

第一篇 管理系统模拟的 基本原理

- 第1章 管理系统模拟概述
- 第2章 概率统计基础与蒙特卡罗法
- 第3章 离散事件系统模拟
- 第4章 连续系统模拟
- 第5章 Agent建模与模拟

第1章

管理系统模拟概述

学习目标

通过本章学习，读者应该能够：

1. 掌握系统、系统模型以及系统模拟的概念；
2. 了解系统模拟方法的技术特点及适用场合；
3. 了解管理系统模拟的应用领域和特点；
4. 了解系统模拟的实施步骤。

1.1 管理决策的特点和挑战

1.1.1 管理决策及其特点

管理的核心就是面向组织（系统）进行管理决策。管理决策是在一个复杂环境下的系统决策，既要考虑组织的状况和目标，也要考虑组织的竞争环境，包括客户、供应商、竞争者、新进入者等因素，还要考虑外部宏观环境，包括社会、经济、技术、法律、人口、地理等因素。

管理决策问题包括结构性决策问题和非结构性决策问题两类。结构性决策问题具有程序性强、因果关系确定、易于量化等特点，非结构性决策问题具有非程序化、思维定量化、无法量化、需要创造性发挥等特点。管理决策问题的难点在于：除了问题的复杂性、非结构性外，还存在问题环境的不确定性和决策实施结果的风险性，决策目标的多样性及冲突性等特点。

如何对管理问题做出一个好的、正确的决策，这取决于管理者自身的管理素质与水平，也取决于管理者借助科学技术工具进行决策的能力。在信息技术时代，管理者可以在制定决策之前通过管理决策技术对方案进行分析判断。对于常见的管理决策问题，如企业库存管理问题、企业生产计划问题、项目活动网络优化问题、服务排队问题、交通管理问题等，一般地，其特点如下：第一，程序型、结构型决策；第二，系统要素可量化。在问题中的信息是确定性的条件下，可采用运筹学方法构建数学解析模型对问题进行求解。

1.1.2 现实问题的新挑战

在实际场合中，问题中的信息往往存在不确定性。比如：

- （1）在库存管理问题中，需求量是随机变动的，到货时间可能被延迟，会出现一

定的缺货等。

(2) 在服务排队问题中,存在顾客的到达不服从泊松分布、服务时间(service time)服从任意分布、顾客在排队过程中离开、服务设施(service facility)发生故障等情况。

(3) 在网络活动计划问题中,存在各项活动时间动态随机变化、活动网络结构(任务结构关系)发生变化等情况。

在上述不确定性存在的情况下,构建实际问题的数学解析模型会很困难,或即使可以构建解析模型,其模型的求解也很困难。不仅如此,在21世纪的“互联网+”时代,管理决策者正面临诸多更加错综复杂的新型决策问题的挑战,这些问题举例如下。

(1) 电子商务及新零售问题。如何配置合理的电子商务云服务系统,以避免高峰期的宕机风险?如何配置合理的仓储物流服务资源应对时刻变动的顾客订单,以避免爆仓发生?如何合理配置无人超市的设施布局和服务系统?

(2) 共享经济问题。在一个区域内如何合理配置共享单车的位置和数量?在新能源汽车时代,在一个城市区域内如何合理配置充电桩的位置和数量?

(3) 智慧社会问题。如智慧社区的资源分配问题,智慧工厂的规划和生产资源配置问题,智慧交通系统的交通规划和交通流控制问题等。

1.1.3 问题的求解对策

综上所述,这些问题的决策复杂性表现在:系统中的要素数量众多、异质多样;系统内部业务相互作用、相互影响;系统外界环境的随机动态性和不确定性对内部活动产生影响。这些特点导致系统状态呈现随机动态变化特点,带来系统建模及问题决策的困难性。这种情况下,对实际问题往往无法采用有效的数学解析方法进行建模和求解。对此,解决这些问题往往采用系统模拟(system simulation)方法。

一般而言,对某些不确定型决策问题,往往难以用数学解析方法描述其系统的状态变化。这时,采用传统运筹学的数学解析方法求解会比较困难甚至无法求解。对此,解决这些问题的对策是:采用系统模拟方法求解。

