

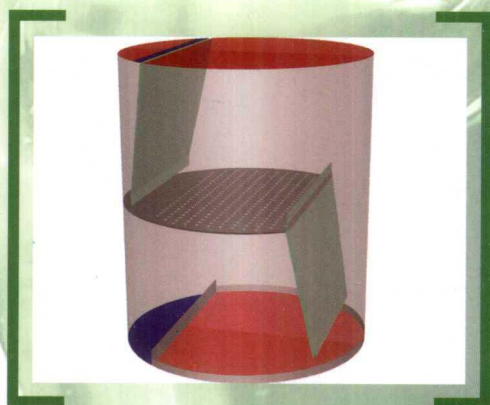


全国应用型本科院校化学课程统编教材

化工原理实验

Experiments of Chemical Processes

孙金堂 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

化工原理实验

Experiments of Chemical Processes

主 编	孙金堂		
副主编	潘永兰	蒋红梅	廖庆玲
参 编	文艳霞	杨胜凯	谢 鹏
	刘明石	高金明	

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

化工原理实验是培养高级工程技术人才的有效途径之一,既能使学生掌握典型单元操作的基本原理,又能使学生掌握处理工程问题的方法,在培养学生动手能力和运用知识能力方面的作用不可或缺。本书主要介绍化工原理实验有关基础知识及典型单元操作共 20 个实验,包括流体流动、固体流态化、传热、精馏、吸收与解吸、干燥、萃取、膜分离、超临界流体萃取、管路拆装、化工原理实验仿真等,其中大多数实验设备还配有工作站,既可手动操作,也可自动控制。

本书注重理论与实践相结合,强调工程观点和实际能力的培养,注意学生综合素质的提高,可供高等院校化工类和相近专业师生使用,也可供从事化工及相关实验研究的研究生和实验人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/孙金堂 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2011.8
ISBN 978-7-5609-7098-1

I. 化… II. 孙… 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 090779 号

化工原理实验

孙金堂 主编

策划编辑:王新华

责任编辑:程 芳

封面设计:潘 群

责任校对:张 琳

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12.5

字 数:333 千字

版 次:2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:23.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

全国应用型本科院校化学课程统编教材

编委会

(排名不分先后)

- | | |
|-----|-----------------|
| 李青山 | 吉林大学珠海学院,教授 |
| 潘祖亭 | 武汉东湖学院,教授 |
| 尹 权 | 武汉大学,教授 |
| 李向荣 | 浙江大学城市学院,教授 |
| 孙延一 | 电子科技大学中山学院,教授 |
| 矫庆泽 | 北京理工大学珠海学院,教授 |
| 卢昌义 | 厦门大学嘉庚学院,教授 |
| 钱晓良 | 华中科技大学文华学院,教授 |
| 熊双贵 | 北京中医药大学东方学院,教授 |
| 李 伟 | 南京中医药大学,教授 |
| 陈昭国 | 武汉理工大学华夏学院,教授 |
| 干 信 | 武汉长江工商学院,教授 |
| 张 龙 | 长春工业大学,教授 |
| 曹 枫 | 湖州师范学院,教授 |
| 黄朝表 | 浙江师范大学,教授 |
| 李克华 | 长江大学工程技术学院,教授 |
| 王允祥 | 浙江农林大学,教授 |
| 罗永明 | 江西中医学院,教授 |
| 孙庆杰 | 青岛农业大学,教授 |
| 黄建华 | 河南科技学院,教授 |
| 李 峰 | 湖南文理学院,教授 |
| 高之清 | 聊城大学东昌学院,教授 |
| 刘灿明 | 湖南农业大学,教授 |
| 唐星华 | 南昌航空大学,教授 |
| 王玉田 | 辽宁医学院,教授 |
| 酆文思 | 成都理工大学工程技术学院,教授 |

