

高等院校名师精品课程教材

化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN

赵亚娟 张伟禄 余卫芳 编著



中国科学技术出版社

高等院校名师精品课程教材

化工原理实验

赵亚娟 张伟禄 余卫芳 编著

中国科学技术出版社

• 北 京 •

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/赵亚娟,张伟禄,余卫芳编著. —北京:中国科学技术出版社,2009.8
高等院校名师精品课程教材

ISBN 978-7-5046-5485-4

I. 化… II. ①赵…②张…③余… 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(2009)第 142201 号

2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

责任编辑:郑洪炜 李 剑

封面设计:中文天地

责任校对:赵丽英

责任印制:王 沛

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京凯鑫彩色印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:15.5 字数:311 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:28.00 元

ISBN 978-7-5046-5485-4/TQ·22

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内容提要

随着科学技术的飞速发展,化工参数测试技术、自动控制技术、数据采集及计算机处理等技术广泛应用于化工原理实验新用仪器与设备上,使得化工原理实验仪器与设备自动化程度明显提高,原有的《化工原理实验》教材已经不能与之相配套,同时实验内容也发生了变化。本教材是针对新型化工原理实验设备与仪器,以满足化学、应用化学、化学工程与工艺及相关专业的需求而编写的。书中介绍了化工原理实验的基础知识,如实验误差的估算与分析、实验数据处理方法及数据处理软件、常用测量仪器和仪表使用原理与方法等。对于化工原理实验,本教材分为基础实验与综合实验,以便学生在掌握了基础实验的基础上,进行综合能力的训练,提高学生的工程意识和工程能力。书后附有化工原理实验常用的数据图表。

本书可作为高等院校化学、应用化学、化学工程与工艺及相关专业的化工原理实验课的实验教材或实验指导书,也可作为石油、化工、轻工、医药等部门从事科研、生产的技术人员进行化工研究的参考资料。

前 言

化工原理实验是化学、应用化学、化学工程与工艺及相关专业的工程实验课,是学习、掌握和运用理论指导实践,实践检验理论的实践过程。该实验课不同于大学基础化学实验,具有显著的工程特点,如规模较大:与基础化学实验比,各种物料的流量、装置都较大,比较接近工业实践;数值粗略:实验数据不像物理、化学实验那么精确,读数一般较粗略,如指针的晃动、液柱的浮动;内容广泛和复杂:实验内容较多,知识面宽,各种因素相互制约。

设备大小各异、物料千变万化、错综复杂的实验过程,决定了不能将物理实验或化学实验的一般方法套用于化工原理实验,而要广泛应用工程手段来处理工程问题。通过化工原理实验,学生将完成科学基础实验向工程技术实验的转变,学会使用不同的工程方法处理不同的工程问题,建立工程意识,并在实验的过程中训练工程能力。

本教材是在温州师范学院与原温州大学两校合并,实验仪器整合与实验设备更新的条件下编写的。为了更好地使用实验仪器,提高化工原理实验课程的教学质量,对照化工原理实验室实验设备以及本课程的培养目标,我们编写了这本《化工原理实验》。本教材包括三章:预备知识、实验部分和常用图表。

1. 预备知识

实验误差分析和实验结果的数据处理部分,使学生明确实验误差产生的主要因素,掌握减小误差的方法和数据处理的过程中误差的传递规律,从而得到有效的实验数据。

常见测量仪表的种类与使用方法部分,介绍了化工原理实验及生产中常用测量仪表的工作原理及使用方法,使学生初步了解常用仪表的结构和原理,并能在化工原理实验中合理、恰当地使用常见仪表与测量元件。

化工原理实验的数据处理方法部分,介绍了常见化工原理实验中实验数据的处理方法、使用各种图表的方法。主要是因为化工原理实验的原始数据,必须进行数据处理才能得到有用的信息,处理过程使用大量化工原理定理与规律,使学生加深对化工原理基本规律的理解,建立数据处

