



Modeling and Simulation  
of Supply Chain  
Complex System

# 供应链 复杂系统 建模与仿真

白世贞 张鹤冰◎著



科学出版社

# 供应链复杂系统建模与仿真

白世贞 张鹤冰 著

国家自然科学基金（项目批准号：71040001）

“结构时变供应链协调机制研究”

国家自然科学基金（项目批准号：71371061）

“顾客导向型供应链竞合网络协调及突变应对研究”

资助项目

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书共 10 章, 讲述了连续与离散系统模型、灰色系统、人工神经网络、马尔可夫链、回归分析、层次分析及模糊评价、Agent 复杂系统建模、系统动力学等基本理论在供应链复杂系统建模与仿真中的运用。

本书的特色在于注重核心概念、思维方法的阐述, 将一些成熟的方法及原理与供应链复杂系统的建模与仿真进行有机结合, 同时兼顾基本工具与模型设计的应用, 内容上深入浅出, 倡导启发与探究式教学方法。

本书是供应链复杂系统仿真领域中一本实用、新颖、全面的读物, 可作为高等院校管理科学与工程、经济学、社会科学、系统工程等专业研究生的教材, 也可供管理科学、系统科学、复杂性科学等领域研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

供应链复杂系统建模与仿真/张鹤冰著. —北京: 科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-039996-0

I. ①供… II. ①张… III. ①供应链-系统建模②供应链-系统仿真 IV. ①F232

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 041758 号

责任编辑: 任锋娟 朱大益 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 子时文化

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2014 年 3 月第 一 次印刷 印张: 16 1/4

字数: 328 000

定价: 66.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135741

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

本书是在国家自然科学基金项目（71040001）“结构时变供应链协调机制研究”和国家自然科学基金项目（71371061）“顾客导向型供应链竞合网络协调及突变应对研究”的研究过程中运用的方法基础上总结而成。主要介绍了在供应链这个复杂系统背景下的建模方法与仿真技术。

随着复杂性科学的兴起，越来越多的社会科学研究者逐渐发现计算机仿真是理解复杂的社会-经济系统动态过程的有效手段。自 20 世纪 90 年代以来，国际社会科学界广泛而深入地开展了复杂系统理论与计算机仿真建模相结合的研究，并明显呈现出越来越深远广泛的发展前景。当今社会不同学科的相互沟通、交叉、渗透和综合成为主要趋势，新学科大多是综合性科学。重新统一的科学作为一种系统，要求有一种能把现有纵向划分的学科沟通连缀起来的横断学科，提供不同学科使用的概念、原理和方法，使之在整体上具有纵横交错的网络结构。系统科学就是这种横断科学，它的科学使命是使新型科学成为一个按多维网络结构组织起来的复杂巨系统。

我院一直坚持交叉学科的综合研究，注重对国外研究前沿中出现的新思潮、新方法的跟踪与引介，特别关注系统科学与复杂理论在经济学等社会科学中的应用。

本书共分 10 章，其中第 2 章和第 3 章是在第 1 章基本概念的基础上，将供应链复杂系统从连续状态和离散状态两个角度去考虑，针对不同的情况建立不同的模型，并结合仿真实例使读者更好地领会其建模的方法。

第 4 章至第 7 章从具体的理论方法介绍供应链复杂系统建模与仿真的技术。第 4 章从灰色系统理论的角度来考虑供应链复杂系统的建模问题，供应链系统在某些情况下可以认为是“灰色”的，因此可将灰色系统理论作为供应链复杂系统的建模方法。第 5 章介绍了人工神经网络方法，可以实现对供应链系统效益建模，或对资源进行配置优化。第 6 章介绍了 Agent 复杂系统建模方法，Agent 是一种基于智能技术的新方法，对于复杂系统建模具有普遍的重要作用。第 7 章介绍了系统动力学，以企业投资成长、供应链系统的牛鞭效应为例，详细讲解了系统动力学原理。

第 8 章和第 9 章主要从统计预测的角度建立供应链复杂系统模型。第 8 章介绍了马尔可夫链预测建模方法，第 9 章介绍了回归预测模型。这两种理论都是很经典的建模方法，将其运用到供应链系统建模中，可以很好地解决供应链管理问题。

