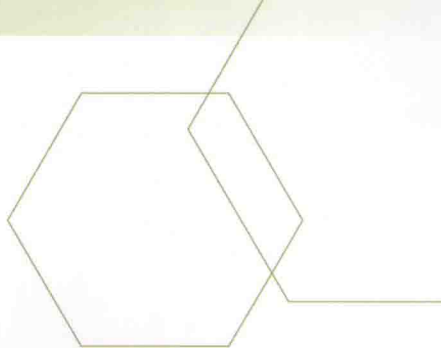




实践教学系列教材



# 化工原理实验

主 编 贾冬梅  
副主编 刘元伟 姚海波



科学出版社

实践教学系列教材

# 化工原理实验

主编 贾冬梅

副主编 刘元伟 姚海波

山东省普通本科高校应用型人才培养专业发展支持计划资助  
滨州学院教材出版基金资助

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

化工原理实验是化工原理课程的重要组成部分,是理论与实践结合的重要途径,也是培养学生动手能力和创新能力的重要环节。通过化工原理实验教学可以提高学生在实验方案设计、设备操作、处理工程实际问题、分工协作及报告撰写方面的能力。本书侧重培养学生的动手能力和实验技能,提高其分析和解决工程问题的能力,与化工原理理论课程教学紧密结合,设置了较多的思考题,便于巩固和加深学生对教学内容的理解。

全书分绪论、实验数据的测量及误差分析、实验研究方法 with 数据的处理、实验项目、附录五部分,包括流体流动能量转换实验、流体阻力测定实验、离心泵性能测定实验、旋风分离器性能实验、总传热系数测定、精馏实验、洞道干燥实验等 17 个实验项目。

本书可作为高等学校化学、化工、环境、制药、食品、材料、生物等专业的化工原理实验教材,也可供相关领域专业人员选用或参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验 / 贾冬梅主编. —北京: 科学出版社, 2016.4

实践教学系列教材

ISBN 978-7-03-047983-9

I. ①化… II. ①贾… 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 (2016) 第 062043 号

责任编辑: 陈雅娴 / 责任校对: 贾伟娟

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

大厂书文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 5 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张: 7 1/4

字数: 144 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

化工原理实验是化工原理课程的一个重要教学环节，与理论课具有同等重要的教学地位。它起着从理论到实践的过渡作用，也是化工、环境、安全、制药、食品、生物工程等专业教学计划中的一门必修课程，具有很强的工程实践性。

编者从化工原理实验的教学特点和教学目的出发，根据地方工科院校培养应用型工程技术人才的要求，结合任课老师多年实践经验和现有实验装置设备条件，力求编写一本适合地方工科院校的针对性强的实验教材。旨在强化学生的工程实践能力，培养学生分析实际问题 and 解决工程问题的能力，为以后从事化工生产、解决工程问题打下基础。

编者共分为 3 章：第 1 章为实验数据的测量及误差分析，主要介绍实验误差来源、分类、分析以及随机误差的正态分布；第 2 章为实验研究方法 with 数据的处理，主要介绍直接实验法、因次分析法和数学模型法三种实验研究方法，以及列表法和图示法两种实验数据处理方法；第 3 章为实验项目，主要涉及动量传递、热量传递与质量传递典型单元操作共 17 个实验项目。

本书由贾冬梅任主编，刘元伟和姚海波任副主编。第 1 章和附录由刘元伟编写，第 2 章和第 3 章的实验一～实验十由贾冬梅编写，第 3 章的实验十一～实验十七由姚海波编写。

本书承蒙仇汝臣教授、邓文生副教授和龙秉文副教授审阅，并提出许多宝贵意见，在此向他们表示衷心的感谢。感谢山东省普通本科高校应用型人才培养专业发展支持计划项目的资助。

