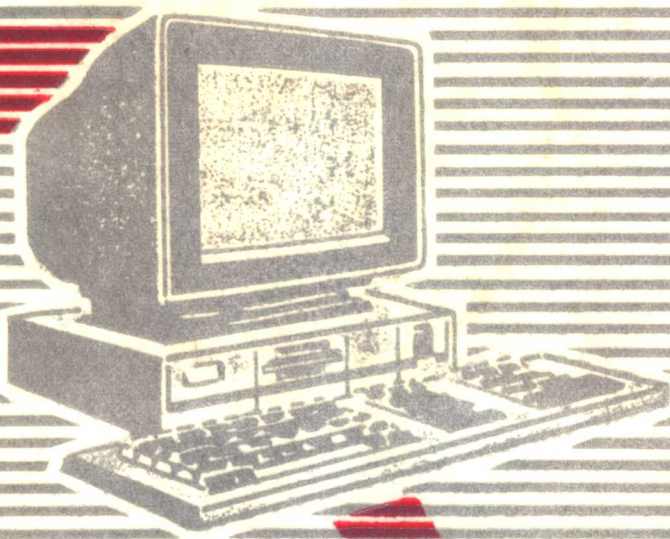


化工过程 的概念设计

HUA
GONG
GUO
CHENG
DE
GAI
NIAN
SHE
JI

[美] J. M. 道格拉斯 著



化学工业出版社

化工过程的概念设计

〔美〕 J.M. 道格拉斯 著

蒋楚生 夏 平 译

化学工业出版社

·北 京·

(京)新登字039号

图书在版编目(CIP)数据

化工过程的概念设计/(美)道格拉斯(Douglas, J. M.)
著, 蒋楚生, 夏平译. -北京: 化学工业出版社, 1994
ISBN 7-5025-1335-3

I. 化… I. ①道… ②蒋… ③夏… II. 化工过
程-工艺设计-最佳化 IV. TQ021

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第04381号

责任编辑: 郭乃铎

封面设计: 季玉芳

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号)

三河科教印刷厂印刷

通达装订厂装订

新华书店北京发行所经销

开本787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张23 $\frac{1}{4}$ 字数589千字

1994年8月第1版 1994年8月北京第1次印刷

印 数 1—1,950

定 价 22.00 元

序 言

本书描述了某些类别的化工过程在进行概念设计时的系统性方法。概念设计的目标是寻找最佳工艺流程（即：选择过程单元以及这些单元之间的相互连接），和估算最佳设计条件。这个问题的困难在于可以考虑的工艺方案非常之多。此外，经验指出，新设计的设想中真正产业化了的从来都不到1%。所以，在大批要考虑的可能方案中，只有很小的成功机会。

在许多情况下，不同工艺方案的加工费用可以相差一个数量级，或者更多。因而，我们可以用简捷算法来筛选方案。但是，必须确认，我们已使每一方案在其最佳设计条件的附近，以免由于设计变量选择不当而放弃某个方案。所以，我们采用成本分析来初步筛选，以去除那些无利可图的设计构想。如果某一过程显得有利可图时，则必须再考虑其它因素，包括安全、环境限制、可控制性，等等。

我们要建立一种分层次的设计决策方法，来探讨合成与分析的问题。借助于这种探讨方式，可以把一个庞大而复杂的问题分解成许多小问题，处理起来会简单得多。注意力集中在每一层次里所必须做出的决策上（如：是否需要增加一个溶剂回收系统？），就可以辨明可用于解决该问题的已有技术（如：吸收、吸附、冷凝），而无须排除某种新技术（如：膜过程）或许能提供的更好解决方法。此外，通过列举我们所能提出的每一决策的解答方案，就可以系统地产生出一张工艺替代方案的清单。

在某些情况下，可以采用设计准则（经验法则或启发式法则）做出一些流程图结构的决策，并且/或者可以给定某些设计变量的值。我们采用数量级分析法来推导许多这类的启发式准则，并且通过简单的分析来确定这些准则的限度。在许多情况下，并没有现成的启发准则，所以我们开发了简捷设计方法作为决策的基础。

按照上述的分层次决策方法，在开发一部概念设计时，一位初学设计者可以用大量额外的计算来代替经验。然而，由于采用了简捷算法，筛选各种方案所需付出的工时代价并不会太高。当然，随着设计者经验的增长，她或他将能看出对于某种特定的过程，哪些方案根本不需要考虑，这样就提高了效率。同时请注意，要获取设计的可操作性，一般讲是需要经验的，所以，总是要请有经验的设计人员来审核初学设计者的设计研究成果。

一、本书的内容安排

本书拟用作化学工程系四年级过程设计课一学期的教材。其内容适合于讲座课程。全书采用一个案例的分析来阐明思想，而课外作业除评价中心案例的各种替代方案外，还包括其它一些案例的研究。研究其它案例的目的是帮助学生了解各种过程之间的相似点与不同点（如：单一反应对产品分布问题，气体循环费用控制的案例，液体分离费用控制的案例，循环或移去可逆反应副产物两者之间的选择，采用气体循环与弛放气之间的经济权衡，等等）。虽然最终要用电子计算机辅助设计程序来检验这些近似方法，但筛选计算仍然是注意的焦点。

第1部分是讨论合成与分析的策略。第1章提到从来只有约1%的新设计构想实现了产业化，所以我们需要一种有效的方法来去除那些较差的项目。同样，由于设计问题总是缺乏明确定义，而且即使对于一个单一产品的装置也常常可以产生出 10^4 至 10^9 个不同的方案，所以

