

化学工程基础实验

北京师范大学化学工程教研室编

人民教育出版社

高等学校试用教材

# 化学工程基础实验

北京师范大学化学工程教研室编

人民教育出版社

高等学校试用教材

# 化学工程基础实验

北京师范大学化学工程教研室编

人民教育出版社

高等学校试用教材  
**化学工程基础实验**  
北京师范大学化学工程教研室编

人民教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
湖北洪湖印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 12.25 字数 275,000  
1980年11月第1版 1981年5月第1次印刷  
印数 00,001—13,500  
书号 13012·0540 定价 0.92元

## 序 言

1977年10月在武汉召开的全国高等学校理科化学专业教材会议上,委托我校编写一本化学工程基础实验教材。这对我们来说,确是一项困难的任务。化学工程实验教材不同于一般理论教材,必须要有实验装置为前提。六十年代我们也曾开设过几个实验,但经过十年动乱,已毁之无遗。况且现已进入八十年代,教学实验既要考虑现代化问题,又要考虑如何切合我们实际情况。为此,我们经过两年努力,重新设计、安装和调试了十八套实验装置,并编纂成本书。

本书实验项目的选择,以理科化学工程基础教学大纲所规定的内容为依据。同时,受时间和各种条件限制,有些应该列入的实验项目,由于尚未安装或调试完毕而未能列入,如圆管内流速分布测定、板式塔塔板效率的测定等实验。有些实验虽已列入,但尚欠完善,这些只能期待今后逐步充实。还有一些实验,如雷诺试验、管道阻力试验、流体流动能量转换试验等,我们主张不列入学生实验,而准备作为教学演示实验单独编印。尽管如此,本书所包括的实验项目总数,已大大超过现定实验教学时数。我们的意图,是为大家根据各自的需要和客观条件,提供更多的选择余地。

化学工程实验的规模:目前国内多采用仿照工业设备缩小而成的实验装置,接近于中间试验规模。据已有国外实验教材来看,除采用中试规模的实验装置外,也有采用小型装置的。本书所提供的实验项目,全部采用以玻璃设备为主的小型化实验装置,显然,小型化实验装置不仅适合理科,对工科院校也是有参考价值的。

即使小型化的化学工程实验装置,也与一般化学实验有很大差别,绝非单人所能操纵,而需要几个人协作才能进行。对此,要使学生有一个清楚的认识,并且注意培养学生的集体观念和协同合作的思想作风。另外,在教学方法上也要有一些必要的措施。

实验小组每组最好不要超过三人,否则会造成浪费时间、降低效率,影响教学效果。每组要有一个有组织能力的小组长,领导并组织实验操作,使大家协调一致。

对于同样装置的实验可设置几套,几组同时进行;也可设一套设备,几组先后进行,合作完成一个实验。各组可选择不同变量来进行试验,然后将各组实验数据汇集成一份较为完整的实验报告。这样几组合作试验,不仅可丰富实验内容,而且进一步能使教学实验与近代科学研究进展相适应。举例来说,在精馏柱中评比不同填料的分离能力。一个组在有限的学时内,完成几种填料的评比是不可能的,但几个组同时在几套设备内,分别进行不同填料的分离能力试验,然后将各组数据整理在一起,就能作出一套较为系统的实验数据。又如间歇搅拌釜试验,这一组作旋桨推进式搅拌叶试验,下一组就改换三叶后掠式搅拌叶试验,再一组可进行开启式平直涡轮式搅拌叶试验,然后将各组先后在同一设备内,取得的不同类型搅拌叶的实验数据,汇集在一起,就能得到一份各种搅拌叶性能评比报告。

本书大部分实验都可按上述两种方法进行。从每个实验内容看起来量很大,采用这种教学方法来组织教学,对每个学生来讲实验工作量并不大,可是得到的却是较为完整的实验结果,培养的是一种协同完成一项科学研究所需的良好作风。

此外,还可采用另一种教学方案。实验装置采用多样化,但在同类实验中,每组只选作其中一个实验,然后各组交流,使学生既亲自进行了实践,又开阔了眼界,丰富了感性知识。举例来说,热量传递有四个实验,因学时所限,学生不能每个实验都做,而是一组只做其中一个实验,其它三个实验经互相交流,也能收到举一反三,触类旁通之效。

显然,后一种教学方案不如前一种容易实施。因为前者只要根据学时,选择少数几个实验项目就可以了,建设起来容易些,而后者要有较大的投资和较多的物质条件。但采取逐年积累,不断丰富,也还是有可能的。

无论采用上述哪种教学方法,小型化实验装置都能为接纳更多的学生从事实验,提供便利条件。

目前,化学工程在实验教学方面还是相当薄弱的,实验设备和测试手段距世界先进水平也还有一定距离。尤其是近来,光导、激光、计算机和微型试验等先进技术,业已进入化学工程领域。我们相信,随着时代的推移,化学工程基础教学实验从内容、设备到测试手段,必将随之不断更新。限于时间、物质条件,以及我们的学术和技术水平,本书的缺点和错误是在所难免的,欢迎大家批评指正。

