

21世纪高等学校教材

化工原理实验

主 编 张光旭
副主编 蔡卫权 吴选军



21 世纪高等学校教材

化工原理实验

主 编 张光旭
副主编 蔡卫权 吴选军

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

本书是一本实验教材,内容包括化工实验数据处理、化工原理实验常用仪器仪表的使用与维护、化工原理实验、化工原理演示实验、化工原理计算机辅助实验、附录等。

本书是根据全国高校化工原理课程教学指导委员会提出的实验教学基本要求编写的。重点讲述7个基础实验和计算机辅助实验(含实验预习和数据处理),以培养学生的动手能力和实验技能,巩固和加深学生对课堂教学内容的理解,提高其分析和解决工程问题的能力及应用计算机的能力,确保实验教学的水平和质量达到教学指导委员会提出的基本要求。

本书内容简明扼要,理论层次适中,有较多的例题和思考题。

本书可作为高等学校本、专科的化工原理实验教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/张光旭主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2011.10

ISBN 978-7-5629-3466-0

I. 化… II. 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(2011)第 203349 号

项目负责人:张淑芳

责任编辑:高 英

责任校对:吴正刚

装帧设计:小 灰

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.techbook.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:8.25

字 数:208 千字

版 次:2011 年 10 月第 1 版

印 次:2011 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:13.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87394412 87383695 87384729 87397097(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

前 言

化工原理实验教学是化工原理课程教学的一个重要组成部分。近些年来,随着化工原理教学实践和教学改革不断深入,化工原理实验教学日益受到重视,能够按照全国高校化工原理课程教学指导委员会提出的实验教学基本要求组织实验教学的单位日渐增多,实验装置和手段日臻普及、完善,因此,编写一本既能反映我校专业特色,又符合“实验教学基本要求”的化工原理实验教材也就显得必要和迫切。于是,本教材便应运而生了。

本教材的编写突出了如下四个特点:

(1)实验内容紧扣实验教学基本要求,以七个基本实验为重点,即:直管摩擦系数和局部阻力系数的测定,离心泵的操作和性能测定,过滤常数的测定,传热实验,精馏塔性能实验,吸收实验,干燥的测定;同时兼顾必要的演示实验和提高实验(如萃取实验等),以保证实验教学水平和质量达标。

(2)引入近年来化工原理实验教学改革的成果——计算机辅助实验等方面的内容。借助先进的教学手段,更好地巩固和加深对教学课堂内容的理解,提高分析问题、解决问题和如何将计算机与实验设备对接,实现实验过程自动控制的能力。

(3)充实了例题、实验数据处理和化工测量仪表方面的内容,以拓宽学生知识面和提高实验教学效果。

(4)强调了实验的操作,以利于培养学生的动手能力和实验技能。

本教材内容简明扼要,理论层次适中,针对性和通用性强。既适用于化工类专业,也适用于轻工类、食品工业类等有关专业;既适用于工科,也适用于理科;既适用于化工原理课程内的实验教学,也适用于化工原理实验单独设课的实验教学。

本教材除参考了原武汉化工学院李德树编写的《化工原理实验》之外,还参考了其他兄弟院校的多种化工原理实验教材和讲义,吸取了多年来化工原理实验教学中积累起来的丰富经验,由多位长期工作在实验教学一线的教师参加编写,可谓为集体智慧的结晶。参加编写的人员有:张光旭、吴选军、王湘、蔡卫权。全书由蔡卫权校核,张光旭统编并定稿。

在本教材出版之际,编者对参编单位的实验室工作人员所做出的贡献表示由衷的感谢;对在本教材编写过程中所参考的文献作者或单位致以深切的谢意。

编者水平有限,疏漏与错误在所难免,如蒙赐教,不胜感激。

编 者

2011年7月于武汉

目 录

绪论	(1)
一、实验的主要内容	(1)
二、实验的基本要求	(1)
第一章 实验数据的处理	(3)
第一节 实验数据的误差	(3)
一、误差的基本概念	(3)
二、直接测量误差	(5)
三、函数误差	(7)
第二节 实验数据的处理	(13)
一、列表法、图示法、经验公式法简介	(13)
二、经验公式中常数的求取	(14)
第二章 实验室常用仪器的使用与维护	(19)
第一节 压力测量仪器的使用与维护	(19)
一、液柱压力计	(19)
二、弹簧式压力计	(21)
第二节 流量测量仪器的使用与维护	(22)
一、测速管	(23)
二、孔板流量计	(23)
三、转子流量计	(24)
四、涡轮流量计	(25)
五、湿式气体流量计	(26)
第三节 温度测量仪器的使用与维护	(27)
一、玻璃管液体温度计	(27)
二、电阻温度计	(28)
三、热电偶温度计	(30)
第四节 液体相对密度测量仪器的使用与维护	(32)
一、工作原理	(32)
二、安装、调整、使用	(33)
三、维护保养	(33)
第三章 演示实验	(34)
第一节 雷诺实验	(34)