第 10 章主要从不确定性问题的决策方法角度考虑复杂系统建模与仿真, 主要介绍了层次分析法及模糊评价。在供应链复杂系统中, 不确定性问题比比皆是, 所以对于供应链系统中不确定性问题的建模方法的学习也是很重要的。

本书较全面地介绍了用微观仿真方法从事复杂系统研究所需的基础知识和建模仿真技术, 对相关领域的研究前沿进行了归纳。同时, 用实例的形式介绍了模型建立、仿真实现、结果分析等方面的知识, 提供了详细、全面的技术信息, 便于读者参考。

本书由白世贞教授负责体系设计、大纲拟定, 张鹤冰负责第 1~10 章内容的撰写工作, 研究生于丽、樊千语、朱智鹏负责校稿。

由于著者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 2 月, 于哈尔滨商业大学管理学院

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 系统的概念与分类.....	1
1.1.1 系统概念.....	1
1.1.2 系统分类.....	1
1.2 复杂系统简介.....	3
1.3 系统研究现状和发展趋势.....	6
1.3.1 研究现状.....	6
1.3.2 发展趋势.....	7
1.4 系统建模与仿真概述.....	7
1.4.1 系统建模.....	8
1.4.2 系统仿真.....	9
1.5 数学建模实例.....	13
思考题.....	14
<b>第 2 章 连续系统建模与仿真技术</b> .....	15
2.1 基于微分方程的建模方法与仿真.....	15
2.1.1 微分方程建模的常用方法.....	15
2.1.2 微分方程建模步骤.....	21
2.1.3 微分方程仿真求解.....	21
2.2 基于数值积分方法的建模与仿真.....	24
2.2.1 离散化原理.....	24
2.2.2 龙格-库塔法.....	26
2.2.3 面向方程的龙格-库塔法仿真举例.....	35
思考题.....	39
<b>第 3 章 离散事件系统建模与仿真</b> .....	40
3.1 离散事件系统的基本概念.....	40
3.2 离散事件系统的建模方法.....	42
3.2.1 实体流程图法.....	42
3.2.2 活动周期图法.....	43
3.3 离散事件系统建模实例.....	44
3.3.1 排队服务系统建模.....	45
3.3.2 报童模型.....	47
3.3.3 库存系统的模型与仿真方法.....	50
3.4 离散事件系统仿真的一般步骤.....	59

3.5	离散事件系统仿真方法	59
3.5.1	离散事件系统仿真的基本原理	59
3.5.2	离散事件系统仿真策略	60
3.6	离散事件系统仿真结果分析	64
3.6.1	终态仿真结果分析	65
3.6.2	稳态仿真结果分析	67
	思考题	70
<b>第4章</b>	<b>基于灰色系统理论的建模方法</b>	<b>71</b>
4.1	灰色系统理论概述	71
4.1.1	灰色系统理论的基本概念	71
4.1.2	灰色系统理论的基本原理	81
4.1.3	灰色系统理论的主要内容	81
4.2	灰色关联分析	83
4.2.1	灰色关联因素和关联算子集	83
4.2.2	灰色关联公理与灰色关联度	84
4.2.3	灰色关联分析的应用举例	89
4.3	灰色系统模型	91
4.3.1	GM(1, 1)模型概述	91
4.3.2	GM(1, 1)建模机理	91
4.3.3	GM(1, 1)模型的形式	92
4.3.4	残差GM(1, 1)模型	94
4.4	灰色系统预测方法及实例	98
	思考题	101
<b>第5章</b>	<b>基于人工神经网络的建模及仿真</b>	<b>103</b>
5.1	人工神经网络简介	103
5.1.1	人工神经网络模型	103
5.1.2	人工神经网络的结构及工作方式	104
5.1.3	人工神经网络的基本特征	105
5.2	BP神经网络	105
5.2.1	BP学习算法	106
5.2.2	BP算法的计算步骤	108
5.3	BP神经网络实证分析——果蔬物流外包风险预警	109
5.3.1	BP神经网络模型的建立	109
5.3.2	果蔬物流外包风险警度、预警信号的确定	118
5.3.3	果蔬物流外包风险预控对策	120
5.3.4	实证仿真分析	121