需要一种有效的方法来筛选这些工艺方案。这些讨论为采用简捷算法提供了推动力。同时也提供了一种把工艺流程图分解成不同层次的一组较简单问题的方法。

第2章是介绍工程经济学,包括关于各种收益率量度方法的讨论。此外,开发了一个适用于概念设计的简单经济模型。

第3章提出了一个非常简单的设计课题(实际上可算作较大型设计课题的一个子系统)。此例阐明了:提出不同的工艺方案是何等简单;需要设计启发准则;设计启发准则的来源;设计启发准则的限制;加工单元之间的相互影响;需要一种系统工程观点来代替单元操作观点;以及如何开发简捷设计方法。

第2部分是介绍用于概念设计的合成与分析的分层次决策法的细节。第4章描述了开始工作所需的信息,并且讨论了一个间歇或连续过程的决策。第5章提出了输入-输出结构所必须的重要决策,在此层次的复杂程度下重要设计变量的辨识,以及计算物流费用和进料压缩机(如果需要一台的话)费用的简捷算法。第6章介绍确定该流程图总循环结构所需的额外决策,即:该过程的反应器系统与该过程其余部分之间的相互影响。反应器的费用和任何气体循环压缩机的费用都用设计变量来评估。这种讨论仅限于单一产品的装置。

目前,系统的初始设计方法也只限于汽液过程。第7章描述这类过程分离系统的结构(即:总体结构、蒸汽回收系统的各种方案,以及液体分离系统的决策)。第8章则提出热交换器网络的合成方法。届时将具备基础案例的设计和最佳设计条例的估算值。

我们的基本设计策略是尽快开发出一部基础案例的设计,一面进行设计,一面简单地列出各种过程替代方案,以确定该过程的某些情况会使得所有替代方案是否都无利可图。只要基础案例设计显得前景良好,就采用第9章介绍的各种方法来筛选这些工艺方案。这样,届时就可以致力于阐明最佳的工艺流程图。

第3部分提出一些其它的设计工具和应用。从第4章到第9章,都采用案例分析计算来估计最佳的设计条件,因为在不断地改变着流程图的结构。只要阐明了最佳的流程图,就可以采用较复杂的优化程序。然而,为了使其复杂程度适当,在第10章里提出了一种近似优化分析法。这种近似优化法有助于阐明每个设计变量的主要经济权衡,各主要设计变量,以及不知道确切最佳值的情况下,指出各设计变量与其最佳值的偏离程度。这种近似优化分析也很适用于技术改造研究和优化稳态控制的计算。

在第11章采用开发新装置设计的同样技术用于工艺改造。为技术改造过程提出了一套系统的方法,包括用同样的或更好的工艺方案来替换现有的整个装置。近似优化法有助于阐明主要的操作变量,以及妨碍减少操作费用的瓶颈设备。然后,以这些结果为依据,增添设备的能力,直至年均设备费用的增量与所减少的操作费用量相平衡。

第12章讨论用计算机辅助设计程序来改进简捷计算的精度。第13章是设计方法的总结,固相和间歇过程的分层次决策法概要,及完成概念设计后还要做的各项遗留工作的简短讨论。

附录都是些辅助性的信息。附录A讨论设备设计的简捷模型,附录B是案例研究的全部具体内容。附录C和E给出一些设计数据和费用数据的示例。

二、致谢

本人非常感谢下列各位对本书的仔细审阅: A. Eric Anderson(以前在ARCO工作), 帝国化学公司(ICI)的Duncan Woodcock, UOP公司的Edward C. Haun, Notre Dame 大学的Jeff Kantor, 杜邦(Du Pont)公司的Carl F. King, 埃克森(Exxon)公司的E. L. Sherk,

R. Hoch(以前在Halcon国际公司工作), 加州理工学院 (Cal Tech) 的 John Seinfeld, 以及Tennessee Eastman公司的J. J. Sirola。同样的, 我深深感谢Massachusetts 大学化工系的学生们, 以及英国的帝国化学公司, Rohm and Haas公司, Monsanto公司, 联合碳化物 (U. C. C) 公司, 及Celanese公司的学生们, 感谢他们对本课程内容的许多宝贵意见。此外, 必须感谢我的同事Mike Malone对本书的许多贡献, 我还要感谢其它几位同事: Mike Doherty, Erik Ydstie和Ka Ng, 因为他们在使用这本教材时提供了许多反馈信息。我的研究生们的贡献, 尤其是Wayne Fisher和Bob Kirkwood, 也需致谢。

当然, 要特别感谢我可爱的妻子Besty, 我的孩子Lynn和Bob, 以及我的母亲 Carolyn K. Douglas, 因为在准备本书的过程中, 他们给予我支持。同样的, 我的行政助手Pat Lewis和担任打字工作的Pat Barschenski都提供了许多必要的帮助。

James M. Douglas

译 者 的 话

我国的“化工新技术开发管理条例”从试行至今，已近15年。经过反复实践，日益显明化工新技术开发的核心是工程研究，而工程研究的关键是概念设计。技术总负责人正是通过这条贯穿开发全过程的总线来主持和展开全面工作的。

概念设计是依据开发性基础研究的结果、文献的数据、现有类似装置的操作数据和工程经验，按照所开发的新技术工业化规模而做出的预想设计，用以指导过程研究及提出对开发性基础研究进一步的试验要求。所以，它是基础研究与过程研究的指南，是整个开发研究过程中十分关键的一个步骤。

概念设计不同于工程设计，因而不能作为施工的依据。但是，成功的概念设计不但可以大量节省宝贵的人力和物力，而且可以加快新技术开发的速度，提高开发的水平与实用价值。

即使一个很普通的单一产品的生产过程，也可能有 10^4 至 10^9 个可供选择的替换方案，必须有可靠的、高效的方法，从技术和经济的角度进行筛选，尽可能及早地删去那些无利可图的方案，同时又一无遗漏地把那些大有希望的方案辨认出来，作为强化研究开发工作的方向。这是一种系统化的多维分级决策过程，也正是概念设计的真谛。

