高等医药院校教材

医用物理实验

（供临床、检验、影像、口腔、高护等专业用）

尹殿云 主编

山东科学技术出版社

高等医药院校教材
（供临床、检验、影像、口腔、高护等专业用）
医用物理实验
主编　尹殿云
*
山东科学技术出版社出版
（济南市玉函路16号　邮编 250002）
山东科学技术出版社发行
（济南市玉函路16号　电话 2014651）
山东莒县印刷厂印刷
*
787mm×1092mm　1/16开本　9.5印张　200千字
1999年8月第1版　1999年8月第1次印刷
印数：1 — 5000
ISBN 7—5331—2485—5
R·748　定价：14.50元

图书在版编目(C I P)数据

医用物理实验／尹殿云主编．－济南：山东科学技出版社，1999.8
ISBN 7-5331-2485-5

Ⅰ.医… Ⅱ.尹… Ⅲ.医用物理学-实验-医学院校-教材 Ⅳ.R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（1999）第 35076 号

主　编　尹殿云

副主编　辛卫东　刘东海

（以下人员按姓氏笔画排列）

王云创　孙朝晖　安郁宽

李光仲　李振江　李德尧

吴运平　宋　敬　施　岩

童家明

编　者　（按姓氏笔画排列）

丁玉昆　王云创　尹殿云　刘东海

刘春波　牟方德　孙朝晖　安郁宽

辛卫东　张　平　李向民　李光仲

李振江　李德尧　吴运平　邢　娟

宋　敬　陈立波　易红英　施　岩

郑建军　赵晓红　徐大堤　童家明

魏冠英　楚天舒

前　言

本书是根据卫生部 1982 年颁布的高等医学院校医用物理学教学大纲，结合参编院校的实际编写的。全书共选编了 26 个实验。可供医药院校的临床、检验、影像、口腔、高护等专业使用，也可供医专及其他医学工作者参考。

本书由滨州医学院、青岛大学医学院、承德医学院的教师联合编写，最后由滨州医学院的尹殿云教授统一修改审定。

在本书的编写过程中，考虑到参编院校的仪器设备不尽相同，实验方法也有差异，有些实验是一个题目几种方法，在书中全部列出，使用本书时，各校可根据实际情况和实验学时选用。

