



普通高等教育“十二五”规划教材

化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN

第二版

汝绍刚 朱庆书 朱兆友 编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

化工原理实验

第二版

汝绍刚 朱庆书 朱兆友 编



化学工业出版社

·北京·

本书介绍了与化工原理实验有关的实验误差分析、实验数据处理方法及化工常见的物理量如温度、压力、流量等的测量方法；精选了 13 个化工原理实验，包括 6 个基本实验（流体力学综合实验、传热综合实验、螺旋板换热器传热系数测定、精馏综合实验、填料塔吸收脱吸综合实验、干燥速率曲线的测定），2 个设计实验（管路设计与安装实验、精馏设计实验），3 个演示实验（柏努利方程实验、边界层分离实验、雷诺数演示实验）及 2 个选做实验（过滤实验和热管传热实验）。

本书主要作为高等院校化工及相关专业的实验教学教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/汝绍刚, 朱庆书, 朱兆友编. —2
版. —北京: 化学工业出版社, 2012. 8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-14241-2

I. 化… II. ①汝…②朱…③朱… III. 化工原
理-实验-高等学校-教材 IV. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 093991 号

责任编辑: 刘俊之
责任校对: 陈 静

装帧设计: 刘丽华

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: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 5 $\frac{1}{4}$ 字数 124 千字 2012 年 7 月北京第 2 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: 15.00 元

版权所有 违者必究

前 言

化工原理实验是化工及相关专业必修的一门技术基础实验课程，是培养学生具有工程观念、创新意识和能力的一项重要实践。它强调工程观点、定量计算、实践技能和设计能力的训练。本课程在基础课与专业课之间起着承上启下、由理及工的桥梁作用。

随着科学技术和我国国民经济的快速发展，社会对化工技术人才的培养提出了更高的要求。多年来，我们注重实验装置、实验技术、实验内容和实验方法的改革与创新，以适应新形势下培养高层次化工科技人才的需要。

作为实验教材，本书的编写重点突出了以下几个方面：

1. 优化知识结构，重视基本技能的培养。从化工单元操作实验的共性出发，涵盖了化工原理实验教学的通用内容，配合课堂教学，加强对学生动手操作能力的培养。
2. 突出工程观念，培养学生的工程意识与工程能力。通过以工程问题为原型的综合实验，锻炼学生解决实际复杂问题的能力。
3. 开拓实验思路，激发学生的创造力。通过问题开放式的设计型实验，培养学生主动思考多途径解决问题的能力。
4. 强调协作意识，培养学生的团队精神。
5. 适应形势，强调应用软件的数据处理方法。

本书由青岛科技大学化工过程实验中心汝绍刚、朱庆书、朱兆友编写。在总结多年实验教学经验的基础上，我们参考国内多本实验教材或实验讲义，结合实验中心的自制实验装置编写了本书。在编写过程中，得到了学校及学院的大力支持和教研室实验指导教师的帮助，在此表示诚挚的感谢！

本书主要作为高等学校化工及相关专业的实验教材。欢迎广大师生和读者多提宝贵意见，以便我们更好地完善本书，提高实验教学水平。

编者
2012年3月

目 录

绪论	1
一、化工原理实验的特点	1
二、化工原理实验的研究方法	1
三、化工原理实验的目的	1
四、化工原理实验的要求	2
第一章 实验误差分析和数据的测量与处理	4
一、实验误差分析	4
二、实验结果数据表示法	7
三、数据的测量	8
四、数据的处理	9
第二章 化工常见物理量的测量方法	14
一、测量仪表的基本技术性能	14
二、温度的测量	16
三、流体压力的测量	18
四、流体流量的测量	21
第三章 化工原理基本实验	27
实验一 流体力学综合实验	27
实验二 传热综合实验	31
实验三 螺旋板换热器传热系数测定	34
实验四 精馏综合实验	36
实验五 填料塔吸收脱吸综合实验	40
实验六 干燥速率曲线的测定	44
第四章 化工原理设计实验	49
实验七 管路设计与安装实验	49
实验八 精馏设计实验	51
第五章 化工原理演示与选做实验	52
实验九 柏努利方程实验	52
实验十 边界层分离实验	54
实验十一 雷诺数演示实验	55
实验十二 过滤实验	56
实验十三 热管传热实验	58
部分思考题参考答案	61
附录	68

