

化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 26 篇

化工系统工程

化学工业出版社

81.17073
152.1
26.2

化学工程手册

第 26 篇

化工系统工程

《化学工程手册》编辑委员会

152.1
26.2



化学工业出版社

本书是化学工程手册第26篇，共分6章，主要介绍化工系统工程的基本概念和方法，内容包括化工系统的分析、最优化问题的数学模型、最优化方法、灵敏度分析、可靠性和稳定性等问题，以大量化工问题为例阐述了系统工程方法的基本原理和在化学工程中的应用以及有关的数学概念和方法。

本书由梁玉衡编写，沈宝欣修改，最后由陈敏恒审校。

本书可供化工、轻工、食品等有关工业部门的设计、研究、工厂的技术人员及有关院校师生参考。

化学工程手册

第 26 篇

化工系统工程

编写人 梁玉衡 北京化工学院
审校人 陈敏恒 华东化工学院

责任编辑：谢丰毅

封面设计：许立

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₁₆印张17³/₄字数446千字印数1—5,370

1986年12月北京第1版1986年12月北京第1次印刷

统一书号15063·3888定价3.70元

《化学工程手册》总篇目

1. 化工基础数据
2. 化工应用数学
3. 化工热力学
4. 流体流动
5. 搅拌及混合
6. 流体输送机械及驱动装置
7. 传热
8. 传热设备及工业炉
9. 蒸发及结晶
10. 传质
11. 蒸馏
12. 气体吸收
13. 气液传质设备
14. 萃取及浸取
15. 增湿与减湿
16. 干燥
17. 吸附及离子交换
18. 薄膜过程
19. 颗粒及颗粒系统
20. 流态化
21. 气态非均一系分离
22. 液固分离
23. 粉碎、分级及团聚
24. 化学反应工程
25. 化工自动控制
26. 化工系统工程

《化学工程手册》编辑委员会成员

主任

冯伯华 化学工业部

副主任

陈自新 化学工业部橡胶司

苏元复 华东化工学院

汪家鼎 清华大学

李步年 陕西省化工设计院

蔡剑秋 化学工业出版社

委员

卢焕章 化学工业部化工设计公司

区灿棋 中国石油化工总公司

邓颂九 华南工学院

朱亚杰 华东石油学院

朱自强 浙江大学

余国琮 天津大学

时 钧 南京化工学院

沈 复 华东石油学院

吴锡军 南京化学工业公司化工研究院

林纪方 大连工学院

杨友麒 化学工业部计算中心筹备处

张洪元 成都科技大学

张剑秋 北京燕山石油化学总公司研究院

郑 焯 上海医药设计院

郭慕孙 中国科学院化工冶金研究所

傅举孚 北京化工学院

萧成基 化学工业部北京化工研究院

第26篇 《化工系统工程》

编写人 梁玉衡 北京化工学院

审核人 陈敏恒 华东化工学院

前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础、并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十年和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤(力)-秒”工程制(MKfS制)。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制(SI)，除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

1979年7月

概 述

系统工程的一般原理与化学工程相结合，开创了化工系统工程这门新学科。这门学科立足于化学工程，运用系统工程的方法，以计算机为工具，解决化工系统的开发、设计、控制、管理等问题。作为处于发展途中的新学科，素材的取舍既要考虑实用性、完整性，又要尽量择其比较成熟的内容，所以全篇通过大量化工实例系统地介绍化工系统工程的基本原理和方法，但重点置于化工系统的模拟和最优化。

全篇共分六章。第一章介绍化工系统工程的一些基本概念，作为阅读本书的导引；第二章为系统的分析，主要介绍化工系统的分解、合成及模拟；第三章围绕最优化问题的数学模型的建立，介绍所涉及的基本概念、目标函数及约束条件；第四、五两章以较多篇幅介绍化工系统的最优化方法，包括定态、动态、大型系统以及随机系统的最优化方法；第六章介绍化工系统的灵敏度分析、可靠性和稳定性问题。

目 录

概述

26.1 基本概念	1
26.1.1 系统工程的基本概念	1
26.1.2 化工系统工程的基本问题	3
26.1.3 化工系统工程的基本方法	6
26.2 系统的分析	9
26.2.1 系统分析的图论基础	9
26.2.2 化工系统的合成	20
26.2.3 化工系统的分解	24
26.2.4 化工系统的模型及模拟	33
26.3 化工系统最优化问题的数学模型	68
26.3.1 最优化问题数学模型的基本概念	68
26.3.2 系统的数学模型	71
26.3.3 最优化的目标函数	96