系统模拟方法和数学解析方法是两种不同的决策技术。运筹学的数学解析方法是一种数学分析方法,适于求解参数确定的静态问题;而系统模拟方法是一种系统分析方法,适于分析解决动态问题。系统模拟方法是通过在计算机上建立系统模型对系统的运行过程进行展现的一种方法。系统模拟方法分析的对象是系统。为此,我们首先从系统谈起。

1.2 系统及模型概述

1.2.1 系统的定义和分类

1. 系统的定义

系统是指为达到某种目的，由互相联系又互相作用的若干要素结合而成的有特定功能的有机整体。在系统科学中，一个系统以其内在特征及表征而区别于其他系统。系统的内在特征体现为实体的集合、实体的属性、系统的活动，由此构成系统的三大要素。系统表征体现为系统的环境，包括系统界面状态、约束和干扰等。

管理系统泛指那些受到管理结构计划和政策指导控制，具有明确的组织目标的系统，如企业系统、社会系统及宏观经济系统等。

2. 系统的分类

按照物理特征、状态变化、自然属性、规模状况、时变属性等不同特征对系统进行分类，结果总结如表1.1所示。按系统中起主导作用的状态变化特征，可将系统分为系统状态随时间连续变化的连续系统、系统状态变化只在离散时间点随机发生的离散系统，以及系统状态是这两种系统混合的连续—离散混合系统。从系统模拟的角度，把系统分为连续系统、离散系统以及连续—离散混合系统有益于进行系统的分析和模拟建模。

表 1.1 系统的分类（按系统特征）

分类特征	类 别	举 例
物理特征	工程系统 非工程系统	电气、机械、化工、热力等 经济、交通、管理、生态等
状态变化	连续系统 离散系统 连续—离散混合系统	飞机、导弹、流体及机械的运动等 生产、医院、通信、交通系统等 上述系统的混合
自然属性	自然系统 人造系统	天体、生物、生态系统等 企业、社会、概念体系等
规模状况	简单小系统 复杂大系统	机械、建筑、设备等 生态、种群、宇宙、经济系统等
时变属性	静态系统 动态系统	桥梁、公路、房屋等 交通系统、社会系统等

1.2.2 系统模型概述

1. 系统模型的定义

系统模型是对一个系统的物理的、数学的或其他形式的逻辑描述。系统模型是为研究系统而开发的，是对系统的内在联系（内在特征）及其与外界关系（外部表

征)的一种抽象描述。系统模型按模型的表示方法分为物理模型、数学模型、半实物模型。

(1) 物理模型。物理模型又称实体模型,它是实际系统在尺寸上缩小或放大后的相似体,如地图、沙盘等。

(2) 数学模型。数学模型是指用数学符号和数学关系式表示的系统模型。比如:麦克斯韦方程、流体力学方程等。如果模型中不含时间因素,则称之为静态模型;若模型与时间有关,则称之为动态模型。

(3) 半实物模型。半实物模型是指由物理模型、数学模型混合而成的模型。

2. 连续系统数学模型

连续系统的状态随时间连续变化,其数学模型可以用微分方程或差分方程表示。设系统的状态变量(state variable)为: $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$, 则系统状态函数可表示为连续函数: $y(x, t) = f(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ 。连续系统的状态变化过程如图1.1所示。

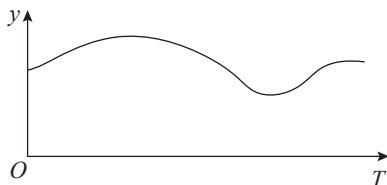


图 1.1 连续系统的状态变化过程

3. 离散系统数学模型

离散系统的状态变化只在时间的离散时刻发生,且往往是随机的。系统的状态值为在有限离散时间点上的离散量,其状态方程(state equation)不可以用微分方程表示。设离散系统的状态变量为 $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$, 则系统状态函数可表示为: $y(x, t) = f(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$, 这里 $f(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ 为离散函数。离散系统的状态变化过程如图1.2所示。

