

张可方 主编

SHUICHULI SHIYAN JISHU

水处理实验技术

(第二版)



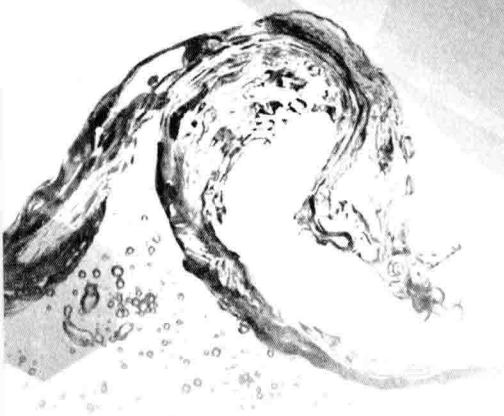
暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

张可方 主编
张朝升 曹勇锋 周莉萍 伍小军 参编

SHUICHULI SHIYAN JISHU

水处理实验技术

(第二版)



暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS
中国·广州

图书在版编目 (CIP) 数据

水处理实验技术/张可方主编. —2 版. —广州: 暨南大学出版社, 2009. 9
ISBN 978-7-81079-263-9

I. 水… II. 张… III. 水处理—实验—高等学校—教材 IV. TU991.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 169146 号

内容提要

本书内容包括给水排水工程和环境工程专业的专业课实验“水处理实验”, 专业基础课实验“水处理微生物学实验”、“水力学实验”和“水泵实验”, 以及实验数据的分析与处理、水样的采集与保存及与教学实验密切相关的一些水质分析方法、水质标准和仪器使用说明。其中, 水处理实验分为给水处理实验和污水处理实验, 共有 21 个; 水处理微生物学实验有 13 个; 水力学实验有 14 个; 水泵实验有 1 个。

这些实验内容既有代表传统水处理工艺的, 又有体现近年来国内先进的处理方法和手段的, 尤其是计算机自动控制技术在水处理中的应用, 对学生学习和掌握新技术是非常有益的。

本书可作为高等学校给水排水工程专业、环境工程专业本科生的教材, 也可作为研究生实验教学参考教材, 同时可作为从事给水排水工程专业及环境工程专业科研及工程技术人员的参考书。

出版发行: 暨南大学出版社

地 址: 中国广州暨南大学

电 话: 总编室 (8620) 85221601

营销部 (8620) 85225284 85228291 85220693 (邮购)

传 真: (8620) 85221583 (办公室) 85223774 (营销部)

邮 编: 510630

网 址: <http://www.jnupress.com> <http://press.jnu.edu.cn>

排 版: 暨南大学出版社照排中心

印 刷: 肇庆市端州报社印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 12.75

字 数: 333 千

版 次: 2003 年 8 月第 1 版 2009 年 9 月第 2 版

印 次: 2009 年 9 月第 2 次

印 数: 3001—5000 册

定 价: 24.80 元

(暨大版图书如有印装质量问题, 请与出版社总编室联系调换)

第二版前言

给水排水工程专业和环境工程专业水处理技术理论是在实验基础上建立起来的,许多水处理的方法、处理设备的设计参数和操作运行方式的确定,都需要通过实验解决。水处理实验技术是给水排水工程专业、环境工程专业的主干课之一,是给水排水工程专业和环境工程专业水处理教学的主要内容之一,也是给水排水工程、环境工程高级技术人员所必修的课程。《水处理实验技术》是根据全国高校给水排水工程学科专业指导委员会制定的教学实验基本要求编写的。

本书根据第一版的使用情况进行了修订。所确定的实验内容主要是面向给水排水工程和环境工程专业学生的实验教学,也可供研究生及科研工作人员参考。本教材中的实验内容既有代表传统水处理工艺的,又有体现近几年来国内外发展的新技术、新工艺的;实验项目有验证性实验、综合性实验、演示性实验,也为设计性实验提供了一些参考。

通过本课程的学习,可以加深学生对水处理技术基本原理的理解,培养学生设计和组织水处理实验方案的能力、进行水处理实验的技能及使用实验仪器和设备的能力、分析实验数据与处理实验数据的能力。

通过对综合性、设计性实验的探索,使学生在学习过程中掌握一门综合技术,培养学生的创新精神和基本的科研素质。

为了使内容更系统和完整,使用更方便,本书还包括水处理微生物学实验、水力学实验、水泵实验及与教学实验密切相关的一些水质分析方法、水质标准和仪器使用说明。本书既是一本专业教科书,又是一本较为实用的专业技术工具书。

