

教育部高等学校
化工类专业教学指导委员会推荐教材

化工过程分析与综合

都 健 主编 姚平经 主审

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材

化工过程分析与综合

都 健 主编 姚平经 主审



单册丁：册数千文

编著者：姚平经

第 1 次印刷

第 1 次印刷



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工过程分析与综合》介绍了过程系统工程的发展历史及研究进展，过程系统工程的基本概念和特点，重点介绍了过程系统的稳态模拟、换热器网络综合、分离序列综合、过程系统能量集成、过程系统质量集成的基本方法，兼顾传统内容与现代内容。通过实际工程案例的研究和应用，将知识点与兴趣点结合，培养学生分析和解决实际问题的能力。

《化工过程分析与综合》可作为化工类及相关专业高年级本科生及研究生教材，也可供相关研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工过程分析与综合/都健主编. —北京: 化学工业出版社, 2017. 3

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材
ISBN 978-7-122-29004-5

I. ①化… II. ①都… III. ①化工过程-分析-综合-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 022201 号

责任编辑: 徐雅妮
责任校对: 王 静

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{1}{4}$ 字数 340 千字 2017 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会 推荐教材编审委员会

主任委员 王静康 冯亚青

副主任委员 张凤宝 高占先 张泽廷 于建国 曲景平 陈建峰

李伯耿 山红红 梁斌 高维平 郝长江

委员 (按姓氏笔画排序)

马晓迅 王存文 王光辉 王延吉 王承学 王海彦

王源升 韦一良 乐清华 刘有智 汤吉彦 李小年

李文秀 李文翠 李清彪 李瑞丰 杨亚江 杨运泉

杨祖荣 杨朝合 吴元欣 余立新 沈一丁 宋永吉

张玉苍 张正国 张志炳 张青山 陈 砺 陈大胜

陈卫航 陈丰秋 陈明清 陈波水 武文良 武玉民

赵志平 赵劲松 胡永琪 胡迁林 胡仰栋 钟 宏

钟 秦 姜兆华 费德君 姚克俭 夏淑倩 徐春明

高金森 崔 鹏 梁 红 梁志武 程 原 傅忠君

童张法 谢在库 管国锋 潘艳秋

序

化学工业是国民经济的基础和支柱性产业，主要包括无机化工、有机化工、精细化工、生物化工、能源化工、化工新材料等，遍及国民经济建设与发展的重点领域。化学工业在各国国民经济中占据重要位置，自 2010 年起，我国化学工业经济总量居全球第一。

高等教育是推动社会发展的重要力量。当前我国正处在加快转变经济发展方式、推动产业转型升级的关键时期。化学工业要以加快转变发展方式为主线，加快产业转型升级，增强科技创新能力，进一步加大节能减排、联合重组、技术改造、安全生产、两化融合力度，提高资源能源综合利用效率，大力发展循环经济，实现化学工业集约发展、清洁发展、低碳发展、安全发展和可持续发展。化学工业转型迫切需要大批高素质创新人才，培养适应经济社会发展需要的高层次人才正是大学最重要的历史使命和战略任务。

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会（简称“化工教指委”）是教育部聘请并领导的专家组织，其主要职责是以人才培养为本，开展高等学校本科化工类专业教学的研究、咨询、指导、评估、服务等工作。高等学校本科化工类专业包括化学工程与工艺、资源循环科学与工程、能源化学工程、化学工程与工业生物工程等，培养化工、能源、信息、材料、环保、生物工程、轻工、制药、食品、冶金和军工等领域从事工程设计、技术开发、生产技术管理和科学研究等方面工作的工程技术人才，对国民经济的发展具有重要的支撑作用。

为了适应新形势下教育观念和教育模式的变革，2008 年“化工教指委”与化学工业出版社组织编写和出版了 10 种适合应用型本科教育、突出工程特色的“教育部高等学校化学工程与工艺专业教学指导分委员会推荐教材”（简称“教指委推荐教材”），部分品种为国家级精品课程、省级精品课程的配套教材。本套“教指委推荐教材”出版后被 100 多所高校选用，并获得中国石油和化学工业优秀教材等奖项，其中《化工工艺学》还被评选为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

