



普通高等教育“十五”国家级规划教材

化工过程设计

(化工设计 第二版)

王静康 主编
伍宏业 主审



化学工业出版社
高等教育教材出版中心

普通高等教育“十五”国家级规划教材

化工过程设计

(化工设计 第二版)

王静康 主编

伍宏业 主审



化学工业出版社
高等教育教材出版中心

· 北 京 ·

本书是在《化工设计》的基础上,依据国际化工发展新趋势与新成就,进一步编写的高等学校化学工程与工艺专业的专业课教材。本书系统地阐述了现代化过程工程学中的核心内容:工艺过程设计与化工厂整体设计的基本原理、基本程序与基本方法。

本书共11章。第1章介绍了现代化过程工程学的核心内容。第2章概述了化工厂整体设计内容与程序。第3章综合阐述了进行设计的基本运算——物料衡算与热量衡算的各种策略与方法。第4章较详细地论述了化工过程合成的基本法则。第5章重点讨论了过程可靠性、安全性与风险性分析的方法,以及它们在过程合成方案优化中的意义。第6章简要总结了化工管路的流体力学设计法。第7章较详细地介绍了对设计进行经济分析与评价的基本原理与方法。第8章探讨了过程控制的意义与描述方法。第9章介绍了安全工程与生态工业系统。第10章综合论述了化工设计的工具——化工应用软件的现在与未来,并为读者提供了一些常用的化工实用软件。第11章为了融会贯通前几章的内容特提供一个大型的实例设计。在附录中,还为读者提供了一些实用的设计基础数据源与实用设计软件表仅供参考。本书附送光盘一张,主要内容包热交换网络、ASPEN PLUS 计算实例、PROCESS II 计算实例、CHEMCAD 计算实例。

本书可作为高等院校化学工程与工艺专业本科生及研究生的教材,也可供化工、石油等领域从事科研、生产、设计的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工过程设计/王静康主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2006.5

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-5025-8747-0

I. 化… II. 王… III. 化工过程-设计-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 055080 号

普通高等教育“十五”国家级规划教材

化工过程设计

(化工设计 第二版)

王静康 主编

伍宏业 主审

责任编辑: 骆文敏 徐雅妮

文字编辑: 贾 婷 汲永臻 荣世芳

责任校对: 李 林

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行

高等教育教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 31¼ 插页 2 字数 833 千字

2006年5月第2版 2006年5月北京第8次印刷

ISBN 7-5025-8747-0

定 价: 49.80 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

第一版前言

“化工设计”是高等学校化学工程专业的专业课教材。内容包括化工工艺过程设计与化工厂设计。本教材系统地阐述了现代化工过程工程学中的核心内容：工艺过程设计与化工厂整体设计的基本原理、基本程序与基本方法。“化工设计”是化学工程技术人员必不可少的技术基础知识之一。

现代化学工业的特点是规模大，综合性强，自动化程度高。现代化工工艺过程，早已不是个别单元操作的机械组合，而是在“三传一反”基础上发展起来的“过程工程学”，其内容较详细地论述了过程开发、建立与改善中的规律与特征。建立具有这样过程的企业，必须完成一整套严谨的化工工艺过程设计与化工厂设计。为了使我国化学工业能矗立于世界化学工业之林，要求现代化学工程师必须适应国际化工形势的发展，不能只停留在会设计单元操作及设备，和使过程顺利运行这一水平上，而是要求具备一定的洞察化学工业全局的能力，对过程进行全面的技术经济评价，在设计中，善于将技术与经济进行综合研究来指导设计和处理设计中的具体问题。

由于世界性的能源短缺，原材料及能源费用的增加以及对环境保护的要求，更加剧了国际化工市场的竞争，必须不断提高化工产品的质量和降低生产成本。所以设计新厂或改造老厂应作到：

1. 保证产品质量；
2. 投资少，操作效率高，即达到同样的目的所需工程量少，操作能耗低，维修费用低，生产成本低。

为达到优化设计必须综合考虑技术的合理性和先进性，资源情况，工艺现有水平，安全可靠，市场销售情况及经济等多方面的因素，要同时处理大量的信息，及时进行多方面的筛选，以求解出最终的优化方案。毫无疑问，进行这样的设计，必须付出巨大的计算工作量。在国外，计算机已被视为实现这些目标的关键工具。计算机辅助化工过程设计与分析已成为“化工设计”的基本手段。

在采用计算机之前，化学工程师运用繁琐而又费时的“台式计算器”或“算尺”进行化工设计，他们不可能对不同的工艺路线和操作条件进行定量的评比，仅能依靠定性的“经验”，也无法从繁重的劳动中解放出来去进行比较思考，寻找最佳方案。如今，国外广泛采用计算机快速而准确地完成复杂计算，可以对不同情况和不同的条件进行计算、比较，以选择优化方案。这种“应用计算机进行的发现”，继“经验”与“实验”之后，已变成化工工艺过程研究、开发和设计的第三技术，把化工设计推向了一个新的阶段。“计算机辅助化工过程设计与分析”目前已有二十余年的发展和应用历史，值得注意的是至今仍以惊人的速度在发展。化工工程师已可以采用成熟的，或者说是已达到化学工程实践年龄的 CAPD（计算机辅助化工过程设计）应用软件，由不同的角度进行优化设计。

目前在我国的化工设计部门，亦已开始注意使用 CAPD 方法，在许多知名的化工或石油化工设计院中，不但均已购置了小型或中型计算机，提供了进行 CAPD 的硬件环境，而且购置了如“ASPEN”或“PROCESS”类型的 CAPD 的应用软件，具备了软件使用环境。可以预见，我国的化工设计也必将开始新的飞跃。

为了使读者能够掌握“化工设计”的全貌以适应现代化建设的需要,本书不但简要地介绍了我国现行有关化工设计的规范、方法和程序,而且试图阐明采用计算机辅助手段的现代化工设计的基本原理与方法,在设计实践中两者有机地融和为一体。