附录 1	常压下乙醇-水溶液的气液平衡数据	68
附录 2	酒精计温度浓度换算表	68
附录 3	温度 20℃下乙醇含量 (质量百分数与体积百分数) 关系曲线	70
附录 4	氨气水溶液的亨利系数	70
附录 5	铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	71
附录 6	镍铬-铜镍热电偶分度表	73
附录 7	镍铬-镍硅热电偶分度表	73
附录 8	铂电阻分度表	75
附录 9	铜电阻 (Cu50) 分度表	77
附录 10	铜电阻 (Cu100) 分度表	77
参考文献	78

绪 论

一、化工原理实验的特点

化工原理是一门介于基础课与工程技术课之间的基础技术课程，属于工程学科。它是用自然科学的基本原理来分析和处理化工生产中的物理过程，以实际的工程问题为研究对象，所涉及的理论和计算方法与实验研究是紧密联系的。化工原理实验是学习、掌握和运用这门课程必不可少的重要环节，与理论课、习题课、课程设计等教学环节构成一个有机的整体，具有明显的工程特点，其面对的是复杂的实际问题和工程问题。工程实验所处理的物料种类繁多，使用的设备大小不一，过程中变量多，工作量大，所以，它远比基础课实验复杂。

二、化工原理实验的研究方法

目前化工原理实验研究方法有实验法和数学模型法两种。

1. 实验法

(1) 直接实验法

直接实验法是最初采用的方法，用于数学分析法无法解决的工程问题上。对被研究的对象进行直接观察、实验，由此法所得到的结果是可靠的，但是只适用于特定的实验条件和设备。因此，仅仅能应用到实验条件完全一致的现象上去。这种研究方法难以抓住现象的本质，所得出的只是个别量之间的关系，这种方法有很大的局限性。

(2) 量纲论指导下的实验研究方法

量纲论指导下的实验研究方法，又称量纲分析法，此法不需要对所研究的对象深入理解，也不一定使用真实的物料或采用实际的设备尺寸，只通过模拟物料（如空气、水）在实验室规模的设备中，有初步实验或分析，找出过程的影响因素，按照量纲分析方法将其组成若干个无量纲数群，然后利用实验求出各个无量纲数群之间的具体函数关系，由这种方法得到经验公式。在量纲论指导下的实验研究方法具有以小见大、由此及彼的优点，是目前解决难以作出数学描述的复杂问题的有效方法。如湍流时管内摩擦系数的计算。

2. 数学模型法

数学模型法是在对所研究的过程充分认识的基础上，将过程高度概括，得出简化而不失真的物理模型，然后进行数学描述——数学方程。这种方法同样具有以小见大、由此及彼的功能。数学模型法离不开实验，因为简化模型由对过程的深刻理解而来的，其合理性需要实验来检验，模型中引入的参数也需要通过实验来测定。其进行步骤为：由预实验认识过程，设想简化模型——建立数学模型——由实验检验简化模型的合理性——由实验确定模型参数。

三、化工原理实验的目的

① 培养学生的工程能力，验证化工单元操作的基本理论，巩固所学知识。学生通过实验验证化工过程的基本理论，并在运用理论分析实验的过程中，可使在化工原理课程中讲授

的理论知识得到进一步的理解和巩固。

② 学习和了解化工原理工程实验的研究方法，掌握如何控制和测量实验中的操作条件，熟悉获取数据以及分析和整理所测数据的技术。学生在试验过程中，通过实验装置的流程、操作条件的确定、测试仪表的选择、过程控制和准确数据的获得，以及实验操作分析、故障处理等，可为将来的实际工作和科研与开发打下较好的基础。