党的十八大报告明确提出要着力提高教育质量，培养学生社会责任感、创新精神和实践能力。高等教育的改革要以更加适应经济社会发展需要为着力点，以培养多规格、多样化的应用型、复合型人才为重点，积极稳步推进卓越工程师教育培养计划实施。为提高化工类专业本科生的创新能力和工程实践能力，满足化工学科知识与技术不断更新以及人才培养多样化的需求，2014年6月“化工教指委”和化学工业出版社共同在太原召开了“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材编审会”，在组织修订第一批10种推荐教材的同时，增补专业必修课、专业选修课与实验实践课配套教材品种，以期为我国化工类专业人才培养提供更丰富的教学支持。

本套“教指委推荐教材”反映了化工类学科的新理论、新技术、新应用，强化安全环保意识；以“实例—原理—模型—应用”的方式进行教材内容的组织，便于学生学以致用；加强教育界与产业界的联系，联合行业专家参与教材内容的设计，增加培养学生实践能力的内容；讲述方式更多地采用实景式、案例式、讨论式，激发学生的学习兴趣，培养学生的创新能力；强调现代信息技术在化工中的应用，增加计算机辅助化工计算、模拟、设计与优化等内容；提供配套的数字化教学资源，如电子课件、课程知识要点、习题解答等，方便师生使用。

希望“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材”的出版能够为培养理论基础扎实、工程意识完备、综合素质高、创新能力强的化工类人才提供系统的、优质的、新颖的教学内容。

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会

2015年1月

前言

《化工过程分析与综合》是在过程系统工程学的基础上建立起来的，是高等学校化工类专业的必修课。为适应高等化工类人才培养的需求，作者总结了十余年来讲授该课程的教学经验，并充分借鉴国内外相关教材、专著和文献，组织编写了本书。

本书介绍了过程系统工程学的发展历史及研究进展，过程系统工程的基本概念和特点，过程系统综合的方法和策略，过程系统集成和优化的理论和最新研究成果，包括过程系统能量集成、过程系统质量集成（包括水系统集成）。本书的编写注重传统内容与现代内容的兼顾；通过实际工程案例的研究和应用，将知识点与兴趣点结合，以培养学生分析和解决实际问题的能力；体系上注重教材的科学性、实用性、通用性。

本书由都健主编。第1章由都健编写，第2章由都健、韩志忠编写，第3章由肖武编写，第4章由董宏光、邹雄编写，第5章由王瑶编写，第6章由刘琳琳编写。姚平经教授审阅了全书，并提出了宝贵的建议，在此深表谢意。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请指正。

编者

2016年12月

目录

第 1 章 绪论 / 1

1.1 过程系统工程的进展	1
1.2 基本概念	2
1.2.1 过程系统	2
1.2.2 过程系统分析	2
1.2.3 过程系统综合	2
1.2.4 过程系统优化	3
1.3 本课程的特点	3
参考文献	4

第 2 章 过程系统的稳态模拟 / 6

2.1 过程系统的稳态模拟概述	6
2.1.1 过程系统的数学模型	6
2.1.2 过程系统模拟的基本任务	7
2.1.3 过程系统稳态模拟的基本方法	9
2.1.4 流程模拟软件简介	9
2.2 过程单元与过程系统的自由度分析	11
2.2.1 自由度概念	11
2.2.2 过程单元的自由度分析	12
2.2.3 过程系统的自由度分析	16
2.3 过程系统模拟的序贯模块法	17
2.3.1 序贯模块法的基本问题	18
2.3.2 不相关子系统的分隔	19
2.3.3 不可分隔子系统的断裂	25
2.3.4 断裂流股变量的收敛	28
2.3.5 应用实例	31
2.4 过程系统模拟的联立方程法	40
2.4.1 联立方程法的基本思想和特点	40
2.4.2 稀疏线性方程组的解法	42
2.5 过程系统模拟的联立模块法	48
2.5.1 联立模块法的基本思想和特点	48
2.5.2 简化模型建立中问题的描述方式	49
2.5.3 单元简化模型的形式	50
本章符号说明	52
参考文献	53

