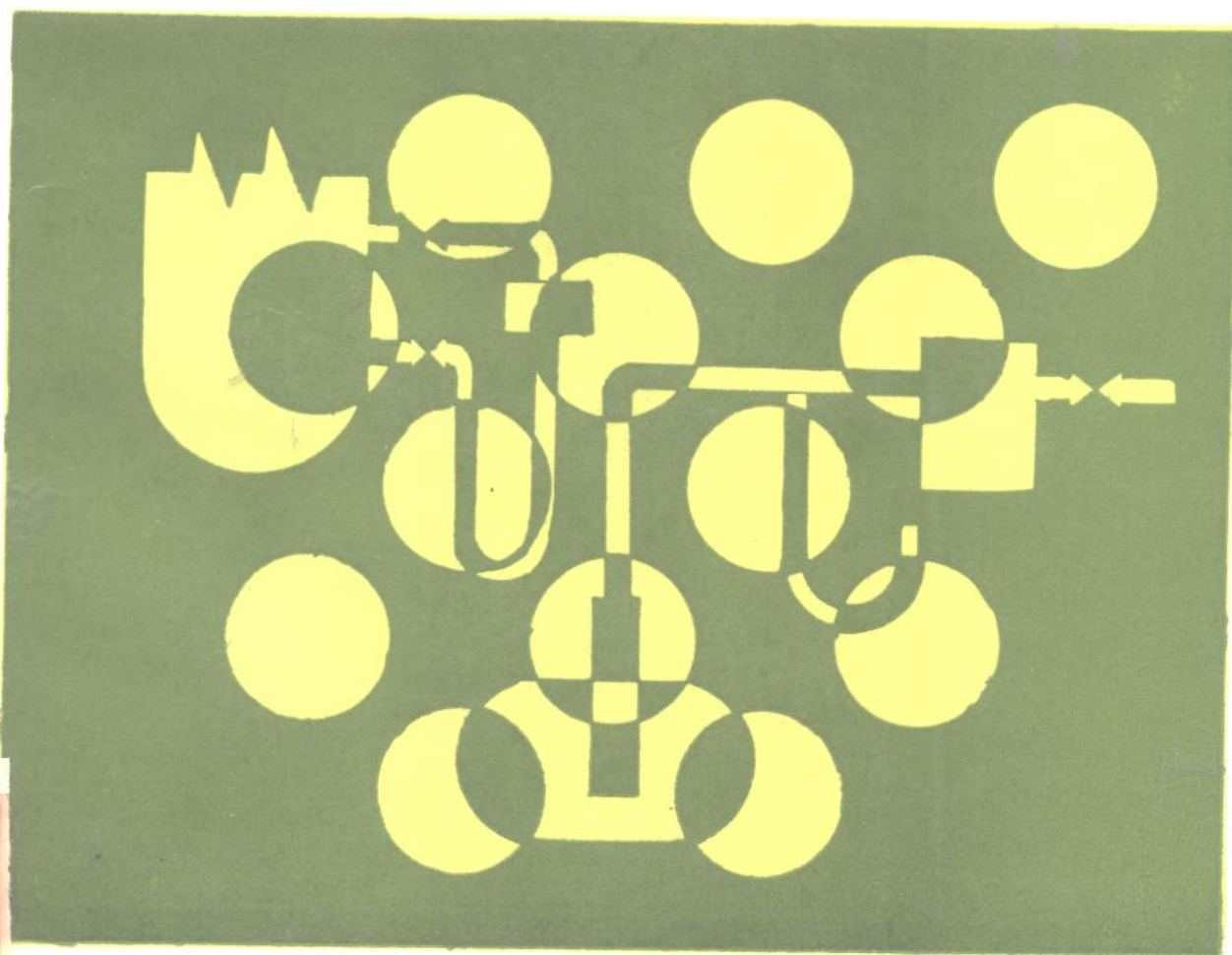


化工基础实验技术

天津大学化工技术基础实验教研室编



天津大学出版社

化工基础实验技术

天津大学化工技术基础实验教研室编

天津大学出版社

1989年

内 容 提 要

本书介绍了化工单元操作实验研究中常用的基础实验技术。全书共八章,包括实验数据的误差分析及实验数据处理,正交试验法,化工基本物理量的测量技术,流体流动过程及设备、热量传递过程及设备、质量传递过程及设备的实验研究方法等。

本书突出基础内容,注重理论联系实际,有些内容是作者多年实践经验的总结,具有实用性和通用性。本书可作大专院校化工技术基础实验和化工原理实验等实验课程的教材或教学参考书,也可供化工、石油、轻工、食品等部门从事科研、生产的科技人员参考。