本书中所有实验都是通过集体努力而完成的,参加实验工作的主要有:于润潮、王定锦、田梦庐、张文朴、胡树永、刘金珩、冯瑞琴、张改莲等。全书主要由王定锦负责编写,书中图表主要由田梦庐设计绘制。本书在编写过程中,并得到了我教研室王珪主任的指导与帮助。

无论在准备实验或者在编写工作中,我们都得到许多兄弟院校、科研单位和工厂等多方面的支持和帮助,这里难以一一列举。又承蒙:南开大学(主审)、北京大学、四川大学、南京大学、兰州大学、复旦大学、山东大学、武汉大学、中山大学、上海师范大学、上海师范学院、吉林师范大学,以及清华大学、北京化工学院和北京工业大学等院校于1980年5月参加了审稿会,接着又先后举行了三期讨论会,共有理工医院校八十余所近一百人参加。与会的同志们本着共同促进我国教育事业的热忱,提供了不少宝贵经验和建议。在此,我们一并表示感谢。

北京师范大学化学系

化学工程教研室

1980年10月

# 目 录

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 总论                                    | 1   |
| 一、化学工程基础实验的教学目的和要求                    | 1   |
| 二、化学工程实验数据处理                          | 2   |
| 三、化学工程实验一般注意事项                        | 13  |
| 实验一 液体流量测定与流量计校验                      | 17  |
| 实验二 气体流量测定与流量计校验                      | 23  |
| 实验三 热电偶温度计的校验                         | 30  |
| 实验四 热敏电阻温度计的校验                        | 38  |
| 实验五 绝热材料导热系数的测定                       | 44  |
| 实验六 液-液热交换的总传热系数及膜系数的测定               | 49  |
| 实验七 蒸汽冷凝膜系数的测定                        | 57  |
| 实验八 蒸汽管的热损失与夹层保温管的有效导热系数的测定           | 64  |
| 实验九 湿壁塔气膜传质系数的测定                      | 72  |
| 实验十 筛板塔气体吸收试验                         | 80  |
| 实验十一 精馏柱和填料性能评比试验                     | 87  |
| 实验十二 部分回流时精馏柱分离能力的测定                  | 96  |
| 实验十三 间歇搅拌釜式反应器流动特性试验                  | 103 |
| 实验十四 固定床与流化床反应器流动特性试验                 | 113 |
| 实验十五 微分反应器评价合成甲醇催化剂的活性                | 124 |
| 实验十六 积分反应器测定 $\text{SO}_2$ 催化氧化反应速度常数 | 131 |
| 实验十七 内循环无梯度反应器的检验                     | 141 |
| 实验十八 内循环无梯度反应器测定二氧化硫催化氧化反应速度常数        | 149 |
| 附录一 国际制(SI)单位及单位换算                    | 156 |
| 1. 国际制(SI)基本单位                        | 156 |
| 2. 化学工程中某些物理量的符号和国际制导出单位示例            | 156 |
| 3. 工程制、C. G. S. 制与国际制之间的单位换算          | 158 |
| 4. 角度、温度与浓度的单位换算                      | 159 |
| 5. 某些常数的单位                            | 160 |
| 附录二 化学工程实验中常用的数据表                     | 161 |

|      |                                   |     |
|------|-----------------------------------|-----|
| 表 1  | 水的密度                              | 161 |
| 表 2  | 几种常见气体的密度                         | 162 |
| 表 3  | 水的粘度                              | 162 |
| 表 4  | 几种常用气体的粘度                         | 164 |
| 表 5  | 水的饱和蒸汽压                           | 164 |
| 表 6  | 水的比热                              | 167 |
| 表 7  | 水的汽化潜热                            | 168 |
| 表 8  | 水的导热系数                            | 168 |
| 表 9  | 几种常用气体的导热系数                       | 169 |
| 表 10 | 几种固体材料的导热系数                       | 169 |
| 表 11 | 几种常用绝热材料的导热系数                     | 170 |
| 表 12 | 几种物质在空气中的扩散系数                     | 171 |
| 表 13 | 二氧化碳的亨利系数                         | 171 |
| 表 14 | 评价精馏柱几种常用的理想二元标准混合液               | 172 |
| 表 15 | 正庚烷-甲基环己烷体系的组成与折光率关系表             | 172 |
| 表 16 | 泰勒标准筛                             | 172 |
| 表 17 | 常用热电阻的特性表                         | 173 |
| 表 18 | WZB 型(BA <sub>1</sub> ) 铂热电阻分度特性表 | 173 |
| 表 19 | WZB 型(BA <sub>2</sub> ) 铂热电阻分度特性表 | 175 |
| 表 20 | 常用热电偶的特性表                         | 176 |
| 表 21 | 铂铑-铂热电偶分度表                        | 177 |
| 表 22 | 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表                | 179 |
| 附录三  | 某些测试仪器的使用方法                       | 183 |
| 1.   | 半导体点温计                            | 183 |
| 2.   | 直流数字电压表                           | 183 |
| 3.   | 光电数字测速仪                           | 184 |
| 4.   | 氯化锂湿度测定仪                          | 185 |
| 5.   | 阿贝折射仪                             | 185 |
| 6.   | 电导仪                               | 186 |
| 7.   | 气相色谱仪                             | 186 |

