

化工过程分析与设计

W·雷斯尼克 著

化学工业出版社

化工过程分析与设计

W. 雷斯尼克 著

苏健民 邵德荣 马相泉 译

化学工业出版社

内 容 提 要

本书系根据美国McGraw-Hill图书公司出版的化工丛书中的《化工过程分析与设计》(Process Analysis and Design for Chemical Engineers)一书译出。

全书计十一章,前六章引入化工过程分析和综合的基本概念,介绍化工热力学和动力学的基本原理及其应用,热物理性质的估算,有效能概念,反应器分析和设计;七~九章为经济分析和评价,叙述各种经济参数的预测及经济分析中不确定性的分析和处理;十~十一章介绍化工过程综合的一些数学方法和五个典型案例的详细研究。

本书内容新颖,陈述简练,通俗易懂,适用面广。各章引有大量实用性的例子,并附有习题和解题参考资料。适作高等院校化工类专业的教学参考书,并可供化学工程、石油化工、过程设计、系统工程、应用数学和经济管理等方面的科研和工程技术人员参考。

苏健民译本书七~九章,邵德荣译序言和一~六章,马栩泉译十~十一章和索引。

William Resnick

Process Analysis and Design for Chemical Engineers

McGraw-Hill Book Company 1981

化工过程分析与设计

苏健民 邵德荣 马栩泉 译

责任编辑:施承薇

封面设计:季玉芳

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本850×1168^{1/32}印张12^{3/4}插页1 字数359千字印数1—6,740

1985年12月北京第1版1985年12月北京第1次印刷

统一书号15063·3738定价2.95元

译 序

本书虽然取名《化工过程分析与设计》，但它并不是一本从传统概念上论述过程设计和设备设计的著作，而是一本从技术上和经济上论述合理的化工过程设计必须遵循的设计方法研究的专著。

本书从内容上大致可以概括为两个部分，第一部分是化工系统的技术分析；第二部分是化工过程设计中的经济分析。两部分内容相互渗透，相互补充，相互配合，从而给出比较完整的化工技术和经济分析的论述。

作者从实用出发，论述化工热力学和动力学的基本原理及其在工程问题中的应用。研究诸如确定最优操作条件，避免不利的热力学特性，引入有效能概念，确定反应器型式和设计方法，以及如何节省能源等；介绍了热力学特性的估算方法，告诉读者如何从现有数据进行内插和外推，或如何利用少量的基本性质精确地估算设计所需要的各种参数；在讨论过程综合的战略和战术时，评述了主要的分析工具，如类推法，形态分析，功能分析和调优过程综合。还阐明了其它重要的过程综合的系统方法，如比较方案的产生和筛选，过程模拟，最优化，计算机辅助的过程设计等，并引入计算机程序包和数据库的资料。此外，作为对上述原理、概念和方法的支持，列举了五个典型案例的详细研究。

随着我国社会主义建设事业的发展，工业生产和基本建设中的经济效益问题日益引起人们广泛的兴趣和重视，在当前，它已成为经济发展的一个关键性问题。一项成功的设计不只是确定一系列的设计参数和提出对设备的要求，也不只是使过程和设备能成功地运行，更重要的是要求这项设计在经济上是合理的。我们处理一个工程问题，不仅要求技术上合理、先进，还要能从资源、人才、工艺现状、安全可靠、市场、经济等方面综合考虑。这就要求化学工程师能对设计方

案进行经济评价，对与经济有关的各种因素进行分析和判断，这些化工技术经济范畴的问题比一项单纯的技术设计更具有综合性，也更为复杂。本书七~九章集中地论述这些内容，包括市场预测，投资估算，方案评价，不确定性问题的分析和处理及通货膨胀的影响等等，并有大量的例子，内容生动引人。

目前，许多设计、科研和教育部门都注重加强化工的实际应用，化工与经济的结合，以及化工这一生气勃勃、与国计民生密切相关的工业领域如何为国民经济的高速、高效发展服务等方面的研究工作，但又普遍感到有关图书资料的缺乏，为适应这一需要，我们译出此书，以起抛砖引玉的作用。

化工过程分析与设计，化工技术经济，这是一个崭新的课题。我们虽然在工作中涉及过一些这样的问题，或正从事这方面的教学研究工作，但系统地处理这类问题，也还是第一次，我们把这一译作作为一次学习和实践的尝试。限于译者的水平和实践经验，书中的错误和毛病一定不少，恳请读者批评指正。

