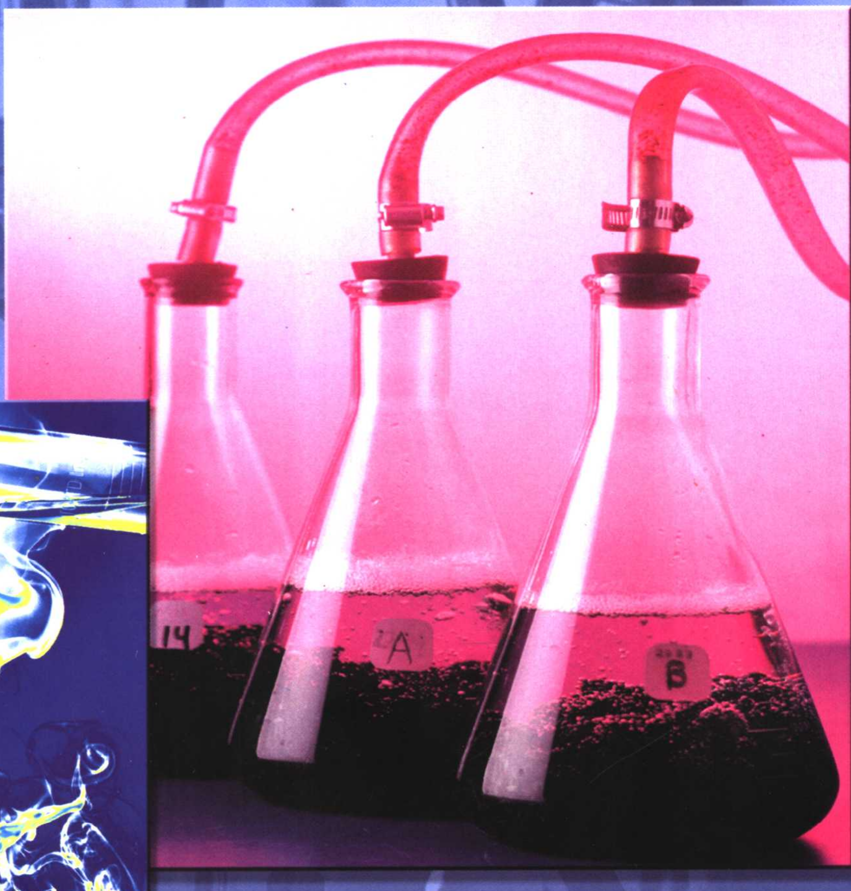
高等学校试用教材

化工原理实验

卫静莉 主编



国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验／卫静莉主编．—北京：国防工业出版社，2003.2

ISBN 7-118-03098-8

Ⅰ．化… Ⅱ．卫… Ⅲ．化工原理—实验
Ⅳ．TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 006138 号

国防工業出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 8¾ 200 千字

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月北京第 1 次印刷

印数：1—6000 册 定价：15.00 元

前　言

本书是根据全国化工原理数学指导委员会制定的实验大纲要求而编写的。

为使学生能在《化工原理》课堂教学后，尽快掌握化工原理实验的基本知识，本书在前两章将化工实验数据处理和实验常用的仪器、仪表等普遍的基础性知识编入。实验包括流体流动阻力的测定等10个基础实验和4个演示实验。在附录中列出了一些测试仪器的使用方法，以便读者查阅，帮助其掌握相关的知识。本书特点：编入了Excel进行化工实验数据处理内容，并有配套"化工原理实验CAI软件"。

本书由华北工学院分院卫静莉副教授主编，其中，绪论、第一章、第三章的实验一至七及实验十、第四章、第五章等由卫静莉编写，第二章由华北工学院分院赵建义副教授编写，实验八和实验九由华北工学院李同川副教授编写。全书由卫静莉审核及统稿。在编写过程中参考了五世瑶等编写的化工原理实验讲义，并得到有关老师的支持和帮助，在此表示谢意。