③ 理论联系实际。化工原理实验是针对化工生产中所遇到的常见的单元操作进行的。学生通过对实验现象和实验结果的分析，应具备在真实设备中来预测某些参数的变化对过程的影响，并做出合理调节的能力。通过实验了解典型化工设备的性能和操作，并熟悉化工常用仪表的使用方法。

④ 增强工程观点，培养科学实验能力。化工原理实验属于工程实验的范畴，试验过程中涉及的变量多，物流复杂，为了通过较为简便的实验研究就得到描述过程的经验方程，最常使用的就是量纲分析法和数学模型的方法。化工原理实验可通过培养学生进行实验设计、组织实验并从中获得可靠的结论、提供基础数据，从而直接服务于化学工程设计，来掌握这些处理工程问题的实验方法。

⑤ 培养学生独立思考的能力和实事求是的科学态度。实验研究是实践性很强的工作，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有丝毫马虎。如果粗心大意、敷衍了事，轻则实验数据不准确，得不到什么结论；重则会造成事故。

四、化工原理实验的要求

实验课应要求学生掌握科学实验的全过程，包括下列几项。

1. 实验前的准备

对参加实验的学生要求必须做到：

① 要认真阅读实验指导书和有关资料，掌握实验目的要求和内容。

② 在实验室做现场预习，了解实验装置的结构、流程、测试点和操作控制点的位置，并熟悉测量仪表的使用方法。

③ 组织好实验小组，要求 2~3 人一组，小组应讨论和拟定实验方案，预先要做好分工，写出预习报告。预习报告的内容包括：实验目的；实验的基本原理；实验装置流程简图，并标明控制点和测试点；实验操作步骤要点及数据点的分布；设计原始数据记录表格等。

2. 实验操作

实验过程中，应全神贯注地进行操作，如实地按照仪表显示的数据进行记录；另一方面又要细心地观察，注意发现问题，进行理论联系实际思考。

对于实验中出现的各种现象要加以分析，对测得的数据要考虑它们是否合理。

由于种种原因出现数据重复性差，甚至反常现象，规律性差的现象，应找出原因加以解决，必要时进行返工。

3. 实验后的总结

编写报告是整个实验的最后环节，也是学生进行综合训练的重要一环。

实验报告中，学生应将测得的数据、观察到的现象、计算结果和分析结论等用科学的工程语言表达出来。

所以实验报告必须书写工整，图表美观清晰，结论明确，分析中肯。实验报告可在预习报告的基础上完成，报告应包括下列几点：

- ① 实验报告的题目；
- ② 实验时间、报告人、同组者；
- ③ 实验目的；
- ④ 实验的基本原理；
- ⑤ 实验装置流程简图，并标明控制点和测试点；
- ⑥ 实验操作步骤要点及数据点的分布；
- ⑦ 实验原始数据记录表及数据处理结果表，计算举例；
- ⑧ 实验结果的曲线图、公式或结论，并标明实验条件；
- ⑨ 实验结果讨论。

第一章 实验误差分析和数据的测量与处理

一、实验误差分析

因实验方法和设备不完善，环境及人的观察力和测量程序等影响，实验观测值和真值间存在着一定的差异，这种差异的数值即称为误差。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。在实验中应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. 真值与平均值

真值是一个理想的概念，是无法测得的，但对某一物理量，经过无限多次测量，出现的误差有正有负，正负误差出现的概率是相同的。求出测量值的平均值，在无系统误差存在的情况下，此平均值非常接近物理量的真值。因为实际测量次数是有限的，所得到的平均值只能近似接近真值，此值称为最佳值。实际计算中，往往将最佳值作为真值来使用。