为了全面介绍化工工艺过程设计与化工厂整体设计的基本内容、基本原理、程序与方法,本书共安排了九章内容。第一章介绍了现代化工过程工程学的核心内容。第二章概述了化工厂整体设计内容与程序。第三章综合阐述了进行设计的基本运算——物料衡算与热量衡算的各种策略与方法,其中包括手工运算与计算机辅助运算。第四章较详细地论述了化工过程合成的基本法则,其中包括了反应、分离、热交换网络、精馏塔网络合成方法与准则,还特别介绍了间歇过程合成的优化方法。第五章重点讨论了过程可靠性与安全性分析的方法,以及它们在过程合成方案优化中的意义,还简要介绍了现代能耗分析与评价方案——有效能分析法。第六章较详细地介绍了对设计进行经济分析与评价的基本原理与方法,并结合大型事例进行讨论。第七章探讨了过程控制的意义与描述方法。第八章为了融会贯通前几章内容特提供一个大型的实例设计。第九章综合论述了化工设计的工具——化工应用软件现在与未来,并为读者提供了一些常用的化工实用软件程序。

本书第一、三、四、五、六章由王静康编写;第二、七章由黄璐编写;第八、九章由秦文军编写。

本书作为化工类专业大学本科与研究生教材。对于大学生,限于学时,可重点学习第一、二、三、四、六章内容;研究生可继续深入其它章节。本节亦可供化工、石油等行业的工程技术人员参考。

在本书编写过程中,得到清华大学苏健民教授、北京化工研究院肖成基总工的指导,在此特表谢意。

主编 王静康

1994. 12.

第二版前言

《化工过程设计》是在《化工设计》(化学工业出版社出版, 1995)的基础上, 依据国际化工发展新趋势与新成就进一步编写的高等学校化学工程与工艺专业的专业课教材。内容包括化工工艺过程设计与化工厂设计。本教材系统地阐述了现代化工过程工程学中的核心内容: 工艺过程设计与化工厂整体设计的基本原理、基本程序与基本方法。“化工设计”是化学工程技术人员必不可少的技术基础知识之一。

21 世纪人类面临着资源、能源及环境的严峻挑战, 为了全球的可持续发展, 必须发展资源节约型、能源节约型及环境友好型的现代制造业。现代制造业包括离散型与过程工程型制造业。广义的化工过程产业概括了我国俗称的化工、轻工、食品加工、功能制品加工及制药等多种工业领域的过程, 是典型的过程工程型制造业。

在现代化学工业中, “产品工程”发展迅速。现代化工过程工程发展的方向是绿色过程工程, 以及实现过程工程与产品工程的结合。绿色化工过程工程是旨在减少或消除有毒有害物质使用与生成的化工生产过程设计的策略与方法。加速绿色化工产业建设, 由末端治理向绿色过程设计采取源头防治的生产工艺转变, 才能保证我国实现循环经济, 保证社会的可持续发展。

21 世纪以来, 大型过程设计已进入以计算机辅助化工过程设计 (CAPD) 为主的阶段, 化工过程系统工程是 CAPD 的基础。现代化学工业的特点是连续和间歇过程并重; 规模大、单产品和中小规模多产品的工厂并存; 产业链综合性强, 自动化程度高, 向生态工业园区方向发展。建立具有绿色环境友好过程的企业, 必须完成一整套严谨的化工工艺过程设计与化工厂设计。为使我国化学工业能矗立于世界化学工业之林, 要求现代化学工程师必须适应国际化工形势的发展, 不能只停留在会设计过程操作及设备和使用过程顺利运行这一水平上, 而是要求具备一定的洞察化学工业全局的能力, 对过程进行全面的技术经济以及环境影响的分析与评价, 在设计中, 善于将技术经济与资源、能源效率以及环境友好等多目标进行综合优化研究, 以指导设计和处理设计中的具体问题。

由于世界性的能源短缺, 原材料及能源费用的增加以及对环境保护的要求, 更加剧了国际化工市场的竞争, 必须按照绿色化学科学与工程学的准则, 不断地提高化工产品的质量和降低生产成本, 所以设计新厂或改造老厂应做到:

- ① 保证产品质量;
- ② 投资少, 操作效率高, 即达到同样的目标所需工程量少, 维修费用低, 生产成本低;
- ③ 环境友好, 资源、能源利用率高。

为达到优化设计, 必须综合考虑技术的合理性和先进性、资源情况、工艺现有水平、安全可靠、市场销售情况及经济等多方面的因素, 要同时处理大量的信息, 及时进行多方面的筛选, 以求解出最终的优化方案。毫无疑问, 进行这样的设计, 必须付出巨大的计算工作量。如今, 国际上广泛采用计算机快速而准确地完成复杂计算, 应用现代过程系统工程方法, 可以对不同情况和不同条件进行计算、比较, 以选择优化方案。现代过程系统工程的发展, 已将化工设计推向了一个新的阶段。应用“计算机辅助化工过程设计与分析”已有三十余年的历史, 值得注意的是至今仍以惊人的速度在发展。化工工程师已可以采用成熟的、或

者说是已达到化学工程实践年龄的 CAPD (计算机辅助化工过程设计) 应用软件, 从不同的角度进行优化设计。

目前, 在我国的化工设计部门, 也已注意使用 CAPD 方法, 在许多知名的化工或石油化工设计院中, 不但均已购置了小型或中型计算机, 提供了进行 CAPD 的硬件环境, 而且购置了如“ASPEN”或“PROCESS”类型的 CAPD 的应用软件, 具备了软件使用环境。可以预见, 我国的化工设计也必将开始新的飞跃。计算机辅助化工过程设计与分析已成为“化工设计”的基本手段。

为使读者能够掌握“化工设计”的全貌以适应现代化建设的需要, 本书不但简要地介绍了我国现行有关化工设计的规范、方法和程序, 而且试图阐明采用计算机辅助手段的现代化化工设计的基本原理——现代过程系统工程方法, 在设计实践中两者有机地融合为一体。