思考题 .....	124
<b>第 6 章 Agent 复杂系统建模 .....</b>	<b>125</b>
6.1 Agent 系统 .....	125
6.1.1 多 Agent 系统研究方法 .....	125
6.1.2 多 Agent 协调 .....	130
6.2 Agent 结构模型 .....	132
6.2.1 Agent 混合结构模型 .....	132
6.2.2 其他 Agent 结构模型 .....	134
6.2.3 具有通用性的 Agent 混合结构模型 .....	134
6.3 Agent 的学习机制 .....	137
6.4 复杂系统中的多 Agent 模型 .....	140
6.4.1 复杂系统的框架结构及工作流程 .....	140
6.4.2 复杂系统多 Agent 建模与控制方法的特点 .....	141
6.4.3 复杂系统多 Agent 建模与控制研究框架 .....	142
6.4.4 复杂系统多 Agent 交互与协调模型 .....	145
思考题 .....	148
<b>第 7 章 系统动力学 .....</b>	<b>150</b>
7.1 系统动力学产生的背景 .....	150
7.2 系统动力学基本理论 .....	151
7.2.1 系统动力学的概念 .....	151
7.2.2 反馈系统的概念 .....	152
7.2.3 系统动力学的图形表示法 .....	153
7.2.4 系统动力学关于内因与外因的辩证关系 .....	160
7.2.5 系统动力学的主导动态结构作用原理 .....	160
7.2.6 系统的历时性与系统的进化规律 .....	161
7.3 系统动力学建模语言 DYNAMO 基础 .....	161
7.3.1 DYNAMO 来源 .....	161
7.3.2 DYNAMO 描述动力学系统的基本原理 .....	161
7.3.3 DYNAMO 模型中的方程 .....	162
7.4 系统动力学解决问题的主要步骤 .....	164
7.5 系统动力学实际案例建模与仿真 .....	166
7.5.1 企业成长与投资不足案例 .....	166
7.5.2 供应链中的牛鞭效应 .....	169
思考题 .....	173
<b>第 8 章 马尔可夫链建模方法 .....</b>	<b>174</b>
8.1 马尔可夫链的基本理论 .....	174



8.1.1	状态转移概率	174
8.1.2	切普曼-柯尔莫哥洛夫方程	175
8.1.3	齐次马尔可夫链的有限维分布	176
8.2	马尔可夫链模型实例	177
	思考题	182
<b>第9章</b>	<b>回归预测模型</b>	184
9.1	相关分析	184
9.1.1	相关关系的概念及分类	184
9.1.2	相关关系的识别	186
9.2	一元线性回归分析	193
9.2.1	一元线性回归方程	193
9.2.2	参数 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$ 的最小二乘估计	194
9.2.3	对一元回归方程的评价	196
9.2.4	一元回归方程的预测区间	199
9.3	多元线性回归分析	202
9.3.1	多元线性回归模型	202
9.3.2	多元回归模型的参数估计	203
9.3.3	对多元线性回归方程的评价	204
9.3.4	灰色多元线性回归模型	207
9.4	非线性回归模型	213
	思考题	214
<b>第10章</b>	<b>层次分析及模糊评价</b>	217
10.1	层次分析	217
10.1.1	层次分析法的基本步骤	217
10.1.2	层次分析法的广泛应用	224
10.2	模糊评价	230
10.2.1	模糊数学的概念	230
10.2.2	模糊综合评价的概念	231
10.2.3	模糊综合评价模型	232
10.2.4	模糊综合评价的一般步骤	233
10.2.5	通过对模糊评判向量 $S$ 的分析做出综合结论	234
10.2.6	多层次模糊综合评判	238
	思考题	243
<b>附录</b>		244
<b>参考文献</b>		249