限于编者水平，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 3 月

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 前言                    |    |
| 绪论                    | 1  |
| 第1章 实验数据的测量及误差分析      | 4  |
| 1.1 实验数据的测量           | 4  |
| 1.1.1 实验数据的真值和平均值     | 4  |
| 1.1.2 实验数据的有效数字       | 5  |
| 1.2 实验误差分析            | 6  |
| 1.2.1 误差的定义           | 6  |
| 1.2.2 误差的分类           | 6  |
| 1.2.3 误差的表示法          | 6  |
| 1.2.4 精密度和准确度         | 7  |
| 1.3 随机误差的正态分布         | 8  |
| 1.3.1 $\sigma$ 法则     | 8  |
| 1.3.2 间接测量误差估计        | 8  |
| 1.3.3 测量结果表示方法        | 9  |
| 第2章 实验研究方法 with 数据的处理 | 10 |
| 2.1 实验研究方法            | 10 |
| 2.1.1 直接实验法           | 10 |
| 2.1.2 因次分析法           | 10 |
| 2.1.3 数学模型法           | 13 |
| 2.2 实验数据的处理方法         | 16 |
| 2.2.1 列表法             | 16 |
| 2.2.2 图示法             | 17 |
| 2.2.3 回归分析法           | 18 |
| 第3章 实验项目              | 20 |
| 实验一 雷诺实验              | 20 |
| 实验二 流体流动能量转换实验        | 24 |
| 实验三 流体阻力测定实验          | 28 |
| 实验四 离心泵性能测定实验         | 34 |
| 实验五 旋风分离器性能实验         | 37 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 实验六 板框式恒压过滤实验              | 41  |
| 实验七 套管换热器对流传热系数测定实验        | 45  |
| 实验八 总传热系数测定                | 50  |
| 实验九 精馏实验                   | 55  |
| 实验十 填料吸收塔的操作及其 $K_y a$ 的测定 | 62  |
| 实验十一 板式塔性能测定实验             | 68  |
| 实验十二 洞道干燥实验                | 72  |
| 实验十三 流化床干燥实验               | 77  |
| 实验十四 NaOH 水溶液降膜蒸发实验        | 83  |
| 实验十五 萃取实验                  | 87  |
| 实验十六 膜分离实验                 | 92  |
| 实验十七 流体流量计校正实验             | 98  |
| 参考文献                       | 102 |
| 附录                         | 103 |
| 附录一 化工原理实验注意事项             | 103 |
| 附录二 乙醇-水在常压下气液相平衡数据        | 107 |
| 附录三 水的重要物理性质               | 108 |
| 附录四 氨在水中的亨利系数              | 108 |
| 附录五 酒精计使用                  | 108 |

# 绪 论

## 1. 化工原理实验课程的目的和任务

化工原理实验是化工原理课程的重要组成部分。化工原理主要研究化工单元操作的基本原理、典型设备的结构原理、操作性能和设计计算,是化学、化工、环境、轻工等专业的重要技术基础课。由于化工原理的自身特点,在其自身发展过程中,形成了以实验方法和数学模型为主的研究方法。实验方法是直接通过各种实验或因次分析方法指导下进行实验,直接测定并将各变量之间的关系以图表或经验公式的形式表示出来。数学模型方法是对复杂的实际问题在深刻理解其内部规律的基础上,提出一个比较接近实际问题的物理模型,建立描述这个物理模型的数学方程,然后确定方程的初始条件,并求解方程。虽然随着计算机技术的发展,人们求解数学方程的能力得到很大提高,但由于化工过程的复杂性,建立物理模型及数学方程的难度仍然很大,其应用受到了限制。另外,数学模型法也离不开实验,只有通过实验了解其内部规律,才能提出准确的模型,而且最后还要依靠实验来检验其模型的等效性并确定模型参数。因此,化工原理是建立在实验基础上的学科,化工原理的发展离不开实验技术的发展。

