

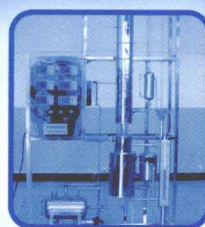
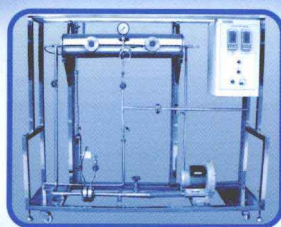
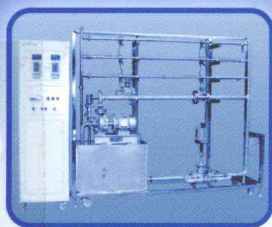
高 · 等 · 学 · 校 · 教 · 材

化工原理

实验指导

赵晓霞 史宝萍 主编

HUAGONG YUANLI
SHIYAN ZHIDAO



化学工业出版社

高 · 等 · 学 · 校 · 教 · 材

化工原理 实验指导

赵晓霞 史宝萍 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

全书分理论和实验两部分。理论部分包括实验误差分析及化工测量仪表和测量方法；实验部分包括化工基本实验（包括流体流动、传热、吸收、精馏、干燥等 11 个实验）和演示实验（包括流体流动、精馏、干燥等 4 个实验）两大部分。本书实用性强，既可作为各高等院校本、专科的化工原理实验教材，也可供化工部门相关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

化工原理实验指导/赵晓霞，史宝萍主编. —北京：化学工业出版社，2012.3
高等学校教材
ISBN 978-7-122-13128-7

I. 化… II. ①赵…②史… 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（2011）第 277815 号

责任编辑：徐雅妮
责任校对：陶燕华

文字编辑：刘志茹
装帧设计：关 飞

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：北京白帆印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 6 字数 118 千字 2012 年 3 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：15.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是根据化工原理实验教学规程，围绕天津大学和浙大中控实验设备特点，结合我院实际而编写的一本化工原理实验教材。

本教材注重理论联系实际的过程及工程与工艺流程的结合，强调动手实践能力和创新意识，同时也是从实践教学走向工厂实践的纽带，因此教材内容的工程实践性较强。

全书分理论和实验两部分。理论部分包括实验误差分析及化工测量仪表和测量方法；实验部分包括化工基本实验（包括流体流动、传热、吸收、精馏、干燥等 11 个实验）和演示实验（包括流体流动、精馏、干燥等 4 个实验）两大部分。本书实用性强，既可作为各高等院校本、专科的化工原理实验教材，也可供化工部门相关工程技术人员参考。

全书由赵晓霞、史宝萍统稿审定。参加编写的有太原科技大学赵晓霞、史宝萍、石国亮（绪论、第 1 章、第 2 章、第 7 章、附录部分内容），王迎春、魏秀萍（第 3 章、第 6 章、附录部分内容），高晓荣（第 4 章、第 5 章）。赵玉英、李变云老师和学院相关领导对教材的编写给予了大力支持，在此表示衷心感谢。

此外，为显现大学生实践效果，本书在编写过程中简化了原理方面的内容而更加突出应用方面的能力考察。鉴于编写时间有限，且部分内容是作者的经验和见解，不妥之处在所难免，衷心希望读者给予指教，以使本教材日臻完善。

编 者
2011 年 11 月

目 录

绪论	1
----	---

第 1 章 实验误差分析及数据处理 / 3

1.1 测量误差的基本概念	4
1.2 实验数据的有效数字及计数法	7
1.3 简单运算中的误差传递	8
1.4 实验数据处理	9

第 2 章 测量仪表和测量方法 / 10

2.1 压力测量方法	11
2.2 流量测量方法	11
2.3 温度测量方法	12

第 3 章 流体流动综合实验 / 13

实验 1 流体阻力及离心泵相关实验	14
实验 2 计算机控制流体阻力测定	20
实验 3 计算机控制离心泵的性能测定	23
实验 4 流体流型演示实验	24
实验 5 机械能转化演示实验	26