本书虽经多次修订，但由于编者水平所限，不足之处在所难免，恳请使用本书的教师和学生指出，以便不断改进。

编　者

1999 年 6 月

目　　录

绪论 …… 1

一、医用物理实验课的目的和任务 …… 1

二、物理实验基础知识 …… 1

三、实验课的基本要求 …… 9

习题 …… 10

实验一　基本测量 …… 11

1.1　用游标卡尺、螺旋测微计测量长度 …… 11

1.2　用读数显微镜测量微小物体长度 …… 15

1.3　固体密度的测定 …… 16

实验二　液体粘度的测定 …… 19

2.1　用奥氏粘度计测定酒精的粘度 …… 19

2.2　用旋转式粘度计测定蒸馏水的粘度 …… 22

2.3　用斯托克斯法(落球法)测定液体的粘度 …… 24

2.4　用转筒粘度计测定液体粘度 …… 25

实验三　杨氏模量的测定 …… 28

实验四　液体表面张力系数的测定 …… 32

4.1　用拉脱法测液体的表面张力系数 …… 32

4.2　用毛细管法测定液体表面张力系数 …… 37

实验五　声速的测定 …… 41

5.1　用共鸣管测声速 …… 41

5.2　用振动合成法测声速 …… 42

实验六　A 型超声诊断仪的原理和使用 …… 46

6.1　水深及超声波传播速度的测量 …… 49

6.2　厚度及声速的测量 …… 51

实验七　静电场的描绘 …… 53

7.1　模拟真空(或空气)中的静电场 …… 53

7.2　模拟心电图 …… 57

7.3　用双层式静电场实验装置描绘静电场 …… 59

实验八　万用电表原理及使用 …… 61

8.1　指针式万用电表 …… 61

8.2　数字式万用电表 …… 66

实验九　示波器及其应用 …… 68

9.1　示波器的基本操作 …… 68

9.2　利用李萨如图形测交流电的频率…………………………………………… 74
9.3　交流电路中电流和电压的相位比较………………………………………… 76
9.4　观察阻尼振荡………………………………………………………………… 77
实验十　常用照明电路的安装 ……………………………………………………… 80
实验十一　简易助听器 ……………………………………………………………… 83
实验十二　晶体管放大电路 ………………………………………………………… 85
12.1　静态工作点的测量 ………………………………………………………… 85
12.2　三极管特性曲线 …………………………………………………………… 87
实验十三　整流电路和滤波电路 …………………………………………………… 90
实验十四　心电图机的原理和使用 ………………………………………………… 93
实验十五　电场的研究与心电的模拟 ……………………………………………… 99
实验十六　模拟直流电离子透入疗法……………………………………………… 103
实验十七　薄透镜焦距的测量……………………………………………………… 105
17.1　薄透镜焦距的测量……………………………………………………… 105
17.2　凹透镜焦距的测量……………………………………………………… 106
实验十八　非正常眼的模拟与矫正………………………………………………… 109
实验十九　光波波长的测定………………………………………………………… 112
19.1　分光计的调节…………………………………………………………… 112
19.2　用衍射光栅和分光计测光波波长……………………………………… 115
19.3　用光栅及光具座测光波波长…………………………………………… 116
19.4　用双缝干涉测光波波长………………………………………………… 117
实验二十　用分光计观察光谱……………………………………………………… 120
实验二十一　用旋光仪测定糖溶液的浓度………………………………………… 123
实验二十二　显微摄影……………………………………………………………… 127
实验二十三　演示光的干涉、衍射等现象 ………………………………………… 129
实验二十四　照相技术初步………………………………………………………… 131
实验二十五　设计实验……………………………………………………………… 137
实验二十六　放射性的测量………………………………………………………… 138

绪　论

一、医用物理实验课的目的和任务

物理学是自然科学中最基本的、最重要的学科之一。它是研究物质运动最基本形式和最普遍规律，并将这些规律应用于生产实践的科学。

医用物理学是一门发展很快的边缘学科，它研究的内容和研究的方法是多方面、多层次的。医用物理学是用物理学的规律来研究和解释一些生物的和医学现象的科学。

（一）医用物理实验课的目的

医用物理实验是医用物理学的研究和发展的重要手段，因为一切理论和真知都是从实践中发源的。医用物理实验是培养医学专业学生总结规律能力、发现问题和解决问题能力、动手能力以及创造性思维能力的一个重要方法，对于医学专业后续课是十分重要的，并可为医学专业学生今后开展科研和专业发展提供基本的、有效的方法。通过物理实验和观察，使学生深入掌握物理现象的规律性，同时也检验物理理论正确性，使这门科学更完整更严密。所以，我们必须正确认识实验课在整个学习过程中的地位和作用，不能把实验课看成是对理论知识的验证，或把实验课视为是理论课的附属，实验课对学生的能力培养是理论课所无法替代的。目前，国内理工科院校已将物理实验课从物理理论课中分离出来，作为一门独立的学科进行教学，学好物理实验课对医学生来说是十分重要的。

（二）医用物理实验课的任务

1．学习方法

熟悉卡尺、千分尺、停表、温度计、伏特计、万用表、示波器、信号发生器、常用电源等仪器的原理和使用方法，学习部分医疗仪器的性能测试方法和使用方法，学习实验数据的记录和处理、实验结果的误差分析方法等。

2．培养技能

通过实验，培养学生科学认真的工作作风，严肃认真的工作态度，培养实验技能和科研能力，要求在实验过程中善于发现问题，提出问题，在教师的指导下，培养解决疑难问题能力。

3．认识规律

我们所做的实验多数是重复前人的实验，以巩固和加深对已学物理现象和物理规律的认识为主，同时要求学生拓展思路，善于把物理规律与医学知识相联系，并使所学知识得到发展和提高。也可以对所开实验内容提出改进意见，对仪器进行革新等。

二、物理实验基础知识

（一）物理量的测量及误差分类

1．测量及分类

物理实验不仅对物理变化过程要作定性的观察，而且还要对某些物理量进行定量的

测量。例如，长度、质量、时间、温度、电流等。测量某一物理量，实际上就是用一个确定为标准单位的物理量和待测的未知量进行比较，所得的倍数就是该未知量的测量值。

测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量是将待测量与标准量作比较而直接得出结果的测量。例如，用米尺测量长度、用秒表测量时间等，就是属于这一类，都是用基本测量仪器就能直接测出该量的结果。间接测量依靠直接测量的结果，再经过物理公式的计算，才能得出最后的结果。例如，要测量圆柱体的体积，首先要测量其直径和高度，然后再用公式计算才能得出体积的数值。大多数测量都是属于这一类。

