高等学校“十一五”规划教材（物理科学类）

大学物理实验

聂喻梅　刘　强　梁　霄　魏　鹏　袁　敏　刘　刚
高洪明　彭川黔　肖汉光　周　波　田　源　编

兵器工业出版社

高等学校“十一五”规划教材(物理科学类)

大学物理实验

聂喻梅　刘强　梁霄　魏鹍　袁敏
刘刚　高洪明　彭川黔　肖汉光　周波　田源　编

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书是重庆工学院物理实验中心的教师们在多年的物理实验教学实践的基础上编写而成的。此书在内容编排上涉及力学、热学、电磁学、光学及近代物理学各方面的内容，共计65个实验项目。每个项目由实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容及步骤、思考题及附录等几部分组成，编写过程中尽量做到通俗易懂，注重实际操作步骤与数据处理，提高学生主动学习物理知识的兴趣。

本书可作为大学本科理、工科专业学生物理教学用书。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验/聂喻梅等编．—北京：兵器工业出版社，2007.8

ISBN 978－7－80172－914－9

Ⅰ．大…　Ⅱ．聂…　Ⅲ．物理学－实验－高等学校－教材　Ⅳ．04－33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第123549号

出版发行：兵器工业出版社
发行电话：010－68962596，68962591
邮　　编：100089
社　　址：北京市海淀区车道沟10号
经　　销：各地新华书店
印　　刷：北京市登峰印刷厂
版　　次：2007年8月第1版第1次印刷
印　　数：1—5000

责任编辑：张小洁
封面设计：李　晖
责任校对：郭　芳
责任印制：赵春云
开　　本：787×1092　1/16
印　　张：15.5
字　　数：375千字
定　　价：24.00元

前　言

随着当前素质教育的逐步深入和社会对高素质复合型人才的需求，大学物理实验作为学生进入大学接触的第一门实验教学课程，对培养学生养成严谨求实的科学态度和创新精神，对提高学生的动手能力均有着启蒙的作用。在高校，大学物理实验是一门重要的基础实践课程。

《大学物理实验》可以配合《大学物理》的课堂教学，加深学生对各种物理现象的理解，让学生在观察与实践中将理论与实际相结合，通过感性认识来加深对理性认识的理解。

本书是重庆工学院物理实验中心全体教师多年教学经验的积累。编者对演示实验项目内容进行了精心挑选，使其涵盖了力、热、光、电及近代物理各方面知识。在内容上力求以简洁明了的语言对各个实验项目进行说明，注重实验项目的可操作性，说明实验原理时在不影响对原理的理解的基础上尽量做到通俗易懂，深入浅出。本书不仅适合理工专业的学生，也同样适合文科、经济、管理等非理工专业的学生使用。

大学物理实验教学是一门探索性的教学，本书在教材编写过程中，曾以讲义的形式在重庆工学院理、工科类专业试用了八届，在广泛征求同行专家和学生意见的基础上，重庆工学院物理实验中心全体教师对讲义进行了认真的修改直至最后定稿。希望本书能够增进读者对物理的了解和兴趣。

北京邮电大学刘刚老师参加了本书的编写工作，编写了部分近代物理实验，在此一并表示感谢。

实验中心的杨长中老师参与了本书的图表处理工作。

由于我们的水平有限，书中的缺点和不足之处在所难免，衷心希望各位专家和读者不吝给予宝贵意见，在此先表示我们真诚的谢意！

编　者

2007 年 7 月 15 日

目　　录

基础实验

提高实验

综合性实验

绪论　测量误差及实验数据处理

第一节　误差的基本概念

1. 测量的定义及分类

物理实验是将自然界物质运动中的物理形态按人们的意愿在实验中再现，找出各物理量之间的关系，确定它们的数值大小，从中获得规律性的认识，或验证理论，或发现规律，或作为实际应用的依据。要得到这种定量化的认识，就必须进行测量。测量就是将被测量与被定为标准的同一物理量的单位量进行比较，并确定其比值的过程。显然，数值的大小与所选的单位有关。因此，表示一个被测对象的测量值时必须包括数值和单位。

