

高等学校教材

# 化工原理实验及课程设计

陈均志 李 磊 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是与《化工原理》理论课教学紧密配合的实验和课程设计实践课教学用书。全书由两部分组成。第一篇：化工原理实验及基础。包括化工实验数据处理、常用化工测量技术及仪表等实验基础知识以及《化工原理》教学大纲所规定的实验内容。第二篇：化工原理课程设计。考虑到教学实际应用和上、下册的分配，本篇编写了传热中的列管换热器设计和传质中的板式精馏塔设计内容。

本书可作为高等院校本科、专科的化工原理实验和课程设计教材，亦可供有关部门从事科研、设计及生产的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验及课程设计/陈均志, 李磊编著. —北京: 化学工业出版社, 2008. 7  
高等学校教材  
ISBN 978-7-122-03074-0

I. 化… II. ①陈…②李… III. ①化工原理-实验-高等学校教材②化工原理-课程设计-高等学校教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 085337 号

---

责任编辑: 刘俊之

文字编辑: 李锦侠

责任校对: 郑捷

装帧设计: 周遥

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 277 千字 2008 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

《化工原理》课是化学工程、化学工艺类及其相近专业的一门主干技术基础课。它是紧密联系化工生产实际、实践性极强的一门工程性学科。《化工原理》课是建立在数学、物理学、物理化学等课的基础上，为专业课的学习打好坚实基础的一门课程。通过本课程的学习，要求学生掌握化工过程的基本原理、典型设备的构造、性能、操作原理、设计计算方法以及探索强化过程的途径。

《化工原理》课由课堂理论教学、化工原理实验及化工原理课程设计三个教学环节组成，通过这三个过程的综合训练，可培养学生具备扎实的化工基础理论知识、较强的实验动手能力和初步的工程设计能力，为了配合实验课教学和课程设计，特编写本教材。

全书由两部分组成。第一篇：化工原理实验及基础。包括化工实验数据处理，常用化工测量技术及仪表等实验基础知识，流体流动阻力测定、离心泵特性曲线测定、恒压过滤常数测定、传热系数测定、精馏塔的操作和塔板效率测定、填料塔的流体力学特性和吸收系数测定、恒定干燥过程速率曲线测定等实验，以及雷诺实验、能量转换、离心泵气蚀及板式塔流体力学现象等演示实验。书中对实验的目的、方法、数据处理进行了阐述，并附有实验报告的编写格式和要求、实验复习思考题。第二篇：化工原理课程设计。由于可供化工原理设计的单元操作内容较多，考虑到教学实际应用和上、下册的分配，本篇编写了传热中的列管换热器设计和传质中的板式精馏塔设计内容，对设计方案的确定，工艺设计的方法及步骤，设备的结构设计和附属设备的选型进行了详细地介绍，并附有设计所需的公式、图表、数据以供查用。

在教学实践中，本教材经过反复修改和内容调整，在本校已使用了五届，此次付梓之前又根据实验设备的更新对实验内容进行了部分修订。

尤艳雪、赵强同志也参与了本书部分内容的修订工作，在编写中参阅了不少院校的相关教材，在此深表谢意。由于编者水平所限，书中不妥之处，敬请读者在使用过程中批评指正。

编著者

2008年4月

# 目 录

## 第一篇 化工原理实验及基础

第一章 第一篇绪论 .....	1
一、化工原理实验的地位及特点 .....	1
二、化工原理实验的目的 .....	1
三、化工原理实验的教学要求 .....	1
四、实验室守则 .....	2
第二章 实验误差分析和数据处理 .....	3
第一节 有效数字及其运算规则 .....	3
一、有效数字 .....	3
二、科学记数 .....	3
三、有效数字的运算规则 .....	3
第二节 实验数据的误差分析 .....	4
一、误差分析的重要性 .....	4
二、真值与平均值 .....	4
三、误差的来源和分类 .....	5
四、误差的表示方法 .....	5
五、精密度、精确度 .....	6
第三节 实验数据处理 .....	7
一、列表法 .....	7
二、实验数据的图示法 .....	8
三、实验数据的函数法 .....	10
第三章 测量技术及仪表 .....	12
第一节 流体压强的测定 .....	12
一、液柱压强计 .....	12
二、弹性压强计 .....	15
三、压强（或压强差）的电测方法 .....	16
四、压强测量要点 .....	16
第二节 流量的测量 .....	17
一、差压式流量计 .....	17
二、转子流量计 .....	18
三、毕托管 .....	19
四、涡轮流量计 .....	19
五、湿式流量计 .....	20