一、实验目的	(34)
二、实验基本原理	(34)
三、实验装置流程和实验方法	(34)
思考题	(36)
第二节 柏努利方程演示实验	(36)
一、实验目的	(36)
二、基本原理	(37)
三、实验装置图	(37)
四、实验操作方法	(38)
五、使用设备时应注意的事项	(38)
六、观察现象及实验结果	(38)
思考题	(41)
第三节 旋风分离器	(41)
一、实验目的	(41)
二、实验原理	(41)
三、实验流程	(43)
四、装置的实验操作方法	(43)
五、装置使用的注意事项	(44)
思考题	(44)
第四节 填料塔流体流动特性实验	(44)
一、实验目的	(44)
二、实验装置	(44)
三、实验步骤	(45)
思考题	(45)
第五节 板式塔演示实验	(46)
一、实验目的	(46)
二、实验装置	(46)
三、实验步骤	(46)
思考题	(46)
第六节 流态化干燥实验	(47)
一、实验目的	(47)
二、基本原理	(47)
三、实验装置	(47)
四、实验步骤	(47)
思考题	(47)
第七节 超滤膜分离实验	(48)
一、实验目的	(48)
二、实验装置	(48)
三、实验步骤	(48)

思考题	(48)
第四章 基本实验	(49)
第一节 流体流动阻力测定实验	(49)
一、实验目的	(49)
二、实验内容	(49)
三、实验原理	(49)
四、实验装置	(50)
五、实验方法	(50)
六、注意事项	(51)
七、实验要求	(52)
思考题	(52)
第二节 离心泵计算机数据采集及过程控制实验	(53)
一、实验目的	(53)
二、实验内容	(54)
三、实验原理	(54)
四、实验装置	(55)
五、实验方法	(56)
六、注意事项	(56)
七、报告内容	(57)
思考题	(57)
第三节 过滤实验	(58)
一、实验目的	(58)
二、设备与流程	(58)
三、操作时应注意的事项	(59)
四、实验方法及操作步骤	(60)
思考题	(65)
第四节 传热综合计算机数据采集和过程控制实验	(65)
一、实验目的	(65)
二、实验内容	(65)
三、实验原理	(65)
四、实验装置	(67)
五、实验方法及步骤	(69)
六、注意事项	(70)
七、报告内容	(70)
思考题	(70)
第五节 列管式换热器传热系数的测定	(71)
一、实验目的	(71)
二、实验原理	(71)

三、实验装置图	(73)
四、实验步骤	(73)
思考题	(76)
第六节 板式精馏塔板效率的测定	(76)
一、全回流精馏塔	(76)
思考题	(77)
二、部分回流精馏塔	(77)
思考题	(86)
第七节 填料精馏塔传质效率的测定	(86)
一、实验目的	(86)
二、设备的主要技术数据	(86)
三、实验设备的基本情况	(86)
四、实验方法及步骤	(86)
五、使用本实验设备应注意事项	(86)
六、实验数据计算过程及结果	(87)
思考题	(89)
第八节 吸收系数的测定	(90)
一、实验目的	(90)
二、基本原理	(90)
三、实验装置的基本情况	(91)
四、实验方法及步骤	(91)
五、使用实验设备时应注意的事项	(93)
思考题	(94)
第九节 干燥实验	(97)
一、实验目的	(97)
二、实验内容	(97)
三、实验原理	(98)
四、实验装置	(100)
五、实验方法及步骤	(102)
六、实验中的注意事项	(102)
七、记录表	(103)
八、报告内容	(104)
思考题	(104)
第五章 选做和提高实验	(105)
第一节 流量计性能测定实验	(105)
一、实验目的	(105)
二、实验内容	(105)
三、实验原理	(105)

