高 等 医 药 院 校 用 教 材

医用物理实验

谭耀东　相德有　主编

学 术 期 刊 出 版 社

内 容 简 介

本书总结参加编写的医学院校十余年物理实验课教学经验，结合教学大纲要求撰写。全书包括 31 个实验题目及两篇附录，适合我国医学院校实际条件，可供国内医学院校医疗系、口腔系、儿科系、检验系本科作教材，亦可供专科班选用。

医 用 物 理 实 验

谭耀东　相德有　主编

许　昆　孙国忠
张同喜　张国光　编著

责任编辑：侯　平（特约）　金永熙

*

学术期刊出版社出版
北京海淀区学院南路86号
大连理工大学印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

1989 年 7 月第 1 版　开本：184×260mm
1989 年 7 月第 1 次印刷　印张：8 1/2
印数：0001—5000　字数：200 千字
ISBN 7-80045-523-8/R·59
定价：3.60 元

前　　言

《医用物理实验》一书是以卫生部颁布的高等医药学院校医用物理学教学大纲为依据，由大连医学院、石河子医学院、宁夏医学院、青海医学院、锦州医学院联合编写，可供本、专科的医疗、检验、药学、口腔、儿科、卫生、法医等专业使用。

根据各院校长期的实验教学经验，针对当前大学生对实验课的认识以及在学习过程中所遇到的问题，在编写过程中，我们从着重开发学生的智力入手，并注意到实验课和理论课的相对独立性，要求通过实验，熟悉仪器的性能，并学会正确使用；掌握物理实验方法；提高实验操作技能；正确处理实验数据；使学生能得到广阔的基础知识和扎实的基本训练。

考虑到各院校的仪器设备各有差异，实验手段也有所不同。编写过程中，我们尽力求同存异。对于各校都相同的题目，则吸取各校长处，使之有所提高。而对个别的题目，则保留原有特色。因此，有些实验虽然是一个题目，但可以用几个方法去做。这样，各院校不仅可以根据自己的具体情况去选择，而且也适应各个专业不同层次学生的需要。

本书由许昆、孙国忠、张同喜、张国光、相德有、谭耀东等同志组成编委，谭耀东、相德有同志担任主编。参加编写的还有潘志达、郭艾青、张毅、汪琏、白英卿、江涛、武洪云、康勇、石俊栋、芮欣、罗风帏等同志。芮欣同志还负责绘制大部分插图。

本书虽经多次修改，但由于我们水平有限，经验不足，错误及疏漏之处在所难免，恳请使用本书的教师和学生提出宝贵意见，以便今后修正提高。

编者

1989 年 2 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，以及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中及实际工作中所必须的物理学知识，并且能运用这些知识去解决医学实践中的某些问题。

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，不能简单地看作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。

医用物理实验课的目的和任务是：

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．学会正确使用常用的物理仪器，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，弄通实验原理，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，保持整洁。

3．报告　实验报告是进行实验的最终总结。要在认真细致地对实验数据做出整理和计算，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、公式和说明图或电学线路图；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结果的那些量。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。真值是不可能确切测得的。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。由于测量值不可能和真值完全相同，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（读数总是偏高或总是偏低等），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，增加测量次数亦不能有所改善。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，使用仪器不正确，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的直接测量。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，在可能情况下，总是采用多次测量，将各次测量的算术平均值作为测量结果来计算误差。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 $\bar{A}$ 为

$$\begin{aligned}\bar{A} &= (A_1 + A_2 + A_3 + \cdots + A_K)/K \\ &= \sum_{i=1}^{K} A_i/K\end{aligned}$$

