21世纪高等医学院校教材

潘志达 主编

医学物理学实验

科学出版社

21世纪高等医学院校教材

（供临床医学、护理、口腔、检验、药学、医学美容等专业用）

医学物理学实验

主　编　潘志达

副主编　罗凤晞

汤以良

科学出版社

2002

内容简介

本书是根据卫生部新世纪课程教材《医学物理学》第五版所要求的教学内容，在认真总结几十年来医学物理学实验教学经验的基础上，结合实验教学与理论教学既相辅相成又相对独立的教学特点编写而成的，分为绪论和实验两大部分。绪论介绍测量误差和数据处理这两项基础实验课的重要内容，为在后续实验中应用打下基础。实验部分包括基本测量、液体黏度的测定、超声诊断仪的应用、惠斯登电桥、光波波长的测定等33个实验，详细介绍了这些实验的实验目的、原理、器材和实验步骤；同时，一种实验给出了几种不同的实验方法，便于各校根据具体情况进行选择与交流。本书内容丰富，实用性强，可供高等医学院校临床医学、口腔、检验、药学、护理等专业使用，也可供相关人员参考、使用。

图书在版编目（CIP）数据

医学物理学实验/潘志达主编. -北京：科学出版社，2002.4
21世纪高等医学院校教材
ISBN 7-03-010240-1

Ⅰ. 医… Ⅱ. 潘… 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（2002）第013356号

科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
源海印刷厂 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2002年4月第 一 版 开本：720×1000 1/16
2002年4月第一次印刷 印张：13
印数：1—4 500 字数：236 000

定价：19.00元

前　言

本书是根据卫生部新世纪课程教材《医学物理学》第五版所要求的教学内容，在认真总结我校几十年来“医用物理学实验”教学经验与不足的基础之上，结合实验教学与理论教学既相辅相成又相对独立的教学特点，重新编写而成的。这本《医学物理学实验》可供基础、临床、口腔、美容、检验及药学等专业使用。

我们的编写宗旨是：尽量满足医学教育中要求掌握的物理实验技能和方法的需要，注重联系医学实际；同时，又要体现教材的先进性、科学性和实用性。

在实验理论和实验内容的安排上，我们也进行了新的尝试。绪论中的测量误差和数据处理是基础实验课的重要内容，为了保持这部分内容的系统性和在后续实验中的应用，我们把它放在前面讲授。另外，本书虽然是依据我校实验室所具备的基本条件而设定的一些实验题目，但是有些实验给出了几种实验方法，这并不是让每个学生在一次实验中把几种方法都学到，而是可让一部分学生做一种，另一部分学生做另一种。除了基于前面的考虑之外，由于各院校之间实验室的设备差异较大，故本书对于相同的实验给予了几种不同的实验方法，可供其他院校参考、交流。

本书在编写过程中，得到了大连医科大学教务处、教材科领导的大力支持，在此一并致谢。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编　者