为了全面介绍化工工艺过程设计与化工厂整体设计的基本内容、基本原理、程序与方法, 本书共安排了 11 章内容。第 1 章介绍了现代化工过程工程学的核心内容与化工工程师的光荣使命及责任。第 2 章概述了化工厂整体设计内容与程序。第 3 章综合阐述了进行设计的基本运算——物料衡算与热量衡算的各种策略与方法, 其中包括简化运算与计算机辅助运算。第 4 章较为详细地论述了化工过程合成的基本法则, 其中包括反应、分离、热交换网络、精馏塔网络、能量集成与质量集成合成方法与准则, 还特别介绍了间歇过程合成的优化方法。第 5 章重点讨论了过程可靠性、安全性与风险性分析的方法, 以及它们在过程合成方案优化中的意义, 还简要介绍了现代能耗分析与评价方案——有效能分析法以及产品生命周期分析与评价方案。第 6 章简要总结了化工管路的流体力学设计法。第 7 章较详细地介绍了对设计进行经济分析与评价的基本原理与方法, 特别是其中包括了环境影响的成本分析, 并结合大型事例进行讨论。第 8 章探讨了过程控制的意义与描述方法。第 9 章介绍了安全工程与生态工业系统, 在化工过程设计中要考虑维护化学过程安全, 保护环境。第 10 章综合论述了化工设计的工具——化工应用软件的现在与未来, 并为读者提供了一些常用的化工实用软件。第 11 章为了融会贯通前几章的内容特提供一个大型的实例设计。在附录中, 还为读者提供了一些实用的设计基础数据源与实用设计软件表仅供参考。本书附送光盘一张, 主要内容包括热交换网络、ASPEN PLUS 计算实例、PROCESS II 计算实例、CHEMCAD 计算实例。

本书第 1、5、9 章由王静康编写; 第 2、3 章由张美景编写; 第 4、6 章由王永莉编写; 第 7 章由尹秋响编写; 第 8 章由侯宝红编写; 第 10、11 章由龚俊波编写。

本书可作为化工类专业大学本科与研究生教材。对于本科生, 限于学时, 可重点学习第 1~5 章的内容; 研究生可继续深入学习其他章节。本书亦可供化工、石油等行业的工程技术人员参考。

本书编写过程中, 得到中国寰球工程公司伍宏业设计大师的指导并审阅全稿, 以及胡健副总工程师的热情帮助, 在此特表谢意。

主 编 王静康

副主编 张美景

2005 年 12 月

目 录

第1章 化工过程设计	1	2.3.6 化工管路设计	36
1.1 现代过程工程	1	2.4 整套设计中的全局性问题	36
1.2 绿色化学科学与工程准则	2	2.4.1 厂址的选择	37
1.3 化工过程设计的基本内容	3	2.4.2 总图布置	38
1.4 化工过程设计的深化改革	6	2.4.3 安全防火与环境保护	40
1.4.1 工艺专业部	6	2.4.4 公用工程	43
1.4.2 工艺系统专业部	6	2.4.5 自动控制	44
1.5 计算机辅助化工过程设计的基础——化工 过程系统工程	7	2.4.6 土建设计	44
1.5.1 计算机硬件发展	7	2.5 化工厂设计的部分参考资料	45
1.5.2 化工过程系统工程——计算机辅助 设计软件的进展	8	参考文献	45
1.6 工程伦理学与责任关怀准则	11	习题	46
1.6.1 工程伦理学	11	第3章 物料衡算与热量衡算	47
1.6.2 责任关怀	11	3.1 简单的物料衡算	47
参考文献	13	3.1.1 简单的衡算模型	47
习题	13	3.1.2 混合器和分离器的物料衡算	48
第2章 化工厂设计概述	14	3.1.3 具有化学反应的物料衡算	49
2.1 化工设计的工作程序	14	3.1.4 简单的过程计算	50
2.1.1 基本建设程序	14	3.1.5 再循环问题的简单代数解	59
2.1.2 项目建议书	14	3.2 带有循环流的物料衡算	61
2.1.3 可行性研究	15	3.2.1 迭代法求解再循环问题	61
2.1.4 我国投资体制的改革及当前的 经济总量	16	3.2.2 非迭代法求解再循环问题	63
2.1.5 计划任务书	17	3.3 热量衡算	68
2.1.6 设计阶段	18	3.3.1 基本热量衡算	68
2.2 工艺包设计	18	3.3.2 热量与物料衡算	69
2.2.1 工艺包设计概述	18	3.4 化工工艺流程中的物料衡算与热量 衡算	72
2.2.2 工艺包设计的内容	19	3.4.1 一般计算策略与方法	72
2.2.3 工艺流程图及工艺流程说明	19	3.4.2 带有循环流的物料衡算与热量 衡算	77
2.2.4 工艺设备数据表及工艺设备表	20	3.5 计算机辅助过程物料衡算与热量 衡算	85
2.2.5 工艺包设计的工作程序	20	3.5.1 序贯模块法求解的策略	85
2.2.6 工艺包阶段各专业的条件关系	22	3.5.2 联立方程法求解的策略	89
2.3 化工工艺设计	22	3.6 当代热动力——工艺工厂 (Heat Power-Process Plant) 的热量平衡	96
2.3.1 化工工艺设计内容	24	符号说明	97
2.3.2 工艺设计的初步设计的内容和 程序	24	参考文献	97
2.3.3 工艺施工图设计的内容和程序	24	习题	98
2.3.4 初步设计的设计文件	24	第4章 流程组织与合成	101
2.3.5 工艺施工图设计文件	31	4.1 过程合成	102

