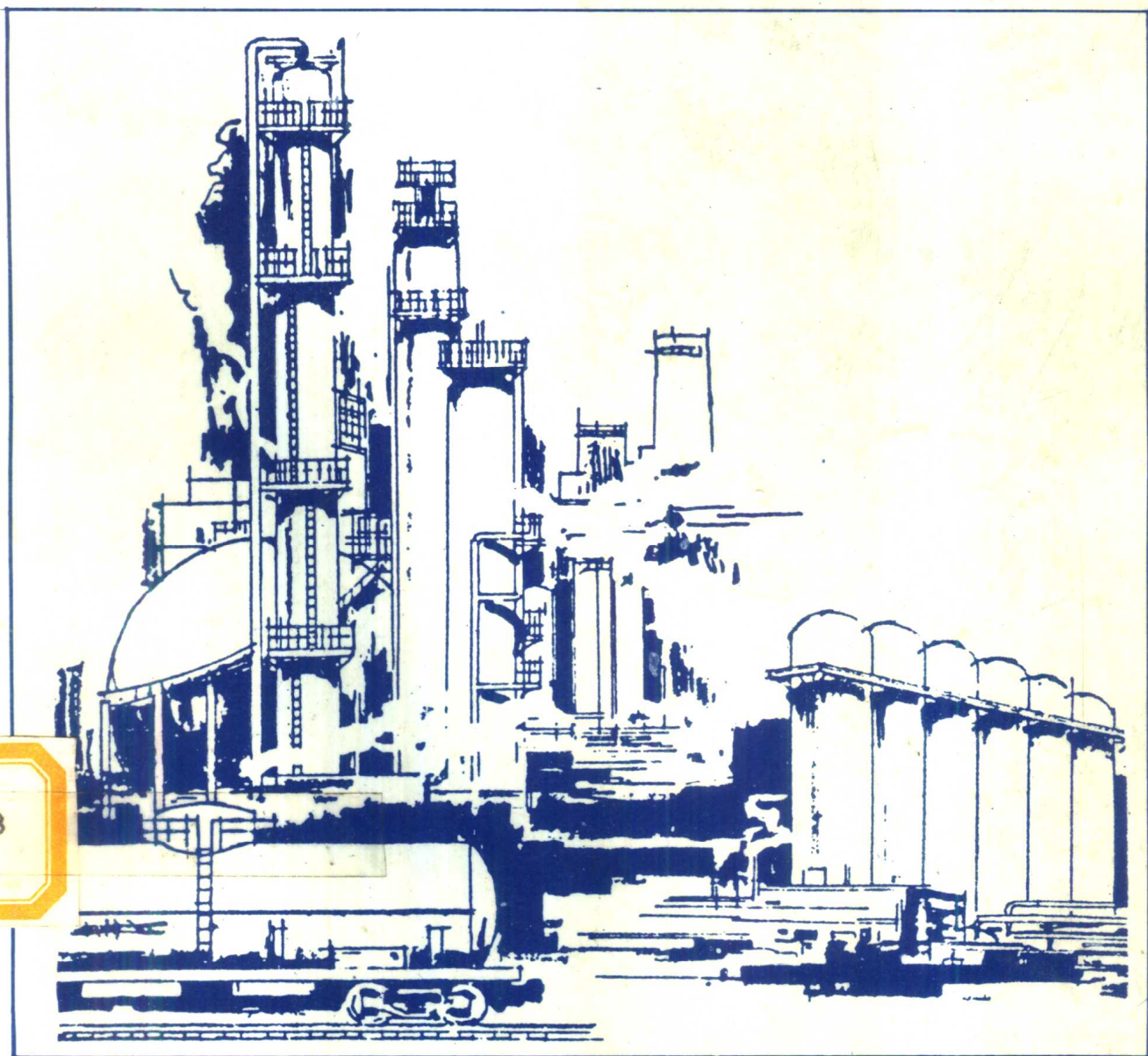


# 化工原理实验

大连理工大学化工原理教研室 编

大连理工大学出版社



2-33

14

# 化工原理实验

大连理工大学化工原理教研室编

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

### 内 容 简 介

本书是根据大连理工大学化工原理教研室的多年教学实践,并参考国内外的教材,由该室组织编写,与该室编写的《化工原理》教材配套使用。该书主要介绍化工原理实验数据处理方法及计算(编有软件使用程序)和化工原理各种单元操作共 12 个实验,包括流体力学实验、过滤实验、传热实验、精馏、吸收、萃取等传质实验和干燥实验。本书注重理论与实践结合,注意学生工程观点和实际能力的培养,可供高等院校化工类和相近专业师生参考,亦可供从事化工实验研究的研究生和实验人员参考。

本书由刘春祥主编,参加编写工作的有刘春祥、樊希山、匡国柱、郝健、潘艳秋、周志坚等。

### 化 工 原 理 实 验 Huagongyuanli Shiyan 大连理工大学化工原理教研室 编

\* \* \*  
大连理工大学出版社出版发行  
(大连市凌水河)  
(邮政编码:116024)  
大连理工大学印刷厂印刷

\* \* \*  
开本:787×1092 1/16 印张:8 字数:186千字  
1995年9月第1版 1995年9月第1次印刷  
印数:0001--2000册