2．测量中的误差及分类

测量的目的就是力图得到真值。所谓真值，就是反映物质自身各种各样特性的物理量所具有的客观真实数值。严格来讲，由于仪器精密度、测量方法、测量程序、实验环境、实验者的观察力等都不可能完美无缺，尽管对同一物理量经过多次测量，所得的结果也只能达到一定限度的准确程度，因而不能认为测得的结果就是它的真值。真值是不可能准确测得的。通常将在相同条件下进行多次重复测量的算术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于真值。然而我们不能对同一物理量进行无限多次测量，因而常用有限次测量的算术平均值作为真值。

物理量的测量值与该量的客观真实值比较所得到的差值称为误差。用数学式子可表示为

$$\delta = N - Z \tag{0-1}$$

式中：δ ——误差，N ——测量值，Z ——真值

由于测量值不能与真值完全相同，所以误差总是存在的。根据误差的性质及产生原因，可分为系统误差、偶然误差和过失误差。

(1) 系统误差　又称恒定误差，是指在测量中由未被发觉或未确认的因素所引起的误差。例如，仪器不准确、周围环境(温度、湿度、气压等)变化的影响、个人习惯与偏向(读数总是偏高或偏低等)、理论和测量方法本身不严密等原因所造成的误差。由于这些因素影响，测得的数值总是朝一个方向偏离，或总是偏大，或总是偏小。其特征是偏离的确定性，增加测量次数也不能有所改善。但如果根据其产生原因分别加以校正，如对仪器修正、改进测量方法、对影响实验的有关因素加以周密考虑等，则系统误差是能尽量减小的。

(2) 偶然误差　亦称随机误差，是由一些无法控制、纯属偶然的因素所引起的误差。其特征是时而偏大，时而偏小，时正时负，方向不定，其发生纯属偶然，受概率支配。减少偶然误差的方法是进行多次重复测量。

(3) 过失误差　这是人为的误差，如实验者粗心大意、实验方法不当、使用仪器不准确、读错数据等。因此，实验者只要有严肃认真的态度、实事求是和一丝不苟的科学作风，过失误差是可以避免的。

(二) 直接测量误差的计算和测量结果的表示

1．连续读数量具和非连续读数量具

(1) 测量中读数时，只能读到仪器精密度位的量具叫做非连续读数量具。卡尺、电子停表、计时计数计频仪、游标分光计度盘、数字万用表等都是非连续读数量具。

(2) 测量中读数时，可估计到仪器精密度的下一位的量具称为连续读数的量具。米尺、千分尺、机械停表、指针式表头、物理天平等都是连续读数的量具。

2. 单次测量中的误差

一般测量为减小偶然误差，均采用多次测量的方法，某些实验受条件限制，只能测量一次称为单次测量。单次测量不存在平均值的问题，通常规定单次测量的误差为：使用连续读数量具进行单次测量，其绝对误差取量具精密度的一半，例如，一般米尺单次测量的绝对误差为 0.5mm。使用非连续读数的量具进行单次测量，其绝对误差取仪器的精密度，例如，电子停表单次测量的绝对误差为 0.01s。

3. 物理量的算术平均值

为了减小偶然误差，在可能的情况下，总是采用多次测量，将各次测量的算术平均值作为该量的真值来计算误差。设对某一物理量在相同条件下进行 k 次测量，各次测量结果分别为 A_1，A_2，A_3，…，A_k，则它们的算术平均值为

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \cdots + A_k}{k} = \sum_{i=1}^{k} \frac{A_i}{k} \tag{0 - 2}$$

这个算术平均值可认为是被测量的真值。

4. 平均绝对误差

各次测量值 A_i 与算术平均值 $\bar{A}$ 的差为 ΔA_i，其值分别是 $\Delta A_1 = A_1 - \bar{A}$，$\Delta A_2 = A_2 - \bar{A}$，…，$\Delta A_k = A_k - \bar{A}$，它反映了各次测量的误差。我们把平均绝对误差定义为

$$\overline{\Delta A} = \frac{|\Delta A_1| + |\Delta A_2| + |\Delta A_3| + \cdots + |\Delta A_k|}{k} = \sum_{i=1}^{k} \frac{\Delta A_i}{k} \tag{0 - 3}$$

