高等学校教材

物理实验

辽宁民族出版社

编者的话

本教材是根据全国高等农林院校物理实验课教学基本要求编写的，是高等农林院校各专业物理实验课的通用教材。重点突出、简明扼要是本书的特点。

参加编写本书的有闫祖威、姚虹、孔生贵、么强、马书申和巴图宝力格。

肖蜀樨副教授对本书进行了全面的审定。

辽宁民族出版社特邀编审安振邦同志为本教材的出版给予了大力支持，内蒙古农牧学院教务处在发行过程中作了大量的工作，在此一并表示衷心的感谢。

欢迎各位读者对本书批评指正。

编　者

1995 年 2 月

目　录

实验者须知

1. 实验前必须预习实验讲义，写好预习报告或划好数据记录表格。

2. 必须保持实验室环境的肃静和整洁。

3. 未了解仪器性能切勿动手。使用仪器时要严守仪器的操作规程，不可以擅自拆卸仪器与动用它组仪器。由于违反操作规程导致仪器损坏，应酌情赔偿。

4. 做电学实验时，线路接完，须请教师检查后方可接通电源。

5. 实验数据测完，交给教师审阅通过后，再将仪器整理好，方可离开实验室。

6. 实验指导教师在离开实验室前，必须关闭电源、水源及门窗。

物理实验课的目的及各实验环节的要求

物理学本质上是一门实验科学。物理规律的发现和物理理论的建立，都必须以严格的物理实验为基础，并受到实验的检验。物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动和密切结合下进行的。因此，在学习物理学时，要正确处理好理论课和实验课的关系，不可偏废于某一方。

普通物理实验是学生进入大学后受到系统的实验技能训练的开端，是后续实验的基础，它在培养学生分析问题、解决

问题和动手能力方面有着重要的作用。

一、物理实验课的目的

1. 培养学生在实验方法、测量技能、数据处理等方面的独立工作能力。

2. 培养并逐步提高学生观察和分析实验现象的能力以及理论联系实际的独立工作能力。通过实验的观察、测量和分析,加深对物理学的某些概念、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公物、遵守纪律的优良品德。

二、物理实验课各个环节的要求

1. 作好实验前的预习。预习的要求是理解本次实验的目的和原理。弄清实验中要测哪些物理量及用什么仪器测量。预习时要划好数据表格,并标明符号所代表的物理量及单位。

2. 进行实验

教师应向学生做必要的讲解,以保证在规定的时间内,高质量安全地完成实验课的任务。

学生开始实验时还要熟悉仪器,进一步了解仪器的工作原理和使用方法,然后将仪器安装调整好。

实验数据一定要真实可靠。实验数据有效数字的位数由所用仪表的最小刻度值来确定。数据测全后交指导教师审阅。若有错漏,要及时重测或补测。

3. 写实验报告

实验报告是实验工作的总结,通常包括以下几个部分:(1) 实验名称;(2) 实验目的;(3) 简要原理或计算公式;(4)

所用仪器和设备；(5) 原始数据表格及数据处理；(6) 误差分析、问题讨论、心得体会以及改进建议等。

实验报告要独立完成，按时交给教师批阅。

绪　论

一、测量和误差

测量分直接测量和间接测量两种。用测量仪器直接测出待测物理量的测量称为直接测量，相应的物理量称为直接测得量，简称直测量。例如，用刻度尺量长度，用天平称质量，用温度计测温度，用停表记时间以及用电表读出安培数、伏特数等都是直接测量。然而，对于更多的物理量来说，没有供直接测量的仪表，只能测量与它有关的一个或多个量，根据公式经过运算才能求得要测的物理量。例如，直接测量金属板的长 a、宽 b、厚 c 以及质量 M，就可以从 $\rho=\frac{M}{abc}$ 的公式算出该金属板材料的密度 ρ。对于 ρ 这个量的测量称为间接测量，物理量 ρ 称为间接测得量，又称“待测量”。

物理量在客观上有确定的真实数值，称为真值。测量的目的就是要力图得到真值。但是测量总是真值的近似值，测量总存在一定的误差。

误差产生的原因是多方面的。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”两大类。

1. 系统误差产生的原因是(1)仪器不够精密或安装调整不妥；(2)实验理论和方法不完善；(3)环境的改变以及个人的习惯和偏向等引起的误差。系统误差的特点是有规律性的，测量值要么都大于真值，要么都小于真值。应查找原因，采取针对性措施来消除系统误差。

