

杨冀宏 麻德贤 编著

过程系统 工程导论



化学工业出版社

73.82
683

过程系统工程导论

杨冀宏 麻德贤 编著

(三/CS97/35)
3K57/02

烃加工出版社

内 容 简 介

本书较全面地介绍了过程系统工程各个领域的基本内容和近年来的主要研究成果。

全书共分十五章：第一章介绍了过程系统工程的概况；第二章至第七章讨论了过程单元及系统的模型化和模拟分析方法；第八章至第十章讨论了过程系统参数的优化技术；第十一章至第十四章叙述了过程系统综合的方法与进展；第十五章为过程系统开发方法与应用实例介绍。

本书取材新颖、内容丰富，可作为高等院校有关专业高年级学生及研究生的教材或参考书，也可作为石油、化工、轻工、医药、冶金等专业的科研、生产、教学和应用开发的科技人员全面了解过程系统工程这一新兴学科的入门参考书。

过程系统工程导论

杨冀宏 麻德贤 编著

*

烃加工出版社出版

北京化工学院七系计算机应用教研室排版

经伟印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 21.75印张 552千字印1—3000

1989年9月北京第1版 1989年9月北京第一次印刷

ISBN 7-80043-132-0/TQ·077 定价：8.95元

序 言

六十年代初，在化学工程、系统工程、运筹学、计算机技术、数值计算、过程控制论等学科发展基础上萌生出一门新兴的边缘学科——过程系统工程。尽管这门学科出现较晚，但由于在过程设计、开发、操作、控制等方面具有广泛的指导意义，因此愈来愈受到工程技术界的普遍关注。

大约在七十年代后期，国内才开始着手过程系统工程方面的研究和教学工作。时至今日，开设这门课程的学校仍为数不多。在国内，这门学科还未被人们普遍了解。

从七十年代末开始，本书作者在北京化工学院开设了“过程系统工程”课程，并指导学生开展有关领域的研究工作。实践中我们深感缺少一本好的教学参考书。于是在广泛搜集、整理有关资料的基础上，我们编写了一套《化工系统工程》讲义，较详细、全面地介绍了如何运用系统工程的理论和方法，对石油化工、煤化工、精细化工、生物化工、轻工、医药、冶金等化学加工工艺过程进行模化、模拟、优化和综合。经过几年的教学实践，我们觉得有必要把该讲义进一步修改、完善、提高后介绍给全国广大读者。改编后的这本书取名《过程系统工程导论》，动机之一是突出该书的普适性。

由于编者的水平、实践和时间的限制，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

一九八八年春于北京

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1-1 系统工程与过程系统工程	(1)
一. 系统	(1)
二. 过程与过程系统	(1)
三. 系统工程	(3)
四. 过程系统工程	(4)
§ 1-2 过程系统工程的研究内容	(5)
一. 分析与综合	(5)
二. 过程系统分析与综合	(5)
三. 过程系统工程与其它学科的关系	(6)
§ 1-3 过程系统工程的研究方法与手段	(7)
一. 数学模型化与模拟	(7)
二. 数学模型的类型	(8)
三. 计算机辅助流程模拟系统	(9)
四. 专家系统	(10)
第二章 过程单元的模型化与模拟	(11)
§ 2-1 过程单元的自由度分析	(11)
一. 自由度概念	(11)
二. 物流的自由度	(12)
三. 过程单元的自由度	(15)
§ 2-2 过程单元的模型化与模拟	(22)
一. 闪蒸单元的模型与类型	(22)
二. 等温闪蒸过程的模拟	(23)
三. 绝热闪蒸过程的模拟	(27)
第三章 过程系统的模型化与自由度分析	(31)
§ 3-1 过程系统的模型化	(31)
一. 有向图描述系统结构	(31)
二. 有向图的矩阵表示——结构矩阵	(32)
三. 过程系统结构的表格表示——结构表	(35)
四. 系统结构的代数表示——联结方程	(36)
§ 3-2 过程系统的自由度	(37)
一. 过程系统的自由度分析	(37)
二. 决策变量的确定	(40)
第四章 过程大系统的分解	(48)
§ 4-1 不相关子系统的识别	(48)
§ 4-2 不可分隔子系统的识别	(50)