化工基础实验技术

天津大学化工技术基础实验教研室编

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 13 字数: 325千

1989年10月第一版 1995年11月第8次印刷

印数: 9 001—12 000

ISBN 7-5618-0151-3

TQ·8 定价: 10.00元

前 言

本书是在天津大学的化工技术基础实验课讲义基础上写成的。化工技术基础实验课是由化工原理实验发展演变而成的。原化工原理实验附属于化工原理课，主要目的是验证课堂教学内容，为化工原理教学服务。这对加深课堂教学内容的理解，帮助学生学好理论课收到了一定的效果。但对于培养现代化学工程技术人材来说，上述要求是不够的，还应该对学生加强实验研究能力的培养。化工技术基础实验课的开设和本书内容的安排就是为了这种目的。

编写本书时遇到的问题一是第2~5章内容如何在实验中应用；二是第6~8章内容与实验指导书内容如何分工。我们的指导思想是：第2~5章内容的应用，有的分散于各个实验之中，有的另外安排新实验；第6~8章的内容应有利于对所做实验加深理解和开阔思路，并且尽量不涉及某一学校实验装置的细节，使本书具有较大的通用性。

本书内容的取舍主要以培养学生实验技术能力训练为主，不以学时定篇幅。教材内容相对多了一些，讲课时可以灵活选择，这对学生进行因材施教是有利的。

考虑到本课程是一门技术基础实验课，故未写入有关文献查阅的内容。又因各方面条件还未成熟，计算机在实验中的应用亦未写入。

本书有些内容是作者的经验和见解，不妥甚至错误之处，衷心地希望读者给予指出，帮助本书日臻完善。

本书由冯朝伍主编，王绍亭教授主审。各章的执笔人为：第一、四章冯亚云，第二章陈远明、冯朝伍，第三章陈远明，第五章冯朝伍，第六章冯亚云、陈远明，第七章陈远明、冯亚云、冯朝伍，第八章冯朝伍。

编 者

1989年1月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 课程的目的和任务	(1)
1.2 课程的内容	(1)
1.3 课程的特点	(1)
第二章 实验数据的误差分析	(3)
2.1 测量值的误差	(3)
2.1.1 真值与平均值	(3)
2.1.2 误差的分类	(4)
2.1.3 误差的表示方法	(4)
2.1.4 精密度、正确度和精确度	(6)
2.1.5 权与不等精度测量的平均值	(7)
2.1.6 仪表的精确度与测量值的误差	(7)
2.2 有效安全数字和实验结果数据的表示法	(9)
2.2.1 数字舍入规则	(9)
2.2.2 本书主张只用有效安全数字一种提法	(9)
2.2.3 直接测量数据的有效安全数字	(10)
2.2.4 非直接测量值的有效安全数字	(11)
2.2.5 实验结果数据的表示法	(12)
2.3 随机误差的正态分布	(12)
2.3.1 随机误差的正态分布特性	(12)
2.3.2 粗大误差的剔除	(16)
2.4 简单运算中的误差传递	(16)
2.4.1 误差传递的一般公式	(16)
2.4.2 误差传递公式的应用	(16)
2.4.3 误差分析的应用	(18)
2.5 本章符号表	(20)
第三章 实验数据处理	(21)
3.1 实验结果的图示法	(21)
3.1.1 实验曲线的绘制	(21)
3.1.2 坐标系的选择	(21)
3.2 经验公式的图解法	(22)
3.3 实验数据的回归分析法	(24)
3.3.1 一元线性回归——直线拟合	(25)
3.3.1.1 用最小二乘法求回归直线的方法	(25)
3.3.1.2 实验数据的相关性	(28)
3.3.1.3 一元线性回归的方差分析	(31)
3.3.1.4 根据回归方程预报 y 值的精度	(33)

