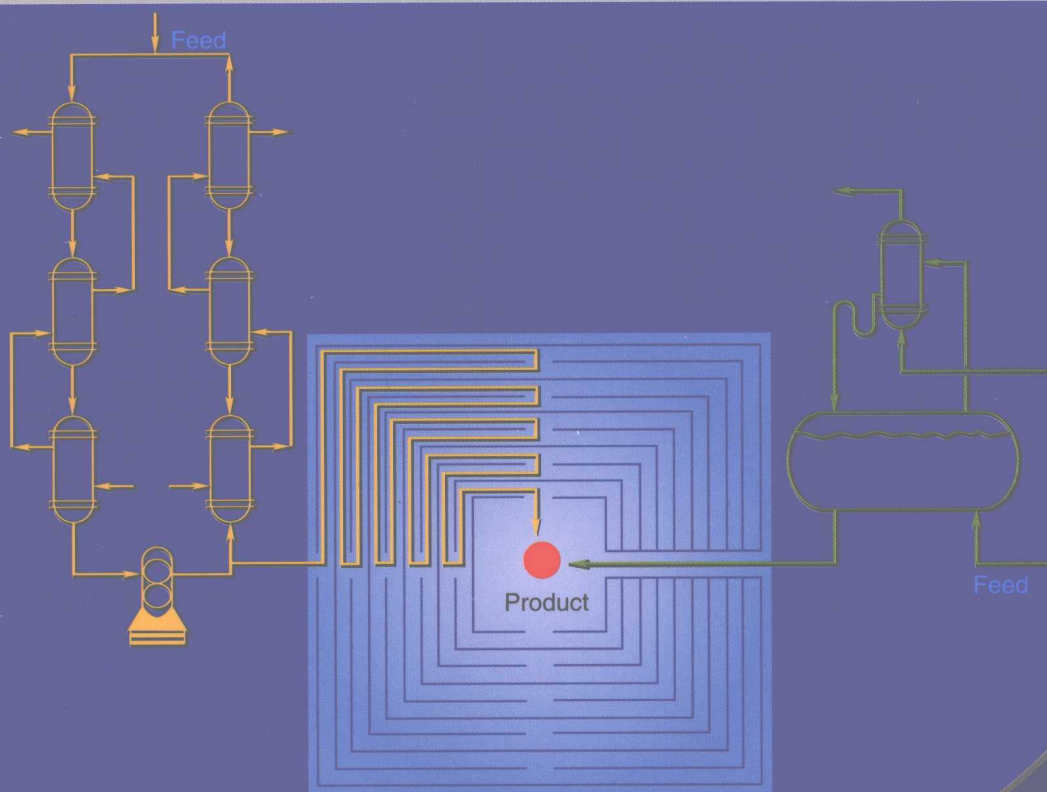


化工厂的 简单和稳健化设计

Design of Simple and Robust Process Plants

[荷] J. L. A. 柯仑 (J. L. A. Koolen) 著

刘 辉 阎建民 杨 茹 译



化学工业出版社

化工厂的 简单和稳健化设计

Design of Simple and Robust Process Plants

[荷] J. L. A. 柯仑 (J. L. A. Koolen) 著

刘 辉 阎建民 杨 茹 译



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

化工厂的简单和稳健化设计/[荷] 柯仑 (Koolen, J. L. A.) 著;
刘辉, 阎建民, 杨茹译. —北京: 化学工业出版社, 2009. 3

书名原文: Design of Simple and Robust Process Plants

ISBN 978-7-122-04501-0

I. 化… II. ①柯…②刘…③阎…④杨… III. 化工厂-设计
IV. TQ08

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 211937 号

Design of Simple and Robust Process Plants/by J. L. A. Koolen

ISBN 3-527-29784-7

Copyright © 2001 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 Verlag GmbH & Co. KGaA. 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, 违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2007-0383

责任编辑: 路金辉 傅聪智
责任校对: 李 林

装帧设计: 王晓宇

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: 北京云浩印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 22½ 字数 452 千字 2009 年 3 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: 68.00 元

版权所有 违者必究

谨以此书献给 Jans, Yvonne 和 Harald, Bart 和
Petra, 以及我的孙子 Sanne 和 Eva

“想象力比知识更重要。”

Albert Einstein

序

二次世界大战后，化学工业的发展迅速；与此相伴，化学工程学科也快速发展。同时，工程学科同步发展也为过程工厂制造出了更好的新设备和仪器。在 20 世纪 70 年代，效率空前提高；时至今日，过程工业的一些研究者还坚持认为，正是在那个时期过程工业发展成熟了。然而，来自大众的新需求使得对安全以及环境保护方面的关注日益增长。而且，在数学、信息、物理以及电子领域的进展为化学工程师提供了机遇；今天，多数设备设计方法已变为软件，许多常规任务都可在计算机上完成。