一. 不可分隔子系统	(50)
二. 矩阵法识别不可分隔子系统	(51)
三. 通路搜索法识别不可分隔子系统	(62)
第五章 过程系统的序贯模块模拟法	(67)
§ 5-1 过程系统模拟的三种基本方法	(68)
一. 序贯模块法	(68)
二. 面向方程法	(69)
三. 联立模块法	(69)
§ 5-2 序贯模块法原理	(70)
§ 5-3 再循环流股的断裂	(71)
一. 断裂的基本概念	(71)
二. 断裂方法的分类	(73)
三. 回路矩阵	(73)
四. Upadhye-Grens 断裂法(1)	(74)
五. Upadhye-Grens 断裂法(2)	(78)
§ 5-4 断裂流股变量的收敛	(84)
一. 收敛单元	(85)
二. 直接迭代法	(87)
三. Wegstein 法	(89)
四. Broyden 法	(91)
五. 收敛判据	(95)
§ 5-5 序贯模块法解设计问题	(95)
第六章 过程系统的面向方程模拟法	(97)
§ 6-1 面向方程法原理	(97)
§ 6-2 大型稀疏非线性方程组的降维解法	(98)
一. 方程组的分解概念	(98)
二. 输出变量的指定方法	(100)
三. 回路搜索法分解方程组	(102)
四. 不可分解稀疏方程组的断裂降维解法	(103)
五. $n < m$ 型稀疏非线性方程组	(104)
六. $n > m$ 型稀疏非线性方程组	(105)
§ 6-3 联立拟线性方程组法解大型稀疏非线性方程组	(105)
一. 线性化方法	(105)
二. 线性方程组的消去解法	(107)
三. 大型稀疏线性方程组的解法	(110)
第七章 过程系统的联立模块模拟法	(116)
§ 7-1 联立模块法原理	(116)
§ 7-2 建立简化模型的两种切断方式	(119)
一. 联结流股全切断方式	(119)
二. 回路切断方式	(120)

§ 7-3 单元简化模型	(122)
一. 线性简化模型	(122)
二. 非线性简化模型	(126)
第八章 过程系统参数的模拟优化法	(130)
§ 8-1 最优化基本概念	(130)
一. 最优化问题的数学定义	(130)
二. 最优化方法的分类	(133)
三. 过程系统参数优化的类型及特点	(134)
§ 8-2 稳态模拟优化法原理	(137)
一. 稳态模拟优化方法	(137)
二. 稳态模拟优化方法评价标准	(138)
三. 系统模拟优化采用的最优化方法评述	(139)
§ 8-3 可行路径过程系统参数优化法	(140)
一. 可行路径黑箱搜索法	(140)
二. 可行路径联立模块法	(141)
§ 8-4 Wilson-Han-Powell 序列二次规划法	(143)
一. 数学规划理论基础	(143)
二. Wilson 序列二次规划法	(145)
三. 无约束最优化的拟牛顿法	(147)
四. Wilson-Han 算法	(148)
五. Wilson-Han-Powell 算法	(149)
六. W-H-P 算法特点	(152)
§ 8-5 不可行路径面向方程法	(153)
一. HQP 问题的分解	(153)
二. 符号高斯消去	(155)
三. Hesse 矩阵更新的 Berna 法	(156)
§ 8-6 不可行路径联立模块法	(158)
§ 8-7 不可行路径序贯模块法	(161)
一. 收敛模块的扩展——优化模块	(161)
二. IPOSEQ 算法	(162)
三. IPOSEQ 的应用	(164)
第九章 过程系统参数的统计调优法	(165)
§ 9-1 统计调优法原理	(165)
§ 9-2 统计调优模型的建立	(167)
一. 多元线性回归分析	(168)
二. 多元线性逐步回归分析	(171)
三. 线性模型的推广	(174)
§ 9-3 回归试验设计	(175)
一. 回归的正交设计	(175)
二. 回归的均匀设计	(177)

§ 9-4 调优搜索	(180)
第十章 动态系统参数的变分优化法	(181)
§ 10-1 无约束连续系统的最优化	(181)
一. 泛函极值的必要条件	(181)
二. 泛函极值的充分条件	(183)
§ 10-2 有微分形式约束方程的连续系统优化	(183)
一. 目标函数不含终态	(183)
二. 目标函数含终态 (终态时刻固定, 终端无约束)	(188)
三. 目标函数含终态 (终态时刻不定, 终端有约束)	(192)
四. 连续系统参数优化的数值解法	(195)
§ 10-3 有不等式约束的连续系统优化	(196)
第十一章 反应路径的综合	(197)
§ 11-1 过程系统综合基本概念	(197)
一. 过程系统综合及其在过程系统设计中的地位	(197)
二. 过程系统综合问题分类	(198)
三. 过程系统综合的基本方法	(199)
§ 11-2 反应路径的类型与综合方法	(200)
一. 反应路径的类型	(200)
二. 反应路径综合的模式与策略	(203)
三. 反应路径的综合方法	(204)
四. 反应路径综合与过程综合的关系	(205)
§ 11-3 矩阵法	(205)
一. 分子表达——BE 矩阵	(205)
二. 化学反应的表示——R 矩阵	(206)
§ 11-4 符号三角形法	(209)
一. 有机分子表达方法	(209)
二. 有机反应的表达方法	(211)
三. 综合树的产生方法	(213)
§ 11-5 几何法	(215)
一. 嵌套多边形	(215)
二. 自由能-反应条件图	(217)
三. 公差作为公共边的综合方法	(218)
四. 假想公差	(220)
§ 11-6 系统综合中反应路径的早期筛选	(222)
一. 产量与消耗分析	(222)
二. 不完全反应产量与消耗分析	(223)
第十二章 热回收网络的综合	(225)
§ 12-1 热回收网络综合的进展	(225)
§ 12-2 TI-ED 法综合热回收网络	(226)
一. TI 法寻求最大能量回收网络	(226)