前 言

本书是根据化工原理实验教学大纲的要求,结合六所院校的现有实验设备编写的。全书内容分为三部分:前两部分介绍化工原理实验相关基础知识和基本技能,包括安全常识、误差分析和实验数据处理等;第三部分详细介绍了化工原理典型单元操作共 20 个实验,包括流体流动、固体流态化、传热、精馏、吸收与解吸、干燥、萃取、膜分离、超临界流体萃取、管路拆装、化工原理实验仿真等,其中大多数实验设备还配有工作站,可自动控制。本书重点介绍各实验的原理及公式应用、装置流程及其特点、具体的操作步骤和注意事项,力求实用;为了帮助学生整理实验报告,还列举了实验报告要点和数据表格参考示例。附录汇总了部分法定计量单位及其换算、化工常用参数、相关系数检验表、有关仪器的操作简介等。

本书最大特点是实用性强。一般化工原理实验书都是针对某一厂家的设备而编写的,本书则汇总了 6 个厂家的 51 种设备的装置图、特点和操作步骤,有利于教学过程中博采众长、扩大眼界;重点针对具体实验,比一般的化工原理实验书内容更详细、具体、实用。其特点有三:①将科学实验过程中所需要的各种能力培养,通过每一个具体实验体现出来,并把严谨的科研作风和实事求是的科学态度的培养融会贯通于每个实验环节;②实验内容和理论知识(思考题)相结合,以利于理论知识的巩固和提高;③实验内容都是选取化工类生产实际中应用较广的,更接近于工程实际。

由于本书内容较多,使用者除应结合具体情况节选之外,还请注意以下几方面。

(1) 实验顺序基本上按配套的化工原理理论课程各章节的先后排列,较新的膜分离及超临界流体萃取、着重训练动手能力的管路拆装、训练模拟操作的仿真实验排在最后。凡标题注明“*”的实验,既可按一般验证性实验进行,也可按综合(或设计)性实验进行。

(2) 同一实验的不同装置(无论是否使用不同的物料体系),分别用装置Ⅰ、装置Ⅱ、装置Ⅲ等加以区别(在此郑重声明:此种编号区别仅仅是为了各参编院校或其他读者与现有装置对应使用的方便,无排名先后之意)。实验原理以统一列举为主,个别的分列(如连续式流化床干燥器和间歇式流化床干燥器等);设备参数、操作步骤按装置号顺序依次对应排列,以便于阅读和使用;对装置流程区别不大、操作步骤相仿的则统一归并列,以尽量减少篇幅。

(3) 某一实验专用的曲线图等,以该实验附录的形式列出。

(4) 实验报告要点、数据表格参考示例都尽量照顾不同装置的特点,使用时请结合具体装置适当增删、修改、选用。

(5) 思考题侧重于重要知识点,并尽量兼顾不同装置的特点,每个实验 3~5 题。

(6) 附录以本书够用为原则,尽量压缩篇幅。

本书由六所院校合编,编写单位及人员有:吉林大学珠海学院孙金堂、谢鹏、刘明石、高金明,南京中医药大学潘永兰,湖南农业大学蒋红梅,武汉长江工商学院廖庆玲,武汉理工大学华夏学院文艳霞,河南科技学院杨胜凯。其中第一部分和第二部分由孙金堂、谢鹏、刘明石、高金明编写,第三部分的实验 12、14、15、17、19 由孙金堂编写,实验 18 由谢鹏编写,实验 2、5、9 由潘永兰编写,实验 7、16 和附录由蒋红梅编写,实验 3、10、13 由廖庆玲编写,实验 4、6、11、20 由文艳霞编写,实验 1、8 由杨胜凯编写。全书由孙金堂审核、修订、补充、

统稿。在编写过程中参考了多本化工原理及实验教材或讲义,在此向有关作者表示衷心的感谢!华中科技大学出版社对本书的出版给予了大力支持,在此致以诚挚的谢意!