六、其他几种流量测量仪表 .....	20
第三节 温度测量 .....	21
一、玻璃管温度计 .....	21
二、压力式温度计 .....	23
三、电阻温度计 .....	23
四、热电偶温度计 .....	25
第四章 化工原理实验 .....	27
实验一 流体流动综合实验 .....	27
实验二 离心泵特性曲线的测定 .....	30
实验三 流量计的标定 .....	33
实验四 套管换热器液-液热交换实验 .....	36
实验五 过滤实验 .....	41
实验六 板式塔精馏实验 .....	44
实验七 间歇精馏实验 .....	47
实验八 填料塔流体力学特性实验 .....	50
实验九 填料吸收塔传质系数的测定 .....	53
实验十 厢式干燥器干燥实验 .....	56
实验十一 流化床干燥实验 .....	60
第五章 演示实验 .....	63
实验一 雷诺实验 .....	63
实验二 机械能转换实验 .....	64
实验三 离心泵的气蚀现象 .....	65
实验四 传热边界层实验 .....	66
实验五 电除尘实验 .....	67
实验六 板式塔的流体力学现象 .....	67
附录一 实验报告的编写及要求 .....	68
附录二 化工原理实验基本题 .....	69
参考文献 .....	71

## 第二篇 化工原理课程设计

第六章 第二篇绪论 .....	72
第一节 化工原理课程设计的目的要求和内容 .....	72
一、化工原理课程设计的目的要求 .....	72
二、化工原理课程设计的内容 .....	72
第二节 化工生产工艺流程设计 .....	73
一、生产工艺流程草图 .....	73
二、工艺物料流程图 .....	73
三、带控制点的工艺流程图 .....	74
第三节 主体设备工艺条件图 .....	74
第七章 热换热器设计 .....	75
第一节 列管换热器的类型与构造 .....	75

一、固定管板式 .....	75
二、浮头式换热器 .....	75
三、U形管换热器 .....	76
第二节 设计方案的确定 .....	76
一、确定列管式换热器的型式 .....	76
二、换热器内流体的流经空间和流动方向的选择 .....	76
三、流速的选择 .....	77
四、加热剂、冷却剂及其出口温度的确定 .....	78
第三节 换热过程工艺计算 .....	78
一、传热面积的初定 .....	79
二、主要工艺尺寸的确定 .....	81
三、确定准确管子数 .....	86
四、流体流动阻力的计算 .....	86
五、总传热系数的校核 .....	87
六、传热面积的校核 .....	90
第四节 换热器结构设计 .....	90
一、壳体壁厚的计算 .....	90
二、管板结构及尺寸的确定 .....	91
三、管板与壳体、隔板的连接结构 .....	92
第五节 温差应力及其补偿方法 .....	111
一、换热器中的温差应力 .....	111
二、温差应力的补偿 .....	112
三、波形膨胀节 .....	113
四、管子拉脱力的计算 .....	114
附录三 .....	116
参考文献 .....	136
第八章 板式精馏塔设计 .....	137
第一节 塔设备简介 .....	137
第二节 板式精馏塔的工艺设计 .....	137
一、概述 .....	137
二、设计方案的选定 .....	138
三、二元连续板式精馏塔的工艺计算 .....	139
四、塔和塔板主要工艺尺寸的设计 .....	143
第三节 板式塔的结构与附属设备 .....	153
一、塔体结构 .....	153
二、塔板结构 .....	154
三、精馏塔的附属设备 .....	154
第四节 筛板精馏塔设计示例 .....	157
一、精馏流程的确定 .....	159
二、塔的物质计算 .....	159
三、塔板数的确定 .....	160

