

SPT 高等院校选用教材

工科类

过程系统工程概论

华东理工大学

张瑞生 王弘轼 宋宏宇 编著



科学出版社

高等院校选用教材

过程系统工程概论

华东理工大学

张瑞生 王弘轼 宋宏宇 编著

科学出版社

2001

内 容 简 介

过程系统工程是研究化工过程整体特性的一门学科。它用系统的观点和方法来研究化工过程的开发、设计、最优操作和最优控制,对化工技术人员具有广泛的指导意义。

本书着重介绍过程系统工程的基础知识和主要方法。全书共分十章:前四章分别介绍数学模拟方法、过程系统的分隔和切断及有关代数方程组的常用解法;第五、六、七章介绍系统模型的三种主要解法(序贯模块法、联立方程法和联立模块法);第八、九章介绍过程系统常用的优化方法;第十章以精馏序列合成、换热器网络合成和热集成为重点介绍过程系统合成的基本方法。

本书内容简明扼要,而且实用,论述深入浅出,使读者易于入门,能应用有关知识根据过程整体特性来解决化工生产、化工过程设计和研究及开发中的实际问题。本书可作为化工类专业的高年级学生与研究生的教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程系统工程概论/张瑞生,王弘轼,宋宏宇编著.-北京:科学出版社,2001
(高等院校选用教材)
ISBN 7-03-009126-4

I.过… II.①张…②王…③宋… III.化工过程-化学系统工程-高等学校-教材 IV.TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第02166号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2001年9月第一次印刷 印张:20 3/4

印数:1—4 000 字数:392 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

过程系统工程是现代化学工程的一门新兴分支学科,20世纪70年代以来已从理论研究转入实用阶段。化工过程系统模拟和优化是现代化工过程开发和现有工厂技术改造的重要手段,工程技术人员熟练掌握过程系统模拟及优化技术对提高化工装置的生产技术水平和经济效益具有重要意义。

本书的目的是使工程技术人员能运用系统的观点和方法来研究化工过程的开发、设计、最优操作和最优控制。本书是作者在华东理工大学开设的本科生和研究生“化工系统工程”课程教材的基础上,经进一步充实、提高而编写成的。本书的主要内容包括过程系统分析、过程系统优化和过程系统合成三大部分。由于过程系统工程是一门正在迅速发展的新兴学科,因此我们在取材上以基础知识和主要方法为主,并力求反映目前应用较为成熟的最新成果和在设计及科研中经常碰到的问题。这样,既可使内容简明扼要,又可使读者易于掌握。本书突出化工系统的整体特性和系统工程的方法,强调方法与工程应用相结合,尽量使方法和应用相互渗透,并配以例题和习题。

系统分析部分着重介绍数学模型方法、系统模型的解法、各种基本迭代方法及模拟程序系统在化工系统中的应用,紧密结合工程背景,着重介绍方法。系统优化部分着重介绍如何将化工实际问题转化为一般的优化问题、常用优化方法和结构参数及操作参数的优化。从应用角度介绍方法,省略了繁琐的数学推导和证明,注重求解过程的逻辑性,使之易于为工程技术人员接受。系统合成部分则通过精馏序列和换热器网络的合成介绍化工系统合成的基本概念和主要方法,同样注重实用性。同时,本书注意了系统分析、优化和合成这三部分在方法上的一致性和连贯性,使全书内容有较强的系统性。

本书第一、第五至十章由王弘轼编写,第二至四章由宋宏宇编写,张瑞生参与了全部章节的编写工作,全书由房鼎业主审。

过程系统工程学科是计算机在化工中应用的理论基础,书中介绍了各种算法和概念。由于篇幅有限,本书不可能给出具体的计算程序。要真正理解和掌握这些方法及概念,在计算机上进行必要的实例运算是必不可少的。由于时间和编著者水平所限,难免有不妥甚至谬误之处,恳请同仁和读者不吝指正。

