

普通高等教育“十二五”规划教材

化工基础实验

Fundamental Experiments of
Chemical Engineering

王艳花 主编 黄向红 乔 军 副主编



化学工业出版社

TQ016
W412



郑州大学 *04010748254Z*

普通高等教育“十二五”规划教材

化工基础实验

Fundamental Experiments of
Chemical Engineering

王艳花 主编 黄向红 乔 军 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·



TQ016
W412

化工基础实验是化工、环境、食品、生物工程等专业教学计划中的必修课程,属于工程实验范畴。全书共分六章,第一章化工实验基础知识,第二章实验误差,第三章实验数据的处理,第四章实验各环节要求,第五章实验相关仪器仪表知识,第六章实验部分,包括阻力实验、离心泵实验、过滤实验、传热实验、吸收解析实验、精馏实验、干燥实验、膜分离实验、多釜串联、管式反应釜返混实验、二元汽液平衡、三元液液平衡、临界状态观察、多功能精馏、乙苯脱氢等。本书适用于较少学时实验课程的相关专业,力求达到培养高技能、应用型人才的目标,也可供有关行业的科研、设计及生产单位的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工基础实验/王艳花主编. —北京:化学工业出版社, 2012.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-13418-9

I. 化… II. 王… III. 化学工程-化学实验-高等学校-教材 IV. TQ016

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第019267号

责任编辑:满悦芝

文字编辑:李 玥

责任校对:顾淑云

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张8 字数200千字 2012年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:19.80元

版权所有 违者必究

前言

化工基础实验是化工、制药、环境、食品、生物工程等院系或专业教学计划中的必修课程，属于工程实验范畴。该课程是在学生完成了基础化学课程以及化工原理等专业课的基础上开设的，涵盖了一些比较典型的化工单元操作。其目的是使学生掌握化工单元操作的基本特点、化工实验的研究方法、实验数据的误差分析、实验数据的处理方法以及与化工基础实验有关的计算机数据采集与控制等基本知识。归纳起来本书有以下特点。

1. 强调数据采集以及数据处理方法，培养学生的工程意识，增强其从工程视角观察、分析和解决实际工程问题的能力。

2. 加强化工实验中常用仪器仪表知识的普及，适用于较少学时实验课程的相关专业，力求达到培养高技能、应用型人才的目标。

全书共分六章，第一章化工实验基础知识，第二章实验误差，第三章实验数据的处理，第四章实验各环节要求，第五章实验相关仪器仪表知识，第六章实验部分，包括阻力实验、离心泵实验、过滤实验、传热实验、吸收解析实验、精馏实验、干燥实验、膜分离实验、多釜串联、管式反应釜返混实验、二元汽液平衡、三元液液平衡、临界状态观察、多功能精馏、乙苯脱氢等。本书可作为高等院校化工及有关专业的教材，也可供有关行业的科研、设计及生产单位的科技人员参考。

本书王艳花主编；黄向红、乔军副主编；方应国、李赫、沈超参编。由于编者时间和经验所限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编者
2012.3

目 录

第一章	化工实验基础知识	1
	一、化工基础实验教学目的	1
	二、化工基础实验的特点	1
	三、化工基础实验教学内容与方法	2
第二章	实验误差	4
	一、误差的基本概念	4
	二、误差的基本性质	5
第三章	实验数据的处理	10
	一、有效数字的处理	10
	二、实验结果的数据处理	10
	三、经验公式的选择	15
第四章	实验各环节要求	18
	一、实验预习	18
	二、实验操作环节	18
	三、测定、记录和数据处理	18
	四、实验安全与环保	20
	五、编写实验报告	22
第五章	实验相关仪器仪表知识	24
	一、涡轮流量计	24
	二、压力测量仪表	25
	三、数字式显示仪表	29
	四、热电偶温度计	30
	五、热电阻温度计	34
	六、阿贝折射仪	34
第六章	实验部分	38
	实验 1 气体转子流量计校正	38
	实验 2 液体流量计的标定	41
	实验 3 流体流动类型及临界雷诺数的测定	45
	实验 4 流体阻力（综合）测定实验	47
	实验 5 离心泵性能测定实验（远程控制）	55
	实验 6 对流传热系数的测定	59
	实验 7 传热综合实验	64
	实验 8 板框恒压过滤常数测定实验	67
	实验 9 真空过滤实验	69
	实验 10 筛板精馏塔实验	71