上式表明被测物理量平均值的误差范围，也就是说，被测物理量的值在 $\bar{A} + \overline{\Delta A}$ 和 $\bar{A} - \overline{\Delta A}$ 之间，因而测量结果用一个数学式子来表达，称为测量结果的标准表达式

$$A = \bar{A} \pm \overline{\Delta A} \tag{0 - 4}$$

注意，平均绝对误差一般取一位有效数字。

5. 标准误差

把各次测量值 A_i 与算术平均值 $\bar{A}$ 的差取其平方的平均值然后开方，这样得到的结果称为标准误差，即

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \frac{(A_i - \bar{A})^2}{k}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \frac{(\Delta A_i)^2}{k}} \tag{0 - 5}$$

标准误差在正式的误差分析和计算中，常作为偶然误差大小的量度。被测物理量的结果可表示为 $\bar{A} \pm \sigma$。

6. 相对误差

绝对误差可用来估计测量的误差范围，但不能反映测量的准确程度。我们将平均绝对误差 $\overline{\Delta A}$ 与测量的算术平均值 $\bar{A}$ 的比值

$$E = \frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}} \tag{0 - 6}$$

称为平均相对误差，用来定量表示测量精确度。

相对误差还可用百分数表示，称为百分误差，写作

$$E = \frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}} \times 100\% \qquad (0-7)$$

相对误差一般取两位有效数字。

在重复前人的实验时，我们常遇到一些已经有公认值或理论值的测量，这时求百分误差可用公认值或理论值代替 $\bar{A}$，而$\overline{\Delta A}$则用测量值与公认值或理论值之差的绝对值表示，所得的百分误差称为百分偏差，相对应的绝对误差叫绝对偏差。

（三）间接测量误差的计算

在物理量的测量中，大多数是间接测量，即由多个直接测得量通过一定公式计算得出最终的测量结果。因此，直接测量的误差必然对间接测量的最后结果的误差产生影响，这种影响是由间接测量的公式形式决定的，具体计算间接测量误差可用相应的误差传递公式来进行计算。公式形式不同误差传递公式不同。

现假定 A 和B 为两个直接测得量，$A=\bar{A}\pm\overline{\Delta A}$，$B=\bar{B}\pm\overline{\Delta B}$，$N$ 为间接测量的最后结果，$N=\bar{N}\pm\overline{\Delta N}$，下面分别讨论五种不同公式形式的误差传递公式。

1. 和的误差

若
$$N = A + B$$
则
$$\bar{N}\pm\overline{\Delta N} = (\bar{A}\pm\overline{\Delta A}) + (\bar{B}\pm\overline{\Delta B}) = (\bar{A}+\bar{B})\pm(\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B})$$
于是得算术平均值为
$$\bar{N} = \bar{A} + \bar{B}$$

考虑到在最不利的情况下可能产生的最大误差，即误差宁大勿小原则，于是得到和的平均绝对误差为
$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta A} + \overline{\Delta B} \qquad (0-8)$$

相对误差为
$$\frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}} = \frac{\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}}{\bar{A}+\bar{B}} \qquad (0-9)$$

2. 差的误差

若
$$N = A - B$$
则
$$\bar{N}\pm\overline{\Delta N} = (\bar{A}\pm\overline{\Delta A}) - (\bar{B}\pm\overline{\Delta B}) = (\bar{A}-\bar{B})\pm(\overline{\Delta A}-\overline{\Delta B})$$
于是得算术平均值为
$$\bar{N} = \bar{A} - \bar{B}$$

同前理由，即误差宁大勿小原则，得到差的平均绝对误差为
$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta A} - \overline{\Delta B} \qquad (0-10)$$

相对误差为
$$\frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}} = \frac{\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}}{\bar{A}-\bar{B}} \qquad (0-11)$$

由此可见，和差运算中的平均绝对误差，等于各直接测量值的平均绝对误差之和。

3. 积的误差

若
$$N = A \cdot B$$
则
$$\begin{aligned}\bar{N}\pm\overline{\Delta N} &= (\bar{A}\pm\overline{\Delta A})\cdot(\bar{B}\pm\overline{\Delta B}) \\ &= \bar{A}\cdot\bar{B}\pm\bar{B}\cdot\overline{\Delta A}\pm\bar{A}\cdot\overline{\Delta B}\pm\overline{\Delta A}\cdot\overline{\Delta B}\end{aligned}$$
于是得算术平均值为
$$\bar{N} = \bar{A}\cdot\bar{B}$$

