高等医药院校实验教材

医用物理实验教程

A Textbook Of Experiments In Medical College Physics

（第二版）

曾仁端　章　萍　赵　敏　主编

华中理工大学出版社

高等医药院校实验教材

医用物理实验教程

（第二版）

曾仁端　章　萍　赵　敏　主编

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

医用物理实验教程/曾仁端　章　萍　赵　敏　主编
武汉:华中理工大学出版社，1995.
ISBN 7-5609-1147-1.

Ⅰ. 医…
Ⅱ. ①曾…　②章…　③赵…
Ⅲ. 医药-卫生-医学实验
Ⅳ. R-0・33

医用物理实验教程
曾仁端　章　萍　赵　敏　主编
责任编辑　周筠
*
华中理工大学出版社出版发行
(武昌喻家山　邮编:430074)
新华书店湖北发行所经销
石首市人民印刷厂印刷

开本:787×1092　1/16　印张:7.75　字数:180 000
1995 年 7 月第 2 版　1995 年 7 月第 1 次印刷
印数:1-8 500
ISBN 7-5609-1147-1/R・7
定价:5.60 元

《医用物理实验教程》编委会

曾仁端　赖生贵　（同济医科大学）
章　萍　赵辰庆　（河南医科大学）
赵　敏　李晓春　（湖南医科大学）
李戈山

编　　者

（以姓氏笔划为序）

刁振琦	元秀华	邓　明	王章金	刘润梅
刘婉华	全　红	朱　权	闵士超	李戈山
李云涛	李旭光	李晓春	陈大庆	陈昌盛
陈香才	罗永辉	张技荣	赵辰庆	赵　敏
侯晓强	唐伟跃	耿京汉	陆　蓉	谢　定
章　萍	黄智达	赖生贵	谭晓红	

前　言

(Preface)

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、卫生等工作打好基础。

本书第一版出版后，经过5年的教学实践，证明它是一本实用性较强的物理实验教材，在医学教学中起到了其应有的作用，使用者普遍反映比较满意。但由于学科的发展，书中有些实验已不能适应当前教学的需要，还有一些实验需要进行删改和补充，所以决定修订本教材。经过修订后，在选题时采用比较灵活的办法，即在一些实验课题中使用不同的仪器，采用多种实验手段进行测量。如阴极射线示波器是医科学生必须熟练掌握的仪器之一，我们根据各校所使用的示波器的型号和性能，将本实验分成3个实验进行，以适应各校的情况。另外在激光全息摄影术实验中，适当增加原理部分的内容，以弥补课堂理论课的不足；同时增加一些基础医学实验中常用到的仪器的实验，如x-y函数记录仪等，使本书更能适应高等医药院校物理实验的需要。

本书由曾仁端、章萍、赵敏、李戈山、赖生贵、赵辰庆、李晓春等同志组成编写委会员，负责审编工作。参加本书修订工作的有：湖南医科大学李戈山(实验一)、谭晓红(实验五)、元秀华(实验七)、赵敏(实验十二、实验十六"Ⅱ")、谢定(实验十三)、李晓春(实验十七)、朱权(实验十九)、李旭光(实验二十五)；河南医科大学唐伟跃(实验三)、刘婉华(实验四)、李云涛(实验六)、闵士超(实验八)、侯晓强(实验十)、罗荣辉(实验十一)、赵辰庆(实验十六)、陈香才(实验十六"Ⅰ")、刘润梅(实验十八)、章萍(实验二十四)、刁振琦(实验二十六)；同济医科大学耿京汉(绪论)、张技荣(实验二)、陈昌盛(实验九)、陈大庆(实验十四)、全红(实验十五)、赖生贵(实验十六"Ⅲ")、黄智达(实验二十)、王章金(实验二十一)、陆蓉(实验二十二)、邓明(实验二十三)。最后由曾仁端、赖生贵负责统一整理全书。

本书第一版出版后，不少同行提出许多有益的建议，指出书中存在的缺点和不足之处以及使用本书的经验，我们在这次修订工作中充分考虑这些同志的意见，借此机会向这些同志和关心本书修订工作的同志表示衷心感谢。

《医用物理实验教程》编委会

1995年2月

内 容 提 要

本书是为医科学生编写的医用物理实验教材，全书除绪论外，共选编了26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，每个实验后面精选的思考题和练习题有利于学生自学和巩固实验知识。

