高等医学院校

医用物理实验教程

主编　龚尔璋

（供医学、儿科、口腔、卫生、检验、预防、中医等专业用）

科学技术文献出版社

高等医学院校

医用物理实验教程

（供医学、儿科、口腔、卫生、检验、预防、中医等专业用）

主　编　龚尔璋

副主编　邵必平　王　勇

主　审　谢正祥

科学技术文献出版社

（京）新登字130号

高等医学院校

医用物理实验教程

（供医学、儿科、口腔、卫生、检验、
预防、中医等专业用）

主编　龚尔璋

科学技术文献出版社出版
（北京复兴路15号　邮政编码100038）
中共重庆市委机关印刷厂印刷
新华书店重庆发行所发行　　各地新华书店经售
·
787×1092毫米　32开本 5.875 印张　130千字
1993年3月第 1 版　　1993年3月第 1 次印刷
印数：1—4500册
科技新书目：281—109
ISBN 7-5032-1801-1/R·312
定　价：4.00 元

前　言

物理学是一门实验科学。物理学的大多数定律都建立在严格的实验基础之上。即使在已有物理知识的基础上，通过大胆假设和逻辑推理而建立起来的物理学新理论，也必须通过实验来验证。物理实验课教学还担负着培养学生的基本操作技能，培养学生进行科学实验的能力和良好的工作作风的任务。所以，物理实验课教学是物理学教学中不可缺少的重要组成部分。

我们根据全国医用物理学教学大纲的基本精神，参照国内兄弟院校的经验，并考虑到近年来物理学教学内容的新进展编写了这本实验教材。本教材系统地介绍了物理实验的基本方法和基本技能，适当增加了与医学关系密切的新内容。各实验都有明确的目的和要求，有简明扼要的实验原理和操作步骤，对数据的处理和误差的计算都有严格的规定，从而将有利于学生自学，有利于培养学生独立思考、分析和解决实际问题的能力。考虑到各校实验设备状况的不同，在实验内容的选择和编写中留有一定的余地。

本教材主要供高等医学院校的医学、儿科、口腔、卫生、卫生检验、医学检验、预防医学、中医等专业用，也可供中等卫生学校师生参考。

参加本教材编写的人员有王学文、王勇、邓必中、甘平、叶继伦、刘向国、陈良迟、陈宏、李前勋、高斌、龚尔

琫、曾林泽、窦晓明、雍杰、裴民、薛晋惠等同志（以姓氏笔划为序）。本书由龚尔琫副教授主编，邓必中副教授和王勇讲师任副主编，由谢正祥教授主审。王高武同志为本书绘制了大部分插图，在此深表感谢。

编　者

1992年5月

内 容 提 要

本书根据全国医用物理学教学大纲对物理实验课的基本要求，参照近年来有关兄弟院校物理实验教学改革的新经验，本着进一步加强物理实验课与医学的联系和着重培养学生的实际操作能力的精神编写而成。全书包括力学、分子物理、振动和波动、电磁学、光学和放射性测量等22个实验。每个实验都有明确的目的和要求，有简明扼要的实验原理、仪器描述和操作步骤。对实验数据的处理和误差的计算都有严格的要求。考虑到有关兄弟院校实验设备情况的不同，多数实验都介绍了两种以上的仪器，可供选用。

本书可供高等医学院校的医学、儿科、口腔、卫生、检验、预防、中医等专业的物理实验课教学用，也可供有关职大、护理夜大和中等卫生学校选用。

目　录

实 验 一

绪 论
(Introduction)

一、医用物理实验课的目的、任务和要求

从根本上说来，物理学是一门实验科学。要发现并掌握物理学的规律，就必须进行实验。在已有知识的基础上，通过大胆假设而建立起来的物理理论，也必须在实验中受到检验，并在实验中得到进一步的发展和深化。因此，物理学是在实验和理论密切结合相互推动中发展的。先进的物理实验的方法和技术、物理科学的新成就不断地推动着生命科学和医学的新发展。

