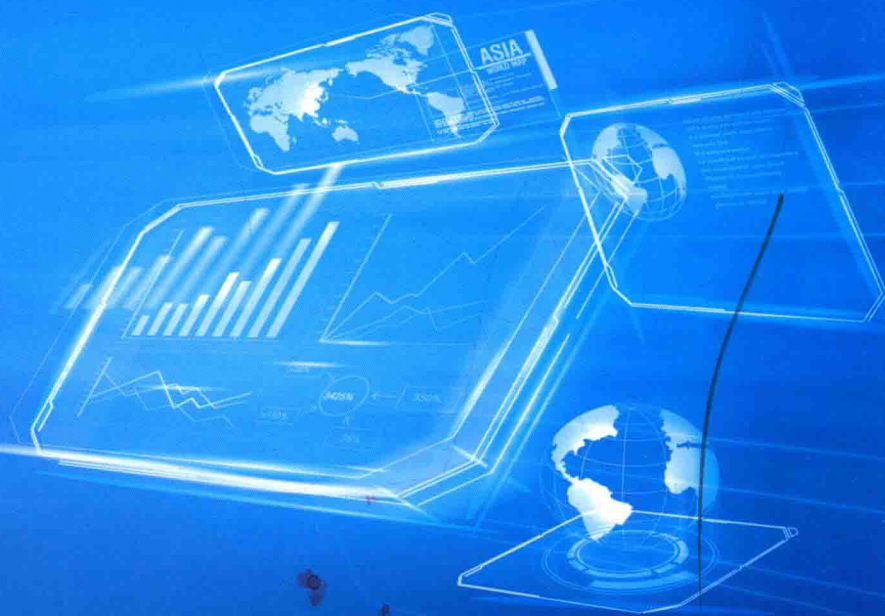


复杂适应性系统建模与 多 Agent 仿真及应用

李臣明 赵 嘉 徐立中 马 辉 著



科学出版社

复杂系统建模 与多 Agent 仿真及应用

李臣明 赵 嘉 徐立中 马 辉 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书阐述复杂适应性系统建模与多 Agent 仿真的相关概念、原理和方法,对跨流域调水系统建模与仿真应用进行深入介绍和讨论。本书详细介绍复杂性科学、复杂适应性系统、Agent 与多 Agent 系统、Agent 仿真等理论和方法。并以南水北调东线工程调度系统为例,以复杂适应性系统理论为指导,研究跨流域调水系统结构及行为特征,建立跨流域调水系统多 Agent 仿真系统,设计仿真情境并进行仿真实验。

本书可供系统工程、水利工程、控制理论与控制工程、人工智能等领域从事系统分析与设计、水资源规划与管理、复杂系统建模与仿真等相关研究及应用的科研、工程技术人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂适应性系统建模与多 Agent 仿真及应用/李臣明等著. —北京: 科学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-03-054241-0

I. ①复… II. ①李… III. ①软件工具—应用—南水北调—水利工程—研究 IV. ①TV68

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 208297 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

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>

三河市书文印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 8 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2017 年 8 月第一次印刷 印张: 11

字数: 220 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

20 世纪 90 年代以来,复杂系统科学与工程的代表性成果包括:①钱学森、戴汝为和于景元等中国科学家的基于开放复杂巨系统及其定性定量综合集成的方法论和技术;②美国 Santa Fe 研究所 (Santa Fe Institute, SFI) 和 Holland(霍兰) 的复杂适应性系统 (complex adaptive system, CAS) 理论以及 Multi-Agent(多主体) 计算和仿真体系;③美国 Carlson 和 Doyle 描述的飞行控制系统、大规模集成电路等一类复杂工程系统所具有的高度最优化容限 (highly optimized tolerance, HOT) 特性和 HOT 理论;④美国 Watts 和 Strogatz 的复杂网络中小世界网络模型以及 Barabási 和 Réka Albert 的无标度特性。当今,复杂系统科学与工程的研究有着日趋迫切的趋势。

美国 Santa Fe 研究所和 Holland 创立的适应性 Multi-Agent 体系和基于 Agent (主体) 的复杂适应性建模与仿真理论及其研究方法,对于人们认识、理解、控制、管理复杂系统,以及以计算手段研究经济、社会问题提供了新思路。