3.3.2 多元线性回归	(34)
3.3.2.1 多元线性回归方程的一般求法	(34)
3.3.2.2 多元线性回归的方差分析	(35)
3.3.3 非线性回归	(36)
3.4 本章符号表	(37)
第四章 正交试验法	(39)
4.1 正交试验法初步	(39)
4.1.1 试验设计的目的	(39)
4.1.2 正交试验法	(39)
4.1.2.1 正交试验法的提出	(39)
4.1.2.2 正交试验法处理的问题	(40)
4.1.2.3 正交试验法的基本特点	(40)
4.1.2.4 正交试验法的基本步骤	(41)
4.1.2.5 正交试验结果的极差分析方法	(42)
4.1.2.6 选用正交表的基本原则	(44)
4.1.2.7 多指标的正交试验问题	(46)
4.2 有交互作用的正交试验法	(46)
4.2.1 交互作用	(46)
4.2.2 有交互作用的正交试验法	(48)
4.2.2.1 有交互作用的正交试验法应用举例	(48)
4.2.2.2 有交互作用试验的安排程序和方法	(49)
4.3 正交试验结果的方差分析	(50)
4.4 正交试验法在化工基础实验中的应用举例	(54)
4.5 本章符号表	(58)
第五章 化工基本物理量的测量技术	(60)
5.1 基础知识	(60)
5.1.1 测量仪表的基本技术性能	(60)
5.1.2 测量系统的动态性能	(62)
5.1.3 非电量的电测量方法	(62)
5.1.3.1 非电量电测量系统的组成	(63)
5.1.3.2 传感器的分类	(64)
5.1.4 传感器输出电信号的测量方法简介	(64)
5.1.4.1 电压的测量	(64)
5.1.4.2 电阻的测量	(70)
5.2 压力差的测量	(73)
5.2.1 液柱压差计	(73)
5.2.1.1 U管压差计	(73)
5.2.1.2 U管双指示液微压差计	(74)
5.2.1.3 倒置U管压差计	(76)
5.2.2 压力差电测量用的传感器	(76)
5.2.2.1 应变片式压差传感器	(76)
5.2.2.2 差动变压器式压力传感器	(77)

5.2.2.3 霍尔压力传感器	(78)
5.2.3 压差测量中的技术问题	(79)
5.3 流量流速测量	(83)
5.3.1 节流式(差压式)流量计	(83)
5.3.1.1 流量基本方程	(83)
5.3.1.2 流量系数与雷诺数 Re_D 的关系	(84)
5.3.1.3 关于标准节流装置	(85)
5.3.1.4 几种节流式流量计简介	(86)
5.3.1.5 使用节流式流量计的一些技术问题	(88)
5.3.2 转子流量计	(89)
5.3.3 涡轮流量计	(91)
5.3.4 另外几种流量流速仪表的简介	(93)
5.3.4.1 椭圆齿轮流量计	(93)
5.3.4.2 质量流量计	(94)
5.3.4.3 皮托管流速计	(94)
5.3.4.4 热丝流速计	(97)
5.4 温度测量	(99)
5.4.1 概述	(99)
5.4.1.1 各种温度计的使用范围	(99)
5.4.1.2 接触式测温与非接触式测温的比较	(100)
5.4.1.3 各种温度计的比较	(100)
5.4.1.4 温度计的选择和使用原则	(100)
5.4.1.5 温度计的标定	(101)
5.4.2 热电偶温度计	(101)
5.4.2.1 热电偶回路的几个定律	(102)
5.4.2.2 常用热电偶的种类	(102)
5.4.2.3 热电偶冷端的温度补偿	(104)
5.4.2.4 热电偶的串、并联应用	(106)
5.4.2.5 一些比较特殊的热电偶及其应用简介	(107)
5.4.2.6 热电偶输出信号的测量	(108)
5.4.3 电阻型温度计	(108)
5.4.3.1 金属丝电阻温度计	(108)
5.4.3.2 热敏电阻温度计	(109)
5.4.4 影响温度测量精度的因素和改善措施	(111)
5.5 仪表电路的抗干扰措施	(112)
5.5.1 干扰进入仪表电路的途径	(113)
5.5.2 抑制干扰的措施	(115)
5.6 本章符号表	(117)
第六章 流体流动过程及设备的实验研究方法	(120)
6.1 管内单相流体流动	(120)
6.1.1 实验研究的内容	(120)
6.1.2 流体内部质点运动情况的观测	(120)
6.1.3 直管流动阻力及摩擦系数 λ 的测定	(121)