但是，概念设计的成功不仅需要开发人员富有创造性的构想，更加需要扎实的基本概念，渊博的专业技能，敏锐的革新胆略和严谨的思维作风。

J. M. Douglas博士在ARCO公司做过5年反应器设计与过程控制方面的工作，然后致力于反应工程、过程控制和概念设计的教学与研究。多有著述，屡受嘉奖。适逢80年代中期，计算机在化工领域的应用已趋成熟，物性数据库、流程模拟、优化、合成与分析等，都已达到广泛实用的阶段。Douglas教授遂能集其大成，完成本著作。

本著作是工程实践与理论研究密切结合，也是计算技术与系统工程的成功应用。书中归纳的大量通用推理准则是广泛经验的提炼与升华，书中提出的排序函数与近似性参数等定量判据是删繁就简的得力手段，作者推荐的逐级分析思维方法更有益于青年开发人员的成长。美中不足之处，主要是时过境迁，书中采用的费用模型数据不宜直接应用于我国。当然，概念设计本身也还需要不断地进展与完善。

本书的序言和第1至6章由蒋楚生翻译，第7至13章和附录由夏平翻译，相互校核后，由蒋楚生完成全书的总译审。他们已分别在化工的教学、研究、开发和设计领域中工作了四十或三十余年，对概念设计的重要性深有同感，遂协力译出本书，衷心奉献给各届同仁，希望能对我国的化工新技术开发工作有所助益。

译文中失误之处，请予指正。

目 录

第1部分 过程合成与分析的策略

第1章 过程合成与分析的性质1

- 1.1 过程设计的创造性方面1
- 1.2 概念设计的分层次方法4
- 1.3 小结与练习9

第2章 工程经济13

- 2.1 需要的费用信息13
- 2.2 估算投资和操作费用17
- 2.3 总投资与产品总成本21
- 2.4 货币的时值29
- 2.5 过程利润率的各种测算方法33

- 2.6 简化概念设计的经济分析40

- 2.7 小结、练习与名词42

第3章 经济决策：溶剂回收系统的设计45

- 3.1 问题的定义及总的考虑45
- 3.2 设计气体吸收塔：流程图、物料衡算与能量衡算、物流费用46
- 3.3 设备设计50
- 3.4 经验准则53
- 3.5 小结、练习与名词56

第2部分 开发概念设计与寻求最佳流程图

第4章 输入信息和间歇对连续61

- 4.1 输入信息61
- 4.2 第一层次的决策：间歇对连续65
- 4.3 小结、练习和名词67

第5章 流程图的输入-输出结构72

- 5.1 输入-输出结构的决策72
- 5.2 设计变量、总的物料衡算和物流费用76
- 5.3 过程的替代方案81
- 5.4 小结、练习与名词82

第6章 流程图的循环结构85

- 6.1 确定循环结构的决策85
- 6.2 循环的物料衡算88
- 6.3 反应器的热效应90
- 6.4 平衡的限制92
- 6.5 压缩机的设计和费用94
- 6.6 反应器的设计96
- 6.7 循环的经济评价98
- 6.8 小结、练习与名词98

第7章 分离系统101

- 7.1 分离系统的总体结构101
- 7.2 蒸气回收系统104
- 7.3 液体分离系统106

- 7.4 共沸系统115

- 7.5 严格的物料衡算123

- 7.6 小结、练习与名词128

第8章 换热器网络132

- 8.1 需要的最低加热量与冷却量132
- 8.2 换热器的最少台数139
- 8.3 估算换热面积141
- 8.4 设计最低能耗的换热器网络143
- 8.5 回路与通道148
- 8.6 减少换热器的台数149
- 8.7 一种较完整的设计算法——物流切割法152
- 8.8 热能与电能的集成154
- 8.9 热与蒸馏156
- 8.10 HDA过程160
- 8.11 小结、练习与名词166

第9章 各种过程方案的费用图与

快速筛选169

- 9.1 费用图169
- 9.2 复杂过程的费用图173
- 9.3 各种过程方案的快速筛选176
- 9.4 HDA过程180
- 9.5 小结、练习与名词183

第3部分 其它的设计工具及其应用

第10章 初步的过程优化	185
10.1 设计变量和经济权衡	185
10.2 过程装置的费用模型	189
10.3 简单过程的费用模型	192
10.4 近似的优化分析	199
10.5 小结、练习与名词	204
第11章 过程的改造	206
11.1 过程改造的一种系统的程序	206
11.2 HDA过程	209
11.3 小结与练习	213
第12章 计算机辅助设计程序	215

12.1 计算机辅助设计程序 (FLOWTRAN) 的总体结构	215
12.2 物料平衡的计算	219
12.3 全装置模拟	231
12.4 小结与练习	235

第13章 概念设计方法的总结与该

方法的外延	236
13.1 回顾石油化工过程的分层次 决策方法	236
13.2 固体过程与间歇过程的设计	237
13.3 设计问题中的其它要素	240

第4部分 附 录

附录A 设备设计的简捷算法	247
A.1 气体吸收塔的塔盘数	247
A.2 蒸馏塔: 塔盘数	253
A.3 气体吸收塔与蒸馏塔的设计	264
A.4 蒸馏塔的排序	270
A.5 复杂蒸馏塔	273
A.6 蒸馏塔的能量集成	281
A.7 换热器的设计	285
A.8 气体压缩机	287
A.9 冷冻系统的设计	288
A.10 反应器	299
A.11 简捷设备设计导则小结和附录A 的符号	299
附录B HDA案例研究	307
B.1 0级层次: 输入信息	307
B.2 1级层次决策: 间歇对连续	308
B.3 2级层次决策: 输入-输出的结构	308
B.4 第3级层次的决策: 流程的 循环结构	310
B.5 第4级层次: 分离系统	313
B.6 第5级层次: 换热器网络	324