二. 热回收网络的 ED 法调优	(233)
§ 12-3 狭点设计法综合热回收网络	(244)
一. 狭点	(244)
二. 狭点的特性	(246)
三. 狭点位置的确定	(248)
四. 狭点设计法综合能量最优热回收网络	(249)
五. 热回收网络的调优	(254)
第十三章 分离序列的综合	(257)
§ 13-1 基本概念	(257)
§ 13-2 数学规划法综合分离序列	(261)
一. 动态规划法	(261)
二. 分枝界限法	(265)
三. 有序分枝搜索法与有序搜索法	(272)
§ 13-3 探试法综合分离序列	(276)
一. 探试法则	(276)
二. 有序探试法	(278)
§ 13-4 调优法综合分离序列	(281)
一. 调优法原理	(281)
二. 调优法寻求最优分离序列实例	(283)
第十四章 具有热集成的分离序列综合	(286)
§ 14-1 问题的特点与综合方法	(286)
一. 问题的陈述及特征	(286)
二. 综合的方法与策略	(287)
§ 14-2 动态规划法综合热集成精馏序列	(288)
§ 14-3 分枝界限法综合热集成精馏序列	(291)
一. 严格数学界限法	(291)
二. 公用工程界限法	(295)
§ 14-4 热集成精馏序列综合的分解策略	(304)
第十五章 过程系统工程应用实践	(305)
§ 15-1 化工过程开发方法	(305)
§ 15-2 自热式轴向多段冷激氨合成塔的模型化、模拟与优化设计	(307)
一. 自热式轴向四段冷激氨合成塔的模拟	(307)
二. 自热式四段冷激氨合成塔的优化设计	(312)
§ 15-3 氨合成回路的模拟	(320)
§ 15-4 乙烯氧化反应器的操作参数调优	(324)
一. 环氧乙烷生产概况	(324)
二. 影响因素分析与数据处理	(326)
三. 模型建立	(329)
四. 参数优化	(331)
参考文献	(332)

第一章 概 论

§ 1-1 系统工程与过程系统工程

一. 系统

系统是由相互联系、相互作用的若干组成部分结合成的具有特定功能的总机体。

(钱学森)

由电器构件构成的电网或电路，化工设备和管道等构成的生产流程，管理部门构成的职能系统，公路、铁路构成的交通网等都是系统。系统具有三个主要特点：

- ① 系统存在于环境中；
- ② 系统的大小是相对的，边界是人为划定的；
- ③ 系统具有嵌套性（或阶层性），系统往往可以划分成若干个子系统，而每个子系统又可能分解成若干更低一级的子系统。

例如，化工联合企业可以看作系统，所属的工厂可看作该联合企业的子系统，工厂又可分为若干个车间，车间的子系统是工段，等等。而化工联合企业又可看作是上级主管部门（如化学工业部，中国石化总公司）这一职能系统的子系统。根据研究的需要，我们可以人为地规定系统的范围，以便于问题的求解。

二. 过程与过程系统

对原料进行物理的或化学的加工处理称作过程。特定的过程称作过程单元，分离过程单元，反应过程单元，换热过程单元等都是过程单元。过程单元按照一定的方式相互联结在一起形成的网络称作过程系统，如化工过程系统，石油加工过程系统，医药生产过程系统，冶金过程系统，等等。过程单元间是通过物料流和能流相互联结的。物料流籍助于管线、输送带传送，能流包括热流和功流。图 1-1 中的过程系统由四个过程单元组成，它们之间由管