编著者

2000年11月于上海

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 系统工程	(1)
1.2 过程系统工程	(2)
1.3 现代过程系统工业的特点	(3)
1.4 过程系统工程的有关基本术语	(3)
1.5 过程系统工程研究的问题	(5)
1.6 过程系统工程的应用	(6)
1.7 系统优化的灵敏度分析	(7)
参考文献	(7)
第二章 化工过程系统数学模拟方法	(8)
2.1 单元过程数学模型概述	(10)
2.1.1 机理模型、统计模型和混合模型	(11)
2.1.2 模型的简化	(13)
2.1.3 模型参数	(14)
2.1.4 模型的建立和检验	(15)
2.1.5 模型的数学描述	(16)
2.1.6 模型的自由度	(17)
2.2 化工单元模型和模块	(17)
2.3 化工系统的结构模型	(25)
2.3.1 结构单元图	(25)
2.3.2 图论的基本概念	(26)
2.3.3 系统的结构模型	(28)
2.4 化工系统模型求解方法概述	(33)
2.4.1 序贯模块法	(33)
2.4.2 联立方程法	(35)
2.4.3 联立模块法	(35)
2.5 流程模拟软件及其用途	(39)
2.5.1 流程模拟软件的分类	(41)
2.5.2 流程模拟软件的组成	(42)

2.5.3 几种主要商业化流程模拟软件	(45)
参考文献	(47)
第三章 过程系统的分解	(49)
3.1 系统分隔	(51)
3.1.1 邻接矩阵法	(52)
3.1.2 通路搜索法	(55)
3.1.3 表格法	(62)
3.2 不可再分块的切断	(70)
3.2.1 环路矩阵法	(71)
3.2.2 无多余切断	(74)
3.2.3 切断流股的变量数最少的切断法	(76)
3.2.4 切断边对收敛特性的影响	(77)
3.3 过程系统结构分析实例	(79)
参考文献	(84)
第四章 非线性代数方程组解法	(85)
4.1 概述	(85)
4.2 预备知识	(87)
4.3 直接迭代法	(91)
4.4 曲线拟合一维搜索方法	(93)
4.4.1 二次拟合一维搜索法	(94)
4.4.2 三次(立方)拟合插值法	(97)
4.5 松弛法	(99)
4.6 韦格斯坦法	(99)
4.7 牛顿法	(102)
4.7.1 牛顿法的构成	(102)
4.7.2 牛顿法的收敛性	(103)
4.7.3 牛顿法的修正	(104)
4.8 离散型牛顿法和割线法	(106)
4.8.1 离散型牛顿法	(106)
4.8.2 割线法	(108)
4.9 拟牛顿法	(113)
4.9.1 一般讨论	(113)
4.9.2 秩1算法	(114)
4.10 最小二乘法	(118)

4.10.1 最小二乘法的一般形式	(119)
4.10.2 高斯-牛顿法	(120)
4.10.3 阻尼最小二乘法	(121)
参考文献	(122)
第五章 序贯模块法	(125)
5.1 系统自由度	(126)
5.2 不可再分块迭代收敛的序贯模块法	(128)
5.2.1 直接迭代法	(130)
5.2.2 用 Wegstein 法解 $X = F(X)$	(131)
5.2.3 离散 Newton 法	(135)
5.2.4 拟 Newton 法	(136)
5.2.5 非线性方程组数值解法的改进	(140)
5.2.6 其他可用于过程系统稳态模拟的算法	(143)
5.3 序贯模块法解设计型问题	(144)
参考文献	(147)
第六章 联立方程法	(148)
6.1 过程系统数学模型的特点	(148)
6.2 过程系统数学模型方程组的建立	(149)
6.3 联立方程组中微分方程的处理	(150)
6.4 初值的选取及变量物理意义的限制	(150)
6.5 过程系统非线性方程组的降阶	(151)
6.6 非线性方程组迭代解法的应用	(155)
6.6.1 线性化的方法	(155)
6.6.2 基本迭代法	(156)
6.7 稀疏矩阵的消去法	(159)
6.7.1 Gauss 消去法	(160)
6.7.2 三角形(LU)分解法	(161)
6.7.3 选主元的 Gauss 消去法	(163)
6.7.4 病态系数矩阵的迭代改进	(164)
6.7.5 稀疏矩阵的压缩存储	(166)
6.7.6 消去过程中稀疏性的保持与解的精度的兼顾	(169)
6.8 联立方程法的潜在优势	(177)
参考文献	(177)