附录C 设计数据	326
C.1 烃的汽液平衡	326
C.2 某些材料的温度范围	329
附录D FORTRAN的输入格式	330
D.1 公用数据档案中的化合物	330
D.2 IFLSH	332
D.3 AFLSH	333
D.4 SEPR	334
D.5 ADD	335
D.6 SPLIT	335
D.7 PUMP	336
D.8 GCOMP	337
D.9 SCVW	339
D.10 DSTWU	341
D.11 REACT	342

附录E 费用数据	345
E.1 操作费用	345
E.2 费用关系式小结	345

附录F 换算因子	351
作者索引	353
主题索引	355

第 1 部分 过程合成与分析的策略

第 1 章 过程合成与分析的性质

1.1 过程设计的创造性方面

工程的目的在于创造新的物质财富。在化学工程中，我们试图通过化学（或生物）的变化和/或物质的分离来完成此目标。过程和工厂的设计是一种创造性的活动。据此，我们产生设想，再将其转变成生产新材料，或能显著提高已有材料价值的设备和过程。

在任一特定的公司里，我们都可以试图提出一些新的设想：

生产某些购置的原料

将废弃的副产物转变成有产值的产品

创造某种崭新的产品（合成纤维、食品、生物加工）

寻找现有产品的新生产方法（新的催化剂，另一种生物加工）

探索新工艺（基因工程、专家系统）

探索新的结构材料（高温或高压操作，特种聚合物）

我们注意到，在大多数化学公司出售的产品中，50%以上都是在近一、二十年内开发出来的，这可以作为工程努力巨大成功的一个标志。

一、成功率

尽管拥有如此良好的成功记录，我们必须认清：无论想改善现有的过程，或开发新的过程，都只有极少数的新设想能导致新的财富。事实上，新过程从研究阶段到产业化的机会只有1~3%，从开发阶段到产业化的机会约为10~25%，而从中试阶段到产业化的机会约为40~60%[●]。当然，我们预计过程改造的成功率将高于全新的过程，但是，这些较有把握的项目所能获取的经济收益的潜力肯定也低得多。

这样少的设想在工程上获得成功是不足为奇的，在任何创造性的活动中，都会有这种同样的模式。由经验得知只有少数设想可以得到报酬，可见“评估”将是任何设计方法论中最重要的组成之一。事实上，过程合成，即选择设备及设备之间的连接方式以达到一定的目标，也正是合成与分析活动的一种结合。

二、合成和分析

设计问题与其它工程问题的主要区别或许就在于设计缺乏明确的定义，即：定义设计问题所需的信息只有很少一部分可以从问题的陈述中得到。例如，一位化学家可能发现了能生产某种现有产品的新化学反应，或者发明了现有工业化反应的某种新催化剂，而我们的任务是把这些发现转化成新的过程。于是，就从这位化学家那里得到的关于化学反应条件的少许知

● 这些数据代表着平均估算值，是由本人的6位朋友提供的，他们在一些大的化学和石油公司的经济评估部门工作。

识, 以及从我们的市场部门得到的有关原料与产品的某些信息着手, 然后就要由我们来提供定义一个设计问题所必需的其它一切信息。

为了提供这些空缺的信息, 我们必须做出一系列假设: 应该采用哪几种过程单元? 这些过程单元应如何相互连结? 需要什么温度、压力和过程流率? 这就是合成工作。合成的困难在于可以提出大量的 ($10^4 \sim 10^9$) 方法来完成同一目标。所以, 设计问题是无止境的。

正常情况下, 要找出费用最低的方案 (从 $10^4 \sim 10^9$ 个可能的方案中去找), 但是也必须确保此过程是安全的, 能满足环境保护的要求, 易于开工和操作, 等等。在某些情况下, 可以采用经验法则 (启发式准则) 去掉一些方案, 但是在多数情况下, 则需要进行各种不同方案的设计, 然后比较其成本。有经验的设计人员进行这类评价时可以节省大部分工作量, 因为他们借助于和其它过程的类比, 常常能够猜测出某一特定装置, 或某组装置的费用。然而, 对于初学设计者来说, 往往必须设计和评估较多的方案, 才能找出最佳方案。

当有经验的设计人员考虑新型的设计问题时, 由于缺乏经验并且找不到类似的过程可资参考, 就尽量采用简捷的设计方法作为方案比较的基础。这些简捷计算仅用于方案筛选。如果发现该过程似乎有利可图, 就将采用更严格的设计计算, 以开发出一个或几个最佳方案的最终设计。

由于设计问题的定义不明和无止境性, 也由于其成功率低, 所以需要开发一种解决设计问题的策略。我们认为初学设计者所采用的合成和分析的策略将不同于有经验的设计人员, 因为初学设计者必须评估多得多的过程方案。虽然如此, 采用简捷设计方法仍然能够把进行这些额外计算的工作量减到最小。

三、工程方法

如果考虑到过程合成和分析的如上所述的性质, 我们将认识到过程设计的确是一种艺术, 即一种创造性的过程。所以, 开展一部设计的努力与画家创作一幅油画简直没有什么不同。换言之, 我们的初期设计方法应该相当于用铅笔钩画轮廓, 此时只注意最重要的设计细节, 而忽略掉其它一切, 即需要发现过程中最昂贵费钱的部分, 以及最重要的经济权衡。一位艺术家的下一步是品评其初稿并且做些修改, 但是只考虑对象的总体轮廓。同样的, 我们要评价设计中的首次猜测, 并且产生出若干或许能够导致改进的过程替代方案。我们希望通过这样做可以产生一个“看着合理”的粗糙过程设计, 然后再添加许多细节。

随后, 画家在画布上添加色彩、阴影、以及各种物体的细节, 并且重新品评其结果。如果确有必要, 可能会做些重大的修改。与此相似, 工程师们对最昂贵的设备将采用更严格的设计和费用的计算, 改进近似物料与能量衡算的精度, 并且增加一些不大贵的小设备、如泵与闪蒸罐之类, 虽然这对于装置的总投资没有多大影响, 却是过程操作不可缺少的。

