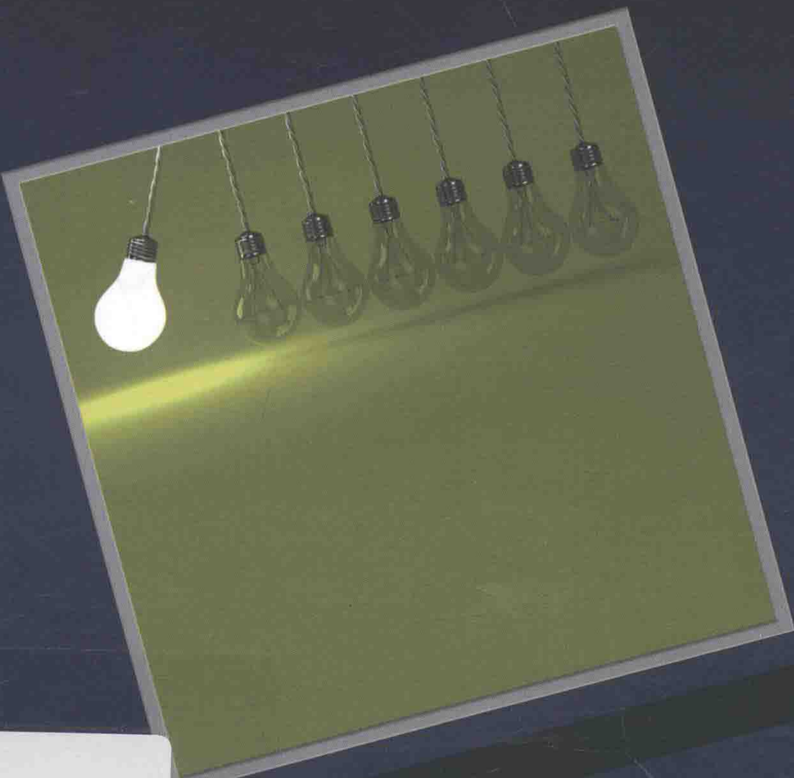
DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

（第2版）

姜友嫦　舒纯军　许刚◎主编



西南交通大学出版社

大学物理实验

（第 2 版）

姜友嫦　舒纯军　许　刚　主编

西南交通大学出版社
·成　都·

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验 / 姜友嫦，舒纯军，许刚主编. —2版. 成都：西南交通大学出版社，2016.8
ISBN 978-7-5643-4959-2

Ⅰ.①大… Ⅱ.①姜… ②舒… ③许… Ⅲ.①物理学–实验–高等学校–教材 Ⅳ.①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 200759 号

大学物理实验
（第 2 版）
姜友嫦 舒纯军 许 刚 主编
*
责任编辑 张 波
封面设计 何东琳设计工作室
西南交通大学出版社出版发行
四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼
邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564
http: //www.xnjdcbs.com
成都中铁二局永经堂印务有限责任公司印刷
*
成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 13
字数: 326 千字
2016 年 8 月第 2 版 2016 年 8 月第 7 次印刷
ISBN 978-7-5643-4959-2
定价: 28.00 元

再版前言

本教材第一版，于 2009 年出版。自出版以来，受到我校师生广泛的好评。在此期间，学校的部分物理实验设备进行了更新，同时，参与实验的教师和学生对本教材提出了一些建议和意见。根据以上情况，决定对本教材进行再版。本次再版，保留了初版的体系、风格、特色，并根据实验设备现状以及师生的意见和建议，对部分内容进行了修订更新。同时，对个别疏漏进行了修正。

本次再版由姜友嫦、舒纯军具体负责。

希望广大师生在使用过程中提出建议和意见，以便本教材不断完善。

编　者

2016 年 8 月

前　言

大学物理实验是理工科学生进入大学后较早学习到的一门系统全面的实验课程，是学生实际技能训练的开端。进入21世纪以来，随着实验教学改革的不断深入，大学物理实验课程在实验技术、实验内容等方面都在不断地更新变化。为了提高学生的科学素质，培养学生的创新能力，大学物理实验教学既要使学生得到基本的实验技能训练，又要使学生在综合能力方面得到提高。这就要求大学物理实验的教学内容必须兼顾基础、综合、近代物理以及工程技术等方面。