本书主要用作为高等医药院校临床医学、儿科、卫生、口腔、法医、影像及药学等专业的物理实验教材和师生参考书。

目　　录

CONTENTS

绪　论

(Introduction)

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，它也是一门实验科学。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它学科和技术中，在临床诊断、治疗、卫生、保健和药物分析鉴定及生命机制研究中起着重要的作用。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　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发展的需要，要求学生通过物理实验，掌握常用物理量的测量原理和方法，包括长度、质量、时间、角度、温度、密度、粘滞系数、压强、电流、电压、电动势、振动频率、光波波长等的测量；熟悉万用表、示波器、光学显微镜、读数显微镜和分光计的使用；在有效数字的记录和运算，误差理论，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，能写出完整的实验报告；对照相、显微摄影、扩印的暗室技术和激光全息摄影有初步的训练。

医用物理实验课就是为达到上述目的而开设的。因此，学生应该在理论指导下，按正规的操作方法进行操作。在实验过程中应认真地观察现象，正确记录数据，分析实验结果，科学地完成实验报告。报告应做到有数据、有分析、有结论，并且书写整齐，图表美观，语句明晰易懂。实验中应注意爱护仪器，保持整洁，严格遵守实验室规章制度。

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、实验环境和实验者存在着各种不理想情况，测量的结果只能具有一定的准确程度，而不是被测物理量本身的真值。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，因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，可将其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，其偏离真值的大小也总是一定的，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，由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 $N_1, N_2, \cdots, N_n$，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 $\overline{N}$ 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 $\Delta N_1 = N_1 - \overline{N}, \Delta N_2 = N_2 - \overline{N}, \cdots, \Delta N_n = N_n - \overline{N}$，这些偶然误差的大小和正负是随机分布的，取它们的绝对值的算术平均值，并称之为平均绝对偏差，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 $\overline{N}$，测量值可能存在的误差范围为 $\pm\Delta N$，而真值 N_0 就是在 $\overline{N}+\Delta N$ 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 $\overline{L}=8.34\text{cm}, \Delta L=0.01\text{cm}$，则 $L_0=\overline{L}\pm\Delta L=(8.34\pm0.01)\text{cm}$，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 $L_1=(8.34\pm0.01)\text{cm}, L_2=(88.34\pm0.01)\text{cm}$，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，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

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

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	$E_N=\frac{\Delta N}{\overline{N}}\times 100\%$ $=\frac{0.0004}{3.4256}\times 100\%$ $=0.01\%$	$N_0=\overline{N}+\Delta N$ $=3.4256\pm 0.0004$
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（又叫方均根偏差）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

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

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，这就叫间接测得量或叫导出量。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，$A,B,C,\cdots$ 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 $A=\overline{A}\pm\Delta\overline{A}$，$B=\overline{B}\pm\Delta B$，$C=\overline{C}\pm\Delta C,\cdots$，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 $\bar{N}=\bar{A}\pm\bar{B}$，$\Delta N=\Delta A+\Delta B$，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

$$E_N=\frac{\Delta N}{\bar{N}}\times 100\%=\frac{\Delta A+\Delta B}{\bar{A}\pm\bar{B}}\times 100\%$$

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

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

因为 ΔA 和 ΔB 两个量与 $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$ 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

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

而相乘积的相对误差为

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

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 $M=(20.1425\pm0.0002)\text{g}$，今将其中的空气抽去，称得其质量 $m=(20.0105\pm0.0002)\text{g}$，问瓶内空气的质量为多少克？

解 设瓶内空气质量为 N，则

$$\begin{aligned}\bar{N}&=\bar{M}-\bar{m}=(20.1425-20.0105)\text{g}=0.1320\text{g}\\\Delta N&=\Delta M\pm\Delta m=(0.0002+0.0002)\text{g}=0.0004\text{g}\\N&=\bar{N}\pm\Delta N=(0.1320\pm0.0004)\text{g}\\E_N&=\frac{\Delta N}{\bar{N}}\times 100\%=\frac{0.0004}{0.1320}\times 100\%=0.3\%\end{aligned}$$