2002年1月

目　录

绪论 …… **1**

一、医学物理学实验的教学目的和任务 …… 1

二、测量的误差及误差的计算 …… 2

三、有效数字及其运算法则 …… 6

四、实验结果的数据处理 …… 9

实验 1　基本测量 …… **12**

实验 1.1　用游标卡尺、螺旋测微计测量长度 …… 12

实验 1.2　用读数显微镜测量微小物体长度 …… 17

实验 2　液体黏度的测定 …… **20**

实验 2.1　用奥氏黏度计测定乙醇的黏度 …… 20

实验 2.2　用旋转式黏度计测定蒸馏水的黏度 …… 22

实验 2.3　用斯托克斯法(落球法)测定液体的黏度 …… 25

实验 2.4　用转筒黏度计测定液体黏度 …… 27

实验 2.5　用血液黏滞系数自动测试仪测定血液的黏滞系数 …… 29

实验 3　液体表面张力系数的测定 …… **32**

实验 3.1　用拉脱法测液体的表面张力系数 …… 32

实验 3.2　用毛细管法测定液体表面张力系数 …… 38

实验 4　热功当量的测定 …… **43**

实验 5　用驻波法测频率 …… **46**

实验 5.1　用驻波法测电振音叉的频率 …… 46

实验 5.2　弦本征振动的观测 …… 48

实验 6　声速的测定 …… **51**

实验 6.1　用共鸣管测声速 …… 51

实验 6.2　用振动合成法测声速 …… 53

实验 7　超声诊断仪的应用 …… **59**

实验 8　静电场的描绘 …… **66**

实验 8.1　模拟真空(如空气)中的静电场 …… 66

实验 8.2　模拟心电图 …… 71

实验 9　制流和分压 …… **74**

实验 9.1　制流电路 …… 74

实验 9.2　分压电路 …… 75

实验 9.3　用伏安法测电阻 …… 77

实验 10　万用电表的使用 …… 80

实验 10.1　指针式万用电表 …… 80

实验 10.2　数字式万用电表 …… 86

实验 11　用补偿法测电动势 …… 89

实验 12　惠斯登电桥 …… 95

实验 12.1　用滑线式惠斯登电桥测电阻 …… 95

实验 12.2　用箱式惠斯登电桥测电阻 …… 97

实验 12.3　用惠斯登电桥测热敏电阻 R-T 特性曲线 …… 99

实验 13　示波器及其应用 …… 101

实验 13.1　示波器的基本操作 …… 101

实验 13.2　利用李萨如图形测交流电的频率 …… 107

实验 13.3　交流电路中电流和电压的相位比较 …… 109

实验 13.4　观察阻尼振荡 …… 112

实验 14　整流电路和滤波电路 …… 114

实验 14.1　用电路板连接的整流、滤波电路 …… 114

实验 14.2　用电工实验箱的整流、滤波电路 …… 117

实验 15　晶体管放大电路 …… 122

实验 16　医用换能器 …… 125

实验 17　心电图机的使用 …… 130

实验 18　阻抗法与导纳法测定心输出量的比较 …… 136

实验 19　简易晶体管助听器 …… 139

实验 20　薄透镜焦距的测量 …… 142

实验 20.1　透镜焦距的测量 …… 142

实验 20.2　凹透镜焦距的测量 …… 143

实验 21　用光电比色计测定溶液的浓度 …… 146

实验 22　用阿贝折射计测定液体的折射率 …… 149

实验 23　旋光仪的使用 …… 153

实验 24　分光计的调节 …… 157

实验 25　用分光计测定棱镜的折射率 …… 161

实验 26　光波波长的测定 …… 165

实验 26.1　用衍射光栅和分光计测光波波长 …… 165

实验 26.2　用光栅及光具座测光波波长 …… 167

实验 26.3 用双缝干涉测光波波长 …… 168
实验 27 用分光计观察原子光谱 …… 171
实验 28 显微摄影 …… 175
实验 29 显微镜放大率和孔径数的测定 …… 178
实验 30 照相技术基础 …… 182
实验 31 非正常眼的模拟与矫正 …… 187
实验 32 人眼曲光度的测定 …… 190
实验 33 放射性的测量 …… 193

绪　论

一、医学物理学实验的教学目的和任务

从自然科学的发展史可以清楚地看出，人们总是从实验中总结出规律和理论，然后再通过新的实验来检验这些规律和理论的正确性，借以进一步发展理论。物理学和实验的关系十分密切，物理学实验是物理学研究的基本方法。物理学规律的发现和理论的建立，都必须以严格的物理实验为基础。在高等医学院校中，"医学物理学实验"是配合"医学物理学"而开设的相对独立的一门课程。通过"医学物理学"的学习，学生能获得在今后的医疗实践和医学科学研究中所需要的物理学知识；而"医学物理学实验"所传授给学生的技能，增长了他们解决某些实际问题的能力，培养了他们严谨的科学作风。

现代医学中，广泛地应用着物理学的理论和实验方法。因此，要掌握现代医学科学知识和技术，就必须具备一定的物理实验理论、方法和技能。对于医学院校所开设的"医学物理学实验"，除了物理实验所包含的一些基本内容之外，实际上是把物理实验的侧重点放在与医学、生命科学联系较为密切的一些实验上。它与理论课相辅相承，既有联系，又相对独立。

