

化工原理课程系列教学用书

Experiment of
Chemical Engineering Principle

化工原理实验 (第2版)

张金利 郭翠梨 胡瑞杰 范江洋 主编

非外借



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

化工原理课程系列教学用书

Experiment of
Chemical Engineering Principle

化工原理实验 (第2版)

张金利 郭翠梨 胡瑞杰 范江洋 主编

常州大学图书馆
藏书章

内容提要

本书强调在实验过程中培养学生的实验设计、实验实施能力,进而培养学生的创新能力。在编写过程中,既突出学生对化工原理知识的学习,又突出化工实验的共性问题。全书共分6章,即实验误差的估算与分析、实验数据处理、正交试验设计方法、化工实验参数测量技术、化工原理基本实验、化工原理演示实验和选修实验。

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,也可以作为石油、化工、轻工、医药等行业从事科研、生产的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验 / 张金利等主编. —2版. —天津:
天津大学出版社, 2016. 11(2017. 7重印)

ISBN 978-7-5618-5713-7

I. ①化… II. ①张… III. ①化工原理—实验—高等学校—教材 IV. ①TQ02-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第267483号

出版发行 天津大学出版社
地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 昌黎县佳印印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 12.25
字 数 306千
版 次 2005年7月第1版 2016年11月第2版
印 次 2017年7月第2次
定 价 28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究



第2版前言

《化工原理实验》自2005年出版以来,已使用11年。在这11年间,化工原理课程及化工原理实验进行了巨大改革,实验教学理念、实验教学内容、实验教学设备都发生了变化,原来的实验教材已不能满足现有的实验教学,因此急需对原教材进行修订。

此次修订,首先增加了绪论,通过这部分让学生了解化工原理实验的特点、教学内容及教学过程各环节的要求,明确学习目标;附录增加了实验基本安全知识,目的是让学生了解消防设备、电气设备、危险品、高压钢瓶等的安全使用方法和废物的处理方法,提高安全和环保意识。其次,在化工原理基本实验部分,在天津大学研发的的设备的基础上,兼顾其他学校使用的实验装置,给出了多种实验装置,如吸收实验给出了氨吸收、二氧化碳吸收两种实验装置,通用性比较强;而且在精馏、吸收、萃取实验中分别增加了精馏塔的操作、吸收塔的操作和萃取塔的操作,有助于学生工程实践能力和理论联系实际能力的培养。再者,在化工原理演示实验和选修实验中增加了一些组合实验,如非均相气固分离演示实验、多功能膜分离实验,这些有利于学生对几种操作进行比较。另外,对化工原理基本实验、化工原理演示实验和选修实验中所有的实验装置流程图进行了修改,使其符合规范。最后,在化工原理基本实验中增加了二维码,通过扫描二维码可以看到各个实验的讲解视频。

全书共分6章,由张金利、郭翠梨、胡瑞杰、范江洋修订。各章执笔者如下:绪论、第1章郭翠梨;第2章张金利;第3章郭翠梨;第4章范江洋;第5章郭翠梨、胡瑞杰;第6章张金利、胡瑞杰;附录范江洋。天津大学化工学院化工基础实验中心的其他教师参与了本教材实验视频的录制,在此对他们表示衷心的感谢。