26.3.4 最优化问题的约束条件	101
26.4 化工系统的最优化方法	104
26.4.1 化工系统最优化的概述	104
26.4.2 化工系统的定态最优化方法	113
26.4.3 化工系统的动态最优化方法	155
26.4.4 大型系统的最优化	197
26.5 随机系统的最优化	212
26.5.1 基本概念	212
26.5.2 随机过程的数学模型	215
26.5.3 随机系统的最优化	226
26.6 化工系统最优化的灵敏度分析、可靠性和稳定性问题	235
26.6.1 化工系统最优化的灵敏度分析	235
26.6.2 化工系统的可靠性分析	257
26.6.3 化工系统的稳定性问题	265

26.1 基本概念

26.1.1 系统工程的基本概念

系统工程是一门处于发展途中的技术科学。系统的概念源于实践。在小规模生产的条件下，系统的概念并不重要；而现代化的大生产是一种大规模的社会活动，它所涉及的内容和规模、科研和设计、组织和管理等问题，以及它所要达到的目标都发生了根本的变化。因此，对整个系统进行综合的、定量的研究就成为人们面临的新课题。

系统工程的研究始于30年代，最初应用于电工系统。第二次世界大战期间，系统工程的方法在解决军事问题中得到了实际的应用。50年代前后，系统工程方法开始引起人们的重视。到了60年代以后，系统工程的方法开始推广移植到工业、农业、交通运输、规划、宇航技术等各个领域，用来解决：技术、经济发展的预测；系统的最优设计和最优控制；系统的组织和管理等一系列问题。

一个现代化的大型企业是由许多单元，如分厂、车间、工段、班组所构成的一个多层次、多序列的网络系统。系统的任务是从系统的整体出发，设计一个总体最优方案，依此来组织人力、财力和物力，以便在最短时间、以最佳方式达到完成规定任务的目的。系统工程的方法是运用信息论、控制论、应用数学以及电子计算技术，对系统整体进行定量的考察，着重研究组成系统的各单元相互之间的关系，各个单元对系统整体的作用，用数学模型描述系统的特性，对系统进行数学模拟，研究使系统实现最优化所必须具备的条件。最优化是系统工程的基本思想；信息处理则是系统工程研究的中心课题。对于一个大型系统的研究，系统工程师的作用在于研究系统的结构，对系统进行分析，建立系统的模型，对系统进行模拟，以便提出系统整体最优化的方案。

下面简要地说明本篇常用的一些名词、术语的函义。

(1) 对象

任何一个被研究或被控制的系统称为对象。对象可以是完成一个特定操作的一个单元或设备，也可以是由一些化工单元和设备按照一定要求组成的一个化工过程。

(2) 过程

按预定或计划好的方式动作的一个系统或者一系列有规律的动作称为过程，例如炼油过程或化学制造过程。在化工中，最基本的过程是原子分子的运动、碰撞、分解和化合等微观过程。当这些微观过程的观测时间很长、空间很大时，其期望值可作为宏观现象的特征，其速度和平衡关系便可用数学关系式表示，这样就构成了流动、热量质量传递和化学反应等基本过程。如果将产生基本过程的结构作为单元的结构，则确定基本过程的形成方式，就能表现单元过程的特性；如果单元过程的组合方式以工艺流程给出时，则可确定化工系统的特征。

(3) 系统

系统是指许多基本单元按某种目标构成的整体，或者说是一组相互关联的事物、性质或某种关系。系统具有特定的功能；系统可按照人们的实际要求进行划分；系统的结构，如整

个系统与各子系统之间、各子系统之间以及系统的功能与系统的内部结构和参数之间的关系都非常复杂，并存在不确定性和竞争的因素。

(4) 子系统

任何一个系统都是由比它小的系统所组成，而任何一个系统本身也是更大系统的一个组成部分，所以把组成系统的次一级较小的系统称为子系统。在化工系统中，最基本的子系统是单元设备和单元过程，它有特定的输入、输出和外扰。单元设备和单元过程的最优设计和最优控制是化工系统最优设计和最优控制的基础。