实验 11	填料精馏塔和等板高度的测定 (全回流)	75
实验 12	填料吸收塔实验	78
实验 13	往复筛板萃取塔实验	82
实验 14	干燥速率曲线测定实验	86
实验 15	膜分离实验	90
实验 16	汽液平衡数据的测定	95
实验 17	三元液液平衡的测定	98
实验 18	二氧化碳临界状态观测及 pVT 关系测定实验	101
实验 19	反应精馏法制乙酸乙酯	106
实验 20	乙苯脱氢制苯乙烯实验	108
实验 21	串联流动反应器停留时间分布的测定	112
实验 22	连续均相管式循环反应器中的返混实验	116
附 录		119
附录一	水的物理性质	119
附录二	干空气的物理性质 ($p=101.325\text{kPa}$)	119
附录三	几种常用理想二元标准混合液	120
附录四	正庚烷-甲基环己烷的组成与折射率关系	120
附录五	乙醇-水系统 $t-x-y$ 数据	120
附录六	各种换热方式下对流传热系数的范围	121
附录七	苯甲酸-煤油-水物系萃取实验分配曲线数据	121
参考文献		122

第一章 化工实验基础知识

化工基础实验是化工、制药、环境、食品、生物工程等院系或专业教学计划中的必修课程，属于工程实验范畴，与一般化学实验的不同之处在于它具有工程特点。每个实验项目都相当于化工生产中的一个单元操作，通过实验能建立起一定的工程概念，同时，随着实验课的进行，会遇到大量的工程实际问题，对理工科学生来说，可以在实验过程中更实际、更有效地学到更多工程实验方面的原理及测试手段，可以发现复杂的真实设备与工艺过程同描述这一过程的数学模型之间的关系，也可以认识到对于一个看起来似乎很复杂的过程，一经了解，可以只用最基本的原理来解释和描述。因此，在实验课的全过程中，学生在思维方法和创新能力方面都得到培养和提高，为今后的工作打下坚实的基础。

一、化工基础实验教学目的

(1) 巩固和深化理论知识 在学习化工基础课程的前提下，进一步了解和理解一些比较典型的已被或将被广泛应用的化工过程与设备的原理和操作，巩固和深化基础化工的理论知识。

(2) 提供理论联系实际的机会 用所学的化工基础理论知识去解决实验中遇到的各种实际问题，同时学习在化工领域内如何通过实验获得新的知识和信息。

(3) 培养学生从事科学实验的能力 实验能力主要包括：①为了完成一定的研究课题，设计实验方案的能力；②进行实验，观察和分析实验现象的能力和解决实验问题的能力；③正确选择和使用测量仪表的能力；④利用实验的原始数据进行数据处理以获得实验结果的能力；⑤运用文字表达技术报告的能力等。学生只有通过一定数量的实验训练，才能掌握各种实验技能，为将来从事科学研究和解决工程实际问题打好坚实的基础。

(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，提高自身素质。

(5) 随着科技的发展，不断引进新的化工技术和实验技术，开阔眼界，启发新创意。

二、化工基础实验的特点

本实验课程不附属于某一门理论课，因此不以印证和学好某一门理论课程为主要目的，而以培养高等化工科技人才应具有的一些能力和素质为主要目的，将能力和素质培养贯穿于实验课的全过程。

① 培养学生进行试验方案设计的能力。先讲授试验设计方法，后让每个学生都必做试验设计应用实验。

② 培养学生处理实验数据的能力。例如，对流传热系数及其特征数关联式测定实验，求 Nu 数对 Re 数和 Pr 数的关联式时，假设 Re 、 Pr 的量纲均为未知，应用多元回归方法处理实验数据，求关联式的系数和指数。