在本书编写过程中参考了其他院校的有关教材,对此向相关教材的作者表示诚挚的谢意。

鉴于作者学识有限,书中难免有不妥之处,诚心希望读者不吝赐教,促使本教材日臻完善。

编者
2016年7月



目 录

绪论	(1)
第1章 实验误差的估算与分析	(6)
1.1 实验数据的误差	(6)
1.1.1 直接测量和间接测量	(6)
1.1.2 实验数据的真值	(6)
1.1.3 误差的定义及表示方法	(7)
1.1.4 误差的分类	(8)
1.1.5 精密度、正确度和准确度	(9)
1.2 实验数据的有效数字和记数法	(9)
1.2.1 有效数字	(9)
1.2.2 数字舍入规则	(10)
1.2.3 直接测量值的有效数字	(11)
1.2.4 非直接测量值的有效数字	(11)
1.3 随机误差	(12)
1.3.1 随机误差的正态分布	(12)
1.3.2 概率密度分布函数	(12)
1.3.3 正态分布的特征值	(12)
1.4 直接测量值的误差估算	(13)
1.4.1 一次测量值的误差估算	(13)
1.4.2 多次测量值的误差估算	(15)
1.5 间接测量值的误差估算	(15)
1.5.1 误差传递的一般公式	(15)
1.5.2 误差传递公式的应用	(16)
1.5.3 误差分析的应用	(18)
本章符号表	(20)
习题	(20)
第2章 实验数据处理	(22)
2.1 列表法和图示法	(22)
2.1.1 列表法	(22)
2.1.2 图示法	(23)
2.2 实验数据的回归分析法	(25)
2.2.1 回归分析法的含义和内容	(25)

2.2.2	回归表达式形式的选择	(26)
2.2.3	一元线性回归	(27)
2.2.4	多元线性回归	(34)
2.2.5	非线性回归	(36)
	本章符号表	(39)
	习题	(40)
第3章	正交试验设计方法	(41)
3.1	正交试验设计方法的优点	(41)
3.2	正交表及其特点	(43)
3.2.1	等水平正交表(单一水平正交表)	(43)
3.2.2	混合水平正交表	(44)
3.3	因素之间的交互作用	(45)
3.4	正交表的表头设计	(46)
3.4.1	有交互作用的表头设计	(46)
3.4.2	无交互作用的表头设计	(49)
3.5	选择正交表的基本原则	(49)
3.6	正交试验的操作方法	(50)
3.7	正交试验结果的极差分析法	(50)
3.8	正交试验结果的方差分析法	(55)
	本章符号表	(59)
	习题	(60)
第4章	化工实验参数测量技术	(62)
4.1	测量仪表的基本技术性能	(62)
4.1.1	测量仪表的特性	(62)
4.1.2	测量仪表的选用原则	(64)
4.2	压力(差)测量	(64)
4.2.1	压力计和压差计	(65)
4.2.2	压力(差)传感器	(67)
4.2.3	压差计的校验和标定	(69)
4.2.4	压差计安装和使用中的一些技术问题	(69)
4.3	流量测量技术	(70)
4.3.1	节流式流量计	(70)
4.3.2	转子流量计	(74)
4.3.3	涡轮流量计	(75)
4.3.4	流量计的检验和标定	(77)
4.4	温度测量技术	(77)
4.4.1	热电偶温度计	(77)
4.4.2	热电阻温度计	(80)
4.4.3	温度计的使用技术	(81)

4.4.4 温度计的校验和标定	(83)
4.5 液位测量技术	(83)
4.5.1 直读式液位计	(83)
4.5.2 差压式液位计	(85)
4.5.3 浮力式液位计	(85)
4.6 显示仪表	(87)
4.6.1 模拟式显示仪表	(87)
4.6.2 数字式显示仪表	(87)
4.6.3 屏幕显示仪表	(88)
本章符号表	(89)
习题	(90)
第5章 化工原理基本实验	(91)
5.1 流体流动阻力测定实验	(91)
5.2 离心泵性能测定实验	(94)
5.3 流量计校正实验	(97)
5.4 正交试验法在过滤研究中的应用实验	(99)
5.5 传热实验	(102)
5.6 板式精馏塔操作和塔板效率测定实验	(107)
5.7 填料塔流体力学性能和吸收传质系数测定实验	(111)
5.8 液-液萃取实验	(118)
5.9 干燥实验	(122)
第6章 化工原理演示实验和选修实验	(126)
6.1 化工原理演示实验	(126)
6.1.1 雷诺实验	(126)
6.1.2 伯努利方程演示实验	(128)
6.1.3 流线演示实验	(129)
6.1.4 板式塔流体力学性能演示实验	(131)
6.1.5 非均相气固分离演示实验	(133)
6.1.6 热电偶特性演示实验	(135)
6.1.7 测温仪表标定实验	(137)
6.1.8 测压仪表标定实验	(139)
6.2 化工原理选修实验	(141)
6.2.1 多相搅拌实验	(141)
6.2.2 多功能膜分离实验	(143)
6.2.3 渗透蒸发膜分离实验	(146)
6.2.4 反应精馏实验	(148)
6.2.5 共沸精馏实验	(151)
6.2.6 萃取精馏实验	(153)
6.2.7 溶液结晶实验	(156)

