高等医药院校教材

医用物理实验

YIYONGWULISHIYAN

YIYONGWULISHIYAN
YIYONGWULISHIYAN

相德有　主编

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

医用物理实验/相德有主编．一大连:大连理工大学出版社,1997.7

ISBN 7-5611-1249-1

Ⅰ．医… Ⅱ．相… Ⅲ．医学:物理学-实验 Ⅳ．R312-33

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第01560号

医用物理实验

相德有　主编

*　　*　　*

大连理工大学出版社出版发行

(大连市凌水河　邮政编码116024)

大连理工大学印刷厂印刷

*　　*　　*

开本:787×1092　1/16　印张:10　字数:237千字

1997年7月第1版　1997年7月第1次印刷

印数:1—5000册

*　　*　　*

责任编辑:韩　露　责任校对:于振波

封面设计:孙宝福

*　　*　　*

ISBN 7-5611-1249-1

R·24

定价:10.00元

前　言

本书是根据卫生部1982年颁布的高等医药院校医用物理学教学大纲，由具有教学实践经验的教师联合编写的，可供医疗、检验、药学、口腔、妇产和卫生等专业学生使用。

“医用物理实验”是一门独立的课程。通过实验课不仅仅是让学生理论联系实际，验证某些定理，增强动手的实践能力，而且要培养学生认真负责的态度、实事求是的精神和严谨的科学作风，达到举一反三、触类旁通的目的。

在编写本书的过程中，我们考虑到各参编院校的仪器设备不完全一致，实验方法也有所不同，为此，我们尽力求同存异、取长补短。有些实验是一个题目几种方法，我们在书中全部列出，这样可达到相互交流、共同提高的目的。

本书由大连医科大学、滨州医学院、齐齐哈尔医学院和遵义医学院的教师联合编写，最后由大连医科大学的相德有统一修改审定，滨州医学院的尹殿云教授在审稿中也付出了较大的精力。

本书虽经多次修订，但由于编者水平有限，不足之处在所难免，恳请使用本书的教师和学生不吝指正，以便今后修订提高。

编　者

1997年1月

目　　录

绪　论

一、医用物理实验的目的和任务

物理学是自然科学中最基本的，同时也是最重要的学科之一。它是研究物质运动最基本的和最普遍的规律，并将这些规律应用于生产实践的科学。在高等医学院校里，物理学是一门基础课程。通过这门课程的学习，使学生能获得今后在医学理论和实际工作中所必需的物理学知识，并且能运用这些知识去解决医学实践中的某些问题。

物理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。通过实验和观察，使我们能够深入掌握物理现象的规律性，同时也检验理论的正确性，使这门科学变得更为完整、严密。物理实验课的任务，不能简单地看做是重复某些物理现象和验证书本里某些物理定律，把实验课变成理论课的附属品。因为实验课有许多教学方面的要求是理论课所不能代替的，我们必须正确认识实验课的地位和作用。

医用物理实验的目的和任务：

(1)通过实验观察和分析物理现象，巩固和加深对物理现象及规律的认识，提高对理论学习的理解能力。

(2)学会正确使用常用物理仪器，熟悉仪器的性能；学会对基本物理量的测量，掌握物理实验的方法，提高实验技能。

(3)培养严肃认真、细致谨慎的实事求是的科学态度和遵守纪律的优良品德。

要做好每个实验，就必须按照预习、操作、报告这三个程序进行。

1. 预习

这是能否使实验顺利进行的关键，因此实验前必须做好预习。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，掌握实际知识，加强对理论的理解能力，提高实验技能。要求做到：①遵守实验室规则和秩序；②操作前要检查和认识实验仪器，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预习时已准备好的记录表格上，计算出必要的结果；⑤实验完毕，整理仪器，保持清洁。

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，在对结果加以分析总结的基础上，写出清楚而简明的实验报告。实验报告要求有如下几方面的内容：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测量数据及计算结果。数据要填入表格内。记录实验时的环境条件，如室温、气压等，有的结果还要绘出图线；⑦结果的分析、讨论、总结、回答问题。

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可以直接测出结果的。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，因此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似值，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叫做误差。由于测量值不可能与真值完全相同，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

或称恒定误差，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，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，则系统误差是能尽量减小或消除的。

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

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)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的测量。这时测量值的误差可根据实际情况进行合理的具体的估算，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，将各次测量的算术平均值作为此量真值来计算误差。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 $A_1,A_2,A_3,\cdots,A_k$，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。