本书共分七章。其中第一章由曹勇锋编写,第三章、第七章由张可方、曹勇锋编写,第二章、第五章由张朝升编写,第四章由周莉萍编写,第六章由伍小军编写。全书由张朝升主审。

由于编者水平有限,书中错误在所难免,欢迎读者给予批评指正。

编 者

2009 年 8 月

目 录

第二版前言	(1)
第一章 实验数据的分析与处理	(1)
一、数据的误差分析	(1)
二、实验结果误差分析	(3)
三、有效数字及其运算	(5)
四、异常数据的取舍	(6)
五、实验数据的表示与分析	(9)
第二章 给水处理实验	(11)
实验一 混凝沉淀实验	(11)
实验二 过滤及反冲洗实验	(17)
实验三 水力循环澄清池实验	(21)
实验四 树脂类型鉴别实验	(23)
实验五 强酸性阳树脂总交换容量的测定实验	(25)
实验六 强酸性阳树脂工作交换容量的测定实验	(27)
实验七 水处理模型动态演示实验	(30)
脉冲澄清实验	(30)
重力式无阀滤池实验	(32)
沉淀实验 (双向流斜板沉淀池实验)	(33)
虹吸滤池模型实验	(35)
V型滤池模型演示实验	(36)
实验八 纯水制备实验	(37)
第三章 污水处理实验	(42)
实验一 颗粒自由沉淀实验	(42)
实验二 曝气充氧实验	(47)
实验三 完全混合式活性污泥法处理系统的观测和控制运行实验	(52)
实验四 污泥沉降比和污泥指数的测定实验	(57)
实验五 SBR法计算机自动控制系统实验	(59)
实验六 曝气池中环境因素的监测和菌胶团中生物相的观察实验	(62)
实验七 生物转盘实验	(64)
实验八 塔式生物滤池实验	(67)

2 水处理实验技术

实验九 厌氧消化实验	(68)
实验十 活性炭静态吸附实验	(70)
实验十一 连续流活性炭吸附实验	(75)
实验十二 加压溶气气浮实验	(76)
实验十三 膜生物反应器实验	(78)
第四章 水处理微生物学实验	(81)
实验一 显微镜的使用实验	(81)
实验二 水中微型动物的观察和计数实验	(84)
实验三 细菌、霉菌、酵母菌、放线菌形态的观察实验	(87)
实验四 微生物的染色实验	(87)
实验五 培养基的制备及灭菌实验	(90)
实验六 微生物纯种分离、培养及接种技术实验	(93)
实验七 纯培养菌种的菌体、菌落形态观察实验	(97)
实验八 微生物的生理生化特征实验	(98)
实验九 大肠杆菌生长曲线的测定实验	(108)
实验十 活性污泥微生物呼吸活性(耗氧速率)的测定实验	(110)
实验十一 发光细菌毒性测试实验	(112)
实验十二 藻类生长及其抑制实验	(114)
实验十三 大肠杆菌的荧光质粒转化及其表达与稳定性的研究实验	(118)
第五章 水泵实验	(126)
离心泵特性曲线的测定实验	(126)
第六章 水力学实验	(130)
实验一 静水压强实验	(130)
实验二 伯努里方程实验	(133)
实验三 动量定律实验	(137)
实验四 毕托管测速实验	(140)
实验五 雷诺实验	(142)
实验六 文丘里流量计实验	(145)
实验七 沿程阻力系数实验	(148)
实验八 局部阻力系数实验	(152)
实验九 孔口与管嘴出流实验	(155)
实验十 流动演示实验	(158)
实验十一 流线演示实验	(160)
实验十二 雷诺演示实验	(161)
实验十三 空化机理演示实验	(162)
实验十四 水击演示实验	(162)

