

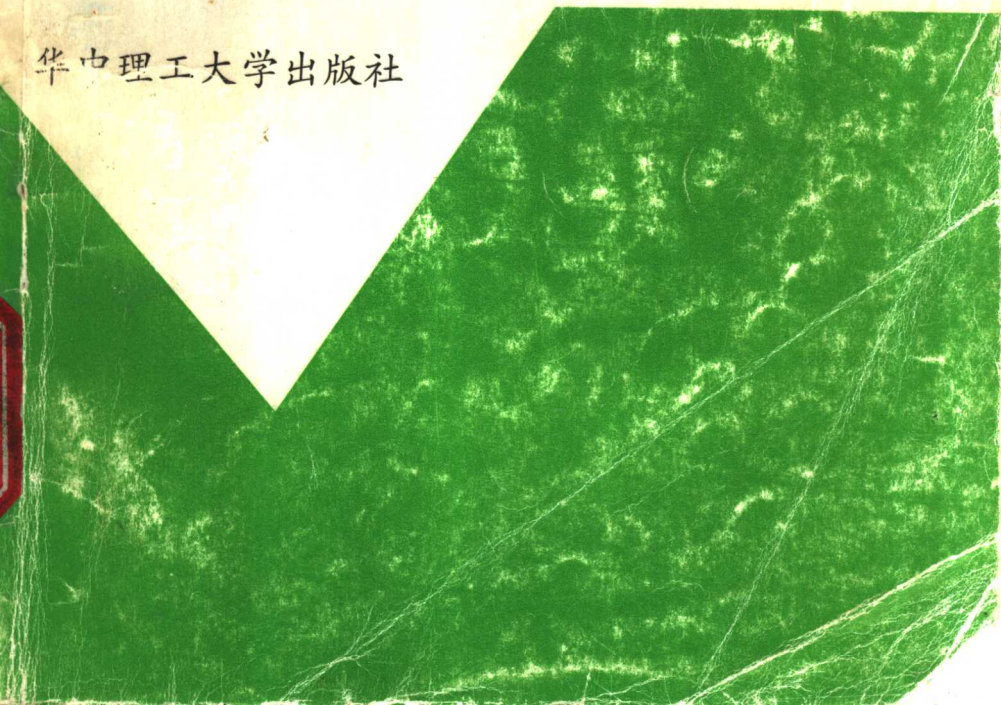
UZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN

李德树 黄光斗 主编

华中理工大学出版社



化工原理实验

李德树 黄光斗 主编

雷达

江苏工业学院图书馆
藏书章

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/李德树,黄光斗 主编
武汉:华中理工大学出版社, 1997 年 8 月
ISBN 7-5609-1622-8

I. 化…

II. ①李… ②黄…

III. 化工原理-实验-高等学校-教材

IV. TQ02

化工原理实验

李德树 黄光斗 主编

责任编辑:叶翠华

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社照排室排版

湖北省社会科学印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:4.5 字数:108 000

1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月第 1 次印刷

印数:1-6 200

ISBN 7-5609-1622-8/TQ·9

定价:4.50 元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书是一本实验教材。内容包括化工实验数据处理、化工原理实验常用仪器仪表的使用与维护、化工原理实验、化工原理演示实验、化工原理计算机辅助实验、附录等六部分。

本书是根据全国高校化工原理课程教学指导委员会提出的实验教学基本要求编写的。重点讲述7个基础实验和计算机辅助实验(含实验预习,仿真实验和数据处理),以培养学生的动手能力和实验技能,巩固和加深对课堂教学内容的理解,提高分析和解决工程问题的能力及应用计算机的能力,确保实验教学的水平和质量达到教学指导委员会提出的基本要求。

本书内容简明扼要,理论层次适中,有较多的例题和思考题。

本书可作为高等学校本科、专科的化工原理实验教材,也可作为化工、轻工、食品工业类专业工程技术人员的参考书。

前 言

化工原理实验教学是化工原理课程教学的一个重要组成部分。近些年来,随着化工原理教学实践和教学改革的不深入,化工原理实验教学日益受到重视,能够按照全国高校化工原理课程教学指导委员会提出的实验教学基本要求组织实验教学的单位日见增多,实验装置和手段日臻普及完备,因此编写一本符合上述“实验教学基本要求”的化工原理实验教材也就显得必要和迫切。于是,本教材就这样应运而生了。