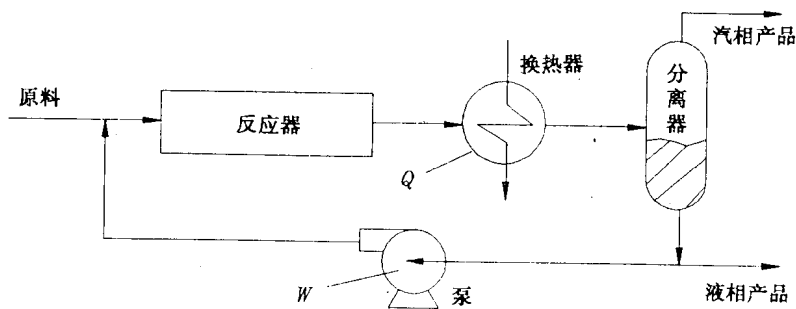


图 1-1 过程系统

线联结（物料流），热流 Q 和功流 W 则属于能流。因此，过程系统又可定义为：

过程系统 = {过程单元} + {单元间联结关系}

过程单元间联结关系的集合称为“系统结构”。当一个系统由具有特定功能的各个过程单元按

照一定的方式相联结时，就确定了一定的系统功能，即可以使系统的输入流股转变成系统的输出流股。系统功能表现为系统与环境间的相互作用，环境向系统提供输入量，同时又接受系统的输出量。我们可以采用不同的过程单元和系统结构构造可达到同一系统功能的多个系统，但就满足系统功能的效果（如利润，投资，原料路线）而论，这些系统是各不相同的。

根据不同的分类原则，有下面几种过程系统的分类方法。

（一）按过程系统功能分类

按系统功能分类，多以单元操作可明确地表征和区别的系统进行分类，如：

- ① 换热系统（热回收系统）；
- ② 物料分离系统；
- ③ 具有热集成的物料分离系统；
- ④ 物料混合系统；
- ⑤ 物料变换系统（反应系统）；
- ⑥ 控制系统；
- ⑦ 开停车系统；
- ⑧ 备用系统。

若系统仅仅是由同类型的过程单元所组成，例如仅由换热级或蒸馏级组成，则称该系统为“同类（或均质）”系统，反之为“非同类（或非均质）”系统。

所有的实际系统都是非同类的。但在研究过程中，可以忽略系统中的非同类单元，通过相应的简化可以将实际非同类系统转化成便于研究同类系统。

（二）按过程系统结构分类

通常过程系统十分复杂，若对系统仔细考察可以发现，过程单元均以下面四种典型的方式互相联结在一起：

- ① 串联联结；
- ② 并联联结；
- ③ 绕行（旁路）联结；
- ④ 反馈联结。

图 1-2(a)~(e)分别表示单元的串联，并联，绕行和反馈联结。反馈联结比其它三种结构在实际处理中要困难得多，这是由于它具有环形结构。而串联，并联，绕行联结不具有环

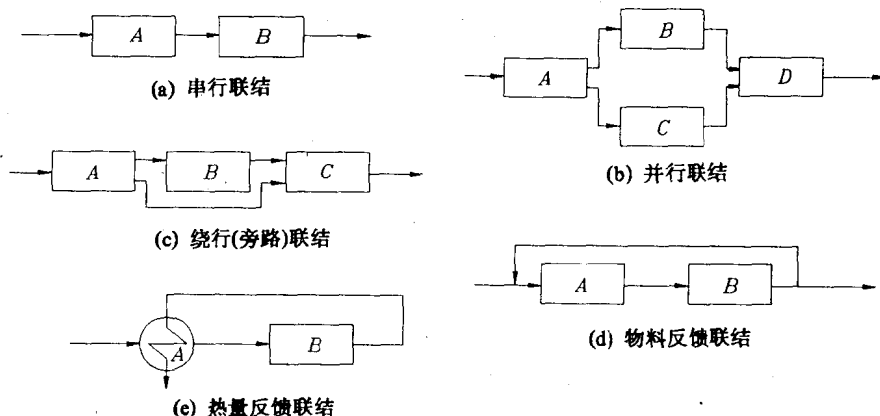


图 1-2 过程系统基本结构

形结构，它们属于树形结构。

在实际过程系统中，上述基本结构往往是交织在一起的。如图 1-3 中就包括了串联，并联，绕行，反馈四种基本结构。无论系统有多复杂，也是由若干具有基本联结结构的子系统构成的。

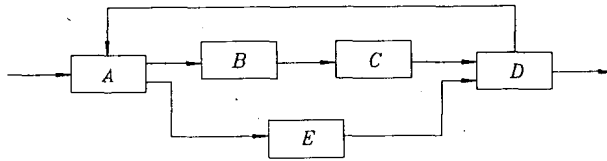


图 1-3 复杂系统

(三) 按输出的时间行为分类

基于系统输出量（特别是产品物料流）随时间的变化关系，可分为：

- ① 连续系统；
- ② 拟连续系统；
- ③ 间歇系统。

在一定的时间域内，若系统输出量不随时间变化，则系统为连续的；若系统输出量随时间显著变化，则为间歇系统；若系统输出量随时间变化十分缓慢，可用平均值表征系统，则为拟连续系统。例如，系统中包括多个间歇操作的单元，且操作循环周期调整到使系统的输出量几乎不随时间变化，则该系统是一种拟连续系统。三个并联循环操作的吸附级系统就是拟连续系统的一个典型例子。

