

化学工程放大技术

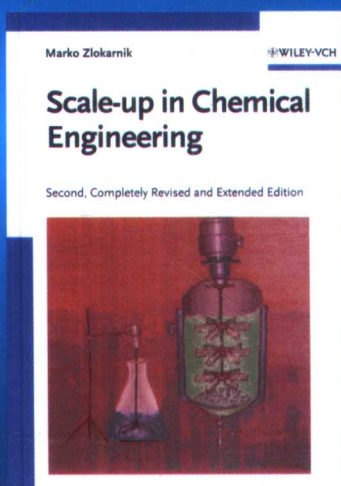
Scale-up in Chemical Engineering

(原著第2版)

[奥地利] 马克·兹洛卡尼克 著

Marko Zlokarnik

王涛 朴香兰 赵毅红 译



化学工业出版社

化学工程放大技术

Scale-up in Chemical Engineering

(原著第2版)

〔奥地利〕马克·兹洛卡尼克 著

Marko Zlokarnik

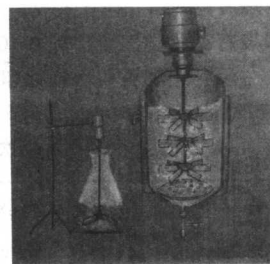
王涛 朴香兰 赵毅红 译

Marko Zlokarnik

WILEY-VCH

Scale-up in Chemical
Engineering

Second, Completely Revised and Extended Edition



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从量纲分析的基本概念和原理出发,结合化工过程的化学反应和单元操作的工程实例,详细介绍了量纲分析在化学工程放大中的应用。

本书共有18章。第1章至第7章详细介绍了量纲分析的理论基础,包括基本量纲、物理量、量纲系统等基本概念,以及 Π 定律的推导和放大理论。第8章至第11章介绍了量纲分析的应用基础,包括物性的量纲分析、量纲分析过程中出现的典型问题以及过程的优化。第12章至第15章通过大量的工程实例介绍了量纲分析在机械设备放大、热单元操作放大、化学反应过程放大、生命过程分析中的应用。第16章简述了量纲分析的发展历史及工程放大方法的发展过程。第17章给出了习题和答案。最后一章是已命名的重要 π 数表。全书内容既有基础理论,又有大量的工程实例,且对实例进行了由浅入深的讲解。

本书可作为化学工程师和环境工程、化学工程、应用化学、生物化工和能源工程等专业高年级本科生和研究生的学习教材,也可作为相关领域科研、工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程放大技术:第2版/[奥地利]马克·兹洛卡尼克著;
王涛,朴香兰,赵毅红译. —北京:化学工业出版社,2007.1
书名原文:Scale-up in Chemical Engineering
ISBN 978-7-5025-9957-7

I. 化… II. ①马…②王…③朴…④赵… III. 量纲分析-应用-化学工程-放大技术 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第011141号

Scale-up in Chemical Engineering, Second, Completely Revised and Extended Edition/by Marko Zlokarnik

ISBN 3-527-31421-0

Copyright©2006 by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

本书中文简体字版由Wiley-VCH出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2007-0381

责任编辑:陈志刚 姚晓敏

封面设计:韩飞

责任校对:洪雅姝

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

开本720mm×1000mm 1/16 印张14 字数236千字

2007年4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:25.00元

版权所有 违者必究

译者序

对于化学工业过程来说,将实验室的研究成果迅速转化成工业规模生产的关键就是要认识放大规律和利用好化工放大技术。目前,化工放大的方法主要有三种:逐级经验放大;数学模拟放大;以“实验方法论”为基础的放大。其中逐级经验放大法的实验工作量大,缺少科学性;数学模拟放大法适合于人们对过程的认识相当透彻,参数的测定相当可靠的场合;第三种方法则结合前两种方法,充分利用量纲分析理论,并根据科学的方法论组织实验,据此进行放大。奥地利化学工程专家 Marko Zlokarnik 教授撰写的《化学工程放大技术》一书从量纲分析的基本概念和原理出发,结合化工过程的化学反应和单元操作的工程实例,详细介绍量纲分析理论在化学工程放大中的应用。

