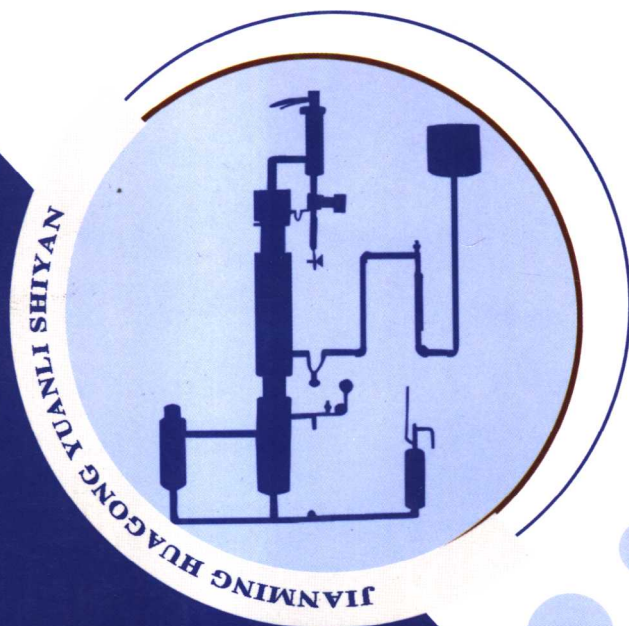


西北民族大学“十一五”规划教材

简明化工原理实验

李思政 编著

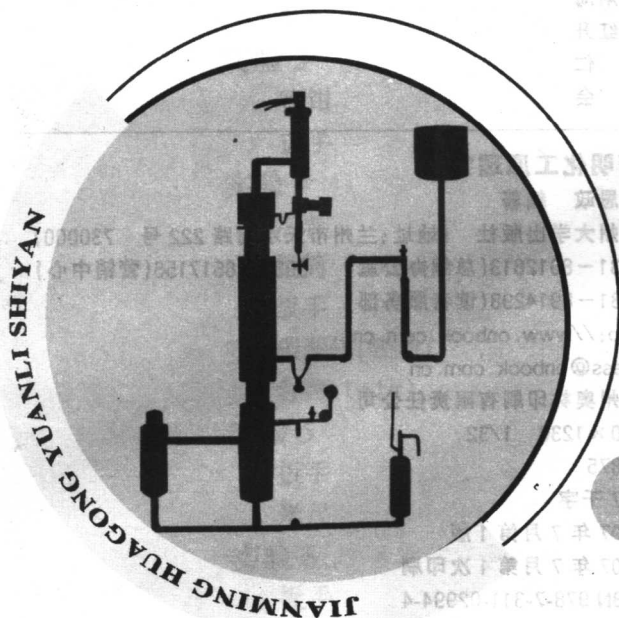


兰州大学出版社
LANZHOU DAXUE CHUBANSHE

西北民族大学“十一五”规划教材

简明化工原理实验

李思政 编著



兰州大学出版社

LANZHOU UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

简明化工原理实验/李思政编著. —兰州:兰州大学出版社, 2007. 7

ISBN 978-7-311-02994-4

I. 简... II. 李... III. 化学原理—实验 IV. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 102041 号

出版人 陶炳海
策划编辑 陈红升
责任编辑 张仁
封面设计 赵会

书 名 简明化工原理实验
作 者 李思政 编著
出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路 222 号 730000)
电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)
网 址 <http://www.onbook.com.cn>
电子信箱 press@onbook.com.cn
印 刷 兰州奥林印刷有限责任公司
开 本 880×1230 1/32
印 张 5.875
字 数 167 千字
版 次 2007 年 7 月第 1 版
印 次 2007 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-311-02994-4
定 价 12.00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

前 言

化工原理(传递过程与单元操作)是化学工程与工艺、环境工程、制药工程等专业必修的十分重要的基础技术课程。不论是从传递过程,还是从单元操作的角度看,课程所涉及的理论与计算方法都是建立在实验基础之上的。

化工原理实验是化工原理课程的实验部分,它属于工程实验范畴,也是工程实践教学的开始。对学生而言,很可能是第一次在工程型装置上进行实验。由于要面对复杂的实际问题和工程问题,工程实验的突出特点是变量多、实验工作量巨大、设备规模大小悬殊、所涉及的物料也千变万化。从实验设计来说,它包括实验流程安排、装置设计、仪表选择、数据处理方法的选择等多方面。因而,化工原理实验课程的复杂性要求学生要作好充分的准备。本实验教材以工程型实验装置为基础,微型化及先进的数字化测量仪表是诸单元装置的突出特点。