第七章 联立模块法	(179)
7.1 联立模块法的基本思想及发展概况	(179)
7.2 两种不同的切断方案及三种不同程式的近似线性方程组	(181)
7.3 不同程式的讨论	(185)
7.4 摄动求近似线性方程组 Jacobian 矩阵的线性化方法	(186)
7.4.1 解析法求子 Jacobian 矩阵	(186)
7.4.2 模块摄动求近似 Jacobian 矩阵	(187)
7.4.3 对角块摄动法求近似 Jacobian 矩阵	(188)
7.4.4 “组合单元”摄动法	(188)
7.5 联立模块法结构分析(系统分解)的特点	(189)
7.6 联立模块法与序贯模块法的比较	(190)
7.7 联立模块三层法	(191)
参考文献.....	(191)
第八章 过程系统的最优化	(193)
8.1 化工过程系统最优化问题的提出及其数学模型	(193)
8.2 过程系统的最优化问题数学描述的一般形式	(200)
8.3 最优化问题及最优化方法概述	(202)
8.4 无约束最优化方法	(204)
8.4.1 单变量函数的优化——一维搜索	(206)
8.4.2 无约束多变量函数的优化策略	(218)
8.4.3 变量轮换法	(219)
8.4.4 负梯度法	(222)
8.4.5 单纯形法	(224)
8.4.6 牛顿型法	(227)
8.4.7 拟牛顿法	(228)
8.4.8 变尺度法	(229)
8.5 有约束多变量函数的最优化方法	(231)
8.5.1 解有约束优化问题的策略	(231)
8.5.2 Lagrange 乘子法	(233)
8.5.3 罚函数法	(234)
8.5.4 既约梯度法	(235)
8.5.5 广义既约梯度法(GRG)	(237)
8.5.6 逐次二次规划(SQP)	(241)
8.6 化工大系统的最优化策略	(245)

8.6.1 化工大系统最优化的基本策略	(245)
8.6.2 基于不可行路径法的两级分解协调法	(248)
8.6.3 黑箱法	(251)
8.6.4 可行路径的联立方程法	(252)
8.6.5 单元模块逼近法	(252)
8.6.6 不可行路径序贯模块法	(253)
8.6.7 不可行路径联立方程法	(254)
8.6.8 不可行路径双层法	(254)
参考文献	(257)
第九章 其他优化问题简介	(258)
9.1 单元设备的优化计算	(258)
9.1.1 目标函数	(258)
9.1.2 数学模型(约束方程)	(260)
9.1.3 自由度分析	(262)
9.1.4 优化方法及计算框图	(263)
9.2 分布参数系统的优化	(263)
9.2.1 分布参数系统优化问题的典型示例	(264)
9.2.2 分布参数系统优化问题的数学描述	(265)
9.2.3 无约束优化问题的求解——变分法	(265)
9.2.4 带约束优化问题的求解	(266)
参考文献	(277)
第十章 过程系统的合成	(278)
10.1 过程合成的基本步骤和方法	(278)
10.2 分离序列的合成	(280)
10.2.1 基本概念	(280)
10.2.2 分枝定界法合成分离序列	(283)
10.2.3 调优法合成分离序列	(287)
10.3 换热网络的合成	(290)
10.3.1 问题的提出	(290)
10.3.2 基本概念	(293)
10.3.3 最优能量回收换热网络的合成方法	(300)
10.3.4 以节能与设备投资为综合目标的换热网络调优	(302)
10.3.5 流股分割	(303)
10.4 系统的热集成	(305)

10.4.1 热泵精馏系统的热集成	(305)
10.4.2 热机与换热网络的系统匹配	(309)
10.4.3 热泵与换热网络的系统匹配	(311)
10.4.4 精馏塔的冷凝器、再沸器与换热网络的匹配	(313)
10.5 其他类型的过程合成	(314)
参考文献	(316)
习题	(317)

第一章 绪 论

过程系统工程是运用系统工程的观点、方法对过程系统进行模拟、分析、评价、优化、控制的一门跨学科的边缘科学,20世纪60年代以来化学工程解析科学、电子计算机技术的飞跃发展,应用数学向化工领域的日益渗透,以及商品经济市场竞争的推动,为本学科的发展提供了扎实的理论基础、精确快速的计算工具和良好的应用环境。而化工生产规模的日趋大型化、综合化,产品更新换代的日益频繁,现代化生产对原料及能源综合利用要求的提高,社会对于化工生产对环境影响的愈来愈多的关注构成了本学科发展的巨大动力。