本书系统介绍复杂适应性系统建模与多 Agent 仿真方法及其在南水北调东线工程运行调度管理中的应用。全书共分 7 章。第 1 章绪论,介绍复杂性科学及其发展、复杂系统研究方法以及分析跨流域调水系统复杂性。第 2 章复杂适应性系统 (CAS) 理论及建模方法,介绍复杂适应性系统原理及建模方法、基于多 Agent 的复杂适应性系统建模方法等。第 3 章多 Agent 系统相关理论,主要介绍 Agent 与多 Agent 系统、Agent 的特征及结构、多 Agent 间交互及协调机制等;提出一种改进的慎思结构模型。第 4 章复杂适应性系统 Agent 仿真方法,介绍和论述仿真 Agent 混合结构模型和抽象结构模型、基于承诺强度的意图更新策略和更新算法、适用于仿真系统应用的改进慎思结构模型以及基于改进的免疫遗传算法的 Agent 学习模型等。第 5~7 章以南水北调东线工程运行调度管理系统为例。第 5 章基于 CAS 的跨流域调水系统建模,介绍和论述系统特性、建模要素和概念模型、各类实体的行为及实体间的交互过程以及基于合同网的多 Agent 间合作模型等。第 6 章跨流域调水多 Agent 仿真,主要介绍多 Agent 仿真系统设计。第 7 章仿真系统设计及仿真实验,结合南水北调东线工程运行调度管理系统情境,介绍基于 Swarm 的多 Agent 仿真平台、检验和评价仿真实验效果。

本书第 1 章由李臣明、胡文才编写,第 2、3 章由赵嘉、马辉编写,第 4、5 章由马辉、赵嘉、胡文才编写,第 6、7 章由赵嘉、胡文才、马辉编写,全书由李臣明、徐立中统稿。

本书是作者研究团队近年来相关研究工作的总结。先后得到国家“十二五”科技支撑计划项目(2015BAB07B01、2015BAB07B03),国家自然科学基金重点项目(71433003)和国家自然科学基金项目(51669014)的资助。

在写作过程中,课题组王建颖、魏晓东等提供了本书的部分素材,在此向他们表示衷心的感谢。向所有的参考文献作者及为本书出版付出辛勤劳动的同志表示感谢。

限于作者水平,书中会有许多缺点和不完善之处,恳请读者批评指正。

作 者

2017年2月16日

写作于河海大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂性科学及其发展	1
1.1.1 复杂性科学	1
1.1.2 复杂性科学研究进展	3
1.2 复杂系统主要研究方法	6
1.2.1 传统的研究方法	6
1.2.2 计算机模拟方法	7
1.3 跨流域调水系统复杂性	11
1.3.1 跨流域调水系统特征	11
1.3.2 水资源系统的复杂性	12
1.3.3 南水北调东线工程调度系统复杂性	13
参考文献	16
第 2 章 复杂适应性系统 (CAS) 理论及建模方法	21
2.1 复杂适应性系统原理	21
2.1.1 CAS 概念	21
2.1.2 CAS 特征与机制	21
2.1.3 CAS 主要特点	24
2.2 复杂适应性系统建模	25
2.2.1 CAS 建模	25
2.2.2 CAS 建模问题	26
2.2.3 CAS 建模方法	28
2.3 基于多 Agent 的复杂适应性系统建模方法	30
2.3.1 复杂系统建模与应用软件建模的比较	30
2.3.2 CASSM 方法的建模阶段及描述元素	31
2.3.3 CASSM 扩展图例	32
2.3.4 建模步骤和流程	34
参考文献	36
第 3 章 多 Agent 系统相关理论	40
3.1 Agent 与多 Agent 系统	40

3.1.1	Agent	40
3.1.2	多 Agent 系统	43
3.2	Agent 的特征及结构	44
3.2.1	Agent 基本特性	44
3.2.2	Agent 的理性与智能	45
3.2.3	Agent 自主性的实现	46
3.2.4	BDI 模型的形式化描述	47
3.3	Agent 慎思结构模型	48
3.3.1	基于谓词逻辑的慎思结构模型	48
3.3.2	基于实用推理的慎思结构模型	50
3.4	多 Agent 间交互及协调机制	53
3.4.1	多 Agent 间的交互关系	53
3.4.2	多 Agent 间的合作与协调	56
3.4.3	多 Agent 合作与协调机制	57
	参考文献	58
第 4 章	复杂适应性系统 Agent 仿真方法	62
4.1	仿真 Agent 及混合结构模型	62
4.1.1	软件 Agent 和仿真 Agent	62
4.1.2	混合结构模型	64
4.1.3	基于知识的控制层结构	65
4.1.4	反应层和交互管理部件	65
4.2	仿真 Agent 抽象结构模型	68
4.2.1	仿真 Agent 抽象结构	68
4.2.2	仿真 Agent 抽象环境与行为结构	69
4.3	仿真 Agent 慎思结构模型	70
4.3.1	仿真 Agent 实用推理模型结构	70
4.3.2	仿真 Agent 的承诺策略	73
4.3.3	仿真 Agent 意图的修正	76
4.3.4	仿真 Agent 慎思层功能模块的实验验证	78
4.4	仿真 Agent 学习器研究与设计	82
4.4.1	机器学习与 Agent 学习	82
4.4.2	基于多重免疫的改进遗传算法学习层模型	83
4.4.3	学习层 MIGA 算法的实验及结果评价	88
4.5	仿真系统中的多 Agent 协调模型	90
4.5.1	多 Agent 协调模型	90

