临床医学、预防医学、基础医学、药学类各专业用作教材，同时也可供其它有关专业师生参考。

参加编写的有桂林医学院、川北医学院、延安医学院、大理医学院、右江民族医学院、包头医学院、张家口医学院、河北省职工医学院、郧阳医学院、海南医学院、湖北医学院咸宁分院、赣南医学院。

全书最后由秦任甲同志统一整理。张明同志为实验八编写了附录。黄慰怀同志参加了此书的审稿会，并提出了许多宝贵意见。参加审稿会的还有谢雨浩、李琦同志。张明同志和何典荣同志绘制了全部插图。还有好些同志为本书的出版做了许多工作。在此表示衷心的感谢。

由于水平有限，缺点在所难免，欢迎批评指正，以便改进。

编 者

1989年8月

目　录

绪　　论

物理学是一门以实验为基础，通过人们的观察、实验和抽象思维来研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学。在研究中须借助于在人为的条件下，使物理现象重演的实验，来发现现象的本质，现象间的内在联系，收集必要的材料来进行抽象思维，并进一步总结出物理理论。物理规律的发现和物理理论的建立，不仅都要以物理实验为基础，并最终要受到实验的检验。因此，物理学的发展是在物理实验和物理理论两个方面相互推动和密切结合下进行的，这两个方面既有联系，又相对独立，不可相互代替。

由于物理学所研究的规律在自然界中具有最基本、最普遍的意义，从而决定了物理学是各门科学技术的基础。现代的医、药科学，由于广泛地运用了物理的理论、方法，特别是物理技术，才有今天这样的发展。因此，作为未来的高级医药人才，学习好物理实验课，在科学实验能力和方法上得到系统地训练和培养，为后继课程的学习和将来从事专业工作打下基础是很有必要的。

一、物理实验课的目的和要求

物理实验的教学目的：

1.对学生进行基本的科学实验方法和技能的训练。通过实验，使学生弄懂实验原理，掌握一些常用物理量的测量方法；熟悉一些基本仪器的原理、性能，掌握其使用方法；正确记录和处理实验数据，分析判断实验结果，正确书写实验报告。

2.培养并逐步提高学生对实验现象的观察和分析能力，进一步了解物理现象和规律，巩固和加深对已学基础理论的理解。

3.培养学生实事求是的科学态度，科学严谨的工作作风，勇于探索的开拓精神和团结合作、共同进取，爱护公物，遵守纪律的优良品德。

为了达到上述目的，根据物理实验的基本程序提出以下几点要求：

1.实验前预习　由于实验时间有限而熟悉仪器和测量的任务重，为了使实验操作准确，达到预期效果，实验前必须预习。预习时应以理解原理为主，以便抓住实验的关键，及时、迅速、准确地获得待测量的数据。为了使实验有条不紊地进行，防止漏测数据，应写好预习报告，设计并画好记录数据的表格、了解所使用的仪器，熟悉实验步骤和应注意事项。

2.认真进行实验　实验操作前应检查、熟悉仪器，并将仪器合理布置、安装和准确地调整。实验时应认真仔细操作、观察和记录。读数一定要适时、准确，未经重复测试时不得修改实验数据。实验完毕应请指导教师检查后方可离开实验室。

3.写好实验报告　实验报告是实验工作的全面总结。完整的实验报告内容应包括实验名称、实验目的、主要实验器材、简要原理公式、主要实验步骤、实验数据、计算与作图，实验结果、误差分析和讨论。书写报告时要求文字通顺、字迹清楚、图表规范、结果正确、讨论认真，写实验报告要及时。误差分析应包括两个内容：一是确定实验结果的误差范围，二是找出影响实验结果的主要原因。最后要回答实验教材中提出的思考题。对实验过程中出现的异常现象作出可能的解释；对仪器装置和实验方法提出建议等。

二、测量与误差的基本概念

1.测量　实验时，除定性观察物理过程外，还须测量有关的物理量，以便确定它们之间的定量关系。将待测量与规定的单位进行直接或间接的比较称为测量，其倍数为物理量的测量值。如测物长，是将物与标有长度标准量的米尺相比较，从而测出长度是多少米。测量的种类很多，常分以下两种：

（1）直接测量　一般仪表均按一定的倍数刻度，以便直接读出待测量的数值，象这样可用仪表直接读出待测量的值的测量称为**直接测量**，相应的物理量称为**直接测得量**。如用米尺测长度，用天平称质量，用秒表测时间等，都是直接测量。