第七章 水样的采集与保存	(164)
一、水样的采集	(164)
二、采样的形式	(165)
三、水样的保存	(166)
附 录	(169)
第一部分 几种常用实验仪器的使用说明	(169)
附录 1 UNICO WFJ2000 型可见分光光度计使用说明	(169)
附录 2 2100P 浊度仪操作简要说明	(171)
附录 3 FA 系列电子天平使用说明	(172)
附录 4 XJ-I 型 COD 消解装置使用说明	(173)
附录 5 ZR4-6 型混凝试验搅拌器使用说明	(177)
第二部分 几种常用的国家及行业标准	(179)
附录 6 地面水环境质量标准 (GB 3838—2002)	(179)
附录 7 地下水质量分类标准 (GB/T 14848—93)	(182)
附录 8 第一类污染物最高允许排放浓度 (GB 8978—1996)	(184)
附录 9 第二类污染物最高允许排放浓度 (一) (GB 8978—1996)	(184)
附录 10 第二类污染物最高允许排放浓度 (二) (GB 8978—1996)	(186)
附录 11 部分行业最高允许排放水量 (一) (GB 8978—1996)	(189)
附录 12 部分行业最高允许排放水量 (二) (GB 8978—1996)	(190)
附录 13 我国生活饮用水水质标准 (GB 5749—2006)	(193)
附录 14 城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB 18918—2002)	(194)
附录 15 溶解氧与水温的关系	(195)
参考文献	(196)

第一章 实验数据的分析与处理

一、数据的误差分析

实验研究需要一系列的测定并取得大量的数据。这些数据受到实验环境、实验水平、实验设备、实验方法等多种因素的影响,测定结果与真值总有差异。这就要求实验人员一方面通过分析研究,从实验数据中获得各种因素和指标间的内在联系和规律,进行误差分析、去伪存真,确定测定结果的可靠程度,对取得的数据给予合理的解释,采用必要的方式完善、充实数据;另一方面,应将所得数据进行整理和归纳,用一定的方式表示出各种数据之间的相互关系。误差分析和数据处理的目的:按实验目的合理地选择实验装置和仪器、实验条件和方法,以便在一定条件下尽可能得到接近真值的最佳结果;合理确定实验结果误差,避免因误差选取不当造成对实验结果的错误判断,以及人力、物力的浪费,通过正确的整理、归纳(如绘成实验曲线或得出经验公式),得出正确的实验结论,并为验证理论分析提供条件。

1. 有关误差的几个基本概念

实验数据的误差分析是以实验数据的误差及其在运行中产生的影响为对象,评定实验的准确度。实验测定的准确度取决于总的研究方案和具体的研究条件,包括仪器及测试方法的先进性和实验方法的科学性,操作人员的经验及熟练程度等,通过对误差来源的研究,可以事先分析可能导致实验误差的最主要因素,以便指导实验的开展。物理量是在一定条件下客观存在的一定数值,这个客观存在的数值是物理量的真值,在通常情况下无法测得真值,所以实验时常采用平均值代替真值。通过对同一考察项目进行无限多次的测定,然后根据误差分布定律中正负误差出现的概率相等的概念,可求得各测试值的平均值。在无系统误差的情况下,此值为接近于真值的数据,由于测定的次数总是有限的,在有限测试次数中求得的平均值,只能是真值的近似值。

常用的平均值有下列几种:算术平均值、均方根平均值、加权平均值、中位值(或中位数)、几何平均值。

计算平均值方法的选择,主要取决于一组观测值的分布类型。

(1) 算术平均值。算术平均值是最常用的一种平均值,设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各次的观测值, n 代表观测次数,则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1)$$

(2) 均方根平均值。均方根平均值应用较少,其表达式为

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1.2)$$

式中符号意义同式(1.1)。

2 水处理实验技术

(3) 加权平均值。若对同一事物用不同方法来测定，或者由不同的人来测定，计算平均值时，常用加权平均值。其计算公式为

$$\bar{x} = \frac{w_1x_1 + w_2x_2 + \cdots + w_nx_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{1.3}$$

式中， $w_1, w_2, \cdots, w_n$ 代表与各观测值相应的权，其他符号意义同式 (1.1)。各观测值的权数 w ，可以是观测值的重复次数、观测者在总数中所占的比例或者根据经验确定。

【例 1-1】某印染厂各类废水的 BOD₅ 测定结果见下表，试计算该厂污水平均浓度。

污水类型	BOD ₅ (mg/L)	污水流量 (m ³ /d)	污水类型	BOD ₅ (mg/L)	污水流量 (m ³ /d)
退浆污水	4 000	15	印染污水	400	1 500
煮布污水	10 000	8	漂白污水	70	900

解
$$\bar{x} = \frac{4\,000 \times 15 + 10\,000 \times 8 + 400 \times 1\,500 + 70 \times 900}{15 + 8 + 1\,500 + 900} = 331.4 \text{ (mg/L)}$$