测量值的误差常用下面几种方法表示：

(1)算术平均误差

各次测量值 A_i 与算术平均值 $\overline{A}$ 的差 ΔA_i，其值分别 $\Delta A_1=A_1-\overline{A},\Delta A_2=A_2-\overline{A},\cdots,\Delta A_k=A_k-\overline{A}$，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值内产生的呢？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 $\dfrac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}}\times 100\%$。

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

在物理实验中，大多数是间接测量，是由多个直接测量值通过一定公式计算得出最后结果的。因此，直接测量的误差必然对间接测量的误差有所影响，这可用相应的误差传递公式来进行计算。设 A,B 为直接测量值，可表示为 $\overline{A}\pm\overline{\Delta A},\overline{B}\pm\overline{\Delta B}$，而 N 为间接测量值，表示为 $\overline{N}\pm\overline{\Delta N}$，是由 A,B 代入计算公式所求得的。

(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，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

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

(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，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

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

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

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

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

相对误差为

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

(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

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

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，后计算相对误差较为方便；当计算式中含有乘、除、乘方或开方运算时，先计算相对误差，后计算绝对误差较为方便。

其他函数的误差传递公式，我们不一一证明，下面仅列出一些常用公式，以备查阅。

常用误差计算公式

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

三、有效数字及其运算法则

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结果的精确度也就各有不同。

所谓仪器的精密度，除有特殊标明的仪器外，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 1 mm，其精密度就是 1 mm。其他仪器依次类推。有的

仪器有特殊标记，例如某一天平的感量是 0.01 g，其精密度就是 0.01 g 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 3.2 cm 和 3.3 cm 之间，能否再精确一点呢?那就要估计读数了。比如说，估计得 3.26 cm。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，它的有效数字位数取决于各直接测量结果，一般可按下列规则进行运算。

1. 加法与减法

对诸数进行加减运算时，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。

例 1

$$32.1+3.276=35.4$$

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

例 2

$$12.4-2.756=9.6$$

$$\begin{array}{lr} & 12.\underline{4} \\ - & 2.75\underline{6} \\ \hline & 9.\underline{6}\,\underline{4}\,\underline{4} \end{array}$$

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. 乘法和除法

对诸数进行乘法或除法运算时，所得结果的有效数字位数，应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。也就是要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

$$1.323\times1.3=1.7$$

$$\begin{array}{lr} & 1.32\underline{3} \\ \times & 1.\underline{3} \\ \hline & \underline{3}\,\underline{9}\,\underline{6}\,\underline{9} \\ & 1\,3\,2\,\underline{3} \\ \hline & 1.\underline{7}\,\underline{1}\,\underline{9}\,\underline{9} \end{array}$$

例 4 $$148.83 \div 1.23 = 121$$

$$
\begin{array}{r}
1\ \underline{21} \\
1.2\underline{3}\ \overline{)\,148.8\underline{3}} \\
\underline{12\underline{3}\quad\ \ } \\
2\underline{5}\ 8 \\
\underline{24\ \underline{6}} \\
\underline{1}\ \underline{23}
\end{array}
$$

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)有效数字的位数与小数点位置无关。例如，2.638 m 与 263.8 cm 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 2.638 m=263.8 cm，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。

(2)有效数字与“0”的关系。例如，两组数 263.8 cm 和 0.002638 km，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”不算做有效数字。

但是，必须特别注意，263.8 cm 和 263.800 cm，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。

(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，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。

(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，但小数点前应一律取一位数字。例如，光速为 $2.997\times10^{8}\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$，为四位有效数字；光谱中 D 线波长为 5.89×10^{-7} m，为三位有效数字。

(5)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。

(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 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

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

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

直接测量的相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta h}}{\bar{h}}=\frac{0.2}{20.3}=1\%$$

$$\frac{\overline{\Delta D}}{\bar{D}}=\frac{0.1}{5.2}=2\%$$

直接测量的结果表示为

$$h=\bar{h}\pm\overline{\Delta h}=20.3\pm0.2\ \text{mm}$$

$$D=\bar{D}\pm\overline{\Delta D}=5.2\pm0.1\ \text{mm}$$

间接测量的平均值为

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

相对误差

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

平均绝对误差

$$\overline{\Delta V}=\bar{V}\cdot E=4.3\times10^2\times5\%=0.2\times10^2\ \text{mm}^3$$