（2）间接测量　大多数物理量都不可能用仪表直接测量，只能用间接方法来进行测量。即只直接测出与其相关的测得值，利用公式、规律将待测值计算出来，这一类测量称为**间接测量**，相应的物理量称为**间接测得量**。如测球体的密度，可先测出球的直径 d 和质量 m，再利用密度公式 $\rho = m/V = 6\,m/\pi d^3$ 算出其密度。

在进行测量时，常须考虑到实验的准确度和精密度。测量的目的总是要力图得到真实值（或真值），而实际的测得值总是真实值的近似。测得值与真实值的符合程度称为**准确度**。在测量中所得到的一组测得值的重复性，或者说一组测得值的离散程度称为**精密度**。测量的精密度高，不一定测量的准确度就高。常讲的精确度就是精密度和准确度的总称。只有精密度和准确度都高的测量，才是好的测量。

2.误差　任何仪器都与用来测量长度的米尺一样，无论多么精密，总有一个最小刻度线。对于不同观察者，由于主观能力的差异，常常将最小刻度线之间的量值读成不同的读数。另外，仪器的刻度线也不可能绝对准确，外界环境也可能要发生变化等原因，都会对测量产生影响，使得任何测量都不可能绝对准确地测出物理量的真实值，测得值与真实值之间的差异称为**误差**，若待测量的真实值为 A，测得值为 x，测量误差 Δx 可表示为

$$\Delta x = x - A \qquad (0-1)$$

在多次测量某一物理量时，即使什么条件都相同，测量者仍无法判断其中哪一次测得量是绝对准确，因此误差是必然存在。

根据误差的性质和产生原因，可将误差分为系统误差、偶然误差和过失误差三种。

（1）系统误差　由于仪器的固有缺陷（如天平两臂不等、零点未调准、砝码未经校正、刻度未刻准等），测量方法粗糙，个人习惯与偏向（如读数总是偏低或偏高），有关因素考虑不周（如测体积时未考虑热膨胀，测重量未考虑浮力等），以及理论、公式和方法的近似性等而引起的误差称为**系统误差**。其误差的特点是具有确定性，即是说测得值总是大于或小于真值而偏向一方。要减小系统误差须改进仪器设备、测量方式或对实验结果作某些修正。

（2）偶然误差　由于人们的感官（如听觉、视觉、触觉等）分辨能力的限制，使每个人估计读数的能力不同；在测量过程中外界环境的干扰（如温度不均匀、振动、气流）等原因而引起的误差称为**偶然误差**。其误差的特点是具有随机性，即测得值比真值时大时小，不固定偏向一方。这种误差是无法控制而不可消除，它服从统计规律。进行多次测量，将结果取算术平均值，就会比任何一次单独测量更可靠、更接近真值。

（3）过失误差　由于实验者使用仪器方法不正确，实验方法不合理，粗心大意，记

错数据等原因，而人为引起的误差称为过失误差。实验者应采取科学严谨的态度，一丝不苟的作风，过失误差是可以避免的。下面我们专门来讨论偶然误差（认为其它误差已经消除或不存在）。

三、算术平均值与误差的估算

在测量中不可避免地带有误差，虽然可使它尽量减小，使测得值不断接近真值，但在一定的条件下，这也是有限的。这就需要在一定的条件下，根据测得值与真值之间的关系，在一组测得值中找出一个确定的最佳值或者说最可信赖值，并对它的准确度作出估计。

1.一次直接测量的误差估计　在实验中，由于条件不许可或要求不高，对物体的测量只能或只需测定一次就得到结果，这称为一次直接测量。在一般情况下，对偶然误差很小的测得值，可按厂家标明的仪器误差或用仪器的准确度（常估读到仪器最小刻度的1/10、1/5或1/2）来表示一次直接测量的误差。如用米尺测长度时，可精确读到1mm，估读到0.1mm或0.2mm或0.5mm。若测得长度是32.4mm，可将结果写为$l \pm \Delta l = 32.4 \pm 0.2$（mm）。

2.多次测量的误差计算

（1）算术平均值　为减小偶然误差，常对一物理量进行多次直接测量来求其算术平均值，使之更接近于真值。若测量次数为n，每次测得值分别为x_1、x_2、x_3、…、x_n，其算术平均值$\bar{x}$为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (0\text{-}2)$$