化工中常用的平均值计算方法如下：

(1) 算术平均值

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

凡是测定值的分布服从正态分布时，算术平均值为最佳值。

(2) 均方根平均值

$$x_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$$

(3) 几何平均值

$$\overline{x_n} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n}$$

(4) 对数平均值

$$x = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}}$$

对数平均值多用于热量和质量传递中，当 $\frac{x_1}{x_2} < 2$ 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%。

对一组测量值取对数，其图形的分布曲线对称时，常用几何平均值。

化工实验中数据分布多属于正态分布，所以常采用算术平均值。

2. 误差的分类

误差指测量值与真值之差，偏差是指测量值与平均值之差。当测量次数足够多时，以上

两值很接近，习惯上二者混用。

按照误差的性质和其产生的原因可分为三类。

(1) 系统误差

系统误差是由某些不变的因素引起的。在相同条件下，多次测量，其误差的数值和正负相同。当条件改变时，误差按一定的规律变化。

误差产生的原因与测量仪表的准确度、外界环境影响、测量方法的近似与否和人的习惯偏向有关。可按具体原因采取适当措施进行校正。

(2) 随机误差

这是由某些不易控制的因素造成的。在相同条件下，多次测量，误差值和符号不确定，但服从统计规律，随测量次数增多，其误差的算术平均值趋近于零。

(3) 过失误差

一种与事实不符的误差，误差值大，无规律。主要因实验者读数或操作不当造成的。相应的观测值在整理数据时应去掉。只要认真负责地工作，这种误差是可以避免的。

系统误差及过失误差可以消除，随机误差为主要研究对象。

3. 误差的表示方法

(1) 绝对误差与相对误差

测量值与真值之间的差的绝对值为误差，又称绝对误差。设测量值为 x ，真值为 X ，则绝对误差 D 为：

$$\begin{aligned} D &= |X - x| \\ X - x &= \pm D \\ x - D &\leq X \leq x + D \end{aligned}$$

真值可由多次测量的平均值代替。设某物理量的最大测量值为 x_1 ，最小测量值为 x_2 ，则平均值 x_m 为：

$$\begin{aligned} x_m &= \frac{x_1 + x_2}{2} \\ x_m - D &< X < x_m + D \quad \text{即} \quad x_2 < X < x_1 \\ \text{最大绝对误差 } D_{\max} &= \frac{x_1 - x_2}{2} \end{aligned}$$

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。有时绝对误差不能用来比较测量值之间误差的大小，就引出了相对误差。绝对误差 D 与真值绝对值的比称相对误差。

$$E_r = \frac{D}{|X|}$$

式中的 X 用平均值 x_m 代替。

例：某炉中温度测出在 1150°C 与 1140°C 之间，求其最大绝对误差 D_{\max} 、平均值和相对误差。

解

$$\text{平均值 } T_m = \frac{1150 + 1140}{2} = 1145^\circ\text{C}$$

$$\text{最大误差 } D_{\max} = \frac{1150 - 1140}{2} = 5^{\circ}\text{C}$$

$$T = (1145 \pm 5)^{\circ}\text{C}$$

$$\text{相对误差 } E_r = \frac{D}{|X|} = \frac{5}{1145} = 0.44\%$$

(2) 算术平均误差

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

式中, n 为测量次数; x_i 为测量值; d_i 为测量值与算术平均值的偏差。

(3) 标准误差

即均方根误差, 对有限测定次数:

$$\text{标准误差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}}$$

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, 实验越精确, 其标准误差越小。因此, 广泛采用这种误差作为评定化工测量精确度的标准。

4. 精密度与准确度

测量质量的高低还可以用精密度和准确度来表示。

(1) 精密度

精密度指测量中所测量数值的重复程度, 它反映了随机误差的大小, 精密度高指随机误差小。

(2) 准确度 (精确度)

