

HUAGONG YUANLI SHIYAN

化工原理实验

程远贵 曹丽淑 主编

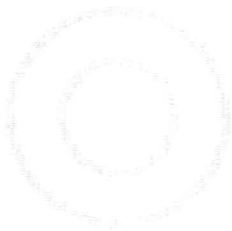


四川大学出版社



化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN



程远贵 曹丽淑 主编

杨雪峰 主审



四川大学出版社

责任编辑:段悟吾
责任校对:李晓静
封面设计:墨创文化
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验 / 程远贵, 曹丽淑主编. —成都:
四川大学出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-5614-5449-7

I. ①化… II. ①程…②曹… 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 174349 号

书名 化工原理实验

主 编	程远贵 曹丽淑
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
书 号	ISBN 978-7-5614-5449-7
印 刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	8
字 数	166 千字
版 次	2011 年 8 月第 1 版
印 次	2011 年 8 月第 1 次印刷
定 价	12.00 元

版权所有◆侵权必究

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电 话:85408408/85401670/
85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

◆网址:www.scupress.com.cn

前 言

化工原理实验是化工原理理论运用于实践不可缺少的中间环节和桥梁，其主要特点是工程性和实用性强。如何把化工原理知识运用于生产和生活中以解决实际问题，如何培养学生的工程观念和动手能力，如何培养学生严谨的实事求是的研究作风和创新精神，实验教学是一个重要环节。化工原理实验作为工程专业基础实验课，侧重于将离散的一些属于某一工程过程的现象，还原其本质过程，让学生在实验过程中，从这些错综复杂的工程现象中去观察问题、分析问题、解决问题，培养使学生从事自然科学工作的基本素质，提高学生的综合素质。

本书根据四川大学化工原理实验教师多年的教学实践，并参考国内外的教材编写而成，介绍了解决工程问题的基本方法，如何正确、合理、快速地进行实验数据处理，并书写合格的技术报告。实验内容涵盖了流体力学、传热、吸收、精馏、干燥、萃取等典型的化工单元操作，同时将化工的一些测试方法贯穿于各实验中，使理论与实践紧密结合。本书可作为化工、化学、高分子、塑料、食品、环境、生物工程、轻化工程、制药、化工机械等各专业的化工原理实验教材或教学参考书，亦可供从事化工实验研究的人员参考。

本书由程远贵、曹丽淑主编，杨雪峰主审。在本书的编写过程中，编者的同事和前辈给予了热情的支持和帮助，并提出了许多宝贵意见，在此向他们表示深切的谢意。

本书编写仓促，限于编者水平，不足之处恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 6 月

目 录

绪 论	(1)
化工原理实验室规则	(1)
化工原理实验教学的目的是要求	(1)
第 1 章 工程实验研究方法	(3)
1.1 量纲分析法	(4)
1.1.1 量纲及无量纲数	(4)
1.1.2 物理方程的量纲一致性	(5)
1.1.3 π 定理及量纲分析	(6)
1.2 数学模型法	(7)
1.2.1 颗粒床层的简化模型	(9)
1.2.2 建立流体压降的数学模型	(10)
1.2.3 模型的检验和模型参数的确定	(10)
第 2 章 实验数据采集和处理	(12)
2.1 实验数据采集	(12)
2.1.1 实验预习	(12)
2.1.2 实验操作	(12)
2.1.3 读取实验数据	(13)
2.2 实验数据处理	(14)
2.2.1 列表表示法	(14)
2.2.2 图示表示法	(15)
2.2.3 数学模型法	(19)
2.3 实验报告	(24)
2.3.1 实验报告格式	(24)
2.3.2 实验报告要求	(24)
第 3 章 实 验	(25)
实验 1 流体力学综合实验	(25)
1. 实验目的	(25)
2. 实验原理	(25)

