

Chemical Product Design

化学产品设计

E . L . Cussler (University of Minnesota)

G . D . Moggridge (University of Cambridge)

刘 铮 余立新 王运东 赵 洪 译
丁富新 审校



清华大学出版社

Chemical Product Design

化学产品设计

121
E . L . Cussler (University of Minnesota)

G . D . Moggridge (University of Cambridge)

刘 铮 余立新 王运东 赵 洪 译

丁富新 审校

清华大学出版社
北京

原作者名 E. L. Cussler, G. D. Moggridge

原书名(版次) Chemical Product Design

EISBN: 0-521-796334

Copyright © 2001 by Cambridge University Press.

Original language published by Cambridge University Press. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Authorized Simplified Chinese translation edition by Cambridge University Press is published by Tsinghua University Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export or this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由剑桥大学出版社授权清华大学出版社在中国境内(香港、澳门特别行政区及台湾地区除外)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2001-5096

图书在版编目(CIP)数据

化学产品设计/(英)卡斯勒,莫格里奇编著;刘铮等译. —北京:清华大学出版社,2003

书名原文: Chemical Product Design

ISBN 7-302-06538-1

I. 化… II. ①卡… ②莫… ③刘… III. 化工产品—设计 IV. TQ07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 026701 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.com.cn>

责任编辑: 刘明华

版式设计: 刘祎森

印 刷 者: 北京牛山世兴印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×960 1/16 印张: 16.5 字数: 286 千字

版 次: 2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN-7-302-06538-1/TQ·13

印 数: 0001~4000

定 价: 25.00 元

译者序

Preface from translator

化学工业是提供满足人类衣食住行所必需的基本和特殊化学品的基础产业部门。伴随着人类社会进入 21 世纪,知识经济及全球化正在改变着全球经济的格局及工业运行的方式。如何塑造中国化学工业的核心竞争优势成为我国化学工程研究者和工程师在进入 21 世纪时所面临的严峻挑战,也成为化学工程高等教育改革的核心目标。

事实上,近年来各国学者都在积极探索化学工程学科及教育体系的改革与创新。本书所述的“化学产品设计”即是其中一个代表性成果。产品是描述化学工业和化工过程的一个重要特征,产品的丰富不仅意味着化学工业核心业务的拓宽与过程的多样化,同时预示着必须对化学工程科研及教学内容加以相应的调整与改革。

本书在分析近年来化学工业的产业发展模式、公司运行机制和学生就业分布等方面的变迁的基础上,提出需要在化工高等教育体系中增加“化学产品设计”的内容。本书提出了一个由 4 步构成的产品设计过程,即需求—方案—选择—生产。作者精心选择了众多案例来展现产品设计各步骤的基本原理和方法,并综合应用科学、技术、经济与人文方面的知识来进行综合分析。本书的最后部分扼要介绍了产品设计过程所涉及的知识。通过本课程学习,将有助于化工专业的学生掌握产品开发的相关知识,提高对于社会需求的洞察力以及综合运用知识的能力。

原著文笔精炼生动,案例丰富形象。然而,由于文化背景与国情的差异,其中的一些具体观点和结论的适用性是需要读者进一步推敲的。译者在翻译中尽可能地保持原著的上述风格及其完整性,只是对其中的个别重要错误之处进行了修正并加以注明。

需要指出的是,本书所述的“化学产品设计”与目前化工课程体系中的“化工过程设计”是相互联系的,“产品”决定“过程”的构成,“过程”决定“产品”的

品质与价格。然而,“产品设计”与“过程设计”又各有侧重,“产品设计”是以产品的化学功能为导向,以分子设计为核心,辅之以过程设计;而“过程设计”则是以将原材料转化为产品的化学或物理变化为核心,以单元操作构造出实现该核心转化的物质流与能量流网络。“产品设计”与“过程设计”又是能动地相互促进的,现代化学工业的发展需要将这二者有机地结合起来,以产品创新拉动产业创新,以过程创新支持产业创新,实现化学工业的可持续发展。