本书可作为高等院校和大专院校的化工原理实验教材和从事化工、生物化工、环境化工等系的实验教材或专业技术人员的参考书。

本书由华北工学院刘有智教授主审，编者对主审提出的许多宝贵意见和积极的建议，表示衷心地感谢。对于本书存在的问题和缺点，殷切地希望广大读者批评指正。

编　者

2003年1月

内 容 简 介

全书分为化工实验数据处理、化工基本参数测量常用仪表、化工原理基础实验、演示实验、Excel 数据处理及附录六部分。其中，化工原理基础实验包括流体流动阻力的测定等 10 个实验，演示实验包括雷诺实验等 4 个实验。本书特点：结合实验设备特点编写成基础实验部分；应用 Excel 进行化工实验数据处理，并有配套“化工原理实验 CAI 软件”。

本书实用性强，可作为高等院校和大专院校的化工原理实验教材和从事化工、生物化工、环境化工等系或专业技术人员的参考书。

目　　录

绪　论

一、化工原理实验的特点

化工原理课是化工、环境、生物化工等系或专业的重要基础技术课，它的历史悠久，已形成了完整的教学内容与教学体系。它属于工程技术学科，可以说，化工原理是建立在实验基础上的学科。所以，化工原理实验在这门课程中占有重要地位。化工原理实验不同于基础课程的实验。后者面对的是基础科学，采用的方法是理论的、严密的，处理的对象通常是简单的、基本的甚至是理想的，而工程实验面对的是复杂的实际问题和工程问题。对象不同，实验研究方法也必然不同。工程实验的困难在于变量多，涉及的物料千变万化，设备大小悬殊，实验工作量之大之难是可想而知的。因此不能把处理一般物理实验的方法简单地套用于化工原理实验。常用处理化学工程问题的两种基本实验研究方法：一种是因次论指导下的实验研究方法(经验方法)，即应用因次论进行实验规划；另一种是数学模型法(半经验半理论的方法)。例如阻力实验，就是采用第一种方法：首先经过实验、因次分析得出影响摩擦系数 λ 的因素为雷诺数 Re 和相对粗糙度 ε/d，有

$$\lambda = \psi(Re、\varepsilon/d)$$

然后再进行实验，用方便的物料(水或空气)，改变流速 u、粗糙度 ε，进行有限实验，通过实验数据处理，便可获得 λ 与 Re 及 ε/d 的关系曲线或归纳出具体的函数形式。

这些处理工程问题的研究方法，通过化工原理实验得到初步认识与应用。

二、化工原理实验的教学目的

1．巩固和深化理论知识

化工原理课程中所讲授的理论、概念或公式，学生对它们的理解往往是肤浅的。对于各种影响因素的认识还不深刻，通过化工原理实验，对于基本原理的理解、公式中各种参数的来源以及使用范围会有更深入的认识，从而理解从书本上较难弄懂的概念。

2．初步掌握化工问题的实验研究方法，熟悉化工数据的基本测试技术

通过实验，掌握化工问题的两种基本实验研究方法——因次分析法和数学模型法，掌握如何规划实验，去检验模型的有效性和模型参数的估值；熟悉操作参数(如流量、温度、压力等)、设备特性参数(如阻力系数、传热系数、传质系数等)和特性曲线的测试方法；熟悉并掌握化工中典型设备的操作。

3．培养学生从事实验研究的能力

理工科院校的毕业生，必须具备一定的实验研究能力，实验能力主要包括：为了完成一定的研究课题，设计实验方案的能力；进行实验、观察和分析实验现象的能力，正确选择和使用测量仪表的能力；利用实验的原始数据进行数据处理以获得实验结果的能力；运用文字表达技术报告的能力。这些能力是进行科学研究的基础，学生只有通过一定数量的基础实验与综合实验练习，经过反复训练才能掌握各种实验能力，通过实验课打下一定的

基础,将来参加实际工作就可以独立地设计新实验和从事科研与开发。

三、化工原理实验的教学要求

化工原理实验是用工程装置进行实验,对学生来说往往感到陌生而无从下手,同时是几个人一组完成一个实验操作,如果在操作中相互配合不好,将直接影响到实验结果。所以,为了切实收到教学效果,要求每个学生必须做到以下几点。

1. 实验前的预习

学生实验前必须认真地预习实验指示书,清楚地了解实验目的、要求、原理及实验步骤,对于实验所涉及的测量仪表也要预习它们的使用方法,写出预习报告,预习报告的内容应包括:

(1) 实验目的;

(2) 实验操作要点;

(3) 原始数据的记录表格。

2. 实验中的操作训练

实验操作是动手动脑的重要过程,学生一定要严格按照操作规程进行。要安排好测量点的范围,测点数目,哪些地方测点要取得密一些等;调试时要求细心,操作平稳;对于实验过程中的现象、仪表读数的变化要仔细观察;实验数据要记录在预习报告表格内。

读取数据应注意:

(1) 凡是影响实验结果的现象或者数据处理过程中所必须用到的数据都必须记录,包括大气条件、设备有关尺寸、物料性质及操作数据和实验现象,要尽量详细记录在预习报告本内,决不能记在随便取来的零散纸上;

(2) 记录数据时,不仅记取数值,还必须注明其单位;

(3) 根据测量仪表的精确度,正确地读取有效数字,必须记录直接读取的数据;

(4) 操作过程要平稳,在改变操作条件后,一定要等待过程重新稳定,再开始读取数据(应在实验前计划好记录的时刻或位置等)。

学生应在实验操作中注意培养自己严谨的科学作风,养成良好的科学实验习惯。

3. 编写实验报告

实验报告内容可在预习报告的基础上完成,它包括以下内容:

(1) 实验目的;

(2) 实验装置流程和主要操作步骤;

(3) 实验原始数据及数据整理方法:列出原始数据记录表和数据整理表,并写出一组数据的详细计算过程示例;

(4) 实验结果及结论:将实验结果用图线或关系式表示出,并得出结论;

(5) 讨论:包括对实验结果的估计、误差的分析及问题讨论、实验改进的建议等。

用计算机辅助教学,让学生进行计算机仿真练习。通过计算机熟悉各个实验的操作步骤和注意事项,学生们在预习和仿真练习的基础上写出实验预习报告;进行现场实验装置了解,做到心中有数。

第一章　实验误差分析和数据处理

第一节　实验数据的误差分析

通过实验测量所得大批数据是实验的主要成果，但在实验中，由于测量仪表、测量方法、周围环境和人的观察等方面的原因，实验数据总存在一些误差，所以在整理这些数据时，首先应对实验数据的可靠性进行客观的评定。

误差分析的目的就是评定实验数据的精确或误差，通过误差分析，可以认清误差的来源及其影响，并设法排除数据中所包含的无效成分，还可进一步改进实验方案。在实验中注意哪些是影响实验精确度的主要方面，这对正确地组织实验方法、正确评判实验结果和设计方案，从而提高实验的精确性具有重要的指导意义。

1.1.1　测量误差的基本概念

一、实验数据的误差来源及分类

误差是实验测量值(包括间接测量值)与真值(客观存在的准确值)的差别，基于下列原因，误差可分为三类。

1. 系统误差

系统误差是由于测量仪器不良，如刻度不准，零点未校准；或测量环境不标准，如温度、压力、风速等偏离校准值；或实验人员的习惯和偏向等因素所引起的系统误差。这类误差在一系列测量中，大小和符号不变或有固定的规律，经过精确的校正可以消除。

2. 随机误差(偶然误差)

随机误差由一些不易控制的因素引起，如测量值的波动、实验人员熟练程度及感官误差、外界条件的变动、肉眼观察欠准确等一系列问题。这类误差在一系列测量中的数值和符号是不确定的，而且是无法消除的，但它服从统计规律，所以，可以被发现并且予以定量。实验数据的精确度主要取决于这些偶然误差。因此，它具有决定意义。

3. 过失误差

过失误差主要是由实验人员粗心大意，如读数错误、记录错误或操作失误所致。这类误差往往与正常值相差很大，应在整理数据时加以剔除。

二、实验数据的真值与平均值

真值是待测物理量客观存在的确定值，由于测量时不可避免地存在一定误差，故真值是无法测得的。但是经过细致地消除系统误差，经过无数次测定，根据随机误差中正负误差出现几率相等的规律，测定结果的平均值，称此平均值为最佳值。但是实际上测量次数总是有限的，由此得出的平均值只能近似于真值，称此平均值为最佳值。计算中可将此最佳值当做真值，或用“标准仪表”(即精确度较高的仪表)所测之值当做真值。

