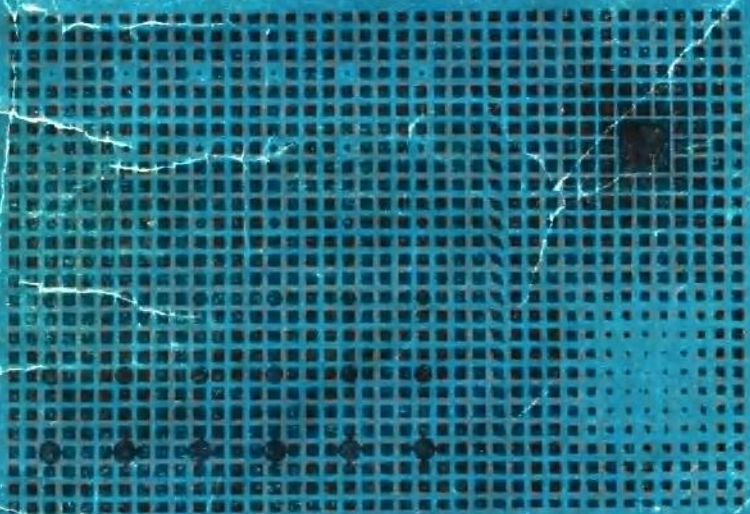
普通物理实验

凌佩玲等编



上海科学技术文献出版社

普通物理实验

凌佩玲　蔡颂仪　周子平　张人越
薛士平　潘翠萍　张祖芬　　编

上海科学技术文献出版社

普通物理实验

凌佩玲　蔡颂仪　周子平 等编

*

上海科学技术文献出版社出版发行

（上海市武康路2号）

新华书店经销

昆山亭林印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32　印张 10.375 字数 250,000

1989年2月第1版　1989年2月第1次印刷

印数：1—7,000

ISBN 7-80513-269-0/O·22

定价：3.80元

《科技新书目》178-590

前　言

为了适应我国现代科学技术的发展，培养各方面的人材，理科非物理专业的系科得到很大扩充，学生人数远远超过物理专业，但长期以来缺乏普通物理实验方面的教材，因此，复旦大学、华东师范大学和上海师范大学加强了横向联系，组成了《普通物理实验》编写组，根据3所学校长期从事非物理专业普通物理实验的教学经验，拟订了教学大纲，在原有的教学基础上修改补充写成本书。

根据理科非物理专业培养人材的要求，并考虑与普通物理课程的配合，共选了40多个实验，每个实验按3学时安排，按各校各系科的特点和条件，可选择不同的题目，由浅入深，循序渐进。在编写过程中，我们力求突出实验思想，为培养学生独立工作能力、进行物理实验基本方法、基本技能和数据处理打下良好的基础。

本书参加编写的有：复旦大学凌佩玲、蔡颂仪、周子平；华东师范大学张人越、薛士平；上海师范大学潘翠萍、张祖芬，由华东师范大学马葭生副教授、上海师范大学张梦心副教授审阅了全稿。在编写过程中复旦大学陆申龙同志和3所大学普通物理实验室全体同志给予了热情的支持，在此深表感谢。

本书可作为综合性大学、师范大学理科非物理专业各系的教材，也可作为工科院校、职工业余大学有关系科实验教学用书或实验教学参考书。

由于编者水平有限，且编写时间仓促，缺点和错误在所难免，恳请批评指正。

编　者

1987.7

绪　论

普通物理实验是一门独立设课的实验基础课，是理科各专业实验的重要基础，物理实验过程对培养学生用实验方法研究问题、解决问题的能力起着重要的作用。教学中着重在实验思想、实验方法、实验技能和数据处理4个方面对学生进行训练，从而能够培养具有独立工作能力和勇于创造的人才。实验是学生在教师指导下独立进行的，学生要主动地自觉地在这4个方面努力，为今后开展工作打下扎实的基础。