\* \* \*  
责任编辑:刘新峰 责任校对:陆雨  
封面设计:孙宝福

\* \* \*  
ISBN 7-5611-1037-5

定价:9.00 元

TQ·33

# 目 录

绪 论	1
第一章 实验数据的处理	6
第一节 实验数据的采集与计算	6
1.1.1 实验数据的采集	6
1.1.2 实验数据的计算	7
第二节 实验数据的处理方法	9
1.2.1 实验数据列表法	9
1.2.2 实验数据的图示法	9
1.2.3 实验数据数学方程表示法	11
1.2.4 曲线拟合与最小二乘法	18
1.2.5 线性方程组求解	31
1.2.6 插值法	34
附录 1 数据处理源程序及使用说明	40
第二章 实验	57
第一节 流体力学实验	57
2.1.1 流体阻力实验(实验一)	57
2.1.2 流量计实验(实验二)	61
2.1.3 离心泵性能实验(实验三)	64
第二节 过滤实验	66
2.2.1 真空恒压过滤实验(实验四)	66
2.2.2 板框过滤机实验(实验五)	70
第三节 传热实验	73
2.3.1 圆形直管中气体传热系数的测定(实验六)	73
2.3.2 计算机数据采集系统及实验软件使用说明	76
2.3.3 圆形直管中液体传热膜系数的测定(实验七)	82
第四节 传质实验	85
2.4.1 筛板式精馏塔的操作及塔板效率测定(实验八)	85
附录 2 液体比重天平使用说明	88
附录 3 乙醇水溶液在常压下的汽液平衡数据	89
2.4.2 填料塔中浓相传质系数测定(实验九)	89
附录 4 水中溶解氧的极谱分析法	93

附录 5 常压下不同温度空气饱和水溶解氧的浓度 .....	95
2.4.3 液-液萃取实验(实验十) .....	96
第五节 干燥实验 .....	99
2.5.1 干燥及干燥曲线测定(实验十一).....	99
2.5.2 单层圆筒流化床干燥实验(实验十二) .....	103
主要参考资料.....	108
附表 化工原理实验记录表.....	109

# 绪 论

## 一、化工原理实验的意义及目的

化工原理是一门研究化工生产过程的工程学科,主要研究生产过程中各种单元操作的规律,并用这些规律解决生产中的工程问题。该课程紧密联系化工生产实际,是化工类各专业学生的一门重要技术基础课。

化工原理实验是配合化工原理课堂理论教学设置的实验课,是教学中的实践环节。化工原理实验不同于基础课实验,具有典型的工程实际特点。实验都是按各单元操作原理设置的,其工艺流程、操作条件和参数变量,都比较接近于工业应用。研究问题的方法是用工程的观点去分析、观察和处理数据。实验结果可以直接用于或指导工程计算和设计。学习、掌握化工原理的实验及其研究方法,是学生从理论学习到工程应用的一个重要实践过程。所以化工原理实验在教学过程中是十分重要的。通过实验达到以下教学目的:

1. 配合理论教学,通过实验从实践中进一步学习、掌握和运用学过的基本理论。
2. 运用学过的化工基本理论,分析实验过程中的各种现象和问题,培养训练学生分析问题和解决问题的能力。
3. 了解化工实验设备的结构、特点,学习常用实验仪器仪表的使用,使学生掌握化工实验的基本方法并通过实验操作,训练学生的实验技能。
4. 通过实验数据的分析处理,计算机的应用,编写报告,培养训练学生实际计算和组织报告的能力。
5. 通过实验培养学生良好的学风和工作作风,以严谨、科学、求实的精神对待科学实验与开发研究工作。

## 二、化工原理实验研究方法

化学工程学科,如同其它工程学科一样,除了生产经验的总结之外,实验研究是学科建立和发展的重要基础。多年来,化工原理在发展过程中形成的研究方法有:直接实验法、理论指导下的实验研究方法和数学模型法等几种。

### 1. 直接实验法

直接实验法是解决工程实际问题最基本的方法。一般是指对特定的工程问题,进行直接实验测定,从而得到需要的结果。这种方法得到的结果较为可靠,但它往往只能用到条件相同的情况,具有较大的局限性。例如物料干燥,已知物料的湿分,利用空气作干燥介质,在空气温度、湿度和流量一定的条件下,直接实验测定干燥时间和物料失水量,可以作出该物料的干燥曲线,如果物料和干燥条件不同,所得干燥曲线也不同。

对一个多变量影响的工程问题,进行实验,为研究过程的规律,用网络法实验测定,即依次固定其它变量,改变某一个变量测定目标值。如果变量数为 $m$ 个,每个变量改变条件数为 $n$ 次,按这种方法规划实验,所需实验次数为 $n^m$ 次。依这种方法组织实验,所需实验数目非常大,难以实现。所以实验需要在一定理论指导下进行,以减少工作量,并使得到的

结果具有一定的普遍性。因次分析法是化学工程实验研究广泛使用的一种方法。

## 2. 因次分析法

在流体力学和传热过程的问题研究中,出现许多影响这些过程的变量,如设备的几何条件,流体流动条件,流体的物性变化等。利用直接实验法测定,使研究工作困难,因为改变许多变量来做实验,这几乎是不可能的,而且实验结果也难以普遍使用。利用因次分析方法,可以大大减少工作量。

因次分析法,所依据的基本原则是物理方程的因次一致性。将多变量函数,整理为简单的无因次数群的函数,然后通过实验归纳整理出准数关系式,从而大大减少实验工作量,同时也容易将实验结果应用到工程计算和设计中。

