

MATLAB-BASED CHEMICAL
ENGINEERING EXPERIMENTS

基于**MATLAB** 的化工实验技术 (汉—英)

刘 俏 范圣第 编著



中国轻工业出版社

基于 MATLAB 的 化工实验技术

(汉 - 英)

刘 俏 范圣第 编著

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于 MATLAB 的化工实验技术/刘俏、范圣第编著. —北京:
中国轻工业出版社, 2007. 1
ISBN 7-5019-5633-2

I. 基... II. ①刘... ②范... III. 化学工业-化学实验-
计算机辅助计算-软件包, MATLAB-汉、英 IV. TQ016-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 114029 号

责任编辑: 姚怀芝 责任终审: 滕炎福 封面设计: 宋琳媛
版式设计: 马金路 责任校对: 燕杰 责任监印: 胡兵 张可

出版发行: 中国轻工业出版社(北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 河北省高碑店市鑫昊印刷有限责任公司

经销: 各地新华书店

版次: 2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 7.625

字数: 198 千字

书号: ISBN 7-5019-5633-2/TQ · 284

定价: 20.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-85119817 65128898 传真: 85113293

网址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换
60115K4X101ZBW

内 容 提 要

介绍当今世界流行的科学计算软件 MATLAB 的基本应用, 引进 MATLAB 进行化工实验的数据处理。化工实验指导采用汉 - 英双语编写, 英语部分精心选自美国高校的化工实验指导, 实验内容的核心词汇在汉语部分中以汉 - 英形式出现。全书共分三章, 即实验数据处理、MATLAB 在化工实验技术中的应用基础和实验部分(包括基础性实验、设计性实验、综合性实验及仿真实验)。

本书可作为高等院校化工及相关专业的化工原理实验课的实验教材或教学参考书, 也可作为石油、化工、生物、轻工、食品、医药等部门从事科研、生产技术人员的参考书。

前 言

在从教 20 多年的过程中,我们始终在思考这样一个问题,如何使学生通过每一个教学环节最大受益?面对 21 世纪,怎样以学生为本,以应用为本,以社会需求为本?这是摆在我们教育工作者面前很实际的问题。本书正是基于这样一种想法,以化工实验(包括基础性实验、设计性实验、综合性实验及仿真实验)为主要内容,介绍了当今世界流行的科学计算软件 MATLAB 的基本应用,引进 MATLAB 进行化工实验的数据处理。实验指导采用了汉-英双语编写,实验内容的核心词汇在汉语部分中以汉-英形式出现,每个实验配有的英文实验指导均精心选自美国高校化工实验指导书。

本书试图将 MATLAB 软件的学习有机地融合到化工实验技术中去,使读者在较短的时间内通过这本书、通过用 MATLAB 处理化工实验数据的实践,了解和掌握 MATLAB 强大的计算功能和图形处理功能,为读者提供一种对现实问题的感受、展示解决实际问题的清晰方法,给他们创造应用计算机的环境和条件,提高他们利用计算机解决实际问题的能力。另一方面,本书也尝试着将化学工程英语词汇的学习有机地融合到化工实验技术中去,读者通过学习核心词汇、阅读单元操作的英文实验指导以及试着用英文撰写实验报告等环节,轻松掌握本单元操作的基本英语词汇,学习到原汁原味的实验技术英语,这些尝试在我们的实践中已初步收到了成效。

在本书的编写过程中参阅和引用了许多作者的书籍和文献,这里,要特别提到的是天津大学化工学院化工基础实验中心

编写的《实验设备说明书》以及天津大学张金利、张建伟、郭翠梨和胡瑞杰编写的《化工原理实验》一书为本书提供了良好的基础,在此真诚地向他们表示谢意。

由于作者的学识有限,不妥之处,恳请读者批评指正。

大连民族学院 刘俏 范圣第

2005 年 12 月

目 录

第1章 实验数据的处理

1.1 实验数据的误差分析	1
1.1.1 误差的基本概念	1
1.1.2 实验数据的有效数字与计数法	6
1.1.3 误差分析的应用	8
1.2 实验数据处理方法	10
1.2.1 列表法	10
1.2.2 图示法	11
1.2.3 回归分析法	14

第2章 MATLAB 在化工实验技术中的应用基础

2.1 MATLAB 简介	22
2.2 MATLAB 工作环境	23
2.3 MATLAB 基本运算功能	26
2.4 MATLAB 绘图功能	31
2.4.1 基本命令	31
2.4.2 对数图形	35
2.4.3 函数绘图	36
2.4.4 双轴绘图	38
2.5 数据拟合	39
2.5.1 一元线性回归	39
2.5.2 多元线性回归	44