在介绍过程系统工程具体的研究方法和技术之前,有必要对过程系统工程的学科发展历史、研究内容及对象、学习本学科所需的相关基础知识以及一些基本概念作一个简略的介绍。

1.1 系统工程

系统工程是20世纪50年代形成的新兴学科,目前正处于兴旺的发展时期,各种有关系统工程理论的书对系统工程的定义还未完全统一。

1984年郑春瑞在《系统工程学概论》中,对系统工程做出下列综合性的阐述:系统工程学是以系统(尤以大系统)为研究对象的一门跨学科的边缘科学。它是根据总体协调的需要,把自然科学和社会科学中的某些思想、理论、方法、策略和手段等从横的方面有效地组织起来应用于人类实践中,是应用现代数学和电子计算机等工具对系统的构成要素、组织结构、信息交换和自动控制等功能进行分析研究,从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目标,是为更加合理地研制和运用系统而采取的各种组织管理技术的总称,归根结底是一种工程学的方法论。

系统工程可简单地定义为:从全局的观点出发,用定量和定性相结合的方法,从技术、经济、社会的角度,对一个大系统作全面的模拟、分析、评价、优化和控制。

总之,系统工程是方法论对于复杂系统研究的应用。它与其他基础科学的区别在于,其重点是研究解决系统问题的方法,而不是讨论构成系统的基本单元的基本原理、规律和特性。

20世纪30年代美国雷德无线电公司在对电视广播系统的电波覆盖问题进行研究时,首先提出“系统”和“系统规模研究”的思想。40年代,美国贝尔电话公司

在研究微波通讯网络的覆盖传输效率时,提出了“系统工程”的概念。第二次世界大战期间,由于军事行动的需要和促进,盟军应用系统工程(严格地讲是运筹学)的方法对防空炮火配备、军事运输、后勤供给系统进行了大量研究,从而加快了系统工程学的研究和发展。50年代,由于战后世界经济发展的需要,系统工程的研究方法开始受到各工业化国家的重视。如1954年美国MIT首先在大学讲授系统工程课程。1957年美国正式出版了第一本专著——《系统工程》。60年代起系统工程的方法逐步推广应用于工业、宇航、交通、经济规划等部门。70年代,我国学者华罗庚致力于运筹学的推广应用。1978年,中国学者钱学森在《文汇报》上发表了我国第一篇系统工程的文章,标志着我国的系统工程研究进入了一个蓬勃发展的阶段。

1.2 过程系统工程

过程系统工程是系统工程的一个分支,它的研究历史晚于系统工程,把系统工程的一套研究方法、观点、思路应用在过程系统的模拟、评价、优化、合成和控制等问题中,形成了过程系统工程学。过程系统曾称为化工系统工程、化工系统模拟分析等。实际上,对物料进行物理的或化学的加工处理泛指为过程,特定的单一过程称为过程单元。而由过程单元的组合构成一个网络,使原料转变为期望产品,同时产生增值效应的系统称为过程系统。由此可见过程系统不仅仅指化工过程系统,它涵盖了整个这一类型的过程网络,如化工、冶金、材料、生化、医药的生产过程。现代的过程系统,形成于20世纪初,但一开始都是采用费时费力费财的逐步放大方法,从小实验开始,经过许多的中间试验才形成工业规模的生产。直到30年代,出现了“相似”原理,借助一系列“准数”用相似模拟的方法实现过程单元的放大问题,但“相似”放大为半经验型的方法,仍不能解决高效开发化工过程的放大问题。稍后又出现了一种数学模拟放大的方法,它是建立在对机理了解基础上进行合理简化而得到的数学模型。但由于这些模型往往相当复杂,非线性程度很高,限于当时数值求解等应用数学方法的滞后以及快速有效的计算工具的缺乏,数学模拟法未能达到真正实用的阶段。

随着1946年世界上第一台电子计算机的发明以及应用数学理论、方法的发展,为数学模拟提供了良好的工具。50年代起非线性方程组的求解及最优化已不再成为障碍,而化学工程本身的深入发展,“三传”、“一反”的归纳,使化学工程学的理论研究达到了空前的水平,利用数学模型实现高倍数放大成为现实。如1961年,美国的Goodyear公司与S.D.公司合作开发丙烯双聚制异戊橡胶的过程,从小试(近10kg/d)一次放大到4.5万t/a的工业规模;甲苯歧化反应器的放大倍数达