近年来，原材料和能源紧张以及对环境保护的高度重视促使不同相关学科间的交叉日益频繁。此外，化工企业的全球化造就了许多较大型的化学公司以及世界范围的激烈竞争态势，这就要求，与其他竞争者比较，公司对于自己在专业知识上的优势和缺点方面要有清醒的认识，竞争也要求对投资严格控制。公司总是在效益最大的地点建厂，因此建厂的投资需要精打细算。投资的节省意味着同样的资金可以建更多的工厂，况且在 21 世纪，还有更大的新需求需要应对！评价技术的标准是其可持续性，未来，我们日常生活中的商品、能源和燃料必须使用新型的可再生原料。而且，生产过程也必须加倍可靠。

多年来，许多科学家都在思考工程学科的基础，包括过程工程的策略以及化学制造的后勤学。这引出许多系统方面的研究甚至过程设计工程师学派。对于系统研究、生产组织以及生产后勤学，虽然已提出许多规则和条例，但是它们很少实际用于过程工业。我们从消费品大规模生产的成功中可以学到许多东西。的确，化学工程师可以自问，我们是否达到了消费品制造者那样成熟的水平？

Jan Koolen 是一位具有几十年经验的过程设计工程师，这个优势使他可以长期思考过程设计工程师的本质任务。Jan 感到，较之其他产品，即使是一个相对简单单元（如冰箱）的设计和生产对化工厂设计师来说也是一个挑战，同时也是促使化工厂设计师做出改进的巨大动力。冰箱能够运行 15 年而无需照料，即使与烯烃工厂制冷单元的控制相比其控制也极为简单。故此，Jan 认为必须进一步推进采用简单、稳健的工厂。他是这个领域的先驱；本书表明，对于过程工厂设

计师而言，该领域仍有很大的改进余地。Jan 擅长抽象思维，且具有长期的过程设计经验，这本有关简单、稳健设计的实用书籍的内容涵盖了化学工程的整个领域。本书对所有从事过程操作、设计以及开发的工程师将会是一个不可替代的工具；也将为他们的日常工作带来启示和开阔的视野，以应对未来遇到的诸多机遇和挑战。富有经验的过程设计者也会在本书中得到灵感。我们可以确信，本书将会影响到未来工厂的设计，使其更好、更简单、更稳健！

K. Roel Westerterp
The Netherlands

自序

我在过去的十多年来从事过程工业的经验促使我写作一本如何设计简单、稳健的过程工厂的书籍，使其操作可靠、简单。过去还没有人出版过这方面的综合著作。如此设计的好处无疑是可观的：较之常规设计，它不仅节省投资约30%~40%，而且通过精简人力、改善操作质量可获得操作收益。已有为数不多关于过程强化的报道，从单元操作的角度谈及上述设计理念。本书试图从过程设计、控制设计直至操作，全景式勾画出应该如何设计一个真正具有竞争力过程的方法。

有一个我常常需要回答的问题是：“为什么你认为现在是引入这个理念的恰当时机？”答案可在以下的技术进步中找寻。

- 通过更为精细的设计，机械设备的设计已得到改进。这里特别值得一提的是减少或消除机械接触的措施，例如在压缩机上首先应用了气体密封，近来它也用在泵上。螺杆式压缩机的双螺杆也配备了同步、独立的电驱动以避免轴承齿轮间直接的金属-金属接触。另一个避免机械接触的例子是开关设计中由机械方式改为感应方式。这类设计历经多年的改进，促成制造出更为可靠、可长时间运行的元件，这样就降低了维修的次数，因机械失效停车的间隔时间延长。这是引入“面向单一元件设计”理念的原因之一。

- 通过简化和强化等手段，过程技术取得了进步。在过去的几十年中，设备趋于小型化，后勤运作更为合理，库存降低，质量控制也避免了不合要求的设备。此外，集多种功能于一个容器，例如反应分离及三组分精馏中采用隔板塔，也使得设备得以集成。通过增大单位体积的表面积、湍流发生增大传递系数以及采用离心力（Highgee）改善相分离等过程强化措施降低了设备尺寸。过程和控制技术也得益于过程（统计的和动态的）模型化的强大能力。

- 计算机技术取得巨大进步，由此开发出带强大处理器的数字化仪表系统，因而可以采用模型加强控制过程。计算机技术也支持过程工厂的动态模拟，使得控制的设计成为现实，也使优化模型可在合理的响应时间内执行。集成电路（ICs）用于精细仪表的附带好处是使得仪表更为准确和可靠，而通讯技术因此大