本书共有 18 章。第 1 章至第 7 章详细介绍了量纲分析的理论基础,包括基本量纲、物理量、量纲系统等基本概念,以及 Π 定律的推导和放大大理论。第 8 章至第 11 章介绍了量纲分析的应用基础,包括物性的量纲分析、量纲分析过程中出现的典型问题以及过程的优化。第 12 章至第 15 章通过大量的工程实例介绍了量纲分析在机械设备放大、热单元操作放大、化学反应过程放大、生命过程分析中的应用。第 16 章简述了量纲分析的发展历史及工程放大方法的发展过程。第 17 章给出了习题和答案。最后一章是已命名的重要 Π 数表。全书内容既有基础理论,又有大量的工程实例,且对实例进行了由浅入深的讲解。本书可作为化学工程师和环境工程、化学工程、应用化学、生物化工和能源工程等专业高年级本科生和研究生的学习教材,也可作为相关领域科研、工程技术人员的参考书。

本书由王涛(第 1 章、第 13 章至第 18 章)、朴香兰(第 2 章至第 8 章)和赵毅红(第 9 章至第 12 章)翻译,朱慎林教授对全书进行了审阅和校对。限于译者的水平,翻译中难免有不当之处,希望同行和广大读者不吝赐教。

译者

2007 年 1 月于清华园

第二版序

本书英文第一版(2002年)受到了令人惊喜的欢迎,并于2005年内售完。J. Wiley-VCH 出版公司欣然接受了我的建议,准备放弃重印,出版一个新的版本。

我要向编辑 Barbara Böck 博士和 Kain Sora 小姐表示诚挚的感谢。

在过去的五年中,我在亚琛、柏林和慕尼黑的“Haus der Technik”,在法兰克福的“Dechema”以及在德语国家(德国-奥地利-瑞士)的多个大学主持过大约30次关于这一主题的研讨课。和年轻同行的讨论,能够使我消除理解这一主题的困难,并发现克服这些困难的方法。我希望在新的版本中应用这些经验。

在新版中加入了下列内容:

1. 完全重写了关于“物性变量”,特别是对非牛顿流体的一章。加入了下列新实例:固体颗粒强度与颗粒直径的关系,黏弹性流体中的 Weissenberg 现象,以及气/液(G/L)体系中的聚并现象。
2. 更言简意赅地讨论了实验室小型装置放大的问题。
3. 列举了两个更有意义的对压片过程和月球表面漫步进行量纲分析的实例。
4. 列举了关于稳态传热的实例,包括管线、混合槽和鼓泡塔中的稳态传热。
5. 重新构架了关于气/液(G/L)体系的传质内容,以便更清楚地表明表面曝气和主体曝气的量纲分析的差别。
6. 加入了对量纲分析发展历史的概述。
7. 增加了25个练习题及其解答。

考虑到本书的篇幅有限,删除了第一版中的若干个相对不重要的例子。

感谢我的朋友和老师 Juri Pawlowski 博士。他对重新构架各章内容,尤其是关于流变学部分的内容提出了宝贵的建议。

Marko Zlokarnik

2005年12月于Graz

第一版序

当今时代，化学工程师要面对许多很复杂的研究和设计问题，这些问题无法用纯数学数值方法来解决。关于这一点，人们只需考虑一下物性与温度相关的流体或具有非牛顿流体行为的流动过程，就可以明白。带有聚并现象或起泡现象的非均相物料体系的流体力学行为也属于这类问题。对处理这类物料所需设备进行放大经常会遇到很严重的阻碍，这些阻碍通常只能借助于部分相似性才能克服。

一般而言，大学生没有受过专门的训练来处理这类问题。在普通的化学工程教科书中，关于量纲分析、相似性理论和放大方法的论述已经过时，且其内容很少，而且是以普及这些方法的方式编写的。此外，在大学里缺少对这类问题研究的动力，因为他们没有放大设备的任务，所以也不会设置放大试验设备。

所有这些会给人以错误的印象：放大方法在化学工程实践中是次要的，否则这些内容应该在大学层次的水平上进一步深入阐述。

本书的目的是弥补这一缺陷。量纲分析是放大的唯一可靠基础，以在本书中这样的一种方式论述，即使没有数学背景的人也可以容易理解和掌握。

在生物技术中非牛顿流体的应用要比在化学工业中频繁得多，由于生物技术的重要性日益增长，本书详细讨论了可变物性问题（例如，随温度、剪切力而变化的黏度）。必须切记，在这类放大过程中，除了与几何及工艺相关的相似性外，材料相似性也必须加以考虑。