6.2.8	流化床干燥实验	(158)
6.2.9	升膜蒸发实验	(162)
6.2.10	裸管与绝热管传热实验	(165)

附录		(169)
附录 1	实验基本安全知识	(169)
附录 2	相关系数检验表	(173)
附录 3	F 分布数值表	(174)
附录 4	常用正交表	(178)
附录 5	乙醇—正丙醇在常压下的气液平衡数据	(185)
附录 6	乙醇—正丙醇的折光率与溶液浓度的关系	(186)
附录 7	乙醇—正丙醇的汽化热和比热容数据表	(186)
附录 8	乙醇—水在常压下的气液平衡数据	(187)
附录 9	氨在水中的相平衡常数 m 与温度 t 的关系	(187)
附录 10	CO_2 水溶液的亨利系数	(188)
附录 11	苯甲酸—煤油—水物系的分配曲线	(188)



绪 论

1. 化工原理实验的主要特点

化工原理实验是一门实践性很强的技术基础课,它用自然科学的基本原理和工程实验方法来解决化工及相关领域的实际工程问题。化工原理实验要解决的是多因素、多变量、综合性、与工业实际有关的问题,具有显著的现实性和特殊性。

①化工原理实验与化工原理课堂教学、实习、课程设计等教学环节相互衔接,构成一个有机整体。化工原理实验通过观察某些基本化工过程中的现象,如液泛、流态化等,测定某些基本参数,如温度、压力、流量等;找出某些重要过程的规律,如管内流体的流动规律、流体通过颗粒床层的规律等;确定化工设备的性能,如离心泵的特性曲线、换热器的传热系数、过滤机的过滤常数、精馏塔的塔板效率、吸收塔的传质单元数等。所以,化工原理实验是学生巩固传递原理、化工单元操作的理论知识,学习与之相关的其他新知识的重要途径。

②化工原理实验不同于基础课实验,如普通物理、无机化学、有机化学、分析化学、物理化学等课程的实验,它是学生接触到的工程性较强的实验。首先,化工原理实验以实际工程问题为研究对象,涉及的变量比较多,采用的研究方法也必然不同,不能将处理物理实验或化学实验的一般方法简单地套用于化工原理实验,应在化工原理实验的整个过程中体验实验的工程性以及掌握解决工程问题的一般方法。其次,化工原理实验设备脱离了基础课实验的小型玻璃器皿,与实际的化工设备相同或相似,每个实验都相当于化工生产中的一个基本过程,所得到的结论对于化工单元操作的设备设计及过程操作条件的确定均具有很重要的指导意义。

③由于化工过程的复杂性,许多工程因素的影响仅从理论上是难以解释清楚的,或者虽然能从理论上作出定性的分析,但难以给出定量的描述,特别是有些重要的设计或操作参数,根本无法从理论上计算,必须通过必要的实验加以确定或获取。初步接触化工单元操作的学生或有关工程技术人员更有必要通过实验来加深对有关过程及设备的认识和理解。

化工类专业的学生学好化工原理实验不仅对学习理论课有帮助,而且可以通过学习化工实验的方法、技能和知识,提高解决实际工程问题的能力,为毕业后从事实际工作打下良好的基础。

2. 化工原理实验的教学目的

通过化工原理实验应达到如下教学目的。

①根据化工原理实验的目的或任务,分析实验原理,设计实验流程,选择实验装置,确定实验的具体步骤,培养学生运用所学知识分析和解决实际问题的能力。

②通过一系列的实践操作以及化工常用仪器仪表的使用,掌握工程实验的一般方法和技巧,如操作条件的确定、实验操作及故障分析、测试仪表的选择、数据采集和过程控制的实现等,得到化工实验技能的基本训练,培养学生的动手操作能力。