因此，"医学物理学实验"的教学目的和任务可归纳成以下几点：

1. 通过实验，使学生直接观察物理现象，进一步地分析和研究物理现象，探讨其产生的原因及规律性，有助于提高学生对理论学习的理解能力。

2. 通过实验，使学生学会正确地使用物理仪器，进而熟悉仪器的性能，掌握物理实验的方法，提高实验技能。

3. 通过实验，培养学生养成严肃认真、细致谨慎、实事求是的科学态度和遵守纪律的优良品格。

要学好这门课程不但要花气力、下功夫，而且还要掌握一定的学习方法。要做好每个实验，实验之前必须认真预习，实验之中认真操作，实验之后认真总结，并提供完整准确的实验报告。有了这种"三认真"的精神，就一定能够学好"医学物理学实验"。下面，我们就实验的预习、操作、报告这三个主要环节进一步加以明确，并提出具体要求。

1. 预习　这是能否使实验顺利进行的关键。因此，实验之前必须做好预习。要

求做到：①详细阅读有关实验内容，明确实验目的，弄懂实验原理，掌握实验方法；②对实验仪器的性能和使用方法有初步认识，避免盲目操作，损坏仪器；③根据实验要求，拟定实验方案和步骤，设计好记录数据的表格。

2. 操作　通过实验操作，对物理现象进行观察和研究，增强对理论知识的理解，促进实验技能的提高。要求做到：①遵守实验室规则和秩序；②操作前先认识实验所用仪器，并认真检查，了解仪器的性能和使用方法，做到正确使用；③按照实验步骤进行操作，要有条不紊；④将测量数据认真地填写在事先准备好的表格上，计算出必要的结果；⑤实验完毕，整理仪器，保持实验室的清洁。

3. 报告　实验报告是进行实验的最终总结。要认真细致地对实验数据做出整理和计算，对结果加以分析，在此基础上写出实验报告。实验报告要求有以下几方面的内容：①实验题目；②实验目的；③实验器材；④简明的实验原理；⑤简要的步骤；⑥填入表格的测量数据，计算实验结果；⑦记录实验时的环境条件，如室温、气压等；⑧结果的分析，有些还要绘出图线。计算误差，讨论总结，回答相关问题。

二、测量的误差及误差的计算

（一）测量的误差及产生误差的原因

物理实验不仅对物理变化过程要做定性的观察，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做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可直接测出结果的。间接测量是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。

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，所以，尽管对同一物理量经过多次测量，所得结果也只能达到一定限度的准确程度。因此，不能认为测量所得到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似值。当测量次数无限增加时，算术平均值将接近于真值。然而，我们不能对同一物理量进行无限多次测量。因此，常把有限次测量的算术平均值作为真值。

每个测量值与真值之间的差，称为误差。由于测量值与真值不可能完全相同，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。下面，我们对此加以详细说明。

1. 系统误差　系统误差也称为恒定误差，是指在测量中由未被发觉或未被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，偏离的确定性在增加测量次数时也不能有所改善。但如果根据其产生原因分别加以校正，例如，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，则系统误差是能够尽量减小或消除的。

2. 偶然误差　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，方向不一定；其发生纯属偶然，受或然率支配。减少偶然误差的方法是进行多次重复测量。

3. 过失误差　过失误差是人为的误差，实验者的粗心大意、实验方法的不当、使用仪器不准确、读错数据等，均可造成过失误差。因此，实验者必须要有严肃认真的态度，实事求是和一丝不苟的科学作风，过失误差就可以避免。

(二) 测量误差和结果的表示

1. 直接测量误差和结果的表示　在实验中，常常由于某种原因而对一个物理量只进行一次直接测量。这时，测量值的误差可根据实际情况进行合理的具体估算。通常，可按仪器上标明的仪器误差作为单次测量的误差。如果没有注明，也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。

为了减小偶然误差，在可能的情况下，总是采用多次测量，并将其算术平均值作为此量真值来计算误差。对某一物理量在相同条件下进行 k 次测量，各次结果分别为 $A_1,A_2,A_3,\cdots,A_k$，则它们的算术平均值为

$$\overline{A}=\frac{A_1+A_2+A_3+\cdots+A_k}{k}=\sum_{i=1}^{k}\frac{A_i}{k}$$

这个算术平均值可认为是被测量的真值。

测量值的误差常用以下几种方法表示：

(1) 算术平均误差：为各次测量值 A_i 与算术平均值 $\overline{A}$ 的差 ΔA_i，其值分别为 $\Delta A_1=A_1-\overline{A},\Delta A_2=A_2-\overline{A},\cdots,\Delta A_k=A_k-\overline{A}$，它反映了各次测量的误差。我们把算术平均误差定义为

