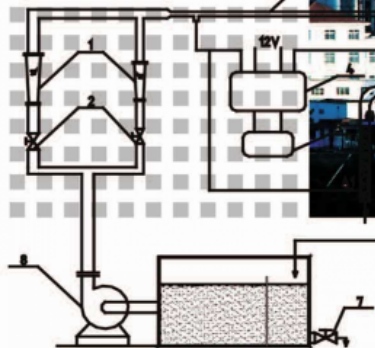


UAGONGSHIYANYUSHIXUN

H 化工

实验与实训

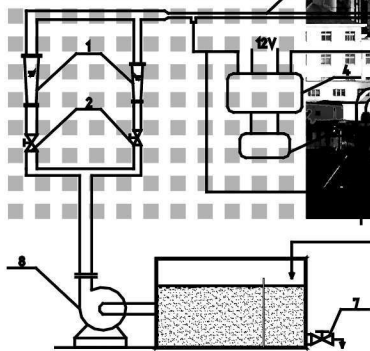
方 芬 范 辉
段潇潇 张晓光 主编



H 化工

实验与实训

方 芬 范 辉 主编
段潇潇 张晓光



黄河出版传媒集团
宁夏人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工实验与实训 / 方芬等主编. -- 银川: 宁夏人民教育出版社, 2016.12

ISBN 978-7-5544-1742-3

I. ①化… II. ①方… III. ①化学工程—化学实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①TQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 321174 号

化工实验与实训

方 芬 范 辉 段潇潇 张晓光 主编

责任编辑 王 宁

封面设计 星 秀

责任印制 殷 戈



黄河出版传媒集团 出版发行
宁夏人民教育出版社

地 址 宁夏银川市北京东路 139 号出版大厦(750001)

网 址 <http://www.yrpubm.com>

网上书店 <http://www.hh-book.com>

电子信箱 jiaoyushe@yrpubm.com

邮购电话 0951-5014284

经 销 全国新华书店

印刷装订 宁夏凤鸣彩印广告有限公司

印刷委托书号 (宁)0003986

开本 787 mm × 1092 mm 1/16

印张 13 字数 280 千字

版次 2016 年 12 月第 1 版

印次 2017 年 2 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5544-1742-3

定价 25.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

化工实验与实训属于工程实验范畴,工程实验的研究方法与基础科学实验是完全不同的,工程实验是针对复杂的工程实际问题而设计的。通过化工实验与实训教学,使学生掌握工程实验方法和技术,加深对化工专业理论知识的理解,从而培养学生的工程理念,提高学生的专业应用能力和工程实践水平。本书作为化工实验实训教材,突出工程观念,注重理论联系实际,强调实验实训安全。全书主要包括五部分:第一部分为化工原理实验基础知识,主要介绍实验数据的测量及误差分析、实验数据处理方法(包括实验数据的整理方法、计算机在数据处理中的应用);第二部分为实验内容,主要介绍化工原理基础实验、反应工程和热力学实验及综合实验的实验装置、操作步骤;第三部分为实训内容,主要包括流体输送、吸收、精馏等综合工艺过程的开车、停车、正常操作、事故处理;第四部分为化工实验实训安全,主要包括实验、实训安全操作规范与事故处理预案;第五部分为附录。

本书由方芬、范辉、段潇潇和张晓光主编,参加编写的还有刘春宁、李建梅、麻晓霞、任永胜、田永华、王淑杰、于辉和詹海鹏。本书完成初稿后,宁夏大学化工系主任李平教授审阅并提出了宝贵意见,在此深表感谢。本书在编写出版工作中,还得到了宁夏大学教务处及化学化工学院领导的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促、编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2016年9月

目 录

001

实验十四 管式反应器停留时间分布测定	113
实验十五 二元物系汽液平衡数据测定	121
实验十六 反应精馏实验	125
 第四章 综合实训内容	131
综合实训一 综合流体输送实训	131
综合实训二 精馏单元操作实训	146
综合实训三 吸收单元操作实训	159
 第五章 实验、实训安全	170
一 实验、实训场所安全注意事项及行为规范	170
二 实验、实训室安全卫生防护设备	171
三 实验、实训室安全操作指导	173
四 事故及应急预案	176
 附 录	
一 常用流量计	183
二 常用测压仪表	188
三 常用测温仪表	191
四 化工实验常用数据表	195
 参考文献	201