本书是根据全国工科物理实验课程指导委员会制定的《高等工科院校物理实验课程基本要求》，结合我校专业特点和实验室仪器设备情况，在使用多年的大学物理实验讲义基础上，经过大量修改编写而成的。力求做到实验原理简明扼要、实验公式推导完整、实验方法清晰合理、数据处理要求规范。全书分为5章，共58个实验。第1章介绍了误差、有效数字和数据处理的基本知识，第2章是力学实验，第3章是热学实验，第4章是光学实验，第5章是电学实验。

本书是集体智慧与劳动的结晶，由主编姜友嫦、谢小维提出主导性意见并立项探索，由主编许刚策划并统筹安排，参编老师苟现奎、廖京川积极参与、充分讨论、分工撰写、反复推敲而完成。其中第2章力学实验1～17、第5章电学实验42～50由姜友嫦编写，第5章电学实验51～58、第4章光学实验36～41由许刚编写，第1章误差、有效数字和数据处理的基本知识、第3章热学实验18～28由苟现奎编写，第4章光学实验29～35由廖京川编写。

实验教学是一项集体工作，从实验内容的确定、实验项目的建设、实验讲义的编写，到实验教学的完成，都是从事实验教学的教师和实验技术人员共同劳动的成果。感谢我院物理学基础实验教学中心以及大学物理教研室各位同仁的热情鼓励，感谢重庆三峡学院教务处、教材科以及西南交通大学出版社的大力支持。本书编写过程中参阅了其他相关的教材和仪器厂家的说明书，在此表示感谢。

由于编者水平所限，书中疏漏、不足之处在所难免，恳请读者批评指正，以便再版时修正。

编　者

2009年4月

目　　录

第一章　误差、有效数字和数据处理

第一节　测量误差的基本概念

一、测量误差

进行物理实验，不仅要观察物理现象、定性地研究物体变化规律，而且要定量地测量所观察物体的量值（量值是指用数和适当的单位表示的量，如 2.30 m、15.5 kg 等）。通过测量可以认识物理现象的内在关系，揭示物理过程的本质。所谓测量，就是把待测的物理量与一个被选做标准的同类物理量进行比较，以确定它是标准量的多少倍。这个标准量称为物理量的单位，这个倍数称为待测物理量的数值。一个物理量必须由数值和单位组成。本书使用国际单位制。

1. 直接测量和间接测量

测量可以分为直接测量和间接测量两类。凡是能以量具、仪器的刻度直接测得待测量的大小的测量，叫做直接测量。但是大多数物理量都没有直接测量的仪器，需要进行间接测量。所谓间接测量，就是先经过直接测量得到一些量值，然后再通过一定的数学公式计算，才能得出所求结果的测量。

2. 测量误差

任何物理量在一定条件下都客观地存在一个唯一确定的值，这个值称为真值。但是，由于实验条件、测量方法、测量仪器和测量者自身判断等原因，任何测量都不是绝对准确的，所以测得数值与真值之间总存在着差异。我们把所得测量值与真值之差定义为测量值的误差，用下式表示

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

式中：x' 为真值；x_i 为第 i 次测量值；Δx_i 为第 i 次测量误差。

产生误差的原因是多方面的，根据误差的性质及其产生原因，可将误差分为系统误差和偶然误差两大类。

（1）系统误差。

系统误差的特点是测量的结果总向某一定方向偏离，或按照一定的规律变化。产生系统误差有以下几个原因：仪器本身的缺陷、理论公式或测量方法的近似性、环境的改变（如测量过程中温度、压强的变化）、个人存在的不良测量习惯等。

由于系统误差的数值和符号（+、−）是定值或按某种规律变化，因此系统误差不能通

过多次测量来消除或减小。但是，如果能找出产生系统误差的原因，就能采取适当的方法来消除或减小它的影响，或对测量结果进行修正。因此，实验中一定要注意消除系统误差。

（2）偶然误差。

即使在测量过程中已减小或消除了系统误差，但在同一条件下对某一物理量进行多次测量，总存在差异，误差时大时小、时正时负。这种现象的产生是由于观察者受到感官的限制，或由于实验过程中受到周围条件无规则变化的影响，或由于测量对象自身的涨落，或由于其他不可预测的偶然因素所引起的。这样的误差称为偶然误差。对某一次测量来说，偶然误差的大小、符号都无法预先知道，完全出于偶然。但是当测量次数足够多时，偶然误差就具有明显的规律性，即偶然误差遵循统计规律。理论和实验都表明，大量的偶然误差均服从“正态分布”。偶然误差有如下特点：