# 总 论

## 一、化学工程基础实验的教学目的和要求

化学工程学的基础教学,不论在工科还是在理院校,日益引起了人们的重视。这与化学工业的飞速发展和学科体系的日益完善是密切相关的。化学工程学是建立在实验基础上的科学,它不仅有完整的理论体系,而且具有一些独特的实验研究方法。化学工程的教学除了系统地讲授基础理论外,基础实验教学也是一项必不可少的实践性环节。因此,实验教学在化学工程教学中的作用、地位及其意义,决不容忽视。

### (一) 实验教学目的

化学工程基础实验虽是整个化学工程教学的有机组成部分,但它既作为一门独立的基础课程,应具有其自身的教学目的和教学要求。我们认为化学工程基础实验应达到如下目的:

#### (1) 培养学生从事实验研究的初步能力。

从科学实践中,我们体会到从事实验研究应具备这样一些能力:对实验现象有敏锐的观察能力;运用各种实验手段正确地攫取实验数据的能力;分析和归纳实验数据的能力;由实验数据和实验现象实事求是地得出结论,并能提出自己见解的能力,以及对所研究的问题具有旺盛的探索 and 创造力。

(2) 初步掌握一些有关化学工程学的实验研究方法和实验技术。为此,基础实验中也应力求接触一些新的测试技术和手段,以便能适应不断发展着的科学技术。

(3) 培养学生运用所学的理论,分析和解决实际问题的能力。在理论与实践结合的过程中,必将有助于巩固和加深对某些基本原理的理解,并且在某些方面还能得到适当的充实和提高。

总而言之,化学工程基础实验的目的应着重于实践能力的培养。这种能力的培养是书本学习所无法替代的。举一个浅近的例子,如在实验数据处理过程中的数值运算,在化学工程中往往是一件繁琐而又乏味的事。尽管近来电子计算机的普及,减轻了不少运算量,但这种数值运算能力仍是一项基本功,否则实验得不到正确的结论。而这种能力的增进,只有反复实践,别无秘诀。因此,实验过程中,不能只局限于增加一些感性认识和印证一下所学的理论为满足。

基础实验课程受学时和各种条件的制约,学生只能在已有的实验装置和规定的实验条件范围内进行实验,因此,上述各种能力的培养只能是初步的。若要取得更好的效果,实验应由学生从确定课题、设计、安装,从头开始做起。但在基础课程中实施这种教学方法是有不少困难的,只能期待毕业实践中去进行这种更全面更深入的训练。因此,可以清楚地意识到,基础实验课程,顾名思义,只能为今后从事科学实验打好基础,远不是科学研究方法的全部,也达不到实验研究能力的全面训练。况且,实验方法和技术是在日新月异地发展着,实验教学只能是为今后去接受新的方法和技术,从事新的探索和研究,打下一点实践基础。

## (二) 实验教学要求

化学工程实验课按三个环节来进行。对各个环节的具体要求分别说明如下:

### 1. 课前预习

要完成好每个实验,就必须认真做好课前预习工作。化学工程实验的装置流程较为复杂,测试仪器又较多,课前预习尤为重要。要求学生在课前必须认真阅读实验指导书,清楚地掌握实验项目的要求,实验内容,和实验所依据的原理;到实验室对照具体实验装置,搞清楚设备结构和流程;对某些精密测试仪器必须仔细阅读该仪器的使用说明,掌握其操作规程和 safety 注意事项;然后写出简明的预习提纲。提纲应包括:(1)实验的主要任务;(2)实验前需要预先计算的数据;(3)准备好记录实验基本参数和实验数据的各种表格。

### 2. 实验课中实际操作

学生进入实验室前,必须经教师考查,达到预习要求后,才能允许参加实验。

学生实验前应仔细检查装置流程和仪器仪表是否完整,并按要求进行实验前准备工作。准备完毕后,经教师检查后,得到允许,才能启动设备。

实验进行过程中,操作要认真,尤其对精密测试仪器,一定要按操作规程操作。发现仪器仪表有故障,学生必须立即向教师报告,未经教师许可,不得擅自行事。实验现象的观察要仔细,实验数据的测定要精心,实验记录要详尽清楚。将测得实验数据和观察到的现象,必须记录在实验记录本上,决不许记在活页纸或零散纸片上。学生应注意培养自己严谨的科学态度,养成一些良好的习惯。

实验课虽是实践性环节,但仍要积极开动脑筋,深入思考,善于发现问题和解决问题。

实验结束后,将实验设备及仪表恢复原状,周围环境整理干净,并把原始实验记录本交教师审阅。经教师检查批准,方可离开实验室。

### 3. 编写实验报告

实验报告虽是以实验数据的准确性和可靠性为基础,但将实验结果整理成一份好的报告,也是需要经过训练的一种实际工作能力。往往有这样情形,有的学生实验技能较好,实验做得也很成功,却整理不成一篇像样的实验报告。因此,对学生来说,编写实验报告的能力也是需要经受过严格的训练。这种训练是今后写好科学论文或研究报告所必不可少的。