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,诚望读者批评指正。

编 者
2011年3月

目 录

第一部分 化工原理实验基础知识	(1)
1.1 实验室安全守则	(1)
1.2 实验数据的记录、处理和实验报告	(1)
1.2.1 实验数据的记录	(1)
1.2.2 实验数据的处理	(2)
1.2.3 实验报告要点	(2)
1.3 化工原理实验课对指导教师和实验技术人员的要求	(3)
1.3.1 对指导教师的要求	(3)
1.3.2 对实验技术人员的要求	(3)
1.4 化工原理实验课对学生的要求	(4)
1.5 化工原理实验成绩考核办法	(5)
第二部分 实验误差分析和数据处理	(6)
2.1 实验数据的误差分析	(6)
2.1.1 真值与平均值	(6)
2.1.2 误差及误差分类	(6)
2.1.3 误差的表示方法	(7)
2.1.4 精密度、正确度和精确度(准确度、精准度)	(8)
2.1.5 仪器的精确度与测量值的误差	(9)
2.1.6 有效数字与运算规则	(9)
2.1.7 异常值的判断与舍弃规则	(11)
2.2 实验数据的处理	(11)
2.2.1 列表法	(12)
2.2.2 图示法	(12)
2.2.3 函数法	(14)
2.2.4 相关系数 r 及显著性检验(回归合理性检验)	(15)
2.2.5 内插法	(17)
第三部分 化工原理实验	(19)
实验 1 雷诺实验	(19)
实验 2 机械能转化实验	(25)
实验 3 流体流动阻力的测定	(30)
实验 4 流量计校正及性能测定实验	(39)

实验 5 离心泵特性曲线的测定实验	(44)
实验 6 恒压过滤实验	(51)
实验 7 固体流态化实验	(58)
3.7.1 固体流态化演示实验	(58)
3.7.2 固体流态化实验	(63)
实验 8 旋风分离器性能测定实验	(66)
* 实验 9 传热系数测定综合实验	(71)
* 实验 10 筛板塔精馏实验	(83)
* 实验 11 填料塔精馏实验(乙醇-正丙醇体系)	(93)
实验 12 板式塔流体力学性能演示实验	(100)
* 实验 13 填料塔吸收综合实验	(105)
* 实验 14 洞道式干燥器干燥实验	(118)
* 实验 15 流化床干燥实验	(124)
3.15.1 间歇式流化床干燥实验	(124)
3.15.2 连续式流化床干燥实验	(129)
实验 16 液-液萃取实验(转盘式萃取器)	(134)
* 实验 17 膜分离实验	(140)
* 实验 18 超临界流体萃取实验	(151)
实验 19 管路拆装实验	(157)
实验 20 化工原理实验仿真	(161)
3.20.1 流体阻力测定实验	(161)
3.20.2 离心泵的性能曲线测定	(162)
3.20.3 流量计的校正实验	(164)
3.20.4 过滤实验	(166)
3.20.5 传热实验	(168)
3.20.6 精馏实验	(170)
3.20.7 吸收实验	(172)
3.20.8 干燥实验	(174)

附录 A 常用数表	(177)
A1 化工中常用计量单位及单位换算	(177)
A1.1 法定基本单位	(177)
A1.2 导出物理量及单位	(177)
A1.3 基本常数与单位	(177)
A1.4 单位换算	(177)
A2 水的物理性质	(180)

A3	干空气的物理性质($p=1.013\times 10^5$ Pa)	(181)
A4	饱和水蒸气表(按温度排列)	(181)
A5	饱和水蒸气表(按压强排列)	(182)
A6	水在不同温度下的黏度	(183)
A7	某些二元物系的气液相平衡数据	(183)
A7.1	乙醇-水(101.325 kPa)	(183)
A7.2	乙醇-正丙醇的 t - x - y 关系	(184)
A7.3	常压($p=101.325$ kPa)下及 CO_2 液相浓度低于 5% 时的相平衡常数 与温度的关系	(184)
A7.4	丙酮的平衡溶解度	(184)
A7.5	温度和浓度对丙酮相平衡常数的影响	(184)
A8	乙醇水溶液的比热和汽化潜热	(185)
A8.1	乙醇-水溶液的比热[kcal/(kg $\cdot$ °C)]	(185)
A8.2	乙醇-水溶液的汽化潜热(kcal/kg)	(185)
A9	某些气体溶于水时的亨利系数	(186)
A10	液体饱和蒸气压 p° 的 Antoine(安托因)常数	(186)
A11	几种常见气体的密度(273 K, 101.325 kPa)	(187)
A12	相关系数检验表	(187)
附录 B	实验相关仪器的使用说明	(188)
B1	阿贝折射仪的使用说明	(188)
B2	气相色谱仪使用简要说明(以 GC1690 型为例)	(189)
参考文献		(190)