2. 偶然误差来源于人的感官灵敏度的限制以及无法估量

的环境的影响。这种误差的特点是其随机性，它是无法控制的，但它的出现服从以下统计规律：(1) 绝对值相等的正负误差出现的机会相等；(2) 绝对值较小的误差比绝对值较大的误差出现的机会要多。因此在一定的测量条件下，偶然误差总有一定的范围，通过多次测量求算术平均值的方法，可以减少偶然误差。

需要强调的是：在整个测量过程中，除了上述两种性质的误差外，还可能发生读数、记录上的错误，仪器损坏及操作不当等造成的测量上的错误。错误不是误差。错误是不允许存在的，同时也是完全可以事先发现和避免的。

在下面的讨论中，假定系统误差已经修正或消除，只存在偶然误差的情况。

二、有效数字及其运算

1. 有效数字的一般概念

例如，我们用毫米尺测量一个物体的长度，读出物体的长度为 32.31cm，如图 1 所示。这个读数的前三位 32.3cm 是直接从刻度尺上准确读出的，称为准确数字或可靠数字，而最末一位 0.01cm 则是从尺上最小刻度之间估计来的，称为欠准数字或可疑数字。把准确数字与欠准数字加起来就称为有效数字。所以该物体的长度 32.31cm 是四位有效数字。测量误差出现在欠准数字的那一位上。如果用比毫米尺更精密的游标尺测量该物体的长度，可得五位有效数字。各个数据的最后一位都是欠准数字。由此可见，使用不同的仪器去测量同一个物理量，可得不同位数的有效数字。仪器越精密，有效数字的位数越多，结果也越接近于真值。

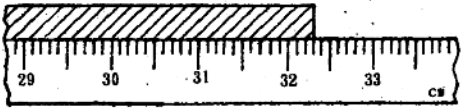

图1　有效数字的读法

用有效数字读数或记录时必须注意三点：

(1) 一般应估读到仪器的最小刻度的后一位，这是读数的基本规则。

(2) 有效数字和小数点的位置无关，和单位变换无关。例如，$24.6\text{mm} = 2.46\text{cm} = 2.46 \times 10^{-2}\text{m} = 2.46 \times 10^{-5}\text{Km} = 2.46 \times 10^{4}\mu\text{m}$，都是三位有效数字。用10的方幂来表示其数量级，前面是有效数字（小数点前取一位数字），这种形式称为标准形式。

(3) 小数点前出现的"0"和它之后紧挨着的"0"是不算作有效数字的。例如，某物体的质量为0.08020kg，是四位有效数字，写成标准形式为$8.020 \times 10^{-2}\text{kg}$。

2. 数字的舍入规则

为了保持各数据有相同的有效位数或计算中的其它需要，数据中多余的位数需要舍入。过去一般采用四舍五入规则，但是这种规则使入的数字比舍的数字多一个，造成处理后的数据偏大，这种因舍入带来的误差也是一种系统误差。为了消除这一缺陷，应采用如下的舍入规则：

(1) 若舍去部分的数值小于所保留数值末位的半个单位，末位数不变。

(2) 若舍去部分的数值大于所保留数值末位的半个单位，则末位数加 1。

(3) 若舍去部分的数值恰好等于所保留数值末位的半个单位，当末位数是偶数时，保持不变；为奇数时，末位加 1。

按上述规则，将下列数值取四位有效数字，得到

$$4.32749 \rightarrow 4.327$$

$$4.32751 \rightarrow 4.328$$

$$4.32750 \rightarrow 4.328$$

$$4.32850 \rightarrow 4.328$$

3. 有效数字的运算规则

例题中数字下面有“—”的表示欠准数字。

(1) 加减法

例如

$$\begin{array}{r} 20.\underline{1} \\ +\ 4.178 \\ \hline 24.\underline{278} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 19.6\underline{8} \\ -\ 5.848 \\ \hline 13.8\underline{32} \end{array}$$