6000 倍;裂解炉放大倍数达 6000~20000 倍,合成丙二醇反应的精馏过程更是成功地实现了 12000 倍的一次直接放大。同时,模拟法在操作优化上也大显身手,如某合成氨厂(4.5 万 t/a)在不增加投资的情况下,通过模拟优化,改变操作条件,达到了增产 10% 的效果。

60 年代初,人们开始认识到过程单元优化的简单组合并不等于过程系统的优化,系统愈大,整体优化的效果愈好。在解决过程单元的模拟、优化、放大的方法问题之后,开始着眼于对整体工艺系统的模拟、优化、设计、控制。在这种背景下产生了综合运用多学科研究成果的过程系统工程学,因此这是一门涉及化学工程、系统工程、应用数学、过程控制论等学科的边缘科学。

1.3 现代过程系统工业的特点

现代过程工业愈来愈注重于物料、能量的综合利用,这就不可避免地使大多数现代过程工业,特别是化学工业,采用了多次循环的复杂网络系统,多种产品、多种牌号的产品结构。由于要根据资源情况(质和量)实现高经济效益的满负荷操作,对设计提出了更高的要求,不再满足于靠“相似模拟乘上安全系数”式的落后设计方法,以及根据定性的工艺分析,将单元过程简单组合成完整的工艺流程,进行过程系统的分析设计。对设计提出高精度的理念,要求减小设计余量,优化投资与操作费用。过程工业向高效、节能、洁净型发展。

由于现代过程工业的复杂性,相应的过程系统模型为具有高度非线性的由代数、微分(偏、常微分)方程混合组成的数学模型,模型中包含大量的过程参数和高维状态变量,且是高度交联、耦合的。

此外,现代过程工业还具有操作可调、工艺灵活、产品多样、控制系统化的特点。

原料的多样性(尤其石油化工工业)、产品更新换代周期的加快、世界经济一体化、商品经济竞争的残酷性都要求加快产品开发的速度。谁掌握了先进的开发方法,谁就能立于世界经济竞争的制高点,在这方面落后就意味着失去生存空间。

1.4 过程系统工程的有关基本术语

1. 数学模型

为了实现对过程系统的操作模拟、设计、控制及最优化,首先必须解决的问题是用定量的方式即用数学表达式来描述所研究的对象。数学模型就是物理实体的数学抽象,即关联研究对象的输入、输出以及一系列参数的数学方程式(组)。数学

模型通常由一组线性或非线性代数方程和微分方程组合而成,它完全不同于原始对象的实体,便于在计算机上实施与实体等效的运作,从而开辟了一条“机上谈兵”的捷径。

根据涉及事物机理的程度,数学模型可分为机理模型、统计模型和混合型模型。所谓机理模型是凭借对过程或过程系统机理的认识,经合理简化建立起来的模型。由于其具有揭示事物本质的特点,故此类模型比较复杂,求解也较困难,但它具有良好的等效性和外推性,因此也称为严格模型、白箱模型。而统计模型则完全不考虑研究对象的真实机理,仅凭借对过程或过程系统的输入、输出的了解,简单地用统计方法回归而成。此类模型只求等效性,相对机理模型比较简单,易于求解,但无外推性,因此可称为“黑箱”。至于介于上述两种极端模型之间的半经验半机理模型,称之为混合型模型,也称为“灰色”模型。

机理模型由于其以严格机理为背景,故精确、可靠,适用于模拟分析、优化,因其复杂、难解、费时而不适宜用于在线控制、操作调优。统计模型的用途则恰恰与理论模型相反,主要用于控制和调优,得益于它的简单、易解及计算效率高的特点,而混合型模型则介于上述两者之间。