4.1.1 过程合成的事例分析	102	5.3.3 事例分析	204
4.1.2 能量的管理与组合	114	5.4 风险性分析与评估	209
4.1.3 最佳操作时间表的安排	114	5.4.1 危害性评估	209
4.2 反应的合成	114	5.4.2 剂量反应	210
4.2.1 反应途径的合成	114	5.4.3 暴露性评价	212
4.2.2 反应器的设计问题	120	5.4.4 风险性表征	214
4.2.3 进入系统物料的预处理	122	5.5 产品生命周期分析与评价	215
4.3 分离过程的合成	122	5.5.1 生命周期的分析评价	216
4.3.1 分离方法的选择	123	5.5.2 生命周期影响评价的过程	220
4.3.2 多组分混合物分离顺序的合成	125	5.5.3 评价	222
4.4 热交换网络的合成	135	5.5.4 生命周期分析应用	224
4.4.1 基本概念与热交换系统的表示 方法	135	符号说明	227
4.4.2 流股的复合曲线、窄点与热交换 网络的最小能耗	137	参考文献	227
4.4.3 窄点法设计最小能耗的热交换 网络的原则	140	习题	228
4.4.4 能耗与设备投资相互消长的权衡 与最少搭配数	141	第6章 化工管路的流体力学设计	232
4.4.5 热交换网络的设计	143	6.1 工艺管路的设计原则	232
4.5 过程能量集成	147	6.1.1 经济管径的选择	232
4.6 过程物质集成	148	6.1.2 允许压力降对管路设计的要求	233
4.6.1 源-阱关系图	149	6.1.3 工艺控制条件对管路设计的 要求	233
4.6.2 流股离析、混合和循环再利用的 优化策略	155	6.1.4 腐蚀性、安全规定及管路规格的 要求	233
4.6.3 质量交换网络合成	158	6.2 管路流体力学设计的基础	234
4.7 批处理过程的过程合成	165	6.2.1 管路流体的机械能衡算与伯努利 方程	234
4.7.1 批处理过程	165	6.2.2 管路流体力学设计的基本问题及 计算步骤	236
4.7.2 过程合成的最佳化	166	6.3 管径的计算	236
4.7.3 多产品工厂事例分析	173	6.4 管路压力降的计算	237
符号说明	177	6.4.1 流体摩擦阻力降的计算	237
参考文献	178	6.4.2 管路网络压力降计算	243
习题	179	6.4.3 单相流管路压力降计算	244
第5章 化工过程分析	183	6.4.4 气-液两相流管路压力降计算	250
5.1 系统可靠性与可靠度分析	183	6.4.5 浆液流的管路压力降计算	254
5.1.1 系统的可靠度	183	6.4.6 水锤问题	258
5.1.2 过程利用率, 并联备用件的经济 合理性分析	186	6.5 管路流体力学设计的计算机应用	259
5.2 安全性及损失的预防	187	符号说明	260
5.2.1 危险率分析与描述方法	188	参考文献	261
5.2.2 燃烧和爆炸指数 (FEI)	189	习题	261
5.2.3 故障树分析	191	第7章 经济分析与评价	262
5.3 化工过程的能耗分析与评价——有 效能(焓)分析及其应用	194	7.1 经济结构与投入产出模型	262
5.3.1 有效能(焓)	195	7.1.1 基本原理	263
5.3.2 通用物系的有效能分析式	200	7.1.2 用于经济分析和物料衡算的企业 投入产出表及其数学模型	265
		7.2 企业投资及成本估算	268
		7.2.1 投资	269

7.2.2 产品成本与费用	275	9.1.4 安全设计的分工	356
7.2.3 环境成本的评估	278	9.1.5 系统安全工程	356
7.3 销售收入、税金和利润	286	9.2 单元操作的绿色环保化措施	358
7.3.1 产值和销售收入	286	9.2.1 单元操作物料选择的环境污染 预防	358
7.3.2 税金	286	9.2.2 化学反应器的环境污染预防	360
7.3.3 利润	287	9.2.3 分离设备中的环境污染预防 措施	368
7.4 经济评价	287	9.2.4 贮罐和挥发源的污染预防措施	374
7.4.1 资金的时间价值	288	9.2.5 污染防治评估与 HAZ-OP 分析的 集成	377
7.4.2 现金流量图	289	9.2.6 过程设计与风险性评估相集 成——案例研究	378
7.4.3 经济评价指标及方法	290	9.3 工业生态系统	380
7.4.4 通货膨胀的影响	296	9.3.1 化工内部工业生态系统及其集成 网络的建立	381
7.4.5 项目方案的评价与选择	298	9.3.2 生态工业园区及其大系统过程 集成	383
7.4.6 项目的风险和不确定性分析	299	参考文献	386
7.4.7 经济评价实例	303	习题	387
符号说明	315	第 10 章 设计的工具——化工设计	
参考文献	316	软件	388
习题	317	10.1 化工流程模拟软件	388
第 8 章 化工过程的自动控制	319	10.1.1 发展概述	388
8.1 工艺流程图简介	319	10.1.2 过程模拟软件系统的结构	390
8.2 化工典型设备的自动控制	322	10.1.3 化工过程动态模拟概述	392
8.2.1 泵	322	10.2 过程模拟系统应用软件介绍	393
8.2.2 换热器	324	10.2.1 软件概述	393
8.2.3 蒸馏塔	325	10.2.2 ASPEN PLUS 介绍	395
8.2.4 反应器	326	10.2.3 PRO/II 在化工设计及模拟中的 应用	407
8.3 过程设计与过程控制的相互作用	327	10.3 其他化工设计软件简介	411
8.3.1 概述	327	10.3.1 化工装置设计软件 PDS	411
8.3.2 控制系统配置	329	10.3.2 化工过程模拟软件 CHEMCAD 和 HYSYS	413
8.3.3 定性的大系统控制系统集成	333	10.4 小结与展望	414
8.4 控制系统设计介绍	336	参考文献	415
8.4.1 简单控制系统	336	习题	415
8.4.2 复杂控制系统	338	第 11 章 化工设计实例	416
8.4.3 先进控制系统	343	11.1 PRO/II 软件设计脱甲烷工段	416
8.4.4 过程控制与系统优化	345	11.1.1 设计任务	416
8.5 计算机过程控制系统设计实例	346	11.1.2 入口物流条件	416
8.5.1 控制系统设计	346	11.1.3 工艺流程图	416
8.5.2 控制系统软硬件设计	349	11.1.4 PRO/II 软件模拟过程	416
8.5.3 生产现场运行效果	350	11.2 裂解炉辐射段炉管设计	422
符号说明	351	11.2.1 设计任务	422
参考文献	351		
习题	352		
第 9 章 安全工程与生态工业系统	353		
9.1 安全工程	353		
9.1.1 重大安全事故的分析	353		
9.1.2 安全工程	354		
9.1.3 化学工业安全设计——实现安全 工程的首要措施	354		