一般说来,实验报告应包括以下几个方面:(1)实验的目的;(2)实验所依据的原理;(3)所采用的实验方法和装置;(4)实验数据及数据整理结果;(5)根据实验结果得出哪些有价值的结论,并对某些问题进行讨论。对于科学论文和研究报告,最后还要列出参考文献。必要时还要编写摘要。在实验课程所要求的实验报告中,参考文献一项可略,其他各项也尽量简明扼要些,重点放在实验数据处理和实验结果的讨论上。

## 二、化学工程实验数据处理

实验数据测量误差问题,已在分析化学和物理化学等课程中,陆续学习过一些有关的理论和

方法。因此,这里不再系统论述。只着重简要介绍化学工程实验中常用的一些数据处理方法。

### (一) 实验数据测量值及其误差

在化学工程实验中,用各种测试仪器测量基本物理量。由于测量仪器、测量方法、人的观察力等原因,使测量值与真值之间总会存在一定差别,测量值也不可能完全一致。

在测量中所测得的数值重现性的大小,称为精确度。测量值与真值之间的符合程度,称为准确度。

为说明准确度与精确度的区别,往往用打靶来作比喻。如图 0-1 中所示, A 表示精确度与准确度都很好; B 表示精确度很好,但准确度却不高; C 表示准确度与精确度都不好。当然在科学测量中没有像靶心那样明确的真值,而是设法去测定这个未知的真值。

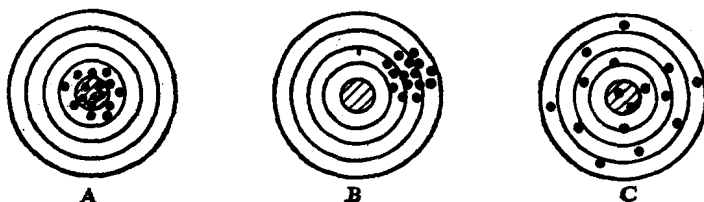


图 0-1

初学者在实验过程中,往往满足于实验数据的重现性,而忽略了精确的测量值是否准确。绝对真值是不可知的,只能在计量上订出一些国际标准作为测量仪表准确性的参考标准。随着人类认识运动的推移和发展,可以逐渐逼近它。

在实验科学中,设在测量次数无限多情况下,在无系统误差情况下,将测量值加以平均,可以获得非常接近于真值的数值。但是在我们的实验测量中次数是有限的,用有限测量值求得平均值,只能是近似真值。在化学工程基础实验中,常用的平均值有下列几种:

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

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

(2) 几何平均值。几何平均值是将一组  $n$  个测量值连乘并开  $n$  次方求得,即

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (2)$$

(3) 均方根平均值。均方根平均值按下式计算:

$$x_m^2 = \frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{n}$$

$$x_m = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \quad (3)$$

在任何一种测量中,无论所用仪器多么精密,测量方法和操作多么完美,所得结果总不能完全一致,而存在一定误差。粗略地讲,测量值与真值之差,或者测量值与规定的标准值之差称为误差。根据误差的性质和产生的原因,误差一般分为系统误差和偶然误差。在化学工程基础实验中,常用的误差表示法有下列两种:

(1) 算术平均误差。算术平均误差是表示误差较好的方法,其表示式为

$$\delta = \frac{\sum |\delta_i|}{n} \quad (4)$$

式中  $n$ ——测量次数;

$\delta_i$ ——为测量值与标准值之间的差值,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

(2) 均方根误差。均方根误差也称为标准误差,其表示式为:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}} \quad (5)$$

式中  $n$  与  $\delta_i$  表示的意义与上式相同。

## (二) 实验数据的记数法及有效数字

实验直接测量或计算结果,该用几位数字来表示,是件很重要的事情。学生中往往容易产生这样两种想法:认为一个数值中小数点后面位数愈多愈准确,或者计算结果保留位数愈多愈准确。其实这两种想法都是错误的。因为其一,小数点的位置不决定准确度,而与所用单位大小有关。例如,用电位差计测热电偶的电动势记为  $764.9\mu\text{V}$  或记为  $0.7649\text{mV}$ ,准确度是完全相同的;其二,测量仪器只能作到一定精度(或称灵敏度),还以上面这个例子来说,这种电位差计精度只能达到  $0.1\mu\text{V}$  或  $0.0001\text{mV}$ ,运算结果的准确度决不会超过这个仪器所允许的范围。

由此可见,测量值或计算结果数值用几位数字来表示,决定于测量仪器的精度。数值准确度大小,由有效数字位数来决定。如上面例子中,数值的精度为  $0.1\mu\text{V}$ ,准确度为四位有效数字。

在科学与工程中,为了清楚地表示出数值的精度与准确度,可将有效数字写出,并在第一个有效数字后面加上小数点,而数值数量级有 10 的整数幂来确定。这种用 10 的整数幂来记数的方法称为科学记数法。例如,  $0.000388$  可写作  $3.88 \times 10^{-4}$ ,而  $38800$  可写作  $3.88 \times 10^4$ 。科学记数法的好处是不仅便于辨认一个数值的准确度(因为现存的数字无疑都是有效数字),而且便于运算。