(5) 状态

系统的状态表示系统在某一给定条件下所具有的特性。定态系统的状态在初始暂态或扰动消失以后，系统中每一点的状态均不随时间而变。动态系统的状态是表示系统特性的最少的一组变量，它包含了系统历史的足够信息，依此可以计算系统的未来特性。只要知道 $t=t_0$ 时这一组变量值和 $t \geq t_0$ 时的输入，便可完全确定动态系统在任何 $t \geq t_0$ 时刻的特性。亦即，动态系统在时间 t 的状态是由 t_0 时的状态和 $t \geq t_0$ 时的输入唯一确定的，而与 t_0 前的状态和输入无关。

(6) 变量和变量的分类

所谓变量是由一组已知量表示未知量所用的符号，通常是某一函数的定义域。变量值表征系统运行所需要的条件，它反映了系统所处的状态，其间的关系构成了描述系统特性的状态方程，即系统的数学模型。一个系统包含种种变量，如图1-1所示。如果按变量的功能分类，有：1.控制变量，又称操作变量，设计变量或决策变量，它可以由设计人员按照系统的

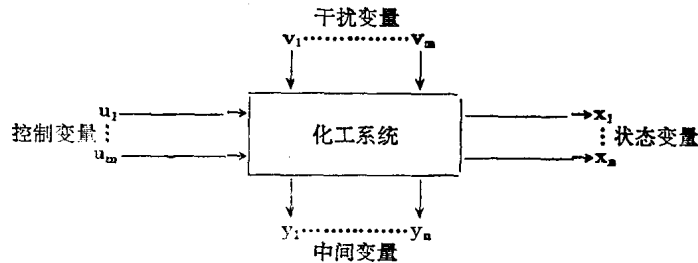


图 1-1 化工系统的变量

目标选取适当的数值，用来描述系统的特性。可变的控制变量个数称为自由度，自由度不能超过变量总数与状态方程数之差，并且控制变量的取值往往受到一定约束条件的限制；2.干扰变量，表示外部系统对系统施加的影响，有可测而不可控制的变量（确定性干扰）和不可测、不可控的（随机干扰）变量；3.状态变量，描述系统所处状态的特征，通过状态方程相关联，其值不能自由选择，取决于控制变量值，状态变量的个数表示系统的阶数；4.中间变量，指为了描述系统的特性，在评价过程中引入的变量。在这些变量中，控制变量和干扰变量属于输入变量，状态变量和中间变量属于输出变量。如果按照变量的数值特征，又可将变量区分为：1.确定性变量，指取值固定的变量；2.随机变量，它并不是自变量，而是样本空间内满足一定条件的实函数，其值通过随机试验加以确定。此外还可以将变量区分为：1.连续变量，它是在给定的时间和空间范围内连续变化的变量；2.离散变量，它只能在给定的时间和空间范围内取某些特定值。最后应注意，变量不同于参数，它是描述系统输入、输出特征的信息，如描述压力、温度、流量、浓度及时间、空间位置的变量；而参数则用于描述系统内部结构和传递特性，如阻力系数、给热系数、传质系数、反应速度常数等均属于参数，

参数可以是常数，也可以是函数，其变化可以是线性的，也可以是非线性的。

(7) 状态空间

由状态变量或向量所构成的空间称为状态空间，例如，状态向量 x_1, x_2, \dots, x_n 组成 n 维空间，任何状态都可用状态空间中的一个点来表示。

(8) 再循环系统

再循环是系统结构中的一种普遍特性，许多实际的系统都是再循环系统。化工系统是物料、能量或其他信息流的再循环系统。例如，在一个大型的化工装置中，各种物流、能量和信息来回传送，形成许多再循环回路，整个装置就是一个有再循环网络系统。

(9) 系统的分析

系统的分析是指系统的结构已定，数学模型已知，在电子计算机上进行模拟，从而预测该系统在不同条件下的性能和行为。

(10) 系统的合成

系统合成亦称系统综合，是指如何按一定的目标应用各种数学方法进行化工系统的最优综合。

(11) 系统的分解

按照分割原理将一个结构已定的系统分割成一些更小的次一级系统的方法称为系统的分解。更具体地说，系统的分解包含了将系统的总目标分解成更小的系统的目标，或者将阶数、维数很大的系统的数学模型分解成阶数、维数较小的子系统的数学模型两种意义。

(12) 系统的数学模型

对简化了的系统作出的数学描述称为数学模型。数学模型的特点是简化，简化的基础是与实际系统之间的等效性，简化的标志是模型参数的多寡。

(13) 系统的模拟

对系统的一种物理或数学的逼近称为系统的模拟。

(14) 线性系统

系统的数学模型用线性数学关系式表示的系统称为线性系统。这里所指的线性是指系统变量之间的关系而不是指系统的参数，尽管一个系统相对于状态变量来说是线性的，但系统中的参数却可以以非线性形式出现，例如，线性微分方程中的参数是某个变量的函数时，但这种微分方程仍然是线性微分方程。线性系统遵循迭加原理和互易原理。

(15) 非线性系统

系统的数学模型是以非线性数学关系式表示的系统称为非线性系统。迭加原理不适用于非线性系统。非线性问题的求解，往往要对非线性模型作线性化处理，以近似的线性模型替代非线性模型，进而反复求解近似的线性模型，最后逼近非线性问题的解。

(16) 定态和动态系统

系统的特性与时间无关的系统称为定态系统。系统的特性随时间而变的系统称为动态系统。如果动态系统是线性的，并由定常的集中参数组成，则系统可用线性常微分方程予以描述，这类系统称为线性定常系统。如果系数是时间的函数，则称为线性时变系统。

26.1.2 化工系统工程的基本问题

传统的化学工程方法以单元操作概念为基础，化工装置的设计仅限于各个单元过程和设备的计算，并不涉及如何把单元过程和设备组成一个完整系统的有关工程问题。随着技术的

发展，石油、化学工业发生了深刻的变化：

1. 现代化的石油，化学工业实现了综合生产，采用了联合企业的生产方式。对于一个大规模的化工联合企业，以往那种仅限于对一个装置或一个单元过程和设备孤立地进行研究、设计、操作管理的传统作法已不能适应要求，而必须将联合企业作为一个整体，对组成系统的各个子系统之间的相互联系和相互作用进行综合的分析和研究，从而保证联合企业高效地运行。

2. 现代化的石油化工装置日趋大型化或超大型化，大型装置能否实现最优设计、最优控制和最优管理，对于装置的投资、安全可靠的生产、产品成本以及环境保护等都有很大的影响，只有通过多个方案的对比、择优选用，才能取得显著的经济效果。

3. 现代化石油化工企业的生产过程实现了连续化、自动化生产，要求整个装置在最优状态下运行。因此，采用以往那种单输入、单输出的调节系统已经不能满足要求，必须结合过程的定态和动态数学模型，采用电子计算机对多变量时变系统进行控制。

4. 随着化学工业原料的不断更迭，流程亦随之不断更新，新的化工产品不断出现，原有的逐级放大技术因工业化周期长、耗费人力、物力多而妨碍了新技术的工业化应用。为了加速技术的发展，增强竞争能力，促使人们寻找和采用新的数学模拟放大技术。

5. 电子数字计算机的普及推广，现代应用数学方法及现代控制论方法在化学工程中的应用，使过去一些无人敢于问津的复杂设计计算及过程控制问题迎刃而解。

鉴于上述原因，促使人们在化工企业的组织管理、生产过程的开发研究、设计中采用新的概念，即系统工程方法来解决企业组织管理、最优设计和最优控制的问题。

从系统工程的观点来看，任何一个化工系统都具有一些共同的特征：

1. 一个化工企业是由企业组织管理系统、生产系统（包括了物流，能量，信息等子系统）、公用工程以及生产辅助、服务系统等组成的一个网络系统。系统的规模庞大、子系统多、各子系统之间的相互关系复杂，而且多数是非线性的。

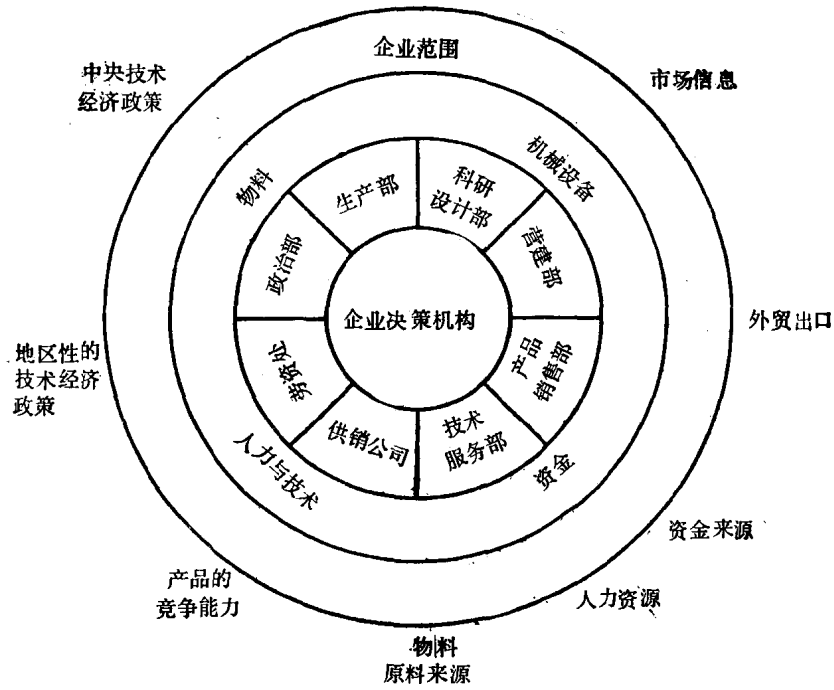
2. 各子系统按一定的目标有机地构成一个整体，各司其职，协同完成规定的任务。在一个化工企业中，除了企业内部各个部门之间构成一个层次分明、统筹分工、相互联系的完整系统外，它还与企业外部的许多因素，如主管部门的政治、经济政策、资源的状况、供求关系等密切相关，构成一个根据外部环境条件的变化不断调整其内部特性的反馈系统。这个系统并非固定不变，而是保持某种动态平衡，同时还包含不确定因素和竞争因素，所以系统的输入在时间、空间或数值上都呈现随机性。如图1-2所示。

3. 由于技术的发展，环境条件的变化，系统的最优化模型并不是完美无缺和固定不变的，在某些情况下，必然会出现新的系统与原有最优系统之间的竞争，或者一些长期运转的系统也必然存在规模增减或改进的可能性，因此在进行系统最优设计和最优控制时要考虑到这种应变的灵活性。

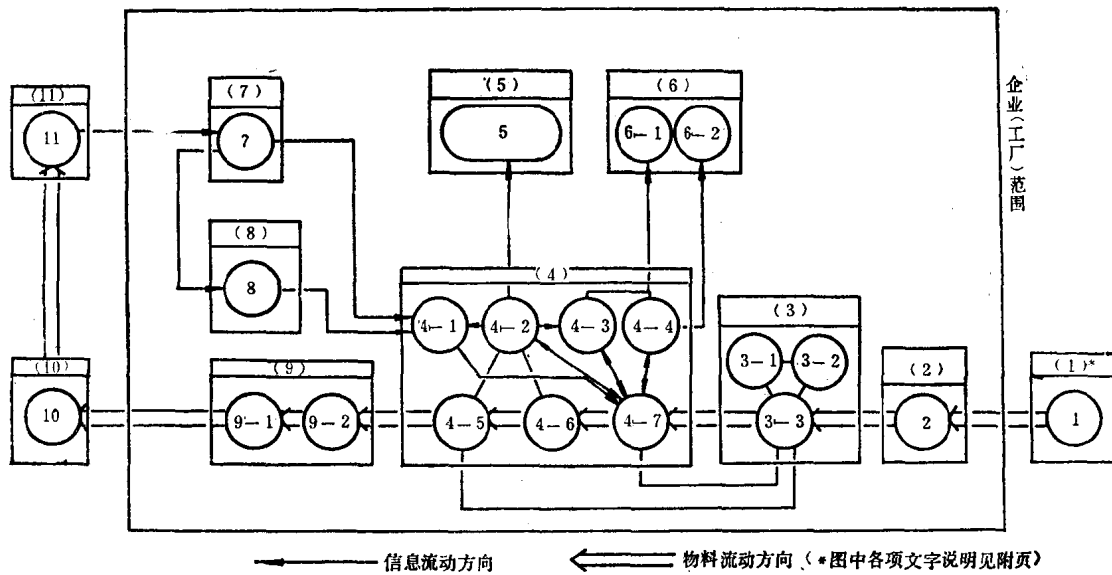
4. 化工系统的最优设计和最优控制以及最优管理要综合运用多种学科，多种专业的知识，要有多种专业人员协同工作。

化工系统工程与化学工程之间的相互关系：

1. 传统的化学工程方法立足于流体流动、传热、传质和化学反应，孤立地研究各个单元操作和设备的特性，很少或甚至不考虑构成一个复杂化工系统时各个单元过程或设备之间的相互组合特性；而化工系统工程则从系统整体出发，既研究组成系统的各个子系统之间的相互影响，又研究整个系统的组合特性。



a 化工系统内部的子系统与外部系统之间的关系



← 信息流动方向 ←← 物料流动方向 (*图中各项文字说明见附页)

b 化工系统内部各子系统之间的相互关系

图 1-2 化工系统的结构

- (1) 输入子系统、1—外部原料，物资供应；
- (2) 物料采购子系统、2—采购，收外部物资；
- (3) 物料管理子系统、3-1—库存管理、3-2—物料管理、3-3—原料与半成品；
- (4) 生产过程子系统、4-1—生产指令、4-2—生产管理、4-3—设备维修、4-4—信息处理、4-5—质量控制、4-6—各车间物料，能量的流动、4-7—生产计划安排与管理；
- (5) 企业主管决策机构子系统、5—调整企业远期目标，计划，预算等等；
- (6) 财务子系统、6-1—成本会计、6-2—企业内支出；
- (7) 销售子系统、7—订货安排；
- (8) 科研、设计子系统、8—产品设计；
- (9) 运输子系统、9-1—入库、9-2—库存；
- (10) 输出子系统、10—输送到用户；
- (11) 企业外部子系统、11—用户；

2. 传统的化学工程主要研究定态过程特性, 而化工系统工程除了研究系统的定态特性外, 还要研究系统的动态特性。

3. 传统的化学工程对最优化问题一般只作定性的讨论; 而化工系统工程则要对系统的最优化问题作定量的计算, 应用最优化原理, 对系统作综合平衡, 使组成系统的各个分系统能最协调、最有效地运行, 此外还要研究系统最优化的灵敏度分析以及可靠性和稳定性问题。

4. 传统的化学工程方法通常与以相似论为基础的物理模拟技术相结合, 采用逐级放大的方法解决工业装置的设计问题; 而化工系统工程则与计算技术相结合, 采用数学模拟方法或者数学模拟和物理模拟相结合的方法, 对化工系统进行最优设计并确定最优控制方案。

5. 传统的化学工程所用的数学工具往往限于经典数学方法; 而化工系统工程所处理的是多变量系统、时变系统、非线性系统以及有不确定因素和竞争因素的系统的最优化问题, 因此涉及更多、更深的数学知识, 包括线性代数、微分方程、数理统计和概率论、变分法、最优化方法以及图论、排队论、博弈论、控制论等。

化工系统工程的基本问题:

1. 化工技术发展的预测和决策。应用系统工程的方法, 定性和定量地预测化工技术未来的发展趋势, 对化工技术发展的路线作出技术经济的评价, 估计技术发展带来的经济效益、对于社会发展、能源、资源的利用、环境保护等带来的后果。简言之, 是对未来化学工业的发展进行预测, 并依此对化学工业的发展方向制订科学的决策。

2. 化工系统的最优设计。亦即按照化工系统的要求, 根据给定的输入和输出条件, 确定系统的结构, 寻求在满足一定约束条件下, 使系统的目标函数取极大值或极小值时各个单元过程和设备的最佳操作条件; 或者对一个系统结构已定的化工系统, 根据给定的输入条件, 确定在满足一定约束条件下, 使系统的目标函数取极大值或极小值的输出条件。

3. 化工系统的最优控制。实现系统的最优控制是指设计一个控制系统, 以保证系统稳定在最佳操作条件下运行。系统的最优控制可分为两类: 对于状态随时间变化的动态系统, 最优控制是要寻找使目标函数取极大或极小值的控制系统, 从而使系统处于最佳状态下运行; 对于系统的状态与时间无关的定态系统, 最优控制是要确定在满足约束条件的情况下, 使目标函数取极大值或极小值的最佳操作条件。

4. 企业的组织管理和经营技术。企业的组织管理系统和经营技术通常涉及规划、计划、实施、管理、市场及经济行为的分析、决策等一系列问题, 管理系统把人作为系统的组成部分, 因而是一个多层次、多目标、具有决策功能的大规模系统。应用系统工程的方法, 把系统中的人、机械设备、材料、资金及信息等有限的资源, 合理地组织、有效地利用, 以便最大限度地发挥各自的作用; 同时综合分析系统内在和外界因素的变化, 藉此不断地调整企业内部的活动以适应内、外条件的变化, 甚至改变系统自身的状态, 从而最优地完成预定的目标。

26.1.3 化工系统工程的基本方法

应用系统工程的方法解决化工系统的最优设计和最优控制问题的一般步骤如下:

(1) 系统的构成

根据给定的输入条件(如原料)和输出条件(如产品)设计一个化工系统时, 首先要收集所有必要的信息, 如所有可供选用的技术路线、环境条件、市场信息, 然后确定系统的范

围和要求达到的目标，以此作为评价所有可供选择方案的依据。

(2) 系统的分析

在一般情况下，往往可以通过几个不同的过程实现同一目标。系统分析的内容包括：立足于系统的特性和整体功能，由系统的输入和输出条件设计各种可能的系统结构方案，并确定最优的系统结构和各子系统的最优操作条件（简称为系统的合成）；或者将结构已定的系统分解为更简单的子系统，并由给定的输入条件确定各个子系统的输出（简称为系统的分解）；此外还有系统的模型化和数学模拟等问题。

(3) 模型的辨识和参数估值

根据系统分析提供的系统结构以及系统的输入和输出条件确定系统的模型，进而对模型中的某些未知参数作出估计，以便获得系统最优设计所要求的最终模型。

(4) 系统的最优设计

系统的最优设计是根据系统的要求，确定在满足约束条件的情况下，使目标函数取最大值或最小值的最优操作条件。进行最优设计所需的各种数学方法将在26.4一章中作详细介绍。一个化工系统通常都比较复杂，非线性强，包含的变量多，模型的阶数高，还有各种约束的限制，因此最优解的求取往往须借助于迭代技术和电子计算机。

(5) 系统最优化的评价

鉴于最优化中使用的模型是在对实际化工系统以及各种不确定因素和竞争因素作出种种简化假定的情况下作出的，由此求得的最优解不能直接付诸实际过程使用，必须对最优化结果进行分析评价，例如需要讨论由于引入简化假定所带来的问题：各个控制变量、参数的变化对过程的影响、单元设备和系统的可靠性、系统定态操作的性质、存在的条件及其稳定操

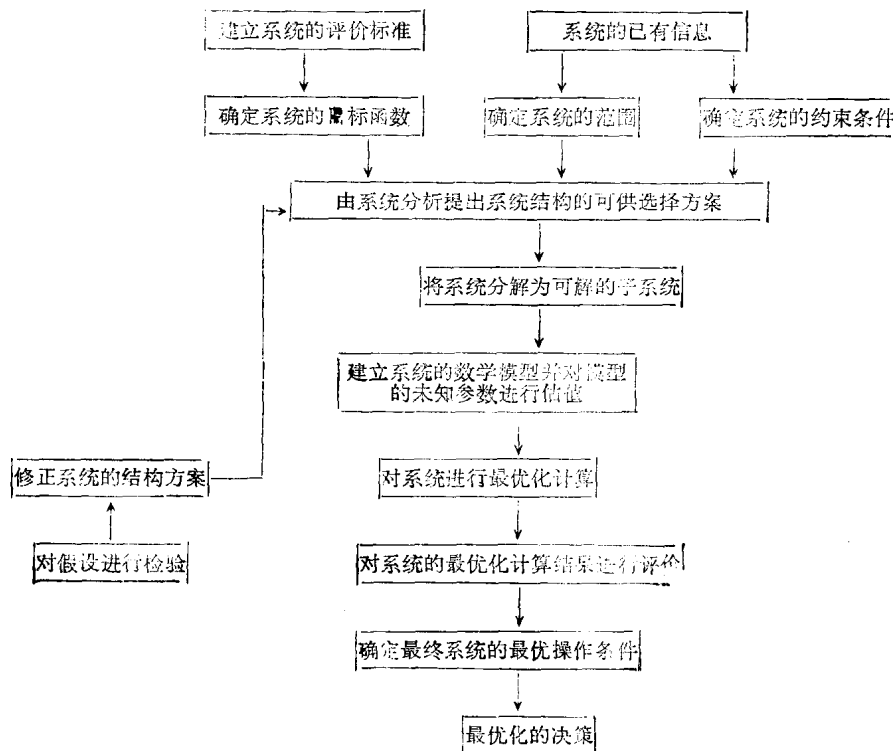


图 1-3 化工系统工程的方法和步骤

作的范围等问题, 简称为系统最优化的灵敏度分析、可靠性和稳定性问题, 这些都属于系统最优化的评价的主要内容, 也是在着手最优控制系统设计之前要做的工作。

(6) 系统的最优控制

化工系统在实际进行时, 由于外扰的影响, 操作条件往往会偏离最优值。系统的最优控制的目的是通过设计一个控制系统, 以保证系统稳定性最优条件下运行。化工系统工程解决系统的最优控制目的仅限于提出最优控制的方案, 并不包括最优控制的实施。

以解决化工系统的最优设计和最优控制为主要目标所采用的各种方法和步骤, 可用图1-3所示简单框图表示。当然这些步骤不是一成不变的, 其顺序也不是严格规定的。在某些情况下可能越过某一步骤; 而在另外一些情况下, 会反复使用某些步骤, 方法和步骤本身也具有反馈网络的特性。

参 考 文 献

- [1-1] Chestnut, H., "Systems Engineering Methods", John Wiley, 1967.
- [1-2] Porter, W. A., "Modern Foundation of Systems Engineering", Mac Millan, 1966.
- [1-3] Rudd, D. F., "Strategy in Process Engineering", John Wiley, 1968.
- [1-4] Williams, T. J., "Systems Engineering for the Process Industries" Mc Graw-Hill, 1962.
- [1-5] Katsuhiko OGata, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, 1970.
- [1-6] Кафаров, В. В., "Методы Кибернетики в Химии и Химической Технолозии", (Издательство «Химия»), 1971.
- [1-7] 矢木荣, 西村肇, "化学プロセス工学", 丸善, 1969.
- [1-8] 松原正一, "プロセスシステム工学", 朝仓, 1970.
- [1-9] 寺野寿郎, "システム工学", ユロナ社, 1971.
- [1-10] 高松武一郎, "プロセスシステム", 日刊技术新闻社, 1972.
- [1-11] 兰州化机所, "化工系统工程学修改稿" 1975~1976.

26.2 系统的分析

在系统工程中,定量地评价系统的特性是十分重要的,在进行过程系统设计时,首先应该构筑新系统的结构,然后进行正确评价,从而为改善系统设计提供依据。系统分析的目的在于通过分析比较各种可供选择的方案的费用、效益、功能和可靠性等各项技术经济指标,得出制订决策所必须的资料和信息,即获得系统最优设计和最优控制以及最优管理的信息。系统的分析与系统的最优设计不同,它主要是利用不完整的现成数据,通过系统的分析,构筑系统的模型并进行模拟和最优化,以此预测系统的性能和效益,通过对解的评价,为确定化工系统设计方案提供足够的信息和依据。

26.2.1 系统分析的图论基础

图论是系统分析的重要工具。在化工系统工程中,图论方法可解决:系统的网络分析;变量及计算顺序的选择;系统结构的设计。

(1) 集合和映射

(1.1) 集合

具有某种属性的一些对象的总体,或者说把对象的一个完全确定的组合称为集合(或集),构成这种组合的对象称为集合的点或元素,这些元素可以是数、函数或单元设备、单元过程等。应特别强调,集合是指一类事物的整体而不是指其中个别对象,集合所包含的对象是确定的,可以确定地判断一个对象属于或不属于这个集合。

一般以大写英文字母表示集合,以英文小写字母表示集合的元素,如

$$A = \{a, b, c, d, \dots\}$$

如果 a 是集合 A 的元素,则称元素 a 属于集合 A ,写成 $a \in A$ 。如果 b 不是集合 A 的元素,则称元素 b 不属于集合 A ,写成 $b \notin A$ 。

1. 空集—没有元素的集合称为空集,以 ϕ 表示。
2. 全集—包含所研究一切对象的集称为全集。
3. 集的相等—如果集 A 、 B 的所有对应元素相同,则称集 A 等于集 B ,写成 $A = B$ 。
4. 子集—由原集 I 的全部元素或部分元素(空集也包括在内)所组成的集 A ,称为 I 的子集,写成 $A \subset I$ 。如果 $A \subset I$,但 $A \neq I$,即集 A 的元素不等于集 I 的元素,但集 A 的一切元素均为集 I 的元素,而集 I 的某些元素不是集 A 的元素,则称集 A 为集 I 的真子集。
5. 交集—由所有既属于集 A ,又属于集 B 的元素构成的集称为集 A 和集 B 的交集或公共部分,写成 $A \cap B$ 。
6. 和集—由属于 A ,或属于 B ,尚或属于 A 、 B 的所有元素组成的集称为集 A 、 B 的和集,写成 $A \cup B$ 。
7. 差集—由属于 A 但不属于 B 的那些元素构成的集称为差集,写成 $A - B$ 。
8. 集 A 、 B 的序积—序积又称直积。取集 A 的一个元素 a ,取集 B 的一个元素 b 组成 (a, b) ,所有这种 (a, b) 构成的集称为集 A 、 B 的序积,写成 $A \times B$,或写成
$$A \times B = \{(a, b) | a \in A, b \in B\}$$