6.1.4 局部阻力及局部阻力系数或当量长度的测定	(123)
6.2 离心泵性能的测定	(126)
6.2.1 测定的目的和内容	(126)
6.2.2 $H_f - Q$ 曲线测定中的一些问题	(127)
6.2.3 测定装置和方法	(127)
6.2.4 注意事项	(128)
6.3 流量计的标定	(128)
6.3.1 实验内容和目的	(128)
6.3.2 流量计的标定	(129)
6.3.3 标定流量计注意事项	(130)
6.4 恒压过滤常数的测定	(131)
6.4.1 实验目的	(131)
6.4.2 实验装置	(131)
6.4.3 过滤操作的主要影响因素及注意事项	(133)
6.5 直管内气液两相流流型和流动参数(空隙率和压力降)的观测技术	(134)
6.5.1 实验目的	(134)
6.5.2 流型及其观测技术	(135)
6.5.3 空隙率的测定	(136)
6.5.4 总压力降和摩擦阻力压力降的测量	(137)
6.5.5 实验操作要点	(139)
6.6 本章符号表	(139)
第七章 热量传递过程及设备的实验研究方法	(142)
7.1 传热设备内流体流动的压降及实验研究方法	(142)
7.1.1 研究传热设备内流体流动压降的意义	(142)
7.1.2 传热设备内压降的研究方法	(142)
7.2 对流传热系数及准数关联式的测定	(142)
7.2.1 实验内容	(142)
7.2.2 对流传热系数 α 的测定方法	(143)
7.2.3 α 测定方法的讨论	(143)
7.2.4 无相变时 α 的准数关联式的求法	(144)
7.3 升膜蒸发器操作的观测	(146)
7.3.1 升膜蒸发器	(146)
7.3.2 直立受热通道中气液两相流动的观测和描述	(146)
7.3.3 流动沸腾对流传热系数的测定	(147)
7.4 热流密度的测定与热流计	(148)
7.4.1 测定热流密度的几种方法	(148)
7.4.2 热流计的分类	(149)
7.5 传热系数分离法求取对流传热系数关联式	(150)
7.5.1 先线性化后回归的分离方法	(150)
7.5.2 直接进行多元非线性回归的分离方法	(151)
7.6 本章符号表	(153)
第八章 质量传递过程及设备的实验研究方法	(155)

8.1 传质设备内的流体流动问题	(155)
8.1.1 重要性	(155)
8.1.2 研究方法	(156)
8.1.3 研究内容	(156)
8.2 精馏塔的操作及其性能测定	(157)
8.2.1 精馏塔的操作	(157)
8.2.2 精馏塔性能测定	(159)
8.3 填料吸收塔实验研究的内容和方法	(163)
8.3.1 研究内容	(163)
8.3.2 流程设计中必须考虑的几个问题	(163)
8.3.3 填料吸收塔传质能力和传质效率的测定	(165)
8.3.4 填料吸收塔实验的操作	(167)
8.4 干燥实验的内容和方法	(169)
8.4.1 干燥实验的内容和方法简介	(169)
8.4.2 干燥实验中的技术问题	(170)
8.5 萃取塔操作的观测	(171)
8.5.1 萃取塔操作观察和测量的内容	(171)
8.5.2 传质单元数和传质单元高度的测定	(171)
8.5.3 萃取实验注意的问题	(173)
8.6 本章符号表	(174)
附录1	(179)
1-1 实验报告的书写要求	(179)
附录2	(180)
2-1 误差分析中应统一使用的名词	(180)
附录3	(181)
3-1 相关系数检验表	(181)
3-2 F分布数值表	(182)
附录4	(185)
4-1 常用正交表	(185)
参考文献	(194)

第一章 绪 论

1.1 课程的目的和任务

化学工程在其发展过程中形成了两种研究方法：实验方法和数学模型方法。实验方法系通过实验直接测定各变量之间的关系，以表格、线图或经验公式的形式表示出来。数学模型方法是，首先对复杂的实际问题作合理简化，提出一个接近实际的物理模型和以方程（多为微分方程）表示的数学模型，然后确定该方程的初始条件并求解方程。由于化工过程的复杂性，数学模型方法的难度很大，至今尚未能广泛应用，而且数学模型方法实际上也离不开实验。如果没有一定的实验数据，不能掌握影响过程的主要因素，那么数学模型的建立、初始条件以及修正系数的确定都将毫无根据。因此，在今后相当长时间内，实验在化学工程的发展中仍将起着非常重要的作用。近年来国内外高等化工教育界，出现了大力加强实验教学的趋势，设置化工技术基础实验课正是这种形势的要求。

课程的任务：

(1) 应用化工原理知识来指导实验和讨论问题，加深对化工单元操作的理解，培养和提
高在实践中运用理论知识发现问题、分析问题和解决问题的能力。

(2) 加强化工基础实验技术的研究，严格进行实验技术基本功的训练。

1.2 课程的内容

化工技术基础实验课包括实验和讲课。

实验另有《化工基础实验指导》，包括以下内容：流体阻力实验；离心泵性能实验；流量计性能实验；对流传热系数及其关联式的测定；精馏塔实验；吸收塔实验；萃取塔实验；干燥实验；温度测量技术实验；过滤常数测定和正交试验法在过滤研究中的应用实验；气液两相流的观测；升膜蒸发器实验等。