略去二级小量$\overline{\Delta A}\cdot\overline{\Delta B}$，同前理由，则平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N}=\bar{B}\cdot\overline{\Delta A}+\bar{A}\cdot\overline{\Delta B} \tag{0-12}$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}}=\frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}}+\frac{\overline{\Delta B}}{\bar{B}} \tag{0-13}$$

4. 商的误差

若

$$N=\frac{A}{B}$$

则

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

$$=\frac{\bar{A}\cdot\bar{B}\pm\bar{B}\cdot\overline{\Delta A}\mp\bar{A}\cdot\overline{\Delta B}-\overline{\Delta A}\cdot\overline{\Delta B}}{\bar{B}^2-\overline{\Delta B^2}}$$

略去二级小量$\overline{\Delta A}\cdot\overline{\Delta B}$和$\overline{\Delta B^2}$，同前理由，则算术平均值为

$$\bar{N}=\frac{\bar{A}}{\bar{B}}$$

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N}=\frac{\bar{B}\cdot\overline{\Delta A}+\bar{A}\cdot\overline{\Delta B}}{\bar{B}^2} \tag{0-14}$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}}=\frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}}+\frac{\overline{\Delta B}}{\bar{B}} \tag{0-15}$$

由此可见，乘除运算的相对误差等于各直接测量值的相对误差之和。

5. 乘方和根的误差

由积和商的相对误差公式容易证明，若

$$N=A^n$$

则

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}}=n\cdot\frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}} \tag{0-16}$$

若

$$N=A^{\frac{1}{n}}$$

则

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}}=\frac{1}{n}\cdot\frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}} \tag{0-17}$$

上述各种运算，可推广到多个直接测得量参与运算的情况。从上述结论可以看出，间接测量测量结果的误差计算顺序为：公式形式是和差形式，先求测量结果的绝对误差，后求相对误差；公式形式是积商形式时，先求测量结果的相对误差，后求绝对误差。

其他函数的误差传递公式，我们不一一证明，表 0.1 列出一些常用公式，以备查阅。

(四) 有效数字及运算

要对某一物理量，例如长度、时间、温度、压强、电流等进行测量，都必须使用各种仪器，但每种仪器由于其结构及生产技术条件等各方面的因素的限制，都有一定的精密度，使用不同精密度仪器测量，测量结果的精确度也就各有不同。

表 0.1　　　　　　　　　　　　　　　　常用误差计算公式

函数表达式	绝对误差$\overline{\Delta N}$	相对误差 $\overline{\Delta N}/\overline{N}$
$N=A+B$	$\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}$	$(\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B})/(\bar{A}+\bar{B})$
$N=A-B$	$\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}$	$(\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B})/(\bar{A}-\bar{B})$
$N=A\cdot B$	$\bar{B}\cdot\overline{\Delta A}+\bar{A}\,\overline{\Delta B}$	$\overline{\Delta A}/\bar{A}+\overline{\Delta B}/\bar{B}$
$N=A/B$	$(\bar{B}\cdot\overline{\Delta A}+\bar{A}\,\overline{\Delta B})/\bar{B}^2$	$\overline{\Delta A}/\bar{A}+\overline{\Delta B}/\bar{B}$
$N=A^n$	$n\bar{A}^{n-1}\cdot\overline{\Delta A}$	$n\,\overline{\Delta A}/\bar{A}$
$N=A^{\frac{1}{n}}$	$\frac{1}{n}\bar{A}^{\frac{1}{n}-1}\cdot\overline{\Delta A}$	$\frac{1}{n}\overline{\Delta A}/\bar{A}$
$N=\sin A$	$(\cos A)\cdot\overline{\Delta A}$	$(\cot A)\cdot\overline{\Delta A}$
$N=\cos A$	$(\sin A)\cdot\overline{\Delta A}$	$(\tan A)\cdot\overline{\Delta A}$
$N=\tan A$	$\overline{\Delta A}/\cos^2\bar{A}$	$2\,\overline{\Delta A}/\sin\overline{2A}$
$N=\cot A$	$\overline{\Delta A}/\sin^2\bar{A}$	$2\,\overline{\Delta A}/\sin\overline{2A}$
$N=KA$（K 为常数）	$K\cdot\overline{\Delta A}$	$\overline{\Delta A}/\bar{A}$