这算术平均值 $\bar{A}$ 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 $\bar{A}$ 的差 ΔA_i，其值分别为 $\Delta A_1=A_1-\bar{A}$，$\Delta A_2=A_2-\bar{A}$，$\cdots\Delta A_K=A_K-\bar{A}$，它反映各次测量的误差。我们把算术平均误差定义为

$$\overline{\Delta A}=(|\Delta A_1|+|\Delta A_2|+|\Delta A_3|+\cdots+|\Delta A_K|)/K$$

$$=\sum_{i=1}^{K}|\Delta A_i|/K$$

因为它是以误差的绝对值来表示测量值的误差，故 $\overline{\Delta A}$ 又称平均绝对误差，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 $\bar{A}+\overline{\Delta A}$ 和 $\bar{A}-\overline{\Delta A}$之间，因而测量结果应表示为 $\bar{A}\pm\overline{\Delta A}$。

（2）方均根误差

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

$$\sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^{K}(A_i-\bar{A})^2/K}$$

$$=\sqrt{\sum_{i=1}^{K}(\Delta A_i)^2/K}$$

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

（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？因此，我们将平均绝对误差 $\Delta\bar{A}$ 与测量的算术平均值 $\bar{A}$ 的比值

$$E=\overline{\Delta A}/\bar{A}$$

称为平均相对误差，以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$\dfrac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}}\times 100\%$

此外，我们常遇到一些已经有公认值或理论值的实验，这时，求百分误差可把 $\bar{A}$ 作为公认值或理论值，而 $\overline{\Delta A}$则是我们所得的实验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 $\bar{A}\pm\overline{\Delta A}$，$\bar{B}\pm\overline{\Delta B}$，而 N 为间接测量值，表示为 $\bar{N}\pm\overline{\Delta N}$，是由 A、B 代入计算公式所求得。

（1）和的误差

若　$N=A+B$

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

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

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

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

平均相对误差为

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

（2）差的误差

若 $\quad N = A - B$

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

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

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

平均相对误差为

$$\overline{\Delta N}/\bar{N} = (\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B})/(\bar{A} - \bar{B})$$

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 $\quad N = A \cdot B$

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

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

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

平均相对误差为

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

（4）商的误差

若 $\quad N = A/B$

则 $\quad \bar{N} \pm \overline{\Delta N} = (\bar{A} \pm \overline{\Delta A})/(\bar{B} \pm \overline{\Delta B}) = (\bar{A} \pm \overline{\Delta A})(\bar{B} \mp \overline{\Delta B}/(\bar{B} \pm \overline{\Delta B})(\bar{B} \mp \overline{\Delta B})$

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

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

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

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = (\bar{B} \cdot \overline{\Delta A} + \bar{A} \cdot \overline{\Delta B})/\bar{B}^2$$

平均相对误差为

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

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 $\overline{\Delta N}/\overline{N}=n\cdot\overline{\Delta A}/\overline{A}$

若 $N=A^{\frac{1}{n}}$ 则 $\overline{\Delta N}/\overline{N}=\frac{1}{n}(\overline{\Delta A}/\overline{A})$

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。

其它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。

表 0－1 常用误差计算公式

运 算 公 式	绝对误差 $\overline{\Delta N}$	相对误差 $\overline{\Delta N}/\overline{N}$
$N=A+B$	$\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}$	$(\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B})/(\overline{A}+\overline{B})$
$N=A-B$	$\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B}$	$(\overline{\Delta A}+\overline{\Delta B})/(\overline{A}-\overline{B})$
$N=A\cdot B$	$\overline{B}\cdot\overline{\Delta A}+\overline{A}\cdot\overline{\Delta B}$	$\overline{\Delta A}/\overline{A}+\overline{\Delta B}/\overline{B}$
$N=A/B$	$(\overline{B}\cdot\overline{\Delta A}+\overline{A}\cdot\overline{\Delta B})/\overline{B}^2$	$\overline{\Delta A}/\overline{A}+\overline{\Delta B}/\overline{B}$
$N=A^n$	$n\overline{A}^{n-1}\cdot\overline{\Delta A}$	$n\overline{\Delta A}/\overline{A}$
$N=A^{1/n}$	$\frac{1}{n}\overline{A}^{\frac{1}{n}-1}\cdot\overline{\Delta A}$	$\frac{1}{n}\overline{\Delta A}/\overline{A}$
$N=\sin A$	$(\cos\overline{A})\cdot\overline{\Delta A}$	$(\mathrm{ctg}\overline{A})\cdot\overline{\Delta A}$
$N=\cos A$	$(\sin\overline{A})\cdot\overline{\Delta A}$	$(\mathrm{tg}\overline{A})\overline{\Delta A}$
$N=\mathrm{tg}A$	$\overline{\Delta A}/\cos^2\overline{A}$	$2\overline{\Delta A}/\sin2\overline{A}$
$N=\mathrm{ctg}A$	$\overline{\Delta A}/\sin^2\overline{A}$	$2\overline{\Delta A}/\sin2\overline{A}$
$N=KA$（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