苏健民 邝德荣 马栩泉
于清华大学

序 言

近20年来，化学工程教育已经发生相当大的变化。大多数大学化学工程系的主要课程是学习工程科学，而用这些基础理论去解决化工实际问题的时间是有限的。在课堂教学中，化学工程专业的学生通常碰到的是意义相当明确的情况和问题。而且，估计他们一次只涉及某一问题的一个方面，例如给定分离要求计算精馏塔，对一个特定的动力学的反应求反应器的体积，或泵送流体通过一定的管路系统所需要的动力。因此，在正规课程中，过程设计与分析、经济学和金融评价的学习时间必然减少了。

鉴于上述因素，年青的大学毕业生产常常发现他们难于适应工业环境。工程师在实践中往往会遇到一些意义很不明确的情况，诸如求解的问题阐述得不明确；可用的数据不完整，也许不精确；对一个因素所作的决策往往会通过整个的化工系统反映出来；或必须进行经济分析。而在学生的课堂教学中，对于经济分析可能强调得并不够。

本书试图帮助化学工程专业的学生和工程师加强他们解决实际问题的技能，并用这些技能来分析可能影响化工系统设计、操作并取得工业成功的诸因素。

前两章详述化学工业的若干特点，简述在生气勃勃的化学工业中化学工程师的任务；讲述过程分析与综合在过程设计中的作用，并研究比较方案的产生与筛选中所涉及到的一些因素。

当年青的化学工程师开始参加实际的工业工作时，他们遇到的一个问题是，对于任何一个实际过程或复杂问题，必须处理几乎没有可用的物理学和热力学数据或有大量矛盾的数据的情况。因此第三章专门研究估算热物理数据的方法。这些方法也能用来从已有数据内插和外推，并可作为评价数据可靠性的一个指导。

有几章专门研究反应平衡分析，无反应过程分析，化学动力学及

反应器的设计和分析。这里虽然没有详细地介绍化工热力学和化学反应器设计，但本书的陈述对于如何将这些基本工具用于分析化工系统已经足够了，几乎不必再去查阅其它的资料。

第七至九章专门研究经济评价、展望和预测，以及论述不确定性。若没有可靠的经济评价，则过程分析就不完整，或没有充分的根据。为了使过程分析符合实际，我们在进行经济评价时要对未来作出预测。因此，化学工程师应当了解展望并预测诸如市场、价格、成本和产量等因素的原理和方法。这三章还研究了通货膨胀的影响及如何考虑货币购买力的变化。化学工程师在实际工作中常常会碰到一些不确定性的问题，因此介绍了定量分析这类问题的一些方法。

第十章讨论了化工过程综合的几种比较有效而系统的方法。介绍最优化及化工过程模拟的基本原理，描述计算机辅助的过程综合。第十一章介绍了五个案例研究，对其作了详细的分析，以便使读者能够了解如何应用各种原理，如何在实践中进行设计。全书给出了许多例题，还有大量不同深度的习题，其中很多习题是广泛适用的，并为读者提供了一些有趣的问题。为方便读者，书末附有参考文献。

本书适合于高年级大学生或大学毕业的化学工程师作为一或两个学期的教程。虽然在章节的顺序上可能安排得更合适一些，但还是安排了本书现在的顺序。另一种适宜的顺序是按第一，七，八，九，二，十，三，四，五，六，十一章排列。如果教师感到学生们已经很好地掌握了第四，五，六章的内容，则这部分内容可从简处理，这可以根据不同的系和课程而定。虽然在我系本课程是和另外的工厂设计课程同时讲授的，但根据设计计划的进展和需要，本书也可在传统的高年级设计课程中供讲授之用。

本书是根据作者多年的“化工过程分析与设计”课程的讲稿编成的，希望它有助于年青的化学工程师从大学学习的园地顺利地过渡到必须进行设计决策的工业化学工程实践的世界。化学工程师对许多化学工程方法应当逐步地做到融会贯通，并能将这些方法用于他们在实践中天天遇到的过程分析与过程设计中去。

感谢我的学生们，我从他们那里学到了许多东西。特别是79级学

生，他们不仅使我认识到许多东西，而且他们还仔细推敲过我最后的手稿，查出许多印刷错误和实际的错误。感谢 P. V. Danckwerts, J. F. Davidson和K. Østergaard，在我访问 Shell 化工研究室和 Danmarks Tekniske Højskole 化学工艺研究所时，由于他们的殷勤招待，使我有机会写出手稿的主要部分。感谢 Churchill 学院的院长和同事们，在我休假期间他们给予我热情友好的招待和鼓励。感谢我系的同事们，特别是 D. Hasson 和我进行过许多讨论，并给予我热情的鼓励。感谢化学系的 A. Halevi 先生，本书引用了他早先提出的许多珍贵的原始资料。