因次分析法的具体步骤是:

- (1) 找出影响过程的独立变量;
- (2) 确定独立变量所涉及的基本因次;
- (3) 构造变量和自变量间的函数式,通常以指数方程的形式表示;
- (4) 用基本因次表示所有独立变量的因次,并写出各独立变量的因次式;
- (5) 依据物理方程的因次一致性和  $\pi$  定理得出准数方程;
- (6) 通过实验归纳总结准数方程的具体函数式。

例如流体在管内流动的阻力和摩擦系数  $\lambda$  的计算研究,是利用因次分析方法和实验得到解决的。实验得知,影响流体在管内流动阻力的因素有:管径  $d$ ,管长  $l$ ,流速  $u$ ,流体的物性密度  $\rho$  和粘度  $\mu$  及管壁的粗糙度  $\epsilon$ ,写成函数关系式为:

$$-\Delta P = f(d, l, u, \rho, \mu, \epsilon) \quad (1)$$

由白金汉  $\pi$  定理指出,无因次数群数  $N$ ,等于影响现象的变量数  $n$  减去基本因次数  $m$ ,即  $N=n-m$ 。由以上分析,变量数  $n=7$  个,表示这些物理变量的基本因次  $m=3$ ,有质量  $[M]$ ,长度  $[L]$  和时间  $[\theta]$ 。由  $\pi$  定理可知可以整理得到 4 个无因次数群。将(1)式写成乘幂函数的形式,即:

$$-\Delta P = K d^a l^b u^c \rho^d \mu^e \epsilon^f \quad (2)$$

通过因次分析,将变量无因次化。式中各物理量的因次是:

$$\begin{aligned} \Delta P &= [ML^{-1}\theta^{-2}] & \rho &= [ML^{-3}] \\ d = l &= [L] & \mu &= [ML^{-1}\theta^{-1}] \\ u &= [L\theta^{-1}] & \epsilon &= [L] \end{aligned}$$

将各物理量的因次代入式(2),则两端因次为:

$$ML^{-1}\theta^{-2} = L^a L^b (L\theta^{-1})^c (ML^{-3})^d (ML^{-1}\theta^{-1})^e L^f$$

$$\text{即} \quad ML^{-1}\theta^{-2} = L^{a+b+c-3d-e+f} M^{d+e} \theta^{-c-e}$$

根据物理方程因次一致原则,上式等号两侧各基本量的因次的指数必然相等,可得方程组:

$$\begin{aligned} \text{对因次}[M] & \quad d + e = 1 \\ \text{对因次}[L] & \quad a + b + c - 3d - e + f = -1 \\ \text{对因次}[\theta] & \quad -c - e = -2 \end{aligned}$$

这样得到三个基本方程,有六个未知数,设用其中三个未知数  $b, e, f$  来表示  $a, d, c$ ,解此方程组,可得:

$$\begin{cases} a = -b - c + 3d + e - f - 1 \\ d = 1 - e \\ c = 2 - e \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = -b - e - f \\ d = 1 - e \\ c = 2 - e \end{cases}$$

求得的  $a, d, c$  代入方程(2)式, 即得

$$-\Delta P = K d^{-b-e-f} l^b u^{2-e} \rho^{1-e} \mu^e \epsilon^f$$

将指数相同的各物理量归并在一起得:

$$\frac{-\Delta P}{u^2 \rho} = K \left( \frac{l}{d} \right)^b \left( \frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left( \frac{\epsilon}{d} \right)^f \quad (3)$$

$$-\Delta P = 2K \left( \frac{l}{d} \right)^b \left( \frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left( \frac{\epsilon}{d} \right)^f \left( \frac{u^2 \rho}{2} \right) \quad (4)$$

将此式与计算流体在管内摩擦阻力公式

$$-\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \left( \frac{u^2 \rho}{2} \right) \quad (5)$$

相比较, 整理得到研究摩擦系数  $\lambda$  的关系式, 即:

$$\lambda = 2K \left( \frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left( \frac{\epsilon}{d} \right)^f \quad (6)$$

或

$$\lambda = \varphi(Re, \epsilon/d) \quad (7)$$

由以上分析可以看出, 在因次分析法的指导下, 将一个复杂的多变量影响的管内流体阻力计算问题, 简化为摩擦系数  $\lambda$  的研究和确定。具体的函数关系还必须依靠实验确定。

许多实验研究了各种具体条件下的摩擦系数  $\lambda$  的计算表达式。其中较著名的, 如适用于光滑管的柏拉修斯(Blasius)公式:  $\lambda = 0.3164/Re^{0.25}$ 。其它研究结果可以参看化工原理教材及有关手册。

在传热过程的问题研究中, 影响过程的物理量增加有热量、温度。在因次分析中温度也可作为基本因次被引入。如果热量不是用质量和温度来定义, 热量也可以作为基本因次。利用因次分析方法, 也可以得到许多各种传热过程的准数函数。

