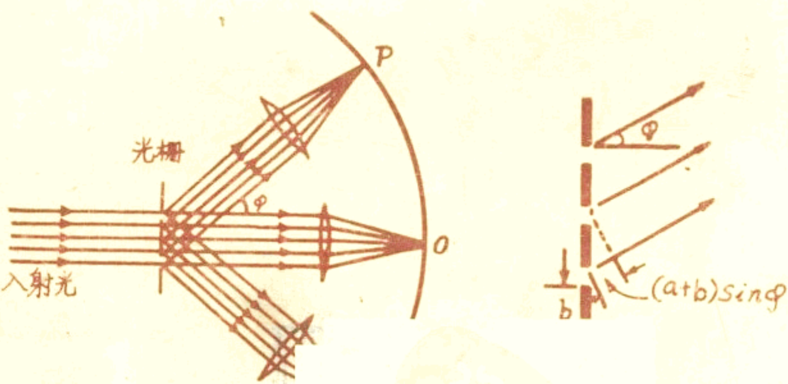
成人高等学校教学参考书

普通物理实验

袁必成　袁钢强　吴贤林　编



中南工业大学出版社

前　　言

成人高等院校的普通物理实验教材，过去一般采用的是本科院校的实验讲义，其内容和深度都不完全适宜。近几年来，成人高等教育发展很快，编写一本适合成人大学生使用的《普通物理实验》教学用书，是非常需要的。

本书充分注意了成人高校实验教学的下述特点：实验学时较少，但教育行政部门的要求逐年提高；设备有限，但仪器较新；中学实验基础较差，但学生动手能力和求知欲望较强，等等。为此，本书打破了物理实验教材传统的编写方式，除绪论和附录以外，将实验分为三部分：第一部分有力、热、电、光共九个基础实验，组成一个大循环。实验起点较低，所需仪器价格便宜，而实验方法和数据处理则完全按照高等工科院校来要求。对于中学实验基础较差，或仪器设备经费不足的学校，做完这九个实验，再选做两、三个其他实验，可以达到教学大纲规定的基本要求。第二部分包括十一个主要实验，起点较高，使用的仪器也比较精密，做完这些实验就完全达到了教学大纲的要求。或者，根据具体情况，从第一、二部分实验中，选做十个左右的实验也可以达到教学大纲的要求。第三部分包括四个综合实验和近代物理实验，有条件的院校可以让学生选作或参观，使学生获得对近代物理的一些感性认识，以便扩大学生的眼界。

对于实验数据处理的基本理论，本书不仅在绪论中作了简明扼要的讲解，而且在每个实验中都提出了数据处理的要求。由于均方根误差在科技领域里广泛地被采用，本书还安

排了两个实验计算均方根误差，这在工科物理实验中是一种尝试。做完第一部分或第二部分实验，学生便可以掌握绪论中介绍的各种数据处理的方法，这样做对后续实验课程的学习和学生将来从事科技工作都是很有必要的。

在编写的过程中，我们参考了兄弟院校的实验讲义。吴贤林编写绪论、实验一、二、五、八、十、十一、十三、十八、二十一；袁必成编写实验三、四、七、九、十二、十四、十七、十九、二十二；袁钢强编写实验六、十五、十六、二十、二十三、二十四。最后进行了集体统稿。

北京钢铁学院李化平副教授担任本书的主审；中南工业大学贺锡纯副教授在编写过程中给予了指导并对部分内容进行了审阅；江南机器厂职工工学院孔俊杰、株洲市职工大学周纪良提出过宝贵的意见；梁源绘制了大部分插图；长沙市教育印刷厂在短的时间内印制出书。在此，我们一并表示诚挚的谢意！

由于我们水平不高，经验不足，缺点错误一定不少。欢迎读者提出批评，以便在有机会重印时修改。

编　者

一九八五年十二月

目　　录

第一部分　基础实验

第二部分 主要实验

第三部分 选作实验

附　　录

绪 论

高等院校培养人才是通过多种教学形式实现的。在许多发达的国家，把实验教学、课堂教学、毕业论文视为教学的“三鼎足”。大学生入学以后约有三分之一的学时搞实验，而普通物理实验，是每一个学习理、工、农、医的学生都必须吃足的“基本口粮”。

