

上海 普通高校“九五”重点教材



化工过程设计

● 倪进方 主编

化学工业出版社



世界银行贷款资助项目 上海市教育委员会组编

上海 普通高校“九五”重点教材

化 工 过 程 设 计

倪进方 主编

化 学 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工过程设计/倪进方主编. —北京: 化学工业出版社,
1999. 8

ISBN 7-5025-2571-8

I. 化… I. 倪… II. ①化工设备-设计②化工过程-过
程控制 N. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 和 20994 号

上海 普通高校“九五”重点教材

化 工 过 程 设 计

倪进方 主编

责任编辑: 陈 丽

责任校对: 凌亚男

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

*

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 391 千字

1999 年 8 月第 1 版 1999 年 8 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-2571-8/TQ · 1146

定 价: 30.00 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

前 言

编写本书的主要目的是为高校化工专业本科高年级学生和研究生提供一本化工设计和过程分析与合成课程的教学参考书。但本书的内容对于从事化工设计,特别是化工过程设计的技术人员也有参考价值。

对于绝大多数化工类高校毕业生来说,到工作岗位后都会遇到与设计基本知识有关的各种问题。对于分配到设计单位的学生,需要学习设计基本概念这一点是不言而喻的,即使是分配到以应用研究和开发研究为主的单位或工厂的毕业生,同样需要熟悉设计的原理、概念和方法。

原化工部新技术开发管理条例规定研究阶段的成果应以基础设计的方式提供,因为开发的目的是将科研成果转化为生产力,开发成果应包括能满足设计所需的一切技术要点。能否做到这点,除了研究人员的理论素养和是否掌握一正确的开发方法以外,了解设计的原理、概念和方法是个重要因素。

工厂的技术人员要管理好自己主管的部分必须对该部分的设计有清晰的了解,即了解流程和各工艺参数是怎样确定的,设备的能力和裕度,生产成本由哪几项构成,各工艺参数变化对原材料消耗、能耗的影响等,再结合现场实际生产情况,就能正确判断生产是否有进一步改善和提高的可能。

因此,掌握化工设计的基本概念和方法能帮助学生从高等学校走向社会时能适应新的工作岗位的需要,迅速实现从大学生向工程师的转化;而对在职的工程技术人员来说则能帮助他们提高工作的质量。

设置化工设计课程的目的是帮助学生学会综合运用各种已学过的知识,系统地分析问题和解决问题。学生在二三年级已学习了化工热力学、化工原理、反应工程等各种主课,这些课程有不同的教学要求;为了清楚阐明本课程的主要原理和概念,对不属本课程教学大纲要求

的内容，其例题和习题往往作各种简化，这样做是必要和正确的。但是为了培养学生解决实际问题的能力和树立经济概念，应该有一门培养学生综合和分析问题能力的课程。它基于工程科学，但重点是应用，设计课就是这样一种综合性质的课程，因此也可以说本书的目的是帮助学生认识和进入真实世界，树立判断问题的能力和信心。

为了达到上述目的，必须防止两种偏向，第一种偏向是教材内容如同设计手册，学生可以通过教材了解设计的具体业务，如设计规定、资料和数据等，但没有阐明设计的本质和思考方法，仅是一本有用的工具书；另一种偏向是叙述新颖但目前尚不成熟的设计方法，因而对实际的设计过程指导意义较少。为避免这两种片面性，本书致力于介绍以理论为指导，以流程模拟系统为工具，先进而实用的设计思想和方法。

本书的主要内容分为四部分。第一部分是第1、2、7章，从工艺工程师的角度，介绍了达到当代先进水平的化工装置设计的内容，使读者对设计的性质、工作内容和步骤有正确而全面的了解。第二部分是第3、4、5、6章，重点介绍流程的组织 and 参数选择，即介绍从过程合成和分析的观点出发，用化学工程各学科知识去进行结构优化和参数优化的工作，并通过案例研究具体说明。第三部分是第8章过程设计案例。第四部分是附录，介绍设计文件的内容和图面表示以及一些常用的设计规定，便于读者查阅。

全书由倪进方确定章节目录，具体的编写分工为：第3章第1、2、3节由朱开宏编写；第4章的第7节由杨丽编写，其余各节由朱世才编写；第6章第2节由费志浩编写；其余各章节均由倪进方编写。