由此看来, 因次分析方法是化工实验研究的有用工具, 它指出了减少实验变量的方法, 但在变量合并过程中, 如何合并变量为有用准数, 这是研究者必须十分注意的问题。在前例中是假设  $b, e, f$  指数, 由指数方程求解  $a, d, c$  得到需要的有关准数  $\Delta P/\rho u^2, l/d, du\rho/\mu, \epsilon/d$ 。若假设指数的条件不同, 整理得到的准数形式也不同。另外还必须指出, 应用因次分析的过程, 必须对所研究的过程问题有本质的了解。如果有一个重要的变量被遗漏, 那么就会得出不正确的结果, 甚至导致谬误的结论。所以应用因次分析法必须持谨慎态度。

### 3. 数学模型法

数学模型方法是近 20 年内产生、发展和日趋成熟的方法, 但这一方法的基本要素, 在化工原理各单元中早已应用。只是没上升为模型方法的高度。数学模型法是在对研究的问题有充分认识的基础上, 将复杂问题作合理简化, 提出一个近似实际过程的物理模型, 并用数学方程(或微分方程)表示的数学模型, 然后确定该方程的初始条件和边界条件, 求解方程。高速大容量电子计算机的出现, 使数学模型方法得以迅速发展, 成为化学工程研究中的强有力工具。但这并不意味着可以取消和削弱实验环节, 相反, 对工程实验提出了更高的要求, 一个新的、合理的数学模型, 往往是在现象观察的基础上, 或对实验数据进行充



分研究后建立提出的,新的模型必然引出一定程度的近似和简化,或引入一定参数,这一切都有待于实验进一步的修正、校核和检验。

### 三、实验要求

#### 1. 实验准备工作

实验前必须认真预习实验教材和化工原理教材有关章节,仔细了解所做实验的目的、要求、方法和基本原理。在全面预习的基础上写出预习报告(内容包括:目的、原理、预习中的问题),并准备好做实验记录用的表格。

进入实验室后,要对实验装置的流程、设备结构、测量仪表做细致的了解,并认真思考实验操作步骤,测量内容与测定数据的方法。对实验预期的结果,可能发生的故障和排除方法,作一些初步的分析和估计。

实验开始前,小组成员应进行适当的分工,明确要求,以便实验中协调工作。设备启动前要检查、调整设备进入启动状态,然后再送电、送水或蒸汽之类启动操作。

#### 2. 实验操作、观察与记录

设备的启动与操作,应按教材说明的程序,逐项进行,对压力、流量、电压等变量的调节和控制,要缓慢进行,防止剧烈波动。

在实验过程中,应全神贯注地精心操作,要仔细观察所发生的各种现象,例如物料的流动状态等,这将有助于对过程的分析理解。

实验中要认真仔细地测定数据,将数据记录在规定的表格中。对数据要判断其合理性,在实验过程中如遇数据重复性差或规律性差等情况,应分析实验中的问题,找出原因加以解决。必要的重复实验是需要的,任何草率的学习态度都是有害的。

做完实验后,要对数据进行初步检查,查看数据的规律性,有无遗漏或记错,一经发现应及时补正。实验记录应请指导教师检查,同意后再停止实验并将设备恢复到实验前的状态。

#### 实验记录:

实验记录是处理、总结实验结果的依据。实验应按实验内容预先制做记录表格,在实验过程中认真做好实验记录,并在实验中逐渐养成良好的记录习惯。记录应仔细认真,整齐清楚。要注意保存原始记录,以便核对。以下是几点参考意见:

(1) 对稳定的操作过程,在改变操作条件后,一定要等待过程达到新的稳定状态,再开始读数记录。对不稳定的操作过程,从过程一开始,就应进行读数记录,为此就要在实验开始之前,充分熟悉方法并计划好记录的时刻或位置等。

(2) 记录数据应是直接读取原始数值,不要经过运算后再记录,例如秒表读数1分38秒,就应记为1'38",不要记为98"。又如U型压差计两臂液柱高差,应分别读数记录,不应只读取或记录液柱的差值,或只读取一侧液柱的变化乘2倍。

(3) 根据测量仪表的精度,正确读取有效数字。例如1/10℃分度的温度计,读数为22.24℃时,其有效数字为四位,可靠值为三位。读数最后一位是带有读数误差的估计值,尽管带有误差,在测量时还应进行估计。

(4) 对待实验记录应取科学态度,不要凭主观臆测修改记录数据,也不要随意弃舍数据,对可疑数据,除有明显原因,如读错,误记等情况使数据不正常可以弃舍之外,一般应在数据处理时检查处理。数据处理时可以根据已学知识,如热量衡算或物料衡算为根据,

或根据误差理论取舍原则来进行。

(5) 记录数据应注意书写清楚,字迹工整。记错的数字应划掉重写,应避免涂改的方法,涂改后的数字容易误读或看不清楚。

### 3. 实验报告

实验结束后,应及时处理数据,按实验要求,认真地完成报告的整理编写工作。实验报告是实验工作的总结,编写组织报告也是对学生工作能力的培养,因此要求学生各自独立完成这项工作。

实验报告应包括以下内容:

- (1) 实验题目;
- (2) 实验的目的或任务;
- (3) 实验的基本原理;
- (4) 实验设备及流程(绘制简图)、简要操作说明;
- (5) 原始记录数据;
- (6) 数据整理方法及计算示例,实验结果可以用列表、图形曲线或经验公式表示;
- (7) 分析讨论。