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 系统的概念与分类

### 1.1.1 系统概念

系统 (system) 是一个实体, 它是指一群由相互关联的个体组成的集合。这里的系统是指广义上的系统, 泛指自然界的一切现象与过程。它含有两个基本特点: 整体性和相关性。其中, 整体性是指系统作为一个整体存在而表现出来的某项特定功能, 它是不可分割的。系统的概念范畴很广, 通常包含系统的概念、层次、结构、功能、属性、行为、实体、演化、进化与环境等, 它们都与系统建模密不可分。不过, 人们主要研究是系统的概念、属性、实体、行为及环境。系统论创始人奥地利学者贝塔朗菲将系统定义为: 系统是相互作用的多元素的复合体。我国科学家钱学森认为, 系统是相互依赖和相互作用的若干组成部分结合的、具有特定功能的有机体。总之, 凡是具有特定功能、按照某些规律结合起来的相互关联、相互制约、相互作用、相互依存的事物总体, 均可称为系统。广义来说, 系统包括工程系统和非工程系统、自然系统和人工系统, 并有简单系统与复杂系统, 中小系统、大系统和巨系统之分。

由系统论可知, 一个独立的系统总是以其特有的外部表征和内在特性而区别于其他系统的, 这主要是由构成系统的实体、属性、行为及环境等内容各异而决定的。实体就是系统的具体形象。属性是描述实体特征的信息 (常以参数、状态或逻辑关系等来表示)。行为是指随时间的推移而发生的状态变化。环境表示系统所处的界面状况 (干扰、约束、关联因素等)。值得注意的是, 任何系统特别是复杂系统, 都有着通过科学研究实现探索和描述上述实体、属性、行为及环境的任务, 这同样符合系统建模与仿真的最终目标。

对任何系统的研究都必须从以下 3 个方面考虑:

- ① 实体: 组成系统的元素、对象。
- ② 属性: 实体的特征。
- ③ 活动: 系统由一个状态到另一个状态的变化过程。

### 1.1.2 系统分类

系统是多样的、复杂的, 且经常充满着惊奇。为了方便人们研究、分析、管理和控制, 我们总是从不同角度对系统进行分类, 常见分类如下。

1) 按照自然属性, 系统分为人工系统(如工程系统、社会系统等)与自然系统(如海洋系统、生态系统等)。

2) 按照物质属性, 系统分为实物系统(如武器装备、机电产品等)与概念系统(如思想体系、战略战术等)。应该指出, 实物系统可以是人工系统或自然系统, 但是概念系统必定是人工系统。

3) 按照运动属性, 系统分为静态系统(如平衡力系统、古建筑群等)与动态系统(如控制系统、动力学系统等)。

4) 按照参数状态特点和性质, 系统分为集中参数系统与分布参数系统、确定型系统与随机系统、线性系统与非线性系统。

5) 按照状态变化对时间是否连续, 系统分为连续系统(如雷达天线位置随动系统、模拟计算机系统等)、离散事件系统(如电话服务系统、生产调度系统等)和混合系统(如数字计算机控制系统、半实物仿真系统等)。

6) 按照结构和关联的复杂程度, 系统分为简单系统(如  $RC$  电路、稳压电源等)和复杂系统(如世界能源系统、国家人口控制系统等)。

7) 按照对系统的认知和研究现状, 系统分为白色系统、灰色系统及黑色系统。它们也可分别叫做白盒系统、灰盒系统和黑盒系统。白色系统具有充足的信息量, 其发展变化规律明显, 结构和参数具体, 定量描述方便。黑色系统的内部特征全部是未知的。灰色系统是介于白色系统与黑色系统之间的一种“信息不确定性”或“信息缺乏”的系统。

此外, 还可以按照系统的静态、动态、专业技术特点及时间与空间情况等, 对各个领域内的系统进行更详细的分类。例如, 控制系统还可以分为经典控制系统和现代控制系统; 进一步又能分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统; 更细地还可分为计算机控制系统、自适应控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统、鲁棒控制系统、智能控制系统和变结构控制系统等。