③ 培养学生对实验数据进行估算和分析的能力。例如在流动阻力测定实验或流量计性能测定实验的实验报告中，务必要求学生对本实验的数据进行全面的误差估算和分析。

④ 使学生逐渐养成对待科学和工作严肃认真的科学作风及良好的习惯。实验前检查学生实验原始数据表格和项目清单的准备情况，实验结束时对学生的实验原始数据记录进行检查和签字，并严格要求学生做好实验的收尾工作和现场清洁卫生。严格要求学生对实验报告

准确书写,目的是培养正确书写实验报告的能力。

⑤ 教材量大、讲授内容少,实验过程中引导学生自学教材中的有关内容,这不只是为了解决学时数不够的问题,更重要是让学生培养自学科学书刊的习惯和爱好,学会“自学”方法。

课程内容强调实践、注意工程概念,做到几个结合。

① 验证化工基础课程中最基本的理论与培养学生掌握实验研究方法、提高分析和解决实际问题的能力相结合。

② 单一验证性实验与综合性、设计性实验相结合,以便训练学生的独立思考、综合分析处理问题的能力。

③ 理论与实践密切结合,在教材各章节的举例时尽量采用化工基础实验中的实测结果,这样做便于学生自学教材内容和将所学的理论知识立即用于实验中,引导学生举一反三,为之后的毕业实践和今后处理工程实际问题打下基础。

④ 传统的与近代的实验方法、测试手段及数据处理技术相结合。

⑤ 注意将目前理论和发展相结合,将完成实验教学基本内容与因材施教、拓宽加深实验教学内容和方法、培养创新精神相结合。

⑥ 引入新的化工技术和科学的实验技术与当今化工研究热点内容相结合,使学生尽早适应 21 世纪化工发展的要求。

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;实验室开放,除完成实验教学基本内容外,可为对化工基础实验感兴趣的同学提供实验场所,培养学生的科研能力和创新精神。

三、化工基础实验教学内容与方法

1. 化工基础实验教学内容

化工基础实验教学内容主要包括实验理论教学、计算机仿真实验和典型的单元操作实验三大部分。

(1) 实验理论教学 主要讲述化工基础实验教学的目的、要求和方法;化工基础实验的特点;化工基础实验的研究方法;实验数据的误差分析;实验数据的处理方法;与化工基础实验有关的计算机数据采集与控制基本知识等。

(2) 计算机仿真实验 包括仿真运行、数据处理和实验测评三部分。

(3) 典型单元操作实验 包括阻力实验、离心泵实验、过滤实验、传热实验、吸收解析实验、精馏实验、干燥实验、膜分离实验、多釜串联、管式反应釜返混实验、二元汽液平衡、三元液液平衡、临界状态观察、多功能精馏、乙苯脱氢等。

2. 化工基础实验教学方法

由于工程实验是一项技术工作,它本身就是一门重要的技术学科,有其自己的特点和系统。为了切实加强实验教学环节,将实验课单独设课。每个实验均安排现场预习(包括仿真实验)和实验操作两个单元时间。化工基础实验工程性较强,有许多问题需事先考虑、分析,并做好必要的准备,因此必须在实验操作前进行现场预习和仿真实验。化工基础实验室实行开放制度,学生实验前必须预约。

3. 实验数据的记录

① 每个学生都应有一个完整的原始数据记录表,在表格中应记下各项物理量的名称、表示符号和单位。不应随便拿一张纸就记录,要保证数据完整,除了记录测取的数据外,还应将装置设备的有关尺寸、大气条件等数据记录下来。

② 实验时一定要在现象稳定后才开始读数据, 条件改变后, 要等待一会儿才能读取数据, 这是因为稳定需要一定时间, 而仪表通常又有滞后现象的缘故。不要条件一改变就测数据, 引用这种数据做报告, 结论是不准确的。