结果表示为

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

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，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）之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，还应简要列出计算公式。此外，实验时间、环境温度、气压等也可记于表首，以便参考。

2. 图示法

许多情况下，实验所得数据是表示一物理量（因变量）随另一物理量（自变量）而改变的关系。这些对应关系的变化情况，通常用图示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。在坐标轴末端标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的大部或全部。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，以便于寻找和计算。

(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，以免混淆。

(4)各实验点标出后，用直尺或曲线尺将这些点连接起来绘出图线。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弯折的，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. 今 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)$12.34\times0.0234=0.288756$ cm^2

(4)$0.1234\div0.0234=5.2735$ cm

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

(大连医科大学　罗凤晞)

实验一 基本测量

1.1 用游标卡尺、螺旋测微计测量长度

【目的】

1. 熟悉游标卡尺、螺旋测微计的结构原理,掌握其使用方法。

2. 进一步体会有效数字的意义,熟悉误差的计算方法。

【器材】

游标卡尺、螺旋测微计、金属圆筒(柱)、金属小球、玻璃棒等。

【原理】

长度测量是最基本的物理测量。测量所用的工具依据测量范围和精度的要求而不同,常用的有米尺、游标卡尺和螺旋测微计等。

1. 游标卡尺

游标卡尺的结构如图 1.1 所示,由主尺 D 和副尺(游标)F 两部分组成。主尺是一根钢制的毫米分度尺,其头上有钳口 A 和刀口 B,游标上刻有等分刻度,附有钳口 A' 和刀口 B' 及可沿主尺滑动的尾尺 C(与游标连在一起)。螺旋 E 用来固定游标。当钳口 AA' 密接时,BB' 对齐,C 与主尺尾部也对齐。这时,主尺上的"0"线与游标上的"0"线应重合。钳口 AA' 用来测量物体的长度及外径,刀口 BB' 用来测量物体的内径,而尾尺 C 用来测量物体的深度。

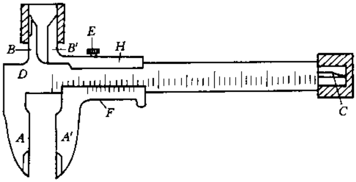

图 1.1

游标卡尺的规格有多种,其精度也不同。若游标上刻有 m 个小分格,则主尺与游标的关系是:主尺上 $(m-1)$ 个分格的长度等于游标上 m 个分格的长度。

若主尺上最小分格的长度为 x,游标上最小分格的长度为 y,则因 $(m-1)x = my$,见图 1.2,于是有

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

游标卡尺的主尺上每一小格为 1 毫米。至于游标上有多少格数,则随规格不同而异,但是基本原理都相同,即游标上 m 格的长度相当于主尺上 $(m-1)$ 格的长度。主尺最小分度值与游

图 1.2

标最小分度值之差 Δ 为

$$\Delta = x - y = \frac{x}{m} \tag{1-2}$$

Δ 称为游标卡尺的精密度(即精度)。当 $x = 1$ mm 时,用游标卡尺测量可以准确到$(\frac{1}{m})$ mm。例如,$x = 1$ mm,$m = 10$,则 $\Delta = 0.1$ mm;$x = 1$ mm,$m = 50$,则 $\Delta = 0.02$ mm;$x = 1$ mm,$m = 20$,则 $\Delta = 0.05$ mm。还有一种游标,主尺 $x = 1$ mm,游标 $y = 1.95$ mm,游标上 20 格与主尺上 39 格的长度相等,称为扩展游标,$\Delta = 2y - x = 0.05$ mm,见图 1.3。

用游标卡尺测量物体长度时,把物体放在钳口之间,用大拇指把游标向前推移,使钳口与物体紧密接触,如图 1.4。设 L 是待测物体的长度,当游标向前移动距离 L 时,游标的零线位于主尺的第 k 刻线与 $k+1$ 刻线之间,因此有

$$L = kx + \Delta L \tag{1-3}$$

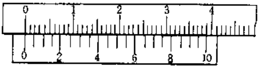

图 1.3

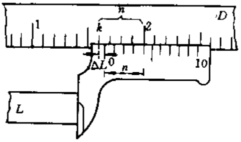

图 1.4

式中,ΔL 为物体长度值的小数部分(以 mm 计)。因为游标的分度与主尺的分度不相等,游标上必然有第 n 根刻线与主尺上第 $k+n$ 根刻线重合或接近重合,所以 $\Delta L = nx - ny = n(x - y) = n(\frac{x}{m})$。故