这样, 就看到一幅油画与一部设计同样经历了一系列逐步深入的合成与评估的步骤。Thatcher把这种逐步深入的方法归纳为一种求解策略, 并且称之为“工程方法(engineering method)^①。请注意, 当逐步深入时, 应该总是集中注意力于全局性的问题。

如果我们接受这种工程设计与艺术之间的相似性, 就会认识到过程设计中的另一些有趣特点。一位艺术家绝不可能真正完成一幅油画, 通常情况下, 每当进一步的努力得不到明显的效益时, 工作就终止了; 换言之, 得不偿失, 就不干了。艺术的另一个特点是: 任何问题都不会只有一个答案, 即: 可以有各式各样的方法来画“伟大的”圣母玛利亚和孩子, 或一

① C. M. Thatcher, The Fundamentals of Chemical Engineering, Merrill, Columbus, Ohio, 1962, 第3章。

幅风景画。在过程工程中,通常也可以采用不同的工艺路线来以基本相同的成本生产同一种化学品。工程设计和艺术的另一个相似点还在于,艺术也像工程设计一样需要做出判断,以决定在绘画的各个阶段该添加多少细节。

当然,开发一部设计时要用到许许多多的科学原理,但是其总体活动仍然是一门艺术。事实上,正是这种科学与艺术在创造性活动中的结合,使得过程设计对于工程师来说成为一种令人神往的挑战。

四、工程设计的层次

现在可以看到,我们将要进行的工程设计与成本估算有着许多层次。它们的变化范围很宽,从非常简单和快速,但不太精确的估算起,一直到我们所能够进行的最详细的精确计算。这些设计估算由Pikulik和Diaz^①归纳于表1.1-1。

表 1.1-1 设计估算的种类

1. 数量级估算(比值估算)是基于以前类似项目的费用数据;其精确性可能超过 $\pm 40\%$
2. 研究估算(分解因子估算)是基于主要设备的知识;其精确性可能达到 $\pm 25\%$
3. 初步估算(授权预算的估算;范围估算)是基于充分的数据,允许进入预算的估值;其精确度约为 $\pm 12\%$
4. 确定估算(项目控制估算)是基于几乎完整的数据,但仍在制图与规格表完成之前;其精确性约为 $\pm 6\%$
5. 详细估算(承包商的估算)是基于完整的工程图纸、规格表、和厂址勘察;其精确性约为 $\pm 3\%$

引自 A. Pikulik and H. E. Diaz, "Cost Estimating Major Process Equipment," Chem. Eng; 84(21):106(1977)。

他们还给出了用于取得这些估算值所需的相对费用,见表1.1-2。由该表可以看到,当我们在计算中纳入更多的细节时,工程费用将会飞速地上升。显然,除非在经济上花得来,我们希望避免大的设计费用。

在新过程的情况下,缺乏已有的参考费用数据,所以好象不大可能进行数量级的估算。然而,有经验的设计人员可以找出新过程与已有过程之间的相似点,从而利用公司档案中已有的某些数据,来克服这个困难。开发数量级估算的方法已经在文献^②中有介绍,但是通常还需要一些经验来评价这种计算的结果。

表 1.1-2 进行估算所需的工程费用 (1977)

估算类别	少于100(10 ⁴ \$)	100~500(10 ⁴ \$)	500~5000(10 ⁴ \$)
	装 置	装 置	装 置
研究(10 ³ \$) ^①	5~15	12~30	20~40
初步(10 ³ \$) ^①	15~35	30~60	50~90
确定(10 ³ \$) ^①	25~60	60~120	100~230

引自 A. Pikulik and H. E. Diaz, "Cost Estimating Major Process Equipment," Chem. Eng; 84 (21): 106 (1976)。

① 译注:原文误为“百万美元”,已改正。

① A. Pikulik and H. E. Diaz, "Cost Estimating Major Process Equipment," Chem. Eng; 84 (21): 106 (1977)注:这些精确性的范围将随着公司的不同而异,而且在通货膨胀率较高的时期,这些详细估值的精确性将不如所列出的这样高(即使详细的估值也可能会有8~10%的误差)。通常得到正偏差的机会也要比负偏差大一些,所以,数量级的估值(即第1项)应为+40~-25%(设计工程师很少把费用估计得过高)。同样的,在较初期的设计阶段或许要计入较高的不可预见费(即:在第3项里是20~25%,而在第4项里就降到10%),以应付分析中未计入的那些费用(它多少不同于估值的精确性)。

② J. H. Taylor, "Process Step-Scoring Method for Making Quick Capital Estimates," Cost. Eng; p 207, July-August 1980, D. H. Allen and R. C. Page, "Revised Technique for Predesign Cost Estimating," Chem. Eng; 82(5):142(March 3, 1975)。

对于没有或少有经验的初学设计人员,很需要有一种系统的方法来开发数量级的估算。可以用数量级分析来简化许多设计计算,而且使我们在进行初期过程设计时可以集中注意力于过程的主要设备。本书的目标就是开发一套数量级分析的系统方法,再展示如何将其结果延伸用于研究估算。

详细估算已超出了本书的范围。然而,正如前述,只有1%左右的新设想有机会做到产业化,预计对于每一部详细设计都要先做大约100部初期设计。所以,对于过程概念设计的方法学,必须掌握到足够详细的深度。

五、设计方法学的其它应用领域

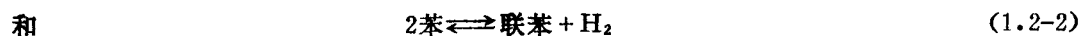
虽然事实上我们在集中精力设计和评价各种新的过程,但是所开发出来的方法学中的许多内涵却很适用于其它的工程任务,如:基础研究和技术服务之类。在基础研究中,期望能把主要精力用于研究那些对过程经济影响最大的变量,而粗略的过程设计正有助于辨识出过程中的高费用部分和主要的设计变量。同样,在技术服务活动中,我们将寻求改进已有过程的各种办法。为了完成这个目标,需要了解过程中的重要经济权衡,而且很需要有快速估算各种新设想的潜在效益的方法。所以,我们开发出的方法学将会在各种过程工业中得到广泛的应用。