③ 同一条件下至少要读取两次数据, 而且只有当两次读数相近时才能改变操作条件。

④ 每个数据记录后, 应该立即复核, 以免发生读错或写错数字等错误。

⑤ 数据记录必须真实地反映仪表的精度, 一般要记录至仪表上最小分度以下一位数。

⑥ 实验中如果出现不正常情况, 以及数据有明显误差时, 应在备注栏中加以注明。

第二章 实验误差

由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响、人的观察力、测量程序限制等，实验观察值和真值之间总是存在一定的差异，在数值上即表现为误差。为了提高实验的精度，缩小实验观测值与真值之间的差值，需要对实验的误差进行分析和讨论。

一、误差的基本概念

1. 真值与平均值

真值是一个理想的概念，一般是不可能观测到的。但是若对某一物理量经过无限多次的测量，出现误差有正有负，而正负误差出现的概率是相同的。因此，在不存在系统误差的前提下，它们的平均值就相当接近于这物理量的真值。所以实验科学中定义：无限多次的观测值的平均值为真值。由于实验工作中观测的次数总是有限的，这些有限的观测值的平均值，只能近似于真值，故称这个平均值为最佳值。化工中常用的平均值有以下几种。

(1) 算术平均值

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-1)$$

(2) 均方根平均值

$$x_s = \left(\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (2-2)$$

(3) 几何平均值

$$x_c = (x_1 x_2 \cdots x_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2-3)$$

计算平均值方法的选择，取决于一组观测值的分布类型。在一般情况下，观测值的分布属于正态类型，即正态分布。因此，算术平均值作为最佳值使用最为普遍。

2. 误差表示法

某测量点的误差通常由下面三种形式表示。

(1) 绝对误差 某量的观测值与真值的差称为绝对误差，通称误差。但在实际工作中，以平均值（即最佳值）代替真值，把观测值与最佳值之差称剩余误差，但习惯上称绝对误差。

(2) 相对误差 为了比较不同被测量值的测量精度，引入了相对误差。

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

(3) 引用误差 引用误差（或相对示值误差）指的是一种简化和实用方便的仪器仪表指示值的相对误差，它是以仪器仪表的满刻度示值为分母，某一刻度点示值误差为分子，所得比值的百分数。仪器仪表的精度用此误差来表示。比如1级精度仪表，即为：

$$\text{引用误差} = \frac{\text{量程内最大示值误差}}{\text{满量程示值}} \times 100\%$$

在化工领域中,通常用算术平均误差和标准误差来表示测量数据的误差。

(4) 算术平均误差

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{n} \quad (2-4)$$

(5) 标准误差 标准误差称为标准差或称为均方根误差。当测量次数为无穷时,其定义为:

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

当测量次数有限时,常用下式表示:

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

式中, n 表示观测次数; x_i 表示第 i 次的测量值; x_m 表示 m 次测量值的算术平均值。

标准误差的大小说明,在一定条件下等精度测量的数据中每个观测值对其算术平均值的分散程度。如果测得数值小,该测量列数据中相应小的误差占优势,任一单次观测值对其算术平均值的分散程度就小,测量的精度高;反之,精度就低。

3. 误差的分类

(1) 系统误差 系统误差是指在同一条件下,多次测量同一量时,误差的数值和符号保持恒定,或在条件改变时,按某一确定的规律变化的误差。系统误差的大小反映了实验数据准确度的高低。产生系统误差的原因:①仪器不良,如刻度不准、仪表未经校正或标准表本身存在偏差等;②周围环境的改变,如外界温度、压力、风速等;③实验人员个人的习惯和偏向,如读数的偏高或偏低等引入的误差。系统误差可针对上述诸原因分别改进仪器和实验装置以及提高实验技巧予以清除。

(2) 随机误差(或称偶然误差) 在已经消除系统误差的前提下,随机误差是指在相同条件下测量同一量时,误差的绝对值时大时小,其符号时正时负,没有确定规律的误差。随机误差的大小反映了精密程度的高低。这类误差产生原因无法预测,因而无法控制和补偿。但是倘若对某一量值作足够多次数的等精度测量时,就会发现随机误差完全服从统计规律,误差的大小和正负的出现完全由概率决定。因此随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值必趋近于零。所以,多次测量结果的算术平均值将更接近于真值。