要把实验安全始终放在首要的位置,它包括人身安全和设备安全两个方面。要遵守安全纪律,严格按操作规程的要求操作。安全检查要经常化,要养成安全检查习惯。在安全问题上,不容有丝毫的懈怠,要反反复复地告诫学生有关的安全事项。

实验预习是实验课的第一环节。预习内容包括:实验目的、实验原理、测量仪表、实验流程、操作步骤、注意事项、数据处理等等。为此,在实验教程中,配有详细的实验流程图,在关键词词后一般都有英文标注,且附有一些思考题目,以提示预习重点。在预习中,要将本次实验的注意事项牢记于心,因为在注意事项中明确指出了必须避免的错误操作及可能发生的损害设备的情况。进入实验室后,还要对照实验装置进行现场预习,遇到问题或疑问时,要及时向指导教师

问清楚。数据处理并不是实验结束以后才开始的工作，在预习时就要注意数据记录和数据处理方法的选择。在实验前，应完成预习报告。在预习报告中，除了前述预习内容外，还应列出原始数据记录表。

要培养良好的实验素质，如细致和耐心等。为此要全身心地投入到实验中，充分调动视觉、听觉和嗅觉诸感官，以便及时发现问题。对在设备中进行的过程或实验现象要注意观察，并及时准确记录。测量时不仅要准确读数，还需注意仪表的精度及量程。在实验装置的开车和停车的动手操作中，实验教程中有详细具体的操作步骤，这些操作步骤是安全可靠的，要严格遵守。发现问题或遇到不正常现象时，要及时向指导教师报告情况。

为提高学生动手操作能力，特别精心地安排了实验顺序，即按动量传递、热量传递、质量传递的次序，由较为简单的过程过渡到较为复杂的过程，使操作能力逐步提高，同时建立起对单元操作的感性经验。随着课程的逐步展开，要注意总结不同单元操作之间的内在联系。例如，在过滤、流化床、沸腾干燥等实验中，都涉及到流体通过颗粒床层的流动；在萃取和吸收实验中，都涉及传质单元高度和传质单元数的计算；在换热器、精馏、干燥等实验中，都涉及传热操作；等等。

要及早完成实验报告。其内容包括：实验目的、实验原理、实验流程图、操作步骤、原始数据记录表、实验结果表等。实验数据处理是一项十分耗时的工作，一定要细致和耐心。在实验报告的结语中要有问题讨论，以及对实验做出的总结和评价。实验报告的书写要工整规范，包括数据的记录、图表的处理等，这方面在教程中有详细的内容可以参考。

总之，在实验现场亲自动手操作，不仅是要提高操作水平或动手能力，还要深化对传递过程的理解，以及建立起对诸单元操作的感性认识。

目 录

前言

数据处理 / 1

1. 数据记录 / 1
2. 单位与量纲分析 / 2
3. 有效数字及其计算规则 / 4
4. 数据处理方法 / 6

测量仪表与测量误差 / 12

1. 测量过程与测量误差 / 13
2. 测量仪表的基本技术性能 / 14
3. 误差分析 / 16
4. 间接测量误差的计算 / 19
5. 显示仪表 / 25

流量测量 / 27

1. 基本术语 / 27
2. 节流式流量计 / 27
3. 转子流量计 / 31
4. 涡轮流量计 / 33
5. 湿式气体流量计 / 37
6. 思考题 / 38

压力测量 / 39

1. 测压仪表 / 39
 - 1.1 液柱压力计 / 39
 - 1.2 弹簧管压力表 / 42
 - 1.3 应变片式远传压力表 / 44
2. 压力计的安装 / 46
3. 思考题 / 47

温度测量与控制 / 49

1. 玻璃液体温度计 / 50
2. 双金属温度计 / 51

3. 电阻温度计 / 52
4. 热电偶温度计 / 54
5. 人工智能温度调节仪表 / 56
6. 测温仪表的安装 / 57
7. 思考题 / 59

实验

- 实验 1 雷诺实验 / 60
- 实验 2 离心泵特性曲线的测定 / 66
- 实验 3 流体流动阻力的测定 / 77
- 实验 4 恒压过滤参数的测定 / 87
- 实验 5 流化床实验 / 101
- 实验 6 换热器的操作和传热系数的测定 / 110
- 实验 7 填料塔精馏实验 / 121
- 实验 8 吸收总传质系数的测定 / 130
- 实验 9 振动筛板塔萃取实验 / 141
- 实验 10 干燥操作和干燥特性曲线的测定 / 150