1.2 概念设计的分层次方法

工程方法(或艺术家的方法)指出,解决各种设计问题时,要首先开发出最简单的答案,然后再逐层添加细节。为了研究如何在过程设计中采用这种思路来解决问题,现以一个典型的石油化工工艺流程为例,先设法剔除各层细节,只留下我们感兴趣的最简单的问题。对不同类型的过程多次用过这种方法以后,或许可以认识到,有一种通式可以用作为合成新过程的基础。

一、示例:甲苯的加氢脱烷基化(HDA过程)

本例是甲苯的加氢脱烷基化制苯^①,有关的化学反应是:



这些均相反应在从1150°F(低于此温度时反应速度太慢)到1300°F(高于此温度时会产生大量的加氢裂化)的范围内进行,压力约为500psia。需要用过量的氢(比值为5/1)来防止结焦,而且反应后的气体必须迅速淬冷至1150°F,以免反应器后续的换热器内结焦。

图1.2-1示出该过程的一种流程方案。甲苯和氢两股原料物流加热后,与循环来的甲苯和氢物流混合送入反应器。反应器出来的产品物流中包含氢、甲烷、苯、甲苯、和多余的联苯。我们试图用一台分凝器来冷凝芳烃,再闪蒸出轻气体,以从芳烃中分离出绝大部分氢与甲烷。闪蒸罐出来的液体用于淬冷反应器出来的热气体(该流程图中并未示出)。

闪蒸汽中的氢气需要循环使用,而甲烷则是氢气进料物流中的杂质,也是反应式(1.2-1)的副产物,将积累在气体循环回路内。所以,需要一股放空物流,以从过程中排除进料与产品中的甲烷。请注意,并没有经验准则(设计指南)可用来估算气体循环回路内允许积累的最佳甲烷浓度。稍后将更详尽地讨论此设计变量。

并非所有的氢和甲烷都可以在闪蒸罐里与芳烃分离,还要用一个蒸馏塔(稳定塔)来去

① 本案例研究是美国化学工程师学会(AIChE)1967年学生竞赛试题的修改版;原题及其解答见J. J. Mcketta, Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Vol 4, Dekker, New York, 1977, p. 182.

除大部分残余量，以免沾污苯产品。然后，由第二个蒸馏塔顶回收苯。最后，循环甲苯与多余的联苯分离。也可以画出其它流程方案，随着分析的进行，将讨论到其中一些方案。

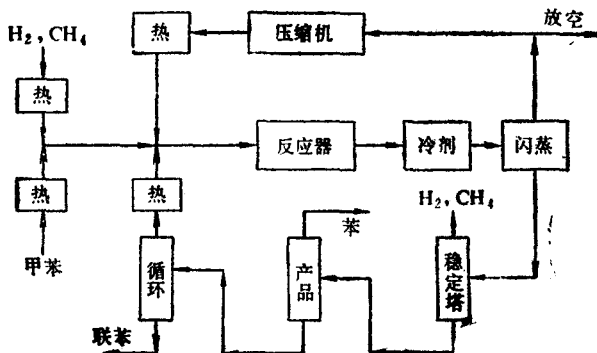


图 1.2-1 HDA过程[引自J. M. Douglas, AIChE J, 33, 353(1985).]

二、能量集成

图1.2-1所示的工艺流程并不很现实，因为其中每一股需要加热和冷却的过程物流都是在各自的换热器内、利用外部公用系统（冷却水、水蒸汽、燃料等）来进行的。70年代末以来，开发了一种新的设计方法，它可以求出过程所需的最低加热和冷却负荷，以及能提供“最佳”能量集成的热交换器网络。第8章将详细介绍这种方法。

要采用这种新的设计方法，必须知道与一股过程物流的流率和组成，以及每股过程物流的进、出口温度。图1.2-2^①示出了得自这种能量集成分析的一个流程方案。首先可以看到，反应器的产品物流用于部分预热反应器的进料。然后，反应器的热气体用作甲苯循环塔再沸