本书的前半部分提出并讨论了量纲分析和放大的理论基础。这个理论框架由二十个例子加以演示，所有的例子都是来自当今实践的很有意义的工程问题。

本书的第二部分阐述了机械过程工程、热过程工程和化学工程领域中问题的整体量纲分析。针对每一个问题的处理，在这里“整体”表示量纲分析是从基本的出发点开始，因此，试验体系的性能和评价是与预测结果相一致的。

这一方法的完整阐述不仅给读者提供了针对自身用途的实践指南，而且

也展示了这些方法所具有的出乎意料的优势。

感兴趣的读者，如果打算解决具体问题但对量纲分析方法又不熟悉，只是出于用这种方式来解决特定任务的目的，那么就不必完整地阅读本书。阅读前 7 章就足够了，前 7 章论述了量纲分析和无因次数的产生。随后，读者可以仔细分析本书第二部分中所给的例子，并选择有助于解决问题的例子。这样做，就可以用量纲分析方法解决手中的问题。只有对这些问题的实际处理才能理解这些方法的益处和有效性。

在我从实践的观点研究量纲分析方法工作的 35 年中，我的朋友和同事 Juri Pawlowski 博士一直是我的老师和顾问，对我的帮助无可估量。我要感谢他所提出的无数建议和提示，以及对本书稿的评议。

最后，我也衷心感谢我的前雇主，BAYER AG 公司（德国 Leverkusen）。在“工程部应用物理处（Engineering Department Applied Physics）”工作期间，除了完成公司的任务和合作研究以外，该公司为我提供了大量的时间进行化学工程领域的基础研究，使我可以将整个职业生涯献给过程工程的研究与开发。

Marko Zlokarnik

符号

英文符号

a	单位体积的相界面; $a \equiv A/V$
A	面积, 表面
$c, \Delta c$	浓度, 浓度差
c	真空声速
C_p	单位质量的比热容
c_s	饱和浓度
d	特征直径
d_b	气泡直径, 通常表示为“Sauter 平均直径” d_{32}
d_{32}	气泡或液滴的 Sauter 平均直径
D	容器直径, 管道直径
D	扩散系数
D_{eff}	有效轴向分散系数
E	能量
	化学吸收中的增强因子
	化学反应活化能
	吸收过程的效率因子
f	函数关系
F	力
F	湿度
g	重力加速度
G	质量流量
G	重力常数
h	传热系数
H	高度
	热量的基本量纲
J	焦耳热功当量

k	反应速率常数 热导率 比例常数 (8.5 节)
k	玻耳兹曼常数
k_G	气相传质系数
k_L	液相传质系数
$k_L a$	单位体积液相传质系数
k_F	浮选速率常数
K	一致性指标 (8.5 节)
l	特征长度
L	长度的基本量纲
m	质量
m	流动指标 (8.5 节)
mol	物质的量
M	质量的基本量纲
n	搅拌速度
N	物质量的基本量纲
N	级数
N_x	法向应力 ($x=1$ 或 2); 式 (8.5 节)
$p, \Delta p$	压力, 压力降
P	功率, 搅拌功率
q	体积通量
Q	热流
r	量纲矩阵的秩
R	反应热
R	通用气体常数
S	横截面积 ($\propto D^2$)
S_i	聚并参数 (在 i 数中)
t	运行时间
T	时间的基本量纲
T	温度
T	绝对温度
u	桨尖速度 ($u=\pi nd$)
U	总传热系数 (例 23)

v	速度, 空塔气速
V	体积
z	数

希腊符号

α	角; 热量扩散系数, $\alpha = k/(\rho C_p)$
β_0	密度的温度系数
β	比破损量 (例 31)
γ	形变
γ_0	黏温系数
$\dot{\gamma}$	剪切速率
Δ	差
δ	膜厚, 层厚, 壁厚
ϵ	液体中的气含量
ϵ	单位质量的功率, $\epsilon \equiv P/\rho V$
ζ	管内流动的摩擦系数
Θ	温度的基本量纲
	接触角
	时间常数 (第 8 章)
θ	持续时间
Λ	宏观湍动尺度
λ	松弛时间 (8.5 节)
	Kolmogorov 微观湍动尺度
μ	动力黏度
μ	放大因子, $\mu \equiv l_T/l_M$
ν	运动黏度
ρ	密度
ρC_p	单位体积的热容
σ	表面张力, 相界面张力
τ	平均停留时间, $\tau \equiv V/q$
	剪切应力
τ_0	屈服应力
φ	分率 (体积, 质量)
ϕ	填充度