附录

- 附录 A 参考书一览表 / 160
- 附录 B 水的物理性质 / 161
- 附录 C 干空气的物理性质 / 162
- 附录 D WZC 型铜热电阻分度特性表 / 163
- 附录 E 乙醇—水的气液平衡组成 / 165
- 附录 F 乙醇水溶液的密度 / 166
- 附录 G 丙酮在空气中的极限浓度 / 170
- 附录 H 丙酮水溶液的平衡分压 / 170
- 附录 I 低浓度下丙酮水溶液的相平衡常数 / 171
- 附录 J 苯甲酸在水中的溶解度 / 171
- 附录 K 气相色谱法测定空气—丙酮混合气体中的丙酮 / 172
- 附录 L 煤油中苯甲酸含量的测定 / 178
- 附录 M 泰勒标准筛 / 180
- 附录 N 实验物品一览表 / 181

数据处理

在化工原理实验中，就测量与数据处理而言，通常包括下面几个基本步骤：

(1)用某些仪表进行测量。有些仪表实际上是很简单的，如水银 U 管压差计；有一些是比较复杂的，如涡轮流量计、电阻温度计等。

(2)把测量得到的数据代入某些公式或关系式，以计算某些要求的量。

(3)在某些情况下，需要应用作图的方法或回归分析法来处理实验数据。

简单地说，测量和实验数据处理是两个重要的实验环节。在初步的水平上，它们要涉及到数据记录、单位与量纲分析、有效数字、列表与作图方法等方面。

从实验方案的设计这个角度来看，数据处理就不完全是实验结束以后的工作。在实验设计中，除了实验流程安排、装置设计、仪表选择之外，还包括数据处理方法的选择。

1. 数据记录

数据记录对实验者的重要性是不言而喻的。对学生而言，这里强调的是，关于数据记录需要引起重视的细节问题。首先，实验记录本必须采用装订的笔记本，以便于携带和保管。每一页应该编码并记录实验日期。可预先记录计算所需要的方程式和常数。在记录本上列出

表格,以便有条理地记录数据。所有测量及有关资料(各种实验条件)应该直接记在记录本上,并在测量时及时记录。实验记录必须忠实完整,书写要清楚整齐,决不允许涂抹。如果某些数据需要废弃,应该在它上面画一道线。

在实验过程中应对数据作核对计算,否则,某一个早期的读数错误,或者某一个不正确的操作,会导致后面的实验徒劳。

数据记录要严格遵守记录要求。在实验完成后,将散乱记录的数据重新整理成原始数据记录表,这是一种费时且易造成差错的记录方法,是必须避免的。

实验记录本必须妥善长期保存,避免由于丢失或损坏等造成数据的丧失。这是必须养成的基本素质。

2. 单位与量纲分析

2.1 国际单位制(SI)

在化工原理实验中,要使用多种测量仪表,其测量值的单位(unit)是不统一的。在将这些测量值代入公式前,需采用国际单位制(SI)进行单位换算。例如,用 LZB—25 型转子流量计测定管内水的流量,读数为 180.0L/h ,若将其换算成 SI 单位,则该测量值等于 $5.000 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ 。国际单位制(SI)是由国际计量大会于 1960 年公布的计量单位制度,它规定了七个基本单位及两个辅助单位。SI 基本单位列于表 1,辅助单位即平面角和立体角。

由 SI 基本单位乘除组合所得的单位称为导出单位。任何物理量的单位都可以用 SI 基本单位表示出来,从而避免了有多少可测的量就有多少单位这样一种既麻烦又混乱的状况。在采用国际单位制时,如果遇到数值过大或过小的情况,可在单位符号前加上一个表示 10 的幂次的词冠,例如 10000Pa 可表示为 10kPa 。国际单位制(SI)中最常用的词冠列于表 2。

表 1 SI 基本单位

物理量	单位名称	符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
发光强度	坎德拉	cd
物质的量	摩尔	mol