## 2. 实验课教学内容及教学方法

通过化工原理实验课的教学让学生掌握工科实验的学习过程,化工原理实验过程包括:实验预习、实验操作与实验数据记录和数据处理与实验报告撰写。

### 1) 实验预习

(1) 认真阅读实验指导书和有关参考资料,了解实验目的和要求。

(2) 进行实验室现场预习。了解实验装置,摸清实验流程、测试点、操作控制点,此外还需了解所使用的检测仪器、仪表。

(3) 预先组织好3~4人的实验小组,实验小组讨论并拟订实验方案,预先做好分工,并写出实验预习报告,预习报告的内容应包括:①实验目的和内容;②实验的基本原理及方案;③实验装置及流程图;④实验操作要点实验数据的布点;⑤设计原始数据的记录表格。

### 2) 实验操作与数据记录

(1) 进行实验操作,要求认真细致地记录实验原始数据。操作中应能进行理论联系实际思考。

(2) 实验做完后, 所记录的数据经指导老师检查合格后, 才可结束实验; 实验若有短缺或不合理应该补全或重做。结束实验后, 指导老师在原始数据表上签字。

(3) 实验结束后, 应将使用的仪器设备整理复原。检查水、电、气等是否已确实关断, 并将场地打扫干净。

### 3) 数据处理与实验报告撰写

实验数据的处理, 如果用计算机处理实验数据, 则学生还须有一组手算的计算示例。撰写实验报告, 内容大致包括: ①实验目的和原理; ②实验装置; ③实验数据及数据处理; ④实验结果及讨论。

## 3. 实验守则

(1) 进入实验室要自觉遵守实验室守则, 保持安静, 严禁喧哗和打闹。

(2) 进入实验室要穿实验服, 不能赤脚或穿拖鞋。遵守纪律, 不迟到不早退, 在实验室内保持安静, 不大声谈笑, 听从教师指导。

(3) 实验前要认真预习, 写好预习报告, 经教师提问通过后, 方可参加实验。

(4) 实验时要严格遵守仪器、设备、电路的操作规程, 不得擅自变更, 操作前须经教师检查同意后方可接通电路和开车, 操作中仔细观察, 如实记录现象和数据。仪器设备发生故障严禁擅自处理, 应立即报告教师。

(5) 实验后根据原始记录、处理数据、分析问题及时写好实验报告。

(6) 爱护仪器, 注意安全, 水、电、药品要节约使用。

(7) 保持实验室整洁, 废品、废物丢入垃圾箱内。

(8) 实验室仪器设备使用后需要在仪器使用记录本上详细记录使用人、使用时间和仪器状态。

(9) 实验室电器设备的功率不得超过电源负载能力。电器设备使用前应检查是否漏电, 常用仪器外壳应接地。使用电器时, 人体与电器导电部分不能直接接触, 也不能用湿手接触电器插头。

(10) 实验完毕, 记录数据须经教师审查签字。做好清洁工作, 恢复仪器设备原状, 关好门窗, 检查水、电、气是否关好, 方可离开实验室。

## 4. 实验报告的书写要求

按照一定的格式和要求表达实验过程和结果的文字材料称为实验报告。它是实验工作的全面总结和系统概括, 是实验工作中最重要的实验环节之一。一份完整的实验报告应包括以下内容。

(1) 实验名称: 实验报告的名称, 又称为标题, 应该列在报告的最前面。实验名称要求简洁、鲜明、准确, 一目了然, 能很恰当地反映实验内容。

(2) 实验目的: 应该简明扼要地说明为什么要进行本实验, 通过该实验解决

什么问题,可以锻炼什么能力,学到什么知识。要求语言表达简洁准确。

(3) 实验原理:简单地说明本实验所依据的基本原理,包括实验设计的主要概念,实验依据的重要定律、公式及数据处理中所需要的推理过程和结果。要求概念清晰,充分了解原理的内容,推理准确并且有依据,结果真实可信。

(4) 实验装置流程示意图:简单地画出实验装置的流程示意图,测试点的位置和主要设备,仪表的名称,关键部位的尺寸大小,各种调节阀的标号及需要注意的关键节点等。同时在流程图的下面标出图的名称和相应标号的仪表名称等。