讲课以本书为教材，涉及化工基础实验技术的基本问题有：(1) 怎样分析和估算实验数据的误差；(2) 实验数据的处理；(3) 如何设计试验可提高实验工作效率；(4) 如何提高压强差、流量、温度等化工基本物理量测量的精度；(5) 流体流动、热量传递等单元操作过程及设备的实验研究方法；(6) 实验报告的书写。

本实验课不但保留了原化工原理实验的项目，而且更深入地探讨了化工单元操作中的一些问题。因此本课程既有利于加强实验研究工作能力的培养，也有利于加强对化工单元操作的理解和掌握。

1.3 课程的特点

(1) 进行实验研究全过程的多种能力的培养。所谓全过程系指根据规定的任务，确定实验目标→制定实验方案→设计实验装置→操作实验装置并测取实验数据→整理、计算、

分析化工过程各种参变量之间的定性和定量关系→确定所得数据的可靠程度→书写完整的实验报告,并开展相互交流或投稿发表。本书的第2~5章正是为了多种能力的培养,如测量技术、误差分析等。在安排每一实验时,应注意包含若干具体实验技术问题,以便在实验课中接受多种实验技术基本功的训练。例如,对流传热系数及其准数关联式测定实验,化工原理实验假定 Pr 数的方次为已知,求 Nu 数对 Re 数和 Pr 数的关联式,以便验证经验公式 $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ 。而在本实验中,为了培养处理实验数据的能力,实验安排为假设 Re 、 Pr 数的方次均为未知,应用多元线性回归法处理数据,求关联式的系数和指数。因此,在做完实验之后,不仅可以掌握对流传热系数 α 的测定方法,对 Nu 、 Re 、 Pr 数之间的关系会进一步理解,而且学到了应用多元线性回归法的技术。

(2) 注意理论联系实际。

这是由课程的目的、任务决定的。①本实验课注意将单元操作实验与实验技术的应用融为一体,每一个单元操作实验都同时探讨若干实验技术问题,这样不仅可以提高测量的精确度,同时使课堂讲授的实验技术立即得到应用,例如在讲授正交试验法后,安排“过滤常数测定和正交试验法在过滤研究中的应用”实验。这样,既初步运用了正交试验法,又掌握了恒压过滤常数的测定方法,分析了恒压过滤常数随影响因素变化的趋势。②为某些实验技术开设相应的实验,如开设温度测量技术实验,这样可专门考察热电偶和电阻温度计的测量精度的各种影响因素。③本实验课要求实验报告一定要有“实验问题的分析和讨论”一项,目的是培养和提高运用理论知识发现、分析和解决问题的能力。

第二章 实验数据的误差分析

2.1 测量值的误差

2.1.1 真值与平均值

1) 真值 真值是指某物理量客观存在的确定值,它通常是未知的。由于测量仪器、测量方法、环境、人的观察力以及测量程序等都不可能完美无缺,因而实验误差难于避免,故真值是无法测得的。当测量次数无限多时,根据正负误差出现机率相等的误差分布定律,取测量值的平均值,在无系统误差情况下,可以获得极为接近于真值的数值。故真值等于测量次数无限多时算出的平均值。但实际测定的次数都是有限的,由有限次数求出的平均值,只能近似地接近于真值,可称此平均值为最佳值,计算时可将此最佳值作真值用。在实际应用上常将精确度高一级的测量仪器所测得的测量值视为真值。

2) 平均值 在化工领域中,常用的平均值有下面几种:

(1) 算术平均值 这种平均值最常用。设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 代表各次的测量值, n 代表测量次数,则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1-1)$$

凡测定值的分布服从正态分布时,用最小二乘法原理即可证明: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。

(2) 均方根平均值 均方根平均值常用于计算气体分子的平均动能,其定义为

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (2.1-2)$$

(3) 几何平均值 几何平均值的定义为

$$\bar{x}_{\text{几}} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_n} \quad (2.1-3)$$