要对某一物理量进行测量，例如长度、时间、温度、压强、电流强度等，都必需使用各种仪器，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，使用不同精密度仪器测量结果的精确度也就各有所不同。

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 1mm，其精密度就是 1mm。其它仪器依此类推。有的仪器有特殊标记，例如某一天平的感量是 1/100 克，其精密度就是 1/100 克了。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，精密度就越高。

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 3.26。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。这数值的这些数字，就是测量的有效数字。

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，因为它不仅反映测量值的大小，而且也反映测量的精确程度，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值，一般可按下列规则进行运算。

1．加法与减法：诸数进行相加或相减运算时，所得结果的有效数字位数，应该取到诸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。后面的的数字按舍入法处理。

例 1　$32.1+3.276=35.4$

$$\begin{array}{r} 32.\underline{1} \\ +)\quad 3.27\underline{6} \\ \hline 35.\underline{376} \end{array}$$

例 2　$12.4-2.756=9.6$

$$\begin{array}{r} 12.\underline{4} \\ -)\quad 2.75\underline{6} \\ \hline 9.\underline{644} \end{array}$$

计算时，我们在可疑数字下面加一横线，以便与确切数字区别。

2．乘法和除法：诸数进行乘法或除法运算时，所得结果的有效数字位数，应以参与运算的诸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诸数中有效数字位数最少的那个数相同。

例 3　$1.323\times1.3=1.7$

$$\begin{array}{r} 1.32\underline{3} \\ \times)\quad 1.\underline{3} \\ \hline \underline{3969} \\ 132\underline{3} \\ \hline 1.\underline{7199} \end{array}$$

例 4　$148.83\div1.23=121$

$$\begin{array}{r} 12\underline{1} \\ 1.2\underline{3})\overline{148.8\underline{3}} \\ 12\underline{3} \\ \hline 2\underline{58} \\ 24\underline{6} \\ \hline \underline{123} \end{array}$$

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 和 263.8 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（米）＝263.8（厘米），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（厘米）和 0.002638（千米），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误差率，这两组数都是四位有

效数字。所以，数字前面的“0”不算作有效数字。

但是，必须特别注意，263.8（厘米）、263.80（厘米）和 263.800（厘米），这些数学上相等的量，在物理学上意义却完全不同，它们有不同的精确程度。所以在数字后面的“0”要算作有效数字，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，用 10 的幂次方来表示，但小数点前应一律取一位有效数字。例如光速为 2.997×10^{8}米/秒，为四位有效数字；光谱中 D 线波长为 5.89×10^{-7}米，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 以上入，遇 5 看前一位，前一位是奇数则入，偶数则舍，使留下的末位数字是双数。

6．为避免由于舍入过多带来较大的附加误差，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。

现在举例说明如何根据有效数字运算规则进行误差计算。

例：用米尺分别对圆柱体的高和直径作三次测量，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、平均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为

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

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

直接测量的结果表示为

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

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

间接测量的平均值为

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

平均相对误差

$$\overline{\Delta V}/\bar{V} = 2\cdot\overline{\Delta D}/\bar{D} + \overline{\Delta h}/\bar{h} = 2\times 2\% + 1\% = 5\%$$