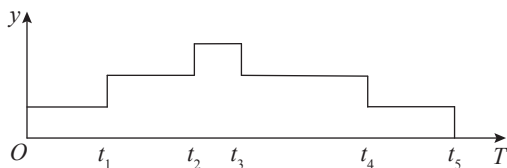


图 1.2 离散系统的状态变化过程

4. 混合系统数学模型

混合系统是指既包括连续型变量又包括离散型变量的系统。系统的状态值时而呈现连续型变量系统特征,时而呈现离散型变量系统特征。例如:在公交车站系统中,公交车、乘客的行为分别用离散型变量和连续型变量表示,如表1.2所示。

表 1.2 公交车站系统的变量及类型

状态变量	行为过程	变量类型
公交车行驶速度	行驶、进站、停车、出站	连续型
顾客状态	到达车站、上车、下车、离开车站时间	离散型
车站状态	公交车、顾客的到达、离开过程	离散型

1.3 系统模拟概述

1.3.1 系统模拟的概念

对于一个系统，需要根据不同情况 and 需求采取不同的研究方法，各类研究方法如图1.3所示。对于一个管理系统，可以构建一定的数学模型来反映管理系统的运行特征及其与外部环境的关系。如果管理系统本身不是太复杂，所构建的数学模型往往可以采用数学解析方法求解。然而，在许多情况下，管理系统的数学逻辑关系往往十分复杂，很难甚至无法采用数学解析方法求解。这时，就需要借助系统模拟方法进行求解。

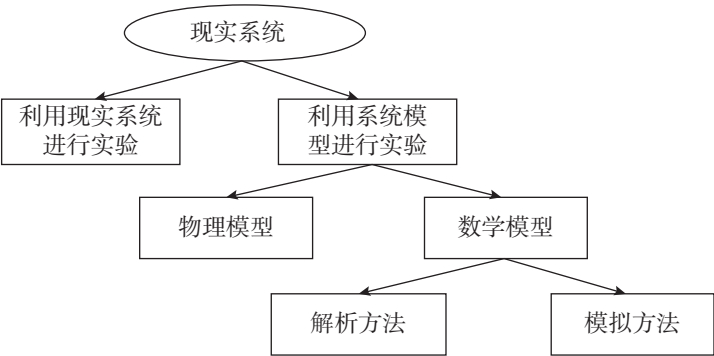


图 1.3 研究系统的不同方法

系统模拟，又称系统仿真，目前人们从不同的视角对其进行定义，常见的定义有以下几种。

- （1）从应用角度，系统模拟是设计实际系统的系统模型并对该模型进行实验的过程，以达到理解系统行为及评价系统运行策略的目的。
- （2）从技术角度，系统模拟是以相似原理、系统理论、信息技术及应用领域的专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型对实际或设想的系统进行动态实验研究的一门综合性技术。
- （3）从活动角度，系统模拟是对系统模型进行随时间演化的实验活动，或是利用系统模型展现对象系统的运行过程或特性的活动。

综上，系统模拟的定义可归纳总结为：系统模拟是利用计算机对系统模型进行动态实验研究的一种方法。系统模拟是基于模型的活动，由三类基本活动构成：建立系统模

型,构造与运行模拟实验系统,分析与评估模拟结果。通过上述模拟活动达到对实际系统的行为进行描述、解释和预测的目的。

1.3.2 系统模拟的分类

1. 不同角度的系统模拟分类

系统模拟可从不同的角度进行分类:按照模型的种类可分为物理模拟、数学模拟(mathematical simulation)、半实物模拟;按应用领域可分为工程领域模拟、非工程领域模拟;按功能用途可分为工程模拟和训练模拟;按虚实结合程度可分为结构模拟、虚拟模拟、实况模拟。对于管理系统而言,按模型的种类划分属于数学模拟,按应用领域划分属于非工程领域模拟。

按照模拟时钟(simulation time 或 simulation clock)与实际时钟的比例关系,系统模拟可分为实时模拟、亚实时模拟、超实时模拟。实时模拟的模拟时钟与实际时钟完全一致,也称为在线模拟,其意义在于可以与实际系统并行。亚实时模拟的模拟时钟慢于实际时钟。超实时模拟的模拟时钟快于实际时钟,如气象预测模拟等。亚实时模拟和超实时模拟属于离线模拟。对于管理系统而言,实时模拟可用于其在线运行监控管理,超实时模拟可用于企业管理决策、社会经济系统预测等。