理的初步概念(在每个实验中详细介绍实验的数据处理方法与过程,并应用实例加以说明)。

2. 实验部分

化工原理验证与演示实验,包括流体静力学基本方程实验、雷诺实验、伯努利方程实验等基本规律验证与演示。

化工原理实施实验,包括流体流动部分典型实验、传热部分典型实验、传质部分典型实验等。

综合设计实验,包括典型化工工艺实验,如合成氨实验、苯加氢实验、甲苯液相催化氧化制苯甲酸实验、乙苯脱氢制苯乙烯实验、邻二甲苯气相氧化制取邻苯二甲酸酐实验等。

3. 常用图表

收集了常用的图表,如 SI 制单位换算、汽液平衡数据、管及管件规格及用途等,供一般学生在实验过程中使用。

本教材适于 40~120 学时的化工原理实验使用,并可用于开放实验。各专业可根据各自的教学要求、实验仪器与设备选取若干实验项目,但至少在不同的单元中选用一个典型实验进行。

本教材由赵亚娟与张伟禄、余卫芳共同编写,其中预备知识、综合实验由赵亚娟编写,演示实验及部分实施实验由张伟禄编写,部分实施实验及附录部分由余卫芳编写。在编写过程中参考了冯辉、陈同芸、冯亚云、管国锋、伍钦等编写的《化工原理实验》,浙江大学、大连理工大学化工原理教研室编写的《化工原理实验讲义》以及其他兄弟院校的有关资料,在此表示衷心的感谢。

化工原理实验课程的教学改革与实践是一项长期的任务,在此我们只是进行了一些初步尝试。由于对化工原理实验教学改革理解与研究深度不够,并受认识水平及能力所限,在本教材的编写中一定存在不妥、不当之处,望读者不惜赐教。

编著者

2009 年 4 月

目 录

前言

第一章 预备知识	1
第一节 实验数据估算与误差分析	1
第二节 实验数据处理	12
第三节 测量仪表和测量方法	23
第二章 化工原理实验	52
实验一 流体静力学基本方程	52
实验二 雷诺实验	56
实验三 伯努利方程实验	59
实验四 流体流动阻力的测定	63
实验五 离心泵特性曲线的测定	67
实验六 孔板流量计流量的校正	72
实验七 非稳态法测定颗粒物料的导温系数	77
实验八 洞道干燥实验	84
实验九 流化干燥速度曲线测定	90
实验十 过滤常数的测定	93
实验十一 液—液热交换系数及膜系数的测定	97
实验十二 裸管与绝热管传热的实验	102
实验十三 二元体系汽液平衡数据测定	109
实验十四 三组分体系液—液平衡数据测定	116
实验十五 二氧化碳临界现象观测及 PVT 关系的测定	124
实验十六 填料吸收塔实验	131
实验十七 填料吸收塔实验(计算机版)	138
实验十八 填料精馏塔的操作与塔效率的测定	146
实验十九 板式精馏塔的操作与塔效率的测定	151
实验二十 连续搅拌釜式反应器液体停留时间分布实验	155
实验二十一 内循环反应器气固相催化动力学实验	162
实验二十二 气体搅拌萃取塔液—液萃取实验	168

实验二十三	传质传热类比实验	172
实验二十四	板式精馏塔塔板性能实验	179
实验二十五	液-液萃取实验	182
实验二十六	萃取精馏实验	187
实验二十七	甲苯液相催化氧化制苯甲酸	194
实验二十八	乙苯脱氢制苯乙烯	199
实验二十九	邻二甲苯气相氧化制取邻苯二甲酸酐	205
实验三十	利用反渗透膜进行分离实验	210
第三章	化工原理实验的基本要求	213
附录		219
附录 1	丙酮在水(水溶液)中的溶解曲线	219
附录 2	丙酮-空气混合气体中丙酮的饱和浓度数据	219
附录 3	乙醇溶液的物理常数(摘要) $P=101.3\text{kPa}$	220
附录 4	乙醇蒸汽的密度及比容(摘要) $P=101.3\text{kPa}$	221
附录 5	乙醇-水混合液在常压下汽液平衡数据	221
附录 6	氨的平衡溶解度	222
附录 7	氨-水溶液液相浓度 5% 以下的亨利系数与温度关系	222
附录 8	氨的亨利系数	222
附录 9	CO_2 的物性数据及 CO_2 的 PV 图	223
附录 10	有关物料的物性数据	223
附录 11	化工企业中常用管子的种类及用途	224
附录 12	常用物理量及单位	227
附录 13	基本常数与单位	228
附录 14	单位换算	228
附录 15	铜-康铜热电偶分度表	232
附录 16	常用固体材料的物理性质	233
附录 17	水的物理性质	233
附录 18	水在不同温度下的黏度	234
附录 19	干空气的物理性质 $P=0.101\text{MPa}$	235
参考文献		237