第一章 工程实验及处理工程问题的实验方法论

一、直接实验方法

直接实验方法是对被研究的对象进行直接的观察、实验,是解决工程问题最基本的方法。用这种方法所得到的结果是可靠的,但由于实验结果只能用到特定的实验条件和实验设备上,或者只能推广到实验条件全相同的现象上,以个别量之间的规律性关系去抓住现象的全部本质,因此有较大的局限性,同时也是耗时费力的方法。例如,过滤某种物料,已知滤浆的浓度和过滤压力,测定过滤时间和滤液量,从而得到过滤曲线,若滤浆浓度或过滤压力改变,所得的过滤曲线也将改变。

二、因次分析方法

实验方法论必须具有两个功能方有成效,其一是应能由此及彼,其二是可由小见大。因次分析法恰恰可以非常成功地使实验研究方法具有这两个功能,故赋予“因次论指导下的实验方法”。在因次论指导下的实验不需要对过程的深入的理解,不需要采用真实的物体,真实流体或实际的设备尺寸,只需借助模拟物体(如空气、水)在实验室规模的小设备中,由一些预备性的实验或理性的推断得出过程的影响因素,从而加以归纳和概括成经验方程。这种因次论指导下的实验研究方法是解决难于作出数学描述的复杂问题的有效方法。

1. 因次分析法基本概念

因次(又称量纲)就是物理量(测量)单位的种类。例如长度可以用米、厘米、分米、英尺等不同单位测量,但这些单位均属于同一类,即长度类。所以测量长度的单位具有同一因次,以 $[L]$ 表示之。其他物理量,如时间、速度、加速度、密度、力、温度等也各属一种因次。

在力学中常取长度、时间及质量(或者力)这三种量为基本量。它们的因次相应地以 $[L]$ 、 $[T]$ 、 $[M]$ (或 $[F]$)表示,称为基本因次。其他力学量可由这三个量,通过某种公式导出,称为导出量,它们的因次则称为导出因次。导出量的因次是由基本因次经公式推导而出,它就必然由基本因次组成,一般地可以把它写为各基本因次的幂指数乘积

的形式。例如,某导出量 Q 的因次为 $[Q] = [M^a L^b T^c]$, 这里指数 a, b, c 为常数。

2. 因次一致性

不同种类的物理量不可相加减,不能列等式,也不能比较它们的大小。例如速度可以和速度相加,但绝不可加上黏性或压力,5 米加上 4 牛顿绝不等于 9 米牛顿,而 3 牛顿既不能大于也不能小于 1.5 米,这些运算和比较是毫无意义的。当然,不同单位的同类量是可以相加的,例如 3 寸加上 5 厘米,仍为某一长度,只要把其中一个单位稍加换算即可。既然不同种类的物理量(因次)不能相加减,也不可相等,那么反之,能够相加减和列入同一等式中的各项物理量,必然有相同的因次,也就是说一个物理方程,只要它是根据基本原理进行数学推演而得到的,它的各项在因次上必然是一致的这叫作物理方程的因次一致性(或均匀性)。

3. π 定理及因次分析

如果某一物理现象中有几个独立自变量, $x_1, x_2, \dots, x_n$, 因变量 y 可以用因次一致的关系来表示,即

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-1)$$

或

$$f(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-2)$$

π 定理指出,由于方程中各项因次是一致的,函数 f 与其作为 n 个独立变量 x 间的关系,不如改为 $(n-m)$ 个独立的无因次参数 π (可以看作是一组新的变量) 间的关系,因为后者所包含的变量数目较前减少了 m 个,而且是无因次的。 π 定理可以从数学上得到证明,此处从略。应用 π 定理进行因次分析的步骤如下:

(1) 确定对所研究的物理现象有影响的独立变量,设共有 n 个: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。写出一组函数表达式

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-3)$$

做到这一点,要求对该物理过程有足够的认识。

(2) 选择 n 个变量所涉及的基本因次。对于力学问题,可能是 $[MLT]$ (或 $[FLT]$) 的全部或者其中任意选择两个。

(3) 用基本因次表示所有各变量的因次。

(4) 在 n 个变量中选择 m 个作为基本变量(m 一般等于这 n 个变量所涉及的基本因次的数目,对于力学问题,一般 m 不大于 3), 条件是它们的因次应能包括 n 个变量中所有的基本因次,并且它们是互相独立的即一个不能从另外几个导出。通常选一个代表某一尺寸的量、一个表征运动的量、另一个则是与力和质量有关的量。