4.5.2 多 Agent 协调的交互过程	91
参考文献	92
第 5 章 基于 CAS 的跨流域调水系统建模	96
5.1 跨流域调水系统特性分析	96
5.1.1 外部环境及调水管理系统的交互策略	97
5.1.2 用水户的水量需求特性	97
5.1.3 可供水量和缺水量特征	98
5.2 跨流域调水组织管理	101
5.3 跨流域调水系统建模要素识别	102
5.3.1 系统的实体分类及交互关系	102
5.3.2 跨流域调水系统宏观结构	103
5.4 跨流域调水系统概念模型	104
5.4.1 功能层次划分及实体聚集	104
5.4.2 交互关系及跨流域调水概念模型	105
5.5 基于合同网的多 Agent 间合作模型	106
5.5.1 仿真系统中多 Agent 间的交互关系	106
5.5.2 基于合同网的多 Agent 合作模型	107
5.5.3 Consumer-Supplier 合同网交互的实现	110
参考文献	111
第 6 章 跨流域调水多 Agent 仿真	114
6.1 跨流域调水系统仿真目标	114
6.1.1 系统研究边界	114
6.1.2 边界内的自然及社会特征	115
6.1.3 仿真系统的研究目标	116
6.2 仿真模型概化及模型的空间时间结构	118
6.2.1 仿真模型概化原则及假设	118
6.2.2 仿真模型空间概化	119
6.2.3 输水河道概化	119
6.2.4 仿真模型时间调度与运行日历	121
6.3 仿真系统的实体分类及交互关系	122
6.3.1 系统中实体的分类及特征	122
6.3.2 仿真系统中实体间交互关系	124
6.4 用水实体行为	125
6.4.1 农业用水实体	125
6.4.2 居民生活用水实体	128

6.4.3	工业用水实体	130
6.5	管理实体行为	132
6.5.1	调水管理实体	132
6.5.2	供水管理实体	134
6.5.3	政府实体	136
6.6	监测实体行为	137
6.6.1	降水模拟实体	138
6.6.2	河道、湖泊监测实体	139
	参考文献	141
第 7 章	仿真系统设计及仿真实验	143
7.1	基于 Agent 的仿真平台	143
7.1.1	基于 Agent 的仿真平台选择	143
7.1.2	Swarm 仿真平台	143
7.1.3	基于 Swarm 的仿真软件结构	144
7.2	Swarm 仿真软件的设计与实现方法	145
7.3	仿真系统软件设计	145
7.3.1	仿真系统结构	145
7.3.2	仿真系统设计	146
7.4	仿真软件运行及结果	150
7.4.1	仿真实验背景描述	150
7.4.2	仿真系统指标体系及仿真情境设计	150
7.5	仿真实验与结果分析	152
7.5.1	仿真实验说明	152
7.5.2	实验结果与分析	153
	参考文献	162
索引		165

第1章 绪 论

复杂性科学是以复杂性和复杂系统为研究对象的一门广泛交叉的新兴科学。本章从复杂性、复杂系统和复杂性科学的角度出发,介绍复杂性科学及其发展和复杂系统的主要研究方法。以跨流域调水系统为研究对象,研究调水系统的复杂性,介绍跨流域调水系统的特征、水资源系统的复杂性及南水北调东线工程调度系统的复杂性。

1.1 复杂性科学及其发展

1.1.1 复杂性科学

复杂性科学 (science of complexity) 是一门新兴的边缘、交叉学科^[1,2]。国外有学者称复杂性科学是科学史上继相对论和量子力学之后的又一次革命^[3]。国内成思危教授认为它是系统科学发展的一个新阶段^[4,5],戴汝为院士称其为“21 世纪的科学”^[6]。复杂性科学打破了线性、均衡、简单还原的传统范式,而致力于研究非线性、非均衡和复杂系统带来的种种新问题^[1]。