2. 模型化与模拟

一个正常生产的工厂(过程系统)不可能为了了解其性能而随意让人冒着破坏正常生产秩序甚至爆炸的危险对其操作参数、原料、设备、流程作大幅度的调整。为了方便、安全、经济地研究一个复杂的对象,常常以一个相对比较简单系统 B 来代替对象系统 A。系统 B 必须在其主要系统性能、操作特性、应答特性上与系统 A 一致,或者说等效,且系统 B 要较系统 A 容易进行试验或解算。因此有必要将过程系统抽象成数学模型,这种将原型抽象成数学模型的过程就是数学模型化,而通过对数学模型的研究达到了解、认识原型特性的这种方法称为数学模拟。实际上模拟包括相似模拟和类似模拟。通常实验室小试,工程放大技术中的中试属于相似模拟,数学模拟则属于类似模拟的范畴。相似模拟和类似模拟在当代化学工程研究及过程系统开发中互为补充,相辅相成,成为过程开发的两个必不可少的手段。

3. 过程系统模拟分析与优化

在确定过程系统的结构及其子系统特性的前提下,借助计算机和系统模型,通过数学模拟的方法,推测特定系统的特性,确定其各部位信息和总体技术经济指标的方法称为过程系统模拟分析。

过程系统的优化可以分成两大类:一类是对确定过程系统的优化,如化工厂的操作优化以及在确定工艺流程前提下的设计优化,通常是求取能使过程系统的目标函数(某些技术经济指标的综合)极小(或极大)的最佳决策变量(某些灵敏的可

调操作变量)的值,这一类优化常常被称为过程系统的优化;另一类对不确定的过程系统的优化,通常给定输入、输出或仅给定其中之一,要求取能使目标函数最优的最佳过程系统,称为过程系统合成或过程系统综合。

1.5 过程系统工程研究的问题

过程系统工程的主要研究内容是如何实现过程系统的操作模拟、设计模拟、操作优化、设计优化以及过程系统的最优合成。下面将通过一个例子来说明之。

图 1.1 表示一个经简化的在实际过程系统中具有代表性的化工流程系统,如无机化工中的合成氨反应系统、石油化工中的乙烯催化氧化制环氧乙烷反应吸收系统均可简化成如图所示的典型化工流程系统。 X_0 、 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 分别为流股变量向量。

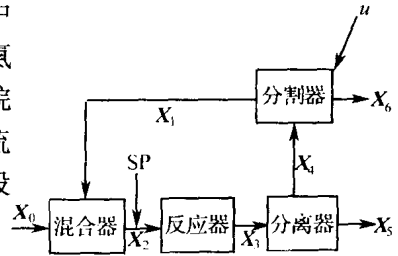


图 1.1 一个典型的化工流程系统

原料气经与未反应循环气混合后进入反应器反应,含有目的产物的反应器出口物料进入分离器分离产物,未反应的原料经分割器(分割比为 u)放掉部分惰性物质,然后回去与新鲜原料混合。

1. 模拟问题

已知系统的输入(X_0),过程参数(u)以及系统中各单元(混合器、反应器、分离器、分割器)的特性,已知系统的拓扑结构(如图 1.1 所示),求过程系统的输出状态(X_5 、 X_6)以及系统中其他所有流股(X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4)的信息,模拟的目的是获得给定系统的应答特性。

2. 设计型问题

已知系统的输入、单元特性以及系统的拓扑结构。求在满足某个设计规定 SP (在该例中,要求混合器出口的惰性组分的分率为 4%)的条件下,系统的输出、系统中其他所有流股的信息以及与设计规定相对应的过程参数(在该例中,为分割器的分割比 u)。

3. 优化问题

已知系统的输入、系统特性、系统结构,求优化目标函数极值(在该例中,优化目标为目的产物的利润最大)以及此时的决策变量(在该例中,决策变量是反应器的温度 T 和分割比 u)的数值。

4. 合成问题

已知输入(用什么原料)、输出(制什么产品),求为达到生产目的在某个目标函

数(如以设备投资的折旧率与操作费用为复合目标)下的最佳工艺流程(过程系统)。当然也可能仅已知输入、生产中的一项求最佳过程系统。归纳起来合成问题的形式见图 1.2。