2.5.3 一元非线性回归	48
2.5.4 多元非线性回归	53
2.5.5 逐步回归	56
2.6 数据插值	62
2.7 数值微分与积分	65
2.7.1 数值微分	65
2.7.2 数值积分	67
2.8 MATLAB 与 Excel 的动态链接	68
2.9 MATLAB 处理化工实验数据举例	72

第3章 实验部分

3.1 流体阻力测定	80
3.2 <i>Friction Loss in Pipes and Fitting Lab</i>	85
3.3 流量计性能测定	89
3.4 <i>Fluid Flow Measurements</i>	93
3.5 离心泵性能测定实验	107
3.6 <i>Centrifugal Pump</i>	111
3.7 <i>Centrifugal Pump Experiment</i>	121
3.8 正交实验法在过滤实验中的应用	123
3.9 板框过滤机仿真实验	128
3.10 <i>Plate and Frame Filtration Experiment</i>	129
3.11 气-汽对流传热综合实验	133
3.12 <i>The Heat Exchange Experiment</i>	141
3.13 连续精馏实验	147
3.14 <i>Continuous Distillation</i>	154
3.15 <i>Lab Scale Sieve Tray Distillation Column</i>	155
3.16 气体吸收	157
3.17 气体吸收仿真实验	163

3.18	<i>Packed Tower Pressure Drop</i>	165
3.19	萃取塔实验	168
3.20	<i>Liquid - Liquid Extraction</i>	175
3.21	洞道干燥实验	180
3.22	流化床干燥实验	185
3.23	<i>Drying Experiment</i>	192
3.24	<i>Fluid Bed</i>	195
3.25	超滤膜分离实验	200
3.26	<i>Membrane Separator Experiment</i>	206
附录		209
一、PT-139E 型仪表操作说明		209
二、阿贝折光仪使用说明		210
三、乙醇 - 正丙醇气液平衡组成		212
四、 $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 系统平衡常数与温度关系曲线		212
五、MATLAB 常用函数		212
六、实验记录表		216
主要参考文献		230

第 1 章 实验数据的处理

1.1 实验数据的误差分析

通过实验测量所得大批数据是实验的主要成果,但在实验中,由于测量仪表和人的观察等方面原因,实验数据总存在一些误差,所以在整理这些数据时,首先应对实验数据的可靠性进行客观的评定。

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。

1.1.1 误差的基本概念

1. 实验数据的误差来源及分类

误差是实验测量值(包括间接测量值)与真值(客观存在的准确值)之差别,基于下列原因,误差可分为三类:

(1) 系统误差 由于测量仪器不良,如刻度不准,零点未校准;测量环境不标准,如温度、压力、风速等偏离校准值;实验人员的习惯偏向等因素所引起的系统误差。这类误差在一系列测量中,大小和符号不变或有固定的规律,经过精确的校正可以消除。

(2) 随机误差(偶然误差) 由一些不易控制的因素所引

起,如测量值的波动,肉眼观察欠准确等。这类误差在一系列测量中的数值和符号是不确定的,而且是无法消除的,但它服从统计规律,也是可以认识的。

(3) 过失误差 它主要是由实验人员粗心大意,如读数错误、记录错误或操作失误所致。这类误差往往与正常值相差很大,应在整理数据时加以剔除。

2. 实验数据的精确度

精确度与误差的概念是相反相成的,精确度高,误差就小;误差大,精确度就低。

要区别以下概念:测量中所得的数据重复性大小,称精密度,它反应随机误差的大小,以打靶为例,图 1-1(a)的系统误差与随机误差均小,精确度高;图 1-1(b)表示弹着点密集但离靶心(真值)甚远,说明精密度高,随机误差小,但系统误差大;图 1-1(c)的随机误差大,但系统误差较小,即精密度低而正确度较高。精确度(或称准确度)表示测量结果与真值接近程度,精确度高则精密度与正确度均高。

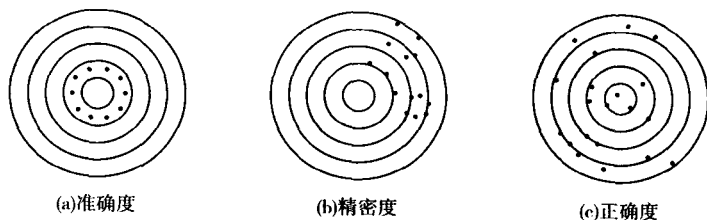


图 1-1 准确度、精密度和正确度关系示意图

3. 数据的真值与平均值

真值是待测物理量客观存在的确定值,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,根据随机误差中正负误差出现几