根据获得测量数据途径的不同或测量条件的不同，测量可分为直接测量和间接测量、等精度测量和不等精度测量。

直接测量是指被测量可以直接从测量仪器（或量具）上读出其数值的测量。

间接测量是指被测量不能用直接测量的方法得到，而是利用若干个直接测量值通过一定的函数关系计算出被测量的数值。

等精度测量是指对一被测量进行重复测量时，认为各次测量数据是在相同测量条件下得到的，也就是说在测量仪器、测量方法、测量人员及测量环境均不变的情况下对同一物理量进行重复测量，所得到的每个测量值都有相同的精度，或者说具有相同的可信赖程度。

不等精度测量就是各次测量数据的精度是不同的。

在以下的讨论中所涉及的测量数据均为等精度的情况。

2. 误差的定义

真值：物理量所具有的客观的真实数值。严格地讲，它表征研究量在所处的条件下严格的确定的量值。真值客观存在，不以人的意志、不以我们测量的工具、手段为转移。真值尽管存在，但是一个理想概念，通常不可能确切知道。

约定真值：能够用来代替真值的称为约定真值。一般认为约定真值非常接近真值，两者之差可以忽略不计，因此，我们就可以用约定真值代替真值。无系统误差的条件下，算术平均值、标准值、公认值、理论值可以认为是约定的真值。实际中多用算术平均值。

测量误差是测量值与被测量真值之差。记为：

$$\Delta x = x_i - x_0 \tag{1}$$

式中，Δx 为测量误差；x_i 为测量值；x_0 为被测量真值。测量误差总是不可避免地贯穿于实验过程的始终。

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向，因此又称为绝对误差。绝

对误差可以表示某一测量结果的优劣，但在比较不同测量结果时则不适用，需要用相对误差来表示。相对误差定义为：相对误差是绝对误差与真值的比值，即：

$$E = \Delta x / |x_0| \tag{2}$$

相对误差通常用百分数表示，故也称百分误差。

绝对误差反映测量偏离真值的范围，相对误差反映不同测量结果的可靠度。相对误差更能测量出误差程度。例如，测量 10 m 长的物体相对误差为 1 cm，另有测量 1 m 长的物体误差为 1 cm，两者的绝对误差相同，均为 1 cm，而相对误差不同，分别为 1/1 000 和 1/100，显然相对误差小的测量结果更可靠。

第二节　误差的分类及其特点

在实验中，测量误差的来源是多方面的，仅就其性质而言，误差可分为系统误差和随机误差两类。

一、系统误差

在相同条件下多次测量同一物理量时，误差的大小恒定，符号总偏向一方或误差按照某一确定的规律变化，称为系统误差。

根据对误差的大小、方向及变化规律掌握的程度，系统误差可分为已定系统误差和未定系统误差。

已定系统误差是大小、方向和变化规律都已确切掌握了的误差。这里又可进一步分为定值系统误差和变值系统误差。当误差的大小和方向恒定时，为定值系统误差；当误差的变化规律已确定，系统的大小和方向随变化规律而变化时，为变值系统误差。如测量仪器的零点有一偏离，偏离的大小和方向是确定的，这个系统误差为定值系统误差；按线性规律变化或周期性规律变化的系统误差就是变值系统误差。

未定系统误差是指误差虽有确定的规律，但这一规律比较复杂或尚不确知，大小和方向不能确切掌握的误差。

1. 系统误差产生的原因及其特点

系统误差产生的原因有以下几个方面：

仪器误差：仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差。如天平不等臂、分光计读数装置的偏心差、电表的示值与实际值不等属于仪器缺陷，在使用时可采用适当的方法加以消除。仪器设备安装调整不妥，不满足规定的使用状态，如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况应尽量避免。

理论和实验方法误差：它是由测量所依据的理论公式近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求等引起的。如单摆测重力加速度时所用公式的近似性；伏安法测电阻时不考虑电表的内阻的影响等。