(5) 实验操作方法和注意事项:根据实际操作程序进行实验分工,注重各操作人员的密切配合;按照实验的先后将整个实验过程划分为几个步骤,并进行排序和标注,以使实验过程条理分明。一般实验步骤的划分以改变某一组参数、实验条件或实验对象作为一个步骤。对于每一个操作步骤,应该简单明了。

注意事项中应包括如下内容:由于不按照规程操作而引起各种事故,实验过程中存在的一些易燃易爆装置,用电的安全,容易损坏的仪表或设备,某些对实验结果影响比较大的操作等情况。

(6) 数据记录:实验数据是在实验过程中测量仪表所读取的数值,要根据仪表的精度决定实验数据的有效数字位数。读取数据的方法要正确,数据记录要准确。要求原始数据和计算数据表分开。对于数据较多时,可以将此表格作为附录放在报告的后面。

(7) 数据的处理和作图:数据处理是实验报告的重点内容之一,要求将实验数据整理、加工成图形或表格的形式。数据处理时应根据有效数字的运算规则进行。一般将重要的中间计算值和最后计算结果列在数据整理表格中。表格要精心设计,使其易于显示数据的变化规律、几个参数的相关性。实验数据不经重复实验不得修改,更不得伪造数据。

(8) 作图:作图是为了更直观地表达出变量之间的相互关系或通过图形求取某些数据。根据数据的变化情况选用合适的坐标纸确定若干点,然后用光滑曲线连接,画出相关曲线。

(9) 数据的整理计算过程举例:数据的整理计算是以某一组原始数据为例,把各项计算过程列出,以说明数据整理表中的结果是如何得到的。

(10) 对实验结果的分析与讨论:实验结果的分析与讨论十分重要,是实验者理论水平的具体体现,也是对实验方法和结果进行的综合分析研究。实验讨论范围应只限于本实验有关的内容。讨论的内容包括:从理论上对实验结果进行分析和解释,说明其必然性;对实验中存在的异常现象进行分析讨论;分析误差的大小和原因,如何提高测量精度。

(11) 实验结论:结论是根据实验结果所做出的最后判断,得出的结论要从实际出发,有充分的理论根据。

什么问题,可以锻炼什么能力,学到什么知识。要求语言表达简洁准确。

(3) 实验原理:简单地说明本实验所依据的基本原理,包括实验设计的主要概念,实验依据的重要定律、公式及数据处理中所需要的推理过程和结果。要求概念清晰,充分了解原理的内容,推理准确并且有依据,结果真实可信。

(4) 实验装置流程示意图:简单地画出实验装置的流程示意图,测试点的位置和主要设备,仪表的名称,关键部位的尺寸大小,各种调节阀的标号及需要注意的关键节点等。同时在流程图的下面标出图的名称和相应标号的仪表名称等。

(5) 实验操作方法和注意事项:根据实际操作程序进行实验分工,注重各操作人员的密切配合;按照实验的先后将整个实验过程划分为几个步骤,并进行排序和标注,以使实验过程条理分明。一般实验步骤的划分以改变某一组参数、实验条件或实验对象作为一个步骤。对于每一个操作步骤,应该简单明了。

注意事项中应包括如下内容:由于不按照规程操作而引起各种事故,实验过程中存在的一些易燃易爆装置,用电的安全,容易损坏的仪表或设备,某些对实验结果影响比较大的操作等情况。

(6) 数据记录:实验数据是在实验过程中测量仪表所读取的数值,要根据仪表的精度决定实验数据的有效数字位数。读取数据的方法要正确,数据记录要准确。要求原始数据和计算数据表分开。对于数据较多时,可以将此表格作为附录放在报告的后面。

(7) 数据的处理和作图:数据处理是实验报告的重点内容之一,要求将实验数据整理、加工成图形或表格的形式。数据处理时应根据有效数字的运算规则进行。一般将重要的中间计算值和最后计算结果列在数据整理表格中。表格要精心设计,使其易于显示数据的变化规律、几个参数的相关性。实验数据不经重复实验不得修改,更不得伪造数据。

