

过程系统工程

下 册

〔民主德国〕 G. 格隆 等著

化 学 工 业 出 版 社

过程系统工程

下册

过程系统的评价，最优化和综合

〔民主德国〕G. 格隆 等著

陆震维 译

化学工业出版社

《过程系统工程》为德意志民主共和国教育部审定作为大学的教学用书。下册内容主要包括：过程系统的评价（热力学评价及热力学经济评价）；过程系统最优化；单元及过程系统的可靠性；过程系统的综合等。

本书着重论述系统工程方法的应用，在选材上考虑到工程实用的要求，并结合化学工程中的问题进行讨论。书中有例题和习题，以便使读者加深对方法的理解。

本书可供有关高等院校师生、工程技术人员和其他有关人员参考。

Systemverfahrenstechnik 2

Bewertung, Optimierung und Synthese

Verfahrenstechnischer Systeme

Autoren: G. Gruhn usw.

VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1976

过程系统工程

下册

过程系统的评价，最优化和综合

陆震维 译

责任编辑：骆文敏

封面设计：任 辉

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787×1092^{1/32}印张77^{1/8}字数173千字印数1—2,820

1986年5月北京第1版1986年5月北京第1次印刷

统一书号15063·3759定价1.60元

前 言

《过程系统工程》下册是已经出版的《过程系统工程》上册的续篇，它是《过程技术教学丛书》的一个组成部分。在上册中讨论了过程系统的模型化和模拟。按照内容，下册的副标题相应为：过程系统的评价，最优化和综合。

按照《能量经济》^①一书中提出的一些设想，本书首先介绍热力学和热力学经济的评价方法，并将其应用到典型的过程系统上。其次是引入可靠性概念，它是估计过程单元和系统的重要判据。有一章是专门讨论多维评价的方法。

本书着重表明评价和最优化间的统一性。由于数学最优化方法在专著的教科书中已有所论及，因此在《过程系统工程》下册中主要介绍如何用其来解决具体过程系统的评价和最优化问题。关于过程系统的可能的分类，可参照上册中提出的分类方法。当然，由于本书题目所规定的范围，不可能将全部有关的典型的最优化问题均一一加以讨论。

本书有较大的一章是讨论过程系统的综合，因为事实上过程技术人员的主要任务在于设计一个过程系统。若能运用过程系统的综合方法，在许多情况下是能明显地达到高的经济效益。可惜目前关于结构设计方法的发展，尚处于开始阶段。

作者和编者愿意把过程系统工程的两本书，作为系统描述本领域的一种可能的设想提供给读者，并且也希望有助于

● 见参考文献〔2〕——译注。

当前国际范围内开展的系统工程专业讨论。应该指出，这两本书是整个数学丛书的一部分，而且是作为教材来考虑的。由于本领域尚在发展中，因此，目前编写的书籍肯定不是“经典”的。就这个意义上讲，编者和作者感谢读者的批评指正。

编者和作者

译 序

《过程系统工程》是德意志民主共和国近年来出版的《过程工程》教学丛书中的一个分册。本书分为上、下两册，上册讲述过程系统的模型化和模拟，下册的内容主要为系统的评价、最优化和综合。

本书特点是：写得深入浅出，特别是对“系统”的阐述较为清楚，着重基本概念，并且全书自始至终贯穿方法论的观点。这些使得读者能由浅入深，逐步地掌握如何运用系统工程的观点和方法来处理较大和复杂的过程系统。虽然书中所举例子大多是取自化工生产过程，但同样也适用于其他领域中的同类过程。因此，译者并不按惯例将书名译成《化工过程系统工程》，而是保留德语中“Verfahrenstechnik”一字的广泛含义，将书名“Systemverfahrenstechnik”译为《过程系统工程》。

由于系统工程的研究和教学在我国还刚刚开始，有关技术术语尚欠统一，译者尽可能采用目前已出版书中的术语。在翻译中发现原书中有个别错误，译者一一加以更正，并加了译注。在原书中对向量无特殊的表示（如用箭头或黑体字），翻译中也未改过来，请读者注意！