习题	54
----------	----

第 3 章 换热器网络综合 / 56

3.1 换热器网络的综合问题	56
3.2 过程系统的夹点及其意义	58
3.2.1 温-焓图 ($T-H$ 图)	59
3.2.2 组合曲线	60
3.2.3 在温-焓图上描述夹点	62
3.2.4 问题表格法确定夹点	65
3.2.5 夹点的意义	70
3.3 过程系统夹点位置的确定	72
3.3.1 操作型夹点计算	73
3.3.2 设计型夹点计算	73
3.4 过程系统的总组合曲线	75
3.4.1 总组合曲线绘制方法分类	75
3.4.2 问题表格法绘制总组合曲线	75
3.4.3 图解法绘制总组合曲线	77
3.4.4 总组合曲线的意义	79
3.5 根据温-焓图综合换热器网络	80
3.5.1 热力学最小传热面积网络的分析	80
3.5.2 热力学最小传热面积网络的综合	81
3.5.3 热力学最小传热面积网络的改进	83
3.6 夹点设计法综合换热器网络	84
3.6.1 夹点处物流匹配换热的可行性规则	85
3.6.2 物流匹配的经验规则	89
3.7 换热器网络的调优	95
3.7.1 最少换热设备个数与热负荷回路	95
3.7.2 热负荷回路的断开	96
3.7.3 热负荷路径及能量松弛	100
3.8 分步综合换热器网络的数学规划法——转运模型法	112
3.8.1 转运模型	113
3.8.2 最小公用工程费用问题	115
3.8.3 最少换热设备个数问题	118
3.8.4 利用转运模型综合的步骤	120
3.9 同步综合换热器网络的数学规划法——超结构法	120
3.9.1 基于分级超结构的混合整数非线性规划模型	121
3.9.2 基于分级超结构的混合整数非线性规划模型的求解	123
本章符号说明	126
参考文献	128
习题	132

第 4 章 分离序列综合 / 134

4.1 分离序列综合概述	134
--------------------	-----

4.2	分离序列综合的基本概念	135
4.2.1	分离序列综合问题的定义	135
4.2.2	分离序列综合组合问题	135
4.2.3	分离序列方案评价	138
4.2.4	分离过程的能耗	139
4.3	有序直观推断法	141
4.4	渐进调优法	145
4.4.1	建立初始分离序列	145
4.4.2	确定调优法则	145
4.4.3	制定调优策略	146
4.5	数学规划法	149
4.5.1	动态规划法	150
4.5.2	有序分支搜索法	155
4.5.3	超结构法	157
	本章符号说明	164
	参考文献	164
	习题	166

第5章 过程系统能量集成 / 167

5.1	过程系统能量集成概述	167
5.2	蒸馏过程与过程系统的能量集成	168
5.2.1	蒸馏塔在系统中的合理设置	168
5.2.2	蒸馏过程与过程系统的能量集成	169
5.3	公用工程与过程系统的能量集成	176
5.3.1	热机与热泵在系统中的合理设置	177
5.3.2	热机在热集成过程中热负荷及温位的限制	177
5.4	全局能量集成	178
5.4.1	全局组合曲线和全局夹点	179
5.4.2	全局能量集成的加/减原则	180
5.5	夹点分析在过程系统能量集成中的应用	182
5.5.1	过程用能的一致性原则	182
5.5.2	过程流股的提取及参数的确定	184
5.5.3	过程系统用能诊断	186
5.5.4	过程系统用能调优	189
5.5.5	工业应用实例	190
	本章符号说明	196
	参考文献	196
	习题	196

第6章 过程系统质量集成 / 198

6.1	过程系统质量集成概述	198
6.2	质量交换网络综合	198
6.2.1	基本概念	198

6.2.2	质量交换网络与热交换网络的类比	200
6.2.3	质量交换网络综合方法	200
6.3	质量夹点法	201
6.3.1	最小浓度差与浓度转换	201
6.3.2	组合曲线法确定夹点	202
6.3.3	浓度间隔图表法确定夹点	206
6.3.4	质量交换网络综合准则	208
6.3.5	质量集成	209
6.4	水分配网络综合	210
6.4.1	基本概念	210
6.4.2	水分配网络综合方法	210
	本章符号说明	215
	参考文献	215
	习题	217

8er v 如非醫圖院系詳以 第 6 章

第1章

绪论

本章学习要点

1. 了解过程系统工程学科的发展历史和研究进展。
2. 掌握过程系统工程的基本概念，包括过程系统、过程系统分析、过程系统设计和过程系统优化。
3. 掌握过程系统工程的研究方法和特点。