医用物理实验课，既是医用物理学教学的重要组成部分，也由于它本身特有的目的和任务而具有相对的独立性。医用物理实验课的目的和任务是：

1. 通过实验，对学生进行实验方法和实验技能的基本训练，使之掌握与医学密切相关的物理量（如长度、质量、时间、角度、压强、电阻、电压、电流、电动势、光波波长、频率等）的测量原理和方法，正确与合理地使用仪器，为医学基础课和专业课的学习打下牢固的基础。

2. 培养并逐步提高学生观察和分析实验现象以及理论联系实际的工作能力，使学生进一步巩固和加深对物理规律和理论的理解。

3. 培养学生严肃认真的工作作风、实事求是的科学态

度和爱护国家财产、遵守纪律的优良品德。

为了完成以上任务，要求学生在实验前做好预习，并接受教师的考查，通过预习掌握实验中用到的基本原理，熟悉所用仪器各部分的作用。严格按照实验操作规程进行实验。在教师指导下，正确地安装并调试仪器。认真地记录所测得的数据，按照要求进行数据处理，得出实验结果，写出实验报告，并对实验结果进行分析和判断，找出产生误差的原因，总结经验教训，逐步提高实验技能。

二、测量与误差的基本知识

1． 测量及其分类：在进行物理实验时，不仅要定性地观察物理变化过程，而且要定量地测量物理量的大小。所谓测量，就是将待测量与同类量的标准单位进行比较，其倍数（可为整数也可为小数）即为该待测量的测量值。

测量可分为直接测量与间接测量。能够用仪表直接读出测量值的测量，称为直接测量（例如用直尺测量人的身高，用磅秤称量人的体重，用停表测量人的心率等）。许多物理量（如固体的体积、光波的波长等）没有直接读数用的仪表，只能用仪表测量一些必须的基本量，然后利用这些基本量，通过一定公式去计算待测量，这种测量称为间接测量。例如活人体内肝脏的大小，通常就是利用超声诊断仪进行间接测量的。

2． 误差及其分类：任何物理量所具有的客观的真实数值，称为该物理量的真值。在测量中，由于任何仪器的精度总有一定的限制，又由于不同的测量者的主观观察能力各有不同，还由于外界环境的偶然变化也会对测量产生一定影响，因此，任何测量值总是真值的近似值，测量值与真值

（或公认值）之差就是误差。任何测量总存在一定的误差。

根据误差的性质及产生的原因，可将误差分为系统误差和偶然误差。

系统误差的特征是其确定性，例如测量值总是有规律地比真值偏大，或总是比真值偏小。产生系统误差的原因主要有测量仪器的缺陷或调节不准（如砝码的质量不准、仪表的零点不准或零点漂移）；测量方法不佳（如公式的近似性较差，达不到理论要求的条件，测量中未考虑某些确定性因素如环境温度、接触电阻、空气浮力等的影响）以及测量者个人的生理和心理特点造成的读数总是偏大或偏小，系统误差应设法减小或消除。为此，应选用精度较高的仪器，改进实验的设计并改良测量者读数的习惯。

偶然误差的特征是其随机性，测量值比真值偏大偏小不定，但服从一定的统计规律。常见的情况是测量值比真值偏大或偏小的几率相等；小误差比大误差出现的几率大；绝对值很大的误差出现的几率小。产生偶然误差的原因主要有人们感观（如听觉、视觉、触觉等）的分辨力不尽相同，表现为每个人的估读能力不一致；周围环境因素的偶然变化（如环境温度、气流、气压等的波动，杂散电磁场的干扰）以及其它不可预测的次要因素的影响。偶然误差是不可避免的，也是无法控制的，但因为偶然误差的出现服从一定的统计规律，可以通过增加测量次数，取平均值的办法来减小偶然误差。

此外，实验方法错误、粗心大意或过度疲劳也会造成读数错误，这与测量误差是有根本区别的。这种错误应当而且能够通过采取严肃认真的态度、纠正实验方法、仔细认真地测量而加以克服。

3． 直接测量误差的估算

（1）单次直接测量的误差估算：在物理实验中，由于条件不许可，或测量准确度要求不高等原因，对一个物理量的直接测量只进行了1次。在这种情况下，可将仪器出厂检定书上的或仪器上直接注明的仪器误差作为单次测量的误差。如果没有注明仪器误差，也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。

