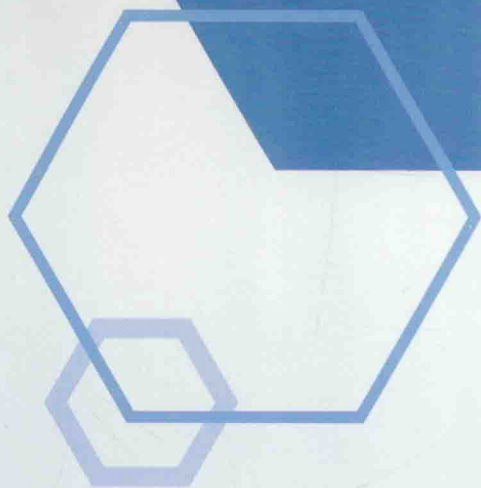


普通高等院校实验教材系列

化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN

刘天成 王红斌 杨 志 李宏利 / 主编



科学出版社

普通高等院校实验教材系列

化 工 原 理 实 验

刘天成 王红斌 杨 志 李宏利 主编

唐光阳 周 强 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

《化工原理实验》是在化工原理课程学习后为化工类各专业开设的一门专业实验课程,目的是拓展学生的化工知识视野,强化学生的工程意识和工程观念,提高学生的实验素质和实际操作技能,为课程设计及后续专业课程的学习打下基础。内容主要是以动量、热量和质量传递(“三传”)为理论基础的化工单元操作实验。全书共分四章,分别为化工原理实验研究方法、实验数据的误差分析、实验数据处理和实验操作。

本书可作为高等学校化工类各专业的实验教材,也可作为从事化工类的研究生、本科生和专科学生的实验指导书和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验 / 刘天成等主编. — 北京: 科学出版社, 2014.11

普通高等院校实验教材系列

ISBN 978-7-03-042269-9

I. ①化… II. ①刘… 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 (2014) 第 248206 号

责任编辑: 杨 岭 郑述方 / 责任校对: 冯 铂

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年11月第一版 开本: B5 (720×1000)

2014年11月第一次印刷 印张: 7.75

字数: 200千字

定价: 22.00元

前 言

化工原理课程是化工类各专业(包括化工、制药、生物、轻工食品、环境、石油、材料等)重要的技术基础课,课程体系包括理论、实验教学和课程设计等教学环节。化工原理理论课程是综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化学加工类生产中各种物理过程问题的工程学科,承担着工程科学与工程技术的双重教育任务,是一门实践性很强的基础技术课程。化工原理实验则是学习、掌握和运用化工原理理论课程必不可少的重要环节,具有明显的工程特点,是一门以处理工程问题的方法论指导人们研究和处理实际化工过程问题的实验课程。

本教材根据教育部化学工程类专业教学指导委员会制定的基本教学要求,在多年教学和科研经验的基础上编写而成。在实验内容上,选取了在实验方法和技术上有代表性的实验,着重介绍现代化学工程研究中常用到的一些重要的实验技术。为了扩大学生的知识面,使学生对该领域有比较全面的了解,在教材的最后一个实验介绍了化学工程中常用参数,如液位、温度等的自动检测与控制系统的实验内容,其中包括一些面向新技术开发、具有一定探索性的研究性实验。本教材的内容可以归结为动量传递、热量传递、质量传递和化工仪表控制四大类,共十五个实验项目,其中动量传递和质量传递实验占有较大的比例。由于化工原理实验课程涉及面广,值得开设的实验种类多,而学生只能选择其中一部分做实验,因此各院校在安排教学实验时,可根据自身条件,选择性地开设部分实验项目。

本书由刘天成、王红斌、杨志、李宏利、唐光阳、周强编写,全书由刘天成统稿。

十分感谢天津大学化工基础实验中心和云南民族大学化学与生物技术学院化工原理教学团队老师的支持,科学出版社的大力帮助,郑述方编辑对书稿提出的宝贵修改意见。同时,教材的出版得到了云南民族大学省级民族机动金民族文化教育项目资助出版,在此致以衷心的感谢。

鉴于参加本书编写的人员较多,编者的水平及经验有限,编写时间仓促,书中不当之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