(8) 作图:作图是为了更直观地表达出变量之间的相互关系或通过图形求取某些数据。根据数据的变化情况选用合适的坐标纸确定若干点,然后用光滑曲线连接,画出相关曲线。

(9) 数据的整理计算过程举例:数据的整理计算是以某一组原始数据为例,把各项计算过程列出,以说明数据整理表中的结果是如何得到的。

(10) 对实验结果的分析与讨论:实验结果的分析与讨论十分重要,是实验者理论水平的具体体现,也是对实验方法和结果进行的综合分析研究。实验讨论范围应只限于本实验有关的内容。讨论的内容包括:从理论上对实验结果进行分析和解释,说明其必然性;对实验中存在的异常现象进行分析讨论;分析误差的大小和原因,如何提高测量精度。

(11) 实验结论:结论是根据实验结果所做出的最后判断,得出的结论要从实际出发,有充分的理论根据。

$$\bar{x}_L = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n} \quad (1-2)$$

对一组测量值取对数, 所得图形的分布曲线轴对称时, 常用几何平均值。几何平均值常小于算术平均值。

### 3) 对数平均值

在动量、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

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1-3)$$

两个量的对数平均值总小于算术平均值。若  $1 < x_1/x_2 < 2$  时, 可用算术平均值代替对数平均值, 引起的误差不超过 5%。

## 1.1.2 实验数据的有效数字

在实验数据的测量和处理过程中, 有效数字的取舍是经常需要考虑和处理的问题。数据中小数点的位置在前或在后仅与所用的测量单位有关。另外, 在实验测量中所使用的仪器仪表只能达到一定的准确度, 因此, 测量或计算的结果不可能也不应该超越仪器仪表所允许的准确度范围。例如, 温度测量中, 若标尺的最小分度为  $0.1^\circ\text{C}$ , 其读数可以读到  $0.01^\circ\text{C}$  (估计值), 故数据的有效数字是四位。

实验数据 (包括计算结果) 的准确度取决于有效数字的位数, 而有效数字的位数又由仪器仪表的准确度来决定。换言之, 实验数据的有效数字位数必须反映仪表的准确度和存在疑问的数字位置。

在判别一个已知数有几位有效数字时, 应注意非零数字前面的零不是有效数字。例如, 质量为  $0.00352\text{kg}$ , 前面的三个零不是有效数字, 它与所用单位有关, 若用  $\text{g}$  为单位, 则为  $3.52\text{g}$ , 其有效数字为三位。非零数字后面用于定位的零也不一定是有效数字。例如,  $20800$  是五位还是四位有效数字, 取决于最后面的零是否用于定位。为了准确地读出有效数字位数, 应该用科学计数法, 写成一个小数与相应的 10 的幂的乘积。若  $20800$  的有效数字为五位, 则可写成  $2.0800 \times 10^4$ ; 有效数字为三位的数可写成  $2.08 \times 10^4$ 。这种计数法的特点是小数点前面永远是一位非零数字, 乘号前面的数字都为有效数字。这种科学计数法表示的有效数字, 位数就一目了然了。

对于位数很多的近似数, 当有效位数确定后, 应将多余的数字舍去。舍去多

余数字常用四舍五入法。这种方法简单、方便，适用于舍、入操作不多且准确度要求不高的场合，因为这种方法大于等于 5 就入，易使所得数据偏大。

在数据运算过程中，为兼顾结果的精度和运算的方便，所有的中间运算结果，工程上一般宜取 5 或 6 位有效数字。

## 1.2 实验误差分析

### 1.2.1 误差的定义

误差是实验测量值（包括直接和间接测量值）与真值（客观存在的准确值）之差。误差的大小表示每一次测得值相对于真值不符合的程度。误差具有的特点：误差永远不等于零、误差具有随机性、误差是未知的。

### 1.2.2 误差的分类

根据误差的性质及产生的原因，误差分为系统误差、随机误差和过失误差三种。

系统误差：在测量或实验过程中未发觉或未确定的因子所引起的误差。当实验条件一经确定，其大小和符号固定不变。

随机误差：在已经消除系统误差的一切测量值的观察中，所测数据仍在末一位或末两位数字上有差别，而且它们的绝对值和符号的变化时大时小、时正时负。随机误差的算术平均值趋近于零。