(5) 列出无因次参数 π 。根据 π 定理,可以构成 $(n-m)$ 个无因次数 π 。它的一般形式可表示为

$$\pi_i = x_i x_A^a x_B^b x_C^c \quad (1-4)$$

式中为 x_i 除去已选择的 m 个基本变量 x_A 、 x_B 、 x_C 以后所余下的 $(n-m)$ 个变量中之任何一个。 a 、 b 、 c 为待定指数。把 x_i 、 x_A 、 x_B 及 x_C 的因次代入上式,根据 π 为无因次参数的要求,利用因次分析法可求得指数 a 、 b 及 c 从而得到 π_i 的具体形式。

(6) 物理现象可用 $(n-m)$ 个 π 参数的函数 F 来表达。注意,无因次参数 π 可以取倒数或取任意次方或互相乘除,以尽可能使各项成为一般熟悉的无因次数,如 Re 、 F 等的形式。

(7) 根据函数 F 中的无因次数,进行实验,以求得函数 F 的具体关系式。

因次分析法指导下的实验研究方法虽然可以起到由此及彼,由小见大的作用,但是如果影响因素太多,实验工作量仍会非常之大,对于复杂的多变量问题仍然困难重重,解决这类问题的方法是过程的分解,即将所待解决的问题分解成若干个弱交联的子过程,使每个子过程变量数大大减少。

三、数学模型法

数学模型法是解决工程问题的另一种实验规划方法,数学模型法和因次论指导下的实验研究方法的重大区别在于,后者并不要求研究者对过程的内在规律有任何认识。因此,对于十分复杂的问题,它都是有效的方法。而前者则要求研究者对过程有深刻的认识,能作出高度的概括,即能得出足够简化而又不过于失真的模型,然后获得描述过程的数学方程,做不到这一点,数学模型法也就不能奏效。

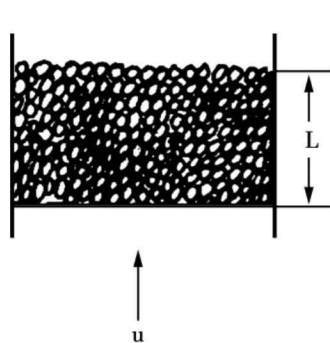


图 1-1

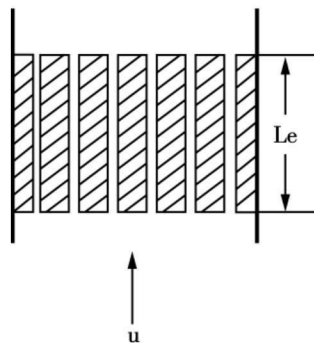


图 1-2

数学模型法处理工程问题,同样离不开实验。因为这种简化模型的来源在于对过程有深刻的评价,其合理性需要经实验的检验,其中引入的参数需由实验测定。

因此,数学模型法解决工程问题的方法大致步骤如下:

- (1) 通过预习实验认识过程,设想简化模型。
- (2) 通过实验检验简化模型的等效性。
- (3) 通过实验确定模型参数。

第二章 实验数据误差分析及数据处理

一、实验数据的误差分析

由于实验方法和实验设备的不完善,周围环境的影响,以及人的观察力,测量程序等限制,实验观测值和真值之间,总是存在一定的差异。人们常用绝对误差、相对误差或有效数字来说明一个近似值的准确程度。为了评定实验数据的精确性或误差,认清误差的来源及其影响,需要对实验的误差进行分析和讨论。由此可以判定哪些因素是影响实验精确度的主要方面,从而在以后实验中,进一步改进实验方案,缩小实验观测值和真值之间的差值,提高实验的精确性。

1. 误差的基本概念

测量是人类认识事物本质所不可缺少的手段。通过测量和实验能使人们对事物获得定量的概念和发现事物的规律性。科学上很多新的发现和突破都是以实验测量为基础的。测量就是用实验的方法,将被测物理量与所选用作为标准的同类量进行比较,从而确定它的大小。

(1) 真值和平均值。

真值是待测物理量客观存在的确定值,也称理论值或定义值。通常真值是无法测得的。若在实验中,测量的次数无限多时,根据误差的分布定律,正负误差的出现几率相等。再经过细致地消除系统误差,将测量值加以平均,可以获得非常接近于真值的数值。但是实际上实验测量的次数总是有限的。用有限测量值求得的平均值只能是近似真值,常用的平均值有下列几种:

①算术平均值。算术平均值是最常见的一种平均值。

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各次测量值, n 代表测量次数,则算术平均值为

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

②几何平均值。几何平均值是将一组 n 个测量值连乘并开 n 次方求得的平均值。即

$$\bar{x}_{\text{几}} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n} \quad (2-2)$$

③均方根平均值。

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (2-3)$$

④对数平均值。在化学反应、热量和质量传递中,其分布曲线多具有对数的特性,在这种情况下表征平均值常用对数平均值。

设两个量 x_1 、 x_2 , 其对数平均值

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (2-4)$$

应指出,变量的对数平均值总小于算术平均值。当 $x_1/x_2 \leq 2$ 时,可以用算术平均值代替对数平均值。

当 $x_1/x_2 = 2$, $\bar{x}_{\text{对}} = 1.443$, $\bar{x} = 1.50$, $(\bar{x}_{\text{对}} - \bar{x})/\bar{x}_{\text{对}} = 4.2\%$, 即 $x_1/x_2 \leq 2$, 引起的误差不超过 4.2%。

以上介绍各平均值的目的是要从一组测定值中找出最接近真值的那个值。在化工实验和科学研究中,数据的分布较多属于正态分布,所以通常采用算术平均值。

(2) 误差的分类。

根据误差的性质和产生的原因,一般分为三类:

①系统误差。系统误差是指在测量和实验中未发觉或未确认的因素所引起的误差,而这些因素影响结果永远朝一个方向偏移,其大小及符号在同一组实验测定中完全相同,当实验条件一经确定,系统误差就获得一个客观上的恒定值。当改变实验条件时,就能发现系统误差的变化规律。

系统误差产生的原因: 测量仪器不良,如刻度不准,仪表零点未校正或标准表本身存在偏差等; 周围环境的改变,如温度、压力、湿度等偏离校准值; 实验人员的习惯和偏向,如读数偏高或偏低等引起的误差。针对仪器的缺点、外界条件变化影响的大小、个人的偏向,待分别加以校正后,系统误差是可以清除的。

②偶然误差。在已消除系统误差的一切量值的观测中,所测数据仍在末一位或未两位数字上有差别,而且它们的绝对值和符号的变化,时而大时而小,时正时负,没有确定的规律,这类误差称为偶然误差或随机误差。偶然误差产生的原因不明,因而无法控制和补偿。但是,倘若对某一量值作足够多次的等精度测量后,就会发现偶然误

差完全服从统计规律,误差的大小或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趋近于零,所以多次测量结果的算数平均值将更接近于真值。

③过失误差。过失误差是一种显然与事实不符的误差,它往往是由于实验人员粗心大意、过度疲劳和操作不正确等原因引起的。此类误差无规则可寻,只要加强责任感、多方警惕、细心操作,过失误差是可以避免的。

(3) 精密度、准确度和精确度。

反映测量结果与真实值接近程度的量,称为精度(亦称精确度)。它与误差大小相对应,测量的精度越高,其测量误差就越小。“精度”应包括精密度和准确度两层含义。

①精密度。测量中所测得数值重现性的程度,称为精密度。它反映偶然误差的影响程度,精密度高就表示偶然误差小。

②准确度。测量值与真值的偏移程度,称为准确度。它反映系统误差的影响精度,准确度高就表示系统误差小。

③精确度(精度)。它反映测量中所有系统误差和偶然误差综合的影响程度。

在一组测量中,精密度高的准确度不一定高,准确度高的精密度也不一定高,但精确度高,则精密度和准确度都高。

为了说明精密度和准确度的区别,可用下述打靶子例子来说明。如图 2-1 所示。

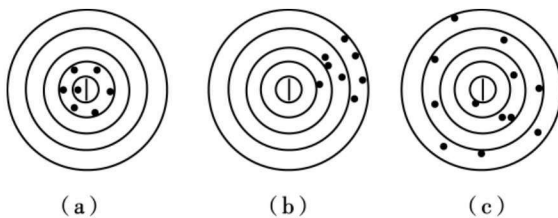


图 2-1 精密度和准确度的关系

图 2-1(a) 中表示精密度和准确度都很好,则精确度高;图 2-1(b) 表示精密度很好,但准确度却不高;图 2-1(c) 表示精密度和准确度都不好。在实际测量中没有像靶心那样明确的真值,而是设法去测定这个未知的真值。