编 者

2014年6月

目 录

绪论	1
第一章 化工原理实验研究方法	4
1.1 直接实验法	4
1.2 因次分析法	4
1.3 数学模型法	6
第二章 实验数据的误差分析	9
2.1 真值与平均值	9
2.2 误差的分类	10
2.3 误差的表示方法	11
2.4 误差的处理方法	12
2.5 仪表的精确度与测量值的误差	13
第三章 实验数据处理	15
3.1 列表法	15
3.2 图解法	17
3.3 数学方程表示法	19
第四章 化工原理实验	25
4.1 雷诺实验	25
4.2 管路流体阻力的测定	28
4.3 机械能转换实验	32
4.4 离心泵及管路特性曲线的测定	36
4.5 传热综合实验	41
4.6 套管换热器液-液热交换系数及膜系数的测定	49
4.7 计算机多釜串联返混性能测定实验	55
4.8 恒压(板框)过滤常数测定	58
4.9 超滤、纳滤、反渗透膜分离实验	63
4.10 洞道干燥实验	66
4.11 萃取实验	71
4.12 变压吸附实验	75
4.13 精馏实验	78

4.14 吸收实验	82
4.15 化工仪表控制实验	86
附录 水的物性参数表	111
主要参考文献	118

绪 论

化工原理实验是化工、环境、制药、石油、材料等院系或专业的重要实验技术课。与理科基础实验不同的是,化工原理实验具有工程的特点,属于工程类实验的范畴。每个单元操作实验就相当于化工生产中的一个基本过程,通过实验来建立工程的概念。随着实验课的进行,通过解决实验问题,学生可以从实验过程中更有效地学到工程实验方面的测试原理和手段,能够了解复杂的真实设备与工艺过程同描述这一个过程的数学模型之间的关系,一个看似复杂的过程,可以用最基本的原理来解释和描述。所以,通过化工原理实验课的教学,学生的思维方法和工程实践能力都会得到培养和锻炼,为以后更深层次的学习奠定基础。

1. 化工原理实验的教学目的

化工原理实验的教学目的主要包括以下四点。

- (1)巩固和深化理论知识。
- (2)提供一个理论联系实际的机会。
- (3)培养学生从事科学实验的能力。
- (4)培养科学的思维方法、严谨的科学态度和良好的科学作风。

2. 化工原理实验的特点

强调实践性和工程观念,并将能力和素质培养贯穿于实验课的全过程。

开设有设计型、研究型 and 综合型实验,培养学生掌握实验研究方法,训练其独立思考、综合分析问题和解决问题的能力。

实验设备采用计算机在线数据采集与控制系统,引入先进的测试手段和数据处理技术,使之更接近现代化工生产过程。

3. 化工原理实验的教学内容与方法

(1)实验理论教学:主要讲述化工原理实验教学的目的、要求和方法;实验的特点、研究方法;实验数据的误差分析与处理方法。

(2)典型单元操作实验:雷诺实验、管路流体阻力实验、机械能转换实验、传热综合实验等 19 个单元操作。

4. 化工原理实验各环节的要求

1) 预习环节

(1) 认真阅读实验教材, 带着问题到实验室现场预习。

(2) 到实验室熟悉设备装置的结构和流程。

(3) 明确操作程序与所要测定参数的项目, 了解相关仪器、仪表的使用方法等。

2) 实验操作环节

8~10 人为一小组进行实验, 做到既分工又合作。实验操作过程应注意以下几点。

(1) 启动操作, 按程序逐项进行。

(2) 操作过程中应随时观察仪表指示值的变动, 确保操作在稳定条件下进行。有异常情况时应立即报告指导教师。

(3) 停车时应严格按操作说明关闭有关气源、水源、电源等, 并将各阀门恢复至实验前所处的位置。

3) 测定、记录和数据处理环节

(1) 确定需要测定的数据。凡是与实验结果有关或是整理数据时必需的参数都应一一测定。原始数据记录表的设计应在实验前完成。原始数据应包括工作介质性质、操作条件、设备几何尺寸及大气条件等。

(2) 读数与记录。①待设备各部分运转正常, 操作稳定后方可读取数据。②同一操作条件下, 不同数据最好是数人同时读取。③每次读数都应与其他数据及前一次数据对照, 看看相互关系是否合理。④所记录的数据应是直接读取的原始数值, 不要经过运算后才记录。⑤读取数据应根据仪表的精度, 读至仪表最小分度以下一位数。碰到波动不能完全消除的情况, 可取波动的最高点与最低点两个数据的平均值。⑥不能凭主观臆测修改记录数据, 也不要随意舍弃数据。⑦记录完毕要仔细检查一遍, 有无漏记或错记之处, 特别要注意仪表上的计量单位。实验完毕, 须将原始数据记录表格交指导教师检查并签字, 认为准确无误后方可结束实验。