值得注意的是, 从系统建模和仿真的角度讲, 系统通常分为离散事件系统、连续系统与混合系统, 以及简单系统与复杂系统, 这样是较为合理的。

从科学研究和科学发展观讲, 钱学森等对系统还进行了如下分类。

1) 按照系统层次结构简单与否, 系统分为简单系统和复杂系统两类。

2) 按照系统组成部分的数量规模大小, 系统分为中小系统、大系统和巨系统三类。

3) 按照系统输入、输出特性的复杂程度不同, 系统分为线性系统、非线性系统和复杂性系统。

4) 按照客观世界物质系统空间尺度大小, 系统分为渺观、微观、宏观、宇观和胀观五类。

5) 生态系统、环境系统、社会系统、人体系统、生物系统等属于非常复杂的适应系统。这类系统被称为开放的复杂巨系统。

## 1.2 复杂系统简介

复杂系统是具有中等数目基于局部信息做出行动的智能性、自适应性主体的系统。客观事物中有许多复杂系统，它们具有非线性、时变性、不确定性、不稳定性、模糊性、难于预测的涌现性等。复杂系统在基础科学、应用科学和技术、工程建设、社会、经济和军事领域大量存在，一般不易求解，而建模仿真技术是研究复杂系统的强有力工具。

复杂性没有统一定义，只能相对于简单性而言，概括起来，理解如下。

1) 复杂性处于混沌的边缘，不是简单系统也不是随机系统，介于随机和有序之间。

2) 复杂性寓于系统之中，是系统复杂性，其内部有很多子系统，这些多层次的子系统相互依赖，具有协同作用。

3) 复杂系统在演化过程中和环境相互作用，表现出复杂的动态行为特性和实现的整体特性，这些特性具有变化莫测和意想不到的特点。

4) 复杂性形式是多样的，主要表现为：结构复杂性、组织复杂性和功能复杂性；算法复杂性、确定性复杂性和集成复杂性；物理复杂性、生物复杂性及经济社会复杂性等。其中，集成复杂性又称集聚复杂性，反映了组分和组分之间相互作用时系统新信息产生、演化和进化的本质影响。

综上，复杂系统是由大量的具有自适应性、智能性的主体构成的大系统，系统中没有中央控制，内部存在许多复杂性，并具有很大的变化性，因此决定了系统主体间及与环境间复杂的相互作用，使得复杂系统涌现出所有单独主体或部分主体不具有的整体行为（特性）——涌现性。

### 1. 复杂系统的特点

根据上述说法和描述性定义，不难总结出复杂系统具有以下明显区别于一般简单系统的特点：从定量上讲，复杂系统具有多回路、多输入、多输出、高阶次、高维数和层次性等特点；从定性上讲，复杂系统具有非线性、不确定性、自相似性、开放性、多时空、内外部扰动、混沌现象及病态结构等特点；这些特点可综合为适应性、自治性、非线性、涌现性、演化性和进化性。其中，涌现性和非线性是复杂系统最本质的特点。涌现性指构成复杂系统的组分之间存在相互作用而形成复杂结构，在表现组成部分特性的同时，还传递着作为整体而新产生的特性，即诸多部分一旦按照某些方式（或规律）形成系统，就会产生系统整体具有而部分加部分总和不具有的属性、特征、行为及功能等，而一旦把整体还原为不相干的各部分，则这些特征、属性、功能和行为等便不会存在。简而言之，我们把这些高层次具有但还原到低层次不会存在的特点称为复

杂系统的涌现性。涌现性是复杂系统在演化过程中呈现出来的一种整体特性。非线性是指不能够用线性数学模型描述的系统特性，构成复杂系统的重要部分、绝大部分乃至所有部分都存在着非线性，且组分间存在着非线性相互作用，而这种相互作用是产生复杂性的根源。不满足叠加原理，整体作用大于部分作用之和是非线性的基本特点，由于这种特点而产生了复杂系统动态过程的多样化和多尺度性，并且使得复杂系统的演化变得丰富多彩。所以，许多学者认为，非线性是复杂系统的主要特征；非线性相互作用是复杂系统区别于简单系统的根本标志。现代复杂工程系统、社会系统、人体系统和宇宙系统是最能够体现上述特点的典型的复杂系统。