（2）多次直接测量的算术平均值及误差：一般情况下，待测量的真值是不知道的。为了减小偶然误差，在可能的情况下，都要进行多次测量，计算多次测量的算术平均值。例如，在同样条件下对某物理量的n次测量值分别为X_1，X_2，$X_3 \cdots\cdots X_n$，用$\overline{X}$表示其算术平均值，则

$$\overline{X}=\frac{1}{n}(X_1+X_2+X_3+\cdots\cdots X_n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i \qquad (1-1)$$

根据误差的统计理论，多次测量的算术平均值最接近于真值，称为测量的最佳值或近真值。随着测量次数的增加，算术平均值愈来愈接近真值。在这种情况下，测定值的误差可用算术平均偏差或均方根偏差表示出来。现分述如下：

算术平均偏差是各次测量值与算术平均值之差（称为偏差）的绝对值的平均值。用ΔX表示算术平均偏差，则

$$\Delta X=\frac{1}{n}(|X_1-\overline{X}|+|X_2-\overline{X}|+|X_3-\overline{X}|+\cdots\cdots|X_n-\overline{X}|)$$

$$=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|X_i-\overline{X}| \qquad (1-2)$$

均方根偏差也称为标准偏差。将各次测量值与平均值的差值平方再求平均值，然后再开方就得到标准偏差。用σ表示标准偏差，则

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2} \qquad (1\text{-}3)$$

算术平均偏差与标准偏差都可作为测定值误差的量度。它们都表示在一组多次测量的数据中，各个数据之间分散的程度。如果算术平均偏差与标准偏差较大，则各数据之间差别较大，这说明测量不精密，偶然误差较大。

必须指出，误差是测量值与真值之差，而偏差是测量值与平均值之差，这两者是有区别的。但当测量次数很多时，在仪器精确可靠的条件下，算术平均值很接近于真值。我们不必去区分偏差与误差的细微差别，而把算术平均偏差、标准偏差分别称为算术平均误差与标准误差。

这样一来，我们就可把多次测量的测定值（即测量结果）X表示为

$$X = \overline{X} \pm \Delta X \text{ 或 } X = \overline{X} \pm \sigma \qquad (1\text{-}4)$$

式中，±号表示每次测量值可能比$\overline{X}$大一些，也可能比$\overline{X}$小一些。

上述算术平均误差或标准误差都是以误差的绝对值来表示测定值的误差，称为绝对误差。测量结果的精确程度不仅与绝对误差有关，而且与待测量本身的大小有关。为此引入相对误差的概念。用E_r表示相对误差。相对误差的定义为

$$E_r = \frac{\Delta X}{\overline{X}}$$

相对误差常用百分数来表示，即

$$E_r = \frac{\Delta X}{\overline{X}} \times 100\% \qquad (1\text{-}5)$$

故又称为百分误差。现举例说明相对误差的意义。用直尺测得某人的身高为$L_1 =$ （1.72 ± 0.005)m，他的食指的平均直

径（将食指横截面近似看作圆形）为$L_2=(0.02\pm0.001)m$。则其相对误差分别为

$$E_{r_1}=\frac{0.005}{1.72}\times100\%\doteq0.29\%$$

$$E_{r_2}=\frac{0.001}{0.02}\times100\%\doteq5\%$$

很显然，后者的绝对误差虽然比前者小，但其相对误差却比前者大很多。这说明前一个测量更准确些。

4． 间接测量的误差计算、误差的传递与合成

间接测得量是利用直接测得量通过一定公式计算出来的。既然公式中的直接测得量都是有误差的，那么间接测得量也必然有误差，这就是误差的传递与合成。

假设N为间接测得量，而X、Y、Z……为直接测得量，它们之间的关系为

$$N=f(X、Y、Z\cdots\cdots) \tag{1-6}$$

如果各直接测得量可表示为$X=\overline{X}\pm\Delta X$；$Y=\overline{Y}\pm\Delta Y$；$Z=\overline{Z}\pm\Delta Z\cdots\cdots$，将这些直接测得量代入公式，便可求得

$$N=\overline{N}\pm\Delta N,\quad E_r=\frac{\Delta N}{\overline{N}}$$

式中，$\overline{N}=f(\overline{X}、\overline{Y}、\overline{Z}\cdots\cdots)$为间接测得量最佳值（或算术平均值）；$\Delta N$为间接测得量算术平均误差。作为一个例子，现假设N与X、Y、Z的函数关系为

$$N=X\pm Y\pm Z$$

则有

$$N=(\overline{X}\pm\Delta X)\pm(\overline{Y}\pm\Delta Y)\pm(\overline{Z}\pm\Delta Z)$$

