化 工 原 理 实 验

雷良恒　潘国昌　郭庆丰　编著

清 华 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书是一本化工原理实验教材，分为五部分：化工实验数据处理，化工实验中常用仪表，化工原理基础实验，化工综合实验，附录。它包括化工原理全国指导委员会规定的实验内容：流体流动阻力的测定，离心泵特性曲线测定，恒压过滤常数测定，传热实验，吸收系数测定，精馏板效率测定，干燥曲线测定等七个实验。此外，还包括流量计标定，固体流态化，板式塔流体力学，填料塔流体力学，振动筛板柱萃取实验，填料等板高度测定和流体流过固体的绕流实验。

书末三个附录分别为 SI 单位及换算、常用数据和某些仪器的使用方法。

本书与清华大学出版社已经出版的《化工原理》教材可以配套使用，也可以单独采用。本书还备有配套软件"化工原理实验 CAI 系统"。

本书实用性强，可作为高校本科和大专的化工原理实验教材和从事化工、生物化工、环境化工等专业技术人员的参考书。

(京)新登字 158 号

化 工 原 理 实 验
雷良恒　潘国昌　郭庆丰　编著

☆

清华大学出版社出版
北京　清华园
顺义振华印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16　印张：8.25　字数：196 千字
1994 年 3 月第 1 版　1994 年 3 月第 1 次印刷
印数：0001—4000
ISBN 7-302-01408-6/O・148
定价：4.80 元

目　　录

绪　　论

化工原理实验的教学目的与要求

化工原理(单元操作)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。化工原理课中所涉及的理论和计算方法是与实验研究紧密联系的。可以说,化工原理是建立在实验基础上的学科,化工原理实验在这门课程中占有重要的地位。

长期以来化工原理实验常以验证课堂理论为主,教学安排上也仅作为化工原理课程的一部分。近20年来,由于化学工程、石油化工、生物工程的飞速发展,要求研制新材料,寻找新能源,开发高科技产品,对化工过程与设备的研究提出了更高的要求,新型高效率低能耗的化工设备的研究也更为迫切。不少高等院校为了适应新形势的要求,加强了学生实践环节的教育,以培养有创造性和有独立工作能力的科技人材。许多教师提出化工原理实验应单独设课,制定实验课的教学大纲,并确立化工原理实验课在培养学生中的应有地位。

一、化工原理实验的教学目的

化工原理实验课是化工类专业教学计划中的一门必修课,其教学目的是:

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,当学生做了化工原理实验后,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。例如离心泵的性能实验,安排了不同转速下泵的性能测定。第一步让学生固定泵的转速,改变阀门开度,测得一组定转速下的泵的性能曲线,再改变泵的转速,按同样操作步骤,可以得到变转速下一系列泵性能曲线;第二步让学生固定管道中的阀门开度,改变泵的转速,可以得到一根管道性能曲线,再改变管道中的阀门开度,又可以测得改变管道阻力的一系列管道性能曲线。通过实验可测出一系列泵的性能曲线和管道性能曲线,了解泵性能和管道性能的各种影响因素,从而帮助学生理解从书本上较难弄懂的概念。

2．培养学生从事实验研究的能力

理工科高等院校的毕业生,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。

3. 培养学生实事求是、严肃认真的学习态度

实验研究是实践性很强的工作,对从事实验者的要求是很高的,化工原理实验课要求学生具有一丝不苟的工作作风和严肃认真的工作态度,从实验操作,现象观察到数据处理等各个环节都不能丝毫马虎。如果粗心大意,敷衍了事,轻则实验数据不好,得不出什么结论,重则会造成设备或人身事故。

总之实验教学对于学生的培养是不容忽视的,对学生动手和解决实际问题能力的锻炼是书本无法代替的。化工原理实验教学对于化工专业的学生来说仅仅是工程实践教学的开始,在高年级的专业实验和毕业论文阶段还要继续提高。

二、化工原理实验的教学要求

化工原理实验对于学生来说是第一次接触到用工程装置进行实验,学生往往感到陌生,无从下手。有的学生又因为是几个人一组而有依赖心理,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。

有计算机辅助教学手段时,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。报告内容为实验目的、原理、装置情况、注意事项。最后还要进行现场了解,做到心中有数。经指导教师提问检查后方可进行实验。

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,实验数据要记录在表格内,并注明单位、条件。实验现象要尽量详细记录在记录本内,决不能记在随便取来的零散纸上,有些当时不能理解的实验现象,重复进行一遍仍然如此,需如实记录下来,待实验结束经过思考后,提出自己的看法或结论。学生应在实验操作中注意培养自己严谨的科学作风,养成良好的习惯。

