高等医药院校实验教材

医用物理实验教程

同济医科大学
河南医科大学　　合编
湖南医科大学

A Textbook Of Experiments In Medical College Physics

华中理工大学出版社

内容提要

本书系根据卫生部颁发的高等医学院校医用物理教学大纲的基本要求和各兄弟院校近十年来的教学实践编写而成。全书除绪论外，共选编了 26 个物理实验，在选材时力求符合高等医学院校的实际情况，并注意与医药学相结合。全书实验原理叙述清楚，实验步骤简明扼要，每个实验后精选的思考题和练习题，有利于学生自学和巩固实验知识。

本书可作为高等医药院校临床医学、儿科、卫生、口腔、法医、影像、运动医学及药学等专业的物理实验教材，亦可供理工农院校生物系、兽医专业，各医专物理实验教材和师生参考书。

医用物理实验教程

同济医科大学
湖南医科大学　合编
河南医科大学

责任编辑　周筠

*

华中理工大学出版社出版发行
（武昌喻家山）
同济医科大学印刷厂印刷

●

开本：787×1092　1/16　印张：8.75　字数：192.000
1990年7月第1版　1990年7月第1次印刷
印数1—10 000
ISBN 7—5609—0509—9/R·1
定价：2.75元

目　录

前言…………………………………………………………………………（1）
绪论…………………………………………………………………………（2）
实验一　长度测量…………………………………………………………（10）
实验二　正负压的测量……………………………………………………（14）
附录2－1　福廷气压计……………………………………………………（16）
附录2－2　干湿球湿度计…………………………………………………（17）
实验三　液体粘滞系数的测定……………………………………………（18）
实验四　表面张力系数的测定……………………………………………（22）
实验五　超声诊断仪的使用………………………………………………（25）
附录5－1　A型超声诊断仪………………………………………………（27）
实验六　电偶极子电场的描绘……………………………………………（28）
实验七　万用电表的使用　制流和分压…………………………………（31）
附录7－1　DT－830型袖珍数字万用表…………………………………（36）
实验八　用惠斯登电桥测定电阻…………………………………………（38）
实验九　灵敏电流计的使用………………………………………………（41）
实验十　用电势计测量电动势……………………………………………（45）
附录10－1　标准电池……………………………………………………（48）
实验十一　照明电路的安装………………………………………………（49）
附录11－1　安全用电……………………………………………………（51）
实验十二　医用换能器……………………………………………………（52）
实验12－1　光电换能器…………………………………………………（52）
实验12－2　热电换能器…………………………………………………（54）
实验十三　晶体管整流电路的研究………………………………………（57）
实验十四　晶体管低频放大器的测试……………………………………（62）
实验十五　晶体管多谐振荡电路的研究…………………………………（64）
实验十六　阴极射线示波器………………………………………………（67）
实验16－1　阴极射线示波器使用Ⅰ……………………………………（67）
实验16－2　阴极射线示波器使用Ⅱ……………………………………（72）
实验十七　薄透镜焦距的测定……………………………………………（78）
实验十八　用衍射光栅测定光波波长……………………………………（83）
实验18－1　用光栅及分光仪测光波波长…………………………………（83）
实验18－2　用光栅及光具座测光波波长…………………………………（85）
附录18－1　单色光源……………………………………………………（86）
附录18－2　FGY－01型分光仪的调整……………………………………（87）

实验十九　用棱镜分光计测量明线光谱……………………………………………（89）
附录19－1　GP－20 型 低压汞灯……………………………………………………（92）
实验二十　显微镜放大率的测定和分辨本领的观察……………………………（93）
附录20－1　读数 显 微镜………………………………………………………………（95）
实验二十一　显微摄影术……………………………………………………………（98）
附录21－1　印像原理及其 过 程………………………………………………………（99）
附录21－2　放大 原 理及其过程………………………………………………………（100）
附录21－3　显影和 定 影原理…………………………………………………………（101）
附录21－4　彩色 扩 印…………………………………………………………………（101）
实验二十二　激光全息照相术…………………………………………………………（103）
实验二十三　用旋光计测量糖溶液的浓度……………………………………………（106）
实验二十四　放射性同位素半衰期的测定……………………………………………（109）
附录24－1　闪 烁 计数器…………………………………………………………………（112）
附录24－2　定 标 器………………………………………………………………………（113）
实验二十五　物质对γ射线吸收 规 律的研究…………………………………………（114）
实验二十六　微型计算机的使用——BASIC语言程序设计简介……………………（117）
附录26－1　LASER－310 微型计算机 …………………………………………………（127）
附录26－2　PB－700 微机实习…………………………………………………………（130）