11.2.2 公式及数据	423	参考文献	477
11.2.3 计算步骤	424	习题	477
11.2.4 初步物料衡算	427	附录	478
11.2.5 设计计算	428	附录 A 主要物理量的单位换算	478
11.3 大型化肥厂工程项目设计中蒸汽 透平机效率的计算	431	附录 B 空气的物理性质	482
11.3.1 透平机蒸汽消耗	431	附录 C 水的物理性质	483
11.3.2 透平机效率计算	431	附录 D 水在不同温度下的黏度	484
11.4 年产 1500t 乙酸乙酯车间工艺设计 ...	434	附录 E 某些液体的主要物理性质	485
11.4.1 设计任务	434	附录 F 某些气体的主要物理性质	487
11.4.2 生产方式的选择	435	附录 G 互联网上化学物质性质数据库	488
11.4.3 初步物料衡算	435	附录 H 常规大气污染物和国家大气环境 质量标准(美国)	490
11.4.4 生产工艺流程图设计	441	附录 I 国家工业废物趋势数据资源 (美国)	490
11.4.5 设备设计和热量计算	442	附录 J 化工管路流体力学计算数据	491
11.4.6 修正后的物料衡算	470	附录 K 化工设计软件简介	495
11.4.7 生产工艺流程图	473		
符号说明	476		

第 1 章

化工过程设计

1.1 现代过程工程

21 世纪人类面临着资源、能源及环境的严峻挑战，为了全球的可持续发展，必须大力发展循环经济，建设节约型社会；必须发展资源节约型、能源节约型及环境友好型的现代制造业。

现代制造业包括离散型与过程工程型制造业。广义的化工过程工程概括了我国俗称的化工、轻工、食品加工、功能制品加工及制药等多种工业领域的过程，图 1.1 给出了 20 世纪末国际大化工涵盖的主要部分及各部分 GDP 的百分率，充分显示了过程工程在国民经济产业发展中的重要地位。化工过程是上述工业群复杂系统的核心部分。由图可知，在现代化学工业中，“产品工程”发展迅速。所谓“产品工程”就是研究、设计并制造各种精细化、个性化及功能化的产品。这类产品的 GDP 值的百分率已占据重要地位，据统计 20 世纪末，各种精细化、个性化及功能化的产品的 GDP 已占美国大化工 GDP 的 79%，欧洲经济共同体（简称欧共体）也有同样的发展趋势。

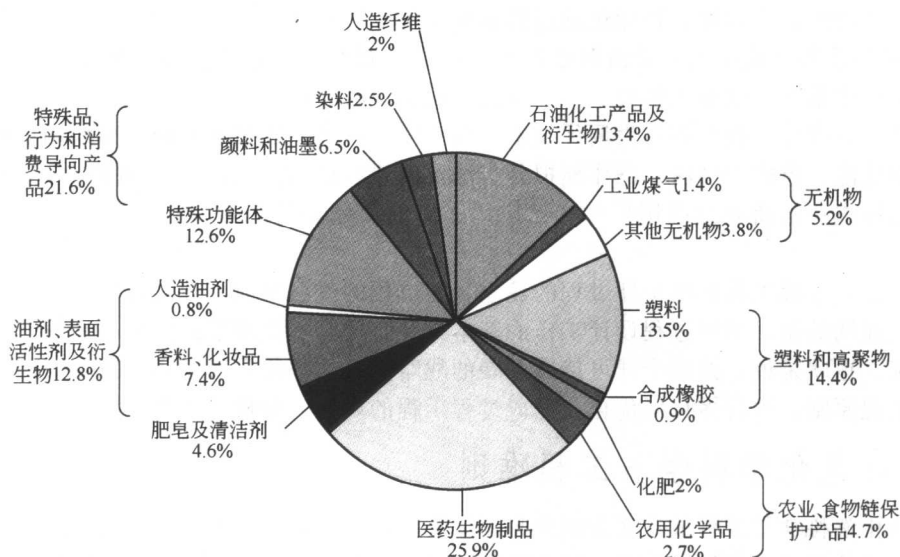


图 1.1 国际化工涵盖的主要部分及各部分 GDP 的百分率

作为核心的过程工程产业，化学工业在 21 世纪仍是全球经济中强大的基础产业之一：发达国家 1990~1999 年化学工业 GDP 平均增长率是其全部工业 GDP 平均增长率的 2.69 倍。化学工业在 2002 年的年收益增长率仍高于全球 GDP（国民生产总值）增长率。根据英国化工协会对全球化学品的统计和预测，2010 年将达到 2.04 万亿美元（是 2000 年的 1.42 倍），仍将一直保持较高的平均增长率。美国化学过程工业 GDP 持续保持占世界化工总值的 30% 左右，它是美国少数具有贸易顺差的制造业之一，它获得的附加值占美国全部制造业

的1/3。根据联邦政府统计,在近六年中对化工 R&D 的投入,1 美元可获得 2 美元的收益,即税后年收益率大于 17%。中国国民经济 GDP 已居全球的第 4 位,大化学工业也一直以较高的速度发展,但目前化工业人均 GDP 仍低于世界人均水平,不能满足我国经济发展的需求,仍需化工界人士为我国化工工业的发展发愤图强,开拓创新。