本教材的编写突出了如下四个特点:

(1)实验内容紧扣《基本要求》,重点为七个基本实验,即:直管摩擦系数和局部阻力系数的测定,离心泵的操作和性能测定,过滤常数的测定,传热实验,精馏塔性能实验,吸收实验,干燥速率曲线的测定;同时兼顾必要的演示实验,以保证实验教学水平和质量达标。

(2)引入了近年来化工原理实验教学改革的成果——计算机辅助实验等方面的内容。借助先进的教学手段,更好地巩固和加深对课堂教学内容的理解,提高分析问题、解决问题和应用计算机的能力。

(3)充实了例题、实验数据处理和化工测量仪表方面的内容,以拓宽学生知识面和提高实验教学效果。

(4)强调了实际的操作,以利于培养学生的动手能力和实验技能。

本教材内容简明扼要,理论层次适中,针对性和通用性强。既适用于化工类专业,也适用于轻工类、食品工业类等有关专业;既适用于工科,也适用于理科;既适用于本科,也适用于大专、中专、电大、职大、夜大;既适用于化工原理课程内的实验教学,也适用于化工原理实验单独设课的实验教学。

本教材参考了多种化工原理实验教材和讲义,吸取了多年来化工原理实验教学中积累起来的丰富经验,由多位长期工作在实验教学第一线的教师参加编写,可以说是集体智慧的结晶。参加编写的人员有:李德树、王存文、徐汶、陈亚琴(武汉化工学院);黄光斗、鄢烈祥(湖北工学院);雷达、方立中、李云雁(武汉食品工业学院);祁存谦(广州中山大学)。全书由李德树、黄光斗统编定稿。

在本教材出版之际,编者对参编单位的实验室工作人员和同事们所作出的贡献表示由衷的感谢;对在本教材编写过程中所参考的文献作者或单位致以深切的谢意。

编者水平有限,疏漏错误在所难免,如蒙赐教,不胜感激。

编者

1997年3月于武汉

目 录

实验的主要内容与基本要求	(1)
第一章 实验数据的处理	(4)
第一节 实验数据的误差	(4)
1-1-1 误差的基本概念	(4)
1-1-2 直接测量误差	(8)
1-1-3 函数误差	(11)
第二节 实验数据处理	(19)
1-2-1 列表法、图示法、经验公式法简介	(19)
1-2-2 经验公式中常数的求取	(20)
第二章 实验室常用仪器的使用与维护	(28)
第一节 压力测量	(28)
2-1-1 液柱压力计	(28)
2-1-2 弹簧式压力计	(32)
第二节 流量测量	(33)
2-2-1 测速管	(33)
2-2-2 孔板流量计	(34)
2-2-3 转子流量计	(35)
2-2-4 涡轮流量计	(37)
2-2-5 湿式气体流量计	(40)
第三节 温度测量	(41)
2-3-1 液体膨胀式温度计	(41)
2-3-2 电阻温度计	(43)
2-3-3 热电偶温度计	(47)
第四节 液体相对密度测量	(51)
第三章 化工原理基本实验	(53)
第一节 流体流动阻力的测定	(53)

第二节	离心泵性能的测定	(62)
第三节	过滤实验	(66)
第四节	传热实验	(72)
第五节	精馏实验	(81)
第六节	吸收实验	(88)
第七节	干燥实验	(100)
第四章	演示实验	(109)
第一节	雷诺实验	(109)
第二节	柏努利方程实验	(110)
第三节	旋风分离器演示实验	(111)
第四节	固体流态化实验	(112)
第五节	填料塔流体流动特性实验	(113)
第六节	板式塔演示实验	(113)
第七节	喷雾干燥实验	(114)
第五章	计算机辅助实验教学	(115)
第一节	化工原理仿真实验	(115)
第二节	化工原理实验预习系统	(124)
第三节	化工原理实验数据处理	(128)
附录一	水的重要物理性质	(130)
附录二	乙醇-水在常压下的气液平衡数据	(130)
附录三	空气的重要物理性质	(131)
附录四	乙醇-水溶液密度与组成的关系	(132)
附录五	乙醇-水溶液的物理常数(摘要)	(133)
附录六	乙醇-正丙醇常压下的气液平衡数据	(134)
附录七	乙醇-正丙醇体系的摩尔分率-折光率图	(134)
参考文献		(135)