(3) 过失误差(或称粗大误差) 过失误差是一种显然与事实不符的误差,它主要是由于实验人员粗心大意如读错数据或操作失误等所致。存在过失误差的观测值在实验数据整理时必须剔除,因此测量或实验时只要认真负责是可以避免这类误差的。

显然,实测数据的精确程度是由系统误差和随机误差的大小来决定的。系统误差愈小,测得数据的精确度愈高;随机误差愈小,测得数据的精确度愈高。所以要使实测数据的精确度提高就必须满足系统误差和随机误差均很小的条件。

二、误差的基本性质

实测数据的可靠程度如何,又怎样提高它们的可靠性?这些都要求我们应了解在给定条件下误差的基本性质和变化规律。

1. 偶然(随机)误差的正态分布

如果测量数列中不包含系统误差和过失误差,从大量的实验中发现偶然误差具有如下特

点：绝对值相等的正误差和负误差，其出现的概率相同；绝对值很大的误差出现的概率趋近于零，也就是误差值有一定的实际极限；绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小；当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，误差的算术平均值趋近于零，这是由于正负误差相互抵消的结果。也就说明在测定次数无限多时，算术平均值就等于测定量的真值。

偶然误差的分布规律，在经过大量的测量数据的分析后可知，它是服从正态分布的，其误差函数 $f(x)$ 表达式为：

$$y = f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2-7)$$

或者

$$y = f(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} \quad (2-8)$$

其中

$$h = \frac{1}{\sigma \sqrt{2}}$$

式中， h 称为精密指数； x 为测量值与真实值之差； σ 为均方误差。

式(2-8)称为高斯误差分布定律。根据此方程所给出的曲线则称为误差曲线或高斯正态分布曲线，此误差分布曲线完全反映了偶然误差的上述特点。

现在我们来考虑一下 σ 值对分布曲线的影响，由式(2-8)可见，数据的均方误差 σ 愈小， e 指数的绝对值就愈大， y 减小得就愈快，曲线下降得也就更急，而在 $x=0$ 处的 y 值也就愈大；反之， σ 愈大，曲线下降得就缓慢，而在 $x=0$ 处的 y 值也就愈小。图 2-1 和图 2-2 对三种不同的 σ 值 (σ 值分别为 1 单位、3 单位、10 单位) 给出了偶然误差的分布曲线。

从这些曲线以及上面的讨论中可知， σ 值愈小，小的偶然误差出现的次数就愈多，测定精度也就愈高。当 σ 值愈大时，就会经常碰到大的偶然误差，也就是说，测定的精度也就愈差。因而实测到数据的均方误差，完全能够表达出测定数据的精确度，也即表征着测定结果的可靠程度。

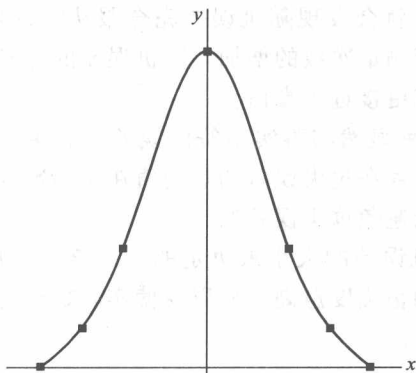


图 2-1 误差分布曲线 (高斯正态分布曲线)

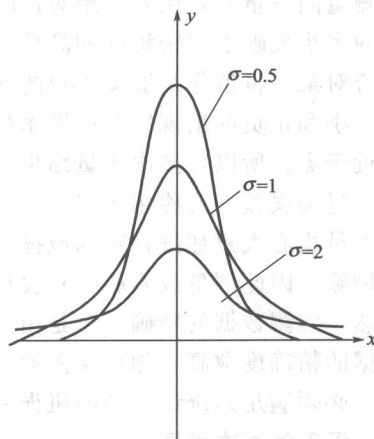


图 2-2 不同 σ 值时的误差分布曲线

2. 可疑的实验观测值的舍弃

由概率积分知，偶然误差正态分布曲线下的全部面积，相当于全部误差同时出现的概率，即

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 1 \quad (2-9)$$

若随机误差在 $-\sigma \sim +\sigma$ 范围内, 概率则为:

$$P(|x| < \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 1 \quad (2-10)$$