本书是在华东理工大学出版社1994年出版的《化工设计》的基础上编写的。《化工设计》出版前，将其部分内容曾作为常规高校和成人高校的化工设计和系统工程的教材使用，取得较好的教学效果，出版后也受到一些从事化工设计和过程开发的技术人员的欢迎。但是1994年他是有不足之处的：第一是包涵的内容极其广泛，而本书的内容偏重过程设计，对详细工程设计的内容叙述较少，因此将书名改为“化工过程设计”更为恰当，阅读本书是今天的和未来的化工过程工程师，

其中详细设计的内容是作为一个称职的化工过程工程师应该了解的内容；第二是缺乏包括反应、传热、分离等各个单元和全过程综合的例子，因此本书将第8章的内容从物性数据计算改为“化工过程设计实践”，把在第3、4、5、6章分别叙述的结构优化和参数优化的方法，通过两个例子加以综合，使读者能更具体地对“设计过程是个交替进行过程合成与分析，不断作出选择或决策，修改原有设想的迭代过程”这一点有所了解。

在本书编写工作中，谢声礼教授对第8章环氧丙烷过程概念设计部分进行审阅并提出修改意见，在此特向谢声礼教授致谢。此外，向我的学生杨丽、林海和张晓敏表示感谢，他们为本书的再版作为大量绘图、打印等繁琐的工作，费去他们不少宝贵的时间，没有他们的帮助和支持我是无法在规定的时间内完成任务的。

由于化工设计涉及的知识面非常广泛而编著者的知识和经验有限，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

作者

1999年4月

目 录

第 1 章 化工设计概念	1
1.1 设计要求	1
1.2 设计性质和过程	2
1.3 设计种类	5
1.3.1 概念设计	6
1.3.2 中试装置设计	6
1.3.3 基础设计	7
1.3.4 初步设计	9
1.3.5 详细设计	9
1.4 项目组织	9
1.5 设计内容	10
1.5.1 设计原则	10
1.5.2 设计基础	11
1.5.3 物料流程图	16
1.5.4 带控制点管道流程图	16
1.5.5 工艺设备设计	20
1.5.6 设备布置	23
1.5.7 管道工程	25
1.5.8 保温工程	33
1.6 安全与防护	36
1.6.1 毒性	37
1.6.2 燃烧与爆炸	38
1.6.3 噪声	46
第 2 章 经济分析与评价	48
2.1 装置投资估算	48
2.1.1 投资组成	48
2.1.2 估算种类	50

2.1.3	估算方法	51
2.1.4	费用指数	57
2.2	单元设备价格估算	59
2.2.1	设备质量	60
2.2.2	压力容器	61
2.2.3	塔设备	62
2.2.4	热交换器	65
2.2.5	常压贮槽	66
2.2.6	离心泵	67
2.2.7	工业炉	71
2.2.8	压缩机	72
2.3	总生产成本估算	73
2.3.1	直接生产成本	73
2.3.2	固定费用	75
2.3.3	工厂管理费	76
2.3.4	销售费用	77
2.4	税金和利润	77
2.5	经济评价的几个基本概念和准则	78
2.5.1	现金流通图	79
2.5.2	金钱的时间价值	80
2.5.3	静态评价方法	90
2.5.4	动态评价方法	92
2.6	风险分析	97
2.6.1	不确定因素的存在	97
2.6.2	灵敏度分析	98
2.6.3	风险型决策分析	102
第3章	反应过程	105
3.1	反应过程设计的评价指标	105
3.2	反应器设计的基本方法	106
3.3	在反应系统设计之前必须掌握的信息	108
3.3.1	化学计量学	108
3.3.2	化学热力学	114
3.3.3	化学动力学	119