所谓仪器的精密度，除有特殊标明的仪器外，一般定义为仪器最小分格所代表的量为该仪器的精密度。例如，米尺的最小分格是 1mm，其精密度就是 1mm。其他仪器依此类推。有的仪器有特殊标记，例如某一天平的感量是 0.01g，其精密度就是 0.01g 了。电子仪表的精密度是以级数标记的，例如，某电表是 2.5 级，表示测量的误差为 2.5%。级数越小，精密度越高。

仪器的精密度限制了测量的精确度，例如，我们用米尺测量某一物体的长度，测得值是在 3.2cm 和 3.3cm 之间，能否再精确一点呢？那就要估计读数了。比如说，估计得 3.26cm。显然，最后一位数字“6”是不准确的，对不同的实验者所估计出来的数不一定相同，因而是可疑数字。我们把测量结果的数字记录到开始可疑的那一位为止。可靠的几位数字加上可疑的一位数字，统称为测量结果的有效数字。

显然，直接测量值有效数字决定于测量仪器的精密度。所以，直接测量值应根据仪器的条件写出应有的有效数字。有效数字的位数不能随意增删，因为它不仅反映了测量值的大小；而且也反映了测量的精确程度，因而表示了测量的误差范围。

间接测量值是根据直接测量值计算才得出的，它的有效数字取决于各直接测量结果，一般可按下列规则进行运算。

1. 和差运算

对多个有效数字进行和差运算时，运算结果的有效数字位数的最低一位，取到参与运算的数字中可疑数字的位数最高的那一位。也就是说，计算结果的有效数字从左至右写到开始可疑的那一位为止，后面的数字按舍入法则处理。这种方法简称“尾对齐”。

【例 1】　　$32.1+3.276=35.4$

$$\begin{array}{r} 32.\underline{1} \\ +\quad 3.27\underline{6} \\ \hline 35.\underline{3}\,\underline{7}\,\underline{6} \end{array}$$

【例 2】 $12.4 + 2.756 = 9.6$

$$\begin{array}{r} 12.\underline{4} \\ -\quad 2.75\underline{6} \\ \hline 9.\underline{6}\underline{4}\underline{4} \end{array}$$

计算时，我们在可疑数字下面加一横线，以便和可靠数字区别。

2. 积商运算

对多个有效数字进行积商运算时，所得结果的有效数字位数，取参与运算的数字中有效数位最少的为计算结果的有效数字位数，多余的数字按舍入法则处理，这种方法简称“位对齐”。

【例 3】 $1.323 \times 1.3 = 1.7$

$$\begin{array}{r} 1.32\underline{3} \\ \times\quad 1.\underline{3} \\ \hline \underline{3}\underline{9}\underline{6}\underline{9} \\ 1\,32\underline{3} \\ \hline 1.\underline{7}\underline{1}\underline{9}\underline{9} \end{array}$$

【例 4】 $148.83 \div 1.23 = 121$

$$\begin{array}{r|l} & 121 \\ \cline{2-2} 1.2\underline{3} & 148.8\underline{3} \\ & 12\underline{3} \\ \cline{2-2} & 2\underline{5}\,8 \\ & 24\,\underline{6} \\ \cline{2-2} & \underline{1}\,\underline{2}\,\underline{3} \end{array}$$

3. 乘方和开方

乘方和开方结果的有效数字与其底的有效数字位数相同。

关于有效数字，还应注意几点：

(1) 舍入法则　采用“四舍六入尾双留”的法则，即 4 以下舍，6 以上进，遇 5 看前一位，前一位是奇数则入，偶数则舍，使留下的末位数是双数。

(2) 有效数字的位数与小数点位置无关　例如，2.638m 与 263.8cm 这两组数字，都是 4 位有效数字，其精确程度都相同。如果我们注意到 2.638m = 263.8cm，就可明白，有效数字与小数点位置无关。亦可推知，有效数字的位数与单位变换无关。

(3) 有效数字与“0”的关系　例如，两组数 263.8cm 和 0.002638km，它们的精确度都一样，显然数字前面的“0”并不影响测量结果的精确度，这两组数都是 4 位有效数字。所以，数字前面的“0”不算做有效数字。但是，必须特别注意，263.8cm 与 263.80cm 这些数字上相等的量，在物理学上意义却完全不同，它们有不同的精确度。所以在数字后面的“0”要算做有效数字，在数字后面的“0”不能随便增加或删去。