第一部分 化工原理实验基础知识

1.1 实验室安全守则

学生在实验时应遵守以下安全规则。

- (1) 实验前要了解电源、消火栓、灭火器和安全出口的位置及正确的使用方法。
- (2) 实验时要身着实验服,不准穿拖鞋。长发(过衣领)必须束起或藏于帽内。
- (3) 实验室内禁止进食,严禁吸烟。
- (4) 乙醇蒸馏实验等涉及易燃有机物的实验,整个实验室内应严禁明火。釜残液要按规定回收,不准倒入水槽中,以免造成危险。
- (5) 涉及易燃、易爆气体的仪器装置如氢气发生器等,使用前要先进行检漏,使用时要保持室内空气流通,严禁明火并应防止一切火星的发生。禁止在此环境内使用移动电话。
- (6) 割伤、划伤是实验中最常见的事故之一,要时刻注意避免。一旦发生伤害事故要及时处理,先用蒸馏水洗净伤口,再涂抹碘酒或红汞药水,或用创可贴贴紧,预防感染。严重者要送医院治疗。
- (7) 若发生烫伤,可在烫伤处涂抹烫伤软膏。严重者应立即送医院治疗。
- (8) 实验室若发生火灾,无论何种原因,应首先切断电源、易燃及助燃气源,然后根据起火原因有针对性地灭火。乙醇及其他可溶于水的液体着火时可用水灭火;汽油、乙醚等有机溶剂着火时用沙土扑灭,此时绝不能用水,否则会扩大燃烧面;导线和电器着火时用 CCl_4 灭火器灭火,不能用水或二氧化碳灭火器;衣服着火时切忌慌乱跑跳,应就地卧倒打滚,或用湿毛巾抽打灭火。
- (9) 使用电器设备时,切忌湿手开启电闸和电器开关。凡发现漏电的仪器不准使用,正在使用的要立即停车检修,严防触电,并立即报告教师,采取防范措施。

1.2 实验数据的记录、处理和实验报告

1.2.1 实验数据的记录

学生要有专门的实验报告本并标上页码,不应撕去任何一页。

实验数据应按要求记在专门的实验记录本、预习报告本预先制订的原始记录表内,或记在与实验报告本规格一致的原始记录纸上,不可随意记在别处。

实验过程中的各种测量数据及有关现象应及时、准确、清楚地记录下来。记录实验数据时要有严谨的科学态度,实事求是,切忌夹杂主观因素,绝不能随意拼凑和伪造数据。

实验过程中涉及的各种装置、仪器的型号等也应及时、准确地记录下来。

记录实验数据及处理数据时,应注意其有效数字的位数。化工原理实验一般取 3 位或 4 位有效数字。通常记录以仪器、仪表的最小刻度位数加 1 位估计数为准,或与电脑显示的有效

位数一致。

实验中的每一个数据都是测量结果,所以,重复测量时即使数据完全相同,也应记录下来。在实验过程中,如果发现某数据读错、测错或算错而需要改动时,可将该数据用一横线划去,并在其上方写上正确的数据。

1.2.2 实验数据的处理

实验数据的处理及其分析、总结的水平代表着实验报告或科研论文的水平,十分重要。这里仅介绍几点基本知识,详细内容请见本书 2.2 节。

1. 列表

把实验获得的大量数据按一定规律列表,以便于处理、运算。列表的基本要求是:每一张表都应有简明完整的名称;在表的每一行或每一列的第一栏,要详细地写出项目名称、单位等;每一列中数字排列要整齐,最好以小数点对齐,有效数字的位数要合理;原始数据可单独列表,也可与处理的结果一并列于一张表上;数据处理方法和引用的公式要在计算举例中详细表达。

2. 数据的取舍

除了已确认的操作失误或仪器设备失常造成的异常数据外,即使某一数值偏差较大也不应随意舍弃。如果怀疑某一数据,应进行检验后再决定取舍。异常数据检验常用的方法有 t 检验法、 Q 检验法、三倍标准误差判据及四倍算术平均误差判据等。

3. 作图

用图形表达实验结果直观明了,易显示出数据的特点,如极大值、极小值、转折点等,还可利用图形求面积、作切线、进行内插和外推等。曲线图的应用示例很多,常见的有以下三种。