过失误差：由于实验人员粗心大意造成与事实不符的误差。

### 1.2.3 误差的表示法

#### 1. 测量点的误差

##### 1) 绝对误差

测量（给出）值  $x$  与真值  $x^*$  之差的绝对值称为绝对误差  $d$ ，即

$$d=|x-x^*| \text{ 或 } d=|x-x_m| \quad (1-4)$$

式中， $x$ ——测量值；

$x^*$ ——真值；

$x_m$ ——最佳值， $x_m=(x_1+x_2+\cdots+x_n)/n$ 。

##### 2) 相对误差

绝对误差  $d$  与真值的绝对值之比称为相对误差  $e_r$ ，它的表达式为

$$e_r = d/x^* \text{ 或 } e_r = d/x_m \quad (1-5)$$

## 2. 测量集合的误差

### 1) 算术平均误差

$n$  次测量值的算术平均误差又称为极限误差, 其定义为

$$\Delta = \sum \frac{|x_i - x_m|}{n} = \sum \frac{d_i}{n} \quad (1-6)$$

### 2) 标准误差

$n$  次测量值的标准误差 (也称均方根误差) 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_m)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (1-7)$$

$$\text{有限次测量: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \text{ (实际)} \quad (1-8)$$

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = x_0 + \frac{e_1 + e_2 + \cdots + e_n}{n} = x_0 + \delta$$

$$\delta = x_m - x_0 = \frac{e_1 + e_2 + \cdots + e_n}{n} = \sigma_m = \sqrt{\frac{\sum \sigma_i^2}{n^2}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-9)$$

( $x_1, x_2$  是同等精度测量值, 其中  $\sigma_i = \sigma$ )

$$\delta = \sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n(n-1)}} \quad (1-10)$$

式中,  $\sigma_m$  ——均值标准误差, 即算术平均值的标准误差。

因此,  $x_m \pm \delta = x_m \pm \sigma_m$ 。

$\sigma$  不是一个具体的误差, 它的大小只说明在一定条件下等精度测量集合中的每一个观测值对其算术平均值的分散程度。

### 3) 算术平均误差与标准误差的联系和差别

$n$  次测量值的重复性 (也称重现性) 越差,  $n$  次测量值的离散程度越大,  $n$  次测量值的随机误差越大, 则  $\delta$  值和  $\sigma$  值均越大。因此, 可以用  $\delta$  值和  $\sigma$  值来衡量  $n$  次测量值的重复性、离散程度和随机误差。但算术平均误差的缺点是无法表示出各次测量值之间彼此符合的程度。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另一组测量值的相同。而标准误差对一组测量值中的较大偏差或较小偏差很敏感, 能较好地表明数据的离散程度。

## 1.2.4 精密度和准确度

测量的质量和水平可用误差概念来描述, 也可用准确度等概念来描述。为了

指明误差的来源和性质，通常用以下两个概念。

### 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，即所测量的数据重现性的程度。它可以反映随机误差的影响程度，精密度高指随机误差小。

### 2. 准确度

准确度（或称精确度）表示测量值和真值之间的符合程度，反映了测量中所有系统误差和随机误差的综合。因此，准确度表示测量结果与真值的逼近程度。

精密度高，准确度不一定高；但准确度高，其精密度一定高。

## 1.3 随机误差的正态分布

在系统误差忽略条件下，一个物理量在同一条件下进行多次测量，发现有一定规律。例如，用流量计测定一固定流量，其结果服从正态分布。其特点如下所述。

- (1) 单峰性：绝对值小的误差出现的概率大。
- (2) 对称性：绝对值相同的正、负误差的概率相同。
- (3) 有界性：大的误差出现概率小，且不超过一定的限度。
- (4) 抵偿性：随着测量次数的增加，随机误差的算术平均值等于零。