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

因为它是以误差的绝对值表示测量值的误差，故 $\overline{\Delta A}$ 又称为平均绝对误差，它表明

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$\overline{A}+\overline{\Delta A}$和$\overline{A}-\overline{\Delta A}$之间，因而，测量结果应表示为$\overline{A}\pm\overline{\Delta A}$。

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

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

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$\overline{A}\pm\sigma$。

(3) 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。究竟这个误差是在多大的测量范围内产生的呢？由此，我们将平均绝对误差$\overline{\Delta A}$与测量的算术平均值$\overline{A}$的比值

$$E=\frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}}$$

称为平均绝对误差，用来定量表示测量精确度。

相对误差还可以用百分数来表示，称为百分误差，写作$\frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}}\times 100\%$。

此外，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$\overline{A}$，而$\overline{\Delta A}$则是我们所得到的测量值与公认值或理论值之差的绝对值。

2. 间接测量误差和结果的表示　在物理学实验中，大多数是间接测量，是由多个直接测量值通过一定的公式计算得出最后结果。因此，直接测量的误差必然对间接测量的误差有所影响，这一问题可应用误差传递公式来进行处理。设A、B为直接测量值，可表示为$A=\overline{A}\pm\overline{\Delta A}$，$B=\overline{B}\pm\overline{\Delta B}$。$N$为间接测量值，$N=\overline{N}\pm\overline{\Delta N}$。那么，间接测量误差结果的表示如下：

(1) 和的误差：

若
$$N=A+B$$
则
$$\overline{N}\pm\overline{\Delta N}=(\overline{A}\pm\overline{\Delta A})+(\overline{B}\pm\overline{\Delta B})=(\overline{A}+\overline{B})\pm(\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B})$$
于是得算术平均值为
$$\overline{N}=\overline{A}+\overline{B}$$
考虑到可能产生的最大误差，于是得到和的平均绝对误差为
$$\overline{\Delta N}=\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}$$
相对误差为
$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}}=\frac{\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}}{\overline{A}+\overline{B}}$$

(2) 差的误差：

若 $$N=A-B$$

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

于是得算术平均值为

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

考虑到可能产生的最大误差，于是得到差的平均绝对误差为

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

相对误差为

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

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

于是得算术平均值为

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

略去$\overline{\Delta A}\cdot\overline{\Delta B}$，考虑到可能产生的最大误差，则平均绝对误差为

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

相对误差为

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

(4) 商的误差：

若 $$N=\frac{A}{B}$$

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

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

略去$\overline{\Delta A}\cdot\overline{\Delta B}$和$\overline{\Delta B}^2$，考虑到可能产生的最大误差，则算术平均值为

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

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N}=\frac{\overline{B}\cdot\overline{\Delta A}+\overline{A}\cdot\overline{\Delta B}}{\overline{B}^2}$$

相对误差为

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

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值之和。

(5) 方次与根:由乘除法的相对误差公式,容易证明

若
$$N=A^n$$
则
$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}}=n\cdot\frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}}$$
若
$$N=A^{\frac{1}{n}}$$
则
$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}}=\frac{1}{n}\cdot\frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}}$$

上述各种运算,可推广到任意个直接测量值的情况。从以上结论可看到,当间接测量值的计算式中只含加减运算时,先计算绝对误差,后计算相对误差,则比较方便;当计算式中含有乘、除、乘方或开方运算时,先计算相对误差,后计算绝对误差,则较为方便。

其他函数的误差传递公式,我们不一一证明,在绪论之后列出一些常用公式,以备查阅。

三、有效数字及其运算法则

(一) 测量仪器的精密度

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因素的限制,都有一定的精密度。使用不同精密度的仪器,测量结果的精确度也就各不相同。