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 $E_N=\frac{\Delta N}{N}$
$A+B+\cdots$	$\pm(\Delta A+\Delta B+\cdots)$	$\frac{\Delta A+\Delta B+\cdots}{\bar{A}+\bar{B}+\cdots}$
$A-B$	$\pm(\Delta A+\Delta B)$	$\frac{\Delta A+\Delta B}{\bar{A}-\bar{B}}$
$A\cdot B$	$\pm(\bar{A}\cdot\Delta B+\bar{B}\cdot\Delta A)$	$\frac{\Delta A}{\bar{A}}+\frac{\Delta B}{\bar{B}}$
$A\cdot B\cdot C$	$\pm(\bar{B}\cdot\bar{C}\cdot\Delta A+\bar{A}\cdot\bar{C}\cdot\Delta B+\bar{A}\cdot\bar{B}\cdot\Delta C)$	$\frac{\Delta A}{\bar{A}}+\frac{\Delta B}{\bar{B}}+\frac{\Delta C}{\bar{C}}$
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 $h=(10.0\pm0.1)$cm，直径 $d=(5.00\pm0.01)$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

$$E_N=\frac{\Delta V}{V}=\frac{\Delta h}{h}+2\frac{\Delta d}{d}=\frac{0.1}{10.0}+\frac{2\times0.01}{5}\approx1\%$$

圆柱体的平均值为

$$\bar{V}=\frac{\pi}{4}hd^2=\frac{1}{4}\times3.14\times10.0\times(5.00)^2\mathrm{cm}^3\approx196.2\mathrm{cm}^3$$

其绝对偏差为

$$\Delta V=E_N\cdot\bar{V}=0.01\times196.2\mathrm{cm}^3\approx2\mathrm{cm}^3$$

于是测量结果可写成

$$V=\bar{V}\pm\Delta V=196\pm2\mathrm{cm}^3$$

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数值大小称为仪器的精密度。例如米尺的精密度为 1mm，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，所量度的物理量的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 10.2cm，则应写成 10.20cm。

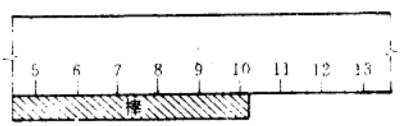

图 0-1

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 3 位有效数字，后者可估计到 1/10mm，得到 4 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。对于同一物理量，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 10.23cm 和 0.1023m 都是 4 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 由前面所述可知，“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29,976,000,000cm/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$2.9976\times10^{10}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$，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0.00005893cm，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$V=\frac{4}{3}\pi r^3$，公式中的分母、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，依据以上规则即可。

(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：$(36.4)^2=1.33\times10^3$；$(56.3)^{1/2}=7.50$；$\sin35°=0.57$。

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$g=4\pi^2L/T^2$，$T=t/n=200.2\text{s}/100=2.002\text{s}$，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，π 应取 4 位有效数字。于是

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

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

实验中，为了直观地表示各物理量之间的关系，便于检查各量的测量结果的合理性，分析各量之间的规律性，常利用表格来记录数据，并绘图示意。

1. 列表记录法　表格设计要简明，应该具有标题栏。在标题栏中写明代表的物理量或注明符号，并写上该量的单位。数据栏内填写实验中测得的数据，它们必须是有效数字。对某些特殊情况应在表格下作出附注说明。

2. 作图表示法　将测量结果在坐标图上标记出来，并用曲线光滑地依次连接各点(特殊情况下用折线)。这种表示方法称作图表示法。作图应注意以下几点：

(1) 坐标纸的选用：根据实验确定幅面大小，以充分利用且保证一定精度。

(2) 坐标轴确定：横轴为自变量，纵轴为因变量；标明名称和单位；标度大小应该适当；为充分利用整个幅面，纵横轴起点通常不选在零点，而以接近测量值中的最小值作为原点，轴的终点略大于数据中的最大值；分度值选择以保证数据皆能以有效数字标出为原则。

(3) 实验数据表示：为明显看出实验数据，应选小圆圈、小三角形、十字叉、小矩形等非点图形标记实验数据。当图中有若干组数据时，各组实验点应选用不同的符号标记，对不同组数据还可选不同线型画曲线。

(4) 注释：在坐标图下方应对图中的符号 、线型所示的含义用文字加以说明。

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 次得如下数据，试计算其算术平均值、绝对偏差或标准偏差(方均根偏差或方差)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 $(12.34+1.234+0.01234)\text{kg}=13.58634\text{kg}$；

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

⑥ $0.1234\text{cm}\div0.0234=5.2735\text{cm}$。

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)。设 1 个大气压近似等

于 10^5Pa。

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/10^{-3}m^3	49.2	24.6	16.4	12.3	9.85	8.20	7.05	6.10	5.48	4.90	4.10	2.46