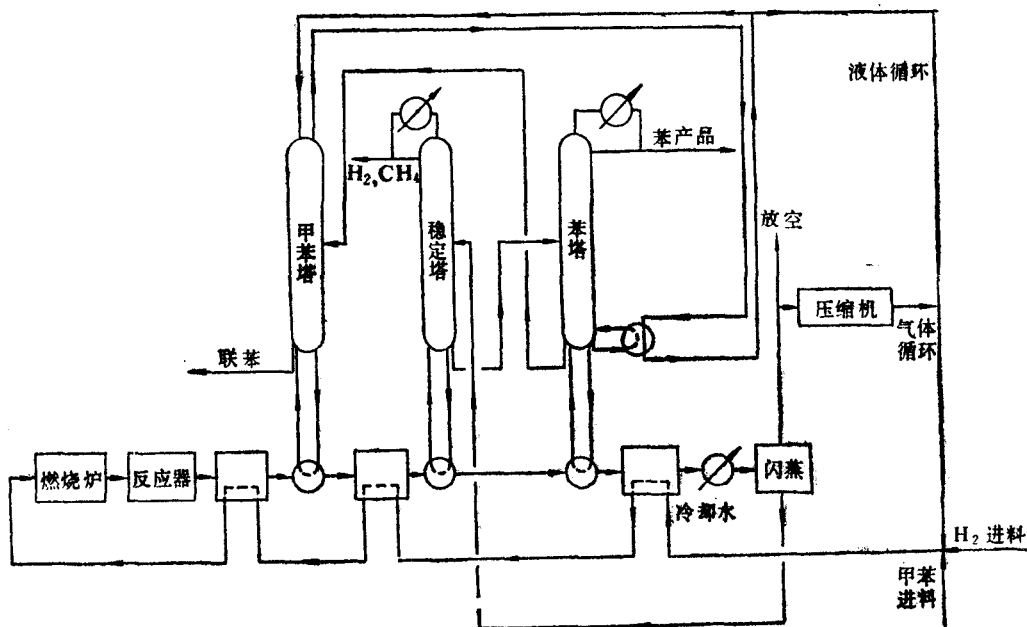


图 1.2-2 甲苯的加氢脱烷基化（最多的能量回收）

① 此能量集成流程是由在联合王国、Runcorn的帝国化学公司（ICI）的D. W. Townsend开发的。

器的热源,再预热一些原料,又作为稳定塔再沸器的热源,并为苯成品塔的再沸器提供部分热源,最后再多预热一些原料之后,才进入分凝器。由于甲苯塔是加压的,所以甲苯的冷凝温度高于苯塔底部物流的沸点。这样一安排,就可以用冷凝的甲苯提供苯再沸器的部分所需热量,以代替采用外界公用系统所提供的水蒸汽和冷却水。

如果对比能量集成的流程图(图1.2-2)与需要外界加热和冷却的流程图(图1.2-1),则可以看到,能量集成使流程图更趋复杂(即:相互多了很多连接)。而且,采用能量集成分析必须知道每股过程物流的流率与组成,即:要知道所有过程的热负荷,包括那些分离系统的热负荷,以及所有物流的温度。由于需要固定几乎全部流程后才能设计能量集成系统,而且这将极大地增加工艺流程的复杂性,所以我们的过程设计方法中是把能量集成分析作为最后一步来考虑。

三、蒸馏塔组

现在来考虑一下图1.2-1所示的蒸馏塔组。由于多余的联苯是由可逆反应式(1.2-2)生成的,可以让它随甲苯一起循环,并且让它达到平衡的量级。这种方案虽然增大了通过反应器的流率,却可以省去一个蒸馏塔。

如果决定如图1.2-1所示,回收联苯,则预计很容易进行甲苯与联苯的分割。所以,或许可以用一个侧线塔来完成苯-甲苯-联苯的分割。也就是说,可以在塔顶回收苯,在进料板下面侧线采出甲苯,而且从塔底得到联苯(见图1.2-3)。如果从进料板下面侧线采出甲苯,仍然可以由塔顶得到非常纯的苯。但是,与塔顶的产品相比,侧线回收的循环甲苯的纯度将会下降。由于循环甲苯并无一定的规格要求,其纯度或许不大重要,而这种方案的节约额可能是值得的。同样,稳定塔内甲烷与苯的分割也容易进行。这样,在一个氢和甲烷-苯-甲苯与联苯的分离塔内(一座巴氏塔,见图1.2-4),侧线回收苯或许比原流程图(图1.2-1)所示的方案更便宜些。

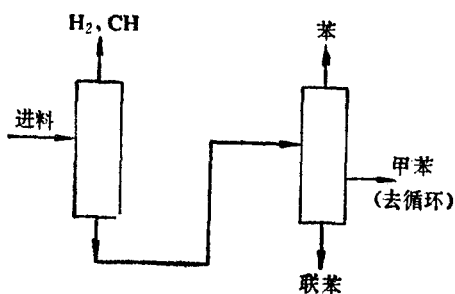


图 1.2-3 蒸馏塔组替换方案

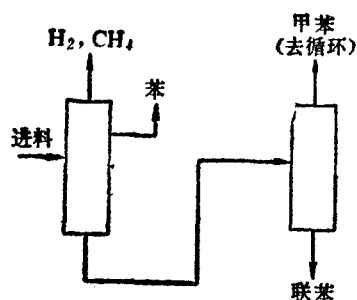


图 1.2-4 蒸馏塔组替换方案

这些分离系统的启示准则(设计指南)需要知道进入蒸馏塔组各物流的进料组成。所以,在考虑与设计蒸馏塔组有关的决策之前,必须先规定好流程图中的各项遗留问题,并且估算出过程的流率。因此,要先考虑蒸馏塔组的设计,然后再考虑热交换器网络的设计。

四、蒸汽回收系统

再参照图1.2-1来考虑从闪蒸罐出来的蒸汽流。众所周知,绝不可能在一个闪蒸罐里实现很清晰的分割,所以总会有一些芳烃随着闪蒸汽一同离开。而且,其中会有一些芳烃随着放空气流损失掉。当然,在闪蒸汽流或放空气流上设置一个蒸汽回收系统可以回收这些芳烃。

可以采用下列各方案之一作为蒸汽回收系统：

冷凝（高压，或低温，或二者合用）

吸收

吸附

膜分离过程

为了估算某个蒸汽回收系统在经济上是否合理，我们必须估算放空气中芳烃以及氢和甲烷损失的流率。因此，在考虑蒸汽回收系统的必要性和/或进行它的设计之前，必须规定流程图中的其它部分，并且必须估算各过程流率。之所以在设计液体分离系统之前先考虑设计蒸汽回收系统，是因为上面列出的任一种蒸汽回收系统（如：气体吸收塔）的出口物流中，通常总有一股液体物流，而且要送入液体分离系统中去。

五、分离系统的简化流程图

我们的目标是寻找一种简化流程图的方法。显然，图1.2-1比图1.2-2简单得多，所以我们决定最后才做能量集成的工作。同样，由于必须知道过程的各股流率才能设计蒸汽和液体的回收系统，我们决定推迟到能量集成前一步才考虑它们的设计。这样，可以将图1.2-1所示的流程图简化到图1.2-5所示。图1.2-5中所示蒸汽和液体回收系统之间的连结将在以后做较详细的讨论。