化工中常用的平均值为 x_m。

(1) 算术平均值

设 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为各次测量值,n 为测量次数,则算术平均值为

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1-1}$$

算术平均值是最常用的一种平均值,因为测定值的误差分布一般服从正态分布,可以证明算术平均值即为一组等精度测量的最佳值或最可信赖值。

(2) 均方根平均值 x_s

$$x_n = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}{n}} \tag{1-2}$$

(3) 几何平均值 x_c

$$x_c = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n} \tag{1-3}$$

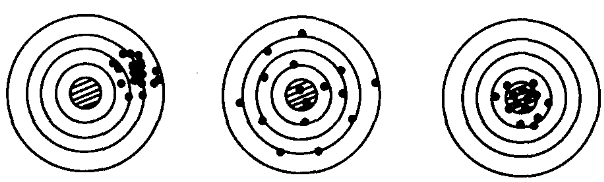
(4) 对数平均值 x_1

$$x_1 = \frac{x_1 - x_2}{\ln(x_1/x_2)} \tag{1-4}$$

对数平均值多用于热量和质量传递中,当 $x_1/x_2<2$ 时,可用算术平均值代替对数平均值,引起的误差不超过 4.4% 。

三、实验数据的精确度

精准度与误差的概念是相辅相成的,精确度高,误差就小;误差大,精确度就低。要区别以下概念:测量中所得到的数据重复性的大小——精密度反应了随机误差的大小,以打靶为例,图 1-1(a)表示弹着点密集而离靶心(真值)甚远,说明精密度高,随机误差小,但系统误差大;图 1-1(b)表示精密度低而正确度较高,即随机误差大,但系统误差较小;图 1-1(c)的系统误差与随机误差均小,精确度均高。



(a)　(b)　(c)

图 1-1　精密度和精确度示意图

四、误差的表示法

1. 绝对误差 d

某物理量在一系列测量中,某测量值与其真值之差称绝对误差。实际工作中常以最佳值代替真值,测量值与最佳值之差称残余误差,习惯上也称为绝对误差,有

$$d_i = x_i - X \approx x_i - x_m \tag{1-5}$$

式中　d_i——绝对误差;

x_i——i 次测量值;

X——真值；

x_m——平均值。

如在实验中对物理量的测量只进行一次，可根据测量仪器出厂鉴定书注明的误差，或可取仪器最小刻度值的一半作为单次测量的误差，例如某压力表注明精(确)度为1.5级，即表明该仪表最大误差为相当档次最大量程的1.5%，若最大量程为0.4MPa，该压力表最大误差为

$$0.4 \times 1.5\%\ \mathrm{MPa} = 0.006\mathrm{MPa} = 6 \times 10^3\mathrm{Pa}$$

又如某天平的感量或名义分度值为0.1mg，则表明该天平的最小刻度或有把握正确的最小单位为0.1mg，即最大误差为0.1mg。

化工原理实验中常用的U形管压差计、转子流量计、秒表、量筒、电压表等原则上均取其最小刻度值为最大误差，而取其最小刻度值的一半作为绝对误差计算值。

2. 相对误差 e

为了比较不同测量值的精确度，以绝对误差与真值(或近似地与平均值)之比作为相对误差，即

$$e = \frac{d}{|X|} \approx \frac{d}{x_m} \times 100\% \tag{1-6}$$

在单次测量中

$$e = \frac{d}{x_i} \times 100\%$$

式中 d——绝对误差；

$|X|$——真值的绝对值；

x_m——平均值。

例1-1 今欲测量大约8kPa(表压)的空气压力，试验仪表用①1.5级，量程0.2MPa的弹簧管式压力表；②标尺分度为1mm的U形管水银柱压差计；③标尺分度为1mm的U形管水柱压差计。求相对误差。