实验人员的误差：实验人员的心理或生理特点所造成的误差。如用停表时总是超前或滞后；对仪表读数总是偏一方斜视等。

系统误差的特点是：规律性、重现性和可修正性。

2. 发现系统误差的方法

发现系统误差的方法有：理论分析法、实验对比法、残差观察法等。

3. 消除或减小系统误差的方法

消除或减小系统误差的方法有：消除产生系统误差的因素、修正法、抵消法、交换法、对称测量法等。

二、随机误差

1. 随机误差及产生的原因

随机误差是指测量中出现的大小和方向都难以预料，且变化方式不可预知的测量误差。但当测量次数足够多时，随机误差的出现和分布总是服从一定的统计规律。

随机误差产生的原因是由于实验过程中存在的某些不可预料或未被掌握而不能控制的偶然因素。

2. 随机误差的分布规律及特性

随机误差的分布规律有多种，不同的分布有不同形式的分布函数，但无论哪一种分布形式，一般都有两个重要的参数——平均值和标准偏差。理论和实践都证明，大多数随机误差服从正态分布（高斯分布）规律。下面简单讨论正态分布的特点及特性参量。

（1）正态分布规律

标准化的正态分布曲线如图 1 所示。图中横轴 x 表示测量值，纵轴表示概率密度 $f(x)$。

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-(x-m)^2/2\sigma^2} \tag{3}$$

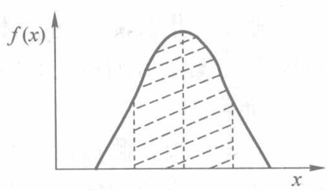

图 1　正态分布曲线

当 $n\to\infty$ 时，$m=\sum X_i/n$。其中，m 称为总体平均值。

$$\sigma=\lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-m)^2}{n}} \tag{4}$$

σ 为正态分布的标准偏差，是表征测量分散性的一个重要参量。

图 1 是概率密度分布曲线。曲线和 x 轴之间的面积为 1，可以用来表示随机误差在一定范围内的概率。如图 1 中阴影部分的面积就是随机误差在 $\pm\sigma$ 范围内的概率，即测量值落在（$m-\sigma$，$m+\sigma$）区间的概率为 P。由定积分计算可得出，其值 $P=68.3\%$。如将区间扩大到 2 倍，则 x 落在（$m-2\sigma$，$m+2\sigma$）区间中的概率为 95.4%。x 落在（$m-3\sigma$，$m+3\sigma$）区间中的概率为 99.7%。

图 1 表现出以下几个特点：

有界性：绝对值特大的误差出现的机率为 0。

单峰性：小误差出现的机率比大误差大。

对称性：绝对值相等的误差出现的机率相等。

抵偿性：当 $n\to\infty$ 时，曲线完全对称，$\sum\Delta X_i=0$。

（2）有限次测量时，单次测量值的标准差 S

实际做实验时，都是有限次测量。因此我们实际应用的都是这种情况下的单次测得值的标准偏差公式，即贝塞尔公式：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{5}$$

S 是从有限次测量中计算出来的对总体标准偏差 σ 的最佳估计值，称为实验标准差。其相应的置信概率接近于 68.3%，但不等于 68.3%。

三、系统误差与随机误差的联系

测量的总误差由系统误差和随机误差共同构成。这两类误差不是对立的，甚至有时会遇到两种误差难以严格区分的情况。

四、精密度、正确度和准确度

1. 精密度

精密度是指对同一被测量做多次重复测量时，各次测量值之间彼此接近或分散的程度。它是对随机误差的描述，它反映随机误差对测量的影响程度。随机误差小，测量的精密度就高。

2. 正确度

正确度是指被测量的总体平均值与其真值接近或偏离的程度。它是对系统误差的描述，它反映系统误差对测量的影响程度。系统误差小，测量的正确度就高。

3. 准确度

准确度是指各测量值之间的接近程度和其总体平均值对真值的接近程度。它包括了精密度和正确度两方面的含义。它反映随机误差和系统误差对测量的综合影响程度。只有随机误差和系统误差都非常小，才能说测量的准确度高。

第三节　不确定度的基本概念

一、为什么要引入不确定度

理论上说的误差是一个理想的概念，它本身就是不确定的。根据误差的定义，由于真值一般不可能准确地知道，因此测量误差也不可能确切地获知。既然误差无法按照其定义式精确求出，那么现实可行的办法就只能根据测量数据和测量条件进行推算（包括统计推算和其他推算），去求得误差的估计值。显然，由于误差是未知的，因此不应再将任何一个确定的已知量称作误差。误差的估计值或数值指标应采用一个专门的名称，这个名称就是不确定度。