记作：

$$24.\underline{3} \qquad 13.8\underline{3}$$

可见；运算结果的有效数字的最后一位是保留了各量中最大欠准数字的那一位。事实上，若先把各量按舍入规则整理，保留到最大欠准数字的那一位，就能简化手续，同样获得合理的结果。上例中，$20.1 + 4.178 = 20.1 + 4.2 = 24.3$；$19.68 - 5.848 = 19.68 - 5.85 = 13.83$。

(2) 乘除法

例如：$121.24 \times 12.4 = 121 \times 12.4 = 1.50 \times 10^3$。运算结果的有效数字和各量中有效数字位数最少的相同。

(3) $\sqrt{A}$、$\lg A$、$\sin A$ 等函数的有效数字一般和 A 的位数相同。

例如：$\sqrt{3.14}=1.77$；　　$\lg 3.14=0.497$；

$\sin 28.75°=0.4810$。

(4) 在乘除运算中遇到无理数(如 π，$\sqrt{2}$ 等)，它取的位数比其余各数中位数最少的多一位，而最后运算结果的位数，仍由乘法规则确定。例如：测得圆的直径 $d=4.0\text{cm}$，圆的面积 $S=\pi(\frac{d}{2})^2=3.14\times 2.0^2=13\text{cm}^2$，$S$ 的有效数字与 d 的有效数字的位数相同。

(5) 在上面的举例如中，由直径 d 求半径 R 时，$R=\frac{d}{2}$ 中出现的 $\frac{1}{2}$ 不是由测量得来的，因此不适用于有效数字的运算规则。运算结果的有效数字位数，由别的测量值的有效数字位数的多少来决定。类似于 $\frac{1}{2}$ 的这类特定的数，叫**正确数**。

三、直接测量的误差估算

1. 算术平均值

如果在相同条件下对某物理量进行了 n 次重复测量，其测量值分别为 $N_1, N_2, \cdots\cdots N_n$，用 $\overline{N}$ 表示它们的算术平均值，

则 $$\overline{N}=\frac{1}{n}(N_1+N_2+\cdots\cdots+N_n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}N_i \qquad (0—1)$$

根据误差统计理论，在一组 n 次测量的数据中，**算术平均值最接近于真值，称为测量的最佳值或近真值**。当测量次数无限增加时，算术平均值就无限接近于真值。

2. 平均绝对误差

算术平均值和各次测量值的差的绝对值，称为各次测量的绝对误差，即

$$\Delta N_1 = |\overline{N} - N_1|, \quad \Delta N_2 = |\overline{N} - N_2|, \cdots\cdots$$
$$\Delta N_n = |\overline{N} - N_n|。$$

各次测量值的绝对误差的算术平均值称平均绝对误差，简称绝对误差，可表示为

$$\Delta N = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |\Delta N_i| \qquad (0\text{—}2)$$

根据统计理论可以证明：如果测量次数很多，真值与平均值之差超过 ΔN 的机会是很少的。可以认为真值在 $\overline{N} - \overline{\Delta N}$ 与 $\overline{N} + \Delta N$ 之间，所以把实验结果写成

$$N = \overline{N} \pm \Delta N \qquad (0\text{—}3)$$

例如测量某物体的长度，得到其算术平均值为 $\overline{L} = 42.8\text{mm}$，绝对误差 $\Delta L = 0.2\text{mm}$，测量结果应表示为 $\overline{L} \pm \Delta L = 42.8 \pm 0.2\text{mm}$，说明被测物体长度的真值在 42.6mm 与 43.0mm 之间。

有时被测物理量不可能在同样条件下进行多次重复测量，或者因要求不高而没有必要进行多次测量，此时可以根据仪器的**分度值**(即最小刻度)来估计偶然误差。一般取 ΔN 为仪器分度值的 $\frac{1}{2}$、$\frac{1}{5}$ 或 $\frac{1}{10}$，视实验条件和观察者的经验不同而异。在一些情况下，也有把仪器的分度值作为单次测量的误差，例如分度值为 0.02mm 的游标尺，一次测量某物体的长度为 5.75mm，则测量结果可表示为 $L = 5.75 \pm 0.02\text{mm}$。

3. 标准误差(方均根误差)

标准误差的定义是

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(N_i - N')^2} \qquad (0—4)$$