① 绝对值相等的正负误差出现的几率相等。

② 绝对值小的误差出现的几率比绝对值大的误差出现的几率大。

③ 偶然误差的算术平均值随测量次数的增加而减小，当测量次数趋于无穷时，它趋于零。

④ 偶然误差存在一个“最大误差”，即误差的绝对值不超过某一限度。

由于偶然误差存在上述性质，我们可以用增加测量次数的方法来减小它。当测量次数足够多时，测量列的偶然误差趋于零，测量列的算术平均值就趋近于真值。

故在有限次测量中，我们应取测量列的算术平均值作为真值的估计值，或称之为最佳值。

二、直接测量的误差估算和测量结果的表示

1. 多次直接测量的误差及其表示

上面我们讲过，为了减小偶然误差，可以在同一条件下对同一物理量进行多次重复测量，用多次测量值的算术平均值作为被测量的最佳估计值。

设我们对某一物理量进行了 n 次测量，测量值分别为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$。其算术平均值为

$$\overline{x}=\frac{1}{n}(x_1+x_2+\cdots+x_n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{2}$$

由上所述，$\overline{x}$ 为该物理量的最佳值。那么，各次测量值与 $\overline{x}$ 的偏差，就近似为各测量值与真值的误差。在一般的讨论中，我们不去严格区分“偏差”和“误差”。

在物理实验中，多次测量的误差常用算术平均绝对偏差和标准偏差来表示。

（1）算术平均绝对偏差。

在多次测量中，每次测量值与算术平均值的偏差的绝对值为

$$\Delta x_1=|x_1-\overline{x}|,\ \Delta x_2=|x_2-\overline{x}|,\ \cdots,\ \Delta x_n=|x_n-\overline{x}|$$

则算术平均绝对偏差定义为

$$\overline{\Delta x}=\frac{1}{n}(|\Delta x_1|+|\Delta x_2|+\cdots+|\Delta x_n|)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\Delta x_i| \tag{3}$$

测量结果可表示为

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \tag{4}$$

式（4）为测量结果的算术平均绝对偏差表示方式。它表明被测量值 x 的最佳估计值是 $\bar{x}$，测量值在 $(\bar{x} - \overline{\Delta x})$ 到 $(\bar{x} + \overline{\Delta x})$ 区间内包含真值的可能性最大。这是一种粗略的估算。

（2）标准偏差（又称方均根偏差）。

偶然误差最通常的表示方式为标准偏差。当测量次数足够多时，标准偏差的定义为

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

当测量次数有限时，标准偏差可表示为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{6}$$

又称为样本标准差。由于实验中测量次数都是有限的，我们常用式（6）估算测量值的偶然误差。应当指出，式（6）是在某列测量中某一次测量结果的标准偏差。

如果进行多组重复测量，则每一组所得的算术平均值也存在误差。误差理论表明，n 次测量的算术平均值的标准偏差为 σ_x 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍。即

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{7}$$

$\sigma_{\bar{x}}$ 称为样本平均值的标准偏差（或简称为标准偏差）。

当偶然误差用标准偏差来表示时，对某一次测量结果可写成

$$x = \bar{x} \pm \sigma_x \tag{8}$$

对 n 次测量结果的平均值，可写成

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \tag{9}$$

标准偏差的大小，表示了在一列多次测量数据中各个数据之间的离散程度，它是对这组测量数据可靠性的一种评价。标准偏差小，说明绝对值小的误差占优势，正态分布曲线尖锐，测量列的离散性小，测量的精密度高。从偶然误差的正态分布规律可以证明，对 x 的任何一次测量值的误差介于 $[-\sigma_x, +\sigma_x]$ 的几率为 68.3%。

由式（7）可知，增加测量次数对于提高测量的精密度是有利的。但我们注意到 $\sigma_{\bar{x}}$ 的下降速度比 n 的增长速度慢得多。因此测量次数应根据实际情况而定，并不是越多越好。测量次数太多，有时会出现“漂移”现象。“漂移”指的是计量仪器特性及所测对象随时间而变化的现象。在物理实验中，根据被测量对象的具体情况一般进行 5 ~ 10 次测量即可。测量次数取得过少，则测量数据将严重偏离正态分布。