3. 实验后的总结

实验总结是以实验报告的形式完成的。实验报告是一项技术文件,是学生用文字表达技术资料的一种训练,不少学生对实验报告没有给予足够的重视,或者不会用准确的科学的数字和观点来书写报告,图形表达也缺乏训练,因此,对学生来说,需要严格训练编写实验报告的能力,这对今后写好研究报告和科研论文是必不可少的。

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:实验目的、流程和操作步骤,数据整理(包括一个计算示例)和结论。有时还要加上问题讨论等。

实验报告必须书写工整,图形绘制必须用直尺或曲线板。实验报告是考核实验成绩的主要方面,应认真对待。

第一章　化工实验数据处理

第一节　实验数据的误差分析

1-1-1　误差分析在化工实验研究中的重要性

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性或误差，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，细心操作，从而提高实验的精确性。

1-1-2　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）之差别，基于下列原因，误差可分为三类：

1．系统误差

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；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）

是由一些不易控制的因素所引起的，如测量值的波动，肉眼观察欠准确等。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，也是可以认识的。

3．过失误差

它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、实验数据的精准度

精准度与误差的概念是相反相成的，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，称精密度，它反应随机误差的大小，以打靶为例，图 1-1(a) 表示弹着点的密集而离靶心（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) 的随机误差大，但系统误差较小，即精密度低而正确度较高；图 1-1(c) 的系统误差与随机误差均小。精确度高。精确度（或准确度）表示测量结果与真值接近程度，精确度高则精密度与正确度均高。

三、实验数据的真值与平均值

图 1-1　精密度和精确度示意图

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，测定结果的平均值可以无限接近真值。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作真值，或用"标准仪表"(即精确度较高的仪表)所测之值当作真值。

化工中常用的平均值有:

(1) 算术平均值 x_m

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

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

(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_l

$$x_l = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}}。\tag{1-4}$$

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%。

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:

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

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之 1.5%,若最大量程为 0.4MPa,该压力表最大误差为:

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

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。

化工原理实验中最常用的 U 形管压差计、转子流量计、秒表、量筒、电压表等仪表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:

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

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① 1.5 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　$d = 0.2 \times 0.015\text{MPa} = 0.003\text{MPa} = 3\text{kPa}$,

相对误差　$e\% = \frac{3}{8} \times 100 \approx 37.5\%$。

(2) 水银压差计

绝对误差　$d = 0.5 \times 1 \times 133.3\text{Pa} = 66.65\text{Pa}$,

其中,$133.3 = 13.6 \times 9.8$(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

它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:

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

式中: x_i——测量值, $i=1, 2, \cdots, n$;

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。

1-1-3 实验数据的有效数与记数法

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?这要根据测量仪表的精度来确定,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,若记为 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 1 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 应记为 8.8×10^{-3}, 88000(有效数 3 位)记为 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=50.8mm,其面积A为:

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

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:

$$t=27.5635s/1.35L=27.6s/1.35L=20.4s/L。$$

可见用一个0.1秒分度的机械秒表精度就足够了。

1-1-4 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 $Re=du\rho/\mu$ 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 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的函数:

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

对上式进行全微分,可得

$$dy=\frac{\partial f}{\partial x_1}dx_1+\frac{\partial f}{\partial x_2}dx_2+\cdots+\frac{\partial f}{\partial x_n}dx_n,\tag{1-10}$$

如以 $\Delta y, \Delta x_1, \Delta x_2, \cdots, \Delta x_n$ 分别代替上式中的 $dy, dx_1, dx_2, \cdots, dx_n$ 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