CONTENTS

Preface Page

Introduction .... (2)

Experiment

I. Measurement of Lengths .... (10)

II. Measurement of Positive and Negative Pressure .... (14)

III. Determination of Viscosity Coefficient for Liquids .... (18)

IV. Determination of Coefficient of Surface Tension .... (22)

V. Use of Ultrasonic Diagnosis A-mode .... (25)

VI. To Tracing the Field of A Dipole .... (28)

VII. Use of Multimeter Divide Current and Voltage .... (31)

VIII. Determination of An Unknown Resistance Using a Wheatstone Bridge .... (38)

IX. Use of Sensitive Galvanometer .... (41)

X. Determination of Electromotive Force by Potentiometer .... (45)

XI. Fixation of the Light Circuit .... (49)

XII. Transducer for Medicine .... (52)

XIII. The Study of Transistor Rectifier Circuits .... (57)

XIV. The Test of Transistor Low-frequency Amplifier .... (62)

XV. The Study of Transistor Multivibrator .... (64)

XVI. Cathode-ray Oscillograph .... (67)

XVII. Determination of Focal length of Thin Lens .... (78)

XVIII. Determination of Wavelenth of Light by Diffraction Grating .... (83)

XIX. Determination of Line Spectra by Prism Spectrometer .... (89)

XX. Determination of Magnifying Power of Microscope and View of Resolving Power .... (93)

XXI. Microphotography .... (98)

XXII. LASER Holography .... (103)

XXIII. Measurement of the Concentration of Sugar Solution by Polarimeter .... (106)

XXIV. Determination of the Half-life of Radioactive Isotope .... (109)

XXV. The Study of the absorption of γ-ray .... (114)

XXVI. Use of Microcomputer——Introduction of BASIC Programming .... (117)

前　　言

(Preface)

近10年来我国高等医药院校教育事业发展很快，但适合医药学各类专业学生需求的物理实验教材，在国内尚不多见。1989年在医学物理学会教学组有关同志的倡议下，组成《医用物理实验教程》编写组，并根据卫生部1982年颁发的高等医药院校医用物理教学大纲对学生基本技能训练项目的基本要求，着手组织编写本教材，经过反复酝酿、讨论和修改，现在终于定稿，由华中理工大学出版社出版。

本书除绪论外，选编了26个实验，其中包括误差理论和数据处理等，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、湖南医科大学和同济医科大学10年来的教学实践和编写的物理实验讲义的基础上，经过删节、增补、改写和提高，编写成《医用物理实验教程》。在编写过程中认真考虑目前国内多数医学院校的设备条件和今后几年医学教育发展的需求，故在选题时留有较大的余地，即在一些实验课题中使用不同的仪器，采用多种实验方法和测量项目，以适应各校的要求。

本书由曾仁端、赵辰庆、李戈山、赖生贵、章萍、骆志东等同志组成编写委员会，并由曾仁端、赵辰庆、李戈山同志负责全书的审编工作。同济医科大学赖生贵、黄智达、李贤珍、李云高、耿京汉、陆蓉、曾仁端，湖南医科大学李戈山、骆志东、刘义廉、李晓春、黄伯若、赵敏、刘佳来、陈卫红、谢平凡、朱权，河南医科大学赵辰庆、章萍、刘润梅、王元明、唐伟跃、刘婉华、闵士超、侯晓强、陈香才，武汉冶金医学专科学校郭淑静和同济医科大学郧阳医学院潘成巨等同志参加编写。

本书在编写过程中得到同济医科大学、湖南医科大学、河南医科大学的积极支持。同济医科大学粟载福副教授参加本书的审稿工作，陈道生、吴锦城、刘国刚等副教授对本书的编写和选题提出许多宝贵意见。湖南医科大学吴承德同志参加绘制部分插图，在此一并表示衷心感谢。