2. 单次测量的误差及其表示

有些物理实验是在动态下测量的，不允许重复多次测量；有些实验的精密度要求不高；有些是间接测量，某一个物理量对结果影响不大，在这些情况下，对被测量可以只进行一次

测量。单次测量的误差估计，一般总是估计误差的最大值。误差最大值的估计比较复杂，有各种方法。如果要求不高或不需要很精确时，常取仪器最小分度 d 的一半来表示。其测量结果为

$$x = x_{测} \pm \frac{d}{2} \tag{10}$$

对于标出精度等级的仪器和仪表，可用仪器误差作为单次测量误差，表示为

$$x = x_{测} \pm \Delta x_{仪} \tag{11}$$

仪器误差一般在仪器上或说明书上标明。例如，50 分度游标尺的 $\Delta x_{仪} = 0.02$ mm，螺旋测微器上的 $\Delta x_{仪} = 0.004$ mm，电学仪表的 $\Delta x_{仪}$ = 量程 × 精度等级%。

有可能会遇到这种情况：在多次测量中，经过计算得到的偶然误差很小，甚至趋近于零。从简单化问题而又不失其合理性考虑，这时仍可取仪器误差作为测量结果的最大误差。

3. 相对误差

上述算术平均绝对偏差 $\overline{\Delta x}$ 和标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$，均是以绝对误差的形式表示测量值的误差。但有时为了全面评价测量的优劣，还需要考虑被测量自身的大小。为此，需引入相对误差的概念。相对误差的定义为

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \tag{12}$$

当 Δx 用算术平均绝对偏差或标准偏差来表示时，相对误差分别为

$$E_x = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\%, \qquad E_x = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} \times 100\%$$

一般来说，在对同一物理量的测量中，相对误差小的精密度高。

由式（12）可见，相对误差与绝对误差的关系为

$$\Delta x = E_x \bar{x} \tag{13}$$

当被测量值有公认理论值或标准值时，在数据的处理中，还常常把测量值与理论值或标准值进行比较，并用相对误差来表示

$$E_x = \frac{|测量值 - 理论值(或标准值)|}{理论值(或标准值)} \times 100\% \tag{14}$$

三、间接测量误差的估算

间接测量值的最佳值，是把各直接测量列中的最佳值代入相对应的函数关系式进行计算而得到的。由于各直接测量值都存在误差，因此间接测量值也必然有一定的误差。这种由直接测量值的误差影响到间接测量值误差的现象，称为误差的传播。所传播的误差与直接测量值误差的大小以及函数关系式的具体形式有关。下面简要介绍算术平均绝对偏差和标准偏差的传播。

1. 算术平均绝对偏差的传播

设间接测量值 N 与各独立的直接测量值 x，y，z，…有下列函数关系

$$N = f(x, y, z, \cdots) \tag{15}$$

用算术平均绝对偏差（通常把算术平均误差看成最大误差）表示各个独立的直接测量值为

$$x = \overline{x} \pm \overline{\Delta x}\,,\quad y = \overline{y} + \overline{\Delta y}\,,\quad z = \overline{z} \pm \overline{\Delta z},\ \cdots$$

则间接测量值可表示为

$$N = \overline{N} \pm \Delta N \tag{16}$$

式中：$\overline{N}$ 是把各个直接测量的最佳值 $\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}, \cdots$ 代入式（15）求出来的值；ΔN 的计算式导出如下：

对式（15）求全微分，得

$$\mathrm{d}N = \frac{\partial f}{\partial x}\mathrm{d}x + \frac{\partial f}{\partial y}\mathrm{d}y + \frac{\partial f}{\partial z}\mathrm{d}z + \cdots$$

式中：$\mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z, \cdots$ 为 $x, y, z, \cdots$ 的微小变化量。由于误差都远小于测量值，我们可把 $\mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z, \cdots, \mathrm{d}N$ 看做误差，并记以 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \cdots, \Delta N$，则绝对误差 ΔN 可表示为

$$\Delta N = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\Delta z\right| + \cdots \tag{17}$$

式中取绝对值是考虑到误差最大的情况。为了计算间接测量值的相对误差，可对式（15）取对数，即

$$\ln N = \ln f(x, y, z, \cdots)$$

对上式求全微分，有

$$\frac{\mathrm{d}N}{N} = \frac{\partial \ln f}{\partial x}\mathrm{d}x + \frac{\partial \ln f}{\partial y}\mathrm{d}y + \frac{\partial \ln f}{\partial z}\mathrm{d}z + \cdots$$