2. 模拟实现角度的系统模拟分类

由上,管理系统模拟属于数学模拟,其系统模型可分为连续系统模型、离散系统模型、混合系统模型,其中混合系统模型是前两种模型的结合。由于连续系统与离散系统这两类系统的固有运动规律不同,因而描述其运动规律的模型形式就有很大的差别。所以从系统模拟实现的角度看,系统模拟分为连续系统模拟与离散系统模拟两大类。

1) 连续系统模拟

连续系统模拟是指系统状态随时间连续变化的系统模拟,主要是针对自然和工程系统的模拟,其数学模型按描述方式可分为集中参数系统模型和分布参数系统模型。

(1) 集中参数系统模型。集中参数系统模型一般用常微分方程(组)描述,如各种电路系统、机械动力学系统、生态系统等。

(2) 分布参数系统模型。分布参数系统模型一般用偏微分方程(组)描述,如各种物理和工程领域内的“场”问题。

在工程领域内,连续系统模拟可以分为四大类:数学模拟、硬件在回路模拟(hardware-in-loop simulation)、软件在回路模拟(software-in-loop simulation)、人在回路模拟(man-in-loop simulation)。

2) 离散系统模拟

离散系统是指系统状态在某些随机时间点上发生变化的系统。针对管理系统而言,系统变化是由某种事件引发的,此类系统称为离散事件动态系统(discrete event dynamic

system, DEDS)或离散事件系统(discrete event system)。其特点是:系统状态的变化是由发生在随机时间点上的某种行为引发的,这种发生在随机时间点上且引发系统状态变化的行为称为“事件”。

针对离散事件系统的模拟称为离散事件系统模拟(discrete event system simulation)。离散事件系统属于人造系统,许多管理领域中的问题都可视为离散事件系统,如生产系统、库存系统、银行服务系统等。因此,许多管理系统的模拟都属于离散事件系统模拟。

1.3.3 系统模拟的特点

1. 系统模拟的技术特点

系统模拟是基于计算机对系统模型进行数值实验的技术及实验环境。系统模拟技术将理论模型与实验研究相融合,体现了实验思考的方法论,已成为当今分析求解复杂系统的重要工具。从系统模拟建立系统模型、构造与运行模拟实验系统、分析与评估模拟结果三类活动角度,系统模拟法与解析法的特点比较如表1.3所示。基于系统模拟的这些技术特点,系统模拟的优点列举如下。

表 1.3 系统模拟法与解析法的特点比较

比 较 内 容	系统模拟法	解 析 法
系统模型构建	对系统的近似抽象 采用流程图 适用于由于随机因素而难以用数学模型表示的动态系统及复杂系统的建模	对实际系统的高度抽象 采用数学方程式 构建动态随机系统和复杂系统模型较为困难
模拟运行实验	一次模拟过程是对系统行为的一次随机抽样,多次模拟运行是一定样本量的随机抽样	不需要多次抽样过程
模拟结果评估	数值解 模拟结果需要通过统计推断,才能得出系统真实的性能估计	解析解 不需要进行统计推断

(1) 经济性。系统模拟是利用计算机对模拟模型进行实验的技术手段,它具有利用模型进行实验的一系列优点,如费用低、易于实现各种反复实验等。

(2) 简单性。有些系统模型难以用数学解析形式表达,或虽能用数学解析形式表达但没有适用的解析方法求解,或虽可解析求解,但其数学求解过程过于复杂、计算量过大。而系统模拟方法则具有建模简单化特点,即系统模拟模型与实际系统的运行过程具有形式和逻辑上的对应性,可避免解析法常见的“维数灾难”问题。