本书的翻译工作得到了德国 BASF 公司的资助,在此表示衷心的感谢。

最后,参加本书翻译工作的全体人员对清华大学出版社刘明华编审及其他工作人员为此书的付梓所做出的努力表示深深的谢意。

前言

Preface

自 19 世纪初现代化学工业的雏形形成伊始,化学工业就以大宗化学品的生产作为其主要任务。大宗化学品的生产规模很大(至少年产 1 000t),产品销往国际市场。不同厂商所提供的同种产品的质量和组成是一致的,其差异只是体现在产品价格上。苯、氢气、聚酯以及二氧化钛就是大宗化学品的例子。化学工业曾具有极高的生产能力并获巨大成功,是为化学家、化学工程师及其他专业人才提供就业岗位的主要工业部门。

如第 1 章中所述,我们认为现代化学工业的黄金时代是在第二次世界大战之后的数十年间,其成长速度与现代软件业相当。从 20 世纪 70 年代开始,市场的增长放缓,企业开始将精力集中于公司合并与规模经济。在过去十余年中,化学工业发生了重大转变——大多数的新资源投入到设计和生产化学产品中,而不是投向传统上占有统治地位的大宗化学品的生产上。这种变化也反映到我们所在大学新毕业生的就业岗位上。30 年以前,绝大多数毕业生进入到与大宗化学品生产相关的企业中,而今天,大多数毕业生则以化学产品作为其职业生涯的开始。

20 世纪 90 年代后期,英国 ICI 公司业务方向的变化,就是一个从大宗化学品转移到化学产品的典型例证。从 19 世纪 20 年代开始,ICI 即成为英国大宗化学品骨干企业,而现在 ICI 不再生产聚酯、化肥或乙烯,取而代之的是香水、香料及电子工业用的涂料。

当然,大宗化学品的生产将会延续,因为世界对甲苯、氨及甲醇等的需求一如既往。但大宗化学品的生产是由少数具有极高效率的公司完成的。这些公司聘用很少的人力并保持很好的利润,除了补充必需的人员以完成劳动力新老交替之外,不再需要聘用大量的化学家及化学工程师。这些公司通常都是私营的,这样就更容易驾驭大宗化学品业务。

据此我们提出:化学工业的重心在过去的十几年中发生了快速的转移,即

从大宗化学品转向化学产品,这两者的区别是什么?我们从生产规模、产值及在市场优势这3个方面来比较化学产品和大宗化学品的差异。化学产品生产规模小,通常低于每年1 000t;药物活性组分就是化学产品的一个典型代表,有些药物活性组分每年仅需生产几千克就可满足几百万美元的市场需求。化学产品具有高附加值及高利润空间,而大宗化学品典型的销售价格在每吨数百美元,利润仅有几个百分点。这种附加值的差异也反映在二者的第三个差别上:化学产品在市场中的优势地位主要取决于产品性能和质量而不是价格,并通过专利保护或商业秘密及技术领先而保持其优势地位。这种特性使得化学产品的上述市场优势很脆弱,如专利会过期,竞争对手的技术会完善。因此,可以预期,化学产品的产品寿命都很短,通常是10年或更短。

显然,化学工业从大宗化学品向化学产品的转变是令人感兴趣的,但它会影响到化学家和化学工程师吗?答案是肯定的。因为化学产品与大宗化学品的不同属性使得其设计和生产途径与后者迥然不同:化学产品常采用分批生产的方式,所用的设备具有通用性——即可用于生产多种产品。化学工程师所受教育的主要部分是围绕着指定产品的大规模生产过程的优化,而不涉及生产化学产品通常采用的过程类型问题。进一步分析,由于化学产品的寿命周期短及巨大的市场首入效益,化学产品企业需要迅捷的新产品设计。我们认为这也导致了企业运作方式的转变,即从专业化转向集成化设计团队。传统化学工程师的工作局限于已经立项的工厂的设计、试车和优化。现代化学工程师则可能从一开始就加入到产品开发团队中,参与从产品构思到市场销售的全过程。而目前为化工专业学生开设的过程设计课对此部分内容讲授却很有限。

综上所述,化学工业所发生的变化,对于工程师或化学家所期望从事的工作的类型已产生了重大影响。我们前面刚刚提到:化学工程教育的核心内容的多数部分与新产品工业联系很少。对此我们不禁要问:是现有课程体系与不断变化的工业需求无关?或它已经做了必要的改进以应对这种变化?我们对这两个问题的答案都是否定的。我们认为化学工程课程体系在过去的50年中仅发生了很小的变化,而忽视了工业上已发生的较大变化。事实上,这是我们写作本书的初衷。当然,我们也认为化学和化学工程的核心知识和技能是能非常好地应用于化学产品设计的。