所谓仪器的精密度,一般定义为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。有的仪器有特殊标记,例如某一天平的感量是 0.01g,其精密度也就是 0.01g,此时就不能用最小分格来代表精密度。电子仪表的精密度是以级数标记的。例如,某电表是 2.5 级,表示测量误差为 2.5%。级数越小,精密度就越高。

(二) 有效数字的概念

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,组成这个数值的数字,即可靠数字加上可疑数字,称为测量结果的有效数字。

(三) 有效数字的运算法则

1. 加法与减法　对各数进行加减运算时,所得结果的有效数字位数,应该取

到各数中绝对误差最大的那个数的最后一位。也就是说，有效数字写到开始可疑的那一位为止，后面的数字按舍入法处理。在以下的举例运算中，我们在可疑数字下面加一横线，以便和可靠数字相区别。

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

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

2. 乘法和除法 对各数进行乘法和除法运算时，所得结果的有效数字位数，以参与运算的各数中相对误差最大的那个数的位数来决定。也就是和参与运算的各数中有效数字位数最少的那个数相同。

例 3 1.323×1.3=1.7

$$\begin{array}{r} 1.32\underline{3} \\ \times\qquad 1.\underline{3} \\ \hline \underline{3}\underline{9}\underline{6}\underline{9} \\ 132\underline{3} \\ \hline 1.\underline{7}\underline{1}\underline{9}\underline{9} \end{array}$$

例 4 148.83÷1.23=121

$$\begin{array}{r} 12\underline{1} \\ 1.2\underline{3}\,\overline{)\,148.8\underline{3}} \\ 123 \\ \hline 2\underline{5}\underline{8} \\ 24\underline{6} \\ \hline \underline{1}\underline{2}\underline{3} \end{array}$$

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，还应注意以下几点：

(1) 有效数字的位数与小数点的位置无关。例如，2.638m 与 263.8cm 这两组数字，都是四位有效数字，其精确程度都相同。如果我们注意到 2.638m=263.8cm，就可以明白，有效数字与小数点的位置无关。亦可推知，有效数字的位数与单位变换无关。

(2) 有效数字与“0”的关系。关于这点，我们从两个方面来论述。其一，数字前面的“0”。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，这两组数都是四位有效数字。所以，数字前面的“0”不算为有效数字。其二，数字后面的“0”。例如，263.8cm 和 263.800cm，从数字上看，它们是相等的量。但是在物理学上的意义却完全不同，它们有不同的精确度。所以，在数字后面的“0”应算为有效数字。在数字后面不能随意增加或删去“0”。

(3) 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，例如 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。但取多少合适呢？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可

以了。

(4) 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的幂次方来表示,但小数点前一律取一位数字。例如,光速为 $2.997\times10^8\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ 是四位有效数字;光谱中 D 线波长为 $5.89\times10^{-7}\mathrm{m}$ 是三位有效数字。

(5) 尾数的舍入法则——尾数凑成偶数。通常所用的尾数舍入法是四舍五入,对于大量尾数分布概率相同的数据来说,这样舍入不是很合理的,因为总是入的概率大于舍的概率。现在通用的做法是:尾数小于5则舍,大于5则入,等于5则凑成偶数。也就是"4舍6入尾凑偶"。例如,1.535取三位有效数字为1.54,12.405取四位有效数字为12.40,2.036取二位有效数字为2.0,0.076取一位有效数字为0.08。

(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。

下面我们举例说明,如何根据有效数字运算法则进行误差计算。

例 用米尺分别对圆柱体的高和直径做三次测量,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、直径和体积测量结果的平均值、平均绝对误差、相对误差及结果表示。

解 直接测量的平均值为

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

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

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为

$$\frac{\overline{\Delta h}}{\bar{h}}=\frac{0.2}{20.3}=1\%\qquad\frac{\overline{\Delta D}}{\bar{D}}=\frac{0.1}{5.2}=2\%$$

直接测量的结果表示为

$$h=\bar{h}\pm\overline{\Delta h}=20.3\pm0.2(\mathrm{mm}) \qquad D=\bar{D}\pm\overline{\Delta D}=5.2\pm0.1(\mathrm{mm})$$