第一章 预备知识

第一节 实验数据估算与误差分析

一、误差分析

实验结果首先以观察、测试的原始数据形式表现出来。要得到更深入的实验信息,就必须对原始数据作进一步的分析与处理。这就要求原始数据必须准确、可靠。对原始数据可靠性、准确性的客观评定,就是误差分析。

在实验过程中,每台实验仪器都有一定的精度,由于人为操作的影响,实验中获得实验值与它的客观真实值不相同,这种情况在数值上表现为数值的误差。误差能说明实验数据的准确程度。误差自始至终存在于一切科学实验工程中。随着科学技术水平的提高和人们经验、技巧、专门知识的丰富,误差可以被控制得越来越小,但是不能完全消除,所以研究误差给实验结果带来的影响非常有意义。

二、真值与平均值

真值是指某量的真实值或实际值(在某一时刻和某一状态下),一般无法观测到。可以说一般真值是未知的。每一次实验所观测的实验值,可能高于或低于真实值,即出现与真值的偏差或误差。如果对某一物理量进行无限次的测量,尽管每次测量都可能出现正或负误差,但从总的趋势来看,正负误差出现的概率是相同的。因此,在不考虑系统误差的前提下,无数次试验观测值的平均值,就可以近似认为是该物理量的真值。

在科学实验中,虽然实验误差一定存在,但平均值却可以在一定条件下反映真值的大小,所以在科学实验中,经常将多次实验值的平均值作为真值的近似值。观测值的平均值就可以表示真值。测量值的平均值就非常重要了。表示平均值的方法很多,在处理实验结果时常用的表示法有:

1. 算术平均值

最常用的一种平均值表示法是算术平均值。

设有 n 个实验值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

式中, x_i 表示第 i 次实验值, 下同。

如果多次实验值服从正态分布, 则算术平均值是实验值中的最佳值或最可信值。

2. 加权平均值

用不同的方法观测的实验数据或不同的实验人员得到的某组实验值, 数据中各个值的精度、不可靠性都不一致, 在这种情况下, 常常取加权平均值来表示平均值。设有 n 个实验值: $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 则加权平均值为:

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

式中, $w_1, w_2, \cdots, w_i, \cdots, w_n$ 代表单个实验值对应的权。

权重的取法, 一般根据科研人员的经验, 如果某值精度较高, 就以较大的权数, 加重它在平均值中的分量。例如, 权重比是 2 : 1 或 1 : 0.5, 认为某一个数比另一个数可靠两倍。显然, 加权平均值的可靠性在很大程度上取决于科研人员的经验。另外, 实验数据的权重是相对值, 可以是整数, 也可以是分数或小数。权不是任意给定的, 除了依据实验者的经验外, 还可以参照下面的原则与方法选取:

(1) 当实验次数很多时, x_i 出现的频率可以作为权重, 即 $\frac{n_i}{n}$ 。

(2) 如果实验值是在同样情况下获得的, 但来源于不同的实验组, 这时加权平均值计算式中 x_i 代表各组的平均值, 而 w_i 代表每组实验次数。

(3) 根据权与绝对误差的平方成反比来确定权数。

3. 对数平均值

向传热过程中的温度分布和传质过程中的浓度分布, 实验数据的分布曲线具有对数特性, 则可以使用对数平均值。设有两个数值 x_1, x_2 都为正数, 则对数平均值为:

$$\bar{x}_L = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} = \frac{x_2 - x_1}{\ln \frac{x_2}{x_1}}$$