(4) 有效数字与自然数或常数的关系　在运算中常遇到一些自然数或常数，如 π，e，$\sqrt{2}$，8 等，这些数不是测量值，其有效数字可以取任意多位。但取多少位适当呢？根据

运算法则可知，自然数或常数在运算中所取位数，与测量值的位数一样就行了。

(5) 有效数字与科学表示法　实验数据很大或很小时，要用科学表示法，即用 10^n 来表示，但小数点前应一律取一位数字。例如，光速为 $2.997\times10^8\mathrm{m\cdot s^{-1}}$，为 4 位有效数字；光谱中 D 线波长为 $5.89\times10^{-7}\mathrm{m}$，为 3 位有效数字。

(6) 为避免由于舍入过多带来的较大误差，在运算过程中，可多保留一位数字，但最后结果只能有一位可疑数字。在乘除运算时，有效数字第一位是 8 或 9，可看成多一位有效数字来处理。例如，82 可看成 82.0 等。

现举例说明如何根据有效数字运算法则进行误差计算。

【例 5】　用米尺分别对圆柱体的高和直径做 3 次测量，结果如下

$$h_1 = 20.1\mathrm{mm},\ h_2 = 20.4\mathrm{mm},\ h_3 = 20.5\mathrm{mm}$$

$$D_1 = 5.1\mathrm{mm},\ D_2 = 5.3\mathrm{mm},\ D_3 = 5.3\mathrm{mm}$$

求圆柱体的高、直径和体积的测量结果平均值、平均绝对误差、相对误差和结果表示。

解　直接测量平均值为

$$\bar{h} = \frac{1}{3}(20.1 + 20.4 + 20.5) = 20.3(\mathrm{mm})$$

$$\bar{D} = \frac{1}{3}(5.1 + 5.3 + 5.3) = 5.2(\mathrm{mm})$$

直接测量的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{3}(|20.1 - 20.3| + |20.4 - 20.3| + |20.5 - 20.3|) = 0.2(\mathrm{mm})$$

$$\overline{\Delta D} = \frac{1}{3}(|5.1 - 5.2| + |5.3 - 5.2| + |5.3 - 5.2|) = 0.1(\mathrm{mm})$$

直接测量的相对误差(百分误差)为

$$E_h = \frac{\overline{\Delta h}}{\bar{h}} \times 100\% = \frac{0.2}{20.3} \times 100\% = 0.98\%$$

$$E_D = \frac{\overline{\Delta D}}{\bar{D}} \times 100\% = \frac{0.1}{5.2} \times 100\% = 1.9\%$$

直接测量的结果表示为

$$h = \bar{h} \pm \overline{\Delta h} = 20.3 \pm 0.2(\mathrm{mm})$$

$$D = \bar{D} \pm \overline{\Delta D} = 5.2 \pm 0.1(\mathrm{mm})$$

间接测量的平均值为

$$\bar{V} = \frac{1}{4}\pi\bar{D}^2\bar{h} = \frac{1}{4}3.14 \times 5.2^2 \times 20.3 = 4.3 \times 10^2(\mathrm{mm}^3)$$

相对误差

$$E = \frac{\overline{\Delta V}}{\bar{V}} \times 100\% = 2\cdot E_D + E_h = 2 \times 1.9\% + 0.98\% = 4.8\%$$

平均绝对误差

$$\overline{\Delta V} = \bar{V}\cdot E = 4.3 \times 10^2 \times 4.8\% = 0.2 \times 10^2(\mathrm{mm}^3)$$

结果表示为

$$V = \overline{V} \pm \overline{\Delta V} = (4.3 \pm 0.2) \times 10^2 (\mathrm{mm}^3)$$

（五）实验数据处理

通过物理量的测定和数据处理，可以找到一个物理量与其他物理量的定量关系，从而找出物理量之间的变化规律。例如：弹簧的弹性力与伸长量成正比；电阻上的电压与电流成正比等等。所以数据处理是物理实验中的重要环节之一。在实验中，除了大量的使用计算法外，为了直观的表示出物理量之间的关系，往往利用列表法和图示法等各种方法进行数据处理，医用物理实验的数据处理主要使用列表和图示两种方法。

1. 列表法

一般说，表格设计的原则是：同种类的数据应列在同一行或同一列中；在行或列之首应注明物理量的名称和单位，若某行或某列的数据系由其他量计算而得，还应注明其运算公式。有时在表首还应记下实验时间、实验人和环境条件等，以便查照。具体实例见各实验中的表格。