由于编写水平所限，时间匆促，书中缺点和错误在所难免，敬请各兄弟院校和广大读者提出宝贵意见，以便改进。

《医用物理实验教程》编委会　1990年3月

绪　论
(Introduction)

一、医用物理实验的意义、目的和要求

1．医用物理实验的意义　物理学是一门以观察和实验为基础的科学。物理实验的内容极为广泛，它是实验技术的基础。它的方法和测量技术被广泛应用在其它科学技术中，并在诊断、治疗、卫生、保健、药物分析鉴定以及生命机制的研究中起着重要的作用。因此，医用物理实验已成为物理实验的重要分支。现在的趋势已明显地说明，要掌握现代医、药科学的技术，就必须具备一定的物理实验理论知识和一定的操作技能。

2．物理实验的目的　学生做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；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；巩固和加深学生对所学的物理现象及其规律的认识。

3．物理实验的要求　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、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；包括熟悉电子射线示波器、万用电表、光学显微镜、读数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，能得到一定程度的训练，能写出正确的实验报告；并对照相、显微摄影、扩印的暗房技术和激光全息的实验以及电子计算机的使用等有初步的训练。

医用物理实验课就是根据这些基本要求开设的，为了达到以上要求，同学们应做到：实验必须在理论指导下进行；一切操作按正规方法进行，严肃认真地观察现象、记录数据；在实验过程中要有条理、保持整洁，并注意爱护每一件仪器，在没有明瞭一件仪器的操作方法时，绝对不能随意搬弄仪器；实验后应写实验报告，实验报告应该有事实、有数据、有分析、有结果，并且书写整齐，图表美观，词句通顺、明晰，使人易于看懂。

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、实验环境和实验者存在的各种不理想情况，测量的结果只能具有一定的准确程度，而不是它本身的真值。例如同一个人使用同一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，错误是由于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，而真值是测不出来的。所以测量时应该是在尽可能消除或减小误差之后求出在该条件下的最可信赖值，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完成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。

【系统误差】　这类误差主要来源于测量仪器本身的缺陷（如零点未校准、刻度不准确等）、实验条件与理想条件不符合、测量方法上的缺陷或由于定理、公式本身不够严密等。这类误差的特点是：测量值总是有规律地朝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一定的，例如由于温度而变长的米尺，测量的长度总是较真值偏

小，重复测量也不能使这种误差减小。因此把它叫作系统误差，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，调节仪器的零点等方法来减小和消除。

【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，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、电路电压等的涨落，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。偶然误差的特点是其测量值时大时小，有正有负，方向不一。由于偶然误差是由一些偶然因素产生的，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。

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，某待测量能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，…，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$\overline{N}$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，而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$\Delta N_1=N_1-\overline{N}$，$\Delta N_2=N_2-\overline{N}$，…，$\Delta N_n=N_n-\overline{N}$，这些偶然误差的大小和正负是随机分布的，取它们的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

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

它表示测得的最可靠值是$\overline{N}$，测量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8.33cm与8.35cm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，严格地说应叫相对偏差，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

测量次数	测量值(cm)	绝对偏差(cm)	相对误差	测量结果(cm)
1	3.4255	0.0001	$E_N=\frac{\Delta N}{\overline{N}}\times 100\%$ $=\frac{0.0004}{3.4256}\times 100\%$ $=0.01\%$	$N_0=\overline{N}\pm\Delta N$ $=3.4256\pm 0.0004$
2	3.4250	0.0006		
3	3.4260	0.0004		
4	3.4260	0.0004		
平均	$\overline{N}=3.4256$	$\Delta N=0.0004$		

有时由于某些原因只可能或只需要测量一次，这就无法计算平均绝对偏差，而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。标准偏差的数学表示式为

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

计算标准偏差时，对单次测量的偏差加以平方，这样做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示式为

$$S=\sqrt{\Sigma(N_i-\overline{N})/(n-1)} \tag{0-4}$$

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，自由度为零，即不可能计算测量值的分散度。如果进行两次测量，独立的偏差数为 1（虽然有两个偏差，但由于偏差之和为零，所以独立的偏差只有一个），分散程度就是这两个测量值之差。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）间接测量误差的表示方法：在物理实验中的测量几乎都是属于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。而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$N=\overline{N}\pm\Delta N$，$E_N=\dfrac{\Delta N}{\overline{N}}\times 100\%$，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 如果间接测量值是两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 如果间接测量值是两个直接测量值的一般乘、除关系，对相乘积的运算结果是：