Norma Jacob 和 Talma Shavit 承担了打字工作。最早在 Cambridge 和 Lyngby 的部分手稿由 Margaret Sansom 小姐和我的妻子打字。

对我妻子的感激是无可估量的。这里只要说一下在我们婚后整个的年代里他对我的劝告、支持和鼓励就已经足够了。

威廉·雷斯尼克

目 录

译 序

序 言

第一章 化学工业	1
1.1 什么是化学工业?	1
1.2 快速发展的化学工业	2
1.3 产品分类	5
1.4 研究和开发的任务	7
1.5 化学工程师的任务	7
习题	9
第二章 比较方案的产生和筛选	10
2.1 分析和综合	10
2.2 比较方案的筛选	12
2.3 分离序列	16
2.4 可供选择的加工路线	17
2.5 可供选择的加工工艺	18
2.6 比较方案分析	20
2.7 过程综合	23
2.8 结论	27
习题	27
第三章 热物理性质的估算	30
3.1 纯化合物的性质	30
3.2 临界性质	31
3.3 压力-体积-温度关系	33
3.4 蒸气压	37
3.5 气化潜热	38
3.6 气体热容	39
3.7 焓图	40
3.8 标准生成热	44

3.9	生成自由能	45
3.10	生成焓	45
3.11	其它物理性质	47
3.12	混合物的性质	50
3.13	气-液平衡	51
3.14	数据来源	53
	习题	54
第四章	反应平衡分析	56
4.1	化学平衡	56
4.2	数据不精确的影响	59
4.3	操作参数对平衡转化的影响	62
4.4	最优进料组成	66
4.5	克服正 ΔG°	68
4.6	绝热反应路径	74
4.7	联立反应表示法	75
4.8	联立反应的平衡	79
4.9	自由能最小化方法	81
	习题	82
第五章	无反应过程的分析	88
5.1	功损失的概念	88
5.2	有效能概念	91
5.3	分离和精制	96
5.4	掺合	98
	习题	99
第六章	反应器设计和分析	105
6.1	反应器物料衡算	105
6.2	化学动力学	106
6.3	化学反应的类型	108
6.4	温度对反应速度的影响	111
6.5	间歇反应和连续反应	112
6.6	理想的化学反应器的类型	113
6.7	间歇式反应器的基本设计公式	115
6.8	CSTR的基本设计公式	117

6.9	管状流反应器的基本设计公式	120
6.10	各种反应器的比较	121
6.11	CSTR的热性能	136
6.12	管状流反应器的热性能	138
6.13	稳定性和开车问题	139
6.14	多相反应	141
6.15	管式反应器的稳定性	153
6.16	最后的评论	154
	习题	155
第七章	经济分析与评价	159
7.1	工程项目评价	159
7.2	现金流通图	160
7.3	金钱的时间价值	161
7.4	评价准则	171
7.5	现值与DCF利润率的比较	175
7.6	实际的经济评价	180
7.7	通货膨胀的特点	181
7.8	通货膨胀余量	183
7.9	通货膨胀对未来的设备需求的影响	185
7.10	投资-成本估算	188
7.11	成本指数	188
7.12	固定资本估算	190
7.13	产品总成本的估算	199
7.14	直接生产成本	201
7.15	固定费用	202
7.16	工厂间接成本	204
7.17	一般费用	204
7.18	总收益费用	204
7.19	初步的产品总成本估算	205
	习题	206
第八章	预测未来	210
8.1	怎样预测	210
8.2	市场预测	211

8.3	定性方法	212
8.4	定量方法	213
8.5	总的经济增长	220
8.6	相关分析	221
8.7	历史类推法	222
8.8	消费模式	223
8.9	市场模拟	223
8.10	告诫的话	224
8.11	预测工厂生产能力	224
8.12	化工产品价格预测	228
8.13	预计产量	229
8.14	预计成本	230
8.15	需求量预计	230
8.16	Twaddle-Malloy例证	231
8.17	经济-价格预测	232
	习题	234
第九章	处理不确定性	237
9.1	处理经济分析中的不确定性	237
9.2	灵敏度分析	237
9.3	不确定性的定量	239
9.4	决策过程	243
9.5	决策	244
9.6	风险下的设计	251
9.7	可靠性和冗余度	254
9.8	过程利用率和冗余度	256
9.9	评价冗余度的获利能力	258
9.10	不确定需求下的计划生产能力	262
	习题	269
第十章	过程综合的战术与战略	273
10.1	过程综合的定性方法	273
10.2	功能分析和调优过程综合	278
10.3	过程综合的编程序战略	286
10.4	过程综合的最优化方法	291