(1) 压力表

绝对误差

$$d = 0.2 \times 0.015\mathrm{MPa} = 0.003\mathrm{MPa} = 3\mathrm{kPa}$$

相对误差

$$e = \frac{3}{8} \times 100 = 37.5\%$$

(2) 水银压差计

绝对误差

$$d = 0.5 \times 1 \times 133.3\mathrm{Pa} = 66.65\mathrm{Pa}$$

其中，133.3≈13.6×9.8(即水银密度×重力加速度)。

相对误差

$$e = \frac{66.65 \times 10^{-3}}{8} \times 100 = 0.83\%$$

(3) 水柱压差计

绝对误差

$$d = 0.5 \times 1 \times 9.8\text{Pa} = 4.9\text{Pa}$$

其中,9.8 为水的密度×重力加速度。

相对误差

$$e = \frac{4.9 \times 10^{-3}}{8} \times 100\% = 0.061\%$$

可见用量程较大的仪表,测量数值较小的物理量时,相对误差较大。

3. 算术平均误差 δ

δ 是一系列测量值的误差绝对值的算术平均值,是表示一系列测定值误差的较好方法之一,有

$$\delta = \frac{\sum |x_i - x_m|}{n} = \frac{\sum |d_i|}{n} \tag{1-7}$$

式中 x_i——测量值,$i = 1,2,3,\cdots,n$;

x_m——平均值;

d_i——绝对误差。

4. 标准误差(均方误差)σ

在有限次测量中,标准误差可用下式表示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_m)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \tag{1-8}$$

标准误差是目前最常用的一种表示精确度的方法,它不但与一系列测量值中的每个数据有关,而且对其中较大的误差或较小的误差敏感性很强,能较好地反映实验数据的精确度,实验愈精确,其标准误差愈小。

1.1.2 间接测量值的误差传递

间接测量值是由几个直接测量值按一定的函数关系计算而得,如雷诺数 $Re = d\,u\rho/\mu$ 就是间接测量值,由于直接测量值有误差,因而使间接测量值也必然有误差。怎样由直接测量值的误差计算间接测量值的误差呢? 这就是误差的传递问题。

一、误差传递的基本方程

设有一间接测量值 y,是直接测量值 $x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n$ 的函数,即

$$y = f(x_1,x_2,\cdots,x_n) \tag{1-9}$$

对上式进行全微分,可得

$$\mathrm{d}y = \frac{\partial f}{\partial x_1}\mathrm{d}x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\mathrm{d}x_2 + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n}\mathrm{d}x_n \tag{1-10}$$

如以 $\Delta y,\Delta x_1,\Delta x_2,\cdots,\Delta x_n$ 分别代替上式中的 $\mathrm{d}y,\mathrm{d}x_1,\mathrm{d}x_2,\cdots,\mathrm{d}x_n$ 则得

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta x_2 + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n}\Delta x_n \tag{1-11a}$$

此即绝对误差的传递公式。它表明间接测量值或函数的误差为各直接测量值的各项分误差之和,而分误差决定于直接测量误差 Δx_i 和误差传递系数$\frac{\partial f}{\partial x_i}$,即

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right| \tag{1-11b}$$

相对误差的计算式为

$$\frac{\Delta y}{y}=\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\Delta x_i}{y}\right| \tag{1-12}$$

上式中各分误差取绝对值，从最保险出发，不考虑误差实际上有抵消的可能，此时函数误差为最大值。

函数的标准误差：

$$\sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2\sigma_i^2} \tag{1-13}$$