四、塔的工艺条件及物性数据计算 .....	161
五、精馏段气液负荷计算 .....	162
六、塔和塔板主要工艺尺寸计算 .....	162
七、筛板的流体力学验算 .....	164
八、塔板负荷性能图 .....	165
九、精馏塔的附属设备及接管尺寸 .....	167
十、筛板塔的工艺设计计算结果总表 .....	167
附录四 .....	169
参考文献 .....	173

# 第一篇

## 化工原理实验及基础

### 第一章 第一篇绪论

#### 一、化工原理实验的地位及特点

《化工原理》是化学工程、化学工艺类及其相近专业的一门主干技术基础课。它是紧密联系化工生产实际、实践性极强的一门工程性学科。化工原理实验则是通过工程实践和实验验证所学理论知识，并在运用理论分析实验的过程中使理论知识进一步得到理解和巩固。因此，化工原理是建立在实验基础上的学科，只有将理论教学与实验教学有机联系在一起，化工原理才可成为一门完整的学科。化工原理实验之所以重要，更是因为它具有明显的工程特点，它与一般的化学实验有极大的不同，它所研究的是工程实际问题，所用的设备大部分为工业的或近于工业的设备，其规模具有工程或者中间实验性质，它所得到的结论，对于化工单元操作设备的设计、选型具有重要的指导意义。

#### 二、化工原理实验的目的

化工原理实验是化工类专业教学计划中必不可少的一部分，通过实验应达到如下目的。

① 验证有关化工单元操作的基本理论，并在运用理论分析实验的过程中巩固和加深对理论知识的理解，同时使所学知识得到充实和提高。

② 熟悉实验装置的流程、结构、原理，以及化工上常用的仪表，给予学生近于工程设备及流程的初步概念。

③ 掌握化学工程实验的方法和技巧。如确定实验装置的流程及操作条件、仪表的选择、过程控制和准确数据的获得，以及实验操作过程的分析、故障的处理等。

④ 增强工程观点，培养学生从事科学实验研究的能力。它包括训练学生为完成一定研究课题进行实验方案的确定和设计的能力；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；组织实验、利用实验数据进行处理以获得可靠结论的能力，以及运用文字、图表等形式表达技术报告的能力。

⑤ 培养学生实事求是、严肃认真的学习态度和一丝不苟的工作作风。

总之，化工原理实验是对学生进行工程实践的初步训练，这将为以后做好专业实验和实际工作打下扎实的基础。

#### 三、化工原理实验的教学要求

化工原理实验是学生第一次用工程装置进行实验，因此必须做到以下几点。

### 1. 实验前做好预习

为了很好地完成每个实验，学生在实验前必须做好预习，认真阅读实验指导书，清楚了解实验目的、要求、原理，详细了解实验装置的流程、设备的构造、仪器仪表的使用方法、实验操作步骤、所需数据的测取方法、数据的整理方法等，以期达到预定目的。

### 2. 实验中认真操作

在实验中，要严格按照实验规程全神贯注地进行操作，细心观察。要安排好测量点的范围、测点数目，对实验过程中出现的各种现象、仪表读数的变化，要随时如实记录在记录本上。实验数据必须记录在表格内，并注明单位、条件，绝不允许记在零散纸片上。对于实验过程中出现数据重复性差、规律性差，甚至反常现象时，务必找出原因加以解决或者作出合理解释。有必要时可重复进行实验。学生应在实验中注意培养自己严谨求实的科学作风和认真负责的学习态度。

### 3. 实验后作好总结

实验做完后，应认真进行实验总结，编写实验报告。实验报告是一项技术文件，是学生用文字的形式将自己所进行实验、观察、判断和分析的结论表达出来，它是为今后在工作岗位上进行题材更广泛的科学研究进行的一种综合训练。实验报告要求必须书写工整、图表美观清晰、结论明确、分析中肯。实验报告的形式和要求可参阅附录一《实验报告的编写及要求》。