多次测量的平均值称为测量的最佳值或近真值。当测量次数无限增加时，算术平均值将无限接近真值，故往往将多次测量的平均值当成真值。

（2）算术平均偏差　严格地讲，测得值与真值的差称为误差，测得值与平均值的差称为偏差。偏差表示为（$x_i - \bar{x}$），i等于1，2，3，…，n时，相应的偏差$d_1 = x_1 - \bar{x}$，$d_2 = x_2 - \bar{x}$，…，$d_n = x_n - \bar{x}$。则算术平均偏差Δx可表示为

$$\Delta x = \frac{1}{n}(|d_1| + |d_2| + \cdots, + |d_n|) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|d_i| \qquad (0\text{-}3)$$

因测量次数n足够大时，可用平均值去代替真值，这样，我们就不再去区分误差和偏差。最后测定的结果可表示为

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \qquad (0\text{-}4)$$

（3）绝对误差和相对误差　平均值$\bar{x}$与每次测得值之差的绝对值$|\bar{x} - x_i|$称为该次测量的绝对误差。各次绝对误差的算术平均值称为平均绝对误差，如（0-3）式所示。

例如测量某物体的长度5次，各次测得值为$x_1 = 52.2$mm，$x_2 = 52.4$mm，$x_3 = 52.6$mm，$x_4 = 52.0$mm，$x_5 = 52.8$mm

则平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{5}(52.2 + 52.4 + 52.6 + 52.0 + 52.8) = 52.4 \text{ (mm)}$$

各次测量的绝对误差

$|d_1| = |52.2-52.4| = 0.2\ (\mathrm{mm})$，$|d_2| = |52.4-52.4| = 0.0\ (\mathrm{mm})$

$|d_3| = |52.6-52.4| = 0.2\ (\mathrm{mm})$，$|d_4| = |52.0-52.4| = 0.4\ (\mathrm{mm})$

$|d_5| = |52.8-52.4| = 0.4\ (\mathrm{mm})$

平均绝对误差为

$$\Delta x = \frac{1}{5}(0.2+0.0+0.2+0.4+0.4) = 0.2\ (\mathrm{mm})$$

测得值可表示为

$$x = \overline{x} \pm \Delta x = 52.4 \pm 0.2\ (\mathrm{mm})$$

为了评价一个测量的优劣，只用绝对误差很不全面。如测人体重量时，误差几克并不重要。但称某些药物时，误差几克就有可能导致生命危险。因此还必须看测量量本身的大小。为此引入相对误差的概念。

平均绝对误差与算术平均值的比称为相对误差，表示为

$$E = \frac{\Delta x}{\overline{x}} \tag{0-5}$$

相对误差也可用百分数表示，即

$$E = \frac{\Delta x}{\overline{x}} \times 100\% \tag{0-6}$$

故又称为百分误差。为说明相对误差的意义举例如下：若测得两个物体的长度分别为 $l_1 = (12.50 \pm 0.03)\,\mathrm{cm}$，$l_2 = (1.25 \pm 0.03)\,\mathrm{cm}$，求其相对误差

$$E_1 = \frac{0.03}{12.50} \times 100\% = 0.24\% \approx 0.3\%$$

$$E_2 = \frac{0.03}{1.25} \times 100\% = 2.4\% \approx 3\%$$

可见，二者的绝对误差虽相等，但相对误差后者是前者的10倍，前者的测量要准确得多。

3.间接测量的误差计算　间接测量是通过计算得来的。既然公式中所包含的直接测得量是有误差的，因此间接测得量也是有误差的。下面介绍几个常用的定理，可用它来计算结果的绝对误差和相对误差。

（1）和与差的绝对误差和相对误差　若两个测得量 $A = \overline{A} \pm \Delta A$，$B = \overline{B} \pm \Delta B$，它们的和 $N = A + B$，则

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

因

$$\overline{N} = \overline{A} + \overline{B}$$

故

$$\Delta N = \pm \Delta A \pm \Delta B$$

因 A 和 B 是独立的两个量，ΔA 与 ΔB 又可正可负，可能出现的最大误差是 ΔA 与 ΔB 取同号，即

$$\Delta N = \Delta A + \Delta B$$

我们规定最大误差为二量和的误差。

对于二量差的绝对误差，与前述讨论相似。

因 $$N = A - B$$

故 $$\overline{N} \pm \Delta N = \overline{A} \pm \Delta A - \overline{B} \mp \Delta B$$

$$\Delta N = \pm \Delta A \mp \Delta B$$

于是和与差的相对误差可表示如下：

二量之和 $$E = \frac{\Delta N}{\overline{N}} = \frac{\Delta A + \Delta B}{\overline{A} + \overline{B}} \tag{0-7}$$