平均绝对误差

$$\overline{\Delta V} = \bar{V}\times\overline{\Delta V}/\bar{V} = 4.3\times 10^2\times 5\% = 0.2\times 10^2 (\mathrm{mm}^3)$$

结果表示为

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

四、实验结果的数据处理

1．列表法

实验所得的测量数据，必须列出表格记录，因为它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于表格中。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，必须注意下列几点：

（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。如果在同一图纸上作几条曲线，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．今测得塑料小球质量5次（单位：克）2.1074，2.1079，2.1075，2.1076，2.1074，求标准误差、平均绝对误差、平均相对误差。

2．上述小球测其直径5次(单位：厘米)1.206，1.205，1.204，1.206，1.205，求小球体积的平均值、平均相对误差和平均绝对误差。

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

4．改正下列各式结果的有效数字。

（1）34.740＋10.28－1.0036＝44.0164 米

（2）12.34＋1.234＋0.01234＝13.58634 克

（3）$12.34\times0.0234=0.288756$ 厘米^2

（4）$0.1234\div0.0234=5.2735$ 厘米

（5）$123\times46=5658$ 米^2

5．气体作等温变化，实验测得气体的体积为：20.0cm^3；30.0cm^3；40.0cm^3；50.0cm^3；60.0cm^3；70.0cm^3；80.0cm^{3}时，相应的压强为 76.0mmHg；50.8mmHg；38.1mmHg；30.3mmHg；25.5mmHg；21.6mmHg；19.0mmHg。试用此数据列表并作图。

（大连医学院　谭耀东）

实验 1　基本测量

一、用游标卡尺测量长度

目的

1．学会使用游标卡尺测量长度，锻炼测量技术的基本技能。

2．练习有效数字的应用和实验结果的误差处理。

器材

游标卡尺、金属小球、金属小圆柱。

原理

游标尺的结构如图 1-1 所示。A、B 可以从外向里卡，C、D 可以从里向外卡，尾尺可以由底向上测。三种测量精确度一样，可依测量对象选用。E 为推动游标的手触点，F 为固定游标的螺丝。

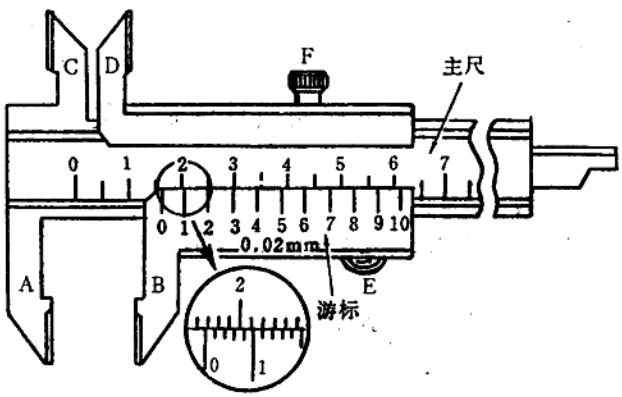


图 1-1

在普通毫米尺（主尺）上套一个滑动的小尺（副尺），这个可以滑动的小尺称为游标。主尺与游标的关系是：主尺上 $(m-1)$ 个格的长度等于游标上 m 个格的长度。

若主尺最小格的长度为 x，游标最小格的长度为 y，则因 $(m-1)x=my$，于是有

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

游标卡尺的主尺，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。例如某游标尺共有 50 格，从式（1-1）可知，每格代表的长度为 $y=\frac{50-1}{50}\times 1=0.98$ 毫米，主尺每小格和游标每小格长度相差为 $x-y$，在此例中为 $1-0.98=0.02$ 毫米，这也是该游标卡尺的精确度。

游标卡尺的读数法则是

$$L=kx+n(x-y)=kx+n\Delta x \tag{1-2}$$

式中 L 是待测物体的长度，k 是在主尺上可准确读出的整最小格数，x 是该最小格的长度，y 是游标最小格的长度，n 是游标零点到主尺与游标尺刻度线对齐线之间游标上的格数，Δx 是游标卡尺的精确度。