以对数表示为

$$\log \bar{x}_{\text{几}} = \frac{\sum_{i=1}^n \log x_i}{n} \quad (2.1-4)$$

对一组测量值取对数,所得图形的分布曲线呈对称形时,常用几何平均值。可见,几何平均值的对数等于这些测量值 x_i 的对数的算术平均值。几何平均值常小于算术平均值。

(4) 对数平均值 在化学反应、热量与质量传递中,分布曲线多具有对数特性,此时可采用对数平均值表示量的平均值。

设有两个量 x_1 、 x_2 ，其对数平均值为

$$\overline{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (2.1-5)$$

量的对数平均值总小于算术平均值。若 $x_1 > x_2$ ，且 $\frac{x_1}{x_2} < 2$ 时，可用算术平均值代替对数平均值，引起的误差不超过4.4%。

以上介绍了各类平均值，目的是要从一组测量值中找出最接近真值的量值。从以上介绍可知，平均值的选择主要取决于一组测量值的分布类型。在化工实验和科学研究中，数据的分布多属于正态分布，故多采用算术平均值。

2.1.2 误差的分类

误差是指测量值（也包括间接测量值）与真值之差。偏差是指测量值与平均值之差。在测量次数足够多时，测量误差与偏差很接近。习惯上常将二者混用。

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 它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，其误差的数值大小正负保持恒定，或误差随条件改变按一定规律变化。即有的系统误差随时间呈线性、非线性或周期性变化，有的不随测量时间变化。

系统误差的起因有：(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。如用未校准而实重偏大的砝码称重，所得称重值总是偏小。再如：使用电子仪器时零点未经校正而造成固定偏向的误差。(2)环境因素：外界温度、湿度及压力变化引起的误差。(3)测量方法因素：近似的测量方法或近似的计算公式等引起的误差。(4)测量人员的习惯偏向或动态测量时滞后现象等。

总之，系统误差有固定偏向和确定的规律，一般可按具体原因采取措施给以校正或用修正公式消除。

2) 随机误差 它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，其误差数值和符号是不确定的，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，其误差与测量次数有关。随着测量次数增加，出现的正负误差可相互抵消。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 它是与实际明显不符的误差，误差值可能很大，无一定规律。它主要由于实验人员粗心大意、操作不当而造成。此类误差只要操作人员认真细致地工作和加强校对即可避免。有时可采用某些准则来消除。

从以上讨论可知，系统误差和粗大误差是可以设法消除的。由于理论上以及仪器、方法上所造成的系统误差往往超过随机误差许多倍，所以首先应该消除系统误差。随机误差是由于暂时未能掌握的某些因素造成的。如外界环境发生微小变化，装置中零件配合不稳定，操作人员读数不稳定等。随机误差是误差理论中的主要研究对象。

2.1.3 误差的表示方法

误差的表示方法有下列几种：

1) 绝对误差与相对误差

测量值与真值之差的绝对值称为测量值的误差。为了区别后面将要介绍的各种误差，称

此误差为绝对误差。

设测量值用 x 表示, 真值用 X 表示, 则绝对误差 D 为

$$D = |X - x| \quad (2.1-6)$$

即

$$X - x = \pm D$$

$$x - D \leq X \leq x + D \quad (2.1-7)$$

真值是未知的, 计算时常用多次测量的平均值代替。如果某物理量的最大测量值 x_1 与最小测量值 x_2 已知, 则可通过下式求出最大绝对误差 D_{max} 。

$$\begin{aligned} x_1 = \bar{x} + D_{max} > X > \bar{x} - D_{max} = x_2 \\ \bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad D_{max} = \frac{x_1 - x_2}{2} \end{aligned} \quad (2.1-8)$$

这就是说, 算术平均值 $\bar{x}$ 是最大绝对误差为 D_{max} 时之真值 X 的近似值。

例2.1-1 已知炉中的温度不高于 1150°C , 不低于 1140°C , 试求其最大绝对误差 D_{max} 与平均值。

解: 由式 (2.1-8) 可得平均温度 $\bar{T} = \frac{1150 + 1140}{2} = 1145^\circ\text{C}$ 。最大绝对误差 $D_{max} = \frac{1150 - 1140}{2} = 5^\circ\text{C}$, 可写成炉温 $T = 1145 \pm 5^\circ\text{C}$ 。

某些情况下, 绝对误差不能用来比较测量值之间误差的大小。譬如, 测量电解槽中通过的电流值与测量半导体三极管基极流过的电流值时, 误差均表示为毫安数量级。显然, 对前者这是非常精确的, 对后者则误差极大。因此, 为了弥补绝对误差概念的不足, 而引出相对误差概念。