四、实验装置	(105)
五、实验方法	(105)
六、注意事项	(106)
七、报告内容	(106)
八、设备主要参数	(106)
思考题	(107)
第二节 萃取实验	(107)
一、转盘萃取塔萃取实验	(107)
二、振动筛板萃取塔萃取实验	(110)
第三节 正交试验法在过滤研究实验中的应用	(116)
一、实验目的	(116)
二、实验内容	(116)
三、实验原理	(116)
四、实验装置	(117)
五、实验方法	(118)
六、注意事项	(118)
七、报告内容	(118)
思考题	(119)
第四节 渗透汽化膜分离实验	(119)
一、实验目的	(119)
二、实验内容	(119)
三、实验原理	(119)
四、实验装置	(119)
五、实验方法	(119)
六、报告内容	(120)
思考题	(120)
参考文献	(121)

绪 论

一、实验的主要内容

实验课程的内容应包括实验理论教学与实验教学两大部分。实验理论教学涉及实验方法论、数据处理、测试技术及典型仪器、仪表的使用。实验教学部分包含了全国高校化工原理课程教学指导委员会规定的 7 个实验,即:

- (1) 流体流动阻力的测定;
- (2) 离心泵性能曲线的测定;
- (3) 过滤曲线及过滤常数的测定;
- (4) 换热器传热系数及过滤常数的测定;
- (5) 填料吸收塔传质系数的测定;
- (6) 精馏塔的操作与塔(板)效率的测定;
- (7) 干燥速率的测定。

根据不同专业、学科的要求,除 7 个基本实验外,还可以选做萃取实验、板式塔实验旋风、除尘实验、雷诺实验、柏努利实验和正交过滤设计实验等。

二、实验的基本要求

通过实验课的教学应让学生掌握科学实验的全过程。此过程应包括:实验前的预习工作;进行实验操作;正确记录和处理实验数据;撰写实验报告。每一环节的具体说明和要求如下:

(1) 实验前的预习工作

- ① 认真阅读实验课本,弄清实验的目的和要求;
- ② 根据本次实验的具体任务,熟悉与实验有关的理论、实验的要求及具体做法;
- ③ 通过对计算机实验仿真系统的预习,进一步熟悉实验装置的流程、操作原理及方法;
- ④ 到实验室现场了解实验流程及所使用的仪器、仪表,确定实验方案和实验操作程序;
- ⑤ 积极回答实验教师提出的问题。

(2) 进行实验操作

一般以 4 人为一个小组进行实验,实验前必须做好组织工作,做到既分工又合作。小组的每个成员要各尽其责,并在适当的时候轮换工作。这样既保证质量,又能得到全面训练。

(3) 正确记录和处理实验数据

① 凡是影响实验结果或者数据整理过程中所必需的数据都必须测取。通常而言,物性数据无须直接测定,通过测定介质的温度即可查得。

② 实验数据的读取和记录必须正确。要求每一个实验者都要有一本专用实验记录本。实验前应拟好记录表格。读取和记录数据时,要特别注意各物理量的单位及有效数字。

③ 当读完一组数据后,若改变操作条件再进行实验,则必须要有一段稳定时间才能读取

另一组数据。前后数据的变化一般都存在一定的规律,因此,在实验过程中,若某一数据出现异常,则应查找和分析原因。

(4) 撰写实验报告

实验报告内容应包括:

- ① 实验报告的题目;
- ② 同实验小组人员姓名;
- ③ 实验目的和内容;
- ④ 实验的基本理论和方案;
- ⑤ 实验装置及流程图;
- ⑥ 实验的主要操作步骤;
- ⑦ 实验数据及数据处理;
- ⑧ 实验结果与讨论;
- ⑨ 完成实验思考题。

实验报告每人一份,要求简洁明了、数据完整、图线清晰。在数据处理部分,若有示例计算要求,则同组中每人应不相同。每个实验的具体要求见第3章实验部分。

第一章 实验数据的处理

化工原理实验是化工原理课程的一个重要教学环节。实验数据是否准确、可靠是实验者最关心的问题之一。由于种种原因,实验数据必然存在误差,因此,实验者应了解什么是误差,怎样计算测量误差。学会分析误差产生的原因,改进实验方案,正确处理实验数据。在允许的误差范围内由实验数据得出科学的结论,为建立数学模型、解决工程问题提供依据。