步骤

1．先练习正确拿取卡尺。用拇指推动游标，使夹口 A、B 紧合，看零点是否对齐。若不齐，记下该系统误差，以校正最后结果。

2．把金属小球放在卡尺的夹口 AB，轻轻卡住。不要太用力，否则会使被测物变形，甚至损坏游标卡尺。

3．读出小球直径的测量值，作好记录，并沿小球不同方向重复测量，共测三次。

4．算出标准误差、平均绝对误差、平均相对误差。

5．算出小球的体积，并算出其平均绝对误差、平均相对误差。

6．按上述步骤测量金属小圆柱的高度和直径。并依照上述要求进行结果处理。

问题

1．用游标卡尺测金属小球三次，读数均一样，这是否说明不存在误差？为什么？

2．若测量某长度时，游标上最前和最后的刻度线都与主尺上的刻度线对齐，则读数怎么读？又如何用数字表示？

二、用螺旋测微计测量长度

目的

1．学会用螺旋测微计测量长度。

2．进一步练习实验结果的误差处理和有效数字的应用。

器材

螺旋测微计、金属小圆球、金属小圆柱。

原理

螺旋测微计的结构如图 1-2 所示。弓形体和有刻度的圆柱体 E 是一个整体，其刻度是在一水平线（准线）上下各刻有相距1毫米的线，但上下相邻两线的间距为 0.5 毫米，这些刻度组成主尺。测量物体放在固定头 A' 和活动卡头 A 之间。E 内部是螺距为 0.5 毫米的螺

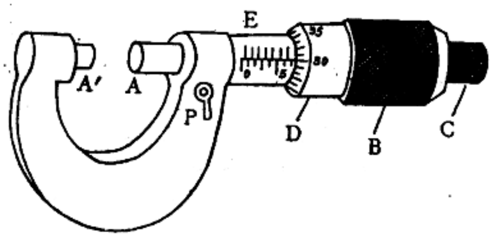


图 1-2

纹，A 通过 E 内的螺纹和套筒 B 一起旋进或旋退。套筒 B 套在 E 上，其端口 D 上也有刻度，绕端口一周均匀分成 50 小格，称为旋转游标。B 旋转一周，即旋转 50 格时，A 连同 DB 一起进或退 0.5 毫米。所以，旋转游标旋转一格，A 就进或退 $\frac{0.5}{50}=0.01$ 毫米，估读到 0.001 毫米（千分之一毫米，即 10^{-6} 米——微米级）。所以螺旋测微计也叫千分尺。图中 C 是可旋转的棘轮，借助摩擦力带动 A、D、B 旋转。当被测物卡紧，或 AA' 紧密接合时，阻止 A 前进的力大于 C 与 B 之间的摩擦力，A、D、B 不再旋转，这时旋转 C，会发出"格、格、……"的声音，从而起保护卡头和螺纹的作用。

螺旋测微计的读数法则是

$$L=k\times0.5+(n+\Delta L)\times0.01\pm\Delta\alpha \tag{1-3}$$

L 是待测长度，k 是主尺上半毫米格的整格数，n 是旋转游标上整格数，ΔL 是旋转游标上不足一格的估计数（以准线为衡量标志），$\Delta\alpha$ 是系统误差的校正值。如图 1-3，设没有系统误差，即 $\Delta\alpha=0$，则 $k=5$，$n=2$，$\Delta L=\frac{3}{10}$，

$$\therefore L=5\times0.5+\left(2+\frac{3}{10}\right)\times0.01\pm0=2.523\text{（毫米）}$$

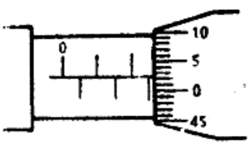
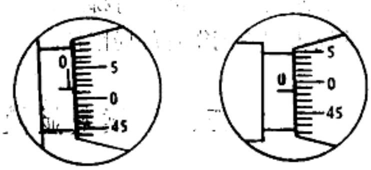