③熟悉典型单元操作的工艺流程及设备的基本原理、结构和性能,验证各单元操作过程

的机理、规律,巩固和强化在化工原理课程中所学的基本理论,培养学生理论联系实际的能力。

④通过实验培养学生对实验现象的敏锐观察能力、正确获取实验数据的能力,分析、讨论工程上的一些现实问题及其产生的原因。

⑤根据实验现象和实验数据,用所学的知识归纳、分析实验结果,撰写实验报告,培养学生从事科学研究的能力。

⑥培养学生认真严肃的科学态度和实事求是的工作作风。

综上所述,化工原理实验教学是化工类专业教学过程中一个非常重要的环节,其目的是对学生的工程实践能力进行全面培养。

3. 化工原理实验的教学内容

化工原理实验主要包括实验基础理论教学和实验教学两大部分。

1) 实验基础理论教学

实验基础理论主要介绍如下几个方面的知识:①实验误差的估算与分析;②实验数据处理;③正交试验设计方法;④化工常见物理量的测量,比较详细地介绍压力差、流量、温度及液位的测量方法与使用时应注意的问题;⑤实验预习、实验报告的书写和实验基本安全知识。

2) 实验教学

为了适应不同专业、不同层次的教学要求,本教材共编写了三类实验。

(1) 第一类:化工原理基本实验 包括:①流体流动阻力测定实验;②离心泵性能测定实验;③流量计标定实验;④正交试验法在过滤研究中的应用实验;⑤传热实验;⑥板式精馏塔操作和塔板效率测定实验;⑦填料塔流体力学性能和吸收传质系数测定实验;⑧液-液萃取实验;⑨干燥实验。

(2) 第二类:化工原理演示实验 包括:①雷诺实验;②伯努利方程演示实验;③流线演示实验;④板式塔流体力学性能演示实验;⑤非均相气固分离演示实验;⑥热电偶特性演示实验;⑦测温仪表标定实验;⑧测压仪表标定实验。

(3) 第三类:化工原理选修实验 包括:①多相搅拌实验;②多功能膜分离实验;③渗透蒸发膜分离实验;④反应精馏实验;⑤共沸精馏实验;⑥萃取精馏实验;⑦溶液结晶实验;⑧流化床干燥实验;⑨升膜蒸发实验;⑩裸管与绝热管传热实验。

按照原全国化工原理教学指导委员会的建议,化工原理实验的课时为30到60学时,大致可安排6到12个不同类型的实验。针对不同专业、不同层次的教学对象,可对实验教学内容进行组合调整。

4. 化工原理实验的教学环节

化工原理实验通常包括实验理论课、实验预习、实验操作、撰写实验报告、实验考核等几个教学环节。为了突出对学生能力和素质的培养,在整个实验过程中必须坚持启发式、讨论式、研究式、交互式的教学方法,突出学生的自主作用,避免教师单纯传授知识、包办代替的做法,克服学生依赖教师、被动学习的习惯。

一般情况下,本课程以小组(每组2~3人为宜)为单位,分工协作完成。

5. 实验预习的要求

由于化工原理实验的特殊性,在实验之前必须进行认真的预习,做到了解和熟悉单元操作设备、流程、测控点、安全要点等。具体要求如下。

①认真阅读实验指导书、理论教材以及相关的参考书,明确所做实验的目的、任务和要求;根据实验任务分析实验的理论依据;理解实验流程、实验装置的设计思路;明确在实验中应该测取哪些数据;拟定出初步的实验方案等。

②熟悉实际的实验装置和流程,明确测控点,了解设备和相关仪表的类型、启动程序及调节方法,搞清楚操作要点和注意事项等。

③为了使实验结果真实地反映参数之间的变化规律,要初步确定出被测参数的数据范围及间隔,并预估实验数据的变化规律。

④写出预习报告,在报告中要明确实验目的和任务、实验原理、实验装置流程示意图、实验步骤及注意事项等;在实验前设计好原始数据记录表,表格中应记录各物理量的名称、符号和单位等。