当代著名的物理学家、诺贝尔奖金获得者丁肇中说过：“自然科学的理论离不开实验的基础，特别是物理学，是从实验产生的。”正因为这样，物理实验课具有相对的独立性，一些高等院校已将物理实验单独设课，而且作为一门考试课程。教育部规定，从一九八四年起有关专业招研收究生，要考物理实验。为什么把物理实验的位置摆得如此重要呢？这是因为，物理实验对培养合格的科学技术人才所起的作用，是理论课无法代替的。

物理实验课的重要性，归纳起来有以下几点：

1.通过观察、测量和分析，加深对物理概念和理论的认识，培养学生理论联系实际的能力。

2.训练学生进行科学实验和独立工作的初步能力。包括学会一定的测试手段，正确使用仪器，合理设计实验，学会数据处理等实际工作能力。

3.培养学生严肃认真的工作作风和实事求是的科学态度。

为了做好物理实验，首先要学习处理实验数据的基本理论。

一、测量与误差的基本概念

(一)测量

在普通物理实验过程中，要对各个物理量进行测量，以便定量地研究它们之间的关系。所谓测量，就是将被测物理量同用作标准的同类物理量进行比较，看被测物理量是用作标准的物理量的多少倍。

按测量的方式分，测量可以分为直接测量和间接测量。直接测量是指仪器能直接测出被测物理量大小的测量；间接测量是指不能用仪器直接测出被测量的大小，而需要借助物理公式进行计算才能得到被测量大小的测量方法。

按测量条件分，测量可以分为等精度测量和不度等精测量。等精度测量，是指多次重复测量时，条件不变的测量；不等精度测量，是指多次重复测量时，有一个或几个条件发生变化的测量。

(二)误差

在常温常压下，当我们对某一物理量进行测量时，该物理量客观上存在着一个恒定不变的数值，称为真实值或真值。测量的任务就是力图要测得真值。

但是，由于种种原因，测量的结果只能是真值的近似值。我们把测量值与真值之差称为测量误差或误差。如果以 N' 表示真值，以 N_i 表示第 i 次测量值，那么第 i 次测量误差 $\Delta' N_i$ 定义为：

$$\Delta' N_i = N_i - N' \qquad (0—1)$$

由（0—1）式定义的误差，反映了测量值偏离真值的大小和方向，因而也叫绝对误差。

根据误差的性质和产生的原因，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，即在相同的实验条件下进行测量时，每次的测量值总是比真值偏大或偏小某一固定的数值。仪器的缺陷、个人的习惯、理论的近似值等都会引起这种误差。为了消除系统误差，在设计实验时应加以周密考虑，做实验后应作出估计。

偶然误差的特性是其随机性，即进行等精度测量时，各测量值有的比真值偏大，有的偏小，似乎毫无规律。人们感觉器官分辨能力的不同、外界环境的干扰等，都是产生偶然误差的原因。偶然误差是无法控制的，但若测量的次数很多以至可以看成无穷多，偶然误差将服从正态分布（高斯分布）。如果以×轴代表误差，Y轴代表某一测量值出现的次数K，则可以得到偶然误差密度分布函数曲线(图0—1)。显然，偶然误差有如下的特点：