3. 实验流程及设备	(29)
4. 实验操作步骤	(29)
5. 实验数据记录及整理	(30)
6. 实验思考与讨论问题	(31)
实验2 对流传热实验	(31)
1. 实验目的	(31)
2. 实验原理	(31)
3. 实验流程及设备	(33)
4. 实验操作步骤	(33)
5. 实验数据记录及整理	(34)
6. 实验思考与讨论问题	(34)
实验3 气体吸收实验	(35)
1. 实验目的	(35)
2. 实验原理	(35)
3. 实验流程及设备	(37)
4. 实验操作步骤	(38)
5. 实验数据记录及整理	(39)
6. 实验思考与讨论问题	(39)
实验4 精馏实验	(40)
1. 实验目的	(40)
2. 实验原理	(40)
3. 实验流程及设备	(41)
4. 实验操作步骤	(41)
5. 实验数据记录及整理	(43)
6. 实验思考与讨论问题	(44)
实验5 常压红外干燥实验	(44)
1. 实验目的	(44)
2. 实验原理	(44)
3. 实验流程及设备	(45)
4. 实验操作步骤	(46)
5. 实验数据记录及整理	(46)
6. 实验思考与讨论问题	(47)
实验6 对流干燥实验	(47)
1. 实验目的	(47)
2. 实验原理	(47)
3. 实验流程及设备	(49)

4. 实验操作步骤	(49)
5. 实验数据记录及整理	(50)
6. 实验思考与讨论问题	(50)
实验 7 流化床、旋风分离器性能组合实验	(51)
1. 实验目的	(51)
2. 实验原理	(51)
3. 实验流程及设备	(52)
4. 实验操作步骤	(52)
5. 实验数据记录及整理	(53)
6. 实验思考与讨论问题	(53)
实验 8 板框过滤实验	(53)
1. 实验目的	(53)
2. 实验原理	(53)
3. 实验流程及设备	(54)
4. 实验操作步骤	(55)
5. 实验数据记录及整理	(55)
6. 实验思考与讨论问题	(56)
实验 9 萃取实验	(56)
1. 实验目的	(56)
2. 实验原理	(56)
3. 实验流程及设备	(57)
4. 实验操作步骤	(57)
5. 实验数据记录及整理	(59)
6. 实验思考与讨论问题	(59)
实验 10 喷雾干燥实验	(59)
1. 实验目的	(59)
2. 实验原理	(59)
3. 实验流程及设备	(60)
4. 实验操作步骤	(61)
5. 实验数据记录及整理	(61)
6. 实验思考与讨论问题	(62)
实验 11 柏努利方程实验	(62)
1. 实验目的	(62)
2. 实验原理	(62)
3. 实验流程及设备	(63)
4. 实验操作步骤	(63)

5. 实验数据记录及整理	(64)
6. 实验思考与讨论问题	(64)
第 4 章 化工仪表	(65)
4.1 流量测量	(65)
4.1.1 皮托管	(65)
4.1.2 孔板流量计与文丘里流量计	(66)
4.1.3 转子流量计	(69)
4.1.4 涡轮流量计	(71)
4.1.5 涡街流量计	(71)
4.2 温度测量	(72)
4.2.1 温度测量的基本概念	(72)
4.2.2 温度测量仪表的分类	(73)
4.2.3 温度传感器的选用	(73)
4.2.4 温度检测器	(75)
4.2.5 热电阻选型	(76)
4.3 压力测量	(77)
4.3.1 压力表的分类	(77)
4.3.2 压力的定义	(78)
4.3.3 压力表	(78)
4.3.4 压力表选型	(80)
4.3.5 压力表常用附件	(81)
4.4 液位计	(82)
4.4.1 液位计分类	(82)
4.4.2 磁浮子液位计	(83)
参考文献	(85)
化工原理实验报告	(87)

绪 论

化工原理实验室规则

1. 实验室是进行科学实验的场所，在实验室进行实验时应保持安静。禁止在实验室内大声喧哗、追逐嬉戏和随地吐痰；禁止赤足、穿拖鞋进实验室；禁止玩手机。
2. 必须以严肃、认真的态度进行实验，遵守实验室的各项规章制度，不得迟到、无故缺课。实验室内不得进行与实验无关的事。
3. 爱护实验仪器、设备及设施。在未弄清仪器设备使用方法前，不得乱动。在保证完成实验要求下，注意节约水、电、气、油以及化学药品等。
4. 实验操作过程中，注意用电、用液化气及使用有害药品的安全防护，并注意防火，实验室内严禁吸烟、精馏塔附近不准使用明火，启动电器设备时应防触电，注意电机有无异常声音。
5. 实验过程中注意保持实验环境的整洁。实验结束后应进行清洁和整理，将仪器设备恢复原状。
6. 实验过程中，如因违反操作规程损坏实验仪器、设备者，应根据情节的轻重程度和认错态度由指导教师同实验室负责人商定，按实验仪器、设备价值酌情折价赔偿。对情节严重、造成严重事故者，上报学校对其进行处理。
7. 实验过程中应服从指导教师及实验室工作人员的指导；否则，将视其情节进行批评教育，对不服从者，指导教师有权停止其实验操作。