把微分号改为误差号，取各项绝对值，求算术和，得到间接测量的相对误差为

$$E_N = \frac{\Delta N}{N} = \left|\frac{\partial \ln f}{\partial x}\Delta x\right| + \left|\frac{\partial \ln f}{\partial y}\Delta y\right| + \left|\frac{\partial \ln f}{\partial z}\Delta z\right| + \cdots \tag{18}$$

由式（17）和式（18）可见，对于加减运算的函数式，可通过直接求全微分的方法求得绝对误差；对于乘除运算的函数式，可用先取对数后求全微分的方法求得相对误差 $\dfrac{\Delta N}{N}$，再用 $\Delta N = E_N \overline{N}$ 的方法求得绝对误差。

2. 标准偏差的传播

上述算术平均绝对偏差的传播的计算，是在考虑各直接测量误差同时出现最坏的情况下，即取各直接测量误差的绝对值相加得到的。实际上测量中出现这种情况的几率是很小的，这

样做往往夸大了间接测量误差。为了更真实地反映各直接测量误差对间接测量误差的贡献，我们常用标准偏差的传播公式。

可以严格证明，对某间接测量值 $N = f(x, y, z, \cdots)$，标准偏差的传播公式为

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \cdots} \tag{19}$$

其相对误差的传播公式为

$$E_N = \frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \left(\frac{\sigma_x}{f}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \left(\frac{\sigma_y}{f}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \left(\frac{\sigma_z}{f}\right)^2 + \cdots} \tag{20}$$

第二节　有效数字及其运算

如第一节所述，任何实验的测量结果都存有误差。那么，当我们直接读取待测量的数值时，应取几位有效数字呢？在间接测量中，计算间接测量值时，又应取多少位有效数字呢？这些都是不能随意决定的，必须按照有效数字及其运算的法则来确定。有效数字及其运算法则对于物理实验，乃至将来从事的科学实验都非常重要，必须很好地掌握。

一、直接测量的有效数字

用量具或仪器直接读取测量值时所得的数值，都含有准确数字和可疑数字两部分。在直接读数时，我们必须在仪器的最小刻度后估读一位，即读数总是由准确数字与最后一位可疑数字组成。准确数字与最后一位可疑数字合称为有效数字。下面对有效数字作几点说明：

① 测量同一物理量时，有效数字的位数与所用测量仪器的精度有关。仪器精度愈高，有效数字的位数愈多。

② 有效数字的位数与测量方法有关。

③ 出现在数值中间的“0”与末尾的“0”均为有效数字。

④ 当进行十进制单位变换时，有效数字与小数点的位置无关。注意，数值前面的“0”不是有效数字。对于特大或特小的数值，一般应该用科学记数法，即用有效数字乘 10 的幂指数的形式表达，如 1.264×10^{-4} km，2.67×10^{5} m 等。一般小数点前只取一位数字，幂指数（如 10^{-4}）不是有效数字。如果用国际单位词头表示测量结果，习惯上不用科学记数法。例如，用 1.2 μs，而不用 1.2×10^{-6} s；用 1.3 kΩ，而不用 1.3×10^{3} Ω。

⑤ 常数不算有效数字。

⑥ 由于有效数字反映了仪器的精度，最末位的可疑数字是有误差的。因此，任何测量结果应截取的有效数字位数是由绝对误差决定的，有效数字的最末位应与误差（只取一位）所在位对齐。

⑦ 有效数字的位数越多，相对误差越少。

二、有效数字的运算

在计算间接测量的结果时，参与运算的各直接测量值的分量可能很多，有效数字也不一定相同，运算可能相当烦琐。怎样处理运算过程中的有效数字，使之尽快获得正确的结果，而且又不至于引进新的“误差”呢？下面介绍一些运算方法。

总的原则是：由误差决定测量结果应截取有效数字的位数；运算过程的中间数据，可以保留一位或两位可疑数字，最后结果只能按尾数舍入法保留一位可疑数字。尾数舍入法是：小于 5 则舍；大于 5 则入；等于 5，则把尾数凑成偶数。