第 4 章 传热综合实验 / 30

实验 6 空气-水蒸气对流传热实验	31
实验 7 计算机控制空气-水蒸气传热实验	36

第 5 章 吸收综合实验 / 42

实验 8 填料塔特性及水吸收空气中氨气传质系数 $K_{Y\alpha}$ 的测定	43
---	----

实验 9 计算机控制水吸收空气中 CO_2 实验	49
---	----

第 6 章 精馏综合实验 / 55

实验 10 乙醇-正丙醇混合液筛板式精馏实验	56
实验 11 计算机控制乙醇-水溶液筛板式精馏实验	60
实验 12 板式塔流体力学演示实验	63

第 7 章 干燥实验 / 67

实验 13 硅胶流化床干燥实验	68
实验 14 计算机控制耐水硅胶 / 绿豆流化床干燥实验	71
实验 15 喷雾干燥演示实验	73

附录 / 75

附录 1 流体阻力实验数据处理	75
附录 2 离心泵特性实验数据处理	77
附录 3 传热综合实验数据表	78
附录 4 $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系统相平衡常数与温度之间的关系	81
附录 5 吸收综合实验数据表	82
附录 6 精馏实验相关汽液平衡数据及处理方法	85
附录 7 流化床干燥实验记录表格	87

参考文献 / 89

绪 论

0.1 化工原理实验的特点

化工原理课程是化工类及相关专业的重要技术基础课，它属于工程技术学科，是建立在实验基础上的科学，不仅有完整的理论体系，也有其独特的实验研究方法。化工原理实验是化工原理课程理论的工程实践过程，属于工程实验范畴。同时，化工原理实验还应当与化工类其他实验相配合，达到培养学生科学实验能力的目的。

0.2 化工原理实验的教学目的

(1) 巩固理论知识

通过实验加深学生对化工原理课程中所讲授的基本原理、基本概念和基本公式的深刻理解。

(2) 掌握实验研究方法和基本数据测试方法

通过实验初步掌握量纲分析法和数学模型法的步骤；掌握操作参数、设备特性参数和特性曲线的测试方法以及典型设备的操作方法。

(3) 提高工程实践能力

主要包括对实验问题的合理设计、分析、操作、归纳、总结，并运用规范语言表述技术报告的能力等。

0.3 化工原理实验的基本要求

(1) 实验预习

① 学生实验前认真预习实验相关指导教材和课堂教学的有关章节，了解实

验目的和要求。

② 结合现场实验装置写出预习报告。预先组织实验小组，小组讨论并拟定实验方案，预先做好分工并写出实验预习报告。预习报告主要包括实验目的、实验方法、基本原理、流程、设备的结构、测量仪表、实验操作步骤以及绘制数据记录表格等。

预习报告应在实验前交实验指导教师审阅，获准后方可参加实验。

(2) 实验操作

① 学生要严格按照操作规程或步骤进行操作；

② 随时注意观察实验现象并进行理论联系实际的思考，及时发现实验问题；

③ 认真细致测定并记录实验原始数据。

(3) 实验数据处理

采用恰当方法处理实验数据。如果采用计算机处理实验数据，学生必须有一组数据作出手算示例。

(4) 撰写实验报告

实验结束后，要求学生完成一份自行撰写成文的实验报告，应避免单纯填写表格的方式。

实验报告主要包括实验名称、实验目的、实验原理、实验操作步骤、数据记录表和计算过程、实验结果的分析和讨论等。

第 1 章

实验误差分析及数据处理

在化工原理实验中,用各种测试仪器测量基本物理量。由于测量仪器、测量方法、周围环境、人的观察力等原因,使实验测量值与真值之间总是存在一定的差异,这种差异在数值上表现为误差。对测量误差进行正确估计和分析,是组织实验、测量和评判实验结果及设计方案的前提。