## 四、实验室守则

① 准时进入实验室，不得迟到，不得无故缺课。

② 遵守纪律，严肃认真地进行实验，室内不准吸烟、唱歌、大声谈笑、喧哗，不得穿拖鞋进入实验室，不要进行与实验无关的活动。

③ 在仪器设备的使用方法没有明确之前，不得动用仪器设备。在实验开始时得到老师许可后方可开始操作。与本实验无关的仪器设备，不得乱摸、乱动。

④ 爱护仪器设备，节约水、电、汽及药品。开闭阀门不要用力过大，以免损坏。

⑤ 保持实验室及设备的整洁，实验完毕后将仪器设备恢复原状，并做好清洁工作。衣服、书包应放在固定地点，不得乱放，不得挂在设备上。

⑥ 注意安全及防火。开动电动机前，应注意电动机及运动部件附近是否有人在工作。合电闸时，应慎防触电，并注意电机有无异声。精馏塔附近不准使用明火。

## 第二章 实验误差分析和数据处理

### 第一节 有效数字及其运算规则

#### 一、有效数字

在化工实验中，我们经常遇到两类数字：一类是没有单位的数字，例如  $\pi$ 、 $e$ ，还有一些经验公式中的常数值、指数值等；另一类是有单位的数字，用来表示结果，例如温度、压强、流量等。在测量和计算中，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，某液面计算尺的最小分度为 1mm，则读数可以到 0.1mm。如在测定时，液面高在刻度 52mm 与 53mm 中间，则应记液面高为 52.5mm，其中前两位是直接读出的，是准确的，最后一位是估计的，是欠准确的或可疑的，故称该数据为三位有效数字。如液面恰在 52mm 刻度上，则应记作 52.0mm。若记为 52mm，则失去了一位精密度。总之，有效数字中应有而且只能有一位（末位）欠准数字。

#### 二、科学记数

在科学与工程中，测量的精确度是通过有效数字的位数来表示的，为了清楚表达有效数或数据的精度，通常将有效数字写出并在第一位数后加小数点，而数值的数量级用 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 981000 中，若有效数字为 4 位，就写成  $9.810 \times 10^5$ ；若只有两位有效数字，就写成  $9.8 \times 10^5$ 。应注意在科学记数法中，在 10 的整数幂之前的数字应全部为有效数字。

#### 三、有效数字的运算规则

##### 1. 数字舍入规则

在用实验数据进行计算时，经常需要将数字截到所需要的有效数字位数，此时应采取以下舍入规则：

舍去部分的第一个数小于 5，则留下部分的末位数不变。

舍去部分的第一个数大于 5，则留下部分的末位数加 1。

若舍去部分的第一个数正好等于 5，则按“偶舍奇入”原则舍去。即留下部分的末位数为偶数，则此末位数不变；留下部分的末位数为奇数，则此末位数加 1。

例如将下面左侧的数舍为三位有效数字。

$$25.47 \rightarrow 25.5 \quad 25.44 \rightarrow 25.4 \quad 25.55 \rightarrow 25.6 \quad 25.45 \rightarrow 25.4$$

采用上述舍入规则的目的在于，使舍入误差成为随机性，它较四舍五入法优越。四舍五入法见 5 就入，易使所得数有偏大的趋势，而采用以上舍入规则，就有一半的机会舍掉，有一半机会进入，使舍入概率相等。

##### 2. 加、减法运算

各不同位数有效数字相加减，所得和或差的有效数字的位数与其中位数最少的一致。

例如求 13.65，0.0082，1.632 三数之和

$$13.65 + 0.0082 + 1.632 = 15.2902$$

则按舍入原则，应取 15.29。

### 3. 乘、除法运算

乘积或商的有效数字，其位数与各乘、除数中有效数字位数最少的相同。

例如求 0.0121, 25.64, 1.05782 三数之积

$$0.0121 \times 25.64 \times 1.05782 = 0.328182308$$

按舍入原则，应取 0.328。

### 4. 对数运算

在对数运算中，所取对数有效数字位数与其真数相同。

$$\text{例如 } \lg 2.35 = 0.371 \quad \lg 4.0 = 0.60$$

### 5. 多数运算

在四个数以上的平均值运算中，平均值的有效数字位数可较各数据中最小有效位数多一位。

另外，所有取自手册上的数据，其中有效数字按计算需要选取，但如原始数据有限制，则应服从原始数据。

## 第二节 实验数据的误差分析

### 一、误差分析的重要性

由于实验方法和实验设备的不完善，周围环境的影响，以及人的观察力等原因，使实验观测值和真实值之间总存在一定差异，在数值上即表现为误差。在进行实验数据整理时，首先应对所测量数据进行客观地评价，以确定其精确程度，这就是误差分析。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，并为今后实验的改进指出途径，缩小实验值与真实值之间的差距，提高实验的精度。