有关有效数字的运算法则,大家都已较熟悉,这里不再赘述。

## (三) 实验数据的整理

所谓实验数据的整理,就是把所获得的一系列实验数据用最合适的方式表示出来。在化学工程实验中,有如下三种表达方式:

### 1. 实验数据列成表格

将实验直接测定的一组数据,或根据测量值计算得到的一组数据,按照其自变量和应变量的原样,依一定的顺序一一对应列出数据表。例如:热电偶标定实验测得一组数据,以温度为自变量,以热电势为应变变量列成数据表。这种列表法最为简便。但在实验测量中,自变量(如上例中的温度)不一定按等间距有规则的分度,这会给使用时带来困难。这就需要根据实验数据重新分度,使表中所列数据有规则地排列起来,而且希望自变量按整数作等间距顺序排列。这样会使查阅更为方便。

数据的分度有多种方法,最为简单的是图解法,将实验原始数据作图,然后再利用图中曲线

按需要重新列表。其他方法这里不再介绍,可参阅有关书籍。但这里需对如何列数据表提出如下几点注意事项:

(1) 表格要有简明扼要而又符合内容的标题名称。

(2) 项目应写明名称、符号及单位。化工数据中,有的数量级很大或很小。如二氧化碳的亨利系数  $E$ , 用科学记数法表示, 在  $20^{\circ}\text{C}$  时,  $E=1.42\times 10^3$  大气压。当列表时, 项目名称写为  $E\times 10^{-3}$ (大气压), 而表中数字写为: 1.42。这种情形在化工数据表中经常遇到, 提请大家注意。

(3) 数字写法应注意有效数字的位数, 每列之间小数点对齐。

(4) 若直接记录实验数据作表, 则在实验中应注意自变量尽可能取等间距和整数。

## 2. 实验数据整理成图形

根据解析几何原理, 可将实验数据的函数关系, 整理成图形表示出来。这种表示法形式直观, 容易由图线直接看出函数关系的变化规律。在化学工程实验中, 常采用这种方法整理实验数据, 因此十分重要。

将实验数据在图上进行标绘时, 需注意下列几点:

(1) 对于一般采用的直角坐标, 常选横轴为自变量, 纵轴为应变量。在两轴侧要标明变量名称、符号和单位。尤其是单位, 初学者往往因受纯数学的影响而容易忽略。

(2) 坐标分度的选择, 要反映出实验数据的有效数字位数, 即与被标数值精度一致, 并要求方便易读。坐标分度值不一定从零开始, 而使图形占满全幅坐标纸较为合适。

(3) 若在同一张坐标纸上, 同时标绘几组测量值, 则各点要用不同符号(如:  $\cdot$ ,  $\times$ ,  $\Delta$ ,  $\circ$  等), 以示区别。若  $n$  组不同函数同绘在一张坐标纸上, 则在曲线上要标明函数关系或名称, 或表明读数方向箭头, 如图 0-2 所示。

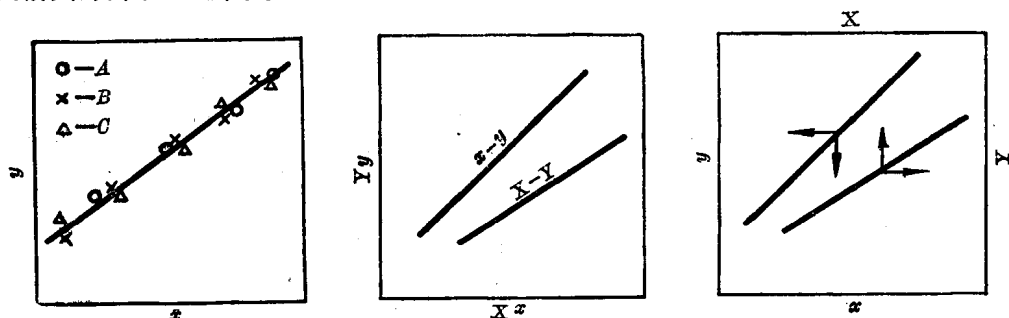


图 0-2 在同一图上表示几组数据和几条曲线

(3) 实验曲线以直线最易标绘, 使用也最为方便。因此在处理数据时, 尽量使曲线直线化。为此, 根据不同情况将变量加以变换或选用不同坐标纸, 如在化学工程实验数据处理上, 经常采用的单对数和双对数坐标纸。并且希望所得曲线的斜率力求近于 1, 来进行分度。

关于曲线标绘的方法和要求, 大家都较为熟悉, 这里无须重述。下面着重介绍一下有关对数坐标的一些基本知识。

在化学工程实验中, 常遇到  $y=ax+b$  和  $y=ax^n$  的函数关系。前者在笛卡儿坐标上可标绘成一条直线; 而后者标绘在笛卡儿坐标上则为一曲线。

如果将  $y = ax^n$  等式的两边取对数, 则可得:

$$\log y = n \log x + \log a$$

此式相当于

$$Y = AX + B$$

该式为一典型的直线方程。

若将  $Y = \log y$  和  $X = \log x$  标绘在笛卡儿坐标上, 也就可以得到一条直线。

例如, 有一组实验数据如下表所示。现将这些实验数据按  $y$  对  $x$  和  $Y = \log y$  对  $X = \log x$ , 分别标绘在笛卡儿坐标上, 可得一条曲线和一条直线, 如图 0-3 所示。

