

化工原理实验

(第二版)

HUAGONG YUANLI SHIYAN

主 编 程远贵



四川大学出版社

化工原理实验

(第二版)

HUAGONG YUANLI SHIYAN

主 编 程远贵

副主编 余 徽 吴 潘
田 文 左 炆



四川大学出版社

责任编辑:段悟吾
责任校对:蒋 琦
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验 / 程远贵主编. —2 版. —成都:
四川大学出版社, 2016. 8
ISBN 978-7-5614-9784-5

I. ①化… II. ①程… 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 192499 号

书名 化工原理实验(第二版)

主 编	程远贵
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 978-7-5614-9784-5
印 刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	8.25
字 数	178 千字
版 次	2016 年 8 月第 2 版
印 次	2016 年 8 月第 1 次印刷
定 价	15.00 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:(028)85408408/(028)85401670/
(028)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:<http://www.scupress.net>

第二版前言

本书是在 2011 年出版的《化工原理实验》教材基础上, 经过近 5 年的教学实践和实验装置建设及改造, 参考国内的教材, 对原实验内容进行了修订, 并对新增加的实验内容进行重新编写而成。本教材进一步将实验内容拓展和加深, 引入现代的新技术和新成果, 重点突出实验的工程性和实践性, 把理论运用于生产和生活中以解决实际问题, 培养学生的工程观念和实验技能, 培养学生严谨、实事求是的学风和创新意识作为本教材编写的宗旨。“化工原理实验”作为化学工程专业的技术基础实验课, 侧重将离散的、错综复杂的工程现象还原为其本质过程, 让学生在实验过程中观察问题、分析问题、解决问题, 培养学生从事自然科学工作的基本素质, 提高学生解决问题的综合能力。

本书介绍了化工原理实验室的常用安全规程, 解决工程问题的基本方法, 如何正确、快速地进行实验数据的采集和处理, 如何书写合格的实验报告以及熟练地使用常用的化工仪器仪表。实验内容有 13 个, 涵盖了流体力学、传热、过滤、吸收、精馏、干燥等化工单元操作, 同时将传统的和现代的化工测试技术贯穿于各实验中, 使理论与实践紧密结合。本书可作为化工、化学、高分子材料、食品、环境、制药、轻化工程等各专业的技术基础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、余徽、吴潘、田文、左炆编写, 周勇教授主审。在本书的编写过程中, 四川大学化学工程学院化学工程实验教学中心的实验人员和前辈给予了热情的支持和帮助, 在此向他们表示诚挚的感谢。

本书此次修订再版, 限于编者水平, 不足之处在所难免, 恳请读者批评指正。

编 者

2016 年 3 月

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 工程实验研究方法	(5)
1.1 量纲分析法	(6)
1.2 数学模型法	(9)
第 2 章 实验数据采集和处理	(14)
2.1 实验数据采集	(14)
2.2 实验数据误差	(16)
2.3 实验数据处理	(17)
2.4 实验报告	(34)
第 3 章 实验	(36)
实验一 伯努利方程实验	(36)
实验二 流体力学实验	(38)
实验三 板框过滤实验	(46)
实验四 流化床、旋风分离器性能组合实验	(51)
实验五 冷空气—蒸汽的对流传热实验	(54)
实验六 热空气—水的对流传热实验	(58)
实验七 平板边界层实验	(63)
实验八 气体吸收实验	(68)
实验九 气体吸收—解吸实验	(73)
实验十 精馏实验	(79)
实验十一 常压红外干燥实验	(85)
实验十二 气流干燥实验	(88)
实验十三 喷雾干燥实验	(92)

第 4 章 化工仪表.....	(96)
4.1 流体的流量测量	(96)
4.2 流体的温度测量	(106)
4.3 流体的压强测量	(111)
4.4 液位计	(117)
4.5 分析仪器	(119)
参考文献.....	(124)

绪 论

1. 化工原理实验室规则

(1) 实验室是进行科学实验的场所，到实验室进行实验时应保持实验室的环境安静。禁止在实验室内大声喧哗、追逐嬉玩，禁止赤足、穿拖鞋进入实验室。

(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) 实验人员实验前应当仔细阅读实验讲义，了解实验目的、原理和操作注意事项，并写好预习报告，以保证实验任务顺利完成。没有准备的同学不准参加当天的实验。

(4) 爱护实验仪器、实验设备及实验室其他设施。在未弄清仪器设备的工作原理、使用说明和注意事项前，不得使用。实验过程中，如因违反操作规程损坏仪器、设备者，应根据情节的轻重由指导教师会同实验室负责人商定，按仪器、设备价值酌情折价赔偿，情节严重、造成损失较大者，上报学校进行处理。