(1) 求外推值。例如,强电解质无限稀释溶液的摩尔电导率的值不能由实验直接测定,但可作图外推至浓度为 0 处,即得无限稀释溶液的摩尔电导率。

(2) 求转折点或极值。例如,干燥速率曲线测定实验中测得的是湿物料质量随时间变化的数据,由此可计算并绘制出干燥速率曲线图($U-X$ 图),实验条件下物料的临界含水量就是恒速干燥段与降速干燥段交点(转折点)所对应的横坐标数值。

(3) 求经验方程。例如,蒸汽-空气传热实验中欲求努塞尔数式($Nu = A Re^m Pr^{0.4}$)中的系数 A 与雷诺数的指数 m ,则测定并计算一系列不同空气流量下的 Re 值与 Nu 值,然后以 $\lg Nu$ 对 $\lg Re$ 作图,得一条直线,由直线的截距和斜率可分别求出努塞尔数式中的系数 A 与雷诺数的指数 m 的值。

1.2.3 实验报告要点

做完实验仅仅是完成了实验的操作过程,更为重要的是分析实验现象、整理实验数据,把直接的感性认识提高到理性思维阶段。实验后,要及时、认真地写出实验报告,并在指定时间内交给教师批阅。实验报告一般包括以下内容。

- (1) 实验名称和日期。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验原理,包括简要的文字说明、必要的原理、依据的方程式和计算公式等。
- (4) 实验装置图及图例说明。
- (5) 实验步骤和须强调的注意事项:简明扼要地写出。
- (6) 数据原始记录表(或称实验记录表)。

(7) 实验数据的处理:用文字、表格、图形将数据表示出来,根据实验要求详细列举一组数据完整的计算过程和结果,以及相对误差的计算过程和结果。

(8) 问题分析、讨论与结论:对实验教材上的思考题和实验中观察到的现象,以及误差产生的原因进行分析和讨论,以提高分析问题和解决问题的能力,最后对实验是否达到目的做出简明扼要的总结。