4) 数据的整理与处理

(1) 原始记录只可进行整理, 绝不可以随便修改。

(2) 经判断确实为过失误差造成的不正确数据须注明后方可剔除不计入结果。

(3) 数据处理过程应有计算示例。

(4) 实验结果及结论用列表法、图解法或回归分析法来说明都可以, 但均需标明实验条件。

(5) 列表法、图解法和回归分析法详见第三章实验数据处理。

5) 实验报告编写环节

实验报告是实验工作的全面总结和系统概括,是实践环节中不可缺少的一个重要组成部分。化工原理实验具有显著的工程性,属于工程技术科学的范畴,它研究的对象是复杂的实际问题 and 工程问题。

5. 化工原理实验报告的编写

本课程实验报告的内容应包括以下几项。

(1)封面:实验名称,报告人姓名、学号、专业,同组人姓名,实验地点,指导教师,实验日期等。

(2)实验目的和内容:简明扼要地说明为什么要进行本实验,实验要解决什么问题。

(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。要求准确、充分。

(4)实验装置流程示意图:简单地画出实验装置流程示意图和测试点、控制点的具体位置及主要设备、仪表的名称。标出设备、仪器仪表及调节阀等的标号,在流程图的下方写出图名及与标号相对应的设备、仪器等的名称。

(5)实验操作要点:根据实际操作程序划分为几个步骤,并在前面加上序数词,以使条理更为清晰。对于操作过程的说明应简单、明了。

(6)注意事项:对于容易引起设备或仪器仪表损坏、容易发生危险以及一些对实验结果影响比较大的操作,应在注意事项中注明,以引起注意。

(7)原始数据记录:记录实验过程中从测量仪表所读取的数值。读数方法要正确,记录数据要准确,要根据仪表的精度决定实验数据的有效数字的位数。

(8)数据处理:数据处理是实验报告的重点内容之一,要求将实验原始数据进行整理、计算,并将其制成便于分析讨论的表和图。表格要易于显示数据的变化规律及各参数的相关性,图要能直观地表达变量间的相互关系。

(9)实验结果的分析与讨论,主要内容包括: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,说明影响实验的主要因素。分析误差的大小和原因,指出提高实验结果的途径。③将实验结果与前人和他人的结果对比,说明结果的异同,并解释这种异同。④本实验结果在生产实践中的价值和意义,推广和应用效果的预测等。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。

(10)实验结论: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,有理论依据。

第一章 化工原理实验研究方法

1.1 直接实验法

直接实验法是解决工程实际问题的最基本的方法，其优点是对特定的工程问题直接进行实验测定，所得到的结果较为可靠；缺点是往往只能用到条件相同的情况，具有较大的局限性。

对一个多变量影响的工程问题，若采用直接实验法，通常是先只改变其中某一变量而将其他变量固定进行实验，然后再改变另一变量而将其他变量固定，依此类推，逐个地研究各变量的影响。

但如果变量数较多，采用直接实验法则会使实验次数剧增。例如，影响流体阻力的主要因素有：管径、管长、平均流速、流体密度、流体黏度及管壁粗糙度，变量数为 6，如果每个变量改变条件次数为 10 次，则需要做 10^6 次实验，不难看出变量数是出现在幂上，涉及变量越多，所需实验次数也越多，因此需要寻找一种方法以减少工作量，并使得到的结果具有一定的普遍性。因次分析法就是一种能解决上述问题的在化工原理中广泛使用的研究方法。

1.2 因次分析法

1.2.1 因次分析法所依据的基本理论

(1) 因次一致性原则：凡是根据基本的物理规律导出的物理量方程，其中各项的因次必然相同。

(2) 白金汉(Buckingham)的 π 定理：用因次分析所得到的独立的因次数群个数，等于变量数与基本因次数之差，即： $N = n - m$ 。

因次分析法是将多变量函数整理为简单的无因次数群的函数，然后通过实验归纳整理出算图或准数关系式。

基本因次：它们是彼此独立的，不能相互导出。

导出因次：由基本因次导出。例如，在力学领域内基本因次有三个，通常为长度 $[L]$ 、时间 $[t]$ 、质量 $[M]$ ，其他力学的物理量的因次都可以由这三个因