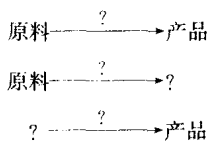


图 1.2 过程合成问题

在以上四类问题中,模拟问题是基础,其他问题均是在过程系统模拟的基础上作更深层次的探讨。

过程系统工程经过 40 年的发展,目前在系统模拟、系统优化方面的技术已相当成熟。商品化的计算机辅助工程模拟分析软件也已历经了一个逐步改进完善的过程,已相当实用化,其中最著名的是通用化工模拟系统 ASPEN PLUS、PRO-II (PROCESS-II)。此外还有许多专用于某一特定流程的专用模拟系统,当然专用软件比通用软件的精度更高一些,等效性更好些。我国青岛化工学院开发研制的通用模拟软件 CESS 也已达到了一定的水平。相比之下,过程系统的合成的研究大约晚了 10 年左右,自 1968 年美国威斯康星大学 Rudd 教授首先提出过程合成概念以来,虽然也已有了很大的发展,但这一技术除了在少数特殊的应用领域外(如分离序列合成、换热网络合成),还仅仅处于理论研究阶段,离实用化、商业化比较远。

1.6 过程系统工程的应用

在系统开发初期运用过程系统工程的研究方法可对过程工艺流程进行经济评价及可行性研究,从而得到方案的概念设计。在设计新厂时,运用系统模拟、优化的手段,配合适当的中试,可以大大加速系统开发的速度,缩短开发周期,降低开发费用,提高设计精度和经济效益。对于已建成的老厂,则可通过系统模拟分析寻找最佳的操作条件,以提高生产效益。由于原料组成的改变(如油品)、产品品质要求的变化等因素引起的对生产操作调整的要求,也可通过系统模拟与优化来解决。此外还可用于老厂的改造,如调整局部工艺,包括个别设备的改造和工艺路线的改进,开工指导等。

作为过程系统预测、决策的手段,系统开发的方法可用于从众多方案中选择最佳的工艺路线,综合设备投资、能耗、物耗、产品质量、操作费用、环境友好等因素,用系统合成的方法找出经济效益最大的方案,为国民经济发展决策提供依据。

另外,应用计算机过程系统辅助操作软件 CAO 可对操作人员进行“在线”的生产培训、事故处理、开停车等不宜在实际装置上进行的培训工作。计算机辅助过程系统教育软件 CAI 可用于学校教学的辅助工具。

借助过程系统工程的原理应用计算机辅助工艺设计系统(CAPD)对过程系统

进行模拟分析、优化和合成的优点在于:

- (1)经济性:减少中间试验,节省人力物力。
- (2)外延性:可用于极端条件下的过程性能的研究。
- (3)互换性:变更单元模块或系统结构,方便地实现方案评价和比较。
- (4)精确性:如单元和系统模型均为严格机理模型,则系统模拟、优化的精确、等效程度是很高的。
- (5)预测性:可预测可调变量的稳定性和灵敏度。

1.7 系统优化的灵敏度分析

在过程系统模拟分析时,用数学模型来描述系统及其单元,而这些数学模型不过是实际过程的某种程度的近似,然后运用数学的方法和电子计算机对这些模型求所谓最优解。但是由于在推演和识别过程中的假设、简化近似和计算误差产生了模型的许多不确定性。这些不确定性包括模型中所包含参数的置信精度、参数对时间的依赖程度、操作变量的扰动以及数学模型结构的合理程度等等。这些不确定性势必会产生这样的问题:为此花费很大劳力所得到的最优解对于指导实践究竟有多大的价值?可靠性如何?为了弥补由于模型不确定性所引起的系统最优解的不确定性应当采取什么样的对策,如取多大的“安全系数”或设计裕量才是合理的?这些问题涉及到最优的结果是否真有成效,理论研究是否能真正解决所涉及的问题是一个重要问题。

优化的灵敏度分析就是用来解决这个重要问题的。其主要分析以下三个方面的内容:(1)过程系统的输出关于模型参数和操作参数的灵敏度;(2)最优化目标函数关于模型参数的灵敏度;(3)当求出的最优操作条件发生扰动时,最优化目标函数所受到的影响的灵敏度。

参 考 文 献

- [1] 钱学森等.组织管理技术——系统工程.文汇报,1978
- [2] H. H. Goode, R. E. Machol. System Engineering. McGraw-Hill, 1957
- [3] 刘豹等.系统工程概论.北京:机械工业出版社,1987
- [4] 郑春瑞.系统工程学概述.北京:科学技术文献出版社,1985
- [5] 张瑞生,沈才大.化工系统工程基础.上海:华东理工大学出版社,1991