6. 实验过程中的注意事项

实验操作是实验教学的核心环节,学生只有通过操作才能了解和领会单元操作设备及流程,了解如何实现过程的优化,分析各种非正常现象产生的原因并研究可能采取的措施。

①进行实验前首先仔细检查实验装置及仪器仪表是否完好,对电机、风机、泵的运转设备必须进行检查;对各种阀门,尤其是一些回路阀或旁路阀,应仔细检查其开启情况,需要打开的要打开,需要关闭的要关闭。检查完毕后方可进行操作。

②在实验中应密切注意仪表示数的变化,并及时调节,使整个过程在规定的条件下进行;实验条件改变后,不要急于测量记录,由于化工过程的稳定需要一定的时间,而且仪表常存在滞后现象,因此一定要在过程稳定后再取样或读取数据。

③在实验过程中切忌只顾埋头操作和读数,而忽略了对实验现象的观察。须知,实验现象往往与过程的内在机理、规律密切相关,如塔板上两相接触状态与效率的关系。勤于观察、善于观察是科研工作者和工程技术人员必备的素质。

④实验中如果出现异常现象或者数据有明显误差,应在数据记录表中如实注明。小组成员应与老师一起认真讨论,研究异常现象发生的原因,及时发现问题、解决问题或者对现象作出合理的分析、解释。

⑤用事先拟定好的原始数据记录表认真记录实验数据,要保证数据可靠、清楚、完整,必须真实地反映仪表的准确度,一般记录至仪表最小分度以下一位数;记录数据后应及时复核,以免读错或写错;应注明所测物理量的名称、符号、单位。

⑥实验数据经指导教师审查合格后结束实验。关停设备时,按操作规程关闭流量计、仪器设备、总电源,将实验场地打扫干净后方可离开。

7. 实验报告的书写

按照一定的格式和要求表达实验过程和结果的文字材料称为实验报告。实验报告是对实验工作和实验工作对象进行评价的主要依据,是撰写科技论文和制订科技工作计划的重要依据和参考资料。它是实验工作的全面总结和系统概括,是实验工作不可缺少的一个环

节。

写实验报告的过程就是对所测取的数据加以处理,对所观察的现象加以分析,从中找出客观规律和内在联系的过程。如果做了实验而不写报告就相当于有始无终、半途而废。对于理工科的大学生来讲,进行实验并写出报告是一种必不可少的基础训练,对所做的实验写出一份完整的实验报告也可认为是撰写正式科技论文的训练。因此,对于化工原理实验课程的实验报告,提倡在正式报告前写摘要,目的是强化撰写科技论文的意识,训练学生综合分析、概括问题的能力。

完整的实验报告一般包括以下几方面的内容。

(1)实验名称 每份实验报告都应有名称,又称标题,列在报告的最前面。实验名称应简洁、鲜明、准确。简洁,就是字数要尽量少;鲜明,就是让人一目了然;准确,就是能恰当反映实验的内容。如流体流动阻力测定实验、干燥实验。

(2)实验目的 简明扼要地说明为什么要进行这个实验,本实验要解决什么问题,常常列出几条。

(3)实验的理论依据(实验原理) 简要说明实验所依据的基本原理,包括实验涉及的主要概念,实验依据的重要定律、公式及据此推算的重要结果,要求写得准确、充分。

(4)实验装置示意图和主要设备、仪表的名称 将实验装置简单地画出来,标出设备、仪表(及调节阀)等的标号,并标注出测控点的位置,在流程图的下面写出图名及与标号相对应的设备、仪表等的名称。

(5)实验操作方法和安全要点 将实际操作程序按时间的先后划分为几个步骤,以使条理更为清晰,一般多以改变某一组因素(参数)作为一个步骤。对于操作过程的说明要简单、明了。对于整个实验过程的安全要点要在操作程序中特别标出,对容易引发危险,损坏仪器、仪表或设备以及对实验结果影响比较大的操作,一般在注意事项里加以提醒,以引起人们的注意。