## 2. 复杂系统的研究对象

复杂系统的研究对象是十分广泛的，可概括为以下两点。

就其特性研究而言，复杂系统的研究对象包括：①系统组成部分的功能、行为及其相互关系；②系统整体行为和功能；③系统的涌现性、自治性、演化性和进化性等。

从研究领域讲，今后研究更多的是黑盒问题和灰盒问题，它们主要包括地球物理系统、深太空系统、生物与生态系统、人工生命系统、自适应进化系统、人工智能系统、社会自组织系统、经济管理系统、军事作战系统及复杂工程系统（如航天、航空、海洋、能源、材料、环保等）等。

## 3. 复杂系统的研究方法

复杂系统的研究方法取决于以上研究对象和特点，它本质地区别于对简单系统或白盒问题的传统研究方法。这里应该指出，在 20 世纪 80 年代初，钱学森先生就发表了《系统科学、思维科学与人体科学》论文，明确提出了“系统学是研究复杂系统结构与功能一般规律的科学。”接着，他又在 1990 年的《自然》杂志上发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》论文，提出“开放的复杂巨系统”这一概念及处理这类系统的方法论。他指出，简单的大系统可用控制论的方法，简单巨系统可用还原论范畴的统计物理方法，而开放的复杂巨系统不可以用还原论及其派生方法，只可以采用本体论方法。这种复杂系统研究方法的新思想在 10 年之后才被西方学术界所认识。1999 年美国《科学》杂志发表的“复杂系统”专辑，明确提出了“超越还原论”的口号。

复杂系统的研究存在两条路线：第一是利用计算机仿真的方法通过模拟复杂系统中个体的行为，让一群这样的个体在计算机所营造的虚拟环境下进行相互作用并演化，从而让整体系统的复杂性行为自下而上地“涌现”出来；第二是通过有限的理性和一些不确定信息做出合理的决策，从而得出满意的结果，也称为自上而下的“控制”方法。具体的研究方法主要包括以下 6 种。

### (1) 隐喻方法

在传统学科中，隐喻和类比有着同等重要的作用，在对复杂系统的研究中，隐喻的作用和意义则被突显出来，著名的复杂适应系统理论及涌现理论都是霍兰教授使用隐喻方法构建出来的。

### (2) 模型方法

模型方法是科学研究中常用的方法之一，综合了还原与整体两种特性。复杂性科学研究一般都是在隐喻类比的基础上建立复杂系统的模型。科学家们从不同的角度、不同的途径建立了大量的复杂系统模型，如复杂网络、多智能体系统、CAS 回升模型、涌现理论中的生成模型等。

### (3) 数值方法

数值方法就是对系统模型进行计算求解，从而把握系统的组成和运行规律，在对复杂系统的研究中，许多新现象和规律都是通过数值计算发现的，比如“蝴蝶效应”的发现。混沌理论与分形理论就是应用数值方法进行复杂性研究所形成的典型理论。

### (4) 计算方法

计算方法就是从可计算理论出发，对问题是否可以计算，以及怎样计算进行分析，并对计算的方法进行算法描述，以找到问题的解决方案或途径。例如，遗传算法、适应性学习和复杂适应系统等这些概念的创立都是运用计算方法的典型案例。

### (5) 虚拟方法

这里所说的虚拟方法，也称为计算机模拟或系统仿真，指的是在计算机上对实际系统的数学模型进行模拟实验，从而达到研究该系统的目的。沿用传统的方法研究复杂系统是难以奏效的，很多情况下根本无法对系统进行受控实验。而使用虚拟方法可以弥补直接实验或受控实验的不足，使复杂系统的实验检验成为可能。例如，SWARM 计算机软件平台就是圣塔菲研究所为了检验 CAS 回声模型的可行性而开发的。

### (6) 综合集成法

在复杂系统的研究中，单独使用前面 5 种方法中的任何一种都是难于实现的。所谓综合集成法，从广义上来说，就是把研究复杂性科学的各种方法综合起来，发挥各自的优势，克服弱点而形成某种真正的综合方法；从狭义上来说，指的是由钱学森先生及其讨论班中的中国学者针对开放的复杂巨系统而提出的一种方法论。这套方法考虑的是从整体上研究和解决问题，采用人-机结合、以人为本的思维方法和研究方式，对不同层次、不同领域的信息和知识进行综合集成，达到对整体的定量认识。综合集成法从提出到现在也不过十多年的时间，方法本身及其应用取得了一些进展。