进行实验数据的误差分析与数据处理时要应用概率论和统计学的原理,本章只介绍一些基础知识,不进行严格的数学推导,重在应用。

第一节 实验数据的误差

本节主要讨论误差的基本概念、直接测量误差及函数误差。

一、误差的基本概念

(一)误差的来源

测量值与真值之差称为误差。误差按其来源可分为三类:过失误差、系统误差和随机误差。

过失误差是由于实验者工作不熟练或粗心大意造成的。如操作错误、读数错误等,这类误差通常与正常值相差较大,整理数据时应予以剔除。

系统误差是指在同一条件下多次测量同一量时,误差的绝对值或符号保持恒定,或者在条件改变时误差按某一确定的规律变化。仪器不准确,如零点未校准;实验者的习惯使读数偏高或偏低;测定环境,如压力、温度偏离校准值等都会造成系统误差。这类误差有规律可循,通过精心校正或检查可以消除。

随机误差是指在相同条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号各不相同,没有确定的规律,也不可预计,但有抵消性的误差,这类误差是由随机因素产生的,遵循统计的规律。

本节主要讨论随机误差。

(二)误差的常用表示法

1. 真值的定义

对某一物理量进行无限次重复测量,各次测量的算术平均值称为测量值的数学期望或称真值,本章中真值记为 x^* 。

对有限次测量,将其算术平均值当作真值的最佳近似值,简称最佳值,记为 $\bar{x}$,测量次数越多,最佳值越接近于真值。

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

式中 x_i ——第 i 次测量值;
 n ——测量次数。

2. 绝对误差与相对误差

(1) 绝对误差 δ_i 与 δ

$$\delta_i = x_i - x^* \approx x_i - \bar{x} \quad (1-2)$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{|\delta_i|}{n} \quad (1-3)$$

式中 δ_i 取绝对值是为了防止正负误差相互抵消。虽然取绝对值后求和夸大了测量误差, 但其计算简便, 故较常用。 δ 又称算术平均误差。

(2) 相对误差 e

$$e = \frac{\delta}{x^*} \approx \frac{\delta}{\bar{x}} \quad (1-4)$$

3. 方差与标准差

算术平均误差不能反映误差的离散程度或偏离平均值的程度。例如, 有下述两组误差:

3, 1, 8, 2, 1

4, 1, 3, 5, 2

由式(1-3)计算知, 这两组数据的算术平均误差均为 3, 但第一组数据中最大误差为 8, 远高于平均值 3。第二组数据中最大误差为 5, 较第一组数据误差要小。

此时, 这两组数据的差异可以用方差与标准差判别。

方差为随机变量与其数学期望之差的平方和的平均值。测量误差的方差为

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x^*)^2}{n} \quad (1-5)$$

标准差 σ 又称为均方差, 其值为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x^*)^2}{n}} \quad (1-6)$$

对有限次测量, 以 $\bar{x}$ 代替 x^* , 可推导出标准差的估计值

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

式中 ϵ_i ——残差。

$$\epsilon_i = x_i - \bar{x} \quad (1-8)$$

式(1-7)中 $\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$ 若按下式计算, 可减少计算量:

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-9)$$

由式(1-7)求得前述的两组数据的标准差 $\sigma_1 = 4.04$, $\sigma_2 = 3.71$ 。可见由标准差可以反映数据的离散程度。

(三) 随机误差的分布

在化学工程中, 大量随机误差服从或近似服从正态分布, 其分布规律参见图 1-1。图中, 横坐标表示测量 x (或绝对误差 δ), 纵坐标表示概率密度函数 $p(x)$ (或 $p(\delta)$)。图中倒钟形曲

线为某一标准差下的概率曲线,它对称于直线 $x = x^*$ (测量值 x 的数学期望)或对称于直线 $\delta = 0$ 。

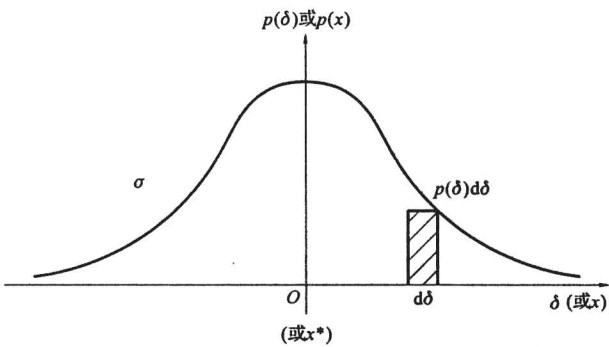


图 1-1 正态分布曲线

正态分布密度函数为

$$p(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \frac{-\delta^2}{2\sigma^2} \tag{1-10}$$