式中 N' 是真值，而真值仍是未知的，因此标准误差仍无法从 (0—4) 获得。可以证明标准误差可用下式计算，下式中 $\overline{N}$ 是 n 次测量的算术平均值。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n}(N_i - \overline{N})^2\right]} \qquad (0—5)$$

为了方便起见，上式可直接用测量值来表示标准误差（推导略去）

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}N_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}N_i\right)^2}{n}}{n-1}} \qquad (0—6)$$

4. 相对误差（又叫百分误差）

为了评价测量结果的准确程度，还需要看测量值本身的大小，为此引入相对误差。

标准相对误差 $\qquad E_\sigma = \frac{\sigma}{\overline{N}} \times 100\% \qquad (0—7a)$

平均相对误差 $\qquad E = \frac{\Delta N}{\overline{N}} \times 100\% \qquad (0—7b)$

式中 $\overline{N}$ 是 n 次测量的算术平均值，σ 是标准误差，ΔN 是绝对误差。

例如，测得两个物体的长度分别为 $L_1 = 23.50 \pm 0.02\text{mm}$，$L_2 = 2.35 \pm 0.02\text{mm}$，它们的标准误差都是0.02 mm，但相对误差大不相同。可知

$$E_1 = \frac{0.02}{23.50} \times 100\% = 0.08\%$$

$$E_2 = \frac{0.02}{2.35} \times 100\% = 0.8\%$$

显然;对 L_1 的测量要比对 L_2 的测量准确得多。

四、间接测量误差的估算

由于间接测量的值是由直接测量的值计算而得,既然直接测量的值有误差,那么间接测量的结果也一定有误差。设 N 为间接测得量,A、B、C、…… 为直接测得量,它们之间满足一定的关系,即 $N = f(A、B、C……)$。将各直接测得量表示为 $A = \overline{A} \pm \Delta A, B = \overline{B} \pm \Delta B, C = \overline{C} \pm \Delta C……$,待测量 N 的平均值 $\overline{N}$ 为

$$\overline{N} = f(\overline{A}, \overline{B}, \overline{C}, \cdots\cdots) \tag{0—8}$$

1. 间接测得量的平均绝对误差的计算

平均绝对误差简称为绝对误差,用 ΔN 表示之。其基本计算方法就是求函数的全微分,而且选择误差最大的值。下面举几例加以说明。

(1) 加、减法 $\quad N = A \pm B$

求全微分,且考虑误差最大的情况,则有

$$\Delta N = \Delta A + \Delta B$$

相对误差为

$$E = \frac{\Delta A + \Delta B}{\overline{A} \pm \overline{B}} \times 100\%$$

(2) 乘法 $\quad N = A \cdot B$

用微分法很容易得到平均绝对误差为

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

相对误差为

$$E = \frac{\Delta N}{\overline{N}} \times 100\% = (\frac{\Delta A}{\overline{A}} + \frac{\Delta B}{\overline{B}}) \times 100\%$$

(3) 除法 $\quad N = \frac{A}{B}$

用微分法求得 $\Delta N = \dfrac{\overline{B} \cdot \Delta A + \overline{A} \cdot \Delta B}{\overline{B}^2}$

相对误差则为 $E = (\dfrac{\Delta A}{\overline{A}} + \dfrac{\Delta B}{\overline{B}}) \times 100\%$

可见，和差的运算中，绝对误差等于直接测得量绝对误差之和；乘除运算的相对误差等于各个直接测得量相对误差之和。所以，计算间接测得量的公式中最后运算是乘除，则先求相对误差 E，然后求绝对误差 ΔN 较方便。