次导出并可写成幂指数乘积的形式。

$$[Q] = [M^a L^b q^c]$$

式中, a 、 b 、 c 为常数。如果基本因次的指数均为零, 这个物理量称为无因次数或无因次数群, 反映流体流动状态的雷诺数就是无因次数群。

1.2.2 因次分析法的具体步骤

- (1) 找出影响过程的独立变量。
- (2) 确定独立变量所涉及的基本因次。
- (3) 构造因变量和自变量的函数式, 通常以指数方程的形式表示。
- (4) 用基本因次表示所有独立变量的因次, 并写出包涵各独立变量的因次式。
- (5) 依据物理方程的因次一致性原则和 π 定理得到准数方程。
- (6) 通过实验归纳总结准数方程的具体函数式。

1.2.3 因次分析法举例说明

以获得流体在管内流动的阻力和摩擦系数 λ 的关系式为例。

- (1) 找出影响过程的独立变量。

$$\Delta P = f(d, l, u, \rho, \mu, \epsilon) \quad (1-1)$$

- (2) 确定独立变量所涉及的基本因次。

$$\begin{aligned} \Delta P &= [ML^{-1}\theta^2] & d &= l = [L] & u &= [L\theta^{-1}] \\ p &= [ML^{-3}] & \mu &= [ML^{-1}\theta^{-1}] & \epsilon &= [L] \end{aligned}$$

- (3) 构造因变量和自变量的函数式。

$$\Delta P = K d^a l^b u^c \rho^d \mu^e \epsilon^f \quad (1-2)$$

- (4) 写出包涵各独立变量的因次式。

$$ML^{-1}\theta^{-2} = KL^a L^b (L\theta^{-1})^c (ML^{-3})^d (ML^{-1}\theta^{-1})^e L^f$$

- (5) 依据因次一致性原则和 π 定理得到准数方程。

对基本因次	$[M]$	$d + e = 1$
对基本因次	$[L]$	$a + b + c - 3d - e + f = -1$
对基本因次	$[\theta]$	$-c - e = -2$

设用其中三个未知数 b 、 e 、 f 来表示 a 、 d 、 c , 解此方程组。可得:

$$\begin{cases} a = -b - e - f \\ d = 1 - e \\ c = 2 - e \end{cases} \quad \begin{cases} a = -b - c + 3d + e - f - 1 \\ d = 1 - e \\ c = 2 - e \end{cases}$$

将求得的 a 、 d 、 c 代入方程(1-2)得:

$$\Delta P = K d^{-b-e-f} l^b u^{2-e} \rho^{1-e} \mu^e \epsilon^f \quad (1-3)$$

将指数相同的各物理量归并在一起得:

$$\frac{\Delta P}{u^2 \rho} = K \left(\frac{l}{d} \right)^b \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^f \quad (1-4)$$

$$N = n - m = 7 - 3 = 4$$

$$\Delta P = 2K \left(\frac{l}{d} \right)^b \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^f \left(\frac{u^2 \rho}{2} \right) \quad (1-5)$$

由于摩擦损失 ΔP 应与管长 l 成正比, 故式中 $b=1$, 实验也证实这一点。

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \left(\frac{u^2 \rho}{2} \right) \quad \lambda = 2K \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^f \quad \lambda = \Phi \left(Re, \frac{\varepsilon}{d} \right)$$

(6)通过实验归纳总结准数方程的具体函数式。

著名的莫狄图即“摩擦系数 λ 与 Re 的关系曲线”就是这种实验的结果。许多实验研究了各种具体条件下的摩擦系数 λ 的计算公式, 例如, 适用于光滑管的柏拉修斯公式:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

1.2.4 因次分析法应注意的问题

(1)最终所得数群的形式与求解联立方程组的方法有关。如何合并变量为有用的准数, 这是研究者必须注意的问题。在上例中如果不以 b 、 e 、 f 来表示 a 、 d 、 c , 而改为以 d 、 e 、 f 表示 a 、 b 、 c , 整理得到的数群形式也就不同。不过, 这些形式不同的数群可以通过互相乘除, 仍然可以变换成上例中所求得四个数群。

(2)必须对所研究的过程的问题有本质的了解, 如果有一个重要的变量被遗漏, 或者引进一个无关的变量, 就会得出不正确的结果, 甚至导致错误的结论。

1.3 数学模型法

1.3.1 数学模型法的主要步骤

数学模型法是在对研究的问题有充分认识的基础上, 按以下主要步骤进行工作。

(1)将复杂问题做合理又不过于失真的简化, 提出一个近似实际过程又易于用数学方程式描述的物理模型。

(2)对所得到的物理模型进行数学描述即建立数学模型, 然后确定该方程的初始条件和边界条件, 求解方程。

(3)通过实验对数学模型的合理性进行检验并测定模型参数。

1.3.2 数学模型法举例说明

以求取流体通过固定床的压降为例。固定床中颗粒间的空隙形成许多可供流体通过的细小通道,这些通道是曲折且互相交联的,这些通道的截面大小和形状又是很不规则的,流体通过如此复杂的通道时的压降自然很难进行理论计算,但我们可以用数学模型法来解决。