表示测量结果与真值间的接近程度, 它反映了测量中所有系统误差与随机误差的总和。测量时的精密度高, 准确度不一定高, 但准确度高, 其精密度一定高。

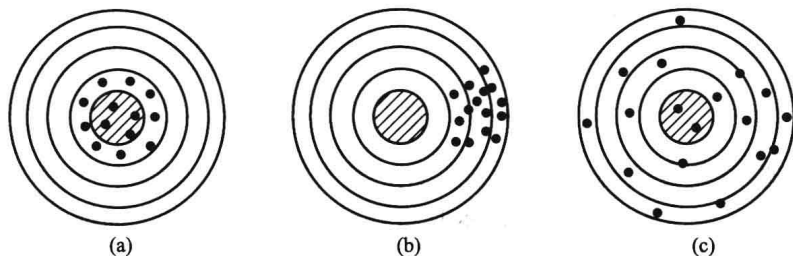


图 1-1 精密度与准确度示意图

如图 1-1 所示, (a) 表示精密度与准确度都很好; (b) 表示精密度很好, 但准确度不高; (c) 表示精密度与准确度都不好。

实验中不能只满足于数据的重复性而忽略数据的准确程度。

5. 间接测量的误差传递

在实验中有些物理量不能直接测量, 而是由一些可以直接测量的物理量, 按一定的函数关系计算出来的。因此, 间接测量的误差需由直接测量的误差值来计算。

设一函数

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

式中, x_1, x_2, \dots, x_n 为各直接测量值。

设 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别代表各测量值的绝对误差, Δy 代表由 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 引起的 y 的绝对误差。

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n)$$

将式右边按泰勒级数展开, 并略去二阶以上的项:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n$$

函数的相对误差为:

$$E_r = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \times \frac{\Delta x_1}{y} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \times \frac{\Delta x_2}{y} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \times \frac{\Delta x_n}{y}$$

为了计算方便, 将简单运算的函数误差关系式列入表 1-1 中。

表 1-1 简单运算的函数误差关系

数学公式	函数误差关系式	
	最大绝对误差	最大相对误差
$y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$	$\Delta y = \pm \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n $	$E_r(y) = \frac{\Delta y}{y}$
$y = x_1 - x_2$	$\Delta y = \pm (\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$E_r(y) = \frac{\Delta y}{y}$
$y = x_1 x_2$	$\Delta y = \pm (x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1)$	$E_r(y) = \pm \left(\left \frac{\Delta x_1}{x_1} \right + \left \frac{\Delta x_2}{x_2} \right \right)$
$y = x_1 x_2 x_3$	$\Delta y = \pm (x_1 x_2 \Delta x_3 + x_1 x_3 \Delta x_2 + x_2 x_3 \Delta x_1)$ 或 $\Delta y = y E_r(y)$	$E_r(y) = \pm \left(\left \frac{\Delta x_1}{x_1} \right + \left \frac{\Delta x_2}{x_2} \right + \left \frac{\Delta x_3}{x_3} \right \right)$
$y = x^n$	$\Delta y = \pm (n x^{n-1} \Delta x)$ 或 $\Delta y = y E_r(y)$	$E_r(y) = \pm \left(n \frac{\Delta x}{x} \right)$
$y = \sqrt[n]{x}$	$\Delta y = \pm \left(\left \frac{1}{n} x^{\frac{1}{n}-1} \times \Delta x \right \right)$ 或 $\Delta y = y E_r(y)$	$E_r(y) = \pm \left(\left \frac{1}{n} \times \frac{\Delta x}{x} \right \right)$
$y = \frac{x_1}{x_2}$	$\Delta y = y E_r(y)$	$E_r(y) = \pm \left(\left \frac{\Delta x_1}{x_1} \right + \left \frac{\Delta x_2}{x_2} \right \right)$
$y = cx$	$\Delta y = \pm c \Delta x $ 或 $\Delta y = y E_r(y)$	$E_r(y) = \pm \left \frac{\Delta x}{x} \right $
$y = \lg x$	$\Delta y = \pm \left \frac{0.43429}{x} \times \Delta x \right $	$E_r(y) = \frac{\Delta y}{y}$