### 二、真值与平均值

#### 1. 真值

真值是待测物理量客观存在的确定值，它是一个理想的观念，又称理论值或定义值。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，根据正、负误差出现概率相等的规律，测定的平均值可以无限接近真值。所以在实验科学中定义：真值是指无限多次观测值的平均值。但由于实验工作中观测的次数总是有限的，由此得出的平均值只能近似于真值，故称这一最佳值为平均值。计算中可将此最佳值当作真值，或用“标准仪表”（即高精度级仪表）所测之值当作真值。

#### 2. 平均值

在化工领域中，常用的平均值有以下几种。

(1) 算术平均值 这种平均值最为常用。设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为各次测量值， $n$  代表测量次数，则算术平均值为

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-1)$$

(2) 均方根平均值 均方根平均值常用于计算气体分子的平均动能，其定义为

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

(3) 几何平均值 几何平均值是将一组  $n$  个测量值连乘并开  $n$  次方求得,即

$$x_c = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \cdots \cdot x_n} \quad (2-3)$$

(4) 对数平均值

$$x_L = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (2-4)$$

对数平均值多用于热量和质量传递中。对数平均值总是小于算术平均值,若  $x_1 > x_2$ ,且

$\frac{x_1}{x_2} < 2$  时,则可用算术平均值代替对数平均值,引起的误差不超过 4.4%。

使用不同的方法求取的平均值,并不都是最佳值。平均值计算方法的选择,取决于一组观测值的分布类型。在化工实验和科学研究中,数据的分布多属于正态分布,这种类型的最佳值是算术平均值,故算术平均值在计算中使用最为普遍。

### 三、误差的来源和分类

误差是指测量值与真值之差。偏差是指测量值与平均值之差。在测量次数足够多时,因平均值接近于真值,则测量误差与偏差也很接近,故习惯上常将两者混用。

根据误差的性质及产生的原因,可将误差分为以下三种。

#### 1. 系统误差

它是由于某些固定不变的因素引起的。在相同条件下进行多次测量,其误差的数值大小正负始终保持恒定,只有当改变实验条件时,才能发现系统误差的变化规律。

产生系统误差的原因:仪器不良,刻度不准,安装不正确,或仪器未经校准等;周围环境温度、湿度、压力等引起的误差;实验人员的习惯偏向,如读数偏高或偏低等。

系统误差有固定的偏向和确定的规律,可根据情况改进仪器和装置以及提高实验技术或用修正公式进行消除。

#### 2. 随机误差

它是由某些不易控制的因素造成的。在相同条件下多次测量,其误差的数值和符号的变化,时大时小,时正时负,没有确定的规律,这类误差称随机误差或偶然误差。这类误差产生的原因不明,因而无法控制和补偿。但随机误差服从统计规律,误差的大小或正负的出现完全由概率决定,因此随测量次数的增加,出现的正负误差可互相抵消,多次测量值的算术平均值接近于真值。

#### 3. 过失误差

过失误差是一种显然与事实不符的误差。它主要是由于实验人员粗心大意,如读错数据,操作失误所致。存在过失误差的观测值应从实验数据中剔除。这类误差只要操作人员认真细致地工作和加强校对是可以避免的。