3.3.4	催化反应	125
3.3.5	共性数据	125
3.4	过程性质和输出输入条件	125
3.4.1	过程连续或间歇	125
3.4.2	原料的预处理	126
3.4.3	目的产品和产品流股数的确定	126
3.5	反应器选型	128
3.5.1	反应器类型	128
3.5.2	反应器选型方法	130
3.5.3	反应器选型判据	131
3.6	主要工艺参数选择	137
3.6.1	温度	138
3.6.2	压力	140
3.6.3	组成	141
3.6.4	转化率	143
3.7	控制反应热的补充方法	143
3.7.1	溶剂蒸发	143
3.7.2	出口物料循环	144
3.7.3	催化剂稀释	144
3.7.4	惰性稀释剂	144
3.8	反应器网络的配置	145
第4章	换热过程	154
4.1	问题的提出	154
4.2	基本概念	156
4.2.1	$T-H$ 图	156
4.2.2	挟点及最小公用工程用量	157
4.2.3	栅格图	160
4.3	挟点和最小公用工程用量的求取	161
4.4	挟点特性	163
4.5	最小换热器个数的确定	164
4.6	换热网络的合成	166
4.6.1	热端的合成	169
4.6.2	冷端的合成	170

4.6.3	初始网络的合成	171
4.6.4	初始网络的调优	171
4.6.5	$\Delta T_{\min}$ 的选择	173
4.7	伪挟点方法	173
4.7.1	伪挟点的确定	174
4.7.2	α 分配原则	174
4.7.3	实例分析	175
4.7.4	减少流股分割	178
第5章	分离过程	182
5.1	分离过程的热力学效率	182
5.1.1	最小分离功	182
5.1.2	净功耗	184
5.1.3	热力学效率	185
5.2	分离流程的合成	185
5.2.1	分离方案数	185
5.2.2	分离方法的选择	187
5.2.3	分离序列的确定	190
5.3	工艺参数的确定	206
5.3.1	塔压	207
5.3.2	回流比	209
5.3.3	产品纯度或回收率	214
5.3.4	进料的热状态	215
5.4	塔型选择和实际板数的确定	219
5.4.1	塔型选择	219
5.4.2	平衡级计算结果分析	222
5.4.3	理论板数的决定	226
5.4.4	实际板数的决定	227
5.5	分离过程的节能措施	228
5.5.1	多股进料	229
5.5.2	侧线塔	231
5.5.3	中间再沸器或中间冷凝器	235
5.5.4	热泵	237
5.5.5	精馏系统之间的热集成	241

5.5.6 精馏系统与全过程的热集成	244
5.5.7 热与功的集成	248
第6章 流程模拟与优化	253
6.1 流程物料衡算的几个问题	253
6.1.1 计算基准	253
6.1.2 比率系数	254
6.1.3 物流的循环	254
6.1.4 物料的排放	259
6.2 流程模拟的几种方法	262
6.2.1 序贯模块法	262
6.2.2 联立方程法	264
6.2.3 联立模块法	267
6.3 流程模拟软件的用途	268
6.4 流程模拟软件的组成	269
6.4.1 执行程序	269
6.4.2 物性数据库	270
6.4.3 算法子程序	271
6.4.4 成本估算和经济评价	271
6.4.5 单元操作模块	271
6.5 化工过程的自由度分析	273
6.5.1 物流的独立变量数	273
6.5.2 单元模块的自由度	274
6.5.3 流程的自由度	278
6.6 流程模拟的数据输入	280
6.6.1 文件名称	280
6.6.2 单位的选择	280
6.6.3 组分集	280
6.6.4 热力学性质	280
6.6.5 流程	283
6.6.6 进料和循环物流	283
6.6.7 单元模块参数	283
6.6.8 迭代方法和收敛精度	284
6.7 流程模拟计算的几个注意点	286

6.7.1	物料流程的正确描述	286
6.7.2	设计变量的选择	288
6.7.3	设计变量数值的决定	290
6.7.4	逐步扩大流程计算的范围	290
6.7.5	有效地选择单元模块	291
6.8	设计优化的基本概念	292
6.8.1	优化问题的数学表达	292
6.8.2	目标函数	293
6.8.3	决策变量和状态变量	293
6.8.4	等式约束	293
6.8.5	不等式约束	293
6.9	解决最优化问题的几种途径	294
6.9.1	案例研究	295
6.9.2	参数灵敏度分析	295
6.9.3	直接优化法	295
6.9.4	减少待优化的决策变量数	298
第7章	过程控制	305
7.1	控制要求	305
7.1.1	抑制外部扰动的影响	305
7.1.2	使过程在优化的工况下操作	306
7.2	控制系统的设计要点及步骤	307
7.2.1	确定为达到设计要求所需测量的参数	307
7.2.2	选择控制变量	310
7.2.3	确定调节器的调节规律	310
7.3	简单调节系统	312
7.3.1	压力控制	312
7.3.2	液位控制	315
7.3.3	温度控制	318
7.3.4	流量控制	321
7.4	复杂调节系统	324
7.4.1	串级控制	324
7.4.2	分程控制	326
7.4.3	超弛控制	327