化工原理实验教学的目的是要求

化工原理实验是化工原理课程中理论与实践相联系、相结合的重要教学环节之一，它验证了化工过程中的一些基本理论，是学习、掌握和应用化工原理这门课程的必要手段之一。它与其他化学实验相比更有明显的工程特点，可以与化工工程技术问题紧密结合，属于工程性实验，对化工单元操作设备的设计具有指导意义。因此，学生通过实验教学需要达到以下目的和要求。

1. 通过实验教学，验证化工单元过程的基本理论；反过来运用所学理论分析实验过程及其现象，让学生进一步掌握、巩固和加深化工原理理论知识，得到将理论应用于实践的训练。
2. 熟悉实验装置流程和常用化工仪器仪表的使用，了解典型化工过程和化工设备

结构的特点。

3. 训练实际操作和掌握化工实验的基本技能，培养观察实验现象，测定化工参数，分析、整理实验数据和编写工程实验报告的能力，进而分析、解决化工原理实验问题，得出正确的结论，增强学生的工程观点，培养学生良好的科学实验能力。

4. 养成实事求是的科学态度，严谨的科学作风和爱护实验仪器、设备、热爱劳动的良好品德。

为达到上述目的，要求参加实验的学生必须严肃、认真地对待实验教学中的每一个环节，认真预习，并按照实验教学的目的和内容，主动、积极、认真地进行实验操作准备，圆满完成实验项目。

第 1 章 工程实验研究方法

化学工程学科同其他工程学科一样，实验研究是学科建立和发展的基础。多年来，在化学工程的发展过程中形成了直接实验法、量纲分析法、数学模型法等解决工程实际问题的研究方法。

直接实验法是指对特定的工程问题直接进行实验观察和测定，从而得到需要的结果。这种实验研究方法得到的结果较为可靠，但它往往只能用于条件相同的情况，即这种实验的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完全相同的过程中。因此，这种实验研究方法具有较大的局限性。例如，物料的干燥，已知物料的湿分，以空气为干燥介质，在一定的空气温度、湿度和流量条件下进行干燥时，可直接通过实验测定干燥时间和物料的失水量，得到该物料的干燥曲线。但如果被干燥的物料不同，或是干燥的条件不同，则所得到的干燥曲线也不同。

对一个受多个变量影响的工程问题，为了研究过程的规律，用直接实验法进行研究时，可以用网络法规划实验，即依次改变某一个变量、固定其他变量来测定目标值。如果变量数为 m 个，每个变量需改变的条件数为 n 次，用这种直接实验法规划实验，所需的实验次数为 n^m 次。依这种方法组织实验，所需实验数目庞大，难以实现。

以圆管内湍流时流体的流动阻力问题为例，从湍流过程的分析可知，影响直管内流体流动阻力的主要因素有管径 d 、管长 l 、绝对粗糙度 ϵ 、流体密度 ρ 、流体黏度 μ 和流体的流动速度 u ，即变量数 m 为 6，若每个变量改变条件数 n 为 5，则需做 5^6 次实验，显然这种实验工作是难以完成的。实际上，除了实验的工作量非常大以外，还有一个更重要的问题是实验的难度。众所周知，化工生产中涉及的物料千变万化，涉及的设备尺寸大小悬殊，要改变 d 、 l 、 ϵ 等设备的尺寸参数，就必须改变实验装置；要改变 ρ 和 μ 则在实验中必须使用多种流体；而只改变 ρ 而固定 μ ，或只改变 μ 而固定 ρ ，则往往很难做到。

由此可见，涉及的变量数愈多，实验工作的量就愈大，且实验工作的量会随变量数的增多而急剧增大。若实验能在一定的理论指导下进行，则不仅可以减少工作量，而且还可以使得到的结果具有一定的普遍性。量纲分析法和数学模型法就是在一定的理论指导下处理工程问题的十分重要的研究方法。