1.1 测量误差的基本概念

1.1.1 实验数据的真值与平均值

真值是指某物理量客观存在的确定值,它一般不能直接测出。而当测量次数无限多时,根据正负误差出现概率相等的分布规律,取测量值的平均值,在无系统误差的情况下可以获得极为接近于真值的数值,故真值等于测量次数无限多时算出的平均值。但实际测定的次数是有限的,由有限次数求出的平均值,只能近似于真值,可称此平均值为最佳值,计算时可将此最佳值作真值用。

在化工中,常用的平均值有以下几种。

(1) 算术平均值 x_m

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示各次的测量值, n 表示测量次数,则算术平均值为:

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

凡测定值的分布服从正态分布时,用最小二乘法原理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

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

(3) 几何平均值 x_c

$$x_c = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (1-3)$$

或以对数表示:

$$\lg x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (1-4)$$

对一组测量值取对数,所得图形的分布曲线呈对称形时,常用几何平均值。可见几何平均值的对数等于这些测量值对数的算术平均值。几何平均值常小于算术平均值。

(4) 对数平均值 x_l

设有两个量 x_1, x_2 , 其对数平均值为:

$$x_1 = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1-5)$$

当 $x_1/x_2 \leq 2$ 时, 可用算术平均值代替对数平均值。在热量与质量传递中, 分布曲线多具有对数特性, 此时可采用对数平均值。

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, 取决于一组测量值的分布类型。在化工实验和科学研究中, 数据的分布多属于正态分布, 故多采用算术平均值。

1.1.2 误差的定义及分类

误差是实验测量值 (包括直接和间接测量值) 与真值 (客观存在的准确值) 之差。

根据误差的性质和产生的原因, 可分为以下三类。

(1) 系统误差

系统误差是指在测量或实验过程中未发觉的误差, 而这些因素影响的结果为永远朝一个方向偏移, 其大小及符号在同一组实验测量中完全相同, 当实验条件一经确定, 系统误差就获得一个客观上的恒定值, 多次测量的平均值也不能减弱它的影响, 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如下: 仪器不准, 如刻度不准, 仪表未校正或标准表本身存在的偏差等; 周围环境的改变, 如外界温度、压力、风速等; 实验人员个人的习惯或偏向, 如读数偏高或偏低等所引起的误差。针对以上具体情况, 分别通过改进仪器和实验装置以及提高实验技巧予以解决。

(2) 随机误差 (偶然误差)

随机误差是由某些不易控制的因素造成的。在相同条件下做多次测量, 其误差数值和符号是不确定的。即时大时小, 时正时负, 无固定大小和偏向。随机误差服从统计规律, 其误差与测量次数有关, 随着测量次数增加, 出现的正负误差可相互抵消, 因此多次测量值的算术平均值接近于真值。

(3) 过失误差 (粗大误差)

过失误差是与实际明显不符的误差, 误差值可能很大, 无一定规律。主要是由于实验人员粗心大意, 如读错数据、记错数据或操作不当造成的, 存在过失误差的观测值在实验数据整理时应该剔除。此类误差只要操作人员认真细致地工作和加强校对, 即可避免。

从以上讨论可知, 系统误差和过失误差是可以设法消除的。由于理论上以及仪器、方法上所造成的系统误差往往超过随机误差许多倍, 所以首先应该消除系统误差。

1.1.3 误差的表示方法

(1) 绝对误差 d

对一个物理量测定后, 其测量值与该物理量真实测量值之差称绝对误差。实

际工作中以最佳值（即平均值）代替真值，有时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。

$$d_i = x_i - X \approx x_i - x_m \quad (1-6)$$

式中 d_i ——绝对误差；

x_i ——第 i 次测量值；

X ——真值；

x_m ——平均值。

(2) 相对误差 $e\%$

为了比较不同测量值的测量精度，以绝对误差与真值（或近似地与平均值）之比作为相对误差：

$$e\% = \frac{d_i}{X} \times 100\% \approx \frac{d_i}{x_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