式中　σ_i——直接测量值的标准误差。

二、某些常用函数的误差

某些常用函数的最大绝对误差和相对误差列在表 1－1 中。

表 1－1　某些函数的误差传递公式

函数式	误差传递公式	
	最大绝对误差 Δy	最大相对误差 e_r/%
$y=x_1+x_2+x_3$	$\Delta y=\pm(\lvert\Delta x_1\rvert+\lvert\Delta x_2\rvert+\lvert\Delta x_3\rvert)$	$e_r=\Delta y/y$
$y=x_1-x_2$	$\Delta y=\pm(\lvert\Delta x_2\rvert+\lvert\Delta x_1\rvert)$	$e_r=\Delta y/y$
$y=x_1x_2$	$\Delta y=\pm(\lvert x_1\Delta x_2\rvert+\lvert x_2\Delta x_1\rvert)$	$e_r=\pm\left(\left\lvert\frac{\Delta x_1}{x_1}\right\rvert+\left\lvert\frac{\Delta x_2}{x_2}\right\rvert\right)$
$y=x_1x_2x_3$	$\Delta y=\pm(\lvert x_1x_2\Delta x_3\rvert$ $+\lvert x_1x_3\Delta x_2\rvert+\lvert x_2x_3\Delta x_1\rvert)$	$e_r=\pm\left(\left\lvert\frac{\Delta x_1}{x_1}\right\rvert+\left\lvert\frac{\Delta x_2}{x_2}\right\rvert+\left\lvert\frac{\Delta x_3}{x_3}\right\rvert\right)$
$y=x^n$	$\Delta y=\pm(nx^{n-1}\Delta x)$	$e_r=\pm\left(n\left\lvert\frac{\Delta x}{x}\right\rvert\right)$
$y=\sqrt[n]{x}$	$\Delta y=\pm\left(\frac{1}{n}x^{\frac{1}{n}-1}\Delta x\right)$	$e_r=\pm\left(\frac{1}{n}\left\lvert\frac{\Delta x}{x}\right\rvert\right)$
$y=x_1/x_2$	$\Delta y=\pm\left(\frac{x_2\Delta x_1+x_1\Delta x_2}{x_2^2}\right)$	$e_r=\pm\left(\left\lvert\frac{\Delta x_1}{x_1}\right\rvert+\left\lvert\frac{\Delta x_2}{x_2}\right\rvert\right)$
$y=cx$	$\Delta y=\pm\lvert c\Delta x\rvert$	$e_r=\pm\left\lvert\frac{\Delta x}{x}\right\rvert$
$y=\lg x$	$\Delta y=\pm\left\lvert\frac{0.4343}{x}\Delta x\right\rvert$	$e_r=\Delta y/y$
$y=\ln x$	$\Delta y=\pm\left\lvert\frac{\Delta x}{x}\right\rvert$	$e_r=\Delta y/y$

例 1－2 在流量计标定实验中,孔板流量计的流量系数 C_0 可由下式计算:

$$C_0=\frac{\overline{V}_s}{A_0\sqrt{2gR(\rho_0-\rho)/\rho}}=\frac{ZA}{tA_0\sqrt{2gR(\rho_0-\rho)/\rho}}$$

式中 $V_s=V/\tau=ZA/t$;

A_0——孔板的锐孔面积(m^2);

R——U 形管压差计读数(m);

ρ——流体密度(kg/m^3);

ρ_0——批示剂密度(kg/m^3);

g——重力加速度,$g=9.81\ m/s^2$;

V——在 t 时间内所测水的体积(m^3);

A——水箱截面积(m^2);

Z——水位增加的高度(m)。

已知某次测量中

$t=(30.0\pm0.05)s$, $Z=(0.230\pm0.001)m$

$A=(0.250\pm0.002)m^2$, $A_0=(3.142\pm0.016)\times10^{-4}\ m^2$,

$R=(0.4000\pm0.001)m$, $\rho_0=(1.36\pm0.005)\times10^{-4}\ kg/m^3$

$\rho=(1.00\pm0.005)\times10^3\ g/m^3$, $g=9.81(1\pm\ 0.0056)\ m/s^2$

求 C_0 的误差。

解:式中多为乘除,故用相对误差计算比较方便。各量的相对误差:

$$e_i=\frac{0.05}{30}=0.17\% \qquad e_z=\frac{0.001}{0.23}=0.43\%$$

$$e_A=\frac{0.002}{0.25}=0.80\% \qquad e_{A_0}=\frac{0.016}{3.142}=0.51\%$$

$$e_R=\frac{0.001}{0.4}=0.25\% \qquad e_{\rho_0}=\frac{0.005}{1.36}=0.37\%$$

$$e_\rho=\frac{0.005}{1}=0.5\% \qquad e_g=0.56\%$$

根据误差传递公式

$$\begin{aligned}e_{C_0}&=e_Z+e_A+e_{A_0}+e_t+\frac{1}{2}\left(e_g+e_R+e_\rho+\frac{\Delta\rho_0+\Delta\rho}{\rho_0-\rho}\right)\\&=0.43+0.8+0.51+0.17+\frac{1}{2}\left[0.56+0.25+0.5+\left(\frac{0.005+0.05}{13600-1000}\right)\times100\right]\\&=2.6\%\end{aligned}$$

$$C_0=\frac{0.23\times0.25}{30\times3.142\times10^{-4}\sqrt{2\times9.81\times0.4\,\dfrac{(13600-1000)}{1000}}}=0.613$$