1.1 过程系统工程的进展

随着科学技术的进步，现代过程工业实现了综合生产，生产装置日趋大型化、复杂化，产品品种精细化，要求实现整个装置乃至一个联合企业的最优设计、最优控制和最优管理，并在安全、可靠和对环境污染最小的状况下运行，以单元操作概念为基础的化学工程方法已不能适应时代的要求。20世纪60年代初，在系统工程学、运筹学、化学工程学、过程控制以及计算机技术等学科的基础上，产生和发展起来一门新兴的技术学科——过程系统工程学。

过程系统工程学是将系统工程的思想和方法用于过程系统而形成的。由于化工过程是一类典型的过程系统，而且关于化工系统工程的研究开展得较早、较为深入，在一些场合常将化工系统工程作为过程系统工程来讨论^[1]，且化工过程分析与综合是化工系统工程的重要研究内容。

20世纪60年代是过程系统工程产生和发展的理论准备时期，这个时期的活动主要在学术界，是学术酝酿期。这期间奠定了过程系统工程学科的理论基础及研究方法，明确了学科范畴为过程系统的分析、过程综合和过程控制，代表性的研究者有美国的 Rudd 和 Watson^[2]，Himmelblau 和 Bischoff^[3]等。

20世纪70年代是过程系统工程走上实用的时期。一方面，随着计算机应用的普及，科研人员采用过程系统工程方法研制工业用化工流程通用模拟系统，如 Aspen Plus、PRO/II 等，对过程系统生产实现计算机控制，取得显著经济效益。另一方面，由于石油

危机的挑战，化学工业需要大幅度节能降耗，同时为满足石油化工装置的大型化、综合化的需求，迫切需要开发新的手段来分析、设计和控制这些复杂的化工系统，这些动因就促成了过程系统工程的大发展。

20世纪80年代和90年代是过程系统工程普及推广的时代，过程系统工程已经从学术理论走向工业应用，不仅在化工、石油、石油化工、核工业和能源等过程工业中获得广泛应用，而且向冶金、轻工、食品等工业部门推广，有力地促进了这些部门生产技术的发展，并实现了不少重大技术突破^[4-6]。相应地，过程系统工程学科在理论、方法和内容方面也在不断发展和完善。

21世纪以来，过程系统工程进入扩展时期，在研究范围和研究内容方面继续向纵深发展，从以换热网络为代表的能量系统的研究和应用，扩展到质量交换网络的研究与应用，典型的有水网络集成和氢网络集成^[7-11]，在国民经济各部门得到越来越深入广泛的应用^[12]；质能同时集成的研究也是过程系统工程目前研究的热点和重点^[13,14]。

1.2 基本概念

1.2.1 过程系统

过程系统是对原料进行物理的或化学的加工处理的系统，它由一些特定功能的过程单元按照一定的方式相互联结组成，它的功能在于实现工业生产中的物质和能量的转换；过程单元用于进行物质和能量的转换、输送和储存；单元间通过物料流、能量流和信息流相连而构成一定的关系^[15]。

但20世纪末以来，过程系统已由原来的常规尺度过程工业系统向巨型和微型过程系统扩充，不限于人造系统。巨型过程系统，如地区和全球气候变化的过程系统；微型过程系统，如纳米级的分子工厂、基因工程中微系统过程^[1]。

1.2.2 过程系统分析

过程系统分析（或过程分析）是指：对于系统结构及其中各个单元或子系统均已给定的现有过程系统进行分析，即建立各单元或子系统的数学模型，按照给定的系统结构进行整个系统的数学模拟，预测系统在不同条件下的特性和行为，借以发现其薄弱环节并加以改进^[16]。过程系统分析的概念如图1-1所示，即对于已知的过程系统，给定其输入参数，求解其输出参数。具体些说，大致包括过程系统的物料、热量衡算，确定设备负荷、费用，以及对过程系统进行技术、经济和环境影响等多目标评价。化工过程模拟系统是过程系统分析的主要工具。

1.2.3 过程系统综合

在哲学中，为了构成较为完整的观点或体系，将各部分或各种因素结合在一起，叫做

综合。过程系统综合（或过程综合）是过程系统工程的核心内容，是指：按照规定的系统特性，寻求所需的系统结构及其各子系统的性能，并使系统按规定的目标进行最优组合^[16]。过程系统综合的概念如图 1-2 所示，即当给定过程系统的输入参数及规定其输出参数后，确定出满足性能的过程系统，包括选择所采用的特定设备及其间的联络关系，并提供某些变量的初值。在设计新建装置时，过程综合用于从众多备选方案中选择最优流程。