二、实验结果数据表示法

1. 有效数字的处理

实验测量中使用的仪表具有一定的精度, 因此, 测量或运算的结果不可能超过仪表所允许的精度范围。所测的数值往往最后一位数为估计值, 是欠准确的。实验数据的有效数字位数必须反映出仪表的准确度和存在疑问数字的位置。如测得一压差计读数为 125.7 mmH₂O, 前三位数字是确定的, 最后一位数字是估计出来的欠准确数字, 此读数

应为四位有效数字。

当实验结果数值位数较多时，需要将数字截止到所要求的位数，若用四舍五入的方法，往往入多于舍，会使所得的数值偏大，采取下述的规则可以使尾数入与舍的概率相同。

这个规则是：尾数小于5则舍；尾数大于5则入；尾数等于5时，若其后面的数字不为0，则进位，若5后面的数字为0，则当5前面数字为奇数时进位，为偶数时不进位。

如：5.35→5.4 5.45→5.4

5.38→5.4 5.42→5.4

有效数字的运算规则：

① 加、减法运算 运算结果所得的和或差其有效数字位数以参加运算的各数中小数点后位数最小的为准。

如：52.35+27.1=79.45→79.5

52.35-27.1=25.25→25.3

② 乘、除法运算 两个数相乘或相除的积或商，其有效数字位数以各因子中有效数字位数最少的为准。

③ 乘方、开方运算 对数的有效数字位数应与其真数相同。

2. 实验结果数据表示法

数值的大小和误差（即精度）应同时给出。有下列几种表示方法：

(1) 已知绝对误差

某数据为 $y=6.325$ ，其绝对误差 $\Delta y=\pm 0.075$ ，此数据可写成 $y=6.325\pm 0.075$ 。

(2) 已知数据 n 次重复测量的标准误差

设 $\sigma=0.011$ ， n 次重复测量的算术平均值 $L_m=1.024$ ，则实验最后结果数据 L_m 应写成

$$L_m=1.024\left(\pm\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)=1.024\left(\pm\frac{0.011}{\sqrt{n}}\right)$$

(3) 已知相对误差

设测量值 $y=99.5$ ，其相对误差 $\Delta y/y=0.006$ ，最后结果应写成 $y=99.5(1\pm 0.006)$

3. 过失误差的删除

测量中有时出现少量过大或过小的数值，这些异常的数值对测量结果不利，应从结果中去掉，但不能人为地丢掉一些误差大的正常测量值，否则会使测量结果不真实。

判断属于正常值较简单的方法是 3σ 准则（拉依达准则），凡是误差大于三倍标准误差的数值应舍去，因为由随机误差正态分布概率理论可知，小于 3σ 的误差出现的概率不到 0.3%，在测量数 n 较大时，此准则比较好。

三、数据的测量

进行测量数据时，应首先考虑在测量范围内各测量点的分配。

① 若各点最后在直角坐标纸上能整理成直线关系，各测量点在测量范围内应均匀分配。

② 在对数坐标纸上能整理成直线的各测量点的分配应当不均匀。为了使各点能均匀分布在对数坐标纸上，可按等比级数的原则分配测量点数值。其作法如下：根据自变量测量值的最大值 (x_{\max})、最小值 (x_{\min}) 及其间要分配的测点数 (n) 算出公式比值 (k)，即可确

定各测量点的分配值 (x_1, x_2, \dots, x_n)

$$k = \left(\frac{x_{\min}}{x_{\max}} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

按 $x_n = kx_{n+1}$ 或 $x_{n+1} = \frac{x_n}{k}$ 求出各测量点自变量值。

③ 若各测量点最后在坐标纸上能整理成曲线，则各测量点分配不能全按平均分配，应在曲率大的部位取点密些。

四、数据的处理

实验数据通常有三种表示方法：列表法、图解法和方程式法。

1. 列表法

实验数据的初步整理是列表法。实验数据表分为记录表和结果综合表两种。记录表分原始数据记录表、计算结果记录表。实验原始数据记录表是按照实验内容设计的，必须在实验正式开始前列出表格，以传热综合实验为例，如表 1-2、表 1-3 所示。