实验数据表

| $x(\text{mm})$    | 20    | 40    | 80                 | 120                | 160                | 200                |
|-------------------|-------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $y(\text{l/min})$ | 5.40  | 7.59  | $1.076 \times 10'$ | $1.301 \times 10'$ | $1.500 \times 10'$ | $1.673 \times 10'$ |
| $X = \log x$      | 1.301 | 1.602 | 1.903              | 2.079              | 2.204              | 2.301              |
| $Y = \log y$      | 0.732 | 0.880 | 1.032              | 1.114              | 1.176              | 1.223              |

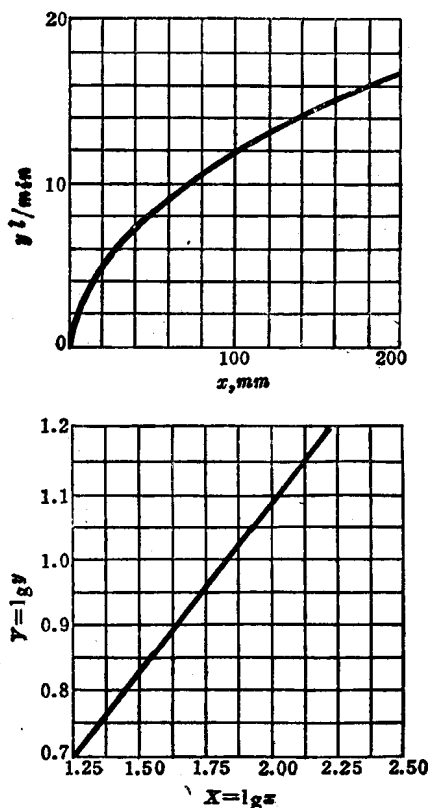


图 0-3 笛卡儿坐标

为了避免将每个数据都换算成对数值, 可以将坐标纸上的分度直接按对数值绘制。现将表 1 的实验数据直接标绘在对数坐标纸上, 如图 0-4 所示

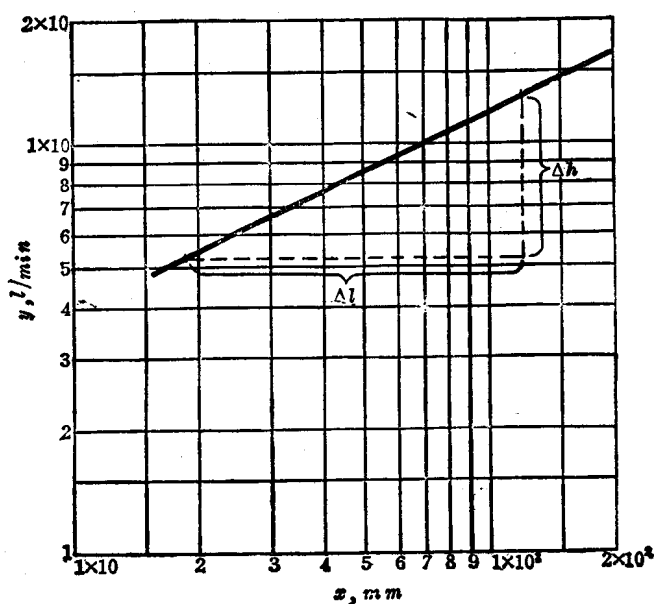


图 0-4 双对数坐标

如图 2 所示, 纵坐标和横坐标都用对数值进行绘制, 称为双对数坐标。对于某些函数关系, 如  $y = ae^{nx}$  只需纵坐标用对数值绘制, 即谓半对数坐标。

对数坐标有几个特点, 在应用时需特别注意:

(1) 标在对数坐标轴上的数值为真数。

(2) 坐标的原点为  $x=1; y=1$ , 而不是零, 因为  $\log 1=0$ 。

(3) 由于 0.01、0.1、1、10、100 等的对数, 分别为 -2、-1、0、1、2 等, 所以在坐标纸上, 每一数量级的距离是相等的。

(4) 在对数坐标上求取斜率的方法, 与笛卡儿坐标上求法有所不同, 这一点需要特别注意。

在笛卡儿坐标上求斜率, 可直接由坐标标度来度量, 如斜率  $= \frac{\Delta y}{\Delta x}$ ; 而在双对数坐标上求斜率, 则不能直接用坐标标度来度量, 因为在对数坐标上标度的数值是真数而不是对数。因此, 双对数坐标纸上直线的斜率, 需用对数值来求算, 或者直接用尺子在坐标纸上量取线段长度求取, 如图 0-4 中所示的曲线, 其斜率

$$n = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{\log y_2 - \log y_1}{\log x_2 - \log x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

式中  $\Delta h$  与  $\Delta l$  的数值, 即为用尺子测量而得的线段长度。

(5) 在双对数坐标上, 直线与  $x=1$  的纵轴相交处的  $y$  值, 即为原方程  $y=ax^n$  中的  $a$  值。若所标绘的直线需延长很远才能与  $x=1$  的纵轴相交, 则可在求得斜率  $n$  之后, 在直线上任取一组数据  $x$  和  $y$ , 代入原方程  $y=ax^n$  中, 也可求得  $a$  值。