实验的主要内容与基本要求

一、实验的主要内容

实验课程的内容应包括实验理论教学与基础实验教学两大部分。实验理论教学涉及到实验方法论、数据处理、测试技术及典型仪器、仪表的使用。基础实验为化工原理全国指导委员会规定的7个实验,即:

- (1) 流体流动阻力的测定;
- (2) 离心泵性能曲线的测定;
- (3) 过滤曲线及过滤常数的测定;
- (4) 换热器传热系数及传热膜系数的测定;
- (5) 填料吸收塔传质系数的测定;
- (6) 精馏塔的操作与塔(板)效率的测定;
- (7) 干燥速率曲线的测定。

根据不同专业、学科的要求,可以选择以上7个基础实验中的若干个作为实验内容。

二、实验的基本要求

通过实验课的教学应让学生掌握科学实验的全过程。此过程应包括:①实验前的预习工作;②进行实验操作;③正确记录和处理实验数据;④撰写实验报告。每一个环节的具体说明和要求如下:

1. 实验前的预习工作

- (1) 认真阅读实验课本,弄清实验目的和要求;
- (2) 根据本次实验的具体任务,熟悉与实验有关的理论、实验的具体要求及具体做法;
- (3) 通过计算机实验仿真系统的预习,进一步熟悉实验装置的流程、操作原理及方法;
- (4) 到实验室现场了解实验流程及所使用的仪器仪表,确定实

验方案和实验操作程序；

(5)积极回答实验教师提出的有关问题。

2. 进行实验操作

一般以四人为一小组合作进行,实验前必须作好组织工作,做到既分工、又合作。每个组员要各负其责,并且要在适当的时候进行轮换工作。这样既能保证质量,又能获得全面的训练。

3. 正确记录和处理实验数据

(1)凡是影响实验结果或者数据整理过程中所必需的数据都必须测取。通常而言,物性数据无须直接测定,往往通过测定介质的温度即可查得;

(2)实验数据的读取和记录必须正确。要求每位实验者都应有一专用实验记录本。实验前应拟好记录表格。读取和记录数据时,特别要注意各物理量的单位及有效数字;

(3)当读完一组数据后,若改变操作条件再进行实验,则必须有一段稳定时间才能再读取另一组数据。前后数据的变化一般都存在一定的规律,因此在实验过程中,若某一数据出现异常,则应查找和分析原因。

4. 撰写实验报告

实验报告内容包括:

- (1)报告的题目;
- (2)同实验小组人员姓名;
- (3)实验目的和内容;
- (4)实验的基本理论及方案;
- (5)实验装置及流程图;
- (6)实验的主要操作步骤;
- (7)实验数据及数据处理;
- (8)实验结果与讨论;
- (9)完成实验思考题。

实验报告每人一份,要求简洁明了、数据完整、图线清晰。在数

据处理部分,若有示例计算要求,则同组中每人应不相同.每个实验的具体要求见第三章实验部分.

第一章 实验数据的处理

化工原理实验是化工原理课程的一个重要教学环节。实验数据是否准确可靠是实验者最关心的问题之一。由于种种原因,实验数据必然存在误差。初学者应了解什么是误差,怎样计算测量误差。学会分析误差产生的原因,改进实验方案。正确处理实验数据,在允许的误差范围内由实验数据得出科学的结论,为进一步建立数学模型,为解决工程问题提供依据。

进行实验数据的误差分析与数据处理时要应用概率论和统计学的原理。本章只介绍一些基础知识,不进行严格的数学推导,重在应用。

第一节 实验数据的误差

本节主要讨论误差的基本概念、直接测量误差及函数误差。

1-1-1 误差的基本概念

一、误差的来源

测量值与真值之差称为误差。误差按其来源可分为三类:过失误差、系统误差和随机误差。

过失误差是由于实验者工作不熟练或粗心大意造成的。如操作错误,读数错误等。这类误差通常与正常值相差较大,整理数据时应予剔除。

系统误差是指在同一条件下多次测量同一量时,误差的绝对值或符号保持恒定,或者在条件改变时误差按某一确定的规律变化。仪器不准确,如零点未校准;实验者的习惯与偏向使读数偏高