在书写导出单位时应注意的事项有：

(1)应以乘积符号“ $\cdot$ ”表示所有单位的积，例如，流体粘度的单位应表示为 Pa $\cdot$ s。

(2)应以一斜线或以负指数相乘来表示两单位相除，例如，流体的体积流量的单位应表示为 m^3/s 或 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。但是，在一个导出单位中，除非插入括号，不能用多于一根以上的斜线，以避免混淆。例如，换热器总传热系数 K 的单位应表示为： $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 或 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

(3)文字和符号不能混用。例如，不可将“ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ”写成“瓦 $\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ”等。

表 2 国际单位制 (SI) 常用的词冠

名称	符号	10 的幂次
兆	M	10^6
千	k	10^3
厘	c	10^{-2}
毫	m	10^{-3}
微	μ	10^{-6}

2.2 量纲分析 (dimensional analysis)

一个物理量的量纲说明该物理量的种类和性质。量纲与单位的区别在于，同一物理量可以有多种单位，但其量纲是唯一的，例如，长

度的单位可以是 m、mm、 μm 等，其量纲为 L。在化工原理实验中，经常遇到的量的 SI 单位和量纲列于表 3。量纲分析方法是建立在量纲和谐原理的基础之上的，即在物理方程式中，各个项的量纲必须相同。具体来说，它是将影响某一物理过程的各个物理量组合成无量纲数群 π ，从而使得变量减少，使描述复杂物理现象的方程简化。例如，流体流过水平直管的压降可用下述方程表示： $\Delta p_f = f(L, d, u, \rho, \mu)$ ，该方程涉及的变量的数目为 6 个；若以无量纲数群方程表示： $\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0$ ，则变量数为 3，方程得以大大简化。量纲分析在许多工程问题中，特别是在流体力学、传热及传质中是一个十分有用的方法。

3. 有效数字及其计算规则

3.1 有效数字 (significant figure)

有效数字是指实际能测到的具有实际意义的数字，它包括所有的准确数字和最后一位存疑数字。例如，用 U 管压差计测量流体通过某一直管后的压降，U 管上的刻度为 1mm，可估计至 1/5，则读数为 45.2mm，其前两位“45”是直接读出的，即为准确数字，最后一位“2”是在 45 与 46 这两个刻度之间估计出的，称为存疑数字。又如，压强表的最小分度为 10kPa，可估计至 1/5，所以读数的末尾应是偶数整数位，例如，26kPa（表压）。

表 3 常见量的 SI 单位和量纲

量	量纲	SI 单位和符号
长度	L	米 (m)
面积	L ²	平方米 (m ²)
体积	L ³	立方米 (m ³)
时间	t	秒 (s)

续表 3

量	量纲	SI 单位和符号
速度	$l \cdot t^{-1}$	每秒米 ($m \cdot s^{-1}$)
加速度	$l \cdot t^{-2}$	每秒每秒米 ($m \cdot s^{-2}$)
质量	m	千克 (kg)
力	$l \cdot t^{-2} \cdot m$	牛顿 (N) $kg \cdot m \cdot s^{-2}$
压力	$l^{-1} \cdot t^{-2} \cdot m$	帕斯卡 (Pa) $N \cdot m^{-2}$
粘度	$l^{-1} \cdot t^{-1} \cdot m$	$Pa \cdot s$
密度	$l^{-3} \cdot m$	$kg \cdot m^{-3}$
能量	$l^2 \cdot t^{-2} \cdot m$	焦耳 (J) $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
功率	$l^2 \cdot t^{-3} \cdot m$	瓦特 (W)
温度	T	开尔文 (K)
热容	$l^2 \cdot t^{-2} \cdot m \cdot T^{-1}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
比热	$l^2 \cdot t^{-2} \cdot T^{-1}$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
传热系数	$t^{-3} \cdot m \cdot T^{-1}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
扩散系数	$l^2 \cdot t^{-1}$	$D, m^2 \cdot s^{-1}$
传质系数	$l \cdot t^{-1}$	$k, m \cdot s^{-1}$

在考虑有效数字时,应对“0”给予特别的注意。当“0”紧挨在小数点的右边时,它们不是有效数字,例如,在 0.0056 中,只有“56”是有效数字,而“0”仅起确定小数点位置的作用;在数字(1~9)之间的,或在小数点后末尾的“0”,都是有效数字,例如,在 105.300 中,有 6 位有效数字;对于如 2500 这样的数字,其中的“0”可能是也可能不是有效数字,但若写成 2.500×10^3 ,即采用指数时,若将 10^n 不包括在有效数字位数中,那么这个数字的任何疑问都可消除。