二量之差 $$E = \frac{\Delta N}{\overline{N}} = \frac{\Delta A + \Delta B}{\overline{A} - \overline{B}} \tag{0-8}$$

前面的证明虽是由两个量推演而来的，对于多个量可在此基础上推广。

（2）积的绝对误差和相对误差 若

$$N = A \cdot B$$

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

$$= \overline{A} \cdot \overline{B} \pm \overline{A} \cdot \Delta B \pm \overline{B} \cdot \Delta A \pm \Delta A \cdot \Delta B$$

因 $\overline{N} = \overline{A} \cdot \overline{B}$，又 $\Delta A \cdot \Delta B$ 较其它项很小而可略去不计，故

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

最大误差

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

则相对误差

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

$$= \frac{\Delta A}{\overline{A}} + \frac{\Delta B}{\overline{B}} \tag{0-9}$$

对于上述两量之积的绝对误差和相对误差的结论仍可推广到多个测得量的情况。另外，对于商和其它函数形式的误差计算，在此不一一推导，其结果见表（0-1）。

四、有效数字及其运算

如前面所述，由于用仪器进行直接测量都有误差，测得的数据是近似值，将这些近似值加以运算得到的间接测量值也是近似值。通过运算，只能增大其误差。因此近似值的表示和运算都有一些规则，以便确切地表示记录和运算结果的近似性，这就要涉及到有效数字及其运算。

1.有效数字 从仪器上读数，通常都要尽可能地估计到仪器最小刻度的下一位数。如用米尺（最小刻度为1 mm）测得物体的长度为35.42cm，其中前三位数“35.4”是从米尺上读出的确切数，最后一位“2”是估计数，也就是有疑问的数，称为**存疑数字**或**可疑数字**。由于第四位数已存疑，对以下各位数的估计也就没有必要。于是我们把带一位存疑数字的近似数称为**有效数字**，它表示测量值中有意义的数字。有效数字的位数等于准确数字的位数加1。根据最末一位是仪器精度的十分位，因此有效数字的末位数就反映了仪器

表（0-1）

运算关系 $N=f(A, B, C, \cdots)$	绝对误差 ΔN	相对误差 $E=\frac{\Delta N}{\overline{N}}$
$N=A+B+C+\cdots$	$\pm(\Delta A+\Delta B+\Delta C+\cdots)$	$\frac{\Delta A+\Delta B+\Delta C+\cdots}{\overline{A}+\overline{B}+\overline{C}+\cdots}$
$N=A-B$	$\pm(\Delta A+\Delta B)$	$\frac{\Delta A+\Delta B}{\overline{A}-\overline{B}}$
$N=A\times B$	$\pm(\overline{A}\times\Delta B+\overline{B}\times\Delta A)$	$\frac{\Delta A}{\overline{A}}+\frac{\Delta B}{\overline{B}}$
$N=A\times B\times C$	$\pm(\overline{B}\,\overline{C}\times\Delta A+\overline{A}\,\overline{C}\times\Delta B+\overline{B}\,\overline{A}\times\Delta C)$	$\frac{\Delta A}{\overline{A}}+\frac{\Delta B}{\overline{B}}+\frac{\Delta C}{\overline{C}}$
$N=A^n$	$\pm n\overline{A}^{n-1}\Delta A$	$n\frac{\Delta A}{\overline{A}}$
$N=\frac{A}{B}$	$\pm\frac{\overline{B}\Delta A+\overline{A}\Delta B}{\overline{B}^2}$	$\frac{\Delta A}{\overline{A}}+\frac{\Delta B}{\overline{B}}$
$N=\sin A$	$\pm\cos\overline{A}\times\Delta A$	$\mathrm{ctg}\,\overline{A}\times\Delta A$
$N=\cos A$	$\pm\sin\overline{A}\times\Delta A$	$\mathrm{tg}\,\overline{A}\times\Delta A$
$N=\mathrm{tg}A$	$\pm\frac{\Delta A}{\cos^2\overline{A}}$	$\frac{2\Delta A}{\sin 2\overline{A}}$
$N=\mathrm{ctg}A$	$\pm\frac{\Delta A}{\sin^2\overline{A}}$	$\frac{2\Delta A}{\sin 2\overline{A}}$
$N=aA$（a为常数）	$\pm a\Delta A$	$\frac{\Delta A}{\overline{A}}$