三. 系统工程

系统工程无论在理论上还是在实践上都处于发展的初期，目前还没有形成一致公认的确切定义。

1978 年钱学森^[1]教授指出，系统工程是“组织管理（这种）系统的规划、研究、制造、试验、使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。”

1984 年郑春瑞^[2]在《系统工程学概述》一书中列举了国际上一些著名学者关于系统工程的定义，最后给出的综合性定义如下：

系统工程学是以系统（特别是大系统）为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，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。

1981 年，日本京都大学高松武一郎^[3]教授指出，系统工程属于工程领域，是对系统作出工程决策的方法学。而系统由若干子系统或部分组成，且必须满足和达到任意给定的条件和目标。

从上述定义中不难看出，尽管系统工程的定义有多种，但在系统工程属于方法学这一认识上是一致的。系统工程不同于基础学科，其重点在研究解决系统问题的方法上，而不在探讨基本原理和定理上。

系统工程萌芽于1930年,美国雷德无线电公司在开发与研究电视广播过程中初步形成了“系统”与“系统化处理”等概念。1940年,美国贝尔电话公司实验室正式采用系统工程这个术语,在发展美国微波通信网络时应用了系统工程学的方法论,按照时间顺序把工作划分为规划、研究、发展、发展期间的研究、通用工程等五个阶段,取得了良好效果。第二次世界大战期间,盟军为了有效地对付德军,组织了一个有数学家、物理学家、军事专家等各方面人员参加的“军事行动研究小组 (Research in Military Operations)”,旨在制定作战计划,如解决护航舰队的编制、防空雷达的配置等问题,从而发展了运筹学 (Operation Research) 的理论 (运筹学是系统工程的重要理论基础之一)。1950年,美国麻省理工学院试验了系统工程学的教育,并于1954年正式开设了系统工程的课程。1957年,美国密执安大学的 Goode 和 Machol^[4]两位教授发表了第一部专著“Systems Engineering”。从六十年代以来,美国阿波罗登月计划的成功 (1969),无人化机械制造厂的诞生 (1980),都是系统工程应用的成功范例。1978年,钱学森教授题为“组织管理技术——系统工程”文章^[1]的发表标志着我国在这一新兴领域工作的全面展开。

四. 过程系统工程

将系统工程的思想、方法用于解决过程系统的设计、开发、操作、控制等问题,就形成了过程系统工程。过程系统工程又称化工系统工程,化工过程系统工程,系统工程在化工中的应用,化学控制论,过程系统的模拟与分析,等等。在不同的国家里,发展这个新兴学科的先驱者来自不同的学科领域是该学科名称不统一的主要原因。根据前面“过程”的定义可以认为,“过程系统工程”的概括性更广一些,因此本书中将统称过程系统工程。

化工生产是一门历史悠久的生产工艺。在本世纪初,对化学生产工艺的研究方法还是很原始的。无论是对新生产工艺的开发,还是对已有生产工艺的改造,都是采用逐级放大的办法。即从实验室的试验开始,经过中间工厂的中试再放大到生产工厂去实现生产,从而解决设备尺寸和操作参数的确定问题。这种开发过程是很费时间的,往往要花十来年的时间才能完成。财力、人力的耗费很大,放大的倍数也是很有限的,每级仅限于50倍。到了二十年代,从大量的化学工艺过程研究实践中认识到,不管是什么产品的化学生产,差不多都是这样一个程序,即原料净化——化学反应——产品的分离提纯;而且不管是哪一种化学生产,都有一些相类似的过程,如流体输送、加热、冷却、吸收、蒸馏等等,从而建立了单元操作的概念。任何化学生产流程,都是由各种单元操作组成的。为了更深入地掌握化学生产的规律,人们开始了对这些单元操作的深入研究,进而建立了化学工程这门新学科,这是化学工程研究发展史上的一个飞跃。三十年代,为了解决单元操作的放大问题,出现了相似原理,建立了相似模拟法。这种方法的概要是:首先找出过程的影响因素,用因次分析的方法整理出相似准数,然后通过实验建立这些准数的关联式,得出准数方程,应用准数方程就可以实现单元操作的放大问题。相似模拟法仍然是个半经验的方法,虽然摆脱了原始的逐级放大方法,但还不能解决化学反应过程的放大问题。三十年代初期出现了另一种开发放大的方法,即数学模拟放大法。这个方法的概要是:以被研究对象的过程机理为依据,应用数学工具来进行描述,建立数学模型。这种数学模型通常是一组微分方程组。应用这种方法,不仅能完善地描述各种物理过程,也能描述各种化学反应过程。对这个数学模型给出边界条件,应能求解得出答案。但是,由于这些微分方程组往往是非线性的,求解很困难,所以在当时限制了这种方法的发展。