率相等的规律,测定结果的平均值可以无限接近真值。但是实际上测量次数总是有限的,由此得出的平均值只能近似于真值,称此平均值为最佳值。计算中可将此最佳值当作真值,或用“标准仪表”(即精确度较高的仪表)所测之值当作真值。化工中常用的平均值有:

(1) 算术平均值 x_m : 设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各次测量值, n 为测量次数,则算术平均值为:

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

算术平均值是最常用的一种平均值,因为测定值的误差分布一般服从正态分布,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

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

(3) 几何平均值

$$x_g = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \quad (1-3)$$

(4) 对数平均值

$$x_l = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1-4)$$

对数平均值多用于热量和质量传递中,当 $x_1/x_2 < 2$ 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%。

4. 误差的表示法

(1) 绝对误差 d : 某物理量在一系列测量中,某测量值与

其真值之差称绝对误差。实际工作中常以最佳值代替真值,测量值与最佳值之差称残余误差,习惯上也称为绝对误差:

$$d_i = x_i - X \approx x_i - x_m \quad (1-5)$$

式中 d_i ——绝对误差;

x_i —— i 次测量值;

X ——真值;

x_m ——平均值。

如在实验中对物理量的测量只进行一次,可根据测量仪器出厂鉴定书注明的误差,或取仪器最小刻度值的一半作为单次测量的误差。例如某压力表注明精(确)度为 1.5 级,即表明该仪表最大误差为相当档次最大量程之 1.5%,若最大量程为 0.4MPa,该压力表最大误差为:

$$0.4 \times 1.5\% \text{ MPa} = 0.006 \text{ MPa} = 6 \times 10^3 \text{ Pa}$$

又如某天平的感量或名义分度值为 0.1mg,则表明该天平的最小刻度或有把握正确的最小单位为 0.1mg,即最大误差为 0.1mg。

化工实验中最常用的 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。

(2) 相对误差 $e\%$: 为了比较不同测量值的精确度,以绝对误差与真值(或近似地与平均值)之比作为相对误差:

$$e\% = \frac{d}{|X|} \approx \frac{d}{x_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

在单次测量中
$$e\% = \frac{d}{x_i} \times 100\%$$

式中 d ——绝对误差;

$|X|$ ——真值的绝对值;

x_m ——平均值。

[例1-1] 今欲测量大约8kPa(表压)的空气压力,试验仪表用①1.5级,量程0.2MPa的弹簧管式压力表;②标尺分度为1mm的U形管水银柱压差计;③标尺分度为1mm的U形管水柱压差计。求相对误差。

解:

① 压力表

绝对误差 $d = 0.2 \times 0.015 \text{ MPa} = 0.003 \text{ MPa} = 3 \text{ kPa}$

相对误差 $e\% = 3/8 \times 100\% \approx 37.5\%$

② 水银压差计

绝对误差 $d = 0.5 \times 1 \times 133.3 \text{ Pa} = 66.65 \text{ Pa}$

其中, $133.3 = 13.6 \times 9.8$ (即水银的密度 $\times$ 重力加速度)。

相对误差 $e\% = 66.65/8 \times 10^{-3} \times 100\% = 0.83\%$

③ 水柱压差计

绝对误差 $d = 0.5 \times 1 \times 9.8 \text{ Pa} = 4.9 \text{ Pa}$

其中9.8为水的密度 $\times$ 重力加速度。

相对误差 $e\% = 4.9/8 \times 10^{-3} \times 100\% = 0.061\%$

可见用量程较大的仪表,测量数值较小的物理量时,相对误差较大。

(3) 算术平均误差 δ : 它是一系列测量值的误差绝对值的算术平均值,是表示一系列测定值误差的较好方法之一。

$$\delta = \frac{\sum |x_i - x_m|}{n} = \frac{\sum |d_i|}{n} \quad (1-7)$$

式中 x_i ——测量值, $i = 1, 2, \dots, n$;

x_m ——平均值;

d_i ——绝对误差。

(4) 标准误差(均方误差) σ : 在有限次测量中, 标准误差可用下式表示:

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

标准误差是目前最常用的一种表示精确度的方法, 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, 实验愈精确, 其标准误差愈小。