1.1 量纲分析法

量纲分析法是化学工程实验研究中广泛使用的实验研究方法。以圆管内湍流时流体的流动阻力问题为例。从湍流过程的分析可知,影响流体流动阻力的主要因素有 6 个,通过量纲分析可以将这些影响因素组成若干个无量纲数群,这样不仅可以减少变量的个数,使实验的次数明显减少;同时也可以通过参数间的组合来消除一些原来难以实现的实验条件(如只改变 ρ 而固定 μ),降低实验的难度。用量纲分析法得到的湍流流动阻力的方程为

$$h_f = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad (1-1)$$

$$\text{其中} \quad \lambda = \varphi\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right) \quad (1-2)$$

式(1-1)和式(1-2)中的 $\frac{du\rho}{\mu}$ 、 $\frac{l}{d}$ 、 $\frac{\varepsilon}{d}$ 均为无量纲数,实验中只要保证这些无量纲数相同,则不论设备的尺寸如何、体系的物性如何,其结果都是相同的。

1.1.1 量纲及无量纲数

量纲是指物理量的单位种类。例如,长度可以用米、厘米、毫米等不同单位表示,但这些单位均属于同一类,即长度类。这些测量长度的单位具有同一量纲。其他物理量,如力、速度、加速度、时间、温度等都有各自的量纲。

在力学中常取质量、长度、时间这 3 种量为基本量。它们的量纲相应以 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[T]$ 表示,称为基本量纲。其他力学量可由这 3 个基本量通过某种公式导出,它们的量纲则称为导出量纲。导出量纲由基本量纲经公式推导而得,因而其必然由基本量纲组成,因此可以把导出量纲写成各基本量纲的幂指数乘积的形式。例如,某导出量纲为 $[Q] = [M^a L^b T^c]$, 指数 a 、 b 、 c 为常数。下面介绍几种常见量纲的导出过程。

(1) 面积 A : 它的量纲就是两个长度量纲相乘,即长度量纲的平方, $A = [L][L] = [L^2]$, 如果写为一般形式: $A = [M^a L^b T^c]$, 其中 $a = c = 0$, $b = 2$ 。同理可得体积的量纲为 $V = [L^3]$ 。

(2) 速度 u : 速度定义为距离对时间的导数,即 $u = \frac{ds}{dt}$, 它是 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 中当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限。长度增量 Δs 的量纲仍为 $[L]$, 而时间增量 Δt 的量纲为 $[T]$, 所以速度的量纲为 $u = \frac{[L]}{[T]} = [M^0 L T^{-1}]$ 。

(3) 加速度 a : 加速度定义为 $\frac{du}{dt}$, 具有 $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ 的量纲, 即 $a = \frac{[L T^{-1}]}{[T]} = [L T^{-2}]$ 。

(4) 力 F : 力由方程 $F = ma$ 定义, 所以 F 的量纲为质量量纲和加速度量纲的乘

积, 即 $F = [MLT^{-2}]$ 。

(5) 应力 σ : 应力定义为 $\frac{F}{A}$ 。所以, 应力的量纲为力 F 的量纲除以面积 A 的量纲, 即 $\sigma = \frac{[MLT^{-2}]}{[L^2]} = [ML^{-1}T^{-2}]$ 。

(6) 黏度 μ : 按牛顿黏性定律, μ 的量纲应为剪切应力量纲除以速度梯度的量纲, 即 $\mu = \frac{[ML^{-1}T^{-2}]}{[T^{-1}]} = [ML^{-1}T^{-1}]$ 。

以上导出量纲是以 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[T]$ 为基本量纲导出的, 取不同的基本量纲时, 如力的量纲 $[F]$ 作为基本量纲, 这样, 以上各量的量纲就不同。例如, 黏度 $\mu = [FL^{-2}T]$ 。采用同样的方法可以导出其他常见力学量的量纲。