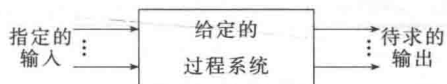


图 1-1 过程系统分析示意图

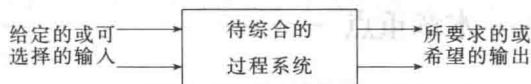


图 1-2 过程系统综合示意图

过程综合需要以过程分析为基础，同时过程综合又对过程分析提出新的要求，过程系统设计是综合与分析交替过程的整体。

过程系统综合是一个极为复杂的大系统、多目标最优组合问题，是过程系统工程的一个前沿领域。

过程系统综合研究的主要课题有：①反应路径的综合；②反应器网络综合；③换热器网络综合；④分离序列综合；⑤公用工程系统综合；⑥控制系统综合；⑦全流程系统综合；⑧过程系统能量、质量集成。

过程系统综合的方法可归纳成 4 种基本方法：①分解法；②直观推断法；③调优法；④结构参数法。

1.2.4 过程系统优化

过程系统优化或系统优化可分为参数优化和结构优化。参数优化是指：在已确定的系统流程中，对其中的操作参数（如温度、压力和流量等）进行优选，以使某些指标（如费用、能耗和环境影响等）达到最优；如果改变过程系统中的设备类型或相互间的联结，以优化过程系统，则称为结构优化^[17]。现场生产装置由于原料、负荷以及产品质量要求等发生变化，与原设计不符合，或个别设备已更新（如更换了新催化剂）或老化（如催化剂老化、换热设备结垢等），因而使过程系统操作条件不协调，并非处于最佳操作状态。针对这种情况，需要采用过程系统优化技术以实现过程结构优化或操作优化。

1.3 本课程的特点^[18,19]

从上述内容可见，“过程系统工程”学科的研究内容和范围不断扩大，但作为本科生的课程，本教材主要介绍该学科的核心内容——化工过程分析与综合。本课程将理论和应用紧密结合。将过程系统的理论直接应用于过程和产品设计、过程操作与控制以及生产调度。对过程的操作优化、节能、增效，以及对设计中的优化综合和过程开发具有指导意义。

本课程注重基本概念、原理、方法和策略的论述，以便使学生掌握系统的知识和综合的能力去应对变化的环境世界的挑战。

本课程采用的研究方法是系统的方法论，即把研究的对象系统看做一个整体，同时把

研究过程也看做一个整体，并贯穿着优化的思想，即把系统中可调的部分调节到获得可能的最优性能。

本课程的一个最基本的目的是讨论化工过程系统设计的现代化方法和策略，即建立过程系统的数学模型，描述出系统中每一部分及总体性能，并给予评价；应用过程集成技术、数学规划方法和人工智能技术等对过程系统进行综合优化。

本章重点

(1) 基本概念

① 过程系统：过程系统是对原料进行物理的或化学的加工处理的系统，它由一些特定功能的过程单元按照一定的方式相互联结而组成，它的功能在于实现工业生产中的物质和能量的转换。

② 过程系统分析：对于系统结构及其中各个单元或子系统均已给定的现有过程系统进行分析，即建立各单元或子系统的数学模型，按照给定的系统结构进行整个系统的数学模拟，预测系统在不同条件下的特性和行为，借以发现其薄弱环节并加以改进。

③ 过程系统优化：过程系统优化或系统优化可分为参数优化和结构优化。参数优化是指在已确定的系统流程中，对其中的操作参数（如温度、压力和流量等）进行优选，以使某些指标（如费用、能耗和环境影响等）达到最优；如果改变过程系统中的设备类型或相互间的联结，以优化过程系统，则称为结构优化。