令 $t = \frac{x}{\sigma}$, 则 $x = t\sigma$

$$\text{所以} \quad P(|x| < \sigma) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 2\phi(t) \quad (2-11)$$

即误差在 $\pm t\sigma$ 的范围内出现的概率为 $2\phi(t)$, 而超出这个范围的概率则为 $1-2\phi(t)$ 。

概率函数 $\phi(t)$ 与 t 的对应值在数学手册或专著中均附有此类积分表, 现给出几个典型的 t 值及其相应的超出或不超出 $|x|$ 的概率, 见表 2-1。

由表 2-1 可知, 当 $t=3$, $|x|=3\sigma$ 时, 在 370 次观测中只有一次绝对误差超出 3σ 范围, 由于在测量中次数不过几次或几十次, 因而可以认为 $|x|>3\sigma$ 的误差是不会发生的, 通常把这个误差称为单次测量的极限误差, 这也称为 3σ 规则。由此认为, $|x|=3\sigma$ 的误差已不属于偶然误差, 这可能是由于过失误差或实验条件变化未被发觉引起的, 所以这样的数据点经分析和误差计算以后予以舍弃。

表 2-1 t 值及相应的概率

t	$ x < t\sigma$	不超过 $ x $ 的 概率 $2\phi(t)$	超过 $ x $ 的概率 $1-2\phi(t)$	测量次数 n	超过 $ x $ 的测 量次数 n
0.67	0.67σ	0.4972	0.5028	2	1
1	σ	0.6226	0.3774	3	1
2	2σ	0.9544	0.0456	22	1
3	3σ	0.9973	0.0027	370	1
4	4σ	0.9999	0.0001	15626	1

3. 函数误差

上述讨论主要是直接测量的误差计算问题, 但在许多场合下, 往往涉及间接测量的变量, 所谓间接测量是通过直接测量与被测的量之间有一定函数关系的其他量, 并根据函数关系计算出被测量, 如流体流速等测量变量。因此, 间接测量就是直接测量得到的各测量值的函数。其测量误差是各原函数。

(1) 函数误差的一般形式 在间接测量中, 一般为多元函数, 而多元函数可用下式表示:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2-12)$$

式中, y 为间接测量值; x 为直接测量值。

由泰勒级数展开得:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (2-13)$$

或

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (2-14)$$

它的极限误差为:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad (2-15)$$

式中, $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为误差传递系数; Δx 为直接测量值的误差; Δy 为间接测量值的极限误差或称函数极限误差。

由误差的基本性质和标准误差的定义, 得函数的标准误差:

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-16)$$

式中, σ_i 为直接测量值的标准误差。

(2) 某些函数误差的计算

① 设函数 $y = x \pm z$, 变量 x 、 z 的标准误差分别为 σ_x 、 σ_z 。

由于误差的传递系数:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial y}{\partial z} = \pm 1$$

函数极限误差: $\Delta y = |\Delta x| + |\Delta z|$ (2-17)

函数标准误差: $\sigma_y = (\sigma_x^2 + \sigma_z^2)^{\frac{1}{2}}$ (2-18)

② 设 $y = k \frac{xz}{w}$, 变量 x 、 z 、 w 的标准误差为 σ_x 、 σ_z 、 σ_w 。

由于误差传递系数分别为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} &= \frac{kz}{w} = \frac{y}{x} \\ \frac{\partial y}{\partial z} &= \frac{kx}{w} = \frac{y}{z} \\ \frac{\partial y}{\partial w} &= -\frac{kxz}{w^2} = -\frac{y}{w} \end{aligned}$$