引入不确定度可以对测量结果的准确程度做出科学合理的评价。不确定度越小，表示测量结果与真值越靠近，测量结果越可靠。反之，不确定度越大，测量结果与真值的差别越大，测量的质量越低，使用价值就越低。

二、不确定度的概念

不确定度是表征测量结果具有分散性的一个参数，它是被测物理量的真值在某个量值范围的一个评定。或者说，它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。不确定度反映了可能存在的误差分布范围，即随机误差分量和未定系统误差分量的联合分布范围。

不确定度通常包含多个分量，按其计算方法可分为两类：

A 类分量 Δ_A：多次重复测量时用统计方法计算的分量；

B 类分量 Δ_B：用非统计方法评定的分量。

这两类分量用方和根合成：

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \tag{6}$$

合成不确定度又称总的不确定度，简称不确定度，通常用符号 Δ 表示。

第四节　直接测量结果的表示

一、直接测量结果的表示

直接测量结果的表示式为：

$$X = x \pm \Delta\ (\text{单位}) \tag{7}$$

其中，X 为测量结果；x 为被测量值；Δ 为总不确定度。此式表示被测量的真值（实际值）一般位于（$x-\Delta$），（$x+\Delta$）之间，真值落在（$x-\Delta$），（$x+\Delta$）之外的可能性（概率）非常小。

（1）关于被测量值 x：不考虑已定系统误差时，被测量值 x 一般取等精度多次测量的平均值 $\bar{x}$；若实验中只能测一次，被测量值 x 就取单次测量值 x_1；如需考虑已定系统分量，还必须按下式将测得值或其平均值减去已定系统误差值，得到 x 值。

测量值 x(修正后) = 测得值(或其平均值) - 已定系统误差(限值)

（2）当测量次数为 6 ~ 10 次时，$\Delta_A = S$；在直接测量中 Δ_B 可近似取计量器具的误差限制 Δ_{ins}，即 $\Delta_B \approx \Delta_{ins}$。$\Delta_{ins}$ 一般取基本误差限或示值误差限，或由实验室根据具体情况给定。

所以在物理实验中，不确定度 Δ 用下式表示：

$$\Delta = \sqrt{S^2 + \Delta_B} \tag{8}$$

（3）对于单次测量 $\Delta \approx \Delta_B \approx \Delta_{ins}$。

例题 1： 用螺旋测微计测量小钢球的直径，共测 6 次，得 6.995 mm、6.998 mm、6.997 mm、6.994 mm、6.993 mm、6.994 mm，测量前螺旋测微计零点读数值（即已定系统误差）为 -0.004 mm，螺旋测微计的示值误差限 $\Delta_{ins} = 0.004$ mm，试写出测量结果的表达式。

［解］

（1）$\bar{d} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} d_i = 6.995$ mm

对已定系统误差进行修正：$d = \bar{d} - (-0.004) = 6.999$ mm。

（2）用贝塞尔公式求标准偏差

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(d_i - \bar{d})^2}{6-1}} = 0.0019\ (\text{mm})$$

由于测量次数为 6 次，所以 $\Delta_A = S = 0.0019$ mm。

（3）取 $\Delta_B = \Delta_{ins} = 0.004$mm。

(4) $\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = 0.0045\ \text{mm}$。

(5) 测量结果 $D = (6.9990 \pm 0.0045)\text{mm}$。

二、相对不确定度

为了更直观地评定测量结果的准确度，也常采用相对概念：

$$\text{相对不确定度 } U_r = \text{不确定度/被测量值}$$

第五节　间接测量结果的表示

间接测量的结果一般也表示为：

$$X = \bar{x} \pm \Delta(\text{单位}) \tag{9}$$

其中，X 为测量结果；$\bar{x}$ 为被测量的最佳估计值；Δ 为总不确定度。

一、间接测量量的最佳估计值 $\bar{x}$

设间接测量量为 φ，它有 n 个直接测量量，分别为 x，y，z，…。其函数关系为：

$$\varphi = F\ (x,\ y,\ z,\ \cdots) \tag{10}$$

间接测量量的最佳估计值 $\overline{\Phi} = F(\bar{x},\ \bar{y},\ \bar{z},\ \cdots)$。即只需把直接测量量的最佳估计值代入函数表达式，就可算出间接测量量的最佳估计值。