如果 $\frac{1}{2} \leq \frac{x_1}{x_2} \leq 2$ 时, 可用算术平均值代替对数平均值。这时, 两数的对数平均值总小于或等于它们的算术平均值。

4. 几何平均值

设有 n 个正实验值: $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则几何平均值为:

$$\bar{x}_G = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n}$$

上式取对数, 得:

$$\lg \bar{x}_G = \frac{\sum_{i=1}^n \lg x_i}{n}$$

当一组实验值取对数后, 所得数据的分布曲线较对称时, 采用几何平均值。一般几何平均值常小于它们的算术平均值。

5. 调和平均值

设有 n 个正实验值: $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则调和平均值为:

$$H = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \cdots + \frac{1}{x_n}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}$$

或

$$\frac{1}{H} = \frac{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \cdots + \frac{1}{x_n}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}{n}$$

调和平均值常用在涉及与一些量的倒数有关的场合。这是由于调和平均值是实验值倒数的算术平均值的倒数。一般调和平均值小于对应的几何平均值和算术平均值。

总之, 不同的平均值都有各自适用的场合, 究竟应该选择哪种方法表示平均值, 主要取决于实验数据本身的特点与性质, 如分布情况、可靠性程度等。

当实验数据较多时, 可以利用科学计数器上的统计功能或者一些计算机软件(如 Excel 等), 方便地求出结果。

三、误差

1. 绝对误差

绝对误差是实验值与真值之差, 就是通常所说的误差, 即

$$\text{绝对误差} = \text{实验值} - \text{真值}$$

绝对误差反映了实验值偏离真值的程度, 这个偏差可正可负。如果用 $x, x_i, \Delta x$ 分别表示实验值、真值和绝对误差, 则:

$$\Delta x = x - x_i$$

$$x_i - x = \pm |\Delta x| \text{ 或 } x_i = x \pm |\Delta x|$$

由此可以导出真值的范围: $x - |\Delta x| \leq x_i \leq x + |\Delta x|$

一般绝对误差无法准确计算,这是由于真值是未知的。尽管绝对误差的准确值不能求出,但是可以根据具体情况,估计出它的大小范围。

设 $|\Delta x|_{\max}$ 为最大的绝对误差,则有:

$$|\Delta x| = |x - x_t| \leq |\Delta x|_{\max}$$

这里的 $|\Delta x|_{\max}$ 是指实验值 x 的绝对误差上限或绝对误差上界。

$$x - |\Delta x|_{\max} \leq x_t \leq x + |\Delta x|_{\max}$$

所以真值也可以表示为: $x_t \approx x \pm |\Delta x|_{\max}$

如果对某物理量只进行一次测量,可依据测量仪器上注明的精度等级或仪器最小刻度作为单次测量误差的计算依据。一般可取最小刻度值作为最大绝对误差,而取其最小刻度的一半作为绝对误差的计数值。

例如,某压强表的精度为 1.0 级,则表明该绝对误差为最大量程的 1.0%,若最大量程为 0.4MPa,该压强表示绝对误差为: $0.4 \times 1.0\% = 0.004\text{MPa}$;又如,某天平的最小刻度为 1mg,该天平准确的最小称量质量是 1mg。可见,多次测量一真值,尽管不能得到准确值,但可以通过比较绝对误差限的大小,来判断它们的精度程度。

注意,绝对误差、绝对误差限都具有与实验值相同的单位。

2. 相对误差

通过上面的讨论,我们了解到绝对误差在一定条件下能反映实验值的准确程度。但见下面实例。两城市之间的距离为 20km,若测量的绝对误差为 2m,则测量的准确度是很高的;但是测定一个长度为 10m 的房间有 2m 的绝对误差,将是误差太大了。显然,绝对误差不全面。判断实验值的准确性,还必须考虑实验值本身的大小,因此引入一个新概念——相对误差。