## 1.3 系统研究现状和发展趋势

### 1.3.1 研究现状

对系统开展广泛而深入的理论研究与实验研究是人类认识和改造世界的基本活动及主要手段。为此，人们进行了长期的努力，并取得了一系列辉煌成就，从而不断推动着科技进步和社会发展。

系统研究状况可概括如下：

就研究范畴而言，①研究和描述了系统的部分组分概念（如空间、时间、事件、过程、性质、因果性、数量、质量、可能性、可观测性、可控性、相互关系、部分与整体等）；②发现与验证了支配组分的部分规律性（如热力学定理、价值规律、相似原理、力学定律、电磁学规律、守恒定律等）；③探索、分析和解释了某些宏观现象和微观世界的机理（如随机过程、能量传递与转换、星球运行、万有引力、战争发展规律、物化效应、物质结构等）；④在适应上述客观规律下，设计、制造、使用、评估及改造了部分领域的人工系统（如设备、装备、机器、市场经济、工程系统、企业、工厂、环境保护、交通运输、能量开发、医疗卫生等）；⑤能够预测和评估某些未知或未来复杂系统的性能、行为和功能（如股市走势，国民经济可持续发展，新星球的可能出现，短、中、长期气象预报，作战模式演变，热核武器模拟试验等）。

可见，已往的研究和取得的成果仍然是少数的、微小的、局部的，尤其是对复杂性问题、复杂系统的研究。在国际上，有组织地进行复杂性问题、复杂系统研究是由美国开始的。1984年，由诺贝尔奖获得者盖尔曼、阿罗和安德森在新墨西哥州建立的斯塔菲研究所（SFI）就是一个专门研究复杂系统和复杂性问题的跨学科领域的机构，后来慢慢发展成了著名的美国研究复杂问题中心。其主要研究成果是提出了复杂适应系统（CAS）理论及其研究方法，也就是创立了 Multi-Agent 体系和基于 Agent 建模与仿真方法学。

系统建模与仿真的方法已经成为复杂系统问题研究的独特方法。可以说，复杂系统的研究直接推动了各门学科特别是仿真科学与技术的发展。如果说 20 世纪 70 年代以前的多数建模与仿真专著是面向物理系统，并讨论基于演绎推理的传统建模与仿真方法，那么 70 年代以后，许多重要的系统建模与仿真专著则是从不同方面转向研究复杂系统建模与仿真的方法学问题。其中，这时期具有代表性的著作和论文有理查森和普茨的《系统动力学建模导论》、戈登的《系统仿真》、斯普里特和范斯蒂恩斯基的《计算机辅助建模与仿真》、陈森发教授的《复杂系统建模理论与方法》及齐格勒的《建模与仿真实论》、王正中教授的《现代计算机仿真技术及其应用》、戴金海教授的《复杂系统理论及其建模仿真方法学》、白方舟教授

的《定性仿真》和欧阳莹之的《复杂系统理论基础》等。

### 1.3.2 发展趋势

随着自然界和人类社会的不断发展,复杂系统的研究已经成为一个热点。其发展主要是解决以下几方面问题:第一是开放的复杂巨系统及其方法论。为此,钱学森教授提出了通过对系统科学、思维科学与人体科学及其多学科进行综合研究,采用这方面的研究成果从定性到定量综合集成技术来解决开放的复杂巨系统问题。第二是复杂性与适应性的关系。为了解决这个问题,霍兰通过研究大量复杂系统(自然、生物、社会等)的演化规律和复杂性产生机理,创立了“复杂适应系统(CAS)理论”,它的核心思想是“适应性造就复杂性”。他提出,复杂适应系统内部的个体是具有适应能力的智能体(agent)并给出该智能体的适应和学习基本模型,因此使CAS具备了描述和研究复杂系统的能力。第三是复杂工程系统的复杂性及可靠性与安全性的关系。Carlson和Doyle基于“稳健性造就复杂性”的思想提出了高度最优化容限理论,即HOT理论。在HOT理论中,高度最优化(HO)指出通过高度结构化、非通用工程设计来实现,而容限(T)则强调复杂系统中稳健性是一个受限和约束量。他们同时表明,HOT系统虽然稳健,但依然脆弱。需要指出,大多数复杂工程系统(如飞行控制系统、大规模集成电路等)都会呈现HOT特性,所以,HOT理论具有极重要的研究意义和应用价值。