曾任英国化学工程师学会主席的P. V. Danckwerts在其1966年的主席报告中讲道:“如果认为化学工程科学内容是一成不变的话,将是一个重大的错误。在满足工业界不断变化的需求的过程中,在将科学新发现及新思想付

诸实践的过程中,化学工程科学内容将会随着时间的推移发生很大的变化”。我们认为化学工程学术研究在响应科学新发现方面做得很好,例如,计算机优化目前就是设计课程的一个标准部分,现代状态方程是化工热力学的正规教学内容。然而,就应对不断变化的工业需求而言,化学工程教育几乎没有做任何事情。简单看一眼旧课程体系或教科书,或咨询已退休的专业人士,就可以发现化学工程课程体系框架在过去的30年中基本没有变化,许多内容与20世纪50年代的课程体系中的内容完全相仿,那些最基本的章节甚至可以追溯到20世纪20年代的第一套化工教材中。

这个问题重要吗?诚然。在过去的几千年中,基本几何的教学内容并没有变化多少,但它的价值不变。我们愿意强调指出:支撑化学工程学科的基础科学体系在很大程度上也没有发生变化,在过程设计中非常适用的原理,在应对化学产品的新挑战时也是适用的。我们希望这一点可以由本书中的许多范例来证实。的确,我们相信化学工程师在开发化学产品中担当着无可替代的重任;化学工程学科是将其他领域的技术整合到由热力学、热量与质量传递及单元操作构成的,具有统一性的工程学科整体中。这一工程学科为与化学产品开发相关的各项研究提供了最理想的知识背景。化学产品设计通过将化学工程学科的已有的完备知识应用于化学工业的新挑战中,为化学工程教育提供了一个与工业共享进步的机会。

我们不希望对化学工程课程体系做全盘变化,尽管其中一些变化将毫无疑问地是必然的和适宜的。我们特别强调的是讲授设计课的方式需要进化,以使得我们对学生的培养符合其未来职业的要求。大规模、连续化工厂设计不再是多数工程师所必须做的。丰富的产品设计经历将有助于培养学生适应更复杂和多变的任务,而这正是工业界对他们的需求。

为了达到这个目的,我们提出由下述4步组成的产品设计过程:需求、方案、选择和生产。这4个部分也就构成了本书的主要内容。类似的产品设计过程在机械工程和商业研究中早已存在,我们将它们移植到化工领域来满足化学产品设计之需。我们希望在这样做的过程中能够反映出与化学工业相关的独特技术。我们坚信化学工业中的产品设计必须是由化工科技所主导。

本书所述的4步设计程序不过是一个模板,一个化学产品设计过程的起点。它提供一个组织设计过程的有益结构:它是一个启发式的教学的起点而不是完美无瑕的策略的表述。在每一个案例中都必须对这个程序的内容进行调整,因为每个产品都是独一无二的。它自然地适合于强调不同产品的不同阶段。所谓产品设计的4步程序构成显然是一个过于简化的说法。经常的情

形是,不同阶段的各个单元会平行展开。更经常的是,在我们已看到终点的曙光时又返回起点。化学工程师了解闭合环路对于强化效率的作用;这一原理适用于反应器设计,也同样适用于设计过程。尽管本书所述的产品设计是非常简单的,但我们坚信为产品设计提供一个知识框架,无论是对教学,还是对于实践都是非常有价值的。

建议和致谢

我们认为本书可采用如下 3 种教学方式:首先,本书可作为 2 学期课程——化工过程设计的附加部分。该课程通常包括由一个学生团队完成的项目;该项目可以包括过程设计或产品设计或二者兼有。我们建议产品设计课程应在过程设计之后讲授,因为我们感觉学生在学习更多的定量的过程合成内容之后,再学习产品设计中与产品相关的定性结论的推演方法将收益更多。

第二种方式是将本书应用于一个学期的产品设计课。我们建议这样的课程包括三分之一的课堂讲授与三分之二的产品设计项目的具体辅导。尽管课程讲授可以分配到整个学期进行,但初始阶段的讲授次数应当多一些。最后一种教学方式是将本书用于一个只包括课堂讲授的短期课程教学使用。然而,我们认为此种教学对于缺乏化工经验而水平又参差不齐的学生而言,是不够有效的。