(5) 在实验操作过程中，注意电、液化气及有害药品的安全使用，并注意防火。实验室内严禁吸烟；精馏塔附近不准使用明火；启动电气设备时应防触电，注意电机有无异常声音。在保证完成实验要求前提下，注意节约水、电、气以及化学药品等。禁止一切违反安全规则的操作。

(6) 实验过程中注意保持实验环境的整洁，实验室内严禁吃东西、随地吐痰和乱丢垃圾。实验结束后应进行清洁和整理，将仪器设备恢复原状。

(7) 实验人员应服从指导教师和实验室工作人员的指导。否则，将视其情节进行批评或停止其实验操作。

2. 化工原理实验教学的目 的

化工原理实验是化工原理课程中理论与实践相联系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的必要手段。化工原理实验与其他实验（化学、物理）的明显区别在于它的工程性，它与化工工程技术问题紧密结合，属于工程性质实验，对化工单元操作设备的设计具有指导意义。化工原理实验不仅能使学生加深对化工原理理论知识的理解，更重要的是对学生进行实验方法、实

验技能的基本训练,培养学生独立组织实验、完成实验的能力,提高学生综合运用理论知识分析和解决实际问题的能力,使学生建立起一定的工程概念。因此,通过实验教学需要达到以下目的:

(1) 通过实验教学,验证化工单元过程的基本理论,运用理论分析实验过程及其现象,让学生掌握、巩固和加深化工原理理论知识,培养学生将理论应用于实践的能力。

(2) 熟悉实验装置流程及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) 掌握化工数据的基本测量技术,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,进而让学生分析、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) 提高学生数据处理和分析讨论问题的能力,学会完整地撰写工程实验报告。

(5) 培养学生实事求是的科学态度,严谨的科学作风,爱护实验仪器、设备和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。

3. 化工原理实验室安全知识

安全是化工原理实验教学中的重中之重,为了保证实验人员的人身安全,避免实验财产损失,每位实验人员在进入实验室前要认真学习安全知识,注重安全防范。化工原理实验与基础化学实验不同,它是一门实践性很强的基础课程。每一个实验相当于一个小生产单元,电器、仪表、设备和管道等有机地组合成一个整体,而且在实验过程中不免要接触易燃、易爆等物质,同时会接触高压、高温或低温下的操作。此外还要涉及用电和仪表操作等方面的问题,所以要想有效达到实验目的就必须掌握一定的安全知识。

(1) 使用化学药品和气体的安全知识。

对有毒或易燃、易爆的气体一定要保存严密,并注意室内通风。

在实验中,往往被人们忽视的毒物是压差计和水银温度计中的汞。汞的毒性大而且是积累性毒物,进入人体后不易排出,如果汞冲洒出来没有及时处理掉,实验者每天吸入少量的汞蒸气和汞尘埃,日久就会中毒。所以对洒出的汞一定要认真并尽可能地将其收集,实在无法收集的要硫磺或氯化铁溶液覆盖,不要随便排入地沟。

(2) 使用高压气瓶的安全知识。

化工实验中所用的气体种类较多:一类是具有刺激性的气体,如氨气,这类气体的泄漏一般容易被发觉;另一类是无色无味,但有毒或易燃、易爆的气体,如氢气在室温下空气中的爆炸极限为4%~75.2%(体积)。因此使用有毒或易燃、易爆气体时,系统一定要达到严密不漏,尾气要导出室外,并注意室内通风。

化工原理吸收实验中常使用二氧化碳高压钢瓶。高压钢瓶是一种储存各种压缩气体或液化气体的高压容器，钢瓶容积一般为 40~60 L。气体钢瓶是由碳素钢或合金钢制成的，适用于装入介质压力在 15 MPa 以下的气体，二氧化碳钢瓶内装液化气体压力大约是 6 MPa。

气体钢瓶主要由筒体和瓶阀构成，其附件有保护瓶阀的安全帽、开启瓶阀的手轮、在运输过程中防止震动的橡胶圈，高压钢瓶在使用时其瓶阀出口还要连接减压阀和压力表。

标准高压气瓶是按国家标准制造的，并经有关部门严格检验方可使用。各种气瓶在使用过程中，必须定期送至有关部门进行水压试验，经过检验合格的气瓶，在气瓶肩上用钢印打上下列信息：制造厂家、制造日期、气瓶型号和编号、气瓶质量、气瓶容积、工作压力、水压试验压力、水压试验日期和下次试验日期。