(6)数据记录 实验数据是在实验过程中从测量仪表上所读取的数值,要根据仪表的准确度确定实验数据的有效数字位数。读取数据的方法要正确,记录数据要准确。数据一般记在原始数据记录表里,数据较多时,此表格宜作为附录放在报告的后面。

(7)数据整理表和图 这部分是实验报告的重点内容之一,要求把实验数据整理、加工成表或图的形式。数据整理应根据有效数字的运算规则进行,一般将主要的中间计算值和最后的计算结果列在数据整理表中。表格要精心设计,以使其易于显示数据的变化规律及各参数的相关性。有时为了更直观地表达变量间的相互关系,采用作图法,即用相对应的各组数据确定出若干坐标点,然后依点画出相关曲线。数据整理表或图要按照第2章中列表法和图示法的要求去做。实验数据未经重复实验不得修改,更不得伪造。

(8)数据整理计算过程举例 这部分以某一组原始数据为例,把各步计算过程列出,从而说明数据整理表或图中的结果是如何得到的。

(9)对实验结果进行分析与讨论 这部分十分重要,是实验者理论水平的具体体现,也是对实验方法和结果的综合分析研究。讨论范围应限于与本实验有关的内容,讨论内容包括:①从理论上对实验所得结果进行分析和解释,说明其必然性;②对实验中的异常现象进

行分析讨论;③分析误差的大小和原因以及如何提高测量的准确度;④本实验结果在生产实践中的价值和意义;⑤由实验结果提出进一步的研究方向或对实验方法及装置提出改进建议等。

有时将(7)、(9)合并在一起,写为“结果与讨论”,这有两个原因:一是讨论的内容少,无须另列一部分;二是实验的几项结果独立性强,需要逐项讨论,说明每项结果。

(10)实验结论 实验结论是根据实验结果所作出的最后判断,得出的结论要从实际出发,要有理论根据。

第 1 章 实验误差的估算与分析

在实验中,由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响以及测量仪表和人的观察等方面的原因,实验所得数据与被测量的真值之间不可避免地存在着差异,这在数值上表现为误差。误差的存在是必然的,具有普遍性的。为了减小或消除误差,必须对测量过程和实验中存在的误差进行研究。通过误差估算和分析,可以认清误差的来源及其影响,确定导致实验总误差的主要因素,从而在准备实验方案的过程中正确组织实验过程,合理选用仪器和测量方法,减少或消除产生误差的来源,提高实验的质量。

1.1 实验数据的误差

1.1.1 直接测量和间接测量

根据获得测量结果的方法不同,测量可以分为直接测量和间接测量。可以由仪器、仪表直接读出数据的测量称为直接测量。例如:用米尺测量长度,用秒表计时间,用温度计、压力表测量温度和压强等。凡是基于直接测量得到的数据按一定的函数关系式通过计算才能求得测量结果的测量称为间接测量。例如:测定圆柱体的体积时,先测量直径 D 和高度 H ,再用公式 $V = \pi D^2 H / 4$ 计算出体积 V , V 就属于间接测量的物理量。化工基础实验中多数测量均属间接测量。

1.1.2 实验数据的真值

真值是某物理量客观存在的确定值。对它进行测量时,由于测量仪器、测量方法、环境、人员及测量程序等不可能完美无缺,实验误差难以避免,故真值是无法测得的,是一个理想值。在分析实验误差时,一般用如下值代替真值。

(1) 理论真值 这一类真值是可以经过理论证实的值。如平面三角形内角之和为 180° ;又如计量学中经国际计量大会决议确定的值,像热力学温标的零度——绝对零度等于 -273.15°C ;还有一些理论公式的表达值等。

(2) 相对真值 在某些过程中,常使用精度等级较高的仪器的测量值代替普通仪器测量值的真值,称其为相对真值。例如:用高精度的涡轮流量计测量的流量值相对于用普通流量计测量的流量值而言是真值。