(3) 可靠性。在真实系统中要实现完全相同条件下的重复实验是很困难的,在计算机模拟实验中则很容易实现。

(4) 最优性。可通过系统模拟分析复杂系统的特性,并通过方案比较得到最优方案。

(5) 预见性。对于经济、金融、社会、战争等非工程系统,直接实验是不可能的,通过计算机模拟可以研究其系统控制策略。

(6) 高技术性。系统模拟技术目前已经跻身高科技领域,与人工智能、网络技术、优化理论、图形技术、虚拟现实(VR)技术等融为一体。

同时,相对于解析法,系统模拟也存在一些不足,列举如下。

(1) 工作量大。系统模拟需要多次重复运行,数据量大,占用大量的计算机时间和存储空间。

(2) 近似求解。模拟方法得到的解是近似解而非精确解,且其精度不容易控制。

(3) 特殊解。模拟方法得到的解是特殊解而非通解,所以需要在不同条件下大量运行模拟以求得近似最优解。

2. 系统模拟的必要性

综上,在进行系统分析时,应针对特定的实际系统的情况,在比较解析法和系统模拟方法的适应特点后再决定所采用的分析方法。一般地,在难以建立用解析方法求解的数学模型时,有必要使用系统模拟方法。通常,在以下场合,有必要采用系统模拟手段解决问题。

(1) 系统太复杂,无法用解析法描述。

(2) 系统太大或太小,难以观察。系统太大,如宇宙、天体等;系统太小,如原子内部等。

(3) 系统太贵重,需要节省,如飞机、卫星、导弹等。

(4) 系统实验的时间长,需要省时,如宇宙演化、生态系统变迁、经济社会发展等。

(5) 系统实施的风险大,如核武器试验、军事作战、金融政策等。

(6) 系统实验的可重复性低。如:系统实验会破坏原系统,无法复原;系统多次实验时,难以保证每一次的实验条件都相同,如人是实验的一部分时。

(7) 系统处于设计阶段,不可能在真实的系统上做实验时。



1.4 管理系统模拟及其应用

1.4.1 管理系统模拟的含义

经济与管理系统属于人造系统,其决策问题属于非“物质性”决策问题。管理系统模拟是系统模拟在经济与管理系统中的应用,是对管理系统模型进行数值分析的一种现代分析方法。管理系统模拟是管理科学、系统工程、现代数学和计算机科学技术的交叉融合,主要研究经济与管理系统中的战略战术、系统设计、运筹规划、预测评估、宏观/微观运作等问题。

随着互联网技术、新一代信息技术的快速发展,系统模拟的理论、方法和工具也在

不断进步，这大大促进了系统模拟技术在经济与管理领域的应用。调查研究表明：在企业
管理领域使用的分析方法中，系统模拟仅次于统计分析，位居第二；在运筹优化与管理
科学研究中，系统模拟仅次于数学规划，位居第二。

1.4.2 主要应用领域

1. 在经济与管理系统中的应用

系统模拟广泛应用于经济与管理领域的方案论证、企业诊断、策略与风险分析、管理
决策等，列举如下。

- (1) 国民经济：社会经济系统、人口系统、生态系统、金融系统、能源系统等。
- (2) 企业经营：供应链管理、销售预测、生产管理、资源分配、布局规划等。
- (3) 服务系统：交通系统、电力网络、计算机网络、系统流程分析、医院系统等。
- (4) 军事国防：军事作战、指挥协调、军事后勤等。
- (5) 社会系统：舆论传播、突发事件人员疏散、人员培训、疫情传播分析等。

2. 面向系统整个生命周期的应用

从系统全生命周期的视角，系统模拟是以相似原理、模型理论、系统技术、信息技
术以及应用领域的专业技术为基础，利用模型对已有或设想的系统的分析、设计、实
验、运行、评估、维护和报废等全生命周期活动进行研究的一门多学科综合性技术。一
个实际系统从提出到实现乃至最后报废的整个生命周期的各个阶段中，系统模拟都发挥
着重要的作用，具体应用如表1.4所示。

表 1.4 系统模拟在系统生命周期各个阶段的应用

阶 段	系统模拟的应用
方案论证	对各种方案进行技术、经济比较，选择合理方案
系统分析	分析系统的特性，确立数学模型，分析系统瓶颈
初步设计	选择合理的系统构造，确定某些部分的合理结构
具体设计	优化系统参数，协调各部分功能
系统实验	将系统样机接入模拟系统进行模拟实验，考核系统设计效果
人员培训	对人员进行操作训练，系统控制模拟演练
系统运行	调整、改进系统某些参数，使系统达到最佳状态
系统维护及改善	评估系统状态，提出改进方案或进行报废的评估及预案