化工过程工程发展的方向是绿色过程工程,以及实现过程工程与产品工程的结合。过程工程概括了建立和定量地分析整个工厂的工艺过程流程的全部工作内容,而且要求所建立的过程流程必须是技术上可行、经济上合理、符合安全条例、环境友好、易于操作的实体。一般来说,过程工程包括过程开发、过程设计和过程改善三个部分。过程工程的发展与化工过程系统工程的方法是密不可分的。

① 过程开发是将实验室研究成果实现工业化的必要步骤,是指过程的概念设计及研究的定向评价。其主要目的是找出尽可能优化的工艺流程及设计条件,其内容可分为以下几个方面:

- ④ 研究部门所研究的过程开发及评价;
- ⑤ 引进技术的过程评价;
- ⑥ 新过程的基准规模或中试规模的开发及评价。

实践证明,运用现代过程系统工程的方法可以更有效及高效率地完成概念设计。

② 过程设计一般包括两方面内容:初步过程设计与最终过程设计。最终过程设计可提供建立过程所需的全部文件与图纸。过程设计一直是过程系统工程的主要应用领域,包括工艺流程的选择、物料及热量平衡、设备尺寸计算、投资与成本估算等。采用过程系统工程这一工具有助于以较高的效率做出优化设计。目前计算机辅助设计已日趋成熟,但仍有待于进一步开发多功能、高精度、智能化的过程系统工程应用软件。

③ 过程改善(或优化)是面对已经建成的化工过程,对它进行过程分析、寻找瓶颈因素、优化操作策略、改革工程设施等,以实现优化挖潜的目的。

生产过程优化的技术亦称为调优技术,有离线与在线调优技术两种。离线调优技术主要有统计调优法、模式识别法、操作模拟分析法及装置模拟与优化法。20 世纪 90 年代在线优化技术已形成一些商业化应用软件,已应用于炼油与乙烯等工业过程,并取得了较显著的效益。

简言之,过程工程包括全新过程的建立和老过程的改造两大部分内容。

应该强调的是,指导过程设计工作的基本方针是资源、能源节约法则、环境友好法则和经济法则。也就是说,按照全球可持续发展的战略需求,必须发展循环经济,按照绿色化学科学与工程原则,进行多目标优化,完成过程工程的设计、分析与评价。

1.2 绿色化学科学与工程准则

绿色化学科学与工程被定义为减少与消除有害物质对人类健康与环境的威胁所做的化学过程与产品的设计、开发和生产。绿色化学化工作为应对 21 世纪挑战、发展循环经济、保持社会可持续发展的关键技术基础,已成为 21 世纪世界科技前沿的热点。1995 年美国总统一克林顿宣布设立“总统绿色化学挑战奖”;日本政府规划了在 21 世纪重建绿色地球的“新阳光计划”;英国皇家化学会主办的国际性杂志《绿色化学》于 1999 年 1 月创刊;澳大利亚创建了绿色化学期刊;在美国 2003 年公布的 21 世纪化学化工发展战略中,再次强调了绿色化学科学与工程的重要性。图 1.2 列出了绿色制造产业与社会可持续发展的关联示意图。

绿色化工过程工程是以“减量化、再利用与资源化”(即 3R)为原则,旨在减少或消除有毒物质的使用与生成;减少废弃物并使废弃物最大限度地转化为再生资源;尽可能延长

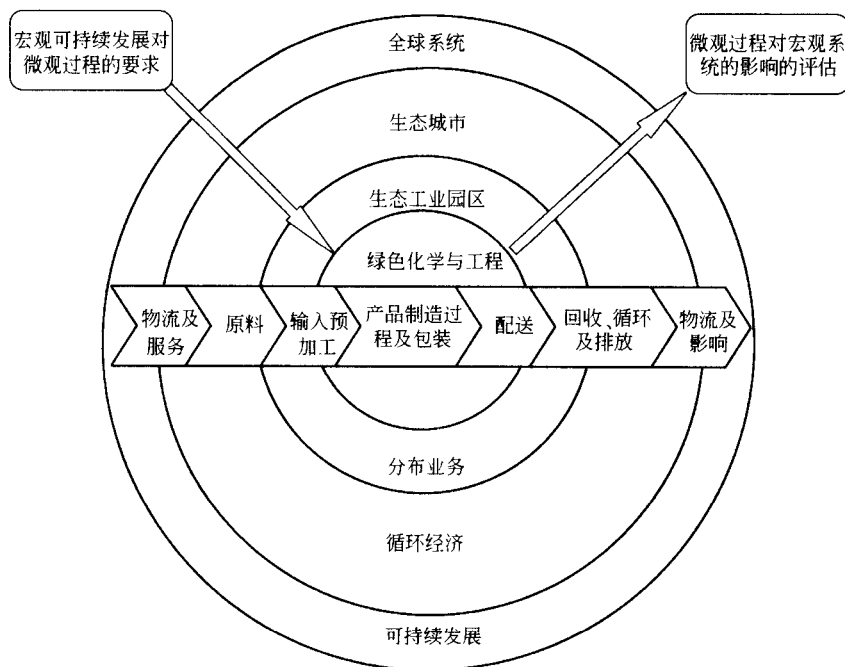


图 1.2 宏观可持续发展与微观过程关联示意图

产品使用周期的化工生产过程设计策略与方法。鉴于生产化工产品的合成路线多种多样，设计工艺流程需要对反应原料、溶剂、反应路径和反应条件进行筛选，设计方案的选择对化工过程的总体环境性能有显著影响。理想的化学反应要具备下列特点：操作简便，安全，高收率和高选择性，节能，使用可再生和可循环利用的试剂与原料。通常，化工过程设计难以同时满足所有的目标，按照多目标寻求优化与平衡化工过程恰是化学家和化学工程师的任务。目前已建立了关于绿色化学的广泛知识体系，并涌现了一批定性和定量的设计软件工具可供参考，将在第 10、11 章中详细介绍。