### 四、误差的表示方法

#### 1. 绝对误差

某物理量在一系列测量中,某测量值与其真值之差称为绝对误差。实际工作中以最佳值(即平均值)代替真值,把测量值与最佳值之差称为残余误差,习惯上也把它称为绝对误差。

$$d_i = x_i - x \approx x_i - x_m \quad (2-5)$$

式中  $d_i$ ——第  $i$  次测量的绝对误差；

$x_i$ ——第  $i$  次测量值；

$x$ ——真值；

$x_m$ ——测量的算术平均值。

绝对误差只可表示某测量值偏离真值数值的大小，并不能反映各测量值之间误差的大小。

## 2. 相对误差

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以绝对误差与平均值之比称为相对误差。

$$d_{ri} = \frac{d_i}{|x|} \approx \frac{d_i}{x_m} \quad (2-6)$$

式中  $d_{ri}$ ——第  $i$  次测量的相对误差；

$d_i$ ——第  $i$  次测量的绝对误差；

$|x|$ ——真值的绝对值。

## 3. 算术平均误差

它是一系列测量值绝对误差的算术平均值，是表示一系列测量值误差的常用方法。

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n} \quad (2-7)$$

式中  $\Delta$ ——算术平均误差；

$x_i$ ——第  $i$  次测量值；

$x_m$ ——测量的算术平均值；

$d_i$ ——第  $i$  次测量的绝对误差；

$n$ ——测量的次数。

## 4. 标准误差

标准误差又称均方根误差，在有限次测量中，标准误差可用式 (2-8) 表示

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} \quad (2-8)$$

式中各符号意义同前。

标准误差是目前常用的一种表示精确度的方法，它不但与一系列测量值中每个数据都有关，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偏差的离散程度。实验愈精确，其标准误差愈小。

## 五、精密度、精确度

测量的质量和水平，可以用误差的概念来描述，也可用精确度等以下概念来描述。

### 1. 精密度

在测量中所测得的数值重现的程度称为精密度。它可以衡量某物理量几次测量值之间的一致性，反映随机误差的影响程度。

### 2. 精确度

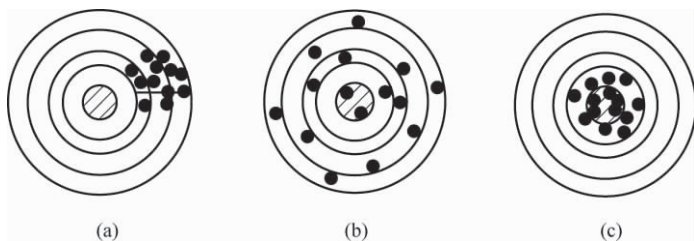


图 2-1 精密度和精确度示意图

测量值与真值之间的符合程度，或者逼近速度称为精确度。它可反映系统误差和随机误差综合影响的程度。

精密度高，精确度不一定高，但精确度高，其精密度一定高。为了说明精密度和精确度的区别，可用打靶作比喻，如图 2-1 所示。

图 2-1 (a) 说明系统误差大而随机误差小，其精密度高而精确度低；图 2-1 (b) 说明系统误差小而随机误差大，其精密度和精确度都不高；图 2-1 (c) 说明系统误差和随机误差都小，精密度和精确度都高。

### 第三节 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，用最合适的方法表达出来，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，指导今后的工作。

数据处理的方法有列表法、图示法和函数法三种。

#### 一、列表法

列表法是将实验数据列成表格，以反映各变量之间的对应关系及变化规律。它是标绘曲线或整理成方程式的基础。

实验数据表可分为原始记录表、中间运算表和最终结果表。

原始数据表是根据实验内容提前设计好，可清楚地记录所有待测数据。例如流体流动阻力实验原始记录表格见表 2-1。

表 2-1 流体流动阻力实验原始记录

序 号	流量计读数	光滑管阻力/cm		局部阻力/cm	
		左	右	左	右
0					
1					
2					
3					
⋮					
管径:	mm	长度:	m		
水温:	℃	其他参数:			

在实验过程中完成一组实验数据测试，必须及时地将有关数据记录入表内，绝对不可用单页纸张随便记录。

流体流动阻力运算表格见表 2-2。

表 2-2 流体流动阻力运算表格

序号	流量 /(m <sup>3</sup> /s)	流速 /(m/s)	$Re \times 10^{-4}$	直管阻力 /m	摩擦系数 $\lambda \times 10^2$	局部阻力 /m	阻力系数 $\zeta$
1							
2							
3							
⋮							

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，该表要求简明、扼要，例如流体流动阻力实验  $\lambda$ 、 $\zeta$  和  $Re$  的关系综合表见表 2-3。