的精度。

书写有效数字时应注意以下几点：

（1）注意“0”的位置。如测出两点间的距离是0.403000km，可写为403.000m。这两个数值反映了同一测量结果。第一个不为0的有效数字前面的“0”的出现，是由于单位大小的不同，用以定位，将单位由千米变成米时，前面的“0”就不出现了。可见，在第一个不为0的数字之前的“0”不是有效数字。在数字中间和后面的“0”必须记下，如403.000m中末位数的“0”是估计读出的，反映了仪器的精确度是厘米，因此其它的“0”是能精确读出的。

（2）数字表示的标准形式。为了记录和计算的方便，在小数点前，一律取一位有效数字。若因采用不同单位而引起数值的不同，则采用乘以10的幂来表示。如4.03000×10^{-1}km，或4.03000×10^{2}m。

（3）有些仪器（如游标卡尺、数字式仪表等）不可能估计到最小刻度以下一位数，读出的数的最后一位为存疑数字。因为在数字式仪表中，最后一位数总有±1的误差。

（4）有效数字的概念，不适用于准确值。如 $s=\frac{1}{2}at^2$ 中，分母和幂指数2，就不能认为是只有一位有效数字。

2.有效数字的运算 间接测得量是由直接测得量计算出来的，存在着有效数字的计算问题，下面讨论有效数字运算的基本方法。

（1）加减法。和与差的有效数字，应当保留到位数最高的一位可疑数字，其次一位通常按"四舍五入"的规则处理。在下面运算中，我们在可疑数下面加上一横以示区别。

例一

$$\begin{array}{rr} & 134.2\underline{1} \\ & 5.\underline{2} \\ +) & 0.00\underline{4} \\ \hline & 139.\underline{4}\underline{1}\underline{4} \end{array}$$

结果取139.4

例二

$$\begin{array}{rr} & 134.2\underline{1} \\ & 5.\underline{2} \\ +) & 0.04\underline{0} \\ \hline & 139.\underline{4}\underline{5}\underline{0} \end{array}$$

结果取139.4

例三

$$\begin{array}{rr} & 63.7\underline{5} \\ -) & 2.18\underline{2} \\ \hline & 61.5\underline{6}\underline{8} \end{array}$$

结果取61.57

必须注意，对于在舍去的数字中最左一位是5的情况下，若"5"以后不全是0时，则进1；5以后全是"0"时，若保留下来的末位数是偶数（包括0）则不进位，是奇数则进1。总之，留下来的末位数是偶数，称为"尾留双"。例二的结果就用到这一规则。

（2）乘除法。积和商的有效数字的位数，等于参与运算的数据中最少的位数。

例一

$$\begin{array}{rr} & 310.\underline{4} \\ \times) & 31.\underline{2} \\ \hline & \underline{6}\underline{2}\underline{0}\underline{8} \\ & 310\underline{4} \\ & 93\underline{1}\underline{2} \\ \hline & 96\underline{8}\underline{4}.\underline{4}\underline{8} \end{array}$$

结果取 9.68×10^3

例二

$$\begin{array}{r} 17\underline{3}.\underline{4} \\ 21\underline{7}\,\overline{)\,3764\underline{3}} \\ 21\underline{7} \\ \hline 15\underline{9}4 \\ 151\underline{9} \\ \hline \underline{7}\underline{5}\underline{3} \\ \underline{6}\underline{5}\underline{1} \\ \hline \underline{1}\underline{0}\underline{2} \end{array}$$

结果取 1.73×10^2

（3）乘方（x^n）、开方（$x^{1/n}$）的有效数字的位数与底的有效数字的位数相同，三角函数（如 $\sin x$）的有效数字的位数与被测量值 x 的位数相同。参与运算的常数（如 π、e）的位数与参与运算的各量有效数字最少位数相同。