在单次测量中：

$$e\% = \frac{d_i}{x_i} \times 100\% \quad (1-8)$$

(3) 引用误差 $\epsilon\%$

除以上两种常用的误差表示外，还有引用误差。引用误差是一种简化的和实用方便的相对误差，常用来表示仪表的精度。它是以量程内最大示值误差与满量程示值之比的百分数表示：

$$\epsilon\% = \frac{d_{\max}}{\Delta x} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 $d_{\max}$ ——最大示值误差；

Δx ——仪表的测量范围。

(4) 算术平均误差 δ

它是一系列测量值误差绝对值的算术平均值，是表示误差较好的方法。

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{n} \quad (1-10)$$

式中 n ——测量次数；

d_i ——第 i 次测量的绝对误差。

(5) 标准误差（均方误差）

对有限测量次数，标准误差可表示为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n-1}} \quad (1-11)$$

标准误差是目前常用的一种表示精度的方法。它不仅与一组测量值的每个数据有关，而且对一组测量值的较大误差和较小误差很敏感，能较好地表示偏差的离散程度。实验愈精确，其标准误差愈小。

【例 1-1】 某次实验测得以下两组数据：

① 10.4 10.3 10.2 10.0 10.1

② 9.9 10.2 10.5 10.2 10.2

求各组实验的算术平均误差和标准误差。

$$\text{解: } \bar{x}_1 = \frac{10.4 + 10.3 + 10.2 + 10.0 + 10.1}{5} = 10.2$$

$$\delta_1 = \frac{0.2 + 0.1 + 0.0 + 0.2 + 0.1}{5} = 0.12$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.2^2 + 0.1^2 + 0.0^2 + 0.2^2 + 0.1^2}{5-1}} \approx 0.16$$

$$\bar{x}_2 = \frac{9.9 + 10.2 + 10.5 + 10.2 + 10.2}{5} = 10.2$$

$$\delta_2 = \frac{0.3 + 0.0 + 0.3 + 0.0 + 0.0}{5} = 0.12$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{0.3^2 + 0.3^2}{5-1}} \approx 0.21$$

可见, 标准误差可以作为 n 次测量值随机误差大小的标准, 在化工实验中得到广泛应用。

1.1.4 精密度和准确度

精密度和准确度是与误差相反的概念。在测量中所测得的数值重现性的程度, 称为精密度, 它反映了偶然误差的大小; 而测量值与真值之间的符合程度, 称为准确度, 它反映了系统误差与偶然误差综合的大小。

1.2 实验数据的有效数字及计数法

1.2.1 有效数字及运算

实验直接测量的数据或运算结果, 总是以一定位数的数字来表达, 到底用几位有效数字加以表示, 是一件很重要的事情, 学生容易这样认为: 小数点后面的有效数字越多就越正确, 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, 因为其一, 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, 例如 568.2mm、56.82cm、0.5682m 这三个数据, 其准确度相同, 但小数点的位置却不同; 其二, 在实验测量中所用的仪器仪表只能做到一定的精度, 一般只能记录到仪表最小刻度的十分之一。如上述的长度测量中, 标尺的最小刻度是 1mm, 其读数可以读到 0.1mm (估计值), 故数据的有效数字是四位, 其中三位是有效安全数字, 一位是估计的, 欠准的。

有效数字的运算规则如下。

(1) 加减法运算

各不同位数有效数相加减，其和或差的有效数字等于其中位数最小的一个。

(2) 乘法运算

乘积或商的有效数字，其位数与各乘、除法中有效位数最少的相同。

(3) 乘方及开方运算

乘方及开方后的有效位数与其底数相同。

(4) 对数运算

对数的有效数字位数应与其真数相同。

(5) 计算平均值

四个数以上平均值的计算，其有效位数可较各数据中最小有效位数多一位。

1.2.2 科学计数法

在科学与工程中，为了清楚地表达有效数字或数据的精确度，可将有效数字写出，并在第一个有效数字后面加上小数点，而数值的数量级由 10 的整数幂来确定，这种以 10 的整数幂来计数的方法称为科学计数法。例如，0.0028 可写为 2.8×10^{-3} ，8800 可写为 8.8×10^3 （有效数字有两位），或 8.80×10^3 （有效数字有三位）。这种计数法的特点是小数点前面永远是一位非零数字，“×”号前面的数字都是有效安全数字，这样，有效位数就一目了然，而且便于运算。