五十年代初,化学工程研究开始采用电子计算机技术,又由于数值计算方法的发展,使

得数学模型的求解不再是难以逾越的难关,从而使化学工程,包括化学反应过程的研究,得到了迅速地发展。对单元操作本身深入研究的结果,认识到它们又都是为热量传递、质量传递、动量传递规律所支配的,从而提出了传递现象这一新的研究领域,这是化学工程发展史中的第二次飞跃。1957年出现了化学反应工程这门化学工程学科的新分支。从此,几乎所有单元操作的开发放大问题,只需要有一些最基本的实验数据,就可以利用数学模型在计算机上快速得出答案。据国外报道,甲苯歧化反应器由实验室数据直接放大到生产设备,放大倍数达到6000;丙烯二聚反应器的放大倍数达17000;提升管催化裂化过程的放大倍数达到80000。如果某个工艺过程的基本数据齐全,甚至连小型试验都不必做,完全依靠数学模型就可以进行大装置的设计。

五十年代末期,人们不再满足于在计算机上只解决个别单元操作过程的计算问题,而开始尝试对各种化工单元操作过程组成的工艺流程系统进行开发设计的研究,以期在最合理的技术经济条件下,得出工艺系统最佳的设计、操作、控制方案。当然,这就要涉及到多方面的理论问题。六十年代初,在化学工程、系统工程、运筹学、数值计算方法、过程控制论等学科的边缘,产生了过程系统工程。

过程系统工程自出现至今不过二十几年的历史,但发展十分迅速。这是因为它能产生巨大的经济效益和社会效益,从而加速生产的发展。反过来,生产的发展又带动了该学科的发展。例如,美国 Kellogg 公司应用系统模拟技术,首先成功地开发了三十万吨合成氨系统,取得了巨大的成功和经济效益。

§ 1-2 过程系统工程的研究内容

过程系统工程中研究的主要内容是过程系统的分析方法和综合方法。

一. 分析与综合

根据逻辑学的解释,分析与综合是思维的基本过程和方法,以对实物的实际分析和综合动作为基础,是由两种信号系统协同活动所实现的。分析是在思想(头脑)中把事物分解为各个属性、部分、方面;综合是在思想(头脑)中把事物的各个属性、部分、方面结合起来。两者彼此相反而又相互联系,分析中有综合,综合中有分析。分析与综合贯穿于思维的整个过程,但只有对事物内部矛盾的各个方面进行具体分析,再综合起来把握其矛盾的总体的,才能真正深入到事物的本质,把握事物发展的规律。

分析与综合是各个领域普遍采用的一种哲学方法,工程技术界也是如此。如机械工程中的机构分析与综合,电力工程中的电路分析与综合,系统工程中的系统分析与综合,等等。同样,过程系统分析与综合是过程系统工程中采用的主要方法和研究的主要内容。在信息化的今天,工程技术界不仅仅在头脑中运用分析与综合方法解决问题,还需要借助电脑——计算机进行工程分析与综合,从而解决复杂的工程技术问题。

二. 过程系统分析与综合

过程系统分析是对特定的过程系统(包括过程单元和单元间的联结关系)进行分析(如模拟分析),确定其各个部位的属性和性能指标的过程(图1-4(a))。其前提条件是过程系统的组件与结构是确定的。