表 2-3  $\lambda$ 、 $\zeta$  和  $Re$  的关系综合表

序号	光滑管		局部阻力	
	$Re \times 10^{-4}$	$\lambda \times 10^2$	$Re \times 10^{-4}$	$\zeta$
1				
2				
3				
⋮				

拟制实验表时，应注意下列事项：

- ① 表格的表头要列出变量名称、单位；
- ② 数字要注意有效位数，要与测量仪表的精确度相匹配；
- 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；
- ④ 记录表格要清楚、整齐，并妥为保管。

## 二、实验数据的图示法

实验数据处理通常是在将数据整理成表格后，再标绘成描述因变量和自变量依从关系的曲线图，它比结果表更简明直观，可显示出函数变化趋势、极点、转折点等规律。

作图时应注意：要选择合适的坐标纸，使图形尽量直线化，以方便求得经验方程式；另外，坐标分度要适当，使变量的函数关系表现清楚。

### 1. 坐标纸的选择

化工领域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。其选用依据因变量和自变量的函数关系而定。

对线性函数  $y = a + bx$ ，选用直角坐标。

幂函数： $y = ax^b$  选用对数坐标，因  $\lg y = \lg a + b \lg x$  在对数坐标纸上为一直线。指数函数： $y = a^{bx}$  选用半对数坐标纸，因  $\lg y$  与  $x$  呈直线关系。

另外，若自变量和因变量两者的最大和最小值之间数量级相差较大时，亦可采用对数坐标，若自变量变化范围不大而因变量变化范围比较小，则可采用半对数坐标以使坐标纸长宽比例适当。

### 2. 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。

习惯上一般取自变量为  $x$  轴，因变量为  $y$  轴，在两侧标明变量名称、符号和单位。坐标分度的选择要反映出实验数据的有效数字位数，即与被标的数值精度一致，并且易于读

取。分度值不一定从零开始，以使所得图形能点满全幅坐标纸，匀称居中。

在分度时，如比例尺选择不合适，可使图形失真。对同一套数据若以不同比例尺标绘，则可得到不同形状的曲线。如有以下一组实验数据：

$x$	1.0	2.0	3.0	4.0
$y$	8.0	8.2	8.3	8.0

若以不同的比例尺标绘，如图 2-2 所示

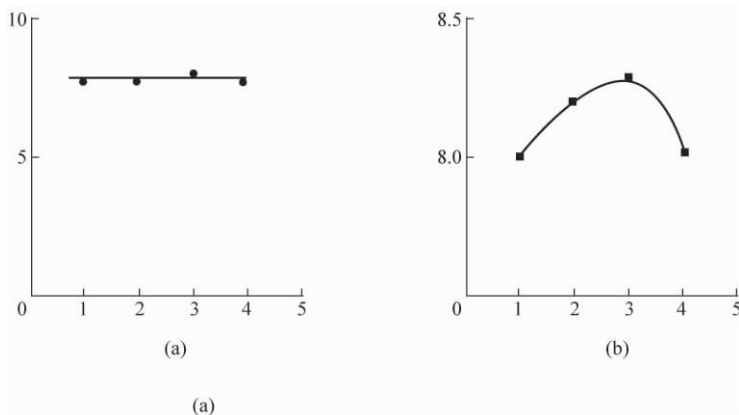


图 2-2 选择的比例尺对函数关系的影响

图 2-2 (a) 中  $y$  轴选择的比例尺寸太小，似乎可以看出自变量  $x$  对因变量  $y$  没有什么影响（图形为一水平线）。图 2-2 (b) 中  $y$  轴所选比例尺过大，似乎可以得出，当  $x=3$  时， $y$  有一最大值。这两种不同的结论，就是因为  $y$  轴所选比例尺不恰当所致，正确的函数曲线应如图 2-3 所示。

### 3. 对数坐标

对数坐标的特点如下。

① 某点与原点的实际距离为该点所表示量的对数值，但是该点标出的量是其本身的数值，即是对数本身的真数。例如对数坐标上标 5 的一点，本身表示是数值 5，但距离原点的距离实际是  $\lg 5 = 0.7$ 。