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\%$$

即

$$E_R = \frac{\Delta x}{x_t} \times 100\% = \frac{x - x_t}{x_t}$$

或者

$$E_R = \frac{\Delta x}{x_t} \times 100\%$$

式中, E_R 表示相对误差。

从其定义式中可以推出, $|E_R|$ 小的实验值,其精度较高。

相对误差的定义式也反映了相对误差与绝对误差的关系。绝对误差和相对误差可以互相求得,其关系为:

$$\Delta x = E_R x_t$$

$$x_t = x \pm |\Delta x| = x \left(1 \pm \left| \frac{\Delta x}{x} \right| \right) \approx \left(1 \pm \left| \frac{\Delta x}{x_t} \right| \right) = x(1 \pm |E_R|)$$

由于真值和绝对误差都不能准确求出,所以相对误差也不可能准确求出。利用绝对误差相类似的办法,也可以估计出相对误差的大小范围,即

$$E_R = \left| \frac{\Delta x}{x_t} \right| \leq \left| \frac{\Delta x}{x_t} \right|_{\max}$$

式中, $\left| \frac{\Delta x}{x_t} \right|_{\max}$ 是实验值 x 的最大相对误差,或称为相对误差上限或相对误差上界。

由于真值 x_t 为未知数,绝对误差定义式中的真值常常用实验值或平均值来代替,即

$$E_R \approx \frac{\Delta x}{\bar{x}} \text{ 或 } E_R = \frac{\Delta x}{x}$$

相对误差和相对误差限都是无因次的。为了适应不同的精度,相对误差可以表示为百分数(%),也可以表示为千分数(‰)。

在实际的科学实验中,一般都无法知道绝对误差和相对误差,所以通常将最大绝对误差和最大相对误差分别作为绝对误差和相对误差,符号表示上也不加以区分。

3. 算数平均误差

实验值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之间的差值为 d_i , d_i 也称为偏差。算数平均误差定义为:

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n}$$

式中, n 是实验次数。

偏差 d_i 可能为正也可能为负,所以一定用绝对值表示。显然,算数平均误差可以反映一组实验数据的误差大小,但是无法表达出各实验值间的彼此符合程度。

4. 标准误差

标准误差也称为均方根误差、标准偏差,简称标准差。当实验次数 n 无穷大时,称为总体标准差,其定义为:

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

但在实际的科学研究中,实验次数一般为有限次,于是又有样本标准差,其定义为:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}{n-1}}$$

通过定义式,可以看出,标准差与一组实验数据中每一个数据有关,而且对其中较大或较小的实验数据误差敏感性很强,能明显地反映出较大的或较小的个别误差。它常用来表示实验值的精密度,标准差越小,则实验数据精密度越好。

四、误差的来源及分类

根据误差性质或产生的原因,可将误差分为随机误差、系统误差和过失误差。

1. 随机误差

在实验中,同样情况下的多次实验数据的绝对误差时正时负,绝对误差的绝对值时大时小,具有明显的不可预测性,这种误差称为随机误差。随机误差是指在一定实验条件下,以不可预知的规律变化着的误差。尽管随机误差具有不可测性,但随机误差的出现一般具有统计规律,大多服从正态分布,即绝对值小的误差比绝对值大的误差出现机会多,而且绝对值相等的正、负误差出现的次数近似相等,因此只要实验次数足够多,正负误差可以相互抵消,误差的平均值趋向于零。多次实验数据取其平均值,可以消除实验的随机误差,即可以通过增加实验次数减小随机误差。

随机误差是由实验过程中一系列偶然因素造成的,例如,温度微小变动、仪器的轻微振动、电压微小波动等。这些偶然因素是实验研究人员无法控制的,一般随机误差是不可避免。

2. 系统误差

在实验中,有些误差与上述的随机误差不同,表现为在一定实验条件下,某一确定的因素在影响实验结果,这种由于某一种特定的因素所引起的误差叫系统误差。系统误差的大小及其符号在同一实验中是恒定,或在实验条件改变时按照某一确定的规律变化。当这个确定的实验因素一旦确定,系统误差就是一个恒定值,它不能通过多次实验被发现,也不能通过取多次实验值的平均值而减小。