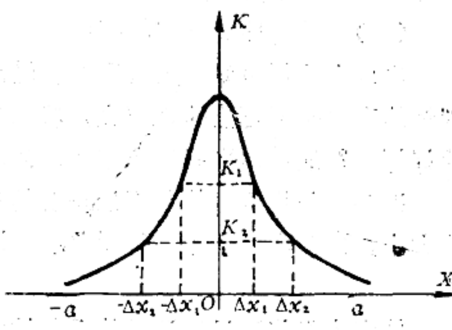


图 0—1

1.有界性：对在一定条件下的有限次测量值中，其偶然误差的绝对值不会超过一定的界限，即$-a<\Delta X<a$。

2.单峰性：绝对值小的误差出现的次数，比绝对值大的误差出现的次数多。如图$|\Delta X_1|<|\Delta X_2|$，则$K_1>K_2$。

3.对称性：绝对值相等而符号不同的误差，出现的次数大致相等。

4.抵偿性：同样条件下对同一量进行测量，其偶然误差

的算术平均值，随着测量次数K的无限增加而趋向于零，即

$$\lim_{K\to\infty}\frac{\sum_{i=1}^{K}\Delta' N_i}{K}=0 \qquad (0-2)$$

抵偿性是偶然误差最本质的特征，因此，增加测量次数对减小偶然误差有利。但是，测量次数不可能做到无穷多，误差将存在于一切测量过程中。

至于因仪器的损坏、设计或读数错误、操作不当等造成的测量错误，不是测量误差，应当在实验中避免。

（三）测量的准确度与精密度

由以上分析可知，用有限的测量次数准确地测量一个物理量的真值是不可能的。那么，我们怎样评价一个测量结果的好坏呢？通常用准确度和精密度来表达。

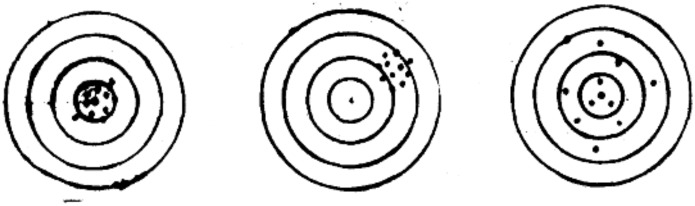
准确度是指测量值与真值符合的程度，它反映系统误差的大小。准确度高表示系统误差小，即测量值与真值的误差小。

精密度是指测量所测数值重复性的好坏，它反映偶然误差的大小，精密度高表示偶然误差小，即测量重复性好。

精确度表示准确度与精密度的综合情况，只有准确度与精密度都高的结果，才是最好的测量结果。

为了形象地说明精密度与准确度的区别，可以用图0—2来说明。同心圆的圆心表示待测量的真值，各小黑点“·”表示测量值。图0—2（a）表示测量的精密度与准确度都很好，亦即精确度高；图0—2（b）表示测量值偏在一边，但分散性很小，表示精密度高，但准确度差。图0—2（c）则

表示测量值很分散，精密度与准确度都不好。



（a）　　　　（b）　　　　（c）

图 0—2

二、直接测量结果的表示

前面讲过，增加测量次数对减少偶然误差有利。下面证明，当测量次数趋于无穷大时，多次测量的算术平均值等于待测量的真值。

设 N' 表示某一待测量的真值，如果对它测量了 K 次，各次测量值为：N_1，N_2，……，N_K；各次测量值的偶然误差为：

$$\triangle' N_1 = N_1 - N',\ \triangle' N_2 = N_2 - N',\ \cdots\cdots,$$
$$\triangle' N_K = N_K - N'$$

各次测量值可以表示为：

$$N_1 = N' + \triangle' N_1,\ N_2 = N' + \triangle' N_2,\ \cdots\cdots,$$
$$N_K = N' + \triangle' N_K$$

又 K 次测量的算术平均值为：

$$\overline{N} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{K} N_j}{K} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{K} (N' + \triangle' N_j)}{K} = N' + \frac{\sum\limits_{i=1}^{K} \triangle' N_j}{K}$$

当测量次数 $K \to \infty$ 时，有：

$$\overline{N}=N'+\lim_{K\to\infty}\frac{\sum_{i=1}^{K}\Delta' N_i}{K}=N' \qquad (0-3)$$

实际上测量次数总是有限的，故$\overline{N}\neq N'$。但根据统计理论证明，多次测量的算术平均值是这一系列测量值中的最佳值，即算术平均值是真值的最佳近似值，因而用它来表示这一系列测量的结果是合理的。但是，用算术平均值作为测量值结果的可靠程度究竟如何呢？我们总是用偶然误差的大小来表示测量结果的精确度。因为，在消除了系统误差的前提下，如果多次测量值相互差异大，那么测量就不精密，偶然误差就大，结果的可靠程度就低。反之，如果各次测量值相互差异小，偶然误差就小，结果的可靠程度就高。

一列多次测量的偶然误差，一般包括两方面：

1.多次测量的平均绝对误差或均方根误差

设对某量作了K次测量，得到一列测量值：N_1，N_2，……，N_K。我们将测量值与算术平均值之差称为偏差。因为算术平均值是真值的最好近似值，通常我们将偏差就称为误差。用ΔN_1，ΔN_2，……，ΔN_K表示各测量值与算术平均值之差的绝对值，有：

$$\Delta N_1=|N_1-\overline{N}|,\ \Delta N_2=|N_2-\overline{N}|,\ \cdots\cdots,$$
$$\Delta N_K=|N_K-\overline{N}|$$