3.2 计算规则

在科学计算中有一些几乎是普遍应用的规则:

(1)在记录数值大小时,只给出有效数字。

(2)在去掉多余的数字时,按“四舍六入五留双”的原则进行。例如,对于数据 10.4350、305.650,若均改为四位有效数字,则分别为 10.44、305.6。

(3)在加和减时,保留的小数位应当和那个有最少小数位的数一样。例如:

$$\begin{aligned} &0.15 + 20.458 - 4.665 \\ &= 0.15 + 20.46 - 4.66 \\ &= 15.95 \end{aligned}$$

(4)相乘和相除时,计算结果的有效数字位数的保留,以有效数字位数最少的那个数为依据,使所得结果的相对误差与各数中相对误差最大的数相一致。例如:

$$\begin{aligned} &10.00 \times 6.000 / 2.0 \\ &= 10 \times 6.0 / 2.0 \\ &= 30 \end{aligned}$$

(5)乘方、开方后的有效数字位数与其底数相同。

(6)对数的有效数字位数与其真数相同。

4 数据处理方法

化工原理实验中所涉及的数据处理方法主要包括列表法、作图法、平均值法和最小二乘法等。

4.1 列表法

列表法是对实验数据进行的初步整理。实验数据表分为原始记录表、中间运算表和最终结果表。

原始记录表应根据实验内容在实验前设计好。例如,在实验“恒压过滤参数的测定”中,其原始记录表可设计成表 4 的形式。

表 4 恒压过滤实验, 原始数据记录表

实验日期:

装置编号:

校直编号:			
序号	过滤压降 (Pa) $\Delta p \times 10^{-3}$	过滤时间 (s)	滤液体积 (ml)
1			
2			
...			
圆板过滤器直径:		滤浆浓度:	
温度:			

列表及记录时应注意下列事项:

- (1)表格的表头要列出变量的名称和单位。
- (2)记录时, 有效数字的位数要与测量仪表的精度相适应。
- (3)数字较大或较小时, 应采用科学记数法, 且将 10^n 记入表头(参数 $\times 10^n$ = 表中数字)。

(4)列表的标题要醒目、完整、准确。

列出中间运算表格, 有助于运算过程, 避免发生数据的混淆。例如, 恒压过滤实验的中间运算表如表 5。

实验最终结果表应列出主要变量之间的关系和实验结论, 相同条件下的重复实验也应列入表内。例如, 恒压过滤实验的实验结果表如表 6。

表 5 恒压过滤实验, 中间运算表

序号	过滤时间 t (s)	滤液体积 q (m^3 / m^2)	t/q (s / m)
1			
2			
...			

表 6 恒压过滤实验结果表

编号	斜率 $1/K$	截距 $2q_e/K$	过滤常数 K ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	介质常数 q_e (m)
1				
2				
...				

4.2 作图方法

在化工原理实验中，经常要用作图法来整理和处理实验数据。例如，在离心泵特性曲线测定实验中，需要将特性曲线标绘出来。类似的还有，沸腾干燥器干燥曲线的测定等。将数据标绘成图形，不仅可达到形象直观的目的，而且，便于突出最高点、最低点、转折点等特性点。除了整理实验数据之外，还可由所绘图形计算另外一些数据。例如，在实验“恒压过滤参数的测定”中，在坐标纸上绘出 t/q 与 q 间的直线，从直线的斜率和截距可求出过滤常数 K 和介质常数 q_e 。

1. 坐标纸的选择

化工中常用的坐标有：直角坐标、双对数坐标 (log-log coordinate) 和半对数坐标 (semi-log coordinate, 见图 2)；相应的坐标纸在市场上都有出售。为了使图形线性化，对于线性函数 $y=ax+b$ ，应采用直角坐标；对于幂函数 $y=ax^b$ ，有 $\lg y = \lg a + b \lg x$ ，即 $\lg y \sim \lg x$ 为线性关系，应采用对数坐标；对于指数函数 $y=a^{bx}$ ，有 $\lg y = b (\lg a) x$ ， $\lg y \sim x$ 为线性关系，应采用半对数坐标。当自变量和因变量的最大值与最小值之差都较大时，可采用对数坐标；而当只有一个变量的最大值与最小值之差较大时，应采用半对数坐标。