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，这种以几种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，图示法在医学研究中被广泛运用，要逐步熟练掌握。作实验曲线时应注意以下几点：

(1) 选用坐标纸(直角坐标或半对数坐标等)　坐标纸大小应根据实验情况确定，应尽可能使实验数据中有效数字位数都能标出。

(2) 确定坐标轴　以横轴代表自变量，纵轴代表因变量。如气体体积一定时，压强 p 随温度 T 升高而增加，T 可作自变量，p 即为因变量。坐标轴上要标明物理量的单位。

(3) 起点(原点)和标度要适当　起点不一定要取为零，可根据实验情况而定。每一小格要能与实验值的有效数字相对应，并要以不用计算能直接读出曲线上每一点的坐标为宜。横轴和纵轴的分度值不一定相同，但应包含所有的实验数据。这样就能使曲线适中，不致偏于一方或一角。

(4) 标注数据　每个实验数据都要用符号在坐标纸上准确地表示出来　常用的符号有×、□、⊙等。符号中心与实验数据吻合。

(5) 用曲线板(或直尺)画出光滑曲线　曲线不一定通过所有的点，只要使实验点均匀分布于曲线两侧的近旁。同一坐标纸上可以作若干曲线，但不同曲线上的相应的实验点应以不同的符号表示。曲线作好后，符号仍应保留，以便复核数据，并应在图的下方注明曲线的名称。如图 0－1 所示。

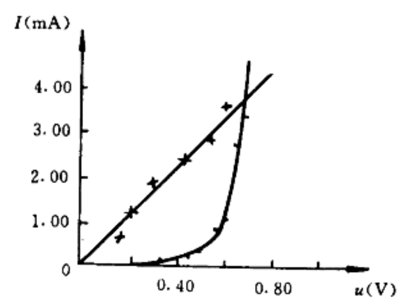

图 0－1

三、实验课的基本要求

1. 课前认真预习，写出预习提纲

学生在做每个物理实验前，要认真对该实验项目教材内容进行预习，弄懂实验原理，了

解所用仪器器材的构造和使用方法，对实验内容和实验步骤做到心中有数，写出一个简单的预习提纲。任课教师对提纲进行检查后方可进行实验。

2. 认真做好实验

学生实验要在教师的指导下进行。学生按预习提纲、注意事项及教师要求，对实验器材进行检查、安装、调整，经指导教师检查允许后才能进行实验。在整个实验过程中，必须认真仔细地进行操作，观察现象和记录数据。测量数据必须经教师检查。实验完毕，学生要整理摆放好仪器、关掉电源、整理好环境卫生方可离开实验室。

3. 认真写好实验报告

实验报告是对学生每个实验结果成功与否及实验体会的总结，实验报告从内容上一般包括实验目的、器材、原理、数据记录与处理、实验结论、误差分析及实验结果的讨论等内容。实验项目中有习题的应在报告的最后完成习题。数据记录要完整真实，计算要准确无误，对实验结果讨论、分析、评价要认真并对实验中发现的问题提出自己的见解，实验报告按时上交给教师。

习　题

1. 经5次测得塑料小球质量(单位：g)分别为2.1074，2.1079，2.1075，2.1076，2.1074，求标准误差、平均绝对误差、相对误差，并写出结果表达式。

2. 5次测其上述小球直径(单位：cm)为1.206，1.204，1.205，1.206，1.205，求小球体积的平均值、相对误差和平均绝对误差。

3. 求上述小球的密度平均值、相对误差和平均绝对误差，写出小球密度的结果表达式。

4. 改正下列各式结果的有效数字：

(1) $34.740+10.28-1.0036=44.0164$ (m)

(2) $12.34+1.234+0.01234=13.58634$ (g)

(3) $12.34\times 0.0234=0.288756$ (cm^2)

(4) $0.1234\div 0.0234=5.2735$ (cm)

5. 气体作等温变化，实验测得气体的体积(单位：cm^3)为20.0，30.0，40.0，50.0，60.0，70.0，80.0时，相应的压强(单位：Pa)为1.01×10^4，6.77×10^3，5.08×10^3，4.04×10^3，3.40×10^3，2.88×10^3，2.53×10^3。试用此数据列成表格并作图。

(承德医学院　刘东海)