1.3 简单运算中的误差传递

在实验研究中，有些物理量往往不能直接测量，必须有若干个直接测量值，按一定的函数关系式计算求得，因而需要各直接测量值的误差去计算间接测量值的误差，这就是误差传递问题。

设有一间接测量值，是直接测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的函数：

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

设 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别表示测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的绝对误差， Δy 表示由 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 引起的 y 的绝对误差，则

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

将上式右边泰勒级数展开，并略去二阶以上的量，即可以得绝对误差 Δy 的表示式：

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

或

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$$

它的极限误差为:

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

式中, $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 称为误差传递系数, 说明 Δy 不仅取决于误差本身, 还取决于误差传递系数。

函数的相对误差为:

$$e_r = \frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \times \frac{\Delta x_i}{y} \right|$$

函数的标准误差:

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

1.4 实验数据处理

在整个实验过程中, 实验数据处理是一个重要的环节, 目的是将实验中获得的大量数据整理成各变量之间的定量关系。实验数据中各变量的关系可表示为列表式、图示式和函数式三种。

(1) 列表式

列表式将实验数据制成表格。它显示了各变量的对应关系, 反映出变量之间的变化规律。它是标绘曲线的基础。

(2) 图示式

图示式将实验数据绘制成曲线。它客观地反映出变量之间的对应关系, 为整理成数学模型提供必要的函数形式。

(3) 函数式

借助于数学方法将实验数据按一定函数形式整理成方程即数学模型的方法称为函数式。

第2章

测量仪表和测量方法

2.1 压力测量方法

化工生产过程和化工基础实验中经常要考察流体流动阻力、某处压力或真空度，均需要测量压力差。如离心泵性能实验中，需测泵进、出口处的压力；精馏塔或吸收塔需通过测量塔底与塔顶的压力来了解塔的操作情况等，由此可见压力的测量在化工基础实验中占有重要地位。下面简要介绍测压差仪表的种类、原理和使用方法，其结构部件及注意事项可参考有关书籍。

2.1.1 液柱式压差计

液柱式压差计是基于流体静力学原理设计的，其结构比较简单，精度较高。既可用于测量流体在某处的压力，也可测量两处的压力差。其基本形式包括 U 形管压差计、倒 U 形管压差计、单管压差计、斜管式压差计和 U 形管双指示液微差压差计。

以上压差计中，除单管压差计是将一端伸入管内测压点，另一端与大气相通外；其余压差计均为两端分别伸入管内两测压点进行压差测量的。

2.1.2 压力差传感器

依据组成结构的差异，压力差传感器主要包括应变片式压力差传感器、电容式压力传感器和压阻式压力传感器。其中应变片式压力差传感器灵敏度和精度均较高；电容式压力传感器灵敏度很高，特别适用于低压和微压测试；压阻式压力传感器精度很高且测压范围宽。

2.2 流量测量方法

流量计的种类较多，按照其结构及工作原理，主要分为节流式流量计、面积式流量计和速度式流量计，以下简要介绍其种类、工作原理和使用方法，关于其结构部件及注意事项可参考有关书籍。

2.2.1 节流式流量计

此类流量计是利用流体流经节流装置时产生压力差来实现流量测量的，故又称为差压流量计。主要包括孔板流量计、文丘里流量计和喷嘴。使用时将其安装于管路的中间某一位置，且必须注意节流件的安装方向、前后的直管段长度、流体充满管路、流量稳定及取压方法等问题。当被测流体的密度与标定用的流体密