实验报告应力求简明,分析说理清楚,文字书写工整,正确使用标点符号。图表要整齐地放在适当位置,报告要装订成册。

报告中应写出学生姓名、班级、实验日期、同组人和指导教师姓名。

报告应在指定时间交指导教师批阅。

### 四、实验课堂纪律和注意事项

- (1) 准时进实验室,不得迟到或早退,不得无故缺课。
- (2) 遵守课堂纪律,严肃认真地进行实验。实验室不准吸烟,不准打闹说笑或进行与实验无关的活动。
- (3) 对实验设备及仪器等在没弄清楚使用方法之前,不得开动。与本实验无关的设备和仪表不要乱动。
- (4) 爱护实验设备、仪器仪表。注意节约使用水、电、汽及药品。
- (5) 保持实验现场和设备的整洁,禁止在设备、仪器和台桌等处乱写,乱画。衣物、书包不得挂在实验设备上,应放在指定的地方。
- (6) 注意安全及防火。电动机开动前,应观察电机及运转部件附近有无人员在工作。合上电闸时,应慎防触电。注意电机有无怪声和严重发热现象。精馏实验附近不准动用明火。
- (7) 实验结束后,同学应认真清扫现场,并将实验设备、仪器等恢复到实验前状态,经检查合格后方可离开实验室。

最后,要严格遵守实验室的规章制度,确保人身安全及设备的完好,使得实验教学正常进行。

# 第一章 实验数据的处理

实验进行大量的数据测定工作,如何采集实验数据,直接关系到实验结果的可靠性,为实验者所关心。实验获得的大量原始数据,通常需要进行计算处理,才能得到可以应用的结果,如列表、作图或整理成经验公式。也便于与课本或前人研究结果对比分析,对实验结果作出评价。下面介绍这方面的基本知识。

## 第一节 实验数据的采集与计算

### 1.1.1 实验数据的采集

为了保证实验获得正确的处理结果,实验时应注意正确采集原始数据。除了认真检查实验装置设备减少系统误差外,应精心操作,认真读取和记录数据,减少人为的过失误差,力求原始数据的准确性。因此,在实验数据采集和记录过程中,需要从以下几方面努力。

#### 1. 正确地选择测试参数

实验时应正确地选定所测参数,测定那些与研究对象相关的独立变量,例如测定实验系统的介质流量、温度、压力及组成。介质的物性可从资料中查得。中间变量可以通过直接测量,然后通过计算获得。应该指出:这里测定与研究的是对象的主要参数,而不是全部参数。

#### 2. 采集的数据应正确地反应对应的关系

对稳态实验操作过程,不仅应注意保证局部数据的准确性,而且要注意与其它数据的联系。所以,一定要在达到稳态的条件下,才可读取数据,否则由于未达到稳定,其数据不具有真实对应关系。而对不稳定实验,则应按实验过程规划好读数的时间或位置,应该取同一瞬时值。

#### 3. 正确地读取及记录数据

首先认真注意仪表指示的量程、分度单位等,按正确方法读取数据。通常在一定条件下,仔细读取两次以达到自检的目的。记录要字迹清楚避免涂改,并注明单位。对所采集的数据要及时复验,运用所学的知识,分析判断其趋势是否正确,发生异常,应及时采取措施,加以排除。此外,要根据事先拟定的数据采集方案,检查是否漏采数据,以减少工作的反复。

#### 4. 选择实验点的适宜分布

为了保证实验数据在处理过程中正确地反映各变量间的关系或在标绘成图形时分布合理,采集数据时应注意选点的分布。通常变量间呈线性关系时,实验点可以均布。在对数坐标中呈线性关系的,其对数值为均布。若按其真数布点时,应随其数值增大应加大间隔。

对于变量间存在非线性关系的情况下,应随实验进行观察适时布点,即变化缓慢时,可加大取点间隔,若变化比较敏感或比较激烈时,则应减小间隔,以便正确反映变化过程中的转折点。

## 1.1.2 实验数据的计算

### 1. 有效数据及有效数字运算规则

#### (1) 有效数据

实验中测定的温度、流量、压力等数据是一类有单位的数字。这一类数据的特点是除了具有特定的单位外,其最后一位数字往往是由仪表的精度所决定的估计数字。如温度计的最小分度为1℃时,则其有效数字可取至1度以下一位数。如某温度可读至20.6℃,最后一位数字是一位带有误差的估计数,其余数为准确数。有效数为三位,含有一位估计数。通常测量某一参数,一般均可估计到最小分度的十分位。估计误差不超过最小分度的±0.5。按此记下有效数据。

#### (2) 有效数字及其表示

测量精度是通过有效数字的位数来表示的。有效数字的位数应是除定位用的“0”以外,余数位都是有效数字。有效数字定义为:一个含 $m$ 位数的近似数( $m$ 从左起非0位始),其中准确数值为 $n$ 位( $n < m$ ),取 $n+1$ 位的数值为该近似数的有效数。如3.1416的有效数有五位,22.4140有六位,而0.08206则只有四位有效数。30.00也是只有四位有效数。对“0”必须特别注意。在工程与科学工作中,为了表示清楚有效数字,采用科学记数法,在第1位有效数字后加小数点,而数值数量级用10的整数幂来表示。如981000中,若有有效数字为四位写成 $9.810 \times 10^5$ ,若只有两位有效数字,就写成 $9.8 \times 10^5$ 。