间接测量的平均值为

$$\bar{V}=\frac{1}{4}\pi\,\bar{D}^2\,\bar{h}=\frac{1}{4}\times3.14\times5.2^2\times20.3=4.3\times10^2(\mathrm{mm})^3$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta V}}{\bar{V}}=2\,\frac{\overline{\Delta D}}{\bar{D}}+\frac{\overline{\Delta h}}{\bar{h}}=2\times2\%+1\%=5\%$$

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta V}=\bar{V}\cdot\frac{\overline{\Delta V}}{\bar{V}}=4.3\times10^2\times5\%=0.2\times10^2(\mathrm{mm}^3)$$

结果表示为

$$V=\bar{V}\pm\overline{\Delta V}=(4.3\pm0.2)\times10^2(\mathrm{mm}^3)$$

四、实验结果的数据处理

1. 列表法 对于实验所得的测量数据，必须列出表格记录。因为它可把物理量之间的对应关系表示得清楚明了，而且可随时检查测量数据是否合理，便于及时发现和纠正错误，提高处理数据的效率。

设计记录表格要合理，表中每行(或每列)的首位应标明其物理量和所用单位，然后将测量数据分类填入表格中。若为间接测量，还应列出计算公式。此外，实验时间、环境温度、气压等也可记录于表格之首，以便参考。

2. 图示法 许多情况下，实验所得数据是表示一个物理量(因变量)随另一个物理量(自变量)而改变的关系。这些对应关系的变化情况，通常用图表法将它们以图线的形式描绘出来。

要正确描绘出一条实验曲线，必须注意以下几点：

(1) 一般以横坐标表示自变量，纵坐标表示因变量。在坐标轴的末端还应表明所示物理量的名称、单位，在图的下方标出图名。

(2) 根据测量数据的范围选定坐标分度，应尽量使图线占据图纸大部分或全部。为了调整图线的大小和位置，在某些情况下，横轴和纵轴的标度可以不同，两轴交点的标度也不一定从零开始。轴上的标度应隔一定间距用整数标出，以便寻找和计算。

(3) 将实验数据用符号“＋”在坐标上标出其位置。如果在同一图纸上做几条

曲线,则每条曲线须用不同符号标出,便于区分,避免混淆。

(4) 把标出的各数据点用直尺或曲线尺连接起来绘出图线。由于实验过程中不可避免地会产生误差,因此,不可能将每一个点都包括在曲线上,而是有一定的偏离。要经过细心处理,使绘出的直线或曲线是平滑的而不是曲折的;同时,使偏离曲线两侧的点数差不多相等,以至于曲线上每个点更接近于所要求的平均值。

【习题】

1. 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 次测上述小球的直径(单位:cm)分别为 1.206,1.204,1.205,1.206,1.205,求小球体积的平均值、相对误差、平均绝对误差。

3. 求上述小球密度的平均值、相对误差、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) 12.34×0.0234=0.288756(cm^2)

(4) 0.1234÷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)分别为 20.0,30.0,40.0,50.0,60.0,70.0,80.0 时,相应的压强(单位:Pa)分别为 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做图。

绪论表 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$\overline{\Delta N}/\overline{N}$
$N=A+B$	$\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}$	$(\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B})/(\overline{A}+\overline{B})$
$N=A-B$	$\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}$	$(\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B})/(\overline{A}-\overline{B})$
$N=A\cdot B$	$\overline{B}\cdot\overline{\Delta A}+\overline{A}\cdot\overline{\Delta B}$	$\overline{\Delta A}/\overline{A}+\overline{\Delta B}/\overline{B}$
$N=A/B$	$(\overline{B}\cdot\overline{\Delta A}+\overline{A}\cdot\overline{\Delta B})/\overline{B}^2$	$\overline{\Delta A}/\overline{A}+\overline{\Delta B}/\overline{B}$
$N=A^n$	$n\,\overline{A}^{n-1}\cdot\overline{\Delta A}$	$n\cdot\overline{\Delta A}/\overline{A}$
$N=A^{\frac{1}{n}}$	$\frac{1}{n}\overline{A}^{\frac{1}{n}-1}\cdot\overline{\Delta A}$	$\frac{1}{n}\cdot\overline{\Delta A}/\overline{A}$
$N=\sin A$	$(\cos\overline{A})\cdot\overline{\Delta A}$	$(\mathrm{ctg}\overline{A})\cdot\overline{\Delta A}$