故

$$C_0=0.613(1\pm0.026)$$

即 C_0 的真值为 0.597～0.629。

三、小结

误差分析的目的在于计算所测数据(包括直接测量值与间接测量值)的真值或最佳值

范围,并判定其精确性或误差。整理一系列实验数据时,应按以下步骤进行:

(1) 求一组测量值的算术平均值 x_m。根据随机误差符合正态分布的特点,按误差的正态分布曲线,可以得出算术平均值是该组测量值的最佳值(当消除了系统误差并进行无数次测定时该最佳无限接近真值)。

(2) 求出各测定值的绝对误差 d 与标准误差 σ。

(3) 确定各测定值的最大可能误差,并验证各测定值的误差不大于最大可能误差。按照随机误差正态分布曲线可得一个绝对误差($x - x_m$)出现在 $\pm 3\sigma$ 范围内的概率为 99.7%,也就是说($x - x_m$) $> \pm 3\sigma$ 的概率是极小的(0.3%),故以 $> \pm 3\sigma$ 为最大可能误差,超出 $\pm 3\sigma$ 的误差已不大于随机误差,而是过失误差,因此该数据应予以剔除。

(4) 在满足第(3)条件后,再确定其算术平均值的标准差。

根据误差传递方程算术平均值的标准差为

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1-14}$$

例 1-3 某参数共测定了16 次,结果如下:

x_i = 102,98,99,100,97,140,95,100,98,96,102,101,102,99,102

求其最佳数及误差。

解:列表计算其平均值及误差(见表 1-2)。

表 1-2 平均值 R 误差

序号	原始数据 x_i	第一次整理		第二次整理		
		$x_m - x_i$	$(x_m - x_i)^2$	x_i	$x_m - x_i$	$(x_m - x_i)^2$
1	102	0	0	102	-2.53	6.4
2	98	4	16	98	1.47	2.2
3	99	3	9	99	0.47	0.2
4	100	2	4	100	-0.53	0.3
5	97	5	25	97	2.47	6.1
6	140	-38	1444			
7	95	7	49	95	4.47	20.0
8	100	2	4	100	-0.53	0.3
9	98	4	16	98	1.47	2.2
10	96	6	36	96	3.47	12.0
11	102	0	0	102	-2.53	6.4
12	101	1	1	101	-1.53	2.3
13	101	1	1	101	-1.53	2.3
14	102	0	0	102	-2.53	6.4
15	99	3	9	99	0.47	0.2
16	102	0	0	102	-2.53	6.4
总计	1632	0	1614	1492	0.15	73.7

求算术平均值

$$x_m = \frac{1632}{16}102$$

个别测量值的最大可能误差为

$$3\sigma = 3\sqrt{\frac{\sum(x_m - x_i)^2}{n-1}} = 3\sqrt{\frac{1614}{16-1}} = 31$$

检查各$(x_m - x_i)$中,第六个数据的$|x_m - x_i| = 38 > 31$,故此数据是不可靠的,舍弃此数据后进行第二次整理。

$$x_m = \frac{1492}{15} = 99.47$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{73.7}{14}} = 2.29$$