1. 物理模型

流体通过颗粒层的流动多呈爬流状态,单位体积床层所具有的表面积对流动阻力有决定性的作用。这样,为解决压降问题,可在保证单位体积表面积相等的前提下,将颗粒层内的实际流动过程做如下大幅度的简化,使之可以用数学方程式加以描述。将床层中的不规则通道简化成长度为 L_e 的一组平行细管,并规定:①细管的内表面积等于床层颗粒的全部表面。②细管的全部流动空间等于颗粒床层的空隙容积。

根据上述假定,可求得这些虚拟细管的当量直径 d_e 。

$$d_e = \frac{4 \times \text{通道的截面积}}{\text{润湿周边}}$$

分子、分母同乘 L_e , 则有:

$$d_e = \frac{4 \times \text{床层的流动空间}}{\text{细管的全部内表面}}$$

以 1m^3 床层体积为基准,则床层的流动空间为 ϵ ,每立方米床层的颗粒表面即为床层的比表面 α_B ,如果忽略因颗粒相互接触而使裸露的颗粒表面减少,则 α 与颗粒的比表面 α_B 之间关系为 $\alpha_B = \alpha(1 - \epsilon)$, 因此:

$$d_e = \frac{4\epsilon}{\alpha_B} = \frac{4\epsilon}{\alpha(1 - \epsilon)}$$

按此简化的物理模型,流体通过固定床的压降可等同于流体通过一组当量直径为 d_e , 长度为 L_e 的细管的压降。

2. 数学模型

上述简化的物理模型,已将流体通过具有复杂的几何边界的床层的压降简化为通过均匀圆管的压降。对此,可用现有的理论作出如下数学描述:

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho} = \lambda \frac{L_e}{d_e} \frac{u_1^2}{2}$$

式中, u_1 为流体在细管内的流速。 u_1 可取实际填充床中颗粒空隙间的流速, 它

与空床流速(表观流速) u 的关系为:

$$u = \epsilon u_1$$

将上述所求的 d_e 和 u_1 代入得:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(\lambda \frac{L_e}{8L} \right) \frac{(1-\epsilon)\alpha}{\epsilon^3} \rho u^2$$

细管长度 L_e 与实际长度 L 不等,但可以认为 L_e 与实际床层高度 L 成正比,即 $L_e/L = \text{常数}$, 将其并入摩擦系数中, 于是:

$$\frac{\Delta P}{L} = \lambda' \frac{(1-\epsilon)\alpha}{\epsilon^3} \rho u^2 \quad \lambda' = \frac{\lambda}{8} \frac{L_e}{L}$$

上式即为流体通过固定床压降的数学模型, λ' 称为模型参数, 也称为固定床的流动摩擦系数。

3. 模型的检验和模型参数的估值

上述床层的简化处理只是一种假定, 其有效性必须经过实验检验, 其中的模型参数亦必须由实验测定。康采尼和欧根等均对此进行了实验研究, 获得了不同实验条件下不同范围的 λ' 与 Re' 的关联式。

1.3.3 数学模型法与因次分析法的比较

对于数学模型法, 决定成败的关键是对复杂过程的合理简化, 即能否得到一个足够简单的既可用数学方程式表示而又不失真的物理模型。只有对过程的内在规律特别是过程的特殊性有着深刻的理解并根据特定的研究目的加以利用, 才有可能对真实的复杂过程进行大幅度的合理简化, 同时在指定的某一侧面保持等效。

对于因次分析法, 决定成败的关键在于能否如数地列出影响过程的主要因素。它无须对过程本身的规律有深入理解, 只要做若干因次分析实验, 考察每个变量对实验结果的影响程度即可。

在因次分析法指导下的实验研究只能得到过程的外部联系, 而对过程的内部规律则不甚了解。然而, 这正是因次分析法的一大特点, 它使因次分析法成为对各种研究对象原则上皆适用的一般方法。