从以上的量纲导出过程可见, 一个量的量纲没有绝对的表示法, 它取决于所选取的基本量纲。

若某物理量的量纲为零, 则称其为无量纲数。一个无量纲数可以通过几个有量纲数乘除组合而成。例如, 反映流体流动状况的雷诺数 $Re = \frac{du\rho}{\mu}$ 就是一个无量纲数, 其中各物理量的量纲 (以 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[T]$ 为基本量纲) 如下: 速度 u 是 $[LT^{-1}]$ 、长度 l 是 $[L]$ 、密度 ρ 是 $[ML^{-3}]$ 、黏度 μ 是 $[ML^{-1}T^{-1}]$, 将各量的量纲分别代入雷诺数 Re 的表达式中, 得

$$Re = \frac{[L][LT^{-1}][ML^{-3}]}{[ML^{-1}T^{-1}]} = [M^0L^0T^0] = [1] \quad (1-3)$$

量纲和单位是不同的。量纲是指物理量的种类, 而单位则是比较同一物理量大小所采用的标准。同一量纲可以有多种单位, 而同一物理量采用不同的单位时, 其数值不同。例如, 某管道长度为 50 m, 也可以表示为 50000 mm 或 0.05 km, 单位不同, 其数值不同, 但量纲不变, 仍为 $[L]$ 。量纲不涉及到量的数值方面, 不论这一长度是 50、50000 或是 0.05, 也不论其单位是什么, 它仅表示量的物理性质。

1.1.2 物理方程的量纲一致性

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, 但绝不能与黏度或压力相加。不同单位的同类量是可以相加的, 如 5 m 加上 50 cm, 仍为某一长度, 但要把其中的一个单位进行换算统一。

既然不同种类的物理量不能相加减, 也不可相等, 即不同种类的量纲不能相加减, 也不可相等。反之, 能够相加减并列入同一等式中的各项物理量, 必然有相同的量纲。也就是说, 只要一个物理方程是根据基本原理进行数学推演而得到的, 它的各项在量纲上必然是一致的, 这就是物理方程的量纲一致性, 这种方程称为“完全方程”。

例如, 在物理学中, 质点运动学中的自由落体公式为

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (1-4)$$

式中, 等号左边的 s 代表距离, 量纲为 $[L]$, 右边第一项 $v_0 t$ 为质点在时间 t 内由于速度 v_0 所经过的距离, 量纲为 $\left[\frac{L}{T}\right] \cdot [T] = [L]$ 。右边第二项 $\frac{1}{2} g t^2$ 为质点在时间 t 内由于加速度 g 所经过的附加距离, 量纲为 $\left[\frac{L}{T^2}\right] \cdot [T^2] = [L]$, 所以方程的三项都具有同样的量纲 $[L]$, 量纲是一致的。

“由理论推导而得的物理方程必然是量纲一致的方程”这一点非常重要, 它是量纲分析法的理论基础。

在化工原理各章节推导的基本公式中都用到了物理方程的量纲一致性原理。例如, 在推导连续方程时, 取一块体积, 分析在微小时段内流进这一体积的质量及从这一体积流出的质量, 求出二者之差 (仍是质量), 然后分析该体积内的质量变化 (仍是质量)。根据质量守恒定律, 它应与进出该体积质量的差相等。可见, 在整个推导过程中, 始终是质量之差, “质量”变化及“质量”相等。这就是说, 推导过程中已经保证了它的量纲一致性。又如欧拉方程, 它是分析微元体积上的受力 (压力、质量力、惯性力), 然后列成等式。实际上使用的是所有外力之和等于惯性力, 这里是“力”和“力”相加减及相等的关系; 对于能量方程, 则是“功”和“能”的相加减及相等的关系。其他方程同样也是如此。由此可见, 所谓一个物理方程的推导过程, 无非是找出一些同类量的不同形式, 根据某种原理把它们列成等式。

有一些方程没有理论指导, 纯粹根据观察归纳所得的关联式, 即所谓的经验公式。这种公式中各个变量采用的单位是有一定限制的, 并有所说明。例如, 计算气体扩散系数的半经验式为

$$D = \frac{0.01498 T^{1.81} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5}}{P (T_{cA} T_{cB})^{0.1405} (V_{cA} V_{cB})^2} \quad (1-5)$$

式中: D ——气体的扩散系数, cm^2/s ;

T ——热力学温度, K ;

p ——总压, atm ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$);

M_A 、 M_B ——组分 A、B 的摩尔质量, kg/kmol ;

T_{cA} 、 T_{cB} ——组分 A、B 的临界温度, K ;