学生在实验过程中,往往满足于实验数据的重现性,而忽略了数据测量值的准确程度。绝对真值是不可知的,人们只能订出一些国际标准作为测量仪表准确性的参考标准。随着人类认识运动的推移和发展,可以逐步逼近绝对真值。

(4) 误差的表示方法。

利用任何量具或仪器进行测量时,总存在误差,测量结果总不可能准确地等于被测量的真值,而只是它的近似值。测量的质量高低以测量精确度作指标,根据测量误

差的大小来估计测量的精确度。测量结果的误差愈小,则认为测量就愈精确。

①绝对误差。测量值 X 和真值 A_0 之差为绝对误差,通常称为误差。记为:

$$D = X - A_0 \quad (2-5)$$

由于真值 A_0 一般无法求得,因而上式只有理论意义。常用高一级标准仪器的示值作为实际值 A 以代替真值 A_0 。由于高一级标准仪器存在较小的误差,因而 A 不等于 A_0 ,但总比 X 更接近于 A_0 。 X 与 A 之差称为仪器的示值绝对误差。记为

$$d = X - A \quad (2-6)$$

与 d 相反的数称为修正值,记为

$$C = -d = A - X \quad (2-7)$$

通过检定,可以由高一级标准仪器给出被检仪器的修正值 C 。利用修正值便可以求出该仪器的实际值 A 。即

$$A = X + C \quad (2-8)$$

②相对误差。衡量某一测量值的准确程度,一般用相对误差来表示。示值绝对误差 d 与被测量的实际值 A 的百分比值称为实际相对误差。记为

$$\delta_A = \frac{d}{A} \times 100\% \quad (2-9)$$

以仪器的示值 X 代替实际值 A 的相对误差称为示值相对误差。记为

$$\delta_X = \frac{d}{X} \times 100\% \quad (2-10)$$

一般来说,除了某些理论分析外,用示值相对误差较为适宜。

③引用误差。为了计算和划分仪表精确度等级,提出引用误差概念。其定义为仪表表示值的绝对误差与量程范围之比。

$$\delta_A = \frac{\text{示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d}{X_n} \times 100\% \quad (2-11)$$

d ——示值绝对误差;

X_n ——标尺上限值-标尺下限值。

④算术平均误差。算术平均误差是各个测量点的误差的平均值。

$$\delta_{\text{平}} = \frac{\sum |d_i|}{n} \quad (2-12)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

n ——测量次数;

d_i ——为第 i 次测量的误差。

⑤标准误差。标准误差亦称为均方根误差。其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (2-13)$$

标准误差不是一个具体的误差, σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量集合所属的每一个观测值对其算术平均值的分散程度, 如果 σ 的值愈小则说明每一次测量值对其算术平均值分散度就小, 测量的精度就高, 反之精度就低。

在化工原理实验中最常用的 U 形管压差计、转子流量计、秒表、量筒、电压等仪表原则上均取其最小刻度值为最大误差, 而取其最小刻度值的一半作为绝对误差计算值。

(5) 测量仪表精确度。

测量仪表的精确等级是用最大引用误差(又称允许误差) 来标明的。它等于仪表示值中的最大绝对误差与仪表的量程范围之比的百分数。

$$\delta_{\max} = \frac{\text{最大示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d_{\max}}{X_n} \times 100\% \quad (2-14)$$

式中: $\delta_{\max}$ ——仪表的最大测量引用误差;

$d_{\max}$ ——仪表示值的最大绝对误差;

X_n ——标尺上限值—标尺下限值。

通常情况下是用标准仪表校验较低级的仪表。所以, 最大示值绝对误差就是被校表与标准表之间的最大绝对误差。

测量仪表的精度等级是国家统一规定的, 把允许误差中的百分号去掉, 剩下的数字就称为仪表的精度等级。仪表的精度等级常以圆圈内的数字标明在仪表的面板上。例如某台压力计的允许误差为 1.5%, 这台压力计电工仪表的精度等级就是 1.5, 通常简称 1.5 级仪表。

仪表的精度等级为 a , 它表明仪表在正常工作条件下, 其最大引用误差的绝对值 $\delta_{\max}$ 不能超过的界限, 即

$$\delta_{\max} = \frac{d_{\max}}{X_n} \times 100\% \leq a\% \quad (2-15)$$

由式(2-16) 可知, 在应用仪表进行测量时所能产生的最大绝对误差(简称误差限) 为

$$d_{\max} \leq a\% \cdot X_n \quad (2-16)$$

而用仪表测量的最大值相对误差为

$$\delta_{\max} = \frac{d_{\max}}{X_n} \leq a\% \cdot \frac{X_n}{X} \quad (2-17)$$