10.5	最优搜索法	291
10.6	数学规划	292
10.7	化学过程的模拟	296
10.8	计算机辅助的过程综合	308
10.9	结论性意见	314
	习题	315
第十一章	案例研究	318
11.1	甲醇生产	318
11.2	苯乙烯生产	330
11.3	乙二醇	343
11.4	失控反应的分析与处理	350
11.5	扩大生产能力的方案	367
	习题	366
	符号说明	369
	参考文献	372
	索引	375

第一章 化学工业

化工产品、原料及其供应的市场所涉及的面是如此之广，以致对于化学工业很难进行简单的表述。在这一章中，我们要介绍化学工业的特点，简述其多种多样性，不仅指出化学工业的经济意义，而且指出它在我们日常生活中的重要性。此外，还将叙述化学工程师在化学工业中所起的作用。

1.1 什么是化学工业？

由于化工产品、原料及市场的多样性，因此化学工业是世界上最难以定义的一种工业。各个国家对化学工业或其产品所作的定义稍有不同，在有些情况下，甚至同一个国家中各个单位之间的定义也不尽相同。但是，我们可以下一个叙述性的定义，这就是把化学过程占优势或与化学工业密切相关的那些工业称之为化学加工工业。

化工产品和某些化工原料的生产是化学加工工业的重要组成部分。例如，化工原料的生产包括石油气的生产和精制，石油化工用的石脑油原料的制备。最终到消费者手里的产品如塑料制品、药品、玻璃制品、橡胶制品及纸张等，也是化学加工工业的产品。

化学产品的广泛性

化学加工工业的产品是国民经济各部门诸如农业、工业和消费者的必需品。可以举出这些产品的一些例子，如在现代化农业中需要化肥、农药、杀虫剂、饲料添加剂和兽医药品。化学加工工业的产品在工业部门是不可少的。如造纸工业需要漂白剂和粘合剂；纺织工业需要碱、洗涤剂、漂白剂、染料和树脂；林产工业需要油漆、木材防腐剂、树脂和粘合剂；冶金工业需要浸取剂、浮选剂和清洗用酸。所有这些工业都是工业化经济的重要组成部分。归根结底，消费者或是直接使用消费性的化工产品，或是使用作为间接化工产品的耐用的消费

品。此外，一些消费品如化妆品、药品、肥皂、洗涤剂及摄影用的化学药品等也属于化学加工工业的产品。

生活在工业化经济世界的每一个人的周围都充满着化工产品。若没有化学工业的贡献，我们就不能达到现在的生活水平。因此，化学工业及其产品在我们生活的各个方面，如卫生、食品、衣着、居住、运输、通讯、娱乐和保卫等方面，都是十分重要的。

从统计上分类

从统计上对工业数据进行汇编和分类的政府机构一般采用美国管理和预算局出版的标准工业分类（SIC）手册确定的分类法。在SIC手册中，化学及有关产品的工业是较大的一类（第28类），它包括生产基本化工产品的企业和产品加工以化学过程为主的企业。这两类企业一般生产三类产品：基本化工产品，如酸、碱、盐和有机化工产品；进一步加工用的化工产品，如合成纤维、塑料和颜料；以及供最终消费的化工产品如药品、化妆品、肥皂，或供其他工业用的物资，如油漆、化肥和炸药等。

石油炼制和有关的工业（SIC中第29类）也包括在化学加工工业中，有大量的化学工程师在这些部门任职。还有其他一些工业，一般认为其一部分也属于化学加工工业，如木材、纸浆、纸张和纸板（SIC中第26类）；橡胶制品（SIC中第30类）；以及石料、粘土、玻璃和陶瓷（SIC中第32类）等工业。

除SIC外，还通用其他的规范和分类法，如企业分类法、关税分类法和商品分类规范。由于各国之间的规范和分类法不尽相同，所以国际性的标准分类就更为复杂。考虑到不同时期、不同目的和不同来源的数据会有重复、遗漏，其活动范围和定义也有差别，因此对这些数据需要进行仔细的分析、比较和辨别。