图 1-3



(a)　图 1-4　(b)

如果没有测量物时，AA' 紧密接合，端口 D 已有一格半读数，如图 1-4(a) 所示，这意味测量值多出了 $\left(1+\frac{5}{10}\right)\times0.01=0.015$ 毫米，因而最后结果中要修正，减去这个数值。如果用这测微计测得图 1-3 中所示的长度时，其结果应是：$k=5$，$n=3$，$\Delta L=\frac{8}{10}$，$\Delta\alpha=-0.015$，

$$\therefore L=5\times0.5+\left(3+\frac{8}{10}\right)\times0.01-0.015=2.523\text{（毫米）}$$

如果没有测量物时，AA' 紧密接合，旋转游标的 0 刻度已超过准线一格半，这数值应为负数，意味测量值少了 $\left(1+\frac{5}{10}\right)\times0.01=0.015$ 毫米，如图 1-4(b) 所示。因而最后结果的修正，要加上这数值。如果用这测微计测量图 1-3 中所示的长度时，结果应是

$$k=5,\ n=0,\ \Delta L=\frac{8}{10},\ \Delta\alpha=+0.015,$$

$$L=5\times0.5+\left(0+\frac{8}{10}\right)\times0.01+0.015=2.523\text{（毫米）}$$

步骤

1. 练习正确拿取测微计。左手拿住弓形部分，右手转动棘轮 C，使 AA' 紧密接合，听到"格、格、…"声为止。观察游标 0 刻度线是否对准主尺的准线。若没对准，记下这个修正值。

2. 转动 C，使 AA' 分开，放入金属小球，再转动 C，使 AA' 将小球夹住，听到"格、格…"声为止。转动时要慢，以防惯性冲击，使误差增大。

3. 读取小球直径的测量值，沿不同部位测量三次，并作好记录。

4. 按误差处理的原则，处理原始数据。

5. 同理测金属小圆柱的直径和高，各测三次。记录数据并做误差处理。

6. 将游标卡尺和螺旋测微计所得的结果进行比较。

注意事项

1. 螺旋测微计旋转前进时，一定要转动棘轮，否则容易把被测物体夹得过紧，使物体变形或损坏螺纹，从而影响精度。

2. 使用螺旋测微计测量之前，一定先读出其系统误差，结果处理时要把系统误差考虑进去。

问题

1. 影响测量精度的因素有哪些？

2. 试说明螺旋测微计的局限性。

三、用读数显微镜测量微小物体长度

目的

学会使用读数显微镜测量长度的方法。

器材

读数显微镜、细铜丝。

原理

读数显微镜主要由测微目镜构成，该目镜的焦平面上固定了一个透明的微尺，微尺每一小格的实际长度为 1 毫米。在这个微尺下面很近处还有一个可以移动的透明分划板，上面刻有十字准线和一组双线，做为定位用。这个可移动的分划板与一个丝杆相连，丝杆的另一头与一个读数鼓轮相连，鼓轮旋转一周，丝杆和分划板一起前进或后退 1 毫米。而沿读数鼓轮的圆周刻有 100 个格，故每旋转一格，相当于分划板前进或后退 $\frac{1}{100}$ 毫米。也就是说，固定的微尺是主尺，移动的分划板与读数鼓轮配合为旋转游标，其原理和螺旋测微计一样，故读数原则也是一样的，只不过测量时，物体和微尺以及分划板同时被目镜放大，看得较清楚而已。其结构如图 1-5 所示。

测物时，将十字准线对准待测物的起始线，可得一读数 x_1，沿同一方向转动丝杆，将十字准线再对准待测物的终止线，又可得另一读数 x_2，则物体的长度为

$$l=|x_1-x_2| \tag{1-4}$$

在测微目镜的下方，连接一个镜筒和一个线放大率为 1:1 的物镜，就组成了一个读数显微镜。如果物镜的线放大率大于 1，则应按实验二十六的练习一的方法，使用物镜微尺确