表 1-2 原始记录表举例

序 号	空气的流量 (m^3/h)	空气 进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	空气 出口温度/ $^{\circ}\text{C}$
1			
2			
3			

表 1-3 计算结果表举例

序 号	空气的流量 (m^3/s)	传热速率 Q	总传热系数 K
1			
2			
3			

实验结果综合表表示变量间的关系，表达实验中得出的结论。该表应简明扼要，只包括所研究变量关系的数据。表 1-4 为流体流动阻力实验的 λ 与 Re 、 e/d 的综合表。

表 1-4 综合表举例

e/d						
a_1		a_2		a_3		...
$\lambda \times 10^2$	$Re \times 10^{-4}$	$\lambda \times 10^2$	$Re \times 10^{-4}$	$\lambda \times 10^2$	$Re \times 10^{-4}$...
...

表中所列的数据应该是足够的。制定实验表时，应遵循下列几条：

- ① 表的标题要清晰，说明问题。
- ② 测量单位应在表头中标明，不要和数据写在一起。
- ③ 数据必须真实地反映仪表的精确度。即数字写法应注意有效数字的位数，每列以小

数点对齐。

④ 对于数量级很大或很小的数，在表头中乘以适当的倍数。例如 $Re=28000$ ，用科学记数法表示为 $Re=2.8\times 10^4$ 。列表时，表头写为 $Re\times 10^{-4}$ ，数据表中数字则写为 2.8。这种情况在化工数据表中经常遇到。

⑤ 整理数据时，应尽可能将一些计算中始终不变的物理量归纳为常数，避免重复计算。

⑥ 在记录表格下边，要求附以计算示例，表明各项之间的关系，以便于阅读或进行校核。

2. 图解法

这种方法比较列表法简明直观，能显示出函数的最高点、最低点、转折点和周期性，并便于在不同条件下进行比较。准确的图形还可以在不知数学表达式的情况下进行微积分运算，因此得到广泛的应用。

作曲线图时必须依据一定的法则，只有遵守这些法则，才能得到与实验点位置偏差最小且光滑的曲线图形。

(1) 坐标纸的选择

直角坐标纸用于线性函数，对于符合 $y=kx+b$ 的数据，在直角坐标纸上表现为一条直线。

对数坐标纸用于幂函数，符合 $y=ax^m$ 的数据在此坐标纸上为一条直线。

半对数坐标纸用来处理指数函数。 $y=ka^x$ 方程式在此坐标纸上为一直线。

此外，当自变量和因变量两者最大和最小值间数量级相差较大时，可采用对数坐标纸。当两变量中之一的最大最小值间数量级相差较大时，也可采用半对数坐标纸。

(2) 坐标分度

即有关选择坐标比例尺的问题。若比例不当，会使图形失真。在选择坐标比例时必须考虑到 x 、 y 的测量误差。只有在自变量 x 和因变量 y 测量误差已知的条件下， x 和 y 间的函数关系才具有固定的形式，但为了得到较理想的图形，应适当选择比例尺。通常按照下法：

$$\text{坐标比例尺 } M_x = \frac{2}{2\Delta x} = \frac{1}{\Delta x}$$

$$M_y = \frac{2}{2\Delta y} = \frac{1}{\Delta y}$$

式中， Δx 为自变量 x 的测量误差 ($x\pm\Delta x$)； Δy 为自变量 y 的测量误差 ($y\pm\Delta y$)。

如某测量数据为 $y\pm 0.2$ 和 $x\pm 0.05$ ，则：

$$M_x = \frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{0.05} = 20$$

$$M_y = \frac{1}{\Delta y} = \frac{1}{0.2} = 5$$

x 轴单位长度为 y 轴长度的 4 倍。

当 x 、 y 都是直接测量值时， Δx 、 Δy 可由仪表的准确度确定它们的值。对于间接测量值，误差值应按误差传递公式计算出来。

(3) 曲线的标绘

标绘曲线首先应有足够的数据点，曲线应光滑连续，尽量无转折点。若非有转折点不可时，转折点附近应当有较多的实验点。各实验点应均匀地分布在曲线的两侧。坐标纸上应标明所表示量的符号、单位、曲线的名称及有关实验的主要条件。