#### (3) 有效数字的运算规则

##### ① 加减运算

在加减运算中,应取各数的小数位数与其中小数位最少者保持一致。例如24.64, 25.67, 28.55, 28.655, 19.3相加应写成:

$$24.6 + 25.7 + 28.6 + 28.6 + 19.3 = 126.8$$

##### ② 乘除运算

在乘除运算中各数保留位数,应与原来各数中有效数字位数最少的那个数一致。其积和商的有效数字具有相同的位数。例如0.0268, 56.573, 1.0645相乘则有

$$0.0268 \times 56.6 \times 1.06 = 1.6078928$$

但只应取其积为1.61。

##### ③ 对数运算

在对数运算中,其对数位数保持与真数有效数字位数一致。

##### ④ 平均值计算

四个或四个以上的数值计算平均值,其平均值有效数字位数可增加一位。

在以上计算有效数位数时,若计算过程有效数字的第一位大于或等于8,则可考虑有效数字位数增加一位。

在有效数字的计算过程中,有效数字的取舍可按“四舍六入,遇五则偶舍奇入”的原则处理,即凡末位数有效数字后边的第一位数大于5则进位,小于5舍去不计,等于5时如

前一位为奇数则进位,前一位为偶数,则舍去。

例如 27.0246 取四位得 27.02 (四舍)  
27.0246 取五位得 27.025 (六入)  
27.025 取四位得 27.02 (偶舍)  
27.035 取四位得 27.04 (奇入)

## 2. 实验数据的计算

由于计算机的普遍应用,实验数据的计算处理,完全可以编制程序由计算机完成,但在编程之前或在编程运算之后,为了检查计算程序是否正确,必须掌握笔算的方法,而在没有条件使用计算机时仍要进行笔算,故在此将化工原理实验数据计算的要求及技巧作以说明。

(1) 计算过程使用 SI 单位。注意有效数字,一般工程计算有效数字取三位,运算过程中可多保留一位不定数字。

(2) 计算时应写出一组数据的完整计算过程,以便检查在计算方法和数字计算上是否有错误。计算完一组数据后,就应该判断其结果是否合理,例如根据已有的流体力学知识,孔板流量计的孔流系数  $C_0$ ,一般在 0.6~0.8 左右,如果计算结果为 0.035 或其它异常数字,首先应检查数据处理过程,发现问题及时纠正,可避免一错到底。如果是实验原因,可以重新实验测定。

(3) 实验数据计算,按实验目的的要求归纳整理计算,由于实验数据较多,为了避免重复计算,减少计算错误,可以将计算式中可合并的常数加以合并,然后再逐一计算。例如流体阻力实验,计算  $Re$  和  $\lambda$  值,可按以下方法进行。

例如:  $Re$  的计算

$$Re = \frac{d u \rho}{\mu}$$

式中管径  $d$ , 流体密度  $\rho$  和粘度  $\mu$ , 在对同一物料,同一设备,在恒定温度条件下进行实验时均为定值,可合并为常数  $A = d\rho/\mu$ , 故有

$$Re = Au$$

$A$  值确定后,改变  $u$  值可算出  $Re$  值。

又例如,管内摩擦系数  $\lambda$  值的计算,由直管阻力计算公式,

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2}$$

得

$$\lambda = \frac{d}{l} \frac{2\Delta P}{\rho u^2} = B' \frac{\Delta P}{u^2}$$

式中常数

$$B' = \frac{d}{l} \frac{2}{\rho}$$

又实验中流体压降  $\Delta P$ , 用 U 型压差计读数  $R$  测定, 则

$$\Delta P = gR(\rho_0 - \rho) = B''R$$

式中常数

$$B'' = g(\rho_0 - \rho)$$

将  $\Delta P$  代入上式整理为

$$\lambda = B' B'' \frac{R}{u^2} = B \frac{R}{u^2}$$

式中常数  $B$  为

$$B = \frac{d}{l} \cdot \frac{2g(\rho_0 - \rho)}{\rho}$$

仅有变量  $R$  和  $u$ , 这样  $\lambda$  的计算非常方便。

## 第二节 实验数据的处理方法

实验数据处理,就是将实验测得的一系列数据,经过计算整理后,用最适宜的方式表示出来,在化工原理实验中,常用列表法、图示法和函数式表示法三种形式表示。

### 1.2.1 实验数据列表法

将实验数据,按着自变量因变量的关系,以一定顺序列出数据表,即为列表法。列表法有许多优点,如简单易作,数据易比较,形式紧凑,同一表格内可以表示几个变量间关系等。

实验数据列表可分为记录表和综合结果表两类。记录表是实验记录和实验数据初步整理的表格。表中数据可分为三类:原始数据、中间结果数据和最终结果数据。它是一种专门的表格,根据实验内容设计。例如流体阻力实验,原始数据需要记录流量,直管阻力测量时 U 型压差计的测量读数,中间结果计算流速、压降,最终计算流体的雷诺数  $Re$  和摩擦系数  $\lambda$  值等。实验综合结果表,只反映变量之间的关系,表达实验最终结果。该表简明扼要,只包括研究变量的关系,如表达不同  $\epsilon/d$  条件下  $\lambda$  与  $Re$  的关系。

在拟制使用实验数据表时,应注意以下几个问题:

(1) 表格设计要力求简明扼要,一目了然,便于阅读和使用。记录、计算项目满足实验要求。

(2) 表头应列出变量的名称、符号、单位。同时要层次清楚、顺序合理。

(3) 记录数字应注意有效数字位数,要与测量仪表的精度相匹配。

(4) 数字较大或较小时应采用科学记数法表示,阶数部分即  $10^{\pm n}$  记录在表头。

用列表法表示实验数据,其变化规律和趋势不明显,不能满足进一步分析研究的需要。如若用于计算机还需进一步处理,但列表法是图示法和函数表示法的基础。

### 1.2.2 实验数据的图示法

用图形表示实验结果,可以明显地看出数据变化的规律和趋势,有利于分析讨论问题,利用图形表示还可以帮助选择函数的形式,是工程上常用的方法。作图过程应遵循一些基本要求,否则达不到预期结果,如对同一组数据,选择不同坐标系,则可得到不同的图形。若选择不适宜会导致错误结论。为保证图示法获得的曲线能正确地表示实验数据变量之间的关系,便于使用,在图形标绘上应注意以下几方面问题:

#### 1. 坐标系的选择

对同一组实验数据,应根据经验判断该实验结果应具有函数形式,或由因变量与自变量变化规律及幅度的大小,选择适宜的坐标系。在适宜坐标系中可获得更简明规律性更好的曲线。而常用坐标系有三种:普通直角坐标(笛卡儿坐标),单对数坐标和双对数坐标。

但本质上还都是直角坐标,仅是其分度方法不同。坐标选择可依以下两点原则。

### (1) 根据数据间的函数关系选择坐标

例如符合线性方程  $y=a+bx$  关系的数据,选普通直角坐标,标绘可获得一条直线,符合  $y=ax^n$  关系的数据,选普通直角坐标标绘是一条曲线。若选取双对数坐标标绘则可获得一条直线。由于直线的使用、处理都比较方便,所以总希望所选用的坐标能使数据标绘后得到直线形式。对于指数函数,如  $y=a^x$  或  $b^x=ax$ ,则可选用单对数坐标,亦可获得一直线关系。

### (2) 根据数据变化的大小选择坐标

如果实验数据的两个变量,两者变化幅度较小,则应选择普通直角坐标。若数量级变化很大,一般是选用双对数坐标来表示。如果实验数据的两个变量,其中一个变量的数量级变化很大,而另一个变化较小,一般是使用单对数坐标表示。例如管内流体摩擦系数  $\lambda$  与  $Re$  数的关系,由于  $\lambda$  的变化从  $0.008\sim 0.1$ ,  $Re$  从  $10^4\sim 10^5$  变化,两个变量的数量级变化都很大,所以用双对数坐标表示。又如流量计实验测得孔流系数  $C_0$  和  $Re$  数的一组数据变化如下表 1-1 所示。

表 1-1 孔板流量计实验结果

$C_0$	0.660	0.652	0.635	0.550	0.55	0.55
$Re$	$5\times 10^3$	$10^4$	$5\times 10^4$	$10^5$	$5\times 10^5$	$10^6$

$C_0$  变化甚小,  $Re$  数变化较大,所以可选用单对数坐标表示比较合适。

## 2. 坐标纸的使用

(1) 标绘实验数据,应选适当大小的坐标纸,使其与图形适宜匹配并能正确表示实验数据大小和范围。

(2) 依使用的习惯自变量取横轴,因变量取纵轴,按使用要求注明各轴代表的物理量和单位。

(3) 根据标绘数据的大小,对坐标轴进行分度。一般分度原则是,分度的最小刻度应与实验数据的有效数保持一致。同时在刻度线上加注便于阅读的数字。

(4) 坐标原点的选择,在一般情况下,对直角坐标原点不一定选为 0 点,应视标绘数据的范围而定,其原点应移至较数据中最小者稍小数的位置为宜。而对数坐标,坐标轴刻度是按  $1, 2, \dots, 10$  的对数值大小划分的,每刻度仍标记真数值。当用坐标表示不同大小的数据时,其分度要遵循对数坐标规律,只可将各值乘以  $10^n$  倍 ( $n$  取正、负整数),而不能任意划分。因此,坐标轴的原点,只能取对数坐标轴上规定的值作原点,而不能任意确定。

(5) 坐标轴的比例关系。坐标轴的比例关系是指横轴和纵轴每刻度表示的长度的比例关系。一般说来,正确地选用坐标轴比例关系,有助于正确判断两个量之间的函数关系。例如标绘层流摩擦系数关系式  $\lambda=64/Re$ , 以  $\lambda$  对  $Re$  作图,在等比轴双对数坐标纸上是一条斜率  $-45^\circ$  的直线,容易看出  $\lambda$  与  $Re$  指数关系为负一次方。若用不等比轴双对数坐标纸标绘,亦绘得一条直线,但斜率不一定为  $45^\circ$ ,不易看出  $\lambda$  与  $Re$  的函数关系。一般市售常用的坐标纸均为等比轴的对数坐标纸,不等比轴的坐标纸在教材上也时有可见。

## 3. 实验数据的标绘

将实验结果数据依次逐个标绘于选定的坐标中,获得大量的离散点,通过这些离散点绘制一光滑曲线,该曲线应穿过实验点密集区,使实验点尽可能接近该曲线,且均匀地分布于曲线的两侧。对于个别偏离曲线较远的点,应加以剔除,如图 1-1 所示。值得强调的是,若要绘制曲线,其实验点不能过少。对于多条曲线绘于同一坐标时,各曲线的实验点应以不同符号加以区别,如图 1-2 所示。由此可见,不同实验点所得曲线特征一目了然,为此也可用于选定实验数据函数关系的表达形式。以便进行函数关系式的回归。