为增强，过程设施的远程操作已是指日可待。

- 应用基于第一原理的动态模型进行操作和控制的设计现在已经成为现实。满足首通主产品操作程序的设计可获得动态模型的支持。此外，控制技术的发展阶段到了基于动态模型分析，据以判断可控性设计的替代方案。关键控制环路可加以调试并在闭环模拟中调整，以支持稳健控制。

本书面向从事过程工厂设计和操作等相关工作的学生、工程师以及经理，旨在向他们提供不同的设计和操作的方法，设计出简单、稳健的过程工厂。确定设备尺寸的设计技术此处不讨论，这方面的出版物众多。虽然本书许多示例来自化学工业，但对其他过程，如食品、制药及水处理厂等，方法是类同的。

本书虽然综合和梳理了大量资料，但是，为了做出与常规设计套路不同的设计，想象力和信念不可或缺。简言之，这可以总结为：

“设计安全可靠、在最为经济的状态下能够无人运行的工厂，并使之成为现实。”

Jan Koolen
The Netherlands

欲对本书加以评论，或者对过程简化有其他宝贵意见的读者，请与我联系。
E-mail: ILA.KOOLEN@wxs.nl。

致 谢

写作一本技术书不仅需要大量阅读，也需要活跃于相关领域同事的大力支持和相互讨论，否则不可能下决心写作本书。讨论和支持不仅限于准备和写作阶段，多数技术资料是我在工作中收集或通过学术联系获取的。故此，这里不可能提到所有的人，这些人在过去对我多有教益，也使得写作本书是愉悦之事而不是苦差。因此，我首先要感谢那些“无名”的人。

如果没有 Dow 化学公司的全力支持，本书的准备工作就不可能开始。除了完备的办公和图书馆条件外，更大的便利是可以和活跃在第一线的工程师直接接触，正是他们使我意识到相关技术的最新进展。在 Dow 化学公司为我创造这些机遇的个人有 Theo van Sint Fiet, Sam Smolik 和 Doyle Haney。

在本书写作中，或许最大的鼓励来自 Roel Westerterp，是他鼓励我从工业的视角写作，以使本书区别于那些大多是讲述具体设计问题的著作。我很高兴他同意为本书作序。

下面以章节为序，感谢那些以其知识和经验支持我的工作以及那些花时间与我讨论并审阅原稿的个人：

Paul van Ellemeet 审阅了本书若干章节，并向我提供了有关写作风格方面的宝贵建议。在有关如何简化过程、什么使过程复杂、何谓“稳健”的讨论中，Peter Vieringa 是出色的辩论对手，他还向我提供了很好的文献。Jan Willem Verwijs 审阅了设计理念部分，他也对如何增大信息量提出了有益的建议。Henk van de Berg 花很多功夫审阅有关过程综合和简化部分，他是我在这个领域的一个诤友。

Stef Luijten 和 Guy de Wispelaere 在过程集成方面对我提供了莫大的帮助。Rudi Dauwe 在可靠性工程方面的学识和经验充分体现在本书中，没有他的帮助，本书不会包含这方面的章节。有关仪表的内容大部分是由 Gees Kayser 和 Rob Kieboom 提供的，而操作自动化部分我与 Herman Liedenbaum 有合作。特别要提到的是，有关关键反应器系统瞬态操作的执行和反应器控制，Jan Willem Verwijs 的帮助是不可替代的。过程工厂的无人控制需要先进的控制技术，Raph

Poppe 在这类控制的执行方面是行家里手，真使我茅塞顿开。得益于与 Sigurd Skogestad 的接触，我写出了本书自优化控制结构构建方面的内容。基于第一原理的动态模型控制策略设计更多来自荷兰控制界同仁的支持，特别是 John Krist，他在过程优化方面的学识和经验体现在了本书之中。Mark Marinan 和 Ton Backx 向我提供了他们关于如何处理操作优化并将其体现在基于模型的控制中的见解。在项目实施中，价值改进行动方法是基于 IPA (Independent Project Analysis, Inc.) 的方法，负责这方面工作的 Edward Merrow 给了我充分的支持。

Bill Down 的编辑工作值得高度赞赏，这对本书的风格贡献良多。

感谢所有这里提到（以及未提到）的个人，他们增进了我的知识和理解，这些都体现在了本书中。

中文版序

传统的化学工业曾在大宗化学品生产方面取得极大的成功，为提高人类的生活质量做出巨大贡献。世界经济发展迅速，全球化趋势日渐扩展，人类面临资源、环境、安全、人口以及可持续性等新的问题；与此同时，科学技术也在空前迅猛地发展。在新的形势下，化学工业或更广义地说是过程工业面临新的挑战 and 机遇。