1. 普通物理实验的目的

(1) 通过实际的观察和测量，理论联系实际，学习和掌握物理概念，了解如何设计合理的实验方案，掌握常用物理量的基本测量方法。

(2) 学习物理实验的基本知识，掌握各种测量技术，能对数据进行处理，正确判断和分析实验结果。

(3) 培养严肃认真的工作作风和实事求是的科学态度。

(4) 培养爱护国家财产、团结协作和遵守纪律的优良品德。

2. 普通物理实验过程的要求

学习一个实验，有3个环节，每一个环节有不同的要求：

(1) 预习，在实验前必须预习，弄清楚本实验的原理和内容，并对测量仪器和测量方法有所了解，在此基础上写好预习报告，内容包括：(1)实验名称；(2)原理，力求简要，如只要写出基本公式或画出实验线路；(3)画好数据记录表格。

(2) 实验时应根据仪器使用说明书或注意事项，正确使用

仪器，并要注意爱护，稳拿妥放，以免损坏。仔细观察物理现象和测量数据，用钢笔或原子笔如实记录数据。实验完毕，应整理好仪器，保持实验室整洁，培养良好的科学作风。

(3) 写实验报告，这是对实验全过程的总结和深入理解的一个环节，应独立完成。内容包括：(*a*)实验名称；(*b*)目的；(*c*)原理，仍力求简要；(*d*)仪器，写出所用仪器的规格和编号；(*e*)根据自己实验的体会总结几条简单的步骤；(*f*)数据处理，由计算或作图得出实验结果；(*g*) 对实验中的现象、结果分析讨论，提倡开拓精神。实验报告字迹要清楚，力求文句通顺、简明扼要，把培养分析问题、解决问题的能力放在重要地位。

目　　录

测量误差与数据处理

物理实验是用实验方法测量物理量和研究物理规律，这就要求我们能选择合适的仪器，达到满意的实验结果。但由于实验条件、测量技术以及实验者生理反应等因素，测量结果总与客观存在的真值之间有一定的差异，而只能是一个近似值。测量值 x 与真值 μ 之差称为误差，$\Delta x = x - \mu$，又称绝对误差。我们在实验过程中，应着眼于减小误差，并对测量结果给予正确的估价，判断其可靠性。为此，必须对误差理论有所了解，正确运用数据处理方法，可以帮助我们合理设计实验方案，选择仪器，获得最佳结果，本课程仅作初步介绍。

一、误差的来源

误差按其性质和来源，可以分为系统误差、偶然误差和过失误差。

1. 系统误差

在相同条件下，多次测量同一物理量，其误差的绝对值与符号总保持不变，或按照一定的规律变化，这种误差称为系统误差。产生系统误差的原因有下列几种。

(1) *仪器本身固有的误差* 如电表指针不在零值（称零值误差），因此，在使用电表时，应先检查指针是否指零；又如用千分尺测量物体长度时，必要检查零位，记下零读数（即零值误差），以便对测量值进行修正；又如天平两臂不等，可用实验方法加以消除。

(2) 理论或方法误差 这是由于测量所依据的实验理论、实验方法或实验条件不完善所致，如用伏特计、安培计测量未知电阻，由于电表内阻的影响，使测量值比实际值总是偏大或偏小。

(3) 个人因素带来的误差 由于测量者生理或心理特点所导致的误差，如用秒表计时，有人按表总过早，有人又偏慢。

总之，系统误差不能依靠在相同条件下，多次重复测量来减小或消除。原则上，系统误差均应予修正，但系统误差的发现和估计，常取决于实验者的经验和判断能力，限于本课程的教学要求，我们只对某些实验作分析，采取适当的方法对测量结果进行修正。

2. 随机误差(又称偶然误差)

设在实验中已理想地消除了系统误差，在实际测量条件下，多次测量同一物理量时，其误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化，这种误差称随机误差。这种误差的起因是由于多种偶然因素引起的，如人的来往引起环境温度的起伏、电源电压的波动等，一般不易找出原因加以排除，但当测量次数增多时，它服从一定的统计规律，在多数情况下，随机误差服从正态分布（也称高斯分布）。服从正态分布的误差有以下几个特点。