绝对误差 D 与真值的绝对值之比, 称为相对误差, 它的表达式为

$$E_r = \frac{D}{|X|} \quad (2.1-9)$$

式中真值 X 一般为未知, 用平均值代之。

如例2.1-1, 相对误差 $E_r = \frac{5}{1145} = 0.00437 = 0.44\%$

相对误差常用百分数或千分数表示, 以适应不同精度的要求。

2) 算术平均误差 δ

算术平均误差的定义为

$$\delta = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n} = \frac{\sum d_i}{n} \quad (2.1-10)$$

式中 n —— 测量次数;

x_i —— 测量值, $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

d_i —— 测量值与算术平均值 ($\bar{x}$) 之差的绝对值, $d_i = |x_i - \bar{x}|$ 。

上式应取绝对值, 否则, 在一组测量值中, $(x_i - \bar{x})$ 值的代数和必为零。

算术平均误差的缺点是无法表示出各次测量之间彼此符合的情况。因为偏差彼此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一组测量值的相同。

3) 标准误差 σ

标准误差亦称均方根误差。当测定次数为无穷多时, 其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}}, D_i = |x_i - X| \quad (2.1-11)$$

对有限测量次数, 标准误差可用下式表示

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (2.1-12)$$

标准误差是目前常用的一种表示精度的方法。它不仅与一组测量值的每个数据有关, 而且对一组测量值中的较大误差或较小误差很敏感, 能较好地表明数据的离散程度。实验愈精确, 其标准误差愈小, 它是评定化工测量精确度的标准, 故被广泛采用。

2.1.4 精密度、正确度和精确度

测量的质量和水平, 可以用误差概念来描述, 也可以用精确度等概念来描述。为了指明误差的来源和性质, 通常用以下三个概念。

1) 精密度

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, 精密度高指随机误差小。如果实验的相对误差为0.01%且误差纯由随机误差引起, 则可认为精密度的精度为 10^{-4} 。

2) 正确度

它是指在规定的条件下, 测量中所有系统误差的综合。正确度高表示系统误差小。若实验的相对误差为0.01%且误差纯由系统误差引起, 则可认为正确度的精度为 10^{-4} 。

3) 精确度

表示测量中所有系统误差和随机误差的综合。因此, 精确度表示测量结果与真值的逼近程度。若测量的相对误差为0.01%且误差系由系统误差和随机误差共同引起, 则可认为精确度的精度为 10^{-4} 。

对于实验或测量来说, 精密度高, 正确度不一定高。正确度高精密度的也不一定高。但精

确度高必须是精密度与正确度都高。如图2.1-1所示, A的系统误差小而随机误差大, 即正确度高而精密度低; B的系统误差大而随机误差小, 即正确度低而精密度高; C的系统误差与随机误差都小, 表示正确度和精密度都高, 即精确度高。

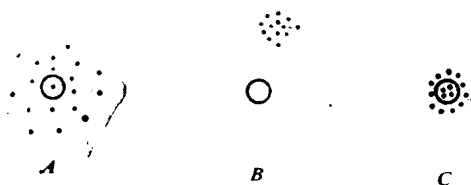


图 2.1-1 精密度、正确度、精确度含义的示意图

目前, 国内外文献中所用的名词术语颇不统一, 各文献中同一名词的含义不尽相同。例如不少书中使用的“准确度”一词, 可能是指系统误差与随机误差两者的合成, 也可能单指系统误差。

在很多书中, 还常常见到精度一词。因为精度一词并无严格的明确定义, 所以各处出现的精度含义不尽相同。少数地方, 精度一词指的是精密度。多数地方, 使用“精度”一词实际上是为了说明误差的大小。如说某数据的测量精度很高时, 实指该数据测量的误差很小。此误差的大小是随机误差和系统误差共同作用的总结果。在这种场合, 精度一词与精确度完全是一回事。

2.1.5 权与不等精度测量的平均值

一般测量基本上都属于等精度测量。在科学研究或高精度测量中,有时在不同测量条件下进行测量,如用不同的仪器、不同的测量方法、不同测量次数以及由不同测量者进行测量(称为不等精度测量),各测量值可靠程度不同,为了得到更精确的测量结果,应让可靠性大的测量值在最后结果中占比例大一些,可用权的数值来区别这些测量值可靠程度的大小。这时,平均值应采用加权平均值 $\bar{x}_{加}$ 。其定义为

$$\bar{x}_{加} = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} \quad (2.1-13)$$

式中 $x_1, x_2, \cdots$ 为各测量值;