复杂性科学研究兴起于 20 世纪 80 年代,起源可以追溯到 20 世纪中期系统科学的出现^[7]。20 世纪 40 年代,维纳 (Wiener) 提出了以信息、反馈和控制为特征的思想,建立了控制论^[8],并在自动控制方面取得了巨大成功;同期,香农 (Shannon) 建立了信息论^[9];贝塔朗菲 (Bertalanffy) 提出一般系统论^[10],这些理论成为系统科学的起点,也是系统科学的第一代系统观。但是,第一代系统观在生命科学和社会科学中的运用并不成功,使人们认识到第一代系统观的局限性。20 世纪 70 年代,普利高津 (Prigogine) 和哈肯 (Haken) 提出了耗散结构理论和协同学,从热力学的观点延伸了系统的概念,提出了随机性和确定性对立统一的思想,从新的角度分析了复杂物理现象中的自组织、相变等概念,使人们对系统的认识提高到新层次,成为研究系统问题的第二代系统观。但是普利高津的系统观在社会经济领域应用时,仍然不能很好地描述系统的现象,表现出第二代系统观的局限性。20 世纪 80 年代,霍兰 (Holland)、安德森 (Anderson)、盖尔曼 (Gell-Mann) 等创立了复杂科学研究机构圣达菲 (Santa Fe) 研究所,研究内容包括复杂经济系统、社会系统、人工生命等,由此标志着复杂性科学的兴起^[11-15]。

复杂性科学以复杂性和复杂系统为研究对象。由于复杂性和复杂系统涉及面

广,内容和范畴不尽相同,因而,复杂性科学呈现出非线性、不确定性、自组织性和涌现性等特征。

复杂性问题的贝塔朗菲于1982年在他撰写的《生物有机体系统》论文中首次提出。随之,怀特梅的《有机体的哲学》论文也发表了类似观点^[16]。此后,许多科学家和学者,如冯·诺依曼、维纳、哈肯及钱学森等,对此进行了多方面的研究,并作出了重要贡献。

复杂性涉及面很宽,比如计算复杂性、生物复杂性、生态复杂性、演化复杂性、发育复杂性、语法复杂性,乃至经济复杂性、社会复杂性、自然复杂性等。日常所说的“复杂性”或“复杂”指的是混乱、杂多、反复等意思^[10]。但在科学研究领域中主要是指与混沌、分形和非线性相关联的“复杂性”。其具体描述与所属的科学领域有关,没有统一的严格定义。但一般认为“复杂性是指系统由于内在元素非线性交互作用而产生的行为无序性的外在表象”。

复杂系统是针对一个系统而言的概念,可描述为:系统拥有大量个体,个体间存在交互,其内部关系复杂^[17]。典型的复杂系统如军事对抗系统、复杂制造系统、复杂工程系统、生物系统、宏观和微观物理系统、复杂化学与化工系统、人体系统、天体系统、经济系统等。由于各学科的研究对象和采用的研究方法各不相同,对复杂系统的定义也不相同。具有代表性的主要有:①复杂系统就是混沌系统(混沌学派)^[18-20];②复杂系统是具有自适应能力的演化系统(Santa Fe)^[21-23];③复杂系统是包含多个行为主体(Agent)具有层次结构的系统^[24,25];④复杂系统是包含反馈环的系统(Stacey)^[26-28];⑤复杂系统是任何人不能用传统理论与方法解释其行为的系统(Warfield)^[29,30];⑥复杂系统是动态非线性系统^[31-33],等等。但对复杂系统基本特征的认识比较一致。复杂系统具有以下特征:

(1) 自适应性(self-adaptive)。系统由时空交叠或分布的组件构成。这些组件具有自适应、自学习、自聚集、自组织等能力,组件能够通过不断地学习,调整自身的结构和行为,以适应外部和内部的变化。组件之间、组件与环境之间会发生各种各样的交互作用。正是由于组件所拥有的自适应等能力及组件与环境间的各种交互,使得整个复杂系统呈现复杂性,同时也是复杂系统不断演化的驱动力。

(2) 不确定性(uncertainty)。复杂系统的不确定性与随机性、混沌相关。复杂系统中的随机因素不仅影响状态,而且影响组织结构和行为方式。混沌可看作“确定的随机性”。“确定”是因为它由系统内在的原因而不是外来的噪声或干扰所产生,即过程是严格确定的,而“随机性”指的是不规则、不能预测的行为。