1. 有效数字的加减

① $25.\underline{3} + 4.2\underline{4} = 29.\underline{54} = 29.\underline{5}$

② $37.\underline{9} - 5.6\underline{2} = 32.\underline{28} = 32.\underline{3}$

③ $71.\underline{4} + 0.75\underline{3} = 72.\underline{153} = 72.\underline{2}$

结论：几个数相加减，其和（或差）在小数点后所保留的位数，跟参与运算的诸数中小数点后位数最少的一个相同。

为了简化运算，也可以小数点后位数最少的数为准，把其余各数用尾数舍入法舍去多余的位数（或保留多一位），再进行运算。

2. 有效数字的乘除

① $52\underline{8} \div 12\underline{1} = 4.\underline{364} = 4.3\underline{6}$

② $3.8\underline{5} \times 9.7\underline{3} = 37.\underline{46} = 37.\underline{5}$

③ $39.\underline{3} \times 4.08\underline{4} = 16\underline{0}.\underline{5} = 16\underline{0}$

结论：几个数相乘除，所得结果的有效数字位数，一般与诸数中有效数字位数最少的一个相同，有时也可多一位或少一位。

为了简化运算，也可以有效数字位数最少的因子为基准，把其他因子的位数用舍入法舍去多余的位数（或保留多一位），再进行运算。

3. 乘方与开方

某数的乘方（或开方）的有效数字位数，应与其底数相同。

例如，$25.2\underline{5}^2 = 637.\underline{6}$，$\sqrt{19.38} = 4.40\underline{2}$。

以上结论虽不十分严密，但都是可行的。最恰当的方法是先算出绝对误差，由此定出可疑数字所在位，最后再确定测量的有效数字。

第三节　数据处理的基本方法

在物理实验中，为了使实验结果能清楚明了地表达出来，需对数据进行处理。处理数据的常用方法有列表法、图示法、逐差法和最小二乘法等。这些方法在科学实验中经常用到，希望能掌握。

一、列表法

在记录数据和处理数据时，为了清楚明确地表示相关物理量的关系，常将数据或处理数据的结果列成表格。这样可以及时发现和分析所测数据是否合理，运算是否正确，并有助于找出各物理量间的规律，得出正确的结论。

列表应该简单明了，使之能看出有关量之间的关系，并便于数据处理。一般的要求是：

① 必须有表题，说明是什么量的关系表。

② 必须注明表中各符号所表示的物理量名称，并写明单位。如果各栏物理量不同，单位应写在标题栏内。

③ 表中的数据要正确反映测量值的有效数字。

④ 必要时可对某一项目加以说明。

二、作图法

为了能直观地表达所测物理量之间的关系，找出它们的变化规律，物理实验所得出的一系列数据，通常都用作图法进行研究。作图法是求经验公式的常用方法之一，也是物理实验中处理数据的常用方法。作出一张正确、实用、美观的图，是实验技能中的基本功。

1. 作图规则

作图前，先要将记录的有关数据列表，然后再按下列要求进行。

（1）选用合适的坐标纸。

常用的作图坐标纸有直角坐标纸、单对数坐标纸和双对数坐标纸等。可以根据具体情况选用适合的坐标纸。在物理实验中常用直角坐标纸。

（2）确定坐标轴。

通常以横坐标表示自变量，以纵坐标表示因变量。画坐标轴时，要标明坐标轴的方向以及所表示的物理量和单位。

（3）确定坐标轴的标度。

选取坐标轴标度时要注意使用测量数据的可靠数字，即最末位可靠数字应与坐标纸中最小分格对应，当然也可以适当扩大一些，可疑数字在图中应是估计的。为了使所作的图线比较对称地充满坐标纸，坐标轴的起点不一定从零开始。同时坐标轴的比例要适当，一般取 1，2，5 等比例，不取 3，7，9 等。选好比例后，在坐标轴上每隔一定间距标明该物理量的数值（注意：标明有效数字！）。

（4）标数据点。

根据测量数据，在坐标纸上找出两个相关数据构成的数据点，并在其对应位置上用削尖的铅笔画上“+”号。“+”号的交叉点应是数据的最佳值点，交叉点到“+”号端点的距离应为该点数据的误差大小。如果一张坐标纸上要画几条曲线，每条曲线的数据点可用不同的标记，如“×”“⊗”“△”等，予以区别。各种符号的交叉点或中心应对应数据的最佳值点。

（5）连线。

用透明直尺、曲线板等作图工具，把数据点连成光滑的直线或曲线（校准曲线可连成折线，除此之外，一般不连成折线）。连直线时，需反复移动直尺，使直线各段两侧分布的数据

点大致相等，而且与直线的距离也大致相同。连曲线时，应使各数据点差不多都在曲线的边缘附近。一般采用“连四画三”的方法，即分段选用四个点，使每个点都差不多与曲线板某段曲线吻合，画出中间三点的连线，然后移到下一段，用同样的方法继续画。注意，连线时应保证各段曲线光滑、连贯。