在本书的写作过程中得到了来自各方的帮助。John Bridgwater 教授安排作者在剑桥大学化工系合作写作,他的鼓励使我们受益匪浅。Aster-Zeneca 的 Keith Carpenter 对本书的写作提供了一些帮助。Ulrich 和 Eppinger 所著“Product Design”对我们启发良多,他们向我们展示了如何在机械工程专业中有效地讲授此门课程。与 Princeton 大学 James Wei 教授和 Groningen 大学 Hans Wesselingh 教授的讨论使我们获益。我们非常感激 Liz Thompson 和 Shirley Tabis,她们完成了许多文稿的录入。最后,我们要感谢我们的学生,当我们将几句空泛的口号融入其教育的经历时,他们是相当宽容的。

E. L. Cussler, G. D. Moggridge

2000 年 5 月 3 日于英国剑桥

符 号 表

Notation

a	比表面积(单位体积的面积)
A	面积
c	总浓度
c_i	组分 i 的浓度
$\hat{C}_p, \tilde{C}_p$	定压比热容和摩尔定压热容
$\hat{C}_v, \tilde{C}_v$	定容比热容和摩尔定容热容
d	特征长度, 如管径
D	扩散系数
f	萃取分数
f	摩擦系数
F	力
$\mathcal{F}$	法拉第常数
g	重力加速度
G	吉布斯自由能
G	气体通量, 单位时间通过单位面积的质量
G	晶体成长速度
h	组分传热系数
H	焓
H	分配系数, 通常指亨利常数
H	萃取中的进料通量
j_i	组分 i 的扩散通量
k, k_D	传质系数
k, k', k''	化学反应速率常数
k_B	玻尔兹曼常数

符号表

14

$k_{\text{表面}}$	表面反应速度常数
k_T	导热系数
K	总传质系数
K, K'	平衡常数
K_a	解离常数, 特指弱酸的解离常数
Kn	克努森数(λ/d)
l	尺寸, 如湍流涡量长度或吸附床高
l'	填充床中未使用部分的长度
L	液体通量, 单位时间通过单位面积的质量
m	传质总量
m	分子质量
m	相平衡常数
$\widetilde{M}$	分子量
n	总摩尔数
n_i	组分 i 的总通量
$\widetilde{n}_i$	产品 i 的平均评价
n_{ij}	顾客 j 对产品 i 的评价
N	颗粒浓度, 单位体积的个数
N_i	组分 i 的界面通量
$\widetilde{N}$	阿伏伽德罗常数
NTU	传递单元数
p	压力
p_i	纯组分 i 的蒸气压
pH	$-\log_{10}[H^+]$, 其中 $[H^+]$ 是氢离子浓度
pK_a	$-\log_{10}[K_a]$, 其中 K_a 是解离常数
P	功率
q	热通量, 单位时间通过单位面积的能量
Q	热量
r	反应速率, 单位时间、单位体积的摩尔数
r	晶体半径
R	气体常数
Re	雷诺数(dv/ν)
s_{ij}	方案 j 在 i 因素上的分数

符 号 表

15

S	熵
Sh	舍伍德数(kd/D)
t	时间
t_B, t_E	吸附中的穿透时间和全透时间
T	温度
U	内能
U	总传热系数
v	速度
V	体积
$\underline{V}_i$	组分 i 的偏摩尔体积
W	功
W	吸附剂体积
We	韦伯数($\rho v^2 \delta / \sigma$)
x_i	组分 i 的摩尔分数,特指在溶液中
y_i	组分 i 的摩尔分数,特指在气体中
z_i	组分 i 的电荷数
α	热扩散系数
$\dot{\gamma}$	应力速率(dv/dz)
δ	厚度,通常是指薄膜的厚度
δ_i	溶解度参数
ε	空隙率
η	电化学过电位
λ	平均自由程
μ	粘度
μ_i	组分 i 的化学位
ν	运动粘度
Π	渗透压
ρ	密度
σ	碰撞直径
σ	表面张力
τ	特征时间
τ	剪切应力