(3) 涌现性(emergence)。肩负不同角色的组件间通过多种交互模式,按局部或全局的行为规则进行交互,组件类型与状态、组件之间的交互以及系统行为随时间不断改变,经过一定的时间之后在整体上演化出一些独特的、新的性质,形成某些模式,这便体现为涌现性。涌现是有层次的,不同的层次将产生不同的涌现效果,

上一层次的涌现必由下面层次的涌现产生。

(4) 预决性 (finality)。复杂系统的发展趋向取决于系统的预决性。由于系统的自适应性和不确定性, 对系统发展趋向进行准确预测是非常困难的。但根据系统目前的实际状态, 可对系统未来状态进行预期。预决性是系统对未来状态的预期和实际状态限制的有机统一。事实上, 任何有生命的物质, 都具有预期或预测的能力, 从而影响系统的运动方向。

(5) 演化 (evolution)。复杂系统对于外界环境和状态的预期—适应—自组织过程导致系统从功能到结构的不断演化。这种演化运动在物理系统中是不存在的。物理系统一般由多个已有的元素组成, 功能和结构都不会改变。复杂系统一般是由简单的元素组合, 经过不断的演化而发展为功能和结构更为复杂的系统。从低级到高级、从简单到复杂不断地演化, 是复杂系统最本质的特性。

(6) 开放性 (opening)。系统与外部环境以及子系统间存在能量、信息或物质的交换, 这种交换取决于系统的开放性。系统的无序程度通常用熵值来衡量, 一个孤立系统的内部熵会随时间不断增加, 最终熵达到最大值, 此时系统趋向于无序。开放系统与孤立系统不同, 它与外界环境之间不断地进行着能量、物质和信息的交换。这种交换使它可能从外界环境输入负熵, 从而使系统的总熵减小, 或控制在某种缓慢的增长速度下, 其结果是增加了系统的有序性。

复杂性科学是运用非还原论方法研究复杂系统产生复杂性的机理及其演化规律的科学^[34]。圣达菲研究所把诸如对称破缺、局域化、分形和奇怪吸引子等“各种新性质怎样冒出来”的种种思想贯穿起来, 作为复杂性科学的研究对象。它涉及数学、物理学、化学、生物学、计算机科学、经济学、社会学、历史学、政治学、文化学、人类学和管理科学等众多学科。

1.1.2 复杂性科学研究进展

依据研究对象的变化, 通常把复杂性科学的发展大致划分为三个阶段, 即研究存在、研究演化及综合研究阶段^[35]。第一阶段的主要成就表现为一般系统论、控制论和人工智能。第二阶段研究系统从无序到有序或从一种有序结构到另一种有序结构的演变过程, 产生的复杂性科学理论有: 耗散结构理论、协同学、超循环理论、突变论、混沌理论、分形理论和元胞自动机理论。第三阶段不再是分门别类地进行, 而是打破了以前的学科界限, 进行综合研究。前两阶段的复杂性科学主要以自然科学为基础, 以数学和自然科学为背景。第三阶段复杂性科学的研究对象是复杂系统, 主要研究工具是计算机, 隐喻和类比成为研究方法。

1. 国外复杂性科学研究

20 世纪 70 年代末至 80 年代中期, 首先是对混沌系统的研究, 但当时学术界的主流仍然只注意到强调因果关系的确定性系统, 直到 1975 年, 美国数学家李天

岩 (Li) 和约克 (Yorke) 将洛伦兹 (Lorentz) 的发现一般化, 提出了著名的李-约克定理^[36], 从而正式定义了“混沌”(chaos) 的概念。随后混沌理论、李-约克定理被应用于生物种群、湍流机理的研究。1990 年奥特 (Ott)、格里博士 (Grebogi) 和约克 (Yorke) 三人提出了著名的混沌控制方法。这些成果拉开了运用混沌理论与方法研究复杂性的序幕, 为人类认识和控制复杂系统开辟了新的途径。同期, 耗散结构理论提出者普利高津 (Prigogine) 与物理学家尼科里斯 (Nicolis) 共同发表了著名的《探索复杂性》这一重要成果。