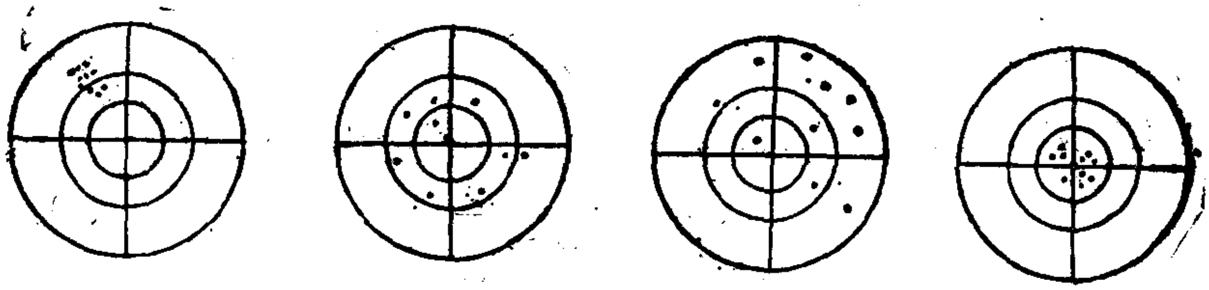
(1) 单峰性 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。

(2) 对称性 绝对值相等的正负误差出现的概率相等。

(3) 有界性 绝对值很大的误差出现的概率近于零，亦即误差有一定的限度。

由上所述可以说，系统误差的大小反映测量结果的正确度，而随机误差的大小反映测量结果的精密度，当系统误差和随机

误差都小时，则称精确度或准确度高。精确度是系统误差和偶然误差的综合反映，表示测量结果的符合程度，在科学实验中，常用正确度、精密度和精确度评价测量结果。通常用打靶时子弹着点的分布情况，形象地说明3个术语的意义。如图所示，图中(a)表示射击的精密度高(随机误差小)、正确度差(系统误差大)；图中(b)表示射击的精密度差、正确度高；图中(c)表示精密度和正确度皆差，即精确度差；图中(d)表示精确度高。



(a) (b) (c) (d)

图

3. **过失误差(又称粗大误差)**

由于读数或计算时发生错误而引入的明显歪曲实验结果的误差，称为过失误差。对初学者来说是容易犯的错误，务必多加注意，关于这种误差的判断方法，在此不作详细讨论。

二、随机误差的计算方法(假定已消除系统误差)

1. 平均绝对误差 在相同的测量条件下，设对某待测量(真值为μ)进行n次测量，所得一系列测量值x_1, x_2, …, x_n，则算术平均值：

$$\bar{x}=\frac{1}{n}(x_1+x_2+\cdots+x_n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$$

当测量次数很多时，可以认为算术平均值接近于待测量真值μ，

通常用平均值作为测量结果的最佳值：

$$\mu=\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=\bar{x} \tag{1}$$

$$\Delta x_i=x_i-\mu\approx x_i-\bar{x} \tag{2}$$

Δx_i称为各次测量值的误差，但各误差的算术平均值为零，因此，取各次误差的绝对值$|\Delta x_i|$的算术平均值，称为平均绝对误差：

$$\overline{\Delta x}=\frac{|\Delta x_1|+|\Delta x_i|+\cdots+|\Delta x_n|}{n}=\frac{\Sigma|\Delta x_i|}{n} \tag{3}$$

2. 标准偏差

在现代科技测量中，都用标准偏差来衡量一组测量值的精密度，在一列测量值中单次测量的标准偏差σ由下式计算

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum(\Delta x_i)^2}{n-1}} \tag{4}$$

从下面两列测量数据中，我们可以看到用标准偏差衡量精密度，可以很好地将较大的误差反映出来：

(1) 10.02, 10.02, 9.98, 9.98。$\bar{x}=10.00$, $\overline{\Delta x}=0.02$, $\sigma=2.3\times10^{-2}$