(4) 中位值。中位值是指一组观测值按大小次序排列的中间值。若观测次数是偶数，则中位值为正中两个值的平均值。中位值的最大优点是求法简单。只有当观测值的分布呈现正态分布时，中位值才代表一组观测值的中心趋向，近似于真值。

(5) 几何平均值。几何平均值是一组 n 个观测值连乘，并开 n 次方所求得的值，计算公式为

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \cdots \cdot x_n} \tag{1.4}$$

也可用对数表示

$$\lg \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \tag{1.5}$$

【例 1-2】某工厂测得污水的 BOD₅ 数据分别为 100 mg/L、110 mg/L、130 mg/L、120 mg/L、115 mg/L、190 mg/L、170 mg/L，求其平均浓度。

解 该厂所测数据大部分在 100 ~ 130 mg/L，少数数据的数值较大，此时采用几何平均值，可以较好地代表这组数据的中心趋向。其平均浓度为

$$\bar{x} = \sqrt[7]{100 \times 110 \times 130 \times 120 \times 115 \times 190 \times 170} = 130.3 \text{ (mg/L)}$$

2. 误差及其类型

(1) 几种误差的概念。对某一指标进行测试后，其观测值与真值之间的差值称为绝对误差，即

$$\text{绝对误差} = \text{观测值} - \text{真值}$$

用绝对误差反映观测值偏离真值的多少，其单位与观测值相同。由于真值不易测得，实际应用中常用观测值与平均值之差表示绝对误差。严格地说，观测值与平均值之差应称为偏差，而在工程实践中多称此偏差为误差。

在分析工作中，常把标准试样中的某成分的含量作为该组分的真值，以此为标准估计误差的大小。

绝对误差很难说明测定的准确程度，在不同情况下，相等的绝对误差会有不同的准确度，如称量两物体的质量。绝对误差都是 1 g，相对质量小的准确度低，所以判断测定的准确度常用相对误差的概念。

绝对误差与平均值的比值称为相对误差，即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{平均值}}$$

相对误差用于不同观测结果的可靠性的比较，常用百分数表示。

(2) 误差的分类。误差可分为以下三种。

①系统误差。系统误差（恒定误差）是指在测定中由未发现或未确认的因素所引起的误差。这些因素使测定结果永远朝某一个方向发生偏差，其大小及符号在同一实验室中完全相同。系统误差不能用多次测量求平均值的方法来消除。产生系统误差的原因有：仪器不良，如刻度不准、砝码未校正等；环境的改变，如外界温度、压力和湿度的变化等；个人的习惯及偏向，如读数偏高或偏低等。这类误差可以根据仪器性能、环境条件或个人偏差等加以校正，使之降低。

②随机误差。这种误差无法控制，但它服从统计规律。单次测定时，观测值总是有些变化且变化不定，其误差时大时小、时正时负，多次测定后，其平均值趋于零，具有这种性质的误差称为随机误差。实验数据的精确度主要取决于随机误差。随机误差是由研究方案及研究条件总体所固有的一切因素引起的。这些因素包括实验者的熟练程度、观测感观的缺陷、外界条件的变化、测量仪器的完好程度等。

③过失误差。过失误差是由于操作人员不仔细、操作不正确等因素造成的，其数据与事实明显不符。这种误差是可以避免的。

3. 准确度和精密度

(1) 准确度。准确度指测定值与真值偏差的程度，它反映系统误差的大小，一般用相对误差表示，相对误差越小，说明测定值越接近真实值，准确度越高。

(2) 精密度。精密度（又称精确度）指在控制条件下用一个均匀试样反复测量，所得数值之间重复的程度。它表示的是测定值与算术平均值的偏差程度。它反映随机误差的大小，随机误差越小，数据的精确度越高。因此，评定观测数据的好坏，首先要考查精密度，然后再考察准确度。一般情况下，无系统误差时，精密度越高，观测结果越准确。但若存在系统误差，则即使精密度高，准确度也不一定高。假如消除了系统误差，可能使测定值既精确又准确。实验分析时，常在试样中加入已知量的标准物质以考核测试方法的准确度和精密度。

二、实验结果误差分析

1. 直接测量值的误差分析

直接从仪器、仪表和设备读取的数值叫直接测量值，把直接测量值代入公式，经过计算得到的测量数值，则称为间接测量值。

(1) 单项测量值的误差分析。影响水质的因素很多，在净化实验中测试量较大，许多实验过程受条件限制，难以做到精确的重复，对某些物理量的测量值往往只有一次，这些测量值的误差应根据具体情况进行修正，对于随机误差较小的测量值，可按仪器上注明的误差范