过程系统综合是针对给定的系统特性(包括输入,输出及系统参数)确定使某项性能指标(如产量,利润等)最优的过程系统的过程(图1-4(b)),其特点是过程系统的组件和

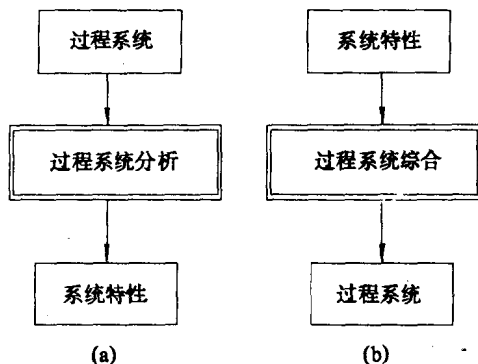


图 1-4 过程系统分析与综合

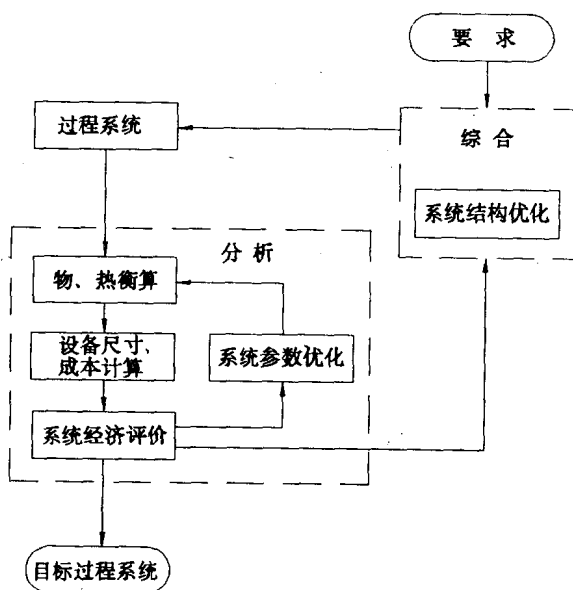


图 1-5 过程系统分析与综合的关系

三. 过程系统工程与其它学科的关系

(一) 与最优化技术的关系

过程系统工程与最优化技术是密切相关的两个独立学科。最优化技术是过程系统工程的基础，最优化思想是过程系统工程的核心思想。从图 1-5 中可以清楚地看到，无论是系统分析还是系统综合，都涉及最优化技术。在系统分析阶段，利用最优化技术对已知系统寻求最优的系统参数，以便得到一组最优的设计变量或操作控制变量。在系统综合阶段，需要利用最优化技术寻求最优的系统结构。此外，在过程系统工程的许多具体细节上都渗透着最优化思想，如回路的最优断裂，操作调优等等。我们可以说，没有最优化技术的发展，就没有过程系统工程的存在。但是，最优化技术不能代替过程系统工程，过程系统工程研究的核心内容是过程系统的分析与综合方法。

(二) 与计算机技术的关系

结构是不确定的。

显而易见，过程系统分析与综合是一对对立统一的逻辑思维过程，是过程设计和开发中不可分隔的两个方面。过程系统综合可给出系统的组件（过程单元）及结构。通过过程系统分析可得到系统内部的属性，以便对综合的效果进行检验。同时，分析得到的信息和概念可用于进一步综合性能更高的过程系统。图 1-5 形象地描绘了过程系统分析与综合的关系。

一般来说，过程系统的设计和开发过程包括了图 1-5 中的全部内容；过程系统的操作与控制仅涉及过程系统分析的内容，这是由于操作与控制的对象系统是确定的。

从六十年代起，过程系统工程的研究领域主要在过程系统分析范围内进行。经过近三十年的不懈努力，过程系统分析技术已日趋成熟和实用化。迄今为止，商品化的计算机辅助过程模拟分析软件不断出新，并被广泛应用于过程系统的开发和设计中。相比之下，过程系统综合的发展大约晚十年左右。1968 年，美国威斯康星大学 Rudd 教授首先提出过程综合这一概念。近年来有关文章发表了数百篇，然而这一技术除个别应用领域外（如换热网络综合，分离序列综合），距实用化还比较远。

我们知道，用手工进行过程单元的计算往往十分困难（如反应器，精馏塔等单元），对于由数十个乃至更多个过程单元组成的过程系统模型进行手工求解，其困难是可以想象的。这也正是过程系统工程在计算机技术出现以后才得以发展的主要原因之一。

计算机是过程系统工程研究的主要工具和手段。人们已开发了许多计算机软件系统以辅助技术人员解决大量的过程系统工程问题，同时避免模型化、计算机程序设计、编制、调试等大量的重复工作，这些软件可分为两大类：

① 计算机辅助流程模拟系统。这类软件可用于过程系统的模拟分析、设计、参数优化、灵敏度分析等目的。

② 计算机辅助过程综合系统。这类软件正在向专家系统发展。不久的将来，工程技术人员将可以方便地借助过程综合专家系统进行新的生产过程系统的开发和设计。

§ 1-3 过程系统工程的研究方法与手段

过程系统工程的主要研究方法是数学模拟。数学模拟包括模型化和模拟两部分内容。

一. 数学模型化与模拟

模型化的基础是抽象，抽象是解决工程问题的重要一环。根据逻辑学解释，抽象是通过思维去分出对象现象的本质而抽去非本质和次要性质的一种逻辑方法。在分析任何物理系统时，必须采用某种程度的抽象。抽象过程实际上就是把物理实体的联系抽象成属性的参数与变数的过程，也即从形式到内容，从现象到本质的过程。例如，在过程系统工程中，目的是研究过程系统的网络特性，温度、压力、浓度的分布情况。因此，常常通过抽象的方法把过程系统表示成方框图或图（图 1-6）。