(2) 10.03, 9.99, 10.01, 9.97。$\bar{x}=10.00$, $\overline{\Delta x}=0.02$, $\sigma=2.6\times10^{-2}$

由此可知，虽然平均值相同，$\overline{\Delta x}$也相同，但标准偏差σ却不相同；因为第二列中出现了与平均值相差较大的测量值，所以σ也大。

根据误差理论可以证明，在相同条件下等精度测量中，各测量列算术平均值的标准偏差为测量列中单次测量的标准偏差值的$\frac{1}{\sqrt{n}}$倍

$$\sigma_{\bar{x}}=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{\Sigma(\Delta x_i)^2}{n(n-1)}} \tag{5}$$

由式(5)可知，增加测量次数对提高测量结果的精密度是有利的，但由于$\sigma_{\bar{x}}$与$\sqrt{n}$成反比，所以n不必取得过多，在普物实验中为了教学上的方便，一般取5至10次即可。

(3) 测量结果的表示　根据上面的介绍，对于一列在相同条件下等精度测量的结果，可以表示为

$$x=\bar{x}\pm\sigma_{\bar{x}} \tag{6}$$

意即待测量的最佳值为$\bar{x}$，误差区间为$\bar{x}+\sigma_{\bar{x}}$与$\bar{x}-\sigma_{\bar{x}}$之间，由误差理论知，在系统误差消除的情况下，在此区间包含x真值的概率是68.3%。为初学者计算简单计，也可用

$$x=\bar{x}\pm\overline{\Delta x} \tag{7}$$

表示测量结果。而大于3σ的误差，其概率为0.3%，因此，3σ称极限误差。在实验中有时重复测量n次，测量值不变，并不表示测量误差为零，而是测量仪器的灵敏度不够，反映不出来，通常将仪器的分度值(相邻两刻线所代表的量值之差即最小刻度)作为偶然误差来处理，于是用$\frac{分度值}{\sqrt{n}}$来代替$\sigma_{\bar{x}}$。在实验中有时也用单次测量，则可根据不同的测量条件估算误差，如用米尺测量，可取分度值的$\frac{1}{10}$即$0.1\text{mm}=\sigma$；如标志线较粗，则有时借用3σ的概念，再返求σ值。总之，应根据具体情况处理。

(4) 相对误差

绝对误差不能对测量的结果的精密度有一个准确的概念，如测量一长度为10cm的物体，其绝对误差为1cm；而另一长度为1000cm的物体，其误差也是1cm，两者绝对误差相同，但误差占测量值的比例大不相同，因此，引出相对误差的概念。

$$相对误差=\frac{|测量值-真值|}{真\quad 值}\approx\frac{|测量值-平均值|}{平均值} \tag{8}$$

有时也可用公认值或理论值代替平均值计算相对误差。相对误

差通常用百分数表示。

三、间接测量的误差

物理实验中所要求的被测量值 y 往往是通过与直接测量值之间有已知函数关系计算出来的，我们称 y 为间接测量量或复合量，由于各直接测量有误差，经过传递必然导致复合量也有误差，计算复合量的误差称为误差的传递。

1. 平均绝对误差的算术传递公式

用绝对误差计算间接测量的误差，对初学者能较直观地掌握计算的要点，并能一目了然地判断各分量误差对复合量误差所起作用的大小。

设间接测量值 y 与若干个相互独立的直接测量值 $x_1, x_2, \cdots$ 有下述函数关系

$$y=f(x_1,\ x_2\cdots)$$

对上式全微分，则得 $dy=\frac{\partial f}{\partial x_1}dx_1+\frac{\partial f}{\partial x_2}dx_2+\cdots dx_1, dx_2\cdots$ 和 dy 都是微小改变量，用 Δx_1，$\Delta x_2\cdots$ 和 Δy 代替 dx_1，$dx_2\cdots$ 和 dy，因偶然误差的正负不能确定，考虑在最不利的极端条件下合成，上式各项取绝对值相加，即

$$\Delta y=\left|\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|\Delta x_1+\left|\frac{\partial f}{\partial x_2}\right|\Delta x_2+\cdots \tag{9}$$