4 水处理实验技术

围分析计算；当无法计算时，可按仪器上最小刻度的 1/2 作为单项测量的最大绝对误差。如仪器的最小刻度为 0.1，则其最大绝对误差为 0.05。若某测量数值为 3.24，则其相对误差为 $0.05/3.24 = 0.0154$ 。

(2) 多次重复测量值的误差分析。为了获得准确可靠的测量值，只要条件许可，应尽可能对某一测量值进行多次重复测量，用这些测量值的算术平均值近似地代替测量值的真值，各测量值与算术平均值的差叫做偏差。该误差值的大小用算术平均误差表示。

设某实验的各测量值为 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)，其算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.6)$$

各测量值的偏差为

$$dx_i = x_i - \bar{x} \quad (1.7)$$

算术平均误差 Δx 为

$$\Delta x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |dx_i| \quad (1.8)$$

其测量值的真值可表示为

$$a = \bar{x} \pm \Delta x \quad (1.9)$$

另外，在工程上多用均方根偏差 σ 表示误差的大小。其计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (dx_i)^2} \quad (1.10)$$

均方根偏差又称为标准偏差，在有限次的测量中，工程上常用下式来计算标准偏差

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.11)$$

工程中的均方根偏差也称均方根误差，简称均方差，其真值可表示为

$$a = \bar{x} \pm \sigma \quad (1.12)$$

【例 1-3】原水浊度经 10 次测量，分光光度计读数分别为 0.482、0.480、0.481、0.479、0.480、0.478、0.479、0.481、0.480、0.481，求算术平均值 $\bar{x}$ 、均方差 σ 及测量值的真值 a 。

解 算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} (0.482 + 0.480 + 0.481 + 0.479 + 0.480 + 0.478 + 0.479 + 0.481 + 0.480 + 0.481) = 0.4803$$

均方差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.00179$$

则真值为

$$a = \bar{x} \pm \sigma = 0.4803 \pm 0.00179$$

所以测量值的真值在 0.4785 和 0.4821 之间。

2. 间接测量值的误差分析

间接测量值是将直接测量值代入公式计算出来的。直接测量值存在误差，间接测量值也

必然存在误差。间接测量值误差的大小不仅取决于直接测量误差,还取决于公式的形式,即直接测量值与间接测量值之间的函数关系。

(1) 间接测量值算术平均误差计算。按算术平均误差计算的间接测量值的误差,是在考虑各项误差同时出现最不利的情况时,将各绝对误差相加而得到的。

当直接测量值和间接测量值之间的函数关系只含加减运算时,设 $y = A + B$ 或 $y = A - B$, 则计算公式为

$$\Delta y = \Delta A + \Delta B \quad (1.13)$$

即只含和、差运算的间接测量值的绝对误差等于各项直接测量值绝对误差之和。

当直接测量值和间接测量值之间的函数关系含乘、除、乘方、开方时,其间接测量值的误差为

设 $y = A \cdot B$ 或 $y = \frac{A}{B}$, 则有

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \quad (1.14)$$

即乘除运算的相对误差等于各直接测量值相对误差之和。

综上所述,当间接测量值计算公式只含加减运算时,应先计算绝对误差,后计算相对误差;当间接测量值计算公式含乘、除、乘方、开方时,应先计算相对误差,后计算绝对误差。

(2) 间接测量值标准误差计算。在工程上,各项误差同时出现的可能性很小,采取各项绝对误差相加,是对间接误差的夸大,因此,实际中多采用标准误差、均方差来计算间接测量的误差。

如果间接测量值是一个直接测量值 x 的函数, x 的均方差为 σ_x , 则间接测量值 y 的绝对误差 σ_y 为

$$\sigma_y = \pm f'(x) \sigma_x \quad (1.15)$$

如果间接测量值 y 是 n 个直接测量值 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的函数,则间接测量值 y 的绝对误差 σ_y 为