总之，用微分法可导出任何间接测得量的绝对误差公式，这里就不再举例详说了。为了方便，现将常用运算关系的误差计算公式列表供查找。

表一 常用运算关系的绝对误差和相对误差计算公式

测量关系 $N = f(A, B, \cdots)$	N 的误差	
	绝对误差 ΔN	相对误差 $E = \dfrac{\Delta N}{N}$
$N = A \pm B$	$\Delta A + \Delta B$	$\dfrac{\Delta A + \Delta B}{A \pm B}$
$N = AB$	$B\Delta A + A\Delta B$	$\dfrac{\Delta A}{A} + \dfrac{\Delta B}{A}$
$N = A^m$	$mA^{m-1}\Delta A$	$m\dfrac{\Delta A}{A}$
$N = \sqrt[m]{A}$	$\dfrac{1}{m}A^{\frac{1}{m}-1}\Delta A$	$\dfrac{1}{m} \cdot \dfrac{\Delta A}{A}$
$N = \dfrac{A}{B}$	$\dfrac{1}{B^2}(B\Delta A + A\Delta B)$	$\dfrac{\Delta A}{A} + \dfrac{\Delta B}{B}$
$N = \sin A$	$\cos A\Delta A$	$\cot A\Delta A$
$N = \cos A$	$\sin A\Delta A$	$\tan A\Delta A$
$N = \cot A$	$\dfrac{\Delta A}{\sin^2 A}$	$\dfrac{2\Delta A}{\sin 2A}$
$N = \tan A$	$\dfrac{\Delta A}{\cos^2 A}$	$\dfrac{2\Delta A}{\sin 2A}$

2. 间接测得量的标准误差的计算

上述绝对误差的计算是考虑各项误差同时出现最不利情况时，即都取绝对值相加而得到的。实际上，出现这种情况的几率不大，因而有些夸大了间接测量值的误差。若采用标准误差系统，可以严格证明出，间接测量值的标准误差公式为（推导过程附在"绪论"的后面）

$$\sigma = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial A})^2\sigma_A^2 + (\frac{\partial f}{\partial B})^2\sigma_B^2 + (\frac{\partial f}{\partial c})^2\sigma_c^2 + \cdots}$$

式中σ为间接测量值的标准误差，σ_A、σ_B、σ_C……分别为直接测量值A、B、C……的标准误差，$\frac{\partial f}{\partial A}$、$\frac{\partial f}{\partial B}$、$\frac{\partial f}{\partial C}$……分别为函数$N = f(A、B、C、\cdots\cdots)$对$A$、$B$、$C$……的偏导数，并以$\overline{A}$、$\overline{B}$、$\overline{C}$……代入求其值。这个标准误差的公式，更真实地反映了各直接测量值的误差对间接测量值的贡献，称为**误差传递公式**，在正式的误差分析和计算中，都采用这个公式。

函数N的标准相对误差公式为

$$E = \frac{\sigma}{\overline{N}} = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial A})^2(\frac{\sigma_A}{\overline{N}})^2 A + (\frac{\partial f}{\partial B})^2(\frac{\sigma_B}{\overline{N}})^2 + (\frac{\partial f}{\partial C})^2(\frac{\sigma_C}{\overline{N}})^2 + \cdots} \quad (0-9)$$

表二　常用函数的标准误差传递公式

测量关系 $N=f(A,B,\cdots)$	标准误差传递公式
$N=A+B$	$\sigma=\sqrt{\sigma_A^2+\sigma_B^2}$
$N=A-B$	$\sigma=\sqrt{\sigma_A^2+\sigma_B^2}$
$N=kA$	$\sigma=k\sigma_A$ ，$\frac{\sigma}{N}=\frac{\sigma_A}{A}$
$N=\sqrt[k]{A}$	$\frac{\sigma}{N}=\frac{1}{k}\frac{\sigma_A}{A}$
$N=AB$	$\frac{\sigma}{N}=\sqrt{(\frac{\sigma_A}{A})^2+(\frac{\sigma_B}{B})^2}$
$N=\frac{A}{B}$	$\frac{\sigma}{N}=\sqrt{(\frac{\sigma_A}{A})^2+(\frac{\sigma_B}{B})^2}$
$N=\frac{A^kB^m}{C^n}$	$\sqrt{k^2(\frac{\sigma_A}{A})^2+m^2(\frac{\sigma_B}{B})^2+n^2(\frac{\sigma_c}{C})^2}$
$N=\sin A$	$\sigma=\lvert\cos A\rvert\sigma_A$
$N=\ln A$	$\sigma=\frac{\sigma_A}{A}$

3. 间接测得量的表示

最后测得的结果应该表示为

$$N=\overline{N}\pm\Delta N \tag{0—10}$$

上式中 ΔN 是绝对误差。若用标准误差，则是

$$N=\overline{N}\pm\sigma \tag{0—11}$$

〔例题〕　测一圆柱体的直径 d，长度 l 和质量 m，求其密