上述各项内容的繁简取舍应根据各个实验的具体情况而定,以完整、规范、清晰、简练、整洁为原则。

1.3 化工原理实验课对指导教师和实验技术人员的要求

1.3.1 对指导教师的要求

1. 岗位职责

(1) 爱岗敬业、尽职尽责、任劳任怨;教书与育人并重,为人师表在先。

(2) 掌握实验原理和计算公式,熟悉数据处理全过程(包括曲线图、数据表的制作)和思考题解答要领。

(3) 熟悉实验设备的基本结构、主要部件的功能和工艺流程,掌握操作规程和详细操作步骤。

(4) 掌握实验安全要点和操作要领,特别是对容易造成安全事故的关键环节一定要做到心中有数,一旦出现安全隐患要能够及时排除。

2. 教学工作要求

(1) 每学期开课前都要做完整的预实验,全面、详细地进行数据处理。特别注意详细记录实验中发现的问题,提交实验组会议并采取措施予以解决。

(2) 预实验后、开课前召开实验组会议,研究解决预实验中发现的问题。统一基本要求、报告格式和评分标准,尽量做到对学生的评价公平合理。

(3) 课前详细讲解实验原理、操作步骤和注意事项,并做规范的操作示范。

(4) 耐心回答学生提出的有关实验问题,启发和鼓励学生自己解决问题,帮助学生尽快提高解决实际问题的能力。

(5) 严格要求学生遵守实验室各项规章制度,杜绝一切不良事故的发生。

(6) 及时、认真地批改实验报告,详细记录报告质量,公平评定报告成绩并签字。

(7) 拟定试卷力争做到难易适中、覆盖面宽、重点突出、侧重实际实验,尽量避免实验考试成为理论考试的翻版。

(8) 严肃、认真、公平、公正地评定每一位学生的实验成绩。

1.3.2 对实验技术人员的要求

1. 岗位职责

(1) 爱岗敬业、尽职尽责、任劳任怨,教书与育人并重,为人师表在先。

(2) 了解实验原理,熟悉实验设备的基本结构、主要部件功能和工艺流程,掌握操作规程。

(3) 掌握实验安全要点和操作要点,特别是对容易造成安全事故的关键环节一定要心中有数,一旦出现安全隐患能够及时排除。

(4) 每学期末在规定时间内提交下学期实验易耗品采购清单。

2. 教学工作要求

(1) 了解实验室所有仪器设备的基本结构,熟悉其保养常识,按规定适时进行保养。

(2) 熟悉每套装置的简单易损部件及其更换方法。

(3) 每次实验前逐一检查每套实验装置的水、电、气源及其通路是否完好畅通,发现问题及时处理,提前做好实验药品,以免影响实验课的正常进行。

(4) 实验过程中注意检查电、高温、高压等涉及安全的关键装置是否有异常,发现问题及时处理,不得无故擅离实验室。

(5) 每次实验后逐一检查每套实验装置的水、电、气源是否切断,确保不留安全隐患。

1.4 化工原理实验课对学生的要求

学生通过本课程的学习,可以加深对化工原理基础理论、基本知识的理解,正确且较熟练地掌握化工原理实验技能和基本操作,以及处理工程实际问题的观点和方法;提高观察现象、分析数据、处理数据和解决问题的能力,培养严谨的工作作风和实事求是的科学态度,为学习专业课、毕业设计以及将来的实际工作打下良好的基础。

1. 实验前认真预习,写预习报告

写预习报告的目的是领会实验原理,了解实验流程、步骤和注意事项,做到心中有数,以便实验时正确操作,及时、准确地记录,也利于处理实验数据和书写实验报告。

预习报告的主要内容应包括:实验标题;必要的公式及式中各个符号的物理意义;规范的原始数据记录表格;必要的参数(有的需要查资料获取);简要的实验步骤和操作注意事项。应根据个人对实验的理解来写预习报告,避免盲目抄书。

2. 遵章守纪,不得迟到、早退、旷课

学生要遵守实验室各项规章制度,不得迟到、早退,更不得无故旷课。实验过程中离开实验室须经指导教师允许。若因病或其他重要事项请假,须在本学期实验开课期间内补做;缺课达3次及以上的,须在在规定时间内重修全课程,否则此门课程无成绩。

3. 严格按照操作规范进行实验

严格按照操作规范认真操作,熟练掌握基本实验技能。仔细观察实验现象,并及时、认真地记录。要善于思考,学会运用所学理论知识解释实验现象和数据,研究实验中的问题。

实验完成,原始数据记录表经指导教师检查合格并签字后,方可结束实验;实验若有欠缺或不合格处,应按指导教师意见补全或重做。

4. 养成良好的实验习惯

保持实验室卫生、安静,仪器、用具、工具摆放整齐,保持实验台和整个实验室的整洁,不乱扔废纸杂物,保持地面、水池清洁。

5. 认真书写实验报告

实验报告要在指定时间内独立完成,不得相互抄袭;报告完成后,以实验组为单位及时交给教师批改。实验报告格式要规范化,指导教师有特殊要求的以教师要求为准。

6. 认真值日

实验后将实验设备、仪器、工具及场所打扫干净,离开实验室前关好实验室的水、电、气源

和门窗等。

7. 爱护公物,注意节约

注意节约实验试剂和用品,爱护公物,损坏仪器要按规定赔偿。

8. 注意安全

要从主观上增强安全意识。实验过程中不要触碰设备旋转部位、高温部位以及与实验无关的仪器设备,尽量避免意外事故的发生,一旦出现意外应及时处理。

1.5 化工原理实验成绩考核办法

实验成绩考核通常采取综合评分制。实验课成绩由实验预习报告(占10%)、实验记录和实验操作(占20%~30%)、实验报告(占20%)、期末实验考试(占30%~40%)、实验习惯(占10%)五部分成绩组成。最终成绩可采用百分制,也可采用五级制。

实验考试一般仍采取闭卷笔试,故一定要密切结合所做的具体实验内容,突出实验技能,特别是实验数据处理和分析能力的考核。较为理想的是“实际操作+获取数据+数据处理+分析讨论”的方式,有条件时可采用。