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad (1.16)$$

式中, σ_i 为第 i 个直接测量值 x_i 的标准误差(均方差)。

上述两种情况的相对误差可用 $E = \frac{\sigma_y}{y}$ 表示。

实际实验中,并非对所有测量值都要进行多次测量,这些计算得到的间接测量值误差,相对各直接测量值的误差均比标准误差算得的误差要大。

三、有效数字及其运算

1. 有效数字

每一个实验都要记录大量的实验数据,还要利用原始数据进行各种必要的运算。为得到准确的实验结果,不仅需要进行准确的测量,还需要进行正确的记录和运算,这就要求正确地处理测量值和计算值的有效数字。

有效数字是指准确测量的数字加上最后一位估读数字(又称可疑数字)所得的数字。

6 水处理实验技术

实验报告中的每一位数字，除最后一位数可能有疑问外，其余各位数字都要求是准确的。可疑数若是两位或以上，则其他一位或几位就应去除。在去除没有意义的位数时，采用四舍五入法。但“五入”时要把前一位数凑成偶数，如果前一位数已是偶数，则“5”应舍去。

实验中观测值的有效数字与仪器仪表的刻度有关，一般根据实际可能估计到最小刻度的 $1/10$ 、 $1/5$ 或 $1/2$ 。例如滴定管的最小刻度是 $1/10$ （即 0.1 mL ），百分位上是估计值，故在读数时，可读至百分位，即其有效数字是到百分位为止。

2. 有效数字运算

在整理数据时，常要运算一些精密度不相同的数值，此时要按一定的规则计算，常用的运算规则如下：

（1）第一位准确数字前的“0”不能作为有效数字，最后一位准确数字后的“0”是可疑数字，有效数字后有无“0”，表示有效数字位数不同。如数字4.23和4.230，前者有效数字是3位，“3”是可疑数字；后者有效数字是4位，“0”是可疑数字。又如0.0038和0.00380，前者是2位有效数字，“8”是可疑数字；后者是3位有效数字，“0”是可疑数字。

（2）记录观测值时，只保留1位可疑数，其余数一律弃去。

（3）在加减运算中，运算后得到的数所保留的小数点后的位数，应与所给各数中小数点后位数最少的相同，多余的位数应四舍五入，如3.83、0.1081、45.8435、0.004四个数字相加，其结果等于49.79。

（4）计算有效数字位数时，若首位有效数字是8或9，则有效数字要多计1位，例如9.35，虽然实际上只有3位，但在计算有效数字时可以以4位计算。

（5）在乘除运算中，运算后所得的商或积的有效数字与参加运算各有效数中位数最少的相同。

（6）计算平均值时，若计算四个数或超过四个数的平均值，其平均值的有效数字位数可增加一位。

（7）乘方或开方结果的有效数字与其底的有效数字相同。对数计算中，首位数不是有效数字，如 $\lg 300 = 2.4771$ 中，有效数字有4位，“2”不是有效数字。

在实验中的一些公式的系数和参数不是用实验测得的，在计算中不应考虑其位数。

四、异常数据的取舍

在一组实验数据中，常会出现个别数据与其他数据偏差大的情况，如果保留这样的数据可能会降低实验的准确度；如果舍去，可能得到精密度较高的结果，但理由不明确。因此，在整理数据时，必须有一个标准来决定异常数据的取舍。

异常数据的取舍，实际上是区别异常数据究竟是由偶然误差还是由系统误差造成的问题。如果是人为因素的偶然误差就应当舍去，如无足够理由证实是偶然过失造成的，应用下述的办法决定取舍。

对一组观测值中离群数据的检验方法有格拉布斯（Grubbs）判断法、狄克逊（Dixon）检验法、肖维涅（Chauvenet）准则等。下面介绍其中的两种方法。

1. 格拉布斯判断法

若实验测定值按大小排列为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，被怀疑最大值（ x_1 ）或最小值（ x_n ）是异常数据，可采用下列步骤进行判断：

(1) 选定信度 γ , γ 值是否定假设的概率, 亦即判断错误的概率, 一般取 5%、2.5%、1%。

(2) 计算观测值的算术平均值 $\bar{x}$ 和标准误差 σ 。

(3) 计算 T 值, 如果最大值 x_1 是可疑的, 则 $T = \frac{x_1 - \bar{x}}{\sigma}$; 如果最小值是可疑的, 则 $T = \frac{\bar{x} - x_n}{\sigma}$ 。

(4) 查 $T(n, \gamma)$ 值, 如表 1-1 所示, 如果 $T \geq T(n, \gamma)$, 所怀疑数据在信度为 γ 时是异常的, 应舍去, 如果 $T < T(n, \gamma)$, 则所怀疑数据在信度为 γ 时是正常的, 不能舍去。