取它们的算术平均值，以$\overline{\Delta N}$表示：

$$\overline{\Delta N}=\frac{\sum_{i=1}^{K}\Delta N_j}{K}=\frac{\sum_{i=1}^{K}|N_j-\overline{N}|}{K} \qquad (0-4)$$

称$\overline{\Delta N}$为平均绝对误差，它是对测量结果可靠性的一种估计方法。

但是，$\overline{\Delta N}$随K的变化而变化，而且对于不等精度测量的两列数据可能算出相同的$\overline{\Delta N}$以及其他缺点，所以，在工程技术和科学研究中，为了更准确地表示测量误差，普遍采用的是均方根误差。均方根误差的定义式是：

$$\sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^{K}(N_i-\overline{N})^2\Big/K} \qquad (0-5)$$

对于K次测量中某一次测量值的均方根误差用下式计算：

$$\sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^{K}(N_i-\overline{N})^2\Big/K-1} \qquad (0-6)$$

统计理论可以证明，K次测量结果的算术平均值的均方根误差

$$\sigma_{\overline{K}}=\frac{\sigma}{\sqrt{K}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{K}(Ni-\overline{N})^2\Big/K(K-1)} \qquad (0-7)$$

统计理论还可以证明，当测量次数K很多时，σ与$\overline{\Delta N}$之间有如下的关系：

$$\sigma=1.25\overline{\Delta N} \qquad (0-8)$$

由于均方根误差具有很多优点，人们又叫它做标准误差。但是它的计算比较复杂，我们只在个别实验中要求计算标准误差，以便了解这类误差的计算方法。

2.仪器的等级误差

仪器的等级误差，是指在正确使用仪器的情况下，仪器的指示数和被测量的真值之间，可能产生的最大误差。它的数值通常由制造厂或计量机关经过检定而给出。凡是测量都要使用仪器，仪器误差在测量中是无法避免的，因此通常作

为偶然误差来考虑。

仪器误差决定于仪器的精确度。某种仪器的精确度是指仪器标尺上最小一个分格的大小。仪器误差通常用仪器精确度的一半或仪器上标出的精度等级来表示。例如，钢板尺的仪器误差$\triangle L_{仪}=0.5\text{mm}$，电表的仪器误差$\triangle I_{仪}=A_m\cdot K\%$，其中$A_m$是m挡的量限，$K$是该表的精度等级——通常在仪器上已经标出。

考虑到仪器的等级误差和测量误差，测量结果最大误差$\triangle N$通常表达为

$\triangle N=\triangle N_{仪}$（仪器精度较低，或测量次数很少）

$\triangle N=\begin{cases}\overline{\triangle N}\\ \sigma\end{cases}$（仪器精度较高，或测量次数很多）

测量结果的表达式通常写为

$$N=\overline{N}\pm\triangle N \qquad (0-9)$$

$$N=\overline{N}\pm\sigma \qquad (0-10)$$

它表示被测量的真值一般在（$\overline{N}+\triangle N$）与（$\overline{N}-\triangle N$）之间，或者在（$\overline{N}+\sigma$）与（$\overline{N}-\sigma$）之间，而取$\overline{N}$的可能性最大。

〔**例题**〕用米尺对某物体的长度进行了5次测量。其值L_i为：2.33，2.30，2.35，2.34，2.38cm，试用均方根误差表示物体长度的测量结果。

第一步，算出算术平均值：

$$\overline{L}=\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}L_i=2.34$$

第二步，算出均方根误差

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{5} (L_i - 2.34)^2 \Big/ 5-1} = 0.03$$

第三步，写出物体长度的测量结果：

$$L = \overline{L} \pm \sigma = 2.34 \pm 0.03\text{cm}$$

以上几步是多次直接测量数据处理的大体过程。但是，当无法对某量进行多次测量，或者不必要进行多次测量时，我们用一次测量值$N_{测}$作为最佳值，用仪器误差$\triangle N_{仪}$作为测量误差，结果则表示为：

$$N = \overline{N} \pm \triangle N = N_{测} \pm \triangle N_{仪} \qquad (0-11)$$

〔例题〕用混合法测铜的比热，用0℃到100℃的温度计，测得铜、水、量热器达到平衡时的温度为31.2℃，求热平衡时的表达式。

解：$\because \quad \overline{T} = T_{测} = 31.2℃$

$\triangle T = \triangle T_{仪} = 0.5℃$

$\therefore \quad T = \overline{T} \pm \triangle T = 31.2 \pm 0.5℃$

以上讲的$\triangle N$是绝对误差，它的单位和测量值的单位相同。凡有单位的误差，都是绝对误差。但它不能完全反映出测量的准确度。例如，测棒的长度$L = 100.00 \pm 0.07$cm，直径$d = 1.00 \pm 0.07$cm，两者的绝对误差都是0.07cm，到底哪个测量结果的精确度高呢?为此，我们引入相对误差的概念。