同时,解决复杂系统的安全性及可靠性关系也至关重要。鉴于此,在复杂系统研究中,高确信高后果系统(HAHC)占有相当重要的地位,它对于军事、武器、交通、信息、能源、金融等尤为重要。Jame指出,HAHC系统应同时具有3个基本特点:首先是复杂和异质的,即HAHC系统必须由不同类的子系统构成;其次必须与所处环境持续不断地相互作用;再次必须具有动态行为。然而,对于出现HOT特性的大多数复杂过程,HAHC系统要求满足系统上述3个特性是很困难的,这方面的研究工作目前还处于方法论层次。

综上,确切地说,通过计算机仿真或半实物仿真试验从定性到定量综合集成技术,并利用复杂系统建模方法与技术来解决发展中的复杂系统问题研究。

## 1.4 系统建模与仿真概述

系统建模与仿真技术是以建模与仿真实论为基础,以计算机、物理效应设备及仿真器为工具,根据所研究问题的目标,建立并运行系统模型,对系统进行认识与改进的一门多学科综合性、交叉性技术。其中,模型是对实体、过程、系统、现象的数学、物理或逻辑的描述,仿真是模型随时间运行的手段和方法。



### 1.4.1 系统建模

模型与模型研究的定义由来已久，可以追溯到古代仿鸟飞行和样板造船，只是在计算机出现以后才在此基础上产生了系统仿真科学与技术。但直到今天，模型仍然是科技工作者经常谈论的重要科学术语之一，它是对于现实世界或实际系统而言的。在系统仿真中，被研究的实际系统或未来的假定系统叫做原型，原型的等效替身则被称为模型。

在科学实验和理论研究中，由于以下两方面主要原因而产生了建模与仿真：第一，由于某种原因，如系统过于复杂，实验现场有毒、有害、受限制、不经济、不安全或者不能在实际系统上进行试验等；第二，人们会希望在产生实际系统（一般指人工系统）之前就能够对实际系统的未来预测出它们的性能、功能和行为。

有效的模型必须能够反映原型的主要表征、特性及功能，并具有普遍性（或等效性）、相对精确性、异构性、可信性及通过性。

1) 普遍性：一个模型可能与多个系统具有相似性，即一种模型通常可以描述多个相似系统。

2) 相对精确性：模型的精度和近似度都不可超出应有有限度和许可条件。因为过于粗糙的模型将失去原型的过多信息和特性，而变得无用；太精确的模型往往会造成模型相当复杂而导致研究困难，甚至终不得其解。因此，模型必须具有考虑诸多条件的精确性。

3) 异构性：对于同一个系统，模型可以具有不同的结构和形式，即模型不是唯一的。

4) 可信性：表明模型必须经过校核、验证和确认，即进行 VV&A 活动，使之具有满意的可信度。

5) 通过性：即模型可被视为“黑箱”，通常能够利用输入/输出实验数据来辨识出其结构和参数。

我们将系统数学模型的建立简称为数学建模。数学模型就是描述系统内、外部各变量间相互关系的数学表达式。它包括逻辑表达式和数值表达式。常量、变量、方程、函数、不等式、如果……那么……、交、并、序列、表格、图形、曲线及程序等都是数学模型的描述形式。

数学建模的最终目的就是要确定系统的模型形式、结构和参数，从而获得正确反映系统表征、功能和特征的最简数学表达式。

数学建模的通常步骤是：观察和分析实际系统→问题的提出→做出假设→描述系统→构建形式化模型→模型求解→模型有效性分析（包括模型校核、验证及确认）→模型修改→最终确认→模型使用。

系统模型遵循的原则如下：

1) 简单性。