### 3. 实验数据整理成经验公式

在化学工程学中, 在某些场合下, 可以根据所研究过程的机理用数学方程来描述该过程的各个参数和变量之间的关系, 即所谓建立数学模型。在计算机技术不断取得进展的现今时代来讲, 为建立数学模型及其求解提供了可能性。至今虽还不是所有场合都能做到, 但它确是一种新的趋向。

在大多数场合, 是把实验中得到的数据绘制成曲线, 与已知函数关系式的典型曲线对照, 求得经验公式。在化学工程中, 把理论上分析困难, 影响因素复杂的众多物理量, 组合成为无因次数群(称为准数), 把有关准数关联成经验公式, 即所谓准数关联式。至今在化学工程学中, 无因次数准数关联式应用极广。

关于如何建立数学模型, 如何选择经验公式, 如何组合准数和建立准数关联式等问题, 不是在这里用较短篇幅所能阐述清楚的。在化学工程基础实验中所常遇到的问题是已知经验公式, 如何确定经验公式中的常数。

经验公式中常数的求法很多, 在化学工程基础实验中, 最常用的是直线图解法和最小二乘法。

#### (1) 图解法

凡属于直角坐标上可直接标绘出一条直线的, 可用此法求得直线方程的常数。若已知线性方程为  $y=ax+b$ , 该直线的斜率  $\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)$ , 即为方程中  $a$  值。直线在  $y$  轴上的截距( $b$ ), 即为方程中  $b$  值。

凡经过适当变换后能标绘成直线时,也可用图解法求已知方程的常数值。如图 0-4 所示,在双对数坐标上标绘的直线,其原始方程应具有这种形式:  $y=ax^n$ 。这时,也可用作图法求得方程中的  $n$  值和  $a$  值。图解的方法和注意事项已在前一节中作过介绍,这里不再重复。

## (2) 最小二乘法

利用最小二乘法求经验公式常数的依据,认为各自变量均无误差,而应变量带有测量误差;并且认为测量值与真值(最佳值)之间的均方根误差平方和为最小。现举例说明,利用最小二乘法求经验公式的常数:

若用标准温度计标定铜-康铜热电偶,可得到一组实验数据:

标准温度计测得温度:  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$

热电偶相应热电势测定值:  $e_{t_1}, e_{t_2}, e_{t_3}, \dots, e_{t_n}$

在  $0 \sim 100^\circ\text{C}$  温度范围内,根据实验数据标绘的曲线,确定温度  $t$  与热电势  $e_t$  之间符合下列关系式:

$$e_t = at + bt^2$$

若测量值  $e_i$  与真值(最佳值)  $e'_i$  之间的偏差为

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= e_{t_1} - e'_{t_1} \\ \delta_2 &= e_{t_2} - e'_{t_2} \\ \delta_3 &= e_{t_3} - e'_{t_3} \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_n &= e_{t_n} - e'_{t_n} \end{aligned} \right\} \delta_i = e_{t_i} - e'_{t_i} \quad (1)$$

或者

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= e_{t_1} - (at_1 + bt_1^2) \\ \delta_2 &= e_{t_2} - (at_2 + bt_2^2) \\ \delta_3 &= e_{t_3} - (at_3 + bt_3^2) \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_n &= e_{t_n} - (at_n + bt_n^2) \end{aligned} \right\} \delta_i = e_{t_i} - (at_i + bt_i^2)$$

按照最小二乘法的原理,测量值与真值之间偏差平方之和为最小(即  $\sum_{i=1}^n \delta_i^2$  为最小)。

最小值的必要条件为

$$\frac{\partial(\sum \delta_i^2)}{\partial a} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\sum \delta_i^2)}{\partial b} = 0 \quad (4)$$

由(3)式展开可得:

$$2\delta_1 \frac{\partial \delta_1}{\partial a} + 2\delta_2 \frac{\partial \delta_2}{\partial a} + \dots + 2\delta_n \frac{\partial \delta_n}{\partial a} = 0$$

其中:

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial a} = \frac{\partial [e_{t_1} - (at_1 + bt_1^2)]}{\partial a} = -t_1$$

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial a} = \frac{\partial [e_{i_2} - (at_2 + bt_2^2)]}{\partial a} = -t_2$$

.....

$$\frac{\partial \delta_n}{\partial a} = \frac{\partial [e_{i_n} - (at_n + bt_n^2)]}{\partial a} = -t_n$$

则代入上式并经整理, 可得

$$\delta_1 t_1 + \delta_2 t_2 + \delta_3 t_3 + \cdots + \delta_n t_n = 0$$

将(2)式代入上式, 得:

$$[e_{i_1} - (at_1 + bt_1^2)]t_1 + [e_{i_2} - (at_2 + bt_2^2)]t_2 + [e_{i_3} - (at_3 + bt_3^2)]t_3 + \cdots + [e_{i_n} - (at_n + bt_n^2)]t_n = 0$$