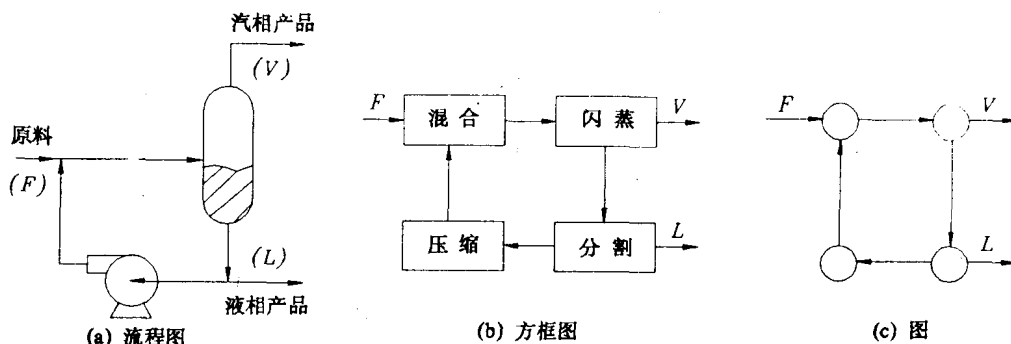


图 1-6 过程系统的抽象

所谓模型化，是对研究对象间接地进行理论或实际的处理，在处理时不是研究原型本身，而是研究一种物质的或抽象的辅助系统，即研究的是模型。模型与所研究的原型具有客观的一致性。例如，研究天体运行的模型——日月仪；研究军事战场作战过程的模型——沙盘等。由于这些实验研究不可能在原型上直接进行，因此必须采用模型这种工具。

数学模型是一组描述原型中发生的主要现象的数学式，它们通常是一组代数方程或微分方程。数学模型完全摆脱了实物模型，为研究方法开拓了新的途径。有些过程的研究必须借助数学模型来进行，例如核爆炸链反应过程。而数学模型化就是在抽象的基础上，对物理原型建立数学模型的过程。

过程系统工程中主要采用数学模型进行研究。过程系统的模型化，就是把与系统有关的

变量归纳成反映系统性能和机制的数学方程组。

利用模型进行实验研究的过程称作模拟。数学模拟则是在不同的条件下对数学模型进行求解的过程，而数学模拟通常是在电子计算机上进行的。

为方便起见，本书中出现的模型与模拟两个术语均指数学模型与数学模拟。

二. 数学模型的类型

一般而论，所有的系统均处于一个时间-空间的连续体中。也就是说，描述系统特性的系统变量 (V) 是时间变量 (t) 和空间变量 (x, y, z) 的函数：

$$V = V(x, y, z, t)$$

根据时间变量存在与否，可把模型分为稳态模型和动态模型。稳态模型又称静态模型，定常态模型。其特点是系统变量不随时间而变化，模型中不含时间变量。严格地讲，现实社会中没有绝对的静态，静态只不过是动态的一种极限状态。这里所说的稳态，指的是对动态过程到达平衡状态的一种简化处理。把生产过程中的动态过程，在平稳状态下转化为稳态，建立相应的稳态模型，这种处理是很有必要的；不然，很多实际过程将无法解决。动态模型中包括时间变量，这类模型对某些过程的研究和分析是非常必要的，如化工生产装置的开、停车，事故处理过程，间歇生产过程。

为了处理方便和研究上的需要，过程系统工程中常常采用忽略空间变量的模型。因此，模型可分为集中参数模型和分布参数模型。集中参数模型中不包括空间变量，即忽略单元内部的变量分布情况，而只关联单元的输入、输出端的变量。分布参数模型中系统变量是空间变量的函数。这种模型可描述空间每一点上变量的分布情况。

根据空间变量数的多少，又可把模型分为一维模型和多维模型。一维模型也是对实际过程的一种简化处理。如平推流反应器模型就是忽略了径向上的分布差异而只考虑轴向分布。

上述模型均属于机理模型，即按化学工程的基本原理建立的模型。机理模型适用范围宽，但较复杂，求解较困难，不适于解决过程系统的在线控制、操作调优等问题。而经验或半经验模型（又称黑箱模型）形式简单，求解方便，多用于在线控制和调优等任务中。黑箱模型的弱点是外推性差。

无论是机理模型还是黑箱模型，均为表示数量关系的模型，它们主要用于描述过程单元。还有一类模型，用于描述过程单元间的逻辑关系，称系统结构模型。这类模型与原型在结构性质上是一致的，描述的是过程系统的结构，是单元间的联结关系，是系统变量间的因果关系。过程单元模型与系统结构模型构成了系统模型。

上述模型分类之间的关系，以及相应的数学型式，可归纳成表 1-1。

表 1-1 数学模型的类型

系统模型	单元模型	机理模型			稳态	动态
			集中参数模型		代数方程	常微分方程
			分布参数模型	一维	常微分方程	偏微分方程
				多维	偏微分方程	偏微分方程
		黑箱模型		代数方程	常微分方程	
	系统结构模型	图（矩阵）				

根据系统模型的功能，又可分为：

① 模拟模型；