1.1.2 实验数据的有效数字与记数法

1. 有效数字

实验数据或根据直接测量值的计算结果, 总是以一定位数的数字来表示。究竟取几位数才是有效, 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, 某液面计标尺的最小分度为 1mm, 则读数可以到 0.1mm。如在测定时液位高在刻度 524mm 与 525mm 的中间, 则应记液面高为 524.5mm, 其中前三位是直接读出的, 是准确的, 最后一位是估计的, 是欠准的或可疑的, 称该数据为 4 位有效数。如液位恰在 524mm 刻度上, 则数据应记作 524.0mm, 若记为 524mm, 则失去了一位精密度。总之, 有效数中应有而且只能有一位欠准数字。有效数与误差的关系由上可见: 液位高度 524.5mm 中, 最大误差为 $\pm 0.5\text{mm}$, 也就是说误差为末位的一半。

2. 科学计数法

在科学与工程中, 为了清楚地表达有效数或数据的精度, 通常将有效数写出并在第 1 位数后加小数点, 而数值的数量级由 10 的整数幂来确定, 这种以 10 的整数幂来记数的方法称科学记数法。例如: 0.0088 应记为 8.8×10^{-3} , 88 000 (有效数 3 位)

记为 8.80×10^4 。应注意,科学记数法中,在10的整数幂之前的数字应全部为有效数。

3. 有效数字的运算

① 加减法运算。各不同位数有效数相加减,其和或差的有效数等于其中位数最少的一个,例如测得设备进出口的温度分别为 65.58°C 与 30.4°C , 则

$$\text{温度和: } 65.58(?)^\circ\text{C} + 30.4(?)^\circ\text{C} = 95.9(?)8(?)^\circ\text{C}$$

$$\text{温度差: } 65.58(?)^\circ\text{C} - 30.4(?)^\circ\text{C} = 35.1(?)8(?)^\circ\text{C}$$

结果中有两位欠准值,这与有效值规则不符,故第二位欠准数应舍去,按四舍五入法,其结果应为 96.0°C 与 35.2°C 。

② 乘除法计算。乘积或商的有效数,其位数与各乘、除数中有效数位数最少的相同,如测得管径 $D = 50.8\text{mm}$, 其面积 A 为:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.14}{4} \times 50.8^2 \text{mm}^2 = 2.03 \times 10^3 \text{mm}^2$$

注意: π 、 e 、 g 等常数有效位数可多可少,根据需要选取。

③ 乘方与开方运算。乘方、开方后的有效数与其底数相同。

④ 对数运算。对数的有效数位与其真数相同。如 $\lg 2.35 = 3.71 \times 10^{-1}$; $\lg 4.0 = 6.0 \times 10^{-1}$ 。

⑤ 在四个数以上的平均值计算中,平均值的有效数字可较各数据中最小有效位数多一位。

⑥ 所有取自手册的数据,其中有效数按计算需要选取,但原始数据如有限制,则应服从原始数据。

⑦ 一般在工程计算中取三位有效数已足够精确,在科学研究中根据需要和仪器的可能,可以取到四位有效数字。

从有效数的运算规则可以看到,实验结果的精确度同时受

几个仪表的影响时,则测试中要使几个仪表的精确度一致,采用一两个精度特别高的仪表无助于整个实验结果精度的提高,如过滤实验中,计量滤液体积的量具分度为 0.1L,而用分度为千分之一秒的电子秒表计时,测得 27.5635s 中流过滤液 1.35L,计算每升滤液通过所需的时间为: $t = 27.5635\text{s}/1.35\text{L} = 27.6\text{s}/1.35\text{L} = 20.4\text{s/L}$ 。可见用一个 0.1 秒分度的机械秒表精度就足够了。

1.1.3 误差分析的应用

误差分析的目的在于计算所测数据(包括直接测量值与间接测量值)的真值或最佳值范围,并判定其精确性或误差。整理一系列实验数据时,应按以下步骤进行:

(1) 求一组测量值的算术平均值 x_m 。

根据随机误差符合正态分布的特点,按误差的正态分布曲线,可以得出算术平均值是该组测量值的最佳值(当消除了系统误差并进行无数次测定时,该最佳值无限接近真值)。

(2) 求出各测定值的绝对误差 d 与标准误差 σ 。

(3) 确定各测定值的最大可能误差,并验证各测定值的误差不大于最大可能误差。按照随机误差正态分布曲线可得一个绝对误差 $(x - x_m)$ 出现在 $\pm 3\sigma$ 范围内的概率为 99.7%,也就是说 $(x - x_m) > \pm 3\sigma$ 的概率是极小的(0.3%),故以 $\pm 3\sigma$ 为最大可能误差,超出 $\pm 3\sigma$ 的误差已不属于随机误差,而是过失误差,因此该数据应予剔除。

(4) 在满足条件 3 后,再确定其算术平均值的标准差。根据差传递方程,算术平均值的标准差为:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$