各类气瓶的表面都应涂上一定颜色的油漆，其目的不仅是防锈，更主要是能从颜色上迅速辨别出钢瓶中所储存气体的种类，以免混淆。

使用气体钢瓶的主要危险是气瓶可能爆炸和漏气，已充气的气瓶发生爆炸和漏气的主要原因是气体受热膨胀，压力超过气瓶的最大负荷；或是瓶颈螺纹损坏，当气瓶内部压力升高时，气体冲出瓶颈，在这种情况下气瓶会朝放出气体的相反方向高速飞行。另外，如果气瓶坠落或撞击坚硬物时也可能会发生爆炸，造成巨大的破坏和伤亡事故，因此使用时必须注意以下几点：

①气体钢瓶应存放在阴凉、干燥、远离热源（如阳光、炉火）的地方，高压钢瓶不能受日光直晒或靠近热源，以免瓶内气体受热膨胀而引起钢瓶爆炸。

②应尽可能避免可燃气体钢瓶和氧气钢瓶在同一室内使用（如氢气钢瓶和氧气钢瓶），以防止因为两种钢瓶同时泄漏而引起着火和爆炸。

③气体钢瓶必须按规定远离明火，可燃性气体钢瓶与明火距离须在 10 m 以上。

④搬运气瓶时要轻放，要把瓶帽旋上，橡胶防震圈要牢固。钢瓶使用时必须靠近墙壁并加以固定。

⑤气瓶使用前必须安装减压阀及气表，各种气表不能混用，一般可燃性气体的钢瓶气门螺纹是反扣的（如氢气），非可燃性气体的钢瓶气门螺纹是正扣的（如氮气，氧气），使用时必须连接减压阀或高压调节阀，不经这些部件而直接与钢瓶连接是十分危险的。

⑥绝不允许其他易燃有机物黏附在钢瓶上。

⑦打开钢瓶阀门或者调压时，人不要站在气体出口的前方，头不要在瓶口之上，而应站在钢瓶侧面，以防钢瓶的总阀门或气表冲出伤人。

⑧当钢瓶瓶内压力为 0.5 MPa 时应停止使用，压力过低会给充气带来不安全影响，当钢瓶内压力与外界压力相同时，会造成空气进入钢瓶。

⑨用气时应注意气瓶颜色，不要用错。

⑩瓶阀发生故障时，不要擅自拆卸瓶阀或瓶阀上的零件，气瓶必须严格按期检验。

(3) 实验室防火安全知识。

①所有实验人员严禁在实验室内吸烟,不准携带引火物进入实验室。

②实验使用的药品不能随意乱倒,应集中回收处理,剩余的易燃药品必须保管好,不得随意乱放。实验前要检查电气设备的安全情况。

③用电气设备进行高温加热时,操作过程中必须有人坚守操作岗位,以防发生火灾。

④实验中发现异味或者不正常响声时,应对正在使用的仪器、设备及实验过程和周围环境进行检查,发现问题及时处理。

⑤熟悉消防器材的使用方法,一旦发生火情,应冷静判断并采取有效措施灭火。

⑥电气设备或带电系统着火,应用四氯化碳干粉灭火器灭火,不能用水或二氧化碳泡沫灭火,因为后者导电,这样会导致灭火人员发生触电事故。使用四氯化碳干粉灭火器时要站在上风侧,以防四氯化碳中毒,灭火后应打开门窗通风。

(4) 实验室用电安全知识。

①实验前必须了解室内总电闸与分电闸的位置,便于出现用电事故时及时切断电源。

②接触或操作电气设备时,手必须保持干燥,所有电气设备不能用湿布擦拭,更不能有水落在其上,不能用试电笔去试高压电。

③电气设备维修时必须停电后才能作业。

④启动电动机,合闸前先用手转动一下电动机的轴,合上电闸后,立即检查电动机是否转动。若不转动,应立即拉闸,否则电动机很容易烧坏。若用电设备是电加热器,在通电之前一定要搞清楚进行电加热所需要的前提条件是否已经具备。比如精馏实验中,接通塔釜电加热器之前,必须观察釜内液位是否符合要求。干燥实验和传热实验中,在接通空气预热器的电加热器前必须先开空气鼓风机,之后才能给预热器通电加热。

⑤所有电气设备的金属外壳应安装接地线,并定期检查是否连接良好。

⑥导线的接头应紧密牢固,裸露的部分必须用绝缘胶布包好,或者用塑料绝缘管套好。

⑦在电源开关与用电设备之间若设有电压调节器或电流调节器,在接通电源开关之前,一定要先检查电压调节器或电流调节器当前所处状态,并将其置于“零位”状态。否则,在接通电源开关时,用电设备会处于较大功率下的运行状态,有可能造成用电设备损坏。

在实验过程中,如果发生停电现象,必须切断电闸,以防操作人员离开现场后突然供电而导致电气设备在无人监视下运行。

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，其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在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。