1984 年, 在诺贝尔物理学奖获得者盖尔曼 (Gell-Mann) 和安德森 (Anderson)、诺贝尔经济学奖获得者阿罗 (Arrow) 等的支持下, 聚集了一批从事物理、经济、理论生物、计算机科学等方面的著名研究人员, 组建了圣达菲研究所。圣达菲研究所是目前世界知名的复杂性科学研究中心, 该所的主要研究方向是复杂系统科学。他们试图通过将多领域的人物和思想聚在一起的方式找出支配复杂系统的一般规律。他们认为复杂系统是由许多相互作用的“Agent”组成, Agent 之间的相互作用可以使系统作为一个整体产生自发的自组织行为。在这种情况下, 单个 Agent 通过寻求互相的协作、适应等超越自己, 获得思想并达到某种目的或形成某种功能, 使系统有了整体的特征。另外, 每个复杂系统都具有某种动力, 这种动力与混沌状态有很大差别, 因为用混沌理论无法解释结构、内聚力以及复杂系统的自组织内聚性。复杂系统具有将秩序和混沌融入某种特殊平衡的能力, 它的平衡点被称为混沌的边缘。在这种状态下, 系统的 Agent 不会静止于某一状态, 也不会动荡甚至解体, 系统有足够的稳定性来支撑自己的存在, 又有足够的创造性使自己维持系统的发展。基于对复杂系统构成的认识, 创立了复杂适应性系统 (complex adaptive system, CAS) 理论。他们认为稳定和均衡是组织的规范状态, 作为对外部环境变化的反映, 系统通过调节以适应环境的要求^[37]。

复杂性科学的发展, 不仅引发了自然科学界的变革, 而且也日益渗透到哲学、管理学、人文社会科学领域。管理科学是目前复杂性科学应用最为广泛的学科之一。以复杂性科学在管理科学的应用为例, 从目前能查到的文献资料看, 最早的论著是美国 George Mason 大学 Warfield 教授^[38] 于 1976 年出版的专著:《社会系统: 计划、政策与复杂性》。之后, Malaska 和 Kinnunen^[39] 研究发现组织决策能导致存储问题的混沌、无序和意外的结果; Streufert 和 Swezey^[40] 于 1986 年出版了《复杂性、管理者和组织》一书; Loye 和 Eisler^[41] 研究了社会科学中的混沌和非均衡现象; Warfield^[42] 出版了通过系统设计的方法管理复杂性的著作; Richards 研究证实了战略规划存在的混沌与复杂性; Mosekilde 等揭示了制造加工过程管理决策的不稳定性和复杂性; Kiel 和 Elliott^[43] 研究认为政府预算是一个充满变化的非线性和复杂系统; Kiel 运用非线性动力学方法发现在政府组织中存在混沌和“隐序”现象; Comfort 证明了复杂性科学能作为一种模型在自然或技术的灾难发生期间协调

组织内部的活动; Warfield 和 Cárdenas 提出了交互式管理的理论与方法, 为在复杂环境下的决策提供了较为可行的决策分析方法^[38,44]; Thietart 和 Forgues^[45] 研究了混沌与组织的关系; Stacey 研究了组织复杂性与创造性问题^[46]。Sackmann 研究了组织的文化复杂性问题后指出, 新时代的组织文化充满了冲突和复杂性, 并从多个层次进行了初步分析; Axlord 研究了组织合作复杂性问题, 初步分析了组织合作稳定与不稳定性条件; Holland^[47] 出版了《涌现: 从混沌到有序》一书; Flood 和 Carson 从系统方法的角度研究了管理混沌与复杂性的方法^[48]。

2. 国内复杂性科学研究

国内最早重视复杂性科学研究的是钱学森先生。他从 20 世纪 80 年代就洞察到这一科学新方向的重要性。以他为核心, 以开放的复杂巨系统 (open complex giant system, OCGS) 理论^[49] 为学术旗帜开创了中国复杂性研究之先河, 被人称为钱学森学派。钱学森学派经过长期的讨论研究形成了自己独有的研究思路与方法。他们于 1990 年在《自然杂志》上发表《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》的论文, 表达了这一研究集体对复杂巨系统探索的基本观点。1996 年, 浙江科学技术出版社出版了以钱学森为首的中国复杂性研究集体的研究成果, 将开放复杂巨系统理论与方法论分门别类地应用于相关领域与部门。

21 世纪以来, 复杂性研究在国内越来越受到重视。哲学界 2001 年成立了复杂性与系统科学哲学研究会, 从科学与哲学的结合上推动复杂性问题的研究; 介绍有关复杂性的书籍大大增加。2002 年科技部批准创立《复杂系统与复杂性科学》学术刊物, 主要目的是努力研究复杂系统与复杂性科学理论, 用现代化科学理论指导复杂性科学研究的深入开展。