V_{cA} 、 V_{cB} ——组分 A、B 的临界容积, cm^3/mol 。

如果用的不是所说明的单位, 那方程中出现的常数必须做相应的改变。这一点正是它和量纲一致方程的区别。不过应当指出, 任何经验公式, 只要引入一个有量纲的常数, 也可以使它量纲一致。

1.1.3 π 定理及量纲分析

如果在某一物理现象中有几个独立自变量, 即 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则因变量 y 可以用量纲一致的关系来表示, 即

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1-6)$$

或
$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad (1-7)$$

π 定理指出, 由于方程中各项量纲是一致的, 函数 F 与其作为 n 个独立变量 x 间的关系, 不如改为 $(n-m)$ 个独立的无量纲参数 π (可以看做是一组新的变量) 间的关系, 因为后者所包含的变量数目较前者减少了 m 个, 而且是无量纲的。

应用 π 定理进行量纲分析的步骤如下:

(1) 确定所研究过程的独立变量数, 设共有 n 个: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。写出一般函数表达式

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad (1-8)$$

(2) 确定独立变量所涉及的基本量纲。对于力学问题, 可选 $[MLT]$ (或 $[FLT]$) 的全部或者其中任意两个。

(3) 用基本量纲表示所有各变量的量纲。

(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量纲的数目, 对于力学问题, 一般 m 不大于 3), 条件是它们的量纲应能包括 n 个变量中所有的基本量纲, 并且它们是互相独立的, 即 1 个基本变量的量纲不能从另外几个基本变量的量纲导出。通常选 1 个代表尺寸的量、1 个表征运动的量、另 1 个则是与力或质量有关的量。

(5) 列出无量纲参数 π 。根据 π 定理, 可以构成 $(n-m)$ 个无量纲数 π 。它的一般形式可表示为

$$\pi_i = x_i x_A^a x_B^b x_C^c \quad (1-9)$$

式中, x_i 为除去已选择的 m 个基本变量 x_A, x_B, x_C 以后所余下的 $(n-m)$ 个变量中的任何一个。 a, b, c 为待定指数。把 x_i, x_A, x_B 及 x_C 的量纲代入上式, 根据 π 为无量纲参数的要求, 利用量纲分析法可求得指数 a, b 及 c , 从而得到 π_i 的具体形式。

(6) 将该研究现象用 $(n-m)$ 个 π 参数的函数 F 来表达, 即

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (1-10)$$

(7) 最后, 根据函数 F 中的无量纲数, 通过实验以求得函数 F 的具体关系式。

1.2 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。数学模型法要求研究者对过程有深刻的认识, 能对所研究的过程作出高度的概括, 能依据过程的特殊性将复杂问题合理简化, 得出足够简化而又不过于失真的近似实际过程的物理模型, 并用数学方程描述和表达该物理模型, 然后求解方程。高速大容量计算机的出现, 使数学模型法得以迅速发展, 成为化学工程研究中的强有力工具。用数学模型法处理工程问题, 同样离不开实验。因为简化的模型其合理性如何, 仍需要经过实验来检验, 其中引入的模型参数也需要由实验来测定, 并做进一步地修正、校核。

圆管内的流动阻力问题是一个典型的工程实际问题,对于层流流动时的流体流动阻力,根据牛顿黏性定律,通过数学分析可导出著名的柏努利方程,得出的流体在直管中呈层流时的摩擦阻力的数学模型为

$$h_f = \frac{32\mu l u}{\rho d^2} \quad (1-11)$$

对于湍流,由于流动情况非常复杂,尽管力的平衡方程并不因流型的变化而改变,但在湍流时其剪应力不能用简单的牛顿黏性定律来表示。因此,解决湍流流动阻力问题可采用半经验、半理论的数学模型法。

普朗特提出的混合场理论就是一种描述湍流流动的数学模型,根据对湍流过程的分析,可以作出湍流的起源是流体微团的脉动运动的假设,其机理与分子的热运动相仿,存在有一个平均的自由径 l ,由此可设想导出湍流黏度 ϵ ,即

$$\epsilon = l \cdot \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

式中用湍流黏度 ϵ 代替牛顿黏性定律中的黏度 μ ,从而导出了湍流流动过程的数学模型。

应该说,有了数学模型方程就可以求解了,但事实上问题至此仍未完全得到解决,过程机理假设的真实性尚待检验,自由径 l 仍为未知值。这时就要借助于实验,从实验测得的速度分布对比中,检验假设模型的真实性,并求出 l 的值。因此,称这种方法为半理论、半经验的数学模型法。