现在，要自问图1.2-5所示出的简化流程图是否代表所有的过程。由于此流程图包含了气体和液体这两种循环回路在内，而某些过程并不含任何气体组分，所以不能期望其结果是有普遍意义的（见第7.1节内的其它方案）。然而，只要把蒸汽和液体分离系统叠合在一个单独的方框内，就可以进一步简化该流程图（见图1.2-6）。这样，在考虑蒸汽或液体回收系统的规定之前，要先考虑分离系统总体结构的规定。

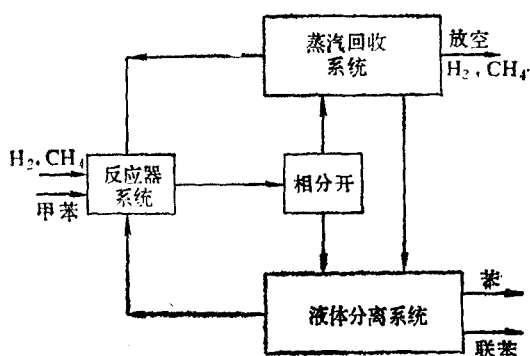


图 1.2-5 HDA分离系统[引自J. M. Douglas, AIChE J. 31, 353(1985)。]

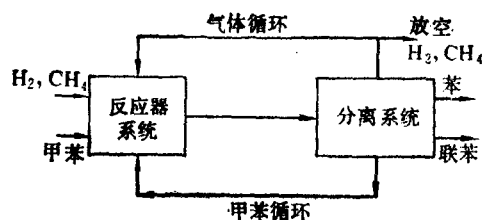


图 1.2-6 HDA循环结构[引自J. M. Douglas, AIChE J. 31, 353(1985)。]

六、流程图中的循环结构

现在有了一个该过程非常简单的流程图（图1.2-6）。可以用此简单的描述来估算循环流以及它们对反应器费用的影响，如果有循环气体压缩机，还可以估算对它价格的影响。此外，还可以充分了解什么样的设计问题对于获取这种简化表示图是重要的，而不必顾虑由分离系统或能量集成网络所引起的额外的复杂性。例如，可以研究那些决定循环物流数目的因素、反应器内的热效应、反应器内的平衡限制，等等。这样，通过不断地剔除各层次的细

节, 可以看到我们要先研究流程图的循环结构, 再考虑分离系统的细节。

七、流程图的输入-输出结构

图1.2-6提供一个很简单的流程图, 但是考虑到获得一个更简单的表示法的可能性。显

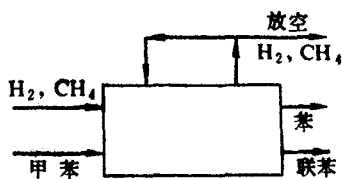


图 1.2-7 HDA的输入-输出结构[引自J. M. Douglas, AIChE J, 31:353(1985)。]

然, 如果围绕整个过程画一个方框, 将只留下进料和出料两种物流。初看之下(见图1.2-7), 此图似乎过于简单, 但是它可以帮助我们了解影响总物料平衡的那些设计变量, 而不会带来其它复杂因素。由于原料费用通常要占产品总成本的33~85%^①, 所以, 总的物料衡算是设计中的一个决定性因素。同时, 在产品和副产品比原料更为便宜的情况下, 我们将不愿再花

任何时间去研究它的那些设计变量。所以, 要先考虑流程图的输入-输出结构, 以及影响这种结构的各种决策, 然后才去考虑各种循环物流。

八、可能的制约

通过不断地简化一张流程图, 可以开发出解决设计问题的一种通用方法。然而, 我们的原始流程图只描述了一个单一产品的连续汽液过程, 而且只涉及简单的化学品(无聚合物或烃类馏分)。有许多过程可满足这些限制条件, 因而要力求详尽地开发出该系统方法。但是, 间歇过程可能具有多少有些不同的基本结构(经常在一个设备内进行多步操作), 并且肯定要用不同的数学模型来描述(一般需要常微分方程或偏微分方程, 而不是代数方程或常微分方程)。因此, 我们的第一个决策很可能是区别间歇和连续过程。

九、决策层次

如果把上述讨论的结果归纳起来, 就可以开发出一种过程设计的系统方法, 就是把设计问题简化为分层次的决策, 见表1.2-1。这种设计方法的一个很大优点是, 随着我们通过该分级系统的各层次时, 可以计算设备的尺寸和估算其费用。再则, 如果在某一层次上发现潜在效益成了负值, 就可以寻找替代方案, 或者终止该设计项目, 而无需再去求取该问题的全部解答。

该方法的另一个优点来自下述事实: 当在不同层次做出关于流程图结构的决策时, 我们

知道只要改变这些决策, 就将产生过程的替代方案。这样, 由于有了鉴别不同方案的系统设计方法, 就可在很大程度上避免了漏掉某些重要方案选择的情况。概念设计的目标就是寻找“最佳”方案。

十、简捷解法

经验指出, 如果要考虑所有的可能性, 则对任何过程的流程图一般都可以提出许多方案(即: 经常是 10^4 至 10^9 个)。所以, 需要尽快降低要予以考虑的方案数目。筛选这些方案时, 常常用数量级分析法来简化过程的物料衡算、设备的设计方程和费用计算。这些简捷计算常

表 1.2-1 决策层次

- | |
|----------------|
| 1. 间歇对连续 |
| 2. 流程图的输入-输出结构 |
| 3. 流程图的循环结构 |
| 4. 分离系统的总体结构 |
| a. 蒸汽回收系统 |
| b. 液体回收系统 |
| 5. 热交换器网络 |

^① E. L. Grumer, "Selling Price vs. Raw Material Cost", Chem. Eng. 79 (9):190(April 14, 1967)。也见H. E. Kyle, Chem. Eng. Prog. 82(8):17(1986)。其中有通用化学产品与专用化学品的一些对比数据。