

(第二版)

# 过程系统优化

沈静珠 编著  
陈丙珍 审校

8

清华大学出版社

380407

# 过程系统优化

(第二版)

沈静珠 编著  
陈丙珍 审校

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

## 内 容 简 介

作者根据多年来在清华大学为研究生讲授“化工系统优化”课程的经验及科研的实践,并且参考了国内外文献编著了此书。本书从工程应用角度出发,系统地介绍了各种过程系统的优化方法,全书共分七章。第一章介绍过程系统优化的基本概念。第二、三、四章是基本系统的优化方法,详细讨论了如何将数学规划、最小值原理及动态规划等运用于解决过程系统的优化计算。第五章为大规模复杂系统的优化方法,阐述了近年来国内外开发的有实用价值的大系统优化方法,按可行路径和不可行路径对方法进行分类。第六章论述多目标优化方法,按非对话型和对话型分别介绍实用的算法。第七章讨论带有不确定因素的系统优化方法,重点放在如何确定合理的设计裕量。本书各章都举有实例,可供读者在实际计算时参考。章末附有讨论题或习题。

本书除作为教材外,还可作为化工工程师继续教育参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

过程系统优化/沈静珠编著. —2版. —北京:清华大学出版社, 1994

ISBN 7-302-01588-0

I. 过… I. 沈… Ⅳ. 0224

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 47836 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

责任编辑:刘明华

印刷者:北京昌平环球印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开本:850×1168 1/32 印张:15 字数:389千字

版次:1994年11月第2版 1994年11月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-01588-0/O·154

印数:0001—1500

定价:16.00元

## 序

随着计算机技术的广泛应用,过程系统的优化方法在 80 年代得到了迅速发展。从最近两届系统工程国际会议上发表的论文中可以看出,过程系统的优化方法已广泛应用于化工、石油化工、冶金、环保及轻工食品等部门,在规划、设计、控制及管理等领域中成为提高技术水平和经济效益的重要手段。

过程系统优化的特点是从系统的全局观点出发,协调系统内部各个组成单元之间的联接关系以及各个单元本身的操作参数,使整个系统按预定的目标在整体上达到最优化。鉴于过程单元模型的复杂性,又加上各单元之间错综的联系,这就使学习和掌握过程系统优化的方法有相当的难度。至今国内外有关这方面的教科书如运筹学、控制论及系统论等多半偏重于数学方法的论证,较少涉及如何应用这些理论解决过程系统优化的实际问题。因此在目前的情况下,沈静珠教授《过程系统优化》一书的出版是值得欢迎的。本书是作者根据她在清华大学化工系为研究生多年讲授“化工系统优化”课程的教材以及长期的科研实践撰写而成的。作为一本介绍发展新学科的教材,本书的取材既考虑了系统性、实用性,又尽量择其比较先进的内容。

本书共有七章,全面地介绍了过程系统优化所用的数学方法,从基本概念到这个领域的最新发展都作了清晰的阐述。在阐述中注意分析方法的思路和几何意义,还总结了各种方法相互之间的内在联系,评价了它们各自的优缺点。书中各章所介绍的许多实例都是作者从亲身科研实践中选取的,因此内容充实,易于被读者掌握及引用。

本书具有较高的学术水平,从其内容安排和联系实际方面来看,比较适合高等院校化工、石油化工、冶金等专业研究生教学的要求,对广大从事过程系统规划、设计、管理的工程技术人员也有相当的参考价值。本书的出版无疑将更好地促进过程系统优化方法在我国的发展。

陈丙珍  
(清华大学化工系)

# 前 言

过程系统的优化方法是系统工程学科的分支。随着生产、运输等规模的扩大,自动化程度的提高,追求最优效果、提高经济效益的问题日益突出。由于快速、大容量计算机的发展,过程系统的优化方法在近 10 多年来发展得十分迅速。虽然已经出版了不少最优优化方法的书籍,但是国内外至今仍缺少应用基本理论,解决由多个单元联接而成的过程系统优化实际问题的书籍。作者根据几年来在清华大学为化工系研究生讲授“化工系统优化”课程及科研的实践,以及参考了国内外文献,编著此书,希望对过程系统优化方法在工业实践中的推广应用能起到一定的作用。

作为一本介绍发展中新学科的书籍,作者在编著时力求做到既考虑学科的系统性和实用性,又尽量选择新开发的较先进的内容。从工程应用角度出发,系统地介绍由多个单元联接组成的整个系统,按预定目标在整体上达到最优的方法。

本书的第一章是介绍过程系统优化的基本概念,为学习本书做必要的准备。第二、三、四章是介绍基本系统的优化方法,详细讨论了如何将数学规划、最小值原理、动态规划以及连续系统离散化等应用于解决过程系统的优化计算。第五章介绍大规模复杂系统的优化方法,阐述了近年来国内外开发的有实用价值的大系统优化方法,如可行路径法和不可行路径法。并通过实例计算对各种方法进行比较。第六章介绍多目标优化方法,在论述了多目标解的定义的基础上,重点介绍非对话型和对话型两类算法。第七章介绍带有不确定因素的系统优化方法,重点在于如何确定合理的设计裕量。本书各章所举的一些实例,可供读者在实际计算时作为参考。

附录中介绍了有关的最优化方法和概率论的基本概念。

清华大学化工系陈丙珍教授对本书作了仔细审阅,对编写工作提出了不少宝贵意见,在此表示衷心感谢。

编写过程系统优化书籍在我国尚属初次尝试,由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳切盼望广大读者指正。

## 第二版前言

本书于 1990 年由机械工业出版社出版,因早已售完,并有不少读者索要,同时,作者根据近三年来的教学与科研工作,感到需对原书加以增补与修改。征得机械工业出版社同意,第二版转由清华大学出版社出版。

第二版增加了三部分内容:① 第四章 4.12 节,连续系统离散优化方法,它亦用来求解连续-离散系统最优的问题;② 第五章 5.4.3 节,模拟退火法,适用于求解性能指标为多峰函数的全局最优解;③ 第六章 6.8 节,多水平多目标优化法,应用于不同水平之间有主从关系的多目标优化问题。这三部分均为当前正在研究的前沿课题。此外,每章之后给出了讨论题或习题,以便读者练习。

虽然作者力图使新版更趋完善,仍难免有不足之处,敬请广大读者予以指正。



# 目 录

<b>第一章 基本概念</b> .....	(1)
1.1 过程系统的最优化 .....	(1)
1.2 过程系统最优化的几个阶段 .....	(4)
1.3 过程系统最优化的主要步骤 .....	(8)
1.4 过程系统的分类及其优化模型 .....	(12)
讨论题 .....	(18)
<b>第二章 离散系统的最优化(I)</b> .....	(19)
2.1 多级离散系统及其目标函数 .....	(19)
2.2 串联多级系统的优化模型 .....	(22)
2.3 串联多级系统的优化方法——非线性规划法 .....	(26)
2.4 带有信息反馈的多级系统 .....	(31)
2.5 状态方程与多级决策变量有关的系统 .....	(33)
2.6 离散线性二次型多级系统 .....	(35)
2.7 有不等式约束的多级系统 .....	(39)
2.8 离散最小值原理 .....	(43)
2.9 迭代计算方法 .....	(48)
2.10 实例 .....	(53)
习题 .....	(67)
<b>第三章 离散系统的最优化(II)——离散动态规划法</b> .....	(71)
3.1 动态规划的基本概念 .....	(71)
3.2 贝尔曼的最优化原则 .....	(74)
3.3 Bellman 方程的建立及求解方法 .....	(77)
3.4 线性二次型系统 .....	(89)
3.5 减少计算维数的 Lagrange 乘子法 .....	(90)
3.6 动态规划应用的限度及解决方法 .....	(96)

3.7	动态规划法与其他优化方法的比较	(102)
	习题	(104)
<b>第四章</b>	<b>连续系统的最优化</b>	(109)
4.1	连续系统的性能指标	(109)
4.2	泛函与变分法的基本概念	(112)
4.3	连续系统的最优化方法——变分法	(125)
4.4	线性二次型系统	(139)
4.5	有不等式约束时的优化方法	(144)
4.6	最小值原理	(149)
4.7	最小值原理的证明	(159)
4.8	奇异最优决策	(163)
4.9	数值解法	(167)
4.10	两个计算实例	(177)
4.11	最小值原理与动态规划的比较	(187)
4.12	连续系统离散优化法	(190)
	习题	(205)
<b>第五章</b>	<b>大规模复杂系统的最优化</b>	(209)
5.1	多等级系统	(210)
5.2	离散系统的分解与协调优化法	(211)
5.2.1	目标协调法	(215)
5.2.2	模型协调法	(221)
5.2.3	混合协调法	(225)
5.3	连续系统的分解与协调优化法	(227)
5.3.1	目标协调法	(229)
5.3.2	关联预估法	(234)
5.4	可行路径法	(237)
5.4.1	复合形法	(239)
5.4.2	随机搜索法	(242)
5.4.3	模拟退火法	(246)
5.4.4	逐次线性规划法	(250)
5.4.5	逐次二次规划法	(253)

5.4.6	广义简化梯度法 .....	(257)
5.5	不可行路径法及其衍变 .....	(259)
5.5.1	IPOSEQ 法 .....	(260)
5.5.2	IPOSEQ 法的衍变——CFV 及 RFV 法 .....	(263)
5.5.3	有关算法的几点讨论 .....	(266)
5.6	计算实例 .....	(268)
5.6.1	分解协调法 .....	(270)
5.6.2	复合形法 .....	(277)
5.6.3	模拟退火法 .....	(280)
5.6.4	不可行路径法 .....	(283)
	习题 .....	(290)
<b>第六章</b>	<b>多目标优化方法 .....</b>	<b>(295)</b>
6.1	概述 .....	(295)
6.2	多目标规划解的定义 .....	(298)
6.3	多目标规划解的必要与充分条件 .....	(303)
6.3.1	真弱非劣解的必要与充分条件 .....	(304)
6.3.2	真非劣解的必要与充分条件 .....	(306)
6.4	非对话型计算方法 .....	(312)
6.4.1	线性加权法 .....	(313)
6.4.2	按重要顺序求解法 .....	(316)
6.4.3	极小-极大法 .....	(320)
6.4.4	效用函数法 .....	(324)
6.4.5	乘法法 .....	(328)
6.5	对话型计算方法 .....	(330)
6.5.1	STEM 法 .....	(331)
6.5.2	SWTOM 法 .....	(338)
6.5.3	对话型复合形法 .....	(343)
6.6	系统分解与多等级优化法 .....	(346)
6.7	一个特例 .....	(350)
6.8	多水平多目标优化法 .....	(356)
	习题 .....	(361)

<b>第七章 带有不确定性因素的优化方法</b> .....	(365)
7.1 系统的统计优化方法 .....	(366)
7.1.1 统计的 Lagrange 乘子法 .....	(367)
7.1.2 多级离散系统的统计优化 .....	(375)
7.1.3 连续系统的统计优化 .....	(382)
7.2 灵敏度分析的基本概念 .....	(384)
7.2.1 灵敏度系数 .....	(385)
7.2.2 灵敏度方程 .....	(387)
7.3 离散系统的灵敏度分析 .....	(388)
7.3.1 系统的出口参数对决策变量和随机变量和灵敏度 .....	(389)
7.3.2 系统的目标函数对随机变量的灵敏度 .....	(392)
7.3.3 系统的目标函数对决策变量的灵敏度 .....	(393)
7.4 连续系统的灵敏度分析 .....	(403)
7.4.1 状态函数和目标泛函的灵敏度 .....	(404)
7.4.2 串联多级系统的灵敏度分析 .....	(407)
7.5 优化计算中的灵敏度分析法 .....	(409)
7.5.1 修改目标函数的方法 .....	(409)
7.5.2 增加约束条件的方法 .....	(411)
7.5.3 相对灵敏度法 .....	(412)
7.6 合理设计裕量的确定 .....	(415)
7.7 一个实例 .....	(422)
习题 .....	(429)
<b>附录</b> .....	(432)
附录 1 Lagrange 乘子法 .....	(432)
附录 2 库恩-塔克(Kuhn-Tucker)定理 .....	(437)
附录 3 二次规划(quadratic-programming) .....	(446)
附录 4 概率和随机过程 .....	(453)
<b>参考文献</b> .....	(464)

# 第一章 基本概念

过程系统最优化(process system optimization)是系统工程学科中的一个重要分支,研究过程系统在给定的约束条件下,使其性能指标达到最优的方法。

本章论述了过程系统最优化的一些基本概念:优化的任务、优化的主要步骤以及过程系统的分类,使读者对过程系统最优化有一概括的了解。

## 1.1 过程系统的最优化

所谓系统是由两个或两个以上相互区别、又相互联系的要素(或称单元)有机地结合起来,为完成同一目的的综合体。

为了达到既定的目的,系统必须具备一定的功能。为了实现这些功能,系统各单元之间就具有某种相互依赖的特定关系,遵循某种特定的法则。决定系统范围的称之为边界。边界之内叫系统,边界之外叫外界。系统与外界的划分并不是固定不变的,而是与系统优化的目标有关。例如对某个企业,如果只考虑其经济效益——产值或利润,那么只需以生产流程、生产装置为研究对象,取其为系统,如图 1-1(a)所示;如果同时还需考虑社会效益——防止污染,那么就要把三废处理部分包括在边界之内,如图 1-1(b)所示。这样,系统与外界的范围就起了变化。

如果一个系统很大,可将其分解为许多子系统。与原系统相比,子系统包括的变量维数少,结构简单,便于分析。但是,每一个子系统都不能独立地影响整体的性能,而是要依赖其它子系统的

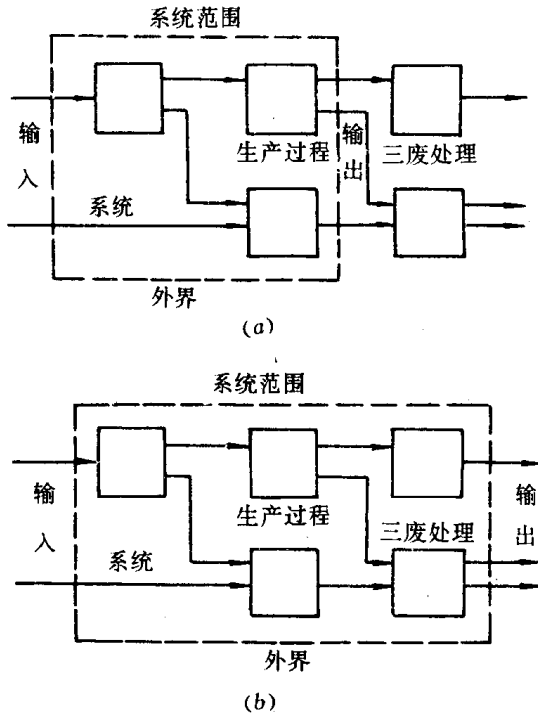


图 1-1 系统与外界

行为。各子系统之间是不可分割的。当然，原来的系统又可以当作高一级系统的组成部分。所以说，系统是可以分为多层次、多部分的整体。

在工业生产中，通过物质和能量转换的生产过程，将原料加工成所需的产品。将系统的概念应用于工业过程，就称之为过程系统。即过程系统是以物质和能量的分配、输送、转换和储存过程，以及其辅助的信息处理过程为研究对象，是针对实际的生产过程和设备及装置的。

以炼油厂的常减压装置的生产过程系统为例(如图 1-2 所

示),过程系统包括两座精馏塔、两台加热炉、数十台换热器以及其他辅助设备。简单的工艺过程如下:经过预处理的原油,经换热网络与温度较高的蒸馏产品换热后进入常压炉加热,使原油的一部分汽化为油蒸气。加热后的原油进入在常压下操作的精馏塔(常压塔),被分馏。由常压塔塔顶馏出重整原料或汽油馏分;自塔侧引

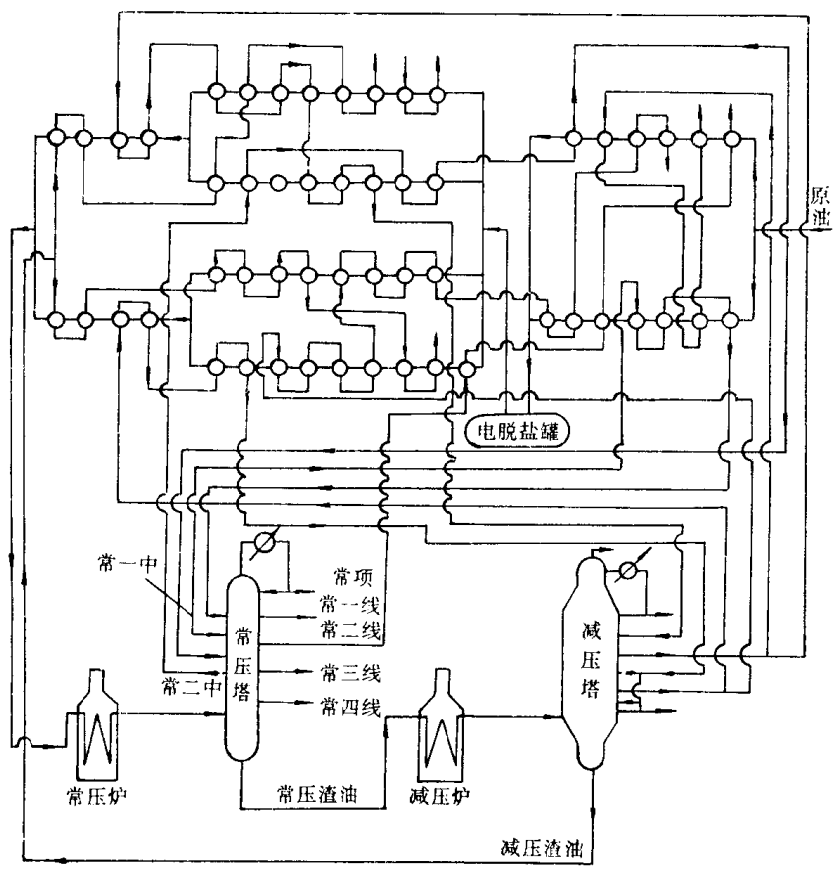


图 1-2 常减压装置简化流程

出煤油、柴油等馏分；塔底馏分经减压炉加热后在减压条件下蒸馏(于减压塔内进行)。从减压塔塔底出渣油，塔侧出蜡油等中间产品。

过程系统最优化就是在过程系统性能、特点所给定的约束条件下，找出使系统的性能指标(performance index)或叫目标函数(objective function)达到最小(或最大)的设备参数或工艺变量。

由于过程系统的结构复杂，包含的变量维数多，其优化计算十分费事。通常不能直接应用一般的最优化方法，必须对过程系统进行分解、降低变量维数、简化目标函数等处理，以便于优化计算。本书的内容就是讨论如何处理复杂的过程系统。关于优化计算方法的数学基础，可参考有关书籍。

过程系统的最优化是一门新兴的学科，还没有形成完整的体系。应该包括哪些方面的内容，也还没有一致的认识。可以相信，随着生产发展的需要，人们对其重要性认识的提高，这门学科必将在理论和实践上得到不断的发展。

## 1.2 过程系统最优化的几个阶段

一个过程系统按其优化任务可以分为最优综合、最优设计和最优操作三个阶段。

### (1) 最优综合

为了完成某类产品的生产任务，将分散的单元，遵循一定的法则，组织成对给定的性能指标来说是最优的过程系统，这个阶段称为最优综合。在此阶段要确定的是单元间的联接关系，是结构变量，是过程系统能否达到优化的根本大计。但是，可以满足生产要求的过程结构不止一个，特别是石油、化工系统，生产同一种产品，可以用不同的原料，不同性能的生产装置，组织成不同的工艺路线。如图 1-3 所示，醋酸生产就可以有四种不同的工艺路线。即使



在工艺路线已经确定的前提下,由于化工生产装置种类的多样性,其过程结构仍不止一个。例如一个由 10 个单元构成的过程系统,从理论上讲可以有  $10! = 3628800$  种排列。过程系统越复杂,可供选择的方案就越多,待求变量的维数就越高。而且一部分结构变量只有采用或不采用两种可能(数学上叫 0-1 整数变量),所以系统的最优综合是很困难的。目前只是在同类设备,如换热器系统、精馏塔系统中得到较为成熟的应用。

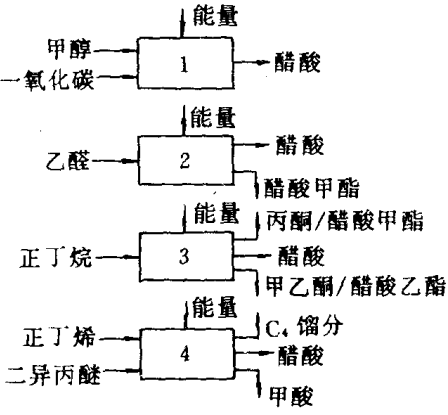


图 1-3 醋酸生产的四种工艺路线

(2) 最优设计

在给定过程结构的条件下,确定各单元的最优参数的优化计算,这个阶段称为最优设计。待定参数称为设计变量。例如,在设计换热器系统时,由工艺条件已决定了冷、热流体的流量和温度,换热器系统的结构,换热器的形式,如图 1-4 所示,要求总投资或总换热面积最小的各换热器尺寸,就是最优化设计问题。

最优设计是以过程系统的模拟为基础,通过系统的优化模型进行的。由于大容量、高速度计算机的出现,最优设计已在实践中