二、间接测量量的不确定度评定

考虑到物理实验课的特殊性，采用如下的近似公式，即：

$$\Delta_\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \cdots} \tag{11}$$

$$\frac{\Delta_\varphi}{\varphi_A} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \cdots} \tag{12}$$

其中，式（12）适用于和差形式的函数，式（13）适用于积商形式的函数，

上式中，Δ_x，Δ_y，Δ_z，…是直接测量量 x，y，z，…的总不确定度，φ 的总不确定度 Δ_φ 等于各直接测量量的总不确定度与相应偏导数乘积的方和根。

例题 2：用流体静力法测固体密度的公式为 $\rho = \dfrac{m}{m - m_1}\rho_0$，测得 $m = (27.06 \pm 0.02)\text{g}$ $m_1 = (17.03 \pm 0.02)\text{g}$　$\rho_0 = (0.9997 \pm 0.0003)\text{g/cm}^3$，求相对不确定度 $U_r = \dfrac{\Delta_\rho}{\rho}$ 及最后结果表达式 $\rho \pm \Delta_\rho$。

[解法 1]：

因

$$\rho = \frac{m}{m - m_1}\rho_0$$

$$\Delta_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial m}\right)^2 \Delta_m^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial m_1}\right)^2 \Delta_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho_0}\right)^2 \Delta_{\rho_0}^2 + \cdots}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial m}\Delta_m = \frac{-m}{(m - m_1)^2}\rho_0 \Delta_m = -3.4 \times 10^{-3}\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial m_1}\Delta_{m_1}=\frac{m}{(m-m_1)^2}\rho_0\Delta_{m_1}=5.4\times10^{-3}\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial\rho_0}\Delta_{\rho0}=\frac{m}{m-m_1}\Delta_{\rho0}=8.1\times10^{-4}\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$\Delta=6.4\times10^{-3}\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}=7\times10^{-3}\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$\rho=\frac{27.06}{27.06-17.03}\times0.9997=2.697\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$$

$$\rho\pm\Delta_\rho=(2.697\pm0.007)\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$U_r=\frac{7\times10^{-3}}{2.697}=0.24\%$$

[解法 2]：$\rho=\frac{m}{m-m_1}\rho_0$

ρ 的对数及其微分形式为：

$$\ln\rho=\ln m-\ln(m-m_1)+\ln\rho_0$$

$$\frac{\partial\ln\rho}{\partial m}=\frac{-m_1}{m(m-m_1)}\ ;\ \frac{\partial\ln\rho}{\partial m_1}=\frac{1}{m-m_1}\ ;\ \frac{\partial\ln\rho}{\partial\rho_0}=\frac{1}{\rho_0}$$

代入方和根合成公式：

$$U_r=\frac{\Delta_\rho}{\rho}=\sqrt{\left(\frac{\partial\ln\rho}{\partial m}\right)^2\Delta_m^2+\left(\frac{\partial\ln\varphi}{\partial m_1}\right)^2\Delta_{m_1}^2+\left(\frac{\partial\ln\varphi}{\partial\rho_0}\right)^2\Delta_{\rho0}^2}$$

$$\sqrt{\frac{m_1^2\Delta_m^2}{m^2(m-m_1)^2}+\frac{\Delta_{m_1}^2}{(m-m_1)^2}+\frac{\Delta_{\rho0}^2}{\rho_0^2}}$$

代入数字计算得：

$$U_r=\sqrt{1.5\times10^{-6}+4.0\times10^{-6}+9.0\times10^{-8}}=2.35\times10^{-3}=0.24\%$$

$$\rho=\frac{m}{m-m_1}\rho_0=2.697\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$\Delta_\rho=\rho u_r=0.007\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$\rho\pm\Delta_r=(2.967\pm0.007)\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

