

过程系统工程

上册

〔东德〕 G. 格隆 等著

化学工业出版社

过程系统工程

上册

过程系统的模型化和模拟

〔东德〕G.格隆 等著

陆震维 译

化学工业出版社

**SYSTEMVERFAHRENSTECHNIK 1
MODELLIERUNG UND SIMULATION
VERFAHRENSTECHNISCHER
SYSTEME**

Autoren, G. Gruhn usw.

1. AUFLAGE

VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.

Leipzig, 1976

过程系统工程

上册

过程系统的模型化和模拟

[东德] G. 格隆 等著

陆震维 译

*

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 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $9^{3/4}$ 插页1字数212千字印数1—5,110

1983年6月北京第1版1983年6月北京第1次印刷

统一书号15063·3504定价1.00元。

本书系根据1976年德意志民主共和国国立德意志基本材料工业出版社 (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie) 出版的格隆 (G. Gruhn) 等著《过程系统工程》(Systemverfahrenstechnik) 第一版译出的。原书是德意志民主共和国高等学校和大学教科书。全书分上下两册出版。

本书上册叙述过程系统的模型化和模拟基础理论。基于过程系统的概念和对所研究对象提出任务的描述，书中讨论了给定过程系统的模型构成问题，模型的主要表达形式，过程系统数学模型的基本构造和利用模型求取系统的性质。本书是按照方法论的观点来写的，而且对方法的讨论最终落实到应用于具体的生产过程。按照这种观点，本书讨论了带中间冷却的多级压缩，多级传热、多级精馏和多级反应等典型的基本系统，以及硫酸生产过程和丙烯腈生产过程等比较大的系统，并且给出了所求得的模拟结果。在书中每一章后面给出了一些例题、习题和问题，并对一些专门领域都指出了一些补充文献，从而使读者有可能主动地掌握和领会本书的内容。

译 序

《过程系统工程》是东德近年来出版的《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

原 著 前 言

《过程系统工程》上册是培养过程工程师的技术基础课教材的一个组成部分，并与本书下册一起，作为过程系统工程专业的基础课程。在学习本课程时，要以热力学过程和力学过程以及反应工程的基础知识作为本课程的自然科学技术的基础。由于所研究对象的完整性，因此尚须具备关于装置技术、能量经济和自动化技术方面的一定知识。只有这样，才能达到与教学大纲中明确规定该课程的教学内容相一致。

无论是过去和现在，编者和作者对于过程系统工程均予以特别的重视。这不仅体现在将教材分为两册，而且还表现在作者、编者和专家间的密切接触。过程系统工程在过程工程中是相当年轻而且是十分活跃的一个分支，在国际范围内还是在最近十五年至二十年内形成的。例如在1960年以前，过程工程的文献中尚无这方面单独的标题。自1960年后，过程系统工程的文献约占过程工程文献总数的25%，并有其自己的主题索引。过程系统工程的整体概念（着眼于整个生产过程），使得在化工工艺方面表现得特别清楚。因此，编者和作者将过程系统工程这两册书优先用于对工艺过程的讨论。关于工艺的讨论，首先是由哈格尔（K. Hager）在麦塞堡和新勃兰登堡（Merseburg und Neubrandenburg）的演讲中提出的^①。过程系统工程上、下两册的内容是这样来分

① 见哈格尔著《社会主义的科学和工艺》

Hager, K. "Wissenschaft und Technologie im Sozialismus"
Dietz-Verlag Berlin, 1974.

的：上册主要讲述过程系统的模型化和模拟，下册则是讨论过程系统的评价、最优化和综合。按此，在上册中感兴趣的是认识和表达给定系统的性质，而下册主要讨论所达到的结果。从目录中可以看出，过程系统工程上册是按照方法论的观点来讲述的，这样有利于清楚地表明过程系统工程的工作方向。为了表示过程系统工程的具体的工艺面貌，尽可能用相同的例子来说明应用系统方法所得出的结果。通过例题，可以清楚地了解过程的系统概念。对于高一级的系统，在本书中不作详细讨论，但是也可用类似的方法。此外，所举例子基本上取自化学工业的范围，因为过程系统工程首先是在研究化学工业中的生产过程而产生的。但是，正如最近的研究结果所指出的一样，在进行物质变换的其他工业领域中，应用过程系统工程的知识也是卓有成效的。

《过程系统工程》上册如同其他过程技术丛书一样，力求通过举例、习题、问题和指点一些补充文献，使读者能进行自学。根据教材的内容，本书主要作为培养过程工程师的技术基础课程。当然这不是说本书对实际工作者是无所裨益的。可惜的是，尽管过程系统工程对许多工业领域的应用是如此的需要，但在德文书藉中对其尚无完整的描述。

因此，本书也是填补这方面的空白。鉴于目前过程系统工程还十分年轻，并且尚在不断的发展中，所以在内容的处理上，本书不是“经典”的。编者和作者特别欢迎读者对本书提出批评和指正。

编者和作者

符 号

A	面积	P	压力
a	面积	r	反应速率
C	热容量	S	矩阵, 灵敏度函数, 熵
c	比热	s	比熵
	克分子浓度	U	图的弧集合, 转化率
Da	丹姆开勒数	U'	U 的子集合
E	有效能	u	图的弧, 控制向量
e	比有效能	W	能量
F	自由度	w	比能
G	图	X	图的节点集合
G'	子图	X'	X 的子集合
H	焓	x	图的节点, 输入量向量
h	比焓	y	输出量向量
K	整体, 回路矩阵	α	相对挥发度
	联结数目, 费用	ε	显著性判据
k	传热系数, 单位费用	η	能流、有效能流、效率的分配系数
L	完整描述一个过程或系统量的数目	δ	无因次温度
M	条件数目	κ	等熵指数
m	质量	λ	物料流、收率、转化率的分配系数
N	机械或电的功率	μ	图的路径
n	单位机械或电的功率, 灵敏度系数, 拟多变指数, 克分子数	ν	能流、有效能流、热机相对效率的分配系数、化学计量系数

ξ 灵敏度判据
 π 压力比
 τ 温度比, 停留时间, 时间
 Φ 换热器的特性函数
 φ 相流
Nu 有用
P 过程
p 等压
pot 势能
Q 源
R 精馏, 管道, 反应器
r 反应
S 塔釜产品, 阱, 系统
t 技术的
u 环境
V 损失, 体积
Vergl. 比较过程
Wü 换热器, 给热
Z 进入产品
zu 导入
下标
A 输出
ab 导出

Au 消耗
E 输入, 单元
ex 有效能
G 界限值, 几何
Geg 逆流
ges 总的
Gl 并流
H 加热剂, 加热
i 第 i 个单元(第 i 个节点)
第 i 个基本回路
is 等熵
j 第 j 个单元
K 压缩, 冷剂, 冷却, 塔顶
产品
k 第 k 个输入流, 一个流的
第 k 个分量
kin 动力学的
l 第 l 个输出流
m 输入流的第 m 个分量
n 输出流的第 n 个分量
注: 1. 符号上加一点表示物流。
2. 过程系统单元的流水号用
右上角一个括号表示。

目 录

符号

第 1 章 过程系统	1
1.1 过程系统的特征	2
1.1.1 用控制论的观点确定系统的概念	2
1.1.2 过程系统的定义和构造	4
1.1.3 过程系统的实例	19
1.1.3.1 乙烯生产过程	19
1.1.3.2 丙烯腈生产过程	22
1.1.3.3 硫酸生产过程	27
1.1.3.4 废水净化过程	31
1.2 典型过程工程的基本系统	33
1.2.1 过程系统单元的分类	33
1.2.1.1 按照输入流和输出流的数目和流向分类	34
1.2.1.2 按照输入和输出间的数学关系分类	36
1.2.1.3 按照时间行为分类	36
1.2.1.4 按照干扰量分类	37
1.2.1.5 按照过程的功能分类	37
1.2.2 过程系统的分类	39
1.2.2.1 按照功能分类	39
1.2.2.2 按照结构分类	41
1.2.2.3 按照输出的时间行为分类	48
1.2.2.4 其他分类的可能性	49
1.3 研究过程系统的任务	51
1.4 第 1 章小结	52

1.5 第1章的问题和练习题	53
第2章 过程系统模型化的基础	58
2.1 重要基本概念的确立	58
2.2 过程系统模型的主要表达形式	60
2.3 模型修正过程	64
2.4 过程系统数学模型的基本构造	69
2.5 第2章小结	73
2.6 第2章的问题	74
第3章 过程系统结构的数学模型	75
3.1 图论的基本概念	75
3.2 用矩阵表示结构	81
3.3 用表格形式表示结构	88
3.4 第3章小结	91
3.5 第3章的问题和练习题	92
3.6 第3章中的专用符号	93
第4章 过程系统单元的模型化和模拟	94
4.1 过程系统单元模型方程的基本类型	94
4.2 建立模型的要求和规则	95
4.3 衡算模型和分布模型	97
4.3.1 衡算模型	97
4.3.2 分布模型	101
4.4 过程系统的一些单元模型	105
4.4.1 管道	106
4.4.2 压缩级	108
4.4.3 传热级	110
4.4.4 精馏级	116
4.4.5 反应级	119
4.5 第4章小结	121
4.6 第4章的例题, 问题和练习题	121

第5章 过程系统的自由度	129
5.1 过程单元自由度的确定	131
5.2 过程系统自由度的确定	134
5.3 第5章小结	136
5.4 第5章的例题, 问题和练习题	136
5.5 第5章专用符号	142
第6章 过程系统模型的简化	143
6.1 一般方法	144
6.2 减少单元	145
6.3 单元的组合	150
6.4 改变单元的模型方程	151
6.5 减少单元的联结	153
6.6 第6章小结	155
6.7 第6章的例题, 问题和练习题	155
第7章 过程系统的结构分析方法和迭代法	164
7.1 确定模拟计算顺序	165
7.2 整体的求得和次序	171
7.3 整体最小切断数的确定	179
7.4 迭代法	186
7.4.1 简单迭代法	189
7.4.2 威格斯坦法	191
7.4.3 牛顿-拉夫逊法	192
7.4.4 牛顿法	197
7.4.5 沃尔夫-奥斯特洛夫斯基法	201
7.5 第7章小结	204
7.6 第7章的例题, 问题和练习题	204
7.7 第7章的专用符号	223
第8章 几个基本系统的模型化和模拟	224
8.1 多级传热过程	225

8.2	带中间冷却的多级压缩	233
8.3	多级精馏	240
8.4	多级反应	246
8.5	第8章小结	249
8.6	第8章的例题, 问题和练习题	249
第9章	模拟用程序系统的构造和应用	252
9.1	对程序系统的要求	252
9.2	程序系统的基本构造	254
9.3	程序系统的应用	256
9.4	第9章小结	259
9.5	第9章的问题	259
第10章	过程的模型化和模拟	260
10.1	制取丙烯腈的生产过程	260
10.1.1	过程单元和系统结构的模型	261
10.1.2	系统模拟的结果	267
10.2	硫酸生产过程	269
10.2.1	过程单元的模型	270
10.2.2	系统结构模型和结构分析	280
10.2.3	系统模拟的实施和结果	285
10.3	第10章小结	287
10.4	第10章的问题和练习题	295
参考文献		296

第1章 过 程 系 统

进行物质变换工业的生产过程，其特点是复杂和多樣的。欲将原料加工成所希望的产品，一般必须经过一系列的过程级，这些过程级是借物料流、能量流和辅助物料流相互联系起来。

在实际中，可以用不同方法来生产一种一定的产品。每种原料又可生产许多产品。这样对于一定的产品或原料，可能存在许多不同的生产过程。

在进行物质变换的工厂里，许多生产过程是通过能量流和辅助物料流而相互联系在一起的。为了生产一定的产品，许多生产过程是借输送和储存装置相互联系，并构成一个联结系统。

引入“过程系统”这个范畴，可能使过程工程师在进行过程开发和实施生产时，系统地掌握和整理这种复杂的物质生产过程，从而为深入了解和进一步发展过程创造条件。并且也有可能对各种不同特点和形式的生产过程采用共同的过程工程的研究方法。

按照这种观点，在本章中，将“过程系统”作为一个总的范畴来讨论，即要阐明：如何将进行物质变换工业中的生产过程，按其特性表示为一种过程系统，以及在研究这种过程系统时的任务是什么。

1.1 过程系统的特征

1.1.1 用控制论的观点确定系统的概念

就观察方法和表达方式而论，控制论是从各个学科所研究对象的特殊性质中抽象出来，并力求找出其共同适用的规律。就这一点讲，控制论已经给系统的概念指明了一个一般的范围。由控制论所规定的系统定义，概括了各个学科中（如自然科学和工程科学）应用系统概念的一些统一的、基本而共同的观点。另一方面，由于控制论的抽象性，因而不可能对各学科范围内存在的每个实际系统的性质，进行必要和真实的描绘。

从这个意义上讲，将控制论中的系统概念用于过程工程中的生产系统上，可以有助于清楚地表明其间的一定关系，而不必对其性质作详细的描述。

按照控制论，系统的定义为（见文献〔1〕）：

元件的集合和在这些元件间构成相互关系的集合。

在此定义范围内，所谓**元件**可理解为构成系统的单元^①，即系统的组成部分，这些部分在系统中不能或不应再分开，也即单元可用“黑箱”的概念来表征。单元的作用是使输入量转变为输出量，即具有一定的功能。

按照上面的定义，一个系统内的单元是通过关系而互相联系在一起的。这里的“关系”这个概念，可以理解为任意方式的逻辑关系。根据两个单元间的逻辑关系（联结）就可确定输入量和输出量间的关系。所有关系的整体，称为**系统**

① 以下将元件均译成单元。——译者注

的结构。这里不应只看到关系的集合，而应理解为单元相互间的一定排列。

在**系统范围**内，包括了属于系统的所有单元。借助于这样一个设想的系统范围，即可如图 1.1 将系统与其**环境**区别开。

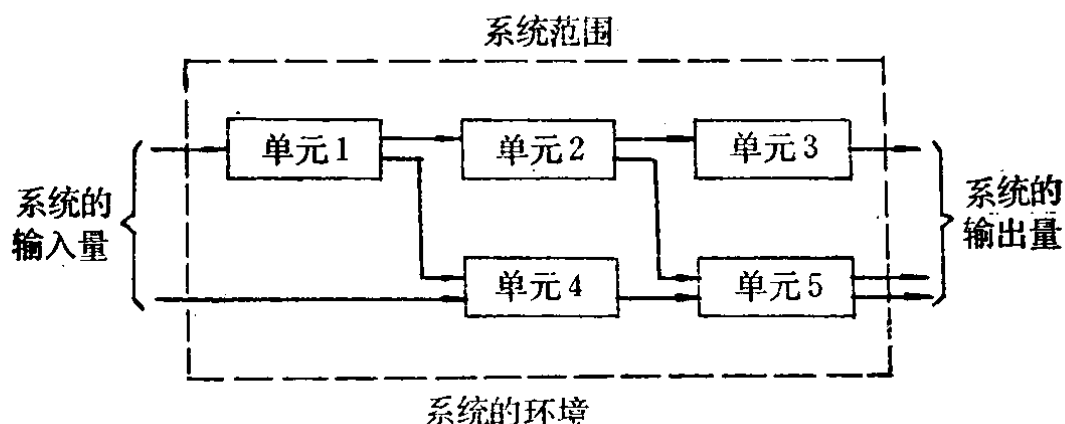


图 1.1 系统简图

当一个系统具有特定功能的各个单元按照一定方式相联结时，就实现了一定的**系统功能**，即使系统的输入量变为系统的输出量。从图 1.1 所表示的意义来讲，系统的功能表示为系统和环境间的相互作用，而环境始终是给系统提供输入量，同时又接受系统的输出量。可以采用不同构成的系统来满足所要求的功能。这表示，采用不同的单元和借助于不同的系统结构，总可以产生具有同样功能的许多系统。当然，就满足功能的效果而论，通常这些系统是各不相同的。

对系统特征总的描述，人们常用**复杂性**和**完整性**两词。按照统一规定，当单元的数目非常大时，才用系统的复杂性这个词，而**完整性**这个概念关系到系统的结构。当单元间联结的数目很大，而且通常还有反馈时，则称系统是完整的。

在应用系统概念时，必须考虑到系统的相对性，因此这里还用**子系统**这个名称。这样可以在一个系统内分为许多子系统。这种**子系统**与原来的系统相比，其复杂性和完整性就小得多。其次，总是可以将原来的系统当作**高级系统**的组成部分。用此方法，就可得到关于系统层次构造的初步设想。对于单元，可以用**单元的组合**，即将许多单元合并为系统的一个新的单元（高级的单元），这种单元在系统内与原来那些单元具有相同的功能。当然，反之也可将这种组合单元分为许多低一级的单元。因此单元的概念也具有相对性。在图 1.2 中清楚地表示了这种关系。这里已能看到，系统一单元关系的相对特性，这对于系统工程的模型化是具有重要意义的。当然，对于要建立模型的过程之客观性质，是不会因此而改变。

1.1.2 过程系统的定义和构造

将控制论中的系统概念应用到工业生产上，即为一种过程系统（参阅文献〔2〕）。与过程的定义相一致，这里讨论的是进行物质变换工业中所有的各种生产过程。根据 1.1.1 节中系统定义所得到的基本思想，可将过程系统的特征表示如下：

1. 过程系统的功能在于实现工业生产中的物质和能量的转换；
2. 过程系统的单元是用于进行物质和能量的转换、输送和储存的；
3. 单元间借物料流和能量流相连而构成一定的关系。

与一般控制系统相比，过程系统的特殊性在于其特殊的功能，以及由此而对单元的类型和联结有特殊的要求。