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

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

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

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。对于其它的函数形式，间接测量误差计算公式可由对函数的全微分求得，这里不作推导，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$M=20.1425\pm0.0002$ g，今将其中空气抽去称得其质量$m=20.0105\pm0.0002$ g，问瓶内空气的质量为多少克？

解　设瓶内空气质量为N，则

$$\overline{N}=\overline{M}-\overline{m}=20.1425-20.0105=0.1320\ \text{g}$$

$$\Delta N=\Delta M+\Delta m=0.0002+0.0002=0.0004\text{g}$$

$$N=\overline{N}\pm\Delta N=0.1320\pm0.0004\text{g}$$

$$E_N=\frac{\Delta N}{\overline{N}}\times100\%=\frac{0.0004}{0.1320}\times100\%=0.3\%$$

表 0-2

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

【例0-3】有一圆柱体，测得其高$h=10.0\pm0.1\text{cm}$，直径$d=5.00\pm0.01\text{cm}$，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

$$E_N=\frac{\Delta V}{\overline{V}}=\frac{\Delta h}{\overline{h}}+2\frac{\Delta d}{\overline{d}}=\frac{0.1}{10.0}+\frac{2\times0.01}{5}=1\%$$

圆柱体的平均值为

$$\overline{V}=\frac{\pi}{4}hd^2=\frac{1}{4}\times3.14\times10.0\times(5.00)^2=196.2\text{cm}^3$$

其绝对偏差为

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

于是测量结果可写成

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

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开始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，游标卡尺的精密度有0.1mm、0.05mm、0.02mm 等，螺旋测微计的精密度为0.01mm，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，很容易读出这棒的长度是大于10cm，小于11cm，虽然这种皮尺没有刻到毫米，但可以估计到毫米（最小刻度的1/10），因此棒长可读为10.2cm，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一位。如果用刻有毫米的米尺来测量，便可以直接读到毫米，估计到毫米的1/10，如10.23cm。若这棒的长度恰巧为10.2 cm，则应写成10.20cm。

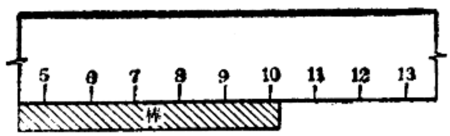


图 0－1

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，得到三位数字，后者可估计到1/10mm，得到四位有效数字。这些数字中最后一位是估计得到的，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0.1023m都是四位有效数字；

② 测量结果的读数中，最后一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”字不能略去，否则测量结果比仪器的精密度将降低10倍。例如测得一棒长为10.50cm，绝不能记作10.5cm；

③ 由前面所说可知，“0”字在数字之后或在数字之间时都是有效数字。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7.03cm和0.0703m都是三位有效数字。

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 29,976,000,000cm/s，

因为这样表示的话，其有效数字是十一位，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，其有效数字是五位。遇到很小的数字，可用10的负n次方来表示，如钠光波长为0.00005893cm，有效数字是四位，应把它写成5.893×10^{-5}cm，有效数字也是四位。

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$\pi=3.14$是三位有效数字，而$\pi=3.1416$是五位有效数字），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，不能认为是一位有效数字，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，可以避免繁琐运算，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它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】$5820\div121=48.1$

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一位，有时则少保留一位，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：$(36.4)^2=1.33\times10^3$；$(56.3)^{1/2}=7.50$；$\sin35^\circ=0.57$。

以上这些规则只适用于测量数的计算，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一位。

【例0－8】　用单摆测定重力加速度g，实验所得摆长$L=100.23$ cm，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$g=4\pi^2L/T^2$，$T=t/n=200.2/100\doteq2.002$s，式中$4\pi^2$是常数，$n$是指定数，$L$、$T$是测量数，以测量数为依据，$\pi$应取四位有效数字。于是

$$g=(4)(3.142)^2(100.23)/(2.002)^2=987.0\text{cm/s}^2$$

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，常用列表记录和作图表示法。

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。

2．作图表示法　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：坐标纸应根据实验情况确定大小，以充分利用纸张幅面为原则；

（2）坐标轴的确定：在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从“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位数都能标出；