有时先计算 y 的相对误差，再求 Δy 比较容易计算。相对误差表示为

$$\frac{\Delta y}{y}=\left|\frac{\partial f}{\partial x_1}\ \frac{\Delta x_1}{y}\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial x_2}\ \frac{\Delta x_2}{y}\right|+\cdots \tag{10}$$

对于具有积、商形式的函数式，可对等式两端取自然对数，然后全微分，则能很方便地得出相对误差公式

即 $$\frac{\Delta y}{y}=\frac{\partial \ln f}{\partial x_1}\Delta x_1+\frac{\partial \ln f}{\partial x_2}\Delta x_2+\cdots \tag{11}$$

2. 标准偏差的传递公式

设 $y=f(x_1, x_2\cdots)$ $x_1, x_2\cdots$为相互独立的直接测量值，则

$$\sigma_{\bar{y}}=\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2\left(\sigma_{\bar{x}_1}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2\left(\sigma_{\bar{x}_2}\right)^2+\cdots\right]^{1/2} \tag{12}$$

或

$$\frac{\sigma_{\bar{y}}}{y}=\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2\left(\frac{\sigma_{\bar{x}1}}{y}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2\left(\frac{\sigma_{\bar{x}2}}{y}\right)^2+\cdots\right]^{1/2} \tag{13}$$

式(12)、(13)中的 $\sigma_{\bar{x}_1}, \sigma_{\bar{x}_2}\cdots$ 为 $x_1, x_2\cdots$的平均值的标准偏差，由式(5)计算。$\sigma_{\bar{y}}$ 为间接测量值 y 的平均值的标准偏差。

为方便计，下面列出常用函数的误差传递公式，以便查用。

函数表达式	算术传递公式	标准偏差传递公式
1. $y=x_1\pm x_2$	$\Delta y=\Delta x_1+\Delta x_2$	$\sigma_y=(\sigma_{x_1}^2+\sigma_{x_2}^2)^{1/2}$
2. $y=x_1\cdot x_2$	$\frac{\Delta y}{y}=\frac{\Delta x_1}{x_1}+\frac{\Delta x_2}{x_2}$	$\frac{\sigma_y}{y}=\left[\left(\frac{\sigma_{x1}}{x_1}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{x2}}{x_2}\right)^2\right]^{1/2}$
3. $y=x_1/x_2$	$\frac{\Delta y}{y}=\frac{\Delta x_1}{x_1}+\frac{\Delta x_2}{x_2}$	$\frac{\sigma_y}{y}=\left[\left(\frac{\sigma_{x1}}{x_1}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{x2}}{x_2}\right)^2\right]^{1/2}$
4. $y=\frac{x_1^k\, x_2^l}{x_3^m}$	$\frac{\Delta y}{y}=k\frac{\Delta x_1}{x_1}+l\frac{\Delta x_2}{x_2}+m\frac{\Delta x_3}{x_3}$	$\frac{\sigma_y}{y}=\left[\left(k\frac{\sigma_{x1}}{x_1}\right)^2+\left(l\frac{\sigma_{x2}}{x_2}\right)^2+\left(m\frac{\sigma_{x3}}{x_3}\right)^2\right]^{1/2}$
5. $y=kx$	$\frac{\Delta y}{y}=\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\sigma_y}{y}=\frac{\sigma_x}{x}$
6. $y=\sqrt[k]{x}$	$\frac{\Delta y}{y}=\frac{1}{k}\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\sigma_y}{y}=\frac{1}{k}\frac{\sigma_x}{x}$
7 $y=\sin x$	$\Delta y=\lvert\cos x\rvert\Delta x$	$\sigma_y=\lvert\cos x\rvert\sigma_x$
8. $y=\ln x$	$\Delta y=\frac{\Delta x}{x}$	$\sigma_y=\frac{\sigma_x}{x}$