美、英等国在 20 世纪绿色产业发展过程中，已经历了三个阶段。第一个阶段（20 世纪 70 年代）：这时的主要驱动力是环保法规。解决方案是末端处理；企业三废处理成本愈来愈高。例如，日本在此时期，环境的清洁化措施占生产总成本由 5% 提高到 18%。第二个阶段（20 世纪 80 年代）：这时的主要驱动力是预防污染及清洁生产，解决方案已转向从生产源头减少污染的产生。第三个阶段（20 世纪 90 年代）：依据可持续发展原则，将环境性能能进一步集成到公司的业务策略方针中去。据美国环保部门 KPMG 对 1100 家公司进行调查，每年公司有环境报告的，由 1993 的 13% 提高到 1999 年的 59%，实现了全系统优化。现今，美、英等国的化工规划已向生态化产业园区目标迈进。加速绿色化工产业建设，与国际接轨，由末端治理向绿色过程设计的源头防治生产工艺转变，才能保证我国实现循环经济，保证社会的可持续发展。

1.3 化工过程设计的基本内容

过程设计是过程工程中极有意义的一个阶段。通常是指继过程开发研究之后直至完成课题全部设计图纸的阶段。过程设计阶段是总结过程开发阶段的全部信息，进而完成全部过程的合成（或过程的改善）方案。因而，从事过程设计的设计者必须全面掌握过程开发的工作内容，分清所开发的内容哪些是属于成熟的、有操作经验的技术；哪些是没有经验的、不具

备工业实践条件的技术。对于后者要慎重地对待，应在使用传统的设计方法及常用的数学模型，做进一步考察之后再下结论。

在现代过程设计中，一个重要概念就是，寻找过程的最优设计方案。这一点在过去是难以设想的，20世纪四五十年代逐级放大的中试过程，方案有限，谈不上多方案的比较；到了五六十年代，虽然出现了台式计算器和计算尺，但也无法应对庞大工作量的多方案寻优计算。20世纪70年代以来大容量计算机的问世以及化工过程系统工程的进展及其模拟与优化软件的出现，为过程设计提供了现代化工具，使过程设计有了实现优化的可能性。过程设计的优化过程，就是应用过程的数学模型在计算机上进行迭代计算，以求最终寻得优化设计方案的历程。优化的目标函数通常是多目标函数，其中包括经济指标和能耗资源利用率以及环境指标。

现代化工过程设计区别于20世纪的一个显著特点还在于，除重视每种产品的单一过程（子系统）设计以外，还特别重视整个大系统中不同子系统之间的系统集成，即大系统的能量集成、质量集成，其中也包括公用工程的集成，如水的集成优化等，系统集成的优化目标在于能量与资源消耗的最小化及保证生产过程与环境的安全。

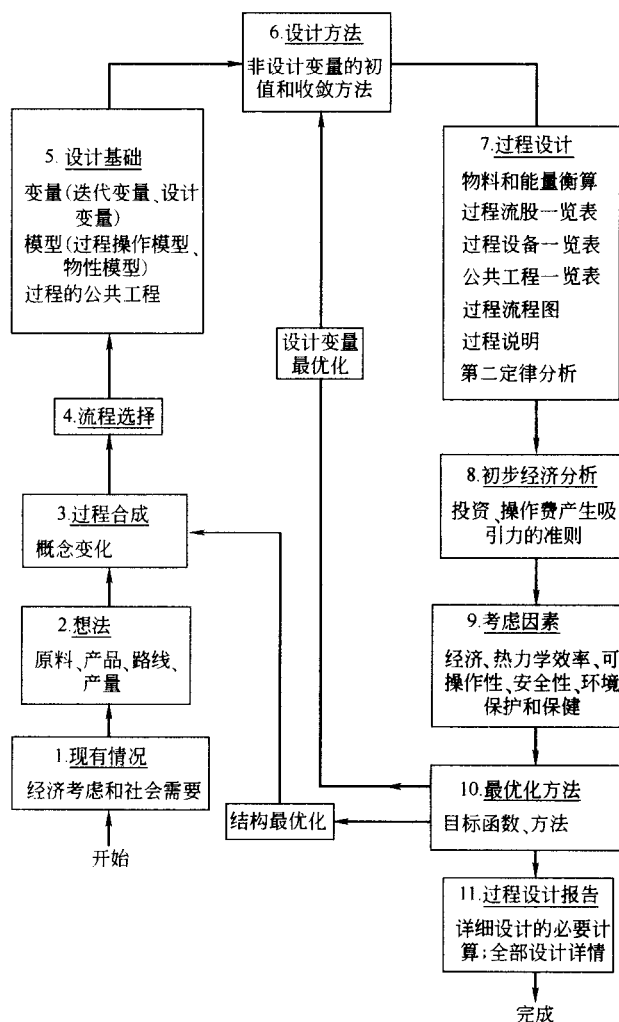


图 1.3 过程设计的主要步骤

图 1.3 给出了国外现代化工过程设计的主要步骤。在数字计算机问世之前,模型常指物理模型,而将用来设计和模拟过程操作的数学模型称为“方法”,它可能是变量间的图形关系,也可能是用于逐个求解的方程。如图 1.3 所示,在连续稳态化工过程的设计中可能包括许多迭代和积分计算,以适应单元操作数学模型求解的需要。通过对现状(社会、经济、技术)的分析,确定了所采用的原料和为得到所需产品应采用的化学路线,这就是图中所示的第 1 步和第 2 步。第 3 步为过程合成,可产生一系列的概念流程。第 4 步通过定量比较(包括经济方面的因素)选择最佳过程流程。第 5 步建立设计基础,包括确定设计变量和迭代变量;选择单元操作及所需物性的数学模型;选定公用工程设施。第 6 步确定设计方法,包括非设计变量初值的选择及收敛方法的确定。第 7 步通过物料和能量衡算列出过程流程一览表、公用工程一览表,绘制过程流程图。第 8 步对以上的设计结果进行详细的经济分析,估计设备投资和操作费,且按一定的评价准则进行经济吸引力评估。第 9 步进一步考察经济可行性、资源与能源利用、热力学效率、可操作性、安全性、环境影响和保健等情况。第 10 步选用适宜的目标函数用最优化方法对结构参数及操作条件进行优化。优化计算包括两层迭代循环,选用的迭代方法要同时使结构及设计变量得到优化,在过程优化的同时又使衡算式收敛。提交过程设计结果时,必须完成过程设计的报告,它包括过程设计所产生的项目、设备设计的详情,如反应器结构的详情、精馏塔板结构详情、蒸发和冷凝器设计所需的加热和冷却曲线等。