下标

c	连续相
d	分散相
e	终端值
F	填料
G	气体 (气态)
L	液体
min	最小
M	模型规模
0	初始条件
p	颗粒
s	饱和值
	层高
S	固体, 泡沫
t	t 时刻的条件
T	工艺规模, 实际规模
w	壁面

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 量纲分析	3
2.1 基本原理	3
2.2 量纲	3
2.3 物理量	3
2.4 基本量、导出量和量纲常数	3
2.5 量纲系统	4
2.6 物理量的量纲一致性	5
例 1: 钟摆的振荡周期	6
例 2: 物体在均匀重力场下的降落时间 θ (自由落体定律) 和液体 由敞开容器流出的速度 v (Torricelli's 方程) 之间的关系	8
例 3: 肉块尺寸和烧烤时间的关系	9
2.7 Π 定律	11
第 3 章 由矩阵变换导出 Π 集合	12
例 4: 均相流体通过光滑直管的压降 (忽略入口段的影响)	12
第 4 章 Π 空间的尺度相似性——放大的基础	17
例 5: 加热丝向空气流的传热	19
第 5 章 关联变量中的特殊参数	22
5.1 通用物理常数的处理	22
5.2 中间量的引入	22
例 6: 不同密度和黏度的液体混合物的均匀混合	23
例 7: 溶解空气的浮选过程	24
第 6 章 与放大有关的重要内容	27
6.1 体系物性未能确定时的放大程序	27
例 8: 机械破沫器的放大	27
6.2 部分相似条件下的放大	30
例 9: 船外壳的阻力	30

例 10: 化学反应器放大的经验规律: 用与体积相关的混合搅拌 功率和表观速度作为混合容器和鼓泡塔的放大设计 标准	33
第 7 章 放大要素的初步总结	36
7.1 使用量纲分析的优点	36
7.2 量纲分析的应用范围	36
7.3 放大中的实验技术	37
7.4 改变模型设备的尺度进行实验	38
第 8 章 物性的量纲分析	39
8.1 物性量纲分析的重要性	39
8.2 物性函数的无因次表达式	40
例 11: 黏度随温度变化的标准无因次数	40
例 12: 密度随温度变化的无因次表达式	43
例 13: 不同材料的颗粒强度随颗粒直径变化的无因次表达式	44
例 14: 湿聚合物干燥过程的物性 $D(T, F)$ 的无因次表 达式	45
8.3 物性函数的参比态表达式	46
8.4 可变化物性的 Π 空间	47
例 15: 用 μ_w/μ 表示关联式 $\mu(T)$ 函数	48
例 16: 用 Grashof 数表示 $\rho(T)$	49
8.5 非牛顿流体的流变学标准函数和过程方程	50
8.5.1 流变学标准函数	50
8.5.1.1 假塑性流体的流动行为	50
8.5.1.2 黏弹性流体的流动行为	52
8.5.1.3 黏弹性流体的量纲分析与讨论	54
8.5.1.4 流变学标准函数	56
例 17: Weissenberg's 现象的量纲分析——选自博士论文	57
8.5.2 非牛顿流体的过程方程	60
8.5.2.1 Metzner-Otto 的有效黏度 μ_{eff} 的定义	60
8.5.2.2 非牛顿流体动力学过程的过程方程	61
例 18: 搅拌桨的能量特性	62
例 19: 搅拌桨的全混特性	62
8.5.2.3 关于非牛顿流体的热力学过程方程	64
8.5.2.4 非牛顿流体过程的放大	65

第 9 章 Π 空间的降阶	66
例 20: Boussinesq 问题的量纲分析	68
例 21: 搅拌槽的传热过程	69
第 10 章 应用量纲分析的典型问题和错误	72
10.1 模型尺寸和流动行为——放大和微型化	72
10.1.1 实验室设备的尺寸和流体力学	72
10.1.2 实验室设备的尺寸和 Π 空间	73
10.1.3 宏观混合与微观混合	74
10.1.4 微观混合和复杂化学反应的选择性	75
10.1.5 基于放大概念的微型和大型设备	75
10.2 目标量的灵敏度分析	76
10.2.1 混合时间 θ	76
10.2.2 按 1-s 判据来判断固体的完全悬浮	76
10.3 模型尺度和测量精度	77
10.3.1 搅拌功率的确定	77
10.3.2 表面曝气过程的传质	77
10.4 实验确定完整的 Π 集合	78
10.5 量纲分析的正确程序	79
10.5.1 模型实验的准备	79
10.5.2 模型实验的进行	79
10.5.3 模型实验的评价	80
第 11 章 过程集成和优化	81
例 22: 确定搅拌条件, 以最小功实现全混过程	81
例 23: 中空自吸式搅拌桨的工艺特性及优化	85
例 24: 去除最大反应热的搅拌器优化	88
第 12 章 量纲分析法在机械设备放大中的应用	91
例 25: 充气搅拌器的功率消耗和放大设计	91
例 26: 固/固混合器的放大	95
例 27: 单螺杆机的输送特性	99
例 28: 液体雾化过程的量纲分析	103
例 29: 挂膜现象	105
例 30: 液/液乳液的生成	108
例 31: 固体在研磨机中进行精磨	111
例 32: 废水处理气浮池的放大	116