$$3\sigma = 6.87$$

第二次整理中所有$|x_m - x_i| < 6.87$,所以认为这些数据是可取的,由此可得算术平均值的标准误差

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{2.29}{\sqrt{15}} = 0.59$$

故其最佳值及误差可表示为

$$x_m = 99.5 \pm 0.59$$

或

$$x_m = 99.5(1 \pm 0.0059)$$

1.1.3 实验数据的有效数字与记数法

一、有效数字

实验数据或根据直接测量值的计算结果,总是以一定位数的数字来表示。究竟取几位数才是有效的呢?是不是小数点后面的数字越多就越正确?或者运算结果保留位数越多就越准确?其实这是错误的想法。因为第一,数据中小数点的位置不决定准确度,而与所用单位大小有关;第二,与测量仪表的精度有关,一般应记录到仪表最小刻度的十分之一位。例如,某液面计标尺的最小分度为1mm,则读数可以到0.1mm。如在测定时液位高在刻度524mm与525mm的中间,则应记液面高为524.5mm,其中前三位是直接读出的,是准确的,最后一位是估计的,是欠准的或可疑的,称该数据为4位有效数。如液位恰在524mm刻度上,则数据应记作524.0mm,若记作524mm,则失去了一位精密度。

总之,有效数中应有而且只能有一位(末位)欠准数字。

有效数与误差的关系:由上可见,液位高度524.5mm中,最大误差为±0.5mm,也就是说误差为末位的一半。

二、科学计数法

在科学与工程中,为了清楚地表达有效数或数据的精度,通常将有效数写出并在第一位数后加小数点,而数值的数量级由10的整数幂来确定,这种以10的整数幂来记数的方法称科学记数法。例如:0.0088应记作8.8×10^{-3},88000(有效数3位)记作8.80×10^4。

应注意,科学记数法中,在10的整数幂之前的数字应全部为有效数。

三、有效数的运算

(1) 加减法运算。各不同位数有效数相加减,其和或差的有效数等于其中位数最少的一个。例如测得设备进出口的温度分别为65.58℃与30.4℃,则

温度和:65.58(?)℃+30.4(?)℃=95.9(?)8(?)℃;

温度差:65.58(?)℃-30.4(?)℃=35.1(?)8(?)℃。

结果中有两位欠准值,这与有效值规则不符,故第二位欠准数应舍去,按四舍五入法,其结果应为96.0℃与35.2℃。

(2) 乘除法计算。乘积或商的有效数,其位数与各乘、除数中有效数位数最少的相同。如测得管径 $D=50.8\text{mm}$,其面积 A 为

$$A=\frac{\pi}{4}D^2=\frac{3.14}{4}\times 50.8^2\text{mm}^2$$
$$=2.03\times 10^3\text{mm}^2$$

注意,π,e,g 等常数有效位数可多可少,根据需要选取。

(3) 乘方与开方运算。乘方、开方后的有效数与其底数相同。

(4) 对数运算。对数的有效数位数与其真数相同,例如

$$\lg 2.35=3.71\times 10^{-1};\lg 4.0=6.0\times 10^{-1}$$

(5) 在四个数以上的平均值计算中,平均值的有效数字可较各数据中最小有效位数多一位。

(6) 所有取自手册上的数据,其有效数按计算需要选取,但原始数据如有限制,则应服从原始数据。

(7) 一般在工程计算中取三位有效数已足够精确,在科学研究中根据需要和仪器的可能,可以取到四位有效数字。

从有效数的运算规则可以看到,实验结果的精确度同时受几个仪表的影响时,则测试中要使几个仪表的精确度一致,采用一两个精度特别高的仪表无助于整个实验结果精度的提高,如过滤实验中,计量滤液体积的量具分度为0.1L,而用分度为千分之一秒的电子秒表计时,测得27.5635s中流过滤液1.35L,计算每升滤液通过所需的时间为

$$t=27.5635\ \text{s}/1.35\ \text{L}=27.6\ \text{s}/1.35\ \text{L}=20.4\ \text{s/L}$$

第二节　实验数据处理

由实验测得的大量数据,必须进行进一步的处理,使人们清楚地观察到各变量之间的定量关系,以便进一步分析实验现象,得出规律,指导生产与设计。

数据处理方法有三种:

(1) 列表法。将实验数据列成表格以表示各变量间的关系。通常这是整理数据的第一步。为标绘曲线或整理成为方程式打下基础。

(2) 图示法。将实验数据在坐标纸上绘成曲线,直观而清晰地表达出各变量之间相互关系,分析极值点、转折点、变化率及其他特性,便于比较,还可以根据曲线得出相应的方程式;某些精确的图形还可用于不知数学表达式的情况下进行图表积分和微分。