(5) 舍去异常数据后, 对剩下的数据重复上述过程。

表 1-1 $T(n, \gamma)$ 值表

n	γ			n	γ			n	γ		
	5%	2.5%	1%		5%	2.5%	1%		5%	2.5%	1%
3	1.15	1.15	1.15	12	2.29	2.41	2.55	21	2.58	2.73	2.91
4	1.46	1.48	1.49	13	2.33	2.46	2.61	22	2.60	2.76	2.94
5	1.67	1.71	1.75	14	2.37	2.51	2.66	23	2.62	2.78	2.96
6	1.82	1.89	1.94	15	2.41	2.55	2.71	24	2.64	2.80	2.99
7	1.94	2.02	2.10	16	2.44	2.59	2.75	25	2.66	2.82	3.01
8	2.03	2.13	2.22	17	2.47	2.62	2.79	30	2.75	2.91	—
9	2.11	2.21	2.32	18	2.50	2.65	2.82	35	2.82	2.98	—
10	2.18	2.29	2.41	19	2.53	2.68	2.85	40	2.87	2.04	—
11	2.23	2.36	2.48	20	2.56	2.71	2.88				

由表 1-1 可以看出, 当实验次数 n 一定时, γ 值越小, $T(n, \gamma)$ 值越大。如果信度 γ 值取的过小, 使不是异常数据的值错判为异常数据的概率减小了, 但同时也意味着使异常数据判为非异常数据的概率增大了, 从而犯错误的概率也增大了。所以信度 γ 值不宜取的过小。

【例 1-4】有 16 个实测值按大小排列为 9.52、9.14、8.99、8.9、8.71、8.69、8.61、8.57、8.51、8.46、8.38、8.29、8.27、8.21、8.07、7.09。试用格拉布斯判断法分析其中有无异常数据。

解 首先怀疑最大值 9.52 和最小值 7.09 是异常数据。

(1) 选定信度 $\gamma = 5\%$ 。

(2) 计算 $\bar{x}$ 、 σ 及 T 值。

$$\bar{x} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_i = 8.53$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (x_i - \bar{x})^2} = 0.536$$

$$T_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{\sigma} = \frac{9.52 - 8.53}{0.536} = 1.85$$

$$T_2 = \frac{\bar{x} - x_{16}}{\sigma} = \frac{8.53 - 7.09}{0.536} = 2.69$$

(3) 判断。由计算值首先怀疑 $x_{16}=7.09$ 是异常数据，查表 1-1，当 $n=16$ ， $\gamma=5\%$ 时， $T(16, 5\%) = 2.44$ ，因为 $T=2.69 > 2.44$ ，所以，7.09 为异常数据，应舍去。

(4) 舍去 7.09 后，还剩下 15 个测定值，再按 $n=15$ 计算 T 值。

$$\bar{x} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} x_i = 8.62$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{14} \sum_{i=1}^{15} (x_i - \bar{x})^2} = 0.388$$

$$T = \frac{x_1 - \bar{x}}{\sigma} = \frac{9.52 - 8.62}{0.388} = 2.32$$

查表 1-1，当 $n=15$ ， $\gamma=5\%$ 时， $T(15, 5\%) = 2.41$ ，因为 $T=2.31 < 2.41$ ，所以，9.52 不是异常数据，应保留。

2. 肖维涅准则

它是根据肖维涅数据取舍标准表来决定可疑值的取舍。其方法如下：

- (1) 求出实测数据的算术平均值 $\bar{x}$ 和标准误差 σ 。
- (2) 由表 1-2 查出测定次数为 n 时对应的极限误差值 k 。

表 1-2 n 与 k 值对应表

n	k	n	k	n	k
4	1.53	11	1.99	19	2.25
5	1.65	12	2.04	20	2.28
6	1.73	13	2.06	25	2.32
7	1.80	14	2.11	30	2.39
8	1.87	15	2.12	40	2.50
9	1.91	16	2.16	50	2.57
10	1.97	18	2.21		

(3) 计算出可疑数据的 $\frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma}$ ，将 $\frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma}$ 与 k 比较，当 $k > \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma}$ 时，保留；反之，则舍去。