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

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

现将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
$y = x_1 + x_2 + x_3$	$\Delta y = \pm(\lvert\Delta x_1\rvert + \lvert\Delta x_2\rvert + \lvert\Delta x_3\rvert)$	$e_r = \Delta y / y$
$y = x_1 - x_2$	$\Delta y = \pm(\lvert\Delta x_1\rvert + \lvert\Delta x_2\rvert)$	$e_r = \Delta y / y$
$y = x_1 x_2$	$\Delta y = \pm(\lvert x_1 \Delta x_2\rvert + \lvert x_2 \Delta x_1\rvert)$	$e_r = \pm\left(\left\lvert\frac{\Delta x_1}{x_1}\right\rvert + \left\lvert\frac{\Delta x_2}{x_2}\right\rvert\right)$
$y = x_1 x_2 x_3$	$\Delta y = \pm(\lvert x_1 x_2 \Delta x_3\rvert + \lvert x_1 x_3 \Delta x_2\rvert + \lvert x_2 x_3 \Delta x_1\rvert)$	$e_r = \pm\left(\left\lvert\frac{\Delta x_1}{x_1}\right\rvert + \left\lvert\frac{\Delta x_2}{x_2}\right\rvert + \left\lvert\frac{\Delta x_3}{x_3}\right\rvert\right)$
$y = x^n$	$\Delta y = \pm(n x^{n-1} \Delta x)$	$e_r = \pm n\left\lvert\frac{\Delta x}{x}\right\rvert$
$y = \sqrt[n]{x}$	$\Delta y = \pm \frac{1}{n} x^{\frac{1}{n}-1} \Delta x$	$e_r = \pm \frac{1}{n}\left\lvert\frac{\Delta x}{x}\right\rvert$
$y = x_1 / x_2$	$\Delta y = \pm \frac{x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2}{x_2^2}$	$e_r = \pm\left(\left\lvert\frac{\Delta x_1}{x_1}\right\rvert + \left\lvert\frac{\Delta x_2}{x_2}\right\rvert\right)$
$y = cx$	$\Delta y = \pm\lvert c \Delta x\rvert$	$e_r = \pm\left\lvert\frac{\Delta x}{x}\right\rvert$
$y = \lg x$	$\Delta y = \pm\left\lvert\frac{0.4343}{x} \Delta x\right\rvert$	$e_r = \Delta y / y$
$y = \ln x$	$\Delta y = \pm\left\lvert\frac{\Delta x}{x}\right\rvert$	$e_r = \Delta y / y$

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:

$$C_0 = \frac{V_s}{A_0\sqrt{2gR(\rho_0-\rho)/\rho}} = \frac{ZA}{tA_0\sqrt{2gR(\rho_0-\rho)/\rho}}。$$

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——**指示剂密度**, kg/m^3;

g——**重力加速度**, $9.81 m/s^2$。

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

$t = (30.0 \pm 0.05) s$　　　　$Z = (0.230 \pm 0.001) m$,

$A = (0.250 \pm 0.002) m^2$,　　　　$A_0 = (3.142 \pm 0.016) \times 10^{-4} m^2$,

$R = (0.400 \pm 0.001) m$,　　　　$\rho_0 = (1.36 \pm 0.005) \times 10^{-4} kg/m^3$,

$\rho = (1.00 \pm 0.005) \times 10^3 kg/m^3$,　　　　$g = 9.81(1 \pm 0.0056) m/s^2$,

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:

$e_t = \frac{0.05}{30} = 0.17\%$,　　$e_Z = \frac{0.001}{0.23} = 0.43\%$,

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

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

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

根据误差传递公式

$$e_{C_0} = e_Z + e_A + e_{A_0} + e_t + \frac{1}{2}\left[e_g + e_R + e_\rho + \frac{\Delta\rho_0 + \Delta\rho}{\rho_0 - \rho}\right]$$

$$= 0.43 + 0.8 + 0.51 + 0.17 + \frac{1}{2}\left[0.56 + 0.25 + 0.5 + \frac{0.005 + 0.05}{13600 - 1000} \times 100\right] = 2.6\%$$

$$C_0 = \frac{0.23 \times 0.25}{30 \times 3.142 \times 10^{-4}\sqrt{2 \times 9.81 \times 0.4\frac{(13600-1000)}{1000}}} = 0.613$$

故　　$C_0 = 0.613(1 \pm 0.026)$

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,该最佳值无限接近真值)。

(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$\pm 3\sigma$的误差已不属于随机误差,而是过失误差,因此该数据应于剔除。

(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:

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

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, 101, 102, 99, 102,

求其最佳数及误差。

解: 列表计算其平均值及误差。

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
$\sum$	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

$$x_m = 99.5(1 \pm 0.0059)。$$

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。这通常是整理数据的第一步,为标绘曲线图或整理成方程式打下基础。

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解积分和微分。

3. 回归分析法

利用最小二乘法对实验数据进行统计处理得出最大限度符合实验数据的拟合方程式,并判定拟合方程式的有效性,这种拟合方程式有利于用电子计算机进行计算。

1-2-1　实验数据的列表法

实验数据表可分为原始记录表、中间运算表和最终结果表。

原始记录表必须在实验前设计好, 可以清楚地记录所有待测数据, 如流体流动阻力实验原始记录表格式如下:

序号	流量计读数	流量 $/m^3/s$	光滑管阻力/cm		粗糙管阻力/cm		局部阻力/cm	
			左	右	左	右	左	右
1								
2								
⋮								

光滑管管径: mm, 粗糙管管径: mm 长度: m
水温: ℃, 其他固定参数:……

运算表格有助于进行运算, 不易混淆, 如流体流动阻力的运算表格为:

序号	流量 $/m^3/s$	流速 /m/s	$Re\times10^{-4}$	沿程阻力 /m	摩擦系数 $\lambda\times10^2$	局部阻力 /m	阻力系数 ξ
1							
2							
⋮							

实验最终结果表只表达主要变量之间的关系和实验的结论, 如

流体流动阻力实验结果表

序号	粗 糙 管		光 滑 管		局 部 阻 力	
	$Re\times10^{-4}$	$\lambda\times10^2$	$Re\times10^{-4}$	$\lambda\times10^2$	$Re\times10^{-4}$	ξ
1						
2						
⋮						

列表注意点:

(1) 表格的表头要列出变量名称、单位。

(2) 数字要注意有效数, 要与测量仪表的精确度相适应。

(3) 数字较大或较小时要用科学记数法表示, 将 $10^{\pm n}$记入表头, 注意: 参数$\times10^{\pm n}$= 表中数字。

(4) 科学实验中, 记录表格要正规, 原始数据要书写清楚整齐, 不得潦草, 要记录各种实验条件, 并妥为保管。

1-2-2 实验数据的图示(解) 法

表示实验中各变量关系最通常的办法是将离散的实验数据标于坐标纸上, 然后联成光滑曲线或直线。

当只有两个变量 x, y 时, 通常将自变量 x 标于坐标纸的横轴, 因变量 y 在纵轴, 得到

一根曲线;如有三个变量 x,y,z,通常在某一 Z 下标出一根 y-x 曲线,改变 Z 得到一组不同 Z 的 y-x 曲线。四个以上变量的关系难以用图形表示。

作图时注意:① 选择合适的坐标,使图形直线化,以便求得经验方程式;② 坐标分度要适当,使变量的函数关系表现清楚。

一、坐标纸的选择

化工中常用的坐标有直角坐标,对数坐标和半对数坐标,市场上有相应的坐标纸出售。

化工实验中常遇到的函数关系有:

直线关系:$y = a + bx$,选用普通坐标纸;

幂函数关系:$y = ax^{b}$,选用对数坐标纸,因 $\lg y = \lg a + b\lg x$,在对数坐标纸上为一直线。

指数函数关系:$y = a^{bx}$,选用半对数坐标纸,因 $\lg y$ 与 x 呈直线关系。

此外,某变量最大值与最小值数量级相差很大时。或自变量 x 从零开始逐渐增加的初始阶段,x 少量增加会引起因变量极大变化。均可用对数坐标。

二、坐标的分度

坐标分度指每条坐标轴所代表的物理量大小,即选择适当的坐标比例尺。

为了得到良好的图形,在量 x 和 y 的误差 Δx,Δy 已知的情况下,比例尺的取法应使实验“点”的边长为 $2\Delta x$、$2\Delta y$,而且使 $2\Delta x = 2\Delta y = 1 - 2\text{mm}$,若 $2\Delta y = 2\text{mm}$,则 y 轴的比例尺 M_y 应为:

$$M_y = \frac{2\text{mm}}{2\Delta y} = \frac{1}{\Delta y}\text{mm}/y。$$

如已知温度误差 $\Delta T = 0.05℃$,则

$$M_T = \frac{1\text{mm}}{0.05℃} = 20\text{mm}/℃,$$

则 1℃温度的坐标为 20mm 长,若感太大可取 $2\Delta x = 2\Delta y = 1\text{mm}$,此时 1℃的坐标为 10mm 长。

三、对数坐标的特点

对数坐标的特点是:某点与原点的距离为该点表示量的对数值,但是该点标出的量是其本身的数值,例如对数坐标上标着 5 的一点至原点的距离是 $\lg 5 = 0.7$,见图 1-2。

图 1-2　对数坐标的标度法

图 1-2 中上面一条线为 x 的对数刻度,而下一条线为 lgx 的线性(均匀)刻度。

对数坐标上,1,10,100,1000 之间的实际距离是相同的,因为上述各数相应的对数值