7.4.4 选拔控制	328
7.4.5 前馈控制	329
7.5 报警、切断和联锁	330
7.6 安全和操作性能检查	331
第八章 化工过程设计实践	336
案例一 乙烯装置的轻烃分离过程合成	337
8.1 裂解气组成	337
8.2 系统压力	337
8.3 冷冻压缩机各级压力和温度的确定	342
8.3.1 制冷剂的选择	342
8.3.2 丙烯冷冻压缩机物料流程图	342
8.3.3 丙烯冷冻压缩机出口压力的决定	344
8.3.4 丙烯冷冻压缩机各级入口压力的决定	344
8.3.5 乙烯冷冻压缩机一级吸入压力的决定	345
8.3.6 乙烯冷冻压缩机的出口压力	345
8.3.7 乙烯冷冻压缩机中间各级压力的决定	345
8.4 裂解气冷却及脱甲烷塔系统过程合成	346
8.4.1 脱甲烷塔压力的决定	346
8.4.2 脱甲烷塔进料股数和温度的决定	348
8.4.3 脱甲烷及进料预冷系统的热量平衡	353
8.4.4 脱甲烷进料冷却系统换热网络的合成	357
8.5 脱碳二系统的设计	383
8.5.1 工艺参数的确定	385
8.5.2 结构优化	395
8.6 脱丙烷系统的设计	412
8.6.1 工艺特性	412
8.6.2 脱丙烷塔工艺设计	412
8.6.3 方案比较	413
8.7 乙烯冷冻压缩机系统设计	416
8.7.1 冷冻负荷	417
8.7.2 流程拓扑表	417
8.7.3 模拟计算结果	419
8.7.4 其他方案的研究	420

8.8 丙烯冷冻压缩机系统设计	422
8.8.1 冷冻负荷	422
8.8.2 流程拓扑表	423
8.8.3 模拟计算结果	425
案例二 环氧丙烷过程概念设计	427
8.9 年产2万吨环氧丙烷概念设计	427
8.9.1 环氧丙烷过程简介	428
8.9.2 现有装置生产情况	428
8.9.3 过程分析和试验	429
8.9.4 小试流程	430
8.9.5 对小试数据的初步评价	431
8.9.6 流程和工艺参数的改进	434
8.9.7 中试装置设计	436
附录 设计文件	439
1.1 设计说明书	439
1.2 操作说明书	439
1.3 分析规程	441
1.4 工艺设备一览表	441
1.5 设备规格说明书	442
1.6 工艺物料流程图 (Process Flow Diagram)	442
1.7 带控制点管道流程图 (Piping and Instrumentation Diagram)	443
1.8 设备布置图	446
1.9 管道布置图和单线图	446
1.10 管道等级表	446
1.11 配管工程说明	447
附图1 常用设备图例	448
附图2 常用管道附件图例	453

第 1 章 化工设计概论

本章从工艺工程师的角度叙述化工装置设计的主要内容和设计程序,使读者对设计的全貌有个概括的了解。

1.1 设计要求

化工装置是由各种单元设备以系统的、合理的方式组合起来的整体。它根据现有的原料和公用工程条件,通过最经济和安全的途径,生产符合一定质量要求的产品。

化工装置设计必须同时满足下列要求。

(1) 产品的数量和质量指标。

(2) 经济性:除了在个别情况下建设生产装置是从产品的社会效益出发外,其余的装置不仅应该有利润,而且其技术经济指标应该有竞争性,即要求最经济地使用资金、原材料、公用工程和人力。要达到这个目标,必须进行流程优化和参数优化的工作。