展开并合并同类项, 得:

$$\sum e_{i_i} t_i - a \sum t_i^2 - b \sum t_i^3 = 0 \quad (5)$$

同理由式(4)可得:

$$\sum e_{i_i} t_i^2 - a \sum t_i^3 - b \sum t_i^4 = 0 \quad (6)$$

联立式(5)与式(6)求解, 得经验式中常数的计算式为

$$a = \frac{\sum e_{i_i} t_i \sum t_i^4 - \sum e_{i_i} t_i^2 \sum t_i^3}{\sum t_i^2 \sum t_i^4 - \sum t_i^3 \sum t_i^3} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum e_{i_i} t_i^2 \sum t_i^2 - \sum e_{i_i} t_i \sum t_i^3}{\sum t_i^2 \sum t_i^4 - \sum t_i^3 \sum t_i^3} \quad (8)$$

用图解法和最小二乘法求函数关系式中的常数值, 确为各种方法中较好的方法, 尤其用最小二乘法求得常数值, 虽不能说是最佳值, 但标准误差确实较其他方法为小。最小二乘法计算虽较繁杂, 但当今在小型计算机不断普及的情况下, 对一些精密的实验, 尤其是计量仪表的标定。愈来愈广泛地采用此法。

#### (四) 数值计算

化工计算常常是十分繁琐的事情, 在电子计算机问世以前, 这种数值计算工作主要是靠笔算、计算尺或机械计算机进行的, 其精度和速度受到了很大限制。电子计算机的出现与发展, 给数值计算工作带来了很大的便利。它不仅减轻了人们的脑力劳动, 而且精度高、速度快, 同时, 促使数值计算方法也有了很大变化。当然, 计算机的功能不只局限于纯数值计算。计算机的应用已成为实验室现代化水平的显著标志。就目前状况来说, 计算机在基础教学实验中的广泛使用还有一些不便。

七十年代中期以来, 大量的袖珍型电子计算器的涌现, 为实验室的现代化建设创造了便利条件。目前, 在基础教学实验室里, 日益广泛采用一种可编程序的科学型电子计算器 (Scientific Calculator-Programmable)。这类计算器体积小, 使用方便, 能够熟练掌握这类计算器的程序计算方法, 对使用计算机也会有一定帮助。

##### 1. 可编程序的科学型计算器

这类计算器的功能相当于一架微型计算机。它不仅可以进行四则、代数函数、三角函数等基本数学运算, 还可以编制程序, 进行各种程序计算。

这类计算器型号很多,但都具有相类似的功能和使用方法,一般均采用AOS输入体制(Algebraic Operation System 代数运算制)。它的优点是便于掌握,与一般人们四则运算时的习惯相同,缺点是计算步骤和按键次数有所增加。

科学型计算器的型号不同,功能也有些差异,一般功能为:

键数: 40 个左右 (键的名称大都采用英文缩字)

显示位数: 8~12 位(阶码二位)

显示方法: 萤光显示或液晶显示

数据存储器: 6~100 个

程序步: 32~960 步(每一按键相当于一歩)

这类计算器一般可进行如下一些数值计算:

(1) 四则、代数函数和三角函数等数值计算。

这些计算的按键次序和用笔书写时的习惯差不多,也可以用括号按需要顺序进行计算(括号内优先进行计算),最后按=键,结束一切计算并显示结果。所以只要按照使用说明书,熟悉各种键的功能,很容易掌握。

(2) 统计学计算。

(3) 程序计算。

程序计算就是让计算器代替人工自动进行运算,那么首先必须把计算步骤(按键次序)告诉计算器,也就是把程序输入到计算器的存储器中去。然后,再通知计算器按照输入程序进行运算。例如,欲计算球体体积 $\frac{4}{3}\pi r^3=?$ ,先将计算步骤(程序)输入到计算器的存储器中,然后按键通知它 $r=3$ 时,结果=?。计算器就会自动按输入的程序进行运算,得出结果=113。如果我们还想知道 $r=5$ 时,结果=?,则不必再重新按一遍计算步骤的各个键,只须按键通知计算器 $r=5$ ,则又会自动按输入的计算公式进行运算,给出结果。

计算器程序计算的另一作用是具有逻辑判断能力。也就是说,计算器能按输入程序判断执行:假如条件A成立,执行B计算;假如条件A不成立,则执行C运算。

一般科学型计算器的存储器数目有限,太复杂的程序尚不能解决。另外,一旦OFF(关机),储存的程序就全部清除,则下次使用此程序,还要重新用手按键输入程序,较为麻烦。最近一些新型号的计算器,为了克服上述不足,在计算器内装有一个比火柴盒还小的“固体软件”。它是一个可以更换的微型组件,里面一般有5000个程序步,组成许多个编好的程序,称为“主程序库”。还有的配备有写入和读回磁卡,可以将编制好的程序录制下来,永久保存,使用时可再读回。

如何编制程序,各种型号的计算器大同小异,只要对照使用说明书,不难掌握。

## 2. 定积分数值计算

在化学工程实验中,还经常遇到对一些已知数学模型进行定积分数值计算。这种数学模型又不能直接积分求解,常需用图解积分的方法或用数值计算方法求得近似值。

### 辛普森图解积分法