（4）混合运算结果的有效数字，常取比按规则所取位数多一位。如

$$\frac{(26.43-25.82)\times315}{15.41}=\frac{0.61\times315}{15.41}=12.5$$

上述原则在一般情况下成立，但也有例外。在了解有效数字的意义和取舍原则之后，对于出现的特殊情况，也是不难解决的。

五、实验结果的图示法

对于所测得的数据，常采用表记法和图示法。用几何图形来表示实验数据的方法称为

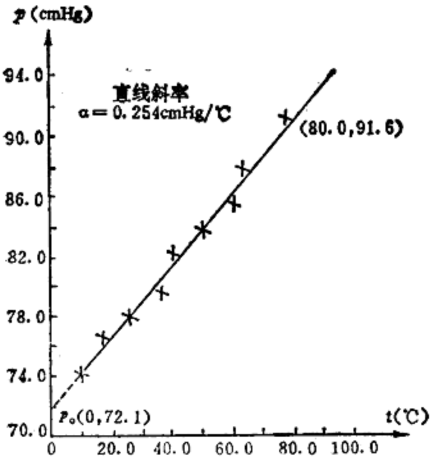


图 0-1　空气压强-温度图线

图示法，利用实验图线可以推导出经验公式，这种实验数据的解析表示法称为图解法。这些方法的优点在于直观，易于比较，能显示数字的极值点、转折点、周期性和各量间的定量关系。在物理实验中最常用的一类是表示在一定条件下某一物理量与另一物理量之间的依赖关系图线（如恒温下气体压强和体积间的等温曲线）。

用图示法表示物理量间的关系时要求做到坐标点和曲线画得清楚正确，容易读数，清晰完整。下面以图 0-1 为例说明图示法的具体规则。

1.选轴　以横轴表示自变量，纵轴表示因变量。在轴的末端标明所代表的物理量及单位。

2.定标尺　选坐标轴的单位长时，应按实验数据而定，使观察点的坐标读数和实验数据大体上有相同的有效数字位数；横轴与纵轴的单位长可以不同；尽量使图不偏于一角或一边，画出曲线不要太平或太陡，角度应适当；纵横坐标不一定从 0 开始，即坐标原点不一定是（0，0）。

3.描点　用硬铅笔，以符号“⊙”、“×”分别记录实验数值对应点。图上不同曲线用不同符号以利于区别。某些偏离很大的点可以不予考虑或重作实验验证该点。

4.连线　除作校正曲线是用直线段依次连结相邻两点成为折线外，一般应连成光滑曲线，使观察点尽可能均匀分布在曲线上和曲线两侧。需延伸曲线时，应依其趋势用虚线表示。

5.写图名并在图名下方加上必不可少的实验条件和图注。

作出曲线后，可以利用它来求未知量。常将实验曲线延伸，以便得到实验范围外的数据的方法称为外推法。如用一定质量气体的“压强-温度”曲线延伸可求 0 ℃ 的压强。这种方法具有冒险性，必须慎用。因此法的根据是物理定律不仅在实验范围内成立，在实验范围外也成立，而事实并非总是这样。另外，更常利用到的是利用实验曲线，在实验曲线范围内找出任一组对应值的方法称为内插法。此外，还可利用曲线找出物理量间的关系，用函数形式或方程式来表示。跟实验图形对应的方程式称为经验公式。最简单的实验图线是直线。利用此图线可找到它在 y 轴上的截距 b 和斜率 a，得到经验公式 $y = ax + b$。对于与图线相对应的复杂的经验公式，在此就不作介绍，可参考有关实验数据的专著。

复 习 与 练 习

1.指出下列情况是属于偶然误差还是系统误差？

天平零点的飘移，视差，游标卡尺的0刻度未对准，温度计的毛细管粗细不均匀，将电表接入电路后引起的误差。

2.用螺旋测微计（最小分度是0.01 mm）测一约为8 mm的物长，可读出几位有效数字？若改用米尺（最小刻度是1 mm）测量时，又有几位有效数字？

3.有不同的实验者用同一米尺测同一物体长度，其结果分别表示为25.63±0.2（cm），25.63±0.02（cm），25.6±0.02（cm），26±0.02（cm）。问谁的结果正确？其它表示法错在哪里？