经济系统是一个开放的系统, 近年来的研究成果表明, 经济系统中存在着大量的复杂性现象, 经济工作者可根据实际情况对系统的复杂性行为实施控制。从微观层面到宏观层面, 都可以利用混沌理论进行分析和控制。因此要客观地分析经济运行规律, 就必须正确研究经济系统中的非线性和混沌现象。陈平研究了国外金融市场的混沌问题, 首次证实了经济系统也存在混沌现象^[50]。由于混沌现象在非线性的系统中普遍存在, 因而经济混沌研究显得尤为重要。宋学锋系统研究了混沌经济学的一些基本理论问题, 给出了混沌经济学的定义, 界定了混沌经济学的研究内容与范畴, 系统总结了混沌的定量特征及其判别方法, 以离散混沌经济系统为对象, 研究其混沌规律, 提出了“区间分析法”^[51-53]。黄登仕、李后强系统总结了非线性经济模型和研究方法, 出版了《非线性经济学的理论和方法》^[54]。陈平出版了《文明分岔、经济混沌和演化经济学》著作^[55]。孙广振、王劲松与徐前方, 宋学锋以及吴冲锋等运用非线性理论和混沌理论研究了我国证券市场股票价格波动的复杂性问题^[56-62]。在管理复杂性方面: 1992 年钱学森提出了“综合集成研讨厅”方法构想,

用于分析复杂巨系统;戴汝为研究了认知复杂性问题并与于景元、王浣尘等合作承担综合集成研讨厅的理论、方法及应用研究任务。在成思危先生的积极推动下,召开了以复杂性科学为主题的香山论坛,并主编出版了《复杂性科学探索》^[4],组织专家翻译出版了复杂科学研究丛书^[63,64];刘洪、袁闯研究了混沌的管理问题^[65,66],马军海、盛昭翰研究了混沌时序的系统重构与预测技术^[67],等等。当前,中国研究复杂性科学的学者正积极推动复杂性、复杂系统和复杂性科学在科技界和工程界的应用^[27,68,69]。

1.2 复杂系统主要研究方法

复杂系统具有的自适应、不确定、涌现、预决、演化和开放等特性,使得复杂系统的研究不同于传统科学。复杂系统的不确定性、开放性、自适应性特征,难以采用传统的自上而下的方法建立数学分析模型,本质上具有不可计算性。这使得复杂系统研究更多的是在思辨层次的理论研究,可操作性不足。为了认识和研究复杂系统的复杂性和运动规律,主要有基于传统的研究方法和基于计算机模拟的方法两大类。

1.2.1 传统的研究方法

概括起来,复杂系统科学家和哲学家们的传统研究方法大致有下列几种^[70]。

1. 一般演绎方法

贝塔朗菲从相互联系的元素集这个一般定义出发,建立一个普遍的系统微分方程组,即 $dx_i/dt = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。然后将这个方程组用泰勒级数展开为有关 x_i 变量的方程组。由于这个方程组不可能有分析解,他便给出各种约束条件,删去了许多高阶的项(当然也留下了一些高阶的项),使之成为线性方程和较为简单的非线性方程。由此,他推出了生命复杂系统的各种特征和规律,如生长的指数规律、有限资源条件下生长的逻辑斯谛曲线。同时,这个演绎推导解释了细胞分裂组成不同器官的“机械化”,也解释了相当于细胞发育为个体过程的神经系统形成的“中心性”,还解释了生物发育过程的“等终性”,并以此来反驳生机论。但这种演绎方法所导出的结论都是生物学和生理学中早已知道的事情,同时由于当时计算机还没有发展起来,计算机模拟的方法还没有为人所熟知,他错过了对他的逻辑斯谛方程进行迭代解的机会,所以也错过了发现混沌的机会。

邦格在研究复杂系统时,主要也是使用一般演绎方法。他从物质客体状态空间分析法开始,演绎推出或给出了一般系统的七大公设,然后从这七大公设推理出系统的一般性质。

2. 一般归纳方法

使用一般归纳方法来研究复杂系统的一个典型莫过于米勒 (Miller) 的“生命系统”理论^[71]。他首先分别从细胞、器官、生物体、群体、组织、社会、超国家系统七个具体领域出发, 对它们的一般复杂系统的范畴, 如复制器、边界、摄取器、分配器、变换器、生产器、储备器、排放器、信息的输入转换器、信息与信息网、信息的解码器等 19 个项目进行归纳。他从中归纳出几个一般的复杂系统规律: 复杂系统从细胞到联合国是一个等级层次系统、一个开放自组织系统、一个信息交流和处理系统。

3. 类比方法

在研究系统科学时使用类比方法的典型案例可以说是贝尔 (Beer) 的活系统理论, 即将企业组织系统与人的生理系统进行类比, 将企业管理机构与大脑进行类比, 将管理过程的人际沟通与神经系统进行类比, 将企业组织的执行机构与人的肌肉进行类比, “某工厂的肌肉就是碾碎机、切削机、轧钢机等”, 由此得出复杂管理系统的机构与动作以及协调原则等^[72]。