或偏低;测定环境,如压力、温度偏离校准值等都会造成系统误差。这类误差有规律可循,通过精心校正或检查可以消除。

随机误差是指在相同条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号各不相同,没有确定的规律,也不可预计,但有抵消性的误差。这类误差是由随机因素产生的,遵循统计规律。

排除过失误差及系统误差后的误差应为随机误差。本节主要讨论随机误差。

二、误差的常用表示法

(一)真值的定义

对某一物理量进行无限多次重复测量,各次测量的算术平均值称为测量值的数学期望或称真值。本章中真值记为 x^* 。

对有限次测量,将其算术平均值当作真值的最佳近似值,简称最佳值,记为 $\bar{x}$ 。测量次数越多,最佳值越接近于真值。

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1-1)$$

式中: x_i ——第 i 次测量值;

n ——测量次数。

(二)绝对误差与相对误差

1. 绝对误差 δ_i 与 δ

$$\delta_i = x_i - x^* \approx x_i - \bar{x} \quad (1-2)$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{|\delta_i|}{n} \quad (1-3)$$

式中: δ_i 取绝对值是为了防止正负误差相互抵消。虽然取绝对值后求和夸大了测量误差,但因其计算简便,故较常用。

δ 又称算术平均误差。

2. 相对误差 e

$$e = \frac{\delta}{x^*} \approx \frac{\delta}{\bar{x}} \quad (1-4)$$

(三) 方差与标准差

算术平均误差不能反映误差的离散程度或偏离平均值的程度。例如,有下述两组误差:

3, 1, 8, 2, 1

4, 1, 3, 5, 2

由式(1-3)计算知,这两组数据的算术平均误差均为 3,但第一组数据中最大误差为 8,远高于平均值 3。第二组数据中最大误差为 5,较第一组数据误差要小。这两组数据的差异可以用方差与标准差判别。

方差定义为随机变量与其数学期望之差的平方和的平均值。测量误差的方差为

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x - x^*)^2}{n} \quad (1-5)$$

标准差 σ 又称均方差,定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x^*)^2}{n}} \quad (1-6)$$

对有限次测量,以 $\bar{x}$ 代替 x^* ,可推导出标准差的估计值 $\hat{\sigma}$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n-1}} \quad (1-7)$$

式中: ε_i 称残差。

$$\varepsilon_i = x_i - \bar{x} \quad (1-8)$$

式(1-7)中 $\sum \varepsilon_i^2$ 若按下式计算,可减少计算量。

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 = \sum x_i^2 - \bar{x} \sum x_i \quad (1-9)$$

由式(1-7)求得前述两组数据的标准差 $\sigma_1 = 4.04$, $\sigma_2 = 3.71$ 。可见由标准差可以反映数据的离散程度。

三、随机误差的分布

在化学工程问题中,大量随机误差服从或近似服从正态分布。其分布规律参看图 1-1。图中,横坐标表示测量值 x (或绝对误差 δ);纵坐标表示概率密度函数 $p(x)$ (或 $p(\delta)$)。图中倒钟形曲线为某一标准差下的概率曲线,它对称于直线 $x=x^*$ (测量值 x 的数学期望)或对称于直线 $\delta=0$ 。

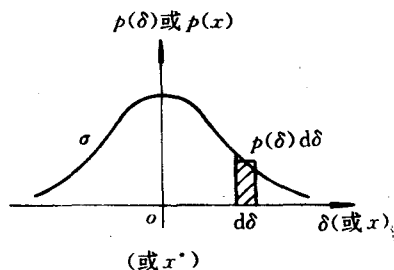


图 1-1 正态分布曲线

正态分布密度函数为

$$p(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{\delta^2}{(2\sigma^2)}\right] \quad (|\delta| < \infty) \quad (1-10)$$