（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 $l=10.30\pm0.002\text{cm}$；

② $m=54000\pm1000\text{ g}$；

③ $t=10.60\pm0.5\text{ s}$；

④ $12.34+1.234+0.01234=13.58634\text{kg}$；

⑤ $12.34\times0.0234=0.288756\text{cm}$；

⑥ $0.1234\div0.0234=5.2735\text{cm}$。

4．完成下列单位变换：

$L=3.756\pm0.001\text{m}=$　　cm＝　　mm＝　　km。

5．有一铅圆柱体，测得其高$h=4.12\pm0.01\text{cm}$、直径$d=2.040\pm0.001\text{cm}$，质量$m=149.10\pm0.05\text{g}$，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(atm)	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	9.85	8.20	7.05	6.10	5.48	4.90	4.10	2.46

实验一 长度测量

(Measurement of Lengths)

【实验目的】

一、学习米尺、游标尺、螺旋测微器的构造原理和正确使用方法。

二、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。

【仪器与器材】

米尺，游标尺，螺旋测微器，金属圆柱，金属圆筒，金属小球等。

【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0.1mm。用米尺测量长度必须注意以下几点：

1．不使用米尺的端点，因为端点常有磨损，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　图 1－1 为游标尺，CD为主尺，AB为游尺，游尺可沿主尺滑动。当E、F两颚吻合时，游尺的 0 线应与主尺的 0 线对准。测物体长度或外径时，将物体夹于 E、F 之间；测槽宽或内径时，将被测物套于 e、f上。E、F 或 e、f两颚分开的距离等于被测物的长度，也就等于游尺 0 线与主尺 0 线的距离。因此，游尺 0 线在主尺上所指的读数就是被测物的长度。游尺能够帮助估计出毫米的十分之几。

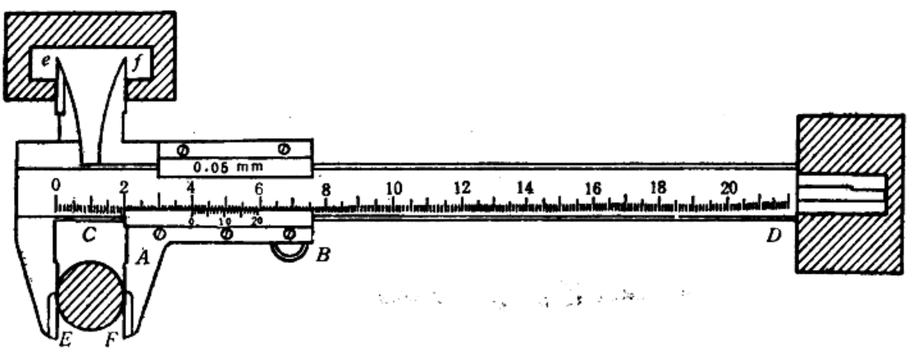


图 1－1

图 1－2 (a) 表示一10分度的游标，游尺10格总长等于主尺上 9 小格的总长（每小格长 $y=1$ mm，9 小格即 9 mm），所以游尺每小格长$x=0.9$mm，主尺上一小格与游尺上一小格之差$\Delta x=y-x=0.1$mm，Δx叫做游标尺的精度。

常用游标尺除10分度的游标尺外，还有20分度、50分度两种，游标尺的精度可以统一表示为

$$\Delta x = \frac{\text{主尺最小分度之长（1 mm）}}{\text{游尺的分度数}}$$

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

测量时，如果游尺的0线介于主尺上12mm与13mm之间，且游尺的第二条刻线与主尺某刻线对齐，见图1－2（b），由图可知$\Delta L=a-b=2(y-x)$。如果游尺的0线介于主尺的第k与$k+1$最小刻度之间，且游尺上第n条刻线与主尺上某刻线对齐，则