由此可见,用数学模型法处理工程问题,并不意味着可以取消和削弱实验环节,相反,对工程实验提出了更高的要求。一个合理的数学模型是建立在对过程充分观察和认识、对实验数据进行充分分析和研究的基础之上的,在所建立的物理模型和数学模型中必然会引出一定程度的近似和简化。因此,数学模型中的模型参数也必须要通过实验来确定、检验和修正。

数学模型法解决工程问题的大致步骤如下:

- (1) 通过预实验认识过程,建立物理模型;
- (2) 物理模型的数学描述;
- (3) 模型参数的确定、模型的求解和检验。

下面以流体通过颗粒层的流动问题为例,就数学模型研究方法进行讨论。

流体通过颗粒层的流动,就其流动过程本身来说并没有什么特殊性,问题的复杂性在于流体通道是不规则的几何形状。一般来说,构成颗粒层的各个颗粒不但几何形状是不规则的,而且颗粒大小不均匀、表面粗糙情况也不同。由这样的颗粒组成的颗粒层通道必然是不均匀的纵横交错的网状通道,如果仍像流体通过圆管那样沿用严格的流体力学的方法进行处理,则需要列出流体通过颗粒层的边界条件,这一点实际很难做到。为此,要解决流体通过颗粒层的流动问题,必须寻求简化的处理方法。

寻求简化途径的基本思路是研究过程的特殊性,并充分利用其特殊性对所研究的过

程作出有效的简化。

对于流体通过颗粒层的流动过程，它的特殊性是什么呢？不难想象，流体通过颗粒层的流动可以有两个极限，一个是极慢流动，另外一个就是高速流动。在极慢流动的情况下，流动阻力主要来自表面摩擦；而在高速流动时，流动阻力主要是形体阻力。对于过滤这一工程问题，其滤饼都是由细小的、不规则的颗粒组成，流体在其中的流动是极其缓慢的。因此，可以抓住极慢流动这一特殊性，对流动过程进行大幅度的简化。

极慢流动又称爬流。此时，可以设想流动边界所造成的流动阻力主要来自表面摩擦。因而，其流动阻力与颗粒总表面积成正比，而与通道形状的关系甚小。这样，就把通道的几何形状的复杂性问题消除了。

下面来讨论用数学模型法解决以过滤操作为背景的流体通过颗粒层的流动问题的具体步骤。

1.2.1 颗粒床层的简化模型

根据以上的分析，可将图 1-1(a) 所示的复杂的不均匀网状通道简化为图 1-1(b) 所示的由许多平行排列、均匀细管组成的管束，并作如下假定：

- (1) 细管的内表面积等于床层颗粒的全部表面积；
- (2) 细管的全部流动空间等于床层的空隙容积。

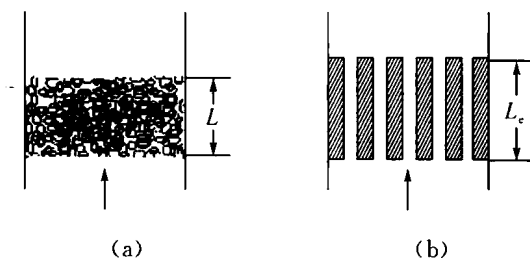


图 1-1 颗粒床层的简化模型

根据上述假定，可求得虚拟细管的当量直径 d_e 。

$$d_e = \frac{4 \times \text{通道截面积}}{\text{湿润周边}} \quad (1-13)$$

分子、分母同乘以 L_e ，则有

$$d_e = \frac{4 \times \text{床层的流动空间}}{\text{全部内表面}} \quad (1-14)$$

以 1 m^3 床层体积为基准，并设床层的流动空间为 ϵ 、床层的比表面积为 a_B ，因此，

$$d_e = \frac{4\epsilon}{a_B} = \frac{4\epsilon}{a(1-\epsilon)} \quad (1-15)$$

式中， a 为颗粒的比表面积。

按此简化模型，流体通过固定床的压降相当于流体通过一组当量直径为 d_e 、长度为 L_e 的细管的压降。