1.4.3 管理问题和对应的模拟方法

不同类型的经济与管理系统决策问题适用不同的系统模拟方法。表1.5列出了经济
与管理系统中的宏观、中观（介观）、微观决策问题所适用的模拟方法，包括离散事件
系统模拟（含离散-连续混合系统模拟）、系统动力学模拟、Agent模拟。与之相对应，
在后面章节中，第3章介绍离散事件系统模拟，第4章介绍连续系统模拟及系统动力学模

拟，第5章介绍Agent模拟。

表 1.5 管理系统决策问题和对应的模拟方法

问题特征	应用领域	模拟方法
宏观复杂系统： 复杂性、涌现性	经济社会系统：社会系统、产业系统、金融系统的政策分析、市场分析、发展预测	系统动力学模拟 Agent模拟
中观跨组织系统： 宏观与微观相结合	跨企业活动：供应链系统、交通/通信系统、企业策略、协调分析、竞争分析、销售预测、资源配置	离散事件系统模拟 离散-连续混合系统模拟 Agent模拟
微观管理系统： 离散性、流程性、自主性	企业内部活动：生产系统、流程分析、资源配置、作业分析、员工行为分析	离散事件系统模拟 离散-连续混合系统模拟 Agent模拟

1.5 系统模拟的实施过程

1.5.1 系统模拟的三个阶段

系统模拟方法求解问题的过程包括三个阶段：建模阶段、模型变换阶段、模拟运行阶段。三个阶段的顺序及相互关系如图1.4所示。

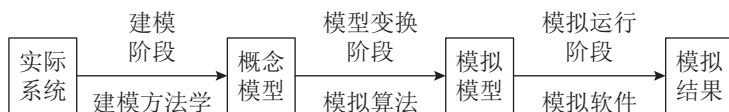


图 1.4 系统模拟三个阶段的顺序及相互关系

(1) 建模阶段：根据研究目的、系统的先验知识以及观察的数据，对系统进行分析，确定组成要素、状态变量和参数之间的逻辑关系，建立系统的数学逻辑模型。

(2) 模型变换阶段：根据数学逻辑模型的形式、计算机的类型以及模拟目的，将原始数学逻辑模型转换为适合于计算机处理的模拟模型。

(3) 模拟运行阶段：对模拟模型进行装载实验，并在计算机上运行。根据模拟运行结果对模型进行验证和统计推断，最后整理成模拟结果报告输出。

系统模拟过程的三要素包括系统、模型与计算机，三者之间的关系如图1.5所示。

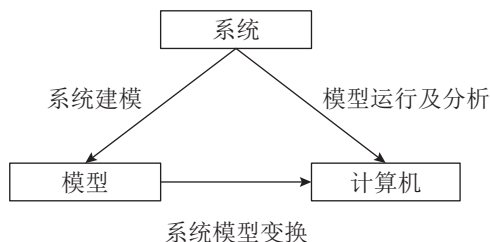


图 1.5 系统模拟过程的三要素及其关系

1.5.2 系统模拟实施的步骤

系统模拟实施的步骤如图1.6所示，共分为12个步骤，简述如下。

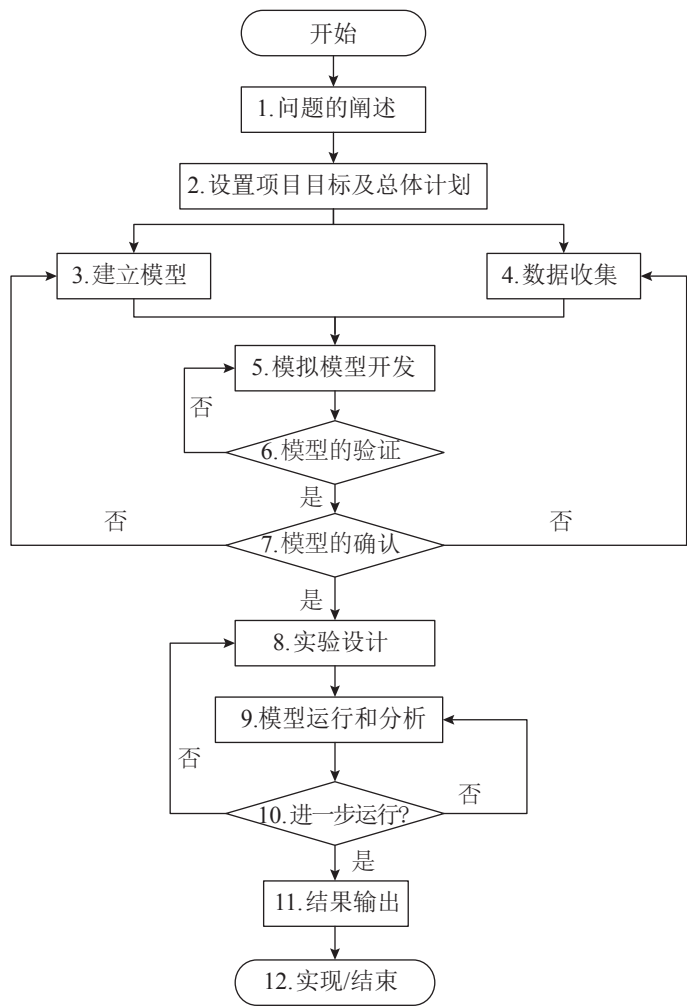


图 1.6 系统模拟实施的步骤

- （1）问题的阐述：每一项研究应从说明问题开始。主要任务是问题描述与系统定义，明确模拟对象，确定被模拟系统的边界，确定模拟的目标及任务。