则函数的相对误差为:

$$\Delta y = |\Delta x| + |\Delta z| + |\Delta w| \quad (2-19)$$

函数的标准误差为:

$$\sigma_y = k \left[\left(\frac{z}{w} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{x}{w} \right)^2 \sigma_z^2 + \left(\frac{x}{w^2} \right)^2 \sigma_w^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-20)$$

③ 设函数 $y = a + bx^n$, 变量 x 的标准误差为 σ_x , a 、 b 、 n 为常数。

由于误差传递系数为:

$$\frac{dy}{dx} = nbx^{n-1}$$

则函数的误差为:

$$\Delta y = |nbx^{n-1} \Delta x| \quad (2-21)$$

函数的标准误差为:

$$\sigma_y = nbx^{n-1} \sigma_x \quad (2-22)$$

④ 设函数 $y = k + n \ln x$, 变量 x 的标准误差为 σ_x , k 、 n 为常数。

由于误差传递系数为:

$$\Delta y = \left| \frac{n}{x} \Delta x \right| \quad (2-23)$$

函数的标准误差为:

$$\sigma_y = \frac{n}{x} \sigma_x \quad (2-24)$$

⑤ 算术平均值的误差。由算术平均值的定义知：

$$M_m = \frac{M_1 + M_2 + \cdots + M_n}{n}$$

其误差传递系数为：

$$\frac{\partial M_m}{\partial M_i} = \frac{1}{n} \quad (i=1, 2, \cdots, n)$$

则算术平均值的误差：

$$\Delta M_m = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta M_i|}{n} \quad (2-25)$$

算术平均值的标准误差：

$$\sigma_m = \left(\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-26)$$

当 $M_1, M_2, \cdots, M_n$ 是同组等精度测量值，它们的标准误差相同，并等于 σ 。所以：

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2-27)$$

除了上述讨论由已知各变量的误差或标准误差计算函数误差外，还可以应用于实验装置的设计和实验装置的改进。在实验装置设计时，如何去选择仪表的精度，即由预先给定的函数误差（实验装置允许的误差）求取各测量值（直接测量）所允许的最大误差。但由于直接测量的变量不是一个，在数学上则是不定解。为了获得唯一解，假定各变量的误差对函数的影响相同，这种设计的原则称为等效原则或等传递原则，即

$$\sigma_y = \sqrt{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \sigma_i \quad (2-28)$$

或

$$\sigma_i = \frac{\sigma_y}{\sqrt{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)} \quad (2-29)$$

第三章 实验数据的处理

一、有效数字的处理

1. 有效数字及其表示方法

所谓有效数字是指一个位数中除最末一位数为欠准或不确定外,其余各位数都是准确的,这个数据有几位数,我们就说这个数据有几位有效数字。

有效数字反映一个数的大小,又表示在测量或计算中能够准确地量出或读出的数字,因此它与测量仪表的精确度有关,在有效数字中只许可包含一位估计数字(末位为估计数字),而不能包含两位数字。例如分度值为 1°C 的温度计,读数 24.5°C ,则三个数字都是有效数字(其中末位是许可估计数),而记为 25°C 或 24.47°C 都是不正确的。对于精度为 $1/10^{\circ}\text{C}$ 的温度计,室温 20.36°C 有效数字是四位,其中第四位是估计值。 51.1g 和 0.0515g 都是三位有效数字, 1500m 代表四位有效数字,而 1.5×10^4 则只代表两位有效数字,若写成 1.500×10^4 表示四位有效数字,这时 1.500 中的“0”不能省去,表示这个数值与实际值只相差不超过 10m 。

2. 有效数字的运算规则

(1) 记录、测量只准保留一位估计数字。

(2) 当有效数字确定后,其余数字一律弃去,舍弃的办法是四舍五入,偶舍奇入。即末位有效数字后面第一位大于5则在前一位上加上1,小于5就舍去,若等于5时,前一位是奇数就增加1,如前一位是偶数则舍去。例如有效数字是三位时, 12.36 应为 12.4 ; 12.34 应为 12.3 ;而 12.35 应为 12.4 ;但 12.45 就应为 12.4 ,而不是 12.5 。