4.指出下列各量各有几位有效数字？

1.008，34.030，0.030，10.00，150，2.8×10^{3}。

5.按误差理论和有效数字规则改正以下错误：

（1）3×10^{-5}g 比3.0g 测得更精确。

（2）$l=(560\pm20)$ mm。

（3）$0.0324\times0.0324=0.00104976$

（4）$\dfrac{40\times250}{22.60-21.6}=10000$

（5）35cm = 350mm

6.试用有效数字的规则，计算下列各式的结果：

（1）36.28 + 1.039　　（2）23.67 − 2.6

（3）12.4 × 0.035　　（4）9.82 ÷ 0.25

7.测得二球质量的结果是：

$m_1=23.0\pm0.1$（g），$m_2=43.2\pm0.1$（g）

写出两次测量的绝对误差和相对误差，并说明哪次测量结果的准确度高？

实验一　长度测量

实验目的

1.熟悉游标卡尺、螺旋测微计的构造、测量原理及使用方法；

2.通过测量金属圆筒和金属球的体积，掌握有效数字和误差的概念及计算方法。

实验器材

游标卡尺，螺旋测微计，金属圆筒，金属球等。

仪器描述

1.游标卡尺

普通测长度的尺子精密度受到限制，主要是由于其分度值（即仪器能准确鉴别的最小量值）较大。例如米尺的分度值为 1 mm 而不能更小，否则，刻度线太密将无法区分。为此，在主尺上装一个能够沿主尺滑动的带有刻度的副尺，称为游标。这样的装置称为游标卡尺。

游标卡尺的结构如图 1－1 所示。主尺D是一根钢制的毫米分度尺，主尺头上附有钳口A和刀口A'。游标E上附有钳口B、刀口B'和尾尺C，可沿主尺滑动。螺旋F可将游标固定在主尺上。当钳口AB密接时，则刀口$A'B'$对齐，尾尺C和主尺尾部也对齐，主尺上的 0 线与游标上的 0 线相重合。

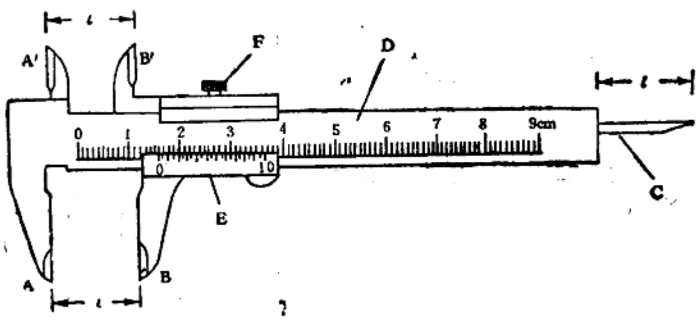


图 1－1　游标卡尺

钳口AB用来测物体的长度及外径，刀口$A'B'$用来测物体的内径，而尾尺C则用来测物体的深度。它们的读数值，都是表示游标的 0 线与主尺的 0 线之间的距离。

游标卡尺的分度法有多种，其精密程度各不相同。常用的卡尺中最简单的一种是在游标上刻有10个分格，10个分格的总长等于主尺上 9 个分格的总长（ 9 mm ）， 即每个游标分格之长是0.9mm，它比主尺的最小分格短0.1mm。这样的游标卡尺的分度值是0.1mm。游标 0 线对准主尺上某一位置，毫米以上整数部分l_0可以从主尺上直接读出。毫米以下部分Δl从副尺上读出。如图1－2 所示，$l_0 = 21$mm，Δl从游标上读出。 首先寻找游标上哪一

刻线与主尺上的刻线对得最齐，从图中可看出第6条线对得最齐。Δl就是6个主尺分格与6个游标分格的长度之差，即0.6mm。

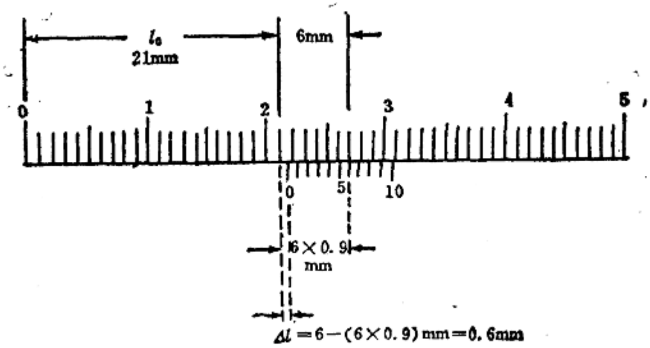


图1-2　游标卡尺的读数

同理，如果第K条刻线对得最齐，则

$$\Delta l = K\times 0.1mm$$

物体的长度

$$l = l_0 + \Delta l$$

除了上述的游标分度外，尚有其它分度，但不论哪一种，它的原理和读数方法都是一样的。如果用y表示主尺上的一个分格的长度，用m表示游标的分格数，m个游标分格与主尺（$m-1$）个分格的总长相等，因此游标的一个分格的长度x为

$$x = \frac{m-1}{m}y$$

所以，主尺与游标上每个分格长度的差值是

$$y - x = y - \frac{m-1}{m}y = \frac{y}{m}$$

这个量就是游标卡尺的分度值。因此，游标的分格数越多，分度值就越小，卡尺的精密度就越高。

常用的游标卡尺的分度值为0.1mm、0.05mm、0.02mm三种。例如$y=1$ mm，$m=20$，则$\frac{y}{m}=0.05$mm；$y=1$ mm，$m=50$，则$\frac{y}{m}=0.02$mm。