- （2）设置项目目标及总体计划：明确项目的目标，即模拟要回答的问题，制订模拟项目的实施计划（资源计划、时间计划等）。
- （3）建立模型：构造一个系统模型，为转换成模拟模型打下基础。一般用流程图的形式描述，重点描述临时实体的产生规律，历经系统的过程，永久实体对临时实体的作用规则、条件及结果等。
- （4）数据收集（data collection）：数据收集和系统建模工作相互影响。确定模型参数数据及输入数据的概率分布等。

(5) 模拟模型开发: 确定系统模型的模拟策略[事件调度法(event scheduling, ES)、活动扫描法(activity scanning, AS)等], 设计模拟程序(基于某模拟平台进行编程开发)。

(6) 模型的验证: 验证模拟模型的计算机程序的正确性, 然后校验模拟模型的正确性。通过了验证的模拟模型才能进行模拟实验。

(7) 模型的确认: 确定模型是否精确地代表实际系统。其中, 确认过程判断模拟模型的结果是否符合实际, 验收过程是指用户接收模拟模型并应用的过程。

(8) 实验设计: 确定模拟运行的方案, 如运行长度和次数等, 与输出分析的要求有密切关系。

(9) 模型运行和分析: 估计所模拟的系统性能。

(10) 进一步运行: 根据已完成的运行分析, 确定是否还需追加实验设计及运行次数等。

(11) 结果输出: 模拟程序说明和模拟结果报表, 模拟输出作为系统评价的依据。

(12) 实现/结束: 判断是否成功实现模拟, 它取决于前面已执行的结果是否合适。



本章小结

管理系统模拟是系统模拟在经济与管理系统中的应用。系统是指互相联系又互相作用的对象有机结合, 模型是对系统行为的抽象描述。系统的数学模型包括连续系统数学模型、离散系统数学模型、混合系统数学模型。系统模拟是指利用系统模型对实际系统进行动态实验研究的一门综合性技术。模拟模型是对实际系统的近似抽象化。模拟过程是对系统行为的抽样过程。与数学解析法相比, 系统模拟的优点包括实验的经济性、模型表达的简单性、重复实验的安全性、复杂系统行为的预见性等。系统模拟技术在思考方法论上体现了实验思考的方法论, 是分析求解复杂系统的重要工具。管理系统模拟适用于分析经济与管理系统中从宏观战略到微观运作等各类问题。

即测即练题

请扫描二维码, 参加即测即评练习。



即测即练题

思考练习题

1. 试说明系统模拟的定义。
2. 试简要说明系统、模型与模拟三者之间的关系。
3. 试比较数学解析方法与系统模拟方法的适用特点。
4. 试说明管理系统模拟可应用于经济与管理系统的哪些领域。
5. 试阐述管理系统模拟解决问题的几个阶段。
6. 试阐述管理系统模拟实施的步骤。
7. 请给出至少两个经济或管理领域的问题，说明采用系统模拟方法比数学解析方法更具有优势。