② 对数坐标上，由于 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000 等数的对数分别为 -2, -1, 0, 1, 2, 3 等，它们之间的差值相等，所以在对数坐标上，每一数量级的距离是相同的。但在每一数量级内的各数，如 2, 3, 4 的对数却分别为 0.301, 0.477, 0.602，它们之间的差值不相等，故在对数坐标上的距离是不相同的。

③ 对数坐标上的原点表示  $x=1$ ,  $y=1$ ，而不是零，因为  $\lg 1 = 0$ 。

④ 在对数坐标上求取斜率的方法，与直角坐标上的求法不同。直角坐标上求斜率，可直接由坐标所标度的数值来求取，而对数坐标上标度的数值是真数而不是对数，因此，双对数坐标上直线的斜率，需用对数值来求算，其斜率应为：

$$\lg a = \frac{\lg y_2 - \lg y_1}{\lg x_2 - \lg x_1} \quad (2-9)$$

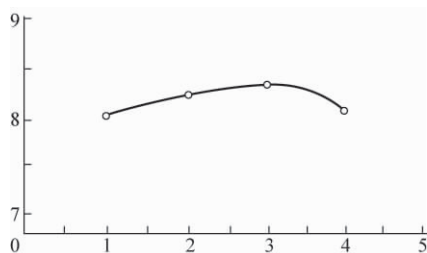


图 2-3 正确比例尺的曲线

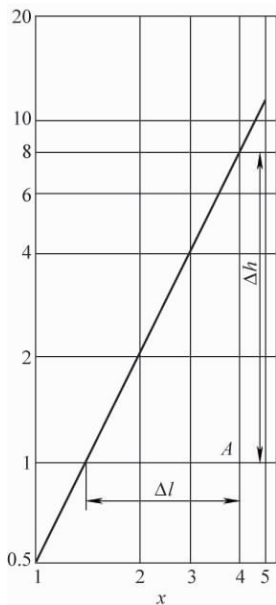


图 2-4 对数坐标图

或者可直接用尺子在双对数坐标纸上量取线段的长度来求取，因为对数坐标上的距离即表示两相应数值的对数值之差，如图 2-4 所示。

$$\lg a = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (2-10)$$

### 三、实验数据的函数法

在化工实验研究中，除了用表格和图形描述变量关系外，常常把实验数据用数学方程式或经验公式的形式表示出来，称为函数法。

#### 1. 函数的形式

对于任何一个过程，都可表示为：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-11)$$

在进行实验数据处理前，首先要确定函数的具体形式。化工上常用的函数形式有以下三种。

(1) 多项式 多项式描述的函数关系，一般是一个经验方程，它仅反映了各变量之间的函数关系，并不具有物理意义。如比热容  $C_p$  和温度  $t$  的关系通常表示为

$$C_p = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots \quad (2-12)$$

式中， $a_0, a_1, \dots$  为待定参数。

(2) 幂函数 由量纲分析法推导得出的特征数式，往往是一个幂函数。如在传热过程中所得的对流传热无量纲方程为：

$$Nu = A Re^a Pr^b Gr^c \quad (2-13)$$

式中， $A, a, b, c$  为待定参数。

(3) 指数函数 有时某些过程可表示为如下指数函数的形式：

$$y = Ae^{bx} \quad (2-14)$$

式中， $A, b$  为待定参数。

#### 2. 函数待定参数的确定

当函数形式确定后，必须采用一定的方法由实验数据来确定各待定参数。当待定参数确定后，再由此函数关系式检验此数学模型是否可靠、准确。通常使用的方法有图解法和最小二乘法。

(1) 图解法 凡属于直角坐标系上可直接标绘出一条直线的，很容易求得直线方程的常数和系数。或者经过适当变换，能绘成直线时，如改用对数坐标等，也可用图解法求得所定函数式的常数和系数。此种方法已在前面图示法中有所叙述。

(2) 最小二乘法 在图解时，坐标纸上标点会有误差，而根据点的分布确定直线位置时，具有人为性。因此，用图解法确定直线斜率及截距常常不够准确。而更多的情况是实验所得数据并不能标绘成直线，或者不能标绘成一根光滑的曲线，因此无法用图解法求出待定参数，此时最好的方法就是用最小二乘法。

最小二乘法的原理是：认为自变量均无误差，而因变量带有测量误差，并且认为测