为应对这些挑战，《化工厂的简单和稳健化设计》一书在总结工程设计实践的基础上，探索性地大胆提出了一个崭新的理念和策略，极富有启示性。作者认为，未来的化工厂应该设计得像家用冰箱那样，操作起来既简单又稳健。为此，传统的化工厂不仅在工程设计建造方面，而且在操作运行方面均需要创新。具体而言，在不远的将来，随着科技的进步，设计者理念和策略的更新，会使得化工厂，这一人、机、过程、环境复杂系统向简单化、稳健化发展。化工厂有可能在安全可靠、环保节能的条件下实现无人值守的远程操作，并能够确保工厂实现效益最大化；相应地，无论拟建、在建或现有的化工厂均应面向上述目标进行简单化、稳健化设计和改造。这一前景无疑是十分诱人的，但是作者并没有停留于此。他继而全方位地给出了一些实现这些目标的途径和方法，这包括：过程综合与设计优化、过程简化和强化、基于可靠性的过程设计、操作和控制自动化、操作优化，以及化工厂有效设计和持续改进的方法等。特别是对于当前社会及公众关心的安全、能源和环境问题，也给出诸如本质安全、能量集成等设计方法；对于经济全球化下的过程工厂生产链和世界级制造的设计和操作，也多有论及。

今后一个时期，化学工业乃至所有过程工业在我国将会有有一个大的发展，新工艺、新产品及新过程装备及控制系统将会不断涌现，这就要求化学或过程工厂的设计以及操作适应全球化以及我国社会经济的发展，与时俱进，变革旧有观念，大胆实践，更好地服务于国民经济建设。该书提出的现代化学工厂的设计和操作理念以及相应的方法或许不一定完全符合当前我国过程工业的实际，科技发展史告诉我们要慎言“不可能”，至少这会是将来的发展方向。有

鉴于此，我乐于向国内化学工厂及相关的过程工厂的设计、建造、运行工程技术人员和管理者，向有关大专院校、设计研究院的师生和工程技术人员推荐此书，相信本书将会有助于使他们探索创新，建造在国际上具有竞争力的新型化工厂。是为序。

高金吉
中国工程院 院士
化工安全教育部工程研究中心 主任
北京化工大学 教授
2009 年 1 月

目 录

1	概述	1
1.1	新的变革	1
1.2	21 世纪的过程工厂：简单和稳健	3
1.3	设计理念	6
1.3.1	精简设备及管线	6
1.3.2	除非有经济或安全方面的原因，否则就面向可靠、 稳健的单一元件进行设计	6
1.3.3	优化设计	6
1.3.4	巧妙的过程集成	6
1.3.5	减少人工干预	7
1.3.6	通过操作优化赚钱	7
1.3.7	准时制生产（JIP）	7
1.3.8	面向全面质量控制（TQC）的设计	8
1.3.9	本质安全的设计	9
1.3.10	环境友好的设计	9
1.4	过程综合和设计优化	9
1.5	过程简化和强化技术	10
1.6	基于可靠性的设计	10
1.7	联合体的优化及其脆弱性评估	11
1.8	仪表、自动化及控制设计	11
1.9	操作优化	12
1.10	高质量过程工厂的有效设计和操作	12
1.11	过程设计的概览性示例	13
1.12	小结	15
	参考文献	16
2	简单、稳健工厂的设计	17
2.1	何谓“简单”？	17
2.2	复杂性程度	18
2.3	何以更加可靠？	22
2.4	什么是稳健？	23

2.4.1 机械稳健性	23
2.4.2 控制稳健性	24
2.4.3 操作稳健性	24
2.5 小结	25
参考文献	25

3 设计理念 26

3.1 特性数据	26
3.2 模型化	26
3.2.1 过程模型化是改进过程的途径	27
3.3 设计理念	28
3.3.1 利润	28
3.3.2 长效性	29
3.3.3 将设备、管路和仪表减到最少	29
3.3.4 面向可靠、稳健的单一元件进行设计	32
3.3.5 优化设计	33
3.3.6 巧妙的过程集成	35
3.3.7 减少人工干预	36
3.3.8 通过操作优化赚钱	39
3.3.9 准时制生产 (JIP)	40
3.3.10 面向全面质量管理 (TQC) 的设计	41
3.3.11 本质安全的设计	44
3.3.12 环境友好的设计	46
3.4 各种设计理念的统一	48
参考文献	49