4. 实验归纳概括法

在系统科学的研究中, 实验归纳概括法占有十分重要的地位。普利高津研究了非平衡态热力学系统, 发现远离平衡态的热力学系统的突变、分叉、涨落和自组织现象, 实验归纳出这个自组织结论再推广到社会经济系统、社会舆论系统中来解释各种现象。哈肯的协同学研究从研究激光的实验开始, 并一步一步地概括到微观元素如何形成宏观序参量, 序参量又如何支配元素之间的协同合作, 最后形成有宏观组织和规律的那些自组织系统的普遍规律中去。

在传统的复杂性研究方法中, 最为重要的还是跨学科的功能模拟方法。上面列举的方法中, 一般演绎方法也包含了“模型”的方法, 那些最一般的数学公设就是一个模型, 只不过是抽象的形式化的模型, 因而研究效果不佳或有某些局限。而一般归纳方法、类比方法本来就是模型方法的前奏曲, 类比中以及归纳的同类中已经隐含着模型的影子。至于在实验归纳概括方法中, 本来就已经有模型的存在, 只不过它们大部分是物理模型、化学模型, 尚未提高到复杂系统一般模型的高度。由于研究对象的日益复杂, 传统的模型方法与模拟方法在 20 世纪 80 年代和 90 年代已经有了重大的突破。

1.2.2 计算机模拟方法

计算机模拟, 也称计算机仿真, 是一种以计算机为基础的模拟技术。由于计算机具有计算速度快、存储量大、精确度高等特点, 它适于解决规模大、难以解析以

及不确定性问题。计算机模拟是一种将模型和计算结合起来的方法,它通过计算机程序对特定系统的抽象模型进行建模和运算。传统上,主要采用基于数学方程的计算机模拟方法,通过数学模型从一系列参量和初始条件中预测出系统行为并得到解析解,但当对象是复杂系统时,依赖于数学模型难以描述复杂系统行为。因此,基于多主体、元胞自动机等新的计算机模拟方法应运而生。

1. 基于多主体的模拟方法

基于多主体系统的模拟或建模方法 (multi-agent based modeling) 是对复杂系统的动态模型,即基于多主体的模型进行计算或模拟的一种研究方法。作为这种方法的一个实质性核心,基于多主体的模型是为了从整体上评价多个自主主体对系统的影响,而对网络中自主主体的行为和相互作用进行模拟的一种计算模型,这种模型将博弈论、复杂系统、涌现、计算社会学、多主体系统的原理与用来介绍随机性的演化程序、蒙特卡罗方法结合起来,对同时运行的多个主体进行模拟,试图重新建立和预测复杂现象的行为。

基于多主体的模型的历史可以追溯到冯·诺依曼机,即一台具有再生能力的理论上的机器。由冯·诺依曼提议的这台设备严格遵循详细的指示去制造一个它自身的复制品。这个想法后来得到冯·诺依曼的朋友、同为数学家的乌拉姆 (Ulam) 的改进;乌拉姆建议如同网格上的元胞的集合一样,在纸上建造这样的机器。这种想法激起冯·诺依曼的兴趣,并引导他创造了后来被称为元胞自动机的第一台设备。

2. 元胞自动机模拟方法

元胞自动机作为基于计算机之上的一类虚拟机,是一类理想化动态模型的总称。元胞自动机方法是用来分析动态系统的一种方法,它在对一个系统进行抽象化或模型化时,充分考虑到系统的动态特征,不像一般的数学物理方法那样简单死板。

从方法论上看,元胞自动机采用的是典型的“自下而上”的建模方法。它并不是用繁杂的方程去描述一个复杂系统,而是用简单系统的相互作用来模拟复杂系统的整体行为。一般来说,复杂系统由许多基本单元或子系统组成,当这些子系统相互作用时,一个子系统的状态演化只受周围少数几个子系统状态的影响,在相应的空间尺度上,子系统间的相互作用往往是局域性和比较简单的。同样对于元胞自动机的元胞来说,由于它具有时间和空间上的局部性,所以某个元胞的状态只受它周围邻居状态的影响,而且元胞自动机的转换规则也是非常简单的。所以元胞自动机中的元胞与复杂系统中的子系统或主体是相互对应的,它们都体现了相互作用的部分构成整体的概念,体现了从局域的相互作用演变成系统整体全局作用的突现概念。因此,当我们从系统元素的状态和行为入手,用元胞间的相互作用来模拟