第二部分 实验误差分析和数据处理

2.1 实验数据的误差分析

2.1.1 真值与平均值

真值是指某物理量客观存在的确定值。通常一个物理量的真值是未知数,需要通过实验测定。严格地讲,由于测量仪器、测定方法、环境、人的观察力、测量的程序等难以做到完美无缺,故真值是难以准确测得的。实验科学中的真值定义为:设在无系统误差情况下,测量次数为无限多时求得的平均值,或用高精度仪器的测量值作为低精度仪器的真值,以及载于手册、文献的公认值。实际上实验观察的次数都是有限的,故用有限观察次数求出的平均值只能是近似真值,也称最佳值。工程上常用的平均值有算术平均值、几何平均值、对数平均值等。

1. 算术平均值

算术平均值是化工生产中应用最多的一种平均值。因化工实验中测量值的误差一般呈正态分布,可以证明算术平均值就是一组等精度测量的最佳值。其定义式为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-1-1)$$

式中: $x_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 为各次的观测值(下同); n 为观测的次数(下同)。

2. 几何平均值

一组测量值取对数后其图形呈对称时,往往用几何平均值。精馏塔平均相对挥发度的计算多用此平均值。其定义式为

$$\bar{x}_n = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n} \quad (2-1-2)$$

用对数表示为

$$\lg \bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (2-1-2a)$$

3. 对数平均值

传热计算中的冷热流体平均温度差、圆筒壁的平均半径及平均传热面积等的计算,都是经过积分导出的对数平均值。其定义式为

$$x_m = \bar{x}_{1,2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln(x_1/x_2)} \quad \text{或} \quad \Delta x_m = \bar{\Delta x}_{1,2} = \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{\ln(\Delta x_1/\Delta x_2)} \quad (2-1-3)$$

在工程计算中,设 $x_1 > x_2$ (或 $\Delta x_1 > \Delta x_2$), 当 $x_1/x_2 \leq 2$ (或 $\Delta x_1/\Delta x_2 \leq 2$) 时,可用算术平均值 $(x_1 + x_2)/2$ (或 $(\Delta x_1 + \Delta x_2)/2$) 代替对数平均值,其相对误差不超过 4%。

之所以罗列上述几种平均值,目的是要从一组测定值中求出最接近真值的那个平均值。实践中宜选用哪种平均值主要取决于该组观测值的分布类型。

2.1.2 误差及误差分类

在任何一种测量中,无论所用仪器多么精密、方法多么完善、实验者多么细心,所得结果仍

难免有一定的误差或偏差。严格来讲,误差指观测值与真值之差,偏差指观测值与平均值之差,但习惯上将二者统称为误差,实际生产、生活中所说的误差都是指偏差。

根据误差的性质及其产生的原因,可将其分为三种:系统误差、随机误差和疏失误差。

1. 系统误差

系统误差又称恒定误差、可消除误差。其产生原因包括:①仪器原因,如设计缺陷、刻度不准、安装不当、砝码未校正等;②试剂原因,如纯度不够或质量不符合要求、受到污染或储存不当等;③环境原因,如环境温度、压力、湿度的变化等;④操作者原因,由于个人的习惯与偏向不同,如读数常偏高或偏低,记录某一信号的时间总是滞后,判定滴定终点的颜色深浅程度各人不同等所引起的误差。

系统误差在同一物理量的测定中是相对恒定的,是可以采取措施消除的。

2. 随机误差

随机误差又称偶然误差、或然误差。在测定中,如果已消除了引起系统误差的全部因素,而所测数据仍存在一定的偏差,则称之为随机误差。

随机误差数值的大小和偏离的方向不固定,其产生的原因也不详,因而难以控制,但其完全服从统计规律,即随着测量次数的增多,测量结果的平均值将更趋近于真值。随机误差可用概率理论来处理。

3. 疏失误差

疏失误差又称粗大误差、过失误差。疏失误差是一种明显与事实不符的误差,主要由操作者粗心大意、操作不当等引起,如刻度值读错、记录笔误、计算错误等。此类误差可由操作者的主观努力而加以避免。一旦在实验中发现了疏失误差,应及时纠正或将所得数据弃去,并如实记录。