符 号 表

16

ϕ, ϕ_i	组分 i 的体积分数
Φ	电化学位
ω	角速度
ω	活度参数
ω_i	因素 i 的权重
Ω	导热系数校正因子

内 容 简 介

长期以来,大宗化学品如苯、化肥、聚酯等的生产在化学工业中占有举足轻重的地位。而在过去的十余年间,化学工业发生了重大的变革。目前大多数化学品公司将资源投入到特殊化学品与高附加值化学品,如药物、化妆品及电子工业用的涂料等的设计和生产中。化学工程师的工作岗位也发生了改变,以适应公司业务的变化。然而,化学工程师的教育却照旧,仍以教授传统大宗化学品的生产为主。

这本具有重大突破的教材首先重新审视了大宗化学品与高附加值化学品之间的关系,它拓宽了化学工程设计的领域,使之包括过程设计和产品设计两个方面。作者提出了一个由4步构成的产品设计过程——需求、方案、选择和生产,并结合许多工业案例来对产品设计过程进行分析讨论。本书的最后部分扼要介绍了产品设计过程所涉及的经济学知识。

化工专业的学生和化学工程师们将会发现本书是一部非常生动的化学产品设计导论。

本书作者 E. L. Cussler 是明尼苏达大学杰出的学院教授,执教于该校化学工程与材料科学系,他曾担任美国化学工程师学会主席,并是剑桥大学出版社出版的《扩散》(Diffusion)一书的作者。

另一位作者 G. D. Moggridge 是剑桥大学化学工程系的讲师,其科学研究从新型吸附剂到斑马贝的生长控制,涉及领域宽广。

目 录

Contents

译者序	7
前言	9
符号表	13
1 化学产品设计导论	1
1.1 什么是化学产品设计	1
1.2 化学产品设计的重要性	3
化学工业的变迁	3
就业的变迁	6
1.3 公司运作机制的变迁	7
公司的组织结构	7
公司策略	8
1.4 产品设计过程	9
如何按照产品设计过程来组织本书的内容	9
产品开发策略的局限性	10
1.5 结论	12
2 需求	14
2.1 用户的需求	14
用户调查	14
诠释用户需求	16
例 2.1-1 更好的绝热窗户	17
例 2.1-2 飞机除冰剂替代品	19
例 2.1-3 “智能”标签	22

目 录

2.2	消费品	25
	用户评估	25
	用户评估与仪器测定的对照	27
	例 2.2-1 可口的巧克力	28
	例 2.2-2 消费品的“粘度”	29
2.3	将需求转化为产品规格	30
	例 2.3-1 汽车消音器设计	31
	例 2.3-2 旅行者用的水净化设备	32
	例 2.3-3 防止高性能电池爆炸	34
2.4	修订产品规格	36
	例 2.4-1 冬季路面除冰	38
	例 2.4-2 天然气除氮	42
2.5	结论与第一关	45
3	方案	48
3.1	从不同人群获取方案	49
	方案的来源	49
	方案的收集	50
	解决问题的风格	52
	未加分类的原始方案的例子	54
3.2	从化学途径获取方案	58
	天然产品筛选	58
	随机分子组装	60
	组合化学	62
	例 3.2-1 燃料电池催化剂	63
3.3	方案的整理	64
	启动	65
	“素材将告诉你如何做”	65
	例 3.3-1 可用于湿金属的粘合剂	67
	例 3.3-2 可重复使用的洗涤剂	67
	例 3.3-3 防污染油墨	71
3.4	方案的筛选	72
	方案筛选策略	73

目 录

改进方案筛选过程	74
例 3.4-1 家用供氧设备	77
例 3.4-2 高放射性废物处理	78
3.5 结论和第二道关	82
4 选择	84
4.1 使用热力学知识进行选择	85
成分替代	85
消费化学品中的成分替代	86
成分改进	89
例 4.1-1 更好的护肤霜	90
例 4.1-2 防污染油墨	90
例 4.1-3 抗生素纯化	91
4.2 使用动力学知识进行选择	92
化学动力学	92
传热与传质系数	94
例 4.2-1 让葡萄酒呼吸的装置	95
例 4.2-2 完美的咖啡杯	97
4.3 客观性较弱的判据	100
何时进行主观判断	101
如何进行主观判断	102
为什么要使用选择矩阵	103
例 4.3-1 君主替换	104
例 4.3-2 家用换气机	105
4.4 产品选择中的风险	112
风险评价	113
风险管理	115
例 4.4-1 散语房屋的电力供应	117
例 4.4-2 在农场就地将牛奶脱水	120
4.5 结论和第三道关	124
5 产品生产	126
5.1 知识产权	127