容易看出，平均值

$$\overline{N}=\overline{X}\pm\overline{Y}\pm\overline{Z}$$

绝对误差

$$\Delta N = \pm\Delta X \pm \Delta Y \pm \Delta Z$$

或

$$\Delta N = \pm\Delta X \mp \Delta Y \mp \Delta Z$$

考虑到最不利的情况可能出现的最大误差，则

$$\Delta N = \Delta X + \Delta Y \Delta \Delta Z \qquad (1-7)$$

由此可见，在和差运算时，间接测得量的绝对误差等于各直接测得量的绝对误差之和。

最大相对误差为

$$E_r = \frac{\Delta X + \Delta Y + \Delta Z}{\overline{X} \pm \overline{Y} \pm \overline{Z}} \times 100\% \qquad (1-8)$$

采用同样的方法，也可以求出一些其他运算关系的误差计算公式（见表1-1）。

在一般情况下，$N = f(X, Y, Z\cdots\cdots)$。测量误差的计算公式可由对函数的全微分求得

$$dN = \frac{\partial f}{\partial X}dX + \frac{\partial f}{\partial Y}dY + \frac{\partial f}{\partial Z}dZ + \cdots\cdots \qquad (1-9)$$

上式称为误差传递与合成的基本公式。式中，$\frac{\partial f}{\partial X}dX$、$\frac{\partial f}{\partial Y}dY$、$\frac{\partial f}{\partial Z}dZ$……各项叫做分误差；$\frac{\partial f}{\partial X}$、$\frac{\partial f}{\partial Y}$、$\frac{\partial f}{\partial Z}$……为一阶偏导数，也叫误差的传递系数；dN 相当于间接测得量的绝对误差。将上式中的dN、dX、dY、dZ……分别用ΔN、ΔX、ΔY、ΔZ……代替，并考虑到误差可能出现的最大值，右方各项均取绝对值，得绝对误差的传递合成公式为

$$\Delta N=\left|\frac{\partial f}{\partial X}\Delta X\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial Y}\Delta Y\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial Z}\Delta Z\right|+\cdots\cdots \tag{1-10}$$

若上式里误差传递系数中的X、Y、Z……分别用$\overline{X}$、$\overline{Y}$、$\overline{Z}$……代替，则得相对误差公式为

$$E_r=\frac{\Delta N}{\overline{N}}=\frac{1}{\overline{N}}\left(\left|\frac{\partial f}{\partial X}\Delta X\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial Y}\Delta Y\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial Z}\Delta Z\right|+\cdots\cdots\right) \tag{1-11}$$

在实际计算中发现，误差合成时起主要作用的常常只是其中一二项或少数几项分误差。当分误差对总误差的贡献很小时，例如占总误差的1/10以下，就可把这项分误差略去不计。考虑到这种情况，在实际测量时，对与主要分误差相关的直接测得量，也应有较高的精确度，对其它直接测得量，其精度要求可低一些。表1-1列出了常用函数的误差传递合成公式。

三、有效数字及其运算

1. 有效数字：由于测量误差的客观存在，在测量中从仪表直接读出的数据只能是近似值，通过这些近似值计算而求得的间接测量值也必然是近似值。只有按照一定的规则来表示和计算这些近似值，才能确切地表示记录和运算结果的近似性。

在测量中，从仪表读出的数字，通常都应估计到仪表最小刻度线的下一位。例如用最小刻度为厘米的直尺测量一个物块的长度（如图1－1所示），3个人分别读出3.4cm、3.3cm、3.5cm。前一位数是从直尺上直接读出的确切数字，称