误差分析曲线积分可得，误差大于  $3\sigma$  出现的概率，在 370 次观测中只有一次。

### 1.3.1 $\sigma$ 法则

凡是误差大于  $3\sigma$  的数据点应予以舍弃（实际测量次数一般不超过 10 次）。

### 1.3.2 间接测量误差估计

设间接测量  $y$  和直接测量  $x_i$  间有如下关系：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-11)$$

令  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$ 、 $\dots$ 、 $\Delta x_n$  为各个直接测量的绝对误差

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (\text{泰勒展开})$$

式中， $\frac{\partial f}{\partial x}$ ——误差传递系数。

极限绝对误差：

$$\Delta y_m = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad (1-12)$$

实际上, 直接测量误差  $\Delta x_i$  是互不相关的随机量, 根据概率论, 要确定未知量  $y$  的随机误差, 应将各部分误差平方再相加, 然后求其开方值, 即

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2} \quad (1-13)$$

标准误差:

$$\sigma_{ym} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_{im}}^2} \quad (1-14)$$

由于真值未知, 常用  $\sigma_m$  代替  $\delta$ 。

### 1.3.3 测量结果表示方法

#### 1. 单次测量结果

$$x_0 = x_i \pm \Delta_{ix} \quad (1-15)$$

$\Delta_{ix}$  = 量程  $\times$  仪表精度

或高精度仪器:  $x_0 = x_i \pm \Delta_{ix} / \sqrt{3}$ ; 低精度仪器:  $x_0 = x_i \pm \Delta_{ix} / 2\sqrt{3}$

#### 2. 多次测量结果

$$\text{单变量: } x_0 = x_m \pm \sigma_m, \sigma_m = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_m)^2}{n(n-1)}} \quad (1-16)$$

$$\text{多变量: } y = y_m \pm \sigma_{ym}, \sigma_{ym} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_{im}}^2} \quad (1-17)$$

注意: 计算的  $\sigma_m \geq \Delta_{ix}$  时, 用  $\sigma_m$ ; 否则用  $\Delta_{ix}$ 。

**例 1-1** 圆柱体的半径  $r$  为  $(2.1 \pm 0.1)$  cm, 长度  $l$  为  $(6.4 \pm 0.2)$  cm, 求圆柱体体积及均值标准误差。

解:

$$V = \pi r^2 l \pm \sigma_m$$

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \sqrt{\sum \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_{im}}^2} = \sqrt{(2\pi r l)^2 \sigma_{mr}^2 + (\pi r^2)^2 \sigma_{ml}^2} \\ &= \sqrt{(2 \times 3.14 \times 2.1 \times 6.4 \times 0.1)^2 + (3.14 \times 2.1 \times 2.1 \times 0.2)^2} \\ &= 8.88 \\ V &= \pi \times (2.1)^2 \times 6.4 \pm \Delta_m = 88.7 \pm 8.9 = 89 \pm 9 \text{ (cm}^3\text{)} \end{aligned}$$

## 第 2 章 实验研究方法 with 数据的处理

### 2.1 实验研究方法

工程实验不同于基础课程的实验，后者采用的方法是理论的、严密的，研究的对象通常是简单的、基本的，甚至是理想的，而工程实验面对的是复杂的实验问题和工程问题，对象不同，实验研究方法必然不一样，工程实验的困难在于变量多，涉及的物料千变万化，设备大小悬殊，困难可想而知。化学工程学科如同其他工程学科一样，除了生产经验总结以外，实验研究是学科建立和发展的重要基础。多年来，化工原理在发展过程中形成的研究方法有直接实验法、因次分析法和数学模型法三种。

#### 2.1.1 直接实验法

直接实验法是一种解决工程实际问题的最基本的方法，对特定的工程问题直接进行实验测定，所得到的结果也较为可靠，但它往往只能用于条件相同的情况，具有较大的局限性。例如，过滤某种物料，已知滤浆的浓度，在某一恒压条件下，直接进行过滤实验，测定过滤时间和所得滤液量，根据过滤时间和所得滤液量两者之间的关系，可以作出该物料在某一压力下的过滤曲线。如果滤浆浓度改变或过滤压力改变，所得过滤曲线也都将不同。