曲线下阴影区的面积 $p(x)d\delta$ 为误差 δ 出现的概率,曲线下的全部面积表示全部误差出现的概率,应为 100%。测量误差 δ 落在区间 $(-\Delta \leq \delta \leq \Delta)$ 内的概率为

$$p(-\Delta \leq \delta \leq \Delta) = \int_{-\Delta}^{\Delta} p(\delta) d\delta \tag{1-11}$$

概率积分的运算较复杂,通常由概率积分表查积分值。

(四) 置信概率 ξ 与显著性水平 α

若将误差以标准差的倍数表示。令 $\Delta = z\sigma$,则式(1-11)可理解为“误差落在区间 $[-z\sigma, +z\sigma]$ 内”这一假设成立的概率,称置信概率,记为 ξ 。若令 $\alpha = 1 - \xi$,则 α 表示上述假设不成立或有显著错误的概率, α 称为置信水平或显著性水平。 z 为置信系数。

若误差服从正态分布,则可根据需要选取一个置信系数 z ,由正态分布概率表查出对应的概率,反之,若选取置信水平 α ,也可由正态分布概率表查出对应的置信系数 z ,再确定某一 α 值下的误差范围 $\pm z\sigma$ 。表 1-1 列举了几组 α 、 ξ 、 z 值。

表 1-1 α 、 ξ 、 z 的关系

显著性水平 α (%)	置信概率 ξ (%)	置信系数 z
31.80	68.2	1
5	95	1.96
4.55	95.45	2
1	99	2.58
0.27	99.73	3

二、直接测量误差

(一) 直接测量误差的计算

本节只讨论等精度直接测量误差的计算。

精度为标准差的倒数,标准差越小,数据的离散程度越小,精度越高,见图 1-2。

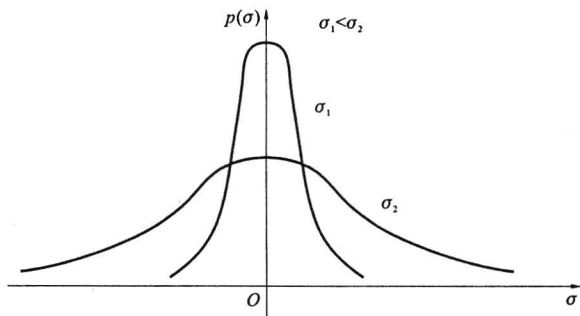


图 1-2 σ 与数据的离散程度

在等精度测量中,测量方法等测量的条件不同,因此各次测量的可靠程度不同,应采用加权平均值计算。

等精度测量是指在测量条件(包括量仪、测量人员、测量方法及环境条件等)不变的情况下,对某一被测几何量进行的多次测量,应采用加权平均值计算。在等精度测量中,各次测量的标准差相同。

等精度直接测量的结果可用绝对误差、相对误差或标准差表示。

1. 用绝对误差及相对误差表示

$$x^* = \bar{x} \pm \delta \quad (1-12)$$

$$x^* = \bar{x}(1 \pm e) \quad (1-13)$$

式中 $\bar{x}$ 、 δ 和 e 分别按式(1-1)和式(1-3)、式(1-4)计算。

2. 用标准差表示

(1)若已知标准差 σ ,则一次测量值 x 的测量结果为

$$x^* = x \pm z\sigma \quad (1-14)$$

若取显著水平 $\alpha=5\%$,由表 1-1 查得置信系数 $z=1.96$,则 $x^* = x \pm 1.96\sigma$ 的置信概率为 95%,此结果有显著错误的概率为 5%。

(2)若对同一物理量进行 n 次等精度测量,则

$$x^* = \bar{x} \pm z\sigma_{\bar{x}} \quad (1-15)$$

式中 $\sigma_{\bar{x}}$ ——算术平均值的标准差,按下式计算:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-16)$$

【例 1-1】 已知某仪器的标准差为 12%,若要求 $\sigma_{\bar{x}}=5\%$ 及 1%,应进行多少次测量?