曲线下阴影区的面积 $p(\delta)d\delta$ 为误差 δ 出现的概率,曲线下的全部面积表示全部误差出现的概率,应为 100%。测量误差 δ 落在区间 $[-\Delta, +\Delta]$ 内的概率为

$$p(-\Delta \leq \delta \leq \Delta) = \int_{-\Delta}^{+\Delta} p(\delta)d\delta \quad (1-11)$$

概率积分的运算较复杂,通常由概率积分表查积分值。

四、置信概率 ξ 与显著性水平 α

若将误差以标准差的倍数表示,令 $\Delta = z\sigma$,则式(1-11)可理解为“误差落在区间 $[-z\sigma, +z\sigma]$ 内”这一假设成立的概率,称置信概率,记为 ξ 。若令 $\alpha = 1 - \xi$,则 α 表示上述假设不成立或有显著错误的概率。 α 称置信水平或显著性水平。 z 称置信系数。

若误差服从正态分布,则可根据需要选取一个置信系数 z ,由

正态分布概率表查出对应的概率。反之,若选取置信水平 α ,也可由正态分布概率表查出对应的置信系数 z ,确定某一 α 值下的误差范围 $\pm z\sigma$ 。表 1-1 列举了几组 α 、 ξ 、 z 值。

表 1-1 α 、 ξ 、 z 的关系

显著性水平 $\alpha\%$	置信概率 $\xi\%$	置信系数 z
31.80	68.20	1
5	95	1.96
4.55	95.45	2
1	99	2.58
0.27	99.73	3

1-1-2 直接测量误差

一、直接测量误差的计算

本节只讨论等精度直接测量误差的计算。

精度定义为标准差的倒数。标准差越小,数据的离散程度越小,精度越高,见图 1-2。

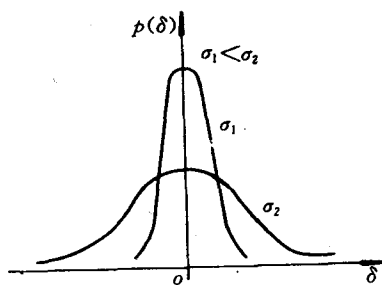


图 1-2 σ 与数据的离散程度

在等精度测量中,各次测量的标准差相同。

不等精度测量指测量仪器、测量方法等测量条件不同,因此各次测量的可靠程度不同,应采用加权平均值计算。

等精度直接测量的结果可用绝对误差、相对误差或标准差表示。

(一)用绝对误差及相对误差表示

$$x^* = \bar{x} \pm \delta \quad (1-12)$$

$$x^* = \bar{x} (1 \pm e) \quad (1-13)$$

式中： $\bar{x}$ 、 δ 、 e 分别按式(1-1)、式(1-3)、式(1-4)计算。

(二)用标准差表示

(1)若已知标准差 σ ，则一次测量值 x 的测量结果为

$$x^* = x \pm z\sigma \quad (1-14)$$

若取显著性水平 $\alpha=5\%$ ，由表 1-1 查得置信系数 $z=1.96$ ，则 $x^* = x \pm 1.96\sigma$ 的置信概率为 95%，此结果有显著错误的概率为 5%。

(2)若对同一物理量进行 n 次等精度测量，则

$$x^* = \bar{x} \pm z\sigma_{\bar{x}} \quad (1-15)$$

式中： $\sigma_{\bar{x}}$ 称算术平均值的标准差，按下式计算：

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-16)$$

例 1-1 已知某仪器的标准差为 12%，若要求 $\sigma_{\bar{x}}=5\%$ 及 1%，应进行多少次测量？

解 由式(1-16)，当 $\sigma_{\bar{x}}=5\%$ 时

$$n = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\bar{x}}} \right)^2 = \left(\frac{12}{5} \right)^2 \text{ 次} = 5.8 \text{ 次}$$

同理 $\sigma_{\bar{x}}=1\%$ 时， $n=144$ 次。

(3)已知有限次测量标准差的估计值 $\hat{\sigma}$ ，测量结果可表示为

$$x^* = \bar{x} \pm z, \hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (1-17)$$

其中
$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (1-18)$$

由于测量次数较少，不服从正态分布，式(1-17)中 z ，查 t 分布