本书译稿承蒙陈丙珍同志和梁玉衡同志（已故）分别对上、下两册作了仔细审阅，在此谨表示感谢！

由于译者水平有限，时间仓促，翻译中难免存在不少错误，希读者批评指正。

译者

符 号

A	消耗, 失效概率, 收率, 面积	参数	
a	化学计量系数, 设计参数	P	压力, 模型参数
B	生产, 操作	Q	热量
b	负荷	R	可靠度, 概率 (一般)
C	热容, 投资费用式中的常数	S	系统函数, 不维修概率
c	比热, 摩尔浓度	T	温度
d	结构参数	u	控制变量
E	有效能	V	容积, 可使用性
H	焓	v	状态变量 (一般)
K	费用, 价格, 形态图中的分量	W	能量
k	单位费用, 单位价格, 传热系数, 反应速率常数	w	流速
l	长度坐标	X	变量 (一般)
M	模型函数	x	浓度, 布尔变量
m	质量, 递减指数	Z	目标函数, 目标量
N	约束条件的函数, 机械功率, 电功率	z	年固定费用, 干扰变量
n	摩尔数	α	费用分配系数
P	维修概率, 形态图中的	η	效率
		κ	多变指数
		λ	失效比率, 朗格拉日乘子, 权重系数
		μ	维修率
		ν	质量等级, 化学计量系数
		π	压力比

σ 功率份数
 τ 温度比, 时间
 Ψ 功率份数
 ω 单位循环过程功

角标

A 失效, 输出, 面积
ab 导出
An 消耗
AW 废水
B 生化, 操作
b 利用
E 输入
ex 有效能的
F 固体
f 固体的
i 序列标号
j 序列标号
K 连结
m 平均值, 物料量
max 最大的

min 最小的
Nu 有用, 利用
NK 后沉淀
opt 最优的
P 产品
R 储备
S 系统, 污泥
Su 有机杂质
th 热力的
U 切换装置
u 环境
V 对比用装置, 容积
v 可变的

附注:

1. 符号上一点表示流。
2. 符号上一横线表示平均值。
3. 过程系统单元的序号用括号内的上标表示。
4. 所有符号在文中有说明。

目 录

符号

第1章 评价和最优化	1
第2章 热力学评价方法	5
2.1 热力学衡算方程和评价量	5
2.2 过程系统的系统效率和单元效率	11
2.2.1 串联	11
2.2.2 级联	17
2.2.3 跨越连接	20
2.2.4 反馈连接	22
2.2.5 结果的推论	23
2.3 第2章总结	24
2.4 第2章的问题和习题	24
第3章 热力学经济评价方法	27
3.1 费用衡算和热力学经济模型	28
3.2 费用分配法	37
3.3 第3章总结	40
3.4 第3章的例题、问题和习题	40
第4章 技术可靠性	48
4.1 可靠性的定义和可靠性的特征参数	50
4.2 过程单元的可靠性	61
4.3 按可靠性行为分类	65
4.4 可靠性行为的技术经济评价	66
4.5 第4章总结	70
4.6 第4章的例题、问题和习题	70
第5章 多目标评价方法	75

5.1	多目标评价系统的结构	75
5.2	过程单元和系统的多目标评价系统	79
5.3	多目标评价系统的计算	81
5.4	第5章总结	83
5.5	第5章的例题、问题和习题	83
第6章	过程系统的评价和最优化	87
6.1	过程的基本系统	94
6.1.1	串联和级联	94
6.1.1.1	换热器的串联	98
6.1.1.2	反应器的串联和级联	109
6.1.2	并联	117
6.1.2.1	换热器的并联	125
6.1.2.2	反应器的并联	127
6.1.2.3	一般规则	132
6.1.3	反馈连接	132
6.2	过程和装置	136
6.2.1	废水净化过程	136
6.3	第6章总结	144
6.4	第6章的例题、问题和习题	144
第7章	过程系统的可靠性	152
7.1	可靠性逻辑图	152
7.2	可靠性逻辑的基本结构	153
7.3	系统的可靠性数学模型	157
7.3.1	布尔系统函数	158
7.3.2	热冗余系统的可靠度	161
7.3.3	系统可靠度的时间行为	165
7.3.4	冷冗余系统的可靠度	169
7.4	系统的可使用性	173
7.5	系统可靠性的最优化	173

7.6	第7章总结	177
7.7	第7章的例题、问题和习题	178
第8章	过程系统的综合	184
8.1	结构综合的系统方法原理	185
8.1.1	概念设计的分解	185
8.1.2	搜索法和顺序法的形态学方法	186
8.2	关于结构综合的算法梗概	191
8.3	结构参数法	196
8.4	线性最优化方法	210
8.5	决策规则法	216
8.6	探试法	222
8.7	第8章总结	228
8.8	第8章的例题和问题	229
	参考文献	239

第1章 评价和最优化

过程系统工程的主要目的是提供最优工作的生产系统。作为其先决条件是：发展为达到该目的所需的方法和手段。在这种十分复杂的目标范围内，有两种极端情况，其一是生产系统的设计，其二是生产系统的运转。前一种情况的特点是自由度最大，而后者其自由度最小。在此两种极端情况之间，还有一系列中间状态，即对现有生产系统在不同范围内的革新或改造。

评价是为了使过程系统的行为达到预定目标的一种手段。一般讲评价，就是对实现一种过程系统的各种不同方法，在给定功能要求和给定功能条件下进行比较。因此，评价也是过程系统最优化的先决条件。

功能要求是通过对系统输出流的要求来给出的（主产品流的量和状态，以及一定的副产品流的量和状态）。上述功能条件要涉及输入流的条件（原料，辅助物料及能量的量和状态），对输出流的要求（其它副产品、废料、辅助物料，能量，不是根据功能要求来定的）和有关系统内部参数的确定（例如：过程参数和设备参数的极限值）。为了确定功能要求和功能条件，应注意工艺间的许多相互关系，特别要知道所研究的过程系统在高一级系统中的位置及其相互关系。例如当规划一个过程时，要了解其在过程链和工厂系统中的位置和相互关系。若用数字表示，在此情况下大约需要100~1000个技术经济数据。

在给定功能要求和功能条件下，通常可能有许多个系统，当然其效能是不同的。所以可能存在多种不同形式的系统，是由于：

- * 采用不同的原料，辅助物料和能量载体，
- * 所用过程单元和所选过程参数之多种多样性，可以采用许多不同的设备以及系统结构的变化，即单元连结有多种可能性。

这样，我们的任务就是要对各种不同系统进行评价和选择其中最有效者。为了进行评价，要把效能的要求体现在评价判据中，这样就可对每个系统确定其满足这个判据的程度。

在评价判据中应包括下列系统的性质：

- * 物质和能量转变的效果，
- * 以可靠性、安全性、方便操作、劳动力消耗和工作条件等形式表示的操作性能，以及由于废料、噪音、废热对周围环境的影响，
- * 装备的费用，
- * 以系统的建立和运转所需费用，以及由此而导出的一些性质，如收益，盈利等形式表示的经济性质。

从这些数据已能看出，通常要使系统设计得能同时最优地满足许多评价判据。为了解决这种多目标的评价问题，所有评价判据要定量地来表示。为此，在下面第2至4章中首先讨论过程系统一个目标的评价，然后再扩展到多目标的评价问题。为了表示评价判据和系统的独立变量间的关系，采用文献〔1〕中提出的模型化和模拟方法。

过程系统的最优化目的是，确定能最优地满足评价判据的工艺变量之数值。一般最优化也包括结构参数。当然结构

最优化需要有专门的处理方法。

因此，过程系统的评价和最优化问题一般可如下表示：

$$Z(x, p) \rightarrow \text{极值} \quad (1.1)$$

$$M(x, p) = 0 \quad (1.2)$$

$$N(x, p) \leq 0 \quad (1.3)$$

这里式 (1.1) 的评价判据或目标判据，式 (1.2) 的模型方程和式 (1.3) 的约束条件均用向量表示，这些式子包含了作为自变量的变量 x 和模型参数 p 的向量。对于动态或不稳定系统，在式 (1.1) 至 (1.3) 中还有时间变量。

在一般地表达最优化问题时，人们经常一开始就把评价判据和模型方程连系起来，并把评价目标的数学式称为目标函数。

在式 (1.3) 的约束条件中，考虑了上述的功能要求和功能条件。

如同将在第 5 章中还要进一步讨论的，对于系统功能的一定要求，不仅能包括到目标判据中，而且也可包括到约束条件中（两者处理方式并不需要完全相同）。

最优化的目的在于，在固定模型参数 p 的数值时来调节变量 x ，使在保持式 (1.2) 和不等式 (1.3) 的条件下，目标函数达到一个极值。当然对于一定的模型参数时所得到的变量的最优数值 x_{opt} 比目标函数的极值 Z_{opt} 更为重要。

借式 (1.1) 至 (1.3) 中的变量 x ，即可把握以下几点来对过程系统作最优设计：

- * 过程单元中的已知变化，
- * 系统结构的可变性，
- * 设备主要尺寸和过程参数的可能变化。

对于过程系统的运转而言，只有一部分参数可变，一艘

仅限于过程参数的变化（倘使在运转中可以改变系统的连结和换用其它设备，则还有结构参数和设备尺寸）。

在解决过程系统的最优化问题时，尚有巨大的困难，其原因在于：

- * 系统单元数量大，
- * 可以采用的系统单元是多种多样的，
- * 单元模型的非线性，
- * 单元的变量数目极多，
- * 系统结构之复杂性，例如由于反馈而引起复杂化。

因此，对于过程系统的最优化必须发展专门的方法。这里有两个途径：

1. 借模型的简化^[1]来修正最优化问题，修改目标函数和约束条件。

2. 发展有效的最优化数学方法，相应的算法和计算程序。使得有可能对复杂问题有效地进行计算处理。

特别要指出的是，应尽一切可能来修正最优化问题。若未能利用所有的可能性，则对以后的计算工作就要花费更多的力量。所有与修正最优化问题有关的问题均是一些工程技术问题，要处理这些问题，必须注意并利用多种多样的工艺关系。

从计算技术来讲，重要的是在相应过程系统的基础上，将原来的最优化问题分解为各个子系统的最优化问题。

最后还应指出的困难是，在结构最优化时其相应的最优化变量均是离散的。

第2章 热力学评价方法

所谓**热力学评价方法**，是指基于物料、能量、熵和有效能的衡算，并采用由这些衡算所导出的评价量来进行评价。因此这种评价方法，一方面可以很好地直接判别物料和能量的效果，但另一方面又不能或只能间接地和不完全地掌握其经济效果。基于此原因，在阐明了热力学评价方法之后，还要研究**热力学经济评价方法**能提供怎样的结论，以及在热力学评价和热力学经济评价之间存在何种关系。

2.1 热力学衡算方程和评价量

在本书上册中已经用式 (4.1)，(4.2)，(4.5)，(4.6) 和 (4.7) 表示了物料，能量，熵和有效能的通用衡算方程。为了从衡算方程导出评价量，最好将这些方程以不同形式表示。根据上述方程，首先可以将能直接表征其进出流和损失流的绝对量者作为评价量。其次是从这些衡算方程可以直接导出在进出流间建立关系的评价量。这就是：

- * 在上册中式 (4.8) 和 (4.11) 表示的物料流分配系数；

- * 按上册中的式 (4.12)，以热效率形式表示的能量流分配系数；

- * 按上册中的式 (4.16)，以有效能效率形式表示的有效能流的分配系数。

当然，用这些评价量还不能完全掌握过程系统具体的工

艺功能。原因在于，这些评价量并不是通过衡量为实施其功能所得的收益和消耗而得到的（不能一般地假定：进入流作为消耗，输出流当作有效功率）。

因此，对于各种不同的情况，在定义和应用评价量时，要对收益和消耗作出说明。为此，下面将衡算方程（4.1），（4.2），（4.5），（4.6）和（4.7）改变，以使清楚地表明其中的收益和消耗。

由式（4.1）得到改变后的物料衡算形式^①：

$$\begin{aligned}
 &(\sum \dot{m}_{zu} - \sum \dot{m}_{ab}) + (\sum \dot{m}_{zu} - \sum \dot{m}_{ab}) + (\sum \dot{m}_{zu} \\
 &\quad \text{原料} \quad \quad \text{原料} \quad \quad \text{辅助物料} \quad \quad \text{辅助物料} \quad \quad \text{能量载体} \\
 &\quad - \sum \dot{m}_{ab}) = \sum \dot{m}_{ab} + \sum \dot{m}_{ab} + \sum \dot{m}_{ab} \quad (2.1) \\
 &\quad \quad \text{能量载体} \quad \quad \text{主产品} \quad \quad \text{副产品} \quad \quad \text{废料}
 \end{aligned}$$

此衡算式的左边表示消耗，这里应计及部分原料（由于未全部转化，或相应于收率）和部分或全部的辅助物料的返回。式的右边是以主产品流和副产品流表示的收益部分。按收益和消耗之比来评价过程系统可得到下面的评价量：

$v =$

$$\frac{\sum \dot{m}_{ab} + \sum \dot{m}_{ab}}{\text{主产品} \quad \text{副产品}} \div \frac{(\sum \dot{m}_{zu} - \sum \dot{m}_{ab}) + (\sum \dot{m}_{zu} - \sum \dot{m}_{ab}) + (\sum \dot{m}_{zu} - \sum \dot{m}_{ab})}{\text{原料} \quad \text{原料} \quad \text{辅助物料} \quad \text{辅助物料} \quad \text{能量载体} \quad \text{能量载体}} \quad (2.2)$$

若按上册中的式（4.2），不是以总衡算为基础，而是以各组分的物料衡算为基础，则不能构成作为评价量的收益/消耗之比。仅由物料衡算导出的评价量，其结论通常是有一定

① 式中下标见上册中符号说明——译注。