第六节　有效数字

一、有效数字的概念

1. 有效数字的定义

有效数字定义为可靠数字加上可疑数字。可靠数字是测量中能够准确读出的数字，可疑数字是通过估计读出的数字。测量误差对应在有效数字的可疑位上。

2. 与有效数字有关的几点说明

（1）运算中，常数的有效数字一般比参与运算的其他数据的有效数字位数多取 1 ~ 2 位。

（2）数据中，出现在第一个非零数字右边的“0”是有效数字。

（3）有效数字的位数与单位（或小数点的位置）无关。

（4）在科学记数法中，指数的系数部分是有效数字，小数点一般放在第一位数字的后面。

3. 有效数字尾数的截取法则

（1）对测量结果而言，有效数字尾数的截取法则为“4 舍 6 入 5 凑偶”即：对要保留的末位数而言，视其下一位尾数的情况，若尾数小于 5 则舍去；若尾数大于 5 则进“1”；若尾数等于 5，要看末位是偶数还是奇数，是偶数则舍去尾数，保留末位上原有偶数，是奇数则进“1”，把末位上的奇数凑成偶数。

（2）不确定度尾数取舍法则为“进位法”，即：对不确定要保留的尾数而言，其后面只要有非零数则都要进 1。

4. 测量结果的表示

测量结果都应表示成 $X \pm \Delta_x$ 的形式，而且测量不确定度的数字与有效数字的可疑位应该具有相同的数量级，或者说，不确定度数字所在位应该与可疑数字所在位对齐。

不确定度一般取 1 ~ 2 位，当不确定度第一位数字较小时通常取 2 位，所以，有效数字中的可疑位也与之对应取 1 ~ 2 位。

二、有效数字的运算

有效数字进行运算时，运算结果仍为有效数字。总的规则是：可靠数字与可靠数字运算后仍为可靠数字，可疑数字与可疑数字运算后仍为可疑数字，可靠数字与可疑数字运算后为可疑数字，进位数可视为可靠数字。