例 33: 离心过滤机中旋转干燥的动态描述	122
例 34: 惯性力分离颗粒过程的分析	124
例 35: 鼓泡塔中的气体滞留量	127
例 36: 压片过程的量纲分析	130
第 13 章 热单元操作过程的量纲分析选例	136
13.1 引言	136
例 37: 混合容器内的稳态传热	136
例 38: 管道中的稳态传热	138
例 39: 鼓泡塔内的稳态传热	139
13.2 气/液 (G/L) 体系传质基础	142
例 40: 表面曝气过程的传质	144
例 41: 混合容器中体积曝气过程的传质	145
例 42: 用喷射器作气体分布器的鼓泡塔内 G/L 体系的传质, 氧气摄取率 $E \equiv G / \sum P [\text{kg}(\text{O}_2) / \text{kW} \cdot \text{h}]$ 的 工艺条件优化	148
13.3 气/液体系中的聚并	154
例 43: 干燥器的放大	156
第 14 章 化学过程的量纲分析选例	160
例 44: 管式反应器内的连续化学反应过程	160
例 45: 气固相催化反应过程热量和质量传递的量纲分析	166
例 46: 石油化工催化反应器的放大	171
例 47: 为进行平行-串连反应而设计的, 配有混合喷嘴的管式反 应器的尺寸设计	174
例 48: 非均相气/液体系中快速化学反应速率的传质限制	177
第 15 章 生命过程的量纲分析选例	181
例 49: 用量纲分析的观点考虑划船问题	181
例 50: 为什么大多数动物在水面下游动	183
例 51: 在月球上步行	184
例 52: 在水面上行走和跳跃	187
例 53: 是什么使得树液沿树枝上升?	187
第 16 章 量纲分析和过程放大的历史简述	189
16.1 量纲分析的发展历史	189
16.2 过程放大的发展历史	192
第 17 章 习题和答案	194

17.1 习题.....	194
17.2 答案.....	196
第 18 章 已命名的重要 II 数表	200
参考文献.....	202

第1章

绪论

化学工程师通常的任务是对工艺过程的工业实施。在这些过程中，物质的化学转化或微生物转化伴随着质量、热量和动量传递发生。这些过程是与规模相关的，即它们在小规模（实验室或中试装置）时的行为与在大规模（生产装置）时的行为是不同的。这包括非均相化学反应和大多数单元操作。可以理解，化学工程师总是希望找出用模型模拟这些过程的方法，以获得有助于设计新的工业装置的参数。有时候，化学工程师也会由于另外的原因而遇到同样的问题：一个工业装置已存在，但不能正常运转，甚至根本不能运行，那么，必须进行适当的测量，以发现这些问题的原因并提供解决方案。

不管所包括的模型是用于过程的“放大”还是“缩小”，一些重要的问题总是要考虑的：

- 模型可以做得多小？一个模型是否够用？是否要用不同大小的模型进行试验？

- 物性参数什么时候必须不同？什么时候可以不同？在模型中的测量，什么时候必须用原始物系？

- 用模型测定的工艺参数应用于大规模装置时由什么规则确定？

- 在模型工艺和工厂装置的工艺过程之间有无可能达到完全的相似？如果不能，应该如何处理？

这些问题涉及到模型的理论基础，而其理论基础基于量纲分析。虽然量纲分析原理已在流体力学和传热领域应用了一个世纪，汽车、飞机、容器和换热器都是根据这些原理被放大，但是，在化学工程中这些方法只得到了一定程度的接受，其原因已在本书的序言中进行解释。

对于化学工程领域，量纲分析方法论当前应用的重要性可以用实际例子很好地加以论证。因此，本书的重点放在如何通过量纲分析法完善解决化学