解 由式(1-16),当 $\sigma_{\bar{x}}=5\%$ 时

$$n = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\bar{x}}}\right)^2 = \left(\frac{12}{5}\right)^2 = 5.76 \text{ 次,取 } n = 6 \text{ 次。}$$

同理 $\sigma_{\bar{x}}=1\%$ 时, $n=144$ 次。

(3)已知有限次测量的标准差的估计值 $\hat{\sigma}$,测量结果可表示为

$$x^* = \bar{x} \pm z_i \hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (1-17)$$

其中

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (1-18)$$

由于测量次数较少,不服从正态分布,式(1-17)中的 z_i ,查 z_i 分布表,见表 1-2。

表 1-2 $\alpha=5\%$ 时的 z_i 值

自由度 m	2	3	4	5	6	7	8	9
z_i	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.37	2.31	2.26
自由度 m	10	11	12	13	15	19	24	∞
z_i	2.23	2.20	2.18	2.16	2.13	2.09	2.06	1.96

表 1-2 中的自由度指独立测量值的个数,它等于子样测量值个数减去约束条件(方程)数。

比较表 1-1 与表 1-2 可知,当自由度 $m>24$ 时, z_i 值已接近正态分布值;当 $m=\infty$ 时, $z_i=1.96$,与正态分布一致。

(二) 3σ 准则

3σ 准则是指可疑测量值能否剔除的一种判据。由表 1-1 可知,若 $z=3$,则 $\alpha=0.27\%$ 。说明大于或等于 3σ 的误差出现的概率只有 0.27% ,即 367 次测量中出现这种情况的概率只有 1 次,因此,将大于或等于 $\pm 3\sigma$ 的误差当作过失误差剔除,产生“弃真错误”的概率只有 0.27% 。

当测量次数 $n\leq 10$ 时, 3σ 准则不适用,当 $n\geq 11$,应用 3σ 准则剔除可疑测量产生的弃真概率见表 1-3。

表 1-3 3σ 准则的弃真概率

测量次数 n	11	16	61	121	333
弃真概率(%)	1.9	1.1	0.5	0.4	0.3

(三) 直接测量误差估计

若测量次数较少或只测量一次,则可参考以下的方法估计测量误差。

(1) 用标准仪表校正

例如,用伏特表测得电压为 203V,用高一级的伏特表测值为 200V,则校正值为 3V。

(2) 按仪表的精度等级或引用误差估计

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{满度示值}} \times 100\% \quad (1-19)$$

例如,某压力表的满度示值即最大量程为 0.4MPa、精度为 1.5 级(表盘上记有符号 1.5),这表示该表的引用误差为 1.5%,因此,该表的最大示值误差为

$$\delta_{\max} = \frac{1.5}{100} \times 0.4 = 0.006(\text{MPa})$$

(3) 取仪表最小分度的一半为绝对误差

若温度计表示值在 $51\sim 52^\circ\text{C}$ 之间,则可记为 $(51.5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。

三、函数误差

用水银温度计测量温度属于直接测量,而用 U 形管测量压差时,差压计示值 R 是左右两侧液柱高度之差,即 $R=R_1-R_2$,属间接测量,其测量误差称为间接测量误差,又称函数误差。函数误差应根据函数关系计算。

(一) 函数的绝对误差与相对误差

(1) 绝对误差

设 y 为直接测量值 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m$ 的函数。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)$$

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} dx_m$$

以小的有限增量 Δx_i 代替微分 dx_i ：

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \Delta x_m \quad (1-20)$$

式中 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ ——误差传递系数；

$\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$ ——第 i 项分误差。

上式称绝对误差的传递公式。

最大绝对误差为

$$\Delta y_{\max} = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad (1-20a)$$

(2) 相对误差

$$e_y = \frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\Delta x_i}{y} \quad (1-21)$$

$$e_{y, \max} = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\Delta x_i}{y} \right| \quad (1-21a)$$

注意，有时先求 e_y 再求 Δy 较方便。

(二) 函数的标准差与算术平均值的标准差

(1) 函数的标准差

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (1-22)$$

若测量次数较少，可类比式(1-7)计算 σ_y 的估计值 $\hat{\sigma}_y$ ：

$$\hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1-23)$$

(2) 算术平均值的标准差 $\hat{\sigma}_{\bar{y}}$

$$\hat{\sigma}_{\bar{y}} = \frac{\hat{\sigma}_y}{\sqrt{n}} \quad (1-24)$$

(三) 极限的相对误差

当测量次数很少或测量一次时，可用下式计算极限相对误差，此式在流体机械试验中较常用。

$$e_y = \frac{\Delta y}{y} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\Delta x_i}{y} \right)^2} \quad (1-25)$$

(四) 间接测量结果的表达方式

$$y^* = \bar{y} \pm \Delta y = \bar{y} \left(1 \pm \frac{\Delta y}{\bar{y}} \right) \quad (1-26)$$