对于已经给出了不确定度的有效数字，在运算时应先计算出运算结果的不确定度，然后根据它决定结果的有效数字位数。

1. 加减运算规则

（1）如果已知参与加减运算的各有效数字的不确定度，则先算出计算结果的不确定度，并保留 1 ~ 2 位，然后确定计算结果的有效位数。

（2）如果没给出参与加减运算的各有效数字的不确定度，则先找出可疑位最高的那个有效数字，计算结果的可疑位应与该有效数字的可疑位对齐。

［例］$A = 13.65$，$B = 0.0082$，$C = 1.6035$。求 $A + B - C = ?$

［解］$A + B - C = 13.65 + 0.0082 - 1.6035 = 12.0547$

按照规则（2），A 的可疑位最高，所以最后结果的可疑位也应保留到这位，即：

$$A + B - C = 13.65 + 0.0082 - 1.6035 = 12.05 \text{（4 位有效数字）}$$

2. 乘除运算规则

若干个有效数字相乘除时，计算结果（积或商）的有效数字位数在大多数情况下与参与运算的有效数字位数最少的那个分量的有效位数相同。

［例］$A = 22.35$，$B = 1.2$。求 $AB = ?$

[解] $AB = 26.820$

按照规则，B 分量的有效数字位数最少，所以计算结果的有效数字位数与其相同，即：

$$AB = 27 \text{（2 位有效数字）}$$

3. 乘方、开方运算规则

有效数字在乘方或开方时，若乘方或开方的次数不太高，其结果的有效数字位数与原底数的有效数字位数相同。

如：$A = 4.25$，$A^2 = 18.0625$，最后取 $A^2 = 18.1$。

4. 对数运算规则

有效数字在取对数时，其有效数字的位数与真数的有效数字位数相同或多取 1 位。

如：$A = 3.27$，$\lg A = 0.51454\cdots$最后取 $\lg A = 0.514$。

第七节　实验数据的处理方法

一、列表法

在记录和处理数据时，将数据排列成表格格式，既有条不紊、简明醒目，又有助于表示出物理量之间的对应关系，同时也有助于检验和发现实验中的问题。

数据在列表处理时，应遵循下列原则：

（1）各栏目（纵或横）均应标明名称及单位，若名称用自定的符号，则需加以说明。

（2）列入表中的数据主要应是原始测量数据，处理过程中的一些重要中间计算结果也应列入表中。

（3）栏目的顺序应充分注意数据间的联系和计算的顺序，力求简明、齐全，有条理。

（4）若是函数测量关系的数据表，则应按自变量由小到大或由大到小的顺序排列。

二、作图法

在研究两个物理量之间的关系时，把测得的一系列相互对应的数据及变化的情况用曲线表示出来，称为作图法。

1. 作图法的应用

（1）分析物理量之间的变化规律、验证理论或找出经验公式。

（2）可在曲线上两点间求值也可在其延长线上求值。

（3）若得到的是直线，可求出直线的斜率和截距，从而获得与之相关的物理量数值。

（4）可把某些曲线关系用直线表示（曲线改直）。

2. 作图的要求

（1）一定要用坐标纸或利用电脑用 Excel 作图。

（2）标明坐标轴代表的物理量名称（或符号）和单位。一般用 x 轴代表自变量，用 y 轴代表因变量。

（3）确定（标明）坐标轴单位长度所代表的物理量值及坐标原点数值。

（4）标出数据点。在坐标图上用“○”或“×”等符号标出数据点的位置；同一张坐标纸上要画不同的曲线时，要用不同的符号标数据点。

（5）连线。连线时应使用直尺或曲线板把点连成直线或光滑曲线；应使曲线尽量通过

大多数点，其他点应靠近曲线两侧均匀分布，对个别偏离大的点应进行分析。

（6）注明绘制的曲线名称、绘制人姓名、绘制日期。

三、逐差法

当自变量与因变量之间成线性关系，自变量按等间距变化，且自变量的误差远小于因变量的误差时，可使用逐差法计算因变量变化的平均值。

例如，用拉伸法测量钢丝杨氏模量实验，可用逐差法处理数据。钢丝上端固定，下端位置随施加砝码质量的变化而变化，其位置可由标尺上读出，用 m 表示。砝码的质量用 m 表示。x_0为未加砝码时标尺的读数，实验中每次增加 1 kg 的砝码，共加 9 次。

m/kg	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x/mm	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9

将数据分为两组：0 ~ 4 为第一组，5 ~ 9 为第二组。这样把相隔 1 kg 的一次测量转换成了相隔 5 kg 测量一次。按顺序将两组相应数据逐项相减并求平均：

$$\Delta x=\frac{(x_5-x_0)+(x_6-x_1)+(x_7-x_2)+(x_8-x_3)+(x_9-x_4)}{5}$$

得到了每增加 5 kg 力，钢丝的平均伸长量。再将其除以 5，可得每增加 1 kg 力钢丝的伸长量：

$$\Delta x'=\frac{(x_5-x_0)+(x_6-x_1)+(x_7-x_2)+(x_8-x_3)+(x_9-x_4)}{5\times 5}$$

如果不用逐差法，而是按照实际的测量顺序，用一般求平均的方法，得到：

$$\Delta x'=\frac{(x_1-x_0)+(x_2-x_1)+(x_3-x_2)+\cdots+(x_9-x_8)}{8}=\frac{x_9-x_0}{8}$$

可见，中间的数据都相互抵消，实际上只用到了 x_0和 x_9两个数据。

由此可知逐差法的优点是：

（1）保证了全部测量数据被充分利用。

（2）计算得到的平均值减小了误差。

四、最小二乘法

最小二乘法是一种常用的数学方法。在实验中常常使用这种方法处理数据，以求得经验公式。在讨论随机误差时，我们曾定义偏差等于测量值与总体平均值之差。当随机误差服从正态分布时，偏差有两个重要特性，即偏差的代数和为零及偏差的平方和最小。这正是最小二乘法的理论基础。

设物理量 x、y 之间具有一定的函数关系 $y=f(x)$。一般都是把误差最小（可以忽略）的物理量定为自变量 x，而主要误差都出现在另一物理量即因变量 y 上。在实验中对自变量取值为 x_i，测得与之相应的因变量数值为 $y_i(i=1，2，\cdots，k)$，在获得（x_i，y_i）这组数据的测量中，我们认为不存在系统误差（即无偏性），y_i的随机误差相互独立，且服从正态分布。此时可用最小二乘法处理数据。

最小二乘法的原理是：利用已获得的一组测量数据（x_i，y_i），求出一个误差最小的经