以流体在圆管内湍流时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 $m=6$ ，若每个变量改变的条件数 $n=10$ ，则需做 10^6 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，要改变管径 d 、管长 l 、绝对粗糙度 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，而且可以使得到的实验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。仍以圆管内流体湍流时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。用量纲分析法得到流体湍流的流动阻力方程为

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

其中

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

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、毫米等不同的单位表示,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。其他力学量可以由这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出,所以它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^aL^bT^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,面积的量纲为[L]·[L]=[L²],一般形式为[M^aL^bT^c],其中a=c=0, b=2。同理可得体积V的量纲为[L³]。

(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u的量纲为 $\frac{[L]}{[T]} = [LT^{-1}]$ 。

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

(4) 力 F : 力定义为 $F = ma$, 所以 F 的量纲为质量量纲和加速度量纲的乘积, 即力 F 的量纲为 $[MLT^{-2}]$ 。

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

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

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, 如以力的量纲 $[F]$ 作为基本量纲, 这样以上各量的量纲就会不同。例如黏度 μ 的量纲就变成 $[FL^{-2}T]$ 。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代表法, 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, 反映流体在圆形直管中流动状况的雷诺数 $Re = \frac{du\rho}{\mu}$ 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 的量纲是 $[LT^{-1}]$ 、直径 d 的量纲是 $[L]$ 、密度 ρ 的量纲是 $[ML^{-3}]$ 、黏度 μ 的量纲是 $[ML^{-1}T^{-1}]$, 将各量的量纲分别代入雷诺数 Re 的表达式中, 得 Re 的量纲为

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

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, 同一物理量采用不同的单位时, 其数值不同。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能相加减, 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, 例如 5 m 加上 50 cm, 仍为某一长度, 但必须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, 那么不同种类的量纲也不能相加减, 同样不可相等。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

$$s = u_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (1-4)$$

式中, 等号左边的 s 代表距离, 量纲为 $[L]$; 右边第一项 $u_0 t$ 为质点在时间 t 内以速度 u_0 所经过的距离, 量纲为 $\frac{[L]}{[T]} \cdot [T] = [L]$; 右边第二项 $\frac{1}{2} g t^2$ 为质点在时间 t 内以加速度 g 所经过的附加距离, 量纲为 $\frac{[L]}{[T^2]} \cdot [T^2] = [L]$ 。所以方程的三项都具有同样的量纲 $[L]$, 即量纲是一致的。

“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。例如在推导连续性方程时, 取一块体积, 分析在微小时段内流体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, 该体积内的质量变化应与进出该体积质量的差相等。可见, 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, 实际上就是使用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”的相加减和相等的关系。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, 然后根据某种原理把它们列成等式。

有一些方程没有理论指导, 是纯粹根据观察归纳所得的关联式, 即所谓经验公式。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 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 , 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
$$f(y, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad (1-7)$$

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:

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

(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, 即一个基本变量的量纲不能从另外几个基本变量的量纲导出。通常选一个表征尺寸的量、一个表征运动的量, 另一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

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

式中, x_i 为除去已选择的 m 个基本变量以后所余下的 $(n-m)$ 个变量中的任何一个。 a, b, c, \dots, m 为待定指数。根据因次一致性原理和 π 定理, 利用量纲分析法可得到 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

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

(7) 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, 能对所研究的过程进行高度地概括, 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强有力的工具。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, 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, 对于流体层流流动时的流动阻力, 根据牛顿黏性定律, 通过数学分析可导出著名的伯努利方程, 得出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, 由于其流动情况非常复杂, 尽管力的平衡方程并不因流型的变化而改变, 但流体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, 根据对流体湍流过程的分析, 可以做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, 存在一个平均的自由径 l , 由此可设想导出湍流黏度 ϵ 为

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

上式中用湍流黏度 ϵ 代替牛顿黏性定律中的黏度 μ , 从而导出了流体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, 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。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进行有效的简化。

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，流动阻力主要来自于表面摩擦，而高速流动时，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、不规则的颗粒组成的，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。这样就消除了通道的几何形状的复杂性问题。

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的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。

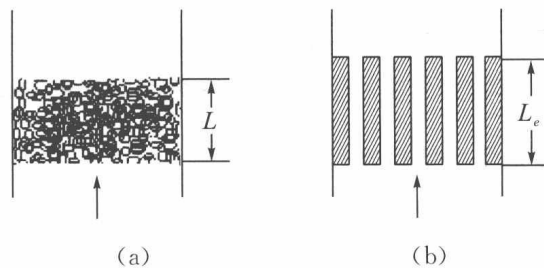


图 1-1 颗粒床层的简化模型

根据上述假定，可求得虚拟细管的当量直径为

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

将式 (1-13) 的分子、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。