对一个多变量影响的工程问题，为研究过程的规律，往往采用网格法规划实验，即依次固定其他变量，改变某一变量测定目标值。例如，影响流体阻力的主要因素有：管径  $d$ 、管长  $l$ 、平均流速  $u$ 、流体密度  $\rho$ 、流体黏度  $\mu$  及管壁粗糙度  $\varepsilon$ ，变量数为 6，如果每个变量改变条件次数为 10 次，则需要做  $10^6$  次实验，不难看出变量数是出现在幂上，涉及变量越多，所需实验次数将会剧增，因此实验需要在一定的理论指导下进行，以减少工作量，并使得到的结果具有一定的普遍性。因次分析法是化工原理广泛使用的一种研究方法。

#### 2.1.2 因次分析法

因次分析法所依据的基本理论是因次一致性原则和白金汉 (Buckingham)  $\pi$  定理。因次一致性原则是：凡是根据基本的物理规律导出的物理量方程，其中各项的因次必然相同。白金汉  $\pi$  定理是：用因次分析所得到的独立的因次数群个数，

等于变量数与基本因次数之差。

因次分析法是将多变量函数整理为简单的无因次数群的函数，然后通过实验归纳整理出算图或准数关系式，从而大大减少实验工作量，同时也容易将实验结果应用到工程计算和设计中。

使用因次分析法时应明确因次与单位是不同的，因次又称量纲，是指物理量的种类，而单位是比较同一种类物理量大小所采用的标准。例如，力可以用牛顿和千克力来表示。

因次有两类：一类是基本因次，它们是彼此独立的，不能相互导出；另一类是导出因次，由基本因次导出。例如，在力学领域内基本因次有三个，通常为长度 $[L]$ 、时间 $[t]$ 、质量 $[M]$ ，其他力学的物理量的因次都可以由这三个因次导出并写成幂指数乘积的形式。

现设某个物理量 $Q$ 的导出因次为 $[Q]=[M^a L^b t^c]$ ，式中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为常数。如果基本因次的指数均为零，这个物理量称为无因次数（或无因次数群），如反映流体流动状态的雷诺数就是无因次数群。

### 1. 因次分析法的具体步骤

- (1) 找出影响过程的独立变量。
- (2) 确定独立变量所涉及的基本因次。
- (3) 构造因变量和自变量的函数式，通常以指数方程的形式表示。
- (4) 用基本因次表示所有独立变量的因次，并表示出各独立变量的因次式。
- (5) 依据物理方程的因次一致性原则和 $\pi$ 定理得到准数方程。
- (6) 通过实验归纳总结准数方程的具体函数式。

### 2. 因次分析法举例说明

以获得流体在管内流动的阻力和摩擦系数 $\lambda$ 的关系式为例。根据摩擦阻力的性质和有关实验研究，得知由于流体内摩擦而出现的压降 $\Delta p$ 与6个因素有关，写成函数关系式为

$$\Delta p = f(d, l, u, \rho, \mu, \varepsilon) \quad (2-1)$$

这个隐函数是什么形式并不知道，但从数学上讲，任何非周期性函数，用幂函数的形式逼近是可取的，所以化工上一般将其改为下列幂函数的形式：

$$\Delta p = K d^a l^b u^c \rho^d \mu^e \varepsilon^f \quad (2-2)$$

尽管式(2-2)中各物理量上的幂指数是未知的，但根据因次一致性原则可知，方程式等号右侧的因次必须与 $\Delta p$ 的因次相同。由式(2-1)分析，变量数 $n=7$ （包括 $\Delta p$ ），表示这些物理量的基本因次 $m=3$ （质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 、时间 $[t]$ ），因此，根据白金汉 $\pi$ 定理可知，组成的无因次数群的数目为 $N=n-m=4$ 。