我们定义绝对误差与真值或算术平均值的比值，叫相对误差。它没有单位，一般用百分数表示：

$$相对误差(E) = \frac{绝对误差}{算术平均值} \times 100\%$$

上例的相对误差分别为：

$$E=\frac{\triangle L}{\overline{L}}=\frac{0.07}{100}\times 100\%=0.07\%$$

$$E=\frac{\triangle d}{\overline{d}}=\frac{0.07}{1}\times 100\%=7\%$$

显然，棒长的测量比棒的直径的测量要精确得多。

三、有效数字

任何直接测量测得的数据都只能是近似数，由这些近似数通过计算而求得的间接测量值也是近似数。因此，近似数的计算和表示都有一些规则，以便确切地表示数据记录和运算结果的近似性。“有效数字”就是为此引入的。

当用仪器来测量某一物理量时，仪器上的示数往往不会刚好在最小分度的刻度线上。例如，用米尺来测量某一物体的长度，如图 0 — 3 所示。物体的一端与 0 刻线重合，而另一端在13mm和14mm 之间，这时我们如果简单地记为13mm和14mm，都不能真实地反映物体的长度。如果想象地把1mm再分成 10 等分，从图上可以估计物体的另一端大约在十分之四毫米的地方把物体的长度记为 13.4mm。其中“13”可以从刻度上准确地读出来，叫做“准确数字”，而第三位“ 4 ”是估读出来的，并不很准确，但被测物体的另一端确实在“0.4”附近，因而“ 4 ”也是有意义的，叫做“估读数字”或“可疑数字”，显然，13.4mm要比13mm或14mm更真实地反映物体的长度，因此，测量记录时，一般应在最小分度后再估读一位数字，而且只能估读一位数字，再多估读一位便无实际意义了。我们把所有准确数

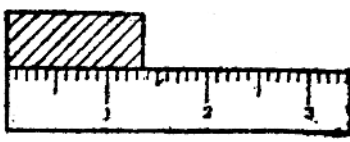


图 0 — 3

字再加上一位有实际意义的估读数字总称为有效数字。

记录有效数字应注意以下几点：

1.待测物理量有效数字的位数决定于测量仪器的精密度，不能任意增减。

2.有效数字的位数与单位变换无关。

3.在数字前面表示小数点位置的“0”不算有效数字，在数字中间或数字后面的“0”都算有效数字。因此记录数据或运算过程中，不能随意舍弃数字末尾的“0”，也不能随意在数字末尾加“0”。

为了正确的确定运算过程中有效数字的位数，必须研究数据舍入的合理规则。对于测量值采用“小于5则舍，大于5则入，等于5则末位凑成偶数”的法则。这个法则克服了见“5”就入引进的系统误差，使偶数误差随机化。例如，$L=3.1415\text{cm}$，取到小数点后面三位 $L=3.142\text{cm}$；大气压$=1.01325\times10^{-5}$帕，小数点后四位为 1.0132×10^{-5} 帕。对于绝对误差和相对误差数据的舍入采用“进位法”，即只要舍弃的数字非零时，不论是大于5还是小于5都得进一位。例如：$\triangle L=0.052\text{cm}=0.06\text{cm}$，$E=1.3\%=2\%$，而且通常只保留一位有效数字。

下面研究四则运算中有效数字的取法。

（1）加、减法

$$\begin{array}{lr} & 32.\underline{1} \\ +) & 3.27\underline{6} \\ \hline & 35.\underline{3}7\underline{6} \end{array} \qquad \begin{array}{lr} & 26.6\underline{5} \\ -) & 3.62\underline{5} \\ \hline & 23.0\underline{2}\underline{5} \end{array}$$

计算时我们在存疑数字下面加一横线。在相加的结果35.376中，由于第三位数“3”已为可疑数字，其后两位便无意义