注意，用游标卡尺测量之前，应先把钳口AB合拢，检查游标尺的0线与主尺0线是否重合。如不重合，应记下这个差数，我们称之为**零点读数**，测量值应加以修正，即

$$待测量 = 读数 - 零点读数$$

零点读数可正可负，若游标0线超出主尺0线，则取负值；反之游标0线未到主尺0线，取正值。

2.螺旋测微计

螺旋测微计（千分尺）是比游标卡尺更精密的长度测量仪器。常用的一种测量范围0～25mm，分度值0.01mm。螺旋测微计的结构如图1-3所示。主要部分是在固定套管上

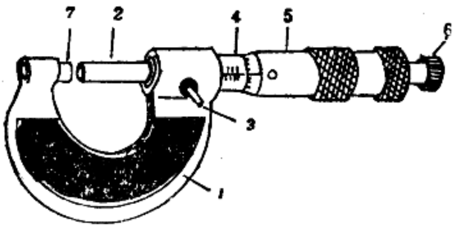
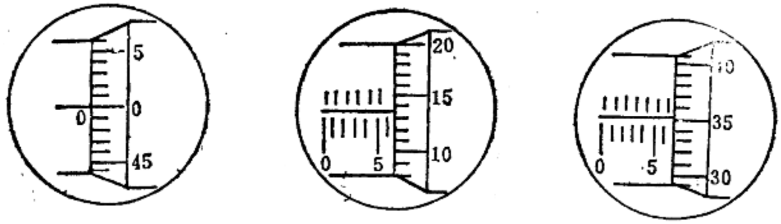


图 1 - 3　螺旋测微计

1.尺架；2.微动螺杆；3.锁紧装置；4.固定套管；5.微分筒；6.棘轮旋柄；7.测砧

有一个微动螺杆，螺距 0.5mm，因此，当螺杆旋转一周时，它沿轴线方向前进或后退 0.5mm，此距离在固定套管的标尺上显示为一个分格（标尺上有两排刻线，上下两条相邻的刻线为一个分格，间距 0.5mm）。在螺旋柄上附有沿圆周刻度，共50个分格，当螺旋柄上的刻度转过一格，螺旋杆沿轴线方向前进或后退$\frac{0.5}{50}$mm。



(a)读数为 0.000　(b)读数为 6.136　(C)读数为 6.852

图 1 - 4　螺旋测微计的读数

读数时，从固定标尺上读出整格数（每格0.5mm），0.5mm以下的读数则由螺旋柄圆周上的刻度读出，估测到0.001mm这一位上，如图 1 - 4 所示。

使用时注意：

（1）用螺旋测微计测量之前，应先记录零点读数，以便对测量值作零点校正，方法同游标卡尺。有一种千分尺，其测量范围为25mm～50mm，因此，零点读数应从主尺上25mm刻线开始计算，零点读数的取得，是用每个盛尺盒中附有的25mm校正量杆来测取。

（2）测量时，不要直接拧转螺杆，应轻轻转动棘轮旋柄推进螺杆，以免夹得太紧，影响测量结果及损坏仪器。只要听到“喀”“喀”声，就可以进行读数了。

（3）测量完毕后，应在测砧间留下间隙，避免因热膨胀而损坏螺纹。

实验步骤

1.用游标卡尺测圆筒的线度

（1）记录游标卡尺的零点读数。

（2）用游标卡尺测量金属圆筒的高度h_1、深度h_2，外径D_1、内径D_2。

（3）对每个量分别在不同的部位测量 5 次，结果记录在表 1 - 1 中。

2.用螺旋测微计测金属球的直径

（1）记录螺旋测微计的零点读数。

（2）用螺旋测微计在不同的部位测量直径 5 次，结果记录在自己设计的表格中。

记录与处理

1.求金属圆筒的体积