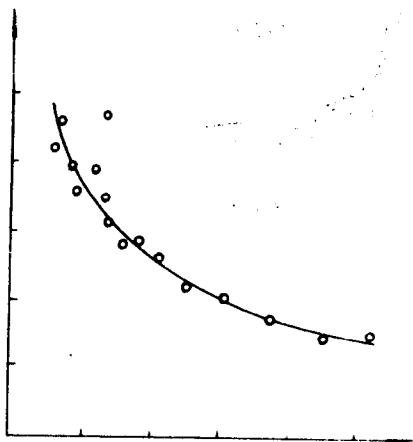


图 1-1 曲线标绘示意图

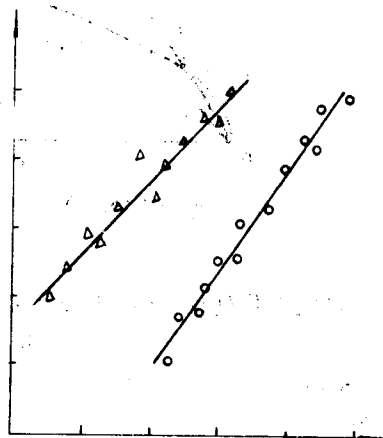


图 1-2 多组实验标绘示意图

### 1.2.3 实验数据数学方程表示法

以上介绍了采用列表、图示形式处理实验数据的方法,反映了其变量与自变量间的对应关系,为工程应用提供了一定方便。但图示法由离散点绘制曲线时还存在一定随意性,而列表法尚不能连续表达其对应关系,若用于计算机还会带来更多的不便。而将实验数据结果表示为数学方程或经验公式的形式,显然可以避免上述不便,更易于理论分析和研究,也便于积分和求导。下面介绍实验数据数学方程表示法。

将实验数据结果表示一方程形式的处理方法,首先应针对数据相互关系的特点选择一适宜函数的形式,然后用图解或数值方法确定函数式中的各种常数,该式是否能准确地反映实验数据存在的关系,最后还应通过检验加以确认,所得的函数表达式才能使用。

#### 1. 数学方程式的选择

一般来说,实验数据处理用方程表示,有两种情况,一种是对研究问题有深入的了解,如流体力学和传热过程,通过因次分析得到物理量之间的关系,即可写出准数函数的关系,具体方程中的常数系数是通过实验确定的。另一种是对实验数据的函数形式未知,为了用方程表示,通常是将实验数据绘成图形,参考一些已知数学函数的图形,选择一种适宜的函数。选择的原则是,既要求形式简单,所含常数较少,同时也希望能准确地表达实验数据之间的关系。这两者常常是相互矛盾的,在实际工作中,通常首先要保证其必要的准确度,牺牲其简单形式,在保证必要的准确度的前提下,尽可能选择简单的线性关系的形式。以下是几种典型函数形式及其图形供选用参考。



(1) 线性函数

$$y = a + bx \quad (1-1)$$

(2) 幂函数

$$y = ax^b \quad (a > 0) \quad (1-2)$$

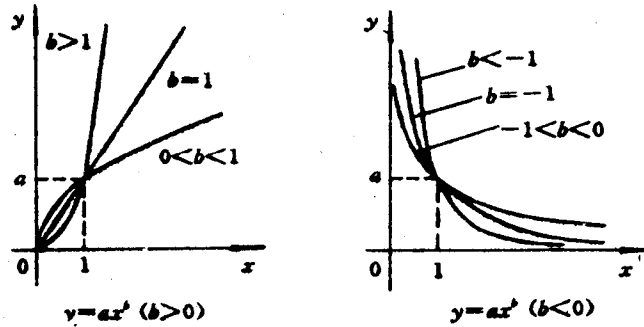


图 1-3 幂函数曲线

该函数通过线性化处理,转换为线性关系:

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

令  $y' = \lg y$ ;  $x' = \lg x$ ;  $A = \lg a$ ;  $B = b$

于是可得

$$y' = A + Bx'$$

(3) 指数函数

$$\frac{1}{y} = ae^{bx} \quad (a > 0) \quad (1-3)$$

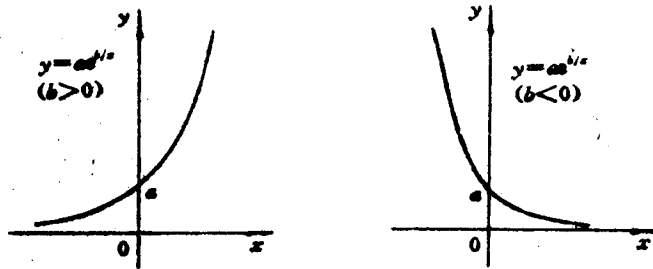


图 1-4 指数函数曲线

该函数通过线性处理,可转换为线性关系:

$$\lg y = \lg a + (blge)x$$

令  $y' = \lg y$ ;  $A = \lg a$ ;  $B = blge$

于是可得

$$y' = A + Bx$$

(4) 双曲线函数

$$\frac{1}{y} = a + \frac{b}{x} \quad (1-4)$$

将该函数也可转化线性函数关系: