

# 管理系统模拟

胡 斌 胡晓琳 编著



科学出版社

# 管理系统模拟

胡 斌 胡晓琳 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书共包含 4 部分,第 1 部分包括 8 章,介绍管理系统模拟概念、离散模拟、连续模拟、多 Agent 模拟、定性模拟原理、模拟模型的输入处理和输出统计分析、模拟模型的确认及实验设计等方法。第 2 部分包括 3 章,介绍 Arena、AnyLogic、NetLogo、Vensim、Excel 和 Matlab 等模拟工具的功能、操作及应用。第 3 部分包括 5 章,介绍离散事件模拟专用工具 Arena 在企业生产系统运作管理上的应用。第 4 部分包括 4 章,介绍四类模拟方法的集成原理、离散事件模拟与优化方法的集成,多 Agent 模拟与实证研究方法的集成及多 Agent 模拟与博弈论、心理学的集成。

本书可作为高等学校的管理科学与工程、工商管理、系统工程等专业的本科生、硕博研究生教科书或参考书,也可供有关领域的科学工作者和管理人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

管理系统模拟 / 胡斌, 胡晓琳编著. —北京: 科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-052820-9

I. ①管… II. ①胡…②胡… III. ①管理信息系统-计算机模拟  
IV. ①C931.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 107573 号

责任编辑: 王京苏/责任校对: 李 影

责任印制: 吴兆东/封面设计: 蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 26

字数: 617 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前言

随着人们日常生活和工作环境的智能化,社会、经济、企业、人群等系统的运作日益呈现出复杂特征。因而,作为复杂管理系统在不确定性环境下运作机理及其性能表现的分析方法、辅助决策与辅助设计方法,管理系统模拟已被人们普遍接受,其原理和工具也在不断地发展和更新,与此同时管理系统模拟也出现了各类思想、概念、方法和术语。国内学术界对管理系统模拟的定义、分类没有达成统一的共识,不利于管理系统模拟在实际应用中的推广和在学术研究上的深入。

基于此,作者首先根据多年来学术研究和社会实践的体验,从对计算机模拟本质特征的深刻认识入手,对管理系统模拟进行分类,包括离散模拟、系统动力学模拟、多 Agent 模拟、定性模拟四大类,并对四类模拟方法的基本概念、原理、方法及其在管理领域中的应用进行系统的介绍和总结。除了四类模拟的基本原理以外,模拟模型的输入处理和输出分析、模拟模型的验证(model verification)和确认,以及实验设计等原理和方法,也是整个管理系统模拟理论不可缺少的组成部分,在本书中作者对它们进行系统介绍。

其次向读者介绍管理系统模拟的常用工具,其中, Arena 擅长于离散事件模拟及离散-连续混合模拟; AnyLogic 是集成化模拟软件,可用于除定性模拟以外的所有类型的模拟,并能在同一个环境中同时模拟不同类型模拟模型; NetLogo 是用于多 Agent 模拟的开放型模拟平台; VenSim 则是传统的专门用于系统动力学(system dynamic, SD)建模与模拟的工具; Excel 和 Matlab 可分别用于蒙特卡罗分析和连续模拟。

对于离散事件模拟在企业生产执行层的应用,本书中分别介绍 Arena 在加工、资源能力变化、物流、布局与调度、库存控制等过程的应用细节。而对于复杂现象或过程,单纯使用模拟方法,不足以应对实际问题,因此,本书中又详细介绍集成模拟原理、离散事件模拟和优化方法、多 Agent 模拟和实证研究方法、多 Agent 模拟和博弈论、心理学等集成方法。

与其他同类型的书籍相比,本书具有的特色是系统性、全面性,即不仅介绍四种类型模拟的原理、方法、工具和应用,而且还介绍模拟模型的输入/输出、验证确认与实验设计、模拟模型的集成化应用。

本书受国家自然科学基金项目(No.71271093)的部分资助,在编撰过程中,作者参阅并应用许多学者的研究成果,硕士研究生李京蔚在收集和整理这些成果上提供了很多帮助,硕士研究生许子来运用C#开发和检验了第2章离散事件模拟模型,硕士研究生刘洪波和博士研究生夏泥在第2章的并行分布式离散事件模拟中做了编辑和开发工作。科学出版社王京苏编辑对本书做了严谨细致的编辑工作。在此,对所有帮助过我们的人士致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,不足之处在所难免,为了我国管理领域计算机模拟事业的发展,恳请广大读者不吝赐教。

作者

2017年2月

# 目 录

## 第1部分 原 理 篇

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第1章 概论             | 3   |
| 1.1 系统的概念          | 3   |
| 1.2 管理系统模拟         | 8   |
| 1.3 系统模拟的一般步骤      | 16  |
| 1.4 系统模拟的实例：一个手工模拟 | 19  |
| 习题与思考              | 22  |
| 第2章 离散模拟原理         | 23  |
| 2.1 基本概念           | 23  |
| 2.2 模拟时间推进机理       | 26  |
| 2.3 离散系统模拟的评价      | 28  |
| 2.4 M/M/1 排队系统的模拟  | 29  |
| 2.5 库存控制的模拟        | 39  |
| 2.6 并行/分布式模拟       | 44  |
| 习题与思考              | 57  |
| 第3章 连续模拟原理         | 59  |
| 3.1 连续模拟基础         | 59  |
| 3.2 连续模拟的数值积分法     | 63  |
| 3.3 系统动力学          | 67  |
| 3.4 连续系统模型的建模示例    | 82  |
| 习题与思考              | 91  |
| 第4章 多 Agent 模拟原理   | 92  |
| 4.1 多 Agent 模拟     | 92  |
| 4.2 元胞自动机模拟        | 103 |

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 本章附录 .....                      | 112  |
| 习题与思考 .....                     | 118  |
| <b>第 5 章 定性模拟原理</b> .....       | 119  |
| 5.1 管理系统的复杂性特征 .....            | 119  |
| 5.2 定性模拟的发展过程 .....             | 121  |
| 5.3 定性模拟方法的分类 .....             | 122  |
| 5.4 QSIM 方法 .....               | 123  |
| 5.5 商品产量与价格演化的定性模拟 .....        | 130  |
| 习题与思考 .....                     | 149  |
| <b>第 6 章 模拟模型的输入处理</b> .....    | 150  |
| 6.1 模拟模型的输入分析 .....             | 150  |
| 6.2 随机变量的生成 .....               | 158  |
| 习题与思考 .....                     | 162  |
| <b>第 7 章 模拟输出的统计分析</b> .....    | 164  |
| 7.1 模拟的类别和系统的性能测度 .....         | 164  |
| 7.2 终态模拟的置信区间 .....             | 170  |
| 7.3 稳态模拟的置信区间 .....             | 173  |
| 7.4 多方案模拟输出的比较分析 .....          | 181  |
| 习题与思考 .....                     | 1866 |
| <b>第 8 章 模拟模型的确认和实验设计</b> ..... | 188  |
| 8.1 模拟模型的验证 .....               | 188  |
| 8.2 系统模型的确认 .....               | 190  |
| 8.3 模拟的实验设计 .....               | 193  |
| 习题与思考 .....                     | 201  |

## 第 2 部分 工 具 篇

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| <b>第 9 章 模拟工具——Arena</b> .....           | 205 |
| 9.1 结构与功能 .....                          | 205 |
| 9.2 基本模块 .....                           | 208 |
| <b>第 10 章 模拟工具——AnyLogic</b> .....       | 219 |
| 10.1 AnyLogic 的开发环境 .....                | 220 |
| 10.2 应用示例 .....                          | 226 |
| <b>第 11 章 模拟工具——Excel 和 Matlab</b> ..... | 245 |
| 11.1 Excel .....                         | 245 |
| 11.2 Matlab .....                        | 252 |

### 第3部分 Arena 应用篇

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第12章 生产系统工件加工过程的模拟    | 267 |
| 12.1 简单生产检验过程的模拟      | 267 |
| 12.2 单件车间生产过程的模拟      | 273 |
| 12.3 实体回避的模拟          | 281 |
| 习题与思考                 | 286 |
| 第13章 生产系统资源能力变化的模拟    | 289 |
| 13.1 资源能力的确定性变化       | 289 |
| 13.2 资源能力的随机性变化       | 290 |
| 13.3 非稳定泊松到达过程        | 292 |
| 习题与思考                 | 296 |
| 第14章 生产系统物流过程的模拟      | 297 |
| 14.1 物流过程             | 297 |
| 14.2 基于移动运输工具的物流过程模拟  | 298 |
| 14.3 基于固定运输工具的物流过程模拟  | 304 |
| 习题与思考                 | 309 |
| 第15章 生产系统布局与调度的模拟     | 310 |
| 15.1 生产系统布局的设计        | 310 |
| 15.2 生产系统中工件流动的控制     | 315 |
| 习题与思考                 | 321 |
| 第16章 生产系统库存控制的模拟      | 322 |
| 16.1 库存系统的设计          | 322 |
| 16.2 库存系统运行的模拟        | 324 |
| 16.3 允许订单积压的库存系统运行的模拟 | 330 |
| 习题与思考                 | 334 |

### 第4部分 集成模拟篇

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 第17章 模拟方法的集成模式      | 337 |
| 17.1 四类模拟方法的本质特征分析  | 337 |
| 17.2 集成模式           | 345 |
| 第18章 离散事件模拟与优化算法的集成 | 352 |
| 18.1 单元制造车间布局的设计问题  | 352 |
| 18.2 整数规划模型         | 353 |
| 18.3 备选制造单元设计方案     | 354 |
| 18.4 模拟评估           | 357 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第 19 章 多 Agent 模拟与实证研究方法的集成 .....  | 363 |
| 19.1 网络营销扩散问题 .....                | 363 |
| 19.2 实证研究 .....                    | 364 |
| 19.3 模拟模型 .....                    | 368 |
| 19.4 模型确认 .....                    | 370 |
| 19.5 模拟分析 .....                    | 371 |
| 本章附录 .....                         | 376 |
| 第 20 章 多 Agent 模拟与博弈论、心理学的集成 ..... | 377 |
| 20.1 人群合作与冲突演化问题 .....             | 377 |
| 20.2 系统模型 .....                    | 378 |
| 20.3 建立和验证模拟模型 .....               | 382 |
| 20.4 模拟实验 .....                    | 385 |
| 参考文献 .....                         | 391 |
| 附录 1 模拟中的概率分布 .....                | 393 |
| 附录 2 正态分布函数 .....                  | 403 |
| 附录 3 $t$ 分布的临界点 .....              | 406 |

第1章

概 论

## 第1部分 原 理 篇



# 第1章

## 概 论

本章首先介绍系统、系统模型、系统类型及系统研究方法的概念和分类。其次介绍管理系统模拟的概念和方法,并介绍蒙特卡罗模拟的概念、原理及应用,尤其是介绍管理系统模拟分类、输入/输出结构、作用。再次介绍管理系统模拟的一般步骤。最后介绍排队系统的人工离散模拟过程<sup>[1]</sup>。

### 1.1 系统的概念

#### 1.1.1 系统

系统是由多个相互依赖、相互作用、共同配合实现预定功能要素的有机集合体。此处的要素包括三种形式,可以是物理形态的,如一台车床的传动箱、床身、底座、进给机构、尾架等;也可以是管理的一定阶段,如构成管理的基本职能的计划、组织、指导、协调和控制等阶段;还可以是子系统或更低层次的组成部分。

但是,本书所要研究的模拟方法是用来分析真实系统的行为特征的。因此,仅从内部组成要素来认识系统是远远不够的,而应该根据系统的运行过程来认识。

从工程和管理角度来说,一个系统包括以下要素——系统输入、输出、“加工”转化过程、资源(resource)、行为变化(动态的随时间而变化的行为)及衡量系统表现的尺度。

其中,加工或转化过程是指把对系统的投入(包括系统输入和资源等)转变成为系统的输出的过程。例如,在一个制造系统中,系统输入包括原材料和设计工艺文件等,转化过程包括所有的加工工序,而系统的输出则包括制造出的产品等。从抽象的角度来讲,系统的输入和输出不一定是具体的实物,还可以是相互关联的逻辑变量(如烤箱的

温度与食物被烤熟时间的长短)。

可以用计算机模拟来分析的系统非常广泛,包括各种类型的生产制造系统、交通运输系统、电信或者通信网络系统、商业服务系统、医疗卫生系统、行政管理系统、军事系统和其他的社会系统。尽管各种系统表面看起来千差万别,但它们都具有前面提到的共同的基本要素。

### 1.1.2 系统模型

系统模型是对一个现实存在的系统或计划建立的系统的抽象描述,即对一个现实系统的抽象化。建立和运用系统模型的目的在于,指明系统的主要组成部分以及它们之间的数学逻辑关系,以便人们对系统的运动规律进行深入的分析 and 研究。一般来说,系统模型能更普遍、更集中、更深刻地反映现实系统的特征和变化规律。

系统模型按存在形式可以分为以下几类。

#### 1) 实体模型

实体模型包括两个方面——直观模型和物理模型。直观模型是指供展览用的实物模型,通常是把原型的尺寸按比例缩小或放大,主要追求外观上的逼真,如一个待研制的新产品的模型,一个工厂、车间、仓库、生产线的平面布置模型等。实体模型的效果是一目了然。

物理模型是指根据相似原理构造的模型,它不仅可以显示原型的外形或某些特征,而且还可以用来进行实物模拟实验,间接地研究原型的某些规律,如波浪水箱中的舰艇模型用来模拟波浪冲击下舰艇的航行性能,风洞中的飞机模型用来试验飞机在气流中的空气动力学特性。通常,物理模型可得到实用上很有价值的结果,但也存在成本高、时间长、不灵活等缺点。

#### 2) 符号模型

符号模型是指在一些约定或假设条件下借助专门的符号、线条等方式,按一定形式组合起来的模型,如地图、电路图、化学结构形式等,具有简明、方便、目的性强及非量化等特点。符号模型还包括定量模型、定性模型及实现它们的计算机程序。

定量模型,即数学逻辑模型,是对系统的各种变量的数学逻辑关系的抽象表述。而定性模型包括以下两类:

(1) 描述性模型运用文字形式简明阐述系统的构成、所处环境、主要功能和研究目的等。

(2) 流程图和图解式模型通常显示出系统组成部分相互之间的基本逻辑关系。

运用定量模型可以对逻辑关系清楚的系统进行建模,如企业中经常发生的排队问题,虽然该问题复杂,但是,其逻辑关系可以根据通用的规则描述清楚。运用定性模型,则可以描述不按通用规则运行的系统,主要体现为人们的经验和知识,如汽车司机对方向盘的操纵、一些技艺性较强的工种(如钳工)的操作,大体上是靠这类模型进行的。通常所说的某些领导凭经验做决策也是如此。

当把定量模型和定性模型开发成计算机系统时,这些模型就转换成计算机程序,因

此, 计算机程序也属于符号模型。

不管是实体模型还是符号模型, 它们都是描述现实系统的不同方法, 在描述时, 要把握现实系统运行规律的显著特征, 因此上述系统模型又有如下的分类:

(1) 按是否包含随机因素, 系统模型可以划分为确定性模型和随机性模型。在确定性模型中, 不涉及随机变量, 系统在某一时刻的新状态完全由系统的原状态及相应的活动所决定, 即在一定的输入下, 产生一定的输出结果。在随机性模型中, 包含随机变量, 在既定的条件和活动下, 系统从一个状态转换为另一个状态, 不是确定性的, 而是具有随机性质, 遵循一定的统计分布规律。显然, 计算机模拟方法是针对随机性模型的。

(2) 按系统变量随时间变化的特征, 系统模型有离散型、连续型及离散-连续混合型之分。这种按时间变化的分类法与系统模拟原理的设计紧密相关, 因此, 有必要详细分析基于时间分类的系统特征。

### 1.1.3 系统类型

#### 1) 离散型系统

在离散系统中, 随着时间的推移, 系统状态只在某些具体的时间点呈离散性变化, 在时间点之间则没有变化, 而时间可以是连续性的或离散性的, 这取决于系统状态的离散性变化是可以在任何时间点发生, 还是仅能在某些特殊时间点发生。

图 1.1.1 表示离散系统的状态与时间的关系。

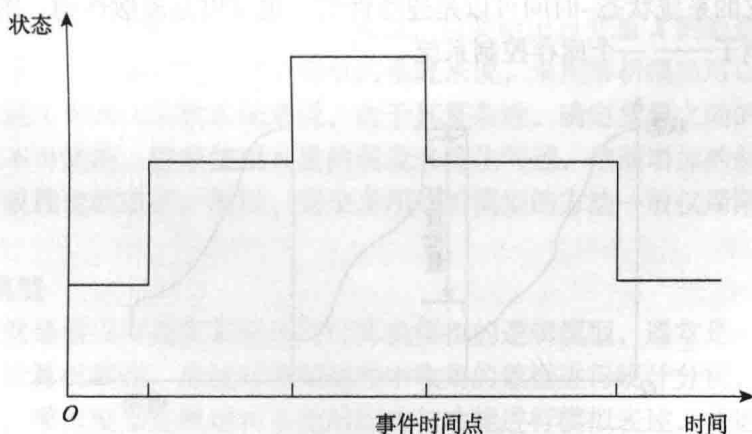


图 1.1.1 离散型系统

#### 2) 连续型系统

在连续系统中, 系统状态随时间呈连续性变化。同样, 模拟时间可以是连续性的, 也可是离散性的。图 1.1.2 和图 1.1.3 分别表示了具有连续时间或离散时间的连续型系统的状态与时间的关系。

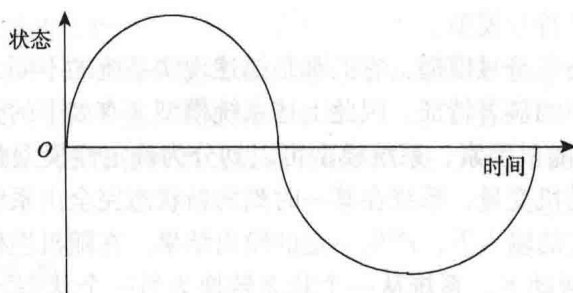


图 1.1.2 连续型系统（连续时间）

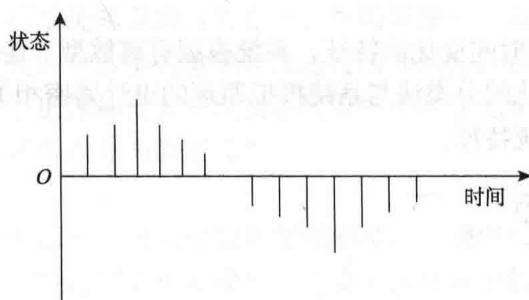


图 1.1.3 连续型系统（离散时间）

### 3) 混合型系统

在混合系统中，系统状态可以做连续性及离散性的变化，或者做连续性变化并具有离散性突变。它的系统状态-时间可以是连续性的，也可以是离散性的。图 1.1.4 表示了混合型系统的例子——一个库存控制系统。

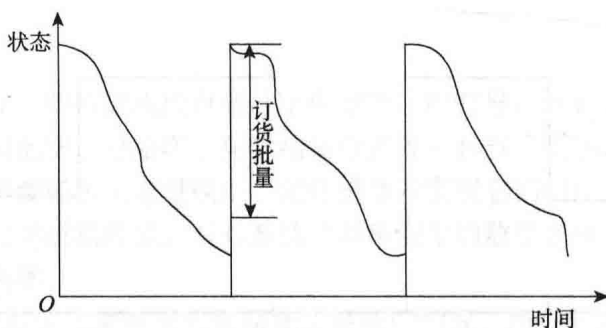


图 1.1.4 混合型系统

图 1.1.4 表明，在这个库存控制系统中，由于要满足用户需求或生产的耗用，库存量随着时间做连续性变化（减少）。当进行库存补充时，库存量离散性增加，其增量等于库存项目的订货批量。

## 1.1.4 系统研究方法

系统研究方法可分为两类——解析模型和模拟模型。从图 1.1.5 中可以看到，用于分析系统的抽象模型也可以被分为两类：一类是解析模型，而另一类是模拟模型。那么

如何决定采用哪一种方法呢？这主要由基于两种方法的基本特点来决定的。

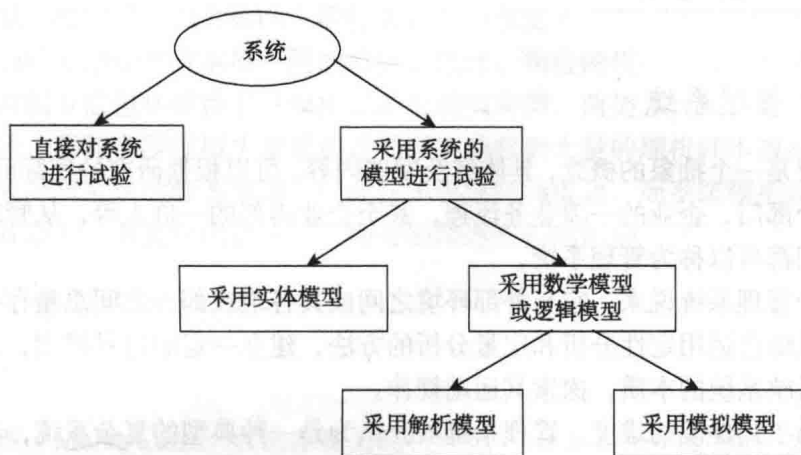


图 1.1.5 研究和分析系统的方法及模型种类

### 1) 解析模型

解析模型，即确定的数学模型。在解析模型中，系统的行为表现（输出变量）是输入变量（包括模型参数）的确定函数，其结果是通过数学计算完全确定的解。如下面的一元二次方程：

$$Y = aX^2 + bX + c$$

解析模型就是一个简单的数学模型，由于变量  $X$  与  $Y$  之间的数量（函数）关系已经确定，对于任何设定的参数组合（ $a, b, c$ ）来说，只要给出自变量  $X$  的数值变化，就可以完全确定因变量  $Y$  的数值变化。对于简单的系统来说，采用解析模型可以求出精确的结果。然而对于现实中的大多数系统来说，由于其复杂性，确定变量之间的函数关系是非常困难甚至是不可能的，除非使用大量的假设来简化问题，然而增加的假设越多，模型的可信度和有效性也就越差。所以，完全采用解析模型的方法一般仅局限于对简单系统的分析研究。

### 2) 模拟模型

模拟模型就是借以对真实系统进行计算机模拟的逻辑模型，通常是一个由相关程序和数据组成的计算机模型。通过对模拟过程中收集的数据进行统计分析，达到对系统表现行为的评估。模拟模型是通过对系统的结构与功能进行模拟表述，并运用统计的方法来分析其行为变化，其并不直接依赖于系统中各变量之间的确定关系（或者说函数关系），所以计算机模拟方法适用于任何复杂程度的系统。

事实上，计算机模拟之所以成为一种在实际应用中流行的系统分析手段，一个主要的原因就是它具有分析复杂系统的能力，或者说，在相对经济的条件下，计算机模拟能够有效分析复杂的系统，为解决复杂问题提供有力的决策支持。

管理系统就是一种典型的复杂系统，尤其适合于采用计算机模拟方法来分析。

## 1.2 管理系统模拟

### 1.2.1 管理系统

管理系统是一个抽象的概念,具体涉及哪些内容,可以根据研究的实际问题来划定,如企业的一个部门、企业的一项业务流程,甚至企业内部的一群人等,从管理控制的角度来看,它们都可以称为管理系统。

对于一个管理系统说来,它与外部环境之间或其各组成部分之间总是存在着一定的关系的,可以综合运用定性分析和定量分析的方法,建立一定的符号模型,正确表述这些关系,以反映系统的本质,探索其运动规律。

但是,由于其建模的难度,管理系统被公认为是一种典型的复杂系统,其复杂性有两层含义,即难解的(complicated)和复杂的(complex)。

#### 1) 难解系统

难解系统是指那些能够被数学模型描述,但是数学模型过于复杂,以致无法用常规方法解题的系统,因此,其也可称做难解系统。在一般科学技术领域,把这一类系统叫做“复杂系统”,如均有大量零部件的机动车、DVD-player等,虽然这样的系统具有复杂的结构和精密的功能,但是毕竟可以用庞大的、数学的、静态的模型来描述和分析。

在管理领域,难解系统在企业执行层的排队问题中比较常见,如车间的生产作业计划编制、库存控制、物流管理等。

#### 2) 复杂系统

复杂系统是指由具有非线性的和反馈回路关系的部件组成的系统,其无法用数学的、静态的模型描述,须用复杂的相互作用的动态关系来描述。

在管理领域,复杂系统在企业的管理层、决策层系统中很常见,如人力资源管理、组织行为管理、市场营销管理等,其中,管理系统面向的或处理的都是“人”,这种由“人”组成的系统,是典型的复杂系统,因为“人”的行为带有极大的不确定性。例如,员工上午答应的事情,下午就有可能变卦。

对于任何系统而言,人类是系统复杂性、不确定性的根源,人类系统是真正意义的复杂系统,并且在管理领域大量存在。

为了研究上述两类管理系统,人们归纳出了三条学术研究路径。

第一条研究路径:物的研究,其研究对象是难解系统,它不考虑人的因素,而是建立数学模型,并求得解析解。在无法获得解析解的情况下,采用启发式的算法或者采用计算机模拟的方法,就是管理科学与工程专业的通常做法。

第二条研究路径:人的研究,其研究对象是复杂系统,由于无法建立数学模型,因此通过经典理论、图形模型、实证研究等方法来解决问题是工商管理专业的通常做法。当然,在传统方法中,第二条研究路径是不包含计算机模拟方法的,但是本书将介绍复杂管理系统的多Agent模拟方法和定性模拟方法。

根据现实社会的现象与常识,这两条路径的做法还不全面,于是人们总结了管理系