系统误差和疏失误差总是可以设法避免的,而随机误差是不可避免、无法消除的,因此最好的实验结果应该只含有随机误差且误差较小。

2.1.3 误差的表示方法

测量误差分为测量点的误差和测量列(一组测量值)的误差,二者的表示方法是不同的。

1. 测量点的误差表示方法

1) 绝对误差 D

一组测量值中某次测量值与其真值之差的绝对值称为绝对误差。其表达式为

$$D = |x - U| \approx |x - \bar{x}| \quad (2-1-4)$$

$$\text{即} \quad x - D \leq U \leq x + D \quad \text{或} \quad x - D \leq \bar{x} \leq x + D \quad (2-1-4a)$$

式中: x 为一组测量值中某次测量值; U 为真值; $\bar{x}$ 为一组测量值的平均值。

绝对误差的单位与被测物理量相同,其数值大小与被测物理量的大小无关。因此,绝对误差不能说明测量结果的精确度。

2) 相对误差 E_r

绝对误差与真值的绝对值之比称为相对误差。其表达式为

$$E_r = \frac{D}{|U|} \times 100\% \approx \frac{D}{|\bar{x}|} \times 100\% \approx \frac{x - \bar{x}}{|\bar{x}|} \times 100\% \quad (2-1-5)$$

相对误差的量纲为1,有偏大(正)、偏小(负)之分,常用百分数表示。不同物理量的相对误差是可以互相比较的。相对误差与被测物理量的大小及绝对误差的数值都有关,故相对误差的大小体现了测量结果的精确度的高低。引用相对误差的概念,测量值可表示为

$$x = \bar{x}(1 \pm E_r) \quad (2-1-5a)$$

3) 最大引用误差

仪器量程内最大示值误差与满量程示值之比的百分数称为最大引用误差。最大引用误差常用于表示仪器的精确度(常简称精度)。

2. 测量列(一组测量值)的误差表示方法

1) 算术平均误差

算术平均误差是各测量点的误差的算术平均值。 n 次测量值的算术平均误差的定义式为

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (2-1-6)$$

算术平均误差是表示误差的较好方法之一,其缺点是无法表示出各次测量间彼此符合的程度。

2) 标准误差

标准误差也称均方根误差,其定义式为

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

标准误差对一组测量中的较大误差或较小误差比较灵敏,是表示精确度的较好方法之一。标准误差 σ 值的大小表明在一定条件下一组等精度测量值中的每个观测值相对其算术平均值的分散程度。若 σ 值小,则该组测量值中小的误差所占比例大,某观测值对其算术平均值的分散度就小,测量值的可靠性就大。

上述误差表示法中,无论是比较各种测量的精确度还是评定测量结果的可靠性,均以相对误差和标准误差为佳,故实际应用中最为普遍。

2.1.4 精密度、正确度和精确度(准确度、精准度)

精密度:指测量结果的可重现性及测得数值的有效数字位数,反映随机误差大小的程度。

正确度:指在规定条件下,测量中所有系统误差的综合,反映系统误差大小的程度。

精确度(准确度、精准度):指测量结果与真值偏离的程度,反映系统误差和随机误差综合大小的程度。

精密度、正确度和精确度的关系如图 2-1-1 所示:(a) 的随机误差小而系统误差大,即精密度高而正确度低;(b) 的随机误差大而系统误差小,即精密度低而正确度高;(c) 的随机误差和系统误差都小,表示精确度(准确度、精准度)高。

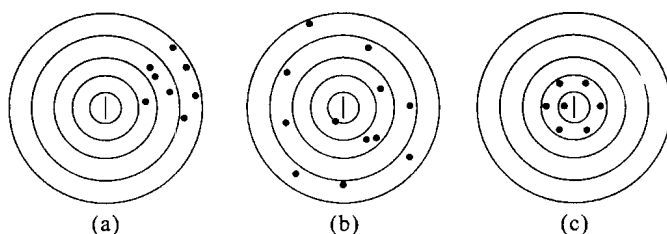


图 2-1-1 精密度、正确度、精确度的关系示意图

对于实验或测量来说,精密度高,正确度不一定高,正确度高,精密度也不一定高,但精确度(准确度、精准度)高,则一定是精密度和正确度都高。