（6）图注或说明。

有时要标明图线名称或当时所处的温度、压强和湿度等。

2. 图解法求图线参数

对已作出的图线，用解析的方法可求得图线的一些参数或图线的方程。

（1）求直线的斜率和截距。

如果图线是直线，则由解析几何可知，它满足 $y = kx + b$。在直线上取两点（为减小相对误差，这两点相距要尽量远些，但不取原始实验数据点）。把两点坐标代入直线方程，解得直线斜率为

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{21}$$

k 的单位由 x，y 的单位决定。

如果横坐标起点为零，则截距 b 的数值可由图中直线读出。如果横坐标起点不为零，则截距 b 的数值为

$$b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} \tag{22}$$

（2）外推法。

求出直线的斜率后，我们还可以用“外推法”求得测量范围外的数据点。所谓“外推法”就是把图线向外延伸，对应于某一自变量 x 值，求得函数 y 值的方法。例如，测量电阻温度系数时，可以把直线延长外推而求得 0 °C 时的电阻 R_0。应该注意的是，使用“外推法”时，必须假定物理关系在外延范围内也是成立的。

3. 函数关系的线性化和曲线改直

在实验中，许多物理量之间的关系都不是线性的，但经过适当的变换，可以使函数具有线性关系，这种方法称为函数关系的线性化。如果原来的函数关系是用曲线表示的，则函数关系线性化后，可以用直线来表示，这称为“曲线改直”。现举例如下：

（1）$y = ax^b$，其中 a，b 均为常数，两边取对数，得

$$\lg y = \lg a + b \lg x$$

若以 $\lg x$ 为自变量，$\lg y$ 为函数（或因变量），则得到斜率为 b，截距为 $\lg a$ 的直线。

（2）$y^2 = 2px$，其中 p 为常数，把上式改写为

$$y = \pm\sqrt{2px}$$

则自变量为 $\sqrt{x}$，函数为 y，斜率为 $\pm\sqrt{2p}$。

（3）$pV = C$，其中 C 为常数，把上式改写为

$$p = C\frac{1}{V}$$

则 p 为 $\frac{1}{V}$ 的线性函数。

4. 用对数坐标纸作图

常用的对数坐标纸有双对数坐标纸和单对数坐标纸。对数坐标纸的尺度与所标数的对数值成正比。对数坐标纸的每一级（一组 1，2，3，…，10）对应一个数量级。

三、逐差法

逐差法是物理实验中经常使用的一种处理数据的方法。设有 $x_0, x_1, x_2, \cdots, x_n$ 共（$n+1$）个测量数据，用逐差法处理这些数据时，把它们对半分成两组，对应项相减，再求平均值和误差。

例如，设有 $x_0, x_1, x_2, \cdots, x_7$ 共 8 个数据，把它们对半分成两组，则对应项的差值为

$$\delta_1 = x_4 - x_0,\ \delta_2 = x_5 - x_1,\ \delta_3 = x_6 - x_2,\ \delta_4 = x_7 - x_3$$

再求平均值

$$\overline{\delta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{4}\delta_i = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4}{n}$$

和算术平均绝对偏差

$$\Delta\overline{\delta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{4}\left|\delta_i - \overline{\delta}\right|$$

实际上，这样处理的结果是达到了在大量数据中求平均，以减少误差的目的。

当然，按理也可采用相邻项逐差的方法（逐项逐差），再求其平均值和误差。例如，对上例进行逐项逐差，求平均值为

$$\overline{\delta} = \frac{1}{7}\Big[(x_1 - x_0) + (x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + (x_4 - x_3) + (x_5 - x_4) +$$
$$(x_6 - x_5) + (x_7 - x_6)\Big] = \frac{1}{7}(x_7 - x_0)$$

即实际上只有首项和末项起作用。如果这两个数据误差较大，势必影响测量结果。所以，使用逐差法处理数据，一般是采用隔多项逐差的方法。

四、最小二乘法

用作图法虽然可以求得函数间的关系，但具有较大的任意性。如果我们能从实验数据直接求得经验公式，就更为明确。这种从实验数据直接求得经验公式的方法，称为方程回归法。为简单起见，这里只介绍一元函数线性回归。

设物理量 x，y 具有线性关系，其测量值（等精度）为