2. 对数坐标的特点

在对数坐标轴上，任一点到原点的距离等于该点标出数值的对数值，并且标出数值就是数值本身。从而，对于 1、10、100、1000 等点，相应的对数值为 0、1、2、3，所以它们之间的实际距离是相等的。对数坐标上的距离等于两点对应数值的对数值的差。对数坐标的标度如

图 1 所示。半对数坐标图如图 2 所示。

3. 作图要点

(1) 自变量一般标绘在横坐标上，因变量一般标绘在纵坐标上。

(2) 选择作图的函数关系取决于作图的最后目的。例如，在恒压过滤实验中，以 t/q 为因变量，以 q 为自变量，则 $t/q \sim q$ 为线性关系，从其斜率和截距可计算出过滤常数 K 和 介质常数 q_e 。

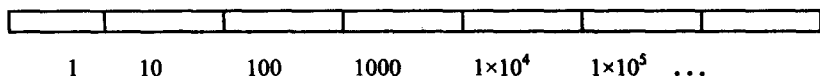


图 1 对数坐标的标度

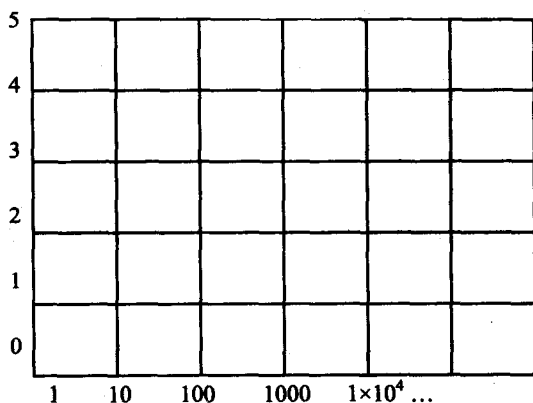


图 2 半对数坐标图

(3) 作图标度的最小分度应与仪表的最小分度一致。当有足够的数
据可以计算各测量量的标准误差时，此标准误差应作为标度的最小刻
度。

在化工原理实验中，可按仪表精度估算测量误差，以确定坐标分
度。例如，涡轮流量计的量程为 $0.45 \sim 2.8 \text{ l/s}$ ，精度为 0.5 级，故流
量误差约为： $\Delta Q = (2.8 - 0.45) \times 0.5\% \approx 0.011 \text{ l/s}$ 。可取 $2\Delta Q$ 在 $1 \sim 2 \text{ mm}$

之间,从而流量坐标的比例尺为: $\frac{2\text{mm}}{0.02 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}}$, 即 $\frac{100\text{mm}}{1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}}$; 若感到此坐标分度太大,也可取 $2\Delta Q$ 作为标度的最小刻度,即取 $2\Delta Q$ 为 1mm, 此时比例尺为: $\frac{1\text{mm}}{0.02 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}}$, 即 $\frac{50\text{mm}}{1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}}$.

(4)实验点的符号选择是任意的,小圈和叉是最常用的符号。

(5)如果作图的函数是线性的或近似线性的,最佳直线的常数可由作图法、平均值法或最小二乘法求得。如果函数是非线性的,一般用曲线尺或曲线板画出最佳的光滑曲线。

(6)图应配以合适的标题,坐标要标上所用单位和数值大小。

4.3 平均值法与最小二乘法

由作图法可方便地求得线性方程的斜率和截距,可用于具有中等精密度的有限数目的点。但是,当有 6 个或 6 个以上具有中等精密度的实验点时,平均值法可给出比作图法更好的结果,只不过平均值法稍微麻烦一点。最小二乘法是三种方法中最麻烦的办法,但能给出斜率和截距的最佳值。在有 7 个或 7 个以上高精密度的数据时,利用这一方法才是合理的。

1. 平均值法

设适用于数据的线性方程为 $y=mx+b$, 若有 6 个实验点,将其分为两组,前 3 点为一组,后 3 点为另一组。由下列方程组联立解出 m 和 b 。

$$y_1+y_2+y_3=m(x_1+x_2+x_3)+3b$$

$$y_4+y_5+y_6=m(x_4+x_5+x_6)+3b$$

2. 最小二乘法 (method of least square)

最小二乘法是回归分析 (regression analysis) 中的数学方法,其所依据的是“使差的平方和为最小”的原则。若设待求的理论值为 y_i^* , 测量值为 y_i , 若使绝对误差 $|y_i^*-y_i|$ 的平方和为最小,可求出最佳拟和函数。下面简单给出一元线性回归方法,即用一条直线来拟合实验数据。