$$L = kx + n(\frac{x}{m}) \tag{1-4}$$

式中,$(\frac{x}{m})$ 是游标卡尺的精密度。综上所述,游标卡尺的读数方法可归纳如下:先读出游标零线前主尺上的分度数 k,然后读出游标上与主尺某一刻线相对齐的刻线数 n,物体的长度 L 可由式(1-4)求得。一般来说,当游标卡尺的钳口 AA' 相接触时,游标的零刻线与主尺的零刻线应重合,则测量时所读出的数值就是被测物的长度。但有时存在不重合的情况,有一个微小的差值,称为游标卡尺的零点差。当游标上的零刻线在主尺零刻线右侧时,零点差读数为正值;若在左侧,零点差读数为负值。物体长度的测量值应该是读数值减去零点差。

实际上,游标卡尺上的刻度,生产厂家已按 $n\frac{x}{m}$ 标出了小数部分,因此在读数时,小数部分可在游标上直接读出。

2. 螺旋测微计(千分尺)

螺旋测微计是比游标卡尺更精密的测量长度的仪器,常用于测量金属丝、小球的直径和薄板的厚度等。其结构如图 1.5 所示,它是由 U 形尺架、固定测杆 E、测微螺杆 A、固定套筒 D、微分鼓轮 C 和棘齿轮旋柄 B 等组成。固定套筒上刻有一水平横线,在水平横线的上、下方每隔 0.5 mm 刻一条线,上面为 0.5 mm 读数,下面为 1 mm 读数。螺杆与固定套筒间有精密螺纹,其螺距为 0.5 mm,螺杆、微分鼓轮与棘齿轮旋柄相连,微分鼓轮的周边上刻有 50 个分格。当螺杆顺时针旋转一周时,螺杆和微分鼓轮沿轴线方向前进 0.5 mm。因此,当微分鼓轮转过一个分格时,螺杆就沿轴线方向移动$\frac{1}{50}\times 0.5\ \text{mm}=0.01\ \text{mm}$,这就是螺旋测微计的精密度。另外,从微分鼓轮上还可以估计一位读数,即可读到 0.001 mm 位。

在测量时,把被测物放在测杆 E 和 A 之间,当两个测杆的端面将与被测物体的端面接触时,只能缓缓地转动棘齿轮旋柄,当听到"咔、咔"的声响后,就应停止转动,进行读数。操作时,不能用力过猛,以免使被测物损坏测微螺杆,影响测量的准确度。

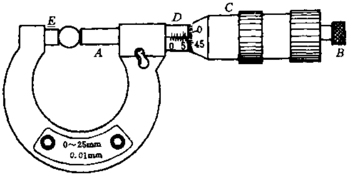

图 1.5

螺旋测微计的读数方法如下:先从固定套筒 D 上读出整数部分,应读到 0.5 mm,再从微分鼓轮 C 的周边上读出小数部分,需估计到最小分度值的$\frac{1}{10}$,即 0.001 mm,将两者相加,即为读数。如图 1.6(a)所示的读数值为 5.780 mm。

在使用螺旋测微计前同样要先确定其零点差。当测杆 A 与 E 互相接触时,微分鼓轮 C 的边缘若与 D 筒的零分度线对齐,则其零点读数为 0.000 mm,如图 1.6(b) 所示。如 D 的水平横线与 C 的零线上方的第 3 分度线对齐,如图 1.6(c),则其零点差读数为 + 0.030 mm,如 D 的水平横线与 C 的零分度线下方的第 2 分度线(也即第 48 分度线) 相对齐,如图 1.6(d),则其零点读数就为 − 0.020 mm。用读数值减去零点差读数,可得物体的实际长度。

【步骤】

1. 使用游标卡尺测量金属圆筒(或铜环、金属小球、金属小圆柱)的体积。

(1)读出游标卡尺的零点差。

(2)用游标卡尺分别测量金属圆筒的高度 H_1、深度 H_2、外径 D_1 和内径 D_2,并从不同方位各测三次,将读数记录在表格中。

(3) 分别求出 H_1、H_2、D_1 和 D_2 的平均值、绝对误差和平均绝对误差,将计算结果记录于表格中。