由上式可以看出,用只是仪表测量某一被测量所能产生的最大示值相对误差,不会超过仪表允许误差 $a\%$ 乘以仪表测量上限 X_n 与测量值 X 的比。在实际测量中为可靠起见,可用下式对仪表的测量误差进行估计,即

$$\delta_m = a\% \cdot \frac{X_n}{X} \quad (2-18)$$

【例 2-1】 用量限为 5A,精度为 0.5 级的电流表,分别测量两个电流, $I_1 = 5\text{A}$, $I_2 = 2.5\text{A}$,试求测量 I_1 和 I_2 的相对误差为多少?

$$\delta_{m1} = a\% \times \frac{I_n}{I_1} = 0.5\% \times \frac{5}{5} = 0.5\%$$

$$\delta_{m2} = a\% \times \frac{I_n}{I_2} = 0.5\% \times \frac{5}{2.5} = 1.0\%$$

由此可见,当仪表的精度等级选定时,所选仪表的测量上限越接近被测量的值,则测量的误差的绝对值越小。

【例 2-2】 欲测量约 90V 的电压,实验室现有 0.5 级 0~300V 和 1.0 级 0~100V 的电压表。问选用哪一种电压表进行测量为好?

用 0.5 级 0—300V 的电压表测量 90V 的相对误差为

$$\delta_{m0.5} = a_1\% \times \frac{U_n}{U} = 0.5\% \times \frac{300}{90} = 1.7\%$$

用 1.0 级 0—100V 的电压表测量 90V 的相对误差为

$$\delta_{m1.0} = a_2\% \times \frac{U_n}{U} = 1.0\% \times \frac{100}{90} = 1.1\%$$

上例说明,如果选择得当,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。因此,在选用仪表时,应根据被测量值的大小,在满足被测量数值范围的前提下,尽可能选择量程小的仪表,并使测量值大于所选仪表满刻度的三分之二,即 $X > 2X_n/3$ 。这样就可以达到满足测量误差要求,又可以选择精度等级较低的测量仪表,从而降低仪表的成本。

2. 误差的传递

误差的计算方法主要用于实验直接测定量的误差估计。但是,在化工专业实验中,通常希望考察的并非直接测量量而是间接的响应量。如反应动力学方程的测定实验中,速率常数 $k = k_0 e^{-E/RT}$ 就是温度的间接响应值。由于响应值是直接测定值的函数,

因此,直接测定值的误差必然会传递给响应值。

(1) 误差传递的基本关系式。

设间接响应量 y 是直接测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的函数,即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-19)$$

由于误差相对于测量量而言是较小的量,因此可将上式依泰勒级数展开,略去二阶导数以上的项,可得函数 y 的绝对误差 Δy 表达式:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (2-20)$$

此式即为误差的传递公式。式中, $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 表示直接测量值的绝对误差, $\partial f / \partial x_i$ 称为误差传递系数。

(2) 函数误差的表达。

由式 2-20 可见,函数的误差 Δy 不仅与各测量值的误差 Δx_i 有关,而且与相应的误差传递系数有关。为保险起见,不考虑各测量值的分误差实际上有相互抵消的可能,将各分量误差取绝对值,即得到函数的最大绝对误差为:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad (2-21)$$

据此,可求得函数的相对误差为:

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\Delta x_i}{y} \right| \quad (2-22)$$

各测量量对响应量的影响相互独立时,响应量的标准误差为:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad (2-23)$$

式中, σ_i 为各直接测量值的标准误差, σ_y 为响应值的标准误差。

根据误差传递的基本公式,可求取不同函数形式的实验响应值的误差及其精度,以便对实验结果作出正确的评价。

二、实验数据的处理

实验中测量得到的许多数据需要处理后才能表示测量的最终结果。对实验数据进行记录、整理、计算、分析、拟合等,从中获得实验结果和寻找物理量变化规律或经验公式的过程就是数据处理。合理的实验数据处理可使得实验结果清晰而准确。实验数据处理常用的方法有三种:表列法、图示法和回归公式法。

1. 实验数据及结果的表列

列表法就是将实验的原始数据,运算数据和最终结果直接列举在各类数据表中以