表1-1　　常用运算关系的误差计算公式

运算关系 $N=f(X,Y,Z,\cdots\cdots)$	绝对误差ΔN	相对误差$E_r=\frac{\Delta N}{\overline{N}}$
$N=X+Y+Z+\cdots\cdots$	$\Delta X+\Delta Y+\Delta Z+\cdots$	$\frac{\Delta X+\Delta Y+\Delta Z+\cdots}{\overline{X}+\overline{Y}+\overline{Z}+\cdots\cdots}$
$N=X-Y$	$\Delta X+\Delta Y$	$\frac{\Delta X+\Delta Y}{\overline{X}-\overline{Y}}$
$N=X\cdot Y\cdot Z$	$\overline{Y}\cdot\overline{Z}\Delta X+\overline{X}\cdot\overline{Z}\Delta Y+\overline{X}\cdot\overline{Y}\Delta Z$	$\frac{\Delta X}{\overline{X}}+\frac{\Delta Y}{\overline{Y}}+\frac{\Delta Z}{\overline{Z}}$
$N=X^n$	$n\cdot\overline{X}^{n-1}\cdot\Delta X$	$n\frac{\Delta X}{\overline{X}}$
$N=\sqrt[n]{X}$	$\frac{1}{n}\overline{X}^{\frac{1}{n}-1}\cdot\Delta X$	$\frac{1}{n}\cdot\frac{\Delta X}{\overline{Y}}$
$N=\frac{X}{Y}$	$\frac{\overline{Y}\Delta X+\overline{X}\Delta Y}{\overline{Y}^2}$	$\frac{\Delta X}{\overline{X}}+\frac{\Delta Y}{\overline{Y}}$
$N=\sin X$	$(\cos X)\cdot\Delta X$	$(\mathrm{ctg}\overline{X})\cdot\Delta X$
$N=\cos X$	$(\sin X)\cdot\Delta X$	$(\mathrm{tg}\overline{X})\cdot\Delta X$
$N=\mathrm{tg}X$	$\frac{\Delta X}{\cos^2\overline{X}}$	$\frac{2\Delta X}{\sin 2\overline{X}}$
$N=\mathrm{ctg}X$	$\frac{\Delta X}{\mathrm{Sin}^2\overline{X}}$	$\frac{2\Delta X}{\sin 2\overline{X}}$
$N=\ln X$	$\frac{\Delta X}{\overline{X}}$	$\frac{\Delta X}{\overline{X}\ln\overline{X}}$

为可靠数字；第二位数是测量者估读出来的，因人而异，称为可疑数字。但它也在一定程度上反映了客观实际，也是有意义的。在它以下的各位数的估计就没有意义了。我们把在实际测量中读出的可靠数字和第一位可疑数字统称为有效数字。上述物块长度的测量值就包含两位有效数字，测量误差在0.1cm以内。

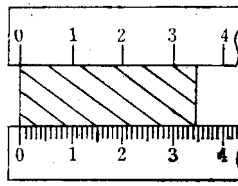

图1-1 长度的测量

与此同时，如果用最小刻度为毫米的直尺测量上述物块的长度，则可读出3.42cm、3.43cm、3.44cm。很显然，前两位数为可靠数字，第三位为可疑数字，共有3位有效数字，测量误差在0.01cm以内。由此可见，后一种测量比前一种的准确度更高，它与所用测量仪器的精度有直接关系。

因为有效数字的位数与测量的准确度有关，所以在对测量值作单位变换时，有效数字的位数不应改变，即与小数点的位置无关。例如把8.42cm换成以微米为单位时，不应该写成为84200μm，因为这增加了有效数字的位数，应该用科学计数法写成8.42×10^4μm，仍然保持3位有效数字。同样，把8.42cm换成以米为单位时，不应写成0.0842m，而应写成8.42×10^{-2}m，在小数点前一律取1位有效数字。如果在实际测量中得到的数字的中间或最后1位甚至几位都是“0”，则这些“0”都是有效数字（例如12.00cm），这些“0”表示了测量的准确程度，因而是不能任意增减的。

2. 有效数字与误差的关系：根据有效数字的定义，有效数字的最后一位是存在误差的可疑数字，因而测量结果的有效数字的位数完全取决于绝对误差的大小。在一般情况