(3) 安全:化工生产中大量物质是易燃、易爆或有毒性的。因此,设计必须充分考虑各种明显的和潜在的危险,保证生产人员的健康和安全。

(4) 符合国家和各级地方政府制订的环境保护法规,对排放的废气、废水、废渣进行处理。

(5) 整个系统必须可操作和可控制。

可操作是指设计不仅能满足常规操作的要求,而且也能满足开停车等非常规操作的要求,可控制是指能抑制外部扰动的影响,系统能适应和稳定。

由此可见,设计是一个多目标的优化问题,不同于常规的数学问题,不是只有唯一正确的答案,设计师在作出选择和判断时要考虑各种经常是相互矛盾的因素,即技术、经济和环境保护等的要求。在允

许的时间范围内选择一个兼顾各方面要求的方案，这种选择或决策贯穿了整个设计过程。

1.2 设计性质和过程^[1,2]

设计是一种创造性的劳动，它是工程师所从事的工作中最有新意、最能使人感到满足的工作之一。当一项设计任务提出时，设计是并不存在的。设计师从接受任务之时开始就要根据设计要求构思各种可能的方案，经过反复比较，选择其中最佳者。

在酝酿各种方案时必须广开思路，寻找各种可能性，然后根据一系列内部和外部约束条件，排除一些不合理或不可能的方案，使需要进一步开展工作的方案数减少。

对每一个不同的设计任务，其外部和内部约束条件是不相同的，外部约束条件是指不随项目具体情况变化的，无法松弛的约束条件。通常是指下列几项。

- (1) 政府制定的各种法律、规定和要求；
- (2) 各种自然规律；
- (3) 安全要求；
- (4) 资源情况；
- (5) 各种必须遵循的标准和规范；
- (6) 经济要求：如投资限额和投资回收期。

设计人员在外部约束条件的制约下，制订若干个可能的方案，若对这些可能的方案不加筛选就进行下一步工作，必然要浪费大量的人力和时间。因此，要根据一些原则或称为内部约束条件，排除一些不符合要求的方案，得到可行的方案。这些内部约束条件是：

- (1) 技术软件的来源，技术成熟程度，价格和使用条件；
- (2) 材料：原材料、建设材料、关键设备供应的难易；
- (3) 时间：允许和需要的设计时间；
- (4) 人员：素质和数量；
- (5) 产品规格；
- (6) 用户的具体要求；

(7) 建厂地区的具体情况。

经过内部约束条件的筛选，最后只得到一个可行方案的情况是很少的。因此，还要对保留的少数方案进行深入的分析研究，再根据设计要求进行筛选，不断优化工艺参数和结构，得到唯一的最佳流程。若此流程经过安全和操作性能分析符合要求，此流程即为最终的工艺流程，可据此进行工程设计。整个设计过程是一个交替进行过程合成与分析，不断作出选择或决策、修改原有设想的迭代过程，在进行决策时必须遵循层次式决策的原则，即先作上层对全局有影响的决策，然后进行下层影响面较小的决策。整个设计过程可用图 1-1 表示。进行过程合成（结构优化）和过程分析（参数优化）的思路将在第 3 章至第 5 章进行说明。

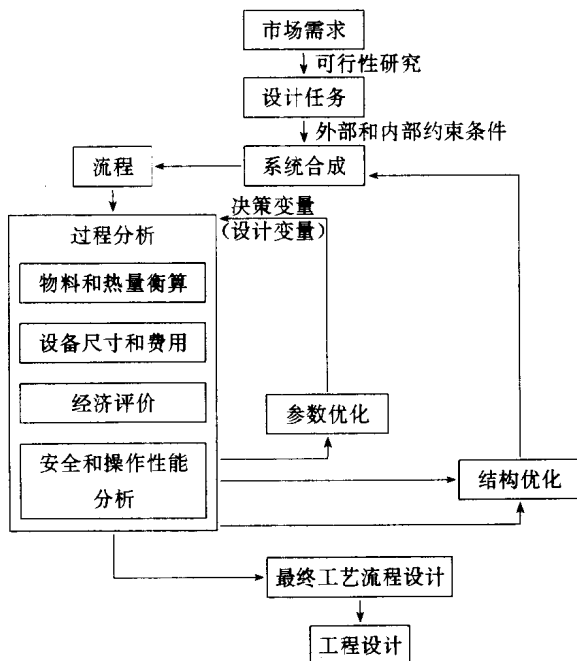


图 1-1 设计过程的内容^[2]

由于化工装置是一个由各种单元设备以系统的、合理的方式组合起来的整体，因此在进行过程合成与分析时必须从全系统，而不是从