现对设计步骤做如下分析,以明确设计工作的要点。

(1) 过程的选择

用标准的单元操作实现过程合成是关键的一步。在过程开发阶段化学家们大多关心化学路线和反应器形式的选择,对于纯化工产品的分离步骤及反应试剂的再循环常常考虑的不多。纵使有所考虑也大多限于实验室的需要,很少顾及工业实践的需要。例如在小型实验中,分离手段常选择溶剂萃取操作(对溶剂的易燃性、毒性或成本考虑的很少),而在工业实践中,往往是精馏、结晶等分离方法用得更多些。所以在过程设计中应认真考虑全过程的优化合成策略问题。

此外,对于过程开发中提出的多种方案,在过程设计阶段应予以认真地评比,以选择出最佳方案。

(2) 生产能力的选择

工厂的生产能力必须在设计的早期阶段予以固定,因为很多工作必须在固定它的前提下才能进行。但是确定生产能力却不是一个简单的问题,因为要涉及对未来市场及竞争对手日后情况的预测。而这种预测常常有一定的不确定性,因而增加了问题的复杂性。

(3) 过程结构的选择

过程合成完毕,过程所需的单元操作已确定,该如何把这些单元操作联系在一起,组成最佳的过程网络呢?这是过程结构问题。由于这个问题的复杂性,目前还常常使用半经验、半数模的“事例研究”的优化方法求解。另外,动态规划、整数规划、数学规划法、人工智能法、直观推断法、多目标进化算法等方法亦已开始用于该系统的优化问题上。

(4) 过程条件的选择

继过程合成、生产能力选择以及过程结构的选择之后,还应选择最佳的过程条件——温度、压力、浓度、停留时间等。它对过程的经济合理性与环境友好以及安全性均有较大的影响。

(5) 其他条件的选择

设备的初估尺寸、备用件选定、可操作性、安全性、过程控制、外围设施配置等也都应



尽可能地按最优化的方案予以确定。

综合上述五个要点可见,过程设计的核心目标是要确定出一个综合优化的设计方案,使其各个方面皆能处于优化状态。正如美国国家顾问团在他们的著作《《化学工程的新领域》》中指出的那样,“过程设计的基本目标是:确定最佳流程与设备单元及其间的最佳组合;寻找最佳操作条件,在此条件下,能使产品以最低成本,达到所希望的产率。同时还必须考虑安全与环境保护的必要约束条件,过程设计是一个复杂的问题,不但要进行定量计算,而且还要处理大量的信息,进行严密的逻辑推理,引用专家的经验。”现有许多类型的过程合成,还处于半科学、半艺术的阶段,确实需要参照专家的经验求解。

1.4 化工过程设计的深化改革

众所周知,工程设计是需多个专业合作完成的,其中又是以工艺专业为核心进行的。随着工厂设计的大型化及我国自主创新设计要求的提出以及与国际工程设计的深入接轨,近年来国内部分大型工程公司已将原来的工艺专业深化改革为“工艺”及“工艺系统”两个专业部。我国的设计部门最早的工艺专业部其设计任务涵盖了从确定工艺方案、设计流程一直到全部工艺配管图的完成,随着20世纪80年代开始引进国外化工技术及与国外工程公司接触,才将原工艺设计工作中的配管设计(主要为机械设计内容)从工艺中分离出来成为一个独立的专业部,近年来又进一步将“工艺”专业部分成“工艺”和“工艺系统”两个专业部,其目的在于使两个专业部的人员更加专业化,以期提高设计质量和设计的劳动生产率,它要求“工艺”专业部人员更集中精力于工艺流程的改进及技术创新;要求“工艺系统”专业部人员更专注于“工程化”的能力的提升,以共同完成不断改进的工艺设计任务。

1.4.1 工艺专业部

工艺专业在设计中主要要求完成工艺流程的模拟计算,工艺流程图的绘制以及和工艺过程密切相关的公用物料流程图,提出初步的设备平面布置图和主要设备条件。总地说来,工艺专业部应承担以下四方面的工作。

- ① 承担本设计项目各阶段工艺专业设计工作。
- ② 参加有关项目的合同谈判等设计前期工作中工艺专业的工作。
- ③ 参加工艺技术的开发,按照合同规定,完成科研成果的工艺设计工作。
- ④ 其他任务:包括为了提高工作效率对引进的计算机应用软件的二次开发,以提高CAD的应用水平;承担工艺专业的基础性工作,如编辑设计、技术数据手册、工程的统一规定等;及时收集了解国内外相关工艺技术领域的技术新进展,并不断提出所从事工艺的改进和创新等。

1.4.2 工艺系统专业部

一般是将前述工艺部完成的工艺流程设计进一步完善,以达到“工程化”要求。首先要完成各设备的结构尺寸计算,完成工艺管路及仪表流程图(PID)和公用物料管路和仪表流程图(UID),并给各专业提出设计条件。这些PID和UID的设计又是分为六个版次来完成的。总地说来,其工作内容如下。

- ① 作为基础工程设计阶段的主导专业,负责将化工工艺设计转化为工程设计成品,在仪表专业参与下编制出版PID及UID,作为配管专业进行配管研究和详细工程设计的主要依据。