4 过程综合和设计优化 51

4.1 过程综合	52
4.1.1 概念设计的层级结构	53
4.1.2 过程综合的约束条件	57
4.1.3 过程综合的研究范围	60
4.1.4 经济核算	61
4.1.5 优化方法	62
4.1.6 创造性	67
4.2 过程综合方法	68
4.2.1 反应	68
4.2.2 分离	76
4.2.3 过程集成	86

4.2.4 可控性分析	101
4.2.5 流程的优化	103
4.2.6 后勤与现场集成	103
参考文献	105

5 过程简化与过程强化 108

5.1 引言	108
5.2 过程功能的避免与消除	109
5.2.1 储罐与容器	109
5.2.2 流体输送	110
5.2.3 回收系统	111
5.3 过程功能的耦合	111
5.3.1 反应	112
5.3.2 精馏	115
5.3.3 萃取、蒸发和挤出	121
5.3.4 加热炉	122
5.4 过程装置的集成	123
5.5 过程功能的强化	126
5.5.1 构筑更紧凑的单元	127
5.5.2 强化传热、传质与脉冲	128
5.5.3 借助离心力场的“超重力”	131
5.6 总体过程简化	132
5.6.1 总体过程设计的改进	133
5.6.2 单套设备的设计	138
5.6.3 供应与储存方面的策略	140
5.6.4 单一元件设计策略	140
5.7 各单元操作的简化与分级	142
5.7.1 反应器	143
5.7.2 精馏与吸收	149
5.7.3 液-液萃取	153
5.7.4 吸附与化学吸附	153
5.7.5 热交换	154
5.7.6 流体输送	155
5.7.7 管路	155
5.7.8 仪表	157
5.8 简化与集成设计之间有无冲突?	159
参考文献	161

6 基于可靠性的过程设计 164

6.1 引言	164
6.1.1 迈向更优设计的可靠性工程	165
6.2 可靠性的基本理论	166
6.2.1 可用性和不可用性	169
6.2.2 可靠性数据及分布	170
6.2.3 失效参数估值	172
6.2.4 可靠性的模型化	173
6.3 用于过程工厂设计的可靠性工程技术方法	176
6.4 过程和公用工厂的可靠性研究	179
6.4.1 连续过程工厂的可靠性研究	179
6.4.2 公用蒸汽工厂的可靠性研究	181
6.5 可靠性、可用性及可维护性 (RAM) 标准	184
6.6 小结	185
6.7 定义	186
参考文献	187

7 集成的过程工厂联合体的优化及其脆弱性评估 189

7.1 引言	189
7.2 化学联合体	190
7.2.1 基于氮的联合体	190
7.2.2 基于烃的联合体	190
7.2.3 基于氯的联合体	191
7.2.4 炼厂联合体	191
7.2.5 集群联合体	191
7.3 集成联合体的设计理念	191
7.4 现场的选择	192
7.5 集成联合体的优化	193
7.5.1 现场流程	193
7.5.2 现场公用工程集成	195
7.6 储存能力的优化	200
7.6.1 工厂失效	200
7.6.2 储罐	201
7.6.3 模拟及结果	202
7.6.4 生产过程链	205
7.7 现场的脆弱性	207
7.8 小结	212

8	操作/控制仪表和自动化	215
8.1	引言	215
8.2	仪表	216
8.2.1	仪表	216
8.2.2	仪表系统	218
8.2.3	仪表设计	218
8.2.4	安全仪表系统 (SIS)	222
8.3	操作自动化	224
8.3.1	仪表选型 (模拟输入、输出和数字输入、输出)	225
8.3.2	基于操作策略的操作自动化	225
8.3.3	仪表安全防护系统	234
8.3.4	联锁	239
8.3.5	监测	239
8.3.6	仪表自动化系统	241
8.3.7	概述: 操作自动化	242
8.4	控制设计	244
8.4.1	基本控制层的策略设计	245
8.4.2	控制目标界定	246
8.4.3	评估开环稳定性	247
8.4.4	过程分解为独立工段	247
8.4.5	确定自由度	247
8.4.6	确定受控变量、操作变量、待测变量和扰动变量	248
8.4.7	工厂和单元范围控制中可行配对方案选取	250
8.4.8	评估配对备选方案中的静态相互作用	258
8.4.9	评估减少后选定配对方案中的动态相互作用	259
8.4.10	建立最终配对并设计控制器	260
8.4.11	采用动态模拟开发并测试控制性能	260
8.4.12	基本控制层上的模型控制	261
8.5	小结	263
	参考文献	264

9	操作优化	266
9.1	引言	266
9.2	发展历史	266
9.3	连续过程的广义操作优化	268
9.3.1	动机	268