(2) 本课程的特点

本课程采用的研究方法是系统的方法论，即把研究的对象系统看做一个整体，同时把研究过程也看做一个整体，并始终贯穿着优化的思想。

● 参考文献

- [1] 王基铭. 过程系统工程辞典. 第2版. 北京: 中国石化出版社, 2011.
- [2] Rudd D F, Watson C C. Strategy of Process Engineering. New York: John Wiley and Sons, 1968.
- [3] Himmelblau D M, Bischoff K B. Process Analysis and Simulation. New York: John Wiley and Sons, 1968.
- [4] Gross B, Roosen P. Total process optimization in chemical engineering with evolutionary algorithms. Comput Chem Eng, 1998, 12: S229-S236.
- [5] 俞红梅, 姚平经, 袁一. 大规模复杂过程系统能量综合方法. 高校化学工程学报, 1998, 4: 368-374.
- [6] 华贲. 过程系统的能量综合和优化. 化工进展, 1994, 3: 6-15.
- [7] Prakash R, U V Shenoy. Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations. Chemical Engineering Science, 2005, 60 (1): 255-268.
- [8] Manan Z A, Y L Tan, D C Y Foo. Targeting the minimum water flow rate using water cascade analysis technique. AIChE Journal, 2004, 50 (12): 3169-3183.

- [9] Agrawal V, U V Shenoy. Unified conceptual approach to targeting and design of water and hydrogen networks. *AIChE Journal*, 2006, 52 (3): 1071-1082.
- [10] Alves J J, Towler G P. Analysis of refinery hydrogen distribution systems [J]. *Industrial&Engineering Chemistry Research*, 2002, 41 (23): 5759-5769.
- [11] El-Halwagi M, Gabriel F, Harell D. Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks. *Industrial&Engineering Chemistry Research*, 2003, 42 (19): 4319-4328.
- [12] Zheng X S, Feng X. Design of optimal water-using networks with internal water mains. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 45 (25): 8413-8420.
- [13] Du J, Meng X, Du H, Yu H, Fan X, Yao P. Optimal Design of Water Utilization Network with Energy Integration in Process Industries. *Chin J Chem Eng*, 2004, 2: 247-255.
- [14] Liu L, Du J, Yang F. Combined mass and heat exchange networks synthesis based on stage-wise superstructure model. *Chin J Chem Eng*, 2015, 9: 1502-1508.
- [15] (民主德国) G. 格隆. 过程系统工程 (上册). 陆震维译. 北京: 化学工业出版社, 1983.
- [16] 《中国大百科全书》编辑委员会. 中国大百科全书——化工. 北京: 中国大百科全书出版社, 1989.
- [17] Westerberg A W, Hutchison H P, Motard R L, Winter P. *Process Flowsheeting*. Cambridge England: Cambridge University Press, 1979.
- [18] 姚平经. 过程系统分析与综合. 大连: 大连理工大学出版社, 2004.
- [19] 都健. 化工过程分析与综合. 大连: 大连理工大学出版社, 2009.

第2章

过程系统的稳态模拟

本章学习要点

1. 掌握过程系统数学模型的类型、过程系统模拟的基本任务。
2. 掌握过程系统稳态模拟的基本方法，即序贯模块法、联立方程法和联立模块法。
3. 掌握自由度概念，过程单元、过程系统的自由度分析。
4. 掌握序贯模块法中不相关子系统的分隔、不可分隔子系统的断裂以及断裂流股变量的收敛；联立方程法、联立模块法的基本思想和特点。
5. 掌握常用流程模拟软件的特点和应用。

2.1 过程系统的稳态模拟概述

过程系统的模拟可分为稳态模拟和动态模拟两类^[1-4]。稳态模拟是过程系统模拟研究中开发最早和应用最为普遍的一种技术，它包括物料和能量衡算，设备尺寸和费用计算，以及过程的技术经济评价等。早期的模拟主要集中于发展分析模型，各种数学方法被用来获得不同化工问题的解析解。之后各种数学方法也被用来解决更严格的化工问题。目前，逆矩阵、非线性方程的求解和数值积分等这些方法在很多软件中应用；其模型主要是更详细地理解过程并用数学形式表达；目的是在各种水平上采用“模型图”以简化模型来表达复杂问题，并应用系统的方法解决问题。最新的比较全面的过程系统模拟方法和应用见参考书^[5]。由于过程系统本身是动态的，即过程变量随时间而变化，因此，要真正认识过程的变化规律，客观上需要对过程系统进行动态模拟。本章主要介绍过程系统稳态模拟的基本概念和方法。

2.1.1 过程系统的数学模型

数学模型是对单元过程及过程系统或流程进行模拟的基础，对模拟结果的可靠性及准