产生系统误差的原因是多方面的,可来自仪器(如温度计不准或刻度不均匀等);可来自操作不当,如某一个人的习惯操作带来的个人主观因素(如观察滴定终点时总是偏高或偏低);也可来自实验方法本身的不完善等。只有对系统误差产生的原因有了充分的认识,才能对它进行校正或设法消除。

3. 过失误差

过失误差是一种由于过失操作等带来的误差,如实验人员粗心大意,读数错误、记录错误或操作失误等造成的误差。显然这种误差没有一定的规律,必须通过加强实验者的工作责任心,才能避免产生过失误差。

五、精准度

误差的大小可以反映实验结果的好坏,但是不能反映引起误差的原因。在实验

中,引起误差的原因可能是随机误差,也可能是系统误差,还可能是两者的叠加。为了说明引起误差的原因,引出了精密度、正确度或准确度的概念。

1. 精密度

精密度主要是描述实验数据分散程度的。例如,甲、乙两人对同一个量进行测量,得到两组实验值:

甲:10.45,10.46,10.45,10.44 乙:10.39,10.45,10.48,10.50

很显然,甲组数据比较集中,而乙组数据较分散,故甲组数据的精密度较高。

所以精密度是指在一定的实验条件下,多次实验值的彼此符合程度或一致程度,反映了随机误差大小的程度。也就是说实验数据分散程度较小,则说明精密度高。但同时也要注意,实验数据的精密度是建立在数据用途基础之上的,对有的用途可能认为是很精密的数据,但对于另一用途可能显得不精密。

由于精密度表示了随机误差的大小,因此不考虑系统误差,那么可以通过增加实验次数而达到提高数据精密度的目的。反过来,如果实验过程消除了随机误差,则只需少量几次实验就能满足对实验数据的要求。

描述实验数据精密度高低的物理量有:

(1)极差:一组实验值中最大值与最小值的差值,叫极差。

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

极差反映随机误差的精度并不是很高,但计算方便,在快速检验中广泛应用。

(2)标准差:若随机误差服从正态分布,则可以用标准差来反映随机误差的大小。标准差 δ 或 s 分别由定义式计算。

标准差的数值大小反映了实验数据的分散程度, δ 或 s 越小,则数据的分散性越低,精密度越高,随机误差越小,实验数据的正态分布曲线也越尖。

(3)方差:方差即为标准差的平方,可用 δ^2 (总体方差)或 s^2 (样本方差)来表示。显然方差也反映了数据的分散性,即随机误差的大小。

2. 正确度

正确度是指大量测试结果的(算术)平均值与真值之间的一致程度,它反映了系统误差的大小,是指在一定的实验条件下,所有系统误差的综合表现。

对于某一组实验数据,精密度高并不意味着正确度也高;反之,精密度不好,但当实验次数相当多时,有时也会得到好的正确度。这主要是由于随机误差和系统误差是两种不同性质的误差,遵循的规律不同所致。

3. 准确度

在考虑系统误差和随机误差的综合影响时,实验数据的好坏用准确度表示,即准确度表示了实验数据与真值或标准值的一致程度。

在图 1.1 中,有三组根据实验数据绘制的分布曲线 A、B、C。假设 A、B、C 三组实验都服从正态分布,而且对应着同一个真值,无系统误差。

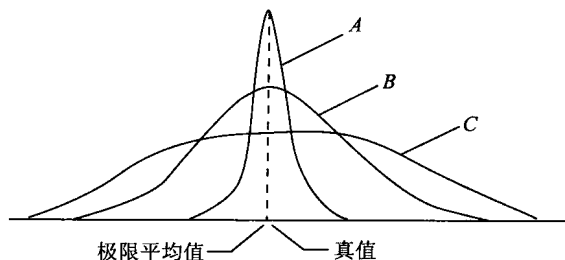


图 1.1 无系统误差的实验数据分布曲线

由 A、B、C 三条曲线可以看出 A、B、C 的精密度依次降低。由于无系统误差,三组数据的极限平均值(实验次数无穷多时的算术平均值)均接近真值,即它们的正确度相当。如果将精密度和正确度综合起来,则三组数据的准确度从高到低依次为 A、B、C。