(3) 加减法规则 以计算流体的进、出口温度之和、差为例,若测得流体进出口温度分别为 17.1°C 和 62.35°C ,则:

温度和/ $^{\circ}\text{C}$	温度差/ $^{\circ}\text{C}$
62.35	62.35
17.1	17.1
79.45	45.25

由于运算结果具有二位存疑值,它和有效数字的概念(每个有效数字只能有一位存疑值)不符,故第二位存疑值应作四舍五入处理。所以两者的结果为温度和等于 79.4°C 和温度差等于 45.2°C 。

从上面的例子可以看出,为了保证间接测量值的精度,实验装置中选取仪器时,其精度要一致,否则系统的精度将受到精度低的仪器仪表的限制。

(4) 乘除法运算 两个量相乘(或相除)的积(或商),与其有效数字位数少的相同。乘方、开方后的有效数字位数与其底数相同。

(5) 对数运算 对数的有效数字位数应与其真数相同。

二、实验结果的数据处理

1. 列表法

实验数据的初步整理是列表,可分为数据记录表与结果计算表两种,它们是一种专门的

表格。实验原始数据记录表是根据实验内容而设计的, 必须在实验正式开始之前列出表格。例如, 流体流动阻力的测定, 实验的原始记录表形式如表 3-1 所示。

表 3-1 流体流动阻力的测定

序号	体积流量/(L/s)	时间/s	沿程损失读数/cm	局部损失读数/cm	
				左	右
0					
1					
2					

在实验过程中完成一组实验数据的测试, 必须及时地将有关数据记录在表内。当实验完成时得到一张完整的原始数据记录表。切忌采用按操作岗位独自记录, 最后在实验完成后, 重新整理成原始数据记录的方法, 这种方法既费时又易造成差错。流体流动阻力实验的运算表格形式如表 3-2 所示。

表 3-2 流体流动阻力的测定

序号	流量 /(m ³ /s)	流速 /(m/s)	$Re \times 10^{-4}$	沿程损失 /mH ₂ O	摩擦系数 $\lambda \times 10^{-2}$	局部损失 /mH ₂ O	阻力系数 ξ

为了得到关于实验研究结果的完整概念, 表中所列数据应该是足够和必需的。同时, 在相同条件下的重复试验也应该列入表内。

拟制实验表时, 应该注意下列事项:

- ① 列表的表头要列出变量名称、单位的量纲。单位不宜混在数字中, 否则会导致分辨不清;
- ② 数字记录要注意有效位数, 它要与实验准确度相匹配;
- ③ 数据较大或较小时就用浮点数表示, 阶数部分 (即 $\pm n$) 应记录在表头;
- ④ 列表的标题要清楚、醒目, 能准确说明问题。

2. 图形法

实验数据在一定坐标纸上绘成图形, 其优点是简单直观, 便于比较, 容易看出数据间的联系及变化规律, 查找方便。现在就有关问题介绍如下。

(1) 坐标的选择 化工实验通常使用的坐标有直角坐标、对数坐标和半对数坐标。根据预测的函数形式选择不同形式。通常总希望图形能呈直线, 以使用方程表示, 因此一般线性函数采用直角坐标, 幂函数采用对数坐标, 指数函数采用半对数坐标。

(2) 坐标的分度 习惯上横坐标表示自变量 x , 纵坐标表示因变量 y , 坐标分度是指 x 、 y 轴每条坐标所代表数值的大小, 它以阅读、使用、绘图以及能真实反映因变关系为原则。

① 为了尽量利用图面, 分度值不一定自零开始, 可以用变量的最小整数值作为坐标起点, 而高于最大值的某一整数值为坐标的终点。

② 坐标的分度不应过细或过粗, 应与实验数据的精度相匹配, 一般最小的分度值为实验数据的有效数字倒数第二位, 即有效数字最末位在坐标上刚好是估计值。