$w_1, w_2, \cdots$ 为各测量值对应的权数。

当测量环境、仪器、方法和测量者水平相同时,重复次数愈多,其可靠程度愈大,这时,确定权的最简单方法,是令权值 $w_1, w_2, \cdots$ 分别等于对应的测量次数。此时 $x_1, x_2, \cdots$ 分别代表各组的平均值。即

w_1 次测量的平均值为 x_1 ;

w_2 次测量的平均值为 x_2 ;

$\vdots$

w_n 次测量的平均值为 x_n 。

如果各组测量的算术平均误差 δ 或标准误差 σ 为已知,则可按权数与误差平方成反比的原则求出权数。即

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \sqrt{\frac{w_2}{w_1}} \quad (2.1-14)$$

例2.1-2 设在测量某一物体长度时,得到以下结果, $\bar{x}_1 = 1.53 \pm 0.06\text{mm}$, $\bar{x}_2 = 1.47 \pm 0.02\text{mm}$ 。试求其加权平均值。

解:
$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\delta_2^2}{\delta_1^2} = \frac{0.02^2}{0.06^2} = \frac{1}{9}$$

$$\bar{x}_{加} = \frac{1.53 \times 1 + 1.47 \times 9}{1 + 9} = 1.48$$

2.1.6 仪表的精确度与测量值的误差

1) 电工仪表等一些仪表的精确度与测量误差。

这些仪表的精确度常采用仪表的最大引用误差和精确度等级来表示。仪表的最大引用误差的定义为

$$\text{最大引用误差} = \frac{\text{仪表示值的绝对误差}}{\text{该仪表相应档次量程的绝对值}} \times 100\% \quad (2.1-15)$$

式中仪表示值的绝对误差指在规定的正常情况下,被测参数的测量值与被测参数的标准值之差的绝对值的最大值。对于多档仪表,不同档次示值的绝对误差和量程范围均不相同。

式(2.1-15)表明,若仪表示值的绝对误差相同,则量程范围愈大,最大引用误差愈小。

我国电工仪表的精确度等级有七种:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。如某仪表为2.5级,则说明此仪表的最大引用误差为2.5%。

在使用仪表时,如何估算一次测量值的绝对误差和相对误差。

设仪表的精确度等级为 p 级,其最大引用误差为 $p\%$ 。设仪表的测量范围为 x_n ,仪表的示值为 x_i ,则由式(2.1-15)得该示值的误差为

$$\left. \begin{aligned} \text{绝对误差 } D &\leq x_n \times p\% \\ \text{相对误差 } E_r &= \frac{D}{x_i} \leq \frac{x_n}{x_i} \times p\% \end{aligned} \right\} \quad (2.1-16)$$

式(2.1-16)表明:

(1)若仪表的精确度等级 p 和测量范围 x_n 已固定,则测量的示值 x_i 愈大,测量的相对误差愈小。

(2)选用仪表时,不能盲目地追求仪表的精确度等级。因为测量的相对误差还与 $\frac{x_n}{x_i}$ 有关。应该兼顾仪表的精确度等级和 $\frac{x_n}{x_i}$ 两者。

例2.1-3 今欲测量大约90V的电压,实验室里有0.5级0~300V和1.0级0~100V的电压表,问选用哪一种电压表测量较好?

解:用0.5级0~300V的电压表测量90V时的最大相对误差为

$$E_{r,0.5} = \frac{x_n}{x_i} \times p\% = \frac{300}{90} \times 0.5\% = 1.7\%$$

而用1.0级0~100V的电压表测量90V时的最大相对误差为

$$E_{r,1.0} = \frac{100}{90} \times 1.0\% = 1.1\%$$

此例说明,如果选择恰当,用量程范围适当的1.0级仪表进行测量,能得到比用量程范围大的0.5级仪表更准确的结果。

2) 天平类仪器的精确度与测量误差

这些仪器的精确度用以下公式来表示:

$$\text{仪器的精确度} = \frac{\text{名义分度值}}{\text{量程的范围}} \quad (2.1-17)$$

式中名义分度值指测量时读数有把握正确的最小单位,即每一个最小分度所代表的数值。例如TG-328A型天平,其名义分度值(感量)为0.1毫克,测量范围为0~200克,则其

$$\text{精确度} = \frac{0.1}{(200-0) \times 10^3} = 5 \times 10^{-7}$$

若仪器的精确度已知,也可用式(2.1-17)求得其名义分度值。

使用这些仪器时,测量值的误差可用下式来确定:

$$\left. \begin{aligned} \text{绝对误差} &\leq \text{名义分度值} \\ \text{相对误差} &\leq \frac{\text{名义分度值}}{\text{测量值}} \end{aligned} \right\} \quad (2.1-18)$$