(4) 舍去异常数据，对剩下的数据重新分析。

【例 1-5】已知条件同【例 1-4】，用肖维涅准则决定异常数据 7.09 的取舍。

解 (1) 计算 $\bar{x}$ 和 σ 值。

$$\bar{x} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_i = 8.53$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (x_i - \bar{x})^2} = 0.536$$

(2) 判断。

$$\left| \frac{\bar{x} - 7.09}{\sigma} \right| = \frac{1.44}{0.536} = 2.69$$

查表 1-2, 当 $n=16$ 时, $k=2.16 < 2.69$, 所以数据 7.09 应舍去。

五、实验数据的表示与分析

处理实验数据的目的是充分利用实验所得的信息, 利用数据统计知识, 分析各个因素对实验结果的影响即影响的主次, 寻找各变量间相互影响的规律。

整理实验数据最常用的方法是制表法和图形法, 也就是将实验所得结果制成各种表格, 或将数据绘在坐标图上, 以直观地表示实验结果各因素之间的关系。

1. 列表表示法

将实验记录表中的原始记录数据, 经过分析、整理、归纳和计算, 表示成各变量之间关系的表格, 即为列表表示法。

实验记录表应根据实验时考虑因素的多少, 制成不同类型的空格表, 并注明时间、记录人、变量的单位, 固定因素的量 (如温度、pH 值、时间、浓度等), 环境条件等, 并装订成册, 供实验时用。制定各种表格时应注意以下几点:

(1) 标题应简单、清楚。

(2) 单位写在表格名称栏内, 若数字过大或过小, 应将数字写成 $N \times 10^n$ 形式, 并写于表头或名称栏内。

(3) 表内记录数据应注意有效数字相同。

(4) 表中数字要清晰、准确, 不能随意涂改。

实验所测量的数据一般都是离散的、不连续的, 有时需要的数据可能在其中查不到, 这时需用内插或外延的方法求得所需数据, 常用的内插或外延法有线性插值法和拉格朗日多项式插值法, 需要时可参考有关资料。

2. 作图表示法

在作出各变量之间的关系表格后, 为了使实验结果更直观、更清楚, 还需要作出各变量之间的依从关系曲线图。由实验数据作曲线图必须遵守一些原则, 才能得到与实验点位置的偏差最小, 而且光滑贴切的曲线。在用作图法表示实验结果时应注意以下几点:

(1) 坐标轴要准确、完整, 能清楚地表示变量间的变化规律。设计坐标时要做到:

①图形标题应尽可能完全, 并说明实验条件;

②坐标轴上注明标度尺寸的单位, 标尺上注明的数据应与测量值精确度对应。

(2) 作图方法。

①选择合适的坐标, 坐标有直角坐标、对数坐标等, 根据所研究的变量间的关系及要表达的图线形式进行选择。

②一般横轴为自变量, 纵轴为因变量。

③坐标分度划分得当, 与测量的有效数字对应。

④为使绘图线在坐标图居中位置, 纵横轴两个变量的变化范围在长度上应相差不大。

⑤将自变量与因变量一一对应的数据点在坐标图内, 不同关系的图线应有不同的符号,

并注明符号定义。

⑥根据实验点的分布,连成直线或光滑曲线,连线一定要使实验点均匀分布于图线的两侧。

3. 实验数据的回归分析

列表法具有简单易做、使用方便的优点,但对客观规律表示不明确,不便于理论分析;作图法具有简明直观、便于比较、变化规律明显等优点,但也不便进行理论分析和计算。为了理论分析和计算的方便,经常对变量之间的关系进行数学回归分析,用数学表达式反映变量之间的关系。

(1)一元线性回归。一元线性回归处理的是两个变量之间的关系,若变量 x 与 y 之间线性相关,就可以通过一组观测数据 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, n$),用最小二乘法算出参数 a 和 b ,建立回归直线方程为

$$y = a + bx \quad (1.17)$$

(2)二元线性回归。如果影响因素不止一个,这类问题的回归就是多元线性回归,多元线性回归的原理与一元线性回归分析相同,只是计算比较复杂。在多元线性回归中,常用的二元线性回归表达式为

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (1.18)$$

式中, y ——因变量;

x_1 、 x_2 ——自变量;

b_1 、 b_2 ——回归系数;

a ——常数。

实验数据的分析处理是从大量实验数据中,用数学的方法求得其中的规律,所以一个实验完成后,都要经过实验误差分析,数据整理、处理与分析等过程,特别是实验数据的分析处理常会用到一些数学原理与方法,需要时注意参考其他文献。