1.2 快速发展的化学工业

化学工业是工业化经济中最生气勃勃的一个部门。化工产品生产和消费的增长比整个经济或制造业要快得多。而且，化学工业的投资比例很高，它是制造业中投资最高的部门之一。在已经工业化和正在

实现工业化的国家中。化学工业的投资相当于制造业总投资的10~15%。

增长弹性 (growth elasticity)

化学工业的增长率及其和整个经济发展的比较可以定量地用增长弹性表示。化工生产的增长弹性定义为化工生产的增长率与国民生产总值的增长率之比。因此，增长弹性表示化学工业发展的动态特性。化学工业的增长弹性一般大于2；即，化学工业增长率是国民生产总值增长率的两倍多。西欧、东欧、美国和日本的化学工业增长弹性是非常相近的，这说明化学工业在整个经济和工业发展中的重要作用。

不难找到化学工业快速发展的原因。最重要的原因之一是要不断地用合成材料如合成纤维、塑料和合成橡胶等代替常常是由农业提供的普通材料。另一个重要的原因是需要大量的化肥和杀虫剂，以提高并保持高度的农业生产率。此外，为了提高人们的健康水平，需要增加药品的供应。化学工业的特点及其创新精神不仅能使这些要求得到满足，而且能够源源不断地提供新的或改进的产品。

国民经济中的化学加工工业

表1.1为化学加工工业和整个制造业的一些有关雇员、投资额、销售额和出口额的统计数字。由这些数字可以明显地看出化学加工工业在国民经济中的重要性。在表1.1所考察的1977年间，化学药品及有关制品工业的雇员占整个制造业的5%以上，投资额占11.3%，销

表 1.1 化学加工工业和整个制造业的比较 (1977年)

SIC分类号	工 业	雇 员 千人	投 资 额 十亿美元	销 售 额 十亿美元	出 口 额 ^① 十亿美元
	整个制造业	19,554	60.16	1335.7	120.1
26	纸张及有关制品	698	3.36	41.9	
28	化学药品及有关制品	1,057	6.83	113.4	10.83
29	石油及煤制品	209	13.87	161.7	
30	橡胶及塑料制品 (别 处不分类的)	675	1.45	33.7	

① 标准国际关税分类。

资料来源: *Chem. Eng. News, Facts and Figures* issue, June 12, 1978.

售额占8.5%。SIC中的第26, 28, 29和30类的雇员总共占国民经济制造业的13.5%，投资额占42.4%，销售额占26.3%。

化学工业是高度资本密集部门。作为工业平均值的制造公司每个雇员的投资约为20,000美元,而石油公司每个雇员的投资为350,000多美元,化学公司每个雇员的投资约为85,000美元。而且化学工业的发展趋势是更高度的资本密集。这一工业还要继续不断地以高速度投资。在美国,化学工业每个雇员的年投资从1970年的3,330美元增加到1977年的6,500美元。

化工产品-工业的连结

虽然消费者也直接使用一些化工产品,但化工产品和最终的消费者之间是必须要有一个连结过程的。化工产品在工业产品中所占的比例很高。化学药品及精选的化学制品工业为纸浆和纸张、林产、纺织及冶金等工业提供原料,其中一些前已提及。鉴于中间工业需要量与总的化工需要量有很高的比例,因此,化工需要量明显地取决于整个经济的生产结构和每个人的收入及消费水平。而且,由于化工产品在工业经济中十分普遍,所以中间化学工业的销售额不会过分集中。因而化学工业的特点在于,它和许多工业都有一定程度的前向连结(forward linkages),而不是只和少数几种工业有特别紧密的前向连结。

表1.2指出了这些连结的特点,该表中给出了化学药品及有关制品工业对其他工业(每年购买1,000,000美元以上的工业部门)的销售模式。有78个其他工业部门购买化学药品及有关制品,最大买主工业仅购买总销售额的19%。石油炼制及有关工业的产品销售到80个其他工业部门,但最大的买主工业仅购买总销售额的7%。

化学工业的内在联系

虽然表1.2没有表示出化学工业的内在联系,但应当指出,各种化学加工工业是化学加工工业产品最大的买主。这是因为一部分化学加工工业的产品变成了另一些加工工业的原料。产品通向最终消费者的路线可能是很长的。图1.1表示出了化学工业的这种特点,该图是石油化工原料乙烯的部分产品树(partial "tree" of products),