使用对数坐标纸时,应注意用法。标在坐标轴上的值为真值,坐标原点不能为零。1、10、100、1000 等各值的对数分别为 0、1、2、3...所以相邻两对数之差相等。在对数坐标纸上每一数量级的距离是相等的。由于 $\lg 1=0$ 、 $\lg 2=0.30$ 、 $\lg 3=0.47$,故在每一个大格(表示一个数量级)内各数值的间隔是不相等的。

图必须有图号和图题,以便于排版和引用。必要时还应有图注。

不同线上的数据点可用○、*、◆等不同符号表示,且必须在图上明确地标出。

3. 方程表示法

化学工程实验研究中,除了用上述两种方法表示实验结果外,常常把数据整理成方程式,以便描述过程变量之间的关系。

(1) 方程式函数形式和确定

进行实验数据处理前,首先要确定函数的具体形式。化工过程常用的函数形式有下列几种。

① 多项式 多项式所描述的函数关系一般是一个经验方程,它仅仅反映了各变量的数量关系,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:

$$c_p = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots$$

② 幂函数 由量纲分析法导出的无量纲式为一个幂函数。如传热过程中对流传热系数关联式:

$$Nu = AR e^m Pr^n$$

③ 指数函数 在反应工程中,常用此函数描述反应过程:

$$y = A_0 e^{A_1 x}$$

除了以上三种形式外,对某些具体过程经分析和简化后可得到相应的函数,另外,也可参考文献资料,由其中选择。当以上方法都不能使用时,可将实验数据先在直角坐标纸上标绘曲线,然后参照典型函数图形选择适当的函数形式。

(2) 经验公式中待定系数的求法

当函数关系决定后,若为非线性关系,还需要进行函数关系的线性化。再进一步就是确定方程中待定系数的问题。常用两种方法。

① 直线图解法 凡属于直角坐标纸上能绘出一条直线的数据或经过变换后在对数坐标纸上可作出直线的数据,它们所关联的方程式皆可用此法求待定系数。

如图 1-2 中的直线 AB,原来形式为 $y = kx^b$,线性化后成为 $\lg y = b \lg x + \lg k$ 。令 $\lg y = Y$, $\lg x = X$, $\lg k = a$ (常数),得 $Y = bX + a$ (直线关系)。

$$\text{直线斜率: } b = \frac{\lg y_2 - \lg y_1}{\lg x_2 - \lg x_1}$$

在所绘直线上取两对 (x, y) 值按上式计算,或者用直尺直接测量出直线上 A、B 两点间的水平及垂直距离,按下式计算:

$$b = \frac{L_y}{L_x}$$

直线截距的求法: $x=1$, $y=k$, k 值可由直线与 y 轴相平行且 $x=1$ 的直线的交点的纵

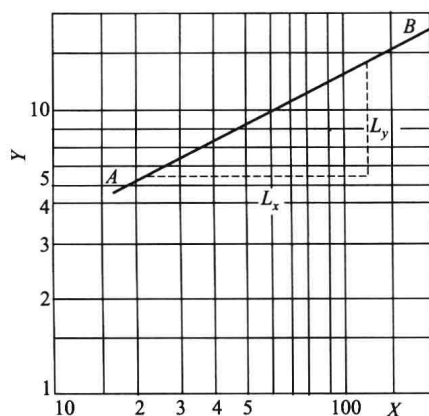


图 1-2 对数坐标中直线斜率和截距的图解法