$$\Delta L=n(y-x)=n\Delta x$$

于是被测结果

$$L=ky+n\Delta x$$

如果图1－2（b）中表示一10分度的游标，则读数为12.2mm。如果图1－2（b）表示一20分度的游标，则读数为12.10mm。

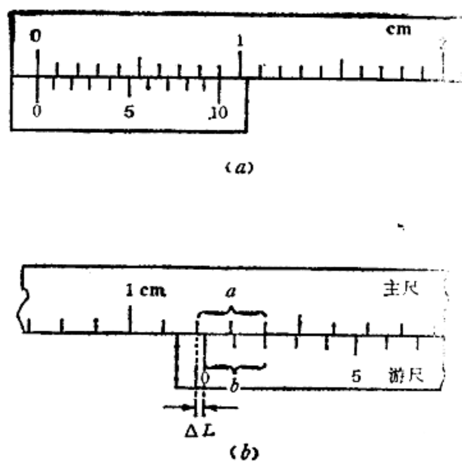


图 1－2

三、螺旋测微器　螺旋测微器的构造如图1－3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0.5mm。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。

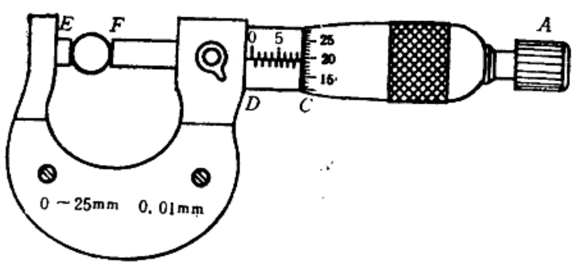


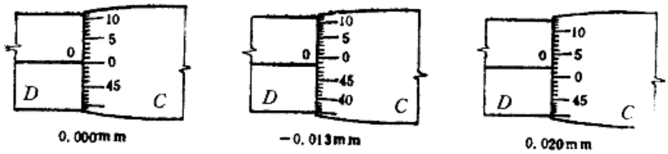
图 1－3

当套筒C在主尺上旋转一周时，螺旋柱F就前进或后退0.5mm，套筒C左端边缘的圆周等分为50刻度，C每转一刻度，F前进或后退0.5/50＝1/100mm，因此可以准确读出1/100mm，连同估计的一位，可以读出1/1000mm。

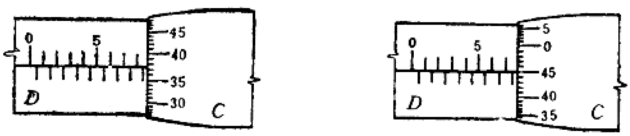
当E、F相接触时，套筒C左端边缘应与主尺D的0线重合，C的0线与D的水平轴重合，如图1－4（a）。

测量时，如将被测物体夹持于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0.5mm以上的读数，然后从C上读出0.5mm以下的数，两者之和，即被测物体的长度。例如图1－4（b）左边的读数为$8.5+37.5/100=8.875$mm，最后一位是估计出来的。图1－4（b）右边所示读数为$7.5+0.450=7.950$mm，有人因看到了主尺上8mm线，常读为$8.0+0.450=8.450$mm，这是错误的。



（a）



（b）

图 1－4

使用螺旋测微器时应注意以下几点：

（1）如果E、F吻合时，其读数不为0，应定出零点校正值，测量零点校正值若干次，求出平均值。通常规定，若主尺D的水平轴在套筒C的0线上方，见图1－4（a）右，则零点校正值为正，图1－4（a）中的校正值为负。按这样的规定，被测物体的长度等于测量读数减去零点校正值。

（2）物体夹在E、F之间，夹得太紧或太松都会引起测量误差，夹得太紧时，被测物体发生形变，同时可能损坏仪器。因此，在转柄上装有保护旋钮A，旋转套筒C，当F快要靠近E或被测物体时，不要再直接旋转套筒，一定要改为旋转保护旋钮A，听到"卡、卡"的声音时，应立即停止旋转。在旋转套筒和保护旋钮时，转速不宜太快，以免损坏螺纹。

【实验步骤】

一、用米尺测量卡片之长，测量五次（记入表1－1），求出其平均值$\overline{L}$，计算出平均绝对误差ΔL，写出测量结果的表达式。

二、用游标尺测金属圆柱体的直径d和高h，各测五次（记入表1－2），求出平均值$\overline{d}$和$\overline{h}$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，写出体积值的表达式。

三、用螺旋测微器测金属小球的直径，测五次（记入表1－3），求出其平均值$\overline{d}$和平均绝对误差，写出直径测量结果的表达式。进而求出小球的体积V和绝对误差ΔV，写出体积值的表达式。

【数据记录与处理】