假设 A'、B'、C' 三组实验都有系统误差,实验数据也服从正态分布,而且对应着同一个真值,相应的结果绘制在图 1.2 中。由图 1.2 可以看出 A'、B'、C' 的精密度依次降低,由于存在系统误差,三组数据的极限平均值均与真值不符,即准确度也不高。

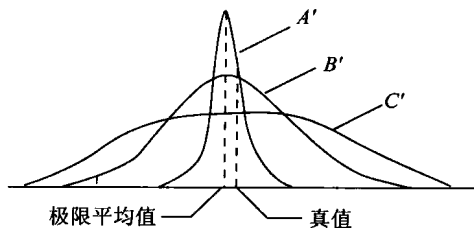


图 1.2 存在系统误差的实验数据分布曲线

只有精密度与正确度都好的实验数据才能正确反映实验数据的准确度。

六、有效数字和实验结果的表示

1. 有效数字

在化工原理实验中经常测定一系列实验数据,而实验数据的表现必须是有效的,即使用有效的数字表示观测值。有效数字就是能够代表一定物理量的数字。例如,用分析天平测得某样品的质量是 1.4687g,共有 5 个数字,其中 1.468g 是根据所加

砝码标值直接读得的,它们都是准确的,但是最后一位数字“7”是估计出来的,是可疑的或不准确的,这样 1.4687g 实际上有四位数字是有效的。

在实验中观测某一个实验数据时,怎样确定正确的有效数字的位数来反映实验观测结果呢?这是非常重要的问题。实际上,某一物理量观测值的有效数字可以反映实验的精度或实验仪表的精度,有效数字不能随便多写或少写。如果有效数字多写一位,则该数据不真实,因而也不可靠;如果有效数字少写一位,则损失了实验的精度,实质上是对测量该数据所用高精度仪表的耗费,也是一种时间浪费。那么怎样确定有效数字的位数呢?下面有几个规律要遵守:

(1)数据中小数点的位置不影响有效数字的位数。例如,40mm,0.040m, $4.0 \times 10^4 \mu\text{m}$,这三个数据的准确度是相同的,它们的有效数字位数都为2,所以常用科学记数法表示较大或较小的数据,而不影响有效数字的位数。

(2)数字0是否是有效数字,取决于它在数据中的位置。一般第一个非0数前的数字都不是有效数字,而第一个非0数后的数字都是有效数字,例如,39mm和39.00mm并不等价,前者有效数字是两位,后者有效数字是四位,它们是用不同精度的仪器测得的。所以在实验数据的记录过程中,特别注意0的位置与表示,不能随便省略末尾的0。但需要指出的是,有些人为了指定的标准值,末尾的0可以根据需要增减,例如,碳原子的原子量为12,它的有效数字可以视计算需要设定。

(3)在计算有效数字位数时,如果第一位数字等于或大于8,则可以多计一位。

例如9.99实际只有三位有效数字,但在实际应用时,可认为有四位有效数字。

2. 有效数字的运算

在实验数据处理中,实验最后结果常常是多个实验数据按照一定的运算规律进行计算而得到的,其有效数字位数的确定可以通过有效数字运算来确定。

(1)加、减运算:在加、减运算中,加、减结果的位数应与其中小数点后位数最少的相同。例如:

$$10.96 + 10.2 + 0.003 = 21.2$$

(2)乘除运算:在乘、除运算中,积和商的有效数字位数,应以各乘、除数中有效数字位数最少的为准。例如:

$$12.6 \times 9.81 \times 0.050 = 6.2$$

(3)乘方、开方运算:乘方、开方后结果的有效数字位数应与其底数相同。例如:

$$2.4^2 = 5.8, \quad \sqrt{6.8} = 2.6$$

(4)对数运算:对数的有效数字位数与其真数相同。例如:

$$\ln 6.84 = 1.92, \quad \lg 0.00004 = -4$$

(5)4以上数的平均值计算中,平均值的有效数字可增加一位。

(6)所有取自手册上的数据,其有效数字按实际需要取,但原始数据如有限制,则