无论是数学模型法还是因次分析法, 最后都要通过实验解决问题, 但实验的目的大相径庭。数学模型法的实验目的是为了检验物理模型的合理性, 并测定为数较少的模型参数; 而因次分析法的实验目的是为了寻找各无因次变量之间的函数关系。

第二章 实验数据的误差分析

自然科学实验离不开对物理量的测量，测量有直接的，也有间接的。由于实验仪器、实验条件及环境等因素的限制，测量不可能无限精确，物理量的测量值与客观存在的真实值之间总会有一定的差异，这种差异就是误差。误差与错误不同，错误是应该而且可以避免的，而误差是不可能绝对避免的，任何实验和测量都会存在误差。

误差分析的主要目的就是评定实验数据的精确性，通过误差分析，认清误差的来源及其影响，并设法消除或减小误差，提高实验的质量。本章就化工原理实验中遇到的一些误差基本概念与估算方法作简要介绍。

2.1 真值与平均值

真值是指某物理量客观存在的确定值。严格来讲，由于测量仪器、测定方法、环境、人的观察力、测量的程序等都不可能是完善无缺的，故真值是无法测得的，是一个理想值。科学实验中真值的定义是：设在测量中观察的次数为无限多，则根据误差分布定律正负误差出现的机率相等，将各观察值相加，加以平均，在无系统误差情况下，可能获得极近于真值的数值。故真值在现实中是指观察次数无限多时，所求得平均值，然而对我们工程实验而言，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，或称为最佳值。一般我们称这一最佳值为平均值，常用的平均值有下列几种。

1. 算术平均值

这种平均值最常用。凡测量值的分布服从正态分布时，用最小二乘法原理可以证明：在一组等精度的测量中，算术平均值为最佳值或最可信赖值。

$$\bar{w} = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中， $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为各次观测值， n 为观察的次数。

2. 均方根平均值

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

3. 加权平均值

设对同一物理量用不同方法去测定, 或对同一物理量由不同人去测定, 计算平均值时, 常对比较可靠的数值予以加重平均, 称为加权平均。

$$\bar{w} = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中, $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为各次观测值, $w_1, w_2, \cdots, w_n$ 为各测量值的对应权重。各观测值的权数一般凭经验确定。

4. 几何平均值

$$\bar{x}_L = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_n}$$

5. 对数平均值

$$x_m = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}}$$

若 $1 < \frac{x_1}{x_2} < 2$ 时, 可用算术平均值代替对数平均值, 引起的误差在 4% 以内。

以上介绍的各种平均值, 目的是要从一组测定值中找出最接近真值的那个值。平均值的选择主要决定于一组观测值的分布类型, 在化工原理实验研究中, 数据分布较多属于正态分布, 故通常采用算术平均值。

2.2 误差的分类

误差是实验测量值与真值之间的差异, 根据误差的性质及其产生的原因, 可将误差分为三类: 系统误差、过失误差和随机误差。

1. 系统误差

又称恒定误差, 由某些固定不变的因素引起的。同一物理量在相同条件下进

行多次测量,其误差数值的大小和正负保持恒定,或随条件改变按一定的规律变化。

产生系统误差的原因有:①测量仪器方面的因素;②环境因素;③测量方法因素;④测量人员的习惯与偏向。一般系统误差是有规律的。其产生的原因也往往是可知或找出原因后可以清除掉。至于不能消除的系统误差,我们应设法确定或估计出来。

2. 过失误差

又称粗大误差,与实际明显不符的误差,主要是由于实验人员粗心大意所致,例如,读错、测错、记错等都会带来过失误差。含有过失误差的测量值称为坏值,应在整理数据时依据相关的准则加以剔除。

3. 随机误差

又称偶然误差,由某些不易控制的因素造成的。同一物理量在相同条件下做多次测量,其误差的大小,正负方向不一定,其产生原因一般不详,因而也就无法控制,主要表现在测量结果的分散性,但完全服从统计规律。随着测量次数的增加,平均值的随机误差可以减小,但不会消除。研究随机误差可以采用概率统计的方法。

2.3 误差的表示方法

1. 绝对误差

测量值与其真值之差的绝对值称为绝对误差。

$$D(x) = |x - A|$$

在工程计算中,真值常用算术平均值或相对真值代替。相对真值指使用高精度的标准仪器的真值代替普通测量仪器测量值的真值。

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

2. 相对误差

绝对误差与真值之比称为相对误差。

$$E_r(x) = \frac{D(x)}{|A|}$$

与绝对误差一样,其真值也常用平均值代替。