(3) 平均值 平均值是对某物理量进行多次测量算出的平均结果,用它代替真值。当测量次数无限多时,算出的平均值是很接近真值的,但实际上测量次数是有限的(比如 10 次),所得的平均值只能近似地接近真值。

1.1.3 误差的定义及表示方法

1. 误差的定义

误差是实验测量值(包括直接和间接测量值)与真值(客观存在的准确值)之差,可表示为

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

误差的大小表示每一次测得的值相对于真值不符合的程度。

2. 误差的表示方法

1) 绝对误差和相对误差

测量值 x 与真值 A 之差的绝对值称为绝对误差 $D(x)$, 即

$$D(x) = |x - A| \quad (1-1)$$

在工程计算中,真值常用平均值 \bar{x} 或相对真值代替,则式(1-1)可写为

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

绝对误差虽然很重要,但仅用它不足以说明测量的准确程度。换句话说,它不能给出测量准确与否的完整概念。此外,有时测量得到相同的绝对误差可能导致准确度完全不同的结果。例如,要判别称量的好坏,单单知道最大绝对误差等于 1 g 是不够的。因为如果所称量物体的质量为几十千克,此次称量的质量是高的;如果所称量的物体本身仅重 2 ~ 3 g,则此次称量的结果毫无用处。

显而易见,为了判断测量的准确度,必须将绝对误差与所测得的值相比较,即求出其相对误差。

绝对误差 $D(x)$ 与真值的绝对值之比称为相对误差,其表达式为

$$E_r(x) = \frac{D(x)}{|A|} \quad (1-3)$$

用平均值代替真值($\bar{x} \approx A$), 则

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

测量值

$$x = \bar{x} [1 \pm E_r(x)] \quad (1-5)$$

需要注意,绝对误差是有量纲的值,相对误差是无量纲的真分数。在化工实验中,相对误差常常表示为百分数(%)或千分数(‰)。

2) 算术平均误差和标准误差

(1) 算术平均误差 n 次测量值的算术平均误差为

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

上式的分子应取绝对值,否则一组测量值($x_i - \bar{x}$)的代数和必为零。

(2) 标准误差 n 次测量值的标准误差(亦称均方根误差)为

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

(3) 算术平均误差与标准误差的联系和区别 n 次测量值的重复性(亦称重现性)愈差, n 次测量值的离散程度愈大, n 次测量值的随机误差愈大, 则 δ 值和 σ 值均愈大。因此, 可以用 δ 值和 σ 值来衡量 n 次测量值的重复性、离散程度和随机误差。但算术平均误差的缺点是无法表示出各次测量值之间彼此符合的程度。因为偏差相近的一组测量值的算术平均误差可能与偏差有大中小三种情况的另一组测量值相同。而标准误差对一组测量值中的较大偏差或较小偏差很敏感, 能较好地表明数据的离散程度。

【例 1-1】 某次测量得到下列两组数据(单位为 cm)。

A 组: 4.3 4.4 4.2 4.1 4.0

B 组: 3.9 4.2 4.2 4.5 4.2

求各组的算术平均误差与标准误差。

解: 算术平均值为

$$\bar{x}_A = \frac{4.3 + 4.4 + 4.2 + 4.1 + 4.0}{5} = 4.2$$

$$\bar{x}_B = \frac{3.9 + 4.2 + 4.2 + 4.5 + 4.2}{5} = 4.2$$

算术平均误差为

$$\delta_A = \frac{0.1 + 0.2 + 0.0 + 0.1 + 0.2}{5} = 0.12$$

$$\delta_B = \frac{0.3 + 0.0 + 0.0 + 0.3 + 0.0}{5} = 0.12$$

标准误差为

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{0.1^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.2^2}{5 - 1}} \approx 0.16$$

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{0.3^2 + 0.3^2}{5 - 1}} \approx 0.21$$

由上例可见, 尽管两组数据的算术平均值相同, 但它们的离散情况明显不同。由计算结果可知, 只有标准误差能反映出数据的离散程度。实验愈准确, 标准误差愈小, 因此标准误差通常被作为评定 n 次测量值随机误差大小的标准, 在化工实验中广泛应用。

(4) 标准误差和绝对误差的联系 n 次测量值的算术平均值 \bar{x} 的绝对误差为

$$D(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-8)$$

n 次测量值的算术平均值 \bar{x} 的相对误差为

$$E_r(\bar{x}) = \frac{D(\bar{x})}{|\bar{x}|} \quad (1-9)$$

由上面的公式可见, n 次测量值的标准误差 σ 愈小, 测量次数 n 愈多, 算术平均值的绝对误差 $D(\bar{x})$ 愈小。因此增加测量次数 n , 以算术平均值作为测量结果, 是减小数据随机误差的有效方法之一。

1.1.4 误差的分类

根据误差的性质及产生的原因, 可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

(1) 系统误差 是由某些固定不变的因素引起的。在相同条件下进行多次测量,其误差数值大小、正负保持恒定,或随条件改变按一定规律变化。有的系统误差随时间呈线性、非线性或周期性变化,有的不随时间变化。

产生系统误差的原因有:①测量仪器方面的因素(仪器设计上的缺点,零件制造不标准,安装不正确,未经校准等);②环境因素(外界温度、湿度及压力变化);③测量方法因素(近似的测量方法或近似的计算公式等);④测量人员的习惯偏向等。

总之,系统误差有固定的偏向和确定的规律,一般可根据具体原因采取相应措施给予校正或用修正公式加以消除。

(2) 随机误差 是由某些不易控制的因素造成的。在相同条件下作多次测量,其数值大小、正负是不确定的,即时大时小,时正时负,无固定大小和偏向。随机误差服从统计规律,与测量次数有关。随着测量次数的增加,随机误差可以减小,但不会消除。因此,多次测量值的算术平均值接近于真值。研究随机误差可采用概率统计方法。

(3) 粗大误差 是与实际明显不符的误差,主要由于实验人员粗心大意,如读数错误、记录错误或操作失败所致。这类误差往往很大,应在整理数据时将相应的数据加以剔除。

必须指出,上述3种误差在一定条件下可以相互转化。例如:尺子刻度划分有误差,对制造者来说是随机误差;用它进行测量时,将产生系统误差。随机误差和系统误差间并不存在绝对的界限。同样,粗大误差有时难以和随机误差相区别,从而被当作随机误差来处理。

1.1.5 精密度、正确度和准确度

测量的质量和水平可用误差的概念来描述,也可用准确度等概念来描述。为了指明误差的来源和性质,通常用以下3个概念。

(1) 精密度 可以衡量某物理量几次测量值之间的一致性,即重复性。它可以反映随机误差的影响程度,精密度高即随机误差小。如果实验的相对误差为0.01%,且误差仅由随机误差引起,则可认为精密度为 10^{-4} 。

(2) 正确度 它是在规定条件下,测量中所有系统误差的综合。正确度高,表示系统误差小。如果实验的相对误差为0.01%,且误差仅由系统误差引起,则可认为正确度为 10^{-4} 。

(3) 准确度(或称精确度) 它表示测量中所有系统误差和随机误差的综合。因此,准确度表示测量结果对真值的逼近程度。如果实验的相对误差为0.01%,且误差由系统误差和随机误差共同引起,则可认为准确度为 10^{-4} 。

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;但准确度高,必定精密度与正确度都高。

1.2 实验数据的有效数字和记数法

1.2.1 有效数字

在实验中,无论是直接测量的数据还是计算结果,用几位有效数字加以表示都是一项很重要的事。有人认为,小数点后面的数字越多就越准确,或者运算结果保留的位数越多就越准确。其实这是错误的想法,原因如下。其一,数据中小数点的位置在前或在后仅与所用的测量单位有关。例如35.6 mm和0.035 6 m这两个数据,准确度相同,但小数点的位置不